جمهوری اسلامی ایران

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

آیین‌نامه سازه‌های فضاکار

نشریه شماره ۴۰۰

معاونت نظارت راهبردی

دفتر نظام فنی اجرایی

NezamFanni.IR

۱۳۸۹

بسمه تعالی

ریاست جمهوری

معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران	شماره: ۱۰۰/۴۳۱۷۰
	تاریخ: ۱۳۹۱/۵/۱۱

موضوع:

آیین‌نامه سازه‌های فضاکار

به استناد آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی، موضوع ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (مصوبه شماره ۴۲۳۳۹/ت۳۳۴۹۷هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۴۰۰ دفتر نظام فنی اجرایی، با عنوان «**آیین‌نامه سازه‌های فضاکار**» از نوع گروه اول، ابلاغ می‌شود؛ تا از تاریخ ۱۳۸۸/۷/۱ به اجرا درآید.

رعایت کامل مفاد این نشریه از طرف دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور، پیمانکاران و عوامل دیگر در طرح‌های عمرانی الزامی است، ولی در یک دوره گذار تا ۱۳۹۰/۱۲/۲۹ استفاده از دیگر آیین‌نامه‌های معتبر نیز مجاز خواهد بود.

امیرمنصور برقعی

معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

(ویرایش شد مورخ ۱۳۸۸/۳/۵)

۶۰۶۹۱۵

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی

دفتر نظام فنی اجرایی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این نشریه کرده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلطهای مفهومی، فنی، ابهام، ایهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این رو، ***از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده‌ی هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را به‌صورت زیر گزارش فرمایید:***

۱- شماره‌ی بند و صفحه‌ی موضوع مورد نظر رامشخص کنید.

۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.

۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.

۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.

کارشناسان این دفتر نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقلام لازم را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر شما همکار ارجمند قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی شاه، مرکز تلفن ۳۳۲۷۱، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، دفتر نظام فنی اجرایی، صندوق پستی ۱۱۴۹۹۴۳۱۴۱

Email:tsb.dta@mporg.ir
web: http://tec.mporg.ir/

پیش‌زمینه و سپاسگزاری

معاون نظارت راهبردی معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور برخود فرض می‌داند که مراتب سپاسگزاری و امتنان خود را به شرح زیر از زحمات تمامی آنانی که در پیشبرد این طرح حایز اهمیت ملی و جهانی تا این مرحله مساعدت، مشارکت و پشتیبانی نموده اند، تقدیم دارد.

- طرح حاضر با پشتیبانی‌های مدیران و مسئولان سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور وقت به انجام رسید. نظر مساعد جناب آقای **مهندس مهدی تفضلّی،** معاون محترم وقت امور فنی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور و پشتیبانی‌های ایشان در تدوین نشریه راهگشا بوده است. جناب آقای **مهندس سیّد اکبر هاشمی** مدیرکل محترم وقت دفتر امور فنی، زمان قابل ملاحظه‌ای صرف عملی ساختن این پشتیبانی‌ها فرموده‌اند. سرکار خانم **مهندس بهناز پورسیّد** مدیرکل محترم دفتر نظام فنی اجرایی، از ابتدای مطرح شدن ایده‌های اولیّه تا زمان نهایی شدن کار همواره پشتیبان طرح بوده و با همفکری مستمر در جهت امکان‌پذیری کار نقش مؤثری ایفا نموده‌اند. در همین ارتباط همکاری‌های جناب آقایان **مهندس علی تبار** و **مهندس سید محمود ظفری** در سطوح کارشناسی و راهبری را یادآور می‌شود. درایت و توانمندی جناب آقای **مهندس حمیدرضا خاشعی** کارشناس محترم دفتر نظام فنی اجرایی در کسوت مدیریت پروژه، در به ثمر رسیدن تمامی تلاش‌های به عمل آمده نقش تعیین کننده و بارزی داشته است. در عین حال لازم می‌داند که از دیدگاه مساعدِ جناب آقای **مهندس احمد شفاعت** و زمینه‌سازی‌های به عمل آمده از طرف ایشان در ارتباط با تحقق طرح تدوین آیین‌نامه حاضر نیز یاد شود.

- تدوین آیین‌نامهٔ سازه‌های فضاکار، برای نخستین بار در سطح جهانی و توسط متخصصان ایرانی، آرزوی دیرینهٔ **استاد هشیار نوشین** بوده است. وجود متخصصین ایرانیِ تراز اوّل در سطح بین‌المللی، در زمینهٔ سازه‌های فضاکار نتیجهٔ تلاش مستقیم یا غیرمستقیم ایشان بوده است. اولّین بارقه‌ها برای تدوین آیین‌نامهٔ سازه‌های فضاکار در سال ۱۳۷۳ نشأت گرفت و با تشویق و پشتیبانی‌های امیدبخش ایشان و کوشش‌های مجری طرح و اعضای محترم کمیتهٔ تدوین آیین‌نامه تا مرحله حاضر پیشرفت نموده است. ایشان در اوقاتی که همه ساله طی چند سال اخیر در کشور حضور یافته‌اند، در کمیتهٔ تدوین آیین‌نامه حضور فعّال و مؤثری داشته و با تقبّل ریاست کمیتهٔ تدوین آیین‌نامهٔ سازه‌های فضاکار علاوه بر مشارکت در تدوین، از نظر کیفی و کمّی نیز برکار نظارت مستمر داشته‌اند.

- جناب آقای **دکتر شاهرخ مالک،** مجری مسؤول پروژه و دبیر محترم کمیتهٔ تدوین آیین نامهٔ سازه‌های فضاکار، از اوان تبلور ایده‌های طرح در سال ۱۳۷۳ و در سیر تکوین مطالعات تا نیل به نتیجهٔ پیش رو، عملاً با اهتمام تمام، ایثارگرانه و خستگی ناپذیر، همّ خود را وقف تحقق اهداف طرح نموده و با توانایی‌های بی‌بدیل توانستند این پروژه را برای نخستین بار در سطح جهانی و با همکاری متخصصان ایرانی در قالب قراردادی با معاونت پژوهشی پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران به سرانجام مطلوب رسانند. در اینجا لازم است از زحمات چندین سالهٔ ایشان تقدیر به‌عمل آید.

- متخصصان عالیقدری که دعوت دبیر کمیته تدوین را برای عضویت در کمیتهٔ تدوین آیین‌نامهٔ سازه‌های فضاکار صمیمانه پذیرفتند، به‌طور مؤثری در این طرح همکاری مبذول فرموده‌اند. اعتقاد راسخ ایشان به اهمّیّت اهدافی که در طرح تبیین گردیده بود،

منجر به نیل به اهداف طرح و توفیق در تدوین این آیین‌نامه گردیده است. اسامی این عزیزان در صفحات ویژهٔ معرفی کمیتهٔ محترم تدوین آورده شده و مجموعهٔ کوشش‌ها، همکاری‌ها و همفکری‌های ایشان شایستهٔ قدردانی ویژه است.

- پیش‌نویس متون آیین‌نامه حاضر، در چارچوب مرحلهٔ دوم طرح توسط اعضای محترم به شرح صفحات بعد به تفکیک به رشتهٔ تحریر درآمده است. اعضای محترم مشارکت‌کننده در تدوین متن پیش‌نویس علاوه بر حضور فعال در جلسات متعدد و خارج از شمار تمام روزهٔ کمیته تدوین و جلسات متمرکز چند روزهٔ کارگروه‌های تخصصی، در تحریر متون آیین‌نامه مشارکت داشته‌اند. طی مرحله اول مطالعات طرح، پس از شناسایی نیاز مبرم به تدوین آیین‌نامه و احراز ضرورت انجام مطالعات در چارچوب مطالعات توجیهی و امکان‌سنجی لازم، فلسفه حاکم بر آیین‌نامه تبیین، الگوهای مطالعاتی تدوین، حوزه و دامنه شمول کار تعیین و سرفصل‌های آیین‌نامه طراحی گردیدند و گزارش مرحله اول طرح، براساس دیدگاه‌ها و نتایج حاصله و مطروحه در جلسات مرحله اول کمیته تدوین، توسط مجری طرح و دبیر کمیتهٔ تدوین، دکتر شاهرخ مالک به رشتهٔ تحریر درآمد. مطالعات مرحله دوم شامل تدوین متن حاضر می‌باشد که طی آن، با توجه به ضرورت برقراری هماهنگی و حفظ همگونی در متون نهایی، مجری طرح و دبیر کمیتهٔ تدوین آیین نامه علاوه بر بازنگری فنی و ویرایش ادبیِ تمامی متون پیش‌نویس، گاه بازنویسی برخی از این متون را ـ شامل متون پیش‌نویسی نیز که شخصاً توسط مجری طرح تدوین گردیده بود ـ ضروری دانسته و در تدوین متن نهایی کوشش به‌عمل آورده است تا همگونی و همسازی ممکن و ارتباطات حتی‌المقدور منطقی بین فصول، بندها و پیوست‌ها برقرار باشد.
- سایر اعضای محترم کمیتهٔ تدوین آیین‌نامهٔ سازه‌های فضاکار در جلسات شرکت فعال داشته و حتی در صورتی‌که در تنظیم و تحریر نوشتارهای پیش‌نویس آیین‌نامه فرصت مشارکت نداشته‌اند، با ارایه رهنمودهای با ارزش در هدایت، ارتقای کیفیت و روش‌شناسی مطالعات تأثیر به‌سزایی برجای گذاشته‌اند.
- معاون نظارت راهبردی از همکاری صمیمانهٔ تمامی این عزیزان قدردانی می‌نماید.

محمد مهدی رحمتی
معاون نظارت راهبردی
بهار ۱۳۸۹

مسؤولین تدوین متون پیش‌نویس و سایر فعالیت‌های ذیربط در تدوین آیین‌نامه سازه‌های فضاکار

استاد هشیـــار نوشین (ریاست کمیته تدوین)	• پیوست ۱ـ الف: نمونه‌هایی از سازه‌های فضاکار شبکه‌ای • پیوست ۱ـ ب: برنامه‌های فرمیینی برای تاشه‌های پیوست ۱ـ الف • بند ۴-۱-۲- سازه‌های فضاکار شبکه‌ای • ویرایش پیش‌نویس‌های آیین‌نامه • مشارکت در تنظیم واژه‌نامه • نظارت عالی بر حسن انجام کار

دکتر شاهرخ مالک (مجری مسؤول طرح و دبیر کمیتهٔ تدوین)	• تدوین پیش‌نویس‌های متون به شرح زیر:
	  • فصل اول:کلیات
	  • فصل دوم: مبانی طراحی
	  • فصل سوم: کنش‌ها و بارهای مؤثر
	  • فصل چهارم: طراحی مجموعهٔ سازه فضاکار
	  • فصل هفتم: طراحی به کمک آزمایش
	  • موارد تکمیلی فصول پنجم و ششم
	  • پیوست ۶ـالف: مبانی طراحی
	  • پیوست ۶ـب: ملزومات طراحی مبتنی بر حالات حدی
	  • پیوست ۷: شیوه‌های اجرای سازه‌های فضاکار
	  • پیوست ۸: اصول مستند سـازی
	  • واژه‌نامه و نمادها
	• تنظیم و تجدید نظر فنی و ویرایش ادبـی تمـامی پـیش‌نـویس‌هـا و اضـافات و الحاقیات و موارد تکمیلی متون اصلی آیین‌نامه و تفسیرها
	• اصلاحات و بازنگری فنی و ویرایش ادبی تمامی پیوست‌ها، به‌ویژه پیوست ۲
	• سـرپرستی امور ترسیم شکل‌ها و تنظیم جدول‌ها، فارسی‌نویسی شکل‌ها، تایـپ، صفحه‌بندی و کنترل فصول متن اصلی و پیوست‌های ۲ تا ۸ و ویرایش و تهیه متون تکمیلی به‌ویژه در ارتباط با بندهای ۳ـ۲ـ۱۱ و پیوست ۲ و بندهای ۴-۸ و ۴ـ۹ـ۳ تا ۴ـ۹ـ۵
	• مسؤول تنظیم، تدوین، بازخوانی، ویرایش کامل و کنترل متن نهایی آیـین‌نامـه، تفسیر آیین‌نامه، پیوست‌ها، فهرست مندرجات، فهرست مراجع، واژه‌نامه، نمادها و برقراری هماهنگی و همگونی متون و ارتباطات مربوط

مسؤولین تدوین متون پیش‌نویس و سایر فعالیت‌های ذیربط در تدوین آیین‌نامه سازه‌های فضاکار

دکتر شاهرخ مالک (مجری مسؤول طرح و دبیر کمیتهٔ تدوین)	• متون خلاصه فارسی و انگلیسی • تهیه‌کننده متن نهایی گزارش مصوب مرحله اول طرح • تهیه‌کننده متن نهایی گزارش مصوب مرحله دوم طرح • تدوین مجموعه نوشتار تحت عنوان برنامه تدوین آیین‌نامه سازه‌های فضاکار • مدیریت طرح و مسؤول برنامه‌ریزی و هماهنگی امور اجرایی، پشتیبانی، تدارکاتی، روابط عمومی، زمان‌بندی و هماهنگی • مسؤول مدیریت کیفیت طرح • تهیه‌کننده متن نهایی مصوب آیین‌نامه
دکتر نصرالله دیانت (عضو)	• مشارکت فعال در کلیه فصول و همفکری در تبیین فلسفه و برنامهٔ مطالعاتِ فصول اصلی و تدوین پیش‌نویس بندهای۴-۱-۱، ۴-۴، ۴-۸، ۴-۹، ۶-۴، ۶-۵ و ... • قرائت متن آیین‌نامه و ارایه توصیه‌های بسیار مفید و رهنمودهای ارزشمند و همکاری همه‌جانبه در پیشبرد اهداف طرح در تمامی جنبه‌ها و به طور مستمر از ابتدا تا مراحل تکمیلی

دکترکریم عابدی
(عضو)
و
دکتر محمدرضاچناقلو
(عضو)
	• تدوین پیش‌نویس‌های:
	  • بندهای ۳-۱-۴-۵ تا ۸
	  • فصل پنجم: تحلیل
	  • بند ۶-۳: طراحی اتصالات و پیونده‌ها
	  • پیوست‌های ۲ تا ۵
	• مشارکت در سایر فصول به ویژه در فصل‌های چهارم و ششم
	• قرائت متون آیین‌نامه و ارایه توصیه‌های سودمند
	• مشارکت در تنظیم فصول و پیوست‌ها و چارچوب و فلسفه و برنامه مطالعات و مشارکت در تنظیم واژه‌نامه و همکاری فعال همه‌جانبه و مستمر و ارایه رهنمودهای ارزشمند

دکتر محمود هریسچیان (عضو)	• تدوین پیش‌نویس‌های بندهای ۶-۱ و ۶-۲ (کلیات و طراحی اعضا) و بند ۳-۱-۴-۵-۹ • مشارکت فعال در کلیه مراحل تدوین آیین نامه و تبیین فلسفهٔ مطالعات • قرائت متون و ارایه توصیه‌های سودمند و رهنمودهای ارزشمند و همکاری فعال همه‌جانبه و مستمر

مسؤولین تدوین متون پیش‌نویس و سایر فعالیت‌های ذیربط در تدوین آیین‌نامه سازه‌های فضاکار

دکتر محمود یحیایی (عضو)	• تهیه پیش‌نویس بند ۳-۲-۱۱- بار باد • مشارکت فعال در جلسات متعدد کمیته تدوین و ارایه رهنمودهای ارزشمند
مهندس سید محمود ظفری (عضو)	• برقراری هماهنگی با آرایه نشریات دفتر امور فنی و قرائت متون و ارایه توصیه‌های سودمند و همکاری در امور اجرایی طرح
مهندس سیداکبر هاشمی (عضو)	• قرائت دقیق متون و ارایه توصیه‌های سودمند از دیدگاه ویرایش ادبی و فنی • مشارکت در جلسات و ارایهٔ رهنمودهای ارزشمند در تدوین متون و شیوه‌های ارایهٔ آیین‌نامه
شادروان دکتر علیرضا دهدشتی (عضو)	• مشارکت‌کننده در ویرایش برخی از فصول
مهندس حمیدرضا خاشعی (عضو)	• قرائت، بررسی و ویرایش دقیق علمی ـ فنی ـ ادبی متون • ارایه توصیه‌های سودمند و رهنمودهای ارزشمند • همکاری همه‌جانبه و مؤثر در تکمیل گزارش نهایی طرح شامل فصل‌بندی نهایی، آرایهٔ نهایی، تهیه نمایه‌ها • مشارکت و فعالیت سازنده در امور اجرایی پروژه

دیگر اعضای محترم کمیته تدوین که با شرکت در جلسات متعدد عمومی و تخصصی کمیته تدوین و ارایه رهنمودهای ارزشمند به‌طور مستمر و مؤثر به پیشبرد اهداف طرح یاری رسانده‌اند، عبارت‌اند از:

مهندس سهیل آیرملو ، دکتر عیسی سلاجقه، دکتر محمّدمهدی علی‌نیا، مهندس محمد کریمی و دکتر محمود گلابچی.

در ضمن آقایان مهندس امید علی سماواتی در پیوست الف و دکتر بهمن طهوری در قرائت و ویرایش بند ۳-۲-۱۱ همکاری داشته‌اند.

همچنین علاوه بر اعضای کمیته تدوین، آقایان دکتر امیر مسعود حر، دکتر مجید صادق آذر، دکتر حسن علیجانی مقدم و دکتر سیّد رسول میرقادری نیز در مرحله مقدماتی و تدوین برنامه عملیاتی آیین نامه همکاری و همفکری نموده‌اند.

فهـــــرست منـــــدرجـــــات

فهرست مندرجات

عنوان **صفحه**

پیش‌زمینه و سپاسگزاری ۷
برنامه تدوین آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ۲۹
نمادهـــــا ۴۹
بخش اول: کلیات ۱-۱
فصل اول : کلیات ۱-۳
۱ـ۱ـ مقدمه ۱ـ۵
۱ـ۱ـ۱ـ اهداف ۱ـ۵
۱ـ۱ـ۲ـ تعاریف ۱ـ۵
۱ـ۱ـ۲ـ۱ـ دسته‌بندی سازه‌های فضاکار ۱ـ۵
۱ـ۱ـ۳ـ دامنه کاربرد ۱ـ۷
۱ـ۱ـ۴ـ سیستم واحدها ۱ـ۸
۱ـ۱ـ۵ـ نمادها ۱ـ۸
۱ـ۲ـ مفاهیم بنیادین و مبانی طراحی ۱ـ۸
۱ـ۲ـ۱ـ مبانی نظری و فلسفهٔ طراحی ۱ـ۸
۱ـ۲ـ۲ـ شرایط طراحی و کنش‌ها ۱ـ۸
۱ـ۲ـ۳ـ مصالح ۱ـ۸
۱ـ۲ـ۴ـ پایایی ۱ـ۹
۱ـ۲ـ۵ـ فرم شناسی سازه‌ای ۱ـ۹
۱ـ۲ـ۶ـ تحلیل ۱ـ۹
۱ـ۲ـ۷ـ طراحی ۱ـ۹
۱ـ۳ـ مدیریت کیفیت ۱ـ۱۰
۱ـ۴ـ اصول اجرا ۱ـ۱۰
۱ـ۵ـ اصول بهره‌برداری و نگهداری ۱ـ۱۰
۱ـ۶ـ اصول مستندسازی ۱ـ۱۰
۱ـ۷ـ سایر استانداردها و مدارک مرتبط با آیین‌نامه ۱ـ۱۱
بخش دوم: طراحی ۲ـ۱
فصل دوم: مبانی طراحی ۲ـ۳
۲ـ مبانی طراحی ۲ـ۵

۲ـ۱ـ مقدمه ۲ـ۵
۲ـ۲ـ الزامات بنیادین طراحی ۲ـ۵
۲ـ۲ـ۱ـ اصول بنیادین ۲ـ۵
۲ـ۲ـ۲ـ قابلیت اعتماد و سطوح اطمینان ۲ـ۶
۲ـ۲ـ۳ـ عمر مفید طراحی ۲ـ۸
۲ـ۲ـ۴ـ پایایی ۲ـ۸
۲ـ۲ـ۵ـ مدیریت کیفیت ۲ـ۹
۲ـ۲ـ۶ـ شرایط طراحی ۲ـ۱۰
۲ـ۳ـ حالات حدی ۲ـ۱۰
۲ـ۳ـ۱ـ کلیات ۲ـ۱۰
۲ـ۳ـ۲ـ حالات حدی نهایی ۲ـ۱۱
۲ـ۳ـ۳ـ حالات حدی خدمت‌رسانی ۲ـ۱۲
۲ـ۳ـ۴ـ طراحی مبتنی بر حالات حدی ۲ـ۱۲
۲ـ۴ـ کنش‌ها و آثار محیطی ۲ـ۱۳
۲ـ۴ـ۱ـ دسته‌بندی ۲ـ۱۳
۲ـ۴ـ۲ـ آثار ناشی از خستگی ۲ـ۱۵
۲ـ۴ـ۳ـ کنش‌های دینامیکی ۲ـ۱۵
۲ـ۴ـ۴ـ کنش‌های وابسته به ویژگی‌های ژئوتکنیکی ۲ـ۱۵
۲ـ۴ـ۵ـ آثار محیطی ۲ـ ۱۶
۲ـ۴ـ۶ـ آتش‌سوزی ۲ـ۱۶
۲ـ۴ـ۷ـ مقادیر مشخصه کنش‌ها ۲ـ ۱۵
۲ـ۵ـ مقاومت لازم و ضرایب بار ۲ـ ۱۷
۲ـ۶ـ خواص مصالح ۲ـ ۱۸
۲ـ۷ـ داده‌های هندسی ۲ـ۱۹
۲ـ۸ـ تحلیل ۲ـ۱۹
۲ـ۸ـ۱ـ اصول مدل‌سازی ۲ـ۱۹
۲ـ۸ـ۲ـ تحلیل استاتیکی ۲ـ۲۰
۲ـ۸ـ۳ـ تحلیل دینامیکی ۲ـ۲۱
۲ـ۸ـ۴ـ تحلیل پایداری ۲ـ۲۲
۲ـ۸ـ۵ـ تحلیل آثار ناشی از آتش‌سوزی ۲ـ۲۳
۲ـ۹ـ مقاومت در مقابل گسیختگی پیش‌رونده ۲ـ۲۳

۲ـ۱۰ـ مبانی شایدی (احتمال‌اندیشانه) طراحی ۲ـ۲۴
۲ـ۱۰ـ۱ـ مفاهیم پایه ۲ـ۲۴
فصل سوم : کنش‌ها و بارهای مؤثر ۳ـ۱
۳ـ۱ـ کلیات ۳ـ۳
۳ـ۱ـ۱ـ مقدمه ۳ـ۳
۳ـ۱ـ۱ـ۱ـ بارهای دارای منشأ بیرونی ۳ـ۳
۳ـ۱ـ۱ـ۲ـ مدل‌های کنش‌های بیرونی ۳ـ۴
۳ـ۱ـ۱ـ۳ـ کنش‌ها و شرایط مؤثر ۳ـ۴
۳ـ۱ـ۱ـ۴ـ بارگذاری و تحلیل ۳ـ۴
۳ـ۱ـ۱ـ۵ـ مفاهیم ضرایب ایمنی ۳-۵
۳ـ۱ـ۲ـ مدل‌ها و کمیت‌های نمایشگر آثار اندرکنش بار و سازه ۳-۵
۳ـ۱ـ۳ـ دسته‌بندی کنش‌ها ۳ـ۵
۳ـ۲ـ بارهای وارده بر سازه فضاکار ۳ـ۸
۳ـ۲ـ۱ـ بارهای ثقلی ۳ـ۸
۳ـ۲ـ۱ـ۱ـ بارهای مرده ۳-۸
۳ـ۲ـ۱ـ۲ـ بارهای زنده ۳-۱۱
۳ـ۲ـ۱ـ۳ـ بار برف ۳ـ۱۷
۳ـ۲ـ۲ـ بارهای ناشی از ضربه و بارهای ناشی از ماشین‌آلات دوار ۳ـ۱۷
۳ـ۲ـ۲ـ۱ـ کلیات ۳-۱۷
۳ـ۲ـ۲ـ۲ـ پاسخ سازه ۳-۱۷
۳ـ۲ـ۲ـ۳ـ تعریف و توصیف بارهای ناشی از ضربه و بارهای ناشی از ماشین‌آلات دوار ۳-۱۸
۳ـ۲ـ۳ـ آثار ناشی از ارتعاش ۳ـ۱۸
۳ـ۲ـ۴ـ بارهای اجرایی ۳ـ۱۹
۳ـ۲ـ۵ـ بارهای ناشی از کنش‌های مرتبط با شرایط جوی ۳ـ۲۰
۳ـ۲ـ۵ـ۱ـ کلیات ۳ـ۲۰
۳ـ۲ـ۵ـ۲ـ آثار ناشی از تغییرات دما ۳ـ۲۰
۳ـ۲ـ۶ـ بارهای ناشی از برف ۳ـ۲۴
۳ـ۲ـ۶ـ۱ـکلیات ۳-۲۴
۳ـ۲ـ۶ـ۲ـ بار برف وارد برزمین ۳-۲۵
۳ـ۲ـ۶ ـ۳ـ بار برف وارد بر بام و پوشانه سازه‌های فضاکار ۳-۲۵
۳ـ۲ـ۶ـ۴ـ بارهای برف، یخ و انباشت آب باران و یخ ۳-۲۶

۳ـ۲ـ۶ـ۵ـ ملاحظات کلی در تعیین بارهای برف ۳-۲۶
۳ـ۲ـ۷ـ بارهای تابع تغییرشکل ۳ـ۲۷
۳ـ۲ـ۸ـ آثار ناشی از اختلاف نشست ۳ـ۲۸
۳ـ۲ـ۹ـ آثار ناشی از نامیزانی ۳ـ۲۹
۳ـ۲ـ۱۰ـ آثار ناشی از پیش‌تنیدگی ۳ـ۳۰
۳ـ۲ـ۱۱ـ بار باد ۳ـ۳۰
۳ـ۲ـ۱۱ـ۱ـ کلیات ۳-۳۰
۳ـ۲ـ۱۱ـ۲ـ تعاریف ۳-۳۱
۳ـ۲ـ۱۱ـ۳ـ روش‌های محاسبه بارهای باد ۳-۳۲
۳ـ۲ـ۱۱ـ۴ـ مقادیر بارهای ناشی از باد ۳-۳۳
۳ـ۲ـ۱۱ـ۵ـ بارگذاری باد بر سازه‌ها ۳-۳۷
۳ـ۲ـ۱۲ـ بارهای ناشی از زلزله ۳ـ۵۹
۳ـ۲ـ۱۲ـ۱ـ مقدمه ۳ـ۵۹
۳ـ۲ـ۱۲ـ۲ـ سطوح خطر زمین لرزه در طراحی مبتنی بر عملکرد ۳ـ۵۹
۳ـ۲ـ۱۲ـ۳ـ مشخصات زمین‌لرزه‌های طراحی ۳-۶۱
۳ـ۲ـ۱۲ـ۴ـ بارگذاری و تحلیل آثار ناشی از زلزله ۳-۶۴
۳ـ۳ـ ترکیب بارها ۳-۶۸
فصل چهارم : طراحی مجموعه سازه فضاکار ۴ـ۱
۴ـ۱ـ کلیات ۴ـ۳
۴ـ۱ـ۱ـ تعریف ۴ـ۳
۴ـ۱ـ۲ـ سازه‌های فضاکار شبکه‌ای ۴ـ۳
۴ـ۱ـ۲ـ۱ـ شبکه‌های تک‌لایه(تخت) ۴ـ۴
۴ـ۱ـ۲ـ۲ـ شبکه‌های دولایه و چندلایه(تخت) ۴ـ۴
۴ـ۱ـ۲ـ۳ـ چلیک‌های شبکه‌ای ۴ـ۴
۴ـ۱ـ۲ـ۴ـ گنبدهای شبکه‌ای ۴ـ۴
۴ـ۱ـ۲ـ۵ـ سهلوی‌های شبکه‌ای ۴ـ۵
۴ـ۱ـ۲ـ۶ـ هرم‌های شبکه‌ای ۴ـ۵
۴ـ۱ـ۲ـ۷ـ برج‌های شبکه‌ای ۴ـ۵
۴ـ۱ـ۲ـ۸ـ سازه‌های فضاکار تاشو ۴ـ۵
۴ـ۱ـ۲ـ۹ـ سازه‌های فضاکار شبکه‌ای مرکب ۴ـ۵
۴ـ۱ـ۲ـ۱۰ـ سازه‌های فضاکار شبکه‌ای با شکل آزاد ۴ـ۶

۴ـ۲ـ طراحی مجموعهٔ سازه فضاکار ۴ـ۶
۴ـ۲ـ۱ـ مبانی طراحی مجموعه سازه فضاکار ۴ـ۶
۴ـ۲ـ۲ـ مفاهیم طراحی مجموعه سازه فضاکار ۴ـ۷
۴ـ۲ـ۲ـ۱ـ شبکه‌بندی ساختاری ۴ـ۸
۴ـ۲ـ۲ـ۲ـ شبکه‌های تک‌لایه ۴ـ۸
۴ـ۲ـ۲ـ۳ـ شبکه‌های دو یا چندلایه ۴ـ۸
۴ـ۲ـ۲ـ۴ـ چلیک‌ها و گنبدها ۴ـ۹
۴ـ۲ـ۳ـ قیاس به صفحه یا پوستهٔ معادل ۴ـ۹
۴ـ۲ـ۴ـ سازهٔ فضاکار در مقایسه با سایر سیستم‌های سازه‌ای ۴ـ۹
۴ـ۲ـ۵ـ تحلیل میزان حساسیت به تغییرات پارامترهای مؤثر در طرح ۴ـ۱۰
۴ـ۲ـ۶ـ روش‌های طراحی فرم هندسی مجموعه سازه فضاکار ۴ـ۱۰
۴ـ۲ـ۶ـ۱ـ طراحی سازه فضاکار شبکه‌ای از کل به جزء ۴ـ۱۰
۴ـ۲ـ۶ـ۲ـ طراحی سازه فضاکار شبکه‌ای از جزء به کل ۴ـ۱۰
۴ـ۲ـ۷ـ عوامل مؤثر بر سختی و مقاومت ۴ـ۱۱
۴ـ۲ـ۸ ـ خرپاهای فضاکار ۴ـ۱۱
۴ـ۲ـ۹ـ نوع هم‌بندی ۴ـ۱۱
۴ـ۲ـ۱۰ـ مقاطع و کارایی اعضا ۴ـ۱۱
۴ـ۲ـ۱۱ـ پیونده‌ها و اتصالات ۴ـ۱۱
۴ـ۲ـ ۱۲ـ رواداری‌های ساخت، بافت و نصب ۴ـ۱۲
۴ـ۲ـ۱۳ـ ابزار طراحی ۴ـ۱۲
۴ـ۲ـ۱۴ـ رفتار سازه‌ای و عملکرد معماری سازه فضاکار ۴ـ۱۲
۴ـ۲ـ ۱۵ـ فرم‌یابی ۴ـ۱۲
۴ـ۲ـ ۱۵ـ۱ـ دسته‌بندی رویه‌های سازه‌های فضاکار ۴ـ۱۳
۴ـ۲ـ ۱۶ـ بهینه‌یابی ۴ـ۱۳
۴ـ۲ـ ۱۷ـ پیش‌خیز ۴ـ۱۴
۴ـ۳ـ شیوه‌های ساخت، بافت و نصب ۴ـ۱۵
۴ـ۳ـ۱ـ سیستم‌های پیونده‌ای ۴ـ۱۶
۴ـ۳ـ۲ـ سیستم‌های واحدی ۴ـ۱۶
۴ـ۳ـ۳ـ سیستم‌های ویژه ۴ـ۱۶
۴ـ۳ـ۴ـ شیوه‌های بافت و جابه‌جایی ۴ـ۱۶
۴ـ۳ـ۵ـ نصب ۴ـ۱۸

۴ـ۴ـ طراحی مبتنی بر حالات حدی ۴ـ۱۸
۴ـ۴ـ۱ـ مقدمه ۴ـ۱۸
۴ـ۴ـ۲ـ حالات حدی نهایی ۴ـ۱۹
۴ـ۴ـ۲ـ۱ـ شرایط صحت‌سنجی ۴ـ۱۹
۴ـ۴ـ۲ـ۲ـ ترکیب کنش‌ها، آرایش بارها و حالت بارگذاری ۴ـ۲۰
۴ـ۴ـ۳ـ حالت حدی خدمت‌رسانی ۴ـ۲۲
۴ـ۴ـ۳ـ۱ـ معیار های حالت خدمت‌رسانی ۴ـ۲۳
۴ـ۵ـ مصالح ۴ـ۲۵
۴ـ۵ـ۱ـ فولاد سازه‌ای ۴ـ۲۵
۴ـ۵ـ۱ـ۱ـ خصوصیات مکانیکی مصالح ۴ـ۲۵
۴ـ۵ـ۲ـ پیوندهای کوبن‌کاری‌شده ۴ـ۲۵
۴ـ۵ـ۳ـ پیوندهای ریخته‌گری‌شده ۴ـ۲۶
۴ـ۵ـ۴ـ مصالح پیچ‌ها ۴ـ۲۶
۴ـ۵ـ۴ـ۱ـ مصالح و مشخصات مکانیکی و متالورژیکی پیچ‌ها ۴ـ۲۶
۴ـ۵ـ۴ـ۲ـ برنامهٔ کنترل کیفیت پیچ‌ها ۴ـ۲۶
۴ـ۵ـ۴ـ۳ـ ملاحظات طراحی، ساخت و نصب پیچ‌ها ۴ـ۲۷
۴ـ۵ـ۴ـ۴ ـ پیچ با رویهٔ گالوانیزه ۴ـ۲۷
۴ـ۵ـ۵ـ اتصالات جوشی ۴ـ۲۷
۴ـ۶ـ اعضای سازه ۴ـ۲۸
۴ـ۶ـ۱ـ دسته‌بندی اعضا ۴ـ۲۸
۴ـ۶ـ۱ـ۱ـ دسته‌بندی بر اساس شکل مقطع ۴ـ۲۸
۴ـ۶ـ۱ـ۲ـ دسته‌بندی بر اساس نوع مقطع از نظر کمانش موضعی ۴ـ۲۹
۴ـ۶ـ۱ـ۳ـ دسته‌بندی بر اساس شرایط سر حدی و قیود جانبی پیچشی ۴ـ۲۹
۴ـ۶ـ۱ـ۴ ـ دسته‌بندی بر اساس نوع نیروها و آثار ناشی از تلاش‌ها ۴ـ۲۹
۴ـ۶ـ۲ـ کلیات و موارد عمومی طراحی اعضا ۴ـ۳۰
۴ـ۷ـ پیوندهها و اتصالات ۴ـ۳۰
۴ـ۷ـ۱ـ کلیات ۴ـ۳۰
۴ـ۷ـ۲ـ سیستم‌های پیونده، مصالح و شیوه ساخت ۴ـ۳۱
۴ـ۷ـ۳ـ رواداری‌های ابعادی ۴ـ۳۱
۴ـ۷ـ۴ـ ملاحظاتی در مورد طراحی مجموعه سازه فضاکار با در نظرگرفتن اتصالات و پیونده‌ها ۴ـ۳۱
۴ـ۷ـ۵ـ جزییات اجرایی ۴ـ۳۱

۴ـ۸ ـ دستگاه‌های تکیه‌گاهی ۴ـ۳۱
۴ـ۹ـ اجزا و پوشانه‌های غیرسازه‌ای ۴ـ۳۷
۴ـ۹ـ۱ـ کلیات ۴ـ۳۷
۴ـ۹ـ۲ـ انواع متداول پوشانه‌های سازه‌های فضاکار ۴ـ۳۷
۴ـ۹ـ۳ـ مقاومت پوشانه‌ها در مقابل آتش‌سوزی ۴ـ۳۹
۴ـ۹ـ۴ـ مقامت پوشانه و اجزا و اعضای نگهدارنده پوشانه در برابر باد ۴ـ۳۹
۴ـ۹ـ۵ـ پایایی پوشانه‌ها ۴ـ۳۹
۴ـ۱۰ـ ملاحظات کلی در طراحی لرزه‌ای سازه‌های فضاکار ۴ـ۳۹
۴ـ۱۰ـ۱ـ کلیات ۴ـ۳۹
۴ـ۱۰ـ۲ـ مبانی طراحی لرزه‌ای ۴ـ۴۰
۴ـ۱۰ـ۲ـ۱ـ عملکرد لرزه‌ای ۴ـ۴۰
۴ـ۱۰ـ۲ـ۲ـ حالات حدی در طراحی لرزه‌ای مبتنی بر عملکرد ۴ـ۴۱
۴ـ۱۰ـ۳ـ روش ارزیابی عملکرد لرزه‌ای ۴ـ۴۲
۴ـ۱۰ـ۴ـ جنبه‌های رفتاری سازه از دیدگاه میزان شکل‌پذیری و قابلیت استهلاک انرژی ۴ـ۴۳
۴ـ۱۰ـ۴ـ۱ـ سازه با رفتار شکل‌پذیر ۴ـ۴۳
۴ـ۱۰ـ۴ـ۲ـ سازه با شکل‌پذیری محدود ۴ـ۴۳
۴ـ۱۰ـ۴ـ۳ـ طراحی مفهومی ۴ـ۴۳
۴ـ۱۰ـ۴ـ۴ـ سازه مجهز به سیستم‌های میراگر ۴ـ۴۳
۴ـ۱۰ـ۵ـ شرایط خاک ۴ـ۴۴
۴ـ۱۰ـ۶ـ فلسفه بارگذاری، تحلیل و طراحی آثار ناشی از زمین‌لرزه ۴ـ۴۴
۴ـ۱۰ـ۷ـ ترکیب آثار ناشی از زلزله با سایر عوامل ۴ـ۴۵
فصل پنجم : تحلیل ۵ـ۱
۵ـ۱ـ تعریف ۵ـ۳
۵ـ۲ـ مبانی تحلیل ۵ـ۳
۵ـ۲ـ۱ـ کنش‌های طراحی ۵ـ۳
۵ـ۲ـ۲ـ آثار ناکاملی ۵ـ۳
۵ـ۲ـ۲ـ۱ـ دسته‌بندی ناکاملی‌ها ۵ـ۳
۵ـ۲ـ۲ـ۲ـ بررسی ناکاملی‌ها ۵ـ۴
۵ـ۲ـ۲ـ۳ـ ماهیت تصادفی ناکاملی‌ها ۵ـ۴
۵ـ۲ـ۲ـ۴ـ نحوهٔ اعمال آثار ناکاملی‌های هندسی ۵ـ۴
۵ـ۲ـ۲ـ۵ـ نحوه اعمال آثار ناکاملی‌های مکانیکی ۵ـ۵

۵ـ۲ـ۳ـ آثار انعطاف‌پذیری اتصالات و پیوندها ۵ـ۶
۵ـ۲ـ۳ـ۱ـ دسته‌بندی اتصالات از دیدگاه میزان انتقال لنگر بین اعضا و پیوندها ۵ـ۶
۵ـ۲ـ۳ـ۲ـ انتخاب نوع اتصال ۵ـ۷
۵ـ۲ـ۳ـ۳ـ آثار رفتار اتصالات ۵ـ۷
۵ـ۲ـ۴ـ آثار درجه دوم و رفتار غیرخطی ۵ـ۷
۵ـ۲ـ۴ـ۱ـ عوامل اصلی ایجاد رفتار غیرخطی در سازه‌های فضاکار ۵ـ۸
۵ـ۲ـ۴ـ۲ـ مراتب تأثیر عوامل اصلی در رفتار سازه‌های فضاکار ۵ـ۸
۵ـ۲ـ۵ـ تحلیل تجربی تنش‌ها و تغییرشکل‌ها ۵ـ۹
۵ـ۲ـ۶ـ ملاحظات مربوط به حالات حدی متناسب با روش‌های طراحی ۵ـ۹
۵ـ۲ـ۶ـ۱ـ دسته‌بندی حالات حدی ۵ـ۹
۵ـ۲ـ۶ـ۲ـ تشخیص نوع تحلیل با توجه به حالت طراحی موردنظر ۵ـ۱۰
۵ـ۳ـ مدل‌سازی ۵ـ۱۰
۵ـ۳ـ۱ـ مدل‌سازی مجموعه ۵ـ۱۰
۵ـ۳ـ۲ـ مدل‌سازی اجزای سازه‌ای ۵ـ۱۰
۵ـ۳ـ۲ـ۱ـ مدل‌سازی اعضا ۵ـ۱۰
۵ـ۳ـ۲ـ۲ـ مدل‌سازی پیوندها و اتصالات ۵ـ۱۱
۵ـ۳ـ۲ـ۳ـ تکیه‌گاه‌ها ۵ـ۱۱
۵ـ۳ـ۲ـ۴ـ پوشانه‌ها ۵ـ۱۱
۵ـ۳ـ۳ـ مدل‌سازی مکانیکی ۵ـ۱۱
۵ـ۳ـ۳ـ۱ـ مدل‌سازی رفتار مصالح ۵ـ۱۱
۵ـ۳ـ۳ـ۲ـ مدل‌سازی سیستم‌های مکانیکی ۵ـ۱۲
۵ـ۳ـ۴ـ مدل‌سازی هندسی سازه ۵ـ۱۲
۵ـ۳ـ۵ـ مدل‌سازی کنش‌ها و بارهای مؤثر ۵ـ۱۲
۵ـ۳ـ۵ـ۱ـ مدل‌سازی بارهای مؤثر ۵ـ۱۲
۵ـ۳ـ۵ـ۲ـ مدل‌سازی آثار ناکاملی‌ها ۵ـ۱۲
۵ـ۳ـ۶ـ مدل‌سازی اجزای غیرسازه‌ای ۵ـ۱۲
۵ـ۳ـ۷ـ مدل‌سازی ریاضی ۵ـ۱۳
۵ـ۴ـ روش‌های تحلیل ۵ـ۱۳
۵ـ۴ـ۱ـ دسته‌بندی تحلیل براساس نوع بار و پاسخ سازه ۵ـ۱۴
۵ـ۴ـ۱ـ۱ـ تحلیل استاتیکی ۵ـ۱۴
۵ـ۴ـ۱ـ۲ـ تحلیل دینامیکی ۵ـ۱۴

۵ـ۴ـ۲ـ دسته‌بندی تحلیل استاتیکی ۵ـ۱۴
۵ـ۴ـ۲ـ۱ـ تحلیل خطی ۵ـ۱۴
۵ـ۴ـ۲ـ۲ـ تحلیل غیرخطی ۵ـ۱۴
۵ـ۴ـ۲ـ۳ـ تحلیل ناپایداری (استاتیکی) ۵ـ۱۵
۵ـ۴ـ۳ـ دسته‌بندی تحلیل دینامیکی ۵ـ۱۶
۵ـ۴ـ۳ـ۱ـ نحوه تحلیل دینامیکی خطی ۵ـ۱۶
۵ـ۴ـ۳ـ۲ـ تحلیل دینامیکی غیرخطی ۵ـ۱۷
۵ـ۴ـ۳ـ۳ـ تحلیل ناپایداری دینامیکی ۵ـ۱۸
۵ـ۴ـ۴ـ تحلیل سازه‌های فضاکار به روش پاره‌سازه‌ها ۵ـ۱۹
فصل ششم : طراحی اعضا، اتصالات و تکیه‌گاه‌ها ۶ـ۱
۶ـ۱ـ کلیات ۶ـ۳
۶ـ۲ـ طراحی اعضا ۶ـ۳
۶ـ۲ـ۱ـ ضرایب کاهش مقاومت در طراحی به روش حالت حدی نهایی ۶ـ۴
۶ـ۲ـ۲ـ مقادیر حالات حدی بهره‌برداری ۶ـ۴
۶ـ۲ـ۳ـ طراحی اعضا بر اساس ماهیت نیروهای اعضا ۶ـ۴
۶ـ۲ـ۳ـ۱ـ طراحی اعضای تحت تأثیر نیروی محوری کششی ۶ـ۴
۶ـ۲ـ۳ـ۲ـ طراحی اعضای تحت تأثیر نیروی محوری فشاری ۶ـ۵
۶ـ۲ـ۳ـ۳ـ طراحی اعضای تحت تأثیر خمش ۶ـ۶
۶ـ۲ـ۳ـ۴ـ طراحی اعضای تحت تأثیر ترکیب نیروی محوری و لنگر خمشی ۶ـ۷
۶ـ۲ـ۴ـ ملاحظاتی در مورد طراحی اجزای سازه‌ای اعضای سازه‌های فضاکار ۶ـ۷
۶ـ۳ـ طراحی اتصالات و پیوندها ۶ـ۸
۶ـ۳ـ۱ـ کلیات ۶ـ۸
۶ـ۳ـ۲ـ دسته‌بندی اتصالات ۶ـ۹
۶ـ۳ـ۲ـ۱ـ دسته‌بندی از دیدگاه میزان صلبیت ۶ـ۹
۶ـ۳ـ۲ـ۲ـ دسته‌بندی از دیدگاه روش اجرای اتصال ۶ـ۱۱
۶ـ۳ـ۲ـ۳ـ دسته‌بندی از دیدگاه مدول‌های مبنا ۶ـ۱۵
۶ـ۳ـ۳ ـ مبانی و معیارهای طراحی اتصالات ۶ـ۱۶
۶ـ۳ـ۳ـ۱ـ دسته‌بندی پیوندها ۶ـ۱۶
۶ـ۳ـ۳ـ۲ـ مبانی و معیارهای طراحی سیستم‌های پیوندہ استاندارد ۶ـ۱۶
۶ـ۳ـ۳ـ۳ـ مبانی و معیارهای طراحی سیستم‌های پیوندہ خاص ۶ـ۱۷
۶ـ۴ـ طراحی تکیه‌گاه‌ها و دستگاه‌های تکیه‌گاهی ۶ـ۱۸

۶ـ۴ـ۱ـ طراحی تکیه‌گاه‌ها ۶ـ۱۸
۶ـ۴ـ۲ـ طراحی دستگاه‌های تکیه‌گاهی ۶ـ۱۹
۶ـ۴ـ۲ـ۱ـ الزامات حالات حدی ۶ـ۱۹
۶ـ۴ـ۲ـ۲ـ عمر طرح ۶ـ۱۹
۶ـ۴ـ۲ـ۳ـ پیش‌بینی‌های لازم برای جای‌گذاری، جابه‌جایی، تنظیم مجدد و دسترسی ۶ـ۱۹
۶ـ۴ـ۲ـ۴ـ دوام ۶ـ۲۰
۶ـ۴ـ۲ـ۵ـ قید حرکتی ۶ـ۲۰
۶ـ۴ـ۲ـ۶ـ برکنش ۶ـ۲۰
۶ـ۴ـ۲ـ۷ـ صفحات پخش بار دستگاه‌های تکیه‌گاهی ۶ـ۲۰
۶ـ۴ـ۲ـ۸ ـ دستگاه تکیه‌گاه‌های الاستومر ۶ـ۲۰
۶ـ۴ـ۲ـ۹ـ دستگاه تکیه‌گاه‌های چنددورانی با بار زیاد ۶ـ۲۱
۶ـ۵ـ طراحی اجزا و پوشانه‌های غیرسازه‌ای ۶ـ۲۲
۶ـ۵ـ۱ـ اجزای غیرسازه‌ای ۶ـ۲۲
۶ـ۵ـ۲ـ زیرسازی پوشانه ۶ـ۲۲
فصل هفتم : طراحی به کمک آزمایش ۷ـ۱
۷ـ۱ـ کلیات ۷ـ۳
۷ـ۲ـ دسته‌بندی انواع آزمایش‌ها در تناسب با اهداف مطالعات ۷ـ۳
۷ـ۳ ـ انواع آزمایش‌ها ۷ـ۵
۷ـ۴ـ برنامه‌ریزی و طراحی آزمایش‌ها ۷ـ۵
۷ـ۴ـ۱ـ موارد عمومی ۷ـ۵
۷ـ۴ـ۲ـ اهداف آزمایش، حیطه و دامنه کار ۷ـ۶
۷ـ۴ـ۳ـ تخمین نتایج آزمایش یا نتایج مورد انتظار آزمایش ۷ـ۶
۷ـ۴ـ۴ـ مشخصات نمونه‌های آزمایش و نحوهٔ نمونه‌گیری ۷ـ۶
۷ـ۴ـ۵ـ مشخصات بارگذاری ۷ـ۷
۷ـ۴ـ۶ـ طراحی مجموعه آزمایش و نصب تجهیزات و ابزاربندی ۷ـ۷
۷ـ۴ـ۷ـ روش اندازه‌گیری کمیت‌ها ۷ـ۷
۷ـ۵ـ ارزیابی، پردازش و پالایش داده‌ها، تجزیه و تحلیل نتایج، استنتاج و جمع‌بندی و ارایه گزارش آزمایش ۷ـ۸
۷ـ۵ـ۱ـ استخراج مقادیر کمّیّت‌ها برای طراحی ۷ـ۸
۷ـ۵ـ۲ـ استخراج مقدار مشخصه از آزمایش‌ها ۷ـ۸
۷ـ۵ـ۳ـ ضرایب پاره‌ای ۷ـ۸
۷ـ۵ـ۴ـ آثار عواملی که از طریق آزمایش پوشش داده نشده‌اند ۷ـ۸

۷ـ۵ـ۵ـ تعیین مقادیر طراحی از روش مستقیم ۷ـ۹
۷ـ۵ـ۶ـ مقایسه نتایج آزمایش با مقادیر پیش‌بینی‌شده از طریق مطالعات نظری ۷ـ۹
۷ـ۵ـ۷ـ ارزیابی نتایج آزمایش براساس روش‌های آماری ۷ـ۹
۷ـ۶ـ تعیین مقادیر کمیت‌های طراحی به روش آماری ۷ـ۱۰
۷ـ۶ـ۱ـ موارد عمومی ۷ـ۱۰
۷ـ۷ـ تعیین آماری مدل‌های مقاومت ۷ـ۱۰
۷ـ۷ـ۱ـ موارد عمومی ۷ـ۱۰
۷ـ۸ـ راهنمای آزمایش‌های بارگذاری (سازه یا زیرمجموعه‌ها) ۷ـ۱۱
۷ـ۸ـ۱ـ کلیات ۷ـ۱۱
۷ـ۸ـ۲ـ اهداف و شرایط آزمایش ۷ـ۱۲
۷ـ۸ـ۳ـ روش‌های عمومی آزمایش بارگذاری ۷ـ۱۳
۷ـ۸ـ۴ـ فرایندهای ویژه ۷ـ۱۴
۷ـ۸ ـ۵ـ آزمایش مقاومت ۷ـ۱۵
۷ـ۸ـ۶ـ آزمایش تا خرابی ۷ـ۱۶
۷ـ۸ ـ۷ـ آزمایش‌های کنترل کیفیت ۷ـ۱۸
پیوست ۱ـ الف ـ نمونه‌هایی از سازه‌های فضاکار شبکه‌ای ..... پ ـ۱ـ الف ـ۱
پیوست ۱ـ ب ـ برنامه‌های فرمینی برای تاشه‌های پیوست ۱ـالف ..... پ ـ۱ـ ب ـ۱
پیوست ۲ـ گونه‌های اتصالات و پیوندها در سازه‌های فضاکار شبکه‌ای ..... پ ـ۲ـ۱
۱ـ سیستم گرهی (پیوندهای) ..... پ ـ۲ـ۳
۱ـ ۱ـ سیستم‌های پیوند گوی‌سان ..... پ ـ۲ـ۳
۱ـ۱ـ۱ـ سیستم پیوند گوی‌سان KK ..... پ ـ۲ـ۴
۱ـ۱ـ۲ـ سیستم پیوند گوی‌سان KRUPP MANTAL ..... پ ـ۲ـ۶
۱ـ۱ـ۳ـ سیستم پیوند گوی‌سان ZUBLIN ..... پ ـ۲ـ۶
۱ـ۱ـ۴ـ سیستم پیوند گوی‌سان UNITRUSS ..... پ ـ۲ـ۸
۱ـ۱ـ۵ـ سیستم پیوند گوی‌سان ORONA ..... پ ـ۲ـ۹
۱ـ۱ـ ۶ـ سیستم پیوند گوی‌سان TRUSS_ KT ..... پ ـ۲ـ۱۰
۱ـ۱ـ ۷ـ سیستم پیوند گوی‌سان SCAN SPACE ..... پ ـ۲ـ۱۱
۱ـ۲ـ سیستم‌های پیوند نیامی (Socket Joint Systems) ..... پ ـ۲ـ۱۱
۱ـ۲ـ۱ـ سیستم پیوند نیامی NS (Nippon steel) ..... پ ـ۲ـ۱۲
۱ـ۲ـ۲ـ سیستم پیوند نیامی SPHEROBAT ..... پ ـ۲ـ۱۲

۱ـ۲ـ۳ـ سیستم پیونده نیامیTUBALL ..... پ ـ۲ـ۱۳
۱ـ۲ـ۴ـ سیستم پیونده نیامی کاسان (آکام فلز) ..... پ ـ۲ـ۱۳
۱ـ۳ـ سیستم‌های پیونده صفحه‌ای (Plate Joint System) ..... پ ـ۲ـ۱۴
۱ـ۳ـ۱ـ سیستم پیونده صفحه‌ای KETRUSS، POWER STRUT،UNISTRUT ..... پ ـ۲ـ۱۴
۱ـ۳ـ۲ـ سیستم های پیونده صفحه ای OCTATUBE،
TORUS GESTO ARTO، TRIDIMATEC ..... پ ـ۲ـ۱۵
۱ـ۴ـ سیستم‌های پیونده شکافی (Slot Joint System) ..... پ ـ۲ـ۱۷
۱ـ۵ـ سیستم‌های پیونده پوسته‌ای (Shell Joint System) ..... پ ـ۲ـ۱۸
۱ـ۵ـ۱ـ سیستم‌های پیونده پوسته‌ای OKTAPLATTE ..... پ ـ۲ـ۱۸
۱ـ۵ـ۲ـ سیستم‌های پیونده پوسته‌ای NODUS ..... پ ـ۲ـ۱۸
۱ـ۵ـ۳ـ سیستم‌های پیونده پوسته‌ای SDC ..... پ ـ۲ـ۱۹
۲ـ سیستم‌های واحدی(Modular System) ..... پ ـ۲ـ۱۹
۲ـ۱ـ سیستم واحدی SPACE DECK ..... پ ـ۲ـ۱۹
۲ـ ۲ ـ سیستم واحدی UNIBAT ..... پ ـ۲ـ۲۱
۲ـ ۳ ـ سیستم واحدی CUBIC ..... پ ـ۲ـ۲۲
۳ـ سیستم ترکیبی (Compositive System) ..... پ ـ۲ـ۲۳
پیوست ۳ ـ تعیین شاخص انعطاف‌پذیری اتصالات سازه‌های فضاکار شبکه‌ای ..... پ ـ۳ـ۱
پیوست ۴ـ گونه‌های ناپایداری در سازه‌های فضاکار شبکه‌ای ..... پ ـ۴ـ۱
۱ـ ناپایداری عضوی ..... پ ـ۴ـ۳
۲ـ ناپایداری گرهی ..... پ ـ۴ـ۳
۳ـ ناپایداری پیچشی گرهی ..... پ ـ۴ـ۴
۴ـ ناپایداری حالات توام ناپایداری ..... پ ـ۴ـ۵
۵ـ ناپایداری در امتداد مسیر ..... پ ـ۴ـ۵
۶ـ ناپایداری کلی ..... پ ـ۴ـ۶
پیوست ۵ـ رده‌های ناپایداری در سازه‌های فضاکار شبکه‌ای ..... پ ـ۵ـ۱
۱ـ فروجهش گرهی ..... پ ـ۵ـ۳
۲ـ فروجهش عضوی ..... پ ـ۵ـ۴
۳ـ آثار توأم فروجهش گرهی و عضوی ..... پ ـ۵ـ۸
پیوست‌ـ۶ـالف‌ـ مبانی طراحی ..... پ ـ۶ـ الف ـ۱
پیوست‌ـ۶ـب‌ـ ملزومات طراحی ..... پ ـ۶ـ ب ـ۳

پیوست۷ـ اصول و شیوه‌های اجرای سازه‌های فضاکار ..... پ ـ۷ـ۱
۷ـ۱ـ مفاهیم عمومی ..... پ ـ۷ـ۳
۷ـ۲ـ ملزومات ساخت و نصب ..... پ ـ۷ـ۳
۷ـ۳ـ مشخصات فنی اجرا ..... پ ـ۷ـ۳
۷ـ۴ـ محدودیت‌ها در کاربری مصالح و به‌کارگیری شیوه‌های ساخت ..... پ ـ۷ـ۴
۷ـ۵ـ اتصالات پیچی ..... پ ـ۷ـ۴
۷ـ۶ـ اتصالات جوشی ..... پ ـ۷ـ۴
۷ـ۷ـ مصالح سخت‌شده ..... پ ـ۷ـ۴
۷ـ۸ـ رواداری‌ها ..... پ ـ۷ـ۴
۷ـ۸ـ۱ـ طبقه‌بندی رواداری‌ها ..... پ ـ۷ـ۴
۷ـ۸ـ۲ـ رواداری‌ها در مراحل تولید، ساخت و نصب ..... پ ـ۷ـ۵
۷ـ۹ـ مدیریت کیفیت ..... پ ـ۷ـ۶
۷ـ۹ـ۱ـ بازرسی فنی و آزمایش‌های کنترل کیفیت ..... پ ـ۷ـ۶
۷ـ۹ـ۲ـ تضمین کیفیت ..... پ ـ۷ـ۶
۷ـ۱۰ـ اصول ایمنی اجرا ..... پ ـ۷ـ۷
۷ـ ۱۱ـ ساخت، بافت و نصب سازه‌های فضاکار شبکه‌ای فولادی ..... پ ـ۷ـ۷
۷ـ۱۲ـ شناسنامه مصالح و قطعات و اعضا ..... پ ـ۷ـ۷
۷ـ ۱۳ـ حمل و تحویل قطعات ساخته‌شده ..... پ ـ۷ـ۸
۷ـ ۱۴ـ نصب ..... پ ـ۷ـ۸
۷ـ ۱۴ـ۱ـ روش نصب ..... پ ـ۷ـ۸
۷ـ ۱۴ـ۲ـ جزییات اتصالات و نحوه اجرای اتصالات ..... پ ـ۷ـ۸
۷ـ ۱۴ـ۳ـ تحویل و انبارنمودن مصالح، تولیدات، اعضا و اجزا ..... پ ـ۷ـ۸
۷ـ۱۵ ـ حفاظت در برابر خوردگی ..... پ ـ۷ـ۹
پیوست ۸ـ اصول مستندسازی ..... پ ـ۸ـ۱
۸ـ۱ـ نقشه‌های طراحی و مشخصات فنی پروژه ..... پ ـ۸ـ۳
۸ـ۲ـ نقشه‌های جزییات اجرایی ساخت کارخانه‌ای ..... پ ـ۸ـ۳
۸ـ۳ـ نقشه‌های جزییات جانمایی، بافت، نصب و اجرای کارگاهی ..... پ ـ۸ـ۳
۸ـ۴ـ نقشه‌های وضعیت اجراشده یا نقشه‌های چون‌ساخت ..... پ ـ۸ـ۴
۸ـ۵ـ نقشه‌های معماری، تأسیسات الکتریکی و مکانیکی و مشخصات فنی مربوط ..... پ ـ۸ـ۴
۸ـ۶ـ موارد مواجهه با تناقض ..... پ ـ۸ـ۴
۸ـ۷ـ تجدید نظرها ..... پ ـ۸ـ۴

۸ـ۸ـ نحوهٔ تأیید نقشه‌های ساخت و نصب کارخانه‌ای قطعات پیش‌ساخته..... پ ـ۸ـ۴
۸ـ۹ـ مستندسازی نقشه‌ها از طریق روش‌های کامپیوتری طراحی، نقشه‌کشی و بایگانی اسناد ..... پ ـ۸ـ۵
فهرست مراجع اصلی
واژه‌نامه
خلاصه انگلیسی

برنامه تدوین آیین‌نامه سازه‌های فضاکار

پیشگفتار

سازه‌های فضاکار گروهی از سازه‌ها هستند که دارای رفتار مسلط سه‌بعدی بوده، معمولاً در خور تولید صنعتی انبوه بوده و در این حالت، قیود فنی و اقتصادی را با تلفیق مناسبی از مفاهیم سازه‌ای، اصول ایمنی، دیدگاه‌های زیبا شناختی و جنبه‌های اقتصادی ارضا می‌نمایند.

متداول‌ترین کاربرد سازه‌های فضاکار در ساخت پوشانه‌های بناهایی است که در آنها عملکرد ساختمان ایجاب می‌نماید که دارای دهانهٔ آزاد نسبتاً بزرگ در دو جهت متعامد باشند. بدیهی است که این نوع از سازه‌های فضاکار در استادیوم‌های ورزشی و تالارهای اجتماعات، نمایشگاه‌های چندمنظوره، مراکز فرهنگی و هنری، مصلی‌ها و مساجد، آشیانه‌های هواپیما، سالن‌های صنعتی، انبارهای وسیع و انواع پایانه‌های مسافربری کاربرد فراوان دارند. در ایران به این‌گونه سازه‌ها نیاز فراوان و روبه تزایدی وجود دارد و بهترین پاسخ برای چنین کاربردی، بدون شک سازه‌های فضاکار می‌باشند ولی متأسفانه از این قابلیت‌ها به نحو شایسته‌ای در کشور بهره‌گیری نشده است.

با توجه به ویژگی‌های سازه‌های فضاکار، آیین‌نامه‌ها و ضوابط موجود تحلیل، طراحی و اجرای ساختمان‌های متداول مسکونی و اداری به هیچ‌وجه پاسخگوی نیازهای طراحی و اجرای سازه‌های فضاکار نبوده و ایجاب می‌نماید که آیین‌نامه ویژه سازه‌های فضاکار که در برگیرندهٔ ویژگی‌های رفتاری، تحلیلی، طراحی و اجرایی این نوع از سازه‌ها باشد، تدوین و مورد استفاده قرارگیرد. متاسفانه در سطح جهانی آیین‌نامه مدونی برای سازه‌های فضاکار جهت استفاده عمومی مهندسان موجود نمی‌باشد. آنچه برخی از شرکت‌های بزرگ سازه‌های فضاکار که در سطح بین‌المللی فعالیت می‌نمایند برای کاربرد داخلی مورد استفاده قرار می‌دهند، محدود به دستورالعمل‌هایی است که اغلب جنبه‌های اجرایی سیستم خاص تولیداتشان را در بر می‌گیرد و لذا کاربردی محدود به سیستم خود داشته و علاوه بر آن از نقطه نظر تجاری محرمانه تلقی می‌گردد و در اختیار عموم قرار داده نمی‌شود و آیین‌نامهٔ مختصری نیز که در کشور چین تهیه گردیده است و در حین انجام مرحلهٔ مقدماتی طرح حاضر در اختیارکمیتهٔ تدوین قرار گرفت، فاقد جامعیت لازم برای پاسخگویی به نیازهای مهندسی سازه‌های فضاکار از نقطه نظر تحلیل، طراحی و اجرا وهمچنین کنترل و تضمین کیفیت انواع متفاوت سازه‌های فضاکار می باشد.

با توجه به آن‌که هنوز استفادهٔ گسترده از سازه‌های فضاکار در ایران به نحو شایسته‌ای تحقق نیافته و با در نظر گرفتن آ ن‌که متخصصان ممتازی در زمینه سازه‌های فضاکار در کشورمان و همچنین در ارتباط نزدیک در خارج از کشور حضوردارند، تدوین آیین‌نامه سازه‌های فضاکار، از یک طرف موجب آن می‌گردد که سازه‌های فضاکاری که در آتیه بنا به نیاز روز افزون در کشورمان تولید و احداث خواهند گردید، مبتنی بر روش‌های صحیح و به نحوی قانونمند طراحی و اجرا گردند و لذا سرمایه‌های ملی به نحو شایسته و با طول عمر مفید طولانی مورد بهره‌برداری قرار داده شوند و از طرف دیگر، کشورمان به عنوان پرچمدار تدوین و ارایهٔ این آیین‌نامه در سطح بین‌المللی سهم عمده ای در ارتقای دانش بشری و کیفیت خدمات مهندسی ایفا نماید.

به این ترتیب متعاقب برگزاری نخستین کنفرانس ملی سازه‌های فضاکار در دانشکده فنی دانشگاه تهران و در پی آن برگزاری دورهٔ آموزشی سازه‌های فضاکار در سازمان یادشده، تدوین آیین‌نامهٔ سازه‌های فضاکار که از آرزوهای دیرینهٔ استاد گرانقدر ***پروفسور هشیار نوشین*** بوده است، با بذل توجه و پشتیبانی مسؤولین محترم وقت سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور به صورت تصمیمی جدی مطرح گردید.

متعاقب اعلام آمادگی دانشگاه تهران، در ارتباط با تقبل مسؤولیت تدوین آیین‌نامهٔ مزبور و معرفی مجری مسؤول طرح و دبیر کمیته تدوین از طرف دانشگاه تهران، مسؤولیت تدوین آیین‌نامهٔ سازه‌های فضاکار به دانشگاه تهران ارجاع گردید.

طی جلساتی که متعاقب این امر با مسؤولین و کارشناسان محترم سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور در ارتباط با نحوهٔ انجام کار تشکیل گردید، مقرر شد که طرح تدوین آیین نامهٔ سازه‌های فضاکار در دو مرحله به شرح زیر انجام پذیرد:

۱. مرحلهٔ مقدماتی
۲. مرحلهٔ تدوین آیین‌نامهٔ سازه‌های فضاکار

موضوع کار در مرحله مقدماتی شامل بررسی و تعیین ساختار آیین‌نامه، روش انجام کار، اولـویت‌بندی مراحل تدوین، تعیین گروه‌های کاری و مسؤولیت‌های مربوط، تدوین برنامه زمان‌بندی، برآورد هزینه و ارایهٔ گزارش توجیهی تدوین آیین‌نامهٔ سازه‌های فضاکار می‌گردید و مقرر گردیده بود که شرح موضوع مرحلهٔ تدوین آیین‌نامه پس از انجام خدمات و تصویب مرحلهٔ اول طرح مشتمل بر موارد زیر تبیین و تدقیق گردد.

- *تعیین حوزه تأثیر آیین‌نامه، چارچوب و دامنهٔ کار*
- *تعیین ساختار (آرایه) آیین‌نامه*
- *تعیین روش انجام کار*
- *بررسی سرفصل‌های پیشنهادی (ضمیمه) و تعیین سرفصل‌های کلی و جزیی*
- *تفکیک موضوعی سرفصل‌ها به بخش‌های تخصصی*
- *اولویت‌بندی مراحل تهیّه و تدوین آیین‌نامه و اولویت‌بندی در پردازش موضوعات و سرفصل‌ها*
- *تعیین گروه کاری در ارتباط با هر بخش (موضوع) تخصصی*
- *تعیین مسؤول هر گروه کاری برای مرحلهٔ دوم*
- *تدوین شرح وظایف مسؤولین گروه‌های کاری و حدود مسؤولیت‌های تقبل شده*
- *تعیین اعضای نهایی کمیته اصلی تدوین آیین‌نامه*
- *تدوین برنامه کار و تهیهٔ برنامه زمان‌بندی تدوین آیین‌نامه*
- *برآورد هزینه انجام طرح تدوین آیین‌نامه*
- *ارایهٔ گزارش توجیهی*

آیین‌نامهٔ سازه‌های فضاکار

مقدمه

آیین‌نامه‌های طراحی و اجرای سازه‌ها و ابنیهٔ فنی سهم عمده‌ای در فرایند احداث بنا- که هدف غایی طرح است ـ داشته، ملزوماتی را تبیین می‌نمایند که لازم است مهندسان در مجموعهٔ فعالیت‌های زنجیره‌وار و مرتبط- از مطالعات توجیهی و امکان‌سنجی تا تحویل قطعی بنا و متعاقباً در مرحله بهره‌برداری و نگهداری ـ آنهارا مدنظر داشته باشند، تا دستیابی به حداقل تراز ایمنی قابل‌پذیرش، میسر گردد.

آیین‌نامه‌های مبتنی بر دیدگاه‌های احتمال‌اندیشانه (قابلیت اطمینان) در دهه‌های اخیر گسترش چشمگیری یافته‌اند. این آیین‌نامه‌ها معمولاً راهنمایی‌های لازم را در زمینهٔ کنش‌ها (بارها و عوامل) ی مؤثر بر ابنیه و همچنین ظرفیت باربری اعضا و اجزای سازه به منظور طراحی ارایه می‌دهند. حاشیه ایمنی مورد نظر با درنظرگرفتن ضرایب بار (منتج به اعمال بارهای محافظه‌کارانه) و همچنین ضرایب مقاومت (ظرفیت باربری طراحی) تأمین می‌گردد.

فروریزی و گسیختگی سازه‌ها، نگرانی ناکامی دست‌اندرکاران در انجام وظایف خطیرشان بوده و همواره در جوامع با تأثیر نامطلوبی بر حیثیت مهندسان همراه بوده است. این گونه ناکامی‌ها و فجایع از یک دیدگاه مرتبط با معرفت زمان و در اثر عدم شناخت کافی رفتار سازه‌ها، مصالح و عوامل مؤثر بوده، گاه در اثر بی‌توجهی و عدم امعان‌نظر به سنگینی بار مسؤولیت مهندسان حادث گردیده و گاه به قصد صرفه‌جویی یا سودجویی‌های منجر به نقض اصول ایمنی به‌وقوع پیوسته‌اند.

احتمال گسیختگی و فروریزی در مورد پروژه‌هایی که طی آنها مصالح جدید و فناوری نوین به‌کار گرفته می‌شوند، فزونی می‌گیرد؛ اگرچه ابداعات نوین در این زمینه‌ها لازمهٔ توسعه و پیشرفت جوامع بشری در زمان‌های مختلف بوده است ـ و ما شاهد ابداعات غرورآمیز و نقاط عطف افتخارآمیزی در تاریخ تکوین مهندسی سازه بوده‌ایم ـ گاه، ناکامی‌های عبرت‌آموزی را نیز تجربه کرده‌ایم.

همچنین انتظار می‌رود چنین ناکامی‌هایی در مورد سازه‌هایی که معمولاً دارای دهانه‌های آزاد قابل ملاحظه‌اند، مانند سازه‌های آشیانه‌ها، ورزشگاه‌ها، سالن‌های اجتماعات، مساجد و مصلی‌ها، نمایشگاه‌ها و فضاهای عمومی سرپوشیده و پل‌های طویل، یا سازه‌های بلند احتمال وقوع افزون‌تری در مقایسه با سازه‌های متعارف داشته باشند. بنابراین لازم‌است از یک‌سو سیستم‌های سازه‌ای متضمن قابلیت اطمینان قابل ملاحظه در مقابل انواع گسیختگی و از جمله گسیختگی پیشرونده را شناسایی و مورد بهره‌گیری قرار داد و از سوی دیگر، در آیین‌نامه‌های مربوط، حاشیهٔ ایمنی منطقی اختیار نمود و متناسباً گزینش سیستم سازه و شیوهٔ ساخت و همچنین فلسفه و معیارهای طراحی را جزء تفکیک‌ناپذیری از فرایند طراحی و ساخت تلقی کرد.

لذا مهندسان در تلاش‌شان برای ساختن دنیای بهتری برای هم‌نوعان خود و پاسخگویی به نیازهای جوامع متحول، دستاوردهای دانش بشری، معرفت زمان و قابلیت‌های فناوری روز را در چارچوب‌های قابل تعمیم به صورت دستورالعمل‌ها، راهنماها و آیین‌نامه‌های طراحی و اجرای سازه‌ها شکل داده‌اند. از اهداف مهم چنین آیین‌نامه‌هایی تعریف مقادیر و نحوهٔ اعمال بارها و نحوهٔ ملحوظداشتن آثار کنش‌های محتمل به منظور طراحی و ارایهٔ روش‌شناسی برای مدل‌سازی سازه و تخمین پاسخ قریب به واقعیت سازه تحت تأثیر این عوامل و شناخت پدیده‌ها و گونه‌های مختلف محتمل گسیختگی و کمی نمودن گسیختگی و حاشیهٔ اطمینان

نسبت به گسیختگی خواهد بود. متعاقباً فرایندهای تحلیل و طراحی مجدد تا نیل به طرح قابل دفاع از نظر تلفیق ملزومات ایمنی و دیدگاه‌های اقتصادی، دنبال خواهد گردید.

با این مقدمه طی سطوری چند، کلیات برنامهٔ تدوین آیین‌نامهٔ سازه‌های فضاکار و دلایل ضرورت تدوین این آیین‌نامه به شرح زیر مورد بحث قرار داده شده است.

کلیات

اصول تدوین آیین‌نامه‌های متنوع طراحی، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری انواع سازه‌ها و ابنیه و همچنین محتوا، ساختار، آرایه و شیوهٔ تدوین و تصویب مجموعهٔ آن‌ها لازم‌است در چارچوب اسلوب واحد و سامانهٔ هماهنگی تجمیع یابد تا امکان بهره‌برداری سازگار و رجوع به یکدیگر و ارتباطات لازم بدون ابهام فراهم گردد. طبعاً تبیین حوزهٔ فراگیری آیین‌نامه و دامنهٔ کار از نخستین مواردی است که باید مورد توجه قرار داده شود. تعاریف اصلی و مفاهیم اولیه باید به طور روشن و واضح ارایه گردند. هدف از تدوین آیین‌نامه‌هایی از این دست آن‌است‌که بر اساس معیارهای فنی پذیرفته‌شده، زمینه‌های ارتقای کیفی فراهم گردد و تولید سازه‌ها با رعایت جنبه‌های ایمنی و اقتصادی، گسترش یابد. چنین آیین‌نامه‌ای روند فعالیت‌های لازم را بر منطق قابل دفاعی مبتنی می‌سازد و با رعایت ضوابط مندرج در آیین‌نامه‌ها طراحان و سازندگان سازه‌ها با اطمینان خاطر به فعالیت‌های خود می‌پردازند. از یک سو، از اهداف تدوین چنین آیین‌نامه‌هایی، تسهیل ارتباط و تبادل نظر میان دست‌اندرکاران صنایع ساختمانی است و از سوی دیگر، نیل به ایمنی و کیفیت لازم و مکفی در عین توجه به جنبه‌های اقتصادی و صرفه جویی در هزینه‌های احداث، بهره‌برداری و نگهداری است. از جنبه‌های مهمی که لازم‌است در تدوین آیین‌نامه‌ها مورد توجه قرار داده شود، ارتقای کیفیت زیست، ایمنی و بهداشت و حفاظت از محیط زیست را می‌توان برشمرد. همچنین تدوین آیین‌نامه‌ها برای انواع تخصصی سازه‌هایی که در چارچوب آیین‌نامه‌های جاری نمی‌گنجند، باعث ترغیب دست اندرکاران به بهره‌گیری ـ با قابلیت اعتماد مکفی ـ از این نوع از سازه‌ها گردیده و در نتیجه منجر به گسترش کاربرد آنها و طبعاً افزایش گزینه‌های طرح‌ها و یافتن روش‌های بهینه به‌منظور برآوردن نیازهای جوامع خواهد گردید.

همچنین در عین پاسخگویی به نیازهای روش‌های ساخت درجا، تشویق تولید سازه‌های مدولار، تولید انبوه صنعتی، کاهش تنوع اجزا، ارتقای کیفیت و ایمنی از جملهٔ اهداف تدوین چنین آیین‌نامه‌هایی خواهد بود.

عملکرد اصلی آیین‌نامه یا آیین‌کاربرد یک نوع از سازه، ارایهٔ توصیه‌های کاربردی پذیرفته شده توسط دست‌اندرکاران پرقابلیت در حرفهٔ مربوطه در زمینهٔ طراحی، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری آن گروه از سازه‌ها می‌باشد. طبعاً تدوین آیین‌نامه یکی از مراحل فرایند بوده و کاربرد صحیح آن مرحله مهم دیگری از کار خواهد بود. بازخور نتایج کاربرد آیین‌نامه منجر به بازنگری و تجدیدنظر، اصلاح یا جایگزینی آیین‌نامه خواهد گردید. لذا به منظور تدوین آیین‌نامه‌ها واستانداردها لازم‌است موارد زیر در نظر گرفته شود:

- شناسایی ضرورت تدوین آیین‌نامه
- برنامه‌ریزی و مدیریت فرایند
- تدوین آیین‌نامه
- تشویق و نظارت برکاربرد
- بررسی باز خور نتایج حاصل از کاربرد و درصورت لزوم تجدید نظر واصلاح آیین‌نامه

سازه‌های فضاکار

مقدمه و کلیات

- ما در فضای سه‌بعدی زندگی می‌کنیم.
- هر سازه‌ای فضای سه‌بعدی را اشغال می‌کند.
- هر سازه‌ای در واقع به صورت سه‌بعدی رفتار می‌نماید.
- طبیعت هم دارای سازه‌هایی است که دارای رفتار سه‌بعدی هستند.
- رفتار برخی از سازه‌ها به گونه‌ای است که اثر یک بعد تحت‌الشعاع آثار رفتاری در دوبعد دیگر است. این گونه سازه‌ها رفتار مسلط دوبعدی داشته و به سازه‌های سنتی موسوم‌اند.
- گاه با وجود آنکه سازه به صورت سه‌بعدی رفتار می‌کند، روش طرح به نحوی است که برای سهولت محاسبات، سازه را به زیر مجموعه‌های صفحه‌ای (دوبعدی) تقسیم می‌نمایند. این امر گاه خطای قابل ملاحظه‌ای در تخمین رفتار سازه به دنبال خواهد داشت.
- قاب متشکل از تیر و ستون با اتصالات صلب در هر دو جهت، یک سازه یا قاب فضاکار به معنای اعم است.
- هر سازه پوسته‌ای، هر سازه حجیم، هر صفحه تحت اثر خمش، نمونه‌ای از سازه با عملکرد مسلط سه‌بعدی است.

مثال:

- یک گنبد فضاکار اسکلتی مهاربندی‌شده،
- گنبد فضاکار را به هیچ روی نمی‌توان به صورت یک سیستم صفحه‌ای تصور، تحلیل و طراحی نمود.

تقسیم‌بندی کلی سازه‌های فضاکار

سیستم فضاکار مشبک: *با استخوان‌بندی و پیکربندی اسکلتی*ـ اغلب شامل تعداد قابل توجّهی اعضای نسبتاً طویل (اغلب) مستقیم‌الخط (وگاه) دارای انحنا (مانند اعضای موسوم به عناصر قاب یا خرپا) که در پیونده‌ها به یکدیگر اتصال یافته‌اند. در حالتی‌که اجزای پوشانهٔ این گونه سازه‌ها به صورت تفکیک‌ناپذیر در رفتار سازه‌ای دخیل باشند، سیستم‌های مختلط و دوگانه ایجاد می‌گردند. *سیستم‌های مشبک تاشونده* زیر مجموعه‌ای از این گروه به شمار می‌روند.

سیستم‌های غشای نازک تحت تنش: که در آنها پوشش (پوشانه) جدار نازک سازه جزء عمده و جدایی‌ناپذیر سیستم بار بر سازه به شمار می‌رود. سیستم‌های متشکل از ورق‌های چین دار نیز در همین گروه طبقه‌بندی می‌شوند.

سیستم‌های پوشانه‌ای متکّی بر کابل‌ها: شبکه‌های متقاطع کابل‌ها، سیستم‌های ترکه‌ای، معلق یا آویخته.

سازه‌های کش بستی

سازه‌های بادی و سازه‌های هوانشین

مزایا و خصوصیّات دیگر

- ایجاد امکان ساخت دهانه‌های بزرگ‌تر بدون پایه‌های میانی و ایجاد آزادی عمل برای معمار،
- جدایی‌ناپذیربودن فرم سازه از معماری،
- ایجادفصل مشترکی برای بهره‌گیری معماران پیشرو از قابلیت‌های مهندسان سازه مسلح به دانش نوین،
- امکان احداث سازه‌ها با کاربرد چندمنظوره.

سازه‌های فضاکار مشبّک (اسکلتی)

عبارت فوق تنها به گروهی از سازه‌های دارای عملکرد مسلط سه‌بعدی اطلاق می‌گردد که ویژگی‌های زیر در آنها مصداق دارد:

- اثر رفتاری هیچ‌یک از سه بعد در جذب نیروهای وارده قابل صرف‌نظر کردن نیست.
- متشکل از اعضای منفصل خطی(اعضای خرپا، تیر، تیرـ ستون) می‌باشد. به عبارت دیگر سیستم سازه پیوسته نبوده و از نوع اسکلتی می‌باشد.
- به عنوان قاعده (صـرف‌نظر از استثناها)، اغلب شامل تعداد قابل توجهی از اجزا و زیرمجموعه‌های ساده و تکرارشونده می‌باشد.
- اجزا و زیرمجموعه‌های ساده اغلب در خور پیش‌سازی و تولید انبوه می‌باشند و در ابعاد و اشکال استاندارد اختیار می‌گردند.
- با استفاده ازقابلیت باربری در ۳ بعد، امکان کاهش وزن فراهم می‌آید. از اینرو سازه‌های فضاکار مشبک اسکلتی معمولاً سبک ولی بالنسبه صلب می‌باشند.
- متداول‌ترین کاربرد این نوع سازه‌ها در ساخت پوشش یا سقف ابنیه‌ای است که در آنها عملکرد ساختمان ایجاب می‌نماید که دهانه‌های آزاد نسبتاً بزرگ در دو جهت در پلان ایجاد گردد.
- معمولاً از دیدگاه زیباشناختی دارای اهمیت هستند.
- معمولاً از ذخیره ظرفیت مقاومتی قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با سازه‌های سنتی برخوردارند.
- معمولاً بسیار اقتصادی بوده و نیازهای اقتصادی به علت امکان صنعتی‌شدن ساخت، افزایش سرعت تولید و نصب، کاهش وزن و صرفه‌جویی در مصالح را برآورده می‌سازند.

به‌طوری‌که ملاحظه می‌شود، برخی از این ویژگی‌ها در مورد سایر سیستم‌های سازه‌های فضاکار نیز صدق می‌نمایند.

اهمیت سازه‌های فضا کار در محیط مصنوع یا طبیعی

- سازه‌های فضاکار قابلیت‌ها و امکانات عمده‌ای را در اختیار مهندسان و معمارها برای تلفیق اصول زیباشناختی و نوآوری‌ها با جنبه‌های رفتاری، عملکردی، کاربری و سرویس‌دهی سازه قرار می‌دهند.
- تمامی سازه‌ها باید از دیدگاه زیباشناسی و هماهنگی با محیط مصنوعی یا طبیعی مورد مطالعه قرار داده شوند.
- با توجه به آنکه اغلب سازه‌های فضاکار وسیع و بزرگ هستند، اثر قابل توجهی بر محیط باقی می‌گذارند.

- بیش از دیگر سازه‌ها، فضا را معرفی می‌نمایند.
- فرم پروژه توسط سازه تعریف می‌شود.

پیوندهها

پیوندهها معرف منطق سازهٔ فضاکاراند.

- پیوندهها باید سخت و مقاوم باشند.
- باید ساده باشند (از نظر فرم وامکان برقراری اتصال).
- به سهولت ساخته شوند و قابلیت تولید صنعتی داشته باشند.
- برون محوری در پیوندهها بایدبه حداقل ممکن برسد.
- رواداری اجرایی لازم در طراحی پیوندهها باید پیش‌بینی شده باشد.
- اصلاح، تعمیر و نگهداری آنها به سهولت امکان‌پذیر باشد.
- قابلیت پذیرش تعداد قابل توجهی عضو را بر حسب نیاز دارا باشند.
- ترجیحاً هر عضو مستقلاً به پیوند متصل گردد.
- زاویه فضایی بین اعضا قابل توجه باشد.

تعریف کلی

در اینجا کوشش به عمل آمده است که تعریف فراگیری از سازه‌های فضاکار ارایه گردد که در عین حال در خور شأن این گروه از سازه‌ها نیز باشد. در این تعریف اصل فدای فرع نشده و جزییات کلیّات را تحت الشّعاع قرار نمی‌دهند:

سازه‌های فضاکار عمدتاً دارای فرم بدیع مستوی یا منحنی در فضا بوده و با واحدهای حتی المقدور یکسان در الگویی تکرار شونده احداث می‌شوند.

اهداف، حوزهٔ فراگیری و دامنهٔ کار

سازه‌های فضاکار مشمول این آیین‌نامه

مقدمه

به‌طوری‌که اشاره شد، درسازه‌های فضاکار، ترکیب مجموعهٔ تاشه و فرم هندسی، بارهای خارجی، نیروهای داخلی و تغییرمکان‌های سازه در یک صفحه قرار نگرفته و از آن فراتر رفته و به سه بعد گسترش می‌یابند. در عمل، ***"سازه‌های فضاکار"*** به گروه‌هایی از سازه‌ها، عمدتاً شامل شبکه‌های تخت، چلیک‌ها، گنبدها، دکل‌ها، شبکه‌های متشکل از کابل‌ها، سازه‌های غشایی، سازه‌های تاشو، سازه‌های کش‌بستی و نظایر آنها اطلاق می‌گردد. سیستم‌های نوین متشکل از عناصر کششی و فشاری خود متعادل‌کنندهٔ کش‌بستی امروزه از جذبهٔ زیادی برخوردارند. سازه‌های فضاکار شکل‌های گوناگون و متنوع به خود گرفته و از انواع

متفاوت مصالح مانند فولاد، آلومینیوم، چوب، بتن‌آرمه، مصالح مختلط و مواد پلاستیکی مسلح با انواع فیبرها، شیشه و ترکیبات این مصالح در ساخت سازه‌های فضاکار بهره‌گیری می‌شود.

سازه‌های فضاکار را می‌توان به شرح زیر نیز طبقه‌بندی نمود (پروفسور نوشین، ۱۹۹۸). این طبقه‌بندی به بحث‌های بعدی، از جمله شناسایی سازه‌های فضاکار مشمول بخشی از آیین‌نامه حاضر که در مرحلهٔ اولویت کاری قرار داده شده است، مدد می‌رساند:

- ***سازه‌های فضاکار مشبک***، که شامل اجزا و اعضای منفصل و معمولاً طویل می‌باشند.
- ***سازه‌های فضاکار پیوسته***، که متشکل از اجزایی از قبیل دال، پوسته، غشای نازک و نظایرآن‌اند.
- ***سازه‌های فضاکار دو گونه***، که مشتمل بر ترکیبی از اجزای منفصل و پیوسته می‌باشند.

به منظور روشن‌ترشدن امرکه در حوزهٔ فراگیری پیش‌بینی‌شدهٔ آیین‌نامه ذیمدخل خواهد بود، به اختصار به تشریح سازه‌های فضاکار با طبقه‌بندی فوق مبادرت می‌شود (پروفسور نوشین، ۱۹۹۸):

شبکه‌های تک‌لایهٔ تخت

شبکه عبارت است از سیستم سازه‌ای مشتمل بر یک یا تعدادی افزون‌تر لایهٔ متشکل از مجموعه‌ای از اعضا. یک شبکهٔ تک‌لایه یا شبکهٔ تخت، متشکل است از اعضای تیر با اتصالات صلب (با قابلیت انتقال لنگر قابل ملاحظه) که در آن تمامی اعضا به نحوی مطلوب طراحی، اجرا و در درون صفحهٔ واحدی هم‌بندی شده‌اند. معمولاً بارهای بیرونی وارد بر چنین شبکهٔ تختی، از نوع نیروهای متعامد بر صفحهٔ شبکه و لنگرهای اعمال‌شونده حول محورهای مارّ بر صفحه می‌باشند. تحت تأثیر چنین نیروهایی، تغییرمکان‌های حاصله در امتداد خارج از صفحه، مؤلفهٔ قابل ملاحظه‌ای خواهند داشت. بنابراین اگرچه اعضای تیر در صورتی‌که به نحومطلوب طرح و اجرا شده باشد (و در صورت صرف‌نظر نمودن از بعد قایم آنها) و تقریباً در درون یک صفحه واقع می‌گردند، ولی بارهای مؤثر و تغییرمکان‌های حاصله در امتداد عمود بر صفحه، مؤلفه‌های قابل توجه داشته و در نتیجه رفتار مجموعه تنها با ملحوظ‌داشتن سه بعد قابل بررسی است. تاشه‌های متداول شبکه‌های تخت شامل الگوهای *"دوراهی"*، *"سه‌راهی"* و *"چهارمسیره"* است. الگوهای دو راهی به عنوان ساده ترین تاشه‌ها متشکل از دو مجموعه از تیرهای متقاطع می باشند که در دو راستای معمولاً متعامد به موازات خطوط مرزی (شبکه راست‌گوشه) یا با زاویهٔ تورب نسبت به مرزها (شبکهٔ قطری) امتداد می‌یابند.

در طراحی تاشه مناسب یک شبکهٔ تخت (تک‌لایه) برای کاربرد ویژه، پس از بررسی گزینه‌های متفاوت و شناسایی ویژگی‌های هر یک، با در نظرگرفتن شکل، نوع مقاطع تیر، نوع مصالح، موقعیت، وضعیت و شرایط تکیه‌گاه‌ها و خطوط مرزی و شیوهٔ ساخت، امکان اتّخاذ تصمیم منطقی در طراحی فراهم خواهدشد.

شبکه‌های دولایه

شبکهٔ دولایه، از دولایه اعضای موازی تشکیل می‌گردد که به‌وسیلهٔ اعضای موسوم به *"جان"* به یکدیگر متّصل می‌شوند. هنگامی که از چنین شبکه‌ای به عنوان پوشانهٔ سقف با شیب اندک استفاده گردد، یکی از لایه‌های شبکه، *لایهٔ رویین* و دیگری *"لایه زیرین"* نامیده می‌شود. در حالاتی که از چنین شبکه‌هایی به عنوان دیواره‌های سازه بهره‌گیری شود، یکی از لایه‌های شبکه را *"لایهٔ بیرونی"* و دیگری را *"لایهٔ درونی"*، در مقایسه با موقعیت مرجع، می‌نامند.

شبکه‌های چندلایه

شبکه‌ها با ساختار چندلایه افزایش فاصلهٔ بین لایه‌های رویین و زیرین را ممکن و به این ترتیب امکان پوشاندن دهانه‌های وسیع‌تر با مصالح بالنسبه سبک را فراهم می‌آورند. در این حالت، وظیفهٔ عمدهٔ لایه‌های میانی کاهش طول مؤثر اعضای "جان" می‌باشد.

تفاوت اساسی رفتار شبکه‌های تک لایه و چندلایه

تفاوت اساسی بین رفتار شبکه‌های تک‌لایهٔ تخت و شبکه‌های دو یا چندلایه، عبارت است از آنکه شبکه‌های تک‌لایهٔ تخت تحت تأثیر رفتار خمشی مسلط بوده و اعضای آنها عمدتاً لنگر خمشی حول محورهای واقع در درون صفحه، نیروی برشی (در امتداد عمود بر صفحهٔ شبکه) و گشتاور پیچشی (حول محور درون صفحه) را تجربه می‌نمایند، حال آنکه نیروهای داخلی اعضا در شبکه‌های دو و چندلایه عمدتاً از نوع نیروهای محوری هستند.

شبکه‌های دو گونه

از گروه‌هایی از شبکه‌های دو گونه به طور متداول بهره‌گیری گسترده به عمل آمده است:

– شبکه‌های تخت بتن‌آرمه یکپارچه با دال فوقانی یا شبکه متقاطع فولادی مختلط با بتن درجای فوقانی.

– نمونه‌های متنوعی از شبکه‌های دو یا چندلایهٔ فولادی ساخته‌شده که لایهٔ رویین آنها در دال بتنی محصور یا اصولاً دال بتنی نقش لایهٔ رویین را ایفا می‌نماید.

– همچنین حالات گوناگونی از شبکه‌های دو یا چندلایه با رفتار توأم با اجزا و عناصر غشایی ـ پوسته‌ای متصور است.

سازه‌های فضاکار دو گونه‌ای که از شبکه‌های متشکل از اعضای منفصل با عملکرد توأم با دال‌ها و پوسته‌های بتنی مسلح تشکیل گردیده‌اند، به طور متداول به "*سازه‌های فضاکار مختلط*" موسومند. گردیده‌اند. همچنین سازه‌های فضاکار مشبکی را که با اجزای غشایی به صورت در هم آمیخته عمل می‌نمایند، "*سازه‌های فضاکار دوگانه*" می‌نامند.

لازمهٔ آنکه سازهٔ فضاکار از نوع دوگونه باشد، عملکرد لاینفک اجزای منفصل با اجزای پیوسته از دیدگاه سازه‌ای می‌باشد.

سازه‌های فضاکار چلیکی

یک "چلیک" از تبدیل یک شبکهٔ تک‌لایه، دولایه یا چندلایه به فرم قوسی در یک جهت ایجاد می‌گردد و حاصل آن تشکیل تاشهٔ چلیکی یک، دو یا چندلایه خواهد بود. سازه‌های فضاکار چلیکی گونه‌های هم‌بندی متنوعی دارند که از هریک بسته به ویژگی‌های رفتاری در مقام مناسب، می توان بهره‌گیری نمود. مقطع عمومی یک سازهٔ چلیکی ممکن است بخشی از دایره، بیضی یا سهمی باشد.

گنبدها

گنبد مشبک، یک سیستم سازهٔ فضاکار است که شامل یک یا چند لایه (از اجزا) می‌باشد که در تمامی جهات به فرم قوسی در آمده‌اند. برخی از گنبدها دارای رویه‌ای ظاهری هستند که بخشی از یک سطح منفرد و واحد همانند کره را تشکیل می‌دهد و برخی دیگر متشکل از مجموعه‌ای از سطوح گنبدی شکل متفاوت می‌باشند.

در صورتی‌که الگوی یک شبکه تخت را بر سطحی منحنی تصویر نموده و تطابق دهیم، *گنبد شبکه گونهٔ تک‌لایه* ایجاد می‌گردد. در این نوع گنبدها باید دقت کافی برای حصول اطمینان از مقاومت مکفی خمشی- برشی علاوه بر مقاومت در مقابل نیروهای محوری و ممانعت از بروز پدیدهٔ فروجهش به‌عمل آید. با توجه به نسبت خیز به دهانه، اتصالات گنبدهای تک‌لایهٔ مشبک را باید چنان طراحی نمود که صلبیت به میزان مورد نظر تأمین گردد.

سازه‌های فضاکار مشبک دوگونهٔ چلیکی و گنبدی

سازهٔ فضاکار گنبدی و چلیکی مختلط متشکّل است از یک شبکهٔ فلزی همراه با یک پوسته بتن آرمهٔ در گیر شده که به منظور عملکرد توام و تفکیک‌ناپذیر باشبکهٔ فلزی طراحی شده است.

سازهٔ فضاکار گنبدی و چلیکی دوگانه، شامل یک شبکهٔ فلزی باربر و اجزای غشایی فعّال با عملکرد توأم سازه‌ای می‌باشد.

سایر تاشه‌ها

انواع سازه‌های فضاکار مورد اشاره سهم قابل ملاحظه‌ای از حالات کاربردی را در بر می‌گیرند و پاسخگوی بسیاری از نیازها می‌باشند. از جملهٔ سایر کاربردهای سازه‌های فضاکار می‌توان از برج‌های مشبک، سازه‌های هرمی شکل، تاشه‌های سهموی، سازه‌های غشای نازک و شبکه‌های کابلی با فرم‌های بدیع و گوناگون نام برد.

کاربردهای نوین سازه‌های فضاکار شبکه‌ای

در کاربرد سازه‌های فضاکار شبکه‌ای به‌نظر نمی‌رسد محدودیتی وجود داشته باشد و از این سازه‌ها تاکنون در کاربری‌های گوناگونی بهره‌گیری شده است. طبعاً استفادهٔ بجا از سازه‌های فضاکار شبکه‌ای به معنی آن‌است‌که در کاربری موردنظر، از جمیع جهات و پس از مقایسه گزینه‌های سازه فضاکار شبکه‌ای با گزینه‌های انواع دیگر سیستم‌های سازه‌ای و بررسی مزایا و معایب گزینه‌ها از دیدگاه فنی و اقتصادی و سایر جنبه‌های ذیربط، گزینه‌های سازهٔ فضاکار شبکه‌ای به‌عنوان گزینه یا گزینه‌های برتر انتخاب شده باشد.

با توجه به سبکی وزن، صلبیت قابل ملاحظه و عملکرد سه بعدی سیستم‌های سازه‌ای فضاکار، امکان احداث سازه‌های پوشش فضاهای سرپوشیده‌ای که در آن عملکرد معماری دهانه‌های آزاد نسبتاً طویلی را در دو امتداد متعامد ایجاب می‌نماید، به نحوه مطلوبی فراهم گردیده است. در عین‌حال، در صورتی‌که فرم به نحو شایسته درخدمت محتوای سازه‌ای قرار گیرد، کاربرد این سازه‌ها در بسیاری دیگر از پروژه‌های متنوعی که تاکنون کمتر در احداث آنها از سازه‌های فضاکار شبکه‌ای بهره‌گیری شده است، واجد مزایای غیرقابل انکاری خواهد بود.

از جمله، بهره‌گیری از سازه‌های فضاکار شبکه‌ای پیش‌ساخته در احداث و تولید انبوه سازه‌های مسکونی، اداری و تجاری سریع‌النصب و با دهانه‌های آزاد نسبتاً قابل ملاحظه، بازسازی بافت‌های دارای ارزش تاریخی ـ فرهنگی، سکوهای دریایی، سازه‌های صنعتی و برج‌های انتقال نیرو و سازه‌های متنوع دیگر، به دلایل عدیده، زمینه‌های کاربرد نوین سازه‌های فضاکار شبکه‌ای را به‌میزان گسترده‌تر میسر خواهد ساخت. درحال حاضر دبیر کمیته تدوین درتمامی موارد کاربرد سازه‌های فضاکار مذکور در فوق پژوهش‌های نظری و آزمایشگاهی انجام داده یا در دست انجام دارد که امید است در آتیه نزدیک کاربرد عملی گسترده سازه‌های فضاکار در این زمینه‌ها نیز فراهم گردد.

همچنین سازه فضاکار به‌دلیل صرفه‌جویی در میزان فولاد و مصالح مصرفی، گامی در جهت کاهش تخریب در منابع موجود در کره خاکی و محیط زیست به‌شمار می‌رود.

هدف از تدوین آیین‌نامه

با توجه به مواردی که در ارتباط با توجیه ضرورت و دلایل تدوین آیین‌نامه ذکر گردید و با در نظرگرفتن جمیع جهات، پس از ارایهٔ نظریات تمامی اعضای محترم کمیتهٔ تدوین، جمع‌بندی ذیل به عنوان هدف از تدوین آیین‌نامه به تایید کمیتهٔ تدوین رسید:

ً هدف از تدوین آیین‌نامه، تعیین ضوابط مکفی برای طراحی، اجرا و نگهداری سازه‌های فضاکار مشمول این آیین‌نامه می‌باشد، به نحوی که حداقل شرایط لازم برای بهره‌برداری ایمن را با رعایت جنبه‌ها و ملاحظات اقتصادی در برگیرد.ً

حوزهٔ فراگیری

با توجه به توضیحات و تعاریف مورد اشاره، پس از بحث و تبادل‌نظر، حوزهٔ فراگیری آیین‌نامه در مرحلهٔ دوم (مرحلهٔ تدوین آیین‌نامه) با توجه به اولویت‌ها به شرح زیر مورد تصویب کمیتهٔ تدوین قرارگرفت:

ً حوزهٔ فراگیری آیین‌نامه شامل سازه‌های فضاکار مشبّک فولادی تخت یا دارای انحنا، اعم از تک‌لایه یا چندلایه از خانوادهٔ شبکه‌ها، چلیک‌ها و گنبدها می‌باشد.ً

دلایل عمدهٔ اولویت‌بندی این حوزهٔ فراگیری عبارت‌اند است از:

- سازه‌های فضاکار مشمول حوزهٔ فراگیری متداول‌ترین انواع سازه‌های فضاکار و دارای بیشترین کاربرد در خارج و داخل کشور بوده‌اند.
- این سازه‌ها پاسخگوی اغلب نیازهای کاربردی می‌باشند و سهم عمده‌ای از سازه‌های فضاکار را به خود اختصاص داده‌اند.
- این سازه‌ها علاوه بر امکان ساخت درجا، در خور تولید انبوه صنعتی بوده و به این ترتیب، با طراحی و ساخت مدولار و مزایای غیرقابل انکار آن هماهنگی دارند و امکان تلفیق ملزومات فنی، مهندسی و ایمنی و دیدگاه‌های زیبا شناختی و جنبه‌های اقتصادی را فراهم می سازند.
- گرچه سازه‌های فضاکار آلومینیومی، چوبی و غیره در سطح جهانی به تعداد قابل توجهی ساخته شده‌اند، لیکن سهم فولاد سازه‌ای تاکنون به عنوان مصالح سازه‌های فضاکار مشبک بلامنازع بوده و انتظار می‌رود که در آینده دراز مدتی نیز این چنین

باشد. در ایران نیز استفادهٔ انبوه از چوب میسر نبوده و تولید مقاطع آلومینیومی برای کاربرد سازه‌ای نیز در داخل کشور تحقق نیافته و در سطح تولید انبوه امکان تهیه و ساخت مقاطع لوله‌ای آلومینیومی در کشور مهیا نگردیده است. آنچه تا کنون به عنوان سازه‌های فضاکار مدرن پیش‌ساخته یا ساخت درجا در داخل کشور احداث گردیده است، از نوع مصالح فولادی بوده و انتظار نمی‌رود که جایگزین دیگری برای فولاد در آتیهٔ نزدیک در داخل کشور متصور باشد.

بنابراین در تعیین حوزهٔ فراگیری، در پردازش موضوعی و تدوین آیین‌نامه به سازه‌های فضاکار مشبک فولادی اولویت داده شده است؛ زیرا تدوین ضوابط طـراحی، سـاخت، نگهداری و بهره‌برداری آنها با توجه به میزان قابل ملاحظهٔ سازه‌های فضاکار مشبک احداث‌شده و در دست احداث در سطح بین‌المللی و همچنین این واقعیت که سازه‌های فضاکار احداث‌شده و در دست احداث در داخل کشور عمدتاً محدود به این نوع از سازه‌ها بوده‌اند و گسترش استفاده از آنها طی سال‌های آینده در کشور و در جهان قابل پیش‌بینی است، امری اضطراری تلقی می‌گردد.

لازم به یادآوری است که حوزهٔ فراگیری به شرح فوق در چارچوب مرحلهٔ دوم کار، سازه‌های فضاکار دوگونه (مختلط و دوگان) به صورت ذکرشده در بالا را شامل نمی‌گردد و امید است پس از تدوین آیین‌نامه با حوزهٔ فراگیری تعیین‌شده، در مراحل گسترش آتی به این موارد نیز پرداخته شود.

یادآوری این نکته نیز ضروری به نظر می‌رسد که اگرچه سازه‌های مشبک برجی شکل برای کاربردهای نظیر دکل‌های انتقال نیرو، دکل‌های مخابراتی، سازه‌های مشبک مورد استفاده برای مخابرات ماهواره‌ای، برج‌های خنک کن و نظایر آن‌ها در بسیاری از موارد در کلیات و جزییات، به ویژه در زمینهٔ طراحی اعضا، اجزا و پیوندها دارای زمینه‌های مشترکی با سازه‌های مشمول حوزهٔ فراگیری مصوب کمیتهٔ تدوین می‌باشند، ولی مقرر گردید در نسخه پیشاروی آیین‌نامه که تدوین آن در مرحلهٔ دومِ کار برنامه‌ریزی گردیده است، به موارد خاص این نوع از سازه‌ها، از جمله بارگذاری آنها مبادرت نشده و این امر نیز به مراحل بعدی گسترش آیین‌نامه موکول شود.

ساختار، پیکربندی و آرایهٔ کلی آیین‌نامه

پیکربندی اولیه آیین‌نامهٔ سازه‌های فضاکار در مرحله اول مطالعات نشان می‌دهد که آیین‌نامه شامل پنج بخش به شرح زیر خواهد بود که هر بخش مشتمل بر فصول اصلی است.

بخش اول: کلیات
بخش دوم: طراحی
بخش سوّم : اجرا
بخش چهارم: بهره‌برداری و نگهداری
بخش پنجم: مستندسازی

در تدوین آیین‌نامه، ضابطه‌های زیر مراعات خواهند گردید:

- هر بخش با یک پیش‌گفتار کوتاه شروع و در ادامه فصول آن بخش ارایه خواهند شد.

- هر فصل بسته به نیاز دارای سرفصل‌هایی مانند کلیات، مقدمه و تعاریف خواهد بود و متعاقباً سرفصل‌ها، فصل‌های فرعی و مباحث زیر مجموعهٔ فصل‌ها ارایه خواهند گردید.
- کوشش به‌عمل خواهد آمد تا هماهنگی آیین‌نامه با سایر آیین‌نامه‌های معتبر جهانی و ملی برقرار گردد و از نظر آرایه با آیین‌نامه‌های جاری ملی در تطابق کلی باشد.
- تعاریف عمومی، واژه‌نامه و نمادها به صورت مستقل از بخش‌ها ارایه خواهند گردید و هماهنگی جهت بهره‌گیری هماهنگ و سازگار از واژه‌ها و تعاریف صورت خواهد گرفت. همچنین از طریق ساز وکارهای هماهنگی، ویرایش، داوری، اصلاح و تجدیدنظر، کوشش به عمل خواهد آمد که تناقض بین تعاریف و واژه‌ها و اصطلاحات به کاربرده شده در فصول متفاوت که پیش‌نویس آنها توسط متخصصین متفاوت تهیه خواهد شد، وجود نداشته باشد.
- تدوین متن نهایی پس از تکمیل پیش‌نویس‌های هماهنگ‌شده، مجدداً به منظور یک‌دست بودن انشا صورت خواهد گرفت.
- قبل از شروع به تدوین پیش‌نویس‌ها، راهنمای استاندارد نحوهٔ تهیه و تنظیم پیش‌نویس، شامل اطلاعات کافی در زمینهٔ آرایه و صفحه‌بندی و قلم‌های مورد استفاده، به مسؤولین تهیه پیش‌نویس‌ها ارایه خواهد شد.
- طرح روی جلد متن فارسی آیین‌نامه در هماهنگی باسایر آیین‌نامه‌های ملی تهیه خواهد شد.
- تمامی بخش‌ها دارای فهرست موضوعی خواهند بود.
- کوشش به عمل خواهد آمد که نحوهٔ ارایه و آرایهٔ آیین‌نامه تاحد امکان با صورت ظاهری دلپذیر و جاذب طراحی گردد.
- همچنین متن آیین‌نامه و مجموعه‌های جنبی آن، به دو صورت چاپ شده به صورت کتاب و همچنین به صورت الکترونیکی تهیه خواهد گردید.
- به‌علاوه یک قسمت مجزا تحت عنوان "ضوابط پذیرش سیستم‌های تجاری" نیز پیش‌بینی شده است که در چارچوب فلسفه حاکم بر مجموعهٔ فرایند و براساس ضوابط مندرج در آیین‌نامه تهیه و تدوین خواهد شد.

سرفصل‌های کلی و جزیی

طی جلسات کمیتهٔ تدوین، بحث و تبادل نظر مبسوطی در زمینهٔ چارچوب‌های اصلی (بخش‌ها) و فصل‌های اصلی و زیرفصل‌ها به عمل آمد. پس از تصویب پیکربندی اصلی، در ارتباط با هر بخش، نظریات اعضای محترم کمیتهٔ تدوین ثبت و بر اساس جمیع نظریات که خوشبختانه متفرق نبوده و به سرعت همگرا می‌شدند، فصول و سرفصل‌های مربوط به آن بخش توسط دبیرکمیتهٔ تدوین به اعضای محترم ارسال می‌شد و در جلسهٔ بعدی کمیتهٔ تدوین مورد بحث و تبادل نظر مجدد قرار می‌گرفت و اصلاحات لازم مطرح، و در صورت تأیید کمیته اعمال و متعاقباً مورد تصویب قرار می‌گرفت و اصلاحات مزبور توسط دبیرکمیته در فهرست سرفصل‌ها اعمال می‌گردید. طبعاً تدوین سرفصل‌ها و میزان جزییات و دامنه کار با در نظر گرفتن فلسفه حاکم در چارچوب اهداف تدوین و حوزهٔ فراگیری به عمل آمده است. علاوه بر این، در بسیاری از موارد، سرفصل‌ها در کمیته‌های تخصصی نیز مورد توجه، بازنگری و اصلاح و تجدید نظر قرار داده می‌شد و جهت تصویب به کمیتهٔ تدوین برگشت داده می‌شد. به ویژه در ارتباط با بخش طراحی، کمیته‌های تخصصی جلسات مبسوطی تشکیل داده درنهایت به چارچوب مناسب و قابل دفاعی دستیابی حاصل گردید. جمع‌بندی نظریات و

مصوبات به صورت سرفصل‌های کلی و جزیی مصوب کمیتهٔ تدوین پس از اعمال هماهنگی‌های لازم توسط کمیتهٔ تخصصی برای اعضای محترم کمیتهٔ تدوین ارسال و متعاقباً نظریات دریافت‌شده و منعکس‌شدهٔ اعضای محترم در جلسات بعدی مورد بحث قرار داده می‌شد و نتایج در نسخهٔ نهایی شدهٔ مصوب بازتاب می‌یافت و پس از تصویب در کمیتهٔ اصلی به وسیلهٔ دبیر کمیته تنظیم و به تمامی اعضای گرامی ارسال و متعاقب آن نظر دیگری مبنی بر وجود اشکالی در مجموعهٔ سرفصل‌ها دریافت نگردید.

به‌طوری‌که از مطالعهٔ اجمالی فهرست موضوعی سرفصل‌ها مشخص می‌گردد، مجموعهٔ پیش‌بینی شده برای آیین‌نامه مبتنی بر چارچوب و ساختار منسجمی است و سرفصل‌های موضوعی مربوط با توجه به ضروریات مطالب و با شناخت مباحث لازم در آیین‌نامه، در این چارچوب به صورت تفصیلی ارایه شده‌اند و شامل فهرست‌های موضوعی کلی و جزیی تفصیلی می‌باشند که مبتنی بر فلسفهٔ عمومی حاکم بر کار بوده است و اگرچه برای تدوین آن، زمان نسبتاً زیادی برای تبادل نظر و تهیه پیشنویس و بازنگری و بازتاب نظریات و تهیهٔ متن نهایی و تصویب اختصاص یافت، در مراحل بعدی کار که شامل تفکیک موضوعی سرفصل‌ها به بخش‌های تخصصی جهت تهیهٔ پیش‌نویس بود و همچنین در تهیهٔ پیش‌نویس به طور مؤثری تسهیل و تسریع گردید.

فهرست موضوعی سرفصل‌ها در ۲۹ صفحه تدوین شد با فصل‌بندی متن نهایی به‌طور قابل قبولی همسازی داشته‌اند. در مرحله اول مطالعات سرفصل‌های موضوعی، کلی و جزیی به صورت تفصیلی تعیین و ارایه گردیدند. با توجه به مباحثات مبسوطی که در این زمینه در مرحله تدوین به عمل آمد، تغییرات نسبتاً جزیی در سرفصل‌ها در حین تدوین پیش‌نویس‌ها صورت گرفت، ولی چارچوب اصلی مبتنی بر فلسفه و اهداف کار به نحو ارایه شده در مطالعات مرحله اول حفظ گردید. این امر حاکی از اهمیت مطالعات مرحله اول و کیفیت مطالعات مزبور قلمداد می‌گردد که منتج به آن گردید که نیازی به تغییر ساختار یا اعمال تغییرات گسترده در مرحلهٔ تدوین متن آیین‌نامه پیش نیامد. به عبارت دیگر، با کوشش‌های به عمل آمده در مرحله اول همان‌گونه که انتظار می‌رفت نیاز به چنین تغییراتی ناچیز و تقریباً منتفی بود.

به طوری‌که ملاحظه می‌شود، لازمهٔ تدوین سرفصل‌های موضوعی تفصیلی شناسایی کامل اهداف، دیدگاه‌ها، حوزهٔ فراگیری و فلسفهٔ کار بوده است و خوشبختانه این سرفصل‌ها نشانگر تسلط کامل کمیتهٔ محترم تدوین بر این دیدگاه‌ها بوده و منتج به آن گردید که آیین‌نامه‌ای با پشتیبانی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور وقت و توسط اساتید گرانمایهٔ کمیتهٔ تدوین و متخصصان دیگر تدوین گردید، از جامعیت لازم در چارچوب حوزهٔ فراگیری مورد نظر برخوردار گردد.

تفکیک موضوعی سرفصل‌ها برحسب زمینه‌های تخصصی

بر اساس فهرست موضوعات کلی و جزیی و در چارچوب پیکربندی پیش‌بینی‌شده، موضوعات سرفصل‌ها به شرح مندرج در صفحهٔ بعد به تفکیک با توجّه به زمینه‌های تخصصی ارایه شده‌اند. به عنوان نمونهٔ، زمینه‌های تخصصی زیر به صورت زیرمجموعهٔ سرفصل‌های کلی‌تر قابل تفکیک می‌باشند:

- *طراحی مجموعه، اعضا و پیونده‌ها*
- *تحلیل*
- *پایداری*
- *رفتار دینامیکی و لرزه‌ای*
- *بارگذاری و رفتار تحت اثر باد*

- *بارگذاری و رفتار تحت تاثیر زلزله*
- *بارگذاری برف*
- *سایر آثار و عوامل*
- *بهینه‌یابی*
- *قابلیت اعتماد*
- *کنترل کیفیت*
- *مصالح فولادی*
- *ریخت‌شناسی*
- *سیستم‌های سازه‌ای*
- *تولید سیستم‌های پیش‌ساخته (ساخت)*
- *بافت و نصب*
- *مدیریت کیفیت*
- *بهره‌برداری*
- *نگهداری*
- *مستندسازی*

زمینه‌های تخصصی در کمیته‌های تخصّصی مورد بحث قرار گرفتند و پس از انتخاب قطعی مسؤولین تهیهٔ پیش‌نویس هر فصل و تقبل مسؤولیت ایشان، به مسؤولین پیش‌نویس‌های سرفصل‌ها توصیه شد که از متخصصان زمینه‌های تخصصی مربوط به زیر مجموعهٔ سرفصل‌ها در تدوین پیش‌نویس بهره‌گیری نمایند.

سرفصل‌های کلی

بخش اول: کلیات

فصل اول: کلیات

بخش دوم: طراحی

فصل دوم: مبانی طراحی

فصل سوم: عوامل و بارهای مؤثر (به تفکیک شامل):

۱ـ کلیات و ترکیب بارها و بارگذاری به جز موارد زیر:

۲ـ زلزله

۳ـ باد

۴ـ بارهای دینامیکی ناشی از ضربه، انفجار، حرکت جراثقال و...

۵ـ برف

۶ـ تأثیر تغییرات دما

۷ـ اثر نامیزانی

فصل چهارم: طراحی مجموعه سازه‌ها:

۱ـ سیستم‌های سازه‌های فضاکار

۲ـ شیوه‌های ساخت، بافت و نصب

۳ـ معیارهای طراحی
۴ـ مصالح
۵ ـ طراحی اولیه
۶ـ شیوه اعمال بارها
۷ـ اعضای سازه‌ای
۸ ـ پیوندها، اتصالات و تکیه‌گاه‌ها
۹ـ اجزا و پوشانه‌های غیرسازه‌ای
فصل پنجم: تحلیل
فصل ششم: طراحی اعضا، اتصالات و تکیه‌گاه‌ها
فصل هفتم: طراحی مبتنی بر آزمایش

بخش سوم: اجرا

فصل هشتم: رواداری‌ها
فصل نهم: ضوابط ساخت
فصل دهم: ضوابط بافت و نصب
فصل یازدهم: مدیریت کیفیت

بخش چهارم: بهره برداری و نگهداری

فصل دوازدهم: ضوابط بهره‌برداری
فصل سیزدهم: ضوابط نگهداری

بخش پنجم: مستندسازی

فصل چهاردهم: مستندسازی مدارک طراحی
فصل پانزدهم: مستندسازی مدارک اجرا
فصل شانزدهم: مستندسازی مدارک بهره‌برداری و نگهداری
فصل هفدهم: اصول بایگانی مدارک فنی

تعاریف، واژه‌نامه، نمادها

اولویت‌بندی مراحل تدوین آیین‌نامه

در ارتباط با مطالعات مربوط به تدوین آیین‌نامهٔ سازه‌های فضاکار لازم است برنامه‌ریزی‌های کوتاه مدت، میان مدت و دراز مدت در چارچوب برنامه‌ریزی‌های کلان تحقیقات و تدوین آیین‌نامه‌ها به عمل آید. در برنامه‌ریزی راهبردی پس از تبیین اهداف و تجسم چشم‌اندازها، با بررسی تمامی امکانات، اهداف قابل حصول تعیین می‌گردند. از اینرو همواره در تدوین برنامه و تخصیص منابع لازم است اولویت‌بندی به نحو منطقی صورت گیرد.

براساس پیشنهادهای گروه‌های کار، مطالعات و بررسی‌های متمرکز توسط دبیر کمیته و شناخت نیروهای متخصص همکار و امکانات کار هم‌زمان روی سرفصل‌های متفاوت، امکانات قابل حصول و همچنین نتایج حاصل از جلسات برگزار شده با مسؤولان محترم سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور و تصویب کمیتهٔ تدوین طی آخرین جلسهٔ مرحلهٔ مقدماتی (مرحلهٔ اول)، مقرر گردید که

اولویت در تدوین آیین‌نامه به بخش اول و دوم: ***کلیات و طراحی*** داده شود. به این ترتیب نکات زیر در این مقوله قابل ذکر بوده و مزایای زیر بر این امر مترتب خواهد بود:

- اگرچه بخش‌های طراحی، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری دارای پیامدها و آثار متقابل فراوانی می‌باشند، ولی کوشش به عمل آمده است که این آثار در تعیین فهرست تفصیلی موضوعات کلی و جزیی مورد توجه قرار داده شوند و تصویری از آنچه ذیل هر سرفصل و زیرفصل باید به آنها پرداخت، قبل از افزودن آن به فهرست موضوعات در اذهان اعضای کمیته مجسم شده باشد. از اینرو به نظر می‌رسد می‌توان بخش کلیات و طراحی را بدون رویارویی با خطر زیاد از نظر تداخل و آثار متقابل منجر به تغییرات اساسی، تدوین نمود.
- در برنامهٔ اولیه‌ای که براساس نیروی متخصص و علاقمند قابل دسترس برای تدوین پیش‌نویس‌ها و شرکت در جلسات کمیته‌های اصلی و تخصصی آیین‌نامه توسط دبیر کمیته تدوین شد، عملاً قسمت ابتدایی کار به کلیات و طراحی تخصیص یافته بود و بخش‌های اجرا، بهره‌برداری و نگهداری و مستندسازی پس از تکمیل پیش‌نویس اولیه و ویرایش و اصلاح بخش طراحی صورت می‌پذیرفت. این امر خود حاکی از کمبود اعضای متخصص برای کار هم‌زمان در کلیهٔ فصول و بخش‌ها و محدودیت میزان پیشرفت عملی و قابل حصول در زمینهٔ تأیید پیش‌نویس‌ها از طرف کمیته‌های تخصصی واصلی بود. بنابراین، در صورت تفکیک بخش طراحی از سایر بخش‌ها تأثیر مستقیمی بر روند کلی کار احساس نمی‌شد.
- اگرچه در برنامه‌ریزی اولیه، باز خور مطالعات در مرحله تدوین بخش‌های اجرا، بهره‌برداری، نگهداری و مستندسازی بر بخش کلیات و طراحی و اصلاحات ناشی از آن در خاتمهٔ کار پیش‌بینی‌شده بود، ولی انتظار نمی‌رفت این امر تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر نتیجهٔ کار بخش طراحی- در صورت تدوین تفکیک‌شده ـ داشته باشد که تعویق ارایهٔ این بخش تا تکمیل کلیهٔ بخش‌ها قابل توجیه باشد.
- با تفکیک بخش‌های کلیات و طراحی، ارایهٔ قسمت مستقلی از کار در مدت کوتاه‌تری میسر می‌گردد. این امر چه از نظر کارفرمای محترم، چه از دیدگاه افزایش انگیزه اساتید و متخصّصان همکار به جهت ارایهٔ سریع‌تر حاصل زحمات و مطالعاتشان به جامعهٔ مهندسی کشور و هم از نظر رفع سریع‌تر نیازهای ملموس و فوری مهندسان و دست اندرکاران طراحی سازه‌های فضاکار، تصمیمی منطقی و قابل دفاع به نظر می‌رسد. با تمرکز روی بخش عمدهٔ کار (طراحی) این امکان حاصل خواهد شد که در زمانی معقول دستاوردی از این مطالعات حاصل گردد که به طور مستقل قابل عرضه به جامعهٔ مهندسین در سطح ملی و بین‌المللی باشد وآثار احتمالی اصلاحات و هماهنگی‌های ناشی از مراحل تدوین بخش‌های بعدی را می‌توان در تجدید نظرهای بعدی، هم‌زمان با تکمیل سایر بخش‌ها ارایه نمود.

از اینرو اولویت‌بندی در واقع به طور ضمنی و همچنین مستقیم در دو مرحله صورت گرفته است:

الفـ در انتخاب حوزهٔ فراگیری و دامنه کار (که به طور ضمنی در آن اولویت به سازه‌های فضاکار مشبک فولادی داده شده است)،

بـ در تدوین بخش‌های اول و دوم (کلیات و طراحی سازه‌های فضاکار) که به طور مستقیم از میان مجموعهٔ بخش‌های تصویب‌شده در سرفصل‌های کلی و جزیی موضوعی، حایز اولویت شناخته شده است.

در اولویت‌های بعدی، تهیه متن انگلیسی برای بخش‌های اول و دوم، تکمیل بخش‌های سوم تا پنجم (اجرا، بهره‌برداری و نگهداری و مستندسازی) برای سازه‌های فضاکار مشبک فولادی و متعاقباً برای انواع دیگر سازه‌ها و تحقیقات جنبی لازم در برنامه‌ریزی‌های میان مدت و دراز مدت مورد توجه قرار داده خواهد شد.

نمـــادهـــا

مقدار طراحی کنش تصادفی	A_d
مقدار مشخصه کنش تصادفی	A_k
ضریب بادگیری	C_e
ضریب C_e برای منطقه باز	C_{eo}
ضریب C_e برای منطقه ناهموار	C_{er}
ضریب تندباد	C_g
ضریب اثر تند باد درونی	C_{gi}
ضریب فشار بیرونی میانگین‌گیری‌شده در سطح مورد نظر	C_P
ضریب فشار درونی	C_{pi}
اثر ناشی از کنش	E, Effect of action
آثار ناشی از کنش‌های ناپایدار کننده	$E_{d,dst}$
آثار ناشی از عوامل پایدارکننده	$E_{d,stb}$
مقادیر طراحی کنش	F_d ,Design value of an action
مقدار مشخصه کنش	F_k
مقادیر معرف کنش	F_{rep} , Representative value of an action
کنش دایمی	G , Permanent action
مقدار طراحی کنش دایمی	G_d
مقدار کرانه پایینی کنش دایمی	$G_{d,inf}$
مقدار کرانه بالایی کنش دایمی	$G_{d,sup}$
مقدار مشخصه کنش دایمی	G_k
مقدار مشخصه کرانه پایینی کنش دایمی	$G_{k,inf}$
مقدار مشخصه کرانه بالایی کنش دایمی	$G_{k,sup}$
ضریب اهمیت ساختمان	I_W
دوره بازگشت بر حسب سال	N
فشار بیرونی که به‌صورت استاتیکی و عمود بر سطح وارد می‌شود که می‌تواند به‌صورت فشار وارده بر سطح یا مکش در جهت خارج از سطح باشد.	P
فشار درونی که به‌صورت استاتیکی و عمود بر سطح وارد می‌شود که می‌تواند به‌صورت فشار به‌طرف سطح یا مکش به سمت خارج از سطح باشد.	P_i
کنش متغیر	Q ,Variable action
مقدار طراحی کنش متغیر	Q_d
آثار ناشی از اعمال کنش i ام بر سازه	Q_i
مقدار مشخصه کنش متغیر	Q_k
مقدار متوسط Q	Q_m
مقدار اسمی Q	Q_n
مقدار ظرفیت طراحی	R_d
مقدار متوسط R	R_m

مقاومت اسمی	R_n
مقدار تقاضای طراحی	S_d
عرض مورد نظر عمود بر جهت وزش باد در تراز hi	W_i
مقدار طراحی پارامتر مصالح	X_d یا R_d , Design value of a material property
مقدار مشخصه پارامترمصالح	X_k یا R_k , Characteristic value
مقدار اسمی پارامتر مصالح	X_{nom} یا R_{nom} , Nominal value of a material property
مقادیر اسمی کمیت‌های هندسی	a_{nom}
نسبت ضریب میرایی به ضریب میرایی بحرانی	d
ارتفاع مرجع	h
ارتفاع بالای تراز طبقه i ام	h_i
فشار متناظر با سرعت مبنا	q
نسبت فرکانس بار اعمالی به فرکانس ارتعاش طبیعی سازه	r
طول ناهمواری بالادست سازه	x_r
کمیت نمایشگر آثار ناشی از نابه‌جایی‌ها، انحراف تجمعی و رواداری‌ها	Δ_a
مقدار طراحی پارامتر هندسی	α_d , Design value of a geometrical property
مقدار مشخصه پارامتر هندسی	α_k , Characteristic value of a geometrical property
شاخص قابلیت اطمینان	β
ضریب کنش تصادفی	γ_A
ضریب پاره‌ای کنش	γ_F
ضریب پاره‌ای کنش	γ_f
ضریب بار پاره‌ای کنش i ام	γ_i
ضریب بار ترکیبی در بررسی حالات حدی نهایی و حالات حدی بهره‌برداری برگشت ناپذیر	γ_{0i}
ضریب بار تناوبی در بررسی حالات حدی نهایی تحت تاثیر کنش‌های تصادفی و حالات بهره‌برداری برگشت‌ناپذیر ناشی از بارهای متناوب	γ_{1i}
ضریب بار شبه‌دایمی برای حالات حدی نهایی تحت اثر کنش‌های تصادفی و حالات حدی بهره‌برداری برگشت‌پذیر، آنگاه که نسبت بازهٔ زمانی احتمال تجاوز مقدار بار به بازهٔ زمانی مبنا از ۵۰٪ تجاوز نماید.	γ_{2i}
ضریب پاره‌ای خواص مصالح	γ_m
ضریب نمایشگر آثار نابه‌جایی کنش‌ها	γ_p
ضریب کنش متغیر	γ_Q
انحراف معیار متناظر با تابع توزیع Q	σ_Q
انحراف معیار متناظر با تابع توزیع R	σ_R
انحراف معیار تابع توزیع $R-Q$	$\sigma_{(R-Q)}$
مقدار میانگین ضریب تبدیل اصلاحی مصالح	η
ضریب ارایه دهندهٔ میزان اهمیت سازه	η_D

ضریب ارایه‌دهندهٔ نسبت شکل‌پذیری	η_1
ضریب ارایه‌دهندهٔ درجه نامعینی سازه	η_R
ضریب مقاومت مربوط	φ
مقاومت طراحی	φR_n
نسبت مقادیر مقاومت متوسط به مقاومت اسمی	λ
ضریب Q_k در ترکیب بار	ψ_0
ضریب Q_k در حالات احتمال وقوع زیاد	ψ_1
ضریب Q_k در حالات بار شبه دایمی	ψ_2
ضریب کنش متغیر i ام	ψ_i
مقدار مؤثر کنش متغیر	ψQ_k , Accompanying value of a variable action
مقدار ترکیبی کنش متغیر	$\psi_0 Q_k$, Combination value of a variable action
مقدار پر تواتر کنش متغیر	$\psi_1 Q_k$, Frequent value of a variable action
مقدار شبه دایمی کنش متغیر	$\psi_2 Q_k$, Quasi-permanent value of a variable action

بخش یک

کلیـــــات

۱

کلیـــات

۱-۱- مقدمه

۱-۱-۱- اهداف

هدف از تدوین این آیین‌نامه تعیین حداقل ضوابط و معیارهای لازم برای تحلیل، طراحی، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری سازه‌های فضاکار شبکه‌ای مشمول این آیین‌نامه می‌باشد؛ به نحوی که شرایط لازم برای بهره‌برداری ایمن و با دوام سازه را متناسب با عملکرد مورد نظر در سطح اطمینان تعریف‌شده، تحت تأثیر کنش‌ها، با رعایت جنبه‌ها و ملاحظات اقتصادی، بر اساس دانش روز تأمین نماید.

در تدوین این آیین‌نامه فرض بر آن است که:

- انتخاب سیستم سازه و طراحی آن توسط کارشناسان ذیصلاح و مجرب انجام می‌گیرد.
- عملیات اجرایی پروژه توسط مجریان ذیصلاح و گروه‌های حایز مهارت‌های فنی و تجارب لازم صورت می‌پذیرد.
- نظارت و کنترل کیفیت در تمامی مراحل طرح و اجرا، شامل مطالعات توجیهی و امکان‌سنجی، بررسی گزینه‌ها و انتخاب گزینهٔ برتر، مدل‌سازی سازه و کنش‌های مؤثر، تحلیل و طراحی، ارزیابی فنی و اقتصادی، تدوین مشخصات فنی عملیات ساخت کارخانه‌ای یا کارگاهی و عملیات نصب یا ساخت درجا و همچنین بهره‌برداری و نگهداری به‌نحوی شایسته اعمال می‌گردد.
- مصالح و تولیدات ساختمانی دارای مشخصات تعیین‌شده در این آیین‌نامه می‌باشند و یا براساس استانداردهایی تولید شده‌اند که در این آیین‌نامه به آن‌ها ارجاع شده است.
- سازه به نحو تعیین شده در مشخصات فنی نگهداری پروژه، نگهداری خواهد شد.
- نحوهٔ بهره‌برداری از سازه با فرضیات طراحی در ارتباط با کاربری، سازگار خواهد بود.

از این رو روش‌های طراحی ارایه‌شده در این آیین‌نامه در صورتی معتبر می‌باشند که شروط لازم برای مصالح، عملیات اجرایی و مهارت‌های مورد نیاز در طرح و ساخت تامین شده باشد.

۱-۱-۲- تعاریف

سازه‌های فضاکار به‌آن دسته از سازه‌ها اطلاق می‌شوند که ماهیتاً دارای رفتار و عملکرد مسلط سه بعدی می‌باشند، به نحوی که اثر هیچ‌یک از سه بعد در رفتار سازه تحت تأثیر کنش‌های وارده قابل صرف‌نظرکردن نیست. این سازه‌ها به طریقی پیکربندی می‌شوند که مسیر انتقال بارها را از طریق عناصر سازه‌ای در سه بعد تأمین نمایند.

سازه‌های فضاکار با مصالح و روش‌های گوناگون احداث و در گروه‌های کلی به شرح زیر طبقه‌بندی می‌گردند.

۱-۱-۲-۱- دسته‌بندی سازه‌های فضاکار

سازه‌های فضاکار بر اساس نوع، شکل، مصالح، روش ساخت، نحوهٔ کاربری و عمر مفید طبقه‌بندی می‌گردند.

۱-۱-۲-۱-۱ – دسته‌بندی بر اساس نوع و شکل

۱-۱-۲-۱-۱-۱- سازه‌های فضاکار شبکه‌ای

سازه‌های فضاکار شبکه‌ای با ریخت‌های گوناگون طراحی و احداث می‌گردند و دارای استخوان‌بندی مقاوم از نوع اسکلتی می‌باشند و به گروه‌های زیر قابل تفکیک هستند:

الف – شبکه‌های تخت تک‌لایه

ب – شبکه‌های تخت دو و چندلایه

پ – چلیک‌های تک‌لایه، دولایه و چندلایه

ت – گنبدهای تک‌لایه، دولایه و چندلایه

ث – سایر شبکه‌های تک‌لایه و چندلایه باریخت‌های گوناگون

ج- برج‌ها و دودکش‌های شبکه‌ای

چ- سازه‌های کش بستی

ح- سازه‌های شبکه‌ای تاشو

خ- سازه‌های کابلی

۱-۱-۲-۱-۱-۲- سازه‌های فضاکار پیوسته

سازه‌های فضاکار پیوسته به گروه‌های زیر قابل تفکیک هستند:

الف – سازه‌های حجیم

ب – تاوه‌ها و پوسته‌ها

پ – سازه‌های پاشامی

۱-۱-۲-۱-۱-۳- سازه‌های فضاکار دوگونه

سازه‌های فضاکار متشکل از اجزای منفصل و پیوسته در این گروه رده‌بندی می‌شوند.

در طراحی سازه‌های فضاکار، می‌توان از تلفیق مناسبی از انواع و شکل‌های مذکور در فوق بهره‌گیری نمود.

۱-۱-۲-۱-۲- دسته‌بندی بر اساس نوع مصالح

سازه‌های فضاکار به‌طور معمول با مصالح فولادی، آلومینیومی، چوبی، بتنی، مواد کامپوزیت، مصالح بنایی، شیشه‌ای، پاشامی، پانل‌های ساندویچی، الیاف بافته شده یا ترکیبی از این‌ها ساخته می‌شوند.

این مصالح هم در اعضای تشکیل‌دهندهٔ سازه‌های فضاکار و هم به عنوان پوشانه‌های این سازه‌ها به‌کاربرده می‌شوند.

۱-۱-۲-۱-۳- دسته‌بندی بر اساس شیوه‌های ساخت و بافت

سازه‌های فضاکار به لحاظ شیوهٔ ساخت به دو گروه پیش‌ساخته و ساخت درجا تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های پیش‌ساخته متعارف سازه‌های فضاکار را می‌توان به ۳ طبقه عمده پیونده‌ای، واحدی و ترکیبی تقسیم‌بندی کرد. بنابراین سیستم‌های پیونده‌ای، واحدی و ترکیبی در اغلب موارد در زمرهٔ سیستم‌های پیش‌ساخته محسوب می‌گردند که اغلب به صورت بخش‌های تکرارشوندهٔ پیش‌ساخته و با قابلیت تولید انبوه به روش‌های صنعتی تولید می‌گردند. هنگامی‌که به‌علت شکل و ابعاد سازه، بهره‌گیری از روش‌های پیش‌ساختهٔ متعارف ملزومات اقتصادی طرح را ارضا ننماید، روش ساخت با توجه به ویژگی‌های پروژه تعیین می‌شود. همچنین از دیدگاه شیوهٔ بافت، سازه‌های فضاکار شبکه‌ای به دو گروه پیش بافته و بافت درجا منقسم می‌گردند. در حالت پیش‌بافته، سازهٔ فضاکار یا زیرمجموعه‌ای از آن، در تراز زمین بافته و از طریق بلند نمودن مجموعه در تراز و موقعیت نهایی خود استقرار خواهد یافت.

۱-۱-۲-۱-۴- دسته‌بندی بر اساس نوع کاربری

سازه‌های فضاکار را با توجه به تنوع کاربرد بر حسب نوع کاربری می‌توان به گروه‌های فراوانی طبقه‌بندی نمود. از جمله این کاربری‌ها می‌توان از سالن‌های اجتماعات، نمایشگاه‌ها، موزه‌ها، فرهنگ‌سراها، فضاها و استادیوم‌های ورزشی، آشیانه‌های هواپیما، پایانه‌های فرودگاه، راه‌آهن و اتوبوس، پروژه‌های صنعتی، پل‌ها، ساختمان‌های آموزشی، مسکونی، اداری، تجاری، بیمارستان‌ها، دکل‌های انتقال نیرو و برج‌های مخابراتی یاد کرد.

۱-۱-۲-۱-۵- دسته‌بندی بر اساس عمر مفید بهره‌برداری

در این آیین‌نامه، سازه‌های فضاکار از لحاظ عمر مفید بهره‌برداری به چهار گروه مطابق بند۲-۲-۳ طبقه بندی گردیده‌اند که بهره‌برداری دراز مدت، میان‌مدت، موقت با امکان نصب و بازکردن به قصد نصب مجدد به صور تاشو یا بازشو یا موقت جهت خدمت‌رسانی کوتاه مدت، برای کاربری‌های متنوع را شامل می‌گردند.

۱-۱-۳- دامنه کاربرد

این آیین‌نامه ضوابط و ملزومات تحلیل، طراحی، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری سازه‌های فضاکار شبکه‌ای فولادی تخت یا دارای انحنا، اعم از تک‌لایه یا چندلایه را در بر می‌گیرد.

بخش عمدهٔ سازه‌های فضاکار فولادی را سازه‌های پیش‌ساخته تشکیل می‌دهند که شامل انواع سیستم‌های تجاری در خور تولید انبوه می‌باشند. این آیین‌نامه ضوابط پذیرش چنین سیستم‌های تجاری را نیز شامل می‌گردد. بنابراین حوزهٔ فراگیری این آیین‌نامه منحصر به سازه‌های فولادی شبکه‌ای مذکور درردیف (الف) تا (ه) بند (۱-۱-۲-۱-۱-۱) می‌باشد که بیشترین کاربرد را در سطح ملی و جهانی داشته‌اند.

۱-۱-۴- سیستم واحدها

سیستم واحدهای مورد بهره‌گیری در ارتباط با کمیت‌های مورد بحث در این آیین‌نامه سیستم آحاد بین المللی (SI) می‌باشد.

۱-۱-۵- نمادها

نمادهای به‌کارگرفته شده در این آیین‌نامه به طور کلی منطبق با نمادهای متحدالشکل مورد تأیید سازمان بین-المللی استانداردها (ISO) می‌باشد و جز در مواردی که به صراحت قید گردد، از این نمادها بهره‌گیری به‌عمل خواهدآمد.

۱-۲- مفاهیم بنیادین و مبانی طراحی

۱-۲-۱- مبانی نظری و فلسفهٔ طراحی

فلسفهٔ طراحی در این آیین‌نامه مبتنی بر حالات حدی است که همراه با ملزومات عملکردی مورد انتظار با بهره‌گیری از روش ضرایب پاره‌ای بار و مقاومت به‌کار گرفته می‌شود. در این آیین‌نامه، در ارتباط با سطوح اطمینان موردنظر، متناسب با کاربری‌های متفاوت، رهنمودهای لازم برای طراحی سازه‌های فضاکار ارایه شده‌است. در این چارچوب از روش‌های طراحی مبتنی بر ترازهای عملکردی سازه، تحت تأثیر سطوح متفاوت کنش‌ها بهره‌گیری‌شده است که با توجه به سطح اطمینان مورد نظر و ملحوظ‌نمودن مبانی دیدگاه‌های بایدی (تعیینی) و شایدی (احتمال‌اندیشانه)، به نحوی سازگار در این آیین‌نامه به‌کار گرفته شده‌اند.

۱-۲-۲ - شرایط طراحی و کنش‌ها

با توجه به رویدادهایی که یقیناً یا محتملاً سازهٔ فضاکار را در طول عمر بهره‌برداری تحت تأثیر قرار می‌دهند، شرایط طراحی متفاوتی ایجاد می‌گردد. سازهٔ فضاکار برای هریک از این شرایط، باید پایداری و عملکرد خود را مطابق با سطح عملکرد مورد انتظار و تعریف شده و تحت تأثیر ترازهای متفاوت کنش‌های محتمل ایفا نماید.

۱-۲-۳ - مصالح

مصالح سازه‌ای مورد کاربرد در سازه‌های فضاکار مشمول این آیین‌نامه، شامل انواع فولادهای سازه‌ای به صورت قطعات نوردشده (گرم و سرد)، کوبن‌کاری (چلنگری) شده یا ریخته‌گری می‌باشند. مشخصات فنی مصالح مورد پذیرش در چارچوب این آیین‌نامه در فصل چهارم ارایه گردیده است. همچنین الکترودهای جوش و قطعات اتصال و پیچ‌ها باید ضوابط فصل چهارم این آیین‌نامه را ارضا نمایند.

مصالح مورد کاربرد در اجزای غیرسازه‌ای از جمله پوشانه‌ها، دامنه وسیعی از مصالح را در برمی‌گیرند که در مورد هریک، لازم‌است ملزومات استانداردهای مربوط ملی یا بین‌المللی به نحو مندرج در فصل چهارم رعایت گردد.

۱-۲-۴- پایایی

مجموعهٔ سازهٔ فضاکار و زیرمجموعه‌های آن باید در شرایط محیطیِ خود و در طول عمر مفید، با رعایت دستورالعمل بهره‌برداری و نگهداری از پیش تعیین‌شده، قابلیت بهره‌برداری مورد نظر را حفظ نمایند.

۱-۲-۵- فرم‌شناسی سازه‌ای

فرم‌شناسی سازه‌ای رشته‌ای از دانش است که به مطالعهٔ ویژگی‌های هندسی شکل‌های سازه‌ای می‌پردازد. این مطالعه شامل بررسی جنبه‌های عمومی هندسهٔ یک سازه مانند مختصات گره‌ها و هم‌بندی اعضا می‌باشد. به بیان دیگر، فرم‌شناسی سازه‌ای عبارت است از مطالعه علمی فرم و ساختار هم‌بندی سازه فضاکار از طریق تلفیق فرم‌شناسی با سازه‌شناسی و به‌کارگیری فرم معماری در خدمت محتوای سازه‌ای طرح که در طراحی سازه‌های فضاکار نقشی اساسی ایفا می‌نماید. ابزار مورد استفاده در فرم‌شناسی سازه‌ای عبارت‌اند از علم هندسه، جبر فرمکسی، نرم‌افزارهای گوناگون دارای قابلیت‌های لازم برای ایجاد و پردازش فرم‌ها و دیگر موارد. رهنمودهای لازم در این زمینه در فصل چهارم و پیوست‌های (۱ـ الف) و (۱ـ ب) این آیین‌نامه ارایه گردیده‌است.

۱-۲-۶ - تحلیل

محاسبات فنی سازه باید با بهره‌گیری از مدل‌های ریاضی تا حد امکان واقع‌گرایانهٔ سازه و کنش‌های مؤثر در تطابق با شرایط مرزی، متناسب با میزان دقت مورد نظر صورت گیرد. لازم است نتایج تحلیل مدل ریاضی با بهره‌گیری از اصول و مفاهیم مهندسی سازه یا به روش‌های تجربی و از طریق آزمایش صحت‌سنجی شود.

۱-۲-۷ - طراحی

طراحی شامل فرایندهای انتخاب شکل شبکه، اندازه‌ها، مشخصات مکانیکی اعضای شبکه، تعیین کنش‌های مؤثر بر آن، تعیین شرایط گوناگون طراحی در طول عمر مفید آن، تعیین شرایط مرزی و تحلیل رفتار آن، مطابق بخش دوم این آیین‌نامه برای بررسی سازگاری فرم و اندازه با نیازها می‌باشد و در صورتی که سازگاری تأمین نشود، فرم‌ها و اندازه‌ها و احتمالاً مشخصات مکانیکی تغییریافته و تحلیل و بررسی تجدید می‌شود تا سازگاری مطلوب حاصل گردد.

طراحی سازه‌های فضاکار را می‌توان براساس ترکیب قانع‌کننده‌ای از محاسبات فنی سازه شامل محاسبات تحلیلی نظری، عددی و شیوه‌های شناخته‌شدهٔ طراحی سازه‌ها و در عین حال بررسی‌های تجربی (آزمایش‌های محلی و آزمایشگاهی) به نتیجه رساند. به‌طور معمول در مواردی که مدل‌ها و روش‌های محاسباتی واقع‌گرایانه‌ای برای تحلیل با دقت مورد نظر در دست نباشد، لازم است از مشاهدات و داده‌های حاصل از آزمایش بهره‌گیری و استنتاج به عمل آید. در بررسی صحت و سقم مفروضات طراحی، انجام آزمایش سهم بسزایی در اتخاذ تصمیمات قابل دفاع طراحی خواهد داشت.

۱-۳- مدیریت کیفیت

سازهٔ فضاکار باید طبق خواسته‌های کارفرما و بهره‌بردار و منطبق با مفروضات طراحی و به منظور برآوردن نیازهای طرح، مطالعه، طراحی، ساخته، نصب و نگهداری شود. در این زمینه باید تدابیر لازم به منظور نیل به سطح اطمینان کیفی مورد نظر، از طریق تعیین سطح اطمینان، سازماندهی سیستم مدیریت کیفیت و اعمال کنترل مضاعف در مراحل مطالعاتی، طراحی، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری، اتخاذ گردد. در بخش سوم این آیین‌نامه به تفصیل و در پیوست ۷ به اجمال به مدیریت کیفیت در فرایند طرح و احداث سازه‌های فضاکار پرداخته شده‌است.

۱-۴- اصول اجرا

در این آیین‌نامه حداقل استانداردهای کیفی عملیات اجرایی ساخت و نصب ارایه گردیده‌اند تا اطمینان حاصل شود که مفروضات طراحی براساس این آیین‌نامه ارضا و سطح ایمنی مورد نظر تأمین گردیده است. همچنین اصول ایمنی اجرای سازه‌های فضاکار، رواداری‌های اجرایی (ساخت و نصب) و شیوه‌های اعمال اصول مدیریت ساخت تبیین گردیده‌اند. متناسب با نوع کنش و کیفیت و عملکرد مورد انتظار رفتار و پاسخ سازه، ممکن است سطوح متفاوت دقت و کیفیت ساخت و نصب مورد نیاز باشد. بخش سوم این آیین‌نامه به صورت تفصیلی و پیوست ۷ به صورت اجمالی به این موارد اختصاص یافته‌است.

۱-۵- اصول بهره‌برداری و نگهداری

بهره‌برداری از سازه باید با فرضیات طراحی سازگار بوده و به نحوی از آن نگهداری به‌عمل آید تا در طول عمر مفید خود جوابگوی نیازهای عملکردی و بهره‌برداری مورد انتظار باشد. بخش چهارم این آیین‌نامه به این امر اختصاص یافته‌است.

۱-۶- اصول مستندسازی

تمامی فعالیت‌های مرتبط با احداث پروژه از بدو احساس نیاز و متعاقباً مطالعات توجیهی و امکان‌سنجی، مطالعات مرحلهٔ اول، مطالعات طراحی تفصیلی، مشخصات فنی، اسناد مناقصه، نقشه‌های طراحی، نقشه‌های ساخت، نقشه‌های نصب، نقشه‌های چون‌ساخت و مدارک فنی بهره‌برداری و نگهداری و تاریخچهٔ بازرسی‌های فنی و همچنین ترمیمات و عملیات بهسازی باید مستندسازی گردند. اصول و مبانی و جزییات فرایندها و روش‌ها و گونه‌های مستندسازی مدارک فنی پروژه موضوع بخش پنجم این آیین‌نامه است. در پیوست ۸ نیز نکات اصلی اصول مستندسازی به اختصار مورد اشاره قرار گرفته است.

۱-۷- سایر استانداردها و مدارک مرتبط با آیین‌نامهٔ

در مواردی که بین مفاد این آیین‌نامه و سایر آیین‌نامه‌ها، دستورالعمل‌ها و مشخصات فنی منتشر شده برای ابنیه، تفاوت یا تناقضی یافت گردد، مشخصات، ضوابط و ملزومات مندرج در آیین‌نامه حاضر در مورد سازه‌های مشمول این آیین‌نامه، حایز اولویت بوده و نافذ خواهند بود. در موارد لزوم، به استانداردها، مقررات و آیین‌نامه‌های ملی و در موارد کمبود مدارک ملی به استانداردهای معتبر جهانی با ذکر شیوه‌های کاربرد همساز و هماهنگ استانداردهای مزبور با این آیین‌نامه، رجوع داده خواهد شد.

بخش دو

طـــراحـــی

۲

مبـــانی طراحـــی

۲-۱ - مقدمه

در این فصل مبانی طراحی، ارزیابی و کنترل طرح براساس فلسفهٔ طراحی مبتنی بر حالات حدی همراه با ملزومات عملکردی مورد انتظار به روش ضرایب پاره‌ای بار و مقاومت تشریح شده است.

۲-۲- الزامات بنیادین طراحی

۲-۲-۱- اصول بنیادین

۲-۱-۲-۱

سازه‌های فضاکار مشمول این آیین‌نامه باید به نحوی طراحی و احداث شوند که در طول عمر مفید مورد نظر، با سطح اطمینان تعریف‌شده و با رعایت ملاحظات اقتصاد مهندسی، شرایط زیر را پاسخگو باشند:

- سازگاری خود را برای کاربری مورد نظر حفظ نمایند.
- در مقابل همهٔ کنش‌های محتمل و آثار محتمل ناشی از آن‌ها، چه در حین ساخت و نصب و چه در طول دورهٔ بهره‌برداری، با توجه به تراز عملکردی مورد نظر، پاسخ تعریف شده‌ای را از خود بروز دهند.

۲-۱-۲-۲

سازه‌های فضاکاری که مطابق با بند فوق طراحی و احداث می‌گردند، باید جنبه‌های ایمنی، خدمت‌رسانی و پایایی را با توجه به شرایط مورد نظر در طراحی و اصول طراحی مفهومی و معیارهای عملکردی ارضا نمایند.

۲-۱-۲-۳

سازه‌های فضاکار باید به نحوی طراحی و احداث گردند که علاوه بر ارایهٔ رفتار پیش‌بینی‌شده تحت تأثیر کنش‌های محتمل در طول عمر مفید خود، در صورت وقوع آتش‌سوزی، انفجار، ضربه و عواقب اشتباهات انسانی، میزان گستردگی خسارات وارده به طور نامتناسب از آنچه به ویژگی‌های علت اولیه و کنش وارده مربوط بوده است، فراتر نرود.

۲-۱-۲-۴

لازم است با بهره‌گیری از تدابیر متناسب تلاش کرد تا از بروز صدمه‌های بالقوه به گونه‌های زیر جلوگیری به عمل آورد یا میزان گستردگی آن‌ها را محدود نمود:

- پرهیز، حذف یا کاهش خطراتی که سازهٔ فضاکار محتملاً در معرض آن قرار خواهد گرفت.
- انتخاب فرم در خدمت محتوا و بهره‌گیری از ویژگی‌هایی که منجر به کاهش میزان حساسیت سازه در برابر خطر یا کنش مورد نظر گردد.

- انتخاب شکل سازه و رعایت اصول طراحی مفهومی به منظور جلوگیری از خرابی پیش‌رونده، به این معنی که در صورت حذف یا نقصان عملکردی اتفاقی یک عضو، پیونده یا بخش محدودی از سازه و همچنین در صورت اعمال خسارات موضعی، سازه فضاکار به صورت زنجیره‌وار دستخوش خرابی پیش‌رونده نگردد.
- اجتناب از انتخاب سیستم‌ها، جزییات و مصالح سازه‌ای که دارای پتانسیل وقوع خرابی به صورت ناگهانی و بدون اخطار قبلی می‌باشند.
- هم‌بندی و پیکربندی به منظور ایجاد پیوستگی و یکپارچگی مجموعهٔ سازه و ارتقای مشارکت عناصر تشکیل‌دهندهٔ سازه در رفتار مجموعه.

۲-۲-۱-۵

الزامات بنیادین مذکور در بند ۲-۲-۱-۴ در سازگاری با اهداف کاربری هر پروژه خاص با اتخاذ تدابیر زیر قابل تأمین خواهند بود:

- انتخاب مصالح مناسب،
- طراحی مفهومی صحیح مجموعه و جزییات،
- انتخاب شیوه‌ها و سیستم‌های متناسب با نوع پاسخ مورد نظر در مقابل کنش خاص و در تراز عملکردی تعریف‌شده،
- ارایه و اعمال مشخصات فنی ساخت،
- برقراری سیستم کنترل و تضمین کیفیت در همهٔ مراحل طراحی، تولید، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری.

۲-۲-۲ - قابلیت اعتماد و سطوح اطمینان

۲-۲-۲-۱

سطوح اطمینان مورد نظر به شرطی برای سازه‌های فضاکار مشمول این آیین‌نامه قابل تأمین تلقّی می‌گردد که طراحی و احداث آنها طبق ضوابط مندرج در این آیین‌نامه و با اعمال سیستم مدیریت کیفیت مؤثر و کارا صورت پذیرد.

۲-۲-۲-۲

معمولاً سطوح اطمینان متفاوتی برای ایمنی و خدمت‌رسانی سازه اختیار می‌گردند. همچنین در چارچوب دیدگاه‌های مبتنی بر عملکرد سازه، در هر تراز عملکردی، متناسب با سطح خطر مرتبط با کنش مورد مطالعه، سطوح اطمینان متفاوتی در نظر گرفته می‌شوند.

۲-۲-۲-۳

سطوح اطمینان به کنش‌های زیر وابسته‌اند:

- سبب و نحوهٔ پاسخ در ارتباط با حالت حدی تعریف‌شده،
- عواقب گسیختگی به لحاظ خسارات جانی، جراحات وارده، صدمات بالقوه یا بالفعل اقتصادی و میزان اختلال در امنیت اجتماعی و فردی،
- میزان هزینه‌های لازم در ارتباط با بهره‌گیری از راهکارهای ممکن برای کاهش خطرپذیری و ارتقای ایمنی،
- سطوح اطمینان مورد نظر متناسب با میزان اهمیت سازه و براساس شاخص‌های معین و سطوح خطرپذیری تعریف‌شده.

۲-۲-۲-۴

طبقه‌بندی سطوح اطمینان در ارتباط با ایمنی و خدمت‌رسانی سازه، برای مجموعهٔ سازه، اعضا و اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای براساس طبقه‌بندی درجهٔ اهمیت این عناصر و با توجه به ترازهای عملکردی متناسب با سطوح خطر مورد نظر تحت تأثیر کنش‌های گوناگونِ مؤثر یا محتمل به عمل می‌آید.

سطح اطمینان لازم در ارتباط با ایمنی و خدمت‌رسانی سازه فضاکار با ترکیب مناسب معیارها و ویژگی‌های زیر قابل حصول تلقی می‌گردد:

- اهداف کاربری و پاسخ مورد انتظار سازه از نظر عملکرد تحت تأثیر کنش‌های مؤثر با درجهٔ احتمال وقوع متفاوت متناسب با طبقه‌بندی سازه از دیدگاه اهمیت،
- عمر مفید و پایایی،
- کیفیت مطالعات به عمل آمده در مراحل توجیهی و امکان‌سنجی، شناسایی‌های منطقه‌ای و محلی و بررسی‌های میدانی، شناسایی کنش‌های تابع موقعیت مکانی و شرایط اقلیمی، شناسایی و بررسی گزینه‌های شدنی و انتخاب گزینهٔ برتر بر اساس شاخص‌های تعیین‌شده،
- معیارهای طراحی و محاسباتی و مقادیر معرف کنش‌های مؤثر،
- ضرایب پاره‌ای بار و مقاومت در محاسبات فنی سازه،
- شیوهٔ اعمال اصول مدیریت کیفیت به منظور: کاهش خطاهای محتمل در برآورد مقادیر کنش‌ها، دستیابی به میزان دقت مورد نظر مدل‌سازی، صحت فرایند طراحی، صحت فرایند ساخت و کاهش خطاهای انسانی،
- میزان پیوستگی و یکپارچگی سازه،
- تدابیر پیشگیرانه و حفاظتی (مانند تدابیر فعال و غیرفعال کنترل لرزه‌ای سازه، تدابیر فعال و غیرفعال در مقابل آتش‌سوزی، حفاظت در مقابل خوردگی و اضمحلال مصالح، حفاظت پایه‌ها در مقابل اعمال ضربه،
- کیفیت و میزان دقت مدل‌سازی و روش و ابزار تحلیل،
- کیفیت طراحی مفهومی و طراحی جزییات اجرایی،

- کیفیت ساخت،
- کیفیت طراحی در ارتباط با میزان سهولت بهره‌برداری و نگهداری و کیفیت بازرسی فنی،
- نگهداری مبتنی بر بازدیدهای عمومی و ادواری، پایش از راه دور و ... مطابق مشخصات فنی تدوین‌شده به منظور نگهداری پروژه.

۲-۲-۳ - عمر مفید طراحی

عمر مفید سازه باید در مدارک طراحی و مشخصات فنی بهره‌برداری و نگهداری به وضوح ذکر گردد. عمر مفید طرح دورهٔ زمانی مفروضی است که طی آن سازه برای کاربری و بهره‌برداری مورد نظر با سطح نگهداری متعارف، بدون نیاز به تعمیر اساسی تحت تأثیر کنش‌های مفروض و با توجه به سطح اطمینان تعریف‌شده و درجهٔ اهمیت، مورد بهره‌برداری قرار داده می‌شود.

در مورد سازه‌های فضاکار مشمول این آیین‌نامه راهنمای عمر مفید طراحی بسته به نوع کاربری به شرح جدول۲-۱ ارایه می‌گردد:

جدول۲-۱- راهنمای تعیین عمرمفید طراحی سازه‌های فضاکار

گروه عمر مفید	عمر مفید طراحی	موارد ذیربط
۱	تا ۱۰ سال	**سازه‌های موقت که برای کاربری کوتاه مدت بدون قابلیت تکرار در کاربری طراحی می‌شوند.**
۲	تا ۲۵ سال	**سازه‌هایی که برای کاربردهای نسبتاً کوتاه مدت احداث می‌گردند؛ شامل سازه‌هایی که برای دفعات متعدد با امکان بازکردن و سرهم‌کردن مجدد به منظور کاربری‌های کوتاه مدت به تکرار به‌کار می‌روند؛ همچنین اعضای قابل تعویض سازه در این بازهٔ زمانی، از قبیل دستگاه‌های تکیه‌گاهی.**
۳	تا ۵۰ سال	**سازه‌های با کاربرد متعارف، سازه‌های صنعتی، آشیانه‌های هواپیما، سازه‌های تجاری، انبارها، نمایشگاه‌ها، سالن‌های اجتماعات، دکل‌ها و ...**
۴	تا ۱۰۰ سال یا بیشتر	**سازه‌های دارای اهمیت استراتژیک با کاربری دراز مدت، سازه‌های فضاکار ماندگار، اغلب با اهمیت نمادین که حایز اهمیت ویژه یا به طور مشخص و منفرداً تاثیرگذار در محیط مصنوع یا طبیعی می‌باشند؛ سازه‌های فضاکار به‌کار رفته در پل‌ها، ورزشگاه‌ها، نمایشگاه‌ها و سایر ابنیه با کاربری طولانی مدت.**

۲-۲-۴ - پایایی

۲-۲-۴-۱

با توجه به شرایط محیطی، دیدگاه‌های عملکردی و روش نگهداری پیش‌بینی‌شده، سازهٔ فضاکار را باید به نحوی طراحی نمود که فرسودگی، اضمحلال، خستگی، تغییرشکل‌های تابع زمان و آثار نظیر آنها در طول عمر مفید طراحی منجر به نزول کیفیت عملکرد سازه در مقایسه با آنچه در طراحی عملکردی مورد انتظار بوده است، نگردد.

۲-۴-۲-۲

نکات زیر باید به منظور حصول اطمینان از پایایی سازهٔ فضاکار در حد مورد انتظار، مدّنظر قرار گیرند:

- تعیین کاربری پیش‌بینی‌شده یا محتمل سازه در آینده و طبقه‌بندی میزان اهمیت سازه و انتخاب عمر مفید،
- رعایت معیارها و ملزومات طراحی مندرج در این آیین‌نامه،
- آثار کنش‌های محیطی شناسایی‌شده، شرایط اقلیمی، مشخصه‌ها و ویژگی‌های ساختگاه،
- ترکیب، خواص و عملکرد مصالح سازه‌ای و غیرسازه‌ای و تولیدات صنایع ساختمانی،
- انتخاب سیستم و فرم مجموعهٔ سازه و مصالح سازه و پوشانه‌ها، متناسب با شرایط اقلیمی و کنش‌های وابسته به ویژگی‌های منطقه‌ای و محلی،
- طراحی تفصیلی گزینهٔ برتر و انتخاب ریخت و ابعاد مناسب برای اعضای سازه‌ای و پوشانه‌ها و طراحی جزییات اجرایی به منظور افزایش پایایی و سهولت نگهداری،
- اعمال سیستم مدیریت کیفیت در طراحی و ساخت و انتخاب سطح متناسب کنترل کیفیت،
- اتخاذ تدابیر پیشگیرانه و حفاظتی ویژه،
- اعمال سیستم مدیریت بهره‌برداری و نگهداری مستمر بر اساس مشخصات فنی مربوط در طول عمر مورد نظر.

۲-۴-۲-۳

آثار شرایط محیطی باید در مرحلهٔ مطالعات توجیهی و امکان‌سنجی، ارزیابی و در مرحلهٔ طراحی تدقیق گردند و در ارتباط با پایایی سازه مورد سنجش قرار گیرند و به تناسب هر یک از کنش‌های مؤثر، پیش‌بینی‌های لازم برای حفاظت مصالح و اجزای سازه به عمل آید.

میزان فرسودگی، خوردگی و اضمحلال مصالح از طریق محاسبات، براساس تحقیقات تجربی و یا از طریق اطلاعات گردآوری‌شده در ارتباط با تجارب حاصله از ساختمان‌های قبلی که در معرض چنین شرایط محیطی قرار داشته‌اند، قابل برآورد می‌باشد.

۲-۲-۵ - مدیریت کیفیت

تمامی فعالیت‌های مطالعات توجیهی و امکان‌سنجی، بررسی گزینه‌های ذیربط و انتخاب گزینهٔ برتر، طراحی، تولید، ساخت، احداث، بهره‌برداری و نگهداری و مستندسازی مدارک فنی سازه‌های فضاکار باید در چارچوب ساختار مدیریت کیفیت فراگیر به عمل آید. در این چارچوب، نیازهای مرتبط با برنامه‌های کنترل و تضمین کیفیت در تمامی مراحل، به طریق اولی ارضا خواهد گردید.

۲-۲-۶ - شرایط طراحی

۲-۲-۶-۱

شرایط طراحی باید به نحوی انتخاب گردند که تمامی اوضاع و شرایطی را که در دورهٔ اجرا و بهره‌برداری سازه قابل پیش‌بینی است، شامل گردند و طراحی به قصد تأمین پایداری و ارایهٔ عملکرد مورد نظر در این شرایط صورت پذیرد.

۲-۲-۶-۲

شرایط طراحی و کنش‌ها در تقسیم‌بندی کلی به گروه‌های زیر منقسم می‌شوند:

الف ـ شرایط مستمر: مربوط به شرایط بهره‌برداری متعارف سازه،

ب ـ شرایط گذرا: مربوط به شرایط موقت سازه، به عنوان مثال: دورهٔ ساخت، تعمیرات، مقاوم‌سازی و بهسازی،

پ ـ شرایط تصادفی: مربوط به شرایط استثنایی محتمل و مرتبط با ویژگی‌های سازه یا شرایط محیطی یا موارد دیگر مانند آتش‌سوزی، انفجار و ضربه،

ت ـ وقوع زلزله: مربوط به زمین‌لرزهٔ محتمل‌الوقوع در ساختگاه. در این آیین‌نامه، به ویژه در حالت طراحی برای درنظرگرفتن آثار ناشی از وقوع زلزله، چارچوب فلسفهٔ طراحی مبتنی بر عملکرد به شرح مندرج در فصل سوم حاکم خواهد بود.

۲-۳ - حالات حدی

۲-۳-۱- کلیات

۲-۳-۱-۱

حالات حدی به حالاتی اطلاق می‌گردند که با گذر از آستانهٔ آنها، سازه قادر به ارضای خواسته‌ها و نیازهای بهره‌برداری و عملکردی طرح نباشد.

۲-۳-۱-۲

حالات حدی به دو طبقهٔ کلی حالات حدی نهایی و حالات حدی خدمت‌رسانی به طور متمایز تقسیم می‌شوند.

در صورتی می‌توان بررسی یکی از حالات حدی را انجام نداد، که اطلاعات متقن موجود ثابت نماید که نیازهای یک حالت حدی با تأمین نیازهای حالات حدی دیگر به طور واضح قابل تأمین است.

۲-۳-۱-۳-

حالات حدی متناسب با شرایط طراحی اختیار می‌گردند. سه گروه مرتبط با کنش‌های دایمی، گذرا یا تصادفی در بررسی حالات حدی مورد توجه می‌باشند. کنترل‌های لازم برای حالات حدی که در ارتباط با آثار تابع زمان مانند

خستگی می‌باشند، در ارتباط با نحوه بهره‌برداری، جزییات اجرایی، عمر مفید سازه و شرایط محیطی به عمل می‌آیند. همچنین در بررسی حالات حدّی مورد مطالعه در شرایط طراحی تحت تأثیر کنش‌های طبیعی، علاوه بر عمر مفید، دورهٔ بازگشت تخمینی برای کنش مورد بحث را نیز باید مورد توجّه قرار داد. در این بررسی‌ها در مورد شیوهٔ انجام تحلیل خطر ویژهٔ ساختگاه و بهره‌گیری از رهیافت‌های بایدی (تعیینی) یا شایدی (احتمال‌اندیشانه)، بسته به میزان اهمیت سازه، نوع کنش و میزان و کیفیت داده‌ها اتخاذ تصمیم می‌گردد.

۲-۳-۲ - حالات حدی نهایی

۱- ۲-۳-۲

حالات حدی نهایی به حالاتی اطلاق می‌شود که با ایمنی سازه، سکنه و بهره‌برداران و در موارد حایز اهمیت، با محتویات سازه ارتباط دارد.

۲- ۲-۳-۲

حالات حدی که بررسی آنها بسته به مورد حایز اهمیت است، به شرح زیر می‌باشند:

- از دست‌رفتن تعادل سازه یا بخشی از سازه، هرگاه به صورت جسم صلب در نظر گرفته شود.
- بروز تغییر شکل‌های بزرگ، تبدیل سازه یا بخشی از آن به ساز و کار ناپایدار، بروز پلاستیسیتهٔ گسترده، شکست، پارگی و از هم گسیختگی، ناپایداری سازه یا بخشی از آن شامل شالوده‌ها و تکیه‌گاه‌ها (ناپایداری‌های کلی یا موضعی).
- گسیختگی‌های ناشی از اثر خستگی یا سایر کنش‌های تابع زمان.

۳-۲-۳-۲

ضرایب پاره‌ای متفاوتی در حالات گوناگون حدی برحسب میزان اهمیت و گسترهٔ حالت حدی مورد نظر از جهت آثار کلی یا موضعی آن قابل اعمال است که در فصل چهارم به آن پرداخته خواهد شد.

۴-۲-۳-۲

حالات حدی نهایی در چارچوب مفاهیم طراحی مبتنی بر عملکرد باید متناسب با میزان خطرپذیری، درجهٔ اهمیت، عملکرد مورد انتظار، تحت تأثیر سطح خطر قابل پیش‌بینی و میزان خسارت قابل پذیرش در ترازهای ایمنی و بهره‌برداری تعیین گردند.

۲-۳-۳ - حالات حدی خدمت‌رسانی

۲-۳-۳-۱

حالات حدی خدمت‌رسانی با کنش‌های مشروح در زیر مرتبط می‌باشند:

- عملکرد سازه و یا عناصر سازه متناسب با کاربری مورد نظر.
- رفاه بهره‌برداران (حد ارتعاش، اختلال عملکردی، ...).
- وضعیت ظاهری (تغییرمکان زیاد، ترک‌خوردگی منجر به اختلال در بهره‌برداری از ساختمان یا تجهیزات و تأسیسات سازه یا آسیب‌رسانی به روسازی و نازک‌کاری).

۲-۳-۳-۲

حالات حدی خدمت‌رسانی از دیدگاه عملکردی باید متناسب با خطرپذیری، میزان اهمیت و عملکرد مورد انتظار در سطوح خطر تعریف‌شده تعیین گردند.

۲-۳-۳-۳

اگر به نحو دیگری به وضوح مشخص نشده باشد، معمولاً خواسته‌های کارفرما در ارتباط با کیفیت خدمت‌رسانی سازه، اعضای سازه و اجزای غیرسازه‌ای در سطوح ایمنی و بهره‌برداری در قرارداد و شرح خدمات طرح مشخص می‌گردند.

۲-۳-۴ - طراحی مبتنی بر حالات حدی

۲-۳-۴-۱

طراحی براساس حالت‌های حدی باید به شیوهٔ زیر دنبال گردد:

- طراحی بر اساس مدل‌های سازه و مدل‌های بار برای حالات حدی و ترازهای عملکردی ذیربط صورت گیرد.
- با توجه به ویژگی‌های سازه فضاکار، روش تحلیل و نحوه مدل‌سازی در فصل پنجم این آیین‌نامه ارایه گردیده‌است. مدل‌های تحلیل سازه باید به گونهٔ واقع‌گرایانه‌ای در برگیرندهٔ مقادیر کنش‌ها در سطوح ایمنی و بهره‌برداری شرایط سرحدی، خصوصیات مصالح و تولیدات ساختمانی و همچنین اطلاعات هندسی و نحوه هم‌بندی اعضا باشند و نتایج تحلیل باید تأیید نماید که در هیچ یک از حالت‌های حدی معیارهای تعریف‌شده، متناسب با ترازهای عملکردیِ متناظر نقض نخواهند گردید.
- کنترل‌های لازم به منظور ارزیابی حالات حدی باید برای همهٔ کنش‌ها، ترکیب بارها و شرایط طراحی به عمل آید.

۲-۴-۳-۲

ملزومات طراحی حالات حدی با اعمال روش ضرایب پاره‌ای بار و مقاومت، به نحوی که در این آیین‌نامه تعیین گردیده‌اند، ارضا می‌گردند.

۲-۴-۳-۳

به عنوان گزینه‌ای دیگر، طراحی مبتنی بر دیدگاه‌های شایدی (احتمال‌اندیشانه) و منطبق با اصول و مبانی فلسفی و نظری طراحی در حیطهٔ مهندسی سازه‌های فضاکار نیز قابل اعمال خواهند بود.

۲-۴-۳-۴

در حالت‌های طراحی متفاوت، مقادیر کنش‌ها و ضرایب پاره‌ای باید در هماهنگی با سطح اطمینان مورد نظر تعیین گردند.

۲-۴-۳-۵

در فرایند طراحی، مجموعه‌های گوناگون حالات بارگذاری و ترکیبات بار محتمل و مجموعه‌هایی از حالت‌های محتمل تغییرشکل‌ها و ناکاملی‌های اولیه‌ای که پیش‌بینی می‌گردد. به طور همزمان با کنش‌های متغیر، ثابت و دایمی اعمال خواهند گردید، تعیین و در مدل‌سازی ملحوظ خواهند گردید.

۲-۴ – کنش‌ها و آثار محیطی

با توجه به این‌که سازه‌های فضاکار را می‌توان در انواع ساختمان‌ها و ابنیه از قبیل، نمایشگاه‌ها و سالن‌های چند منظوره، سالن‌های اجتماعات، ساختمان‌های صنعتی، دکل‌های انتقال نیرو، سازه‌های دریایی، برج‌های خنک‌کن، پل‌ها، ساختمان‌های مسکونی، اداری و تجاری، بیمارستان‌ها و ... به کاربرد، ضوابط بارگذاری هر یک از این ابنیه، منطبق بر آیین‌نامهٔ تدوین‌شده برای کاربرد مزبور، باید علاوه بر ضوابط کلّی این آیین‌نامه ارضا گردند.

۲-۴-۱ – دسته‌بندی

در این آیین‌نامه کنش‌ها و آثار تابع شرایط محیطی به شرح زیر طبقه‌بندی می‌گردند:

۲-۴-۱-۱

براساس ماهیّت اعمال بار و پاسخ سازه:

- کنش‌های استاتیکی،
- کنش‌های دینامیکی.

۲-۱-۴-۲

بر اساس منشأ اثر بار:

- کنش‌های مستقیم،
- کنش‌های غیرمستقیم.

به عنوان مثال، اعمال نیرو بر سازه حالت اعمال مستقیم کنش، ولی اعمال تغییرشکل از پیش تعیین‌شده، شتاب تکیه‌گاهی، آثار ناشی از تغییرات دما، ناکاملی‌ها، رطوبت، نشست غیرمتجانس شالوده‌ها در زمره حالات اعمال غیرمستقیم این کنش‌ها به شمار می‌روند.

۲-۱-۴-۳

بر اساس تغییرات فضایی موقعیت اثر کنش‌ها:

- کنش‌های ثابت،
- کنش‌های متحرک.

بارهای مرده و بارهای تجهیزات ثابت از جملهٔ کنش‌های ثابت و بارهای جراثقال و قطار از جمله کنش‌های متحرک به‌شمار می‌روند. در بسیاری از حالت‌ها، ممکن است به توان آثار دینامیکی کنش‌ها را با کنش‌های شبه استاتیکی به نحوی جایگزین نمود که به آثار معادل رفتار واقعی به اندازهٔ کافی نزدیک شده باشند.

۲-۱-۴-۴

براساس وابستگی و تغییرات نسبت به زمان:

- کنش‌های دایمی مانند وزن سازه، بار تجهیزات ثابت، روکاری و کنش‌های غیرمستقیم ناشی از انقباض یا نشست نامتجانس،
- کنش‌های متغیر مانند سربارها (بارهای زنده)، بارهای باد یا برف،
- کنش‌های تصادفی مانند اعمال ضربه ناشی از وسایط نقلیه، بارهای ناشی از انفجار.

برخی از کنش‌ها مانند زلزله و برف را می‌توان در بیش از یک گروه مذکور در فوق (تصادفی یا متغیر) تقسیم‌بندی کرد که این امر به موقعیت محلی و کنش‌های موثر دیگر بستگی دارد.

تفسیر *– برخی از کنش‌ها را می‌توان بسته به میزان تغییراتشان نسبت به زمان، دایمی یا متغیر در نظر گرفت. همچنین برخی از کنش‌های غیرمستقیم ناشی از اعمال تغییر مکان‌هایی مانند نشست تکیه‌گاهی در مواردی دایمی و در مواردی غیردایمی خواهند بود که بستگی به نحوهٔ بروز و شیوهٔ اعمال خواهند داشت.*

پیش‌تنیدگی را می‌توان یک کنش دایمی در نظر گرفت که تحت کنترل نیرو یا تغییرمکان اعمال می‌گردد. با این وجود، در بررسی آثار افت پیش‌تنیدگی و خزش، این کنش تابع زمان خواهد بود.

برخی از کنش‌های غیرمستقیم مانند نشست تکیه‌گاهی اغلب دارای اثر دایمی می‌باشند و برخی دیگر مانند آثار تغییرات دما معمولاً به صورت متغیر بررسی می‌گردند.

هر کنش از طریق مدلی مناسب و واقع‌گرایانه شبیه‌سازی می‌شود. مدل کنش‌های مؤثر بر سازه‌ها معمولاً به صورت کمیّت‌های برداری، دارای بزرگا و جهت‌برداری ثابت یا متغیر، مستقل یا وابسته به زمان تعریف می‌گردد.

۲-۴-۲ - آثار ناشی از خستگی

مدل‌سازی به منظور بررسی آثار ناشی از خستگی بر اساس معرفت زمان، توصیه‌های طراحی و در صورت فقدان آن براساس پژوهش و آزمایش، به منظور تعیین طیف‌های طرح، صورت خواهد گرفت. در ارزیابی این آثار باید کنش‌های محیطی، نوع مصالح، نحوهٔ اعمال بار، ویژگی‌های هندسی و نوع رفتار (براساس مکانیک شکست الاستیک خطی یا مکانیک شکست الاستوپلاستیک) و پارامترهایی مانند حیطه تغییرات تنش، تنش متوسط، نسبت تنشی منظور گردند.

