دانشکده عمران

گروه سازه

طراحی سیستم های تنسگریتی برای کاربری پل عابر پیاده

احسان ارباب

استاد راهنما:

دکتر علی کیهانی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۳

به نام خدا

دانشکده عمران

گروه سازه

طراحی سیستم های تنسگریتی برای کاربری پل عابر پیاده

احسان ارباب

استاد راهنما:

دکتر علی کیهانی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۳

شماره: ۹۳/ت ت ع/۱۱۶
تاریخ:
ویرایش:

باسمه تعالی

دانشگاه صنعتی شاهرود
مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای **احسان ارباب** رشته **عمران** گرایش **سازه**

تحت عنوان **طراحی سیستم های تنسگریتی برای کاربری پل عابر پیاده**

که در تاریخ **۹۳/۰۶/۳۰** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : ~~خوب~~ امتیاز ~~۱۷/۹۹~~) ☑ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

۱ـ عالی (۲۰ ـ ۱۹)
۲ـ بسیار خوب (۱۸/۹۹ ـ ۱۸)
۳ـ خوب (۱۷/۹۹ ـ۱۶)
۴ـ قابل قبول (۱۵/۹۹ ـ ۱۴)
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استادراهنما	دکترعلی کیهانی	استادیار	
۲ـ استاد مشاور			
۳ـ نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی گلی	استادیار	
۴ـ استاد ممتحن	دکتر وحیدرضا کلاّت جاری	دانشیار	
۵ ـ استاد ممتحن	دکتر رامین امینی	استادیار	

رئیس دانشکده : امضاء

تقدیم به

پدر، مادر

و همسر عزیزم

سپاسگذاری

اکنون که کار نگارش این پایان نامه به یاری ایزدی به اتمام رسیده است، برخود لازم میدانم از زحمات استاد بزرگوار جناب آقای دکتر علی کیهانی، که همواره بنده را از راهنمایی و مساعدت های بی دریغ خود بهره مند نمودند، کمال تشکر را داشته باشم. همچنین با سپاس فراوان از اساتید گرامی جناب آقای دکتر وحیدرضاکلات جاری، جناب آقای دکتر فرشید علایی و جناب آقای دکتر قناد که افتخار شاگردی در محضر گرانقدرشان را داشته ام .

در پایان از محبت و زحمات دوستان عزیزم مهندس مهدی اردیانی و محسن یاحقی که در این راه همراه من بوده اند کمال تقدیر و تشکر را داشته و از درگاه خداوند متعال برای ایشان آرزوی توفیق روزافزون را دارم.

.

تعهد نامه

اینجانب **احسان ارباب** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **عمران – سازه**، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **طراحی سیستم های تنسگریتی برای کاربری پل عابر پیاده** تحت راهنمائی **دکتر علی کیهانی** متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

ساز ه های فضاکار امروزه جایگاه بسیار ویژه ای را در بین سازه ها و در مهندسی سازه و البته در معماری باز کرده اند. چراکه این سازه ها دارای ویژگی های منحصربه فردی هستند که آنها را از سایر سازه ها متمایز می سازد.

سیستم های تنسگریتی نوع خاصی از سازه های فضاکار می باشند که در آنها از کابل به عنوان جایگزین اعضای کششی استفاده می شود، مجموعه ای از المان های کششی و فشاری در یک حالت خود متعادل مونتاژ می شوند که به موجب آن پایداری و سختی سیستم را فراهم می کنند. مطالعه سازه های تنسگریتی به لحاظ برخی ویژگی ها از دیگر سازه های معمول فضاکار متمایز می باشد. از جمله این ویژگی ها می توان به ۱) لزوم اعمال خود تنیدگی برای ایجاد سختی ۲) عدم وجود سخت شدگی کرنشی برای اعضای کششی بعد از ناحیه ی پلاستیک ۳) امکان شل و سفت شدن اعضای کششی.

در این تحقیق، پس از معرفی سازه های فضاکار، به معرفی سازه های تنسگریتی به عنوان نوع خاصی از سازه های فضاکار پرداخته و اصول و مفاهیم اساسی این سازه ها مطرح شد و روش تحلیل مناسب برای سازه های تنسگریتی(غیرخطی هندسی و مصالح) درنظرگرفته شد، در ادامه با در نظرگرفتن ملاحظات معماری، بافتار مناسب برای پل عابر پیاده تنسگریتی انتخاب و ساختار مورد مطالعه ارائه گردید، پس از مدلسازی هندسی و عناصر محدود، سازه تحت ترازهای مختلف خودتنیدگی و نسبت های مختلف سختی کابل به میله، توسط نرم افزار آباکوس تحلیل شد. نتایج بدست آمده از تحلیل حاکی از آن است که در نسبت سختی کابل به میله ثابت، افزایش ترازهای خودتنیدگی بر سختی اولیه سازه اثر نداشته و بر بار نهایی کمی اثر می گذارد اما در افزایش بار نقطه شروع سخت‌شدگی و کاهش تغییرمکان نهایی سازه کاملا موثر است. همچنین در تراز خودتنیدگی ثابت، افزایش نسبت‌های سختی کابل به میله عموما بر بار نهایی اثری نداشته اما سختی اولیه سازه را افزایش می‌دهد و همچنین در افزایش بار نقطه شروع سخت‌شدگی و کاهش تغییرمکان نهایی سازه کاملا موثر است. در سیستم دو نوع مکانیزم خرابی کلی و خرابی موضعی بدون فروجهش دینامیکی مشاهده شد. درنهایت با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل ها، راه های جلوگیری از مکانیزم خرابی نامطلوب(کلی)و میل به مکانیزم خرابی مطلوب(موضعی) ارائه شده است.

کلمات کلیدی : سیستم های تنسگریتی، پل عابرپیاده، طراحی سازه ای

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول : مقدمه ۱

۱-۱ محتوا ۲

۱-۲ انگیزه ۴

۱-۳ اهداف ۵

۱-۴ فرضیات ۶

۱-۵ طرح کلی مطالب ۶

فصل دوم : مروری بر ادبیات موضوع ۱۱

۲-۱ سازه های فضاکار ۱۰

۲-۱-۱ تعریف سازه های فضاکار ۱۰

۲-۱-۲ تاریخچه سازه های فضاکار ۱۱

۲-۱-۳ طبقه بندی سازه های فضاکار ۱۵

۲-۱-۳-۱ سازه های Catenary-like types ۱۶

۲-۱-۳-۲ سازه های طاق مانند ۱۷

۲-۱-۳-۳ سازه های تیر مانند ۱۸

۲-۲ سیستم های تنسگریتی ۲۰

۲-۲-۱ سیستم های تنسگریتی در طبیعت ۲۰

۲-۲-۲ تاریخچه سیستم های تنسگریتی ۲۳

۲-۲-۳ برخی ویژگی های کاربردی سیستم های تنسگریتی ۲۵

۲-۲-۴ مروری برروند مطالعاتی سیستم های تنسگریتی ۳۰

۲-۲-۴-۱ مطالعات استاتیکی سازه های تنسگریتی ۳۰

۲-۲-۴-۲ مطالعات دینامیکی سازه های تنسگریتی ۳۲

۲-۲-۴-۳ مطالعات کنترل سازه های تنسگریتی ۳۴

فصل سوم : سیستم های تنسگریتی ۳۵

۳-۱ مفاهیم اساسی سیستم های تنسگریتی ۳۶
۳-۱-۱ تعریف سیستم های تنسگریتی ۳۶
۳-۱-۲ پایداری سیستم های تنسگریتی ۳۷
۳-۱-۲-۱ خود تنیدگی خطی ۳۹
۳-۱-۲-۲ خود تنیدگی دو بعدی (صفحه ای) ۴۰
۳-۱-۲-۳ خود تنیدگی سه بعدی (فضایی) ۴۱
۳-۱-۳ سختی سیستم های تنسگریتی ۴۲
۳-۱-۳-۱ مکانیزم محدود و بینهایت کوچک ۴۳
۳-۱-۳-۲ پایدارسازی مکانیزم های بینهایت کوچک ۴۴
۳-۱-۴ فرم یابی سیستم های تنسگریتی ۴۶

۳-۲ خصوصیات مکانیکی سیستم های تنسگریتی ۴۷
۳-۲-۱ قانون بسط داده شده ماکسول ۴۸
۳-۲-۲ تحلیل ماتریسی ۴۹
۳-۲-۳ تقسیم بندی سازه های با اتصالات مفصلی برمبنای مکانیزم ۵۰

۳-۳ خصوصیات هندسی سیستمهای تنسگریتی ۵۳
۳-۳-۱ طبقه بندی سیستم های تنسگریتی ۵۳
۳-۳-۲ واحدهای تشکیل دهنده سیستم های تنسگریتی ۵۴
۳-۳-۳ مدولهای تنسگریتی حلقه ای ۵۷
۳-۳-۴ بافتارهای تشکیل دهنده سیستم های تنسگریتی ۵۹
۳-۳-۴-۱ بافتارهای مدولار و غیرمدولار ۵۹
۳-۳-۴-۲ بافتارهای پیوسته و ناپیوسته عضو فشاری ۶۰
۳-۳-۴-۳ بافتارهای صلب و انعطاف پذیرهندسی ۶۰

۳-۴ اصول و مبانی تحلیل سیستم های تنسگریتی ۶۱
۳-۴-۱ روند کلی تحلیل سازه های تنسگریتی ۶۱
۳-۴-۲ فرضیات تحلیل ۶۱

۳-۵ مکانیزم رفتار سیستم های تنسگریتی ۶۳
۳-۵-۱ رفتار تنش محوری- کرنش محوری اعضای کششی ۶۵
۳-۵-۲ رفتار تنش محوری- کرنش محوری اعضای فشاری ۶۶

۳-۶ مکانیزم های خرابی سیستم های تنسگریتی ۶۶
۳-۶-۱ خرابی کلی سازه ۶۷
۳-۶-۲ خرابی موضعی سازه با یک فروجهش دینامیکی ۶۷
۳-۶-۳ خرابی موضعی بدون فروجهش ۶۹
۳-۶-۴ مکانیزم خرابی شل شدگی کابل ها ۶۹
۳-۶-۵ مکانیزم خرابی کلی ناشی از گسیختگی کابل ها ۷۰

فصل چهارم : روش تحقیق ۷۱

۴-۱ روش های تحلیل مسائل عمومی ۷۲
۴-۱-۱ روش عناصر محدود ۷۵

۴-۲ مدلسازی هندسی سیستم ۷۷

۴-۳ مدلسازی اجزائ محدود ۷۸
۴-۳-۱ نرم افزار مورد استفاده در تحلیل ۷۸
۴-۳-۲ المان های مورد استفاده در مدل سازی ۷۸
۴-۳-۳ مدلسازی رفتار تنش محوری- کرنش محوری اعضای کششی و فشاری ۷۹

۴-۴ ارزیابی صحت مدل سازی ۷۹
۴-۴-۱ بررسی تحلیل غیرخطی هندسی مدول چهارعضو فشاری ۷۹

فصل پنجم : نتایج وتفسیر آنها ۸۳

۵-۱ ساختار مورد مطالعه ۸۴
۵-۱-۱ انتخاب بافتار ۸۴
۵-۱-۲ مشخصات مدول تنسگریتی پل عابرپیاده ۸۶
۵-۱-۳ مشخصات بافتار تنسگریتی پل عابرپیاده ۸۸

۵-۲ بارگذاری ۸۹

۵-۳ پارامترهای طراحی مورد مطالعه ۸۹

۵-۴ مکانیزم های گسیختگی مورد مطالعه ۹۱

۵-۵ تاثیر ترازهای مختلف خودتنیدگی در رفتار بافتار ۹۱
۵-۵-۱ مطالعه به ازای نسبت سختی کابل به میله ۰,۰۱۲۵ ..... ۹۲
۵-۵-۲ مطالعه به ازای نسبت سختی کابل به میله ۰,۰۲۵ ..... ۹۳
۵-۵-۳ مطالعه به ازای نسبت سختی کابل به میله ۰,۰۵ ..... ۹۴

۵-۶ تاثیر نسبت های مختلف سختی کابل به میله در رفتار بافتار ۹۵
۵-۶-۱ مطالعه به ازای تراز خودتنیدگی ۱۰٪ ۹۵
۵-۶-۲ مطالعه به ازای تراز خودتنیدگی ۲۰٪ ۹۶
۵-۶-۳ مطالعه به ازای تراز خودتنیدگی ۳۰٪ ۹۷

۵-۷ نتیجه گیری ۹۸

فصل ششم : جمع بندی و پیشنهادها ۱۰۱

۶-۱ مقدمه ۱۰۲

۶-۲ توصیه های طراحی ۱۰۳

۶-۳ تعیین یک روش سیستماتیک برای طراحی ۱۰۵

۶-۴ پیشنهادات ۱۰۷

پیوست ها .....

پیوست الف : نمونه کارهای اسنلسون ۱۰۹
پیوست ب : روش های تحلیل غیر خطی ۱۱۵
پیوست ج - رفتار تنش-کرنش محوری اعضای فشاری به ازای لاغری و ناکاملی های مختلف ۱۲۱
پیوست د : آرایش سازه ای مدول تنسگریتی حلقه ای پنج ضلعی ۱۲۳
پیوست و : توپولوژی مدول تنسگریتی حلقه ای پنج وجهی ۱۲۷
پیوست ه : توپولوژی پل عابرپیاده تنسگریتی حلقه ای ۱۳۰

فهرست شکل ها

عنوان صفحه

شکل ۱-۱: پل عابرپیاده متشکل از مدول های تنسگریتی حلقه ای ۴
شکل ۱-۲ : حوزه عمل تحقیق ۵
شکل ۲-۱: مراحل ساخت برج ایفل بعنوان اولین سازه فضاکار محاسبه شده برمبنای هندسه سه بعدی ۱۲
شکل ۲-۲ : یک شبکه چند لایه فضاکار ساخته شده توسط گراهام بل ۱۲
شکل ۲-۳: سازه های Catenary-like types ۱۶
شکل ۲-۴: سازه های Catenary-like types – کابل ها در نقش المان اساسی سازه ای ۱۶
شکل ۲-۵: سازه های Catenary-like types – کابل ها در نقش المان اساسی سازه ای ۱۷
شکل ۲-۶: سازه های طاق مانند ۱۷
شکل ۲-۷ : سازه های طاق مانند- کابل ها در نقش تقویت کننده ۱۸
شکل ۲-۸: سازه های طاق مانند- کابل ها در نقش پایدارکننده ۱۸
شکل ۲-۹: سازه های تیر مانند ۱۹
شکل ۲-۱۰: سازه های تیر مانند - کابل ها به عنوان المان های پایدارکننده ۱۹
شکل ۲-۱۱: سازه های تیر مانند - کابل ها به عنوان المان های تقویت کننده ۲۰
شکل ۲-۱۲: سیستم های تنسگریتی در عضلات اسکلتی موجودات زنده ۲۱
شکل ۲-۱۳: سیستم تنسگریتی نوع یک شبکه تار عنکبوت، متشکل از ورقه های پلیسه دار بتا(اجسام صلب) و رشته های بی شکل(اعضای کششی) ۲۲
شکل ۲-۱۴: سیستم های تنسگریتی در اسکلت سلولی ۲۲
شکل ۲-۱۵: سازه سه بعدی پایدار متشکل از سه میله و ۹ کابل، Karl Ioganson ۲۳
شکل ۲-۱۶: مدول ایکس- پیس اسنلسون، ۱۹۴۸ و مدول صفحه ای مشتق شده ازآن ۲۴
شکل ۲-۱۷: نمونه ای از ماهواره های توسعه یافته در فضا ۲۵
شکل ۲-۱۸: گیرنده ماهواره ای تنسگریتی ۲۶
شکل ۲-۱۹: سازه موقت تنسگریتی ۲۶
شکل ۲-۲۰: سقف تنسگریتی در ولودرومی سوییس ۲۷
شکل ۲-۲۱: برج تنسگریتی روستوک واقع در آلمان ۲۸
شکل ۲-۲۲: رباط تنسگریتی ناسا ۲۹

شکل ۳-۱: ترکیب بندی دو جسم: به ترتیب از چپ به راست: پیکربندی تنسگریتی نمی باشد، پیکربندی تنسگریتی می باشد، سیستم تنسگریتی می باشد ۳۷
شکل ۳-۲: دو جسم صلب و یک رشته(متعادل) که تشکیل پیکربندی تنسگریتی را نمی دهند(ناپایدار). ۳۷
شکل ۳-۳: سیستم کابل و میله ۳۹
شکل ۳-۴: نیروی داخلی کابل و میله در حالت خود تنیدگی خطی ۳۹
شکل ۳-۵: هندسه متعادل خودتنیده صفحه ای شامل چهار میله و دو کابل ۴۰
شکل ۳-۶: توزیع نیروهای داخلی کابل و میله در حالت خود تنیدگی صفحه ای ۴۱
شکل ۳-۷: حالت خود تنیدگی سه بعدی ۴۱
شکل ۳-۸ : مکانیزم محدود ۴۳
شکل ۳-۹ : مکانیزم بینهایت کوچک ۴۴
شکل ۳-۱۰:حالت پیش تنیدگی فشاری ۴۴
شکل ۳-۱۱:حالت پیش تنیدگی کششی ۴۵
شکل ۳-۱۲: سیستم انعطاف پذیر هندسی ۵۱
شکل ۳-۱۳: سیستم تغییرشکل پذیر هندسی ۵۲
شکل ۳-۱۴: سیستم صلب هندسی ۵۲
شکل ۳-۱۵: سیستم های تنسگریتی نوع دوم و سوم ۵۴
شکل ۳-۱۶: یک جسم صلب منفرد: یک سیستم تنسگریتی نوع یک کابلی منفرد ۵۵
شکل ۳-۱۷: ساده ترین سیستم تنسگریتی متشکل از میله و کابل ۵۵
شکل ۳-۱۸: نمای پرسپکتیو و دیاگرام یک منشور تنسگریتی حداقل منظم با شعاع های برابر بالا و پایین واحد ۵۶
شکل ۳-۱۹: نمای بالا و دیاگرام یک منشور تنسگریتی حداقل منظم با شعاعهای برابر بالا و پایین واحد ۵۶
شکل ۳-۲۰: فضای توخالی مناسب ملاحظات معماری پل عابر در مدول تنسگریتی حلقه ای ۵۸
شکل ۳-۲۱: مدول های تنسگریتی حلقه ای پیشنهاد شده توسط Pugh ۵۸
شکل ۳-۲۲: سرهم بندی خطی، صفحه ای و فضایی مدول های تنسگریتی ۵۹
شکل ۳-۲۳: رفتار تنش-کرنش اعضای کششی ۶۵
شکل ۳-۲۴: مکانیزم خرابی کل سازه ۶۷
شکل ۳-۲۵: مکانیزم خرابی موضعی با یک فروجهش دینامیکی ۶۸
شکل ۳-۲۶: مکانیزم خرابی موضعی بدون فروجهش ۶۹
شکل ۳-۲۷: مکانیزم خرابی ناشی از شل شدگی کابل ها ۷۰
شکل ۳-۲۸: مکانیزم خرابی ناشی از گسیختگی کابل ها ۷۰
شکل ۴-۱: روش های تحلیل مسائل عمومی ۷۴
شکل ۴-۲: مدول تنسگریتی متشکل از چهار عضو فشاری ۸۰
شکل ۴-۳: نمودار تغییرات نیروی عضو کششی - کابل افقی تحتانی ۱ ۸۱

شکل ۴-۴: نمودار تغییرات نیروی عضو کششی - کابل افقی فوقانی ۵ ۸۲
شکل ۴-۵: نمودار تغییرات نیروی عضو کششی - کابل مهاری ۹ ۸۲
شکل ۴-۶: نمودار تغییرات نیروی عضو فشاری ۱۴ ۸۲
شکل ۵-۱: پل عابرپیاده کولیپرا استرالیا ۸۵
شکل ۵-۲: مدول تنسگریتی مناسب جهت کاربری پل عابر پیاده ۸۵
شکل ۵-۳: مدول تنسگریتی مناسب جهت کاربری پل عابر پیاده ۸۶
شکل ۵-۴: اجزای مدول تنسگریتی حلقه ای پنج ضلعی(تنسگریتی نوع ۲) ۸۶
شکل ۵-۵: ملاحظات معماری مدول تنسگریتی مورد مطالعه ۸۷
شکل ۵-۶: مدول تنسگریتی حلقه ای پنج ضلعی ۸۷
شکل ۵-۷: پل تنسگریتی متشکل از مدول های تنسگریتی حلقه ای پنج وجهی ۸۸
شکل ۵-۸: تاثیر تراز خودتنیدگی بررفتار در نسبت سختی کابل به میله ۰,۰۱۲۵ ۹۲
شکل ۵-۹: تاثیر تراز خودتنیدگی بررفتار در نسبت سختی کابل به میله ۰,۰۲۵ ۹۳
شکل ۵-۱۰: تاثیر تراز خودتنیدگی بررفتار در نسبت سختی کابل به میله ۰,۰۵ ۹۴
شکل ۵-۱۱: تاثیر نسبت سختی کابل به میله بررفتار در تراز خودتنیدگی ۱۰٪ ۹۶
شکل ۵-۱۲: تاثیر نسبت سختی کابل به میله بررفتار در تراز خودتنیدگی ۲۰٪ ۹۷
شکل ۵-۱۳: تاثیر نسبت سختی کابل به میله بررفتار در تراز خودتنیدگی ۳۰٪ ۹۸
شکل ۶-۱: نمودار شماتیک مکانیزم گسیختگی موضعی بدون فروجهش دینامیکی ۱۰۴
شکل ۶-۲ :روند طراحی سیستم های تنسگریتی ۱۰۶
شکل الف-۱ : برج نیدل- آلومینیوم و فولاد ضد زنگ ۱۰۹
شکل الف-۲: برج ایکس-پلنر، ۱۹۸۸-۱۹۶۲ ،آلومینیوم و فولاد ضد زنگ،cm ۱۲۹,۵ x ۵۵,۹ x ۱۷,۱ ۱۱۰
شکل الف-۳: ایزی-کی ۱۹۷۹، آلومینیوم و فولاد ضد زنگ، m ۶,۵ x ۶,۵ x ۳۲ ، هلند ۱۱۱
شکل الف-۴: نیو دایمنشن، ۱۹۷۷، (سافت لندینگ، ۷۷-۱۹۷۵)، آلومینیوم و استیل ضد زنگ ۱۱۲
شکل الف-۵: دراگون ۲۰۰۰-۱۹۹۹، استیل زدزنگ ، m ۹,۲۹ x ۹,۴۴ x۳,۶۵ ۱۱۳
شکل الف-۶: کی سیتی، ۱۹۶۸، آلومینیوم و فولاد ضدزنگ، m ۳,۶۵ x ۱۲,۲ x ۱۲,۲، فرانسه ۱۱۳
شکل الف-۷: قوس رنگین کمان، ۲۰۰۱، آلومینیوم و فولاد ضدزنگ، cm ۲۱۳,۴ x ۳۸۶,۱ x ۸۱,۳ ۱۱۴
شکل الف-۸: نورس وود، ۱۹۶۹، فولاد رنگ شده و ضدزنگ، m ۳,۶۵ x ۳,۶۵ x ۳,۶۵، دالاس، تگزاس ۱۱۴
شکل ب-۹: روش نیوتن – رافسون ۱۱۶
شکل ب-۱۰: روش نموی نیوتن – رافسون ۱۱۶
شکل ب-۱۱: روش نیوتن – رافسون اصلاح شده ۱۱۷
شکل ج-۱۲: رفتار تنش-کرنش محوری اعضای فشاری به ازای لاغری۶۵ و ناکاملی های مختلف ۱۲۱
شکل ج-۱۳: رفتار تنش-کرنش محوری اعضای فشاری به ازای لاغری۱۰۰ و ناکاملی های مختلف ۱۲۱
شکل ج-۱۴: رفتار تنش-کرنش محوری اعضای فشاری به ازای لاغری و ناکاملی های مختلف ۱۲۲

شکل ج-۱۵: رفتار تنش-کرنش محوری اعضای فشاری به ازای لاغری و ناکاملی های مختلف ۱۲۲
شکل د-۱۶ : میله های قطری مدول ۱۲۳
شکل د-۱۷ : مشخصات هندسی بر اساس Lو R و θ ۱۲۳
شکل د-۱۸ : میله های میانی مدول ۱۲۴
شکل د-۱۹ : کابل های لایه ای مدول ۱۲۴
شکل د-۲۰ : کابل های X مدول ۱۲۵
شکل د-۲۱: توپولوژی مدول: ۱-کابل های لایه ای و میله های قطری ۲-اضافه شدن میله های میانی برای یک وجه ۳- اضافه شدن تمام میله های میانی ۴- اضافه شدن کابل های X برای یک وجه ۵-تمام کابل های مدول ۶-مدول تنسگریتی حلقه ای پنج ضلعی ۱۲۵
شکل د-۲۲ : یک مدل فیزیکی کوچک از مدول پنج ضلعی تنسگریتی حلقه ای ۱۲۶
شکل ه-۷-۲۳ : توپولوژی پل تنسگریتی حلقه ای ۱۳۰

جدول ۳-۱: مشخصات سیستم های با اتصالات مفصلی. ۶۸
جدول ۵-۱: بررسی رفتار بافتار به ازای ترازهای خودتنیدگی و نسبت های مختلف میله به کابل ۱۱۴
جدول و-۱: شماره گذاری گره ها و مختصات گره ای ۱۴۲
جدول و-۲: شماره گذاری المان ها، اتصالات گره ای و مشخصات المان ها ۱۴۳

فصل اول

مقدمه

۱- مقدمه

۱-۱ محتوا

بررسی تحقیقات انجام گرفته برروی شکل و نوع سیستم‌های سازه‌ای در ۲۰۰ سال گذشته نشان دهنده علاقه روزافزون به استفاده از سازه‌های سبک با مقاومت بالا را نشان می‌دهد. برای این منظور استفاده از مواد با مقاومت زیاد برای نیل به این هدف انجام گرفته ولی کاربرد این روش برای هرنوع سازه مقرون به صرفه نبوده است. یک مثال مشخص از سازه‌های با وزن کم سازه‌های فضاکار می باشند که با توجه به وزن کم می توانند اهداف اقتصادی طرح‌ها را ارضا نماید[۱] .

سازه‌های فضاکار[۱] امروزه جایگاه بسیار ویژه‌ای را در بین سازه‌ها و در مهندسی سازه و البته در معماری باز کرده اند. چراکه این سازه‌ها دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی هستند که آن‌ها را از سایر سازه‌ها متمایز می‌سازد. سازه‌های فضاکار از جمله سازه‌هایی می باشند که دارای عملکرد سه-

[۱] Space structures

بعدی هستند. در این سازه‌ها، برعکس سازه‌های مسطح نظیر خرپای صفحه‌ای، مجموعه بافتار، بارهای خارجی، نیروهای داخلی و تغییر مکان‌های سازه‌ای در فضای سه‌بعدی تعریف می‌شوند. به عبارت دیگر در سازه‌های فضاکار عملکرد سازه‌ای در فضای دوبعدی قابل بیان نیست.

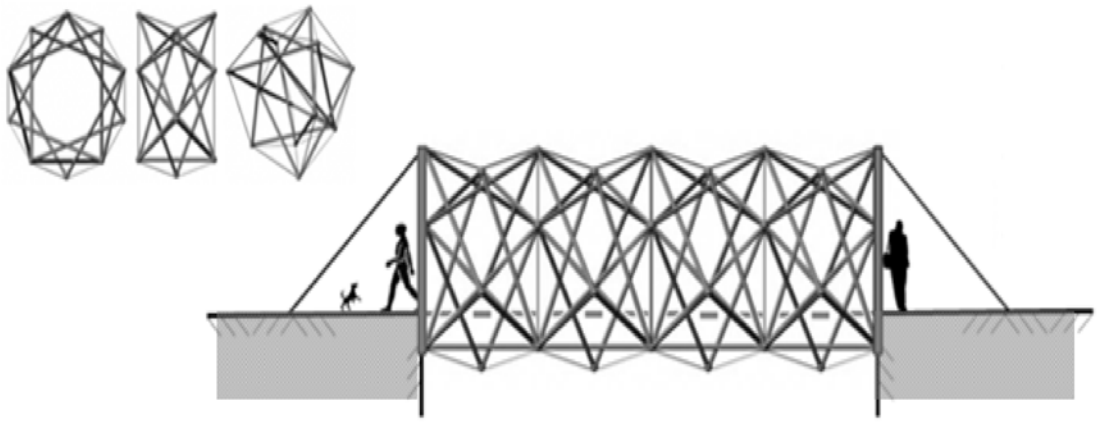
سازه‌های تنسگریتی[۱] یا کش‌بستی، نوع خاصی از سازه‌های فضاکار می‌باشند که در آن‌ها از کابل به عنوان جالگزین اعضای کششی استفاده می‌شود؛ به عبارتی وجه تمایز این سازه‌ها با سیستم خرپایی فضایی استفاده از کابل به جای میله‌های مورد استفاده در سیستم‌های معمول خرپایی است. سازه‌های تنسگریتی، سازه‌های خرپای-کابلی مشبک فضایی[۲] هستند[۲] . اعضای فشاری همواره در فشار و اعضای کششی همواره در کشش می باشند. در حقیقت مجموعه‌ای از المان‌های کششی و فشاری در یک حالت خود متعادل[۳] مونتاژ می شوند که به موجب آن پایداری و سختی سیستم را فراهم می کنند. به عبارت دیگر سیستم‌های مشبک فضایی هستند که سختی سازه ای آن‌ها به وسیله خودتنیدگی[۴] (سختی از مرتبه پیش تنیدگی[۵]) ایجاد می شود[۳] .

این سازه‌ها نسبت به سیستم‌های سازه‌ای دیگر در دستیابی به یک مقاومت یکسان، نسبتا سازه‌های سبک‌تری هستند، ازدیگر مزایای این سازه‌ها حفظ تعادل بدون حضور نیروهای خارجی (خاصیت خودتنیدگی)، انعطاف‌پذیری ذاتی[۶]، قابلیت تاشوندگی[۷] و امکان جابجایی‌های بزرگ، تغییر شکل راحت، قابلیت انطباق‌پذیری و اجرای مدولار است. با وجود اینکه مفهوم تنسگریتی از هنر سرچشمه گرفته است، در طول سال‌های متمادی، در میان دانشمندان و مهندسان سراسر رشته ها از جمله بیولوژی، معماری، عمران، رباتیک و هوافضا [۴] و . . . بسیار مورد توجه واقع شده است. با این وجود نمونه‌های کمتری از سازه‌های تنسگریتی برای اهداف مهندسی عمران به کارگرفته شده اند.

---

۱ Tensegrity structures
۲ Spatial reticulated truss-cable structures
۳ Self-equilibrium
۴ Self-stressing
۵ Prestressing
۶ Inherent flexibility
۷ Foldability

این پایان نامه یک پل عابر پیاده متشکل از مدول‌های تنسگریتی حلقه ای را به عنوان نمونه‌ای از سازه‌های مهندسی عمران، مورد بررسی قرار می‌دهد. شکل(۱-۱) .



شکل ۱-۱: پل عابرپیاده متشکل از مدول‌های تنسگریتی حلقه‌ای[۵]

۱-۲ انگیزه

باتوجه به ویژگی‌های خاص سازه‌های تنسگریتی ازقبیل سبک بودن، نسبت تحمل بار به وزن بالا و. . . که این سازه را برای طراحی و اجرای سازه‌های با دهانه‌های بزرگ مناسب کرده، همچنین قابلیت اجرای مدولار این سازه‌ها و به طورکلی کاربردی کردن بیشتر این سازه‌ها در مهندس عمران، بررسی یک سیستم پل عابر پیاده تنسگریتی مورد بررسی قرار گرفته است.

برای رسیدن به این هدف دو سوال علمی زیر مطرح است :

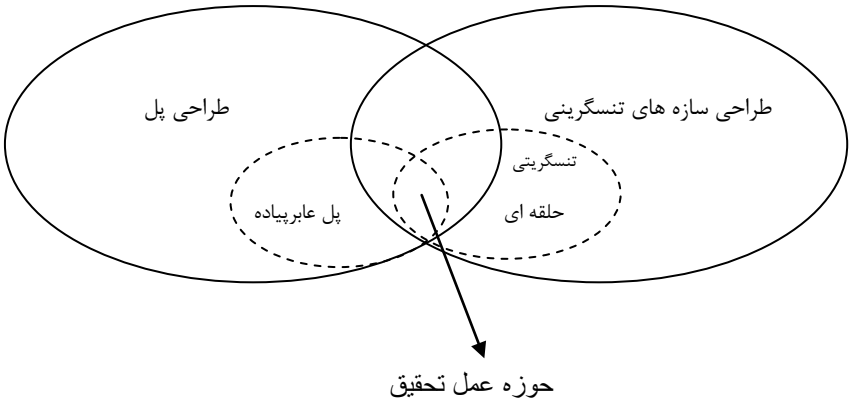
آیا کاربرد مدول‌های[۱] " تنسگریتی حلقه ای[۲] " برای کاربری پل عابرپیاده امکان پذیر است؟

آیا تعیین یک روش سیستماتیک برای طراحی سازه‌های تنسگریتی برای کاربری پل عابر پیاده میسر است؟

[۱] Simplexs
[۲] Tensegrity rings

۱-۳ اهداف

این پایان نامه سعی در توسعه کار در زمینه کاربرد سیستم‌های مدولار تنسگریتی در طراحی سازه‌ای را دارد. تمرکز این پایان نامه برروی مطالعه درمورد یک پل عابر پیاده برپایه مدول‌های تنسگریتی حلقه‌ای است.شکل(۱-۲).



شکل ۱-۲ : حوزه عمل تحقیق

بدین منظور اهداف مطالعاتی زیر تنظیم گردید:

- معرفی و شناخت سیستم‌های تنسگریتی
- انتخاب مدول تنسگریتی مناسب برای کاربری پل عابر پیاده
- مدلسازی هندسی و اجزای محدود بافتار پل عابرپیاده تنسگریتی
- بررسی رفتار بافتار پل عابرپیاده تنسگریتی تحت تاثیر پارامترهای موثر طراحی
- تعیین مکانیزم‌های خرابی[۱] در بافتار پل عابرپیاده تنسگریتی
- ارائه توصیه های طراحی
- ارائه یک روش سیستماتیک برای طراحی

[۱] Collapse mechanism

۱-۴ فرضیات

امید است نتایج این تحقیق منجر به پیشرفت در زمینه طراحی سازه‌های مهندسی عمران شود، توجه شود که این نتایج باتوجه به محدودیت های زیر معتبر خواهد بود.

- اتصالات اعضا بصورت مفصلی فرض شده است.
- بارهای خارجی بر گره ها وارد شده است.
- از اثرات کمانش موضعی در اعضای فشاری صرف نظر شده است.

۱-۵ طرح کلی مطالب

مطالب این پایان نامه در شش فصل آورده شده است. در فصل اول به عنوان مقدمه‌ی کار، به معرفی اجمالی سیستم‌های تنسگریتی، انگیزه، اهداف و فرضیات این تحقیق پرداخته شده است.

در فصل دوم ابتدا به معرفی سازه‌های فضاکار و تاریخچه آن پرداخته شده و طبقه بندی این سازه‌ها برمبنای نوع المان تشکیل دهنده و الگوی انتقال بار[۱] ارائه گردیده است و با توجه به زمینه تحقیق به بررسی نقش کابل‌ها در هر گروه نیز پرداخته شده است. سپس به تعریف سازه‌های تنسگریتی به عنوان نوع خاصی از سازه‌های فضاکار پرداخته و نمونه هایی از سیستم‌های تنسگریتی در طبیعت به همراه تاریخچه پیدایش این نوع سازه مورد بررسی قرار گرفته است و در ادامه به برخی ویژگی‌های کاربردی این سازه‌ها در قالب چند مثال اشاره شده است و در پایان این فصل مروری بر روند مطالعاتی این سازه‌ها توسط محققین در زمینه های مختلف ارائه گردیده است.

در فصل سوم در ابتدا به تعریف سازه‌ای این سیستم‌ها و مسئله پایداری پرداخته شده است. در ادامه ، قبل از هر چیز به عنوان پیش زمینه مکانیکی برای فهم مکانیکی این سیستم‌ها، مفاهیم

[۱] Load-transfer patterns

اساسی چون پیش‌تنیدگی، خودتنیدگی، سختی، مکانیزم‌های محدود[1] و بینهایت کوچک[2]، پایدارسازی[3] مکانیزم‌های بینهایت کوچک و شکل یابی[4] مطرح شده است و سپس به بررسی روش‌های محاسبه تعداد حالات پیش‌تنیدگی و مکانیزم در این سیستم‌ها در کنار یک تقسیم‌بندی از سازه‌های با اتصالات مفصلی برمبنای مکانیزم پرداخته شده است. بعد از مطرح کردن مفاهیم اساسی این سیستم-ها، طبقه‌بندی سیستم‌های تنسگریتی، واحدهای تشکیل دهنده آن‌ها، انواع مدول‌ها به همراه بررسی مدول‌های تنسگریتی حلقه‌ای به عنوان نمونه ای از مدول‌های قابل قبول برای سیستم پل عابر پیاده و همچنین انواع بافتارهای تشکیل دهنده آن‌ها پرداخته شده است. در قسمت بعد به بررسی اصول تحلیل سیستم‌های تنسگریتی و روش‌های مرتبط با آن پرداخته و در انتها به بررسی مکانیزم‌های رفتار سیستم‌های تنسگریتی به همراه مکانیزم‌های محتمل خرابی در آن‌ها پرداخته شده است.

در فصل چهارم انواع روش‌های تحلیل مسائل عمومی و تعیین روش تحلیل مناسب برای سیستم‌های تنسگریتی مطرح شده است. سپس مدلسازی هندسی و المان محدود سازه‌های تنسگریتی توسط نرم افزار عناصر محدود آباکوس معرفی شده است. درنهایت برای اطمینان از صحت مدلسازی انجام گرفته، تحلیل غیرخطی یک سازه تنسگریتی بررسی شده است و با نتایج تحلیل معتبر انجام گرفته توسط دیگر محققین بر روی این نمونه ها، مقایسه شده است.

در فصل پنجم با در نظرگرفتن ملاحظات معماری، بافتار مناسب برای پل عابر پیاده تنسگریتی انتخاب و ساختار مورد مطالعه ارائه گردیده است و در ادامه سازه تحت ترازهای مختلف خودتنیدگی و نسبت های سختی متفاوت کابل‌ها به میله‌ها ($Cable\ to\ strut=E_CA_C/E_SA_S$)، تحلیل شده و تاثیر هریک از پارامترها در رفتار بار- تغییر مکان بافتار مورد بررسی قرار گرفته و نمودار بار تغییرمکان نقطه ای وسط پل عابرپیاده تنسگریتی ترسیم شده و مکانیزم‌های گسیختگی از آن‌ها استخراج و درمورد هر مکانیزم علل رویداد آن نیز بررسی شده است و درنهایت با استناد به همین

[1] Finite mechanisms
[2] Infinitesimal
[3] Stabilize
[4] Form finding

تحلیل‌ها، توصیه‌هایی برای جلوگیری از رخداد مکانیزم‌های گسیختگی نامطلوب و خطرناک در این سازه‌ها ارائه گردیده است.

در فصل ششم خلاصه‌ای از تحقیق آورده شده و توصیه‌های طراحی برای دستیابی به رفتاری مطلوب در بافتار مورد مطالعه، پیشنهاد شده است و درنهایت روشی سیستماتیک برای طراحی سازه-های تنسگریتی بررسی شده است.

فصل دوم

مروری بر ادبیات موضوع

۲- مروری بر ادبیات موضوع

۲-۱ سازه‌های فضاکار

۲-۱-۱ تعریف سازه‌های فضاکار

سازه‌های فضاکار، گروهی از سازه‌ها هستند که رفتار مسلط سه بعدی دارند؛ معمولا درخور تولید انبوه صنعتی بوده و در این حالت، الزامات فنی و اقتصادی را با تلفیق مناسبی از مفاهیم سازه‌ای، اصول ایمنی، دیدگاه‌های زیباشناختی[۱] و جنبه‌های اقتصادی فراهم می‌کنند. در سازه‌های فضاکار، برعکس سازه‌های مسطح نظیر خرپای صفحه‌ای، مجموعه بافتار[۲]، بارهای خارجی، نیروهای داخلی و تغییر مکان‌های سازه‌ای در فضای سه بعدی تعریف می‌شوند. به عبارت دیگر، در سازه‌های فضاکار، عملکرد سازه در فضای دو بعدی قابل بیان نیست. رفتار برخی از سازه‌ها به گونه ای است که اثر یک بعد تحت‌الشعاع آثار رفتاری در دو بعد دیگر است. این گونه سازه ها رفتار مسلط دو بعدی دارند. اما

[۱] Aesthetic
[۲] Configuration

یک سازه فضاکار را به هیچ روی نمی توان به صورت یک سیستم صفحه‌ای، تصور، تحلیل و طراحی نمود [۶].

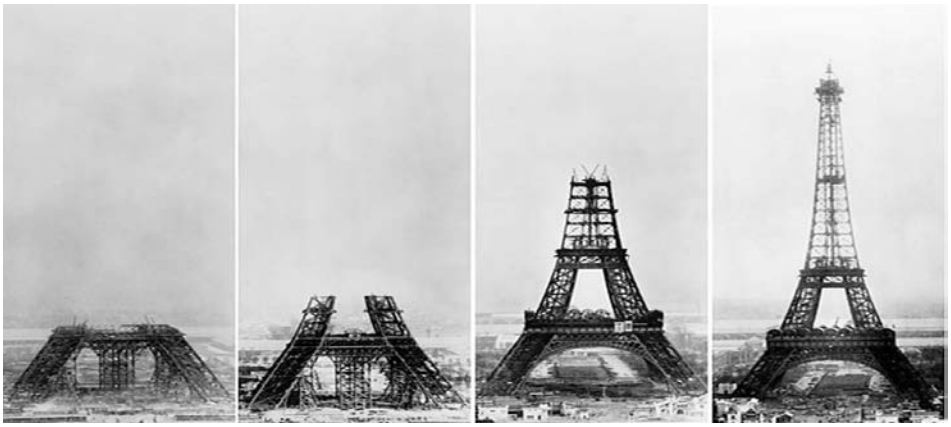
جنس اعضا در سازه‌های فضاکار، اغلب فولادی است ولی از مصالح دیگر نظیر آلومینیوم، چوب، بتن آرمه، مصالح مختلف و مواد پلاستیکی مسلح با انواع فیبرها، شیشه و ترکیبات آن‌ها نیز ساخته می شوند.

اتصالات اعضا در سازه‌های فضاکار ممکن است اتصال مفصلی، صلب و یا ترکیبی از این دو باشد. در سیستمی که اتصالات آن مفصلی است، نیروی اعضا عمدتا محوری بوده و خمش بسیار ناچیزی ناشی از وزن عضو به وجود می آید. لیکن مقدار آن در حدی است که معمولا در طراحی اعضا می‌توان از آن در مقابل نیروی محوری صرفنظر نمود.

