



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران و معماری

پایان نامه کارشناسی ارشد

بهینه سازی سازه های تنسگریتی

احمد نجفعلی

استاد راهنما:

دکتر علی کیهانی

بهمن ۱۳۹۰

رسالة محمد



دانشگاه تبریز

دانشکده فنی مهندسی
پایان نامه کارشناسی ارشد

بهینه سازی سازه‌های تنگریتی

استاد راهنما:

دکتر علی کیهانی

دانشجو:

احمد نجفعلی

بهمن ماه ۱۳۹۰

چکیده

سازه‌های فضایی مناسب‌ترین سازه‌ها برای پوشش فضاها با دهانه‌های بزرگ می‌باشد. سازه‌های فضاکار گروهی از سازه‌ها هستند که دارای عملکرد سه‌بعدی می‌باشند. در عمل سازه‌های فضاکار به گروه خاصی از سازه‌ها گفته می‌شود که شامل شبکه‌ها، گنبد‌های استوانه‌ای^۱، گنبد‌های کروی، دکل‌ها، شبکه‌های کابلی، سیستم‌های غشایی^۲، سازه‌های تاشو^۳ و تنسگریته‌ها^۴ هستند. سازه‌های تنسگریته شامل مجموعه ناپیوسته‌ای از عناصر فشاری در داخل مجموعه پیوسته‌ای از عناصر کششی می‌باشند که به وسیله حالت خودتنیدگی^۵ پایدار می‌شوند. در سازه‌های تنسگریته لزوم اعمال پیش‌تنیدگی برای ایجاد سختی، عدم وجود سخت‌شدگی کرنشی برای اعضای کششی بعد از ناحیه پلاستیک و مکانیزم گسیختگی از جمله عوامل مهم و تأثیرگذار برای تحلیل سازه‌های تنسگریته می‌باشد. در واقع این سازه‌ها دارای چندین مکانیزم بینهایت کوچک می‌باشند، و ایجاد سختی با اعمال پیش‌تنیدگی، موجب پایداری سازه می‌گردد. در این پایان‌نامه، پس از آشنایی با روش‌های بهینه‌سازی و سازه‌های تنسگریته، بهینه‌سازی سازه‌های تنسگریته مورد بررسی قرار گرفته است. در طراحی بهینه‌سازه، متغیرهای طراحی به نحوی محاسبه می‌شوند که وزن، در ضمن ارضاء کلیه محدودیت‌های طراحی کمینه گردد. در این پایان‌نامه سطح مقطع اعضا به عنوان متغیرهای طراحی انتخاب گردیده‌اند. تابع هدف، وزن شبکه و محدودیت‌ها نیز حداکثر تنش و ماتریس‌های سختی و تنش و حداکثر تغییر مکان گره‌ها می‌باشند. بهینه‌سازی عددی به کمک نرم افزار مطلب انجام گرفته شده است و به منظور بهینه‌سازی از روش الگوریتم وراثتی استفاده گردیده است.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، مکانیزم‌های بینهایت کوچک، پیش‌تنیدگی، نقص اولیه، مکانیزم گسیختگی، سخت‌شدگی کرنشی، کمانش اعضای فشار

-
- 1-Barrel Vaults
 - 2- Membrane Systems
 - 3- Foldable Structures
 - 4- Tensegrity Structures
 - 5- self stressing

فهرست مطالب

۱	فصل اول
۱	مروری بر
۱	الگوریتم‌های جستجوی ابتکاری
۲	الگوریتم‌های جستجوی ابتکاری
۴	۱-۱- هوشمندی جمعی و خودسازماندهی
۶	۱-۳- عوامل موثر بر توانمندی الگوریتم‌های ابتکاری
۶	۱-۴- بهینه سازی
۷	۱-۴-۱- متغیرهای طراحی
۷	۱-۴-۱-۱- متغیرهای پیوسته
۸	۱-۴-۱-۲- متغیرهای گسسته
۸	۱-۴-۱-۲- تابع هدف
۸	۱-۴-۱-۳- مسائل مقید و نامقید
۹	۱-۴-۱-۴- فضای طراحی
۱۰	۱-۵- لزوم استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری
۱۱	۱-۶- آشنایی با الگوریتم‌های ابتکاری مختلف
۱۳	۱-۶-۱- الگوریتم وراثتی
۱۵	۱-۶-۱-۱- عملگرهای ژنتیکی
۱۶	۱-۶-۲- الگوریتم جمعیت مورچگان
۱۹	۱-۶-۳- الگوریتم جمعیت ذرات
۲۱	۱-۷- اهداف پایان نامه
۲۲	فصل دوم
۲۲	بهینه سازی
۲۳	۲-۱- مقدمه
۲۴	۲-۲- مسائل بهینه سازی
۲۴	۲-۳- روشهای بهینه سازی
۲۸	۲-۵- انواع متغیرهای بهینه سازی

۲۸	۶-۲- روشهای بهینه سازی
۲۹	۷-۲- روش وراثتی
۳۲	۸-۲- بهینه سازی توابع مقید ریاضی
۳۳	۱-۸-۲- تابع آزاد معادل
۳۳	۲-۸-۲- جمعیت اولیه
۳۴	۳-۸-۲- شایستگی
۳۵	۵-۸-۲- ضریب شایستگی
۳۷	۶-۸-۲- جمعیت موثر
۳۸	۷-۸-۲- کد گذاری جمعیت موثر
۴۰	۸-۵-۲- انتخاب جفت و پیوند
۴۲	۹-۵-۲- جهش ژنها
۴۳	۱۰-۵-۲- کد گشایی نسل جدید
۴۳	۱۱-۵-۲- تکرار الگوریتم:
۴۴	۱۲-۵-۲- شرط همگرایی در الگوریتم وراثتی
۴۵	فصل سوم
۴۵	معرفی و تحلیل سازههای تنسگریتی
۴۷	۱-۳- سیستمهای سازههای فضاکار
۴۷	۲-۳- اهمیت مطالعه سازههای تنسگریتی
۵۲	۳-۲- سازه تنسگریتی سه وجهی
۵۴	۲-۳-۳- سیستم مختصات:
۵۶	۴-۳- تعادل نیروها
۶۱	۶-۳- مثال عددی:
۶۶	۷-۳- بررسی نتایج مثال
۶۸	فصل چهارم
۶۸	بهینه سازی سازههای تنسگریتی
۶۹	۱-۴- بهینه سازی سازههای تنسگریتی
۷۲	۲-۴- تابع هدف
۷۳	۳-۴- متغیرهای مسئله
۷۳	۴-۴- جمعیت اولیه

۷۳	۵-۴-۵- قیود مسئله
۷۴	۶-۴-۶- تابع هدف اصلاح شده
۷۵	۸-۴-۸- تابع برازندگی
۷۵	۸-۴-۸- مراحل گام به گام بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک:
۷۶	۹-۴-۹- بهینه سازی کلاس ۲ برج‌های تنسگریتی:
۷۷	۱-۹-۴- فرمول‌بندی مسئله
۷۸	۲-۹-۴- قیدهای مقاومت
۷۸	۳-۹-۴- قیدهای کمانش
۷۹	۱۰-۴-۱۰- تیر طره تنسگریتی
۸۱	۱۲-۴-۱۲- بهینه سازی مدول برج
۸۱	۱-۱۲-۴- موضوع بار فشاری
۸۲	۲-۱۲-۴- بحث
۸۴	فصل پنجم
۸۴	تحلیل‌های ناپایداری استاتیکی بر روی شبکه‌های دولایه تنسگریتی
۸۵	۱-۵-۱- مقدمه
۸۹	۲-۵-۲- نقش استخراج مکانیزم‌های خرابی
۹۰	۳-۵-۳- بافتارهای مورد مطالعه
۹۰	۴-۵-۴- طراحی اولیه بافتار
۹۱	۴-۵-۴- طراحی اولیه بافتار
۹۲	۴-۵-۴- طراحی اولیه بافتار
۹۳	۵-۵-۵- رفتار تنش محوری - کرنش محوری اعضای فشاری
۹۴	بخش ۱۱-۶- ۱- ۳- انحراف‌های مجاز در مقاطع
۹۵	۶-۵-۶- رفتار تنش محوری - کرنش محوری اعضای کششی
۹۶	۷-۵-۷- مکانیزم‌های مورد مطالعه و پارامترهای مورد بررسی
۹۷	۸-۵-۸- تحلیل بافتار با مکانیزم کمانش اعضای فشاری
۹۷	۱-۸-۵-۱- تحلیل‌های ناپایداری استاتیکی بر روی بافتار
۹۸	۱-۸-۵-۱- تحلیل‌های مربوط به بارگذاری متقارن
۹۹	۱-۸-۵-۱- تحلیل‌های مربوط به بارگذاری متقارن
۹۹	۱-۸-۵-۱- شرایط تکیه‌گاهی نوع اول

- ۱-۱-۱-۲-۸-۵ استفاده از نمودار تنش - کرنش شکل (۱۱-۵) به عنوان رفتار مشخصه مصالح
- ۱۱۳..... اعضای کششی
- ۱-۱-۱-۲-۸-۵ بررسی تاثیر مقادیر پیش تنیدگی بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور..... ۱۱۳
- ۱-۱-۱-۲-۸-۵ مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=65$ ۱۱۳
- ۲-۱-۱-۲-۸-۵ مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=100$ ۱۱۴
- ۳-۱-۱-۲-۸-۵ مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=160$ ۱۱۴
- ۲-۱-۱-۲-۸-۵ بررسی تاثیر مقادیر نسبت‌های لاغری اعضای فشاری بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور..... ۱۱۵
- ۲-۱-۱-۲-۸-۵ استفاده از نمودار تنش - کرنش شکل (۱۲-۵) به عنوان رفتار مشخصه مصالح
- ۱۱۶..... اعضای کششی
- ۱-۲-۱-۲-۸-۵ بررسی تاثیر مقادیر پیش تنیدگی بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور..... ۱۱۶
- ۱-۱-۲-۱-۲-۸-۵ مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=65$ ۱۱۶
- ۲-۱-۲-۱-۲-۸-۵ مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=100$ ۱۱۶
- ۳-۱-۲-۱-۲-۸-۵ مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=160$ ۱۱۷
- ۲-۲-۱-۲-۸-۵ بررسی تاثیر مقادیر نسبت‌های لاغری اعضای فشاری بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور..... ۱۱۸
- ۲-۱-۲-۸-۵ شرایط تکیه گاهی نوع دم..... ۱۱۸
- ۱-۲-۱-۲-۸-۵ بررسی تاثیر مقادیر پیش تنیدگی بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور..... ۱۱۸
- ۱-۱-۲-۱-۲-۸-۵ مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=65$ ۱۱۸
- ۲-۱-۲-۱-۲-۸-۵ مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=100$ ۱۱۹
- ۳-۱-۲-۱-۲-۸-۵ مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=160$ ۱۱۹
- ۲-۲-۱-۲-۸-۵ بررسی تاثیر مقادیر نسبت‌های لاغری اعضای فشاری بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور..... ۱۲۰
- ۲-۲-۸-۵ بررسی اثر شرایط تکیه گاهی بر روی رفتار بافتار پیوسته عضو فشاری تحت اثر بارگذاری متقارن..... ۱۲۱
- ۳-۲-۸-۵ بررسی اثر نمودار تنش - کرنش اعضای کششی بر روی رفتار بافتار پیوسته عضو فشاری تحت اثر بارگذاری متقارن و شرایط تکیه‌گاهی نوع اول..... ۱۲۳
- ۱-۳-۸-۵ مقایسه رفتار بافتارهای پیوسته و ناپیوسته عضو فشاری با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی نوع اول تحت اثر بارگذاری متقارن..... ۱۲۵

۲-۳-۸-۵- مقایسه رفتار بافتارهای پیوسته و ناپیوسته عضو فشاری با در نظر گرفتن شرایط تکیه گاهی	۱۲۷
نوع دوم تحت اثر بارگذاری متقارن	۱۲۷
۹-۵- نتیجه گیری	۱۲۹
فصل ششم	۱۳۴
تاشه ذپردازی سازههای تنسگریتی	۱۳۴
۱-۶- استفاده از نرم افزارها برای فرمبندی سازههای تنسگریتی	۱۳۵
۱-۱-۶- نرم افزار فرمین	۱۳۵
۲-۱-۶- سایر نرم افزارهای فرم سازی	۱۳۶
۳-۱-۶- قالب فایل های خروجی در نرم افزار فرمین	۱۳۶
۴-۱-۶- بررسی فایل متنی ایجاد شده توسط فرمین	۱۳۷
۵-۱-۶- انتقال اطلاعات فرمکسی از فرمین به نرم افزار abaqus	۱۳۷
۶-۱-۶- انتقال اطلاعات فرمکسی از فرمین به نرم افزار Ansys	۱۳۸
فصل هفتم	۱۴۰
مثالهای عددی	۱۴۰
فصل هشتم	۱۴۴
نتایج و پیشنهادات	۱۴۴
۱-۸- نتیجه گیری	۱۴۵
۲-۸- پیشنهادات	۱۴۸
پیوست ۱	۱۴۹
مراجع	۱۶۱
و منابع	۱۶۱

فصل اول

مروری بر

الگوریتم‌های جستجوی ابتکاری

مقدمه

الگوریتم‌های جستجوی ابتکاری^۱

امروزه با بزرگ شدن مسائل و اهمیت یافتن سرعت رسیدن به پاسخ، روش‌های کلاسیک جوابگوی حل بسیاری از مسائل نیست، چرا که فضای جستجو^۲ با افزایش بعد مسئله به صورت نمایی گسترش می‌یابد و روش‌های کلاسیک به خاطر محدودیت‌های مختلف مقرون به صرفه نیستند. با توجه به ملاحظات فوق امروزه بیشتر از الگوریتم‌های جستجوی تصادفی به جای جستجوی همه جانبه استفاده می‌شود و استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و الگوریتم‌های جستجوی ابتکاری در سالهای اخیر رشد چشمگیری داشته است. تفاوت اصلی روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک و الگوریتم‌های تکاملی در فرایند جستجو و در اطلاعات استفاده شده در جستجو است که به صورت خلاصه به شرح زیر می‌باشند:

- در روش‌های کلاسیک از قوانین مشخصی برای حرکت در فضای جستجو استفاده می‌شود ولی الگوریتم‌های ابتکاری از قوانین مبتنی بر احتمال استفاده می‌کنند.
- در روش‌های کلاسیک جستجو از یک نقطه شروع می‌شود ولی در غالب روش‌های ابتکاری جستجو از مجموعه‌ای از نقاط اولیه شروع می‌شود که اجازه جستجوی موازی منطقه‌ی وسیعی از فضا را می‌دهد. در واقع در روش‌های جستجوی کلاسیک جستجو به صورت ترتیبی انجام می‌شود ولی غالب روش‌های ابتکاری از جستجوی موازی استفاده می‌کنند.
- در روش‌های کلاسیک از اطلاعات مشتق استفاده می‌شود ولی در روش‌های ابتکاری تنها از مقادیر برازندگی^۳ برای هدایت جستجو استفاده می‌گردد.
- در روش‌های کلاسیک لازم است سیستم شناخته شده باشد، اما از آنجا که روش‌های ابتکاری از اطلاعات گرادیان فضا استفاده نمی‌کنند قادرند مسائل ناشناخته یا به عبارتی سیستم‌های جعبه سیاه را نیز حل کنند [۱-۴].

الگوریتم‌های جستجوی ابتکاری الگوریتم‌هایی هستند که با الهام از فرایندهای فیزیکی بیولوژیکی و طبیعی به وجود آمده‌اند. مانند الگوریتم وراثتی^۴ با الهام از علم وراثت و تکامل (۱۹۷۵)، پخت شبیه سازی شده^۵ با الهام از مشاهدات ترمودینامیک (۱۹۸۳)، جستجوی تابو^۱ بر پایه پاسخ

1 - Heuristic Algorithms.
2- Search Space
3- Fitness.
4- Genetic Algorithm.
5 - Simulated Annealing.

حافظه (۱۹۸۶)، الگوریتم ایمنی با شبیه‌سازی سیستم دفاعی انسان (۱۹۸۶)، الگوریتم جستجوی جمعیت مورچگان^۲ با شبیه‌سازی رفتار مورچه‌ها در هنگام جستجوی غذا (۱۹۹۱) و بهینه‌سازی جمعیت ذره‌ها^۳ با تقلید از رفتار اجتماعی پرندگان (۱۹۹۵). هر کدام از الگوریتم‌های فوق خصوصیات منحصر به خود را دارند [۱-۸].

الگوریتم وراثتی یک الگوریتم جستجوی موازی است که با یک جمعیت اولیه^۴ از جواب‌های مسئله شروع شده و به مرور نسل‌های بعدی به روز می‌شوند. فرایندی که جمعیت را به سمت بهترین‌ها سوق می‌دهد و زادوولد اعضا به گونه‌ای است که به اعضای بهتر شانس بیشتری برای تولید فرزند^۵ می‌دهد [۵-۶]. در الگوریتم پخت شبیه‌سازی شده عامل جستجو کننده با سرعتی متناسب با دما حرکت تصادفی می‌کنند و موقعیت بعدی را در صورتی که موقعیت بهتری باشد انتخاب و در غیر این صورت با یک احتمال جای خود را تغییر نمی‌دهد [۷-۹]. در الگوریتم ایمنی جواب‌های مسئله به صورت آنتی‌بادی^۷ و تابع هدف^۸ به عنوان آنتی‌ژن^۹ فرض می‌شوند. آنتی‌بادی‌ای که بیشتر با آنتی‌ژن منطبق شود جواب مسئله است. الگوریتم جمعیت مورچه‌ها از اجتماعی از مورچه‌های مصنوعی^{۱۰} تشکیل شده است و اغلب برای حل مسائلی که بصورت گراف قابل بیان هستند به کار می‌رود. در این الگوریتم مورچه‌ها مسیر بین گره‌ها را برای بررسی وضعیت جواب مسئله جستجو می‌کنند [۴]. هر مورچه کشفیات خود را از طریق ردپا در مسیرها به جا می‌گذارد و از طریق ردپای سایر مورچه‌ها از تجربیات آنها بهره می‌برد [۷]. الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت ذره‌ها از اجتماعی از ذرات تشکیل شده که در فضای مسئله حرکت می‌کنند. هر ذره بهترین موقعیت کشف شده‌ی جمعیت تاکنون را می‌بیند و به سمت بهترین موقعیتی که خودش تاکنون کشف کرده و بهترین موقعیتی که تاکنون توسط ذرات جمعیت پیدا شده است شتاب می‌گیرد [۸].

-
- 1- Tabu Search.
 - 2- Ant Colony Optimization.
 - 3 - Particle Swarms Optimizer.
 - 4- Initial population.
 - 5- Generation..
 - 6- Offspring.
 - 7- Antibody.
 - 8- Objective Function.
 - 9- Antigene.
 - 10- Artifitial ants.

۱-۱- هوشمندی جمعی و خودسازماندهی

عموم الگوریتم‌های ابتکاری از مجموعه اعضایی تشکیل شده‌اند که فضا را به صورت موازی جستجو می‌کنند. هر عضو جمعیت رفتار تعریف شده‌ای از خود بروز می‌دهد و به طریقی با سایر اعضا مبادله اطلاعات می‌کند. از خصوصیات الگوریتم‌های اجتماعی این است که از اعضایی تشکیل شده‌اند که رفتارهای ساده‌ای از خود بروز می‌دهند اما اثر جمعی این رفتارها به گونه‌ای است که هوشمندی جمعی را نتیجه می‌دهد.

واژه هوشمندی جمعی در ابتدا در مورد سیستم‌های رباتیک سلولی برای توضیح خود سازمانده بودن این سیستم‌ها به کار رفته‌است. هوشمندی توده‌ای یکی از انواع جالب هوشمندی است و در مواردی مطرح می‌شود که جمعیتی از اعضا اعمال ساده‌ای انجام می‌دهند ولی در نهایت تمام گروه یک مسئله پیچیده را به طور دقیق حل می‌کند. نمونه بارز این نوع هوشمندی در رفتار حشراتی دیده می‌شود که به صورت جمعی زندگی می‌کنند مثل مورچه‌ها، زنبورها، موریانها و انواعی از سوسک‌ها. مشاهده همین موجودات بود که دانشمندان را به سمت طراحی الگوریتم‌هایی از این نوع هدایت کرد. آنها با بررسی رفتار این حشرات مشاهده کردند که با وجود ساده و کم هوش بودن هر حشره مجموعه آنها یک کار نسبتاً پیچیده را انجام می‌دهد [۹].

هوشمندی جمعی در مواردی ظاهر می‌شود که جمعیتی از عامل‌های غیر خبره داریم. این عامل‌ها هر کدام تحت شرایط معین رفتارهای ساده‌ای از خود بروز می‌دهند و همچنین به صورت محلی روی یکدیگر اثر متقابل دارند. تعاملات محلی اعضا باعث بوجود آمدن اثرات فرامحلی غیر منتظره‌ای می‌شود و در نهایت کل مجموعه قادر است بدون داشتن یک کنترل کننده مرکزی راه حل مسئله را کشف کند. رفتار اعضا باعث سازماندهی سیستم از درون می‌گردد که به این اثر خودسازماندهی^۱ می‌گویند. عامل اصلی ایجاد هوشمندی جمعی در جمعیت‌ها همین خودسازمانده بودن آنهاست که باعث می‌شود یک جمعیت با وجود داشتن اجزا بسیار ساده قادر به انجام یک وظیفه‌ی پیچیده باشد. خودسازماندهی یک نتیجه عمومی دارد در حالی که از اطلاعات محلی بهره می‌گیرد. خودسازماندهی در رسیدن به این هدف مدیون عوامل زیر است.

- جستجوی تصادفی در فضا و ترقی و تنزل^۲
- بازخورد مثبت^۳
- بازخورد منفی^۴

1-Self adaption.
2-Fluctuation.
3-Positive feedback.
4-Negative feedback.

• وجود عملکردهای متنوع موثر بر هم¹

فرض کنید جمعیتی از اجزاء ساده داریم که در فضای مسئله دنبال جواب بهینه می‌گردند. این اجزا فضا را به صورت تصادفی جستجو می‌کنند که معمولاً با جابجایی بین جواب‌های با کیفیت‌های متفاوت (ترقی و تنزل) همراه است. در این میان مجموعه عواملی وجود دارد که باعث تقویت جواب‌های مناسب‌تر می‌شود و جمعیت را به سمت جواب‌های هر چه بهتر می‌کشاند (بازخورد مثبت) و مجموعه محدودیت‌هایی نیز هستند که باعث می‌شوند جواب‌های دیگر هم تا حدی بررسی شود (بازخورد منفی). اما مورد جالبتری که در اجتماع موجودات دیده می‌شود تاثیر پذیری اعضای جمعیت از یکدیگر است. یعنی رفتار یک عضو تا حدی تاثیر گرفته از رفتارهای قبلی جمعیت است و در عین حال بر رفتارهای بعدی جمعیت اثر می‌گذارد. در واقع این عملکردهای موثر بر هم که بسیار متنوع نیز هستند در جهت خود سازماندهی جمعیت بسیار کمک کننده هستند. این تاثیرات می‌تواند به دو صورت مستقیم یا غیر مستقیم باشد.

در تاثیر پذیری مستقیم، هماهنگی بین اعضاء از طریق ارتباطات مستقیم دیداری فیزیکی یا شیمیایی است و در تاثیر پذیری غیرمستقیم از طریق اثرگذاری بر محیط صورت می‌گیرد. یعنی رفتارهایی که طی آن اعضا از طریق اثرگذاری بر محیط با هم ارتباط داشته و با یکدیگر هماهنگ می‌شوند. نحوه ارتباط موربانه‌ها در جریان ساخت خانه از این نوع است. این موضوع در مورد خانه سازی زنبورها هم صادق است. هر زنبور خاص تنها سلول کوچکی از سلول‌های خانه را می‌سازد در حالی که خانه منظم حاصل نتیجه کار مجموعه زنبورهاست. شکل هر سلول ساختار سلول‌های جدید کناری را تعیین می‌کند یعنی خودسازماندهی باعث هوشمندی جمعی می‌شود. مثال دیگر ساختن خانه توسط توده موربانه‌ها می‌باشد. در جریان خانه سازی در ابتدا صدها موربانه به صورت تصادفی در محیط حرکت می‌کنند. هر موربانه به محض رسیدن به فضایی که کمی بالاتر از سطح زمین قرار دارد خاک را به بزاق خود آغشته می‌کند و گلوله‌های کوچک خاکی درست می‌کند. بعد از مدتی محیط از تپه‌های کوچک پر می‌شود و هر موربانه به محض رسیدن به یک تپه کوچک با انرژی بسیار بالایی تپه‌ها را به کمک خاک و بزاق خود به ستون تبدیل می‌کند و وقتی ارتفاع هر ستون به حد خاصی رسید سراغ ستون بعدی می‌رود تا تعداد ستون‌های نزدیک به هم بترتیب بیشتر گردد. در این هنگام ستون‌ها به هم متصل می‌گردند. هر موربانه مثل یک سیستم ساده عمل می‌کند اما در انتها یک خانه دقیق ایجاد می‌شود که بدون داشتن نقشه قبلی یا وجود مغز مرکزی تنها با هماهنگی بین رفتارهای اعضا به وجود آمده است.

1- Multiple interactions..

۳-۱- عوامل موثر بر توانمندی الگوریتم های ابتکاری

یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر توانایی یک الگوریتم، قدرت آن الگوریتم در جستجوی مناطق مختلف فضای جستجو است تا بتواند بهینه مناسب را موقعیت‌یابی نماید. این موضوع بویژه در گام‌های ابتدایی و آنگاه که الگوریتم نیاز بیشتری به کنکاش فضای جستجو دارد مدنظر قرار می‌گیرد. از این روست که هر گاه محققین مختلف می‌خواهند الگوریتمی ابداع کنند و یا اینکه با ایجاد یک سری تغییرات مناسب و مقتضی در صدد رفع نقایص احتمالی یک الگوریتم موجود برآیند، نگاه بسیار ویژه‌ای به مقوله‌ی بهبود کاوش^۲ الگوریتم مدنظر خواهند داشت. بهره‌وری^۳ قابلیت متمرکز کردن جستجو در محدوده مطلوب است تا جواب مورد نظر موشکافی گردد. بهره‌وری نیز در کنار کاوش دیگر عامل عمده و تاثیرگذار در کارایی یک الگوریتم است. در واقع بهره‌وری در گام‌های نهایی اهمیت فراوانی در بهترین جواب الگوریتم در حل یک مسئله‌ی خاص داراست. یک الگوریتم بهینه‌یابی خوب این دو هدف متناقض را با همدیگر متعادل می‌کند [۹].

۴-۱- بهینه سازی

بطور کلی ما همواره بدنال راه حلی هستیم تا مسائل خود را از بهترین راه ممکن حل کنیم و هرگز راضی به مصرف بیش از حد مصالح و مواد اولیه ویا انجام کارهای وقت‌گیر و فرایندهای دشوار و پیچیده نمی‌باشیم. یک مهندس عمران همواره بدنال آن است تا کوچکترین مقاطع و کمترین مصالحی را بیابد که با مصرف آنها سازه دارای مقاومت مورد نیاز باشد. بطور کلی یکی از وظایف هر مهندس عمران جلوگیری از مدفون شدن حجم عظیمی از فولاد و بتن در قالب سازه‌هایی است که با مقادیر کمتر فولاد و بتن مصرفی قادر به ادامه حیات بوده‌اند. قیمت کمتر تمام شده هر پروژه در کنار سرعت اجرا و سادگی آن چیزی است که مهندسان از ابتدا به دنبال آن بوده‌اند. بهینه سازی را می‌توان استفاده هر چه بهتر از امکانات موجود برای نیل به هدف نهایی تعریف نمود. درک هر چه بهتر هر مفهوم جدید نیازمند آشنایی قبلی با پیش نیازهایی است که نقش اساسی در آن مفهوم جدید ایفا می‌کنند. در اینجا برای درک بهتر مسائل بهینه‌سازی به تعریف چند اصطلاح خواهیم پرداخت.

1-Iteration
2-Exploration.
3-Exploitation.

۱-۴-۱- متغیرهای طراحی^۱

متغیر طراحی به آن عواملی گفته می‌شود که با تغییر آنها در چهارچوب مقادیر ارائه شده در حل مسئله خاص می‌توان به جواب بهینه نزدیک گشت. هر مسئله با توجه به نوع و هدف خود و قابلیت‌های ممکنه‌ی متغیرها مقادیر مجازی را برای هر متغیر در نظر می‌گیرند که جواب‌های نهایی ملزم به رعایت این حدود می‌باشند. بطور مثال اگر مسئله بهینه‌سازی تحت عنوان ماکزیمم یا مینیمم کردن تابع مفروض $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ باشد مقادیر x_1 تا x_n متغیرهای طراحی هستند. اینجاست که احتمالاً برای x_1 تا x_n حدودی لحاظ می‌شود

$$i < x_i < i + 1 \quad (1-1)$$

پس هر جوابی برای متغیرهای x_1 تا x_n گرچه مقدار تابع F را کمینه یا بیشینه نماید بعنوان یک جواب مدنظر نمی‌باشد مگر اینکه حداقل شروط در نظر گرفته‌شده را ارضاء نمایند. برای درک بهتر مثالی را می‌آوریم.

خواسته‌شده‌است تا تابع $F(x_1, x_2) = x_1 + x_2$ را کمینه نماییم در حالی که $0 \leq x_1 \leq 3$ و $1 \leq x_2 \leq 3$ باشند. جواب این مسئله ساده با یک نگاه $x_1 = 0$ و $x_2 = 1$ در نظر گرفته می‌شود. جواب فرضی $x_1 = 0$ و $x_2 = 0$ که مقدار $F(x_1, x_2)$ را برابر با 0 قرار می‌دهد مقداری کمتر از مقدار $F(x_1, x_2) = 1$ را ارائه می‌دهد اما با توجه به اینکه x_2 از بازه خواسته شده انتخاب نشده است جوابی برای مسئله فوق نمی‌باشد. همین موضوع که به ظاهر مسئله‌ی ساده و پیش پا افتاده‌ای است در مسائل دارای متغیرهای زیاد بایستی بدقت رعایت گردد تا جواب‌های نهایی قابل پذیرش باشند. در مسئله دیگری اگر شیمی‌دانی بخواهد مقدار مواد بهینه برای دستیابی به ماده‌ی خاصی را بدست آورد مقدار مصرفی از هر نوع ماده‌ی اولیه بعنوان یک متغیر در نظر گرفته می‌شود.

بازه مسائل بهینه‌سازی بسیار گسترده و به علوم مختلف کشیده می‌شود ولی آنچه در تمامی این علوم مدنظر است این است که متغیرهای طراحی بطور کلی به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند:

۱-۴-۱-۱- متغیرهای پیوسته^۲

در برخی مسائل بهینه‌سازی متغیرهای توضیح داده شده در پیش، از بین مقادیری انتخاب می‌گردند که در یک بازه پیوسته بوده و با اندکی تغییر مقدار تغییر جدیدی بوجود می‌آید که با مقدار پیشین متفاوت است. بطور مثال اگر در مسئله‌ی ریاضی ذکرشده x_1 قابل انتخاب از بازه

1- Design variables.

2- Continues variables

[۰۳] فرض شده باشد هر مقداری بین این بازه قابل انتخاب و استناد می‌باشد که فضای جستجوی بزرگی را پیش رو قرار می‌دهد.

۱-۴-۱-۲- متغیرهای گسسته^۱

نوع دیگری از متغیرها وجود دارد که به جهت آن که از بازه‌ای پیوسته انتخاب نمی‌شوند و تنها از بین چند مقدار محدود و معین انتخاب می‌گردند؛ به متغیرهای گسسته معروفند. بهر حال کار با متغیرهای گسسته یکی از توانایی‌های هر الگوریتم به حساب می‌آید چرا که با وجود کاهش فضای جستجو اما از سوی دیگر محدودیت‌های بیشتری پیش روی الگوریتم قرار می‌دهد. در مثال بالا اگر بجای اینکه x_1 از بازه ی پیوسته [۰۳] انتخاب گردد از بین مقادیر ۰.۵ و ۱.۵ و ۲.۵ و ۳ انتخاب گردد x_1 متغیری گسسته می‌باشد. بعنوان مثال در این مورد دیگر جوابی مثل ۲.۲ و بسیاری جوابهای دیگر از بازه‌ی مقادیر ممکن برای متغیر x_1 حذف شده و تنها ۷ مقدار فوق ممکن‌اند. این‌گونه متغیرها در مسائل سازه‌ای نیز بسیار متداولند و بویژه در مسائل بهینه‌سازی سطح مقطع حالت گسسته بسیار مدنظر است.

۱-۴-۲- تابع هدف^۲

تابع هدف که ممکن است متشکل از یک تا چند تابع هدف باشد ارتباط ریاضی بین متغیرهای طراحی است با آنچه که بایستی بهینه گردد. بطور کلی آنچه که بایستی بهینه شود به صورت تابعی از متغیرهای طراحی بیان می‌شود و سر انجام این مقدار با دست‌بردن‌های پیاپی و البته هدفمند در مقادیر متغیرهای طراحی به حالت ماکزیمم یا مینیمم خود می‌رسد. در اینجا برای درک مفهوم مسائل بهینه‌سازی به تعریف دیگری نیازمندیم تا با توجه به این مفهوم بتوان یک مسئله ی بهینه‌سازی را به فرم ریاضی نوشت. معمولاً یکی از مشکلاتی که برخی از الگوریتم‌های ابتکاری با مسائل بهینه‌سازی پیچیده‌تر و به ویژه مسائل سازه‌ای پیدا می‌کنند این است که برخی از مسائل بهینه‌سازی مسائلی مقید^۳ هستند و الگوریتم‌ها برای حل نمودن مسائل نامقید^۴ طراحی شده‌اند. در قسمت بعدی به معرفی قیود در مسائل بهینه‌سازی می‌پردازیم.

۱-۴-۳- مسائل مقید و نامقید

مسائل بهینه‌سازی را بسته به وجود و یا عدم وجود قید یا قیود در آنها به دو گروه مسائل بهینه‌سازی مقید و نامقید تقسیم‌بندی می‌کنند. در موارد نامقید، متغیرهای طراحی هر مقداری را می‌توانند بپذیرند اما در مسائل مقید متغیرهای طراحی بایستی از بازه‌ای خاص که قیود خاصی را

-
- 1- Discrete variables.
 - 2- Objective Function
 - 3- Constrained problems.
 - 4- Unconstrained problems

ارضاء می‌کنند انتخاب گردند [۱۴و۱۳و۱۲و۷]. بطور مثال در یک مسئله بهینه‌سازی سازه‌ای، قیود حداکثر تغییر مکان گرهی و یا حداکثر ضریب لاغری و یا حداکثر تنش مجاز هر عضو و قیودی از این دست مسئله را وارد فاز مقید بودن می‌کنند که هر الگوریتم ابتکاری بایستی خود را بنحوی با این قیود هماهنگ کند و جواب‌های بهینه‌نهایی درحالی قابل استناد هستند که این قیود را ارضاء کنند.

یک مسئله کمینه‌سازی مقید را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$\begin{aligned} & \text{minimize: } F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2-1) \\ & \text{subject to: } g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

در اینجا m نماینده تعداد قیود می‌باشد و x_1 تا x_n متغیرهای طراحی هستند. $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ تابع هدفی می‌باشد که قرار است اکسترمم گردد.

۴-۴-۱- فضای طراحی

فضای طراحی که به تعداد متغیرهای طراحی بعد دارد، عبارتست از کلیه جواب‌های ممکن برای یک مسئله بهینه‌سازی خاص که در هر بعد شامل کلیه جواب‌های ممکن برای متغیر طراحی نظیر آن بعد است. هر چقدر که این فضای طراحی توصیف شده بزرگتر باشد کار الگوریتم بهینه‌یاب در جستجوی آن دشوارتر است و مسئله بهینه‌سازی به تبع آن مسئله‌ای دشوارتر در نظر گرفته خواهد شد. هر نقطه از فضای طراحی جوابی از جواب‌های مسئله است.

۱-۵- لزوم استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری

امروزه مسائل بهینه‌سازی دارای فضاهای بسیار بزرگی می‌باشند که جستجو در چنین فضایی کاری بسیار دشوار، طولانی و به عبارتی با روش‌های شناخته شده پیشین غیرممکن می‌نماید. آنگاه که ما با حل مسئله‌ای سازه‌ای نظیر بهینه‌سازی وزن یا قیمت یک سازه کوچک روبرو هستیم این مقوله به ظاهر مسئله‌ای ساده و کم‌دردسر می‌نماید اما آنگاه که به جستجو در زوایای مختلف این چنین مسئله‌ای می‌پردازیم کم‌کم دشواری‌هایی نمایان می‌شود که در ابتدا از نظر مخفی بوده‌است. بطور مثال در صورتی که مسئله‌ی بهینه‌سازی به بهینه‌سازی خرپای کوچک ۱۰ عضوی و آن هم تنها با متغیر طراحی سطح مقطع ختم گردد که یکی از ساده‌ترین مسائل بهینه‌سازی سازه‌ای است و بطور مثال هر یک از این ۱۰ متغیر از بین بازه پیوسته [۰/۱ و ۳۵] اینچ مربع انتخاب گردند، می‌توان نشان داد که این مسئله به ظاهر ساده تا چه حد فضای طراحی بزرگ و پیچیده‌ای داراست که بدون استفاده از الگوریتم‌های جستجوی تصادفی حل آن غیرممکن می‌نماید. جستجوی تمام فضای طراحی در چنین مسئله‌ای در حالت ساده‌تر گسسته‌ی آن، با فرض تنها و تنها فقط ۳۰ سطح مقطع ممکن برای هر متغیر مستلزم انجام 3^{10} آنالیز یا تحلیل می‌باشد که عدد بزرگی در حدود $5/9 \times 10^{14}$ آنالیز را مشخص می‌کند. در صورت استفاده از کامپیوترهای متداول و در دسترس امروزی این کار چیزی حدود $5/9 \times 10^{11}$ ثانیه طول خواهد کشید که متجاوز از عمر چندین هزار انسان است. این موضوع فقط برای حل مسئله‌ی ساده‌ی ۱۰ متغیره و آن هم با متغیرهای گسسته بوده است و بعنوان مثالی برای کارا بودن استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری در حل مسائل بهینه‌سازی سازه‌ای آورده شده و مثالی موثر است. توجه به این نکته ضروری است که هر یک از الگوریتم‌های ابتکاری که در سالیان اخیر مدنظر قرار گرفته‌اند در زمینه حل پاره‌ای مسائل موثرتر از سایرین واقع شده و در برخی مسائل هم ضعیف‌تر عمل می‌کنند. لذا هرگز چنین نبوده است که الگوریتمی خاص برای حل تمامی مسائل موجود بهترین راه‌حل را ارائه دهد و به همین دلیل است که راه برای کار بر روی الگوریتم‌های ابتکاری همواره باز بوده‌است. در ضمن الگوریتم‌های ابتکاری جواب‌های بسیار مناسبی را در زمان کمتر از چند ثانیه در حل مسائل با تعداد متغیر بالا بدست می‌دهند که این موضوع بسیار در خور توجه است.

۱-۶- آشنایی با الگوریتم‌های ابتکاری مختلف

با توجه به آنچه در بخش ۱-۵ توضیح داده شد، اهمیت استفاده از روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های ابتکاری اثبات شده است، لذا در پی سالیان متمادی، محققین مختلف به پیشبرد این الگوریتم‌ها از راه تولید الگوریتم‌های جدید و یا بهبود الگوریتم‌های موجود پرداخته‌اند. به‌هرحال در روش‌های ابتکاری از دانش به دست آمده از راه حل‌های قبلی برای هدایت الگوریتم به سمت مناطق مناسب‌تر فضای جستجو استفاده می‌شود. وجه تشابه تمامی این الگوریتم‌ها که همگی از عوامل طبیعی الهام گرفته اند این است که به صورت موازی فضای جستجو را با عوامل خود از نقاط مختلف آن جستجو می‌کنند، بدین صورت که عوامل در ابتدا در نقاط تصادفی از فضای جستجو قرار می‌گیرند و سپس طی چندین گام موقعیت قرار گرفتن عوامل در فضا بهبود داده می‌شود که این گام در الگوریتم‌های مختلف بسته به نوع ایده‌ی در نظر گرفته شده در آن‌ها متفاوتند. نهایتاً این تجدید موقعیت آنقدر ادامه می‌یابد تا الگوریتم به جواب بهینه‌ای که نقطه‌ای از فضای جستجو است، همگرا^۱ گردد.

آنچه سالهاست توجه محققین مختلف را به خود معطوف ساخته، سرعت الگوریتم در همگرا شدن به جواب بهینه و در ضمن خود بهینه بدست آمده می‌باشد. بایستی توجه کرد که گرچه رسیدن سریع‌تر به جواب نهایی عاملی بسیار مهم است اما یکی از مشکلات همیشگی کار با الگوریتم‌های جستجوی تصادفی همگرایی زودرس می‌باشد. مطمئناً در صورت ایجاد همگرایی زودرس جواب بدست‌آمده جواب مناسبی نخواهد بود، چرا که اجازه‌ی جستجوی کامل فضا به عوامل داده نشده است. ما خواهان رسیدن به یک تعادل ما بین سرعت همگرایی و دستیابی به جواب بهینه خواهیم بود. تغییراتی که در سالیان متمادی توسط محققین مختلف بر روی مثلاً الگوریتم وراثتی اعمال می‌شد، در راستای رسیدن به چنین حالت اعتدالی بوده است.

تینگ یو چن^۲ و چونگ چن^۳ در سال ۱۹۹۷ آثار تغییرات مختلف را بر روی الگوریتم وراثتی و جواب‌های آن بررسی نمودند [۱۰]. آنها سعی داشتند تا با ایجاد یک‌سری تغییرات مناسب جواب‌های بهتر در مدت زمان کوتاه‌تر یعنی تعداد تکرار کمتر بدست آورند. آنچه این محققین در آن سال‌ها به عنوان یکی از موارد شاخص بهبود دادن یک الگوریتم مورد توجه قرار داده بودند مواردی چون استراتژی بقای نخبگان و ایجاد تغییرات در نحوه آمیزش والدین و ایجاد مفهومی تحت عنوان متغیرهای طراحی پسیو^۴ بوده است که نمونه‌ای بارز از تلاش در بهبود الگوریتم وراثتی است.

1-Convergence.

1-Ting Yu Chen.

2-Chung Chen.

3-Passive design variables.

آقایان چن^۱ در مقاله خود تحت عنوان بهبودهایی در الگوریتم وراثتی جهت کارکرد در طراحی بهینه سازه‌ای که در سال ۹۷ انتشار یافت انتخاب نخبه‌گرا را به عنوان حافظ بقای بهترین فرد موجود در جمعیت حاضر در نسل آینده تعریف می‌کنند و این استراتژی را ضامن ارتقاء و یا حداقل عدم افت برزندگی بهترین فرد نسل‌های بعدی می‌دانند [۱۰]. بعنوان راه حلی دیگر ایجاد نحوه‌های گوناگون آمیزش^۲ یک نقطه‌ای و دو تا چهار نقطه‌ای را معرفی و اثر آنرا بر عملکرد الگوریتم بررسی می‌کنند و متغیرهایی را که از بازه‌ی مورد نظر خارج شوند بعنوان متغیرهای پسیو معرفی کرده آنها را به ابتدا و یا انتهای بازه باز می‌گردانند. اثرات مثبت چنین تغییراتی امروزه بر همگان مشهود است. اینگونه تغییرات در سالیان بعد بر روی الگوریتم‌های دیگر نیز مورد توجه قرار گرفت. امروزه حتی ایجاد الگوریتم‌های جدید مرکب از چندین الگوریتم مختلف مورد توجه قرار گرفته که در برخی موارد جواب‌های مناسبی نیز از آنها گرفته شده است. در این بخش جهت آشنایی بیشتر با نحوه‌ی بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های مختلف چند نمونه از متداول‌ترین الگوریتم‌های جستجوی تصادفی و ایده استفاده شده در آنها آورده شده است [۱۱-۱۵].

از جمله الگوریتم‌های ابتکاری مطرح شده در سالیان اخیر

- الگوریتم وراثتی^۳ (۱۹۷۵)
 - الگوریتم جهش قورباغه‌های متحرک^۴ (۱۹۸۲)
 - پخت شبیه‌سازی شده^۵ (۱۹۸۳)
 - جستجوی تابو^۶ (۱۹۸۶)
 - الگوریتم ممتیک^۷ (۱۹۸۹)
 - الگوریتم جستجوی جمعیت مورچگان^۸ (۱۹۹۱)
 - الگوریتم فرهنگی^۹ (۱۹۹۴)
 - بهینه‌سازی جمعیت ذرات^{۱۰} (۱۹۹۵)
- می‌باشند که برخی از آنها در ادامه توضیح داده خواهند شد.

1- Chen.
 2- Cross over.
 3- Genetic Algorithm.
 4- Leap Frog Animated Algorithm.
 5 - Simulated Annealing.
 6- Tabu Search.
 7- Memetic Algorithm.
 8- Ant Colony Optimization.
 9- Cultural Algorithm.
 10- Particle Swarms Optimizer.

۱-۶-۱- الگوریتم وراثتی

الگوریتم ژنتیک الهامی از علم ژنتیک و نظریه تکامل داروین^۱ است و بر اساس بقای برترین‌ها یا انتخاب طبیعی استوار است. یک کاربرد متداول الگوریتم ژنتیک استفاده از آن بعنوان تابع بهینه‌کننده است. در الگوریتم ژنتیک نحوه تکامل ژنتیکی موجودات زنده شبیه‌سازی می‌شود.

اگرچه کارهایی توسط یک زیست‌شناس به نام فریسر^۲ در زمینه مدل‌سازی تکامل در سیستم‌های بیولوژیک^۳ در دهه ۶۰ میلادی صورت گرفت ولی الگوریتم ژنتیک برای کاربردهای مهندسی و به صورت امروزی آن نخستین بار توسط جان هلند^۴ متخصص علوم کامپیوتر دانشگاه میشیگان در سال ۱۹۷۵ پیشنهاد گردید [۶]. کار وی آغاز تمامی کوشش‌ها برای کاربرد الگوریتم وراثتی در مهندسی است. پس از آن کارهای دیجانگ^۵ در سال ۱۹۷۵ در زمینه بررسی و مقایسه چندین روش الگوریتم ژنتیک پایه‌های نظری بحث را فراهم آورد. این الگوریتم با الهام از طبیعت برپایه اصل تکاملی پایداری بهترین‌ها استوار است. الگوریتم ژنتیک اگرچه پس از الگوریتم استراتژی تکاملی پیشنهاد گردید ولی مشهورترین روش‌ها از بین الگوریتم‌های تکاملی است. در الگوریتم ژنتیک یک جمعیت از افراد طبق مطلوبیت آنها در محیط بقا می‌یابند. افرادی با قابلیت‌های برتر شانس ازدواج و تولید مثل بیشتری را خواهند یافت. بنابر این پس از چند نسل فرزندان با کارایی بهتر بوجود می‌آیند. در الگوریتم ژنتیک هر فرد از جمعیت به صورت یک کروموزوم^۶ معرفی می‌شود. کروموزوم‌ها در طی چندین نسل کامل‌تر می‌شوند. در هر نسل کروموزوم‌ها ارزیابی می‌شوند و متناسب با ارزش خود امکان بقا و تکثیر می‌یابند. تولید نسل در بحث الگوریتم ژنتیک با عملگرهای پیوند و جهش صورت می‌گیرد. والدین برتر بر اساس یک تابع برازندگی انتخاب می‌شوند [۱۶-۲۲].

در هر مرحله از اجرای الگوریتم ژنتیک یک دسته از نقاط فضای جستجو مورد پردازش‌های تصادفی قرار می‌گیرند. به این صورت که به هر نقطه دنباله‌ای از کاراکترها نسبت داده می‌شود و بر روی این دنباله‌ها عملگرهای ژنتیکی اعمال می‌شود. سپس دنباله‌های بدست آمده رمزگشایی^۷ می‌گردد تا نقاط جدیدی در فضای جستجو بدست آید. در آخر بر اساس این که تابع هدف در هر یک از نقاط چه مقدار باشد احتمال شرکت نمودن آنها در مرحله بعد تعیین می‌گردد.

-
- 1- Darwin.
 - 2- Fraser.
 - 3- Biological system.
 - 4- John Holland..
 - 5- Dejong.
 - 6- Choromosom.
 - 7- Decode.

الگوریتم ژنتیک را می‌توان یک روش بهینه‌سازی تصادفی جهت‌دار دانست که به تدریج به سمت نقطه بهینه حرکت می‌کند. در مورد ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک در مقایسه با دیگر روش‌های بهینه‌سازی می‌توان گفت که الگوریتمی است که بدون داشتن هیچ‌گونه اطلاعی از مسئله و هیچ‌گونه محدودیتی بر نوع متغیرهای آن، برای هر گونه مسئله‌ای قابل اعمال است و دارای کارایی اثبات شده‌ای در یافتن بهینه‌کلی^۱ می‌باشد. توانایی این روش در حل مسائل پیچیده‌ی بهینه‌سازی است که روش‌های کلاسیک یا قادر به حل آنها نیستند و یا در یافتن بهینه کلی قابل اطمینان نیستند.

به طور کلی الگوریتم ژنتیک از اجزاء زیر تشکیل می‌شود:

- کروموزوم

در الگوریتم ژنتیک هر کروموزوم نشان دهنده یک نقطه در فضای جستجو و یک راه‌حل ممکن برای مسئله مورد نظر است. کروموزوم‌ها خود از تعدادی ژن تشکیل می‌شوند. برای نمایش کروموزوم‌ها معمولاً از کدگذاری‌های دودویی استفاده می‌شود.

- جمعیت

مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها یک جمعیت را تشکیل می‌دهند. با تاثیر عملگرهای ژنتیکی بر روی هر جمعیت، جمعیت جدیدی با همان تعداد کروموزوم تشکیل می‌شود.

- تابع برازندگی

به منظور حل هر مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک ابتدا بایستی یک تابع برازندگی برای آن مسئله ابداع شود. برای هر کروموزوم این تابع عددی غیرمنفی را بر می‌گرداند که نشان دهنده شایستگی یا توانایی فردی آن کروموزوم است.

- عملگرهای ژنتیکی

در الگوریتم ژنتیک در طی مرحله تولید مثل از عملگرهای ژنتیکی استفاده می‌شود. با تاثیر این عملگرها بر روی یک جمعیت نسل بعدی آن جمعیت تولید می‌شود. عملگرهای انتخاب، پیوند و جهش معمولاً بیشترین کاربرد را در الگوریتم‌های ژنتیکی دارند.

1- Global optimum.

۱-۶-۱-۱- عملگرهای ژنتیکی

در بخش قبلی اشاره شد که در الگوریتم وراثتی به منظور تولیدمثل معمولاً از عملگرهای انتخاب^۱ آمیزش^۲ و جهش^۳ استفاده می‌شود. در این بخش هر یک از عملگرهای فوق به صورت جداگانه معرفی می‌شود:

• عملگر انتخاب

این عملگر از بین کروموزوم‌های موجود در یک جمعیت تعدادی کروموزوم را برای تولید مثل انتخاب می‌کند. کروموزوم‌های برانده‌تر شانس بیشتری دارند تا برای تولید مثل انتخاب شوند [۱۹-۲۰].

• عملگر پیوند

عملگر پیوند بر روی یک زوج کروموزوم از نسل مولد عمل کرده و یک زوج کروموزوم جدید تولید می‌کند. عملگرهای پیوند متعددی از قبیل پیوند تک نقطه‌ای و پیوند دو نقطه‌ای وجود دارد. در پیوند تک نقطه‌ای یک موقعیت تصادفی بین دو ژن در نظر گرفته می‌شود. سپس تمامی ژن‌های طرف راست یا طرف چپ این موقعیت در کروموزوم‌های والد با یکدیگر جابجا می‌شوند تا کروموزوم‌های جدید بدست آیند [۲۱ و ۲۳].

در پیوند دو نقطه‌ای دو موقعیت به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و تمامی ژن‌های بین این دو موقعیت در کروموزوم‌های والد با یکدیگر جابجا می‌شوند. لازم به ذکر است که آمیزش معمولاً بر روی همه زوج کروموزوم‌های انتخاب شده برای جفت‌گیری به کار برده نمی‌شود. معمولاً احتمال آمیزش برای هر زوج کروموزوم بین ۰/۶ تا ۰/۹۵ در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که بر روی یک زوج کروموزوم عمل آمیزش صورت نگیرد فرزندان با تکرار نمودن والدین تولید می‌شوند.