۲-۴-۳ – کنش‌های دینامیکی

مدل‌های کنش‌های دینامیکی شامل آثار اعمال شتاب خواهند بود که به صورت مستقیم با اعمال دینامیکی یا به صورت غیرمستقیم از طریق اعمال ضرایب بزرگنمایی بر بارهای استاتیکی مشخصه ملحوظ می‌گردند. در حالاتی که کنش‌های دینامیکی منجر به ایجاد شتاب قابل ملاحظهٔ سازه فضاکار شوند، تحلیل دینامیکیِ سیستم الزامی است.

۲-۴-۴- کنش‌های وابسته به ویژگی‌های ژئوتکنیکی

این کنش‌ها براساس داده‌های حاصل از مطالعات مکانیک و دینامیک خاک و مشخصه‌های دیگر ژئوتکنیکی ساختگاه تخمین‌زده می‌شوند.

۲-۴-۵- آثار محیطی

آثار محیطی مؤثر بر پایایی سازه را باید در انتخاب مشخصات فنی مصالح و طراحی مفهومی و تفصیلی و شیوهٔ ساخت و حفاظت و نگهداری مورد توجه قرار داد. در حالاتی که این کنش‌ها قابل کمّی‌شدن باشند، لازم است به بررسی کمّی این آثار پرداخت.

۲-۴-۶- آتش‌سوزی

طراحی در مقابل آثار آتش‌سوزی باید براساس وضعیت و شرایط محتمل آتش‌سوزی به عمل آید.

۲-۴-۷- مقادیر مشخصه کنش‌ها

۲-۴-۷-۱

مقدار مشخصهٔ هر کنش معرف و شاخص اصلی آن کنش به شمار می‌رود.

۲-۷-۴-۲

مقادیر مشخصهٔ کنش‌ها در بخش‌های مربوط این آیین‌نامه در مورد کنش‌های متغیر به روش‌های زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- کرانهٔ بالایی با این هدف که در طول بهره‌برداری احتمال تجاوز از آن به میزان اندکی محدود گردد.
- کرانهٔ پایینی با در نظرگرفتن میزان احتمال وقوع مشخص و قابل حصولی در یک بازهٔ معلوم زمانی،
- مقدار اسمی در حالاتی که توزیع احتمالی متقنی در دست نباشد.

۳-۷-۴-۲

مقدار مشخصه یک کنش دایمی باید به ترتیب زیر تعیین شود:

- اگر تغییرات مقادیر کنش دایمی کوچک باشد، یک مقدار ثابت را می‌توان به کار برد.
- اگر تغییرات در مقدار کنش دایمی کوچک نباشد، دو مقدار را باید به کار گرفت: یک مقدار کرانهٔ بالایی و یک مقدار کرانهٔ پایینی،
- بار مردهٔ سازه را می‌توان با مقدار مشخصه معینی که بر اساس ابعاد اسمی و جرم ویژهٔ متوسط به دست می‌آید، محاسبه نمود.

۴- ۷-۴-۲

مقادیر مشخصه کنش‌های وابسته به شرایط اقلیمی و ساختگاه در حالات طراحی مربوط، باید بر مبنای احتمال تجاوز مشخصِ بخش تابع زمانِ کنش در دورهٔ زمانی مشخص و در ارتباط با عمر مفید و دورهٔ بازگشت مورد نظر تعیین گردند. با توجه به شرایط طراحی و ماهیت کنش‌های مؤثر، جزییات امر در فصل‌های سوم و چهارم ارایه خواهد گردید.

۵- ۷-۴-۲

در مورد کنش‌های تصادفی، مقادیر مشخصه با توجه به نوع و ماهیت پروژه تعیین می‌گردند.

۶- ۷-۴-۲

در مورد آثار ناشی از زلزله، در این آیین‌نامه بر اساس معیارهای ارزیابی مبتنی بر عملکرد، بررسی‌های لازم برای دو سطح ایمنی و بهره‌برداری و با ترازهای عملکردی تعریف‌شده از نظر بهره‌برداری و میزان خسارت بسته به میزان اهمیت سازه (سازه‌های حیاتی، مهم، متعارف و ...) صورت می‌گیرد. مشخصه‌های زلزله در سطح بهره‌برداری و در سطح ایمنی متناسب با عمر مفید سازه، دورهٔ بازگشت و میزان احتمال تجاوز مشخصی از آن در عمر مفید سازه، تعیین می‌گردند.

۷- ۷-۴-۲

در تمامی مواردی که آثار ناشی از کنش‌ها به صورت چند مؤلفه‌ای تأثیر می‌نمایند، مقادیر مشخصه شامل مجموعه‌ای از مقادیر خواهند بود که با ملحوظداشتن اثر همزمانی کنش‌های چندمؤلفه‌ای در نظر گرفته می‌شوند.

۸- ۷-۴-۲

مقادیر مشخصه یا مقادیر اسمی انواع بارهای مؤثر بر سازه‌های فضاکار در فصل چهارم و پیوست ششم به تفصیل ارایه شده‌اند.

۲-۵- مقاومت لازم و ضرایب بار

۱-۵-۲

مقاومت لازم سازه و اجزای آن باید براساس ترکیب بحرانی بارهای ضریب‌دار ذیربط برای حالات حدی نهایی و بهره‌برداری تعیین گردند. ضرایب پاره‌ای بار، در این آیین‌نامه بر دیدگاه‌های شایدی (احتمال‌اندیشانه) مبتنی بوده و در فصل چهارم ارایه خواهند گردید.

۲-۵-۲

در صورتی که اثرهای ناشی از بارگذاری حاصل از بارهای اسمی نوع i را با Q_i نشان دهیم، ضرایب بار مربوط با γ_i نشان داده می‌شود. بنابراین مقاومت لازم سازه عبارت خواهد بود از:

$$\Sigma \gamma_i \, Q_i$$

که از مدل‌سازی و تحلیل سازه تحت تأثیر بارهای اسمی به دست می‌آید. در مسایل خطی، نتایج تحلیل تحت تأثیر کنش i ام را می‌توان مستقلاً محاسبه و با نتایج تحلیل تحت تأثیر کنش‌های دیگر جمع کرد. در مسایل غیرخطی، منظور از علامت Σ فوق‌الذکر، تأکیدی بر اعمال توأم و مبتنی بر ترکیب محتمل کنش‌های قابل اعمال به‌طور همزمان خواهد بود.

۳-۵-۲

در مورد کنش‌های متغیر بسته به نوع و ماهیت کنش و حالت حدی مورد نظر، ضرایب بار به شرح زیر به جای γ_i به کار خواهند رفت.

- γ_{0i} به عنوان ضریب بار ترکیبی در بررسی حالت‌های حدی نهایی و حالات حدی بهره‌برداری برگشت‌ناپذیر.
- γ_{1i} به عنوان ضریب بار تناوبی در بررسی حالت‌های حدی نهایی تحت تأثیر کنش‌های تصادفی و حالات حدی بهره‌برداری برگشت‌ناپذیر ناشی از بارهای متناوب.
- γ_{2i} به عنوان ضریب بار شبه دایمی برای بررسی حالات حدی نهایی تحت تأثیر کنش‌های تصادفی و همچنین حالات حدی بهره‌برداری برگشت‌پذیر، آنگاه که نسبت دورهٔ زمان تجاوز مقدار بار به دورهٔ زمانی مبنا از ۵۰٪ تجاوز نماید.

مقادیر کمیت‌های فوق در فصل چهارم و پیوست ششم این آیین‌نامه ارایه شده‌است.

۲-۶- خواص مصالح

۲-۶-۱

خواص مصالح باید به صورت مقادیر مشخصه ارایه گردند.

۲-۶-۲

هرگاه بررسی حالت حدّی نشانگر حساسیت نسبت به تغییرات مشخصه‌های مصالح باشد، لازم است کنترل‌ها براساس مقادیر مشخصهٔ کرانهٔ بالایی و همچنین کرانهٔ پایینی به عمل آید.

۲-۶-۳

مشخصات مکانیکی و متالورژیکی مصالح باید براساس آزمایش‌های استاندارد در شرایط مشخص به دست آید. برای تبدیل نتایج آزمایش‌ها به مقادیری که با حاشیه اطمینان مورد نظر معرف رفتار مصالح سازه یا خاک باشند، لازم است ضرایب تبدیل واقع‌گرایانه‌ای اعمال نمود.

۲-۶-۴

کاهش مقاومت مصالح در اثر خستگی ناشی از اعمال بارهای تکرارشونده، باید از طریق تحلیل، آزمایش یا براساس توصیه‌های آیین‌نامه‌های معتبر ذیربط مصالح در نظر گرفته شوند.

۲-۶-۵

پارامترهای مشخصه سختی (مانند مدول الاستیسیته، ضرایب خزش) و ضرایب انبساط حرارتی و ... معمولاً با مقادیر متوسط بیان می‌گردند؛ مگر آنکه مقادیر کرانه بالایی و پایینی به دلایلی ضرورت بررسی یابند. در مواردی که پارامترها تابع زمان بارگذاری باشند، باید مقادیر متفاوتی را که متناسب با دورهٔ بارگذاری باشد، اختیار نمود.

۲-۶-۶

مقادیر مشخصه و پارامترهای مکانیکی مصالح در فصل چهارم این آیین‌نامه ارایه شده‌است. براساس استاندارد مورد استفاده باید از تطابق مصالح با مشخصه‌های مزبور، اطمینان حاصل گردد.

۲-۶-۷

هرگاه اطلاعات در مورد توزیع آماری خواص مصالح در اختیار نباشد، مقادیر اسمی به عنوان مقادیر مشخصه به کار گرفته می‌شوند یا مقادیر طراحی مشخصات مصالح مستقیماً از طریق آزمایش تعیین می‌گردند.

۲-۶-۸

هرگاه اعمال ضرایب مشخصات مصالح مورد نظر باشد، لازم‌است از مقادیر محافظه‌کارانه‌ای استفاده نمود، مگر آنکه اطلاعات آماری مکفی برای ارزیابی قابلیت اطمینان مقادیر اختیارشده در دست باشد.

۲-۷- داده‌های هندسی

- داده‌های هندسی با مقادیر مشخصه خود ارایه می‌شوند.
- ابعاد هندسی تعریف‌شده در طرح را می‌توان به عنوان مقادیر مشخصه به کار گرفت.
- هرگاه داده‌های هندسی به میزان مکفی در دست بوده و توزیع آماری داده‌ها با سطح اطمینان قابل قبول در اختیار باشد، مقادیر کمّیّت‌های هندسی متناظر با نقطهٔ تعریف‌شده‌ای از توزیع آماری را می‌توان به کار برد.
- نابه‌جایی‌های تصادفی که باید در طراحی اعضای سازه‌های فضاکار در نظر گرفته شوند، در فصل سوم تعریف گردیده‌اند. این امر با فرض آن است که در ساخت سازه‌های فضاکار باید رواداری‌های اجرایی مطابق بخش سوم این آیین‌نامه رعایت شده باشند.
- رواداری‌های اجرایی در تمامی مواردی که در این آیین‌نامه ذکر نگردیده باشند، باید مطابق مبحث یازدهم مقررات ملی ساختمانی ایران در نظر گرفته شوند.

۲-۸ - تحلیل

شیوهٔ تحلیل سازه باید متناسب با ویژگی‌های هندسی و مصالح سازهٔ فضاکار و خصوصیات بارها و کنش‌های مؤثر و بر اساس فرضیات واقع‌گرایانه و قابل دفاع مهندسی سازه و با بهره‌گیری از مدل‌های ریاضی گویای خواص سازه و شرایط مرزی اختیار گردد؛ به گونه‌ای که رفتار سازه به منظور طراحی از طریق مدل ریاضی با دقت مورد نظر و هماهنگ با شرایط طراحی مربوط و با توجه به حالات حدی تحت بررسی، قابل پیش‌بینی باشد. بر اساس این، نوع، روش و ابزار تحلیل متناسب با شرایط واقعی و معیارهای طراحی اختیار خواهند شد.

۲-۸-۱- اصول مدل‌سازی

۲-۸-۱-۱

در فرایند مدل‌سازی مجموعه سازه، زیرمجموعه‌ها (مدول‌ها) و اعضا و اجزای سازه (اتصالات و پیوندها)، تکیه‌گاه‌ها و تغییرمکان‌های از پیش‌تعیین‌شده (شرایط مرزی ذاتی)، بارهای وارده و کنش‌های مؤثر (شرایط مرزی طبیعی)، مشخصه‌های مصالح و آثار اجزای غیرسازه‌ای (به طور مستقیم یا غیرمستقیم) باید به نحو مناسبی که اهداف تحلیل را برآورده سازد، مدل‌سازی شوند. روش‌های مدل‌سازی، متناسب با دقت مورد نظر می‌توانند از شیوه‌های ساده‌سازی‌شده تا روش‌های دقیق‌تر را در برگیرند.

۲-۸-۱-۲

محاسبات سازه باید براساس مدل‌های واقع‌گرایانه‌ای از سازه صورت گیرد که اثر متغیرهای ذیربط در آن در نظر گرفته شده باشد.

۳-۱-۸-۲

مدل‌های سازه باید به نحوی اختیار گردند که برای تخمین رفتار سازه با میزان دقت قابل‌پذیرش، معتبر باشند. مدل‌های سازه همچنین باید در هماهنگی با حالت حدی مورد بررسی اختیار گردند.

۴-۱-۸-۲

مدل‌های سازه باید بر مبنای مفاهیم نظری و عملی تأییدشدهٔ مهندسی تهیه گردند. در موارد لازم باید از طریق آزمایش قابلیت مدل در ارایهٔ رفتار نزدیک به واقعیت سازه ارزیابی و تأیید گردد.

۲-۸-۲ - تحلیل استاتیکی

درصورتی‌که آثار ناشی از کنش‌های مؤثر بر سازه (پاسخ سازه) مستقل از زمان باشد یا شتاب ایجادشده در سازه بالنّسبه ناچیز باشد، تحلیل سازه به روش استاتیکی کفایت خواهد نمود.

۱-۲-۸-۲

تحلیل استاتیکی بسته به شرایط، نوع سازه، معیارهای طراحی، مشخصه‌های مصالح و ویژگی‌های هندسی به صورت خطی یا غیرخطی انجام می‌گیرد. در تحلیل غیرخطی، رفتار غیرخطی هندسی، رفتار غیرخطی مصالح یا حالت ترکیبی این دو رفتار متناسب با نوع سازه و رفتار مورد انتظار و میزان حسّاسیّت به نوع تحلیل ملحوظ خواهد شد.

۲-۲-۸-۲

مدل‌سازی برای تحلیل سازه تحت تأثیر کنش‌های استاتیکی معمولاً براساس انتخاب رابطهٔ مناسب نیرو و تغییرمکان صورت می‌گیرد. در این رابطه باید مدل‌سازی به‌منظور در برگرفتن اثر رفتار اتصالات و همچنین آثار اندرکنشی بین سازه، شالوده‌ها و خاک صورت گیرد.

۳-۲-۸-۲

آثار جابه‌جایی‌ها و تغییرمکان‌ها در صورتی‌که منجر به افزایش متزاید و تشدید اثر کنش‌های وارده گردد، باید در بررسی‌های مربوط به حالات حدی (شامل تعادل استاتیکی) ملحوظ گردد.

۴-۲-۸-۲

تحلیل سازه برای حالات حدی بهره‌برداری و همچنین به منظور بررسی آثار ناشی از خستگی پرتواتر می‌تواند در چارچوب رژیم الاستیک خطی صورت گیرد.

۵-۲-۸-۲

کنش‌های غیرمستقیم را می‌توان به شرح زیر در تحلیل در نظر گرفت:

- در تحلیل الاستیک خطی، به طور صریح با اعمال تغییرشکل‌های مربوط یا به صورت نیروهای معادل.
- در تحلیل الاستیک غیرخطی، به طور صریح به صورت اعمال تغییرشکل‌های مربوط.

۲-۸-۳ - تحلیل دینامیکی

در صورتی‌که آثار ناشی از کنش‌های مؤثر (پاسخ سازه) تابع زمان بوده و زمان به عنوان متغیر کلیدی در تعیین پاسخ سازه ایفای نقش نماید و شتاب ایجادشده در سازه قابل ملاحظه باشد، باید تحلیل سازه به روش دینامیکی انجام شود؛ مگر در مواردی‌که براساس ملزومات حداقل مندرج در این آیین‌نامه، بهره‌گیری از روش‌های تحلیل استاتیکی معادل مجاز شناخته شده باشد.

۱-۳-۸-۲

تحلیل دینامیکی به روش‌های طیفی و همچنین تاریخچهٔ زمانی در حوزهٔ زمان یا در محدودهٔ بسامدی صورت می‌پذیرد. در این حالت نیز بسته به جمیع شرایط، معیارهای طراحی و اهداف پروژه، تحلیل باید به گونه‌ای مناسب در رژیم خطی یا غیرخطی (از نظر هندسی، رفتار مصالح یا ترکیبی) انجام گیرد.

۲-۳-۸-۲

در مدل‌سازی به منظور تحلیل آثار کنش‌های دینامیکی، باید مشخصه‌های تمامی اعضای سازه‌ای و اجرام، مشخصه‌های مقاومتی، خواص سختی و میرایی آنها همراه با آثار اجزای غیرسازه‌ای توأم با مشخصات ذیربط آنها در نظر گرفته شوند.

۳-۳-۸-۲

در مواردی که اعمال بارهای دینامیکی به صورت معادل استاتیکی قابل‌پذیرش باشد، اعمال بارهای بخش دینامیکی از طریق شمول در مجموعهٔ بارهای استاتیکی یا با منظورداشتن ضریب بزرگنمایی دینامیکی معادل که بر بارهای استاتیکی اعمال خواهد گردید، در نظر گرفته می‌شوند.

۴-۳-۸-۲

برای در نظرگرفتن اثر اندرکنش خاک- سازه، اثر خاک را می‌توان به صور قابل قبولی برحسب نوع سازهٔ فضاکار مدل‌سازی کرد. معمولاً آثار اندرکنشی مزبور با بهره‌گیری از سیستم مناسب فنر- میراگر ویسکوز، یا با استفاده از روش‌های مدل‌سازی خاک با اجزای محدود یا روش اجزای مرزی و نظایر آن مورد بررسی قرار داده می‌شود. در این

بررسی حایز اهمیت است که پارامترها و کمیّت‌های مربوط به خواص مکانیکی و دینامیکی خاک براساس اطلاعات متقن و به طور واقع‌گرایانه‌ای در مدل اعمال گردند.

۵-۳-۸-۲

به منظور تحلیل تحت تأثیر بار زلزله، تحلیل طیفی با فرض رفتار خطی مصالح و هندسی سیستم، در مورد سازه‌های فضاکاری که دارای نظم و تقارن از نظر هندسی، سختی و توزیع جرم باشند، کافی تلقّی می‌شود. در مورد دامنهٔ کاربرد روش‌های تحلیل در فصل پنجم به تفصیل معیارهای لازم ارایه شده است.

با توجه به ویژگی‌های اکثر سازه‌های فضاکار مشمول این آیین‌نامه، معمولاً مود اساسی به تنهایی برای تحلیل کفایت نمی‌نماید و لذا به طور کلی تحلیل تحت تأثیر بارهای استاتیکی معادل دارای دقت کافی نخواهد بود، مگر در مورد سازه‌های منظمی که مود اساسی در آنها مشخصاً غالب‌بوده و از نظر میزان مشارکت مودی کافی تلقی شود.

۶-۳-۸-۲

آثار کنش‌های دینامیکی را همچنین می‌توان در موارد ذیربط، از طریق تحلیل تاریخچه زمانی در حوزهٔ زمان و یا در دامنهٔ بسامدی تعیین نمود و پاسخ سازه را به روش‌های معتبر تحلیل دینامیکی سازه‌ها به دست آورد.

۷-۳-۸-۲

ملزومات بهره‌برداری را باید از نظر بزرگای دامنه یا حد بسامد قابل‌پذیرش برای ارتعاشات ناشی از اعمال کنش‌های دینامیکی مورد کنترل قرار داد. رهنمودهایی در مورد ارزیابی به منظور عدم تجاوز از حدود قابل‌پذیرش برای سازه‌های فضاکار از انواع گوناگون در فصل سوم ارایه گردیده است.

۲-۸-۴- تحلیل پایداری

پایداری مجموعهٔ سازه فضاکار و همچنین اعضا و اجزای تشکیل‌دهندهٔ آن باید با سطح اطمینان مکفی تأمین گردد. به منظور ارضای معیارهای حالات حدی نهایی مرتبط با پایداری، تحلیل مجموعهٔ سازه از دیدگاه پایداری صورت می‌گیرد. در چنین تحلیلی باید آثار ناشی از اندرکنش بارها و تغییرمکان سازه به طور توأم در نظر گرفته شود. در تحلیل پایداری باید مودهای متفاوتی از قبیل کمانش کلّی و موضعی عضو، ناپایداری گرهی، ناپایداری‌های کلی و موضعی مورد بررسی قرار داده شوند.

بسته به نوع کنش‌های مؤثر و گونهٔ ناپایداری و نحوهٔ گسترش آن، تحلیل پایداری می‌تواند به روش استاتیکی یا دینامیکی صورت گیرد.

۲-۸-۵- تحلیل آثار ناشی از آتش‌سوزی

۲-۸-۵-۱

تحلیل به منظور طراحی در مقابل آثار آتش‌سوزی باید شامل مدل‌سازی آثار ناشی از آتش‌سوزی در شرایط و مواضع محتمل باشد. در مدل‌سازی به این منظور باید آثار تابع دمای مصالح و سازه و رفتار مکانیکی سازه در دمای زیاد براساس استانداردهای معتبر و ملزومات مندرج در فصل سوم این آیین‌نامه پیش‌بینی‌شده باشد.

۲-۸-۵-۲

عملکرد سازهٔ در معرض آتش‌سوزی باید از طریق تحلیل کلی مجموعهٔ سازه، تحلیل زیر مجموعه‌های سازه و عناصر آن و با توجه به داده‌های موجود در منابع معتبر در این زمینه و یا نتایج آزمایش مورد بررسی قرار داده شود و کفایت سازه برای عملکرد به ثبوت رسد.

۲-۸-۵-۳

مدل‌سازی حرارتی می‌تواند بسته به شرایط با فرض دمای یکسان و یا متغیر در مقطع و در طول اعضا انجام شود.

۲-۸-۵-۴

تحلیل باید برای مطالعهٔ رفتار اعضای منفرد و همچنین با در نظرگرفتن اثر اندرکنش اعضا و اجزای در معرض آتش‌سوزی و مجموعهٔ سازه انجام گیرد.

۲-۸-۵-۵

مدل‌سازی و تحلیل رفتار مکانیکی اعضای سازه‌ای در دمای زیاد باید به نحوی صورت گیرد که عملکرد غیرخطی سازه فضاکار در معرض آتش‌سوزی قابل ارایه و بررسی باشد.

۲-۹ - مقاومت در مقابل گسیختگی پیش‌رونده

مجموعه سازه باید برای حالت حذف اعضا و گره‌ها به شرح زیر کنترل گردد تا اطمینان حاصل شود که گسیختگی پیشرونده در اثر عدم عملکرد یا حذف این عناصر اتفاق نخواهد افتاد:

الف) گسیختگی یا شکست هر عضو کششی،

ب) شکست پیچ شامل شکست برشی در محل رزوه پیچ تحت تأثیر کشش،

پ) کمانش هر عضو فشاری،

ت) حذف هر گره دلخواه و مجموعهٔ اعضای منتهی به آن.

در این حالت ضرایب پاره‌ای بار و ضرایب پاره‌ای مقاومت مطابق فصل چهارم اختیار می‌گردند.

۲-۱۰- مبانی شایدی (احتمال‌اندیشانه) طراحی

۲-۱۰-۱- مفاهیم پایه

۲-۱-۱۰-۱

دیدگاه کلی در این آیین‌نامه از طریق فرمول (۲-۱) تبیین می‌شود:

$$\sum \gamma_i Q_i \le \phi R_n \qquad (۲-۱)$$

که در آن $\sum \gamma_i Q_i$ در (۲-۵) تعریف شده است و بقیه کمیّت‌ها به شرح زیر تعریف می‌شوند:

R_n مقاومت اسمی

ϕ ضریب مقاومت مرتبط با R_n

ϕR_n مقاومت طراحی

۲-۱-۱۰-۲

سمت چپِ نامعادلهٔ (۲-۱) مقاومت مورد نیاز می‌باشد که براساس مفروضات بارگذاری، مدل‌سازی واقع‌گرایانه و روش تحلیلی مبتنی بر مبانی نظری قابل دفاع تعیین‌شده است. سمتِ راستِ نامعادله، ظرفیت حدی عضو یا جزء سازه‌ای را ارایه می‌دهد. به عبارت دیگر، آثار ناشی از بارهای افزایش یافته از طریق اعمال ضرایب بار با مقاومت (طراحی) عضو سازه، که با ضریب ϕ کاهش یافته است، مقایسه می‌گردد و ارضای نامعادلهٔ (۲-۱) به منزلهٔ اقناع معیار پذیرش تلقی خواهد شد.

۲-۱-۱۰-۳

در این آیین‌نامه فرض بر آن است که آثار حاصل از کنش‌ها و همچنین مقاومت اعضا و اجزای سازه فضاکار متغیرهای تصادفی می‌باشند که با توزیع نرمال (زنگدیس) قابل ارایه خواهند بود.

۲-۱-۱۰-۴

فلسفه طراحی به روش ضرایب پاره‌ای بار و مقاومت مبتنی بر آن است که تابع توزیع مقاومت R را از تابع توزیع آثار ناشی از اعمال کنش‌های Q به نحوی دور کنند که ناحیه‌ای که در آن آثار ناشی از کنش‌ها از مقاومت افزون‌تر گردد، به میزان قابل‌پذیرشی کوچک باشد.

۵-۱-۱۰-۲

در صورتی‌که $\sigma_{(R-Q)}$ انحراف معیار تابع توزیع $(R - Q)$ باشد:

$$\sigma_{(R-Q)} = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2} \qquad (۲-۲)$$

که در آن σ_Rو σ_Q به ترتیب عبارت‌اند از مقادیر انحراف معیار متناظر با توابع توزیع R و Q.

۶-۱-۱۰-۲

شاخص قابلیت اطمینان به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = \frac{R_m - Q_m}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \qquad (۲-۳)$$

که در آن R_m , Q_m مقادیر متوسط R و Q می‌باشند.

۷-۱-۱۰-۲

در هر دو موردِ آثار ناشی از کنش‌ها و همچنین مقاومت، علاوه بر مقادیر متوسط، مقادیری را که در مورد مقاومت کمتر از R_m و در مورد آثار ناشی از کنش‌ها، بیشتر از Q_m می‌باشند، به ترتیب با R_n و Q_n نشان می‌دهند که عبارتند از مقادیر اسمی کمیت‌های مزبور. مقادیر اخیرالذکر به عنوان مقادیر آثار ناشی از بارها و مقاومت طراحی در محاسبات منظور می‌گردند. در این حالت با تعریف λ به صورت:

$$\lambda = \frac{R_m}{R_n} \qquad (۲-۴)$$

و حل رابطه (۲-۳) برای R_m:

$$R_m = Q_m + \beta\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2} = \lambda R_n \qquad (۲-۵)$$

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i \;\Rightarrow\; R_n \geq \frac{1}{\phi}\sum \gamma_i Q_i \qquad (۲-۶)$$

$$Q_m + \beta\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2} \geq \frac{\lambda}{\phi}\sum \gamma_i Q_i \qquad (۲-۷)$$

لذا ضریب مقاومت باید نامعادله (۲-۸) را ارضا نماید:

$$\phi \geq \frac{\lambda \sum \gamma_i Q_i}{Q_m + \beta\sqrt{\sigma_R^{۲} + \sigma_Q^{۲}}} \qquad (۲-۸)$$

۸-۱-۱۰-۲

ضرایب پاره‌ای بار برای انواع کنش‌ها و ترکیبات کنش‌ها و همچنین ضرایب پاره‌ای مقاومت برای انواع اعضا و تلاش‌ها در فصل چهارم ارایه گردیده‌اند.

۹-۱-۱۰-۲

با توجه به ویژگی‌های سازه فضاکار از نظر شکل‌پذیری، درجهٔ نامعینی و میزان اهمیت، دیدگاه کلی این آیین‌نامه به نحو زیر تدقیق می‌گردد:

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_{in} \le \phi R_n = R_R \qquad (۹-۲)$$

که در آن

$\eta_i = \eta_D \cdot \eta_R \cdot \eta_I \ge ۰.۹۵$ برای بارهایی که در مورد آنها حداکثر مقدار γ_i ذیربط خواهد بود.

$\eta_i = \frac{۱}{\eta_D \cdot \eta_R \cdot \eta_I} \le ۱.۰$ برای بارهایی که در مورد آنها حداقل مقدار γ_i مصداق خواهد داشت.

Q_{in} عبارت است از مقدار اسمی اثر ناشی از کنش i

R_R مقاومت طراحی (مقاومت با اعمال ضریب کاهش)

η_D، η_R و η_I به ترتیب عبارت‌اند از ضرایب مرتبط با شکل‌پذیری، درجهٔ نامعینی و میزان اهمیت سازه.

مفاهیم طراحی مبتنی بر حالات حدی در چارچوب مبانی فلسفی ارایه‌شده در این فصل، در فصل چهارم و پیوست ششم این آیین‌نامه با جزییات و با دیدگاه تجزیه ضرایب پاره‌ای کنش‌ها و مقاومت گسترش داده شده‌است و رهنمودهای لازم در مورد مقادیر ضرایب پاره‌ای بار و مقاومت برای سازه‌های فضاکار ارایه گردیده است.

۳

عوامل و بارهای مؤثر برسازه

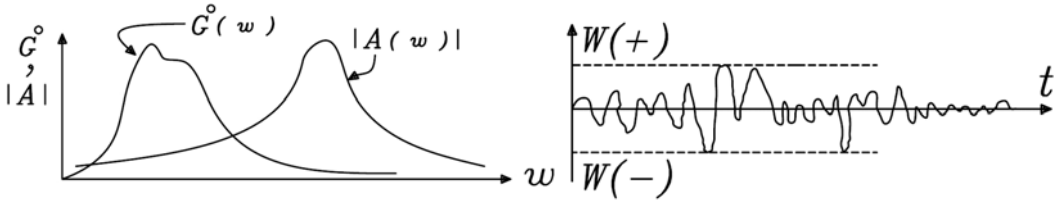
۳-۱-کلیات

۳ ـ۱ـ۱ـ مقدمه

۳ـ۱ـ۱ـ۱ـ بارهای دارای منشأ بیرونی

اصطلاح کنش‌های بیرونی بر بارهایی اطلاق می‌شود که دارای منشأ بیرونی نسبت به سازه می‌باشند که شامل آثار ناشی از تغییرات دما و تغییرمکان‌های اعمالی مانند نشست تکیه‌گاه‌ها نیز می‌گردند.

تفسیر- *به منظور دستیابی به نتایج قابل بهره‌گیری، این کنش‌ها را باید حتی‌المقدور به نحوی مدل‌سازی کرد که تنها آن بخش از خصوصیات کنش‌ها که بر پاسخ سازه اثر گذار می‌باشند، در مدل وارد گردند. بنابراین مدل مورد نظر وابسته به مشخصات کنش‌های بیرونی و همچنین خود سازه می‌باشد و در بسیاری از موارد، تبعیت کامل از تمامی خصوصیات کنش‌های مزبور با در نظر گرفتن تمامی بغرنجی‌های مربوطه، مورد لزوم نمی‌باشد. به عنوان مثال، برای مقاصد طراحی سازه‌های فضاکار مشمول این آیین‌نامه یک نیروی متناوب $W(t)$ با دامنه متغیر مطابق شکل ۳-۱- (الف) با چگالی طیفی $G^0(\omega)$ نشان داده شده در شکل۳-۱- (ب) را در بسیاری از موارد می‌توان تنها با مقادیر حداکثر و حداقل $W(+)$ و $W(-)$ قابل وقوع در عمر قابل انتظار سازه توصیف نمود. از جمله مواردی که روش فوق در آن سودمند نیست، اثر بارگذاری متناوب منجر به خستگی می‌باشد. همچنین نباید بسامدهای مسلط ارتعاش آزاد سازه، در ارتباط با مقادیر حداکثر تابع پاسخ بسامدی سازه، $A(W)$، در محدوده‌ای که در آن $G^0(\omega)$ قابل ملاحظه است، قرار گیرد.*



(ب) (الف)

شکل ۳ـ۱

۳ـ۱ـ۱ـ۲ـ مدل‌های کنش‌های بیرونی

این مدل‌ها حاصل ترکیبی از مشاهدات، دیدگاه‌های مهندسی و تجربه می‌باشند و مدل سازه را با آثار محیطی در بر می‌گیرند. در واقع حالت سازه و خواص مکانیکی آن، در هر زمان تابع تاریخچه و محیط اعمال بار است و در نتیجه نسبت به زمان و مکان تغییر می‌نمایند. ساده‌سازی مدل عمدتاً در ایده‌آل‌سازی بارها ـ به نحوی که ارایه خواهدشد ـ در جهت محدودنمودن تعاریف و توصیفات کلی به گونه‌های ساده و قابل تفکیک می‌باشد، به نحوی که از طریق انتقال اطلاعات حتی‌المقدور ساده شده، نیّات این آیین‌نامه نیز برآورده گردد. پارامترهای نمایش‌دهندهٔ کنش‌های بیرونی را ماهیتاً- نمی‌توان صرفاً با اعداد یا توابع تعیینی ارایه نمود.

در مورد مقادیر اسمی، مثل آنچه در آیین‌نامه‌های بارگذاری ارایه می‌گردند، این مقادیر باید حاصل تحلیل آماری فرایندی تصادفی باشند و بهترین آگاهی از ماهیت بارهایی که محتملاً بر سازه اعمال خواهند شد، تنها از طریق مطالعات مبتنی بر دیدگاه‌های احتمال‌اندیشانه قابل کسب است.

۳ـ۱ـ۱ـ۳ـ کنش‌ها و شرایط مؤثر

اولین دسته از کمّیت‌های مؤثر ناشی از کنش‌هایی می‌باشند که با محیط بارگذاری ظاهری سازه مرتبط بوده و مستقل از مشخصات سازه فرض می‌گردند.

تفسیر *به عنوان مثال، می‌توان موارد زیر را بر شمرد:*

(۱) ـ شدت بار (گسترده یکنواخت) ناشی از نوع اشغال طبقات

(۲) ـ شتاب حداکثر زمین در یک زمین‌لرزه

(۳) ـ سرعت میانگین باد در یک بازهٔ زمانی

به عبارت دیگر، این کنش‌های محیطی مستقل از ویژگی‌های مکانیکی سازه محسوب گردیده و به طور کلی برای تعیین مقادیر اسمی کمّیت‌های نمایشگر این کنش‌ها در یک بازه زمانی، بسته به ویژگی‌های کنش و اهمیت و نوع کاربری سازه، یکی از دو روش زیر را به‌کار می‌گیرند:

(الف) ـ مقادیر میانگین کمّیّت مورد نظر معمولاً با ملحوظداشتن مقادیر انحراف معیار

(ب) ـ مقادیر بیشینهٔ کمّیّت

این مقادیر عمدتاً شامل ابعاد زمان و فضا در مقیاس بزرگ (درشت نمود) می‌گردند. لذا این کنش‌ها در مقیاس عمر سازه و در ابعادی به مراتب بزرگ‌تر و فراگیرتر از ابعاد سازه بیان و بررسی می‌گردند.

دستهٔ دوم کمّیّت‌ها آثار متقابل بار و سازه را توصیف می‌نمایند.

تفسیر *مثال‌هایی از این دست عبارت‌اند از:*

ضریب کاهش بار زنده

طیف پاسخ در یک بارگذاری زلزله

ضریب وزش باد

کمّیّت‌های منعکس‌کنندهٔ آثار اندرکنشی بار و سازه وابسته به پارامترهای ظاهری سازه، از قبیل پریود بنیادین ارتعاش طبیعی سازه یا ابعاد ظاهری بیرونی آن می‌باشند. در این حالت، خصوصیات زمانی و مکانی محیط بارگذاری، در مقیاس مقادیر واقعی کمّیّت‌های ذیربط بیان می‌گردند.

دستهٔ سوم کمّیّت‌ها، پاسخ واقعی سازه را تحت اثر الگویی از بارگذاری اعمالی ملحوظ می‌دارند.

۳ـ۱ـ۱ـ۴ـ بارگذاری و تحلیل

روش تحلیل معمولاً مرتبط با نوع بارگذاری و در عین حال تابع مشخصات مکانیکی تفصیلی سازه خواهد بود. مقیاس فضایی در همان حدودی است که ابعاد و خواص مقاطع اعضای سازه‌ای با آن مقیاس بیان می‌گردند. در شرایطی که آثار دینامیکی بارها یا رفتار وابسته به تغییر شکل سازه مورد مطالعه باشند، از تغییرات زمانی کوتاه مدت و بلند مدت بار نباید صرف‌نظر نمود.

۳ـ ۱ـ۱ـ۵ـ مفاهیم ضرایب ایمنی

نظریهٔ همساز ایمنی سازه‌ها بر مبنای روش‌های احتمال‌اندیشانه پی‌ریزی شده است که شالودهٔ فلسفی مفاهیم حاکم بر این آیین‌نامه خواهد بود، با این وجود، به ویژگی‌های کاربردهای عملی در روش‌های معمول مهندسی نیز بهای لازم داده شده است. در این آیین‌نامه ضرایب ایمنی، به صورت ضرایب بار و مقاومت منظور می‌گردند.

تفسیر *با علم به اینکه تعیین چنین ضرایبی، ماهیتاً تجربی بوده است و از طریق روش‌های در برگیرندهٔ پیچیدگی‌های ریاضی مفاهیم کلی تئوری سازه‌ها و نتایج عددی حاصل از روش‌های نوین رایانه‌ای حاصل نگردیده است، می‌توان انتظار داشت که این ضرایب در مواردی با چنین نتایجی همخوانی اندکی داشته باشند.*

۳ـ۱ـ۲ـ مدل‌ها و کمّیّت‌های نمایشگر آثار اندرکنش بار و سازه

با توجه به مفاهیم مندرج در پیوست ۶ـالف، کمّیّت‌هایی که به صورت کمّیّت‌های ورودی سیستم (کنش‌هـای ورودی) یـا کمّیّت‌های مرتبط با مشخصات سیستم (ویژگی‌های هندسی، هم‌بندی، مشخصات مصالح، شـرایط مــرزی ذاتی و غیره) به طور تفکیک‌پذیر قابل طبقه‌بندی نمی‌باشند، تحت عنوان کمّیّت‌های اندرکنشی بار و سازه ملحوظ می‌گردند.

تفسیر– *بنابراین تا آنجا که بتوان ویژگی‌های اندرکنش را قبل از دانستن جزییات مشخصات سیستم سازه تعریف نمود، تحلیل تفصیلی سازه را می‌توان بدون ملحوظ داشتن منشأ ایجاد بار و گاه با اجتناب از تکرارهای متوالی، به سرانجام رساند. بنابراین محیط بارگذاری ظاهری را گاه می‌توان بدون ملحوظ داشتن ویژگی‌های سازه فضاکار مورد مطالعه قرار داد. در موارد قابل ملاحظه دیگری، این اثر اندرکنش حایز اهمیت ویژه بوده و تابع خواص پاسخ اندرکنشی سازه است و در این حالت باید آثار اندرکنش را در مدل‌سازی و تحلیل منظور نمود. این حالات در شرایطی که در آن آثار اندرکنشی قابل صرفنظر کردن نباشند، در این آیین‌نامه مورد بحث قرار داده شده و شیوهٔ ملحوظ‌نمودن این آثار در فرایند بارگذاری، تحلیل و طراحی ارایه خواهند گردید.*

۳ـ۱ـ۳ـ دسته‌بندی کنش‌ها

تفسیر *به طور کلی، توصیف بارها، شامل مجموعه‌ای از اطلاعات از قبیل نحوه توزیع فضایی و میزان شدت نیروها (بزرگی نیروها)، نرخ تغییرات در مکان یا شدت، نحوهٔ وابستگی به فعالیت‌های انسان یا کاربرد تجهیزات و ماشین‌آلات، محدوده زمانی عملکرد فعال و نظایر آن، می‌گردد. در اغلب موارد، تمامی اطلاعات از این دست ضروری نمی‌باشند. به منظور مشخص‌نمودن میزان دقت و میزان توجه به جزییات، معمولاً تلاش به عمل می‌آید تا طبقه‌بندی مناسبی از کنش‌ها صورت گیرد، که در آن برای هر طبقه، خصوصیات مسلط در مدل تعریف می‌گردد. پس از آن که کنشی در یک یا چند رسته طبقه‌بندی شد، خصوصیات مهم آن در چارچوب ویژگی‌های آن طبقه‌بندی تعیین می‌گردند.*

نمونه‌هایی از دسته‌بندی کنش‌ها

یک نوع ممکن از دسته‌بندی کنش‌ها را می‌توان به صورت زیر ارایه داد:

الف ـ کنش‌های استاتیکی (یا شبه‌استاتیکی): این کنش‌ها بدون ایجاد شتاب قابل ملاحظه به سازه اعمال می‌گردند.

ب ـ کنش‌های دینامیکی: این کنش‌ها باعث اعمال شتاب‌های قابل ملاحظه، در اثر تغییرات قابل اعتنای کنش‌ها نسبت به زمان می‌گردند که قابل مقایسه با پریود بنیادین سازه می‌باشند.

پ ـ کنش‌های دایمی: که در تمام طول عمر مفید سازه، بدون آنکه در بزرگی و شدت آنها تغییر قابل اعتنایی حاصل گردد، به صورت فعال حضور دارند.

ت ـ کنش‌های تابع زمان: این کنش‌ها شدت‌های متغیر و متفاوتی را در لحظات متفاوت خواهند داشت.

ث ـ کنش‌های کوتاه مدت: این کنش‌ها در بازه زمانی بسیار کوتاه‌تر از عمر مفید سازه بر آن اعمال می‌گردند.

ج ـ کنش‌های دراز مدت: این کنش‌ها در حیطهٔ زمانی قابل قیاس با عمر مفید سازه اعمال می‌گردند.

چ ـ کنش‌های استثنایی: این کنش‌ها در ارتباط با وقوع حوادث نادر اعمال می‌گردند.

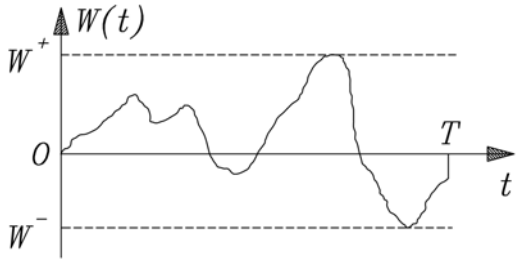
ح ـ کنش‌های ثابت: این کنش‌ها با توزیع فضایی مستقل از زمان اعمال می‌گردند.

خ ـ کنش‌های آزاد: این کنش‌ها دارای توزیع فضایی متغیر می‌باشند.

تفسیر ـ *هر یک از گروه‌های فوق، تلویحاً بر اطلاعاتی دلالت دارند که به منظور تحلیل قابلیت اطمینان ضروری می‌باشند. به عنوان مثال، بار باد وارده بر یک سازه سخت را می‌توان در گروه‌های الف، ت، ث، خ طبقه‌بندی نمود، ولی همان نوع بار باد وقتی بر یک سازه انعطاف‌پذیر اعمال گردد، متعلق به گروه‌های ب، ت، ث و خ خواهد بود زیرا در این حالت، آثار دینامیکی قابل چشم‌پوشی نیستند. در حالت نخست، شدت فشار باد از طریق مقدار حداکثر یا مقدار متوسط در هر حالتِ اعمال بار قابل تعریف است؛ به طوریکه در محاسبات، بزرگ‌ترین مقادیر در تمامی حالات محتمل اعمال باد، ملاک محاسبات خواهد بود. نحوهٔ توزیع بار باد نیز باید مشخص گردد. به عنوان مثال لازم است که پروفیل بار باد مشخص شود. در حالت دوم، بار باد را نمی‌توان فقط با مقدار حداکثر ممکن تعریف نمود، زیرا تغییرات زمانی آن را باید در نظر داشت.*

مجموعه‌ای از اطلاعات در چـارچوب مطالعات احتمال‌انـدیشانه، برای هر گروه از کنش‌های مذکور در فوق حایز اهمیت خواهد بود. در وهله اول، بارهایی را در نظـر می‌گیریم که تنها با یک پارامتـر $W = W(t)$ مشخص می‌گردند. گروه‌های متفاوت کنش‌ها، براساس طبقه‌بندی مذکور در فوق، به شرح زیر قابل توصیف‌اند:

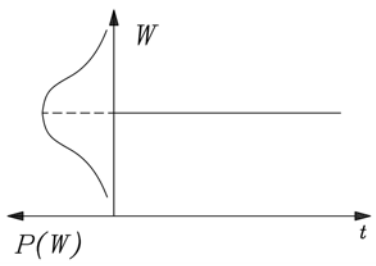
(الف) کنش‌های استاتیکی: در این حالت $W(t)$ یک فرایند تصادفی؛ مانند شکل۳ـ۲ بوده، و به طور کلی، تنها تابع چگالی احتمالی مقادیر حداکثر و حداقل آن در محدوده زمانی $(0, T)$ مورد نظر است. T عبارت است از عمر مفید طراحی سازه (یا به عبارت کامل‌تر، عمر مفیدی که در مرحله طراحی برای سازه در نظر گرفته شده است).



شکل ۳-۲

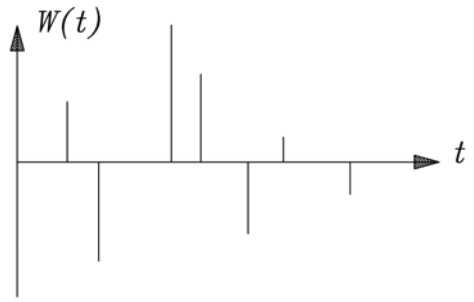
(ب)کنش‌های دینامیکی: $W(t)$ یک فرایند تصادفی می‌باشد. در حالات کلی، توصیف نسبتاً کاملی از فرایند مورد لزوم خواهدبود.

(پ) کنش‌های دایمی: $W(t)$ متغیری تصادفی می‌باشد که به طور کامل از طریق یک تابع چگالی احتمالی $P(W)$ قابل توصیف است (شکل۳ـ۳).



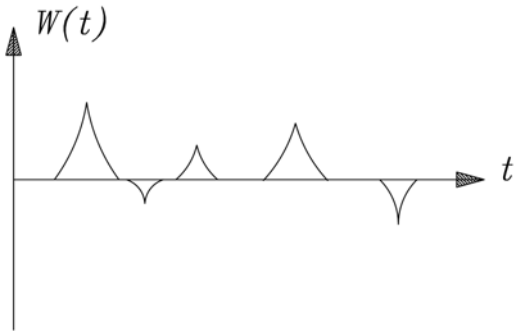
شکل ۳ـ۳

(ت) کنش‌های تابع زمان: اغلب، حتی اگر کنش بیرونی آثار دینامیکی در بر نداشته باشد، توصیف صرف آن از طریق مقادیر حداکثر و حداقل (آنچنان که در مورد کنش‌های استاتیکی ذکر گردید)، کافی نمی‌باشد. به عنوان مثال، ممکن است لازم تشخیص داده شود که احتمال وقوع و اعمال بارهایی متجاوز بر بار معینی به منظور ترکیب با سایر بارها یا انباشتگی خسارات محتمل، مورد مطالعه قرار داده شود. در این حالت نیز توصیف نسبتاً کاملی از فرایند، بسته به نوع مسأله مورد مطالعه، ضروری خواهد بود. در موارد بسیاری، کنش‌های تابع زمان، ماهیتاً فرایندهای منفصل (مانند شکل۳-۴) می‌باشند. در این حالات، معمولاً از طریق فرایند زمان اعمال بار و خواص بار اعمالی توصیف می‌گردند و آثار دراز مدت و کوتاه مدت بارها از یکدیگر تمیز داده می‌شوند.



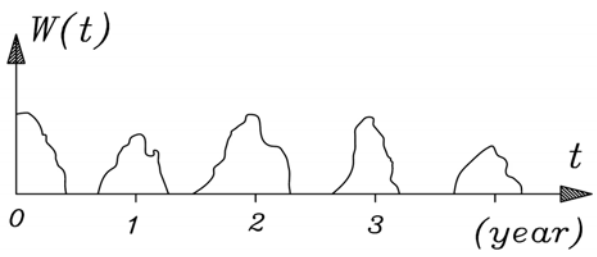
شکل ۳-۴

(ث) کنش‌های کوتاه مدت: $W(t)$ فرایندی منفصل و احتمالاً تکرارشونده است. توصیف فرایند وقوع و اعمال بار باید پارامترهای اصلی بار (از قبیل شدت و طول مدت و نظایر آن) را شامل گردد(شکل ۳-۵).



شکل ۳-۵

(ج) کنش‌های دراز مدت: $W(t)$ یک فرایند پیوسته یا ناپیوسته است که پس از اعمـــال بار، دارای تغییـرات زمانی نسبتاً بطی می‌باشد (به عنوان مثال بار برف در ناحیهٔ خاص، مانند شکل ۳-۶). علاوه بر پارامترهای اصلی همانند کنش‌های کوتاه مدت، اطلاعات مربوط به تغییرات زمانی بار نیز باید مشخص گردد.



شکل ۳-۶

(چ) کنش‌های استثنایی: در موارد کاربرد عملی، اطلاعات مربوط به احتمال وقوع چنین بارهایی مورد نیاز می‌باشد. معمولاً به دلیل عدم در اختیارداشتن اطلاعات کافی، شدت بار از طریق یک مقدار اسمی بیان می‌گردد.

(ح) کنش‌های ثابت: قبل از توصیف شدت بار، در این حالت ممکن است لازم باشد که قوانین احتمالاتی متغیرهای تصادفی معرف موقعیت اعمال بار مورد بررسی قرار داده شوند.

(خ) کنش‌های آزاد: $W(t)$ یک حوزه تصادفی است و توصیف آن در ارتباط با وابستگی به مختصات فضایی، علاوه بر توصیف آن در ارتباط با زمان مورد لزوم می‌باشد.

۳ـ۲ـ بارهای وارده بر سازه فضاکار

۳ـ۲ـ۱ـ بارهای ثقلی

بارهای ثقلی به طور معمول در دو گروه اصلی بارهای مرده (یا دایمی) و بارهای زنده طبقه‌بندی می‌شوند. بارهای برف به لحاظ وابستگی به شرایط جوی اگرچه به طور ذاتی از نوع بارهای ثقلی می‌باشند، در این آیین‌نامه به نحو جداگانه مورد بحث قرارداده شده‌اند. بارهای زنده به طور کلی شامل وزن اثاثیه، انسان‌ها، تجهیزات و نظایر آن می‌گردند. برخلاف سایر بارها مثل بارهای ناشی از زلزله و باد، بارهای زنده را می‌توان تا حدودی تحت کنترل داشت. بارهای زنده فرایندهای تصادفی می‌باشند که تابع متغیرهای معرف زمان و مکانند.

دسته‌بندی بارهای ثقلی

۳ـ۲ـ۱ـ۱ـ بارهای مرده

بارهای مرده تمامی بارهای ثقلی (وزن) سازه فضاکار، اعضا و اجزای سیستم باربر، سازه‌های کف‌ها و سقف‌ها، کف‌سازی، نازک‌کاری، سقف‌ها و کف‌های کاذب، تیغه‌های دایمی، دیوارهای بیرونی و درونی، نماسازی، پوشانه‌ها و تمامی تجهیزات و وسایلی را که در موقعیت ثابت به صورت دایمی استقرار می‌یابند، دربر می‌گیرد. بارهای مرده همواره به صورت مقادیر تصادفی ثابت اعمال می‌گردند. در آیین‌نامه‌های ساختمانی گوناگون معمولاً جداولی که ارایه‌دهندهٔ فهرستی از مصالح مورد استفاده در سازه و همچنین اجزای غیرسازه‌ای متداول است، همراه با وزن مخصوص یا وزن بر واحد سطح مربوطه، در این ارایه می‌گردند. در این زمینه برای مصالح ساختمانی متداول باید به استاندارد ۵۱۹ و مبحث ششم مقررات ملی ساختمانی ایران مراجعه گردد.

۳ـ۲ـ۱ـ۱ـ۱ـ محاسبه مقادیر بارهای مرده

محاسبه وزن مرده در سازه‌های متعارف امر پیچیده‌ای نیست. معذلک با توجه به تغییرات وزن مخصوص مصالح و ابعاد اجزای سازه‌ای، معمولاً تنها مقادیر تقریبی به دست‌آمده، مورد بهره‌برداری قرار داده می‌شوند. همچنین حایز اهمیت خواهد بود که حتی‌المقدور، تمامی اقلام و از جمله پوشانه‌ها و اجزای نگهدارندهٔ آنها و در مورد اعضای دارای مخروطی انتهایی، وزن قطعات انتهایی و در مورد سیستم‌های متشکل از اعضا و پیوندهای فضاکار، وزن اعضا، پیوندها و ادوات اتصال به نحو واقعگرایانه‌ای در محاسبات در نظر گرفته شوند.

۳ـ۲ـ۱ـ۱ـ۲ـ تغییرات بارهای مرده

تمایل زیادی بین مهندسان سازه وجود دارد که بارهای مرده را کاملاً دانسته فرض نمایند. معذلک در عمل، تفاوت‌هایی بین مقادیر محاسباتی و مقادیر اندازه‌گیری‌شده وجود خواهد داشت. لذا به نظر می‌رسد که درک عمیق امر به منظور محاسبه مقادیر نزدیک‌تر به مقادیر واقعی جهت کاهش میزان خطا در احتساب و تخمین بارهای مرده ضروری باشد. به عبارت دیگر، تفاوت بین مقادیر واقعی و مقادیر اسمی بارهای مرده، متغیری تصادفی است.

در طراحی سازه‌های فضاکار که معمولاً به دلیل ویژگی‌های مرتبط با فرم و پیچیدگی‌های هندسی و هم‌بندی، ممکن است حدس اولیهٔ طرح با یک طرح نهایی قابل دفاعی از دیدگاه فنی و اقتصادی فاصلهٔ قابل اعتنایی داشته باشد. لازم است فرایند تکرار در هر مرحله از فرایند تحلیل، کنترل، اصلاح طرح تا نیل به طرح منطقی یا بهینه، با قیود معین، آنچنان دنبال گردد تا در هر مرحله از اصلاح طرح، بارهای مرده نیز متناظر با تغییرات مقاطع و نوع اعضا و ابعاد و نوع پیوندهها و یا تغییر فرم و چگالی طرح تغییرداده شوند و همان گونه که در هر مرحله از این فرایند، خواص سختی طرح اصلاح شده در ماتریس سختی بهنگام‌شده اصلاح و در محاسبات منظور می‌گردد، در هر مرحله از فرایند طراحی و تحلیل مجدد طرح اصلاح شده، ضرورت اصلاح بارگذاری بارهای مرده را نیز نباید از نظر دور داشت. به عبارت دیگر، با توجه به موارد مذکور در فوق و اهمیت بار مرده در طراحی سازه‌های فضاکار پوشانندهٔ دهانه‌های وسیع فاقد ستون‌های میانی، باید توجه داشت که در طرح نهایی، بار مردهٔ متناظر با آن برای تحلیل و طراحی منظور گردیده باشد. در سازه‌های فضاکار شبکه‌ای بار اعضا را می‌توان در طول عضو به طور گسترده (وزن در واحد طول) و بسته به نوع اتصال بار پیوندهها، قطعات انتهایی و ادوات اتصال را به طور متمرکز در گره‌ها اعمال نمود. در مورد گنبدها و چلیک‌هایی که در امتداد نصف‌النهاری فاصلهٔ گره‌های آنان تغییر می‌نماید، در تعیین بارهای متمرکز معادل ناشی از سازه و پوشانه‌ها باید آثار تغییرات فاصله مزبور را در محاسبهٔ نیروهای ناشی از بارهای مرده در نظر گرفت.

تفسیر ـ *همچنین است تعریف نحوهٔ توزیع جرم سازه به صورت اجرام متمرکزشده در گره‌ها که باید با توجه به سهم بار گیر گره‌های شبکهٔ فضاکار، در تحلیل مقادیر و بردارهای مشخصه، تحلیل طیفی و تحلیل دینامکی تاریخچهٔ زمانی سازهٔ فضاکار منظور گردد. در سازه‌های متعارف، یکی از روش‌های مناسب و تقریبی به منظور ملحوظداشتن آثار متغیربودن بارهای مرده آن است که شدت بار نسبتاً کم‌تری را برای آن به طور تعیینی در نظر گرفته و ازدیاد بار متغیر را به صورت بار زنده و با ضرایب پاره‌ای مرتبط ملحوظ دارند.*

وزن سازه معمولاً به دلایل زیر تغییر می‌نماید:

الف ـ *تغییرات درصد رطوبت مصالح به دلیل خشک‌شدن، بارش باران، تعرق، وقوع سیل و تغییرات شیمیایی مصالح سازه و پوشانه‌ها.*

ب ـ *در ارتباط با سازه‌های موجود، تغییرات سازه‌ای مانند افزودن طبقات یا جایگزینی بخشی از سازه یا پوشانه آن با مصالح جدید؛ همچنین تغییرات در کف‌سازی و نازک‌کاری سطوح کف و دیوارها و پوشانه‌ها و افزودن یا برداشتن سقف‌ها و کف‌های کاذب، افزودن تیغه‌ها جهت جداسازی فضاها یا برداشتن تیغه‌های موجود جهت تجمیع فضاها. در مورد چنین تغییراتی باید مطالعات توجیهی و امکان‌سنجی به عمل آید و در صورتی که پاسخ مثبت از مطالعات مزبور حاصل گردد، باید آثار ناشی از اعمال تغییرات در سازهٔ موجود، در حین فرایندهای عملیاتی اجرای تغییرات و در حالت سازهٔ تغییریافته، صرفاً توسط مهندسان مجرب آشنا به مفاهیم طراحی و ساخت و بهسازی سازه‌های فضاکار بررسی و در صورت نیاز به بهسازی سازهٔ موجود قبل از اقدام به اعمال تغییرات مورد نظر، تمامی مطالعات و عملیات اجرایی تحت سیستم کنترل کیفیت کارا صورت گیرد.*

علاوه بر آن، برخی از منابع دیگری که باعث بروز تغییراتی در مقادیر بارهای مرده می‌گردند و لازم است به عنوان کنش‌های کاهش‌دهندهٔ دقت طراحی، ملحوظ گردند، به شرح زیر می‌باشند:

احجام به طور دقیق مشخص نمی‌باشند؛ بلکه تخمین‌زده می‌شوند. به عنوان مثال در مورد سازه‌های فضاکار مختلط با قشر بتنی پوشانه فوقانی در ضخامت این قشر رواداری‌هایی وجود دارد. حال آنکه معمولاً بارها بر اساس ابعاد منظورشده در طراحی، بدون ملحوظ‌داشتن رواداری‌های اجرایی محاسبه می‌گردند. در ارتباط با این امر لازم خواهد بود در مرحله اعمال ضریب بار مناسب، تدابیری اندیشیده شود تا ضرایب بارهای مرده مزبور شامل احتمال تغییر در ابعاد آنها نیز باشند. در حالت عضوی که ابعاد مقطعش کوچک‌تر از مقادیر اسمی اختیارشده در طراحی باشد، این امر معمولاً منجر به کاهش مقاومت عضو خواهد گردید. بخشی از این اشکال با توجه به محاسبه مقادیر بزرگ‌تر بار مرده عضو از مقادیر واقعی، عملاً در طراحی ملحوظ خواهد گردید.

در مورد کارگذاشتن عضوی که ابعاد مقطعش از مقادیر اسمی اختیارشده در طراحی بزرگ‌تر باشد، معمولاً مقاومت بالاتر بوده و این امر در جهت مقابله با تغییر میزان بار مرده در مقایسه با بار مرده‌ای است که در محاسبات به کار رفته است. باید توجه داشت که در سازه‌های فضاکار این امر به هر میزانی که باشد، متناسباً منجر به باز توزیع نیروهای اعضا و نتایج متفاوتی در تلاش‌های اعضا خواهد گردید.

اگر چه معمولاً در طراحی سازه فضاکار مقادیر بار مرده براساس ابعاد اسمی و وزن مخصوص اعضا و اجزا و پوشانه‌ها و سایر کنش‌های مشمول بارهای مرده تعریف می‌گردند، ضرایب بار باید به نحوی اختیار گردند که طی آن آثار رواداری‌ها در ابعاد ـ که خود منجر به تغییرات در مقاومت اعضای و مقاطع خواهد گردید ـ به صورت منطقی در مدل‌سازی بارها ملحوظ شود.

مقادیر وزن مخصوص (یا وزن واحد حجم) مصالح به ویژه پوشانه‌ها و اجزای الحاقی ثابت به دقت مشخص نیستند، بلکه معمولاً تخمین‌زده می‌شوند. روش معمول، استفاده از جداولی است که در آیین‌نامه‌های ذیربط یا از طریق مراجع معتبر ارایه گردیده است. در مرحله طراحی، در مواردی، نقشه های نهایی اجرایی معماری در اختیار طراح نیست و در این حالات، لازم است ابعاد احتمالی اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای را حدس زد و در مراحل بعد، صحت این حدس را مورد بررسی و کنترل قرار داد.

در مواردی برخی از اقلام کار پس از تکمیل طراحی سازه قطعی می‌گردند. مانند مصالح دیوارها و تیغه‌ها و پوشانه‌ها و سایر اجزای غیرسازه‌ای. در صورتی که تغییرات بارها موجب تفاوت قابل ملاحظه در فرضیات بارگذاری طراحی گردند، تجدید نظر در بارگذاری، تحلیل و طراحی مورد لزوم خواهد بود.

تخمین نحوهٔ اعمال بار مرده بر اعضای سازه‌ای نیز تقریبی است. در عین حال، در مورد سازه‌های فضاکار مشمول این آیین‌نامه، فرض دیگری نیز در ارتباط با رفتار سازه اعمال گردیده‌است که بر دیدگاه تفکیک اعضای اصلی از فرعی استوار است و تمایز مشخصی بین اعضای باربر اصلی (مانند شبکهٔ فضاکار و پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های آن) با اعضای باربر فرعی (مانند پوشانه‌ها) که بار مرده خود را به اعضای اصلی منتقل می‌نمایند، قایل است. در این دیدگاه، از اثر اندرکنشی فیمابین اعضای اصلی و فرعی صرفنظر گردیده است. در مواردی که چنین اثر اندرکنشی قابل ملاحظه باشد، طبعاً این فرض صادق نیست.

همچنین فرض احداث سیستم سازه باربر اصلی قبل از اعمال بار اعضای فرعی ـ با توجه به شیوه اجرای سازه‌های فضاکار ـ گاه صدق نمی‌نماید. به خصوص در مورد سازه‌های فضاکار ساخت درجا و سازه‌های فضاکار مختلط شامل پوشانهٔ بتنی در جا یا پیش ساخته این نکته ملموس‌تر است.

در حالتی که بارها و سازه به صورت متزاید مطابق با فرایند ساخت، احداث و اعمال می‌گردند و همزمان با آن سختی سازه افزایش می‌یابد، انتظار می‌رود تنش‌های حاصله در این فرایند، با تنش‌های محاسباتی تفاوت اساسی داشته باشند.

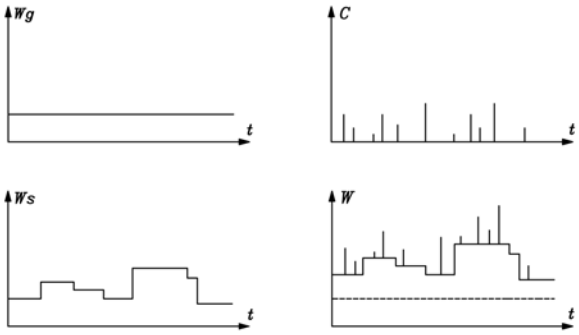
به این ترتیب، انحراف از میزان بارهای واقعی مرده دور از ذهن نبوده و نتیجتاً تخمین مقادیر پاسخ سازه (تنش‌ها و نیروها و لنگرهای مقاطع) نیز دارای انحرافات ناشی از آن خواهند بود.

به عنوان جمع‌بندی در مورد نحوهٔ تخمین بارهای مرده، باید به این نکته توجه نمود که اگرچه بارهای مرده را نمی‌توان به طور دقیق پیش‌بینی کرد، ولی می‌توان به اندازهٔ کافی از دیدگاه نیات طراحی به مقادیر واقعی آن نزدیک شد. در آیین‌نامه‌های بارگذاری سعی گردیده‌است این مسایل به نحوی در ارایه ضرایب بار طراحی ملحوظ گردند. در بارگذاری سازه‌های فضاکار در حال حاضر تمایل طراحان بیشتر حاکی از سمت‌گیری در جهت تعریف طول واقعی اعضا و اعمال بار پیونده‌ها به طور جداگانه می‌باشد.

۳ـ۲ـ۱ـ۲ـ بارهای زنده

بارهای زنده شامل بارهای ثقلی (وزن) ناشی از نحوه بهره‌برداری و اشغال سازه می‌باشند که بر اعضا و اجزای سازه فضاکار اعمال می‌گردند. تجهیزات تأسیساتی الکتریکی و مکانیکی (که ممکن است شامل آثار ضربه نیز باشند)، در زمرهٔ بارهای زنده به شمار می‌روند. تغییرات تصادفی بارهای زنده معمولاً از طریق جمع‌کردن فرایند بارهای زنده تعلیقی و فرایند بارهای زندهٔ گذرای مستقل، مدل‌سازی می‌شوند. فرایند بار زندهٔ تعلیقی نشانگر بارهای زنده‌ای است که در طول مدت اعمال، مقدار تقریباً ثابتی داشته باشند و فرایند بـارهای زنده گذرا، نمایشگر بارهای زندهٔ کوتاه مدت می‌باشد. ترکیب بارهای تعلیقی و گذرا با دیدگاه‌های احتمال‌اندیشانه جهت طراحی مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

تفسیر- *بار ثقلی وارده بر سازه فضاکار را می‌توان به صورت ترکیبی از مؤلفه‌های بارهای تصادفی، ایده‌آل‌سازی نمود (شکل۳-۷).*



شکل ۳-۷

۳ـ۲ـ۱ـ۲ـ۱ـ آثار دینامیکی و ضربه ناشی از بارهای زنده

در اینجا آثار اعمال ضربه و ارتعاشات ناشی از تجهیزات مکانیکی، وسایط نقلیه، ماشین‌آلات، جراثقال‌ها، بالابرها، بادبزن‌ها و دستگاه‌های تهویه، کمپرسـورهـا، مـاشین‌آلات چاپ، دستگاه‌های پرس و تجهیزاتی از این قبیل موردنظـر می‌باشند که در حین بهره‌برداری از آنان، آثار بارهای ثقلی توأم با آثار دینامیکی بر سازه اعمال می‌گردند. لازم به یادآوری است که نیروهای دینامیکی بیرونی مانند نیروهای ناشی از باد یا زلزله در گروه‌بندی‌های دیگر مورد بررسی قرار داده خواهند شد. نحوه ملحوظداشتن این آثار در بند ۳ـ۲ـ۲ـ۳ ارایه گردیده است.

۳ـ۲ـ۱ـ۲ـ۲ـ تخمین بارهای زنده

بارهای زنده، ناشی از فعالیت‌های انسان و نحوه بهره‌برداری از سازه‌ها می‌باشند. این تعریف آنها را از بارهای ناشی از کنش‌های طبیعی متمایز می‌سازد. زیرا بارهای ناشی از کنش‌های طبیعی را می‌توان هماهنگ با قوانین فیزیکی پدیده‌های طبیعی و لذا قابل پیش‌بینی در حیطه یا محدودهٔ خاصی بر مبنای تجارب گذشته، فرض نمود. فعالیت‌های انسانی به این نحو قابل پیش‌بینی نیستند. بنابراین، تجارب قبلی در مورد فعالیت‌های انسانی، صرفاً راهنمایی برای آتیهٔ محتمل به شمار می‌روند و حدی را که می‌توان با اطمینان در مورد بارهای آتی قایل شد، حداکثر آن چیزی است که به طور فیزیکی ممکن به نظر می‌رسد. طبعاً این مقادیر حداکثر بار، از دیدگاه‌های عملی چندان جاذبه ندارند. بارهای زنده به نحوی که در آیین‌نامه‌های ساختمانی فعلی مشخص گردیده‌اند، نتایج قضاوت‌های مبتنی بر تجارب کمّی نشده و یا بر اساس مطالعه تاریخچه اعمال بارها بوده‌اند.

از آنجا که هر سازه فضاکار برای نوع بهره‌برداری خاصی طراحی می‌شود، روش متداول آن است که بارگذاری را براساس نوع اشغال (و بهره‌برداری) در نظر گیرند.

در مراحل اولیه، در مواردی ممکن است برای طراح دشوار باشد که تمامی حالات بارگذاری را که در طول عمر مفید سازه قابل اعمال می‌باشند، پیش‌بینی نماید. بارگذاری بارهای زنده معمولاً شامل دو نوع از بار می‌باشند: (الف) بار گسترده یکنواخت معادل و (ب) بار متمرکز از پیش تعیین‌شده.

(الف) بارهای گسترده یکنواخت

بارهای یکنواخت معادل از پیش‌تعیین‌شده‌ای را به منظور ارایهٔ آثار بار زنده متغیر در سازه به کار می‌برند. مقادیر بارهای یکنواخت از طریق مطالعه و بررسی سازه‌های با بهره‌برداری مشابه و تقریب‌زدن بارهای واقعی تعیین می‌گردند. معمولاً این گونه بارها بر اساس قضاوت‌های محافظه‌کارانه استوار بوده‌اند که منجر به طراحی سازه‌هایی می‌گردند که برای بهره‌برداری مورد نظر، حالات حدی نهایی و بهره‌برداری را ارضا می‌نمایند.

(ب)- بارهای متمرکز

مقادیر بارهای متمرکز شامل بارهای متمرکز محتمل‌الوقوع برای حالات مشخصی، تعیین گردیده‌اند. از جمله برای بام‌ها، پارکینگ‌ها، کف ساختمان‌های اداری، اطاق تجهیزات بالابر، پلکان‌ها، محل‌های استقرار تجهیزات مکانیکی و در مورد پل‌ها به صورت بارهای تیغه‌ای تعریف گردیده‌اند. به طور کلی مقادیر تعیین‌شده، باید مدلل بوده و نقاط اعمال نیز باید به نحوی در نظر گرفته شوند که نواحی بحرانی را دربر گیرند.

با تمایل روز افزون به استفاده از پوشانه‌های غشایی، شیشه‌ای و فلزی در سازه‌های فضاکار، ذکر مقادیر بار متمرکز بدون تعیین نمودن ناحیه اعمال بار، مفید نخواهد بود و لازم است توزیع فضایی بار نیز تعیین گردد.

همچنین در مورد همزمانی یا عدم همزمانی بارهای گسترده و متمرکز، باید مطالعات کافی با توجه به نوع کاربری و ترازهای عملکردی مورد نظر به عمل آید.

۳-۲-۱-۲-۳- مقادیر بارهای زنده

در حالت بارگذاری ثقلی بارهای غیرمتحرک، در نوع به خصوصی از کاربری و بهره‌برداری، نه تنها تغییرات مکانی، بلکه تغییرات زمانی متفاوت خواهند بود. تغییرات زمانی شـــامل تغییرات کوتاه مدت (ناشی از جابه جایی بارهایی که وابسته به نوع بهـره‌برداری می‌باشند) و تغییرات دراز مدت (ناشی از تغییرات در ویژگی‌های کلی بارها) خواهند بود.

تغییرات کوتاه مدت بارگذاری محتمل، قاعدتاً تأثیر چندانی بر توزیع بسامدی بارگذاری نخواهند داشت.

تفسیر ـ *کاربرد تئوری احتمالات منجر به فرمول ساده‌ای برای ارزیابی احتمالات تجدید نظرشده خواهد گردید: در صورتی که باری با احتمال وقوع در هر یک از مجموعه‌های بارگذاری ملحوظ گردد، دارای احتمال وقوع ترکیبی P_n پس از n بار تغییر الگوی بارگذاری و جابه‌جایی مجموعه بارها خواهد بود. کنش‌های دراز مدت را نمی‌توان به این روش مورد بررسی قرار داد و نیاز به مطالعات مربوط به حالات کاربری متفاوت وجود خواهد داشت.*

می‌توان فرض نمود که تغییرات کوتاه مدت زمانی، با تغییرات مکانی مشاهده‌شده تحت پوشش قرارداده شده‌اند. در برخی از انواع کاربری، تغییرات بارگذاری با طول زمانی متوسط وجود دارد که ناشی از افزایش دوره‌ای میزان انبارنمودن کالا یا تجمع افراد در ایام به خصوصی از سال می‌باشد. این نوع تغییرات زمانی دارای اهمیت ویژه‌ای است.

تا زمانی که داده‌های تفصیلی مستدل در مورد مقادیر بارهای زندهٔ وارده بر انواع سازه‌های فضاکار با کاربری خاص یا چند منظوره گردآوری نگردیده باشد، بارهای زنده ارایه‌شده در آیین‌نامه‌های کشوری: نشریهٔ شماره ۵۱۹ مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران و در مورد پل‌های متشکل از سازه‌های فضاکار، بارهای زندهٔ ارایه‌شده در مشخصات فنی AASHTO و AREA را که مبتنی بر تجربه و قضاوت مهندسی می‌باشند، باید به عنوان سطوح بار مشخصه برای سازه‌های فضاکار نیز در نظر گرفت. بـــارهای زنده در مورد سازه‌های با فرم و کاربری خاص، بسته به مورد، براساس آیین‌نـــامه‌های معتبر بین‌المللی ویژهٔ نوع سازه و کاربری و در موارد عدم وجود آیین‌نامه‌های قابل کاربرد مستقیم، براساس مطالعات قابل دفاع از دیدگاه فنی و اقتصادی، برای پروژه و کاربری مورد نظر تعیین خواهند شد.

تفسیر- *بارهای مشخصه به صورت سطحی از بار تعریف می‌شوند که میزان احتمال اختیاری مشخصی (مثلاً ۵ درصد) از نظر تجاوز از آن در طول عمر مفید سازه در نظر گرفته شده باشد. با آنکه این تعریف کاملاً واضح به نظر می‌رسد، کاربرد عملی آن به دلیل عدم در اختیارداشتن اطلاعات جهت پردازش آماری دشوار خواهد بود. حتی با داشتن مجموعه مناسبی از داده‌ها، سؤال در زمینه حالات غیرمتعارف یا استثنایی بارگذاری مطرح خواهد بود. در مشاهده‌های طولانی مدت فضاهای انتخاب شده و بررسی شده ـ حتی اگر روش‌های آماری ریاضی چنین تغییراتی را نشان ندهند ـ معمولاً شاهد تغییرات زمانی خواهیم بود. با توجه به ویژگی‌های سازه‌های فضاکار، این داده‌ها ماهیتاً متفاوت و از دیدگاه جامعهٔ آماری محدود می‌باشند.*

۳-۲-۱-۲-۴-تغییرات بارهای زنده

در حالی‌که بارهای مرده را می‌توان با درجـه‌ای از دقت پیش‌بینی کرد، بـارهای زنـده تا آن درجـه قابل پیش‌بینی نیستند. با بهره‌گیری از روش‌های ضرایب پاره‌ای بار در این آیین‌نامه، انواع مختلف بار با ضرایب بار متفاوت در ترکیب بارها منظور می‌گردند؛ لذا مطلوب خواهد بود که هر نوع از ملزومات بارگذاری در واقع حاصل ارزیابی معتبر و متقنی از نوع کاربری مربوطه را ارایه دهند و علاوه بر آن مطلوب خواهد بود معیاری از تغییرات محتمل به منظور ارایه مقادیر محتمل حداقل و حداکثر بارها تعیین گردد.

تفسیر- *شیوهٔ بهره‌برداری مجموعه یا فضاهای زیر مجموعهٔ یک سازهٔ فضاکار ممکن است با تغییرات کوتاه مدت و ناگهانی دگرگون شود. همچنین، تغییرات نوع تجهیزات، متناسب با تغییر نیازها، نسبت به زمان دور از انتظار نخواهد بود.*

همچنین در صورتی که از طریق مبانی آماری، با مقایسه اقلام مشابه این امر مورد بررسی قرار داده شود، لازم خواهد بود که بارها در تعداد قابل ملاحظه‌ای گروه ـ به منظور پوشش دادن به انواع گوناگون بارها ـ طبقه‌بندی شوند. عدم قطعیت بارها در طول عمر مفید سازه چنین طبقه‌بندی متنوعی را از دیدگاه عملی غیرسودمند می‌سازد. با در نظرگرفتن مقادیر عددی دقیق مفروض برای هر نوع بار، ابعاد مقاطع اعضای سازه‌ای، نه تنها بر مبنای مقدار و بزرگی بار به دست می‌آیند، بلکه روش تحلیل سطوح مقاومت قابل قبول نیز در تعیین آنها مؤثرند. با توجه به آنکه تمامی این کنش‌ها در محاسبات دخیل می‌باشند، لازم است مفروضات و منطق حاکم بر روند طراحی به روشنی درک و تبیین گردند.

مطالعات تفصیلی به منظور تعیین بارهای زنده در ساعات متفاوت روز برای انواع سازه‌ها و کاربری‌ها در کشورهای گوناگون به عمل آمده است. با انتخاب شرایطی که الگوی نمونهٔ گونه خاصی از کاربری محسوب می‌گردند، نتایجی حاصل گردیده که به میزان قابل قبولی یکنواخت و دارای انحراف معیار کوچکی بوده‌اند. معذلک این اطلاعات را نمی‌توان در محاسبات وارد نمود، زیرا بر اساس مقادیر گردآوری‌شده در لحظه‌های مشاهده و برداشت بوده‌اند و هنوز تصور حالاتی که احتمال دارد بارها از مقادیر اندازه‌گیری‌شده به میزان قابل ملاحظه‌ای فراتر روند، دور از انتظار نخواهد بود و بر این مبنا، حالاتی با احتمال وقوع اندک برای بارهای استثنایی زنده مطرح گردیده‌اند.

در حالت بارگذاری ثقلی بارهای غیرمتحرک، بسته به نحوهٔ کاربری و بهره‌برداری، نه تنها تغییرات مکانی، بلکه تغییرات زمانی نیز محتمل خواهند بود. تغییرات زمانی شامل تغییرات کوتاه مدت (ناشی از جابه‌جایی بارهای وابسته به نوع بهره‌برداری) و تغییرات دراز مدت (ناشی از تغییرات در ویژگی‌های کلی بارها) خواهند بود.

۳ـ۲ـ۱ـ۲ـ۵ـ کاهش سربارهای زنده

نحوه تجمع بارهای اعمالی بر ستون یا هر عضو سازه‌ای تکیه‌گاهی به کنش‌های متنوعی بستگی دارد. به ویژه، متغیرهای زیر حایز اهمیت می‌باشند:

ـ ویژگی بار زنده،

ـ سطح وابسته (یا مرتبط)،

ـ تعداد کف‌ها یا سقف‌هایی که بار خود را بر عضو سازه‌ای اعمال می‌نمایند،

ـ احتمال اعمال همزمان بارها در مواضع متفاوت.

علاوه بر آن، موارد زیر نیز که عمدتاً دارای طبیعت احتمالی نمی‌باشند، تأثیرگذار خواهند بود:

ـ ملزومات ممانعت از وقوع گسیختگی پیشرونده

ـ نسبت بار مرده به بار زنده

ـ انتخاب بارهای زنده مشخصه، مستقل از نیت اولیهٔ بهره‌برداری از سازه فضاکار

از موارد حایز اهمیت در اعمال بارهای زنده عبارت است از تعیین مقادیر مناسب کاهش بارها و همچنین تلاش‌های حاصل در اعضا در اثر اعمال غیرمتقارن بارها به صور محتمل بر سازهٔ فضاکار. نکته اخیرالذکر باید با محاسبات جداگانه مورد توجه قرار داده شود.

***تفسیر*ـ** *بار زنده اعمالی بر سازه برخلاف آنچه اغلب در طراحی در نظر گرفته می‌شود، یکنواخت نیست. بارگذاری واقعی شامل اعمال شدت بارهای متفاوت بر سطوح متفاوت می‌باشد.*

به طور کلی هرچه مساحت سطح مورد بررسی کوچک‌تر باشد، شدت بار زندهٔ افزون‌تری ملحوظ می‌گردد. این واقعیت را با کاهش‌دادن بارهای زنده ملحوظ می‌دارند همچنین بین اعضای سازه‌ای سقف‌ها، ستون‌ها و شالوده‌ها تفاوت قایل می‌گردند.

شیوه‌های متداول تعیین ضرایب کاهش بار زنده

سه شیوه متداول تعیین ضرایب کاهش بار زنده به شرح زیر می‌باشند:

(الف) ـ روش کاهش بار زنده برحسب درصد بار

ماهیت این روش مبتنی بر آن است که اعضای اصلی را که بار سطوح نسبتاً بزرگی را تحمل می‌نمایند، می‌توان برای تحمل مقادیر کوچک‌تری از شدت بارهای زندهٔ یکنواخت تصریح‌شده، طراحی نمود. هر چه مساحت سطح بارگیر بزرگ‌تر باشد، شدت بار طراحی عضو مربوطه کوچک‌تر خواهد بود.

***تفسیر*ـ** *این امر به معنی آن نیست که هیچ یک از بخش‌های سطح بارگیر با شدت بار تصریح شده بارگذاری نمی‌شوند، بلکه به معنی آن است که شدت متوسط بار وارده بر کل سطح بارگیر عضو، مقداری کم‌تر از مقدار حداکثر خواهد داشت.*

این روش به صورت زیر به‌کار برده می‌شود:

۱ـ در سازه‌هایی که به منظور بهره‌برداری به صورت انبار معمولی کالاها، مواد و تولیدات صنعتی و کشاورزی بی‌خطر و غیرمضر از دیدگاه زیست محیطی طراحی می‌گردند، تمامی ستون‌ها و پایه‌ها، دیوارهای باربر و شالوده‌ها را می‌توان برای ۸۵٪ بار زنده کامل مفروض طراحی نمود. در مورد انواع دیگر سازه‌ها، متناسب با نوع بهره‌برداری و تعداد طبقه‌های اشغال شونده، بار زنده مفروض برای طراحی ستون‌ها، پایه‌ها، دیوارهای مشبک و شالوده‌ها را می‌توان با احتساب میزان بارهای زیر، محاسبه نمود:

ـ ۱۰۰٪ بار زنده بام‌ها

ـ ۸۵٪ بار زنده برای کف طبقه فوقانی

ـ ۸۰٪ بار زنده برای کف طبقه پایین‌تر از طبقه فوقانی

ـ ۷۵٪ بار زنده برای کف یک طبقه پایین‌تر

ـ در مورد هر طبقه پایین‌تر می‌توان کاهش بار زنده مربوطه را برحسب درصد اعمال نمود، مشروط بر آنکه حداقل ۵۰٪ بار زنده کل در نظر گرفته شده باشد.

۲ـ می‌توان اعضای اصلی شبکه فضاکار را که بار طراحی مربوط به سطحی بیش از ۵۰ متر مربع را تحمل می‌نمایند، برای ۸۵٪ بار زنده مشخصهٔ تعریف‌شده طراحی نمود.

۳ـ در طراحی خرپاهای فضاکار و شاه‌تیرها و شالوده‌های منفرد، می‌توان بارهای مرده کامل به علاوهٔ بارهای زنده را با مقادیر کاهش مذکور در بند ۲ فوق در نظر گرفت.

برای نوع اشغال به عنوان انبار (که گاه شامل بهره‌برداری تجاری نیز می‌گردد)، مقادیر کاهش مجاز محدودتر در نظر گرفته‌شده‌اند؛ زیرا احتمال آنکه کف طبقه در چنین حالت از کاربری، به طور کامل بارگذاری شود، از سایر کاربری‌های بیشتر خواهد بود.

(ب) ـ روش مبتنی بر نسبت بار مرده به بار زنده

در این روش، میزان کاهش سربار با افزایش سطح بارگیر عضو افزایش می‌یابد و همچنین در مورد فضاهای انبار و تجاری برای میزان کاهش سربار محدودیت اعمال می‌گردد. علاوه برآن، محدودیت‌هایی از قبیل عدم اجازه کاهش سربار برای اعضایی که سطوح بارگیر کوچک‌تری از مقدار معینی دارند، در نظر گرفته شده است. همچنین در این روش برای کاهش سربار کرانهٔ بالایی به میزان ۶۰٪ تعیین گردیده‌است.

تفسیر ـ *شیوهٔ کاهش بارهای زنده در این روش به صورت زیر است:*

۱ ـ برای اعضای باربرِ سطوحی با شدت بارهای زنده کوچک‌تر یا مساوی ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع: بار زنده طراحی هر عضو یا جزء را که بار سطحی به مساحت بزرگ‌تر یا مساوی ۵۰ متر مربع را تحمل می‌نماید، می‌توان با نرخ ۰/۵٪ به ازاء هر مترمربع سطح بارگیر کاهش داد.

۲ ـ در مورد فضاهایی که به عنوان فضاهای اجتماع افراد مورد استفاده قرار می‌گیرند، کاهش سربار مجاز نیست.

۳ ـ میزان کاهش بار زنده نباید از ۵۵٪ یا R (براساس رابطه زیر) تجاوز نماید:

$$R= 100\ [(D+L)/4.33L] \qquad (۱-۳)$$

که در آن، R میزان کاهش(٪)، D بار مرده بر واحد سطح بارگیر عضو و L بار زنده طراحی بر واحد سطح بارگیر عضو می‌باشند.

۴ ـ در مورد بارهای زنده با شدت بیش از ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمربع، کاهش سربار مجاز نمی‌باشد. تنها در مورد بار طراحی ستون‌ها، بار زنده طراحی را می‌توان تا حداکثر ۲۰٪ کاهش داد.

فرمول R که مبتنی بر فلسفه گسیختگی ایمن است، به نحوی تعیین شده است که در صورت وقوع اعمال بار کامل زنده بر کل سطح بارگیر، تقاضای نیرویی عضو سازه‌ای مزبور نباید از ظرفیت آن تجاوز نماید؛ حتی اگر عضو براساس بار زندهٔ کاهش یافته طراحی شده باشد.

(پ) ـ روش سطح وابسته

در این روش موارد زیر ملحوظ گردیده است:

ـ میزان کاهش بار زنده با سطح وابسته متناسب است.

ـ میزان کم‌تری از نرخ کاهش برای انبارها و فضاهای تجاری عمومی و اجتماعات در مقام مقایسه با فضاهای دیگر مانند فضاهای مسکونی و اداری مجاز دانسته شده‌است.

ـ در این روش برای میزان کاهش بار زنده کرانهٔ بالایی قایل شده‌است (فرمول کاهش بار زنده برای سطوح به مساحت‌های بزرگ به سمت مجانب میل می‌نماید).

ـ مستثنی دانستن برخی از بارها (مانند برف) از احتمال اعمال کامل.

***تفسیر ـ** در این روش کاهش بار زنده به شرح زیر می‌باشد:*

۱ـ هرگاه عضو سازه‌ای بار سطح وابسته بارگیری از کف طبقات، بام یا ترکیبی از آنها را در حد متجاوز بر ۱۰۰ مترمربع، به منظور بهره‌برداری به عنوان انبار، کارگاه، پارکینگ یا فضای اجتماعات تحمل نماید، بار زنده طراحی (جز بار برف) عبارت خواهد بود از بار زنده مبنا ضرب‌در $(0.5+5/\sqrt{A})$؛ که در آن، A عبارت است از سطح وابسته ترکیبی بارگیر برحسب متر مربع.

۲ـ هرگاه عضو سازه‌ای بار سطح وابسته بارگیر از کف طبقات، بام یا ترکیبی از آنها را تا حد متجاوز بر ۵۰ متر مربع، به منظور هرگونه بهره‌برداری غیر از آنچه در بالا قید شد، تحمل نماید، بار زنده طراحی (جز بار برف) عبارت خواهد بود از بار زنده مبنا ضرب در $(0.3+3/\sqrt{B})$؛ که در آن، B عبارت است از مساحت سطح وابسته بارگیر ترکیبی برحسب متر مربع.

سه روش فوق چند نارسایی مشترک دارند. مهم‌ترین آنها شاید عدم اتکا به مبانی کمّی باشد. برداشت بارهای واقعی برای انواع کاربری‌های سازه‌های فضاکار و مطالعات آماری این نقیصه را بهبود می‌بخشد. باید توجه داشت که در روش‌های فوق، آثار کاهش بارهای زنده مستقل از نوع سیستم سازه فضاکار اختیار شده و تابع نوع مصالح سازه‌ای نمی‌باشد. اگر بپذیریم که بار زنده متغیر است، که به صورت متمرکز شده در بخشی از سطوح و با بزرگی و شدت کوچک‌تر در نواحی دیگر اعمال می‌شود، قابلیت سازه در تحمل چنین بارهایی به قابلیت توزیع بارها از طریق پل‌زدن و انتقال بارهای ناحیه با شدت بار بزرگ‌تر به نواحی با شدت بار کوچک‌تر بستگی خواهد داشت. این قابلیت در سازه‌های فضاکار به میزان قابل ملاحظه وجود دارد و البته به نوع سازه فضاکار، نوع مصالح سازه، نوع اتصالات، نحوه پیوستگی سازه و حضور مسیرهای مضاعف برای انتقال بارها و ممانعت از بروز گسیختگی زنجیره‌وار پیشرونده و مشخصه‌هایی نظایر آن که در اغلب موارد از خصیصه‌های سازه‌های فضاکار به شمار می‌روند، وابسته خواهد بود.

بار وارده بر سازه تابع عمر سازه است. در مورد ساختمان در دست احداث، ابتدا شالودهٔ ساختمان تکمیل می‌گردد، سپس سازه برآن احداث می‌شود، پس از آن پوشش‌های جانبی، لوله‌ها و کانال‌های تأسیساتی و نازک‌کاری اجرا می‌گردند. پس از آن است که بارهای زنده ناشی از نوع بهره‌برداری بر سازه اعمال خواهد گردید.

بخشی از عناصر سازه‌ای تکیه‌گاهی ساختمان (مثلاً شالوده‌ها یا ستون‌ها) از مصالح بتنی ساخته می‌شوند که با عمر، افزایش مقاومت می‌دهند. مهندس طراح، محاسبات را بر مبنای مقاومت نمونه‌های بتنی در عمر مشخصی (مثلاً ۲۸ روزه) انجام می‌دهد.

کسب مقاومت افزودهٔ بتن پس از ۲۸ روز، به ویژه در اعضای سازه‌ای مانند پی‌ها و پایه‌هایی که در شرایط مراقبت مناسب قرار داشته‌باشند، می‌تواند در حدود۲۰ تا ۳۰ درصد در مدت ۴ ماه تا یکسال باشد. از سوی دیگر، متناسب با شرایط محیطی و نوع کاربری، اضمحلال مصالح بتن‌آرمه و یا خوردگی و خستگی مصالح فولادی در مقاومت و سایر پارامترهای مرتبط با خواص مکانیکی و متالورژیکی مصالح تأثیر گذارند.

آیا باید اعضای سازه‌ای را برای مقاومت متناسب با عمر عضو در مرحله اعمال بار کامل طراحی نمود؟ تلاش‌هایی برای ملحوظ داشتن غیرمستقیم این آثار در ضرایب بار یا ضرایب کاهش بارهای زنده به عمل آمده‌است. معذلک، روش ضرایب پاره‌ای بار و مقاومت این امکان را داده‌است که آثار مزبور را مستقیماً در مقاومت طراحی اعضا و اجزای سازه منظور کرد.

تفسیر- *مقایسهٔ نتایج حاصل از چند فرمول نمونه کاهش بار زنده پیشنهادشده از سوی چندین آیین‌نامهٔ معتبر در مورد سازه‌های چند طبقه پراکندگی قابل ملاحظه‌ای را در نتایج حاصله از روش‌های این آیین‌نامه‌ها در احتساب ضرایب کاهش بار زنده بر ستون‌ها نشان داده‌است. لذا این مسأله نیاز به بررسی بیشتری به منظور برقرارنمودن معیار معتبری برای آیین‌نامه‌نویسان و طراحان خواهد داشت. معذلک، پراکندگی فوق‌الاشاره بیشتر مربوط به ساختمان‌های چند طبقه و بلند مرتبه بوده است که هنوز این کاربرد از سازه‌های فضاکار چندان مرسوم نیست و در مورد سازه‌های فضاکار دارای یک سقف پوشانه یا تعداد طبقات محدود که کاربرد متداول‌تری از سازه‌های فضاکار بوده‌اند، این پراکندگی کمتر مشاهده می‌شود.*

۳-۲-۱-۳- بار برف

اگرچه بار برف نیز دارای ماهیت ثقلی است، به دلیل وابستگی به شرایط جوی، در این آیین‌نامه از سایر بارهای ثقلی تفکیک‌شده و به طور جداگانه در بند ۳-۲-۶ مورد بحث قرار داده خواهد شد.

تفسیر- *شدت بارها به منظور طراحی، معمولاً به صورت مقادیر متوسط وزن در واحد سطح بیان می‌گردند. معمولاً علاوه بر این، ملزوماتی در مورد اعمال وزن با شدت بیشتر در ناحیه محدودتری از سازهٔ فضاکار نیز مطرح می‌گردد که از این طریق، احتمال اعمال بارهای با تمرکز بیشتر منظور می‌شود. این مقادیر را می‌توان به سه طریق متفاوت تعیین کرد:*

(الف) روش تعیینی: متکی بر تجربه و قضاوت مهندسی به منظور تعیین مقادیر مشخصی می‌باشد. مقادیر مزبور قراردادی می‌باشند، ولی باید به میزان کافی واقع‌گرایانه اختیار گردند که نیل به سطح اطمینان کافی در ارتباط با ایمنی سازه را تضمین نمایند.

(ب) روش احتمال‌اندیشانه: در این روش از تئوری احتمالات و روش‌های آماری به منظور دستیابی به مقادیر واقع‌گرایانهٔ کمیت‌های معرف مقادیر اسمی بارها بهره‌گیری می‌گردد و با بیان میزان تغییرات شدت بارها به منظور دستیابی به سطح اطمینان مورد نظر برای تراز عملکردی از پیش تعیین‌شده همراه است.

(پ) روش نیمه‌احتمالی: در این روش با اتکا بر مطالعات آماری، ایدهٔ بارهای مشخصه ارایه می‌گردد. بار مشخصه عبارت است از مقدار باری که احتمال آنکه در طول عمر مفید سازه از آن تجاوز گردد، ۵٪ می‌باشد.

در بهره‌گیری از هر یک از روش‌های فوق، با توجه به آنکه ضرایب بار پاره‌ای متفاوتی به گروه‌های متفاوت بار (مرده، زنده و غیره) اعمال خواهد گردید، به ویژه در مورد سازه‌های فضاکار پوشش دهانه‌های نسبتاً وسیع ضرورت دارد که مقادیر هر نوع از بارها به طور موشکافانه تعریف گردیده و آثار تغییرات این بارها نیز ملحوظ گردیده باشند.

۳-۲-۲- بارهای ناشی از ضربه و بارهای ناشی از ماشین‌آلات دوار

۳-۲-۲-۱-کلیات

بارهای متعارف دینامیکی در دو دسته عمده طبقه‌بندی می‌شوند: بارهای ناشی از اعمال ضربه و بارهای چرخه‌ای تناوبی. در این حالات پاسخ سازه تابع جرم مرتعش و ویژگی‌های سختی و استهلاک سازه است.

بارهای چرخه‌ای تناوبی معمولاً ناشی از کار ماشین‌آلات بوده و ممکن است ملزومات خاصی را در طراحی سازه و جزییات اجرایی به منظور ایزوله‌نمودن یا کاهش آثار ارتعاشات ناشی از آن‌ها، نسبت به سازه اصلی، ایجاب نماید. در این‌گونه موارد، احتمال بروز حالت تشدید و ارتعاشات تشدیدی سازه اصلی را باید مدّنظر داشت. همچنین از موارد محتمل، ضربات ناشی از توقف اطاقک آسانسور، جراثقال‌های متحرک و نظایر آنها می‌باشد.

۳-۲-۲-۲- پاسخ سازه

تحت آثار بارهای چرخه‌ای تناوبی، دامنهٔ ارتعاشات پاسخ سازه نه تنها به ویژگی‌های بار اعمالی وابسته است، بلکه به نسبت r یعنی نسبت بسامد بار اعمالی به بسامد ارتعاش طبیعی سازه و نسبت d یعنی نسبت ضریب میرایی واقعی به ضریب میرایی بحرانی نیز بستگی دارد. برای مقادیر d که در عمل با آن مواجه هستیم (یعنی حدود ۰/۰۲ تا ۰/۱۰) می‌توان فرض نمود که پاسخ سازه برای مقادیر r کوچک‌تر از ۰/۲۵، مستقیماً آثار بار وارده را دنبال می‌نماید. برای $r=1$ بزرگنمایی متناسب با $(1/2d)$ مشاهده می‌گردد و برای مقادیر r بزرگ‌تر از ۱/۵، دارای دامنه کم‌تری از آن است که به طور مستقیم به ویژگی‌های بارگذاری مربوط می‌شود. محاسبهٔ دامنه ارتعاش در نزدیکی تشدید $r=1$ ، فاقد مفهوم منطقی است و حایز اهمیت است که از بروز حالت تشدید جلوگیری به عمل آید. هرگاه دامنهٔ تنش‌های حاصله بالنسبه زیاد باشد، بروز پدیده خستگی نیز محتمل بوده و باید در مقابل آن تدابیر لازم را اندیشید.

۳-۲-۲-۳-تعریف و توصیف بارهای ناشی از ضربه و بارهای ناشی از ماشین‌آلات دوار

توصیف کامل بارهای ناشی از ضربه و بارهای رفت و برگشتی به منظور طراحی و همچنین تحلیل کامل پاسخ سازه به چنین بارهایی در تمامی موارد قابل توجیه نیست و در مواردی که بهره‌گیری از بارهای استاتیکی معادل کفایت نماید، توصیف بارهای دارای آثار دینامیکی با دیدگاه معادل‌سازی استاتیکی مورد توجه مهندسان طراح انواع سازه‌های صنعتی و پل‌ها بوده‌است. بارهای استاتیکی معادل را معمولاً با اعمال "ضریب ضربه" به بار استاتیکی مبنا، تعریف و تعیین می‌نمایند. جدول ۳-۱ برخی از چنین ضرایب باری را ارایه می‌دهد.

چنین ضرایب بارهایی را نمی‌توان در سطح بین‌المللی صادق دانست. اینگونه ضرایب را اغلب از طریق مشاهدات و تجارب گذشته تعیین می‌نمایند. به این ترتیب که چنین ضرایبی، در موارد اعمال، منجر به بهره‌برداری رضایت‌بخشی گردیده است. در صورتی‌که فرم و سیستم سازه تغییر نماید، تجارب گذشته، بهره‌برداری رضایت‌بخش را ضمانت نخواهد نمود.

جدول۳-۱- درصد افزایش بارهای استاتیکی به‌منظور ملحوظداشتن آثار ناشی از اعمال ضربه یا آثار دینامیکی در قالب بارهای استاتیکی‌معادل

بار		درصد افزایش بار
تجهیزات بالابرها (آسانسورها) و سازه‌های تکیه‌گاهی آن		۱۰۰
اعضا و اتصالات حامل جراثقال‌های متحرک (۱۵تا ۲۵)	**جراثقال‌های بطی (سرعت کم‌تراز یک متر بر ثانیه)**	۱۵
	جراثقال‌های سریع (سرعت بیش از یک متر بر ثانیه)	۲۵
عناصر سازه‌ای تکیه‌گاه ماشین‌آلات سبک		۲۵
ماشین‌آلات گردشی		۵۰
آویزهای نگهدارندهٔ کف طبقات و بالکن‌ها		۳۳
بار زندهٔ پل‌ها	**بخش‌های طرّه‌ای**	۳۰
	سایر دهانه‌ها	$۶۵/(۳/۲۸L+۱۵۰)\times۱۰۰\leq۳۰$*

* *(که در آن L طول بارگذاری شدهٔ دهانهٔ پل بر حسب متر می‌باشد)*

۳ـ۲ـ۳ـ آثار ناشی از ارتعاش

تمـامی سازه‌ها در اثر عبور ترافیک سنگین، باد، نوسانات تجهیزات مکانیکی و منابع دیگر، بسته به نوع کاربری به ارتعاش در می‌آیند. هرگاه میزان دامنه تغییرمکان از حد معینی تجاوز نماید، افراد ساکن احسـاس حرکت نامطبوعی خواهند نمود. مطالعات دامنه‌داری جهت تشخیص حد ارتعاش قابل تحمل توسط افراد متعارف، به عمل آمده است که نشانگر آن بوده‌است که عکس‌العمل

افراد به ارتعاش یکسان متفاوت است و به محل استقرار فرد در سازه و نحوه استقرار: درحال حرکت، ایستاده، خوابیده یا نشسته نیز بستگی دارد. اغلب افراد ارتعاشات با بسامد زیاد را احساس می‌نمایند ولی در مورد ارتعاشات با بسامد کم، حالتی مانند تهوع ناشی از سفر در دریای متلاطم دست می‌دهد. این امر باید توسط طراح سازه فضاکار مورد توجه قرار داده‌شود. ارتعاشات نامطبوع از جملهٔ حالت‌های حدی بهره‌برداری تلقی می‌گردند که باید از ایجاد حالت تشدید و گسیختگی ناشی از آن تفکیک گردند. اطلاعات موجود به ویژه در مورد کاربری‌های متداول سازه‌های فضاکار ناچیز می‌باشند. کاهش جرم سیستم سازه کف‌ها و پوشانه‌ها در طراحی نوین سازه‌های مستقر بر خاک‌های با پریود نوسان مشخصی می‌تواند منجر به کاهش آسودگی کاربران گردد. لذا در مورد بسیاری از سیستم‌های ابتکاری سازه سبک کف طبقات و سازه‌های فضاکار سبک مطبق، تحلیل دینامیکی با در نظرگرفتن آثار اندرکنش خاک ـ پی ـ سازه و با بررسی اثر تغییرات سختی و جرمِ سیستم ضروری خواهد بود.

۳ـ۲ـ۴ـ بارهای اجرایی

با توجه به شیوهٔساخت، بافت و نصب سازهٔ فضاکار، باید آثار اعمال بارهای محتمل را در تمامی مراحل و گام‌های ساخت، بافت و نصب بر سازه فضاکار تکمیل‌نشده و در حین اجرا با توجه به شرایط موقت سازهٔ فضاکار در دست احداث و شرایط تکیه‌گاهی موقت یا دایمی در طراحی ملحوظ داشت. امکان ذخیره‌سازی مصالح بر کف‌ها و وضعیت پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های موقت، مهارهای موقت و همچنین کیفیت موقت اتصالات و مهاربندی‌ها قبل از تکمیل عملیات اجرایی مربوطه را نباید از نظر دور داشت. همچنین ترتیب اعمال بار بر اعضا، اجزا و مجموعهٔ سازه فضاکار را باید مورد توجه قرار داد. در مورد سازه‌های فضاکاری که در تراز پایین بافته و به وسیلهٔ جک‌های هیدرولیکی و برج‌های بالابر به ارتفاع نهایی انتقال می‌یابند و همچنین در حالاتی‌که از بافت در زمین مرتفع مجاور یا سکوهای مجاور و نصب از طریق سراندن به کمک خرپاهای پیشانی استفاده می‌شود یا از روش‌های ساخت طره‌ای بهره‌گیری می‌گردد، طراح باید ضمن اتخاذ تصمیم در مورد گزینهٔ برتر بافت و نصب از جنبه‌های فنی و اقتصادی، بار های اجرایی متناسب با گام‌های اجرا و سیستم‌های باربر مرحله‌ای را به درستی با توجه به دیدگاه‌های احتمال‌اندیشانه در تخمین بزرگی بارهای محتمل‌الوقوع در دورهٔ زمانی برنامه‌ریزی‌شده برای عملیات اجرایی و به منظور تأمین پایداری مجموعهٔ سازه و تکیه‌گاه‌های دایم و موقت آن و آثار اعمال ضربه ناشی از شیوهٔ نصب، به نحو همه‌جانبه و واقع‌گرایانه ملحوظ دارد. طراح و تیم‌های طراحی سازهٔ فضاکار باید گام‌های اجرایی را در مشخصات فنی بافت و نصب پروژه به دقت منعکس سازند.

در مورد هر یک از اعضای سازهٔ فضاکار که محور آن با افق زاویه‌ای کوچک‌تر از ۳۰ درجه می‌سازد، لازم است بار اجرایی متمرکزی برابر با ۱۰۰۰ نیوتن در هر نقطه دلخواه آن (معمولاً وسط دهانه عضو) اعمال گردد تمامی چنین اعضایی از سازه فضاکار باید قادر باشند بار مزبور را بدون بروز تغییرشکل موضعی یا کلی پس‌ماند، تحمل نمایند.

۳ـ۲ـ۵ـ بارهای ناشی از کنش‌های مرتبط با شرایط جوی

۳ـ۲ـ۵ـ۱ـ کلیات

در این آیین‌نامه، بارهای ناشی از برف و آثار ناشی از تغییرات دما در چارچوب بارهای جوی طبقه‌بندی‌گردیده‌اند. این نوع بارها تابع شرایط جوی و وضعیت هوا در خارج و داخل سازه می‌باشند. کنش‌های جوی همچنین شامل باد (یکنواخت، تند باد و یا مغشوش)، برف و یخ، باران و گرد و غبار، تگرگ و حرکت های ناشی از تغییرات رطوبت نیز می‌گردند.

حرکت‌های ناشی از تغییرات دما و رطوبت و همچنین بارهای باد به وضعیت جوی داخل و خارج سازه بستگی دارند. با توجه به آنکه وضعیت هوا در داخل سازه معمولاً توسط انسان قابل کنترل می‌باشد، تنها به تغییرات هوا در خارج سازه اکتفا می‌شود. حرکت‌های ناشی از تغییرات دما و رطوبت همچنین به نوع، اندازه، شکل و موقعیت سازه بستگی داشته و به جز موارد خـاص، مستقل از نوع بهره‌برداری می‌باشند. همچنین آثار وجود یا عدم وجود قیود حرکت‌های حرارتی در ایجاد تنش‌ها و تلاش‌های مربوطه حایز اهمیت خواهند بود.

سطوح بارهای ناشی از کنش‌های جوی هم نسبت به زمان و هم نسبت به موقعیت جغرافیایی سازه تغییر می‌نمایند. برای هر منطقه، الگوی معمول، شامل یک مجموعه از تغییرات دوره‌ای نسبتاً منظم به همراه تغییراتی با نظم کم‌تر (ناشی از وضعیت جوی برهه‌ای، ناحیه‌ای، منطقه‌ای و جهانی) خواهد بود. در ارتباط با کنش‌های دارای منشأ جوّی ـ اقلیمی، و در چارچوب مفاهیم طراحی عملکردی، می‌توان دوره‌های بازگشت متناسب با سطوح خطر مورد نظر و ترازهای عملکردی مربوطه را تعیین و اختیار نمود. در این آیین‌نامه، برای انواع سازه‌های فضاکار، نحوهٔ اعمال چنین روش‌هایی مورد بحث قرار داده شده‌است.

علیرغم آنکه بارهای برف، باد و سایر بارهای ناشی از شرایط جوی در ماهیت، زیرمجموعهٔ کنش‌هـای مـرتبط با شرایط جوی به‌شمار می‌روند، به‌منظور سهولت بهره‌برداری از آیین‌نامه و همچنین به‌دلیل اهمیت بعضی از این کنش‌ها در طراحی سازه‌های فضاکار، کنش‌های مزبور به‌طور جداگانه در این فصل مورد بحث قرارداده شده‌اند. بنابراین از مجموعهٔ کنش‌های ناشی از شرایط جوی ذیل بند حاضر تنها به آثار ناشی از تغییرات دما پرداخته شده است.

۳ـ۲ـ۵ ـ۲ـ آثار ناشی از تغییرات دما

در این‌جا، آثار ناشی از تغییرات دما شامل آثار حاصل از تغییرات فصلی متعارف هوا یا آثار گرادیان حرارتی ناشی از اختلاف دمای محدود در حین بهره‌برداری می‌گردند. مواردی مانند بروز حریق، انفجار و نظایر آن به طور جداگانه در نظر گرفته خواهند شد.

تغییرات فصلی دما بر حسب شرایط اقلیمی به ترتیب مندرج در این آیین‌نامه منظور می‌گردند.

در این بخش اثر تغییرات دمای محیطی، که با انبساط یا انقباض نامتجانس اعضای سازه رخ می‌دهد، بر پایداری اعضای سازه‌ای، خدمت‌رسانی و پاسخ سازه مورد بحث قرار داده می‌شود.

در سازه‌های با ابعاد بزرگ در پلان و سازه‌های بلند، آثار ناشی از بارهای حرارتی می‌توانند مقادیر قابل ملاحظه‌ای داشته باشند. معذلک وضعیت تحت کنترل هوای داخل این سازه‌ها آثار تمایل به حرکت‌های نسبی یا ایجاد تنش‌های ناشی از جلوگیـری از حرکت‌ها بین اجزای سازه را کاهش می‌دهد. سازه‌های بادهانه‌های آزاد وسیع و سازه‌های اداری و مسکونی و صنعتی بلند و سازه‌های نظیر اغلب باید شامل حفاظی از بخش کاملاً محصورشده و عایق‌بندی‌شده برای سازه باشند. به منظور حصول اطمینان از تأمین

دمای مناسب برای افراد یا محتویات داخل ساختمان، باید سیستم‌های مکانیکی مناسبی که کنترل دمای داخل ساختمان را تضمین می‌نمایند، مورد استفاده قراردادهشوند. این شرایط، طول اعضای درونی را طی تغییر فصول تقریباً ثابت نگه می‌دارد و لذا تنش‌های حرارتی در این اعضا کنش‌های مهمی از نظر طراحی محسوب نمی‌گردند.

آثار ناشی از حرکت‌های فصلیِ پوسته بیرونی سازه را نیز می‌توان با ایجاد درزهای لغزشی در امتدادهایی که نیاز به آزادی حرکت حرارتی و دفع تنش‌های ناشی از آن داشته‌اند، حل و فصل نمود. در سازه‌های فضاکارِ دارای دهانه‌های طویل مقیدشده در تکیه‌گاه‌ها یا با اتصالات یکپارچه با ستون‌ها و قاب‌های مهاربندی‌شده، حضور تنش‌های حرارتی می‌تواند مسأله‌ساز باشد. در طول مدت اجرای سازه، آثار تغییرات دما در سازه‌ای که موقتاً در معرض کنش‌های جوی است، باید به کمک مرحله‌بندی بافت و نصب کاهش داده شود.

بخش دیگری از مسایل مرتبط با آثار حرارتی با احداث سازه‌های با دهانه های طویل، ایجاد آزادی‌های حرکت حرارتی، احداث سازه‌های فضاکار با اعضای سازه‌ای بیرونی در معرض دید و در معرض کنش‌های جوی و به خصوص با شکستن حصارهای محدودکننده دهانه‌ها و ارتفاع سازه در دهه‌های اخیر همراه بوده‌است.

در صورت وجود قیود حرکتی و عدم آزادسازی تنش‌ها، تغییرات فصلی دما می‌تواند آثار نامطلوبی بر میزان تنش‌ها و تغییرشکل‌های اعضا و اجزای بیرونی سازه داشته باشد.

تفسیر- *در مورد سازه‌های فضاکار محصور که در هر جهت طولی، بعدشان از ۵۰ متر تجاوز ننماید و همچنین ساختمان‌های تا ارتفاع حدود ۵۰ متر، آثار تغییرات دما معمولاً نادیده انگاشته می‌شوند. تنش‌های ناشی از تغییرات دما در این سازه‌ها قابل ملاحظه نبوده و اثر قابل اعتنایی بر اعضای غیرسازه‌ای، به دلیل تغییر مکان‌های حرارتی، وارد نمی‌آورند. معذلک اصول مهندسی در مورد سازه‌هایی که در مناطق معتدل نیستند، یا سازه‌هایی که دارای ستون‌ها و اعضای بیرونی در معرض کنش‌های جوی در ترکیب یکپارچه با اعضای درونی هستند و قیود حرکتی نیز وجود دارد، لازم می‌دارد که آنالیز حرارتی صورت گیرد. معمولاً در مورد سازه‌های با دهانه‌های بیش از ۵۰ متر و ارتفاع بیش از ۵۰ متر، به دلیل تغییرمکان‌های مطلق یا نسبی قابل ملاحظهٔ ناشی از تغییرات دما، تحلیل آثار تغییرات دما در تمامی حالات محتمل ضروری خواهد بود.*

۳-۲-۵-۲-۱- ماهیت بارهای ناشی از تغییرات دما

تغییر دما، به خودی خود، بار محسوب نمی‌شود؛ بلکه این تغییرات منجر به تنش‌های درونی به دلیل وجود قیود در مقابل انبساط و انقباض آزادانه می‌گردند. پاسخ سازه به تغییرات دما به صورت تغییر شکل‌ها و انبساط و انقباض مصالح سازه‌ای و غیرسازه‌ای ساختمان در تمامی جهات نمایان می‌گردد و تغییرات هر بعد سازه عمدتاً تابعی از آن بعد می‌باشد.

تفسیر- *معادلهٔ کلی تغییر شکل به همان فرم مأنوس است که طول، تغییرات دما و ضریب ثابتی را در بر می‌گیرد. به‌طور کلی، اعضای ساختمانی لاغر، آثار مسلط تغییرات دما را بیش از اعضای غشایی و صفحه‌ای و پوسته‌ای تجربه خواهند کرد؛ زیرا در مورد اجزای اخیرالذکر، آثار نسبت پواسون جنبهٔ تعدیل‌کننده دارد. در مورد سازه‌های فضاکار با رفتار مسلط سه بعدی، این آثار تعدیل‌کننده قابل توجه است. در مورد سازه‌های با رفتار قابل تفکیک به زیرمجموعه‌های دو بعدی، این آثار در جهت طولی حادث گردیده و در جهات عمود بر آن معمولاً ناچیز می‌باشند.*

سازه فضاکار، در مقابل تمایل به انبساط هر عضو، از طریق اعوجاج، افزایش تنش‌ها و آثار ثانویه بر اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای، واکنش نشان می‌دهد. در برخی از موارد، گسیختگی تحت آثار ترکیبی اختلاف دما همزمان با سایر کنش‌ها اتفاق می‌افتد.

به طور کلی برای سازه های متجاوز بر ۵۰ متر در ارتفاع یا ۵۰ متر در طول، توصیه می‌شود آثار ناشی از تغییرات دما در جهات قایم و افقی از طریق مطالعهٔ مدل سه بعدی سازه فضاکار و پایه‌ها با توجه به وضعیت قیود حرارتی در نظر گرفته شود. در این حالت، باید مدل واقع‌گرایانه‌ای از سازه و تکیه‌گاه‌ها و درزهای جدایی یا انبساط و انقباض تهیه‌شده، دماهای مشخصه محیطی تعیین گردیده و نسبت به مبدأ اختیار شده‌ای، تغییر دما به اعضای سازه‌ای اعمال و

نتایج حاصله مورد بررسی قرار داده شوند. متعاقباً باید پاسخ سیستم سازه، اعضاء اجزا و مصالح سازه به تغییرات دما و ترکیب این آثار با آثار دیگر، مورد مطالعه قرار داد شوند.

در صورتی‌که، عضوی از اعضای سازه فضاکار شبکه‌ای با نوعی از مصالح و با شکل و فرم و شرایط سرحدی معین، تحت آثار تغییرات دمای محیطی قرار داده شود، تنش‌های درونی حاصله، تابعی از میزان تغییر طولی (بُعدی) خواهند بود که با در نظرگرفتن نوع اتصالات انتهایی و سختی بقیهٔ سازه در صورت عدم گسیختگی یا کمانش، سازه را در وضعیت تعادل جدید قرار خواهد داد.

شرایط سرحدی مجموعهٔ سازه یا عضو سازهٔ فضاکار می‌تواند به شرح زیر باشد:

۱ـ انبساط کامل، بدون ممانعت و بدون قید که در این حالت تنش‌های حرارتی برابر با صفر خواهند بود.

۲ـ قید کامل با ممانعت کامل از تغییر طول مجموعهٔ سازه یا عضو که در این حالت تنش‌های حرارتی مقادیر بیشینه خواهندیافت.

۳ـ حالتی بین حالات ۱و ۲ که در آن قید وجود داشته ولی این قید دارای سختی معین بوده و مطلقاً صلب نمی‌باشد (مانند آثار انعطاف‌پذیری اتصالات در پیوندهای طرفین عضو یا واحد سازه فضاکار یا اثر اندرکنشی سایر بخش‌های سازه با عضو مورد بحث یا شیوهٔ رفتار پایه‌ها، تکیه‌گاه‌ها و دستگاه‌های تکیه‌گاهی سازه‌های فضاکار که دارای سختی محدود می‌باشند).

حیطه مسایلی که در ملحوظداشتن آثار تغییر دما مطرح می‌گردند، به شرح زیر می‌باشند:

۱ـ تغییرات نسبتاً اندک و یکنواخت دما

۲ـ تغییرات نسبتاً زیاد واتساع (انبساط) حرارتی

۳ـ آثار گرادیان حرارتی در مقطع عضو

۴ـ آثار گرادیان حرارتی در لایه‌های متفاوت سازه فضاکار شبکه‌ای دو یا چند لایه

۵ـ سیلان و شکست تابع زمان علاوه بر آثار الاستیک

۶ـ گسیختگی تردگونه (اغلب در دمای پایین).

۳-۲-۵-۲-۲- آثار گرادیان حرارتی

براساس وضعیت واقعی سازه فضاکار و پوشانه‌ها و سیستم‌های تأسیساتی و شرایط آب و هوایی و سایر شرایط محتمل‌الوقوع، لازم است توزیع دما در مواضع متفاوت سازه فضاکار تخمین‌زده‌شده و آثار گرادیان حرارتی در مدل‌سازی و تحلیل و ترکیب بارها ملحوظ گردند. به ویژه در مورد شبکه‌های دو یا چندلایه و در حالاتی که دمای داخل و خارج ساختمان متفاوت بوده و همچنین در موارد تابش آفتاب بر یک سمت یا یک‌لایه از شبکه در حالی‌که لایه‌ها یا بخش‌های دیگر سازه در معرض تابش آفتاب قرار نداشته باشند، بررسی این آثار الزامی است. در مدل‌سازی به این منظور، نوع و میزان قابلیت انتقال حرارت از طریق پوشانه‌ها را باید مورد توجه قرار داد.

در سازه‌های فضاکار شبکه‌ای فولادی، با توجه به مقدار قابل ملاحظه ضریب انتقال حرارت فولاد، در مواردی که سازه فضاکار فاقد پوشانه‌های حایز خاصیت ایزولاسیون حرارتی باشد، آثار تغییرات دمای فصلی کل سازه یا آثار تغییرات دما در مجموعه سازه (گرادیان حرارتی) می‌تواند قابل ملاحظه باشد.

همچنین در حد امکان، زمان ساخت و نصب بهتر است از سوی طراحان تعیین یا پیش‌بینی گردد و متناسباً تغییرات روزانه و فصلی دما و همچنین آثار گرادیان حرارتی برای دوره ساخت و نصب تخمین‌زده شود.

در مواردی نیز ممکن است بسته به نوع تکیه‌گاه‌ها و قیود حرکتی و رفتار درزهای انبساط ضرورت داشته باشد آثار نیروهای ناشی از تغییرات دما بر سازه فاقد پوشانه نیز در کوتاه مدت مورد بررسی قرار داده شود.

۳-۲-۵-۲-۳- تحلیل و طراحی آثار ناشی از تغییرات دما

در هنگام بررسی آثار حرارتی، به طور کلی، طراح سازهٔ فضاکار گزینه‌های زیر را پیش رو دارد:

الف ـ طراحی اتصالات و درزهای لغزشی به منظور ایجاد امکان جابه جایی آزاد،

ب ـ طراحی میزان مصالح مصرفی مطابق با تنش‌های حرارتی حاصله (با فرض آنکه قید موجود در مقابل حرکت‌های حرارتی، از قید کامل به قید پاره‌ای متناسب با سختی بخش‌های دارای اندرکنش سازه بدل شده باشد)،

پ ـ تدابیری در جهت خنثی‌سازی و مقابله‌نمودن با ایجاد تغییرات دما اندیشیده شود.

ت ـ ترکیبی از مجموعهٔ روش‌های فوق مورد بررسی قرار داده شود.

__تفسیر ـ__ ذیلاً توصیه‌هایی به منظور طراحی و تحلیل سازه‌های فضاکار با دهانه‌های طویل، تحت اثر تغییرات دماهای اعمال‌شده بر اعضای سازه‌ای مطابق با روش ب فوق ارایه می‌گردد:

۱ ـ تحلیل اولیه

ـ تهیه طرح شماتیک اعضای سازهٔ فضاکار در معرض کنش‌های جوی،

ـ اعمال مفروضات ساده‌کننده (درحد قابل دفاع) برای تحلیل،

ـ مدل‌سازی کامل هندسی و شرایط مرزی سازه و اختیارنمودن سختی تقریبی برای سازه و دستگاه‌های تکیه‌گاهی، پوشانه‌ها، مهاربندی‌ها، پایه‌ها و...،

ـ اختیار مقادیر تغییرات دما (افزایش و یا کاهش) با توجه به شرایط جوی و موقعیت استقرار سازه در مناطق سردسیر، گرمسیر یا معتدل با فرض تغییرات دمای یکنواخت اعمال‌شده بر سازه،

ـ اختیار نمودن ضریب انبساط حرارتی مناسب برای مصالح سازه‌ای و غیرسازه‌ای،

ـ تحلیل سازه فضاکار تحت آثار تغییرات دما و به دست آوردن تغییر شکل‌ها، کرنش‌ها و تنش‌های حرارتی حاصله،

ـ مقایسه بزرگی تغییر شکل‌های حاصله با مقادیری که به عنوان معیار طراحی اختیار گردیده‌اند:

ـ در صورتی که تغییرمکان‌های بیشینه ناشی از تغییرات دما از معیار از پیش‌تعیین‌شده‌ای که با اصول منطقی تئوری سازه‌ها سازگار باشد (تغییرمکان هدف)، تجاوز نماید، طراحی باید با در نظرگرفتن این آثار ادامه یابد یا طرح به‌منظور کاهش آثار ناشی از تغییرات دما مورد تجدیدنظر قرار داده شود.

ـ در صورتی که تغییرمکان‌های بیشینه حرارتی از معیار اختیارشدهٔ حداقلی کم‌تر باشند، از آثار حرارتی صرفنظر گردد.

ـ در حد فاصل بین دو معیار فوق، تحلیل اولیه کافی تلقی می‌گردد.

ـ طراحی اولیهٔ اعضای سازه‌ای به منظور تعیین ابعاد مقاطع انجام شود.

۲ ـ طراحی نهایی

ـ سختی‌های اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای بر اساس طرح اولیه تعیین گردد،

ـ توزیع دمای سازه فضاکار و آثار گرادیان حرارتی در تمامی حالات بیشینه و کمینه تعیین شود،

ـ نتایج تحلیل تحت آثار حرارتی با نتایج حاصله از تحلیل تحت اثر سایر بارهای مربوط، با دیدگاه احتمال‌اندیشانه ترکیب گردند،

ـ اعضای سازه ای مورد طراحی تفصیلی قرار داده شوند،

ـ جزییات اجزای غیرسازه‌ای با توجه به مفروضات طراحی تهیه گردند.

__تفسیر ـ__ اعضای غیرسازه‌ای مانند تیغه‌های جداگر در اثر تغییرمکان‌ها و حرکت‌های ناشی از تغییرات دمای سازه مستعد بروز خسارت هستند. تغییرمکان‌های اعضای سازه‌ای در تماس با تیغه‌ها را باید در صورت عدم جداسازی تیغه‌ها و در صورت تماس با تیغه‌ها، به دقت مورد کنترل قرار داد و

محدود نمود. در غیر این صورت، ممکن است لازم باشد درز جدایی بین تیغه‌ها و سازه اصلی ایجاد نمود. تیغه‌های غیرسازه‌ای از نظر مقاومت در مقابل نیروهای جانبی متعامد بر آنها، باید بر سازه اصلی تکیه نمایند، ولی نباید در درون صفحهٔ خود، به نحوی به سازه متصل گردند که مانع عملکرد فرض شدهٔ سازه شوند، مگر آنکه مشارکت تیغه‌ها و نحوهٔ توزیع آنها در پلان سازه در طراحی مورد نظر بوده و به این منظور سیستم ترکیبی طراحی شده باشد انتظار نمی‌رود چنین سیستمی در سازه‌های فضاکار عملکرد کارا و مناسبی از خود نشان دهد.

نامطلوب‌ترین نوع ترک‌های ناشی از تغییرات دما در تیغه‌هایی مشاهده می‌گردند که به طور تنگاتنگ به سازه متصل گردیده‌اند.

چند راه حل در ارتباط با طراحی جزییات تیغه‌ها به شرح زیر به نظر می‌رسد:

۱ـ دیوارهای شبکه‌ای باربر به منظور مقاومت در مقابل تنش‌های حاصله طراحی گردند. در بسیاری از سازه‌های فضاکار، تنها سقف‌ها و کف‌ها و پوشش از نوع فضاکار هستند که اغلب متکی بر مجموعهٔ پایه‌های دارای دیوارهای قایم برشی یا سیستم‌های مهاربندی‌شده مقاوم در مقابل نیروهای جانبی می‌باشند.

۲ـ درز جدایی بین تیغه‌ها و عناصر غیرسازه‌ای و اعضای سازه پیش‌بینی گردد؛ به نحوی که امکان حرکت نسبی کافی در پیرامون تیغه‌ها فراهم شود. در این حالت توصیه می‌شود میزان جابه‌جایی سازه فضاکار در اثر تغییر دما تخمین زده شده و آزادی حرکت نسبی اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای به میزان مکفی فراهم شود.

۳ـ۲ـ ۶ـ بارهای ناشی از برف

۳-۲-۶-۱- کلیات

بار برف وارده بر بام بستگی به شرایط آب و هوایی، فرم، نوع، ابعاد، نسبت، ناحیه و جهت استقرار سازه و میزان تصعید حرارت از طریق بام و تفاوت دمای داخل سازه و خارج آن دارد. بار برف مبنا (تابع آب و هوا و شرایط اقلیمی) عبارت است از حداکثر بار برف قابل انتظار (برحسب وزن بر واحد سطح) در دوره بازگشت متوسط تعیین‌شده (به طور نمونه، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و یا ۲۰۰ سال). معمولاً نقشه‌هایی که دارای خطوط هم‌تراز بار برف مبنا می‌باشند، در کشورها در مقیاس درشت نمود تهیه شده‌اند و چنین نقشهٔ تقریبی نیز در نشریهٔ شمارهٔ ۵۱۹ مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و مبحث ششم مقررات ملی ساختمان کشور ارایه شده است. بار برف یکی از مؤثرترین کنش‌های وارده بر سازه‌های فضاکار پوشانندهٔ فضاهای وسیع در مناطق سردسیر و معتدل به شمار می‌رود. با توجه به آنکه نسبت بار برف به بار مرده سازه‌های فضاکار در مناطقی از کشور قابل ملاحظه‌است، نحوهٔ توزیع بار برف در این نوع سازه‌ها نقش مهمی در طراحی اجزای سازه فضاکار ایفا می‌نماید. از اینرو بارهای ناشی از برف که در دسته‌بندی‌های بارهای ثقلی و بارهای ناشی از شرایط جوی نیز قرار می‌گیرند، با توجه به اهمیت به طور جداگانه در این آیین‌نامه مورد بحث قرار داده شده‌اند. ملزومات بارگذاری برف در آیین‌نامه‌های ساختمانی رایج از جمله نشریهٔ شماره ۵۱۹ و مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران که برای سازه‌های متعارف تهیه شده‌اند، نمایشگر کنش‌های ناشی از برف در چنین سازه‌هایی تلقی نمی‌گردند. لذا تدوین دستورالعمل ویژهٔ این نوع از سازه‌های فضاکار به منظور تدقیق مقدار و شناخت نحوهٔ توزیع فضایی بار برف جهت ارایهٔ طرح‌های بهینه مورد نیاز می‌باشد. با وجود این تا تدوین چنین دستورالعملی، با توجه به موارد مندرج در بندهای ۳ـ۲ـ۶ـ۲ تا ۳ـ۲ـ۶ـ۵ بارهای ناشی از برف وارد بر سازه‌های فضاکار مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران در نظر گرفته می‌شوند.

شدت و شیوه توزیع بار برف روی سقف‌ها تابعی از شرایط آب و هوایی، توپوگرافی، شکل ساختمان و مصالح پوشش سقف، دمای سقف برف‌گیر، جهت کل باد و زمان می‌باشد. تمامی حالات محتمل بارگذاری از قبیل بارگذاری برف متقارن، نامتقارن، برف انباشتگی موضعی، یخبندان کلی یا موضعی، آویزه‌های یخی (قندیل) و نظایر آن باید در بارگذاری ملحوظ گردد.

تفسیر- *به علت تغییرات آب و هوای یک کشور و بین کشورهای متفاوت، مقایسهٔ مستقیم بارگذاری برف ارایه شده در آیین‌نامه‌های ساختمانی کشورهای متفاوت نتیجه بخش نخواهد بود. بیش از آن، این امر اهمیت دارد که پدیده‌های شناخته‌شدهٔ توزیع برف بر بام سازه‌های فضاکار بادیسه‌های متفاوت مورد مطالعه قرار داده شود که این امر با توجه به موارد کاربرد متداول سازه‌های فضاکار مشمول این آیین‌نامه شایستهٔ مطالعه ویژه است.*

لازم به یاد آوری است که نحوهٔ اعمال بار برف به صورت توصیه شده در مبحث ششم مقررات ملی ایران برای برخی از فرم‌های ساختمانی در تناقض آشکار با توصیه‌های آیین‌نامه اروپا می‌باشد و به نظر می‌رسد تصحیحات و تجدید نظر در این زمینه در مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران ضروری باشد. همچنین ضرورت دارد به بارگذاری برف در مورد برخی از فرم‌های رایج مانند گنبدها نیز پرداخته شود.

۳-۲-۶-۲- بار برف وارده بر زمین

در هر ناحیه آب و هوایی مهم (که در یک کشور پهناور مثل ایران نواحی متفاوتی از نظر آب و هوایی وجود دارد)، سنگین‌ترین بار برف وارده بر زمین بسته به منطقه، ناحیه و محل متغیر خواهد بود. میزان بار برف به منظور طراحی بر اساس داده‌های موجـود و ثبت‌شده در منطقه ساختگاه، موقعیت جغرافیایی، شرایط توپوگرافی محل، امتداد و جهت گل باد و سایر عوامل ذیربط برای ساختگاه تخمین‌زده می‌شود.

تفسیر- *تغییرات منطقه‌ای و برخی از تغییرات ناحیه‌ای (وابسته به ارتفاع از سطح آب آزاد و فاصله از دریا و نظایر آن) می‌تواند قابل ملاحظه باشد. در اغلب موارد، نیاز به تعریف جداگانه‌ای از بارها برای این نواحی واقع در یک منطقه وجود خواهد داشت. طبعاً، لازم است تعداد نواحی با بارهای متفاوت را در آیین‌نامه‌های بارگذاری محدود نماییم و از تغییرات موضعی ـ مگر در صورت تأثیر قابل اعتنا ـ در به دست آوردن بار برف متوسط منطقه‌ای صرف نظر نماییم.*

حالت بار برف بیشینه ممکن است در اثر ریزش یک برف سنگین یا انباشته‌شدن برف‌های پی در پی یا ریزش برف و به دنبال آن باران باشد. در هر موقعیت معین، اندازه‌گیری ضخامت برف و چگالی آن یا ارتفاع آب معادل آن، در طول سـال‌های متمـادی به عمل آمده و مقدار بیشینه سالانـه در دوره زمانی قابل ملاحظه مقایسه با عمر مفید سازه محـاسبه می‌گردد. جهت تخمین بار بیشینه برای دوره‌ای به طول تقریبی معادل عمر مفید سازه، گاه تحلیل آماری با استفاده از توزیع مقدار بیشینه صورت می‌گیرد. این مطالعات، منتج به تخمین بیشینه بار برف مورد انتظار روی سطح زمین در یک دوره بازگشت مشخص خواهد گردید.

۳-۲-۶-۳- بار برف وارده بر بام و پوشانهٔ سازه‌های فضاکار

در مورد سازه‌های فضاکار پوشانندهٔ فضاهای وسیع فاقد ستون‌های میانی در دو امتداد متعامد بارهای برف در مناطق سردسیر و معتدل، اغلب نقش تعیین‌کننده در طراحی سازه فضاکار خواهند داشت. بار برف ماهیتاً ثقلی محسوب گردیده و به صورت قائم بر مساحت سطح افقی حاصل از تصویر سطح بام شیب‌دار یا رویه‌های منحنی شکل اعمال می‌گردد.

جز در مناطق کم باد یا حفاظدار، بار وارده بر بام سازه معمولاً از بار برف وارده بر سطح زمین با همان مساحت، کوچک‌تر خواهد بود. زیرا بخشی از برف فرود آمده بر بام به وسیله باد پراکنده می‌گردد. همچنین باد می‌تواند بخش‌هایی از برف برجای مانده را هم به تدریج بردارد. به علت افزایش دما یا گرم‌شدن بام از طبقه زیرین و انتقال حرارت از طریق مصالح پوشانهٔ بام، بخشی از برف تبخیر و یا ذوب می‌شود. گاه از روش‌های گرم‌کردن پوشانه به منظور عدم تجمع برف در سازه‌های فضاکار پوشش دهانه‌های وسیع در دو امتداد متعامد بهره‌گیری می‌شود. از طرف دیگر ذوب شدن و به دنبال آن کاهش دما و یخبندان متعاقب آن، ممکن است مانع جابه جایی برف از بام توسط باد گردد.

موارد فوق و همچنین احتمال نزول برف از بخش‌های مرتفع‌تر بر پوشانهٔ مورد بحث نه تنها کل بار را تغییر می‌دهد، بلکه نحوه توزیع بار برف را نیز دگرگون می‌نماید. در حالتی که شکل و فرم بام موجب کاهش سرعت باد در موضعی از بام گردد، ممکن است در آن موضع، شدت بار برف از شدت بار برف روی زمین افزون‌تر باشد.

نسبت بار برف وارده بر بام به بار برف روی زمین به طور عمده به فرم سازه، شیب سقف‌ها، میزان زبری سطوح در معرض بارش برف سرعت و جهت و طول مدت وزش باد و شرایط تابش خورشید بستگی دارد و توزیع بار برف بر بام سازه فضاکار باید با توجه به این عوامل و شروط، تخمین‌زده شود و لذا در حالت‌های متفاوتی مانند اعمال بار گستردهٔ یکنواخت یا به صورت نامتقارن یا با انباشتگی موضعی با توجه به جمیع جهات ملحوظ گردد.

تفسیر- *معمولاً روش‌های آماری با کاربرد به مراتب کلی‌تر، مورد استفاده قرار می‌گیرند که طی آن مقادیر بارهای برف بر تعداد قابل ملاحظه‌ای از سازه‌های دارای فرم و نوع خاص، اندازه‌گیری‌شده و روابطی برای بار برف روی سازه برحسب بار برف میانگین منطقه‌ایِ روی زمین تهیه و به کار برده می‌شود.*

۳-۲-۶-۴- بارهای برف، یخ و انباشت آب باران و یخ

براساس داده‌های موجود، تاریخی و شرایط اقلیمی و آب و هوایی و مسیر مسلط گل باد، لازم است بارهای مربوطه به صورت بارهای مبنا برای ساختگاه تعیین شوند.

با توجه به فرم سازه فضاکار، انحنا یا شیب رویهٔ تمام‌شدهٔ بیرونی، زبری پوشانه‌ها، باید توزیع بار برف را در شرایط محتمل بر سازه فضاکار به دست آورد. اثر باد بر برف و جابه‌جایی آن و امکان بروز یخ‌بندان و انباشت یخ، در بررسی‌ها گنجانده شود.

در مواردی که به دلیل نارسایی‌های محتمل و سیستم زهکشی احتمال انباشت آب ناشی از ذوب یخ یا آب باران وجود داشته‌باشد، باید این اثر در نظر گرفته شود. همچنین تشکیل قندیل‌های آویز از لبه‌های بام‌ها، در صورت محتمل بودن، باید تخمین و ملحوظ گردد. باید از احتمال تشکیل فروافتادن چنین قندیل‌هایی در مواردی که می‌تواند منجر به اعمال صدمات و یا خساراتی گردد، با زهکشی مناسب شود.

۳-۲-۶-۵- ملاحظات کلی در تعیین بارهای برف

با توجه به آنکه در اغلب سازه‌های شبکه‌ای فضاکار با توجه به سبکی نسبی وزن سازه فضاکار پوشش بام‌ها، نسبت بار برف به بار مرده قابل ملاحظه می‌باشد، ملاحظات زیر را در بارگذاری برف در مورد سازه‌های فضاکار مزبور، به ویژه سازه‌های فضاکار مورد بهره‌گیری در پوشش فضاهای وسیع در دو راستای متعامد، بدون ستون‌های میانی قابل توصیه‌اند:

تفسیر - *تجارب حاصل از فروریزی تعداد قابل ملاحظه‌ای سازه با دهانه‌های بزرگ در اثر ریزش برف سنگین در زمستان ۱۳۸۵در چندین کشور از جمله آلمان، شمال هندوستان، چین، اروپای شرقی، روسیه و ایران (گیلان) نشان‌دهندهٔ ضرورت تجدید نظر در دیدگاه‌های طراحی برای بارهای برف و بارگذاری کنش‌های ناشی از برف بوده است. لذا تا انجام مطالعات گسترده‌تر و در اختیارداشتن شواهد متقن در این زمینه، توصیه‌های محافظه‌کارانه این بند برای گروهی از سازه‌های فضاکار مشخص‌شده در زیر، ارایه گردیده‌اند.*

-بار برف بدون ضرایب کاهش سربار اعمال گردد.

- کوشش به عمل آید برای ممانعت از انباشت برق و یخ از المان‌های گرم‌کننده، به قصد ذوب برف و یخ پوشانه بام بهره‌گیری شود.
- در مورد سازه‌های فضاکار مهم که انتظار می‌رود در گروه عمر مفید ۳ و۴ قرار داشته باشند (دارای عمر مفید ۵۰ سال یا بیشتر) و پوشش فضاهایی را تأمین می‌نمایند که افراد بالنسبه زیادی را در خود جای می‌دهند یا تجهیزات یا مدارک حایز اهمیتی را پوشش می‌دهند یا به عنوان پوشش محفظه‌هایی به‌کار گرفته می‌شوند که موادی را دربردارند که آزادشدن آنها خطرآفرین خواهد بود و یا ساختمان‌هایی که برای بهره‌گیری در مدیریت بحران پس از وقوع سوانح طبیعی در نظر گرفته شده‌اند و همچنین ساختمان‌های پرهزینه با اهمیت نمادین یا استراتژیک، بار برف باید در دو سطح با توجه به دورهٔ بازگشت طولانی مدت متناسب با احتمال اندک وقوع در عمر مفید ساختمان (سطح ایمنی) و احتمال وقوع قابل قبولی طی عمر مفید (سطح بهره‌برداری با احتمال وقوع قابل ملاحظه در عمر مفید) تعیین و در هر دو سطح ترازهای عملکردی مورد انتظار از سوی طراحان تعیین و به تأیید کارفرما برسد.
- در دیدگاه طراحی مبتنی بر عملکرد بار برف در دو تراز بهره‌برداری (با دوره بازگشت قابل مقایسه با عمر مفید سازه) و در تراز ایمنی (با دوره بازگشت به مراتب افزون‌تر از عمر مفید سازه و احتمال وقوع اندک) همراه با تبیین معیارهای عملکردی متناسب، صورت می‌گیرد.

۳ـ۲ـ۷ـ بارهای تابع تغییرشکل

تغییرشکل سازه‌ها باعث جابه‌جایی بار می‌شود و گاهی این جابه‌جایی باعث افزایش اثر آن خواهد شد. پدیده موسوم به اثر P-Δ ناشی از اثر اندرکنش بارهای ثقلی و تغییرمکان‌های جانبی، نمونه‌ای از این نوع افزایش اثر بار در اثر جابه‌جایی آن در قاب‌های ساختمانی و ستون‌ها می‌باشد. گاه در اثر تغییرشکل سازه، میزان بار وارده بر کل سازه و یا منطقه‌ای از سازه (که معمولاً مواضع حساس و بحرانی می‌باشند) افزایش می‌یابد. لذا به این بارها تابع تغییرشکل سازه می‌باشند.

تغییر میزان بارهای وارد بر سازه و آثار ناشی از آن، در سازه‌های با دهانه و ابعاد بزرگ می‌تواند حایز اهمیت ویژه باشد و باید در تحلیل و طراحی سازه و جزییات آن منظور گردد.

بارهای تابع تغییر شکل برحسب نوع وکاربرد سازه فضاکار، ممکن است به صورت‌های گوناگونی اعمال گردند. مثال‌هایی از این نوع بارها به این قرار می‌باشد:

- انباشتگی و یا ایجاد حوضچه آب، این نوع بار از بارزترین نمونه‌های بار تابع تغییرشکل بوده و به سرازیر و جمع و روان‌شدن فزاینده آب به سمت "داخل و مرکز" سازه‌های سقفی تخت افقی بدون شیب یا کم شیب اطلاق می‌گردد. این پدیده ممکن است ناشی از بارش شدید و سیل آسای باران‌های به ویژه موسمی؛ یا ذوب شدن سریع برف در مناطق "داخلی" یک سازه سقفی دراثر افزایش ناگهانی دمای محیط یا داخل به طور طبیعی و یا مصنوعی مثل "گرمکن‌های برقی" و عدم زهکشی و کفایت آبروها و ناودانی‌های تخلیه آب و یا همزمانی بارش باران و یا ذوب شدن برف در مناطقی از سطح سازه با مسدودشدن و یا انجماد و در سایه قرارگیری مسیر و محل عبور و تخلیه آب حادث گردد. جنس، هندسه و نحوه قرارگیری پوشانه نیز امر انباشتگی آب را می‌تواند شدت بخشد. به عنوان مثال در مورد پوشش‌های پاشامی با انعطاف زیاد، به ویژه درصورت دارا بودن مقاومت زیاد، انباشتگی موضعی آب شدت خواهد یافت.

- انباشتگی و غلت‌خوردن و جمع‌شدن "بهمن‌گونه" برف در مناطق مرکزی و داخلی سقف‌های بزرگ در اثر افزایش تغییرشکل سازه.
- افزایش انباشتگی مواد ریزدانه، موادی مثل گرده بینه‌های چوبی، مواد و یا وسایلی به شکل بشکه و کره که در اثر تغییرشکل سازه و پیدایش شیب به طرف مرکز سازه، امکان سرخوردن یا غلتیدن جابه‌جایی به طرف وسط دهانه سازه را دارند.
- افزایش ارتفاع آب (و یا دیگر مایعات) در پشت سازه‌های فضاکار دیواره‌ای در اثر افزایش تغییرشکل که منجر به افزایش فشارهیدرواستاتیکی خواهد شد.
- افزایش قندیل‌های یخی به علت به وجود اختلاف دما در نواحی متفاوت سازه‌های وسیع و ذوب برف و جاری‌شدن و افزایش یخزدگی قندیل‌های آویخته.

برای جلوگیری از آثار نامطلوب ناشی از افزایش بارها در اثرافزایش تغییرشکل، باید به یکی از طرق زیر عمل شود:

- با شیب‌بندی و جزییات مناسب امکان انباشتگی وافزایش بارها حذف گردد. در سازه‌های با پوشانه‌های انعطاف‌پذیر، طبعاً نیاز به شیب‌بندی از پوشانه‌های صلب افزون‌تر خواهد بود.
- در سازه‌های با انحنای منفی (کاو) تمهیدات ویژه‌ای نسبت به عبور و زهکشی آب و ممانعت از آب انباشتگی و انباشت یخ باید منظور گردد.
- با افزایش سختی سازه و کاهش تغییر شکل با بارهای ناشی از تغییرشکل سازه تقلیل داده شود به نحوی که افزایش محتمل بار منجر به بروز ناپایداری سازه نگردد.

باید توجه داشت که در صورتی که آثار ناشی از بارهای تابع تغییرشکل سازه به میزانی قابل ملاحظه باشد که نیاز به تحلیل این آثار باشد، با توجه به ماهیت بارها، تحلیل باید با توجه به آثار غیرخطی هندسی و مصالح صورت گیرد.

۳ـ۲ـ۸ ـ آثار ناشی از اختلاف نشست

نشست تکیه‌گاه‌های سازه‌ها معمولاً از سه جنبه مورد بررسی قرار داده می‌شود:

- نشست مطلق کلی (نشست متجانس)،
- نشست نسبی (اختلاف نشست یا نشست نا متجانس)،
- نشست با تغییرات خطی منجر به دوران مجموعهٔ پی و سازه.

نشست مطلق کلی یکنواخت تکیه‌گاه‌ها با ماهیت استاتیکی، از دیدگاه حالات‌های حدی نهایی معمولاً برای تمامیت سازه منجر به نقض معیارهای پذیرش نگردیده، ولی از نقطه نظرات مرتبط با حالات حدی بهره‌برداری، بسته به مقدار نشست، ممکن است به نقض معیارهای مربوط بینجامد. معمولاً آثار مربوطه به ویژه در مورد خطوط تأسیساتی باید مورد بررسی قرار داده شده و مقادیر بیشینهٔ مجاز نشست مطلق کلی سازه بسته به نوع سازه و پی در مشخصات فنی طرح تعیین گردد.

نشست نسبی متزاید می‌تواند تاثیرات قابل ملاحظه‌ای بر پی و سازه داشته باشد. برای سازه‌های فضاکار که دارای درجه نامعینی زیادی می‌باشند، آثار ناشی از اختلاف نشست در باز توزیع لنگرهای خمشی، نیروهای برشی و نیروهای محوری و اعضا و نیروها و لنگرهای وارده بر اتصالات می‌تواند قابل ملاحظه باشد.

بنابراین در طراحی پی‌های سازه‌های فضاکار بایستی نکات زیر را در نظر گرفت:

الف) مقدار نشست نسبی تکیه‌گاه‌ها به میزان مشخصی محدود گردد تا اثر آن بر رفتار مجموعه و اعضا و اجزای سازه فضاکار ناچیز باشد.

ب) در مشخصات فنی طرح، با توجه به ویژگی‌های طرح و نوع سیستم سازه و شیوهٔ بهره‌برداری، باید حد مشخصی برای اختلاف نشست مجاز پی‌های پایه‌های مجاور یکدیگر تعیین گردد.

پ) در صورت تجاوز از حد ذکر شده، اثر نشست نامتجانس پی‌ها باید برای بحرانی‌ترین حالات محتمل مورد بررسی قرار داده شود.

ت) آثار نشست نامتجانس احتمالی که در عمر سازه ممکن است اتفاق بیفتد و می‌تواند رفتار سازه فضاکار را تحت تأثیر قرار دهد، باید در طراحی به گونه مناسب مدّ نظر قرار داده‌شود. هرگونه علایم بروز این نوع اختلاف نشست، باید در گزارش‌های بازرسی فنی ثبت و اقدامات به موقع نگهداری یا بهسازی در این زمینه به عمل آید.

ث) احتمال بروز روانگرایی و یا گسترش جانبی خاک در مورد خاک‌های مستعد بروز این پدیده تحت تأثیر زلزله باید در طراحی لرزه‌ای سازه فضاکار مورد بررسی قرارداده شود و مرجحاً اقدامات بهسازی خاک زیرشالوده یا طراحی شالوده از نوع عمیق برای کاهش بروز آثار مخرب ناشی از چنین پدیده‌هایی به عمل آید.

۳ـ۲ـ۹ـ آثار ناشی از نامیزانی

در بافت، ساخت و نصب و سایر عملیات اجرایی سازه‌های فضاکار اغلب به دو دلیل نامیزانی اتفاق می‌افتد:

الف) ـ عدم دقت در ساخت اعضا، اتصالات و پی‌ها،

ب) ـ عدم دقت در اجرا (به‌ویژه پیاده‌سازی محورها).

اگر در فرایند بافت، ساخت و اجرای سازه‌های فضاکار، مسأله نامیزانی برای اعضای سازه‌ای پیش آید یا به عبارت دیگر طول واقعی عضو کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از طول آن در وضعیت نهایی اجرا باشد، اگر نیروی لازم برای کشیدن عضو کوتاه‌تر و یا برای فشردن عضو بلندتر جهت جاگذاری کوچک‌تر از ۱۰٪ نیروی محوری طراحی عضو باشد، می‌توان از اثر این نامیزانی صرف‌نظر کرد، در غیر این صورت، نیروهای پیش‌تنیدگی مذکور باید در تحلیل و طراحی سازه فضاکار مدّنظر قرار داده شوند.

اگر در طی ساخت، بافت و نصب سازه‌های فضاکار، مسأله نامیزانی برای اتصالات پیچی پیش آید یا به عبارت دیگر در صورتی‌که کاهش سختی ناشی از شلی و افزایش سختی ناشی از سفتی اتصالات کمتر از ۲۰٪ سختی اسمی اتصال باشد، می‌توان از این اثر صرف‌نظر کرد، در غیر این صورت باید تغییر در سختی اتصال در تحلیل و طراحی سازه فضاکار و طراحی اتصال و عضو مدّنظر قرار گیرد. در اینجا، حالت شلی یا پیش‌تنیدگی پیچ‌ها در مقایسه با حالت سفتی ایجادکنندهٔ تماس عضو و پیونده مورد نظر می‌باشد.

۳ـ۲ـ۱۰ـ آثار ناشی از پیش‌تنیدگی

پیش‌تنیدگی در اعضا و اتصالات سازه‌های فضاکار به دو گونه می‌تواند اتفاق بیفتد:

الف) اعمال پیش‌تنیدگی معین

ب) اعمال پیش‌تنیدگی تصادفی ناشی از نامیزانی

در صورتی‌که با هدف خاصی، پیش‌تنیدگی به برخی از اعضای سازه‌های فضاکار اعمال شود، در این صورت نیروهای ناشی از پیش‌تنیدگی مذکور باید در تحلیل و طراحی سازه‌های فضاکار و اعضای آن ملحوظ گردند.

در خصوص اعمال پیش‌تنیدگی ناشی از نامیزانی به بند (۳ـ۲ـ۶ ـ آثار ناشی از نامیزانی) مراجعه شود.

۳ـ۲ـ۱۱ـ بار باد

۳ـ۲ـ۱۱ـ۱ـ کلیات

در بندهای ذیل، ملزومات و شیوه‌های محاسبه بارهای ناشی از باد برانواع سازه‌های فضاکار مشمول این آیین‌نامه، زیرمجموعه‌ها و اجزای سازه و همچنین اجزای غیرسازه‌ای و پوشانه‌های سازه فضاکار ارایه گردیده‌اند. این ملزومات عمدتاً در مورد سازه‌های فضاکار دارای انتظام هندسی و تقارن در توزیع سختی و جرم صادق بوده و با انحراف از این ویژگی‌ها، میزان دقت در کاربرد این ملزومات نیز کاهش می‌یابد. در مورد سازه‌های نامنظم، شامل سازه‌هایی با شکل هندسی متفاوت با اشکال مورد بحث در این قسمت، سازه‌های دارای فرم‌های هندسی پیچیده، سازه‌های واقع در ساختگاه‌های با آثار نامعمول باد یا مواردی که نوع و رفتار پوشانه‌ها به گونه‌ای است که تخمین پاسخ دینامیکی سیستم به آثار ناشی از باد مستلزم بررسی‌های ویژه است، باید از مطالعات عددی و آزمایشگاهی متناسب با نوع و میزان اهمیت پروژه بهره‌گیری شود. انجام آزمایش‌های تونل باد بسته به امکانات قابل دسترسی در مقیاس‌های واقعی یا بر مدل‌های به مقیاس کوچک‌شده، همراه با مدل‌سازی و تحلیل واقع‌گرایانهٔ آثار توأم باد و سازه به منظور تعیین آثار ناشی از باد بر سازه و پاسخ دینامیکی سازه در این حالت‌ها ضروری خواهد بود؛ معذلک در مواردی که امکانات انجام آزمایش‌های تونل باد بادقت مورد نظر فراهم نباشد، مطالعات عددی روشنگر رفتار دینامیکی سازه در مقابل آثار محتمل ناشی از باد به‌عنوان مطالعات حدّاقل برای چنین سازه‌هایی الزامی است.

در بندهای زیر اثر باد بر سازه‌های متشکل از سقف‌های با فرم‌های هندسی تخت، استوانه‌ای، محدب (چلیک‌ها)، سازه‌های گنبدی شکل و سقف‌های طره‌ای در حالت مستقر بر زمین و یا دارای ارتفاع نسبت به تراز سطح زمین، مورد بحث قرار داده شده است. چنانکه ذکر شد، انواع سازه‌های فضاکار دیگر را باید مرجحاً با شبیه‌سازی دقیق فرم و مصالح در تونل باد آزمایش نموده، فشارهای ناشی از باد را برای بارگذاری، تحلیل و طراحی آنها به دست آورد.

تفسیر- *لازم به یادآوری است که بار باد وارده بر سازهٔ فضاکار نیمه‌تمام در تمامی مراحل ساخت و نصب باید به نحوه واقع‌گرایانه‌ای توسط طراح تخمین زده شود و تمهیدات لازم برای پایدارسازی سازهٔ نیمه تمام تحت تأثیر وزش باد محتمل در بازهٔ زمانی ساخت پیش‌بینی گردد.*

با توجه به تعداد قابل ملاحظه اعضای سازه‌های فضاکار شبکه‌ای و احتمال قابل ملاحظه بودن آثار باد بر مجموعه اعضا و پیوندهای سازه فضاکار، ممکن است در مواردی ضرورت یابد آثار ناشی از بار باد بر سازهٔ فضاکارِ فاقد پوشانه نیز در کوتاه مدت مورد بررسی قرار داده شود. در تمامی حالات ممکن، باید اثر موضعی باد بر اعضای سازه شبکه‌ای فضاکار مطابق ملزومات مندرج در این آیین‌نامه در تحلیل و طراحی ملحوظ گردد.

اتصالات تکیه‌گاه‌ها به شالوده‌ها باید به نحوی طراحی شوند و مهار پی در زمین یا وزن شالوده باید به گونه‌ای اختیار گردد که بار برِکَنش ناشی از باد را با حاشیه ایمنی کافی خنثی نماید. به این منظور برای دهانه‌های وسیع ممکن است بسته به باز یا بسته‌بودن دیواره‌ها نیروی برِکَنش به میزانی باشد که در برخی یا تمام تکیه‌گاه‌ها، احداث پی شمعی یا شالودهٔ حجیم و سنگین برای جلوگیری از برِکَنش سازه ضروری می‌باشد و

در این حالات اتصالات سازه به اجزای تکیه‌گاهی، پایه و پی باید قادر به تحمل جمع جبری نیروی بر کنش و نیروهای ثقلی و سایر نیروهای ذیربط در ترکیب بار مورد مطالعه باشد. در این حالت، ضریب ایمنی مکفی برابر با ۱/۷۵ توصیه می‌شود. معمولاً باید حالات ترکیب بار موردی بررسی شامل حالات مقادیر بیشینه اثر نیروی بر کنش باد در ترکیب با مقادیر کمینه بارهای مرده (با اعمال ضریب کاهش ۰/۹ بر بارهای مرده)، بدون در نظرگرفتن سایر بارهای ثقلی نیز باشد.

۳ـ۲ـ۱۱ـ۲ـ تعاریف

ـ سرعت باد مبنا

سرعت باد اندازه‌گیری‌شده به مدت ۳ ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری از تراز سطح زمین باز در موقعیتی که ارتفاع موانع پراکنده اطراف محل اندازه‌گیری از ده متر کمتر باشد. سرعت باد مبنا برای دوره بازگشت متوسط ۵۰ ساله با احتمال وقوع سالانه‌ای برابر با ۲٪ در نظر گرفته می‌شود. سرعت باد مبنا را باید از داده‌ها و اطلاعات سازمان هواشناسی و یا مدارک معتبر استحصال نمود.

ـ سازه‌های فضاکار باز

سازه‌هایی که مساحت سطوح بازشو در وجوه جانبی آنها حداقل ۸۰٪ مساحت ظاهری سطوح جانبی آنها است.

ـ سازه‌های فضاکار نیمه بسته

به سازه‌هایی اطلاق می‌شود که دو شرط زیر را ارضا نمایند:

الف ـ مساحت سطح کل بازشوها در وجهی که فشار بیرونی بر آن وارد می‌شود، به میزان ده درصد از مجموع مساحت سطوح بازشوها در بقیه وجوه سازه (شامل دیوارها و سقف‌ها) افزون‌تر باشد.

ب ـ مساحت سطح کل بازشوها در دیوار یا وجهی که فشار بیرونی بر آن وارد می‌شود، کوچک‌تر از ۱٪ مساحت آن وجه باشد و در عین حال، مجموع مساحت بازشوها در سایر وجوه سازه از ۲۰٪ تجاوز ننماید.

ـ سازه‌های فضاکار بسته

سازه‌هایی که با شرایط سازه‌های باز یا نیمه بسته مطابقت نداشته باشند، در این گروه طبقه‌بندی می‌گردند.

ـ اجزای فرعی و پوشانه‌ها

به عناصری اطلاق می‌شود که سهمی در سیستم اصلی مقاوم در برابر نیروی باد نداشته و صرفاً نقش انتقال بارهای موضعی باد به اعضای اصلی سازه مقاوم را ایفا می‌نمایند.

ـ سطح مؤثر باد

به سطحی گفته می‌شود که برای تعیین ضرایب فشار باد به‌کار برده می‌شود.

ـ سازه‌های انعطاف‌پذیر

به سازه‌هایی اطلاق می‌شود که دارای بسامد طبیعی اساسی کمتر از ۱ هرتز باشند. سازه‌هایی لاغر تلقی می‌گردند که نسبت ارتفاع آنها به بعد کوچک ساختمان از ۴ تجاوز نماید.

ـ سیستم اصلی مقاوم در برابر نیروی باد

مجموعه‌ای از اجزای سازه که صرف‌نظر از اثرات موضعی در مسیر انتقال نیروهای ناشی از باد قرار داشته و برای مقاومت در مقابل نیروهای ناشی از باد و تأمین تعادل و پایداری کل سازه در مقابل باد در نظر گرفته شده‌اند. این سیستم عموماً بار باد را در بیش از یک سطح (وجه) دریافت و منتقل می‌نماید.

۳ـ۲ـ۱۱ـ۳ـ روش‌های محاسبه بارهای باد

روش‌های مجاز تحلیل آثار ناشی از بارهای باد عبارت‌اند از:

الف) روش تحلیل استاتیکی

ب) روش تحلیل دینامیکی

پ) روش تجربی

۳ـ۲ـ۱۱ـ۳ـ۱ـ روش تحلیل استاتیکی

فشارهای باد طراحی و نیروهای باد مطابق ۳ـ۲ـ۱۱ـ۴ تعیین می‌شوند. آثار ناشی از باد باید برای سیستم‌های اصلی مقاوم در برابر نیروی باد و همچنین برای اجزای فرعی و پوشانه سازه‌های فضاکار محاسبه شوند.

۳ـ۲ـ۱۱ـ۳ـ۲ـ روش تحلیل دینامیکی

ساختمان‌ها و سازه‌هایی که ارتفاع آنها بزرگ‌تر از چهار برابر حداقل عرض مؤثر و یا بزرگ‌تر از ۱۲۰متر باشد و یا سازه‌هایی که وزن، بسامد و میرایی آنها باعث می‌شود تا سازه در معرض ارتعاشات با پریود نوسان طولانی قرارگیرند، باید به صورت زیر طراحی شوند.

الف) از روش‌های تجربی برای بررسی آثار بارهای افزایش‌یافته، ارتعاشات و خستگی،

ب) با استفاده از روش‌های دینامیکی مبتنی بر اثر تندباد.

عرض مؤثر برای ساختمان‌ها با رابطه (۳-۲) تعریف می‌شود:

$$w = \frac{\sum h_i w_i}{\sum h_i} \qquad (۳ـ۲)$$

که در آن:

h_i : ارتفاع بالای تراز طبقهiام

w_i: عرض مورد نظر عمود بر جهت وزش باد در تراز h_i

حداقل عرض مؤثر، عبارت است از کوچک‌ترین مقدار عرض مؤثر به دست آمده از رابطهٔ ۳-۲.

در روش دینامیکی ضریب بادگیری"C_e"و ضریب تندباد "C_g " متفاوت با ضرایب روش استاتیکی (به شرحی که متعاقباً خواهدآمد) است، ولی ضریب فشار برابر با ضرایب حاصل از روش استاتیکی در نظر گرفته‌می‌شود. ضرایب فوق را باید از مراجع معتبر بین‌المللی برای روش دینامیکی استخراج نمود.

۳ـ۲ـ۱۱ـ۳ـ۳ـ محدودیت‌های روش‌های تحلیلی

روابط این بخش شامل بارگذاری باد در جهت عمود بر وزش باد، ریزش گرد بادی یا ناپایداری ناشی از نوسانات بیضوی یا شلاقی نمی‌شود. برای بررسی این آثار، طراح باید به مدارک فنی معتبر مربوط به این آثار مراجعه و یا از روش آزمایش نمونه در تونل باد بهره‌گیری نماید.

۳ـ۲ـ۱۱ـ۳ـ۴ـ روش تجربی

ضرایب فشار و نیروی باد برای برخی از سازه‌ها و اجزای سازه‌ای در این آیین‌نامه ارایه‌شده است که بر پایه نتایج آزمایش در تونل باد تعیین گردیده‌اند. سازه‌ها و اجزای سازه‌ای دیگر به غیر از آنچه در اشکال ۳ـ۸ الی ۳ـ۲۵ ارایه شده‌اند، باید به روش تجربی تحلیل شوند.

در مواردی که نیاز به آزمایش در تونل‌های باد باشد، در شبیه‌سازی جریان باد در تونل باید دقت متزایدی به کار برد و جریان باد را به نحو واقع‌گرایانه‌ای شبیه‌سازی نمود. برای این منظور، سرعت، شدت و مقیاس اغتشاش باید شبیه‌سازی شوند. برای به دست‌آوردن نیروها و فشارهای استاتیکی از مدل‌های صلب سازه و برای اندازه‌گیری شتاب و پارامترهای رفتاری کل سازه از مدل‌های آیروالاستیک استفاده می‌شود.

روش تجربی یا روش تونل باد بالاخص برای سازه‌ها و ساختمان‌هایی که تحت آثار هوابندی یا کانالی ناشی از موانع یا سازه‌های بالادست قرار می‌گیرند و همچنین سازه‌هایی که ناپایداری آیروالاستیکی و آیرودینامیکی دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳ـ۲ـ۱۱ـ۴ـ مقادیر بارهای ناشی از باد

فشارهای طراحی تعیین‌شده در این قسمت باید در بارگذاری باد وارده بر سازه‌های فضاکار با پوشانه‌های نفوذپذیر مورد استفاده قرار گیرند، مگر آنکه بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی مورد تأیید یا مدارک فنی معتبر مقادیر کوچک‌تری را برای بارهای وارده بر پوشانه‌های نفوذپذیر، با توجه به ویژگی‌های پوشانه و خصوصیات هندسی، نشان دهند.

۳ـ۲ـ۱۱ـ۴ـ۱ـ ارتفاع مرجع

برای ساختمان‌های تحت تأثیر فشار بیرونی، ارتفاع مرجع"h" برای تعیین ضریب بادگیری C_e به صورت زیر تعریف می‌شود.

الف) برای ساختمان‌های کوتاه (دارای ارتفاع کوچک‌تر از ۲۰ متر):

برابر با ارتفاع میانگین سقف یا ۶ متر هرکدام بزرگ‌تر باشند. در صورتی که شیب سقف کوچک‌تر از ۷ درجه باشد، ارتفاع لبه را می‌توان جایگزین ارتفاع میانگین نمود.

ب) برای ساختمان‌های بلند:

i) h برای وجه روبه باد: برابر با ارتفاع واقعی نقطه مورد نظر از تراز زمین،

ii) h برای وجه پشت به باد: برابر با نصف ارتفاع ساختمان،

iii) h برای سقف و دیوارهای جانبی: برابر با ارتفاع ساختمان.

پ) برای فشارهای درونی، h برابر نصف ارتفاع ساختمان در نظر گرفته می‌شود، مگر هنگامی‌که دارای یک بازشو بزرگ باشد، که در آن حالت باید h را ارتفاع بازشو از تراز زمین اختیار نمود.

۳ـ۲ـ۱۱ـ۴ـ۲ـ تعیین فشار باد

فشار یا مکش ناشی از باد بر یک جزء یا تمام سطح یک سازه یا ساختمان از رابطه (۳-۳) محاسبه می‌گردد.

$$P=I_w q\ C_e\ C_g\ C_p \qquad (۳\text{ـ}۳)$$

در رابطه بالا

P : فشار بیرونی که به صورت استاتیکی و عمود بر سطح وارد می‌شود که می‌تواند به صورت فشار وارده بر سطح یا مکش در جهت خارج از سطح باشد.

I_w : ضریب اهمیت ساختمان،

q : فشار متناظر با سرعت مبنا،

C_e : ضریب بادگیری،

C_g : ضریب تندباد،

C_P : ضریب فشار بیرونی میانگین‌گیری‌شده در سطح مورد نظر.

فشار خالص باد وارد بر کل ساختمان یا سازه از جمع جبری فشار بر سطوح رو به باد و پشت به باد و یا در بعضی موارد از جمع فشار و مکش سطوح حاصل می‌شود.

۳ـ۲ـ۱۱ـ۴ـ۳ـ فشار خالص ناشی از باد

۳ـ۲ـ۴ـ۷ فشار خالص ناشی از باد بر یک جزء یا تمام سطح یک ساختمان از جمع جبری فشار و مکش به‌دست می‌آید. فشار یا مکش درونی ناشی از باد از (۳-۴) به‌دست می‌آید.

$$P_i= I_w q\ C_e\ C_{gi}\ C_{pi} \qquad (۳\text{-}۴)$$

در رابطه بالا

P_i: فشار درونی که به صورت استاتیکی و عمود بر سطح وارد می‌شود که می‌تواند به صورت فشار به رویه سطح یا مکش به سمت خارج از سطح باشد.

I_w: ضریب اهمیت،

q: فشار متناظر با سرعت مبنا،

C_e: ضریب بادگیری،

C_{gi}: ضریب اثر تند باد درونی،

C_{pi}: ضریب فشار درونی.

۳ـ۲ـ۱۱ـ۴ـ۴ـ ضریب اهمیت

به منظور محاسبه فشار ناشی از باد در روابط ۳ـ۳ و ۳ـ۴ ضریب اهمیت، I_w ، از جدول ۳ـ۲ به دست می‌آید.

جدول ۳ـ۲ـ مقادیر ضرایب اهمیت، I_w ، برای محاسبه کنش‌های ناشی از باد

ضریب اهمیت	گـــروه ساختمـــان
۰/۸	سازه‌های کوتاه و سازه‌های طبقه‌بندی‌شده در گروه عمر مفید۱
۱	سازه‌های با ارتفاع متوسط و سازه‌های طبقه‌بندی‌شده در گروه عمر مفید۲
۱/۱۵	سازه‌های بلند و سازه‌های طبقه‌بندی‌شده در گروه عمر مفید۳
۱/۲۵	سازه‌های با اهمیت ویژه از جمله سازه‌های مورد بهره‌برداری در مدیریت بحران پس از وقوع سوانح‌طبیعی و سازه‌های طبقه‌بندی‌شده در گروه عمرمفید۴.

۳ـ۲ـ۱۱ـ۴ـ۵ ـ فشار متناظر با سرعت مبنا q:

فشار متناظر با سرعت مبنا برابر است با فشار متناظر با سرعت میانگین در منطقه باز در ارتفاع ۱۰ متری که با احتمال وقوع بیش از یک بار در دوره بازگشت ۵۰ ساله تعیین می‌شود. سرعت باد در بازه زمانی ده دقیقه‌ای میانگین‌گیری می‌شود. فشار متناظر سرعت مبنا از رابطه $q=\rho V^2$ محاسبه می‌شود. فشار متناظر با دوره بازگشت، N، متناوب با۵۰ ساله از رابطه (۳ـ۵) محاسبه می‌گردد.

$$q(N) = q\ (10) +[q(100)+q(10)][LnN/Ln10) - 1] \qquad (۵ـ۳)$$

در رابطه بالا N دوره بازگشت بر حسب سال می‌باشد. در برخی ساختگاه‌ها فشار متناظر با سرعت مبنا در اثر ویژگی‌های توپوگرافی، ناهمواری‌های زمین و شرایط اقلیمی و هوای منطقه با جهت به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌نماید.

تفسیر *در صورتی‌که به دلیل اهمیت ویژهٔ ساختمان، در مورد ضرورت انجام مطالعات طراحی بر اساس روش‌های مبتنی بر عملکرد اتخاذ تصمیم گردیده‌باشد، لازم است فشار متناظر با سرعت مبنا برای دو دورهٔ بازگشت متناسب با عمر مفید و ترازهای عملکردی در سطوح بهره‌برداری و ایمنی تعیین گردد. توصیه می‌شود در مورد ساختمان‌های طبقه‌بندی‌شده در گروه‌های عمرمفید در زمینه انجام مطالعات در چارچوب طراحی مبتنی بر عملکرد (که مستلزم اختیار دو سطح بارگذاری و ترازهای عملکردی مربوط می‌شود یا طراحی تک‌سطحی اختیار فشار متناظر با سرعت مبنا بر اساس یک دورهٔ بازگشت۵۰ ساله) مطالعه و اتخاذ تصمیم گردد.*

۳ـ۲ـ۱۱ـ۴ـ۶ـ ضریب بادگیری، Ce

ضریب بادگیریC_e، نمایانگر تغییرات سرعت باد با ارتفاع و همچنین آثار تغییر ویژگی‌های زمین اطراف و توپوگرافی محل می‌باشد. ضریب بادگیری برای روش استاتیکی به شرح زیر به‌دست می‌آید:

الف) $0.9 \geq (h/10)^{0.2}$، برای نواحی باز که ساختمان‌ها، درخت‌ها و یا موانع به صورت پراکنده در آن قرار دارند. (h) ارتفاع مرجع بر حسب متر برای تمام یا قسمتی از سطح می‌باشد.

ب) $0.7 \geq 0.7\ (h/10)^{0.3}$ ، برای نواحی ناهموار مانند مناطق شهرها، حومه شهری یا مناطق جنگلی در حالتی که این ناهمواری حداقل یک کیلومتر یا ده برابر ارتفاع ساختمان (هرکدام بزرگ‌تر باشد) در بالا دست سازه ادامه یابد.

پ) زمانی‌که منطقه ناهموار کوچک‌تر از یک کیلومتر امتداد (X_r<1Km)، و سازه کمتر از ۱۰۰ متر ارتفاع داشته باشد، ضریب بادگیری C_e را می‌توان بین مقادیر بند الف و ب طبق رابطه (۳ـ۶ـ الف) از طریق درون‌یابی تعیین نمود.

$$C_e=C_{er}\ (0.816 + 0.184 \log_{10}(\frac{10}{X_r - 0.05})) \leq C_{eo} \qquad \text{(۳ـ۶ـ الف)}$$

و برای x_r مساوی یا کمتر از ۰/۰۵کیلومتر

$$C_e=C_{eo} \qquad \text{(۳ـ۶ـ ب)}$$

در رابطه‌های (۳ـ۶ـ الف و ب)، x_r طول ناهمواری بالادست سازه، "C_{er}" ضریب C_e برای منطقه ناهموار و "C_{eo}" ضریب C_e برای منطقه باز می‌باشد.

ت) سازه‌ها یا ساختمان‌هایی که بر تپه‌ها استقرار دارند، تحت تأثیر آثار افزایش یافته باد قرار می‌گیرند که به طور معمول فشاری افزون‌تر از فشار متناظر با سرعت باد مرجع را اعمال می‌نمایند، در این صورت باید ضریب بادگیری را از آیین‌نامه‌ها و استانداردهای معتبر بین‌المللی به دست آورد.

ث) اگر رفتار دینامیکی باد موردنظر باشد، مقدار C_e تابعی از ارتفاع و نحوه اثر پوششی سازه‌ها و موانع مجاور بر سازه مورد نظر خواهد بود.

۳ـ۲ـ۱۱ـ۴ـ۷ـ ضریب اثر تندباد، C_g

C_g ضریب اثر تندباد به شرح زیر در نظر گرفته می‌شود:

الف) برای کل ساختمان و اعضای اصلی سازه: Cg=2،

ب) برای فشار و مکش بیرونی وارد بر اجزای کوچک نما:C_g=2.5

پ) برای فشارهای درونی می‌توان مقدار C_{gi}=2 فرض نمود ولی ترجیح دارد با در نظرگرفتن ابعاد بازشوها، حجم درونی و انعطاف‌پذیری ساختمان مقدار C_{gi} را از روش‌های موجود محاسبه نمود.

ت) اگر رفتار دینامیکی مورد نظر باشد، مقدار C_g به اغتشاش باد، ابعاد ساختمان و بسامد طبیعی آن بستگی خواهد داشت.

۳ـ۲ـ۱۱ـ۵ـ بارگذاری باد بر سازه‌ها

الف) اگر شیشه و یا پنجره‌ای در توفان شکسته شود، فشار قابل توجهی به داخل نفوذ کـــرده و باعث تشدید اختلاف فشار (درونی و بیرونی) می‌گردد. از آنجا که این تغییر فشار در موارد متعددی باعث فروریختگی نشده‌است، اختلاف فشـــار بدون ضریبی برابر حداقل ۰/۲۵ kpa پیشنهاد شده است و زمانی‌که بازشو بزرگ بوده و فشارِ ناشی از شکست می‌تواند به تیغه‌بندی‌ها و جداکننده‌های داخلی انتقال یابد، مقدار ۰/۵ kpa یا بیشتر توصیه می‌گردد.

ب) در مورد پوشانه‌های پاشامی (غشایی) با عایق حرارتی، در حالتی که عایق به غشای آب‌بندی نچسبیده باشد، عایق تحت همان فشاری قرار نخواهد داشت که به تمام مجموعه سقف وارد می‌شود. علت این امر نشت هوا و برقراری تعادل موضعی فشار رویین و زیرین عایق می‌باشد.

۳ـ۲ـ۱۱ـ۵ـ۱ـ اجزای سازه‌ای، قاب‌ها و سازه‌های گرد

در اشکال۳ـ۸ الی ۳ـ۲۵ از طریق فرمول‌های ارایه‌شده نیروی‌های ناشی از باد محاسبه می‌گردد.

ضریب بادگیری و ضرایب تندباد را برای این سازه‌ها می‌توان از مقادیر ارایه‌شده در بند ۳-۲-۴-۹ و ۳-۲-۴-۱۰ به دست آورد.

(۱) بار باد بر اجزای سازه‌های خود ایستا، قاب‌ها و خرپاها را می‌توان با استفاده از روابط و اشکال مذکور در فوق به دست آورد. اندیس∞ در اشکال مربوطه نشانگر آن است که این ضرایب برای اعضای سازه‌ای که طول بی‌نهایت دارند، صادق‌اند. اگر عضو سازه‌ای به صورت طرّه‌ای نسبت باشد، لاغری باید معادل دو برابر طول واقعی در نظرگرفته شود. اگر عضوی از هر دو طرف به دیوار و یا صفحه بزرگی متصل شده باشد، ضریب کاهندگی طول مؤثر مورد استفاده قرار داده می‌شود.