۲-۱-۲ تاریخچه سازه‌های فضاکار

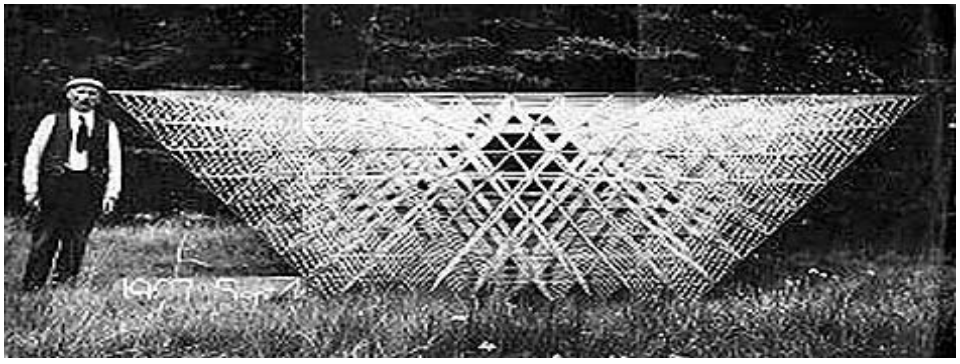
توسعه قابل توجه سازه‌های فضاکار از زمانی آغاز شد که فاپل[۱] اولین کتاب خود را در زمینه سازه‌های فضاکار تحت عنوان "تئوری سیستم‌های مشبک" به سال ۱۸۸۰ نوشت. بین نادر افرادی که تئوری‌های محاسباتی ایشان را مورد توجه قرار دادند، مهندس ایفل بود که برج معروف خود را برای نمایشگاه جهانی پاریس در سال ۱۸۸۹ ساخت شکل(۲-۱). این برج اولین سازه فضاکار ساخته شده می باشد که محاسبات آن بر مبنای هندسه سه بعدی انجام گرفته است. این برج قرار بود، پس از نمایشگاه برچیده شود، ولی چنان با موفقیت روبرو گردید که نه تنها هنوز پابرجاست، بلکه به عنوان سمبل شهر پاریس نیز شمرده می شود و نشانه ای از نبوغ طراح آن است.

[۱] Fopple



شکل ۲-۱: مراحل ساخت برج ایفل به عنوان اولین سازه فضاکار محاسبه شده برمبنای هندسه سه بعدی [۷]

بل مخترع معروف تلفن در سال ۱۹۰۷ آزمایشات وسیعی را روی سیستم‌های فضاکار چند لایه پیش ساخته انجام داد. او بیشتر وقت خود را روی ساخت ماشین های پرنده از سازه‌های فضاکار چند لایه صرف کرد. ایشان هواپیمای کوچک یک نفره و برج های دیده بانی را با موفقیت و با استفاده از واحد های پیش ساخته صنعتی چهار وجهی ، مرکب از لوله و پوسته تنیده ساخت. یک شبکه چند لایه فضاکار ساخته شده توسط گراهام بل در شکل(۲-۲) نشان داده شده است.



شکل ۲-۲ : یک شبکه چند لایه فضاکار ساخته شده توسط گراهام بل[۷]

از آنجا که کاهش وزن در سازه‌های فضاکار بسیار مهم‌تر از ساختمان‌ها است، جای تعجب نیست که اولین تلاش‌ها برای بهره گیری از مزیت سبکی سازه‌های فضاکار، که از کارایی سازه‌ای آن‌ها

ناشی می‌شد، در ساختن هواپیما انجام گرفت. در این شرایط بود که برادران رایت امکاناتی را به وسیله واحدهای چهاروجهی فراهم می‌شد، کشف کردند [۸] .

همچنین مهندسان آلمانی چون زیمرمن[۱] را می توان از پیشگامان این علـم دانسـت. سـاخت دهانه ۳۶۱ فوتی برای سازه نمایشگاه لیوان در سال ۱۸۹۴.م توسط زیمرمن کامل شد. در واقع، سـازه-هایی با این ابعاد در آن زمان، بزرگ و قابل توجه بودند. این تجربه های آغازین، تقریبا تا سال ۱۹۳۷.م هنگامی که Mangerighausen تمایل به سازه‌هـای فضـاکار را دوبـاره رواج داد، فرامـوش شـده بـود. او دریافته بود که رواج سازه‌های فضاکار در مقیاس بزرگ جهانی، فقط در صورتی امکان پذیر خواهد بـود که اجزای سازه بصورت کارخانه ای تولید و مونتاژ آن در محل انجام شود. برای دستیابی به این هـدف لازم بود که تنوع عضوی کاهش یابد و روش مونتاژ آسان توسعه یابد. بطور مطلوب، یک سـازه فضـاکار باید شامل عضوهایی با طول برابر باشد. بنابراین در عمل سعی می شود که تعداد اعضا بـا طـول هـای نابرابر کاهش یابد[۸] .

سازه‌های فضاکار با توجه به قابلیت‌هایی که دارند، از مزایای ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. از جمله-ی این مزایا می‌توان به مسائل زیر اشاره کرد [۸]:

- هر کدام از اجزای این سازه سبک بوده و این امر حمل و نقل ساده آن ها را ممکن می سازد. این سازه ها بازده سازه‌ای خوبی دارند و درآن‌ها از مصالح به صورت بهینه استفاده می‌شود. به علت سبکی، بارهای مرده بسیار کوچک بوده و در نتیجه در ستون‌ها و سایر عضوهای سازه‌ای صرفه جویی می‌شود.
- برای پوشش فضاهای بزرگ بدون ستون با کاربردهای متنوع، مانند ساختمان‌های ورزشی، تالارهای سخنرانی، آشیانه‌های هواپیما و سالن‌های اجتماعات، استفاده از سازه‌های فضاکار یک روش موثر و اقتصادی می‌باشد(کاهش بار مرده).

[۱] Zimmerman

- سازه‌های فضاکار بارها را به صورت سه بعدی انتقال می دهند. بارهایی که به یک نقطه وارد می شوند، فقط به وسیله عضوهای منتهی به آن نقطه متحمل نمی‌شوند، بلکه با پخش بار در عضوهای متعدد دیگر، آن‌ها هم در تحمل بار کمک می کنند. بدین طریق می‌توان بارهای متمرکز سنگین را به هر گره اعمال نمود. این ویژگی، به خصوص در آشیانه‌های نگهداری هواپیما بسیار مفید است، زیرا امکان آن را می‌دهد که سیستم‌های تعمیر کننده هواپیما از گره ها آویزان شوند و بدین ترتیب انعطاف پذیری قابل توجهی ایجاد می شود.
- به دلیل سختی زیاد این سازه‌ها، تغییر مکان‌ها کوچک است. این ویژگی در کاربرد سازه‌های فضاکار به عنوان پشت‌بند برای آنتن‌های بشقابی، آنتن‌های چند بشقابی و تلسکوپ‌ها حائز اهمیت است، زیرا این سازه‌ها علاوه بر سبکی، نیاز به صلبیت بالایی دارند.
- صلبیت آن‌ها باعث می شود که این گونه سازه‌ها نسبت به سازه‌های معمولی کمتر به جابجایی محل تکیه گاه‌ها حساس باشند.
- از آنجایی که سازه‌های فضاکار با در کنار هم قرار دادن اجزای دقیق کارخانه ای ساخته می-شوند، کارگر غیر متخصص هم می‌تواند در مونتاژ و اجرای آن‌ها به کار گرفته شود.
- خدماتی مانند نورپردازی و تهویه می‌توانند با سازه‌های فضاکار تلفیق شوند و غالبا این تاسیسات روی زمین نصب می‌شوند و بنابراین خطرهای کار در ارتفاع برطرف می‌شود.
- زمان ساخت سازه‌های فضاکار کوتاه است، زیرا اجزای آن‌ها در کارخانه و با روش‌های سریع تولید می شوند، و پس از حمل به کارگاه به راحتی نصب می‌شوند.
- این سازه‌ها به مهندس معمار آزادی نامحدودی برای تعیین محل تکیه‌گاه‌ها و طراحی زیر مجموعه‌های فضای سرپوشیده می‌دهد.
- این گونه سازه‌ها حتی تحت بارگذاری نامتقارن دارای توزیع تنش نسبتا یکنواختی هستند.

- تجارب علمی نشان می دهند که این گونه سازه ها حتی تحت آسیب‌های شدید به طور ناگهانی واژگون نمی‌شوند.

۲-۱-۳ طبقه بندی سازه‌های فضاکار

سازه‌های فضاکار را مراجع مختلف به روش‌های گوناگون تقسیم و طبقه‌بندی می‌کنند. این طبقه‌بندی بر اساس اندازه دهانه‌ها، مصالح به کار رفته، تعداد لایه‌ها، نوع المان تشکیل دهنده، نوع اتصال به کار رفته، نوع الگوی انتقال بار و شکل سازه از قبیل گنبدی- چلیکی و سطح شیبدار و... می-باشد.

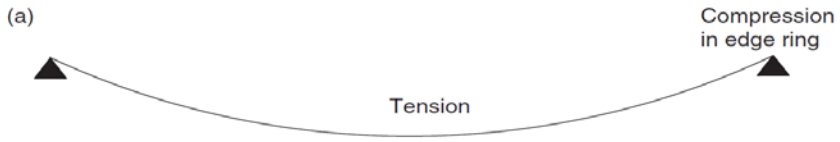
سازه‌های فضاکار را بسته به نوع المان‌های تشکیل دهنده آن‌ها و نیز نوع اتصال اعضای آن‌ها به یکدیگر، می توان به سه گروه زیر تقسیم کرد :

- سازه‌های فضاکار مشبک که دارای المان های منفصل می‌باشند.
- سازه‌های فضاکار پیوسته نظیر دال‌ها و پوسته‌ها که دارای المان‌های پیوسته می‌باشند.
- سازه‌های فضاکار ترکیبی که ترکیبی از سازه‌های فضاکار پیوسته و مشبک می‌باشند.

همچنین سازه‌های فضاکار با دهانه‌های متفاوت را برطبق الگوی انتقال بارحاکم می‌توان به سه گروه تقسیم کرد که با توجه به زمینه تحقیق به بررسی نقش کابل‌ها در هر گروه نیز پرداخته شده است. مطالب این بخش از مرجع [۹] اقتباس شده است.

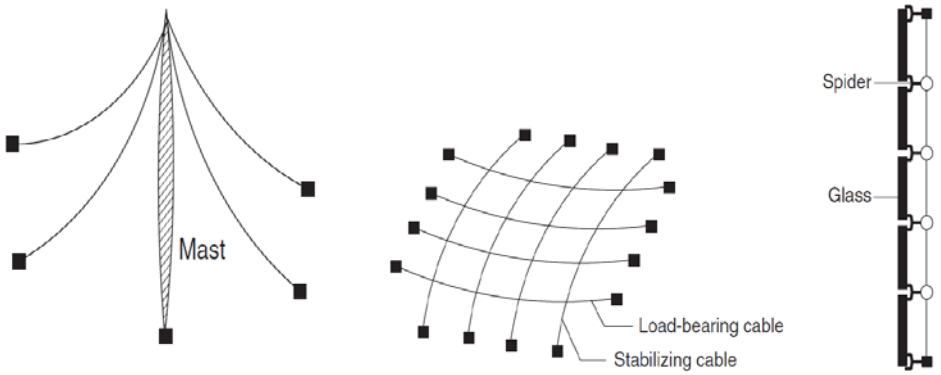
۲-۱-۳-۱ سازه های Catenary-like types

الگوی انتقال باراین گروه سازه‌ها، کشش محوری[۱] است شکل(۲-۳). تعادل سازه توسط فشار تحمل شده توسط سیستم مهاربندی مرزی یا تکیه‌گاه‌ها فراهم می شود. سازه خودایستا[۲] نبوده و درنتیجه پاسخ بار به مرز انتقال می‌یابد.



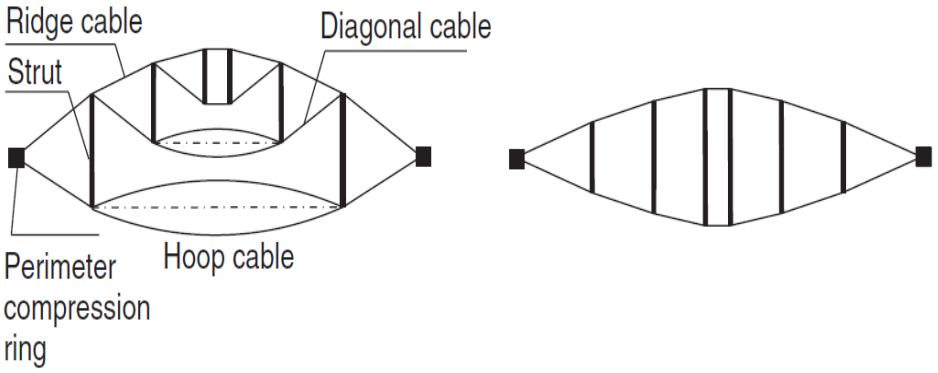
شکل ۲-۳: سازه‌های Catenary-like types

فرم‌های کابل‌های معلق[۳] آشناترین این دسته اند. در این نوع سازه‌ها کابل‌ها نقش المان‌های اساسی سازه‌ای[۴] را دارند. شکل(۲-۴) و شکل(۲-۵) نمونه‌هایی از این سازه‌ها می‌باشند.



شکل ۲-۴: سازه‌های Catenary-like types – کابل‌ها در نقش المان اساسی سازه‌ای

[۱] Axial Tension
[۲] Free-standing
[۳] Cable-suspended forms
[۴] Principal structural component



شکل ۲-۵: سازه‌های Catenary-like types – کابل‌ها در نقش المان اساسی سازه‌ای

۲-۱-۳-۲ سازه‌های طاق مانند[۱]

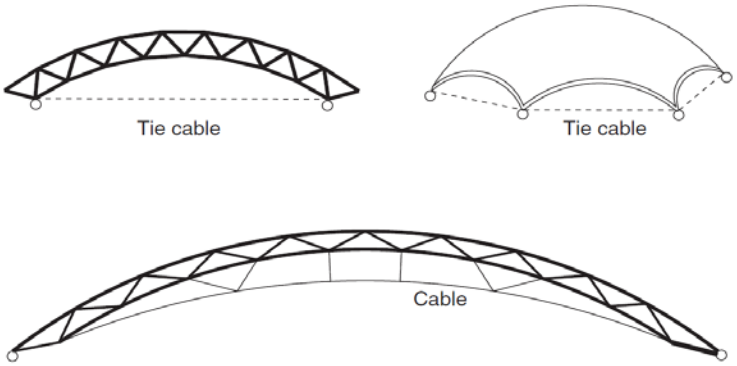
الگوی انتقال بار این گروه سازه‌ها، فشار محوری[۲] است شکل(۲-۶). نیروهای فشاری[۳] توسط تکیه‌گاه‌ها متعادل می‌شوند. معمولا خود سازه تحت وزن خودش می تواند خودایستا باشد اما بدون تکیه‌گاه‌ها تغییرشکل‌ها ممکن است بسیار بیشتر باشد.

شکل ۲-۶: سازه های طاق مانند

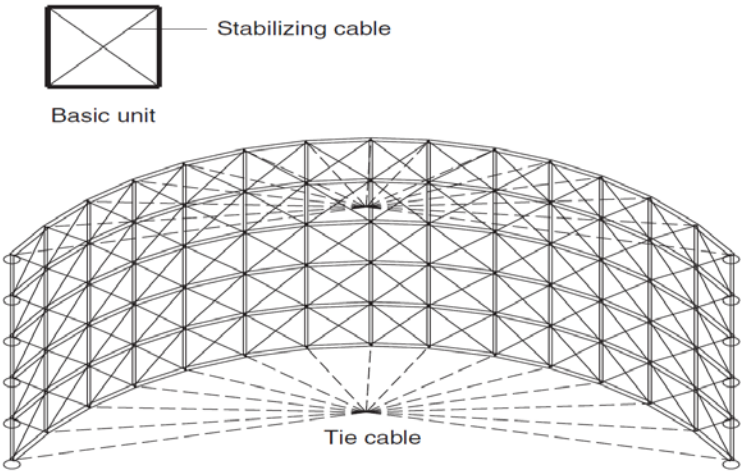
آشناترین این نوع سازه‌ها شامل فرم‌های پوسته‌ای مشبک یا پیوسته[۴] می‌باشند. در این نوع سازه‌ها کابل‌ها نقش پایدارکنندگی[۵] و یا تقویتی[۶] را دارند (مانند میله‌ها نقش سازه‌ای ندارند). کابل‌ها

۱ Arch-like types
۲ Axial compression
۳ Thrust forces
۴ Latticed or continuum
۵ Stabilizing
۶ Reinforcing

به عنوان المان‌های تقویتی برای بهبود سختی و توزیع نیرو ویا کاهش شدت نیروها در تکیه‌گاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل(۲-۷) و شکل(۲-۸) نمونه هایی از این سازه‌ها می باشند.



شکل ۲-۷ : سازه‌های طاق مانند- کابل‌ها در نقش تقویت کننده



شکل ۲-۸: سازه‌های طاق مانند- کابل‌ها در نقش پایدارکننده

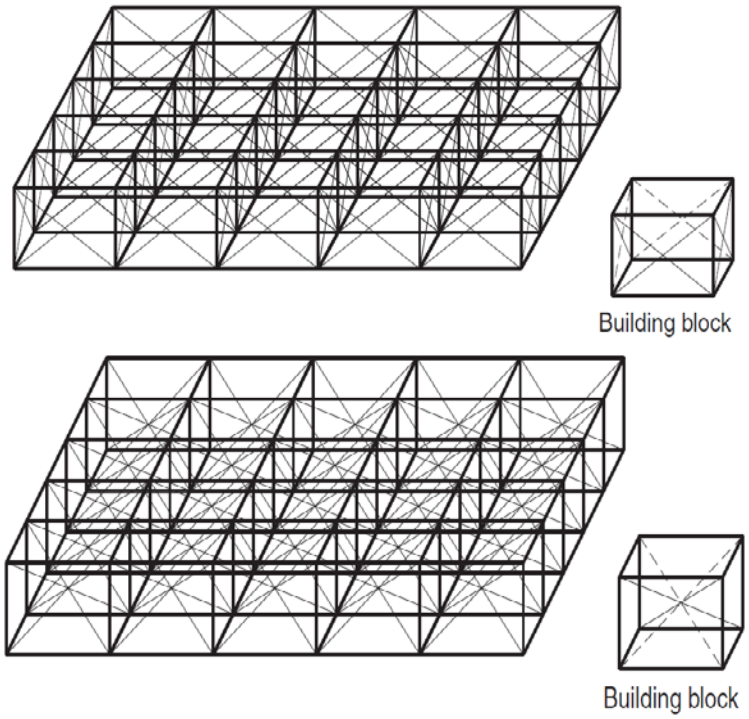
۲-۱-۳-۳ سازه‌های تیر مانند[۱]

الگوی انتقال بار این گروه ترکیب خودمتعادل[۲] فشار و کشش می‌باشد. شکل(۲-۹). سازه خودایستا می‌باشد. نیروهای داخلی کلی توسط گشتاورهای خمشی و برش‌ها در هر مقطع شناخته می‌شوند. قاب‌های فضایی[۳] آشناترین این دسته اند.

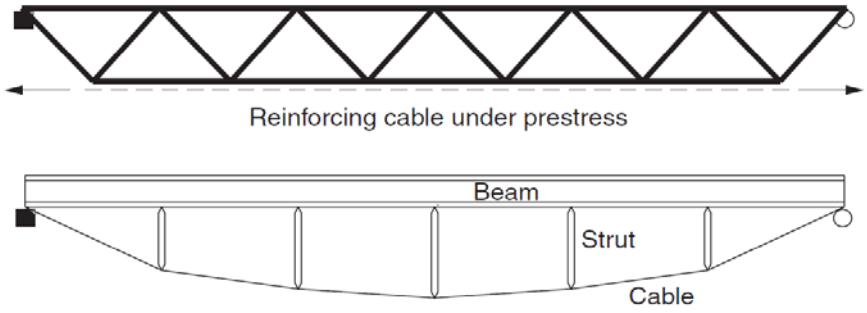
[۱] Beam-like types
[۲] Self-equilibrated combination
[۳] Space frames

شکل ۲-۹: سازه‌های تیر مانند

در سسیستم Catenary-like types کابل‌ها به عنوان مولفه‌های سازه‌ای اساسی مورد استفاده قرار می-گیرند و در سازه‌های طاق مانند به عنوان پایدارکننده و تقویتی. در حالت مقایسه در سیستم سازه‌های تیر مانند، کابل‌ها علاوه بر مزیت‌های ذاتی آن‌ها به عنوان المانهای پایدارکننده و تقویتی می توانند به عنوان المان‌های سازه‌ای (کششی) در کنار میله‌ها مورد استفاده قرار بگیرند و مولفه‌های کششی لنگرهای داخلی را تحمل می‌کنند و یک شبکه کابلی خودایستا تشکیل می‌شوند. شکل(۲-۱۰) و شکل(۲-۱۱) نمونه‌هایی از این سازه‌ها می باشند.



شکل ۲-۱۰: سازه‌های تیر مانند – کابل‌ها به عنوان المان‌های پایدارکننده



شکل ۲-۱۱: سازه‌های تیر مانند – کابل‌ها به عنوان المان‌های تقویت کننده

در این تحقیق سیستم‌های تنسگریتی، به عنوان نوعی از سازه‌های فضاکار کششی مشبک که کابل‌ها در آن نقش المان سازه‌ای را در کنار نقش متداول پایدارکنندگی و تقویتی، ایفا می کنند مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

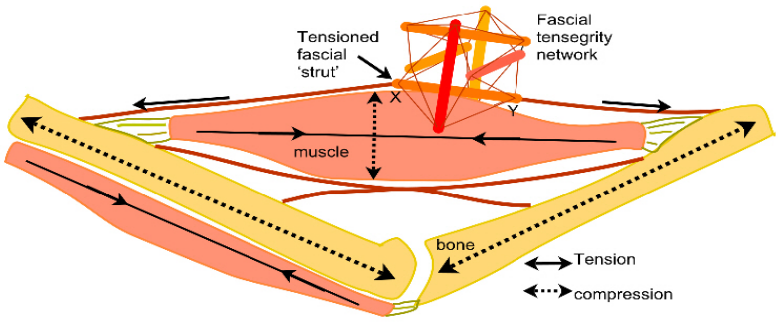
۲-۲ سیستم‌های تنسگریتی

۲-۲-۱ سیستم‌های تنسگریتی در طبیعت

سیستم‌های تنسگریتی نوع خاصی از سازه‌های فضاکار می‌باشند که در آن‌ها از کابل به عنوان جایگزین اعضای سازه‌ای کششی استفاده می شود. اعضای فشاری همواره در فشار و اعضای کششی همواره در کشش می‌باشند. در حقیقت مجموعه‌ای از المان‌های کششی و فشاری در یک حالت خود متعادل مونتاژ می شوند که به موجب آن پایداری و سختی سیستم را فراهم می کنند. به عبارت دیگر سیستم های مشبک فضایی هستند که سختی سازه ای آنها به وسیله خودتنیدگی (سختی از مرتبه پیش تنیدگی) ایجاد می‌شود. محققان در این زمینه تعاریف دیگری را نیز ارائه کرده اند که برای مطالعه می توان به مراجع [۲, ۱۰] مراجعه کرد.

به عنوان نمونه ای از یک سیستم تنسگریتی در طبیعت می توان به سیستم عضلات اسکلتی موجودات زنده اشاره کرد شکل(۲-۱۲). در این سیستم ها عضلات و تاندون ها عضوهای تحت کشش

و استخوان‌ها عضوهای تحت فشار می‌باشند، همچنین ترکیب عضلات و تاندون ها مجموعه‌ای پیوسته درحالی که استخوان‌ها مجموعه ای ناپیوسته را تشکیل می دهند[۱۲ ,۱۱] .

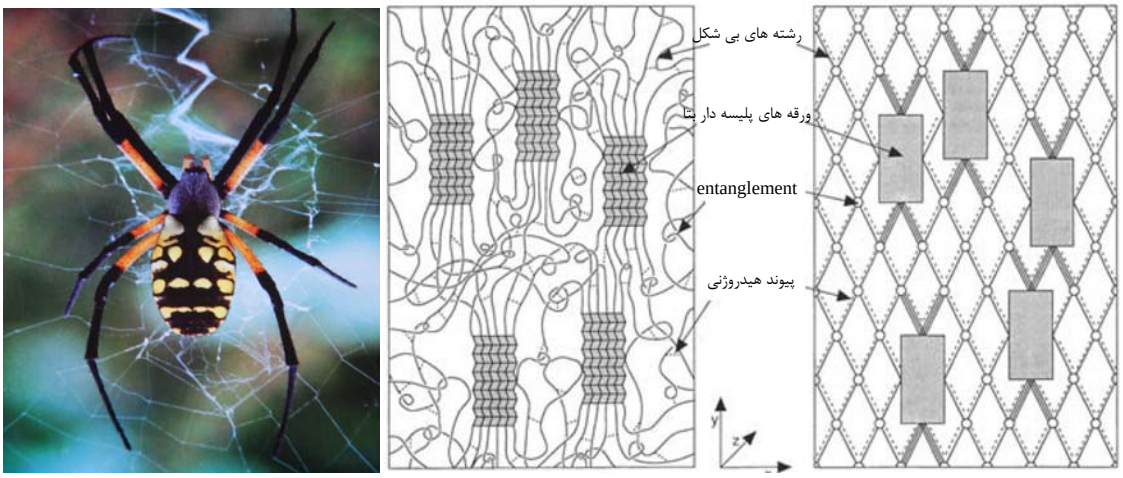


شکل ۲-۱۲: سیستم‌های تنسگریتی در عضلات اسکلتی موجودات زنده[۷]

تار عنکبوت از پروتئین‌های پیچیده تاشونده[۱] متشکل از آمینواسیدهای اصلی به نام‌های آلانین[۲] و گلیسین[۳] تشکیل شده است. آلانین‌ها به دو طریق شکل می گیرند، یک صفحات مستطیلی[۴](صفحه های مولکولی از کریستال‌های بسیار کوچک)که ورقه‌های پلیسه‌دار بتا[۵] نامیده می-شوند، و دوم رشته‌های بی شکل[۶] (نامنظم و غیرمتبلور) می‌باشند که یک شبکه کششی از موادی که می‌توانند تغییرشکل را جذب کنند ایجاد می‌کنند شکل(۲-۱۳).صفحات مستطیلی نقش جسم صلب و رشته‌های بی شکل نقش اعضای کششی را در تعریف سازه‌های تنسگریتی ایفا می‌کنند. از آنجایی که ورقه‌های پلیسه‌دار بتا در تماس با یکدیگر نمی‌باشند، مواد تار عنکبوت توسط اعضای کششی پایدار خواهند شد. اگر زمین یا درختان را که شرایط مرزی غیرقابل حرکت را برای نقاط تماس خارجی شبکه تارعنکبوت فراهم می‌کند به عنوان بخشی از ترکیب‌بندی تنسگریتی اجسام صلب درنظر بگیریم تارعنکبوت با قدری ایده‌آل سازی، یک سیستم تنسگریتی نوع یک را تشکیل خواهدداد[۱۲] .

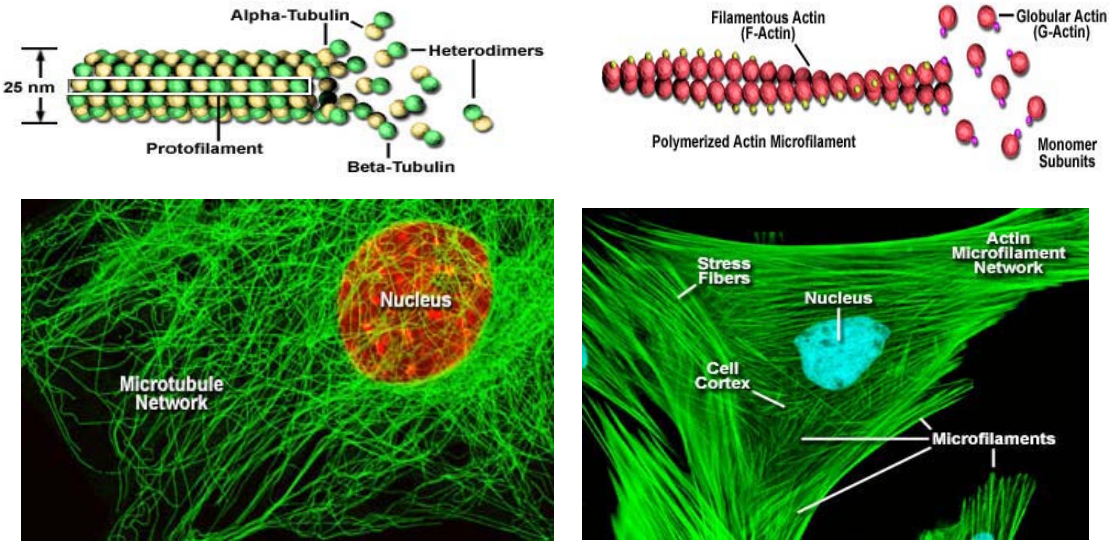
---

۱ complex-folded proteins
۲ Alanine
۳ Glycine
۴ Rectangular plates
۵ β-pleated sheets
۶ Amorphous strands



شکل ۲-۱۳: سیستم تنسگریتی نوع یک شبکه تار عنکبوت، متشکل از ورقه های پلیسه دار بتا(اجسام صلب) و رشته-های بی شکل(اعضای کششی)[۱۲]

ساختمان اسکلت سلولی از میکروفلامنت‌ها[۱] به عنوان اجزا انعطاف پذیر تحت کشش پیوسته و میکرو تیوبلس‌ها[۲] به عنوان اجزای تحت فشار غیر پیوسته ساخته شده است شکل(۲-۱۴) [۱۳] .

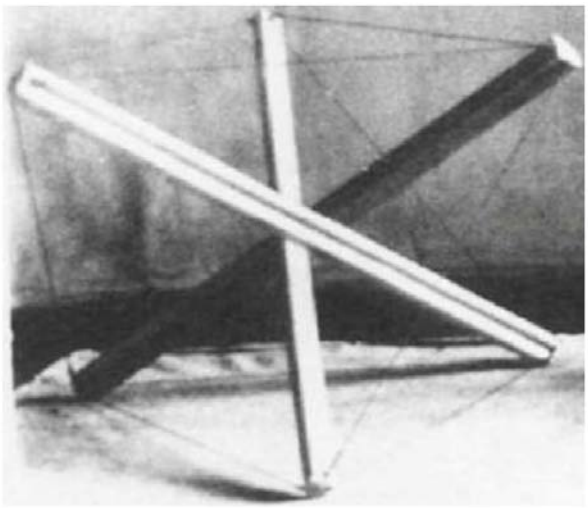


شکل ۲-۱٤: سیستم‌های تنسگریتی در اسکلت سلولی[۱۴]

[۱] Microfilaments
[۲] Microtubules

۲-۲-۲ تاریخچه سیستم‌های تنسگریتی

سیستم‌های تنسگریتی نخست توسط هنرمندان ساخته شدند، درحقیقت مبدا این سازه‌ها را می‌توان به سال ۱۹۲۱ و به سازه ساخته شده توسط Karl Ioganson نسبت داد[۱۵] . این سازه در شکل(۲-۱۵) نشان داده شده است. می توان سیستم را جزو سازه های تنسگریتی نوع یک طبقه بندی کرد[۱۲] .

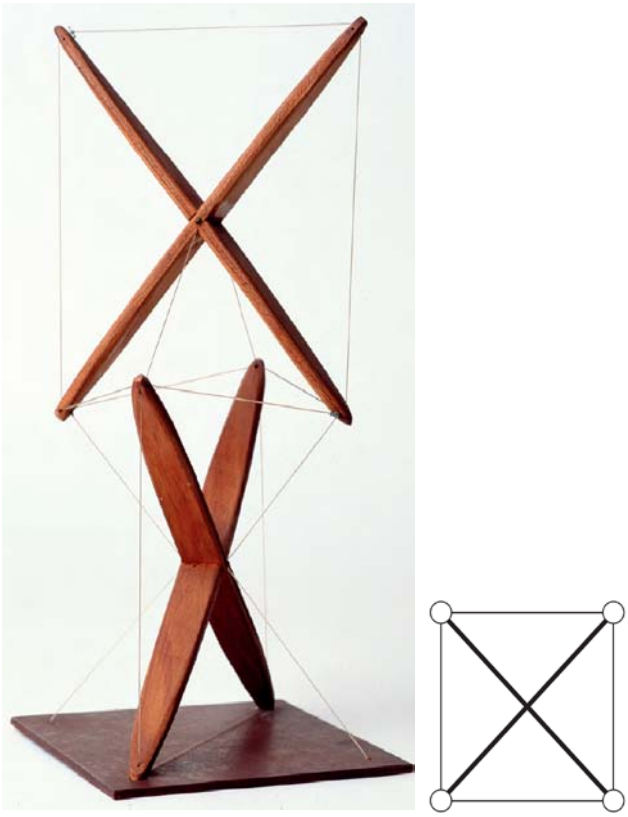


شکل ۲-۱۵: سازه سه بعدی پایدار متشکل از سه میله و ۹ کابل، Karl Ioganson ،۱۹۲۱-۱۹۲۰ [۱۲]

هرچند امروزه معمولا سازه X شکل(۲-۱۶)، که توسط اسنلسون[۱] در سال ۱۹٤۸ ساخته شده است، به عنوان اولین نوع سازه‌های تنسگریتی در نظر گرفته می‌شود. نمونه او از دو عضو فشاری چوبی و چهار کابل نایلونی تشکیل شده است[۹] . او این سیستم‌ها را تحت عنوان "سازه‌های ناپیوسته فشاری، پیوسته کششی" نامگذاری کرد(کتاب موترو). واژه تنسگریتی که ترکیبی از دو واژه "کشش"[۲] و "یکپارچگی"[۳] است، برای اولین بار توسط ریچارد باکمینستر فولر[۴] در اوایل دهه شصت برای سازه ساخته شده توسط اسنلسون ، بکار گرفته شد[۱۶] و به این معنی است که یکپارچگی این گروه از

[۱] Snelson
[۲] Tension
[۳] Integrity
[۴] Richard Buckminster Fuller

ساختارها، بسته به تعادل کشش‌های داخلی است. بطور همزمان دیوید جورج امریش[۱] نیز برروی سیستم‌های خودمتعادل متشکل از میله و کابل کار می‌کرد. او این سیستم‌ها را تحت عنوان سازه های خودکشش[۲] نامگذاری کرده بود [۱۷] .



شکل ۲-۱۶: مدول ایکس- پیس[۳] اسنلسون، ۱۹٤۸ و مدول صفحه ای مشتق شده از آن [۱۸]

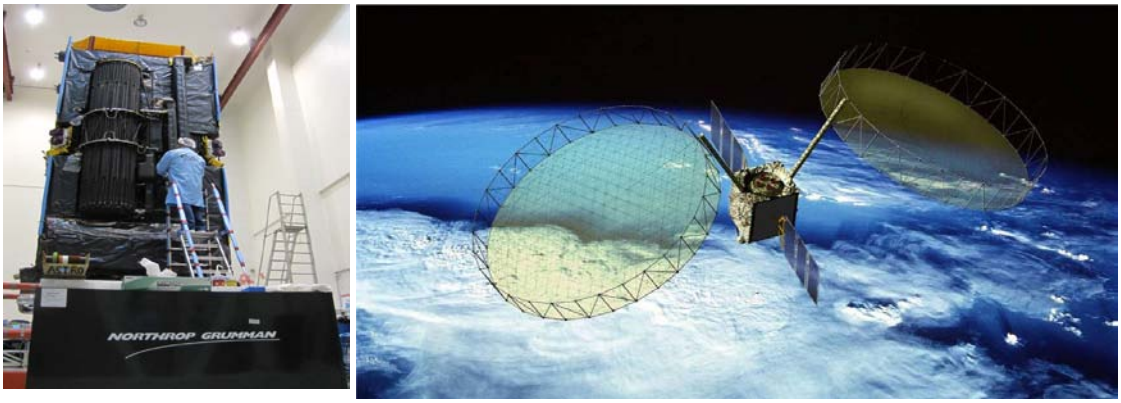
در نمونه ساخته شده توسط اسنلسون اعضای فشاری در فضای دو بعدی با یکدیگر در اتصال می‌باشند که این با مفهوم پایداری سازه‌های تنسگریتی متفاوت می‌باشند. وی در ادامه کارهای خود و با استناد به نمونه‌ای که طراحی کرده بود، نمونه‌های دیگری را طراحی کرد که درپیوست (الف) نشان داده شده است[۱۹] . این سازه‌ها مفهوم کامل سازه‌های کش‌بستی را بیان می‌کنند، چراکه در این سازه‌ها مجموعه‌ای از اعضای ناپیوسته فشاری و پیوسته کششی، ایجاد کننده این سازه هستند[۹] .

۱ Emmerich
۲ Self-tensioning
۳ X-piece

۲-۲-۳ برخی ویژگی‌های کاربردی سیستم‌های تنسگریتی

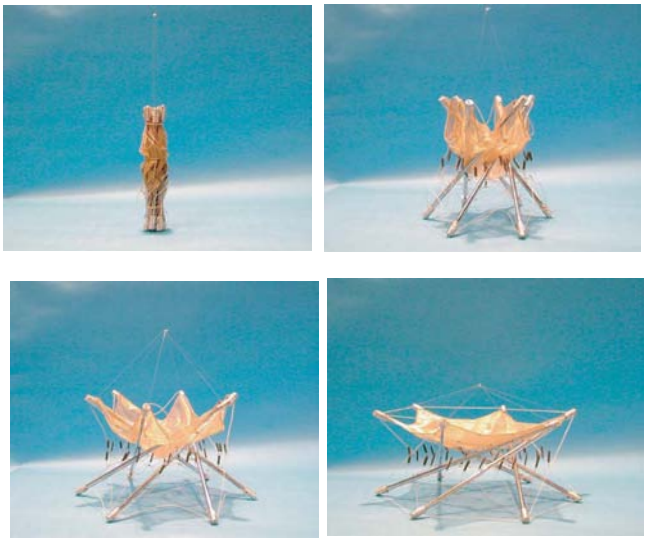
نسبت تحمل بار به وزن بیشتر در مقایسه با سیستم‌های مشابه به صورت ریاضی می‌توان نشان داد که سازه‌های تنسگریتی می‌توانند به گونه‌ای ساخته شوند که به شکل خیلی مناسب کشش و فشار را تحمل کنند. مزایای چنین سیستم‌های این است که $\frac{۳}{۴}$ اعضای خطی در این سیستم می‌توانند اعضای منحصرا کششی بوده، که این مسئله منجر به سبک‌تر شدن این سازه‌ها نسبت به سایر سازه‌های فضاکار خواهد شد. در حقیقت این سازه‌ها، در مقایسه با سیستم‌های مشابه نسبت تحمل بار به وزن بیشتری دارند و این ویژگی به خصوص برای کاهش هزینه‌های ساخت با توجه به کاهش وزن سازه بسیار پراهمیت است.

قابلیت تاشوندگی، انبارکردن و انتقال این سیستم‌ها را آسان می کند و استفاده از آنها را به عنوان سازه‌های توسعه پذیر سبک وزن مانند گیرنده‌ها و فرستنده‌های ماهواره‌ای، تلسکوپ‌ها، رشته‌های خورشیدی و سازه‌های شاخکی و آنتن‌ها با کاربردهای هوافضا، سازه‌های موقت(مانند پناگاه‌ها) و ... میسر می سازد. شکل(۲-۱۷) نمونه ای از این ماهواره های توسعه یافته در فضا را نشان می دهند این سیستم‌ها بصورت جمع شده به فضا فرستاده شده و در فضا توسعه پیدا کرده به اندازه واقعی خود می‌رسند.



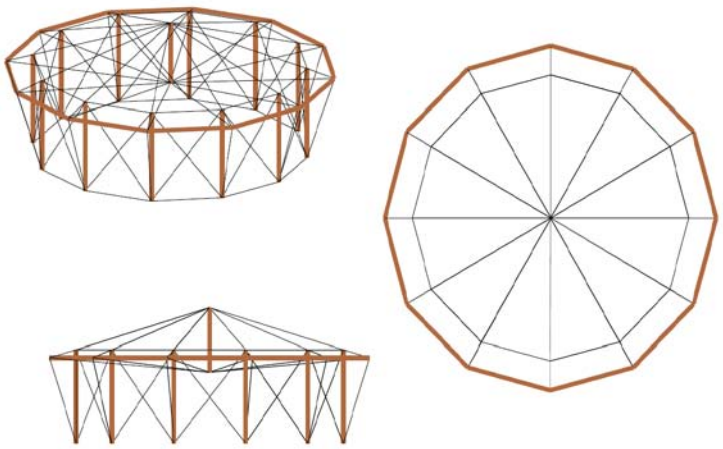
شکل ۲-۱۷: نمونه‌ای از ماهواره‌های توسعه یافته در فضا [۲۰]

از میان سیستم‌های تاشو مورد استفاده در مهندسی هوافضا مانند ساخت گیرنده‌ها و فرستنده‌های ماهواره‌ای، سیستم‌های تنسگریتی به دلیل سبکی و کارائی بیشتر، کاربرد بیشتری پیدا کرده‌اند. یک نمونه از این نوع سازه‌ها در شکل(۲-۱۸) نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۸: گیرنده ماهواره‌ای تنسگریتی[۴]

یک نمونه از پناهگاه ساده در شکل(۲-۱۹) نشان داده شده است. این‌چنین سازه‌هایی در یک بسته کوچک قابل جمع شدن بوده که پس از حمل به سایت مورد نظر قابل باز شدن به اندازه اصلی می‌باشند (کاربری بیمارستان صحرایی و ...) .



شکل ۲-۱۹: سازه موقت تنسگریتی [۱۲]

انعطاف‌پذیری ذاتی سیستم‌های تنسگریتی پتانسیل قابل توجهی را برای سازه‌های تنسگریتی جهت ساخت برج‌ها و سازه‌های سقفی[۱] ایجاد می‌کنند. پارونسو[۲] و پاسرا [۳]، صفحه‌های تنسگریتی[۴] را برای نمایشگاه بین‌المللی ۲۰۰۲ سوییس مطرح کردند[۲۱] . آن‌ها همچنین یک سقف تنسگریتی را برای ولودرومی[۵] در سوییس طراحی کردند. شکل(۲-۲۰) [۲۲] .

شکل ۲-۲۰: سقف تنسگریتی در ولودرومی سوییس [۷]

برج روستوک[۶] واقع در آلمان که طراحی آن توسط Schlaich و همکاران انجام شده بود، در سال ۲۰۰۳ ساخته شد که شاید مرتفع ترین برج تنسگریتی باشد. (۶۲,۳ متر) شکل(۲-۲۱). این برج مرکب از مونتاژ پی‌درپی شش مدول ساده است[۲۳] .