• عملگر جهش

پس از اتمام عمل آمیزش عملگر جهش بر روی کروموزوم‌ها اثر داده می‌شود. این عملگر یک ژن از یک کروموزوم را به طور تصادفی انتخاب می‌کند و سپس محتوای آن ژن را تغییر می‌دهد. اگر ژن از جنس اعداد دودویی باشد آن را به وارونش تبدیل می‌کند و چنانچه متعلق به یک مجموعه باشد مقدار یا عنصر دیگری از آن مجموعه را به جای آن ژن قرار می‌دهد. احتمال انجام عمل جهش بر روی هر کروموزوم را نرخ جهش یا احتمال جهش می‌گویند. معمولاً این عدد را بسیار کوچک (مثلاً ۰/۰۰۱) در نظر می‌گیرند. پس از اتمام عمل جهش کروموزوم‌های تولید شده به عنوان نسل جدید شناخته شده و برای دور بعد اجرای الگوریتم ارسال می‌شوند [۲۲].

1-Selection.
2-Cross over.
3-Mutation.

این الگوریتم با استفاده از عملگرهای مذکور جمعیت اولیه خود را به جمعیتی تبدیل می‌کند که برازندگی بهترین فرد در آن افت نکرده و برازندگی متوسط افزایش می‌یابد. با طی چنین روندی پس از طی چندین نسل که تعداد آن به مسئله‌ی مورد نظر بستگی دارد، الگوریتم به جواب‌های مناسبی همگرا می‌گردد. این الگوریتم به عنوان یک الگوریتم قدیمی‌تر و البته کارا برای کسانی که می‌خواهند با نحوه‌ی کار الگوریتم‌های جستجوی تصادفی آشنایی یابند پایه و شروعی مناسب بشمار می‌آید و از این رو اهمیت فراوانی دارد.

۱-۶-۲- الگوریتم جمعیت مورچگان

دیده شده است که اگر منبع غذایی در فاصله‌ای از لانه‌ی مورچه‌ها واقع گردد و چند مسیر برای نیل به مقصود برای مورچه‌ها متصور باشیم، با گذشت زمان تعداد مورچه‌هایی که از مسیر کوتاه‌تر بسوی غذا حرکت می‌کنند بیشتر از تعداد مورچه‌هایی خواهد بود که از مسیر طولانی‌تر این کار را انجام می‌دهند. این در حالی است که مورچه‌ها موجوداتی کور، بی‌حافظه و بسیار کم‌هوشند. در جستجوی یافتن دلیلی جهت این رویداد اعجاب انگیز دانشمندان به این نتیجه رسیدند که هر مورچه حین گذشتن از هر مسیر مقداری فرمون از خود بجا می‌گذارد که به آن ردپای مورچه‌ها گفته می‌شود.

هر چه مسیری کوتاهتر باشد مورچه‌ها سریع‌تر از آن عبور کرده به غذا رسیده و مجدداً حین بازگشت به لانه روی همان مسیر فرمون^۱ ریزی می‌کنند لذا در مدت زمان کوتاهی حجم فرمون واقع بر روی مسیر کوتاه‌تر بالاتر از حجم فرمون روی مسیرهای طولانی‌تر خواهد بود. از سوی دیگر آنها دریافتند که مورچه‌ها مسیر حرکت خود بسوی غذا را بگونه‌ای تصادفی انتخاب می‌کنند که در این بین شانس انتخاب مسیری که فرمون بیشتری روی آن قرار گرفته است به میزان قابل توجهی بیشتر می‌باشد. بدین ترتیب بر طبق چنین هوشمندی توده‌ای مورچه‌ها به همین سادگی طوری سازمان می‌یابند که در مدت کوتاهی به کوتاه‌ترین مسیر دست می‌یابند و با بعبارت علمی‌تر به کوتاه‌ترین مسیر همگرا می‌شوند.

در ابتدا آقای مارکودوریگو^۲ بود که مباحث مربوط به بهینه‌سازی جمعیت مورچگان را به مسائل مهندسی رهنمون گشت. در اینجا مورچه‌های مصنوعی جای مورچه‌های طبیعی را می‌گیرند و بعنوان عوامل جستجوگر فضای جستجو در الگوریتم جمعیت مورچگان کار می‌کنند. الگوریتم بهینه‌سازی بروش جمعیت مورچگان از دسته الگوریتم‌های جستجوی فوق ابتکاری می‌باشد که با الهام از رفتار مورچه‌ها در طبیعت ایجاد شده است چراکه قادرند با وجود کور بودن کوتاه‌ترین مسیر

1-Pheromone.

2-Marco Dorigo.

رفت و برگشت از خانه تا غذا را پیدا کنند. دانشمندان دریافته‌اند این قابلیت نتیجه‌ی ردپای فرمونی است که مورچه‌ها از آن برای برقراری ارتباط با هم و جابجایی اطلاعات مسیر استفاده می‌کنند. در حل مسائل مختلف از طریق الگوریتم جمعیت مورچگان مسائل را بصورت گراف در نظرمی‌گیریم که هر جزء مسئله بصورت گره و روابط بین اجزاء مسئله بصورت یالهای بین این گره‌ها معرفی می‌گردند. در این گراف‌ها اگر اتصال بین دو گره n_i و n_j را با یال L_{ij} نمایش دهیم، هر یال L_{ij} دارای دو مشخصه T_{ij} و η_{ij} می‌باشد که بترتیب میزان ردپای موجود در یال و مقدار ابتکاری آن می‌باشند.

معمولاً در همه‌ی یالهای گراف یک مقدار کوچک ردپا^۱ بعنوان پیش‌فرض در نظر گرفته می‌شود که مقدار آن در طول حل مسئله تغییر می‌کند، چون الگوریتم طوری هدایت می‌شود که در یالهایی که منجر به جواب‌های بهتر می‌شوند، ردپای بیشتری قرار می‌گیرد. η_{ij} نیز در هر مسئله بطور شهودی تعیین می‌شود که در خیلی از مواقع تابع F (تابع هزینه) مقدار آن را پیشنهاد می‌کند. به η_{ij} بینایی مسئله گفته می‌شود.

همانند هر الگوریتم ابتکاری دیگر، الگوریتم جمعیت مورچگان نیز برای جستجو در فضای مسئله نیاز به عوامل جستجوگر خواهد داشت. در اینجا این عوامل مورچه‌های مصنوعی می‌باشند که مقدار m تا از آنها، که این مقدار بسته به نوع مسئله و شرایط جوابگیری از الگوریتم متفاوت خواهد بود، وظیفه‌ی جستجو را بر عهده خواهند داشت. لازم به تذکر نمی‌باشد که این مورچه‌های مصنوعی نیز همانند انواع طبیعی خود که از آنها الهام گرفته شده اند طی حرکت بر روی مسیر فرمون روی آن اضافه می‌کنند و البته مسیری را برای حرکت انتخاب می‌کنند که فرمون بیشتری روی آن قرار داشته‌باشد که این انتخاب بصورت تصادفی و با احتمال بیشتر برای مسیر با فرمون بیشتر خواهد بود. اما این مورچه‌های مصنوعی بر خلاف انواع طبیعی خود کاملاً کور نمی‌باشند. این بدین معناست که ما ضریب η را بعنوان بینایی^۲ مسئله، در حل مسئله دخیل خواهیم نمود. درضمن گرچه مورچه‌های طبیعی حافظه‌ای ندارند اما برای این انواع مصنوعی حافظه‌ی اندکی در نظر گرفته شده‌است تا آنها را قادر به نگهداری اطلاعات مسیر پیموده شده بگرداند. از این اطلاعات برای ارزیابی سفر مورچه به منظور ردپا گذاری مسیرها استفاده می‌شود. حافظه‌ی مورچه‌ی k با M_k نشان داده می‌شود. در ضمن این نکته نیز قابل توجه می‌باشد که این مورچه‌های مصنوعی در

1-Trail.

2-Visibility

محیطی با زمان گسسته زندگی می‌کنند. این همان موضوعی است که در مورد حرکت عوامل در سایر الگوریتم‌های ابتکاری نیز صادق می‌باشد.

مورچه‌ها باید گراف را که نماینده مسئله است به منظور پیدا کردن جواب بهینه جستجو کنند. هر گره در گراف جزئی از مسئله و هر جواب مسئله مجموعه‌ای از این اجزاء است. پس مورچه‌ها باید برای ساختن جواب بین گره‌ها حرکت کنند.

الگوریتم جامعه مورچگان بر اصل تکرار استوار است. به این صورت که با تکرار حرکات کوچک، سفر مورچه، و با انجام سفر هر m مورچه یک سیکل و با تکرار چند سیکل الگوریتم ACO انجام می‌شود. توضیح جامع‌تر این است که اگر به جابجایی مورچه از گره i به j یک قدم بگوییم با تکرار چند حرکت پیاپی طبق قوانین حرکت سفر مورچه کامل می‌شود. هر سفر مورچه یک جواب از مسئله است. با اتمام سفر هر m مورچه یک سیکل پایان می‌یابد.

در این زمان سفر مورچه‌ها به کمک حافظه‌شان ارزیابی شده یک مرحله به روز کردن ردپا داریم. سیکل بعد با ردپای جدید انجام می‌شود. این سیکل‌ها تا پیش آمدن شرایط توقف و رسیدن به جواب شبه بهینه تکرار می‌شوند.

دو نکته اساسی در الگوریتم ACO که مسئول هدایت آن به سمت جواب بهینه است قوانین احتمالی حرکت و قوانین به روز کردن ردپا در مسیرها می‌باشند. قوانین حرکت شامل توابع احتمالاتی است که طبق آنها مورچه‌ها روی یالهای گراف حرکات تصادفی می‌کنند. یعنی اگر در یک لحظه از زمان روی یک گره خاص هستند به کمک این توابع احتمالاتی گره بعد را برای رفتن انتخاب می‌کنند. قوانین به روز کردن ردپا نیز مجموعه توابعی هستند که مطابق آنها در یک زمان خاص مثل بعد از هر یک قدم بعد از سفر هر مورچه یا بعد از هر سیکل ردپای مسیرها برای حرکات بعدی عوض می‌شود. نحوه انجام این دو گزینه از این جهت که روی جواب نهایی از نظر قابل اطمینان بودن اثر می‌گذارند بسیار مهم است که به هر کدام در قسمتهای جداگانه پرداخته می‌شوند.

قوانین حرکت بین گره‌ها در ACO

این قوانین توابعی از نوع توابع احتمالاتی هستند که طبق آنها هر مورچه گره بعد را برای رفتن انتخاب می‌کند. اگر مورچه k در زمان t در گره i باشد تابع P_{ij}^k احتمال بودن آن در گره j در زمان $t + 1$ می‌باشد که بصورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} T_{ij}^\alpha \times \eta_{ij}^\beta / \sum_{i \in \text{admissible nodes}} T_{ik}^\alpha \times \eta_{ik}^\beta & \text{if } j \in \text{admissible nodes} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-1)$$

T_{ij} ردپای موجود در یال L_{ij} در زمان t و η_{ij} مقدار بینایی آن می‌باشد. مقادیر α و β نیز پارامترهای مسئله‌اند که میزان اهمیت ردپا در مقابل بینایی مسئله را کنترل می‌کنند. در تابع P برای هر یالی که مورچه مجاز به طی کردن آن است یک مقدار $T_{ij}^\alpha \times \eta_{ij}^\beta$ در نظر گرفته شده با تقسیم به حاصل جمع همه آنها نرمالیزه می‌شود و یک احتمال برای طی کردن هر یال به مورچه می‌دهد. سپس مورچه با یک حرکت تصادفی یکی از این یالها را طی می‌کند. در این میان احتمال انتخاب یالهای دارای ردپای بیشتر و مقدار بینایی بهتر بیشتر است چراکه تابع فوق مقدار بیشتری به آنها نسبت می‌دهد. در تابع P احتمال انتخاب گره‌های غیر مجاز صفر است. گره‌های غیر مجاز در زمان $t+1$ در آن گره‌ها قرار بگیرد [۹ و ۲].

• قوانین به روز کردن ردپای مسیره
به روز کردن ردپا شامل دو مرحله تبخیر و اضافه کردن ردپای مورچه‌ها است که بصورت روابط زیر قابل انجام است. طبق این روابط مقدار کوچکی از ردپای قدیمی موجود در مسیره‌ها دور ریخته شده و ردپای جدید که ناشی از حرکت مورچه‌های مصنوعی بر روی یالهای گراف می‌باشد اضافه خواهدگشت.

$$T_{ij}(new) = (1 - \rho) \cdot T_{ij}(old) + \Delta T_{ij} \quad (4-1)$$

$$\Delta T_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta T_{ij}^k$$

$$\Delta T_{ij}^k = \begin{cases} q/F^k & \text{if the } K\text{th ant traverse } L_{ij} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

در انتهای هر سیکل ابتدا ردپای قبلی هر یال با ضریب ρ که ضریب تبخیر^۱ نام دارد تبخیر شده سپس مطابق آنچه ذکر شد ردپای مورچه‌ها را به آن اضافه می‌کنیم. ΔT_{ij} اضافه ردپا برای یال L_{ij} می‌باشد و مجموع ردپای تمام مورچه‌هایی است که در سیکل فوق از این یال عبور کرده‌اند. در این الگوریتم هر مورچه می‌تواند به یالهایی که از آنها گذشته ردپا اضافه کند. q جزء پارامترهای مسئله و F هزینه سفر است [۷].

۱-۶-۳- الگوریتم جمعیت ذرات

الگوریتم جمعیت ذرات از روی رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان مدل شده است. رفتار هر یک از اعضا رفتار ساده‌ای است ولی در کل رفتار کل مجموعه رفتاری پیچیده است. اساس کار PSO بر

1-Evaporation coefficient.

این اصل استوار است که در هر لحظه هر ذره مکان خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین مکانی که تا کنون در آن قرار گرفته است و بهترین مکانی که در کل همسایگی‌اش وجود دارد تنظیم می‌کند. در **PSO** ذرات در فضای جستجو جاری می‌شوند.

تغییر مکان ذرات در فضای جستجو تحت تاثیر تجربه و دانش خودشان و همسایگانشان است. بنابراین موقعیت دیگر ذرات جمعیت روی چگونگی جستجوی یک ذره اثر می‌گذارد. نتیجه‌ی مدلسازی این رفتار اجتماعی فرآیند جستجویی است که ذرات به سمت نواحی موفق میل می‌کنند. ذرات در جمعیت از یکدیگر می‌آموزند و بر مبنای دانش بدست آمده به سمت بهترین همسایگان خود می‌روند.

ذرات در **PSO** به وسیله‌ی دو متغیر تعریف می‌شوند. V و X بطوری که X کاندیدای جواب بهینه و V بیانگر شتاب ذره است. در دو مفهوم متفاوت استفاده می‌شود:

بهترین جواب خصوصی و بهترین جواب عمومی. هنگامی که ذره در فضای جستجو حرکت می‌کند مقدار جاری برازندگی خود را با بهترین مقداری که قبلاً بدست آورده مقایسه می‌کند و بهترین موقعیت و بهترین جواب دیده شده را بهترین جواب خصوصی گویند که با $Pbest$ نشان داده می‌شود. بهترین جواب عمومی یا $Gbest$ از بین بهترین جواب خصوصی هر ذره بدست می‌آید با استفاده از $Pbest$ و $Gbest$ شتاب ذره i ام در بعد d ام بر طبق رابطه زیر بهنگام می‌شود [۹].

$$V_{id}(t+1) = w \cdot V_{id}(t) + c_1 \cdot A + c_2 \cdot B \quad (5-1)$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad \text{and} \quad d = 1, 2, \dots, n$$

$$A = rand_1 \cdot (Pbest_{id} - X_{id}(t)) \quad (6-1)$$

$$B = rand_2 \cdot (Gbest_{id} - X_{id}(t))$$

در روابط بالا w برابر با وزن ایستا A و B ثابت شتاب می‌باشند. N اندازه جمعیت، d تعداد متغیرها (بعدها) هستند. با استفاده از شتاب بهنگام شده موقعیت هر ذره با استفاده از رابطه‌ی زیر تغییر می‌کند:

$$X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + V_{id}(t+1) \quad (7-1)$$

۷-۱- اهداف پایان نامه

در طراحی بهینه سازه، متغیرهای طراحی به نحوی محاسبه می شوند که وزن، در ضمن ارضاء کلیه محدودیت های طراحی کمینه گردد. در این پایان نامه سطح مقطع اعضا به عنوان متغیرهای طراحی انتخاب گردیده‌اند. تابع هدف، وزن شبکه و محدودیت ها نیز حداکثر تنش و ماتریس‌های سختی و تنش و حداکثر تغییر مکان گرهها می باشند. در هر مرحله از بهینه یابی برای محاسبه محدودیت ها بایستی دهها مرتبه سازه تحلیل گردد، این امر سبب بالا رفتن زمان بهینه سازی شده و روی آوردن به روشهای تقریبی را در پی داشته است. با استفاده از نرم‌افزارهای برنامه نویسی همچون مطلب، فرترن و برنامه بهینه‌ساز نوشته می‌شود. روش بهینه سازی بکار گرفته شده، روش الگوریتم وراثتی می باشد. این تحقیق نشان می دهد، در بهینه سازی شبکه تنسگریتی، می-توان به جواب اقتصادتر بخصوص در سازههای بزرگ، دست یافت. پس از یافتن مقادیر بهینه برای سطح مقطع اعضای کششی و اعضای فشاری، وزن سازه بهینه با سازه قبلی مورد مقایسه قرار گرفته و ماتریس سختی اعضا و ماتریس تنش و حداکثر تغییر مکان نیز به عنوان قیود در نظر گرفته شده بودند که اهمیت مورد بهینه شده را نشان می‌دهد.

فصل دوم

بهینه سازی

۲-۱- مقدمه

در طراحی هر نوع سیستم کاربردی علاوه بر مسایل فنی و ضوابط طراحی، اقتصاد مساله نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. محاسبه طرحی که کمترین هزینه اجرایی را داشته باشد با استفاده از الگوریتمهای متعددی امکان پذیر است. الگوریتمهای مذکور تابعی از پارامترهای اقتصادی مساله را به عنوان تابع هدف انتخاب می‌کنند و با محاسبه حداقل یا حداکثر آن و اقناع ضوابط طراحی گزینه مناسب را به دست می‌آورند. در نتیجه سیستم حاصل علاوه بر دارا بودن استانداردهای طراحی کمترین هزینه اجرایی را خواهد داشت.

از دیدگاه علوم ریاضی فرآیند محاسبه حداقل یا حداکثر تابع هدف بهینه‌سازی نامیده می‌شود و در طرحهای عملی بر حسب نوع تابع هدف یکی از مقادیر حدی آن طرح مناسب را که به طرح بهینه موسوم است مشخص می‌کند. بهینه‌سازی یک سیستم کاربردی همزمان با اقناع شرایط طراحی حاکم بر آن انجام می‌شود. شرایط طراحی قیود مساله بهینه‌سازی کاربردی هستند. مساله بهینه‌سازی تابع هدف با حضور قیود و محدودیت‌های عددی مساله بهینه‌سازی مقید خوانده می‌شود. با اصلاح الگوریتم‌های بهینه‌سازی توابع آزاد امکان بهینه‌سازی مقید فراهم خواهد شد. پارامترهای تابع هدف متغیرهای بهینه‌سازی می‌باشند. مقادیر این پارامترها ویژگی‌های سیستم مورد بحث را نشان می‌دهند و با تغییر آنها طرحهای مختلفی برای سیستم تداعی خواهد شد. مقادیر متغیرها از مجموعه‌ای موسوم به مجموعه مرجع انتخاب می‌شوند. بدیهی است که مجموعه مرجع بخشی از دامنه تابع هدف می‌باشد [۶، ۷ و ۹].

۲-۲- مسائل بهینه سازی

مسائل بهینه سازی را می توان به دو گروه مسائل بدون قید و مسائل مقید تقسیم نمود. در بهینه سازی سازه ها بدلیل وجود قیدهای متعدد برای محدود نمودن تنشها، تغییر شکلها و مصالح مصرفی غالباً با مسائل مقید سر و کار داریم.

برای حل مسائل مقید بوسیله ی الگوریتم های ابتکاری روشهای مختلفی وجود دارد که رایج ترین آن استفاده از روش توابع جریمه است، ولی قبل از پرداختن به آن به تعریف یک مساله بهینه سازی کلی می پردازیم. یک مساله مقید بهینه سازی در حالت کمینه سازی را می توان به شکل زیر نمایش داد:

Minimize: $F(X)$

Subject to: $g_j(X) < 0 \quad j=1,2,\dots,m$ (۱-۲)

در دو رابطه اول (۱-۲)، X نشان دهنده متغیرهای طراحی، $F(x)$ تابع هدف و $g(X)$ قیود مساله بهینه سازی هستند.

در این تحقیق برای تبدیل نوع مساله از مقید به نامقید از تابع جریمه به شکل زیر استفاده شده است:

$$P(X) = R_p \cdot \sum_{j=1}^m \left[\max\left(\frac{g_j}{\bar{g}_j} - 1, 0\right) \right]^2 \quad (۲-۲)$$

بطوریکه \bar{g}_j حد نهایی قید R_p, g_j ضریب تابع جریمه می باشند. پس از بکارگیری روش تابع جریمه، مساله نامقید مذکور به شکل قید زیر تبدیل می شود:

$$\text{Minimize: } F(X) + R_p \cdot P(X) \quad (۳-۲)$$

۳-۲- روشهای بهینه سازی

در حالت کلی مسائل بهینه سازی سازه ها را می توان بر حسب متغیرهای طراحی و کمیت های کنترل کننده رفتار سازه، به صورت مسائل ریاضی مورد بررسی قرار داد. روشهای بررسی و حل

چنین مسائلی بطور کلی به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول، شامل روشهای مبتنی بر گرادیان است که مشتقات تابع هدف و محدودیت‌ها را به همراه مقادیرشان برای یافتن طرح بهینه بکار می‌گیرند. در برخی مسائل بهینه سازی در مهندسی عمران، می‌توان از روشهای مبتنی بر گرادیان سود برد ولی در تعدادی از مسائل یا نمی‌توان از این روش‌ها استفاده کرد و یا بکار گیری آنها به سادگی امکان پذیر نخواهد بود. به طور مثال وقتی که فضای جستجوی مساله گسسته است و یا با وجود پیوستگی این فضا بهینه‌های محلی مانع رسیدن روشهای گرادیانی به بهینه کلی می‌شوند، نمی‌توان از روشهای گرادیانی استفاده نمود. در این موارد از روشهای جستجوی مستقیم که در گروه دوم روشهای ریاضی قرار دارند، استفاده می‌شود. روشهای گروه دوم بر پایه گرادیان نبوده و تنها به ارزیابی مقادیر تابع هدف و محدودیتها برای انجام جستجوهای بعدی نیاز دارند. از آنجایی که روشهای گروه اول، اطلاعات بیشتری از تحلیل سازه را در یک نقطه بکار می‌گیرند، می‌توان انتظار داشت که از کارآیی بیشتری نسبت به روشهای گروه دوم برخوردار و به تعداد کمتری از تحلیل‌های پیاپی سازه نیازمند باشند. ماهیت خطی و یا غیر خطی مسائل بهینه سازی روشهای ریاضی را به دو گروه دیگر تقسیم می‌کند. در روشهای خطی، تابع هدف و محدودیتها به صورت توابعی خطی از متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شوند. اگر چه به ظاهر تنها گروه کوچکی از مسائل بهینه سازی را می‌توان در قالب روشهای خطی مورد ارزیابی قرار داد، ولی به دلیل آنکه روشهای خطی ابزار قدرتمندی در برخی از روشهای حل مسائل غیر خطی مانند مسیرهای قابل قبول¹ و برنامه ریزی خطی پیاپی می‌باشند، در عمل روش مزبور در سطح گسترده‌ای از مسائل طراحی بهینه سازه‌ها کاربرد دارد.

گروه عمده‌ای از مسائل طراحی بهینه سازه‌ها به دلیل وابستگی غیر خطی میان رفتار سازه و متغیرهای طراحی در چهارچوب مسائل غیر خطی قرار می‌گیرند. با توجه به ماهیت غیر خطی این مسائل واضح است که حل آنها با دشواریهایی همراه خواهد بود بطوریکه رسیدن به یک پاسخ بهینه

1 - Deterministic methods

کلی با چنین روشهایی با تردید همراه بوده و فرآیند بهینه سازی در بسیاری از موارد به پاسخ بهینه محلی همگرا می‌شود.

از دیدگاه دیگر می‌توان این روشها را در دو گروه روشهای قطعی^۱ (غیر تصادفی) و تصادفی جای داد. منظور از روشهای تصادفی، روشهایی هستند که از نمونه برداری تصادفی فضای جستجو یا مدل‌های تصادفی تابع هدف استفاده می‌کنند که در سالهای اخیر توجه بسیاری را به خود جلب نموده‌اند و این به دلیل ارائه روشهای موثری در حل مسائل بهینه سازی مشکل و امکان دست یابی به نقطه بهینه کلی می‌باشد. از طرف دیگر، بیشتر روشهایی قطعی دارای این اشکال اساسی هستند که به محض رسیدن به اولین نقطه بهینه محلی متوقف شده و توانایی خروج از این نقطه و حرکت به سوی نقطه بهینه کلی را از دست می‌دهند. بنابراین مدتهاست که مطالعاتی بر روی الگوریتم‌هایی که بتوانند از نقطه بهینه موضعی بگریزند، آغاز شده و تا کنون روش‌های متفاوتی ارائه و مورد بررسی قرار گرفته است. در این میان الگوریتم‌های تصادفی به دلیل عملکرد ساده‌تر و در نتیجه، راحتی اجرا به کمک رایانه مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند.

با توجه به مطالب فوق، در فرآیند جستجوی نقاط بهینه دو مورد را باید به طور همزمان مدنظر قرار داد. نخست اینکه بهینه کلی می‌تواند در هر جای فضای جستجو قرار بگیرد و دوم اینکه بر اساس استراتژی محلی، احتمال یافتن نقطه‌ای جدید که مقدار تابع هدف را بهبود بخشد، نزدیک نقطه‌ای با مقدار تابع هدف بهتر، بیشتر از نقطه‌ای با مقدار تابع هدف بدتر است. [۹]

بنابراینچه بیان شد، یک روش بهینه سازی موثر باید دو هدف متناقض را پیگیری کند با در نظر گرفتن استراتژی کلی، توزیع نقاط انتخابی باید یکنواخت باشد و برای برآوردن استراتژی دوم، توزیع نقاط باید در پیرامون بهترین نقاط فعلی متمرکز گردد به همین دلیل بیشتر روشهای بهینه سازی از دو استراتژی جستجوی کلی و محلی استفاده می‌کنند.

1 - stochastic methods

۲-۴- روشهای بهینه سازی برگرفته از طبیعت

بسیاری از سیستم‌های زنده و غیر زنده طبیعی، نسبت به سیستم‌های ساخت دست بشر از لحاظ کارایی برتری کاملی دارند. ترکیبی از خود تعمیری، راهنمای خود بودن و تولید مثل قوانینی در سیستم‌های زیستی می‌باشند که به سختی می‌توان حتی بعضی از آنها را در سیستم‌های ساخت دست بشر یافت. همین امر محققین را بر آن داشته که سیستم‌های طبیعی را بعنوان الگوی طراحی سیستم‌های مهندسی مورد توجه قرار دهند. چنین تلاشهایی به ایجاد مجموعه روشهای بهینه سازی برگرفته از طبیعت منجر شده است که به دو زیر مجموعه اصلی تقسیم می‌شوند: روشهای مبتنی بر طبیعت جاندار و روشهای برگرفته از طبیعت بی جان اکثر روشهای مبتنی بر طبیعت جاندار از فرآیند تکاملی جانداران در طبیعت ایده می‌گیرند. در این فرآیند ویژگی‌های جانداران بهبود می‌یابد تا بهتر بتوانند با محیط سازگار شوند و در رقابت با سایر جانداران برای دست یابی به منابع محدود طبیعی پیروز گردند. دو گروه عمده این زیر مجموعه، الگوریتمهای وراثتی^۱ و تکاملی^۲ می‌باشند.

در روش‌های برگرفته از طبیعت ابتدا جمعیتی از نقاط بطور تصادفی از میان جوابها و انتخاب و سپس مقدار تابع هدف به ازای تک تک نقاط جمعیت محاسبه می‌شود. در مرحله تولید جمعیت نقاط جدید، با کمک جمعیت موجود و استفاده از تابع توزیع احتمال مشخص و یا هر عملگر تصادفی دیگر، جمعیت نقاط دیگری تولید و مقدار تابع هدف به ازای هر یک از نقاط جمعیت بوجود آمده، محاسبه می‌شود. در اینجا جمعیت جدید با جمعیت مولد سنجیده شده و بر اساس این سنجش، جمعیت نقاط جدید برای مرحله بعد انتخاب می‌شوند.

روشهای بهینه سازی برگرفته از طبیعت، وابسته به گروه روشهای مستقیم بوده و شباهت زیادی به روشهای جستجوی تصادفی دارند. روشهای جستجوی تصادفی تنها از استراتژی جستجوی کلی

1 - Genetic algorithm

2 - Evolution algorithm

برخوردارند در حالیکه روشهای برگرفته از طبیعت بطور همزمان هر دو استراتژی جستجوی کلی و محلی را اجرا می‌کنند.

در بهینه سازی سازه‌ها با استفاده از الگوریتم وراثتی در هر نسل برای محاسبه قیده‌های حاکم بر طرح نیازمند تحلیل سازه می‌باشیم.

۲-۵- انواع متغیرهای بهینه سازی

ماهیت و پراکندگی اعضای مجموعه مرجع متغیرهای بهینه سازی را به دو گروه اصلی تقسیم می‌کند. اگر بین دو عضو متوالی مجموعه مرجع فاصله‌ای وجود نداشته باشد متغیرهای مساله از نوع پیوسته خواهند بود به عنوان مثال اعضای مجموعه اعداد حقیقی و مجموعه اعداد گویا از نوع پیوسته می‌باشند. بر عکس مجموعه‌ای که اعضای متوالی آن نسبت به یکدیگر با فاصله قرار گرفته‌اند از نوع گسسته می‌باشد. مجموعه اعداد صحیح و مجموعه اعداد طبیعی نمونه‌ای از مجموعه‌های گسسته می‌باشند. متغیرهای توابع ریاضی نیز بر حسب نوع مجموعه‌ای که از آن برداشت می‌شوند به دو دسته گسسته و پیوسته تقسیم خواهند شد. در واقع نوع متغیر به ماهیت فیزیکی آن بستگی دارد متغیرهایی که به کمیت‌هایی از قبیل وزن و حجم اشاره می‌کنند دارای ماهیت پیوسته می‌باشند و متغیرهایی که کمیت تعداد را نشان می‌دهند گسسته می‌باشند. البته ممکن است شرایطی به مساله تحمیل شود که متغیرهای معرف کمیت‌های فیزیکی پیوسته به نوع گسسته تغییر حالت دهند.

۲-۶- روشهای بهینه سازی

تاریخ علم بهینه سازی به اوایل قرن نوزدهم باز می‌گردد. تمامی روشهای بهینه سازی قدیمی بر اساس مفهوم مشتق جزئی تابع چند متغیره بیان شده‌اند. چنین روشهایی با عنوان روشهای تحلیلی بهینه سازی شناخته می‌شوند. از آنجا که مفهوم مشتق فقط برای توابع پیوسته تعریف می‌شود، محاسبه بهینه دقیق توابع گسسته با استفاده از روشهای تحلیلی امکان پذیر نیست و اعمال آنها برای توابع گسسته صرفاً تخمینی از مقدار بهینه و نقطه نظیر آن را به دست می‌آورد. محاسبات

روشهای تحلیلی از یکی از نقاط دامنه تابع آغاز می‌شود و با توجه به گرادیان تابع هدف به صورت خطی به نقطه دیگری منتقل می‌شود. محاسبات مذکور برای نقطه جدید تکرار می‌شوند تا نقاط بعدی به دست آیند. بدیهی است که عمیات تکراری روشهای تحلیلی تا حصول همگرایی ادامه می‌یابد انجام عملیات بهینه سازی بر نقاط خاصی از دامنه تابع هدف و همچنین حرکت خطی میان نقاط مذکور، در بسیاری از موارد باعث همگرایی الگوریتم در بهینه موضعی تابع هدف می‌شود. این ویژگی در شرایطی که تابع هدف دارای نوسانات شدید باشد تشدید می‌شود. برای جبران این نقیصه الگوریتم مورد نظر در دفعات مختلف با نقاط آغازین مختلف تکرار می‌شود تا پس از مقایسه نتایج آنها اطمینان کامل از مقادیر محاسبه شده حاصل گردد. مطالعات چند دهه اخیر روشهای عددی مختلفی را برای بهینه سازی توابع مقید ارائه کرده است. این روشها معمولا با تفکر و استدلالات منطقی در چرخه‌های سعی و خطا گام به گام به سمت نقطه بهینه پیش می‌روند در این تحقیق از میان روشهای بهینه سازی عددی روش وراثتی مورد استفاده قرار گرفته است. محاسبات این روش از مشتق تابع هدف و قیود حاکم بی نیاز می‌باشد. به همین دلیل استفاده از آن برای بهینه سازی توابع گسسته سودمند خواهد بود. همچنین به دلیل اینکه محاسبات روش وراثتی با نمونه گیری از تمامی فضای مجموعه مرجع انجام می‌شود احتمال همگرا شدن آن در بهینه موضعی کاهش می‌یابد.

۲-۷- روش وراثتی

در میان روشهای بهینه سازی الهام گرفته شده از طبیعت جاندار، الگوریتم وراثتی از تکامل یافته‌ترین‌ها به شمار می‌رود. اصول اولیه الگوریتم وراثتی توسط جان هلند^۱ در دانشگاه میشیگان ایالات متحده در سال ۱۹۶۲ پایه گذاری شد. سپس تحقیق در جهت توسعه چهار چوب ریاضی این الگوریتم و بطور همزمان در زمینه کاربردهای آن ادامه یافت. این تحقیقات منجر به انتشار کتاب «سازش در سیستم‌های طبیعی و مصنوعی» در سال ۱۹۷۵ گردید [۴] از اوایل دهه ۸۰ به بعد

1 - john holland

مقاله‌ها و رساله‌های بسیاری در تایید شیوه بهینه‌سازی توابع توسط این الگوریتم انتشار یافته است. در زمینه مهندسی سازه، راجیو^۱ و کریشنامورتی^۲ [۳] نشان داده‌اند که الگوریتم‌های وراثتی مناسب‌ترین روش برای بهینه‌سازی سازه‌ها با متغیرهای گسسته می‌باشند. امروزه کاربردهای الگوریتم‌های وراثتی در بهینه‌سازی مسایل طراحی مهندسی موفقیت آمیز بوده است [۳، ۷، ۸ و ۹]. الگوریتم وراثتی یکی از روشهای موثر در بهینه‌سازی است. این روش با الهام از طبیعت موجودات زنده و نقش وراثت در تکامل تدریجی آنها به محاسبه مقدار بهینه سیستم های ریاضی می‌پردازد. مبنای طبیعی الگوریتم وراثتی بر این اصل استوار است که رقابت موجودات زنده برای تصاحب منابع محدود طبیعی باعث تکامل آنها می‌شود. در رقابت های طبیعی موجوداتی پیروز می‌شوند که از دیگران قوی تر باشند. اقتدار موجودات پیروز مرهون ویژگی‌های طبیعی و فیزیکی منحصر به فرد آنهاست. آنها پس از پیروزی خود را مالک منابع موضوع رقابت می‌دانند. در نتیجه امکان استفاده بیشتر از منابع برای آنها فراهم می‌شود و به طور معکوس امکان بهره‌مندی موجودات ضعیف از منابع کاهش می‌یابد. این فرآیند امکان حیات موجودات مغلوب را محدود می‌کند و در صورتی که موجودات مغلوب بسیار ضعیف باشند از گردونه حیات حذف می‌شوند.

از آنجا که موجودات مقتدر بیش از دیگران امکان ادامه حیات دارند در تولید نسل بعد از خود نیز موثرتر از دیگران خواهند بود. بنابراین اکثر اعضای نسل جدید فرزندان موجودات مقتدری خواهند بود که همواره در رقابت‌های طبیعی پیروز بوده‌اند. از طرفی اعضای نسل جدید ویژگی‌های منحصر به فرد والدین خود را با دریافت ژن‌های آنها دارا خواهند بود. مجموعه عوامل فوق باعث می‌شوند که بیشتر اعضای نسل جدید دارای قدرت برابر یا بیش از والدین خود باشند. انجام رقابت های میان اعضای نسل جدید منجر به پیروزی اعضای قوی تر می‌شود.

به این دلیل که پیروزی اعضای مقتدر در جمعیتی رخ می‌دهد که اعضای آن به طور متوسط قوی تر از اعضای نسل قبل می‌باشند. اعضای پیروز قوی تر از کلیه اعضای نسل گذشته خواهند بود.

1 - s. rajeev

2 - c.s. krishnamoorthy

پیروزی‌های مکرر اعضای قدرتمند همراه با انتقال ژن‌های آنها به نسل بعد از خود باعث افزایش قدرت متوسط جمعیت از نسلی به نسل دیگر می‌شود. بنابراین رقابت میان موجودات زنده باعث تکامل تدریجی آنها می‌شود. از دیدگاه عمل ریاضی، در حالت حدی با بی‌نهایت تکرار این چرخه اعضای جمعیت مورد بحث به کمال مطلق خود خواهند رسید که همان نقطه بهینه برای آنها خواهد بود.

الگوریتم وراثتی با مدل سازی ریاضی چرخه طبیعی فوق بهینه توابع مقید ریاضی را محاسبه می‌کند. به این صورت که تعدادی از اعضای مجموعه مرجع را به عنوان جمعیت اولیه^۱ انتخاب می‌کند. سپس مقدار تابع هدف و قیود حاکم را به ازای هر یک از اعضای جمعیت محاسبه می‌نماید. با انجام عملیات جبری بر مجموعه مقادیر تابع هدف و قیدهای حاکم میزان اقتدار هر عضو با یک عدد مثبت برآورد می‌شود. به کمیت اقتدار هر عضو شاخص شایستگی^۲ تبدیل می‌شود. ضریب شایستگی هر عضو شرط بقای آن می‌باشد. اعضای که دارای ضریب شایستگی کوچک باشند از چرخه محاسبات حذف می‌شوند و اعضای که دارای ضریب شایستگی بزرگ هستند ممکن است چندین مرتبه در تولید اعضای نسل جدید شرکت کنند. تعداد تکرار اعضای مقتدر و حذف اعضای ضعیف شایستگی آن دارای ارتباط مستقیم می‌باشد. از تکرار اعضای شایسته و حذف اعضای ضعیف، جمعیت موثر بر تولید نسل جدید حاصل می‌شود. در ادامه اعضای جمعیت موثر کدگذاری می‌شوند. عملیات کدگذاری به وسیله ارقام مبنای دو انجام می‌شود. اعضای نسل جدید از ترکیب دو به دوی اعضای کدگذاری شده به دست می‌آیند. اعضای نسل جدید را پس از کدگشایی مورد ارزیابی قرار داده و شایستگی آنها را تعیین می‌کنیم. چرخه محاسباتی مذکور را بر اعضای جمعیت جدید اعمال کرده و مجدداً فرزندان آنها را به دست می‌آوریم. تکرار محاسبات الگوریتم وراثتی تا حصول همگرایی کامل ادامه خواهد یافت. محاسبات روش وراثتی به وسیله چهار عملگر مهم انجام

1 - initial population
2 - fitness value

می‌شود. جزییات محاسباتی هر یک از مراحل عملیاتی فوق و عملگرهای چهارگانه الگوریتم وراثتی به طور مفصل در بخشهای بعد بررسی خواهند شد.

الگوریتم وراثتی به دلیل ساختار منحصر به فرد خود برای بهینه سازی توابعی که دارای متغیرهای گسسته می‌باشند مناسب است. در مراجع مختلف بهینه‌سازی سازه‌های فضاکار با استفاده از روش وراثتی انجام شده و نتایج حاصل مفید ارزیابی شده است همچنین در این روش محاسباتی مشتق تابع هدف و قیود حاکم ضروری نیست و از آنجا که جمعیت اولیه با نمونه‌گیری تصادفی از همه فضای دامنه انجام می‌شود احتمال همگرا شدن به بهینه کلی بسیار زیاد خواهد بود. به رغم امتیاز فوق محاسبات عددی الگوریتم وراثتی بسیار حجیم می‌باشد به طوری که انجام آنها مستلزم صرف زمان طولانی‌تری نسبت به سایر روشها می‌باشد.

۲-۸- بهینه سازی توابع مقید ریاضی

بهینه سازی توابع مقید ریاضی ، محاسبه مقدار حداقل یا حداکثر آن تابع همزمان با اقناع قیود حاکم می‌باشد تابع هدف مساله را می‌توان به صورت زیر نمایش داد

$$W = F(x_1, x_0, K, x_n) \quad (۴-۳)$$

تابع فوق تحت تأثیر قیود زیر قرار دارد:

$$(۵-۳)$$

$$g_k \leq \bar{g}_k \quad k = 1, 2, K, n_c$$

در روابط فوق W نشانگر تابع هدف، F معرف رابطه ریاضی میان متغیرهای x_1 و x_2 و K و x_n می‌باشد . پارامتر n نیز مبین تعداد متغیرهای تابع هدف است. عبارت g_k تابعی از یک یا چند متغیر به کا رفته در تابع هدف و \bar{g}_k حد نهایی آن می‌باشد که مجموعه آنها معرف یکی از قیود حاکم بر تابع هدف است. پارامتر n_c نیز تعداد قیود حاکم را نشان می‌دهد.

۲-۸-۱- تابع آزاد معادل

محاسبات روش وراثتی برای توابع بدون قیدبیا ن شده اند. بنابراین جهت اعمال آنها بر تابع هدف مقید باید مجموعه تابع هدف و قیود حاکم بر آن را به تابع آزاد معادل تبدیل کنیم. به همین منظور با اعمال عملیات جبری بر تابع هدف و قیود تابع جدیدی را معرفی می کنیم که تحت اثر هیچ قیدی ندارد. بدیهی است که بهینه تابع آزاد معادل با عنوان تابع الحاقی معرفی می شود روشهای مختلفی برای تشکیل تابع الحاقی وجود دارد که رایج ترین آنها افزودن تابع جریمه^۱ خارجی به تابع هدف می باشد این روش تابع هدف و قیود حاکم بر آن را به صورت زیر به تابع آزاد معادل تبدیل می کند (۱۳)

(۶-۲)

$$\Phi = W + R_p \cdot \sum_{i=1}^{nc} \left[\max \left(\frac{g_i}{\bar{g}_i} - 1, 0 \right) \right]^2$$

در رابطه فوق Φ تابع الحاقی یا همان تابع آزاد معادل می باشد. W تابع هدف اولیه و g_i و \bar{g}_i عبارت طرفین قیود نامساوی می باشند همچنین R_p یک ضریب عددی است که در همگرایی الگوریتم موثر است و به صورت زیر محاسبه می شود.

$$R_p = 25 \cdot [1 + r \cdot (n_g - 1)] \leq M \quad (۷-۳)$$

در عبارت اخیر r ضریب ثابت است که برابر $0/۲$ پیشنهاد می شود و n_g تعداد تولیدات متوالی نسل ها در فرآیند سعی و خطا می باشد. پارامتر M یک عدد نسبتاً بزرگ است که معمولاً برابر ۱۰۰ فرض می شود. (۱۳)

۲-۸-۲- جمعیت اولیه

همان گونه که در بخشهای قبل بیان شد روش وراثتی بر جمعیت های متوالی اعمال می شود و با انجام محاسبات لازم بهینه جمعیت را تعیین می کند. بنابراین جهت آغاز محاسبات به مجموعه ای از

1 - penalty function

اعضای دامنه تابع به عنوان جمعیت اولیه نیاز است. اعضای جمعیت اولیه بر حسب تعداد متغیرهای تابع هدف چندتایی مرتب می‌باشند بوسیله عملگر مهم روش وراثتی موسوم به عملگر انتخاب¹ به دست می‌آیند عملگر انتخاب فقط یکبار در فرآیند بهینه سازی وراثتی وارد می‌شود به این صورت که در آغاز عملیات چندتایی‌های مرتب جمعیت اولیه را به طور تصادفی و با نمونه‌گیری از تمام نقاط مجموعه مرجع بر می‌گزینند. جمعیت حاصل از عملگر انتخاب نسل اول داده‌ها می‌باشد. انجام محاسبات الگوریتم وراثتی بر این نسل جمعیت‌های بعدی را از آن بدست می‌آورد. جمعیتی که محاسبات روش وراثتی بر آن در حال انجام است جمعیت جاری فرآیند بهینه سازی می‌باشد.

۲-۸-۳- شایستگی

اولین مرحله طبقه‌بندی اعضای جمعیت جاری محاسبه شاخص شایستگی آنها است. بدین منظور ابتدا لازم است مقدار تابع آزاد معادل به ازای هر یک از اعضای جمعیت جاری محاسبه شود. در نتیجه مجموعه‌ای از مقادیر تابع هدف به دست خواهد آمد تعداد اعضای این مجموعه برابر تعداد اعضای جمعیت جاری می‌باشد. اگر هدف از بهینه سازی تابع هدف محاسبه مقدار حداکثر آن باشد شاخص شایستگی هر عضو برابر مقدار نظیر آن از تابع آزاد معادل خواهد بود و رابطه زیر صادق است:

$$F_1 = \Phi_i \quad i = 1, 2, K, n \quad (۸-۲)$$

در رابطه فوق n تعداد اعضای جمعیت جاری، Φ_i مقدار تابع آزاد معادل به ازای عضو شماره i جمعیت جاری و F_i پارامتری است که درجه شایستگی عضو i ام را نشان می‌دهد و با عنوان شاخص شایستگی شناخته می‌شود. در صورتی که هر عضو با اصلاح مقدار نظیر آن عضو از تابع آزاد معادل به صورت زیر به دست می‌آید:

$$i = 1, 2, K, n \quad F_1 = \Phi_{\max} - \Phi_i \quad (۹-۲)$$

1- selection operator

در رابطه اخیر Φ_{max} حداکثر مقدار تابع الحاقی است که به ازای اعضای جمعیت جاری به دست می‌آید.

استفاده از روش وراثتی بر اساس شاخص های محاسبه شده توسط رابطه (۲-۹) اعضای را تعیین خواهد کرد که نظیر مقدار حداقل تابع هدف هستند.

تفاوت روشهای کمینه‌سازی و بیشینه سازی تابع هدف فقط در مرحله محاسبه شاخص شایستگی ظاهر می‌شود و پس از آن عملیات الگوریتم وراثتی برای هر دو حالت یکسان خواهد بود.

۲-۸-۵- ضریب شایستگی

میزان تاثیر هر عضو در تولید اعضای نسل جدید مستقیماً توسط شاخص شایستگی تعیین می‌شود. در واقع شاخص شایستگی پارامتری است که درجه اهمیت هر عضو را نسبت به سایرین مشخص می‌کند. از دیدگاه بیولوژیک شاخص شایستگی هر عضو معرف میزان قدرت آن می‌باشد. بزرگتر بودن شاخص شایستگی هر عضو برتری نسبی آن را می‌رساند. چنین اعضای در تولید نسل جدید به طور موثرتری دخالت می‌کنند. برای اینکه نقش هر عضو در تولید اعضای نسل بعد در الگوریتم‌های ریاضی قابل اعمال باشد شاخص های شایستگی اعضا نرمال می‌شوند به این صورت که با توجه شاخص شایستگی هر عضو ضریبی به آن منسوب می‌شود که تعداد دفعات حضور عضو را در مراحل بعدی نشان می‌دهد. این ضریب با عنوان ضریب شایستگی شناخته می‌شود.

روشهای مختلفی برای محاسبه ضرایب شایستگی اعضا وجود دارد. از میان این روش ها، روش چرخ گردان^۱ از دیگر روشها کاربرد بیشتری دارد (۱۳). مبنای فیزیکی این روش یک آزمایش ساده است. به این صورت که یک چرخ مدور را به وسیله تعدادی از شعاع‌هایش به قطاع های نامساوی تقسیم می‌کنیم. سپس چرخ مدور را در یک صفحه افقی و در برابر یک شاخص ساکن حول محوری که بر سطح آن عمود است و از مرکز آن می‌گذرد با یک ضربه دورانی به گردش در می‌آوریم. بدیهی است که سرعت دوران چرخ به واسطه عوامل محیطی با گذشت زمان کاهش می‌یابد. کاهش تدریجی

1 - roulette wheel

سرعت دوران چرخ به واسطه عوامل محیطی با گذشت زمان کاهش می‌یابد. کاهش تدریجی سرعت باعث سکون آن در مدتی معین خواهد شد. پس از پایان گردش چرخ یکی از قطاع‌های آن در برابر شاخص ساکن قرار می‌گیرد. تکرار آزمایش به دفعاتی که قطاع بزرگتر در برابر شاخص قرار می‌گیرد بیش از دیگر قطاع‌ها است. این نتیجه به وسیله تئوری احتمالات در ریاضی تایید می‌شود. بیان ریاضی این پدیده این است که احتمال سکون قطاع بزرگتر در برابر شاخص بیش از سایر قطاع‌ها است. احتمال سکون هر قطاع در برابر شاخص به طول کمان انتهایی آن بستگی دارد و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$i = 1, 2, K, n \quad (10-2)$$

$$P_i = \frac{L_i}{L_{tot}}$$

در رابطه فوق P_i احتمال قرارگیری قطاع i ام در برابر شاخص می‌باشد. L_i طول این قطاع و L_{tot} مجموع طول کلیه قطاع‌ها است که برابر محیط خارجی چرخ می‌باشد. n هم تعداد قطاع‌های موجود در چرخ می‌باشد. تعداد دفعاتی که هر قطاع در برابر قرار می‌گیرد با رابطه زیر برآورده می‌شود:

$$N_i = N.P_i \quad i = 1, 2, K, n \quad (11-2)$$

در این رابطه N تعداد دفعات انجام آزمایش و N_i تعداد دفعاتی است که قطاع i ام در برابر شاخص خواهد ایستاد. بدیهی است که با افزایش دفعات تکرار آزمایش دقت محاسبات فوق افزایش می‌یابد و نتایج حاصل به مقدار واقعی نزدیک‌تر خواهند بود.

آزمایش فوق از نظر تئوری ریاضی با بحث محاسبه ضرایب شایستگی اعضا در الگوریتم وراثتی یکسان است. در آزمایش فوق تعداد دفعاتی که هر قطاع در برابر شاخص قرار می‌گیرد به احتمال وقوع این پیشامد برای آن بستگی دارد. همچنین مجموع تعداد دفعاتی که قطاع‌ها در برابر تعداد دفعات انجام آزمایش می‌باشد. در واقع پارامتر N_i در این آزمایش میزان قدرت هر قطاع برای دستیابی به پیشامد مطلوب از میان N پیشامد را نشان می‌دهد بنابراین پارامتر مذکور معادل ضریب شایستگی اعضا در الگوریتم وراثتی می‌باشد. همچنین احتمال جلب پیش آمد مطلوب

توسط هر قطاع (P_i) که مبین قدرت حاکمیت نسبت به یکدیگر می‌باشد معادل شاخص شایستگی اعضا در الگو رینم وراثتی می‌باشد.

باتوجه به مطالب فوق و با ترکیب روابط (۲-۱۰) و (۲-۱۱) و تعویض پارامترهای این روابط با پارامترهای معادل از روش وراثتی عبارت زیر برای ضریب شایستگی اعضا به دست می‌آید.

$$F_i = \frac{n \cdot F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (2-12)$$

$$i = 1, 2, K, n$$

در رابطه فوق، n تعداد اعضا جمعیت جاری و F_i ضریب شایستگی عضو i ام می‌باشد.

۲-۸-۶- جمعیت موثر

ضریب شایستگی هر عضو نماد قدرت آن عضو در مدل طبیعی می‌باشد. بنابراین پارامتر مذکور معیاری برای بقا یا زوال اعضای مدل ریاضی می‌باشد. اعضای جمعیت جاری با توجه به ضریب شایستگی محاسبه شده برای هر عضو اصلاح می‌شوند و جمعیتی را پدید می‌آورند که اعضای آن مستقیماً در توالی اعضای نسل آتی دخالت می‌کنند. جمعیت اصلاح شده با عنوان جمعیت موثر شناخته می‌شود.