(۲) برای اعضای قابی شکل که به طور متوالی و در جهت باد قرار می‌گیرند، اثر پوششی را می‌توان در نظر گرفت. اعضای پشت به باد برای فشار کاهش یافته q_x مطابق شکل ۳ـ۲۳ طراحی می‌شوند.

(۳) با توجه به آنکه خواص سازه در هنگام نصب تغییر می‌نماید، بار باد ممکن است در بازه زمانی موقت در حالتی بحرانی‌تر از حالت سازه تکمیل‌شده، بر سازه نیمه‌تمام اعمال گردد. این افزایش بار باید با ضرایب مناسب مطابق شکل۳ـ۲۰ الی ۳ـ۲۴ در نظر گرفته شود.

تفسیر- *این امر در مورد سازه‌های فضاکار متشکل از تعداد قابل ملاحظه‌ای از اعضا و پیونده‌ها می‌تواند حایز اهمیت ویژه باشد.*

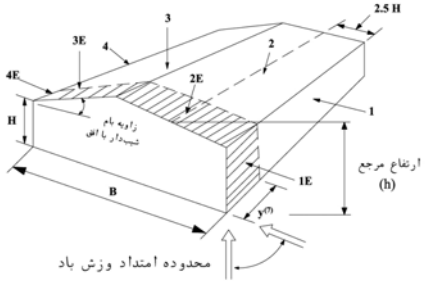
(۴) برای سازه‌های با اعضای لوله‌ای با مقاطع دایره‌ای شکل با $D>۰/۱۶۷\sqrt{q_{ce}}$ و نسبت توپری $A_s/A>۰/۳۰$ ضـرایب پوششی تقـریبی مطابق شکل۳ـ۲۰ را می‌توان به‌کار برد. اگر $D\geq۰/۱۶۷\sqrt{q_{ce}}$ ، برای نسبت توپری $A_s/A>۰/۳۰$.

(۵) برای سازه‌های گرد (برخلاف سازه‌های تیزگوشه) فشارهای متعامد بر جهت باد با سرعت باد تغییر می‌نمایند و به شدت حساس به عدد رینولدز می‌باشند. ضرایب فشار برای برخی سازه‌های گرد در اشکال۳ـ۱۶، ۳ـ۱۷، ۳ـ۲۰ و ۳ـ۲۴ ارایـه گردیده‌است. در این رابطه قطر گنبد یا چلیک برحسب متر و q_{ce} فشار متناظر با سرعت بر حسب KP_a می‌باشد. برای تبدیل این رابطه فرمول متعارف رینولدز را باید در $۲/۷۰\times۱۰^{۶}$ ضرب نمود.

(۶) میزان زبری سازه‌های گرد حایز اهمیت می‌باشد. با توجه به شکل۳ـ۱۶مصالح فولادی، بتنی یا چوبی تقریبـاً صاف فرض می‌شوند. سطوح دارای برجستگی‌های دندانه‌ای که بیش از ۲٪ از بعد قطر حداقل بیرون زده باشند، خیلی زبر فرض می‌شوند.

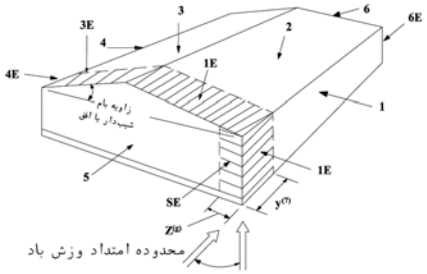
در شرایطی که در مورد میزان زبری نتوان تشخیص قطعی داد، ضرایبی را باید اختیار نمود که نیروهای افزون‌تری از آنها حاصل گردد. برای سازه‌های چلیکی یا گنبدی با سخت‌کننده‌های محیطی و شعاعی و نیز تکیه‌گاه‌ها و اعضای سازه‌ای ویژه، ضرایب فشار بستگی به نوع، محل و بزرگی ناهمواری‌های سطحی داشته و این گونه سازه‌ها یا اجزای سازه‌ای باید در تونل باد مورد آزمایش قرار گیرند.

حالت بار (الف): امتداد وزش باد در حیط عمدتاً متعامد بر خطالرأس



شیب سقف	سطوح ساختمان							
	۱	۱E	۲	۲E	۳	۳E	۴	۴E
۰° تا ۵°	۰/۷۵	۱/۱۵	−۱/۳	−۲/۰	−۰/۷	−۱/۰	−۰/۵۵	−۰/۸
۲۰°	۱/۰	۱/۵	−۱/۳	−۲/۰	−۰/۹	−۱/۳	−۰/۸	−۱/۲
۳۰° تا ۴۵°	۱/۰۵	۱/۳	۰/۴	۰/۵	−۰/۸	−۱/۰	−۰/۷	−۰/۹
۹۰°	۱/۰۵	۱/۳	۰۱/۵	۱/۳	−۰/۷	−۰/۹	−۰/۷	−۰/۹

حالت بار (ب): امتداد وزش باد در حیطه عمدتاً موازی با خطالرأس



شکل۳-۸- حداکثر ضریب خارجی (C_gC_p) برای ساختمان اصلی زمانی که نیروی باد به صورت متقارن در تمام سطوح وارد شود.

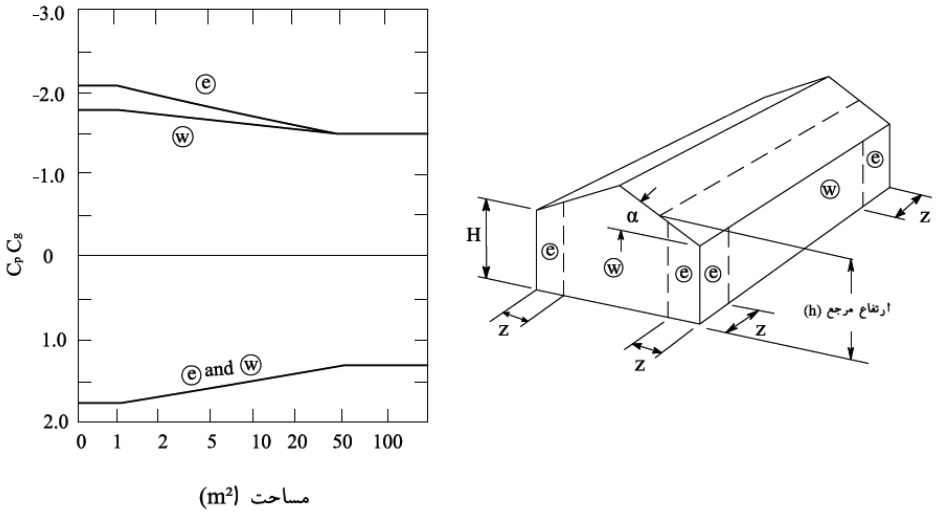
شیب سقف	سطوح ساختمان											
	۱	۱E	۲	۲E	۳	۳E	۴	۴E	۵	۵E	۶	۶E
۰° تا ۹۰°	-۰/۸۵	-۰/۹	-۱/۳	-۲/۰	-۰/۷	-۱/۰	-۰/۸۵	-۰/۹	۰/۷۵	۱/۱۵	-۰/۵۵	-۰/۸

توضیحات شکل ۳- ۸:

سازه باید تحت تأثیر اعمال بار باد در تمام امتدادها و جهت‌های نشان داده شده طراحی شود. بار باد مطابق شکل باید بر هر گوشه ساختمان اعمال گردد. برای هر شیب سقف باید، دو حالت بارگذاری الف و ب با ملحوظداشتن اثر پیچش در نظر گرفته شود.

- برای مقادیر شیب سقف نشان داده نشده، حاصل‌ضرب C_pC_g از میان‌یابی خطی به دست می‌آید.
- ضرایب دارای علامت مثبت بیانگر آن است که جهت نیرو به سمت سطح (حالت فشاری) و ضرایب دارای علامت منفی بیانگر جهت نیرو به سمت خارج سطح (مکش) می‌باشند.
- برای طراحی شالوده فقط ۷۰٪ بار مؤثر لحاظ می‌شود؛ مگر آن که شالوده به قاب مهار شده باشد.
- ارتفاع مبنا (h) برای تعیین نیروی فشاری بزرگ‌ترین دو مقدار $h=6m$ یا ارتفاع میانی سقف در نظر گرفته می‌شود. درصورتی‌که شیب سقف کمتر از ۷ درجه باشد، می‌توان ارتفاع لبه بام (H) را جایگزین ارتفاع میانی سقف نمود.
- عرض ناحیه انتهایی (y) بزرگ‌ترین دو مقدار $2Z$ و $6m$ در نظرگرفته‌می‌شود. (Z ناحیه دیوار واقع در کنج در حالت بار ب می‌باشد.) برای ساختمان‌های قاب‌بندی‌شده y فاصله بین اولین و آخرین قاب داخلی در نظر گرفته می‌شود.
- بعد ناحیه انتهایی (Z) برابر کمترین دو مقدار۱۰٪ کوچک‌ترین بعد و یا ۴۰٪ ارتفاع (H) در نظر گرفته می‌شود که نباید از ۴٪ کوچک‌ترین بعد افقی یا $1m$ کوچک‌تر اختیار شود.
- برای $B/H>5$ در حالت بار الف، ضرایب دارای علامت منفی در سطوح 2 و $2E$ فقط باید در سطحی به پهنای $2/50H$ از لبه بام اعمال شوند. فشار در بقیه قسمت‌های رو به باد سقف را می‌توان به اندازه ضرایب سطح پشت به باد کاهش داد.

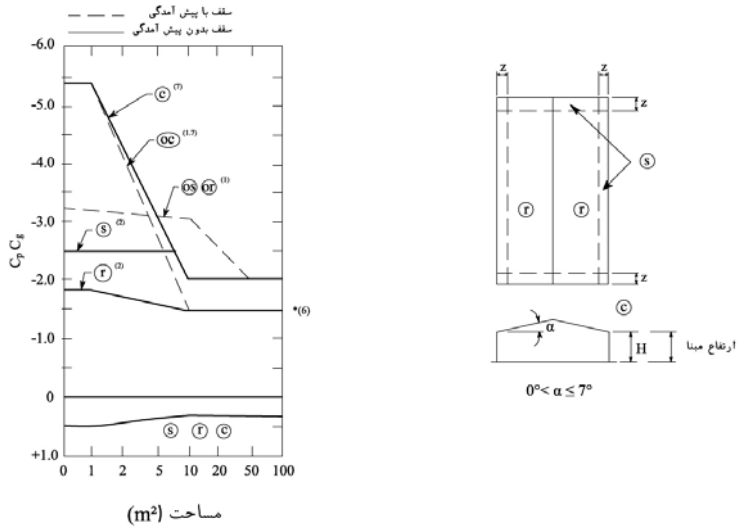
ادامه- شکل۳-۸- حداکثر ضریب خارجی (C_gC_p) برای ساختمان اصلی زمانی که نیروی باد به صورت متقارن در تمام سطوح وارد شود.



شکل ۳-۹- حداکثر ضریب خارجی C_gC_p در دیوارهای تک برای طراحی اجزای نمای ساختمان‌ها

توضیحات شکل ۳-۹ :

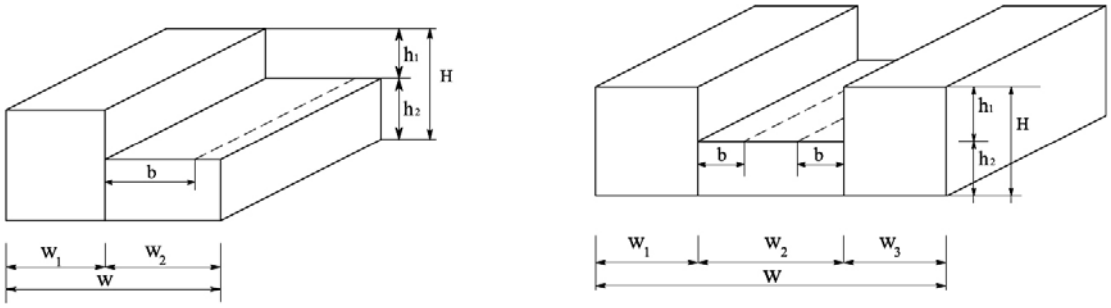
- این ضرایب برای هر شیب سقف به کار برده می‌شوند.
- مقیاس افقی مشخص‌کننده مساحت سطح مؤثر باد بر حسب m^2 می‌باشد.
- ناحیه انتهایی (Z) برابر کمترین دو مقدار۱۰٪ کوچک‌ترین بعد و یا۴۰٪ ارتفاع (H) می‌باشد که نباید از ۴٪ کوچک‌ترین بعد افقی یا 1m کوچک‌تر باشد.
- حالات متفاوت ترکیب فشارهای داخلی و خارجی باید برای حصول به نامطلوب‌ترین حالت بارگذاری مورد بررسی قرارداده شوند.
- علایم مثبت نشان‌دهنده فشار مؤثر به سمت سطح و علایم منفی نمایشگر مکش مؤثر به سمت خارج از سطح می‌باشند و هر عضو سازه‌ای باید برای تحمل هر دو حالت فشار و مکش طراحی شود.
- ضرایب فشار اغلب برای نمای معماری مورد استفاده قرار داده می‌شوند و هرگاه ارتفـاع پشت بندهای نما از یک متر بیشتر باشد، برای ناحیه‌های مشخص‌شده با e مقدار ۲/۸۰ - $=C_pC_g$ می‌باشد.



شکل ۳ـ۱۰ ـ حداکثر ضریب خارجی C_pC_g در سقف‌های با شیب کمتر از ۷ درجه برای طراحی اجزای سازه‌ای و نما

توضیحات شکل ۳ـ۱۰:

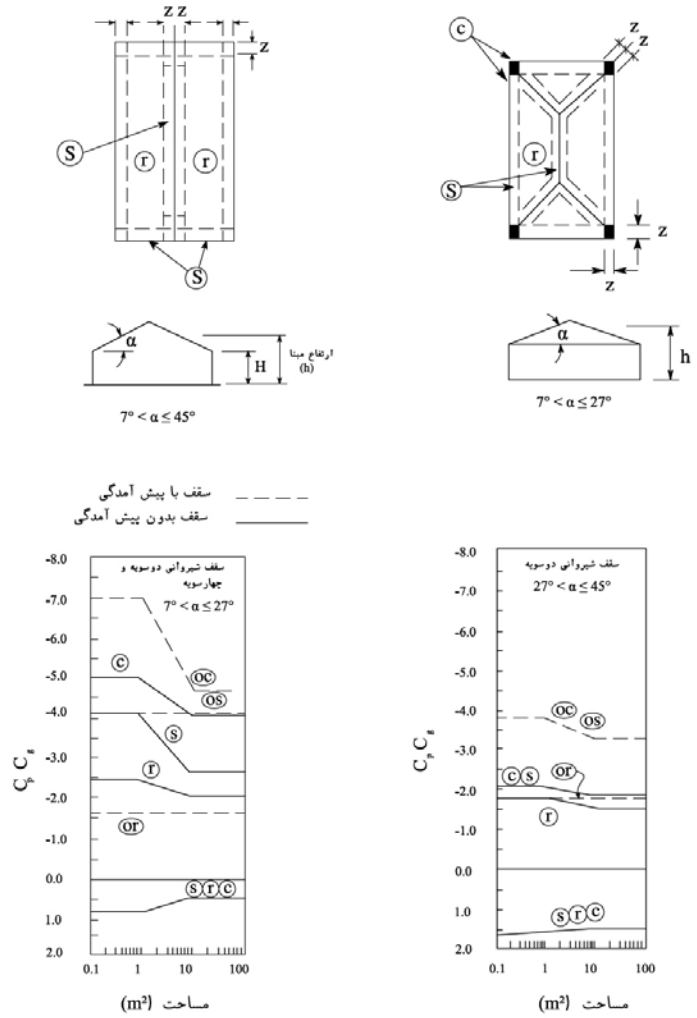
- ضرایب s و r برای سقف‌ها و سطوح بالای سایبان‌ها مورد استفاده قرار داده می‌شوند.
- مقیاس افقی مشخص‌کننده، مساحت سطح مؤثر باد بر حسب m^2 می‌باشد.
- ناحیه انتهایی (Z) برابر کوچک‌ترین دو مقدار ۱۰٪ کوچک‌ترین بعد و یا ۴۰٪ ارتفاع (H) می‌باشد که نباید از ۴٪ کوچک‌ترین بعد افقی یا 1m کوچک‌تر اختیار شود.
- برای طراحی شالوده فقط ۷۰٪ بار مؤثر لحاظ می‌شود؛ مگر آنکه شالوده به قاب مهار شده باشد.
- ارتفاع مبنا (h) برای فشار بزرگ‌ترین دو مقدار h=6m یا ارتفاع میانی سقف در نظر گرفته‌می‌شود. در صورتی‌که شیب سقف کمتر از ۷ درجه باشد می‌توان ارتفاع لبه بام (H) را جایگزین ارتفاع میانی سقف نمود.
- برای محاسبه نیروی برکنش در سطوح بزرگ‌تر از ۱۰۰ مترمربع در سقف‌های تقریباً تخت غیرمسدود و با جان پناه کوتاه و در مواضعی که مرکز سطح مورد نظر در فاصله حداقل دو برابر ارتفاع ساختمان از نزدیکترین لبه قراردارد، مقدار C_gC_p در x/H=2 به ۱/۰۱- کاهش می‌یابد و برای x/H=5، برابر، ۰/۶- در نظر گرفته می‌شود (x فاصله محل تا نزدیک‌ترین لبه و H ارتفاع ساختمان است).
- برای سقف‌هایی که دارای پیش‌آمدگی پیرامونی به بُعد یک متر یا بیشتر هستند، ضریب C_gC_p گوشه برای سطوح کوچک‌تر باید به جای ۵/۴۰- به مقدار ۴/۴۰- تغییریابد.



شکل ۳-۱۱-حداکثر ضریب خارجی (C_pC_g) در سقف‌های پله‌ای برای طراحی اجزای سازه‌ای و نما

توضیحات شکل ۳-۱۱:

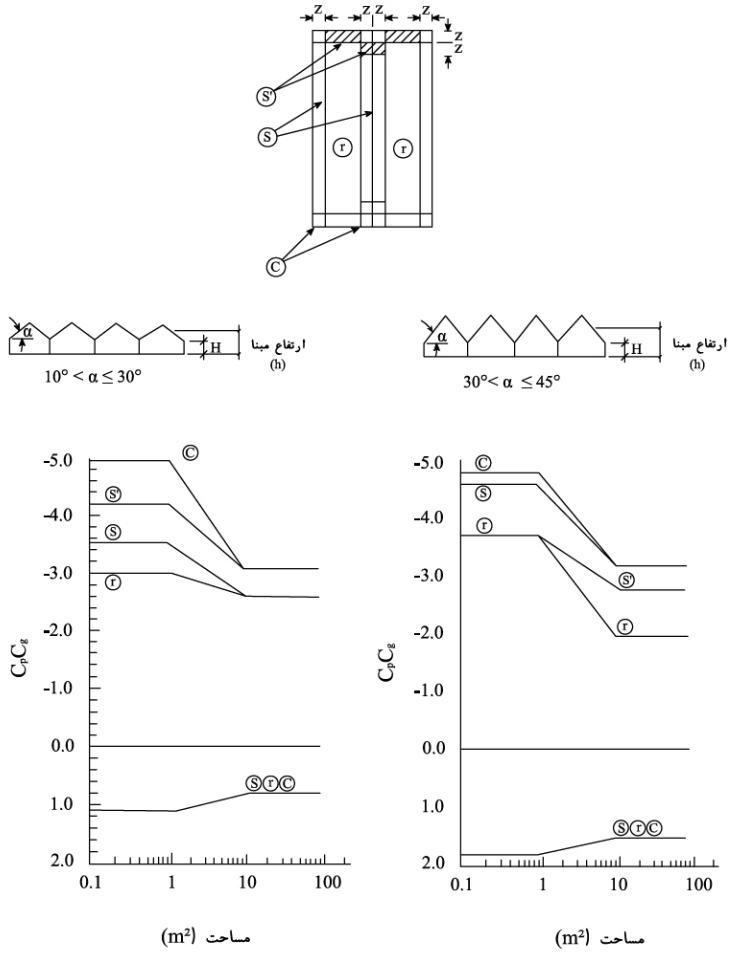
- ضرایب خارجی C_pC_g و توضیحات ارایه‌شده در شکل۳ـ۱۰برای تمامی سطوح پایین و بالای سقف‌های پله‌ای مسطح نیز مورد استفاده قرارداده می‌شود؛ به جز آنکه در ضرایب فشار خارجی مثبت برای سطوح پایینی از مقادیر ارایه‌شده در شکل ۳ـ۹ برای دیوارها با فاصله b استفاده می‌شود. b برابر کمترین دو مقدار $1/5h_1$ و ۳۰m می‌باشد، برای دیوارهای نشان داده شده در تاشه‌های شکل ۳ـ۱۱ ضرایب فشار خارجی دیوارها به صورت ارایه‌شده در شکل ۳ـ۹ به کار برده می‌شود.
- ضرایب C_pC_g به شرح فوق فقط هنگامی که شرایط زیر ارضا گردند، به‌کار برده می‌شوند: $h_1>0/3H$ ، $h_1\geq 3m$ و w_1، w_2 یا w_3 بزرگ‌تر از ۰/۲۵w و یا کوچک‌تر از ۰/۷۵w.



شکل ۳-۱۲- ضرایب فشار خارجی C_pC_g برای سقف‌های تک‌شیب و شیروانی با شیب 7° و یا بیشتر برای طراحی اجزای و نمای ساختمان

توضیحات شکل ۳-۱۲:

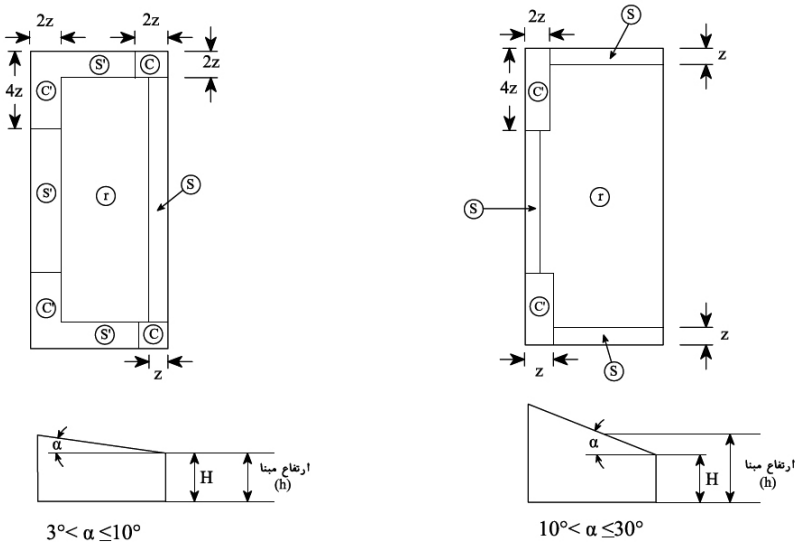
- ضرایب سقف‌های با پیش‌آمدگی با پیشوند (o) مشخص گردیده‌اند و مرتبط با مساحت سطح بام برابر با حالت متناظر بدون پیشوند می‌باشند. این ضرایب شامل آثار مرتبط با هر دو سطح بالایی و پایینی می‌باشند
- محور افقی نمایشگر مساحت سطح مؤثر باد در ناحیهٔ مشخص شده بر حسب m^2 می‌باشد.
- بعد ناحیه انتهایی (Z) برابر کمترین دو مقدار ۱۰٪ کوچک‌ترین بعد و یا ۴۰٪ ارتفاع (H) در نظر گرفته می‌شود که نباید از ۴٪ کوچک‌ترین بعد افقی یا ۱m کوچک‌تر اختیار شود.
- برای طراحی شالوده فقط ۷۰٪ بار موثر ملحوظ می‌شود؛ مگر آنکه شالوده به قاب مهار شده باشد.
- ارتفاع مبنا (h) برای فشار بزرگ‌ترین دو مقدار $h=$ ۶m یا ارتفاع میانی سقف در نظر گرفته می‌شود. در صورتی‌که شیب سقف کوچک‌تر از ۷ درجه باشد، می‌توان ارتفاع لبه بام (H) را جایگزین ارتفاع میانی سقف نمود.
- برای بام‌های با شیب $7^\circ<\alpha<27^\circ$ ، ناحیه‌های نواری مجاور لبه‌ها و خط الرأس‌ها و ضرایب فشار خط الرأس‌های بام‌های شیب‌دار شیروانی مانند باید برای هر یک از خط الرأس‌ها در نظر گرفته شود.



شکل ۳-۱۳- ضرایب فشار خارجی C_pC_g در سقف‌های شیروانی چند دهانه با شیب بزرگ‌تر از ۱۰°

توضیحات شکل ۳-۱۳ :

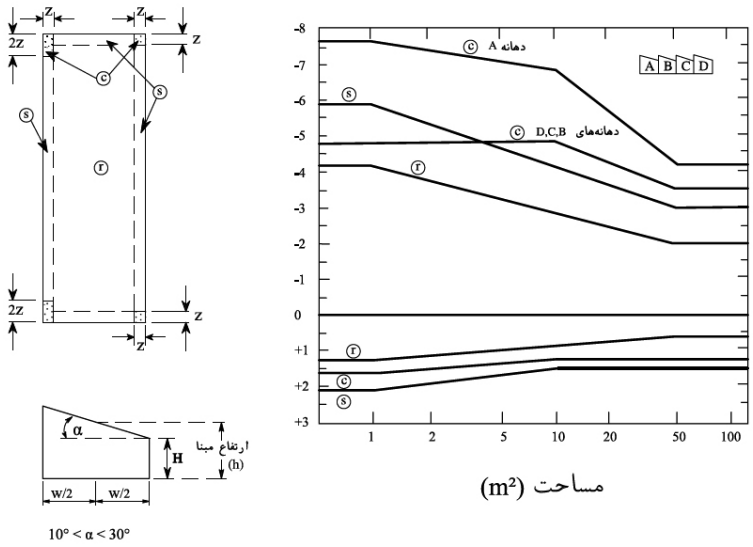
- محور افقی نمایشگر مساحت سطح مؤثر باد در ناحیه مشخص شده بر حسب m^2 می‌باشد.
- بعد ناحیه انتهایی (Z) برابر کمترین دو مقدار ۱۰٪ کوچک‌ترین بعد و یا ۴۰٪ ارتفاع (H) در نظر گرفته می‌شود که نباید از ۴٪ کوچک‌ترین بعد افقی یا ۱m کمتر باشد.
- برای طراحی شالوده فقط ۷۰٪ بار مؤثر ملحوظ می‌شود، مگر آنکه شالوده به قاب مهار شده باشد.
- ارتفاع مبنای (h) برای فشار بزرگترین دو مقدار h=۶m یا ارتفاع میانی سقف در نظر گرفته می‌شود. درصورتی‌که شیب سقف کوچک‌تر از ۷ درجه باشد، می‌توان ارتفاع لبه بام (H) را جایگزین ارتفاع میانی سقف نمود.
- برای $\alpha \leq ۱۰^\circ$ ضرایب فشار خارجی از شکل (۳-۱۰) استخراج می‌گردند.



شکل ۳-۱۴- ضرایب فشار خارجی C_pC_g برای سقف‌های تک شیب

توضیحات شکل۳-۱۴:

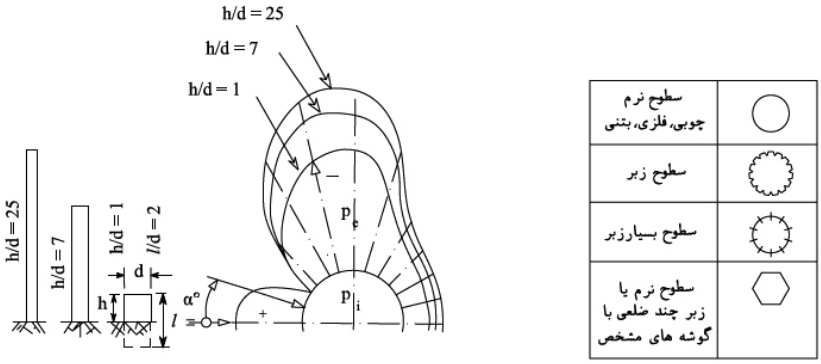
- محور افقی نمایشگر مساحت سطح مؤثر باد در ناحیه مشخص شده بر حسب m^2 می‌باشد.
- بعد ناحیه انتهایی (Z) برابر کمترین دو مقدار ۱۰٪ کوچک‌ترین بعد و یا ۴۰٪ ارتفاع (H) در نظر گرفته می‌شود که نباید از ۴٪ کوچک‌ترین بعد افقی یا ۱m کمتر باشد.
- برای طراحی شالوده فقط ۷۰٪ بار مؤثر ملحوظ می‌شود، مگر آنکه شالوده به قاب مهار شده باشد.
- ارتفاع مبنای (h) برای فشار بزرگ‌ترین دو مقدار $h=6m$ یا ارتفاع میانی سقف در نظر گرفته می‌شود. درصورتی‌که شیب سقف کوچک‌تر از ۷ درجه باشد، می‌توان ارتفاع لبه بام (H) را جایگزین ارتفاع میانی سقف نمود.
- برای $\alpha< 3^\circ$ ضرایب فشار خارجی از شکل (۳-۱۰) استخراج می‌گردند.



شکل ۳-۱۵- ضرایب فشار خارجی C_pC_g برای سقف‌های دندانه‌ای با شیب ۱۰° و بیشتر

توضیحات شکل ۳-۱۵ :

- محور افقی نمایشگر مساحت سطح مؤثر باد در ناحیه مشخص شده بر حسب m^2 می‌باشد.
- بعد ناحیه انتهایی (Z) برابر کمترین دو مقدار ۱۰٪ کوچک‌ترین بعد و یا ۴۰٪ ارتفاع (H) در نظر گرفته می‌شود که نباید از ۴٪ کوچک‌ترین بعد افقی یا ۱m کمتر باشد.
- برای طراحی شالوده فقط ۷۰٪ بار مؤثر ملحوظ می‌شود، مگر آنکه شالوده به قاب مهار شده باشد.
- ارتفاع مبنای (h) برای فشار بزرگ‌ترین دو مقدار $h=6m$ یا ارتفاع میانی سقف در نظر گرفته می‌شود. درصورتی‌که شیب سقف کوچک‌تر از ۷ درجه باشد، می‌توان ارتفاع لبه بام (H) را جایگزین ارتفاع میانی سقف نمود.
- ضرایب منفی در ناحیه‌های گوشه‌ای دهانه A مقادیر متفاوتی با دهانه‌های D,C,B خواهند داشت.
- برای $\alpha \leq 10°$ مقادیر ضرایب فشار خارجی (۳-۱۰) به دست می‌آید.



ضریب فشار خارجی برای $d\sqrt{qCe} > 0.167$ و سطوح نسبتاً نرم

$A=dh$ و $F=C_f qC_gC_eA$ نیروی کل

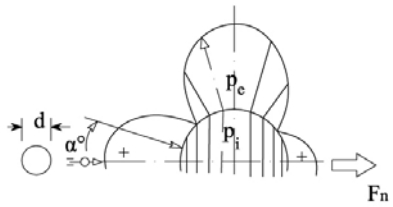
مقادیر ضرایب نیرو، C_f برای $d\sqrt{qC_e} > ۰/۱۶۷$

h/d لاغری	۱	۷	۲۵
شکل مقطع و ناهمواری	C_f	C_f	C_f
رویهٔ تقریباً مسطح (بتن، چوب، فلز)	۰/۵	۰/۶	۰/۷
سطوح زبر (اندازه دندانه‌ها)	۰/۷	۰/۸	۰/۹
سطوح خیلی زبر (اندازه دندانه‌ها)	۰/۸	۱/۰	۱/۲
سطوح با پستی و بلندی و لبه‌های تیز	۱/۰	۱/۲	۱/۴

مقادیر C_p، ضریب فشار خارجی برای $d\sqrt{qC_e} > ۰/۱۶۷$ و سطوح تقریباً صاف

h/d	1/d	=α	۰°	۱۵°	۳۰°	۴۵°	۶۰°	۷۵°	۹۰°	۱۰۵°	۱۲۰°	۱۳۵°	۱۵۰°	۱۶۵°	۱۸۰°
۲۵	۵۰	C_p	+۱/۰	+۰/۸	+۰/۱	−۰/۹	−۱/۹	−۲/۵	−۲/۶	−۱/۹	−۰/۹	−۰/۷	−۰/۶	−۰/۶	−۰/۶
۷	۱۴	C_p	+۱/۰	+۰/۸	+۰/۱	−۰/۸	−۱/۷	−۱/۶	−۲/۲	−۱/۷	−۰/۸	−۰/۶	−۰/۵	−۰/۵	−۰/۵
۱	۲	C_p	+۱/۰	+۰/۸	+۰/۱	−۰/۷	−۱/۲	−۱/۶	−۱/۷	−۱/۲	−۰/۷	−۰/۵	−۰/۴	−۰/۴	−۰/۴

شکل ۳ـ۱۶ـ سازه‌های استوانه‌ای ـ چلیکی



ضریب فشار خارجی برای $d\sqrt{qCe} > 0.8$ و سطوح نسبتاً نرم

نیروی کل $F=C_f\, q\, C_g C_e A$

$A=\pi d^2/4$

$C_f = ۰/۲$

$P=P_i-P_e$

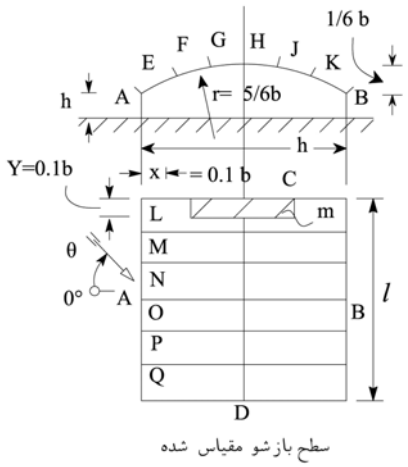
P_i= فشار داخلی برای فضاهای بسته

$P_e=C_p q C_g C_e$

مقادیر C_p، ضریب فشار خارجی برای $d\sqrt{qC_e} > ۰/۸$ و سطوح تقریباً صاف

α =	۰°	۱۵°	۳۰°	۴۵°	۶۰°	۷۵°	۹۰°	۱۰۵°	۱۲۰°	۱۳۵°	۱۵۰°	۱۶۵°	۱۸۰°
C_p	+۱/۰	+۰/۹	+۰/۵	−۰/۱	−۰/۷	−۱/۱	−۱/۲	−۱/۰	−۰/۶	−۰/۲	+۰/۱	+۰/۳	+۰/۴

شکل ۳ـ۱۷ـ سازه‌های گنبدی (کروی)



سطح بازشو مقیاس شده

RAD.r=(۵/۶)b

H:b:L= ۱:۱۲:۱۲

مقادیر C_p، ضرایب فشارداخلی

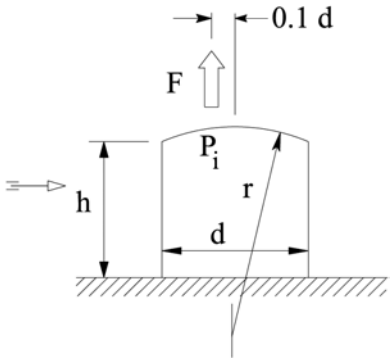
K	J	H	G	F	E	D	C	B	A	ϕ
−۰/۱	−۰/۴	−۰/۸	−۰/۸	−۰/۵	−۰/۱	−۰/۳	−۰/۳	−۰/۲	+۰/۷	۰°
−۰/۴	−۰/۷	−۰/۹	−۰/۷	−۰/۴	−۰/۱	−۰/۴	+۰/۲	−۰/۳	+۰/۶	۳۰°

Q	P	O	N	M	L	D	C	B	A	ϕ
−۰/۱	−۰/۱	−۰/۳	−۰/۵	−۰/۷	−۰/۸	−۰/۳	۰/۹	−۰/۳	−۰/۳	۹۰°
مقطع "m" با −۱/۸ = C^*_{pr} = −۲/۵										۳۰°

ضرایب فشار داخلی

ϕ=۹۰°	ϕ=۳۰°	ϕ=۰°	بازشوها
±۰/۲	±۰/۲	±۰/۲	**بار توزیع یکنواخت**
−۱/۰	۰/۷	۰/۴	**پنجره Y در سمت A باز می‌شود.**
۰/۸	۰/۶	−۰/۱	**تمام در سمت C باز می‌شود**
۰/۴	۰/۷	−۱/۵	**فقط X در سمت C باز می‌شود**

شکل ۳ـ۱۸ـ سازه‌های چلیکی با سطوح نسبتاً هموار



نیروی کل $F=(P_i-P_e)A$

فشار داخلی $P_i =$

$P_e =C_p q\ C_g C_e$

$A = \frac{\pi}{4} d^2$

ضریب فشارخارجی C_p = ۱/۰

شکل ۳ـ۱۹ـ نیروی مکش وارده بر سطح گنبدی (کروی) مستقر بر استوانه در مخازن یا سازه‌های با جدار بسته

$L/d > ۱۰۰$

نیروی کل $F=C_f C_g C_e A$

$A= dL$

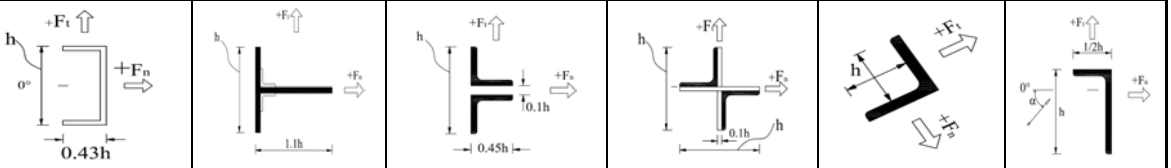
	$D\sqrt{qCe}$	
	<۰/۱۶۷	>۰/۱۶۷
لوله‌ها، میله‌ها و کابل‌ها با سطوح هموار	۱/۲	۰/۵
میله‌ها و کابل‌های نسبتاً هموار	۱/۲	۰/۷
کابل‌های نازک	۱/۲	۰/۹
کابل‌های ضخیم	۱/۳	۱/۱

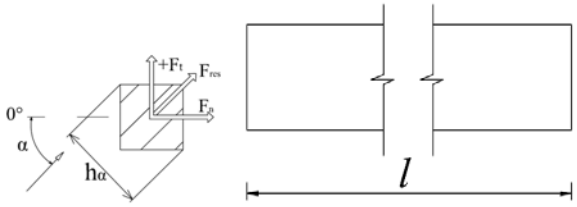
شکل۳ـ۲۰ـ اعضای لوله‌ای، میله‌ها، کابل‌ها

مقادیر $C_{n\infty}$ و $C_{t\infty}$، ضرایب نیرو برای اعضا با طول نامحدود برای مقاطع غیرلوله‌ای

α	مقطع شماره ۱		مقطع شماره۲		مقطع شماره۳		مقطع شماره۴		مقطع شماره۵		مقطع شماره۶	
	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$
۰°	۱/۹	۰/۹۵	۱/۸	۱/۸	۱/۷۵	۰/۱	۰	۱/۶	۲/۰	۰	۲/۰۵	۰
۴۵°	۱/۸	۰/۸	۲/۱	۱/۸	۰/۸۵	۰/۸۵	۱/۵	−۰/۱	۱/۲	۰/۹	۱/۸۵	۰/۶
۹۰°	۲/۰	۱/۷	−۱/۹	−۱/۰	−۰,۱	۱/۷۵	−۰/۹۵	۰/۷	−۱/۶	۲/۱۵	۰	۰/۶
۱۳۵°	−۱/۸	−۰/۱	−۲/۰	۰/۳	−۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۵	۱/۰۵	−۱/۱	۲/۴	−۱/۶	۰/۴
۱۸۰°	−۲/۰	۰/۱	−۱/۴	−۱/۴	−۱/۷۵	−۰/۱	−۱/۵	۰	−۱/۷	±۲/۱	−۰/۸	۰

α	مقطع شماره۷		مقطع شماره۸		مقطع شماره۹		مقطع شماره۱۰		مقطع شماره ۱۱		مقطع شماره ۱۲	
	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$	$C_{n\infty}$	$C_{t\infty}$
۰°	۱/۴	۰	۲/۰۵	۰	۱/۶	۰	۲/۰	۰	۲/۱	۰	۲/۰	۰
۴۵°	۱/۲	۱/۶	۱/۹۵	۰/۶	۱/۵	۱/۵	۱/۸	۰/۱	۱/۴	۰/۷	۱/۵۵	۱/۵۵
۹۰°	۰	۲/۲	±۰/۵	۰/۹	۰	۱/۹	۰	۰/۱	۰	۰/۷۵	۰	۲/۰





$A=hL$ *مساحت*

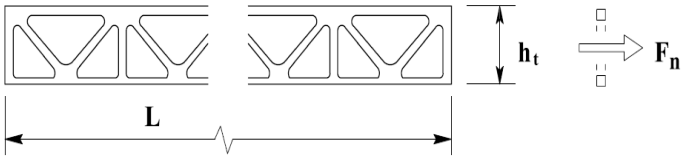
L *= طول عضو*

$F_n=k_L C_{n\infty}\, q\, C_g\, C_e A$ *= فشار متعامد بر محور عضو*

ضریب کاهش برای اعضا با نسبت لاغری محدود

L/h_α	۵	۱۰	۲۰	۳۵	۵۰	۱۰۰	∞
K	۰/۶۰	۰/۶۵	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۱/۰

شکل۳-۲۱



$C_{n\infty}$= ضریب نیرو برای خرپا با طول نامحدود ($0 \le A_s/A \le 1$)

A_s/A	۰	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۳الی۰/۸	۰/۹۵	۰/۱
$C_{n\infty}$	۲	۱/۹	۱/۸	۱/۷	۱/۶	۱/۸	۲

مقادیر k، ضریب کاهش برای خرپا با طول و نسبت لاغری محدود

A_s/A / L/h_t	۰/۲۵	۰/۵	۰/۹	۰/۹۵	۱
۵	۰/۹۶	۰/۹۱	۰/۸۷	۰/۷۷	۰/۶۰
۲۰	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۴	۰/۸۹	۰/۷۵
۵۰	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۰
∞	۱	۱	۱	۱	۱

A_s عبارت است از مساحت سطح مقطع

$A=h_tL$

A_s/A =نسبت صلبیت

$F_n = k_x C_{n\infty}\, qC_gC_e\, A_s$ =نیروی متعامد (برای وزش باد در امتداد عمود بر سطح A)

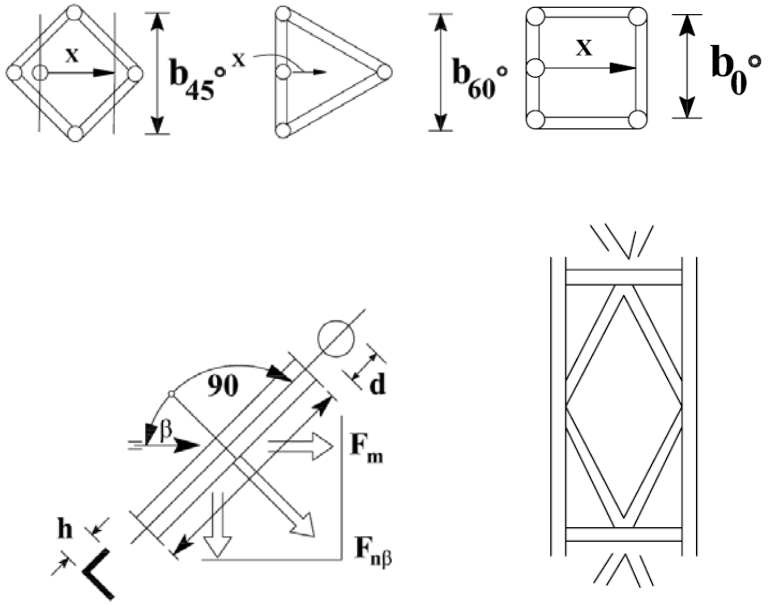
شکل ۳ـ۲۲

$q_x=k_xq$

مقادیــر k_x، ضریب پوششی عضو یا خرپا بر عضو یا خرپای بعدی واقع در مسیر وزش باد

A_s/A / X/h یا X/h_t	۰/۱	۰/۳	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۰/۸	۱
۰/۵	۰/۹۳	۰/۷۵	۰/۵۶	۰/۳۸	۰/۱۹	۰	۰	۰
۱	۰/۹۹	۰/۸۱	۰/۶۵	۰/۴۸	۰/۳۲	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
۲	۱	۰/۸۷	۰/۷۳	۰/۵۹	۰/۴۴	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۰
۴	۱	۰/۹۰	۰/۷۸	۰/۶۵	۰/۵۲	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۰
۶	۱	۰/۹۳	۰/۸۳	۰/۷۲	۰/۶۱	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰

شکل۳ـ۲۳ـ مقادیر ضرایب منعکس‌کنندهٔ اثر پوششی عضو یا خرپای واقع در مسیر وزش باد بر عضو یا خرپای بعدی واقع در این مسیر



$F=\Sigma F_m$= نیروی کل در جهت وزش باد

$F_m=K\, C_{\infty\beta}\, q\, C_g\, C_e\, A\, Cos\, \beta$ = نیروی باد وارده بر عضوm

$A=dL$ یا hL

L=طول واقعی عضو

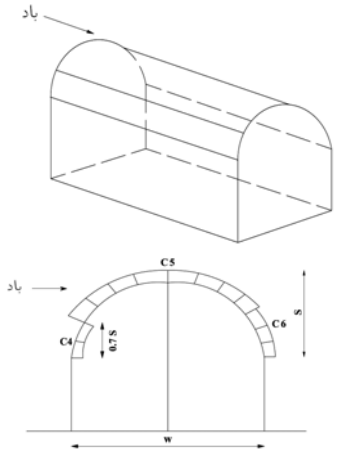
β =زاویه بین امتداد وزش باد و امتداد متعامد بر محور عضو

$k_x = \frac{x}{b}$ و $\frac{A_s}{A}$

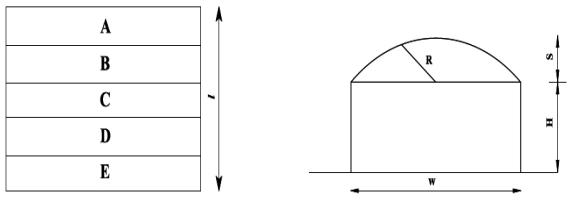
β	اعضای تیزگوشه			اعضای دارای سطح گروه صاف و زبر و خشن $d\sqrt{q}$ <۰/۱۶۷			اعضای دارای گروه سطح صاف و مناسب $d\sqrt{q}$ <۰/۱۶۷		
	$C_{\infty\beta}$	k	k_X	$C_{\infty\beta}$	k	k_X	$C_{\infty\beta}$	k	k_X
۰°	۱	(۲)	(۳)	۱/۲۰	(۲)	(۳)	۰/۶۰	۰/۹ برای l/d=۲۵	۰/۹۵ مقدار ثابت
۱۵°	۰/۹۸			۱/۱۶			۰/۵۸		
۳۰°	۰/۹۳			۱/۰۴			۰/۵۳		
۴۵°	۰/۸۸			۰/۸۵			۰/۴۲		
۶۰°	۰/۸۸			۰/۶۰			۰/۲۸		

شکل۳ـ۲۴ـ خرپاهای فضاکار (سه بعدی)

۳ـ۲ـ۱۱ـ۵ـ۲ـ سازه‌های چلیکی



(الف)ـ سازه با رویهٔ چلیکی در ارتفاع (امتداد وزش باد عمود بر محور استوانه)



سازه با رویهٔ چلیکی در ارتفاع (امتداد وزش باد موازی با محور استوانه)

مقادیر ضرایب C_p برای چلیک‌ها در ارتفاع (امتداد وزش باد عمود بر محور استوانه)

C_6	C_5	C_4	S/W
−۰/۵	−۰/۸	۰/۱	۰/۱
−۰/۵	−۰/۹	۰/۰	۰/۲
−۰/۵	−۱/۰	۰/۲	۰/۳
−۰/۵	−۱/۱	۰/۴	۰/۴
−۰/۵	−۱/۲	۰/۷	۰/۵

مقادیر ضرایب C_p برای چلیک‌ها در ارتفاع (امتداد وزش باد در راستای محور استوانه)

E	D	C	B	A	ناحیه
−۰/۱	−۰/۳	−۰/۵	−۰/۷	−۰/۸	C_p

شکل۳ـ ۲۵

۳ـ۲ـ۱۱ـ۵ـ۳ـ کنش‌های ناشی از باد بر رویه‌های گنبدی

شدت و توزیع بار باد بر گنبدها به طور عمده به نسبت ارتفاع به دهانه گنبد، وضعیت توپوگرافی محل و همچنین ویژگی‌های سازه‌ها و محیط و ابنیه مصنوع مجاور و بالادست بستگی دارد. الگوی جریان باد و در نتیجهٔ نحوه توزیع نیروهای ناشی از باد بر سازه در عین حال با حضور بازشوهای نسبتاً بزرگ و منافذ نسبتاً ریز و همچنین میزان زبری (یا ناهمواری) سطوح تغییر می‌نماید.

ملزومات ارایه‌شده در این آیین‌نامه به شرح زیر، برای برآورد اولیه کنش‌های ناشی از باد بر گنبدها ارایه گردیده‌اند و در مورد سازه‌های فضاکار گنبدی شکل با دهانه‌های نسبتاً بزرگ و با طبقه‌بندی عمر مفید ۳ و ۴ (مطابق فصل ۲)، طراحی تفصیلی باید براساس نتایج آزمایش‌های تونل باد صورت گیرد. برای آزمایش‌های سازه‌های فضاکار گنبدی در تونل باد لازم است پروفیل سرعت و حالات اغتشاش طبیعی باد و آثار ناشی از عدد رینولدز به نحو واقع‌گرایانه‌ای با توجه به انحنای سطح سازه شبیه‌سازی شود. در مورد گنبد با ویژگی‌های هندسی معین، افزایش زبری (ناهمواری) سطوح پوشانه‌ها منجر به افزایش نیروی جانبی و کاهش نیروی بر کنش (رو به بالا) در مقایسه با سطوح پوشانه هموارتر (زبری کمتر) می‌گردد.

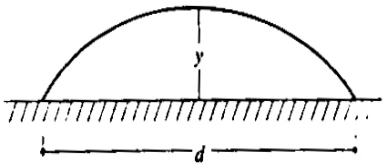
کنش‌های ناشی از باد، اغلب، بخش قابل ملاحظه‌ای از آثار ناشی از ترکیب کنش‌های محتمل‌الوقوع وارده بر سازه فضاکار گنبدی شبکه‌ای را شامل می‌گردند. در گنبدهای با منافذ ناچیز به‌طور معمول بر ناحیه‌ای واقع در سمت بادگیر نیروی فشاری وارد می‌گردد؛ ولی بخش بزرگ‌تری از سطح سازه تحت تأثیر مکش قرار می‌گیرد. مساحت سطح تحت مکش با افزایش نسبت ارتفاع به دهانهٔ گنبد افزایش می‌یابد.

گنبد تشکیل‌شده از بخشی از کره که مستقیماً بر زمین استقراریافته

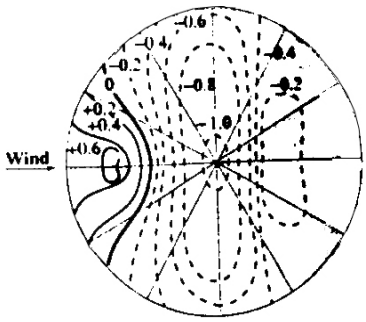
با توجه به موارد مندرج در بند ۳ـ۲ـ۱۱ـ۴، ضرایب فشار (یا مکش) C_p برای گروهی از گنبدهای دارای دیسه شامل بخشی از کره که بر زمین استقرار یافته‌اند، با مقادیر نسبت ارتفاع به دهانهٔ از $\frac{۱}{۱۵}$ تا $\frac{۱}{۲}$ در جدول شکل ۳ـ۲۶ ارایه شده است.

گنبد مستقر در ارتفاع متکی بر سازهٔ سیلندری (چلیکی) شکل

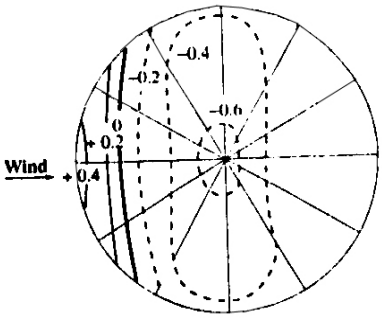
آثار ناشی از باد بر گنبد مستقر در ارتفاع و متکی بر سازه چلیکی شکل از نظر کمّی مقادیر بزرگ‌تری از حالت گنبد مستقر بر زمین داشته و از نظر کیفی نیز توزیع فشار و مکش در این دو حالت، بسته به میزان ارتفاع سازه چلیکی شکل تکیه‌گاهی، متفاوت خواهند بود. برخی از حالات مورد انتظار نحوه توزیع فشار و مکش بر سطوح گنبدی مستقر در ارتفاع واقع بر سازه چلیکی شکل تکیه‌گاهی در شکل ۳ـ۲۷ ارایه گـردیده است. برای سازه‌های گنبدی با نسبت $\frac{y}{d}$ کوچک‌تر از $\frac{۱}{۵}$ مستقر بر ســازه چلیکی شکل تکیه‌گاهی با ارتفاع افزون‌تر از $\frac{d}{۴}$، تمام سطح گنبد تحت تأثیر مکش قرار می‌گیرد. مقادیر ضرایب فشار یا مکش برای رویه‌های گنبدی مستقر در ارتفاع واقع بر سازه‌های چلیکی تکیه‌گاهی در جدول ذیل شکل ۳ـ۲۷ درج گردیده است. تمام آثار فشار یا مکش در هر موضع به صورت متعامد بر سطح در نظر گرفته می‌شوند.



الف) نما



ب) دید از بالا، خطوط هم‌تراز ضرایب فشار و مکش برای $\frac{y}{d}=\frac{1}{2}$

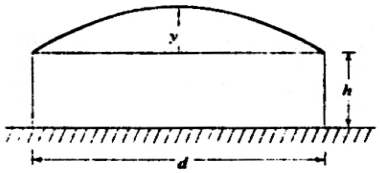


پ) دید از بالا، خطوط هم‌تراز ضرایب فشار و مکش‌برای $\frac{y}{d}=\frac{1}{4}$

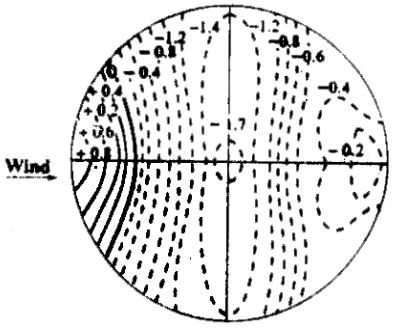
مقادیر بیشینه ضرایب فشار و مکش و مقدار ضریب بر کنش کلی برای رویه‌های گنبدی متشکل از بخشی از کره مستقر بر زمین

نسبت ارتفاع به دهانه $\frac{y}{d}$	مقادیر بیشینه ضریب فشار، C_p	مقادیر بیشینه ضریب مکش در ناحیه مرکزی، C_p	ضریب بر کنش کلی، C_L
$\frac{1}{15}$	+۰/۱	-۰/۳	۰/۱۵
$\frac{1}{10}$	+۰/۲	-۰/۳	۰/۲
$\frac{1}{8}$	+۰/۲	-۰/٤	۰/۲
$\frac{1}{6}$	+۰/۳	-۰/٥	۰/۳
$\frac{1}{4}$	+۰/٤	-۰/٦	۰/۳
$\frac{1}{2}$	+۰/٦	-۱/۰	۰/٥

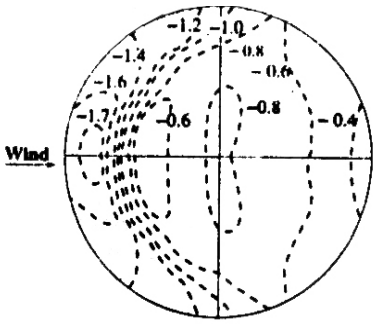
شکل ۳ـ۲۶ـ مقادیر بیشینه ضرایب فشار یا مکش(C_p) و بر کنش کلی(C_L) برای گنبد تشکیل‌شده از بخشی از کره مستقر بر زمین با نسبت ارتفاع به دهانه متفاوت و نحوهٔ توزیع فشار و مکش اعمال‌شونده بر گنبد، تحت تأثیر مؤلفه افقی ناشی از باد ($\cong C_L q\,\pi d^{\,2}/4$ مقدار تقریبی نیروی کل برکنش).



الف) نما



ب) نمای گنبد در پلان، نشانگر خطوط هم‌تراز ضرایب فشار و مکش برای گنبد با مشخصه هندسی $\frac{y}{d}=\frac{۱}{۲}$ (نیم‌کره) مستقر برسازه چلیکی تکیه‌گاهی با ارتفاع، h ، برابر با نصف قطر چلیک ($\frac{d}{۲}$).



پ) نمای گنبد در پلان، نشانگر خطوط هم‌تراز ضرایب مکش برای گنبد با مشخصه هندسی $\frac{y}{d}=\frac{۱}{۱۰}$ مستقر بر سازه چلیکی تکیه‌گاهی با ارتفاع، h ، برابر با قطر چلیک، d.

مقادیر ضرایب فشار یا مکش برای گنبد مستقر در ارتفاع واقع بر سازه اتکایی چلیکی

نسبت $\frac{y}{d}$	نسبت $\frac{h}{d}$	موقعیت		
		درست در منتهی‌الیه سمت بادگیر	در مرکز گنبد	در سمت پشت بادگیر
$\frac{۱}{۲}$	$\frac{۱}{۴}$	+۰/۹	−۱/۵	−۰/۴
	$\frac{۱}{۲}$	+۰/۸	−۱/۷	−۰/۴
	۱	+۰/۸	−۱/۷	−۰/۵
$\frac{۱}{۶}$	$\frac{۱}{۴}$	−۰/۱	−۰/۹	−۰/۴
$\frac{۱}{۱۰}$		−۱/۲	−۰/۶	−۰/۳
$\frac{۱}{۱۵}$		−۱/۴	−۰/۵	−۰/۳
$\frac{۱}{۲۰}$		−۱/۴	−۰/۴	−۰/۲
$\frac{۱}{۶}$	۱	−۱/۴	−۱/۱	−۰/۴
$\frac{۱}{۱۰}$		−۱/۷	−۰/۸	−۰/۴
$\frac{۱}{۱۵}$		−۱/۵	−۰/۵	−۰/۴
$\frac{۱}{۲۰}$		−۱/۴	−۰/۵	−۰/۴

شکل۳ـ۲۷ـ مقادیر ضرایب فشار یا مکش در مواضع مهم گنبدهای مستقر در ارتفاع واقع بر سازه اتکایی چلیکی برای مقادیر متفاوت نسبت‌های ارتفاع گنبد به قطر چلیک و نسبت‌های ارتفاع چلیک به قطر چلیک

ضرایب فشار داخلی

فشار داخلی تابع ابعاد و موقعیت بازشوها و منافذ و شرایط داخلی سازه و نحوهٔ تأثیرگذاری جریان خارجی باد پس از عبور از بازشوها در داخل گنبد می‌باشد. فشار داخلی در اغلب موارد اثر قابل‌ملاحظه‌ای در مقدار برآیند نیروی برکنش کلی سازه گنبدی دارد. اطلاع متقنی در ارتباط با مقادیر فشار داخلی برای گنبدها در دست نمی‌باشد و در این مورد باید جانب احتیاط رعایت و فشار داخلی به نحو واقع‌گرایانه ولی به میزان محافظه‌کارانه‌ای تخمین‌زده شود. با توجه به کمبودهای اطلاعات در زمینه بارگذاری کنش‌های ناشی از باد بر سازه‌های گنبدی، توصیه می‌شود با توجه به جمیع جهات، سازه‌های گنبدی با دقت کامل از نظر هندسی، زبری سطوح و میزان بازشوها شبیه‌سازی گردند و ضرایب فشارها و مکش‌های بیرونی و درونی برای هر حالت، از طریق آزمایش در تونل باد تعیین گردد.

لازم به یادآوری است که در بیشتر موارد، بررسی آثار اندرکنشی باد و سازه از طریق شبیه‌سازی مدل‌های کوچک‌مقیاس با دقت قابل قبولی میسر نمی‌گردد. به طورکلی، سازه فضاکار گنبدی دو یا چندلایه دارای سختی قابل ملاحظه‌ای می‌باشد و در صورتی‌که پوشانه‌ها دارای انعطاف‌پذیری اندکی بوده و آثار زبری سطوح به‌درستی شبیه‌سازی شود، انتظار می‌رود نتایج آزمایش تونل باد در مورد سازه‌های گنبدی فضاکار شبکه‌ای در حد قابل‌پذیرشی برای مقاصد طر احی قابل کاربرد باشند.

۳ـ۲ـ۱۲ـ بارهای ناشی از زلزله

۳-۲-۱۲-۱- مقدمه

با توجه به آنکه پاسخ سازه به تحریکات ناشی از زمین لرزه ماهیت دینامیکی دارد، مشخصه‌های دینامیکی سازه، شالوده و خاک زیر شالوده و همچنین ویژگی‌های ژئوتکنیکی لرزه‌ای ساختگاه، خصوصیات توپوگرافی محل، وضعیت لرزه زمین‌ساختی و شرایط لرزه‌خیزی و زمین‌شناسی مهندسی منطقه، نوع و مکانیسم محتمل گسلش، محتوای فرکانسی، طول مدت نوسان‌های شدید زمین و احتمال وقوع زلزله در حوزه نزدیک و بروز پدیده‌هایی از قبیل روانگرایی و گسترش جانبی خاک تأثیر قابل توجهی در پاسخ لرزه‌ای سازه خواهند داشت. برای تعیین بیشینه شتاب حرکت زمین بسته به میزان اهمیت سازه و خطرپذیری ساختگاه، دامنه مطالعات از حد توصیه‌های عمومی آیین‌نامه‌های ساختمانی تا نتایج مبتنی بر مطالعات تحلیل خطر ویژه ساختگاه متفاوت اختیار می‌شود.

۳-۲-۱۲-۲- سطوح خطر زمین لرزه در طراحی مبتنی بر عملکرد

در طراحی مبتنی بر عملکرد، سطوح خطر زمین‌لرزه در ارتباط با ترازهای عملکردی سازه فضاکار منظور خواهند گردید.

تفسیر- *تاکنون در کشورمان طراحی سازه‌ها و سازه‌های فضاکار احداث‌شده برای یک سطح خطر زمین‌لرزه مورد نظر بوده است. زمین‌لرزه‌ها با مشخصه‌هایی که برای طراحی به‌کار گرفته می‌شده‌اند، به زلزله طراحی موسوم‌اند و انتظار بر این بوده که نمایشگر بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌ای باشند که به میزان مدلل در عمر مفید سازه محتمل‌الوقوع خواهد بود. به این ترتیب وقوع زمین‌لرزه با سطح خطر افزون‌تر، نامحتمل نبوده، بلکه احتمال وقوع آن اندک خواهد بود. احتمال وقوع زمین‌لرزه‌ای با مشخصه‌های تعریف‌شده را یا به صورت احتمال تجاوز طی بازهٔ زمانی معین مطرح می‌سازند یا با دوره بازگشت معین مورد اشاره قرار می‌دهند.*

۳-۲-۱۲-۲-۱-طراحی مبتنی بر یک سطح خطر (زمین‌لرزهٔ طراحی)

در اغلب آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌ها استانداردهای عملکردی برای زلزلهٔ طراحی تک سطحی به شرح زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- مقاومت در برابر زمین‌لرزه کوچک تا متوسط باید در حـد رژیم الاستیک پاسخ تأمین شود؛ بدون آنکه خسارت قـابل ملاحظه‌ای بر سازه اعمال گردد.
- در طراحی، شدت (یا بزرگا)ی زمین‌لرزه طراحی باید به میزان واقع‌گرایانه‌ای تخمین‌زده و به‌کار گرفته شود.
- وقوع زمین‌لرزه شدید نباید منجر به فروریزی کل یا بخشی از سازه گردد و هرگاه مقدور گردد، خساراتی که محتمل‌الوقوع است باید قابل ردیابی بوده و امکان دسترسی برای تعمیر بخش‌ها و اعضای مستعد تحمل خسارت وجود داشته باشد.

تفسیر- *استانداردهای عملکردی مذکور در فوق با این مفهوم و هدف در نظر گرفته شده‌اند که :*

- *خسارت جانی به حداقل ممکن محدود گردد.*
- *سازه احتمال خسارت دیدگی داشته ولی احتمال فروریزی آن باید به میزان قابل قبولی ناچیز و تقریباً منتفی باشد.*
- *در مورد سازه‌های مهم و حیاتی، به خدمت‌رسانی آنان خدشه‌ای وارد نگردد.*
- *در عمر مفید سازه، احتمال تجاوز سطح خطر زمین‌لرزه از آنچه در طراحی به‌کار گرفته شده به میزان قابل قبولی اندک باشد.*

دیدگاه فوق تلویحاً اشاره براین فرض دارد که در طراحی مبتنی بر یک سطح خطر و تراز عملکردیِ تک سطحی مذکور در فوق، در تمامی سطوح خطر زمین‌لرزه محتمل نیز سازه متناسب با اهمیت و عملکرد مورد نظر رفتار رضایتبخشی از خود ارایه خواهد داد.

سطح خطر زمین‌لرزه طراحی در آیین‌نامه شماره ۲۸۰۰ سعی در تخمین طیف طـراحی با احتمال تجـاوز ۱۰٪ در پنجـاه سال داشته که مـرتبط با وقوع زمین‌لرزه‌ای با دوره بازگشت ۴۷۵ سال است.

۳-۲-۱۲-۲-۲- طراحی مبتنی بر دو سطح خطر زمین‌لرزه

در طراحی مبتنی بر دو سطح خطر زمین‌لرزه توصیه می‌شود از دیدگاه‌های مبتنی بر عملکرد تعریف‌شده سازه در دو سطح خطر در ترازهای بهره‌برداری و ایمنی بهره‌گیری شود. با توجه به تنوع سازه‌های فضاکار مشمول این آیین‌نامه، این ترازها به‌طور معمول باید بر اساس میزان اهمیت، عمـر مفید، خطـرپذیری ساختگاه و شرایط مورد نظر بهـره‌برداری پس از وقوع زلزله تعیین گردند و لازم‌است مسؤولین طراحی سازه، در هماهنگی و با تأیید کارفرما در ارتباط با ترازهای عملکردی سازهٔ فضاکار موردنظر در این زمینه اتخاذ تصمیم نمایند.

تفسیر- *در تجارب خسارات زلزله‌های اخیر عدم کفایت روش‌های مبتنی بر یک سطح خطر زمین‌لرزهٔ طراحی به ثبوت رسیده است. لذا جایگزینی دیدگاه و فرایند تک سطحی با دیدگاه دو یا چند سطحی ضروری به‌نظر می‌رسد. طراحی مبتنی بر عملکرد مورد انتظار تحت سطوح خطر متفاوت، با توجه به میزان اهمیت سازه فضاکار، روشی منطقی‌تر با قابلیت پاسخگویی مطلوب‌تر در ارتباط با اعتمـادپذیری و در عین حال، پاسخگوی نیازهای بهره‌برداران با رعایت دیدگـاه‌های ایمنی، فنی و اقتصادی پروژه تشخیص داده می‌شود. طراحی سـازه‌های فضاکـار به منظور ارضای ترازهای عملکردی و میـزان خسـارت تعریف‌شده برای دو سطح خطر زمین‌لرزه در سطوح بهره‌برداری و ایمنی، با قابلیت اتخاذ تصمیم مقتضی با توجه به جمیع جهات در ارتباط با دورهٔ بازگشت زمین‌لرزه در هر دو سطح، روشی منطقی برای طراحی لرزه‌ای سازه‌های فضاکار به‌شمار می‌رود.*

۳-۲-۱۲-۳- مشخصات زمین‌لرزه‌های طراحی

۳-۲-۱۲-۳-۱-کلیات

در حالاتی‌که ویژگی‌های زمین‌لرزه محتمل در ساختگاه را بتوان براساس اطلاعات حاصل از زلزله‌های گذشته و دانسته‌هایی در زمینهٔ گسل‌های فعال، زلزله‌های واقع‌شده در اثر گسلش در مرز صفحات تکتونیکی، ساختار زمین‌شناسی منطقه، شرایط خاک محلی، نگاشت‌های زمین‌لرزه‌های قبلی و نظایر آن تخمین زد، مشخصه‌های زمین‌لرزهٔ ویژهٔ ساختگاه را برای سازه‌های فضاکار مهم، که معمولاً دارای عمر مفید قابل ملاحظه‌اند، باید تعیین نمود و این امر در هر دو سیستم طراحی تک‌سطحی و طراحی مبتنی بر عملکرد در دو سطح خطر برای سازه‌های مهم توصیه می‌شود. در صورتی‌که اطلاعات مقتضی در ارتباط با ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای منطقهٔ دربرگیرندهٔ ساختگاه در اختیار باشد، مشخصه‌های زمین‌لرزه ویژه ساختگاه را می‌توان با روش‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی لرزه‌ای و بررسی ویژگی‌های ستون خاک از تراز بستر سنگی تا تراز پی تخمین زد.

۳-۲-۱۲-۳-۲- مؤلفه‌های حرکت زمین

در اغلب موارد کافی خواهد بود سه مؤلفهٔ حرکت انتقالی زمین درنظر گرفته شوند. در تحلیل طیفی، سازه را می‌توان به‌طور جداگانه برای زمین‌لرزه‌های ناشی از مؤلفه‌های طولی، عرضی و قائم زلزله تحلیل و آثار ترکیبی آن‌ها را به‌شرح مقرر در این آیین‌نامه درنظر گرفت.

در حالت تحلیل خطی در بازه زمان یا در حالاتی‌که مدل۶ مؤلفه‌ای حرکت زمین یا آثار ناشی از تغییرات فضایی یا تحریک نامتجانس تکیه‌گاهی در دست مطالعه است، لازم‌است تحلیل به‌صورت همزمان تحت تأثیر این مجموعه مؤلفه‌ها قرار داده شود.

هر مؤلفه حرکت زمین باید حداقل به یکی از روش‌های زیر کمی گردد:

- طیف پاسخ
- طیف نمایی
- تاریخچه زمانی

__تفسیر__ آثار ناشی از زلزله را می‌توان از طریق یک فرایند گوسی تصادفی نیز توصیف کرد. در این حالت از طیف نمایی بهره‌گیری می‌شود. توصیف حرکت در این حالت باید به ترتیبی اتخاذ گردد که با طیف پاسخ ویژه ساختگاه همساز باشد.

در چارچوب مطالعات به روش تاریخچه زمانی، مشخصه‌های حرکت زمین به دو صورت تعیین و در محاسبات به‌کار گرفته می‌شوند:

الف) شتاب نگاشت تولیدشده به روش‌های مصنوعی مبتنی بر دیدگاه‌های احتمال‌اندیشانه

ب) شتاب نگاشت‌های ثبت‌شده و میانگین‌گیری شده یا اصلاح‌شده.

۳-۲-۱۲-۳-۳- مشخصات زمین‌لرزه در روش‌های مبتنی بر یک سطح خطر

طیف‌های پاسخ طراحی استاندارد ۲۸۰۰ را می‌توان با توجه به ملزومات مندرج در بند ۳-۱-۵-۱-۸ در مطالعات تک‌سطحی برای طراحی به‌کار برد.

۳-۲-۱۲-۳-۴- مشخصات زمین‌لرزه در دو سطح خطر

در این دیدگاه دو سطح خطر به شرح زیر در نظر گرفته می‌شود:

- زمین‌لرزهٔ محتمل‌الوقوع در طول دورهٔ بهره‌برداری (عمر مفید) سازه با بزرگای متوسط (سطح خطر۱)،
- زمین‌لرزهٔ مخرب که احتمال وقوع آن در طول دورهٔ بهره‌برداری اندک است (سطح خطر۲).

تفسیر- *زمین‌لرزه در سطح خطر۲ آنگاه تحقق می‌یابد که یا گسلش در مرز صفحات تکتونیکی اتفاق افتد (زلزله نوع I) یا گسلش در گسل‌های فرعی درون صفحات تکتونیکی در فواصل نسبتاً نزدیک با اثر حوزهٔ نزدیک با ساختگاه (زمین لرزه نوع II) پدید آید. از مشخصه‌های زمین‌لرزهٔ نوع I ، دامنه بزرگ و تعداد سیکل‌های نوسان قابل‌ملاحظه می‌باشد. زمین‌لرزه‌های نوع II ، اغلب دارای طول مدت کوتاه و آثار مخرب می‌باشند.*

۳-۲-۱۲-۳-۵- طبقه‌بندی خاک و ضریب ساختگاه

با توجه به اثر بزرگ‌نمایی حرکت زمین در تراز بستر سنگی از طریق خاک روی بستر تا تراز پی، که تابع شدت حرکت زمین در تراز بستر سنگی و سختی و ضخامت لایه خاک زیر پی می‌باشد، در این آیین‌نامه، انواع خاک با کلاس‌های I تا IV مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ طبقه‌بندی شده‌اند. در غیاب مطالعات تحلیل خطر ویژه ساختگاه و در مراحل آغازین مطالعات، می‌توان سطح خطر عمومی زمین‌لرزه ساختگاه را به صورت حاصل‌ضرب ضریب بازتاب خاک، در بیشینه شتاب زمین‌لرزه در تراز بستر سنگی، در نظر گرفت. در مورد خاک‌های مسأله‌دار، مطالعات ژئوتکنیکی لرزه‌ای و تحلیل خطر ویژه ساختگاه الزامی است.

۳-۲-۱۲-۳-۶- سطوح خطر زمین‌لرزه در این آیین‌نامه

در این آیین‌نامه دو سطح خطر زمین‌لرزه شامل زمین‌لرزه در سطح بهره‌برداری و زمین‌لرزه در سطح ایمنی ملاک مطالعات خواهند بود. مشخصه‌های زلزله در هریک از دو سطح خطر مزبور و ترازهای عملکردی متناظر با آن‌ها باید با توجه به عواملی از قبیل میزان اهمیت، عمر مفید، خطرپذیری و نوع خاک ساختگاه اختیار گردند. در مورد سازه‌های فضاکار متعارف واقع در فواصل بیش از ۲/۵ کیلومتر از گسل فعال و فاقد خطرپذیری ویژه ژئوتکنیکی یا مستقر بر خاک‌های غیرمسأله‌دار، در مواردی که به دلایلی، از جمله عدم وجود اطلاعات مکفی در ارتباط با مشخصه‌های زلزله در دو سطح خطر مزبور و عدم در اختیاربودن فرصت یا امکانات کافی برای انجام مطالعات تحلیل‌خطر ویژه ساختگاه، صرفاً مشروط به تأیید کارفرما، روش تک‌سطحی مبتنی بر زلزله در سطح خطر طراحی با دورهٔ بازگشت ۴۷۵ سال برای سازه‌های فضاکار با عمر مفید متناظر با گروه عمر مفید ۳، مطابق با جدول ۲ـ۱ قابل کاربرد خواهد بود.

۳-۲-۱۲-۳-۷- تهیه مشخصه‌های زمین‌لرزه ویژهٔ ساختگاه

در این آیین‌نامه روش تخمین مشخصه‌های زمین‌لرزهٔ ویژه ساختگاه محدود نگردیده است و با بهره‌گیری از داده‌های ثبت‌شدهٔ حرکت زمین و به‌کارگیری راه‌کارهای مناسب مانند استفاده از روابط کاهندگی سازگار با شرایط منطقه‌ای و محلی و به‌کارگیری روش‌های نظری یا نیمه‌تجربی برای شبیه‌سازی حرکت زمین، می‌توان به تخمین قابل‌قبولی از مشخصه‌های حرکت زمین دست

یافت و آثار زلزله را در هماهنگی با ویژگی‌های مسیر سیر امواج ناشی از گسلش در محاسبات به‌کار برد. چارچوب و نتایج این مطالعات باید به تأیید کارفرما رسانده شود.

۳-۲-۱۲-۳-۸- تهیه طیف‌های پاسخ و یا تاریخچه‌های زمانی حرکت زمین ویژه ساختگاه

در هر یک از موارد زیر، در سطح کشوری تهیه طیف‌های پاسخ و یا تاریخچه‌های زمانی حرکت زمین ویژه ساختگاه الزامی است:

- سازه‌های طبقه‌بندی‌شده در ردهٔ سازه‌های فضاکار مهم،
- سازه‌های فضاکار واقع در فاصله ۲/۵ کیلومتر از گسل شناسایی شدهٔ فعال،
- سازه‌های واقع بر خاک‌های مسأله‌دار در مناطق با خطرپذیری لرزه‌ای زیاد و خیلی‌زیاد (*مطابق طبقه‌بندی آیین‌نامه ۲۸۰۰*)،
- مواردی که کارفرما یا مدیر طرح مقرر می‌دارد *(که غیر از موارد فوق شامل مواردی است که مطالعات ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیکی لرزه‌ای برای منطقه به‌عمل نیامده، یا طیف‌های پاسخ مرتبط در دو سطح خطر مورد نظر برای منطقه موجود نیست، یا در نظر نیست از فرضیات ساده‌شده برای دستیابی به طیف‌های طرح در دو سطح خطر مورد نظر به مدد طیف‌های موجود یکنواخت ارایه‌شده در سطح کشوری یا منطقه بهره‌برداری شود و یا دقت افزون‌تری مورد نظر کارفرما یا مدیریت طرح‌ها است).*

مطالعات ویژه ساختگاه باید شامل شناسایی منابع و موقعیت چشمه‌های لرزه‌زا، مکانیسم محتمل گسلش و به‌کارگیری روابط کاهندگی متناسب با شرایط موجود و شناسایی و تحلیل پاسخ دینامیکی خاک ساختگاه باشد. در مطالعات احتمال‌اندیشانه (شایدی)، منابع عدم قطعیت باید مورد توجه قرار داده شوند و از جمله لازم است آثار عدم قطعیت در موقعیت منابع چشمه‌های لرزه‌زا، طول و عمق و هندسهٔ گسل، بزرگای بیشینهٔ زمین‌لرزه، دورهٔ بازگشت و روابط کاهندگیِ حاکم مورد مطالعه قرارداده شوند.

جزییات مطالعات تحلیل خطر، شامل مطالعات میدانی، پیمایش و همچنین مطالعات کتابخانه‌ای و مستندات ذیربط و شیوه انجام کار باید در گزارش مربوطه ارایه و توسط کارفرما بررسی گردد. بدون تأیید کارفرما، به‌کارگیری نتایج حاصله مجاز نمی‌باشد.

در مطالعهٔ آثار مؤلفه‌های افقی حرکت زمین، در مورد سازه‌های فضاکار واقع در فاصله افقی کمتر از۱۰کیلومتر از گسل شناسایی‌شدهٔ فعال، باید آثار ناشی از حرکت‌های متزاید زمین در جهات متفاوت و به ویژه متعامد بر مسیر گسلش، برای سازه‌های با پریود ارتعاش آزاد اساسی متجاوز بر ۰/۵ثانیه، مورد بررسی قرار داده شوند. همچنین در صورت احتمال وقوع انشعاب شکست به سمت ساختگاه نیز باید این مطالعات برای سازه‌های فضاکار با پریود ارتعاش مذکور در فوق به عمل آید.

۳-۲-۱۲-۳-۹- طیف پاسخ مرتبط با مؤلفه قائم حرکت زمین

نسبت مقادیر طیف پاسخ مرتبط با مؤلفه قائم حرکت زمین به مؤلفه افقی، تابع شرایط تکتونیکی، وضعیت توپوگرافی، نوع بدنه بستر سنگی و خاک منطقه، بزرگای زلزله، فاصله مرکز سطحی زمین‌لرزه از ساختگاه و زاویه بین محور قائم گذرنده از کانون و خط متصل‌کنندهٔ کانون زمین‌لرزه به ساختگاه و پریود ارتعاش سازه فضاکار می‌باشد.

تفسیر *– در ارتباط با نسبت مقادیر طیف پاسخ مرتبط با مؤلفه قائم زمین‌لرزه به مولفهٔ افقی تجارب حاصل از زمین‌لرزه‌های گذشته حاکی از آن بوده است که توصیه‌های رایج در زمینه اتخاذ کسر $\frac{۲}{۳}$ برابر مشخصه‌های مؤلفهٔ افقی، برای پریودهای طولانی محافظه‌کارانه و برای پریودهای کوتاه در جهت عدم اطمینان بوده است و در نواحی متأثر از حوزهٔ نزدیک زلزله، نسبت‌های مقادیر طیفی مؤلفه قائم به افقی به‌میزان متجاوز بر یک نیز برای پریودهای کوتاه‌تر از ۰/۱ ثانیه ثبت گردیده است.*

توصیه می‌شود برای سازه‌های فضاکار با پریود ارتعاش ۰/۲ثانیه و فراتر، از نسبت $\frac{۲}{۳}$ استفاده شود؛ مگر آنکه مطالعات تحلیل خطر متقنی صورت پذیرفته و مقادیر کوچک‌تری را ارایه دهند. در هر حال این نسبت را نباید از ۰/۵کوچک‌تر اختیار نمود.

در مورد سازه‌های فضاکار با پریود ارتعاش کوچک‌تر از ۰/۲ ثانیه در حوزه نزدیک، باید مطالعات تحلیل خطر به منظور تهیه طیف پاسخ مرتبط با مؤلفه قائم حرکت زمین به عمل آید.

در مواردی که اثر مؤلفه قائم حرکت زمین حایز اهمیت است (شامل سازه‌های فضاکار واقع در حوزهٔ نزدیک گسلش، سازه‌های فضاکار دارای طول دهانه‌های قابل ملاحظه در دو امتداد متعامد و سازه‌های فضاکار متکی بر پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های فولادیِ مستعد کمانش یا شکست جوش)، در صورت انجام مطالعات تحلیل خطر ویژهٔ ساختگاه، باید این مطالعات برای هر سه مؤلفه انتقالی حرکت زمین، شامل مؤلفه قائم، به عمل آید.

۳-۲-۱۲-۳-۱۰- میزان اهمیت سازه فضاکار

در این آیین‌نامه طبقه‌بندی سازه‌های فضاکار از دیدگاه اهمیت شامل دو گروه سازه‌های فضاکار معمولی (*متعارف*) و سازه‌های فضاکار مهم می‌باشد. سازه‌های فضاکار مهم در ارتباط با مواردی از قبیل ضرورت بهره‌برداری بلاوقفه یا تعداد افرادی که در بازه زمانی قابل ملاحظه در خود جای می‌دهند یا نوع تجهیزات و موادی که در برمی‌گیرند و یا اهمیت نمادین و عمر مفید مورد نظر، از سازه‌های فضاکار متعارف متمایز می‌گردند.

۳-۲-۱۲-۴- بارگذاری و تحلیل آثار ناشی از زلزله

با توجه به عناصر گوناگون عدم قطعیت در تعیین ویژگی‌های زمین‌لرزه، آثار ناشی از زلزله را نیز علی‌القاعده باید از دیدگاه احتمال‌اندیشانه (شایدی) مورد بررسی قرار داد؛ ولی با توجه به پیچیدگی‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی احتمال‌اندیشانه سازه‌های فضاکار، به طور معمول از روش‌های تعیینی (بایدی) بهره‌گیری می‌شود. براساس ویژگی‌های سازه و نوع و میزان اهمیت آثار ناشی از زلزله بر سازهٔ فضاکار مورد نظر، روش‌های تحلیل و نوع بارگذاری از یکدیگر قابل تفکیک نیستند و از روش‌های ساده‌تر تا شیوه‌های پیشرفته‌تر به شرح زیر دسته‌بندی می‌شوند.

۳-۲-۱۲-۴-۱- روش استاتیکی معادل

در این روش برای مقاصد طراحی، پاسخ ناشی از اثر دینامیکی زمین‌لرزه با رفتار استاتیکی سیستم تحت تأثیر مجموعه‌ای از بارهای استاتیکی معادل در امتداد افقی تقریب زده می‌شود. این روش برای سازه‌های فضاکار متعارف دارای انتظام هندسی در پلان و ارتفاع متشکل از سقف‌های شبکه‌ای تخت تک‌لایه و چندلایه، در حالاتی‌که فاصله مرکز جرم و سختی در آنان ناچیز بوده و دارای پایه‌های با سختی همسان و دهانه‌های مجاور با طول دهانه‌های یکسان یا نزدیک به یکدیگر باشند و در عین حال، جرم سازه و

کف‌سازی قابل ملاحظه نباشد، نتایج قانع‌کننده‌ای برای تخمین برش پایه‌ها و سیستم‌های تکیه‌گاهی مهاربندی شدهٔ سقف‌های فضاکار، به‌دست می‌دهد. در هر حال، احتمال بروز کمانش و سایر گونه‌های خرابی و شکست اعضای سازه فضاکار، اتصالات و پایه‌ها را در اثر مؤلفه قائم زمین‌لرزه، به ویژه در حوزه نزدیک گسلش نباید از نظر دور داشت. بنابراین بهره‌گیری از این روش برای مقاصد مذکور در فوق و صرفاً برای طراحی پایه‌ها و اعضای مهاربندی سازه‌های منتظم مشروحه فوق به طور معمول کفایت می‌نماید؛ ولی برای طراحی سازه فضاکار شبکه‌ای سقف همین سازه‌ها نیز کافی تلقی نمی‌شود.

تفسیر- *در مورد سازه‌های فضاکار تخت متکی بر پایه‌ها و ستون‌های مهاربندی‌شده با هندسه ساده، در صورت ارضای شرایط مذکور در فوق، تحلیل به روش استاتیکی معادل در طراحی اولیه پایه‌ها و اعضای مهاربندی نگهدارندهٔ سازه فضاکار مزبور قابل کاربرد است. باید توجه داشت که اثر مؤلفه قائم زمین لرزه، که با این روش مورد بررسی قرار داده نمی‌شود، در مورد بسیاری از سازه‌های فضاکار مشمول این آیین‌نامه به‌طور معمول قابل ملاحظه بوده و بنابراین در چنین مواردی نیز کفایت روش استاتیکی معادل در مراحل طراحی تفصیلی مورد تردید است و توصیه می‌شود از روش‌های پیشرفته‌تر بارگذاری و تحلیل که در بندهای زیر تشریح خواهند شد، در طراحی تفصیلی بهره‌گیری به‌عمل آید.*

با توجه به عدم قطعیت در ارتباط با تحریکات محتمل ناشی از زمین‌لرزه در سطوح خطر متفاوت مورد نظر (متناظر با دوره بازگشت متناسب با عمر مفید، میزان اهمیت و...)، اغلب کوشش بر این است که تا حدامکان از روش‌های ساده‌سازی شده‌ای که با رفتار سازه سازگاری داشته باشند، بهره‌گیری شود. از جمله در روش اعمال بار معادل استاتیکی ناشی از کنش‌های لرزه‌ای، سعی می‌شود کنش‌های دینامیکی ناشی از زلزله با کنش‌های استاتیکی به صورت بارهای معادل شبیه‌سازی شوند. کاربرد روش شبه استاتیکی (استاتیکی مستعار) به شرح مورد اشاره، صرفاً برای سازه‌های ساده و منتظم در آیین‌نامه‌های ساختمانی، مجاز دانسته شده است. در مورد سازه‌های فضاکاری که دارای پیچیدگی‌هایی از نظر فرم هندسی و نحوه توزیع جرم ویا سختی باشند، لازم‌است تحلیل دینامیکی صورت گیرد.

در مورد سازه‌های فضاکار شبکه‌ای تخت مستقر بر مجموعه‌ای از ستون‌ها (با یا بدون مهاربندی یا دیوار برشی)، در حالی‌که سازه دارای تقارن هندسی بوده و مرکز جرم و سختی تقریباً بر یکدیگر منطبق باشند و در صورتی‌که صرفاً اثر تک مؤلفه‌ای زمین‌لرزه در راستای افقی مورد نظر باشد، با توجه به آنکه سازه‌های فضاکار شبکه‌ای مورد استفاده در پوشش بام و سقف‌ها اغلب در درون صفحه خود دارای صلبیت قابل ملاحظه بوده و قابلیت عملکرد به‌صورت دیافراگم صلب افقی را خواهند داشت، محدودیت در کاربرد روش استاتیکی معادل براساس روش‌های ارایه‌شده در آیین نامه‌های ساختمانی با توجه به وابستگی نتایج به رفتار مجموعه سازه تکیه‌گاهی (شامل ستون‌ها، با یا بدون مهاربندی یا دیوار برشی)، همانند سایر گونه‌های سازه‌های ساختمانی خواهد بود. با این‌همه طراح باید در ارتباط با ضرورت بررسی آثار ناشی از مؤلفه قائم زمین‌لرزه، که به‌ویژه در سازه‌های فضاکار مشمول این آیین‌نامه حایز اهمیت‌اند، بررسی‌های لازم را به‌عمل آورد.

۳-۲-۱۲-۴-۲- روش تحلیل طیفی

۳-۲-۱۲-۴-۲-۱- تحلیل طیفی تک مودی

در مورد سازه‌های فضاکار شبکه‌ای تخت منتظمِ پوشش بامِ مستقر بر سازهٔ تکیه‌گاهی منتظم، برای بررسی اولیهٔ اثر تک‌مؤلفه‌ای زمین‌لرزه در راستای افقی، ساده ترین روش دینامیکی تحلیل طیفی تک‌مودی (شبیه‌سازی سیستم به سیستم با یک درجه آزادی انتقالی افقی) خواهد بود؛ ولی با توجه به رفتار مسلط سه بعدی سازه‌های فضاکار شبکه‌ای در انواع و دیسه‌های گوناگون، به طور معمول تعداد قابل‌ملاحظه‌ای از مودها دارای مشارکت مودی قابل اعتنا خواهند بود و لذا تحلیل تک مودی صرفاً برای تخمین نیروهای برشی پایه سازه تکیه‌گاهی در امتداد افقی قابل کاربرد خواهد بود.

۳-۲-۱۲-۴-۲-۲- تحلیل طیفی چند مودی

در مورد سازه‌های فضاکار شبکه‌ای که به‌طور معمول به دلیل رفتار سه‌بعدی در پاسخ دینامیکی آن‌ها مودهای متفاوت و متعددی مشارکت می‌نمایند، تحلیل طیفی چند مودی قابل کاربرد است. همچنین اثر مؤلفه قائم زمین‌لرزه، به ویژه در مورد سازه‌های فضاکار پوشش دهانه‌های وسیع، با توجه به نسبت قابل ملاحظه بار زنده یا برف به بار مرده در اغلب این سازه‌ها، حایز اهمیت خواهد بود. بنابراین، در اینجا توصیه می‌شود به عنوان ملزومات حداقل در طراحی سازه‌های فضاکار شبکه‌ای از روش تحلیل دینامیکی طیفی چند مودی بهره‌گیری شود. تعداد حداقل مودهایی که در چنین تحلیلی ملحوظ می‌گردند، باید به‌میزانی باشد که حداقل ۹۰٪ میزان مشارکت مودها را شامل گردند.

۳-۲-۱۲-۴-۲-۳- ترکیب آثار مؤلفه‌های انتقالی زلزله

در مواردی که رفتار غیرخطی دینامیکی سیستم سازه فضاکار مسلط تلقی نگردد، می‌توان اثر مؤلفه قائم ناشی از زلزله را، از طریق تحلیل طیفی در نظر گرفت. در تحلیل طیفی، مجاز است ترکیب آثار مؤلفه‌های متعامد را در سه امتداد حرکتی به صورت ۱۰۰٪ در امتداد مورد نظر اصلی در ترکیب با آثار ۳۰٪ و ۳۰٪ مؤلفه‌های متعامد بر امتداد اصلی ملحوظ نمود.

۳-۲-۱۲-۴-۲-۴- آثار اندرکنش خاک ـ سازه

در مورد ضرورت درنظر گرفتن آثار اندرکنش خاک ـ سازه باید اتخاذ تصمیم نمود و در موارد لازم، مطالعات مربوطه را به‌عمل آورد. چنین مطالعاتی شامل مدل‌سازی واقع‌گرایانه خاک ـ شالوده و سازه به قصد منظورداشتن این آثار در تحلیل طیفی خواهد بود.

۳-۲-۱۲-۴-۲-۵- اثر تحریک نامتجانس تکیه‌گاه‌ها

در مواردی که به دلیل ابعاد قابل ملاحظهٔ دهانه‌ها و فواصل تکیه‌گاه‌های سازه یا تغییرات شرایط خاک زیر پی‌های پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها یا وضعیت توپوگرافیک ساختگاه بررسی آثار تحریک نامتجانس تکیه‌گاه‌ها و نحوهٔ انتشار فضایی امواج و تأخیرات فاز در تحریک پایه‌ها و امتداد و مشخصه‌های تحریک ضرورت یابد، از روش‌های مودی می‌توان این آثار را مورد بررسی قرار داد. در این حالت، سناریوهای محتمل آزادشدن انرژی ناشی از زلزله با توجه به موقعیت منبع آزادشدن انرژی، نوع ساز و کار گسلش و شیوهٔ انتشار امواج و همچنین آثار تأخیرات فاز در حرکت خاک زیر پی و تحریک تکیه‌گاه‌ها باید در تحلیل منظور گردد.

تفسیر ـ *به‌ویژه در مورد سازه‌های فضاکار پوشش فضاهای وسیع، پی‌ها و تکیه‌گاه‌ها تحریکات نامتجانس ناشی از اختلاف فاز در تحریک شالوده‌ها را در اثر توزیع فضایی هندسی شالوده‌ها و نحوهٔ انتشار امواج ناشی از زلزله تجربه خواهند کرد. این تحریکات به‌طور کلی در سه امتداد متعامد (دو امتداد افقی و امتداد قائم) بسته به نحوهٔ جهت انتشار امواج، ویژگی‌های ژئوتکنیکی لرزه‌ای ساختگاه، توپوگرافی محل، هندسه استقرار شالوده‌ها و فواصل آن‌ها و آثار اندرکنش خاک ـ پی ـ سازه می‌تواند حایز چنان اهمیتی باشد که پاسخ کاملاً متفاوتی را در مقایسه با تحریکات هم فاز ایجاب نماید. در عین حال، اختلاف تغییرمکان‌های تکیه‌گاه‌ها در چنین حالاتی تابع زمان خواهند بود.*

در مورد سازه‌های فضاکار، هرگاه شرایط زیر برقرار باشد، لازم است اثر تحریک نامتجانس تکیه‌گاهی به‌کار گرفته شود:

- *ناپیوستگی از دیدگاه‌های زمین‌شناسی،*
- *آثار توپوگرافیک مؤثر بر رفتار سازه،*
- *سازه‌های فضاکار با دهانه‌های نسبتاً بزرگ.*

۳-۲-۱۲-۴-۳- روش تحلیل تاریخچه زمانی الاستیک

این روش در رژیم رفتار خطی سیستم برای سازه‌های منظم و نامنظم قابل کاربرد می‌باشد. در این روش باید حداقل ۳ و مرجحاً ۷ مجموعه متمایز تاریخچه زمانی شتاب برای ساختگاه سازه تهیه یا همساز با ویژگی‌های لرزه‌خیزی، لرزهٔ زمین‌ساختی و ژئوتکنیک لرزه‌ای ساختگاه ـ در تطابق با ساز و کار گسلش محتمل و شرایط توپوگرافیک و نوع خاک ـ اختیار گردند.

بنابراین حداقل ۳ و مرجحاً ۷ تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی باید برای مدل سازه فضاکار صورت گیرد.

هر مجموعه تاریخچه زمانی شتاب حرکت زمین باید مشتمل بر ۳ مؤلفه حرکت انتقالی زمین باشد. در حالتی‌که تحلیل برای ۳ تاریخچه زمانی سازگار با ویژگی‌های ژئوتکنیکی لرزه‌ای ساختگاه صورت گیرد، پاسخ بیشینه هر کمیت تقاضای مورد نظر باید از مجموعه این سه تحلیل استخراج و برای طراحی به‌کار برده شود. در صورتی‌که تحلیل برای حداقل ۷ مجموعه تاریخچه زمانی حرکت زمین صورت گیرد، استفاده از میانگین مقادیر پاسخ کمیت مورد نظر حاصل از ۷ تحلیل مزبور برای پاسخ کمیت مورد نظر مجاز است.

در صورت عدم دسترسی به مشخصه‌های تاریخچه زمانی حرکت زمین ویژه ساختگاه می‌توان با استفاده از طیف طرح ویژه ساختگاه، تاریخچه‌های زمانی شتاب حرکت زمین را به صورت مصنوعی تولید نمود.

پاسخ حاصله از مؤلفه‌های متعامد زلزله باید به‌طور مستقیم از طریق اعمال همزمان مؤلفه‌های متعامد تاریخچه زمانی نگاشت‌های زمین لرزه‌های مورد نظر ملحوظ گردد.

۳-۲-۱۲-۴-۴- روش تحلیل استاتیکی غیر خطی

تحلیل استاتیکی غیرخطی (تک‌آهنگ) به منظور تعیین ظرفیت تغییرمکانی و الگو و شیوهٔ رفتار غیرخطی مجموعهٔ سازه فضاکار به‌کاربرده‌می‌شود. بارگذاری در این حالت تحت کنترل تغییرمکان و معمولاً با اعمال تغییرمکان افزاینده به صورت همساز با یکی از بردارهای مشخصه متناظر با یکی از مودهای اساسی سازه صورت می‌گیرد.

۳-۲-۱۲-۴-۵- روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی

تحلیل تقاضای لرزه‌ای مجموعه، زیرمجموعه‌ها، اعضا و اجزای سازه از طریق تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه با بهره‌گیری از چند تاریخچه زمانی موجود حرکت زمین و تا حد ممکن سازگار با شرایط منطقه‌ای و ساختگاهی یا میانگین‌گیری آنها تعیین می‌گردد. ظرفیت اعضا باید در مدل تحلیل غیرخطی سازه ملحوظ گردیده و بر آن اساس تقاضای نیرویی و تغییرمکانی محاسبه گردد.

این روش برای سازه‌های نامنظم با هندسه پیچیده و برای سازه‌هایی که مجهز به ادوات میراگر بوده یا رفتار غیرخطی از دیدگاه مصالح و یا هندسی از خود بروز می‌دهند، توصیه می‌گردد.

تحلیل براساس ویژگی‌های تاریخچه زمانی حرکت زمین صورت می‌گیرد. پاسخ مورد نظر در طراحی عبارت است از بیشینه مقادیر حاصل از اعمال مرجحاً ۷ (حداقل برای سازه‌های مهم) و حداقل ۳ تاریخچه زمانی با شرایط و ویژگی‌های قابل تطبیق با شرایط ساختگاه.

پاسخ ناشی از مؤلفه‌های متعامد زمین‌لرزه باید به‌طور مستقیم از طریق اعمال همزمان مؤلفه‌های متعامد تاریخچه زمانی نگاشت‌های زمین‌لرزه‌های مورد نظر ملحوظ گردد.

۳-۲-۱۲-۴-۶- روش ارتعاشات تصادفی

در این روش تاریخچه زمانی مصنوعی براساس دیدگاه‌های احتمال‌اندیشانه و مبانی نظری ارتعاشات تصادفی تعیین و سازه به روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی احتمال‌اندیشانه تحلیل می‌گردد.

۳ـ۳ـ ترکیب بارها

شیوه‌های ترکیب بارها و کنش‌های گوناگون مؤثر، در چارچوب احتمال وقوع آثار ترکیبی آنان، به قصد ارضای شرایط ایمنی و اهداف عملکردی تعیین می‌گردد. ضرایب پاره‌ای ترکیب انواع بارهای با احتمال وقوع همزمان باید از طریق روش‌های آماری واحتمالاتی تعیین گردد.

سازه‌های فضاکار معمولاً تحت تأثیر حالات بارگذاری متنوعی در طول عمر مفید خود قرار می‌گیرند. کنش‌های مؤثر را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

جدول ۳-۳ طبقه‌بندی کنش‌ها

دسته‌بندی کنش‌ها	نمونه کنش‌ها
بارها	بار مرده، بار زنده، آثار ناشی از ضربه، رانش خاک، فشار مایعات، آثار ناشی از انفجار، .....
کنش‌های ناشی از آثار محیطی و ساختگاهی	باد و طوفان، برف، زلزله، سیل و طغیان، ...
کنش‌های ناشی از آثار قیود موجود و شرایط مرزی	آثار ناشی از نابه‌جایی، ناکاملی و نامیزانی، تغییرات دما، آثار ناشی از افت، انقباض، خزش، .....

ضرایب پاره‌ای بارها به نحوی که در فصل چهارم این آیین‌نامه ارایه گردیده‌اند با ملحوظداشتن این واقعیت تعیین شده‌اند که احتمال وقوع همزمان بارهای با منشأ متفاوت با مقادیر مشخصهٔ آنان اندک می‌باشد. در حالت طراحی به روش ضرایب بار و مقاومت، به هر یک از آثار بارها، با ضریبی که به نحو احتمال‌اندیشانه میزان مشارکت همزمان آن بار را در نتایج کلی بیان می‌دارد، وزن داده می‌شود.

به طور کلی، احتمال اعمال همزمان ترکیبی از دو منشأ اعمال بارِ مستقل از یکدیگر بر سازه، کوچک‌تر از احتمال اعمال هر یک از آن دو عامل به صورت جداگانه می‌باشد. معذلک، خواص آماری هر یک از بارها و کنش‌ها، باید مورد بررسی قرار داده شود.

یکی از روش‌های رایج ترکیب بارها عبارت است از تخصیص ضرایب احتمالی پاره‌ای برای هریک از کنش‌های متنوع مؤثر.

همچنین نحوه پاسخ سازه به نوع به‌خصوصی از بارها یا ترکیب بارها نیز به همین میزان حایز اهمیت است.

در طراحی به روش حالات حدی، این امر به‌این‌گونه ملحوظ می‌گردد که هرگاه سازه‌ای تحت تأثیر دو نوع بارگذاری متفاوت قرارگیرد، که هر یک به طور مستقل دارای احتمال وقوع $P(a)$ و $P(b)$ باشند، احتمال اعمال همزمان این دو بار عبارت خواهد بود از:

$$P(a \cdot b) = P(a) \cdot P(b)$$

سطح خطر در تـراز ایمنی، با اختیار دوره بازگشت طولانی‌تر و احتمال وقوع کمتر طی عمر مفیـد سـازه، از سطح خطـر در تـراز بهره‌برداری متمایز می‌گردد.

۴

طـــراحی مجمـــوعه ســـازهٔ فضاکار

۴-۱- کلیات

۴-۱-۱- تعریف

طراحی سازهٔ فضاکار شبکه‌ای فولادی، فرآیند پی در پی گزینش فرم سازه‌ای، اندازه‌ها، شرایط مرزی، مصالح، نوع اعضا و اجزا، شیوهٔ هم‌بندی، نوع پوشانه‌ها و اجزای غیرسازه‌ای، شیوهٔ ساخت، بافت، نصب و دیگر موارد، و مطالعهٔ رفتار هرگزینه در برابر کنش‌ها با توجه به معیارهای پذیرش و همچنین بررسی سازگاری آن با نیازهای عملکردی مورد نظر و جنبه‌های مدیریت نگهداری در دورهٔ بهره‌برداری می‌باشد. در هر مرحله از این فرایند، مقایسهٔ فنی و اقتصادی گزینه‌ها منجر به حذف برخی از گزینه‌ها و اصلاح برخی دیگر جهت تکرار روند مطالعاتی می‌باشد، تا برای هریک از گزینه‌ها، همگرایی مکفی تأمین‌شده و بررسی‌های فنی و اقتصادی اثبات نماید که گزینه نهایی(گزینهٔ برتر) پاسخگوی بهینه تمامی معیارها خواهد بود. بنابراین بخشی از این فرآیند، شامل گزینش و بخش دیگر، شامل محاسبات و بررسی‌های عددی می‌باشد. با توجه به آنکه برای دستیابی به طرح بهینه لازم است تمامی گزینه‌های ذیربط مورد بررسی قرار گیرند و با توجه به تعدّد گزینه‌های در خور مطالعه در طراحی یک سازه فضاکار، در اغلب موارد یافتن گزینه بهینه را، علیرغم در اختیار بودن رایانه‌های توانمند، نباید امری ساده تلقی کرد.

تفسیر- *به‌طور معمول در مراحل اولیه طراحی سازه‌های فضاکار، گزینه‌های منطقی توسط مهندسان مجرب تعیین و تعریف می‌شوند. نقش مهندس مجرب آن خواهد بود که احتمال از قلم افتادن گزینه‌های مطلوب تا جای ممکن کاهش یابد و در عین حال، زمان به بیهودگی صرف مطالعهٔ گزینه‌های نامطلوب نگردد. پس از تعریف گزینه‌ها، بررسی و مقایسه آنها آغاز می‌شود و در طی مراحل بررسی که به ترتیب با افزایش دقت همراه است، از تعداد آنها کاسته می‌شود تا گزینه مطلوب به‌دست آید.*

گزارش در برگیرندهٔ مطالعات این مرحله باید نمایشگر منطق و شیوهٔ انتخاب گزینه‌های مطالعه‌شده و معیارها و نحوهٔ انتخاب گزینهٔ برتر با ارایهٔ استدلال‌ها قانع‌کننده باشد. در صورت تأیید کیفیت، کمیت و صحتِ مطالعات از سوی مرجع ذیصلاح، از این پس، مراحل طراحی تفصیلی گزینهٔ برتر دنبال خواهد گردید.

در این فصل با توجه به دامنه شمول این آیین‌نامه، ابتدا به معرفی سیستم‌های سازه‌های فضاکار مبادرت‌شده و سپس با بررسی شیوه‌های ساخت و بافت و نصب، رهنمودهای لازم برای طراحی گزینه‌های سازه فضاکار به قصد ارضای نیازهای طرح ارایه خواهد شد. مجموعهٔ فرایندهای مطالعاتی به شرح مندرج در فصل‌های چهارم تا ششم این آیین‌نامه، حاوی روش‌های طراحی مفهومی مجموعهٔ سازهٔ فضاکار و همچنین روش‌های مدل‌سازی و تحلیل و طراحی اولیه و تفصیلی این سازه‌ها خواهند بود.

تفسیر - *مجموعه وسیعی از انواع فرم‌های سازه‌های فضاکار در پیوست۱ این آیین‌نامه معرفی شده‌اند. همچنین برنامهٔ فُرمیَن را می‌توان به عنوان ابزاری برای فرم‌یابی، فرم‌سازی و تهیه داده‌های مورد نیاز تحلیل در فرایند طراحی مجموعهٔ سازهٔ فضاکار به خدمت گرفت.*

۴-۱-۲- سازه‌های فضاکار شبکه‌ای

سازه‌های فضاکار شبکه‌ای دارای انواع فراوان‌اند که در بندهای۴-۱-۲-۱ تا ۴-۱-۲-۱۰تشریح شده‌اند. نمونه‌هایی از این سازه‌ها در پیوست (۱ـ الف) این آیین‌نامه نشان داده شده‌اند. همچنین پیوست (۱ـ ب) آیین‌نامه دربرگیرندهٔ برنامه‌های رایانه‌ای برای ایجاد همه سازه‌های پیوست (۱ـ الف) می‌باشد. این برنامه‌ها در محیط نرم‌افزار فرمین نوشته شده‌اند. در ضمن منابع و مراجع لازم برای توضیح روش فرمول‌بندی چنین برنامه‌هایی در پیوست (۱ـ ب) ارایه شده است.

۴-۱-۲-۱- شبکه‌های تک‌لایه (تخت)

شبکهٔ تک‌لایه از مجموعه‌ای از اعضایی تشکیل شده که محورهایشان در یک صفحه قرار دارند و به صورت صلب به هم متصل شده‌اند. نمونه‌هایی از شبکه‌های تک‌لایه در شکل‌های شماره ۱ تا ۳۶ پیوست (۱ـ الف) نشان داده شده است.

۴-۱-۲-۲- شبکه‌های دولایه و چندلایه (تخت)

شبکهٔ دولایه از زیر مجموعه‌های ذیل تشکیل شده است:

ـ یک لایه بالایی با اعضای متصل به هم،

ـ یک لایه پایینی با اعضای متصل به هم و

ـ اعضای جان که لایه بالایی و پایینی را به هم متصل می‌کنند.

شبکه‌های دولایه اغلب در حالت افقی طرح و اجرا می‌شوند، ولی می‌توان آنها را با هر درجه تمایلی نسبت به سطح افقی نیز طرح و اجرا نمود. نمونه‌هایی از شبکه‌های دولایه در شکل‌های شماره ۳۷ تا ۶۵ پیوست (۱ـ الف) نشان داده شده است. در این شکل‌ها، لایه بالا با خط کلفت‌تر و لایه پایین و جان با خط نازک‌تر نشان داده شده‌اند.

شبکه‌های چندلایه دارای بیش از دولایه می‌باشند. این شبکه‌ها از نظر ساختاری مانند شبکه‌های دولایه می‌باشند و لایه‌های این شبکه‌ها نیز توسط اعضای جان به یکدیگر متصل شده‌اند. همچنین ممکن است شبکه‌ای در قسمت‌هایی دارای دولایه بوده و در قسمت‌های دیگر از بیش از دولایه تشکیل شده باشد.

۴-۱-۲-۳- چلیک‌های شبکه‌ای

چلیک شبکه‌ای از مجموعه اعضایی تشکیل‌شده که در یک‌لایه، دولایه و یا چندلایه پوششی دالان‌گونه ایجاد می‌کنند. چلیک می‌تواند استوانه‌ای، چنبره‌ای، زین‌اسبی و یا خمره‌ای باشد. نمونه‌هایی از انواع چلیک‌ها در شکل‌های شماره ۶۶ تا۹۰ پیوست (۱ـ الف) نشان داده شده‌اند.

۴-۱-۲-۴- گنبدهای شبکه‌ای

گنبد شبکه‌ای از مجموعه اعضایی در یک‌لایه، دولایه و یا چندلایه که پوششی کوژ ایجاد می‌کنند، تشکیل شده است. گنبدها دارای انواع فراوانی هستند مانند:

ـ گنبد دنده‌ای

ـ گنبد اشودلر

ـ گنبد لَمِلا

ـ گنبد دیامتیک

ـ گنبد اسکالپ

ـ گنبد پیازی

ـ گنبد گل ختمی

- گنبد فرازشی
- گنبد ژئودزیک
- گنبد نوانشی.

نمونه‌هایی از انواع گنبدها در شکل‌های شماره ۹۱ تا ۱۵۹ پیوست (۱ـ الف) نشان داده شده‌اند. شکل پلان گنبد می‌تواند دایروی، بیضوی، تخم‌مرغ‌گونه، چندبری و به صورت‌های دیگر باشد.

۴-۱-۲- ۵- سهلوی‌های شبکه‌ای

واژه سهلوی مخفف "سهمی‌گون هذلولوی" می‌باشد. سهلوی شبکه‌ای از مجموعه اعضایی در یک‌لایه، دولایه و یا چندلایه که پوششی زین‌اسب‌گونه ایجاد می‌کنند، تشکیل شده است. نمونه‌هایی از انواع سهلوی‌ها در شکل‌های شماره ۱۶۶ تا ۱۶۸ پیوست (۱ـ الف) نشان داده شده‌اند. از ترکیب سهلوی‌ها سازه‌های فراوانی را می‌توان ایجاد نمود که نمونه‌هایی از آنها در شکل‌های ۱۶۹ تا ۱۷۳ پیوست (۱ـ الف) نشان داده شده است. همچنین گنبدهای گل ختمی نشان داده شده در شکل‌های ۱۲۴ تا ۱۲۹ پیوست (۱ـ الف)، از پاره‌های سهلوی ایجاد شده است.

۴-۱-۲-۶- هرم‌های شبکه‌ای

هرم شبکه‌ای از مجموعه اعضایی در یک‌لایه، دولایه و یا چندلایه تشکیل‌شده که به حالت هرم شکل گرفته‌اند. قاعده این هرم می‌تواند مثلثی، چهاربری و یا چندبری باشد. نمونه‌هایی از هرم‌های شبکه‌ای در شکل‌های شماره ۱۷۴ تا ۱۸۳ پیوست (۱ـالف) نشان داده شده است.

۴-۱-۲-۷- برج‌های شبکه‌ای

برج شبکه‌ای از مجموعه اعضایی در یک‌لایه، دولایه و یا چندلایه تشکیل‌شده که به‌حالتی برج‌گونه شکل گرفته‌اند. نمونه‌هایی از برج‌های شبکه‌ای در شکل‌های شماره ۱۹۳ تا ۱۹۷ پیوست (۱ـالف) نشان داده شده‌اند.

۴-۱-۲-۸ - سازه‌های فضاکار تاشو

سازهٔ فضاکار تاشو از مجموعهٔ اعضا و اتصالاتی تشکیل شده‌است که قابلیت تاشدن و بازشدن دارند. نمونه‌هایی از چنین سازه‌هایی در شکل‌های شماره ۱۹۸ تا ۲۰۰ پیوست (۱ـ الف) نشان داده شده‌اند.

۴-۱-۲-۹- سازه‌های فضاکار شبکه‌ای مرکب

سازهٔ فضاکار شبکه‌ای مرکب از ترکیب دو یا چند سازهٔ فضاکار از یک نوع و یا انواع متفاوت شبکه‌ای تشکیل می‌شود. نمونه‌هایی از شبکه‌های دولایه مرکب در شکل‌های شماره ۶۴ و ۶۵، نمونه‌هایی از چلیک‌های مرکب در شکل‌های شماره ۷۲، ۷۳، ۷۹ و ۸۱، نمونه‌هایی از چلیک‌ـگنبدها در شکل‌های ۱۶۰ تا ۱۶۵ و نمونه‌هایی از سهلوی‌های مرکب در شکل‌های ۱۶۹ تا ۱۷۳ پیوست (۱ـ الف) نمایش داده شده‌اند.

۴-۱-۲-۱۰- سازه‌های فضاکار شبکه‌ای با شکل آزاد

سازهٔ فضاکار شبکه‌ای با شکل آزاد از مجموعهٔ اعضایی تشکیل شده است که به‌صورتی نامنظم شکل یافته‌اند. چنین سازه‌ای می‌تواند با تغییر و یا ترکیب شکل‌های متعارف منظم به‌دست آید. نمونه‌هایی از چنین سازه‌هایی در شکل‌های شماره ۱۸۴ تا ۱۹۲ پیوست (۱ـ الف) نشان داده شده‌اند.

۴-۲- طراحی مجموعهٔ سازهٔ فضاکار

۴-۲-۱- مبانی طراحی مجموعهٔ سازهٔ فضاکار

در مرحله طراحی مجموعهٔ سازهٔ فضاکار، در مورد کلیات فرم سازه، سیستم سازه‌ای و تکیه‌گاهی (شامل پی، پایه‌ها، دستگاه‌های تکیه‌گاهی) با رعایت اصول ایمنی، عملکردی، زیباشناختی و دیدگاه‌های اقتصاد مهندسی و با توجه به کنش‌های مؤثر بر سازه فضاکار و اهداف کاربری و عمر مفید اتخاذ تصمیم می‌گردد. به این منظور لازم‌است انواع گزینه‌های ذیربط از نظر فرم هندسی، نوع مصالح، سیستم سازه‌ای، ملزومات عملکردی، شیوه ساخت، بافت و نصب، هزینه‌های اولیهٔ احداث، هزینه‌های نگهداری در دورهٔ بهره‌برداری، کیفیت بهره‌برداری، سهولت یا صعوبت نگهداری و دیگر موارد، مورد بررسی فنی و اقتصادی قرار گرفته و گزینه یا تعداد معدودی گزینه برتر اختیار گردد. فرم معماری آنگاه که در خدمت محتوای سازه ای آن قرار گیرد، به ارضای ملزومات مذکور در فوق انجامیده، به طرح توفیق آمیزی بدل می‌گردد. بنابراین همکاری نزدیک گروه‌های کاری معماری و مهندسی (سازه، ژئوتکنیک، تأسیسات، محیط زیست) از ابتدای طراحی مجموعهٔ یک سازهٔ فضاکار، از مرحله بررسی‌های امکان‌سنجی و توجیهی تا مراحل طراحی مجموعه سازه فضاکار مورد نیاز خواهد بود. به عبارت دیگر فرم سازه فضاکار اغلب فرم ظاهری پروژه را نیز معرفی می‌نماید.

به منظور توفیق در طراحی مجموعه سازه فضاکار، لازم‌است گروه طراحی با امکانات قابل حصول از نظر تجهیزات ساختمانی، تکنولوژی ساخت، شیوه‌ها و قابلیت‌های تولید صنعتی کارخانه‌ای و شیوه‌های عملیات اجرایی کارگاهی و اصول مدیریت ساخت آشنایی کامل داشته و طراحی را منطبق با شیوه ساخت و با در نظرگرفتن و تأمین شرایط پایداری زیرمجموعه‌ها در طول فرایند بافت و نصب به انجام رساند.

به‌طور معمول طراح سازهٔ فضاکار باید در این مرحله در مورد نوع و سیستم اعضا و پیوندها و اتصالات و واحدهای نمونه اتخاذ تصمیم نماید و طراحی را منطبق با امکانات قابل حصول به نتیجه رساند. در این مرحله از طراحی باید از کفایت مطالعات در مورد تمامی جنبه‌های فنی و اقتصادی طرح به‌منظور امکان برگزیدن تعداد محدودی گزینه ذیربط برای مطالعات مرحله اول تا انتخاب گزینه برتر و مطالعات بعدی در زمینهٔ طراحی تفصیلی گزینه برتر اطمینان حاصل گردد. به عبارت دیگر لازم‌است تصمیمات اساسی در مورد آنچه در مطالعات طراحی تفصیلی مورد نیاز است، شامل جزییات فرم، هم‌بندی و شبکه‌بندی، مدل‌سازی، تحلیل، طراحی اعضا، پیوندها، اجزا و جزییات اجرایی و تدوین مشخصات فنی طرح و ساخت اتخاذ گردد.

تمامی سازه‌ها و به ویژه سازه‌های فضاکار عظیم باید از دیدگاه زیباشناختی و تأثیرگذاری بر محیط مصنوع و طبیعی پیرامون ساختگاه مورد بررسی قرار گیرند و برای دست‌یابی به فرم فضایی بدیع کوشش به‌عمل آید.

علاوه بر مباحث مذکور در فوق، لازم‌است جنبه‌های تأسیساتی، مکانیکی و الکتریکی (تبادل حرارتی، تهویه، نورپردازی)، خواص آکوستیک مجموعه، سیستم‌های حفاظتی در مقابل آتش‌سوزی (هشدار، اطفا و حفاظت)، اجزای گرم‌کننده پوشانه‌ها برای ممانعت از

انباشت برف و شیوه‌های دسترسی به اعضا و اجزای سازه فضاکار و تمهیدات تأسیساتی در مراحل بهره‌برداری و نگهداری و غیره از دیدگاه‌های فنی و اقتصادی به دقت مورد مطالعه قرار داده شده و در مورد آنها گزینه‌های مرتبط مورد توجه قرار داده شوند. همچنین در مرحله طراحی مجموعه لازم‌است در مورد نوع نماها و روسازی درونی، پوشانه‌های بام، دیواره‌ها، کف‌های سازه و پوشانه‌های درونی و بیرونی و سقف‌ها وکف‌های کاذب بررسی و اتخاذ تصمیم گردد.

طراحی سازه فضاکار را می‌توان به‌قصد کاهش مسایل و مشکلات و هزینه‌های مربوط به دورهٔ بهره‌برداری و نگهداری ساماندهی نمود.

۴-۲-۲- مفاهیم طراحی مجموعهٔ سازهٔ فضاکار

در طراحی مجموعهٔ سازه‌های فضاکار شبکه‌ای موارد زیر را می‌توان به عنوان راهنما مدنظر قرار داد:

بر طراحی مجموعه سازه فضاکار به صورت مجموعه‌ای از مدول‌ها یا واحدهای تکـرارشونده و حتی‌المقــدور ساده و در خور پیش‌سازی و تولید انبوه، در ابعاد و اشکال استانـدارشده، مـزایای متعددی از نظر سهولت ساخت، نصب، سرعت اجرا و کاهش هزینه‌ها مترتب است. اگرچه گاه طراح به‌دلایل قابل دفاعی ممکن است از سیستم‌های ساخت درجا بهره‌گیری نماید.

با توجه به آنکه عملکرد سه بعدی فضاکار این سازه‌ها منجر به ایجاد قابلیت باربری در تمامی جهات و کاهش وزن مرده سازه در مقایسه با سیستم‌های سنتی می‌گردند، سازه‌های فضاکار به‌طور معمول نسبتاً سبک و در عین‌حال دارای صلبیت قابل ملاحظـه‌ای می‌باشند. علاوه برآن، با توجه به درجه نامعینی قابل ملاحظه، اغلب سازه‌های فضاکار شبکه‌ای، در اغلب موارد به علت وجود مسیرهای ثانویه انتقال بارها، مقاومت مطلوبی در مقابل گسیختگی زنجیره‌وارِ پیش‌رونده از خود نشان می‌دهند.

به‌ویژه در مورد سازه‌های فضاکار ابنیه‌ای که در آنها عملکرد معماری ایجاب می‌نماید که دهانه‌های آزاد و نسبتاً بزرگ در دو امتداد متعامد در پلان تأمین گردد، سازه‌های سنتی متشکل از تیرها و خرپاهای یک‌جهته در این چنین کاربردهایی سازه‌های نامطلوبی از جنبه‌های فنی و اقتصادی محسوب می‌گردند و از دیدگاه پایداری و رفتار سازه‌ای از یک‌سو و به‌لحاظ سنگینی وزن مرده، با به‌کارگیری چنین سازه‌هایی، نیات عملکردی، ایمنی و اقتصادی، به‌نحو مطلوبی برآورده نخواهد شد. در این حالت بهره‌گیری از سازه‌های فضاکار با فرم مناسب به‌منظور افزایش صلبیت، افزایش پایداری و ایمنی، ارتقای قابلیت اعتماد، سبک‌سازی وزن مرده و در نتیجه قابلیت افزایش دهانه‌های آزاد و در عین حال، صرفه‌جویی در مصالح و در نتیجه تخریب کمتر محیط زیست، در واقع از ضرورت‌های بنیادین تلقی می‌گردند.

سازه‌های فضاکار امکان عمده‌ای به مهندسان و معماران برای تلفیق اصول زیباشناسی و ابداعات بدیع با تضمین عملکرد مورد نظر به‌دست می‌دهند. در این حالت، فلسفه حاکم بر فرایند طراحی مبتنی بر فرم‌شناسی سازه‌ای و به مفهوم به‌کارگرفتن فرم معماری در خدمت محتوای سازه‌ای با توجه به این واقعیت است که سازه و معماری مفاهیم تفکیک‌پذیری نخواهند بود.

۴-۲-۲-۱- شبکه‌بندی ساختاری

شبکه‌بندی یا استخوان‌بندی ساختاری سازه فضاکار به‌طور معمول از دو طریق تشکیل می‌شود:

ـ شبکه‌های متشکل از اعضا و گره‌ها،

ـ شبکه‌های متشکل از واحدهای شاخص، که خود شامل اعضا و اجزای کوچک‌تر می‌باشند.

۴-۲-۲-۲- شبکه‌های تک‌لایه

در سیستم‌های متشکل از اعضا در شبکه‌های تک لایه، اعضا در راستاهای مورد نظر در فضا قرار گرفته و فرم رویه سازه را ایجاد می‌نمایند. در شبکه‌های صفحه‌ای تک‌لایه، اعضا در دو یا سه راه قرار گرفته و رفتار عمدتاً خمشی ـ برشی ـ پیچشی از خود بروز می‌دهند.

۴-۲-۲-۳- شبکه‌های دو یا چندلایه

در حالت‌های کلی متداول، سیستم‌های واحدی تشکیل‌دهندهٔ شبکه‌های فضاکار دو یا سه لایه می‌باشند که در آن‌ها لایه‌های فوقانی، تحتانی و میانی توسط اعضای جان به‌یکدیگر متصل می‌گردند. در این حالات به‌طور معمول ویژگی‌های واحدهای بنیادین بر مشخصه‌های سازه مانند سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و سایر ویژگی‌های آن تأثیر عمده خواهند داشت.

در مورد شبکه‌های تخت دولایه در پوشانه‌های ساختمان‌ها، امکانات پیش‌روی طراح سازه فضاکار با توجه به وضعیت و موقعیت و نوع پایه‌ها در اغلب موارد متنوع خواهد بود. گاه از شبکه‌های عمدتاً هم‌سیستم با جابه‌جایی در پلان به عنوان شبکه‌های فوقانی و تحتانی بهره‌گیری می‌شود و گاه شبکه‌های فوقانی و تحتانی در الگویی کاملاً متفاوت طراحی می‌شوند، به نحوی‌که با اتصال آنها با اعضای جانِ متصل‌کننده شبکه‌های مزبور، واحدهای منظم و تکرارشونده ایجاد می‌گردند.

در طراحی پیوندهها در هر دو نوع شبکه مذکور در فوق، به‌طور معمول باید در مورد میزان سختی (یا انعطاف‌پذیری) پیوندهها اتخاذ تصمیم نمود و متناسباً محاسبات فنی و طراحی پیونده را انجام داد. طراحی پیوندهها باید به منظور سهولت ساخت و نصب، محدودیت امکان بروز برون محوری و تأمین رواداری‌های اجرایی لازم صورت گیرد. همچنین طراح باید به قصد سهولت نگهداری، پیوندهها و اتصالات را طراحی نماید. پیوندهها و اتصالات در واقع منطق سیستم سازه فضاکار را معرفی می‌نمایند.

در مورد پیوندهها قابلیت‌پذیرش تعداد قابل ملاحظه‌ای عضو در زوایای فضایی گوناگون امتیازی عمومی تلقی می‌شود. همچنین ابعاد پیوندهها، ادوات اتصال و اعضا باید متناسب با زوایای فضایی و ابعاد اعضا انتخاب شوند.

به طور معمول پیوندهای کروی (گوی‌سان) یا چندوجهی چنین نیازهایی را پاسخ می‌گویند. در اغلب موارد ۳ نوع پیوند گوی‌سان به‌طور متداول به‌کارگرفته شده‌اند: (الف) ـ پیوندهای کروی یا چند وجهی توپر با سوراخ‌های حدیده‌شده برای پذیرش پیچ‌های اتصال عضو به پیوند. (ب) ـ پیوندهای کروی توخالی با سوراخ‌های حدیده شده. (ج) ـ پیوندهای کروی تو خالی با سوراخ‌های حدیده نشده با ناحیه‌ای باز برای ایجاد امکان عبور پیچ اتصال.

۴-۲-۲-۴- چلیک‌ها و گنبدها

در مورد چلیک‌ها و گنبدهای فضاکار، اگرچه بهره‌گیری از سیستم ضلع و گرهی (پیونده‌ای) یا واحدی پیش‌ساخته متداول است، ولی باید توجه داشت که در اینجا تنوع در ابعاد اعضا می‌تواند قابل ملاحظه باشد. در ارتباط با شبکه‌بندی گنبدهای شبکه‌ای مهاربندی‌شده، در بسیاری از موارد با رعایت جنبه‌های عملی و اجرایی، بهره‌گیری از نزدیک‌ترین چندوجهی محاطی یا محیطیِ سطح مورد نظر، حایز اهمیت است.

در این حالات اغلب فرم‌شناسی سازه‌ای، فرم‌یابی و فرم‌سازی بخشی از فرایند بهینه‌یابی در روند طراحی سازه‌های فضاکار به‌شمار می‌روند. در مواردی که سازهٔ فضاکار شبکه‌ای تخت دولایه به عنوان سازهٔ کف طبقات ساختمان‌های چندطبقه با دهانه‌های متنوع به‌کار گرفته می‌شود یا سازهٔ شبکه‌ای فضاکار به‌عنوان پایه‌های برج‌گونه یا دیوارهای فضاکار برای تکیه‌گاه سازه‌های فضاکار به‌کار برده می‌شوند، به‌طور معمول انتخاب موقعیت و فرم و ابعاد هندسی شبکه فضاکار پایه باید به‌نحوی در هماهنگی با شبکه فضاکار سقف باشد تا موقعیت گره‌های مشترک همساز گردند.

در مورد بسیاری از گنبدها و چلیک‌ها در صورت وجود فضای کافی می‌توان قوس چلیک و همچنین گنبد فضاکار را به‌طور مستقیم و بدون واسطه پایه یا دیواره بر شالوده استوار ساخت.

۴-۲-۳- قیاس به صفحه یا پوستهٔ معادل

در این روش، سازهٔ فضاکار شبکه‌ای به صفحه یا پوسته (یا محیط پیوسته) معادل با رفتار شناخته‌شده تشبیه می‌شود که دارای خواص ایزوتروپیک یا ارتوتروپیک خواهد بود. بهره‌گیری از مفاهیم معادل‌سازی تقریبی شبکه‌های فضاکار با محیط پیوسته معادل، از آن جهت که رفتار کلی سازه فضاکار را براساس رفتار شناخته‌شده سازه‌های صفحه‌ای و پوسته‌ای معادل برای مطالعات اولیه امکان‌پذیر می‌سازد، در مراحل بررسی‌های اولیه قابل کاربرد خواهد بود.

بسته به نوع واحدهای بنیادین، در مورد شبکه‌های فضاکار تک‌لایه و دولایه، سازه فضاکار می‌تواند دارای خواص ایزوتروپیک یا ارتوتروپیک باشد.

۴-۲-۴- سازهٔ فضاکار در مقایسه با سایر سیستم‌های سازه‌ای

طراح سازه فضاکار باید قانع شده باشد که برای کاربری مورد نظر پروژه، در قیاس با سایر انواع سیستم‌های سازه‌ای، سازه فضاکار گزینه برتر خواهد بود. به این منظور باید انواع دیگر گزینه‌های ذیربط را مورد بررسی قرار داد و با گزینه‌های ذیربط از نوع سازه فضاکار شبکه‌ای، از جنبه‌های گوناگون و از دیدگاه فنی و اقتصادی مقایسه نمود تا از کاربرد به‌جای سازهٔ فضاکار برای پروژهٔ مورد نظر اطمینان حاصل شود. در اغلب موارد برای سازه‌های با دهانه‌های آزاد قابل ملاحظه، سازه فضاکار از سازه پوسته‌ای نظیر خود به مراتب سبک‌تر خواهد بود و با قابلیت تولید پیش‌ساخته صنعتی، در صورت به‌کارگیری این شیوه، اغلب صرفه اقتصادی نیز تأمین خواهد شد. از سوی دیگر، نصب و بافت سریع سازه‌های فضاکار، زمان به مراتب کمتری از طراحی قالب‌ها، قالب‌سازی، قالب‌بندی، آرماتوربندی، جادادن و مراقبت و عمل آوردن بتن را طلب می‌نماید.

۴-۲-۵- تحلیل میزان حساسیت به تغییرات پارامترهای مؤثر در طرح

در طراحی سازه‌های فضاکار، چگالی شبکه، نسبت ارتفاع شبکه به طول دهانه‌ها و علاوه بر آن در مورد سازه‌های فضاکار چلیکی یا گنبدی، نسبت خیز به دهانه باید به نحوی انتخاب شوند که تحت تأثیر کنش‌های مسلط، پاسخ مطلوب سازه به معنی ارضای تمامی معیارهای پذیرش حاصل گردد. به منظور نیل به نتایج مطلوب، لازم‌است تحلیل میزان حساسیت به تغییرات پارامترهای مؤثر در طرح به‌عمل آید. در این ارتباط، به موارد مندرج در بندهای ذیل در این فصل در زمینهٔ بهینه‌یابی فرم سازه مراجعه شود.

۴-۲-۶- روش‌های طراحی فرم هندسی مجموعهٔ سازه فضاکار

طراحی مجموعهٔ سازه‌های فضاکار شبکه‌ای را می‌توان از کل به جزء یا از جزء به کل به عمل آورد.

۴-۲- ۶-۱- طراحی سازه فضاکار شبکه‌ای از کل به جزء

طراحی سازه فضاکار شبکه‌ای از کل به جزء به مفهوم اختیار فرم کلی سازه و تقسیم‌بندی آن به واحدهای شبکه‌ای یا اعضایی است که به‌طور معمول و ترجیحی تـکرارشونده بوده و فرم کلی سازه را به صورت شبکه‌ای ارایه می‌نمایند. طراحی از کل به جزء به ویژه در صورت امکان بهره‌گیری از واحدهای تکرارشونده با تنوع محدود در بخش اعظم سازه، ضمن ایجاد فرم هندسی مورد نظر، مزایای تولید انبوه صنعتی را نیز دربر خواهد داشت. در حالت طراحی از کل به جزء، احتمال دارد در حوالی تکیه‌گاه‌ها، به منظور ارضای شرایط سرحدی، نیاز به تغییراتی در واحدها یا اعضای سازه وجود داشته باشد. تقسیم‌بندی فرم کلی به اعضا و واحدهای کوچک‌تر، باید به نحو منطقی و معقولی صورت گیرد تا حتی‌المقدور، از واحدهای یکسان استفاده شود.

روش تقسیم‌بندی از کل به جزء برای فرم‌های با سطوح نمادین از نوع تخت، استوانه‌ای، مخروطی و کروی (چندوجهی) به سادگی صورت می‌پذیرد. نحوه هم‌بندی اعضا و واحدهای شاخص در مورد سطوح بغرنج یا دارای انحنا مضاعف به‌طور طبیعی پیچیده‌تر خواهد بود.

۴-۲-۶-۲- طراحی سازه فضاکار شبکه‌ای از جزء به کل

در طراحی از جزء به کل، واحدهای مبنا اختیار و با هم‌بندی آنان به منظور ارضای ملزومات طرح، فرم هندسی مجموعه سازه فضاکار حاصل می‌گردد.

در حالت طراحی از جزء به کل، در مواردی که فرم اولیه هندسی پیچیده است، ممکن است نتوان به‌طور دقیق با سرهم‌بندی واحدهای شاخص اولیه، به فرم مورد نظر دست یافت ولی در اغلب موارد می‌توان با تنوع محدودی از واحدهای تکرارشونده، برای ارضای ملزومات طرح، به میزان کافی به آن نزدیک شد. ایجاد یک سطح پیچیده با چنین واحدهایی گاه امکان‌پذیر نخواهد بود، ولی در عوض با سرهم‌بندی واحدهای مدوله ممکن است به فرم‌هایی دست یافت که از پیش تعیین نشده‌اند.

۴-۲-۷- عوامل مؤثر بر سختی و مقاومت

ترتیب استقرار اعضا و اجزا و واحدهای سازه فضاکار، سیستم سازه اسکلتی (شبکه‌ای) فضاکار را تشکیل می‌دهد. خواص و رفتار سازه فضاکار طبعاً وابستگی زیادی به خواص واحدهای پایهٔ تشکیل‌دهنده آن و اتصالات این اعضا و واحدها به یکدیگر و نحوه هم‌بندی آنان خواهد داشت.

سختی، مقاومت و سایر خواص سازه وابسته به عوامل چندی از جمله فرم هندسی سازه، خواص مصالح، نحوه هم‌بندی اعضا و واحدها، ویژگی‌های شبکه‌بندی، نوع و رفتار پیوندها، اجزا، ادوات و نوع اتصالات، رفتار اعضا، تعداد لایه‌ها و تواتر (یا چگالی) شبکه، خواهند بود.

۴-۲-۸- خرپاهای فضاکار

خرپاهای فضاکار حالت خاصی از سازه‌های فضاکار می‌باشند که از هم‌بندی اعضای خطی مستوی به صورتی پایدار تشکیل‌شده باشند. در مورد خرپاهای فضاکار نیروهای درونی در اعضا به‌طور عمده از نوع محوری (بدون ملحوظداشتن اثر خمش ناشی از وزن اعضا یا بارهای متمرکز احتمالی) خواهند بود.

اعضای سازه فضاکار شبکه‌ای را مرجحاً به صورت مستوی و در مواردی که توجیه‌پذیر باشد، می‌توان به‌صورت اعضای خطی دارای انحنا اختیار نمود.

۴-۲-۹- نوع هم‌بندی

ترتیب هم‌بندی اعضای یک شبکه فضاکار یا به صورت هم‌بندی ضلع و گرهی (پیونده‌ای) یا از اتصال واحدها یا زیرمجموعه‌هایی از سازه (پاره‌سازه‌ها) صورت می‌پذیرد. در سیستم‌های واحدی یا پاره‌سازه‌ای، در اغلب موارد، هر زیرمجموعه به‌خودی خود از هم‌بندی چند یا چندین ضلع و گره ایجاد می‌گردد.

در سیستم‌های ضلع و گرهی در اغلب موارد اتصال عضو به گره به صورت مستقل صورت می‌گیرد.

۴-۲-۱۰- مقاطع و کارایی اعضا

به دلیل کارایی تحت فشار محوری، استفاده از اعضای لوله‌ای با مقطع دایروی استفاده گسترده‌ای در خرپاهای فضاکار داشته است ولی از سایر مقاطع ساختمانی نیز بسته به مورد و نوع عملکرد عضو و جزییات طراحی می‌توان استفاده نمود.

۴-۲-۱۱- پیوندها و اتصالات

به‌طور معمول با توجه به وظایف پیوندها و اتصالات در سازه فضاکار، شیوه انتقال تنش‌ها از طریق پیوندها پیچیده بوده در مواردی که اطلاعات مکفی در مورد رفتار آنها موجود نباشد، مطالعات تحلیلی و طراحی به کمک آزمایش باید مورد توجه قرار گیرد. با توجه به اهمیت پیوندها، نوع اتصال اغلب سیستم‌های تجاری، نقطه عطف سیستم به‌شماررفته و به ثبت رسانده می‌شوند. اجزای اتصالات و پیوندهای فولادی را می‌توان از فولاد تراش داده شده، فرم داده شده در حرارت بالا، پرس‌شده یا فولاد ریخته‌گری با مصالح مناسب ساخت. اتصالات سازه‌های فضاکار، اغلب با ادوات اتصال پیچی یا از طریق جوش صورت می‌گیرد.

نوع رفتار پیوندهها، میزان انعطاف‌پذیری اتصالات، ممتدبودن یا غیرممتدبودن اعضا اهمیت قابل ملاحظه‌ای در رفتار مجموعه سازه فضاکار خواهند داشت و باید در مدل‌سازی و تحلیل به نحو واقع‌گرایانه‌ای ملحوظ گردند. همچنین میزان انعطاف‌پذیری یا میزان‌گیرداری اتصالات، در ظرفیت مقاومتی اعضا در مقابل خمش و همچنین طول مـؤثر و مقاومت کمـانشی اعضا حایز اهمیت می‌باشد.

۴-۲-۱۲- رواداری‌های ساخت، بافت و نصب

دقت در ساخت اجزا و قطعات، پیوندهها و اعضا و واحدهای نمونه سازه فضاکار حایز اهمیت است و اغلب برای سازه‌های فضاکار پوشش فضاهای وسیع، نیاز به رعایت رواداری‌های محدودتری از اعضا و اجزای سازه‌های متعارف ساختمانی خواهد بود.

۴-۲-۱۳- ابزار طراحی

در ارتباط با فرم‌یابی و فرم‌سازی، تحلیل و طراحی و بهینه‌یابی سازه‌های فضاکار، امروزه امکانات قابل توجهی در دسترس است که این امر را تسهیل نموده و امکان بررسی فرم‌های تازه و ارایه شکل‌های بدیع را میسر می‌سازد. به این ترتیب، بهره‌گیری از جبرفرمکسی و برنامه فُرمیِیَن، روش‌های تولید اطلاعات مربوط به هم‌بندی و ویژگی‌های هندسی و پیش‌پردازش داده‌ها، ابزار تحلیل ماتریسی و اجزای محدود سازه‌ها و ابزار پردازش نتایج، به‌ویژه به شیوه‌های ترسیمی، تصویری و گرافیک در حال حاضر از ابزار لاینفک طراحی سازه‌های فضاکار به‌شمار می‌روند.

۴-۲-۱۴- رفتار سازه‌ای و عملکرد معماری سازه فضاکار

رفتار سازه‌ای و عملکرد معماری سازهٔ فضاکار به‌طور عمده تحت تأثیر عوامل زیر می‌باشد:

- فرم سازه
- سیستم هم‌بندی
- خواص مصالح سازه
- نوع اتصالات

۴-۲-۱۵- فرم‌یابی

به‌طور معمول در طراحی سازه فضاکار گزینه‌های کلی و اولیه و قابل تصور برای رویه‌هایی که ارضاکننده نیازهای عملکردی و شرایط سرحدی باشند، مورد بررسی قرار می‌گیرند و کوشش می‌گردد شبکه‌بندی با تطابق دادن مجموعه اعضا و پیوندهها یا واحدهای بنیادین یا مدول‌ها و پاره‌سازه‌ها صورت گیرد تا به فرم‌های مربوط به میزان مطلوبی نزدیک شود. در اغلب موارد گزینه‌ها بی‌شمارند و این به معنی آزادی عمل طراحان و در عین حال دشواری انتخاب گزینه برتر از میان گزینه‌های متعدد ذیربط خواهد بود.

۴-۲-۱۵-۱- دسته‌بندی رویه‌های سازه‌های فضاکار

گروه‌بندی زیر برای رویه‌های متنوعی که برای سازه‌های فضاکار با ویژگی‌های هندسی گوناگون متصورند، به‌هیچ روی به مفهوم و منظور ایجاد محدودیت نبوده؛ بلکه از دیدگاه ایجاد انتظام در ذهن طراح و در عین حال مطرح‌کردن برخی از امکانات پیش روی طراح به شرح زیر ارایه شده‌اند.

الف ـ رویه‌های گوسی

از دیدگاه انحنای گوسی رویه‌ها را به حالت‌های زیر دسته‌بندی می‌نمایند:

الف_۱_ انحنای گوسی مثبت (مانند کُره، پارابولای بیضوی)

الف_۲_ انحنای گوسی صفر (مانند استوانه، مخروط، صفحات تخت)

الف_۳_ انحنای گوسی منفی (مانند پارابولای هیپربولیک هذلولی شکل)

الف_۴_ انحنای گوسی متغیر(مانند رویه‌های موجدار)

ب ـ رویه‌های دیگری که با روابط ریاضی تعریف می‌شوند

این رویه‌ها اغلب به صورت توابع چند جمله‌ای درجهٔ سوم به بالا تعریف می‌گردند. ضرایب چند جمله‌ای‌ها اغلب با ارضای شرایط سرحدی و انتخاب چند نقطه هادی ارضاکننده نیازهای عملکرد معماری و تبیین‌کننده فرم کلی سازه فضاکار تعیین می‌گردند.

پ ـ رویه‌هایی که به روش‌های تجربی تعیین می‌گردند

این رویه‌ها به طرق گوناگون قابل تولید می‌باشند، از جمله: غشا ایجادشده از طریق حباب آب و صابون، غشاهای نازک از مصالح ارتجاعی، شبکه‌های ساخته‌شده از اعضای کشسان یا سیم‌های متقاطع و نظایر آن. در این فرآیند برای دستیابی به فرم رویه‌ای که ارضاکننده نیازهای عملکردی و رفتاری طرح باشد، با قضاوت از دیدگاه‌های تخصصی و زیباشناختی و جهت نیل به فرم دلخواه و منطقی پی‌جویی به‌عمل خواهد آمد.

۴-۲-۱۶- بهینه‌یابی

بهینه‌یابی سازهٔ فضاکار از آن جهت حایز اهمیت است که با کاهش وزن مرده سازه، علاوه بر صرفه‌جویی در مصالح و تخریب کمتر در محیط زیست، امکان افزایش دهانه‌های آزاد برای رفع نیازهای جوامع متحول فراهم خواهد گردید. در عین حال کاهش جرم به‌طور معمول از نظر رفتار لرزه‌ای نیز مطلوب تلقی می‌گردد.

هدف از بهینه‌یابی، دستیابی به مقدار یا مقادیر حدی (حداقل یا حداکثر) یک تابع هدف، با ارضای قیود تعریف‌شده‌ای می‌باشد که در آن در اغلب موارد این تابع برحسب بردار متغیرهای حایز اهمیت در فرایند بهینه‌یابی تعریف می‌گردد. قیود مورد اشاره در فوق، خود نیز به صورت توابعی از همان بردار متغیرها نمایش داده می‌شوند. توابع هدف و قیود می‌توانند خطی یا غیرخطی اختیار شوند که به ترتیب با روش‌های برنامه‌ریزی خطی یا غیرخطی مورد بررسی قرار می‌گیرند. از موارد حایز اهمیت در بهینه‌یابی سازه‌های فضاکار حداقل‌سازی وزن می‌باشد که علاوه بر هزینه، مزایای دیگری از قبیل کاهش جرم و نیروهای اینرسی، امکان افزایش دهانه، نیاز به امکانات و تجهیزات کم ظرفیت‌تر برای حمل و نصب خواهد داشت. از موارد دیگر، بیشینه‌سازی سختی سیستم یا بهینه‌یابی هزینه‌های کل احداث و همچنین بهره‌برداری و نگهداری در عمر مفید سازه را می‌توان مورد اشاره قرار داد. در هر حالت، قیودی بر بهینه‌یابی مترتب خواهند بود.

در طراحی سازه‌های فضاکار، اغلب اعضا از مجموعه منفصلی از مقاطع موجود در استانداردها یا در بازار یا تولیدات کارخانه سازنده انتخاب می‌شوند. بنابراین، روش برنامه‌ریزی ریاضی از این جنبه منفصل خواهد بود؛ بنابراین به‌طور معمول توابع پیوسته‌ای مانند تغییرمکان‌ها و تنش‌های سازه اغلب به روش انفصال یافته ایده‌آل‌سازی می‌گردند.

به طور معمول در فرایند کاربردی بهینه‌یابی به دلیل پیچیدگی‌ها در تعریف توابع هدف، به ویژه در مواردی که تعداد متغیرها زیاد باشد، و همچنین عدم نیل به‌نتایج عملی در بهینه‌یابی ریاضی، از روش‌های نیمه آنالیتیک بهره‌گیری می‌شود. در این روش‌ها تعداد قابل ملاحظه معادلات جبری تعادل با تعداد محدودی معادلات دیفرانسیل جایگزین می‌گردند. این روش برای سیستم‌های سازه فضاکار متشکل از اعضا و واحدهای منظم تکرارشونده به نتایج مطلوبی رسیده است.

در روش‌های مبتنی بر قضاوت مهندسی، برای دستیابی به طرح منطقی، توجیه‌پذیر و قابل دفاع از جنبه‌های موردنظر، از روش تکرار فرایند چرخه‌ای **طراحی ـ تحلیل مجدد ـ اصلاح طرح ـ کنترل**، تا نیل به مرحله‌ای از طراحی که در گام‌های تکرار این فرایند چرخه‌ای، وزن کل سازه تغییری کمتر از مقدار معینی یابد، بهره‌گیری می‌شود تا برای فرم هندسی مشخص و شبکه‌بندی و هم‌بندی معین، کار به انتخاب مطلوبی از مقاطع اعضا منتهی شود.

همین فرایند را می‌توان برای فرم‌های متفاوت از پیش‌تعیین‌شده اعمال نمود و به طرح بهینه‌ای از مجموعه سازه فضاکار نزدیک شد.

همچنین از روش‌های مبتنی بر صفحه یا پوسته معادل شبکه فضاکار نیز در بهینه‌یابی بهره‌گیری شده است. در این روش، با تغییر چگالی و شبکه‌بندی سازه فضاکار، صفحه یا پوسته معادل آن اختیار و بهینه‌یابی با رعایت قیود متناسب برای صفحه یا پوسته معادل صورت می‌گیرد.

باید به این نکته توجه داشت که انتخاب سیستم و فرم مناسب سازهٔ فضاکار از دیدگاه طراحی مفهومی در اغلب موارد به مراتب حایز اهمیت بیشتری از آن است‌که سیستم نامناسبی انتخاب و کوشش در بهینه‌یابی آن به‌عمل آید.

در عمل، لازم‌است کوشش به‌عمل آید تا مقاطع و اعضا گروه‌بندی شوند و تعداد این گروه‌ها از دیدگاه اجرایی، به نحوی بی‌رویّه زیاد نگردد.

۴-۲-۱۷- پیش‌خیز

ایجاد پیش‌خیز در سازه‌های فضاکار پوشاننده بام‌ها، کف‌ها، سقف‌ها و عرشه‌ها در موارد زیر مفید خواهد بود:

ـ به منظور کنترل میزان تغییرمکان سازه در دهانه‌های نسبتاً بزرگ،

ـ ایجاد شیب یا انحنا برای هدایت آب‌های سطحی به کناره‌ها و ممانعت از بروز آب یا برف انباشتگی.

سازه‌های فضاکار مورد اشاره در فوق را می‌توان به صور زیر طراحی نمود:

ـ بدون پیش‌خیز و به طور تخت (در این حالت برای جمع‌آوری آب‌های سطحی و زهکشی ممکن است مجموعه سازه فضاکار شبکه‌ای به خودی خود در شیب قرار داده شود یا فاصلهٔ لایه‌ها به تدریج افزایش یابد یا از طریق نصب دستک‌های با ارتفاعات متفاوت و استقرار پرلین‌ها در شیب مناسب، شیب‌بندی صورت گیرد).

ـ با پیش‌خیز در یک راستا شامل:
ـ پیش‌خیز کم شیب پله‌ای (شامل یک خط الرأس)،
ـ پیش‌خیز کم شیب چلیکی (با شعاع انحنای قابل ملاحظه)،
ـ پیش‌خیز کم شیب گنبدی شکل (با شعاع انحنای قابل ملاحظه)،
ـ با پیش‌خیز در راستاهای متعدد با چند خط الرأس.

به منظور ایجاد پیش‌خیز به طور معمول لازم است طول اعضای لایه زیرین کوچک‌تر از طول اعضای شبکه رویین باشند. در برخی از سیستم‌های سازه‌های شبکه‌ای فضاکار، بسته به نوع اتصالات، امکان کاهش یا افزایش محدود فاصله مرکز تا مرکز پیونده‌ها به طرق گوناگونی بدون آنکه طول اعضای لایه‌های رویین و زیرین را متفاوت طراحی نمایند، فراهم گردیده است؛ به عنوان مثال، با اتصالات پیچی با رزوه‌های راست‌گرد و چپ‌گرد در دو انتهای عضو می‌توان این نیت را به میزان محدود برآورده ساخت. در سایر موارد، باید برای ایجاد پیش‌خیز به میزان مورد نظر، طول اعضای شبکه زیرین و رویین را به طور متناسب متفاوت اختیار نمود، که این امر را می‌توان بدون نقض فلسفه طراحی مدوله سازه‌های فضاکار به انجام رساند.

میزان پیش‌خیز سازه‌های مورد بحث در این قسمت متناسب با مقدار کمّی بارهای ثقلی، نوع پوشانه و شرایط اقلیمی اختیار می‌گردد. پیش‌خیز را می‌توان برای مقابله با تغییرمکان ناشی از بار مرده یا بار مرده همراه با سهمی از بار زنده یا بار مرده توأم با تمامی بار زندهٔ طراحی، پیش‌بینی نمود.

۴-۳- شیوه‌های ساخت، بافت و نصب

سازه فضاکار شبکه‌ای فولادی از مجموعه‌ای از اعضای فولادی مرتبط با یکدیگر تشکیل شده‌است که در آن اعضا طبق نظمی معین به یکدیگر متصل شده‌اند. فرآیند ساخت سازه مشتمل است بر ساخت و آماده‌سازی اعضا، اجزا، پیونده‌ها و ادوات اتصال و در پی‌آن انبارکردن، حمل و اتصال آنان به یکدیگر بر اساس نقشه‌های جزییات ساخت، بافت و نصب. فرایند ساخت و بافت و نصب باید به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شود که با توجه به امکانات و تجهیزات و شیوه‌هایی که در روند مطالعات طراحی پروژه تعیین گردیده‌اند، مطابق مشخصات فنی طرح، به طرح جامهٔ عمل پوشانده شود. بنابراین تأکید بر این نکته ضروری است که فرایند طراحی سازه نه‌تنها فرایندی قابل تفکیک از اقدامات عملی ساخت، بافت و نصب سازه نمی‌باشد، بلکه تعیین‌کنندهٔ فعالیت‌های گام به‌گام و روش‌های اجرای سازه می‌باشد، بنابراین چنانچه در پیوست‌های ۷ و ۸ این آیین‌نامه مقرر گردیده است، یکی از دستاوردهای مطالعات طراحی، ارایهٔ مشخصات فنی ساخت، بافت و نصب می‌باشد.

اغلب در مرحلهٔ مطالعات طراحی، سازه به واحدها یا زیرمجموعه‌های قابل بافت تقسیم می‌شود؛ به نحوی‌که این واحدها جداگانه ساخته و در موقعیت مناسب بهم بافته شوند. در نهایت زیرمجموعه‌ها یا مجموعه‌های بافته‌شده در محل نهایی نصب خواهند گردید.

تفسیر ـ *شیوهٔ تقسیم سازه به واحدهای کوچک‌تر، نحوه بافت واحدها و روش نصب زیرمجموعه‌ها یا مجموعه‌های پیش‌بافته موجب ارایهٔ شیوه‌های گوناگون ساخت و بافت و نصب سازه‌های فضاکار شده است. هرگاه این شیوه‌ها توفیق یابند که در فرآیند احداث سازه فضاکار تسهیل و در کاهش زمان و هزینه‌ها با حفظ معیارهای کیفی مؤثر واقع شوند، به سرعت مورد بهره‌برداری قرار گرفته و گسترش می‌یابند. واژه‌های کلیدی در این زمینه عبارت‌اند از پیش ساختن و تولید انبوه صنعتی. پیش‌ساختگی می‌تواند برای دهانه‌های متعارف تا حد تولید انبوه پیش رود، در دهانه‌های بزرگ نیز پیش‌سازی قطعات تحت کنترل کیفیت دقیق، دستاوردهای مطلوب فنی و اقتصادی به همراه خواهد داشت.*

روش‌های پیش‌ساخته متعارف سازه‌های فضاکار را می‌توان به ترتیب زیر طبقه‌بندی کرد:

۴-۳-۱- سیستم‌های پیونده‌ای

هر سیستم سازهٔ فضاکار شبکه‌ای متشکل از دو جزء اصلی: ۱) اضلاع و ۲) پیونده‌ها می‌باشد. در این سیستم‌ها پیونده‌ها واسطه ارتباط بین اضلاع می‌باشند و در سیستم‌های رایج به‌طور معمول هر عضو به‌وسیله پیچ یا جوش به پیونده متصل می‌شود. شکل پیونده و نحوه اتصال ضلع و پیونده به یکدیگر عامل ایجاد تنوع در این سیستم‌ها می‌باشد.

۴-۳-۲- سیستم‌های واحدی

در این سیستم‌ها هر واحد سازه فضاکار(مدول) به‌خودی خود مجموعه‌ای از ضلع‌های مرتبط با یکدیگر است. شبکه فضاکار از بهم پیوستن این واحدها شکل می‌گیرد. ویژگی‌های هندسی این واحدها، نوع اجزای تشکیل‌دهندهٔ آنان و نحوه اتصال واحدها به یکدیگر موجب تنوع قابل ملاحظهٔ این سیستم‌ها گردیده است. یک مدول تکرارشونده ممکن است تک واحدی یا چند واحدی باشد.

در برخی از سیستم‌ها تنها از یک نوع واحد تکرارشونده و پاره‌ای دیگر از چند واحد متفاوت برای ایجاد مجموعه یا زیرمجموعه‌های شبکه‌ای سازه فضاکار استفاده می‌شود.

تفسیر – *سیستم‌های متشکل از تعداد محدودی از واحدهای حتی‌المقدور یکسان تکرارشونده یا لااقل با فرم‌ها و ابعاد کلی یکسان و به اصطلاح مدوله در خور پیش ساختن و تولید انبوه صنعتی می‌باشند.*

۴-۳-۳- سیستم‌های ویژه

سیستم‌های رایج پیش‌ساخته، که از آن‌ها در دو بند گذشته یاد شد، بیشتر در دهانه‌های متعارف کاربرد دارند و توسعه آنها برای استفاده در دهانه‌های بزرگ اغلب اقتصادی نخواهد بود. در چنین مواردی اگر رفتار سازه در بخش‌هایی از آن در امتدادهای متفاوت یکسان نباشد یا به عبارت دیگر نیروهای درونی در یک امتداد بالنسبه قابل ملاحظه باشد، می‌توان اعضا را به‌صورت پیوسته در امتداد مزبور ادامه داد و دیگر اعضا را در گره‌ها به اعضای ممتد متصل کرد. اغلب با طراحی یک اتصال خاص در چنین موقعیت‌هایی می‌توان دامنه استفاده از سیستم‌های متعارف را گسترش داد.

همچنین، با استفاده از یک شبکه سازه فضاکار اصلی که با اتصالات خاص ایجاد خواهد شد، می‌توان سطح مورد پوشش را به سطوح کوچک‌تر تقسیم کرد و این سطوح را با سیستم‌های پیونده‌ای یا واحدی پوشش داد. به عبارت دیگر، در این روش شبکه سازه فضاکار اصلی از اتصال زیر مجموعه‌های فضاکار شبکه‌ای متشکل از سیستم‌های متعارف تشکیل می‌شود.

می‌توان از نظم معمول شبکه‌های سازه فضاکار استفاده کرده و شبکه مورد نظر را به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم کرد و با طراحی الگوهای خاص این بخش‌های کوچک را جداگانه ساخته و به موقعیت مربوط حمل کرد تا شبکه اصلی ایجاد گردد.

۴-۳-۴- شیوه‌های بافت و جابه‌جایی

امروزه با پیشرفت روش‌های جابه‌جایی می‌توان قطعات سنگین و حجیم را به طور مطمئن جابه‌جا کرد و این امکان اجازه می‌دهد تا سازه‌ها و تأسیسات بزرگ در کارخانه‌ها و یا در کارگاه‌ها در تراز زمین ساخته شوند و سپس در سطح و یا در ارتفاع جابه‌جاشده و در موقعیت لازم استقرار یابند. به‌این ترتیب در حالتی‌که ساخت و بافت در تراز پایین انجام شود، شرایط ارضای ملزومات

اقتصاد طرح و ایمنی ساخت به‌نحو مطلوب فراهم گردیده، با امکان اعمال سیستم کنترل کیفیت آسان‌تر، دسترسی به کیفیت برتر نیز میسر می‌شود. در مورد سازه‌های فضاکار فرا ساحلی، مجموعه‌های تا چندین ده هزار تن در ساحل ساخته‌شده، توسط شناور به موقعیت نصب انتقال می‌یابند.

قطعه‌بندی برای ساخت و جابه‌جایی باید با توجه به امکانات در دسترس و پایداری و مقاومت هر قطعه در مراحل جابه‌جایی صورت گیرد. بر این اساس، شیوه‌های متداول بافت و جابه‌جایی به‌کار گرفته می‌شوند.

پرداختن به جزییات مربوط به این شیوه‌ها موضوع بخش سوم این آیین‌نامه است. در فصل حاضر، به نکاتی که باید در ارتباط با مسایل ساخت و نصب در طراحی مجموعه سازه فضاکار مورد نظر قرارگیرند، اشاره می‌شود.

شیوه‌های زیر برای بافت و نصب سازه‌های فضاکار شبکه‌ای فولادی به‌کار گرفته می‌شوند:

ـ بافت کل سازه با ترتیب مناسبی روی داربست (به‌طور معمول متحرک)،

ـ تثبیت بخشی از سازه در موقعیت خود و بافت بقیه به‌صورت طره‌ای و با استفاده از پایه‌های موقت به ترتیبی که بخش‌های بافته‌شده به یکدیگر و به تکیه‌گاه‌های خود برسند،

ـ تقسیم سازه با توجه به توان تجهیزات در دسترس به نوارها و یا بلوک‌های خود ایستا. بافت هر نوار یا بلوک به‌طور جداگانه در تراز زمین و رساندن آن به جایگاه نهایی خود و اتصال به مجموعه قبلی،

ـ بافت نواری از سازه در ارتفاع نهایی روی داربست و لغزاندن روی بستر تا فراهم‌شدن امکان بافت بخش بعدی بر روی داربست و ادامه عملیات تا پایان‌کار،

ـ بافتن کل شبکه در سطح زمین و رساندن آن به موقعیت نهایی با استفاده از مجموعه‌ای از جراثقال‌ها. در این روش جابه‌جایی افقی شبکه نیز تا اندازه‌ای قابل انجام است.

ـ بافتن کل شبکه در موقعیت نهایی افقی خود با رواداری قابل‌پذیرش در تراز زمین و جابه‌جایی آن با استفاده از سیستمی از جک‌های مستقر بر برج‌های بالابر و کابل‌های آویخته از آنها در ارتفاع تا رسیدن به تراز مطلوب. در این روش همچنین می‌توان بسته به مورد از ستون‌ها یا قاب‌های سیستم سازه تکیه‌گاهی نیز برای استقرار جک‌ها استفاده کرد یا جک‌ها را بر روی پایه‌های موقت مستقر کرد.

ـ روش‌های رایج ساخت طره‌ای پل‌ها در موارد قابل کاربرد و همچنین در حالاتی‌که موقعیت نهایی شبکهٔ فضاکار با زمین یا بام ساختمان موجود مقاومی در مجاورت آن هم‌تراز باشد، به‌کارگیری شیوه‌های نظیر روش‌های متداول احداث پل‌ها از طریق پیشرانی قابل استفاده خواهد بود. در این حالت انتظار می‌رود شبکه فضاکار به خودی خود بتواند عملکرد خرپای پیش‌رانی را ایفا نماید. درهرحال، در صورتی‌که از سازه‌های فضاکار شبکه‌ای به‌عنوان پایه‌ها و یا سازهٔ عرشهٔ پل بهره‌گیری شود، روش‌های متداول احداث پل‌ها به‌طور معمول در این نوع از سازه‌ها نیز قابل کاربرد خواهد بود؛ با توجه به این نکته که کاهش وزن قابل ملاحظهٔ ناشی از بهره‌گیری از سازه‌های فضاکار شبکه‌ای با کف یا عرشه فولادی یا بتنی در عین افزایش صلبیت، منجر به امکان افزایش طول دهانه‌ها و تسهیل و تسریع در احداث چنین پل‌هایی در مقایسه با پل‌های متداول بتن‌آرمه یا فولادی خواهد گردید.

انتخاب هر یک از شیوه‌های یادشده و یا ترکیب مناسبی از آنها یا روش‌های متنوع ابتکاری و ابداعی دیگر با توجه به موقعیت پروژه، تجهیزات و ماشین‌آلات در دسترس، فضای موجود برای عملکرد ماشین‌آلات، شکل و مقاومت سازه یا زیر مجموعه‌های آن، تغییرشکل سازه یا قطعات آن در ارتباط با نقاط آویز انتخابی، مسایل مربوط به جابه‌جایی افقی بر بسترهای مربوط یا نقاط اتکایی

موقت، بخش عمده‌ای از مطالعات طراحی را برای هرگزینه طرح تشکیل می‌دهد. نقاط قوت و ضعف هرگزینه از دیدگاه فنی و اقتصادی باید در انتخاب گزینه برتر مورد توجه قرار گیرد.

تفسیر ـ *شیوهٔ ساخت باید در مرحله طراحی معین و محاسبات فنی با توجه به روش بافت و نصب صورت گیرد به نحوی که در هر مرحله از بافت و نصب، پایداری مجموعهٔ سازه‌های نا تمام و تکیه‌گاه‌ها و مهاربندی‌ها یا کابل‌های موقت یا دایم آن‌ها تحت تأثیر تمامی کنش‌های قابل اعمال در بازه زمانی مربوط تأمین شده باشد.*

۴-۳-۵- نصب

بعد از نصب دستگاه‌ها و قطعات تکیه‌گاهی، سازهٔ بافته‌شده، به موقعیت نهایی خود نزدیک‌شده، پس از تنظیم نهایی در موقعیت خود استقراریافته ونصب می‌شود. به طور معمول و با توجه به شرایط محیطی، ازجمله باد و به ویژه درجه حرارت، موقعیت سازه به طور دقیق تعیین و خطاهای موجود محاسبه و در مرحلـه تنظیم نهایی خطاها تا حدممکن سـرشکن‌شـده و با توجه به حدود رواداری‌های مجاز، سازه در بهترین موقعیت ممکن استقرار داده می‌شود. متعاقباً قطعات و دستگاه‌های تکیه‌گاهی تنظیم و سازه بر تکیه‌گاه‌ها تثبیت می‌گردد.

در طراحی سازه‌های فضاکار باید جزییات اجرایی نصب پیش‌بینی و رواداری‌های نصب تعیین و ملاحظات لازم تبیین و در نقشه‌ها و همچنین مشخصات فنی ساخت و نصب قید گردند.

۴-۴- طراحی مبتنی بر حالات حدی

۴-۴-۱- مقدمه

الزامات بنیادین طراحی به تفصیل در بند ۲ـ۲ این آیین‌نامه تبیین گردیده‌است. همچنین در بند ۲ـ۳ حالات حدی ـ که لازم است پاسخ سازه در آن حالات بررسی گردد ـ و شیوه طراحی بر مبنای حالات حـدی و تعیـین شـرایط طراحـی مربـوط تعریـف و تشـریح گردیده‌اند. کنش‌ها و آثار محیطی اعمال شونده بر سازه در بند ۲ـ۴ تعریف و طبقه‌بنـدی‌شـده و مقـادیر مشخصـه کـنش‌هـا معرفـی گردیده‌اند. در بند ۲ـ۵ مقاومت لازم سازه در مقایسه با کنش‌ها و ترکیب‌های بحرانی برای شرایط متفاوت طراحی مـورد تاکیـد قـرار گرفته است و در بند ۲ـ۶ به تعریف مقادیر اسمی، مشخصه و طراحی پرداخته‌شده و ویژگی‌های مکانیکی مصالح و داده‌های هندسی در بند ۲ـ۷ مورد بحث قرار گرفته‌اند. بند ۲ـ ۸ با توجه به ویژگی‌های سازه، شرایط طراحی، ترازهای عملکردی، اهمیت کنش‌ها و آثار محیطی، به شیوه‌های مدل‌سازی متناسب با روش‌های تحلیل مورد نیاز تخصیص‌یافته است و بند ۲ـ ۹ بر لزوم تأمین مقاومت سـازه در مقابل گسیختگی پیش‌رونده تأکید داشته و تدابیر لازم برای ممانعت از بروز گسیختگی پیشرونده را مورد اشاره قرار داده‌است.

بند ۲ـ۱۰ رابطه صحت‌سنجی لازم برای طرح سازه فضاکار را با دیدگاه احتمال‌اندیشانه ارایه مـی‌دهـد. در فصـل سـوم جزییـات کنش‌ها و آثار محیطی اعمال‌شونده برسازه و مقادیر اسمی کنش‌ها با توجه به اهمیت سازه، سطح خطر مورد بررسی و مـوارد ذیـربط دیگر، ارایه گردیده است.

در بندهای زیر روابط صحت‌سنجی طرح تشریح‌شده و ضرایب پاره‌ای ایمنی بار و مقاومت و معیارهای کمی طراحی و ترکیب‌های بارها برای شرایط گوناگون طراحی و حالات گوناگون حدی تعیین گردیده‌اند.

۴-۴-۲- حالات حدی نهایی

۴-۴-۲-۱- شرایط صحت‌سنجی

۱ـ هنگامی که یکی از حالات حدی تعادل استاتیکی یا جابه‌جایی یا تغییرشکل بزرگ سازه بررسی می‌شود، باید نامعادلـه ۴ـ۱ ارضا گردد.

$$E_{d,dst} \le E_{d,stb} \qquad (۱ـ۴)$$

که در آن:

$E_{d,dst}$ اثر کنش‌های نامتعادل‌کننده مفروض در طراحی و

$E_{d,stb}$ اثر کنش‌های متعادل‌کننده مفروض در طراحی است.

۲- هنگامی که یکی از حالات حدی گسیختگی یا تغییرشکل زیاد مقطع، عضو یا اتصال (به جز خستگی) بررسی مـی‌شـود، بایـد نامعادله ۴ـ۲ ارضا شود.

$$S_d \le R_d \qquad (۲ـ۴)$$

که در آن:

S_d بر مقدار طراحی نیرو یا لنگر درونی عضو یا جزء مورد بررسی و

R_d بر مقدار طراحی مقاومت نظیر دلالت دارند.

هریک از این دو، مقادیر طراحی همه خصوصیات سازه‌ای را دربردارند.

۳- هنگامی که حالت حدی تشکیل مکانیزم مورد بررسی قرار می‌گیرد، باید اطمینان حاصل‌گردد که تشکیل مکـانیزم ناپایـدار بـا قابلیت اعتماد مشخصی محتمل نخواهد بود؛ مگر در حالتی‌که کنش‌ها با در نظرگرفتن مقادیر طراحـی ویژگـی‌هـای سـازه‌ای، از مقادیر طراحی تجاوز نمایند.

۴- هنگامی که یک حالت حدی پایداری ناشی از آثار درجه دوم مورد بررسی قرار می‌گیرد، باید تأیید گردد که ناپایداری به‌وقـوع نخواهد پیوست، مگر آنکه با ملحوظداشتن مقادیر طراحی همه ویژگی‌های سازه‌ای، کنش‌ها از مقادیر طراحی تجـاوز نماینـد. در ضمن باید صحت‌سنجی مقاطع نیز طبق بند ۲ فوق، به‌عمل آید.

۵- هنگامی که حالت حدی گسیختگی ناشی از خستگی مورد بررسی قرار می‌گیرد، باید تأیید گردد کـه مقـادیر طراحـی انـدیس خرابی، D_d ، از واحد تجاوز نمی‌نماید.

۶- هنگامی که اثر کنش‌ها بررسی می‌شود، باید نامعادله ۴ـ۳ برقرار باشد.

$$E_d \le C_d \qquad (۳ـ۴)$$

که در آن:

E_d مقدار طراحی اثر ناشی از کنش‌های اعمالی و

C_d ظرفیت طراحی متناظر با آثار این کنش‌ها می‌باشد.

۴-۴-۲-۲- ترکیب کنش‌ها، آرایش بارها و حالات بارگذاری

هر آرایش بار، موقعیت، مقدار، امتداد و جهت یک یا مجموعه‌ای از کنش‌های آزاد را مشخص می‌سازد. هر حالت بارگذاری، آرایش بارها، مجموعه تغییرشکل‌ها و ناکاملی‌های سازگار با یکدیگر را که در صحت‌سنجی به نیت خاص در نظر گرفته می‌شود، مشخص می‌سازد.

برای هر حالت بارگذاری، مقادیر طراحی E_d برای آثار کنش‌ها باید از قواعد ترکیب مقادیر طراحی کنش‌ها تعیین شوند. این مقادیر در جدول ۴ـ۱ ارایه شده‌اند.

جدول ۴ـ۱ـ مقادیر طراحی کنش‌ها

شرایط طراحی	کنش‌های دایمی G_d	کنش‌های متغیر Q_d		کنش‌های تصادفی A_d
		عوامل متغیر غالب	عوامل متغیر همراه	
دایمی و گذرا	$\gamma_G G_K$	$\gamma_Q Q_K$	$\psi_O \gamma_Q Q_K$	
تصادفی	$\gamma_{GA} G_K$	$\psi_1 Q_K$	$\psi_2 Q_K$	$\gamma_A\ A_K$

در ترکیب کنش‌ها رعایت نکات مشروحه زیر الزامی است:

(الف) مقادیر طراحی ارایه‌شده در جدول ۴ـ۱ باید با استفاده از قواعد زیر ترکیب شوند:

- در شرایط دایمی و گذرا برای صحت‌سنجی طراحی در مقابل تمامی آثار کنش‌ها به جز پدیده خستگی

$$\sum \gamma_{G,J} + \gamma_{Q,1} Q_{K,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{O,i} Q_{K,i} \qquad (۴ـ۴)$$

- در شرایط طراحی با درنظرگرفتن آثار کنش‌های تصادفی

$$\sum_j \gamma_{GA,j} G_{k,j} + A_d + \psi_{1,1} Q_{K,1} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} Q_{K,i} \qquad (۵ـ۴)$$

که در آن:

$G_{K,j}$ مقادیر مشخصه کنش‌های دایمی،

$Q_{K,1}$ مقدار مشخصه یکی از انواع کنش‌های متغیر،

$Q_{K,i}$ مقادیر مشخصه دیگر کنش‌های متغیر،

A_d مقدار طراحی کنش تصادفی،

$\gamma_{G,i}$ ضریب پاره‌ای کنش دایمی $G_{K,j}$،

$\gamma_{GA,j}$ مانند $\gamma_{G,j}$ ولی برای شرایط طراحی تصادفی،

$\gamma_{Q,i}$ ضرایب پاره‌ای کنش متغیر $Q_{K,1}$،

ψ_0ضریب کنش متغیر برای ترکیب نادر و ψ_1 ضریب کنش متغیر با رویداد متناوب و ψ_2 ضریب کنش متغیر شبه‌دایمی می‌باشند.

(ب) ترکیب‌های شرایط طراحی تصادفی یا شامل یک کنش آشکار A می‌باشد یا وضعیت پس از یک رویداد تصادفی را در برمی‌گیرد (A=0). مقدار γ_{CA} را می‌توان برابر ۱ فرض نمود.

(پ) در روابط (۴ـ۴) و (۴ـ۵) کنش‌های غیرمستقیم هرگاه مصداق داشته باشند، باید درنظر گرفته شوند.

(ت) برای سازه ساختمان‌ها ترکیب‌های کنش‌ها را می‌توان به‌شرح ساده‌تر زیر درنظر گرفت.

- برای شرایط طراحی مستمر و گذرا ضرایب ایمنی پاره‌ای داده شده در جدول ۴ـ۲ باید اعمال گردد.

جدول ۴ـ۲ـ ضرایب ایمنی پاره‌ای برای سازه ساختمان‌ها در شرایط طراحی مستمر وگذرا

حالات کرانه‌های پایینی و بالایی آثار کنش‌ها	کنش‌های دایمی(γ_G)	عوامل متغیر (γ_Q)	
		عوامل متغیر غالب	عوامل متغیر همراه
در کرانه آثارمطلوب $\gamma_{F,\inf}$	1.0	*	*
در کرانه آثار نامطلوب $\gamma_{F,\sup}$	1.35	1.5	1.5

*** برای سازه‌های متعارف برابر با ۱/۰ و در مورد سازه‌های خاص بر اساس مطالعه و پیشنهاد طراح و تأیید کارفرما تعیین می‌گردد.**

- برای شرایط طراحی تصادفی که در آن رابطه (۴ـ۵) صادق است، ضریب ایمنی پاره‌ای برای عوامل متغیر برابر با واحد در نظر گرفته می‌شود.
- هنگامی‌که نیاز باشد که آثار یک کنش مستمر متشکل از اجزای دارای اثر مطلوب و یا نامطلوب درنظر گرفته شوند، ضرایب پاره‌ای بار $\gamma_{G\inf}$ را برای اثر مطلوب می‌توان برابر با ۱/۱ ($\gamma_{G,\inf} = 1.1$) اختیار نمود.

و در مورد آثار نامطلوب، ضریب $\gamma_{G,\sup}$ برابر ۱/۳۵ ($\gamma_{G,\sup} = 1.35$) را به‌کار برد، مشروط برآنکه اختیار ۱ برای آثار مطلوب و نامطلوب منجر به ایجاد نتیجه نامطلوب‌تری نگردد.

- هنگامی‌که مولفه‌های یک اثربرداری بتواند به طور مستقل تغییر نماید، مؤلفهٔ مطلوب باید در ضریب کاهش ψ_{vec}=0.8 ضرب شود.
- برای سازه ساختمان‌ها، به عنوان ساده‌سازی رابطه (۴-۴) را می‌توان با هر یک از دو رابطه زیر که مقدار افزون‌تری از آن حاصل گردد، جایگزین نمود.