برج روستوک از لحاظ ساختار هندسی مشابه برج نیدل می‌باشد که در سال ۱۹۶۹ توسط اسنلسون ساخته شده است. انواع برج هایی که می‌توان با استفاده از سیستم‌های کش‌بستی جهت

۱ Roof structures
۲ Paronesso
۳ Passera
۴ Tensegrity platforms
۵ Veldrome
۶ Rostock tower

کاربری‌های مختلف ساخت عبارتند از: برج‌های هادی رعد و برق(برق‌گیرها)، برج‌های ارتباطی و دکل-های مخابراتی، دکل‌هایی جهت نصب توربین‌های تولید برق با استفاده از انرژی باد و. . . .

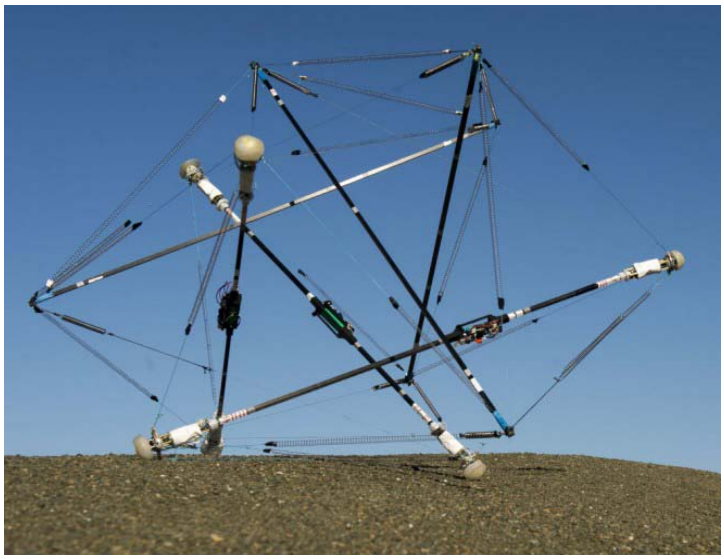
شکل ۲-۲۱: برج تنسگریتی روستوک واقع در آلمان[۷]

امکان جابجایی‌های بزرگ که به صورت بالقوه در سازه‌های تنسگریتی به‌ویژه نوع یک که اعضای تحت فشار بطور ناپیوسته در سیستم قرار گرفته‌اند، وجود دارد یکی از مهم‌ترین خصوصیت سازه‌های تنسگریتی است. زیرا در طبیعت هرگاه که به جابجایی‌های کنترل شده در مقیاس بزرگ نیاز است از تنسگریتی بهره‌گیری شده است(همانند بدن حیوانات و سلولهای زنده). بنابراین پاسخگو بودن سازه به عوامل محیطی نظیر زلزله و باد و گرما برتری خاصی به این سازه ها می‌بخشد.

امکان تغییرشکل راحت: تحقیقات در مورد سیستم‌های تنسگریتی آشکار کرد که انرژی بسیار کمی جهت تغییرشکل چنین سیستم‌هایی مورد نیاز است. بنابراین سازه‌های تنسگریتی گزینه‌های مناسبی در جهت سیستم‌های کنترل شونده و همانطور که پیش‌تر گفته‌شد توسعه‌پذیر می‌باشند.

قابلیت انطباق‌پذیری: با تجهیز سازه به حسگرهای حساس به تغییرمکان و پاسخ سازه به تغییرات اعمالی، می‌توان سازه‌های هوشمندی ساخت که بتوانند خود را با این تغییرات (اثرات محیطی نظیر تغییرات حرارت، نزولات آسمانی، بادهای شدید و ...) وفق دهند.

از دیگر برتری‌های این سیستم‌ها سرعت زیاد آن‌هاست که به همراه زیاد بودن طناب‌های کنترلی، جهت جابجایی اجسام ظریف، می‌توانند مورد توجه سیستم‌های روباتی قرار گیرند. یک نمونه رباط تنسگریتی در شکل(۲-۲۲) نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۲: رباط تنسگریتی ناسا [۷]

امکان اجرای مدولار مانند سایر سازه‌های فضاکار یکی دیگر از مزیت‌های این سیستم‌هاست که می-توان ، شبکه‌های عظیم تنسگریتی را توسط مونتاژ مدول‌های خودتنیده ابتدایی ساخت[۹] .

۲-۲-۴ مروری برروند مطالعاتی سیستم‌های تنسگریتی

سیستم‌های تنسگریتی به عنوان یک سیستم سازه‌ای، برای دهه‌های متمادی برای مهندسان شناخته شده‌است. مطالعات بر روی سیستم‌های تنسگریتی، از نقطه‌نظر مهندسی برای اولین بار توسط فولر مطرح شد و اغلب تحقیقات هندسی که روی این سازه‌ها انجام گرفته، توسط فولر و Pagh گزارش شده‌اند. اولین مرجع علمی برای سیستم‌های تنسگریتی به کتاب کرنر[۱] بر ریاضیات ژئودزیک تعلق دارد[۲۴] .

اولین قدم جهت بررسی این سازه‌ها در دانشگاه کمبریج روی خواص استاتیکی سازه‌های پیش تنیده صورت گرفته‌است. سلطان در سال ۲۰۰۷ یک معرفی از کارهای انجام شده برروی سازه‌های کش‌بستی در مرجع [۲۵] ارائه داده است که به عنوان منبع اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد و خلاصه آن به شرح زیر است:

۲-۲-۴-۱ مطالعات استاتیکی سازه‌های تنسگریتی

کالادین[۲] در سال ۱۹۷۸ قانون ماکسول [۳] (۱۸۶۴) را در مورد محاسبات پایداری و سختی قاب‌ها، برای سازه‌های کش‌بستی بکار برد. مطابق قانون ماکسول یک قاب فضایی سه بعدی با تعداد j گره و تعداد b عضو، هنگامی سخت به حساب می‌آید که رابطه $b = 3j - 6$ برقرار باشد. کالادین با نمونه ساده‌ای ازسازه‌های تنسگریتی ثابت کرد که باتعداد اعضای کمتر از رابطه ماکسول می توان سازه ای سخت به وجود آورد، به‌طوری‌که مطابق قانون ماکسول چنین سازه‌هایی دارای سختی از مرتبه پایین می‌باشند. این مسئله با ایجاد پیش تنیدگی قابل جبران می‌باشد به‌طوری‌که حالت پیش‌تنیدگی، این سازه‌ها را از نظر استاتیکی و سینماتیکی به حالت نامعین با مکانیزم‌های بینهایت کوچک تبدیل

[۱] Hugh kenner’s
[۲] Calladine
[۳] Maxwell

می‌کند. این بدان مفهوم است که تغییرات جزئی در هندسه سازه تاثیری در تغییر طول هیچ کدام از اعضا ندارند. مزایای چنین سیستمی این است که تقریبا ٤/٣ اعضای خطی در این سیستم می‌توانند اعضای منحصرا کششی بوده و بدین ترتیب می‌توان به سازه ای سبک‌تر دست یافت.

تارانی[1] در سال ۱۹۸۰ این کار را بر روی برج‌های خرپایی و دارای تقارن دایروی مطابق با قانون ماکسول ادامه داد. وی شرایط نامعینی استاتیکی و سینماتیکی این سازه‌ها را باتوجه ماتریس تعادل ان سازه‌ها تعریف نمود.

کالادین و پلگرینو[2] در سالهای ۱۹۸٦ و ۱۹۹۱ پیرو یافته‌های کالادین در سال ۱۹۷۸، با انجام مطالعات فیزیکی بر روی ماتریس تعادل سازه‌های خرپایی دارای نامعینی استاتیکی و سینماتیکی، یک الگوریتم ماتریسی جهت تمایز مکانیزم‌های بینهایت کوچک درجه اول و مکانیزم‌های از مراتب بالاتر ابداع نمودند.

هانر[3] در سال ۱۹۸۸ یک الگوریتم منسجم جهت تحلیل و طراحی بهینه سازه‌های خرپایی پیش تنیده ارائه نمود. این الگوریتم برپایه روش نرمی تحلیل سازه‌ها استوار بود و برای تمامی سازه-های خرپایی با نامعینی استاتیکی و سینماتیکی، با یا بدون حضور پیش تنیدگی کاربرد داشت که به راحتی برای سازه‌های تنسگریتی نیز قابل کاربرد می‌باشد. همچنین او ثابت کرد که پیش‌تنیدگی می-تواند ظرفیت باربری سازه های تنسگریتی را افزایش دهد. هانر در سال ۱۹۹۲ پارامترهای موثر بر طراحی گنبدهای تنسگریتی دولایه را بهبود بخشید.

[1] Tarani
[2] Pellegrino
[3] Honaor

کوئیرنت [1]و همکاران[۲۶] مراحل متفاوتی از طراحی شبکه‌های تنسگریتی را مورد مطالعه قرار دادند و یک پروسه طراحی توسعه پیدا کرد که برای پوشش یک سطح به مساحت m^2 ۸۱ از شبکه تنسگریتی تک لایه به کار برده شد.

موترو[2] و اسمایل[3] [۲۷] مطالعات طراحی را بر روی سیستم‌های تنسگریتی خمیده[4] ارائه کردند و قوانین روند توسعه را برای این گونه از سازه‌ها بررسی کردند.

۲-۲-۴-۲ مطالعات دینامیکی سازه‌های تنسگریتی

موترو در سال ۱۹۸٦ نتایج حاصل از آزمایشات دینامیکی خطی بر روی سازه‌ای متشکل از سه المان میله‌ای و نه المان کششی را منتشر کرد که نتایج آزمایشات دینامیکی از تحریک هارمونیک گره‌ها حاصل شده بود. موارد و جوانب متعددی توسط موترو و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت که از این میان می‌توان به بررسی اثرات پیش‌تنیدگی توسط کبیش[5] در سال ۱۹۹۹، روش‌های شکل یابی توسط وسارت[6]در سال ۱۹۹۹ و ژانگ[7] در سال ۲۰۰٦ و الگوریتم طراحی توسط کوئیرنت در سال ۲۰۰۳ اشاره نمود.

فورویا[8] در سال ۱۹۹۲ از روش المان محدود برای بررسی خواص نوسانی سازه‌های تنسگریتی استفاده نمود و به این نتیجه رسید که فرکانس مودی با افزایش پیش‌تنیدگی، افزایش می‌یابد.

---

[1] Quirant
[2] Motro
[3] Smail
[4] curved
[5] Kebiche
[6] Vassart
[7] Zhang
[8] Furuya

سلطان[۱] در سال ۱۹۹۹ معادلات غیرخطی حرکت برای سازه‌های تنسگریتی را ارائه نمود که این معادلات در سال‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای در تئوری کنترل غیرخطی این سیستم‌ها پیدا کرده است. همچنین سلطان درسال ۲۰۰۲ معادلات خطی حرکت سازه‌های تنسگریتی را برای تئوری کنترل خطی ارائه نمود.

نیشیمورا[۲] و موراکامی[۳] درسال ۲۰۰۱ معادلاتی شامل روش‌های المان محدود برای تحلیل استاتیکی و دینامیکی سازه‌های تنسگریتی با استفاده از تئوری الاستیسیته سه بعدی برای تغییر شکل‌های بزرگ، ارائه نموده و از تحلیل مقادیر ویژه با توجه به اثرات پیش‌تنیدگی، برای توصیف مود-های بینهایت کوچک بهره گرفتند.

اپنهیم[۴] و ویلیامز[۵] در سال ۲۰۰۰ خصوصیات نوسانی و میرائی سازه‌های تنسگریتی را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین بررسی‌هایی بر روی اثر سختی هندسی، روابط غیر خطی نیرو، تغییر مکان و اثر نیروهای آشفته بر روی سازه‌های تنسگریتی انجام دادند.

اپنهیم و ویلیامز در سال ۲۰۰۱ در مورد پاسخ دینامیکی سازه‌های تنسگریتی تحقیق نمودند که درپی این مطالعات میزان میرایی نوسان سازه با استفاده از میرایی طبیعی کابل‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

کانچاناساراتول[۶] و ویلیامسون[۷] در سال ۲۰۰۲ بر روی رفتار دینامیکی سازه‌های تنسگریتی مطالعاتی انجام دادند که نتیجه کار آنها پیشنهاد مدل ذره ای مقید[۸] بود.

اسکلتون[۹] در سال ۲۰۰۵ یک تئوری برای سازه‌های تنسگریتی با توجه به روش نیرو و جنبش ارائه نمود. دی اولویرا[۱۰] در سال ۲۰۰۵ یک تئوری کامل برای سازه‌های تنسگریتی با توجه به روش

---

۱ Sultan
۲ Nishimura
۳ Murakami
۴ Oppenheim
۵ Williams
۶ Kanchanasaratool
۷ Williamson
۸ Constrained particle model
۹ Skelton
۱۰ De Oliviera

انرژی ارائه داد. در سال ۲۰۰٦ نتایج حاصل از مقایسه مطالعه فرمول‌های مختلف را در مورد پاسخ‌های دینامیکی سازه‌های تنسگریتی، ارائه نمود.

۲-۲-۴-۳ مطالعات کنترل سازه‌های تنسگریتی

از اواسط دهه ۱۹۹۰ بررسی‌ها درمورد کنترل سازه‌های تنسگریتی توسط اسکلتون در دانشگاه بوردو[۱] و سپس دانشگاه کالیفرنیا در سانديياگو[۲] آغاز گردید. اسکلتون و سلطان در سال ۱۹۹۷ تئوری سازه‌های تنسگریتی قابل کنترل تحت عنوان سازه‌های هوشمند ارائه نمودند. سپس محققینی نظیر ماستیک[۳] در سال ۲۰۰۲ و پیناد[۴] در سال ۲۰۰۳ بر روی این سازه‌ها تحقیقات گسترده‌ای انجام دادند.

جوآدی[۵] در سال ۱۹۹۸ و چان[۶]در سال ۲۰۰٤ بررسی‌هایی در مورد روش‌های کنترل فعال در سازه‌های تنسگریتی انجام دادند.

اسکلتون و دجاگر[۷]در سال ۲۰۰۱ تحقیقاتی در مورد نصب یک سری حسگر و محرک روی سازه‌های تنسگریتی تخت انجام دادند.

آردیش[۸] و اسکلتون در سال ۲۰۰۷ بر روی کاربرد سازه‌های تنسگریتی جهت ساختن ربات تحقیق نمودند. اریکسون[۹] در سال ۲۰۰۷ تحقیقاتی بر روی های‌بیومکانیکی انجام داد که نمونه ای از این کارها شبیه‌سازی سیستم ماهیچه و استخوان در بدن موجودات زنده جهت کنترل بیومکانیکی سازه‌های تنسگریتی است که شرح کامل این تحقیق در صفحه وب وی قابل دسترسی می باشد.

---

۱ Purdue
۲ San Diego
۳ Mastic
٤ Pinaud
٥ Djouadi
٦ Chan
۷ Dejager
۸ Ardich
۹ Eriksson

فصل سوم

سیستم‌های تنسگریتی

۳- سیستم‌های تنسگریتی

۳-۱ مفاهیم اساسی سیستم‌های تنسگریتی

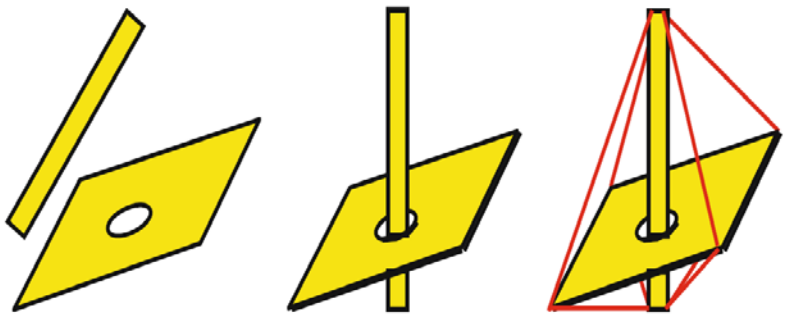
۳-۱-۱ تعریف سیستم‌های تنسگریتی

سازه‌های تنسگریتی نوع خاصی از سازه‌های فضاکار می‌باشند که در آن‌ها از کابل به عنوان جایگزین اعضای کششی استفاده می‌شود. اعضای فشاری همواره در فشار و اعضای کششی همواره در کشش می‌باشند.

اسکلتون[۱۲] تعریف دقیقی را ارائه می‌دهد که به کمک آن خصوصیات سیستم‌های تنسگریتی را از سایر سیستم‌هایی که به این طبقه تعلق ندارند متمایز می‌کند :

"در غیاب نیروهای خارجی، مجموعه‌ای از اجسام صلب را در یک پیکربندی خاص که در محل اتصال به یکدیگر گشتاوری را تحمل نمی‌کنند، در نظر بگیرید (اتصال مفصلی بدون اصطکاک). آنگاه این پیکربندی تشکیل یک پیکربندی تنسگریتی می‌دهد اگر بتواند به وسیله مجموعه‌ای از

اعضای کششی که بین این اجسام صلب قرار می‌گیرد پایدار شود، بافتار مورد نظر با مجموعه اعضای کششی آن تشکیل یک سیستم تنسگریتی می‌دهد. پیکربندی مورد نظر چنانچه هیچ عضو کشش لازم نداشته باشد ویا هیچ عضو کششی به منظور پایدارسازی آن موجود نباشد سیستم تنسگریتی نامیده نمی‌شود. شکل(۳-۱). "



شکل ۳-۱: ترکیب بندی دو جسم: به ترتیب از چپ به راست: پیکربندی تنسگریتی نمی‌باشد، پیکربندی تنسگریتی می‌باشد، سیستم تنسگریتی می‌باشد[۱۲]

۳-۱-۲ پایداری سیستم‌های تنسگریتی

پایداری این سیستم‌ها تنها برای هندسه‌ای فراهم خواهد شد که در یک وضعیت خودمتعادل پایدار، قابل تحقق باشد خودمتعادل یعنی پایداری سیستم مستقل از وجود تکیه‌گاه و دیگر نیروی خارجی(حتی گرانش) محقق می‌شود. به عنوان مثالی دیگر شکل(۳-۲) از دو جرم و یک رشته تشکیل شده‌است. این پیکربندی یک پیکربندی تنسگریتی نمی‌باشد زیرا سیستم در غیاب نیروهای خارجی پیش تنیده نمی‌باشد.

شکل ۳-۲: دو جسم صلب و یک رشته(متعادل) که تشکیل پیکربندی تنسگریتی را نمی‌دهند (ناپایدار) [۱۲]

خودمتعادلی که جزء خواص اصلی و تمییزدهنده‌ی این سیستم‌ها از سازه‌های سنتی است حاصل تنش‌های اولیه‌ای است که اصطلاحا خودتنیدگی نامیده می‌شود. خودتنیدگی حالتی از تنش-های داخلی است که به محض مونتاژ کردن عناصر، در سیستم ایجاد می‌شود. خودتنیدگی با کوتاه کردن کابل‌ها و یا طویل کردن میله‌ها از یک هندسه بدون تنش ایجاد می شود[۲۶] .

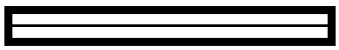
لازم‌به‌ذکر است تفاوت ظریفی بین خودتنیدگی و پیش‌تنیدگی وجود دارد و آن این است که زمانی که در یک سیستم کابل و میله‌ای، فقط کوتاه بودن کابل‌ها برای ایجاد تنش در دیگر اعضا کافی باشد و نیازی به مقید کردن دیگر اعضا برای ایجاد تنش اولیه نباشد سیستم خودتنیده است[۲] . و چنانچه برای ایجاد تنش در دیگر اعضا، علاوه بر کوتاه کردن طول کابل‌ها، به تکیه‌گاه نیز نیاز باشد، سیستم پیش‌تنیده است. در این سیستم‌ها به دلیل این که پایداری، اساسا مستقل از نیروهای خارجی و تکیه‌گاه می باشد لذا ترجیح براین است برای تنش‌های اولیه‌ای که در سیستم‌ها ایجاد می شود از لفظ خودتنیدگی استفاده شود.

همانطور که گفته شد از آنجایی که شرط پایداری، خود تنیدگی اولیه می باشد از این رو خودتنیدگی نقش اساسی در رفتار این سیستم‌ها ایفا می کند. همچنین از آنجایی که سازه‌های فضاکار سیستم‌های سه بعدی می‌باشند، ازاین‌رو مسئله خودتنیدگی در این سیستم‌ها در فضای سه‌بعدی مطرح است و سیستم‌های تنسگریتی جزو سیستم‌های خودتنیده سه‌بعدی می‌باشند[۲].

برای بررسی خودتنیدگی در فضای سه‌بعدی لازم است که نخست مفهوم خودتنیدگی دوبعدی برای سیستم‌های خطی تعریف و سپس به حالت سه‌بعدی تعمیم داده شود. برای بررسی این مفاهیم از مرجع [۲] استفاده شده است.

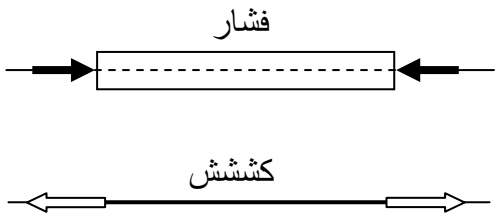
۳-۱-۲-۱ خودتنیدگی خطی

خودتنیدگی خطی ساده‌ترین حالت خودتنیدگی می‌باشد. شکل(۳-۳) یک عنصر فشاری مستقیم با مقطع دایره‌ای را نشان می‌دهد که یک عضو کششی کابلی داخل آن قرار داشته و سیستم توسط دیسک‌های فلزی در دو انتها مقید شده است، به‌طوری‌که دو انتهای اعضای کابلی و میله ای درجات آزادی یکسان داشته و باهم قادر به حرکت و تغییر مکان می‌باشند. اگر طول عضو فشاری s و طول عضو کششی c باشد در این صورت سه حالت قابل بررسی می‌باشد.



شکل ۳-۳: سیستم کابل و میله

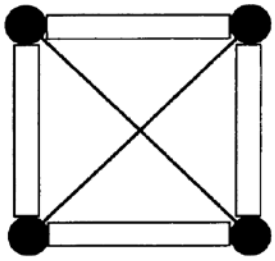
- $S < C$ که در این حالت کابل داخل لوله شل بوده و سیستم کاملا خنثی می‌باشد.
- $s = c$ دراین حالت کابل نه شل بوده و نه تحت نیروی کششی خاصی قرار دارد ولی دارای شکل مشخص و پایداری است و باز در این حالت سیستم در حالت تعادل خنثی از لحاظ خودتنیدگی به‌سر می‌برد.
- $s > c$ در این حالت هم عضو فشاری و هم عضو کششی مطابق شکل(۳-۴) تحت نیروی داخلی فشاری و کششی قرار داشته و مقادیر نیروی فشاری میله و نیروی کششی کابل برابر بوده و سیستم از لحاظ استاتیکی پایدار می‌باشد. در هر دو عضو فشاری و کششی تغییر شکلهای محوری روی می‌دهد و در این حالت سیستم دارای خودتنیدگی خطی است.



شکل ۳-٤: نیروی داخلی کابل و میله در حالت خودتنیدگی خطی

۳-۱-۲-۲ خودتنیدگی دوبعدی (صفحه ای)[۱]

خودتنیدگی دوبعدی را با یک سیستم مربعی شامل چهار میله و دو کابل مطابق شکل(۳-۵) می‌توان نشان داد که کابل‌ها دارای طول c و میله‌ها دارای طولs می‌باشند .



شکل ۳-۵: هندسه متعادل خودتنیده صفحه‌ای شامل چهار میله و دو کابل

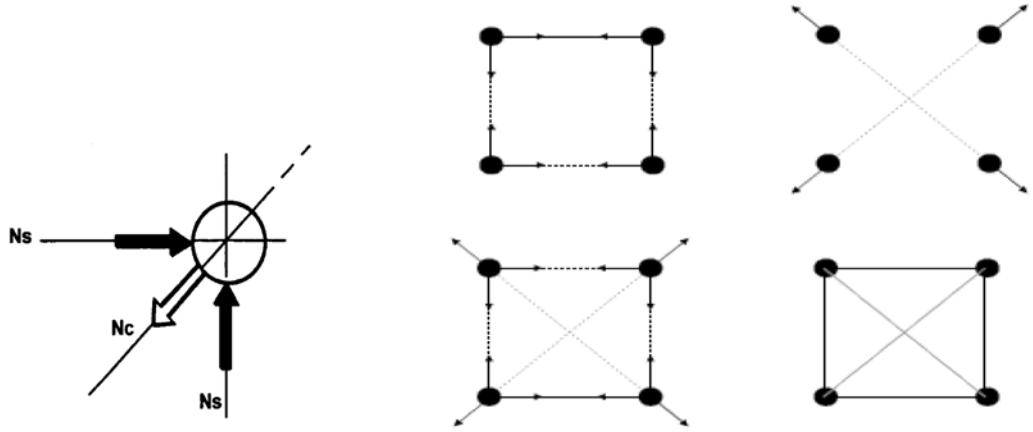
باتوجه به توضیحات (قسمت خودتنیدگی خطی) و با فرض $r = \frac{c}{s}$ حالات زیر قابل بررسی می‌باشد:

- $r > \sqrt{2}$ یعنی در سازه مورد نظر کابل‌ها در وضعیت شل قرار داشته و شکل معین و ثابتی ندارند در این وضعیت سازه نامعین سینماتیکی است.
- $r = \sqrt{2}$ (طول کابل برابر قطر مربع) دراین حالت کابل‌ها فاقد تنش کششی ولی دارای شکل معین و خاص می‌باشند و سیستم در حالت تعادل خنثی قرار دارد.
- $r < \sqrt{2}$ دراین حالت کابل‌ها و میله‌ها دارای تنش محوری بوده و سیستم در حالت خودتنیدگی قرار دارد.

درصورتی که با روش‌های ابتدایی استاتیک، معادلات تعادل گره‌ها را در این سازه بنویسیم در می‌یابیم که رابطه بین نیروی فشاری میله و نیروی کششی کابل به صورت رابطه (۳-۱) می‌باشد.

$$N_c = \sqrt{2}\, N_S \qquad (۱-۳)$$

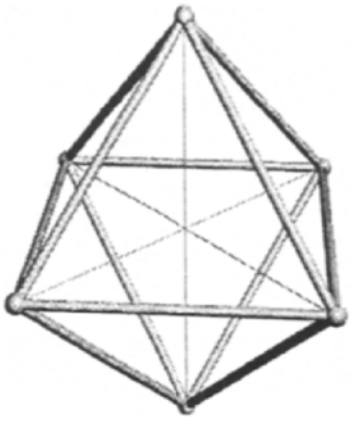
[۱] Bidimensional self-stress



شکل ۳-۶: توزیع نیروهای داخلی کابل و میله در حالت خودتنیدگی صفحه‌ای

۳-۱-۲-۳ خودتنیدگی سه‌بعدی (فضایی)[۱]

برای بسط دادن مسئله خودتنیدگی به فضای سه‌بعدی می توان از مثال یک هشت‌وجهی[۲] شکل(۳-۷) بهره برد که ماهیتا صلب می‌باشد مانند حالت خودتنیدگی دوبعدی نسبت r در این سیستم نیز به راحتی قابل محاسبه و برابر $r = ۱,٤۱٤$ می باشد. در این سیستم نیز همانند حالت صفحه‌ای چنانچه $r > ۱,٤۱٤$ باشد، سیستم خودتنیده خواهد بود.



شکل ۳-۷: حالت خودتنیدگی سه‌بعدی

[۱] Tridimensional self-stress
[۲] Polygonal

این مثال یک مثال از سیستم‌های تنسگریتی نیست اما به‌دلیل وضوح تعادل استاتیکی برای به تصویر کشیدن خودتنیدگی سه‌بعدی و بیان هندسه متعادل به کار می رود.

۳-۱-۳ سختی سیستمهای تنسگریتی

سیستمهای تنسگریتی مجموعه‌ای از المان‌های کششی و فشاری می‌باشند که در یک حالت خودمتعادل مونتاژ می‌شوند و به موجب آن پایداری و سختی سیستم را فراهم می‌کنند. به‌عبارت‌دیگر سیستم‌های مشبک فضایی هستند که سختی سازه‌ای آن‌ها به وسیله خودتنیدگی (سختی از مرتبه پیش‌تنیدگی) ایجاد می‌شود. این سختی که مقاومت اولیه در برابر نیروی خارجی را سبب می‌شود، اساسا به خودتنیدگی (پیش‌تنیدگی) وابسته است و به دلیل سختی محوری EA هرکدام از اعضا نیست. به‌عبارتی، سختی یا انعطاف‌پذیری کلی سازه وابسته به سختی محوری اعضا نبوده بلکه به مشخصات کامل هندسی سیستم بستگی دارد. به همین دلیل است که از این وضعیت تحمل بار، به سختی هندسی یاد می شود[۲۸] .

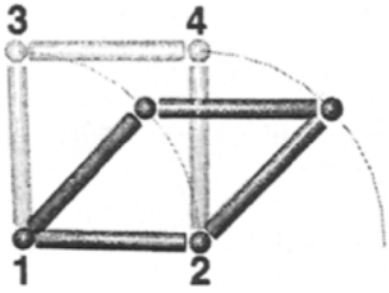
حالت‌های خودتنیدگی تنها به این دلیل که باعث سخت شدن [۱] سازه می‌شوند قابل اهمیت نیستند، بلکه آنها باعث پایدار شدن مکانیزم‌های بینهایت کوچک خواهند شد. این مکانیزم‌ها سبب کاهش سختی محلی می‌شوند. ازاین‌رو عدم حضور مکانیزم‌های بینهایت کوچک سبب افزایش عملکرد و کارایی سازه‌های سیستم‌های تنسگریتی خواهد شد[۲۹] . به‌عبارتی سختی این سیستم‌ها توسط پایدارسازی مکانیزم‌های بینهایت کوچک در یک حالت خودتنیده فراهم می‌شود. در ادامه به بررسی مفاهیم مکانیزم‌های محدود و بینهایت کوچک و پایدارسازی آنها خواهیم پرداخت.

[۱] Stiffen

۳-۱-۳-۱ مکانیزم محدود و بینهایت کوچک

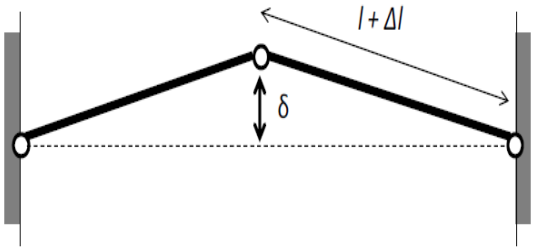
زمانی که اعضای متعددی مونتاژ می‌شوند. مسیر شکل‌گیری هندسه‌های متفاوت برای سیستم مونتاژ شده امکان‌پذیر بوده (نامعینی سینماتیکی) که حرکت اعضا را به دنبال خواهد داشت، این حرکت که به هیچ انرژی جهت این جابجایی نیاز ندارد تحت عنوان" مکانیزم " نامیده می‌شود.

اگر در مسیر این حرکت هیچ تغییر طولی برای اعضا رخ ندهد این مکانیزم"محدود" نامیده می شود. به عنوان مثال یک مجموعه از عضوهای با صلبیت فشاری با اتصالات مفصلی را درنظر بگیرید. برای حذف کردن اثر وزن این چهار میله آن‌ها را روی سطح افقی قرار می‌دهیم. دو گره انتهایی یکی از اعضا به‌طور کامل مهارشده فرض می‌شود. (برای مثال گره ۱و۲)، و این کار از هر جابجایی کلی جلوگیری می‌کند. مسیر شکل‌گیری هندسه‌های متفاوت (مسیر دایره‌ای گره‌های ۳و٤)، حرکت اعضا را به دنبال خواهد داشت. چنین سیستمی نامعین سینماتیکی تلقی می‌شود و این جابجایی مکانیزم محدود نامیده می‌شود. شکل(۳-۸).



شکل ۳-۸ : مکانیزم محدود[۲]

حال اگر در مسیر این حرکت تغییرات طولی بی نهایت کوچک برای اعضا رخ دهد بطوری که درجه تغییرات آن، Δl از درجه جابجایی δ کمتر باشد، جابجایی متناظر یک "مکانیزم بینهایت کوچک" نامیده می‌شود و سیستم همچنان نامعین سینماتیکی است. شکل(۳-۹) [۲].



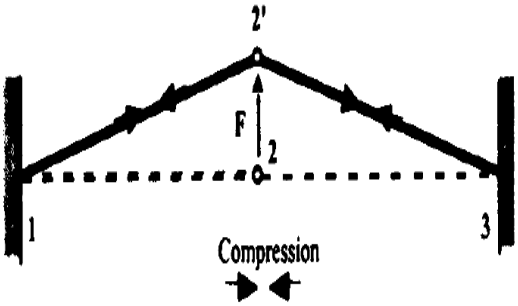
شکل ۳-۹ : مکانیزم بینهایت کوچک [۲۹]

۳-۱-۳-۲ پایدارسازی مکانیزم‌های بینهایت کوچک

بحث پایدارسازی مکانیزم‌های بینهایت کوچک، با خودتنیدگی یک خصوصیت اساسی در سیستم‌های تنسگریتی بوده و در کمک به فهم رفتار سیستم‌های تنسگریتی بسیار ضروری است. پیش‌تنیدگی یا خودتنیدگی می‌تواند برخی مکانیزم‌های بینهایت کوچک را پایدار کند.

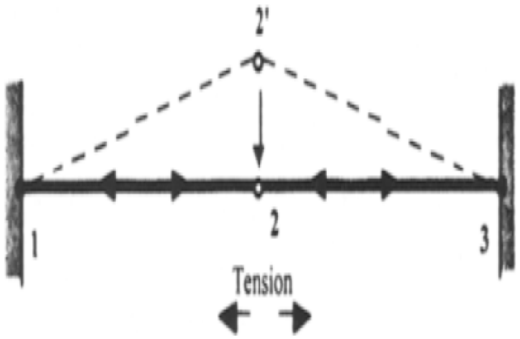
با در نظرگرفتن مثال دو میله که انتهابه‌انتها به هم متصل شده‌اند این امکان وجود دارد که با اعمال پیش‌تنیدگی مکانیزم‌های بینهایت کوچک را پایدار کنیم.

با درنظر گرفتن lij برابر با طول میله و dij برابر با فاصله بین دو گره j و i در حالت $lij > dij$ حالت پیش‌تنیدگی فشاری محقق خواهدشد. شکل(۳-۱۰).



شکل ۳-۱۰:حالت پیش‌تنیدگی فشاری [۲]

و در حالت $lij < dij$: حالت پیش‌تنیدگی کششی محقق خواهدشد. شکل(۳-۱۱).



شکل ۳-۱۱:حالت پیش تنیدگی کششی [۲]

در مورد اول، اگر نقطه اتصال توسط نیروی محرک F از مکان اولیه‌اش دور شود، دراین‌حالت تنها تا رسیدن نقطه اتصال به مکان جدیدش مکانیزم‌های بینهایت کوچک فعال می‌شود و مجموعه یک حالت متعادل برای مکان جدید را پیدا خواهد کرد. در حقیقت پیش‌تنیدگی فشاری سیستم را به ترکیب‌بندی اولیه بازنمی‌گرداند. درحقیقت اعضا در حالت جدید بدون تنش هستند یعنی انرژی پتانسیل آنها صفر است. با حذف نیروی محرک، اثر پیش‌تنیدگی ناشی ازفشار آنرا به مکان اولیه‌اش باز نمی‌گرداند زیرا در آن حالت انرژی داخلی سیستم بیشتر خواهد بود.

در مورد دوم، اگر نقطه اتصال توسط نیروی محرک F از مکان اولیه‌اش دور شود، دراین‌حالت مکانیزم‌های بینهایت کوچک فعال می‌شود. با حذف نیروی محرک، اثر پیش‌تنیدگی. ناشی از کشش (کشامد عناصر میله ای) سختی سازه را افزایش داده، آن‌را به مکان اولیه‌اش باز می‌گرداند. این سیستم برای تعادل به بارهای خارجی نیاز ندارد، و برای F=۰ در یک حالت خودتنیده قرار خواهد داشت. درحقیقت مکانیزم‌های بینهایت کوچک با پیش‌تنیدگی کششی پایدار می‌شود.

این دو مثال،این حقیقت را آشکار می‌کند که وابسته به ذات حالت پیش‌تنیدگی اعمالی به سیستم، مکانیزم‌های بینهایت کوچک می‌توانند پایدار شوند (با کشش) یا نشوند (با فشار)[۲] .

۳-۱-۴ فرم‌یابی سیستم‌های تنسگریتی

یکی از مسائل عمده و اصلی در طراحی سازه‌های تنسگریتی تعیین ابعاد، هندسه و نحوه قرارگیری اعضای واحدهای تنسگریتی جهت ایجاد یک سازه واحد می‌باشد به‌طوری‌که طول اعضای فشاری و کششی به ترتیبی انتخاب شود که یک هندسه واحد ایجاد کند تا حالات خودتنیدگی مناسب جهت پایداری سازه بدست آید. بدیهی است خودتنیدگی اولیه‌ای که به سیستم اعمال می‌شود نمی‌تواند هر مقداری باشد بلکه باید به گونه ای انتخاب شود که تعادل بافتار حفظ شود. شاید در یک مدول ساده با تعداد اعضای محدود بتوان به حل معادلات تعادل برای تک‌تک گره‌ها برای بدست آوردن تنش‌های اولیه هرکدام از اعضا اکتفا نمود اما بی‌شک با افزایش تعداد اعضا و پیچیده شدن مدل هندسی سازه، بایستی تدابیر دیگری اتخاذ نمود. این مسئله مدت‌هاست که محققین زیادی برای حل آن روش‌هایی پیشنهاد نموده‌اند و سبب باز شدن مبحثی تحت عنوان فرم‌یابی سازه تنسگریتی گردیده است.

در واقع در فرآیندهای فرم‌یابی همزمان به دو مسئله‌ی شکل سازه و تعادل گره‌ها اندیشید. روش‌های زیادی ارائه شده‌اند که ایده اصلی ارائه‌دهنده‌ی آن شکل سازه بوده و تعادل سازه را فقط با روش‌های آزمون و خطا پیشنهاد نموده‌اند و بنابراین به این روش‌ها، روش کنترل فرم اطلاق می‌شود. از طرف دیگر روش‌های متعددی نیز ارائه شده که ایده‌ی اصلی ارائه دهنده‌ی آن فقط یافتن حالت-هایی از خودتنیدگی است که تعادل گره‌ها حفظ شود، این روش‌ها را روش‌های کنترل نیرو می نامند.

توجه شود که مرحله شکل‌یابی بدون در نظرگرفتن بار خارجی و پیش‌تنیدگی انجام می‌شود و منجر به دستیابی به یک هندسه خودتنیده خنثی و در حال تعادل می‌شود[۳۰] .

یکی از روش‌های معروف در زمینه فرم‌یابی سازه‌های تنسگریتی ، روش دانسیته نیرو[۱] [۳۱] می باشد. مجهولات در این روش، یا خودتنیدگی خواهدبود یا هندسه، برای سازه‌هایی که هندسه آن‌ها

[۱] Force density

از قبل مشخص است، خودتنیدگی مجهول خواهد بود. با استفاده از این تئوری، معادلات به صورت یک دستگاه معادلات همگن در می‌آید. حل همین دستگاه مساله اصلی است. چراکه به هنگام تشکیل دستگاه، سختی یک طرفه‌ی کابل‌ها لحاظ نشده است و بنابراین در جواب‌هایی که برای دستگاه حاصل می شود، جواب‌هایی حاصل می شود که شدنی نیست یعنی مثلا برای کابل‌ها، تنش‌های اولیه‌ی فشاری را پیشنهاد می‌دهد. یکی از راه‌های شدنی کردن جواب‌ها اینست که ترکیبی خطی از جواب‌ها یافت شود به قسمی که شرط مذکور را برآورده کند. مروری جامع بر روش‌های شکل‌یابی برای سازه تنسگریتی را می‌توان در[۳۲, ۳۳] یافت. این مرحله مورد تحقیق در این پایان نامه نمی‌باشد.

۳-۲ خصوصیات مکانیکی سیستم‌های تنسگریتی

مفاهیم اساسی از قبیل پیش‌تنیدگی، خودتنیدگی، مکانیزم‌های محدود، بینهایت کوچک، پایدارسازی مکانیزم‌های بینهایت کوچک و شکل‌یابی در قسمت‌های قبلی مطرح گردید که آن‌ها پیش‌زمینه مکانیکی‌ای را تشکیل می‌دهند که برای فهم مکانیک سیستم‌های تنسگریتی بسیار ضروری‌اند [۲].

اگر سازه‌های تنسگریتی به‌طور مناسبی پیش‌تنیده شوند، می‌توان این سازه‌ها را همانند قابهای با اتصال مفصلی مورد مطالعه قرار داد. خصوصیات سینماتیکی و استاتیکی سیستم‌های تنسگریتی با بدست آمدن یک ترکیب‌بندی پایدار قابل تحقیق خواهد بود. برای مثال حالت‌های خودتنیدگی و مکانیزم های داخلی باید بعد از مرحله شکل‌یابی محاسبه شوند.

برای توصیف خصوصیات سیستم‌های تنسگریتی دو پارامتر اصلی مورد نیاز است:

۱. تعداد حالت‌های خودتنیدگی "s"
۲. تعداد مکانیزم‌ها "m"

در ادامه دو روش تحلیلی برای محاسبه این پارامترها بیان شده است :

۳-۲-۱ قانون بسط داده شده ماکسول[۱]

به عنوان یک ابزار جهت تحلیل حالت‌های خودتنیدگی و مکانیزم‌های سیستم‌های میله‌ای با اتصالات مفصلی قانون بسط داده شده ماکسول نشاد داده شده است [۳٤] :

برای سیستم‌های دوبعدی

$$۲N_j - N_e - N_c = \mathrm{m} - \mathrm{s} \qquad (۱-۳)$$

برای سیستم‌های سه‌بعدی

$$۳N_j - N_e - N_c = \mathrm{m} - \mathrm{s} \qquad (۲-۳)$$

$\mathrm{N_j}$ و $\mathrm{N_e}$ و N_c به ترتیب تعداد گره ها المان‌ها و قیدهای خارجی می‌باشند.

در سیستم‌های تنسگریتی برای کابل‌ها این امکان وجود دارد که جمع شوند. در این وضعیت $\mathrm{N_e}$ تعداد اعضای باربر به استثنای کابل‌های جمع شده خواهد بود. اما در حالت عمومی تحلیل بر مبنای هندسه اولیه می‌باشد. در یک سیستم با اتصالات مفصلی با یک هندسه نسبتا ساده، مقادیر m یا s از طریق تحلیل تعادل گره‌ای قابل دستیابی است و سپس دیگری از طریق معادله بالا قابل دستیابی است.