ضریب شایستگی هر عضو مراتب حضور آن عضو را در جمعیت موثر نشان می‌دهد. بنابراین برای ایجاد جمعیت موثر اعضای جمعیت جاری تکثیر می‌شوند. پس از انجام مرحله تکثیر تعداد هر عضو در جمعیت حاصل برابر ضریب شایستگی آن عضو خواهد بود. بدیهی است که اعضای از جمعیت جاری که دارای ضریب شایستگی برابر صفر می‌باشند در جمعیت موثر حضور نخواهند داشت. لذا تکثیر بعضی اعضا در جمعیت موثر با حذف بعضی دیگر از آنها موازنه خواهد شد. به طوری که تعداد اعضای جمعیت موثر با تعداد اعضای جمعیت جاری قبل از مرحله تکثیر مساوی خواهد بود.

حذف اعضای که ضریب شایستگی بسیار کوچک دارند معادل مرگ زودرس موجودات بسیار ضعیف یا ناقص در چرخه طبیعی می‌باشد. نابودی این موجودات باعث می‌شود که موجودات قوی‌تر به جای

آنها از منابع حیاتی مشترک استفاده نموده و در تولید موجودات نسل بعد نیز دخالت موثرتری داشته باشند این پدیده با تکثیر اعضای دارای ضریب شایستگی بزرگ در الگوریتم ریاضی وراثتی لحاظ می‌گردد.

اعضای جمعیت موثر اعضای مرغوب نسل جاری می‌باشند که مستقیماً در تولید اعضای جمعیت آتی دخالت میکنند نقش همه اعضای جمعیت موثر در ایجاد جمعیت جدید مساوی است و هیچ یک از اعضای آن بر دیگری برتری ندارد.

۲-۸-۷- کد گذاری جمعیت موثر

اعضای جمعیت موثر اعضای مرغوب نسل جاری می‌باشند که مستقیماً در تولید اعضای باید به گونه‌ای انجام شود که خصوصیات آنها به فرزندان منتقل نماید. در چرخه طبیعی وراثت عامل انتقال خصوصیات والدین به فرزندان می‌باشد که از طریق انتقال کروموزومهای آنها صورت می‌گیرد. هر کروموزوم^۱ شامل چندین ژن^۲ مختلف می‌باشد و هر ژن ناقل یکی از خصوصیات والدین می‌باشد. برای این که بتوانیم مدل وراثتی مشروحه فوق را بر داده‌های ریاضی اعمال کنیم هر یک آنها را به صورت کدهایی از صفر و یک بیان می‌کنیم. بدین منظور از اصول محاسبه اعداد درمبنای دو استفاده می‌کنیم. به این صورت که ابتدا اعضا دامنه تابع را شماره گذاری می‌کنیم. شماره گذاری اعضای دامنه با عدد صفر برای اولین عضو شروع می‌شود و با یک واحد افزایش برای اعضای متوالی به صورت ترتیبی ادامه می‌یابد. شماره ترتیبی هر عضو شاخص آن عضو در محاسبات بعد می‌باشد. شماره هر عضو دامنه را به صورت معادل در مبنای دو تبدیل می‌کنیم و به صورت رشته‌ای از صفر و یک نشان می‌دهیم. طول هر رشته از اعضای دامنه که برابر تعداد صفر و یک‌های آن می‌باشد. به تعداد اعضای دامنه بستگی دارد. به عنوان مثال اگر دامنه تابعی دارای هشت عضو باشد یک رشته سه‌تایی برای معرفی اعضای آن کافی است. بدیهی است که برای شدن طول تمامی رشته‌ها تعداد

1 - chromosome

2 -Gee

صفر به سمت چپ اعضا که از نظر محاسباتی فاقد ارزش می‌باشند جهت انجام صحیح مراحل بعدی الگوریتم الزامی است.

رشته‌های منتسب به اعضای دامنه مبین خصوصیات آن می‌باشند. به بیان دیگر هریک از این رشته‌ها حاوی یکی از صفات متغیرهای تابع هدف می‌باشند. از این رو در قیاس با الگوریتم طبیعی دارای نقش ژنهای ناقل ویژگیهای والدین می‌باشند.

کدگذاری اعضای جمعیت موثر با استفاده از رشته‌های منتسب به اعضای دامنه تابع به سهولت انجام می‌گیرد. تفاوت کدگذاری اعضای جمعیت موثر با اعضای مجموعه دامنه از ماهیت آنها ناشی می‌شود. هریک از دامنه عدد صریحی می‌باشند که با انتساب یک عدد ترتیبی به سادگی به رشته کددار تبدیل می‌شوند. اما هریک از اعضای جمعیت موثر یک چندتایی مرتب می‌باشند و هر چندتایی مرتب به تعداد متغیرهای تابع هدف دارای عضو عددی است. رشته مشخصه هر یک از این چندتایی‌ها از کنار هم قرار دادن رشته‌های نظیر اعداد درونی آنها تشکیل می‌شود. با توجه به آنچه گفته شد طول رشته اعضای جمعیت موثر به طول رشته اعضای دامنه و همچنین به تعداد متغیرهای تابع هدف بستگی دارد و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L_{sr} = n_v \cdot L_D \quad (13-2)$$

در رابطه فوق L_{sr} طول رشته نظیر اعضای جمعیت موثر، L_D طول رشته اعضای دامنه و n_v تعداد تغییرهای تابع هدف می‌باشد.

بعنوان مثال اگر در یک سازه خرپایی با سه عضو بدلیل محدودیت مسایل اجرایی، پروفیل‌های $IPE24, IPE22, IPE20, IPE18, IPE16, IPE14, IPE12, IPE10$ قابل استفاده باشند، می‌توان به هر کدام از مقادیر صحیح بدون علامت بین ۰ و ۷ (یا بین ۱ و ۸) یک رشته به طول سه را وابسته نمود. به این ترتیب دامنه یک تابع هدف سه متغیر این سازه در بهینه سازی به روش وراثتی به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$D = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$$

در جدول (۱-۲) اعضای دامنه (متغیرهای طراحی) و رشته‌های وابسته به آنها گنجانده شده‌اند.

جدول (۱-۲): اعضای دامنه و رشته‌های وابسته به آنها

رشته وابسته	کدگذاری پروفیل	پروفیل فولادی
۰۰۰	۱	<i>IPE 10</i>
۰۰۱	۲	<i>IPE 12</i>
۰۱۰	۳	<i>IPE 14</i>
۰۱۱	۴	<i>IPE 16</i>
۱۰۰	۵	<i>IPE 18</i>
۱۰۱	۶	<i>IPE 20</i>
۱۱۰	۷	<i>IPE 22</i>
۱۱۱	۸	<i>IPE 24</i>

اگر سه تایی مرتب (۸ و ۶) یکی از اعضای جمعیت موثر باشد کد وابسته آن به صورت زیر خواهد بود:

۱۰۱۱۱۱۰۰۰ → (۸ و ۶)

هر سه رقم رشته فوق به شماره یکی از اعضای دامنه اشاره دارد. رشته فوق متغیر مورد نظر را به وضوح مشخص می‌کند و می‌توان از آن در محاسبات آینده استفاده نمود.

۲-۵-۸- انتخاب جفت و پیوند

عملگرهای جفت کننده^۱ و پیوند آدو عملگر اصلی روش وراثتی می‌باشند که بخش عمده عملیات تولید نسل جدید را عهده‌دار می‌باشند. عملگرهای مذکور باید به گونه‌ای عمل کنند که اعضای جدید صفات غالب والدین خود را داشته باشند. همانطور که قبلاً بیان شد در طبیعت جاندار کروموزومهایی که هر کدام چندین ژن مختلف را در بر گرفته‌اند واسطه انتقال وراثت از والدین به فرزندان می‌باشند. هریک از ژنهای تشکیل دهنده کروموزومها تنها ناقل یکی از ویژگیهای والدین می‌باشند. کروموزومی که ویژگیهای موجود جدید را تعریف می‌کند ترکیبی از کروموزومهای

1 - mating operator

2 - crossover operator

والدین است. بنابراین هر موجود متولد شده برخی ویژگی‌های خود را از پدر و برخی را از مادر خود دریافت می‌دارد. همچنین برخی از خصوصیات او تلفیقی از خصوصیات پدر و مادر می‌باشد.

شبیه‌سازی اجزای فرآیند طبیعی فوق شامل والدین ژنها و کروموزومها به سادگی در الگوریتم وراثتی انجام می‌شود. در واقع هر دو عضو جمعیت موثر والدین دو عضو نسل جدید می‌باشند و رشته‌های کددار منتسب به آنها کروموزومهای ناقل صفات آنها هستند که با عنوان کروموزوم مصنوعی شناخته میشوند هر یک از کروموزومهای مصنوعی مانند نمونه‌های طبیعی خود از چندین ژن تشکیل شده‌اند. ژن‌های مذکور همان رشته‌های منتسب به اعضای دامنه می‌باشند ژنهای مصنوعی نامیده می‌شوند از مجموع آنچه گفته شد تعداد ژنهای مصنوعی تشکیل دهنده هر یک از کروموزومهای مصنوعی برابر تعداد متغیرهای تابع هدف می‌باشند.

جهت تولید اعضای نسل آتی باید هر دو کروموزوم مصنوعی نسل حاضر با یکدیگر پیوند خورده و دو کروموزوم جدید را که مبین صفات دو عضو نسل جدید می‌باشند نتیجه دهند. پیوند کروموزومهای مصنوعی با ترکیب ژنهای آنها انجام می‌شود به این صورت که هر یک از ژنهای دو کروموزوم مولد در یک یا چند مقطع بریده شده و اجزا بریده شده‌ای که در موقعیتهای زوج یا فرد قرار دارند بین دو ژن نظیر جابجا می‌شوند. براین اساس سه نوع ترکیب رایج بین ژنها وجود دارد. در نوع اول که به ترکیب یک نقطه موسوم است هر ژن در یک نقطه بریده می‌شود و ارقام یک طرف محل برش از ژن اول با ارقام نظیر از ژن دوم تعویض می‌شوند. در ترکیب نوع دوم هر یک از ژنها در دو نقطه بریده می‌شود و اجزا میانی آنها باهم تعویض می‌شوند. روش ترکیبی مذکور به روش ترکیب دو نقطه موسوم است. در ترکیب نوع سوم نیز که به روش سه نقطه موسوم است هر ژن در سه نقطه بریده می‌شود و اجزا متناظر موقعیتهای اول و سوم آنها جابجا می‌شوند. موقعیت مقاطع برش در ژنها می‌تواند معلوم و همواره ثابت باشد اما انتخاب تصادفی آنها در افزایش دقت و سرعت همگرایی الگوریتم تاثیر مثبت خواهد داشت.

در مرحله تولید اعضای نسل جدید ابتدا هر دو عضو جمعیت موثر به یکدیگر منتسب می‌شوند. انتساب تصادفی اعضا به یکدیگر توسط عملگر جفت انجام می‌شود. سپس عملگر پیوند کروموزومهای مصنوعی هر دو عضو منتسب را به یکدیگر پیوند می‌زند. در واقع عمل پیوند تکرار عمل ترکیب برای همه ژنهای کروموزومهای نظیر می‌باشد. با توجه به نوع ترکیب انجام شده میان اعضا چندین نوع عملگر پیوند می‌باشند که از میان آنها روش پیوند سه نقطه موثر تر از سایر روشها می‌باشد.

عملگر پیوند با احتمال حدود ۸۰ تا ۱۰۰ درصد میان اعضای منتسب عمل می‌کند. بنابراین ممکن است در بعضی موارد میان کروموزومهای منتسب پیوند ایجاد نشود. در چنین حالتی کروموزومهای موجود مستقیماً و بدون تغییر به نسل بعد منتقل میشوند. تجربه نشان می‌دهد که احتمال کمتر از ۱۰۰ برای عملگر پیوند در بعضی موارد باعث همگرایی سریعتر و دقیقتر الگوریتم شده است. انتخاب احتمال پیوند مناسب به تجربه و تبحر فرد بستگی دارد مقدار آن بر حسب شرایط مسایل مختلف تغییر خواهد کرد.

اعمال عملگر پیوند بر تمامی جفت کروموزومهای منتسب اعمال شده و به تعداد اعضای جمعیت موثر کروموزوم جدید تولید می‌کند. کروموزومهای جدید مبین صفات اعضای جمعیت جدید هستند که در دور جدید محاسبات مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

۲-۵-۹- جهش ژنها

عملگر جهش آخرین عملگر الگوریتم وراثتی می‌باشد که دارای یک نقش فرعی است و روند همگرایی الگوریتم را به سمت بهینه واقعی سوق می‌دهد به بیان دیگر عملگر جهش غالب شدن زود هنگام اعضای نامناسب جلوگیری می‌نماید این عملگر برای هر یک از ارقام رشته‌های منتسب به جمعیت موثر با احتمال بسیار کوچک وارد عمل می‌شود و در صورت وقوع احتمال رقم مورد نظر تغییر داده و به دیگر رقم مبنای دو تبدیل می‌کند. احتمال ۰/۱٪ تا ۰/۴٪ برای عملگر جهش مناسب است. تجربه نشان می‌دهد که احتمال کمتر از ۰/۱٪ باعث کاهش دقت الگوریتم و احتمال

بیش از ۴/۰٪ همگرایی الگوریتم را مختل می‌کند. مقدار دقیق احتمال جهش به شرایط مساله مورد نظر بستگی دارد و با روشهای تجربی قابل محاسبه می‌باشد.

۲-۵-۱۰- کد گشایی نسل جدید

پس از آنکه عملیات پیوند عملیات و سپس جهش بر اعضای جمعیت موثر اعمال گردید کروموزومهای مصنوعی اعضای نسل جدید به دست می‌آیند. هریک از این کروموزومها ویژگی‌های یکی از اعضای جمعیت جدید را تعریف می‌کنند. برای اینکه ویژگی‌های اعضای جدید آشکار شوند باید کروموزومهای آنها کد گشایی شوند برای این منظور هریک از ژن‌ها آنها را به مقدار نظیر در مبنای ده تبدیل کرده و عدد حاصل را با شماره اعضای دامنه تطبیق می‌دهیم. بنابراین مقدار عددی هر ژن به دست می‌آید. از کنار هم قرار دادن مقادیر ژنهای هر کروموزوم چندتایی مرتب نظیر آن کروموزوم حاصل می‌شود. کدگشایی از همه کروموزومای اعضای جمعیت جدید را به طور صریح مشخص می‌کند.

۲-۵-۱۱- تکرار الگوریتم:

پس از معلوم شدن اعضای جمعیت جدید مراحل الگوریتم وراثتی برای آنها قابل اجرا خواهد بود بدین صورت که ابتدا مقادیر تابع هدف را به ازای آنها محاسبه نموده وبا استفاده از آن شاخص‌های شایستگی و در نهایت ضرایب شایستگی اعضا را به دست می‌آوریم در ادامه جمعیت موثر تشکیل و اعضای آن کد گذاری می‌شوند. سپس عملگرهای جفت یاب پیوند و جهش وارد عمل شده و رشته‌های کددار جدیدی را ایجاد می‌کنند. رشته‌های مذکور مبین صفات اعضای نسل آتی می‌باشند کدگشایی از این رشته‌ها اعضای جمعیت جدید را نتیجه می‌دهد عملیات فوق را می‌توان مجددا بر جمعیت حاصل اعمال نمود و جمعیت‌های بعدی را به دست آورد انجام این چرخه تا حصول همگرایی در الگوریتم ادامه می‌یابد پس از همگرایی مقدار بهینه تابع هدف و نقطه‌ای که شرایط بهینه را ایجاد می‌کند توسط الگوریتم ارائه می‌شود.

۲-۵-۱۲- شرط همگرایی در الگوریتم وراثتی

شرایط مختلفی را می‌توان برای کنترل همگرایی الگوریتم مورد استفاده قرار داد. در بعضی تحقیقات تکرار هشتاد درصد اعضای جمعیت جاری در نسل جدید به عنوان شرط پایان محاسبات الگوریتم منظور شده است. (۲۱) در بعضی تحقیقات دیگر تکرار متوالی یک مقدار خاص به عنوان بهینه تابع هدف شرط همگرایی الگوریتم می‌باشد (۱۸)

لازم به ذکر است که استفاده از روشهای مختلف در مراحل الگوریتم وراثتی به تفکر خلاقیت و تجربه افراد بستگی دارد در صورتی که روشهای به کار رفته در قسمتهای مختلف با یکدیگر انطباق داشته باشند چرخه محاسباتی الگوریتم به پاسخ مناسب همگرا می‌شود.

۲-۹- الگوریتم وراثتی برای بهینه‌سازی توابع مقید ریاضی

الگوریتم وراثتی دارای یک حلقه محاسبات تکراری است که شامل مراحل مختلف می‌باشد در ادامه مراحل گام به گام یک الگوریتم وراثتی ساده بیان می‌شود.

گام اول - عملگر انتخاب، جمعیت اولیه را ایجاد می‌کند.

گام دوم - مقادیر تابع هدف به ازای اعضای جمعیت جاری محاسبه می‌شوند.

گام سوم - شاخص شایستگی اعضا با استفاده از مقادیر تابع هدف نظیر محاسبه می‌شوند.

گام چهارم - ضریب شایستگی نظیر هر عضو محاسبه می‌شود.

گام پنجم - جمعیت موثر از جمعیت جاری استخراج می‌گردد.

گام ششم - اعضای جمعیت موثر به وسیله رشته‌هایی از صفر و یک کدگذاری می‌شوند.

گام هفتم - عملگر جفت یاب هر دو عضو جمعیت موثر را به یکدیگر منتسب می‌کند.

گام هشتم - عملگر پیوند، از هر دو عضو منتسب به هم دو عضو جدید به وجود می‌آورد.

گام نهم - عملگر جهش، بر اعضای جمعیت جدید اعمال می‌شود.

گام دهم - اعضای جمعیت جدید کدگشایی می‌شوند.

گام یازدهم - معیار همگرایی بر حسب اعضای جدید کنترل می‌شود.

گام دوازدهم - در صورت برقراری شرط همگرایی محاسبات متوقف می‌شود.

گام سیزدهم - در صورتی که شرط همگرایی برقرار باشد جمعیت جدید جایگزین جمعیت جاری شده و محاسبات از گام دوم تکرار می‌شوند.

استفاده از الگوریتم وراثتی با استفاده از رایانه‌های سریع به سادگی امکان پذیر است.

فصل سوم

معرفی و تحلیل سازه‌های

تنسگریتی

مقدمه

سازه‌های فضاکار سازه‌های هستند، که عملکرد آنها در فضا، سه بعدی است. یعنی ترکیب شکل، بارهای خارجی، نیروهای داخلی و تغییر شکل‌ها در این سازه‌ها فراتر از یک صفحه واحد قرار دارند. این سازه‌ها بیشتر برای پوشش دهانه‌های بزرگ و بدون ستون‌های داخلی از قبیل آشیانه هواپیماها، سالن‌های ورزشی، پوشش سقف کارخانه‌ها ... استفاده می‌شود. سازه‌های فضاکار در کل به سه دسته سازه‌های فضاکارمشبک، سازه‌های فضاکارپیوسته و سازه‌های فضاکارمرکب تقسیم می‌شوند. سازه‌های تنسگریتی در زمزه سازه‌های فضاکار مشبک قرار می‌گیرند. ظهور این سازه‌ها به کارهای جانسون در سال ۱۹۲۱ برمی‌گردد. بررسی رفتار و کاربرد این سازه‌ها، از سال ۱۹۴۸ با کارک.اسنلسون و در دهه شصت با تلاش‌های د.ج.امریک و ر.ب.فولر گسترش یافته است [۱۱].

سازه تنسگریتی درواقع نوعی سازه‌ی فضاکار سه‌بعدی پایدار متشکل از عناصر کششی و عناصر فشاری است بطوریکه عناصر کششی پیوسته و عناصر فشاری ناپیوسته هستند. البته محققان در این زمینه تعاریف دیگری را نیز ارائه نموده‌اند که به برخی از آنها اشاره خواهد شد.

۳-۱- سیستم‌های سازه‌های فضاکار

سازه‌های فضاکار^۱، سیستم‌های سازه‌ای هستند که دارای عملکرد سه بعدی می‌باشند. در سازه‌های فضاکار، ساختار^۲، بارهای خارجی، نیروهای داخلی و تغییر مکان‌های سازه‌ای در فضای سه بعدی تعریف می‌شوند. در عمل سازه‌های فضاکار به گروهی از سازه‌ها گفته می‌شود که شامل شبکه‌ها، گنبد‌های استوانه‌ای^۳، گنبد‌های کروی، دکل‌ها، شبکه‌های کابلی، سیستم‌های غشایی^۴، سازه‌های تاشو^۵ و تنسگریتی‌ها^۶ هستند. سازه‌های فضاکار به سه دسته تقسیم می‌شوند که شامل: الف- سازه‌های فضاکار مشبک. ب- سازه‌های فضاکار پیوسته. ج- سازه‌های فضاکار مرکب می‌باشد.

سازه‌های فضاکار مشبک شامل المان‌های منفصل میله‌ای؛ سازه‌های فضاکار پیوسته نظیر دال‌ها، پوسته‌ها غشاهای؛ سازه‌های فضاکار مرکب نیز ترکیبی از سازه‌های مشبک و پیوسته می‌باشند. سازه‌های تنسگریتی در زمره سازه‌های فضاکار مشبک قرار می‌گیرند.

سازه‌های تنسگریتی شامل مجموعه ناپیوسته‌ای از عناصر فشاری در داخل مجموعه پیوسته‌ای از عناصر کششی می‌باشند که به وسیله حالت خودتنیدگی^۷ پایدار می‌شوند سازه‌های تنسگریتی به خاطر تعداد نسبتاً کم عناصر فشاری، بسیار سبک می‌باشند. همچنین این سازه‌ها قابلیت تاشوندگی دارند. تاشوندگی سیستم‌های تنسگریتی، انبار کردن و انتقال این سیستم‌ها را آسان می‌سازد. این قابلیت، استفاده از سیستم‌های تنسگریتی را به عنوان سازه‌های فضاکار با کاربردهای هوا و فضا میسر می‌سازد. سیستم‌های تنسگریتی به خاطر مزیت‌های قابل توجهی که دارند در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کردند و لزوم تحقیق در زمینه رفتار مکانیکی این سازه‌های ابداعی احساس می‌شود. {۲۲}

۳-۲- اهمیت مطالعه سازه‌های تنسگریتی

اهمیت مطالعه سازه‌های تنسگریتی از آنجا ناشی می‌شود که :

- گرچه متون علمی وسیعی راجع به ناپایداری سازه‌های فضاکار وجود دارد، اما هیچ کدام از آنها برای سازه‌های تنسگریتی مناسب نیستند. زیرا سازه‌های تنسگریتی نوع خاصی از سازه‌های فضاکار هستند

-
- 1 - Space Structures
 - 2 - Configuration
 - 3 - Barrel Vaults
 - 4 - Membrane Systems
 - 5 - Foldable Structures
 - 6 - Tensegrity Structures
 - 7 - Self stressing

که در آنها خودتندگی بایستی ایجاد شود و تحلیل این سازه‌ها بر اساس پیش‌تندگی استوار است. {۲۷}

-در سازه‌های فضاکار متداول، اعضای کششی بعد از ناحیه پلاستیک دارای سخت‌شدگی کرنشی^۱ می‌باشند که این اعضا می‌توانند نیروهای اضافی را جذب نمایند {۲۸}. از این رو اعضای فشاری نقش اصلی را در تحلیل خرابی این سازه‌ها ایفا می‌کنند. اما در سازه‌های تنسگریتی، اعضای کششی که به صورت کابل می‌باشند؛ طبق نتایج آزمایش، بعد از ناحیه پلاستیک دارای سخت‌شدگی کرنشی نمی‌باشند {۲۹}. در نتیجه برای این سازه‌ها مکانیزم گسیختگی کششی نیز مطرح می‌باشد.

-عناصر کابلی در سازه‌های تنسگریتی، بر عکس عناصر کششی در سازه‌های متداول، به دلیل تغییر حالت^۲ (حالت شل و سفت) باعث رفتار غیرخطی سازه‌ای نیز می‌شوند. این نوع رفتار غیرخطی در کنار سایر پارامترها می‌توانند نقش اساسی در نحوه‌ی وقوع مکانیزم خرابی^۳ داشته باشند.

- اغلب مطالعات استاتیکی انجام گرفته روی این سازه‌ها، محدود به مرحله پیش‌کمانش^۴ عناصر فشاری پیش‌گسیختگی^۵ و یا شل‌شدن^۶ عناصر کششی می‌باشد. هنوز مطالعات تحلیلی متمرکزی در مورد تاثیر رفتار پس‌کمانشی اعضای فشاری و رفتار پس‌گسیختگی اعضای کششی روی رفتار کلی سازه‌های تنسگریتی انجام نشده است.

در سازه‌های تنسگریتی کابل‌ها به عنوان المان‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در کشش هستند و میله‌ها نقش المان‌هایی را دارند که در فشار عمل می‌کنند.

در این قسمت سازه‌های تنسگریتی با سه وجه دارای سه میله مورد آنالیز قرار گرفته‌اند. برای دستیابی به مکانیزم مطلوب طول اعضا قابل تغییر می‌باشد این آنالیز نشان می‌دهد و سیستم سازه کششی زمانی که یک یا دو کابل قرار گرفته در گوشه‌ها جای خود را با میله عوض کنند رفتاری که سازه از خود نشان می‌دهد بدون تغییر باقی می‌ماند به شرط آنکه میله‌ها با گوی به یکدیگر متصل شده باشند.

1 - Strain Hardenin

2 - Changing tatus

3 - CollapseMechanis

4 -Pre-buckl

5 - Pre -rupture

6 - Slacking

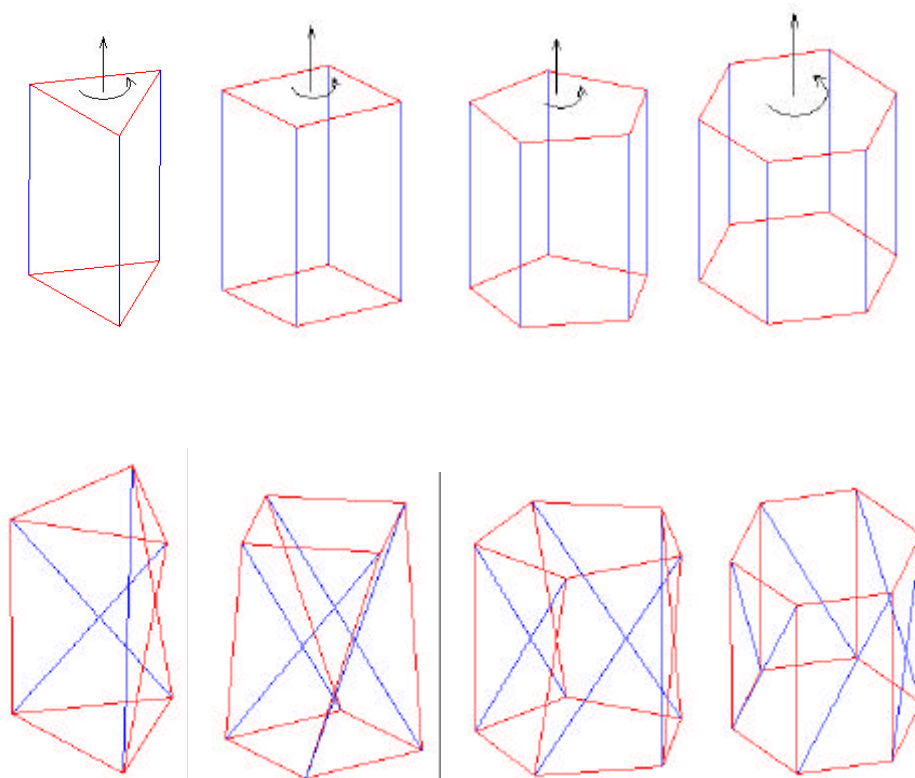
سازه‌های تنسگریتی تشکیل شده‌اند از کابل‌های کششی و میله‌های فشاری سازه تنسگریتی از ترکیب دو واژه *tention* و *integrity* تشکیل شده‌اند نیروها در اعضای سازه در فشار و کشش خالص هستند و هیچ گونه خمش یا پیچشی رخ نمی‌دهد شکل ۱-۳ خانواده سازه تنسگریتی را نشان می‌دهد که منشور اریب گفته می‌شود. شکل ۲-۳ یک سازه را نشان می‌دهد که کابل‌ها و میله‌ها در آن مشخص شده است

آنگاه که کابل‌های سازه الاستیک باشند تحت باربرداری قابلیت بازگشت به شکل اولیه خود را دارا هستند شکل سازه تنسگریتی متقارن یکتاست و *kenner* این گونه بیان می‌کند.

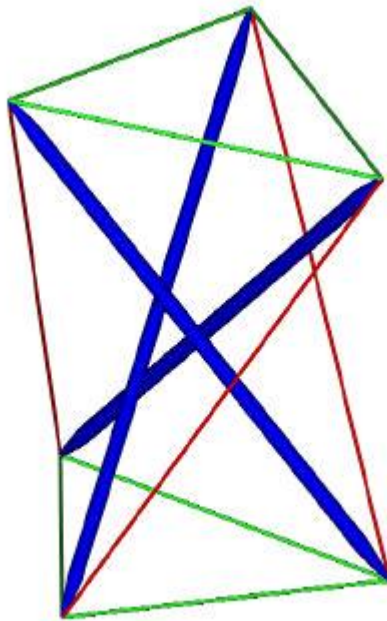
$$\alpha = \pi/2 - \frac{\pi}{n} \quad (1-2)$$

رابطه فوق n تعداد میله‌ها و α حداقل زاویه پیچش است در حالی $\pi/2$ حداکثر مقدار است. بنابراین

مثلاً، مربع، پنج ضلعی، شش ضلعی دارای زاویه α معادل با $\pi/6, \pi/4, \pi/3, 3\pi/10, \pi/2$ می‌باشند.



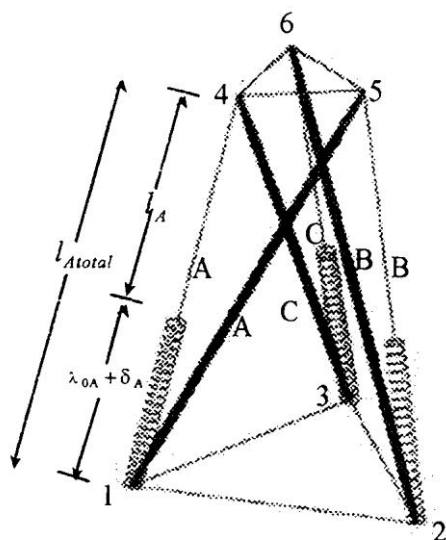
شکل ۱-۳- خانواده سازه‌های تنسگریتی



شکل ۳-۲- سازه تنسگریتی

هرمها در سطر اول شکل (۱-۳) هرمهای موازی نامیده می‌شوند چرا که همه کابل‌ها موازی هستند. آنگاه که هر هرم موازی به اندازه α نسبت به صفحه پایین می‌چرخد یک سازه تنسگریتی متناظر ایجاد می‌شود که در سطر دوم شکل ۱-۳ نشان داده شده است اخیراً در دانشگاه فلوریدا Corria نقطه تعادل یک سازه تنسگریتی را برای نیروها تعیین کرد. قبل از همه پایداری سازه تنسگریتی برای آنتن‌های قابل گسترش توسط knight مطالعه شده بود برای هر هندسه سازه stern معادله‌ای را برای یافتن طول المان‌ها پیشنهاد داد. روابط بالا و پایین سازه به صورت گسترده‌ای توسط Tobie و Kenner مورد بررسی قرار گرفتند [۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵]. مطالعات ذکر شده با این فرض انجام شده بودند که صفحات بالا و پایین در حین عملکرد سازه به صورت موازی باقی بمانند. اغلب این موضوع به ندرت اتفاق می‌افتد که صفحات در حین تغییر شکل‌ها موازی باقی بمانند. در شرایطی این اتفاق می‌افتد که هر کابل به صورت محکم و سفت بماند یا به همان میزان طولی که نیاز است شل شود. کابل‌ها از مصالح غیر خطی تشکیل شده‌اند. این المان‌ها در معرض تغییرات طول قرار دارند. در این پایان نامه این تغییرات طول مد نظر است یک سازه تنسگریتی با دو وجه مثلثی همان مورد در شکل (۳-۳) نشان داده شده است مورد آنالیز قرار خواهد گرفت. تنها ۳ کابل A و B و C مورد نظراند و سه کابل الاستیک که در بالا و پایین سازه قرار دارند به صورت سری به یکدیگر متصل هستند از آنجا بالا و پایین دارای سه کابل می‌باشد.

دستگاه در اثر مکانیزم موازی و معکوس قرار دارد. برای آنالیز معکوس مکان مطلوب و جهت دهی مناسب با یکدیگر به صورت ماتریس انتقال T_T^B با انرژی پتانسیل مورد نظر U در المان‌های سازه مشخص شده‌اند طول میله‌های مورد نیاز L_C, L_B, L_A و طول کابل‌های مطلوب L_C, L_B, L_A در نظر گرفته شده است.



L_A, L_B, L_C	طول میله‌ها
K_A, K_B, K_C	سختی فنرها
l_{OA}, l_{OB}, l_{OC}	طول آزاد فنرها
$\delta_A, \delta_B, \delta_C$	تغییر طول فنرها
l_A, l_B, l_C	طول متغیر کابل‌ها

شکل ۳-۳

شکل (۳-۳) نامگذاری‌ها را در این پایان نامه مشخص می‌کند. شش راس نقاط گره‌ها شماره گذاری شده‌اند میله A و کابل A هر دو از نقطه یک سر منشاء می‌گیرد به صورت مشابه میله B و کابل B و همچنین میله C و کابل C به ترتیب از نقاط دو و سه سر منشاء می‌گیرد. نامگذاری به صورت زیر است:

- طول آزاد فنر و ثابت فنر به ترتیب عبارتند از: $K_C, K_B, K_A, L_C, L_B, L_A$

- تغییر طول فنر که به صورت $\delta_C, \delta_B, \delta_A$ نوشته می‌شود.

- کابل‌های بالا و پایین که با d_B, d_T نمایش داده می‌شوند.

- طول کابل‌ها که با l_C, l_B, l_A نمایش داده می‌شوند.

- طول کل کابل‌های C, B, A که با $L_{ctotal}, L_{bttotal}, L_{atotal}$ نمایش داده می‌شوند.

برای سیمپلکس فرض می‌شود که مختصات گره‌های ۱ و ۲ و ۳ به صورت سه راس یک مثلث و مختصات نقاط ۴ و ۵ و ۶ به صورت سه راس مثلث دیگری شناخته می‌شوند.

برای آنالیز معکوس نقاط مطلوب برای صفحات بالائی نسبت به صفحه پایین به آسانی از روی مختصات نسبی نقاط ۴ و ۵ و ۶ نسبت به مختصات نقاط ۱ و ۲ و ۳ بدست می‌آید. بنابراین فرض می‌شود که مختصات نقاط ۱ تا ۶ شناخته شده‌اند و تمامی معلومات مسئله به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- ماتریس انتقال T_T^B برای صفحه بالا با رعایت صفحه پایین سیمپلکس

- طول کابل‌های بالا و پایین سیمپلکس d_B, d_T

- طول آزاد فنر l_{oc}, l_{oB}, l_{oA}

- ثابت فنر K_C, K_B, K_A

- انرژی پتانسیل ذخیره شده مطلوب در سه فنر U

آنچه که مورد نظر است:

- طول سه میله L_C, L_B, L_A

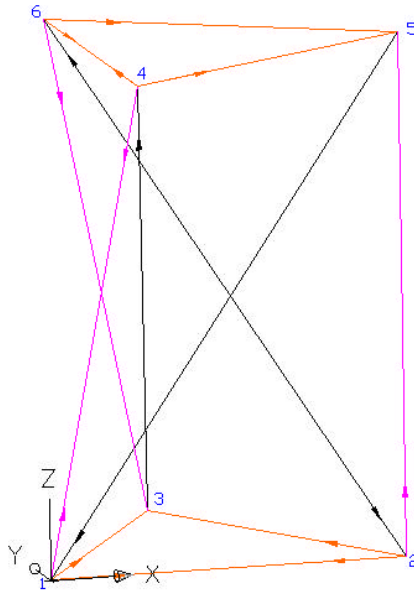
- طول سه کابل l_C, l_B, l_A

باید به این نکته توجه کنیم که مختصات و موقعیت صفحه بالا نسبت به صفحه پایین دلخواه انتخاب نمی‌شود.

۲-۳- سازه تنسگریتی سه وجهی

در این قسمت طول‌های L_C, L_B, L_A l_C, l_B, l_A آنچنان داده شده‌اند که مختصات صفحه بالا و

انرژی پتانسیل به گونه‌ای باشد که مدنظر است.



شکل (۳-۴) - ماتریس انتقال

ماتریس انتقال ${}^B T$ ماتریسی است که تمام نقاط صفحه بالای سیستم را به نقاط صفحه پائینی ربط می‌دهد بنابراین نقطه PI که در صفحه بالا قرار دارد و به صورت P_1^T می‌باشد با رابطه زیر تبدیل می‌شود به:

$$B_P = {}^B T^T P_1 \quad (۲-۲)$$

اگر ماتریس انتقال ${}^B T$ که شامل (x_0, y_0, z_0) و یک چرخش حول محور x هاست و آن را با θ نمایش می‌دهیم و یک چرخش β حول محور y و یک چرخش γ حول محور z ، آنگاه داریم:

$${}^B T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

به عنوان مثال در نظر بگیرید که مختصات سیستم T با سیستم B در یک راستاست بدین گونه که نقطه $(0.4, 1)^T$ ابتدا حول محور x ۳۰ درجه می‌چرخد، سپس محور مختصات ۶۰ درجه حول محور y می‌چرخد و سپس حول محور z ۵۰ درجه می‌چرخد. می‌خواهیم ماتریس انتقال ${}^B T$ را پیدا کنیم

از رابطه (۳-۳) داریم:

$${}^B T_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 30^\circ & -\sin 30^\circ & 0 \\ 0 & \sin 30^\circ & \cos 30^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 60^\circ & 0 & \sin 60^\circ & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin 60^\circ & 0 & \cos 60^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 50^\circ & -\sin 50^\circ & 0 & 0 \\ \sin 50^\circ & \cos 50^\circ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

اگر مختصات نقطه pI در سیستم بالا (۲۵ و ۴۲ و ۸۰) باشد انگاه مختصات نقطه pI نسبت به پایین بدین صورت بدست می آید:

$${}^B P_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}^B P_2 = \begin{bmatrix} d_B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \text{and} \quad {}^B P_3 = \begin{bmatrix} \frac{d_B}{2} \\ d_B \sin(60^\circ) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۴-۳)$$

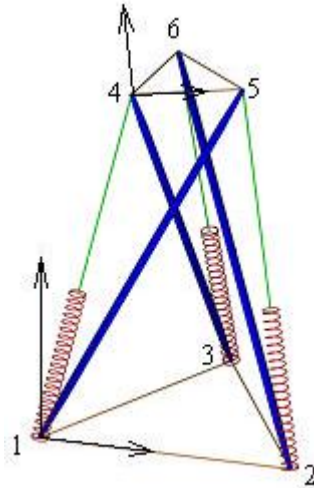
۳-۳-۲- سیستم مختصات:

فرض کنید سیستم مختصات B به صورت x_B, y_B, z_B برای صفحه زیری چنان در نظر گرفته شده است که بردار L در راستای محور x از نقطه ۱ تا ۲ و همچنین در راستای محور z از صفحه بالا تا پایین کشیده شده است مانند شکل (۳-۵). به طریق مشابه سیستم مختصات $T(x_T, y_T, z_T)$ چنان در نظر گرفته شده است که مبدأ آن در نقطه ۴، محور x آن از نقطه ۴ به ۵ و محور z آن به صورت قائم کشیده شده است. مقادیر d_B و d_T به عنوان طول کابل بالا و پایین داده شده اند و مختصات نقاط ۱ و ۲ و ۳ در سیستم B و نقاط ۴ و ۵ و ۶ در سیستم T به صورت زیر محاسبه می شوند.

$${}^B P_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}^B P_2 = \begin{bmatrix} d_B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \text{and} \quad {}^B P_3 = \begin{bmatrix} \frac{d_B}{2} \\ d_B \sin(60^\circ) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^T P_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}^T P_5 = \begin{bmatrix} d_T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \text{and} \quad {}^T P_6 = \begin{bmatrix} \frac{d_T}{2} \\ d_T \sin(60^\circ) \\ 0 \end{bmatrix}$$

-۵-۲



شکل ۳-۵

زمانی که ماتریس انتقال ${}^B_T T$ داده شده است نقاط ۴ و ۵ و ۶ در سیستم مختصات B به گونه زیر محاسبه می‌شوند.

$${}^B P_i = {}^B_T T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad {}^B P_o = {}^B_T T \begin{bmatrix} d_T \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \text{and} \quad {}^B P_v = {}^B_T T \begin{bmatrix} \frac{d_T}{2} \\ d_T \sin(\alpha) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

طول سه میله L_C, L_B, L_A به سادگی قابل محاسبه‌اند بدین ترتیب که فاصله بین نقاط (۵ و ۱) و (۶ و ۲) و (۴ و ۳) به ترتیب این مقادیر را بدست می‌دهند به طور مشابه طول کابل‌های l_C, l_B, l_A که با $l_{Ctotal}, l_{Btotal}, l_{Atotal}$ به صورت فاصله بین نقاط (۴ و ۱) و (۵ و ۲) و (۶ و ۳) بدست می‌آیند، به علاوه بردارهای یکه در راستای هر یک از خطوط کابل‌ها و میله‌ها تعریف می‌شوند و با S_{ij} نمایش داده می‌شوند. این در حالی است که اندیس i و j باز می‌گردد به مکانیزم خاص نقاط تعریف شده از نقطه i تا نقطه j به عبارت بهتر نقاط ابتدا و انتهای خطوط به طوری که $-S_{ij} = S_{ji}$

در این پروسه ۱۲ متغیر که مقادیر نیرو هستند وجود دارد، سه کابل قطری، سه میله، سه کابل بالا و سه کابل پایین سیستم نیروی فشاری در سه میله با F_C, F_B, F_A نامگذاری شده است.

نیروی کششی در سه کابل با f_A, f_B, f_C داده می‌شود. نیروی کششی در کابل پایین بین جفت نقاط (۲و۱) و (۳و۲) و (۳و۱) بدین صورت نوشته می‌شود. $T_{۱۲}, T_{۲۳}, T_{۱۳}$ و به طور مشابه نیروی کششی در کابل‌های بالا بین جفت نقاط (۵و۴) و (۶و۵) و (۶و۴) با $T_{۴۵}, T_{۵۶}, T_{۴۶}$ نمایش داده می‌شود.

۳-۴- تعادل نیروها

برای هر راستا سه معادله مستقل داریم و مجموع نیروها در راستاهای x, y, z برابر با صفر است برای این مسئله تعادل نیروها را در نقاط ۱و۲و۳و۴ می‌نویسیم.

$$\begin{aligned} f_A - F_A + T_{۱۲} + T_{۱۳} &= 0 \\ f_B - F_B + T_{۱۲} + T_{۲۳} &= 0 \\ f_A - F_C + T_{۴۵} + T_{۴۶} &= 0 \\ f_C - F_B + T_{۵۶} + T_{۴۶} &= 0 \end{aligned} \quad (۷-۳)$$

دلیل این که تعادل در ۴ نقطه را نوشتیم این است که ما ۱۲ معادله برای ۱۲ مجهول نیاز داریم. اکنون در معادله (۷-۲) بردارهای یکه را نیز وارد می‌کنیم.

$$\begin{aligned} f_A S_{۱۴} - F_A S_{۱۵} + T_{۱۲} S_{۱۲} + T_{۱۳} S_{۱۳} &= 0 \\ f_B S_{۲۵} - F_B S_{۲۶} - T_{۱۲} S_{۱۲} + T_{۲۳} S_{۲۳} &= 0 \\ -f_A S_{۱۴} + F_C S_{۳۴} + T_{۴۵} S_{۴۵} + T_{۴۶} S_{۴۶} &= 0 \\ -f_C S_{۳۶} + F_B S_{۳۶} - T_{۵۶} S_{۵۶} - T_{۴۶} S_{۴۶} &= 0 \end{aligned} \quad (۸-۳)$$

حال معادله (۸-۳) را در راستا تجزیه می‌کنیم.

(۹-۳)

$$\begin{aligned}
& f_A S_{1\varepsilon x} - F_A S_{1o x} + T_{1r} S_{1r x} + T_{1r} S_{1r x} = 0 \\
& f_A S_{1\varepsilon y} - F_A S_{1o y} + T_{1r} S_{1r y} + T_{1r} S_{1r y} = 0 \\
& f_A S_{1\varepsilon z} - F_A S_{1o z} + T_{1r} S_{1r z} + T_{1r} S_{1r z} = 0 \\
& f_B S_{r_o x} - F_B S_{r_o x} - T_{1r} S_{1r x} + T_{rr} S_{rr x} = 0 \\
& f_B S_{r_o y} - F_B S_{r_o y} - T_{1r} S_{1r y} + T_{rr} S_{rr y} = 0 \\
& f_B S_{r_o z} - F_B S_{r_o z} - T_{1r} S_{1r z} + T_{rr} S_{rr z} = 0 \\
& -f_A S_{1\varepsilon x} + F_C S_{r\varepsilon x} + T_{\varepsilon o} S_{\varepsilon o x} + T_{\varepsilon r} S_{\varepsilon r x} = 0 \\
& -f_A S_{1\varepsilon y} + F_C S_{r\varepsilon y} + T_{\varepsilon o} S_{\varepsilon o y} + T_{\varepsilon r} S_{\varepsilon r y} = 0 \\
& -f_A S_{1\varepsilon z} + F_C S_{r\varepsilon z} + T_{\varepsilon o} S_{\varepsilon o z} + T_{\varepsilon r} S_{\varepsilon r z} = 0 \\
& -f_C S_{r\varepsilon x} + F_B S_{r_o x} - T_{o\varepsilon} S_{o\varepsilon x} - T_{\varepsilon r} S_{\varepsilon r x} = 0 \\
& -f_C S_{r\varepsilon y} + F_B S_{r_o y} - T_{o\varepsilon} S_{o\varepsilon y} - T_{\varepsilon r} S_{\varepsilon r y} = 0 \\
& -f_C S_{r\varepsilon z} + F_B S_{r_o z} - T_{o\varepsilon} S_{o\varepsilon z} - T_{\varepsilon r} S_{\varepsilon r z} = 0
\end{aligned}$$

طبق معادله (۹-۳) اکنون ما ۱۲ معادله داریم.

$$JV=0 \quad (۱۰-۳)$$

که J برابر است با:

$$J = \begin{bmatrix}
S_{1\varepsilon x} & \cdot & \cdot & -S_{1o x} & \cdot & \cdot & S_{1r x} & \cdot & S_{1r x} & \cdot & \cdot & \cdot \\
S_{1\varepsilon y} & \cdot & \cdot & -S_{1o y} & \cdot & \cdot & S_{1r y} & \cdot & S_{1r y} & \cdot & \cdot & \cdot \\
S_{1\varepsilon z} & \cdot & \cdot & -S_{1o z} & \cdot & \cdot & S_{1r z} & \cdot & S_{1r z} & \cdot & \cdot & \cdot \\
\cdot & S_{r_o x} & \cdot & \cdot & -S_{r\varepsilon x} & \cdot & -S_{1r x} & S_{rr x} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
\cdot & S_{r_o y} & \cdot & \cdot & -S_{r\varepsilon y} & \cdot & -S_{1r y} & S_{rr y} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
\cdot & S_{r_o z} & \cdot & \cdot & -S_{r\varepsilon z} & \cdot & -S_{1r z} & S_{rr z} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
-S_{1\varepsilon x} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & S_{r\varepsilon x} & \cdot & \cdot & \cdot & S_{\varepsilon o x} & \cdot & S_{\varepsilon r x} \\
-S_{1\varepsilon y} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & S_{r\varepsilon y} & \cdot & \cdot & \cdot & S_{\varepsilon o y} & \cdot & S_{\varepsilon r y} \\
-S_{1\varepsilon z} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & S_{r\varepsilon z} & \cdot & \cdot & \cdot & S_{\varepsilon o z} & \cdot & S_{\varepsilon r z} \\
\cdot & \cdot & -S_{r\varepsilon x} & \cdot & S_{r\varepsilon x} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -S_{o\varepsilon x} & -S_{\varepsilon r x} \\
\cdot & \cdot & -S_{r\varepsilon y} & \cdot & S_{r\varepsilon y} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -S_{o\varepsilon y} & -S_{\varepsilon r y} \\
\cdot & \cdot & -S_{r\varepsilon z} & \cdot & S_{r\varepsilon z} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -S_{o\varepsilon z} & -S_{\varepsilon r z}
\end{bmatrix}$$

و V برابر است با:

$$V = [f_A, f_B, f_C, F_A, F_B, F_C, T_{1r}, T_{rr}, T_{1r}, T_{\varepsilon o}, T_{o\varepsilon}, T_{\varepsilon r}]^T$$

معادله (۱۰-۳) شامل ۱۲ معادله است که می‌توان ۱۲ نیروی مجهول را از آن بدست آورد، یک

روش حل معادله این است که تمام معادلات را بر f_A تقسیم کنیم.

$$\begin{aligned}
S_{1\varepsilon}x - F_{A'}S_{1\varepsilon}x + T_{1r'}S_{1r}x + T_{1r'}S_{1r}x &= \cdot \\
S_{1\varepsilon}y - F_{A'}S_{1\varepsilon}y + T_{1r'}S_{1r}y + T_{1r'}S_{1r}y &= \cdot \\
S_{1\varepsilon}z - F_{A'}S_{1\varepsilon}z + T_{1r'}S_{1r}z + T_{1r'}S_{1r}z &= \cdot \\
f_{B'}S_{\varepsilon\sigma}x - F_{B'}S_{\varepsilon\sigma}x - T_{1r'}S_{1r}x + T_{1r'}S_{1r}x &= \cdot \\
f_{B'}S_{\varepsilon\sigma}y - F_{B'}S_{\varepsilon\sigma}y - T_{1r'}S_{1r}y + T_{1r'}S_{1r}y &= \cdot \\
f_{B'}S_{\varepsilon\sigma}z - F_{B'}S_{\varepsilon\sigma}z - T_{1r'}S_{1r}z + T_{1r'}S_{1r}z &= \cdot \\
-s_{1\varepsilon}x + F_{C'}S_{\varepsilon\sigma}x + T_{\varepsilon\sigma'}S_{\varepsilon\sigma}x + T_{\varepsilon\sigma'}S_{\varepsilon\sigma}x &= \cdot \\
-S_{1\varepsilon}y + F_{C'}S_{\varepsilon\sigma}y + T_{\varepsilon\sigma'}S_{\varepsilon\sigma}y + T_{\varepsilon\sigma'}S_{\varepsilon\sigma}y &= \cdot \\
-S_{1\varepsilon}z + F_{C'}S_{\varepsilon\sigma}z + T_{\varepsilon\sigma'}S_{\varepsilon\sigma}z + T_{\varepsilon\sigma'}S_{\varepsilon\sigma}z &= \cdot \\
-f_{C'}S_{\varepsilon\sigma}x + F_{B'}S_{\varepsilon\sigma}x - T_{\varepsilon\sigma'}S_{\varepsilon\sigma}x - T_{\varepsilon\sigma'}S_{\varepsilon\sigma}x &= \cdot \\
-f_{C'}S_{\varepsilon\sigma}y + F_{B'}S_{\varepsilon\sigma}y - T_{\varepsilon\sigma'}S_{\varepsilon\sigma}y - T_{\varepsilon\sigma'}S_{\varepsilon\sigma}y &= \cdot \\
-f_{C'}S_{\varepsilon\sigma}z + F_{B'}S_{\varepsilon\sigma}z - T_{\varepsilon\sigma'}S_{\varepsilon\sigma}z - T_{\varepsilon\sigma'}S_{\varepsilon\sigma}z &= \cdot
\end{aligned} \tag{۱۱-۳}$$

به طوری که

$$\begin{aligned}
f_{B'} &= \frac{f_B}{f_A}, \\
f_{C'} &= \frac{f_C}{f_A}, \\
\cdot \\
\cdot \\
\cdot \\
T_{\varepsilon\sigma'} &= \frac{T_{\varepsilon\sigma}}{f_A}
\end{aligned} \tag{۱۲-۳}$$

معادله (۱۱-۳) دارای ۱۱ مجهول است. همه یازده معادله می تواند برای حل مجهول ها مورد استناد

قرار گیرد. در این آنالیز اولین معادله حذف شده است. با بازنویسی معادله (۱۱-۳) داریم.

$$J'V' = b \tag{۱۳-۳}$$

به طوری که

$$J' = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & -s_{10}y & \cdot & \cdot & s_{12}y & \cdot & s_{13}y & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & -s_{10}z & \cdot & \cdot & s_{12}z & \cdot & s_{13}z & \cdot & \cdot & \cdot \\ s_{r0}x & \cdot & \cdot & -s_{r1}x & \cdot & -s_{r1}x & s_{r3}x & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ s_{r0}y & \cdot & \cdot & -s_{r1}y & \cdot & -s_{r1}y & s_{r3}y & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ s_{r0}z & \cdot & \cdot & -s_{r1}z & \cdot & -s_{r1}z & s_{r3}z & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & s_{r4}x & \cdot & \cdot & \cdot & s_{\varepsilon5}x & \cdot & s_{\varepsilon6}x \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & s_{r4}y & \cdot & \cdot & \cdot & s_{\varepsilon5}y & \cdot & s_{\varepsilon6}y \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & s_{r4}z & \cdot & \cdot & \cdot & s_{\varepsilon5}z & \cdot & s_{\varepsilon6}z \\ \cdot & -s_{r1}x & \cdot & s_{r1}x & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -s_{\varepsilon6}x & -s_{\varepsilon6}x \\ \cdot & -s_{r1}y & \cdot & s_{r1}y & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -s_{\varepsilon6}y & -s_{\varepsilon6}y \\ \cdot & -s_{r1}z & \cdot & s_{r1}z & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & -s_{\varepsilon6}z & -s_{\varepsilon6}z \end{bmatrix}$$

$$b = [-s_{14}y, -s_{14}z, \cdot, \cdot, s_{14}x, s_{14}y, s_{14}z, \cdot, \cdot, \cdot]$$

$$V' = [f_{B'}, f_{C'}, F_{A'}, F_{B'}, F_{C'}, T_{12'}, T_{23'}, T_{13'}, T_{\varepsilon5'}, T_{\varepsilon6'}, T_{\varepsilon6'}]^T$$

و V' می‌تواند توسط معادله (۱۴-۳) محاسبه شود.

$$V' = (J')^{-1} b \quad (14-3)$$

ماتریس J' زمانی معکوس می‌شود که در مختصات خطی میله‌ها و کابل‌ها به یکدیگر وابسته نباشند به این نکته باید توجه کنیم که مقادیر بدست آمده مولفه‌های V' باید چک شوند تا مطمئن شویم $f'_{C'}, f'_{B'}$ مقادیر مثبت داشته باشد. مقدار منفی نشان دهنده این است که در سازه تخریب رخ می‌دهد.