با در نظرگرفتن نامطلوب‌ترین کنش متغیر:

$$\sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \qquad \text{(۴ـ۶ـ الف)}$$

و با در نظرگرفتن تمامی کنش‌های نامطلوب:

$$\sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + 0.9 \sum_{i\geq 1} \gamma_{Q,1} Q_{k,i} \qquad \text{(۴ـ۶ـ ب)}$$

جزییات مفاهیم طراحی مبتنی بر حالات حدی نهایی در پیوست ۶ این آیین‌نامه ارایه گردیده‌است.

۴-۴-۳- حالت حدی خدمت‌رسانی

باید تأیید شود که $E_d \le R_d$ یا $E_d \le C_d$

که در آن:

C_d مقدار اسمی یا تابعی از ویژگی‌های معینی از مصالح در ارتباط با آثار کنش‌های مفروض در طراحی و E_d آثار ناشی از کنش‌های طراحی است که براساس یکی از ترکیب‌های زیر تعیین می‌شود. ترکیب‌های لازم برای صحت‌سنجی در هر یک از حالات خدمت‌رسانی ذیربط به شرح زیر مشخص شده است. ترکیب کنش‌ها برای حالت خدمت‌رسانی با روابط زیر تعریف می‌شوند:

ـ حالات نادر ترکیب کنش‌ها

$$\sum_j Q_{k,i} \quad + \quad Q_{K,1} + \sum_{i\ge 1} \Psi_{0,i}\, Q_{k,i} \qquad (۴-۷)$$

ـ ترکیب کنش‌ها با احتمال رویداد متناوب و مکرر

$$\sum_j Q_{k,i} \quad + \quad \psi_{1,1} Q_{K,1} + \sum_{i>1} \Psi_{2,i}\, Q_{k,i} \qquad (۴-۸)$$

ـ ترکیب کنش‌های شبه دایمی

$$\sum_j Q_{k,j} \quad + \sum_{i\ge 1} \psi_{2,i}\; Q_{k,i} \qquad (۴-۹)$$

- در مواردی که قواعد ساده برای در نظر گرفتن حالات حدی خدمت‌رسانی ارایه شده است، محاسبه تفصیلی با کاربرد ترکیب کنش‌های مذکور در فوق ضروری نخواهد بود.
- به‌منظور ساده‌سازی فرآیند، رابطه (۴-۷) برای حالات ترکیب نادر کنش‌ها را می‌توان با یکی از ترکیب‌های زیر که مقدار بزرگ‌تری داشته باشد جایگزین کرد:

هنگامی‌که تنها نامطلوب‌ترین واکنش متغیر درنظر گرفته می‌شود:

$$\sum_j Q_{k,i} \quad + \quad Q_{k,1} \qquad (۴-۱۰)$$

هنگامی‌که تمامی کنش‌های متغیر نامطلوب به‌طور همزمان در نظر گرفته می‌شوند:

$$\sum_j G_{k,j} \quad + \; 0.9 \sum_{i\ge 1} Q_{k,i} \qquad (۴-۱۱)$$

این رابطه را می‌توان همچنین به‌عنوان جایگزینی برای رابطه (۴-۸) برای ترکیب بار با رویداد متناوب به‌کار برد. مقدار γ_M باید برای همه حالات حدی خدمت‌رسانی برابر با یک منظور شود، مگر آنکه خلاف آن در این آیین‌نامه تصریح‌شده باشد.

۴-۴-۳-۱- معیارهای حالت حدی خدمت‌رسانی

سازه‌های فضاکار علاوه بر دارا بودن مقاومت لازم در مقابل حالات حدّی نهایی مندرج در فصل۳ باید شرایط خدمت‌رسانی‌لازم را نیز ارضا نمایند. شرایط و نیازهای خدمت‌رسانی سازه‌های فضاکار بسته به هندسه، مصالح و سیستم مورد استفاده و کاربری و ترازهای عملکردی در سطوح خطر متفاوت مورد نظر، متفاوت می‌باشند. میزان تغییرشکل، ترک‌خوردگی و صدمه‌دیدگی اجزای غیرسازه‌ای، نشت آب، عدم هوابندی مناسب بعضی از انواع سازه‌ها و در نتیجه انباشتگی نامتعارف گرد و خاک، انعکاس و تشدید نامطلوب صدا به‌علت هندسه و پوشانه خاص، اثر تغییر دما و ارتعاش سازه در مقابل بارهای زنده و یا باد نباید شرایط نامساعدی را برای بهره‌برداران ایجاد نماید. بعضی از معیارهای بهره‌برداری سازه‌های فضاکار به‌شرح زیر می‌باشد:

تفسیر – *به‌طور کلی تغییرمکان سازه فضاکار بر اساس ملزومات سازه‌ای تعین نمی‌گردد، بلکه به نوع کاربری، نیازهای معماری، نوع پوشانه و ماهیت بارگذاری وابسته است. تغییرمکان سازه فضاکار پوشانه سقف‌ها به نوع بارگذاری، سختی و صلبیت سازه، ارتفاع سازه شبکه‌ای، ابعاد واحدهای تکرارشونده، مشخصات و خواص مصالح، مشخصات و خواص اعضا، ویژگی‌های هندسی و ابعاد دهانه‌ها، انعطاف‌پذیری اتصالات و پیوندها، شرایط تکیه‌گاهی و موارد چند دیگری بستگی دارد.*

- حد تغییرمکان

تغییرمکان‌های ناشی از شرایط بهره‌برداری باید درحد ارتجاعی باقی‌مانده و نباید به‌حالت ماندگار تبدیل گردند. در مورد سازه‌های فاقد اهمیت ویژه و فاقد جراثقال سقفی، حد تغییرمکان تحت تأثیر ترکیب بارهای ثقلی در مواردی که پوشانه‌ها آسیب نبینند نباید از میزان $\frac{۱}{۱۵۰}$ دهانه تجاوز نمایند.

در ساختمان‌های متعارف در صورتی که سازه‌های فضاکار به عنوان سقف یا کف همراه با نازک‌کاری با مصالح بنایی استفاده‌شده باشد، حد تغییرمکان ناشی از بارهای مرده (که پس از نصب اجزای غیرسازه‌ای به‌آن اضافه می شود) در شرایط بهره‌برداری به $\frac{۱}{۲۴۰}$ طول دهانه کوچک‌تر و حد تغییرمکان ناشی از بارهای زنده بهره‌برداری به میزان $\frac{۱}{۳۶۰}$ طول دهانه کوچک‌تر محدود می‌گردد. درصورتی که نوع و جزییات اجرایی پوشانه‌هایی مثل شیشه حدود تغییرمکان‌های کوچک‌تری را ایجاب نماید، این حدود باید تعیین و پس از تأیید مرجع ذیصلاح مسؤول کنترل و تصویب طرح، رعایت گردد.

جزییات اتصال اجزای غیرسازه‌ای به اعضای سازه‌ای باید چنان باشد که تغییرمکان سازه موجب اشکال در عملکرد آنها نگردد.

تفسیر– *این موضوع در سازه‌های با دهانه‌های بزرگ مانند آشیانه‌های هواپیما، که قدرمطلق تغییرمکان می‌تواند دارای مقدار قابل توجهی باشد، نیازمند توجه ویژه می‌باشد. به‌عنوان مثال، اگرچه تغییرمکان مزبور تا حدی که از نظر بصری قابل‌پذیرش باشد و در کاربری جراثقال‌های سقفی اختلال ایجاد ننماید، قابل قبول تلقی می‌گردد، اما ممکن است با توجه به نوع جزییات اجرایی در عملکردهای کشویی ورودی هواپیما به آشیانه ایجاد اشکال نماید.*

همچنین باید به جهت مؤثر تغییرمکان‌های حاصله از حالات متفاوت بارگذاری توجه شود، حتی اگر مقادیر مطلق آنها به طور نسبی کوچک‌تر باشد (مثل تغییرمکان‌های طره‌ها در اثر اضافه و یا کم‌شدن بارهای زنده در دهانه‌های ممتد و پیوسته).

تغییرمکان نسبی موضعی سازه فضاکار در راستای درون صفحهٔ شبکه‌های فضاکار تخت نسبت به تکیه‌گاه‌ها نباید از $\frac{۱}{۵۰۰}$ طول دهانه تجاوز نماید، مگر آنکه عملکرد آن به صورت دیافراگم مورد نظر نباشد.

در شبکه‌های فضاکار با پوشانه‌هایی مثل انواع ورق‌های نازک فلزی/ پلاستیکی تک یا دوجداره، تغییرمکان عمود بر سطح نظیر بار مرده نباید از $\frac{۱}{۲۰۰}$ و برای بار زنده از یک $\frac{۱}{۲۵۰}$ طول دهانه کوچک مؤثر تجاوز نماید؛ مگر آنکه از طریق کمّی نشان داده شود که با توجه به نوع کاربری و عملکرد مورد انتظار می‌توان بدون نقض معیارهای حالات حدی بهره‌برداری، از حدود تغییرمکان‌های ذکر شده تجاوز نمود.

در دهانه‌های بزرگ باید با طراحی اعضای اصلی و فرعی و شیب‌بندی مناسب و کافی از بروز پدیده آب‌انباشتگی موضعی (مانداب) و یا عمومی و به طور کلی اعمال بارهای ناشی از افزایش تغییرشکل، احتراز گردد؛ در غیر این‌صورت، باید برای شرایط آب‌انباشتگی طراحی سازه پوشانه و زیرسازی آن مطابق با ملزومات مندرج در فصل ۳ با ملحوظداشتن، بارهای محتمل ناشی از این پدیده صورت گیرد.

تغییرمکان اعضای فرعی یک سازه فضاکار با پوشانه‌های نسبتاً انعطاف‌پذیر، به میزان $\frac{۱}{۱۵۰}$ طول‌دهانه آن عضو محدود می‌گردد.

درصورتی که نصب وسایلی مانند انواع جراثقال‌ها و یا ابزار دقیق و نظایر آنها رعایت حدود تغییرشکل‌های موضعی و یا کلی خاصی را ایجاب نماید، باید محدودیت‌های تغییرمکان‌ها با توجه به نوع بهره‌برداری و تراز عملکردی مورد نظر مورد مطالعه کافی قرار گرفته و در طراحی منظور گردد.

در کاربرد سازه‌های فضاکار به عنوان سازه عرشه پل‌ها، باید محدودیت‌های تغییرمکان سازه عرشه پل‌ها رعایت گردد و تغییرمکان سازه فضاکار عرشه پل تحت تأثیر بارهای زنده و (با ملحوظداشتن اثر ضربه) از $\frac{۱}{۱۰۰۰}$ طول دهانه تجاوز ننماید. در مورد سایر کاربری‌ها مانند کف پارکینگ‌ها، سالن‌های ورزشی و نظایر آن، باید از محدودیت‌های مندرج در آیین‌نامه‌ها و مشخصات فنی و استانداردهای مربوط تبعیت گردد.

- حد ارتعاش

در نسبت‌های کوچک ضخامت به دهانه شبکه‌های فضاکار و نیز در طره‌های بزرگ، برای جلوگیری از ارتعاش مزاحم سازه دراثر بار باد و یا سایر بارهای زنده، باید طراحی با توجه به نحوهٔ توزیع جرم و ویژگی‌های سازه از دیدگاه میرایی انجام شود. در صورتی‌که به دلیل نوع اثر کنش‌ها و نوع کاربری و عملکرد مورد نظر بررسی میزان ارتعاش سازه ضروری تشخیص داده شود، تحلیل دینامیکی مدل واقع‌گرایانهٔ سازه به منظور کنترل دامنه تغییرشکل‌ها و کنترل بسامدهای ارتعاش طبیعی تحت تأثیر بارهای بهره‌برداری، در اغلب مواقع کفایت خواهد داشت. در مواردی که نتایج قانع‌کننده‌ای از تحلیل عددی قابل حصول نباشد، باید از شیوه‌های مبتنی بر آزمایش، بر اساس دیدگاه‌های مندرج در فصل هفتم این آیین‌نامه بهره جست. امکان و سودمندی بهره‌گیری از تمهیدات افزایندهٔ میرایی و جداگرهای ارتعاشی باید در موارد مرتبط در چارچوب گزینه‌های مطالعاتی مورد بررسی قرار گیرد.

۴-۵ - مصالح

۴-۵-۱- فولاد سازه‌ای

مصالح فولادی سازه‌ای مورد استفاده در سازه‌های فضاکار موضوع این آیین‌نامه، انواع فولادهای ساختمانی می‌باشند که از طرق نورد (گرم و یا سرد)، کوبن‌کاری یا ریخته‌گری تولید می‌شوند. تمامی مصالح فولادی سازه‌ای باید با استانداردهای ملی کشور مطابقت داشته باشند. در صورت فقدان استاندارد ملی برای برخی از مصالح مورد نیاز، باید از استانداردهای معتبر بین‌المللی (ترجیحاً استانداردهای ISO) پیروی نمود.

۴-۵-۱-۱- خصوصیات مکانیکی مصالح

۴-۵-۱-۱-۱- مقادیر طراحی ضرایب مصالح

ویژگی‌های مصالح فولادی برای محاسبات طراحی در این آیین‌نامه عبارت‌اند از:

مدول الاستیسیته: $E=210000\ N/mm^2$

مدول برش: $G=E/2(1+v)$

ضریب پواسون: $v=0.3$

ضریب انبساط حرارتی: $\alpha=12*10^{-6}/^0C$

چگالی جرمی: $\rho=7.850$

۴-۵-۱-۱-۲- مشخصات مصالح برای فولادهای گرم نوردشده

مقادیر اسمی برای مقاومت تسلیم، f_y و مقاومت نهایی، f_u و سایر مشخصات مکانیکی فولادهای گرم نوردشده مطابق پیوست ب مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران، *طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی*، در نظر گرفته می‌شود. در صورت ضرورتِ به‌کارگیری مصالح فولادی با مشخصات مکانیکی و متالوژیکی متفاوت، باید ضمن تعیین استاندارد معتبر منطبق با مصالح مورد نظر و ارایهٔ گواهی‌نامه‌های بازرسی فنی، نسبت به اخذ تأییدیه از مرجع مسؤول کنترل کیفیت طرح و ساخت اقدام به عمل آمده و آزمایش‌های کنترل کیفیت به میزان مکفی برای اثبات تطابق ویژگی‌های مکانیکی و متالوژیکی مصالح با استاندارد معتبر معرفی شده، زیر نظر مرجع مزبور به عمل آید.

۴-۵-۲- پیوندهای کوبن‌کاری‌شده

استفاده از قطعات کوبن‌کاری‌شده در پیوندهای سازه‌های فضاکار بسیار متداول است. فولاد مصرفی در این قطعات، فولادهای ساختمانی با مقاومت‌های متفاوت می‌باشند که باید با مشخصات مکانیکی و متالوژیکی مصالح جوش مصرفی و مقاومت پیچ‌های مورد استفاده سازگار باشد. رزوه‌های داخلی قطعات کوبن‌کاری‌شده که در برخی از حالت‌ها برای اتصالات پیچی به‌کار می‌روند، باید برای برش در سطح چلیکی شکل دورادور پیچ طراحی شود.

۴- ۵-۳- پیوندهای ریخته‌گری‌شده

در حالاتی که ضرورت یابد از پیوندهای با وزن بیش از ۱۰۰ کیلوگرم با شکل‌های خاص یا پیچیده استفاده شود و ساخت آنها به‌وسیله عملیات کوبن‌کاری عملی نباشد یا تهیه آنها به روش ریخته‌گری ارجح باشد، استفاده از فولاد ریخته‌گری با مصالح و آلیاژهای ارایه‌دهنده میزان شکل‌پذیری مطلوب، به نحو تعیین‌شده در مشخصات فنی طرح و با اعمال سیستم کنترل کیفیت کارا، قابل قبول می‌باشد.

۴- ۵-۴- مصالح پیچ‌ها

پیچ‌های مورد استفاده در سازه‌های فضاکار اغلب از فولاد با مقاومت زیاد ساخته می‌شوند، بسته به نوع اتصالات، استفاده از انواع پیچ‌های فولادی سازه‌ای با مشخصات مکانیکی ارایه‌شده در استاندارد ملی کشور یا پیوست ب، مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران، *طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی*، بلامانع می‌باشد.

۴-۵-۴-۱- مصالح و مشخصات مکانیکی و متالورژیکی پیچ‌ها

مشخصه‌ها و خواص مصالح پیچ‌ها باید ملزومات استانداردهای معتبر بین‌المللی یا ملی را ارضا نمایند. در چارچوب استاندارد ISO 898T1 (مورد استناد در پیوست ب مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان ایران: *طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی*)، در مورد پیچ‌های نوع ۱۰/۹ باید مقاومت در برابر ضربه برای نمونه با زخمه استاندارد از طریق آزمایش شارپی بر نمونه‌هایی که از میله اصلی پیچ گالوانیزه‌شده، حتی‌المقدور از موقعیتی در نزدیکی سطح تهیه شده‌اند، تعیین گردد. ظرفیت مقاومت کششی، برشی و ترکیبی پیچ‌ها باید مطابق استانداردهای معتبر اختیار گردند. برای پیچ‌های مشمول مشخصات ISO 898T1 ، مقادیر مقاومت حد جاری‌شدن، مقاومت نهایی، بیشینهٔ تغییر طول نسبی و مقادیر کمیت‌های سختی و حداقل انرژی قابل جذب در آزمایش ضربهٔ نمونهٔ زخمه‌دار پیچ از جدول ب-۴ ، پیوست ب مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان ایران: *طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی* به‌دست می‌آید.

۴-۵-۴-۲- برنامهٔ کنترل کیفیت پیچ‌ها

نمونه‌های شارپی باید در دمای ۳۰- درجه سانتیگراد براساس استانداردی معتبر، ازجملهISO، EN، DIN یا ASTM مورد آزمایش و استنتاج قرار داده شوند و مقادیر انرژی قابل جذب آن‌ها باید از آنچه در استاندارد مزبور ارایه‌شده، افزون‌تر باشد. تمامی پیچ‌ها باید دارای رزوه مطابق استاندارد متریک ISO باشند. در صورت استفاده از انواع دیگر استانداردهای معتبر، باید در تمامی مراحل طرح و اجرا همسازی کامل برقرار باشد. ابعاد پیچ‌ها باید مطابق ابعاد استاندارد مورد استفاده انتخاب شود؛ با این‌وجود در مواردی که جزییات اجرایی، استفاده از پیچ‌هایی با ابعاد غیراستاندارد را ایجاب نمایند، اینگونه پیچ‌ها باید با مشخصات مصالح استاندارد و در ابعاد موردنظر با سفارش مخصوص تولید گردند. در این حالت، باید برنامهٔ کنترل کیفیت پیچ تدوین و اعمال گردد.

تمامی پیچ‌های مورد استفاده باید از دیدگاه احتمال بروز استعداد شکست نارس مورد آزمایش‌های غیرمخرب و ترک‌یابی (از جمله با بهره‌گیری از روش براده‌های مغناطیسی) قرار گیرند. برای هر بسته پیچ تحویل‌شده، باید مدارک زیر ارایه گردد تا مجوز استفاده از آن در پروژه صادر شود:

ـ گواهی نتایج آزمایش‌های ترکیبات شیمیایی و متالورژیک مصالح پیچ،

ـ گواهی نتایج آزمایش‌های مشخصه‌های مکانیکی شامل مقاومت حد جاری‌شدن و مقاومت نهایی کششی، میزان تغییر طول نسبی تا گسیختگی و میزان انرژی جذب‌شده در آزمایش ضربه استاندارد (شارپی)،

ـ گواهی کنترل‌های لازم از نظر رواداری‌های مجاز ساخت از طریق کنترل جزییات ابعاد و زوایای پیچ و رزوه‌ها با ابزار دقیق براساس استانداردهای معتبر.

مقادیر قابل‌پذیرش حاصل از نتایج آزمایش (مقادیر میانگین حاصل از آزمایش۳ نمونه) در آزمایش‌های ضربه استاندارد نمونهٔ زخمه‌دار در دمای ۳۰ـ درجه سانتیگراد، مقاومت حد جـاری‌شدن، مقاومت نهایی، بیشینهٔ تغییر طول نسبی و سختی پیچ در جدول ب-۴، پیوست ب مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان ایران ارایه گردیده است.

۴-۵-۴-۳- ملاحظات طراحی، ساخت و نصب پیچ‌ها

برای پیچ‌های نوع ۱۰/۹ تحت کشش، مقاومت طراحی را باید به میزان ۱۵٪ کاهش داد. به عبارت دیگر، در مورد این پیچ‌ها در حالت عملکرد تحت تأثیر کشش، ضریب کاهش مقاومت ۰/۸۵ را باید مدنظر قرار داد. استفاده از پیچ‌های گروه مقاومتی ۱۲/۹ در اتصالات کششی مجاز نیست.

پیچ‌ها باید عموماً به صورت گرم شکل داده شوند. رزوه‌های پیچ‌ها باید از طریق غلطک ایجاد گردند.

کلیه پیچ‌ها باید دارای نمایه نوع مصالح و شماره پیچ باشند.

در تعیین ابعاد و همچنین ساخت رزوه‌های پیچ و حدیده‌ها باید ضخامت لایه گالوانیزه به‌میزان مکفی در نظر گرفته شود.

باید توجه داشت که در برخی از اتصالات پیچیِ برخی از سیستم‌های متداول سازه‌های فضاکار شبکه‌ای، مانند سیستمMERO ، اثر سفت‌شدگی پیچ‌ها می‌تواند منجر به کاهش انعطاف‌پذیری اتصال گردیده و در نتیجه کاهش طول مؤثر اعضا گردد. در این حالت، طراح سازه در صورت پیش‌تنیده نمودن پیچ‌ها در اتصالات، باید از ذخیره مکفی قابلیت جذب انرژی پیچ تا بروز حالت حدی شکست اطمینان حاصل نماید.

۴-۵-۴- ۴ - پیچ با رویهٔ گالوانیزه

اعمال کنترل کیفی لازم برای اطمینان از سازگاری پیچ‌ها با مشخصات استاندارد الزامی است، به ویژه هنگامی که برای حفاظت در برابر خوردگی، نسبت به اعمال پوشش گالوانیزه اقدام می‌شود.

اعمال گالوانیزه گرم برای پیچ‌های با مقاومت زیاد که قبلا مورد عملیات حرارتی قرار گرفته‌اند، مجاز نیست. در اعمال گالوانیزه سرد باید نهایت دقت برای جلوگیری از نفوذ یون هیـدروژن، به‌عمل آید؛ از اینرو اعمال گالوانیزه به طریقهٔ پاشـش پودری مجاز تلقی می‌گردد.

۴-۵-۵- اتصالات جوشی

برای جوش‌کاری قطعات پیش ساختهٔ سازه‌های فضاکار تا حد ممکن استفاده از روش‌های خودکار زیر پودری و جوش‌کاری تحت حفاظت گاز توصیه می‌گردد. الکترودهای مورد استفاده در روش‌های ساخت در کارخانه یا جوش‌کاری درمحل یا درجا باید مطابق با استاندارد ملی مربوط بوده و با توجه به کیفیت و در سازگاری با فولاد مبنا اختیار شود. مقاومت تسلیم، مقاومت کششی نهایی، ازدیاد طول نسبی در گسیختگی و کمینه مقدار انرژی در آزمایش ضربه استاندارد فلز الکترود باید مشخصات فنی طرح را ارضا نمایند.

مقررات و ملزومات آماده‌سازی و جوش‌کاری قطعات و کنترل کیفیت عملیات اجرایی مندرج در مبحث یازدهم مقررات ملی ساختمان ایران باید در تمامی جوش‌کاری‌های قطعات و اتصالات پیش ساخته رعایت گردد. ملزومات عمومی عملیات اجرایی در پیوست ۷ این آیین‌نامه مورد اشارهٔ اجمالی قرار گرفته است. همچنین شیوه‌های کنترل کیفیت جوش ـ در کارخانه و در محل ـ به روش‌های مخرب و غیرمخرب همراه با برنامه‌های بازرسی فنی جوش متناسب با ویژگی‌های ساخت، بافت و نصب سازه‌های فضاکار، در بخش سوم این آیین‌نامه به تفصیل ارایه گردیده است.

۴-۶- اعضای سازه

هر عضو سازه فضاکار از اجزای مهم سازه‌ای سازه‌های فضاکار به‌شمار می‌رود که دو گره (یا پیونده) را به‌هم می‌بندد و نقش انتقال نیروها را ایفا می‌نماید. به‌منظور شناخت و طراحی مطلوب اعضای سازه‌های فضاکار، لازم است که طبقه‌بندی‌های مناسبی برای آن‌ها انجام گیرد.

۴-۶-۱- دسته‌بندی اعضا

اعضای سازه‌های فضاکار را می‌توان از دیدگاه‌های متنوعی به‌شرح زیر دسته‌بندی نمود:

الف) بر اساس شکل مقطع

ب) بر اساس نوع مقطع از نظر میزان استعداد بروز کمانش موضعی

پ) بر اساس شرایط سرحدی و قیود جانبی ـ پیچشی

ت) بر اساس نوع نیروها و آثار اعمال شونده و ماهیت پاسخ حاصله.

۴-۶-۱-۱- دسته‌بندی بر اساس شکل مقطع

اعضای سازه‌های فضاکار را بر اساس شکل مقطع در دو گروه اصلی زیر می‌توان دسته‌بندی کرد.

الف) مقاطع ساده یا مرکب

ب) مقاطع باز یا بسته

۴-۶-۱-۱-۱- مقاطع ساده یا مرکب

ـ مقاطع ساده به مقاطعی اطلاق می‌گردد که از اشکال ساده هندسی نظیر دایره توپر، دایره توخالی، مربع مستطیل توپر، مربع مستطیل توخالی و نظایر آن ساخته شده باشند.

ـ مقاطع مرکب به مقاطعی اطلاق می‌گردد که به صورت ترکیبی از اشکال ساده هندسی مذکور ساخته می‌شوند.

۴-۶-۱-۱-۲ - مقاطع باز یا بسته

ـ مقاطع باز به مقاطعی اطلاق می‌گردد که بتوان برای آن ابتدا و انتهایی را یافت که به‌یکدیگر متصل نشده‌اند.

ـ مقاطع بسته به مقاطعی اطلاق می‌گردد که برای آن ابتدا و انتهایی متصور نیست.

تفسیر- *از نمونه‌های متداول مقاطع باز سازه‌ای فولادی می‌توان به مقاطع تیرآهن (I)، بال پهن (H)، سپری (T)، ناودانی (U) و نبشی (L) اشاره نمود. اعضای لوله‌ای با مقاطع دایروی و یا اعضای قوطی شکل با مقاطع راست‌گوشه از متداولترین نمونه‌های اعضای سازه‌های فضاکار شبکه‌ای با مقاطع بسته به‌شمار می‌روند.*

۴-۶-۱-۲- دسته‌بندی بر اساس نوع مقطع از نظر کمانش موضعی

مقاطع اعضای سازه‌های فضاکار از نظر میزان استعداد آنها برای کمانش موضعی به سه رده زیر دسته‌بندی می‌شوند:

الف) مقاطع فشرده

ب) مقاطع نیمه‌فشرده

پ) مقاطع لاغر

مشخصات حدی هر یک از مقاطع مذکور بر اساس هندسه مقطع در آیین‌نامه‌های معتبری که با مفاهیم و مبانی طراحی پیش‌بینی‌شده در این آیین‌نامه مطابقت داشته باشند، از قبیل مبحث دهم مقررات ملی ساختمانی ایران تعریف شده‌اند. همچنین در برخی از استانداردها مقاطعی تحت عنوان مقاطع پلاستیک تعریف گردیده‌اند که در آن‌ها احتمال بروز کمانش موضعی اجزای مقطع حتی پس از بروز پلاستیسیتهٔ گسترده محتمل نمی‌باشد و شرایط محدودتری از مقاطع فشرده برای نسبت بعد به ضخامت اجزای آنان پیش‌بینی شده‌اند که برای اعضای سازه‌ای با شکل‌پذیری زیاد کاربرد خواهند داشت. مشخصات چنین اعضایی در استانداردهایی از قبیل مبحث سوم استاندارد EN و BS 5950 و ملزومات ویژه طراحی لرزه‌ای سازه‌های فولادی AISC ارایه‌شده است.

۴-۶-۱-۳- دسته‌بندی بر اساس شرایط سرحدی و قیود جانبی پیچشی

اعضای سازه‌های فضاکار بسته به شرایط مرزی انتهاهای خود از قبیل حالت مفصلی، حالت نیمه‌گیرداری و حالت گیرداری به رده‌های متنوعی نظیر اعضای دو سر مفصل، دو سرگیردار، دو سر نیمه‌گیردار، یک سر مفصل- یک سرگیردار و تقسیم‌بندی می‌شوند.

در ضمن اعضای سازه‌های فضاکار بسته به آنکه دارای قیود و مهارهایی برای مقابله با کمانش جانبی و کمانش پیچشی باشند یا چنین قیودی برای آنها تأمین نشده باشد، به اعضای با تکیه‌گاه مقید و اعضای با تکیه‌گاه غیرمقید از دیدگاه جانبی ـ پیچشی تقسیم می‌شوند.

۴-۶-۱-۴- دسته‌بندی بر اساس نوع نیروها و آثار ناشی از تلاش‌ها

اعضای سازه‌های فضاکار بر اساس نوع نیروها و آثار کنش‌های اعمال‌شونده به رده‌های زیر تقسیم می‌شوند:

الف) اعضای تحت تأثیر نیروهای محوری کششی

ب) اعضای تحت تأثیر نیروهای محوری فشاری

پ) اعضای تحت تأثیر نیروهای محوری کششی ـ فشاری (نظیر مهاربندها هنگام تغییر جهت بارگذاری)

ت) اعضای تحت تأثیر لنگرهای خمشی و نیروهای برشی

ث) اعضای تحت تأثیر لنگرهای پیچشی

ج) اعضای تحت تأثیر ترکیب نیروهای محوری فشاری و لنگرهای خمشی

چ) اعضای تحت تأثیر ترکیب نیروهای محوری کششی و لنگرهای خمشی

ح) اعضای تحت تأثیر ترکیبی از آثار کنش‌های مذکور در فوق

۴-۶-۲- کلیات و موارد عمومی طراحی اعضا

در طراحی اعضای سازه‌های فضاکار موارد زیر باید در نظر گرفته شوند.

الف) حالات حدی مورد نظر در طراحی باید مشخص و ارضا شوند.

ب) برای اعضای تحت تأثیر نیروهای محوری فشاری، باید ضرایب طول مؤثر تعیین شوند.

پ) بسته به نوع مقطع اعضا از نظر کمانش موضعی (فشرده، نیمه‌فشرده و لاغر) طراحی متناسب با آن صورت پذیرد.

ت) بسته به مقیدبودن و نبودن اعضا از نظر کمانش کلی (جانبی، پیچشی) طراحی متناسب با آن صورت پذیرد.

ث) رده اعضای سازه‌های فضاکار بر اساس نوع نیروها و آثار اعمال‌شونده، باید مشخص‌شده و ملاحظات لازم طراحی بر اساس آیین‌نامه‌های معتبری که با مفاهیم و مبانی طراحی پیش‌بینی‌شده در این آیین‌نامه مطابقت داشته باشند، از قبیل مبحث دهم مقررات ملی ساختمانی ایران رعایت و اجرا شوند.

ج) بسته به باز و بسته‌بودن مقاطع اعضای سازه‌های فضاکار، ملاحظات لازم طراحی به ویژه از نقطه‌نظر برش و پیچش باید رعایت شوند.

۴-۷- پیوندها و اتصالات

اتصالات به دو نوع اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

الف ـ اتصال مستقیم اعضا به یکدیگر

ب ـ اتصال از طریق پیوندهای واسط

تفسیر *ـ پیوندها معرف منطق سازه فضاکاراند و لازم‌است تا حد امکان:*

ـ سخت و مقاوم باشند (مگر آن‌که نیت طراح به عمد بر انعطاف‌پذیری آنان باشد)،

ـ از نظر فرم و امکان برقراری اتصال ساده باشند،

ـ به سهولت ساخته شوند و قابلیت تولید صنعتی داشته باشند،

ـ شرایطی را فراهم سازند تا برون محوری اتصال به حداقل ممکن برسد.

ـ رواداری اجرایی قابل حصول را تأمین نمایند،

ـ به سهولت قابل بازبینی فنی، اصلاح، تعمیر و نگهداری باشند،

ـ قابلیت پذیرش تعداد قابل توجهی عضو را در زوایای فضایی گوناگون داشته باشند.

۴-۷-۱- کلیات

در سازه‌های فضاکار مشبک، پیوندها و اتصالات از اجزای مهم و اصلی سازه فضاکار می‌باشند. تنوع اتصالات سازه‌های گوناگون فضاکار و تعداد قابل ملاحظه اتصالات در سازه‌های شبکه‌ای فضاکار نشانگر اهمیت ویژه آنان می‌باشد. بنابراین، آشنایی طراحان با انواع پیوندهای متداول از ضروریات طراحی مجموعه سازه می‌باشد. چه طراح از چنین پیوندهایی بهره‌گیری نماید یا شیوه‌های ابداعی خود را ارایه و با توجه به رهنمودهای این آیین‌نامه و به‌ویژه مندرجات فصل هفتم مورد صحت‌سنجی قرار دهد.

پیوندههای متداول که تاکنون در تعداد قابل ملاحظهای از سازهها در سطح جهانی بهکار گرفته شدهاند، بهطور تفصیلی در فصل ۶ و پیوست ۳ آیین‌نامه معرفی شدهاند. پیوندههای سازههای شبکهای فضاکار از دیدگاههای سیستم اتصال میزان صلبیت اتصال و شیوه ساخت و اجرا به شرح زیر طبقهبندی گردیدهاند.

۴-۷-۲- سیستم‌های پیونده، مصالح و شیوه ساخت

سیستم‌های پیونده در سازه‌های فضاکار با توجه به پیش‌ساختگی غالب آنها به‌صورت سیستم‌های پیونده استاندارد و یا سیستم‌های پیوند خاص می‌باشند که بسته به نوع سیستم مورد نظر و نوع مصالح، الزامات خاص مربوط به‌آن باید در طراحی درنظر گرفته شوند. این الزامات به‌تفصیل در بند ۶-۳-۳ ارایه شده‌اند. با توجه به اهمیت سیستم‌های پیونده در سازه‌های فضاکار، این سیستم‌ها از مصالح فولادی با مشخصات ویژه، که در استاندارد مربوط معرفی شده‌اند، ساخته می‌شوند و از شیوه‌های ریخته‌گری، ماشین‌کاری و کوبن‌کاری برای ساخت آن‌ها استفاده می‌شود.

۴-۷-۳- رواداری‌های ابعادی

رواداری‌های ساخت و نصب باید در مشخصات فنی طرح با توجه به اهداف قابل حصول طرح تعیین و ارایه گردند. تا انجام مطالعات ویژه در مورد انواع سازه‌های فضاکار با ابعاد گوناگون، می‌توان رواداری‌ها در ابعاد ضوابط مندرج در مبحث یازدهم مقررات ملی ساختمان ایران را به عنوان رهنمود کلی همراه با قضاوت مهندسی در همسازی با نوع سازه مورد نظر به‌عنوان ملزومات حداقل مورد توجه قرار داد.

۴-۷-۴- ملاحظاتی در مورد طراحی مجموعه سازه فضاکار با در نظرگرفتن اتصالات و پیوندهها

الف) انتخاب سیستم پیونده بر اساس ملاحظات معماری، اقتصادی و عملکردی انجام می‌گیرد.

ب) انتخاب نوع اتصال از دیدگاه صلبیت باید متناسب با فرضیات مدل‌سازی و امکانات تولید انجام گیرد.

پ) در صورت انتخاب اتصال با بهره‌گیری از نوع خاص از سیستم پیونده استاندارد، متداول بسته به ویژگی‌های هندسی، ابعاد اولیه سیستم انتخاب شده و برای طراحی اولیه ابعاد پیوندهها و اعضا می‌توان از ابعاد یک سیستم استاندارد همانند استفاده نمود.

۴-۷- ۵- جزییات اجرایی

با توجه به تعداد اتصالات و پیوندههای سازههای فضاکار و برای رعایت دقیق رواداری‌های ابعادی، کنترل جزییات اجرایی و بهره‌گیری از مزایای تولید انبوه، توصیه می‌شود تا حدامکان از شیوه‌های صنعتی برای ساخت اتصالات و پیوندهها و کنترل مراحل اجرایی بهره جست.

۴- ۸ - دستگاه‌های تکیه‌گاهی

پایداری کلی سازهها در برابر کنش‌های وارده با عکس‌العمل تکیه‌گاهها تأمین می‌گردد. به‌عبارت دیگر، تکیه‌گاهها بخشی از سازه هستند که پایداری کلی سازه را تأمین می‌نمایند. تکیه‌گاهها متناسب با قیودی که در برابر حرکت سازه ایجاد می‌کنند، دارا یا فاقد

عکس‌العمل می‌باشند. انتخاب محل تکیه‌گاه‌ها و نوع آنها یا قیدی که هر تکیه‌گاه در برابر حرکت سازه ایجاد می‌کند، شرایط مرزی ماهیتی سیستم را تعریف می‌نماید و از این‌رو طراحی تکیه‌گاه‌ها از مباحث مهم طراحی مفهومی مجموعهٔ سیستم سازه فضاکار به‌شمار می‌رود که علاوه بر موارد فوق، در رفتار و دوام سازه اثر قابل توجهی خواهد داشت.

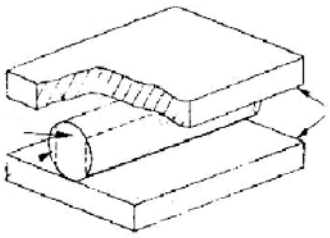
کنش‌های مؤثر بر سازه از قبیل بارهای زنده، کنش‌های محیطی، باد، زلزله، تغییرات دما، رفتار مصالح، خزش، نشست تکیه‌گاه‌ها و سایر عوامل موجب تغییرشکل یا حرکت سازه می‌گردند و به‌طورکلی بررسی رفتار سازه در هر نقطه آن به لحاظ حرکت ممکن در سه امتداد متعامد و دوران حول سه محور متعامد ضروری می‌باشد که بخشی از بررسی‌های حالات حدی را تشکیل می‌دهد که متناسب با آن قیدها و میزان حرکت در تکیه‌گاه‌ها تعیین می‌گردد. برای مثال در یک آشیانه هواپیما با دهانه بزرگ، سازه، تکیه‌گاه‌ها، پوشش‌ها و درها باید جوابگوی نیروها و تغییرشکل‌های بزرگ باشند؛ در صورتی‌که در سایه‌بان طولانی یک ایستگاه راه‌آهن یا یک سالن طولانی کشتی‌سازی می‌توان سازه طویل را با چند سازه با ابعاد طولی مناسب که با درز از یکدیگر جداسازی‌شده ولی در جوار یکدیگر قرار می‌گیرند، جایگزین کرده و میزان تغییرمکان‌ها را محدود کرد.

لازم است شرایط سرحدی تکیه‌گاهی و میزان آزادی یا قیود لازم برای حرکت‌های انتقالی و دورانی متناسب با مفروضات طراحی تعیین و جزییات اجرایی با قابلیت عملکرد مورد نظر تهیه گردد. هرگاه ممانعت از تغییرمکان‌های تکیه‌گاهی موجب بروز نیروهای درونی قابل ملاحظه در سازه گردد، باید آثار این قیود مورد بررسی قرار گیرد.

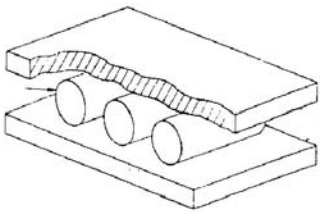
برای کنترل حرکت‌ها در تکیه‌گاه‌ها از اتصالات ویژه یا دستگاه‌های تکیه‌گاهی استفاده می‌شود. نقش دستگاه‌های تکیه‌گاهی تأمین ارتباط برای کنترل تعامل بارها و حرکت‌ها بین بخش‌های سازه در اغلب موارد بین سازه و تکیه‌گاه‌ها می‌باشد.

تفسیر *ـ نمونه‌هایی از دستگاه‌های تکیه‌گاهی که به‌طور متداول در سازه‌های فضاکار با دهانه‌های نسبتاً وسیع و همچنین پل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، در این سطور مورد اشاره قرار داده شده‌اند:*

*- **تکیه‌گاه غلتکی فولادی** ـ تکیه‌گاهی است که در آن از یک یا چند غلتک فولادی شامل استوانه‌های متشکل از مصالح سخت صیقلی‌شده یا سیستم‌های چرخ‌دنده‌ای که بین صفحات فولادی رویین و زیرین قرار داده می‌شوند، تشکیل می‌گردد. به این ترتیب در صورت طراحی و نگهداری صحیح، آزادی حرکت در امتداد مورد نظر تأمین می‌گردد. در امتداد متعامد می‌توان با طراحی ضامن‌هایی حرکت را محدود یا مقید نمود. در مواردی که شرایط محیطی و میزان پایایی مورد نظر ایجاب نماید، می‌توان از فولادهای ضد زنگ یا با لایه پوشش ضد زنگ در این تکیه‌گاه‌ها بهره‌گیری نمود. به‌منظور عملکرد مورد نظر این سیستم، نباید در اجزای تکیه‌گاه لهیدگی به‌وجود آید. بنابراین به‌طور معمول در این تکیه‌گاه‌ها از مصالح سخت استفاده می‌شود (شکل‌های ۴ـ۱ و ۴ـ۲).*

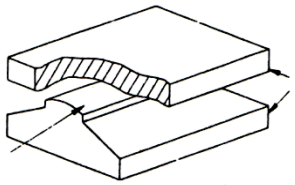


شکل ۴-۱: تکیه‌گاه تک غلتکی

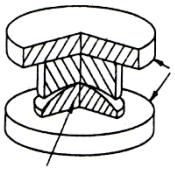


شکل ۴-۲: تکیه‌گاه چند غلتکی

- ***تکیه‌گاه الاکلنگی***- تکیه‌گاهی است که از یک سطح قوسی در تماس با یک سطح تخت یا قوسی تشکیل شده و برای جلوگیری از حرکت نسبی افقی مهار شده است. سطوح قوسی می‌توانند استوانه‌ای (به‌منظور آزادی دوران حول یک محور) یا کروی (به منظور آزادی دوران حول تمام محورهای افقی) باشند. در این نوع تکیه‌گاه در واقع غلتش یک بخش بر روی بخش دیگر دوران را میّسر می‌سازد (شکل‌های ۴-۳ و ۴-۴).

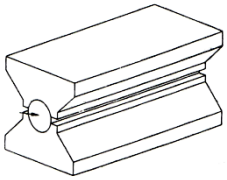


شکل ۴-۳: تکیه‌گاه الاکلنگی طولی

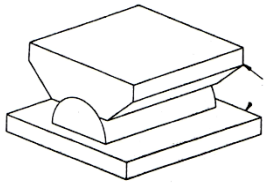


شکل ۴-۴: تکیه‌گاه الاکلنگی کروی

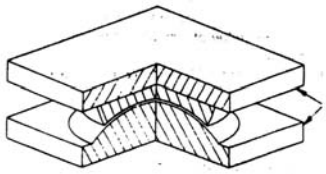
تکیه‌گاه مفصلی ـ تکیه‌گاهی است که اغلب از دو یا چند عضو با سطوح قوسی جفت‌شونده تشکیل شده است سطوح قوسی می‌توانند استوانه‌ای یا کروی باشند. در این نوع تکیه‌گاه لغزش یک بخش بر روی بخش دیگر دوران را میسر می‌سازد (شکل‌های ۴-۵ تا ۴-۷).



شکل ۴-۵: تکیه‌گاه مفصلی میله‌ای

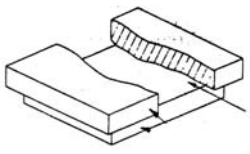


شکل ۴-۶: تکیه‌گاه مفصلی استوانه‌ای

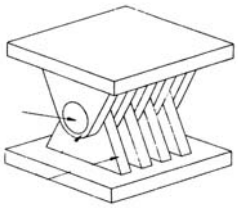


شکل ۴-۷: تکیه‌گاه مفصلی کروی

- ***تکیه‌گاه چنگالی یا برگه‌ای***ـ تکیه‌گاهی است متشکل از یک استوانه توپر، که از میان تعدادی ورق که یک در میان به دو صفحه بالایی و پایینی تکیه‌گاه متصل شده‌اند، می‌گذرد (شکل ۴-۸).



شکل ۴-۸: تکیه‌گاه چنگالی برگه‌ای



شکل ۴-۹: تکیه‌گاه لغزشی

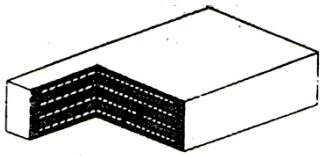
تکیه‌گاه لغزشی ـ *تکیه‌گاهی است شامل دو سطح که یکی روی دیگری می‌لغزد. به‌منظور امکان لغزش سطوح کاملاً ماشین‌کاری و صیقلی می‌شوند و از مصالحی با ضرایب اصطکاک بسیار اندک مانند تفلون (PTFE) استفاده می‌شود (شکل ۴ـ۹).*

تکیه‌گاه الاستومر ـ *تکیه‌گاهی است که شامل یک قطعه (بلوک) از مواد الاستومر با یا بدون ورق‌های درونی فولادی می‌باشد. با توجه به مدول برشی اندک این تکیه‌گاه‌ها، هم به صورت غیرمقید به منظور ایجاد آزادی حرکت نسبی ناشی ازتغییرات دما و هم در حالات مقیدشده به‌کار برده می‌شود. با توجه به میزان مدول الاستیسیته فشاری تکیه‌گاه‌های الاستومر، معمولاً اختلاف فشار ناشی از دوران سازه متکی بر آن منجر به تغییرمکان همساز این تکیه‌گاه‌ها گردیده و در مواردی که قیود دورانی ایجاد نشده باشد، می‌توانند به‌صورت تکیه‌گاه ساده به‌کار گرفته شوند.*

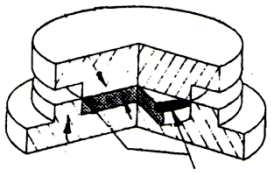
الف ـ تکیه‌گاه غیرمسلح *ـ تکیه‌گاه الاستومری است که مسلح نشده است.*

ب ـ تکیه‌گاه نواری ـ تکیه‌گاه الاستومر غیرمسلحی است که طول آن نسبت به عرض قابل ملاحظه است.

پ ـ تکیه‌گاه لایه‌ای ـ تکیه‌گاه الاستومری می‌باشد که با ورقه‌های فولادی مسلح شده است (شکل ۴ـ۱۰).



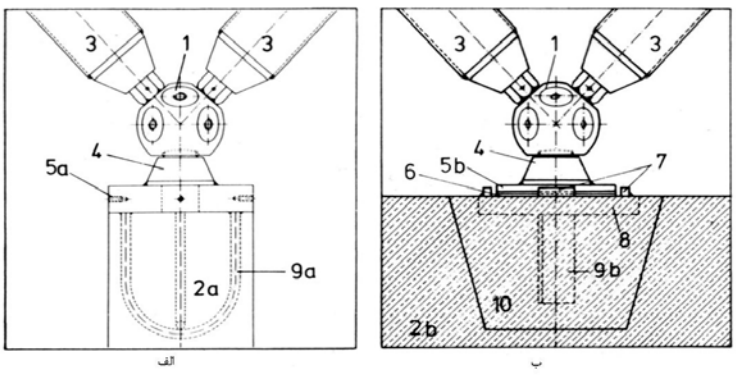
شکل ۴-۱۰: تکیه گاه الاستومری لایه ای



شکل ۴-۱۱: تکیه‌گاه قابلمه ای

ت ـ تکیه‌گاه قابلمه‌ای *ـ تکیه‌گاهی است شامل یک استوانه فلزی واقع بر گرده‌ای از الاستومر ساده که در استوانه فلزی دیگری به‌منظور محدود نمودن حرکت قرار داده شده است (شکل ۴ـ۱۱).*

علاوه بر انواع تکیه‌گاه‌های مورد اشاره در فوق، دستگاه‌ها و اتصالات تکیه‌گاهی متنوع دیگری از نوع فولادی یا از مصالح الاستومر یا ترکیبی از آنها به‌صورت پیش‌ساخته یا براساس طراحی ویژه در سازه‌های فضاکار مورد استفاده قرار گرفته‌اند و از این جهت محدودیتی برای طراحان در جهت ارایه جزییات اجرایی تکیه‌گاهی، متناسب با نیازهای طرح و معیارهای پذیرش متصور نیست. در ارتباط با سیستم‌های تجاری سازه‌های فضاکار نیز اغلب انواع اتصالات تکیه‌گاهی ویژه سیستم مزبور طراحی و به‌کار گرفته شده است. به عنوان مثال، با توجه به گستردگی کاربرد سیستم متشکل از پیونده‌های گوی‌سان مرو در سطح جهانی، نمونه‌هایی از جزییات اجرایی اتصالات تکیه‌گاهی این سیستم از سازه‌های فضاکار در شکل‌های ۴ـ۱۲ و ۴ـ۱۳ نشان داده شده‌اند.

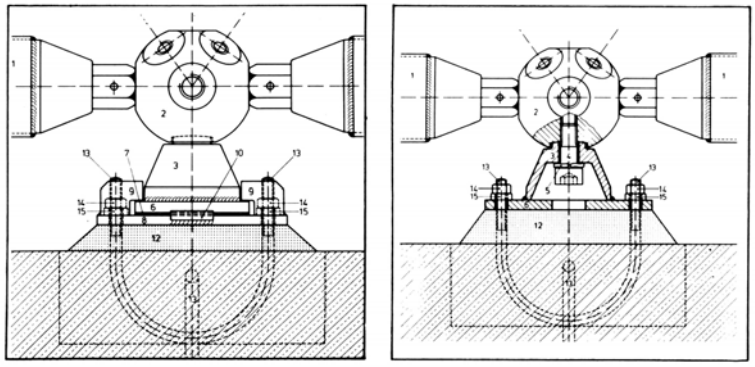


شکل ۴ـ۱۲ـ نمونه‌هایی از تکیه‌گاه‌های سیستم مرو مناسب برای تولید انبوه برای سازه‌های فضاکار نسبتاً سبک.

(الف) ـ تکیه‌گاه مستقر بر ستون بتن آرمه با مقطع دایروی با همسازی حرکت‌های انتقالی در امتدادهای افقی و قائم با تغییرمکان انتهای ستون.

(ب) ـ تکیه‌گاه مستقر بر دیوار یا سر ستون بتن آرمه با آزادی حرکت نسبی محدود در دو امتداد افقی و فاقد قید در مقابل بلندشدن سازه از تکیه‌گاه.

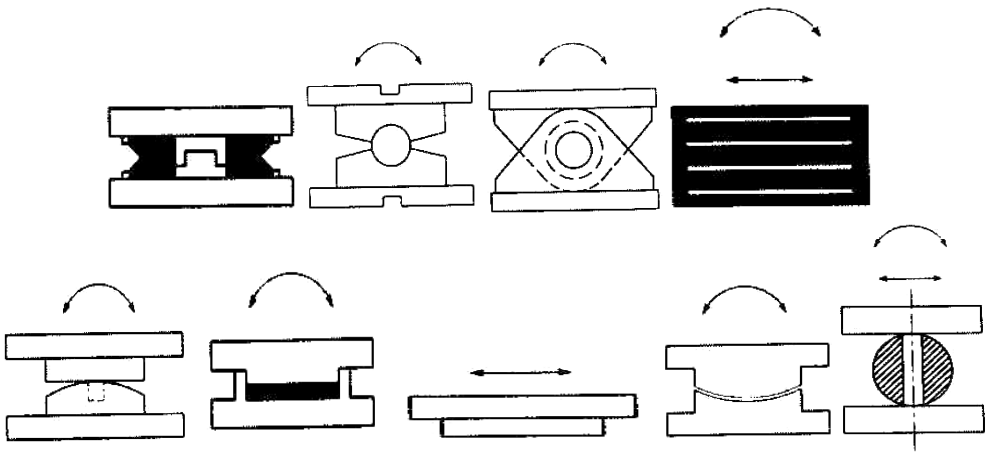
۱ـ پیوندهٔ گوی‌سان سیستم مرو؛ ۲a ـ ستون بتن آرمه با مقطع دایروی؛ ۲b ـ دیوار یا سرستون بتن آرمه؛ ۳ـ عضو قطری؛ ۴ـ مخروطی انتهایی؛ ۵a ـ ورق نشیمن (زیر سری) با سوراخ‌های رزوه شده و میل مهارهای U شکل و سوراخ میانی برای نصب به قالب و ایجاد امکان جادادن بتن ستون و فراهم‌آوردن مهار لازم در ستون؛ ۵b ـ ورق نشیمن (زیرسری)؛ ۶ـ ورق تـفلون؛ ۷ـ ضامـن برای ایجـاد قـیود حرکتی در مقابل جابه‌جایی‌های افزون‌تر از فاصلهٔ پیش‌بینی‌شده برای میزان محـدود حرکت آزاد؛ ۸ـ ورق تکیه‌گاهی؛ ۹a ـ میل مهارهای U شکل جوش‌شده به ورق نشیمن؛ ۹b ـ پـروفیل‌هـای بـرش‌گیـر جوش‌شـده به ورق نشیمن؛ ۱۰ـ حفره جاسازی شده برای تنظیم که متعاقباً با بتن روان ریزدانه و مواد افزودنی منبسط شونده پر خواهد شد.



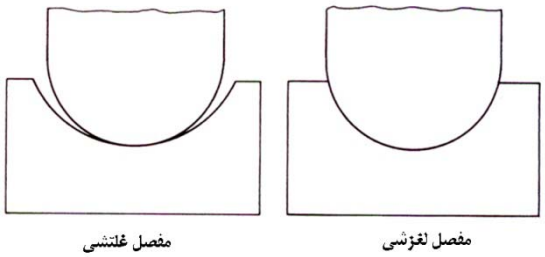
شکل ۴ـ۱۳ـ نمونه‌هایی دیگر از تکیه‌گاه‌های سیستم مرو برای ایجاد امکان دوران محدود در صفحهٔ افقی به میزان مورد نظر.

۱ـ عضو لایه تحتانی شبکه دو یا چند لایه؛ ۲ـ پیوند گوی‌سان مرو؛ ۳ـ مخروطی انتهایی؛ ۴ـ پیچ با فرو رفتگی در سر پیچ برای سفت شدن با آچار آلن؛ ۵ـ واشر فنری؛ ۶ـ ورق نشیمن؛ ۷ـ تفلون؛ ۸ـ ورق تکیه‌گاهی؛ ۹ـ ضامن نگهدارنده؛ ۱۰ـ ضـامن هادی محدود کننده میزان حرکت؛ ۱۲ـ مـلات (گراوت) زیرسری؛ ۱۳ـ میل مهار؛ ۱۴ـ مهره؛ ۱۵ـ واشر.

تصاویر شماتیک انواع تکیه‌گاه‌ها و دستگاه‌های تکیه‌گاهی به صورت نمایش داده شده در شکل ۴-۱۴، درجات آزادی انتقالی یا دورانی هر سیستم را ارایه می‌نمایند. لذا در صورتی‌که نیاز باشد از دستگاه‌هـای تکیه‌گاهی بهره‌گیری شـود، مجموعهٔ دستگاه‌هـای تکیه‌گاهی به نحو ارایه شده در شکل ۴-۱۴ به عنوان نمونه‌هایی از انواع متنوع ممکن برای حصول به درجات آزادی یا قیود حرکتی یا دورانی موردنظر می‌تواند مورد توجه طراح قرار گیرد.



شکل ۴ ـ ۱۴



شکل۴ـ ۱۴- بقیه

برای مقاصد متفاوت طراحی و با توجه به میزان بار وارده، میزان جابه‌جایی یا دوران مورد نظر، ابعاد پروژه، عمرمفید و شرایط محیطی و دوام، طراح امکانات متعددی برای انتخاب و طراحی تکیه‌گاه‌های پروژه خواهد داشت و بنـابراین به هیچ روی نبـاید مثال‌های ارایه‌شده در فوق در جهت ممانعت از ابداعات طراح در انتخاب تکیه‌گاه‌ها تعبیر شود. طراح باید از مقاومت و عملکرد مورد نظر تکیه‌گاه طراحی‌شده و امکان ساخت و سهولت ساخت و نگهداری و بازرسی فنی ان اطمینان حاصل نماید.

برای رسیدن به درجه آزادی لازم ممکن است ادغام خصوصیات چند نوع گوناگون دستگاه‌های تکیه‌گاهی ضرورت داشته باشد به‌طوری‌که دستگاه تکیه‌گاهی حاصله حرکت‌های لازم و مقاومت در برابر بارهای مربوط را تأمین نماید. به‌عنوان مثال یک تکیه‌گاه لغزشی تخت برای حرکت‌های افقی در ادغـام با یک تکیه‌گاه قابلمه‌ای دوران لازم را تأمین می‌کند.

دستگاه‌های تکیه‌گاهی را می‌توان به شرح زیر دسته‌بندی کرد:

۱ـ تکیه‌گاه‌های الاستومری که شامل الاستومرهای غیرمسلح یا مسلح با فولاد یا الیاف نخی و تار شیشه نیز می‌باشند.

۲ـ تکیه‌گاه‌های چند دورانی با بار زیاد

تکیه‌گاه‌های قابلمه‌ای، صفحه‌ای و کروی که نوع پیش‌ساخته آن‌ها قابل تهیه است در این طبقه قرار می‌گیرند. در این تکیه‌گاه‌ها با پیش‌بینی صفحات لغزشی (سرشی) می‌توان حرکت انتقالی را نیز تأمین کرد و یا با استفاده از قید مناسب در یک امتداد، حرکت افقی در امتداد متعامد آن را آزاد گذاشت.

۳ـ تکیه‌گاه‌های مکانیکی

در تکیه‌گاه‌های مکانیکی یا تکیه‌گاه‌های فولادی (که شامل صفحات برنزی نیز می‌باشند) بارها از طریق تماس فـلز با فلز منتقل می‌شوند. تکیه‌گاه‌های ثابت که وابسته به یک محور یا یک مفصل هستند، دوران را تأمین می‌کنند و انوع غلتکی، الاکلنگی و لغزشی این تکیه‌گاه‌ها به‌طور معمول در درزهای انبساط بسته به میزان تغییرمکان مورد نظر در درز، به‌کار گرفته می‌شوند.

تماس فلز با فلز موجب زنگ‌زدگی و در نتیجه قفل‌شدن اجزای تکیه‌گاه می‌گردد. از اینرو استفاده از آنها بدون لایه ضد زنگ در محیط‌های خورنده تماماً فولاد ضدزنگ مگر در شرایط خاص محیطی توصیه نمی‌شود.

آنچه در این خلاصه مورد اشاره قرار گرفته راهنمایی است که می‌تواند در طراحی کلی تکیه‌گاه‌های سازه‌های فضاکار پوشش دهانه‌های متوسط تا وسیع به‌کارگرفته شود. برای طراحی، سـاخت، نصب، نگهداری، تعمیر یا تعویض دستگاه‌های تکیه‌گاهی به بخش‌های دیگر این آیین نامه رجوع شود.

تکیه‌گاه‌ها و دستگاه‌های تکیه‌گاهی باید بر اساس مشخصات فنی طرح به‌طور مستمر مورد بازدید فنی قرار گیرد تا اقدامات نگهداری به موقع صورت پذیرد.

۴-۹- اجزا و پوشانه‌های غیرسازه‌ای

۴- ۹- ۱- کلیات

سازه‌های فضاکار شبکه‌ای را می‌توان با یک نوع یا ترکیبی از انوع گوناگون پوشانه‌ها پوشاند. پوشانه مناسب با توجه به نیازهای عملکردی پروژه از قبیل کیفیت هوابندی، آب‌بندی، عایق‌بندی حرارتی و صوتی، درزگیری، سایه‌سازی، جنبه‌های زیبایی‌شناسی، دوام و دیدگاه‌های اقتصادی طرح و مقاومت در مقابل کنش‌های وارده انتخاب می‌گردد. هنگامی‌که پوشانه در بام‌ها به‌کار می‌رود علاوه بر قابلیت باربری و جنبه‌های زیباشناختی، زهکشی و جمع‌آوری آب‌های سطحی بام و آب‌بندی پوشانه حایز اهمیت خواهد بود. در کف‌ها اغلب توانمندی آن در تحمل بارهای وارده از درجه اهمیت زیادی برخوردار است. برای پوشش بدنه‌ها علاوه بر موارد فوق و ایزولاسیون حرارتی زیبایی پوشانه نیز اهمیت ویژه‌ای خواهد داشت.

۴-۹-۲- انواع متداول پوشانه‌های سازه‌های فضاکار

انواع پوشانه‌ها را می‌توان به شرح زیر دسته‌بندی کرد:

- پوشانه‌های فلزی (با یا بدون لایه‌های مواد عایق)
- پوشانه‌های شفاف
- پوشانه‌های پاشامی
- پوشانه‌های سیاه (قیری)
- پوشانه‌های پیش‌ساخته بتنی
- پوشانه‌های ویژه کف‌ها
- سایر مصالح

از میان پوشانه‌های یادشده سه مورد پوشانه‌های فلزی، شفاف و پاشامی ذیلاً مورد اشاره قرار داده شده‌اند.

تفسیر:

پوشانه‌های فلزی

پوشانه‌های فلزی در دهه‌های گذشته هم در دیوارها و هم در بام‌ها از پرکاربردترین نوع پوشانه‌ها بوده‌اند. مهم‌ترین نوع فلزهای به‌کار گرفته‌شده در پوشانه‌ها از فولاد و آلومینیوم بوده‌اند. فولاد معمولاً کم هزینه‌تر بوده و با ضریب انبساط حرارتی کم‌تر دارای برتری‌های اجرایی است. میزان کارایی اندودهای به‌کارگرفته‌شده برای حفاظت در برابر خوردگی در محیط‌های خورنده حایز اهمیت است. در موارد حساس از دیدگاه خوردگی، استفاده از پوشانه‌های آلومینیومی برتری می‌یابد. اندودهای حفاظتی روی فلزات چه به لحاظ مصالح و چه به لحاظ فن آوری اجرا پیشرفت‌های بسیاری کرده است و اجرای اندود نهایی از جنس PVDF و مشابه آن، محافظت پوشانه‌های نما را آسان نموده است.

پوشانه‌های فلزی در شکل‌های گوناگونی ساخته و به‌کار گرفته می‌شوند. شکل‌هایی که به‌طور متداول برای سازه‌های فضاکار مورد استفاده قرار داده می‌شوند، عبارت‌اند از:

- تک لایه دوزنقه‌ای
- دو لایه دوزنقه‌ای
- با درزهای ایستاده جذب و جفت
- کامپوزیت‌ها (پانل‌های ساندویچی)

پوشانه‌های شفاف

استفاده از پوشانه‌های شفاف به دلایل زیر رو به گسترش است :

۱ـ کاهش بار انرژی با استفاده از نور طبیعی در برابر نور الکتریکی،

۲ـ استفاده از گرمای خورشیدی و کاهش بار انرژی گرمایشی،

۳ـ تنوع بیشتر مصالح شفاف موجود برای بهینه‌سازی استفاده از آفتاب،

۴ـ پیدایش سیستم‌های سازه‌ای جدید به عنوان نگهدارنده پوشانه‌های شفاف در بام و دیوار،

۵ـ استفاده بیشتر از منظر با دیواره‌های شیب دار یا قایم شفاف.

ایجاد تعادل بین توان نورگیری طبیعی روز و تبادل حرارتی فضای داخل و خارج که با معیار افزایش یا کاهش انرژی گرمایشی یا سرمایشی لازم سنجیده می‌شود، عامل مهمی در استفاده از پوشانه‌های شفاف می‌باشد. در این مورد باید به نقش آرامش‌بخش نور طبیعی نیز بها داده شود.

پوشانه‌های شفاف را می‌توان به شرح زیر دسته‌بندی کرد:

شیشه

پلی کربنات

آکریلیک

پوشانه‌های پاشامی

با پیشرفت در تولید بافته‌های مرغوب با مقاومت زیاد در چند دهه اخیر پیشرفت قابل توجهی در زمینه کاربرد آنها به عنوان مصالح ساختمانی پیش آمده است و به این ترتیب سازه‌های سنتی چادری تجدید حیات یافته و فن‌آوری سازه‌های پاشامی که خود نوعی از سازه‌های فضاکار است، ایجاد شده است. یکی از کاربردهای مصالح پاشامی پوشاندن سازه‌های فضاکار شبکه‌ای است. با توجه به سوگذرانی مناسب این نوع پوشانه‌ها هنگامی‌که سازه فضاکار سالن با دهانه بزرگی با آنها پوشانده می‌شود در داخل فضای پوشیده‌شده نور روز به نمایش گذاشته‌شده و در شب نیز نورپردازی داخل بنا تجلی‌گر بوده و زیبایی بخش محیط می‌باشد.

پوشانه‌های پاشامی را می‌توان به صورت تک‌لایه یا چندلایه به‌کار برد که در حالت اخیر عایق حرارتی لازم را نیز می‌توان تأمین کرد. نوع چندلایه می‌تواند باد شده انتخاب گردد به نحوی که قطعات باد شده مدوله برای پوشش چشمه‌های سازه فضاکار به‌کار گرفته شود.

با توجه به قابلیت انعطاف این نوع از پوشانه‌ها می‌توان آنها را به آسانی در سازه‌های فضاکار بازشو نیز به‌کار گرفت و همچنین طراحی پوشانه به صورت آویخته از سازه فضاکار نیز میسر است به صورتی که امکان جمع‌کردن و بازکردن سریع آن با توجه به تغییرات آب و هوا در فصول و حتی ساعت‌های مختلف تأمین گردد.

پارچه‌های مورد کاربرد در سازه‌های پاشامی را می‌توان در دو رده عمده: ۱) بافته با الیاف تار شیشه و اندود تفلون ۲) بافته پلی‌استر و اندود $P.V.C$ و روکش $PVDF$ رده‌بندی کرد که مقاومت و دوام انواع رده اول بیشتر ولی انواع رده دوم دارای قابلیت انعطاف‌پذیری بیشتری می‌باشند. نوع اخیر به‌عنوان پوشانه سازه‌های فضاکار شبکه‌ای در اغلب موارد مناسب‌تر به‌نظر می‌رسد.

این نوع پوشانه‌ها با تنوع رنگ و تنوع مقاومت امکان انتخاب مناسب را برای کاربردهای گوناگون میسر می‌سازد.

پوشانه‌ها را می‌توان به یکی از روش‌های زیر به سازه فضاکار شبکه‌ای متصل کرد:

ـ به‌صورت سطوح باربر که بار وارده را مستقیماً به گره‌ها منتقل می‌کنند.

ـ به صورت نوارهای باربر که بار وارده را بوسیله اعضاء خمشی ثانوی به گره‌ها منتقل می‌کنند.

ـ به صورت سطوح باربر که بار وارده را در دو امتداد به اضلاع شبکه منتقل می‌کنند.

ـ به صورت نوارهای باربر که بار وارده را به اضلاع شبکه منتقل می‌کنند.

در شبکه‌های با چشمه‌های بزرگ ممکن است یک شبکه ثانویه برای نگهداشتن پوشانه لازم باشد.

۴-۹-۳- مقاومت پوشانه‌ها در مقابل آتش‌سوزی

مقاومت پوشانه‌ها درمقابل آتش‌سوزی باید براساس مشخصات فنی قابل اعتماد کارخانه سازنده یا آزمایش‌های استاندارد مقاومت در برابر آتش‌سوزی ویژه انواع پوشانه‌های متداول، براساس استانداردهای معتبر جهانی صورت گیرد و از عملکرد مورد نظر پوشانه در برابر آتش‌سوزی، اطمینان حاصل گردد. آزمایش‌ها را برحسب مورد و میزان اهمیت می‌توان در مقیاس کوچک یا کامل در مورد پوشانه‌ها انجام داد.

۴-۹-۴- مقاومت پوشانه و اعضا و اجزای نگهدارنده پوشانه در برابر باد

در مواردی‌که، به‌دلیل عدم شناخت کافی از رفتار مصالح، پیچیدگی نوع پوشانه یا عدم قطعیت در رفتار اتصالات پوشانه به اعضا و اجزای نگهدارنده پوشانه، صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی و تحلیل پوشانه‌های متکی بر اعضا و اجزای نگهدارنده آنها تحت تأثیر فشار یا مکش ناشی از باد مورد تردید باشد، لازم‌است از طریق آزمایش، کفایت پوشانه‌ها، اعضا و اجزا و اتصالات تکیه‌گاهی آنها از دیدگاه مقاومت و تغییرمکان و ارتعاش مورد بررسی قرار داده شود تا اطمینان حاصل شود که نیات عملکردی تحت تأثیر بار باد در عمر مفید سازه برآورده خواهد شد.

۴-۹- ۵- پایایی پوشانه‌ها

انتخاب پوشانه‌ها باید با توجه به شرایط محیطی صورت گیرد و از پایایی پوشانه‌ها برای دورهٔ عمر مفید سازه (با تعمیرات محدود) یا برای دورهٔ عمر پیش‌بینی شده تا تعویض پوشانه‌ها در شرایط محیطی ساختگاه اطمینان حاصل گردد. لذا در شرایط محیطی متفاوت از قبیل سرما، وزش باد، تابش مستقیم خورشید و آثار ناشی از اشعه ماورای بنفش، رطوبت، عوامل شیمیایی، خوردگی و سایر آثار محیطی و جوی پوشانه باید قادر به ایفای عملکرد مورد نظر باشد؛ بدون آنکه هزینه‌های پیش‌بینی نشده‌ای بر بهره‌برداران تحمیل گردد.

۴-۱۰- ملاحظات کلی در طراحی لرزه‌ای سازه‌های فضاکار

۴-۱۰-۱- کلیات

با توجه به سبک بودن و در عین حال سختی و صلبیت قابل ملاحظهٔ شبکه‌های فضاکار و همچنین درجه نامعینی قابل ملاحظه آن‌ها که اغلب مسیرهای متعدد ثانویه برای انتقال بارها را فراهم می‌سازد، سازهٔ فضاکار در مقابل زلزله از ایمنی نسبی افزون‌تری در

قیاس با انواع سازه‌های به اصطلاح سنتی برخوردار است. معذلک نباید این مزایا منجر به عدم بذل دقت لازم از سوی طراحان و مسؤولان کنترل طرح در مطالعات مربوط به طراحی لرزه‌ای این سازه‌ها گردد.

از دیدگاه شکل‌پذیری، می‌توان طراحی اعضای فشاری (به‌منظور ممانعت از بروز کمانش کلی) و اتصالات (به‌منظور جلوگیری از شکست نارس یا کمانش موضعی) و همچنین طراحی پیوندها را به نحوی انجام داد که سازه فضاکار رفتار شکل‌پذیری از خود بروز دهد. شرایط ساختگاهی و احتمال بروز روانگرایی باید مورد بررسی قرار داده شده و تدابیر مقتضی در طراحی پی، پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های سازه فضاکار به عمل آید.

در مواردی که طراح مناسب تشخیص دهد، از شیوه‌ها و تمهیدات افزایندهٔ میرایی و ایزولاسیون ارتعاشی به قصد کاهش پاسخ دینامیکی سازه می‌توان در بررسی گزینه‌های طراحی بهره جست. در این‌گونه موارد، به‌طور معمول لازم خواهد بود، مدل‌سازی این تمهیدات به‌نحوه واقع‌گرایانه در طراحی مجموعه ملحوظ گردد و از روش‌های تحلیل غیرخطی به‌منظور تعیین پاسخ سیستم بهره‌گیری شود.

با توجه به درجات نامعینی قابل ملاحظه سازه‌های فضاکار شبکه‌ای، انتظار می‌رود مقاومت سازه‌های فضاکار در مقابل گسیختگی پیشرونده، در صورت طراحی مناسب، قابل ملاحظه و در نتیجه خطرپذیری‌لرزه‌ای این سازه‌ها، به‌ویژه با توجه به سبکی وزن و نیروهای اینرسی در قیاس با بسیاری از سیستم‌های سازه‌ای دیگر اندک باشد، با اینهمه بروز ناپایداری دینامیکی ناشی از زلزله در سازه‌های فضاکار، در صورت وقوع، می‌تواند بسته به نحوهٔ هم‌بندی و ویژگی‌های سازه فضاکار منجر به گسیختگی‌های موضعی یا کلی گردد.

۴-۱۰-۲- مبانی طراحی لرزه‌ای

سازه فضاکار باید به نحوی طراحی گردد که در تطابق با سطح خطر زمین‌لرزه و میزان اهمیت سازه، سطح عملکرد تعریف شده‌ای را ارایه نماید. طبعاً ویژگی‌های توپوگرافیک، جغرافیایی و ویژگی‌های ساختگاه نقش بسزایی در انتخاب سیستم و فرم سازه فضاکار خواهند داشت.

۴-۱۰-۲-۱- عملکرد لرزه‌ای

سه سطح عملکرد به شرح زیر ملحوظ گردیده است:

- سطح عملکرد لرزه‌ای۱ـ در این سطح عملکرد خدمت‌رسانی بلاوقفه سازهٔ فضاکار مورد نظر می‌باشد.
- سطح عملکرد لرزه‌ای۲ـ در این سطح عملکرد، خسارات در حدی محدود گردیده است که برقرارساختن بهره‌برداری مجدد از سازه در زمان بالنسبه کوتاهی تضمین گردد.
- سطح عملکرد لرزه ای۳ـ ممانعت از بروز خسارات عمده و حیاتی(جانی)، ممانعت از فروریزی جزیی یا کلی.

در جدول ۴-۳ اهداف عملکردی ملحوظ‌شده در این آیین‌نامه خلاصه گردیده است. در تبیین تراز عملکردی سه جنبه مورد توجه قرار داده شده است: ایمنی، بهره‌برداری و قابلیت بهسازی.

جدول ۴-۳- ترازهای عملکرد لرزه‌ای

تراز عملکرد لرزه‌ای	ایمنی	خدمت‌رسانی	قابلیت ایمن‌سازی، بهسازی و ترمیم خسارات	
			کوتاه‌مدت	درازمدت
عملکرد لرزه‌ای ۱	ایمنی جانی و ایمنی در برابر گسیختگی و فروریزش	خدمت‌رسانی در سطح عملکرد قبل از وقوع زلزله	نیازی به تعمیر برای بازیافت شرایط خدمت‌رسانی وجود ندارد.	اغلب، نیاز به بازبینی و انجام تعمیرات جزیی وجود دارد.
عملکرد لرزه‌ای ۲	ایمنی جانی و ایمنی در برابر گسیختگی و فروریزش	قابلیت خدمت‌رسانی محدود با قابلیت بازیافت بالنسبه سریع خدمت‌رسانی به سطح قبل از وقوع زلزله	با اقدامات و عملیات ترمیم اضطراری بازیافت شرایط خدمت‌رسانی میسر خواهد بود.	انجام عملیات بهسازی و تعمیرات دایمی بدون دشواری غیرمتعارف امکان‌پذیر است.
عملکرد لرزه‌ای ۳	ایمنی جانی و ایمنی در برابر گسیختگی و فروریزش	انتظار نمی‌رود قابلیت خدمت‌رسانی متعارف حفظ گردد.	نیاز به بررسی فنی و اقتصادی و اتخاذ تصمیم در مورد بهسازی لرزه‌ای جهت بهره‌برداری کوتاه مدت وجود دارد	نیاز به بررسی فنی و اقتصادی و اتخاذ تصمیم در مورد بهسازی لرزه‌ای جهت بهره‌برداری درازمدت دارد

جدول ۴-۴-سطوح خطر زمین‌لرزه و عملکرد لرزه‌ای مورد انتظار سازه‌های فضاکار مشمول گروه‌بندی عمرمفید ۳ و۴

	سازه‌های فضاکار متعارف	سازه‌های فضاکار مهم
سطح خطر ۱ زمین‌لرزه	سطح عملکرد لرزه‌ای ۲	سطح عملکرد لرزه‌ای ۱
سطح خطر ۲ زمین‌لرزه	سطح عملکرد لرزه‌ای ۳	سطح عملکرد لرزه‌ای ۲

جدول ۴-۴ خلاصه دیدگاه‌های مورد نظر در این آیین‌نامه را مورد اشاره قرار می‌دهد.

تفسیر- *ایمنی در ارتباط با خسارات جانی تعریف گردیده است و لذا برای برقراری ایمنی باید از فروریزی و ناپایداری و شکست منجر به گسیختگی کلی سازه فضاکار جلوگیری کرد. بهره‌برداری (خدمت‌رسانی) بلاوقفه بر عملکردی دلالت دارد که در آن کاربری معمول سازه فضاکار پس از وقوع زلزله نیز برقرار می‌ماند.*

قابلیت خدمت‌رسانی محدود نمایشگر نوع عملکردی است که در آن خسارت در حدی محدود می‌گردد که امکان بهسازی و ترمیم خسارات وارده ناشی از زلزله و در بازه زمانی بالنسبه کوتاه و با هزینه نسبتاً اندک وجود داشته باشد.

۴-۱۰-۲-۲- حالات حدی در طراحی لرزه‌ای مبتنی بر عملکرد

به منظور ارزیابی عملکرد سازه، حالات حدی را باید برای سازه و اعضا و اجزای آن تبیین نمود. پاسخ لرزه‌ای هر یک از اعضای و اجزای به منظور ارضای حالات حدی ذیربط مورد بررسی قرار داده می‌شود.

۴-۱۰-۲-۱-۲- حالات حدی در سطح عملکرد ۱

این حالات باید با این فرض تعیین گردند که پاسخ سیستم کلی سازه در محدودهٔ رفتار الاستیک قرار داشته باشد. لذا حالات حدی مزبور به این ترتیب مشخص می‌گردند که عملکرد متعارف سازه پس از وقوع زلزله نیز برقرار باشد و بنابراین محدودهٔ خسارات به میزان حداقل یا ناچیز خواهند بود. بر این اساس معیارهای حالات حدی برای هر یک از اعضا و اجزا به نحوی تعیین می‌گردند که پاسخ لرزه‌ای در ارتباط با هر یک از آن‌ها در حیطه رژیم الاستیک رفتار باقی بماند.

۴-۱۰-۲-۲-۲- حالات حدی در سطح عملکرد ۲

حالات حدی در این سطح عملکرد باید به نحوی تعیین گردند که میزان تغییرشکل‌های پلاستیک در آن‌ها محدود به آن دسته از اعضای سازه‌ای باشد که به منظور این رفتار پیش‌بینی گردیده‌اند. این حالات حدی به منظور حصول اطمینان از امکان برقراری سریع عملکرد و خدمت‌رسانی سازه پس از وقوع زلزله منظور می‌گردند. به این ترتیب بهره‌گیری از اعضا و اجزایی که به نحو اطمینان بخشی قابلیت جذب انرژی کرنشی پلاستیک داشته و امکان تعمیر (یا تعویض) آن‌ها به سهولت میسر باشد، توصیه می‌گردد. با انتخاب این نوع از اعضا و اجزا و همچنین اعضا و اجزایی که از نظر ظرفیتی باید حفاظت گردند، حالات حدی اعضا و اجزای متفاوت تبیین می‌گردند. توصیه می‌شود پایه‌ها به نحوی طراحی شوند که قابلیت جذب انرژی قابل‌ملاحظه‌ای داشته باشند. در مورد تکیه‌گاه‌های دارای قابلیت ایزولاسیون ارتعاشی، حالات حدی سایر اعضا را باید به نحوی درنظر گرفت که جذب انرژی به‌صورت قابل اطمینانی در تکیه‌گاه‌های مزبور صورت گیرد.

۴-۱۰-۲-۲-۳- حالت حدی برای سطح عملکرد ۳

در حالت حدی متناظر با سطح عملکرد ۳، ضمن آنکه امکان بروز تغییرشکل‌های پلاستیک را باید به آن دسته از اعضای سازهٔ فضاکار محدود نمود که به منظور رفتار فرا الاستیک طراحی شده‌اند، لازم‌است تغییرشکل‌های خمیری از ظرفیت تغییرشکل خمیری عضو تجاوز ننمایند.

این حالت حدی به منظور ممانعت از بروز فروریزی یا خسارات عمده و حیاتی تعیین گردیده است. حالت حدی اعضایی که مجاز به رفتار پلاستیک می‌باشند را باید به‌روشنی تبیین نمود.

۴-۱۰-۳- روش ارزیابی عملکرد لرزه‌ای

در مورد سازه‌های منتظم، ارزیابی و کنترل طراحی به روش استاتیکی معادل به شرح مندرج در فصل سوم، با رعایت تمامی محدودیت‌های ذکرشده بر اساس دیدگاه‌های مبتنی بر ضریب زلزله و ضرایب رفتار سازه، به عنوان روش ارزیابی اولیه تحت تأثیر مؤلفه افقی آثار ناشی از زلزله قابل اعمال می‌باشند.

در مورد سازه‌هایی که رفتار لرزه‌ای آن‌ها بغرنج پیش‌بینی می‌گردد، لازم‌است روش ارزیابی دینامیکی به‌کار گرفته شود. در این آیین‌نامه سازه‌های فضاکار دارای رفتار لرزه‌ای بغرنج شامل موارد زیر می‌باشند:

- مودهای ارتعاش اصلی سازه با آنچه از روش ارزیابی استاتیکی قابل استنتاج است، مشخصاً متفاوت باشند.
- بیش از یک مود اساسی به صورت مسلط در پاسخ لرزه‌ای دخیل باشند. در مورد سازه‌های فضاکار معمولاً تعداد قابل ملاحظه‌ای مود ارتعاش در پاسخ مشارکت می‌نمایند.
- در ارزیابی به منظور بررسی سطح عملکرد متناظر با سطح خطر ۲ زمین‌لرزه یا احتمال تشکیل لولاهای پلاستیک تجمعی وجود داشته باشد یا اصولاً نتوان موقعیت و لولاهای پلاستیک را با تقریب قابل قبولی تعیین نمود.

- کاربرد اصل بقای انرژی (انرژی ثابت) براساس مشخصه‌های رفتاری غیرخطی اعضا و اجزا یا کل سیستم سازه از قابلیت اعتماد مکفی برخوردار نباشد.

۴-۱۰-۴- جنبه‌های رفتاری سازه از دیدگاه میزان شکل‌پذیری و قابلیت استهلاک انرژی

۴-۱۰-۴-۱- سازه با رفتار شکل‌پذیر

در ناحیه‌های با لرزه‌خیزی متوسط و زیاد، معمولاً از جنبه‌های اقتصادی و ایمنی ارجحیت دارد که سازه برای قابلیت ارایه رفتار شکل‌پذیر طراحی گردد و برای آن تمهیدات قابل اعتمادی جهت استهلاک بخش عمده‌ای از انرژی وارده ناشی از زلزله شدید، تأمین شود. این هدف با ممانعت از بروز کمانش یا شکست یا ایجاد امکان بروز تغییرشکل‌های پلاستیک در نقاط و مواضعی از سازه و یا از طریق تأمین قابلیت جذب انرژی در اتصالات و یا به‌کارگیری تمهیدات میراگر و ایزولاسیون ارتعاشی قابل حصول است.

۴-۱۰-۴-۲- سازه با شکل‌پذیری محدود

در چارچوب این معیار رفتاری، تحت تأثیر زلزله طراحی، پلاستیسیتهٔ گسترده اتفاق نمی‌افتد. البته معمولاً این سازه‌ها با قابلیت رفتار شکل‌پذیر به میزان محدود و لذا توانایی ارایهٔ رفتار فرا الاستیک در حد محدود، قابلیت استهلاک میزان محدودی از انرژی را دارا می‌باشند.

در مورد سازه‌هایی که در آن‌ها پاسخ لرزه‌ای شامل مودهای بالاتر از مود اساسی می‌گردد یا حالاتی‌که جزییات اجرایی به نحوی طراحی یا اجرا شده باشند که امکان بروز پلاستیسیته به میزان محدود مورد تردید باشد، ارجحیت دارد رفتار سازه را الاستیک فرض نماییم.

۴-۱۰-۴-۳- طراحی مفهومی

اصول طراحی مفهومی لرزه‌ای سازه‌های فضاکار معیارهای افزوده‌ای را در ارتباط با میزان شکل‌پذیری و قابلیت استهلاک انرژی در قیاس با سازه‌هایی که در معرض کنش‌های ناشی از زلزله نمی‌باشند، ایجاب می‌نماید. بنابراین ضوابطی برای طراحی جزییات اجرایی متناسب با میزان شکل‌پذیری موردنظر و رفتار مورد انتظار در چارچوب طراحی مفهومی لرزه‌ای ملحوظ می‌گردد. در مورد سازه‌های واقع در مناطق با لرزه‌خیزی زیاد و بسیار زیاد، علاوه بر رعایت اصول صحیح طراحی مفهومی لرزه‌ای به قصد تأمین رفتار شکل‌پذیر، لازم است جزییات طراحی تفصیلی نیز به دقت تهیه و ارایه گردد.

۴-۱۰-۴-۴- سازه مجهز به سیستم‌های میراگر

در این سازه‌ها، از طریق ایزولاسیون ارتعاشی یا به‌کارگیری تمهیدات استهلاک‌دهندهٔ انرژی، پاسخ لرزه‌ای سازه تحت کنترل قرار داده می‌شود. در چنین سازه‌هایی، تغییرشکل‌های غیرخطی باید به‌طور عمده در مواضع ویژه و محدود و یا تمهیدات میراگر متمرکز گردند.

۴-۱۰-۵- شرایط خاک

در حالت مطلوب انتظار می‌رود، ویژگی‌های ژئوتکنیکی لـــرزه‌ای ساختگاه و ماهیت خاک زیر شالـوده سازه فضاکار نشانگر منتفی‌بودن احتمال غالب شکست خاک، ناپایداری شیروانی‌ها و احتمال بروز روانگرایی و فرونشست و گسترش جانبی خاک باشد. به عبارت دیگر، در انتخاب ساختگاه مناسب باید مطالعات مکانیک و دینامیک خاک ویژه ساختگاه نشانگر عدم احتمال قابل‌توجه بروز چنین پدیده‌هایی باشد. در غیر این‌صورت، لازم است مطالعات ویژهٔ مکانیک و دینامیک خاک و در صورت لزوم بهسازی خاک صورت گیرد.

۴-۱۰-۶- فلسفه بارگذاری، تحلیل و طراحی آثار ناشی از زمین‌لرزه

فلسفه بارگذاری آثار ناشی از زمین‌لرزه مبتنی بر پهنه‌بندی منطقه و نوع خاک ساختگاه قابل قبول بوده و سه عامل مهم مؤثر در ویژگی‌های حرکت زمین به شرح زیر در مطالعات مورد توجه قرار داده می‌شوند:

الف) یک پارامتر مرتبط با حرکت زمین (به‌ویژه بیشینه شتاب حرکت زمین)،

ب) طول مدت زمان حرکت نیرومند زمین و

پ) محتوای بسامدی (از دیدگاه مقایسه بین بسامد حرکت زمین و بسامدهای طبیعی ارتعاش سازه).

برای تعیین ویژگی‌های زمین‌لرزه طراحی و پاسخ سازه، روش‌های زیر را می‌توان مورد استفاده قرار داد:

- مدل تصادفی، مبتنی بر دیدگاه‌های احتمال‌اندیشانه (شایدی) که در این آیین‌نامه به‌صورت طیف نمایی توصیه می‌گردد.
- مدل تعیینی (بایدی)، شامل:

الف- تحلیل دینامیکی؛

- تحلیل تاریخچه زمانی خطی، هرگاه پاسخ خطی تصویر واقع‌گرایانه‌ای از رفتار را ارایه نماید.
- تحلیل طیف پاسخ غیرخطی، هرگاه پاسخ سازه فضاکار دارای رفتار غیرخطی مسلط بوده یا از تمهیدات دارای میرایی قابل ملاحظه بهره‌گیری شود.

ب- روش‌های مبتنی بر نیروی‌های استاتیکی معادل (روش تجربی)، برای دسته‌ای از سازه‌های فضاکار منتظم با رعایت محدودیت‌هایی که در فصل سوم تشریح شده است؛ جهت ارزیابی اولیه آثار ناشی از مؤلفه افقی زمین‌لرزه.

طراحی لرزه‌ای با هدف ارضای ملزومات اساسی زیر صورت می‌گیرد:

الف- معیارهای مرتبط با ملزومات عدم فروریزی (حالات حدی نهایی مرتبط با آستانهٔ فروریزش)

ب- معیارهای مرتبط با ملزومات محدودیت میزان خسارت (در ارتباط با حالات حدی بهره‌برداری و ترازهای عملکردی موردنظر)

معیارهای مرتبط با ملزومات محدودیت میزان خسارت و حالات حدی بهره‌برداری مربوط و همچنین معیارهای پذیرش در هر حالت، در فصول دیگر این آیین‌نامه تشریح گردیده‌اند.

۴-۱۰-۷- ترکیب آثار ناشی از زلزله با سایر عوامل

در طراحی در چارچوب حالات حدی و روش ضرایب پاره‌ای کنش‌ها، نیروهای اینرسی آثار ناشی از زمین‌لرزه طراحی با درنظرگرفتن حضور جرم‌های مرتبط با تمامی بارهای ثقلی محتمل محاسبه می‌شوند. مقادیر طراحی آثار ناشی از کنش‌های دارای احتمال اعمال همزمان با اثر زلزله به‌صورت زیر با آثار ناشی از زلزله ترکیب می‌گردند:

$$E_d = \sum G_{k,j} + \sum \Psi_{E,i} Q_{k,i} \qquad (۱۲-۴)$$

که در آن:

$G_{k,j}$: *مقدار مشخصه عامل دایمی* j،

$Q_{k,i}$: *مقدار مشخصه عامل متغیر* i،

$\Psi_{E,i}$: *ضریب ترکیب بار برای عامل متغیر* i.

مقادیر ضرایب ترکیب بار $\Psi_{E,i}$ بسته به نوع سازه از آیین‌نامه‌های بارگذاری مرتبط قابل استخراج است.

۵

تحلیـــل

۵-۱- تعریف

تحلیـل فرایندی است که طی آن می‌توان پاسخ سازه را تحت تأثیر کنش‌ها با دقت و قابلیت اطمینان موردنظر پیش‌بینی کرد. به‌این منظور لازم است مبانی تحلیل، مدل‌سازی و روش‌های تحلیل برای رسیدن به پاسخ واقع‌گرایانه سازه تحت تأثیر کنش‌های محتمل متناسب با هر پروژه به نحو قابل اعتمادی تعیین شوند. برای رسیدن به اهداف مطلوب از تحلیل سازهٔ مورد نظر، فرایند و نتایج تحلیل باید به‌گونه‌ای مناسب مورد صحت‌سنجی قرار گیرند.

۵-۲- مبانی تحلیل

۵-۲-۱- کنش‌های طراحی

۵ـ۲ـ۱ـ۱ـ کنش‌های طراحی که در تحلیل باید مورد نظر قرار گیرند، شامل کنش‌ها و آثار محیطی وارده بر سازه مطابق فصل سوم این آیین‌نامه تعیین می‌شوند.

در موارد کمبود، به ضوابط آیین‌نامه‌های معتبر نظیر استاندارد شماره ۵۱۹ ایران، مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران و سایر آیین‌نامه‌های معتبر بین‌المللی ویژه سازه‌های با کاربری موردنظر مراجعه شود.

۵-۲-۱-۲- کنش‌های محاسباتی متفاوت باید با توجه به احتمال هم‌زمان بودنشان با یکدیگر ترکیب‌شده و در بارگذاری منظور شوند. در ترکیب عوامل و بارهای محاسباتی باید نامساعدترین وضعیت‌های محتمل بارگذاری مطابق مطالب مندرج در فصل چهارم به‌کار برده شوند.

۵-۲-۱-۳- کنش‌ها محاسباتی وارد بر سازه در مواردی که با ضرایب جزیی ایمنی و مقاومت در حالت حدی بهره‌برداری تشدید شده‌اند، بارهای "بهره‌برداری" و در مـواردی که با ضرایب جزیی ایمنی و مقاومت در حالت حدی نهایی تـشدید شده‌اند، بارهای "نهایی" نامیده می‌شوند. جزییات این ضرایب در فصل چهارم ارایه شده است.

۵-۲-۲ - آثار ناکاملی

یکی از عواملی که در رفتار برخی از سازه‌های فضاکار تاثیر به‌سزایی دارد، آثار ناکاملی می‌باشد. در حالت کلی، ناکاملی به انحراف از حالت سازه کامل (بدون نقص) اطلاق می‌شود.

۵-۲-۲-۱- دسته‌بندی ناکاملی‌ها

ناکاملی‌ها را با توجه به ماهیت آنها، می‌توان به ناکاملی‌های هندسی و مکانیکی دسته‌بندی نمود.

۵-۲-۲-۱-۱- ناکاملی‌های هندسی

ناکاملی‌های هندسی مربوط به هندسه سازه می‌باشند که در ارتباط با اعضا و اتصالات تعریف می‌شوند و ناشی از بی‌دقتی در ساخت و یا نصب اعضا و اجزای سازه فضاکار می‌باشند.

الف) در ارتباط با اعضا: انحنای اولیه اعضا،

ب) در ارتباط با اتصالات: انحراف از هندسه ایده‌ال و برون محوری.

۵-۲-۲-۱-۲- ناکاملی‌های مکانیکی

ناکاملی‌های مکانیکی، مربوط به خصوصیات مکانیکی و شرایط بارگذاری سازه می‌باشند و عبارت‌اند از:

الف) تنش‌های پسماند ناشی از نورد، برش‌کاری، جوش‌کاری؛

ب) خروج از مرکزیت‌های اتفاقی در بارهای وارده؛

پ) نیروهای اضافی اعضا، ناشی از عدم انطباق.

۵-۲-۲-۲- بررسی ناکاملی‌ها

دسته‌بندی حساسیت سازه‌ها نسبت به آثار ناکاملی‌ها

هندسه سازه فضاکار، شرایط بارگذاری، پاسخ سازه در برابر بارگذاری و نوع رفتار ناپایداری آن تاثیر بسزایی در میزان حساسیت سازه فضاکار در برابر آثار ناکاملی دارند. با توجه به میزان حساسیت به ناکاملی‌ها، سازه‌های فضاکار را می‌توان در دو رده طبقه‌بندی نمود:

الف) سازه‌های حساس به ناکاملی‌ها: در این سازه‌ها، اثر ناکاملی‌ها بر پاسخ سازه مشهود بوده و به‌ویژه بار حدی سازه را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهند.

ب) سازه‌های غیرحساس به‌ناکاملی‌ها: در این سازه‌ها، ناکاملی‌ها به میزانی می‌باشند که اثر چندانی بر پاسخ سازه نداشته و به‌ویژه بار حدی سازه را به‌طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار نمی‌دهند.

۵-۲-۲-۳- ماهیت تصادفی ناکاملی‌ها

در حالت کلی ناکاملی‌ها در سازه‌های فضاکار با توجه به نوع، میزان، مکان و توزیع ناکاملی‌ها ماهیت تصادفی دارند. از اینرو رفتار سازه فضاکار در اثر ناکاملی‌ها از طریق تحلیل‌های مناسب احتمالاتی ـ تصادفی قابل مطالعه است. روش تحلیل مونته کارلو در این ارتباط کارایی و توانمندی کافی داشته و برای تعیین میزان حساسیت سازه‌های فضاکار در برابر ناکاملی به عنوان روشی مؤثر توصیه می‌شود. با این‌حال می‌توان آثار ناکاملی ـ به‌ویژه ناکاملی‌های هندسی ـ را به‌طریقه‌ای بایدی (تعیینی) به سازه‌های فضاکار اعمال نمود.

۵-۲-۲-۴- نحوهٔ اعمال آثار ناکاملی‌های هندسی

انحنای اولیهٔ اعضا و انحراف پیونده‌های سازه‌های فضاکار از هندسه ایده‌ال را می‌توان به روش‌های بایدی (تعیینی) به سازه‌های فضاکار اعمال نموده حساسیت پاسخ سازه به آثار این نوع از ناکاملی را مورد سنجش قرار داد.

۵-۲-۲-۴-۱- نحوهٔ اعمال انحراف اولیهٔ اعضا

به‌طور معمول در تحلیل‌های غیرخطی به‌ویژه در تحلیل‌های حدی نهایی سازه‌های فضاکار، انحنای جانبی عضو را به صورت متقارن به عنوان ناکاملی در نظر می‌گیرند. اعمال این ناکاملی به ویژه برای اعضای فشاری بحرانی در سازه‌های فضاکار دو و چند لایه الزامی است. اعضای بحرانی، به اعضایی اطلاق می‌شود که در تحلیل حدی نهایی کمترین حاشیه ایمنی را داشته باشند. مقدار بیشینهٔ ناکاملی در وسط طول عضو بحرانی فشاری سازه فضاکار مطابق رواداری مجاز تعیین‌شده در مبحث یازدهم مقررات ملی

ساختمان ایران به میزان $\frac{۱}{۱۰۰۰}$ برابر طول عضو در نظر گرفته می‌شود. برای فرم انحنا یافتهٔ عضو فشاری می‌توان از توابع مناسبی که ویژگی‌های هندسی ناکاملی را به‌نحو واقع‌گرایانه‌ای ارائه داده و شرایط سرحدی را ارضا نمایند، استفاده نمود.

۵-۲-۲-۴-۲- نحوه اعمال انحراف گره‌ها از هندسه ایده‌ال

الف) برای تحلیل حساسیت نسبت به انحراف گره‌ها از هندسه ایده‌ال، معمولاً یک تحلیل کمانشی برای سازه ایده‌ال انجام می‌گیرد و مودهای غالب کمانشی تعیین می‌گردند. سپس تحلیل سازه ناکامل با فرض این که ناکاملی هندسی آن، متناظر با مودهای کمانشی است، انجام می‌گردد. میزان ناکاملی متناسب با هندسه سازه، نحوه بارگذاری، شرایط تکیه‌گاهی و غیره تعیین می‌شود.

ب) باید توجه داشت که مود ناکاملی اولیهٔ بحرانی، الزاماً همان مود کمانشی نمی‌باشد. به عبارت دیگر، ممکن است مود ناکاملی که بیشترین میزان کاهش در ظرفیت باربری سیستم سازه‌ای را ایجاد نماید، مود دیگری غیر از مود اولیه کمانش باشد. بنابراین شناخت مودهای بحرانی حایز اهمیت است.

پ) ناکاملی‌های هندسی (به‌ویژه انحراف اولیهٔ گره‌ها) باعث تحریک مودهای نامتقارن کمانشی می‌شوند و به همین دلیل معمولاً هنگام بررسی حساسیت به ناکاملی سازه‌ها، مودهای نامتقارن نیز باید در نظر گرفته شوند، لیکن برخی از تاشه‌های سازه‌ای به ناکاملی‌های متقارن بیش از ناکاملی‌های نامتقارن حساس هستند. از اینرو، تحلیل حساسیت به ناکاملی برای هر دو نوع مودهای متقارن و نامتقارن مورد مطالعه توصیه می‌گردد.

ت) سازه‌هایی که در تحلیل غیرخطی، ناپایداری با انشعاب دو شاخگی از خود بروز می‌دهند، حساسیت بیشتری نسبت به ناکاملی‌های هندسی (به‌ویژه از نوع انحراف گره‌ها) در مقایسه با حالت ناپایداری در نقطه حدی دارند. لذا حساسیت‌سنجی نسبت به ناکاملی‌ها در این‌گونه سازه‌های فضاکار مخصوصاً سازه‌های تک‌لایه گنبدی- به‌ویژه در طراحی حالت حدی نهایی - الزامی است.

۵-۲-۲-۵- نحوه اعمال آثار ناکاملی‌های مکانیکی

تنش‌های پسماند، خروج از مرکزیت‌های بارها، نیروهای اضافی ناشی از نامیزانی، به عنوان ناکاملی‌های مکانیکی، به‌طور عمده مطابق با بند ۵-۲-۲-۳ اعمال می‌شوند. لیکن در صورت موجود بودن اطلاعات لازم، می‌توان این ناکاملی‌ها را به روش‌های بایدی (تعیینی) به سازه‌های فضاکار اعمال نمود.

۵-۲-۲-۵-۱- آثار ناشی از نامیزانی

کنش‌های ناشی از نامیزانی اعضا مطابق با بند ۳-۱-۴-۹ به سازه‌های فضاکار اعمال می‌شود. در این ارتباط، توجه به چند نکته ضروری است:

الف) سازه‌های فضاکار با توجه به ویژگی‌های هندسی، نوع سیستم، اتصالات، تعداد و شرایط تکیه‌گاهی و همچنین نوع ساخت و بافت، حساسیت‌های متفاوتی به نامیزانی از خود بروز خواهند داد. لذا تحلیل به قصد مطالعهٔ آثار نامیزانی باید با توجه به منشأ بروز نامیزانی صورت گیرد.

ب) شناسایی اعضای بحرانی برای اعمال کنش‌های ناشی از نامیزانی ضروری می‌باشد. به‌طور معمول برای اعضای بحرانی، میزان نامیزانی متناظر با $\frac{۱}{۱۰۰۰}$ طول عضو در نظر گرفته می‌شود. در حالت کلّی، نامیزانی بیش از این مقدار مجاز نمی‌باشد. در صورتی‌که در مواردی نامیزانی عضو بیش از مقدار مجاز باشد، آثار نامیزانی باید از طریق تحلیل غیرخطی مورد بررسی قرار داده شود.

۵-۲-۲-۵-۲- آثار تنش‌های پسماند

الف) برای اعمال تنش‌های پسماند به سازه‌های فضاکار فولادی باید از مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران یا آیین‌نامه معتبر دیگری تبعیت شود.

ب) در صورت وجود شناخت از مکان و میزان تنش‌های پسماند و آثار قابل توجه آن که در حین ساخت، بافت و اجرای قطعات و کل سازه فضاکار ایجاد می‌شود، اعمال این آثار به نحوی واقع‌گرایانه در تحلیل توصیه می‌شود.

۵-۲-۲-۵-۳- آثار ناشی از برون محوری بار

الف) هرگاه در مدل‌سازی و تحلیل آثار ناشی از انحراف پیونده‌ها از هندسه ایده‌آل به عنوان ناکاملی هندسی اولیه در نظر گرفته شده باشد، معمولاً این آثار شامل اثر برون محوری نیز می‌شود مگر آن‌که هندسهٔ اتصال به‌گونه‌ای باشد که اعمال بار به‌صورت برون محور را علاوه بر آثار مزبور ایجاب نماید.

ب) در سایر موارد، با شناخت مکان اعمال و میزان برون محوری‌های بارها در شرایط متفاوت بارگذاری (به‌ویژه بارهای زنده)، اعمال آثار ناشی از برون محوری بار در تحلیل الزامی می‌باشد.

۵-۲-۳- آثار انعطاف‌پذیری اتصالات و پیونده‌ها

اتصالات با توجه به رفتار خود آثار مهمی در رفتار کلی سازه دارند. به‌این منظور لازم است به نحو واقع‌گرایانه‌ای در تحلیل مدل‌سازی شوند. در اینجا منظور از انعطاف‌پذیری اتصالات، میزان انعطاف‌پذیری اتصال عضو به پیونده از دیدگاه میزان انتقال لنگر خمشی در اتصال است. از سوی دیگر، لازم است اثر انعطاف‌پذیری و تغییرشکل پیونده‌ها به‌ویژه پیونده‌های نوع نیامی (توخالی) و پیونده‌های دارای ادوات اتصال صفحه‌ای را با شناسایی رفتار پیونده به روش تحلیلی یا آزمایشگاهی در محاسبات ملحوظ نمود.

۵-۲-۳-۱- دسته‌بندی اتصالات از دیدگاه میزان انتقال لنگر بین اعضا و پیونده‌ها

اتصالات بسته به نوع و مقدار تغییرشکل‌های ممکن در آنها که می‌تواند رفتار سازه را تحت تأثیر قرار دهد، به سه رده اصلی تقسیم می‌شود:

الف) اتصالات مفصلی

ب) اتصالات نیمه صلب

پ) اتصالات صلب

اتصال مفصلی به اتصالی اطلاق می‌شود که انتهای اعضای متصل به آن دارای دوران آزاد و حرکت انتقالی یکسان باشند. اتصال صلب به اتصالی اطلاق می‌شود که انتهای اعضای متصل به آن دارای حرکت انتقالی و دورانی یکسان باشند. اتصال نیمه‌صلب به اتصالی اطلاق می‌شود که انتهای اعضای متصل به آن دارای حرکت انتقالی یکسان ولی دوران نسبی بینابین حالات آزاد و صلب باشند.

۵-۲-۳-۲- انتخاب نوع اتصال

از آنجاکه نوع اتصال در توزیع نیروها در یک سازه مؤثر می‌باشد، انتخاب نوع اتصال باید با ملاحظات کافی و با در نظر گرفتن اثر آنها بر رفتار سازه انجام پذیرد. برخی از این ملاحظات عبارت‌اند از:

الف) در انتخاب نوع اتصال، بسته به ویژگی‌های هندسی، تعداد لایه‌ها، نوع سیستم، نوع تحلیل (اعم از خطی یا غیرخطی)، سطح بارگذاری و معیارهای طراحی می‌توان اتخاذ تصمیم نمود.

ب) در صورتی که شاخص اتصال (مطابق پیوست شماره ۳) کوچک‌تر از ۰/۲ باشد اتصال را می‌توان مفصلی فرض کرد.

پ) در صورتی که شاخص اتصال (مطابق پیوست شماره ۳) بزرگ‌تر از ۰/۸ باشد اتصال را می‌توان صلب فرض کرد.

ت) در تحلیل خطی، در صورتی که نسبت بسامد غالب سازه در دو حالت فرض رفتار مفصلی و صلب اتصالات، به واحد نزدیک باشد، اتصال را می‌توان مفصلی فرض کرد (این حالت در مورد گروه‌هایی از سازه‌های فضاکار شبکه‌ای دو و چندلایه صادق است).

ث) در برخی از سازه‌ها نظیر شبکه‌های تک‌لایه گنبدی و چلیکی با خیز کم، صلبیت اتصال حایز اهمیت اساسی می‌باشد.

۵-۲-۳-۳- آثار رفتار اتصالات

صلبیت خمشی اتصال بر شرایط سرحدی دو انتهای عضو تأثیرگذار بوده و در ضریب طول مؤثر عضو و در نتیجه نسبت لاغری عضو اثر داشته و به این ترتیب در طراحی اعضای فشاری تأثیرگذار خواهد بود. به عنوان مثال اتصال عضو به پیونده با رفتار نزدیک به صلب می‌تواند منجر به کاهش وزن سازه و آثار قابل ملاحظه مترتبه باشد.

در اتصالات پیچ‌دار سازه‌های فضاکار، میزان سفتی پیچ‌ها می‌تواند اثر گذار باشد. بنابراین میزان سفتی پیچ‌ها با توجه به تعداد، اهمیت، و اثر آنها روی رفتار اعضا، طول مؤثر اعضا و رفتار سازه، تعیین می‌شود.

در ارتباط با تغییرشکل‌های ادوات اتصال و پیونده‌ها، به‌ویژه پیونده‌های نیامی و صفحه‌ای، عدم توجه به آثار این تغییرشکل‌ها در تحلیل و طراحی، احتمال دارد به تخمین غیر واقع‌گرایانه رفتار (پاسخ) مجموعه سازه و اعضا و اجزای سازه منتج گردد.

۵-۲-۴- آثار درجه دوم و رفتار غیرخطی

شناخت منابع غیرخطی در رفتار سازه‌های فضاکار به منظور انتخاب روش مناسب تحلیل، حایز اهمیت است. رفتار غیرخطی سازه‌ها ناشی از اثر غیرخطی هندسی و رفتار غیرخطی مصالح می‌باشد.

در مورد آن دسته از سازه‌های فضاکار (به ویژه سازه‌های تک‌لایه) که دارای رفتار غیرخطی نرم‌شونده می‌باشند، تحلیل خطی، منتج به تخمین پایین دست تغییرمکان‌ها می‌شود. از اینرو، در این نوع سازه‌ها حتی برای مقاصد طراحی در محدوده پیش بحرانی نیز، تحلیل خطی مناسب نمی‌باشد، زیرا ممکن است مقادیر بارهای مجاز که توسط تحلیل خطی به‌دست می‌آید، باعث بروز تغییرمکان‌های بزرگ و پدیده ناپایداری شود.

۵-۲-۴-۱- عوامل اصلی ایجاد رفتار غیرخطی در سازه‌های فضاکار

در بیشتر موارد سازه‌های فضاکار، رفتار غیرخطی هندسی و مصالح را به‌طور توأم از خود بروز می‌دهند. عوامل اصلی ایجاد رفتار غیرخطی این سازه‌ها عبارت‌اند از:

الف)کوتاه‌شدگی اعضا، ناشی از نیروهای محوری؛

ب) تغییر در طول اعضا، ناشی از کمانش عضوی؛

پ) دوران پیوندها، ناشی از سیستم‌های اتصال؛

ت) تغییر طول اعضا، ناشی از شلی سیستم‌های اتصال؛

ث) تغییر در سختی اعضا، ناشی از رفتار غیرخطی مصالح.

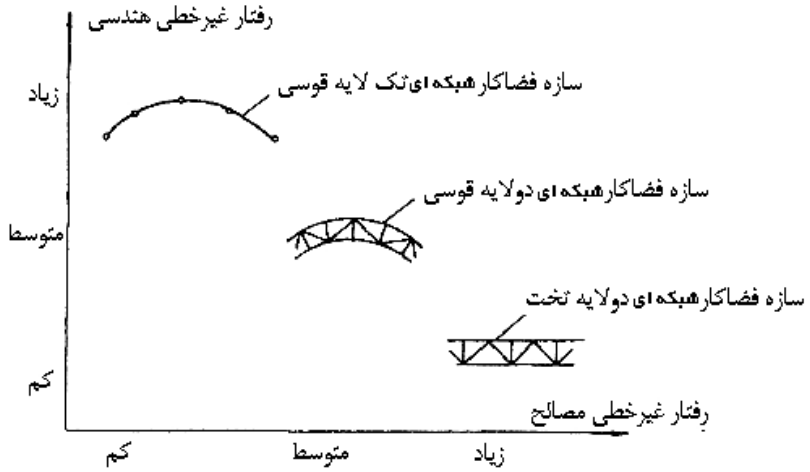
چهار عامل نخست ناشی از عوامل غیرخطی هندسی و عامل پنجم ناشی از آثار رفتار غیرخطی مصالح می‌باشند.

۵-۲-۴-۲- مراتب تأثیر عوامل اصلی در رفتار سازه‌های فضاکار

الف) بسته به نوع سازه (هندسه ـ سیستم اتصالات)، معیار حدی و سطح بارگذاری موردنظر، باید هر یک از عوامل مذکور به نحو مناسبی انتخاب شده و سپس در تحلیل اعمال شوند.

ب) به عنوان یک معیار اولیه در انتخاب عوامل اصلی، رفتار غیرخطی سازه و در نتیجه انتخاب نوع تحلیل (غیرخطی هندسی صرف، غیرخطی مصالح صرف، غیرخطی توام هندسی و مصالح)، نمودار زیر می‌تواند راهنمای اولیه مناسبی باشد.

به‌عبارت دیگر برای گنبدها و چلیک‌های فضاکار شبکه‌ای تک‌لایه، آثار غیرخطی هندسی قابل ملاحظه است، حال آنکه خواص غیرخطی مصالح ممکن است ناچیز باشد. برای شبکه‌های دولایه تخت، خواص غیرخطی مصالح رفتار غیرخطی هندسی را اغلب تحت الشعاع قرار می‌دهند. در مورد سازه‌های فضاکار دولایه گنبدی و چلیکی، هر دو عامل غیرخطی هندسی و مصالح می‌توانند حایز اهمیت باشند.



شکل ۵-۱

۵-۲-۵- تحلیل تجربی تنش‌ها وتغییر شکل‌ها

تحلیل سازه‌های فضاکار را می‌توان براساس ترکیب قانع‌کننده‌ای از محاسبات فنی سازه شامل محاسبات تحلیلی نظری، عددی و شیوه‌های شناخته شده طراحی سازه‌ها و در عین حال بررسی‌های تجربی به نتیجه رساند. به‌طور معمول در مواردی که مدل‌ها و روش‌هـای محـاسباتی قانع‌کننده‌ای برای تحلیل با دقت مورد نظر در دست نباشند، از مشاهـدات و داده‌های حاصل از آزمایش بـهره‌گیری و استنتاج به عمل می‌آید. برخی ملاحظات عمومی که در تحلیل تجربی تنش‌ها در نظر گرفته می‌شوند عبارت‌اند از:

الف) برحسب نوع عامل و حالت حدی مورد نظر و تراز عملکرد ذیربط لازم است در بهره‌گیری از آزمایش در تعیین کمیت‌های طراحی به سطح معینی از قابلیت اعتماد نایل شد.

ب) مساله عدم قطعیت از نظر آماری به دلیل محدودیت در تعداد آزمایش‌ها باید مد نظر قرار گیرد.

پ) انواع آزمایش‌ها در تناسب با اهداف مطالعات طبقه‌بندی شود.

ت) قبل از انجام آزمایش‌ها لازم است طرح آزمایش در هماهنگی آزمایشگاه یا سازمانی که آزمایش را انجام می‌دهد، تهیه شود که شامل تمامی اهداف آزمایش، جزییات ساخت نمونه‌ها، نحوه انجام آزمایش، شیوه اعمال کنش‌ها و تعیین نوع ابزار، موقعیت وکیفیت و جزییات اندازه‌گیری و ثبت نتایج است.

ث) گزارش آزمایش بر اساس ارزیابی، پردازش و پالایش داده‌ها، تجزیه و تحلیل نتایج همراه با جمع‌بندی ارایه گردد.

ج) تحلیل تجربی تنش‌ها و تغییرشکل‌ها بسته به نیازهای تحلیل و طراحی می‌تواند شامل آزمایشات تجربی مصالح، سیستم اتصال، اعضا، مدول‌ها و مجموعهٔ سازه با توجه به شرایط محیطی و کنش‌های مؤثر باشد.

تبصره: جزییات مربوط به طراحی مبتنی بر آزمایش به تفصیل در فصل هفتم این آیین‌نامه ارایه شده است.

۵-۲-۶- ملاحظات مربوط به حالات حدی متناسب با روش‌های طراحی

سازه‌های فضاکار باید عملکرد خود را مطابق با سطح عملکرد مورد انتظار و تعریف‌شده ایفا نمایند. حالات حدی باید به نحوی انتخاب گردند که تمامی اوضاع و شرایطی که در دوره اجرا و بهره‌برداری سازه قابل پیش‌بینی است، ملحوظ گردیده باشد. حالات حدی به حالاتی اطلاق می‌گردد که با گذر از آستانه آنها، سازه خواسته‌ها و نیازهای بهره‌برداری و عملکردی طرح را ارضا ننماید.

۵-۲-۶-۱- دسته‌بندی حالات حدی

حالات حدی به دو طبقه کلی زیر دسته‌بندی می‌شوند:

الف)حالات حدی نهایی؛

ب) حالات حدی خدمت‌رسانی.

حالات حدی نهایی به حالاتی اطلاق می شود که با ایمنی سازه و سکنه و در موارد حایز اهمیت با محتویات سازه سروکار دارد. حالات حدی خدمت‌رسانی به عملکرد سازه یا اعضا یا اجزای متناسب با کاربری مورد نظر، رفاه بهره‌برداران و وضعیت ظاهری سازه مرتبط می‌باشند.

۵-۲-۶-۲- تشخیص نوع تحلیل با توجه به حالت طراحی مورد نظر

بسته به حالت طراحی مورد نظر حالات حدی نهایی یا حالت حدی خدمت‌رسانی، باید متناسب با آن، تحلیل مورد نظرانتخاب شود.

۵-۳- مدل‌سازی

۵-۳-۱- مدل‌سازی مجموعه

مدل مجموعهٔ سازه فضاکار عبارت‌است از یک مدل مجازی (ریاضی) از سازه واقعی که بتوان با درنظر گرفتن اجزا و عوامل مؤثر در آن، با دقت مناسبی رفتار سازه را پیش‌بینی نمود. مدل‌سازی مجموعه که برای تحلیـل به قصد اخذ نتایج قابل اعتماد ضروری می‌باشد، شامل مدل‌سازی اجزای سـازه‌ای، مدل‌سازی مکانیکی، مدل‌سازی هندسی، مدل‌سازی‌کنش‌های مـؤثر و مدل‌سازی اجـزای به‌ظاهر غیرسازه‌ای در شرایطی که با سازه به‌صورت مختلط عمل می‌نمایند و در رفتار سازه تأثیر گذارند. نکته اساسی در مدل‌سازی پرهیز از انتخاب مدل کاملاً جامع در شروع مراحل تحلیل و طراحی می‌باشد. توصیه می‌شود که مدل‌سازی با مدل‌های ساده‌تر شروع و سپس بسته به دقت مورد نظر از مدل‌های کامل تر و پیچیده‌تر استفاده شود.

۵-۳-۲- مدل‌سازی اجزای سازه‌ای

اجزای سازه‌ای به اجزایی اطلاق می‌گردد که نقش باربری در سازه دارند و در فرایند اعمال عوامل و بارهای موثر ضمن تحمل بارهای وارده نقش انتقال آنها را به زمین دارند. این اجزای شامل اعضای، پیوندهها و اتصالات، تکیه‌گاه‌ها و پوشانه‌ها می‌باشند.

۵-۳-۲-۱- مدل‌سازی اعضا: در سازه‌های فضاکار شبکه‌ای، به‌طورمعمول اعضا شامل اعضای خرپایی یا اعضای تیر ـ ستونی می‌باشند.

۵-۳-۲-۱-۱- اعضای خرپایی به اعضایی اطلاق می‌گردد که فرض مفصلی بودن ابتدا و انتهای عضو در مورد آنها صادق است. معیار انتخاب مفصلی بودن اتصال در فصل ششم ـ بند ۶-۳-۲-۱-۱ ذکر شده است. به منظور مدل‌سازی اعضای خرپایی بسته به میزان دقت تحلیل، مشخصات لازم باید در مدل‌سازی لحاظ شود. اگر نوع تحلیل خطی باشد (ر.ک. بند ۵-۴ ، روش‌های تحلیل)، در این صورت طول عضو، مدول الاستیسیته مصالح، مشخصات سطح مقطع و درصورت نیاز چگالی مصالح عضو در مدل‌سازی تعریف می‌شود.

اگر نوع تحلیل غیرخطی باشد (ر.ک. بند ۵-۴، روش‌های تحلیل)، در این صورت پاسخ سازه‌ای تنش محوری ـ کرنش محوری عضو بسته به اینکه فشاری یا کششی باشد، باید با استفاده از روش‌های مناسب پیش‌بینی و در مدل‌سازی لحاظ شود.

۵-۳-۲-۱-۲- اعضای تیر ستون به اعضایی اطلاق می‌گردند که حداقل یکی از دو انتهای عضو نیمه‌گیردار یا گیردار باشند و نحوهٔ هم‌بندی اعضا به‌گونه‌ای باشد که آثار خمش و برش در آنها قابل اعتنا باشد. معیار انتخاب نیمه‌گیردار یا گیرداربودن اتصال در فصل ششم ـ بند۶ـ۳ـ۲ـ۱ـ۲ ذکر شده است. مشخصات مورد نیاز اعضای مذکور باید مطابق با نظریه تیرـ ستون در مدل‌سازی لحاظ گردد. بسته به نوع مقطع، نوع تغییرشکل‌های غالب از نظریه اویلرـ برنولی یا نظریه تیموشنکو بهره‌گیری خواهد شد.

۵-۳-۲-۲- مدل‌سازی پیوندها و اتصالات

اتصالات برحسب نوع و رفتار آنها به سه طریق مدل‌سازی می‌شود: اتصال مفصلی، اتصال صلب و اتصال گیردار

۵-۳-۲-۲-۱- اتصال مفصلی و صلب بر اساس قیود تغییرشکل در آنها به طور معمول مدل‌سازی می‌شود.

۵-۳-۲-۲-۲- اتصال نیمه‌صلب به صورت یک عضو مستقل در انتهای عضو و یا به‌صورت عضو با رفتار اصلاح‌شده مدل‌سازی می‌شود. در هرحالت اتصال نیمه‌صلب، بسته به نوع تحلیل و سطح بارگذاری بر اساس رفتار خطی و غیرخطی و به‌صورت یک فنر متناظر با تغییر شکل مورد انتظار مدل‌سازی می‌شود.

در صورت قابل اعتنابودن تغییرشکل‌های ادوات، اجزا و وسایل اتصال و پیوندها، این آثار نیز پس از شناخت ویژگی‌های رفتاری باید به منظور تخمین واقع‌گرایانه رفتار مجموعه سازه و اعضای منتهی به چنین اتصالاتی، ملحوظ گردند. معمولاً چنین آثاری به صورت فنرهای خطی یا در صورت لزوم غیرخطی مدل‌سازی می‌گردند.

۵-۳-۲-۳- تکیه‌گاه‌ها: تکیه‌گاه‌ها بر حسب نوع و رفتار آنها به سه طریق مدل‌سازی می‌شوند. تکیه‌گاه ساده، تکیه‌گاه صلب و تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر.

۵-۳-۲-۳-۱- تکیه‌گاه ساده و صلب براساس قیود تغییرشکل در آنها به طور معمول مدل‌سازی می‌شوند.

۵-۳-۲-۳-۲- تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر شامل انواع تکیه‌گاه‌های الاستومری، برگه‌ای، قابلمه‌ای و غیره که در فصل چهارم ـ بند ۴ـ۸ تعریف شده‌اند، مدل‌سازی می‌شوند. تکیه‌گاه شکل‌پذیر، بسته به نوع تحلیل و سطح بارگذاری براساس رفتار خطی و غیرخطی به صورت یک فنر یا مجموعه‌ای از فنرها و یا یک المان متناظر با تغییرشکل‌های ممکن تکیه‌گاه مدل‌سازی می‌شوند. هرگاه تکیه‌گاه‌ها دارای میرایی قابل توجه باشند، تحلیل غیرخطی مجموعه سازه و تکیه‌گاه تحت تأثیر بارهای دینامیکی و به‌ویژه آثار ناشی از زلزله الزامی است.

۵-۳-۲-۴- پوشانه‌ها: پوشانه‌ها در صورتی که به عنوان یک عضو سازه‌ای رفتار نمایند، بسته به نوع مشخصات و رفتار آنها به صورت غشایی یا پوسته‌ای مدل‌سازی می‌شوند.

۵-۳-۳- مدل‌سازی مکانیکی: مدل‌سازی مکانیکی به مدل‌سازی رفتار مصالح و سیستم‌های مکانیکی اطلاق می‌شود.

۵-۳-۳-۱- مدل‌سازی رفتار مصالح: مصالح بسته به نوع تحلیل و سطح و نوع بارگذاری که در بند ۵ـ۴ آمده است و براساس نتایج آزمایش به صورت الاستیک یا فرا الاستیک مدل‌سازی می‌شوند.

۵-۳-۳-۱-۱- رفتار الاستیک مصالح بر اساس قانون هوک تعیین می‌شود.

۵-۳-۳-۱-۲- رفتار فرا الاستیک بر اساس نوع مصالح به صورت الاستیک ـ پلاستیک کامل یا الاستوپلاستیک همراه با سخت-شدگی کرنشی تعریف می‌شود. بـراساس نوع مصالح و نوع و سطح بارگذاری، در تحلیـل سیکلیک سخـت‌شدگی را می‌توان به‌صورت سینماتیک، ایزوتروپیک و یا آمیخته فرض شود که در این حالت رفتار پسماند مصالح نیز به صورتی مناسب تعریف نمود.

۵-۳-۳-۱-۳- برای سازه‌های مشمول این آیین‌نامه که از نوع مصالح فولادی می‌باشند، در مدل‌سازی رفتار فرا الاستیک مصالح، معیار تسلیم فن‌میسس مورد استفاده قرار داده می‌شود.

۵-۳-۳-۲- مدل‌سازی سیستم‌های مکانیکی: سیستم‌های میراگر و سیستم‌های اتلاف‌گر و جاذب انرژی براساس مشخصات مکانیکی آنها به طریقه‌ای مناسب مدل‌سازی می‌شوند. در مدل‌سازی سیستم‌های مکانیکی مذکور، منحنی‌های رفتاری نیرو- تغییر مکان یا لنگر- دوران مربوط به آنها که از نتایج آزمایش استخراج شده‌اند، در نظر گرفته می‌شوند.

۵-۳-۴- مدل‌سازی هندسی سازه: هندسه سازه که بیانگر مختصات گـره‌ها، نحـوه اتصال آنها و توپولوژی سازه می‌باشند به‌نحوی مناسب و با دقت کافی باید مدل‌سازی شوند. از آنجایی‌که هندسه سازه‌های فضاکار غالباً پیچیده و تعداد اعضای آنها زیاد می‌باشد استفاده از جبر فرمکسی و نرم‌افزار مربوط (فُرمییَن) می‌تواند مفید باشد.

۵-۳-۵- مدل‌سازی کنش‌ها و بارهای مؤثر: کنش‌های مؤثر بر سازه‌های فضاکار در فصل سوم مورد بحث قرار داده شده‌اند.

۵-۳-۵-۱- مدل‌سازی بارهای مؤثر: بارهای مؤثر بر سازه که شامل عوامل مستقیم (نظیر بارهای مرده، بارهای زنده، بار برف، بار باد و بار زلزله) و عوامل و بارهای اجرایی و بارهای ویژه (نظیر بارهای دینامیکی ویژه، آثار ناشی از تغییر دما، اختلاف نشست، نامیزانی، پیش‌تنیدگی، وادادگی، رانش خاک، جریان آب و آثار موج و یخ، نیروهای شناوری و بارهای تابع تغییرشکل سازه) می‌باشنـد، براساس فصل سوم، تعیین و بسته به‌نـوع و موقـعیت بارهـای موثر، به صورت گسترده بر عضو یا پوشانه سازه‌ای و یا به‌صورت متمرکز در گره‌ها مدل‌سازی می‌شوند.

۵-۳-۵-۲- مدل‌سازی آثار ناکاملی‌ها: ناکاملی‌ها در سازه‌های فضاکار که شامل ناکاملی‌های هندسی (نظیر انحراف اولیه اعضا، انحراف گره‌ها از هندسه ایده‌آل) و ناکاملی‌های مکانیکی (نظیر تنش‌های پسماند، خروج از مرکزیت‌های اتفاقی در بارهای وارده، نیروهای اضافی اعضا، ناشی از عدم انطباق) می‌باشند، براساس بند ۵-۲-۲ ، به صورتی واقع‌گرایانه مدل‌سازی می‌شوند.

۵-۳-۶- مدل‌سازی اجزای غیرسازه‌ای: اجزای غیرسازه‌ای به اجزایی اطلاق می‌شود که در باربری و ایستایی سازه نقشی نداشته و یا نقشی ناچیز دارند. اجزای غیرسازه‌ای به طور مستقیم در مدل‌سازی سیستم لحاظ نمی‌شوند. امـا بسته به اثرات آنها به صورت جرم‌افزوده و یا بارهای ثقلی و یا اثرات ثانویه (نظیر اثر ضربه سقف‌های کاذب بدون مهاربندی‌های کافی) بایـد در مدل‌سازی در نظر گرفته شوند. در حالاتی که اجزای به‌ظاهر غیرسازه‌ای به‌صورت مختلط با سازه فضاکار عمل نموده و در رفتار سازه تأثیرگذار باشند، ضمن آنکه نمی‌توان آنها را اجزای غیرسازه‌ای به‌شمار آورد، باید آثار آنها در رفتار مجموعه سازه و رفتارهای موضعی ملحوظ

گردد. به‌طوری که در فصل اول ذکر شد، سازه‌های فضاکار شبکه‌ای که با پوشانه‌ها یا اجزای دیگر به‌صورت مختلط عمل می‌نمایند، از دامنهٔ شمول این آیین‌نامه خارج‌اند.

۵-۳-۷- مدل‌سازی ریاضی: مدل‌سازی ریاضی یک مدل مجازی از سازه واقعی است که رابطه بین اجزای سازه، مشخصات مکانیکی، هندسه سازه، عوامل و بارهای مؤثر و پاسخ سازه را تبیین می‌کند. تنها نتایج تحلیل مدل ریاضی قابل اعتماد، پاسخ مناسبی از سازه را با دقت قابل قبولی در مقایسه با مدل واقعی سازه و یا مدل کاملاً جامع سازه پیش‌بینی خواهد نمود. برای تعیین پاسخ مورد نظر با دقت کافی و حداقل هزینه می‌توان از مدل‌های ریاضی ساده و تدقیق شده استفاده کرد. در حالت کلی روش‌های مدل‌سازی ریاضی به ۳ روش عمده تحلیلی، تحلیل معمول ماتریسی سازه و تحلیل عناصر محدود طبقه‌بندی می‌شوند.

روش تحلیلی با توجه به پیچیدگی سازه‌های فضاکار، کارایی لازم و مطلوبی در سازه‌های فضاکار ندارد. بنا به‌دلایل زیر روش‌های عناصر محدود روش جامعی است که می‌تواند به عنوان یک تکنیک کارآمد و مناسب برای مدل‌سازی ریاضی سازه‌های فضاکار مورد استفاده قرار گیرد.

تفسیر- *روش‌های جدید مورد استفاده در تحلیل الاستوپلاستیک سازه‌ها نظیر روش‌های انتگرال‌گیری تنش روش‌های اعمال سخت‌شدگی سینماتیک و ایزوتروپیک، روش‌های استخراج روابط تنش ـ کرنش پلاستیک به گونه‌ای ایجاد و توسعه یافته‌اند که کاربرد و پیاده‌سازی آنها در تحلیل‌های عناصر محدود، ساده و آسان و در عین حال بسیار مؤثر و کارآمد می‌باشد.*

برای تحلیل غیرخطی خرابی سازه‌های فضاکار دولایه، باید رفتار بار محوری ـ تغییرمکان محوری اعضای فشاری را از پیش تعیین نمود. پاسخ بار محوری ـ تغییرمکان محوری عضو فشاری را می‌توان بعداً برای مدل‌نمودن رفتار عضو در تحلیل غیرخطی خرابی سازه به کار برد. معمولاً کارایی روش عناصر محدود برای یافتن پاسخ اعضای فشاری مطلوب‌تر از سایر روش‌های مورد استفاده می‌باشد. به‌ویژه برای وضعیت‌های پیچیده در اعضای فشاری نظیر غیرخطی مصالح، غیرخطی هندسی و کمانش موضعی ثابت شده است که روش عناصر محدود کارآمد و مناسب بوده و به نتایج قابل اعتمادی منجر می‌گردد.

۵-۴- روش‌های تحلیل

گام اصلی در تحلیل و طراحی مهندسی، انتخاب نوع و سطح تحلیل می‌باشد. برحسب سازه مورد نظر، نوع بارگذاری و نوع پاسخ سازه، نوع و سطح تحلیل انتخاب می‌شود و ضروری است که برای پیش‌بینی پاسخ، روش تحلیل مورد نظر مطمئن و مؤثر برگزیده شود. به عبارت دیگر روش تحلیلی مورد نظر است که منجر به پاسخ سازه با دقت کافی و حداقل هزینه گردد. تحلیل در حد قابل اعتماد تحلیلی است که پاسخ ناشی از آن از دقت قابل قبولی در مقایسه با پاسخ تحلیل کاملاً جامع ـ که شامل تمامی اثرات غیرخطی و مدل‌سازی‌های دقیق و پیچیده تمامی اجزای سازه می‌باشد ـ برخوردار باشد یا با نتایج آزمایش‌های مربوط تطابق نزدیکی داشته باشد. توصیه اکید، پرهیز از انتخاب تحلیل کاملاً جامع در شروع مراحل تحلیل و طراحی می‌باشد. بالعکس توصیه می‌شود که تحلیل و طراحی با روش‌ها و مدل‌های تحلیل ساده‌تر (به عنوان مثال تحلیل خطی یا تحلیل فرا الاستیک مدل‌های ساده‌سازی‌شده سیستم) شروع شود و در مراحل بعدی از مدل‌ها و روش‌های تحلیل تفضیلی‌تر به قصد تدقیق نتایج تحلیل پیچیده‌تر استفاده شود. در این صورت با انباشت اطلاعاتی که از تحلیل‌های ساده‌تر به دست می‌آوریم، قضاوت در مورد نوع تحلیل انتخابی برای مؤثر و مطمئن بودن آن به راحتی و با اطمینان انجام می‌گیرد.

۵-۴-۱- روش‌های تحلیل بر اساس نوع بار و پاسخ سازه

بسته به نوع بارگذاری (تابع زمان بودن و نبودن بارگذاری)، آثار ناشی از کنش‌های مؤثر بر سازه (پاسخ سازه) و با مقایسه مشخصه‌های دینامیکی بار و مشخصه دینامیکی سازه (به ویژه بسامد سازه) تحلیل به صورت استاتیکی یا دینامیکی انجام می‌گیرد.

۵-۴-۱-۱- تحلیل استاتیکی

در صورتی که آثار ناشی از کنش‌های مؤثر بر سازه (پاسخ سازه) مستقل از زمان باشد یا شتاب ایجاد شده در سازه بالنسبه ناچیز باشد تحلیل سازه به روش استاتیکی کفایت خواهد نمود.

۵-۴-۱-۲- تحلیل دینامیکی

در صورتی که آثار ناشی از کنش‌های مؤثر (پاسخ سازه) تابع زمان بوده یا به عنوان متغیر کلیدی در تعیین پاسخ سازه ایفای نقش نماید و شتاب ایجادشده در سازه قابل ملاحظه باشد، باید تحلیل سازه به روش دینامیکی انجام شود.

۵-۴-۲- دسته‌بندی تحلیل استاتیکی

تحلیل استاتیکی بسته به شرایط، نوع سازه، نوع بارگذاری و معیارهای طراحی و مشخصات مصالح، ویژگی‌های هندسی و نوع عوامل تأثیرگذار در رفتار غیرخطی که در بند ۵ـ۲ـ۴ـ۱ ذکر گردید، به صورت خطی یا غیرخطی انجام می‌گیرد.

۵-۴-۲-۱- تحلیل خطی

تحلیل سازهٔ فضاکار برای حالات حدی "بهره برداری" به‌طور معمول در چارچوب رژیم الاستیک خطی صورت می‌گیرد.

۵-۴-۲-۱-۱- در حالت حدی بهره‌برداری، با توجه به عملکرد سازه یا اجزای آن، وضعیت ظاهری و رفاه بهره‌برداران، می‌توان تحلیل خطی یا غیرخطی را انتخاب نمود.

۵-۴-۲-۱-۲- در تحلیل الاستیک خطی، اثرات کنش‌های غیرمستقیم را می‌توان به طور صریح با اعمال تغییرشکل‌های مربوطه یا به صورت نیروهای معادل اعمال نمود.

۵-۴-۲-۱-۳- متناسب با نوع و هندسه سازه، نوع بارگذاری، درصورت لزوم آثار ناکاملی مطابق بند ۵ـ۲ـ۲ و آثار انعطاف‌پذیری اتصالات و پیوندها مطابق بند ۵ـ۲ـ۳ در تحلیل اعمال می‌شود.

۵-۴-۲-۲- تحلیل غیرخطی

در شرایطی که حالت حدی نهایی به عنوان حالت طراحی مبنای عمل قرار می‌گیرد، با توجه به اهمیت سازه‌های فضاکار، انجام تحلیل غیرخطی که شامل اثرات غیرخطی هندسی و مصالح می‌باشد، الزامی است. در صورتی که به تشخیص مرجع کنترل طراحی، سازهٔ فضاکار از اهمیت کمتری برخوردار باشد، می‌توان در حالت حدی نهایی نیز به تحلیل خطی اکتفا نمود.

۵-۴-۲-۲-۱- تحلیل غیرخطی با توجه به مراتب تأثیر کنش‌های اصلی در رفتار سازه‌های فضاکار که در بند ۵ـ۲ـ۴ـ۲ به آنها اشاره شد و نیز (در حالت حدی بهره‌برداری) با توجه به بند ۵ـ۴ـ۲ـ۱ـ۱ به یکی از سه صورت زیر انجام می‌گیرد:

الف) تحلیل غیرخطی صرف هندسی؛

ب) تحلیل غیرخطی صرف مصالح؛

پ) تحلیل غیرخطی توأم هندسی و مصالح.

۵-۴-۲-۲-۲- در تحلیل غیرخطی در سازه‌های فضاکار باید ملاحظات زیر را در نظر گرفت:

الف) به طور معمول تحلیل غیرخطی به صورت نموی ـ تکراری انجام می‌گیرد.

ب) در تحلیل تکراری متناسب با نوع هندسه سازه، رواداری‌های مناسب برحسب تغییرمکان یا نیرو یا انرژی درنظر گرفته می‌شوند. توصیه می‌شود رواداری بر حسب انرژی در نظر گرفته شود.

پ) همچنین توصیه می‌شود از روش تکراری نیوتون ـ رافسون (به صورت تام یا تعدیل یافته) استفاده شود.

ت) در تحلیل غیرخطی مصالح یا غیرخطی توأم هندسی و مصالح برای سازه‌های فضاکار فولادی، معیار فن میسس به عنوان معیار تسلیم توصیه می‌شود.

ث) در صورتی که نوع بارگذاری وارد بر سازه فضاکار در حالت استاتیکی مستلزم پاسخ چرخه‌ای (رفت و برگشتی) باشد، توصیه می‌شود از قاعده سخت‌شوندگی سینماتیک، ایزوتروپیک یا سخت‌شوندگی آمیخته (ایزوتروپیک و سینماتیک) بسته به مشخصات مصالح و عوامل مؤثر بر رفتار غیرخطی مصالح استفاده شود.

ج) آثار ناکاملی‌های هندسی و مکانیکی مطابق بند ۵-۲-۲ در تحلیل اعمال می‌شود.

چ) آثار انعطاف‌پذیری اتصالات و پیوندها مطابق بند ۵-۲-۳ در تحلیل اعمال می‌شود.

۵-۴-۲-۳- تحلیل ناپایداری (استاتیکی)

پایداری سازه‌ای مجموعهٔ سازه فضاکار و همچنین اعضا و اجزای تشکیل‌دهنده آن باید با سطح اطمینان کافی تأمین شود. به منظور ارضای معیارهای حالات حدی نهایی مرتبط با پایداری، تحلیل مجموعه سازه از دیدگاه ناپایداری سازه‌ای صورت می‌گیرد. تحلیل ناپایداری هنگامی به صورت استاتیکی انجام می‌گیرد که:

الف) آثار ناشی از عوامل مؤثر بر سازه (پاسخ سازه) مستقل از زمان باشد؛

ب) شتاب ایجادشده در سازه بالنسبه ناچیز باشد؛

پ) اثر ناپایداری موضعی رخ داده در سازه دینامیکی نباشد (به عنوان مثال در حالت کمانش عضوی در سازه‌های فضاکار دو و چندلایه، اگر سختی سازه باقیمانده از سختی منفی پس کمانشی آن عضو فشاری کمانش یافته بیشتر باشد)؛

ت) اثر دینامیکی ناپایداری موضعی رخ داده در سازه بالنسبه ناچیز باشد (به عنوان مثال در حالت ناپایداری گرهی، اگر انرژی جنبشی آزادشده در مقایسه با کل کار انجام یافته ناچیز باشد).

۵-۴-۲-۳-۱- در انجام تحلیل ناپایداری استاتیکی در سازه‌های فضاکار باید ملاحظات زیر را در نظر گرفت:

الف) در تحلیل ناپایداری استاتیکی سازه‌های فضاکار، آثار غیرخطی هندسی و مصالح به صورت توأم باید در نظر گرفته شوند.

ب) رعایت همه ملاحظاتی که برای تحلیل غیرخطی استاتیکی در بند ۵ـ۴ـ۲ـ۲ـ۲ ذکر شد، الزامی است.

پ) در تحلیل نموی ـ تکراری غیرخطی ناپایداری باید از الگوریتم‌های مؤثر و کارآمدی برای کشف نقاط حـدی و نقاط دوشاخگی استفاده شود.

ت) روش‌های تکراری نیوتون ـ رافسون در همسایگی نقاط بحرانی فاقد کارایی و توانایی لازم می‌باشند. هنگامی که ماتریس سختی به حالت تکینگی نزدیک می‌شود، توصیه می‌گردد که برای غلبه بر این مسأله و دنبال نمودن مسیرهای تعادل و گذر از نقاط بحرانی به محدوده فرا بحرانی از روش‌های مبنی بر طول کمان استفاده شود.

ث) برای به دست آوردن پاسخ سازه در حالت ناپایداری دوشاخگی، باید از الگوریتم‌های کارآمد منعکس‌کننده تعویض مسیر در نقطه دوشاخگی استفاده شود.

ج) در تحلیل‌های ناپایداری استاتیکی، توجه کافی به استخراج مودهای ناپایداری شامل ناپایداری عضوی، ناپایداری گرهی، ناپایداری پیچشی گرهی، ناپایداری ترکیبی عضوی ـ گرهی، ناپایداری در امتداد مسیر و ناپایداری عمومی مبذول شود.

تفسیر- *برای شناخت مودهای ناپایداری به پیوست ۴ مراجعه شود.*

چ) در تحلیل‌های ناپایداری استاتیکی، باید به استخراج مکانیزم‌های خرابی ـ که نقش قابل ملاحظه‌ای در طراحی ایمن و با قابلیت اعتماد کافی سازه فضاکار دارند ـ پرداخت شود. مکانیزم‌های خرابی را در یک دسته‌بندی کلی می‌توان به سه رده زیر طبقه‌بندی کرد:

ناپایداری کلی:

ناپایداری موضعی بدون اثر دینامیکی:

ناپایداری موضعی با اثر دینامیکی (از نوع فروجهش گرهی، از نوع فروجهش عضوی، از نوع ناپایداری توأم عضوی ـ گرهی)

تفسیر- *برای شناخت مفاهیم فروجهش گرهی، فروجهش عضوی و ناپایداری ترکیبی عضوی ـ گرهی به پیوست۴ مراجعه شود.*

در صورتی که مکانیزم خرابی از نوع ناپایداری موضعی با اثر دینامیکی باشد، باید تحلیل ناپایداری با ملحوظداشتن آثار دینامیکی صورت گیرد.

۵-۴-۳- دسته‌بندی تحلیل دینامیکی

تحلیل دینامیکی بسته به شرایط، نوع سازه، سطح و نوع بارگذاری، معیارهای طراحی و مشخصات مصالح، ویژگی‌های هندسی و نوع عوامل تاثیر گذار در رفتار غیرخطی که در بند ۵ـ۲ـ۴ـ۱ ذکر گردید، به صورت خطی یا غیرخطی انجام می گیرد.

۵-۴-۳-۱- نحوه تحلیل دینامیکی خطی

برای سازه‌های فضاکار که تحت بار تابع زمان و یا هر اثر دینامیکی دیگر رفتار خطی از خود نشان می‌دهند، اساساً دو روش تحلیل وجود دارد:

الف– تحلیل مودی (مودال)،

ب– تحلیل تاریخچه زمانی.

تفسیر- *متناسب با نوع و هندسه سازه و نوع بارگذاری، در صورت لزوم، آثار ناکاملی مطابق بند ۵ـ۲ـ۲ و آثار انعطاف‌پذیری اتصالات و پیوندهها مطابق بند ۵ـ۲ـ۳ در تحلیل اعمال می‌شود.*

۵-۴-۳-۱-۱- روش تحلیل مودی (مودال)

در این روش، تحلیل دینامیکی سازه با فرض رفتار خطی آن انجام‌شده و یک سازهٔ فضاکار با n درجه آزادی به n سیستم یک درجه آزادی تبدیل می‌شود. به این منظور ابتدا با تحلیل ارتعاش آزاد، بسامدهای طبیعی و مودهای ارتعاش آزاد سازهٔ فضاکار محاسبه می‌شود. تبدیل یک سیستم n درجه آزادی به n سیستم یک‌درجه آزادی بر اساس خاصیت تعامد مودها انجام می‌گیرد.

۵-۴-۳-۱-۱-۱- تعداد مودهای ارتعاشی

مشارکت هر کدام از مودها در پاسخ کل سازه فضاکار متفاوت می‌باشد و با توجه به دقت مهندسی لازم نیست سهم تمام n مود محاسبه گردد؛ بلکه کافی است تمامی مودهای ارتعاشی را که مجموع جرم‌های مؤثر آنها بیشتر از۹۰ درصد جرم کل سازه است، مورد استفاده قرار داد.

تفسیر- *در سازه‌های فضاکار بر خلاف بسیاری از سازه‌های متعارف، در حالت کلی، ممکن است تنها منظورداشتن مودهای اولیه در پاسخ سازه کفایت نداشته و بسته به نوع سیستم احتمال دارد مودهای بالاتر سهم عمده‌تری در پاسخ داشته باشند. لذا مودهای مؤثر باید در تحلیل طیفی به نحوی که در این بند مقرر گردیده، مدنظر قرار گیرند.*

۵-۴-۳-۱-۱-۲- ترکیب آثار مودها

با توجه به مقادیر کمیت‌های مشخصهٔ ارتعاش آزاد سازه باید یکی از روش‌های متداول ترکیب مودها (روش جذر مجموع مربعات یا ترکیب کوادراتیک کامل) برای محاسبه آثار ترکیب مودها به‌کار گرفته شود.

۵-۴-۳-۱-۲- روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی

در این روش، تحلیل دینامیکی سازه با حل معادله حرکت سازهٔ فضاکار با استفاده از یکی از روش‌های عددی متداول (مانند انتگرال‌گیری عددی مستقیم) انجام می‌شود.

۵-۴-۳-۲- تحلیل دینامیکی غیرخطی

در شرایطی که حالت حدی نهایی به عنوان حالت طراحی، مبنای عمل قرار می‌گیرد، با توجه به اهمیت سازه‌های فضاکار، انجام تحلیل غیرخطی که شامل اثرات غیرخطی هندسی و مصالح می‌باشد، الزامی است. صرفاً در صورتی می‌توان به تحلیل خطی اکتفا نمود که با توجه به جمیع جهات، از جمله میزان اهمیت سازه، مراتب به تأیید کارفرما رسیده باشد.

۵-۴-۳-۲-۱- تحلیل غیرخطی با توجه به مراتب تأثیر عوامل اصلی در رفتار سازه‌های فضاکار که در بند ۵ـ۲ـ۴ـ۲ به آنها اشاره شد و نیز (در حالت حدی بهره برداری) با توجه به بند ۵ـ۴ـ۲ـ۱ به یکی از سه صورت زیر انجام می‌گیرد:

الف) تحلیل غیرخطی صرف هندسی؛

ب) تحلیل غیرخطی صرف مصالح؛

پ) تحلیل غیرخطی توأم هندسی و مصالح.

۵-۴-۳-۲-۲- در انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی در سازه‌های فضاکار باید ملاحظات زیر را در نظر گرفت:

الف) تحلیل غیرخطی به صورت نموی ـ تکراری انجام می‌گیرد.

ب) هنگام استفاده از روش‌های عددی، انتخاب گام زمانی با توجه به میزان دقت مورد نظر و نیل به پایداری عددی و همگرایی در تحلیل صورت می‌گیرد. گام زمانی بسته به نوع روش عددی مورد استفاده و شرایط حاکم بر طرح انتخاب می‌گردد.

پ) در تحلیل دینامیکی غیرخطی بسته به نوع مسأله و شرایط بارگذاری از یکی از روش‌های ضمنی و یا صریح استفـاده می‌شود.

ت) در تحلیل تکراری، متناسب با نوع و هندسه سازه، رواداری‌های مناسب بر حسب تغییرمکان یا نیرو یا انرژی در نظر گرفته می‌شود. استفاده از رواداری بر حسب انرژی در اغلب موارد ارجح است.

ث) در تحلیل‌های غیرخطی مصالح یا غیرخطی توأم هندسی و مصالح برای سازه‌های فضاکار فولادی، معیار فن میسس به عنوان معیار تسلیم توصیه می‌شود.

ج) استفاده از قاعده سخت‌شوندگی سینماتیک، ایزوتروپیک سخت‌شوندگی آمیخته (ایزوتروپیک و سینماتیک توأم) بسته به مشخصات مصالح و عوامل غیرخطی توصیه می‌شود.

چ) آثار ناکاملی‌های هندسی و مکانیکی مطابق بند ۵ـ۲ـ۲ در تحلیل اعمال می‌شود.

ح) آثار انعطاف‌پذیری اتصالات و پیونده‌ها مطابق بند ۵ـ۲ـ۳ در تحلیل اعمال می‌شود.

۵-۴-۳-۳- تحلیل ناپایداری دینامیکی

تحلیل ناپایداری دینامیکی در دو حالت انجام می‌گیرد:

الف) در حالتی که بار تابع زمان باشد و ناپایداری در یک بار بحرانی به انضمام یک بسامد ارتعاش بحرانی مخالف صفر، در سازه رخ دهد، در این صورت ناپایداری از نوع دینامیکی می‌باشد. در این تحلیل‌ها پارامتری به نام پارامتر بار تعریف می‌شود. برای مقادیر کوچک پارامتر بار، سیستم دارای نوسانات کوچکی می‌باشد. دامنه حرکت پاسخ با افزایش بار به آرامی افزایش می‌یابد. در برخی از ترازهای بار، دامنه حداکثر پاسخ دارای جهش قابل ملاحظه‌ای خواهد بود که مقدار تراز بار متناظر با این جهش، به عنوان پارامتر بار بحرانی دینامیکی شناخته می‌شود.

ب) در حالتی که بار تابع زمان نبوده ولی پاسخ سازه دینامیکی می‌باشد (در فروجهش گرهی، فروجهش عضوی ـ در ناپایداری عضوی ـگرهی).

در سازه‌های فضاکار اغلب نوع دوم تحلیل ناپایداری دینامیکی انجام می‌شود، به عبارت دیگر هنگامی که ناپایداری موضعی ناشی از فروجهش گرهی یا فرو جهش عضوی یا ناپایداری از نوع توأم فروجهش گرهی و عضوی، آثار اثر دینامیکی به دنبال داشته باشد.

تفسیر- *تشخیص لزوم انجام تحلیل ناپایداری دینامیکی مطابق با بند ۵-۴-۲-۳ خواهد بود.*

۵-۴-۳-۱-۳- در انجام تحلیل ناپایداری دینامیکی (از نوع دوم) باید ملاحظه‌های زیر را در نظر گرفت:

الف) در تحلیل ناپایداری دینامیکی سازه‌های فضاکار، باید آثار غیرخطی هندسی و مصالح به صورت توأم درنظر گرفته شوند.

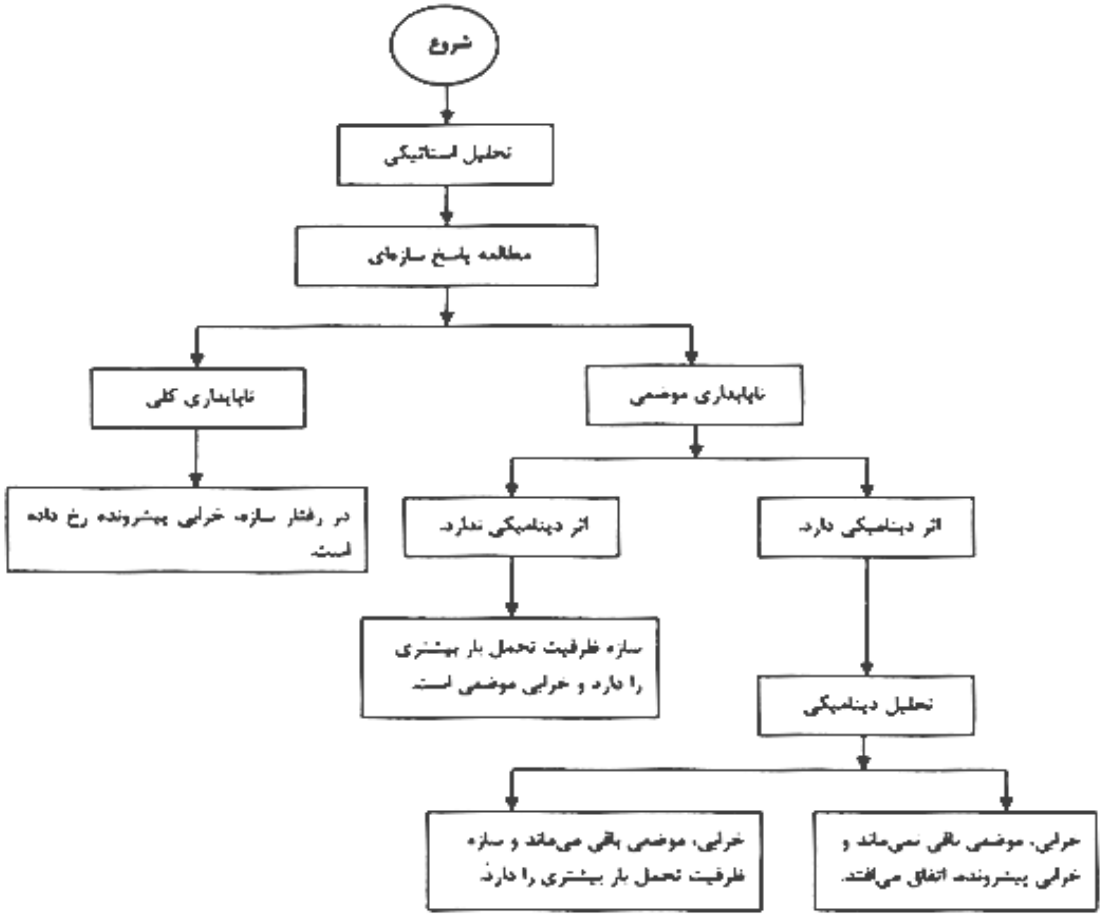
ب) رعایت تمامی ملاحظاتی که برای تحلیل غیرخطی دینامیکی در بند ۵ـ۴ـ۳ـ۲ـ۲ ذکر شد، الزامی است.

پ) توصیه می‌شود آثار انرژی جنبشی آزاد شده به دلیل وقوع فروجهش گرهی به‌ویژه در سازه‌های فضاکار تک‌لایه به نحو مناسبی در تحلیل دینامیکی اعمال شوند.

ت) توصیه می‌شود آثار انرژی جنبشی آزاد شده به دلیل وقوع فروجهش عضوی یا ناپایداری عضوی ـ گرهی به‌ویژه در سازه‌های فضاکار دو یا چندلایه پیش می‌آیند، به نحو مناسبی در تحلیل دینامیکی اعمال شوند

ث) در تحلیل ناپایداری دینامیکی سازه‌های فضاکار امکان وقوع خرابی پیشرونده باید به نحو مناسبی ارزیابی شود. خرابی پیشرونده را می‌توان به عنوان انتشار دینامیکی ناپایداری موضعی نظیر *"فروجهش گرهی"*، *"فروجهش عضوی"* یا ناپایداری *"عضوی ـ گرهی"* به کار برد.

تفسیر *در مورد ارزیابی و تشخیص وقوع خرابی پیشرونده در سازه‌های فضاکار می‌توان نگارهٔ روند عملیاتی زیر را مبنای عمل قرار داد.*



شکل ۵-۲

۵-۴-۴- تحلیل سازه‌های فضاکار به روش پاره‌سازه‌ها

اگرچه روش تحلیل چند مرحله‌ای پاره‌سازه‌ها به طور اعم در مورد هر نوع سازه‌ای قابل کاربرد می‌باشد، به طور اخص در مورد سازه‌های فضاکارِ دارای الگوی تکرارشونده و متشکل از واحـدها، مدول‌ها یا زیر مجموعه‌ها (پاره‌سازه‌ها)ی تکرارشونده بسیار کارا می‌بـاشد. چنین سازه‌های فضاکاری را سازه‌های فضاکار مدوله می‌نامند. بخش اعظم سازه‌های فضاکار شبکه‌ای احداث شده در سطح

جهانی، به‌گونه‌ای، در زمره سازه‌های فضاکار مدوله به‌شمار می‌روند. از مهمترین خواص این سازه‌ها قابلیت تولید انبوه صنعتی آن‌ها است. فرایند تحلیل پاره‌سازه‌ها در مواردی مفید خواهد بود که از نظر ملزومات مربوط به میزان حافظه کمبود وجود داشته باشد یا سازه به پاره‌سازه‌های تفکیک‌پذیری تقسیم شده باشد که توسط گروه‌های طراحی متفاوت بررسی می‌گردند. تقسیم‌بندی سازه به تعداد تحت کنترلی از پاره‌سازه‌هایی که بررسی آنها سهل‌تر از سازه کامل است، در پردازش نتایج نیز تسهیل خواهد نمود. در حالاتی که انتظام در الگوهای تکرارشوندهٔ واحدهای نمونه (مدول‌ها) در سازه برقرار باشد، این روش به‌ویژه کارا و مؤثر خواهد بود. همچنین در این حالات ماتریس‌های حاصله دارای بلوک‌های تکراری و از نظر ساختاری از نوع پراکنده می‌باشند که خود، به‌لحاظ امکان کاهش ملزومات مربوط به حافظه فعال، حایز اهمیت می‌باشد.

برنامه‌نویسی توفیق‌آمیز به منظور تحلیل چند مرحله‌ای پاره‌سازه‌ها عمدتاً مسأله‌ای تکنیکی در برنامه‌نویسی و ذخیره‌سازی و دستیابی به اطلاعات است. با سازماندهی مطلوب برنامه می‌توان مشکلات تکنیکی برنامه‌نویسی را از سر راه برداشت. با بهره‌گیری از خاصیت انتظام در سازه‌های مدوله و در نتیجه کاهش ملزومات حافظه، افزایش سرعت و کاهش تعداد عملیات محاسباتی و همچنین کاهش هزینه تحلیل با حفظ دقت نتایج، روش پاره‌سازه‌ها در تحلیل سازه‌های فضاکار مدوله توانمندی آشکاری در بر خواهد داشت.

تفسیر- *با استفاده از مفاهیم پاره‌سازه‌های مافوق و گره‌های مافوق، ماتریس‌های پاره سازه‌ها در تمامی مراحل تحلیل به صورت بلوک‌بندی‌شده با استفاده از روابط بزرگنمایی‌شده بین پاره‌سازه‌های مافوق، به سهولت تشکیل داده شده و در فرم ملخص ذخیره می‌گردند. با بهره‌گیری از مفاهیم جبر فرمکسی و در چارچوب ساختار جبر فرمکسی به منظور ساده‌سازیِ پردازش فرم‌های بخش‌بندی‌شده و ذخیره‌سازی ماتریس‌های بلوک‌بندی‌شده، تهیه و اصلاح داده‌ها ساده شده و فرایند سرهم‌بندی ماتریس‌های پاره سازه‌ها که بدواً امری بغرنج به نظر می‌رسید، به طور خود به‌خودی و به سادگی، قابل انجام است؛ بدون آنکه نیازی به اطلاعات مربوط به‌هم‌بندی پاره‌سازه‌ها در مراحل متفاوت تحلیل وجود داشته باشد. با اتخاذ روش ذخیره‌سازی اطلاعات به صورت فشرده و ارایه روش‌های کارا برای حل سیستم معادلات بلوک‌بندی‌شده مرتبط با ساختارهای مدوله سازه‌های فضاکار، محیط کامپیوتری و ابزار تحلیل کارایی را می‌توان برای تحلیل به روش پاره‌سازه‌ها برای سازه‌های مدوله ایجاد نمود که تعادل مناسبی بین ملزومات مربوط به سرعت محاسبات، حافظه مورد نیاز و امکانات تولید خود به خودی داده‌ها را در سطوح متفاوت هم‌بندی پاره‌سازه‌ها برقرار نماید. با توجه به مشکلاتی که برنامه‌نویس و تحلیلگر سازه در پردازش خواص توپولوژیک و هم‌بندی پاره‌سازه‌های متنوع در آنالیز چند مرحله‌ای سازه‌های بغرنج با آنها مواجه است، با استفاده از مفاهیم جبرفرمکسی، تئوری گراف، جبرخطی، ریاضیات منفصل و آنالیز عددی به‌ویژه روش اجزای محدود، شالوده‌های ریاضی برای تحلیل اجزاء محدود پاره سازه‌ها بنا نهاده شده که مشکلات مذکور در فوق را مرتفع ساخته است. همچنین با بهسازی روش‌های تولید اتوماتیک و ذخیره‌سازی داده‌ها و سرهم‌بندی دستگاه معادلات بلوک‌بندی‌شده و حل معادلات، ارتباطات توپولوژیک پاره‌سازه‌ها و ذخیره‌سازی و دسترسی به بلوک‌های اطلاعاتی در کلیه مراحل آنالیز، به نحو سیستماتیک و اتوماتیک قابل انجام است.*

از نتایج قابل حصول از سیستم و روش تحلیل پاره سازه‌ها در چارچوب جبر فرمکسی، ایجاد محیط نرم‌افزاری مناسب جهت تحلیل پاره سازه‌ها بخصوص پاره‌سازهای تکرارشونده (سازه‌های مدوله) می‌باشد. همچنین انواع الگوریتم‌های حل سیستم‌های مدوله در دسترس تحلیل‌گران دستگاه‌های معادلات بلوک‌بندی‌شده بوده و برای حل معادلات مربوطه به نحو کاراتر قابل استفاده خواهند بود. در چنین محیط نرم‌افزاری، پاره‌سازه‌های مبنا در واقع بسته‌های اطلاعاتی مناسبی هستند که برحسب فرمول فرمکسی ژنریک بیان می‌گردند. فرمکس‌های پاره‌سازه‌ها تلخیص گردیده و فرایند تلخیص سازگار با تلخیص ماتریسی مربوطه اعمال می‌گردد. فرایند هم‌بندی پاره‌سازه‌ها که امری بغرنج می‌رسید، ساده و سهل گردیده و به‌صورت اتوماتیک بدون ارایه اطلاعات و داده در مرحله‌های مختلف سرهم‌بندی پاره‌سازه‌ها انجام‌پذیر می‌گردد. در یک سیستم برنامه‌نویسی سازمان یافته، نرم‌افزار مورد نظر شامل یک برنامه کنترل‌کننده و مدول‌های: الف) داده‌های ورودی و خروجی قابل انتخاب، ب) مدول فرمکسی، پ) مدول هم‌بندی اجزای محدود و پاره‌سازه‌ها، ت) مدول فرمول‌بندی روش اجزای محدود و ث) مدول تلخیص و حل معادلات بلوک‌بندی‌شده می‌باشد و در واقع از جبر فرمکسی برای سازماندهی برنامه تحلیل سازه‌ها می‌توان بهره‌گیری نمود. به خصوص در مورد سازه‌های مدوله با تقارن انتقالی یا سیکلیک بهره‌گیری از این شیوه در تدوین برنامه کامپیوتری تحلیل به نحو بسیار سریع و با حداقل حافظه نتایجی بدون کاهش دقت به دست خواهد داد.

در تحلیل سازه‌ها به روش پاره‌سازه‌ها، با بهره‌گیری از جبرفرمکسی، قابلیت تحلیل کلی بدون نیاز به ارایه اطلاعات (اضافی) در مراحل متفاوت آنالیز فراهم می‌گردد و با دقت و بازدهی قابل توجهی تحلیل اجزای محدود صورت خواهد گرفت. در بسیاری از سازه‌های مهندسی و به‌ویژه سازه‌های فضاکار، نوعی از انتظام و تکرار واحدها یا مدول‌های تکرارشونده مشاهده می‌گردد. با استفاده از خواص ماهیتی این الگوهای تکرارشونده، قابلیت تحلیل بسیار سریع و با کارایی مطلوب در آنالیز سازه‌های مدوله فراهم می‌گردد. این امر به معنی سهولت تهیه داده‌ها، سهولت اصلاح داده‌ها، حداقل حافظه فعال مورد نیاز، حداقل تعداد عملیات لازم با استفاده از خاصیت تکراری بودن الگوها و در نتیجه صرفه‌جویی در فرایند تلخیص، ذخیره‌سازی و سرهم‌بندی مدول‌ها، پاره‌سازه‌ها و اجزای مافوق می‌باشد. این مزیت، تحلیل سازه‌های بغرنج و با درجات آزادی قابل ملاحظه را به صورتی اقتصادی عملی می‌سازد. در این زمینه می‌توان به مقالات ذیربط انتشاریافته در مجله بین‌المللی سازه‌های فضاکار، مجموعهٔ مقالات چهارمین و پنجمین کنفرانس بین‌المللی سازه‌های فضاکار و مجموعه مقالات نخستین کنفرانس ملی سازه‌های فضاکار، مندرج در فهرست مراجع این آیین‌نامه، مراجعه نمود.

۶

طراحی اعضـــا، اتصـــالات و تکیـــه‌گاه‌هـــا

۶-۱- کلیات

هر سازه فضاکار شبکه‌ای متشکل از تعداد قابل توجهی از اجزای گوناگون می‌باشد. این اجزا را می‌توان با توجه به رفتار آنها در مجموعه سازه به سه رده کلی اعضا، اتصالات و تکیه‌گاه‌ها تقسیم کرد.

اعضا، اضلاع تشکیل‌دهندهٔ شبکه سازه فضاکار می‌باشند که مطابق با بند ۴ـ۶ـ۱ دسته‌بندی می‌شوند.

اتصالات، عبارت‌اند از گره‌های شبکه سازه فضاکار که انتقال نیروهای بین اعضا را برعهده دارند و بسته به رفتاری که تحت اثر کنش‌ها بروز می‌دهند، دسته‌بندی می‌شوند.

تکیه‌گاه‌ها، گره‌هایی از شبکه سازه فضاکار می‌باشند که بارهای وارده بر سازه فضاکار را به شالوده پایه‌ها یا دیگر سازه‌ها یا ابنیه تکیه‌گاهی منتقل کرده و در عین حال از حرکت سازه فضاکار به‌صورت جسم صلب ممانعت به‌عمل می‌آورند.

نقش هر یک از این اجزا در عملکرد سازه در فرایند طراحی مجموعه تعیین می‌گردد و به‌عبارت دیگر رفتار هر جزء در رفتار مجموعه تأثیرگذار می‌باشد. از این‌رو شناخت رفتار هر یک از اعضا و اجزای سازه بخشی از فرآیند طراحی و تعیین کمّی نقش هر عضو در رفتار مجموعه و تعیین ابعاد هر عضو بخش دیگری از روند طراحی به‌شمار می‌روند.

تعیین ملاحظات و روابط ناظر بر رفتار هر یک از اجزای مذکور در فوق، موضوع این فصل آیین‌نامه می‌باشد. این روابط در سازگاری با مبانی نظری این آیین‌نامه و با توجه به مفاهیم حالات حدی نهایی و حالات حدی خدمت‌رسانی مورد بحث قرار داده می‌شوند و مقادیر این حالات حدی از طراحی مجموعه سازه فضاکار حاصل می‌گردند.

۶-۲- طراحی اعضا

این فصل معیارهای طراحی اعضای متداول در سازه‌های فضاکار فولادی شبکه‌ای را ارایه می‌دهد. برای طراحی اعضایی که در این فصل اشاره‌ای به آنها نشده است، باید به آیین‌نامه‌هایی که با مبانی و معیارهای این آیین‌نامه سازگاری دارند و پاسخگوی نیازهای طراحی اعضای مزبور باشند، مراجعه شود.

مجموعهٔ سازه فضاکار و تمامی اعضای تشکیل‌دهنده اصلی آن و اجزای الحاقی به اعضا مانند ورق‌های اتصال و مخروطی‌های انتهایی و همچنین قطعات اتصال و پیونده‌ها، باید معیارهای مقاومت و تغییرشکل و شرایط بهره‌برداری این فصل را در مقابل نیروهای طراحی نهایی و بهره‌برداری ارضا نمایند. عضو اصلی به عضوی از سازه فضاکار اطلاق می‌گردد که حذف آن، منجر به تغییر نیروهای وارده بر دیگر اعضا و اجزای سازه و همچنین تغییرشکل‌های سازه به‌میزانی افزون‌تر از ۲٪ گردد. عضوی که چنین تأثیری بر رفتار سازه فضاکار و سایر اعضا و اجزای آن نگذارد، عضوی فرعی محسوب خواهد شد.

" نیروی طـراحی" عضو سازه به نیروهای تقاضای حاصل از تحلیل که به‌منـظور طراحی عضو به‌کار گرفته می‌شود، اطـلاق می‌گردد. روش‌های متفاوت تحلیل سازه تحت تأثیر کنش‌های گوناگون در فصل ۵ تشریح گردیده‌اند. نیروهای طراحی هر مرحله از مدل تحلیلی باید برای حالات حدی نهایی و حالات حدی بهره‌برداری ذیربط با استفاده از مدل‌سازی واقع‌گرایانه هندسه، مصالح و شرایط تکیه‌گاهی به‌دست آیند.

۶-۲-۱- ضرایب کاهش مقاومت در طراحی به روش حالت حدی نهایی

برای تعیین ضرایب کاهش مقاومت در طراحی به روش حالت حدی نهایی برای هر حالت خاص با توجه به ماهیت نیروی حاکم (ر.ک. بند۶-۲-۳) به آخرین ویرایش "مقررات ملی ساختمان ایران ـ مبحث دهم: طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی" که براساس روش ضرایب بار و مقاومت (LRFD) تدوین گردیده، مراجعه شود.

۶-۲-۲- مقادیر حالات حدی بهره‌برداری

برای تعیین مقادیر حالات حدی بهره‌برداری مورد نظر از قبیل خیز، تغییرشکل، ارتعاش و غیره تحت اثر حالات ترکیبی بارهای بهره‌برداری (بدون ضریب)، به فصل ۴ آیین‌نامه مراجعه شود.

۶-۲-۳- طراحی اعضا بر اساس ماهیت نیروهای اعضا

۶-۲-۳-۱- طراحی اعضای تحت تأثیر نیروی محوری کششی

اعضای کششی به اعضایی از یک سازه فضاکار شبکه‌ای اطلاق می‌گردد که نیروی محوری کششی اصلی‌ترین نیروی وارد به آن عضو باشد. به‌این معنی که رفتار عضو به‌طور عمده تحت تأثیر کنش بوده سایر آثار وارده بر عضو مقادیر ناچیزی داشته باشند. طراحی اعضای کششی باید با توجه به نکات زیر انجام گیرد:

الف) طراحی با استفاده از روش حالت حدی نهایی انجام شود.

ب) مقطع خالص و مؤثر عضو مطابق با آیین‌نامه‌های معتبر (از جمله مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران) درنظر گرفته شوند.

پ) برش پارگی مطابق با آیین‌نامه‌های معتبر تعیین شود.

ت) در مورد اعضایی که انتهاهای آنها پرس شده‌اند، باید کنترل‌های موضعی بر اساس مبنای مکانیک سازه‌ها و ترجیحاً از طریق آزمایش به‌عمل آید.

ث) نسبت لاغری عضو کششی نباید از ۳۰۰ تجاوز نماید، ولی در صورتی‌که معیارهای طراحی و شرایط اجرایی در کلیه مراحل از قبیل حمل، ساخت و نصب اجازه دهند، می‌توان از این محدودیت با بهره‌گیری از میزان لازم پیش‌تنیدگی و مشروط به تایید مدیریت طرح، عدول نمود.

ج) در طراحی اعضای کششی، نیروهای پیش‌تنیدگی (پیش‌کشیدگی) قابل توجهی که ناشی از نوع طرح و یا به علت نحوه اجرا باشد، باید در نظر گرفته شوند.

چ) از آنجا که اعضای کششی در سازه‌های فضاکار می‌توانند ترکیبی از عضو اصلی، قطعات انتهایی و پیچ باشند، طراحی باید بر اساس مقاومت ضعیف‌ترین جزء در مقابل نیروی کششی وارده انجام گیرد. توصیه می‌شود مقاومت کششی عضو اصلی با حاشیه ایمنی مکفی از مقاومت نهایی پیچ افزون‌تر باشد.

ح) در مورد اعضای کششی با شرایط انتهایی خاص باید کنترل‌های موضعی صورت گیرند. با توجه به تولید انبوه اعضای سازه‌های فضاکار توصیه می‌شود در این‌گونه موارد آزمایش‌های موضعی برای شناخت رفتار موضعی انتهای اعضا و

آزمایش‌های عضو کامل با شرایط انتهایی مزبور صورت پذیرفته و نتایج پس از تجزیه و تحلیل با بهره‌گیری از دانش مهندسی سازه و قضاوت مهندسی با رعایت جانب احتیاط مکفی به‌کار برده شود.

۶-۲-۳-۲- طراحی اعضای تحت تأثیر نیروی محوری فشاری

اعضای فشاری به اعضایی از یک سازه فضاکار شبکه‌ای اطلاق می‌گردد که نیروی محوری فشاری اصلی‌ترین نیروی وارد بر آن عضو باشد. به‌عبارت دیگر عضو تحت تأثیر فشار مسلط رفتار نماید. طراحی اعضای فشاری باید با توجه به نکات زیر انجام گیرد:

الف) طراحی با استفاده از روش حالت حدی نهایی انجام شود.

ب) ضریب طول مؤثر اعضای فشاری با در نظرگرفتن نوع سازه، شرایط اتصالات اعضا به پیونده‌ها در ابتدا و انتهای عضو و میزان انعطاف‌پذیری اتصالات و پیونده‌ها به روش‌های تحلیل عددی و یا تحلیل تجربی تعیین‌شده و به تأیید مرجع کنترل طراحی برسد.

پ) در حالت کلی طول عضو فشاری را می‌توان از مرکز تا مرکز پیونده‌ها در نظر گرفت. در صورتی‌که صلبیت محوری پیونده به اندازه کافی نسبت به سختی محوری و سختی خمشی عضو، بزرگ باشد می‌توان طول عضو را با در نظرگرفتن طول قسمت صلب پیونده کاهش داد.

ت) توصیه می‌شود به‌طور کلی ضریب لاغری اعضای فشاری در سازه‌های فضاکار از ۲۰۰ فراتر نرود، ولی در صورتی‌که با توجه به منشأ و ماهیت کنش‌های محتمل معیارهای طراحی سازه، علاوه بر شرایط اجرایی سازه در زمان ساخت، حمل و نقل، بافت و نصب سازه، اجازه دهد، می‌توان مشروط به تأیید مرجع کنترل‌کننده طرح از این محدودیت عدول کرد.

ث) میزان لاغری موضعی و حداقل نسبت بعد به ضخامت اعضا و اجزای سازه‌ای نیز باید با توجه به موارد زیر تعیین گردد:

- در اثر تنش‌های ناشی از نیروهای طراحی، کمانش، تسلیم و شکست موضعی ایجاد نشود. در محاسبه نیروهای طراحی ملحوظ‌نمودن شرایط مراحل ساخت، حمل، بافت و نصب مرحله‌ای و کامل و شرایط نگهداری اجباری است.
- ضخامت‌ها با فن‌آوری‌های متداول جوش‌کاری سازگاری داشته باشند.
- کاهش ضخامت در شرایط محیطی خورنده، باعث تضعیف بیش ازحد اجزا منجر به عدم کفایت مقاومتی یا بروز کمانش موضعی یا شکست نگردد.

ج) نوع مقطع عضو فشاری از نقطه‌نظر کمانش موضعی (فشرده، نیمه‌فشرده و لاغر) باید تعیین شده و در صورت نیاز، کنترل‌های لازم برای مقابله با کمانش موضعی مطابق مقررات ملی ایران- مبحث دهم انجام گیرند.

چ) بسته به مقیدبودن یا مقید نبودن عضو فشاری، کنترل‌های لازم برای مقابله با کمانش کلی عضو باید مطابق با مبحث دهم مقررات ملی ایران انجام گیرند.

