





دانشکده فنی مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی سازه تنسگریتی برای کاربری سقف مسطح

محسن جلیلی

استاد راهنما:

دکتر علی کیهانی

تیر ماه ۱۳۸۸

## تقدیر و تشکر

اکنون که با یاری خداوند متعال، فصلی دیگر از زندگی و مقطعی دیگر از تحصیل را به پایان رسانده‌ام شایسته می‌دانم، زحمات و راهنمایی‌های کلیه معلمان و اساتید دوران تحصیلم را ارج نهاده و مراتب تشکر قلبی و باطنی خویش را از نقش اساسی و ماندگار آنها ابراز دارم.

ابتدا بر خود لازم می‌دانم از زحمات فراوان و کارگشای استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر علی کیهانی که با راهنمایی‌های ارزنده خود، نقش مهمی در به ثمر رسیدن این پایان نامه داشته‌اند، صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم.

همچنین از اساتید گرامی و ارجمندم جناب آقای دکتر بهروز حسنی، جناب آقای دکتر وحیدرضا کلاتجاری جناب آقای دکتر فرشید علایی که افتخار شاگردی در محضر گرانقدرشان را داشته‌ام، تقدیر و تشکر نمایم.

در پایان از زحمات مشفقانه و بیدریغ خانواده عزیز و بزرگوارم که همیشه سر آغاز خوبی و نهایت مهربانی بوده‌اند و در تمامی مراحل زندگی حامی، پشتیبان و مشوق من بوده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

## تعهد نامه

اینجانب محسن جلیلی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد عمران-سازه دانشکده فنی-مهندسی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی سازه تنسگریتی برای کاربری سقف مسطح تحت راهنمایی دکتر علی کیهانی متعهد می شوم:

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

تاریخ:

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده

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<sup>۱</sup>، گنبد‌های کروی، دکل‌ها، شبکه‌های کابلی، سیستم‌های غشایی<sup>۲</sup>، سازه‌های تاشو<sup>۳</sup> و تنسگریتی‌ها<sup>۴</sup> هستند. سازه‌های تنسگریتی شامل مجموعه ناپیوسته‌ای از عناصر فشاری در داخل مجموعه پیوسته‌ای از عناصر کششی می‌باشند که به وسیله حالت خودتنیدگی<sup>۵</sup> پایدار می‌شوند. در سازه‌های تنسگریتی 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 تنسگریتی 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 سازه‌های تنسگریتی، انواع مدول‌ها مورد بررسی قرار گرفت. سپس مسئله انتخاب مناسب‌ترین آرایش برای پوشش تخت مورد بحث قرار گرفت. برای ادامه کار، ساختار تنسگریتی با ترکیب مدول‌های هرمی با چهار عضو فشاری که در نهایت با آرایش پیوسته، سطح مشبک تختی را ایجاد نموده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته شده است. سپس رفتار خرابی این سازه تحت بارگذاری استاتیکی، با انجام تحلیل‌های غیرخطی هندسی و رفتار غیرخطی مصالح به روش اجزا محدود بررسی شده است. در مدل سازی غیرخطی برای اعضای کششی، رفتار تنش - کرنش مصالح به صورت چند خطی ایزوتروپیک در نظر گرفته می‌شود. بدین معنی که تا نقطه تسلیم، رابطه تنش - کرنش به صورت خطی و پس از آن به صورت غیرخطی غیر ارتجاعی می‌باشد. در مدل سازی غیرخطی برای عناصر

---

<sup>1</sup> Barrel Vaults

<sup>2</sup> - Membrane Systems

<sup>3</sup> - Foldable Structures

<sup>4</sup> - Tensegrity Structures

<sup>5</sup> - self stressing

فشاری از پاسخ‌های تنش - کرنش محوری اعضای فشاری در حضور نقص اولیه استفاده شده است. مدل سازی رفتار اعضا شامل پاسخ غیر الاستیک پس کمانشی اعضای فشاری با مد نظر قرار دادن نقص اولیه و گسیختگی غیر خطی اعضای کششی می‌باشد. تأثیر پیش تنیدگی و نقص اولیه در مکانیزم‌های گسیختگی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. بر اساس تحلیل‌ها و بررسی‌های انجام شده، نتایجی در مورد رفتار خرابی سازه‌های تنسگریتی بدست آمده است و پیشنهادهای طراحی برای جلوگیری از وقوع مکانیزم خرابی کلی (مکانیزم خرابی خطرناک) ارائه گردیده است. از بین مکانیزم‌های خرابی، مکانیزم خرابی کلی نامطلوب است. چرا که این مکانیزم خرابی بدون هیچ‌گونه علائم هشدار دهنده‌ای، به صورت ترد و ناگهانی اتفاق می‌افتد. اما مکانیزم‌های خرابی موضعی بدلیل اینکه به صورت ناگهانی و ترد رخ نمی‌دهند، نسبت به مکانیزم خرابی کلی ارجحیت دارد. در بین مکانیزم‌های خرابی موضعی نیز، خرابی موضعی ناشی از کمانش عضوی بدلیل حالت شکل‌پذیری که نسبت به خرابی موضعی با فروجهش دارد، مطلوب‌تر است. بنابراین پیشنهادهایی جهت ممانعت از مکانیزم‌های گسیختگی خطرناک ارائه شده است.

کلمات کلیدی: مکانیزم‌های بینهایت کوچک، پیش‌تنیدگی، نقص اولیه، مکانیزم گسیختگی، سخت

شدگی کرنشی، کمانش اعضای فشاری.

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده	۱
فصل اول: مقدمه	۲
۱-۱- سیستم‌های سازه‌های فضاکار	۳
۱-۲- تاریخچه سازه‌های تنسگریتی	۴
۱-۳- اهداف پروژه	۷
۱-۴- رئوس مطالب پایان نامه	۷
فصل ۲: سازه‌های تنسگریتی	۹
۲-۱- مقدمه	۱۰
۲-۲- خواص و مزایای سازه‌های تنسگریتی	۱۰
۲-۳- تعایف بیان شده برای سازه‌های تنسگریتی	۱۱
۲-۴- پیش‌بینی‌دگی در سازه‌های تنسگریتی و مسأله خودتیندگی	۱۲
فصل ۳: شکل‌یابی و روش‌های اتصال ساختار سازه‌های تنسگریتی	۱۴
۳-۱- مدول‌ها	۱۵
۳-۲- روش‌های اتصال ساختار تنسگریتی ناپیوسته اعضای فشاری	۱۷
۳-۳- شبکه‌های انعطاف پذیر هندسی و شبکه‌های صلب هندسی	۱۸
۳-۴- روش‌های اتصال ساختار پیوسته اعضای فشاری	۲۳
۳-۵- شبکه‌های صلب و انعطاف پذیر هندسی	۲۳
۳-۶- شبکه‌های تنسگریتی جدید	۲۷

- ۲۸-۷-۳- گنبدهای تنسگریتی-----
- ۳۰- فصل ۴: بارگذاری سازه‌های تنسگریتی-----
- ۳۲-۱-۴- بارهای مرده-----
- ۳۲-۲-۴- بارهای برف-----
- ۳۳-۳-۴- سربار(بار زنده)-----
- ۳۳-۴-۴- بار ناشی از تغییر درجه حرارت-----
- ۳۴-۵-۴- بارباد-----
- ۳۵-۶-۴- بارزلزله-----
- ۳۶-۷-۴- ترکیب بارگذاری-----
- ۳۷- فصل ۵: تاشه پردازی سازه‌های تنسگریتی-----
- ۳۸-۱-۵- استفاده از نرم‌افزارها برای فرم‌بندی سازه‌های تنسگریتی-----
- ۳۸-۱-۱-۵- نرم‌افزار فرمین-----
- ۳۹-۲-۱-۵- سایر نرم‌افزارهای فرم سازی-----
- ۳۹-۳-۱-۵- قالب فایل‌های خروجی در نرم‌افزار فرمین-----
- ۴۰-۴-۱-۵- بررسی فایل متنی ایجاد شده توسط فرمین-----
- ۴۱-۵-۱-۵- انتقال اطلاعات فرمکسی از فرمین به نرم‌افزار abaqus-----
- ۴۲-۶-۱-۵- انتقال اطلاعات فرمکسی از فرمین به نرم‌افزار ansys-----
- ۴۴- فصل ۶: مدل سازی به روش اجزاء محدود-----
- ۴۵-۱-۶- مقدمه-----
- ۴۵-۲-۶- تحلیل مورد استفاده-----
- ۴۶-۳-۶- مدل سازی غیرخطی مصالح برای سازه‌های تنسگریتی-----



- ۴۶-۱-۳-۶- مدل سازی پلاستیسیته برای عناصر کششی
- ۴۷-۲-۳-۶- مدل سازی پلاستیسیته برای عناصر فشاری
- ۴۷-۴-۶- بررسی و ارزیابی صحت مدل سازی اجزاء محدود
- ۵۰-۱-۴-۶- تحلیل غیرخطی هندسی سیستم تنسگریتی
- ۵۳-۵-۶- مدل سازی و ارزیابی آن با کار آزمایشگاهی
- ۵۳-۱-۵-۶- مدل سازی پلاستیسیته برای عناصر کششی
- ۵۳-۲-۵-۶- مدل سازی پلاستیسیته برای عناصر فشاری
- ۵۴-۳-۵-۶- ساختار مورد نظر
- ۵۷- فصل ۷: تحلیل‌های ناپایداری استاتیکی
- ۵۸-۱-۷- تحلیل‌های ناپایداری استاتیکی
- ۶۲-۲-۷- ساختار مورد مطالعه
- ۶۳-۳-۷- مکانیزم رفتار مصالح
- ۶۵-۴-۷- مکانیزم گسیختگی فشاری
- ۶۶-۱-۴-۷- تحلیل‌های ناپایداری استاتیکی
- ۶۶-۱-۱-۴-۷- تأثیر مقادیر پیش تنش
- ۷۴-۲-۱-۴-۷- تأثیر مقادیر نقص اولیه اعضای فشاری
- ۸۰-۳-۱-۴-۷- تأثیر نسبت‌های لاغری اعضای فشاری
- ۸۵-۴-۱-۴-۷- نتایج تحلیل غیرخطی
- ۸۷-۵-۷- مکانیزم گسیختگی کششی
- ۸۷-۱-۵-۷- تحلیل‌های ناپایداری استاتیکی
- ۸۸-۱-۱-۵-۷- تأثیر مقادیر پیش تنش

۹۴	۷-۵-۱-۲- تأثیر مقادیر نقص اولیه اعضای فشاری
۹۶	۷-۵-۱-۳- نتایج تحلیل غیر خطی
۹۸	۷-۶- نتایج حاصل از بررسی مکانیزم‌های گسیختگی فشاری و کششی
۱۰۲	فصل ۸: بحث و نتیجه‌گیری
۱۰۶	پیوست‌ها
۱۰۷	پیوست الف
۱۰۸	پیوست ب
۱۱۶	مراجع و منابع

# فصل اول:

مقدمه

## فصل اول: مقدمه

سازه‌های فضاکار گروهی از سازه‌ها هستند که دارای عملکرد سه‌بعدی می‌باشند. سازه‌های فضاکار در کل به سه دسته سازه‌های فضاکار مشبک، سازه‌های فضاکار پیوسته و سازه‌های فضاکار مرکب 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.

سازه تنسگریتی در واقع 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. اکثراً ابداع این سیستم را به فردی بنام کنث اسنلسون و نیز توسعه و ثبت اختراع آن را به فولر نسبت می‌دهند. د.ج. امریک نیز در مطرح نمودن این نوع از سازه‌ها موثر بوده است.

## ۱-۱- سیستم‌های سازه‌های فضاکار

سازه‌های فضاکار<sup>۱</sup>، سیستم‌های سازه‌ای هستند که دارای عملکرد سه‌بعدی می‌باشند. در سازه‌های فضاکار، ساختار<sup>۲</sup>، بارهای خارجی، نیروهای داخلی و تغییر مکان‌های سازه‌ای در فضای سه‌بعدی تعریف می‌شوند. در عمل سازه‌های فضاکار به گروهی از سازه‌ها گفته می‌شود که شامل شبکه‌ها، گنبدهای استوانه‌ای<sup>۳</sup>، گنبدهای کروی، دکل‌ها، شبکه‌های کابلی، سیستم‌های غشایی<sup>۴</sup>، سازه‌های تاشو<sup>۵</sup> و تنسگریته‌ها<sup>۶</sup> 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، پیوسته‌ها غشاها؛ سازه‌های فضاکار مرکب نیز ترکیبی از سازه‌های مشبک و پیوسته می‌باشند. سازه‌های تنسگریته 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.

سازه‌های تنسگریته شامل مجموعه ناپیوسته‌ای از عناصر فشاری در داخل مجموعه پیوسته‌ای از عناصر کششی می‌باشند که به وسیله حالت خودتنیدگی<sup>۷</sup> پایدار می‌شوند سازه‌های تنسگریته به خاطر تعداد نسبتاً کم عناصر فشاری، بسیار سبک می‌باشند. همچنین این سازه‌ها قابلیت تاشوندگی دارند. تاشوندگی سیستم‌های تنسگریته، انبار کردن و انتقال این سیستم‌ها را آسان می‌سازد. این قابلیت، استفاده از سیستم‌های تنسگریته را به عنوان سازه‌های فضاکار با کاربردهای هوا و فضا میسر می‌سازد. سیستم‌های تنسگریته به خاطر مزیت‌های قابل توجهی که دارند در سال‌های اخیر توجه

---

<sup>1</sup> - Space Structures

<sup>2</sup> - Configuration

<sup>3</sup> - Barrel Vaults

<sup>4</sup> - Membrane Systems

<sup>5</sup> - Foldable Structures

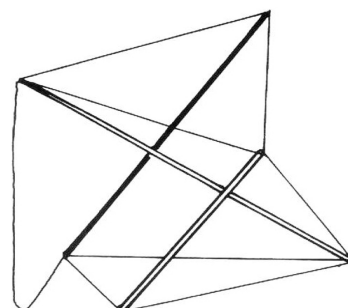
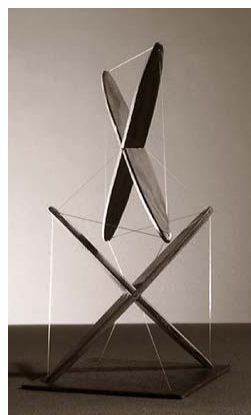
<sup>6</sup> - Tensegrity Structures

<sup>7</sup> - self stressing

زیادی را به خود جلب کردند و لزوم تحقیق در زمینه رفتار مکانیکی این سازه‌های ابداعی احساس می‌شود. {۲}

### ۱-۲- تاریخچه سازه‌های تنسگریتی

مبدأ سازه‌های تنسگریتی به سال ۱۹۲۱ و به سازه ساخته شده توسط ک. جانسون برمی‌گردد. این سازه در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. براساس تعاریف فعلی، این سازه در زمره سازه‌های تنسگریتی قرار نمی‌گیرد، اما به تعریف سازه‌های تنسگریتی بسیار نزدیک است. امروزه معمولاً سازه  $X$  (شکل ۱-ب) که توسط اسنلسون در سال ۱۹۴۸ ساخته شده است، به عنوان اولین نوع سازه‌های تنسگریتی در نظر گرفته می‌شود.