۳-۵- انرژی پتانسیل

انرژی پتانسیل ذخیره شده در سازه:

$$U = \frac{1}{2} (k_A \delta_A^2 + k_B \delta_B^2 + k_C \delta_C^2) \quad (15-3)$$

که $\delta_C, \delta_B, \delta_A$ تغییر طول فنرها و k_C, k_B, k_A سختی فنرهاست.

نیروی کششی در کابل‌ها برابر است با:

$$f_i = k_i \delta_i \quad (16-3)$$

با ترکیب معادلات بالا داریم:

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{f_A}{k_A} + \frac{f_B}{k_B} + \frac{f_C}{k_C} \right) \quad (17-3)$$

از معادله (17-3) و (12-3) داریم:

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{f_A}{k_A} + \frac{f_A f'_B}{k_B} + \frac{f_A f'_C}{k_C} \right) \quad (18-3)$$

با حل معادله بالا برای f_A داریم:

$$f_A = \sqrt{\frac{\sqrt{2} U k_A k_B k_C}{k_B k_C + k_A k_C f'_B + k_A k_B f'_C}} \quad (19-3)$$

طبق معادله (12-3) برای کابل‌ها و میله‌ها داریم:

$$\begin{aligned} f_B &= f_A f'_B \\ f_C &= f_A f'_C \\ F_A &= f_A F'_A \\ F_B &= f_A F'_B \\ F_C &= f_A F'_C \end{aligned} \quad (20-3)$$

و از معادله (3-16) داریم:

$$\begin{aligned} \delta_A &= \frac{f_A}{k_A} \\ \delta_B &= \frac{f_B}{k_B} \\ \delta_C &= \frac{f_C}{k_C} \end{aligned} \quad (21-3)$$

و سرانجام طول سه متغیر l_C, l_B, l_A مشخص می‌شود توسط:

$$\begin{aligned} l_A &= l_{A_{total}} - l_{OA} - \delta_A \\ l_B &= l_{B_{total}} - l_{OB} - \delta_B \\ l_C &= l_{C_{total}} - l_{OC} - \delta_C \end{aligned} \quad (۲۲-۳)$$

به طوری که

$$\begin{aligned} l_{A_{total}} &= \left| {}^B p_1 - {}^B p_4 \right| \\ l_{B_{total}} &= \left| {}^B p_5 - {}^B p_7 \right| \\ l_{C_{total}} &= \left| {}^B p_7 - {}^B p_8 \right| \end{aligned}$$

مقدارهای مختلف انرژی پتانسیل طول‌هایی متفاوتی برای سه متغیر می‌دهد بنابراین به منظور افزایش سختی در سازه باید طول کابل‌ها کوتاه‌تر در نظر گرفته شود.

۳-۶- مثال عددی:

مثال ۱- در این مثال میزان ثابت و مقادیر چنان داده شده‌اند که صفحه بالا و پایین موازی هم باشند آنگاه که سه ثابت فنر و طول آزاد سه فنر برابر باشد طبیعی است که l_C, l_B, l_A برابراند بنابراین در آنها نیروهای یکسانی تولید می‌شود.

مقادیر زیر داده شده‌اند.

$${}^B T = \begin{bmatrix} ۰.۸۶۶ & -۰.۵ & ۰ & ۲۱.۹۰۶ \\ ۰.۵ & ۰.۸۶۶ & ۰ & -۱۴.۰۱۹ \\ ۰ & ۰ & ۱ & ۱۳۵.۱۷۱ \\ ۰ & ۰ & ۰ & ۱ \end{bmatrix},$$

$$d_T = ۸۰mm \quad (\text{طول کابل بالا})$$

$$d_B = ۹۰mm \quad (\text{طول کابل پایین})$$

$$k_A = k_B = k_C = k = ۱.۵N/mm \quad (\text{سختی فنر})$$

$$l_{OA} = l_{OB} = l_{OC} = ۲۵mm \quad (\text{طول آزاد فنر})$$

$$U = ۱۲۰۰Nmm \quad (\text{انرژی پتانسیل مطلوب})$$

طبق معادله (۴-۳) مختصات نقاط ۱ و ۲ و ۳ در صفحه پایین چنین می باشد

$${}^B P_1 = [0, 0, 0] mm, {}^B P_2 = [90, 0, 0] mm, \text{ and } {}^B P_3 = [45, 77.943, 3] mm.$$

طبق معادله (۵-۳) مختصات نقاط ۴ و ۵ و ۶ در صفحه بالا چنین می باشد

$${}^T P_4 = [0, 0, 0] mm, {}^T P_5 = [80, 0, 0] mm, \text{ and } {}^T P_6 = [40, 69.282, 0] mm.$$

طبق معادله (۶-۳) مختصات نقاط بالای نسبت به صفحه پایین چنین می باشد

$${}^B P_4 = [21.906, -14.019, 135.171] mm,$$

$${}^B P_5 = [91.188, 25.981, 135.171] mm,$$

$${}^B P_6 = [21.906, 65.981, 135.171] mm.$$

بر طبق این اطلاعات طول سه میله قطری قابل محاسبه می باشد.

$$L_A = L_B = L_C = 165.11 mm$$

بر طبق معادله (۱۴-۳) داریم.

$$V^T = [1.000, 1.000, 1.200, 1.200, 1.200, 0.336, 0.336, 0.336, 0.378, 0.378, 0.378]^T N$$

بر طبق معادله (۱۹-۳) داریم:

$$f_A = \sqrt{\frac{2Uk}{3}} = \sqrt{\frac{2 * 1200 * 1.5}{3}} = 34.641 N.$$

و از معادله (۲۰-۳) داریم

$$f_A = f_B = f_C = 34.641 N.$$

و از معادله (۲۱-۳) داریم

$$\delta_A = \delta_B = \delta_C = 23.094 mm$$

طول کلی کابل ها C, B, A محاسبه شده است

$$l_{Atotal} = l_{Btotal} = l_{Ctotal} = 137.65 mm$$

و از معادلات (۲۱-۳) و (۲۲-۳) طول کابل متغیر قابل محاسبه است

جدول ۱- داده‌ها مثال ۱

مختصات ۱	[۰.۰.۰]	K_A سختی فنر	۱.۵
مختصات ۲	[۹۰.۰.۰]	k_B سختی فنر	۱.۵
مختصات ۳	[۴۵.۷۷.۹۴۳.۰]	K_C سختی فنر	۱.۵
مختصات ۴	[۲۱.۹۰۶. -۱۴.۰۱۹. ۱۳۵.۱۷۱]	l_{OA} طول آزاد فنر	۲۵
مختصات ۵	[۹۱.۱۸۸. ۲۵.۹۸۱. ۱۳۵.۱۷۱]	l_{OB} طول آزاد فنر	۲۵
مختصات ۶	[۲۱.۹۰۶. ۶۵.۹۸۱. ۱۳۵.۱۷۱]	l_{OC} طول آزاد فنر	۲۵
		انرژی پتانسیل U	۱۲۰۰

جدول ۲- نتایج مثال ۱

A طول میله $A l_A (mm)$	۱۶۵.۱۱	A تغییر طول $A \ddot{a}_A (mm)$	۲۳.۰۹۴
B طول میله $B l_B (mm)$	۱۶۵.۱۱	B تغییر طول $B \ddot{a}_B (mm)$	۲۳.۰۹۴
C طول میله $C l_C (mm)$	۱۶۵.۱۱	C تغییر طول $C \ddot{a}_C (mm)$	۲۳.۰۹۴
A نیروی کابل $A f_A (N)$	۳۴.۶۴۱	A طول کابل $A l_A (mm)$	۸۹.۵۶۰
B نیروی کابل $A f_B (N)$	۳۴.۶۴۱	B طول کابل $B l_B (mm)$	۸۹.۵۶۰
C نیروی کابل $A f_C (N)$	۳۴.۶۴۱	C طول کابل $C l_C (mm)$	۸۹.۵۶۰

مثال ۲- در این مثال مختصات نقاط ۱ تا ۶ داده شده است میزان داده به گونه‌ای است که صفحات بالا و پایین موازی هم نیستند و سازه متقارن نیست و مختصات پیوستگی خطی ندارند و پیش خارجی به صفحه‌ی بالایی و پایین وارد می‌شود تا تعادل در موقعیت مطلوب برقرار گردد و لذا انرژی پتانسیل موجود است.

$${}^B P_1 = [0.0.0] cm \quad (1 \text{ مختصات})$$

$${}^B P_2 = [15.0.0] cm \quad (2 \text{ مختصات})$$

$${}^B P_3 = [7.5, 13, 0] cm \quad (3 \text{ مختصات})$$

$${}^B P_4 = [6.865, 2.473, 28.07] \quad (4 \text{ مختصات})$$

$${}^B P_5 = [18.291, 9.778, 21.677] cm \quad (5 \text{ مختصات})$$

$${}^B P_6 = [6.915, 16.425, 22.985] cm \quad (6 \text{ مختصات})$$

$$k_A = k_B = k_C = k = 20 N / cm \quad (\text{ثابت فنر})$$

$$l_{OA} = l_{OB} = l_{OC} = 8 cm \quad (\text{طول آزاد فنر})$$

$$U = 40 N cm \quad (\text{انرژی پتانسیل مطلوب})$$

طبق معادله (۳-۱۴) داریم:

$$V^1 = [0.953, 0.988, 1.339, 1.123, 1.364, 0.377, 0.262, 0.406, 0.415, 0.244, 0.389]^T N$$

طبق معادله (۳-۱۷) داریم:

$$f_A = \sqrt{\frac{2Uk}{1 + f_B'' + f_C''}} = \sqrt{\frac{2 * 40 * 20}{1 + 0.953^2 + 0.988^2}} = 23.552 N.$$

طبق معادله (۳-۲۰) داریم:

$$f_B = f_A f'_B = 22.440 N,$$

$$f_C = f_A f'_C = 23.270 N.$$

طبق معادله (۳-۲۱) داریم:

$$\delta_A = 1.178 \text{ cm},$$

$$\delta_B = 1.122 \text{ cm},$$

$$\delta_C = 1.163 \text{ cm}$$

طول کلی کابل‌ها قابل محاسبه‌اند:

$$l_{A\text{total}} = \|{}^B P_i - {}^B P_1\| = 29.006 \text{ cm},$$

$$l_{B\text{total}} = \|{}^B P_5 - {}^B P_2\| = 24.007 \text{ cm},$$

$$l_{A\text{total}} = \|{}^B P_7 - {}^B P_3\| = 23.383 \text{ cm},$$

و طبق معادله (۳-۲۳) طول کابل‌های متغیر قابل محاسبه‌اند:

$$l_A = 19.844 \text{ cm},$$

$$l_B = 14.876 \text{ cm},$$

$$l_C = 14.218 \text{ cm}.$$

جدول ۱- جدول داده‌ها

مختصات 1(cm)	[۰,۰,۰]	K_A ثابت فنر (N/cm)	۲۰
مختصات 2(cm)	[۱۵,۰,۰]	K_B ثابت فنر (N/cm)	۲۰
مختصات 3(cm)	[۹.۵,۱۳,۰]	K_C ثابت فنر (N/cm)	۲۰
مختصات 4(cm)	[۶.۸۶۵,۲.۴۷۳,۲۸.۰۷۳]	طول آزاد فنر l_{oA} (cm)	۸
مختصات 5(cm)	[۱۸.۲۹۱,۹.۷۷۸,۲۱.۶۷۷]	طول آزاد فنر l_{oB} (cm)	۸
مختصات 6(cm)	[۴.۹۱۵,۱۶.۴۲۵,۲۲.۹۸۵]	طول آزاد فنر l_{oC} (cm)	۸
		U انرژی پتانسیل (N/cm)	۴۰

جدول ۲- جدول نتایج

$A l_A(cm)$ طول میله A	۳۰	$A \ddot{a}_A(cm)$ تغییر طول A	۱.۱۷۸
$B l_B(cm)$ طول میله B	۳۰	$B \ddot{a}_B(cm)$ تغییر طول B	۱.۱۲۲
$C l_C(cm)$ طول میله C	۳۰	$C \ddot{a}_C(cm)$ تغییر طول C	۱.۱۶۳
$A f_A(N)$ نیروی کابل A	۲۳.۵۵۲	$A l_A(cm)$ طول کابل A	۱۹.۸۲۸
$A f_B(N)$ نیروی کابل B	۲۲.۴۴۰	$B l_B(cm)$ طول کابل B	۱۴.۸۸۵
$A f_C(N)$ نیروی کابل C	۲۳.۲۷۰	$C l_C(cm)$ طول کابل C	۱۴.۲۱۹

۳-۷- بررسی نتایج مثال

این آنالیز از طریق برآیند نیروها انجام شده است به منظر بازبینی نتایج روش‌های مختلف یک آنالیز بر آیند لنگر انجام می‌دهیم. مجموع لنگرهای حول هر نقطه باید برابر با صفر باشد.

بازبینی مثال ۱ در شکل (۳-۷) برآیند نیروها را در گره ۶ نشان داده است. جهت نیروها در جهت برداریکه المان‌هاست. از این رو $T_{\varepsilon_6}, T_{\sigma_6}, f_c$ دارای مقدار منفی هستند.

اگر سیستم در موقعیت تعادل باشد مجموع لنگرهای حول گره ۲ برابر با صفر است.

$$-L_B \times f_C - L_B \times T_{\varepsilon_2} - L_B \times T_{\sigma_2} = 0$$

$$L_B = P_r - P_r = \begin{bmatrix} 21.906 \\ 65.981 \\ 135.171 \end{bmatrix} mm - \begin{bmatrix} 90 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} mm = \begin{bmatrix} -68.094 \\ 65.981 \\ 135.171 \end{bmatrix} mm.$$

$$f_c = f_c S_{r1} = 34.741 \begin{bmatrix} 21.906 & 45 \\ 65.981 & 77.943 \\ 135.171 & 0 \end{bmatrix} N = \begin{bmatrix} -5.813 \\ -3.01 \\ 34.017 \end{bmatrix} N.$$

$$T_{\varepsilon 1} = T_{\varepsilon 1} S_{\varepsilon 1} = 13.094 \begin{bmatrix} 21.906 & 21.906 \\ 65.981 & -14.019 \\ 135.171 & 135.171 \end{bmatrix} N = \begin{bmatrix} 0 \\ 13.077 \\ 0 \end{bmatrix} N.$$

$$T_{\sigma 1} = T_{\sigma 1} S_{\sigma 1} = 13.094 \begin{bmatrix} 21.906 & 91.188 \\ 65.981 & 25.981 \\ 135.171 & 135.171 \end{bmatrix} N = \begin{bmatrix} -11.324 \\ 7.537 \\ 0 \end{bmatrix} N$$

$$- \begin{bmatrix} 275.14 \\ 153.08 \\ 58.84 \end{bmatrix} N.mm - \begin{bmatrix} -176.76 \\ 0 \\ -89.04 \end{bmatrix} N.mm - \begin{bmatrix} -88.38 \\ -153.08 \\ 30.20 \end{bmatrix} N.mm = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} N.mm.$$

از این رو لنگرهای حول گره ۲ برابر با صفر شد و این تایید می‌کند که میله B در حال تعادل است.

همین نتایج برای میله A و C نیز بدست آمد بنابراین سازه در حال تعادل است.

فصل چهارم

بهینه سازی سازه‌های تنسگریتی

۴-۱- بهینه سازی سازه‌های تنسگریتی

برای یک طراحی خوب، صحیح و مناسب تعاریف متعددی ارائه گردیده است ولی از مجموعه آنچه که در تعریف یک طراحی صحیح از گذشته تا به حال بیان شده است و براساس آنچه که در طراحی سازه به عنوان هدف نهایی مدنظر گرفته می‌شود می‌توان نتیجه گرفت اساساً یک طرح خوب واجد مشخصاتی به شرح زیر است.

الف- سادگی

ب- وحدت

ج- ضرورت.

هر یک از این مشخصات باید در تمامی مراحل طراحی مورد توجه قرار گیرد و حتی در مرحله تعیین جزئیات به طور دقیق رعایت گردد. با توجه به علم بهینه سازی متوجه شدیم که علم بهینه سازی در فرآیند یافتن سازه‌ای با حالت مطلوب کاربرد فراوان دارد. آنچه ما دنبال آن هستیم کاربرد این علم در نوع خاصی از سازه‌های فضاکار به نام سیستم تنسگریتی است. اما تنها تحقیقی که در مورد بهینه سازی سازه‌های تنسگریتی وجود دارد می‌توان به مقاله‌ای توسط *milenko masic* و همکارانش از دپارتمانی مهندس هوافضای دانشگاه *san diego* و *California* انجام شده است اشاره نمود. در بهینه سازی سازه‌های تنسگریتی مسائلی مطرح است که از دیگر سازه‌ها متفاوت است.

مقاله‌ای توسط *milenko masic* و همکارانش تحت عنوان هندسه توپولوژی بهینه تنسگریتی انجام شد بیان کننده یک پروسه برای تمام المان‌های سازه و محدودیت کمانش برای اعضای فشاری سازه می‌باشد. برای یک مدت طولانی بهینه سازی توپولوژی از سازه مورد مطالعه قرار گرفته است.

هدف از این آنالیز طراحی سازه تنسگریتی است که برای یک جرم داده شده از مصالح قابل دسترس که سختی بهینه‌ای دارد می‌باشد. به بیان دیگر نسبت جرم به سختی مینیمم گردد. با فرض اینکه تمام المان‌ها داده شده از مصالح مشابه ساخته شده باشند. در سازه تنسگریتی تعداد گره‌ها، کش‌ها و تمام تعداد المان‌ها به ترتیب n_{cl}, n_s, n_n می‌باشد

سازه تنسگریتی توسط اسنلسون معرفی شد. و فولر نیز اولین کسی بود که ارزش مهندسیش را تشخیص داد. سازه‌های تنسگریتی در رفتارهای توصیفی‌اش مورد آنالیز قرار گرفت. اکثراً این تکنیک به صورت تجربی و هندسی آنالیز می‌شد. سیستم‌های طراحی و آنالیز ایجاد سازه، تعریف شده نبود. همه‌ی طرح‌ها معمولاً بوسیله‌ی مؤلفان آنها بدست می‌آمد. سازه تنسگریتی توسط فعالیت چندین محقق دیگر همچون پلگرینو، کالادین، هانار و اسکلتون گسترش داده شد. برخی از مزیت‌های سازه تنسگریتی را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

۱. همه‌ی عناصر فقط شامل بارهای محوری می‌شوند، این نوع از بارها می‌توانند، محل بارهای بیشتری از بارهای ستون را تحمل کنند.

۲. انتخاب مصالحی که می‌توانند به بارهای محوری تخصیص داده شوند که جهت حمل بارهای فشاری در مقابل فشارهای متمادی و نیز حمل بارهای کششی جهت کشیدگی در مقابل بارهای کششی که در نهایت همین تلاش برای ممانعت‌های هندسی می‌باشد. یکی از خواص متفاوت سازه‌های تنسگریتی که از اغلب سازه‌ها این است که آنها خیلی مناسب برای کنترل شکل‌ها می‌باشد.

با کنترل اعضای کششی می‌توان کنترل مطلوب سازه را انجام داد. سازه تنسگریتی می‌تواند به آسانی کنار هم، در یک حجم کوچک چیده شود و به مکان مطلوب انتقال داده شود و گسترش یابد. جهت ایجاد سازه‌های مختلف فضایی کاربرد دارد. همانند گسترش دادن آنتن و نیز اینکه بخوبی قابل گسترش در گنبد می‌باشد.

ماسیک و اسکلتون یک لوپ باز کنترل شده قانونی را برای کنترل شکل‌ها از واحد پایدار سازه تنسگریتی را تعریف می‌کنند.

تاندون‌ها در سازه‌های تنسگریتی دارای نقش‌های مضاعف هستند که:

۱- صلبیت و سختی سازه ۲- حمل کردن بار سازه ۳- فراهم کردن فرصت برای تحریک پذیری مشاهدات

تحریک پذیری می‌تواند باعث بهبود خصوصیات مثل سختی یا نسبت جرم به سختی و دمپینگ شود و نمی‌تواند برای استراتژی کنترل شکل‌ها مورد استفاده قرار گیرد. مشاهدات، اطلاعاتی را در مورد هندسه سازه و تغییر شکل آنها را فراهم می‌کند. تحریک‌پذیری می‌تواند بوسیله‌ی تغییر طول تاندون‌ها یا میله‌ها انجام شود. این موارد به چندین روش انجام می‌شود:

۱- حفظ شکل آلیاژ که می‌تواند تاندون را قادر سازد در جهت تغییرات دما موجب کوتاه شدگی یا افزایش طول گردد.

۲- موتورهای چرخشی یا خطی که می‌تواند با کشیدن تاندون‌ها در درون حفره‌ی میله‌ها، آنها را کوتاه کنند.

۳- میله‌های قابل امتداد

برای یک مدت طولانی بهینه‌سازی توپولوژی از سازه مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از نتایج آن فرمولبندی از بهینه‌سازی بحرانی است که برای شبکه ساختمانی که برای خرپاها انجام می‌شود. همچنین مجموعه‌ای از شرایط اما نه کاملاً نزدیک برای شبکه ساختمان وجود دارد. علاوه بر این، چندین شیوه برای بهینه‌سازی عددی شناخته شده است. که شیوه اخیر مدل‌سازی مصالح آزاد، هستند. یا بهینه‌سازی خرپاها از یک شبکه پر جمعیت آغاز می‌گردد. اهداف عملی نیازمند این است که:

- اختصاص دادن قیدها (غیرخطی) برای شکست (خرابی) سازه. مشابه تسلیم و کمانش.

- مانع شدن از گششادگی و عریض شدگی هندسه و نیز شرایط مرزی و بارگذاری که از خطی سازی محلی، ممانعت نماید.

- پایدار سازی سیستم توسط الزام پیش‌تنیدگی در سازه.

هدف از این تحقیق کاهش این درز (شکاف) در پایه‌های دانش است که:

الف- بهینه‌سازی هندسه توپولوژی کلی، ترکیب نیازمندی‌های تعادل استاتیکی برای سازه‌های مکانیکی پیش‌تنیده برای موارد بارگذاری شده و غیر بارگذاری شده.

ب- نشان دادن تاثیرات ترکیب قید های خرابی (شکست) غیرخطی در بهینه‌سازی، مشابه تسلیم و کمانش.

ج- ایجاد شواهدی که منجر به هندسه و توپولوژی مناسب فیزیکی می‌گردد.

د- جستجو و تحقیق در راه‌اندازی الزامات نصب وسایل عمل‌کننده برای کنترل طول تاندون‌ها بوسیله ممانعت نمدن از دامنه‌ی مشخص طول تاندون‌ها.

جهت بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک به دلیل مزایای قابل توجه نسبت به دیگر روش‌های بهینه‌سازی استفاده می‌کنیم. این روش براساس اصول تکاملی موجودات زنده استوار است. رقابت میان موجودات زنده برای تصاحب منابع مشترک محدود باعث می‌شود که کارآمدترین افراد پیروز

شوند. نتیجه این امر برازندگی بیشتر هر نسل و نیز سازگاری بهتر نسل‌های بعدی با شرایط حاکم بر محیط اطراف خواهد بود.

۴-۲- تابع هدف

برای طراحی یک سیستم، طرح‌های زیادی وجود دارد که بعضی از این طرح‌ها با توجه به شرایط سیستم بهتر می‌باشند برای دستیابی به بهترین طرح باید طرح‌های مختلف را با هم مقایسه کنیم. این معیار باید به صورت یک کمیت عددی باشد. مقدار این توابع اسکالر برای هر طرح به صورت مقدار عددی مشخص می‌شود که تابعی از متغیرهای طرح می‌باشد به چنین تابعی که باید بهینه شود تابع هدف می‌گویند. این تابع گاه منفرد وجود دارد مثل حداقل وزن، حداقل قیمت و... و گاهی به صورت ۲ یا چند هدف مطرح می‌شود. در این تحقیق تابع هدف وزن سازه می‌باشد وزن یک سازه فضاکار برابر مجموع وزن اعضای آن می‌باشد که با رابطه زیر بیان می‌شود.

$$w = \sum_{i=1}^{n_e} \rho_i A_i L_i \quad (1-4)$$

در این رابطه w وزن سازه و پارامترهای L, A_i, ρ_i, n_e به ترتیب تعداد، چگالی، سطح مقطع و طول عضو i ام است.

۴-۳- متغیرهای مسئله

اولین گام مهم برای طراحی و فرموله نمودن مسئله تعریف متغیرهای طراحی می‌باشد. اگر متغیرهای طراحی درست انتخاب شوند، فرموله نمودن مسئله نادرست و بعضی مواقع غیر ممکن خواهد بود.

مهمترین مسئله که همواره باید در زمان انتخاب متغیرهای طراحی به خاطر این است که تا حد امکان متغیرها مستقل از هم بوده و به یکدیگر وابسته نباشند. در این تحقیق این متغیرها به وسیله مقادیر مشخصه خود را از جمله مساحت مقطع، ممان، مدول و وزن واحد طول بر روند بهینه‌سازی تأثیر می‌گذارند.

۴-۴- جمعیت اولیه

تعداد جمعیت اولیه نیز پارامتر مهمی است که مقدار مناسب آن معمولاً به صورت تجربی انتخاب می‌شود و در مدول فرآیند بهینه سازی ثابت است. با افزایش تعداد جمعیت اولیه نقاط بیشتری از فضای پاسخ در هر نسل جستجو می‌شود و احتمال رسیدن به جواب بهینه عملی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر افزایش تعداد جمعیت اولیه، تحلیل سازه و ارزیابی تابع برازندگی در هر نسل افزایش را افزایش می‌دهد. و در مرحله‌ای از فرآیند بهینه سازی نسبت به افزایش زمان قابل توجیح نیست.

۴-۵- قیود مسئله

قید مقاومت:

تمام المان‌های تنش در حالت‌های بارگذاری شده و غیر بارگذاری شده نبایستی اضافه‌تر از مقدار تنش جاری‌اش باشد، تمام اعضا در بارگذاری محوری هستند که این قیودها منجر به فرم ذیل می‌گردد:

$$z_i e_i (L_i - l_{0_i}) - l_{0_i} \sigma_i \leq 0 \quad (۲-۴)$$

توجه شود که این قید مستقیماً از قانون هوک سرچشمه می‌گیرد به طوری که با تنش بارگذاری محور المان الاستیک خطی در رابطه با تغییر شکل المان مرتبط است:

$$\sigma_i = z_i e_i \frac{(l_i - l_{0_i})}{l_{0_i}} \quad (۳-۴)$$

قید کمانش:

برای اطمینان از پایداری المان‌ها جهت حفظ کردن پایداری زیر نیروهای پیش تنیدگی، المان‌های فشاری (میله) بایستی مقید از کمانش باشند. نیروی المان‌های فشاری در حالت مدل الاستیک خطی مصالح نبایستی از فرمول اویلر بیشتر شود.

$$p \leq p_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2_0} \quad (4-4)$$

$$\lambda_i = \text{لاغری عضو فشاری} \quad \lambda_i \leq \frac{p_{cr}}{l_i}$$

$$\lambda_i l_i \leq \frac{\pi^2 EI}{l^2_0}$$

بنابراین قیود بهینه سازی مسئله فوق به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\sigma_i \leq \bar{\sigma}_i \quad i=1,2,3,\dots ne$$

$$\lambda_i \leq \bar{\lambda}_i \quad i=1,2,3,\dots ne$$

که رابطه فوق ne تعداد اعضای سازه، σ_i تنش در عضو i ام، $\bar{\sigma}_i$ تنش مجاز عضو i ام λ_i لاغری عضو i ام، $\bar{\lambda}_i$ لاغری مجاز عضو i ام می‌باشد.

4-6- تابع هدف اصلاح شده

الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی مسائل نامقید کاربرد دارد. لذا برای تبدیل تابع مقید به نامقید از روش تابع جریمه خارجی استفاده می‌کنیم. برای این منظور ابتدا ضریب نقض محدودیت کل سازه را از رابطه زیر بدست می‌آوریم.

$$C = \sum_{i=1}^{ne} \left[\left[\max\left(\frac{\sigma_i}{\bar{\sigma}_i} - 1, 0\right) \right]^2 + \left[\max\left(\frac{\lambda_i}{\bar{\lambda}_i} - 1, 0\right) \right]^2 \right] \quad (5-4)$$

پس با به کارگیری روش تابع جریمه خارجی، تابع هدف اصلاح شده (وزن) به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Goli = w + rc \quad (6-4)$$

که در رابطه بالا GOL_i تابع هدف اصلاح شده کروموزم (فرد) i ام و r ضریب تابع جریمه است. r ضربی است که در همگرایی الگوریتم موثر است.

۴-۸- تابع برازندگی

الگوریتم ژنتیک برای پیشینه سازی مسائل کاربرد دارد لذا برای تبدیل پیشینه سازی تابع به کمینه سازی تابع هدف از تابع برازندگی استفاده می کنیم روش های متعددی برای تابع برازندگی ارائه شده است ولی ما در این تحقیق از روش ریز استفاده می کنیم:

$$F_{it_i} = Gol \max - Goli \quad (۷-۴)$$

که در این رابطه F_{it_i} تابع برازندگی طرح i ام، $Gol \max$ بزرگترین مقدار تابع هدف اصلاح شده می باشند. بنابراین بعد از محاسبه تابع برازندگی شروط همگرایی بررسی می شود و در صورت برآورد شدن الگوریتم ژنتیک پایان می یابد و در غیر این صورت عملگرهای ژنتیکی برای نسل بعد وارد عمل می شوند.

۴-۸- مراحل گام به گام بهینه سازی الگوریتم ژنتیک:

- گام اول- مشخصات سازه، در برنامه بهینه ساز از یک فایل ورودی خوانده می شود.
- گام دوم- سازه، تحت نیروی های پیش تنیدگی آنالیز می گردد.
- گام سوم- به تعداد نقاط جستجو جهت اولیه به صورت تصادفی ایجاد می گردد.
- گام چهارم- اختصاص سطح مقطع به اعضای سازه زمینه.
- گام پنجم- محاسبه تابع وزن هدف.
- گام ششم- محاسبه ضریب نقض محدودیت و تابع هدف اصلاح شده در هر طرح.
- گام هفتم- محاسبه تابع برازندگی طرح ها.
- گام هشتم- رتبه بندی طرح ها و تعیین برازندگی رتبه بندی شده کروموزم ها.
- گام نهم- کنترل شرط همگرایی و توقف الگوریتم در صورت برقراری شرط.
- گام دهم- تکثیر طرح ها در استخر آمیزش.
- گام یازدهم- جفت کردن کروموزم ها.
- گام دوازدهم- انجام عملگر پیوند و ایجاد نسل جدید.

گام سیزدهم- انجام عملگر جهش.

گام چهاردهم- کنترل شرط همگرایی و در صورت برقرار نشدن بازگشت به گام پنجم.

گام پانزدهم- توقف الگوریتم و چاپ نتایج.

۴-۹- بهینه سازی کلاس ۲ برج های تنسگریتی:

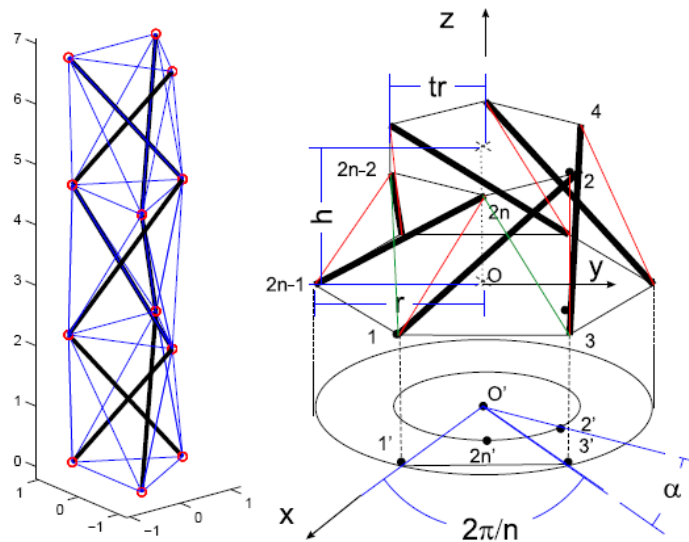
در این مبحث موضوع طراحی بهینه نسبت جرم به سختی برج های تنسگریتی کلاس ۲ می باشد. در این پروسه به نظر می رسد که توپولوژی و هندسه سازه منجر به اغنای طراحی بهینه قیدهای عمومی گردد. محدوده قابل امکان هندسه های تنسگریتی توسط تحمیل شرایط تعادل تنسگریتی روی سازه تعریف می شود. قیدهای باقی مانده شامل قید مقاومت برای تمام اعضای سازه و قید کمانش برای میله ها می باشد. طراحی متقارن توسط محدود کردن بازه متغیرهای هندسی و پارامترهای المان مورد تحمیل قرار می گیرد. پاسخ استاتیکی سازه برای اشاره مدل تغییر مکان های بزرگ غیر خطی محاسبه می شود و تأثیر پارامترهای مصالح روی شکل بهینه سازه مورد تحقیق قرار می گیرد.

سازه تنسگریتی یک سیستم خرپا مانند پایه دار پیش تنیده است. خرپاهای منظم پیش تنیده تنسگریتی ها شامل اعضای کششی است که قادر است بارها در یک جهت انتقال دهد. اتصالات بین اعضا گره های گوین هستند. بارهای خارجی تنها در گره ها اعمال می شود و به طوری که هیچ گشتاوری روی اعضا موجود نباشد. افزایش جالب در سازه های تنسگریتی نتیجه خاصیت مطلوبش است. تمام المان های سازه تنها دارای بارگذاری محوری هستند. این نوع از بازگذاری می تواند بسیار کارآمد در حمل کردن بار نسبت به بارهای خمشی باشند.

بهینه سازی توپولوژی سازه ها برای مدت طولانی مورد مطالعه قرار گرفته بود. چندین شیوه برای بهینه سازی محوری مشهورند. شیوه اخیر مدل سازی مصالح آزاد می باشد و بهینه سازی شرایط موجود، پارامتر سازی تعادل پیش تنیده سازه است. دلایل عملی مستلزم به هم پیوستن قیدهاست که باقی ننگ داشتن سازه توسط ممانعت از مدهای شکست متفاوت المان های سازه می باشد. در مقابل با بهینه سازی خرپاها، از یک شبکه پر جمعیت آغاز می شود. ماگزیمم مجموعه هندسه مجاز از سازه در فرمول بندی از پیش تعریف شده نیست.

۴-۹-۱- فرمول بندی مسئله

هدف از این آنالیز طراحی یک برج تنسگریتی کلاس ۲ است که دارای جرم مصالح قابل دسترس است. مقدار کلی V_{total} می تواند برای جرم ثابت زیر فرضیاتی که تمام المانها از مصالح مشابه ترکیب شده اند مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱. برج تنسگریتی کلاس ۲ و هندسه آن مدول یک طبقه

برج نشان داده شده در شکل مدولار سازه‌ای را بیان می کند. برای شرایط بارگذاری مشخص، مشابه مثال متقارن فشاری یا پیچشی با در نظر گرفتن تقارن محوری برج می باشد. سختی روی هم رفته سازه می تواند همانند اتصالات پشت سر هم از مدل های زیر بنایی الاستیک مدل سازی شود، اگر چه آنالیز خاصیت های مرتبط با تمام سازه روی مدل ها به طوری ایفای نقش می کند که هندسه در شکل آمده است. نتایج بدست آمده روی برجها تنسگریتی به اندازه دلخواه به درازای شرایط بارگذاری شده مورد کاربرد قرار می گیرد. فرمول بندی مسئله ای که بدست خواهد آمد می تواند با یک کلاس عریض تر از مسئله نسبت به آنالیز مدول برج کلاس ۳ تطبیق داده شود.

اگر مجموعه N از n_n گره از یک سازه تنسگریتی داده شده باشد و اگر گره $V_j \in N$ در موقعیت تعریف شده توسط بردار گره‌ی $P_j \in R^3$ مکان یابی شده باشد و اگر E_s و E_b به ترتیب مشخص شده در ناحیه مجموعه n_n کشها و n_b میله‌ها علامت گذاری شده باشد. اسکالر Z_i در تعریف

المان $e_j = \{v_j, v_k, z_i\} \in E$ که اتصالات گره‌های V_k و V_j از تنسگریتی نوع المان را تعیین می‌کند. به طوری که:

$$Z = \int_{-1, e_i \in E_b}^{1, e_i \in E_s} \quad (۸-۴)$$

۴-۹-۲- قیدهای مقاومت

تمام المان‌های سازه تنسگریتی بایستی مقید باشد در ساختار غیر بارگذاری شده p و ساختار بارگذاری شده $p+u$ باشد: این قیدها از قانون هوک تبعیت می‌کنند.

$$\begin{aligned} \epsilon_i(p)\gamma_i &= z_i \frac{l_i(p) - l_{0i}}{l_{0i}} \gamma \leq \sigma_i \\ \epsilon_i(p+u)\gamma_i &= z_i \frac{l_i(p+u) - l_{0i}}{l_{0i}} \gamma \leq \sigma_i \end{aligned} \quad (۹-۴)$$

به طوری که σ_i تنش جاری المان e_i است. هم ارز این قیدها این‌ها هستند:

$$\begin{aligned} z_i(l_i(p) - l_{0i})\gamma_i - \sigma_i l_{0i} &\leq 0 \\ z_i(l_i(p+u) - l_{0i})\gamma_i - \sigma_i l_{0i} &\leq 0 \end{aligned} \quad (۱۰-۴)$$

تا زمانی که المان تحت تنش هستند این قیود باید ارضا گردد.

۴-۹-۳- قیدهای کمانش

المان‌های میله‌ها تنها المان‌هایی هستند که ممکن است تحت فشار باشند. قید کمانش تنها برای میله‌ها کاربرد دارد. ماگزیمم مقدار f_{\max} ، نیروی فشاری f_i که میله‌ها می‌تواند تحمل کند توسط فرمول اویلر تعریف شده است:

$$f_i \leq f_{\max} = \frac{\pi^2 EI_{\min}}{l_{0i}^2} \quad (۱۱-۴)$$

به طوری که γ_i مدول الاستیسته، I_{\min} ممان اینرسی مقطع عرضی المان است با فرض اینکه تمام میله‌ها یک مقطع عرفی گرد با شعاع I_{\min} و r_i دارند که همانند زیر تعریف می‌شود:

$$I_{\min} = \frac{\pi r_i^4}{4} \quad (۱۲-۴)$$

$$r_i^2 = \frac{V_i}{\pi l_{oi}}$$

$$I_{\min} = \frac{V_i^2}{4\pi l_{oi}^2}$$

سپس با استفاده از I_{\min} می‌تواند همانند زیر محاسبه شود:

$$l_{oi}^2 (l_i(p) - l_{oi}) - \frac{\pi}{4} v_i \leq 0, e_i \in E_b \quad (13-4)$$

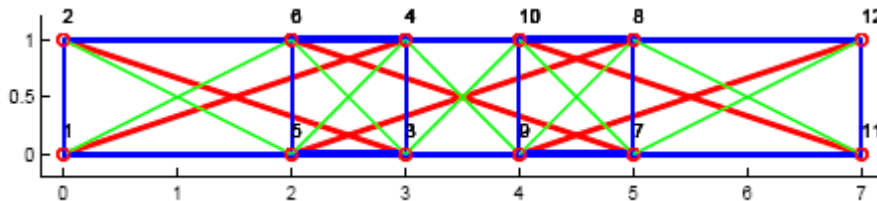
قید کمانش باید در هر حالت بارگذاری ساختار p و ساختار $p+u$ را ارضا کند.

$$l_{oi}^2 (l_i(p) - l_{oi}) - \frac{\pi}{4} v_i \leq 0, e_i \in E_b \quad (14-4)$$

$$l_{oi}^2 (l_i(p+u) - l_{oi}) - \frac{\pi}{4} v_i \leq 0, e_i \in E_b$$

۴-۱۰- تیر طره تنسگریتی

مسئله دو بعدی پایه‌ای جهت دست یابی به نسبت جرم به سختی بهینه در طراحی سازه تنسگریتی در شکل ۲ آمده است

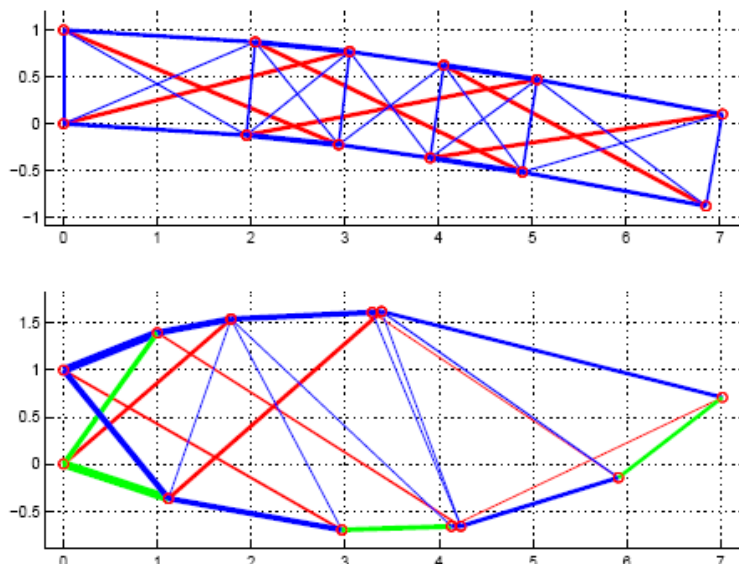


شکل ۲. طراحی تیر سازه تنسگریتی اولیه در حالت غیر بارگذاری شده؛ المان‌های غیر تنش.. خاکستری کم رنگ، میله‌های پیش‌تنیدگی: خاکستری پر رنگ، تاندون‌های پیش‌تنیده سیاه رنگ،

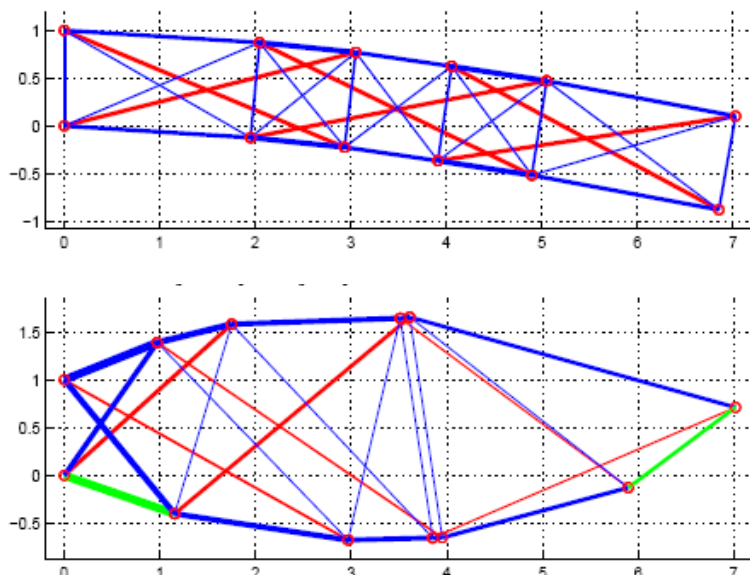
این تیر تنسگریتی:

- از سه تنسگریتی عرضی مسطح ساخته شده است
 - با در نظر گرفتن نسبت ۷
 - در گره‌های ۱ و ۲ محافظت شده است.
 - توسط واحد بار عمودی در بالای سمت راست گره ۱۲ بارگذاری شده است.
- بعد از به کارگیری پروسه بهینه‌سازی در طراحی زیر شکل ۳ جهت دست‌یابی مورد تحقیق قرار می‌گیرد ما از نوشته‌های ذیل تبعیت می‌کنیم

- دقت بهینه شامل کلاس ۲، المان ها (یعنی اینکه گره هایی که ۲ میله به هم متصل اند) به دلیل حرکت برخی از گره ها به طرف همدیگر بسته شده اند.
- استلزام اینکه اعضای کششی در فشار قرار نگیرند این است که ساختار بارگذاری شده در برخی مواقع قید بسته شده، منجر به سازه بهینه ای می گردد به طوری که کش های شل شده در ساختار بارگذاری شده باشد



شکل ۳. تیر بهینه طراحی شده تنسگریتی در حالت بارگذاری شده که نشان می دهد زیر بار تغییر شکل داده است؛ المان غیر تنش: خاکستری کم رنگ، میله پیش تنیده: خاکستری تیره، تاندون های پیش تنیده: سیاه.



شکل ۴. طراحی بهینه زمانی که مصالح کششی کوتاه تر از مصالح فشاری اند؛ المان غیر تنش: خاکستری کم رنگ، میله پیش تنیده: خاکستری تیره، تاندون های پیش تنیده: سیاه.

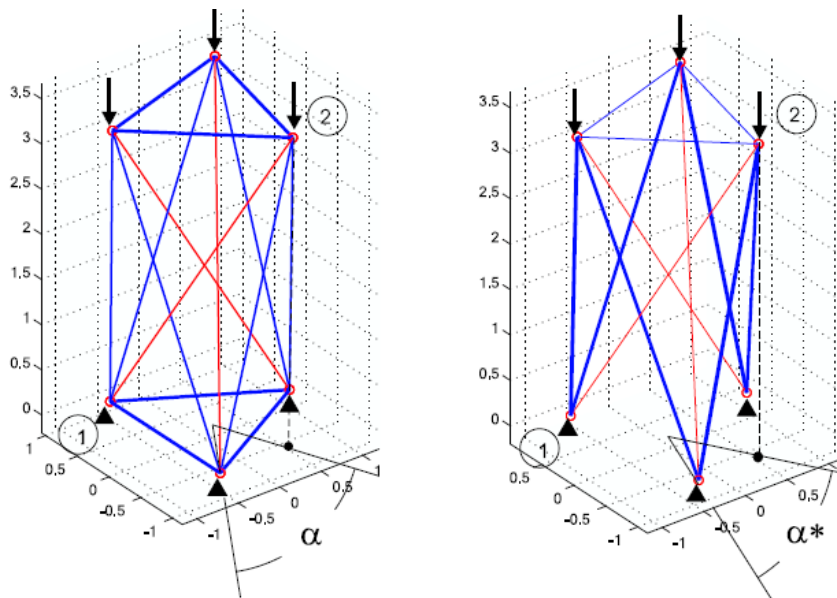
۴-۱۲- بهینه سازی مدول برج

۴-۱۲-۱- موضوع بار فشاری

تحقیق در توپولوژی بهینه مدول سه میله تحت بار فشاری عمودی واحد که در انتهای گره‌های فوقانی مدول اعمال شده است. فرمول‌بندی قیدها در مدول بهینه شده می‌بایست با تقارن سازه شرایط تکیه گاه موقعیت گره در جائیکه بار اعمال می‌شود تطبیق داده شود.

در طی مدول متقارن تنها موقعیت گره P_1 و P_2 مانند متغیرها در مسئله ذخیره می‌گردد.

موقعیت گره در P_2 همانند متغیر جهت ضمانت اینکه بار خارجی می‌تواند به سازه در مکان دلخواه P_2 ضمیمه گردد حذف گردد.