ح) در طراحی اعضای فشاری، در صورتی‌که روش خاص ساخت منجر به بروز تنش‌های پسماند در اعضا گردد، مشروط بر آنکه الگوی تنش پسماند در کمانش اجزای عضو تأثیرگذار باشد، باید آثار تنش‌های مذکور به طور مناسبی مطابق با آیین‌نامه‌های معتبر در محاسبات ملحوظ شوند.

خ) در صورتی‌که ناکاملی هندسی عضو فشاری (انحنای اولیه عضو در وسط) از مقدار $\Delta=۰/۰۰۱L$ بیشتر باشد، در تحلیل کل مجموعه باید آثار ناکاملی از روش‌های تحلیل غیر خطی با درنظر گرفتن هندسه نزدیک به‌واقعی اعضا منظور و نتایج تحلیل با توجه به این آثار در طراحی عضو ملحوظ شوند.

د) در موارد اعمال برون محور بار بر عضو فشاری، آثار ثانویه برون محوری باید مطابق آیین‌نامه‌های معتبر منظور گردند.

ذ) بسته به شکل مقطع از نقطه‌نظر باز یا بسته بودن یا ساده و ترکیبی بودن، طراحی عضو فشاری باید مطابق با مقررات ملی ساختمان ایران مبحث دهم انجام گیرد.

ر) جوش‌ها و پیچ‌های انتهایی و یا وصله میانی اعضایی که در همه حالات بارگذاری، نیروی آنها فشاری بوده و یا تحت برخی از ترکیب بارها نیروی کششی اندکی بر آنها وارد می‌شوند، باید مقاومت لازم در مقابل بزرگترین مقدار نیروی کششی محتمل و در عین حال یا یک سوم نیروی فشاری وارده را کششی داشته باشند.

ز) از آنجا که اعضای فشاری در سازه‌های فضاکار می‌توانند ترکیبی از عضو اصلی، قطعات انتهایی و پیچ باشند، طراحی باید بر اساس مقاومت ضعیف‌ترین جزء در مقابل نیروی فشاری وارده انجام گیرد. توصیه می‌شود طراحی تحت کنترل کمانش کلی عضو صورت گیرد.

ژ) جزییات اجرایی انتهای اعضا، در موارد خاصی به بررسی تفصیلی و مرجحاً انجام آزمایش نیاز خواهند داشت. آثار رفتار خاص اجزای انتهایی یا پیوندهای نیامی تحت فشار (یا ترکیب فشار در امتداد عضو و کشش در امتداد متعامد) باید پس از به‌دست آوردن اطلاعات مربوط به نحوه رفتار موضعی در رفتار مجموعه سازه ملحوظ گردند. این آثار می‌توانند قابل ملاحظه باشند و صرف‌نظرکردن از این آثار بدون مطالعه کافی مجاز نمی‌باشد.

۶-۲-۳-۳- طراحی اعضای تحت تأثیر خمش

اعضای خمشی به اعضایی از سازه فضاکار شبکه‌ای اطلاق می‌گردد که لنگر خمشی به‌عنوان تلاش مؤثر و مسلط بر رفتار آن عضو عمل نماید. طراحی اعضای خمشی باید با توجه به نکات زیر انجام گیرد:

الف) طراحی با استفاده از روش حالت حدی نهایی انجام شود.

ب) نوع مقطع عضو خمشی از نقطه‌نظر کمانش موضعی (مقاطع فشرده، غیرفشرده و یا لاغر) باید تعیین‌شده و بسته به وضعیت تکیه‌گاه جانبی آن طراحی مطابق با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران انجام گیرد.

پ) بسته به شکل مقطع، کنترل‌های لازم برای مقابله با کمانش موضعی و کمانش جانبی ـ پیچشی و کمانش پیچشی ـ خمشی مطابق با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران انجام گیرد.

ت) بسته به شرایط بهره‌برداری که در این آیین‌نامه ذکر شده، کنترل‌های لازم در مورد تغییرشکل اعضای خمشی به‌عمل آید.

ث) از آنجا که در اکثر موارد لنگر خمشی با برش همراه است، بنابراین ضروری است کنترل‌های لازم مربوط به مقاومت برشی مقطع نیز صورت گیرند.

ج) اعضای سازه بایستی علاوه بر خمش ناشی از وزن خود عضو، خمش ناشی از اثر وزن حداقل یک فرد نصاب (حدود ۱۰۰کیلوگرم) را در وسط عضو در حالتی که نیروهای مؤثر بر عضو در تحلیل سازه صرفاً برای بارهای مرده محاسبه شده باشد، تحمل نماید.

چ)هرگونه موارد خاصی که در اعضای خمشی سازه‌های فضاکار از قبیل شرایط انتهایی، به ویژه میزان صلیبت یا انعطاف‌پذیری اتصالات، پیش می‌آیند، ملاحظات مربوط مطابق با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران رعایت شوند. در حالات خاص رفتار کلی عضو با تحلیل تفصیلی و یا انجام آزمایش باید تعیین‌شده و نتایج حاصله در طراحی مجموعه سازه منظور گردد.

تفسیر- *به‌طور کلی در حیطه تغییر شکل‌های کوچک، مفاهیم فوق و بهره‌گیری از روش‌های طراحی ارایه شده در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران، در طراحی اعضا کفایت می‌نماید. نکته حایز اهمیت در تخمین میزان انعطاف‌پذیری اتصالات، میزان انعطاف‌پذیری اجزای اتصال و پیونده‌ها، شرایط سرحدی، میزان دوران پیونده‌ها و جابه‌جایی نسبی آنهاست که در حیطه تغییرمکان‌های بزرگ می‌تواند در رفتار کلی سازه تأثیرگذار باشد و در آن حالت لازم‌است تحلیل غیرخطی سازه فضاکار با ملحوظ داشتن آثار غالب غیرخطی و از جمله تغییرمکان‌های بزرگ و کرنش‌های بزرگ به‌عمل آمده و طراحی با توجه به این آثار به‌عمل آید.*

۶-۲-۳-۴- طراحی اعضای تحت تأثیر ترکیب نیروی محوری و لنگر خمشی

این‌گونه اعضای سازهٔ فضاکار شبکه‌ای به اعضایی اطلاق می‌گردد که تحت اثر توأم لنگر خمشی و نیروی محوری می‌باشند، به‌گونه‌ای که نمی‌توان از اثر یکی از آنها صرف‌نظر نمود. طراحی این‌گونه اعضا باید با توجه به نکات زیر انجام گیرد:

الف) طراحی با استفاده از روش حالت حدی نهایی انجام شود.

ب) متناسب با نوع نیروی محوری (کششی یا فشاری)، طراحی عضو برای اثر توأم کشش محوری و لنگر خمشی یا اثر توأم فشار محوری و لنگر خمشی مطابق با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران صورت پذیرد.

پ) ملاحظات ذکرشده در بند ۶ـ۲ـ۳ـ۱ برای اعضای کششی، بند ۶ـ۲ـ۳ـ۲ برای اعضای فشاری و بند ۶ـ۲ـ۳ـ۳ برای اعضای خمشی، باید در طراحی این‌گونه اعضا تحت آثار ترکیبی این تلاش‌ها مدنظر قرار گیرد.

۶-۲-۴- ملاحظاتی در مورد طراحی اجزای سازه‌ای و اعضای سازه‌های فضاکار

الف) خمش ناشی از جزییات انتهایی اعضای سازه‌ای

در صورتی‌که انتهای اعضا آزادی چرخش نداشته باشد، در این حالت لازم است جزییات انتهایی عضو به‌نحوی طراحی گردد که قابلیت تحمل نیروهای محوری همراه با لنگرهای خمشی و پیچشی وارده را داشته باشد.

در صورتی‌که جزییات انتهایی عضو به‌نحوی طراحی و اجرا شده باشد که آثار برون محوری اعمال گردد، (برای مثال در حالت اتصال نبشی‌ها توسط یک بال) به ویژه اگر تعداد ردیف‌های پیچ یا طول جوش کافی نباشد، اثر این برون محوری باید به‌طور موضعی برای اتصال، در مقیاس بزرگ‌تر برای عضو و در مقیاس کلی برای مجموعه سازه منظور گردد.

ب) لهیدگی

تنش‌های تماسی لهیدگی باید برای محل تماس عضو فشاری به پیونده، پیچ‌های برشی، برش‌گیرها در بعضی از انواع پیونده‌های صفحات تاخورده، پیچ‌های کششی، سطح تماس مخروطی‌ها و شش پر (غلاف)ها کنترل گردد. برای مثال، در حالتی‌که نیروهای فشاری در طراحی اعضا حاکم باشند، در سیستم سازه‌های فضاکار با پیونده گوی‌سان، کنترل لهیدگی غلاف ضروری می‌باشد.

ابعاد و مصالح مخروطی‌های انتهایی اعضا و پیونده‌ها باید به نحوی اختیار گردند که تحت تأثیر کنش‌های بحرانی، میزان تنش‌های لهیدگی، برشی و ترکیبی (مانند تنش فون میسس) از حدود مجاز که در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران ارایه‌شده است، تجاوز ننماید.

برای جلوگیری از تمرکز تنش‌های ناخواسته لهیدگی، لازم است بعضی از سطوح با انحنای خاصی تراشیده شوند، به عنوان نمونه می‌توان به تراش سطح تماس پیونده گوی‌سان با شش پر (غلاف)، یا تراش رویه گوی و یا تراش زیر سرپیچ‌های مورد استفاده در پیونده‌های کاسان و یا استفاده از واشر محدب پیچ اشاره نمود.

تفسیر- *انواع پیونده‌ها و اجزای آن‌ها در پیوست ۲ ارایه شده است.*

پ) میزان لاغری موضعی و حداقل نسبت بعد به ضخامت اعضا و اجزای سازه‌ای نیز باید با توجه به موارد زیر تعیین گردد:

۱) تنش‌های ناشی از نیروهای طراحی، منجر به بروز کمانش، سیلان و شکست مـــوضعی نگردند.

۲) در محاسبه نیروهای طراحی شرایط مراحل ساخت، حمل، بافت و نصب مرحله‌ای و کامل و شرایط بهره‌برداری و نگهداری باید ملحوظ گردند.

۳) ضخامت‌ها در اتصالات جوشی به میزانی منظور گردند که عملیات جوش‌کاری با توجه به نوع و روش جوش‌کاری امکان‌پذیر بوده، منجر به پارگی و شکست فلز مبنا نگردد.

۴) کاهش ضخامت‌ها در شرایط محیطی خورنده، با توجه به طول عمر مفید و نحوه نگهداری، نباید به‌میزانی باشد که باعث تضعیف اجزا و عدم کفایت لازم آن‌ها از دیدگاه مقاومت در برابر تلاش‌های وارده، خستگی و سایر پدیده‌های ذیربط گردد.

۶-۳- طراحی اتصالات و پیونده‌ها

۶-۳-۱- کلیات

الف) باتوجه به‌آنکه رفتار سازه‌های فضاکار متأثر از نوع اتصالات و پیونده‌ها می‌باشد، در طراحی سازه‌های فضاکار فرض نیز فرضیات مدل‌سازی در ارتباط با رفتار اتصال و پیونده نقش بارزی در نتایج حاصله خواهند داشت. به منظور شناسایی رفتار سازه فضاکار و مدل‌سازی واقع‌گرایانه و تدقیق محاسبات سازه‌ای، لازم است دسته‌بندی مناسبی از اتصالات و پیونده‌ها به عمل آید.

ب) علی‌رغم تنوع اتصالات و پیونده‌ها در انواع سازه‌های فضاکار، دسته‌بندی آنها از سه دیدگاه اساسی زیر می‌تواند صورت گیرد:

۱) دسته‌بندی از دیدگاه میزان صلبیت (میزان انعطاف‌پذیری)

۲) دسته‌بندی از دیدگاه روش اجرای اتصال

۳) دسته‌بندی از دیدگاه سیستم‌های پیونده‌ها و شیوه‌های ساخت و مصالح مربوط

پ) فرضیات در نظر گرفته‌شده در مدل‌سازی اتصالات و پیوندها برای تحلیل سازه، باید به‌گونه‌ای هماهنگ و سازگار در طراحی اتصالات و پیوندها ارضا شوند. به‌این منظور خواصی مانند میزان صلبیت اتصالات و پیوندها، تغییرشکل پیوندها، میزان مقاومت اتصال، رفتار پسماند اتصال و میزان میرایی آن، که از عوامل اصلی و مبانی طراحی اتصال و پیوند به‌شمار می‌روند، باید متناسب با فرضیات مدل‌سازی اتصالات و پیوندها در مرحله تحلیل، طراحی شوند.

۶-۳-۲- دسته‌بندی اتصالات

میدان حاکم تنش‌ها در اتصالات سازه‌های فضاکار از تنوع خاصی برخوردار است. به نحوی که یک اتصال یا پیوند می‌تواند به تنهایی یا همزمان تحت اثر نیروهای محوری، برشی و لنگرهای خمش و پیچشی چند محوری قرارگیرد. در تعیین نوع این نیروها و میزان آنها، میزان صلبیت اتصال، روش‌های اجرای اتصال و نوع سیستم‌های پیوند تأثیر بسزایی در رفتار اتصال خواهد داشت. بنابراین به منظور دسته‌بندی جامع، در این آیین‌نامه اتصالات و پیوندها در سازه‌های فضاکار از این سه دیدگاه دسته‌بندی می‌شوند.

۶-۳-۲-۱- دسته‌بندی از دیدگاه میزان صلبیت

یکی از معیارهای اساسی در طراحی اتصالات و پیوندها در سازه‌های فضاکار، فرضیات به کار رفته در مدل‌سازی اتصالات در مرحله تحلیل سازه فضاکار می‌باشد که مبتنی بر صلبیت اتصالات و پیوندها می‌باشد. فرض میزان صلبیت اتصالات نه تنها بستگی به نوع اتصال، اجزا و مصالح آن دارد، بلکه به نوع تاشه و ابعاد سازه فضاکار نیز وابسته است. از سوی دیگر، صلبیت با توجه به تغییرشکل‌های ممکن در اتصال می‌تواند محوری، برشی، خمشی، پیچشی و یا ترکیبی از آنها (به‌صورت اندرکنش آنها) تعریف شود که بسته به پروژه مورد نظر باید مدنظر قرار گیرد. در این مرحله دسته‌بندی اتصالات و پیوندهای سازه فضاکار بر اساس صلبیت خمشی در نظر گرفته شده است. بر اساس این اتصالات به سه نوع متفاوت دسته‌بندی می‌شوند:

۱) اتصال مفصلی
۲) اتصال صلب
۳) اتصال نیمه‌صلب

طراحی جزییات انواع اتصالات با توجه به شاخص‌هایی که در بندهای زیر تعریف می‌شوند، باید به‌نحوی صورت گیرد، که رفتار اتصال با فرضیات تحلیل سازگار باشد.

۶-۳-۲-۱-۱- اتصال با عملکرد نزدیک به مفصل

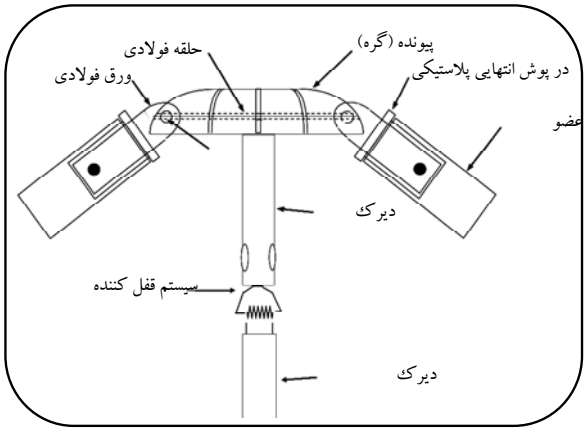
اتصالی با عملکرد نزدیک به مفصل تلقی خواهد شد که

۱) قابلیت اندکی برای انتقال لنگر عضو داشته باشد. اتصالاتی که قادر به انتقال لنگر گیرداری عضو تا میزان حداکثر ۲۰٪ لنگرگیرداری عضو باشند به‌طور معمول در این دسته طبقه‌بندی می‌شوند،
۲) در میدان حاکم تلاش‌های اتصال مقدار لنگر ناچیز باشد.

شاخص اتصال در مورد این نوع از اتصالات کوچک‌تر یا برابر با ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود.

تفسیر- *در مورد نحوه تعیین شاخص اتصال به پیوست ۳ این آیین‌نامه مراجعه شود.*

در شکل(۶ـ۱) نمونه‌ای از اتصال با عملکرد نزدیک به مفصل نشان داده شده است.



شکل(۶ـ۱)

۶-۳-۲-۱-۲- اتصال با عملکرد نزدیک به صلب

اتصالی با عملکرد نزدیک به صلب تلقی خواهد شد که:

۱) قادر باشد حداقل ۹۰٪ لنگر عضو را انتقال دهد؛

۲) در صورت عدم وجود لنگر در اتصال، عملاً تغییرشکل‌های دورانی وجود نخواهد داشت و فرض رفتار صلب حتی برای یک اتصال مفصلی نیز صادق خواهد بود.

حداقل شاخص اتصال در مورد این نوع اتصالات برابر با ۰/۸ و یا بزرگ‌تر در نظر گرفته می‌شود.

تفسیر- *در مورد نحوه تعیین شاخص اتصال به پیوست ۳ این آیین‌نامه مراجعه شود.*

در شکل(۶ ـ۲) نمونه‌ای از اتصال با عملکرد نزدیک به صلب نشان داده شده است.

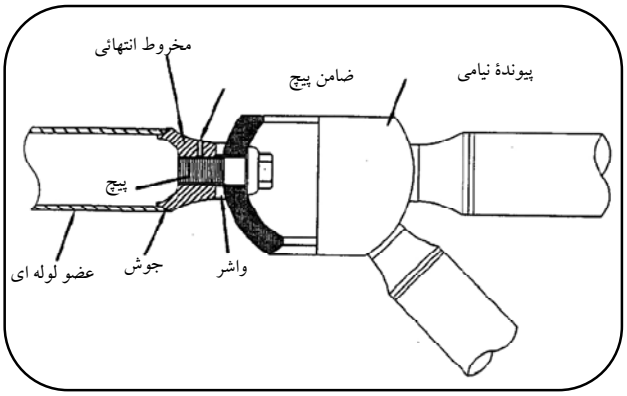
شکل ۶-۲: نمونه‌ای از اتصال با عملکرد نزدیک به صلب

۶ـ۳ـ۲ـ۱ـ۳ ـ اتصال با عملکرد نیمه‌صلب

اتصالی با عملکرد نیمه‌صلب تلقی خواهد شد که بتواند لنگری مابین مقادیر ۲۰٪ و ۹۰٪ لنگر عضو را تحمل و انتقال دهد. شاخص اتصال در مورد این نوع اتصالات بسته به میزان قابلیت انتقال لنگر بین ۰/۲ و ۰/۸ می‌باشد.

تفسیر- *در مورد نحوه تعیین شاخص اتصال به پیوست ۳ این آیین‌نامه مراجعه شود.*

در شکل(۶-۳) نمونه‌ای از اتصال با عملکرد نیمه‌صلب نشان داده شده است.



شکل ۶-۳: نمونه‌ای از اتصال با عملکرد نیمه‌صلب

۶-۳-۲-۲- دسته‌بندی از دیدگاه روش اجرای اتصال

در طراحی اتصالات نه تنها فرضیات به‌کار رفته در ارتباط با صلبیت اتصالات باید واقع‌گرایانه و قابل حصول باشد، بلکه نحوه اجرا و ساخت اتصال در طراحی آن نقش اساسی دارد. با توجه به تنوع اتصالات و سیستم‌های پیونده در سازه‌های فضاکار از دیدگاه شیوه ساخت از جمله اتصالات و پیونده‌های پیش‌ساخته یا به‌صورت ساخت درجا یا قابلیت یا فقدان قابلیت مونتاژنمودن سازه در پای کار، طیف وسیعی از نوع اتصالات در سازه‌های فضاکار ابداع گردیده است. که از دیدگاه اجرایی شامل اتصالات جوشی، پیچی، پرسی، کام و زبانه‌ای و یا ترکیبی از این روش‌ها می‌گردد که در نحوه طراحی هر کدام از آنها معیارهای مربوط باید به کار گرفته شوند.

در دسته‌بندی اتصالات از نقطه‌نظر نحوه اجرای اتصال، نه تنها نحوه اتصال می‌تواند عامل اساسی در طراحی باشد، بلکه اجزای به‌کار رفته و شیوه اتصالات آنها نیز حایز اهمیت است. به‌عنوان مثال، در اتصال جوشی، جوش‌کاری ورق‌های مستوی، استوانه‌ای و کروی با شیوه‌های اجرایی متفاوت ولی متناسب با هندسه اتصال به‌کار گرفته می‌شود.

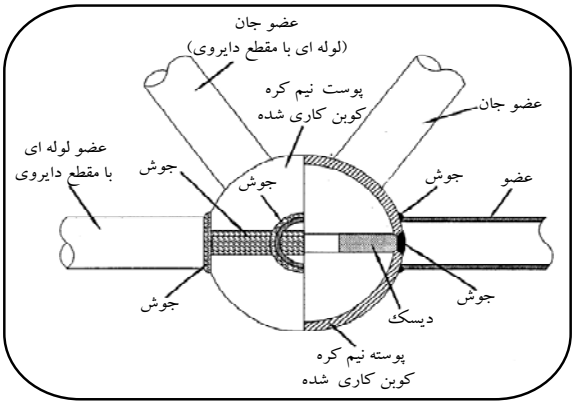
در صورت استفاده از اتصالات پرچی، معیارهای خاص آنها نیز باید ملحوظ گردند.

در صورتی که تعیین صلبیت اتصالات با توجه به ماهیت و اجزای اتصالات به روش‌های تحلیلی میسر نباشد، برای آن اتصالات باید آزمایش‌های لازم برای استخراج منحنی‌های رفتاری لنگر- دوران (چرخش) صورت پذیرفته و بر اساس مفاد بند ۶ـ۳ـ۲ـ۱، از دیدگاه صلبیت دسته‌بندی شوند.

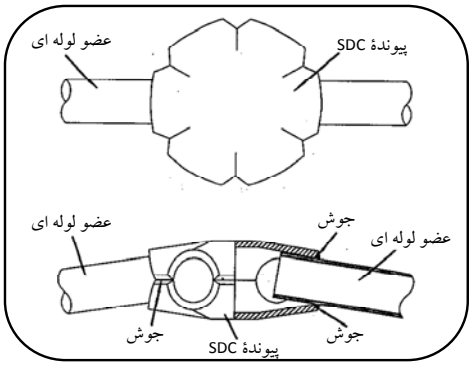
تفسیر- *در خصوص آزمایش‌های مذکور، به فصل هفتم - طراحی به کمک آزمایش مراجعه شود.*

۶-۳-۲-۲-۱- اتصالات جوشی

در اتصال جوشی همان‌گونه که از عنوانش نمایان است، از جوش برای اتصال اعضا به پیوندهها و یا کل اجزای اتصال و یا اتصال مستقیم اعضا به یکدیگر استفاده می‌شود. نمونه‌هایی از این نوع اتصالات سازه‌های فضاکار، در شکل‌های ۶ـ۴ و ۶ـ۵ نشان داده شده است.



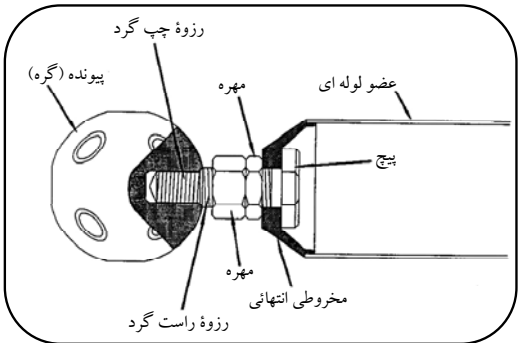
شکل ۶-۴: نمونه‌ای از اتصال جوشی



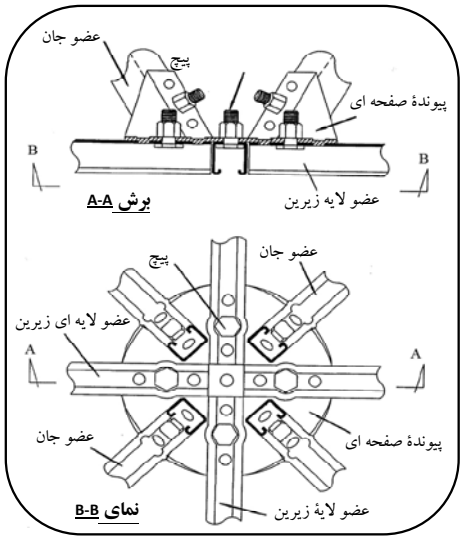
شکل ۶-۵: نمونه‌ای از اتصال جوشی

۶-۳-۲-۲-۲- اتصالات پیچی

در اتصال پیچی همان‌گونه که از عنوانش مشخص است از پیچ به عنوان وسیله اتصال اعضا استفاده می‌شود. نمونه‌هایی از این نوع اتصالات در سیستم‌های متفاوت سازه‌های فضاکار در شکل‌های ۶ـ۶ و ۶ـ۷ نشان داده شده است.



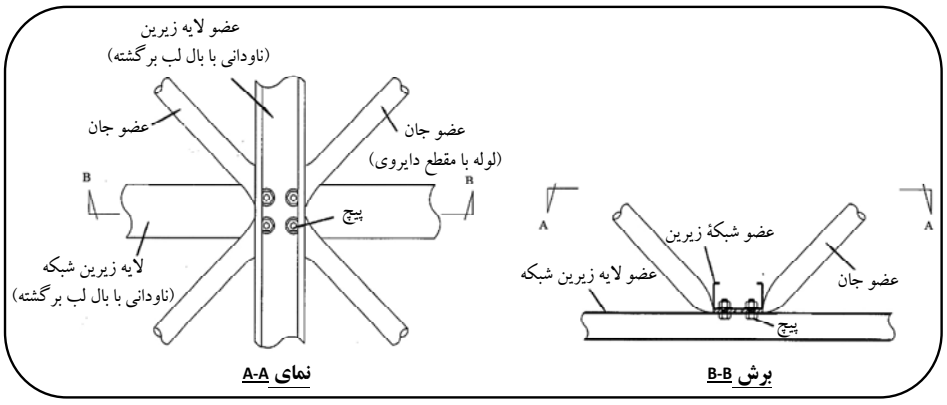
شکل ۶-۶: نمونه‌ای از اتصال پیچی



شکل ۶-۷: نمونه‌ای از اتصال پیچی

۶-۳-۲-۲-۳- اتصالات پرسی

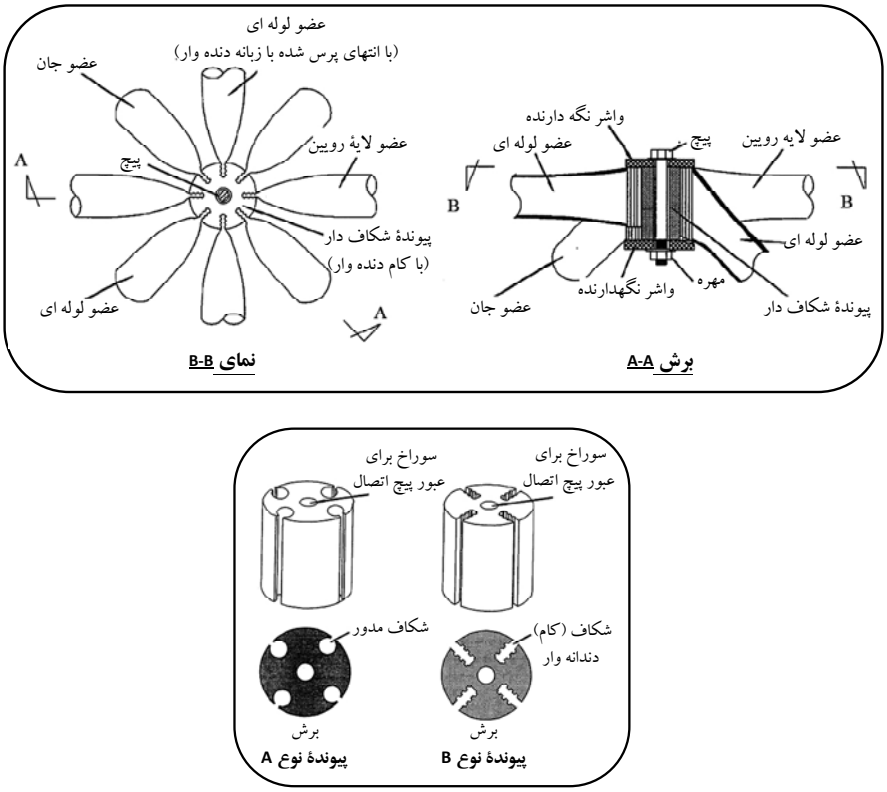
در اتصال پرسی برای اجرای اتصال، انتها یا قسمتی از اعضا پرس می‌شوند. در شکل۶ـ۸ نمونه‌ای از این نوع اتصال نشان‌داده شده است.



شکل ۶-۸: نمونه‌ای از اتصال پرسی

۶-۳-۲-۲-۴- اتصالات کام و زبانه‌ای

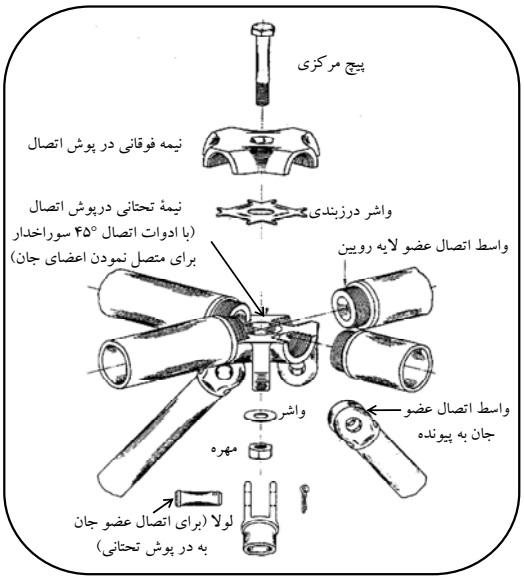
در این نوع از اتصال از سیستم کام و زبانه برای تأمین اتصال استفاده می‌شود. در شکل۶ـ۹ نمونه‌ای از این نوع اتصال نشان داده شده است.



شکل ۶-۹: نمونه‌ای از اتصال کام و زبانه‌ای

۶-۳-۲-۲-۵- اتصالات ترکیبی

اتصالات ترکیبی اتصالاتی را شامل می‌شوند که ترکیبی متناسب از برخی از انواع اتصالات جوشی، پیچی، پرسی و یا کام و زبانه‌ای باشند. در شکل۶ـ۱۰ نمونه‌ای از این نوع اتصال نشان داده می‌شود.



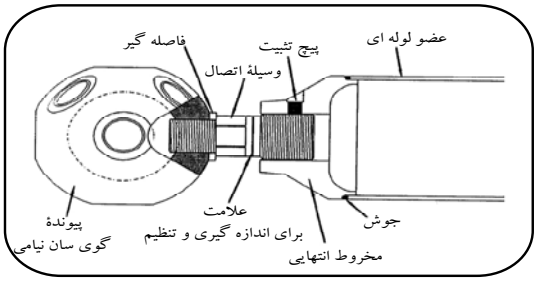
شکل ۶-۱۰: نمونه‌ای از اتصال ترکیبی

۶-۳-۲-۳- دسته‌بندی از دیدگاه مدول‌های مبنا

بسته به نوع اعضای سازه‌های فضاکار، ملاحظات صنعتی، تجاری و اقتصادی و همچنین جنبه‌های رفتاری سازه‌ای، انواع گوناگون سیستم‌های پیونده‌ها ابداع گردیده‌اند. در دسته‌بندی کلی، سیستم‌های متنوع مزبور را می‌توان در دو رده مهم سیستم‌های پیونده‌ای (گرهی) و سیستم‌های واحدی (مدوله) مورد بررسی قرار دارد.

۶-۳-۲-۳-۱- سیستم‌های پیونده‌ای

در این سیستم‌ها پیونده‌ها به صورت واسطه‌ای بین اعضا عمل می‌نمایند. این سیستم‌ها با توجه به نوع کاربرد آنها در سازه‌های فضاکار و اجزای تشکیل‌دهنده آنها به پنج گروه: پیونده‌های گوی‌سان، پیونده‌های نیامی، پیونده‌های صفحه‌ای، پیونده‌های شکافی و پیونده‌های پوسته‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. در شکل۶ ـ۱۱ نمونه‌ای از سیستم‌های شامل پیونده گوی‌سان نشان داده شده‌است.

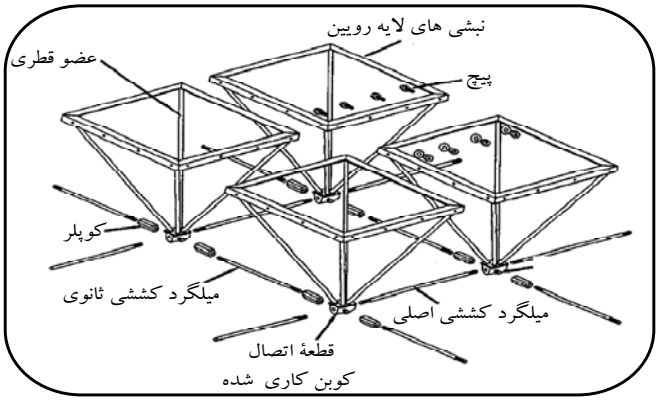


شکل ۶-۱۱: نمونه‌ای از سیستم‌های پیونده گوی‌سان

۶-۳-۲-۳-۲- سیستم‌های واحدی

این نوع سیستم‌ها، از مدول‌هایی تشکیل شده‌اند که شامل دو یا چند جزء متصل بهم می‌باشند. فرم‌های متنوع این مدول‌ها، انواع متنوعی از سیستم‌های واحدی را به وجود آورده‌اند. متداول‌ترین انواع این سیستم‌ها با توجه به کاربرد گسترده آنها در سازه‌های فضاکار شامل سیستم‌های موسوم به Space Deck، Unibat، Cubic، Diamond و Harley تقسیم‌بندی می‌گردند.

در شکل ۶ ـ۱۲ سیستم space deck به عنوان نمونه‌ای از سیستم‌های واحدی نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۲: نمونه‌ای از سیستم‌های واحدی

تفسیر- *مجموعه‌ای از جزییات سیستم‌های مذکور در فوق در پیوست ۲ ارایه شده است.*

در استفاده از سیستم‌های تجاری مورد اشاره باید محدودیت‌های هر یک در نظر گرفته‌شده و تناسب آن برای کاربری موردنظر مورد کنترل قرار گیرد در مورد سیستم‌های تجاری باید ضوابط ویژه طرح و ساخت و نصب آنها برای کاربری خاص به تصویب مراجع ذیصلاح رسیده و کنترل‌های لازم برای رعایت این ضوابط اعمال گردد. در غیر این صورت مقررات عمومی این آیین‌نامه برای چنین سیستم‌هایی نیز نافذ خواهند بود. در مورد سیستم‌های جدید که بالطبع برای دامنه کاربرد خاصی ایجاد می‌شوند، نیز باید معیارهای پذیرش برای کاربری موردنظر ارضا گردند و پیش از کاربرد، به تأیید مراجع ذیصلاح رسیده باشند.

۶-۳-۳- مبانی و معیارهای طراحی اتصالات

۶-۳-۳-۱- دسته‌بندی پیوندها

در انتخاب نوع سیستم پیوند با توجه به نیازها و ملزومات طرح، از دو ردهٔ قابل تفکیک به شرح زیر می‌توان بهره‌گیری نمود:

- سیستم‌های پیوند استاندارد(صنعتی‌شده) (ر.ک. پیوست ۲)،
- سیستم‌های پیوند خاص، که بسته به ویژگی‌های پروژه و امکانات ساخت، توسط طراح پیشنهاد می‌شود.

بسته به تصمیمات اتخاذ شده در انتخاب نوع سیستم پیوند، به تناسب، مراحل طراحی مربوط دنبال می‌شود.

تفسیر- *سیستم‌های پیوند استاندارد به سیستم‌هایی اطلاق می‌گردد که معیارهای پذیرش کشور سازنده را منطبق با ضوابط تعیین شده ارضا نموده و مجوز تولید انبوه صنعتی آن را اخذ کرده باشد. هرگونه تغییر در اجزای اتصال، که ناقض معیارهای پذیرش مذکور در فوق باشد، آن سیستم را از حالت استاندارد خارج خواهد ساخت و در چنین حالتی باید ملاحظات مربوط به پیوندهای خاص در نظر گرفته شوند.*

۶-۳-۳-۲- مبانی و معیارهای طراحی سیستم‌های پیوند استاندارد

الف) انتخاب سیستم پیوند

ملاحظات زیر در انتخاب سیستم پیوند در نظر گرفته می‌شوند:

۱ـ ملاحظات معماری

۲ـ ملاحظات اقتصادی (امکان دسترسی و غیره)

۳ـ ملاحظات عملکردی

ب) مدل‌سازی و تحلیل و طراحی

۱ـ براساس طرح اولیه سازه‌فضاکار، ابعاد اولیه سیستم پیوند انتخاب می‌شود.

۲ـ طبق مفاد بند ۶-۳-۲-۱ (دسته‌بندی اتصالات از دیدگاه میزان صلبیت)، نوع اتصال و میزان صلبیت آن اختیار می‌گردد.

۳ـ مدل‌سازی و تحلیل سازه بر اساس اطلاعات فوق انجام پذیرفته و با استفاده از روش آزمون و خطا و طی فرایند تکرار در تحلیل و طراحی مجدد، باید در نهایت همگرایی لازم بین فرضیات به‌کار رفته در مدل‌سازی با نتیجه تحلیل نهایی

حاصل شود. به‌عبارت دیگر، بر اساس نیروهای موجود در سیستم پیونده، فرضیات مربوط به صلبیت سیستم، باید همساز و هماهنگ شود.

پ) کنترل‌های لازم برای ارضای معیارهای طراحی

در سیستم‌های استاندارد، بسته به نوع و تلاش‌های اعضای طراحی شده، ابعاد سیستم پیونده متناظر اختیار می‌گردد و انتظار می‌رود با ارضای معیارهای پذیرش به شرح پیش‌گفته، کنترل‌های لازم از نظر ارضای ملزومات طراحی نظیر مقاومت، شکل‌پذیری، میزان تغییر شکل پیونده و اتصال، از طریق مطالعات آزمایشگاهی بر آنها انجام شده باشد. با این‌همه طراح موظف است که معیارهای لازم در طراحی پروژه مورد مطالعه خود را تعیین و کفایت اجزای سیستم مورد استفاده را برای کاربری مورد نظر کنترل نماید.

۶-۳-۳-۳- مبانی و معیارهای طراحی سیستم‌های پیونده خاص

الف) طراحی ابعاد اتصال

ابعاد اتصال باید طوری اختیار شود که تنش و تغییرشکل حاصل از تحلیل در هر یک از حالت‌های زیر که بحرانی‌تر باشند، از حد تنش و تغییرشکل تعیین‌شده تجاوز ننماید.

۱ـ بر مبنای تحلیل سازه برای ترکیب کنش‌های مؤثر،

۲ـ بر مبنای درصدی از مقاومت اعضای متصل‌شونده (که توسط طراح برای تعیین ظرفیت اتصال در نظر گرفته می‌شوند)،

۳ـ بر مبنای حد تغییرشکل پذیرفته‌شده برای اتصال بر اساس فرضیات به کار رفته در مدل‌سازی و تحلیل.

ب) کنترل صلبیت اتصال

بر اساس مفاد بند ۶-۳-۲-۱، فرض در نظر گرفته‌شده برای اتصال و میزان صلبیت آن باید کنترل شود. به عبارت دیگر برای کنترل صلبیت اتصال، با فرضیات به کار رفته باید از روش‌های تحلیلی قابل اعتماد و یا روش‌های تجربی مطابق با فصل هفتم این آیین‌نامه بهره‌گیری شود.

طراحی اجزای اتصال (به طور مثال شامل مخروطی، غلاف، پیچ و غیره) بسته به نوع اتصال از قبیل اتصال جوشی، پیچی، پرسی، کام و زبانه‌ای و یا ترکیبی و نیز محاسبه تنش‌های طراحی در مواردی که در این آیین‌نامه تصریح نشده باشد، بر اساس دیگر آیین‌نامه‌های معتبر صورت خواهد گرفت.

پ) در مواردی‌که برای طراحی اجزای اتصال آیین‌نامه یا دستورالعمل معتبری موجود نباشد و روش‌های تحلیلی نیز منجر به نتایج قابل اعتمادی نمی‌گردند، باید از روش طراحی به‌کمک آزمایش مطابق فصل هفتم این آیین‌نامه استفاده شود.

ت) موارد خاص در طراحی اجزای اتصال در سیستم‌های پیونده خاص

۱) جوش

اندازه جوش‌ها در عین دارا بودن مقاومت کافی در مقابل نیروهای طراحی باید متناسب با ضخامت جداره اجزای سازه‌ای اختیار گردد. سیستم کنترل کیفیت جوش‌کاری برای کاهش نارسایی‌های ناشی از جوش‌کاری باید به نحو کارایی سازماندهی گردد.

تفسیرـ *نیروی حاکم بر طراحی عضو، لزوماً نیروی حاکم بر طرح جوش نیست؛ به عنوان مثال ممکن است عضو برای نیروی فشاری طرح شود در صورتی‌که لازم باشد جوش برای کشش طراحی شود.*

۲) پیچ

در طرح سازه‌های فضاکار می‌توان از پیچ‌های قوی به صورت اتکایی و یا اصطکاکی استفاده نمود. پیچ‌های اتصال به‌ویژه اتصال عضو به پیونده باید مقاومت مورد نیاز در مقابل نیروهای طراحی را داشته باشند. نیروی برای طراحی عضو، لزوماً نیروی طراحی پیچ نمی‌باشد، به عنوان مثال، ممکن است نیروی حاکم بر طرح عضو از نوع فشاری بوده، ولی نیروی حاکم بر طرح پیچ از نوع کششی باشد.

بعضی از سیستم‌های سازه‌های فضاکار نیاز به ایجاد سوراخ در بدنه پیچ‌های انتهایی اعضا را دارند، در محاسبه مقاومت این پیچ‌ها باید سطح مقطع پیچ به اندازه قطر سوراخ ضرب در قطر پیچ کاهش یابد؛ مگر اینکه سوراخ روی قسمت بدون دندانه پیچ‌ها قرار داشته و قطر سوراخ پیچ‌ها در حدی باشد که با محاسبه نشان داده شود که وجود سوراخ اثری در کاهش مقاومت پیچ ندارد.

۳) لغزش پیچ‌ها

در صورتی‌که رواداری اندازه سوراخ‌های پیچ‌ها در شرایط بارهای بهره‌برداری و یا بارهای نهایی باعث لغزش پیچ‌ها و در نتیجه باعث افزایش تغییرشکل‌ها و یا افزایش نیروها و یا تغییر جهت آنها گردد، بایستی این نوع عملکرد در تحلیل سازه‌ای و در طراحی اجزای آن منظور شود.

۴) مخروط‌های انتهایی

در صورت استفاده از مخروط‌های انتهایی، این قطعات بایستی مقاومت لازم در مقابل خمش و لهیدگی ناشی از نیروی کششی و فشاری پیچ مربوط را با رعایت حد تغییر شکل مناسب داشته باشند. همچنین باید برای برش استوانه‌ای دورادور پیچ کنترل گردند.

۵) در طراحی سازه‌های فضاکار شامل هرگونه اتصال به‌طور اعم و اتصال پیچی به‌طور اخص، باید مقاومت اتصال با حاشیه اطمینان مکفی افزون‌تر از مقاومت عضو اختیار شود.

۶-۴- طراحی تکیه‌گاه‌ها و دستگاه‌های تکیه‌گاهی

۶-۴-۱- طراحی تکیه‌گاه‌ها

طراحی تکیه‌گاه‌های سازه فضاکار باید با مفروضات اختیارشـده در مدل‌سازی و تحلیل سازگاری داشته و با توجه به قیود حرکتی دورانی یا میزان آزادی‌های جابه‌جایی‌های افقی و قائم و چرخش‌های ناشی از کنش‌های ثقلی، تغییـر دما و یا نیروهای برکنشی باد و غیره انجام گیرد.

عدم توجه به میزان جابه‌جایی‌های سازه فضاکار و پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های مربوط در شرایط متفاوت بارگذاری، می‌تواند باعث بروز صدمات جدی در سازه دستگاه‌های تکیه‌گاهی و سازه‌ها یا پایه‌های تکیه‌گاه گردد.

در حالتی‌که در اثر حذف تکیه‌گاه، منجربه ناپایداری کلی گردد یا در مورد تکیه‌گاه‌هایی که بیش از ۵۰٪ کل بارهای وارده در یک حالت بارگذاری را جذب می‌نمایند طراحی پایه‌ها، دستگاه‌های تکیه‌گاهی و اجزای بلافصل آن، باید برای ۱۲۵٪ نیروها و تلاش‌های ناشی از حالت بارگذاری مربوط صورت گیرد. طراحی این‌گونه تکیه‌گاه‌ها باید برای مقابله با نیروهای افقی ضربه‌ای (برای مثال بار ناشی از ضربه وسایط نقلیه در صورت احتمال وقوع) انجام گیرد، یا پایه‌های تکیه‌گاهی مزبور به‌طریقی در مقابل اعمال ضربه ناشی از وسایط نقلیه محافظت شوند. هنگامی‌که کنش‌ها و تغییرمکان‌ها در تکیه‌گاه‌ها دارای مقادیر قابل توجهی باشند، برای تأمین امکان تعامل کنش‌ها و تغییرمکان‌ها بین سازه و پایه‌ها، نیاز به طراحی خاص و استفاده از دستگاه‌های تکیه‌گاهی مناسب می‌باشد.

۶-۴-۲- طراحی دستگاه‌های تکیه‌گاهی

ظرفیت باربری و حرکتی دستگاه‌های تکیه‌گاهی هر سازه خاص باید با فرضیات به کارگرفته‌شده در طراحی کلی آن سازه سازگار باشد. اگر به تعریف فرایند طراحی توجه شود، معلوم می‌گردد این مشخصات برای هر تکیه‌گاه مانند مشخصات هر عضو دیگر سازه‌ای در هر گام طراحی انتخاب و سپس بررسی‌شده و در صورت لزوم تغییر می‌یابد. به این ترتیب هنگامی که طراحی سازه به انجام می‌رسد، سازگاری موردنظر نیز تأمین‌شده است. مشخصات مکانیکی دستگاه‌های تکیه‌گاهی و همچنین مقیدسازی یا ایجاد آزادی جابه‌جایی در امتدادهای موردنظر شرایط سرحدی سازه فضاکار و پایه‌های نگهدارنده آن را تبیین می‌نماید. پس از قطعیت این مشخصات در فرایند طراحی مجموعه و تعیین پوش بارها و جابه‌جایی‌ها، طراحی دستگاه‌های تکیه‌گاهی انجام می‌پذیرد.

۶-۴-۲-۱- الزامات حالات حدی

دستگاه‌های تکیه‌گاهی که بر اساس این آیین‌نامه طراح می‌گردند، الزامات حالات حدی به‌شرح زیر را تأمین خواهند ساخت:

ـ حالت حدی خدمت‌رسانی

به دستگاه تکیه‌گاهی تحت تأثیر کنش‌های بهره‌برداری متعارف نباید به میزانی صدمه‌ای وارد آید که در کارایی و خدمت‌رسانی آن اثرگذار باشد و یا هزینه تعمیر زیادی را در طول عمر مفید آن ایجاب نماید.

– حالت حدی نهایی

مقاومت و پایداری دستگاه تکیه‌گاهی باید پاسخگوی میزان نیروهای اعمالی و جابه‌جایی‌های نهایی مفروض در طراحی باشد.

۶-۴-۲-۲- عمر طرح

طراحی دستگاه‌های تکیه‌گاهی و قطعات اتصالی آنها با در نظرگرفتن مسایل نگهداری و جایگزینی باید متناسب با عمر طرح سازه فضاکار به‌عمل آید.

۶-۴-۲-۳- پیش‌بینی‌های لازم برای جای‌گذاری، جابه‌جایی، تنظیم مجدد و دسترسی

هنگامی که عمر مفید دستگاه تکیه‌گاهی به طور قابل توجهی کمتر از عمر سازه فضاکار باشد، باید پیش‌بینی‌های لازم از جمله فضای مکفی برای دسترسی، بازرسی، برداشتن، جای‌گذاری و تعویض کل دستگاه تکیه‌گاهی یا بخش‌هایی از آن به‌عمل آید.

تمهیدات لازم برای جبران اثر اختلاف نشست‌ها و دوران‌های نامتجانس باید در طراحی پیش‌بینی گردد، مگر آنکه سازه به لحاظ سیستم با ویژگی‌های متفاوتی توان تحمل چنین اثرهایی را داشته باشد یا بتواند با چنین آثاری به‌طور سازگار تطابق یابد.

۶-۴-۲-۴- دوام

طراحی جزییات دستگاه‌های تکیه‌گاهی باید نیاز به خدمات بعدی نظیر تمیزکردن و رطوبت‌گیری را برطرف کند. مصالح به کار رفته برای ساخت و حفاظت و معیارهای نگهداری در برابر خوردگی و زوال در برابر اثرهای محیطی باید چنان باشد که عملکرد صحیح دستگاه تکیه‌گاهی در طول عمر مفید آن تضمین گردد.

۶-۴-۲-۵- قید حرکتی

وقتی لازم باشد قیودی برای ممانعت از حرکت انتقالی سازه به‌طور کلی، جزیی یا در امتداد خاصی ایجاد گردد، این قیود را می‌توان به‌عنوان جزیی از دستگاه تکیه‌گاهی یا به‌طور جدا از آن طراحی نمود. نیروهای وارده بر قیدهای مزبور باید در طراحی دستگاه‌های تکیه‌گاهی و اتصالات آنها و در طراحی سازه فضاکار و پایه‌های تکیه‌گاهی در نظر گرفته شود. هرگاه مقابله با این نیروها به اصطکاک واگذار می‌شود، باید مقدار حد پایین ضریب اصطکاک حاصل از نتایج آزمایش در دسترس که با شرایط و جنس مصالح سطوح تماس در طول بهره‌برداری سازگار باشد، انتخاب شود.

۶-۴-۲-۶- بَرکَنِش

در موارد مستعد برکنش، دستگاه تکیه‌گاهی و اتصالات آن باید چنان طرح شود که جدایی اجزا به مقدار کنترل‌شده‌ای محدود گردد و بتواند نیروهای مقاوم لازم را به‌منظور خنثی نمودن نیروهای بالابرنده، تأمین نماید.

۶-۴-۲-۷- صفحات پخش بار دستگاه‌های تکیه‌گاهی

ابعاد صفحات پخش بار دستگاه‌های تکیه‌گاهی باید چنان تعیین شود که بارهای متمرکز به طور مناسب پخش‌شده و در هیچ موقعیتی از فشار مجاز بستر تجاوز ننماید. سطح مؤثر برای پخش بار را می‌توان از سطح تماس دستگاه تکیه‌گاهی با صفحه، به علاوه حاشیه‌ای برابر با کلفتی صفحه ضرب در تانژانت ۶۰ درجه (نسبت به مولفه عمود بر سطح تکیه‌گاه) در نظر گرفت. اگر سازه بستر تغییر شکل قابل ملاحظه‌ای داشته باشد، رفتار متقابل دستگاه تکیه‌گاهی و سازه باید در طراحی کلی منظور شده باشد.

۶-۴-۲-۸ – دستگاه‌های تکیه‌گاهی الاستومر

روش‌های محاسباتی این گونه تکیه‌گاه‌ها مدون شده است و طراحی آنها باید بر اساس آیین‌نامه‌های معتبر مربوط، مانند آیین‌نامه اروپا یا اشتو، صورت گیرد. ساخت و آزمایش آنها را نیز می‌توان بر اساس این آیین‌نامه‌ها انجام داد. شرکت‌های سازنده محصولات خود را دسته‌بندی کرده و اطلاعات فنی مربوط (توان باربری و حدود تغییرشکل‌ها و غیره) به هر یک از انواع تولیدات خود را در مدارک مشخصات فنی مربوط ارایه می‌دهند. طراح با توجه به نیاز خود می‌تواند دستگاه تکیه‌گاهی مناسب را از مجموعه تولیدات مزبور انتخاب نماید. در موارد خاص، ممکن است دستگاه تکیه‌گاهی متناسب با نیازهای خاص پروژه طراحی و ساخته شده و از طریق آزمایش‌رفتارشان مورد ارزیابی قرار گیرد.

۶-۴-۲-۹- دستگاه تکیه‌گاه‌های چنددورانی با بار زیاد

ـ دستگاه‌های تکیه‌گاهی قابلمه‌ای

در دستگاه تکیه‌گاهی قابلمه‌ای، قطعه‌ای به شکل گرده از الاستومر محدودشده تهیه و تحت فشار زیاد قرار می‌گیرد. این‌امر موجب می‌شود مواد الاستومر به طور مؤثری همانند مایع عمل نماید. اجزای دستگاه تکیه‌گاه قابلمه‌ای در فصل ۴ تشریح شده‌اند. گرده نئوپرن یا لاستیک طبیعی در صفحه قابلمه ماشین‌کاری شده محدود شده و بار قائم به گرده الاستومر توسط پیستون که در داخل جزء قابلمه‌ای شکل قرار می‌گیرد وارد می‌شود. درگیری حلقه آب‌بندی، از فرار الاستومر در حد فاصل بین پیستون و قابلمه جلوگیری می‌کند. مقاومت در مقابل نیروهای افقی از طریق سطح تماس بین پیستون و قابلمه تأمین می‌شود. بارهای افقی و قائم از طریق پیستون و قابلمه به صفحه زیرین و از طریق فشار و اتصالات مکانیکی به پایه‌های تکیه‌گاهی منتقل می‌شوند.

در آیین‌نامه‌های معتبر تخصصی، الزامات طراحی این تکیه‌گاه‌ها ارایه شده است. همچنین آیین‌نامه‌های مزبور استفاده از اصول مهندسی را برای طراحی دستگاه تکیه‌گاه‌های قابلمه‌ای مجاز می‌دانند که شامل استفاده از تئوری‌های گسیختگی در محاسبات کلفتی بدنه قابلمه‌ها نیز می‌باشد. ولی از آنجا که سازندگان این نوع تکیه‌گاه در طرح و ساخت آنها از آزمایش برای طراحی به طور گسترده استفاده کرده و رفتار آنها را بر اساس آزمایش نیز ارزیابی کرده‌اند، بهتر است طراحی این نوع تکیه‌گاه‌ها را به سازنده واگذار کرد و در مشخصات فنی قرارداد، بارها و حرکت‌ها تعیین گردند و همچنین مشخصات پیچ‌های مهاری، طول، فاصله، ضخامت صفحات زیرین و رویین نیز به اضافه ارتفاع لازم برای تعویض در مشخصات فنی قرارداد تعیین شوند.

مدارک طراحی و محاسبات مربوط یا گزارش آزمایش عملکرد باید توسط مهندس طراح کنترل و تأیید شود.

– دستگاه تکیه‌گاه‌های گرد

در دستگاه تکیه‌گاه‌های گرد، صفحه گردی از نوع الاستومر وجود دارد که تحت فشار بالا قرار می‌گیرد. گرده الاستومری در برابر فشار و دوران سخت بوده ولی به راحتی شکم می‌دهد. نیروی افقی از صفحه بالایی یا توسط میله برشی میانی یا حلقه محدودکننده محیطی منتقل می‌شود. حالت اخیر شبیه به دستگاه تکیه‌گاه قابلمه‌ای است بدون آنکه گرده محدود شده باشد و یا آنکه نیازی به حلقه آب‌بندی باشد. طراحی این نوع از دستگاه‌های تکیه‌گاهی نیز بهتر است با ارایه نیازها و ملزومات طرح و رفتار مورد انتظار تحت اثر کنش‌های گوناگون به سازنده واگذار گردد.

– تکیه‌گاه‌های کروی

در دستگاه تکیه‌گاه‌های کروی، هم انتقال بار قائم و هم انتقال بار افقی از تماس کروی دو صفحه کاو و کوژ انجام می‌گیرد. سطح ارتباطی معمولاً از بالشتکی با اصطکاک پایین شامل تفلون، PTFE، و فولاد ضدزنگ تشکیل شده است. کلیه بارهای قائم به صورت شعاعی و کلیه بارهای افقی با توجه به هندسه کروی صفحات انتقال می‌یابد. در این مورد معمولاً به جهت ملاحظات اجرایی بار افقی، به میزان کسر محدودی از بار قائم در نظر گرفته می‌شود. طراحی این نوع از دستگاه‌های تکیه‌گاهی نیز بهتر است با ارایه نیازها و ملزومات طرح و رفتار مورد انتظار به سازنده واگذار گردد.

۶-۵- طراحی اجزا و پوشانه‌های غیرسازه‌ای

۶-۵-۱- اجزای غیرسازه‌ای

طراحی و اجرای جزییات اجزای غیرسازه‌ای باید زیر نظر و یا با هماهنگی مهندس طراح سازه انجام یابد. طراح سازه بایستی از نحوه اتصال اجزای غیرسازه‌ای و احتمال بروز آثار اندرکنشی متقابل آنها با سازه آگاه بوده و پیش‌بینی‌های لازم را به عمل آورد. با توجه به آنکه در این آیین‌نامه از اثر عملکرد توام پوشانه‌های غیرسازه‌ای و سازه فضاکار شبکه‌ای سخنی به میان نیامده است، فرض بر این است که طراحی به‌نحوی صورت می‌گیرد که اثر اندرکنشی فیمابین سازه و پوشانه ناچیز و قابل صرفنظر کردن است.

۶-۵-۲- زیرسازی پوشانه

نصب پوشانه چه به‌صورت مستقیم بر اجزای سازه فضاکار و چه به‌صورت غیرمستقیم از طریق زیرسازی (نصب دستک‌های شیب‌بندی و پرلین‌ها) صورت گیرد، در دوره بهره‌برداری نباید به کارکرد اجزای سازه‌ای صدمه‌ای وارد سازد. همچنین در طراحی باید دقت گردد که در زمان تعمیر و تعویض پوشانه به اجزای سازه‌ای صدمه‌ای وارد نیاید. هر یک از دستک‌های شیب‌بندی و اتصالات مربوط باید قابلیت تحمل خمش ناشی از اثر نیروی افقی، برابر ۳۰٪ وزن یک تکنیسین نصاب پوشانه، در انتهای آزاد عضو را ـ بدون تغییرشکل زیاد ـ داشته باشد.

در حالتی‌که طراحی و نصب پرلین‌ها بدون درز انبساط صورت گرفته باشد، باید اطمینان حاصل شود که آثار ناشی از تغییرات دما منجر به بروز کمانش جانبی ـ پیچشی پرلین‌ها در حین انقباض یا شکست ادوات اتصال (درحین انبساط) نمی‌گردند. همچنین دستک‌های نگهدارنده کرنش‌ها باید برای نیروی برشی و لنگر خمشی ناشی از تغییر طول پرلین‌ها طراحی شوند. توصیه می‌شود در فواصل مناسب از درزهای انبساط آب‌بندی شده استفاده گردد.

۷

طـراحـــی بـــه کمک آزمـــایش

۷ ـ۱ـ کلیات

طراحی سازه‌های فضاکار را می‌توان براساس ترکیب قانع‌کننده‌ای از محاسبات فنی سازه شامل محاسبات تحلیلی نظری، عددی و شیوه‌های شناخته‌شدهٔ طراحی سازه‌ها ـ مطابق ضوابط مندرج در فصل‌های دوم تا ششم ـ و در عین حال بررسی‌های تجربی (آزمایش‌های محلی و آزمایشگاهی) به نتیجه رساند. به‌طور معمول در مواردی که مدل‌ها و روش‌های محاسباتی قانع‌کننده‌ای برای تحلیل با دقت مورد نظر در دست نباشد، از مشاهدات و داده‌های حاصل از آزمایش بهره‌گیری و استنتاج به عمل می‌آید. در حالاتی که تعداد زیادی از اعضا و اجزای مشابه یا واحدهای تکرارشونده در سازه فضاکار مورد استفاده قرار می‌گیرند، انجام آزمایش روی نمونه‌هایی که به طور تصادفی از واحدهای تکرارشونده انتخاب شده‌اند، بر اساس برنامه‌ای که توسط مسؤولین کنترل و تضمین کیفیت تدوین خواهد شد، ضروری خواهد بود. همچنین در مواردی که نیاز به بررسی صحت و سقم مفروضات طراحی احساس شود، انجام آزمایش سهم بسزایی در اتخاذ تصمیمات قابل دفاع طراحی خواهد داشت.

برحسب نوع عامل و حالت حدّی مورد نظر و تراز عمکردی ذیربط، لازم‌است در بهره‌گیری از آزمایش در تعیین کمیت‌های طراحی به سطح معینی از قابلیت اعتماد نایل شد. مسایل عدم قطعیت، از نظر آماری را نیز به دلیل محدودیت در تعداد آزمایش‌ها باید مدّ نظر قرار داد. به این ترتیب، در صورت لزوم، ضرایب پاره‌ای مرتبط با عدم قطعیت ناشی از طراحی و ساخت مدل آزمایش، در مقایسه با سازه واقعی، و همچنین شرایط آزمایش، در مقایسه با شرایط واقعی، در نتیجه‌گیری به منظور کاربرد در محاسبات طراحی اعمال خواهد گردید.

۷ـ۲ـ دسته‌بندی انواع آزمایش‌ها در تناسب با اهداف مطالعات

انواع آزمایش‌ها به شرح زیر قابل تفکیک می‌باشند:

۷ـ۲ـ۱

آزمایش‌هایی که برای تعیین مقاومت نهایی یا ویژگی‌های خدمت‌رسانی سازه یا اعضای سازه تحت تأثیر حالات ترکیب بار مشخصی به‌کار گرفته می‌شوند؛ مانند آزمایش‌های اعضای خرپاهای فضاکار تحت تأثیر نیروی محوری، آزمایش پیونده‌ها تحت تأثیر نیروهای چند محوری، آزمایش روی واحدهای تکرارشونده یا مدول‌های سازه فضاکار از جمله مدول‌های هرمی شکل، آزمایش بارگذاری بر مدل‌های به مقیاس کوچک‌شده یا با مقیاس کامل از مجموعه یا زیرمجموعه سازه فضاکار به قصد بررسی الگوی توزیع تنش‌ها، حاشیه ایمنی در مقابل گسیختگی و یا مطالعه میزان تغییرمکان‌ها.

۷ـ۲ـ۲

آزمایش‌های تعیین خواص مصالح .

۳ـ۲ـ۷

آزمایش‌هایی که با نیّت کاهش عدم قطعیت‌های مرتبط با کمیّت‌ها یا پارامترهای منظور شده در مدل بارگذاری یا آثار ناشی از بارگذاری مشخصی مورد استفاده قرار می‌گیرند، به عنوان نمونه بارزی از این گروه آزمایش‌ها، می‌توان از آزمایش‌های مدل‌های سازه‌های فضاکار در تونل باد یاد کرد.

۴ـ۲ـ۷

آزمایش‌هایی که برای کاهش عدم قطعیت‌های مرتبط با کمیت‌ها و پارامترهای مدل‌های رفتاری، ظرفیتی و مقاومتی سازه، زیر مجموعه سازه یا اجزای سازه به‌کار گرفته می‌شوند؛ مانند آزمایش‌های شناسایی میزان انعطاف‌پذیری پیوندهها و اتصالات، آزمایش‌های تعیین مدل رفتاری اعضای فشاری، آزمایش به منظور بررسی آثار ناشی از عدم قطعیت در ابعاد، میزان نابه‌جایی‌های تصادفی، مقادیر پارامترهای مصالح و پارامترهای مرتبط با مدل‌سازی اثر اندرکنشی خاک و سازه.

۵ـ۲ـ۷

آزمایش‌هایی که به‌منظور شناخت و بررسی کیفیت تولیدات تحویل‌شده یا بررسی میزان همسازی و یکنواختی مشخصات تولیدات به‌کار گرفته می‌شوند؛ مانند آزمایش بر پیوندهها یا به طور جزیی‌تر، پیچ‌های تهیه‌شده برای اتصالات سازه فضاکار.

۶ـ۲ـ۷

آزمایش‌های در حین ساخت که برای کسب اطلاعات لازم در شرایط واقعی سازه برای بخش‌هایی از کار مورد استفاده قرار داده می‌شوند؛ مانند آزمایش‌های بررسی میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها در اتصال پیوندهها، بررسی برقراری تماس در اتصالات تماسی، یا تعیین نیروهای کابل‌های سازه‌های فضاکار کابلی.

۷ـ۲ـ۷

آزمایش‌های کنترل رفتار واقعی سازه یا اعضای سازه‌ای پس از ساخت؛ مانند اندازه‌گیری تغییرمکان الاستیک تحت تأثیر بار مرده یا بارگذاری مشخص، آزمایش‌های تعیین پریودهای ارتعاش طبیعی سازه.

برای انواع آزمایش‌های مذکور در بندهای۷ـ۲ـ۱ تا ۷ـ۲ـ۴، مقادیر طراحی باید از طریق اعمال روش‌های آماری با توجه به معیارهای پذیرش، به‌گونه‌ای مناسب تعیین گردد.

هرگاه هیچ‌گونه نتایج آزمایش قبلی روی نمونه‌های مشابه در زمان طراحی در اختیار نباشد، آزمایش‌های مورد اشاره در بندهای ۷ـ۲ـ۵ تا ۷ـ۲ـ۷ را می‌توان به عنوان آزمایش‌های پذیرش منظور نمود. مقادیر طراحی به‌طور معمول باید تخمین محافظه‌کارانه‌ای باشند که انتظار می‌رود معیارهای پذیرش را در شرایط واقعی ارضا نمایند.

۷ـ۳ ـ انواع آزمایش‌ها

بر حسب نیاز، انواع آزمایش‌های زیر برای سازه‌های فضاکار به‌کار گرفته می‌شوند:

- آزمایش‌های خواص مکانیکی و متالورژیکی مصالح
- آزمایش‌های شناسایی رفتار پیوندهها و اتصالات (استاتیکی، رفت و برگشت، دینامیکی، خستگی پرتواتر و کم تواتر)
- آزمایش‌های شناسایی رفتار اعضا و اتصالات (استاتیکی، رفت و برگشت، دینامیکی، خستگی پرتواتر و کم تواتر)
- آزمایش‌های شناسایی رفتار مدول‌ها و زیرمجموعه‌ها در مقیاس کامل (استاتیکی، رفت و برگشت، دینامیکی، خستگی پرتواتر و کم تواتر)
- آزمایش‌های شناسایی رفتار مدل‌های کوچک مقیاس زیرمجموعه‌ها و مجموعه سازه فضاکار (استاتیکی، رفت و برگشت، دینامیکی، خستگی پرتواتر و کم تواتر)
- آزمایش‌های تونل باد بر مدل‌های کوچک مقیاس
- آزمایش‌های مدل‌های سازه فضاکار بر میز لرزان (به مقیاس کوچک‌شده از مجموعه سازه و زیر مجموعه‌ها یا با مقیاس کامل از زیرمجموعه‌ها)
- آزمایش‌های ایمنی در مقابل حریق
- آزمایش‌های کنترل کیفیت در حین ساخت
- آزمایش‌های کنترل پس از اختتام ساخت (آزمایش بارگذاری برای مطالعه مقاومت و خدمت‌رسانی)
- آزمایش تحت شرایط محیطی ویژه (محیط خورنده، دمای کم و غیره)

۷ـ۴ـ برنامه‌ریزی و طراحی آزمایش‌ها

۷ـ۴ـ۱ـ موارد عمومی

قبل از انجام آزمایش لازم است طرح آزمایش در هماهنگی با مسؤولان آزمایشگاه محل انجام آزمایش‌ها تهیه شود که شامل تمامی اهـداف آزمـایش، جزییات ساخت نمونـه‌ها، نحوهٔ انجام آزمایش، شیوهٔ اعمال بارها و تعیین نـوع، موقعیت و کیفیت ابزار اندازه‌گیری است. در طرح مزبور، به‌طور معمول نتایج مورد انتظار آزمایش، مشخصات نمونه‌های آزمایش یا شیوهٔ نمونه‌گیری، مشخصات بارگذاری، طراحی مجموعهٔ آزمایش، ادوات اندازه‌گیری و میزان دقت اندازه‌گیری‌ها مورد مداقه قرار گیرد و همچنین روش‌شناسی در ارزیابی نتایج حاصله و روش تنظیم گزارش آزمایش‌ها را نیز دربر می‌گیرد. به این ترتیب باید طراحی آزمایش‌ها آنچنان روشن و دقیق صورت گرفته و تبیین گردد که در شرایط یکسان امکان بازتولید نتایج و مشاهدات وجود داشته و تفاوت‌های نتایج در شرایط تقریباً یکسان محدود به حیطهٔ تغییرات قابل تبیین پارامترها، کمیت ها و رواداری‌ها باشد.

۷ـ۴ـ۲ـ اهداف آزمایش، حیطه ودامنه کار

در این طرح لازم‌است اهداف آزمایش به روشنی تشریح گردد. محدودیت‌های آزمایش و ضرایب اصلاحی و تبدیل لازم (برای مثال در حالت نمونه‌های به مقیاس کوچک‌شده)، باید به وضوح توصیف گردند. حدود بارهای اعمالی حداکثر، میزان تغییرشکل‌های حداکثر قابل پیش‌بینی یا مورد نیاز و محدودیت‌های کنترل کنندهٔ آزمایش تشریح گردند. نحوهٔ اعمال کنترل‌های لازم برای حالات قطع اتوماتیک آزمایش در حالات اضطراریِ نقض شرایط ایمنی در حین آزمایش مشخص شوند.

۷ـ۴ـ۳ـ تخمین نتایج آزمایش یا نتایج مورد انتظار آزمایش

لازم‌است تمامی ویژگی‌ها، شرایط و عوامل مؤثر در نتایج آزمایش به دقت مورد توجه قرار گیرند. برخی از موارد حایز اهمیت عبارت‌اند از:

- شرایط سرحدی طبیعی و الزامی،
- پارامترهای هندسی وحیطه تغییرات این پارامترها،
- نابه‌جایی‌های هندسی،
- خواص مصالح،
- پارامترهای متأثر از شیوهٔ ساخت و نصب،
- آثار ناشی از شرایط محیطی و مراحل و ترتیب اعمال عوامل مربوط،
- گونهٔ مورد انتظار خرابی مسلط.

در حالاتی که در مورد گونهٔ غالب خرابی مسلط تردید وجود داشته باشد، برنامه‌ریزی آزمایش‌ها باید شامل آزمایش‌های مکمّل نیز باشد.

۷ـ۴ـ۴ـ مشخصات نمونه‌های آزمایش و نحوهٔ نمونه‌گیری

مشخصات نمونه آزمایش باید به روشنی تعریف گردد یا در انواع آزمایش‌هایی که در آن‌ها نیاز به نمونه‌گیری از مجموعهٔ تولیدات مشابه باشد، باید شیوه نمونه‌گیری از مجموعه‌های تکرارشونده، به نحوی تشریح گردد که نمایشگر شرایط سازه واقعی باشد. نکاتی که باید مد نظر قرار گیرند، عبارت‌اند از:

- ابعاد و رواداری‌ها،
- کیفیت مصالح و ساخت،
- تعداد نمونه‌های آزمایش،
- روش نمونه‌گیری،
- قیود و محدودیت‌ها،

هدف از فرایند نمونه‌گیری به‌دست آوردن نمونه‌هایی است که از نظر آماری نمایندگان مناسبی از مجموعه باشند. لازم‌است توجه خاصی به تفاوت‌های بین نمونه‌های آزمایش و جامعه آماری تولیدات معطوف گردد؛ زیرا این تفاوت‌ها می‌تواند نتایج آزمایش‌ها را

تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین شناسایی آثار ناشی از چنین تفاوت‌هایی در تجزیه و تحلیل و اصلاح نتایج و شیوهٔ استنتاج دارای اهمیت می باشد.

۷ـ۴ـ۵ـ مشخصات بارگذاری

شرایط بارگذاری و همچنین محیطی که باید برای آزمایش مشخص گردد، شامل موارد زیر می‌باشند:

- مشخص نمودن نقاط و مواضع بارگذاری،
- تبیین تاریخچهٔ بارگذاری،
- تعریف شرایط تکیه‌گاهی و قیود حرکتی (جابه‌جایی و دَوَران)،
- تعیین دما یا تغییرات دما در حین آزمایش،
- مشخص نمودن رطوبت نسبی و تغییرات آن در حین آزمایش،
- تشریح عوامل شیمیایی محیطی مؤثر،
- اتخاذ تصمیم در مورد نحوهٔ اعمال بار از طریق کنترل نیرو یا تغییر مکان.

ترتیب بارگذاری باید در حد امکان معرف حالات متعارف، استثنایی یا بحرانی باشد که می‌تواند در اجزای زیرمجموعه‌ها یا سازه واقعی بروز نماید. اندرکنش پاسخ سازه و ابزارهای مجموعهٔ آزمایش و اعمال بار را باید در موارد مؤثر منظور نمود.

۷ـ۴ـ۶ـ طراحی مجموعه آزمایش و نصب تجهیزات و ابزار بندی

تجهیزات آزمایش باید از نظر میزان دقت و حیطه اندازه‌گیری ظرفیت با نوع آزمایش هماهنگ باشند. همچنین باید توجه خاص به مسایلی از قبیل تمهیداتی برای ایجاد صلبیت، سختی و مقاومت مکفی قاب‌های عکس‌العمل، تأمین ظرفیت کافی تجهیزات اعمال نیرو، تعیین مسیر اعمال بارها، ایجاد فضاهای آزاد به میزان کافی برای تغییرمکان‌های نمونه آزمایش و بالاخره اندازه‌گیری تغییرمکان‌های تکیه‌گاهی مبذول گردد.

۷ـ۴ـ۷ـ روش اندازه‌گیری کمیت‌ها

پیش از آزمایش لازم‌است فهرستی از تمامی کمّیّت‌های متغیری که باید تغییرات آنان در حین آزمایش اندازه‌گیری شوند، برای هر نمونه آزمایش تهیه گردد. در این زمینه باید نوع و میزان دقت و دامنهٔ اندازه‌گیری‌های ابزارهای اندازه‌گیری، موقعیت و جهات اندازه‌گیری‌ها، روش ثبت نتایج و در صورت لزوم، تاریخچهٔ زمانی بارها، تغییر مکان‌ها، کرنش‌ها، سرعت‌ها، شتاب‌ها، بسامدها و غیره تعیین گردند.

۷ـ۵ـ ارزیابی، پردازش و پالایش داده‌ها، تجزیه و تحلیل نتایج، استنتاج، جمع‌بندی و ارایـه گـزارش آزمایش

نحوهٔ ارزیابی، تجزیه و تحلیل داده‌ها وارایه گزارش‌های آزمایش‌ها به شرح زیر است.

۷ـ۵ـ۱ـ استخراج مقادیر کمیت‌ها برای طراحی

استخراج مقادیر کمّیّت‌های مورد نظر برای خواص مصالح و پارامترهای مدل یا ارزیابی مقاومت به یکی از روش‌های زیر صورت می‌گیرد:

(الف) با ارزیابی مقدار مشخصه، که با یک ضریب پاره‌ای اصلاح و در صورت نیاز، ضرایب تبدیل مربوط به مشخصه‌های ابزار اندازه‌گیری، تجهیزات اندازه‌گیری یا مقیاس کار، بر آن اعمال می‌گردد.

(ب) از طریق تعیین مستقیم مقدار طراحی با در نظر گرفتن ضرایب اصلاحی و تبدیل لازم و سطح اطمینان کلی مورد نظر.

۷ـ۵ـ۲ـ استخراج مقدار مشخصه از آزمایش‌ها

تعیین مقادیر مشخصه کمیت‌ها باید با در نظر گرفتن موارد زیر صورت گیرد:

الف) پراکندگی داده‌های حاصل از آزمایش،

ب) عدم قطعیت مرتبط با تعداد آزمایش‌ها،

پ) اطلاعات آماری پیشین.

۷ـ۵ـ۳ـ ضرایب پاره‌ای

ضرایبی را که باید به مقدار مشخصه کمیت یا پارامتری اعمال شود، می‌توان برابر با ضرایب پاره‌ای مشخص‌شده در این آیین‌نامه اختیار نمود، مشروط برآنکه کمیت حاصل از آزمایش و حوزهٔ کاربرد ضریب پاره‌ای مورد استفاده در طراحی، از تطابق ماهیتی برخوردار باشند.

۷ـ۵ـ۴ـ آثار عواملی که از طریق آزمایش پوشش داده نشده‌اند

در صورتی‌که پاسخ سازه یا عضو سازه‌ای یا مقاومت مصالح وابسته به آثاری باشد که به میزان مکفی از طریق آزمایش پوشش داده نشده باشند، باید از طریق مدل محاسباتی چنین آثاری را مورد مطالعه قرار داد. به عنوان مثال، در صورتی‌که شرایط آزمایش دربرگیرندهٔ آثار زمان و طول مدت آزمایش، آثار مربوط به مقیاس شدن نمونه‌ها، اثر مقادیر مطلق اندازه‌ها، شرایط متفاوت محیطی و نمایشگر واقع‌گرایانهٔ شرایط بارگذاری و سرحدی نـباشند، مطالـعات نظری و یا عددی کافی برای درنظرگرفتن این آثـار به نـحو واقع‌گرایانه ضروری خواهد بود.

۷ـ۵ـ۵ـ تعیین مقادیر طراحی از روش مستقیم

در حالاتی که روش ۷ـ۵ـ۱ـ ب مورد استفاده قرار گیرد، برای تعیین مقادیر طراحی، موارد زیر را باید منظور داشت:

- حالت حدی مربوط در تراز عملکردی مورد نظر،
- سطح اطمینان مورد نیاز در سطح خطر مورد نظر،
- همسازی با مفروضات مربوط به عوامل،
- عمر مفید مورد نظر،
- اطلاعات گردآوری‌شده از مطالعات و آزمایش‌های پیشین یا در زمینهٔ رفتار سازه‌ها یا نمونه‌های با رفتار مشابه.

۷ـ۵ـ۶ـ مقایسه نتایج آزمایش با مقادیر پیش‌بینی شده از طریق مطالعات نظری

در روند ارزیابی نتایج آزمایش، باید رفتار نمونهٔ آزمایش و گونه‌های خرابی مشاهده شده با پیش‌بینی‌های حاصل از مطالعات نظری مقایسه شود. هرگاه عدم تطابق نتایج به میزان قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با مقادیر تخمین زده شده ملاحظه گردد، دلایل آن باید روشن شود. نتیجهٔ بررسی‌ها می‌تواند منجر به انجام آزمایش‌های بیشتر، در حالات بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی متنوع تر شود یا به اصلاح مدل‌های نظری منتهی گردد.

۷ـ۵ـ۷ـ ارزیابی نتایج آزمایش براساس روش‌های آماری

ارزیابی نتایج آزمایش باید بر روش‌های آماری متکی باشد و با استفاده از اطلاعات آماری موجود در مورد نوع تابع توزیع مناسب و پارامترهای مرتبط آن به عمل آید.

روشی که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد، تنها در حالت ارضای شرایط زیر قابل استفاده خواهد بود:

(الف) داده‌های آماری (شامل داده‌های موجود از آزمایش‌های پیشین) از جوامع آماری شناسایی‌شده که به میزان مکفی همگن باشند، استخراج گردیده باشد،

(ب) داده‌ها به مقدار مکفی برداشت شده باشند،

(پ) حیطهٔ صحت و سقم نتایج آزمایش مورد توجه قرار داده شود.

دامنهٔ اعتبار و صحت و سقم نتایج ارزیابی آزمایش تنها برای مشخصات و ویژگی‌های بار اعمالی در آزمایش در نظر گرفته می‌شود. در حالاتی که لازم است برای پوشش دادن به مقادیر پارامترهای طراحی و بارگذاری، برون‌یابی از نتایج آزمایش به عمل آید، در اغلب موارد لازم خواهد بود از اطلاعات و داده‌های مکمل آزمایش‌های قبلی یا اطلاعات حاصل از مطالعات نظری در استنتاج نهایی بهره‌گیری شود.

۷ـ۶ـ تعیین مقادیر کمیت‌های طراحی به روش آماری

۷ـ۶ـ۱ـ موارد عمومی

در این بند، نحوهٔ عملی استخراج مقادیر طراحی از نتایج آزمایش‌های نوع ۷ـ۵ـ۱ـ (الف) و ۷ـ۵ـ۱ـ(ب)، برای یک ویژگی یا کمیت یا پارامتر مانند مقاومت (منفرداً) مورد بحث قرار داده شده‌است.

روابطی که در این بخش به آن رجوع شده، براساس روش‌های پیشین با توزیع‌های از پیش‌تعیین‌شدهٔ غیرصریح تقریباً به همان نتایجی منتهی می‌گردد که از روش‌های کلاسیک آماری با سطح اطمینان ۷۵٪ به دست می‌آید.

۷ـ۶ـ۲

برای نمایش مقاومت یک عضو، قطعه یا فراورده تولیدی یا مشخصهٔ مؤثر بر مقاومت آن، ویژگی، کمیت یا پارامتر منفـردی را به‌کار می‌بریم.

۷ـ۶ـ۳

در حالت مذکور در بند ۷ـ۵ـ۱ـ(الف)، روش‌های آماری معمول به‌طور مستقیم برای تعیین مقادیر مشخصه، طراحی یا ضرایب پاره‌ای قابل کاربرد خواهند بود.

۷ـ۶ـ۴

در حالت مذکور در بند ۷ـ۵ـ۱ـ (ب)، لازم‌است به این امر توجه شود که مقادیر طراحی مقاومت باید شامل آثار عوامل زیر باشند:

- آثار خواص مصالح و سایر پارامترهای مؤثر،
- آثار عدم قطعیت در مدل، مجموعه و روش آزمایش و شیوه‌های اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها،
- سایر آثار (مقیاس، اندازه، و غیره).

۷ـ۶ـ۵

روابط آماری مورد اشاره مبتنی بر مفروضات زیر می‌باشند:

- تمامی متغیرها از توزیع نرمال یا لوگ ـ نرمال تبعیت می‌نمایند.
- از پیش اطلاعی در ارتباط با مقادیر متوسط در دست نیست.

۷ـ۷ـ تعیین آماری مدل‌های مقاومت

۷ـ۷ـ۱ـ موارد عمومی

بند ۷-۷ به‌طور عمده به روش‌های کالیبره‌نمودن مدل‌های مقاومت برای استنتاج مقادیر طراحی از آزمایش‌های گروه ۷ـ۲ـ۴ اختصاص یافته است. داده‌ها، دانسته‌ها و مفروضات مرتبط با مطالعات پیشین را باید تا حد ممکن یافته و از آنها بهره‌گیری نمود.

۲ـ۷ـ۷

براساس مشاهدات رفتار واقعی طی آزمایش‌ها و همچنین بر مبنای مطالعات نظری، لازم‌است یک "مدل طراحی" ایجاد گردد که منتج به دستیابی به یک تابع مقاومت شود. صحت این مدل را باید از طریق تفسیر آماری تمامی داده‌های موجود حاصل از آزمایش‌ها مورد بررسی قرار داد. در صورت لزوم، مدل طراحی تا برقراری هماهنگی بین نتایج آزمایش و مقادیر نظری اصلاح خواهد شد.

۳ـ۷ـ۷

انحرافات حاصل از به‌کارگیری مدل طراحی باید از طریق مقایسه با نتایج آزمایش‌ها مشخص گردند. این انحرافات را باید در ترکیب با سایر انحرافات مربوط به دیگر متغیرهای تابع مقاومت در نظر گرفت تا میزان انحراف کلی قابل تخمین باشد. متغیرهای دیگر تابع مقاومت شامل موارد زیر می‌گردند:

- انحراف در ارتباط با مقاومت مصالح و سختی،
- انحراف در ارتباط با خواص هندسی.

۴ـ۷ـ۷

مقاومت مشخصه باید با در نظرگرفتن انحرافات تمامی متغیرها تعیین گردد.

۷ ـ۸ ـ راهنمای آزمایش‌های بارگذاری (سازه یا زیرمجموعه‌ها)

۷ـ۸ـ۱ـ کلیات

۱ـ۱ـ۸ـ۷

آزمایش بارگذاری به‌طور معمول در حالات زیر انجام می‌شود:

(الف) مدل‌های ریاضی برای نمایش یا تخمین واقع‌گرایانه رفتار سازه فضاکار یا زیرمجموعه‌های آن ناکافی بوده یا به نتایجی منتج گردند که از نظر اقتصادی قابل توجیه نباشد.

(ب) هرگاه لازم باشد، مقاومت طراحی سازه یا زیرمجموعه‌هایش را از طریق مقاومت نهایی واقع‌گرایانه سازه تعیین نمود.

(پ) در مورد تولیداتی که قبلاً از طریق آزمایش ارزیابی و پذیرفته شده باشند؛ هرگاه لازم باشد میزان یکنواختی یا پراکندگی خواص تولیدات مزبور، شامل زیرمجموعه‌ها و واحدهای تکرارشوندهٔ سازه فضاکار بررسی گردد.

(ت) در مواردی که میزان مقاومت یا سختی سازه یا زیرمجموعه‌ها و اجزای سازه مورد تردید باشد و مشاهدهٔ رفتار و عملکرد واقعی سازه توصیه گردد.

۷ـ۸ـ۱ـ۲

برای ارضای این حالات چهار نوع آزمایش به شرح زیر قابل توصیه است:

(الف) آزمایش پذیرش، برای تأیید رفتار کلی سازه،
(ب) آزمایش مقاومت، تحت اعمال بارهای نهایی مورد نظر با توجه به سطح خطر و تراز عملکردی،
(پ) آزمایش تا خرابی ، جهت تعیین مقاومت نهایی و گونهٔ گسیختگی مسلط،
(ت) آزمایش کنترل کیفی برای بررسی:

- ارضا یا عدم ارضای معیارهای مرتبط با خواص و پارامترها و کمیّت‌های از پیش تعیین‌شده،
- میزان یکنواختی یا پراکندگی نتایج تولیدات اجزا، پیوندهها، اعضا و واحدهای تکرارشوندهٔ سازهٔ فضاکار در تولید انبوه.

۷ـ۸ـ۱ـ۳

روش‌های آزمایش مورد بحث در این بخش تنها برای سازه‌های فضاکار فولادی در نظر گرفته شده‌اند. در مورد آزمایش‌های استاندارد اعضا و پوشانه‌های سردنورد شده باید به استانداردهای معتبر در این زمینه مراجعه شود.

این فصل روش‌های آزمایش سازه‌های فضاکار مختلط با پوشانه‌های بتنی مختلط با شبکه فضاکار و روش‌های آزمایش برای بررسی پدیده‌های خستگی پرتواتر و خستگی کم‌تواتر را پوشش نمی‌دهد. در مورد آزمایش‌های بارگذاری روی مدل‌های به مقیاس کوچک شده باید جزییات نحوه مقیاس نمودن و استنتاج تعیین گردد. در آزمایش‌های تحت بارهای چرخه‌ای باید تاریخچه بارگذاری به‌روشنی مشخص شود.

۷ـ۸ـ۲ـ اهداف و شرایط آزمایش

۷ـ۸ـ۲ـ۱

طراحی قاب عکس‌العمل (واکنش) آزمایش باید به‌گونه‌ای باشد که سیستم بارگذاری به میزان کافی و به نحو واقع‌گرایانه‌ای بزرگی و توزیع بارها را به صورت مورد نظر ایجاد نماید و شرایطی برای نمونه فراهم گردد که نمایشگر قابل‌پذیرشی از شرایط واقعی مورد نظر نمونه در سازهٔ واقعی، تحت تأثیر سطح بار مورد نظر باشد.

۷ـ۸ـ۲ـ۲

نمونه باید بتواند آزادانه تحت تأثیر بار، تغییرمکان و تغییـرشکل دهد. قیود جانبی و پیچشی باید نمایشگـر وضعیت واقعی در بهره‌برداری واقعی باشند.

۷ـ۸ـ۲ـ۳

باید دقت شود تا از بروز برون محوری‌های ناخواسته در نقاط اعمال بار و تکیه‌گاه‌ها ممانعت به عمل آید.

۷ـ۸ـ۲ـ۴

اندازه‌گیری‌های بار و تغییرمکان باید حتی‌المقدور در فواصل زمانی کوتاه و در گام‌های نسبتاً کوچک تغییر شکل به عمل آید.

۷ـ۸ـ۲ـ۵

اندازه‌گیری تغییرمکان‌ها باید به تعداد کافی در نقاط و مواضعی به عمل آید که از نظر میزان تغییرمکان و نمایش فرم تغییرشکل یافته یا هندسهٔ کمانش، حایز اهمیت تشخیص داده می‌شوند. مقادیر محتمل تغییرمکان‌ها را باید از پیش تخمین زد و به میزان کافی فضای لازم را برای تغییر مکان آزادانهٔ نمونه فراهم کرد و همچنین از ابزار اندازه‌گیری با دقت کافی و قابل کاربرد در هماهنگی با میزان تغییرمکان حداکثر قابل تخمین استفاده نمود.

۷ـ۸ـ۲ـ۶

در برخی از حالات که اندازه‌گیری تنش‌های نمونه مورد نظر باشد، این امر به طور کیفی با بهره‌گیری از پوشش شکننده و به طور کمّی با نصب کرنش‌سنج در مواضع مورد نظر انجام خواهد شد. اطلاعات مزبور باید همراه و هماهنگ با اطلاعات مربوط به رفتار کلی و روابط بارـ تغییرمکان نمونه مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند.

۷ـ۸ـ۳ـ روش‌های عمومی آزمایش بارگذاری

۷ـ۸ـ۳ـ۱

هرگاه وزن خود نمونه حاوی بار دایمی وارده در شرایط بهره‌برداری باشد، لازم‌است این شرایط بارگذاری از طریق اعمال بار خارجی ثابت تأمین شود یا اثر عدم حضور این بارها در مرحله ارزیابی نتایج آزمایش، در محاسبات در نظر گرفته شود.

۷ـ۸ـ۳ـ۲

پیش از انجام آزمایش تا مراحل بروز رفتار الاستوپلاستیک، به‌طور معمول یک بارگذاری اولیه در حد رفتار خطی روی نمونهٔ آزمایش انجام می‌گیرد تا صحت عملکرد ابزار و تجهیزات، کیفیت عملکرد تکیه‌گاه‌ها و شرایط سرحدی مورد بررسی قرار گیرد و در صورت نیاز، اصلاحات لازم اعمال گردد.

۷ـ۸ـ۳ـ۳

بارگذاری باید به صورت گام به‌گام با طرح از پیش تعیین شده و متناسب با نیّت مورد نظر در آزمایش اعمال گردد. پس از هر مرحلهٔ بارگذاری، باید نمونه را از نظر ردیابی علایم بروز و گسترش پلاستیسیته، کمانش و شکست مورد بازرسی دقیق قرار داد. با شروع رفتار غیرخطی و افزایش تغییرمکان برای گام‌های بارگذاری، باید مقادیر گـام‌های بارگذاری را کاهش داد. استفـاده از منحنی‌های بارـ تغییر مکان در مواضع و جهات اصلی که نمایشگر رفتار کلی سیستم باشند، به شناسایی این مراحل کمک می نمایند.

۷ـ۸ـ۳ـ۴

برای تعیین بار حداکثر از دیدگاه آزمون پذیرش، یا آزمایش مقاومت، این بار را باید به میزان ثابت برای حداقل ۱ ساعت بر نمونه اعمال نمود و قرائت بار و تغییرمکان حداقل هر ۱۵ دقیقه صورت گیرد. این امر تا زمانی ادامه می‌یابد که افزایش قابل ملاحظه‌ای در تغییرمکان تحت بار ثابت طی دو برداشت در بازه زمانی ۱۵ دقیقه یا حداقل ۱ ساعت، مشاهده نگردد.

۷ـ۸ـ۳ـ۵

بار برداری باید در گام‌های کاهشی منظمی صورت گیرد و در هر مرحله قرائت میزان تغییرمکان‌ها به عمل آید تا بار کاملاً برداشته شود.

۷ـ۸ـ۳ـ۶

هرگاه نتایج آزمایش برای تأیید رفتار سازه‌های شاهد یا زیرمجموعه‌ها، واحدها و اعضا و اجزای سازه مورد نظر باشد، خواص فولاد مورد استفاده در نمونه‌های آزمایش را باید از طریق آزمایش‌های کششی مصالح شناسایی نمود تا بتوان بین نتایج آزمایش‌های نمونه‌های آزمایش شدهٔ گوناگون در زمان‌های متفاوت، مقایسه به عمل آورد.

نمونه‌های آزمایش کششی را می‌توان از باقیمانده همان مصالح تهیه نمود که نمونهٔ آزمایش از آن ساخته‌شده‌است. همچنین تهیه این نمونه‌ها از بخش جاری نشده، کمانش نکرده و فاقد ترکِ نمونهٔ آزمایش، پس از انجام آزمایش نیز مجاز می‌باشد.

۷ـ۸ـ۴ـ فرایندهای ویژه

۷ـ۸ـ۴ـ۱

آزمایش‌های پذیرش به صورت آزمایش بارگذاری غیرمخرب برای تأیید عملکرد سازه یا اعضا و اجزا و اتصالات سازه به‌کار برده می شوند. نمونه‌های آزمایش باید قابلیت تحمل بار مورد اشاره در بند ۷ـ۸ـ۳ـ۴ را به اثبات رسانند.

۷ـ۸ـ ۴ـ۲

با توجه به وجود احتمال ایجاد تغییرشکل‌ها و اعوجاج‌ها موضعی دایمی تحت تأثیر بار فوق، این آثار لزوماً نشانگر خرابی سازه‌ای در آزمایش پذیرش تلقی نمی‌گردند؛ ولی در ارتباط با پاسخ منفرد آنها و اثر آن در پاسخ کلی باید مطالعات لازم به‌عمل آید.

۷ـ۸ ـ۴ـ ۳

ضرایب بار برای آزمایش‌های پذیرش به شرح زیر می‌باشند:

(۱/۰۰) برای وزن نمونه حاضر در حین آزمایش،

(۱/۱۵) برای باقیماندهٔ بار دایمی،

(۱/۲۵) برای بارهای متغیر.

۷ـ۸ـ۴ـ۴

نمونه آزمایش باید معیارهای زیر را ارضا نماید:

(الف) تحت اثر بار پذیرش، پاسخ نمونه عمدتاً در حیطه رژیم خطی قرار داشته باشد.

(ب) پس از باربرداری، تغییر مکان پس ماند از ۲۰٪ حداکثر تغییرمکان ثبت‌شده در حین بارگذاری تجاوز ننماید.

۷ـ۸ـ۴ـ۵

در صورت عدم ارضای شرایط مندرج در بندهای ۷ـ۸ـ۴ـ۴ (الف و ب)، تنها یک بار می‌توان آزمایش را تکرار نمود. در این حالت، شرط (الف) فوق باید برقرار بوده و تغییرمکان پس ماند نباید از ۱۰٪ حداکثر تغییرمکان ثبت‌شده حین بارگذاری تجاوز نماید.

۷ـ ۸ ـ ۵ ـ آزمایش مقاومت

۷ـ۸ـ۵ـ۱

آزمایش‌های مقاومت برای تأیید مقاومت محاسباتی سازه، زیرمجموعه‌های سازه، اعضا؛ پیوندها و اتصالات، ادوات اتصال و سایر اجزا و تکیه‌گاه‌ها به‌کار گرفته می‌شوند.

۷ـ۸ـ۵ـ۲

هرگاه تعدادی از اقلام و قطعات، اعضا، یا واحدهای تکرارشونده براساس طرح واحدی تولید می‌گردند و یک یا دو نمونه اولیه جهت تأیید مقاومت آنها مورد آزمایش قرار داده می‌شود، بقیه آزمایش‌های پذیرش صرفاً به منظور کنترل یکنواختی فرایند تولید به عمل می‌آید.

۷ـ۸ـ۵ـ۳

پیش از آزمایش‌های مقاومت، نمونه‌ها باید آزمایش پذیرش را ارضا نموده باشند.

۷ـ۸ـ۵ـ۴

مقادیر مورد انتظار بارگذاری برای آزمایش مقاومت باید بر اساس بار طراحی محاسباتی در حالت حدی نهایی برای ترکیب بارهای ذیربط دایمی و متغیر تخمین زده شود.

۷ـ۸ـ۵ـ۵

مقاومت نمونه آزمایش تابع خواص مصالح خواهد بود، بنابراین ضرورت دارد مشخصات مصالح فولادی از طریق تهیه و آزمایش نمونه‌های آزمایش کششی، مشخص گردند.

۷ـ۸ـ۵ـ۶

مقادیر متوسط مقاومت جاری شدن حاصل از آزمایش نمونه‌های کششی باید برای نمونهٔ آزمایش اصلی تعیین گردد.

۷ـ۵ـ۸ـ۷

بار آزمایش (شامل وزن نمونه) عبارت‌است از :

$$F_{t,s} = (F_{d,ult})\ (f_{ym}/f_y)\ (\gamma_t) \qquad (۱ـ۷)$$

که در آن :

$F_{t,s}$ بار آزمایش،

$F_{d,ult}$ بار طراحی برای حالت حدّی نهایی مورد نظر،

f_{ym} مقاومت جاری شدن متوسط حاصل از آزمایش نمونه‌های کوپن کششی،

γ_t ضریب بار در آزمایش،

f_y مقاومت جاری شدن مشخصه طراحی، است.

در ارتباط با ضریب بار باید متناسب با نوع عامل و ترکیب عوامل مورد نظر، این ضریب مطابق ضرایب بار این آیین‌نامه اختیار شود.

۸ـ۵ـ۸ـ۷

تحت اثر بار $F_{t,s}$ هیچگونه خرابی ناشی از کمانش یا شکست در هیچ یک از مواضع نمونه نباید بروز نماید.

۹ـ۵ـ۸ـ۷

پس از باربرداری کامل، تغییرمکان برگشت پذیر نمونه نباید از ۲۰٪ تغییر مکان حداکثرِ اندازه‌گیری شده در آن راستا کمتر باشد.

۷ـ۸ـ۶ـ آزمایش تا خرابی

۱ـ۶ـ۸ـ۷

هدف از آزمایش تا مرحله تخریب تعیین مقاومت طراحی از طریق شناخت مقاومت نهایی واقعی ثبت‌شده طی آزمایش است.

۲ـ۶ـ۸ـ۷

تنها از طریق آزمایش تا مرحله تخریب است که گونهٔ خرابی واقعی و مقاومت یک نمونه را می‌توان تعیین نمود. از نظر کسب اطلاعات بیشتر، مفید است که این آزمایش پس از آزمایش مقاومت انجام گیرد.

۳ـ۶ـ۸ـ۷

پیش از آزمایش تا مرحله تخریب، نمونه آزمایش باید ابتدا شرایط مندرج در بند ۷ـ۸ـ ۵ مربوط به آزمایش مقاومت را ارضا نماید. مقاومت نهایی تخمین زده شده از روش‌های نظری را باید براساس آگاهی‌های حاصل از ملاحظهٔ رفتار نمونه، طی آزمایش مقاومت مورد تجدید نظر قرار داد.

۷ـ۸ـ۶ـ۴

طی آزمایش نمونه تا مرحله تخریب، لازم است بارگذاری به صورت گام به‌گام و به طریق افزاینده تا بار آزمایش مقاومت، به صورتی که در بند ۷ـ ۸ ـ ۵ ذکر شد، افزایش یابد و پس از بررسی منحنی رفتاری بار ـ تغییر مکان تا مرحله آزمایش مقاومت، نسبت به مقادیر افزایش بار و نحوهٔ ادامهٔ بارگذاری بعدی اتخاذ تصمیم گردد، آزمایش باید با پایش مستمر رفتار نمونه و منحنی رفتاری آن توأم باشد.

۷ـ۸ـ۶ـ۵

مقاومت بار نهایی نمونه، $F_{t,R}$ ، عبارت‌است از باری که در آن نمونه آزمایش قادر به حمل افزایش بار بیشتری نباشد و در واقع بر آستانه‌ای دلالت دارد که فراتر از آن، با وجود اعمال بار، نمونه از تحمـل بار بیشتر شانه خالی نموده و مقاومت کمتری را نشان می‌دهد که به‌طور معمول با افزایش تغییر مکان توأم خواهد بود، بسته به آنکه نمونه در زمره اعضا و اجزا یا واحدهای کنترل‌شونده توسط تغییرمکان یا نیرو باشد، منحنی رفتاری آن پس از نیل به بار نهایی به لحاظ ماهیت متفاوت خواهد بود.

۷ـ۸ـ۶ـ۶

تحت تأثیر بار نهایی، $F_{t,R}$ ، اعوجاج‌ها، تغییرمکان‌ها و تغییرشکل‌های پس‌ماند دایمی به احتمال زیاد به وجود خواهند آمد. گاه مقادیر بار نهایی را براساس حد تغییرمکان تعریف‌شده مشخص می‌نمایند که در این حالت در صورتی‌که مقادیر بار، تا نیل به حد تغییر مکان مزبور، به بار نهایی نمونه نرسیده باشد، با توجه به میزان قابل ملاحظهٔ تغییرمکان ایجاد شده در حد تعریف‌شده، در عمل نمونه از حیزانتفاع ساقط گردیده و بار حدی آزمایش بر اساس بار متناظر با این حد تغییرمکان تعیین می‌گردد.

۷ـ۸ـ۶ـ۷

به‌طور معمول در مورد نمونه‌هایی که اسماً یکسان ساخته شده‌اند، برای نتیجه‌گیری حداقل ۳ آزمایش تا حد تخریب مورد نیاز خواهد بود.

۷ـ۸ـ۶ـ۸

درحالتی‌که انحراف نتایج هر یک از آزمایش‌ها از مقدار متوسط تمامی آزمایش‌ها از ۱۰٪ تجاوز نماید، لازم‌است حداقل ۶ آزمایش به انجام رسد. در این حالت، برای تعیین مقاومت طراحی باید از روش‌های آماری بهره‌گیری نمود.

۷ـ۸ـ۶ـ۹

هرگاه انحراف از مقادیر متوسط، از ۱۰٪ تجاوز ننماید، مقاومت طراحی، F_{Rd}، را می‌توان از روابط زیر به دست آورد:

۷ـ۸ـ۶ـ۹ـ۱ـ در حالت رفتار شکل‌پذیر (کنترل تغییرمکانی) :

$$F_{Rd} = 0.9\ (F_{(t,R)min})\ (f_y / f_{ym}) / (\gamma_t) \qquad (۲ـ۷)$$

که در آن :

$F_{(t,R)min}$ حداقل مقاومت نهایی قرائت شده در آزمایش‌های نمونه‌های مشابه و

f_{ym} مقاومت جاری‌شدن متوسط نمونه‌های آزمایش نمونه کششی است.

۷ـ۸ـ۶ـ۹ـ۲ـ در حالت خرابی با شکست ترد:

$$F_{Rd} = 0.9\ (F_{(t,R)min})\ (f_y / f_{um})\ /(\gamma_t) \qquad (۳\text{-}۷)$$

در اینجا f_{um} عبارت‌است از تنش متناظر با مقاومت نهایی متوسط نمونه‌های آزمایش کوپن کششی.

۷ـ۸ـ۶ـ۹ـ۳ـ در حالت خرابی ناشی از کمانش ناگهانی (کنترل نیرویی):

$$F_{Rd} = 0.75\ (F_{(t,R)min})\ (f_y / f_{ym})\ /(\gamma_t) \qquad (۴\text{-}۷)$$

۷ـ۸ـ۶ـ۹ـ۴ـ در حالت بروز خرابی با گونهٔ کمانشی الاستوپلاستیک با قابلیت جذب انرژی در رفتار فراکمانشی:

$$F_{Rd} = 0.85\ (F_{(t,R)min})\ (f_y / f_{ym})\ /(\gamma_t) \qquad (۵\text{-}۷)$$

۷ـ ۸ ـ ۷ـ آزمایش‌های کنترل کیفیت

۱ـ ۷ ـ ۸ ـ ۷

هرگاه نمونه آزمایش براساس آزمایش‌های مقاومتی یا آزمایش تا حد تخریب طراحی شده باشد و از آن نمونه در عمل و حسب مورد، پیونده، عضو یا زیرمجموعه‌هایی به صورت انبوه تولید گردد، تعداد مناسبی نمونه (حداقل دونمونه) را باید از هر دستهٔ نمونهٔ ساخته شده، به طور تصادفی انتخاب و مورد آزمایش کنترل قرار داد.

۲ـ ۷ ـ ۸ ـ ۷

باید دقت کافی مبذول گردد تا اطمینان حاصل شود که نمونه‌گیری از میان تولیداتی انتخاب می‌شود که از تمامی جنبه‌ها با نمونهٔ آزمایش مشابه باشند و به ویژه از دیدگاه ابعاد، نوع اتصالات، نوع ادوات اتصال، رواداری‌ها، کیفیت ساخت و کیفیت فولاد مصرفی، به طور اسمی یکسان باشند.

۷ـ۸ـ۷ـ۳

هرگاه تعیین میزان تغییرات نتایج یا آثار تغییرات نتایج از نمونه‌های آزمایش قابل استنتاج نباشد، باید آزمایش پذیرش را به عنوان آزمایش کنترل به عمل آورد.

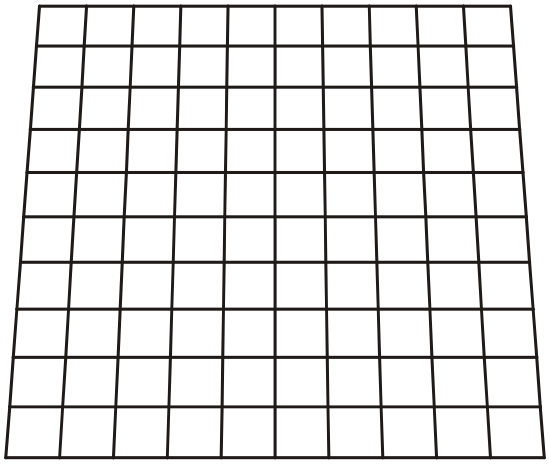
۷ـ۸ـ۷ـ۴

در آزمایش کنترل، مقادیر تغییرمکان‌ها باید در همان مواضعی اندازه‌گیری شوند که در آزمایش پذیرش اندازه‌گیری شده‌اند و مقدار حداکثر تغییرمکان اندازه‌گیری‌شده در آزمایش کنترل نباید از ۱۲۰٪ مقادیر ثبت‌شده طی آزمایش پذیرش تجاوز نماید و مقادیر تغییرمکان پس‌ماند نباید از ۱۰۵٪ مقادیر تغییرمکان پس‌ماند ثبت‌شده در آزمایش پذیرش افزون‌تر باشد.

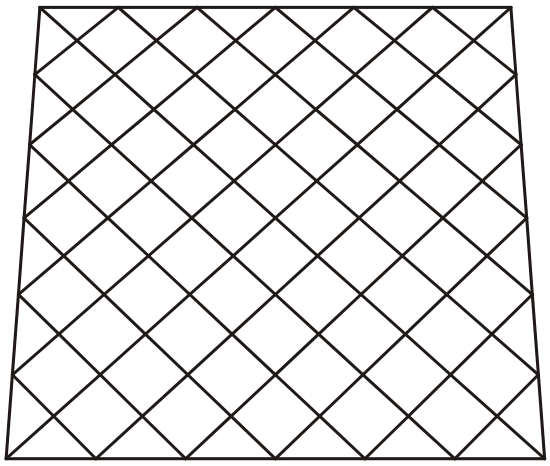
پیوست ۱–الف

نمونه‌هایی از سازه‌های فضاکار شبکه‌ای

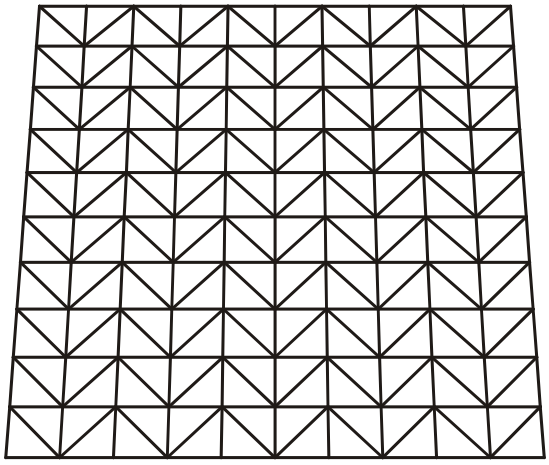
پیوست ۱ ـ الف ـ نمونه‌هایی از سازه‌های فضاکار شبکه‌ای



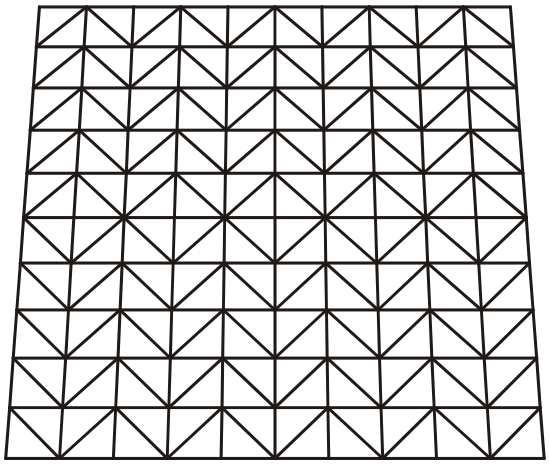
شکل ۱- شبکهٔ تک لایه با نقش دوراهه



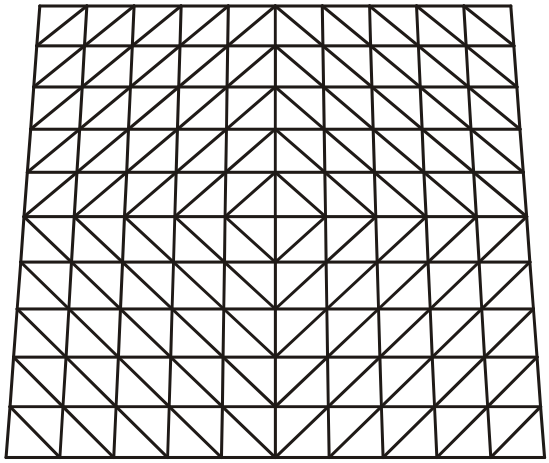
شکل ۲- شبکهٔ تک لایه با نقش اریبی



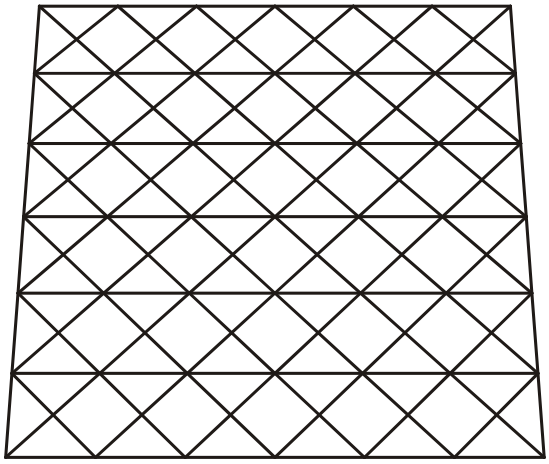
شکل ۳- شبکهٔ تک لایه با نقش دوراهه و همموندهای قطری اضافی



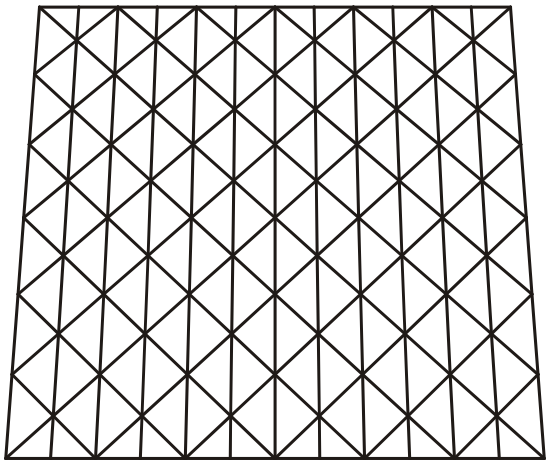
شکل ۴- شبکهٔ تک لایه با نقش دوراهه و همووندهای قطری اضافی



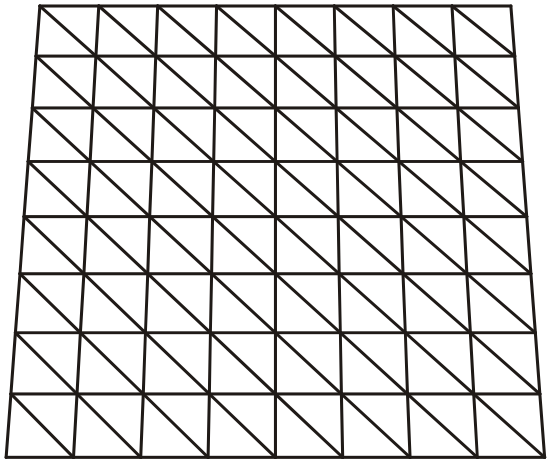
شکل ۵- شبکهٔ تک لایه با نقش دوراهه و همووندهای قطری اضافی



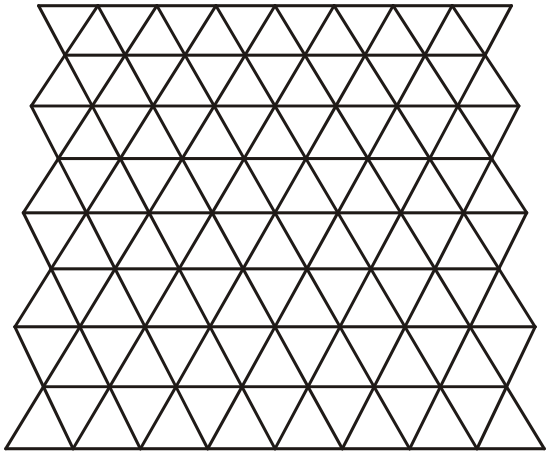
شکل ۶- شبکهٔ تک لایه با نقش اریبی و همووندهای قطری اضافی



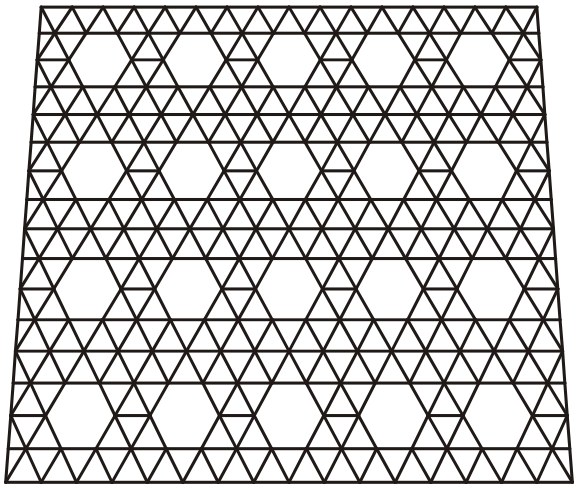
شکل ۷- شبکهٔ تک لایه با نقش سه راهه



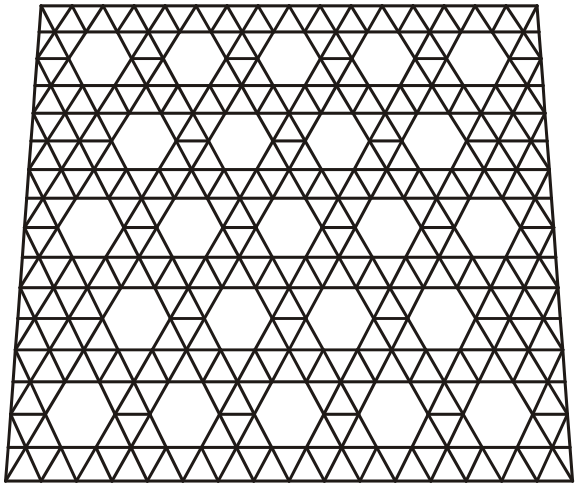
شکل ۸- شبکهٔ تک لایه با نقش سه راهه



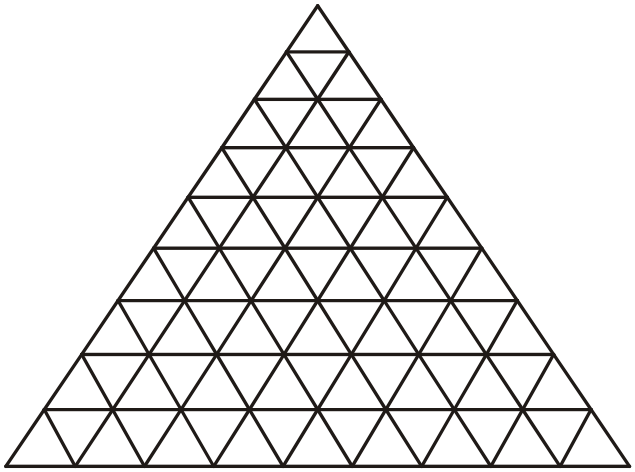
شکل ۹- شبکهٔ تک لایه با نقش سه راهه



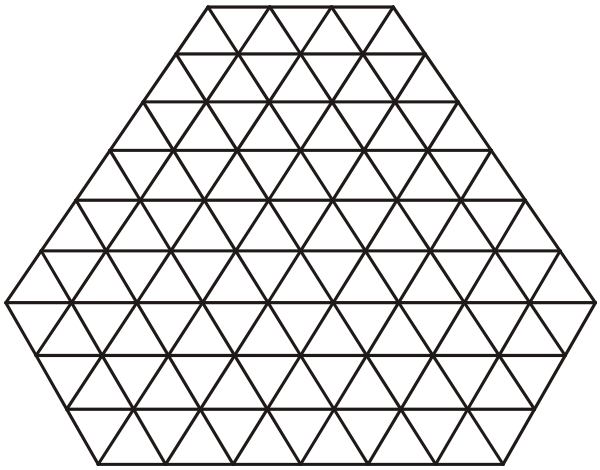
شکل ۱۰- شبکهٔ تک لایه با نقش سه راهه/شش بری



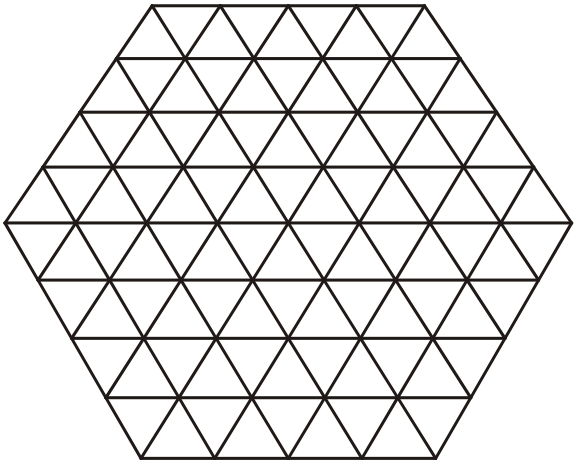
شکل ۱۱- شبکهٔ تک لایه با نقش سه راهه/شش بری



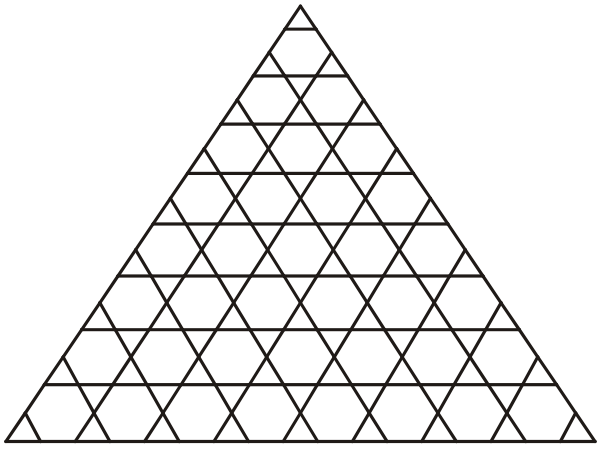
شکل ۱۲- شبکهٔ مثلثی تک لایه با نقش سه راهه



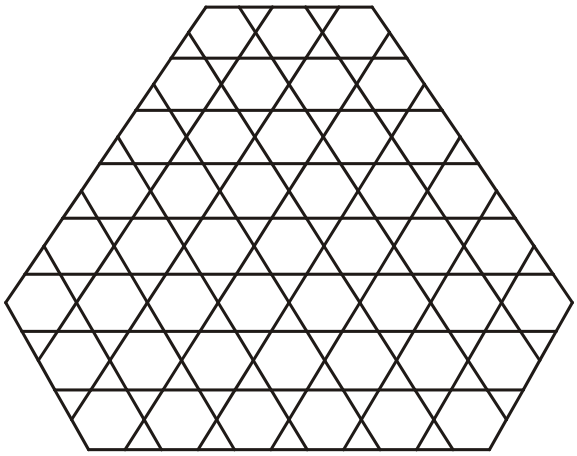
شکل ۱۳- شبکهٔ مثلثی تک لایه با نقش سه راهه و گوشه های بریده



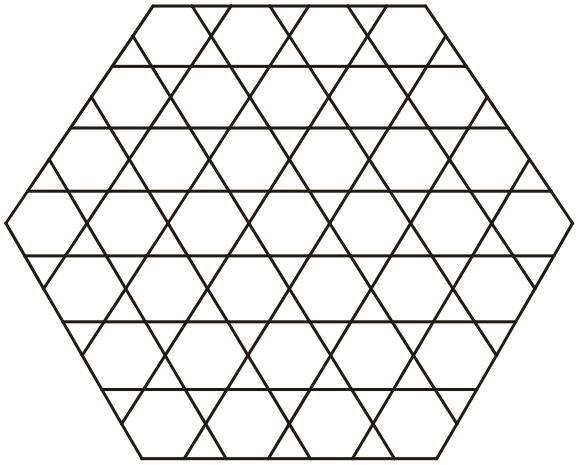
شکل ۱۴- شبکهٔ مثلثی تک لایه با نقش سه راهه و گوشه های بریده



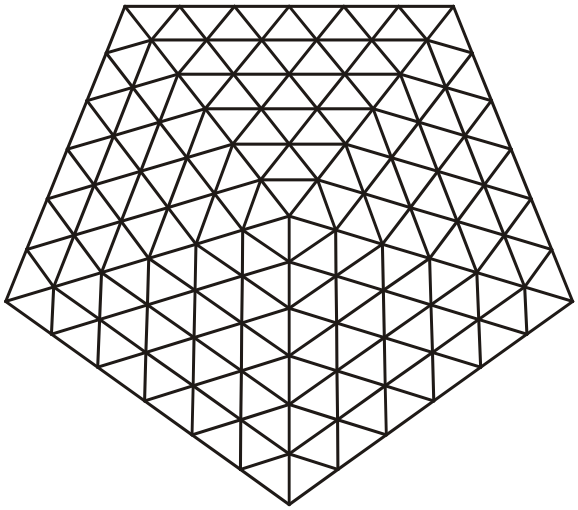
شکل ۱۵- شبکهٔ مثلثی تک لایه با نقش سه راهه/ شش بری



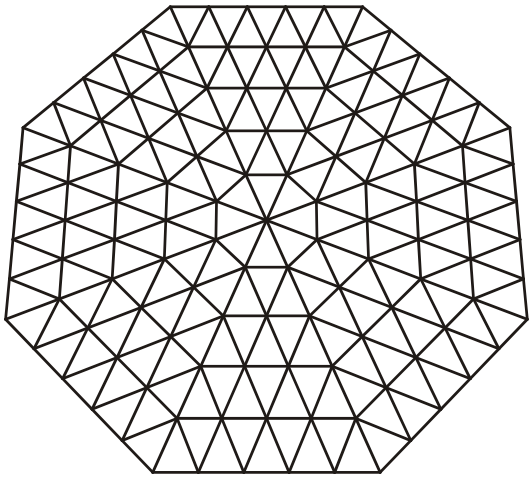
شکل ۱۶- شبکهٔ مثلثی تک لایه با نقش سه راهه/شش بری و گوشه های بریده



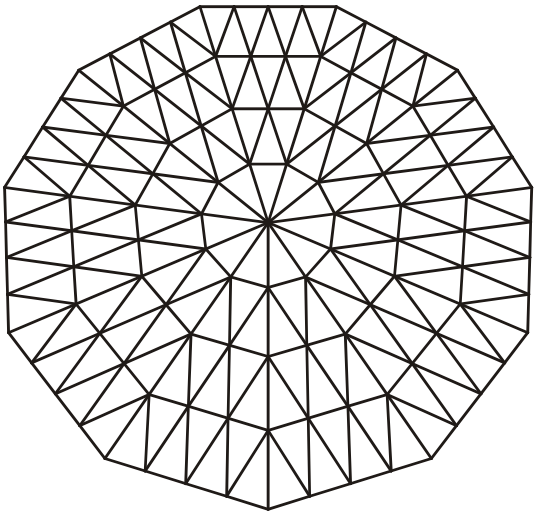
شکل ۱۷- شبکهٔ مثلثی تک لایه با نقش سه راهه/ شش بری و گوشه های بریده



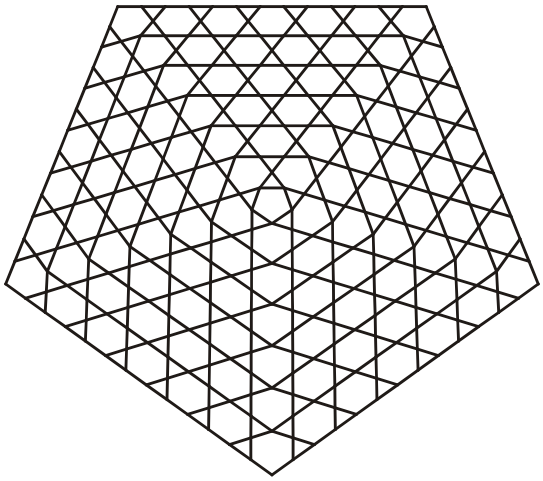
شکل ۱۸- شبکهٔ قاچی تک لایه با نقش سه راهه



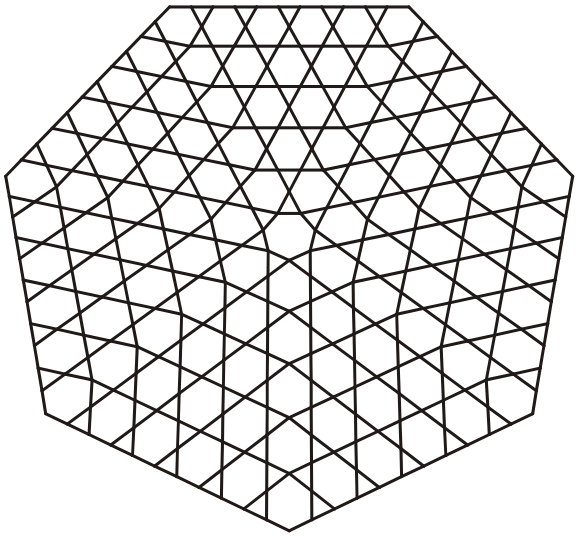
شکل ۱۹- شبکهٔ قاچی تک لایه با نقش سه راهه



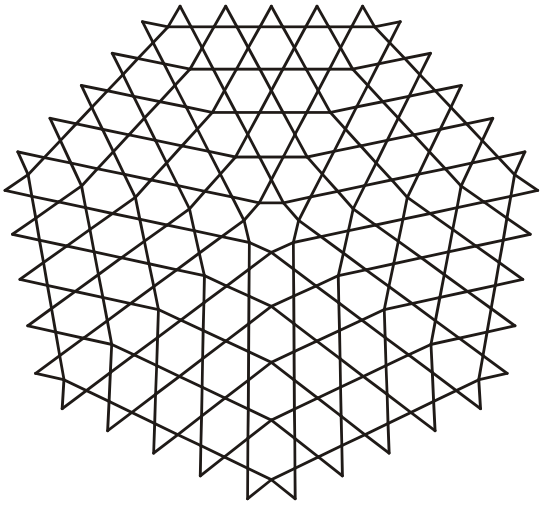
شکل ۲۰- شبکهٔ قاچی تک لایه با نقش سه راهه



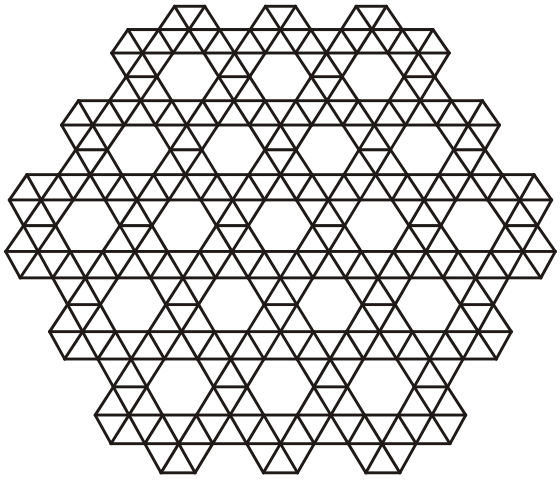
شکل ۲۱- شبکهٔ قاچی تک لایه با نقش سه راهه/ شش بری



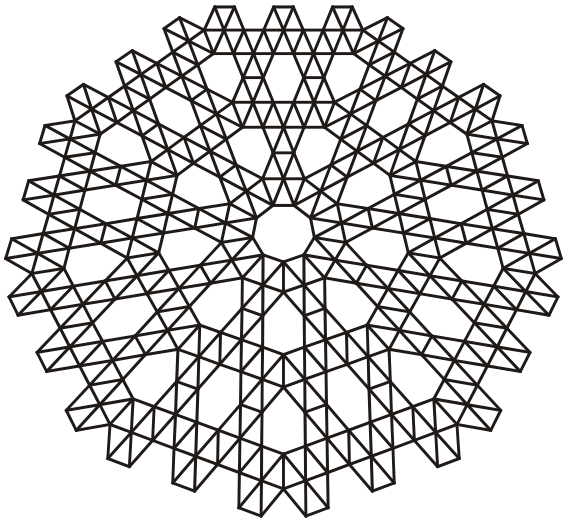
شکل ۲۲- شبکهٔ قاچی تک لایه با نقش سه راهه/ شش بری



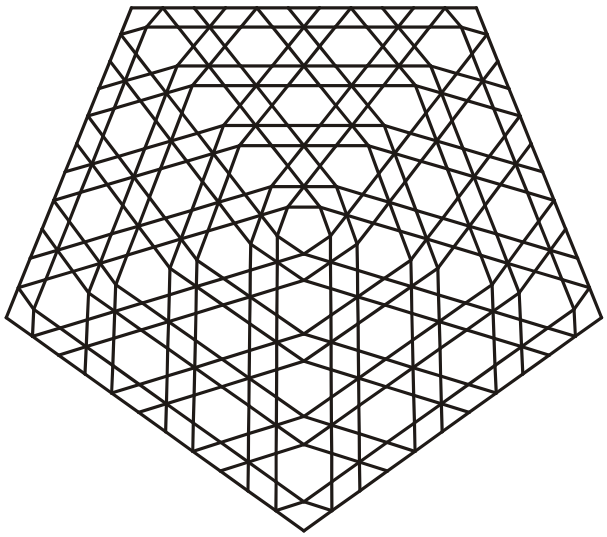
شکل ۲۳- شبکهٔ قاچی تک لایه با نقش سه راهه/ شش بری



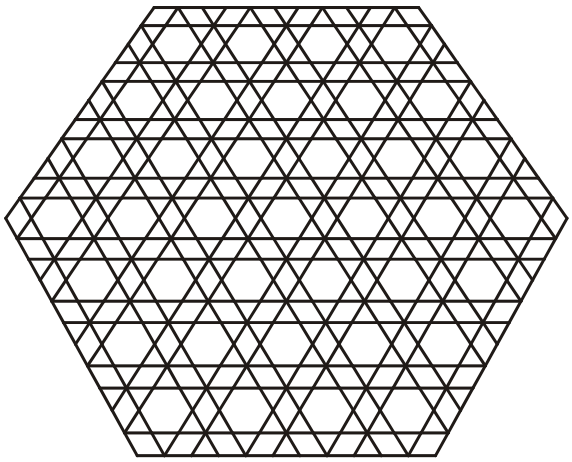
شکل ۲۴- شبکهٔ قاچی تک لایه با نقش سه راهه/ شش بری



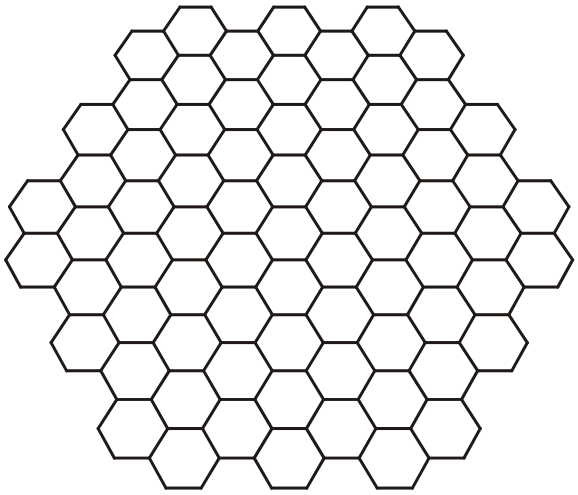
شکل ۲۵- شبکهٔ قاچی تک لایه با نقش سه راهه/ شش بری



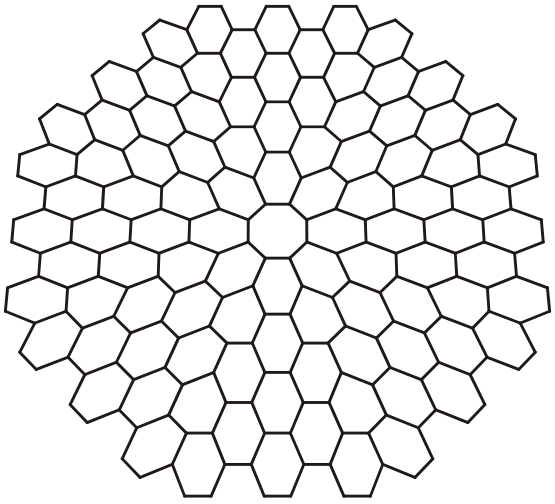
شکل ۲۶- شبکهٔ قاچی تک لایه با نقش سه راهه/ شش بری



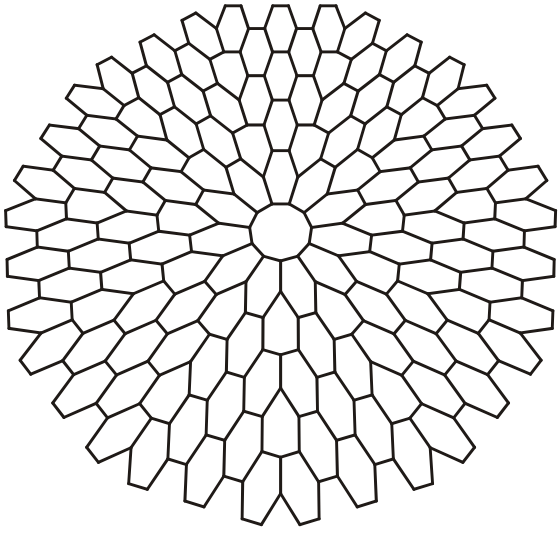
شکل ۲۷- شبکهٔ قاچی تک لایه با نقش سه راهه/ شش بری



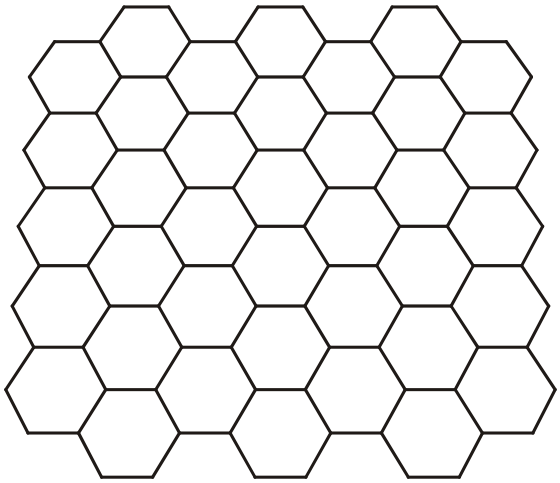
شکل ۲۸- شبکهٔ قاچی تک لایه با نقش لانه زنبوری



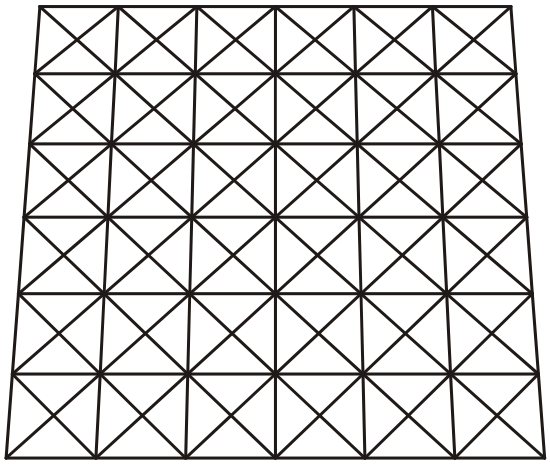
شکل ۲۹- شبکهٔ قاچی تک لایه با نقش لانه زنبوری



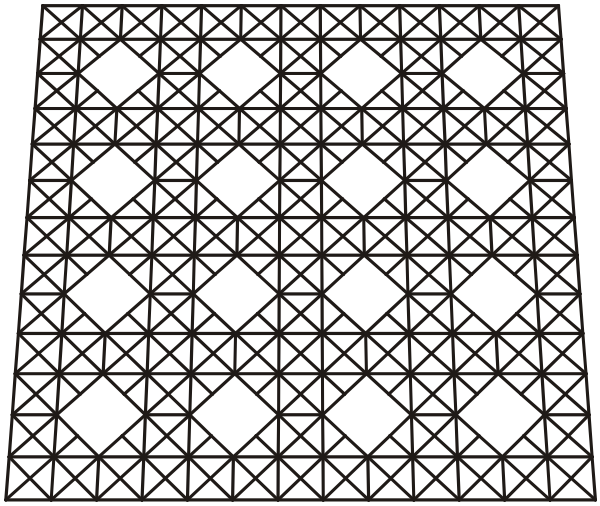
شکل ۳۰- شبکهٔ قاچی تک لایه با نقش لانه زنبوری



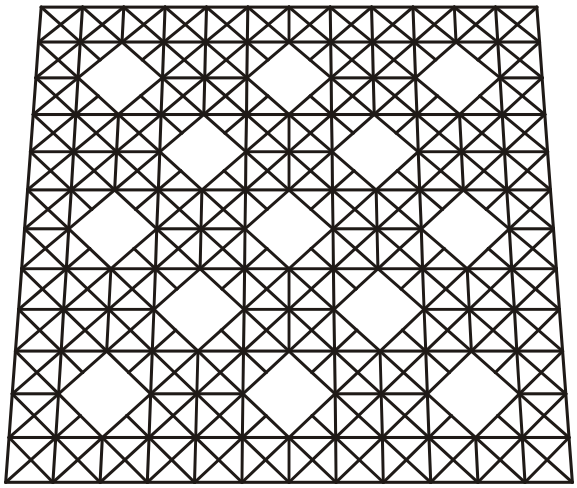
شکل ۳۱- شبکهٔ تک لایه با نقش لانه زنبوری



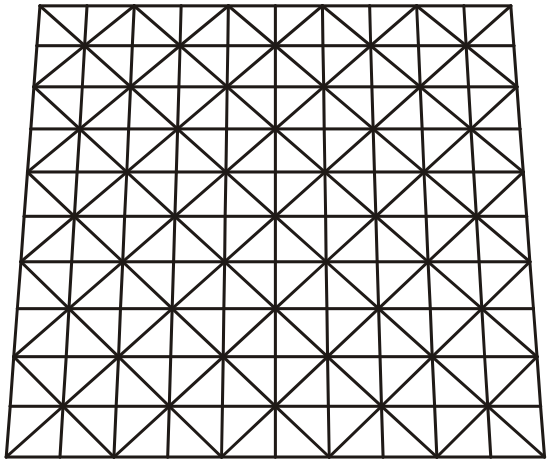
شکل ۳۲- شبکهٔ تک لایه با نقش چهار راهه



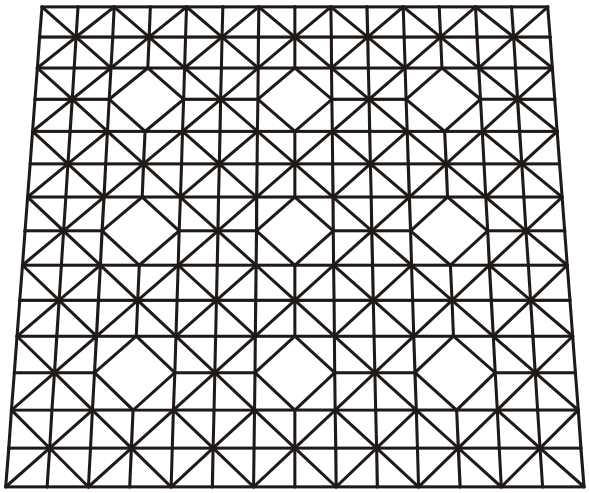
شکل ۳۳- شبکهٔ تک لایه با نقش چهار راهه و چشمه های باز



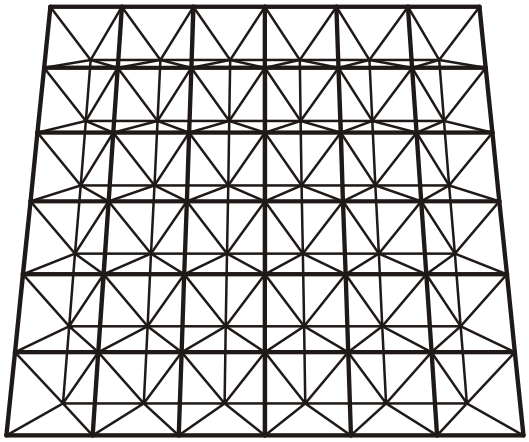
شکل ۳۴- شبکهٔ تک لایه با نقش چهار راهه و چشمه های باز



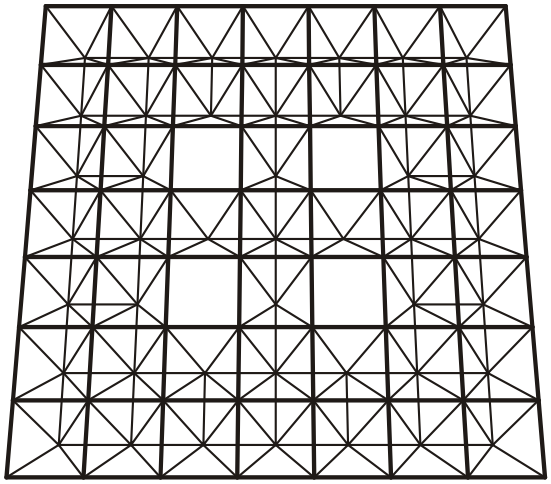
شکل ۳۵- شبکهٔ تک لایه با نقش چهار راهه



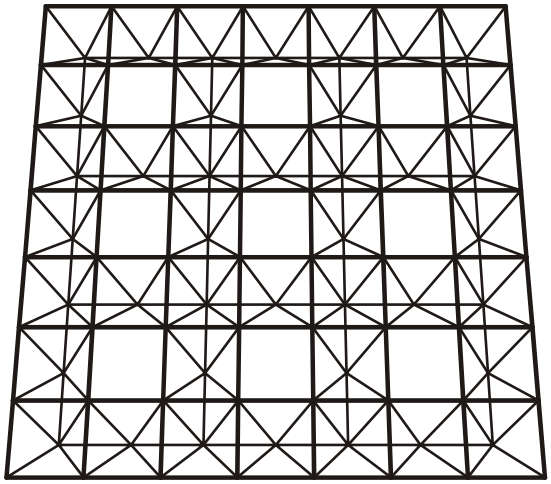
شکل ۳۶- شبکهٔ تک لایه با نقش چهار راهه و چشمه های باز



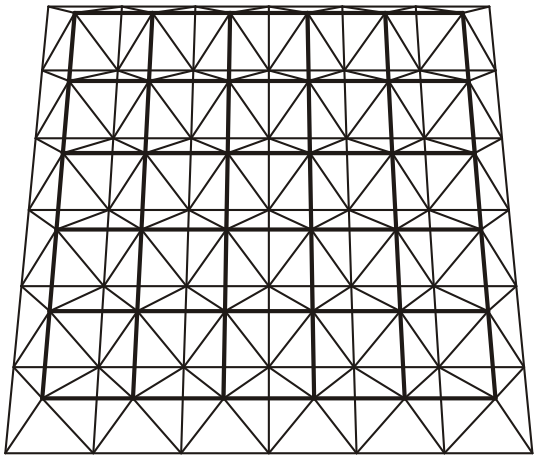
شکل ۳۷- شبکهٔ دولایه با نقش دوراهه روی دوراهه
(در سازه های دولایه در این پیوست، لایهٔ بالا با خط کلفت تر و لایهٔ پایین و جان با خط نازک تر نشان داده شده اند)



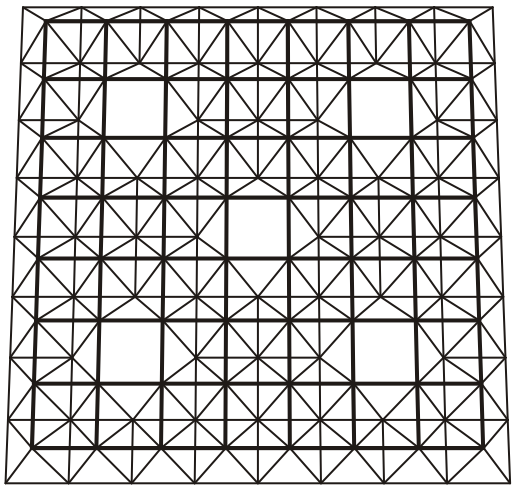
شکل ۳۸- شبکهٔ دولایه با نقش دوراهه روی دوراهه و با چند چشمهٔ باز



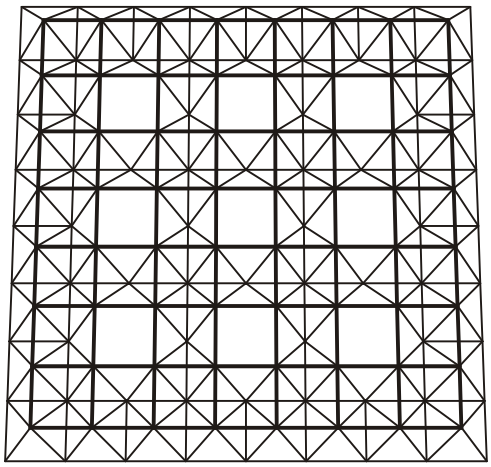
شکل ۳۹- شبکهٔ دولایه با نقش دوراهه روی دوراههٔ بزرگتر



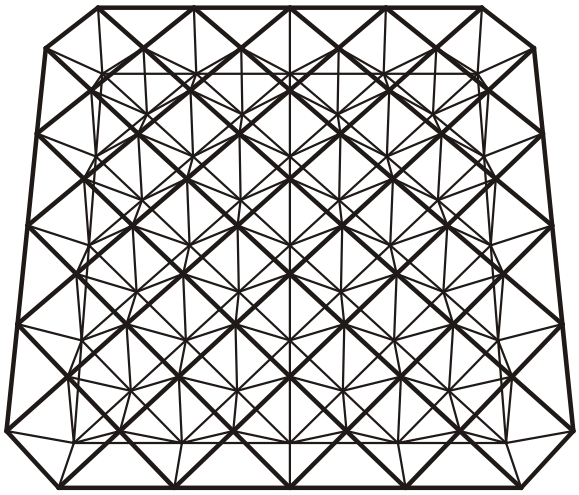
شکل۴۰- شبکهٔ دولایه با نقش دوراهه روی دوراهه و کنارهٔ"فراگرا"،
بدین معنی که کناره از بالا به پایین به خارج تمایل دارد.
در شکل ۳۷ کناره از بالا به پایین به داخل تمایل دارد.
در این حالت کناره "فروگرا" خوانده می‌شود.



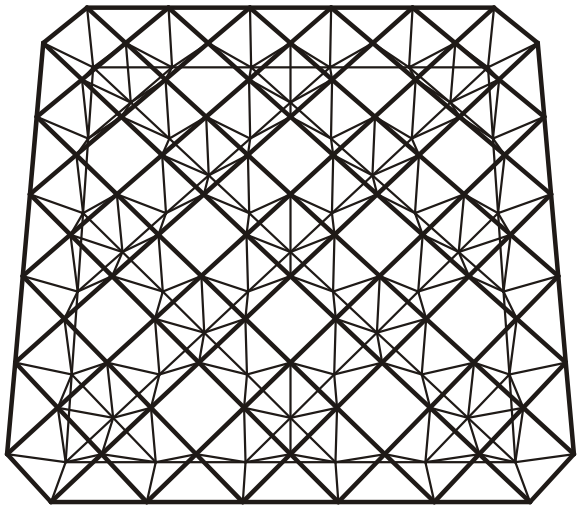
شکل ۴۱- شبکهٔ دولایهٔ فراگرا با نقش دوراهه روی دوراهه و با چند چشمهٔ باز



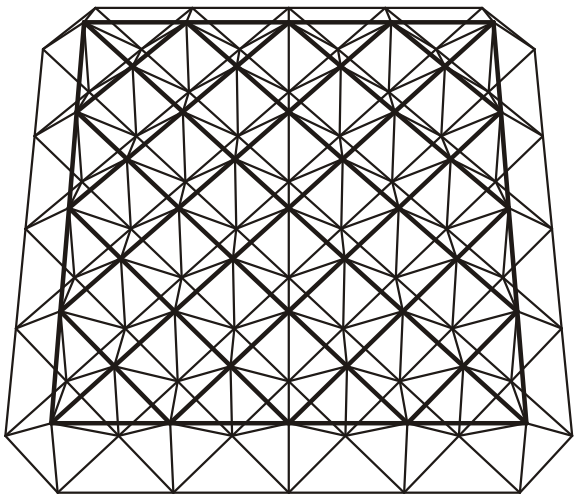
شکل ۴۲- شبکهٔ دولایهٔ فراگرا با نقش دوراهه روی دوراههٔ بزرگتر



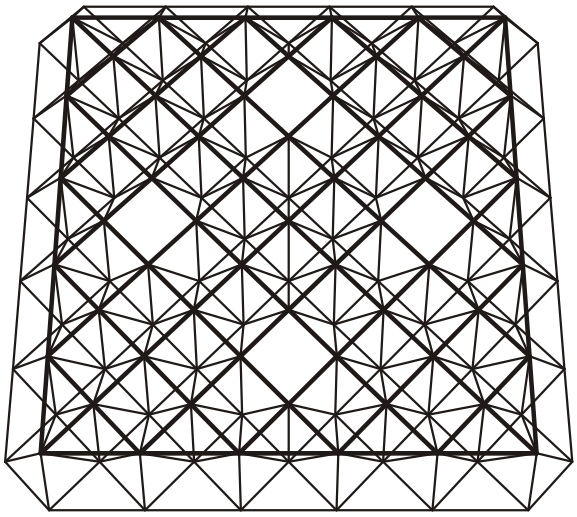
شکل ۴۳- شبکهٔ دولایه با نقش اریبی روی اریبی



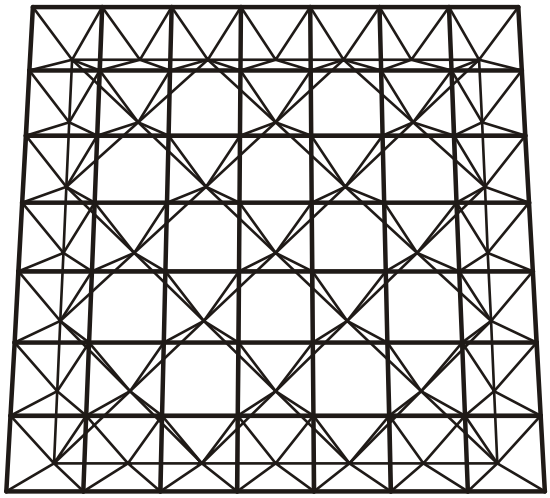
شکل ۴۴- شبکهٔ دولایه با نقش اریبی روی اریبی بزرگتر



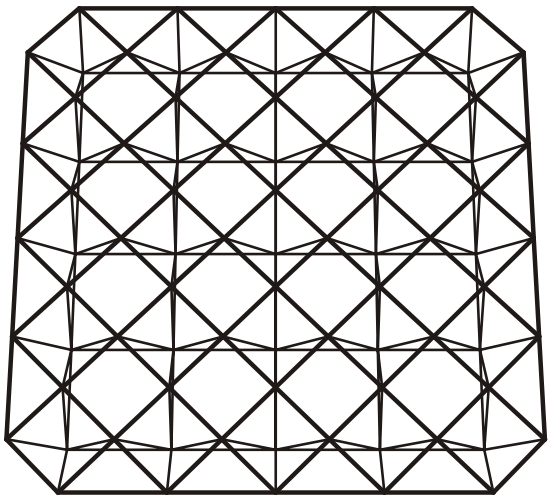
شکل ۴۵- شبکهٔ دولایهٔ فراگرا با نقش اریبی روی اریبی



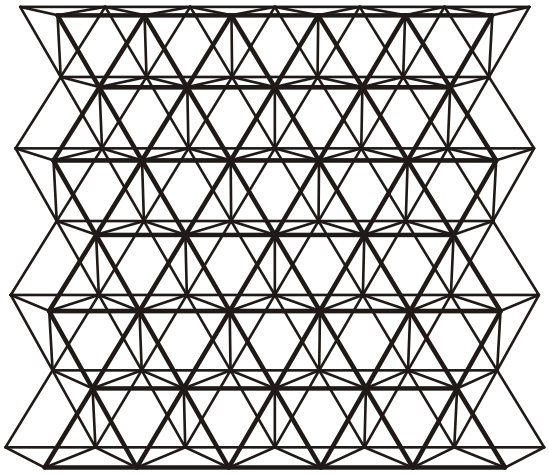
شکل ۴۶- شبکهٔ دولایهٔ فراگرا با نقش اریبی روی اریبی و با چند چشمهٔ باز



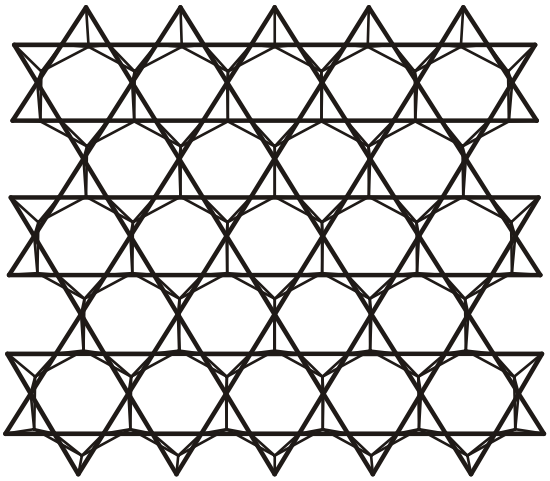
شکل ۴۷- شبکهٔ دولایه با نقش دوراهه روی اریبی بزرگتر



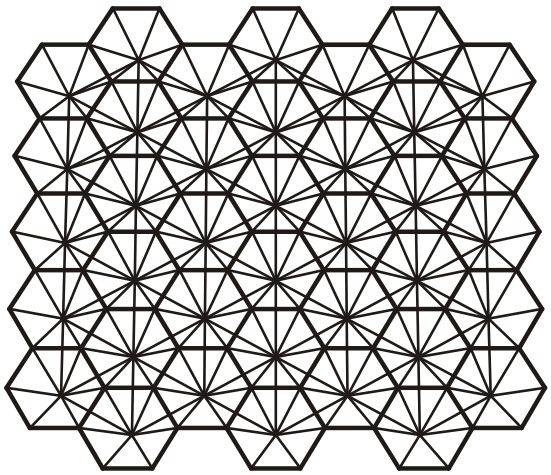
شکل ۴۸- شبکهٔ دولایه با نقش اریبی روی دوراهه بزرگتر



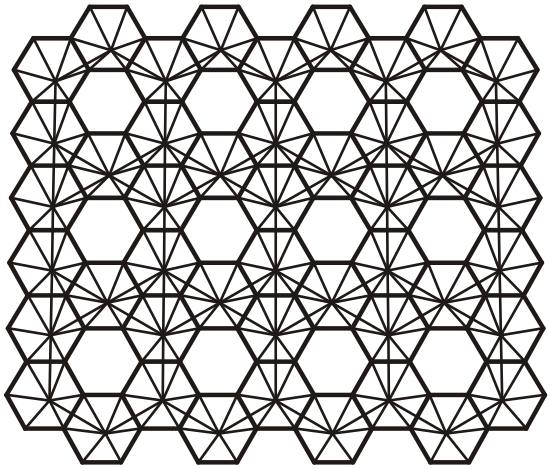
شکل ۴۹- شبکهٔ دولایه با نقش سه راهه روی سه راهه



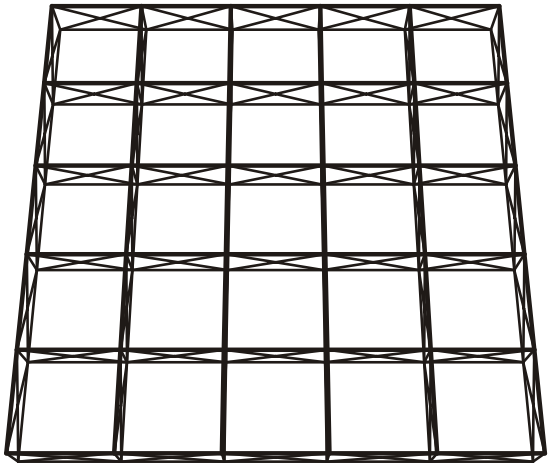
شکل ۵۰- شبکهٔ دولایه با نقش شش بری روی شش بری



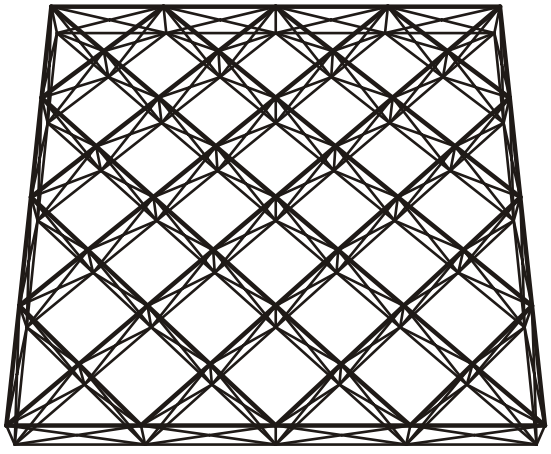
شکل ۵۱- شبکهٔ دولایه با نقش شش بری روی مثلث



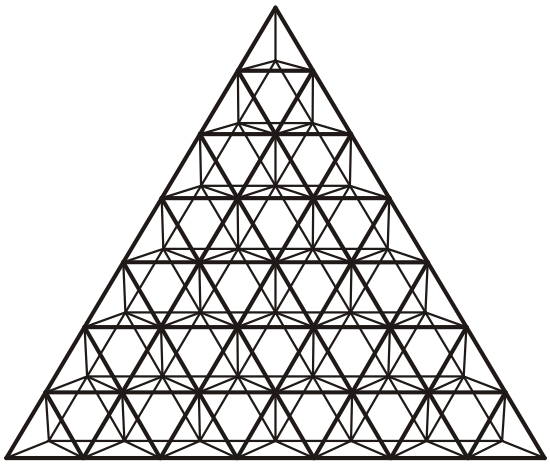
شکل ۵۲- شبکهٔ دولایه با نقش شش بری روی شش بری بزرگتر



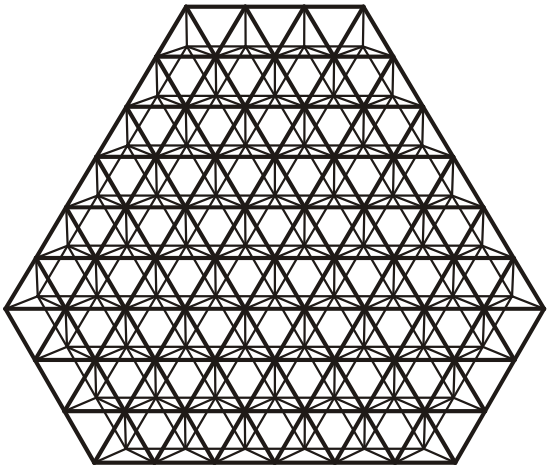
شکل ۵۳- شبکهٔ دولایهٔ خرپایی با نقش دوراهه



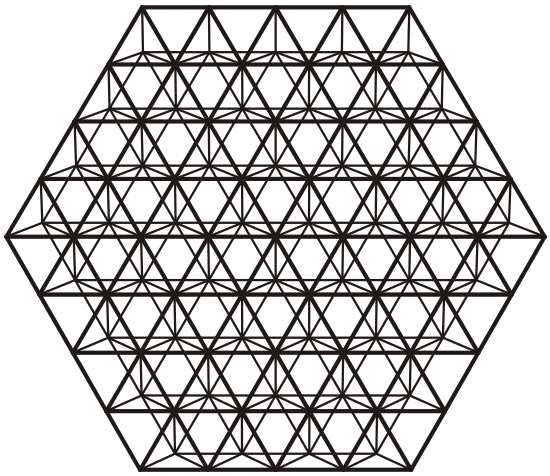
شکل ۵۴- شبکهٔ دولایهٔ خرپایی با نقش اریبی



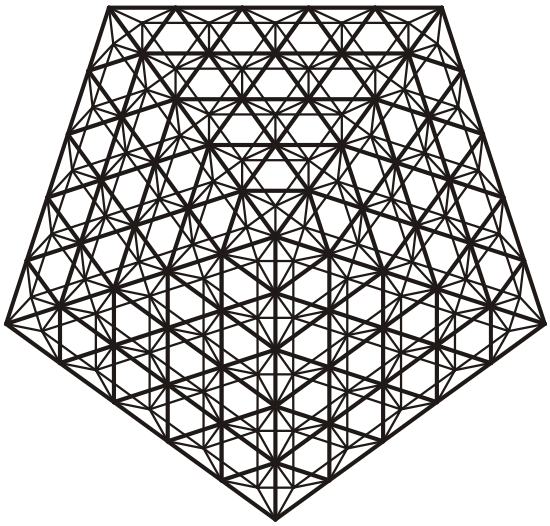
شکل ۵۵- شبکهٔ دولایه با نقش سه راهه روی سه راهه و پلان مثلثی



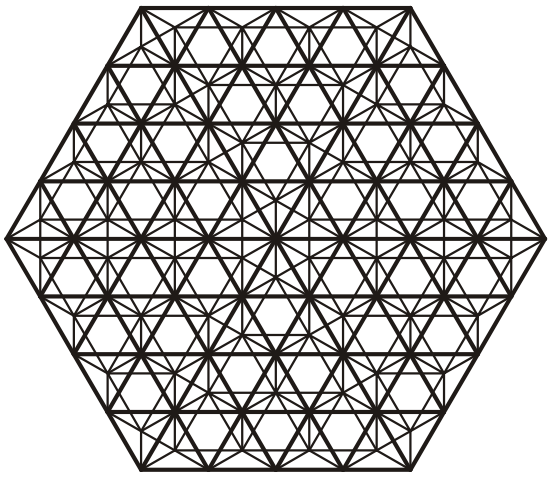
شکل ۵۶- شبکهٔ دولایه با نقش سه راهه روی سه راهه و پلان مثلثی با گوشه های بریده



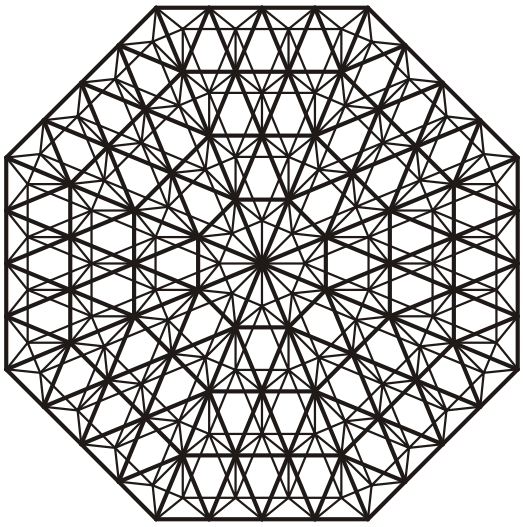
شکل ۵۷- شبکهٔ دولایه با نقش سه راهه روی سه راهه و پلان مثلثی با گوشه های بریده



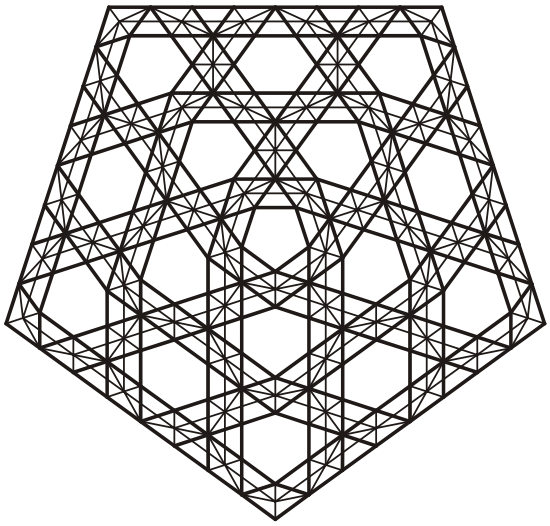
شکل ۵۸- شبکهٔ دولایهٔ قاچی با نقش سه راهه روی سه راهه



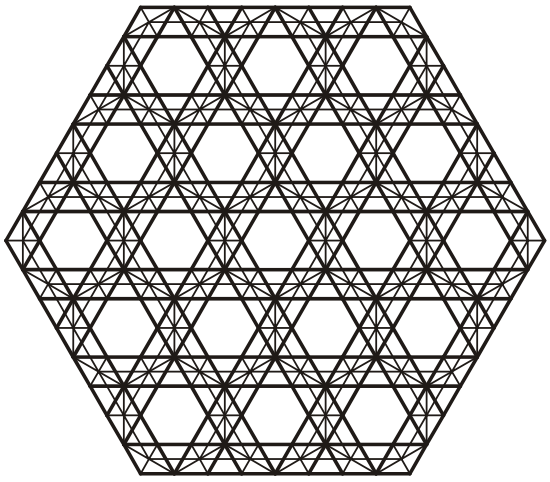
شکل ۵۹- شبکهٔ دولایهٔ قاچی با نقش سه راهه روی سه راهه



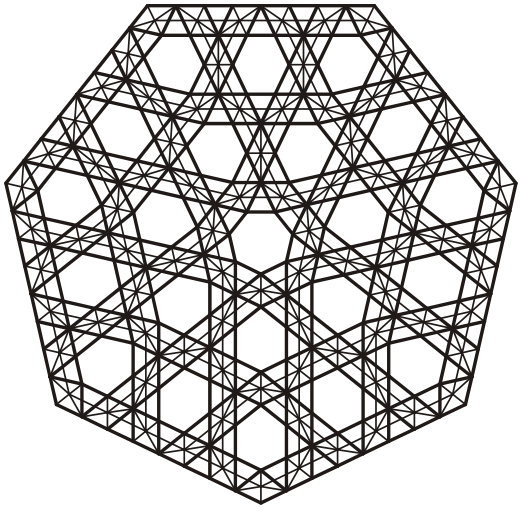
شکل ۶۰- شبکهٔ دولایهٔ قاچی با نقش سه راهه روی سه راهه



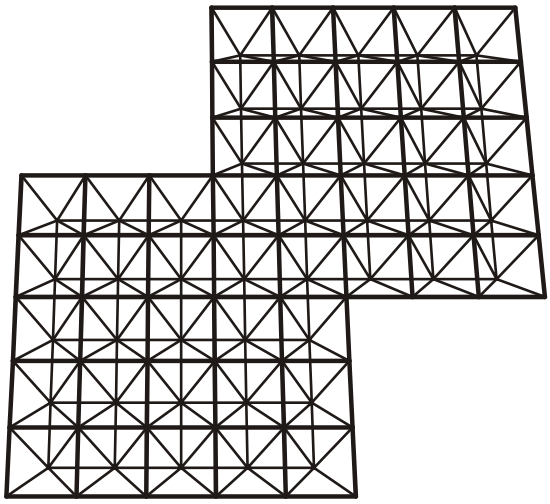
شکل ۶۱- شبکهٔ دولایهٔ قاچی با نقش سه راهه/شش بری روی سه راهه/شش بری



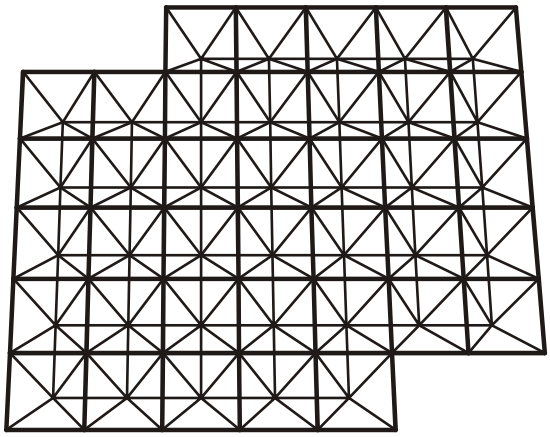
شکل ۶۲- شبکهٔ دولایهٔ قاچی با نقش سه راهه/ شش بری روی سه راهه/ شش بری



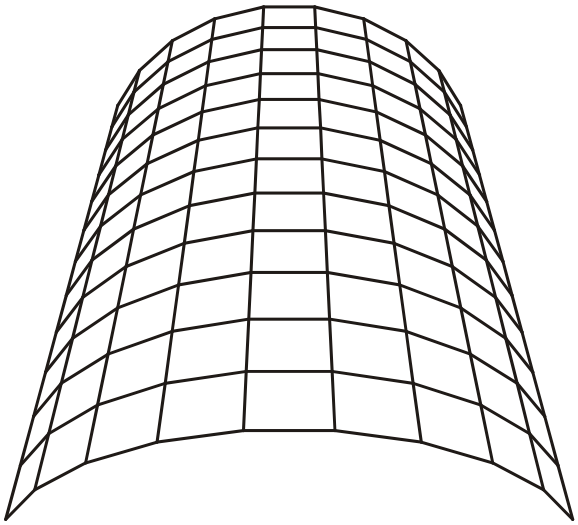
شکل ۶۳- شبکهٔ دولایهٔ قاچی با نقش سه راهه/ شش بری روی سه راهه/ شش بری



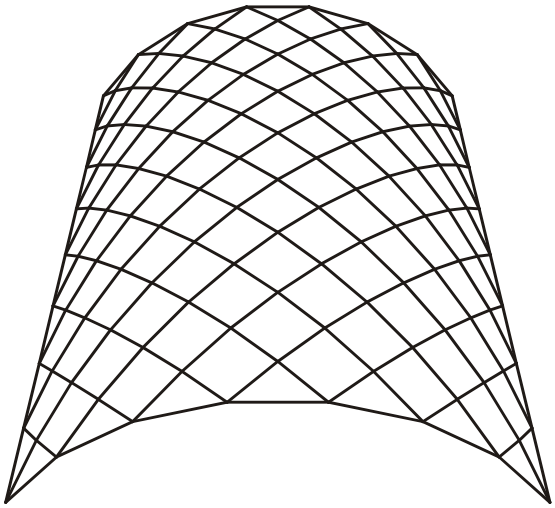
شکل ۶۴- شبکهٔ دولایهٔ مرکب با نقش دوراهه روی دوراهه (بدست آمده از ترکیب دو شبکهٔ دولایه)



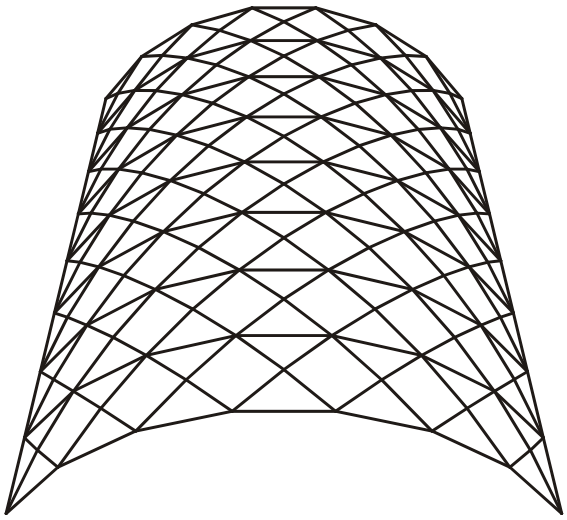
شکل ۶۵- شبکهٔ دولایهٔ مرکب با نقش دوراهه روی دوراهه



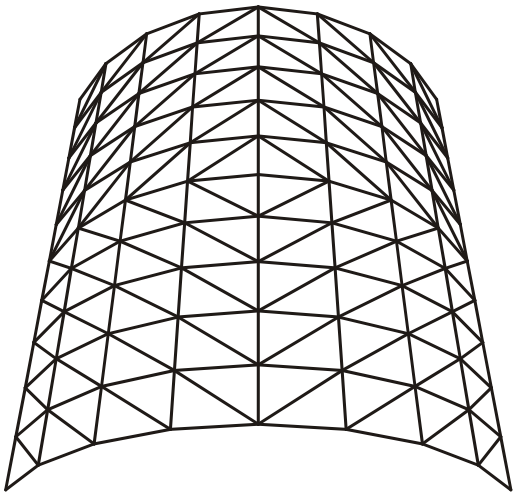
شکل ۶۶- چلیک با نقش دوراهه



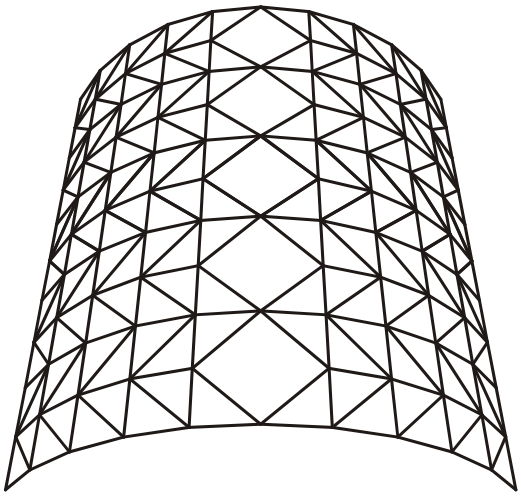
شکل ۶۷- چلیک با نقش لملا (اریبی)



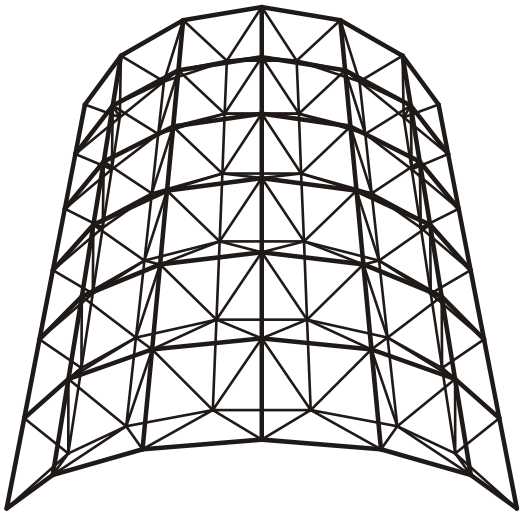
شکل ۶۸- چلیک لملا با دنده های اضافی



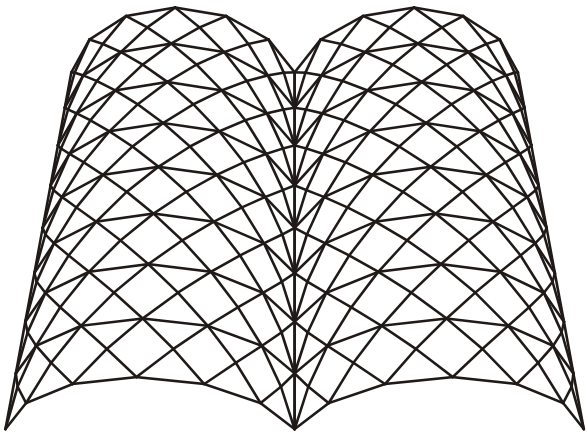
شکل ۶۹- چلیک دوراهه با همووندهای قطری اضافی