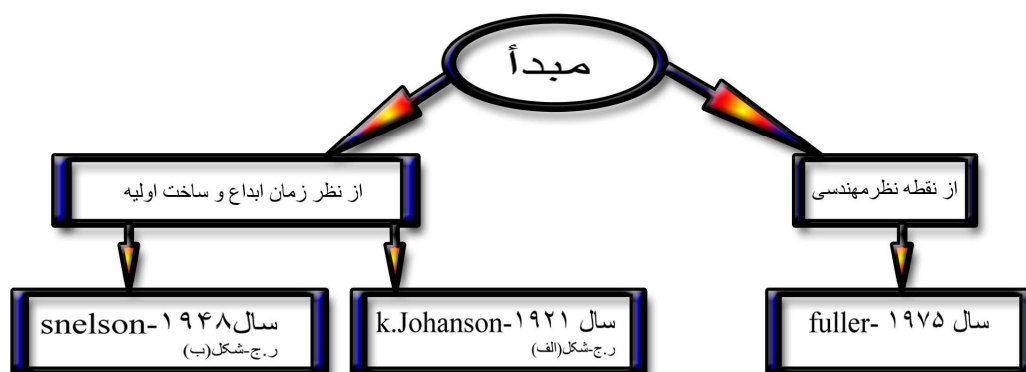


شکل (۱) (الف) سازه مورد مطالعه توسط ک. جانسون؛ (ب) سازه  $X$  مطالعه شده توسط ک. جانسون. {۳}؛

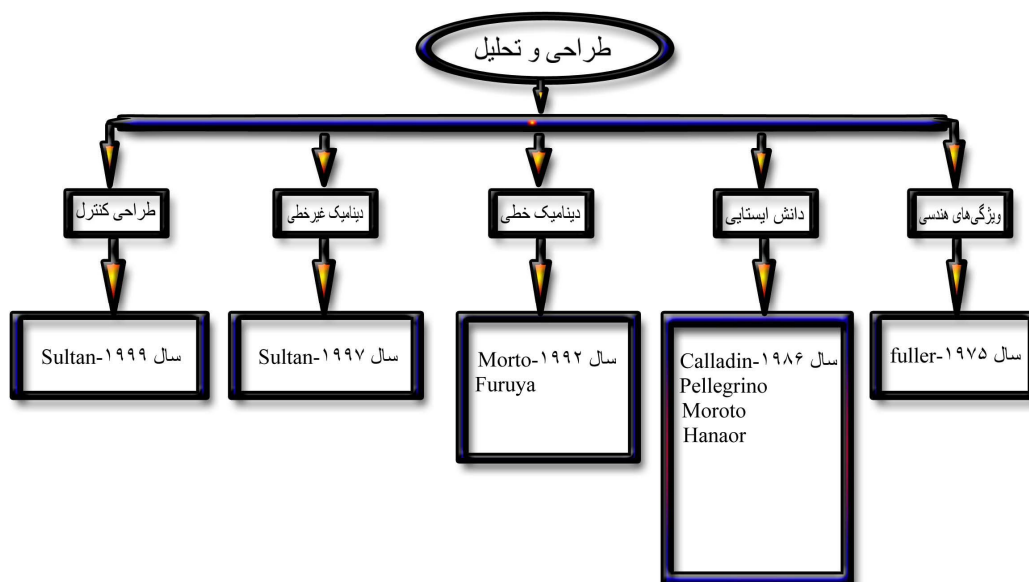
گرچه اسنلسون مخترع این سازه‌ها است اما این سازه‌ها از نقطه نظر مهندسی برای اولین بار توسط فولر در سال ۱۹۷۵ بررسی شده‌اند. (شکل ۲) {۳}.

اغلب ویژگی‌های هندسی این سازه‌ها توسط فولر در سال ۱۹۷۵ و ویژگی‌های سازه‌های آنها توسط پوگ در سال ۱۹۷۶ مورد بررسی قرار گرفته است. در سال‌های اخیر روش‌هایی مبتنی بر مکانیک در تحلیل این سازه‌ها گسترش یافته و تحقیقات منظم و سیستماتیک در روی سازه‌های تنسگریتی انجام

می‌گیرد. بدین ترتیب امکان ارائه مبانی تئوریکی برای تحلیل و طراحی این سازه‌ها فراهم شده است. در بین محققین روی رفتار سازه‌های تنسگریتی، پلگرینو (۱۹۹۰)، پلگرینو و کالادین (۱۹۸۶)، موترو (۱۹۹۲)، موترو و همکاران (۱۹۸۶) و هانار (۱۹۹۴)، سهم مهمی در درک دانش ایستایی این سازه‌ها دارند. نتایج تحلیل دینامیکی خطی این سازه‌ها توسط موترو (۱۹۹۲) و فوریه (۱۹۹۲) و مطالعات دینامیکی غیرخطی و طراحی کنترل این سازه‌ها توسط سلطان (۱۹۹۷ و ۱۹۹۹، ۱۹۹۷) گزارش شده‌اند. شکل (۳) {۴}.



شکل (۲): مبدا سازه‌های تنسگریتی



شکل (۳): طراحی و تحلیل 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 که در آنها خودتنیدگی بایستی ایجاد شود و تحلیل این سازه‌ها بر اساس پیش‌تنیدگی استوار است. {۷}

-در سازه‌های فضاکار متداول، اعضای کششی بعد از ناحیه پلاستیک دارای سخت‌شدگی کرنشی<sup>۸</sup> می‌باشند که این اعضا می‌توانند نیروهای اضافی را جذب نمایند {۸}. 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 {۹}. 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<sup>۹</sup> (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<sup>۱۰</sup> داشته باشند.

-اغلب مطالعات استاتیکی انجام گرفته روی این سازه‌ها، محدود به مرحله پیش‌کمانش<sup>۱۱</sup> عناصر فشاری پیش‌گسیختگی<sup>۱۲</sup> و یا شل‌شدن<sup>۱۳</sup> 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.

---

<sup>8</sup> - Strain Hardenin

<sup>9</sup> - Changing tatus

<sup>10</sup> - CollapseMechanis

<sup>11</sup> -Pre-buckl

<sup>12</sup> - Pre -rupture

<sup>13</sup> - Slacking



### ۱-۳-اهداف پروژه

هدف از این مطالعات یافتن راهبردی جهت کاربردی نمودن این سازه‌ها برای سقف تخت می‌باشد. نتایج این پایان نامه می‌تواند رهنمونی برای گسترش کاربرد سازه‌های تنسگریتی در صنعت و ساختمان باشد. این سازه‌ها در صنعت و ساختمان، آشیانه‌های موقت، پارکینگ‌های وسیع، کاربردهای ویژه در هوا-فضا و... مورد استفاده قرار می‌گیرد. از حیث جنبه‌های جدید و نوآوری بودن این مطالعات شامل کارکرد این سازه‌ها برای سقف مسطح می‌باشد. اهداف مطالعات حاضر عبارتند از:

- معرفی و شناسایی سازه‌های تنسگریتی

- شناخت رفتار سازه‌های تنسگریتی

- مدل سازی اجزا محدود سازه‌های تنسگریتی

- ارائه توصیه‌های طراحی برای سازه‌های تنسگریتی

### ۱-۴-رئوس مطالب پایان نامه

در فصل دوم پس از ارائه مقدمه‌ای بر سازه‌های تنسگریتی، مزایا و خواص این سازه‌ها بررسی می‌گردد. در قسمت بعد به مسئله پیش‌تنیدگی در سازه‌های تنسگریتی پرداخته می‌شود. در فصل سوم فرآیند شکل‌یابی و روش‌های اتصال ساختار سازه‌های تنسگریتی بررسی می‌گردد. در واقع در این بخش ابتدا مدول‌های متداول معرفی شده و سپس نحوه‌ی اتصال آنها بررسی می‌گردد. در نهایت شبکه‌های جدید تنسگریتی و گنبد‌های تنسگریتی معرفی می‌گردد. در فصل چهارم بارگذاری سازه‌های تنسگریتی و ترکیبات بار بررسی می‌شود. البته در این بخش انواع بارهای وارده و مقدارشان بر سازه بررسی می‌گردد. در نهایت نحوه مدل سازی این سازه‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای موجود شرح داده می‌شود. در فصل پنجم مدل سازی اجزا محدود برای سازه‌های تنسگریتی تشریح می‌شود. در این بخش پس از تاشه‌پردازی، به ارزیابی و صحت مدل سازی اجزا محدود پرداخته می‌شود. در نهایت با استفاده از یک نمونه از مدول‌ها یک سقف تخت مونتاژ شده و تحلیل می‌گردد.

فصل ششم شامل مدل سازی به روش اجزا محدود می باشد. در این فصل با محاسبه یک نمونه از مدول و مقایسه آن با دست آورد دیگر محققین، صحت و درستی آنالیز مورد ارزیابی قرار می گیرد. در فصل هفتم تحلیل های ناپایداری جهت بررسی رفتار این سازه ها و ارائه توصیه های طراحی انجام شد.

فصل هشتم شامل نتیجه گیری ها، توصیه های طراحی و راهکارهای آتی در زمینه طراحی سازه های تنسگریتی می باشد.

## فصل ۲:

### سازه‌های تنسگریتی

## ۲-۱- مقدمه

تنسگریتی (با حداکثر ۵۰ سال قدمت) یک سیستم سازه‌ای نسبتاً جدید و پیشرفته‌ای است که امکان ایجاد سازه‌ای با شکل‌های خیره‌کننده، سبک و انطباق‌پذیر را دارد. وبه صورت گروهی از میله‌های معلق و شناور در فضا به نظر می‌رسد. تنسگریتی‌ها نوع شناخته شده و متداولی از سازه‌ها نیستند، بنابراین درک مکانیزم و اصول فیزیکی آنها چندان میان معماران و مهندسين شایع و گسترده نیست.

## ۲-۲- خواص و مزایای سازه‌های تنسگریتی

موارد زیر از مشخصه‌های سازه‌های تنسگریتی محسوب می‌گردد:

- در مقایسه با دیگر سازه‌ها، سبک وزن‌اند، یا ترجیحاً، آنها مقاومت بالاتری در مقایسه با دیگر سازه‌های وزن مشابه دارند.

- تاندون‌های جدید می‌تواند برای تحکیم به سازه اضافه گردد.

تنسگریتی پاسخی به این سؤال هست که:

«چه سازه‌ای می‌تواند وزن و نیروهای افقی مخالف را تحمل می‌کند بطوریکه از فشار و کشش استفاده نماید، اما گشتاوری را تحمل نکند؟» (فولر، سال ۱۹۹۶)

- انعطاف‌پذیری یا سختی سازه‌ها وابسته به بکارگیری مصالح و بوسیله روش‌های نصبشان می‌باشد. آنها می‌توانند نرم‌تر یا خیلی سخت‌تر و کاملاً قویتر باشند.

موارد زیر از مزایای سازه‌های تنسگریتی محسوب می‌گردد:

- تنسگریتی می‌تواند در استفاده از مصالح مسیر خیلی اقتصادی‌تری را داشته باشد.

- آنها هیچ نوع از گشتاور یا پیچش را تحمل نمی‌کنند.

- تعاریف خاص مدول‌های منحصربفرد که پایدارند، بوسیله خودشان می‌باشد. مجوز یک ظرفیت

استثنایی برای خلق سیستم‌ها بوسیله الحاق نمودن آنها به همدیگر صادر می‌گردد. بنابراین می‌توان

اشکال متفاوتی ایجاد نمود.

## ۲-۳- تعاریف بیان شده برای سازه‌های تنسگریتی

موترو تعریف زیر را برای این سازه‌ها پیشنهاد کرده است: سیستم‌های تنسگریتی، سیستم‌های مشبک فضاکاری هستند که سختی سازه‌ای آنها به وسیله حالت خودتنیدگی<sup>۱۴</sup> ایجاد می‌شود. در این سیستم‌ها، عناصر فشاری یک مجموعه ناپیوسته و عناصر کششی یک مجموعه پیوسته را تشکیل می‌دهند. به هر گره، حداقل یک عضو فشاری و سه عضو کششی متصل می‌باشند. عناصر کششی و فشاری به ترتیب دارای صلبیت منحصراً کششی و منحصراً فشاری می‌باشند. {۶}

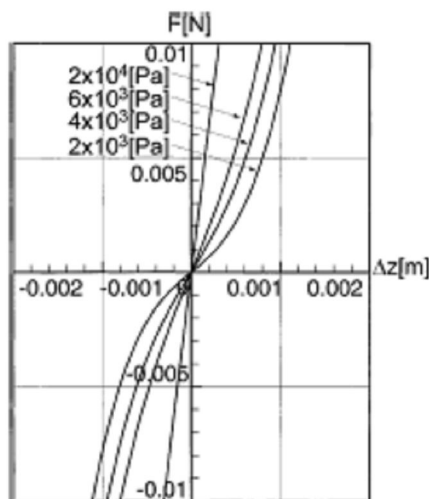
عناصر فشاری می‌توانند شکل خطی، سطحی یا حجمی داشته باشند. یک عضو فشاری، یک قطعه غشایی، یا یک حجم هوایی... یا ترکیبی از یک یا چندین عنصر به صورت مجموعه‌ی عناصر فشاری می‌باشد. ماده عنصر می‌تواند هوا، فولاد، کامپوزیت و... باشد. حتی اگر شکل یک عنصر خیلی پیچیده باشد. یا از ترکیب عناصر اولیه مشخصی به دست آمده باشد، بایستی ماده آن در هر نقطه تحت فشار باشد. عبارات "مجموعه ناپیوسته و محیط پیوسته" با کلمات "جزایر و دریا" تقریباً متناسب هستند. هر عنصر فشاری یک جزیره را تشکیل می‌دهد، یعنی اگر بیش از یک عنصر فشاری وجود داشته باشد، این عناصر ناپیوسته خواهند بود. مجموعه‌ی عناصر کششی بایستی پیوسته باشند.