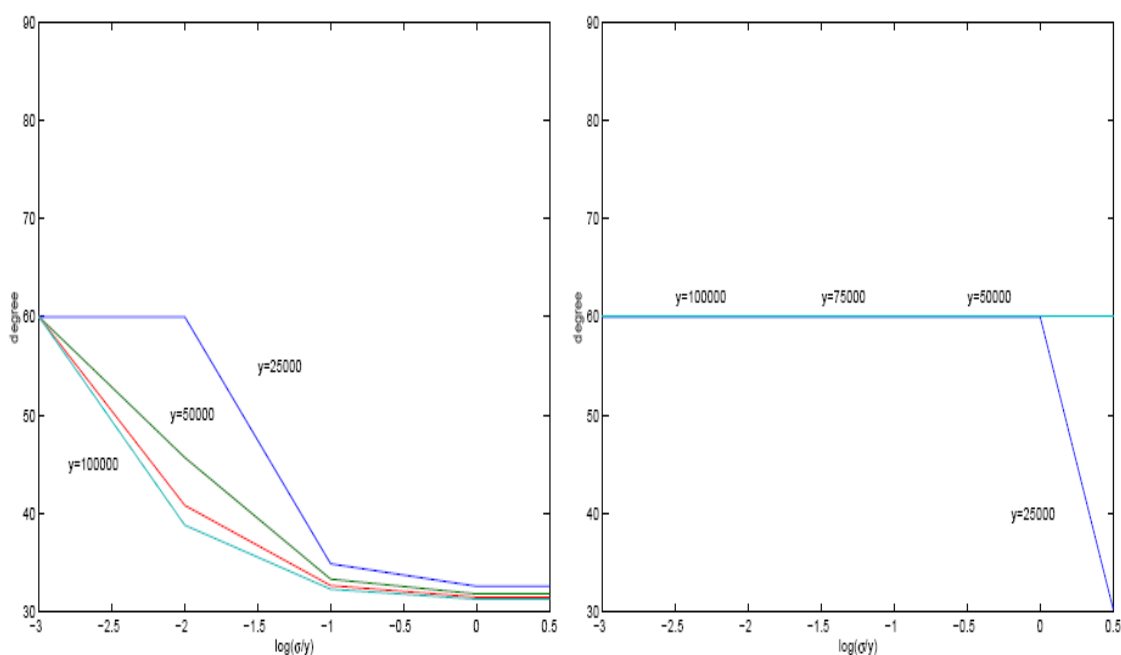
شکل ۲ - سازه‌ی اولیه (شکل سمت چپ) و سازه‌ی بهینه (شکل سمت راست)

قید تغییر مکان گره‌ی جهت انعکاس این واقعیت که گره‌های پایین مدول که به تکیه‌گاه‌ها متصل شده‌اند را تعریف می‌کند. فرمول هم‌ارز با قید تسلیم مقاومت ممکن است توسط تقسیم‌بندی قید با مدول‌های یانگ γ بدست آید. اگرچه تنش جاری مصالح σ ، در مسئله با الاستیسیته به مقاومت

مصالح جانشین سازی شده است. γ (کرنش تسلیم) که قید تنش را هم ارز می‌نماید. افزایش تأثیر

مقدار نسبت γ موجب می‌شود که قید تنش تسلیم محدود کننده کمتری در مقایسه با دیگر قیدها باشد. مقادیر کوچکتر این پارامترها در مقایسه با مصالح لاستیک مانند می‌تواند متحمل تغییر شکل

الاستیک بزرگ باشد. بطوریکه نسبت بزرگ $\frac{\sigma}{\gamma}$ وابسته به مصالح مهندسی، مشابه فلز سنتی تر می‌باشد. این مسئله برای چندین انتخاب متفاوت پارامترهای مصالح γ و $\frac{\sigma}{\gamma}$ با اثرات توپولوژی بهینه که بار ثابت به کار برده شده را نگهدارد مورد تحقیق قرار می‌گیرد. جهت ایجاد نتایج قابل مقایسه با روش سختی بهینه که قیدهای مقاومتی جهت محاسبه را ندارد، مسئله مجزایی برای حل کردن می‌باشد بطوریکه قیدهای مقاومت سازه‌های بارگذاری شده شل شده‌اند. این قیدها برای سازه بارگذاری نشده جهت محدود کردن اثر سختی برای پیش‌تنیدگی باقی می‌مانند. وقوع این اثر می‌تواند با رسیدگی به ماتریس سختی سازه پیش‌تنیده داده شده مستند و تصدیق گردد. مقدار بهینه مدول چرخیده زاویه α برای انتخاب متفاوت پارامتر مصالح و قیدهای مقاومت فعال متفاوت مورد نتیجه واقع شود و در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳- زاویه نهایی برای سیمپلکس مثلثی با و بدون در نظر گرفتن قیود

۴-۱۲-۲- بحث

نتایج شکل ۳ اشاره به این می‌نماید که $\alpha = 60^0$ زاویه چرخش بهینه برای اکثر مصالح است بطوریکه قید مقاومت سازه بارگذاری شده مورد کاربرد قرار می‌گیرد و خیلی غیر حساس به تغییرات پارامترهای مصالح است. این زاویه‌ها محدوده قابل امکانی از مدول سه میله را معین می‌کند.

در موردی که قید مقاومت از سازه ی بارگذاری شده شل شده است این زاویه به ۳۰ درجه همگرا می شود همانند افزایش نسبت مقاومت مصالح به سختی. ممکن است به نظر برسد یک تضادی باشد بطوری که این زاویه در مقداری که هست همگرا شود در جایی که ماتریس سختی خطی شده به شرطی که سازه پیش تنیده نشود و تعیین کننده یک مد مکانیزم بینهایت کوچک را نشان دهد نتایجی که به وضوح نمایش داده می شود این است که ساختاری که به طور نرمال، نامرغوب برای سازه مصالح فلز مانند است مافوق سازه های مصالح پلاستیک ماندی هستند که می توانند به سهم اضافی پیش تنیدگی متفاوت به سختی سازه نسبت داد در نتیجه ما سعی می کنیم این ادعا را توجیح نماییم.

با بازرسی کردن ماتریس سختی یک سازه پیش تنیده نشان داده می شود که افزایش پیش تنیدگی در یک سازه موجب افزایش سختی می گردد همچنین می توان تحقیق کرد که میزان حساسیت ماتریس سختی به این افزایش تغییرات همچون افزایش نسبت الاستیسیته به مقاومت مصالح می گردد. این منجر می گردد به نتایجی که سختی کافی سازه در طی پیش تنیدگی ممکن است مورد انتظار باشد تنها اگر سازه، مصالحی با نسبت الاستیسیته به مقاومت بالا وابسته باشد. اغلب مصالح بیولوژیکی متعلق به این مقوله ای است که ممکن است میزان حساسیت قابل توجهی از سختی سیتواسکلتن به تغییر پیش تنیدگی را همچون چندین تحقیق تصدیق شده را بیان کند برخی از ساختارهای هندسی مشهور منجر به خاصیت سختی فوق العاده ای می گردد نتایج اشاره می کند به این که وجود دارند ساختارهایی که برخورد بیشتر پیش تنیدگی که در برخی از مصالح بطور برجسته در سختی سازه مشارکت دارند. این نتایج به ساختارهایی اشاره می کند که مدول برج سه میله ای هستند .

فصل پنجم

تحلیل‌های ناپایداری استاتیکی بر روی شبکه‌های
دولایه تنسگریتی متشکل از سیمپلکس‌های
مثلثی

۵-۱- مقدمه

پدیده‌های ناپایداری در سازه‌های فضاکار را می‌توان در سه رده اصلی طبقه‌بندی کرد: فروجهش گرهی^۱ کمانش عضوی^۲ خرابی پیشرونده^۳.

فروجهش گرهی: فروجهش گرهی را می‌توان به عنوان انحراف قابل توجهی تعریف نمود که در هندسه سازه در یک ناحیه محلی در یک گره رخ می‌دهد.

کمانش عضوی: در عمل یک عضو فشاری غالباً کمانش از نوع شکننده را به نمایش می‌گذارد، که در این حالت نیرو به طور دینامیکی کاهش پیدا کرده و یک پرش دینامیکی یا فروجهش در رفتار پس کمانش عضو پدید می‌آید.

خرابی پیشرونده: در حالت کلی خرابی پیشرونده را می‌توان به عنوان انتشار گسترده یک خرابی که ناشی از صدمه به بخش نسبتاً کوچکی از سازه می‌باشد، تعریف نمود. همچنین واژه خرابی پیشرونده را می‌توان به منظور انتشار دینامیکی یک ناپایداری محلی نظیر فروجهش گرهی و کمانش عضوی در سازه‌های فضاکار به کار برد.

در سازه‌های فضاکار با اتصالات مفصلی که سازه‌های تنسگریتی نیز جزو آنها می‌باشند، رفتار انفرادی اعضا اثر تعیین کننده در رفتار سازه دارد. کمانش عضوی در رفتار سازه عموماً دارای اثر دینامیکی بوده و موجب عمل ضربه‌ای بر قسمت‌های مجاور می‌شود. در نتیجه در اعضای سازه‌ای باز توزیع نیرو رخ می‌دهد. این باز توزیع به نوبه خود دارای مشخصه دینامیکی بوده و ممکن است موجب شود که اعضای نزدیک به اعضای خراب شده، رفتار غیرخطی را به نمایش بگذارند و در اعضای کششی گسیختگی و در اعضای فشاری کمانش ایجاد گردد. بنابراین اگر اعضای فشاری و کششی نتوانند کاهش بار اعضای خراب شده را تحمل نمایند، به نوبه خود گسیخته شده 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 دینامیکی را سریعاً جذب نمایند، این بازتوزیع موجب خواهد شد که سایر اعضا خراب شوند و بازتوزیع‌های دیگر ایجاد شوند. در نتیجه خرابی می‌تواند در سازه پیشرفت کند و موجب خرابی کل سازه شود [۱۲]. در ضمن بدلیل اینکه اعضای کششی در

۱- Nodal Snap - Through

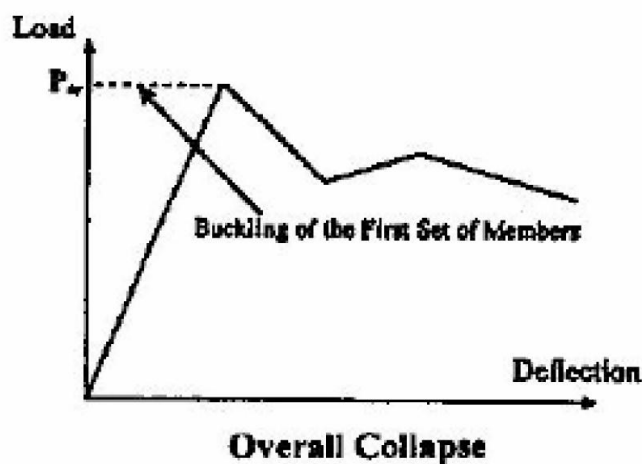
۲- Member Bucking

۳- Progressive Collapse

سازه‌های کش‌بستی، برعکس دیگر سازه‌های فضاکار با اتصالات مفصلی، دارای مشخصه سخت‌شوندگی کرنشی نمی‌باشند، در نتیجه در این سازه‌ها خرابی ناشی از گسیختگی اعضای کششی نیز مطرح می‌گردد.

مکانیزم‌های خرابی سازه‌های فضاکار با اتصالات مفصلی که انتظار می‌رود در سازه‌های تنسگریتی نیز این مکانیزم‌ها اتفاق بیفتند، با در نظر گرفتن پدیده کمانش عضوی، بصورت زیر می‌باشند:

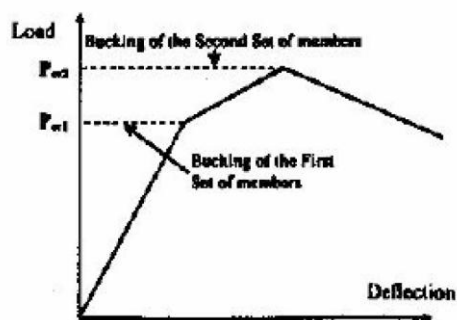
۱- خرابی کل سازه: در این حالت، همانگونه که در شکل (۵-۱) نشان داده شده است، مشخصه فروریزی بار اعضای فشاری ناگهانی بوده و به هنگام فرایند باز توزیع، سایر اعضا نمی‌توانند بار کاهش یافته در نخستین عضو (یا در نخستین مجموعه اعضا) خراب شده را تحمل نمایند و در خودشان نیز خرابی رخ می‌دهد. در نتیجه، کمانش یک عضو فشاری (یا یک مجموعه اعضا) که دارای تنش‌های بالایی می‌باشند، منجر به خرابی کلی سازه می‌شود، یا به عبارت دیگر یک مکانیزم خرابی کلی تشکیل می‌گردد. [۱۲].



شکل (۵-۱): مکانیزم خرابی کلی سازه فضاکار [۱۲]

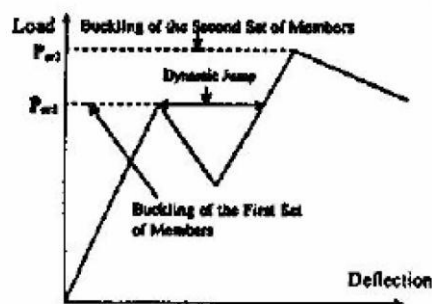
۲- خرابی موضعی سازه با یک فروجهش دینامیکی: در این حالت، همانگونه که در شکل (۲-۵) نشان داده شده است، مشخصه فروریزی بار اعضای فشاری به گونه‌ای ناگهانی است که در فرایند بازتوزیع، سایر اعضا نمی‌توانند بارهای بازتوزیع شده را با سرعت کافی جذب نمایند و ناپایداری در سازه رخ می‌دهد. تحت بارگذاری کنترل شده تغییر مکانی، تغییر شکل سازه افزایش یافته ولی بار وارده کاهش می‌یابد. ناپایداری ادامه پیدا می‌کند تا اینکه نخستین عضو کمانش یافته (یا نخستین مجموعه اعضای فشاری) به کمترین مقاومت پس کمانشی خود می‌رسد. در این حال، حالت تعادل سازه مجدداً پایدار می‌شود و سایر اعضا می‌توانند بار اضافی را تحمل نمایند تا اینکه به ظرفیت بحرانی خود برسند. به عبارت دیگر هنگام کمانش نخستین عضو (یا مجموعه 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 نماید. حرکت به سمت چنان حالت تعادلی با تغییرات بزرگی در تغییر شکل همراه بوده و سازه شامل یک فروجهش دینامیکی گرهی خواهد بود. در عمل بخش ناپایدار مسیر تعادل را نمی‌توان دنبال کرد چون حالت کنترل باربر رفتار سازه حاکم است. در نتیجه سازه یک پرش دینامیکی را تجربه خواهد کرد. هنگام رسیدن عضو به بار بحرانی خود که ناپایدار است، حفظ تعادل امکان‌پذیر نیست و در نتیجه 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 پدیده دینامیکی ترکیبی را تجربه خواهد کرد. به عبارت دیگر، فروجهش گرهی دینامیکی در گره‌های اعضا و نیز فروجهش عضوی در اعضای کمانش یافته رخ خواهد داد [۱۲].

۳- خرابی موضعی بدون فروجهش: در این حالت، همانگونه که در شکل (۳-۵) نشان داده شده است، مشخصه فرو ریزی اعضای فشاری، ناگهانی نیست و به هنگام فرایند باز توزیع، سایر اعضا می‌توانند بارهای باز توزیع شده 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 در نتیجه خرابی کلی سازه حاصل گردد [۱۲].



شکل (۳-۵): مکانیزم خرابی موضعی بدون

فروجهش دینامیکی [۱۲]



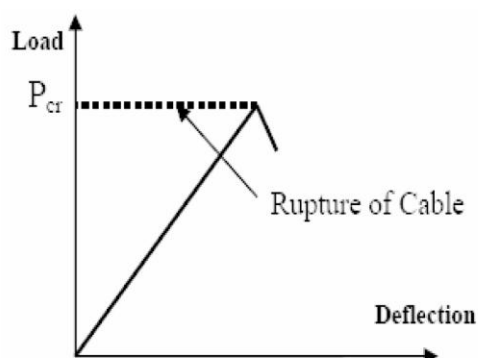
شکل (۲-۵): مکانیزم خرابی موضعی همراه با

فروجهش دینامیکی [۱۲]

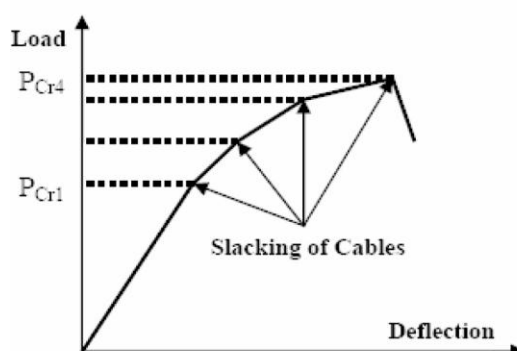
البته دو مکانیزم خرابی دیگر نیز در سازه‌های تنسگریتی تحت شناسایی شده که عبارتند از:

۱- خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی: در این حالت همانگونه که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است، تعدادی از اعضای کششی شل می‌گردند، اما چون سرعت شل‌شدگی بسیار کم می‌باشد، لذا در فرایند باز توزیع، سایر اعضا می‌توانند بارهای باز توزیع شده را تحمل و جذب نمایند و بنابراین حالت تعادل سازه پایدار می‌باشد و سازه می‌تواند بار اضافی دیگری را تحمل نماید تا اینکه نخستین عضو (یا مجموعه اعضا) فشاری کمانش کنند و در نتیجه خرابی کل سازه حاصل گردد. این شل‌شدگی ناشی از تغییر شکل زیاد کابل‌ها می‌باشد که باعث می‌شود فرم و بافتار سازه نیز تا حدی درهم بریزد و در نتیجه کابل از حالت کششی سفت خود خارج شود و شل گردد. لازم به ذکر است که در این مکانیزم خرابی، همانطور که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است، شل‌شدگی اعضای کششی با کاهش سختی توأم می‌باشد.

۲- خرابی کلی ناشی از گسیختگی کابل‌ها: در این حالت همانگونه که در شکل (۵-۵) نشان داده شده است، به دلیل کاهش سطح مقطع کابل‌ها، مکانیزم گسیختگی کششی حاکم است و خرابی کلی ناشی از گسیختگی کابل‌ها رخ می‌دهد. در این مکانیزم قبل از اینکه کمانش میله‌های فشاری اتفاق بیفتد، اعضای کششی پاره می‌شوند و سازه ناپایدار می‌شود.



شکل (۵-۵): خرابی کلی ناشی از گسیختگی کابل [۴۲]



شکل (۴-۵): خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی کابل‌ها [۴۲]

۵-۲- نقش استخراج مکانیزم‌های خرابی در طراحی سازه‌های تنسگریتی

در این بخش لازم است ابتدا بحثی در مورد مکانیزم‌های خرابی مطلوب و نامطلوب داشته باشیم. به‌طور کلی به دلیل آنی بودن و غیرمنتظره بودن خرابی کلی، چه در حالت مکانیزم گسیختگی کمانشی و چه در حالت مکانیزم گسیختگی کششی، باید از این مکانیزم خرابی اجتناب نمود. بنابراین مکانیزم خرابی کلی نامطلوب‌ترین نوع مکانیزم خرابی می‌باشد. در مورد مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی باید گفت که به دلیل اثر دینامیکی که در این خرابی مشاهده می‌شود، امکان دارد که این اثر دینامیکی منجر به خرابی کلی گردد که برای پی بردن به این موضوع باید تحلیل دینامیکی انجام داد. مطلوب‌ترین و مناسب‌ترین نوع مکانیزم خرابی، مکانیزم خرابی موضعی بدون فروجهش دینامیکی و همچنین مکانیزم خرابی ناشی از شل‌شدگی می‌باشد که هر دو این مکانیزم‌ها به دلیل تدریجی بودنشان مناسب می‌باشند.

استخراج مکانیزم‌های خرابی پایه و اساس طراحی ایمن و قابل اعتماد است. با طراحی ایمن، سازه بگونه‌ای طراحی می‌شود که بتواند بارهای معمولی که در طول عمر مفید سازه به آن وارد می‌شود بدون رسیدن به خرابی با حاشیه ایمنی کافی تحمل نماید. با در نظر گرفتن مکانیزم‌های خرابی در طراحی سازه، در واقع طراح پارامترهای موثر در طراحی را طوری انتخاب می‌کند که اگر سازه تحت شرایط خاصی دچار خرابی شد رفتار خرابی مطلوبی داشته باشد. یعنی خرابی سازه به صورت ناگهانی و غیرمنتظره نباشد بلکه به صورت تدریجی و موضعی باشد تا در صورت امکان بتوان با تمهیداتی از خرابی کلی سازه جلوگیری کرد.

همانطور که قبلاً ذکر شد، کمانش اعضای فشاری و گسیختگی اعضای کششی از عمده‌ترین عوامل ایجاد خرابی در سازه‌های تنسگریتی محسوب می‌شوند. با استخراج مکانیزم‌های خرابی می‌توان مشخص کرد که برای هر سازه‌ای بهتر است که کدام یک از عوامل خرابی فوق به عنوان عامل خرابی سازه تنسگریتی ملاک طراحی قرار گیرد تا سازه رفتار خرابی مناسبی را از خود نشان دهد و همچنین می‌توان تعیین کرد که چه پارامترهایی برای سوق دادن خرابی سازه به این نوع عامل خرابی باید مدنظر قرار گیرند. با استخراج مکانیزم‌های خرابی، طراح علاوه بر آشنایی با پارامترهای موثر در رفتار خرابی سازه، با نحوه تغییرات این پارامترها، برای داشتن رفتار خرابی مطلوب آشنا می‌شود. برخی از پارامترهای موثر در خرابی عبارتند از: نسبت لاغری اعضای فشاری،

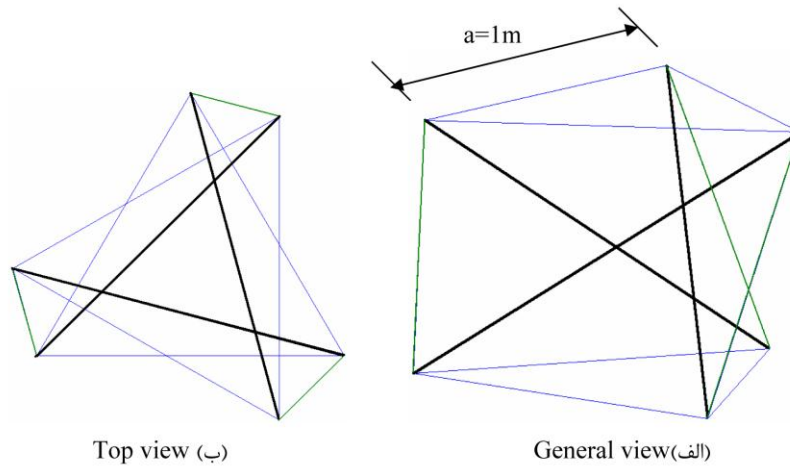
کرنش اولیه اعمال شده به اعضای کششی جهت پیش تنیدگی سازه تنسگریتی، سطح مقطع اعضای کششی، شرایط مرزی و بارگذاری سازه، رفتار تنش - کرنش مصالح. در تحقیق حاضر اثر برخی از پارامترهای فوق الذکر در رفتار خرابی بافتارهای مورد مطالعه بررسی شده است.

۳-۵- بافتارهای مورد مطالعه

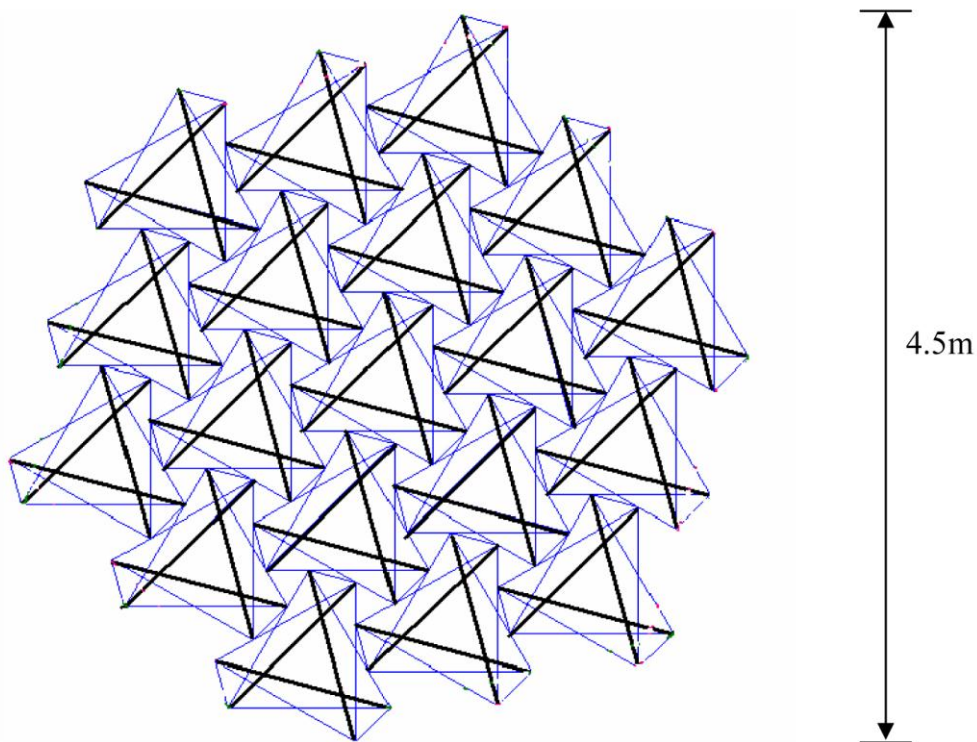
بافتارهای تنسگریتی مورد مطالعه در این تحقیق، شبکه‌های دولایه تنسگریتی پیوسته و ناپیوسته عضو فشاری با انعطاف‌پذیری هندسی می‌باشند.

بافتارهای مورد مطالعه از نظر هندسی به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

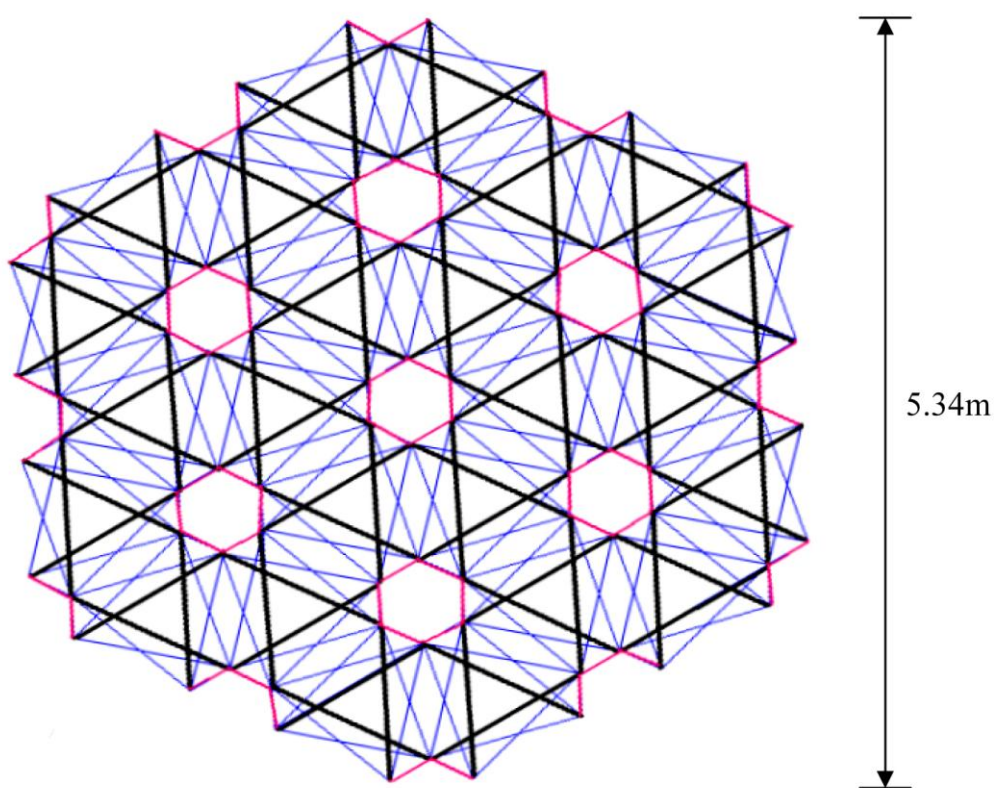
- ۱- بافتار ناپیوسته عضو فشاری که از اتصال راس به لبه سیمپلکس‌های مثلثی ایجاد می‌شوند.
 - ۲- بافتار پیوسته عضو فشاری که از اتصال راس به راس سیمپلکس‌های مثلثی ایجاد می‌شوند.
- برای اینکه مقایسه رفتار دو بافتار با هم امکان‌پذیر باشد، از سیمپلکس‌های مثلثی یکسان برای تشکیل آنها استفاده شده است. در شکل (۵-۶) مشخصات سیمپلکس مورد استفاده نشان داده شده است. بافتارهای مورد مطالعه، در شکل‌های (۵-۷) و (۵-۸) ارائه شده‌اند. بافتار ناپیوسته دارای دهانه ۴.۵m و ارتفاع ۱ متر و بافتار پیوسته دارای دهانه ۵.۳۴m و ارتفاع ۱ متر می‌باشد.



شکل (۵-۶): سیمپلکس مثلثی



شکل (۷-۵): بافتار ناپیوسته عضو فشاری ایجاد شده با روش اتصال راس به لبه سیمپلکس‌های مثلثی



شکل (۸-۵): بافتار پیوسته عضو فشاری ایجاد شده با روش اتصال راس به راس سیمپلکس‌های مثلثی

۵-۴- طراحی اولیه بافتار

برای مشخص کردن سطح مقطع اعضای موجود در بافتارهای مورد بررسی در این تحقیق ابتدا یک طراحی اولیه به شرح زیر بر روی این بافتارها انجام شده است.

بارگذاری سازه‌های فضاکار شامل تمام نیروهایی است که در طول مراحل ساخت، اجرا و بهره‌برداری 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 و ضرایب آن با توجه به این که آئین نامه ۵۱۹ ایران جوابگوی تمامی حالات متنوع معماری این نوع سازه‌ها (سازه‌های فضاکار) نیست، معمولاً از آئین نامه‌های معتبر برای بارگذاری این نوع سازه‌ها استفاده می‌شود.

برای بارگذاری سازه‌های فضاکار هم مانند سایر سازه‌های معمول، ترکیبات مختلف بارگذاری را می‌توان اعمال کرد. ترکیبی که در این تحقیق استفاده شده عبارتست از $D+S$ که D معرف بار مرده و S معرف بار برف می‌باشد.

بار مرده سازه فضاکار متشکل از وزن سازه، وزن پوشش، و وزن تأسیسات می‌باشد. وزن سازه با توجه به طول دهانه، نوع و مشخصات بافتار و ارتفاع شبکه، طول اعضا و...، شکل سازه (گنبدی، مسطح و...) و مقادیر بارهای وارده متغیر است. جرم واحد حجم مصالح فولاد برای کابل‌ها و اعضای فشاری 7850 kg/m^3 می‌باشد. بار مرده پوشش، متناسب با نوع آن تعیین می‌شود. از انواع پوشش‌های رایج می‌توان ورق گالوانیزه فولادی یا آلومینیومی با یک لایه پشم شیشه، پوشش‌های شفاف از جمله ورق‌های شیشه و پوشش‌های سنگین مانند بلوک‌های بتنی پیش‌ساخته را نام برد. وزن این پوشش‌ها متغیر می‌باشد که برای پوشش‌های سبک حدود ۱۵ الی ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع و برای پوشش‌های سنگین حدود ۱۲۰ الی ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع برآورد می‌گردد. مقداری که برای بافتار مورد مطالعه در نظر گرفته شده است برابر با ۲۰ کیلوگرم بر متر مربع انتخاب شده است. وزن تأسیسات نصب شده در سازه‌های فضاکار معمولاً بستگی به مشخصات آن دارد که در حدود ۱۰ تا ۵۰ کیلوگرم بر متر مربع برآورد می‌شود در این تحقیق وزن تأسیسات ۱۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده است.

مقدار بار برف بر اساس محل پروژه طبق آئین نامه ۵۱۹ ایران تعیین می‌گردد که ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع برای مناطق سردسیر و ۲۵ کیلوگرم بر متر مربع برای مناطق گرم تعیین شده است. مقدار بار برف در طراحی بافتار موجود ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق برای هر کدام از بافتارهای پیوسته و ناپیوسته به صورت جداگانه بار وارده محاسبه گردید. سپس این بار به صورت مساوی به گره‌های لایه بالایی هر کدام از بافتارها وارد شد. با انجام طراحی، مشخص شد که اگر از میله‌های فولادی با سطح مقطع 5cm^2 استفاده شود برای هر دو بافتار جواب می‌دهد.

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

در اغلب روش‌های تحلیل ایستایی خرابی مورد استفاده در ارزیابی رفتار سازه‌های فضاکار که دارای گره‌های مفصلی می‌باشند با در نظر گرفتن کمانش عضو، ابتدا رفتار بار محوری - تغییر مکان محوری اعضای فشاری تعیین می‌شود. پاسخ بار محوری - تغییر مکان محوری عضو فشاری به صورت رابطه تنش محوری - کرنش محوری تبدیل گشته متعاقبا برای مدل کردن رفتار مصالح عضو فشاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین نمایش رفتار عضو نقش اساسی در تحلیل خرابی سازه‌های فضاکار دارد. برای مدل کردن رفتار مصالح عضو فشاری از عنصر تیری تیموشنکو. برای نمایش رفتار هر عنصر استفاده می‌شود و یک تحلیل استاتیکی غیرخطی (الاستوپلاستیک) برای یافتن پاسخ بار محوری - تغییر مکان محوری اعضای فشاری انجام می‌شود. یعنی غیرخطی‌های هندسی و مصالح در تحلیل در نظر گرفته می‌شوند. شایان ذکر است که طبیعت ناکاملی‌ها در اعضای فشاری معمولا شامل انحنای اولیه عضو، خروج از مرکز انتهایی اجتناب‌ناپذیر در اعمال بار محوری و تنش‌های پسماند در مقطع عضو می‌باشد. معمولا صرفا انحنای اولیه عضو به عنوان ناکاملی در نظر گرفته می‌شود و e ماکزیمم ناکاملی در وسط عضو می‌باشد. به منظور رسیدن به مود کمانش غالب در اعضای فشاری، طبق مبحث یازدهم از مقررات ملی ساختمان تحت عنوان اجرای صنعتی ساختمان‌های فلزی، رواداری‌هایی در مورد ناکاملی‌های اولیه ارائه شده که به شرح زیر می‌باشد.

- بخش ۱۱- ۶- ۱- انحراف‌های مجاز اعضای نورد شده پس از ساخت

- بخش ۱۱- ۶- ۱- ۳- انحراف‌های مجاز در مقاطع

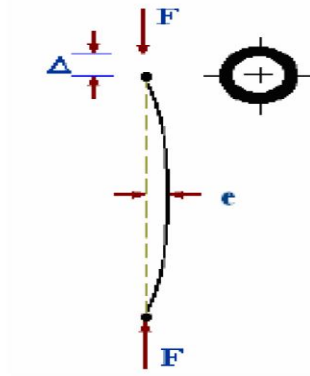
بر طبق موارد فوق برای یک عضو فشاری با طول L ، ناکاملی اولیه‌ای به اندازه $e = 0.001L$ در نظر گرفته می‌شود. که محل اعمال این ناکاملی در شکل (۹-۵) نشان داده شده است که در واقع مطابق با مود اول کمانش یک ستون تحت اثر بار محوری می‌باشد.

پاسخ‌های تنش محوری - کرنش محوری اعضای فشاری به ازای لاغری‌های مختلف در شکل (۱۰-۵) نشان داده شده است.

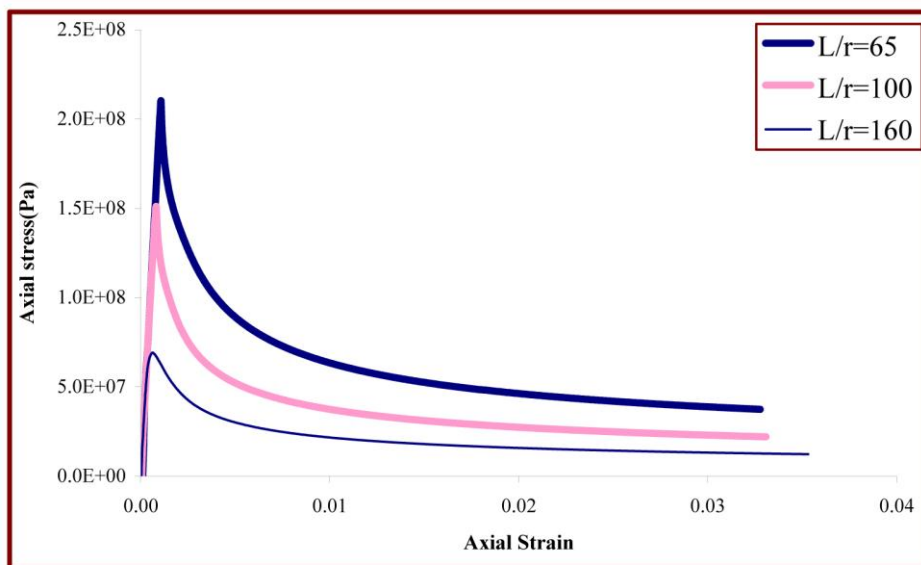
در بافتارهای مورد مطالعه، با توجه به طراحی اولیه انجام شده، برای اعضای فشاری از نیمرخ‌های لوله‌ای به طول $L = 1/65m$ و سطح مقطع $A = 5cm^2$ استفاده می‌شود. تنش تسلیم مصالح فشاری $240MPa$ و مقدار مدول الاستیسیته $2E = 205GPa$ فرض می‌شود. به منظور بررسی اثر نسبت لاغری بر رفتار تنش محوری - کرنش محوری اعضای فشاری، ممان اینرسی‌های مختلفی برای اعضا در نظر گرفته شده است. نسبت‌های لاغری مربوط به این اعضا بترتیب $165, 100, 65$ می‌باشد. مشخصات سطح مقطع مورد استفاده برای هر کدام از نسبت‌های لاغری در جدول (۱-۵) آمده است.

جدول (۱-۵): مشخصات سطح مقطع مورد استفاده برای هر کدام از نسبت‌های لاغری

مشخصات مقطع ضرایب لاغری	شعاع خارجی (cm)	شعاع داخلی (cm)	ممان اینرسی مقطع (cm^4)	سطح مقطع (cm^2)
$L/r=65$	3.001	2.72295	20.526	5
$L/r=100$	2.064	1.6336	8.66	5
$L/r=160$	1.466	0.7467	3.383	5



شکل (۹-۵): نمایی شماتیک از یک عضو فشاری با ناکاملی وارده و بار محوری اعمال شده

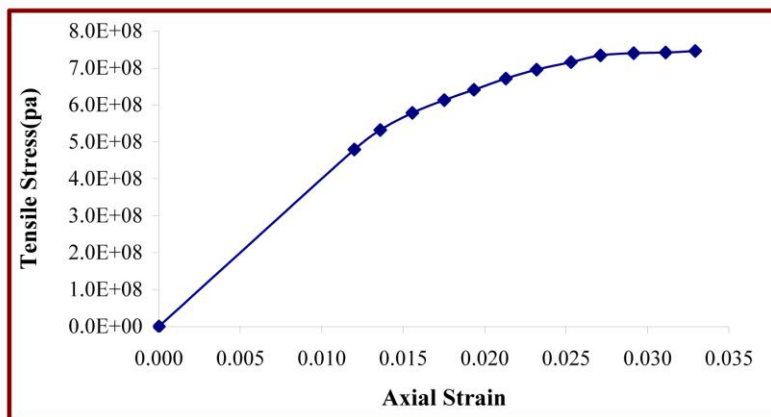


شکل (۱۰-۵): پاسخ تنش محوری - کرنش محوری عضو فشاری به ازای ضرایب لاغری مختلف

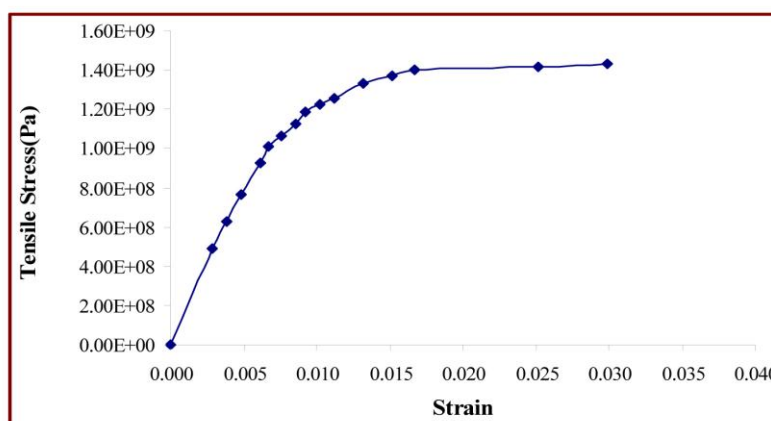
۵-۶- رفتار تنش محوری - کرنش محوری اعضای کششی

رفتار تنش محوری - کرنش محوری اعضای کششی، با توجه به نتایج آزمایش موجود که بر روی کابل انجام گرفته، به دو صورت زیر در نظر گرفته می‌شود. در هر دو مورد تا نقطه تسلیم، رابطه تنش - کرنش به صورت خطی و پس از آن به صورت غیرخطی غیرارتجاعی می‌باشد. در آزمایش انجام شده توسط Kebich عناصر کششی دارای مدول الاستیسیته $E = 4 \text{ MPa}$ ، کرنش تسلیم $\epsilon_e = 1/2\%$ ، کرنش - گسیختگی $\epsilon_r = 3/3\%$ ، تنش تسلیم $\sigma = 480 \text{ MPa}$ و مقاومت گسیختگی $\sigma = 750 \text{ MPa}$ می‌باشند (شکل (۱۱-۵)). نتیجه آزمایش دیگر هم در شکل (۱۲-۵) آمده است. همچنانکه در این شکل ملاحظه می‌شود، عناصر کششی دارای مدول الاستیسیته $E = 16/5$

(Mpa)، کرنش تسلیم $\epsilon = 0.3\%$ کرنش - گسیختگی $\epsilon = 3\%$ ، تنش تسلیم $\sigma = 480 \text{ MPa}$ و مقاومت گسیختگی $\sigma = 1414 \text{ MPa}$ میباشند.



شکل (۱۱-۵): رفتار تنش - کرنش مصالح کششی (کابل‌ها) [۱۰]



شکل (۱۲-۵): رفتار تنش - کرنش مصالح کششی (کابل‌ها) [۴۹]

از شکل‌های (۱۱-۵) و (۱۲-۵) دیده می‌شود که کابل شکل (۱۲-۵) دارای مدول الاستیسیته و مقاومت گسیختگی بیشتری نسبت به کابل شکل (۱۱-۵) می‌باشد. یعنی کابل شکل (۱۲-۵) دارای سختی بیشتری نسبت به شکل (۱۱-۵) می‌باشد بطوریکه در مقدار یکسان تنش تسلیم کابل شکل (۱۲-۵) در کرنشی بسیار کمتر از کرنش کابل شکل (۱۱-۵) به حد تسلیم می‌رسد.

۷-۵- مکانیزم‌های مورد مطالعه و پارامترهای مورد بررسی

به دلیل اینکه سازه‌های تنسگریتی سازه‌هایی با اتصالات مفصلی می‌باشند در نتیجه رفتار اعضا، منفرد بر رفتار کلی سازه تاثیر دارد. بنابراین بر روی هر بافتار دو نوع تحلیل ناپایداری انجام می‌شود. اولی تحلیل استاتیکی ناپایداری با مکانیزم‌های گسیختگی فشاری و دیگری تحلیل استاتیکی

ناپایداری با مکانیزم گسیختگی کششی می‌باشد. در ضمن اثرات لاغری اعضای فشاری با در نظر گرفتن سه نسبت لاغری برای این اعضا بر روی رفتار هر دو بافتار مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامتر مورد بررسی دیگر، پیش تنیدگی اولیه بافتارها می‌باشد که بررسی این اثر با بکار بردن کرنش‌های اولیه مختلف برای اعضای کششی میسر می‌باشد.

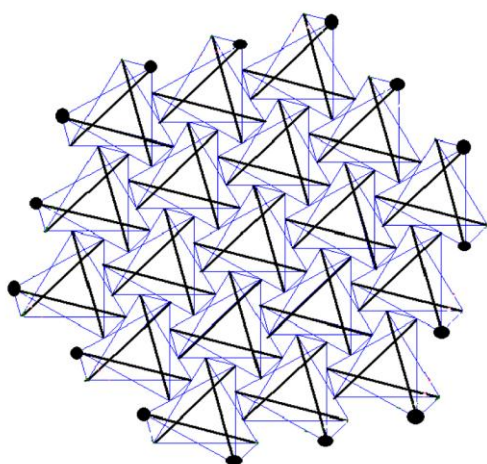
۵-۸- تحلیل بافتار با مکانیزم کمناش اعضای فشاری

تحلیل‌های انجام شده در این قسمت مربوط به کمناش اعضای فشاری می‌باشد. با تغییر در مقادیر سطح مقطع اعضای کششی می‌توان نوع خرابی را به سمت کمناش اعضای فشاری و یا گسیختگی اعضای کششی پیش برد. یعنی با افزایش سطح مقطع اعضای کششی مکانیزم خرابی بافتار از نوع کمناش اعضای فشاری خواهد بود. به منظور مطالعه مکانیزم کمناش اعضای فشاری در سازه‌های تنسگریتی، بافتارهای انتخاب شده به ازای پارامترهای مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است. سازه‌های تنسگریتی با انعطاف پذیری هندسی شامل مکانیزم‌های بی‌نهایت کوچک می‌باشد. برای حذف این مکانیزم‌ها، بایستی پیش تنیدگی اعمال شود. لذا در مطالعه حاضر، اثر پارامترهای مختلفی همچون مقادیر کرنش اولیه اعمال شده به اعضای کششی (پیش تنیدگی)، نسبت‌های مختلف لاغری لحاظ شده برای اعضای فشاری، اثرات تکیه گاهی و اثرات بارگذاری‌های مختلف روی رفتار ناپایداری و نوع مکانیزم خرابی بررسی شده است.

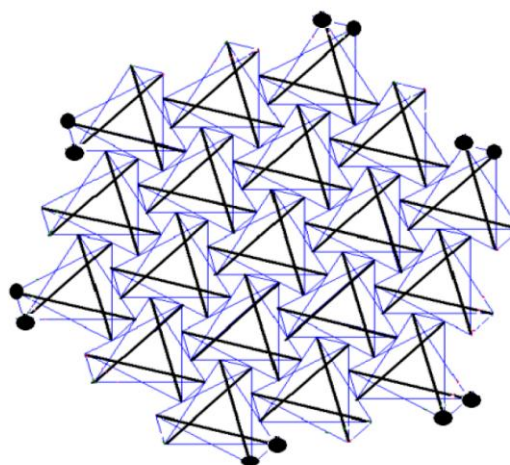
۵-۸-۱- تحلیل‌های ناپایداری استاتیکی بر روی بافتار ناپیوسته عضو فشاری ایجاد شده به روش اتصال راس به لبه سیمپلکس‌های مثلثی

این بافتار همانطور که در شکل (۵-۷) نشان داده شده است از ترکیب سیمپلکس‌های منشوری مثلثی به روش اتصال راس به لبه ایجاد شده است. سازه مورد مطالعه دارای ۵۷ عضو فشاری و ۱۷۱ عضو کششی می‌باشد. اعضای فشاری دارای مدول الاستیسیته $2E$ MPa، سطح مقطع 5cm^2 و مقاومت تسلیم 240MPa می‌باشند. پاسخ تنش محوری - کرنش محوری نشان داده شده در شکل (۵-۱۰) به عنوان رفتار مشخصه مصالح فشاری در نظر گرفته شده است. اعضای کششی دارای سطح مقطع متناظر با نسبت لاغری اعضای فشاری می‌باشند که در قسمت‌های مختلف ذکر خواهد شد. در همه بخش‌های زیر از رفتار تنش - کرنش شکل (۵-۱۱) برای رفتار مشخصه مصالح اعضای کششی استفاده شده است. دو نوع شرایط تکیه‌گاهی برای این بافتار در نظر گرفته شده است که در شکل (۵-۱۳) نشان داده شده‌اند. در نوع اول در شش گره پیرامونی از لایه پایینی و شش گره

پیرامونی از لایه بالا انتقال بافتار در هر سه راستای Z, Y, X مقید شده است. در صورتی که در نوع دوم در همه گره‌های پیرامونی لایه پایینی انتقال در هر سه راستای Z, Y, X مقید شده است.



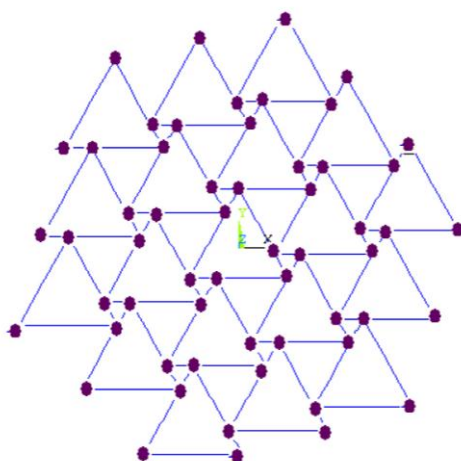
(ب): شرایط تکیه‌گاهی نوع ۲



(الف): شرایط تکیه‌گاهی نوع ۱

شکل (۵-۱۳): شرایط تکیه‌گاهی در نظر گرفته شده برای بافتار ناپیوسته عضو فشاری

بارگذاری بافتار به صورت بارهای قائم‌رو به پایین در گره‌های لایه بالایی در نظر گرفته شده است. در شکل (۵-۱۴) بارگذاری‌های مورد نظر در گره‌های لایه بالایی نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۴): بارگذاری در نظر گرفته شده برای بافتار ناپیوسته عضو فشاری

۵-۸-۱-۱- تحلیل‌های مربوط به بارگذاری متقارن

بافتارهای مورد بررسی در این قسمت دارای بارگذاری نشان داده شده در شکل (۵-۱۴) می‌باشند.

۵-۸-۱-۱-۱- شرایط تکیه‌گاهی نوع اول

۵-۸-۱-۱-۱- استفاده از نمودار تنش - کرنش شکل (۵-۱۱) به عنوان رفتار مشخصه

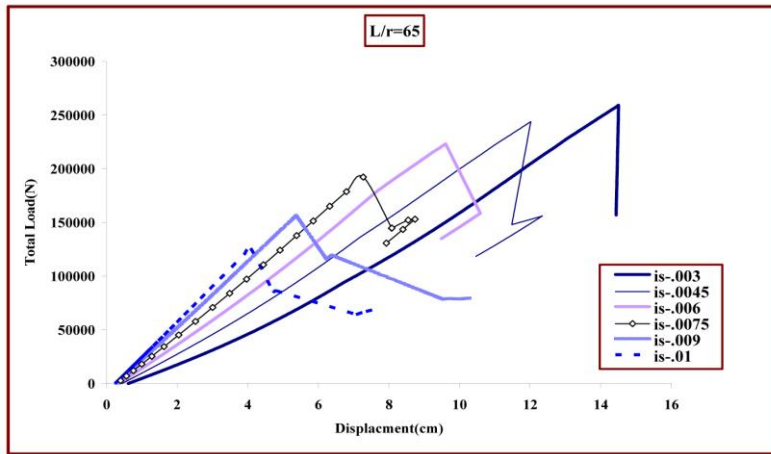
مصالح اعضای کششی

در این قسمت تحلیل‌های انجام شده بر روی بافتارهای دارای شرایط تکیه‌گاهی نوع اول (شکل ۵-۱۳ الف) با در نظر گرفتن بارگذاری متقارن، همچنین رفتار مشخصه اعضای کششی به صورت نمودار تنش - کرنش شکل (۵-۱۱) به ازای سه ضریب لاغری اعضای فشاری ارائه می‌شود.

۵-۸-۱-۱-۱-۱- بررسی تاثیر مقادیر پیش‌تنیدگی بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور

۵-۸-۱-۱-۱-۱- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=65$

در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع $1/2\text{cm}^2$ می‌باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی که با $\dot{\epsilon}_s$ نشان داده شده است. در شکل (۵-۱۵) قابل مشاهده است. با توجه به شکل (۵-۱۵)، این بافتار برای $L/r=65$ ، به ازای کرنش‌های اولیه $0/0006$ ، $0/00045$ ، $0/0003$ ، $\dot{\epsilon}_s$ مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی را به نمایش می‌گذارد. در این مکانیزم تعدادی از اعضای کششی شل می‌گردند، اما چون سرعت شل‌شدگی بسیار کم می‌باشد لذا در فرایند بازتوزیع، سایر اعضا می‌توانند بارهای توزیع شده را تحمل و جذب نمایند. بنابراین حالت تعادل سازه پایدار می‌باشد. سازه می‌تواند بار اضافی دیگری را تحمل نماید تا اینکه نخستین عضو (یا مجموعه اعضا) فشاری کمانش کنند تا در نتیجه خرابی کل سازه حاصل گردد. و به ازای کرنش‌های اولیه $\dot{\epsilon}_s = 0/0001$ ، $0/0009$ ، $0/00075$ مکانیزم خرابی کلی رخ می‌دهد. در این حالت بعد از کمانش نخستین عضو (یا مجموعه اعضا) فشاری، به هنگام فرایند بازتوزیع، سایر اعضا نمی‌توانند بار کاهش یافته در این اعضای خراب شده را تحمل نمایند و در خودشان نیز خرابی رخ می‌دهد، به عبارت دیگر یک مکانیزم کلی ایجاد می‌گردد.