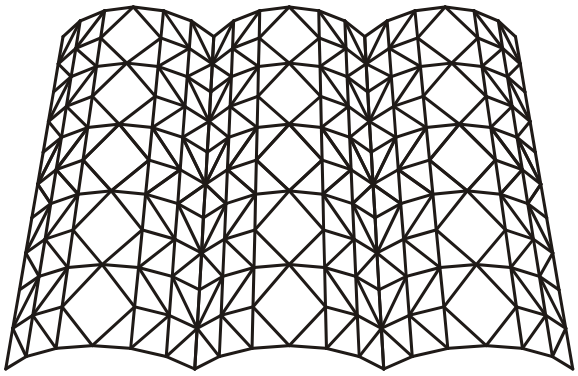
شکل ۷۰- چلیک دوراهه با همموندهای قطری اضافی



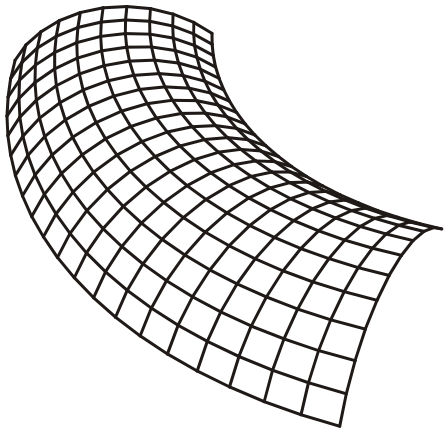
شکل ۷۱- چلیک دو لایه با نقش دوراهه روی دوراهه



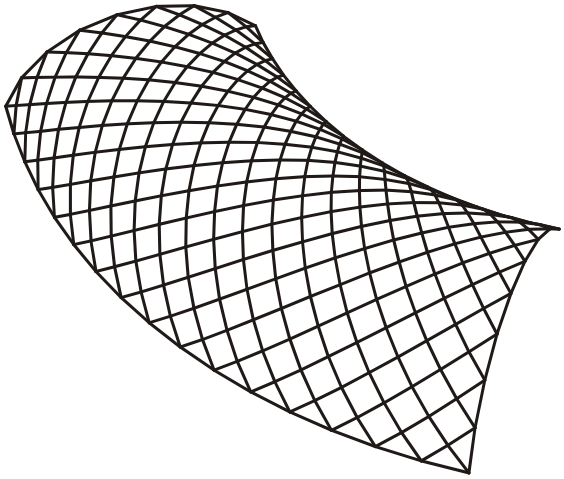
شکل ۷۲- چلیک مرکب با نقش لملا و دنده های اضافی



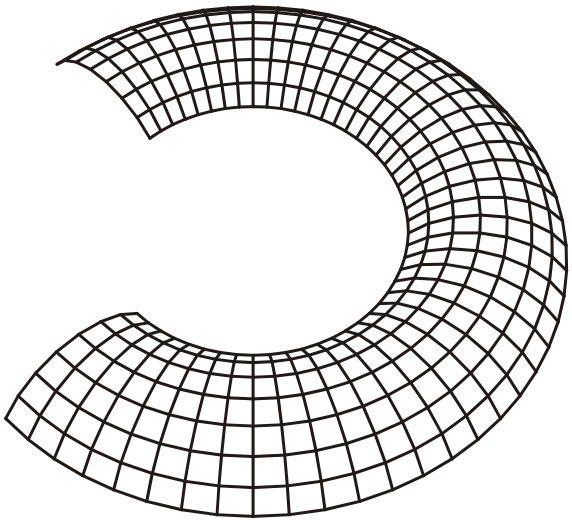
شکل ۷۳- چلیک مرکب با نقش دوراهه و همووندهای قطری اضافی



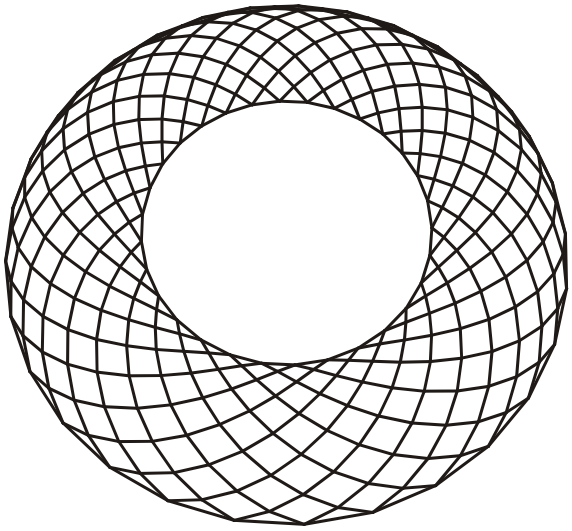
شکل ۷۴- چلیک چنبره ای پهلو خمیده با نقش دوراهه



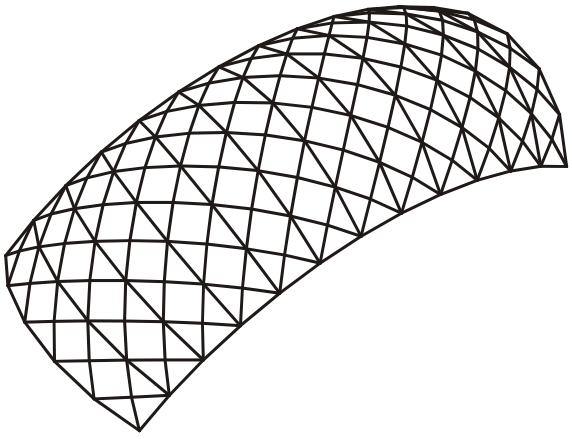
شکل ۷۵- چلیک چنبره ای پهلوخمیده با نقش لملا (اریبی)



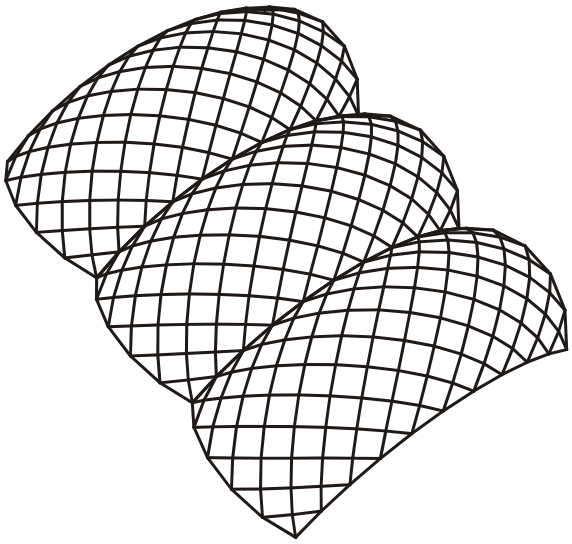
شکل ۷۶- چلیک چنبره ای پهلوخمیدهٔ نعل اسبی با نقش دوراهه



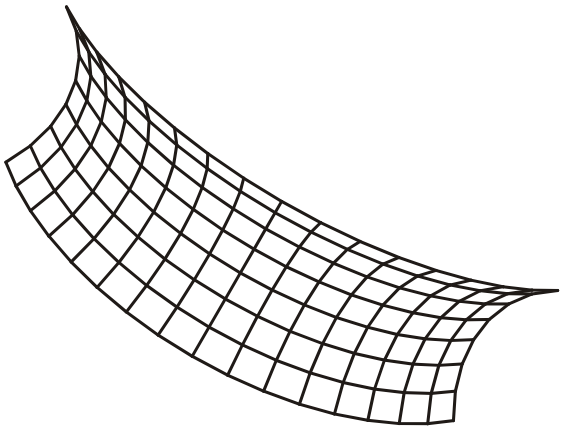
شکل ۷۷- چلیک چنبره ای پهلوخمیدهٔ حلقوی با نقش لملا (اریبی)



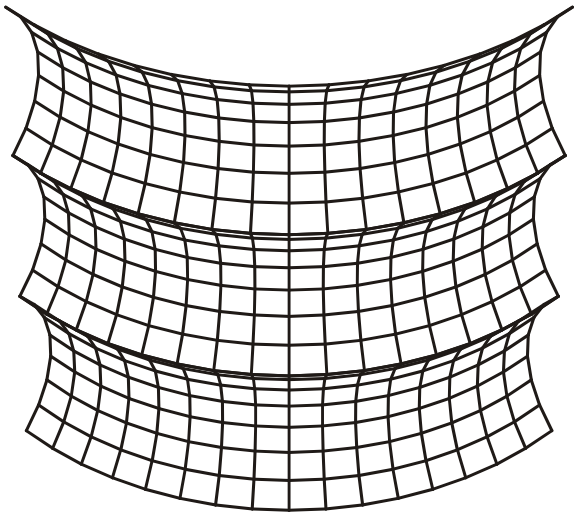
شکل ۷۸- چلیک چنبره ای برون خمیده با نقش لملا



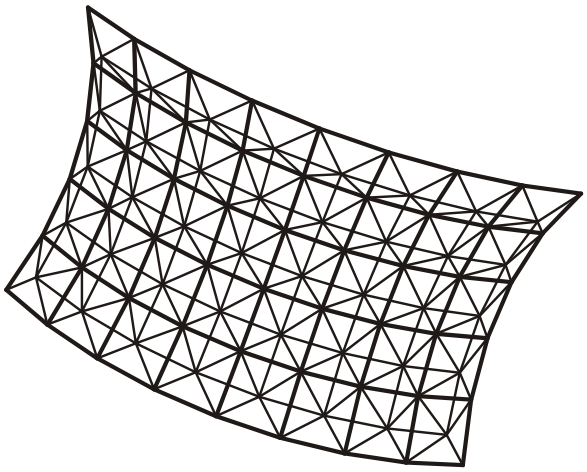
شکل ۷۹- چلیک مرکب چنبره ای برون خمیده با نقش لملا



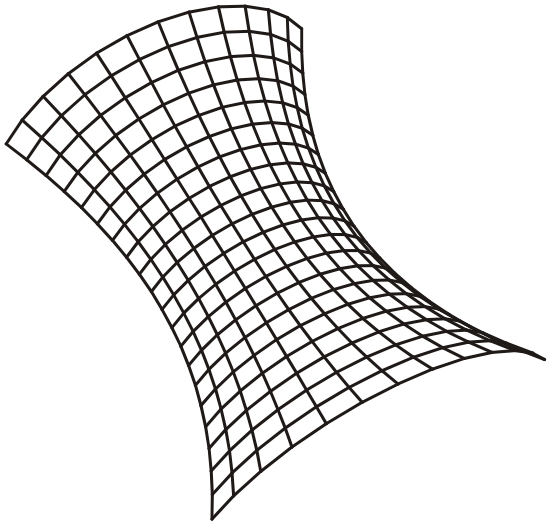
شکل ۸۰- چلیک چنبره ای درون خمیده با نقش دوراهه



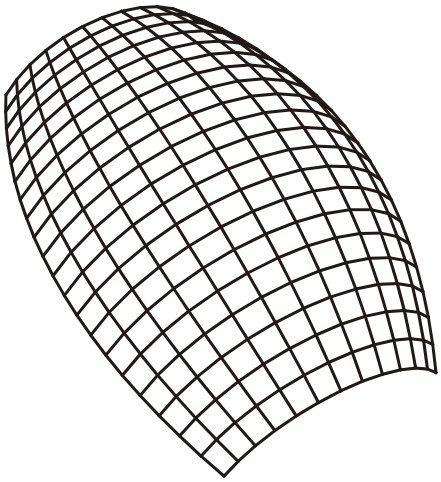
شکل ۸۱- چلیک مرکب چنبره ای درون خمیده با نقش دوراهه



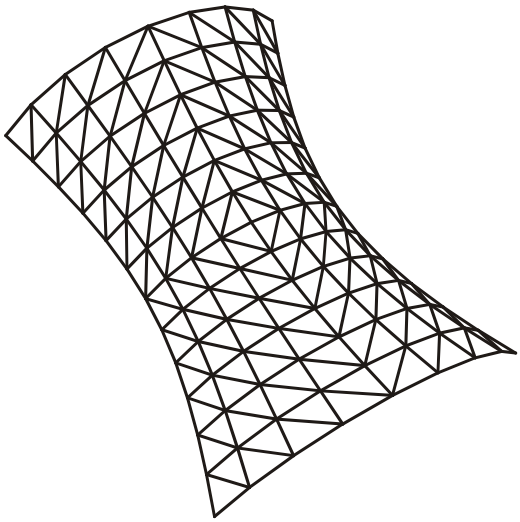
شکل ۸۲- چلیک دولایهٔ چنبره ای درون خمیده با نقش دوراهه روی دوراهه



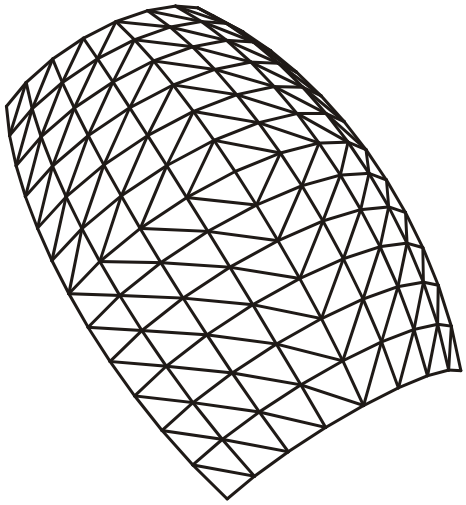
شکل ۸۳- چلیک زین اسبی سهموی با نقش دوراهه



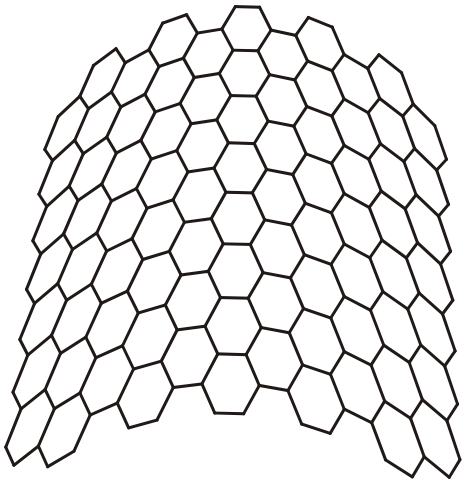
شکل ۸۴- چلیک خمره ای سهموی با نقش دوراهه



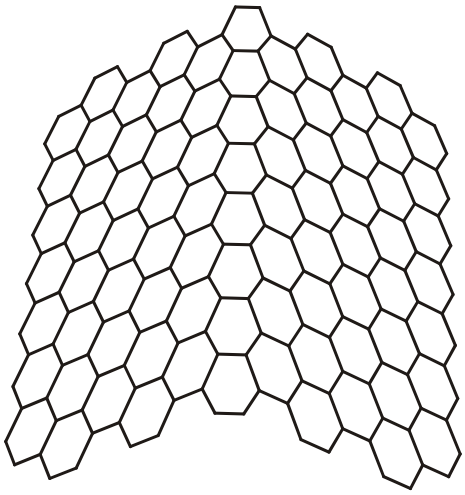
شکل ۸۵- چلیک زین اسبی هذلولوی



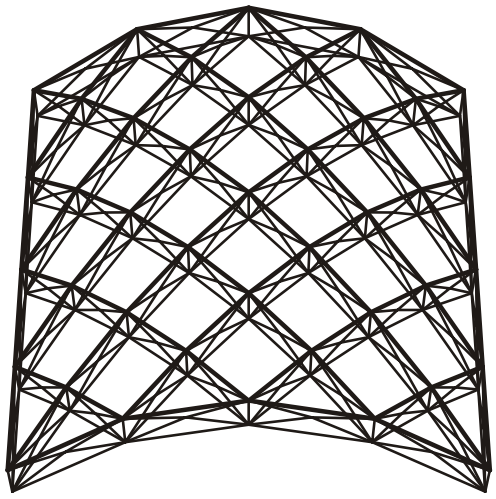
شکل ۸۶- چلیک خمره ای بیضوی



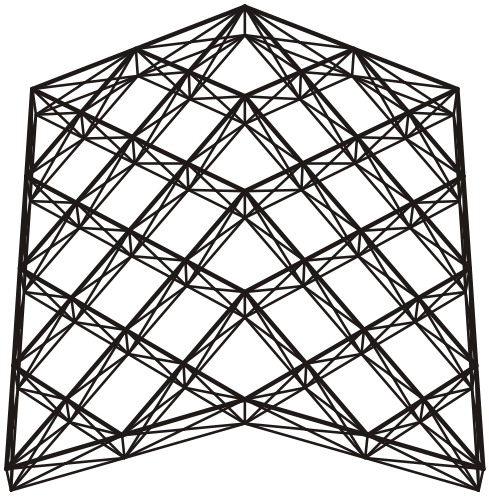
شکل ۸۷- چلیک سهموی فرازشی با نقش لانه زنبوری



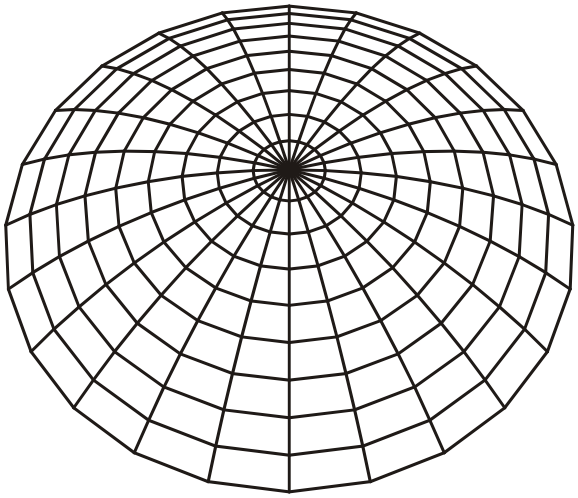
شکل ۸۸- چلیک لته ای فرازشی با نقش لانه زنبوری



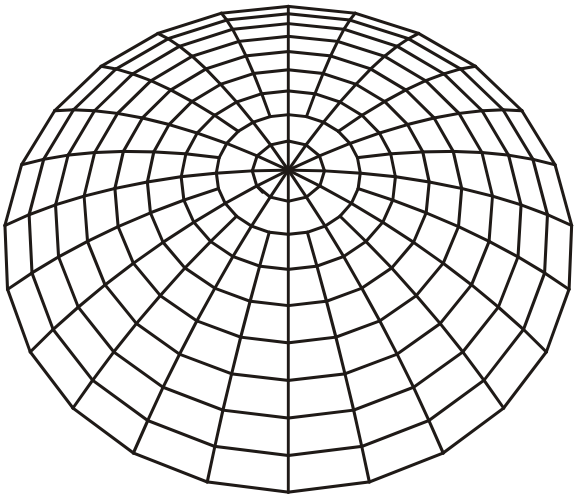
شکل ۸۹- چلیک سهموی دولایهٔ فرازشی خرپایی لملا



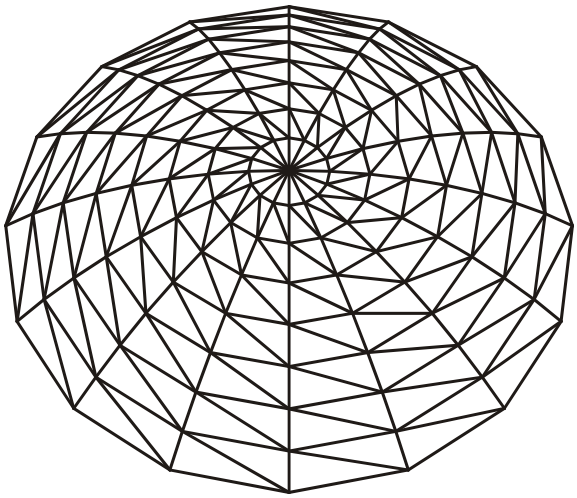
شکل ۹۰- چلیک لته ای دولایهٔ فرازشی خرپایی لملا



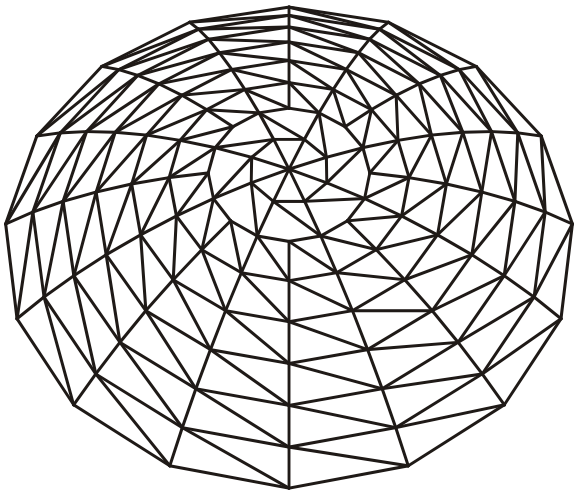
شکل ۹۱- گنبد دنده ای



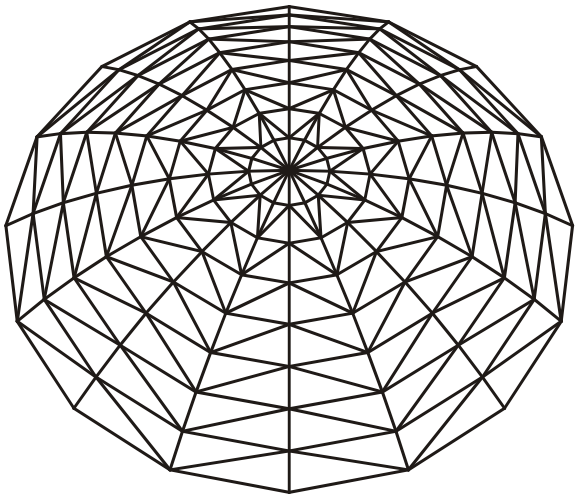
شکل ۹۲- گنبد دنده ای هرس شده



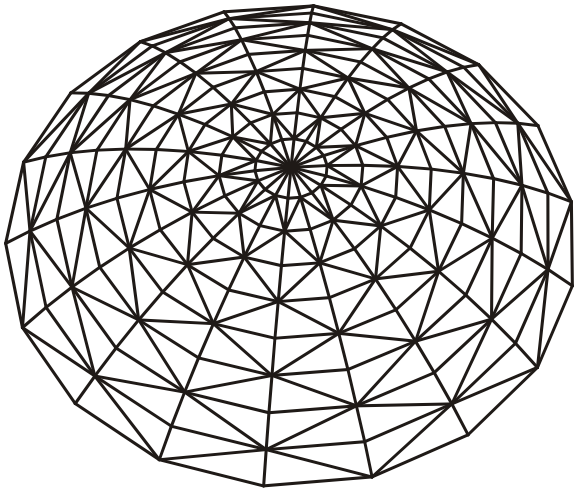
شکل ۹۳- گنبد اشودلر



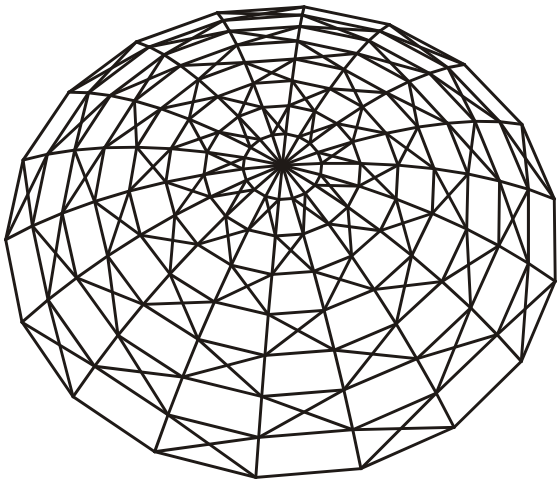
شکل ۹۴- گنبد اشودلر هرس شده



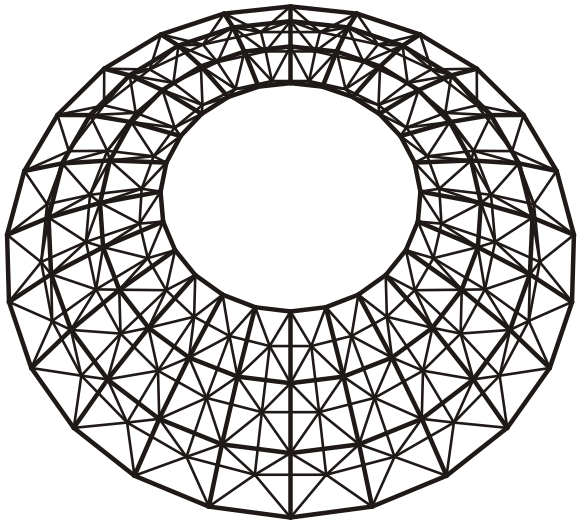
شکل ۹۵- گنبد اشودلر



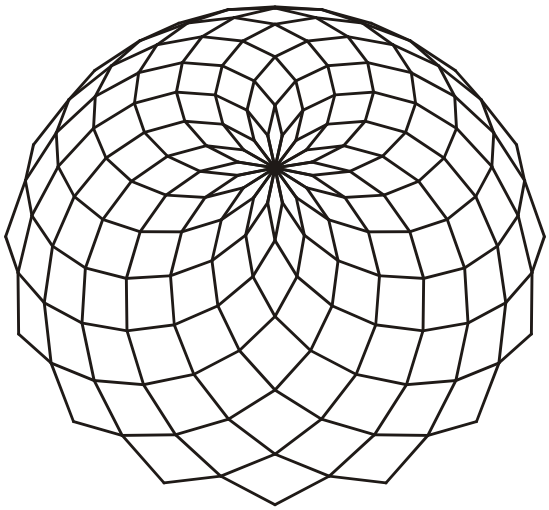
شکل ۹۶- گنبد اشودلر



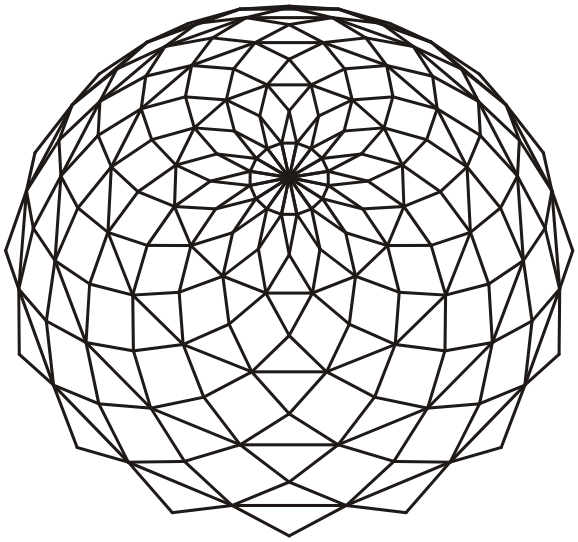
شکل ۹۷- گنبد اشودلر



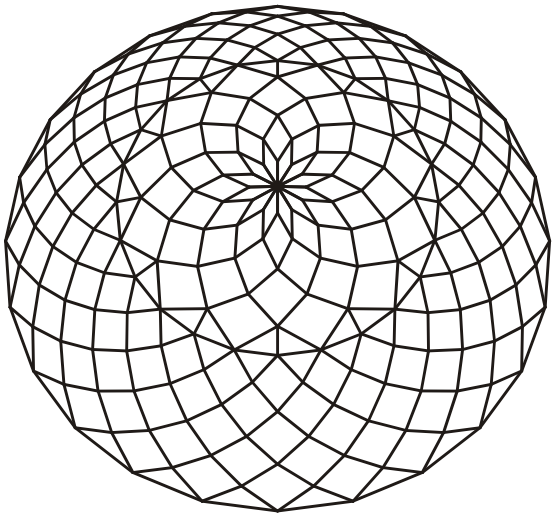
شکل ۹۸- گنبد دولایهٔ دنده ای میان باز



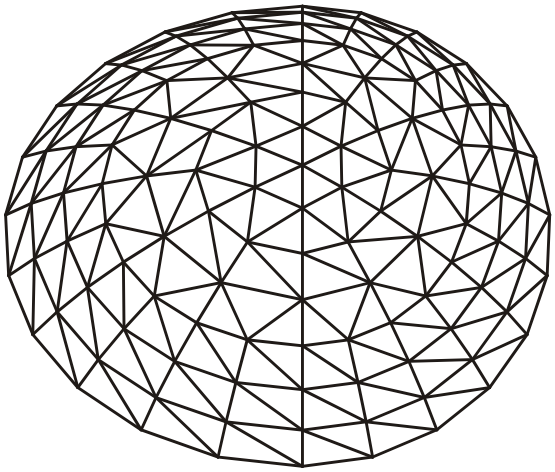
شکل ۹۹- گنبد لملا



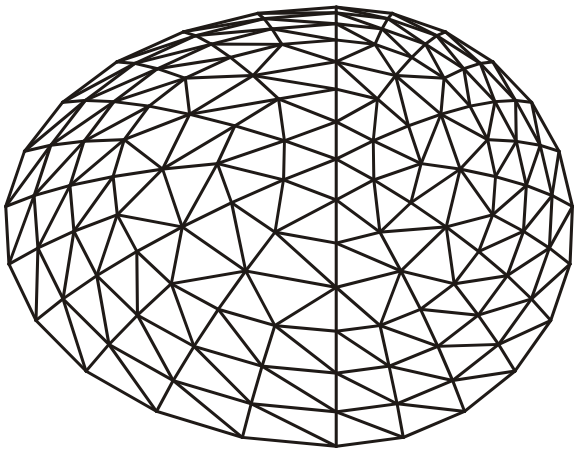
شکل ۱۰۰- گنبد لملا



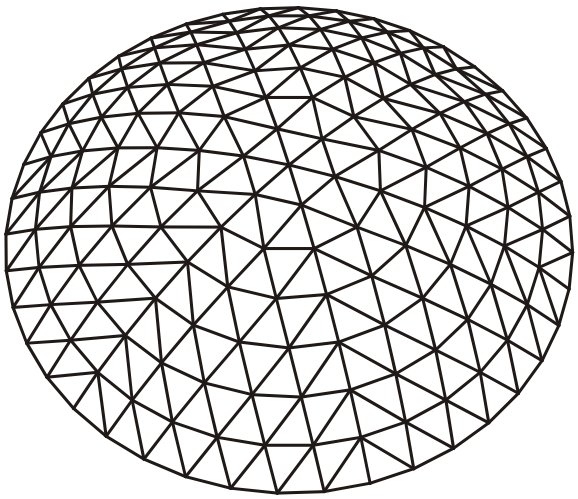
شکل ۱۰۱- گنبد لملای هرس شده



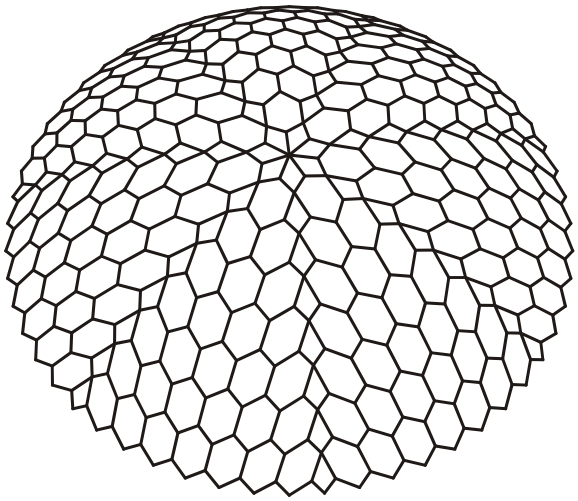
شکل ۱۰۲- گنبد تخم مرغی با ضرایب ۱ و ۱,۲ برای مقیاس دو نیمهٔ گنبد



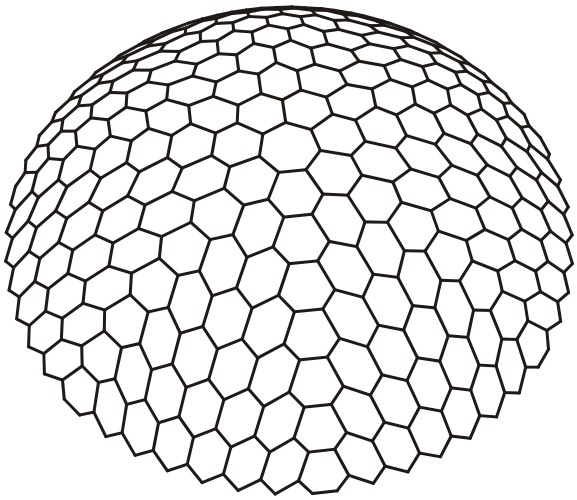
شکل ۱۰۳- گنبد تخم‌مرغی با ضرایب ۱ و ۱,۴ برای مقیاس دو نیمهٔ گنبد



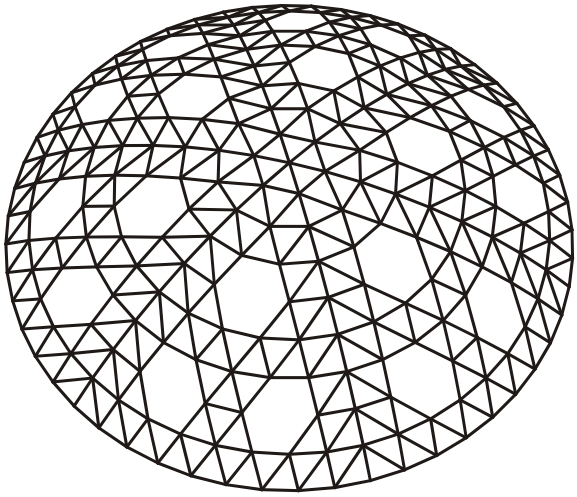
شکل ۱۰۴- گنبد دیامتیک



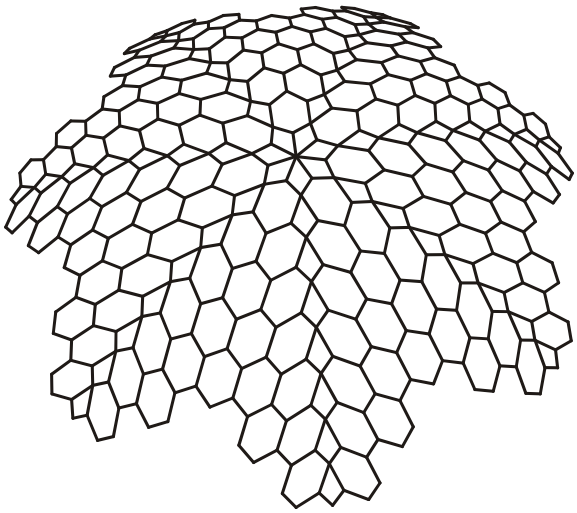
شکل ۱۰۵- گنبد دیامتیک



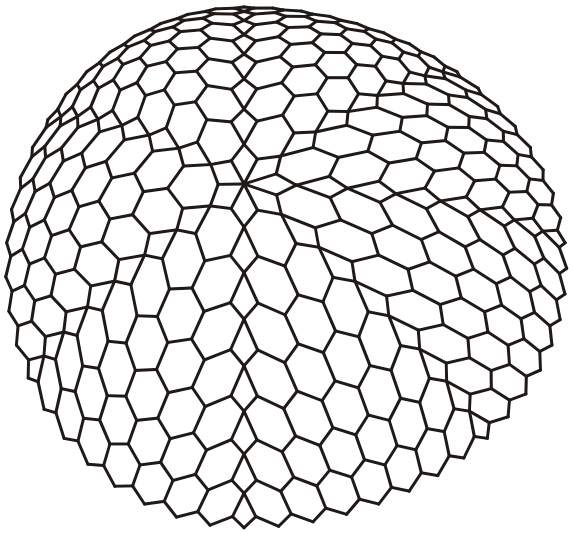
شکل ۱۰۶- گنبد دیامتیک



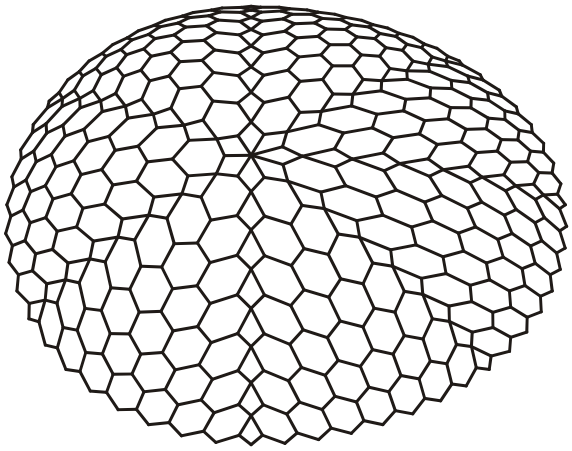
شکل ۱۰۷- گنبد دیامتیک



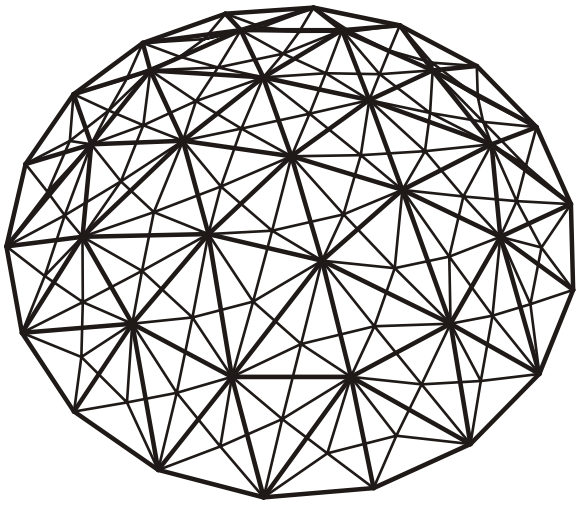
شکل ۱۰۸- گنبد دیامتیک



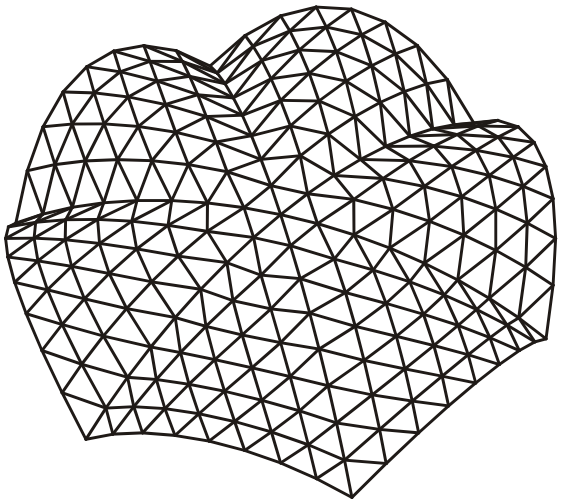
شکل ۱۰۹- گنبد تخم‌مرغی با ضرایب ۱/۱۵ و ۰/۸۵ برای مقیاس دو نیمهٔ گنبد



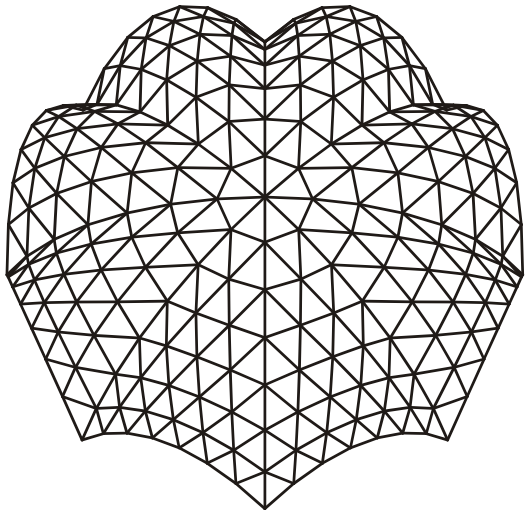
شکل ۱۱۰ -گنبد تخم مرغی با ضرایب۱/۳۵ و ۱/۰۵ برای مقیاس دو نیمهٔ گنبد



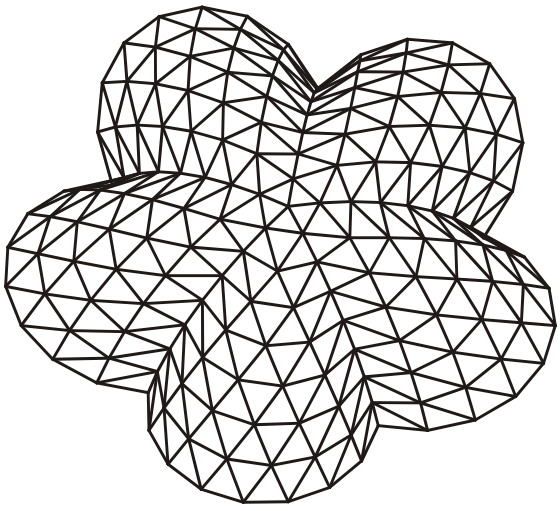
شکل ۱۱۱- گنبد دولایهٔ دیامتیک



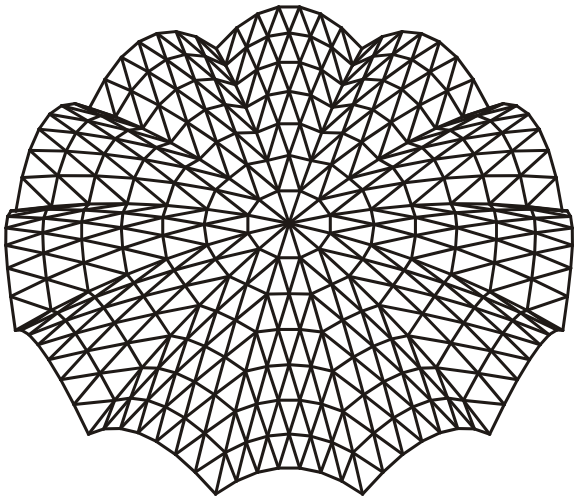
شکل ۱۱۲- گنبد اسکالپ با کد ۱، برآمدگی ۹ و پیش‌آمدگی صفر



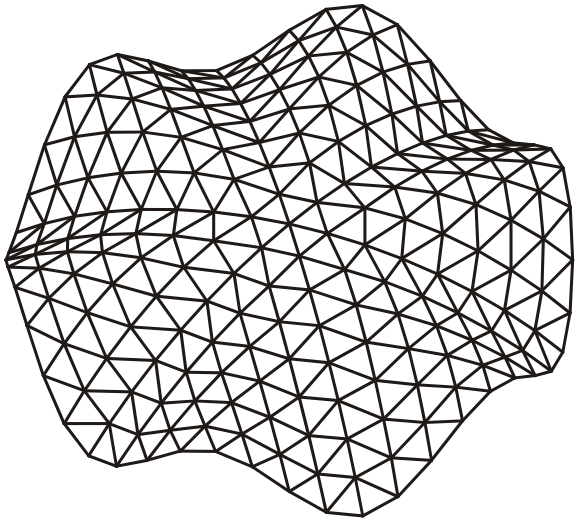
شکل ۱۱۳- گنبد اسکالپ با کد ۱، برآمدگی ۱۵ و پیش‌آمدگی صفر



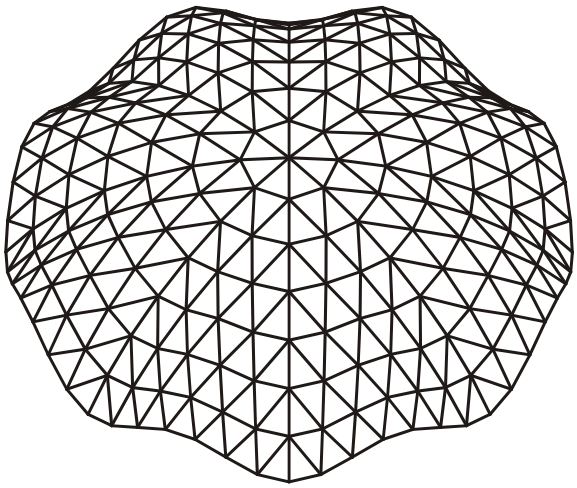
شکل ۱۱۴- گنبد اسکالپ با کد ۱، برآمدگی ۸ و پیش‌آمدگی ۱۵



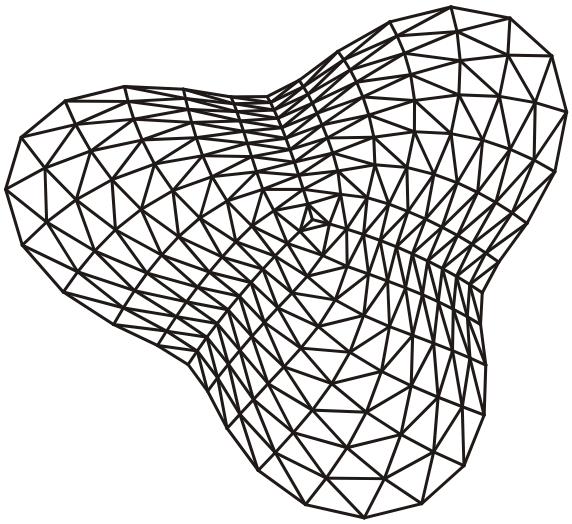
شکل ۱۱۵- گنبد اسکالپ با کد ۱، برآمدگی ۴ و پیش‌آمدگی صفر



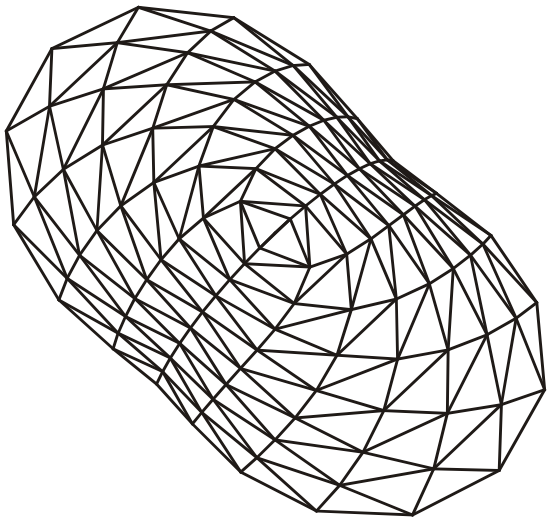
شکل ۱۱۶- گنبد اسکالپ با کد ۲، برآمدگی ۱۰ و پیش‌آمدگی صفر



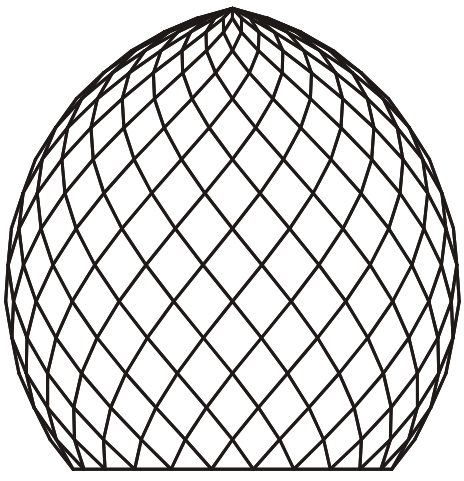
شکل ۱۱۷- گنبد اسکالپ با کد ۲، برآمدگی ۶ و پیش‌آمدگی صفر



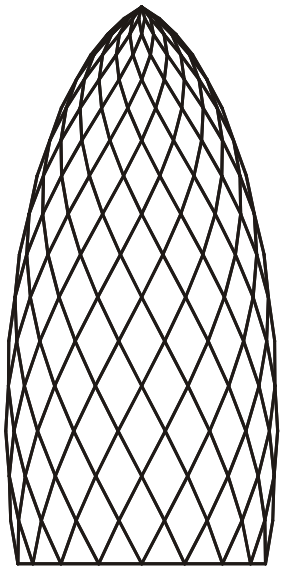
شکل ۱۱۸- گنبد اسکالپ با کد ۲، برآمدگی ۵ و پیش آمدگی ۲۰



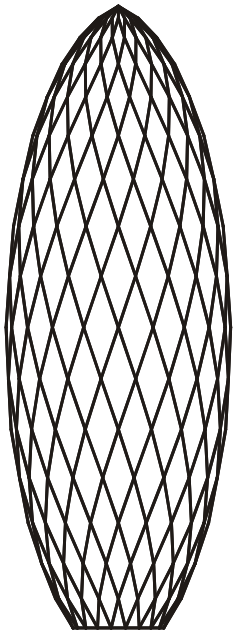
شکل ۱۱۹- گنبد اسکالپ با کد ۲، برآمدگی ۸ و پیش آمدگی ۳۰



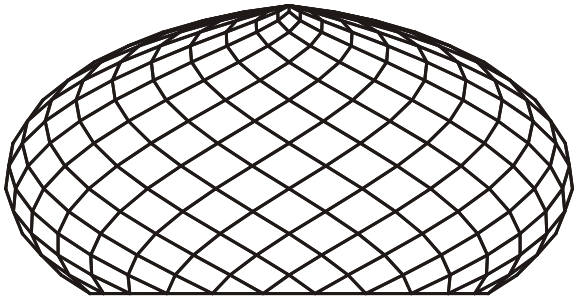
شکل ۱۲۰- گنبد پیازی با نقش لملا (نمای جانبی)



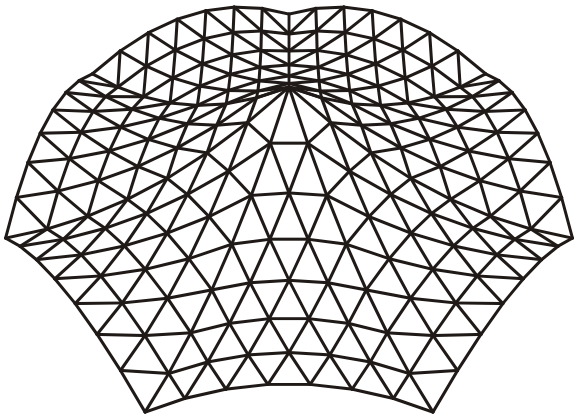
شکل ۱۲۱- گنبد پیازی کشیده با نقش لملا (نمای جانبی)



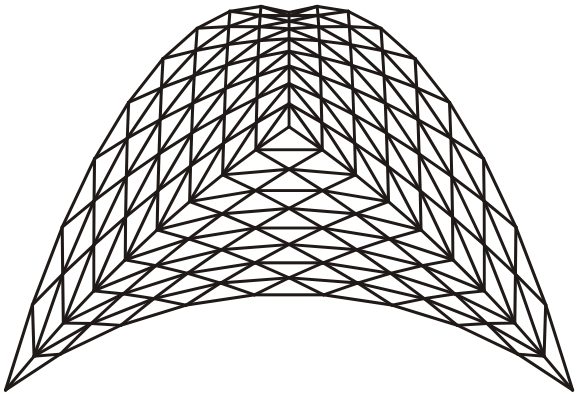
شکل ۱۲۲- گنبد پیازی کشیده با نقش لملا (نمای جانبی)



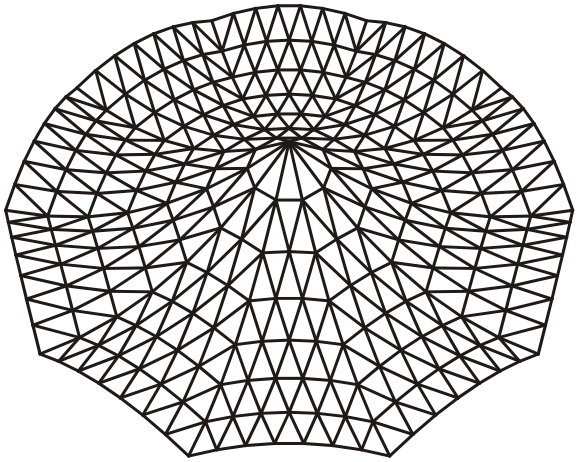
شکل ۱۲۳- گنبد پیازی پَخ با نقش لملا (نمای جانبی)



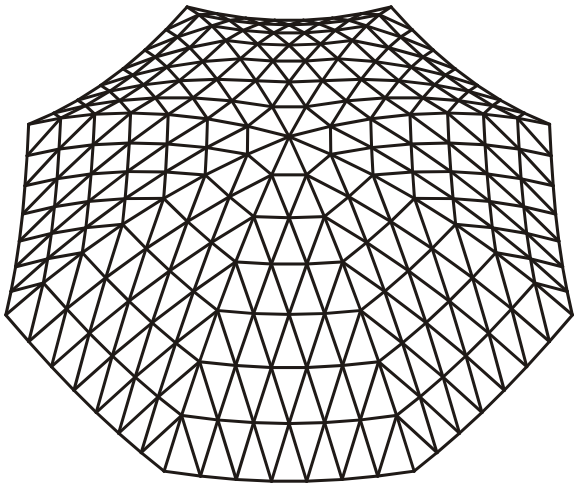
شکل ۱۲۴- گنبد گل ختمی (فراخمیده)



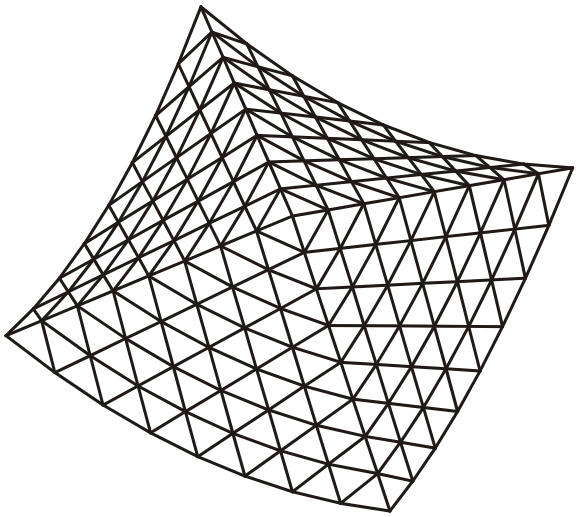
شکل ۱۲۵- گنبد گل ختمی (فراخمیده)



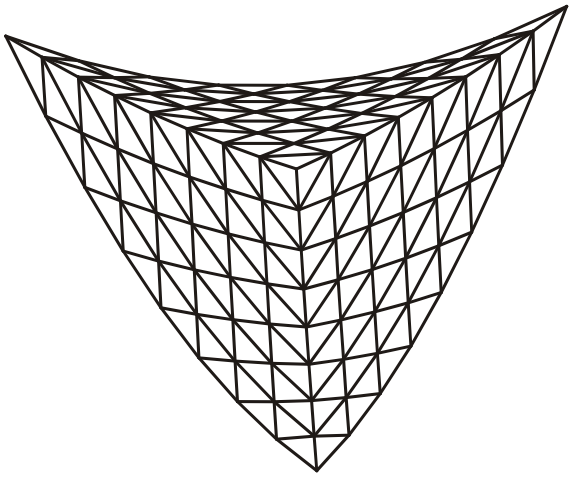
شکل ۱۲۶- گنبد گل ختمی (فراخمیده)



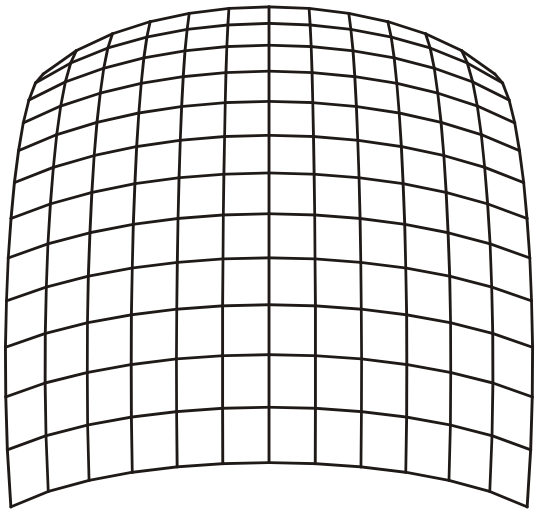
شکل ۱۲۷- گنبد گل ختمی فروخمیده



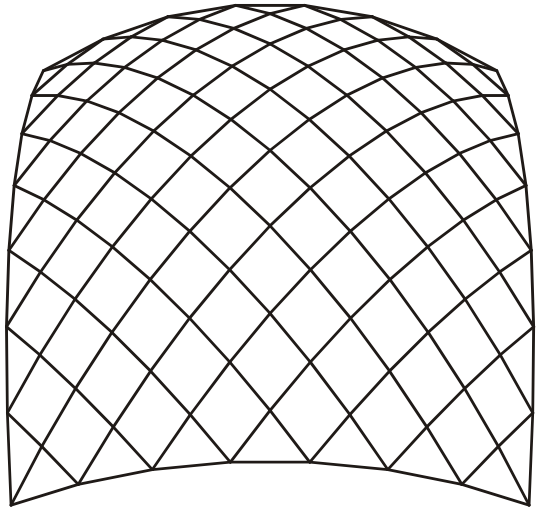
شکل ۱۲۸- گنبد گل ختمی فروخمیده



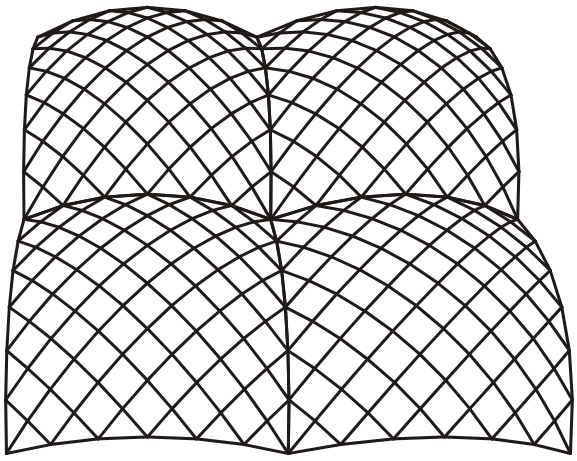
شکل ۱۲۹- گنبد گل ختمی فروخمیده



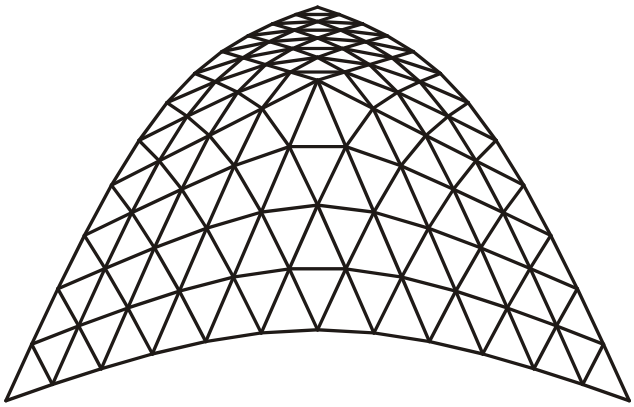
شکل ۱۳۰- گنبد فرازشی (کروی) با نقش دوراهه



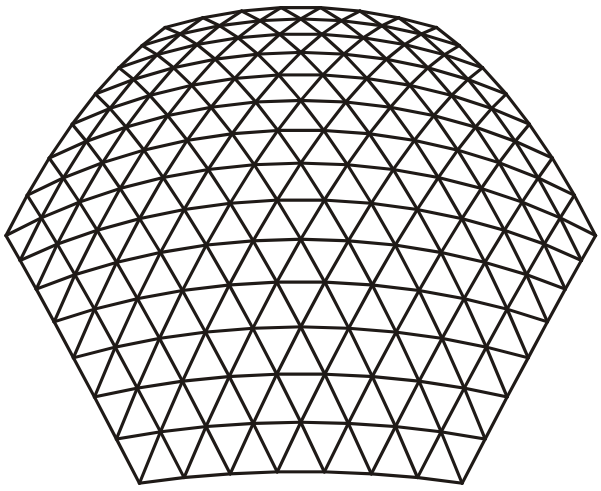
شکل ۱۳۱- گنبد فرازشی (سهموی) با نقش اریبی



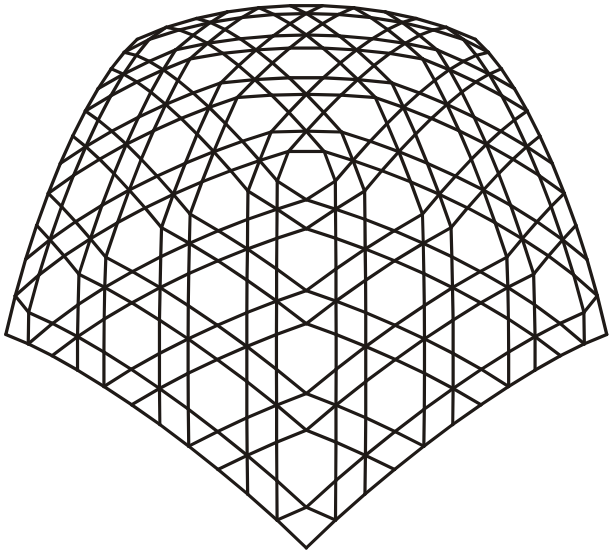
شکل ۱۳۲- گنبد مرکب فرازشی (سهموی) با نقش اریبی



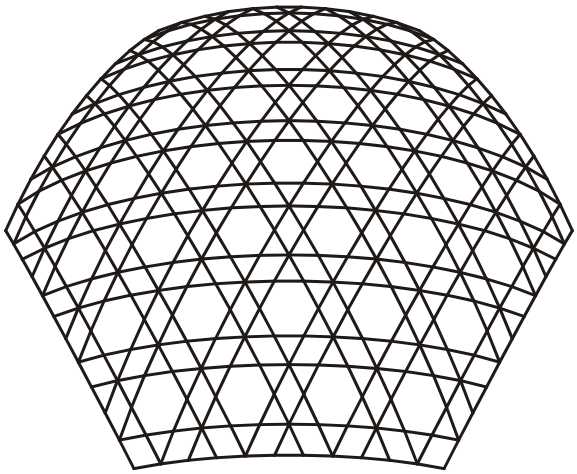
شکل ۱۳۳- گنبد مثلثی فرازشی (مخروطی) با نقش سه‌راهه



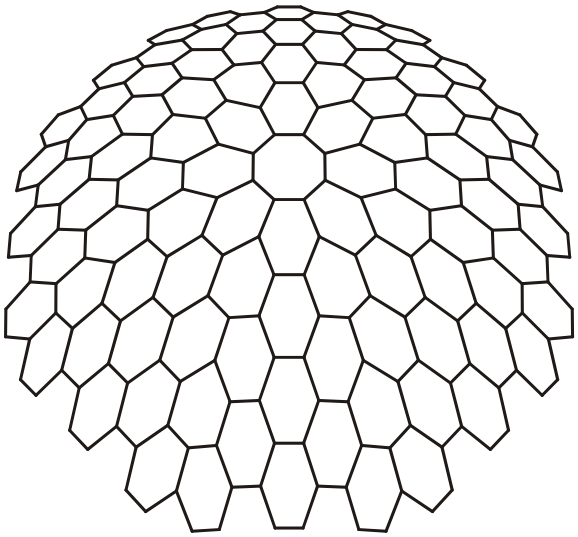
شکل ۱۳۴- گنبد قاچی فرازشی (سهموی) با نقش سه‌راهه



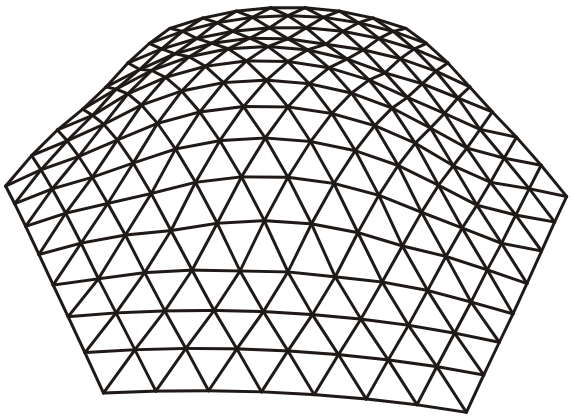
شکل ۱۳۵- گنبد قاچی فرازشی (کروی) با نقش سه‌راهه/شش بری



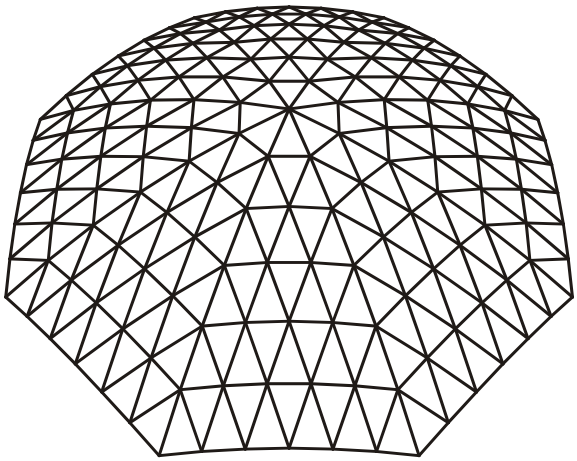
شکل ۱۳۶- گنبد قاچی فرازشی (کروی) با نقش سه راهه/شش بری



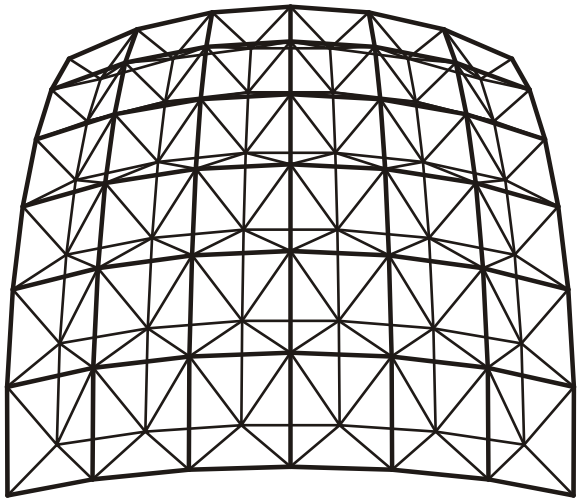
شکل ۱۳۷- گنبد قاچی فرازشی (سهموی) با نقش لانه‌زنبوری



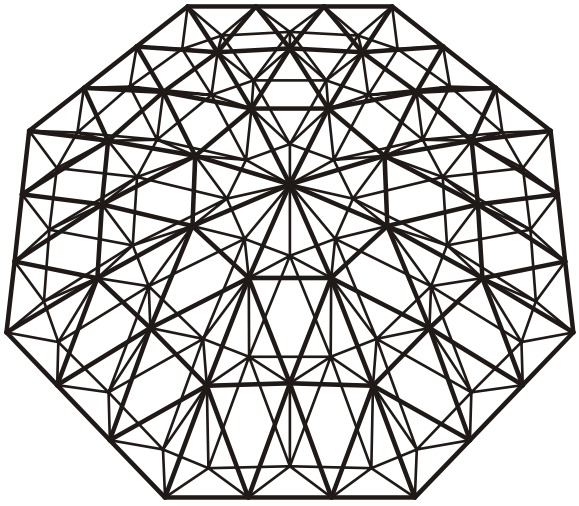
شکل ۱۳۸- گنبد قاچی فرازشی (ترکیب سه فرازش کروی) با نقش سه‌راهه



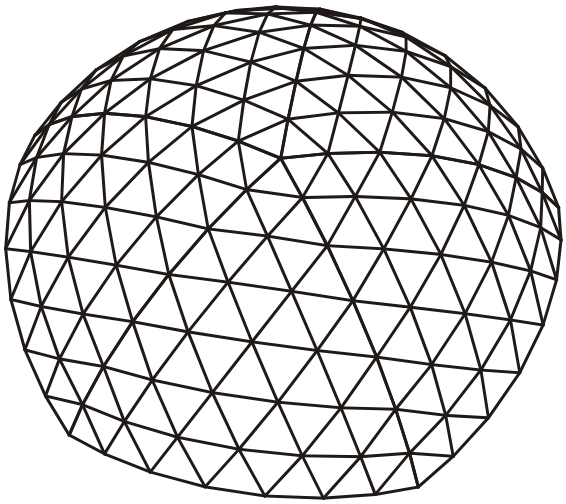
شکل ۱۳۹- گنبد قاچی فرازشی (ترکیب دو فرازش سهموی و مخروطی) با نقش سه‌راهه



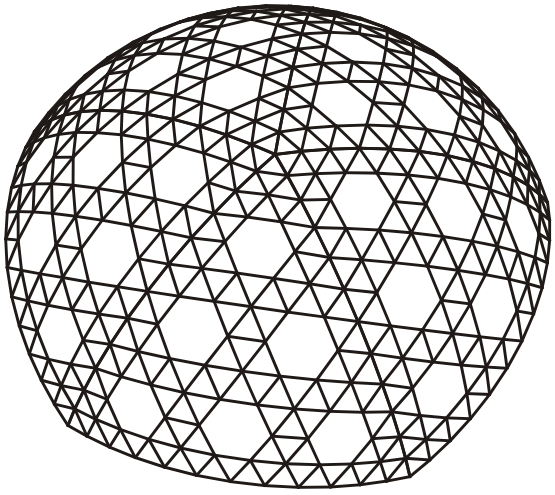
شکل ۱۴۰- گنبد دولایهٔ فرازشی (کروی) با نقش دوراهه روی دوراهه



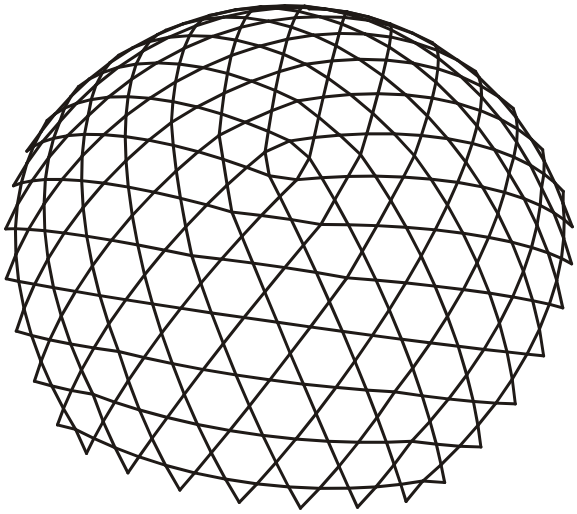
شکل ۱۴۱- گنبد قاچی دولایهٔ فرازشی (سهموی) با نقش سه‌راهه روی سه‌راهه



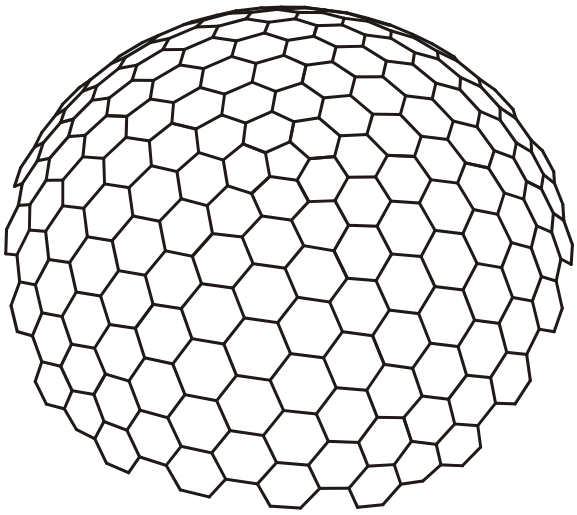
شکل ۱۴۲- گنبد ژئودزیک (بر مبنای ۵ رخ یک بیست رخی)



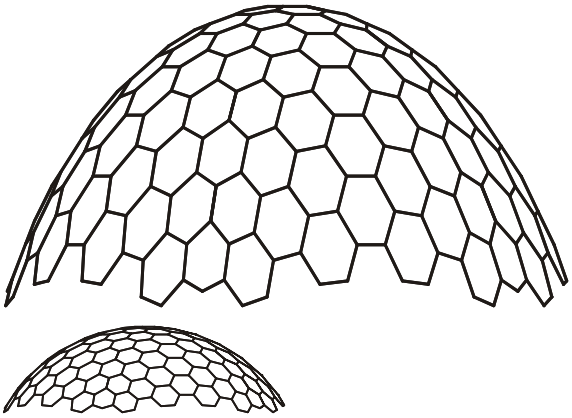
شکل ۱۴۳- گنبد ژئودزیک (بر مبنای ۵ رخ یک بیست رخی)



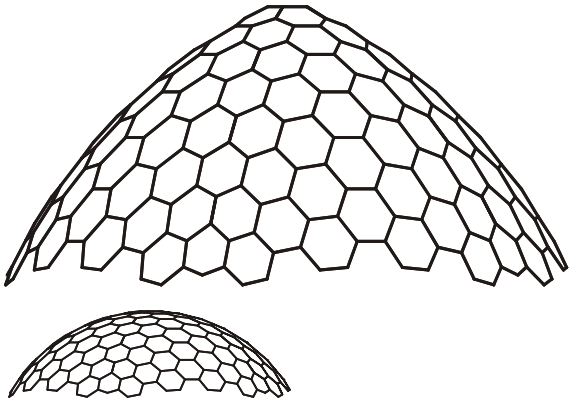
شکل ۱۴۴- گنبد ژئودزیک (بر مبنای ۵ رخ یک بیست رخی)



شکل ۱۴۵- گنبد ژئودزیک (بر مبنای ۵ رخ یک بیست رخی)



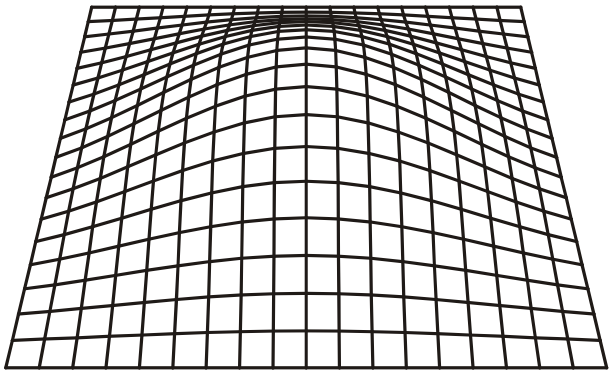
شکل ۱۴۶ (نمای جانبی)- گنبد ژئودزیک شکل ۱۴۵که با مقیاس شدن در راستای قائم به حالت بیضوی درآمده است
(صورت اولیهٔ گنبد هم در زیرش نشان داده شده است)



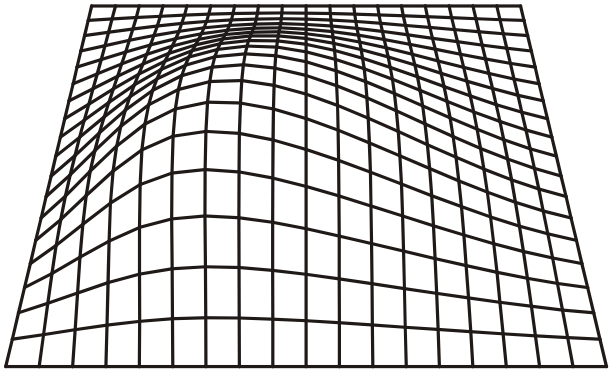
شکل ۱۴۷- (نمای جانبی)

گنبد ژئودزیک شکل ۱۴۵که با فرازش حالتی مخروطی به آن افزوده شده است

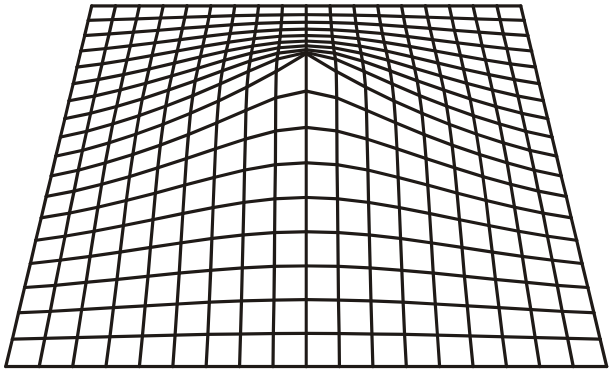
(صورت اولیهٔ گنبد هم در زیرش نشان داده شده است)



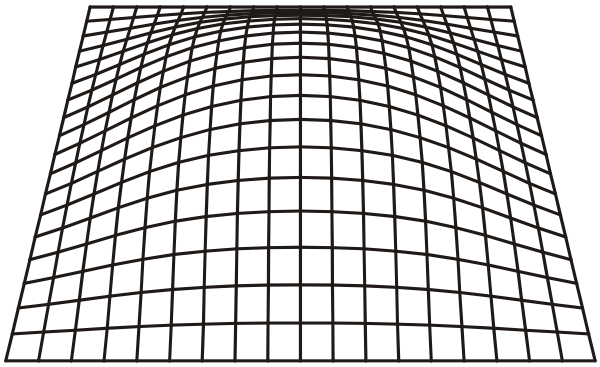
شکل ۱۴۸- گنبد نوانشی با نقش دوراهه و کناره‌های درجا نگهداشته (حالت ۳ نوانش به کار رفته است)



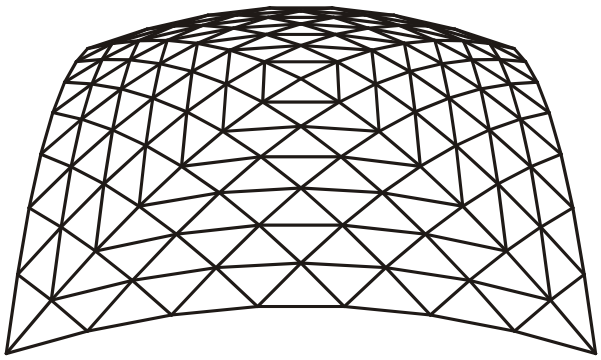
شکل ۱۴۹- گنبد نوانشی با نقش دوراهه و کناره‌های درجا نگهداشته (حالت ۳ نوانش به کار رفته است)



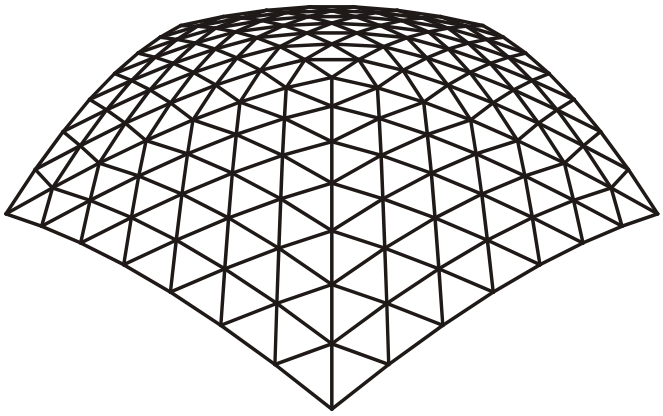
شکل ۱۵۰- گنبد نوانشی با نقش دوراهه و کناره‌های درجا نگهداشته (حالت ۲ نوانش به کار رفته است)



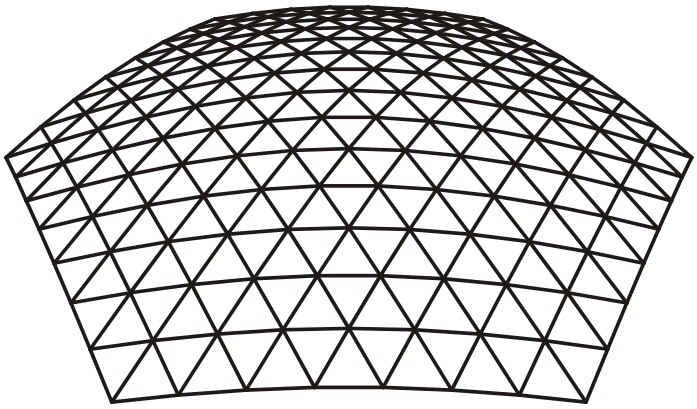
شکل ۱۵۱- گنبد نوانشی با نقش دوراهه و کناره‌های درجا نگهداشته (حالت ۳ نوانش وچهار نقطهٔ برآمده به کار رفته است)



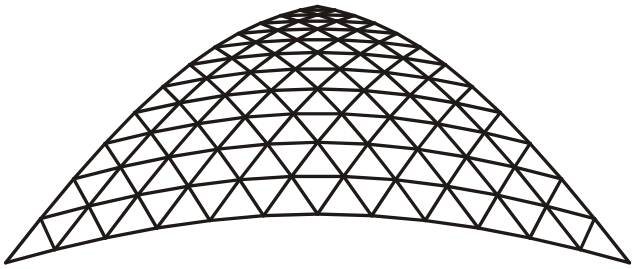
شکل ۱۵۲- گنبد قاچی نوانشی با نقش سه‌راهه و گوشه‌های درجانگهداشته (حالت ۳ نوانش و یک نقطهٔ مرکزی برآمده به کار رفته است)



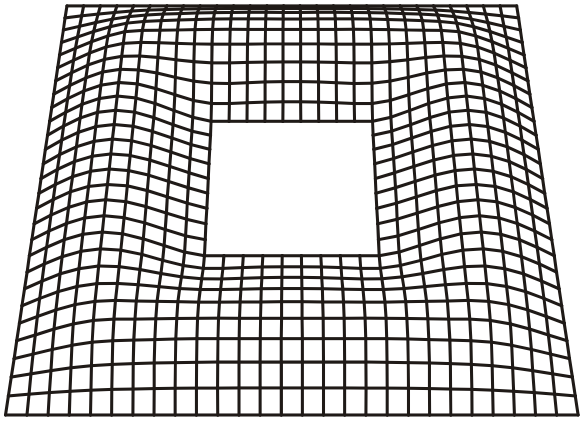
شکل ۱۵۳- گنبد قاچی نوانشی با نقش سه راهه و گوشه‌های درجا نگهداشته (حالت ۳ نوانش و یک نقطهٔ مرکزی برآمده به کار رفته است)



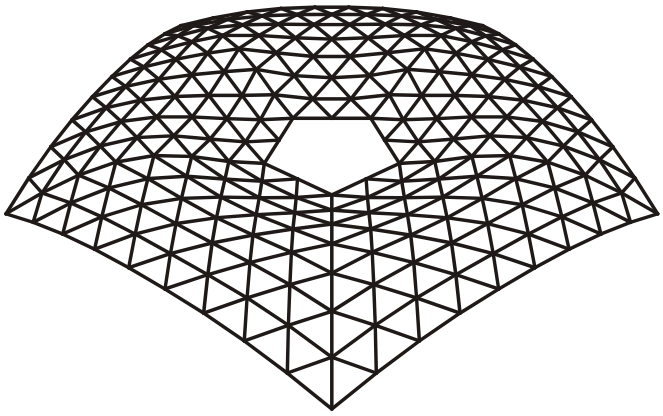
شکل ۱۵۴- گنبد قاچی نوانشی با نقش سه‌راهه و گوشه‌های درجا نگهداشته (حالت ۳ نوانش و یک نقطهٔ مرکزی برآمده به کار رفته است)



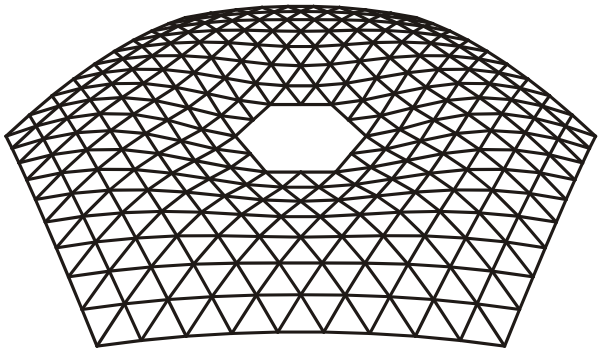
شکل ۱۵۵- گنبد نوانشی مثلثی با نقش سه راهه و گوشه‌های درجا نگهداشته (حالت ۳ نوانش و یک نقطهٔ مرکزی برآمده به کار رفته است)



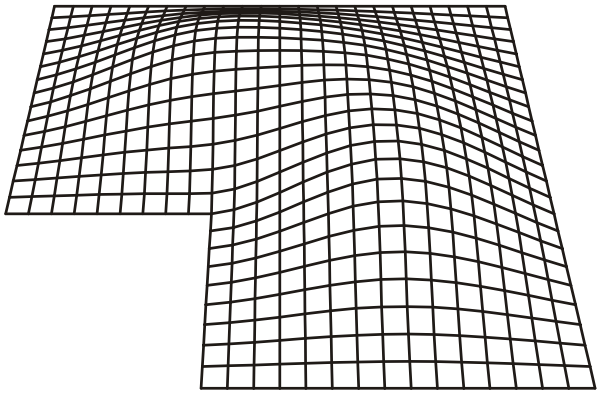
شکل ۱۵۶- گنبد نوانشی با قسمت خالی مرکزی و نقش دوراهه و با کناره‌های درجا نگهداشته (حالت ۳ نوانش و چند نقطهٔ برآمده به کار رفته است)



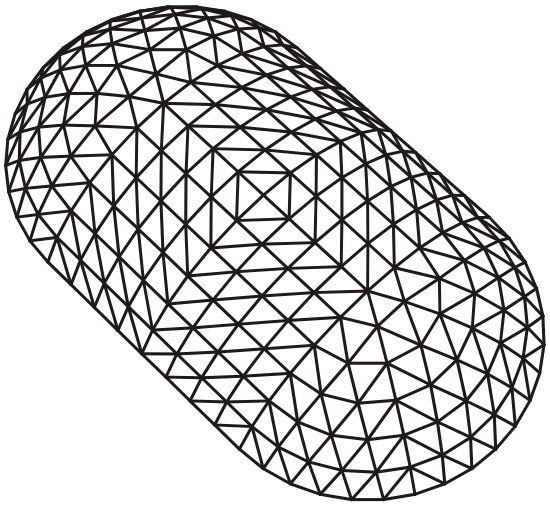
شکل ۱۵۷- گنبد قاچی نوانشی با قسمت خالی مرکزی و نقش سه راهه و با گوشه‌های درجا نگهداشته (حالت ۳ نوانش و چند نقطهٔ برآمده به کار رفته است)



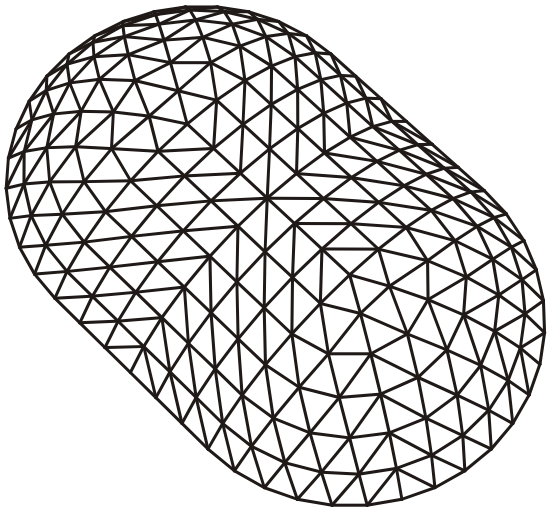
شکل ۱۵۸- گنبد قاچی نوانشی با قسمت خالی مرکزی و نقش سه راهه و با گوشه‌های درجا نگهداشته (حالت ۳ نوانش و چند نقطهٔ برآمده به کار رفته است)



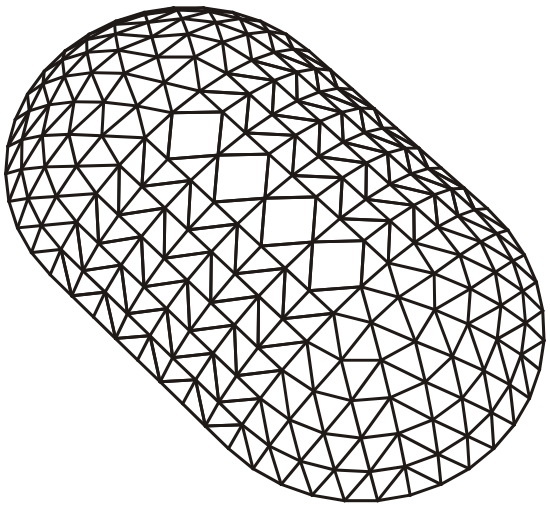
شکل ۱۵۹- گنبد نوانشی با نقش دوراهه و با کناره‌های درجا نگهداشته (حالت ۳ نوانش و چند نقطهٔ برآمده به کار رفته است)



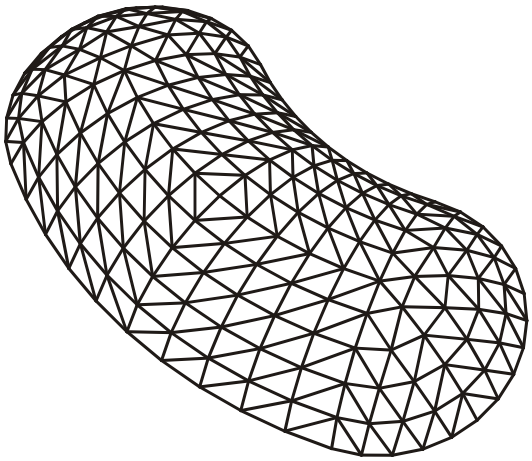
شکل ۱۶۰- چلیک-گنبد



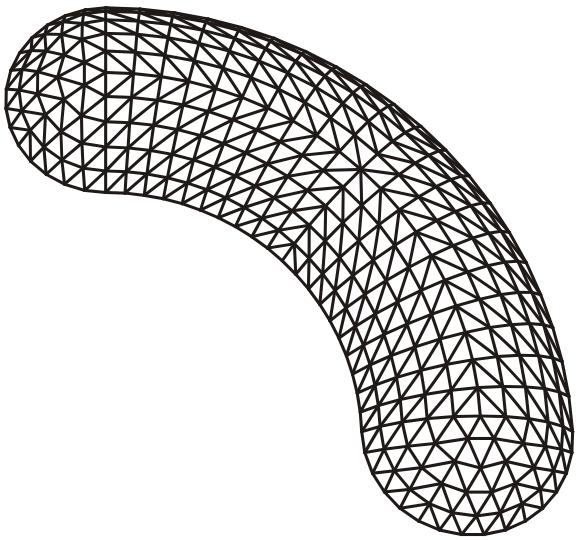
شکل ۱۶۱- چلیک-گنبد



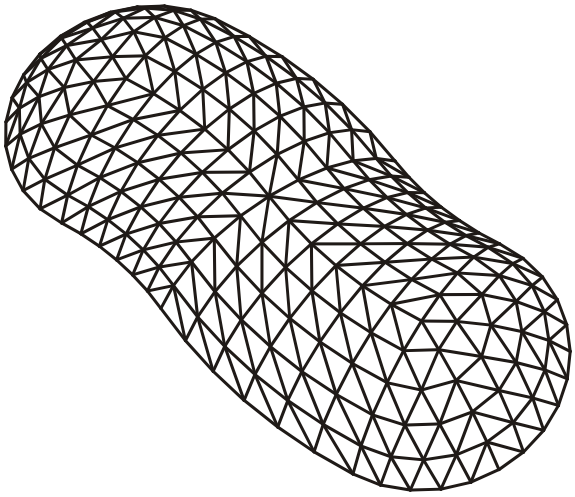
شکل ۱۶۲- چلیک-گنبد



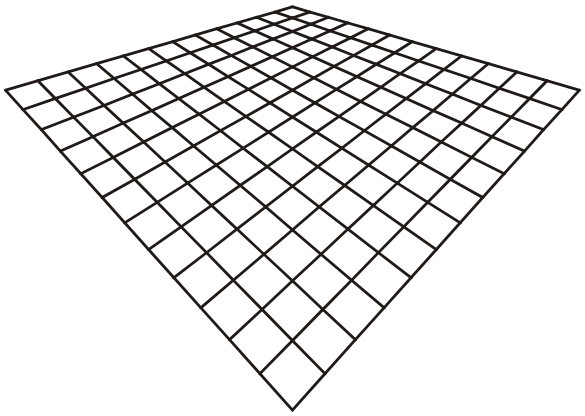
شکل ۱۶۳- چلیک-گنبد پهلوخمیده



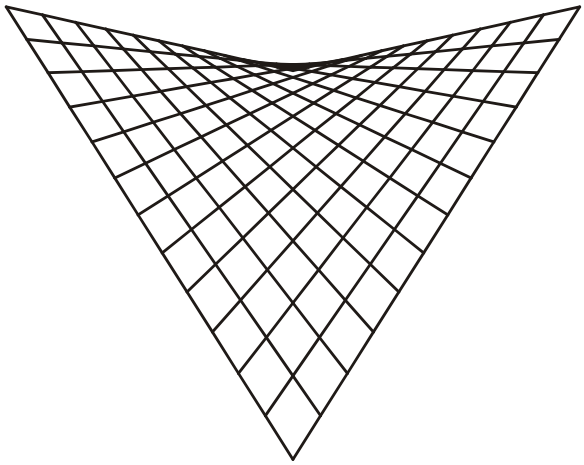
شکل ۱۶۴- چلیک-گنبد پهلوخمیده



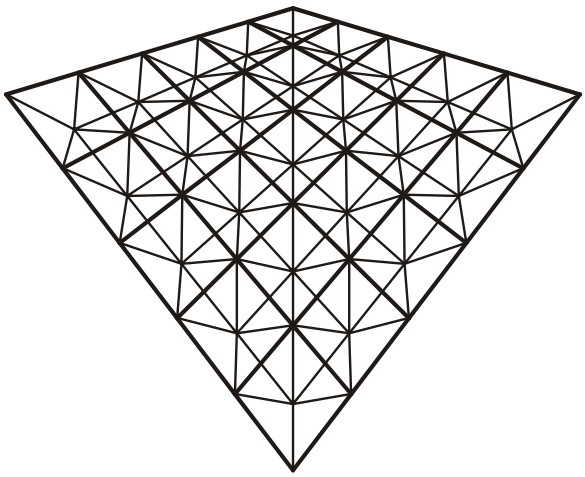
شکل ۱۶۵- چلیک-گنبد دوخم



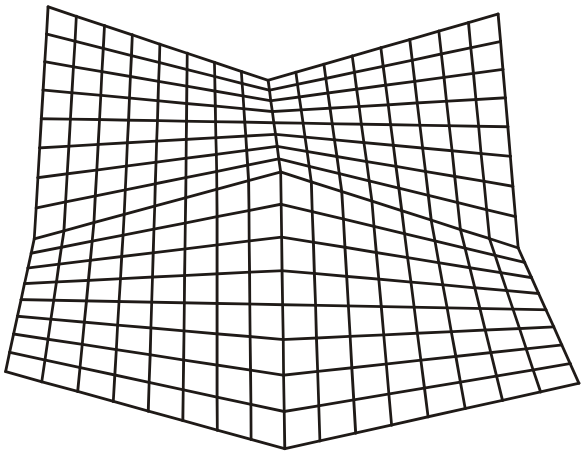
شکل ۱۶۶- سَهلوی با تاب ملایم
(واژهٔ سَهلوی فشردهٔ «سهمی گون هذلولوی» است)



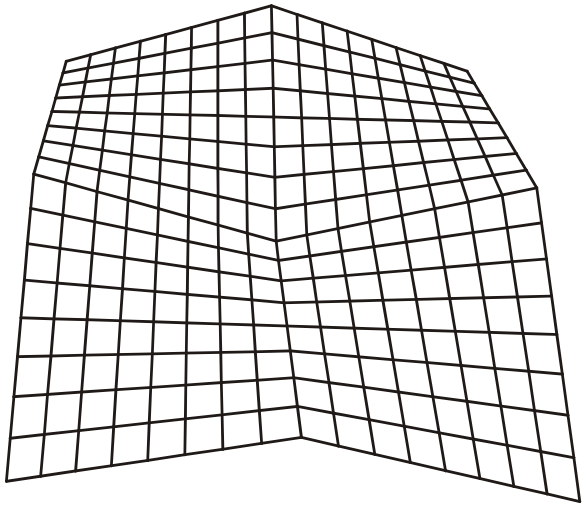
شکل ۱۶۷- سهلوی با تاب شدید



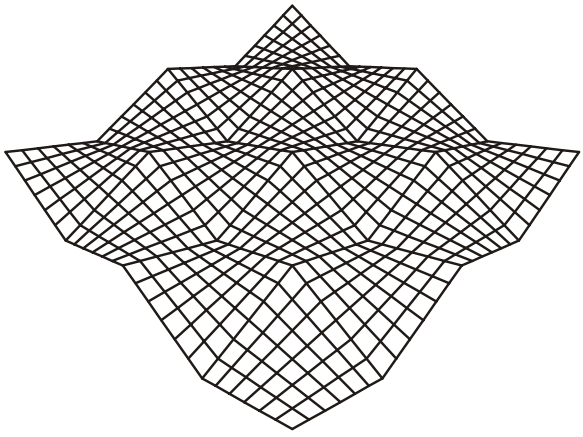
شکل ۱۶۸- سهلوی دولایه



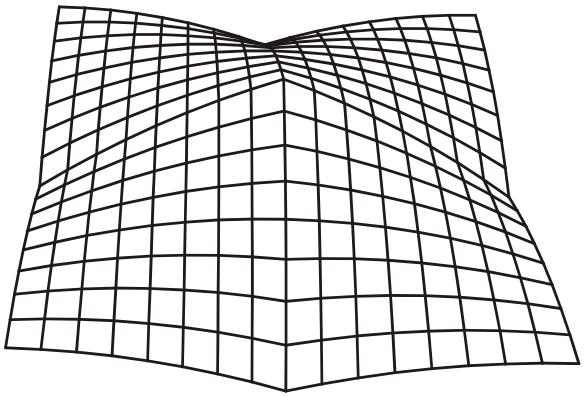
شکل ۱۶۹- سهلوی مرکب (چهارتایی کوژ)



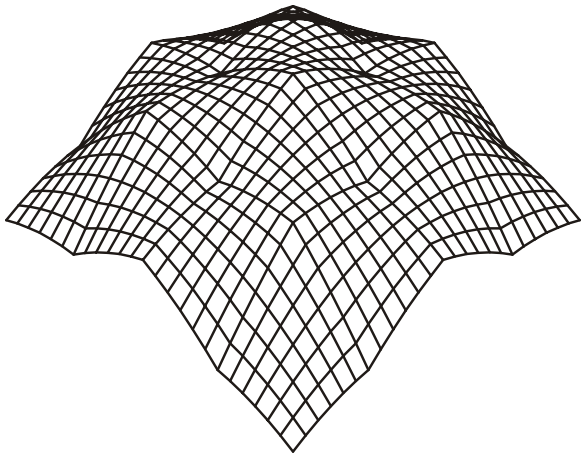
شکل ۱۷۰- سهلوی مرکب (چهارتایی کاو)



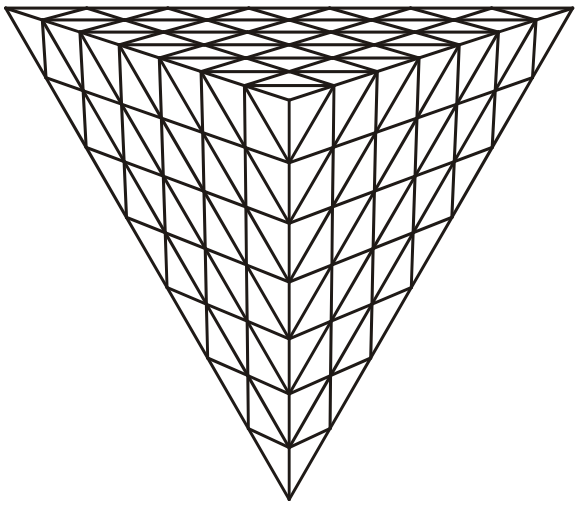
شکل ۱۷۱- سهلوی مرکب



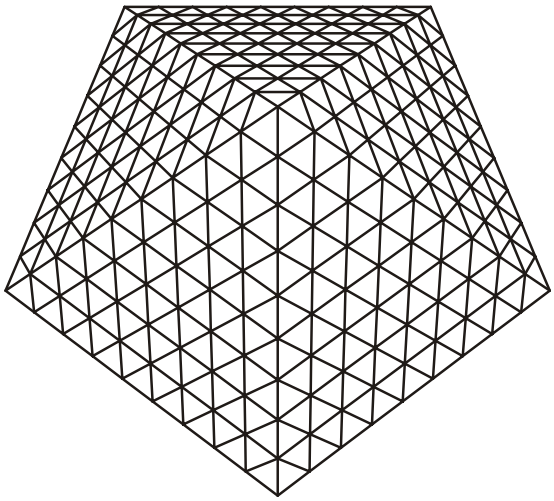
شکل ۱۷۲- شکل ۱۶۹ که یک حالت سهموی با فرازش به آن افزوده شده است



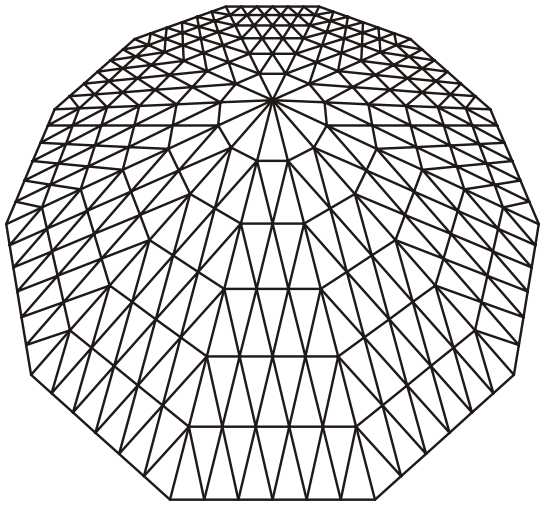
شکل ۱۷۳- همان شکل ۱۷۱ که یک حالت سهموی با فرازش به آن افزوده شده است



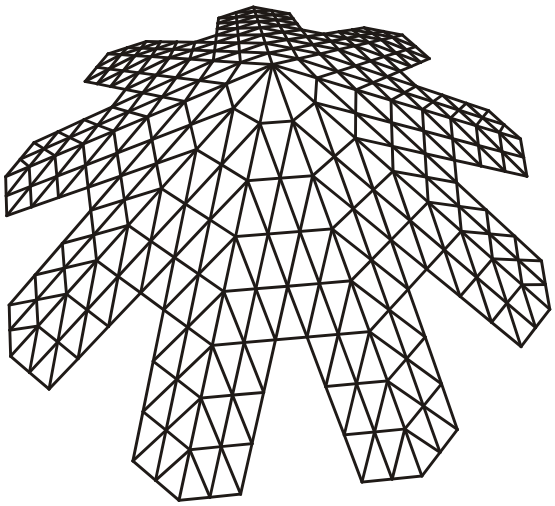
شکل ۱۷۴- هرم با قاعدهٔ مثلثی



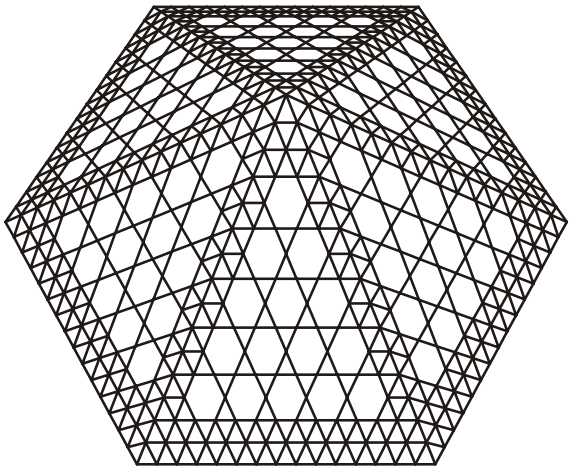
شکل ۱۷۵- هرم با قاعدهٔ پنج بری



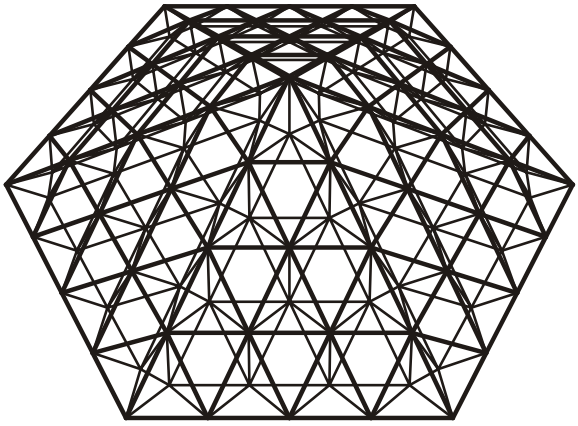
شکل ۱۷۶- هرم با قاعدهٔ دوازده بری



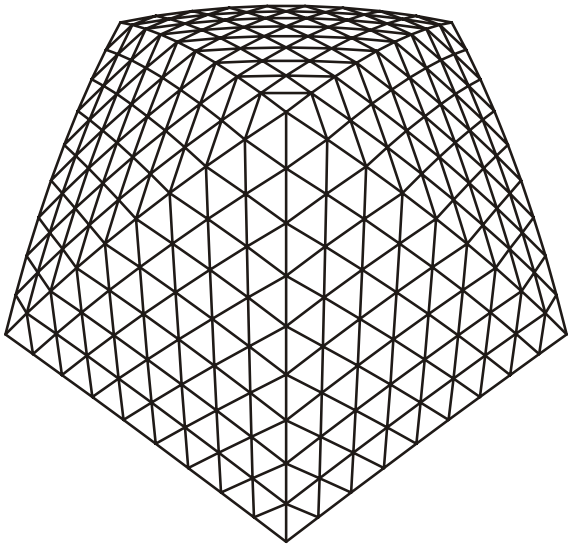
شکل ۱۷۷- هرم با قاعدهٔ نه بری و همووندهای حذف‌شده



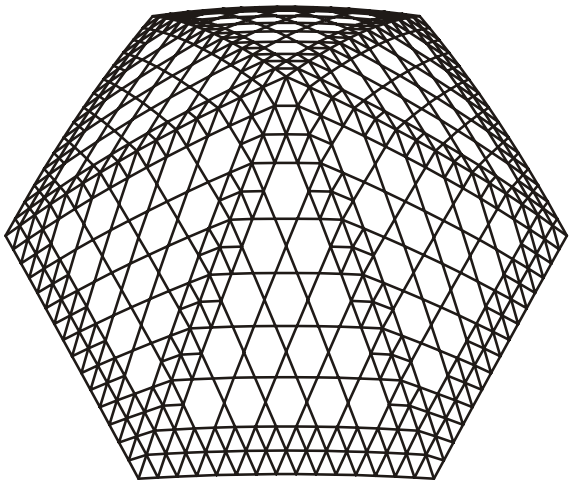
شکل ۱۷۸- هرم با قاعدهٔ شش بری و همووندهای حذف‌شده



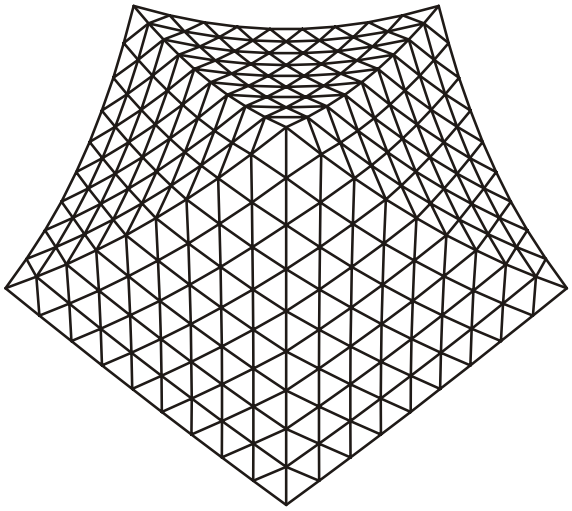
شکل ۱۷۹- هرم دولایه با قاعدهٔ شش بری



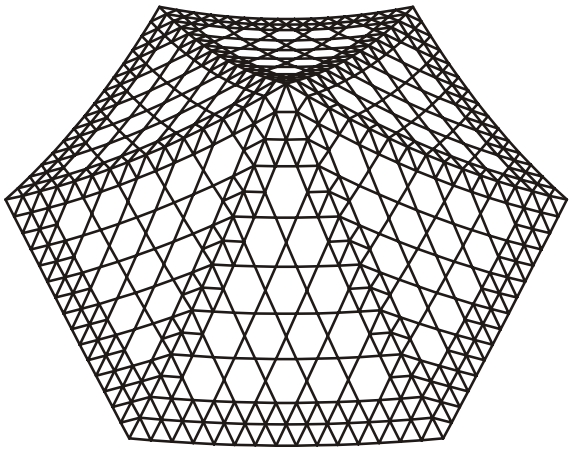
شکل ۱۸۰- شکل ۱۷۵ که یک حالت سهموی با فرازش به آن افزوده شده است



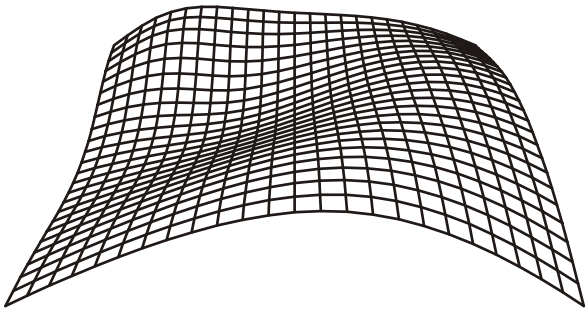
شکل ۱۸۱- شکل ۱۷۸ که یک حالت سهموی با فرازش به آن افزوده شده است



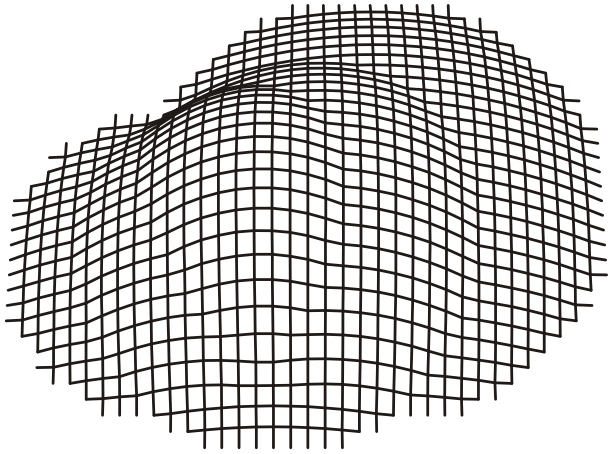
شکل ۱۸۲- شکل ۱۷۵ که یک حالت سهموی با فرازش از آن کم شده است



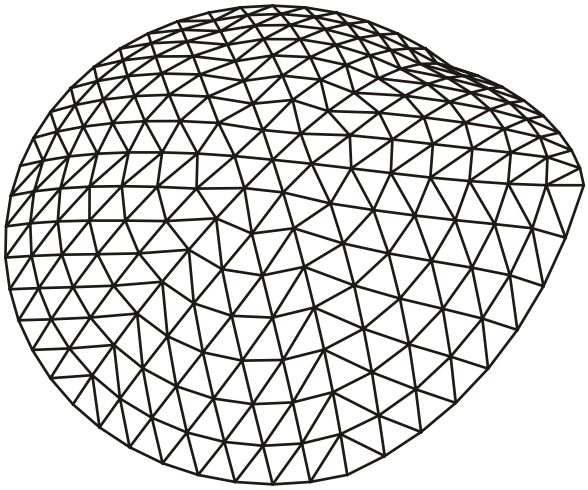
شکل ۱۸۳- شکل ۱۷۸ که یک حالت سهموی با فرازش از آن کم شده است



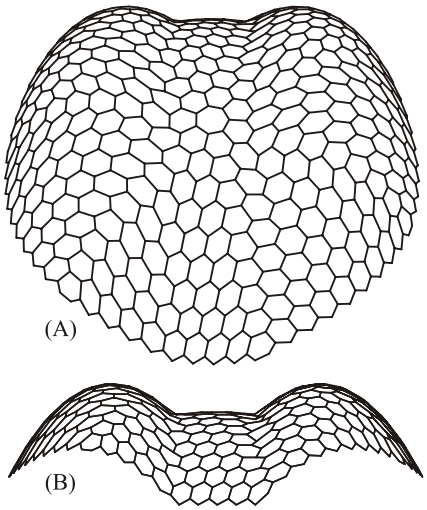
شکل ۱۸۴- شکل آزاد: شبکهٔ تک لایهٔ نوانیده با نقش دوراهه و با گوشه‌های درجا نگهداشته (نوانش حالت ۳ به کار رفته است)



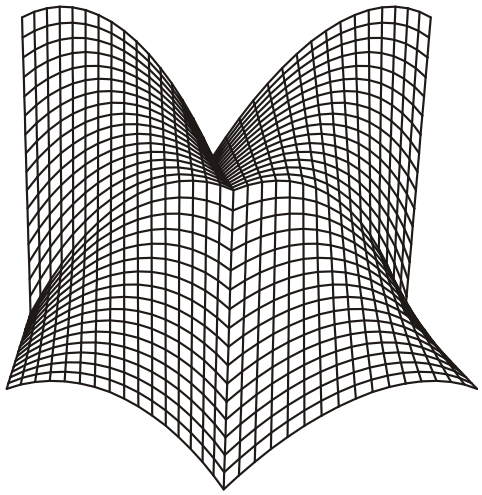
شکل ۱۸۵- شکل آزاد: شبکهٔ تک‌لایهٔ فرازیده با نقش دوراهه (۳ فراِش سهموی به کار رفته است)



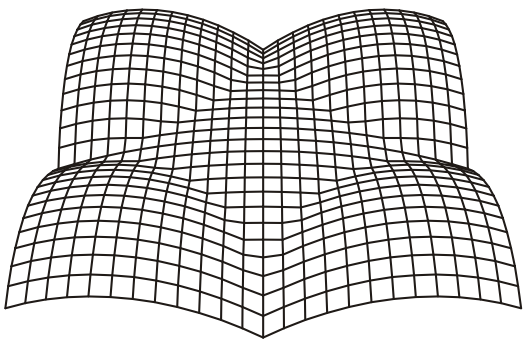
شکل ۱۸۶- شکل آزاد: گنبد دیامتیک نوانیده با دوسوم گره های پیرامونی درجا نگهداشته (نوانش حالت ۲ به کار رفته است)



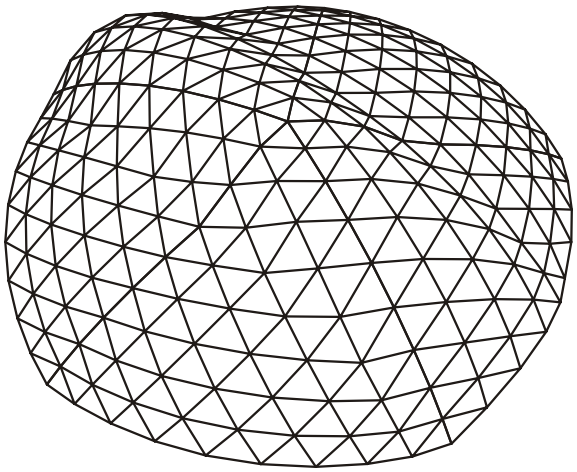
شکل ۱۸۷- شکل آزاد: گنبد دیامتیک فرازیده (۲فزارش)
استوانه‌ای با مقطع سهمی به کار رفته‌اند
(A) : دیدسه بعدی
(B) : دید جـــانبی



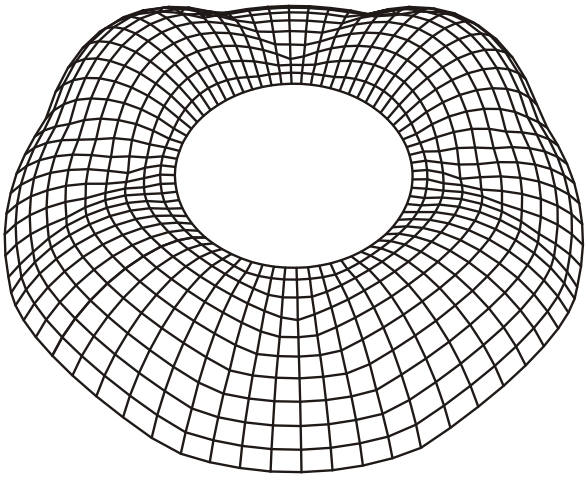
شکل ۱۸۸- شکل آزاد: سهلوی مرکب فرازیده
(۲ فرازش استوانه‌ای با مقطع سهمی به کار رفته‌اند)



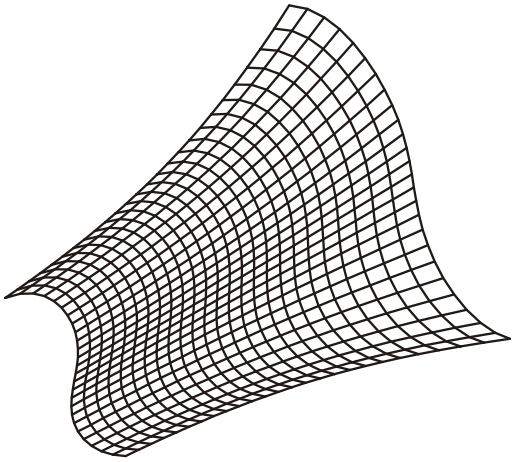
شکل ۱۸۹- شکل آزاد: شبکهٔ دوراههٔ فرازیده
(۴ فرازش سهموی و یک فرازش کروی به کار رفته‌اند)



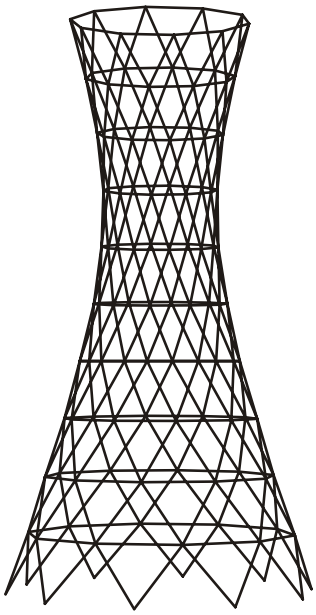
شکل ۱۹۰- شکل آزاد: گنبد پخ‌شدهٔ ژئودزیک فرازیده
(یک فرازش استوانه‌ای با مقطع سهمی به کار رفته است)



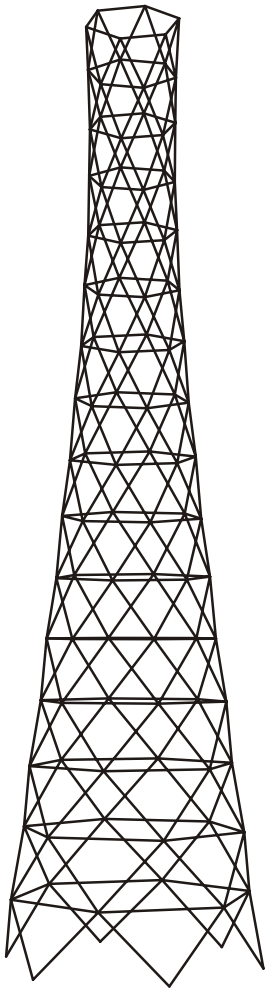
شکل ۱۹۱- شکل آزاد: چلیک حلقوی فرازیده
(۲ فرازش استوانه‌ای با مقطع سهمی به کار رفته‌اند)



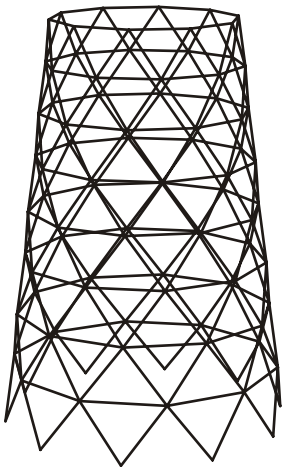
شکل ۱۹۲- شکل آزاد: سازهٔ شبکه‌ای پاراژنیک



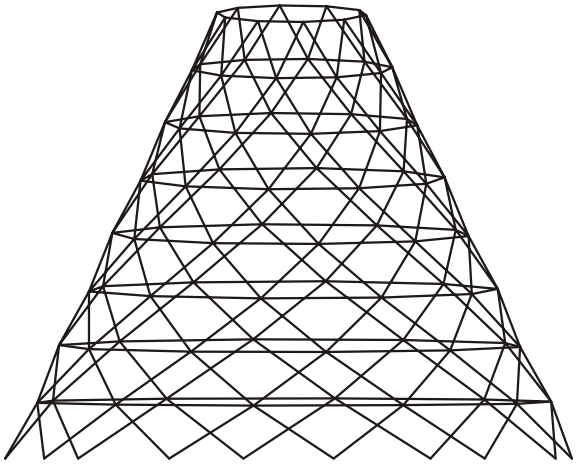
شکل ۱۹۳- برج شبکه‌ای هذلولوی



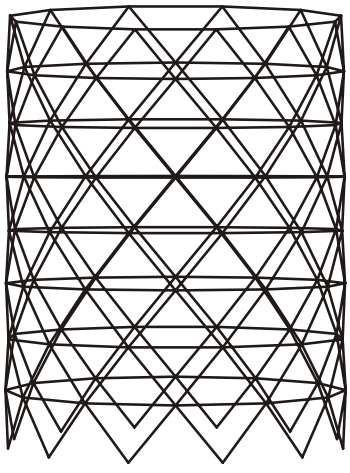
شکل ۱۹۴- برج شبکه‌ای هذلولوی



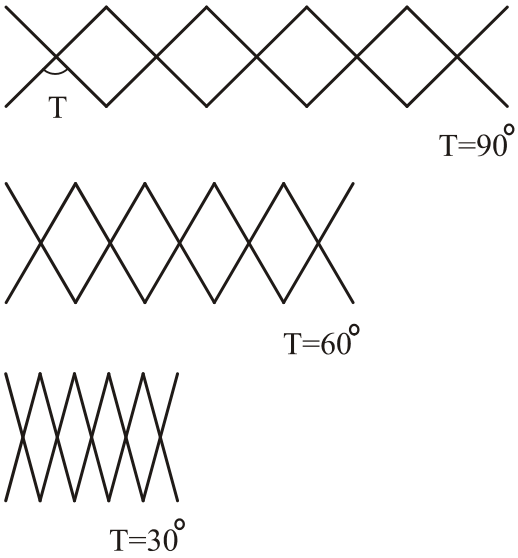
شکل ۱۹۵- برج شبکه‌ای مخروطی



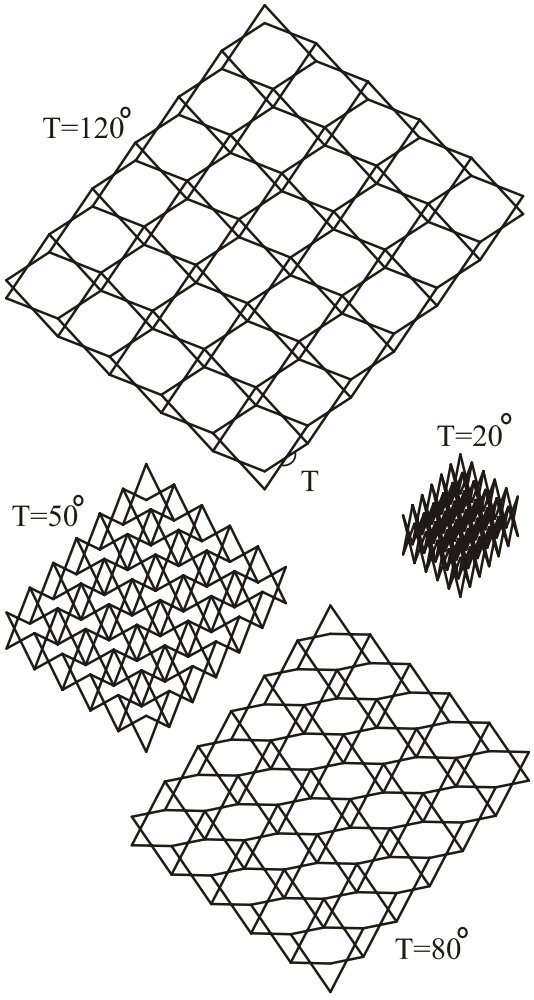
شکل ۱۹۶- برج شبکه‌ای مخروطی



شکل ۱۹۷- برج شبکه‌ای استوانه‌ای



شکل ۱۹۸- یک سیستم سادهٔ تاشو متشکل از پنج دولایه (سه حالت بازشدگی سیستم نشان داده شده است)



شکل ۱۹۹- شبکهٔ دولایهٔ تاشو (چهار حالت بازشدگی سازه نشان داده شده است)

پیوست ۱–ب

برنامه‌های فرمیینی برای تاشه‌های پیوست ۱–الف

پیوست ۱ ـ ب ـ برنامه‌های فرمیینی برای تاشه‌های پیوست ۱ ـ الف

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 1:  Single layer grid with
  binate pattern. See Reference 1. (*)
L1=25;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=25;   (*) Length in U2 direction (*)
m=10;    (*) Frequency in U1 direction (*)
n=10;    (*) Frequency in U2 direction (*)
E=rinid(m,n+1,1,1)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(m+1,n,1,1)|[0,0,0; 0,1,0];
Grid=bb(L1/m,L2/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۲

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 2:  Single layer grid with
  obnate pattern. See Reference 1. (*)
L1=25;  (*) Length in U1 direction (*)
L2=25;  (*) Length in U2 direction (*)
m=6;    (*) Frequency of crosses
                    in U1 direction (*)
n=6;    (*) Frequency of crosses
                    in U2 direction (*)
E=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,0]#
  rinid(m,2,2,2*n)|[0,0,0; 2,0,0]#
  rinid(2,n,2*m,2)|[0,0,0; 0,2,0];
Grid=bb(L1/(2*m),L2/(2*n))|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۳

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 3:  Single layer grid with
  binate pattern and additional diagonal
  elements. See Reference 1. (*)
L1=25;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=25;   (*) Length in U2 direction (*)
m=10;    (*) Frequency in U1 direction,
                        m must be even (*)
n=10;    (*) Frequency in U2 direction (*)
E=rinid(m,n+1,1,1)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(m+1,n,1,1)|[0,0,0; 0,1,0]#
  rinid(m/2,n,2,1)|lam(1,1)|[0,1,0; 1,0,0];
Grid=bb(L1/m,L2/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 4:  Single layer grid with
  binate pattern and additional diagonal
  elements. See Reference 1. (*)
L1=25;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=25;   (*) Length in U2 direction (*)
m=10;    (*) Frequency in U1 direction,
                        m must be even (*)
n=10;    (*) Frequency in U2 direction,
                        n must be even (*)
E=rinid(m,n+1,1,1)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(m+1,n,1,1)|[0,0,0; 0,1,0]#
  lam(2,n/2)|rinid(m/2,n/2,2,1)|lam(1,1)|
  [0,1,0; 1,0,0];
Grid=bb(L1/m,L2/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۵

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 5:  Single layer grid with
  binate pattern and additional diagonal
  elements. See Reference 1. (*)
L1=25;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=25;   (*) Length in U2 direction (*)
m=10;    (*) Frequency in U1 direction,
                    m must be even (*)
n=10;    (*) Frequency in U2 direction,
                    n must be even (*)
E=rinid(m,n+1,1,1)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(m+1,n,1,1)|[0,0,0; 0,1,0]#
  lamid(m/2,n/2)|rinid(m/2,n/2,1,1)|
  [0,1,0; 1,0,0];
Grid=bb(L1/m,L2/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۶

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 6:  Single layer grid with
  obnate pattern and additional diagonal
  elements. See Reference 1. (*)
L1=25;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=25;   (*) Length in U2 direction (*)
m=6;     (*) Frequency of crosses
                    in U1 direction (*)
n=6;     (*) Frequency of crosses
                    in U2 direction (*)
E=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,0]#
  rinid(m,n+1,2,2)|[0,0,0; 2,0,0]#
  rinid(2,n,2*m,2)|[0,0,0; 0,2,0];
Grid=bb(L1/(2*m),L2/(2*n))|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 7:  Single layer grid with
  ternate pattern. See Reference 1. (*)
L1=25;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=25;   (*) Length in U2 direction (*)
m=6;     (*) Frequency of crosses
                    in U1 direction (*)
n=6;     (*) Frequency of crosses
                    in U2 direction (*)
E=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,0]#
  rinid(2*m,2,1,2*n)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(m+1,n,2,2)|[0,0,0; 0,2,0]#
  rinid(m,n-1,2,2)|[1,1,0; 1,3,0]#
  rinid(m,2,2,2*n-1)|[1,0,0; 1,1,0];
Grid=bb(L1/(2*m),L2/(2*n))|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;   draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۸

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 8:  Single layer grid with
  ternate pattern. See Reference 1. (*)
L1=25;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=25;   (*) Length in U2 direction (*)
m=8;     (*) Frequency in U1 direction (*)
n=8;     (*) Frequency in U2 direction (*)
E=rinid(m,n+1,1,1)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(m+1,n,1,1)|[0,0,0; 0,1,0]#
  rinid(m,n,1,1)|[0,1,0; 1,0,0];
Grid=bb(L1/m,L2/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;   draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۹

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 9:  Single layer grid with
  ternate pattern. See Reference 1. (*)
L1=24;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=21;   (*) Length in U2 direction (*)
m=8;     (*) Frequency in U1 direction (*)
n=8;     (*) Frequency in U2 direction,
                    n must be even (*)
E=rinid(m,n/2,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,0]#
  rinid(m,1+n/2,2,2)|[0,0,0; 2,0,0]#
  rinid(m-1,n/2,2,2)|[1,1,0; 3,1,0]#
  rinid(2,n/2,2*m,2)|[0,0,0; 0,2,0]#
  rinid(2,n,2*m,1)|[0,0,0; 0,1,0]#
  rinid(2,n/2,2*m-1,2)|[0,1,0; 1,1,0];
Grid=bb(L1/(2*m),L2/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 10:  Single layer grid with
  ternate pattern and hexagonal openings.
  See Reference 1. (*)
L1=36;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=36;   (*) Length in U2 direction (*)
m=16;    (*) Frequency in U1 direction,
        m must be a multiple of 3 plus 1 (*)
n=16;    (*) Frequency in U2 direction,
                n must be a multiple of 4 (*)
mm=ric|((m-1)/3);  nn=ric|(N/4);
E=rinid(m,n/2,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,0]#
  rinid(m,1+n/2,2,2)|[0,0,0; 2,0,0]#
  rinid(m-1,n/2,2,2)|[1,1,0; 3,1,0]#
  rinid(2,n,2*m,1)|[0,0,0; 0,1,0]#
  rinid(2,n/2,2*m-1,2)|[0,1,0; 1,1,0];
RN=rinid(mm,nn,6,4)|[4,2,0];
Grid=bb(L1/(2*m),L2/n)|lux(RN)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 11:  Single layer grid with
  ternate pattern and hexagonal openings.
  See Reference 1. (*)
L1=36;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=36;   (*) Length in U2 direction (*)
m=16;     (*) Frequency in U1 direction,
      m must be a multiple of 3 plus 1 (*)
n=16;     (*) Frequency in U2 direction,
       n must be a multiple of 6 plus 4 (*)
mm=ric|((m-1)/3);  nn=ric|(N/4);
E=rinid(m,n/2,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,0]#
  rinid(m,1+n/2,2,2)|[0,0,0; 2,0,0]#
  rinid(m-1,n/2,2,2)|[1,1,0; 3,1,0]#
  rinid(2,n,2*m,1)|[0,0,0; 0,1,0]#
  rinid(2,n/2,2*m-1,2)|[0,1,0; 1,1,0];
RN=rinid(mm,nn,6,6)|[4,2,0]#
  rinid(mm-1,nn-1,6,6)|[7,5,0];
Grid=bb(L1/(2*m),L2/n)|lux(RN)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;   draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۲

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 12:  Single layer grid with
  ternate pattern and triangular boundary.
  See Reference 1. (*)
L=24;  (*) Length of each side of the grid (*)
m=9;    (*) Frequency (*)
Grid=bb(L/(2*m),L*(sqrt|3)/(2*m))|
  genid(m,m,2,1,1,-1)|{[0,0,0; 2,0,0],
  [1,1,0; 0,0,0], [1,1,0; 2,0,0]};
use &,vm(2),vt(2),vh(L/2,-L,3*L,
  L/2,L/2,0, L/2,L/2,1);
clear;   draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۱۳ و ۱۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Figs 13 (n=3) and 14 (n=4):
  Single layer grid with ternate pattern
  and triangular boundary with cut
  corners.  See Reference 1. (*)
L=30;   (*) Length of each side of
          the original triangular grid (*)
m=12;   (*) Frequency of the
          original triangular grid (*)
n=3;    (*) Size of corner cuts (*)
E=genid(m,m,2,1,1,-1)|{[0,0,0; 2,0,0],
  [1,1,0; 0,0,0], [1,1,0; 2,0,0]};
RN=lam(1,m)|genid(n,n,2,1,1,-1)|[0,0,0]#
  genid(1,n,2,-1,-1,1)|[m,m,0];
Grid=bb(L/(2*m),L*(sqrt|3)/(2*m))|
  lux(RN)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L/2,-L,3*L,
  L/2,L/2,0, L/2,L/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۵

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 15:  Single layer grid with
  ternate/hexagonal pattern and triangular
  boundary.  See Reference 1. (*)
L=36;  (*) Length of each side of the grid (*)
m=17;  (*) Frequency, m must be odd (*)
p=ric|((m-1)/2);
E=genid(m,m,2,1,1,-1)|{[0,0,0; 2,0,0],
  [1,1,0; 0,0,0], [1,1,0; 2,0,0]};
RN=genid(p,p,4,2,2,-1)|[3,1,0];
Grid=bb(L/(2*m),L*(sqrt|3)/(2*m))|
  lux(RN)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L/2,-L,3*L,
  L/2,L/2,0, L/2,L/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۱۶ و ۱۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Figs 16 (n=5) and 17 (n=7):
  Single layer grid with ternate/hexagonal
  pattern and triangular boundary with cut
  corners.  See Reference 1. (*)
L=40;  (*) Length of each side of
           the original triangular grid (*)
m=21;  (*) Frequency of the original
           triangular grid, m must be odd (*)
n=5;   (*) Size of corner cuts,
                    n must be odd (*)
p=ric|((m-1)/2);
E=genid(m,m,2,1,1,-1)|{[0,0,0; 2,0,0],
  [1,1,0; 0,0,0], [1,1,0; 2,0,0]};
RN=genid(p,p,4,2,2,-1)|[3,1,0]#
  lam(1,m)|genid(n,n,2,1,1,-1)|[0,0,0]#
  genid(1,n,2,-1,-1,1)|[m,m,0];
Grid=bb(L/(2*m),L*(sqrt|3)/(2*m))|
  lux(RN)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L/2,-L,3*L,
  L/2,L/2,0, L/2,L/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۱۸، ۱۹ و ۲۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 18 (m=6, n=5), Fig 19
  (m=5, n=8) and Fig 20 (m=4, n=11):
  Sectorate single layer grid with ternate
(*).  pattern. See Reference 1
L=20;  (*) Length of each side of the grid (*)
m=6;   (*) Frequency (*)
n=5;   (*) Number of sides (*)
E=bb(L/(2*m),L/(2*m*tan|(180/n)))|
  genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
Grid=pex|rosad(0,0,n,360/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(0,-2*L,5*L,
  0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۲۱، ۲۲ و ۲۳

```
(*) Formian scheme for configurations
3, n=5), 22١   similar to Fig 21 (m=
  (m=11, n=7) and Fig 23 (m=10, n=7):
  Sectorate single layer grid with
  ternate/hexagonal pattern.
(*).  See Reference 1
L=20;  (*) Length of each side of the grid (*)
m=13;  (*) Frequency of the
           original ternate grid (*)
n=5;    (*) Number of sides (*)
E=genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
RN=genid(1,ric|((m+1)/2),4,2,-2,1)|[0,0,0];
Grid=rosad(0,0,n,360/n)|bb(L/(2*m),
  L/(2*m*tan|(180/n)))|lux(RN)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(0,-2*L,5*L,
  0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۲۴ و ۲۵

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 24 (m=9, n=6) and
  Fig 25 (m=9, n=9):  Sectorate single
  layer grid with ternate/hexagonal pattern.
(*).  See Reference 1
L=20;  (*) Length of each side of the grid (*)
m=9;   (*) Frequency of the original ternate
           grid, m must be a multiple of 3 (*)
n=6;    (*) Number of sides (*)
E=genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
RN=genid(1,((m/3)+1),6,3,-3,1)|[0,0,0];
Grid=pex|rosad(0,0,n,360/n)|bb(L/(2*m),
  L/(2*m*tan|(180/n)))|lux(RN)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(0,-2*L,5*L,
  0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۲۶ و ۲۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 26 (m=11, n=5) and
  Fig 27 (m=11, n=6):  Sectorate single
  layer grid with ternate/hexagonal pattern.
 (*).  See Reference 1
L=20;  (*) Length of each side of the grid (*)
m=11;  (*) Frequency of the original ternate
   grid, m must be a multiple of 3 minus 1(*)
n=5;    (*) Number of sides (*)
q=ric|((m+1)/3);
E=[-1,1,0; 1,1,0]#lam(1,0)|{[-1,1,0; 0,2,0],
  [-2,2,0; 0,2,0]};
F=genid(1,q,6,3,-3,1)|E#
  genid(1,q-1,6,3,-3,1)|(lamid(0,3)|lam(1,-1)|
  [-2,2,0; -1,3,0]#ref(2,3)|E);
Grid=rosad(0,0,n,360/n)|bb(L/(2*m),
  L/(2*m*tan|(180/n)))|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(0,-2*L,5*L,
  0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۲۸، ۲۹ و ۳۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 28 (n=6), Fig 29 (n=8)
  and Fig 30 (n=11):  Sectorate single layer
  grid with hexagonal pattern.
 (*).  See Reference 1
L=20;  (*) Length of each side of the grid (*)
m=9;   (*) Frequency of the original ternate
       grid, m must be a multiple of 3 (*)
n=6;    (*) Number of sides (*)
E=genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
RN=genid(1,((m/3)+1),6,3,-3,1)|[0,0,0]#
  genid(1,m/3,6,3,-3,1)|[0,2,0]#
  genid(1,((m/3)-1),6,3,-3,1)|[0,4,0];
Grid=pex|rosad(0,0,n,360/n)|bb(L/(2*m),
  L/(2*m*tan|(180/n)))|lux(RN)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(0,-2*L,5*L,
  0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۳۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 31:  Single layer grid with
  hexagonal (honycomb) pattern.
  See Reference 1. (*)
L1=25;  (*) Length in U1 direction (*)
L2=24;  (*) Length in U2 direction (*)
m=4;    (*) Frequency of second row
          of hegxagons in U1 direction (*)
n=5;    (*) Frequency of hegxagons in
          U2 direction along the sides (*)
E=rinid(m,n,6,2)|lamid(2,2)|[1,1,0; 0,2,0]#
  rinid(m,n+1,6,2)|[1,1,0; 3,1,0]#
  rin(1,m-1,6)|lamid(5,n+1)|[4,0,0; 3,1,0]#
  rinid(m-1,n+2,6,2)|[4,0,0; 6,0,0];
Grid=bb(L1/(6*m-2),L2/(2*(n+1)))|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۳۲

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 32:  Single layer grid with
  quadnate pattern. See Reference 1. (*)
L1=25;  (*) Length in U1 direction (*)
L2=25;  (*) Length in U2 direction (*)
m=6;    (*) Frequency of crosses
                    in U1 direction (*)
n=6;    (*) Frequency of crosses
                    in U2 direction (*)
E=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,0]#
  rinid(m,n+1,2,2)|[0,0,0; 2,0,0]#
  rinid(m+1,n,2,2)|[0,0,0; 0,2,0];
Grid=bb(L1/(2*m),L2/(2*n))|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۳۳

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 33:  Single layer grid with
  quadnate pattern and openings.
  See Reference 1. (*)
L1=25;  (*) Length in U1 direction (*)
L2=25;  (*) Length in U2 direction (*)
m=13;    (*) Frequency of crosses in U1
           direction, m must be a multiple
           of 3 plus 1 (*)
n=13;    (*) Frequency of crosses in U2
           direction, n must be a multiple
           of 3 plus 1 (*)
E=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,0]#
  rinid(m,n+1,2,2)|[0,0,0; 2,0,0]#
  rinid(m+1,n,2,2)|[0,0,0; 0,2,0];
RN=rinid((m-1)/3,(n-1)/3,6,6)|[4,4,0];
Grid=bb(L1/(2*m),L2/(2*n))|lux(RN)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۳۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 34:  Single layer grid with
  quadnate pattern and openings.
  See Reference 1. (*)
L1=25;  (*) Length in U1 direction (*)
L2=25;  (*) Length in U2 direction (*)
m=12;   (*) Frequency of crosses in U1
    direction, m must be a multiple of 4 (*)
n=12;    (*) Frequency of crosses in U2
     direction, n must be a multiple of 4 (*)
E=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,0]#
  rinid(m,n+1,2,2)|[0,0,0; 2,0,0]#
  rinid(m+1,n,2,2)|[0,0,0; 0,2,0];
RN=rinid(m/4,n/4,8,8)|[4,4,0]#
  rinid((m/4)-1,(n/4)-1,8,8)|[8,8,0];
Grid=bb(L1/(2*m),L2/(2*n))|lux(RN)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۳۵

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 35:  Single layer grid with
  quadnate pattern. See Reference 1. (*)
L1=25;  (*) Length in U1 direction (*)
L2=25;  (*) Length in U2 direction (*)
m=5;    (*) Frequency of crosses
                    in U1 direction (*)
n=5;    (*) Frequency of crosses
                    in U2 direction (*)
E=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,0]#
  rinid(2*m,2*n+1,1,1)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(2*m+1,2*n,1,1)|[0,0,0; 0,1,0];
Grid=bb(L1/(2*m),L2/(2*n))|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۳۶

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 36:  Single layer grid with
  quadnate pattern with openings.
  See Reference 1. (*)
L1=25;  (*) Length in U1 direction (*)
L2=25;  (*) Length in U2 direction (*)
m=7;    (*) Frequency of crosses in U1
            direction, m must be odd (*)
n=7;    (*) Frequency of crosses in U2
            direction, n must be odd (*)
E=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,0]#
  rinid(2*m,2*n+1,1,1)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(2*m+1,2*n,1,1)|[0,0,0; 0,1,0];
RN=rinid((m-1)/2,(n-1)/2,4,4)|[3,3,0];
Grid=bb(L1/(2*m),L2/(2*n))|
  (lux(RN)|E#rinid((m-1)/2,(n-1)/2,4,4)|
  rosad(3,3)|[3,2,0; 2,3,0]);
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۳۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 37:  Double layer grid with
  binate on binate pattern. See Section 1.7
  of Reference 1. (*)
L1=20;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=20;   (*) Length in U2 direction (*)
D=2;     (*) Depth of grid (*)
m=6;     (*) Frequency in U1 direction (*)
n=6;     (*) Frequency in U2 direction (*)
T=rinid(m,n+1,2,2)|[0,0,1; 2,0,1]#
  rinid(m+1,n,2,2)|[0,0,1; 0,2,1];
B=rinid(m-1,n,2,2)|[1,1,0; 3,1,0]#
  rinid(m,n-1,2,2)|[1,1,0; 1,3,0];
W=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,1; 1,1,0];
Grid=bt(L1/(2*m),L2/(2*n),D)|(T#B#W);
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/3,2*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۳۸

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 38:  Double layer grid with
  binate on binate pattern and some openings.
  See Section 1.7 of Reference 1. (*)
L1=20;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=20;   (*) Length in U2 direction (*)
D=2;     (*) Depth of grid (*)
m=7;     (*) Frequency in
         U1 direction, m must be odd (*)
n=7;     (*) Frequency in
         U2 direction, n must be odd (*)
T=rinid(m,n+1,2,2)|[0,0,1; 2,0,1]#
  rinid(m+1,n,2,2)|[0,0,1; 0,2,1];
B=rinid(m-1,n,2,2)|[1,1,0; 3,1,0]#
  rinid(m,n-1,2,2)|[1,1,0; 1,3,0];
W=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,1; 1,1,0];
RN=lamid(m,n)|[m-2,n-2,0];
G=T#lux(RN)|(B#W);
Grid=bt(L1/(2*m),L2/(2*n),D)|G;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/6,2*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۳۹

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 39:  Double layer grid with
  binate on larger binate pattern.
  See Section 1.7 of Reference 1. (*)
L1=20;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=20;   (*) Length in U2 direction (*)
D=2;     (*) Depth of grid (*)
m=7;     (*) Frequency in
         U1 direction, m must be odd (*)
n=7;     (*) Frequency in
         U2 direction, n must be odd (*)
T=rinid(m,n+1,2,2)|[0,0,1; 2,0,1]#
  rinid(m+1,n,2,2)|[0,0,1; 0,2,1];
B=rinid(m-1,n,2,2)|[1,1,0; 3,1,0]#
  rinid(m,n-1,2,2)|[1,1,0; 1,3,0];
W=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,1; 1,1,0];
RN=rinid(tic|(m/2),tic|(n/2),4,4)|[3,3,0];
G=T#lux(RN)|(B#W);
Grid=bt(L1/(2*m),L2/(2*n),D)|G;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/6,2*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۴۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 40:  Mansard double layer
  grid with binate on binate pattern.
  See Section 1.7 of Reference 1. (*)
L1=20;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=20;   (*) Length in U2 direction (*)
D=2;     (*) Depth of grid (*)
m=6;     (*) Frequency in U1 direction (*)
n=6;     (*) Frequency in U2 direction (*)
T=rinid(m-1,n,2,2)|[1,1,1; 3,1,1]#
  rinid(m,n-1,2,2)|[1,1,1; 1,3,1];
B=rinid(m,n+1,2,2)|[0,0,0; 2,0,0]#
  rinid(m+1,n,2,2)|[0,0,0; 0,2,0];
W=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,1];
Grid=bt(L1/(2*m),L2/(2*n),D)|(T#B#W);
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/3,2*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۴۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 41:  Mansard double layer
  grid with binate on binate pattern and
  some openings.
  See Section 1.7 of Reference 1. (*)
L1=24;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=24;   (*) Length in U2 direction (*)
D=2;      (*) Depth of grid (*)
m=8;      (*) Frequency in
          U1 direction, m must be even (*)
n=8;      (*) Frequency in
          U2 direction, n must be even (*)
T=rinid(m-1,n,2,2)|[1,1,1; 3,1,1]#
  rinid(m,n-1,2,2)|[1,1,1; 1,3,1];
B=rinid(m,n+1,2,2)|[0,0,0; 2,0,0]#
  rinid(m+1,n,2,2)|[0,0,0; 0,2,0];
W=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,1];
RN=lamid(m,n)|[m-4,n-4,0]#[m,n,0];
G=T#lux(RN)|(B#W);
Grid=bt(L1/(2*m),L2/(2*n),D)|G;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/6,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۴۲

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 42:  Mansard double layer
  grid with binate on larger binate pattern.
  See Section 1.7 of Reference 1. (*)
L1=24;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=24;   (*) Length in U2 direction (*)
D=2;      (*) Depth of grid (*)
m=8;      (*) Frequency in
          U1 direction, m must be even (*)
n=8;      (*) Frequency in
          U2 direction, n must be even (*)
T=rinid(m-1,n,2,2)|[1,1,1; 3,1,1]#
  rinid(m,n-1,2,2)|[1,1,1; 1,3,1];
B=rinid(m,n+1,2,2)|[0,0,0; 2,0,0]#
  rinid(m+1,n,2,2)|[0,0,0; 0,2,0];
W=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,1];
RN=rinid((m-2)/2,(n-2)/2,4,4)|[4,4,0];
G=T#lux(RN)|(B#W);
Grid=bt(L1/(2*m),L2/(2*n),D)|G;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/6,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۴۳

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 43:  Double layer grid with
. obnate on obnate pattern
  See Reference 1 (*)
L1=20;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=20;   (*) Length in U2 direction (*)
D=2;     (*) Depth of grid (*)
m=5;     (*) Frequency in U1 direction (*)
n=5;     (*) Frequency in U2 direction (*)
T=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[1,0,1; 0,1,1]#
  rinid(m-1,2,2,2*n)|[1,0,1; 3,0,1]#
  rinid(2,n-1,2*m,2)|[0,1,1; 0,3,1];
B=rinid(m-1,n-1,2,2)|lamid(2,2)|
[1,1,0; 2,2,0]#rinid(m-1,2,2,2*(n-1))|
  [1,1,0; 3,1,0]#rinid(2,n-1,2*(m-1),2)|
  [1,1,0; 1,3,0];
W=rinid(m,n,2,2)|rosad(1,1)|[1,0,1; 1,1,0]#
  rinid(m-1,n-1,2,2)|rosad(2,2)|
  [2,1,1; 2,2,0];
Grid=bt(L1/(2*m),L2/(2*n),D)|(T#B#W);
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/3,2*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۴۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 44:  Double layer grid with
  obnate on larger obnate pattern.
  See Reference 1 (*)
L1=20;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=20;   (*) Length in U2 direction (*)
D=2;     (*) Depth of grid (*)
m=6;     (*) Frequency in
         U1 direction, m must be even (*)
n=6;     (*) Frequency in
         U2 direction, n must be even (*)
T=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[1,0,1; 0,1,1]#
  rinid(m-1,2,2,2*n)|[1,0,1; 3,0,1]#
  rinid(2,n-1,2*m,2)|[0,1,1; 0,3,1];
B=rinid(m-1,n-1,2,2)|lamid(2,2)|
[1,1,0; 2,2,0]#rinid(m-1,2,2,2*(n-1))|
  [1,1,0; 3,1,0]#rinid(2,n-1,2*(m-1),2)|
  [1,1,0; 1,3,0];
W=rinid(m,n,2,2)|rosad(1,1)|
  [1,0,1; 1,1,0]#rinid(m-1,n-1,2,2)|
  rosad(2,2)|[2,1,1; 2,2,0];
RN=rinid(ric|((m-2)/2),ric|((n-2)/2),4,4)|
  rosad(4,4)|[4,2,0];
G=T#lux(RN)|(B#W);
Grid=bt(L1/(2*m),L2/(2*n),D)|G;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/5,2*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۴۵

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 45:  Mansard double layer
. grid with obnate on obnate pattern
  See Reference 1 (*)
L1=20;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=20;   (*) Length in U2 direction (*)
D=2;     (*) Depth of grid (*)
m=5;     (*) Frequency in U1 direction (*)
n=5;     (*) Frequency in U2 direction (*)
T=rinid(m-1,n-1,2,2)|lamid(2,2)|
  [1,1,1; 2,2,1]#rinid(m-1,2,2,2*(n-1))|
  [1,1,1; 3,1,1]#rinid(2,n-1,2*(m-1),2)|
  [1,1,1; 1,3,1];
B=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[1,0,0; 0,1,0]#
  rinid(m-1,2,2,2*n)|[1,0,0; 3,0,0]#
  rinid(2,n-1,2*m,2)|[0,1,0; 0,3,0];
W=rinid(m,n,2,2)|rosad(1,1)|[1,0,0; 1,1,1]#
  rinid(m-1,n-1,2,2)|
  rosad(2,2)|[2,1,0; 2,2,1];
Grid=bt(L1/(2*m),L2/(2*n),D)|(T#B#W);
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/3,2*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۴۶

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 46:  Mansard double layer
  grid with obnate on larger obnate pattern.
  See Reference 1 (*)
L1=20;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=20;   (*) Length in U2 direction (*)
D=2;     (*) Depth of grid (*)
m=7;     (*) Frequency in U1 direction (*)
n=7;     (*) Frequency in U2 direction (*)
T=rinid(m-1,n-1,2,2)|lamid(2,2)|
  [1,1,1; 2,2,1]#rinid(m-1,2,2,2*(n-1))|
  [1,1,1; 3,1,1]#rinid(2,n-1,2*(m-1),2)|
  [1,1,1; 1,3,1];
B=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[1,0,0; 0,1,0]#
  rinid(m-1,2,2,2*n)|[1,0,0; 3,0,0]#
  rinid(2,n-1,2*m,2)|[0,1,0; 0,3,0];
W=rinid(m,n,2,2)|rosad(1,1)|[1,0,0; 1,1,1]#
  rinid(m-1,n-1,2,2)|
  rosad(2,2)|[2,1,0; 2,2,1];
RN={[m,n-3,0], [m-3,n,0], [m,n+3,0],
  [m+3,n,0]};
G=T#lux(RN)|(B#W);
Grid=bt(L1/(2*m),L2/(2*n),D)|G;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/5,2*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۴۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 47:  Double layer grid with
  binate on larger obnate pattern.
  See Reference 1 (*)
L1=20;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=20;   (*) Length in U2 direction (*)
D=2;     (*) Depth of grid (*)
m=7;     (*) Frequency in
         U1 direction, m must be odd (*)
n=7;     (*) Frequency in
         U2 direction, n must be odd (*)
T=rinid(m,n+1,2,2)|[0,0,1; 2,0,1]#
  rinid(m+1,n,2,2)|[0,0,1; 0,2,1];
B=rinid(tic|(m/2),tic|(n/2),4,4)|lamid(3,3)|
  [1,1,0; 3,3,0]#rinid(m-1,2,2,2*(n-1))|
  [1,1,0; 3,1,0]#rinid(2,n-1,2*(m-1),2)|
  [1,1,0; 1,3,0];
RN=rinid(ric|((m-3)/2),ric|((n-1)/2),4,4)|
  [5,3,0]#rinid(ric|((m-1)/2),ric|
  ((n-3)/2),4,4)|[3,5,0];
W=lux(RN)|rinid(m,n,2,2)|
  lamid(1,1)|[0,0,1; 1,1,0];
Grid=bt(L1/(2*m),L2/(2*n),D)|(T#B#W);
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۴۸

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 48:  Double layer grid with
.  obnate on larger binate pattern
See Reference 1 (*)
L1=20;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=20;   (*) Length in U2 direction (*)
D=2;     (*) Depth of grid (*)
m=5;     (*) Frequency in
         U1 direction, m must be odd (*)
n=5;     (*) Frequency in
         U2 direction, n must be odd (*)
T=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[1,0,1; 0,1,1]#
  rinid(m-1,2,2,2*n)|[1,0,1; 3,0,1]#
  rinid(2,n-1,2*m,2)|[0,1,1; 0,3,1];
B=rinid(m-1,n,2,2)|[1,1,0; 3,1,0]#
  rinid(m,n-1,2,2)|[1,1,0; 1,3,0];
W=rinid(m,n,2,2)|rosad(1,1)|[1,0,1; 1,1,0];
Grid=bt(L1/(2*m),L2/(2*n),D)|(T#B#W);
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۴۹

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 49:  Double layer grid with
  ternate on ternate pattern.
  See Reference 1 (*)
L1=24;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=22;   (*) Length in U2 direction (*)
D=2;     (*) Depth of grid (*)
m=5;     (*) Frequency in U1 direction (*)
n=6;     (*) Frequency in
           U2 direction, n must be even (*)
T=rinid(m,n/2,2,6)|lamid(2,3)|[1,0,1; 2,3,1]#
  rinid(m,1+n/2,2,6)|[1,0,1; 3,0,1]#
  rinid(m-1,n/2,2,6)|[2,3,1; 4,3,1];
B=rinid(m+1,n/2,2,6)|lamid(1,4)|
  [0,1,0; 1,4,0]#rinid(m+1,1+n/2,2,6)|
  [0,1,0; 2,1,0]#rinid(m,n/2,2,6)|
  [1,4,0; 3,4,0];
W=rinid(m+1,1+n/2,2,6)|lam(1,1)|
  [0,1,0; 1,0,1]#rinid(m,n/2,2,6)|
  lam(1,2)|[1,4,0; 2,3,1]#
  rinid(m+1,n/2,2,6)|[1,4,0; 1,6,1]#
  rinid(m,n/2,2,6)|[2,1,0; 2,3,1];
Grid=bt(L1/(2*m+2),L2/(3*n+1),D)|
  (T#B#W);
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/2,4*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۵۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 50:  Double layer grid with
  hexagon on hexagon pattern.
  See Reference 1 (*)
L1=22;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=20;   (*) Length in U2 direction (*)
D=2;     (*) Depth of grid (*)
m=5;     (*) Frequency in U1 direction (*)
n=3;     (*) Frequency in U2 direction (*)
T=rinid(m+1,n,4,12)|lamid(1,6)|
  [0,3,1; 1,6,1]#rinid(m,n,4,12)|lamid(3,6)|
  [2,3,1; 3,0,1]#rinid(2*m+1,2*n,2,6)|
  [0,3,1; 2,3,1];
B=rinid(m,n,4,12)|lamid(3,6)|[1,4,0; 3,2,0]#
  rinid(m+1,n,4,12)|[1,4,0; 1,8,0]#
  rinid(m,n-1,4,12)|[3,10,0; 3,14,0];
W=rinid(m+1,n,4,12)|(lamid(1,6)|
  [0,3,1; 1,4,0]#lam(2,6)|[1,6,1; 1,4,0])#
  rinid(m,n,4,12)|(lamid(3,6)|[2,3,1; 3,2,0]#
  lam(2,6)|[3,0,1; 3,2,0]);
Grid=bt(L1/(4*m+2),L2/(12*n),D)|
  (T#B#W);
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,6*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۵۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 51:  Double layer grid with
  hexagon on triangle pattern.
  See Reference 1 (*)
L1=22;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=20;   (*) Length in U2 direction (*)
D=2;     (*) Depth of grid (*)
m=4;     (*) Frequency in U1 direction,
              number of hexagons in the
              second row of top layer (*)
n=5;     (*) Frequency in U2 direction,
              number of hexagons along
              the sides of top layer (*)
T=rinid(m,n,6,2)|lamid(2,2)|[1,1,1; 0,2,1]#
  rin(1,m-1,6)|lamid(5,n+1)|[3,1,1; 4,0,1]#
  rinid(m,n+1,6,2)|[1,1,1; 3,1,1]#
  rinid(m-1,n+2,6,2)|[4,0,1; 6,0,1];
B=rinid(m-1,n,6,2)|lamid(5,2)|[2,2,0; 5,1,0]#
  rinid(m,n-1,6,2)|[2,2,0; 2,4,0]#
  rinid(m-1,n,6,2)|[5,1,0; 5,3,0];
W=rinid(m,n,6,2)|(lamid(2,2)|[1,1,1; 2,2,0]#
  lam(1,2)|[0,2,1; 2,2,0])#
  rinid(m-1,n+1,6,2)|(lamid(5,1)|
  [4,0,1; 5,1,0]#lam(1,5)|[3,1,1; 5,1,0]);
Grid=bt(L1/(6*m-2),L2/((n+1)*2),D)|
  (T#B#W);
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/2,4*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;   draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۵۲

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 52:  Double layer grid with
  hexagon on larger hexagon pattern.
  See Reference 1 (*)
L1=24;  (*) Length in U1 direction (*)
L2=21;  (*) Length in U2 direction (*)
D=2;    (*) Depth of grid (*)
m=5;    (*) Frequency in U1 direction (*)
n=6;    (*) Frequency in U2 direction,
                        n must be even (*)
T=rinid(m,n,6,2)|lamid(2,2)|[1,1,1; 0,2,1]#
  rin(1,m-1,6)|lamid(5,n+1)|[3,1,1; 4,0,1]#
  rinid(m,n+1,6,2)|[1,1,1; 3,1,1]#
  rinid(m-1,n+2,6,2)|[4,0,1; 6,0,1];
RN=rinid(m-1,n/2,6,4)|[5,3,0];
B=lux(RN)|(rinid(m-1,n,6,2)|lamid(5,2)|
  [2,2,0; 5,1,0]#rinid(m,n-1,6,2)|[2,2,0;
  2,4,0]#rinid(m-1,n,6,2)|[5,1,0; 5,3,0]);
W=lux(RN)|(rinid(m,n,6,2)|(lamid(2,2)|
  [1,1,1; 2,2,0]#lam(1,2)|[0,2,1; 2,2,0])#
  rinid(m-1,n+1,6,2)|(lamid(5,1)|
  [4,0,1; 5,1,0]#lam(1,5)|[3,1,1; 5,1,0]));
Grid=bt(L1/(6*m-2),L2/((n+1)*2),D)|
  (T#B#W);
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/2,4*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۵۳

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 53:  Binate trussed double
 See Reference 1 (*).  layer grid
L1=16;  (*) Length in U1 direction (*)
L2=16;  (*) Length in U2 direction (*)
D=1.5;  (*) Depth of grid (*)
m=5;    (*) Frequency in U1 direction (*)
n=5;    (*) Frequency in U2 direction (*)
T=rinid(m,n+1,2,2)|[0,0,1; 2,0,1]#
  rinid(m+1,n,2,2)|[0,0,1; 0,2,1];
B=rinid(m,n+1,2,2)|[0,0,0; 2,0,0]#
  rinid(m+1,n,2,2)|[0,0,0; 0,2,0];
E=lamis(1,0.5)|[0,0,0; 1,0,0.5]#
  lam(1,1)|[0,0,0; 0,0,1];
W=pex|(rinid(m,n+1,2,2)|E#
  rinid(m+1,n,2,2)|verad(0,0)|E);
Grid=bt(L1/(2*m),L2/(2*n),D)|(T#B#W);
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/3,2*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۵۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 54:  Obnate trussed
 See Reference 1 (*).  double layer grid
L1=16;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=16;   (*) Length in U2 direction (*)
D=1.5;   (*) Depth of grid (*)
m=4;     (*) Frequency in U1 direction (*)
n=4;     (*) Frequency in U2 direction (*)
T=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,1; 1,1,1]#
  rinid(m,2,2,2*n)|[0,0,1; 2,0,1]#
  rinid(2,n,2*m,2)|[0,0,1; 0,2,1];
B=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,0]#
  rinid(m,2,2,2*n)|[0,0,0; 2,0,0]#
  rinid(2,n,2*m,2)|[0,0,0; 0,2,0];
E=lam(3,0.5)|{[0,0,0; 0.5,0.5,0.5],
  [0.5,0.5,0.5; 1,1,0]}#
  {[0,0,1; 0,0,0], [1,1,1; 1,1,0]};
F=lamis(1,0.5)|[0,0,0; 1,0,0.5]#
  lam(1,1)|[0,0,0; 0,0,1];
W=pex|(rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|E#
  rinid(m,2,2,2*n)|F#rinid(2,n,2*m,2)|
  verad(0,0)|F);
Grid=bt(L1/(2*m),L2/(2*n),D)|(T#B#W);
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,2.5*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;   draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۵۵

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 55:  Double layer grid with
  ternate on ternate pattern and with a
  triangular shape in plan.
  See Section 1.7 of Reference 1. (*)
L=20;   (*) Length of each side of grid (*)
D=2;    (*) Depth of grid (*)
m=7;    (*) Number of tetrahedral units
            along each side of the grid (*)
T=genid(m,m,2,3,1,-1)|([0,0,1; 2,0,1]#
  lam(1,1)|[0,0,1; 1,3,1]);
B=genid(m-1,m-1,2,3,1,-1)|([1,1,0; 3,1,0]#
  lam(1,2)|[1,1,0; 2,4,0]);
W=genid(m,m,2,3,1,-1)|([1,3,1; 1,1,0]#
  lam(1,1)|[0,0,1; 1,1,0]);
*m),D)|۶Grid=bt(L/(2*m),L*sqrt|3/(
  (T#B#W);
use &,vm(2),vt(2),vh(L/2,-L/2,6*L,
  L/2,L/2,0, L/2,L/2,1);
clear;   draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۵۶ و ۵۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 56 (m=12, n=3) and
Double layer grid   Fig 57 (m=12, n=4):
  with ternate on ternate pattern and
  a triangular plan with curtailed corners.
  See Section 1.7 of Reference 1. (*)
L=40;   (*) Length of each side of the
          complete triangular plan (*)
D=2;    (*) Depth of grid (*)
m=12;   (*) Number of tetrahedral units
  along each side of the complete
  triangular plan (*)
n=3;    (*) Extent of the corner
            curtailment of the grid (*)
RN=lam(1,m)|genid(n,n,2,3,1,-1)|
  {[0,0,1],[1,1,0]}#genid(1,n,2,-3,-1,1)|
  {[m,3*m,1], [m,3*m-2,0]};
T=lux(RN)|genid(m,m,2,3,1,-1)|
  ([0,0,1; 2,0,1]#lam(1,1)|[0,0,1; 1,3,1]);
B=lux(RN)|genid(m-1,m-1,2,3,1,-1)|
  ([1,1,0; 3,1,0]#lam(1,2)|[1,1,0; 2,4,0]);
W=lux(RN)|genid(m,m,2,3,1,-1)|
  ([1,3,1; 1,1,0]#lam(1,1)|[0,0,1; 1,1,0]);
*m),D)|۶Grid=bt(L/(2*m),L*sqrt|3/(
  (T#B#W);
use &,vm(2),vt(2),vh(L/2,-L/2,6*L,
  L/2,L/2,0, L/2,L/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۵۸، ۵۹ و ۶۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 58 (m=5, n=5), Fig 59
  (m=4, n=6) and Fig 60 (m=4, n=8):
  Sectorate double layer grid with ternate
  on ternate pattern. See Section 2.2 of
(*).  Reference 2
L=20;     (*) Length of each side (*)
D=2.15;   (*) Depth of grid (*)
m=5;      (*) Frequency of top layer (*)
n=5;      (*) Number of sides (*)
S=L/(2*tan|(180/n));
ET=genid(1,m,2,3,-1,1)|{[0,0,0; -1,3,0],
  [0,0,0; 1,3,0], [-1,3,0; 1,3,0]};
EB=genid(1,m-1,2,3,-1,1)|{[0,2,-1; -1,5,-1],
  [0,2,-1; 1,5,-1], [-1,5,-1; 1,5,-1]};
EW=genid(1,m,2,3,-1,1)|{[0,0,0; 0,2,-1],
  [-1,3,0; 0,2,-1], [1,3,0; 0,2,-1]};
E=bt(L/(2*m),S/(3*m),D)|(ET#EB#EW);
Qi=[0,2,-1];   Ri=bt(L/(2*m),S/(3*m),D)|Qi;
Rj=verad(0,0,360/n)|Ri;   K1=tig|(Ri#Rj);
K2=rinad(0,0,-L/(2*m),S/m,m)|K1;
Grid=pex|rosad(0,0,n,360/n)|(E#K2);
use &,vm(2);   clear;   draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۶۱، ۶۲ و ۶۳

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 61 (n=5), Fig 62 (n=6)
  and Fig 63 (n=7):  Sectorate double layer
  grid with ternate/hexagonal on ternate/
 (*).  hexagonal pattern. See Reference 1
L=20;  (*) Length of each side of the grid (*)
D=2;   (*) Depth of grid (*)
m=8;   (*) Frequency of the original ternate
           pattern of the top layer, m must
               be a multiple of 3 minus 1 (*)
n=5;   (*) Number of sides (*)
q=ric|((m+1)/3);
E=[-2,2,1; 2,2,1]#lam(1,0)|{[-2,2,1; 0,4,1],
  [-4,4,1; 0,4,1]};
T=genid(1,q,12,6,-6,1)|E#
  genid(1,q-1,12,6,-6,1)|(lamid(0,6)|
  lam(1,-2)|[-4,4,1; -2,6,1]#ref(2,6)|E);
B=genid(1,q-1,12,6,-6,1)|lamid(0,6)|[-3,3,0;
  0,6,0]#genid(1,q,6,6,-6,2)|[-3,3,0; 3,3,0];
W=(genid(1,q,12,6,-6,1)|lam(1,0)|
  {[0,4,1; -3,3,0], [-2,2,1; -3,3,0],
  [-4,4,1; -3,3,0]}#genid(1,q-1,12,6,-6,1)|
  (lam(1,0)|{[-2,6,1; 0,6,0], [0,8,1; -3,9,0]}#
  lam(2,6)|[0,4,1; 0,6,0]));
Grid=pex|rosad(0,0,n,360/n)|bt(L/(4*m),
  L/(4*m*tan|(180/n)),D)|(T#B#W);
use &,vm(2);  clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۶۴ و ۶۵