بنابراین کل عناصر کششی می‌توانند به عنوان یک مجموعه‌ی عناصر کششی تعریف شوند. به منظور اینکه بدانیم "جزیره فشاری داخل دریای کششی است یا نه"، لازم است یک تعریف حدی مشخص برای مرز بین داخل و خارج سیستم ایجاد کنیم. نتیجه مستقیم این تعریف اینست که همه نقاط هندسی سیستم به محیط پیوسته عناصر کششی تعلق دارند. همه خطوط موثر روی سطح مرزی بین بیرون و درون سیستم، خطوط کششی هستند. البته این نکته در تعریف سیستم‌های تنسگریتی حائز اهمیت می‌باشد، چرا که در این سیستم‌ها، خود تعادلی بر اساس کشش استوار است و این واقعیت برای سیستم‌های تنسگریتی جذابیت ایجاد می‌کند. {۶}

<sup>14</sup> - self stressing

## ۴-۲- پیش‌تنیدگی در سازه‌های تنسگریتی و مسأله خودتنیدگی

با اعمال بار روی سازه‌های تنسگریتی، مکانیزم‌های بی‌نهایت کوچک فعال شده و تغییرشکل‌های بزرگی ایجاد می‌شود. در شکل (۴) رابطه بار قائم و تغییر مکان نقطه اثر نیرو برای مدول تنسگریتی استوانه‌ای شامل سه عضو فشاری نشان داده شده است. بار قائم یکسانی در جهت Z برگره‌های فوقانی وارد شده است.



(شکل ۴): رابطه نیرو - تغییر مکان به ازای ترازهای مختلف پیش‌تنیدگی {۱۰}

همانطور که در شکل نشان داده شده است، با افزایش پیش‌تنیدگی، سختی مماس اولیه به طور خطی افزایش می‌یابد. برای سازه‌های تنسگریتی با مکانیزم‌های بی‌نهایت کوچک رابطه نیرو- تغییر مکان به وسیله یک فنر غیر خطی توصیف می‌شود. رفتار پس‌کمانشی عناصر فشاری متأثر از نقص است، لذا بار بحرانی بایستی یا به وسیله آزمایش یا انجام تحلیل غیرخطی المان محدود تعیین شود {۱۰}.

بطور کلی یک حالت تنسگریتی، یک سیستم پایدار خودمتعادل است که شامل مجموعه ناپیوسته از عناصر فشاری، داخل محیط پیوسته‌ای از عناصر کششی می‌باشند. حالت "خودمتعادل" حالت اولیه مکانیکی سیستم را قبل از هرگونه بارگذاری، حتی بار ثقلی بیان می‌کند. سیستم باید در حالت "خودتعادلی" باشد، بگونه‌ای که بتواند معادل با حالت خودتنیده با هر تراز خودتنیدگی باشد. در ضمن این حالت تعادل باید پایدار نیز باشد {۱۵}. همچنین این سازه‌ها دارای چندین مکانیزم بی‌نهایت

کوچک می‌باشند. پیش‌تنیدگی با فراهم آوردن سختی اضافی باعث پایداری سازه می‌گردد. شکل این سازه‌ها از نتایج فرایند شکل‌یابی بدست می‌آید. در این فرایند، هندسه و حالت خودتنیدگی به روش‌های مختلف ایجاد می‌گردد. در این سازه‌ها، همه‌ی عناصر تحت بارگذاری محوری قرار گرفته و دارای عملکرد منحصراً فشاری و منحصراً کششی می‌باشند. {۱۶}

## فصل ۳ :

شکل یابی

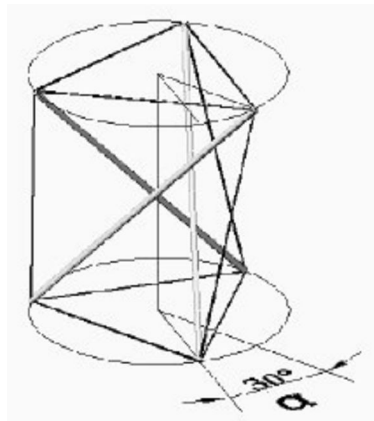
و

روش‌های اتصال ساختار سازه‌های تنسگریتی



### ۳-۱-مدول‌ها

در حالت کلی سازه‌های تنسگریتی در شبکه‌های تخت از ترکیب مدول‌های تنسگریتی ایجاد می‌شوند. این مدول‌ها انواع مختلفی دارند که به عنوان نمونه یک مدول استوانه‌ای در شکل (۲۱) مشاهده می‌شود.



(شکل ۲۱): مدول استوانه‌ای {۱}

کندر در سال ۱۹۷۶ بیان می‌کند که زاویه‌ی چرخش ( $a$ ) یا «زاویه تاب خورده» وابسته به اعضای میله‌ها باشد ( $n =$  تعداد لبه‌های چند ضلعی) و توسط فرمول اثبات شده راگر توبی در سال ۱۹۶۷ بیان می‌شود:

$$a = 90 - 180/n$$

به عنوان مثال برای یک منشور مثلثی  $a = 30$ ، در یک ساختار مربع  $a = 45$ ، در یک پنج ضلعی  $a = 54$ ، در یک منشور شش ضلعی  $a = 60$ ، و همین طور الی آخر، در هر صورت بنا به نظر پیوگ در سال ۱۹۷۶، تعداد بالاتر میله‌ها، دارای پایداری کمتر و منعطف‌تر، می‌باشد.

مدول‌های استوانه‌ای<sup>۱۵</sup> از دو وجه پایین و بالا تشکیل شده که این دو وجه به صورت  $n$  ضلعی منتظم هستند. اضلاع وجه بالانسبت به وجه پایین در جهت مثلثاتی دوران یافته است. اضلاع جانبی این استوانه از وصل کردن رئوس چند ضلعی بالا و پایین به دست می‌آید.

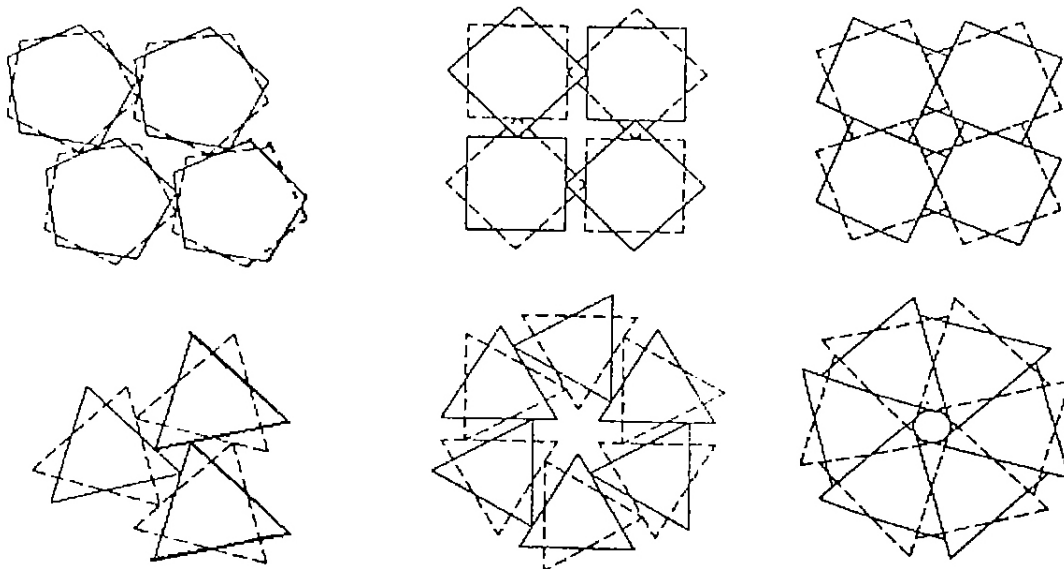
بسته به این که ابعاد  $n$  ضلعی فوقانی و تحتانی یکسان یا متفاوت باشد، مدول‌های استوانه‌ای منتظم به شکل منشور یا هرم درمی‌آید که به آنها سیمپلیکس‌های تنسگریتی<sup>۱۶</sup> نیز گفته می‌شود. مدول‌های تنسگریتی استوانه‌ای منتظم به عنوان مدول‌های اساسی برای ساخت سازه‌های تنسگریتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

---

<sup>16</sup>-Tensegrity Simplexes

### ۳-۲- روش‌های اتصال ساختار تنسگریتی ناپیوسته اعضای فشاری

برای ساختارهای تنسگریتی ناپیوسته، سه روش اتصال (Ia و Ib و II) به وسیله هانار در سال 1991 پیشنهاد شده است. روش‌های Ia و Ib، اتصالات رأس به لبه هستند. در روش Ia سیمپلیکس‌ها به طور متناوب به هم وصل می‌شوند. بدین صورت که دو رأس در لایه‌های مختلف یک سیمپلیکس به یک لبه سیمپلیکس مجاور متصل می‌شوند. این روش اتصال تنها برای سیمپلیکس‌های با تعداد رئوس فرد قابل اجرا است. (شکل ۲۲-الف) ولی در روش Ib هر زوج از سیمپلیکس‌ها با اتصال رأس یک لایه سیمپلیکس بر لبه سیمپلیکس مجاور متصل می‌شوند (شکل ۲۲-ب) روش اتصال II نیز اتصال لب به لب است که لبه سیمپلیکس‌های مجاور در قسمتی از لبه در هر لایه، مشترک می‌شوند (شکل ۲۲-ج) {۱۲}.



الف: اتصال رأس به لبه روش Ia

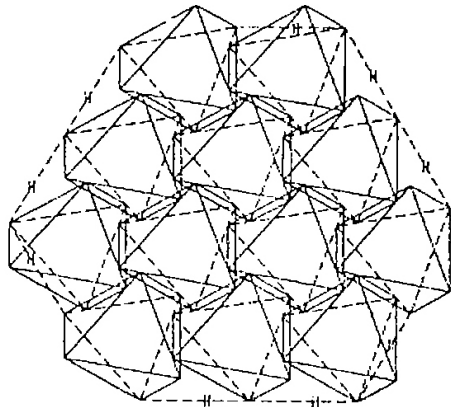
ب: اتصال رأس به لبه روش Ib

ج: اتصال لب به لب روش II

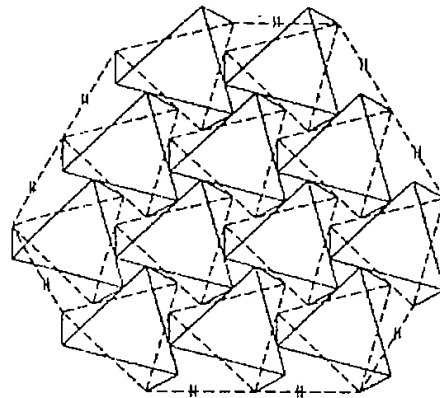
(شکل ۲۲) روش‌های اتصال ساختار تنسگریتی ناپیوسته اعضای فشاری {۱۲}

### ۳-۳- شبکه‌های انعطاف پذیر هندسی و شبکه‌های صلب هندسی

در روش اتصال Ia، هر منشور داخلی به شش منشور مجاور متصل می‌شود که در شکل (۲۳) نشان داده شده است. در روش Ib و روش II هر منشور داخلی به سه منشور مجاور متصل می‌شود. بنابراین سختی‌شان پایین است. در نتیجه روش Ia موثرتر است و به طور سیستماتیک مطالعه شده است. این روش برای شبکه‌های متشکل از منشورهای مربعی قابل استفاده نیست. در روش‌های اتصال Ib و II، اعضای فشاری و همچنین کابل‌های قطری در هر منشور مربعی، بر خلاف منشورهای مثلثی، می‌توانند به طرق مختلف جایگزین شوند. طرح‌های مختلف متشکل از منشورهای انعطاف پذیر هندسی و صلب در شکل (۲۳) نشان داده شده اند.