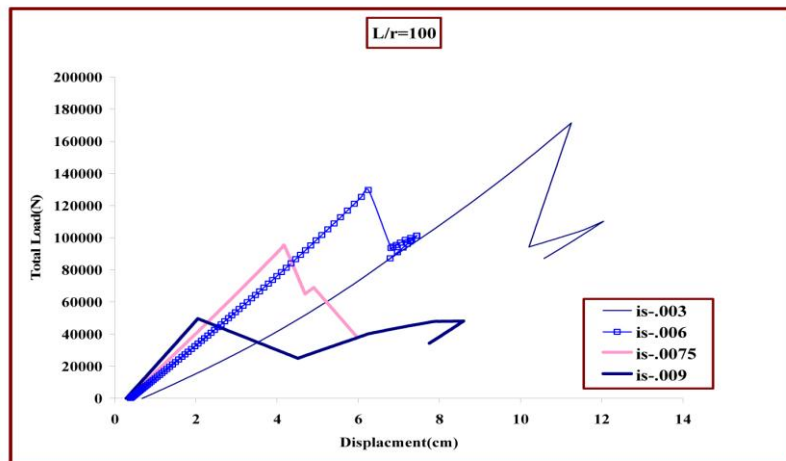
شکل (۵-۱۵): تاثیر مقادیر پیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=65$

۵-۸-۱-۱-۱-۱-۲- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=100$

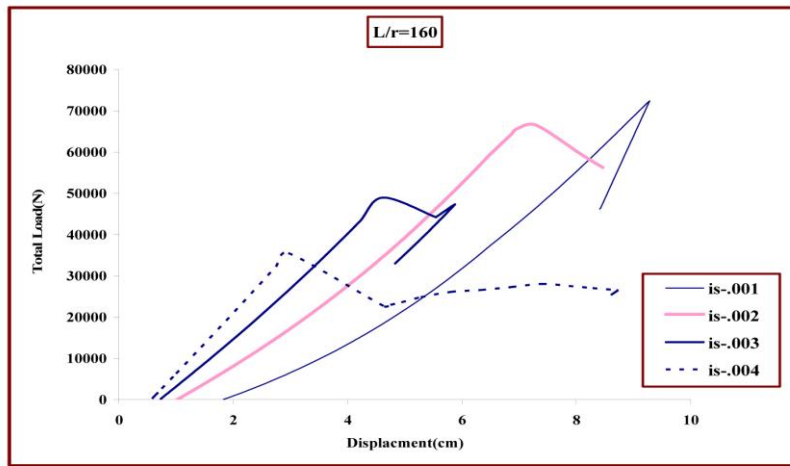
در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع $1/1 \text{ cm}^2$ می باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی در شکل (۵-۱۶) قابل مشاهده است. این شکل نشان می دهد که برای $L/r=100$ ، به ازای کرنش های اولیه $0/006$ ، $0/003$ ، $is=0/0075$ ، مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل شدگی اعضای کششی و به ازای کرنش های اولیه $0/009$ ، $0/0075$ ، $is=0/0075$ ، مکانیزم خرابی کلی رخ می دهد.

۵-۸-۱-۱-۱-۳- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=160$

در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع 1 cm^2 می باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی در شکل (۵-۱۷) نشان داده شده است. از روی این شکل می توان فهمید که به ازای $L/r=160$ و کرنش های اولیه $0/002$ ، $0/001$ ، $is=0/001$ مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل شدگی اعضای کششی رخ داده است. در صورتی که به ازای $0/004$ ، $0/003$ ، $is=0/003$ ، مکانیزم خرابی کلی رخ داده است.



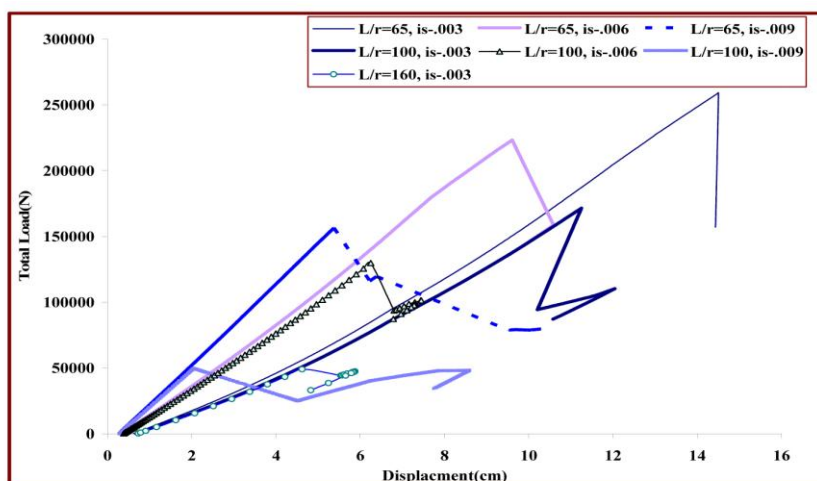
شکل (۵-۱۶): تاثیر مقادیر پیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=100$



شکل (۵-۱۷): تاثیر مقادیر پیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=160$

۵-۸-۱-۱-۱-۲- بررسی تاثیر مقادیر نسبت‌های لاغری اعضای فشاری بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور

در این مرحله تاثیر نسبت‌های لاغری مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که به ازای نسبت‌های لاغری مختلف سطح مقطع اعضای کششی فرق می‌کنند. اما این مساله با توجه به متناظر بودن تغییرات سطوح مقطع با ظرفیت اعضای فشاری قابل توجیه است. یعنی به ازای هر کدام از نسبت‌های لاغری سطح مقطع اعضای کششی طوری انتخاب می‌شود که خرابی ناشی از کمانش اعضای فشاری اتفاق بیفتد. با توجه به شکل (۵-۱۸) مشاهده می‌شود که این بافتار برای کرنش اولیه $\epsilon_s = 0.003$ ، به ازای نسبت‌های لاغری $L/r = 65,100$ مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی و به ازای $L/r = 160$ ، مکانیزم خرابی کلی رخ می‌دهد. برای کرنش اولیه $\epsilon_s = 0.006$ به ازای نسبت‌های لاغری $L/r = 65,100$ مکانیزم خرابی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی رخ می‌دهد و برای کرنش اولیه $\epsilon_s = 0.009$ ، به ازای $L/r = 65,100$ مکانیزم خرابی کلی قابل مشاهده است. در این مورد مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت لاغری، مقاومت اولیه سازه کاهش می‌یابد و سختی سیستم سازه‌ای کاهش می‌یابد ولی این کاهش چندان محسوس نیست.



شکل (۵-۱۸): تاثیر نسبت لاغری بر روی رفتار ناپایداری به ازای کرنش‌های اولیه مختلف

۵-۸-۱-۱-۲- استفاده از نمودار تنش - کرنش شکل (۵-۱۲) به عنوان رفتار مشخصه

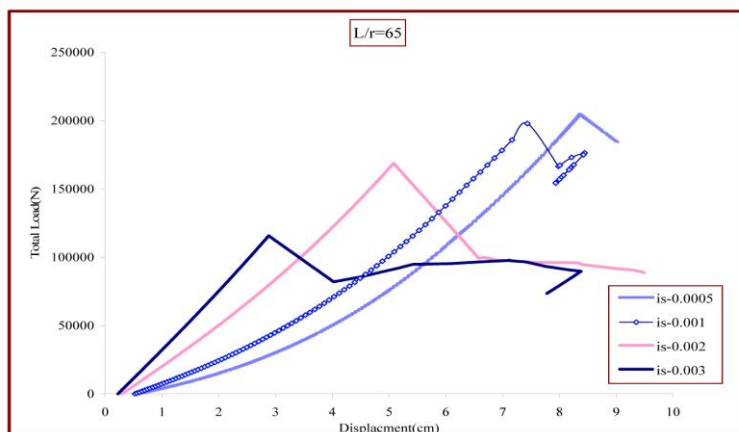
مصالح اعضای کششی

در این قسمت تحلیل‌های انجام شده بر روی بافتارهای دارای شرایط تکیه‌گاهی با در نظر گرفتن بارگذاری متقارن و همچنین رفتار مشخصه اعضای فشاری به صورت نمودار تنش - کرنش شکل (۵-۱۲) به ازای سه ضریب لاغری اعضای فشاری ارائه می‌شود.

۵-۸-۱-۱-۲- بررسی تاثیر مقادیر پیش‌تنیدگی بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور

۵-۸-۱-۱-۲- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=65$

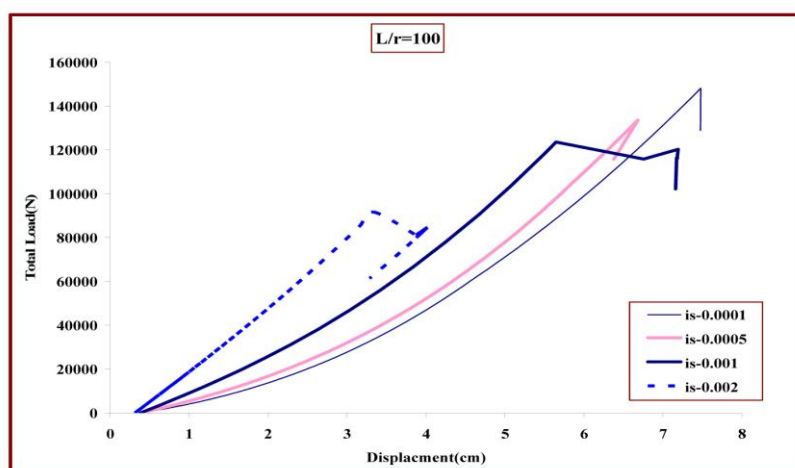
در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع $1/2 \text{ cm}^2$ می‌باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی در شکل (۵-۱۹) نشان داده شده است. این بافتار برای لاغری $L/r=65$ ، به ازای کرنش‌های اولیه $\delta_s=0/00005, 0/001$ مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی و به ازای کرنش‌های اولیه $\delta_s=0/002, 0/003$ ، مکانیزم خرابی کلی را به نمایش می‌گذارد.



شکل (۵-۱۹): تاثیر مقادیر پیش‌کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=65$

۵-۸-۱-۱-۲-۱-۲- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=100$

در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع $1/1 \text{ cm}^2$ می‌باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی در شکل (۲۰-۵) قابل مشاهده است. این بافتار برای لاغری $L/r=100$ به ازای کرنش‌های اولیه $\dot{\epsilon}_s=0/0001, 0/0005$ مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل شدگی اعضای کششی و به ازای کرنش‌های اولیه $\dot{\epsilon}_s=0/001, 0/002$ مکانیزم خرابی کلی را به نمایش می‌گذارد.

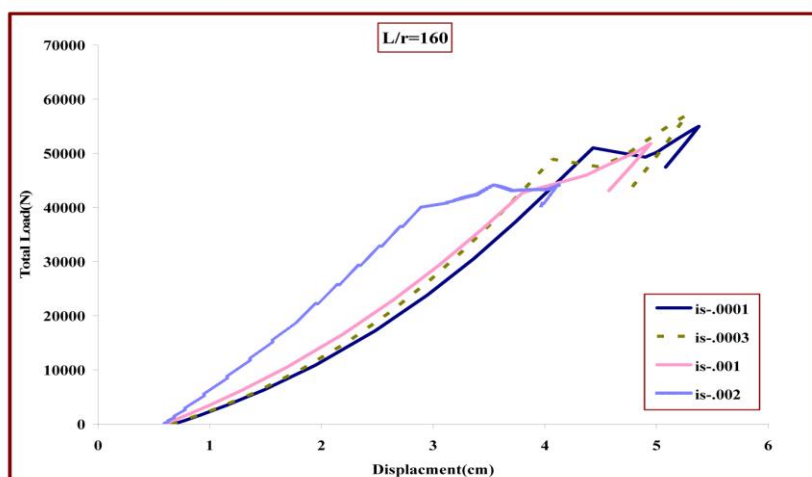


شکل (۲۰-۵): تاثیر مقادیر پیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=100$

۵-۸-۱-۱-۲-۳- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=160$

در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع 1 cm^2 می‌باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی در شکل (۲۱-۵) قابل مشاهده است. این بافتار با لاغری $L/r=160$ ، به ازای کرنش‌های اولیه $\dot{\epsilon}_s=0/0001, 0/0003$ دارای مکانیزم خرابی همراه با فروجهش دینامیکی می‌باشد. یعنی بعد از کمانش نخستین عضو (یا مجموعه اعضای) فشاری، یک خرابی محلی رخ می‌دهد که باعث ناپایداری سازه می‌گردد. این ناپایداری تا موقعی که نخستین عضو کمانش یافته (یا نخستین مجموعه اعضای فشاری) به کمترین مقاومت پس کمانشی خود برسد، ادامه پیدا می‌کند. در این حال، حالت تعادل سازه، دوباره پایدار می‌شود و سایر اعضا می‌توانند بار اضافی را تحمل نمایند، تا اینکه به ظرفیت بحرانی خود برسند و خرابی نهایی رخ دهد. در این بافتار برای نسبت لاغری مذکور، به ازای کرنش‌های اولیه $\dot{\epsilon}_s=0/001, 0/002$ مکانیزم خرابی موضعی بدون فروجهش دینامیکی رخ می‌دهد. یعنی بعد از خرابی موضعی ناشی از کمانش عضوی، به هنگام فرایند باز توزیع، سایر اعضا می‌توانند

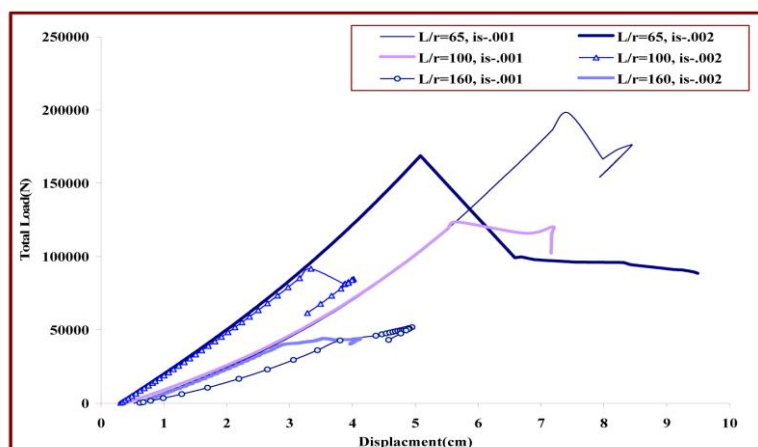
بارهای توزیع شده را تحمل و جذب نمایند. لذا سازه می‌تواند بار اضافی دیگری را تحمل نماید تا موقعی که خرابی کل سازه حاصل شود.



شکل (۵-۲۱): تاثیر مقادیر پیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=160$

۵-۸-۱-۱-۱-۲-۲- بررسی تاثیر مقادیر نسبت‌های لاغری اعضای فشاری بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور

شکل (۵-۲۲) نشان می‌دهد که این بافتار برای کرنش اولیه $\dot{\epsilon}_s=0/002$ به ازای لاغری‌های $L/r=65, 100$ مکانیزم خرابی کلی و به ازای لاغری $L/r=160$ ، مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی را به نمایش می‌گذارد. و برای کرنش اولیه $\dot{\epsilon}_s=0/001$ ، به ازای لاغری $L/r=65$ ، مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی، به ازای لاغری $L/r=100$ ، مکانیزم خرابی کلی و به ازای لاغری $L/r=160$ ، مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی رخ می‌دهد. در این مورد با افزایش نسبت لاغری مقاومت اولیه سازه و سختی سیستم سازه‌ای کاهش می‌یابد.



شکل (۲۲-۵): تاثیر نسبت لاغری بر روی رفتار ناپایداری به ازای کرنش‌های اولیه مختلف

۵-۸-۱-۱-۲- شریط تکیه‌گاهی نوع دوم

در این قسمت تحلیل‌های انجام شده بر روی بافتارهای دارای شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم (شکل ۵-۱۳-ب) با در نظر گرفتن بارگذاری متقارن به ازای سه ضریب لاغری اعضای فشاری ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که در تحلیل‌های این بخش از نمودار تنش - کرنش شکل (۵-۱۱) استفاده شده است.

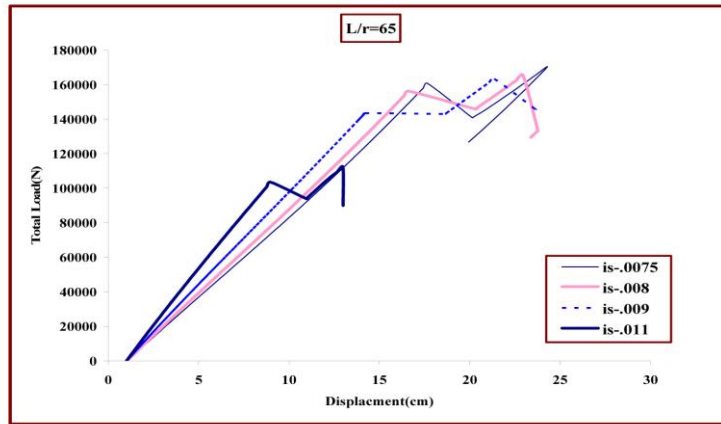
۵-۸-۱-۱-۲-۱- بررسی تاثیر مقادیر پیش تنیدگی بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور

۵-۸-۱-۱-۲-۱-۱- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=65$

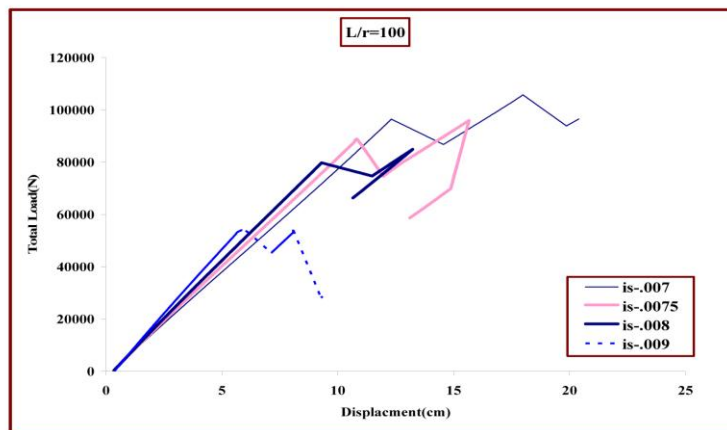
در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع $1/15 \text{ cm}^2$ می‌باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی در شکل (۵-۲۳) نشان داده شده است. این بافتار با لاغری $L/r=65$ ، به ازای تمام مقادیر کرنش اولیه مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی را به نمایش می‌گذارد.

۵-۸-۱-۱-۲-۱-۲- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=100$

در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع 1 cm^2 می‌باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی در شکل (۵-۲۴) نشان داده شده است. این بافتار برای $L/r=100$ ، به ازای کرنش‌های اولیه $is=0/007, 0/0075, 0/008, 0/009$ مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی را به نمایش می‌گذارد.



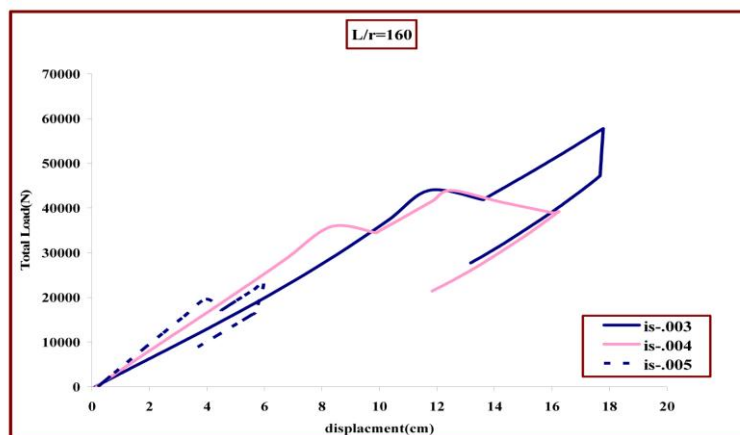
شکل (۲۳-۵): تاثیر مقادیر پیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=65$



شکل (۲۴-۵): تاثیر مقادیر پیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=100$

۵-۸-۱-۱-۲-۱-۳- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=160$

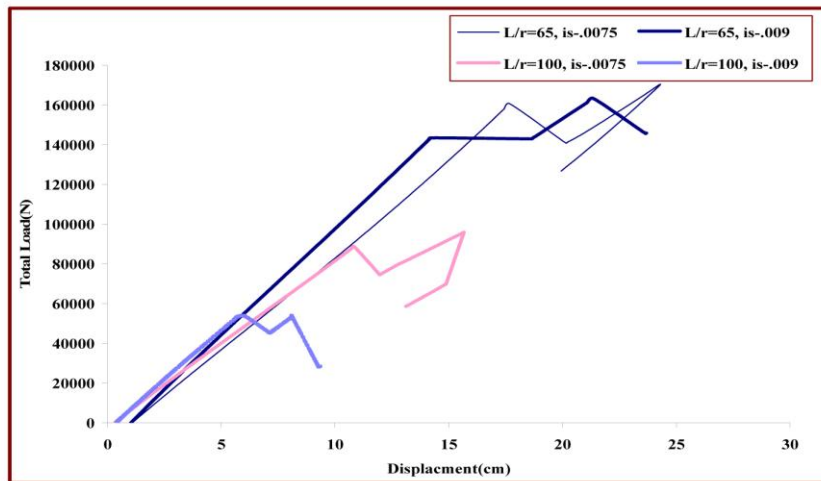
در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع $9/0 \text{ cm}^2$ می باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی در شکل (۲۵-۵) نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد که به ازای $L/r=160$ و $is=0/003, 0/004, 0/005$ مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی رخ می دهد.



شکل (۲۵-۵): تاثیر مقادیر پیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=160$

۵-۸-۱-۱-۲- بررسی تاثیر مقادیر نسبت‌های لاغری اعضای فشاری بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور

در این قسمت تاثیر نسبت‌های لاغری مختلف به ازای کرنش‌های اولیه مشخص بر روی رفتار بافتار مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که از شکل (۵-۲۶) مشاهده می‌شود برای کرنش‌های اولیه $\epsilon_s = 0.0009, 0.0075$ ، به ازای نسبت‌های لاغری $L/r = 65, 100$ ، مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی رخ می‌دهد. بنابراین ملاحظه می‌شود که با تغییر نسبت لاغری تغییری در نوع مکانیزم خرابی دیده نمی‌شود و افزایش نسبت لاغری با کاهش مقاومت سازه همراه است. همچنین افزایش نسبت لاغری کاهش نامحسوسی را در سختی سیستم سازه‌ای ایجاد می‌کند.

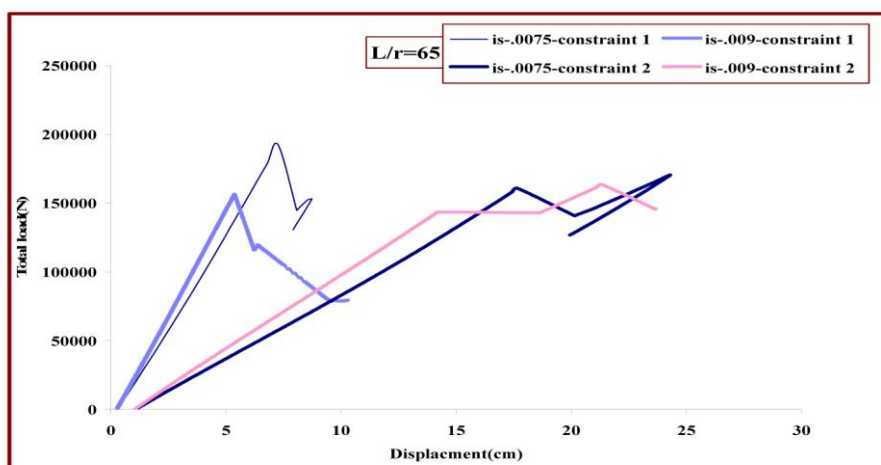


شکل (۵-۲۶): تاثیر نسبت لاغری بر روی رفتار ناپایداری به ازای کرنش‌های اولیه مختلف

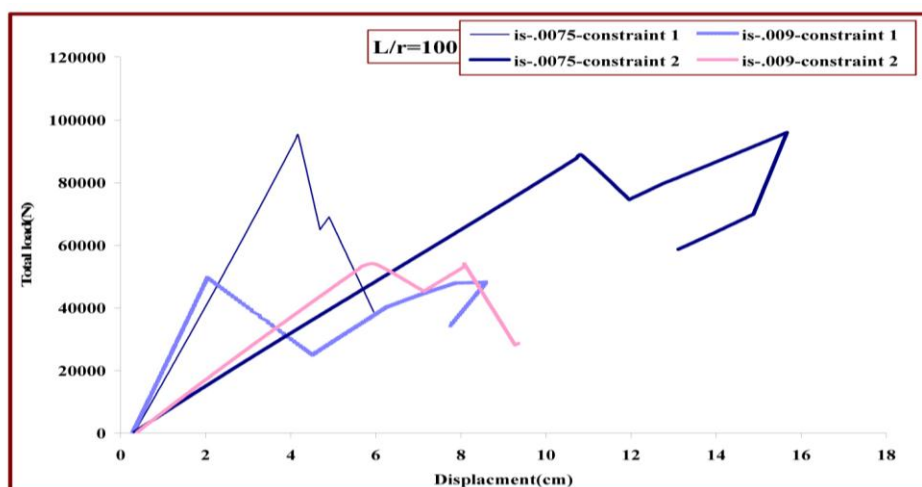
۵-۸-۱-۲- بررسی اثر شرایط تکیه‌گاهی بر روی رفتار بافتار ناپیوسته عضو فشاری تحت اثر بارگذاری متقارن

برای بررسی اثر شرایط تکیه‌گاهی بر روی رفتار بافتار ناپیوسته عضو فشاری تحت اثر بارگذاری متقارن از نمودارهای مقایسه‌ای شکل‌های (۵-۲۸) تا (۵-۳۰) که در آنها به ازای لاغری‌های مختلف دو نوع شرایط تکیه‌گاهی مذکور در شکل (۵-۱۳) و کرنش‌های اولیه مختلفی در نظر گرفته شده است، استفاده می‌کنیم. در شکل‌های زیر شرایط تکیه‌گاهی نوع ۱ با constraint1 و شرایط تکیه‌گاهی نوع ۲ با constraint2 نشان داده شده است. همانطور که از شکل‌های (۵-۲۸) و (۵-۲۹) قابل مشاهده است برای نسبت‌های لاغری $L/r = 65, 100$ و کرنش‌های اولیه $\epsilon_s = 0.0009, 0.0075$ به ازای شرایط تکیه‌گاهی نوع اول مکانیزم خرابی کلی و به ازای شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم

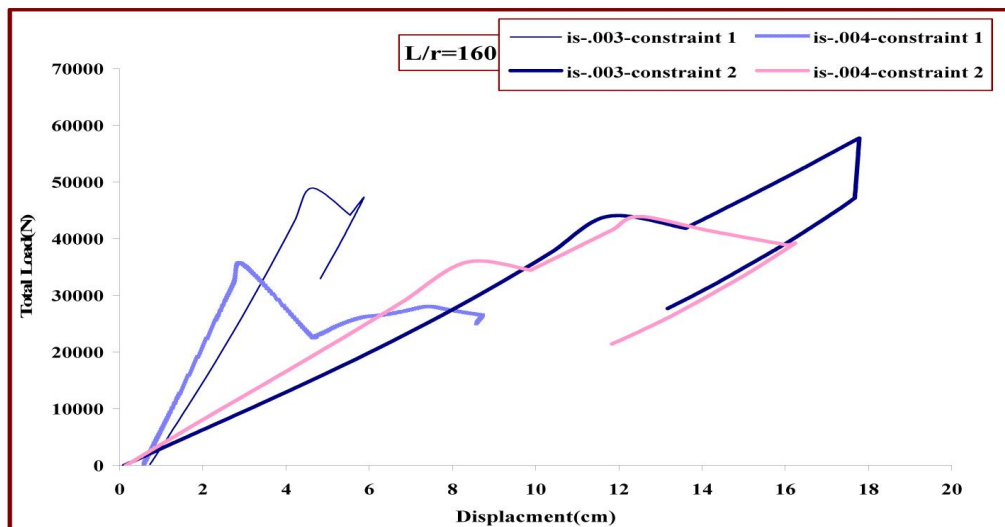
مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی رخ می‌دهد. شکل (۵-۳۰) نشان می‌دهد که برای نسبت لاغری $L/r=160$ و کرنش‌های اولیه 0.004 ، 0.003 ، در شرایط تکیه‌گاهی نوع اول مکانیزم خرابی کلی و در شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی رخ می‌دهد. برای هر سه نسبت لاغری و کرنش‌های اولیه مختلف مشاهده می‌شود که سختی سیستم سازه‌ای با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی نوع اول به میزان قابل توجهی از شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم بیشتر است و این بافتار با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم شکل‌پذیر از نوع اول است. اما مقاومت سازه با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی مختلف چندان تغییری نمی‌کند. همچنین در شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم مکانیزم‌های خرابی مطلوبتری نسبت به شرایط تکیه‌گاهی نوع اول شاهد هستیم.



(۵-۲۸): بررسی تاثیر شرایط تکیه‌گاهی بر روی رفتار ناپایداری به ازای نسبت لاغری $L/r=65$



(۵-۲۹): بررسی تاثیر شرایط تکیه‌گاهی بر روی رفتار ناپایداری به ازای نسبت لاغری $L/r=100$



(۳۰-۵) بررسی تاثیر شرایط تکیه‌گاهی بر روی رفتار ناپایداری به ازای نسبت لاغری $L/r=160$

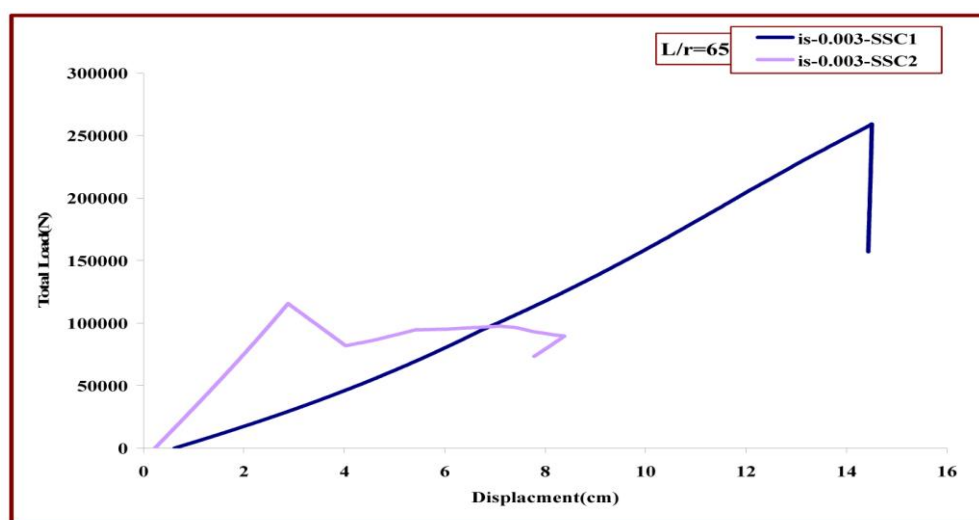
۵-۸-۱-۳- بررسی اثر نمودار تنش - کرنش اعضای کششی بر روی رفتار بافتار ناپیوسته

عضو فشاری تحت اثر بارگذاری متقارن و شرایط تکیه‌گاهی نوع اول

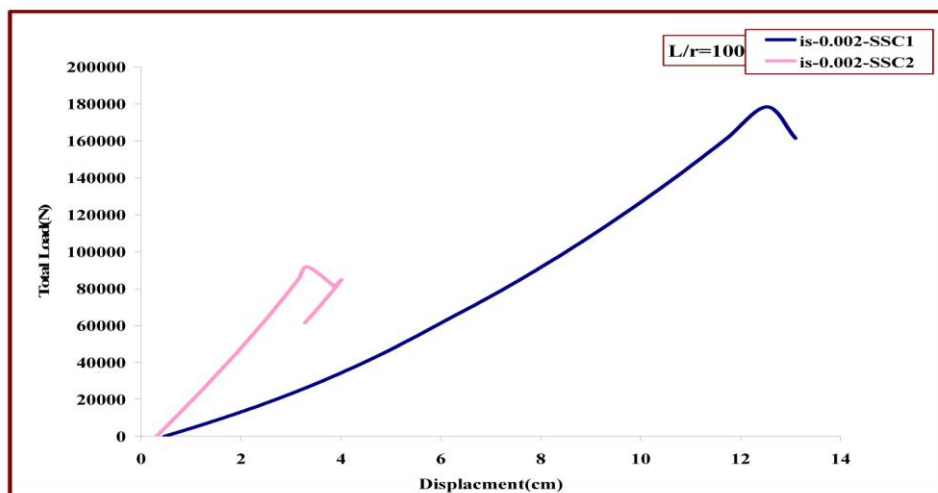
به منظور بررسی اثرات مربوط به نمودار تنش - کرنش اعضای کششی در رفتار بافتار ناپیوسته عضو فشاری که دارای شرایط تکیه‌گاهی نوع اول و تحت اثر بارگذاری متقارن می‌باشد، از نمودارهای مقایسه‌ای شکل‌های (۳۱-۵) تا (۳۳-۵) که برای نسبت‌های لاغری و کرنش‌های اولیه مختلف با در نظر گرفتن دو نوع نمودار تنش - کرنش نشان داده شده در شکل‌های (۱۱-۵) و (۱۲-۵) رسم شده است، استفاده می‌کنیم.

در شکل‌های زیر، نمودار تنش - کرنش شکل (۱۱-۵) با SSC1 و نمودار تنش - کرنش شکل (۱۲-۵) با SSC2 نشان داده شده است. شکل (۳۱-۵) نشان می‌دهد که این بافتار برای نسبت لاغری $L/r=65$ و کرنش اولیه $\delta_s=0/003$ ، به ازای SSC1، مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی و به ازای SSC2، مکانیزم خرابی کلی را به نمایش می‌گذارد. با توجه به شکل (۳۲-۵) می‌توان فهمید که در این بافتار برای نسبت لاغری $L/r=100$ و کرنش اولیه $\delta_s=0/002$ ، به ازای SSC1، مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی و به ازای SSC2، مکانیزم خرابی کلی رخ می‌دهد. از روی شکل (۳۳-۵) مشاهده می‌شود که برای نسبت لاغری $L/r=160$ و کرنش‌های اولیه $0/001$ ، $0/002$ به ازای SSC1 مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی و به ازای SSC2، مکانیزم خرابی موضعی بدون فروجهش

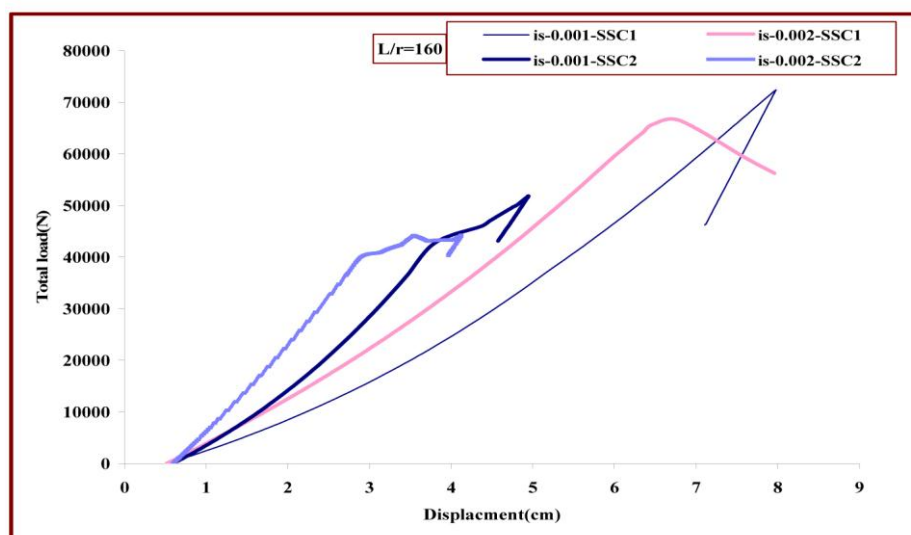
دینامیکی رخ می‌دهد. در حالت کلی مشاهده می‌شود که با یکسان در نظر گرفتن سطح مقطع اعضای کششی و نسبت‌های لاغری اعضای فشاری برای دو حالت نمودار تنش - کرنش اعضای کششی، بافتار دارای SSC1، در کرنش‌های اولیه خیلی کوچکتر از بافتار دارای SSC2، پیش تنیده می‌شود زیرا با بزرگ در نظر گرفتن کرنش‌های اولیه، اعضای فشاری در مرحله پیش تنیدگی کمانش می‌کنند. همچنین مشاهده می‌شود که مقاومت سازه در حالت SSC1، بیشتر از حالت SSC2، و سختی سیستم سازه‌ای در حالت SSC2، بیشتر از حالت SSC1، است. بنابراین در این بافتار استفاده از SSC1، مکانیزم‌های خرابی مطلوب‌تری نسبت به SSC2، مشاهده می‌شود و همچنین در این حالت مقاومت و شکل‌پذیری سازه نسبت به حالت SSC2، بیشتر است.



شکل (۳۱-۵): بررسی تاثیر نمودار تنش - کرنش اعضای کششی بر روی رفتار ناپایداری برای نسبت لاغری $L/r=65$



شکل (۵-۳۲): بررسی تاثیر نمودار تنش - کرنش اعضای کششی بر روی رفتار ناپایداری برای نسبت لاغری $L/r=100$

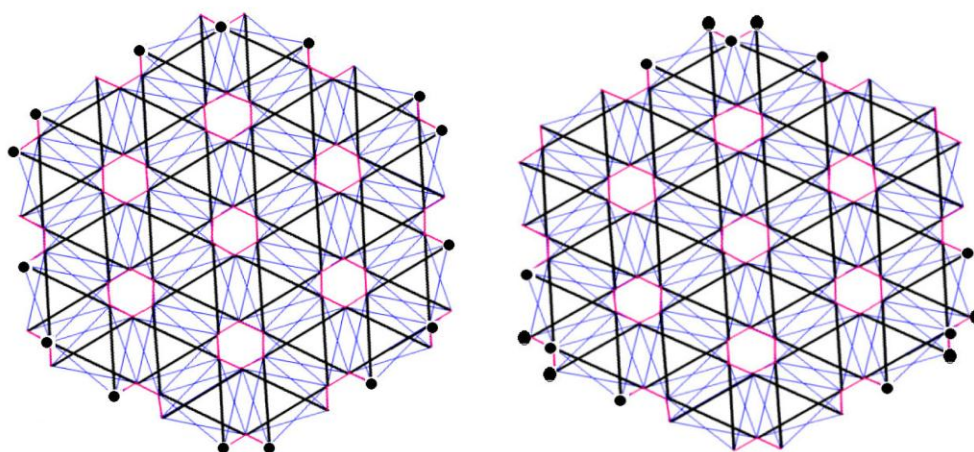


شکل (۵-۳۳): بررسی تاثیر نمودار تنش - کرنش اعضای کششی بر روی رفتار ناپایداری برای نسبت لاغری $L/r=160$

۵-۸-۲- تحلیل‌های ناپایداری استاتیکی بر روی بافتار پیوسته عضو فشاری ایجاد شده به روش اتصال راس به راس سیمپلکس‌های مثلثی

این بافتار همانطور که در شکل (۵-۸) نشان داده شده است از ترکیب سیمپلکس‌های منشوری مثلثی به روش اتصال راس به راس ایجاد شده است. سازه مورد مطالعه دارای ۷۲ عضو فشاری و ۱۴۴ عضو کششی می‌باشد. پاسخ تنش محوری - کرنش محوری نشان داده شده در شکل (۵-۱۰) به عنوان رفتار مشخصه مصالح فشاری در نظر گرفته شده است. اعضای کششی دارای سطح مقطع متناظر با نسبت لاغری اعضای فشاری می‌باشند که در قسمت‌های مختلف ذکر خواهد شد. در همه بخش‌های زیر از نمودار شکل (۵-۱۱) برای رفتار مشخصه مصالح اعضای کششی استفاده شده است.

دو نوع شرایط تکیه‌گاهی برای این بافتار در نظر گرفته شده است که در شکل (۳۴-۵) نشان داده شده‌اند. در نوع اول در نه گره پیرامونی از لایه پایینی و شش گره پیرامونی از لایه بالا انتقال بافتار در هر سه راستای Z, Y, X مقید شده است. در صورتی که در نوع دوم در همه گره‌های پیرامونی لایه پایینی انتقال در هر سه راستای Z, Y, X مقید شده است.

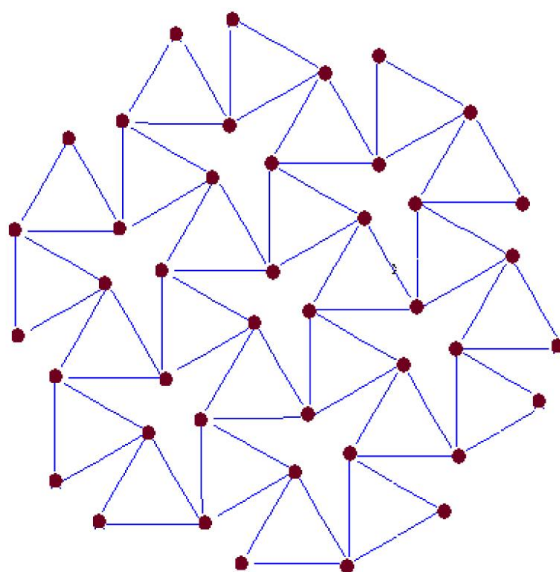


(ب): شرایط تکیه‌گاهی نوع ۲

(الف): شرایط تکیه‌گاهی نوع ۱

شکل (۳۴-۵): شرایط تکیه‌گاهی در نظر گرفته شده برای بافتار پیوسته عضو فشار

بارگذاری بافتار به صورت بارهای قائم رو به پایین در گره‌های لایه بالایی و به صورت متقارن در نظر گرفته شده است. در شکل (۳۵-۵) بارگذاری مورد نظر در گره‌های لایه بالایی نشان داده شده است.



شکل (۳۵-۵): بارگذاری در نظر گرفته شده برای بافتار پیوسته عضو فشاری

۵-۸-۲-۱- تحلیل‌های مربوط به بارگذاری متقارن

بافتارهای مورد بررسی در این قسمت دارای بارگذاری نشان داده شده در شکل (۳۵-۵) می‌باشند.

۵-۸-۲-۱-۱- شرایط تکیه‌گاهی نوع اول

۵-۸-۲-۱-۱-۱- استفاده از نمودار تنش - کرنش شکل (۱۱-۵) به عنوان رفتار مشخصه

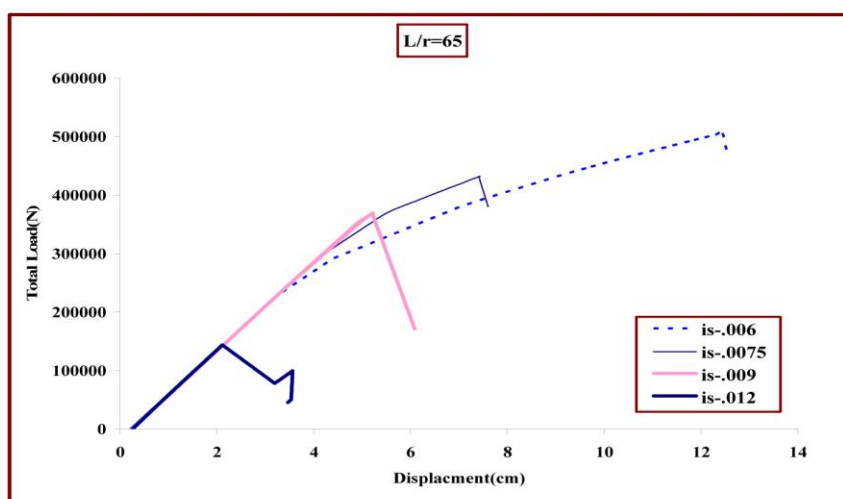
مصالح اعضای کششی

در این قسمت تحلیل‌های انجام شده بر روی بافتارهای دارای شرایط تکیه‌گاهی نوع اول (۳۵-۵) با در نظر گرفتن بارگذاری متقارن و همچنین رفتار مشخصه اعضای کششی به صورت نمودار تنش - کرنش شکل (۱۱-۵) به ازای سه ضریب لاغری اعضای فشاری ارائه می‌شود.

۵-۸-۲-۱-۱-۲- بررسی تاثیر مقادیر پیش تنیدگی بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور

۵-۸-۲-۱-۱-۱-۲- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=65$

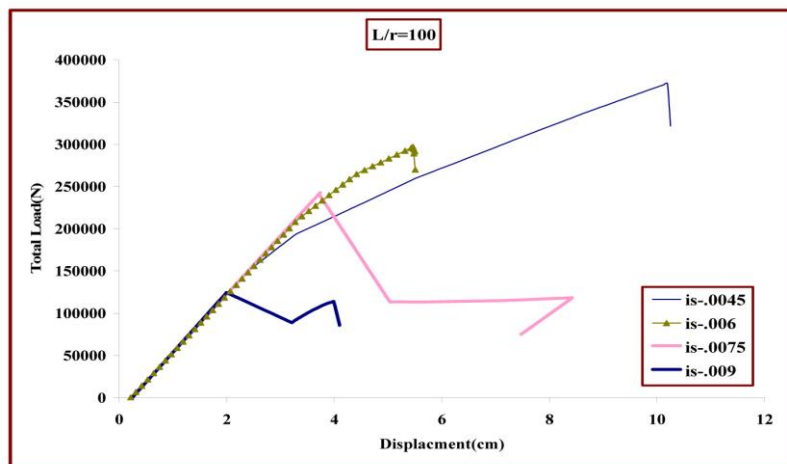
در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع $1/2\text{cm}^2$ می‌باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه در شکل (۳۶-۵) قابل مشاهده است. این بافتار برای $L/r=65$ ، به ازای $i_s=0/006, 0/007, 0/009$ دارای مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی و به ازای کرنش اولیه $i_s=0/012$ دارای مکانیزم خرابی کلی می‌باشد.



شکل (۳۶-۵): تاثیر مقادیر پیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=65$

۵-۸-۲-۱-۱-۱-۱-۲- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=100$

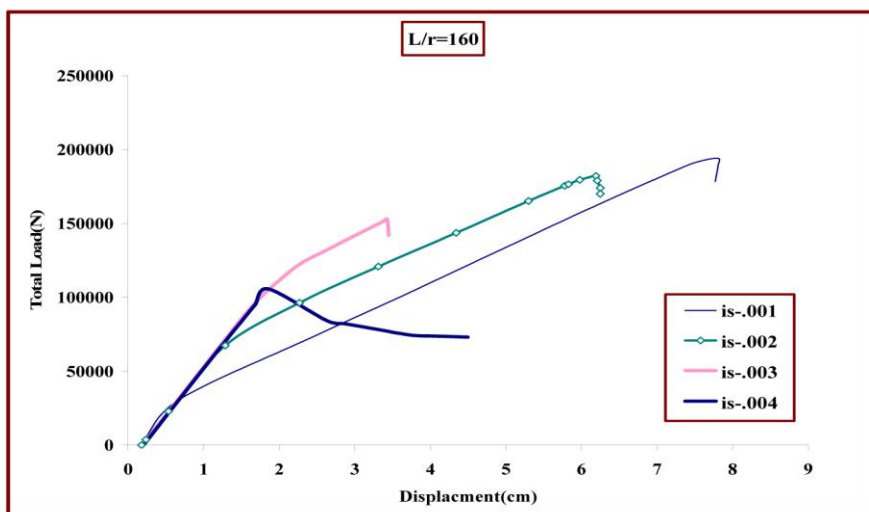
در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع $1/1\text{cm}^2$ می‌باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی در شکل (۳۷-۵) نشان داده شده است. این بافتار برای $L/r=100$ ، به ازای $i_s=0/0045$ ، $0/006$ ، $0/0075$ ، $0/009$ دارای مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی و به ازای کرنش‌های اولیه $i_s=0/0075$ ، $0/009$ دارای مکانیزم خرابی کلی می‌باشد.



شکل (۳۷-۵): تاثیر مقادیر پیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=100$

۵-۸-۲-۱-۱-۱-۳- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=160$

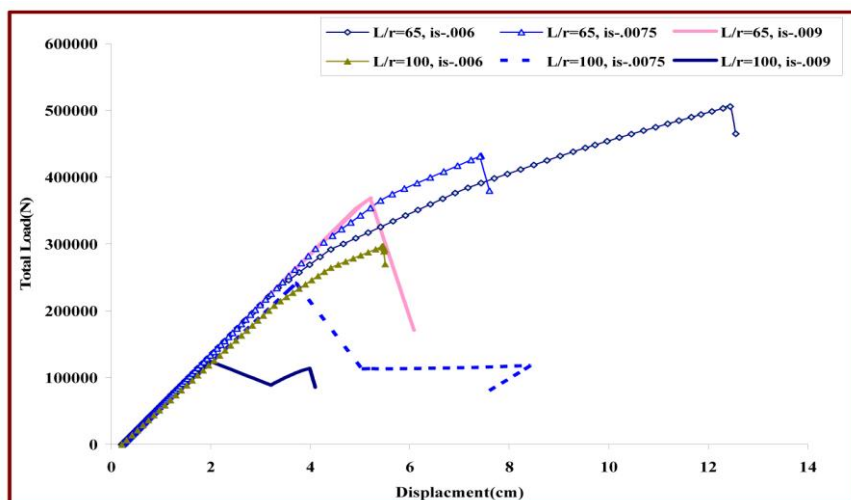
در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع 1cm^2 می‌باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی در شکل (۳۸-۵) قابل مشاهده است. این بافتار برای $L/r=160$ ، به ازای $i_s=0/001$ ، $0/002$ ، $0/003$ ، $0/004$ دارای مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی و به ازای کرنش‌های اولیه $i_s=0/004$ دارای مکانیزم خرابی کلی می‌باشد.



شکل (۳۸-۵): تاثیر مقادیر بیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=160$

۵-۸-۲-۱-۱-۲- بررسی تاثیر مقادیر نسبت‌های لاغری اعضای فشاری بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور

از روی شکل (۳۹-۵) می‌توان مشاهده کرد که این بافتار برای $\delta_s=0/006$ ، به ازای نسبت‌های لاغری $L/r=65, 100$ ، مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی را به نمایش می‌گذارد. همچنین برای $0/009$ ، $0/0075$ ، $\delta_s=0/0075$ ، به ازای نسبت لاغری $L/r=65$ ، مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی و به ازای $L/r=100$ ، مکانیزم خرابی کلی رخ می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت لاغری مقاومت اولیه سازه کاهش می‌یابد و همچنین کاهش نامحسوسی در سختی سیستم سازه‌ای دیده می‌شود.



شکل (۳۹-۵): تاثیر نسبت لاغری بر روی رفتار ناپایداری به ازای کرنش‌های اولیه مختلف

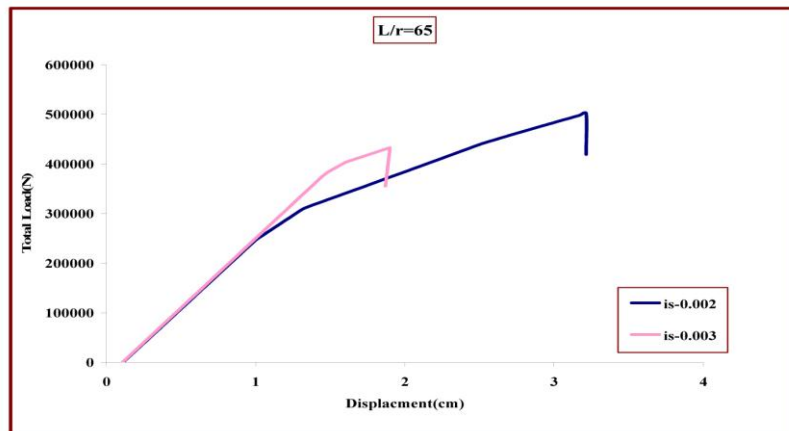
۵-۸-۲-۱-۱-۲- استفاده از نمودار تنش - کرنش شکل (۵-۱۲) به عنوان رفتار مشخصه مصالح اعضای کششی

در این قسمت تحلیل‌های انجام شده بر روی بافتارهای دارای شرایط تکیه‌گاهی نوع اول با در نظر گرفتن بارگذاری متقارن و همچنین رفتار مشخصه اعضای کششی به صورت نمودار تنش - کرنش شکل (۵-۱۲) به ازای سه ضریب لاغری اعضای فشاری ارائه می‌شود.

۵-۸-۲-۱-۱-۲- بررسی تاثیر مقادیر پیش تنیدگی بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور

۵-۸-۲-۱-۱-۲- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=65$

در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع $1/2\text{cm}^2$ می‌باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی در شکل (۵-۴۰) نشان داده شده است. این بافتار برای نسبت لاغری $L/r=65$ ، به ازای کرنش‌های اولیه $\epsilon_s=0/002, 0/003$ ، مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی را به نمایش می‌گذارد.