```
 (*) Formian scheme for configurations
   similar to Fig 64 (p=6, q=6) and Fig 65
   (p=4, q=2):  Compound double layer
   grid with binate on binate pattern
   (obtained by overlapping two grids).
   See Section 1.7 of Reference 1. (*)
L1=16;   (*) Length of the base grid
                        in U1 direction (*)
L2=16;   (*) Length of the base grid
                        in U2 direction (*)
D=2;     (*) Depth of grid (*)
m=5;     (*) Frequency of the base grid
                        in U1 direction (*)
n=5;     (*) Frequency of the base grid
                        in U2 direction (*)
p=6;     (*) Shift in U1 direction,
                        p must be even (*)
q=6;     (*) Shift in U2 direction,
                        q must be even (*)
T=rinid(m,n+1,2,2)|[0,0,1; 2,0,1]#
  rinid(m+1,n,2,2)|[0,0,1; 0,2,1];
B=rinid(m-1,n,2,2)|[1,1,0; 3,1,0]#
  rinid(m,n-1,2,2)|[1,1,0; 1,3,0];
W=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,1; 1,1,0];
G=T#B#W;
G=pex|(G#tranid(p,q)|G);
Grid=bt(L1/(2*m),L2/(2*n),D)|G;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/3,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Grid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۶۶

```
(*) Formian scheme for configurations
   similar to Fig 66:  Barrel vault with binate
   pattern. See Section 1.8 of Reference 1. (*)
S=28;  (*) Span (*)
H=8;   (*) Rise (*)
L=37;  (*) Length (*)
m=9;   (*) Frequency in U2 direction (*)
n=12;  (*) Frequency in U3 direction (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);         (*) Radius (*)
E=rinit(m,n+1,1,1)|[1,0,0; 1,1,0]#
  rinit(m+1,n,1,1)|[1,0,0; 1,0,1];
F=bc(R,2*A/m,L/n)|E;
Vault=verad(0,0,90-A)|F;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,2.5*R,-R, 0,0,R, 0,1,R);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۶۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 67:  Barrel vault with lamella
  (obnate) pattern. See Section 1.8 of
  Reference 1. (*)
S=30;   (*) Span (*)
H=8;    (*) Rise (*)
L=45;   (*) Length (*)
m=7;    (*) Frequency in U2 direction (*)
n=8;    (*) Frequency in U3 direction (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);        (*) Radius (*)
E=rinit(m,n,2,2)|lamit(1,1)|[1,0,0; 1,1,1]#
  rinit(m,2,2,2*n)|[1,0,0; 1,2,0]#
  rinit(2,n,2*m,2)|[1,0,0; 1,0,2];
F=bc(R,A/m,L/(2*n))|E;
Vault=verad(0,0,90-A)|F;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,3*R,-2*R, 0,0,R, 0,1,R);
clear;   draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۶۸

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 68:  Lamella barrel vault
  with additional ribs.
  See Section 1.8 of Reference 1. (*)
S=30;   (*) Span (*)
H=8;    (*) Rise (*)
L=45;   (*) Length (*)
m=7;    (*) Frequency in U2 direction (*)
n=8;    (*) Frequency in U3 direction (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);        (*) Radius (*)
E=rinit(m,n,2,2)|lamit(1,1)|[1,0,0; 1,1,1]#
 rinit(m,n+1,2,2)|[1,0,0; 1,2,0]#
  rinit(2,n,2*m,2)|[1,0,0; 1,0,2];
F=bc(R,A/m,L/(2*n))|E;
Vault=verad(0,0,90-A)|F;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,3*R,-2*R, 0,0,R, 0,1,R);
clear;   draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۶۹

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 69:  Binate barrel vault
  with additional bracings.
  See Section 1.8 of Reference 1. (*)
S=28;   (*) Span (*)
H=8;    (*) Rise (*)
L=32;   (*) Length (*)
m=8;    (*) Frequency
        in U2 direction, m must be even (*)
n=10;   (*) Frequency
        in U3 direction, n must be even (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);          (*) Radius (*)
mm=ric|(m/2);   nn=ric|(n/2);
E=rinit(m,n+1,1,1)|[1,0,0; 1,1,0]#
  rinit(m+1,n,1,1)|[1,0,0; 1,0,1]#
  lamit(mm,nn)|rinit(mm,nn,1,1)|
  [1,0,1; 1,1,0];
F=bc(R,2*A/m,L/n)|E;
Vault=verad(0,0,90-A)|F;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,3*R,-R, 0,0,R, 0,1,R);
clear;   draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۷۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 70:  Binate barrel vault
  with additional bracings.
  See Section 1.8 of Reference 1. (*)
S=28;   (*) Span (*)
H=8;    (*) Rise (*)
L=32;   (*) Length (*)
m=10;  (*) Frequency
        in U2 direction, m must be even (*)
n=10;   (*) Frequency
        in U3 direction, n must be even (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);          (*) Radius (*)
mm=ric|(m/2);   nn=ric|(n/2);
E=lux(rin(3,nn,2)|[1,mm,1])|
  (rinit(m,n+1,1,1)|[1,0,0; 1,1,0]#
  rinit(m+1,n,1,1)|[1,0,0; 1,0,1]#
  lamit(mm,nn)|rinit(mm,ric|(nn/2),1,2)|
  lam(3,1)|[1,0,1; 1,1,0]);
F=bc(R,2*A/m,L/n)|E;
Vault=verad(0,0,90-A)|F;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,3*R,-R, 0,0,R, 0,1,R);
clear;   draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۷۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 71:  Double layer barrel
  vault with binate on binate pattern.
  See Section 1.8 of Reference 1. (*)
S=20;   (*) Span (of top layer) (*)
H=6;    (*) Rise (of top layer) (*)
D=1.5;  (*) Depth of the vault (*)
L=24;   (*) Length of the vault (*)
m=6;    (*) Frequency in U2 direction (*)
n=6;    (*) Frequency in U3 direction (*)
A=2*atan|(2*H/S);  (*) Sweep angle (*)
Rt=S/(2*sin|A);      (*) Top radius (*)
Rb=Rt-D;             (*) Bottom radius (*)
T=rinit(m,n+1,2,2)|[Rt,0,0; Rt,2,0]#
  rinit(m+1,n,2,2)|[Rt,0,0; Rt,0,2];
B=rinit(m-1,n,2,2)|[Rb,1,1; Rb,3,1]#
  rinit(m,n-1,2,2)|[Rb,1,1; Rb,1,3];
W=rinit(m,n,2,2)|lamit(1,1)|
  [Rt,0,0; Rb,1,1];
E=bc(1,A/m,L/(2*n))|(T#B#W);
Vault=verad(0,0,90-A)|E;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,3*Rt,-Rt, 0,0,Rt, 0,1,Rt);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۷۲

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 72:  Compound barrel vault.
  See Section 1.8 of Reference 1. (*)
S=20;   (*) Span (*)
H=7;    (*) Rise (*)
L=36;   (*) Length (*)
m=6;    (*) Frequency in U2 direction (*)
n=8;    (*) Frequency in U3 direction (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);        (*) Radius (*)
E=rinit(m,n,2,2)|lamit(1,1)|[1,0,0; 1,1,1]#
 rinit(m,n+1,2,2)|[1,0,0; 1,2,0]#
  rinit(2,n,2*m,2)|[1,0,0; 1,0,2];
F=bc(R,A/m,L/(2*n))|E;
Vault=rin(1,2,S)|verad(0,0,90-A)|F;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(S/2,6*R,-3*R, S/2,0,R, S/2,1,R);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۷۳

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 73:  Compound barrel vault.
  See Section 1.8 of Reference 1. (*)
S=16;  (*) Span of each barrel vault (*)
H=4;   (*) Rise (*)
L=40;  (*) Length (*)
m=6;   (*) Frequency
       in U2 direction, m must be even (*)
n=10;  (*) Frequency
       in U3 direction, n must be even (*)
A=2*atan|(2*H/S);  (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);        (*) Radius (*)
mm=ric|(m/2);  nn=ric|(n/2);
E=lux(rin(3,nn,2)|[1,mm,1])|
  (rinit(m,n+1,1,1)|[1,0,0; 1,1,0]#
  rinit(m+1,n,1,1)|[1,0,0; 1,0,1]#
  lamit(mm,nn)|rinit(mm,ric|(nn/2),1,2)|
  lam(3,1)|[1,0,1; 1,1,0]);
F=bc(R,2*A/m,L/n)|E;
Vault=rin(1,3,S)|verad(0,0,90-A)|F;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(S,8*R,-4*R, S,0,R, S,1,R);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۷۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 74:  Sidebent annular barrel
  vault with binate pattern.
  See Section 3.4 of Reference 3. (*)
S=24;  (*) Span of barrel vault (*)
H=6;   (*) Rise of barrel vault (*)
m=20;  (*) Frequency in U2 direction (*)
n=10;   (*) Frequency in U4 direction (*)
R=60;  (*) Radius of annulus (*)
T=60;  (*) Central angle
           containing the barrel vault (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
Q=S/(2*sin|A);        (*) Radius of
             cross-section of annulus (*)
E=rinic(2,4,m,n+1,1,1)|[1,0,1,-n/2;
  1,1,1,-n/2]#rinic(2,4,m+1,n,1,1)|
  [1,0,1,-n/2; 1,0,1,1-n/2];
Vault=dep(4)|ba(R,T/m,Q,2*A/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(R/2,2*R,1.5*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۷۵

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 75:  Sidebent annular barrel
  vault with lamella (obnate) pattern.
  See Section 3.4 of Reference 3. (*)
S=28;  (*) Span of barrel vault (*)
H=8;   (*) Rise of barrel vault (*)
m=16;  (*) Frequency in U2 direction (*)
n=8;   (*) Frequency in U4 direction (*)
R=70;  (*) Radius of annulus (*)
T=50;  (*) Central angle
           containing the barrel vault (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
Q=S/(2*sin|A);      (*) Radius of
            cross-section of annulus (*)
E=rinic(2,4,m,n,2,2)|lam(4,1-n)|lam(2,1)|
  [1,0,1,-n; 1,1,1,1-n]#
  rinic(2,4,m,2,2,2*n)|
  [1,0,1,-n; 1,2,1,-n]#
  rinic(2,4,2,n,2*m,2)|
  [1,0,1,-n; 1,0,1,2-n];
Vault=dep(4)|ba(R,T/(2*m),Q,A/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(R,2*R,2*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۷۶

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 76:  Sidebent horseshoe
  annular barrel vault with binate pattern.
  See Section 3.4 of Reference 3. (*)
S=60;   (*) Span of barrel vault (*)
H=15;  (*) Rise of barrel vault (*)
m=48;  (*) Frequency in U2 direction (*)
n=7;    (*) Frequency in U4 direction (*)
R=90;  (*) Radius of annulus (*)
T=270; (*) Central angle
           containing the barrel vault (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
Q=S/(2*sin|A);      (*) Radius of
            cross-section of annulus (*)
E=rinic(2,4,m,n+1,1,1)|
  [1,0,1,-n/2; 1,1,1,-n/2]#
  rinic(2,4,m+1,n,1,1)|
  [1,0,1,-n/2; 1,0,1,1-n/2];
Vault=dep(4)|ba(R,T/m,Q,2*A/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(2*R,2*R,4*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۷۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 77:  Sidebent annular ring
  barrel vault with lamella (obnate) pattern.
  See Section 3.4 of Reference 3. (*)
S=50;   (*) Span of barrel vault (*)
H=15;   (*) Rise of barrel vault (*)
m=30;   (*) Frequency in U2 direction (*)
n=5;    (*) Frequency in U4 direction (*)
R=80;   (*) Radius of annulus (*)
T=360; (*) Central angle
            containing the barrel vault (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
Q=S/(2*sin|A);      (*) Radius of
              cross-section of annulus (*)
E=rinic(2,4,m,n,2,2)|lam(4,1-n)|lam(2,1)|
  [1,0,1,-n; 1,1,1,1-n]#
  rinic(2,4,m,2,2,2*n)|
  [1,0,1,-n; 1,2,1,-n];
Vault=dep(4)|ba(R,T/(2*m),Q,A/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۷۸

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 78:  Outbent annular
  barrel vault with lamella (obnate) pattern
  and additional ribs.
  See Section 3.4 of Reference 3. (*)
S=48;   (*) Span of barrel vault (*)
H=10;   (*) Rise of barrel vault (*)
m=12;   (*) Frequency in U2 direction (*)
n=5;    (*) Frequency in U4 direction (*)
R=50;   (*) Radius of annulus (*)
T=90;   (*) Central angle
            containing the barrel vault (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
Q=S/(2*sin|A);      (*) Radius of
              cross-section of annulus (*)
E=rinic(2,4,m,n,2,2)|lam(4,1-n)|lam(2,1)|
  [1,0,1,-n; 1,1,1,1-n]#
  rinic(2,4,m,2,2,2*n)|
  [1,0,1,-n; 1,2,1,-n]#
  rinic(2,4,m+1,n,2,2)|
  [1,0,1,-n; 1,0,1,2-n];
E=tran(4,n*90/A)|E;
Vault=dep(4)|ba(R,T/(2*m),Q,A/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(5*R,10*R,5*R, 0,0,0, 1,1,0);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۷۹

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 79:  Compound outbent
  annular barrel vault with lamella pattern.
  See Section 3.5 of Reference 3. (*)
S=48;    (*) Span of barrel vault (*)
H=12;    (*) Rise of barrel vault (*)
m=10;    (*) Frequency in U2 direction (*)
n=5;     (*) Frequency in U4 direction (*)
R=50;    (*) Radius of annulus (*)
T=90;    (*) Central angle
             containing the barrel vault (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
Q=S/(2*sin|A);   (*) Radius of
              cross-section of annulus (*)
E=rinic(2,4,m,n,2,2)|lam(4,1-n)|lam(2,1)|
  [1,0,1,-n; 1,1,1,1-n]#
  rinic(2,4,m,2,2,2*n)|[1,0,1,-n; 1,2,1,-n]#
  rinic(2,4,2,n,2*m,2)|[1,0,1,-n; 1,0,1,2-n];
E=tran(4,n*90/A)|E;
B=dep(4)|ba(R,T/(2*m),Q,A/n)|E;
Vault=rin(3,3,S)|B;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(5*R,10*R,5*R, 0,0,0, 1,1,0);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۸۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 80:  Inbent annular barrel
  vault with binate pattern.
  See Section 3.4 of Reference 3. (*)
S=40;    (*) Span of barrel vault (*)
H=8;     (*) Rise of barrel vault (*)
m=16;    (*) Frequency in U2 direction (*)
n=7;     (*) Frequency in U4 direction (*)
R=100;   (*) Radius of annulus (*)
T=90;    (*) Central angle
             containing the barrel vault (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
Q=S/(2*sin|A);      (*) Radius of
              cross-section of annulus (*)
E=rinic(2,4,m,n+1,1,1)|
  [1,0,1,-n/2; 1,1,1,-n/2]#
  rinic(2,4,m+1,n,1,1)|
  [1,0,1,-n/2; 1,0,1,1-n/2];
F=tran(4,-n*90/(2*A))|E;
Vault=dep(4)|ba(R,T/m,Q,2*A/n)|F;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(1.5*R,1.5*R,R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۸۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 81:  Compound inbent
  annular barrel vault with binate pattern.
  See Section 3.5 of Reference 3. (*)
S=40;    (*) Span of barrel vault (*)
H=8;     (*) Rise of barrel vault (*)
m=16;    (*) Frequency in U2 direction (*)
n=7;     (*) Frequency in U4 direction (*)
R=100;  (*) Radius of annulus (*)
T=90;    (*) Central angle
              containing the barrel vault (*)
A=2*atan|(2*H/S);    (*) Sweep angle (*)
Q=S/(2*sin|A);       (*) Radius of
               cross-section of annulus (*)
E=rinic(2,4,m,n+1,1,1)|
  [1,0,1,-n/2; 1,1,1,-n/2]#
  rinic(2,4,m+1,n,1,1)|
  [1,0,1,-n/2; 1,0,1,1-n/2];
F=tran(4,-n*90/(2*A))|E;
G=dep(4)|ba(R,T/m,Q,2*A/n)|F;
Vault=rin(3,3,S)|G;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(6*R,6*R,8*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۸۲

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 82:  Double layer inbent
  annular barrel vault with binate on
  binate pattern. See Section 3.4 of
  Reference 3. (*)
S=45;    (*) Span of top layer (*)
H=6;     (*) Rise of top layer (*)
D=2;     (*) Depth of barrel vault (*)
m=8;  (*) Top layer frequency along U2 (*)
n=5;  (*) Top layer frequency along U4 (*)
R=100;  (*) Radius of annulus (*)
TT=70;   (*) Central angle containing the
                top layer of barrel vault (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
Qt=S/(2*sin|A);        (*) Radius of top
          layer cross-section of annulus (*)
Qb=Qt-D;
T=rinic(2,4,m,n+1,2,2)|
  [1,0,Qt,-n; 1,2,Qt,-n]#
  rinic(2,4,m+1,n,2,2)|
  [1,0,Qt,-n; 1,0,Qt,2-n];
B=rinic(2,4,m-1,n,2,2)|
  [1,1,Qb,1-n; 1,3,Qb,1-n]#
  rinic(2,4,m,n-1,2,2)|
  [1,1,Qb,1-n; 1,1,Qb,3-n];
W=rinic(2,4,m,n,2,2)|lamic(2,4,1,1-n)|
  [1,0,Qt,-n; 1,1,Qb,1-n];
E=tran(4,-2*n*90/(2*A))|(T#B#W);
Vault=dep(4)|ba(R,TT/(2*m),1,A/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(2*R,1.5*R,R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۸۳ و ۸۴

```
 (*) Formian scheme for configurations
   similar to Fig 83 (R1=16, R2=10) and
   Fig 84 (R1=10, R2=15):  Parabolic barrel
   vault. See Section 2.3 of  Reference 2. (*)
R1=16;   (*) Radius at the ends (*)
R2=10;   (*) Radius at the middle (*)
L=36;    (*) Length of barrel vault (*)
P=60;    (*) Sweep angle (*)
m=12;    (*) Frequency in U2 direction (*)
n=20;    (*) Frequency in U3 direction (*)
a=4*(R1-R2)/L^2;   b=-a*L;
c=R1;   d=L/n;
E=rin(2,m,1)|lib(i=0,n)|
  [a*(d*i)^2+b*d*i+c,0,i;
  a*(d*i)^2+b*d*i+c,1,i]#
  rin(2,m+1,1)|lib(i=0,n-1)|
  [a*(d*i)^2+b*d*i+c,0,i;
  a*(d*(i+1))^2+b*d*(i+1)+c,0,i+1];
Vault=verad(0,0,90-P)|bc(1,2*P/m,d)|E;
use &, vm(2),vt(2),
  vh(L,3*L,-L, 0,0,L, 0,1,L);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۸۵ و ۸۶

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 85 (R1=16, R2=12) and
  Fig 86 (R1=12, R2=16):
  Hyperboloidal barrel vault.
  See Section 3.3.2 of Reference 3. (*)
R1=16;  (*) Radius at the ends (*)
R2=11;  (*) Radius at the middle (*)
L=36;   (*) Length of barrel vault (*)
A=60;   (*) Sweep angle (*)
m=4;  (*) Circumferential semifrequency (*)
n=6;  (*) Longitudinal semifrequency (*)
P=(R1^2-R2^2)/(L/2)^2;   (*) Pitch (*)
E=pex|lamit(0,0)|rinit(m,n,1,1)|
  (rosat(0.5,0.5)|[1,0,0; 1,1,0]#
  [1,0,1; 1,1,0]);
F=bh(R2,A/m,L/(2*n),P)|E;
Vault=verad(0,0)|F;
use &, vm(2),vt(2),
  vh(L,3*L,-L, 0,0,L, 0,1,L);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۸۷ و ۸۸

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 87 (C=3, parabolic) and
  Fig 88 (C=4, Wedge-shaped): Pellevated
  honeycomb grid.
  See References 4, 5 and 6. (*)
S=20;   (*) Span (*)
L=24;   (*) Length (*)
H=7;    (*) Rise (*)
m=6;    (*) Circuferential frequency,
   number of hexagons in the second row (*)
n=7;    (*) Longitudinal frequency,
    number of hexagons along the sides (*)
C=3;    (*) Pellevation code (*)
E=rinid(m,n,6,2)|lamid(2,2)|[1,1,0; 0,2,0]#
  rinid(m,n+1,6,2)|[1,1,0; 3,1,0]#
  rin(1,m-1,6)|lamid(5,n+1)|[4,0,0; 3,1,0]#
  rinid(m-1,n+2,6,2)|[4,0,0; 6,0,0];
Grid=bb(S/(6*m-2),L/(2*(n+1)))|E;
Vault=bapel(C,S/2,0,S/2,1,S,H)|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(L/2,-2*L,3*L,
  S/2,L/2,0, S/2,L/2,1);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۸۹ و ۹۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 89 (C=3, parabolic) and
  Fig 90 (C=4, Wedge-shaped): Pellevated
  trussed lamella double layer barrel vault.
  See References 4, 5 and 6. (*)
S=20;    (*) Span (*)
L=20;    (*) Length (*)
D=2;     (*) Depth of grid (*)
H=6;     (*) Rise (*)
m=4;     (*) Circuferential frequency (*)
n=4;     (*) Longitudinal frequency (*)
C=3;     (*) Pellevation code (*)
T=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,1; 1,1,1]#
  rinid(m,2,2,2*n)|[0,0,1; 2,0,1]#
  rinid(2,n,2*m,2)|[0,0,1; 0,2,1];
B=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,0]#
  rinid(m,2,2,2*n)|[0,0,0; 2,0,0]#
  rinid(2,n,2*m,2)|[0,0,0; 0,2,0];
E=lam(3,0.5)|{[0,0,0; 0.5,0.5,0.5],
  [0.5,0.5,0.5; 1,1,0]}#
  {[0,0,1; 0,0,0], [1,1,1; 1,1,0]};
F=lamis(1,0.5)|[0,0,0; 1,0,0.5]#
  lam(1,1)|[0,0,0; 0,0,1];
W=pex|(rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|E#
  rinid(m,2,2,2*n)|F#rinid(2,n,2*m,2)|
  verad(0,0)|F);
Grid=bt(S/(2*m),L/(2*n),D)|(T#B#W);
Vault=bapel(C,S/2,0,S/2,1,S,H)|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(L/2,-2*L,4*L,
  S/2,L/2,0, S/2,L/2,1);
clear;  draw Vault;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۹۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 91:  Ribbed dome.
  See Section 1.9 of Reference 1. (*)
S=36;    (*) Span (*)
H=6;     (*) Rise (*)
m=24;    (*) Frequency of
                    elements on a ring (*)
n=9;  (*) Frequency of elements on a rib (*)
A=2*atan|(2*H/S);  (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);  (*) Radius (*)
E=rinit(m,n-1,1,1)|{[1,0,1; 1,1,1],
  [1,0,1; 1,0,2]}#rin(2,m,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
  [1,0,n; 1,1,n]};
Dome=bs(R,360/m,A/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۹۲

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 92:  Trimmed ribbed dome.
  See Section 1.9 of Reference 1. (*)
S=36;    (*) Span (*)
H=6;     (*) Rise (*)
m=24;    (*) Frequency of elements
                  on a ring, must be even (*)
n=9;  (*) Frequency of elements on a rib (*)
A=2*atan|(2*H/S);      (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);   (*) Radius (*)   p=ric|(m/2);
E=rinit(m,n-1,1,1)|{[1,0,1; 1,1,1],
  [1,0,1; 1,0,2]}#rin(2,m,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
  [1,0,n; 1,1,n]};
E=lux(rin(2,p,2)|[1,0,1])|E#
  rin(2,p,2)|[1,1,1; 1,3,1];
Dome=bs(R,360/m,A/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۹۳

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 93:  Schwedler dome.
  See Section 1.9 of Reference 1. (*)
S=36;    (*) Span (*)
H=6;     (*) Rise (*)
m=16;    (*) Frequency of
                    elements on a ring (*)
n=8;  (*) Frequency of elements on a rib (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);         (*) Radius (*)
E=rinit(m,n-1,1,1)|{[1,0,1; 1,1,1],
  [1,0,1; 1,0,2], [1,0,1; 1,1,2]}#rin(2,m,1)|
  {[1,0,0; 1,0,1], [1,0,n; 1,1,n]};
Dome=bs(R,360/m,A/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۹۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 94:  Trimmed Schwedler
 (*).  dome. See Section 1.9 of Reference 1
S=36;    (*) Span (*)
H=6;     (*) Rise (*)
m=16;    (*) Frequency of
         elements on a ring, must be even (*)
n=8;  (*) Frequency of elements on a rib (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);   (*) Radius (*)   p=ric|(m/2);
E=rinit(m,n-1,1,1)|{[1,0,1; 1,1,1],
  [1,0,1; 1,0,2]}#rin(2,m,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
  [1,0,n; 1,1,n]};
E=lux(rin(2,p+1,2)|[1,0,1])|E#rin(2,p,2)|
  [1,1,1; 1,3,1];
E=E#rin(2,p,2)|[1,1,1; 1,3,2]#
  rinit(m,n-2,1,1)|[1,0,2; 1,1,3];
Dome=bs(R,360/m,A/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۹۵

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 95:  Schwedler dome.
  See Section 1.9 of Reference 1. (*)
S=36;    (*) Span (*)
H=6;     (*) Rise (*)
m=16;    (*) Frequency of
         elements on a ring, must be even (*)
n=7;  (*) Frequency of elements on a rib (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);         (*) Radius (*)
E=rinit(m,n,1,1)|{[1,0,1; 1,1,1],
  [1,0,1; 1,0,2]}#rin(2,m,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
  [1,0,n+1; 1,1,n+1]}#
  rinit(ric|(m/2),n,2,1)|lam(2,1)|[1,0,1; 1,1,2];
Dome=bs(R,360/m,A/(n+1))|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۹۶

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 96:  Schwedler dome.
  See Section 1.9 of Reference 1. (*)
S=36;    (*) Span (*)
H=6;     (*) Rise (*)
m=18;    (*) Frequency of
          elements on a ring, must be even (*)
n=9;     (*) Frequency of
          elements on a rib, must be odd (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);      (*) Radius (*)
E=rinit(m,n-1,1,1)|{[1,0,1; 1,1,1],
 [1,0,1; 1,0,2]}#rin(2,m,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
 [1,0,n; 1,1,n]}#rinit(ric|(m/2),tic|(n/2),2,2)|
 lamit(1,2)|[1,1,1; 1,2,2];
Dome=bs(R,360/m,A/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۹۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 97:  Schwedler dome.
  See Section 1.9 of Reference 1. (*)
S=36;    (*) Span (*)
H=6;     (*) Rise (*)
m=18;    (*) Frequency of
          elements on a ring, must be even (*)
n=8;     (*) Frequency of
          elements on a rib, must be even (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);      (*) Radius (*)
E=rinit(m,n-1,1,1)|{[1,0,1; 1,1,1],
 [1,0,1; 1,0,2]}#rin(2,m,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
 [1,0,n; 1,1,n]}#rinit(ric|(m/2),ric|(n/2),2,2)|
 {[1,1,1; 1,2,2], [1,1,2; 1,2,1]}#
 rinit(ric|(m/2),ric|(n/2)-1,2,2)|
 {[1,2,2; 1,3,3], [1,2,3; 1,3,2]};
Dome=bs(R,360/m,A/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۹۸

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 98:  Double layer ribbed
  canopy dome.
  See Section 1.9 of Reference 1. (*)
S=60;    (*) Span of top layer (*)
P=25;    (*) Gap diameter (*)
D=2;     (*) Depth (*)
A=40;    (*) Sweep angle (*)
m=24;    (*) Frequency of
                    elements on a ring (*)
n=3;  (*) Frequency of elements on a rib (*)
R=S/(2*sin|A);       (*) Top radius (*)
Rb=R-D;              (*) Bottom radius (*)
G=asin|(P/(2*R));    (*) Gap angle (*)
i=(A-G)/(2*n);       (*) increment (*)
T=rinit(m,n+1,2,2*i)|[R,0,G; R,2,G]#
  rinit(m,n,2,2*i)|[R,0,G; R,0,G+2*i];
B=rinit(m,n,2,2*i)|[Rb,1,G+i; Rb,3,G+i]#
  rinit(m,n-1,2,2*i)|[Rb,1,G+i; Rb,1,G+3*i];
W=rinit(m,n,2,2*i)|lamit(1,G+i)|
  [R,0,G; Rb,1,G+i];
Dome=bs(1,360/(2*m),1)|(T#B#W);
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,4*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۹۹

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 99:  Lamella dome.
  See Section 1.9 of Reference 1. (*)
S=36;    (*) Span (*)
H=5;     (*) Rise (*)
m=16;    (*) Frequency of
              rhombuses in U2 direction (*)
n=5;     (*) Frequency of
              rhombuses in U3 direction (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);       (*) Radius (*)
E=rinit(m,n,2,2)|lamit(0,1)|[1,0,0; 1,1,1];
Dome=pex|bs(R,360/(2*m),A/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,4*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۰۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 100:  Lamella dome.
  See Section 1.9 of Reference 1. (*)
S=36;    (*) Span (*)
H=5;     (*) Rise (*)
m=16;    (*) Frequency of
             rhombuses in U2 direction (*)
n=5;     (*) Frequency of
             rhombuses in U3 direction (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);      (*) Radius (*)
E=pex|rinit(m,n,2,2)|(lamit(0,1)|
  [1,0,0; 1,1,1]#[1,1,1; 1,-1,1]);
Dome=bs(R,360/(2*m),A/n)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,4*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۰۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 101:  Trimmed lamella dome.
  See Section 1.9 of Reference 1. (*)
S=36;    (*) Span (*)
H=4;     (*) Rise (*)
m=24;    (*) Frequency of rhombuses
          in U2 direction, m must be even (*)
n=6;     (*) Frequency of rhombuses
   in U3 direction, n must be larger than 3 (*)
p=ric|(m/2);
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);      (*) Radius (*)
E=rinit(m, n-3,2,2)|lamit(0,7)|[1,0,6; 1,1,7];
F=rinit(p,3,4,2)|lamit(0,1)|[1,0,0; 1,2,1];
G=E#F#rinit(m,2,2,2*(n-3))|[1,0,6; 1,2,6]#
  rin(2,p,4)|[1,2,6; 1,2,5];
Dome=pex|bs(R,360/(2*m),A/n)|G;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,4*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۱۰۲ و ۱۰۳

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 102 (f=1.2) and
  Fig 103 (f=1.4): Ovate dome.
  See Section 1.9 of Reference 1. (*)
S=36;    (*) Span (*)
H=8;     (*) Rise (*)
f=1.2;   (*) Factor for
               scaling of half the dome (*)
A=2*atan|(2*H/S);  (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);        (*) Radius (*)
E1=rin(2,3,4)|{[1,0,0; 1,0,1], [1,0,1; 1,4,1],
  [1,0,1; 1,0,2], [1,0,1; 1,2,2],
  [1,2,2; 1,4,1]}#rin(2,6,2)|{[1,0,2; 1,2,2],
  [1,0,2; 1,0,3], [1,0,2; 1,2,3]}#
  rin(2,6,2)|{[1,0,3; 1,2,3], [1,0,3; 1,0,4],
  [1,0,3; 1,1,4], [1,1,4; 1,2,3]};
E2=rinit(12,3,1,1)|{[1,0,4; 1,1,4],
  [1,0,4; 1,0,5], [1,0,4; 1,1,5]};
E3=E1#E2#rin(2,12,1)|[1,0,7; 1,1,7];
E4=bs(R,360/24,A/7)|E3;
Dome=E4#bb(1,f)|refid (0,0)|E4;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,0,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۰۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 104:  Diamatic dome.
  See Section 2.5 of Reference 2. (*)
R=36;    (*) Radius of circumsphere (*)
A=40;    (*) Sweep angle (*)
m=7;     (*) Frequency (*)
n=6;     (*) Number of sectors (*)
E=genit(1,m,1,1,0,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
  [1,0,0; 1,1,1], [1,0,1; 1,1,1]};
F=bd(R,360/n,A/m)|E;
Dome=pex|rosad(0,0,n,360/n)|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۰۵

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 105:  Diamatic dome.
  See Section 2.5 of Reference 2. (*)
R=36;     (*) Radius of circumsphere (*)
A=45;     (*) Sweep angle (*)
m=8;      (*) Frequency (*)
n=7;      (*) Number of sectors (*)
E=genit(1,m,3,3,0,1)|{[1,0,0; 1,1,2],
  [1,1,2; 1,0,3], [1,1,2; 1,3,3]};
F=bd(R,360/n,A/(3*m))|E;
Dome=rosad(0,0,n,360/n)|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۰۶

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 106:  Diamatic dome.
  See Section 2.5 of Reference 2. (*)
R=36;     (*) Radius of circumsphere (*)
A=45;     (*) Sweep angle (*)
m=7;      (*) Frequency (*)
n=7;      (*) Number of sectors (*)
E=genit(1,m,3,3,0,1)|{[1,2,4; 1,1,2],
  [1,2,4; 1,1,5], [1,2,4; 1,4,5]}#
  rin(3,m+1,3)|[1,1,2; 1,-1,2];
F=bd(R,360/n,A/(3*m))|E;
Dome=rosad(0,0,n,360/n)|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۰۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 107:  Diamatic dome.
  See Section 2.5 of Reference 2. (*)
R=36;     (*) Radius of circumsphere (*)
A=40;     (*) Sweep angle (*)
m=9;      (*) Frequency (*)
n=6;      (*) Number of sectors (*)
E=genit(1,m,1,1,0,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
  [1,0,0; 1,1,1], [1,0,1; 1,1,1]};
Hole={[1,2,4], [1,2,7], [1,5,7]};
F=bd(R,360/n,A/m)|lux(Hole)|E;
Dome=pex|rosad(0,0,n,360/n)|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۰۸

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 108:  Diamatic dome.
  See Section 2.5 of Reference 2. (*)
R=36;     (*) Radius of circumsphere (*)
A=45;     (*) Sweep angle (*)
m=8;      (*) Frequency (*)
n=7;      (*) Number of sectors (*)
E=genit(1,m,3,3,0,1)|{[1,0,0; 1,1,2],
  [1,1,2; 1,0,3], [1,1,2; 1,3,3]};
Hole=rin(2,5,3)|[1,6,24]#rin(2,2,3)|[1,9,21]#
  {[1,10,20], [1,7,23], [1,16,23]};
F=bd(R,360/n,A/(3*m))|lux(Hole)|E;
Dome=rosad(0,0,n,360/n)|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۱۰۹ و ۱۱۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 109 (f1=1.15, f2=0.85) and
  Fig 110 (f1=1.35, f2=1.05):
  Ovate diamatic dome.
  See Section 2.5 of Reference 2. (*)
R=36;  (*) Initial radius of circumsphere (*)
A=50;  (*) Sweep angle (*)
m=8;   (*) Frequency (*)
f1=1.15;  (*) Scale factor for 1st half (*)
f2=0.85;  (*) Scale factor for 2nd half (*)
n1=4;  (*) Number of sectors in 1st half (*)
n2=3;  (*) Number of sectors in 1st half (*)
E=genit(1,m,3,3,0,1)|{[1,0,0; 1,1,2],
  [1,1,2; 1,0,3], [1,1,2; 1,3,3]};
E1=bd(R,180/n1,A/(3*m))|E;
E2=bd(R,180/n2,A/(3*m))|E;
Dome=dil(2,f1)|rosad(0,0,n1,180/n1)|E1#
  dil(2,f2)|ref(2,0)|rosad(0,0,n2,180/n2)|E2;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,0,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۱۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 111:  Double layer diamatic
  dome. See Section 2.5 of Reference 2. (*)
R=36;    (*) Radius of top circumsphere (*)
Rb=34.5;  (*) Radius of
                  bottom circumsphere (*)
A=45;     (*) Sweep angle (*)
m=3;      (*) Frequency  of top layer (*)
n=6;      (*) Number of sectors (*)
T=genit(1,m,3,3,0,1)|{[R,0,0; R,0,3],
  [R,0,0; R,3,3], [R,0,3; R,3,3]};
B=genit(1,m-1,3,3,0,1)|{[Rb,2,4; Rb,1,2],
  [Rb,2,4; Rb,1,5], [Rb,2,4; Rb,4,5]}#
  rin(3,m,3)|[Rb,1,2; Rb,-1,2];
W=genit(1,m,3,3,0,1)|{[Rb,1,2; R,0,0],
  [Rb,1,2; R,0,3], [Rb,1,2; R,3,3]}#
  genit(1,m-1,3,3,0,1)|{[Rb,2,4; R,3,6],
  [Rb,2,4; R,0,3], [Rb,2,4; R,3,3]};
F=bd(1,360/n,A/(3*m))|(T#B#W);
Dome=pex|rosad(0,0,n,360/n)|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۱۲

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 112:  Scallop dome.
  See Reference 12. (*)
R=36;     (*) Radius of circumsphere (*)
A=45;     (*) Sweep angle (*)
m=8;      (*) Frequency (*)
n=6;      (*) Number of sectors (*)
C=1;      (*) Code (*)
D=9;      (*) Amplitude (*)
P=0;      (*) Prominence (*)
nn=360/n;
E=genit(1,m,1,1,0,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
  [1,0,0; 1,1,1], [1,0,1; 1,1,1]};
F=sbd(C,nn,[R,m,D,P],1,nn,A/m)|E;
Dome=pex|rosad(0,0,n,nn)|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,2*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۱۳

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 113:  Scallop dome.
  See Reference 12. (*)
R=36;     (*) Radius of circumsphere (*)
A=70;     (*) Sweep angle (*)
m=7;      (*) Frequency (*)
n=8;      (*) Number of sectors (*)
C=1;      (*) Code (*)
D=15;     (*) Amplitude (*)
P=0;      (*) Prominence (*)
nn=360/n;
E=genit(1,m,1,1,0,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
  [1,0,0; 1,1,1], [1,0,1; 1,1,1]};
F=sbd(C,nn,[R,m,D,P],1,nn,A/m)|E;
Dome=pex|rosad(0,0,n,nn)|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۱۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 114:  Scallop dome.
  See Reference 12. (*)
R=36;     (*) Radius of circumsphere (*)
A=70;     (*) Sweep angle (*)
m=8;      (*) Frequency (*)
n=5;      (*) Number of sectors (*)
C=1;      (*) Code (*)
D=8;      (*) Amplitude (*)
P=15;     (*) Prominence (*)
nn=360/n;
E=genit(1,m,1,1,0,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
  [1,0,0; 1,1,1], [1,0,1; 1,1,1]};
F=sbd(C,nn,[R,m,D,P],1,nn,A/m)|E;
Dome=pex|rosad(0,0,n,nn)|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۱۵

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 115:  Scallop dome.
  See Reference 12. (*)
R=36;     (*) Radius of circumsphere (*)
A=32;     (*) Sweep angle (*)
m=7;      (*) Frequency (*)
n=12;     (*) Number of sectors (*)
C=1;      (*) Code (*)
D=4;      (*) Amplitude (*)
P=0;      (*) Prominence (*)
nn=360/n;
E=genit(1,m,1,1,0,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
  [1,0,0; 1,1,1], [1,0,1; 1,1,1]};
F=sbd(C,nn,[R,m,D,P],1,nn,A/m)|E;
Dome=pex|rosad(0,0,n,nn)|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,2*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۱۶

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 116:  Scallop dome.
  See Reference 12. (*)
R=36;     (*) Radius of circumsphere (*)
A=45;     (*) Sweep angle (*)
m=8;      (*) Frequency (*)
n=6;      (*) Number of sectors (*)
C=2;      (*) Code (*)
D=10;     (*) Amplitude (*)
P=0;      (*) Prominence (*)
nn=360/n;
E=genit(1,m,1,1,0,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
  [1,0,0; 1,1,1], [1,0,1; 1,1,1]};
F=sbd(C,nn,[R,m,D,P],1,nn,A/m)|E;
Dome=pex|rosad(0,0,n,nn)|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,2*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۱۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 117:  Scallop dome.
  See Reference 12. (*)
R=36;     (*) Radius of circumsphere (*)
A=60;     (*) Sweep angle (*)
m=7;      (*) Frequency (*)
n=8;      (*) Number of sectors (*)
C=2;      (*) Code (*)
D=6;      (*) Amplitude (*)
P=0;      (*) Prominence (*)
nn=360/n;
E=genit(1,m,1,1,0,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
  [1,0,0; 1,1,1], [1,0,1; 1,1,1]};
F=sbd(C,nn,[R,m,D,P],1,nn,A/m)|E;
Dome=pex|rosad(0,0,n,nn)|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,2*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۱۸

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 118:  Scallop dome.
  See Reference 12. (*)
R=36;     (*) Radius of circumsphere (*)
A=45;     (*) Sweep angle (*)
m=11;     (*) Frequency (*)
n=3;      (*) Number of sectors (*)
C=2;      (*) Code (*)
D=5;      (*) Amplitude (*)
P=20;     (*) Prominence (*)
nn=360/n;
E=genit(1,m,1,1,0,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
  [1,0,0; 1,1,1], [1,0,1; 1,1,1]};
F=sbd(C,nn,[R,m,D,P],1,nn,A/m)|E;
Dome=pex|rosad(0,0,n,nn)|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۱۹

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 119:  Scallop dome.
  See Reference 12. (*)
R=36;     (*) Radius of circumsphere (*)
A=70;     (*) Sweep angle (*)
m=10;     (*) Frequency (*)
n=2;      (*) Number of sectors (*)
C=2;      (*) Code (*)
D=8;      (*) Amplitude (*)
P=30;     (*) Prominence (*)
nn=360/n;
E=genit(1,m,1,1,0,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
  [1,0,0; 1,1,1], [1,0,1; 1,1,1]};
F=sbd(C,nn,[R,m,D,P],1,nn,A/m)|E;
Dome=pex|rosad(0,0,n,nn)|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,4*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۲۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 120:  Onion dome.
  See Section 3.4 of Reference 3. (*)
R=10;     (*) First radius (*)
Q=50;     (*) Second radius (*)
B=40;     (*) Base angle (*)
m=24;  (*) Number of rhombi along U2 (*)
n=8;     (*) Number of rhombi along U3 (*)
V=1;    (*) Vertical scale factor (*)
A=acos|(R/Q)+B;     (*) Sweep angle (*)
P=asin|(R/Q);          (*) Position angle (*)
E=rinic(2,4,m,n,2,-2)|lamic(2,4,1,-1)|
  [1,1,1,0; 1,0,1,-1]#rin(2,m,2)|
  [1,1,1,-2*n; 1,3,1,-2*n];
F=tran(4,-2*n*P/A)|E;
G=pex|dep(4)|ba(R,360/(2*m),Q,A/(2*n))|F;
Dome=dil(3,V)|G;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,100000*Q,Q, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۲۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 121:  Onion dome.
  See Section 3.4 of Reference 3. (*)
R=10;     (*) First radius (*)
Q=50;     (*) Second radius (*)
B=20;     (*) Base angle (*)
m=18;  (*) Number of rhombi along U2 (*)
n=8;     (*) Number of rhombi along U3 (*)
V=2.5;  (*) Vertical scale factor (*)
A=acos|(R/Q)+B;     (*) Sweep angle (*)
P=asin|(R/Q);          (*) Position angle (*)
E=rinic(2,4,m,n,2,-2)|lamic(2,4,1,-1)|
  [1,1,1,0; 1,0,1,-1]#rin(2,m,2)|
  [1,1,1,-2*n; 1,3,1,-2*n];
F=tran(4,-2*n*P/A)|E;
G=pex|dep(4)|ba(R,360/(2*m),Q,A/(2*n))|F;
Dome=dil(3,V)|G;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,100000*Q,Q, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۲۲

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 122:  Onion dome.
  See Section 3.4 of Reference 3. (*)
R=10;     (*) First radius (*)
Q=65;     (*) Second radius (*)
B=60;     (*) Base angle (*)
m=20;  (*) Number of rhombi along U2 (*)
n=8;     (*) Number of rhombi along U3 (*)
V=2.5;  (*) Vertical scale factor (*)
A=acos|(R/Q)+B;     (*) Sweep angle (*)
P=asin|(R/Q);          (*) Position angle (*)
E=rinic(2,4,m,n,2,-2)|lamic(2,4,1,-1)|
  [1,1,1,0; 1,0,1,-1]#rin(2,m,2)|
  [1,1,1,-2*n; 1,3,1,-2*n];
F=tran(4,-2*n*P/A)|E;
G=pex|dep(4)|ba(R,360/(2*m),Q,A/(2*n))|F;
Dome=dil(3,V)|G;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,100000*Q,Q, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۲۳

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 123:  Onion dome.
  See Section 3.4 of Reference 3. (*)
R=10;     (*) First radius (*)
Q=50;     (*) Second radius (*)
B=40;     (*) Base angle (*)
m=24;   (*) Number of rhombi along U2 (*)
n=8;      (*) Number of rhombi along U3 (*)
V=0.5;  (*) Vertical scale factor (*)
A=acos|(R/Q)+B;      (*) Sweep angle (*)
P=asin|(R/Q);          (*) Position angle (*)
E=rinic(2,4,m,n,2,-2)|lamic(2,4,1,-1)|
  [1,1,1,0; 1,0,1,-1]#rin(2,m,2)|
  [1,1,1,-2*n; 1,3,1,-2*n];
F=tran(4,-2*n*P/A)|E;
G=pex|dep(4)|ba(R,360/(2*m),Q,A/(2*n))|F;
Dome=dil(3,V)|G;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,100000*Q,Q, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۲۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 124: Upcurved mallow
  dome. See Section 3.2 of Reference 3. (*)
L=40;       (*) Span of dome (*)
C=20;      (*) Central height (*)
P=0.04;    (*) Pitch (*)
T=-1;      (*) Curving style coefficient (*)
m=7;       (*) Frequency (*)
n=7;       (*) Number of sectors (*)
B=360/(2*n);
D=sqrt|(cos|B^2*L*L/4+C*C);
      (*)  D must be lager than C  (*)
A=acos|(C/D);   S=D/m;
W=D*sin|A*tan|B;   K=W/m;
E1=genid(1,m,2,S,-1,1)|{[0,0,0; -1,S,0],
  [0,0,0; 1,S,0], [-1,S,0; 1,S,0]};
E2=verat(0,0,A-90)|E1;
E3=dil(1,K)|E2;
E4=verad(0,0,T*45)|E3;
F=bhp(1,1,1,P)|E4;
Dome=pex|rosad(0,0,n,360/n)|F;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(L,L,1.3*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۲۵

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 125:  Upcurved mallow
  dome. See Section 3.2 of Reference 3. (*)
L=40;       (*) Span of dome (*)
C=6;        (*) Central height (*)
P=0.04;     (*) Pitch (*)
T=-1;       (*) Curving style coefficient (*)
m=9;        (*) Frequency (*)
n=3;        (*) Number of sectors (*)
B=360/(2*n);
D=sqrt|(cos|B^2*L*L/4+C*C);
      (*)  D must be lager than C  (*)
A=acos|(C/D);   S=D/m;
W=D*sin|A*tan|B;   K=W/m;
E1=genid(1,m,2,S,-1,1)|{[0,0,0; -1,S,0],
  [0,0,0; 1,S,0], [-1,S,0; 1,S,0]};
E2=verat(0,0,A-90)|E1;
E3=dil(1,K)|E2;
E4=verad(0,0,T*45)|E3;
F=bhp(1,1,1,P)|E4;
Dome=pex|rosad(0,0,n,360/n)|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(L,L,2*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۲۶

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 126:  Upcurved mallow
  dome. See Section 3.2 of Reference 3. (*)
L=36;       (*) Span of dome (*)
C=20;       (*) Central height (*)
P=0.05;     (*) Pitch (*)
T=-1;       (*) Curving style coefficient (*)
m=7;        (*) Frequency (*)
n=10;       (*) Number of sectors (*)
B=360/(2*n);
D=sqrt|(cos|B^2*L*L/4+C*C);
      (*)  D must be lager than C  (*)
A=acos|(C/D);   S=D/m;
W=D*sin|A*tan|B;   K=W/m;
E1=genid(1,m,2,S,-1,1)|{[0,0,0; -1,S,0],
  [0,0,0; 1,S,0], [-1,S,0; 1,S,0]};
E2=verat(0,0,A-90)|E1;
E3=dil(1,K)|E2;
E4=verad(0,0,T*45)|E3;
F=bhp(1,1,1,P)|E4;
Dome=pex|rosad(0,0,n,360/n)|F;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(L,L,1.7*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۲۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 127:  Downcurved mallow
  dome. See Section 3.2 of Reference 3. (*)
L=36;       (*) Span of dome (*)
C=1.5;      (*) Central height (*)
P=0.03;     (*) Pitch (*)
T=1;        (*) Curving style coefficient (*)
m=7;        (*) Frequency (*)
n=8;        (*) Number of sectors (*)
B=360/(2*n);
D=sqrt|(cos|B^2*L*L/4+C*C);
      (*)  D must be lager than C  (*)
A=acos|(C/D);   S=D/m;
W=D*sin|A*tan|B;   K=W/m;
E1=genid(1,m,2,S,-1,1)|{[0,0,0; -1,S,0],
  [0,0,0; 1,S,0], [-1,S,0; 1,S,0]};
E2=verat(0,0,A-90)|E1;
E3=dil(1,K)|E2;
E4=verad(0,0,T*45)|E3;
F=bhp(1,1,1,P)|E4;
Dome=pex|rosad(0,0,n,360/n)|F;
use &,vm(2),vt(2),vh(L,L,2*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۱۲۸ و ۱۲۹

```
 (*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 128 (n=4) and Fig 129 (n=3):
  Downcurved mallow dome.
  See Section 3.2 of Reference 3. (*)
L=36;       (*) Span of dome (*)
C=4.5;      (*) Central height (*)
P=0.03;     (*) Pitch (*)
T=1;        (*) Curving style coefficient (*)
m=8;        (*) Frequency (*)
n=4;        (*) Number of sectors (*)
B=360/(2*n);
D=sqrt|(cos|B^2*L*L/4+C*C);
     (*)  D must be lager than C  (*)
A=acos|(C/D);   S=D/m;
W=D*sin|A*tan|B;   K=W/m;
E1=genid(1,m,2,S,-1,1)|{[0,0,0; -1,S,0],
  [0,0,0; 1,S,0], [-1,S,0; 1,S,0]};
E2=verat(0,0,A-90)|E1;
E3=dil(1,K)|E2;
E4=verad(0,0,T*45)|E3;
F=bhp(1,1,1,P)|E4;
Dome=pex|rosad(0,0,n,360/n)|F;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(L,3*L,6*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۳۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 130:  Pellevated dome
  (spherical) with binate pattern.
  See References 4, 5 and 6. (*)
L1=25;  (*) Length in U1 direction (*)
L2=25;  (*) Length in U2 direction (*)
m=12;   (*) Frequency in U1 direction (*)
n=12;   (*) Frequency in U2 direction (*)
S=sqrt|(L1^2+L2^2);
                (*) Span of pellevant (*)
R=0.3*S;        (*) Rise of pellevant (*)
E=rinid(m,n+1,1,1)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(m+1,n,1,1)|[0,0,0; 0,1,0];
Grid=bb(L1/m,L2/n)|E;
Dome=capel(1,L1/2,L2/2,S,R)|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۳۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 131:  Pellevated dome
  (parabolic) with obnate pattern.
  See References 4, 5 and 6. (*)
L1=25;  (*) Length in U1 direction (*)
L2=25;  (*) Length in U2 direction (*)
m=7;    (*) Frequency of crosses
                    in U1 direction (*)
n=7;    (*) Frequency of crosses
                    in U2 direction (*)
S=sqrt|(L1^2+L2^2);
                (*) Span of pellevant (*)
R=0.35*S;       (*) Rise of pellevant (*)
E=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,0]#
  rinid(m,2,2,2*n)|[0,0,0; 2,0,0]#
  rinid(2,n,2*m,2)|[0,0,0; 0,2,0];
Grid=bb(L1/(2*m),L2/(2*n))|E;
Dome=capel(3,L1/2,L2/2,S,R)|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۳۲

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 132:  Compound pellevated
  dome (parabolic) with obnate pattern.
  See References 4, 5 and 6. (*)
L1=25;  (*) Length in U1 direction (*)
L2=25;  (*) Length in U2 direction (*)
m=6;    (*) Frequency of crosses
                    in U1 direction (*)
n=6;    (*) Frequency of crosses
                    in U2 direction (*)
S=sqrt|(L1^2+L2^2);
              (*) Span of pellevant (*)
R=0.25*S;     (*) Rise of pellevant (*)
E=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,0; 1,1,0]#
  rinid(m,2,2,2*n)|[0,0,0; 2,0,0]#
  rinid(2,n,2*m,2)|[0,0,0; 0,2,0];
Grid=bb(L1/(2*m),L2/(2*n))|E;
D=capel(3,L1/2,L2/2,S,R)|Grid;
Dome=pex|rinid(2,2,L1,L2)|D;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,3*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۳۳

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 133:  Pellevated dome
  (conical) with ternate pattern.
  See References 4, 5 and 6. (*)
L=24;  (*) Length of each side of dome (*)
m=12;  (*) Frequency (*)
Grid=bb(L/(2*m),L*(sqrt|3)/(2*m))|
  genid(m,m,2,1,1,-1)|{[0,0,0; 2,0,0],
  [1,1,0; 0,0,0], [1,1,0; 2,0,0]};
Dome=capel(4,L/2,S/4,S,R)|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(L/2,-L,2*L,
  L/2,L/2,0, L/2,L/2,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۳۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 134:  Pellevated sectorate
  dome (parabolic).
  See References 4, 5 and 6. (*)
S=40;       (*) Span of dome (*)
H=10;       (*) Rise (*)
m=7;        (*) Frequency (*)
n=6;        (*) Number of sides (*)
nn=180/n;   L=S*sin|nn;
E=genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
F=bt(L/(2*m),L/(2*m*tan|nn),1)|E;
Base=pex|rosad(0,0,n,360/n)|F;
Dome=capel(3,0,0,S,H)|Base;
use &,vm(2),vt(2),vh(0,S,2*S, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۱۳۵ و ۱۳۶

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 135 (n=5) and Fig 136 (n=6):
  Pellevated sectorate dome (spherical) with
  ternate/hexagonal pattern.
  See References 4, 5 and 6. (*)
L=20;  (*) Length of each side of the grid (*)
m=11;  (*) Frequency of the original ternate
   grid, m must be a multiple of 3 minus 1(*)
n=5;    (*) Number of sides (*)
S=L/(sin|(360/(2*n)));
                  (*) Span of pellevant (*)
R=0.25*S;         (*) Rise of pellevant (*)
q=ric|((m+1)/3);
E=[-1,1,0; 1,1,0]#lam(1,0)|{[-1,1,0; 0,2,0],
  [-2,2,0; 0,2,0]};
F=genid(1,q,6,3,-3,1)|E#
  genid(1,q-1,6,3,-3,1)|(lamid(0,3)|lam(1,-1)|
  [-2,2,0; -1,3,0]#ref(2,3)|E);
Grid=rosad(0,0,n,360/n)|bb(L/(2*m),
  L/(2*m*tan|(180/n)))|F;
Dome=capel(1,0,0,S,R)|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(0,-2*L,4*L,
  0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۳۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 137:  Pellevated sectorate
  dome (parabolic) with honeycomb pattern.
  See References 4, 5 and 6. (*)
L=20;  (*) Length of each side of the grid (*)
m=9;   (*) Frequency of the original ternate
           grid, m must be a multiple of 3 (*)
n=8;   (*) Number of sides (*)
S=L/(sin|(360/(2*n)));
                  (*) Span of pellevant (*)
R=0.35*S;        (*) Rise of pellevant (*)
E=genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
RN=genid(1,((m/3)+1),6,3,-3,1)|[0,0,0]#
  genid(1,m/3,6,3,-3,1)|[0,2,0]#
  genid(1,((m/3)-1),6,3,-3,1)|[0,4,0];
Grid=pex|rosad(0,0,n,360/n)|bb(L/(2*m),
  L/(2*m*tan|(180/n)))|lux(RN)|E;
Dome=capel(3,0,0,S,R)|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(0,-2*L,5*L,
  0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۳۸

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 138:  Pellevated sectorate
  dome (tri-spherical). See References
  4, 5 and 6. (*)
S=40;      (*) Span of dome (*)
H=4;       (*) Rise (*)
m=7;       (*) Frequency (*)
n=6;       (*) Number of sides (*)
nn=180/n;  L=S*sin|nn;
E=genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
F=bt(L/(2*m),L/(2*m*tan|nn),1)|E;
Base=pex|rosad(0,0,n,360/n)|F;
Dome=capel(1,S*sin|nn/4,S*cos|nn/4,S,H)|
  capel(1,S*sin|nn/4,-S*cos|nn/4,S,H)|
  capel(1,-S*sin|nn/4,-S*cos|nn/4,S,H)|Base;
use &,vm(2),vt(2),vh(0,S,S, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۳۹

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 139:  Pellevated dome
conical). See References +    (parabolic
  4, 5 and 6. (*)
S=40;     (*) Span of dome (*)
H1=6;     (*) Rise of the paraboloid (*)
H2=4;     (*) Rise of the cone (*)
m=6;      (*) Frequency (*)
n=8;      (*) Number of sides (*)
nn=180/n;   L=S*sin|nn;
E=genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
F=bt(L/(2*m),L/(2*m*tan|nn),1)|E;
Base=pex|rosad(0,0,n,360/n)|F;
Dome=capel(3,0,0,S,H1)|
  capel(4,0,0,S,H2)|Base;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(S,0,1.4*S, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۴۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 140:  Pellevated double layer
  dome (spherical). See References
  4, 5 and 6. (*)
L1=20;    (*) Length in U1 direction (*)
L2=20;    (*) Length in U2 direction (*)
D=1.5;    (*) Depth in U3 direction (*)
H=6;      (*) Rise of dome (*)
m=6;   (*) Frequency in U1 direction (*)
n=6;   (*) Frequency in U2 direction (*)
T=rinid(m,n+1,2,2)|[0,0,1; 2,0,1]#
  rinid(m+1,n,2,2)|[0,0,1; 0,2,1];
B=rinid(m-1,n,2,2)|[1,1,0; 3,1,0]#
  rinid(m,n-1,2,2)|[1,1,0; 1,3,0];
W=rinid(m,n,2,2)|lamid(1,1)|[0,0,1; 1,1,0];
G=bt(L1/(2*m),L2/(2*n),D)|(T#B#W);
Dome=capel(1,L1/2,L2/2,
  sqrt|(L1^2+L2^2),H)|G;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2/2,2*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۴۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 141:  Pellevated double layer
  dome (parabolic): See References
  4, 5 and 6. (*)
L=20;    (*) Length of each side in plan (*)
H=8;     (*) Rise of dome (*)
D=2.15; (*) Depth of grid (*)
m=3;     (*) Frequency of top layer (*)
n=8;     (*) Number of sides (*)
S=L/tan|(180/n);  (*) Span (*)
ET=genid(1,m,2,3,-1,1)|{[0,0,0; -1,3,0],
[0,0,0; 1,3,0], [-1,3,0; 1,3,0]};
EB=genid(1,m-1,2,3,-1,1)|{[0,2,-1; -1,5,-1],
[0,2,-1; 1,5,-1], [-1,5,-1; 1,5,-1]};
EW=genid(1,m,2,3,-1,1)|{[0,0,0; 0,2,-1],
[-1,3,0; 0,2,-1], [1,3,0; 0,2,-1]};
E=bt(L/(2*m),S/(6*m),D)|(ET#EB#EW);
Qi=[0,2,-1];   Ri=bt(L/(2*m),S/(6*m),D)|Qi;
Rj=verad(0,0,360/n)|Ri;   K1=tig|(Ri#Rj);
K2=rinad(0,0,-L/(2*m),S/(2*m),m)|K1;
Grid=pex|rosad(0,0,n,360/n)|(E#K2);
Dome=capel(3,0,0,S,H)|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(0,S,2*S, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۴۲

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 142:  Geodesic dome,
  based on top 5 faces of icosahedron.
  See References 7 and 8. (*)
S=60;   (*) Span (*)
m=7;    (*) Frequency of subdivision (*)
R=sqrt|(10+2*sqrt|5)*sin|36*S/4;
E=pol(1,5,'[1-5]',R,[0,0; 2*m,0])|
  dil(2,sqrt|3)|genid(m,m,2,1,1,-1)|
  {[0,0; 2,0], [0,0; 1,1], [2,0; 1,1]};
Dome=trac(1,[0,0,0,R],4,-15)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(S,S,3*S, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۴۳

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 143:  Geodesic dome,
  based on top 5 faces of icosahedron.
  See References 7 and 8. (*)
S=60;  (*) Span (*)
m=12;  (*) Frequency,
           m must be divisible by 3 (*)
mm=m/3-1;
R=sqrt|(10+2*sqrt|5)*sin|36*S/4;
E=genid(m,m,2,1,1,-1)|{[0,0; 2,0],
  [0,0; 1,1], [2,0; 1,1]};
E=lux(genid(mm,mm,6,3,3,-1)|[6,2])|E;
G=pol(1,5,'[1-5]',R,[0,0; 2*m,0])|
  dil(2,sqrt|3)|E;
Dome=trac(1,[0,0,0,R],4,-15)|G;
use &,vm(2),vt(2),vh(S,S,3*S, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۴۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 144:  Geodesic dome,
  based on top 5 faces of icosahedron.
  See References 7 and 8. (*)
S=60;  (*) Span (*)
m=14;  (*) Frequency, m must be even (*)
p=tic|(m/2)+1;
R=sqrt|(10+2*sqrt|5)*sin|36*S/4;
E=genid(m,m,2,1,1,-1)|{[0,0; 2,0],
  [0,0; 1,1], [2,0; 1,1]};
C=genid(p,p,4,2,2,-1)|[0,0];
G=pol(1,5,'[1-5]',R,[0,0; 2*m,0])|
  dil(2,sqrt|3)|lux(C)|E;
Dome=trac(1,[0,0,0,R],4,-15)|G;
use &,vm(2),vt(2),vh(S,S,3*S, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۴۵

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 145:  Geodesic dome,
  based on top 5 faces of icosahedron.
  See References 7 and 8. (*)
S=60;   (*) Span (*)
m=14;   (*) Frequency,
          m must be 5 plus a multiple of 3 (*)
p=(m-2)/3;
R=sqrt|(10+2*sqrt|5)*sin|36*S/4;
E=genid(m,m,2,1,1,-1)|{[0,0; 2,0],
  [0,0; 1,1], [2,0; 1,1]};
C=[0,0]#[2*m,0]#genid(p,p,6,3,3,-1)|
  [5,1]#genid(p+1,p+1,6,3,3,-1)|
  {[2,0], [2,2]};
G=pol(1,5,'[1-5]',R,[0,0; 2*m,0])|
  dil(2,sqrt|3)|lux(C)|E;
Dome=trac(1,[0,0,0,R],4,-15)|G;
use &,vm(2),vt(2),vh(S,S,3*S, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۴۶

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 146:  Geodesic dome of
  Fig 145, scaled vertically to make it
  ellipsoidal. See References 7 and 8. (*)
S=60;   (*) Span (*)
m=14;   (*) Frequency,
          m must be 5 plus a multiple of 3 (*)
f=1.75;    (*) Scale factor (*)
p=(m-2)/3;
R=sqrt|(10+2*sqrt|5)*sin|36*S/4;
E=genid(m,m,2,1,1,-1)|{[0,0; 2,0],
  [0,0; 1,1], [2,0; 1,1]};
C=[0,0]#[2*m,0]#genid(p,p,6,3,3,-1)|
  [5,1]#genid(p+1,p+1,6,3,3,-1)|
  {[2,0], [2,2]};
G=pol(1,5,'[1-5]',R,[0,0; 2*m,0])|
  dil(2,sqrt|3)|lux(C)|E;
Dome=dil(3,f)|trac(1,[0,0,0,R],4,-15)|G;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,100000*S,0, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۴۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 147:  Geodesic dome of
  Fig 145, pellevated to add a conical
  effect. See References 7 and 8. (*)
S=60;   (*) Span (*)
H=12;   (*) Pellevational rise (*)
m=14;   (*) Frequency,
        m must be 5 plus a multiple of 3 (*)
p=(m-2)/3;
R=sqrt|(10+2*sqrt|5)*sin|36*S/4;
E=genid(m,m,2,1,1,-1)|{[0,0; 2,0],
  [0,0; 1,1], [2,0; 1,1]};
C=[0,0]#[2*m,0]#genid(p,p,6,3,3,-1)|[5,1]#
  genid(p+1,p+1,6,3,3,-1)|{[2,0], [2,2]};
G=pol(1,5,'[1-5]',R,[0,0; 2*m,0])|
  dil(2,sqrt|3)|lux(C)|E;
D=trac(1,[0,0,0,R],4,-15)|G;
Dome=capel(4,0,0,S,H)|D;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,100000*S,0, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۱۴۸ و ۱۴۹

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Figs 148 (P=2) and 149
  (P=4):  Novated dome with binate
  pattern and edges held in position
  (novation mode 3 is used).
  See References 9, 10 and 11. (*)
L1=45;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=45;   (*) Length in U2 direction (*)
m=18;    (*) Frequency in U1 direction (*)
n=18;    (*) Frequency in U2 direction (*)
Sh=11;   (*) Specifed height (*)
P=2;     (*) Position specifier (*)
Sb=[L1/P,L2/P,0];   (*) Specified base (*)
St=[L1/P,L2/P,Sh];  (*) Specified target (*)
E=rinid(m,n+1,1,1)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(m+1,n,1,1)|[0,0,0; 0,1,0];
Grid=bb(L1/m,L2/n)|E;
Edge=bb(L1/m,L2/n)|(rinid(m+1,2,1,n)|
  [0,0,0]#rinid(2,n-1,m,1)|[0,1,0]);
Dome=nov(3,1,Edge#Sb,Edge#St)|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,1.5*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۵۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 150:  Novated dome with
  binate pattern and edges held in position
  (novation mode 2 is used).
  See References 9, 10 and 11. (*)
L1=45;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=45;   (*) Length in U2 direction (*)
m=18;    (*) Frequency in U1 direction (*)
n=18;    (*) Frequency in U2 direction (*)
Sh=12;   (*) Specifed height (*)
Sb=[L1/2,L2/2,0];   (*) Specified base (*)
St=[L1/2,L2/2,Sh];  (*) Specified target (*)
E=rinid(m,n+1,1,1)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(m+1,n,1,1)|[0,0,0; 0,1,0];
Grid=bb(L1/m,L2/n)|E;
Edge=bb(L1/m,L2/n)|(rinid(m+1,2,1,n)|
  [0,0,0]#rinid(2,n-1,m,1)|[0,1,0]);
Dome=nov(2,1,Edge#Sb,Edge#St)|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,1.5*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۵۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 151:  Novated dome
  with binate pattern, four raised points and
  edges held in position (novation mode 3 is
  used). See References 9, 10 and 11. (*)
L1=45;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=45;   (*) Length in U2 direction (*)
m=18;    (*) Frequency in U1 direction (*)
n=18;    (*) Frequency in U2 direction (*)
Sh=5;    (*) Specifed height (*)
Sb=rinid(2,2,L1/2,L2/2)|[L1/4,L2/4,0];
St=proj(3,Sh)|Sb;
E=rinid(m,n+1,1,1)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(m+1,n,1,1)|[0,0,0; 0,1,0];
Grid=bb(L1/m,L2/n)|E;
Edge=bb(L1/m,L2/n)|(rinid(m+1,2,1,n)|
  [0,0,0]#rinid(2,n-1,m,1)|[0,1,0]);
Dome=nov(3,1,Edge#Sb,Edge#St)|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,1.5*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۱۵۲، ۱۵۳ و ۱۵۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Figs 152 (n=4), 153 (n=5)
  and 154 (n=6):  Sectorate novated dome
  with ternate pattern, a central raised point
  and with corners held in position.
  See References 9, 10 and 11. (*)
L=30;  (*) Length of each side (*)
m=7;   (*) Frequency (*)
n=4;   (*) Number of sides (*)
Sh=7;  (*) Specified height (*)
E=bb(L/(2*m),L/(2*m*tan|(180/n)))|
  genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
Grid=pex|rosad(0,0,n,360/n)|E;
Corner=rosad(0,0,n,360/n)|bb(L/(2*m),
  L/(2*m*tan|(180/n)))|[m,m,0];
Dome=nov(3,1,Corner#[0,0,0],
  Corner#[0,0,Sh])|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(0,-2*L,1.5*L,
  0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۵۵

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 155:  Novated dome with
  ternate pattern and triangular boundary
  and with a central raised point and corners
  held in position.
  See References 9, 10 and 11. (*)
L=36;   (*) Length of each side (*)
m=12;   (*) Frequency (*)
Sh=L/7;  (*) Specifed height (*)
s=L*(sqrt|3)/2;
Corner=rosad(L/2,s/3,3,120)|[0,0,0];
Grid=bb(L/(2*m),s/m)|
  genid(m,m,2,1,1,-1)|{[0,0,0; 2,0,0],
  [1,1,0; 0,0,0], [1,1,0; 2,0,0]};
Dome=nov(3,1,Corner#[L/2,s/3,0],Corner#
  [L/2,s/3,Sh])|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(L/2,-L,L,
  L/2,L/2,0, L/2,L/2,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۵۶

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 156:  Novated dome
  with binate pattern, a number of raised
  points and with edges held in position.
  See References 9, 10 and 11. (*)
L1=45;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=45;   (*) Length in U2 direction (*)
m=27;    (*) Frequency in U1 direction,
             must be a multiple of 3 (*)
n=27;    (*) Frequency in U2 direction,
             must be a multiple of 3 (*)
m1=m/3;  n1=n/3;
Sh=3.5;  (*) Specifed height (*)
Sb=bb(L1/m,L2/n)|(rinid(2*m1+1,2,1,2*n1)|
  [m1/2,n1/2,0]#rinid(2,2*n1-1,2*m1,1)|
  [m1/2,1+n1/2,0]);
E=rinid(m,n+1,1,1)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(m+1,n,1,1)|[0,0,0; 0,1,0];
E=lux(rinid(m1-1,n1-1,1,1)|[m1+1,n1+1,0])|E;
Grid=bb(L1/m,L2/n)|E;
Edge=bb(L1/m,L2/n)|(rinid(m+1,2,1,n)|
  [0,0,0]#rinid(2,n-1,m,1)|[0,1,0]#
  rinid(m1+1,2,1,n1)|[m1,n1,0]#
  rinid(2,n1-1,m1,1)|[m1,n1+1,0]);
Dome=nov(3,1,Edge#Sb,Edge#
  proj(3,Sh)|Sb)|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,2*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۱۵۷ و ۱۵۸

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Figs 157 (n=5) and 158
  (n=6):  Sectorate novated dome with
  ternate pattern, n raised points and with
  outside corners and inside edges held in
  position. See References 9, 10 and 11. (*)
L=30;   (*) Length of each side (*)
m=9;    (*) Frequency (*)
n=5;    (*) Number of sides (*)
Sh=2.5; (*) Specified height (*)
Sb=rosad(0,0,n,360/n)|bb(L/(2*m),
  L/(2*m*tan|(180/n)))|[m/2,m/2,0];
E=bb(L/(2*m),L/(2*m*tan|(180/n)))|
  lux({[0,0,0], [1,1,0], [-1,1,0]})|
 genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
Grid=pex|rosad(0,0,n,360/n)|E;
Corner=rosad(0,0,n,360/n)|bb(L/(2*m),
  L/(2*m*tan|(180/n)))|
  {[m,m,0], [2,2,0], [0,2,0]};
Dome=nov(3,1,Corner#Sb,
  Corner#proj(3,Sh)|Sb)|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(0,-2*L,1.5*L,
```

```
  0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۵۹

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 159:  Novated dome
  with binate pattern, three raised points
  and edges held in position.
  See References 9, 10 and 11. (*)
L1=45;   (*) Length in U1 direction (*)
L2=45;   (*) Length in U2 direction (*)
m=24;    (*) Frequency in U1 direction,
             must be a multiple of 3 (*)
n=24;    (*) Frequency in U2 direction,
             must be a multiple of 3 (*)
Sh=6;    (*) Specifed height (*)
m1=m/3;  n1=n/3;  L11=L1/3;  L21=L2/3;
Sb={[L11,2*L21,0], [2*L11,2*L21,0],
  [2*L11,L21,0]};
E=rinid(m,n+1,1,1)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(m+1,n,1,1)|[0,0,0; 0,1,0];
E=lux(rinid(m1+1,n1+1,1,1)|[0,0,0])|E;
Grid=bb(L1/m,L2/n)|E;
Edge=bb(L1/m,L2/n)|
  (rinid(m1+1,2,1,2*n1-1)|
  [0,n1+1,0]#rinid(2*m1,2,1,n)|[m1+1,0,0]#
  rinid(2,n1+1,2*m1-1,1)|[m1+1,1,0]#
  rinid(2,2*m1-2,m,1)|[0,n1+2,0]);
Dome=nov(3,1,Edge#Sb,Edge#
  proj(3,Sh)|Sb)|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(L1/2,-L2,1.5*L2,
  L1/2,L2/2,0, L1/2,L2/2,1);
clear;  draw Dome;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۶۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 160:  Barrel-dome.
  See Section 3.5 of Reference 3. (*)
S=40; (*) Span of barrel vault
                and the semi-domes (*)
H=12; (*) Rise of barrel vault
                and the semi domes (*)
L=32; (*) Length of barrel vault (*)
m=6;  (*) Frequency of the semi-domes (*)
n=8;   (*) Frequency along the
    length of barrel vault, n must be even (*)
p=3;  (*) Number of sectors of
                    each semi-dome (*)
A=2*atan|(2*H/S);    (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);       (*) Circumradius (*)
E=rinit(2*m+1,n,1,1)|[1,0,0; 1,0,1]#
  rinit(2*m,n-1,1,1)|[1,0,1; 1,1,1]#
  lamit(m,n/2)|rinit(m,n/2,1,1)|
  [1,1,0; 1,0,1];
B=verad(0,0,90-A)|bc(R,A/m,L/n)|E;
F=bd(R,180/p,A/m)|genit(1,m,1,1,0,1)|
  {[1,0,0; 1,0,1], [1,0,0; 1,1,1],
  [1,0,1; 1,1,1]};
D=pex|rosad(0,0,p,180/p)|F;
Domes=lam(2,-L/2)|D;
Barrel=verat(0,0)|B;
Bard=Barrel#Domes;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(2*R,2*R,8*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Bard;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۶۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 161:  Barrel-dome.
  See Section 3.5 of Reference 3. (*)
S=35; (*) Span of barrel vault
                  and the semi-domes (*)
H=10; (*) Rise of barrel vault
                  and the semi domes (*)
L=20; (*) Length of barrel vault (*)
m=6;  (*) Frequency of the semi-domes (*)
n=6;  (*) Frequency along the length of
           barrel vault, n must be even (*)
p=3;  (*) Number of sectors of
                    each semi-dome (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);      (*) Circumradius (*)
E=rinit(2*m+1,n,1,1)|[1,0,0; 1,0,1]#
  rinit(2*m,n-1,1,1)|[1,0,1; 1,1,1]#
  lamit(m,n/2)|rinit(m,n/2,1,1)|
  [1,0,0; 1,1,1];
B=verad(0,0,90-A)|bc(R,A/m,L/n)|E;
F=bd(R,180/p,A/m)|genit(1,m,1,1,0,1)|
  {[1,0,0; 1,0,1], [1,0,0; 1,1,1],
  [1,0,1; 1,1,1]};
D=pex|rosad(0,0,p,180/p)|F;
Domes=lam(2,-L/2)|D;
Barrel=verat(0,0)|B;
Bard=Barrel#Domes;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(2*R,2*R,8*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Bard;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۶۲

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 162:  Barrel-dome.
  See Section 3.5 of Reference 3. (*)
S=35; (*) Span of barrel vault
                  and the semi-domes (*)
H=10; (*) Rise of barrel vault
                   and the semi domes (*)
L=25;  (*) Length of barrel vault (*)
m=6;   (*) Frequency of the semi-domes (*)
n=8;   (*) Frequency along the length
           of barrel vault, n must be even (*)
p=3;   (*) Number of sectors of
                        each semi-dome (*)
A=2*atan|(2*H/S);     (*) Sweep angle (*)
R=S/(2*sin|A);        (*) Circumradius (*)
E=rinit(2*m+1,n,1,1)|[1,0,0; 1,0,1]#
  rinit(2*m,n-1,1,1)|[1,0,1; 1,1,1]#
  lamit(m,n/2)|rinit(m,n/2,1,2)|
  lam(3,1)|[1,1,0; 1,0,1];
E=lux(rin(3,n/2,2)|[1,m,1])|E;
B=verad(0,0,90-A)|bc(R,A/m,L/n)|E;
F=bd(R,180/p,A/m)|genit(1,m,1,1,0,1)|
  {[1,0,0; 1,0,1], [1,0,0; 1,1,1],
  [1,0,1; 1,1,1]};
D=pex|rosad(0,0,p,180/p)|F;
Domes=lam(2,-L/2)|D;
Barrel=verat(0,0)|B;
Bard=Barrel#Domes;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(2*R,2*R,8*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Bard;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۶۳

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 163:  Barrel-dome.
  See Section 3.5 of Reference 3. (*)
S=35;  (*) Span of barrel vault
                    and the semi-domes (*)
H=10;  (*) Rise of barrel vault
                     and the semi domes (*)
T=45;  (*) Central angle
              containing the barrel vault (*)
R=60;  (*) Radius of annulus (*)
f=5;    (*) Frequency of the semi-domes (*)
m=10;  (*) Frequency along the length
            of barrel vault, m must be even (*)
p=3;   (*) Number of sectors of
                         each semi-dome (*)
A=2*atan|(2*H/S);     (*) Sweep angle (*)
Q=S/(2*sin|A);          (*) Radius of
                 cross-section of annulus (*)
E=rinic(2,4,m,2*f+1,1,1)|[1,0,1,-f;
  1,1,1,-f]#rinic(2,4,m+1,2*f,1,1)|
  [1,0,1,-f; 1,0,1,1-f]#
  lamic(2,4,ric|(m/2),0)|rinic(2,4,ric|
  (m/2),f,1,1)|[1,0,1,0; 1,1,1,1];
Barrel=dep(4)|ba(R,T/m,Q,A/f)|E;
F=bd(Q,180/p,A/f)|genit(1,f,1,1,0,1)|
  {[1,0,0; 1,0,1], [1,0,0; 1,1,1],
  [1,0,1; 1,1,1]};
D=tran(1,R)|rosad(0,0,p,180/p)|F;
Domes=ref(2,0)|D#verad(0,0,T)|D;
Bard=pex|(Barrel#Domes);
use &,vm(2),vt(2),
  vh(2*S,4*S,6*S, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Bard;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۶۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 164:  Barrel-dome.
  See Section 3.5 of Reference 3. (*)
S=35;  (*) Span of barrel vault
                  and the semi-domes (*)
H=10;  (*) Rise of barrel vault
                   and the semi domes (*)
T=90;  (*) Central angle
             containing the barrel vault (*)
R=60; (*) Radius of annulus (*)
f=5;    (*) Frequency of the semi-domes (*)
m=20;  (*) Frequency along the length
           of barrel vault, m must be even (*)
p=3;   (*) Number of sectors of
                       each semi-dome (*)
A=2*atan|(2*H/S);     (*) Sweep angle (*)
Q=S/(2*sin|A);          (*) Radius of
                cross-section of annulus (*)
E=rinic(2,4,m,2*f+1,1,1)|[1,0,1,-f;
  1,1,1,-f]#rinic(2,4,m+1,2*f,1,1)|
  [1,0,1,-f; 1,0,1,1-f]#
  lamic(2,4,ric|(m/2),0)|rinic(2,4,ric|
  (m/2),f,1,1)|[1,1,1,0; 1,0,1,1];
Barrel=dep(4)|ba(R,T/m,Q,A/f)|E;
F=bd(Q,180/p,A/f)|genit(1,f,1,1,0,1)|
  {[1,0,0; 1,0,1], [1,0,0; 1,1,1],
  [1,0,1; 1,1,1]};
D=tran(1,R)|rosad(0,0,p,180/p)|F;
Domes=ref(2,0)|D#verad(0,0,T)|D;
Bard=pex|(Barrel#Domes);
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,-2*S,8*S, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Bard;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۶۵

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 165:  Barrel-dome.
  See Section 3.5 of Reference 3. (*)
S=35;  (*) Span of barrel vault
                    and the semi-domes (*)
H=10;  (*) Rise of barrel vault
                     and the semi domes (*)
T=25;  (*) Central angle
           containing half the barrel vault (*)
R=60; (*) Radius of annulus (*)
f=5;    (*) Frequency of the semi-domes (*)
m=6;  (*) Frequency along
             half the length of barrel vault (*)
p=3;   (*) Number of sectors of
                         each semi-dome (*)
A=2*atan|(2*H/S);      (*) Sweep angle (*)
Q=S/(2*sin|A);          (*) Radius of
                  cross-section of annulus (*)
E=rinic(2,4,m,2*f+1,1,1)|[1,0,1,-f;
  1,1,1,-f]#rinic(2,4,m+1,2*f,1,1)|
  [1,0,1,-f; 1,0,1,1-f]#
  lam(4,0)|rinic(2,4,m,f,1,1)|
  [1,0,1,0; 1,1,1,1];
B=dep(4)|ba(R,T/m,Q,A/f)|E;
F=bd(Q,180/p,A/f)|genit(1,f,1,1,0,1)|
  {[1,0,0; 1,0,1], [1,0,0; 1,1,1],
  [1,0,1; 1,1,1]};
D=tran(1,R)|rosad(0,0,p,180/p)|F;
BD=B#verad(0,0,T)|D;
Bard=pex|(BD#verad(R,0,180)|BD);
use &,vm(2),vt(2),
  vh(3*S,4*S,8*S, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Bard;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۱۶۶ و ۱۶۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 166 (H=3) and Fig 167
  (H=12):  Simple hypar.  See Section 3.2
  of Reference 3. (*)
L=20;    (*) Length of side in plan (*)
H=3;      (*) Height (*)
m=6;      (*) Semi-frequency (*)
P=H/(L*L);    (*) Pitch (*)
n=2*m;
E=rinid(n,n+1,1,1)|[-m,-m,0; 1-m,-m,0]#
  rinid(n+1,n,1,1)|[-m,-m,0; -m,1-m,0];
Hypar=bhp(L/n,L/n,1,P)|E;
use &,vm(2),vt(2),vh(L,-L,L,0,0,0, 0,0,1);
```

```
clear;   draw Hypar;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۶۸

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 168:  Double layer hypar.
  See Section 3.2 of Reference 3. (*)
L=30;       (*) Length of side
                    of top layer in plan (*)
D=1.5;     (*) Distance between layers (*)
m=5;       (*) Frequency of top layer (*)
P=0.015;  (*) Pitch (*)
T=pex|rinid(m,m,2,2)|rosad(1-m,1-m)|
  [-m,-m,1; 2-m,-m,1];
B=pex|rinid(m-1,m-1,2,2)|rosad(2-m,2-m)|
  [1-m,1-m,0; 3-m,1-m,0];
W=rinid(m,m,2,2)|rosad(1-m,1-m)|
  [-m,-m,1; 1-m,1-m,0];
Hypar=bhp(L/(2*m),L/(2*m),D,P)|
  (T#B#W);
use &,vm(2),vt(2),vh(L,-L,2*L,0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Hypar;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۶۹

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 169:  Compound hypar
  (convex).  See Section 3.2 of
  Reference 3. (*)
L=20;     (*) Length of side
               of each hypar units in plan (*)
H=7;       (*) Height (*)
m=4;       (*) Semi-frequency (*)
P=H/(L*L);     (*) Pitch (*)
n=2*m;
E=rinid(n,n+1,1,1)|[-m,-m,0; 1-m,-m,0]#
  rinid(n+1,n,1,1)|[-m,-m,0; -m,1-m,0];
F=bhp(L/n,L/n,1,P)|E;
Hypar=pex|rosad(L/2,L/2)|F;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0.1*L,-4*L,4*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Hypar;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۷۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 170:  Compound hypar
  (concave).  See Section 3.2 of
  Reference 3. (*)
L=20;    (*) Length of side
              of each hypar units in plan (*)
H=7;     (*) Height (*)
m=4;     (*) Semi-frequency (*)
P=H/(L*L);    (*) Pitch (*)
n=2*m;
E=rinid(n,n+1,1,1)|[-m,-m,0; 1-m,-m,0]#
  rinid(n+1,n,1,1)|[-m,-m,0; -m,1-m,0];
F=bhp(L/n,L/n,1,P)|E;
Hypar=pex|rosad(L/2,-L/2)|F;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0.1*L,-3*L,3*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Hypar;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۷۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 171:  Compound hypar.
  See Section 3.2 of Reference 3. (*)
L=20;    (*) Length of side
              of each hypar units in plan (*)
H=8;     (*) Height (*)
m=3;     (*) Semi-frequency (*)
P=H/(L*L);    (*) Pitch (*)
n=2*m;
E=rinid(n,n+1,1,1)|[-m,-m,0; 1-m,-m,0]#
  rinid(n+1,n,1,1)|[-m,-m,0; -m,1-m,0];
F=bhp(L/n,L/n,1,P)|E;
Hypar=pex|rosad(3*L/2,3*L/2)|
  rosad(L/2,L/2)|F;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(6*L,6*L,5*L,0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Hypar;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۷۲

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 172:  Pellevated compound
  hypar. See Section 3.2 of Reference 3
  and References 4 and 5. (*)
L=20;    (*) Length of side
               of each hypar units in plan (*)
H=7;     (*) Original height (*)
R=7;     (*) Pellevational rise (*)
m=4;     (*) Semi-frequency (*)
P=H/(L*L);    (*) Pitch (*)
n=2*m;
E=rinid(n,n+1,1,1)|[-m,-m,0; 1-m,-m,0]#
  rinid(n+1,n,1,1)|[-m,-m,0; -m,1-m,0];
F=bhp(L/n,L/n,1,P)|E;
G=pex|rosad(L/2,L/2)|F;
Hypar=capel(3,L/2,L/2,2*L*sqrt|2,R)|G;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0.1*L,-3*L,3*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Hypar;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۷۳

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 173 :  Pellevated compound
  hypar. See Section 3.2 of Reference 3
  and References 4, 5 and 6. (*)
L=20;    (*) Length of side
               of each hypar units in plan (*)
H=8;     (*) Original height (*)
R=35;    (*) Pellevational rise (*)
m=3;     (*) Semi-frequency (*)
P=H/(L*L);    (*) Pitch (*)
n=2*m;
E=rinid(n,n+1,1,1)|[-m,-m,0; 1-m,-m,0]#
  rinid(n+1,n,1,1)|[-m,-m,0; -m,1-m,0];
F=bhp(L/n,L/n,1,P)|E;
G=pex|rosad(3*L/2,3*L/2)|
  rosad(L/2,L/2)|F;
Hypar=capel(3,3*L/2,3*L/2,
  4*L*sqrt|2,R)|G;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(20*L,20*L,25*L,0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Hypar;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۷۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 174:  Pyramid.
  See Section 2.2 of Reference 2. (*)
L=20; (*) Length of each side of base (*)
H=20; (*) Height of pyramid (*)
m=7;   (*) Frequency (*)
n=3;    (*) Number of sides of the base (*)
C=L/(2*tan|(180/n));
S=sqrt|(C*C+H*H);
B=atan|(H/C);
E1=genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
E2=bb(L/(2*m),S/m)|E1;
E3=tran(2,C-S)|E2;
E4=verat(C,0,-B)|E3;
Pyramid=pex|rosad(0,0,n,360/n)|E4;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,-L,9*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Pyramid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکلهای ۱۷۵ و ۱۷۶

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 175 (m=9, n=5) and
  Fig 176 (m=6, n=12):  Pyramid.
  See Section 2.2 of Reference 2. (*)
L=20; (*) Length of each side of base (*)
H=15; (*) Height of pyramid (*)
m=9;   (*) Frequency (*)
n=5;    (*) Number of sides of the base (*)
C=L/(2*tan|(180/n));
S=sqrt|(C*C+H*H);
B=atan|(H/C);
E1=genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
E2=bb(L/(2*m),S/m)|E1;
E3=tran(2,C-S)|E2;
E4=verat(C,0,-B)|E3;
Pyramid=pex|rosad(0,0,n,360/n)|E4;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,-L,3*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Pyramid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۷۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 177:  Pyramid.
  See Section 2.2 of Reference 2. (*)
L=20; (*) Length of each side of base (*)
H=20; (*) Height of pyramid (*)
m=8;   (*) Frequency, m must be even (*)
n=9;    (*) Number of sides of the base (*)
C=L/(2*tan|(180/n));
S=sqrt|(C*C+H*H);
B=atan|(H/C);
mm=ric|(m/2)-1;
E=genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
E1=lux(genid(1,3,2,1,-1,1)|[0,m-2,0])|E;
E2=bb(L/(2*m),S/m)|E1;
E3=tran(2,C-S)|E2;
E4=verat(C,0,-B)|E3;
Pyramid=pex|rosad(0,0,n,360/n)|E4;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(L,L,2.5*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Pyramid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۷۸

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 178:  Pyramid.
  See Section 2.2 of Reference 2. (*)
L=20; (*) Length of each side of base (*)
H=20; (*) Height of pyramid (*)
m=15; (*) Frequency (*)
n=6;    (*) Number of sides of the base (*)
C=L/(2*tan|(180/n));
S=sqrt|(C*C+H*H);
B=atan|(H/C);
mm=ric|(m/2)-1;
E=genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
E1=lux(genid(1,5,4,2,-2,1)|[0,4,0])|E;
E2=bb(L/(2*m),S/m)|E1;
E3=tran(2,C-S)|E2;
E4=verat(C,0,-B)|E3;
Pyramid=pex|rosad(0,0,n,360/n)|E4;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,2*L,5*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Pyramid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۷۹

```
(*) Formian scheme for configurations
   similar to Fig 179:  Double layer pyramid.
   See Section 2.2 of Reference 2. (*)
L=20;     (*) Length of each side of base (*)
H=12;    (*) Height of pyramid (*)
D=1.25; (*) Distance between two layers (*)
m=4;      (*) Frequency (*)
n=6;      (*) Number of sides of the base (*)
C=L/(2*tan|(180/n));
S=sqrt|(C*C+H*H);
B=atan|(H/C);
Et=genid(1,m,2,3,-1,1)|{[0,0,0; -1,3,0],
   [0,0,0; 1,3,0], [-1,3,0; 1,3,0]};
Eb=genid(1,m-1,2,3,-1,1)|{[0,2,-1; -1,5,-1],
   [0,2,-1; 1,5,-1], [-1,5,-1; 1,5,-1]};
Ew=genid(1,m,2,3,-1,1)|{[0,0,0; 0,2,-1],
   [-1,3,0; 0,2,-1], [1,3,0; 0,2,-1]};
E1=Et#Eb#Ew;
E2=bt(L/(2*m),S/(3*m),D)|E1;
E3=tran(2,C-S)|E2;
E4=verat(C,0,-B)|E3;
Qi=[0,2,-1];
Ri=verat(C,0,-B)|tran(2,C-S)|
   bt(L/(2*m),S/(3*m),D)|Qi;
Rj=verad(0,0,360/n)|Ri;
K1=tig|(Ri#Rj);
K2=rinax(0,0,H, -L/(2*m),
   C/m,(m-1)*H/m, m)|K1;
(*) K2 represents the bottom layer
     elements that link the n segments
     of the pyramid (*)
Pyramid=pex|rosad(0,0,n,360/n)|(E4#K2);
use &,vm(2),vt(2),
   vh(0,2*L,3*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Pyramid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۸۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 180 :  Pellevated pyramid.
  See Section 2.2 of Reference 2 and
  References 4, 5 and 6. (*)
L=20; (*) Length of each side of base (*)
H=18; (*) Height of pyramid (*)
P=8;   (*) Pellevational rise (*)
m=9;   (*) Frequency (*)
n=5;    (*) Number of sides of the base (*)
C=L/(2*tan|(180/n));
S=sqrt|(C*C+H*H);
B=atan|(H/C);
E1=genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
E2=bb(L/(2*m),S/m)|E1;
E3=tran(2,C-S)|E2;
E4=verat(C,0,-B)|E3;
E5=pex|rosad(0,0,n,360/n)|E4;
Pyramid=capel(3,0,0,
  L/sin|(180/n),P)|E5;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,-L,4.5*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Pyramid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۸۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 181:  Pellevated Pyramid.
  See Section 2.2 of Reference 2
  and References 4, 5 and 6. (*)
L=20; (*) Length of each side of base (*)
H=20; (*) Height of pyramid (*)
P=6;   (*) Pellevational rise (*)
m=15; (*) Frequency (*)
n=6;    (*) Number of sides of the base (*)
C=L/(2*tan|(180/n));
S=sqrt|(C*C+H*H);
B=atan|(H/C);
mm=ric|(m/2)-1;
E=genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
E1=lux(genid(1,5,4,2,-2,1)|[0,4,0])|E;
E2=bb(L/(2*m),S/m)|E1;
E3=tran(2,C-S)|E2;
E4=verat(C,0,-B)|E3;
E5=pex|rosad(0,0,n,360/n)|E4;
Pyramid=capel(3,0,0,
  L/sin|(180/n),P)|E5;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,2*L,5.5*L, 0,0,0, 0,0,1);
```

```
clear;   draw Pyramid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۸۲

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 182:  Pellevated pyramid.
  See Section 2.2 of Reference 2 and
  References 4, 5 and 6. (*)
L=20; (*) Length of each side of base (*)
H=18; (*) Height of pyramid (*)
P=8;   (*) Pellevational rise (*)
m=9;   (*) Frequency (*)
n=5;    (*) Number of sides of the base (*)
C=L/(2*tan|(180/n));
S=sqrt|(C*C+H*H);
B=atan|(H/C);
E1=genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
E2=bb(L/(2*m),S/m)|E1;
E3=tran(2,C-S)|E2;
E4=verat(C,0,-B)|E3;
E5=pex|rosad(0,0,n,360/n)|E4;
Pyramid=capel(-3,0,0,
  L/sin|(180/n),P)|E5;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,-L,2.5*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Pyramid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۸۳

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 183:  Pellevated Pyramid.
  See Section 2.2 of Reference 2
  and References 4, 5 and 6. (*)
L=20; (*) Length of each side of base (*)
H=20; (*) Height of pyramid (*)
P=6;   (*) Pellevational rise (*)
m=15; (*) Frequency (*)
n=6;    (*) Number of sides of the base (*)
C=L/(2*tan|(180/n));
S=sqrt|(C*C+H*H);
B=atan|(H/C);
mm=ric|(m/2)-1;
E=genid(1,m,2,1,-1,1)|{[0,0,0; -1,1,0],
  [0,0,0; 1,1,0], [-1,1,0; 1,1,0]};
E1=lux(genid(1,5,4,2,-2,1)|[0,4,0])|E;
E2=bb(L/(2*m),S/m)|E1;
E3=tran(2,C-S)|E2;
E4=verat(C,0,-B)|E3;
E5=pex|rosad(0,0,n,360/n)|E4;
Pyramid=capel(-3,0,0,
  L/sin|(180/n),P)|E5;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,2*L,3.5*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Pyramid;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۸۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 184:  Freeform (novated
  single layer grid with binate pattern and
  with corners held in position (novation
  mode 3 is used)). See References 9, 10
  and 11. (*)
Grid=rinid(24,25,1,1)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(25,24,1,1)|[0,0,0; 0,1,0];
Corner=lamid(12,12)|[0,0,0];
Base={[14,2,0], [8,18,0], [20,16,0],
  [4,22,0]};
Target={[14,2,5], [8,18,0], [20,16,3],
  [4,22,2]};
Form=nov(3,1,Corner#Base,
  Corner#Target)|Grid;
use &,vm(2),vt(2),vh(12,-24,24,
  12,12,0, 12,12,1);
clear;   draw Form;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۸۵

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 185:  Freeform (pellevated
  single layer grid with binate pattern).
  See References 4, 5 and 6. (*)
Grid=rinid(40,41,1,1)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(41,40,1,1)|[0,0,0; 0,1,0];
Form=capel(3,12,16,20,4)|
  capel(3,18,16,24,5)|
  capel(3,24,20,28,6)|Grid;
Form=rel(U(1,3)>0 || U(2,3)>0)|Form;
use &,vm(2),vt(2),vh(20,-40,120,
  20,20,0, 20,20,1);
clear;   draw Form;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۸۶

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 186:  Freeform (novated
  diamatic dome with nodes along 2/3 of the
  perimeter held in position (novation mode
  2 is used)). See Section 2.5 of Reference 2
  and References 9, 10 and 11. (*)
R=36;       (*) Radius of circumsphere (*)
A=40;       (*) Sweep angle (*)
m=8;        (*) Frequency (*)
n=6;        (*) Number of sectors (*)
E=genit(1,m,1,1,0,1)|{[1,0,0; 1,0,1],
  [1,0,0; 1,1,1], [1,0,1; 1,1,1]};
F=bd(R,360/n,A/m)|E;
Dome=pex|rosad(0,0,n,360/n)|F;
Edge=bd(R,360/n,A/m)|rin(2,33,-1)|[1,m,m];
Sb=bd(R,360/n,A/m)|[1,2*m,m];
Form=nov(2,1,Edge#Sb,Edge#
  tran(3,R/2)|Sb)|Dome;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3.5*R,
  0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Form;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۸۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 187:  Freeform (pellevated
  diamatic dome). See Section 2.5 of
  Reference 2 and References 4, 5 and 6 (*)
R=36;     (*) Radius of circumsphere (*)
A=45;     (*) Sweep angle (*)
m=9;      (*) Frequency (*)
n=7;      (*) Number of sectors (*)
E=genit(1,m,3,3,0,1)|{[1,2,4; 1,1,2],
  [1,2,4; 1,1,5], [1,2,4; 1,4,5]}#
  rin(3,m+1,3)|[1,1,2; 1,-1,2];
F=bd(R,360/n,A/(3*m))|E;
Dome=rosad(0,0,n,360/n)|F;
Form=verad(0,0,-45)|bapel(3,R/2,0,R/2,R/2,
  0.7*R,0.2*R)|bapel(3,-R/2,0,-R/2,R/2,
  0.7*R,0.2*R)|Dome;
use &,vm(2),vt(2),vh(R,R,3*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Form;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۸۸

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 188:  Freeform (pellevated
  compound hypar). See Section 3.2 of
  Reference 3 and References 4, 5 and 6. (*)
L=20;   (*) Length of side
            of each hypar units in plan (*)
H=24;   (*) Height of each unit(*)
m=8;    (*) Semi-frequency of each unit(*)
P=H/(L*L);    (*) Pitch (*)
n=2*m;
E=rinid(n,n+1,1,1)|[-m,-m,0; 1-m,-m,0]#
  rinid(n+1,n,1,1)|[-m,-m,0; -m,1-m,0];
F=bhp(L/n,L/n,1,P)|E;
Hypar=pex|rosad(L/2,L/2)|F;
Form=bapel(3,0,0,0,L,L,L/2)|
  bapel(3,L,0,L,L,L,L/2)|Hypar;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(0,-3*L,6*L, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Form;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۸۹

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 189:  Freeform (pellevated
  binate grid). See References 4, 5 and 6. (*)
L=40;   (*) Length of each side of grid (*)
R=8;    (*) Rise of pellevants (*)
m=24;   (*) Frequency of grid (*)
A=L/2;
Grid=bb(L/m,L/m)|
  (rinid(m,m+1,1,1)|[0,0,0; 1,0,0]#
  rinid(m+1,m,1,1)|[0,0,0; 0,1,0]);
Form=capel(3,0,0,L,R)|capel(3,0,L,L,R)|
  capel(3,L,0,L,R)|capel(3,L,L,L,R)|
  capel(1,A,A,L*sqrt|2,R)|Grid;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(A,-L,1.5*L, A,A,0, A,A,1);
clear;  draw Form;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۹۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 190:  Freeform (pellevated
  geodesic dome). See References
  4, 5, 6, 7 and 8. (*)
RC=50; (*) Radius of circumsphere (*)
SP=30;  (*) Span of cylindrical pellevant (*)
Rise=7;  (*) Rise of pellevant (*)
m=9;     (*) Frequency of dome (*)
t=sqrt|3;
D=pol(1,5,'[1-5]',RC,[0,0; 2*m,0])|
  genid(m,m,2,t,1,-1)|rosad(1,t/3,3,120)|
  [0,0; 2,0];
Geodome=dil(3,1/3)|
  trac(1,[0,0,0,RC],4,-15)|D;
Form=bapel(3,0,0,0,10,SP,Rise)|Geodome;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(RC,RC,2*RC, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Form;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۹۱

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 191:  Freeform (pellevated
  ring barrel vault with binate pattern).
  See References 4, 5 and 6 and Section 3.4
  of Reference 3. (*)
S=60;   (*) Span of barrel vault (*)
SP=80;  (*) Span of cylindrical pellevants (*)
H=14;   (*) Rise of barrel vault (*)
RP=16; (*) Rise of pellevants (*)
m=70;   (*) Frequency in U2 direction (*)
n=10;   (*) Frequency in U4 direction (*)
R=70;   (*) Radius of annulus (*)
A=2*atan|(2*H/S);   (*) Sweep angle (*)
Q=S/(2*sin|A);        (*) Radius of
                cross-section of annulus (*)
E=rinic(2,4,m,n+1,1,1)|
  [1,0,1,-n/2; 1,1,1,-n/2]#
  rinic(2,4,m+1,n,1,1)|
  [1,0,1,-n/2; 1,0,1,1-n/2];
F=dep(4)|ba(R,360/m,Q,2*A/n)|E;
Form=bapel(3,0,0,R,0,SP,RP)|
  bapel(3,0,0,0,R,SP,RP)|F;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(2*R,2*R,4*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Form;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۹۲

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 192:  Freeform (paragenic
  configuration). See Section 3.6 of
  Reference 3. (*)
m=25;   (*) Frequency (*)
E=rinit(m,m+1,1,1)|[1,0,0; 1,1,0]#
  rinit(m+1,m,1,1)|[1,0,0; 1,0,1];
Form=bhp(1,1,1,0.01)|verad(0,0,-45)|
  tran(2,25)|verat(0,0)|bc(1,7.5,1)|
  verad(0,0,45)|bc(30,80/m,60/m)|E;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(30,30,60, 0,0,30, 0,1,30);
clear;   draw Form;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۹۳

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 193:  Hyperboloidal tower.
  See Section 3.3 of Reference 3. (*)
H=30;   (*) Height of tower (*)
H1=20; (*) Height at the neck of tower (*)
R=8;     (*) Radius at the base of tower (*)
R1=3;   (*) Radius at the neck of tower (*)
m=10;   (*) Number of sides of the base (*)
n=5;     (*) Number of rhombic units in
                    the vertical direction (*)
B=-2*n*H1/H;
P=(R*R-R1*R1)/(H1*H1);
E=rinit(m,n,2,2)|(lamit(0,B+1)|
 [1,0,B; 1,-1,B+1]#{[1,-1,B+1; 1,1,B+1],
 [1,0,B+2; 1,2,B+2]});
Tower=bh(R1,360/(2*m),H/(2*n),P)|E;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(10*R,10*R,-R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;   draw Tower;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۹۴

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 194:  Hyperboloidal tower.
  See Section 3.3 of Reference 3. (*)
H=60;  (*) Height of tower (*)
H1=50; (*) Height at the neck of tower (*)
R=8;   (*) Radius at the base of tower (*)
R1=3;  (*) Radius at the neck of tower (*)
m=6;   (*) Number of sides of the base (*)
n=8;   (*) Number of rhombic units in
                  the vertical direction (*)
B=-2*n*H1/H;
P=(R*R-R1*R1)/(H1*H1);
E=rinit(m,n,2,2)|(lamit(0,B+1)|
 [1,0,B; 1,-1,B+1]#{[1,-1,B+1; 1,1,B+1],
 [1,0,B+2; 1,2,B+2]});
Tower=bh(R1,360/(2*m),H/(2*n),P)|E;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(10*R,10*R,-4*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Tower;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۹۵

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 195:  Conical tower.
  See Section 3.3 of Reference 3. (*)
H=20;  (*) Height of tower (*)
H1=80; (*) Height at the neck of tower (*)
R=8;   (*) Radius at the base of tower (*)
R1=0;  (*) Radius at the neck of tower (*)
m=10;  (*) Number of sides of the base (*)
n=4;   (*) Number of rhombic units in
                  the vertical direction (*)
B=-2*n*H1/H;
P=(R*R-R1*R1)/(H1*H1);
E=rinit(m,n,2,2)|(lamit(0,B+1)|
 [1,0,B; 1,-1,B+1]#{[1,-1,B+1; 1,1,B+1],
 [1,0,B+2; 1,2,B+2]});
Tower=bh(R1,360/(2*m),H/(2*n),P)|E;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(10*R,10*R,-6*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Tower;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۹۶

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 196:  Conical tower.
  See Section 3.3 of Reference 3. (*)
H=22;   (*) Height of tower (*)
H1=30; (*) Height at the neck of tower (*)
R=15;   (*) Radius at the base of tower (*)
R1=0;   (*) Radius at the neck of tower (*)
m=10;  (*) Number of sides of the base (*)
n=4;    (*) Number of rhombic units in
                    the vertical direction (*)
B=-2*n*H1/H;
P=(R*R-R1*R1)/(H1*H1);
E=rinit(m,n,2,2)|(lamit(0,B+1)|
 [1,0,B; 1,-1,B+1]#{[1,-1,B+1; 1,1,B+1],
 [1,0,B+2; 1,2,B+2]});
Tower=bh(R1,360/(2*m),H/(2*n),P)|E;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(10*R,10*R,-2*R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Tower;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۹۷

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 197:  Cylindrical tower.
  See Section 3.3 of Reference 3. (*)
H=20;   (*) Height of tower (*)
H1=20; (*) Height at the neck of tower (*)
R=8;    (*) Radius at the base of tower (*)
R1=8;   (*) Radius at the neck of tower (*)
m=12;  (*) Number of sides of the base (*)
n=4;    (*) Number of rhombic units in
                    the vertical direction (*)
B=-2*n*H1/H;
P=(R*R-R1*R1)/(H1*H1);
E=rinit(m,n,2,2)|(lamit(0,B+1)|
 [1,0,B; 1,-1,B+1]#{[1,-1,B+1; 1,1,B+1],
 [1,0,B+2; 1,2,B+2]});
Tower=bh(R1,360/(2*m),H/(2*n),P)|E;
use &,vm(2),vt(2),
  vh(10*R,10*R,-R, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Tower;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۹۸

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 198:  Lazy-tongs.
  See Section 2.4 of Reference 2. (*)
T=90;  (*) Control angle (*)
D=1.2;  (*) Dimensions
            of a duplet for T=90 (*)
m=5;   (*) Frequency of duplets (*)
H=sqrt|2*D*sin|(T/2);
V=sqrt|2*D*cos|(T/2);
Fold=rin(1,m,H)|{[0,0,0; H,0,V],
  [0,0,V; H,0,0]};
use &,vn(250,150),vs(35),
  vh(0, m*H,0, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Fold;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۱۹۹

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 199:  Foldable double layer
  grid. See Section 2.4 of Reference 2. (*)
T=120; (*) Control angle (*)
D=0.8; (*) Dimensions
                of a duplet for T=90 (*)
m=6;   (*) Frequency in the x-direction (*)
n=5;   (*) Frequency in the y-direction (*)
H=sqrt|2*D*sin|(T/2);
V=sqrt|2*D*cos|(T/2);
Fold=rinid(m,n+1,H,H)|{[0,0,0; H,0,V],
  [0,0,V; H,0,0]}#rinid(m+1,n,H,H)|
  {[0,0,0; 0,H,V], [0,0,V; 0,H,0]};
use &,vn(150,250),vs(35),
  vh(m*H, n*H,15*H, 0,0,0, 0,0,1);
clear;  draw Fold;
```

برنامهٔ فرمیینی برای تاشه‌های شبیه به شکل ۲۰۰