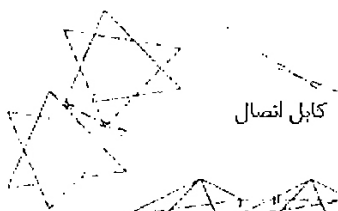


ب :

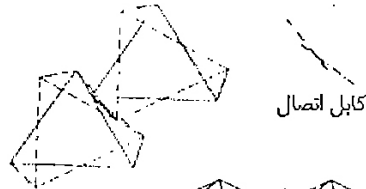


الف :

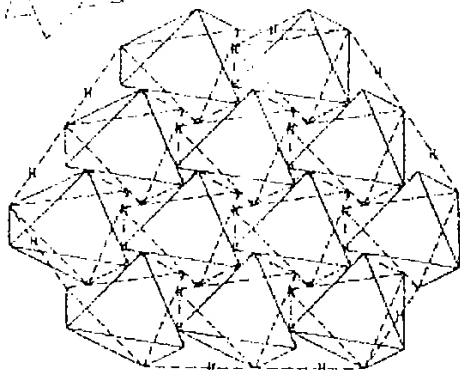
الف: شکل انعطاف پذیر هندسی متشکل از سیمپلیکس های صلب هندسی  
 ب: شکل انعطاف پذیر هندسی متشکل از سیمپلیکس های انعطاف پذیر هندسی



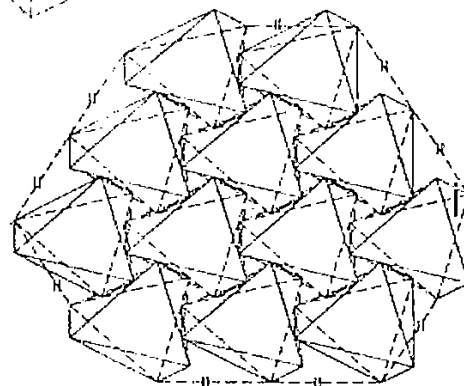
کابل اتصال



کابل اتصال



د :



ج :

ج: شکل صلب متشکل از سیمپلیکس های انعطاف پذیر هندسی  
 د: شکل صلب هندسی متشکل از سیمپلیکس های صلب هندسی

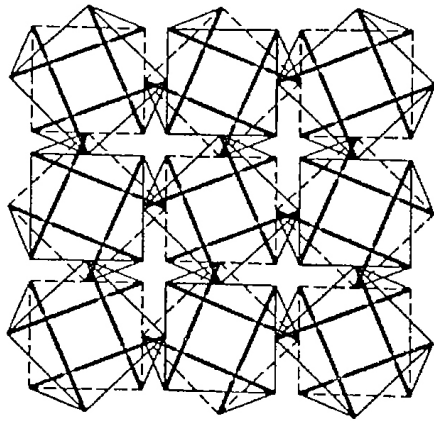
(شکل ۲۳) آرایش ساختار ناپیوسته اعضا ی فشاری، روش Ia برای سیمپلیکس های مثلثی {۱۲}

روش اتصال Ib دو طرح مختلف ایجاد می‌کند: طرح منظم (شکل ۲۴-الف) و طرح نامنظم (شکل ۲۴-ب) روش اتصال II، سه طرح ایجاد می‌کند: طرح الف-اعضای فشاری به خط مرزی متعامد هستند. (شکل ۲۵-الف) طرح ب-اعضای فشاری به خط مرزی موربند. (شکل ۲۵-ب) طرح ج-آرایش مختلط (شکل ۲۵-ج).

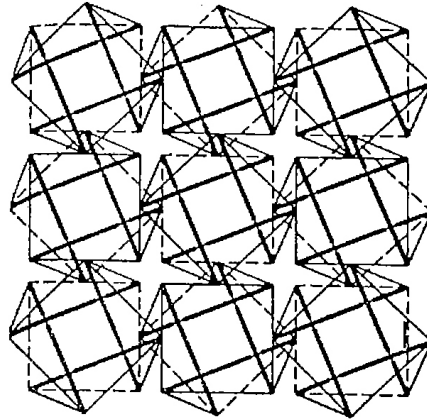
مکانیزم موجود در هر منشور مثلثی (شکل ۲۳-الف) می‌تواند توسط سیمپلیکس‌های مجاور برطرف شود، اما شبکه از نظر هندسی انعطاف پذیر است. علاوه بر اینکه با اتصال منشورهای صلب هندسی به وجود می‌آید اما از لحاظ هندسی انعطاف پذیر است. دلیل انعطاف پذیری اینست که در رئوس اتصال، کابل‌های مستقیم به دو تکه تقسیم می‌شوند. و دو مکانیزم بی‌نهایت کوچک ایجاد می‌شود. این ضعف مشخص ساختارهای تنسگریتی ناپیوسته است. {۱۲}

شبکه‌های انعطاف پذیر هندسی متشکل از منشورهای مثلثی را می‌توان با اضافه نمودن کابل‌های اتصالی بین منشورهای مجاور، به صورت شبکه صلب هندسی درآورد. که در شکل (۲۳-ج) نشان داده شده است. بدین صورت که به هر رأس اتصال، دو کابل اضافه می‌شود. و این کابل‌ها به هردولایه متصل می‌شوند. برخی کابل‌های مورب اضافی را می‌توان در مرز به منظور کاهش ماکزیمم نیروی اعضای فشاری، متصل کرد. شبکه صلب هندسی با افزایش دوران منشور، خواص مکانیکی بهتری را نشان می‌دهد.

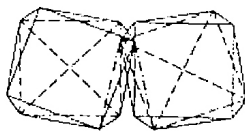
در شبکه متشکل از منشورهای مربعی، هر سیمپلیکس داخلی با چهار سیمپلیکس مجاور اتصال دارد. (روش Ia) در نتیجه مکانیزم بین لایه‌ها نمی‌تواند برطرف شود. بنابراین برای ایجاد شبکه صلب هندسی بایستی از منشورهای صلب هندسی استفاده شود. مکانیزم‌های جدید ناشی از اتصال منشورها را می‌توان با اضافه کردن کابل‌های اتصالی به منشورهای مختلف برطرف کرد. شبکه‌های صلب هندسی منتجه در (شکل ۲۴-ج) و (شکل ۲۴-د) نشان داده شده‌اند که زوایای دوران منشورها در روش اتصال Ib  $60^\circ$  و در روش اتصال II،  $45^\circ$  است {۱۲}.



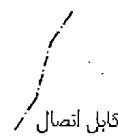
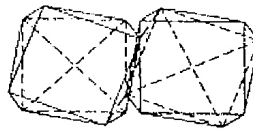
ب: آرایش نامنظم (انعطاف پذیر هندسی)



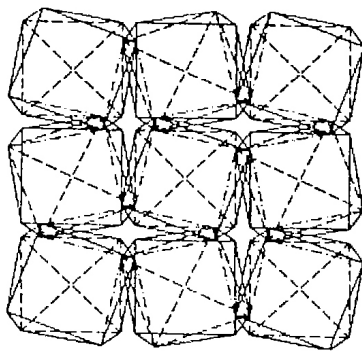
الف: آرایش منظم (انعطاف پذیر هندسی)



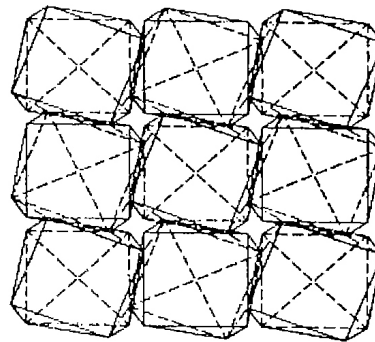
کابل اتصال



کابل اتصال

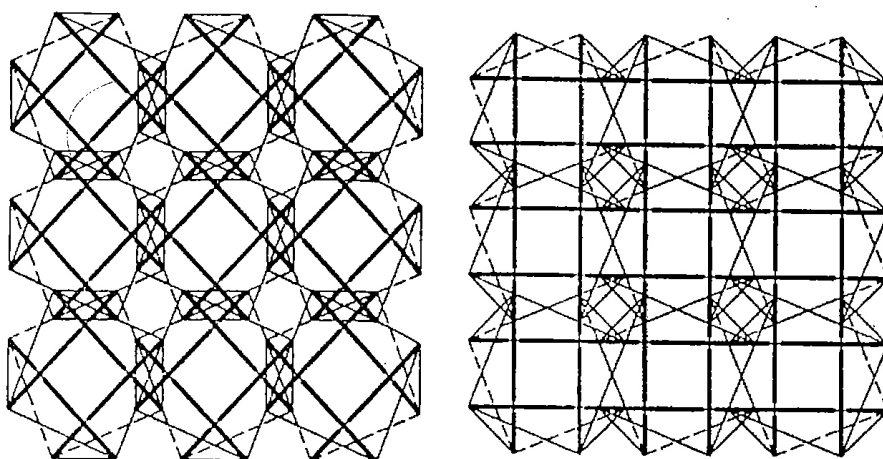


د: آرایش نامنظم (صلب هندسی)

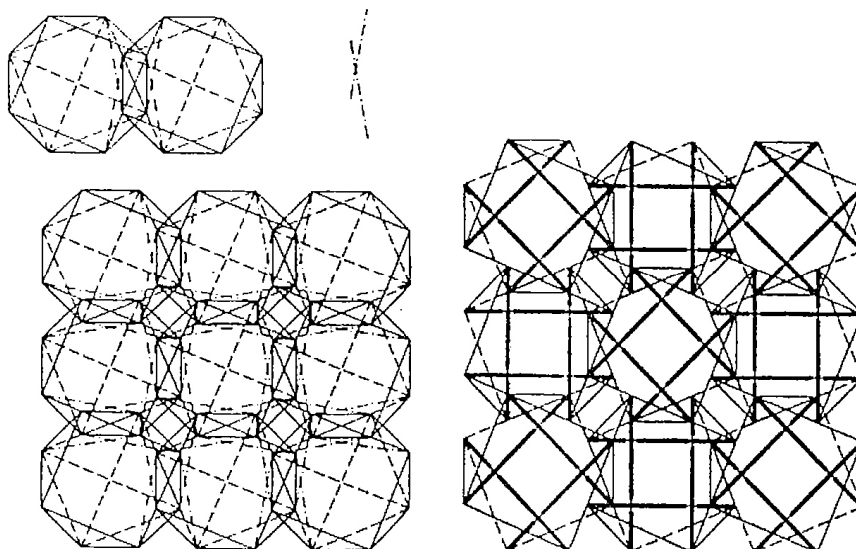


ج: آرایش منظم (صلب هندسی)

(شکل ۲۴) آرایش ساختار ناپیوسته اعضای فشاری، روش Ib برای سیمپلیکس های مربعی {۱۲}



الف: اعضای فشاری بر مرز متعامدند (انعطاف پذیر هندسی) ب: اعضای فشاری مرز موربند (انعطاف پذیر هندسی)



د: شکل صلب هندسی

ج: آرایش مختلط (انعطاف پذیر هندسی)

(شکل ۲۵): آرایش ساختار ناپیوسته اعضای فشاری، روش II برای سیمپلیکس های مربعی {۱۲}



### ۳-۴- روش‌های اتصال ساختار پیوسته اعضای فشاری

دو روش برای شکل‌دهی ساختارهای تنسگریتی پیوسته وجود دارد. یکی اتصال رأس به رأس سیمپلکس‌ها است. (سیمپلکس‌ها در دو لایه توسط رأس‌ها به هم وصل می‌شوند) دیگری اتصال راس و لبه می‌باشد. در شبکه‌های تخت، منشورهای تنسگریتی برای اتصال رأس به رأس مناسب هستند. (شکل ۲۶- الف) و هرم‌های تنسگریتی برای اتصال رأس و لبه مناسب هستند. (شکل ۲۶- ب)

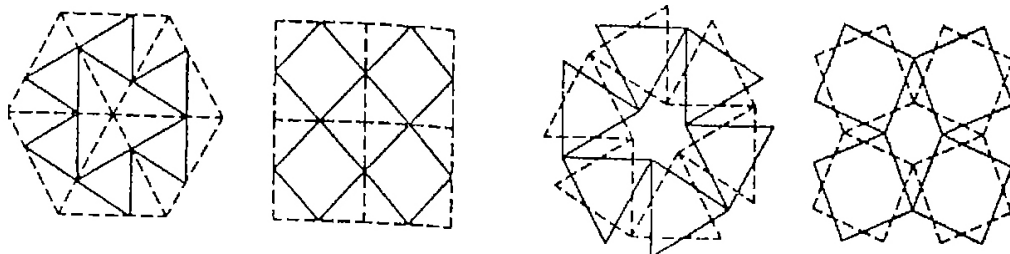
### ۳-۵- شبکه‌های صلب و انعطاف پذیر هندسی

در اتصال رأس و لبه هرم‌های مربعی، مکانیزم‌ها در لایه‌ها حذف می‌شوند با این نحوه‌ی اتصال، دو نوع آرایش اعضای فشاری امکان دارد: یکی طرح منظم (طرح الف) که اعضای فشاری در پلان به صورت هم راستا قرار دارند. (شکل ۲۷- الف) و دیگری طرح نامنظم (طرح ب) که اعضای فشاری در پلان به صورت نامنظم (زیگزاگ) قرار دارند. (شکل ۲۷- ب) در طرح نامنظم کابل‌های اضافی قطری به منظور حذف مکانیزم‌ها لازم است. (شکل ۲۷- ج)

در اتصال رأس به رأس منشورهای مربعی، مکانیزم‌ها و سیمپلکس‌ها نمی‌توانند حذف شود با این نحوه اتصال، سه نوع آرایش اعضای فشاری امکان دارد: در طرح A که اعضای فشاری به خط مرزی متعام هستند (شکل ۲۸- الف) در طرح B که اعضای فشاری به خط مرزی موربند (شکل ۲۸- ب) و طرح C یک طرح مختلط است (شکل ۲۸- ج) به منظور ایجاد شبکه صلب‌هندسی بایستی از سیمپلکس‌های صلب هندسی استفاده شود. نکته حائز اهمیت این است که در این ساختار هنوز یک مکانیزم بی‌نهایت کوچک وجود دارد. این مکانیزم دوران نسبی سیمپلکس‌های مجاور است. {۱۲}

این مکانیزم را می‌توان با اضافه نمودن کابل در لایه‌ی کششی با اتصال سیمپلکس‌های مجاور بهم، بر طرف نمود. مشخصات ساختاری سیمپلکس‌های مثلثی با انعطاف‌پذیری هندسی مشابه هم است اتصال راس و لبه این سیمپلکس‌ها منجر به ساختار صلب‌هندسی می‌شود، اما اعضای فشاری با کارایی کمتر مصالح ظاهر می‌شوند.