[۱] Extended Maxwell’s rule

۳-۲-۲ تحلیل ماتریسی[۱]

زمانی که هندسه نسبتا پیچیده باشد، تحلیل ماتریسی مورد نیاز خواهد بود و پارامترهای (m) و (s) با توجه به ماتریس تعادل سیستم‌های تنسگریتی بدست می‌آیند و درجه نامعینی سازه‌های تنسگریتی را تعیین می‌کنند[۲] [۹] .

برای یک شبکه تنسگریتی سه‌بعدی، که با تعداد N_e عضو متصل به N_j گره که با N_c قیدهای جابجایی[۲] مقید شده است، مجموعه معادلات تعادل بصورت زیر قابل بیان است:

$$[A]\{t\}=\{F\} \quad (۳-۳)$$

که $[A]$ ماتریس تعادل می باشد و تنها به پارامتر های هندسی وابسته است. r_A رنک ماتریس برای حالت سه بعدی $(۳N_j - N_c) \times N_e$ می باشد . $\{t\}$ بردار نیروهای داخلی با رنک $N_e \times ۱$ می باشد و در سمت راست معادله، بردار بار صفر اعمالی به درجه آزادی نامقید، با رنک $(۳N_j - N_c) \times ۱$ است. باتوجه به عدم حضور بار خارجی $\{F\}=۰$ حالت خودتنیده با معادله تعادل زیر تعریف خواهد شد [۲] [۳۶]:

$$[A]\{t\}=\{۰\} \quad (٤-۳)$$

تعداد حالت‌های خودتنیدگی (یک حالت تنش پایدارخود متعادل بین میله‌ها و کابل‌ها برابر با تعداد راه‌حل‌های غیربدیهی معادله تعادل می باشد. بنابراین برای یک سیستم تنسگریتی پایدار فقط یک حالت خودتنیده وجود خواهد داشت. هر حالت خودتنیده یک ترکیب خطی از (s)حالت خودتنیده مستقل می باشد.درحالت خودتنیدگی تمام میله‌ها در فشار و تمام کابلها در کشش خواهند بود [۲۶] .

[۱] Matrix analysis
[۲] Displacement constraints

$$S = N_e - r_A \qquad (۵-۳)$$

هرچند، مکانیزم محدود و مکانیزم‌های بینهایت کوچک نمی توان از هم مجزا کرد. تعداد مکانیزم‌های داخلی m در یک سیستم مشبک سه بعدی ظریف[۱] برابر است با:

$$m = ۳N_j - N_c - r_A \qquad (۶-۳)$$

۳-۲-۳ تقسیم‌بندی سازه‌های با اتصالات مفصلی برمبنای مکانیزم

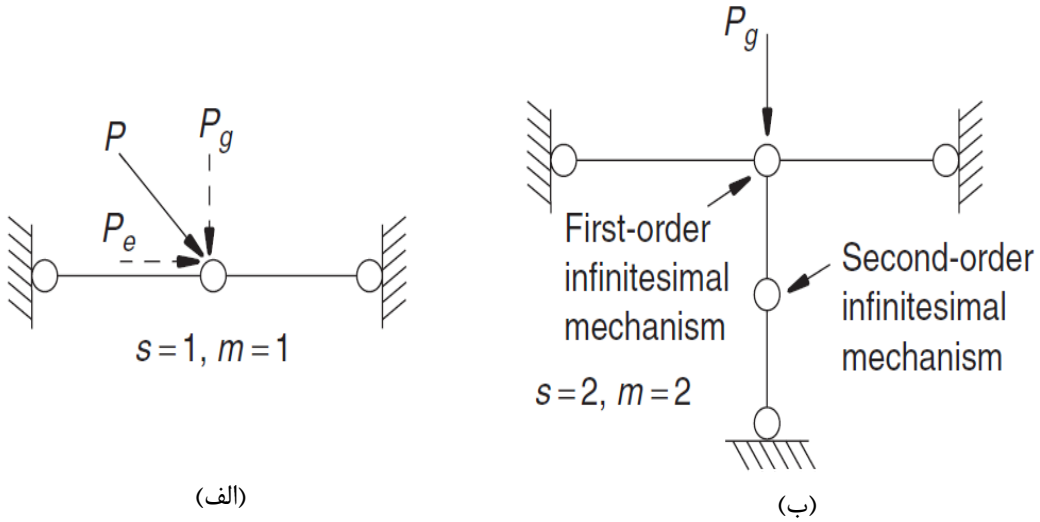
سیستم‌های با اتصالات مفصلی به سیستم‌هایی اطلاق می شود که تمام اعضا تحت بارهای محوری قرار دارند. این اعضا شامل میله‌هایی هستند که می‌توانند در معرض فشار و کشش قرار گیرند، و کابل‌هایی که می‌توانند فقط در معرض کشش قرار بگیرند. سیستم‌های با اتصالات مفصلی شامل گستره وسیعی از سازه‌های فضاکار می‌باشند. مانند سازه‌های فضاکار خرپایی (همه میله) و سازه‌های کابلی معلق (همه کابل یا اکثرا کابل)، و غیره . منشورهای تنسگریتی و سازه‌های منتج از آنها (ترکیبی از میله و کابل) به طور آشکار به سیستم‌های با اتصالات مفصلی تعلق دارند.

طبقه‌بندی سیستم‌های با اتصالات مفصلی بر مبنای حالت‌های خودتنیدگی مستقل (s) و مکانیزم های مستقل(m) انجام می‌شود. توجه داشته باشید که این طبقه‌بندی بر مبنای هندسه اولیه می‌باشد و مکانیزم‌های مربوطه می‌توانند محدود یا بینهایت کوچک باشند. یک مکانیزم بینهایت کوچک بعد از یک جابجایی کمتر از درجه (مرتبه) طول ناپدید می‌شود درحالی‌که هنوز مکانیزم‌های محدود وجود خواهند داشت[۹] .

[۱] Reticulated

یک سیستمی که شامل مکانیزم‌های بینهایت کوچک است حداقل یک حالت خودتنیده دارد. برای یک سیستم با $m > ۰$ و $s > ۰$ ، اگر یک حالت خودتنیده بتواند تاثیر مثبتی را بر سختی درجه یک هر مکانیزم بگذارد، این مکانیزم‌ها، مکانیزم‌های بینهایت کوچک درجه یک می‌باشند، به این دلیل که آن‌ها با تغییرات درجه دوم طول‌های اعضا مرتبط می‌باشند. اگر از طرف دیگر تعدادی مکانیزم وجود داشته باشد که با این حالت خودتنیده پایدار نشوند، این مکانیزم‌ها (حداقل) مکانیزم‌های بینهایت کوچک درجه دوم یا مکانیزم محدود هستند[۳۶] .

شکل(۳-۱۲) (الف) و (ب) به ترتیب مکانیزم‌های بینهایت کوچک درجه یک و دوم را نشان می‌دهد. هرچند مکانیزم‌های بینهایت کوچک درجه یک یا بالاتر، به‌ندرت در سازه‌های واقعی اتفاق می‌افتد.

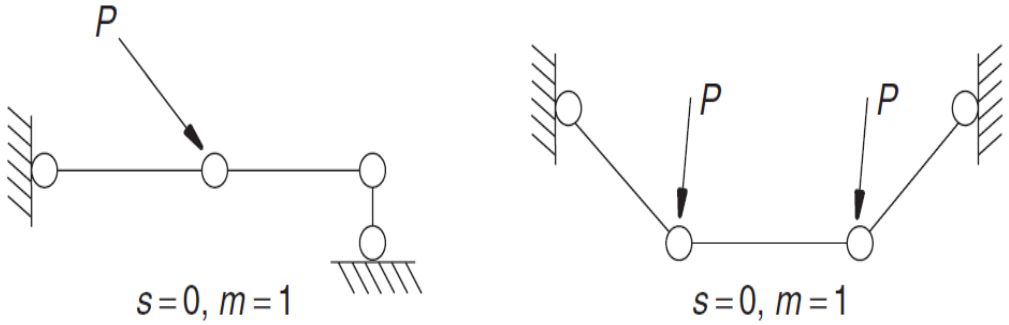


(الف) (ب)

شکل ۳-۱۲: سیستم انعطاف‌پذیر هندسی[۹]

سیستم‌های تغییرشکل پذیر هندسی با اتصال مفصلی[۱] که شامل مکانیزم‌های محدود ($s=۰,m > ۰$) هستند، در حالت کلی یک سازه در نظر گرفته نمی شوند. شکل(۳-۱۳) (ج) و (د) .

[۱] Geometrically deformable pin-jointed systems

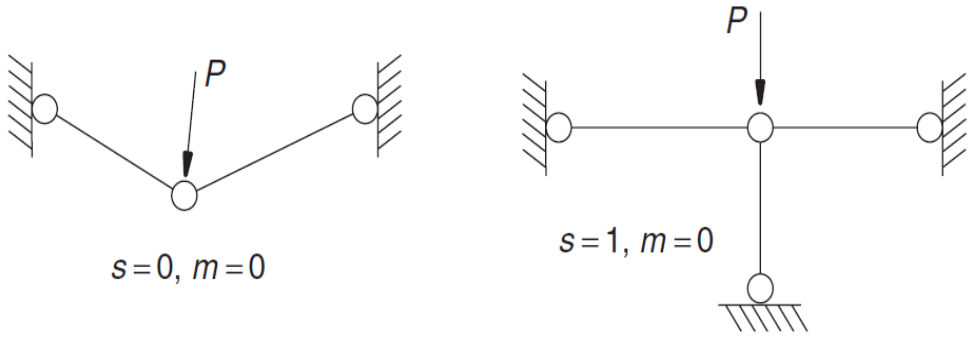


(ج) (د)

شکل ۳-۱۳: سیستم تغییرشکل‌پذیر هندسی[۹]

سیستم‌های انعطاف پذیر هندسی نمی‌توانند تحت بار اعمالی تعادل خود را حفظ کنند (شیب منحنی بار- تغییر مکان از مبدا صفر است). اما می‌توانند با تغییر شکل نیروی داخلی اعضا را توسعه دهند و نیروی خارجی را متوازن کنند. شدت این تغییر شکل‌ها حتی برای مقادیر کوچک می‌تواند کاملا بزرگ باشد. سختی اولیه با حالت خودتنیدگی بدست خواهد آمد.

سیستم صلب هندسی که هیچ مکانیزمی را شامل نمی‌شود و در هندسه اصلی‌اش می‌تواند متعادل شود. تغییرشکل‌هایش ناشی از تغییرشکل‌های الاستیک اعضا بوده و از این رو تغییر شکل‌ها معمولا بسیار کوچک‌تر از سیستم‌های انعطاف‌پذیر خواهد بود، مگر اینکه هندسه‌اش به مکانیزم نزدیک باشد. شکل(۳-۱۴) (و) و (ه) موردهای عاری از مکانیزم می‌باشند.



(و) (ه)

شکل ۳-۱۴: سیستم صلب هندسی[۹]

سیستم‌های با اتصالات مفصلی بدون مکانیزم محدود به شکل زیر می‌توانند طبقه بندی شوند:

- وقتی $s>0$, $m>0$ ، سیستم به‌طوراستاتیکی و سینماتیکی نامعین (انعطاف‌پذیر هندسی) است. شکل(۳-۱۲) (الف) و (ب).
- وقتی $s=0$, $m=0$ ، سیستم از نظر استاتیکی و سینماتیکی معین است. شکل(۳-۱۴) (و).
- وقتی $s>0$, $m=0$ ، سیستم از نظر استاتیکی نامعین و از نظر سینماتیکی معین. شکل (ه).

خصوصیات سیستم‌های با اتصالات مفصلی در جدول (۳-۱) مورد مقایسه قرار گرفته است:

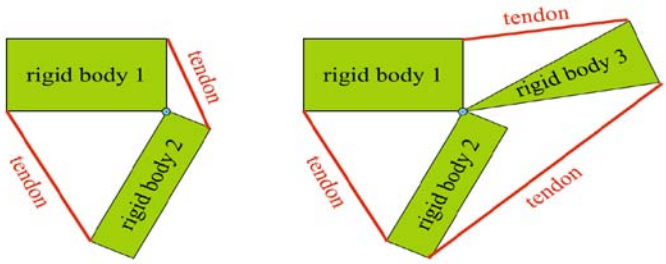
جدول ۳-۱: مشخصات سیستم‌های با اتصالات مفصلی [۹]

سختی اولیه تحت بار خارجی		وضعیت پایداری	مکانیزم‌های موجود	وضعیت هندسی
با پیش‌تنیدگی	بدون پیش‌تنیدگی			
غیر قابل اجرا	خیر	خیر	محدود	بدون شکل هندسی
بله	خیر	بله	بی‌نهایت کوچک	انعطاف‌پذیر هندسی
بله	بله	بله	خیر	صلب هندسی

۳-۳ خصوصیات هندسی سیستم‌های تنسگریتی

۳-۳-۱ طبقه‌بندی سیستم‌های تنسگریتی

اسکلتون[۳۷]برای متمایز کردن سیستم‌های تنسگریتی از سیستم‌هایی که به این طبقه تعلق ندارند، اصطلاح کلاس"k"را پیشنهاد کرد. یک پیکربندی تنسگریتی را سیستم تنسگریتی نوع "k" می‌نامیم اگر در یک‌گره،تعداد k میله توسط یک اتصال مفصلی به‌هم متصل شده‌باشند. شکل(۳-۱۵).



شکل ۳-۱۵: سیستم های تنسگریتی نوع دوم و سوم[۱۲]

بر این اساس این سازه‌هارا می‌توان به دو گروه عمده تقسیم بندی کرد :

گروه اول همان سیستم‌های تنسگریتی متعارف (تنسگریتی نوع یک طبق طبقه‌بندی اسکلتون) می‌باشند که اعضای فشاری، سیستم ناپیوسته‌ای را در داخل مجموعه اعضای پیوسته کششی ایجاد می‌کنند.

موترو ۲۰۰۳ : "تنسگریتی یک سیستم خودمتعادل پایدار است که از مجموعه‌ای از اعضای ناپیوسته فشاری درون یک مجموعه‌ای از اعضای کششی تشکیل شده است". [۲].

گرو دوم سیستم‌های تنسگریتی نوعk (به عنوان مثال، سازه‌های جدید کابل- میله[۱]) می‌باشند باشند که بارزترین تفاوت این سازه‌ها با گروه اول در این است که اعضای فشاری تک مدول برخلاف گروه اول می‌توانند با یکدیگر در تماس باشند.

۳-۳-۲ واحدهای تشکیل دهنده سیستم‌های تنسگریتی

سازه‌های تنسگریتی همانند سازه‌های فضاکار از به‌هم پیوستن واحدهای مجزا که مدول یا سیمپلکس نامیده می‌شود، تشکیل می شوند. سیمپلکس‌ها، سیستم‌های تنسگریتی فضایی بنیادی می‌باشند. اساسا سیمپلکس‌های تنسگریتی به منشور تنسگریتی مثلثی حداقل منظم، شکل(۳-۱۶)،

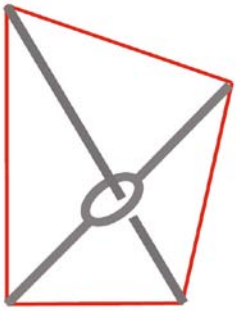
[۱] Cable-Strut

ارجاع داده می‌شوند[۹]. سیمپلکس تنسگریتی را می‌توان یک جزء تجزیه ناپذیر مانند اتم تصورکرد [۲].

ساده‌ترین سیستم تنسگریتی در غالب میله و رشته، یک جسم صلب منفرد با یک کابل قابل تعریف می‌باشد. شکل(۳-۱۶). در غالب میله و رشته این در حقیقت یک میله پیش‌تنیده است.

شکل ۳-۱۶: یک جسم صلب منفرد: یک سیستم تنسگریتی نوع یک کابلی منفرد[۱۲]

ساده‌ترین مدول بعدی، سیستم متشکل از دو میله و ۴ رشته می باشد. شکل(۳-۱۷).



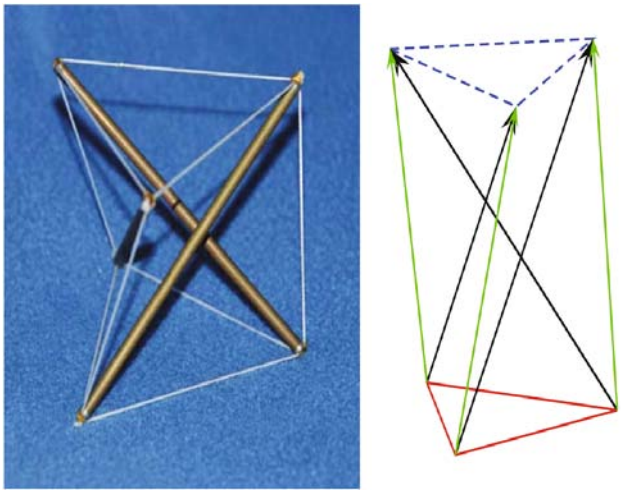
شکل ۳-۱۷: ساده‌ترین سیستم تنسگریتی متشکل از میله و کابل[۱۲]

ساده‌ترین مدول بعدی، یک واحد سه‌بعدی اساسی یا پایه‌ای است که منشور تنسگریتی[۱] نامیده می‌شود. منشور تنسگریتی، یک منشور سه‌بعدی شامل هر واحد سه‌بعدی است که از تعداد P میله و چند ضلعی‌های P وجهی از کابل‌ها در بالا و پایین واحدها تشکیل شده است.

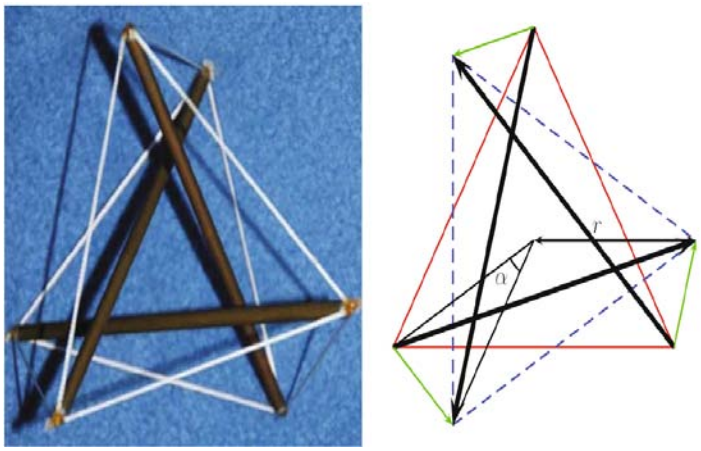
منشور تنسگریتی حداقل[۲] منظم، شکل(۳-۱۸) و شکل(۳-۱۹)، از دو وجه مثلثی متساوی الاضلاع از کابل‌ها در بالا و پایین واحد تشکیل شده است. این دو وجه مثلثی موازی‌اند اما می‌توانند در حالت کلی شعاع‌های دایره‌های محیطی بالا و پایین برابر نداشته باشند (اینجا برابرند). سه کابل باقی

[۱] Tensegrity prism
[۲] Minimal

مانده رئوس مثلث بالا و پایین را به هم متصل می‌کنند. میله‌ها نیـز رئـوس وجـوه مثلثـی را در بـالا و پایین به هم متصل می‌کنند. منظور از حداقل استفاده از کمترین تعدادکابل‌ها (سه برابر میله‌ها) جهت پایداری سیستم و منظور از منظم وضعیت موازی و متساوی الاضـلاع بـودن چنـدوجهی بـالا و پـایین واحد است، که الزاما همیشه اینگونه نیست. به ظاهر Karl Ioganson اولین واحد متشکل از سه میلـه را ساخت، اما اسنلسون این سازه را در شکل هنری معروف ساخت.



شکل ۳-۱۸: نمای پرسپکتیو و دیاگرام یک منشور تنسگریتی حداقل منظم با شعاع‌های برابر بالا و پایین واحد[۱۲]



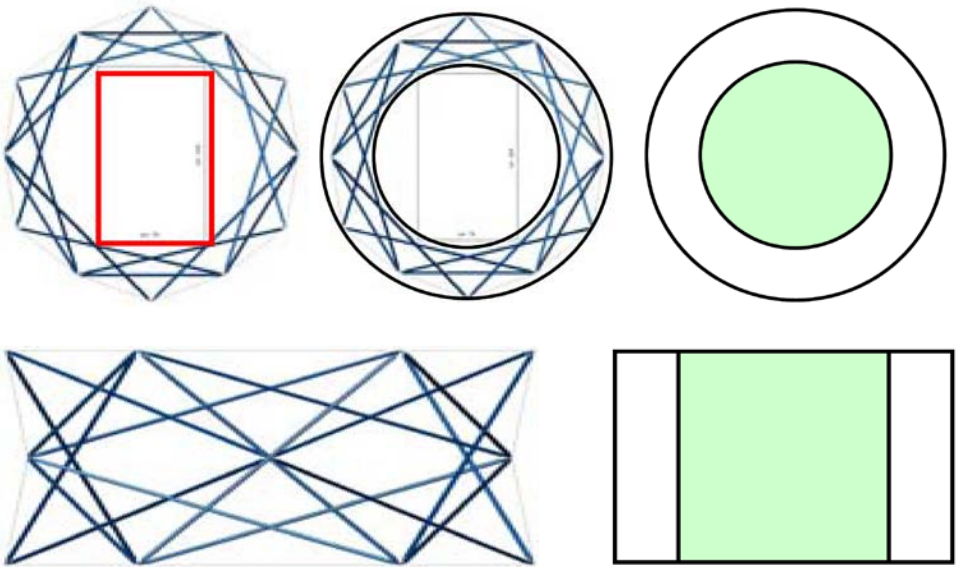
شکل ۳-۱۹: نمای بالا و دیاگرام یک منشور تنسگریتی حداقل منظم با شعاع‌های برابر بالا و پایین واحد[۱۲]

و به همین ترتیب مدول‌های تنسگریتی، بسته به هندسه‌های مختلف، تعداد اعضای کششی و فشاری و همچنین طول اعضای کششی و حالت اتصال اعضای کششی و فشاری به انواع مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند. برای مطالعات بیشتر می توان به منابع [۲] [۹] [۳۸] رجوع کرد . در این تحقیق از نوعی خاص از مدول‌های تنسگریتی تحت عنوان مدول‌های تنسگریتی حلقه‌ای استفاده شده است، که در ادامه به آن اشاره شده است.

۳-۳-۳ مدول‌های تنسگریتی حلقه‌ای

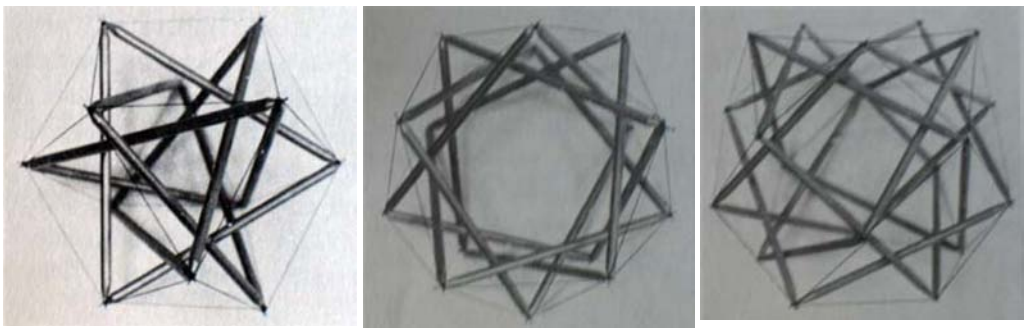
Pugh، مدول‌های تنسگریتی مقدماتی را با فرم چند ضلعی پیشنهاد کرد که در مرکز خود فضای خالی قابل توجهی را دارا می باشند[۱۵] . در این مدول‌ها انتهای هر میله به انتهای میله‌های دیگر متصل شده به‌طوری که یک مدار متشکل از میله‌ها را درون مدارهای کابل خارجی ایجاد می‌کند. وقتی کل المان‌ها، کابل‌ها و میله‌ها درون یک شکل حلقه‌ای توخالی قرار گرفته اند، این سلول‌های تنسگریتی تحت عنوان تنسگریتی حلقه‌ای شکل، نامگذاری می‌شوند(۳-۲۰). مدول‌های تنسگریتی حلقه‌ای، مدول‌های تنسگریتی مقدماتی چندضلعی فرم با فضای باز مناسب در مرکز خود می‌باشند [۱۵].

به منظور دستیابی به بعضی از معیارهای مورد نیاز در معماری، به‌سادگی می‌توان روی پارامترهای هندسی ازجمله، ارتفاع سلول"h"، شعاع داخلی "r"و شعاع خارجی"R" آن نیز کار کرد. تمام هندسه سلول می تواند توسط ارتفاع، یکی از شعاع‌های داخلی یا خارجی و ضخامت حلقه مشخص شود [۱۵].



شکل ۳-۲۰: فضای توخالی مناسب ملاحظات معماری پل عابر در مدول تنسگریتی حلقه‌ای[۱۵]

در اینجا به اختصار به بررسی سه مدول تنسگریتی حلقه‌ای جذاب که توسط Pugh معرفی شد، می‌پردازیم شکل(۳-۲۱). اولین مدول متشکل از۴ مدار مثلثی متشکل از اعضای فشاری درون شبکه‌ای از اعضای کششی است، و دیگری یک مدول متشکل از ۴ مدار مربعی متشکل از اعضای فشاری درون‌شبکه از اعضای کششی است، و درنهایت سومین مدول، که یکی از جذاب‌ترین مدول‌های حلقه‌ای است و از یک مدار منفرد پیوسته میله‌ای(اعضای فشاری) متشکل از ۱۵ گره و ۱۵ عضو فشاری تشکیل شده است .

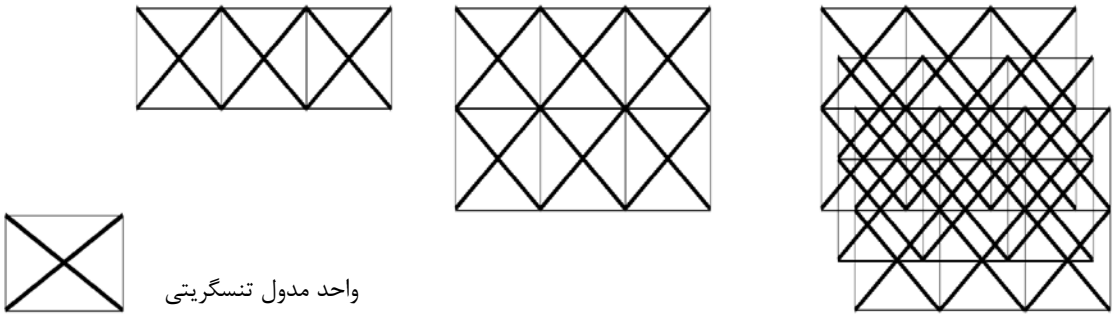


شکل ۳-۲۱: مدول های تنسگریتی حلقه ای پیشنهاد شده توسط Pugh [۱۵]

برای این مدول، کابل‌ها گوشه‌های این چندضلعی بوده که دو وجه پنج ضلعی موازی هم را در دو وجه انتهایی مدول ایجاد می‌کنند، به‌طوری‌که میله‌ها یک مدار پیوسته با ۱۵ گره و ۱۵ عضو فشاری را تشکیل می‌دهند. در این مدول‌ها، انتهای هرمیله به میله دیگر متصل شده به‌طوری‌که یک مدار منفرد پیوسته را درون شبکه کابل‌های خارجی بوجود می آورد [۱۵].

۳-۳-۴ بافتارهای تشکیل دهنده سیستم‌های تنسگریتی

سیستم‌های تنسگریتی بسته به انواع مختلف مدول‌ها، نوع ترکیب‌بندی مطابق شکل(۳-۲۲) و نیز نوع اتصال آن‌ها به یکدیگر، بافتارهای مختلفی را به خود می‌گیرند که در زیر به اختصار به آن‌ها اشاره می کنیم.



شکل ۳-۲۲: سرهم‌بندی خطی، صفحه‌ای و فضایی مدول‌های تنسگریتی [۲۹]

۳-۳-۴-۱ بافتارهای مدولار و غیرمدولار

سیستم های متداول تنسگریتی، متشکل از واحدهایی هستند که هر واحد به تنهایی، خودمتعادل می‌باشد، این سیستم‌ها را مدولار تنسگریتی می‌نامند. سیستم‌هایی که واحدهای تنسگریتی تشکیل دهنده آن‌ها، به‌طورمستقل متعادل نمی‌باشند، اما سازه کلی متشکل از واحدهای آن متعادل هستند، سیستم‌های غیر مدولار تنسگریتی نامیده می‌شوند. تعریف سیستم‌های غیر مدولار

توسط موترو و همکاران جهت سهولت در جهت کاربردهای عملی ارائه شد. آن‌ها استدلال نمودند که اگر بنابه تعریف رایج، هر سازه‌ی تنسگریتی از سرهم کردن مدول‌های تنسگریتی خودمتعادل ایجاد شود، اولا: سازه‌ی حاصله در اثر مکانیزم‌های ایجاد شده در محل وصله‌ی واحدها، سختی‌اش کاهش میابد، ثانیا: ایجاد این سازه‌هایی که تک‌تک مدول‌های آن تنسگریتی باشند دشوار است. از این‌رو آن‌ها سیستم جدیدی را پیشنهاد نمودند که واحدهای تشکیل دهنده‌ی آن‌ها مستقلا تنسگریتی نمی‌باشند، اما سازه‌ی کلی تنسگریتی می‌باشد[۳۹] .

۳-۳-۴-۲ بافتارهای پیوسته و ناپیوسته عضو فشاری

در بافتار اگر اعضای فشاری مدول‌های مجاور با یکدیگر اتصال نداشته باشند، به‌عبارتی هیچ عضو فشاری با عضو فشاری دیگر در تماس نباشد، بافتار تشکیل شده ناپیوسته عضو فشاری است. اگر اعضای فشاری دو مدول مجاور با یکدیگر در تماس باشند، بافتار تشکیل شده پیوسته عضو فشاری است. برای مطالعات بیشتر می توان به منابع [۹] [۳۸] رجوع کرد.

۳-۳-۴-۳ بافتارهای صلب و انعطاف پذیرهندسی

باتوجه به تعداد کابل‌های موجود در هر یک از مدول‌ها، می‌توان مدول صلب و یا انعطاف‌پذیر ایجادکرد، در پی آن با توجه به نوع مدول کاربردی در بافتار که از نوع صلب و یا انعطاف‌پذیر باشد وروش اتصال مدول‌ها در بافتار، بافتار ایجادی می‌تواند صلب و یا انعطاف‌پذیر باشد. برای مطالعات بیشتر می توان به منابع [۹] [۳۸] رجوع کرد.

۳-۴ اصول و مبانی تحلیل سیستم‌های تنسگریتی

۳-۴-۱ روند کلی تحلیل سازه‌های تنسگریتی

سازه‌های تنسگریتی سیستم‌های دارای شبکه سه‌بعدی در یک حالت خودمتعادل می‌باشند [۳۰]. لذا در تحلیل سازه‌های تنسگریتی یک مرحله ابتدایی اضافی، جهت یافتن این بافتار یا ترکیب متعادل وجود خواهد داشت که به‌عنوان مرحله فرم‌یابی شناخته می شود. فرم‌یابی درحقیقت مرحله کلیدی در طراحی سازه‌های تنسگریتی است.

بطور خلاصه تحلیل کامل سیستم‌های تنسگریتی شامل مراحل زیر است:

- فرایند شکل‌یابی سازه بدون اعمال پیش‌تنیدگی و بارگذاری خارجی
- اعمال پیش‌تنیدگی به سیستم برای ایجاد سختی مطلوب
- مطالعه رفتار سازه تحت بارگذاری خارجی

در فرایند طراحی و تحلیل باید موارد فوق به ترتیب ذکر شده، انجام شوند.در این پایان نامه مطالعه رفتار سازه تحت بارگذاری خارجی مد نظر است.

۳-۴-۲ فرضیات تحلیل

به طور کلاسیک محاسبات سیستم‌های فضاکار شامل شبکه‌های سه‌بعدی، بر اساس دو فرضیه تغییر شکل‌های کوچک و تغییر مکان‌های کوچک استوار است. این فرضیات به مدلسازی خطی رفتار این سازه‌ها منجر خواهد شد. برای بعضی حالت‌ها باتوجه به خصوصیات مکانیکی اعضا، سطح عمل‌های خارجی و خصوصیات سازه‌ای، بایستی فرضیات دیگری برای بررسی رفتار مصالح

(الاستیسیته غیرخطی[۱]، الاستوپلاستیسیته[۲]) و شدت تغییرمکان‌ها و تغییرشکل‌ها در نظر گرفت. محاسبات مرتبط با این حالت تحت عنوان غیرخطی نامیده می‌شوند که به آنالیز غیرخطی هندسی و مصالح[۳] تقسیم‌بندی می‌شوند.

سازه‌های تنسگریتی به دلایل زیر دارای رفتار غیرخطی می باشند :

- سختی کل سازه [k] برخلاف تحلیل خطی که ثابت فرض می‌شد، به‌صورت تابعی از تغییر شکلها {u} می شود.
- جابجایی در این سیستم‌ها می‌تواند بزرگ باشد حتی اگر تغییر شکل‌ها کوچک باشد [۳۰].
- به علت وجود کابل به عنوان اعضای کششی امکان شل و سفت شدن کابل در شرایط بارگذاری وجود خواهد داشت.
- باتوجه به آزمایشات انجام شده رفتار مشخصه عناصر کششی در سیستم‌های تنسگریتی به صورت غیرخطی می‌باشد، همچنین روابط تنش-کرنش محوری برای عناصر فشاری نیز غیرخطی می‌باشد. این مسئله الزام به درنظر گرفتن غیرخطی مصالح (که منجر به تغییر در سختی سازه می‌شود) را در پروسه تحلیل سازه‌ای به وجود می‌آورد.

با توجه به مطالب اشاره شده، انتخاب نوع تحلیل غیرخطی هندسی و مصالح برای این نوع سازه‌ها اجتناب‌ناپذیر است. لذا برای تعیین مسیر تعادل این سازه‌ها از روش‌های تحلیل غیرخطی استفاده می‌شود. رفتار تنش-کرنشی که به‌عنوان رفتار اعضای فشاری وکششی به نرم‌افزار داده می‌شود به شکل غیر خطی می‌باشد. دو نمونه از روش‌های غیرخطی در پیوست (ب) قید شده است.

[۱] Non-linear elasticity
[۲] Elastoplasticity
[۳] Geometric and material nonlinear analysis

۳-۵ مکانیزم رفتار سیستم‌های تنسگریتی

در سازه‌های فضاکار با اتصالات مفصلی، که سازه‌های تنسگریتی نیز جزو آنها می‌باشند، رفتار انفرادی اعضا اثر تعیین کننده در رفتار سازه دارد. نقش رفتار اعضای فشاری در رفتار کلی سازه بدین صورت است که کمانش عضوی در رفتار سازه موجب عمل ضربه‌ای[۱] بر قسمت‌های مجاور عضو می-گردد درنتیجه در اعضای سازه‌ای بازتوزیع[۲] نیرو رخ می‌دهد. این بازتوزیع به نوبه‌ی خود ممکن است موجب شود که اعضای نزدیک به اعضای خراب شده، رفتار غیر خطی را به نمایش بگذارند و به دلیل اینکه اعضای کششی در سازه‌های کش‌بستی برعکس دیگر سازه‌های فضاکار با اتصالات مفصلی، دارای مشخصه سخت‌شدگی کرنشی نمی‌باشند، در اعضای کششی، گسیختگی و در اعضای فشاری، کمانش ایجاد گردد. بنابراین اگر اعضای کششی و فشاری نتوانند کاهش بار اعضای خراب شده را تحمل نمایند، به نوبه‌ی خود یا گسیخته شده یا کمانش می‌کند و موجب بازتوزیع اضافی نیرو میگردند. اگر کاهش بار در اعضای فشاری به گونه‌ای ناگهانی و شکننده باشد که سایر اعضا نتوانند بارهای بازتوزیع شده را سریعا جذب نمایند، این بازتوزیع موجب خواهد شد که سایر اعضا خراب شوند و بازتوزیع‌های دیگر ایجاد شوند. درنتیجه خرابی می‌تواند در سازه پیشرفت کند و موجب خرابی کلی[۳] سازه شود [۴۰]. همچنین در این سازه‌ها، اعضای کششی به دلیل تغییر حالت (حالات شل و سفت) نوعی رفتار غیرخطی را به نمایش می‌گذارند که به بارگذاری بستگی دارد[۳۸] .

در سیستم‌های تنسگریتی ، اعضای سازه اساسا تحت نیروهای محوری قرار گرفته و امکان خرابی عضو در اثر تسلیم در کشش و یا کمانش در فشار وجود دارد. درصورت خرابی عضوی از سازه، رفتار عضو مزبور از مشخصه‌های پس بحرانی آن تبعیت خواهد کرد. بنابراین درصورتی که رفتار اعضای کششی و فشاری پس از رسیدن به بار بحرانی مشخص شود، می‌توان سازه‌ای را که عضو یا اعضایی از آن خراب شده است، مورد تحلیل قرار داده و انجام تحلیل را تا مرحله‌ی خرابی کلی سازه

---

[۱] Impulsive action
[۲] Re-distribution
[۳] Overall collapse

ادامه داد.درنتیجه می توان حداکثر باری را که سازه پیش از خرابی کلی می تواند تحمل نماید، تعیین کرد.

در این تحقیق نیز با توجه به اینکه با دو دسته اعضای منحصرا کششی و منحصرا فشاری روبرو می‌باشیم، لذا دانستن رفتار هرکدام از این اعضا الزامی می‌باشد. از این‌رو اولین گام در بررسی رفتار سازه‌های فضاکار تنسگریتی ، بدست آوردن رفتار اعضای کششی و فشاری سازه‌های تنسگریتی می‌باشد. لذا در ادامه رفتار بار- تغییر مکان اعضای کششی و فشاری آورده شده است و از آن برای تعیین مدل ایده‌آل رفتار تنش محوری- کرنش محوری اعضا کششی و فشاری در تحلیل‌ها استفاده می‌شود

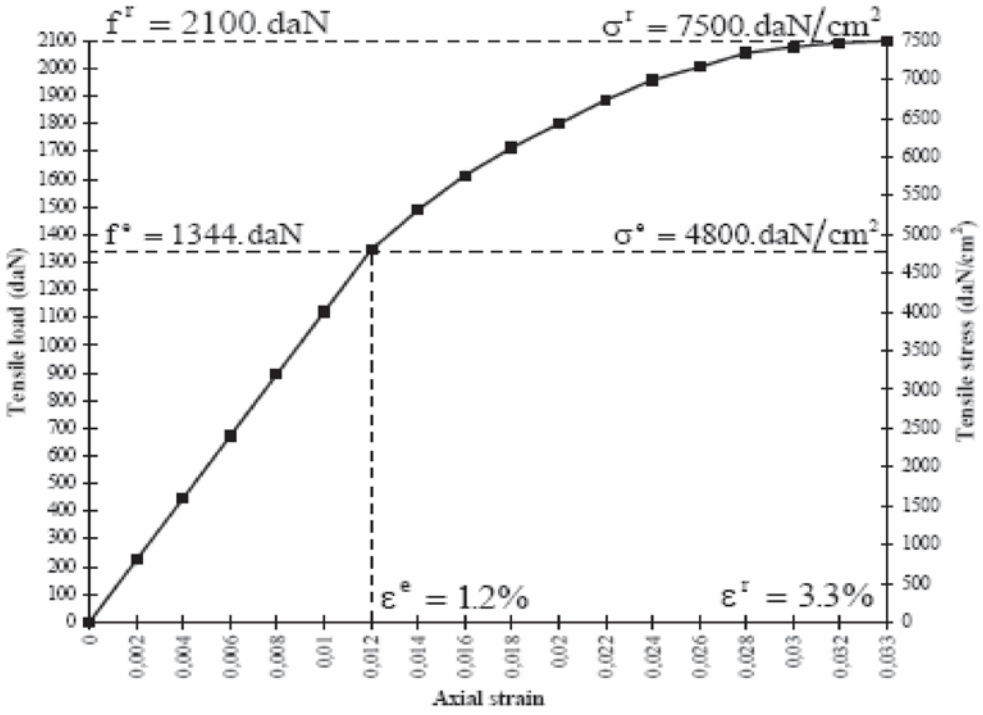
۳-۵-۱ رفتار تنش محوری- کرنش محوری اعضای کششی

برای اعضای کششی مورد استفاده در سازه‌های تنسگریتی از کابل استفاده می شود. برای این منظور باید رفتار کابل به‌عنوان عضو منحصرا کششی که از به‌هم پیوستن مجموعه‌ای از رشته‌های نازک ایجاد می‌شود، مشخص شود. بهترین راه برای تعیین رفتار کابل استفاده از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. چرا که باتوجه به ماهیت رشته‌ای بودن کابل، تعیین رفتار کابل با استفاده از روش‌های دیگر بسیار مشکل می‌باشد. رفتاری که برای کابل‌ها در این تحقیق استفاده شده است، از آزمایشی که کبیش[۱] و بن کالا[۲] بر روی کابل انجام داده اند، انتخاب شده است. شکل(۳-۲۳) [۳] .

در شکل(۳-۲۳ تا نقطه تسلیم، رابطه تنش محوری- کرنش محوری به صورت خطی و پس از آن به صورت غیر خطی غیر ارتجاعی می‌باشد. همچنان‌که در شکل ملاحظه می‌شود، عناصر کششی دارای کرنش تسلیم $\varepsilon^e = ۱.۲٪$ ، کرنش گسیختگی $\varepsilon^r = ۳.۳٪$ ،تنش تسلیم $\sigma^e = ۴۸۰۰۰ N/cm^۲$

[۱] Kebiche
[۲] Benkahla

و نیروی تسلیم $f^e = ۱۳٤٤۰N$ ،مقاومت گسیختگی $\sigma^r = ۷۵۰۰۰ N/cm^۲$ و نیروی گسیختگی $f^r = ۲۱۰۰۰N$ می‌باشند [۳].



شکل ۳-۲۳: رفتار تنش-کرنش اعضای کششی

۳-۵-۲ رفتار تنش محوری- کرنش محوری اعضای فشاری

دراغلب روش‌های تحلیل ایستایی خرابی[۱] مورداستفاده در ارزیابی رفتارسازه‌های فضاکار که دارای گره‌های مفصلی می‌باشند، با درنظر گرفتن کمانش عضوی بنا به لاغری مدنظر، مقداری ناکاملی اولیه به صورت انحنای اولیه در عضو ایجاد کرده (ماکسیمم انحنا در وسط عضو)، و با درنظر گرفتن رفتار الاستوپلاستیک، یک تحلیل غیرخطی هندسی و مصالح بر روی آن انجام می‌شود و سپس منحنی بار- تغییر مکان به صورت رابطه‌ی ایده‌آل تنش محوری- کرنش محوری تبدیل گشته، متعاقبا

[۱] Static collapse analysis

برای مدل کردن رفتارمصالح عضو مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل(۳-۲۳). بنابراین نمایش رفتار عضو نقش اساسی در تحلیل خرابی سازه‌های فضاکار دارد.