```
(*) Formian scheme for configurations
  similar to Fig 200:  Foldable double layer
  barrel vault. See Section 2.4 of
  Reference 2. (*)
T=140;  (*) Control angle (*)
L1=0.8; (*) Length of
                upper part of uniplet (*)
L2=0.7; (*) Length of
                lower part of uniplet (*)
m=7;    (*) Circumferential frequency (*)
n=5;    (*) Longitudinal frequency (*)
L =L1+L2;   T1=180-T;
D=sqrt|(L1*L1+L2*L2-2*L1*L2*cos|T1);
D1=sqrt|(L*L-D*D);
A=asin|(L2*sin|T1/D);
B=180+A-T;
R=D*sin|B/(sin|B-sin|A);
C=asin|(L*sin|B/R);
E=rinit(m,n+1,C,D1)|{[R-D,0,0; R,C,0],
  [R,0,0; R-D,C,0]}#rinit(m+1,n,C,D1)|
  {[R-D,0,0; R,0,D1], [R,0,0; R-D,0,D1]};
F=bc(1,1,1)|E;   P=m*C/2;
Fold=verad(0,0,90-P)|F;
use &,vn(150,100),vs(30),
  vh(5,8*R,-12*R, 0,0,R, 0,1,R);
clear;   draw Fold;
```

مراجع پیوست ۱-ب

1. Nooshin H and Disney P L, Formex Configuration Processing I, International Journal of Space Structures, Vol 15, 2000

2. Nooshin H and Disney P L, Formex Configuration Processing II, International Journal of Space Structures, Vol 16, 2001

3. Nooshin H and Disney P L, Formex Configuration Processing III, International Journal of Space Structures, Vol 17, 2002

4. Nooshin H, A Technique for Surface Generation, IASS Symposium, Stuttgart, Germany, October 1996

5. Hofmann I S, The Concept of Pellevation for Shaping of Structural Forms, PhD Thesis, University of Surrey, UK, 1999

6. Hofmann I S, The Concept of Pellevation for Shaping of Structural Forms, Fifth International Conference on Space Structures, University of Surrey, Published by Thomas Telford, 2002

7. Nooshin H, Disney P L and Champion O C, Computer-Aided Processing of Polyhedric Configurations, Chapter 12 in Beyond the Cube, Edited by J F Gabriel, John Wiley, 1997

8. Champion O C, Polyhedric Configurations, PhD Thesis, University of Surrey, UK, 1997

9. Nooshin H, Albermani F G A and Disney P L, Novational Transformations, IASS Colloquim on Structural Morphology, Nottingham, UK, August 1997

10. Nooshin H and Moghimi M, Formex Formulation of Freeform Structural Surfaces, Second National Conference on Space Structures, Teheran, Iran, May 2007

11. Moghimi M, Formex Configuration Processing of Compound and Freeform Structures, PhD Thesis, University of Surrey, UK, 2006

12. Nooshin H, Tomatsuri H and Fujimoto M, Scallop Domes, IASS Symposium, Singapore, November 1997

پیوست ۲

گونه‌های اتصالات و پیونده‌ها
در سازه‌های فضاکار شبکه‌ای

مقدمه

با توجه به انواع گوناگون اعضا و شیوه و وسایل اتصال، انواع متنوع سیستم‌های سازه‌های فضاکار ابداع گردیده‌اند. این سیستم‌ها با نام شرکت سازنده و یا شخص پیشنهاد دهنده شناخته می‌شوند. با گذشت زمان تعداد این نوع سیستم‌ها افزون‌تر گشته است. در یک تقسیم‌بندی کلی، سیستم‌های گوناگون متداول سازه‌های فضاکار را می‌توان در سه نوع گنجاند:

الف- سیستم گرهی (پیونده‌ای)، ب- سیستم واحدی، ج - سیستم ترکیبی.

در این پیوست به طور اجمالی به معرفی نمونه‌های متداولی از سیستم‌های مذکور در فوق پرداخته شده و کوشش به‌عمل آمده است که مزایا و معایب اصلی آنها مورد اشاره قرار داده شوند.

۱- سیستم گرهی (پیونده‌ای)

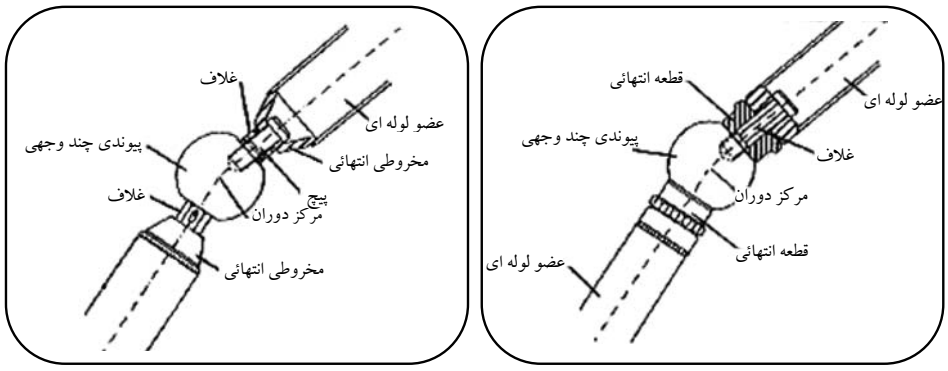
سیستم‌هایی هستند که شامل پیونده ها و اعضا می‌باشند. به طوری‌که این پیونده‌ها، به صورت واسطه‌ای بین اعضا قرار می‌گیرند. سیستم‌های از نوع پیونده‌ای با توجه به نوع کاربرد آنها در شبکه‌ها، چلیک‌ها و گنبدها به پنج گروه تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- پیونده گوی‌سان، ۲- پیونده نیامی، ۳- پیونده صفحه‌ای، ۴- پیونده شکافی، ۵- پیونده پوسته‌ای.

از هر یک از پنج سیستم فوق نیز انواع متنوعی ابداع شده است.

۱- ۱- سیستم‌های پیونده گوی‌سان

این سیستم‌ها، از یک پیونده کروی یا چندوجهی، اعضا و وسایل اتصال‌دهنده تشکیل شده‌اند. شکل ۱، دو نمونه از این سیستم را نشان می‌دهد.



شکل (۱): دو نمونه از سیستم پیونده گوی‌سان

به طور کلی، نقش اصلی پیونده در سازه‌های فضاکار، همچنان که روشن است به هم پیوستن اعضا و انتقال نیرو بین اعضای متصل‌شونده به آن پیونده است.

شکل ۱ قسمت (الف)، حالتی را نشان می‌دهد که فقط نیروی محوری از لوله به گره انتقال می‌یابد و قسمت (ب)، حالتی را ارایه می‌دهد که نیروی محوری به همراهِ درصدی از لنگر خمشی، انتقال می‌یابد.

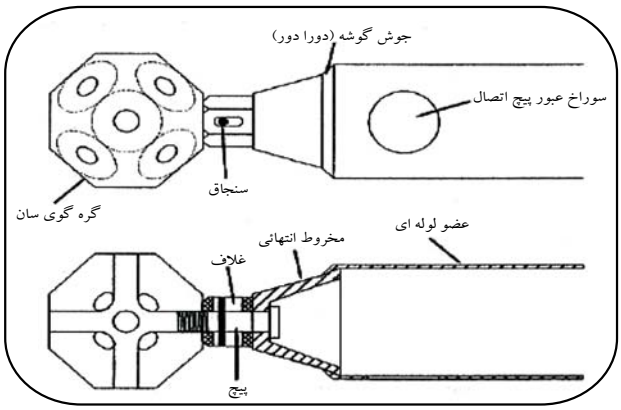
در اکثر سیستم‌هـای گوی‌سان از جمله این سیستم، اعضا به شکل لوله‌ای بوده و محورهای مرکزی آنها از مرکز پیونده عبور می‌کند. به طور کلی در تمامی سیستم‌ها، دو دلیل عمده، برای کاربرد اعضا به صورت لوله‌ای وجود دارد:

- گشتاور اینرسی یک عضو لوله‌ای با مقطع دایروی، در تمامی جهات یکسان بوده و در نتیجه با درنظرگرفتن نیروی فشاری و کمانش اعضا، اقتصادی ترین مقاطع به شمار می‌روند.
- قطر خارجی اعضا لوله‌ای را در مجموعه سیستم سازه‌ای می‌توان ثابت نگه داشت، به گونه‌ای که برای ظرفیت باربری‌های متفاوت، از ضخامت جدار متفاوت استفاده نمود. در این صورت، سازه از زیبایی و نظم خاصی برخوردار خواهد بود.

سیستم‌های گوی‌سانی که به آنها اشاره خواهد شد، عبارت‌اند از:

در سطور زیر نمونه‌هایی از سیستم‌های گرهی گوی‌سان به اختصار معرفی شده‌اند.

۱-۱-۱- سیستم پیونده گوی‌سان KK: این سیستم، اولین سیستم تجاری سازه‌های فضاکار است که به وسیله شرکت Mero ارایه شده و بیشترین کاربرد آن در سازه‌های صنعتی بوده است. این سیستم در سال ۱۹۴۲ طراحی شده است. امروزه، این سیستم بیشتر در سازه‌هایی از قبیل آشیانه‌های هواپیما، استادیوم‌های ورزشی، تالارهای چندمنظوره، سایبان‌ها و غیره به‌کار برده می‌شود. شکل ۲، نما و مقطعی از سیستم KK را نشان می‌دهد.



شکل (۲) : سیستم KK (Mero)

این سیستم شامل کره فلزی توپر با سوراخ‌های رزوه شده، اعضا لوله‌ای، مخروط انتهایی، غلاف و پیچ اتصال می‌باشد. مطابق شکل ۲، به منظور اصلاح محل نشست غلاف و از بین‌بردن خطای ناشی از تولید انبوه، اطـراف سوراخ‌های موجود در گوی، به صورت یک سطح صاف تولید شده است.

پیونده‌های KK به روش کوبن‌کاری به شرح زیر تولید می‌شوند:

۱) گوی‌های کروی توپر بوسیله کوبن‌کاری تولید می‌شوند. ترتیب که یک میلگرد استوانه‌ای را به طول مشخص بریده و تحت حرارت قرار می‌دهند، سپس به وسیله دو قالب نیم‌کره‌ای آن را تحت فشار قرار داده و به صورت کروی در می‌آورند.

۲) بر رویهٔ کره توپر ساخته‌شده، عملیات ماشین‌کاری و به دنبـال آن سـوراخ‌کاری صورت می‌گیـرد و سـوراخ‌ها از درون روزه می‌شوند.

۳) پیونده‌ها به طور کامل گالوانیزه می‌شوند.

۴) سوراخ‌های اضافی که به هیچ عضوی متصل نمی‌شوند، بوسیله درپوش پلاستیکی برای جلوگیری از خوردگی‌های داخلی بسته می‌شوند.

روش تولید اعضای سیستم، نیز به قرار زیر می‌باشد:

۱) یک لوله با ضخامت مشخص، به طول معین بریده می‌شود.

۲) مخروط‌های انتهایی به هر دو سر لوله جوش‌کاری می‌گردند.

۳) لوله‌ها به همراه مخروط‌های انتهایی جوش شده، گالوانیزه می‌شوند.

نحوه برقراری اتصال به شرح زیر می‌باشد:

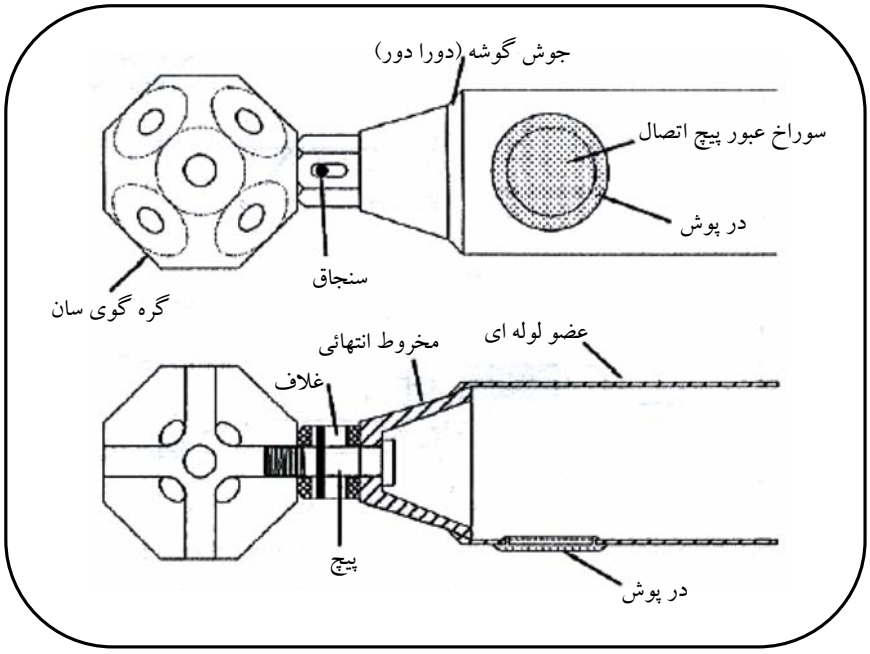
۱) پیچ‌ها از سوراخ نزدیک انتهای لوله، جاگذاری می‌گردند.

۲) به‌وسیله یک پین، غلاف و پیچ به هم متصل و سفت می‌گردند.

نکته‌ای که می‌توان در مورد این سیستم بیان نمود، این است که سوراخ ایجادشده در نزدیک انتهای لوله، برای جاگذاری پیچ، را می‌توان یک نقیصه تلقی نمود که در بسیاری از کاربردها ایجاد اشکال نمی‌نماید، ولی در برخی دیگر باید کنترل‌های لازم برای اثر حضور این سوراخ در مقاومت عضو کمانش موضعی و خستگی مورد بررسی قرار داده شود.

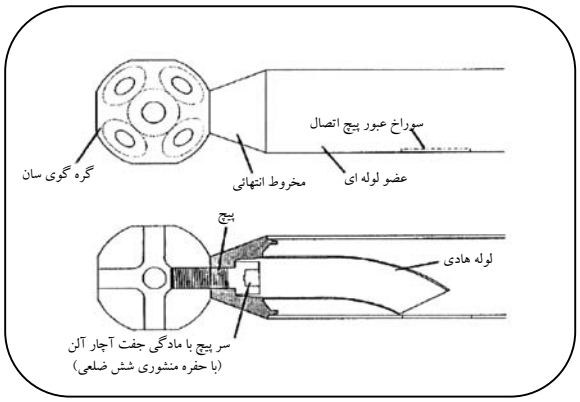
حداکثر تعداد اعضای قابل اتصال به این نوع پیوند ۱۸ عضو می‌باشد.

سیستم دیگری نیز بنام سیستم Uzaykon ارایه شده است که از نظر نحوهٔ برقراری اتصال و ادوات اتصال همانند سیستم KK می‌باشد اما با این تفاوت که پیوند گوی‌سان به کارگرفته شده در این سیستم از نوع توخالی است (شکل ۳).



شکل (۳) : سیستم Uzaykon

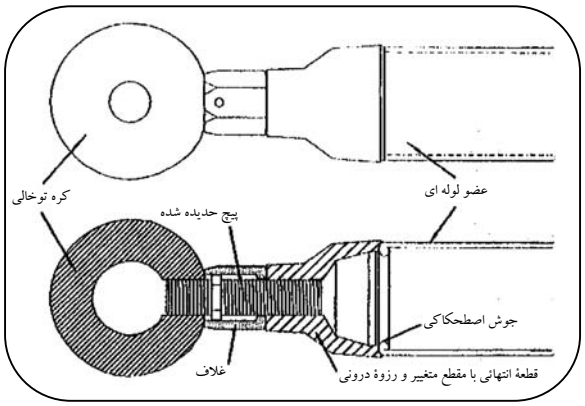
۱-۱-۲- سیستم پیونده گوی‌سان RUPP MANTAL: این سیستم در دو نوع متفاوت وجود دارد. نوع اول آن، پیونده-ای کروی با اعضا لوله‌ای (با مقطع دایروی) بوده و نوع دوم، پیونده‌ای چندوجهی با اعضای قوطی‌شکل با (با مقطع راست‌گوشه) می-باشد. در شکل ۴، نمونه‌ای از نوع اول آن ارایه شده است.



شکل (۴) : سیستم KRUPP MANTAL

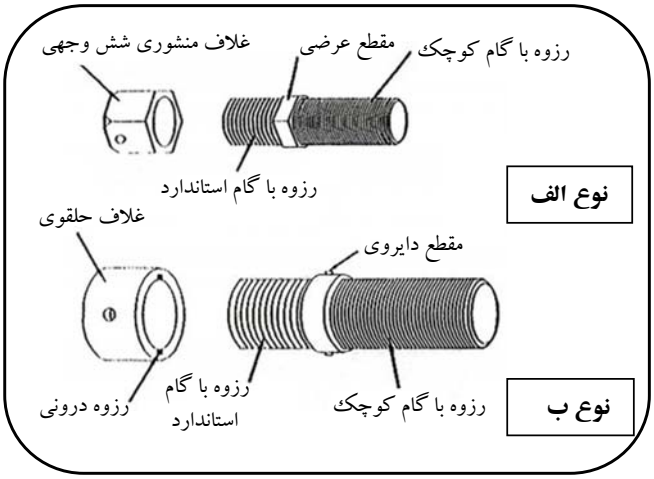
مطابق شکل ۴، در این سیستم، از حد واسطی مابین مخروط و پیونده استفاده نشده و مخروط انتهایی مستقیماً با پیونده در تماس است. در این سیستم، از پیچ‌هایی استفاده می‌شود که در سر آنها برای سفت‌کردن پیچ با آچار ویژهٔ شش وجهی نظیر آچار آلن، مادگی متناسب تعبیه شده است.

۱-۱-۳- سیستم پیونده گوی‌سان ZUBLIN: شکل ۶ مقطعی از این سیستم را نشان می‌دهد. مطابق شکل، اجزای سازنده این سیستم شامل یک کره توخالی، اعضا لوله‌ای، پیچ، مخروط انتهایی و یک غلاف حلقوی می‌باشد. از مزیت‌های سیستم، این است که می توان پیونده قادر به پذیرش ۱۸ عضو در اتصال می‌باشد (شکل۵).



شکل (۵) : سیستم ZUBLIN

پیچ‌های به‌کار رفته در این سیستم نیز، مطابق شکل ۶ می‌باشد.



شکل (۶) : انواع پیچ‌های سیستم ZUBLIN

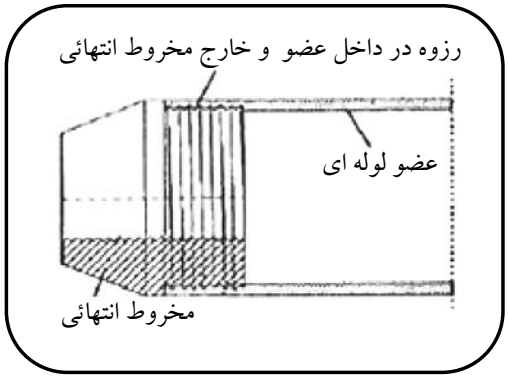
مطابق شکل، هر پیچ از دو قسمت رزوه‌ای مختلف تشکیل‌شده که یک غلاف واسط با رویهٔ شش وجهی یا استوانه‌ای مابین آنها قرار دارد و با استفاده از همین پیچ سفت می‌گردد. یک سوراخ نیز برای بازدید و مطمئن‌شدن از سفتی پیچ تعبیه‌شده است.

در گام اول تولید پیوند یک صفحه گرد فلزی در قالب U شکلی تحت اثر حرارت در کوره کوبن‌کاری می‌شود تا صفحه به صورت U شکل درآید. در گام بعدی قسمت باز فوقانی را، تحت فشار توسط قالب دیگری می‌بندند. در خاتمه یک سوراخ در بالای پیوند باقی می‌ماند که می‌تواند رزوه شده و محل اتصال اولین پیچ باشد.

گام‌های تولید اعضا نیز به شرح زیراند:

۱) برای سایز معمول لوله‌ها، با قطر $۶۰mm$ تا mm ۱۳۰، اتصال به روش جوش‌کاری اصطکاکی صورت می‌گیرد. به این ترتیب که مخروط انتهایی را در دستگاه چرخانی قرارداده و لوله را به صورت هم محور به طرف آن حرکت می‌دهند تا محل اتصال لوله و مخروط انتهایی گداخته شود. سپس دوران را متوقف‌ساخته و لوله را با اعمال نیروی فشاری به مخروط متصل می‌کنند. انجام این فرآیند جوش‌کاری در حدود ۲ تا ۱۵ ثانیه طول می‌کشد.

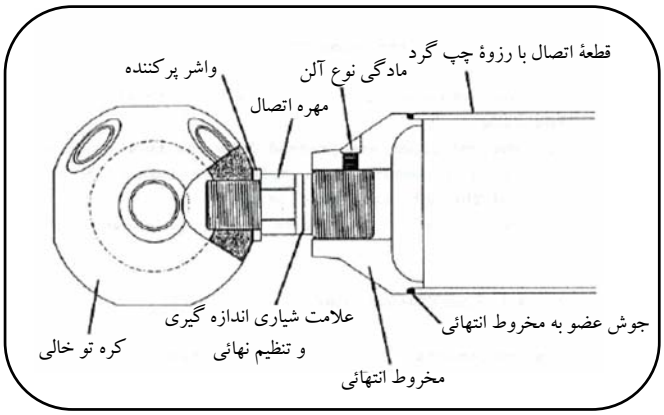
۲) در لوله‌های با ابعاد کوچک‌تر، انتهای لوله رزوه‌شده و مخروط مطابق شکل ۷، به آن پیچ می‌شود.



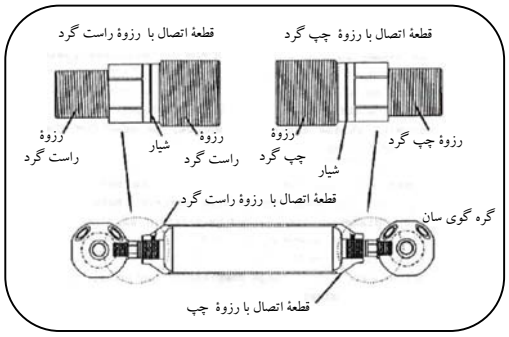
شکل (۷) : نحوه اتصال مخروط انتهایی به اعضای لوله‌ای

۳) برای اعضای تحت فشـار زیاد و کشش اندک و با قطر خارجی mm ۱۵۹ تا mm ۲۱۹، اتصال مخروط به این ترتیب انجام می‌شود که مخروط انتهایی به صورت درپوش داخل لوله، تحت فشار قرار می‌گیرد. سپس در همان حالت چهار پین داخل سوراخ‌هایی که قبلاً تعبیه شده‌اند، قرار داده می‌شوند.

۱-۱-۴- سیستم پیونده گوی‌سان UNITRUSS: این سیستم که توسط شرکت TOMOE ارایه شده است، از یک کره توخالی کوبن‌کاری شده، اعضا لوله‌ای و وسایل اتصال تشکیل شده است. شکل ۸، مقطعی از این سیستم را نشان می‌دهد.



شکل (۸) : سیستم UNITRUSS

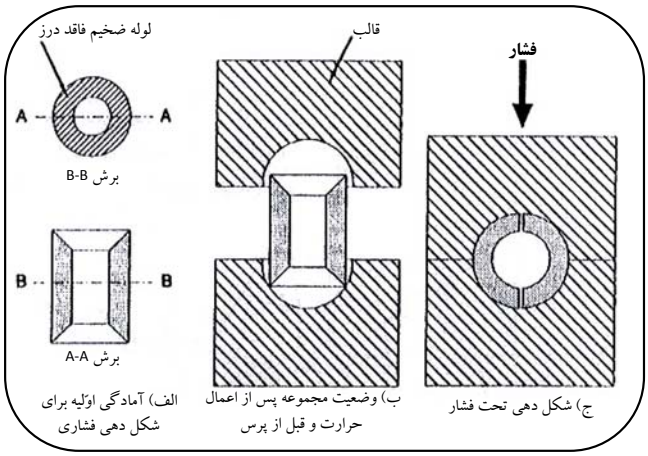


شکل (۹): نحوه اتصال اعضای به پیونده‌ها در سیستم UNITRUSS

پیچ‌های به کار رفته در این سیستم دارای شکل ویژه‌ای هستند. شکل ۹، جزییات پیچ‌ها را نشان می‌دهد. مطابق شکل، این پیچ‌ها به صورت دو نوع راست گرد و چپ گرد می‌باشند. همچنین با توجه به اینکه دو نوع پیچ مورد استفاده قرار می‌گیرد، پیونده‌ها نیز به دو صورت چپ گرد و راست گرد رزوه می‌گردند. مزیتی که چنین پیچ‌هایی دارا هستند، این است که می‌توان با چرخاندن لوله فاصله مابین دو پیونده را کم و زیاد نموده و تنظیم کرد و در صورت نیاز در شبکه دولایه پیش‌خیز ایجاد نمود. البته بیشینه محدوده‌ای که در این سیستم برای تنظیم وجود دارد $5mm$ می‌باشد.

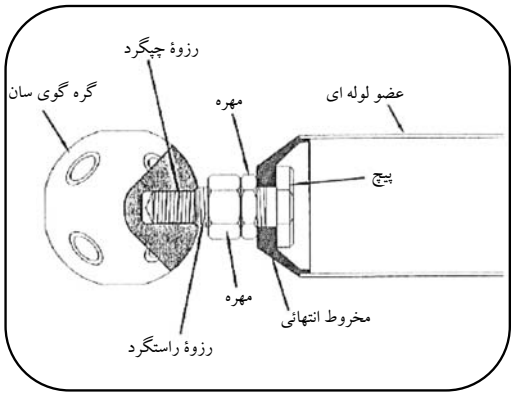
مطابق شکل۹، پیچ کوچکی نیز پس از تنظیم فاصله بین پیونده‌ها برای جلوگیری از دوران عضو به‌کار می‌رود. با توجه به پیچیدگی تولید انبوه سیستم و جلوگیری از بروز اشتباه، برای ساخت سیستم از سیستم‌های کنترل عددی بهره‌گیری می‌شود. شکل ۱۰، روند تولید این پیونده را نشان می‌دهد. به این صورت که لوله‌ای با طول مشخص در دمای ^{c}۹۰۰ داخل قالب قرار داده شده و به

صورت کره توخالی در آورده می‌شود. سوراخ‌کاری این کره‌ها نیز با سیستم کنترل عددی انجام‌شده و مشابه سیستم KK، اطراف سوراخ‌ها ماشین‌کاری می‌گردد.

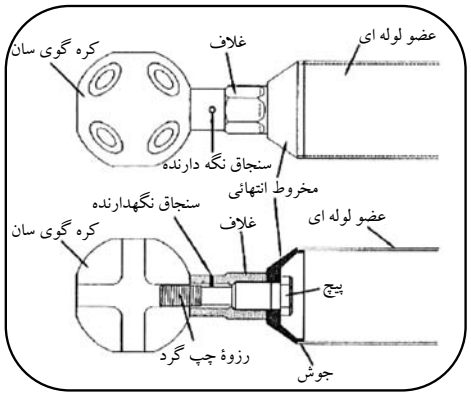


شکل (۱۰) : روند تولید پیوند UNITRUSS

۱-۱-۵- سیستم پیوند گوی‌سان ORONA: این سیستم به دو صورت سیستم ELKAR و ORT ارایه شده است. سیستم ORTZ که در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد، سیستم قدیمی ORONA بوده است که بعد از اصلاح سیستم مطابق شکل ۱۲، به سیستم ELKAR موسوم گردیده است.



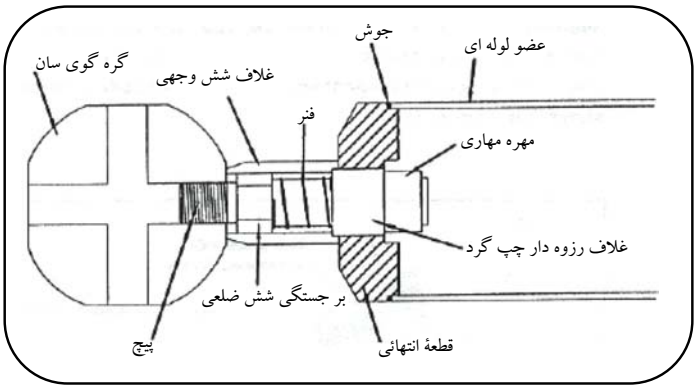
شکل (۱۱) : سیستم ORTZ



شکل (۱۲) : سیستم ELKAR

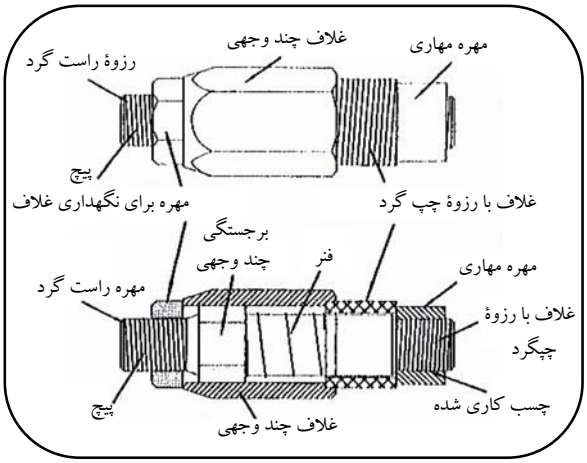
هر دو سیستم شامل پیوند گوی‌سان، اعضا لوله‌ای، پیچ‌ها و مهره‌ها می‌باشند. پیوندها به صورت کروی توپر بوده که سوراخ کاری و رزوه می‌گردند. قبل از جوش‌کاری مخروط انتهایی به لوله‌ها، یک پیچ داخل مخروط قرارداده شده و با یک مهره نازک در جای خود سفت می‌شود. پس از جوش‌کاری مخروط انتهایی به لوله‌ها، رنگ‌کاری صورت می‌گیرد. تفاوتی که دو سیستم فوق دارند در این است که، پیچ‌های سیستم ORTZ، از دو قسمت مختلف رزوه شده تشکیل شده‌اند که به صورت چپ گرد (متصل به پیوند) و راست‌گرد (متصل به عضو) ساخته‌شده‌اند، اما پیچ‌های به‌کار رفته در سیستم ELKAR، فقط از یک قسمت رزوه‌شده چپ گرد تشکیل شده‌اند که با یک پین به غلاف رویین متصل می‌گردند.

۱-۱-۶- سیستم پیونده گوی‌سان KT-TRUSS: این سیستم اخیراً توسط یک شرکت ژاپنی ارایه شده است. اجزای این سیستم شامل پیونده گوی‌سان، اعضا لوله‌ای و قطعات اتصال‌دهنده می‌باشند. این سیستم از لحاظ کلیات طراحی پیونده نظیر سیستم KK شرکت Mero است. شکل ۱۳، مقطعی از آن را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳) : سیستم KT-TRUSS

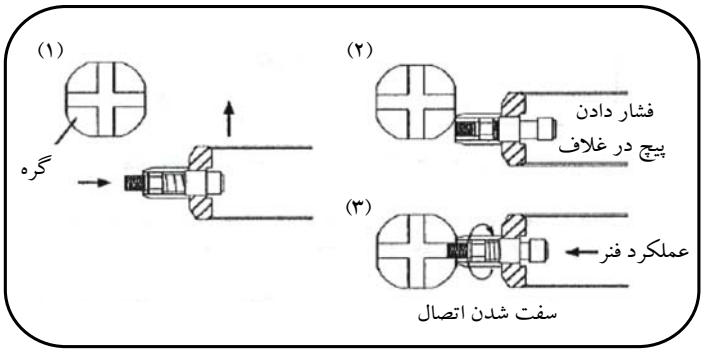
همچنین سیستم دارای پیچ ویژه‌ای است که موسوم به پیچ KT-TRUSS می‌باشد که جزییات مربوط به این پیچ در شکل۱۴ نشان داده شده است.



شکل (۱۴) : جزییات پیچ KT-TRUSS

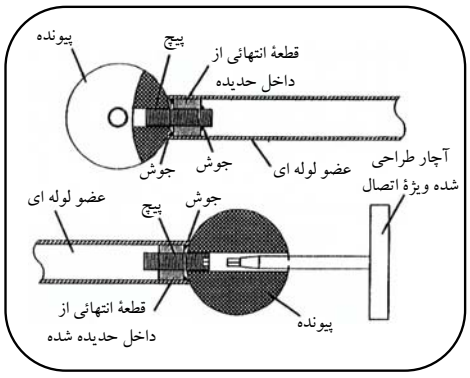
پیچ KT-TRUSS، شامل دو قسمت رزوه شده در انتهاها و یک برجستگی شش ضلعی در قسمت میانی می‌باشد. مزیتی که این پیچ نسبت به سایرین دارد در این است که برای بستن آن نیاز به آچار یا وسیله دیگری نمی‌باشد. نحوه مونتاژ آن به این صورت است که از یک سمت یک فنر را در قسمت رزوه نشده پیچ قرارداده، غلافی را که سطح رویین آن رزوه‌شده، بر آن مستقر کرده و با یک مهره آن را سفت می‌کنند. از سمت دیگر، غلاف دیگری را قرارداده و به وسیله یک مهره، که در هنگام مونتاژ آن را باز خواهند کرد، آن را در محل خود نگهداری می‌کنند. پس از مونتاژ پیچ، آن را به قطعه انتهایی لوله می‌بندند. با انجام مراحل فوق سیستم آماده مونتاژ خواهد بود. روند مونتاژ به این صورت است که مهره مربوط به غلاف بزرگ‌تر را باز کرده و پیچ را به طرف لوله فشار می‌دهند. در اثر فشار وارده، پیچ به طرف داخل لوله حرکت‌کرده و فنر جمع می‌گردد. پس از اینکه پیچ در مقابل سوراخ رزوه‌شده

پیوند قرار گرفت، نیروی فنر باعث چرخش پیچ‌شده و اتصال صورت می‌گیرد. در شکل ۱۵، نحوه مونتاژ عضو به پیوند نشان داده شده است.



شکل (۱۵) : نحوه مونتاژ عضو به پیوند

۱-۱-۷- سیستم پیوند گوی‌سان SCAN SPACE: این سیستم توسط یک مهندس دانمارکی ارایه شده است. اجزای این سیستم شامل پیوند گوی‌سان، اعضای لوله‌ای و پیچ‌ها می‌باشد. شکل ۱۶، مقاطعی از این سیستم را نشان می‌دهد.



شکل (۱۶) : سیستم SCAN SPACE

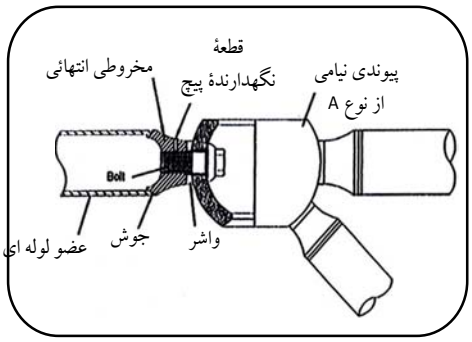
مطابق شکل، پیچ‌ها به قسمت انتهایی لوله‌ها، بسته می‌شوند. بستن پیچ‌ها در این سیستم به دو صورت انجام می‌گیرد. به صورتی‌که یکی از دو پیچ عمود بر یکدیگر، از پیش به لوله جوش‌شده و دیگری به وسیله یک آچار ویژه، از داخل پیوند به لوله بسته می‌شود.

۱-۲- سیستم‌های پیوند نیامی (Socket Joint Systems)

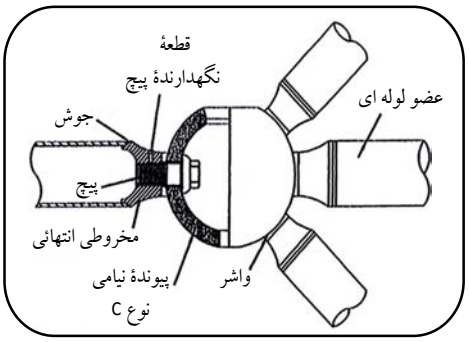
این سیستم‌ها، همانند سیستم‌های گوی‌سان توخالی هستند، با این تفاوت که دارای یک قسمت باز در یک یا دو طرف پیوند می‌باشند. قسمت‌های باز پیوند برای ورود و بستن پیچ‌ها از درون پیوند در نظر گرفته شده‌اند. بستن پیچ‌ها از درون، این مزیت را دارد که نیازی به رزوه کردن پیوند نمی‌باشد. با این همه باید توجه داشت که انعطاف‌پذیری و تغییرشکل پیوندهای نیامی با توجه به توخالی‌بودن باید در حد قابل قبولی محدود گردد، در غیراین صورت مفروضات تحلیل بدون در نظرگرفتن اثر این تغییر شکل‌ها به نتایج نادرست منتهی خواهد شد. تغییرشکل‌های پیوندهای نیامی در صورتی که قابل ملاحظه باشند در رفتار سازه فضاکار تأثیرگذار بوده و باید در رفتار آنها در تحلیل ملحوظ گردد. در این حالت به طور معمول لازم خواهد بود آزمایش‌ها برای به دست‌آوردن

منحنی‌های رفتار نیرو و تغییر شکل این پیوندهها تحت تأثیر نیروهای چند محوری فشاری و کششی محتمل تهیه گردد و در تحلیل به کار گرفته شود.

۱-۲-۱- سیستم پیوندہ نیامی NS (Nippon steel): شکل‌های ۱۷و ۱۸ نماها و مقاطع شماتیک این سیستم را نشان می-دهند. اجزای سیستم شامل پیوندہ نیامی، اعضاء لوله‌ای، پیچ‌ها و واشرها می‌باشند.



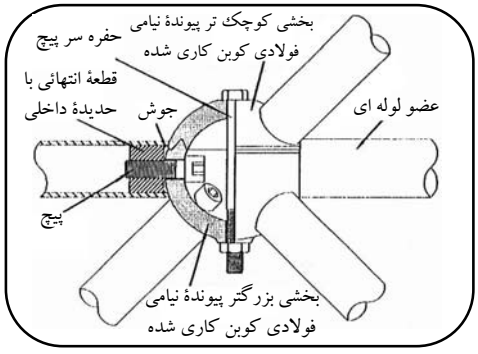
شکل (۱۷) : سیستم نیامي NS ـ نوع A



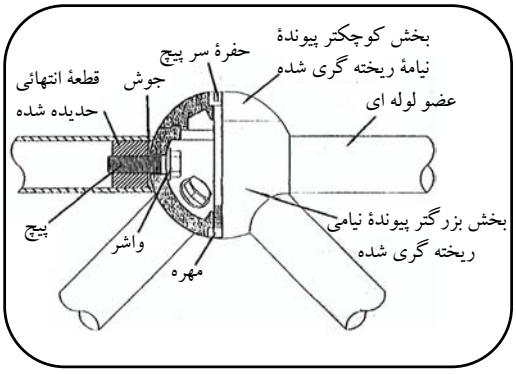
شکل (۱۸) : سیستم نیامي NS ـ نوع C

سیستم NS، دارای دو نوع مختلف برای ابعاد متفاوت است. سیستم نوع A، با مقطعی مطابق شکل ۱۷ با دو قسمت باز در پایین و بالا، با اندازه قطر پیوندہ mm ۱۱۰ تا mm۲۹۰ و سیستم نوع C با مقطعی مطابق شکل ۱۸، با یک قسمت باز و اندازه قطر پیوندہ mm۱۹۰ تا mm۴۳۰ می‌باشد. برای سیستم نوع A محدودیتی وجود دارد و آن نسبت عمق به بعد چشمه شبکه است که باید کمتر از ۰/۶۵ باشد. اعضا در این سیستم، شامل لوله‌ها و مخروط‌ها می‌باشند. مخروط انتهایی به لوله جوش‌شده و با پیچ به پیوندہ متصل می‌گردد. سطح در تماس با پیوندهٔ سر پیچ و واشر به کار رفته مابین پیوندہ و مخروط انتهایی، برای تماس مناسب به صورت منحنی در آورده می‌شود.

۱-۲-۲- سیستم پیوندہ نیامی SPHEROBAT: این سیستم توسط De Chateau و Batiment ارایه شده است و در دو نوع فولادی و آلومینیومی تولید گردیده است. هر دو نوع سیستم فوق، دارای دو قسمت تحتانی و فوقانی هستند که به وسیله یک پیچ به هم متصل می‌گردند. سطوح در تماس سر پیچ و واشر به کار رفته مابین پیوندہ و مخروط انتهایی، برای تماس مناسب به صورت انحنادار ساخته شده‌اند. شکل ۱۹ نوع فولادی اتصال را نشان می‌دهد. چنانکه ملاحظه می‌گردد، تفاوت این سیستم‌ها، در قسمت‌های انتهایی اعضای لوله‌ای است.



شکل (۱۹) : سیستم نیامی SPHEROBAT (فولادی)



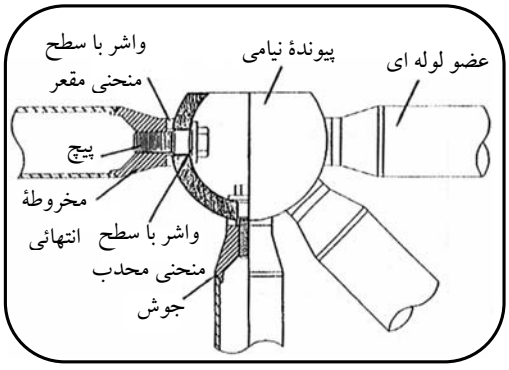
شکل (۲۰) : سیستم نیامی SPHEROBAT (آلومینیومی)

۱-۲-۳- سیستم پیونده نیامی UBALL: ایـن سیستم به وســیله یک معمار هلنـدی ارایه شده است. سیستم شامل پیونده کروی به صورت دو تکه، اعضای لوله‌ای، پیچ، مهره و واشر می‌باشد. شکل ۲۱، نمونه‌ای از این اتصال را نشان می‌دهد.

در این سیستم پیونده از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت کوچک‌تر آن که حدود یک چهارم کل پیونده را تشکیل می‌دهد، به صورت کلاهکی روی قسمت دیگر نصب‌شده و به وسیله پیچ به یکدیگر جفت می‌شوند. پیونده از مصالح آلومینیومی یا چدن گرافیتی دانه‌ای ساخته می‌شود. در انتهای اعضا از قطعه ریخته‌گری شده برای بستن پیچ‌ها استفاده می‌گردد. در مواردی که جنس قطعه انتهایی از فولاد باشد، یک سوراخ برای گالوانیزه‌کردن فولاد، تعبیه می‌گردد.

قطر استاندارد این پیونده‌ها، ۱۱۰mm، ۱۳۵mmو ۱۶۲mm بوده و ضخامت جدار آنها از mm ۴ تا ۲۰mm، تغییر می‌کند. قطر استاندارد اعضا ساخته‌شده از آلومینیوم از ۴۰mm تا ۱۵۰mm و ضخامتشان از ۳mm تا mm ۱۰ تغییر می‌کند و در صورتی که این اعضا از فولاد ساخته‌شده باشد، دارای قطری حدود ۳۸mm تا ۱۹۴mmو ضخامت ۲mm تا ۴mm خواهند بود. این سیستم برای چلیک‌ها و گنبدها، اعم از دولایه و تک لایه قابل کاربرد می‌باشد.

۱-۲-۴- سیستم پیونده نیامی کاسان (آکام فلز): این سیستم توسط یک شرکت ایرانی به نام آکام فلز ارایه شده است. اجزای این سیستم شامل پیونده نیامی، اعضای لوله‌ای، پیچ‌ها و واشرها می‌باشد (شکل ۲۱).



شکل (۲۱) : سیستم نیامی کاسان

این سیستم دارای یک قسمت باز برای بستن پیچ‌ها می‌باشد. روش تولید آن نیز مشابه سیستم گوی‌سان Zublin، به صورت کوبن‌کاری است. پیونده‌ها در دو مرحله کوبن‌کاری‌شده به شکل نهایی در می‌آیند. در پی آن رویهٔ پیونـده تراش‌کاری و سوراخ‌کاری می‌شوند. سوراخ‌کاری پیونده، به روش نیمه اتوماتیک در یک قاب قابل تنظیم صورت می‌گیرد. قطر لوله‌های مورد استفاده در این سیستم از $60\ mm$ تا $250\ mm$ تغییر می‌کند.

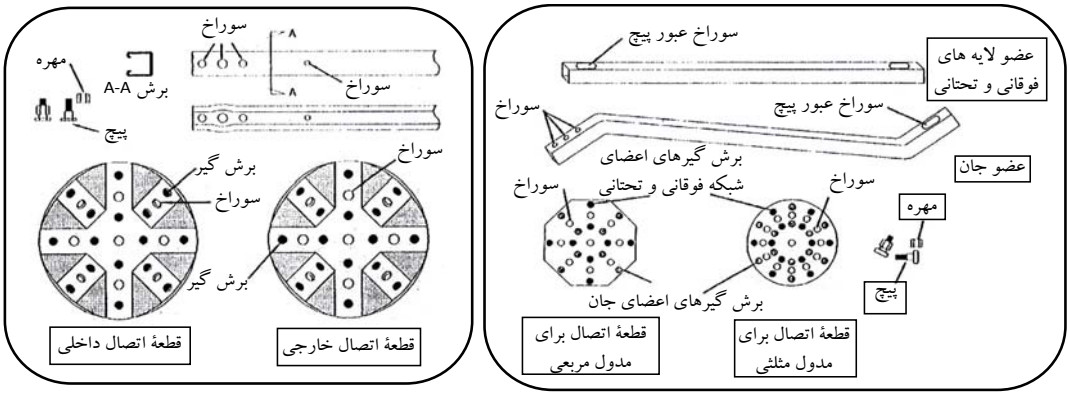
مطابق شکل ۲۱، واشرهای مورد استفاده برای سیستم دارای سطوح منحنی متناسب با انحنا پیونده هستند و در سمت درونی واشرها از نوع فنری می‌باشند.

واشرهای با انحنا مقعر مابین مخروط و پیونده، و واشرهای با انحنا محدب مابین سرپیچ و پیونده قرار می‌گیرند.

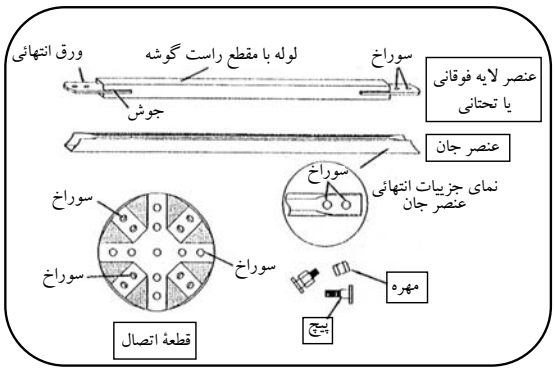
۱-۳- سیستم‌های پیونده صفحه‌ای

این سیستم‌ها از یک پیونده صفحه ای، اعضا، پیچ‌ها و مهره‌ها تشکیل شده‌اند. تفاوتی که این سیستم با سیستم گوی‌سان دارد در نحوه انتقال نیرو است. انتقال نیرو در سیستم پیونده گوی‌سان از طریق پیچ در کشش و قطعات انتهایی در فشار صورت می‌گیرد، در حالیکه انتقال نیرو در این سیستم‌ها، از طریق برش از پیچ به پیونده منتقل می‌گردد.

۱-۳-۱- سیستم‌های پیونده صفحه‌ای UNISTRUT ، POWER STRUT، KETRUSS : پیونده این سه سیستم فقط از یک صفحه تشکیل شده است. شکل هندسی آن، در سیستم Power-strut به صورت تخت و در سیستم‌های UNISTRUT, KETRUSS به صورت غیرتخت می‌باشد. اشکال ۲۲، ۲۳ و ۲۴ اجزای این سیستم‌ها را نشان می‌دهند.



شکل (۲۲) : قسمت‌های اصلی سیستم UNISTRUT **شکل (۲۳) : قسمت‌های اصلی سیستم Power-strut**

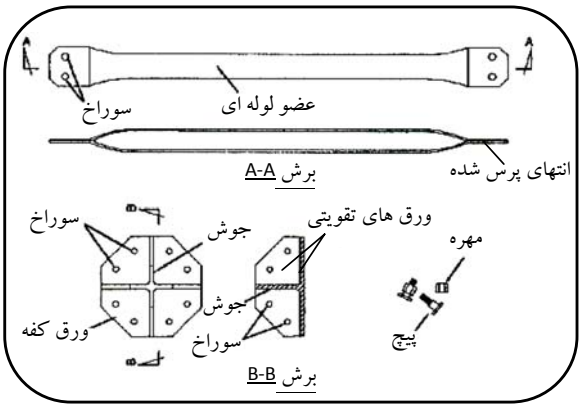


شکل (۲٤) : قسمت‌هاي اصلي سيستم KETRUSS

تفاوت دیگری که مابین سیستم‌های فوق وجود دارد در این است که در سیستم‌های UNISTRUT و POWERSTRUT برای اتصال اعضا به پیونده از یک پیچ و دو برش‌گیر و در سیستم KETRUSS از دو پیچ استفـاده می‌گردد. با توجه به شکل پیونده‌ها، اعضای به‌کار رفته در این سیستم‌ها می‌توانند مقاطع گوناگونی داشته باشند. این سیستم‌ها در سازه‌های فضاکار کاربرد فراوانی دارند. به طوری که سیستمUNISTRUT در شبکه‌های چندلایه مسطح مربع روی مربع، سیستمPOWERSTRUT، در شبکه‌های چند لایه، شبکه‌های قطری، شبکه‌های مثلثی (سه‌راهی) و سیستم KETRUSS در شبکه‌های دولایه مربع روی مربع به‌کار می‌روند.

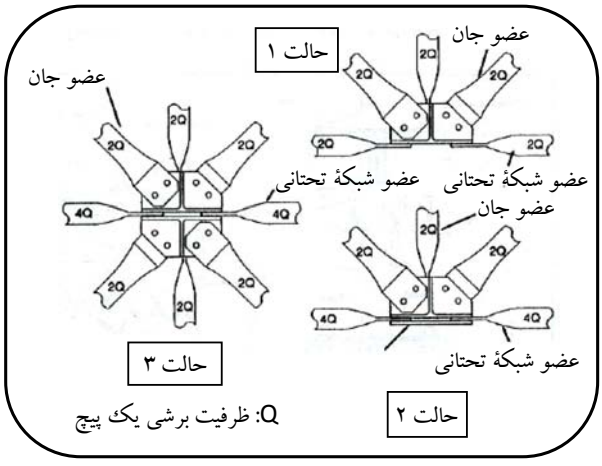
۱- ۳-۲- سیستم‌های پیونده صفحه‌ای OCTATUBE، TRIDIMATEC، TORUS GESTO PARTO: پیونده این سیستم‌ها، از دو صفحه تحتانی و فوقانی (به جز حالت ۱، در سیستم OCTATUBE) تشکیل یافته‌اند.

سیستم پیونده OCTATUBE، شامل یک صفحه هشت ضلعی، دو نیم صفحه هشت ضلعی، اعضای لوله‌ای با انتهاهای له‌شده، پیچ و مهره می‌باشد. در این سیستم مطابق شکل ۲۵، صفحات به هم جوش‌شده و اعضای لوله‌ای به آنها پیچ می‌شوند. این سیستم را می‌توان در شبکه‌های چند لایه، گنبدها وچلیک‌ها به‌کار برد.



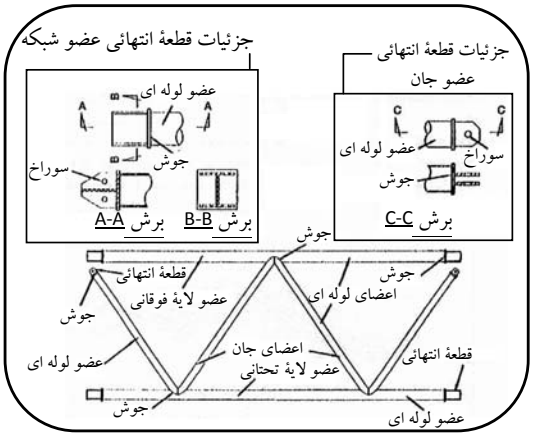
شکل (۲۵) : اجزای سیستم OCTATUBE

در شکل۲۶، انواع حالت‌های مونتاژ پیونده OCTATUBE، نشان داده شده‌اند. هر یک از حالت‌های نشان داده شده برای استفاده در شبکه‌های متفاوت به کار می‌روند.

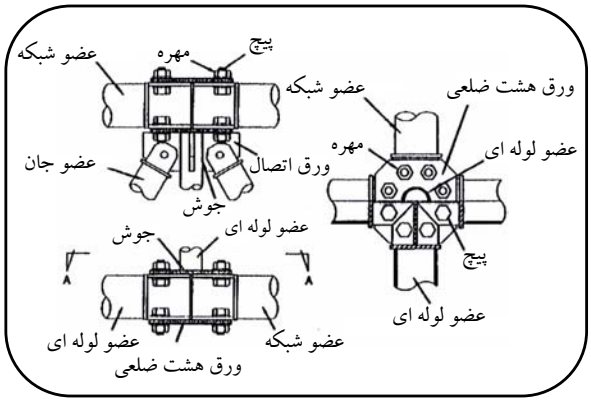


شکل (۲۶) : انواع حالات مونتاژ سیستم OCTATUBE

سیستم پیوندہ Tridimatec، از دو صفحه فولادی تشکیل شده که اعضای لوله‌ای با دو نوع قطعه انتهایی به آنها پیچ می‌شوند. قطعه انتهایی اعضای افقی شامل یک ورق انتهایی و یک قطعه H شکل بوده و قطعه انتهایی اعضای جان که به پیوندہ می‌رسد، مطابق شکل۲۷، شامل دو صفحه فلزی است که به ورق انتهایی لوله جوش می‌شوند. همچنین در قسمت‌هایی از شبکه، اعضای جان مستقیماً به اعضای افقی جوش‌کاری می‌شوند. شکل ۲۸، نمایی از این پیوندہ را نشان می‌دهد. این سیستم در انواع مختلف شبکه‌های دو لایه به کار گرفته شده است.

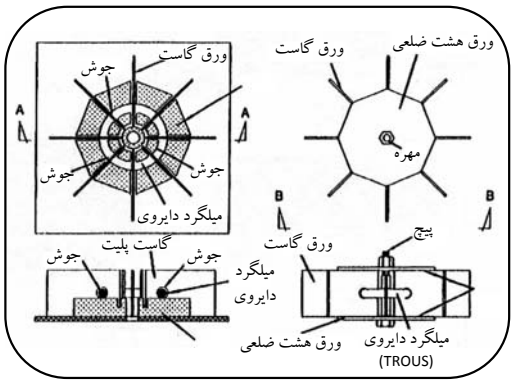


شکل (۲۷) : سیستم Tridimatec در یک خرپا



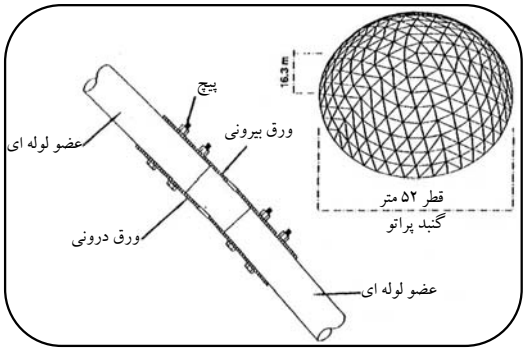
شکل (۲۸) : جزئیات سیستمTridimatec در شبکه مسطح

مطابق شکل ۲۹، سیستم پیوندہ صفحه‌ای Torus Gesto، از دو صفحه هشت ضلعی و هشت ورق فولادی مستطیلی، میلگرد، پیچ و مهره تشکیل شده است. ابتدا ورق‌های فولادی به صفحه تحتانی جوش‌شده و میلگردی دایروی از مابین سوراخ‌های آنها عبور داده می‌شود که به آنها جوش می‌گردد. بعد از جوش‌کاری، صفحه فوقـانی به قطعات مزبور پیچ می‌شود. در این سیستم، اعضای سازه‌ای می‌توانند با جوش‌کاری یا پیچ به پیوندہ متصل گردند.



شکل (۲۹) : جزئیات سیستم Torus Gesto

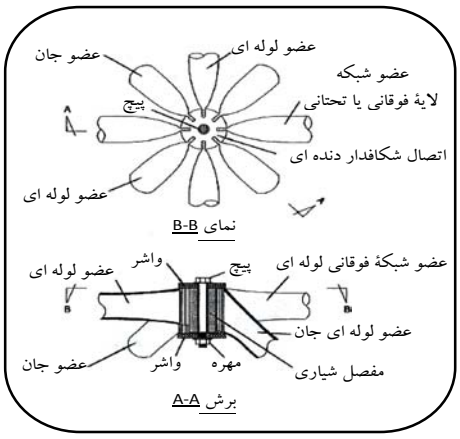
سیستم پیوندہ Prato که توسط یک مهندس ایتالیایی طراحی شده است، مطابق شکل۳۰ می‌باشد. این سیـستم از دو صفحـه گرد تشـکیل‌شده که بعـد از سوراخ‌کـاری، انحنـای کوچکی نیز به آنها داده می‌شود تا امکان اتصال اعضای لوله‌ای به یکدیگر فراهم گردد.



شکل (۳۰) : جزییات سیستم PARTO

۱-۴- سیستم‌های پیونده شکافی (Slot Joint System)

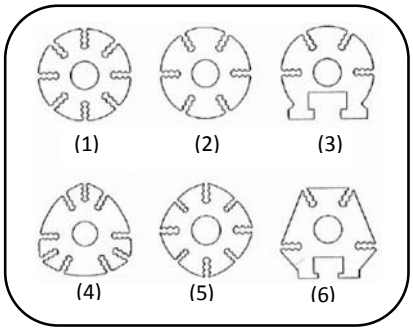
این سیستم‌ها، شامل پیونده استوانه‌ای شکاف‌دار با شکاف‌های دنده‌ای شکل، اعضا با انتهاهای له‌شده و فرم داده‌شده، پیچ، مهره و واشر می‌باشند. شکل ۳۱، نمونه‌ای از این پیونده را نشان می‌دهد.



شکل (۳۱) : سیستم Triodetic

برای اتصال، انتهای اعضا را مطابق دنده‌های شکاف‌ها له کرده، فرم‌داده و داخل شکاف‌های ایجادشده در پیونده فرو برده و به وسیله دو واشر نگهدارنده و بستن یک پیچ و مهره، نصب کامل می‌گردد.

امروزه یکی از مشهورترین سیستم‌های پیونده شکافی سیستم Triodetic است که به وسیله یک شرکت کانادایی ارایه شده است. شکل ۳۲، انواع این پیونده را نشان می‌دهد.



شکل (۳۲): انواع پیونده‌های سیستم Triodetic

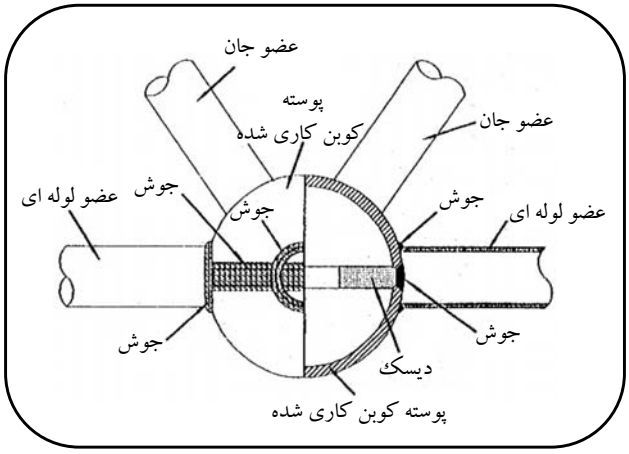
کابردهای این شش نوع پیونده، به ترتیب عبارت‌اند از:

۱) شبکه‌های دو لایه دو طرفه
۲) گنبدهای تک لایه لاملا
۳) خرپاها و پل‌های عابر پیاده
۴) شبکه‌های دو لایه سه سویه
۵) شبکه‌های دو لایه دو سویه
۶) خرپاهای پل‌ها

جنس مصالح سیستم سازه فضاکار مزبور از آلومینیوم یا فولاد و یا ترکیبی از این دو در نظر گرفته شده است. گاه پیوندهها از آلومینیوم و اعضا از فولاد ساخته می‌شوند.

۱-۵- سیستم‌های پیونده پوسته‌ای

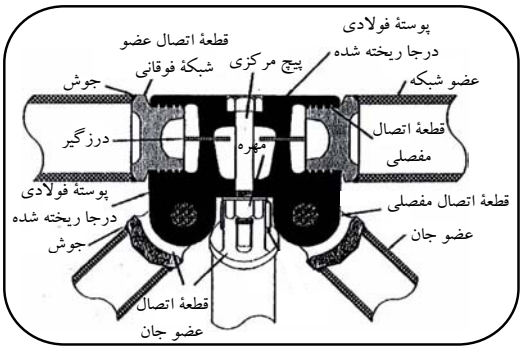
۱-۵-۱- سیستم‌های پیونده پوسته‌ای OKTAPLATTE: این سیستم توسط یک شرکت آلمانی ارایه شده است و شامل دو پوسته نیم کره‌ای کوبن‌کاری‌شده، یک صفحه گرد و اعضای لوله‌ای می‌باشد. قسمت‌های یادشده به یکدیگر جوش می-گردند. شکل ۳۳، اجزای این سیستم را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه اعضای لوله‌ای با جوش به پیونده متصل می‌گردند، زوایای متنوعی بین اعضای اتصال یافته، می‌توان ایجاد نمود. از این رو با این سیستم می‌توان انواع فرم‌های شبکه‌های فضایی را به وجود آورد.



شکل (۳۳) : سیستم OKTAPLATTE

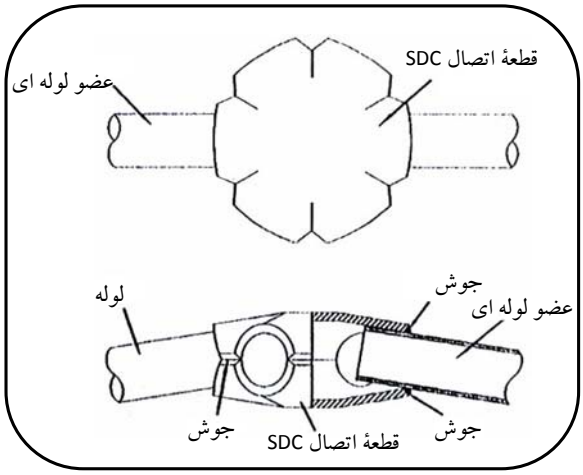
۱-۵-۲- سیستم‌های پیونده پوسته‌ای NODUS: سیستم پیونده NODUS، که توسط یک شرکت انگلیسی ارایه شده، عموماً در شبکه‌های دولایه کاربرد دارد. شکل ۳۴، نمونه‌ای از این سیستم را نشان می‌دهد. اجزای پیونده شامل دو پوسته فلزی، پیچ مرکزی، مهره، واشر و پین می‌باشد. برای اتصال پیونده به اعضای لوله‌ای قطعاتی به انتهای آنها جوش می‌شوند. در اعضای

شبکه‌های زیرین و رویین قطعه انتهایی به صورت شیاردار و در اعضای جان، به صورتی است که به توان یک پین را از آن عبور داده و به پیونده متصل کرد.



شکل (۳٤) : سیستم NODUS

۱-۵-۳- سیستم‌های پیونده پوسته‌ای SDC: این سیستم نیز از جمله سیستم‌های پوسته‌ای به شمار می‌رود و از دو پوسته فلزی و اعضای لوله‌ای تشکیل یافته‌است که این دو پوسته، در کارخانه به هم جوش می‌شوند. مطابق شکل ۳۵، پیونده دارای شش سوراخ است که اعضای لوله‌ای داخل آن قرار گرفته و به آن جوش می‌شوند.



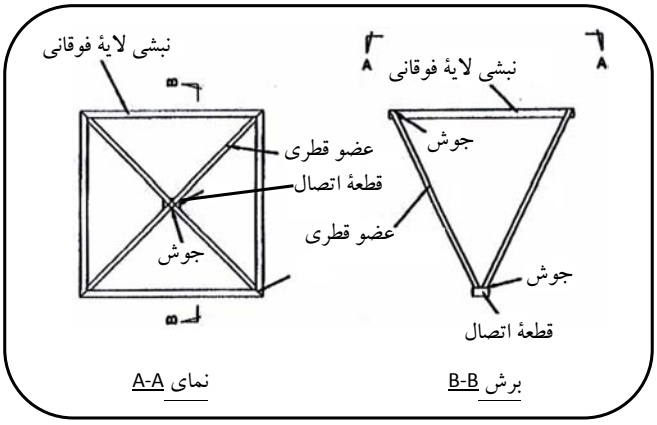
شکل (۳۵) : سیستم SDC

۲- سیستم‌های واحدی

این سیستم‌ها از واحدهایی تشکیل یافته‌اند که با اتصال آنها به یکدیگر مجموعه سازه فضاکار حاصل می‌گردد. فرم‌های متنوع این واحدها، انواع گوناگون سیستم‌های واحدی رایج را به وجود آورده‌اند.

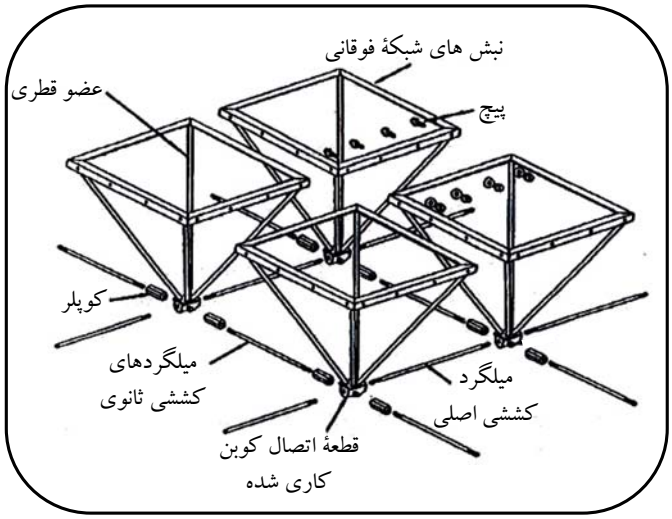
۲-۱- سیستم واحدی SPACE DECK

این سیستم توسط یک شرکت انگلیسی در سال ۱۹۵۴ ارایه شده است. جزء تشکیل‌دهنده سیستم، هرم مربع القاعده‌ای است که به صورت معکوس قرار می‌گیرد . شکل ۳۶، نمایی شماتیک از این واحد را نشان می‌دهد.



شکل (۳۶) : جزییات هر واحد سیستم SPACE DECK

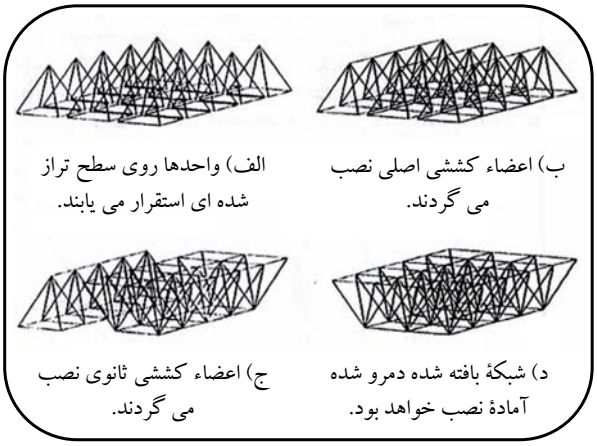
اجزای تشکیل‌دهنده هر واحد، شامل چهار نبشی فوقانی، چهار عضو قطری میله‌ای و یک قطعه پیونده تحتانی است که به یکدیگر جوش می‌شوند. این سیستم با توجه به عملکرد و نحوه مونتاژ در دوره‌ای از زمان از پرکاربردترین سیستم‌های سازه‌های فضاکار به شمار می‌رفت. برای ساخت مجموعه سازه فضاکار، واحدهای هرمی آماده را به یکدیگر متصل می‌کنند. مطابق شکل ۳۷، اتصال در قسمت فوقانی بوسیله پیچ و مهره و در قسمت تحتانی با میلگردهای رزوه شده انجام می‌گیرد.



شکل (۳۷) : اجزاء تشکیل دهنده سیستم SPACE DECK

مراحل نصب این نوع شبکه‌ها در شکل ۳۸ نشان داده شده است. ابتدا واحد هرمی به محل نصب حمل گردیده و به صورت منظم و به حالت وارونه روی زمین قرارداده می‌شوند. بعد، قسمت‌های تحتانی و فوقانی هر ردیف از سیستم به یکدیگر متصل

می‌گردند. با تشکیل سیستم به صورت ردیفی، هر ردیف را روی زمین برگردانده و این ردیف ها را دو به دو به هم وصل می‌کنند تا سیستم کامل گردد.

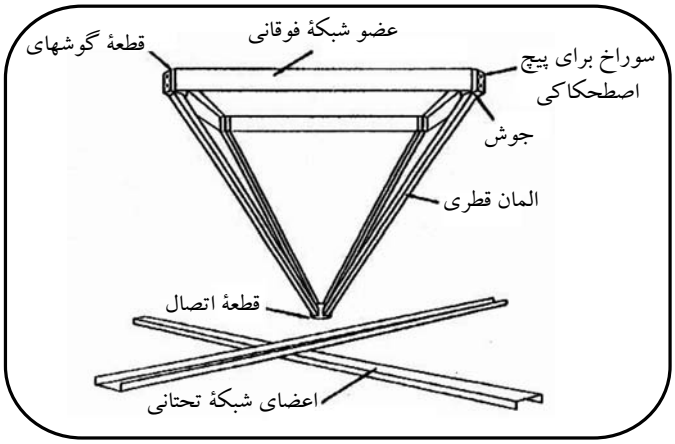


شکل (۳۸) : مراحل مونتاژ سیستم SPACE DECK

همچنین لازم به توضیح است که این سیستم با توجه به فرم هندسی خاص واحدها فقط درشبکه‌های دولایه از نوع مربع روی مربع کاربرد دارد.

۲-۲- سیستم واحدیUNIBAT

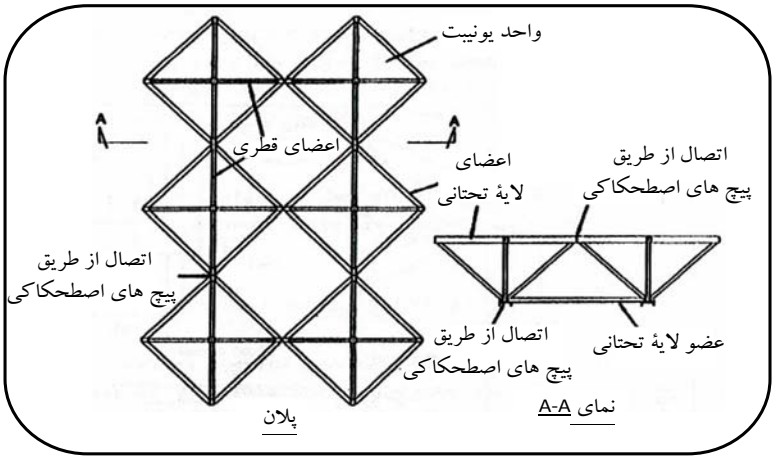
مطابق شکل ۳۹، این سیستم از واحدهای هرمی، اعضای تحتانی و پیچ‌های اتصال تشکیل شده است. هر واحد شامل چهار عضو فوقانی، چهار عضو جان و چهار قطعه مرکزی و یک قطعه انتهایی است که این قطعات مرکزی و انتهایی به صورت کوبن‌کاری شده ساخته می‌شوند.



شکل (۳۹) : جزییات هر واحد سیستم UNIBAT

برای ساخت این واحدها از مقاطع مختلفی از جمله لوله‌های توخالی و توپر، نبشی، ناودانی استفاده می‌گردد. تولید آنها از نبشی و مقاطع توخالی مستطیلی به‌دلایل اقتصادی متداول‌تر است؛ به صورتی که نبشی برای لایه فوقانی و مقطع قوطی شکل مستطیلی برای اعضای قطری به کار برده می‌شود.

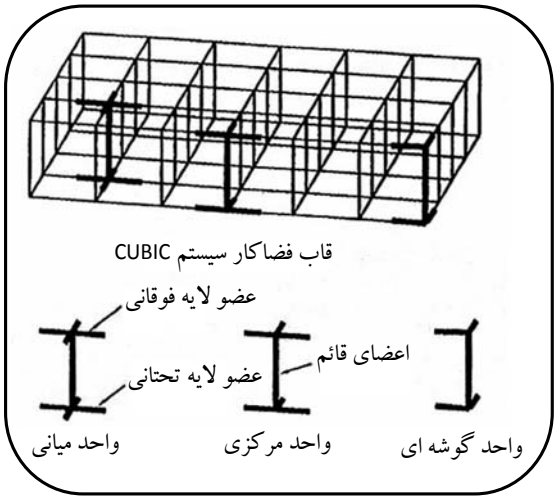
مطابق شکل۴۰، با سیستم UNIBAT، یک شبکه قطری روی مربع ایجاد می‌شود. نحوه نصب این شبکه‌ها به این صورت است که اعضای زیرین روی زمین قرارداده شده و سپس واحدهای هرمی روی آنها قرار داده می‌شوند. این واحدها و اعضای تحتانی با پیچ‌های اصطکاکی مقاومت زیاد، به هم اتصال می‌یابند. پس از کامل‌شدن سیستم، به وسیله بالابرها شبکه در محل نهایی خود قرار داده می‌شود.



شکل (۴۰) : سیستم UNIBAT

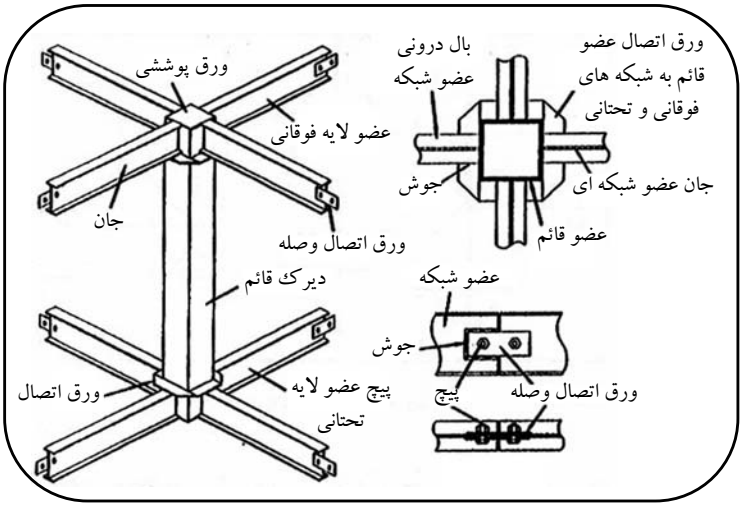
۲-۳- سیستم واحدی CUBIC

شکل۴۱، سه واحد داخلی، کناری و گوشه‌ای این سیستم را نشان می‌دهد.



شکل (٤١) : واحدهاي سيستم CUBIC

مطابق شکل ۴۲، هـر واحد شـامل یک عضو قـائم با مقطع قوطی شکل راست‌گوشه و اعضای افقی با مقطع I شکل می‌باشد. به هر دو انتهای عضو قایم یـک صفحه جوش می‌شود و بال‌های اعضای افقی به آن صفحه از طریق جوش متصل می‌گردند. همچنین یک صفحه به قسمت انتهایی هر عضو افقی جوش می‌شود تا واحدهای هرمی به یکدیگر با پیچ اتصال یابند.

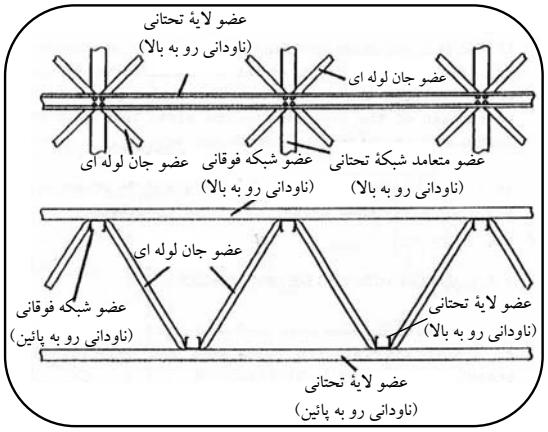


شکل (۴۲) : جزییات هر واحد سیستم CUBIC

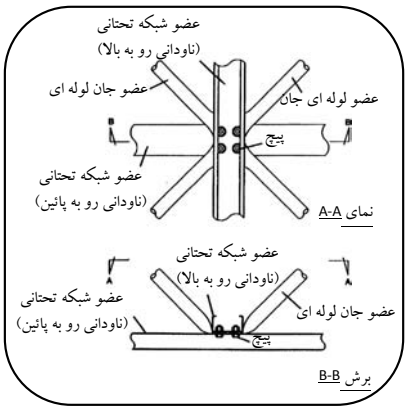
۳- سیستم ترکیبی (Compositive System)

این سیستم برخلاف مانند سیستم‌های واحدی و پیونده‌ای دارای یک واحد مشخص و یا دارای قطعات پیونده نمی‌باشد. از معروفترین سیستم‌های ترکیبی، سیستمHARLEY است که به سه صورت متفاوت طراحی شده است. در اینجا به سری۸۰ سیستم HARLEY پرداخته می‌شود.

اشکال ۴۳ و ۴۴، نماهایی از این سیستم را نشان می‌دهند. اجـزای سیستم شامل اعضـای افقی، اعضای جـان، پیچ، مهره و واشـر می‌باشند.



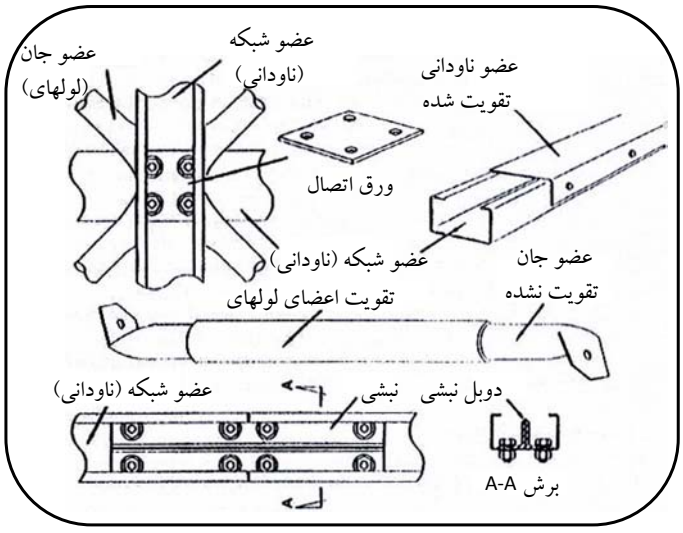
شکل (۴۳) : سیستم HARLEY



شکل (٤٤) : جزییات سیستم HARLEY

چنانـــکه ملاحظه می‌گردد، اعضـای افـقی در این سیستم به صورت پیوسته می‌بـاشند. این اعـضا از مقطع ناودانی ۷۵ × ۱۰۰ و ۵۰ × ۱۰۰ میلی‌متر ساخته می‌شوند و چهـار سوراخ در محل هر گره برای اتصال دیگر اعضا در نظـر گرفته می‌شود. اعضـای جـان، از لوله‌هایی با قطر $۴۲/۴mm$ و ضخامت $۲mm$ یا قطر $۴۸/۳mm$ و ضخامت $۲/۳mm$ می‌باشند که هر دو انتهـای آن باید به صورت له‌شده درآید. البته ابعادی که در فوق ارایه گردید، برای سیستمHARLEY سری۸۰ بوده که برای کاربرد تا دهانه خاص و تحت بار

خاص طراحی گردیده است. در واقع سری‌های دیگر برای کاربردهای متنوع به‌کار گرفته می‌شوند. قابلیت برجسته سیستمHARLEY، امکان تقویت آن مطابق شکل ۴۵ می‌باشد.



شکل (۴۵) : صفحات تقویت‌کننده در سیستم HARLEY

در گره‌هایی که مقدار بارهای متمرکز قابل ملاحظه باشد، می‌توان از یک صفحه تقویتی استفاده نمود. همچنین در اعضای افقی، از مقطع ناودانی با لبهٔ برگشته برای کاهش احتمال بروز کمانش موضعی و از ناودانی تقویتی برای کاهش احتمال بروز کمانش کلی استفاده می‌گردد. برای تقویت اعضای جان، می‌توان لوله‌های توخالی با قطر اندکی بزرگ‌تر را به آنها جوش‌کاری نمود. در سیستم HARLEY نیز مانند سایر سیستم‌ها، برای محافظت در مقابل خوردگی، اعضا و اتصالات را گالوانیزه می‌کنند. لازم به ذکر است که برای ساخت سیستم HARLEY، از مصالح آلومینیومی نیز علاوه بر فولاد استفاده می‌شود.

پیوست ۳

تعیین شـــــاخص انعطاف‌پذیری اتصالات سازه‌های فضاکار شبکه‌ای

مقدمه

یکی از ملاحظات اساسی در تحلیل سازه‌های فضاکار، تصمیم‌گیری در مورد نحوه مدل‌سازی اتصالات می‌باشد. نحوه مدل‌سازی اتصالات بستگی به نوع و مصالح اتصال و همچنین نوع تاشه و ابعاد سازه فضاکار دارد. اتصالات بر اساس صلیبت آنها به سه گروه زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

۱- اتصال مفصلی

۲- اتصال صلب

۳- اتصال نیمه‌صلب

تفسیر- *این پیوست شامل آثار ناشی از انعطاف‌پذیری و تغییرشکل متزاید پیوندها (به‌ویژه پیوندهای نوع نیامی) و ادوات اتصال نمی‌گردد. تأکید اصلی در این پیوست بر میزان قابلیت اتصال لنگر از طریق اتصال و میزان دوران نسبی عضو و پیوند می‌باشد که بر تأثیر رفتار کلی و موضعی سازه، در ضریب طول مؤثر عضو سازه فضاکار و در نتیجه در نسبت لاغری عضو نیز مؤثر خواهد بود.*

اگر چه گروه‌های ۱ و ۲ در تحلیل و طراحی سازه‌های فضاکار به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند ولی رفتار واقعی اتصالات اغلب نیمه‌صلب می‌باشد. طبقه‌بندی اتصالات در حالت کلی بستگی به سازه فضاکار و رفتار آن دارد. در واقع طبقه‌بندی اتصالات تنها بر اساس رفتار اتصال از کارایی مطلوب برخوردار نخواهند بود. به طور مثال، ممکن است یک اتصال خاص تحت تأثیر بار بهره‌برداری مفصلی یا صلب در نظر گرفته شود؛ در صورتی‌که برای بار نهایی به صورت نیمه‌صلب عمل نماید. همچنین ممکن است اتصالی برای یک سازه فضاکار شبکه‌ای دولایه به صورت مفصلی فرض شود، در حالی‌که برای یک گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه اندک، آن را به صورت نیمه‌صلب در نظر گرفت.

روش‌های چندی برای طبقه‌بندی اتصالات پیشنهاد شده است که از میان آنها دو روش برای سیستم‌های اتصالات در سازه‌های متشکل از قاب‌های ساختمانی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

۱- سیستم طبقه‌بندی Eurocode 3

۲- سیستم طبقه‌بندی .Bjorhovde et.al

این دو سیستم طبقه‌بندی برای اتصالات تیر به ستون پیشنهاد شده‌اند. سیستم طبقه‌بندی بورهود برای حالتی مناسب است که اطلاعی از جزییات اعضا در دسترس نباشد. از طرف دیگر، طبقه‌بندی در Eurocode3 بر اساس ظرفیت باربری قاب‌ها پیشنهاد گردیده‌است. همچنین سیستم طبقه‌بندی بورهود ظرفیت دَوَرانی مورد نیاز برای اتصال را تعیین می‌کند؛ در صورتی‌که در Eurocode3 این موضوع ملحوظ نمی‌شود. در این پیوست، با توجه به نوع اتصالات در سازه‌های فضاکار، به ویژه برای سیستم‌های پیونده‌ای، روش جدیدی ارایه می‌شود که کارایی آن با مطالعات پارامتریک به اثبات رسیده است.

روش پیشنهادی برای طبقه‌بندی سیستم‌های پیونده‌ای در سازه‌های فضاکار و تعیین شاخص اتصال

گام‌های اساسی در روش‌های طبقه‌بندی اتصالات شامل موارد زیر است :

۱- تعیین مرز بین نواحی مفصلی، صلب و نیمه‌صلب

۲- تخمین دَوَران اتصال در سازه‌های متفاوت

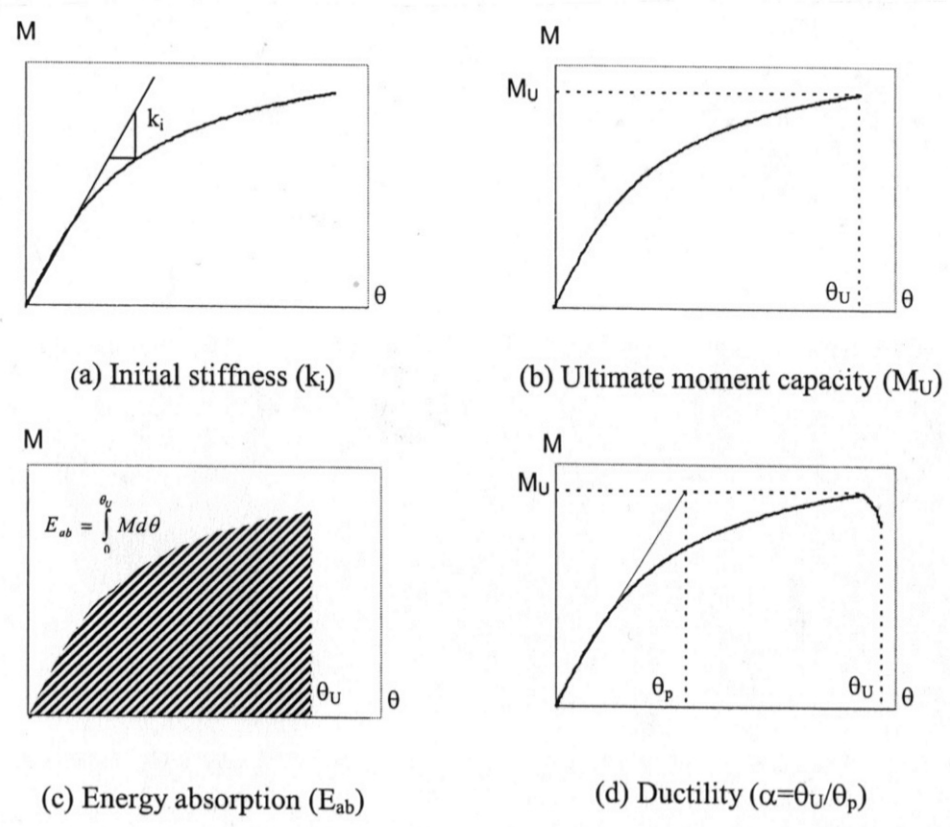
در حالت کلی مرز بین ناحیه‌ها بستگی به ویژگی‌های سازه مورد نظر دارد. عوامل زیر تأثیر بسزایی در تعیین مرز بین نواحی خواهند داشت:

- مشخصات اعضا
- فرم و مشخصات سازه
- روش تحلیل سازه (دینامیکی یا استاتیکی)

یک روش ساده برای طبقه‌بندی اتصالات، تعیین شاخصی برای اتصال بر اساس منحنی لنگر ـ دوران می‌باشد. به‌این منظور، چهار مشخصه مهم زیر در نظر گرفته می‌شود.

- سختی اولیه اتصال
- ظرفیت نهایی لنگر خمشی اتصال
- مقدار جذب انرژی اتصال
- شکل‌پذیری

این مشخصه‌ها در شکل (پ-۳-۱) نشان داده شده‌اند:



شکل (پ-۳-۱)

بدون نرمالیزه‌کردن مقادیر مشخصه استفاده از آنها در حالت کلی مقدور نخواهد بود. طبقه‌بندی اتصال به طور جدی متأثر از مشخصات عضو متصل به آن و مقدار تغییرشکل صورت گرفته در آن است. بنابراین طبقه‌بندی یک اتصال صرفاً بر اساس رفتار خود

اتصال مفید نخواهد بود. به عبارت دیگر، مشخصه‌های اتصال باید با مقادیر مرجعی مقایسه شود. این مقادیر مرجع می‌توانند با توجه به مشخصات عضو متصل به آن و یا بر اساس آگاهی قبلی در نظر گرفته شوند. در این پیوست، از ترکیب این دیدگاه‌ها استفاده شده است.

به منظور دخیل‌کردن مشخصات عضو متصل به اتصال، ابتدا مشخصات اتصال بر اساس مشخصات عضو نرمالیزه می‌شود. از آنجا که مقدار لنگر خمشی در یک اتصال بستگی به دَوَران اتصال دارد، به جای ظرفیت نهایی لنگر خمشی اتصال، از لنگر انتقالی استفاده می‌شود. بر این اساس سه مشخصه مهم برای طبقه‌بندی به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

- سختی اولیه (K_i)
- لنگر انتقالی (M_t)
- مقدار انرژی جذب شده (E_{ab})

تفسیر: *میزان شکل‌پذیری، در عوامل مذکور در فوق مستتر است.*

در این صورت یک اتصال می‌تواند به صورت یک بردار نظیر V_c مشخص شود.

$$V_c = \left[K_{in}, M_{tn}, E_{abn}\right]^T \quad \text{(پ ـ۳ـ۱)}$$

که در آن K_{in} ، M_{tn} و E_{abn} به ترتیب مربوط به مقادیر نرمالیزه‌شدهٔ K_i ، M_t و E_{ab} می‌باشند.

مقادیر نرمالیزه از روابط زیر استخراج می‌شوند:

$$K_{in} = \frac{2}{\pi} \times Arc\tan\left(K_i \frac{\theta_t}{M_u}\right) \quad \text{(پ ـ۳ـ۲)}$$

$$M_{tn} = M_t \Big/ M_p \quad \text{(پ ـ۳ـ۳)}$$

$$E_{abn} = E_{ab} \Big/ \left(M_p . \theta_t\right) \quad \text{(پ ـ۳ـ۴)}$$

که در آن

M_u : ظرفیت نهایی لنگر خمشی اتصال

M_p : ظرفیت لنگر پلاستیک عضو متصل به اتصال

θ_t : دوران ممکن اتصال می‌باشند.

در روابط فوق، انتخاب دَوَران ممکن اتصال مهم نبوده و بستگی به فرم سازه، شرایط سازه و بارگذاری دارد. برای محاسبه θ_t دو معادله که بر اساس مشخصات عضو متصل به اتصال تعریف شده‌اند، مورد استفاده قرارداده می‌شوند. این معادلات مبتنی بر پیشنهادات Eurocode3 و بورهود می‌باشند. در عین حال، نتایج حاصل از تعداد قابل ملاحظه‌ای از مطالعات تحلیلی انجام یافته در مورد سازه‌های فضاکار قابلیت استفاده از معادلات مذکور را برای مقاصد مورد نظر تأیید می‌نمایند. این معادلات عبارت‌اند از :

$$\theta_t = \frac{L_b . M_p}{E . I_b} \quad \text{(پ ـ۳ـ۵)}$$

$$\theta_t = \frac{5d.M_p}{E.I_b} \qquad \text{(پ ـ۳ـ۶)}$$

که در آن L_b طول عضو، I_b ممان اینرسی عضو و d ارتفاع عضو می‌باشد. همچنین E مدول الاستیسیته عضو و M_p ظرفیت لنگر پلاستیک عضو متصل به اتصال می‌باشد. مقادیر تقریبی میانگین θ_t برای مقاطع آهن بر اساس BS 4 و مقاطع لوله‌ای شکل دایروی بر اساس BS 4848 در جدول **پ ـ۳ـ۱** ارایه شده است. برای محاسبه θ_t ، L_b برابر 24d انتخاب شده است.

جدول پ ـ۳ـ۱

نوع مقطع تیر	θ_t (rad)	
	معادله (I)	معادله (II)
تیرآهن مطابق با BS 4	0.058	0.0120
مقاطع لوله‌ای دایروی مطابق با BS 4848	0.070	0.0147

بر اساس مقادیر محاسبه‌شده در جدول فوق، مقدار θ_t را می‌توان بین 0.015 و 0.050 انتخاب نمود.

بردار V_c برای اتصالات مفصلی و صلب به صورت زیر می‌باشد

برای اتصال مفصلی: $V_p = [۰.۰ \quad ۰.۰ \quad ۰.۰]^T$

برای اتصال صلب: $V_R = [۱.۰ \quad ۱.۰ \quad ۱.۰]^T$

حال با استفاده از ویژگی‌های متفاوت بردار V_c در مقایسه با بردار V_p، نگاشت بردار V_c به یک کمیّت عددی مقدور می‌باشد. این کمیّت عددی به عنوان شاخص اتصال C_I نامیده شده و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$C_I = (V_c - V_p)^T (V_c - V_p)/\sqrt{۳} \qquad \text{(پ ـ۳ـ۷)}$$

با دانستن شاخص اتصال می‌توان یک اتصال را در طبقه ویژه‌ای رده‌بندی کرد که به طور تحلیلی:

- اگر C_I=0.0 باشد، اتصال از نوع مفصلی ایده‌آل است.
- اگر C_I=1.0 باشد، اتصال از نوع صلب ایده‌آل است.
- در غیر این صورت اتصال نیمه‌صلب می‌باشد.

مطالعات پارامتریک روی سازه‌های شبکه‌ای فضاکار نشان می‌دهد که:

۱- برای C_I<0.2، اتصال را می‌توان مفصلی فرض نمود.

۲- برای C_I>0.8، اتصال را می‌توان صلب فرض کرد.

۳- برای 0.2<C_I<0.8، اتصال را می‌توان نیمه‌صلب فرض نمود.

در حالت سوم از آنجا که تحلیل با پیچیدگی مواجه خواهد شد ـ برای برخی از سازه‌ها که شرایط زیر را ارضا نمایند، اتصال را می‌توان مفصلی در نظر گرفت:

$W_P/W_R \Rightarrow 1$ و $0.2<C_I<0.8$ **(پ ـ۳ـ۷)**

W_P : فرکانس اصلی سازه در حالت اتصال مفصلی،

W_R : فرکانس اصلی سازه در حالت اتصال صلب.

پیوست ۴

گونه‌های ناپایداری در سازه‌های فضاکار شبکه‌ای

مقدمه

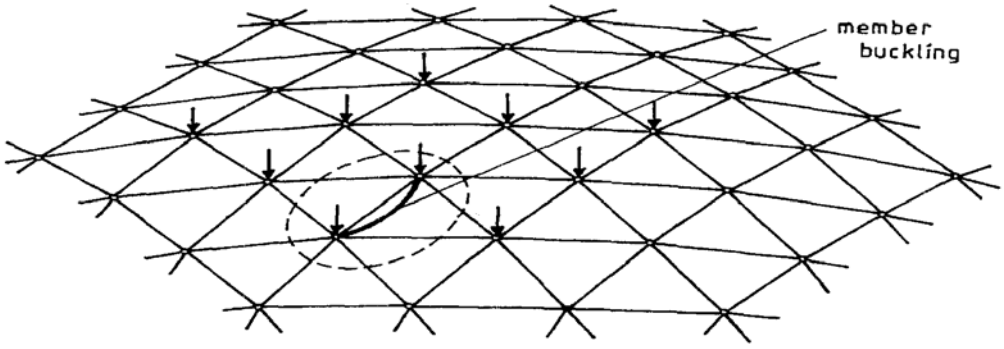
معمولاً چندین مود ناپایداری در سازه‌های فضاکار رخ می‌دهند که عبارت‌اند از:

۱- ناپایداری عضوی

همانطور که در شکل پ-۴-۱ نشان داده شده است، ناپایداری عضوی هنگامی رخ می‌دهد که یک عضو منفرد کمانش کرده و سایر اعضا تحت تأثیر قرار نگیرند. علی‌رغم مطالعات ارزشمند، محاسبه طول مؤثر واقع‌گرایانه اعضای فشاری در سازه‌های فضاکار هنوز یک مساله بحث برانگیز است. این مود ناپایداری یکی از ساده‌ترین شکل‌های ناپایداری است که می‌تواند به وسیله عوامل زیر ایجاد گردد.

تغییرشکل خمشی: انتظار می‌رود این نوع تغییرشکل به‌طور معمول در اعضای دارای سطح مقطع متقارن دو سویه (دارای تقارن دو محوری) نظیر مقاطع I شکل (تیرآهن و بال پهن) رخ دهد.

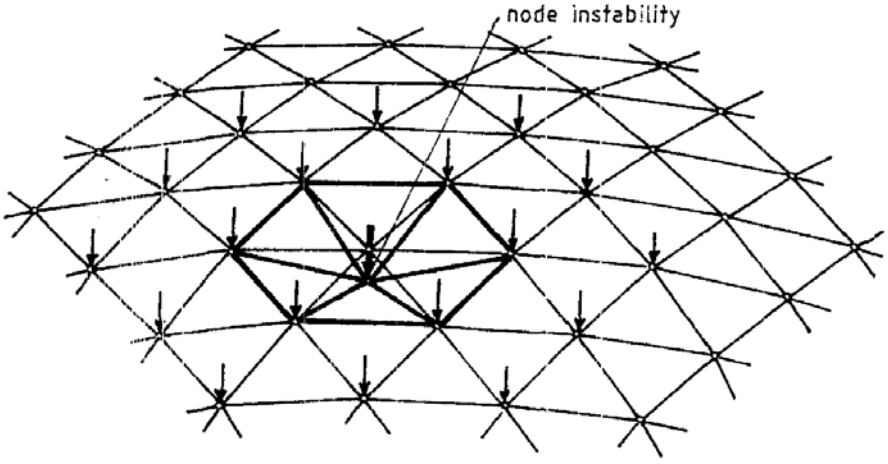
تغییرشکل پیچشی- خمشی: انتظار می‌رود این نوع تغییرشکل به‌طور غالب در اعضای دارای سطح مقطع متقارن یک سویه (دارای تقارن تک محوری) نظیر مقاطع T شکل رخ دهد.



شکل پ-۴-۱- ناپایداری عضوی

۲- ناپایداری گرهی

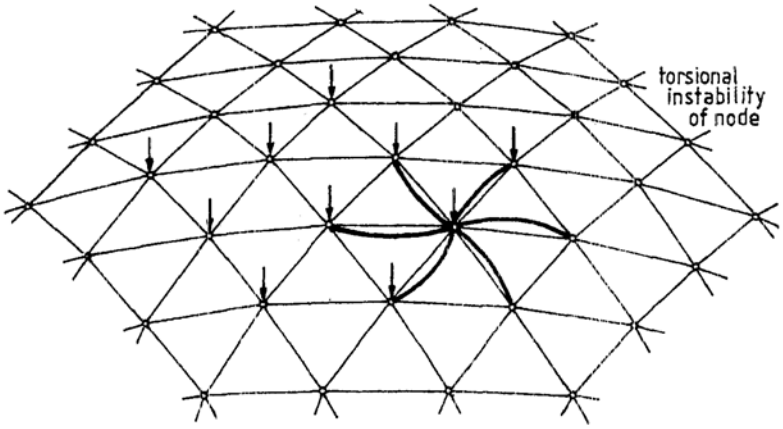
ناپایداری گرهی، مطابق شکل پ-۴-۲، هنگامی رخ می‌دهد که تمامی اعضای متصل به یک گره، تحت اثر آنچنان کرنش‌های محوری قرار گیرند که توانایی مقاومت در برابر بار خارجی گرهی را از دست دهند. در این نوع ناپایداری به دلیل اینکه اعضا دارای صلبیت خمشی درون صفحه‌ای قابل ملاحظه‌ای می‌باشند، تغییرمکان گرهی در جهت خارج از صفحه رخ می‌دهد.



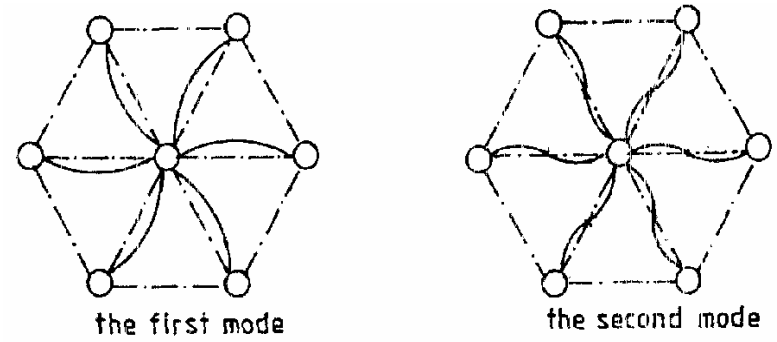
شکل پ-۴-۲- ناپایداری گرهی

۳- ناپایداری پیچشی گرهی

مطابق شکل پ-۴-۳، ناپایداری پیچشی گرهی هنگامی رخ می‌دهد که اعضا دارای صلبیت خمشی درون صفحه‌ای ضعیف‌تری از پیونده‌ها باشند. معمولاً در سازه‌های فضاکار دو مود کمانش پیچشی که در شکل پ-۴-۴ نشان داده شده‌اند، امکان بروز خواهند داشت.



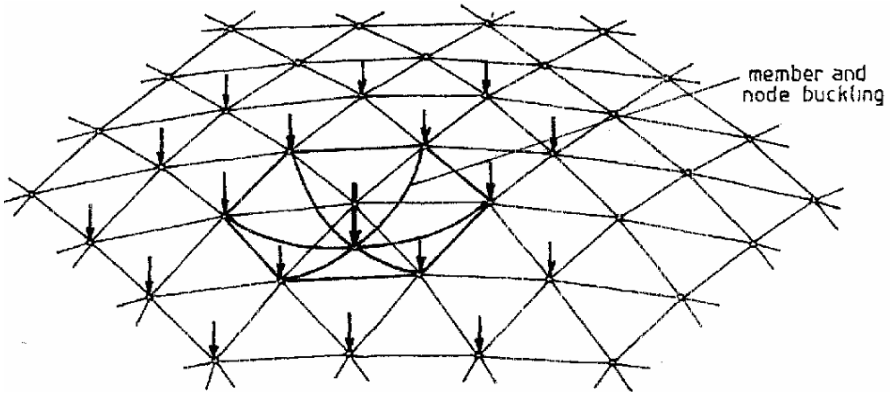
شکل پ-۴-۳- ناپایداری پیچشی گرهی



شکل پ-۴-۴- مودهای ناپایداری پیچشی گرهی

۴- حالات توأم ناپایداری

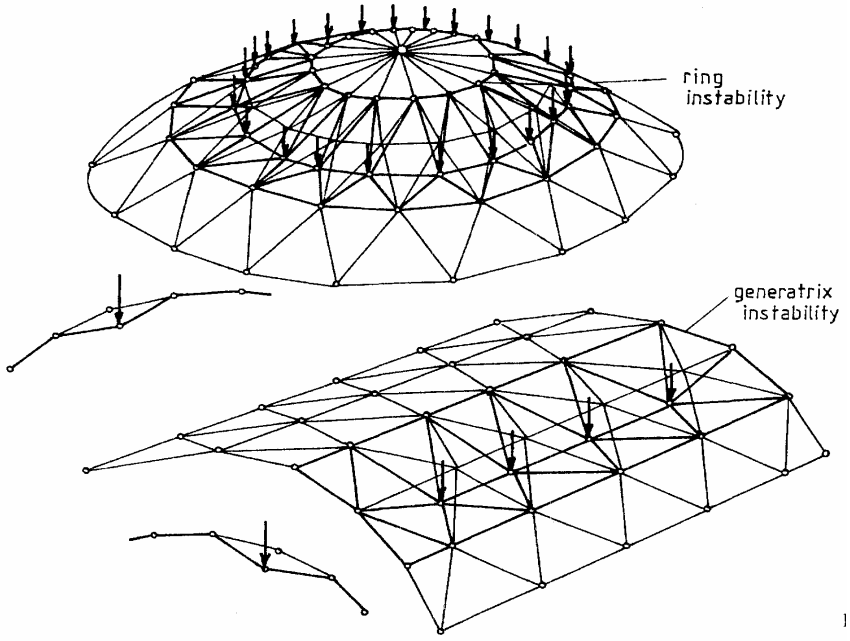
حالات توأم ناپایداری هنگامی رخ می‌دهند که مقادیر بارهای بحرانی مربوط به دو مود مختلف ناپایداری (معمولاً ناپایداری عضوی و گرهی) به‌هم نزدیک باشند و پدیدهٔ کمانش هر دو مود را شامل شود. در شکل پ-۴-۵، نمونه‌ای از حالات محتمل ناپایداری توأم شامل دو مود کمانش عضوی و گرهی نشان داده شده است.



شکل پ-۴-۵- ناپایداری کوپل

۵- ناپایداری در امتداد مسیر

همانطور که در شکل پ-۴-۶ نشان داده شده است، ناپایداری در امتداد مسیر هنگامی رخ می‌دهد که فقدان پایداری در مجموعهٔ گره‌های واقع بر حداقل یک حلقه (یا مدار) سازه فضاکار گنبدی یا تمامی گره‌های واقع بر حداقل یک مسیر سازهٔ فضاکار چلیکی یا مجموعهٔ گره‌های حداقل یک ردیف شبکه دو یا چند لایه، به همراه تمامی اعضای متصل به آن گره‌ها، حادث گردد.

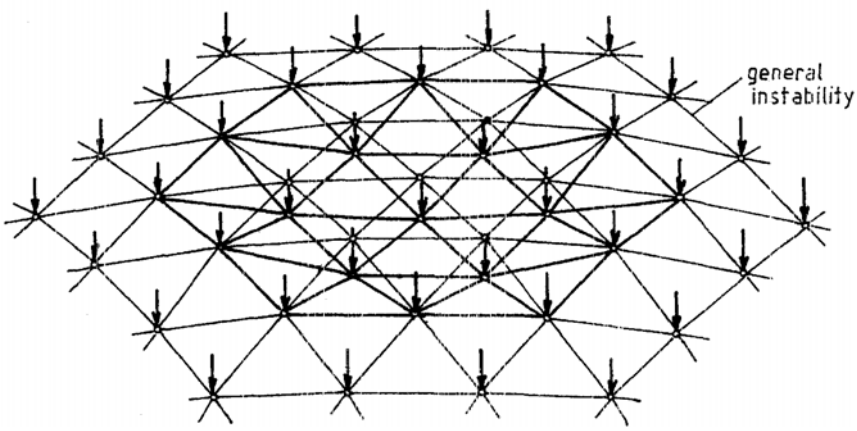


شکل پ-۴-۶- ناپایداری در امتداد محور

مطالعات انجام گرفته در مورد این حالات ناپایداری، نشان می‌دهند که بروز این نوع ناپایداری بسیار خطرناک می‌باشد، چراکه اثرات مساعد میله‌های افقی که در پایداری از نوع کمانش فروجهشی گرهی دخالت می‌نمایند، در حالت ناپایداری در امتداد مسیر ظاهر نمی‌شوند.

۶- ناپایداری کلی

مطابق شکل پ-۴-۷، ناپایداری کلی به حالتی اطلاق می‌گردد که رخداد پدیده کمانش تمامی گره‌ها و اعضای یک سطح بالنسبه وسیع از سازه را شامل گردد. این مود ناپایداری معمولاً هنگامی بروز می‌نماید که طول موج کمانش به میزان قابل توجهی از طول عضو بزرگتر باشد.



شکل پ- ۴-۷ ناپایداری کلی

پیوست ۵

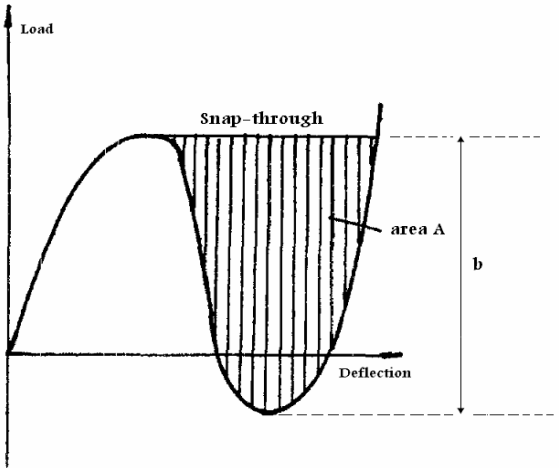
رده‌های ناپایداری در سازه‌های فضاکار شبکه‌ای

رده‌های ناپایداری در سازه‌های فضاکار شبکه‌ای

۱- فروجهش گرهی

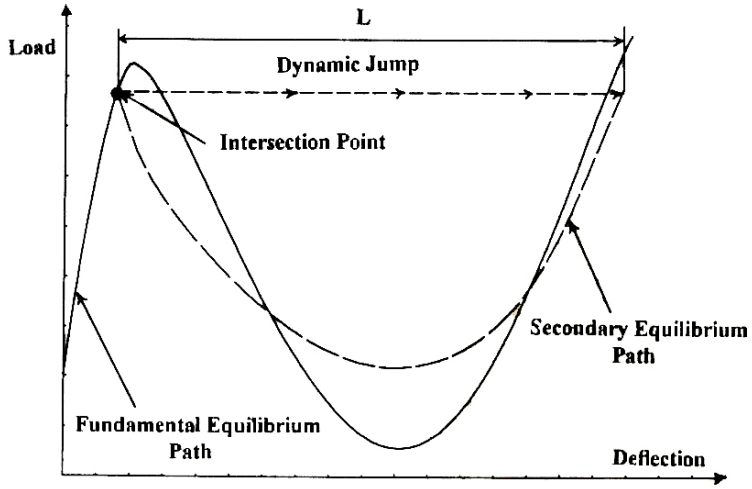
کمانش موضعی گرهی یکی از خطرناک‌ترین شکل‌های ناپایداری در سازه‌های فضاکار می‌باشد. این پدیده ناپایداری معمولاً با انحراف قابل توجهی در هندسه یک سازهٔ ایده‌آل ایجاد می‌گردد. ناپایداری موضعی گرهی دارای اثر دینامیکی است که بوسیله فروجهش گرهی ایجاد می‌شود. فروجهش گرهی می‌تواند باعث خرابی ناحیه وسیعی از سازه فضاکار گردد. این نوع پدیدهٔ ناپایداری بیشتر در گنبدها و سازه‌های چلیکی مهاربندی‌شده تک‌لایه (شبکه‌ای) رخ می‌دهد. همچنین بروز فروجهش گرهی در سازه‌های فضاکار دولایه در شرایط خاص منتفی نخواهد بود.

یک سازه با مشخصه نرم‌شوندگی غیرخطی که در آن سختی با افزایش بار کاهش می‌یابد، ممکن است پایداری خود را به طریقی که به ناپایداری نقطه حدی معروف است از دست دهد. در این نوع ناپایداری، نرم‌شوندگی که همراه با مود اولیه تغییرشکل است، می‌تواند با کاهش تدریجی سختی به حالت فقدان کامل سختی برسد. در این صورت گفته می‌شود که مسیر تعادل بار- تغییرمکان سازه به یک نقطه حدی رسیده است که در آن یک پرش دینامیکی به تاشه‌ای تغییرشکل یافته رخ می‌دهد. همان‌گونه که در شکل پ ـ۵ـ۱ نشان داده شده است، در نقطه حدی سختی سازه‌ای صفر بوده و به ازای یک افزایش بسیار کوچک در بار، هیچ‌گونه حالت تعادلی در همسایگی آن موجود نمی‌باشد. در این نقطه است که سازه در جستجوی حالت تعادل پایدار دیگری خواهد بود که ممکن است در همین تراز بار و عموماً در همان مسیر تعادل موجود باشد. حرکت به سمت چنین حالت تعادلی می‌تواند شامل بروز تغییرمکان‌های بزرگ ناگهانی توام با اثرات دینامیکی ناشی از آن باشد. در این مرحله با توجه به آنکه عکس‌العمل الاستیک سازه مسیر تعادل را دنبال می‌نماید، برای پرکردن شکاف بین نیروهای خارجی و عکس‌العمل الاستیک در حین فروجهش، طبق اصل دالامبر نیروهای اینرسی ایجاد می‌گردند. با صرف‌نظر نمودن از نیروهای میرایی، b به‌صورت نشان‌داده شده در شکل پ‌ـ۵ـ۱ بیانگر نیروهای اینرسی ایجاد شده بوده و مساحت سطح A نمایشگر میزان انرژی جنبشی دریافت‌شده توسط سیستم در حین فروجهش گرهی می‌باشد. پس از فروجهش گرهی، این انرژی به صورت ضربه به گره‌های مجاور اعمال می‌گردد.



شکل پ-۵-۱- اثر دینامیکی فروجهش گرهی

پرش دینامیکی می‌تواند در ناپایداری نقطه دوشاخگی متقارن ناپایدار نیز رخ دهد. در این نوع ناپایداری همان‌گونه که در شکل پ-۵-۲ نشان داده شده است، مسیر بنیادین تعادل که از مبدأ سرچشمه می‌گیرد، سختی خود را در محل تقاطع خود با یک مسیر تعادل ثانوی نزولی ناپایدار از دست می‌دهد. در این نقطه تقاطع، که نمایشگر یک حالت بحرانی تعادل ناپایدار نیز می‌باشد، سازه در جستجوی حالت تعادل پایدار دیگری خواهد بود و از این‌رو یک پرش دینامیکی رخ خواهد داد. پرش دینامیکی می‌تواند در ناپایداری نقطه دوشاخگی نامتقارن نیز اتفاق افتد، ولی در اغلب حالت‌ها، سازه‌های فضاکار ناپایداری‌های از نوع نقطه حدی و یا نقطه دوشاخگی متقارن ناپایدار را از خود بروز می‌دهند.



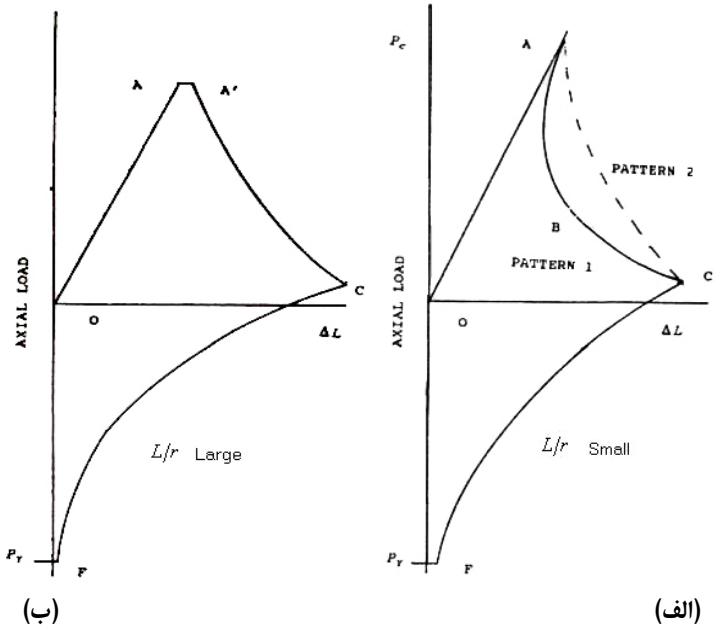
شکل پ-۵-۲- فروجهش دینامیکی در ناپایداری نقطه دوشاخگی متقارن ناپایدار

فروجهش گرهی می‌تواند به عنوان یک فروجهش محلی یا فروجهش کلی رخ دهد. بنابراین درک تمایز بین"فروجهش محلی" و "فروجهش کلی" ضروری است.

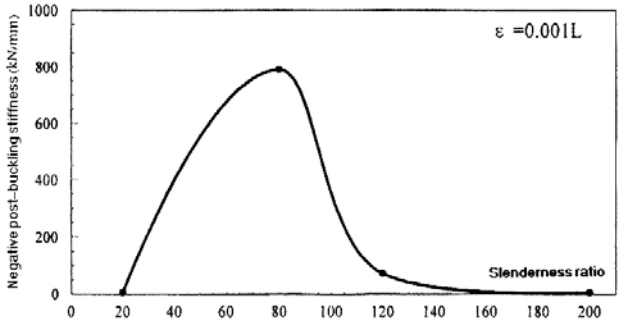
۲- فروجهش عضوی

از آنجایی که اغلب سازه‌های فضاکار تک‌لایه با اتصالات صلب ساخته می‌شوند، این سازه‌ها را می‌توان به عنوان سازه‌های فضاکار با اتصالات صلب ایده‌آل‌سازی نمود. اگرچه در عمل اتصالات واقعی مفصلی وجود ندارند، ولی سازه‌های فضاکار دولایه را که با توجه به شیوهٔ هم‌بندی حالات با اتصال مفصلی آن‌ها از نظر ایستایی، پایدار می‌باشند، می‌توان به عنوان سازه‌های فضاکار با اتصالات مفصلی نیز ایده‌آل‌سازی نمود. در حالت اتصال مفصلی فرض می‌شود که اتصالات نمی‌توانند لنگرها را منتقل نمایند. هرگاه فرض شود که یک سازه فضاکار شبکه‌ای دولایه، همانند سازه‌های متشکل از اعضایی با دو انتهای مفصلی عمل می‌نماید، در این صورت رفتار انفرادی اعضا، اثر تعیین‌کننده در رفتار مجموعهٔ سازه خواهد داشت. در شکل پ-۵-۳، منحنی پاسخ بار محوری- تغییرمکان محوری اعضای فشاری با انتهاهای مفصلی نشان داده شده است. در این شکل L، طول و r شعاع ژیراسیون عضو می‌باشد. نقطه A بیانگر بار کمانشی است که به ناکاملی اولیه و نسبت لاغری اعضا بستگی دارد. شکل منحنی کمانش نیز بعد از بروز کمانش به نسبت لاغری اعضا وابسته خواهد بود. بر اساس مطالعات انجام یافته، با کاهش نسبت لاغری، بار کمانشی و شیب منفی پس‌کمانشی افزایش می‌یابند. در شکل‌پ-۵-۴ نمودارهای نمایشگر ماهیت تغییرات سختی منفی پس‌کمانشی برای نسبت‌های لاغری بزرگ و کوچک، به ازای ناکاملی اولیه، ε و معادل ۰/۰۰۱ طول عضو نشان داده شده است. با افزایش ناکاملی اولیه، بار

کمانشی کاهش یافته، ولی منحنی پس‌کمانشی حساسیت کمتری نشان خواهد داد. همچنین میزان انعطاف‌پذیری انتهایی اعضای فشاری در ضریب بار پس‌کمانشی (نسبت بار پسماند به بار کمانشی) و میزان شیب منفی پس‌کمانشی تأثیرگذار خواهد بود. در اعضای فشاری، افزایش تنش تسلیم باعث کاهش ضریب بار پس‌کمانشی و افزایش شیب منفی پس‌کمانشی می‌گردد.



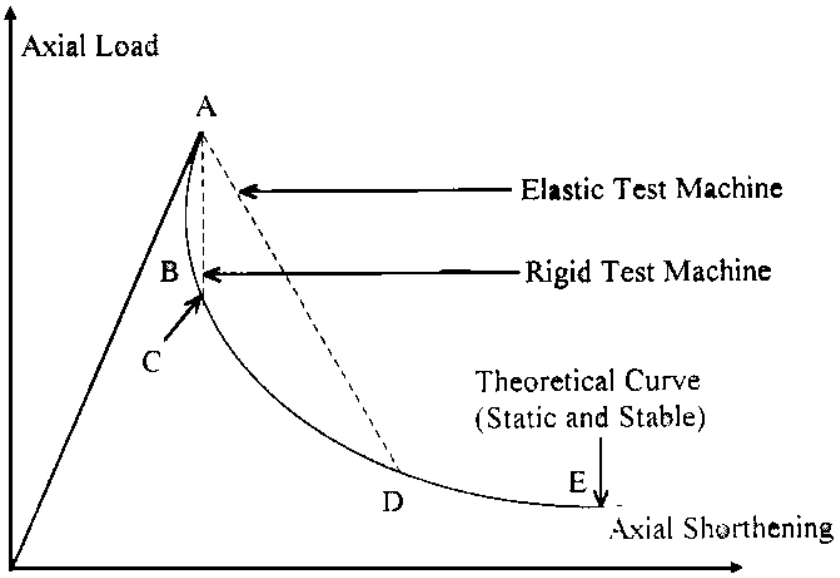
شکل پ ـ ۵ـ۳ـ منحنی بار محوری ـ تغییرمکان محوری اعضای فشاری: الف ـ نسبت لاغری بزرگ، ب ـ نسبت لاغری کوچک



شکل پ ـ۵ـ۴ـ نمودار تقریبی تغییرات سختی منفی پس‌کمانشی ـ نسبت لاغری به ازای ناکاملی اولیه $\varepsilon = 0.001L$

مطابق شکل پ ـ ۵ـ۳ برای مقادیر بزرگ L/r، ممکن است بعد از کمانش، یک ناحیه ثابت'AA وجود داشته باشد که با کاهش تدریجی بار تا تراز بار پسماند در C دنبال خواهد شد. اما برای مقادیر کوچک و متوسط L/r، مسیر باربرداری یک منحنی برگشتی با انحنای زیاد خواهد بود که دارای شیب منفی قابل ملاحظه‌ای می‌باشد (منحنی ABC) یا آن‌که همانند منحنی AC دارای شیب پس‌کمانشی بیشتری خواهد بود. اعضای فشاری با مقادیر L/r کوچک و متوسط، کمانشی از نوع متفاوت با اعضای فشاری با مقادیر L/r بالنسبه بزرگ به نمایش می‌گذارند. منحنی ABC در شکل پ‌ـ۵ـ۳ نمایشگر پاسخ نظری است که انتظار نمی‌رود در یک عضو واقعی رخ دهد. بلکه در این حالت، نیرو به‌طور دینامیکی کاهش پیدا کرده و یک پرش دینامیکی یا فروجهش در رفتار پس-کمانشی چنین عضوی پدید می‌آید. شکل پ‌ـ۵ـ۵، مقایسه‌ای از پاسخ‌های پس‌کمانشی پایدار و ناپایدار در ابتدای ناحیه پلاستیک

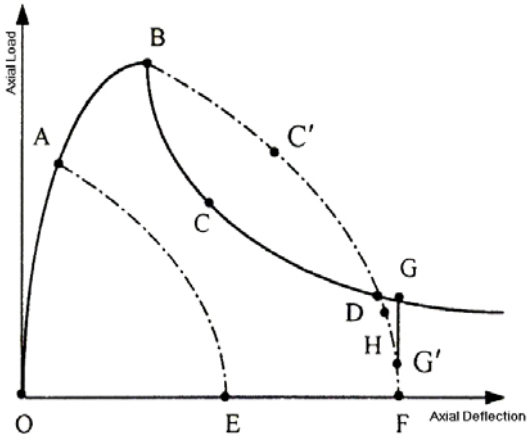
یک عضو فشاری را نشان می‌دهد. منحنی ABCDE نمایشگر پاسخ نظری است، در حالی که مسیر باربرداری واقعی مشابه ADE می‌باشد. در آزمایشات فشاری یک میله، هنگام رسیدن به بار بیشینه، میله کمانش کرده و ناپایدار خواهد شد و برای نیل مجدد به‌حالت تعادل روی مسیر ABCDE ناچار به کاهش بار می‌باشد که همراه با افزایش در تغییرمکان نیز خواهد بود. اگر دستگاه آزمایش بی‌نهایت صلب باشد، در این صورت مسیری که دنبال خواهد شد، مسیر AC خواهد بود. ولی در عمل یک دستگاه بارگذاری به صورت الاستیک عمل می‌نماید، هنگامی که میله کمانش می‌کند، به دلیل رهایی کرنش‌ها در داخل خود دستگاه، تغییرمکان‌های اضافی نیز در نمونه آزمایشگاهی وارد می‌شود. این عامل موجب می‌شود که به‌جای برداشت مسیر ناپایداری با افت ناگهانی بار، AC، نتایج آزمایشگاهی مسیرAD را با شیب متفاوت با حالت دستگاه آزمایش کاملاً صلب نشان دهند. حرکت از A تا D یک پرش دینامیکی بوده که به عنوان پدیده فروجهش عضوی تلقی می‌شود. در بازیافت مجدد تعادل در D، میله دیگر به‌صورت دینامیکی عمل نمی‌کند و می‌توان آن را به صورت استاتیکی فرض نمود. بنابراین ناحیه‌های پایینی منحنی‌های پس‌کمانشیِ حاصل از نتایج تجربی و نظری را تقریباً می‌توان یکسان در نظر گرفت.



شکل پ-۵-۵- مقایسه پاسخ‌های پس‌کمانشی پایدار و ناپایدار یک عضو فشاری

در منحنی ABC شکل پ ـ۵ـ۳ (الف)، مدول مماسی منفی در منطقه A روی مسیر باربرداری، بسیار بزرگ می‌باشد. این پاسخ نظری عضو در یک سازه، تنها در حالتی قابل تحقق است که دستگاه آزمایش دارای صلبیت به مراتب بیشتری نسبت به سختی منفی عضو باشد. اگر دستگاه بارگذاری دارای صلبیت کمتری نسبت به سختی منفی عضو باشد، در این صورت با پرش عضو به یک حالت تعادل، به‌طور ناگهانی مقدار انرژی بالنسبه قابل ملاحظه‌ای رها خواهد شد. دستگاه بارگذاری برای یک عضو در یک سازه فضاکار، نمایشگر سازه باقیمانده می‌باشد که عضو به آن متصل است. بنابراین برای تعیین رفتار عضو در یک سازه فضاکار در ناحیه پس‌کمانشی لازم است سختی سازه باقیمانده را با سختی منفی پس‌کمانشی عضو مقایسه نمود. حال، یک سازه فضاکار شبکه‌ای دو لایه با اتصالات مفصلی را در نظر گرفته، فرض می‌کنیم که عضو فشاری تعادل و سازگاری خود را با سازه باقیمانده، که عضو به آن متصل است، حفظ می‌کند. بنابراین، اندرکنش عضو با سازه باقیمانده را می‌توان بر حسب رابطه تعادل و سازگاری نیروی محوری ـ تغییرمکان توصیف نمود. یک رابطه نمونه بین پاسخ غیرخطی عضو و سازه باقیمانده در شکل پ ـ۵ـ۶ نشان داده شده است. منحنی

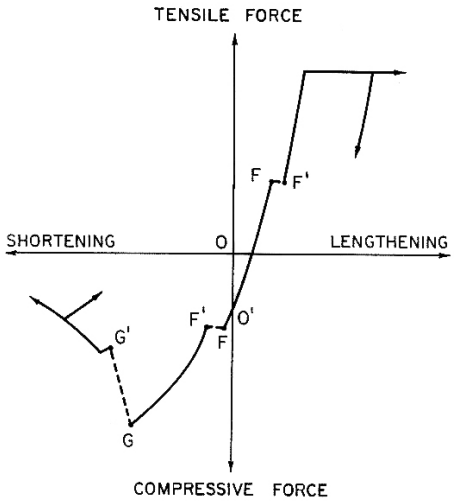
OABCD نمایشگر پاسخ عضو می‌باشد، منحنی‌های OAE و OBDF به ترتیب پاسخ سازه باقیمانده فاقد عضو مزبور تحت بارگذاری خارجی معلوم و همچنین پاسخ سازه باقیمانده با جایگزینی نیروی محوری معادل به جای عضو را نشان می‌دهند. بنابراین در نقاط A، B و D بین عضو و سازه اتصالی باقیمانده تعادل و سازگاری وجود دارد. می‌توان مشاهده نمود که تحت شرایط خاصی، به ازای یک بار خارجی معلوم، به عنوان مثال در B و D دو جواب می‌تواند وجود داشته باشد. بنابراین در اثر ادامه بارگذاری سازه تا نقطه B که خود یک نقطهٔ نمایشگر وضعیت ناپایدار می‌باشد، با توجه به آن‌که سختی منفی پس‌کمانشی عضو از سختی سازه باقیمانده افزون‌تر است، یک افزایش بسیار کوچک در تغییرمکان محوری موجب خواهد شد که نیروی ناشی از سازه باقیمانده، از نیروی متناظر با حالت تعادل در عضو به ازای همان تغییرمکان، بزرگ‌تر گردد. در نتیجه شرایط تعادل نقض گردیده و تغییرمکان محوری عضو ادامه خواهد یافت. به عبارت دیگر، فروجهش محوری روی خواهد داد تا تعادل و سازگاری مجدداً در نقطه D میسر شود. طی این پدیده بخشی از کار انجام شده توسط سازه در عضو اتلاف می‌شود. انرژی اضافی که به وسیله BCDC' بین پاسخ‌های عضو و سازه اتصالی باقیمانده مشخص می‌شود، موجب خواهد شد که بین GوG' حالت نوسانی پیش آید که طی آن انرژی اتلاف گردد. بعد از نوسان، تعادل و سازگاری در نقطه H حاصل خواهد شد. با ادامه بارگذاری عضو از نقطه H به'G باز خواهد گشت و سپس مسیر منحنی پس‌کمانشی نرم‌شونده را دنبال خواهد نمود.



شکل پ-۵-۶- پاسخ‌های عضو و سازه باقیمانده اتصالی به هنگام پدیده فروجهش عضوی

بنابراین نتیجه می‌شود که اگر سختی موثر سازهٔ باقیمانده کوچک‌تر از سختی منفی پس‌کمانشی عضو باشد، در این صورت یک ناپایداری محلی وجود خواهد داشت و عضو در حالت تعادل ناپایدار خواهد بود و به ازای یک اختلال کوچک کوتاه خواهد شد تا تعادل بین عضو و سازه باقیمانده حاصل شود. ولی اگر سختی مؤثر سازه باقیمانده بزرگتر از سختی منفی پس‌کمانشی عضو باشد، در این صورت وضعیت پایدار خواهد بود. در این شرایط عضو در حالت تعادل پایدار خواهد بود و مسیر باربرداری عضو، یعنی مسیر BCD، می‌تواند بدون پرش دینامیکی دنبال شود همچنین در این حالت، برای آن‌که بخش پایینی پاسخ پس‌کمانشی عضو دنبال شود، بار اضافی خارجی مورد نیاز خواهد بود.

شکل پ ـ۵ـ۷ یک نمونه پاسخ عضو در اندرکنش با سازه باقیمانده را نشان می‌دهد. در این شکل، 'OO، 'FF و 'GG به ترتیب نمایشگر تنش اولیه ناشی از عدم تناسب، لغزش گرهی و فروجهش محوری می‌باشند.



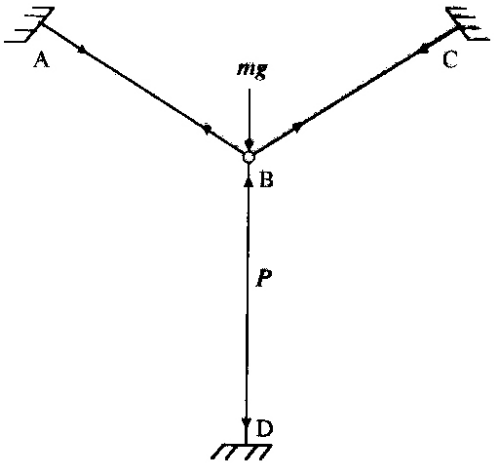
شکل پ ـ۵ـ۷ـ اندرکنش عضو و سازه اتصالی باقیمانده ـ پدیده فروجهش عضوی

۳- آثار توأم فروجهش گرهی و عضوی

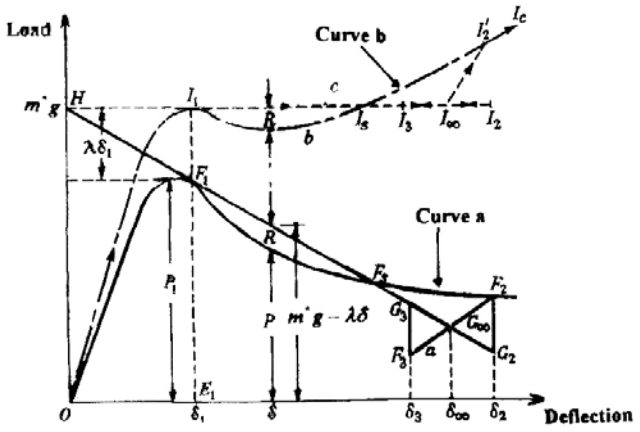
در حالات خاصی امکان وقوع فروجهش گرهی و عضوی به‌طور توأم وجود دارد. برای تشریح این پدیده، رفتار خرپای نشان داده شده در شکل پـ ۵ـ ۸ قابل مطالعه است. در شکل پ ـ۵ـ۹، منحنی a رابطه (p,δ) عضو فشاری را نشان می‌دهد.

فرض می‌شود که اعضای AB و CB دارای رفتار الاستیک بوده و تواماً دارای سختی λ در برابر تغییرمکان قائم گره B می‌باشند. به ازای بار قائم m^*g در B شرط تعادل استاتیکی ایجاب می‌نماید که: $m^*g=p+\lambda\delta$.

با افـزایش یکنواخت بار m^*g از صفر، در مرحله نخست، تعادل استاتیکی حفظ می‌شود. رابطه بین m^*g و δ در شکل با OI_1 نشان داده شده است. به ازای تغییرمکـان δ_1، نیروی P_1 در عضو فشـاری با E_1F_1 نمـایش داده می‌شود. خط F_1H دارای شیب λ می‌باشد، بنابرین: $F_1L_1=\lambda\delta_1$ و $E_1L_1=P_1+\lambda\delta_1$ خواهند بود. با توجه به معادله فوق، E_1L_1 نمایشگر بار m^*g می‌باشد. منحنی b نمایشگر رابطه (m^*g,δ)، یعنی رفتار سازه خواهد بود. در روابط فوق، L_1 طول عضو فشاری می‌باشد.



شکل پ-۵-۸- خرپای ساده شامل یک عضو فشاری با اتصالات مفصلی



شکل ب-۵-۹- پاسخ بار- تغییرمکان خرپای ساده شامل یک عضو فشاری با اتصالات مفصلی

ملاحظه می‌شود که به ازای تغییرمکان‌های بزرگ‌تر از δ_1، بار تعادل به مقداری کمتر از m*g افت می‌کند. در این حالت، تحت بارگذاری نیرویی، تعادل استاتیکی برقرار نخواهد بود؛ بنابراین فروجهش گرهی در سازه رخ می‌دهد. براساس معادله تعادل استاتیکی فوق‌الذکر، این حالت فروجهش گرهی هنگامی اتفاق می‌افتد که $-\frac{dP}{d\delta} > \lambda$ باشد. به‌عبارت دیگر، در این وضعیت، سختی منفی پس‌کمانشی عضو فشاری از سختی توأم دو عضو باقیمانده بیشتر است. بر اساس آنچه که در بحث کمانش عضوی ذکر شد، این شرایط متناظر با فروجهش عضوی می‌باشد. با توجه به شکل، به ازای هر δ فراتر از δ_1 یک نیروی رو به پایین R موثر بر جرم m* خواهیم داشت. که مقدار آن برابر است با:

$$R=m^*g-P-\lambda\delta \qquad \textbf{(ب-۵-۱)}$$

همچنین ملاحظه می‌شود که R نمایشگر اختلاف خط سختی HG_2 (خط فروجهش عضوی) و پاسخ نظری عضو فشاری (منحنی a) می‌باشد. در نقطهF_s که نمایشگر نقطه پایان فروجهش عضوی است، مقدار R صفر بوده و تعادل استاتیکی حاصل خواهد شد. در فروجهش عضو از نقطه F_1 تا نقطه F_S، R همواره مثبت بوده و بنابراین، باعث ایجاد شتاب در جرم m* خواهد گردید. در نتیجه جرم m* تحت اثر این شتاب دارای حرکت نوسانی خواهد بود. با در نظر گرفتن میرایی، تعادل نهایی در δ_∞ حاصل خواهد شد. همچنین ملاحظه می‌شود که نخستین مرحله پرش دینامیکی گرهی از نقطهI_1 تا نقطه I_2 با نوسان بین I_2 و I_3 دنبال خواهد شد. که در نهایت در نقطه I_∞ میرا خواهد گردید. با افزایش بارگذاری بر سازه، تغییرشکل عضو فشاری مسیر$G_\infty F_2$ و رابطه بار- تغییرمکان مسیر $I_\infty I_2'$ را دنبال خواهند کرد.

پیوست ۶– الف

مبانی طراحی

مقدمه

سازهٔ فضاکار را می‌توان به مثابه سیستمی انگاشت که با سه دسته از کمّیّت‌ها در ارتباط تنگاتنگ می‌باشد:

(الف) ـ کمّیّت‌های ورودی که بر سیستم اعمال می‌گردند، شامل بارهای اعمالی وعوامل محیطی

(ب) ـ کمّیّت‌های مشخصه که سیستم را تعریف می‌نمایند، شامل مشخصه‌ها و خواص سازه، شرایط سرحدّی تغییرمکانی، ویژگی‌های هندسی، خواص مصالح، جرم، نسبت استهلاک و ...

(پ) ـ کمّیّت‌های خروجی که پاسخ سیستم را ارایه می‌دهند، شامل تلاش‌ها، تنش‌ها، کرنش‌ها، تغییرمکان‌ها، تغییرزاویه‌ها،...

در این آیین‌نامه کمّیّت‌های سه‌گانهٔ مذکور در فوق به طور کلی در فضا به صورت منفصل و نسبت به زمان به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شوند.

در تحلیل سازه، کمّیّت‌هـای ورودی و مشخصهٔ سیستم، هم در مرحلـه حدس اولیه، هم در مراحل تدقیق طراحی، به صورت داده‌های ورودی منظور می‌شوند. نتایج تحلیل سازه شامل مقادیر پاسخ یا کمّیّت‌های خروجی خواهند بود. به عبارت نمادین:

$$U(t) = U[\, W(t) , S_q(t) \,] \qquad \textbf{(پ ـ۶ـ الف ـ۱)}$$

که درآن: $W(t)$ نمایشگر کمّیّت‌های ورودی، $S_q(t)$ نمایشگر کمّیّت‌های مشخصه سیستم و $U(t)$ به عنوان تابع پاسخ سازه منظور گردیده‌اند.

در حالتی که تابع $U[\, W(t) , S_q(t) \,]$ به صورت آنالیتیک تعریف شده باشد، حل سیستم"به صورت بسته" حاصل گردیده و در غیر این‌صورت، استفاده از فرایند عددی جهت تعیین خروجی (پاسخ سازه) مورد نیاز خواهد بود.

عدم قطعیت و مبانی احتمال‌اندیشانهٔ تحلیل سازه‌های فضاکار

تحلیل سازه‌ها معمولاً به منظور طراحی برای احداث سازه‌های جدید و یا جهت ارزیابی ایمنی سازه‌های موجود انجام می‌شود.

اگرچه در نگاه اول دو حالت مذکور در فوق بسیار متفاوت به نظر می‌رسند، ولی از نظر آنکه در هر دو حالت کمّیّت‌های ورودی و کمّیّت‌های سیستم به دلایل گوناگون، از جمله عدم قطعیت، غیردقیق و گاه نامشخص می‌باشند، با یکدیگر مشابهت‌هایی نیز دارند.

بارهای اعمال‌شده یا قابل پیش‌بینی، هرگز به طور دقیق قابل شناسایی نمی‌باشند. این بارها را از اطلاعات ثبت‌شده حاصل از مطالعهٔ سازه‌های نظیر تخمین می‌زنند؛ ولی چنین اطلاعاتی در مورد دو سازه مشابه عملاً یکسان نمی‌باشند.

تفسیر ـ *عدم قطعیت در مورد میزان واقعی بارها را می‌توان با اندازه‌گیری بالنسبه دقیق بارهای مرده و کنترل میزان بارهای زنده اعمالی کاهش داد. البته این‌گونه اندازه‌گیری‌ها اغلب در موارد خاص ممکن بوده و اغلب با توجه خاص به مقادیر حداکثر بارها صورت می‌گیرد و شامل تاریخچهٔ کامل اعمال بار نمی‌گردد.*

همچنین در مورد کمّیّت‌های مرتبط با مشخصات هندسی سیستم نیز اصل عدم قطعیت صادق می‌باشد، ولی غالباً میزان نامشخصی‌ها نسبت به کمّیّت‌های ورودی (کنش‌ها) محدودتر است.

تفسیر *ـ در سازه‌های موجود، برخی از کمّیت‌های هندسی از قبیل طول و زوایای اعضای سازه فضاکار را اغلب می‌توان با دقت کافی اندازه‌گیری کرد؛ ولی برخی دیگر از کمّیت‌های مرتبط با مشخصات هندسی سازه را تنها در تعداد محدودی از نقاط یا مواضع می‌توان اندازه‌گیری نمود. این امر در مورد کمّیت‌هایی مانند انحنا یا ناکاملی اولیهٔ اعضا منجر به تأثیرات قابل ملاحظه‌ای در نتایج تحلیل می‌گردد.*

در مورد خواص مکانیکی و مقاومتی و پایایی مصالح، نه تنها انتظار می‌رود از یک نقطه تا نقطهٔ دیگر تغییراتی موجود باشد، بلکه اغلب به تخمین غیرمستقیم این خواص بسنده می‌شود. گاه پاسخ حاصل از تحلیل سازه حسّاسیت زیادی به تغییرات برخی از کمّیت‌های مرتبط با خواص مصالح نشان می‌دهد.

تفسیر *ـ کمّیتی را که گونه‌های مختلف عدم قطعیت به شرحی که در فوق ذکر گردید، در مورد آن صدق نماید، کمّیت تصادفی و اغلب متغیر تصادفی می‌نامند. از مشخصه‌های چنین کمّیتی آن‌است‌که این نوع کمّیت‌ها تابع زمان نمی‌باشند. در مقابل، کمّیتی را که تابع زمان (یا بعضی از پارامترهای مستقل دیگر) باشد، فرایند تصادفی می‌نامند. لذا متغیّر تصادفی، نوع خاصی از فرایند تصادفی می‌باشد. کمّیت تصادفی را نمی‌توان با تابع یا اندازه‌گیری واحدی تعریف نمود. در واقع هر لحظه، یا هر دفعه که چنین کمّیتی اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد، تابع نمونهٔ جدیدی حاصل می‌شود. هر تابع نمونه، تحقّق ویژه‌ای از فرایند تصادفی را ارایه می‌دهد. مجموعهٔ کلیه توابع نمونهٔ ممکن، کل فرایند تصادفی را ارایه می‌نماید که تنها از طریق خواص احتمالی مربوطه قابل توصیف است و امکان تخمین کرانه پایینی را در درجه‌ای از اطمینان میسر می‌سازد.*

در تضاد با کمّیت‌های تصادفی، کمّیتی که در مورد آن میزان قابل اعتنایی از موارد عدم قطعیت صدق ننماید، کمّیت تعیینی خوانده می‌شود. در این حالت کلیه توابع نمونه‌گیری‌شده با یکدیگر یکسان فرض می‌گردند.

در صورتی‌که کمّیت‌های ورودی (کنش‌ها) و کمّیت‌های مشخصه سیستم سازه از نوع تصادفی باشند، این امر در مورد کمّیت‌های خروجی (پاسخ سازه) اثر خواهد گذاشت. لذا تحلیل احتمال‌اندیشانه سازه فضاکار عبارت است از کاربری معادلهٔ (پ-۶-الف-۱) جهت تعیین خصوصیات احتمالی فرایند تصادفی خروجی $\tilde{U}(t)$، با استفاده از مقادیر اطلاعات ورودی (شامل: الف- بخش احتمالی، که به صورت کمّیت‌های تصادفی ارایه می‌گردند و ب-بخش تعیینی اطلاعات ورودی که به صورت مقادیر ثابت ارایه می‌شوند).

منبع دیگر عدم قطعیت در نتایج حاصل از تحلیل (فرایند خروجی) در فرمول‌بندی روابط تحلیل نهفته است که در اینجا به‌طور نمادین با رابطه (پ-۶-الف-۱) نشان داده شد. این فرمول‌بندی‌ها مدل‌های ریاضی (تحلیلی یا عددی) از واقعیت بوده و در ماهیت، تقریبی می‌باشند.

حالات حدّی

کلیات و مفاهیم بنیادین

پس از محاسبه پاسخ سیستم سازه فضاکار از طریق روش‌های تحلیل سازه (چه تعیینی و چه تصادفی)، لازم است از دیدگاه عملکرد در تراز بهره‌برداری و در تراز ایمنی بررسی و قضاوت لازم صورت گیرد.

تفسیر *ـ معیارهای پذیرش در ترازهای بهره‌برداری و ایمنی، برحسب نوع پارامترهای پاسخ مورد نظر، مورد بررسی قرار داده می‌شوند. به عنوان مثال، در صورتی‌که تغییرمکان یا شتاب مورد مطالعه قرار داده شود، باید بررسی گردد که کمّیت مورد نظر به چه میزان (یا دفعات) و در چه طول مدتی از مقدار مشخصی، که ایمنی یا بهره‌برداری ایمن را مورد تهدید قرار می‌دهد، طی طول عمر مفید سازه تجاوز می‌نماید.*

درصورتی‌که پاسخ فرایندی تصادفی باشد، جواب به این سؤال تنها در قالب احتمال‌اندیشانه قابل ارایه است. در این حالت به‌طور معمول لازم‌است بازهٔ زمانی را که طی آن، پارامتر مربوط از مقدار مشخصی تجاوز نماید، به صورت کمّی تعیین نماییم. در عمل، قضاوت در مورد پاسخ سازه اغلب به نحو ساده‌تری صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر، فرض می‌گردد سازه هنگامی به حالت حدّی رسیده‌است که یک پارامتر به خصوص از پاسخ به مقدار حدّی (یا آستانه) رسیده باشد. حالات حدّیِ ممکن برای اغلب سازه‌ها متنوع می‌باشند. در آیین‌نامه‌های معتبر جهانی دو مجموعه از حالات حدّی متمایز گردیده‌اند: حالت حدّی نهایی و حالت حدّی بهره‌برداری.

از حالات حدّی نهایی، بسته به شرایط، موارد زیر در مورد سازه‌های فضاکار شبکه‌ای فولادی حایز اهمیت ویژه می‌باشند:

(الف) ـ نقض شرایط تعادل در بخشی از سازه یا در کل سازه، وقتی به صورت جسم صلب در نظر گرفته شود،
(ب) ـ حالت عملکرد فرا الاستیک، سیلان و گسیختگی پلاستیک،
(پ) ـ حالت عملکرد فراکمانشی، ناپایداری هندسی عضوها یا اجزای تشکیل‌دهندهٔ سازه،
(ت) ـ بروز ناپایداری هندسی و تغییرمکان‌های بزرگ، فروجهش، ناپایداری گرهی و گونه‌های دیگر ناپایداری،
(ث) ـ گونه‌های بروز شکست و ترک‌خوردگی شامل گسترش ترک ناشی از خستگی.

حالات حدی بهره‌برداری

از حالات حدّی بهره‌برداری، گونه‌های زیر در خور توجه خاص می‌باشند:

(الف) ـ حالتی که فراتر از آن، بهره‌برداری، به نحوی مختل می‌گردد یا در حین بهره‌برداری موجبات تشویش خاطر افراد فراهم می‌شود،
(ب) ـ حدود ارتعاش قابل ملاحظه.

از دیدگاه حالات حدی بهره‌برداری، میزان تغییرمکان سازه و اعضای سازه و میزان ارتعاش دارای اهمیت ویژه می‌باشند. همچنین میزان ترک‌خوردگی در سازه‌ها و پوشانه‌های بتن‌آرمه از دیدگاه بهره‌برداری باید مورد توجه قرار داده شود.

فلسفه و مبانی طراحی مبتنی بر حالات حدی

هرگاه بخشی از سازه یا کل سازه برای نیّت به‌خصوصی به حالت نامناسب و نامطلوبی رسد که در خور خدمت‌رسانی مورد نظر نباشد و موجب اختلال در بهره‌برداری یا ایجاد نگرانی گردد یا تهدیدی برای ایمنی تلقی شود، زیرمجموعه یا مجموعهٔ سازه به حالت حدّی رسیده است.

برخی از حالات حدی که اهمّیّت ویژه‌ای به‌لحاظ احتمال بروز خطرات جانی دارند، باید مورد توجه خاصّی قرار داده شوند.

به طور کلّی برای هر حالت حدّی، یک نامعادله بحرانی قابل فرمول‌بندی می‌باشد که با بهره‌گیری از آن می‌توان در فضای کمّیّت‌های مربوط، حیطه پذیرش (یا حیطه توفیق)، S ، یا به عبارت دیگر بازه‌ای که نامعادله بحرانی در آن صادق است را از حیطه عدم پذیرش (یا حیطه عدم توفیق)، U، که به بازه‌ای اطلاق می‌گردد که در آن نامعادلهٔ بحرانی صدق نمی‌نماید، تمیز داد.

فضای R و S به شرح زیر تعریف می‌گردد:

$S \geq 0$ عبارت است از پاسخ یا تقاضای به دست آمده در یک عضو، جزء، زیرمجموعه یا مجموعهٔ سازهٔ فضاکار بر اساس داده‌های مرتبط با کمّیّت‌های ورودی و مشخّصهٔ سیستم.

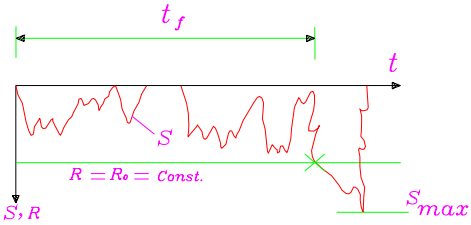
R عبارت است از ظرفیت عضو، جزء، زیرمجموعه یا مجموعهٔ سازهٔ فضاکار متناظر با تقاضای مورد نظر.

به دلیل تصادفی بودن کمّیّت‌های ورودی، $S = S(t)$ در اغلب حالات یک فرایند تصادفی است.

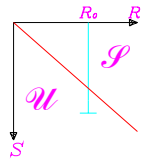
تفسیر ـ *ظرفیت R که بر اساس مفروضات مستدلی محاسبه گردیده است (و وابسته به خواص مصالح و ابعاد و خواص مقطع عضو است)، در حالت کلی کمّیّتی تصادفی است که در بسیاری از حالات به جز در حالات زوال مقاومت ناشی از اثرات محیطی یا کسب مقاومت تابع زمان در مصالح بتنی و نظایر آن، می‌توان آن را مستقل از زمان و به صورت متغیر تصادفی فرض نمود.*

برای هر سازه واقعی، اگرچه مقاومت به قطعیت، مشخص نگردیده، ولی می‌توان مقدار ثابت نزدیک به واقعیت R_0 را براساس مطالعات نظری و آزمایشگاهی برای آن در نظر گرفت.

در صورتی‌که خط $R = R_0$ در مختصات $(R\ ,\ S)$ ظرفیت مستقل از زمان عضو را ارایه نماید، شکل(پ-۶-الف-۱-ب)، یک حالت ممکن یا اثر ناشی از یک فرایند بارگذاری تصادفی را با پاسخ $\check{S}(t)$ که خود نیز فرایندی تصادفی خواهد بود، نشان می‌دهد. حالت حدّی آنگاه اتفاق می‌افتد که $S(t)$ از آستانهٔ R_0 تجاوز نماید و این به معنی آن است که نقطه $(R\ ,\ S)$ به مرز حیطه عدم‌پذیرش U در شکل(پ-۶-الف-۱-الف)، برسد. زمان گسیختگی (زمان از شروع تا بروز حالت حدی نهایی)، t_f، در شکل (پ-۶-الف-۱-ب)، یکی از معیارهای مهم قابلیت اطمینان سازه و از مهمترین خواص توصیفی فرایند تصادفی $\check{S}\ (t)$ می‌باشد.



شکل پ-۶-الف-۱-(الف)



شکل پ-۶-الف-۱-(ب)

اغلب برای محدوده زمانی $(0\ ,\ t)$ نامعادلهٔ بحرانی تنها در بدترین وضعیت ممکن مورد کنترل قرار داده می‌شود. با توجه به اطلاعات در دسترس (از جمله در اختیاربودن بزرگ‌ترین مقدار بار در بازه زمانی مورد نظر)، استفاده از روش اخیرالذّکر گاه ضروری است و به‌ویژه در حالاتی که عمر مفید طراحی برای سازه از پیش تعیین گردیده‌است، این امر حایز اهمیت خواهدبود. از دیدگاه احتمال‌اندیشانه، امر فوق به این صورت بیان می‌گردد که احتمال گسیختگی (در ارتباط با حالت حدی مورد بررسی)، PF، عبارت است از احتمال آن‌که نامعادلهٔ بحرانی، حداقل یک بار در محدوده زمانی $(0\ ,\ t)$ نقض گردد و احتمال مکمّل قابلیت اطمینان (توفیق)، $R=PS$، عبارت است از احتمال آن‌که این نامعادله در بازه زمانی مزبور صادق باشد. به عبارت دیگر:

$$PF = \text{Prob}\ [\check{S} > \check{R}\ (0\ ,\ t)\ \text{حداقل یک بار در بازه}\ ] = \text{Prob}\ [\ \max t\ \check{S} > \check{R}] \qquad \textbf{(پ-۶-الف-۲)}$$

$$PS = 1 - PF = \text{Prob}\ [\check{S} < \check{R}\ (0\ ,\ t)\ \text{همواره در بازه}] = \text{Prob}\ [\ \max t\ \check{S} \leq \check{R}] \qquad \textbf{(پ-۶-الف-۳)}$$

که در آن $\check{S}_{max\,t}$ عبارت است از یک متغیر تصادفی که به‌صورت بزرگ‌ترین مقدار قابل حصول فرایند تصادفی $\check{S}(t)$ در محدوده زمانی $(0\ ,\ t)$ تعریف می‌گردد.

پیوست ۶– ب

ملزومات طراحی مبتنی بر حالات حدّی

۱- کلیات

ملزومات طراحی مبتنی بر حالات حدی

در طراحی مبتنی بر حالات حدی ملزومات زیر باید ملحوظ گردند:

- کنترل‌های لازم، به نیت حصول اطمینان از آن‌که هیچ‌یک از حالات حدی مربوط نقض نگردیده باشند، به عمل آید.
- تمامی شرایط طراحی و حالات بارگذاری در نظر گرفته شوند.
- انحرافات و تغییرات محتمل از امتدادها و موقعیت‌های مفروض کنش‌ها در نظر گرفته شوند.
- محاسبات فنی با بهره‌گیری از مدل‌های طراحی واقع‌گرایانه به عمل آید و در صورت لزوم با آزمایش تدقیق گردد. مدل‌های تحلیل باید شامل تمامی پارامترهای مؤثر باشند.
- مدل تحلیل برای تخمین رفتار سازه در چارچوب مقاصد طراحی از دقت کافی برخوردار باشد.
- استانداردهای متعارف کیفی اجرای سازه‌های فضاکار و قابلیت اعتماد و اطلاعات مبنای طراحی ارضا گردند.

۲- حالات حدی نهایی

شرایط صحت سنجی

- در بررسی حالت‌های حدی تعادل استاتیکی یا تغییرمکان‌های ظاهری یا تغییرشکل‌های سازه، لازم است رابطهٔ زیر برقرار باشد:

$$E_{d,dst} \le E_{d,stb} \qquad \text{(پ ـ ۶ ـ ب ـ ۱)}$$

که در آن $E_{d,dst}$ نمایشگر آثار ناشی از کنش‌های ناپایدارکننده و $E_{d,stb}$ نشان‌دهندهٔ آثار ناشی از عوامل پایدار سازنده می‌باشند.

- هرگاه حالات حدی گسیختگی یا تغییرشکل متزاید یک مقطع، عضو، اتصال یا پیونده مورد بررسی است، لازم است صحت‌سنجی به منظور تأیید و ارضای رابطه زیر به عمل آید:

$$S_d \le R_d \qquad \text{(پ ـ ۶ ـ ب ـ ۲)}$$

- که در آن، S_d مقدار طراحی یک نیرو یا لنگر داخلی (مقدار نمایشگر تقاضا) و R_d مقدار طراحی مقاومت (مقدار نمایشگر ظرفیت) متناظر می‌باشند.

۳- مقادیر مشخصه کنش‌ها

- مقادیر مشخصه کنش‌ها، F_k ، به شرح زیر تعیین می‌گردند:

الف)- بر اساس آیین‌نامه بارگذاری معتبر مورد استفاده در هماهنگی با فصل سوم این آیین‌نامه، یا

ب)- بر اساس خواسته‌های کارفرما یا پیشنهادات مبتنی بر مطالعات ویژهٔ طرح که به تأیید کارفرما رسیده باشد.

در این حالت، ملزومات حداقل آیین‌نامه‌های معتبر بارگذاری سازه‌های با کاربری نظیر با رعایت موارد مندرج در فصل سوم این آیین‌نامه باید ارضا گردند.

- در مورد کنش‌های دایمی، هرگاه ضریب تغییرات قابل ملاحظه باشد، یا آنکه احتمال تغییر مقادیر عوامل در طول عمر مفید سازه قابل ملاحظه باشد، دو مقدار مشخصه را باید از یکدیگر متمایز نمود. مقدار مشخصهٔ کرانه بالایی، $G_{k,sup}$ و مقدار مشخصهٔ کرانه پایینی $G_{k,inf}$؛ در غیراین‌صورت، مقدار مشخصه واحد G_k کفایت خواهد نمود.

- در مورد کنش‌های متغیر، مقدار مشخصه، Q_k، بر اساس مقادیر از پیش‌تعیین‌شده تعریف می‌گردد، در صورت عدم کفایت اطلاعات لازم، می‌توان مقدار مشخصه را به صورت مقدار کرانه بالایی تعریف نمود با این نیت که از آن مقدار تجاوز نگردد (یا احتمال تجاوز به میزان قابل‌پذیرشی اندک باشد). همچنین می‌توان مقدار مشخصه را به صورت مقدار کرانه پایینی تعریف نمود که احتمال نیل به آن با درجه احتمال معینی ارایه گردیده باشد.

- در مورد کنش‌های تصادفی، مقادیر مشخصه A_k به طور کلی باید از سوی مراجع ذیصلاح یا براساس مطالعات ویژه تعیین گردند.

مقادیر معرف کنش‌های متغیر

مهمترین مقدار معرف این کنش‌ها عبارت است از مقدار مشخصه Q_k.

مقادیر معرف دیگر، از طریق ضرایب ψ_i به مقادیر مشخصه مرتبط می‌گردند.

مقادیر ψ_i در این آیین‌نامه معرف شرایط زیر می‌باشند:

$\psi_0 Q_k$: مقدار ترکیب بار

$\psi_1 Q_k$: مقادیر با احتمال وقوع زیاد

$\psi_2 Q_k$: مقادیر شبه دایمی

مقادیر ψ_0، ψ_1 و ψ_2 یا باید براساس آیین‌نامه معتبر سازگار با دیدگاه‌های مطروحه یا استاندارد بارگذاری مربوط و با توجه به موارد مندرج در فصل سوم این آیین‌نامه تعیین گردند، یا توسط کارفرما، یا براساس مطالعات ویژه توسط طراح پیشنهاد و به تأیید کارفرما رسانده شوند. درهر حالت، نباید این مقادیر از مقادیر حداقل تعیین‌شده در استانداردهای بارگذاری مربوط کمتر اختیار گردند یا به بیان دقیق‌تر باید به نحوی در نظرگرفته شوند که نامطلوب‌ترین حالت را از آنچه که از مقادیر تعیین‌شده در استانداردهای بارگذاری مربوط حاصل می‌گردد، در برگیرند.

مقادیرمعرف مکمل

این مقادیر در ارتباط با آثاری نظیر خستگی و کنش‌های دینامیکی مشخص می‌گردند.

مقادیر طراحی کنش‌ها

مقدار طراحی F_d هر کنش در بیان کلی عبارت است از:

$$F_d = \gamma_F F_k \qquad \textbf{(پ ـ ۶ ـ ب ـ ۳)}$$

که در آن γ_F ضریب پاره‌ای کنش مورد نظر است که احتمال انحراف از مقادیر کنش‌ها، اثر عدم قطعیت در مدل‌سازی آن‌ها، عدم قطعیت در تعیین مقادیر و همچنین عدم قطعیت در ارزیابی حالت حدی مورد نظر را در برخواهد گرفت.

بنابراین مقادیر γ_F برای عوامل متفاوت به صورت زیر نمایش داده می‌شوند:

$G_d = \gamma_G G_k$ **(پ ـ ۶ ـ ب ـ ۴ـ الف)**

$Q_d = \gamma_Q Q_k$ **یا** $\gamma_Q \psi_i Q_k$ **(پ ـ ۶ ـ ب ـ ۴ـ ب)**

مگر آنکه A_d مستقیماً تعریف شده باشد.

$A_d = \gamma_A A_k$ **(پ ـ ۶ ـ ب ـ ۵)**

مقادیر کرانه بالا و پایین کنش‌های دایمی به‌صورت زیر خواهند بود:

–هرگاه تنها یک مقدار مشخصه تعریف گردیده باشد:

$G_{d,sup} = \gamma_{G,sup} G_k$ **(پ ـ ۶ ـ ب ـ ۶ـ الف)**

و

$G_{d,inf} = \gamma_{G,inf} G_k$ **(پ ـ ۶ ـ ب ـ ۶ـ ب)**

– هرگاه مقادیرکرانه بالایی و پایینی مشخصه تعریف گردیده باشند:

$G_{d,sup} = \gamma_{G,sup} G_{k,sup}$ **(پ ـ ۶ ـ ب ـ ۷ـ الف)**

$G_{d,inf} = \gamma_{G,inf} G_{k,inf}$ **(پ ـ ۶ ـ ب ـ ۷ـ ب)**

که در آن کمیت‌های ذیربط به‌شرح زیر تعریف شده‌اند:

$G_{k,inf}$ مقدار مشخصه کرانه پایینی کنش دایمی،

$G_{k,sup}$ مقدار مشخصه کرانه بالایی کنش دایمی،

$\gamma_{G,inf}$ مقدار کوچک‌تر ضریب ایمنی پاره‌ای بار دایمی،

$\gamma_{G,sup}$ مقدار بزرگ‌تر ضریب ایمنی پاره‌ای بار دایمی.

مقادیر طراحی آثار ناشی از کنش‌ها

در اینجا آثار ناشی از کنش‌ها با E نشان داده می‌شوند و نمایشگر پاسخ سازه به این کنش‌ها می‌باشند.

مقادیر طراحی آثار ناشی از کنش‌ها (E_d) بر اساس مقادیر طراحی کنش‌ها (F_d)، داده‌های هندسی (a_d) و مشخصه‌ها و خواص مصالح تعیین می‌گردند. به عبارت دیگر، مقادیر E_d تابعی از F_d و a_d و پارامترهای دیگر چندی خواهند بود.

۴-خواص مصالح

مقادیر مشخصه

خواص مصالح از طریق مقادیر مشخصهٔ پارامتر مربوطه، X_k ارایه می‌گردد که به‌طورکلی به‌نتایج حاصل از آزمایش‌های استاندارد مصالح در شرایط استاندارد اطلاق می‌گردد.

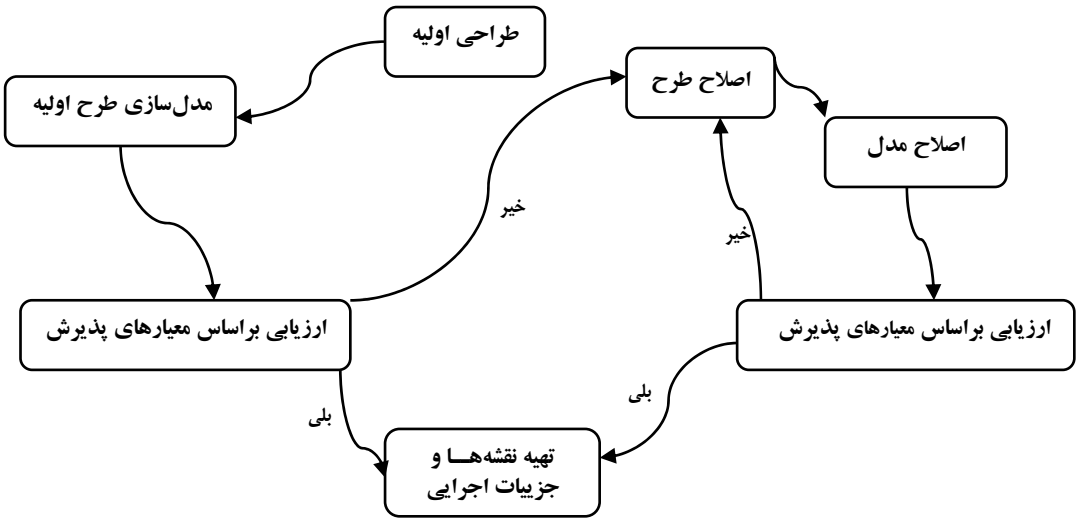
- در حالات مشخص، مقدار اسمی پارامتر مصالح به عنوان مقادیر مشخصه به‌کار گرفته می‌شود.
- خواص مصالح فولادی به طور کلی از طریق مقادیر اسمی پارامتر مصالح به عنوان مقادیر مشخصه به‌کار گرفته می‌شود.

- یک پارامتر خاص از مصالح ممکن است حاوی دو مقدار مشخصهٔ کرانهٔ بالایی و کرانهٔ پایینی باشد. در حالات کنترل عضو حفاظت‌نشده از دیدگاه ظرفیتی معمولاً کرانهٔ پایینی و در طراحی اعضای دیگری که به صورت حفاظت‌شده طراحی می‌گردند، باید مقدار میانگین به‌عنوان مقدار مشخصه عضو حفاظت‌نشده به‌کار برده شود.

۵-فرآیند طراحی به روش ضرایب پاره‌ای بار و مقاومت

مقدمه و کلیات

- طراحی مبتنی بر روش ضرایب پاره‌ای بار و مقاومت، شامل یک فرایند تکراری به صورت زیر خواهد بود.



ارزیابی بر اساس معیارهای پذیرش به معنای ارضای موارد زیر است:

- در تمامی شرایط طراحی (به نحو تعریف شده در فصل دوم) و تحت تأثیر مقادیر کنش‌های مؤثر در ترازهای عملکردی و در سطوح اطمینان مورد نظر و با توجه به تقاضای ناشی از آن و با توجه به مقادیر ظرفیت متناسب سازه، هیچیک از حالات حدّی محتمل مخدوش نگردد.
- در هر یک از شرایط طراحی و حالات حدی مورد نظر، کنش‌ها و بارهای ایجادکننده مقادیر تقاضای بحرانی کمیت‌های پاسخ سازه و اعضای آن، باید به صورت ارایه شده در این بخش ترکیب گردند.
- در مواردی که اعمال آثار کنش‌ها به صورت همزمان متصور یا ممکن یا محتمل نیستند، بارگذاری نیز فاقد حالات ترکیبی نامحتمل آثار چنین کنش‌هایی خواهد بود. از سوی دیگر، آثار احتمال وقوع همزمان کنش‌هایی که اعمال کسری از کمیت‌های مشخصه آنان به صورت همزمان محتمل به نظر می‌رسند، باید با توجه به دیدگاه‌های احتمال‌اندیشانه ملحوظ گردند.
- مقادیر بارها و ضرایب پاره‌ای و کلی آنها در ترکیب بارهای ذیربط به صورت مقادیر مشخصه یا مقادیر ارایه‌دهنده آثار کنش‌های مزبور در ترازهای ایمنی، خدمت‌رسانی یا طراحی، ارایه می‌گردند.

- مقادیر بارها و ضرایب بارها به منظور طراحی در حالات حدی متفاوت و به منظور ارضای ترازهای عملکردی متفاوت و سطوح متفاوت بارگذاری، هرگاه بر اساس داده‌های آماری حاصل گردند، باید کوشش گردد تا در تمامی حالات حدی محتمل، از قابلیت اطمینانِ تا حد ممکن همسانی با دیگر حالات بارگذاری برخوردار باشند. در این آیین‌نامه کوشش گردیده این امر از طریق اعمال ضرایب پاره‌ای بار منظور شود.

مقادیر بارهای طراحی در رابطه با حالات حدی و ترازهای عملکردی و سطح خطر

مقادیر طراحی عوامل

در صورتی‌که مقدار کمیت نماینده هریک از کنش‌های مؤثر (بارها) را با F نمایش دهیم، مقادیر طراحی کنش مربوطه با F_d نشان داده می‌شوند:

$$F_d=\gamma_f F_{rep} \quad , \quad F_{rep}=\psi F_k \qquad \text{(پ ـ ۶ـ ب ـ ۸)}$$

در روابط فوق، F_k نمایشگر مقدار مشخصه یک کنش دلخواه مؤثر و F_{rep}، مقادیر نمایشگر آن کنش محسوب می‌گردند. γ_f نمایشگر ضریب پاره‌ای بار مزبور می‌باشد که امکان انحراف مقادیر واقعی را از مقادیر نمایشگر بار مورد نظر ارایه می‌دهد.

به ψ در این آیین‌نامه مقادیر زیر را می‌توان حسب مورد تخصیص داد (بند ۳ فوق) :

$\psi=1$

$\psi=\psi_0$

$\psi=\psi_1$

$\psi=\psi_2$

مقادیر کمّی آثار ناشی از کنش‌های مؤثر

۱) در ارتباط با یک حالت بارگذاری خاص، مقادیر طراحی آثار ناشی از اعمال آن بار (تقاضای ناشی از اثر بار مربوط) در حالت کلی به صورت زیر قابل ارایه است:

$$E_d=\gamma_{sd}\, E\{\gamma_{f,i}\,;\, F_{rep,i}\,;\, a_d\}\ i\geq 1 \qquad \text{(پ ـ ۶ـ ب ـ ۹)}$$

که در آن، a_d عبارت است از مقادیر طراحی داده‌های هندسی به شرحی که خواهد آمد،

γ_{sd} عبارت است از ضریب پاره‌ای مرتبط با عدم قطعیت در مقادیر مفروض کمیّت بار و مدل‌سازی آثار ناشی از آن‌ها.

۲) در اغلب حالات، ساده‌سازی زیر را می‌توان به کار بست.

$$E_d=E\{\gamma_{F,i}\,;\, F_{rep,i}\,;\, a_d\}\ i\geq 1 \qquad \text{(پ ـ ۶ـ ب ـ ۱۰)}$$

که در آن

$$\gamma_{F,i}=\gamma_{sd}\times\gamma_{f,I} \qquad \text{(پ ـ ۶ـ ب ـ ۱۱)}$$

ضرایب پاره‌ای $\gamma_{F,i}$ را می‌توان به هریک از کنش‌ها یا به صورت عمومی بر تمامی کنش‌ها در ترکیب بارها با مقادیر ذیربط بار مزبور، اعمال نمود.

۳) هرگاه لازم باشد تمایزی بین آثار حالات کرانه پایینی و بالایی کنش‌های دایمی منظور گردد، می‌توان از دو ضریب پاره‌ای بار

بهره‌گیری نمود که با $\gamma_{G,inf}$ و $\gamma_{G,sup}$ نشان داده می‌شود.

۴) در تحلیل غیـرخطی (یعنی در حالت‌هایی که رابطه بین کنش‌هـا و آثار ناشی از آنهـا ـ تقاضا ـ غیرخطی باشد)، قـوانین ساده‌سازی‌شده زیر را می‌توان برای حالاتی که اثر یکی از کنش‌ها مسلط است، به‌کار برد:

الف) هرگاه تقاضا با نرخ افزون‌تری از نرخ افزایش بار، افزایش یابد: در این حالت، ضریب پاره‌ای γ_F باید به مقدار نمایشگر آن کنش اعمال گردد.

ب) هرگاه نرخ افزایش تقاضا، از نرخ افزایش بار کمتر باشد، ضریب پاره‌ایγ_F باید به تقاضا اعمال گردد.

مقادیر طراحی مشخصه‌های مصالح و فراورده‌های سازه‌ای

۱) مقادیر طراحی X_d مربوط به خواص ماده یا مصالح ساختمانی در حالت کلی می‌تواند به طریق زیر نمایش داده شود:

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m} \qquad \textbf{(پ ـ ۶ـ ب ـ۱۲)}$$

که در آن X_k مقدار مشخصه پارامتر مصالح یا خاصیت مواد سازه می‌باشد و

η عبارت است از مقدار میانگین ضریب تبدیل به منظور ملحوظداشتن آثار زیر:

- آثار حجم و مقیاس،
- آثار رطوبت و دما،
- پارامترهای مرتبط دیگر.

γ_mضریب پاره‌ای مصالح یا خاصیت مواد به منظور ملحوظداشتن آثار زیر می‌باشد:

- امکان انحراف نامطلوب خواص مصالح از مقدار مشخصه،
- آثار تصادفی ضریب تبدیلη.

۲) به عنوان گزینه‌ای دیگر، در حالات ذیربط، ضریب تبدیل η را می‌توان به‌طور تلویحی در مقادیر مشخصه مصالح در نظر گرفت، یا با استفاده از ضریب γ_M به جای γ_m به صورتی که خواهد آمد، عمل نمود.

مقـادیر طراحی مشخصـات مصـالح برای ترازهای عملکردی گوناگون و سطوح خطر و حـالات حدی مرتبط را می‌توان از طریق زیر به‌دست آورد:

- روابط تجربی با بهره‌گیری از خواص فیزیکی اندازه‌گیری‌شده از طریق آزمایش،

-از طریق بررسی ترکیبات شیمیایی و خواص متالورژیکی مصالح،

-برای مصالح دارای گواهینامه تولید و کنترل کیفیت، بر اساس مقادیر ارایه‌شده در استاندارد معتبر مربوط با ارایه مستندات و گواهینامه ذیربط.

مقادیر طراحی داده‌های هندسی

۱) مقادیر طراحی داده‌های هندسی ـ مانند ابعاد اعضا که برای محاسبهٔ آثار کنش‌ها و یا مقاومت به کار می‌رود ـ را می‌توان برابر با همان مقادیر اسمی آن کمیت‌ها در نظر گرفت. به عبارت دیگر:

$$a_d = a_{nom} \qquad \text{(پ ـ ۶ـ ب ـ ۱۳)}$$

۲) هرگاه آثار انحراف از داده‌های هندسی (مانند برون‌محوری در اعمال بار یا عدم تطابق محل و موقعیت واقعی نصب تکیه‌گاه‌ها با نقشه‌های اجرایی) از نظر قابلیت اعتماد حایز اهمیت باشند، مقادیر طراحی داده‌های هندسی باید از طریق

$$a_d = a_{nom} \pm \Delta_a \qquad \text{(پ ـ ۶ـ ب ـ ۱۴)}$$

تعریف شوند که در آن:

Δ_a آثار زیر را در برمی‌گیرد:

- امکان انحراف نامطلوب از مقادیر مشخصه یا اسمی
- امکان بروز انحرافات تجمعی حاصل از بروز همزمان چندین انحراف هندسی

در حالتی که $a_{nom}=0$ باشد، $a_d=\Delta_a$ مقادیر ناکاملی، نابه‌جایی و انحرافات مرتبط با رواداری‌ها را ارایه می‌دهد.

۳) آثار انحرافات دیگر را باید با ضرایب پاره‌ای پوشش داد. این انحرافات در ارتباط با کنش‌های مؤثر از طریق ضریب γ_p و در ارتباط با ظرفیت (مقاومت) یا ضریب γ_M ملحوظ می‌گردند.

- مقادیر رواداری‌ها را می‌توان برای سازه‌های ساختمانی متعارف از مقررات ملی ایران ـ مبحث یازدهم اتخاذ نمود که در این کاربری از سازه‌های فضاکار صادق خواهند بود.

مقادیر رواداری‌های مربوط به انواع دیگر سازه‌های فضاکار در بخش ۳ این آیین‌نامه ارایه خواهد گردید.

ظرفیت‌های طراحی

۱) مقاومت (ظرفیت) طراحی، R_d، تحت تأثیر حالات حدی نهایی برای ترازهای عملکردی متفاوت و سطوح متفاوت بارگذاری محتمل متناسب با عمر مفید و دورهٔ بازگشت، از رابطهٔ زیر تعیین می‌گردد:

$$\text{ر}_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R\{X_{d,i}\,;\, a_d\} = \frac{1}{\gamma_{Rd}}\, R\{\eta\, \frac{X_{k,i}}{\gamma_{m,i}}; a_d\}\, i \geq 1 \qquad \text{(پ ـ ۶ـ ب ـ ۱۵)}$$

که در آن: γ_{RD} ضریب پاره‌ای پوشش‌دهندهٔ عدم قطعیت در مدلی است که مقاومت بر اساس آن تخمین زده می‌شود. علاوه بر آن، آثار ناکاملی‌ها و انحرافات و رواداری‌ها در صورتی که به‌طور صریح مدل‌سازی نشده باشند، از طریق این ضریب پاره‌ای منظور می‌شوند.

X_{di} عبارت است از مقدار طراحی مشخصهٔ i اُم مصالح

۲) رابطهٔ بالا را می‌توان به طریق زیر نیز ساده‌سازی نمود:

$$\xi_d = R\left\{\eta_i \frac{X_{k,i}}{\gamma_{M,i}} ; a_d\right\} \quad i \geq 1 \qquad \textbf{(پ ـ ۶ـ ب ـ ۱۶)}$$

که در آن

$$\gamma_{M,i} = \gamma_{Rd} \times \gamma_{m,i} \qquad \textbf{(پ ـ ۶ـ ب ـ ۱۷)}$$

یادآوری: ضریب η_i را می‌توان در $\gamma_{M,i}$ ملحوظ نمود.

۳) به عنوان گزینه‌ای دیگر، مقاومت طراحی (ظرفیت طراحی) را می‌توان مستقیماً از مقادیر مشخصهٔ مصالح بدون تعیین صریح مقادیر کمیّت‌های طراحی برای متغیرهای منفرد اصلی با بهره‌گیری از رابطهٔ زیر به‌دست آورد:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} \qquad \textbf{(پ ـ ۶ ـ ب ـ ۱۸)}$$

این رابطه در مورد سازه‌های متشکل از صرفاً یک نوع مصالح (مثلاً فولاد) و روش‌های طراحی به کمک آزمایش، قابل انطباق است.

۴) باز هم به عنوان گزینه دیگر، برای سازه‌ها و اعضای سازه‌ای تحلیل‌شده به روش غیرخطی که از بیش از یک نوع مصالح در آن استفاده شده باشد که توأم با یکدیگر به‌کار گرفته می‌شوند، یا در حالتی‌که خواص خاک در مقاومت طراحی ملحوظ شده است، رابطه زیر برای تعیین مقاومت طراحی به‌کار گرفته می‌شود:

$$\xi_d = \frac{1}{\gamma_M} R\left\{\eta_1 X_{k,1} ; \eta_i X_{k,i} \ (i>1) \frac{\gamma_{m,1}}{\gamma_{m,i}} ; a_d\right\} \qquad \textbf{(پ ـ ۶ ـ ب ـ ۱۹)}$$

در برخی از حالات، مقاومت طراحی را می‌توان با کاربرد مستقیم ضریب پاره‌ای γ برای خواص مصالح مورد استفاده قرار داد.

حالات حدی نهایی

کلیات

۱) حالات حدی نهایی باید به روش زیر مورد ارزیابی قرار داده شود:

الف)- تعادل:

از بین رفتن تعادل استاتیکی سازه یا بخشی از سازه در حالتی‌که به صورت جسم صلب درنظر گرفته شود؛ در صورتی‌که:

- تغییرات جزیی مقادیر توزیع فضایی بارها از یک منبع واحد حایز اهمیت باشند،
- مقاومت مصالح ساختمانی یا خاک طراحی را کنترل ننمایند.

ب) مقاومت:

خرابی داخلی یا تغییرشکل زیاده از حد سازه یا اعضای سازه‌ای و شالوده‌ها و پی و پایه‌ها، هرگاه مقاومت مصالح سازه یا خاک طرح را کنترل نماید.

پ) گسیختگی یا تغییرشکل زیاده از حد خاک (نشست، فرونشست، روانگرایی، گسترش جانبی)، هرگاه مقاومت خاک یا سنگ در تأمین مقاومت مجموعه سازه حایز اهمیت خاص باشد.

ت) خرابی و شکست ناشی از خستگی سازه یا عضو سازه‌ای.

۲) مقادیر طراحی کنش‌ها باید مطابق با این پیوست اختیار گردند.

ارزیابی معیارهای پذیرش برای تعادل استاتیکی و مقاومت

۱) با در نظرگرفتن حالت حدی تعادل استاتیکی سازه، معیار پذیرش عبارت است از:

$$E_{d,dst} < E_{d,stb} \qquad \textbf{(پ ـ۶ ـ ب ـ۲۰)}$$

که در آن $E_{d,dst}$ عبارت است از مقدار طراحی اثر کنش ناپایدارکننده

و $E_{d,stb}$ عبارت است از مقدار طراحی اثر کنش پایدارکننده.

۲) در موارد لازم، رابطه‌های کنترل حالت تعادل استاتیکی را می‌توان با ملحوظداشتن آثار پدیده‌های دیگر تکمیل نمود، به عنوان مثال: با اعمال ضریب اصطکاک بین اجسام صلب و نظایر آن.

۳) هرگاه حالت حدی مرتبط با گسیختگی (پارگی و شکست) یا تغییرشکل متزاید یک مقطع، عضو یا اتصال مورد نظر باشد، باید:

$$E_d \le R_d \qquad \textbf{(پ ـ۶ ـ ب ـ۲۱)}$$

که در آن: E_d عبارت است از مقدار طراحی ناشی از عواملی مانند تقاضای نیروهای داخلی، لنگرها یا بردار نمایشگر چندین بار داخلی یا لنگر و R_d نمایشگر مقادیر طراحی مقاومت مربوط می‌باشند.

۶. ترکیب بارها

مقدمه و کلیات

۱) برای هر حالت بار بحرانی، مقادیر طراحی آثار ناشی از کنش‌ها (E_d) باید با ترکیب مقادیر کنش‌های متفاوتی که احتمال وقوع و بروز و اعمال همزمان داشته باشند، تعیین گردند.

۲) هر ترکیب بار باید شامل یک عامل متغیر اصلی یا یک عامل تصادفی باشد.

۳) ترکیب بارها باید به شرح مندرج در بندهای زیر صورت گیرد.

۴) هرگاه نتایج ارزیابی به تغییراتِ بزرگی یک عامل دایمی (مستمر) و نحوه توزیع فضایی آن وابسته باشد، حالات ناخوشایند و خوشایند این بارها باید ملحوظ گردند.

۵) هرگاه چند اثر ناشی از یک کنش دارای اثر متقابل بر یکدیگر نباشند، ضـرایب پاره‌ای مربوط به هر یک از مؤلفه‌های خوشایند را می‌توان کاهش داد.

۶) تغییرشکل‌های اعمالی را در موارد حایز اهمیت باید ملحوظ داشت.

ترکیب بارها برای شرایط طراحی مستمر یا گذرا (ترکیب بارهای اساسی)

فرم کلی آثار ناشی از عوامل و بارها به صورت زیر می‌باشد.

$$E_d = \gamma_{sd} E\{\gamma_{g,j} G_{k,j} ; \gamma_p P ; \gamma_{q,1} Q_{k,1} ; \gamma_{q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}\} \quad \text{(پ ـ۶ ـ ب ـ ۲۲)}$$

$$j \geq 1 \ ; \ i > 1$$

۱) ترکیب آثار ناشی از بارهایی که باید ملحوظ شوند، باید بر اساس مقادیر طراحی عامل متغیر اصلی و مقادیر ترکیبی طراحی سایر عواملِ متغیر تعیین گردد.

$$E_d = E\{\gamma_{G,j} G_{k,j} ; \gamma_p P ; \gamma_{Q,1} Q_{k,1} ; \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}\} \quad \text{(پ ـ۶ ـ ب ـ ۲۳)}$$

$$j \geq 1 \ ; \ i > 1$$

ترکیب بارهای نشان داده شده در آکولادهای فوق را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$\sum_{j\geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{ "+" } \gamma_P P \text{ "+" } \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i>1} \gamma_{Qi} \psi_{o,i} Q_{k,i} \quad \text{(پ ـ۶ـ ب ـ۲۴)}$$

یا به بیان دیگر، برای حالات حدی مقاومتی هندسی، ناخوشایندترین حالت حاصل از دو عبارت زیر را می‌توان به‌کار گرفت:

$$\sum_{j\geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{ "+" } \gamma_P P \text{ "+" } \gamma_{Q,1} \psi_{0,i} Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad \text{(پ ـ۶ـ ب ـ۲۵)}$$

$$\sum_{j\geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{ "+" } \gamma_P P \text{ "+" } \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad \text{(پ ـ۶ـ ب ـ۲۶)}$$

"+" نمایشگر ترکیب کنش‌هاست.

Σ نمایشگر اثر توأم یا ترکیبی بارها و

ξ عبارت‌است از ضریب کاهش برای کنش‌های دایمی G در ناخوشایندترین حالت.

۲) در حالتی‌که رابطه بین کنش‌ها و آثار آنها غیرخطی است، روابط بالا را باید مستقیماً اعمال نمود که متناسب با افزایش نسبی آثار کنش‌ها، در مقایسه با افزایش بزرگی مقادیر این کنش‌ها، باید اعمال گردند.

ترکیب بارها برای شرایط طراحی تصادفی

۱) فرم عمومی آثار ناشی ازکنش‌های مزبور باید به صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$E_d = E\{ G_{k,j} ; P ; A_d ; (\psi_{1,1} \text{ یـا } \psi_{2,1}) \ Q_{k,1} ; \psi_{2,i} ; Q_{k,i}\} \quad \text{(پ ـ ۶ ـ ب ـ ۲۷)}$$

$$j \geq 1 \ ; \ i > 1$$

۲) ترکیب کنش‌های مندرج در حد فاصل آکولادها را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\sum_{j\geq 1} G_{k,j} \text{ "+" } P \text{ "+" } A_d \text{ "+" } (\psi_{1,1} \text{ یا } \psi_{2,1})\, Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i>1} \psi_{2,1}\, Q_{k,1} \qquad \textbf{(پ ـ۶ ـ ب ـ۲۸)}$$

انتخاب بین $\psi_{1,1}\, Q_{k,1}$ یـا $\psi_{2,1}\, Q_{k,1}$ باید با

درنظرگرفتن شرایط طراحی تصادفی مرتبط صورت گیرد. بنابراین در شرایط طراحی تصادفی تحت آثار ناشی از ضربه، آتش‌سوزی یا ضرایب پاره‌ای مرتبط با شرایط ایمنی جانی ناشی از وقوع سانحه تصادفی، این کمیت متناسباً اختیار می‌گردد.

ترکیب بارها برای شرایط طراحی لرزه‌ای

۱) صورت عمومی آثار ناشی از بارها باید به‌صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$E_d = E\{G_{k,j} ; P ; A_{Ed} ; \psi_{2,1}\, Q_{k,i}\} \qquad \textbf{(پ ـ۶ ـ ب ـ۲۹)}$$

$$j \geq 1 \;\; ; \;\; i \geq 1$$

۲) ترکیب بارهای داخل آکولاد را می‌توان به‌صورت زیر نمایش داد:

$$\sum_{j\geq 1} G_{k,j} \text{ "+" } P \text{ "+" } A_{Ed} \text{ "+" } \sum_{i\geq 1} \psi_{2,i}\, Q_{k,i} \qquad \textbf{(پ ـ۶ ـ ب ـ۳۰)}$$

ضرایب پاره‌ای بار و ترکیب بارها

مقادیر ضرایب γ و □ برای کنش‌های مؤثر باید مطابق مراجع معتبر از جمله آیین‌نامه اروپا، EN1991 اختیار گردد.

ضرایب پاره‌ای مصالح و فراورده‌های ساختمانی

مقادیر ضرایب پاره‌ای مقاومت و خواص ضرایب مصالح و مواد ساختمانی باید از مراجع معتبر از جمله آیین‌نامه‌های اروپا EN1991 تا EN1999 اختیار گردند.

پیوست ۷

اصول و شیوه‌های اجرای سازه‌های فضاکار

۷-۱- مفاهیم عمومی

در این آیین‌نامه حداقل استانداردهای کیفی عملیات اجرایی ساخت و نصب ارایه گردیده‌اند تا اطمینان حاصل شود که مفروضات طراحی براساس این آیین‌نامه ارضا گردیده و سطح ایمنی مورد نظر تأمین گردیده است. متناسب با نوع عامل و کیفیت مورد انتظار رفتار سازه، ممکن است سطوح متفاوت دقت و کیفیت در عملیـات ساخت و نصب مورد نیاز باشد. این موارد در بخش سوم این آیین-نامه به تفصیل ارایه خواهند شد.

۷-۲- ملزومات ساخت و نصب

هرگونه نیاز ویژه یا تکمیلی مربوط به ساخت و نصب برای سازهٔ خاص باید در مشخصات فنی پروژه به روشنی تعیین گردد. مشروط برآن‌که مصالح فولادی، مصالح جوش‌کاری و پیچ‌ها با مشخصات تعیین‌شده در بخش۲ این آیین‌نامه مطابقت داشته باشند، کیفیت عملیات اجرایی ساخت و نصب باید از مشخصات ارایه‌شده در بخش۳ تبعیت نماید.

۷-۳- مشخصات فنی اجرا

به‌جز مواردی که در این آیین‌نامه به صراحت مورد اشاره قرار داده شده باشد، موارد مندرج در مقررات ملی ساختمانی ایران مبحث یازدهم، استاندارد جوش ایران، استاندارد پیچ‌های کشور یا در موارد نقص یا کمبود، استانداردهای معتبر جاری خواهند بود.

مشخصات فنی ساخت و نصب پروژه باید توسط طراح، تهیه یا اختیار گردد که طی آن تمامی جزییات و مشخصات مصالح، ساخت و نصب به‌منظور حصول اطمینان از سازگاری گام‌های اجرایی با مفروضات طراحیِ هر سازهٔ فضاکار ارایه شده باشد. مشخصات فنی پروژه باید جزییات کافی در مورد ملزومات ویژهٔ زیر را شامل شود:

- ساخت
- نصب
- بازرسی فنی و کنترل کیفیت
- پذیرش

مشخصات فنی می‌تواند مکمل ضوابط استانداردهای مرجع باشد ولی نباید از حداقل ملزومات تعیین‌شده در این آیین‌نامه عدول به‌عمل آید.

مشخصات فنی مصوب پروژه نباید بدون موافقت طراح و مرجع مسؤول کنترل و بازرسی فنی طرح و یا دستگاه مسؤول نظارت بر حسن انجام عملیات اجرایی تغییر یابد.

لازم‌است مشخصات فنی مصالح، ساخت، بافت و نصب سازه فضاکار برای هر پروژه به روشنی ارایه گردد. در موارد عدم تهیه و تدوین مشخصات فنی پروژه و برای حالات معمول، ملزومات این آیین‌نامه جاری خواهند بود.

۷-۴- محدودیت‌ها در کاربری مصالح و به‌کارگیری شیوه‌های ساخت

بسته به نوع کاربری سازه و کنش‌ها و عوامل مؤثر، محدودیت‌های کاربرد انواع مصالح و شیوه‌های برش‌کاری، سوراخ‌کاری، آماده‌سازی و اصلاحات سطحی، اصلاحات کناره‌ها، لبه‌ها و زدگی‌ها، فرم‌دادن، صاف‌کردن، رنگ‌کاری و گالوانیزه‌نمودن باید مطابق بخش سوم این آیین‌نامه مراعات گردند.

۷-۵- اتصالات پیچی

مشخصه‌های سوراخ‌ها، سوراخ‌کاری، فاصلهٔ آزاد سوراخ‌ها، مشخصات فنی پیچ‌ها و مهره‌ها و واشرها، شیوه سفت‌کردن پیچ‌ها و همچنین پیچ‌های اصطکاکی و غیرلغزشی و نحوهٔ اجرای اتصال پیچی در سازه‌های فضاکار در بخش سوم این آیین‌نامه ارایه گردیده است.

۷-۶- اتصالات جوشی

جوش‌کاری و مونتاژ قطعات جوش‌شده باید به‌نحوی صورت گیرد که ابعاد نهایی در محدودهٔ رواداری‌های قابل‌پذیرش در این آیین‌نامه باشند.

مشخصات فنی پروژه باید جزییات فرایند جوش‌کاری، سطح کنترل کیفیت، نحوه اعمال بازرسی فنی و آزمایش‌های کنترل کیفیت را شامل گردد. بسته به روش ساخت تعیین‌شده در مشخصات فنی و شیوهٔ اتخاذشده برای ساخت به‌صورت درجا یا پیش‌ساخته، امکان دارد جوش‌کاری در کارخانه یا در کارگاه یا ترکیبی از کارخانه و کارگاه صورت گیرد.

۷-۷- مصالح سخت‌شده

در مورد کاربرد مصالح سخت‌شده باید مطابق با شرایط محیطی و عوامل مؤثر، دقت‌های ویژه به‌کار برده شود و در مواردی که کاربرد این مصالح دارای محدودیت‌هایی است، این امر توسط طراح در مشخصات فنی ذکر گردد.

۷-۸- رواداری‌ها

۷-۸-۱- طبقه‌بندی رواداری‌ها

رواداری‌های ساخت و نصب سازه‌های فضاکار در انواع "معمول" ، "ویژه" و"موردی خاص" طبقه‌بندی می‌گردند.

رواداری‌های معمول، محدودیت‌های اساسی لازم در ارتباط با انحرافات از ابعاد را به‌شرح زیر در بر می‌گیرند. بنابراین، رواداری-های معمول عبارت‌اند از حدود مبنا در ارتباط با انحرافات ابعادی به‌منظور:

- ارضای مفروضات طراحی برای عوامل استاتیکی،
- تعریف معیارهای پذیرش رواداری‌ها برای سازه‌های فضاکار در موارد عدم وجود ملزومات دیگر.

رواداری‌های ویژه، مقادیر محدودتری را ارایه می‌نمایند که برای ارضای مفروضات طراحی ضروری تلقی می‌گردند و در موارد زیر حاکم خواهند بود:

ـ در مورد سازه‌هایی که رواداری محدودتری از سازه‌های معمولی را طلب می‌نمایند،

ـ در مورد حالات بارگذاری مسلط ناشی از خستگی.

رواداری‌های موردی خاص بر مقادیر حتی محدودتری از رواداری‌ها دلالت می‌نمایند که به منظور ارضای ملزومات عملکردی سازه فضاکار خاص یا اجزای خاصی از سازه فضاکار در ارتباط با موارد زیر، مورد نیاز باشند:

ـ مسیرهای جرثقیل‌های بالاسری یا بالابرها،

ـ معیارهای دیگر از قبیل فواصل آزاد لازم بین اجزای سازه‌ها و یا اجزای متحرک،

ـ امتداد نماهای بیرونی سازه.

سازه‌های فضاکار در معرض دید، علاوه بر رواداری‌های ساخت و نصبِ حایز اهمیت از دیدگاه سازه‌ای، باید با دقت هرچه تمام‌تر و با رواداری‌های محدودتری ساخته شوند که در بخش سوم این آیین‌نامه به آن اشاره شده است (رواداری‌های خاص).

۷-۸-۲- رواداری‌ها در مراحل تولید، ساخت و نصب

رواداری‌ها را همچنین می‌توان در چارچوب رواداری‌های *تولید، ساخت و نصب* طبقه‌بندی بررسی نمود.

رواداری‌های تولید مربوط به تولیدات در مقیاس وسیع پروفیل‌های مورد استفاده، پیچ‌ها و دیگر اجزای مورد نیاز در ساخت و نصب قطعات سازه فضاکار می‌باشند که باید ملزومات کیفی و کمّی این تولیدات را ارضا نمایند.

رواداری‌های ساخت مربوط به قطعات پیش‌ساخته سازه فضاکار در کارخانه است.

در صورت رعایت رواداری‌های ساخت در مورد اعضا و اجزای سازه‌های فضاکار با توجه به میزان انحنا یا ناکاملی اولیه، اختلاف طول قطعات و در سازه‌های مشمول این آیین‌نامه درحد و حدودی که در این آیین‌نامه مشخص می‌گردند، نیازی به رعایت ملاحظات ویژه در تحلیل و طراحی نخواهد بود.

در حالاتی که رواداری‌های ساخت با مقادیر تعیین‌شده در این آیین‌نامه متفاوت باشند، باید اثرات مربوط در تحلیل و طراحی عضو، جزء سازه‌ای و مجموعهٔ سازه ملحوظ گردد.

رواداری‌های نصب رواداری‌های نصب مربوط به بافت و نصب قطعات سازه فضاکار به‌طور عمده در محل پروژه می‌باشند. این نوع از رواداری‌ها اغلب متأثر از موقعیت محورهای پیاده‌شدهٔ تکیه‌گاه‌ها و شالوده‌ها بوده و لازم‌است اثر تجمعی آنها با دیدگاه احتمال‌اندیشانه و با توجه به ملزومات این آیین‌نامه مراعات گردد.

رواداری‌های ساخت و نصب باید در مشخصات فنی پروژه و نقشه‌ها مشخص گردند. در بخش سوم این آیین‌نامه جزییات کمّی و کیفی مربوط به رواداری‌های تولید، ساخت، بافت و نصب در تمامی حالات معمول، ویژه و موردی خاص برای انواع سازه‌های فضاکار ارایه خواهند شد.

۷-۹- مدیریت کیفیت

شیوه‌های اعمال مدیریت کیفیت فراگیر در تمامی مراحل تکوین پروژه، از مطالعات توجیهی و امکان‌سنجی تا تحویل قطعی و بهره‌برداری و نگهداری ویژه پروژه‌های متشکل از سازه‌های فضاکار در بخش ۳ این آیین‌نامه ارایه خواهند شد.

۷-۹-۱- بازرسی فنی و آزمایش‌های کنترل کیفیت

سطح بازرسی فنی و آزمایش‌های کنترل کیفیت برحسب ویژگی‌های پروژه، درجهٔ اهمیت، نوع، ریخت و ماهیت سیستم سازه، مصالح و شیوه ساخت و نصب باید در مشخصات فنی پروژه ذکر گردد.

معیارهای پذیرش خواص مصالح، میزان رواداری‌ها و ملزومات کیفی تولیدات مورد نیاز جهت ساخت قطعات، اجزا، پیوندهها، اتصالات، زیرمجموعه‌ها و مجموعهٔ سازه فضاکار و همچنین رهنمودهای لازم در زمینه شیوه‌های بازرسی فنی و کنترل کیفیت ساخت، بافت و نصب اعضا و اجزای سازه‌های فضاکار در بخش سوم این آیین‌نامه ارایه خواهند شد.

۷-۹-۲- تضمین کیفیت

سازنده باید برنامه تضمین کیفیت کارایی را تدوین یا از برنامه ارایه‌شده در بخش ۳ این آیین‌نامه پیروی نماید تا اطمینان حاصل گردد که ملزومات آیین‌نامه حاضر و مشخصات فنی پروژه رعایت خواهد گردید. این برنامه باید قبل از شروع به‌کار به تأیید کارفرما رسیده باشد. سازنده باید توانایی مدیریت، تأمین منابع نیروی انسانی متخصص و کارگران ماهر و ساده و ماشین‌آلات و تجهیزات لازم را برای انجام توفیق‌آمیز کار در هماهنگی با ویژگی‌های کمّی و کیفی پروژه، دارا باشد.

توصیه می‌شود کارفرما با بهره‌گیری از متخصصان مجرب، کنترل و بازرسی فنی مستقلی در تمامی مراحل پروژه از مطالعات توجیهی و امکان‌سنجی تا تحویل قطعی و در پی آن بهره‌برداری و نگهداری اعمال نماید.

کنترل و تضمین کیفیت باید به روش‌های آماری از روش‌های مخرب و غیرمخرب در مورد مصالح، رواداری‌ها، اعوجاج‌ها اعمال گردد. همچنین کیفیت آماده‌سازی سطوح جهت رنگ‌کاری و کیفیت و کمّیت رنگ‌کاری با لایه‌های محافظ باید به روشنی تبیین گردد.

برنامه تضمین کیفیت به‌منظور حذف (یا کاهش احتمال بروز) هرگونه خطای حایز اهمیت در فرایندهای طراحی، ساخت، بافت، نصب و بهره‌برداری سازه فضاکار تنظیم می‌گردد. کنترل کیفیت مستقل نمایندگان کارفرما می‌تواند به صورت تصادفی یا مستمر بسته به شرایط و کیفیت و اهمیت کار تدوین گردد. برنامه تضمین کیفیت نباید منجر به توقف یا تعلیق کار گردد مگر آن‌که نقیصه‌ای که نیاز به رفع آن باشد، مشاهده گردد. در فرایند کنترل کیفیت، رد یا قبول قطعات و اقلام کار و فعالیت‌های کنترل‌شده براساس معیارهای این آیین‌نامه و مشخصات فنی پروژه صورت خواهد گرفت.

نارسایی‌های عملیات اجرایی باید بلافاصله پس از کشف از سوی بازرسان فنی اعلام گردد.

نسخه‌ای از کلیه گزارش‌های تهیه‌شده توسط بازرسی فنی باید در اختیار سازنده و نصاب قرار داده شود و اقدامات اصلاحی برای قطعات معیوب یا اقدامات پیش‌گیرانه در زمینه رفع نارسایی در منشأ برای تولیدات بعدی و اصلاح روند ادامه کار صورت گیرد.

۷-۱۰- اصول ایمنی اجرا

مراحل بافت و نصب سازه فضاکار باید به صورت گام به گام در مشخصات فنی پروژه قید گردد و در عمل نیز رعایت شود؛ به نحوی که در هر زمان، هر بخش بافته یا نصب‌شده برای بارها و عوامل محتمل با سطح اطمینان از پیش‌تعیین‌شده پایدار باشد.

جزییات اصول ایمنی اجرا، ویژهٔ ساخت، بافت و نصب سازه‌های فضاکار، در بخش سوم این آیین‌نامه ارایه خواهد گردید.

۷-۱۱- ساخت، بافت و نصب سازه‌های فضا کار شبکه‌ای فولادی

۷-۱۱-۱- درک مبانی و مفاهیم اصلی ساخت و نصب سازه‌های فضاکار مستلزم شناخت کامل روش‌ها و فرایندها و گام-های ساخت، بافت و نصب می‌باشد. نقشه‌های طراحی معماری، سازه و تأسیسات سازه فضاکار همراه با مشخصات فنی ساخت انتقال دهندهٔ ایده‌های طراحی به عوامل ساخت جهت جامهٔ عمل پوشاندن به آنها خواهد بود. در مورد نحوهٔ بافت و نصب و شیوه اجرا باید در مرحلهٔ طراحی سازه فضاکار اتخاذ تصمیم گردد.

۷-۱۱-۲- با استفاده از مدارک طراحی، نقشه‌های جزییات برای ساخت قطعات سازه فضاکار (یا نقشه‌های ساخت کارخانه) تهیه می‌گردند که باید جهت تأیید به مهندسان طراح ارایه گردند.

۷-۱۱-۳- در یک پروژه وسیع، تعداد زیادی از فعالیت‌های اجرایی و مراحل کار را می‌توان به طور همزمان انجام داد. در سیستم‌های پیش‌ساخته، اجزای ساخته‌شده در کارخانه طبق برنامه زمان‌بندی‌شده به تدریج از کارخانه به کارگاه حمل می‌گردند. همچنین مصالح مورد نیاز نیز طبق جدول زمان‌بندی برحسب نیاز با توجه به میزان ذخیره متناسب با شرایط و حجم پروژه، تهیه‌شده و به کارخانه حمل می‌گردند. به‌طور معمول نقشه‌های جزییات اجرایی نیز، برحسب نیاز و توانایی‌های ساخت و تولید در کارخانه، ارایه می‌گردند. بنابراین سازنده و نصاب سازه فولادی باید برنامه تفصیلی برای حصول اطمینان از آن‌که کلیه مراحل و عملیات اجرایی مطابق با برنامه زمان‌بندی و در هماهنگی با روش‌های اجراییِ از پیش تعیین‌شده، به پیش خواهد رفت، تهیه نموده و برای واقعیت بخشیدن به آن از هیچ کوششی فروگذار ننمایند.

۷-۱۱-۴- کلیه اعضای پیش‌ساخته باید در کارخانه با شماره‌ای مشخص‌شده و این شماره یا با رنگ و یا با علامت حک‌شده روی قطعات منعکس گردیده و این قطعات پس از حمل به کارگاه در محل مناسبی مطابق مشخصات فنی پروژه انبار شوند.

۷-۱۱-۵- سازنده باید برنامه اجرایی فعالیت‌ها را برای ارضای ملزومات پیمان ارایه دهد.

۷-۱۲- شناسنامه مصالح و قطعات و اعضا

مصالح هر پروژه مطابق مشخصات فنی طرح سفارش داده می‌شود و باید همراه با گواهی کنترل کیفیت و مرجحاً با حضور و تأیید نمایندهٔ بازرسی فنی پروژه حمل گردد. مصالح و تولیدات مزبور باید پیش از حمل توسط تأمین‌کننده آن‌ها علامت‌گذاری شود. در مواردی که گواهی‌نامه‌های کنترل کیفیت و با چنین علامت‌گذاری موجود نباشد، لازم‌است آزمایش‌های کنترل کیفیت مندرج در مشخصات فنی پروژه برای شناخت مصالح به‌عمل آید و متعاقباً مصالح براساس خواص دسته‌بندی و توسط سازنده براساس یک سیستم تبیین‌شده علامت‌گذاری شوند. تا مرحله نصب هر قطعه در محل تعیین‌شده در نقشه‌های نصب، باید علامت ویژه قطعه مزبور که از طرف سازنده بر آن حک‌شده، به خوبی قابل رؤیت باشد.

شیوه و نحوه آماده‌سازی سطوح قبل از رنگ‌کاری باید در مشخصات فنی ذکرشده و برنامه بازرسی سطوح آماده‌سازی‌شده تعیین گردیده باشد.

اعضای سازه فضاکار پس از تکمیل عملیات کارخانه‌ای باید شماره‌گذاری و علامت‌گذاری (کدگذاری) شده در محل مناسب انبار یا به محل احداث پروژه حمل گردند. پیوندهها، اجزا و ادوات اتصال، هر یک باید به‌طور جداگانه در بسته‌بندی مجزا تحویل گردند.

۷-۱۳- حمل و تحویل قطعات ساخته‌شده

ترتیب و برنامه حمل اعضا و قطعات و اجزا و پیوندهها و ادوات سازه فضاکار، مطابق برنامه ساخت، بافت و نصب به محل ارسال می‌گردند، به‌نحوی‌که در زمانی که به هر یک نیاز باشد، در محل حاضر باشند.

در صورت آن‌که قطعات در حین حمل و انبار صدمه دیده باشند، باید موارد به مسؤولان ساخت و نصب و نظارت اطلاع داده شود و (قبل از نصب) در صورت امکان با نظر مسؤولان دستگاه نظارت رفع نقص گردد یا قطعات صدمه دیده جایگزین گردند.

۷-۱۴- نصب

۷-۱۴-۱- روش نصب

روش نصب با در نظرگرفتن جنبه‌های ایمنی و اقتصادی اختیار می‌گردد.

۷-۱۴-۲- جزییات اتصالات و نحوه اجرای اتصالات

سازنده باید جزییات اتصالات و نصب کارگاهی را براساس نقشه‌های طراحی و اسناد مناقصه تهیه نماید.

تمامی تکیه‌گاه‌ها و پایه‌ها و کابل‌های نگهدارنده و تأمین‌کنندهٔ پایداری موقت سازه در حین بافت و نصب باید طراحی و در مشخصات فنی با ذکر موقعیت مشخص شوند و باید قابلیت تأمین پایداری سازهٔ نیمه‌تمام را در تمامی مراحل در مقابل بارهای اجرایی و جانبی و بارهای اتفاقی دارا باشند.

در حین ساخت برای رعایت اصول ایمنی، سازنده باید مکان و محل مناسب برای کار و همچنین مسیر عبور ایمن، پوشش‌های کف‌های آدم‌رو، نرده‌های حفاظ، کمربند و کلاه و کفش و گوشی ایمنی را مطابق بخش ۳ این آیین‌نامه تأمین نماید.

۷-۱۴-۳- تحویل و انبارنمودن مصالح، تولیدات، اعضا و اجزا

سازنده، مسؤول تحویل‌گرفتن و انبارنمودن اعضا و قطعات پیش‌ساخته در محل مناسبی است که موجب زوال و اضمحلال مصالح و واردشدن صدمه به اعضا نگردد.

در مورد اعضا و قطعات سازه فضاکار در معرض دید، باید دقت ویژه‌ای در حمل، تخلیه، انبارنمودن و نصب این قطعات مبذول داشت تا از اعمال هرگونه صدمه بر اعضا و اجزا و رنگ‌کاری آن‌ها ممانعت به عمل آید. اعضا و اجزای سازه فضاکار و به‌ویژه آن دسته از اعضا که در معرض دید قرار خواهند گرفت، باید فاقد نارسایی‌هایی از قبیل خم‌شدگی، پیچ‌خوردگی و آثار اعمال ضربه باشند.

۷-۱۵- حفاظت در برابر خوردگی

حفاظت اعضا، گره‌ها، پیوندهها و اتصالات و ادوات اتصال باید براساس مشخصات فنی طرح با توجه به شرایط محیطی صورت گیرد.

شیوه حفاظت ادوات اتصال در مقابل خوردگی متناسب با میزان خورندگی در شرایط محیطی متفاوت اختیار می‌گردد.

در مراحل آماده‌سازی با حمام اسیدی یا گالوانیزه نمودن پیچها باید تدابیر لازم را برای ممانعت از بروز پدیده تردشکنی ناشی از نفوذ هیدروژن پیش‌بینی نمود.

در مراحل نگهداری و بازدیدهای فنی لازم‌است شناسنامه‌فنی مربوط به آثار خوردگی برای سازه فضاکار فولادی تکمیل و علایم هرگونه خوردگی گزارش گردد. نقاط حایز اهمیت در بازرسی فنی از این دیدگاه عبارت‌اند از:

- نقاطی که کار سرد در مورد آنها صورت گرفته است،
- مراکز تمرکز تنش و نقاط حاد،
- در مواضع محتمل بروز نارسایی‌های ناشی از جوش‌کاری،
- مواضع تحت تنش تعلیقی کششی در شرایط در معرض خوردگی،
- در مواضع سوراخ‌کاری به روش پانچ و برش‌کاری از طریق گیوتین،
- در اعضا، اجزا، اتصالات و پیوندهایی که تحت تأثیر خستگی به‌ویژه در محیط خورنده قرار دارند.

پیوست ۸

اصول مستندسازی

۸-۱- نقشه‌های طراحی و مشخصات فنی پروژه

نقشه‌های طراحی باید به نحو گویایی ارایه‌دهندهٔ اطلاعات لازم و کافی برای ساخت، بافت و نصب سازه فضاکار باشند و باید شامل اطلاعات لازم در مورد نوع و کیفیت مصالح، ابعاد کامل و موقعیت هر یک از اعضا و اجزای سازه باشند و کلیه اطلاعات لازم از دیدگاه هندسی را برای پروژه نشان دهند. همچنین در صورتی‌که پیش‌خیز در نظر گرفته شده باشد، این موارد نیز باید مشخص گردد. تمامی نقشه‌های طراحی، مشخصات فنی و تجدیدنظرهای مربوط باید دارای تاریخ باشند. همچنین باید ملزومات رنگ‌کاری از قبیل آماده‌سازی سطوح، مشخصات رنگ، ضخامت رنگ یا لایهٔ گالوانیزه یا هرگونه سیستم حفاظتی دیگر، همراه با دستورالعمل گام‌به‌گام فعالیت‌های مربوط، در مشخصات فنی ارایه‌شده باشد. تعداد، ابعاد و موقعیت استقرار نهایی هر قطعه سازه فضاکار باید در نقشه‌های طراحی سازه نشان داده شود. نقشه‌های طراحی باید در مقیاس مناسب ترسیم گردند. جزییات پیچیده باید به مقیاسی ترسیم شوند که جهت انتقال اطلاعات لازم کفایت نماید.

۸-۲- نقشه‌های جزییات اجرایی ساخت کارخانه‌ای

نقشه‌های جزییات اجرایی ساخت وسیله القا و انتقال نظرات مهندس طراح به کارخانه سازنده می‌باشد.

این نقشه‌ها باید گویای شناخت کاملی از قابلیت‌ها و توانایی‌های موجود در کارخانه سازنده باشد.

نقشه‌کش طراح با استفاده از نقشه‌های ارایه‌شده توسط طراحان و با در اختیارداشتن مشخصات فنی طرح و مصالح و با شناخت از روش‌ها و امکانات ساخت در کارخانه، اقدام به تهیه نقشه‌های جزییات اجرایی ساخت می‌نماید. این نقشه‌ها، پس از تهیه، باید به طور دقیق مورد کنترل و بررسی قرار داده شوند و پس از اعمال اصلاحات نهایی و اخذ تأییدیه مهندسان طراح، جهت ساخت به کارخانه ابلاغ گردند. سازنده باید نقشه‌های ساخت کارخانه‌ای قطعات پیش‌ساخته، نقشه‌های ساخت و نصب قطعات، زیرمجموعه‌ها و مجموعهٔ سازهٔ فضاکار را تهیه نماید.

تهیه نقشه‌های جزییات اجرایی ساخت قطعات در کارخانه امری الزامی در فرایند ساخت سازه‌های فولادی فضاکار پیش‌ساخته به‌شماره می‌رود. این نقشه‌ها توسط بازرسان فنی نیز به منظور کنترل کیفیت ساخت قطعات فولادی به‌کار گرفته می‌شوند.

دو نوع نقشه جزییات مورد نظر می‌باشند: نقشه‌های جزییات اجرایی ساخت کارخانه‌ای و نقشه‌های جزییات بافت و نصب و عملیات اجرایی کارگاهی.

۸-۳- نقشه‌های جزییات جانمایی، بافت، نصب و اجرای کارگاهی

نقشه‌های نصب و اجرای کارگاهی توسط نصاب سازه فولادی در کارگاه مورد استفاده قرار داده می‌شود و شامل نقشه‌های نشان‌دهندهٔ موقعیت قطعات و اعضای سازه فضاکار در مجموعه ساختمان و همچنین جزییات نصب و اتصال کارگاهی آن‌ها می‌باشند. تمامی اعضای پیش‌ساخته در کارخانه باید با شماره‌ای مشخص‌شده و این شماره (کد) یا با رنگ و یا با علامتِ حک‌شده، روی قطعات منعکس گردیده و این قطعات پس از حمل به کارگاه در محل مناسبی مطابق مشخصات فنی پروژه انبار شوند.

۸-۴- نقشه‌های وضعیت اجراشده یا نقشه‌های چون‌ساخت

در عین حال، در صورتی‌که تغییراتی در حین اجرا به دلایل قابل توجیهی از نظر فنی و اقتصادی اعمال شود، نقشه‌های مذکور در بندهای ۸ـ۱، ۸ـ۲ و ۸ـ۳ باید اصلاح گردند، به گونه‌ای که نقشه‌های نهایی شامل تمامی اطلاعات پروژه، *به‌صورت عملاً اجراشده*، باشند. این نقشه‌ها را نقشه‌های وضعیت اجراشده یا نقشه‌های چون‌ساخت می‌نامند که برای کارفرما و مسؤولین نگهداری و بهره‌برداری از سازه حایز اهمیت ویژه‌ای است و این امکان را می‌دهد که در صورتی‌که در مراحلی در آتیه مطالعاتی در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری سازه ضرورت یابد یا تغییراتی یا اصلاحاتی در سازه مورد نیاز باشد، نقشه‌های گویایی برای سازه واقعی احداث‌شده جهت هرگونه بررسی و اتخاذ تصمیم لازم در اختیار باشند.

۸-۵- نقشه‌های معماری، تأسیسات الکتریکی و مکانیکی و مشخصات فنی مربوط

نقشه‌های معماری و تأسیساتی باید نشان‌دهندهٔ جزییات مربوطه و دارای اطلاعات کامل از جهات مزبور باشند.

۸-۶- موارد مواجهه با تناقض

در موارد مواجهه با تناقض در مدارک فنی پروژه، لازم‌است کارفرما و مهندسان مسؤول طراحی را آگاه ساخت تا در مورد رفع آن با همفکری و هماهنگی اقدام گردد.

۸-۷ - تجدیدنظرها

تجدیدنظرهای جزیی در نقشه‌های طراحی و مشخصات فنی را اغلب روی نقشه‌ها و مشخصات فنی قبلی اعمال و با مشخص-نمودن محل تجدیدنظرها روی نقشه‌ها و مدارک فنی و شمارهٔ تجدیدنظر و تاریخ، مجدداً ابلاغ می‌نمایند.

در مواردی که تجدیدنظر جنبهٔ کلی داشته باشد، باید نقشه‌های جدید ترسیم و ابلاغ شوند. این نقشه‌ها نیز باید نشان‌دهندهٔ تجدیدنظر و شماره و تاریخ تجدیدنظر باشند. در این مورد نیز باید موارد تجدیدنظر در مشخصات فنی و گزارش‌های مرحله‌ای پروژه به روشنی قید گردند.

۸-۸ - نحوهٔ تأیید نقشه‌های ساخت و نصب کارخانه‌ای قطعات پیش‌ساخته

به‌صورتی که در بندهای فوق ذکر شد، ایده‌های طراحی به نقشه‌های کامل برای ساخت و نصب ترجمه می‌گردند. این نقشه‌ها شامل اطلاعات مربوط به ابعاد دقیق و کامل قطعات و همچنین ابعاد لازم برای نصب قطعات سازه در محل خواهند بود.

نقشه‌های مزبور باید مورد بررسی و کنترل طراح یا مشاور عالی طرح قرار گرفته و در صورت نیاز مورد تجدیدنظر قرار داده شوند. در نهایت تنها نقشه‌هایی برای ساخت و نصب مورد بهره‌برداری قرار داده خواهند شد که مورد تأیید نماینده کارفرما قرار گرفته باشند.

اخذ تأییدیه از نماینده کارفرما در زمینه نقشه‌های ساخت موارد زیر را شامل می‌شود:

- تأیید صحت درک و استنباط کلی تهیه‌کننده نقشه‌ها از مفاهیم و اصول طراحی و اسناد مناقصه،
- تأیید آن‌که نمایندهٔ کارفرما کلیه جزییات نقشه‌ها را مورد بررسی و در نتیجه مورد تأیید قرار داده است،
- صدور مجوز شروع به تولید و ساخت و آغاز عملیات اجرایی.

این تأییدیه رافع مسؤولیت سازنده در ارتباط با میزان دقت و همچنین صحت ابعاد و جزییات در نقشه‌های ساخت و نصب و جانمایی قطعات و جزییات اجرایی اتصالات نخواهد بود.

۸-۹- مستندسازی نقشه‌ها از طریق روش‌های کامپیوتری طراحی، نقشه‌کشی و بایگانی اسناد

با توجه به حجم کوچک بایگانی مستندات پروژه در پرونده‌های کامپیوتری، بهره‌گیری از روش‌های کامپیوتری سودمند می‌باشد؛ ولی لازم‌است تمامی اصول اخلاقی و قانونی و حقوقی مربوطه توسط عوامل دست‌اندرکار رعایت گردد. بهره‌برداری غیرمجاز از هرگونه مستندات پروژه تابع قوانین صیانت از حقوق کارفرمایان، طراحان و سایر عوامل ذیمدخل خواهد بود.

فهرست مراجع اصلی

۱ـ مجموعه مقالات انتشاریافته در ژورنال بین‌المللی سازه‌های فضاکار از بدو انتشار تاکنون:

- International Journal of Space Structures, Collection of Papers, Vol. 1 No. 1 to Vol. 20 No. 4 (1984-2005), Founders and Editors: H. Nooshin and Z.S. Makowski.
- International Journal of Space Structures, Collection of Papers, Vol. 21 No. 1 to Vol. 23 No. 4 (2005-2008), Editor: R. Motro.

۲ـ مجموعه مقالات پنج کنفرانس جهانی سازه‌های فضاکار که در مرکز تحقیقات سازه‌های فضاکار ـ دانشگاه‌های لندن و ساری ـ بریتانیا در حد فاصل سال‌های ۱۹۶۶ تا ۲۰۰۲ برگزار گردیده‌اند:

- Proceedings of the First International Conference on Space Structures, held in the Space Structures Research Centre, University of London, Battersea College, Edited by: Z. S. Makowski, 1966.
- Proceedings of the Second International Conference on Space Structures, held in the Space Structures Research Centre, University of Surrey, Edited by: W. J. Supple, 1975.
- Proceedings of the Third International Conference on Space Structures, held in the Space Structures Research Centre, University of Surrey, Edited by: H. Nooshin, 1984.
- Proceedings of the Fourth International Conference on Space Structures, held in the Space Structures Research Centre, University of Surrey, Edited by: G. A. R. Parke and C .M .Howard, 1993.
- Proceedings of the Fifth International Conference on Space Structures, held in the Space Structures Research Centre, University of Surrey, Edited by: G. A. R. Parke and P. Disney, 2002.

۳ـ مجموعه مقالات نخستین کنفرانس ملی سازه‌های فضاکارـ دانشکده فنی دانشگاه تهران، به کوشش: شاهرخ مالک با همکاری استادان و متخصصان سازه‌های فضاکار کشور ۱۳۷۹.

۴ ـ مجموعه۳ کتاب مهم در زمینه ۳ نوع اصلی سازه‌های فضاکار شبکه‌ای که به کوشش مرحوم پروفسور ماکوفسکی و با همکاری متخصصان سازه‌های فضاکار تدوین شده است:

- Analysis, Design and Construction of Double Layer Grids, Edited by : Z. S. Makowski, Applied Science Publishers, London, 1981.
- Analysis, Design and Construction of Braced Barrel Vaults, Edited by : Z. S. Makowski, Applied Science Publishers, London, 1983.
- Analysis, Design and Construction of Braced Domes, Edited by : Z. S. Makowski, Applied Science Publishers, London, 1985.

۵ـ مجموعه آیین‌نـامه‌ها و استـانداردهای ملی و بین‌المللی در زمینه‌های گوناگون مرتبط که با توجه به عدم وجود آیین‌نامه جامع سازه‌های فضاکار، به طور غیرمستقیم مورد بهره‌گیری قرار داده شده‌اند:

ـ مجموعه مقررات ملی ساختمانی ایران، به ویژه مبحث دهم، ویرایش ۱۳۸۷ و مبحث یازدهم.

ـ مجموعه استانداردهای ملی کشور.

ـ مجموعه آیین‌نامه‌های اتحادیه اروپا سریENV.

ـ مجموعه آیین‌نامه‌های کشورهای اروپایی: (CEB, DIN, BS ,…).

ـ مجموعه آیین‌نامه‌ها و مشخصات فنی ایالات متحده امریکا:

(AISC-LRFD, AASHTO-LRFD, UBC, IBC, FEMA, ASCE, ACI, …)

ـ مجموعه آیین‌نامه‌های کشور کانادا.

ـ مجموعه استانداردهای ISO.

۶ ـ مجموعه رساله‌های دکترا وکارشناسی ارشد حاصل تحقیقات مستقل اعضای کمیته تدوین آیین‌نامه سازه‌های فضاکار در زمینه‌های تخصصی مربوط.

۷ ـ مجموعه رساله‌های دکترا و کارشناسی ارشد تکمیل شده تحت‌نظر و به راهنمائی اساتید عضو کمیتـه تدوین آیین-نامه سازه‌های فضاکار در زمینه‌های ذیربط.

۸ ـ مجموعه مقالات کنفرانس‌های سالانه انجمن جهانی سازه‌های پوسته‌ای و فضاکار:

- International Association for Shell and Spatial Structures.

۹ـ مجموعه بولتن‌های انجمن جهانی سازه‌های پوسته‌ای و فضاکار از جمله:

- Analysis, Design and Realization of Space Frames, a state of the art report, Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol. XXV – 1/2 , 1984.

۱۰ـ مجموعه کتب و انتشارات تخصصی در زمینه سازه‌های فضاکار به ویژه:

- Z. S. Makowski, Steel Space Structures, Michael Joseph, London, 1965.
- H. Nooshin, Formex Configuration Processing, Elsevier Applied Science Publishers, London, 1984.
- W. R. Wendel, Space Frame Basics, published by: Space Structures International Corporation, 1983.

واژه نـــامــه

Acceptance criteria	معیارهای پذیرش
Accidental design situation	وضعیت طراحی تصادفی
Accidental imperfection	ناکاملی تصادفی
Actions	کنش‌ها
Active control systems	سیستم‌های کنترل فعال
Air supported structure	سازه هوانشین
Aircraft hangar	آشیانه هواپیما
Analogy	مانستگی
Analysis tool	ابزار تحلیل
Arch	قوس
Archimedean polyhedron	چندرخی ارشمیدسی
Archimedean solids	جامدات (احجام) ارشمیدسی
Architectural function	عملکرد معماری
Arc-length method	روش طول کمان
As built drawings	نقشه‌های چون ساخت
Assembly	بافت
Ball joint system	سیستم پیونده گوی‌سان
Ball joints	پیونده‌های کروی (گوی سان)
Barrel vault	چلیک
Bearings, supports	تکیه‌گاه‌ها
Behavior (behaviour)	رفتار
Bi- form space structure	سازه فضاکار دوگونه
Bifurcation	دوشاخگی
Bifurcation point instability	ناپایداری نقطه دوشاخگی
Bilinear	دوخطی
Bottom layer	لایه پایین، لایه زیرین
Boundary conditions	شرایط مرزی
Boundary element method	روش اجزای مرزی
Boundray conditions	شرایط مرزی
Braced dome	گنبد مهاربندی‌شده (شبکه‌ای)
Bracket	مرزانه
Brittle	ترد
Brittle fracture	شکست ترد
Buckling	کمانش
Cable	کابل
Cable roof systems	سیستم‌های بام کابلی

Cable stayed structures	سازه‌های کابل ایستا
Cable structure	سازه کابلی
Cast	ریخته‌گری‌شده
Characteristic value of actions	مقادیر مشخصه کنش‌ها
Characteristic value of an action	مقدار مشخصه کنش
Chordal snap-through	فروجهش عضوی
Circular Hollow Section (CHS)	مقطع توخالی دایروی
Cladding	پوشانه
Cold- formed member	عضو سرد شکل یافته
Combination of actions	ترکیب کنش‌ها
Compatibility conditions	شرایط سازگاری
Component	مؤلفه ـ سازند
Composite space structure	سازه فضاکار مختلط
Composite truss	خرپای مختلط
Compositive system	سیستم ترکیبی
Compression	فشار
Concentrated load	بار متمرکز
Conceptual design	طراحی مفهومی
Configuration	بافتار ـ تاشه
Configuration processing	تاشه پردازی
Configurational	تاشه‌ای
Connection	اتصال
Connectivity	هم‌بندی
Connector	وسیله اتصال
Connector deformability	تغییرشکل‌پذیری پیونده‌های اتصال
Consistent mass	جرم گسترده
Constrained	فرابسته
Constraint	فرابند
Construction management	مدیریت ساخت
Construction material	مصالح ساختمانی
Construction safety procedures	فرایندهای ایمنی ساخت
Continuity	پیوستگی
Continuous	پیوسته
Continuum	پیوستار
Continuum analogy	قیاس به محیط پیوسته معادل
Convex	کوژ

Convexity	کوژی
Corrosion fatigue	خستگی توام با خوردگی
Corrosion protection	حفاظت در برابر خوردگی
Covering	پوشانه
Critical load	بار بحرانی
Cyclic loading	بارگذاری رفت و برگشتی
Cyclic symmetry	تقارن چرخشی
Cylindrical coordinate system	دستگاه با مختصات سیلندری
Damage level	سطح خسارت، میزان خسارت
Damping ratio	نسبت میرایی
Data generation	داده آمایی
Data mining	داده کاوی
Data processing	داده‌پردازی
Dead load	بارمرده
Deep single-layer dome	گنبدتک‌لایه عمیق
Deformation	تغییرشکل
Degree of Freedom (DOF)	درجه آزادی
Dense configuration	تاشه چگال
Density of configuration	چگالی تاشه
Dependence	وابستگی
Deployable structures	سازه‌های بازشو
Design alternatives	گزینه‌های طراحی
Design basis earthquake	زلزله مبنای طراحی
Design criteria	معیارهای طراحی
Design drawings	نقشه‌های طراحی
Design for maintaineability	طراحی برای تسهیل نگهداری
Design situation	وضعیت طراحی
Design spectrum	طیف طراحی
Design tools	ابزار طراحی
Design working life	عمر مفید طراحی
Detailed design	طراحی تفصیلی
Detailing	طراحی جزئیات
Deterministic analysis	تحلیل تعیینی (بایدی)
Deterministic methods	روش‌های بایدی (تعیینی)
Deterministically	بایدانه، به طور تعیینی
Developable surface	سطح گسترش‌پذیر
Diagonal grid	شبکه قطری

Diagonal member	اعضای قطری
Diagonal struts	اعضای جان شبکه‌های دو یاچندلا یه فضاکار (که لا یه‌های شبکه فضاکار را به‌یکدیگر متصل می‌کنند)
Diagonal-on-diagonal grid	شبکه دولا یه متشکل از شبکه قطری رویین و زیرین
Diagonal-on-square grid	شبکه دولا یه متشکل از شبکه قطری رویین و شبکه راستگوشه زیرین
Diamatic dome	گنبد دیاماتیک
Displacement controlled	تحت کنترل تغییرمکان
Displacment	جابه‌جایی، تغییرمکان
Distributed load	بارگسترده
Division	تقسیم
Documentation	مستندسازی
Dodecahedron	دوازده رخی
Dome	گنبد
Double curvature	دو انحنایی
Double layer	دولا یه
Double layer barrel vaults	چلیک‌های دولا یه
Double layer braced domes	گنبدهای دولا یه شبکه‌ای (مهاربندی‌شده)
Double layer grid	شبکه دولا یه
Double layer space truss	خرپای فضاکار دو لا یه
Dual	دوگان
Dual polyhedron	چندرخی دوگان
Duality	دوگانی
Ductile fracture	شکست (گسیختگی) شکل‌پذیر
Ductility	شکل پذیری
Durability	دوام، پایایی
Dynamic action	کنش دینامیکی
Dynamic instability	ناپایداری دینامیکی
Dynamic jump	جهش دینامیکی
Eccentricity	خروج از مرکزیت
Economy of design	(جنبه‌های) اقتصاد(ی) طرح
Eigen value	مقدار مشخصه
Eigen value analysis	تحلیل مقدار ویژه

Eigen vector	بردار ویژه
Elastic	کشسان
Elastic instability	ناپایداری ارتجاعی (الاستیک)
Elasticity	کشسانی
Elastic-plastic analysis (first or second order)	تحلیل الاستیک پلاستیک (از درجه اول یا دوّم)
Element	جزء
Ellipsoid	بیضی‌گون
End cone	مخروط انتهائی
Environmental conditions	شرایط محیطی
Environmental effects	آثار محیطی
Equilibrium	تعادل ـ ترازش
Equilibrium conditions	شرایط تعادل
Erection	نصب ـ برپاداشتن
Erection drawings	نقشه‌های نصب (کارگاهی)
Experimental methods	روش‌های تجربی-روش‌های مبتنی‌برآزمایش
Experimental stress analysis	تحلیل تجربی تنش‌ها
Explosion	انفجار
Fabrication	ساخت
Fabrication shop drawings	نقشه‌های ساخت کارخانه‌ای
Fatigue	خستگی
Fault	گسل
Faulting	گسلش
Feasibility studies	مطالعات توجیهی و امکان سنجی
Field investigations	بررسی‌های میدانی
Field testing	آزمایش‌های محلی
Fire design	طراحی در مقابل آتش‌سوزی
Fire protection	حفاظت در برابر آتش سوزی
First order elastic-perfectly plastic analysis	تحلیل الاستیک ـ کاملاً پلاستیک درجه‌اول
First order linear static analysis with redistribution	تحلیل استاتیکی خطی درجه اول با بازتوزیع
First order linear static analysis without redistribution	تحلیل استاتیکی خطی درجه اول بدون بازتوزیع
First order nonlinear analysis	تحلیل غیرخطی از درجه اول
Fixed action	کنش ثابت
Fixed support	تکیه‌گاه گیردار

Floor structure	سازه کف (یا سقف)
Foldable space structure	سازه فضاکار تاشو
Foldable structure	سازه تاشو
Force controlled	تحت کنترل نیرو
Forged	آهنگری‌شده، کوبن‌کاری‌شده، چلنگری‌شده
Form	دیسه، ریخت
Form finding	فرم‌یابی، دیسه‌یابی، ریخت‌یابی
Formation	فرم‌سازی
Formex	فرمکس
Formex algebra	جبرفرمکسی
Formian	برنامه (نرم افزار) فرمین
Four way grids	شبکه چهار راهه (چهار سویه)
Fourier analysis	تحلیل فوریه
Fourier transformation	تبدیل فوریه
Fracture	شکست
Free action	کنش آزاد
Gaussian curvature	انحنای گوسی
Gaussian surface	رویه گوسی
Geodesic	ژئودزیک
Geodesic dome	گنبد ژئودزیک گنبدی که از محاط‌شدن یک چندوجهی (چندرخی) در یک کره تشکیل می‌شود. وجوه چندوجهی خود معمولاً از چند ضلعی تشکیل می‌شوند. اضلاع وجوه مجاور مشترک می‌باشند. هر وجـــه (رخ) از شبکـــه‌ای تخت تشکیل می‌گردد.
Geodesic form	دیسه ژئودزیک
Geodesic line	خط ژئودریک (کوتاهترین فاصله بین دو نقطه روی سطح کره)
Geodesic structure	سازه ژئودزیک
Geometric nonlinear analysis	تحلیل غیر خطی هندسی
Geometric nonlinearity	غیرخطی هندسی
Geometrical imperfection	ناکاملی هندسی
Geometrical properties	خواص هندسی
Geometrical tolerance	رواداری هندسی
Geotechnical action	کنش ژئوتکنیکی
Geotechnical particulars	ویژگی‌های ژئوتکنیکی
Grade	درجه

Gravitational force	نیروی گرانشی
Gravity	گرانش
Grid	شبکه
Grid dome	گنبد شبکه‌ای
Hangar	آشیانه هواپیما
Hardening rule	قاعده سخت‌شدگی
Hazard	خطر
Hemispherical dome	گنبدی که رؤوس آن در یک نیم کره محاط شده باشد
Hexahedron	شش رخی
High cycle fatigue	خستگی پرتواتر
Hollow spherical node	پیوندهٔ گوی سان نیامی
Hubs	پیونده‌ها
Human errors	اشتباهات انسانی
Hybrid space structure	سازه فضاکار دوگانه
Hyperbola	هذلولی
Hyperbolic	هذلولوی
Hyperbolic-paraboloid	سهمی‌گون هذلولوی (سهلوی)
Hystersis performance	عملکرد هیسترزیس (چرخه‌ای)
Idealisation	ایده‌آل‌سازی ـ مدل‌سازی ریاضی
Impact	ضربه
Imperfect member	عضو ناکامل
Imperfect structure	سازه ناکامل
Imperfection	ناکاملی، نابه‌جایی
Imperfection sensitivity	حساسیت به ناکاملی
initial imperfection	ناکاملی اولیه
Importance	اهمیت
Importance category	ردهٔ اهمیت
Incremental-iterative	نموی ـ تکراری
Indeterministic analysis	تحلیل احتمال‌اندیشانه (شایدی)
Indeterministic methods	روش‌های شایدی (احتمال اندیشانه)
Industrial mass production	تولید انبوه صنعتی
Industrialised space structures	سازه‌های فضاکار صنعتی‌سازی‌شده
Inflatable structure	سازه بادشو
Initial curvature	انحنای اولیه
Inner strut	عضو شبکه زیرین (درونی) در شبکه‌های چندلایه
In-situ	درجا

Inspection methods	بازرسی (فنی)
Instability	ناپایداری
Interconnection pattern	الگوی هم‌بندی
Irreversible limit state	حالت حدی برگشت‌ناپذیر
Isotropic hardening	سخت‌شدگی ایزوتروپیک
Isotropic plate	صفحه ایزوتروپیک (همگن و همسان)
Iterative methods	روش‌های مبتنی بر فرایند تکرار
Joint	اتصال
Joint flexibility	انعطاف‌پذیری اتصال
Joint instability	ناپایداری اتصال
Joint, node	پیوندە، گره
Keyword	کلیدواژه
Kinematic hardening	سخت‌شدگی سینماتیک
Laboratory testing	آزمایش‌های آزمایشگاهی
Lack of fit imperfection	ناکاملی عدم انطباق
Lamella barrel vault	چلیک لاملایی
Large displacement effects	آثار تغییر مکان‌های بزرگ
Large strain effects	آثار کرنش‌های بزرگ
Lateral buckling	کمانش جانبی
Lateral spreading	گسترش جانبی
Lattice dome	گنبد متشکل از اعضای مستقیم‌الخط، معمولاً با هم‌بندی مثلثی
Level of confidence	سطح اطمینان
Lift up methods of erection	روش‌های نصب از طریق بالابری
Limit analysis	تحلیل حدی
Limit state analysis	تحلیل حالت حدی
Limit states	حالت حدی
Line instability	ناپایداری در امتداد محور
Linear analysis	تحلیل خطی
Liquefaction	روانگرایی
Live load	بار زنده
Load and resistant factor design	روش ضرایب پاره‌ای بار و مقاومت
Load arrangement	آرایش بارها
Load case	حالت بار
Load controlled	تحت کنترل بار

Load test	آزمایش تحت اعمال بار
Loading imperfections	نابه‌جایی‌های بارگذاری (مانند برون محوری در اعمال بار)
Local buckling	کمانش موضعی
Local snap-through	فروجهش محلی
Long term actions	کنش های دراز مدت
Low cycle fatigue	خستگی کم تواتر
Lower limit	کرانه پایینی
Lumped mass	جرم متمرکز فرض شده
Maintenance	نگهداری
Mallow dome	گنبد گل ختمی
Manual Metal-Arc Welding	جوش‌کاری قوسی فلزی دستی
Mass	جرم
Mass production	تولید انبوه
Material deterioration	اضمحلال مصالح
Material nonlinear analysis	تحلیل غیرخطی مصالح
Material nonlinearity	غیرخطی مصالح
Material properties	خواص مصالح
Maximisation	بیشینه‌یابی
Maximum considered earthquake	زلزله ملحوظ‌شده به عنوان بیشینه
Maximum credible earthquake	زلزله باورپذیر بیشینه
Mechanical properties	خواص مکانیکی
Member	عضو- هموند ـ عنصر
Member buckling	کمانش عضوی
Member instability	ناپایداری عضوی
Membrane	غشا- پاشام
Membrane space structure	سازه فضاکار غشایی
Membrane structure	سازه غشایی، سازه پاشامی
Metal Inert Gas (MIG) Welding	جوش‌کاری با حفاظت گازی
Metalurgical properties	خواص متالوژریکی
Minimisation	کمینه‌یابی
Mirror image symmetry	تقارن نسبت به صفحه (تقارن بسان تصویر جسم در آینه)
Modal participation factor	ضریب مشارکت مودی
Mode shape	شکل مودی
Modeling (Modelling)	مدل‌سازی

Modular structures	سازه‌های مدوله، واحدی
Modular system	سیستم واحدی
Module	مدول، واحد تکرارشونده
Monotonic loading	بارگذاری تک آهنگ
Morphology	دیسه‌شناسی، ریخت‌شناسی، فرم‌شناسی
Multi - layer	چندلایه
Multi - layer barrel vaults	چلیک‌های چند لایه
Multi - layer braced domes	گنبدهای چند لایه شبکه‌ای
Multi -layer grids	شبکه‌های چند لایه
Multi-layer grid	شبکه چند لایه
Multi-layer grid	شبکه‌های چند لایه
Multi-level substructuring	تحلیل چند سطحی پاره سازه‌ها
Multiple support excitation	تحریک نامتجانس تکیه گاه‌ها
Near field	حوزه نزدیک
Network	شبکه
Neutral stability	پایداری خنثی
Nodal displacement	تغییر مکان گرهی
Nodal snap-through	فروجهش گرهی
Node	پیونده، گره
Node instability	ناپایداری گرهی
Nodular	پیونده‌ای، گرهی
Nodular system	سیستم پیونده ای
Nodular systems	سازه پیونده‌ای
Nominal value	مقدار اسمی
Non-linear analysis	تحلیل غیرخطی
Non-linear dynamic analysis	تحلیل دینامیکی غیرخطی
Nonlinear response	پاسخ غیرخطی
Non-linear static analysis	تحلیل استاتیکی غیرخطی
Notatin	نمونش
Novated dome	گنبد نوانشی
Octahedron	هشت رخی
Onion dome	گنبد پیازگونه
Operational basis earthquake	زلزله مبنای خدمت رسانی
Optimization	بهینه‌یابی
Optimum	بهینه
Orthotropic plate	صفحه ارتوتروپیک (دارای خواص غیرهمسان در دو امتداد متعامد)

Outer strut	عضو شبکه رویین (بیرونی) در شبکه‌های چندلایه
Overall buckling	کمانش کلی
Overall instability	ناپایداری عمومی
Overtightening	پیش‌تنیدگی(سفت‌شدگی بیش از میزان موردنظر)
Parallel lamella dome	گنبد لاملایی موازی
Passive control systems	سیستم های کنترل غیر فعال
Pellevated dome	گنبد فرازشی
Perfect structure	سازه کامل
Performance	عملکرد
Performance based design	طراحی مبتنی بر عملکرد
Performance levels	ترازهای عملکردی
Permanent actions	کنش‌های دایمی
Persistent design situation	وضعیت طراحی دایمی
Pin connection	اتصال مفصلی
Pin jointed connection	اتصال مفصلی
Pin support	تکیه‌گاه مفصلی
Pin-connected grid	شبکه با اتصالات مفصلی
Pin-jointed grid	شبکه با اتصالات مفصلی
Plane of symmetry	صفحه تقارن
Plane structure	سازه مسطح
Plate (shell) analogy	قیاس به صفحه (پوسته) معادل
Plate joint system	سیستم پیونده صفحه‌ای
Platonic polyhedron	چندرخی افلاطونی
Platonic solids	احجام افلاطونی
Platonic solids	جامدات (احجام) افلاطونی
Polar coordinate system	دستگاه با مختصات قطبی
Polyhedra	چندرخی، چندبری، چندوجهی
Polyhedron	چندوجهی (با وجوه چند ضلعی)، چندرخی
Ponding	آب‌انباشتگی
Post - elastic	فراالاستیک
Post buckling behaviour	رفتار فراکمانشی
Post buckling strength	مقاومت فراکمانشی
Postprocessing	پس‌پردازی
Prefabricated	پیش‌ساخته
Pre-fabricated space structures	سازه‌های فضاکار پیش ساخته
Prefabrication	پیش‌ساختن
Preprocessing	پیش‌پردازی

Prescribed pre-stressing	پیش تنیدگی از پیش تعیین‌شده
Prestressed	پیش‌تنیده
Prestressing	پیش تنیدگی
Principal polyhedral triangle	مثلث سه پهلو برابری که یکی از رویه‌های یک چندوجهی منتظم را تشکیل می‌دهد
Probabilistic	احتمالی، شایدی
Probabilistically	احتمال‌اندیشانه، شایدانه
Probability	احتمال، شایمندی
Process	فرایند
Processing	پردازش
Production management	مدیریت تولید
Progressive collapse	خرابی(گسیختگی) پیش‌رونده (زنجیره‌وار)
Progressive failure	خرابی پیش‌رونده
Prototype	پیش‌نمونه
Pseudo-static	شبه استاتیکی
Push over analysis	تحلیل بار افزون
Quality assurance	تضمین کیفیت
Quality control	کنترل کیفیت
Quality management	مدیریت کیفیت
Rayleigh damping coefficient	ضریب میرایی ریلی
Rectangular grid	شبکه راستگوشه
Rectangular Hollow Section (RHS)	مقطع راستگوشه توخالی
Reference period	دوره زمانی مبنا
Relaxation	وادادگی
Reliability	اعتمادپذیری ـ قابلیت اطمینان، قابلیت اعتماد
Repair	ترمیم
Residual displacement	تغییرمکان پس‌ماند
Residual stresses	تنش‌های پس‌ماند
Resistance	مقاومت (تاب)
Response spectrum analysis	تحلیل طیف پاسخ
Reticulated space structure	سازه فضاکار شبکه‌ای
Return period	دوره بازگشت
Reversible limit state	حالت حدی بهره‌برداری برگشت‌پذیر
Revision	تجدیدنظر
Ribbed dome	گنبد دنده‌ای

Rigid body movment	حرکت جسم صلب
Rigid connection	اتصال صلب
Rigidity	صلبیت
Rigidly jointed connection	اتصال صلب
Rigidly- jointed grid	شبکه با اتصالات صلب
Rise-to-span ratio	نسبت ارتفاع به دهانه
Roller	غلطک، غلتک
Roller support	تکیه‌گاه غلطکی (غلتکی)
Rolling	نورد
Roof structure	سازه بام
Safety evaluation	ارزیابی در سطح ایمنی
Safety level	تراز ایمنی
Scallop dome	گنبد اسکالپ
Schwedler dome	گنبد شودلر
Second order elastic-perfectly plastic analysis	تحلیل الاستیک ـ کاملاً پلاستیک درجه‌دوّم
Second order linear-elastic analysis	تحلیل الاستیک خطی از درجه دوّم
Second order nonlinear analysis	تحلیل غیرخطی از درجه دوّم
Seismic action (AE)	کنش لرزه‌ای (ناشی از زمین لرزه)
Seismic design	طراحی لرزه ای
Seismic hazard levels	سطوح خطرپذیری لرزه ای
Semi-rigid connection	اتصال نیمه صلب
Sensitivity analysis	تحلیل حساسیت
Serviceability	بهره‌برداری
Serviceability criteria	معیار بهره‌برداری
Serviceability evaluation	ارزیابی در سطح بهره‌برداری (خدمت‌رسانی)
Serviceability level	تراز بهره‌برداری
Serviceability limit state	حالت حدی بهره‌برداری
Shallow dome	گنبد کم‌خیز
Shear modulus	مدول برشی
Shell	پوسته
Shell joint system	سیستم پیونده پوسته‌ای
Short term actions	کنش‌های کوتاه مدت
Simple support	تکیه‌گاه ساده
Single action	کنش منفرد

Single layer	تک لایه
Single layer barrel vaults	چلیک‌های تک‌لایه
Single- layer braced dome	گنبد تک لایه شبکه‌ای
Single layer gridworks	شبکه‌های تک لایه
Single-layer flat grid	شبکه تخت تک لایه
Singular	تکینه
Singularity	تکینگی
Site	ساختگاه
Skeletal space structure	سازه فضاکار شبکه‌ای (اسکلتی)
Skeletal structure	سازه اسکلتی
Skew symmetry	تقارن معکوس (حالت پاد متقارن)
Slab	تاوه
Sleeve	غلاف
Slenderness	لاغری
Slot joint system	سیستم پیونده شکافی ـ دنده‌ای
Slot node	پیونده شکافی
Snap-through	فروجهش
Snap-through buckling	کمانش فروجهشی
Socket joint deformability	تغییرشکل‌پذیری پیونده‌های نیامی
Socket joint system	سیستم پیونده نیامی
Socket joints	پیونده‌های نیامی
Socket node	پیونده نیامی
Soil-foundation-structure interaction	اندرکنش خاک ـ پی ـ سازه
Sound proofing	صداربندی
Space frame	قاب فضاکار
Space structure	سازه فضاکار
Space truss	خرپای فضاکار
Sphere	کره
Spherical	کروی
Spherical coordinate system	دستگاه مختصات کروی
Spherical dome	گنبدی که از محاط‌شدن رؤوس رخ‌های آن در یک کره حاصل می‌شود.
Spherical node	پیوندهٔ گوی سان
Spherical shell	پوسته کروی
Square on diagonal grid	شبکه دولایه با لایه رویین راستگوشه و لایه زیرین قطری

Square on diagonal grid	شبکه دو لایه رویین راستگوشه و لایه زیرین قطری
Stability	پایداری
Stable	پایدار
Static action	کنش استاتیکی
Static condensation	تلخیص استاتیکی
Step by step integration of equations of motion	انتگرال‌گیری گام به گام معادلات حرکت
Step-by-step incremental analysis	تحلیل نموی گام‌به‌گام
Stiffness	سختی
Storage	انبارکردن
Strain hardening	سخت‌شدگی کرنشی
Strength	مقاومت
Structural analysis	تحلیل سازه
Structural assessment	ارزیابی سازه‌ای
Structural form	دیسه سازه‌ای
Structural member	عضو سازه‌ای
Structural model	مدل سازه‌ای
Structural morphology	دیسه شناسی سازه‌ای
Structural performance	عملکرد سازه‌ای
Structural response	پاسخ سازه‌ای
Structural system	سیستم سازه‌ای
Structure	سازه
Subdivision	زیربخش
Submerged Metal-Arc Welding (SMA)	جوش‌کاری زیرپودری
Substructure	پاره سازه
Super element	جزء مافوق
Support settlement	نشست تکیه‌گاه
Symmetry	تقارن
Technical specifications	مشخصات فنی
Tensegrity	کش‌بستی
Tensegrity space structure	سازه فضاکار کش‌بستی
Tensegrity structure	سازه کش‌بست
Tension structure	سازه کششی
Three way grids	شبکه سه راهه (سو سویه)
Time dependent actions	کنش های تابع زمان

Time-history analysis	تحلیل تاریخچه زمانی
Tolerance	رواداری
Top layer	لایه بالایی
Topology	هم‌بندی
Torsion	پیچش
Torsional buckling	کمانش پیچشی
Torsional instability of node	ناپایداری پیچشیِ گرهی
Total Quality Management (TQM)	مدیریت کیفیت فراگیر
Tower	برج ـ دکل
Transient design situation	وضعیت طراحی گذرا
Translational symmetry	تقارن انتقالی
Transmission tower	دکل انتقال برق
Transportation	حمل
Triple layer	سه‌لایه
Triple layer grid	شبکه سه‌لایه
Triple layer space truss	خرپای فضاکار سه‌لایه
Triple-layer grid	شبکه سه‌لایه
Truss	خرپا
Tubular joint	اتصال (مستقیم) اعضای لوله‌ای
Tubular member	عضو لوله‌ای
Ultimate limit state	حالت حدی نهائی
Unstable	ناپایدار
Unsymmetric loading	بارگذاری نامتقارن
Upper limit	کرانه بالایی
Verification	صحت‌سنجی
Vulnerability	آسیب‌پذیری
Vulnerability assessment	ارزیابی آسیب‌پذیری
Water tightness	آب‌بندی
Weather proofing	هوابندی ـ درزبندی
web	جان
Web members	اعضای جان (واسط شبکه‌های رویین وزیرین یا بیرونی و درونی)
Weight optimisation	بهینه‌یابی به قصد کمینه‌سازی وزن
Wind external pressure	فشار نیروی باد
Wind flow parameters	پارامترهای جریان باد
Wind force coefficients	ضرایب نیروی باد

ضرایب فشار باد	Wind pressure coefficients
آزمایش درون تونل باد	Wind tunnel test

Islamic Republic of Iran
Vice presidency for Strategic Planning and Supervision

Code of Practice for Skeletal Steel Space Structures

No.400

Office of Deputy for Strategic Supervision

Bureau of Technical Execution System

http://tec.mporg.ir

2010

Summary

The present volumes contain the outcome of investigations carried out in the framework of the second phase of a programme of research aiming at the preparation of a code of practice for Skeletal steel Space Structures.

The realization of the research work has been made possible in the context of a research contract between the Technical Bureau of the Management and Planning Organization of Iran and the Faculty of Engineering of the University of Tehran.

The present code of practice for Space Structures has been prepared for the first time in this scale in an International level with the support provided by the management and planning organization of Iran.

The enclosure includes the final thoroughly revised version of the main text of the code, necessary commentaries and appendices which have been approved unanimously by the members of the main committee and the specialty working group responsible for the preparation of this code. The members had been selected among the distinguished nationally and internationally recognized academic and professional specialists in the field. The prepared code of practice for space structures covers the scope of work intended to be met in the second phase of the current research programme.