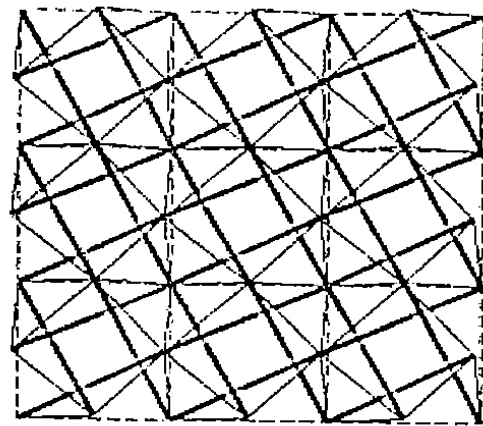
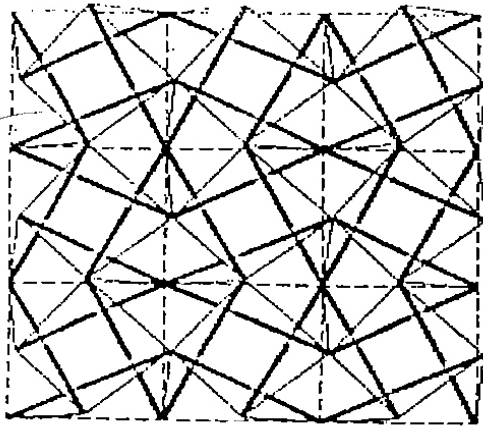
اتصال رأس به رأس منشورهای انعطاف‌پذیری هندسی، ساختار انعطاف‌پذیر ایجاد می‌کند. به منظور ایجاد ساختار صلب هندسی، سیمپلکس‌های صلب‌هندسی لازم است. جهت بر طرف نمودن مکانیزم دورانی بی‌نهایت کوچک سیمپلکس‌های مجاور، بایستی از کابل‌های اتصال استفاده شود {۱۲}.



(ب): اتصال راس و لبه (روش II)

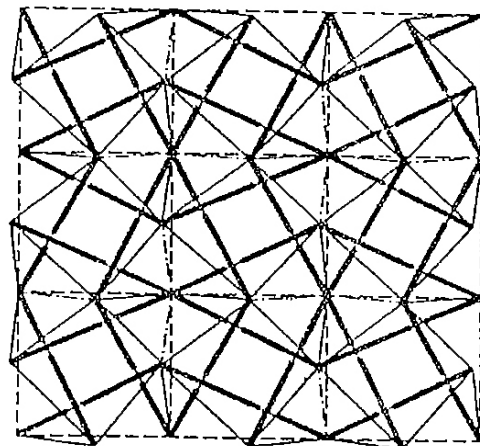
(الف): اتصال راس به راس (روش I)

(شکل ۲۶): روش‌های اتصال ساختار پیوسته اعضای فشاری {۱۲}



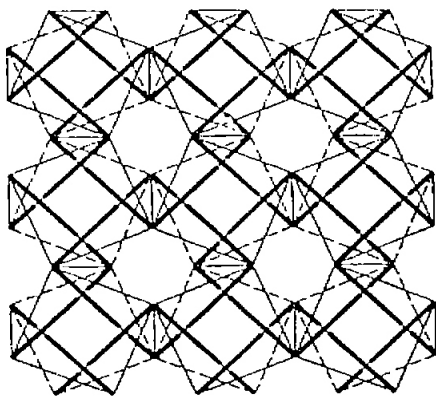
الف: آرایش منظم

ب: آرایش نا منظم (انعطاف پذیر هندسی)

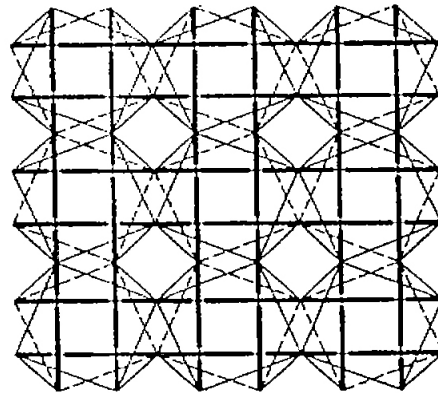


ج: آرایش نا منظم (صلب هندسی)

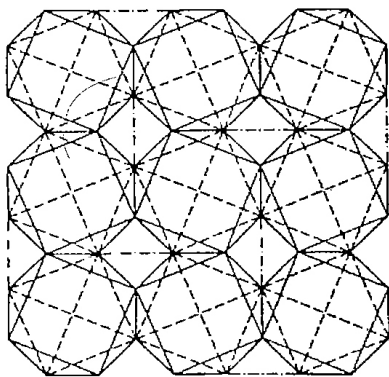
(شکل ۲۷): آرایش ساختار پیوسته عضو فشاری، روش (II) برای هرم های مربعی {۱۲}



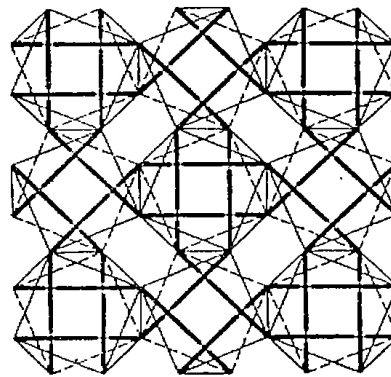
ب: آرایش B- اعضای فشاری مرز موریند (انعطاف پذیر هندسی)



الف: آرایش A- اعضای فشاری بر مرز متعامدند (انعطاف پذیر هندسی)

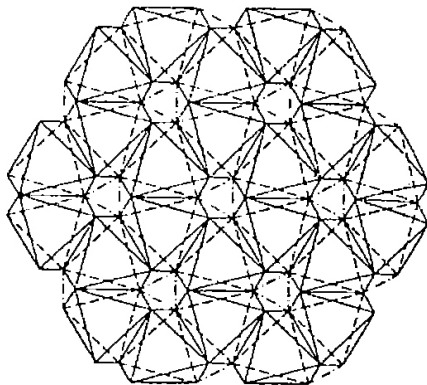


د: آرایش صلب هندسی برای همه آرایش ها

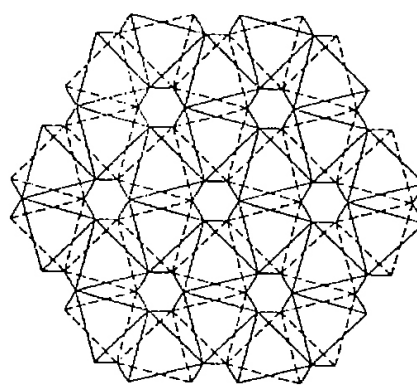


ج: آرایش C-نوع مختلط (انعطاف پذیر هندسی)

(شکل ۲۸): آرایش پیوسته عضو فشاری، روش (I) برای منشورهای مربعی {۱۲}



ب: شبکه صلب هندسی



الف: شکل انعطاف پذیر هندسی

(شکل ۲۹): آرایش پیوسته عضو فشاری، روش (I) برای منشورهای مثلثی {۱۲}

### ۳-۶- شبکه‌های تنسگریتی جدید

در روش‌های متداول طراحی تنسگریتی، از ترکیب مدول‌های تنسگریتی استفاده می‌شود. بطوریکه این شبکه‌ها مکانیزم‌های بی‌نهایت کوچک سیمپلکس‌ها را نیز دارا می‌باشند و سیمپلکس‌ها به صورت آرایش پیچیده با راه حل‌های اتصالهای مختلف گسترش پیدا می‌کنند. ساختار شبکه‌های جدید به این صورت است که : {۱۴}

۱- شبکه تنسگریتی با لایه‌های مرزی تعیین می‌شود و دارای پهنابند<sup>۱</sup> داخلی می‌باشد که کل

سیستم را از لحاظ ایستایی پایدار می‌کند

۲- هر کدام از لایه‌ها یک شبکه دو بعدی انعطاف پذیر و منظم هستند در واقع به وسیله عناصر

خطی این لایه‌ها به هم وصل می‌شوند. انتهای عناصر خطی گره‌ها را تشکیل می‌دهند.

۳- زیر مجموعه‌های یکسانی از کابل‌ها و اعضای فشاری، در داخل شبکه بین دو لایه توزیع می‌شوند

که یک دسته گره لایه بالا را به یک دسته گره پایین متصل می‌کنند.

روش دیگر برای تعریف شبکه‌ها، استفاده از مدول‌های مقدماتی وصله‌ای<sup>۲</sup> است. ترکیب این مدول‌ها به

صورت تکرار متقارن در امتداد هر یک از وجوه قائم، سیستم‌های پایدار ایستایی را فراهم می‌کند، مشروط

براینکه راه حل مناسبی (مثلاً کابل‌های لبه‌ای مشخص) منظور شده باشد تا رانش جانبی اعضای فشاری

را متعادل سازد {۱۴}.

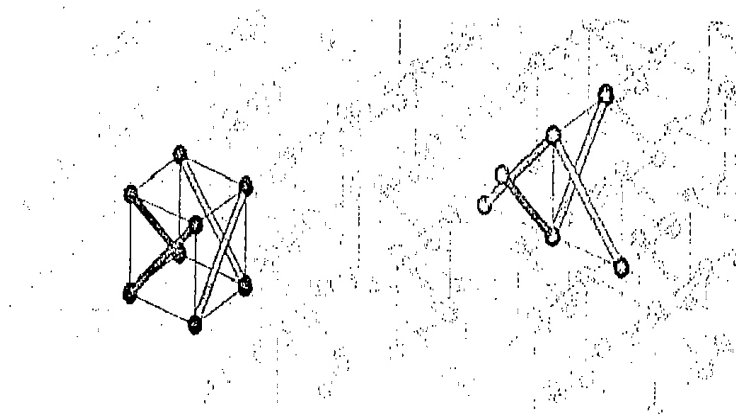
شکل (۳۰) مدول مقدماتی وصله‌ای منظم را نشان می‌دهد. اما ممکن است مدول، نامنظم نیز باشد.

برای مثال، ممکن است مدول‌ها، به صورت هرم‌های ناقص باشند.

---

<sup>1</sup>-extender

<sup>2</sup>-elementary stitche



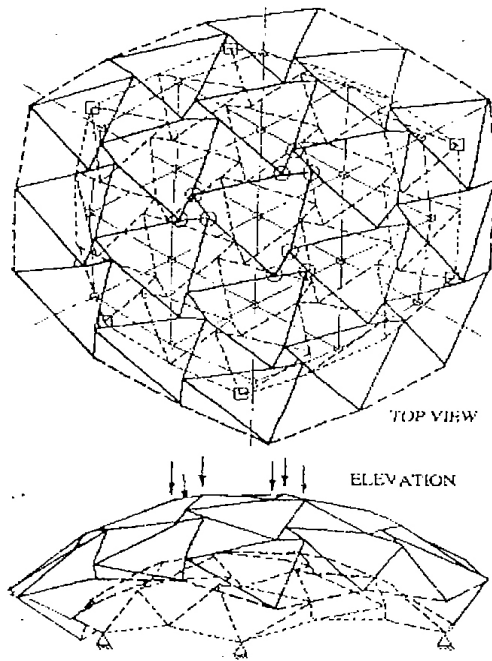
(شکل ۳۰): شبکه های تنسگریتی دو لایه {۱۴}

- یک عامل اساسی که حالت خودتنیدگی را برای بسیاری از شبکه‌های تنسگریتی جدید دو لایه ایجاد می‌کند پهنابند ۷ است که متشکل از موارد زیر می‌باشد: {۱۴}
- ۱- هر مدول دارای اعضای فشاری است که گره‌هایشان روی لایه‌ها قرار می‌گیرند. در هر مدول اعضای فشاری از دو، سه یا چهار و ... عضو فشاری تشکیل شده است.
  - ۲- با کابل‌های موثر می‌توان یک حالت خودتنیدگی بین برخی المان‌های شبکه مجاور ایجاد نمود.
  - ۳- کابل‌های لایه‌ها، که گره یک گروه از اعضای فشاری را به گره‌های دیگر گروه‌های اعضای فشاری وصل می‌کنند. از اینرو کابل‌ها به لایه‌ها متعلق هستند.

### ۳-۷- گنبد‌های تنسگریتی

تفاوت اساسی بین گنبد‌ها و شبکه‌های تخت اینست که هندسه پیش‌تنیده شبکه‌های تخت، مستقیماً از ترکیب هندسی سیمپلکس‌ها ایجاد می‌شود، ولی گنبد‌ها با توجه به هندسه اولیه، به فرآیند شکل‌یابی نیاز دارد تا هندسه پیش‌تنیده ایجاد گردد.

در گنبد شکل (۳۱)، همه‌ی سیمپلکس‌های هرمی ابعاد یکسانی دارند. هندسه اولیه فرضی برای این گنبد با قرار دادن مراکز سیمپلکس‌های هرمی در شش وجهی ژئودزیک محیط بر یک کره، به دست آمده است. شبکه حاصل از اتصال این مراکز سیمپلکس‌ها، شبکه قوسی نامیده می‌شوند و در شکل (۳۱) با خط نقطه نشان داده شده است. این گنبد، انعطاف‌پذیر هندسی می‌باشد و به منظور حذف مکانیزم‌های بی-نهایت کوچک، می‌توان با اتصال کابل‌های اضافی، بدون نیاز به اعمال پیش‌تنش، این مکانیزم را حذف نمود {۵}.



(شکل ۳۱): گنبد تنسگریتی انعطاف‌پذیر هندسی {۵}

## فصل ۴:

### بارگذاری سازه‌های تنسگریتی



## بارگذاری سازه‌های تنسگریتی

بارهای سازه تنسگریتی شامل تمام نیروهایی است که در طول مراحل ساخت، اجرا و بهره‌برداری به سازه اعمال می‌گردد و این بارها 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 آیین نامه ۵۱۹ ایران جوابگوی تمامی حالات متنوع معماری این نوع سازه‌ها نیست. معمولاً جهت بارگذاری از آیین نامه‌های معتبر برای بارگذاری این نوع سازه‌ها استفاده می‌شود. مثلاً هنگام بارگذاری برف برای منطقه‌ای خاص با استفاده از آیین نامه ۵۱۹ تعیین می‌گردد ولی جهت توزیع برف در سطح گنبد در حالات متقارن و نامتقارن می‌توان از ANSI/ASCE استفاده کرد.