پاسخ های تنش محوری- کرنش محوری برای اعضای فشاری برای دامنه‌های مختلف لاغری و ناکاملی اعضای فشاری در پیوست (ج) آورده شده است. سطح مقطع و طول اعضای فشاری به ازای لاغری‌های مختلف ثابت درنظر گرفته شده است و برای تغییر لاغری اعضای فشاری ممان اینرسی این اعضا مختلف درنظر گرفته شده است. تنش تسلیم مصالح فشاری ۲۳۵Mpa و مقدار مدول الاستیسیته ۲ E۵Mpa انتخاب شده است.

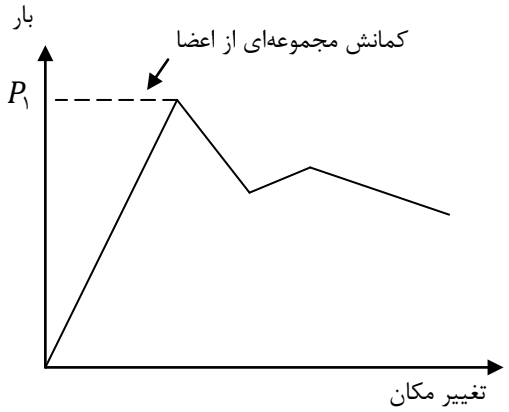
۳-۶ مکانیزم‌های خرابی سیستم‌های تنسگریتی

مکانیزم خرابی سازه‌های فضاکار که انتظار می‌رود در سازه‌های تنسگریتی نیز این مکانیزم‌ها اتفاق بیفتند، با درنظرگرفتن پدیده‌ی کمانش عضوی به صورت زیر می‌باشند:

۳-۶-۱ خرابی کلی سازه

در این حالت همانگونه که در شکل(۳-۲۴) نشان داده شده است، مشخصه فروریزی بار[۱] اعضای فشاری ناگهانی بوده و به هنگام فرایند بازتوزیع، سایر اعضا نمی‌توانند بار کاهش یافته در نخستین عضو (یا در نخستین مجموعه‌ی اعضا) خراب شده را تحمل نمایند و در خودشان نیز خرابی رخ می‌دهد. درنتیجه، کمانش یک عضو فشاری (یا یک مجموعه‌ی اعضا) که دارای تنش‌های بالایی می‌باشند منجر به خرابی کل سازه می‌شود، یا به‌عبارت‌دیگر یک مکانیزم خرابی کلی تشکیل می‌گردد [۴۰].

[۱] Load shedding



شکل ۳-۲۴: مکانیزم خرابی کل سازه [۴۲]

۳-۶-۲ خرابی موضعی[۱] سازه با یک فروجهش[۲] دینامیکی

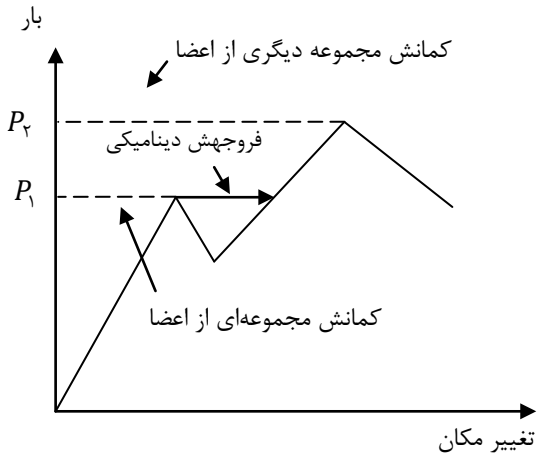
انحراف قابل توجهی که در هندسه سازه در یک ناحیه محلی، فروجهش نامیده می‌شود. در این حالت همان‌گونه که درشکل(۳-۲۵) نشان داده شده است، مشخصه‌ی فروریزی بار اعضای فشاری به گونه‌ای ناگهانی است که در فرایند بازتوزیع، سایر اعضا نمی‌توانند بارهای باز توزیع شده را با سرعت کافی جذب نمایند و ناپایداری در سازه رخ می‌دهد. تحت بارگذاری کنترل شده، تغییر شکل سازه افزایش یافته ولی بار وارده کاهش می‌یابد. ناپایداری ادامه پیدا می‌کند تا اینکه نخستین عضو کمانش یافته (یا نخستین مجموعه‌ی اعضای فشاری) به کمترین مقاومت پس‌کمانشی خود می‌رسند. در این حال، تعادل سازه مجددا پایدار می‌شود و سایر اعضا می‌توانند بار اضافی را تحمل نمایند تا اینکه به ظرفیت بحرانی خود برسند.

به‌عبارت‌دیگر هنگام کمانش نخستین عضو (یا مجموعه ی اعضا) به ازای کوچک‌ترین افزایش در بارگذاری هیچ‌گونه حالت تعادلی در همسایگی وجود ندارد. در این نقطه است که سازه مجبور خواهد شد که حالت تعادل پایدار جدیدی را که ممکن است در این تراز بار موجود باشد، جستجو

[۱] Local collapse
[۲] Snap-through

نماید. حرکت به سمت حالت تعادل با تغییرات بزرگی در شکل همراه بوده و سازه شامل یک فروجهش دینامیکی گرهی خواهد بود. درنتیجه سازه یک پرش دینامیکی را تجربه خواهد کرد.

هنگام رسیدن عضو به بار بحرانی[۱] خود که ناپایدار است، حفظ تعادل امکان‌پذیر نیست و درنتیجه تغییر مکان عضو ادامه پیدا کرده و یک فروجهش عضوی اتفاق خواهد افتاد تا اینکه تعادل حفظ شود. بنابراین هنگامی که خرابی محلی با یک فروجهش رخ می‌دهد سازه یک پدیده‌ی دینامیکی ترکیبی را تجربه خواهد کرد. به‌عبارت‌دیگر، فروجهش گرهی دینامیکی در گره‌های اعضا و نیز فروجهش عضوی در اعضای کمانش یافته رخ خواهد داد[۴۰] .



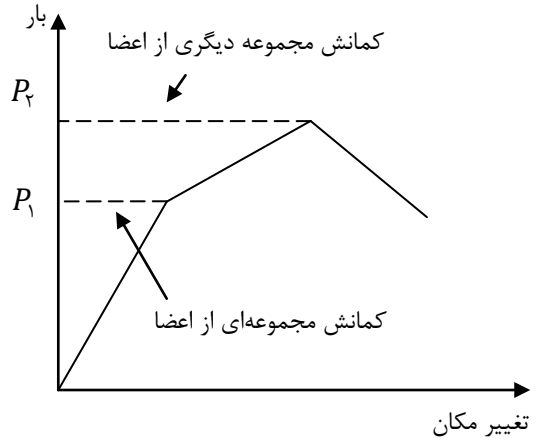
شکل ۳-۲۵: مکانیزم خرابی موضعی با یک فروجهش دینامیکی[۴۲]

۳-۶-۳ خرابی موضعی بدون فروجهش

در این حالت، همان‌گونه که در شکل(۳-۲۶) نشان داده شده است، مشخصه‌ی فروریزی اعضای فشاری، ناگهانی نیست و به هنگام فرایند بازتوزیع، سایر اعضا می توانند بارهای بازتوزیع شده

[۱] Critical load

را تحمل و جذب نمایند و لذا حالت تعادل سازه پایدار می‌باشد. سازه می‌تواند بار اضافی دیگری را تحمل نماید تا اینکه سایر اعضا کمانش کنند و درنتیجه خرابی کلی سازه حاصل گردد[۴۰] .

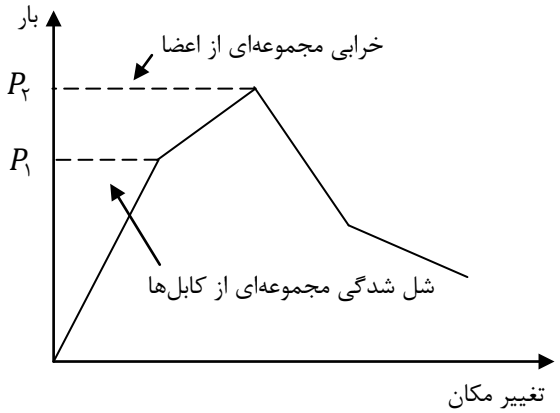


شکل ۳-۲۶: مکانیزم خرابی موضعی بدون فروجهش [۴۲]

علاوه بر مکانیزم‌های خرابی اشاره شده‌ی فوق، سازه‌های فضاکار تنسگریتی دارای دو نوع مکانیزم خرابی دیگر می‌باشند. این دو نوع مکانیزم خرابی به ماهیت وجود کابل به عنوان عضو منحصرا کششی برمی‌گردد که به شرح زیر می باشد:

۳-۶-۴ مکانیزم خرابی شل شدگی کابل ها

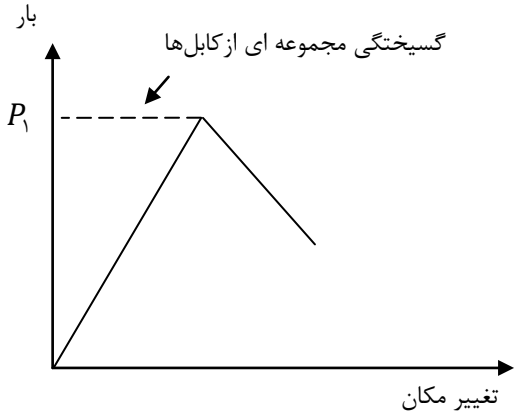
این نوع خرابی مختص سازه های تنسگریتی می باشد. در این نوع خرابی همچنان‌که در شکل(۳-۲۷) دیده می‌شود، سختی بافتار با افزایش بار کاهش می‌یابد. به‌عبارتی کاهش ملایم در شیب منحنی بار- جابجایی سازه دیده می‌شود.



شکل ۳-۲۷: مکانیزم خرابی ناشی از شل شدگی کابل‌ها

۳-۶-۵ مکانیزم خرابی کلی ناشی از گسیختگی کابل‌ها

همانگونه که در شکل(۳-۲۸) نشان داده شده است، در این نوع مکانیزم خرابی با گسیختگی اولین مجموعه‌ی کابل‌ها، بافتار دچار خرابی کلی می‌شود. در حالت مکانیزم خرابی کلی ناشی از گسیختگی کابل‌ها، رفتار اعضای کششی به گونه‌ای ناگهانی است که در فرایند بازتوزیع، سایر اعضا نمی‌توانند بارهای بازتوزیع شده را باسرعت کافی جذب نمایند و ناپایداری کلی در سازه رخ می‌دهد.



۳شکل ۳-۲۸: مکانیزم خرابی ناشی از گسیختگی کابل‌ها

فصل چهارم

روش تحقیق

۴- روش تحقیق

۴-۱ روش‌های تحلیل مسائل عمومی

به‌طور کلی برای تحلیل مسائل مختلف علمی، روش‌های گوناگونی موجود می‌باشد. انتخاب هر کدام از این روش‌ها، به عوامل مختلفی بستگی دارد. از جمله‌ی این عوامل می‌توان به نوع مسئله، سادگی و پیچیدگی مسئله، امکانات موجود و... اشاره کرد. روش‌های رایج تحلیل مسائل عمومی را می‌توان در سه دسته طبقه‌بندی نمود. این سه روش عبارتند از:

- روش‌های تحلیلی[۱]
- روش‌های عددی[۲]
- روش‌های تجربی و آزمایشگاهی[۳]

[۱] Analytical method
[۲] Numerical method
[۳] Experimental method

بهترین روش برای تعیین رفتار سازه‌ها مطالعات تجربی و آزمایشگاهی می‌باشد. چراکه در آزمایشگاه تمامی مراحل کار به واقعیات نزدیک می‌باشد. به‌عنوان مثال برای تعیین رفتار یک ستون بهترین روش، بررسی آزمایشگاهی آن می‌باشد. چراکه ستونی که در آزمایشگاه ساخته می‌شود، از بسیاری جهات همانند ستون واقعی است و رفتاری که از خود نشان خواهد داد، مشابه ستون واقعی خواهد بود. ولی باید به این نکته توجه داشت که انجام عملیات آزمایشگاهی، نیاز به امکانات متناسب با آزمایش مورد نیاز دارد. درمورد سازه‌های فضاکار تنسگریتی نیز باتوجه به ویژگی‌های خاص این سازه ها (پر هزینه بودن، کمبود امکانات آزمایشگاهی، محدودیت زمانی و...)، نمی‌توان از روش‌های تجربی و آزمایشگاهی استفاده کرد.

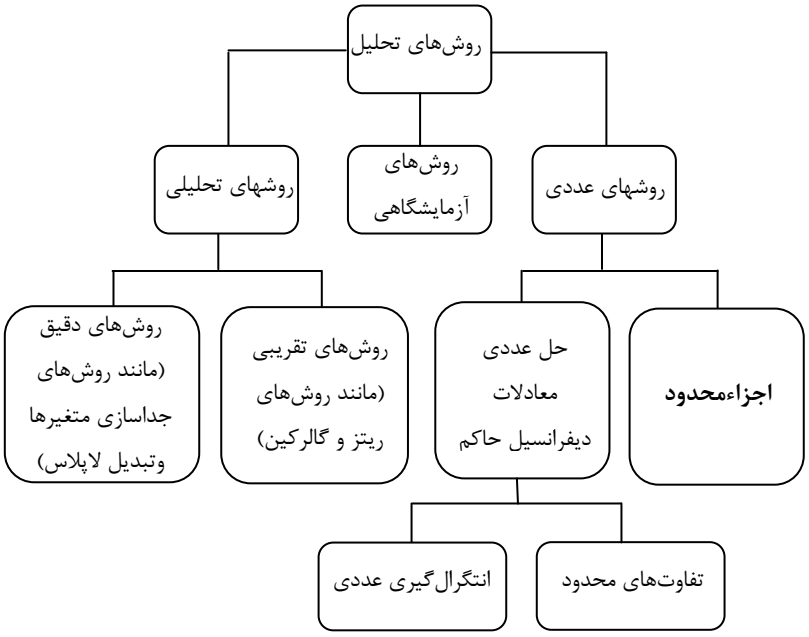
استفاده از روش های تحلیلی برای مسائل ساده بهترین گزینه می‌تواند باشد. چراکه با امکانات اندک، می‌توان دقیق‌ترین نتایج را بدست آورد. از جمله‌ی این روش‌ها می توان به روش‌های جداسازی متغیرها، تبدیل به لاپلاس و روش‌های ریتز و گالرکین اشاره کرد. در عمل مسائل مهندسی بسیاری وجود دارد که با استفاده از روش‌های تحلیلی نمی توان جواب دقیقی برای آنها یافت. شاید بتوان دلیل این امر را در طبیعت پیچیده معادلات دیفرانسیل یا مشکلات ناشی از اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه دانست. سازه‌های فضاکار تنسگریتی نیز از این قاعده مستثنا نمی‌باشند و لذا در مواجهه با چنین مسائلی از روش‌های عددی استفاده می‌کنیم.

از نمونه‌ی روش‌های حل عددی می‌توان به روش‌های تفاضلات محدود و عناصر محدود اشاره کرد. به عنوان مثال در صورت استفاده از روش تفاضلات محدود برای تعیین رفتار عضو فشاری، تعداد محدودی نقطه در روی عضو مشخص می‌گردد. یک شکل تغییر مکان آزمایشی برای عضو فشاری فرض می‌شود. وضعیت تنش در هر نقطه، می‌تواند به صورت الاستیک، الاستوپلاستیک یا پلاستیک کامل باشد. نیروی محوری و لنگرهای خمشی را می توان با استفاده از برایند تنش محاسبه کرد. لذا می‌توان معادلات دیفرانسیلی تعادل را برای هر نقطه نوشت. حل همزمان این معادلات منجر به تعیین مجموعه‌ای از تغییر مکان نقاط می‌شود. با این شکل جدید تغییرمکان، روند قبلی تکرار می‌شود و این

چرخه‌ی عملیات تا حصول همگرایی ادامه می‌یابد. اگر مجموعه‌ای از این‌گونه تحلیل‌ها با نمو دادن بار یا تغییر مکان انجام گیرد، میتوان به این ترتیب رفتار بار- تغییر مکان عضو را تعیین کرد.

در صورت استفاده از روش عناصر محدود، عضو فشاری با مجموعه‌ای از عناصر مستقل جایگزین می‌شود. سختی هر عنصر به کمک تابع تغییر شکل تقریبی که در طول عنصر تعریف می-شود، بدست می‌آید. شرایط تعادل، سازگاری و مشخصه‌های الاستوپلاستیک مصالح اعمال شده و با حل معادلات مربوطه، تغییر مکان‌های گرهی و نیروهای داخلی بدست می‌آید [۴۳].

به‌طورکلی روش‌های رایج تحلیل مسایل عمومی را می‌توان به‌صورتی‌که در شکل(۴-۱) نمایش داده شده است، طبقه‌بندی نمود:



شکل ۴-۱: روش های تحلیل مسائل عمومی [۴۴]

باید توجه داشت که بررسی آزمایشگاهی رفتار چنین شبکه‌هایی با توجه به برخی عوامل از قبیل حجیم بودن سازه، تعداد زیاد المان‌ها، پرهزینه بودن طرح و نیاز به امکانات وسیع عملا امکان پذیر نمی‌باشد. لذا در این تحقیق از روش عناصر محدود استفاده شده است و سعی شده است که

مدلسازی به نحوی انجام پذیرد که به واقعیت نزدیک باشد و نیز برای نیل به این هدف نیز پس از مدلسازی سازه، تحقیقی برای بررسی صحت مدلسازی انجام گرفته شده است.

۴-۱-۱ روش عناصر محدود

روش اجزاء محدود یک روش عددی است که از آن می‌توان برای حل مسائل پیچیده مهندسی شامل تجزیه و تحلیل تنش، انتقال حرارت، الکترومغناطیس و جریان سیال و غیره استفاده نمود. هدف اصلی روش اجزا محدود، یافتن حل یک مسئله پیچیده از طریق جایگزینی یک مدل ساده‌تر می‌باشد که منجر به حل تقریبی آن خواهد شد.

کورنت [۱] به سال ۱۹۴۳، اولین کسی بود که روش اجزاء محدود را توسعه بخشید. او از این مسئله برای تحلیل مسائل تنش از روش میان‌یابی توسط چند جمله‌ای‌های تکه‌ای بر روی نواحی مثلثی شکل استفاده نمود. گام مهم بعدی در استفاده از روش‌های اجزای محدود توسط شرکت بوئینگ در سال ۱۹۵۰ برداشته شد. پس از آن ظرف یک دهه، قابلیت بالقوه این روش برای حل انواع مختلف مسائل مربوط به علوم کاربردی و مهندسی شناخته گردید. طی چند سال با توسعه کامپیوتر-های پیشرفته با حافظه‌های بزرگ و سرعت بالا، روش اجزای محدود چنان خود را جلوه‌گر ساخت که امروزه به عنوان یکی از بهترین و پربازده‌ترین روش‌های حل طیف وسیعی از مسائل عملی قلمداد می-گردد. [۴۴]

در حقیقت این روش به یکی از زمینه‌های فعال تحقیقاتی و ریاضیات کاربردی بدل گشته است. یکی از دلایل عمده ترویج این روش در زمینه‌های مختلف مهندسی است که پس از نوشتن یک برنامه کامپیوتری عمومی، می‌توان از این مسئله برای حل هر مسئله تنها با تغییر داده‌های ورودی استفاده نمود. این رو اساس تحلیل اکثر نرم‌افزارهای کامپیوتری در زمینه‌ها مختلف از قبیل مکانیک سازه‌ها، مکانیک سیالات و انتقال حرارت می‌باشد[۴۴] .

[۱] Courant

قابلیت این روش، تحلیل خطی و غیر خطی سیستم‌های استاتیکی و دینامیکی پیوسته و مجزا را دربرمی‌گیرد. کاربرد عمومی این روش ریاضیدانان را بر استفاده از این تکنیک برای حل مسائل پیچیده مقادیر مرزی و مسائل دیگر برانگیخته است. قابلیت بکارگیری عمومی روش اجزا محدود را می‌توان با ملاحظه تشابهات نیرومندی که بین انواع مختلف مسائل مهندسی وجود دارد مشاهده نمود. بطور کلی توسعه این روش را می توان در زمینه‌هایی مانند پاسخ دینامیکی و ارتعاشی، شکست، مواد مرکب لایه‌ای، انتشار موج، دینامیک سازه‌های فضایی و هواپیما، پاسخ دینامیکی تصادفی و مواردی از این قبیل را نام برد[۴۴] .

در روش اجزا محدود مراحل اصلی مورد بحث عبارتند از[۴۴] :

- گسسته سازی حوزه یا ناحیه حل
- انتخاب یک مدل درون‌یابی برای بیان تغییرات متغیر میدان
- بدست آوردن ماتریس و بردارهای مشخصه المان
- جمع بردارها و ماتریس المان برای بدست آوردن معادلات کلی یا معادلات سیستم
- حل معادلات سیستم برای بدست آوردن مقادیر متغیر میدان گره‌ها
- محاسبه متغیر میدان در داخل المان‌ها

در روش اجزا محدود ابتدا سازه به یک یا چند سری از این المان‌ها دارای الگوی هندسی و فرضیات فیزیکی مشابهی می باشد. این المان‌ها را المان محدود می‌نامند. این المان‌ها شکل سازه را مشخص می‌کنند و توسط نقاط گرهی به المان‌های مجاور مرتبط می‌شوند. نیروهای گرهی بر گره‌ها اعمال شده و تغییر مکان‌ها (درجات آزادی) نیز در گره‌ها درنظر گرفته می‌شوند. به طور کلی سایر کمیت‌های فیزیکی در انواع مسائل مانند مسائل حرارتی، سیالاتی، الکتریکی و... بر گره‌ها اعمال می-شوند. برای هر المان می‌توان یک سری معادلات در نظر گرفت که کمیت‌های فیزیکی را به یکدیگر مربوط می‌سازد. از سرهم‌بندی معادلات همه این المان‌ها، معادلات مربوط به کل سازه بدست می‌آید

که این معادلات به صورت یک دستگاه معادلات چند مجهولی می‌باشد و به‌خوبی با کامپیوتر قابل حل هستند.

با اعمال شرایط مرزی و بارگذاری (برای مسائل سازه‌ای) می‌توان این دستگاه معادلات را به راحتی حل و مجهولات را تعیین نمود و با جاگذاری این مقادیر در معادلات مربوط به المان‌ها، توزیع تنش و تغییر مکان را برای تمام جسم تعیین نمود.

۲-۴ مدلسازی هندسی سیستم

برای مدلسازی هندسی شبکه‌های فضاکار با توجه به پیچیدگی هندسه این سازه‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد که باتوجه به امکانات نرم‌افزار مورد استفاده، انتخاب می‌شود. معمول‌ترین روش، استفاده از روش تاشه‌پردازی فرمکسی می‌باشد که یک روش جبر ریاضی است که با استفاده از زبان برنامه نویسی فرمین[۱] شبکه مورد نیاز را ترسیم می‌نماید [۴۵] [۳۸].

سازه‌های فضاکار به دلیل اینکه دارای المان‌های متعدد با هندسه پیچیده در فضای سه‌بعدی می‌باشند، لذا ایجاد هندسه این شبکه‌ها در غالب نرم‌افزارهای عناصر محدود مشکل و پیچیده می‌باشد. سازه‌های فضاکار تنسگریتی نیز از این قاعده مستثنی نمی‌باشند. یک راه مدل هندسی سه‌بعدی این بافتار در نرم‌افزار اتوکد می باشد. با توجه مدولار بودن و متقارن بودن بافتار مورد تحقیق، جهت کم کردن خطاهای ناشی ار انتقال توسط نرم‌افزارهای واسطه به نرم‌افزار اجزاء محدود، از مختصات گرهی بافتار جهت مدلسازی هندسه بافتار در نرم‌افزار اجزا محدود استفاده شده است.

[۱] Formian

۴-۳ مدلسازی اجزاء محدود

۴-۳-۱ نرم افزار مورد استفاده در تحلیل

گسترش روش‌های عناصر محدود برای حل مسائل عملی مهندسی با ورود کامپیوتر آغاز گشت. در سال‌های اخیر نرم افزارهای تحلیلی اجزای محدود همچون: آباکوس[۱]، انسیس[۲]، نسترن[۳] و... که اکثرا قابلیت تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی و غیره را با تعداد گره‌های نا محدود دارند، توسط گروه کثیری از محققین به خدمت گرفته می‌شوند. در میان این نرم افزارها، نرم افزار آباکوس به دلیل امکان دسترسی بهتر و مقبولیت و عمومیت بالاتر نسبت به بقیه، در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است.

۴-۳-۲ المان‌های مورد استفاده در مدلسازی

برای اطمینان از صحت نتایج تحلیل‌ها، انتخاب المان‌هایی که رفتار واقعی سازه‌های تنسگریتی را ارائه دهند، امری ضروری می‌باشد. باتوجه به تعریف سازه‌های تنسگریتی ، در این نوع سازه‌ها ما با دو نوع المان متمایز روبرو هستیم. دسته‌ی اول مجموعه‌ی اعضای کششی است که منحصرا دارای رفتار کششی می‌باشند و دسته دیگر مجموعه‌ی اعضای فشاری می‌باشند که منحصرا دارای رفتار فشاری می‌باشند. از مهم‌ترین مسائل در سازه‌های تنسگریتی ، سختی یک‌طرفه آن‌هاست، یعنی کابل‌ها فقط در کشش و میله‌ها فقط در فشار سختی دارند. از طرف دیگر آزمایش‌ها نشان داده-اند که رفتار اعضای کابلی غیرخطی می‌باشد. بنابراین در مدلسازی اجزاء محدود، باید از عنصری برای مدل کردن اجزای فشاری و کششی استفاده نمود که اولا بتوان به آن (سختی یک‌طرفه) اعمال نمود، ثانیا بتوان برای آن رفتار غیر خطی هندسی و مصالح تعریف نمود.

---

[۱] Abaqus
[۲] Ansys
[۳] Nastran

۴-۳-۳ مدلسازی رفتار تنش محوری- کرنش محوری اعضای کششی و فشاری

برای اعضای کششی، رفتار تنش- کرنش مصالح با توجه به نتیجه آزمایش شکل(۳-۲۳) به نرم‌افزار عناصر محدود معرفی می‌شود. برای مدلسازی رفتار عضو فشاری در تحلیل غیرخطی، پاسخ بار محوری- تغییر مکان محوری عضو فشاری براساس ناکامی‌ها و لاغری‌های موردنظر، به منحنی تنش- کرنش تبدیل می‌شود و نتایج حاصل به عنوان رفتار مشخصه اعضای فشاری به صورت رفتار تنش- کرنش چند خطی به نرم‌افزار اجزاء محدود وارد می‌شود. در پیوست (ج) نمونه ای از این نمودارها آورده شده است.

۴-۴ ارزیابی صحت مدلسازی

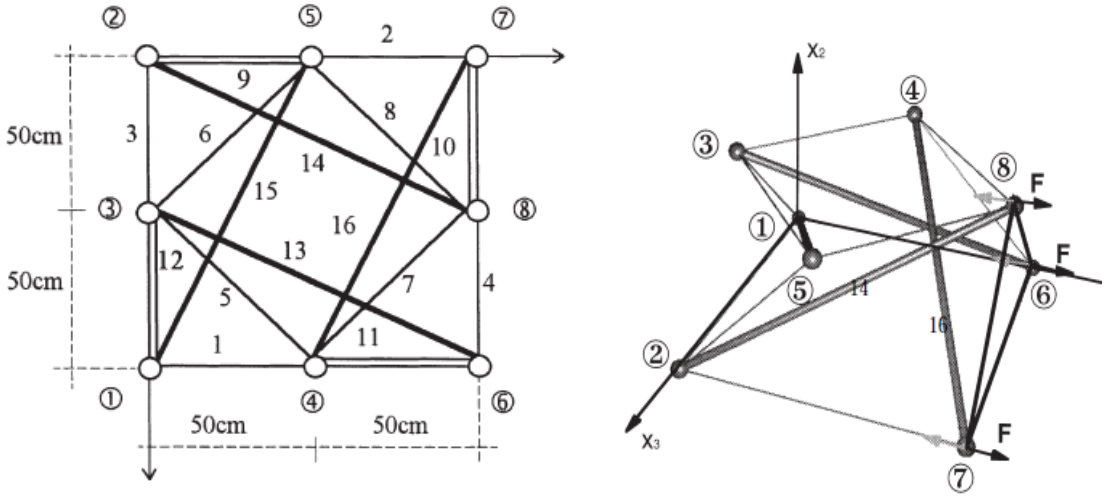
در این بخش، هدف بررسی صحت مدلسازی عناصر محدود سازه‌ی تنسگریتی می‌باشد. برای این منظور مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات قبلی انجام گرفته شده است. لذا از تحقیقی که قبلا که توسط کبیش و موترو روی یک مدول چهار عضو فشاری انجام گرفته است، به عنوان معیار دقت سنجی استفاده شده است. این روش بر اساس کارهای قبلی بس[۱] انجام گرفته است و کارهای او را طوری بسط داده اند که بر اساس آن ماتریس سختی مماسی و بردار تنش داخلی محاسبه می‌شود.

۴-۴-۱ بررسی تحلیل غیرخطی هندسی مدول چهارعضو فشاری

همان‌گونه که قبلا اشاره شد این تحقیق توسط موترو و همکارانش روی یک تک مدول انجام گرفته است و اثرات جابجایی ها و تغییر شکل‌های بزرگ درنظر گرفته شده است. مشخصات هندسی و مصالح اعضای این سیستم به صورت زیر است:

[۱] Bathe

سیستم تنسگریتی شامل چهار عضو فشاری، نشان داده شده در شکل(۴-۲)، دارای ۸ گره (چهار گره تحتانی:(۱)،(۲)،(۶)،(۷) و چهار گره فوقانی(۳)،(۴)،(۵)،(۸) و ۱۶ عنصر (۱۲ عنصر کششی و ۴ عنصر فشاری) می باشد. این سازه دارای سه نوع عنصر کششی: ۴ کابل افقی تحتانی (۴،۳،۲،۱)، ۴ کابل افقی فوقانی (۸،۷،۶،۵)، ۴ کابل مهاری (۱۲،۱۱،۱۰،۹) و ۴ عنصر فشاری (۱۶،۱۵،۱۴،۱۳) می‌باشد. عناصر کابلی دارای مدول الاستیسیته‌ی ٤×١٠E ٦ N/cm^2، سطح مقطع ۰.۲۸cm^2 و وزن واحد طول ۰،۰۲۰۵ N/cm می‌باشند. عناصر فشاری مورد استفاده مدول الاستیسیته‌ی ۲×۱۰ E x۷ N/cm^2، سطح مقطع ۳.۲۵cm^2، و وزن واحد طول ۰،۲۷۹ N/cm، تنش تسلیم ۲۳۵۰۰ N/cm^2 و ظرفیت فشاری ۳٦۳۰۰N می‌باشند.



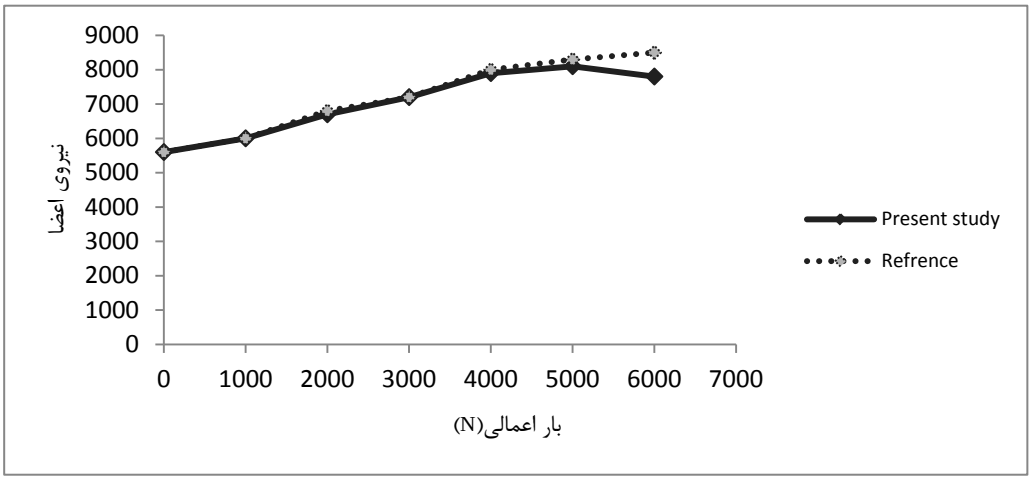
شکل ۴-۲: مدول تنسگریتی متشکل از چهار عضو فشاری

رفتار مصالح عناصر کششی، باتوجه به نتایج آزمایش که در شکل (۳-۲۳) به صورت رابطه تنش محوری-کرنش محوری نشان داده شده است، در مدلسازی درنظر گرفته شده است [۳۰].

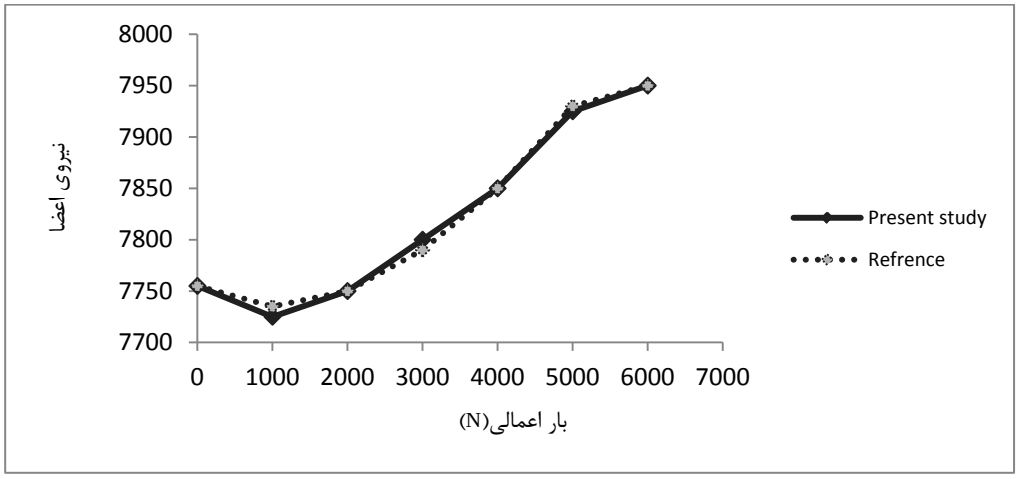
علیرغم مقید کردن سیستم تنسگریتی شامل چهار عضو فشاری در برابر حرکت صلب جسمی (گره ۱ در راستای X و Y و Z، گره ۲ در راستای X و Y ، گره ۳ در راستای X گیردار می شود)، این

سیستم به دلیل وجود کابل‌ها دارای مکانیزم‌های بینهایت کوچک می‌باشد (انعطاف پذیر هندسی). لذا برای حذف این مکانیزم‌ها، تحلیل پیش‌تنیدگی انجام می‌شود[۳۰] .

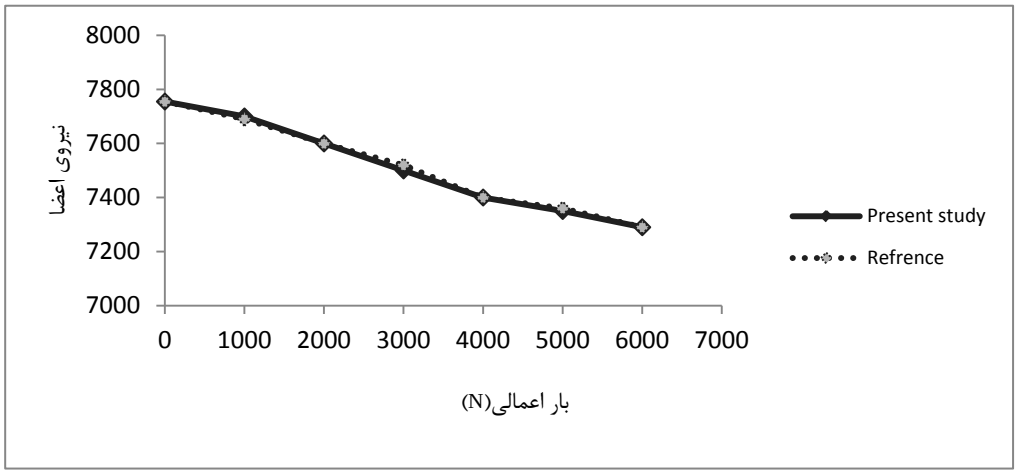
با اعمال پیش‌تنیدگی در عناصر کششی و تحلیل پیش‌تنیدگی یک سختی به سازه داده می شود و بدین ترتیب مکانیزم‌های بینهایت کوچک موجود در این سیستم حذف می‌شود. سپس با اعمال بارگذاری کششی به اندازه‌ی ٦٠٠٠N روی گره‌های ۶، ۷ و ۸ با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس یک تحلیل غیرخطی هندسی روی این مدول انجام شده و نتایج آن با نتایج بدست آمده از تحقیق موترو روی این مدول مقایسه می‌شود. این نتایج برای منتخبی از اعضا در شکل‌های (۴-۳) تا (۴-۶) ارائه شده است. نمودارهای مشخص شده با نام Present study نتایج حاصل از تحقیق حاضر می‌باشد و نمودارهای مشخص شده با نام Reference از نتایج تحقیقات موترو بدست آمده است که مشاهده می‌شود نتایج از دقت قابل قبولی برخوردار است. محور افقی در این نمودارها بارهای خارجی اعمالی بر این مدول می‌باشد که این بارها به صورت متمرکز بر گره‌های ۶، ۷ و ۸ وارد می‌شود.



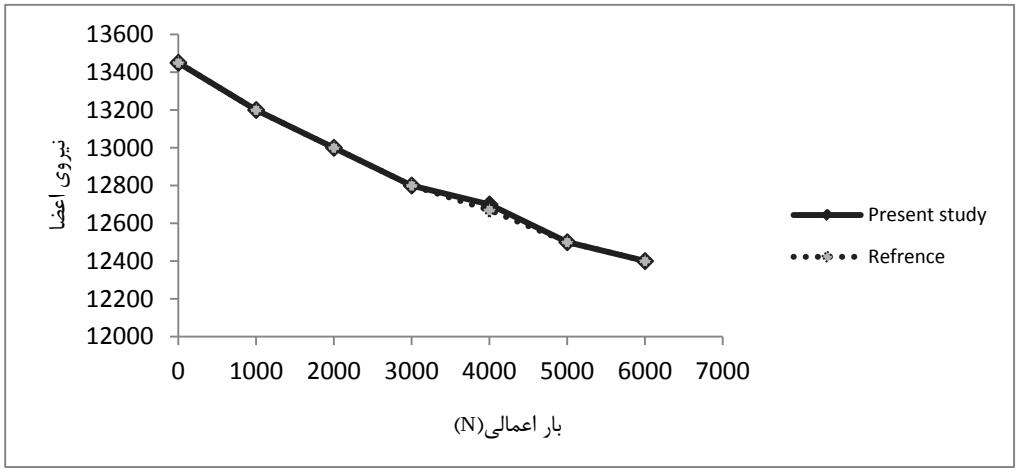
شکل ۴-۳: نمودار تغییرات نیروی عضو کششی - کابل افقی تحتانی ۱



شکل ٤-٤: نمودار تغییرات نیروی عضو کششی - کابل افقی فوقانی ۵



شکل ٤-٥: نمودار تغییرات نیروی عضو کششی - کابل مهاری ۹



شکل ٤-٦: نمودار تغییرات نیروی عضو فشاری ۱۴

فصل پنجم

نتایج و تفسیر آن

۵- نتایج وتفسیر آنها

۵-۱ ساختار مورد مطالعه

۵-۱-۱ انتخاب بافتار

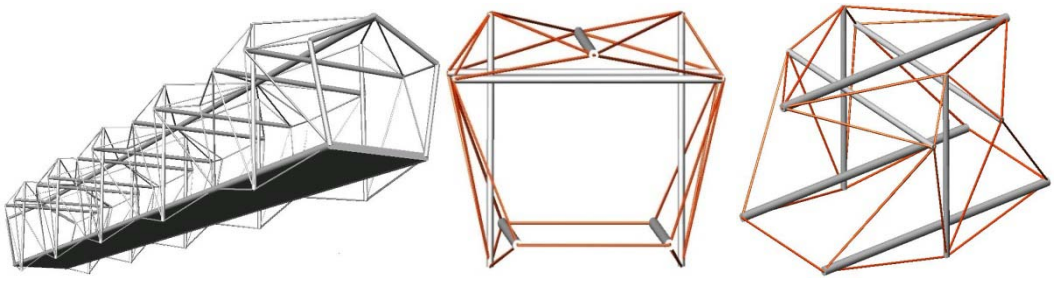
طراحی سازه‌ای یک سیستم تنسگریتی کارا برای کاربرد مهندسی عمران یک امر چالش انگیز است. طیف گسترده‌ای از مدول‌های مقدماتی تنسگریتی وجود دارد که می‌توانند برای توسعه سیستم های سازه‌ای به کار برده شوند.

اول از همه ضروری است که بگوئیم تاکنون هیچ سازه پلی که به‌طورکامل بر اساس اصول تنسگریتی ساخته شده باشد توسط نویسنده پیدا نشد. تنها یک مثال واقعی که تاحدودی از اصول تنسگریتی استفاده کرده پل عابرپیاده کولیپرا[۱] استرالیا می‌باشد که برروی رودخانه بریزبن[۲]، برای عبور عابر پیاده و دوچرخه ساخته شده است. شکل(۵-۱). طول این پل ۴۷۰ متر، عرض آن ۶٫۵ متر و بزرگترین دهانه آن ۱۲۰ متر می‌باشد.

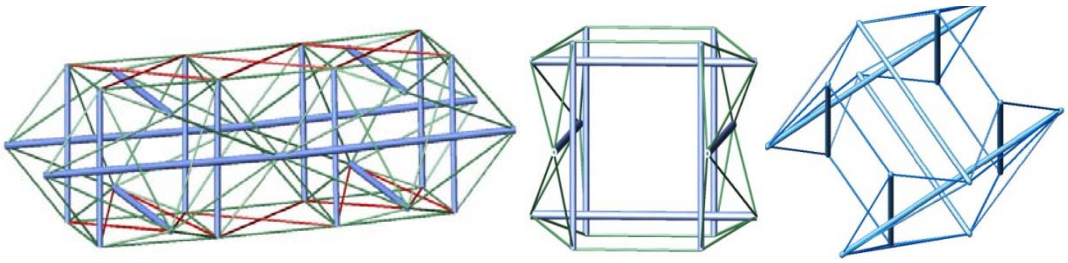
[۱] Kurilpa
[۲] Brisbane

شکل ۵-۱: پل عابرپیاده کولیپرا استرالیا[۷]

سازه‌های فضاکار تنسگریتی همانند سایر سازه‌های فضاکار معمول، دارای بافتارهای مختلفی می‌باشند. چگونگی اتصال اعضای کشش و فشاری در داخل مدول باعث ایجاد مدول‌های متنوعی می-شود. نحوه اتصال این مدول‌ها به یکدیگر نیز متنوع می‌باشد لذا بافتارهای مختلفی در سازه‌های تنسگریتی پدیدار می‌گردد. اولین نکته در انتخاب مدول تنسگرینی جهت اجرای پل عابرپیاده، مناسب بودن ابعاد اجزای سازه‌ای جهت اجرای ملاحظات معماری با توجه به آیین نامه‌ها جهت فراهم کردن فضای مورد نیاز می‌باشد. در شکل(۵-۲) و شکل(۵-۳) نمونه‌های از مدول‌های چندوجهی مناسب در کاربری پل عابر پیاده نشان داده شده است.