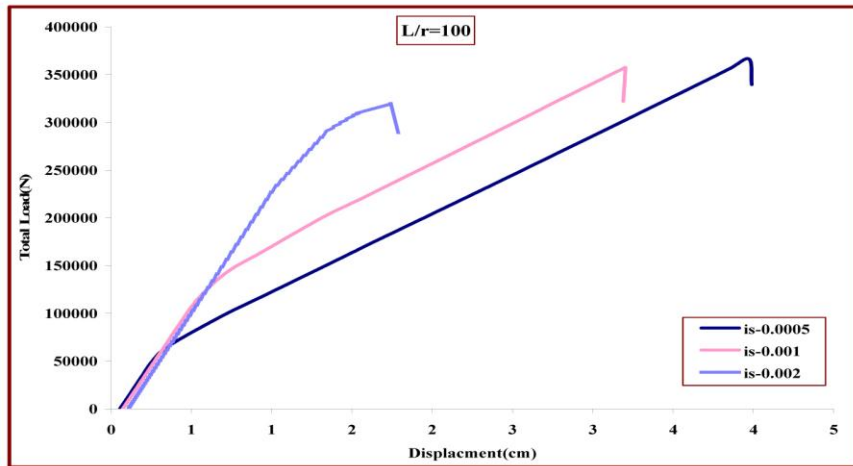
شکل (۵-۴۰): تاثیر مقادیر پیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=65$

۵-۸-۲-۱-۱-۲- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=100$

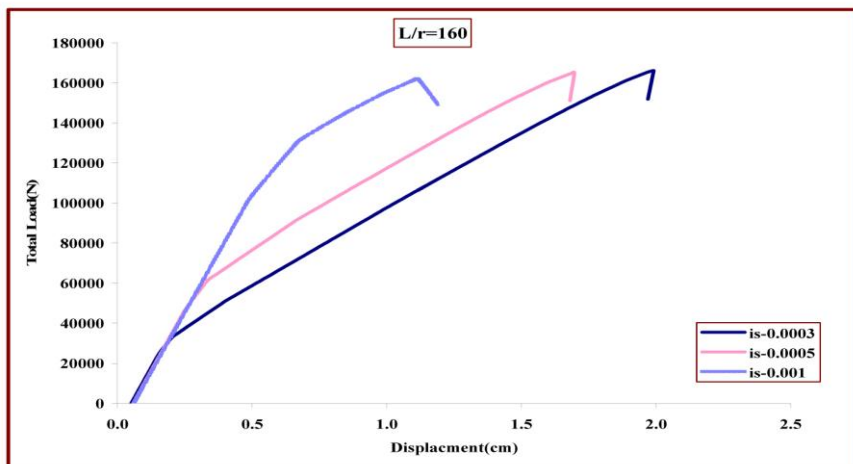
در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع $1/1\text{cm}^2$ می‌باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی در شکل (۵-۴۱) نشان داده شده است. این بافتار برای نسبت لاغری $L/r=100$ ، به ازای کرنش‌های اولیه $\epsilon_s=0/0005, 0/001, 0/002$ ، مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی را به نمایش می‌گذارد.

۵-۸-۲-۱-۱-۲-۳- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=160$

در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع 1 cm^2 می‌باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی در شکل (۵-۴۲) نشان داده شده است. این بافتار برای نسبت لاغری $L/r=160$ ، به ازای کرنش های اولیه $is=0.0003, 0.0005, 0.001$ مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی را به نمایش می‌گذارد.



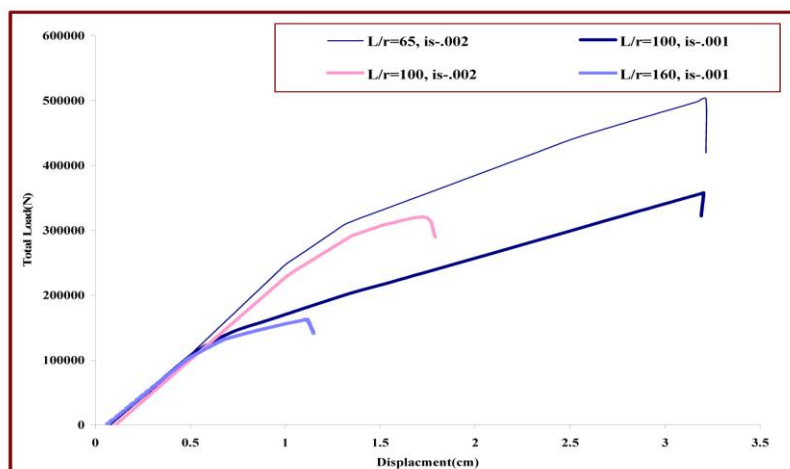
شکل (۵-۴۱): تاثیر مقادیر پیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=100$



شکل (۵-۴۲): تاثیر مقادیر پیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=160$

۵-۸-۲-۱-۱-۲-۲- بررسی تاثیر مقادیر نسبت‌های لاغری اعضای فشاری بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور

همانطور که در شکل (۴۳-۵) مشاهده می‌شود این بافتار برای کرنش اولیه $\epsilon_s = 0/001, 0/002$ به ازای نسبت‌های لاغری $L/r = 65, 100$ مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی را به نمایش می‌گذارد. در این مورد افزایش نسبت لاغری با کاهش مقاومت سازه همراه است. سختی سیستم سازه‌ای با افزایش نسبت لاغری کاهش نامحسوسی را از خود نشان می‌دهد. همچنین با تغییر نسبت لاغری تغییری در مکانیزم خرابی مشاهده نمی‌شود.



شکل (۴۳-۵): تاثیر نسبت لاغری بر روی رفتار ناپایداری به ازای کرنش‌های اولیه مختلف

۵-۸-۲-۱-۲- شرایط تکیه گاهی نوع دم

در این قسمت تحلیل‌های انجام شده بر روی بافتارهای دارای شرایط تکیه گاهی نوع دوم (۳۴-۵-ب) با در نظر گرفتن بارگذاری متقارن به ازای سه ضریب لاغری اعضای فشاری ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که تحلیل‌های این قسمت با در نظر گرفتن نمودار تنش - کرنش شکل (۱۱-۵) انجام شده است.

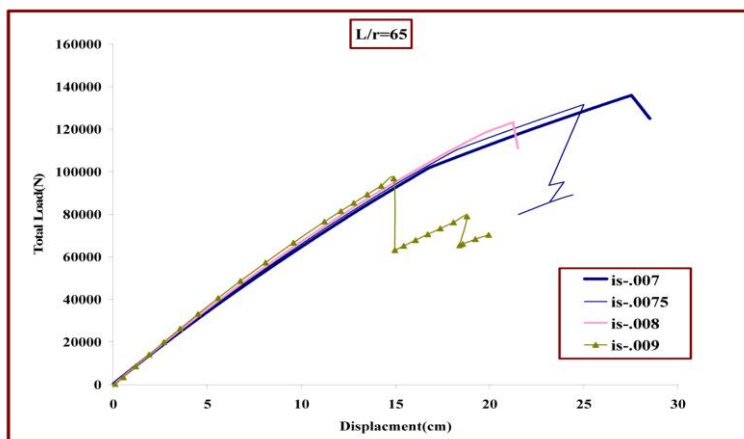
۵-۸-۲-۱-۲-۱- بررسی تاثیر مقادیر پیش تنیدگی بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور

۵-۸-۲-۱-۲-۱- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r = 65$

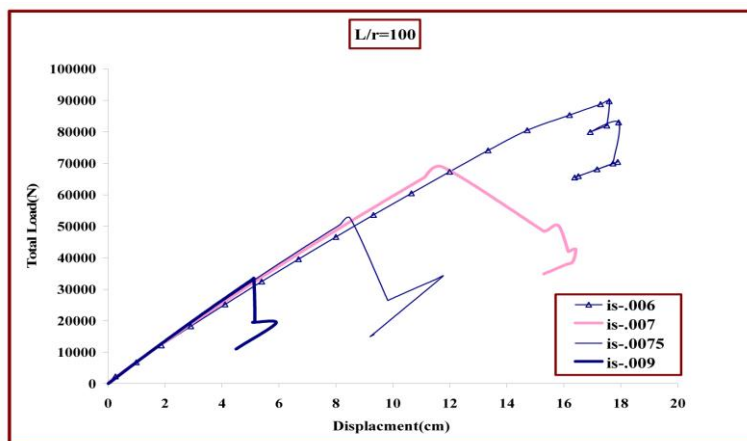
در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع $1/4 \text{ cm}^2$ می‌باشند و تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی در شکل (۴۴-۵) نشان داده شده است. این بافتار برای لاغری $L/r = 65$ و به ازای کرنش‌های اولیه $\epsilon_s = 0/007, 0/0075, 0/008$ مکانیزم خرابی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی و به ازای کرنش اولیه $\epsilon_s = 0/009$ مکانیزم خرابی کلی را نشان می‌دهد.

۵-۸-۲-۱-۲-۱-۲- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=100$

در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع $1/2\text{cm}^2$ می باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی در شکل (۴۵-۵) نشان داده شده است. این بافتار برای لاغری $L/r=100$ و به ازای کرنش اولیه $\delta_s=0/006$ ، مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل شدگی اعضای کششی و به ازای کرنش های اولیه $\delta_s=0/007$ ، $0/0075$ ، $0/009$ مکانیزم خرابی کلی را به نمایش می گذارد.



شکل (۴۴-۵): تاثیر مقادیر پیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=65$

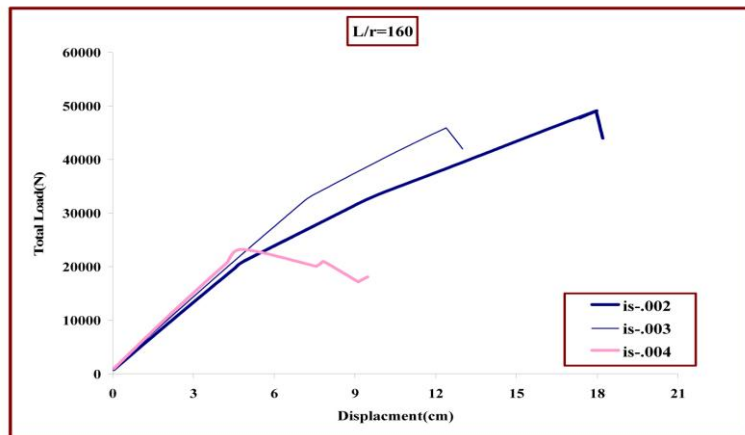


شکل (۴۵-۵): تاثیر مقادیر پیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=100$

۵-۸-۲-۱-۲-۱-۳- مطالعه تحلیلی به ازای $L/r=160$

در این حالت اعضای کششی دارای سطح مقطع $1/15\text{cm}^2$ می باشند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی در شکل (۴۶-۵) نشان داده شده است. در این بافتار برای لاغری $L/r=160$ ، به ازای

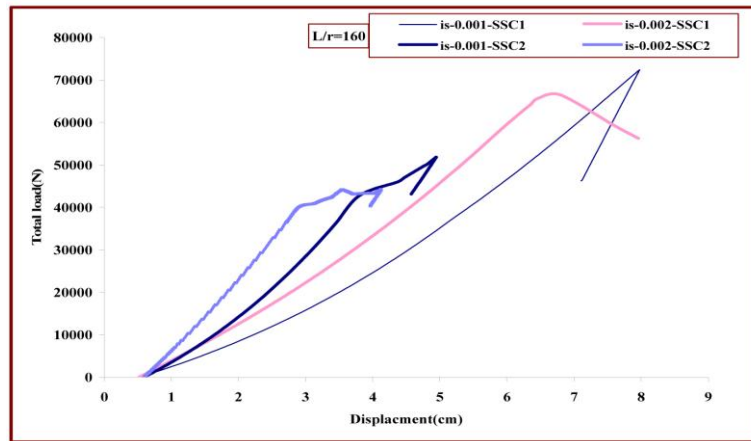
کرنش‌های اولیه $\delta_s=0/002,0/003$ مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل شدگی اعضای کششی و به ازای کرنش اولیه $\delta_s=0/004$ مکانیزم خرابی کلی رخ می دهد.



شکل (۶-۵): تاثیر مقادیر پیش کرنش روی رفتار ناپایداری به ازای $L/r=160$

۵-۸-۲-۱-۲- بررسی تاثیر مقادیر نسبت‌های لاغری اعضای فشاری بر روی رفتار ناپایداری بافتار مذکور

همچنانکه از شکل (۵-۴۷) می توان فهمید این بافتار برای $\delta_s=0/007$ به ازای نسبت لاغری $L/r=65$ مکانیزم موضعی ناشی از شل شدگی اعضای کششی و به ازای $L/r=100$ مکانیزم کلی را به نمایش می گذارد. همچنین برای $\delta_s=0/009$ به ازای نسبت‌های لاغری ۱۰۰، $L/r=65$ مکانیزم خرابی کلی رخ می دهد. مشاهده می شود که با افزایش نسبت لاغری مقاومت اولیه سازه پایین می آید و در ضمن کاهش نامحسوسی در سختی سیستم سازه‌ای مشاهده می شود.



شکل (۵-۴۷): تاثیر نسبت لاغری بر روی رفتار ناپایداری به ازای کرنش‌های اولیه مختلف

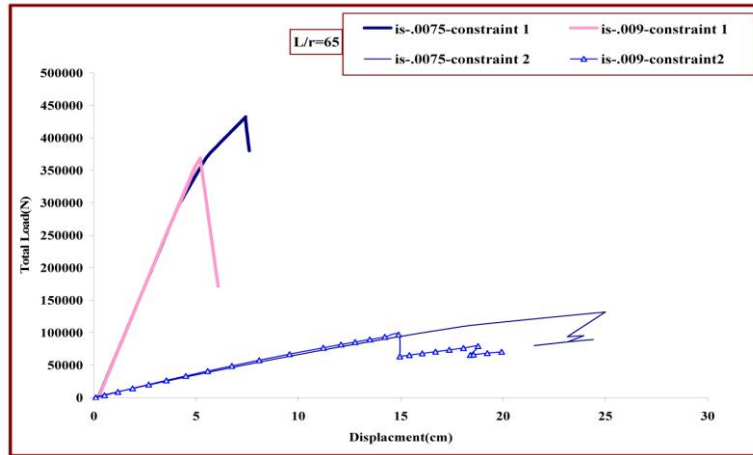
۵-۸-۲- بررسی اثر شرایط تکیه گاهی بر روی رفتار بافتار پیوسته عضو فشاری تحت اثر بارگذاری متقارن

برای بررسی اثر شرایط تکیه گاهی بر روی رفتار بافتار پیوسته عضو فشاری تحت اثر بارگذاری متقارن از نمودارهای مقایسه‌ای شکل‌های (۵-۴۸) تا (۵-۵۰) که در آنها به ازای لاغری‌های مختلف دو نوع شرایط تکیه گاهی مذکور در شکل (۵-۵۰) و کرنش‌های اولیه مختلفی در نظر گرفته شده است، استفاده می‌کنیم.

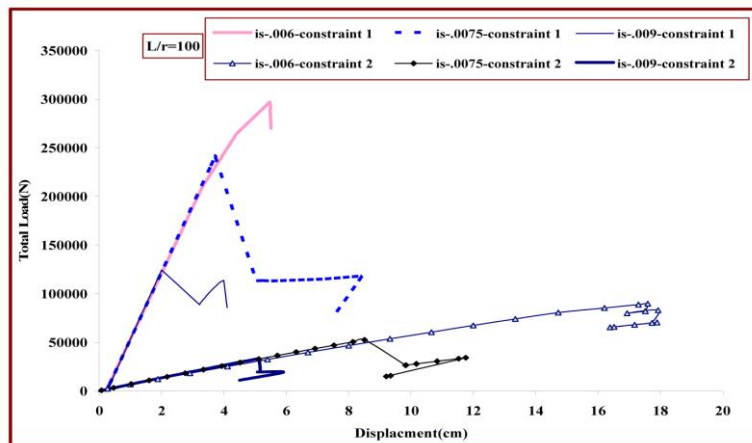
همانطور که از شکل (۵-۴۸) می‌توان فهمید برای نسبت لاغری $L/r=65$ ، به ازای کرنش اولیه $\delta_s=0/0075$ ، در هر دو شرایط تکیه گاهی نوع اول و دوم مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی رخ می‌دهد. ولی به ازای کرنش اولیه $\delta_s=0/009$ ، با در نظر گرفتن شرایط تکیه گاهی نوع اول مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی و در حالت شرایط تکیه گاهی نوع دوم مکانیزم خرابی کلی اتفاق می‌افتد. شکل (۵-۴۹) نشان می‌دهد که برای نسبت لاغری $L/r=100$ ، به ازای کرنش اولیه $\delta_s=0/006$ ، در هر دو نوع شرایط تکیه گاهی مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی و به ازای کرنش‌های اولیه $0/009$ ، $0/0075$ ، در هر دو حالت شرایط تکیه گاهی مکانیزم خرابی کلی رخ می‌دهد.

با توجه به شکل (۵-۵۰) مشاهده می‌شود که برای نسبت لاغری $L/r=160$ ، به ازای کرنش اولیه $\delta_s=0/002$ ، با در نظر گرفتن هر دو نوع شرایط تکیه گاهی مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی رخ می‌دهد. در صورتی که به ازای کرنش اولیه $\delta_s=0/004$ ، در هر دو حالت شرایط تکیه گاهی مکانیزم خرابی کلی اتفاق می‌افتد. در حالت کلی می‌توان گفت که بافتار پیوسته عضو

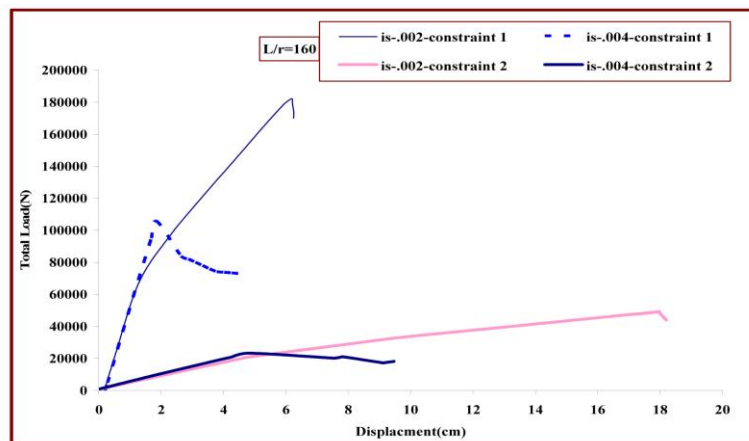
فشاری تحت اثر بارگذاری متقارن با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی نوع اول دارای سختی سازه‌ای و مقاومت بالاتری نسبت به حالت دارای شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم می‌باشد.



(۴۸-۵): بررسی تاثیر شرایط تکیه‌گاهی بر روی رفتار ناپایداری به ازای نسبت لاغری $L/r=65$



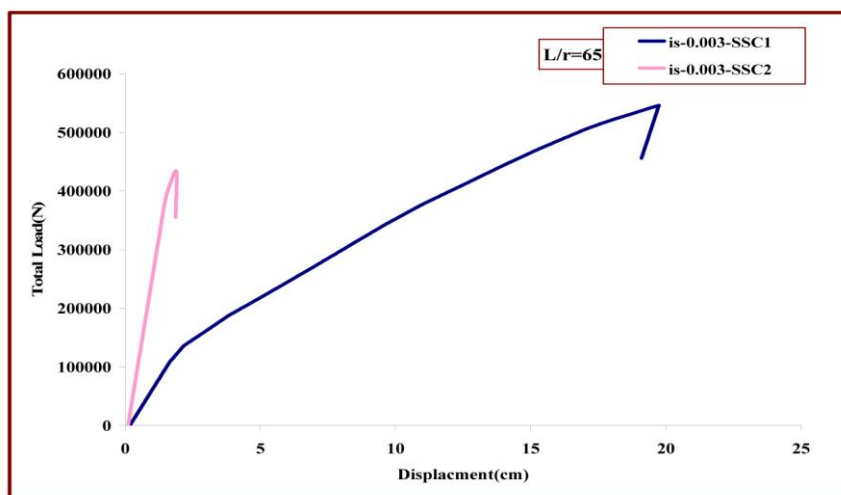
(۴۹-۵): بررسی تاثیر شرایط تکیه‌گاهی بر روی رفتار ناپایداری به ازای نسبت لاغری $L/r=100$



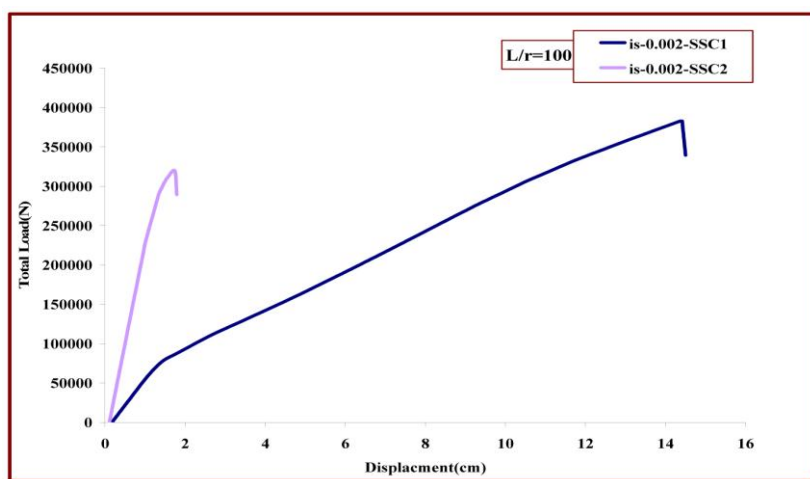
(۵۰-۵): بررسی تاثیر شرایط تکیه‌گاهی بر روی رفتار ناپایداری به ازای نسبت لاغری $L/r=160$

۵-۸-۲-۳- بررسی اثر نمودار تنش - کرنش اعضای کششی بر روی رفتار بافتار پیوسته عضو فشاری تحت اثر بارگذاری متقارن و شرایط تکیه‌گاهی نوع اول
به منظور بررسی اثرات مربوط به نمودار تنش - کرنش اعضای کششی در رفتار بافتار پیوسته عضو فشاری که دارای شرایط تکیه‌گاهی نوع اول و تحت اثر بارگذاری متقارن می‌باشد، از نمودارهای مقایسه‌ای شکل‌های (۵-۵۰) تا (۵-۵۲) که برای نسبت‌های لاغری و کرنش‌های اولیه مختلف با در نظر گرفتن دو نوع نمودار تنش - کرنش نشان داده شده در شکل‌های (۵-۱۱) و (۵-۱۲) رسم شده است، استفاده می‌کنیم.

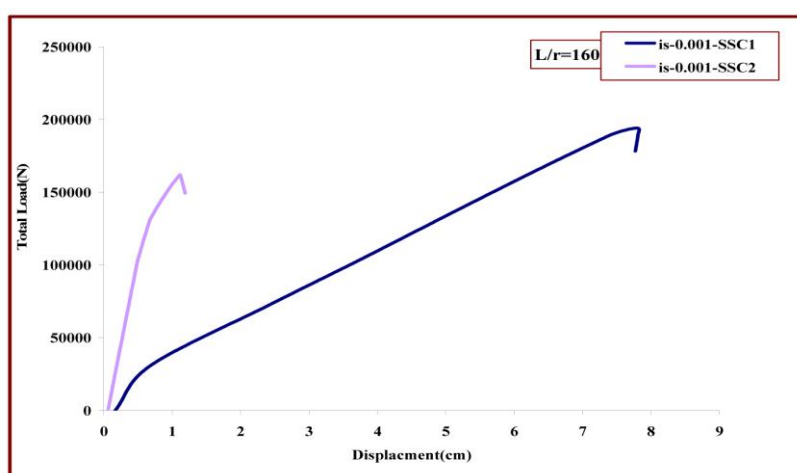
شکل (۵-۵۰) نشان می‌دهد که برای نسبت لاغری $L/r=65$ و کرنش اولیه $\delta_s=0/003$ ، به ازای هر دو حالت $SSC1$ ، $SSC2$ مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی را به نمایش می‌گذارد. از روی شکل (۵-۵۲) مشاهده می‌شود که برای نسبت لاغری $L/r=160$ و کرنش اولیه $\delta_s=0/001$ ، به ازای هر دو حالت $SSC1$ ، $SSC2$ ، مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی رخ می‌دهد. در این بافتار هم، همانند بافتار ناپیوسته مشاهده می‌شود که با یکسان در نظر گرفتن سطح مقطع اعضای کششی و نسبت‌های لاغری اعضای فشاری برای دو حالت نمودار تنش - کرنش اعضای کششی، بافتار دارای $SSC1$ ، در کرنش‌های اولیه خیلی کوچکتر از بافتار دارای $SSC2$ ، پیش تنیده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که مقاومت سازه در حالت $SSC1$ ، بیشتر از حالت $SSC2$ ، و سختی سیستم سازه‌ای در حالت $SSC2$ ، بیشتر از حالت $SSC1$ ، است. بنابراین در این بافتار استفاده از $SSC1$ ، به عنوان نمودار تنش - کرنش مناسب اعضای کششی توصیه می‌شود زیرا در این حالت مقاومت و شکل‌پذیری سازه نسبت به حالت $SSC2$ ، بیشتر است.



شکل (۵-۵۰): بررسی تاثیر نمودار تنش - کرنش اعضای کششی بر روی رفتار ناپایداری برای نسبت لاغری $L/r=65$



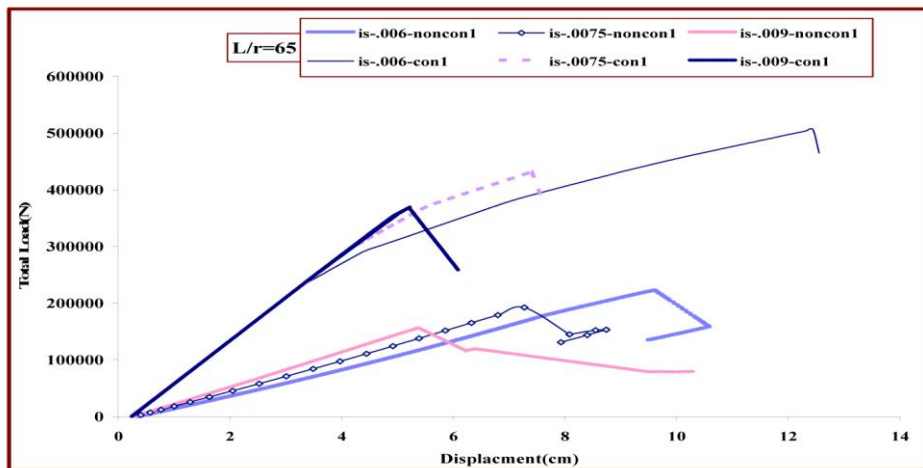
شکل (۵-۵۱): بررسی تاثیر نمودار تنش - کرنش اعضای کششی بر روی رفتار ناپایداری برای نسبت لاغری $L/r=100$



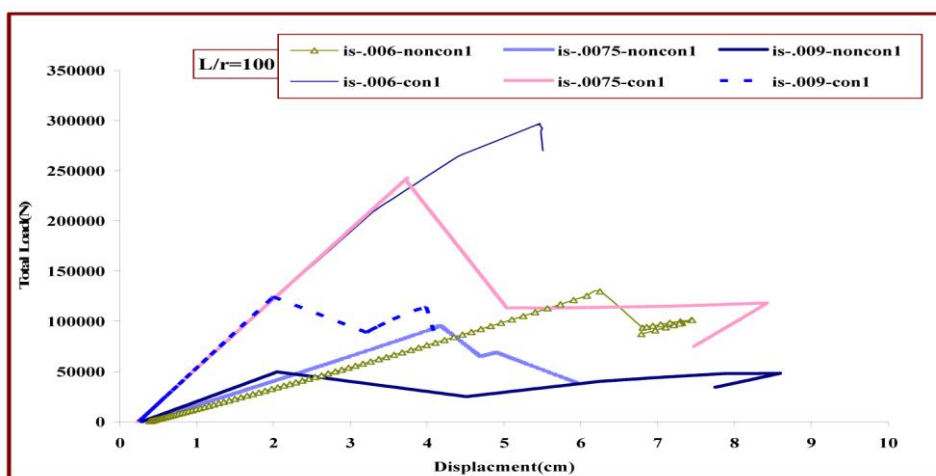
شکل (۵-۵۲): بررسی تاثیر نمودار تنش - کرنش اعضای کششی بر روی رفتار ناپایداری برای نسبت لاغری $L/r=160$

۵-۸-۳-۱- مقایسه رفتار بافتارهای پیوسته و ناپیوسته عضو فشاری با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی نوع اول تحت اثر بارگذاری متقارن

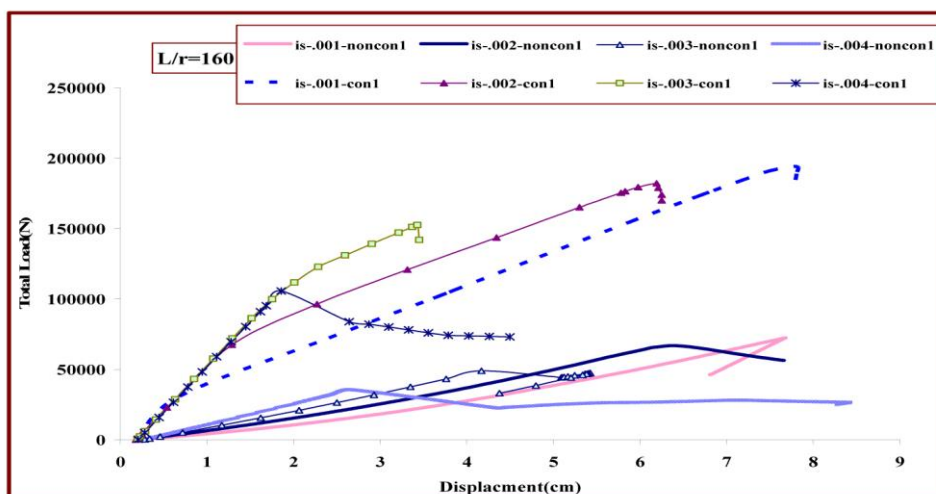
هر چند شرایط تکیه‌گاهی نوع اول در دو بافتار از لحاظ تعداد و محل تکیه‌گاهها متفاوت است (که این تفاوت ناشی از متفاوت بودن دو بافتار است) ولی به دلیل اینکه در شرایط تکیه‌گاهی نوع اول از دو بافتار، تکیه‌گاه‌ها هم در لایه بالا و هم در لایه پایین جایگذاری شده‌اند، این مقایسه را انجام می‌دهیم. در این مقایسه از تحلیل‌هایی که در آنها نمودار تنش - کرنش شکل (۵-۱۱) برای اعضای کششی بکار رفته، استفاده می‌کنیم. در شکل‌های زیر بافتار ناپیوسته عضو فشاری با noncon1 و بافتار پیوسته عضو فشاری با con1 نشان داده شده است. شکل (۵-۵۳) نشان می‌دهد که برای نسبت لاغری $L/r=65$ ، و کرنش اولیه $\delta_s=0/006$ ، هر دو بافتار مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی را به نمایش می‌گذارند در صورتی که برای کرنش‌های اولیه $\delta_s=0/007, 0/009$ ، بافتار ناپیوسته، مکانیزم خرابی کلی و بافتار پیوسته، مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی را به نمایش می‌گذارد. از روی شکل (۵-۵۴) مشاهده می‌شود که برای نسبت لاغری $L/r=100$ ، و کرنش اولیه $\delta_s=0/006$ ، هر دو بافتار مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی را به نمایش می‌گذارند در صورتیکه برای کرنش اولیه $\delta_s=0/0075, 0/009$ ، در هر دو بافتار مکانیزم خرابی کلی رخ می‌دهد. با توجه به شکل (۵-۵۵) می‌توان فهمید که برای نسبت لاغری $L/r=160$ ، به ازای کرنش‌های اولیه $\delta_s=0/001, 0/002$ ، هر دو بافتار مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی را به نمایش می‌گذارند در صورتیکه به ازای کرنش اولیه $\delta_s=0/003$ ، بافتار ناپیوسته مکانیزم خرابی کلی و بافتار پیوسته مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی اعضای کششی را نشان می‌دهد. برای کرنش اولیه $\delta_s=0/004$ ، در هر دو بافتار مکانیزم خرابی کلی مشاهده می‌شود. از روی نمودارهای مقایسه‌ای زیر ملاحظه می‌شود که بافتار ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول دارای مکانیزم‌های خرابی کلی بیشتری نسبت به بافتار پیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول می‌باشد همچنین بافتار پیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول دارای مقاومت سازه‌ای و سختی بیشتری نسبت به بافتار ناپیوسته می‌باشد. بنابراین از بین دو بافتار پیوسته و ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول، بافتار پیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول دارای رفتار مطلوب‌تری می‌باشد.



شکل (۵۳-۵): مقایسه رفتار بافتارهای پیوسته و ناپیوسته با درنظر گرفتن شرایط تکیه گاهی نوع اول و $L/r=65$



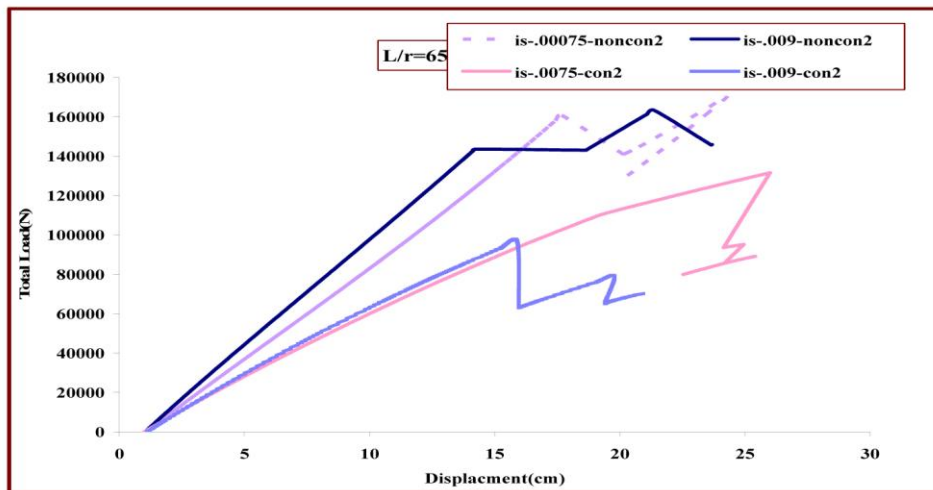
شکل (۵۴-۵): مقایسه رفتار بافتارهای پیوسته و ناپیوسته با درنظر گرفتن شرایط تکیه گاهی نوع اول و $L/r=100$



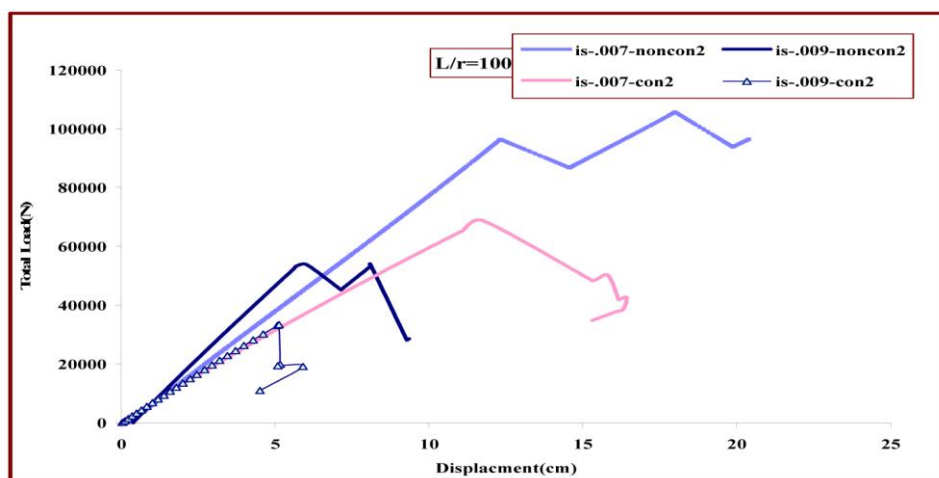
شکل (۵۵-۵): مقایسه رفتار بافتارهای پیوسته و ناپیوسته با درنظر گرفتن شرایط تکیه گاهی نوع اول و $L/r=160$

۵-۸-۳-۲- مقایسه رفتار بافتارهای پیوسته و ناپیوسته عضو فشاری با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم تحت اثر بارگذاری متقارن

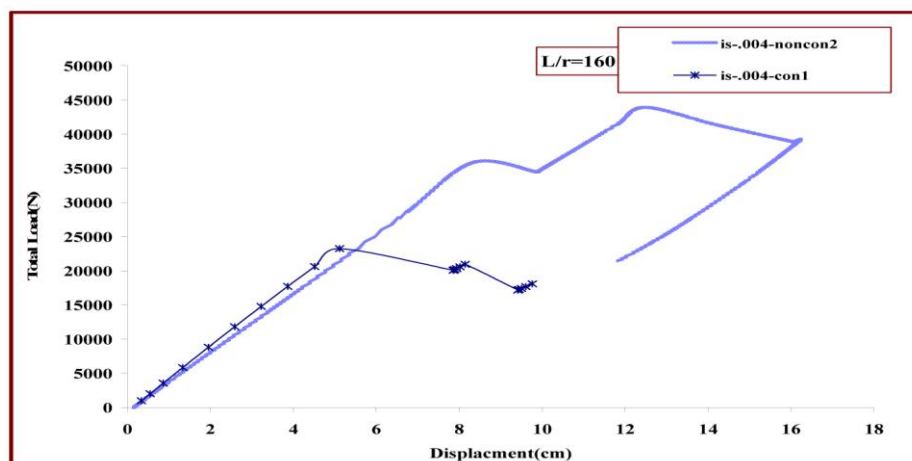
در این قسمت می‌خواهیم مقایسه‌ای را مابین رفتار بافتار ناپیوسته عضو فشاری با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم و بافتار پیوسته عضو فشاری با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم انجام دهیم. در شکل های زیر بافتار ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم با noncon2 و بافتار پیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم با con2 نشان داده شده است. شکل (۵-۵۶) نشان می‌دهد که برای نسبت لاغری $L/r=65$ ، به ازای کرنش اولیه $\epsilon_s=0/0075$ ، بافتار ناپیوسته مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی و بافتار پیوسته مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل شدگی اعضای کششی را به نمایش می‌گذارد. در صورتیکه برای کرنش اولیه $\epsilon_s=0/009$ ، بافتار ناپیوسته مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی و بافتار پیوسته مکانیزم خرابی کلی را نشان می‌دهد. شکل (۵-۵۸) نشان می‌دهد که برای نسبت لاغری $L/r=160$ ، به ازای کرنش اولیه $\epsilon_s=0/004$ ، بافتار ناپیوسته مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی و بافتار پیوسته مکانیزم خرابی کلی را به نمایش می‌گذارد. از روی نمودارهای مقایسه‌ای زیر ملاحظه می‌شود که بافتار پیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم در اکثر موارد مکانیزم خرابی کلی را به نمایش می‌گذارد. در صورتی که بافتار ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم در همه موارد مکانیزم خرابی موضعی را به نمایش می‌گذارد. همچنین بافتار ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم دارای مقاومت سازه‌ای و سختی بیشتری نسبت به بافتار پیوسته می‌باشد. بنابراین از بین دو بافتار پیوسته و ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم، بافتار ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم دارای رفتار مطلوب‌تری می‌باشد.



شکل (۵۶-۵): مقایسه رفتار بافتارهای پیوسته و ناپیوسته با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم و $L/r=65$



شکل (۵۷-۵): مقایسه رفتار بافتارهای پیوسته و ناپیوسته با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم و $L/r=100$



شکل (۵۸-۵): مقایسه رفتار بافتارهای پیوسته و ناپیوسته با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم و $L/r=160$

۹-۵- نتیجه گیری

در این فصل، مکانیزم گسیختگی فشاری روی بافتارهای پیوسته و ناپیوسته عضو فشاری با انعطاف پذیری هندسی مورد مطالعه قرار گرفت. تقسیم‌بندی بافتارهای مورد مطالعه از نظر هندسی به صورت زیر می‌باشد:

۱- بافتار ناپیوسته عضو فشاری که از اتصال راس به لبه سیمپلکس‌های مثلثی ایجاد می‌شوند.

۲- بافتار پیوسته عضو فشاری که از اتصال راس به راس سیمپلکس‌های مثلثی ایجاد می‌شوند.

جهت بررسی اثر شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری، برای هرکدام از بافتارها دو نوع شرایط تکیه‌گاهی در تحلیل خرابی بافتار ناپیوسته عضو فشاری در مبحث گسیختگی فشاری با در نظر گرفتن و شرایط تکیه‌گاهی چهارنوع مکانیزم خرابی مشاهده گردید: ۱- مکانیزم خرابی کلی؛ ۲- مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی؛ ۳- مکانیزم خرابی موضعی بدون فروجهش دینامیکی، ۴- مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل شدگی اعضای کششی.

در جدول‌های (۲-۵) تا (۴-۵) رفتار خرابی بافتار ناپیوسته عضو فشاری با ابعاد مشخص داده شده، شامل هر دو نوع شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری، به ازای نسبت‌های لاغری و کرنش‌های اولیه مختلف داده شده است. در این جدول‌ها، اعداد ۱، ۲، ۳، ۴ به ترتیب بیانگر مکانیزم خرابی کلی، مکانیزم خرابی موضعی همراه با فروجهش دینامیکی، مکانیزم خرابی بدون فروجهش دینامیکی و مکانیزم خرابی ناشی از شل شدگی اعضای کششی می‌باشند. در ضمن SSC1 نشان دهنده نمودار تنش - کرنش عضو کششی شکل (۵-۱۱) و SSC2 نشان دهنده نمودار تنش - کرنش عضو کششی شکل (۵-۱۲) می‌باشد. در این بافتار با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول و نسبت‌های لاغری $L/t=65,100$ در حالت بارگذاری متقارن با افزایش کرنش اولیه، مکانیزم خرابی نوع ۴ به ۱ تبدیل می‌شود که تغییر مکانیزم مطلوبی نمی‌باشد. همچنین با افزایش نسبت لاغری ضمن کاهش مقاومت سازه، کاهش نامحسوسی را هم در سختی سیستم شاهد هستیم. از جدول (۲-۵) و (۳-۵) دیده می‌شود که در این بافتار با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول و بارگذاری متقارن، موقع استفاده از نمودار تنش - کرنش SSC2، که دارای مدول الاستیسیته و تنش گسیختگی بیشتری نسبت به SSC1 می‌باشد، پیش تنیدگی سازه در کرنش‌های اولیه کوچکتری اتفاق می‌افتد که این با توجه به مدول

الاستیسیته بالای SSC2 قابل توجه است. همچنین ملاحظه می‌شود که در شرایط یکسان از نسبت‌های لاغری و کرنش‌های اولیه، در صورت استفاده از SSC1، مکانیزم‌های خرابی مطلوبتری نسبت به حالت استفاده از SSC2، رخ می‌دهد. و در صورت استفاده از SSC1 مقاومت و شکل‌پذیری سازه نسبت به حالت SSC2 بیشتر است. با توجه به جدول (۴-۵) ملاحظه می‌شود که بافتار ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم در حالت بارگذاری مکانیزم‌های خرابی موضعی را به نمایش می‌گذارد که رفتار بسیار خوبی است. در این حالت شرایط تکیه‌گاهی، همانند شرایط تکیه‌گاهی نوع اول مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت لاغری، ضمن کاهش مقاومت سازه، سختی سیستم سازه‌ای نیز کاهش نامحسوسی را از خود نشان می‌دهد. برای بافتار ناپیوسته عضو فشاری مشاهده می‌شود که در حالت بارگذاری متقارن با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی نوع اول سختی سیستم سازه‌ای از شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم بیشتر است و این بافتار با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم شکل‌پذیرتر از نوع اول است. همچنین در شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم مکانیزم‌های خرابی مطلوبتری نسبت به شرایط تکیه‌گاهی نوع اول شاهد هستیم.

جدول (۲-۵): رفتار خرابی بافتار ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول و بارگذاری متقارن با SSC1

0.01	0.009	0.0075	0.006	0.0045	0.004	0.003	0.002	0.001	کرنش اولیه مقادیر لاغری
1	1	1	4	4		4			L/r=65
	1	1	4			4	4		L/r=100
					1	1	4	4	L/r=160

جدول (۳-۵): رفتار خرابی بافتار ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول و بارگذاری متقارن با SSC2

0.003	0.002	0.001	0.0005	0.0003	0.0001	کرنش اولیه مقادیر لاغری
1	1	4	4			L/r=65
	1	1	4		4	L/r=100
	3	3		2	2	L/r=160

جدول (۴-۵): رفتار خرابی بافتار ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم و بارگذاری متقارن

0.011	0.009	0.008	0.0075	0.007	0.005	0.004	0.003	کرنش اولیه مقادیر لاغری
2	2	2	2					L/r=65
	2	2	2	2				L/r=100
				2	2	2		L/r=160

در جدول‌های (۵-۵) تا (۷-۵) رفتار خرابی بافتار ناپیوسته عضو فشاری با ابعاد مشخص داده شده شامل هر دو نوع شرایط تکیه‌گاهی و در حالت بارگذاری، به ازای نسبت‌های لاغری و کرنش‌های اولیه مختلف نشان داده شده است. جدول (۵-۵) نشان می‌دهد که برای این بافتار با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی نوع اول و بارگذاری متقارن با افزایش کرنش اولیه مکانیزم خرابی نوع ۴ به مکانیزم خرابی نوع ۱ تبدیل می‌شود.

از جدول (۵-۵) و (۶-۵) دیده می‌شود که در این بافتار هم، همانند بافتار ناپیوسته با یکسان در نظر گرفتن سطح مقطع اعضای کششی و نسبت‌های لاغری اعضای فشاری برای دو حالت نمودار تنش - کرنش اعضای کششی، بافتار دارای SSC1، در کرنش‌های اولیه خیلی کوچکتر از بافتار دارای SSC2، پیش تنیده می‌شود. در این بافتار برای حالت SSC2، برای کرنش‌های اولیه‌ای که امکان پیش تنیدگی وجود داشته باشد مکانیزم خرابی نوع ۴ رخ می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که مقاومت سازه در حالت SSC1، بیشتر از حالت SSC2، و سختی سیستم سازه‌ای در حالت SSC2، بیشتر از حالت SSC1، است. در این بافتار برای شرایط یکسان از نسبت لاغری و کرنش‌های اولیه تغییری در نوع مکانیزم خرابی دیده نمی‌شود. جداول (۷-۵) و (۸-۵) نشان می‌دهند که برای بافتار پیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم در بارگذاری، با افزایش کرنش اولیه مکانیزم خرابی نوع ۴ به ۱ تبدیل می‌شود که تغییر مکانیزم خوبی نیست. همچنین دیده می‌شود که با افزایش نسبت لاغری مقاومت اولیه سازه پایین می‌آید و در ضمن کاهش نامحسوسی در سختی سیستم سازه‌ای شاهد هستیم.

در بررسی اثر شرایط تکیه‌گاهی بر روی رفتار بافتار پیوسته عضو فشاری می‌توان گفت که با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی نوع اول مکانیزم‌های خرابی کلی کمتری را نسبت به حالت با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم شاهد هستیم. همچنین این بافتار با در نظر گرفتن شرایط تکیه‌گاهی نوع اول دارای سختی سازه‌ای و مقاومت بالاتری نسبت به حالت دارای شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم می‌باشد.

جدول (۵-۵): رفتار خرابی بافتار پیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول و بارگذاری متقارن با SSC1

0.012	0.009	0.0075	0.006	0.0045	0.004	0.003	0.002	0.001	کرنش اولیه مقادیر لاغری
1	4	4	4						L/r=65
	1	1	4	4					L/r=100
					1	4	4	4	L/r=160

جدول (۶-۵): رفتار خرابی بافتار پیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول و بارگذاری متقارن با SSC2

0.003	0.002	0.001	0.0005	0.0003	کرنش اولیه مقادیر لاغری
4	4				L/r=65
	4	4	4		L/r=100
		4	4	4	L/r=160

جدول (۷-۵): رفتار خرابی بافتار پیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم و بارگذاری متقارن

0.009	0.008	0.0075	0.007	0.006	0.004	0.003	0.002	کرنش اولیه مقادیر لاغری
1	4	4	4					L/r=65
1		1	1	4				L/r=100
					1	4	4	L/r=160

مقایسه مابین بافتارهای ناپیوسته و پیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول نشان می‌دهد که بافتار ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول دارای مکانیزم‌های خرابی کلی بیشتری نسبت به بافتار پیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول می‌باشد همچنین بافتار پیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول دارای مقاومت سازه‌ای و سختی بیشتری نسبت به بافتار ناپیوسته می‌باشد. بنابراین از بین دو بافتار پیوسته و ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول، بافتار پیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع اول دارای رفتار مطلوب‌تری می‌باشد. همچنین مقایسه‌ای ما بین بافتار پیوسته و ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم انجام شد و ملاحظه گردید که بافتار پیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم در اکثر موارد مکانیزم خرابی کلی را به نمایش می‌گذارد. در صورتی که بافتار ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم در همه موارد مکانیزم خرابی موضعی را به نمایش می‌گذارد و همچنین بافتار ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم دارای مقاومت سازه‌ای و سختی بیشتری نسبت به بافتار پیوسته می‌باشد. بنابراین از بین دو بافتار پیوسته و ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم، بافتار ناپیوسته با شرایط تکیه‌گاهی نوع دوم دارای رفتار مطلوب‌تری می‌باشد.

فصل ششم

تاشه‌پردازی سازه‌های تنسگریتی

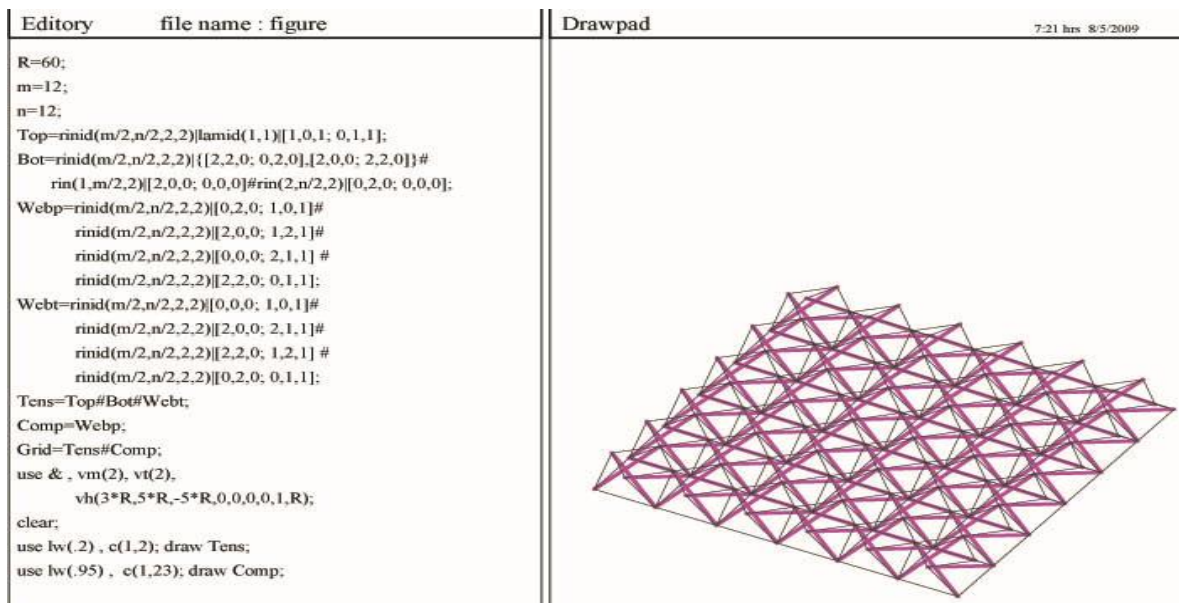
تاشه‌پردازی سازه‌های تنسگریتی

با استفاده از نرم‌افزارهای متفاوت می‌توان تاشه تنسگریتی ایجاد نمود و سپس تاشه را به نرم-افزارهای دیگری که قابلیت تحلیل را دارند انتقال داد. جبر فرمکسی، یک سیستم ریاضی است که پردازش ساختارهای سازه را فراهم می‌کند. شاخه‌ای از جبر فرمکسی که ساختار هندسی را ایجاد می‌کند، تاشه‌پردازی فرمکسی نامیده می‌شود، و وسیله مناسب برای استفاده از مفاهیم تاشه‌پردازی فرمکسی، زبان برنامه‌نویسی فرمین می‌باشد. ساختارهای سازه‌های تنسگریتی بسیار زیبا و در عین حال بسیار پیچیده می‌باشد، لذا استفاده از زبان برنامه‌نویسی فرمین برای تاشه‌پردازی هندسه این سازه‌ها لازم است.