ماهیت بارهای وارده به یک سازه معمولاً از نوع حجمی یا سطحی می‌باشند. مثلاً نیروهای ناشی از زلزله، تغییر درجه حرارت و وزن سازه جزء نیروهای حجمی می‌باشد. به عبارت دیگر این نیروها در حجم سازه و اعضای آن توزیع می‌گردند. ولی نیروی سطحی به سطح سازه اعمال می‌شوند. مثل بار برف، باد، وزن تأسیسات، سربار، نیروی جرثقیل و غیره. در این حالت بار توسط یک سطح تحمل گردیده و منتقل می‌گردد که در سازه‌های تنسگریتی سعی در انتقال این نیروها از طریق اتصالات می‌باشد. همچنین در مورد نیروهای حجمی، معمولاً نیروها به طول اعضا وارد می‌گردند که سبب خمش در اعضای فشاری شده و بنابراین در مراحل بارگذاری می‌بایست این نیروها در طول المان اعمال گردد و یا با تقسیم نیروها بین اتصال ابتدا و انتها مقادیر لنگر روی عضو را در مراحل طراحی منظور شود.

#### ۴-۱- بارهای مرده

بار مرده سازه تنسگریتی متشکل از وزن سازه، وزن پوشانه، و وزن تأسیسات می‌باشد. وزن سازه با توجه به طول دهنه، نوع و مشخصات ساختار (ارتفاع شبکه، طول اعضا و...)، شکل سازه (گنبدی یا مسطح) و مقادیر بارهای وارده متغیر است که حدوداً از ۲۰ الی ۶۰ کیلوگرم برای هر مترمربع سازه تغییر می‌کند. معمولاً امروزه توسط برنامه‌های کامپیوتری بارهای مرده مستقیماً به سازه اعمال می‌گردد.

بار مرده پوشانه، متناسب با نوع آن تعیین می‌شود. از انواع پوشانه‌های رایج می‌توان ورق گالوانیزه فولادی یا آلومینیومی با یک لایه پشم شیشه و توری مرغی، پانل ساندویچی، پوشانه‌های شفاف از جمله ورقهای لکسان، شیشه و پوشانه‌های سنگین مانند بلوک‌های بتنی پیش‌ساخته را نام برد. وزن این پوشانه‌ها متغیر می‌باشد که برای پوشانه‌های سبک حدود ۱۵ الی ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع و برای پوشانه‌های سنگین حدود ۱۲۰ الی ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع برآورد می‌گردد.

وزن تأسیسات نصب شده در سازه‌های تنسگریتی معمولاً بستگی به مشخصات آن دارد که در حدود ۱۰ کیلوگرم بر مترمربع برآورد می‌شود. بنابراین وزن مرده سازه تنسگریتی برای هر متر مربع حدود ۳۰ الی ۵۰ کیلوگرم برای سقف‌های سبک و بیشتر از ۱۵۰ کیلوگرم برای سقف‌های سنگین منظور می‌گردد.

#### ۴-۲- بار برف

مقدار بار برف بر اساس محل پروژه صبق آیین‌نامه ۵۱۹ ایران تعیین می‌گردد که ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع برای مناطق سردسیر و ۲۵ کیلوگرم بر متر مربع برای مناطق گرم تعیین شده است. نحوه توزیع بار برف در سقف‌های مسطح مشخص است ولی در سازه‌های قوسی و شکل‌های پیچیده‌تر، می‌بایست توسط آیین‌نامه‌های معتبر و با قضاوت مهندسی و با درک شکل خاص سازه توزیع گردد. در اینجا می‌توان به عوامل مؤثر در توزیع بار برف اشاره کرد.

۱- سرخوردن برف و کاهش مقدار آن که بستگی به نوع پوشش و همچنین دمای داخل پوشش دارد. (سقف گرم و سرد).

۲- شیب سقف در هر نقطه.

۳- برف روبي باد و تجمع برف در محل‌های خاص.

۴- بارگذاری نامتقارن برف ناشی از باد و حرکت خورشید در طول روز.

#### ۴-۳- سر بار (بار زنده)

در سازه‌هایی که به عنوان سقف استفاده می‌گردد، معمولاً سرباری در نظر گرفته نمی‌شود ولی در سازه‌هایی با کاربری‌های دیگر همانند کف سالن‌های ورزشی یا سالن اجتماعات بر اساس نوع کاربری سرباری طبق آیین‌نامه‌ها در نظر می‌گیریم.

#### ۴-۴- بار ناشی از تغییر درجه حرارت

با توجه به ابعاد سازه‌های تنسگریتی که معمولاً بزرگ هستند تغییر درجه حرارت در مقدار نیروی اعضا تعیین کننده می‌باشد. چرا که دمای محاسباتی که همان دمای ساخت و نصب می‌باشد، با دمای بهره‌برداری متفاوت خواهد بود. این اختلاف دما معمولاً به صورت یکنواخت در کل سازه اعمال می‌گردد که منجر به انقباض سازه گشته و در صورت وجود مهاربندها و یا تکیه‌گاه‌های مقید تولید نیروهای داخلی در سازه می‌نماید. (البته در پاره‌ای موارد مخصوصاً در مورد سازه‌های دولایه که لایه بالا و پایین دارای دمای متفاوت باشند سبب خمش سازه می‌گردد که بایستی اثر آن بررسی شود.) جهت کاهش اثرات تغییر درجه حرارت بهتر است که قیده‌های تکیه‌گاهی به قسمت‌های میانی سازه منتقل گردند تا

سازه بتواند تحت انبساط و انقباض ناشی از تغییر درجه حرارت تغییر شکل داده، تنش‌های داخلی تولید نگردد.

مقدار تغییر درجه حرارت در ایران نسبت به محل پروژه متفاوت است. مثلاً اگر ساخت در تهران در دمای ۲۰ درجه و بافت نیز در همین دما انجام گیرد، با توجه به اینکه درجه حرارت در تهران از ۱۰- تا ۴۵ درجه متغیر است بایستی تغییر درجه حرارتی معادل با ۳۰- درجه الی ۲۵ درجه منظور گردد که در کارهای اجرایی معمولاً ۳۰+ درجه رقم قابل قبولی می‌باشد. البته باید دقت کرد در مناطق سردسیر و گرمسیر مقدار کاهش و افزایش درجه حرارت ثابت نبوده و متفاوت است.

#### ۴-۵-بارباد

مقدار بار باد در ایران (آیین نامه ۵۱۹) برای تمامی نقاط ثابت فرض شده است که فشار آن برحسب ارتفاع سازه متغیر می‌باشد. در سازه تنسگریتی معمولاً بار باد بصورت بار جانبی و بیشتر بعنوان بار مکش سقف منظور می‌گردد. توزیع بار باد بر اساس فشار داخلی و خارجی که توسط آیین‌نامه‌های معتبر ارائه شده است، برای دیوارهای جانبی و سقف سازه تعیین می‌شود. برای سازه‌های پیچیده با استفاده از آیین-نامه‌ها، گزارش آزمایش‌های تونل باد و با قضاوت مهندسی توزیع معقولی برای بار باد منظور می‌گردد که به محل پروژه، سازه‌های مجاور به اضافه‌ی ارتفاع و شکل سازه بستگی دارد. بار باد معمولاً برای هردو حالت منافذ باز و بسته محاسبه می‌گردد. باد معمولاً زمانی که بار زنده وجود ندارد با توجه به وزن سبک سازه، سبب برکنش شده و سبب تولید کشش در ستون‌ها می‌شود. به همین سبب کشش در میل مهارها و پی‌ها ایجاد می‌گردد که باید مد نظر قرار گیرد.

اثر باد در طراحی سازه تنسگریتی معمولاً در محاسبه بادبندها، مهارها و ستون‌های خمشی (در صورت عدم بادبندی) تأثیر بسزایی دارد. همچنین سبب تولید فشار در لایه پایین در قسمت میانی سازه می‌گردد ولی غالباً تأثیر چندانی در طراحی اعضای شبکه ندارد.

#### ۴-۶- بار زلزله

اثرات زلزله در سازه تنسگریتی تا حدی متفاوت از سازه‌های متعارف می‌باشد. آیین‌نامه‌ها جرم سازه را جرم ناشی از بار مرده و درصدی از بار زنده در نظر می‌گیرند که معمولاً ۲۰ درصد می‌باشد. بر این اساس و با فرض قبول تقریب در محاسبات جرم محل را به صورت متمرکز در گره‌های سازه اعمال می‌گردد. با توجه به اشکال خاص این نوع سازه‌ها معمولاً بهتر است از روش شبه دینامیکی استفاده کنیم چرا که مدهای ارتعاشی این نوع سازه‌ها همانند سازه‌های متعارف نیست. جهت آنالیز شبه دینامیکی از طیف طراحی آیین‌نامه‌ها استفاده می‌شود. همچنین شتاب پایه زمین براساس منطقه پروژه و لرزه خیزی آن تعیین می‌گردد. ضریب شکل پذیری و یا رفتار برای سازه تنسگریتی معمولاً (۵-۶) منظور می‌گردد که در تعیین آن می‌بایست به عوامل مؤثر در این ضریب توجه کرد و با قضاوت مهندسی عدد درست را انتخاب نمود. در رفتار لرزه‌ای سازه تنسگریتی می‌توان به مدهای ارتعاشی قائم اشاره کرد که با توجه به دهانه زیاد این نوع سازه‌ها مدهای قائم خود تعیین کننده هستند و می‌بایست مؤلفه قائم زلزله را در محاسبات منظور کرد. (در محاسبات عملی معمولاً مقدار طیف را در دو جهت افقی با مقیاس ۱ و در جهت قائم با مقیاس ۲/۳ منظور می‌نماییم و سپس با ضرایبی با هم ترکیب می‌کنیم.) تأثیر نیروی ناشی از بارهای زلزله معمولاً در طرح شبکه ناچیز می‌باشد و بیشتر در طراحی مهارهای جانبی، بادبندها ستون‌های خمشی تعیین کننده است.

#### ۴-۷- ترکیبات بارگذاری

بارهای اشاره شده در بالا برای ترکیبات بارگذاری زیر آنالیز می‌گردند.

$$D$$

$$D + S$$

$$D + T$$

$$D + S - T$$

$$(D + W) \cdot 0.75$$

$$(D + S + W) \cdot 0.75$$

$$(D + E) \cdot 0.75$$

$$(D + S + E) \cdot 0.75$$

که D معرف بار مرده، S بار برف، E بار زلزله، W بار باد و T بار ناشی از تغییر درجه حرارت می‌باشد. البته ضرایب فوق براساس طراحی به روش تنش مجاز می‌باشد و برای طراحی به روش مقاومت نهایی، ضرایب دیگری باید اعمال گردد.

بجز ترکیبات مطرح شده در بالا، سازه می‌بایست برای بار مرده‌ی وزن سازه در تمامی مراحل نصب آنالیز گردد که در این حالت محل‌های آویز بعنوان تکیه‌گاه‌های سازه و یا قسمتی از آن منظور می‌گردند.

## فصل ۵:

### تاشه‌پردازی سازه‌های تنسگریتی

## تاشه‌پردازی سازه‌های تنسگریتی

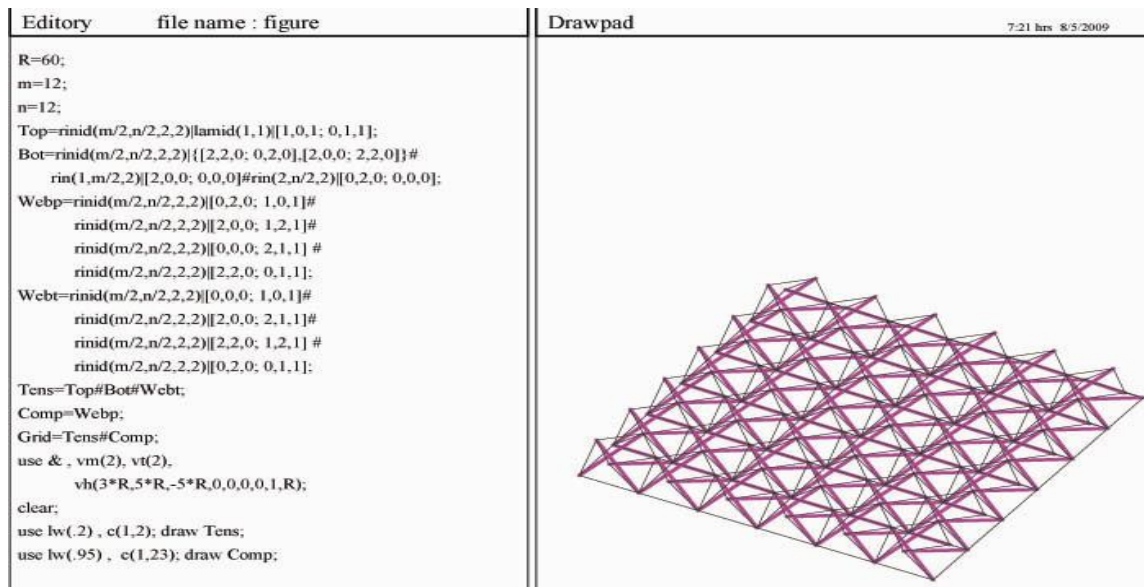
با استفاده از نرم‌افزارهای متفاوت می‌توان تاشه تنسگریتی ایجاد نمود و سپس تاشه را به نرم‌افزارهای دیگری که قابلیت تحلیل را دارند انتقال داد. جبر فرمکسی، یک سیستم ریاضی است که پردازش ساختارهای سازه را فراهم می‌کند. شاخه‌ای از جبر فرمکسی که ساختار هندسی را ایجاد می‌کند، تاشه-پردازی فرمکسی نامیده می‌شود، 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.