شکل ۵-۲: مدول تنسگریتی مناسب جهت کاربری پل عابر پیاده[۴۶]

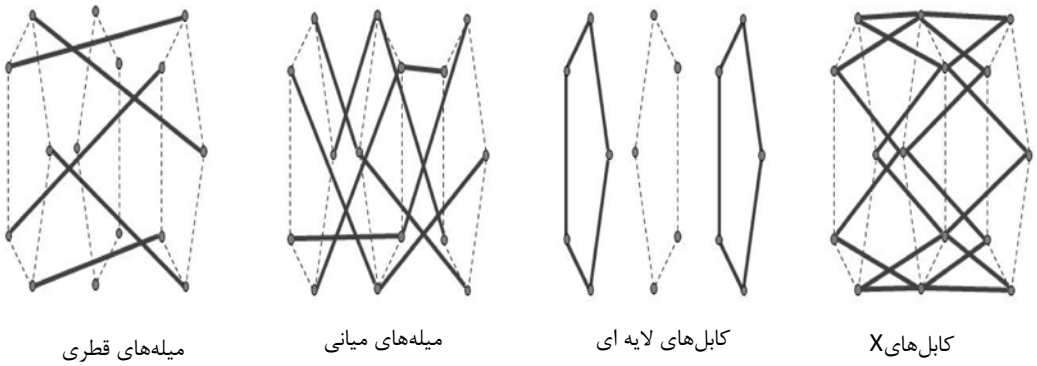


شکل ۵-۳: مدول تنسگریتی مناسب جهت کاربری پل عابر پیاده[۴۸] [۴۷] [۴۶]

در این تحقیق جهت مطالعه رفتار پل عابرپیاده تنسگریتی ، مدول حلقه‌ای پنج‌ضلعی با بافتار پیوسته عضو فشاری انتخاب شده است که مشخصات این بافتار در ادامه ارائه گردیده است.

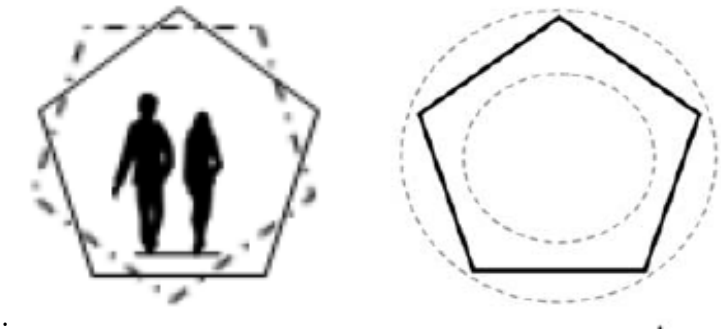
۵-۱-۲ مشخصات مدول تنسگریتی پل عابرپیاده

توپولوژی تنسگریتی حلقه‌ای، با مطالعه موقعیت میله‌ها قابل درک خواهد بود میله‌ها با توجه به توپولوژی به میله‌های قطری و میانی و کابل‌ها به کابل‌های لایه‌ای و x تقسیم‌بندی می‌شوند. شکل(۵-۴). موترو و همکاران[۴۹] یک روش عمومی جهت ساختن این سلول‌های تنسگریتی با هر منشور n وجهی را فراهم آوردند. روند شکل‌گیری مدول حلقه‌ای پنج‌ضلعی، در پیوست (د) ارائه شده است.



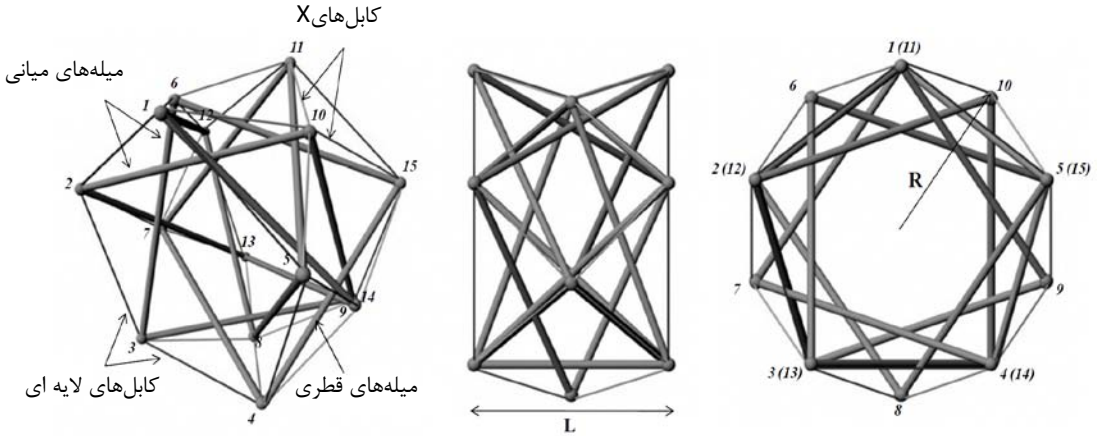
شکل ٥-٤: اجزای مدول تنسگریتی حلقه‌ای پنج ضلعی (تنسگریتی نوع ۲)[۲۹]

ابعاد اجزای سازه‌ای جهت اجرای ملاحظات معماری با توجه به آیین نامه‌ها جهت فراهم کردن فضای مورد نیاز (عرض برابر ۲,۵ متر جهت کاربرد پیاده‌روی) مطابق زیر لحاظ گردیده است. شکل(۵-۵) [۵۰].



شکل ۵-۵: ملاحظات معماری مدول تنسگریتی مورد مطالعه[۵۰]

مدول تنسگریتی (نوع ۲) حلقه‌ای پنج‌ضلعی، شامل ۱۵ گره در۳ لایه پنج‌ضلعی بوده که از ۱۵ میله تشکیل شده و توسط ۳۰ کابل نسبت به هم نگه داشته شده‌اند و یک مدار میله‌ای حلقه‌ای شکل را شکل می‌دهند. شکل(۵-۶).



شکل ۵-۶: مدول تنسگریتی حلقه‌ای پنج‌ضلعی[۲۹]

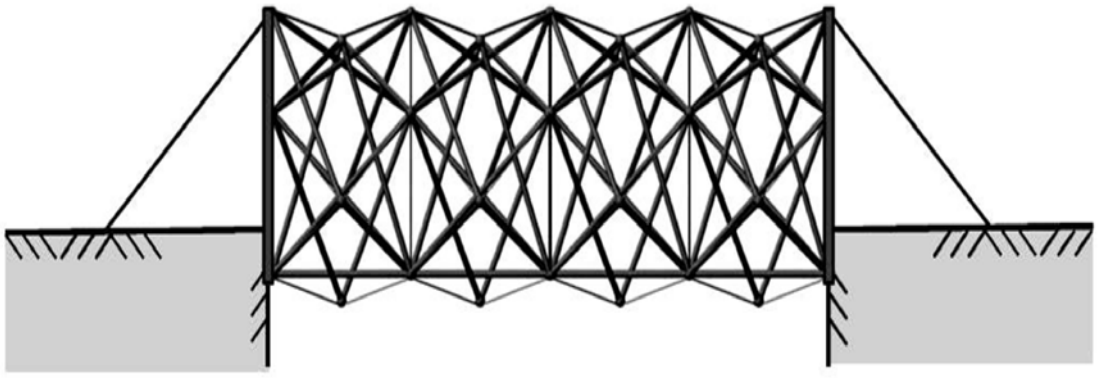
میله‌های قطری و میانی مورد استفاده، نیمرخ های لوله‌ای با طول یکسان ۵۴۲ سانتی متر می‌باشند. کابل‌های لایه‌ای مورد استفاده طولی برابر ۳۶۶ سانتی‌متر و کابل‌های X دارای طول ۲۷۷

ساتنی‌متر می‌باشند. توپولوژی مدول حلقه‌ای پنج‌ضلعی که برای کاربری پل عابرپیاده مورد استفاده قرار گرفته در پیوست (و) قید شده است.

اولین مرحله در طراحی سازه‌های تنسگریتی، تعیین پیکربندی متعادل آن‌ها می‌باشد که تحت عنوان شکل‌یابی نامیده می شود. (به فصل سوم مراجعه شود). در این پایان‌نامه مسئله فرم‌یابی مد نظر نمی‌باشد و مدول مورد بررسی پیکربندی متعادل پایدار را دارا می باشد.

۵-۱-۳ مشخصات بافتار تنسگریتی پل عابرپیاده

پل تنسگریتی که در این پایان‌نامه مورد مطالعه قرار می‌گیرد از ترکیب خطی ۴ مدول تنسگریتی حلقه‌ای پنج‌ضلعی ۱۵ میله‌ای یکسان تشکیل شده است. با اضافه کردن یک عرشه، فضای مناسب پیاده‌روی را فراهم خواهدکرد. شکل(۵-۷). توپولوژی بافتار در پیوست (ه) ارائه شده است. هرکدام از مدول‌ها طولی برابر ۴ متر داشته و نسبت به مرکز متقارن می‌باشند. گره‌های مدول در دو انتهای سازه پل عابرپیاده در هر سه جهت گیردار به‌طور کامل مقید فرض شده اند. کل پیکربندی پل از ۶۰ میله و ۱۰۵ کابل تشکیل شده است. در پیکربندی مدول‌ها در هر اتصال ۴ عضو فشاری به‌هم متصل می‌شوند.



شکل ۵-۷: پل تنسگریتی متشکل از مدول‌های تنسگریتی حلقه‌ای پنج وجهی [۲۹]

۵-۲ بارگذاری

بارگذاری سازه‌های فضاکار شامل تمام نیروهایی است که در طول مراحل ساخت، اجرا و بهره برداری به سازه اعمال می‌گردد و این بارها بستگی به محل پروژه، مشخصات سازه و همچنین کاربری آن دارد. در پروژه‌های عملی جهت تعیین مقادیر بارها معمولا از آیین نامه‌های معتبر برای بارگذاری این نوع سازه‌ها استفاده می‌شود.

در این تحقیق از بارمرده[۱](DL) و بارعابرپیاده[۲](PL) به عنوان بارهای موثر در طراحی عابرپیاده استفاده شده‌است. بارهای مرده متشکل از وزن سازه می‌باشند و طبق آیین نامه آشتو بار عابرپیاده برابر با بار یکنواخت ۴,۲۴ kPa لحاظ می شود، که با این بارگذاری، درنظر گرفتن ملاحظات بار دینامیکی نیاز نمی‌باشد. بارگذاری بصورت مساوی به گره‌های پایینی مدول اعمال می‌شود.

برای بارگذاری سازه‌های فضاکار مانند سایر سازه‌های معمول، ترکیبات مختلف بارگذاری را می‌توان اعمال کرد. ترکیبی که در این تحقیق استفاده شده است، عبارتست از DL+PL به ترتیب بار مرده و بار عابرپیاده می باشند.

۵-۳ پارامترهای طراحی مورد مطالعه

یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد سازه‌های تنسگریتی، خودتنیدگی اولیه موجود در اعضای آن‌ها است. درحقیقت به منظور پایداری اولیه سازه بایستی کابل‌های سازه کشیده شود و به این ترتیب در همه اعضا تنش‌های اولیه ایجاد می شود که به آن پیش‌تنیدگی یا خودتنیدگی گفته می‌شود . این خودتنیدگی بر روی رفتار مسلما تاثیر خواهد گذاشت. ازاین‌رو ترازهای خودتنیدگی به عنوان یکی از پارامترهای مهم در این سیستم‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند.

[۱] Dead Load or Standard earth Gravity
[۲] Pedestrian load

طبق تعریف اعضای سازه‌ای تنسگریتی فقط بارهای محوری را تجربه می‌کنند. درحقیقت اعضای کششی و فشاری دریک حالت خودمتعادل سرهم‌بندی می‌شوند و سختی و پایداری سیستم را فراهم می‌کنند. از آنجایی که سختی سیستم‌های تنسگریتی از ترکیب سختی کابل‌ها و میله‌ها حاصل می‌شود، نسبت سختی کابل‌ها به میله‌ها ($E_C A_C / E_S A_S$)، که درآن E_C مدول ارتجاعی کابل‌ها، A_C سطح مقطع کابل‌ها، E_S مدول ارتجاعی میله‌ها و A_S سطح مقطع میله‌ها می‌باشد به عنوان یکی دیگر از پارامترهای مهم در این سیستم‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد.

در این مطالعه نیز اثر ترازهای مختلف خودتنیدگی اعضای کششی و نسبت‌های مختلف سختی کابل به میله، برروی رفتار بافتار پل عابرپیاده تنسگریتی به عنوان پارامترهای مؤثر در طراحی سیستم‌های تنسگریتی مورد بررسی قرار گرفته اند.

ترازهای خودتنیدگی به صورت درصدی از مقاومت کششی کابل و در سه تراز ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد اعمال می‌شوند. به‌عنوان مثال تراز خودتنیدگی ۱۰ درصد به این معناست که حداکثر تنش اولیه در اعضای کششی معادل ۱۰درصد تنش متناظر با مقاومت کششی اعضای کششی است. نسبت‌های مختلف سختی کابل‌ها به میله‌ها نیز، با تغییر در سطح مقطع کابل‌ها ایجاد می‌شود و در سه نسبت ۰,۰۱۲۵، ۰,۰۲۵ و ۰,۰۵ مورد بررسی قرار گرفته است. در زیر محاسبات مربوط به نسبت های مختلف سختی آمده است.

$\mathrm{E_s} = ۲ \times ۱۰^{۷}\ N/\mathrm{cm}^{۲} \quad , \mathrm{A_s} = ۲۰.۴\mathrm{cm}^{۲}$

$\mathrm{E_c} = ۰.۴ \times ۱۰^{۷}\ N/\mathrm{cm}^{۲} \quad , \mathrm{A_c} = ?$

$\frac{\mathrm{E_C A_C}}{\mathrm{E_S A_S}} = ۰.۰۵ \quad \rightarrow \mathrm{A_c} = ۵.۱\mathrm{cm}^{۲}$ قطر تقریبی کابل ۲۶ میلی متر

$\frac{\mathrm{E_C A_C}}{\mathrm{E_S A_S}} = ۰.۰۲۵ \quad \rightarrow \mathrm{A_c} = ۲.۵۵\mathrm{cm}^{۲}$ قطر تقریبی کابل ۱۸ میلی متر

$\frac{\mathrm{E_C A_C}}{\mathrm{E_S A_S}} = ۰.۰۱۲۵ \quad \rightarrow \mathrm{A_c} = ۱.۲۷۵\mathrm{cm}^{۲}$ قطر تقریبی کابل ۱۳ میلی متر

۵-۴ مکانیزم‌های گسیختگی مورد مطالعه

در سازه‌های تنسگریتی، مهم‌ترین عوامل وقوع گسیختگی، کمانش اعضای فشاری، گسیختگی اعضای کششی و شل شدن اعضای کششی و یا مجموعه‌ای از این عوامل می‌باشد. بسته به اینکه دلیل گسیختگی کدام‌یک از موارد فوق باشد، مکانیزم گسیختگی نیز متفاوت خواهد بود. در زمینه مکانیزم-های گسیختگی در سازه‌های تنسگریتی هنوز تحقیقات کافی وجود ندارد. در این تحقیق، پس از معرفی هندسه و مصالح بافتار مورد انتخاب، سازه تحت ترازهای مختلف خودتنیدگی و نسبت سختی-های مختلف کابل به میله تحلیل و تاثیر هریک از آنها در رفتار بار- تغییر مکان بافتار بررسی و نمودار بار- تغییرمکان نقطه ای وسط پل عابرپیاده تنسگریتی متشکل از ۴ مدول تنسگریتی پنج ضلعی ۱۵ میله‌ای یکسان ترسیم می‌شود و مکانیزم‌های گسیختگی (نحوه خراب شدن سازه) از آن‌ها استخراج می‌شود و درمورد هر مکانیزم علل رویداد آن نیز بررسی شده است.

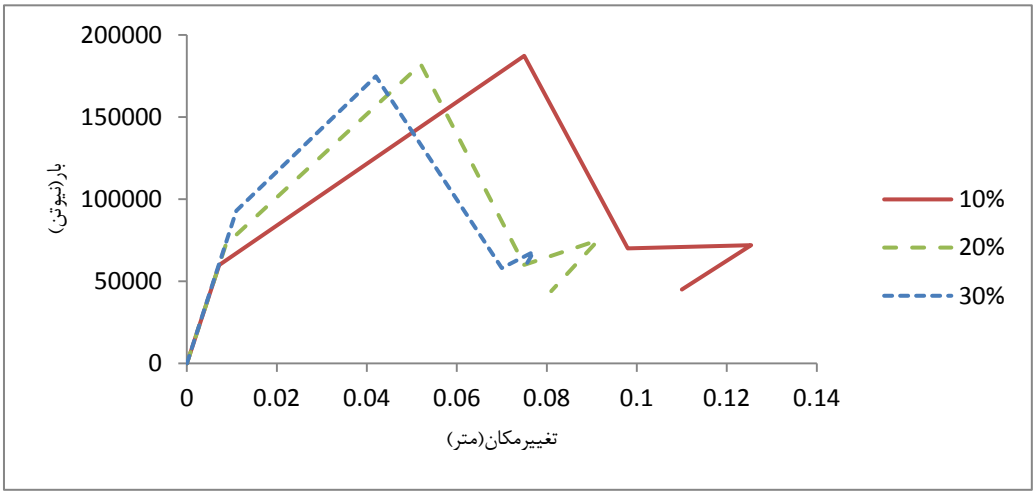
لازم به ذکر است که در تمام تحلیل‌ها، رفتار مصالح برای اعضای کششی به صورت شکل (۳-۲۳) و برای اعضای فشاری به صورت پیوست (ج) تعریف شده است. سطح مقطع و طول اعضای فشاری برای همه حالت‌ها ثابت و به ترتیب برابر ۲۰,۴ سانتی‌متر مربع و ۵,۴۲ متر می‌باشد و مقدار ناکاملی ۰,۰۰۱ طول نیز برای اعضای فشاری لحاظ شده است.

۵-۵ تاثیر ترازهای مختلف خودتنیدگی در رفتار بافتار

در این مطالعه برای بررسی تاثیر این پارامتر بر رفتار بافتار تنسگریتی پل عابر پیاده ، در سه تراز ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، خودتنیدگی‌های اولیه به سازه اعمال می‌شود و بعد انجام تحلیل پیش تنیدگی، بارگذاری روی سازه انجام می‌گیرد و سپس سازه تحلیل می‌شود و بارگذاری تا زمانی که سازه گسیخته می شود، ادامه می‌یابد. در ادامه نتایج حاصل از این تحلیل‌ها آمده است.

۵-۵-۱ مطالعه به ازای نسبت سختی کابل به میله ۰،۰۱۲۵

در این نسبت سختی کابل‌ها دارای سطح مقطع ۱،۲۷۵ سانتی‌متر مربع و قطر تقریبی ۱۳ میلیمتر بوده که مساحت کابل‌ها نسبت به دو نسبت سختی دیگر، کمترین سطح مقطع را دارا می-باشد.



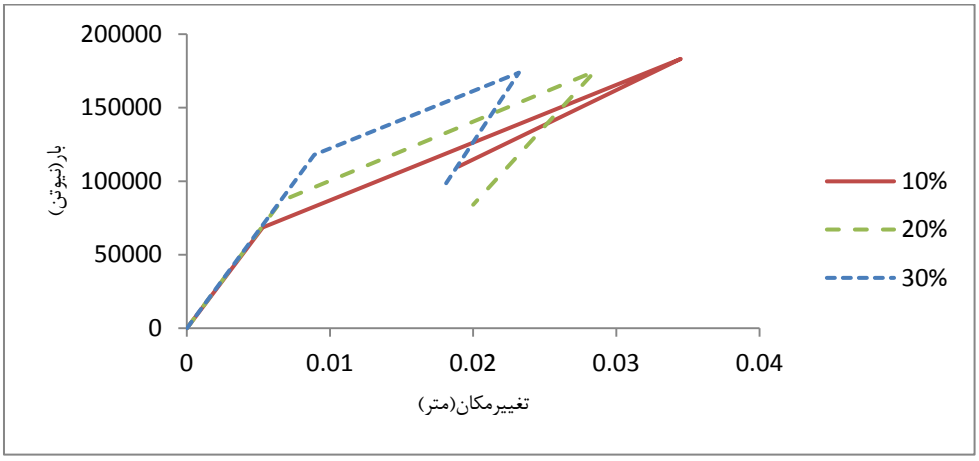
شکل ۵-۸: تاثیر تراز خودتنیدگی بر رفتار در نسبت سختی کابل به میله ۰،۰۱۲۵

همانگونه که در شکل(۵-۸) دیده می‌شود افزایش تراز خودتنیدگی، سختی اولیه‌ی سازه را تغییر نخواهد داد. ظرفیت باربری بافتار به ازای ترازهای مختلف خودتنیدگی کاهش یافته است. در حقیقت، افزایش ترازهای خودتنیدگی در یک سطح مقطع اعضای کششی ثابت، باعث افزایش نیروی داخلی اعضا و از جمله اعضای فشاری می شود و لذا با افزایش بار وارده به بافتار، اعضای فشاری سریع‌تر به بار کمانشی خود می‌رسند و لذا ظرفیت باربری بافتار کاهش می‌یابد. مکانیزم خرابی بافتار در همه حالت‌ها، به صورت خرابی موضعی بدون فروجهش دینامیکی است. به‌عبارتی مشخصه فروریزی بار اعضای خراب شده ناگهانی نبوده و در فرایند بازتوزیع نیروها، سایر اعضا قادر به جذب بارهای بازتوزیع شده بوده و لذا حالت تعادل سازه پایدار می‌باشد و سازه می‌تواند بارهای اضافی را تحمل کند.

این نوع خرابی به دلیل اینکه نه به صورت ناگهانی است و نه با آزاد کردن انرژی و اثرات دینامیکی همراه است کم خطرترین نوع خرابی است.

۵-۵-۲ مطالعه به ازای نسبت سختی کابل به میله ۰،۰۲۵

در این نسبت سختی کابل‌ها دارای سطح مقطع ۲،۵۵ سانتیمتر مربع و قطر تقریبی ۱۸ میلیمتر بوده که مساحت کابل‌ها نسبت به حالت قبل دوبرابر شده است.

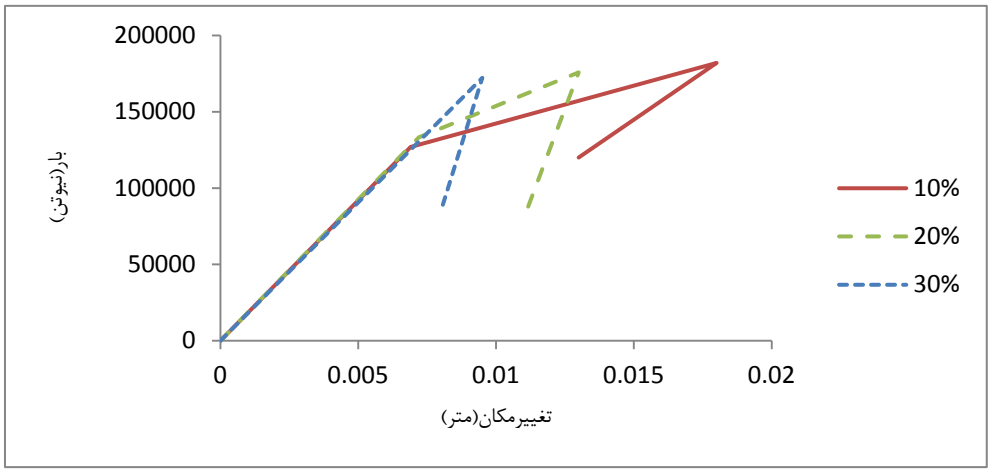


شکل ۵-۹: تاثیر تراز خودتنیدگی بررفتار در نسبت سختی کابل به میله ۰،۰۲۵

همان‌طور که از شکل(۵-۹) مشاهده می‌شود در یک نسبت سختی کابل و میله مشخص، افزایش تراز خودتنیدگی، سختی اولیه‌ی سازه را تغییر نخواهد داد. مانند حالت قبل ظرفیت باربری بافتار با افزایش تراز خودتنیدگی کاهش یافته است، در حقیقت افزایش ترازهای خودتنیدگی در یک سطح مقطع اعضای کششی ثابت، باعث افزایش نیروی داخلی اعضا و از جمله اعضای فشاری می‌شود و لذا با افزایش بار وارده به بافتار، اعضای فشاری سریع تر به بار کمانشی خود می‌رسند و لذا ظرفیت باربری بافتار کاهش می‌یابد. همچنین به ازای نسبت سختی کابل به میله مشخص، مکانیزم خرابی بافتار به صورت خرابی موضعی بدون فروجهش دینامیکی می‌باشد.

۵-۵-۳ مطالعه به ازای نسبت سختی کابل به میله ۰،۰۵

در این نسبت سختی کابل‌ها دارای سطح مقطع ۵،۱ سانتیمتر مربع و قطر تقریبی ۲۶ میلیمتر بوده که مساحت کابل‌ها نسبت به دو نسبت سختی دیگر، بیشترین سطح مقطع را دارا می‌باشد.



شکل ۵-۱۰: تاثیر تراز خودتنیدگی بررفتار در نسبت سختی کابل به میله ۰،۰۵

همانطور که از شکل(۵-۱۰) مشاهده می شود افزایش تراز خودتنیدگی، سختی اولیه‌ی سازه را تغییر نخواهد داد اما بر نقطه‌ی ((آغاز کاهش سختی)) بسیار موثر است و این کاهش سختی ناشی از شل شدن کابل‌ها می‌باشد. ظرفیت باربری بافتار با افزایش تراز خودتنیدگی کاهش یافته است. در حقیقت افزایش ترازهای خودتنیدگی در یک سطح مقطع اعضای کششی ثابت، باعث افزایش نیروی داخلی اعضا و از جمله اعضای فشاری می‌شود و لذا با افزایش بار وارده به بافتار، اعضای فشاری سریع‌تر به بار کمانشی خود می‌رسند و لذا ظرفیت باربری بافتار کاهش می‌یابد.

مکانیزم خرابی بافتار به ازای تراز خودتنیدگی ۱۰ و ۲۰ از نوع خرابی موضعی بدون فروجهش دینامیکی شده است و به ازای تراز خودتنیدگی ۳۰ بافتار دچار مکانیزم خرابی کلی شده است. بعبارتی مشخصه فروریزی بار اعضای خراب شده به گونه‌ای سریع بوده که در فرایند بازتوزیع نیروها سایر اعضا

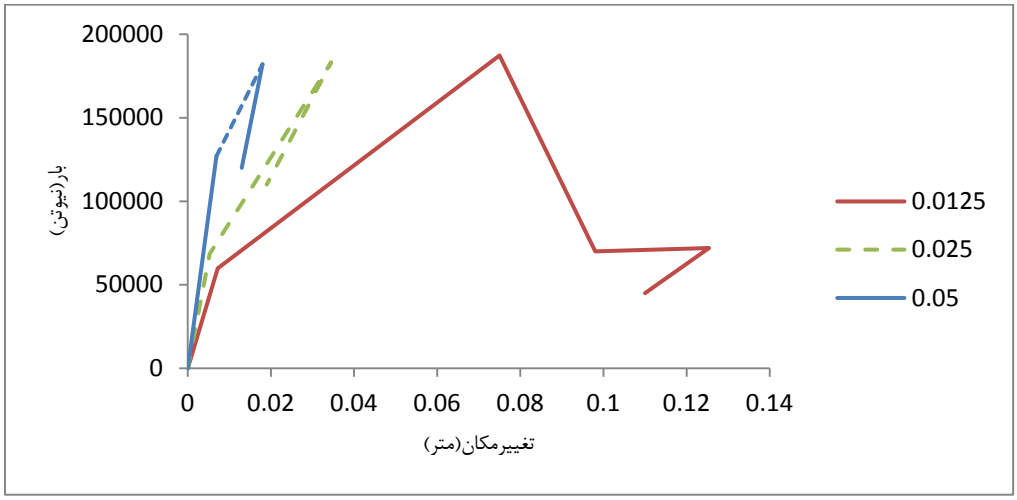
توانایی جذب نیروهای اعضای خراب شده را نداشته و لذا خرابی کلی در بافتار روی داده است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که در نسبت سختی بالا تغییر در تراز خودتنیدگی برای بافتار مورد مطالعه سبب تغییر در مکانیزم خرابی بافتار می‌شود.

۵-۶ تاثیر نسبت‌های مختلف سختی کابل به میله در رفتار بافتار

یکی از محدودترین مطالعاتی که به بررسی تاثیر این پارامتر پرداخته است، مطالعه‌ای است که کوئیرنت در سال ۲۰۰۰ انجام داد و به این نتیجه رسید که هرچه نسبت سختی میله‌ها به کابل‌ها، بیشتر باشد سختی سازه کاهش می‌یابد[۲۶] . در این مطالعه برای بررسی تاثیر این پارامتر بر رفتار پل عابرپیاده تنسگریتی، در سه نسبت سختی کابل به میله ۰,۰۱۲۵، ۰,۰۲۵ و ۰,۰۵ روی سازه بارگذاری انجام می‌گیرد و سپس سازه تحلیل می‌شود و بارگذاری تا زمانی که سازه، گسیخته می‌شود ادامه می‌یابد. در ادامه، نتایج این تحلیل ها آمده است:

۵-۶-۱ مطالعه به ازای تراز خودتنیدگی ۱۰٪

همانطور که در شکل ملاحظه می شود با افزایش نسبت سختی کابل‌ها به سختی میله‌ها (در واقع با افزایش سطح مقطع کابل‌ها) سختی بافتار افزایش می‌یابد. به‌عبارتی افزایش سطح مقطع اعضای کششی به ازای پیش‌تنیدگی ثابت باعث افزایش نیروی داخلی اعضا و درنتیجه پیش‌تنیدگی بافتار شده و لذا سختی بافتار افزایش می یابد.

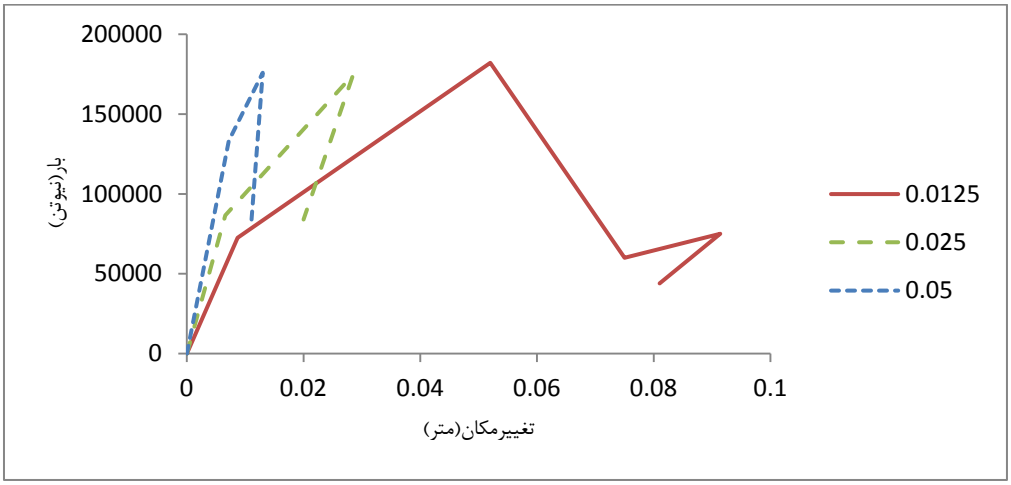


شکل ۵-۱۱: تاثیر نسبت سختی کابل به میله بررفتار در تراز خودتنیدگی ۱۰٪

از لحاظ ظرفیت باربری بافتار، همان‌طور که در شکل(۵-۱۱) دیده می‌شود، افزایش نسبت سختی کابل به میله که با افزایش سطح مقطع اعضای کششی همراه است کاهش ظرفیت باربری بافتار را سبب می‌شود. درحقیقت، افزایش سطح مقطع اعضای کششی به ازای پیش‌تنیدگی ثابت، باعث افزایش نیروی داخلی اعضا و از جمله اعضای فشاری می‌شود و لذا با افزایش بار وارده به بافتار، اعضای فشاری سریع‌تر به بار کمانشی خود می‌رسند و لذا ظرفیت باربری بافتار کاهش می‌یابد. همچنین به ازای پیش تنیدگی ثابت، مکانیزم خرابی بافتار به ازای نسبت‌های مختلف سختی کابل به میله، دچار خرابی موضعی بدون فروجهش دینامیکی شده است.

۵-۶-۲ مطالعه به ازای تراز خودتنیدگی ۲۰٪

همانطور که در شکل(۵-۱۲) ملاحظه می‌شود با افزایش نسبت سختی کابل‌ها به سختی میله‌ها (در واقع با افزایش سطح مقطع کابل‌ها) سختی بافتار افزایش می‌یابد. به‌عبارتی افزایش سطح مقطع اعضای کششی به ازای پیش‌تنیدگی ثابت باعث افزایش نیروی داخلی اعضا و درنتیجه پیش‌تنیدگی بافتار شده و لذا سختی بافتار افزایش می‌یابد.

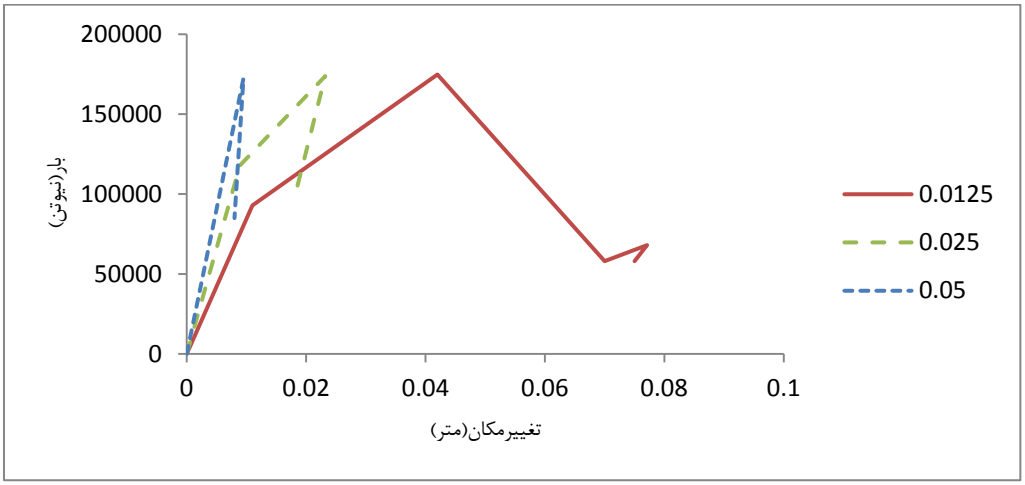


شکل ۵-۱۲: تاثیر نسبت سختی کابل به میله بررفتار در تراز خودتنیدگی ۲۰٪

از لحاظ ظرفیت باربری بافتار، همان‌طور که در شکل(۵-۱۲) دیده می‌شود، افزایش نسبت سختی کابل به میله، که با افزایش سطح مقطع اعضای کششی همراه است، کاهش ظرفیت باربری بافتار را سبب می‌شود. درحقیقت، افزایش سطح مقطع اعضای کششی به ازای پیش‌تنیدگی ثابت، باعث افزایش نیروی داخلی اعضا و از جمله اعضای فشاری می‌شود و لذا با افزایش بار وارده به بافتار، اعضای فشاری سریع‌تر به بار کمانشی خود می‌رسند و لذا ظرفیت باربری بافتار کاهش می‌یابد. همچنین به ازای پیش‌تنیدگی ثابت، مکانیزم خرابی بافتار به ازای نسبت‌های مختلف سختی کابل به میله، دچار خرابی موضعی بدون فروجهش دینامیکی شده است..

۵-۶-۳ مطالعه به ازای تراز خودتنیدگی ۳۰٪

همانطور که در شکل(۵-۱۳) ملاحظه می‌شود با افزایش نسبت سختی کابل‌ها به سختی میله‌ها (در واقع با افزایش سطح مقطع کابل‌ها) سختی بافتار افزایش می‌یابد. به‌عبارتی افزایش سطح مقطع اعضای کششی به ازای پیش‌تنیدگی ثابت باعث افزایش نیروی داخلی اعضا و درنتیجه پیش‌تنیدگی بافتار شده و لذا سختی بافتار افزایش می‌یابد.



شکل ۵-۱۳: تاثیر نسبت سختی کابل به میله بررفتار در تراز خودتنیدگی ۳۰٪

از لحاظ ظرفیت باربری بافتار، همان‌طور که در شکل(۵-۱۳) دیده می‌شود، افزایش نسبت سختی کابل به میله، که با افزایش سطح مقطع اعضای کششی همراه است، کاهش ظرفیت باربری بافتار را سبب می‌شود. درحقیقت، افزایش سطح مقطع اعضای کششی به ازای پیش‌تنیدگی ثابت، باعث افزایش نیروی داخلی اعضا و از جمله اعضای فشاری می‌شود و لذا با افزایش بار وارده به بافتار، اعضای فشاری سریع‌تر به بار کمانشی خود می‌رسند و لذا ظرفیت باربری بافتار کاهش می‌یابد. همچنین به ازای پیش‌تنیدگی ثابت، مکانیزم خرابی بافتار به ازای نسبت‌های سختی کابل به میله ۰,۰۱۲۵ و ۰,۰۲۵ ، از نوع خرابی موضعی بدون فروجهش دینامیکی می‌باشد و به ازای نسبت سختی کابل به میله ۰,۰۵ از نوع خرابی کلی می‌باشد.

۵-۷ نتیجه گیری

همان‌طور که مشاهده می‌شود مطابق تحلیل‌های صورت گرفته در رفتار بافتار تنسگریتی پل عابرپیاده متشکل از ۴ مدول تنسگریتی حلقه‌ای پنج ضلعی ۱۵ میله‌ای یکسان، به ازای نسبت سختی کابل به میله ثابت، افزایش ترازهای خودتنیدگی بر سختی اولیه سازه اثر نداشته و بر بار نهایی کمی اثر می گذارد اما در افزایش بار نقطه شروع سخت‌شدگی و کاهش تغییرمکان نهایی سازه موثر است.

همچنین در تراز خودتنیدگی ثابت، افزایش نسبت‌های سختی کابل به میله عموما بر بار نهایی اثری نداشته اما سختی اولیه سازه را افزایش می‌دهد و همچنین در افزایش بار نقطه شروع سخت‌شدگی و کاهش تغییرمکان نهایی سازه موثر است. دو نوع مکانیزم خرابی کلی و خرابی موضعی بدون فروجهش دینامیکی مشاهده می‌شود. می‌توان خرابی کلی را حالت خاصی از مکانیزم خرابی موضعی دانست که در آن بار نقطه شروع کاهش سختی با بار نهایی برابر می‌شود.

نکته مهمی که در مورد مکانیزم‌های خرابی می‌توان گفت این است که افزایش نسبت‌های سختی کابل به میله و تراز خودتنیدگی باعث افزایش بار نقطه شروع کاهش سختی می شود و اگر این افزایش به حدی باشد که بار نقطه شروع سخت‌شدگی بیشتر یا مساوی بار نهایی گردد، مکانیزم گسیختگی موضعی تبدیل به مکانیزم خرابی کلی و ناگهانی می‌گردد. درجدول زیر رفتار خرابی بافتار با ابعاد مشخص داده شده به ازای پارامترهای مختلف نشان داده شده است. مکانیزم خرابی کل با عدد ۱ و مکانیزم خرابی موضعی بدون فروجهش با عدد ۲ در جدول (۵-۱) نشان داده شده است.

جدول ۵-۱: بررسی رفتار بافتار به ازای ترازهای خودتنیدگی و نسبت‌های مختلف کابل به میله

شرح وضعیت سازه	مکانیزم خرابی بافتار به ازای نسبت های کابل به میله		
	۰,۰۱۲۵ s to c ۸۰	۰,۰۲۵ s to c ۴۰	۰,۰۵ s to c ۲۰
	قطر کابل ۱۳ mm	قطر کابل ۱۸ mm	قطر کابل ۲۶ mm
تراز خودتنیدگی ۱۰ ٪	۲	۲	۲
تراز خودتنیدگی ۲۰ ٪	۲	۲	۲
تراز خودتنیدگی ۳۰ ٪	۲	۲	۱

فصل ششم

جمع‌بندی و پیشنهادها

۶-جمع‌بندی و پیشنهادها

۶-۱ مقدمه

سازه‌های فضاکار ازجمله سازه‌هایی می‌باشند که دارای عملکرد سه بعدی می‌باشند. رفتار این سازه‌ها برعکس سازه‌های مسطح نظیر قاب‌های مسطح و خرپاهای مسطح در دو بعد قابل بیان نیست. به عبارت دیگر مجموعه بافتار، بارهای وارده، جابجایی‌ها و... همگی در فضای سه‌بعدی قابل بیان هستند.

سیستم‌های تنسگریتی نوع خاصی از سازه‌های فضاکار می‌باشند که در آن‌ها از کابل به عنوان جایگزین اعضای سازه‌ای کششی استفاده می‌شود، اعضای فشاری همواره در فشار و اعضای کششی همواره در کشش می‌باشند. درحقیقت مجموعه‌ای از المان‌های کششی و فشاری در یک حالت خودمتعادل مونتاژ می‌شوند که به موجب آن پایداری و سختی سیستم را فراهم می‌کنند.

این سازه‌ها نسبت به سیستم‌های سازه‌ای دیگر در دستیابی به یک مقاومت یکسان، نسبتا سازه‌های سبک‌تری هستند، ازدیگر مزایای این سازه‌ها انعطاف‌پذیری ذاتی، قابلیت تاشوندگی و امکان جابجایی‌های بزرگ، تغییرشکل راحت، قابلیت انطباق‌پذیری و اجرای مدولار و... است.