۶-۱- استفاده از نرم‌افزارها برای فرم‌بندی سازه‌های تنسگریتی

۶-۱-۱- نرم‌افزار فرمین

هدف از این بخش، ارائه راهکاری مناسب جهت ترسیم فرم سازه‌های تنسگریتی و تاشه‌پردازی آن در نرم‌افزار فرمین بوده و سپس اطلاعات تولید شده در نرم‌افزار تاشه‌پردازی فرمین به سایر نرم-افزارهای محاسباتی و معماری می‌باشد. بنابراین ابتدا تاشه مورد نظر در نرم‌افزار فرمین تولید می-شود سپس با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار فرمین فایل ایجاد شده را به فرمت دلخواه برای نرم‌افزار دیگر تبدیل می‌کنیم.



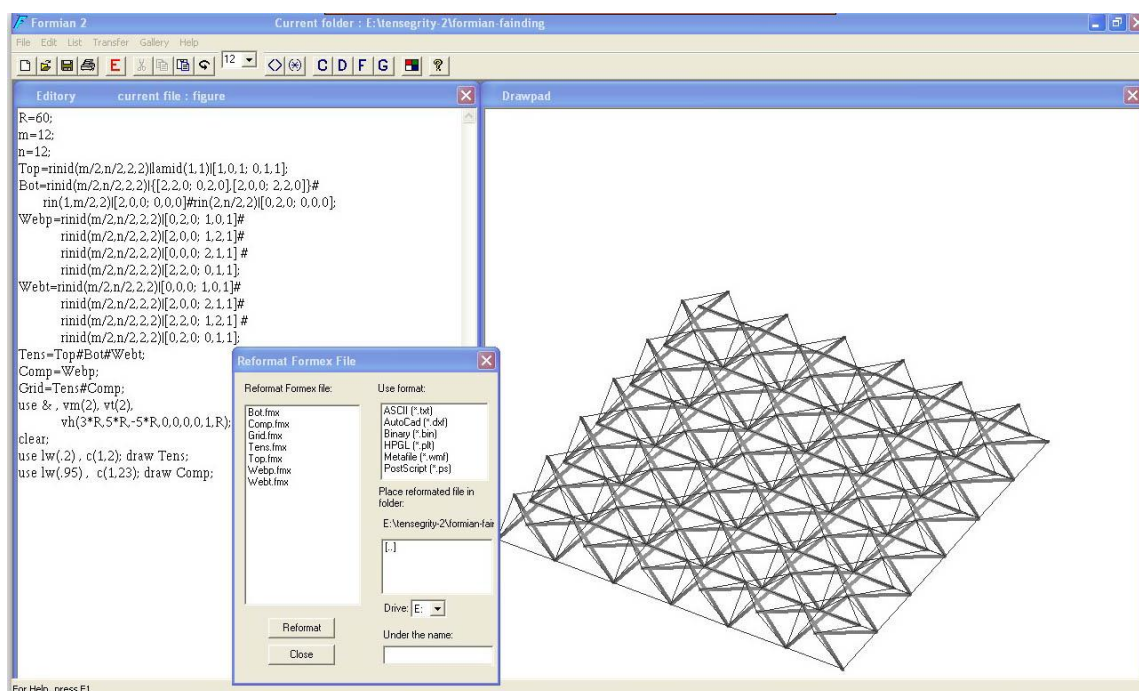
(شکل ۳۲): تاشه‌پردازی در نرم‌افزار فرمین

۶-۱-۲- سایر نرم افزارهای فرم سازی

در این بخش منظور نرم افزارهایی هستند که متفاوت از فرمین بوده ولی توسط آنها نیز می توان شبکه سازه تنسگریتی را ایجاد نمود. از این قبیل نرم افزارها می توان، نرم افزار ATUOCAD,SOLIDWORK,3DMAX و... را نام برد. بنابراین پس از ایجاد فرم بایستی به نرم افزار محاسباتی مورد نظر انتقال داد.

۶-۱-۳- قالب فایل های خروجی در نرم افزار فرمین

در نرم افزار فرمین می توان فرمکس های ایجاد شده را به صورت فایل و در قالب هایی که استفاده در نرم افزارهای دیگری باشند، درآورد. شکل زیر تصویری از محیط نرم افزار فرمین که در آن یک شبکه تخت تنسگریتی تاشه پردازی و ترسیم شده را نشان می دهد.



(شکل ۳۳): فایل های خروجی در نرم افزار فرمین

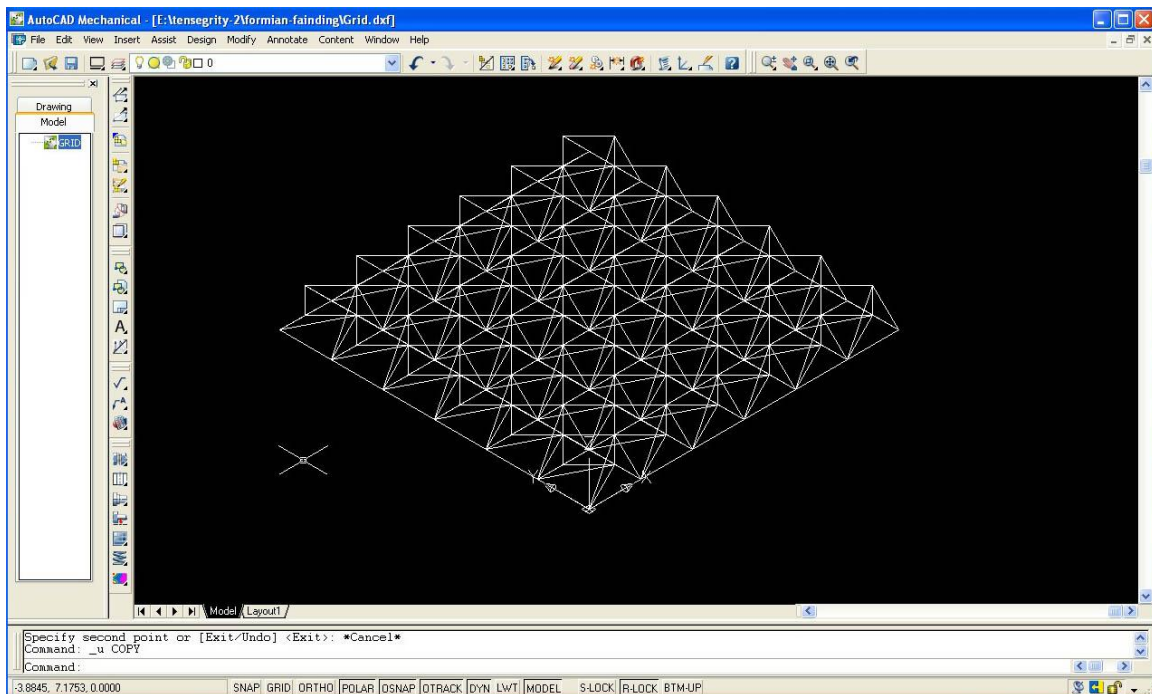
جهت تبدیل متغیر فرمکسی به دیگر قالبها که مورد استفاده در سایر نرم افزارهاست، transfer را از نوار ابزار انتخاب کرده و به فرمت مورد نظر تبدیل می کنیم این نرم افزار قابلیت تبدیل به فرمت هایی همچون dxf,ASCII,Binary و... را دارد.

۴-۱-۶- بررسی فایل متنی ایجاد شده توسط فرمین

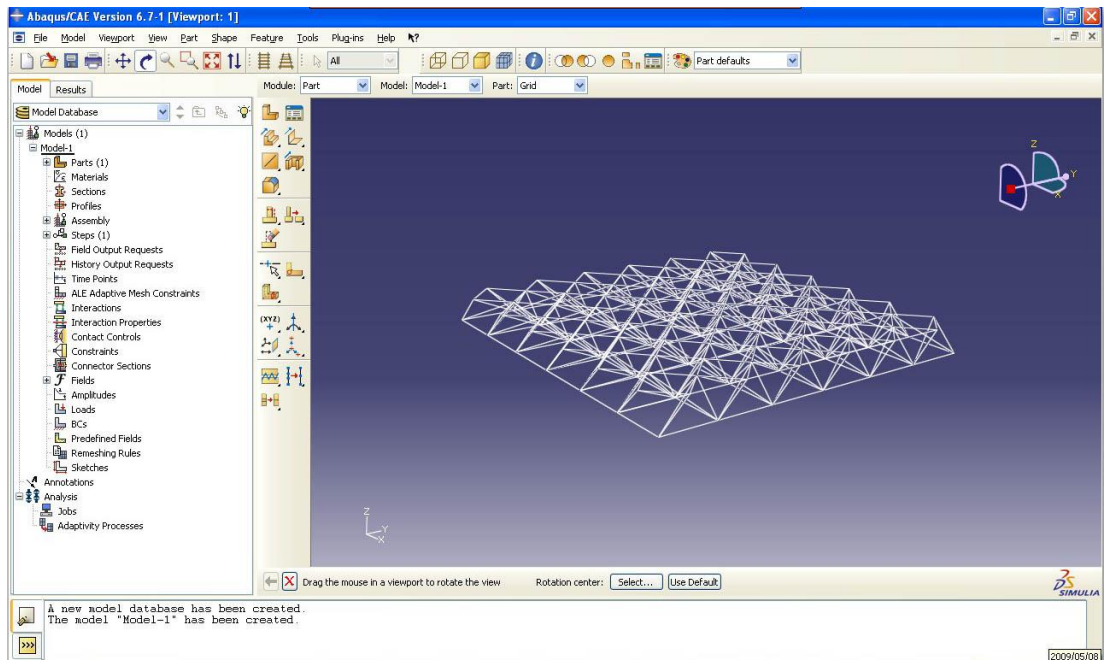
یکی از انواع فایل‌های ایجاد شده توسط فرمین، فایل‌های متنی (یا ASCII) می‌باشد. برای ایجاد کردن یک فایل متنی که حاوی اطلاعات متغیر فرمکسی است. بدین ترتیب عمل می‌نماییم که همانند قسمت ۲، عمل کرده و بجای قالب dxf، قالب ASCII در نظر گرفته شده و متغیر grid به نام grid-2 ذخیره می‌شود.

۵-۱-۶- انتقال اطلاعات فرمکسی از فرمین به نرم‌افزار abaqus

قالب dxf، که ایجاد شده بود، مستقیماً توسط نرم‌افزار abaqus قابل استفاده نمی‌باشد و می‌بایست توسط نرم‌افزار دیگری مانند Mechanical Desktop به قالب iges تبدیل گردد و سپس وارد نرم‌افزار abaqus گردد.



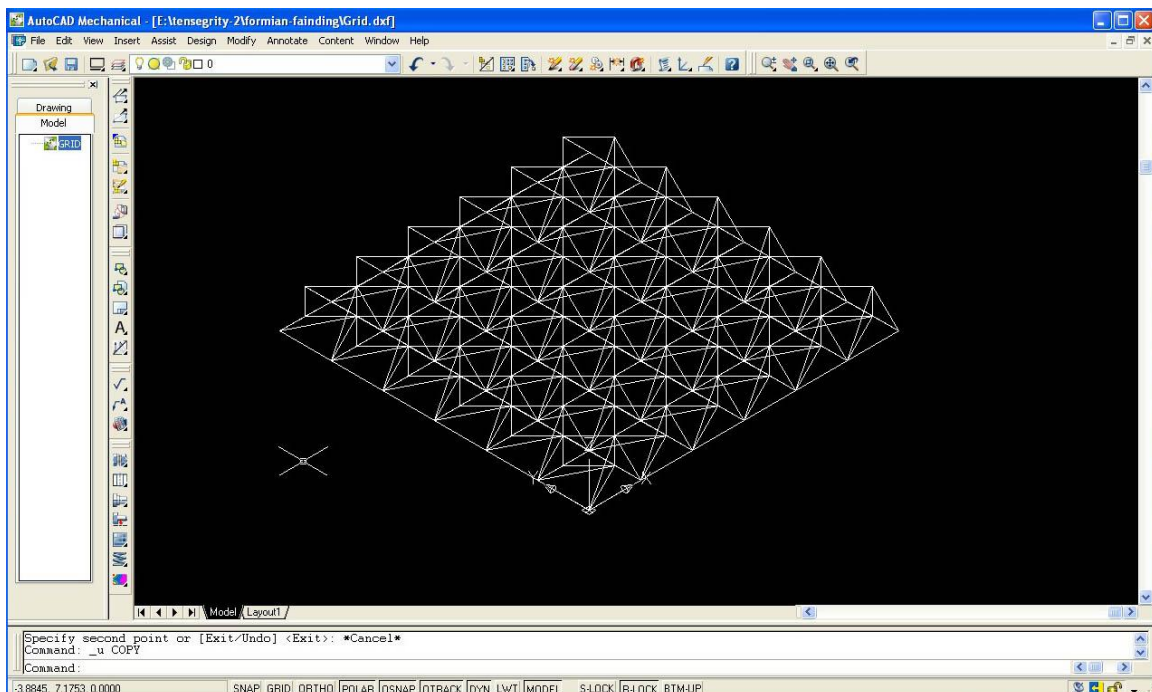
(شکل ۳۴): در نرم‌افزار Mechanical Desktop به قالب iges تبدیل گردد.



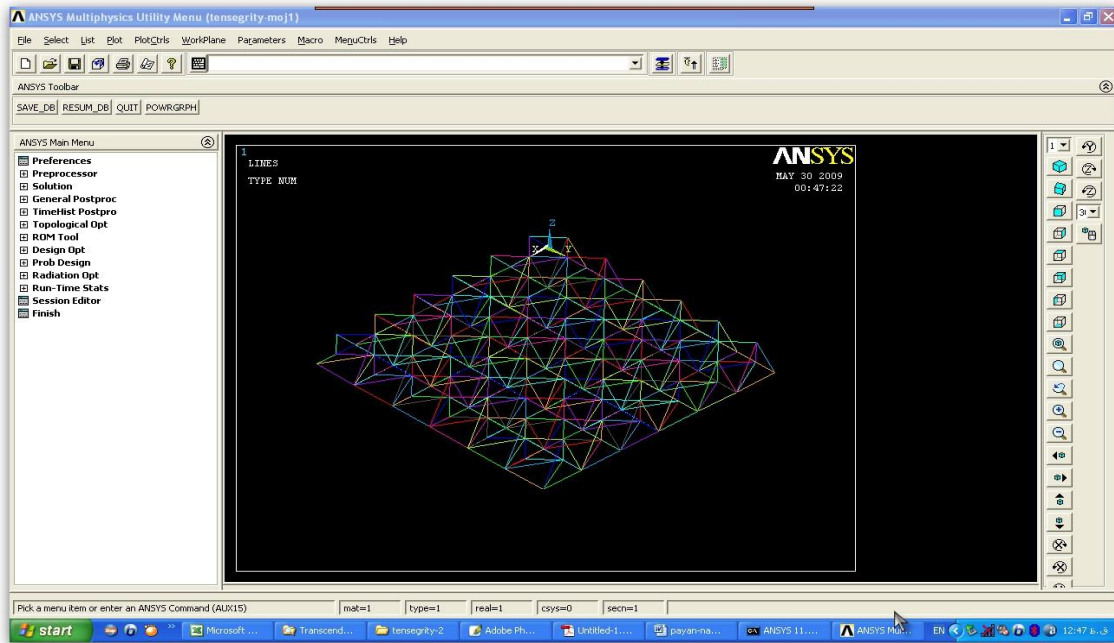
(شکل ۳۵): وارد نرم افزار abaqus می گردد.

۶-۱-۶- انتقال اطلاعات فرمکسی از فرمین به نرم افزار Ansys

قالب dxf ، که ایجاد شده بود، مستقیماً توسط نرم افزار abaqus قابل استفاده نمی باشد و می-بایست توسط نرم افزار دیگری مانند Mechanical Desktop به قالب iges تبدیل گردد و سپس وارد نرم افزار Ansys گردد.



(شکل ۳۶-الف): در نرم افزار Mechanical Desktop به قالب iges تبدیل گردد.



(شکل ۳۶-ب): وارد نرم افزار Ansys می گردد.

فصل هفتم

مثالهای عددی

مثالهای عددی

مثال ۱- در این مثال مقادیر مختصات گرهی به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که صفحات بالا و پایین سمپلکس موازی هستند در چنین شرایطی هم طول واقعی و هم طول آزاد فنرها برابر می‌باشند لذا می‌بایست $l_c = l_c = l_A$ بنابراین با توجه به موقعیت کابل‌ها نیروهای موجود در آنها نیز برابر خواهند بود.

$$d_T = 100\text{cm} \text{ (طول کابل‌های بالا)}$$

$$d_B = 100\text{cm} \text{ (طول کابل‌های پایین)}$$

$$K_A = k_B = K_C = 60\text{N/cm} \text{ (سختی کابل)}$$

$$U = 600\text{N}\cdot\text{cm} \text{ (انرژی پتانسیل مورد نظر)}$$

$$P_1 = [0, 58, 0]\text{cm}$$

$$P_2 = [-50, -29, 0]\text{cm}$$

$$P_3 = [50, -29, 0]\text{cm}$$

$$P_4 = [50, 29, 100]\text{cm}$$

$$P_5 = [-50, 29, 100]\text{cm}$$

$$P_6 = [0, 58, 100]\text{cm}$$

$$UST = 11000\text{kg/cm}^2 \text{ تنش مجاز کابل}$$

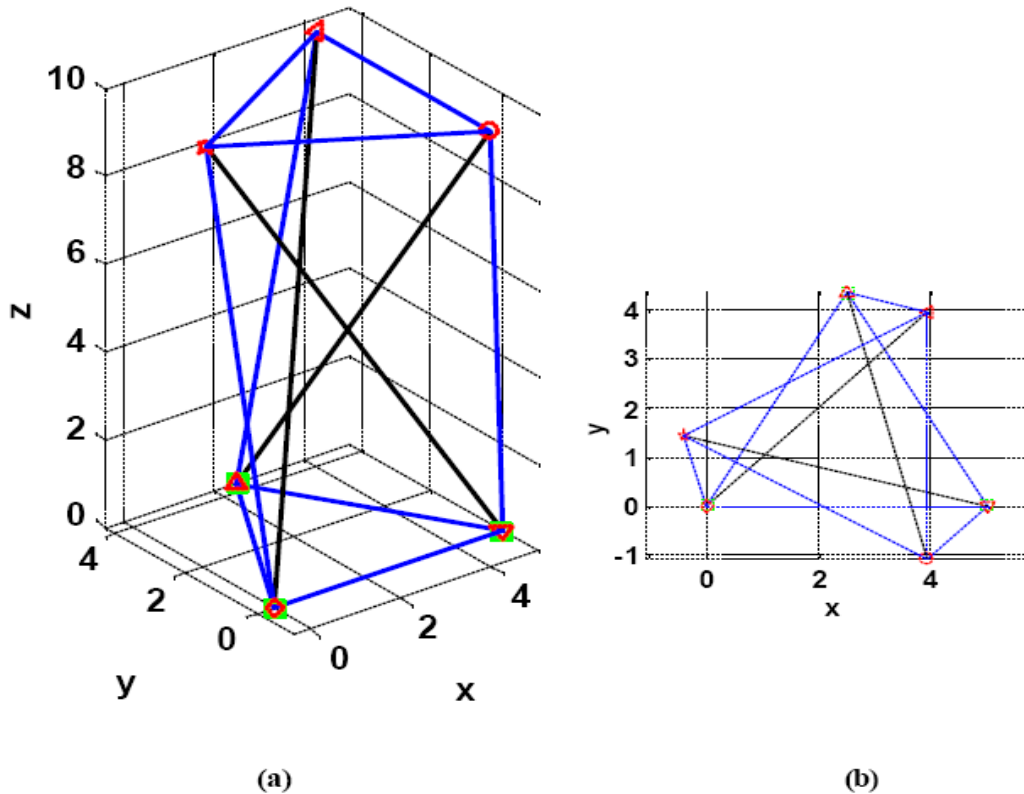
$$USS = 3000\text{kg/cm}^2 \text{ تنش مجاز میله}$$

جدول ۱- نتایج مثال ۱

L_A طول میله A	141	a_A تغییر طول کابل A	1/7mm
L_B طول میله B	141	a_B تغییر طول کابل B	1/7mm
L_C طول میله C	141	a_C تغییر طول کابل	1/7mm
$f_A(N)$ نیروی کابل A	282	L_A طول کابل A	141cm
$f_B(N)$ نیروی کابل B	282	L_B طول کابل B	141cm
$F_C(N)$ نیروی کابل C	282	L_C طول کابل C	141cm

جدول ۲- نتایج بدست آمده از کد الگوریتم ژنتیک

سطح مقطع کابل A	0.9cm^2	سطح مقطع میله A	$4/8\text{ cm}^2$
سطح مقطع کابل B	0.9cm^2	سطح مقطع میله B	$4/8\text{ cm}^2$
سطح مقطع کابل C	0.9cm^2	سطح مقطع میله C	$4/8\text{ cm}^2$



شکل ۱- سیمپلکس مثلثی

با افزایش انرژی پتانسیل نتایج زیر حاصل می‌شود.

$$U=1000\text{N/cm}$$

سطح مقطع کابل A	0.97 cm^2	سطح مقطع میله A	$4/9\text{cm}^2$
سطح مقطع کابل B	0.97 cm^2	سطح مقطع میله B	$4/9\text{cm}^2$
سطح مقطع کابل C	0.97 cm^2	سطح مقطع میله C	$4/9\text{cm}^2$

$$U=1200N/cm$$

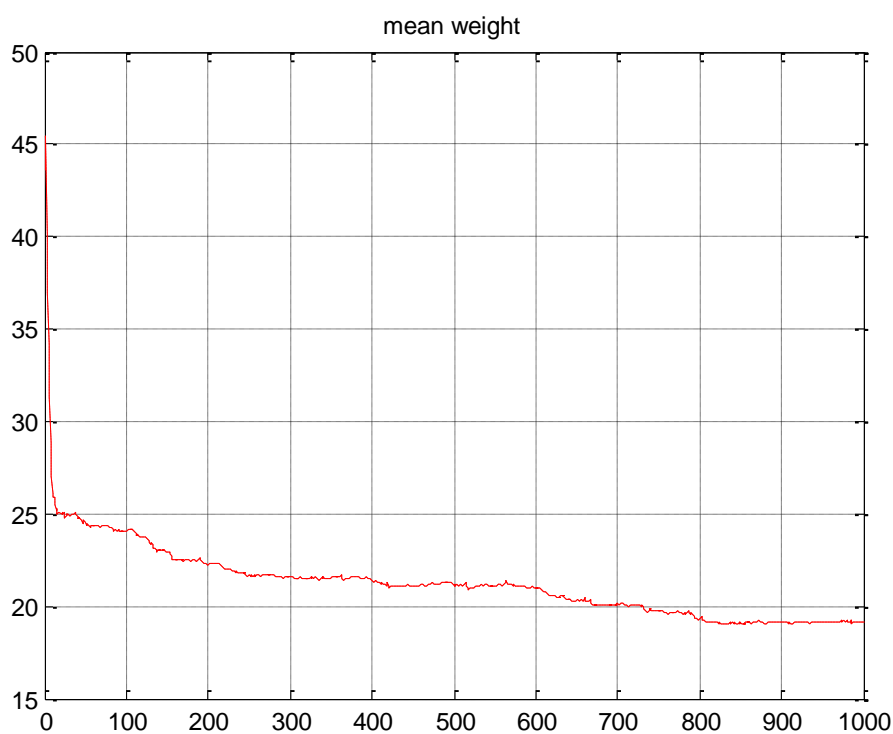
سطح مقطع کابل A	1.1 cm ²	سطح مقطع میله A	4/95 cm ²
سطح مقطع کابل B	1.1 cm ²	سطح مقطع میله B	4/95 cm ²
سطح مقطع کابل C	1.1 cm ²	سطح مقطع میله C	4/95 cm ²

$$U=1400N/cm$$

سطح مقطع کابل A	1.2cm ²	سطح مقطع میله A	5cm ²
سطح مقطع کابل B	1.2cm ²	سطح مقطع میله B	5cm ²
سطح مقطع کابل C	1.2cm ²	سطح مقطع میله C	5cm ²

با افزایش انرژی پتانسیل مشاهده شد که سیمپلکس‌ها به سمت سیمپلکس سنگین میل می‌کند.

شکل ۲ نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک در حل این مثال را نمایش می‌دهد.



شکل ۲- نمودار همگرایی مثال یک

فصل هشتم

نتایج و پیشنهادات

۸-۱- نتیجه گیری

در این پایان نامه موضوع بهینه سازی سازه تنسگریتی مورد بررسی قرار گرفته است بهینه سازی در محیط نرم افزار MATLAB انجام شده است.

از آنجا که در سازه‌های تنسگریتی اعضای فشاری همان مقاطع فولادی هستند اما اعضای کششی کابل می‌باشند این نوع سازه در مقایسه با سایر انواع سازه‌ها از جمله سازه‌های فضا کار بسیار سبکتر بوده و در صورت اجرای مناسب انتظار می‌رود رفتار بهتری در تحریکات ناشی از زلزله داشته باشد به هر حال بهینه سازی سازه تنسگریتی را می‌توان بهینه سازی سازه‌های بهینه دانست.

با در نظر گرفتن ضرایبی به عنوان پارامترهای پنالتهی سعی شده است تا تغییرات سازه بهینه شده در اثر تغییرات پارامترها بررسی گردد و با تغییر پارامترهای پنالتهی (جریمه) از کمترین میزان تا بیشترین میزان سازه‌هایی به دست آمد که از سازه‌های سبک اما غیر قابل اطمینان تا سازه‌های کاملاً قابل اطمینان اما بسیار سنگین دسته بندی می‌شدند در این میان کار کد بهینه سازی و کد آنالیز پیدا کردن سازه‌ای بود که علاوه بر ارضاء قیود طراحی از نظر وزن هم کمترین وزن ممکن را دارا باشد.

روند تغییر پارامترهای پنالتهی از میزان بسیار بزرگ در تکرارهای ابتدایی به مقدار نهایی بسیار کوچک تغییر می‌کرد چرا که در ابتدا نیاز به جستجوی دقیق و کامل فضای جستجو حس می‌گردید نهایتاً می‌بایست بهره وری کد بهینه ساز مورد نظر قرار می‌گرفت تابع هدف تعیین شده برای این مسئله که حساس به نوع عضو و جنس آن می‌باشد راهنمای کد بهینه ساز در رسیدن به جواب نهایی مناسبی می‌باشد هر چه جنس اعضای کششی از مواد سبکتری انتخاب گردد اهمیت آنها در جواب نهایی مسئله کمتر می‌شود و لذا با استفاده از مصالح مناسب و با چگالی یکسان مقادیر بدست آمده برای تابع هدف را که شامل وزن اعضای فشاری سنگین‌تر در برابر اعضای کششی که احتمالاً وزن سبکتری را دارا می‌بودند به سوی جواب مناسب رهنمون می‌گردیم با استفاده از یک ضریب نرمالیزاسیون نیز به این هدف می‌رسیم استفاده از این ضریب نرمالیزاسیون در کارهای بهینه سازی برای کنترل اهمیت و تاثیر گذاری پارامترهای مختلف در جواب نهایی بدست آمده بسیار مهم است.

جهت بدست آوردن سطح مقطع بهینه شبکه‌ها که تا چندی پیش این کار بر اساس تجربه و دید مهندسی صورت می‌گرفت روش علمی ارائه شد که با بهینه سازی سطح مقطع پارامتر اقتصادی وزن سازه کاهش می‌یابد که در کاهش هزینه سازه نقش به‌سزایی دارد با توجه به قدرت کاوش

مناسب الگوریتم ژنتیک این الگوریتم توانمند در بین فضای گسترده مسائل بهینه سازی سازه‌های تنگ‌ریستی به کنکاش پرداخته و پس از گذر تعدادی تکرار تمرکز خود را حین محدوده مناسبی از جواب قرار می‌داد. ترکیب قدرت کاوش مناسب الگوریتم ژنتیک با قدرت بهره‌وری بالای آن باعث شد تا در این پایان نامه از این الگوریتم به عنوان ابزار بهینه سازی استفاده گردد و به نتایج مناسبی نیز رسیده نتایج نهایی به دست آمده از حل مثال‌های نهایی این پایان‌نامه به خوبی بیان‌گر این است که اولاً سازه‌هایی که به عنوان جواب نهایی و از سوی الگوریتم ژنتیک ارائه می‌گردند جواب‌های بسیار مناسب و در حقیقت به جواب نهایی بسیار نزدیک است و از سوی دیگر این جواب‌ها با توجه به حجم عظیم ارزیابی‌های مورد نیاز در حل مسائل بهینه سازی سازه‌ای و به ویژه مسئله بهینه سازی وزن سازه‌های تنسگریتی که فضای جستجوی گسترده‌ای دارد در مدت زمان مناسبی به دست آمده است. دست یابی به این جواب‌ها در مدت زمان کوتاه از طریق روش‌های کلاسیک به هیچ وجه امکان پذیر نبوده و این خود ارزش استفاده از روش‌های ابتکاری را بیش از پیش نمایان می‌سازد.

از بین مکانیزم‌های خرابی، مکانیزم خرابی کلی مطلوب نیست. چرا که این مکانیزم خرابی بدون هیچ علائم هشدار دهنده‌ای، به صورت ترد اتفاق می‌افتد اما مکانیزم‌های خرابی موضعی به دلیل خرابی موضعی، نیز خرابی موضعی ناشی از کم‌انرژی عضو بدلیل حالت شکل پذیری که نسبت به خرابی موضعی با فروجهش دارند.

در مطالعه تحلیلی ساختار مورد نظر تحت مکانیزم گسیختگی فشاری، به ازای مقادیر لاغری زیاد، مشاهده می‌گردد که با افزایش کرنش اولیه، ضمن کاهش مقاومت نهایی، نوع مکانیزم خرابی را تغییر می‌دهد. به طوریکه مکانیزم خرابی کلی به مکانیزم خرابی کلی به مکانیزم خرابی موضعی تبدیل می‌شود. همچنین مشاهده می‌گردد که با افزایش مقدار لاغری مقاومت نهایی کاهش یافته و سازه معمولاً مکانیزم خرابی موضعی را به نمایش می‌گذارد لازم به ذکر است که این ساختار به ازای مقدار لاغری متوسط مکانیزم خرابی موضعی را از خود نشان نمی‌دهد. که این مساله با توجه به سرعت فروریزش بار عضو فشاری به ازای مقدار لاغری نسبت به سایر مقادیر لاغری مورد مطالعه، منطقی به نظر می‌رسد با توجه به رفتار این ساختار به ازای مقادیر لاغری مورد بررسی، مشاهده می‌شود که برای دستیابی به مکانیزم خرابی موضعی مقادیر لاغری زیاد مطلوب می‌باشند ولی با توجه به اینکه مقدار لاغری خیلی زیاد باعث کاهش قابل ملاحظه مقاومت نهایی سازه در مقایسه با مقدار لاغری متوسط، می‌گردد بنابراین استفاده از مقادیر لاغری زیاد (در محدوده $L/r=100$) برای

اعضای فشاری، مطلوب تر است همچنین در محدوده لاغری زیاد و خیلی بزرگ می توان با افزایش کرنش اولیه، در رفتار این ساختار، مکانیزم خرابی موضعی را مشاهده نمود.

با افزایش کرنش اولیه به سمت مکانیزم خرابی موضعی پیش می رویم. در طراحی سازه های تنسگریتی ارجح آن است که: الف، مکانیزم گسیختگی فشاری ملاک عمل قرار گیرد. ب) با مقادیر لاغری بزرگ ($L/r=100$) مکانیزم خرابی موضعی را مشاهده نمودیم، در حالیکه در لاغری متوسط ($L/r=65$) با توجه به اینکه مقاومت نهایی بیشتری در سازه ملاحظه شد، ولی خرابی کلی را مشاهده نمودیم که همیشه باید از مقدار لاغری متوسط اجتناب نمود بنابراین پیشنهاد می شود که در مقادیر لاغری $L/R=100$ مقادیر کرنش های اولیه نسبتاً بزرگ در محدوده 0,01 ملاک طراحی باشد ولی در مقادیر لاغری خیلی بزرگ ($L/R=160$) مقدار کرنش اولیه کوچک در محدوده 0,008 و 0,006 ملاک طراحی باشد.

به طور کلی لزوم اعمال پیش تنیدگی برای ایجاد سختی و عدم وجود سخت شدگی کرنشی برای اعضای کششی (کابل) بعد از ناحیه پلاستیک ملاک عمل است و نتایجی به صورت زیر حاصل شده است:

- با افزایش انرژی پتانسیل سطح مقطع اعضا بیشتر شده و سازه ها به سمت سازه های سنگین تر پیش می روند.

- افزایش سختی المان های کششی (کابل) سازه به سمت سازه سبکتر و بهینه تر میل می کند

- با افزایش کرنش اولیه مکانیزم خرابی کلی به سمت مکانیزم خرابی موضعی پیش می رود

- با افزایش نسبت لاغری ضمن کاهش مقاومت سازه، کاهش را هم در سختی سازه شاهد هستیم.

- در شرایط یکسان نسبت های لاغری و کرنش اولیه در صورت استفاده از SSC1 مکانیزم های خرابی مطلوب تری نسبت به حالت SSC2 رخ می دهد.

- برای بافتار ناپیوسته با شرایط تکیه گاهی نوع اول سختی سازه ای از شرایط تکیه گاهی نوع دوم بیشتر است و بافتار در شرایط تکیه گاهی نوع دوم شکل پذیرتر از نوع اول است.

۲-۸ - پیشنهادات

بررسی بهینه‌سازی رفتار غیرخطی شبکه‌های دولایه و سه لایه بهینه‌سازی سازه‌های تنسگریتی را می‌توان با انواع اتصالات و تحت بارهای دینامیکی، رفتار غیرخطی آنها را بررسی کرد.

۲- بهینه‌سازی شکل شبکه‌های دولایه و سه لایه با متغیر گرفتن وجود یا عدم وجود گره‌ها و از روش الگوریتم ژنتیک می‌توان شکل شبکه‌های دو لایه و سه‌لایه را بهینه کرد.

۳- ادغام الگوریتم ژنتیک با سایر روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی سازه‌های تنسگریتی وقت گیر است، زیرا بیشتر زمان انجام الگوریتم صرف تحلیل سازه‌های فضاکار می‌شود. استفاده از روش‌های تقریبی و یا شبکه‌های عصبی در تحلیل سازه‌های تنسگریتی، نقش بسزایی در کاهش زمان انجام الگوریتم بهینه‌ساز خواهد داشت.

۴- نوشتن یک برنامه بهینه‌ساز برای استفاده عموم مهندسان مانند برنامه sap یا abaqus.

پیوست ۱

```

clear all;
clc;
% barname vorudihai morede niaz ra migirad

% in vorudi ha shamele parametrhaie algorithmhe genetic va shamele

% parametrhaie sazeie tensigrity mibashad

% UST- uss- denss-denst-U-kA-kB-kC-loA-loB-loC

% medol: medole elastisiteie maghate

% UST: tanashe mojaze kablha

% USS: taneshe mojaze mileha

% denss: chegalie marboot be mileha

% denst: chegalie marboot be kablha
%
UST=14000;
USS=3000;
denss=.01;
denst=.01;
r1=1;
r2=1;
filename = input('Enter Output Filename:test.txt ');
mystring = input('Enter Message String:Test Results ');
fp = fopen(filename) ;
fprintf(fp, '%s\n', mystring) ;
U=900;
kA=70;
kB=70;
kC=70;
loA=22;
loB=22;
loC=22;
medol=2e6;
a=[0,0,0];
b=[90,0,0];
c=[46,96,0];
d=[21.865,-14.473,135.0];
e=[91.291,25.778,135.0];
f=[22,65.425,135.0];
% % % LA: toole mileie A

% % % LB: toole mileie B

% % % LC: TOOLE MILEIE c
% % %
LA=sqrt(sum((e-a).^2));
LB=sqrt(sum((f-b).^2));
LC=sqrt(sum((d-c).^2));

F=force(a,b,c,d,e,f);
[w,l]=length_(U,kA,kB,kC,F,a,b,c,d,e,f,loA,loB,loC);

% EMKAN PAZIRIE SAZE BAYAD SANJIDE SHAHAD

```



```

%
% YANI AYA IN SAZE AZ NAZARE FIZIKI EMKAN PAZIR AST???

% DAR INJA BAYAST DAR DAKHELE KABLHA NIROOIE KESHESHI IJAD GARDAD
CHERA KE

% KABLHA NIROOIE FESHARI TAHAMOL NEMIKONANAD
% %
%

for i=1:11
    if F(i)<=0
        if i==1
            disp('The Structure May Not Be in Tensegrity!
FB is Not in Tension!!!')
        else if i==2
            disp('The Structure May Not Be in
Tensegrity! fC is Not in Tension!!!')
        else if i==3
            disp('The Structure May Not
Be in Tensegrity! FA is Not in Compression!!!')
        else if i==4
            disp('The Structure
May Not Be in Tensegrity! FB is Not in Compression!!!')
        else if i==5
            isp('The
Structure May Not Be in Tensegrity! FC is Not in Compression!!!')
        else if i==6

disp('The Structure May Not Be in Tensegrity! T12 is Not in
Tension!!!')

else
if i==7

disp('The Structure May Not Be in Tensegrity! T23 is Not in
Tension!!!')

else if i==8

disp('The Structure May Not Be in Tensegrity! T13 is Not in
Tension!!!')

else if i==9

disp('The Structure May Not Be in Tensegrity! T45 is Not in
Tension!!!')

else if i==10

disp('The Structure May Not Be in Tensegrity! T56 is Not in
Tension!!!')

else if i==11

disp('The Structure May Not Be in Tensegrity! T46 is Not in
Tension!!!')

end

```



```

S14=(d-a)/sqrt(sum((d-a).^2));
S25=(e-b)/sqrt(sum((e-b).^2));
S36=(f-c)/sqrt(sum((f-c).^2));
S15=(e-a)/sqrt(sum((e-a).^2));
S26=(f-b)/sqrt(sum((f-b).^2));
S12=(b-a)/sqrt(sum((b-a).^2));
S23=(c-b)/sqrt(sum((c-b).^2));
S34=(d-c)/sqrt(sum((d-c).^2));
S45=(e-d)/sqrt(sum((e-d).^2));
S56=(f-e)/sqrt(sum((f-e).^2));
S46=(f-d)/sqrt(sum((f-d).^2));
S13=(c-a)/sqrt(sum((c-a).^2));

J=[0,0,-S15(2),0,0,S12(2),0,S13(2),0,0,0;
    0,0,-S15(3),0,0,S12(3),0,S13(3),0,0,0;
    S25(1),0,0,-S26(1),0,-S12(1),S23(1),0,0,0,0;
    S25(2),0,0,-S26(2),0,-S12(2),S23(2),0,0,0,0;
    S25(3),0,0,-S26(3),0,-S12(3),S23(3),0,0,0,0;
    0,0,0,0,S34(1),0,0,0,S45(1),0,S46(1);
    0,0,0,0,S34(2),0,0,0,S45(2),0,S46(2);
    0,0,0,0,S34(3),0,0,0,S45(3),0,S46(3);
    0,-S36(1),0,S26(1),0,0,0,0,0,-S56(1),-S46(1);
    0,-S36(2),0,S26(2),0,0,0,0,0,-S56(2),-S46(2);
    0,-S36(3),0,S26(3),0,0,0,0,0,-S56(3),-S46(3)];

% dastoore inv makusse matriss ra be dast dade ast
J_inv=inv(J);

RS=[-S14(2);-S14(3);0;0;0;S14(1);S14(2);S14(3);0;0;0];

F=J_inv*RS;

%

forces_sum=-F(2)*S36-F(10)*S56-F(11)*S46+F(4)*S26;
moment=cross((f-b),-F(10)*S56)+cross((f-b),-F(11)*S46)+cross((f-b),-
F(2)*S36);

% paiane analiz

tic          % zaman ra be dast midahad

%%%%%%%%%%for see evaluation%%%%%%%%%%

ave_aff(1:20)=0; % miangine fit ha
for loop=1:1

    % loop varaie iteration

%%%%%%%%%%

```

```

N=100;           % tedade chromosome

Pc=.5;          %crossover

L1=0.3;         % cross over real chromosome baraie mesal
off1=L1*off1+L2*off2

L2=0.7;         % for cross over real chromosome baraie mesal
off2=L1*off2+L2*off1

Pm=.005;        %jahesh

delta=.5;       % baraie ijade jahesh chegoone amal konim?
x'=x+randn*delta

it=1000;        % tedade iteration
m=6;
mem=1;%

Lo=[0].*ones(1,m); % hade paiene har moteghaier

Hi=[10].*ones(1,m); % hade balaie har moteghaier
Population=rand(N,m);
penalty1=zeros(N,1);
penalty2=zeros(N,1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ijade jamiate avalie

[real_val]=norm2real(Population,N,Lo,Hi);

for iteration=1:it
    iteration
    u=iteration;
if iteration>=90
    r1=1100000;
else if iteration>=70
    r1=990000;
    else if iteration>=40
    r1=9500;
    else if iteration>=20
    r1=1000;
        else if iteration>=1
            r1=10;
        end
    end
end
end
if iteration>=90
    r2=8000;
else if iteration>=70
    r2=2000;
    else if iteration>=40

```

```

        r2=100;
    else if iteration>=20
        r2=10;
        else if iteration>=1
            r2=1;
        end
    end
end
end

    for i=1:N

denss=.01;
denst=.01;
%

rrr=real_val/pi;
rrr=(rrr).^5;

% real_val jamiate avalie ( tekrare aval)

% real_val matrise shamele sath maghta haie taghier yafte (
tekrarehaie bad az 1)

% rrr: shoaie maghta

% A=pi*(r^2)

%hold on

    %end
    penalty1=zeros(N,1);

% penalty1 : penalty1 marboot be taneshe mileha

    penalty2=zeros(N,1);
% penalty2 : penalty1 marboot be taneshe kablha

% penalty3: penalty3 marboot be lagharie aza

weight(i,1)=(denss*((LA*real_val(i,1))+(LB*real_val(i,2))+(LC*real_val(i,3))))+(denst*((LA*real_val(i,4))+(LB*real_val(i,5))+(LC*real_val(i,6))));

    end

% estefade az tabe jarimeie daraje 2

% ((stress mojud/stress momken)-1)^2

for j=1:N
    for i=1:3
        if abs(v(i,1)/(real_val(j,i)*UST))<=1

```

```

        penalty1(j,1)=penalty1(j,1)+0;
    else
        najaf=1-(abs(v(i,1)/(real_val(j,i)*USS)));
        najaf=najaf^2;
        penalty1(j,1)=penalty1(j,1)+najaf;
    end
end
end
for j=1:N
    for i=4:6
        if abs(v(4,1)/(real_val(j,i)*USS))<=1
            penalty2(j,1)=penalty2(j,1)+0;
        else
            najaf=1-(abs(v(i,1)/(real_val(j,i)*UST)));
            najaf=najaf^2;
            penalty2(j,1)=penalty2(j,1)+najaf;
        end
    end
end
end
% pcr nirooie oiler

moment=(pi/4)*(rrr.^4);
pcr=(pi^2)*medol*moment;
pcr(:,4)=pcr(:,4)/(LA^2);
pcr(:,5)=pcr(:,5)/(LB^2);
pcr(:,6)=pcr(:,6)/(LC^2);
pcrm(1:100,1)=pcr(:,4)-(FA*ones(100,1));
pcrm(1:100,2)=pcr(:,5)-(FB*ones(100,1));
pcrm(1:100,3)=pcr(:,6)-(FC*ones(100,1));
penalty3=zeros(N,1);
for ttt=1:100
    for jjj=1:3

        if pcrm(ttt,jjj)<0
            penalty3(ttt,1)=penalty3(ttt,1)+pcrm(ttt,jjj)^2;
        end
    end
end
r3=10000;
%
fit=(weight+(r1*penalty1+r2*penalty2+r3*penalty3));
for kkkk=1:N;
    fit(kkkk,1)=1/fit(kkkk,1);
end

% pcr=pi^2*e*i/l^2

%   weight vazne saze
%
%
% fit : fit vazne eslah shode ba penaltyha

% i=(pi*r^4)/4

selection_probablity=fit/sum(fit); % shans entekhabe har saze ya
koromozom

```



```

ave_fit=mean(fit);
[min_fit,min_loc]=min(fit);
opt_sol=real_val(min_loc,:);
[max_fit,max_loc]=max(fit);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if u==1
    resultt{iteration}(loop,:)=real_val(min_loc,:);
    best_sofar(iteration,loop)=min_fit;
elseif min_fit<best_sofar(iteration-1,loop)
    resultt{iteration}(loop,:)=real_val(min_loc,:);
    best_sofar(iteration,loop)=min_fit;
else
    resultt{iteration}(loop,:)=resultt{iteration-1}(loop,:);
    best_sofar(iteration,loop)=best_sofar(iteration-1,loop);
end
avg_fit(iteration,loop)=ave_fit;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%

[mating_pool]=g_roulette_wheel(real_val,N,selection_probablity);
%

[popnew]=g_crossover(mating_pool,Pc,N,m,L1,L2,Lo,Hi);

[real_val]=g_mutation(popnew,Pm,N,m,delta,Lo,Hi);

% v nirooie mohasebe shode baraie saze
%
%
%
%
%

if v(1,1)-v(2,1)<=1
    for i=1:N
        real_val(i,2)= real_val(i,1);
        real_val(i,3)= real_val(i,1);
    end
end
if v(4,1)-v(5,1)<=1
    for i=1:N
        real_val(i,5)= real_val(i,4);
        real_val(i,6)= real_val(i,4);
    end
end
end
% real_val=sort(real_val,'descend');
meanw(1,iteration)=mean(weight);

```

```

end

% tanesh=niroo/ sathe meghta

% in mizan dar mohaseebeie penalty ha lafaz mishavad

%%%%%%%%%%for see evaluation%%%%%%%%%%

% offspring= .3*parent+.7 * parent

end
% r1: mizane penalty parametr motenazer ba penalty1

% r2: mizane penalty parametr motenazer ba penalty1

% r3: mizane penalty parametr motenazer ba penalty3
for i=1:it
    best_sofar_kool(i,1)=mean(best_sofar(i,:));
    [temp tr]=min(best_sofar(i,:));
    minnx_bestofar(i,1)=min(best_sofar(i,:));
    b_result(i,:)=resultt{i}(tr,:);
end
    opt_sol=b_result(it,:)
mean_best_so_far=mean(best_sofar(it,:))
min_f=min(best_sofar(it,:))

T_Ave_fit=mean(avg_fit,2);
figure(1),plot(best_sofar_kool,'-r'),grid,title('best_sofar')
hold on
figure(1),plot(T_Ave_fit,'r')
hold off;
xxx=1:it;
yyy=meanw;
figure(2),plot(yyy,'-r'),grid,title('mean weight')
hold on
figure(2),plot(yyy,'r')
hold off;

```

مراجع و منابع

reference

- [1] D. E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison Wesley, Reading, MA, 1989.
- [2] T. Blickle, and L. Thiele. A Comparison of Selection Schemes used in Genetic Algorithms, TIK- Report, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, 1995.
- [3]. Rajeev, S. and Krishnamorthy. C.S. "Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithms", J. Struct. Engng, ASCE, Vol.118, No.5,1233-1250,1992.
- [4] Holland, J.H. "Adaptation in Natural and Artificial Systems", University of Michigan press, Ann Arbor, Mich, 1975.
- [5] Chen, T.Y. and Chen, C. J., (1997), "Improvements of simple Genetic Algorithms in structural Design," International J. for Numerical Methods in Engng, 40, pp 1323-1334.
- [6].Vafaie, H., and De Jong, K., "Genetic algorithms as a tool for feature selection in machine learning", Proc. of the 4th Int. conference on tools with artificial intelligence,pp.200-204 Arlington,VA, 1992.
- [7].Vafaie,H. and Imam,I., "Feature selection methods: genetic algorithms vs. greedy-like search". Proc. of the Int. conference on fuzzy and intelligent control systems, 1994.
- [8] Masic, M. and R.E. Skelton (2001). Open-loop controlled deployment of stable unit tensegrity structures.In: 3rd World Conference on Structural *Control*. Como,Italy, 07–12 April
- [9] M. Masic, R.E. Skelton, and P. Gill. Algebraic tensegrity form-
_nding.International Journal of Solids andStructures-submitted 11-07-2003..
- [10]. R. Motro. Tensegrity systems: The state of the art. International Journal of Space Structures, 7(2):75{83, 1992.
- [11]. Snelson, K. (1965). Continuous tension, discontinuous compression structures. *U.S. Patent 3,169,611*.
- [12]Kenner, H., Geodesic Math and How to Use It, University of California Press, Berkeley and Los Angeles, California, 1976.
- [13]. Knight, B.F., Deployable Antenna Kinematics using Tensegrity Structure Design, Doctor of Philosophy Dissertation, University of Florida, Gainesville, 2000.
- [14]Tobie, R.S., A Report on an Inquiry into The Existence, Formation and Representation of Tensile Structures, Master of Industrial Design Thesis, Pratt Institute, New York, 1976.
- [15]Stern, I.P., Development of Design Equations for Self-Deployable N-Strut Tensegrity Systems, Master of Science Thesis, University of Florida, Gainesville, 1999.

- [16]. Sultan , C. Corless , M., skelton., " The Prestressability Problem of Tensegrity Structures: some Analytical Solution ;, International Journal of Solids and
- [17]. Hanaor , A., "Geometrically Rigid Double –Layer Tensegrity Grids "International Journal of Space Structures , Vol.9, No. 4,1994.
- [18]. Motro, R., " Tensegrity : State - of – the Art", Space Structures 5 , Thomas Telford , London,2002
- [19]. Murakami , h. , "Static and Dynamic Analysis of Tensegrity Structures. Part 1.Nonlinear equation of motion " , International Journal of Solids and Structures 38 (2001)3599-3613..
- [20]. Wang , C.J., Qian,. R. J and Wang , R.P. , "the Geometrical Stability and Prestress Analysis for Tensegrity Elements " ,. IASS symposium 2001 , Nagoya.
- [21].Motro, R., “ Tensegrity: State-of-the-Art”, Space Structure 5 , Thomas ,Telford,London 2002
- [22]. Skelton, R.E., “Smart Tensegrity Wings”, Structural Systems and Control Laboratory
School of Engineering, UCSD, 2003
- [23]. Hanaor , A., "Geometrically Rigid Double –Layer Tensegrity Grids "International Journal of Space Structures , Vol.9, No. 4,1994.
- [24]. Wang bin bing “ Free-standing tension structures from tensegrity systems to cable-strut systems” spon press, taylor& francis group , London and newyork.
- [25]. sheidaii, M.R., Abdi, k. and Behravaesh , A., "Collapse Behaviour of Double Layer space Trusses" , IASS symposium 2001 , Nagoya.
- [26].Luo, Y.Z., Fu Gang, Chen Ting. (2004) The Experimental _Research on Combined Unit of Flat-Quadrprism_Tensegrity. IASS Symposium, Montpellier
- [۲۷] جلیلی، محسن.، "معرفی سازه‌های تنسگریتی" پایان نامه .کارشناسی ارشد، بخش مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۸.



دانشکده فنی مهندسی
پایان نامه کارشناسی ارشد

بهینه سازی سازه‌های تنگ‌ریتی

استاد راهنما:

دکتر علی کیهانی

دانشجو:

احمد نجفعلی

زمان:

دوشنبه

ساعت:

مکان:

سمعی و بصری دانشکده عمران

بهمن ماه ۱۳۹۰