### ۵-۱- استفاده از نرم‌افزارها برای فرم‌بندی سازه‌های تنسگریتی

#### ۵-۱-۱- 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 نرم‌افزارهای محاسباتی و معماری می‌باشد. بنابراین ابتدا تاشه مورد نظر در نرم‌افزار فرمین تولید می‌شود سپس با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار فرمین فایل ایجاد شده را به فرمت دلخواه برای نرم‌افزار دیگر تبدیل می‌کنیم.





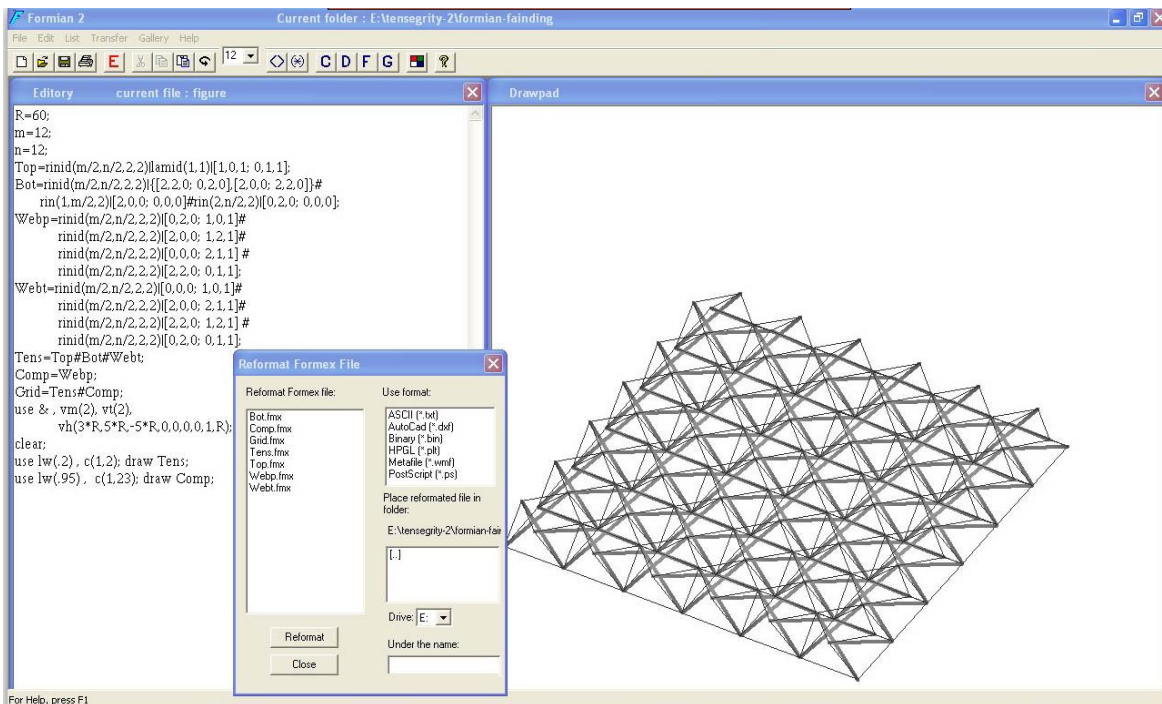
(شکل ۳۲): تاشه‌پردازی در نرم‌افزار فرمین

### ۵-۱-۲- سایر نرم‌افزارهای فرم‌سازی

در این بخش منظور نرم‌افزارهایی هستند که متفاوت از فرمین بوده ولی توسط آنها نیز می‌توان شبکه سازه‌تسنگریتی را ایجاد نمود. از این قبیل نرم‌افزارها می‌توان، نرم‌افزار ATUOCAD,SOLIDWORK,3DMAX و... را نام برد. بنابراین پس از ایجاد فرم بایستی به نرم‌افزار محاسباتی مورد نظر انتقال داد.

### ۵-۱-۳- قالب فایل‌های خروجی در نرم‌افزار فرمین

در نرم‌افزار فرمین می‌توان فرمکس‌های ایجاد شده را به صورت فایل و در قالب‌هایی که استفاده در نرم‌افزارهای دیگری باشند، درآورد. شکل زیر تصویری از محیط نرم‌افزار فرمین که در آن یک شبکه تخت تنسگریتی تاشه‌پردازی و ترسیم شده را نشان می‌دهد.



(شکل ۳۳): فایل‌های خروجی در نرم‌افزار فرمین

جهت تبدیل متغیر فرمکسی به دیگر قالب‌ها که مورد استفاده در سایر نرم‌افزارهاست، transfer را از نواری ابزار انتخاب کرده و به فرمت مورد نظر تبدیل می‌کنیم این نرم‌افزار قابلیت تبدیل به فرمت‌هایی همچون dxf, ASCII, Binary و... را دارد.

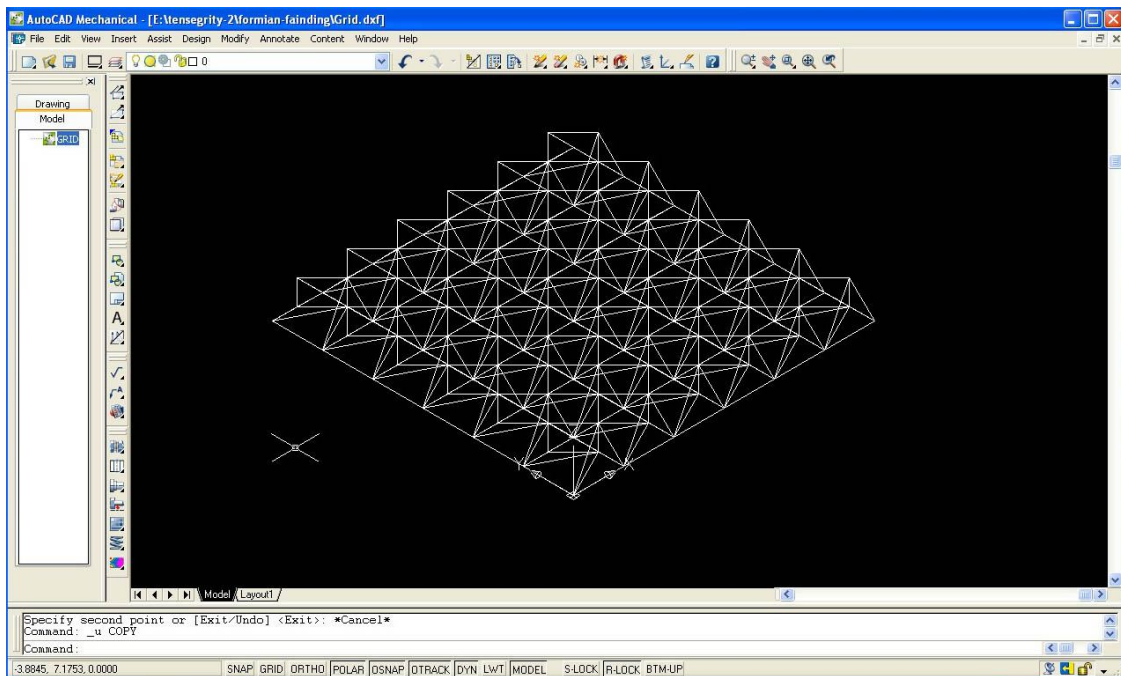
#### ۵-۱-۴- بررسی فایل متنی ایجاد شده توسط فرمین

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.

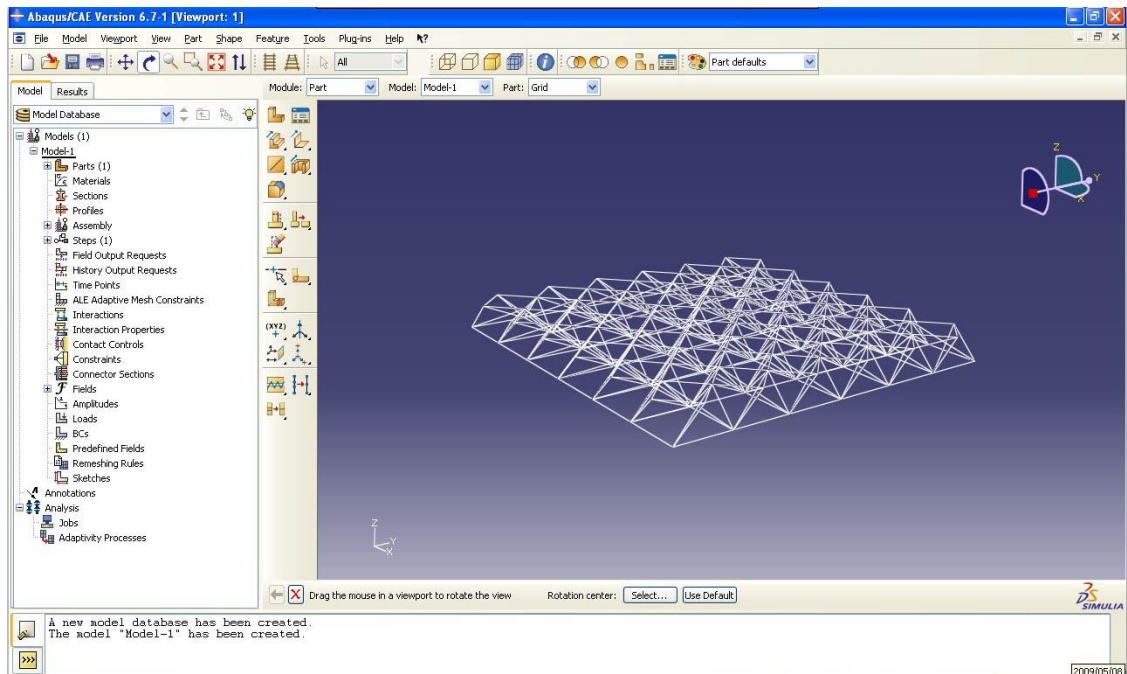
## ۵-۱-۵- انتقال اطلاعات فرمکسی از فرمین به نرم افزار abaqus

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 abaqus گردد.



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

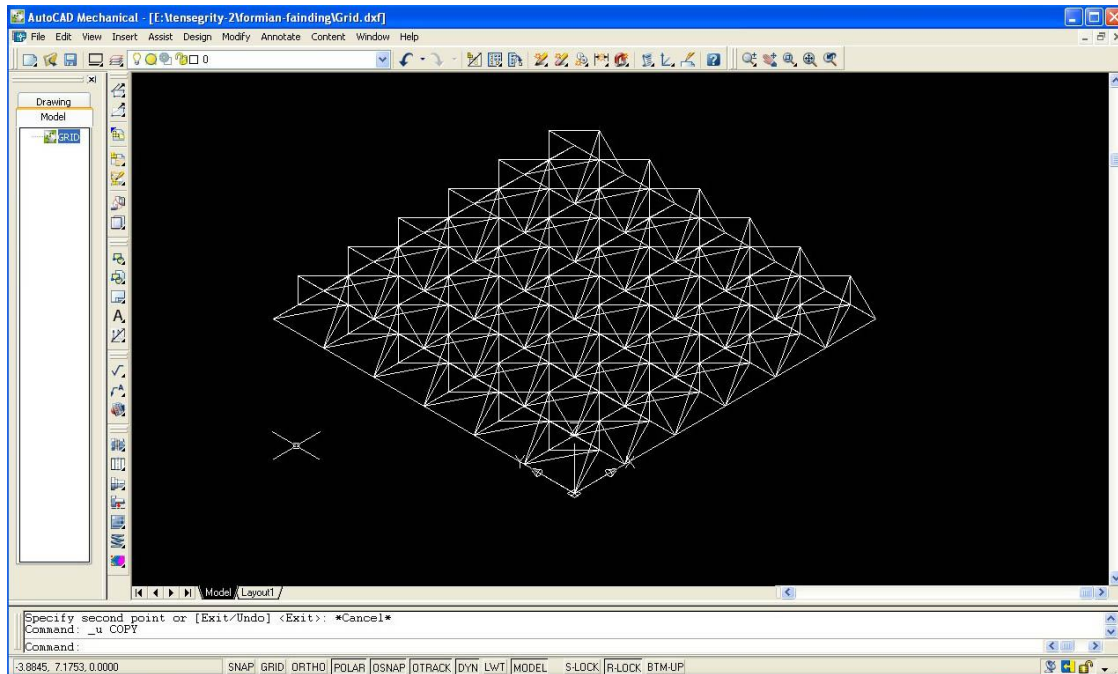


(شکل ۳۵): وارد نرم افزار abaqus می گردد.

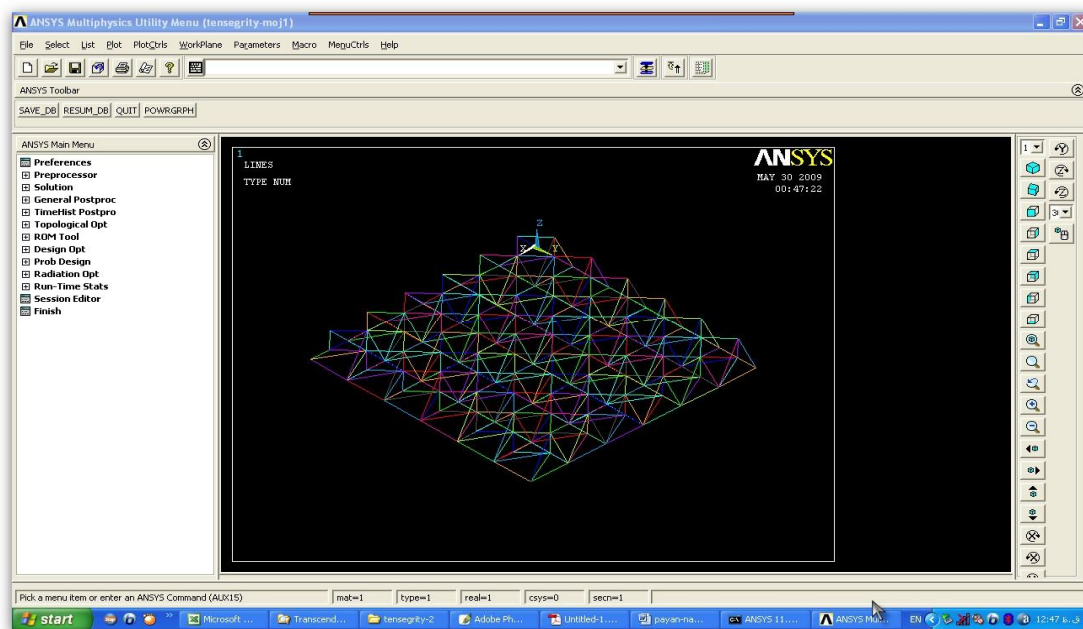
## ۵-۱-۶- انتقال اطلاعات فرمکسی از فرمین به نرم افزار Ansys

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 ۶:

مدل سازی به روش اجزاء محدود

## مدل سازی به روش اجزاء محدود

### ۶-۱- مقدمه

جهت یافتن رفتار واقعی سازه‌های تنسگریتی اتکا بر مطالعات آزمایشگاهی اجتناب ناپذیر است. بدلیل اینکه می‌توان اعضا و اتصالات مربوط به آن را به درستی مدل سازی کرده و رفتار مکانیکی سازه‌های تنسگریتی را مورد مطالعه و بررسی قرار داد. ولی با توجه به ویژگی‌های خاصی همچون پرهزینه بودن، کمبود امکانات آزمایشگاهی لازم، محدودیت زمانی و... در پایان نامه حاضر از روش اجزاء محدود استفاده می‌کنیم.