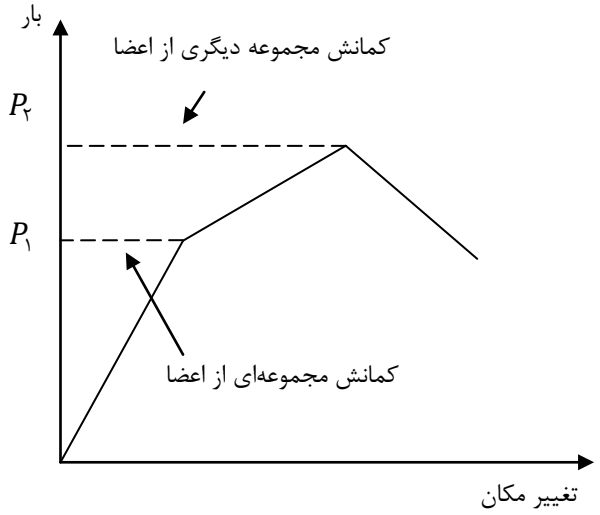
در این بین مطالعه سازه‌های کش‌بستی به لحاظ برخی ویژگی‌ها از دیگر سازه‌های معمول فضاکار متمایز می‌باشد. ازجمله‌ی این ویژگی‌ها می‌توان به لزوم اعمال پیش‌تنیدگی برای ایجاد سختی، عدم وجود سخت‌شدگی کرنشی برای اعضای کششی بعد از ناحیه‌ی پلاستیک و بنابراین مطرح شدن مکانیزم گسیختگی کششی، امکان شل و سفت شدن اعضای کششی با توجه به این نکته که اعضای کششی فاقد سختی در فشار می‌باشند و کمبود اطلاعات مربوط به سازه‌های کش‌بستی اشاره کرد.

در این تحقیق، با درنظر گرفتن ملاحظات معماری، بافتار مناسب برای پل عابر پیاده تنسگریتی انتخاب و ساختار مورد مطالعه ارائه گردید، پس از مدلسازی عناصر محدود ، سازه پس از اعمال خطای ساخت متعارف ۰,۰۰۱ طول در وسط عضو، تحت ترازهای مختلف خودتنیدگی و نسبت-های سختی متفاوت کابل به میله، توسط نرم‌افزار آباکوس تحلیل شد و تاثیر هریک از آن‌ها در رفتار بار- تغییر مکان بافتار بررسی گشت و نمودار بار- تغییرمکان نقطه وسط پل عابرپیاده تنسگریتی ترسیم شد و مکانیزم‌های گسیختگی (نحوه خراب شدن سازه) از آن‌ها استخراج شد و درمورد هر مکانیزم علل رویداد آن نیز بررسی شده است و درنهایت با استناد به همین تحلیل‌ها، توصی‌هایی برای جلوگیری از رخداد مکانیزم‌های گسیختگی نامطلوب و خطرناک در این سازه‌ها ارائه گردیده است. در تحلیل‌های انجام گرفته غیرخطی هندسی و مصالح برای اعضای کششی شکل(۳-۲۳) و فشاری به صورت پیوست (ج) لحاظ شده است.

۶-۲ توصیه های طراحی

باتوجه به نتایجی که از تحلیل بافتار انتخاب شده در این تحقیق بدست امده است، برای طراحی این بافتار توصیه‌های زیر ارائه گردیده است:

در تحلیل بافتار دو نوع مکانیزم گسیختگی کلی و موضعی بدون فروجهش دیده شد. باتوجه به شکل(۶-۱) ، فرق بین مکانیزم خرابی کلی و خرابی موضعی بدون فروجهش دینامیکی را می‌توان اینگونه توصیف کرد که در مکانیزم خرابی موضعی بار نقطه شروع کاهش سختی (P_1) کمتر از بار نهایی (P_2) می‌باشد، اما در مکانیزم خرابی کلی بار نقطه شروع کاهش سختی به اندازه ی بار نهایی می‌باشد.



شکل ۶-۱: نمودار شماتیک مکانیزم گسیختگی موضعی بدون فروجهش مکانیکی

لذا سازه بدون اینکه کاهش سختی داشته باشد به صورت ناگهانی فرو میریزد. از این رو عاملی که باعث شود که بار نقطه شروع کاهش سختی افزایش یابد، این تهدید را به‌وجود می‌آورد که مکانیزم خرابی را به مکانیزم خرابی کلی تبدیل کند. از بین مکانیزم‌های خرابی، مکانیزم خرابی کلی مطلوب نیست چراکه این مکانیزم خرابی بدون هیچ‌گونه علائم هشدار دهنده‌ای به صورت ترد رخ می‌دهد به همین دلیل مکانیزم خرابی موضعی نسبت به مکانیزم‌های خرابی کلی ارجح می باشد.

بنابراین طراح باید درنظر داشته باشد گرچه هرچه میزان تراز خودتنیدگی یا سطح مقطع کابل‌ها را افزایش دهد بار نقطه شروع کاهش سختی افزایش می‌یابد اما ممکن است این بار به قدری افزایش یابد که به مکانیزم خرابی کلی بیانجامد، لذا به عنوان پیشنهادی کلی، برای جلوگیری از وقوع مکانیزم خرابی کلی، باید سعی شود که تراز خودتنیدگی بالا با نسبت سختی زیاد کابل به میله به‌کار

برده نشود، بلکه اگر تراز خودتنیدگی در سطوح بالا اختیار می‌شود، سعی شود نسبت سختی کابل به میله هم در حدود پایین انتخاب گردد.

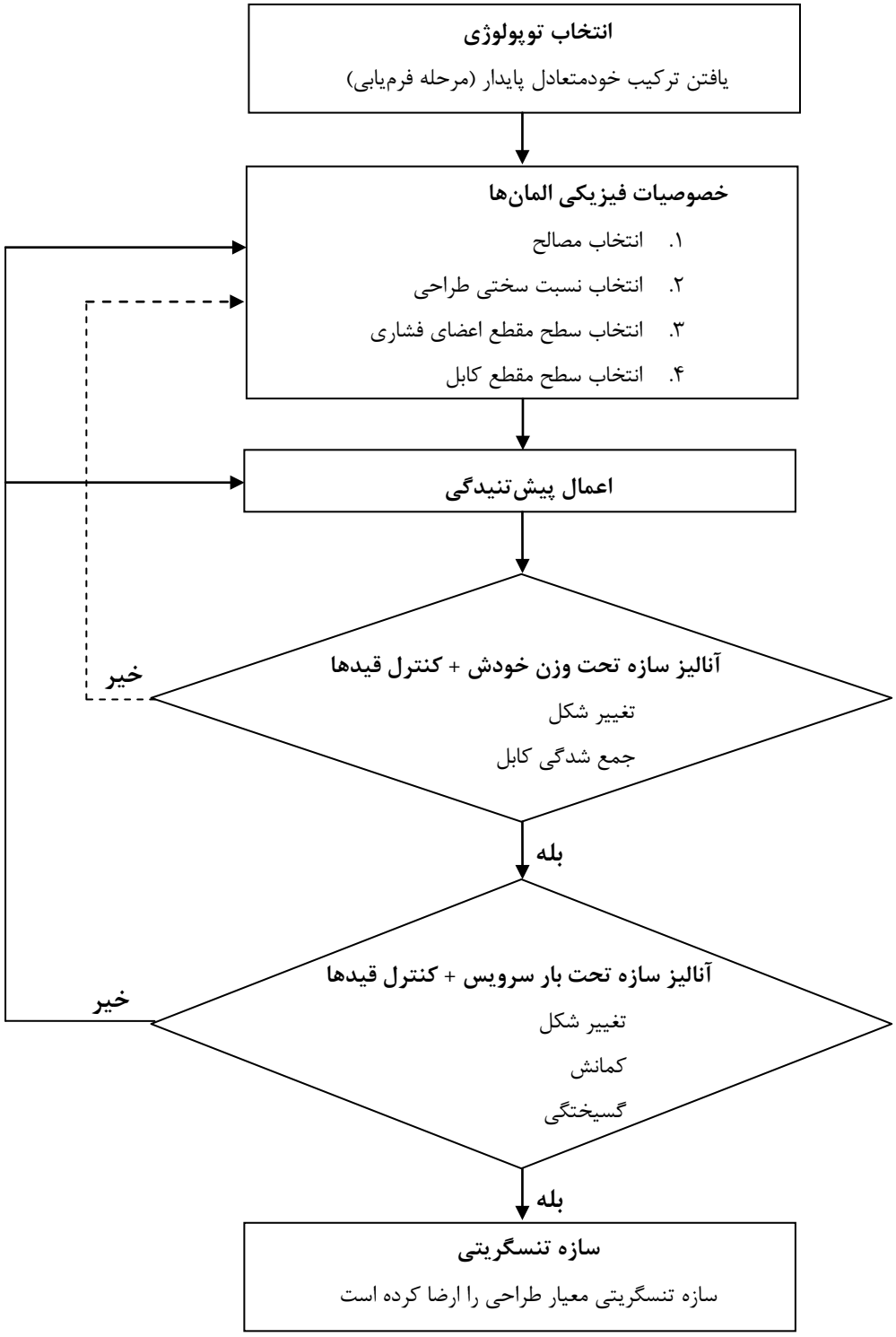
۶-۳ تعیین یک روش سیستماتیک برای طراحی

در مطالعه طراحی سازه‌های تنسگریتی کوئیرنت[۲۶] یک روش طراحی برای کاربرد در شبکه‌های تنسگریتی دولایه پیشنهاد داد. در روش مشابه برمبنای نتایج حاصل از مطالعات پارامتریک سیستم‌های تنسگریتی، یک روش برای طراحی توسط رهودی پیشنهاد شد. شکل(۶-۲) [۲۹].

همان‌طور که در این تحقیق مطرح شد، سازه‌های تنسگریتی سیستم‌های دارای شبکه سه بعدی در یک حالت خودمتعادل می‌باشند. لذا در تحلیل سازه‌های تنسگریتی یک مرحله ابتدایی اضافی، جهت یافتن این بافتار یا ترکیب متعادل وجود خواهد داشت که به‌عنوان مرحله فرم‌یابی شناخته می‌شود این مرحله بدون اعمال پیش‌تنیدگی و بارگذاری خارجی است. (این تحقیق مرحله شکل‌یابی را شامل نمی شود).

انتخاب نوع مصالح در وزن سازه و سختی آن تاثیر می‌گذارد همچنین در نسبت سختی بین المان‌های کششی و فشاری نیز تاثیرگذار است. نسبت سختی طراحی، می‌تواند با مطالعه پارامتریک بر روی مدول الاستیسیته کابل یا میله تخمین زده شود که مقادیر سختی کمتر از این نسبت منجر به یک سازه انعطاف‌پذیر با تغییر شکل زیاد خواهدشد و در سمت دیگر، مقادیر سختی بالاتر از این نسبت منجر به یک سازه سخت‌تر با تغییرشکل‌های کوچک خواهد شد.

در مرحله بعد با توجه به محدودیت نسبت لاغری سطح مقطع میله‌ها تعیین می‌شوند. با توجه به این سطح مقطع و نسبت سختی کابل به میله، مقدار سطح مقطع کابل قابل محاسبه است. تعیین خودتنیدگی به دلیل اثر دوگانه‌ای که به‌عنوان بار برای اعضا و تقویت کننده سختی برای سازه دارد، توجه ویژه‌ای را می‌طلبد. زمانی‌که خودتنیدگی به‌طور مساوی در سازه توزیع می‌شود. فقط تغییر اندکی در نسبت سختی ایجاد می‌شود.



شکل ۶-۲ :روند طراحی سیستم‌های تنسگریتی

در این تحقیق اثر نسبت‌های خودتنیدگی و نسبت‌های مختلف سختی کابل به میله، بر روی رفتار بافتار و نوع مکانیزم خرابی آن مورد بررسی قرار گرفت و طبق آن توصیه می‌شود که تراز خود-تنیدگی بالا با نسبت سختی زیاد کابل به میله به کار برده نشود، بلکه اگر تراز خودتنیدگی در سطوح بالا اختیار می‌شود سعی شود نسبت سختی کابل به میله هم در حدود پایین انتخاب گردد.

بعد از اعمال پیش‌تنیدگی تحلیل تحت وزن سازه انجام می‌شود تا اگر سطح مقطع اعضا و میزان پیش‌تنیدگی نیاز به اصلاح داشت انجام شود. اگر تغییرمکان‌ها یا تغییر شکل‌ها بیشتر از حد مجاز شوند، دو حالت رخ می‌دهد. برای تغییرمکان‌های زیاد ممکن است نیاز به افزایش سطح مقطع اعضا باشد، اما اگر تفاوت اندک باشد، افزایش در میزان خودتنیدگی ممکن است کافی باشد. بعد از این مرحله، سازه با توجه سرویس پذیری و معیار طراحی آنالیز می‌شود. اگر یکی از معیارها نقض شود، سطح مقطع‌های جدید باید تعریف شود و پروسه تکرار می‌شود.

۶-۴ پیشنهادات

- بررسی رفتار پل عابر پیاده تنسگریتی با انواع مدول‌های تنسگریتی ممکن
- بررسی اثرات مشخصات دینامیکی بافتار، برروی رفتار پل عابپیاده تنسگریتی
- بررسی تجربی و آزمایشگاهی پل عابرپیاده تنسگریتی
- بررسی وضعیت ارتعاشات پل عابرپیاده تنسگریتی و کنترل آن
- بررسی اثرات پارامترهای مختلف طراحی در رفتار لرزه‌ای پل عابرپیاده تنسگریتی
- بررسی اثرات لاغری، ناکاملی، نشست تکیه‌گاهی و طول دهانه برروی رفتار پل عابرپیاده تنسگریتی

۷- پیوست ها

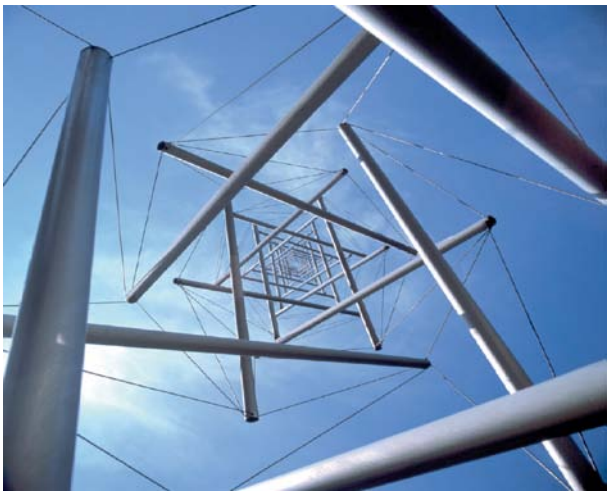
پیوست الف : نمونه کارهای اسنلسون[۱۹]

برج نیدل، ۱۹۶۹

آلومینیوم و فولاد ضد زنگ

30 x 6 x 6 m

[۱]



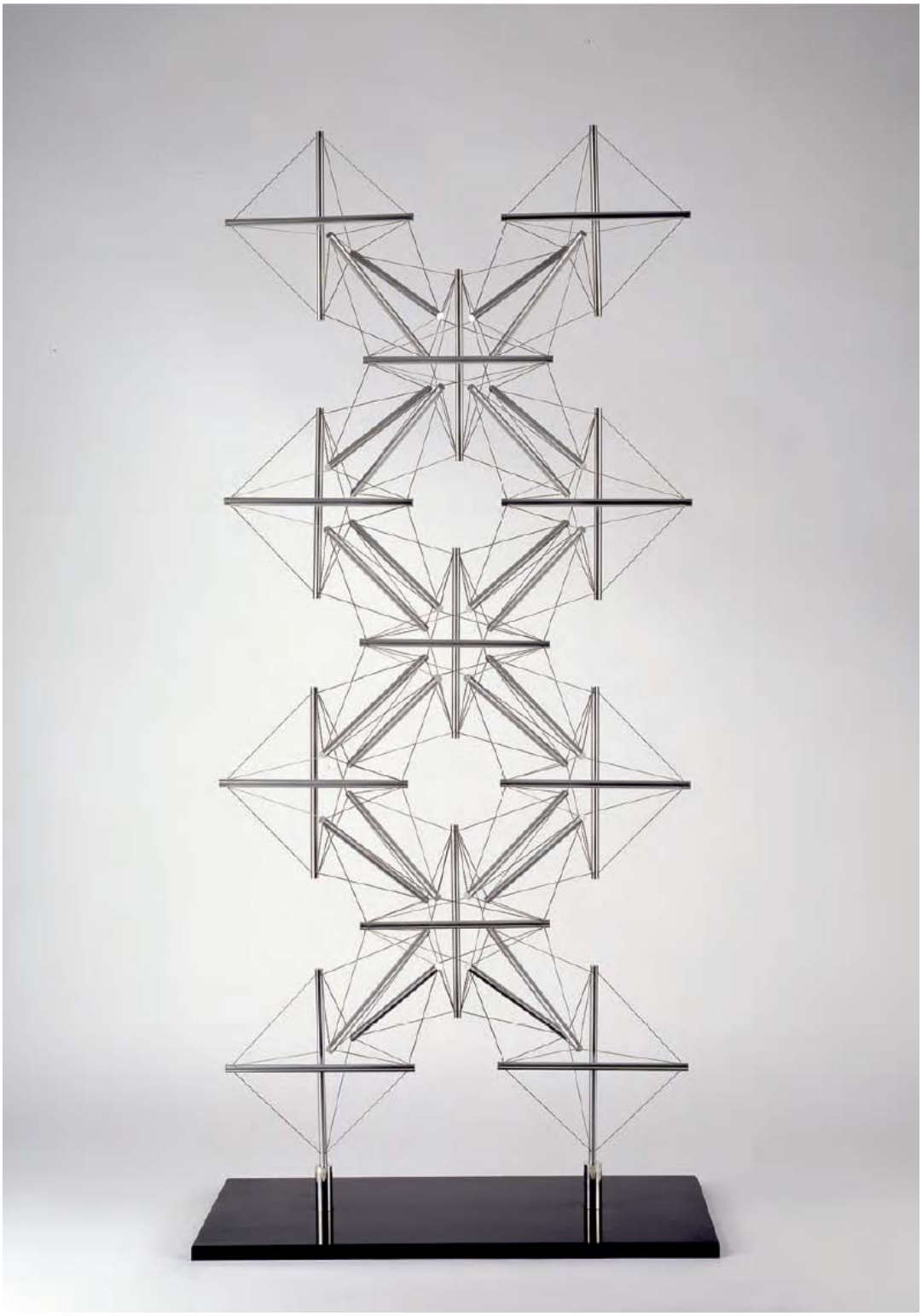
برج نیدل، ۱۹۶۸

آلومینیوم و فولاد ضد زنگ

18.2 x 6 x 6 m

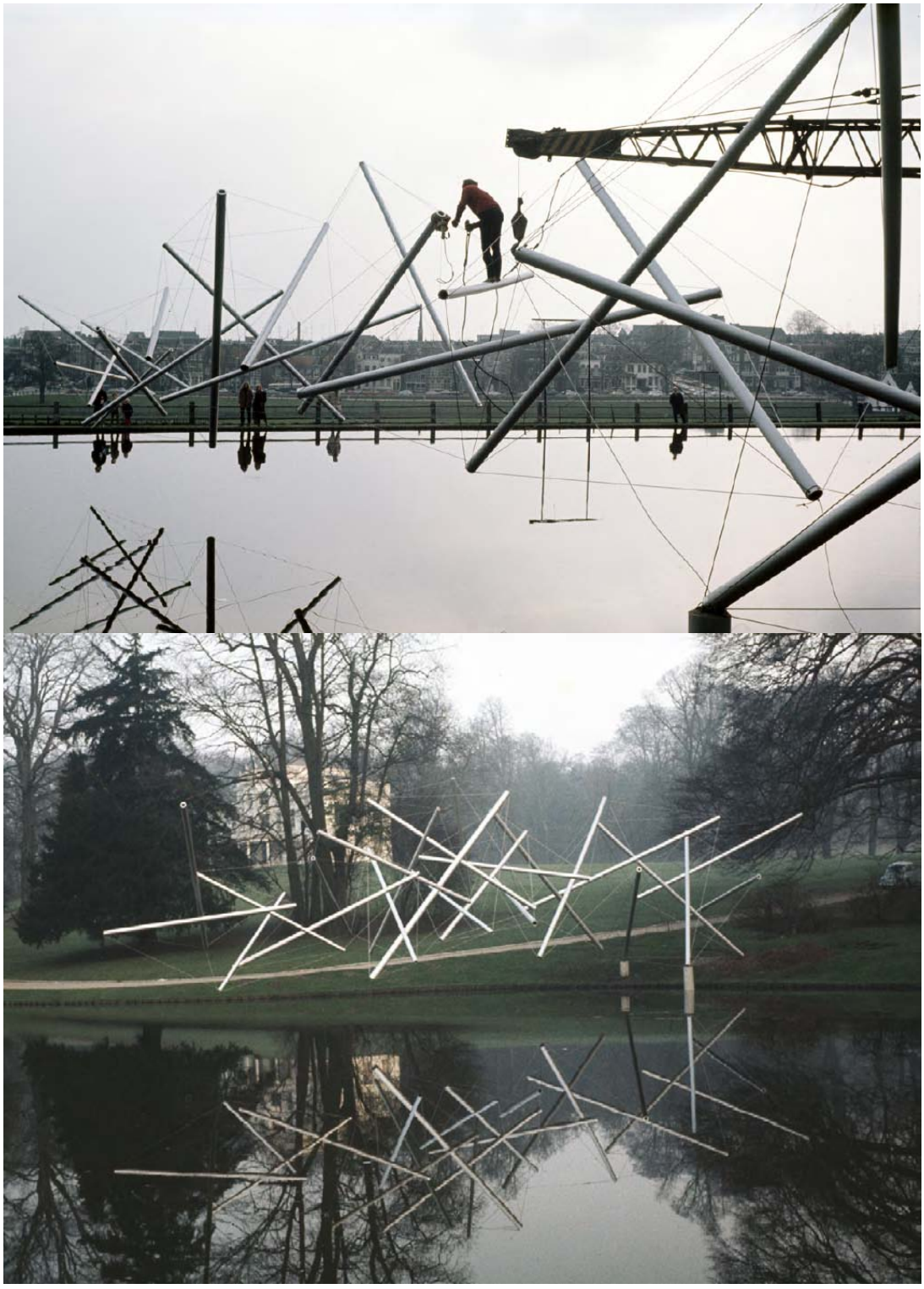
شکل الف-۱: برج نیدل- آلومینیوم و فولاد ضد زنگ

[۱] Needle Tower



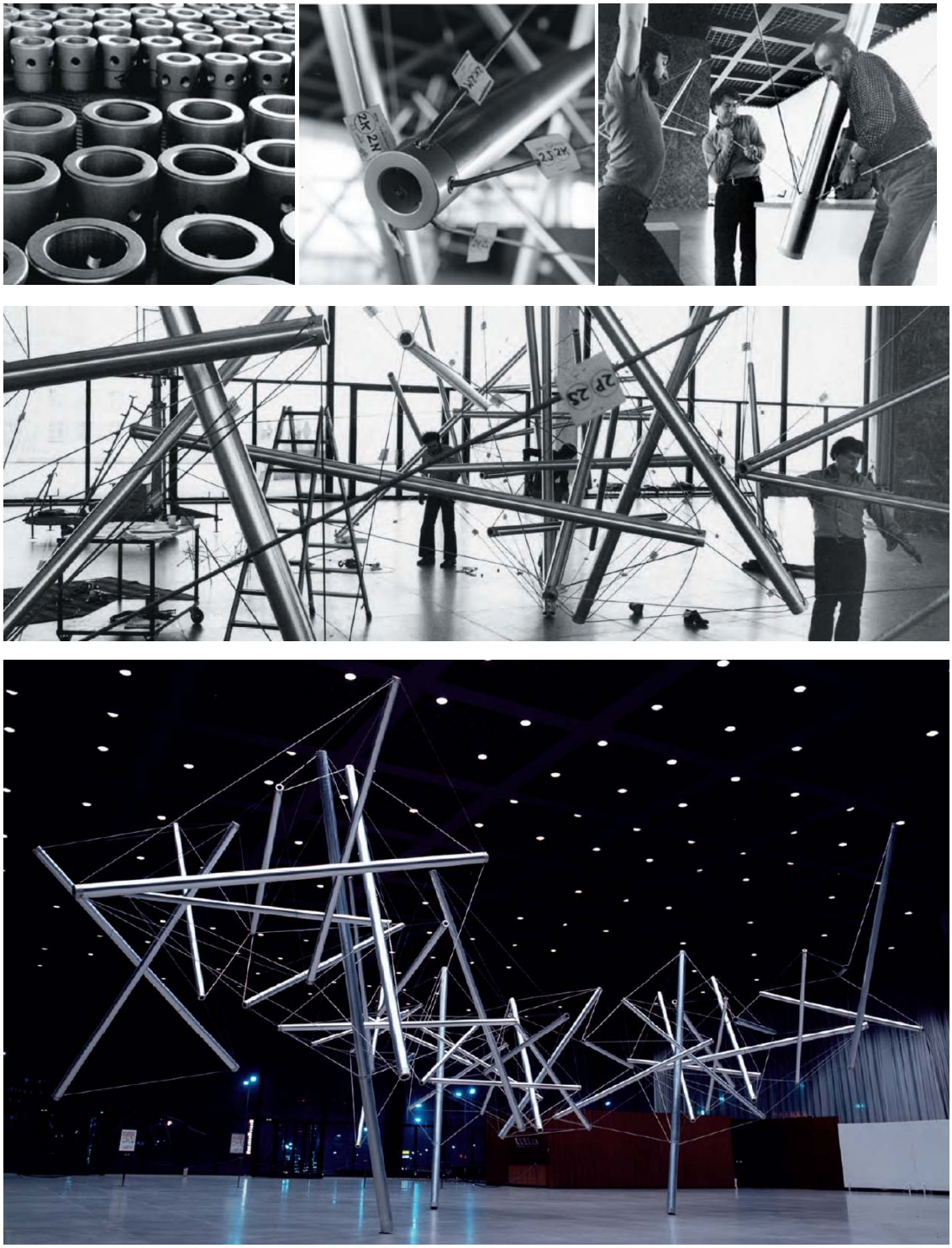
شکل الف-۱: برج ایکس-پلنر[۱]، ۱۹۸۸-۱۹۶۲ ،آلومینیوم و فولاد ضد زنگ،cm ۱۷,۱ x ۵۵,۹ x ۱۲۹,۵

[۱] X-Planar twoer



شکل الف-۲: ایزی-کی[۱] ۱۹۷۹، آلومینیوم و فولاد ضد زنگ، m ۳۲ x ۶٫۵ x ۶٫۵ ، هلند

[۱] Easy-K



شکل الف-۳: نیو دایمنشن[1]، ۱۹۷۷، (سافت لندینگ[2]، ۷۷-۱۹۷۵)، آلومینیوم و استیل ضد زنگ
۱۳,۷ x ۱۹,۲ x ۵,۲ m ، آلمان

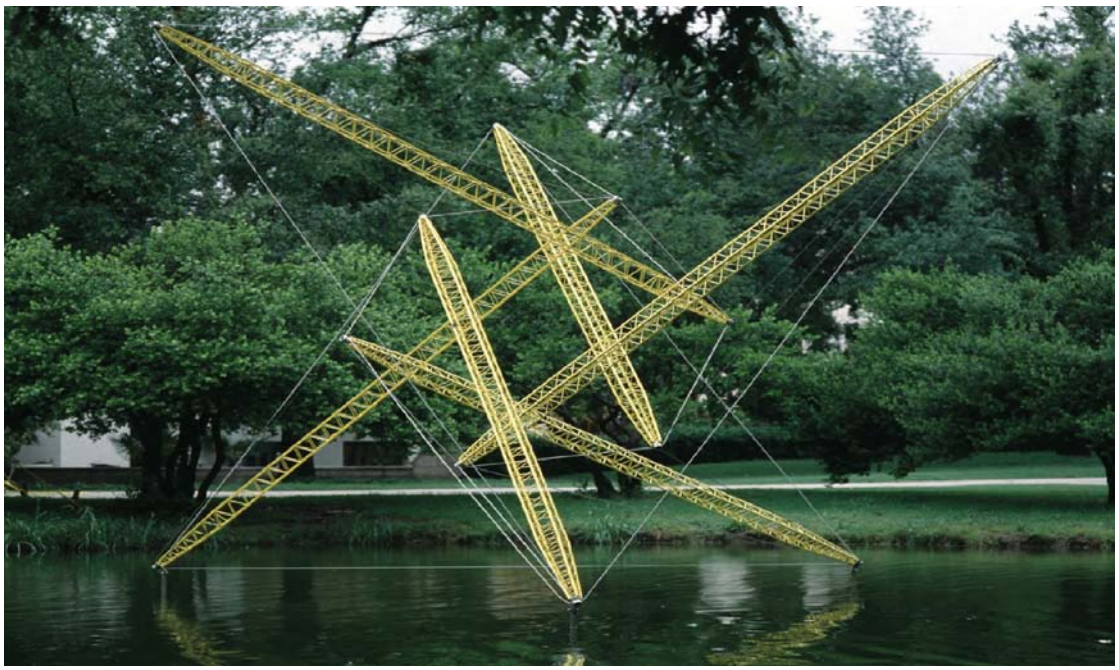
[1] New Dimension
[2] Soft Landing

شکل الف-۴: دراگون[۱] ۲۰۰۰-۱۹۹۹، استیل زدزنگ ، m ۹,۲۹ x ۹,۴۴ x۳,۶۵

شکل الف-۵: کی سیتی[۲]، ۱۹۶۸، آلومینیوم و فولاد ضدزنگ، m ۳,۶۵ x ۱۲,۲ x ۱۲,۲، فرانسه

[۱] Dragon
[۲] Key City

شکل الف-۶: قوس رنگین کمان[۱]، ۲۰۰۱، آلومینیوم و فولاد ضدزنگ، ۸۱,۳ cm x ۳۸۶,۱ x ۲۱۳,۴



شکل الف-۷: نورس وود[۲]، ۱۹۶۹، فولاد رنگ شده و ضدزنگ، ۳,۶۵ m x ۳,۶۵ x ۳,۶۵، دالاس، تگزاس

[۱] Rain bow Arch
[۲] North Wood

پیوست ب : روشهای تحلیل غیرخطی

روش نیوتون – رافسون

اساس روش‌های عناصر محدود بر اساس رابطه زیر می‌باشند:

$$[k]\{u\} = \{F^a\} \qquad (ب-۱)$$

که در این معادله "k" عبارتست از ماتریس سختی، $\{u\}$ بردار جابجایی ها و "F^a" بردار نیروی اعمالی به سیستم می‌باشد. اگر در معادله (ب-۱) ماتریس سختی تابعی از جابجایی‌ها باشد، آنگاه معادله بالا غیرخطی خواهد شد.

روش نیوتون – رافسون یک روش فرایند تکراری حل معادلات غیرخطی می‌باشد که به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$[k_i^T]\{\Delta U_i\} = \{F^a\} - \{F_i^{nr}\} \qquad (ب-۲)$$

$$\{U_{i+1}\} = \{U_i\} + \{\Delta U_i\} \qquad (ب-۳)$$

$[k_i^T]$ = ماتریس سختی مماسی

i = نشان دهنده تکرار تعادل موجود

$\{F^a\}$ = بردار بارهای اعمال شده

$\{u\}$ = بردار تغییر مکان

$\{F_i^{nr}\}$ = بردار بارهای مقاوم مربوط به بارهای داخلی عناصر

هر دو مقدار $[k_i^T]$ و $\{F_i^{nr}\}$بر اساس مقادیر $\{U_i\}$ تعیین می‌شوند. سمت راست معادله (ب-۲) بردار بار باقی مانده یا غیرتعادل است. در شکل (۷-۹) می‌توان این فرایند را برای دو تکرار مشاهده کرد.

اگر تحلیل شامل غیرخطی‌های وابسته به مسیر (مانند پلاستسسیته) باشد، فرایند تحلیل نیاز دارد که برخی از گام‌های داخلی در تعادل باشند تا مسیر بار را به درستی دنبال کنند. این فرایند با تعریف

تحلیل نموی گام‌به‌گام انجام می‌شود. یعنی بردار بار نهایی $\{F^u\}$ با اعمال بار به صورت افزایشی و انجام تکرارهای نیوتن – رافسون در هر گام بدست می‌آید:

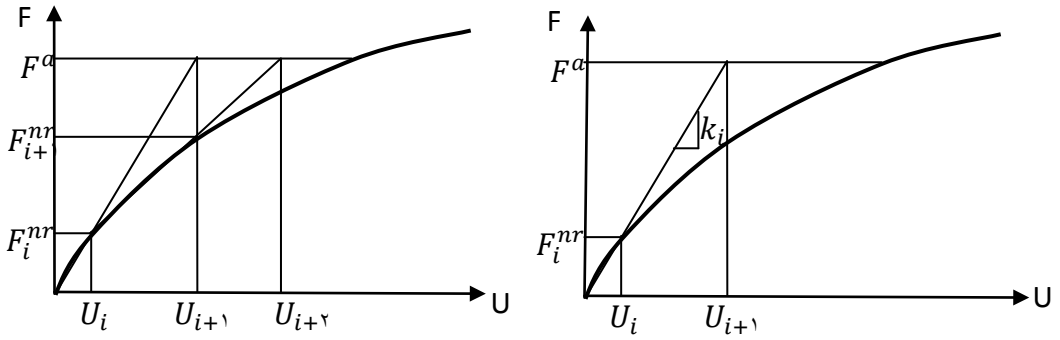
$$[k_{n,i}^T]\{\Delta U_i\} = \{F_n^u\} - \{F_{n,i}^{nr}\} \quad (ب-۴)$$

$[k_{n,i}^T]$ = ماتریس سختی مماسی برای گام n و تکرار i

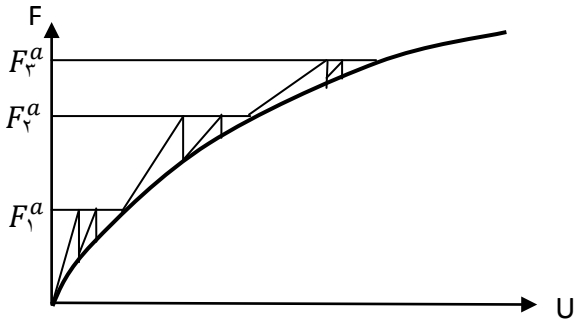
$\{F_n^u\}$ = بردار کل نیروی اعمال شده در گام n

$\{F_{n,i}^{nr}\}$ = بردار نیروی مقاوم برای گام n و تکرار i

این فرایند روش نموی نیوتن – رافسون نام دارد و در شکل (الف-۱۰) نشان داده شده است.



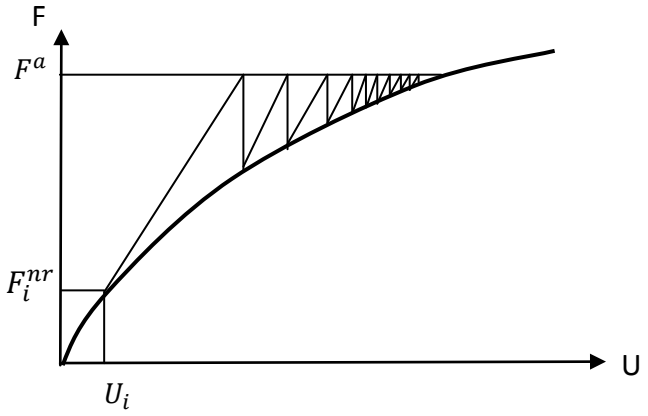
شکل الف-۸: روش نیوتن – رافسون



شکل الف-۹: روش نموی نیوتن – رافسون

در حالت کلی اگر ماتریس سختی در هر مرحله تکرار تغییر کند، روش حاصل را روش نیوتن – رافسون کامل گویند(مانند دو حالت قبل). بجای این روش می‌توان از روش اصلاح شده‌ی نیوتن – رافسون که تغییرات کمتری را در ماتریس سختی اعمال می‌کند استفاده کرد. بخصوص در تحلیل‌های استاتیکی با استفاده از این روش ماتریس سختی فقط در تکرارهای اول یا دوم هر گام تغییر می‌کند.

با استفاده از این روش از هرگونه تغییر در ماتریس سختی در هر تکرار می‌توان جلوگیری کرد. روش نیوتن– رافسون اصلاح شده با سرعت کمتری در مقایسه با روش‌های دیگر به مرحله همگرایی می‌رسد درحالیکه به تعداد معادلات کمتری نیاز دارد. در شکل (ب-۱۱) می‌توان این روش را ملاحظه کرد.



شکل ب-۱۰: روش نیوتن – رافسون اصلاح شده

روش طول کمان

روش طول کمان برای تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی که دارای مشکل پایداری هستند، راه‌حل مناسبی می‌باشد. مشخص است که روش‌های تکراری نیوتن– رافسون در همسایگی نقاط بحرانی فاقد کارایی و توانایی لازم می‌باشند. هنگامی که ماتریس سختی به حالت تکینی نزدیک می شود، تعداد زیادی تکرار باید مورد استفاده قرار گیرد و نیز نموهای بار کوچکتری مورد نیاز می‌باشند و سرانجام راه‌حل واگرا می‌شود. برای غلبه بر این مسئله و دنبال نمودن مسیرهای تعادل و گذر از نقاط بحرانی به محدوده‌ی پس بحرانی، چندین روش پیشنهاد شده اند که روش طول کمان یکی از این روش ها است .

کاربردهای روش طول کمان شامل پیدا کردن مسیرهای پیچیده‌ی پاسخ بار– تغییر مکان مربوط به حالت‌های کمانشی و پس کمانشی می‌باشد. روش طول کمان از تکرارهای ساده کروی برای نگه داشتن تعامد بین شعاع طول کمان و جهت عمود بر امتداد مسیر استفاده می‌کند. فرض بر این است

که بار اعمالی با استفاده از پارامتر اسکالری کنترل می‌شود. پاسخ بار– تغییر مکان ناپیوسته یا غیر-یکنواخت که معمولا در تحلیل‌های تماسی و تحلیل‌های الاستوپلاستیک کامل ملاحظه می‌شوند، نمی‌توانند به طور موثر توسط روش تحلیلی طول کمان ترسیم شوند. از دید ریاضی، روش طول کمان می‌تواند به صورت ترسیم یک منحنی تعادل در فضای متغیرهای تغییرمکان گرهی و ضریب کل بار ملاحظه شود. چون بردارهای تغییر مکان و ضریب بار اسکالر به صورت نامعلوم فرض می‌شوند، روش طول کمان یک روش گام بار اتوماتیک می‌باشد. برای مسایل با تغییر جهت تند در منحنی بار– تغییر مکان یا مصالح وابسته به مسیر، لازم است شعاع طول کمان (اندازه گام بار طول کمان) با استفاده از شعاع اولیه‌ی طول کمان محدود شود. طی تحلیل، روش طول کمان در هر زیرگام طول کمان، بر طبق درجه غیر خطی هایی که دارد، شعاع طول کمان را تغییر می‌دهد.

در روش طول کمان، شکل کلی معادله غیرخطی به صورت زیر می‌باشد:

$$[k_i^T]\ \{\Delta u_i\} = \lambda\{F^u\} - \{F_i^{nr}\} \qquad -1 \le \lambda \le 1 \qquad (ب-۵)$$

با نوشتن ضریب بار به صورت نموی در زیر گام n و تکرار i خواهیم داشت:

$$[k_i^T]\ \{\Delta u_i\} - \Delta\lambda\{F^u\} = (\lambda_n + \lambda_i)\{F^u\} - \{F_i^{nr}\} \qquad (ب-۶)$$

$\Delta\lambda$ = ضریب نموی بار

تغییر مکان نموی $\{\Delta u_i\}$ را می توان به دو بخش تقسیم نمود:

$$\{\Delta u_i\} = \Delta\lambda\ \{\Delta u_i'\} + \{\Delta u_i''\} \qquad (ب-۷)$$

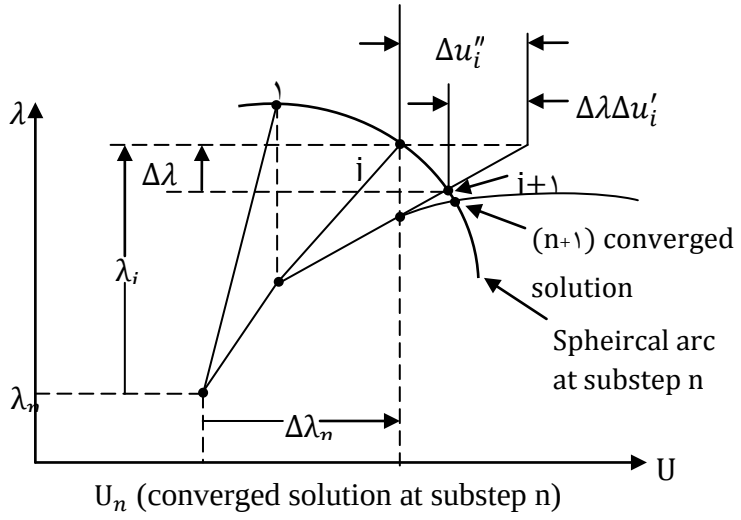
$\{\Delta u_i'\}$ = تغییر مکان ناشی از ضریب واحد

$\{\Delta u_i''\}$ = نمو تغییر مکان از روش نیوتن– رافسون

این مقادیر به روش زیر تعیین می شوند:

$$\{\Delta u_i'\} = [k_i^T]^{-1}\ \{F^u\} \qquad (ب-۸)$$

$$\{\Delta u_i''\} = -[k_i^T]^{-1}\ \{R_i\} \qquad (ب-۹)$$



شکل ب-۱۲: روش طول کمان

در هر تکرار طول کمان، استفاده از معادلات (ب-۸) و (ب-۹) برای بدست آوردن $\{\Delta u_i'\}$ و $\{\Delta u_i''\}$ لازم است. ضریب نموی بار $\Delta\lambda$ در معادله ب-۷ توسط معادله طول کمان تعیین می شود که این معادله، برای مثال در تکرار i به صورت زیر خواهد بود:

$$\ell_i^2 = \lambda_i^2 + \beta^2 \{\Delta u_n\}^T \{\Delta u_n\} \qquad (ب-۱۰)$$

β = ضریب مقیاس (با دیمانسیون تغییر مکان) بکار رفته برای اطمینان از مقیاس درست

Δu_n = مجموع نمو های تغییر مکان Δu_i این تکرار

طی تکرارها، بایستی شعاع طول کمان ℓ_i با شعاع طول کمان تکرار اول برابر باشند.

یعنی: $\ell_i = \ell_{i-1} = \ldots = \ell_j$

معادله‌های (ب-۳) و (ب-۶) ، بردار تحلیلی $(\Delta u_i , \Delta\lambda)^T$ را تعیین می‌کنند. به هر حال، راه‌های زیادی برای حل تقریبی $\Delta\lambda$ وجود دارد. در روش تکرار مشخص کروی، نخست باقی‌مانده مورد نیاز r_i برای تکرار مشخص روی یک کره محاسبه می‌شود. سپس ضریب نمو بار طول کمان به وسیله فرمول زیر تعیین می‌شود:

$$\Delta\lambda = \frac{r_i - \{\Delta u_n\}^T \{\Delta u_i''\}}{\beta^2 \lambda_i + \{\Delta u_n\}^T \{\Delta u_i'\}} \qquad (ب-۱۱)$$

و نهایتا بردار تحلیلی به صورت زیر بهنگام می شود:

$$\{u_{i+1}\} = \{u_n\} + \{\Delta u_n\} + \{\Delta u_i\}$$ (ب-۱۲)

$$\lambda_{i+1} = \lambda_n + \lambda_i + \Delta\lambda$$ (ب-۱۳)

n = شماره زیرگام موجود

همگرایی

فرایند تکراری اشاره شده تا رسیدن به مرحله همگرایی ادامه می‌یابد. برای رسیدن به مرحله همگرایی باید تعداد معادلات به تعادل لازم انتخاب شود. همگرایی وقتی حاصل می‌شود که :

$$\|\{R\}\| < \varepsilon_R R_{ref}$$ (همگرایی نامتعادل) (ب-۱۴)

و یا

$$\|\{\Delta U_i\}\| < \varepsilon_U U_{ref}$$ (همگرایی افزایشی) (ب-۱۵)

که $\{R\}$ عبارتست از بردار باقیمانده ها: $\{R\} = \{F^a\} - \{F^{nr}\}$

که معادله بالا برابر با سمت راست معادله نیوتن– رافسون می‌باشد. $\{\Delta U_i\}$ بردار جابجایی‌های افزایشی، ε_R و ε_U ضریب تغییرات و R_{ref} و U_{ref} مقادیر رفرنس می‌باشد.

$\| \|$ هم نشان دهنده مقدار اسکالر بردار جابجایی‌ها است. بنابراین همگرایی زمانی حاصل می‌شود که یکی از دو معادله (ب-۱۴) و یا (ب-۱۵) ارضا شود. مقدار پیش‌فرض برای ضریب تغییرات ۰,۰۰۱ می-باشد.

سه حالت مختلف برای انتخاب $\|\{R\}\|$ وجود دارد:

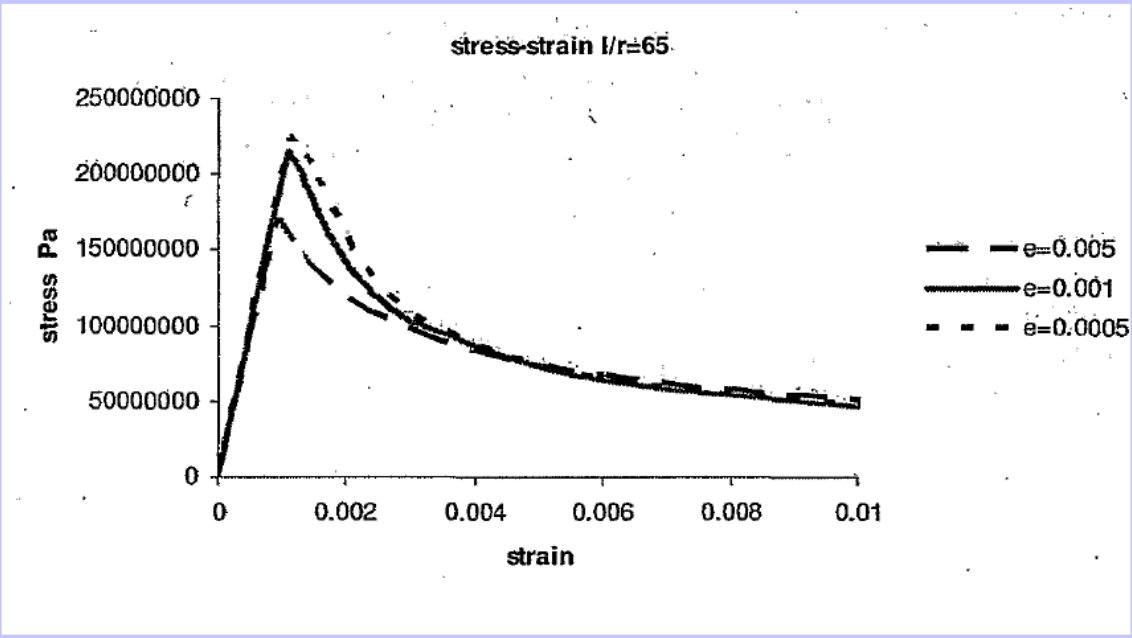
۱- حالت نامحدود $\|\{R\}\|_\infty = max \ |R_i|$

۲- حالت L۱ $\|\{R\}\|_1 = \sum |R_i|$

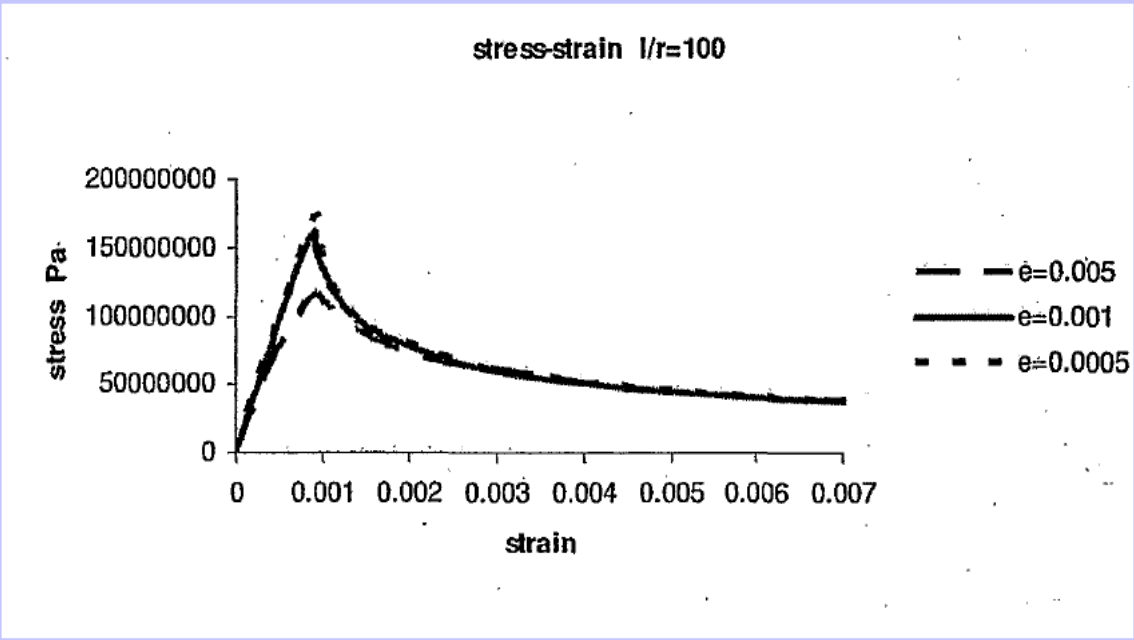
۳- حالت L۲ $\|\{R\}\|_2 = (\sum R_i^2)^{1/2}$

برای حالت همگرایی جابجایی افزایشی بجای R در معادلات بالا ΔU جایگزین می‌شود. مقدار پیش فرض برای R_{ref} برابر با $\|\{F^a\}\|$ و برای U_{ref} برابر با $\|\{U\}\|$ می‌باشد.

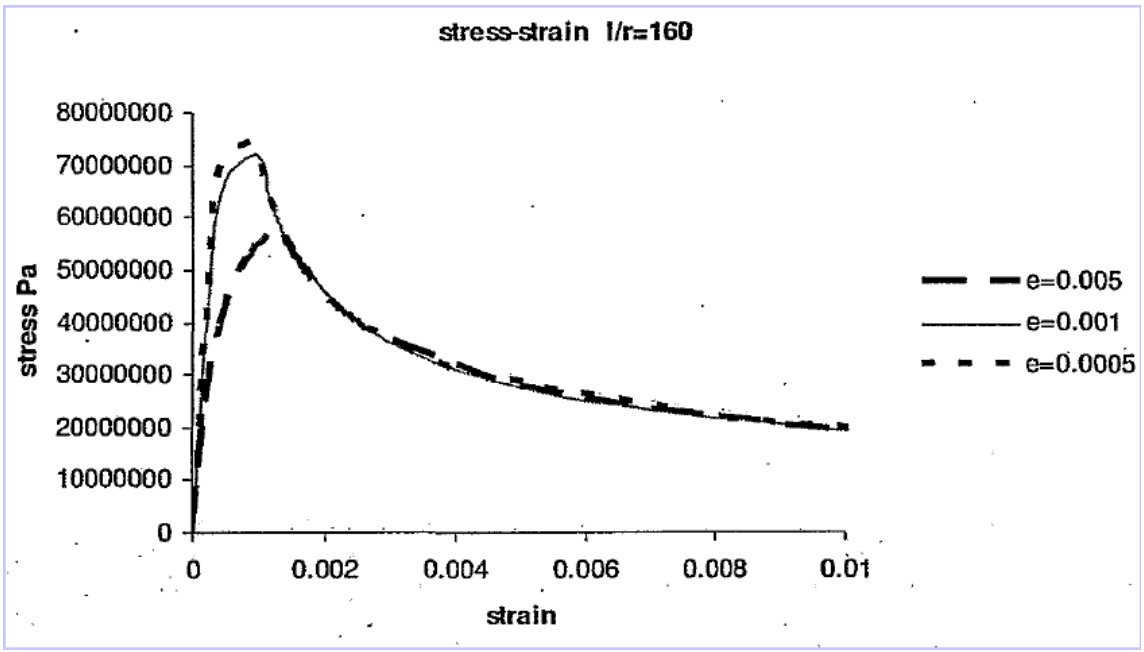
پیوست ج- رفتار تنش-کرنش محوری اعضای فشاری به ازای لاغری و ناکاملی‌های مختلف



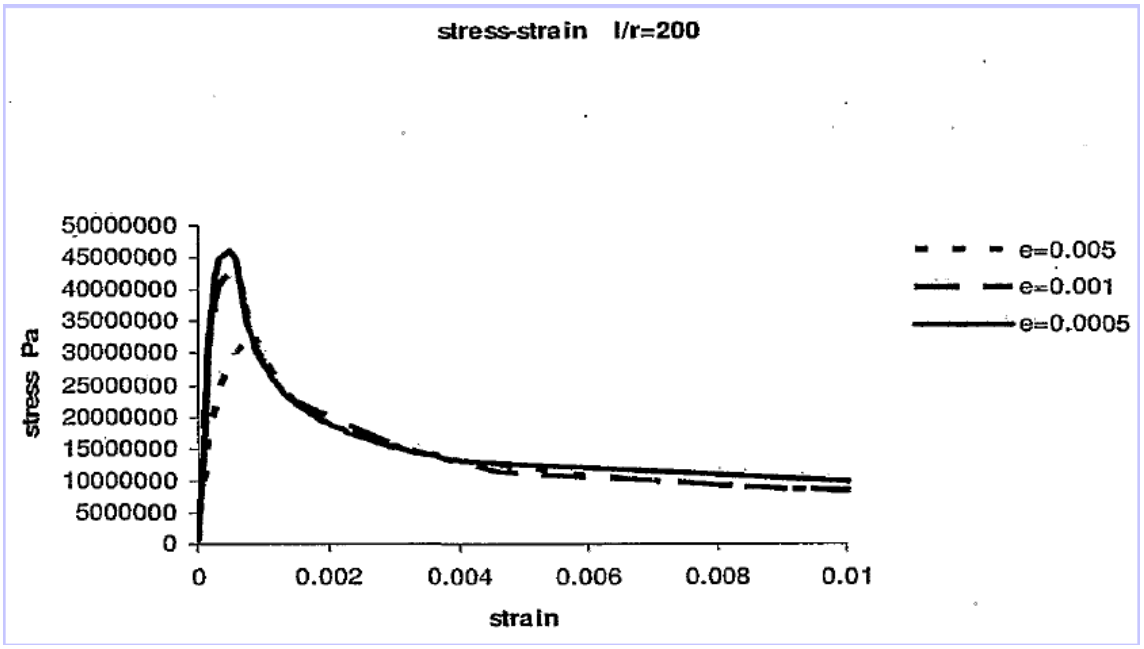
شکل ج-۱۱: رفتار تنش-کرنش محوری اعضای فشاری به ازای لاغری۶۵ و ناکاملی های مختلف



شکل ج-۱۲: رفتار تنش-کرنش محوری اعضای فشاری به ازای لاغری۱۰۰ و ناکاملی های مختلف



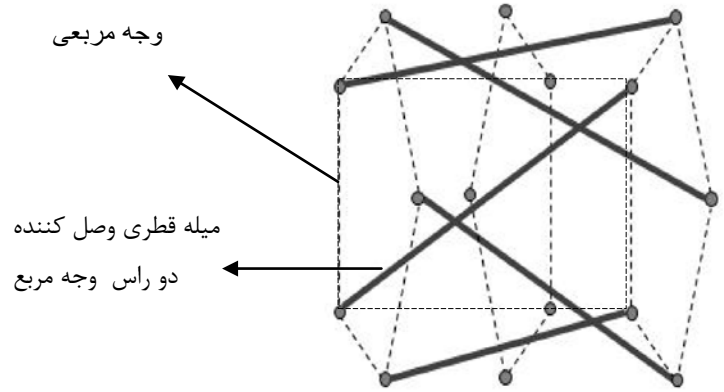
شکل ج-۱۳: رفتار تنش-کرنش محوری اعضای فشاری به ازای لاغری ۱۶۰ و ناکاملی‌های مختلف



شکل ج-۱۴: رفتار تنش-کرنش محوری اعضای فشاری به ازای لاغری ۲۰۰ و ناکاملی‌های مختلف

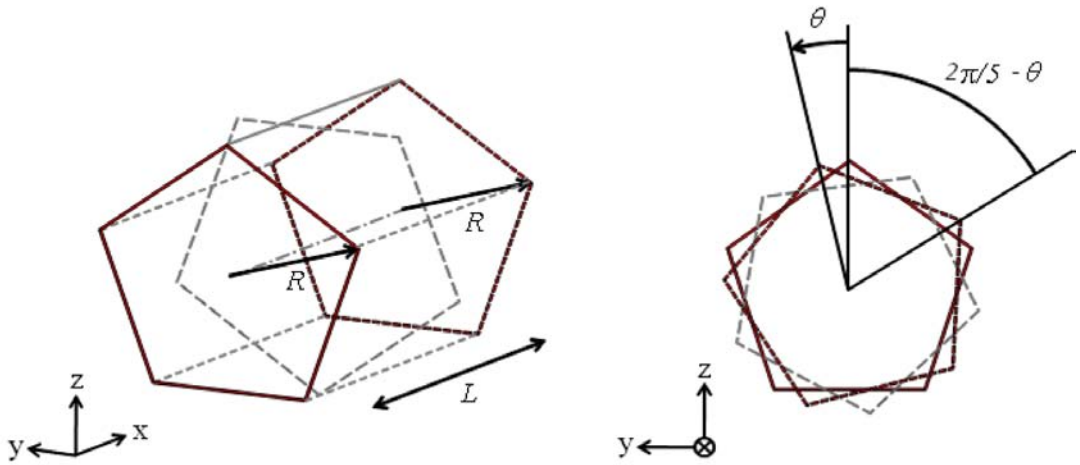
پیوست د : آرایش سازه ای مدول تنسگریتی حلقه ای پنج ضلعی

اساس هندسی مدول برپایه یک منشور مستقیم با پایه پنج‌ضلعی است. شکل(د-۱۶). لبه‌های عمودی در انتها حذف خواهند شد. درهریک از وجه‌های مربع‌های کناری منشور اولیه، ۵ میله قطری، یک راس را در امتداد قطر به راس دیگر متصل می‌کند.



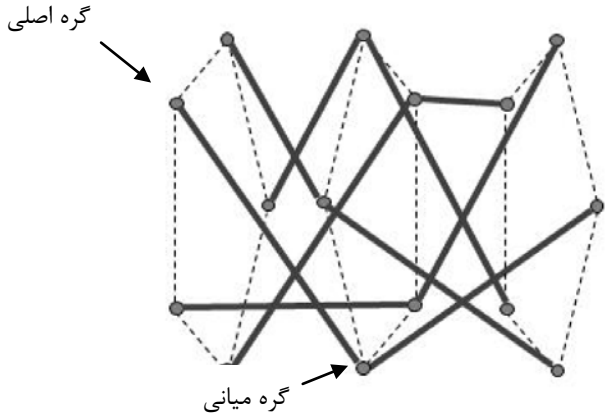
شکل د-۱۵ : میله‌های قطری مدول

گره‌های لایه میانی، تشکیل یک پنج‌ضلعی می‌دهند که نسبت به پنج‌ضلعی خارجی در امتداد طولی به اندازه ۳۶ درجه در جهت خلاف عقربه‌های ساعت چرخانده شده‌اند. شکل(د-۱۷).



شکل د-۱۶ : مشخصات هندسی بر اساس L و R و θ

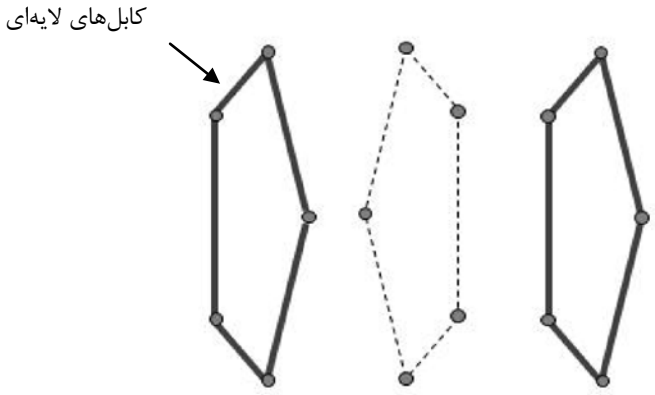
۱۰ میله میانی هر یک از گره‌های میانی[۱] را به هر یک از گره‌های اصلی[۲] مرتبط با وجوه مدول متصل می‌کنند. شکل(د-۱۸). گره‌های میانی در یک دایره مشخص در وسط طول مدول قرار گرفته اند.



شکل د-۱۷ : میله‌های میانی مدول

دو نوع کابل وجود دارد:

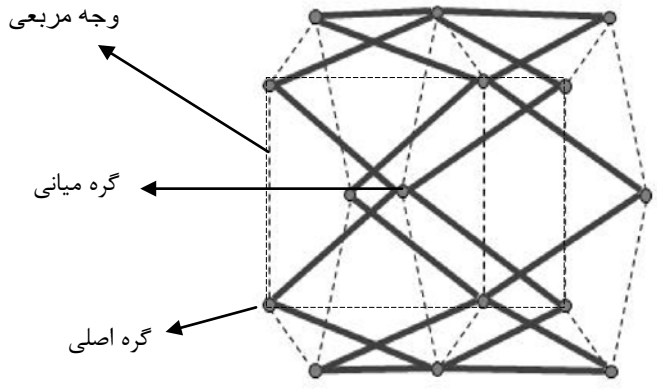
ده کابل لایه‌ای که گره‌های اصلی را در دو وجه مدول به هم متصل می‌کند، (۵ کابل برای هر وجه خارجی) شکل(۷-۱۹).



شکل د-۱۸ : کابل‌های لایه‌ای مدول

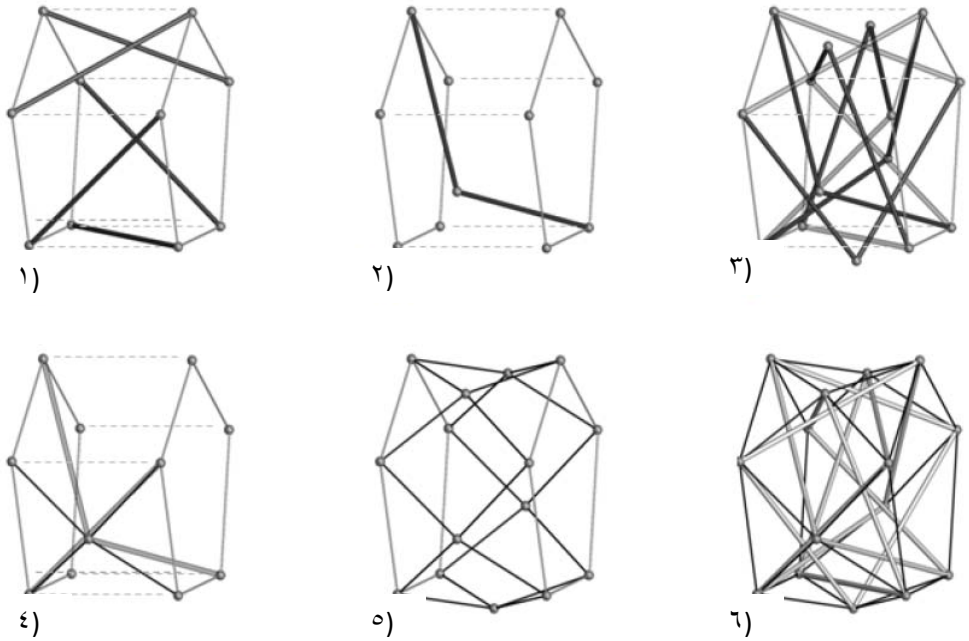
[۱] Middle node
[۲] Base point

۲۰ کابل X که گره‌های میانی را به گره‌های اصلی متصل می‌کند. (۴ کابل برای هر گره خارجی که این کابل‌ها با چهارگوشه هریک از وجه‌های مربع‌های کناری منشور اولیه، پیوند می‌یابند).

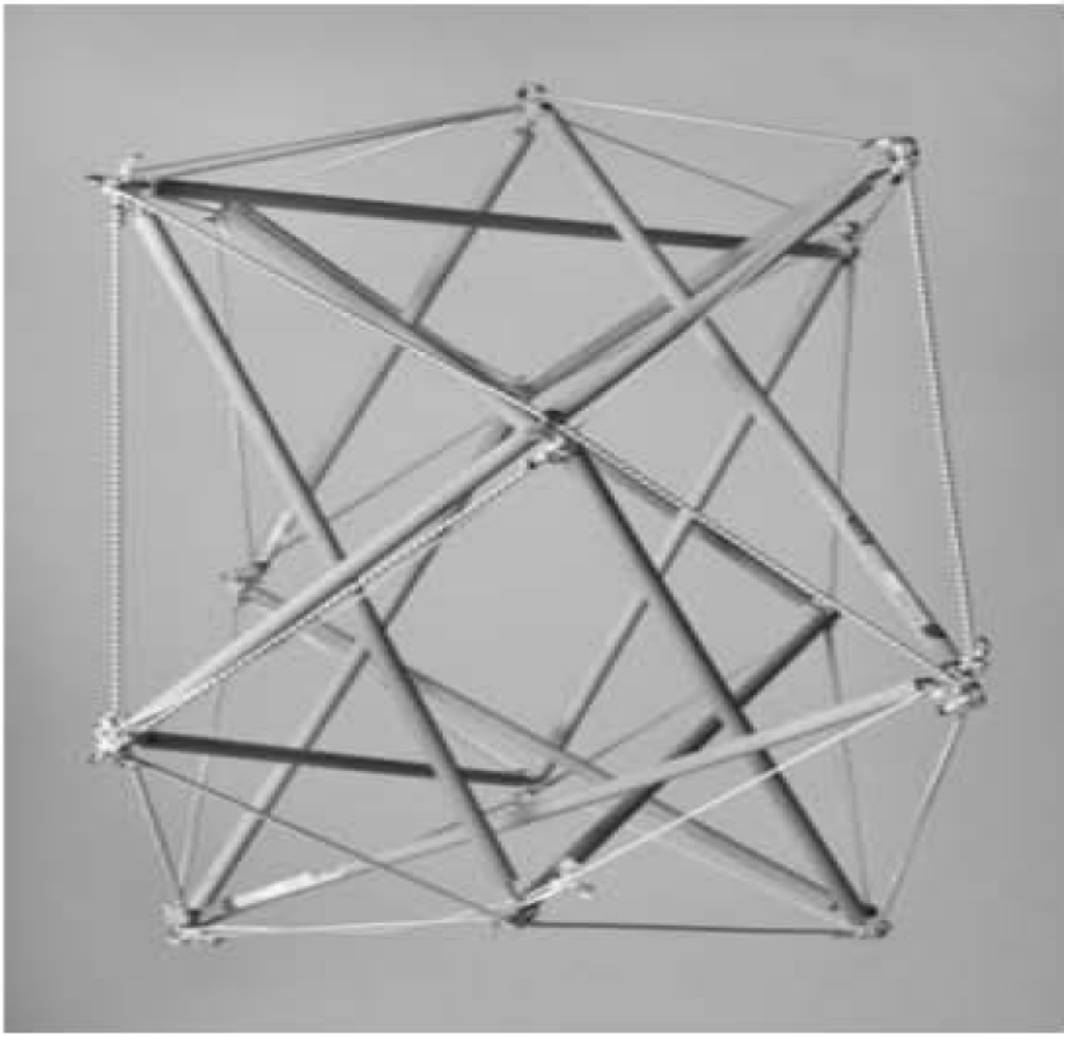


شکل د-۱۹ : کابل‌های X مدول

فرایند کلی شکل‌گیری مدول حلقه‌ای پنج‌ضلعی در شکل زیر رسم شده است:



شکل د-۲۰: توپولوژی مدول: ۱-کابل‌های لایه‌ای و میله‌های قطری ۲-اضافه شدن میله‌های میانی برای یک وجه ۳- اضافه شدن تمام میله‌های میانی ۴- اضافه شدن کابل‌های X برای یک وجه ۵-تمام کابل‌های مدول ۶-مدول تنسگریتی حلقه‌ای پنج‌ضلعی



شکل د-۲۱ : یک مدل فیزیکی کوچک از مدول پنج ضلعی تنسگریتی حلقه ای[۳۰]

پیوست و : توپولوژی مدول تنسگریتی حلقه ای پنج ضلعی

جدول د-۱: شماره‌گذاری گره‌ها و مختصات گره‌ای

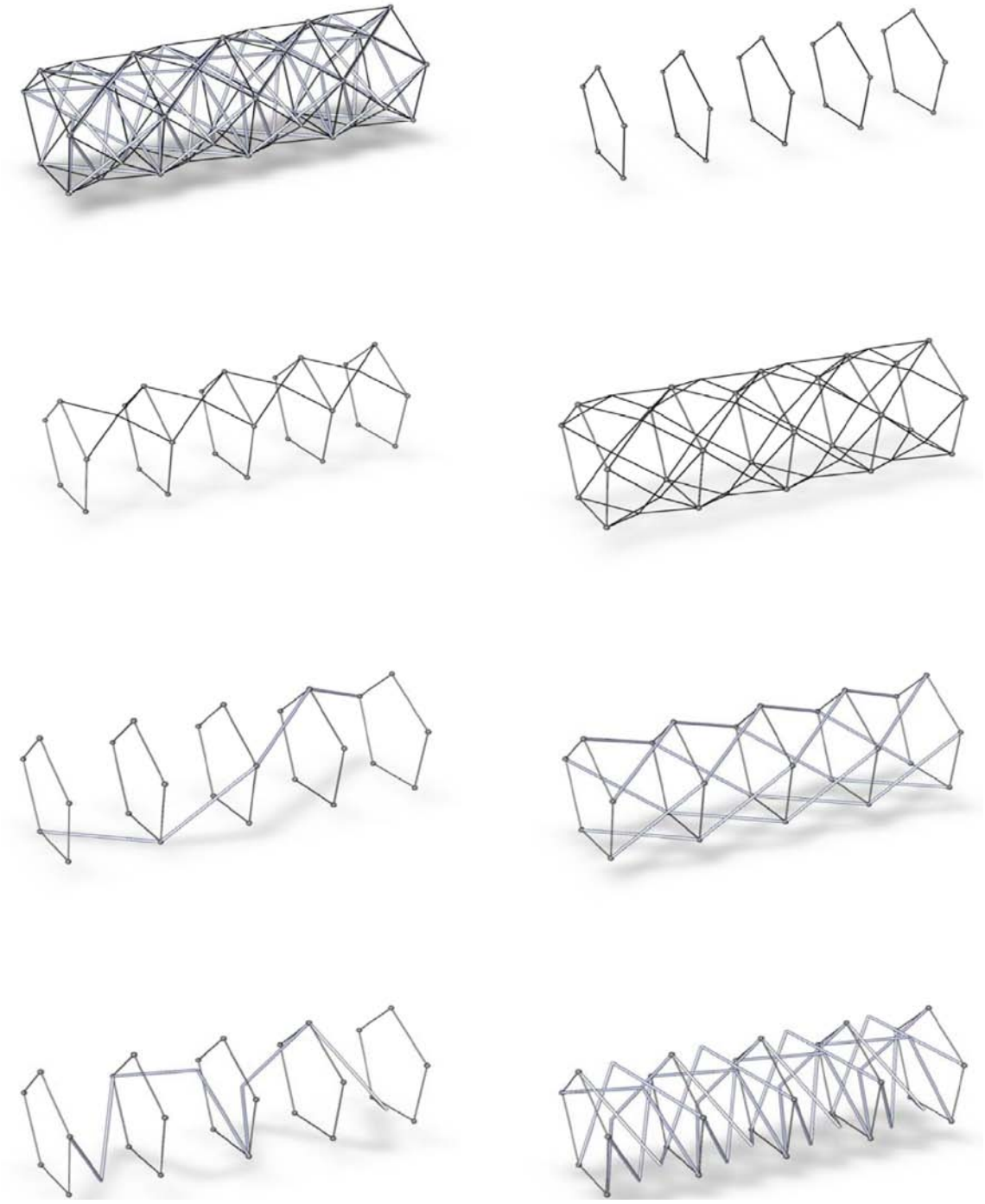
شماره گره	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)
۱	۰,۰	۰,۰	۳۱۱,٦
۲	۰,۰	-۲۹٦,۳	۹٦,۳
۳	۰,۰	-۱۸۳,۱	-۲٥۲,۱
٤	۰,۰	۱۸۳,۱	-۲٥۲,۱
٥	۰,۰	۲۹٦,۳	۹٦,۳
٦	۲۰۰,۰	-۱۸۳,۱	۲٥۲,۱
۷	۲۰۰,۰	-۲٦۹,۳	-٦۹,۳
۸	۲۰۰,۰	۰,۰	-۳۱۱,٦
۹	۲۰۰,۰	۲٦۹,۳	-۹٦,۳
۱۰	۲۰۰,۰	۱۸۳,۱	۲٥۲,۱
۱۱	٤۰۰,۰	۰,۰	۳۱۱,٦
۱۲	٤۰۰,۰	-۲۹٦,۳	۹٦,۳
۱۳	٤۰۰,۰	-۱۸۳,۱	-۲٥۲,۱
۱٤	٤۰۰,۰	۱۸۳,۱	-۲٥۲,۱
۱٥	٤۰۰,۰	۲۹٦,۳	۹٦,۳

جدول د-۲: شماره‌گذاری المان‌ها، اتصالات گره‌ای و مشخصات المان‌ها

مشخصات	گره B	گره A	شماره المان
میله‌های قطری	۱۲	۱	۱
میله‌های قطری	۱۳	۲	۲
میله‌های قطری	۱٤	۳	۳
میله‌های قطری	۱٥	٤	٤
میله‌های قطری	۱۱	٥	٥
میله‌های میانی	۹	۱	٦
میله‌های میانی	۱۰	۲	۷
میله‌های میانی	٦	۳	۸
میله‌های میانی	۷	٤	۹
میله‌های میانی	۸	٥	۱۰
میله‌های میانی	۷	۱۱	۱۱
میله‌های میانی	۸	۱۲	۱۲
میله‌های میانی	۹	۱۳	۱۳
میله‌های میانی	۱۰	۱٤	۱٤
میله‌های میانی	٦	۱٥	۱٥
کابل‌های لایه ای	۲	۱	۱٦
کابل‌های لایه ای	۳	۲	۱۷
کابل‌های لایه ای	٤	۳	۱۸
کابل‌های لایه ای	٥	٤	۱۹
کابل‌های لایه ای	۱	٥	۲۰
کابل‌های لایه ای	۱۲	۱۱	۲۱
کابل‌های لایه ای	۱۳	۱۲	۲۲
کابل‌های لایه ای	۱٤	۱۳	۲۳
کابل‌های لایه ای	۱٥	۱٤	۲٤
کابل‌های لایه ای	۱۱	۱٥	۲٥
کابل‌های X	۱	٦	۲٦
کابل‌های X	۲	٦	۲۷
کابل‌های X	۱۱	٦	۲۸
کابل‌های X	۱۲	٦	۲۹
کابل‌های X	۲	۷	۳۰

کابل‌های X	۳	۷	۳۱
کابل‌های X	۱۲	۷	۳۲
کابل‌های X	۱۳	۷	۳۳
کابل‌های X	۳	۸	۳٤
کابل‌های X	٤	۸	۳٥
کابل‌های X	۱۳	۸	۳٦
کابل‌های X	۱٤	۸	۳۷
کابل‌های X	٤	۹	۳۸
کابل‌های X	٥	۹	۳۹
کابل‌های X	۱٤	۹	٤۰
کابل‌های X	۱٥	۹	٤۱
کابل‌های X	۱	۱۰	٤۲
کابل‌های X	٥	۱۰	٤۳
کابل‌های X	۱۱	۱۰	٤٤
کابل‌های X	۱٥	۱۰	٤٥

پیوست ه : توپولوژی پل عابرپیاده تنسگریتی حلقه ای[۳۰]



شکل ه-۲۲ : توپولوژی پل عابرپیاده تنسگریتی حلقه‌ای [۳۰]

فهرست منابع

[۱] J.G.A Croll, A.C.Wallker, “ **Elements of structural stability.**” , Londen and Basingstoke: First published By The Macmilan Press Ltd , 1972 .

[۲] R. Motro, “ **Tensegrirty:structural systems for the future.**” , Hermes ed. U.K. , 2003 .

[۳] N. Ben Kahla, k .Kebiche, “ **Nonlinear Elastoplastic Analysis of Tensegrity.**” Engineering Structure 23 (2000) 1552-1566 .

[۴] G. Tibert, “ **Deployable tensgrity structures for space applications.**” , PhD Thesis, Royal Institute of Technology, Stckholm, Sweden, 2002 .

[۵] L. Rhode-Barbarigos, “ **Active and Deployable Structures: A Tensegrity Pedestrian Bridge.** ”,ENAC Research day poster , 2012 .

[۶] عابدی. کریم، " تحلیل پایداری سازه‌های فضاکار, تبریز" ، دانشگاه صنعتی سهند ، ۱۳۸۸.

[۷] “ http://www.google.com.”

[۸] G.S.Ramaswamy, M.Eekhout, G.R.Suresh, “ **Analysis,design and construction of steel space frams.**” , Thomas Telford Publishing, 2002 .

[۹] W. B. Bing, “ **Free standing Tension Structures From tensegriy systems to cable strut systems.“**, NY,USA: Spon-Press , 2004.

[۱۰] “ www.tensegrity.wikispaces.com.”

[۱۱] C.S. Chen, and D.E. Ingber, “ **Tensegrity and mechanoregulation: from skelton to cytoskeleton.** ”,.Osteoarthritis and Cartilage, 7 , pp. 81-94 1999 .

[۱۲] Robert E. Skelton, Mauricio C. de Oliveira, “ **Tensegrity Systems.** ”, Springer,London, New York, 2009 .

[۱۳] D . Stamenovic, “ **Effects of cytoskeletal prestress on cell rheological behavior.** ”,Acta Biomaterialia, 1 , 3 pp. 255-262 .

[۱۴] “ http://www.micro.magnet.fsu.edu.”

[۱۵] R. Motro “ **Structural morphology of tensegrity systems.** ”,International Journal of Space Structures 11(1-2): 25-32 .1996 .

[١٦] R.B. Fuller, " **Tensile-integrity structures.** ",United State Ptent 3,063,521 ,Field 31 Agust 1959, Grants 13 Novenber 1962 .

[١٧] R. Motro, " **Tensegrity systems: the state of the art.** ",International Journal of Space Structures 7(2): 75-82.1992 .

[١٨] K. Snelson," **Snelson on tensegrity.** ",International Journal of Space Structures ,1996 .

[١٩] " http://www.kennethsnelson.net."

[٢٠] " http://www.northropgrumman.com."

[٢١] A. Paronesso , R. Passera, " **The cloud of Yverdon.** ",IASS Symposium, 184-5, 2004 .

[٢٢] A.Paronesso, " **The 2002 World Cycling Center Arena Aigle.** ",Switzerland. International IASS .

[٢٣] H. Klimke, S.Stephan, " **The making of a tensegrity tower.** ",IASS 2004 Symposium, International Association for Shell and Spatial Structures .

[٢٤] H. Kenner, " **Geodesic Math and How to Use It**. " , Berkley, California, 1976 .

[٢٥] C. Sultan, " **Tensegrity Structures: Sixty Years of Art, Science, and Engineering**." 2007.

[٢٦] J. Quirant , MN. Kazi-Aoual , R. Motro " **Designing tensegrity systems: the case of a double layer.** ",Engineering Structures. 2003;25(9):1121-30 .

[٢٧] R. M. A. Smaili, " **Foldable/unfordable curved tensegrity systems by finite mechanism.** ",activation. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures. 2007;48(155):153-60 .

[٢٨] "**Analytical and numerical investigations of form-finding methods for tensegrity structures.** ",PHD Thesis ,2007 .

[٢٩] L. Rhode-Barbarigos, " **An Active Deployable Tensegrity Structure.** ",PHD Thesis, 2012.

[٣٠] K. Kebiche, M.N. Kazi-Aoual, R. Motro, " **Geometrical non-linear analysis of tensegrity systems.** ",Engineering Structures 21 (1999) 864 -876.

[٣١] MR.Barnes, " **Form Finding and Analysis of Tension Structures by Dynamic Relaxation.** ",International Journal of Space Structures. 1999;14:89-104 .

[٣٢] AG. Tibert, S. Pellegrino, " **Review of Form-Finding Methods for Tensegrity Structures.** ",International Journal of Space Structures. 2003;18:209-23 .

[۳۳] SH Juan , Tur JM.Mirats, " **Tensegrity frameworks: Static analysis review. Mechanism and Machine Theory.**",81-859:(7) 43:2008. "

[۳۴] C. R.Calladine, " **Buckminster Fuller's Tensegrity.**" structures and Clerk Maxwell's rules for the construction of stiff frames ",International Journal of Solids and Structures 14(2):161-172 ,1978 .

[۳۵] S. Pellegrino, " **Deployable structures.** ", Springer, 2001 .

[۳۶] C.R.Calladine , S.Pellegrino, " **First-order infinitesimal mechanisms.** ",International Journal of Solids & Structures, 27,1991 , 505-515.

[۳۷] RE.Skelton ,R. Adhikari , JP.Pinaud ,C. Waileung , JW.Helton, " **An introduction to the mechanicsof tensegrity structures.** ",Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Orlando,Machine Theory.2008;43(7):859-81 .

[۳۸] شکسته بند، " بررسي رفتار پایداری استاتیکی سازه‌های فضاکار کش‌بستی "، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

[۳۹] V. Raducanu , R. Motro, " **New Tensegrity Grids.** ",IASS Symposium, Nagoya, 2001 .

[۴۰] k. Abedi, " **Instability Behaviour and Collapse Analysis of Space Structures.** ", Proceeding of the First National Conference on Space Structures, Iran, Tehran, May 15-17,2000 .

[۴۱] Behzad Shekastehband, Karim Abedi, Mohammad Reza Chenaghlou, " **Nonlinear Dynamic Analysis of Tensegrity Structures.** " 4th National Congress on Civil Engineering , 2008.

[۴۲] M.R. Sheidaii ,K. Abedi, A. Behravesh, " **Collapse Behaviour of Double Layer Space Trusses.** ",lASS Symposium 2001, Nagoya .

[۴۳] شیدایی. محمدرضا ، عابدی. کریم ، "بررسی رفتار کمانشی اعضا فشاری به روش اجزا محدود "، اولین کنفرانس سازه‌های جدار نازک ایران، دانشگاه ارومیه، ۱۳۸۱.

[۴۴] س.س. راو، مترجم: مجذوبی.غلامحسین، فریبا. فرزاد، روش اجزای مجدود در مهندسی، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا.

[۴۵] H.Nooshin, P.Disney, " **Formex Configuration Processing.** ",International journal of Space Structures Vol.15,No. 1, 2000 .

[۴۶] A. Micheletti, " **Una passerella pedonale tensintegra per il campus di TorVergata.** ", Aprile 2009.

[۴۷] A. Micheletti, " **Tensegrity modules for cable-strut systems.** ",IASS Poster .

[۴۸] A. Micheletti, " **Modular Tensegrity Structure: The Tor Vergata Footbridge.** "

[۴۹] R. Motro , B. Maurin , C. Silvestri, " **Tensegrity Rings and the Hollow Rope.** ",IASS Symposium 2006, New Olympics, New Shells and Spatial Structures.

[۵۰] L. Rhode Barbarigos, N. Bel Hadj Ali, R. Motro, and Smith, " **Designing tensegrity modules for pedestrian bridge.** ",Engineering Structures ,vol.۳۲, No.4, 2010 .

Abstract

The Tensegrity Systems are a specific type of Space Frame Structures (SFS) in which cables are used as the alternative tension members. A series of tensile and compressive elements are assembled in a self-equilibrated state, which provides stability and rigidity to the system. The study of Tensegrity structures is distinct from other type of the SFS due to specific features, which include: ١) the need for applying self-tensioning for creating stiffness; ٢) the lack of strain hardening for tensile members after the plastic region; ٣) the possibility of loosening and tightening of the tension members.

In this research, the Tensegrity Structures are treated as special type of SFS. The principles and the basic concepts of these structures along with the relevant method of analysis for the structural Tensegrity (geometric and material nonlinearities) are presented. The appropriate configuration for a Tensegrity pedestrian bridge has been selected for the architectural considerations. After geometric modeling and finite element configuration, the structure, under different levels of Self-tensioning and different ratio of cable stiffness to strut, was analyzed using the Abaqus software. The results obtained from the analysis indicated that in the fixed stiffness ratio of the cable to the strut, increasing of self-tensioning levels do not affect the initial stiffness of the structure, but the ultimate load is slightly affected. However, it is quite effective on the increasing load on the stiffening starting point, thereby, reducing the final displacement of the structure. Also in the fixed self-tensioning levels, increasing of stiffness ratio of the cable to the strut, do not affect the ultimate load of the structure, But the initial stiffness of the structure increases. However, it is quite effective on the increasing load on the stiffening starting point, thereby, reducing the final displacement of the structure .Two types of system failure were observed: overall failure and local failure without Dynamic Snap-Through. The method to prevent undesirable failure mechanisms (overall) and to guide it to desirable failure mechanisms (local) has been presented.

Keywords: Tensegrity systems, Pedestrian Bridge, Structural Design

Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

Designing Tensegrity Systems For Pedestrain Bridges

Ehsan Arbab

Supervisor:

Dr. Ali Keyhani

September 2014