### ۶-۲- تحلیل مورد استفاده

در سازه‌های تنسگریتی، سه عامل موجب رفتار غیرخطی می‌گردد که:

الف- تغییر حالت: عناصر کابلی، نوعی رفتار غیرخطی را به نمایش می‌گذارند که وابسته به حالت و وضعیت است. بدلیل اینکه این عناصر دارای دو حالت شل و سفت می‌باشد. شایان ذکر است که تغییر حالت در عناصر کابلی به بارگذاری بستگی دارد.

ب- غیرخطی‌های هندسی: در سازه‌های تنسگریتی، عوامل زیر باعث رفتار غیرخطی هندسی می‌شوند: ۱- کوتاه شدگی طول اعضا تحت نیروهای محوری ۲- تغییر طول اعضا به خاطر خمیدگی<sup>۳</sup> در این سازه‌ها اندازه تغییر مکان‌ها ممکن است بزرگ باشند، حتی اگر تغییر شکل‌ها کوچک باشند ۴- در این سازه‌ها، بدلیل اعمال پیش‌تنیدگی، سخت‌شدگی تنش رخ می‌دهد. در نتیجه سختی  $[k]$  به صورت تابعی از تغییر مکان  $\{u\}$  می‌شود.

---

<sup>3</sup>- Bowing

ج- غیر خطی مصالح: بنا به آزمایشات و تحقیقات انجام شده توسط محققین، رفتار مشخصه عناصر کابلی به صورت غیرخطی می‌باشد. همچنین روابط تنش محوری - کرنش محوری برای عناصر فشاری نیز غیرخطی می‌باشد.

بنابراین با توجه به عوامل ذکر شده، می‌توان گفت که برای بررسی رفتار سازه‌های تنسگریتی، می‌بایست از تحلیل‌های غیرخطی هندسی و رفتار غیر خطی مصالح استفاده گردد. نوع تحلیل (غیرخطی هندسی و رفتار غیر خطی مصالح)، روش تحلیل غیرخطی طول کمان<sup>۴</sup> به همراه روش نیوتن-رافسون، مدل سازی اعضای کششی و مدل سازی اعضای فشاری می‌باشد.

### ۶-۳- مدل سازی غیرخطی مصالح برای سازه‌های تنسگریتی

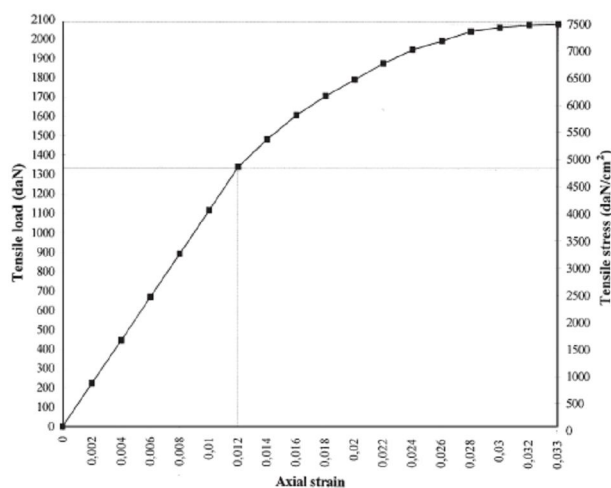
#### ۶-۳-۱- مدل سازی پلاستیسیته برای عناصر کششی

رفتار تنش - کرنش مصالح کششی با توجه به نتیجه‌ی آزمایش که در شکل ۳۷ نشان داده شده است، به صورت چند خطی با سخت شدگی ایزوتروپیک به برنامه *abaqus* وارد می‌شود. که تا نقطه تسلیم، رابطه تنش - کرنش به صورت خطی و پس از آن به صورت غیرخطی غیرارتجاعی می‌باشد.

---

<sup>4</sup>- Arc-length Method





(شکل ۳۷): رفتار تنش - کرنش مصالح کششی {۹}

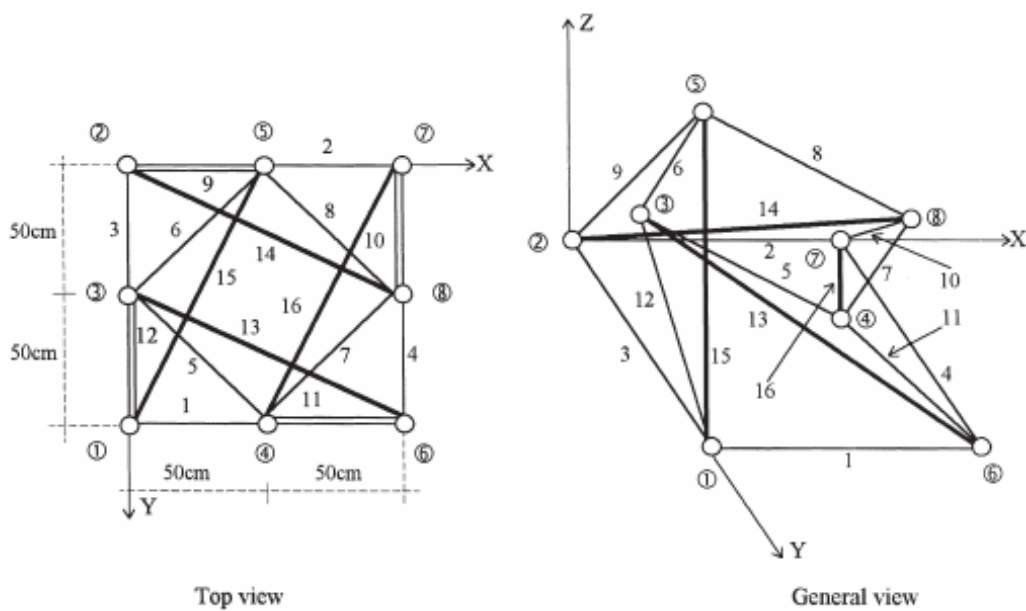
### ۶-۳-۲- مدل سازی پلاستیسیته برای عناصر فشاری

برای مدل کردن رفتار عضو فشاری در تحلیل غیرخطی، از پاسخ بار محوری - تغییرمکان محوری عضو فشاری استفاده می‌شود. یک تحلیل استاتیکی غیرخطی (الاستوپلاستیک، تغییرمکان‌های بزرگ) برای یافتن پاسخ بارمحوری - تغییرمکان اعضای فشاری انجام می‌گیرد، به عبارت دیگر، غیرخطی‌های مصالح و هندسه غیرخطی در تحلیل در نظر گرفته می‌شوند. در ضمن برای دنبال نمودن مسیر تعادل و گذر از نقطه‌ی بحرانی به محدوده پس بحرانی، روش طول کمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. انحنا‌ی اولیه عضو به عنوان نقص در نظر گرفته می‌شود و ماکزیمم نقص در وسط عضو می‌باشد.

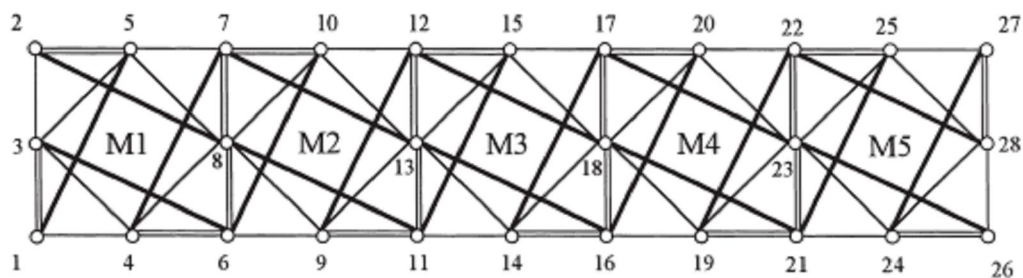
### ۶-۴- بررسی و ارزیابی صحت مدل سازی اجزا محدود

تحلیل‌های غیرخطی موجود روی سیستم‌های تنسگریتی تا مرحله پیش گسیختگی اعضای کششی و پیش کمانش اعضای فشاری، انجام یافته‌اند. لذا در اینجا چند نمونه تحلیل غیرخطی روی سیستم‌های

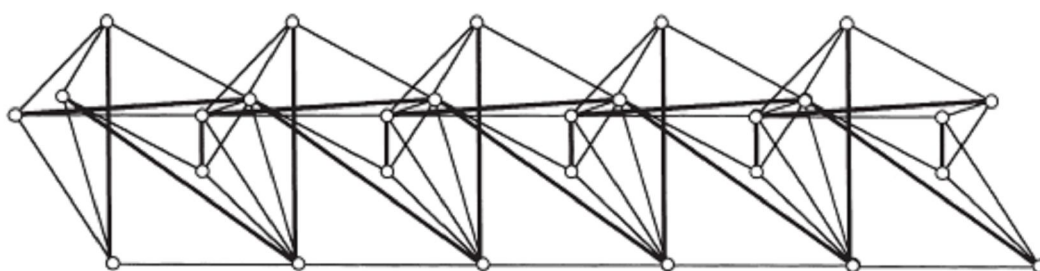
تنسگریتی با روش نیوتن-رافسون توسط نرم افزار *abaqus* انجام داده ایم و با نتایج تحلیل های غیرخطی انجام یافته توسط دیگر محققین روی همین سیستم ها مقایسه کرده ایم. سیستم های مورد مطالعه در شکل های ۳۸ و ۳۹ نشان داده شده است.



(شکل ۳۸): مدول تنسگریتی متشکل از چهار عضو فشاری



Top view



General view

(شکل ۳۹): سازه تنسگریتی متشکل از ۵ مدول مربع

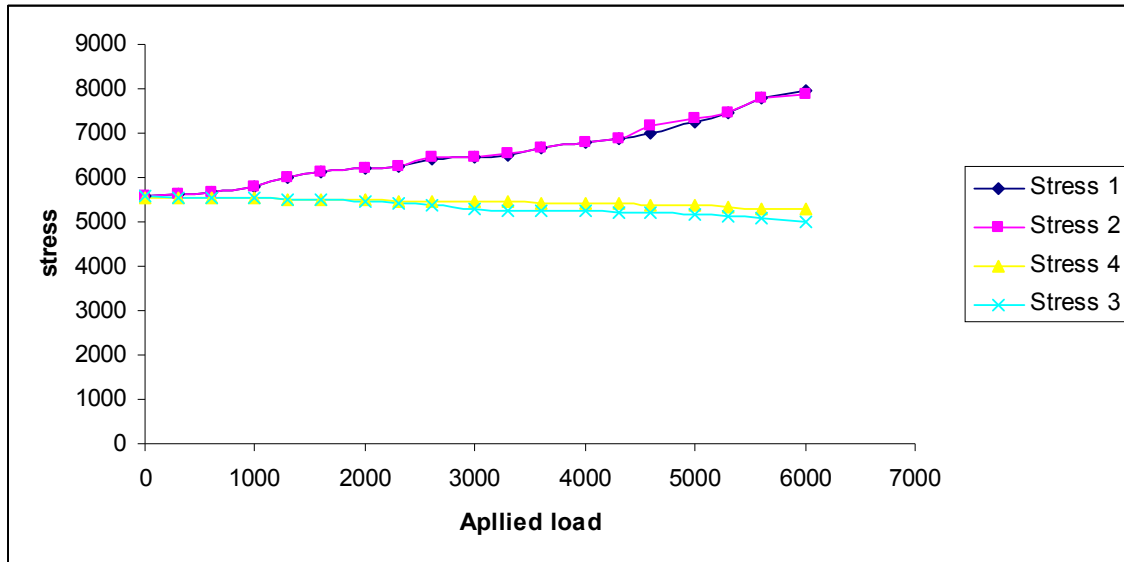
مشخصات هندسی، مصالح و سیستم‌ها به صورت زیر می‌باشد:

سیستم تنسگریتی شامل چهار عضو فشاری، نشان داده شده در شکل ۴۱، دارای ۸ گره ۴ گره تحتانی: (۱)، (۲)، (۳)، (۴)، (۵)، (۶)، (۷) و ۴ گره فوقانی: (۳)، (۴)، (۵)، (۸) و دارای ۱۶ عضو: ۱۲ عضو کششی و ۴ عضو فشاری، می‌باشد. این سازه دارای سه نوع عضو کششی: ۴ کابل افقی تحتانی (۱، ۲، ۳، ۴)، ۴ کابل افقی فوقانی (۵، ۶، ۷، ۸) و ۴ کابل مهار (۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲) و ۴ عضو فشاری (۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶) می‌باشد. و اعضای کابلی، دارای مدول الاستیسیته  $0.4 \times 10^6 N/cm^2$  و سطح مقطع  $0.28 cm^2$  و وزن واحد طول  $0.205 N/cm$  می‌باشند. عناصر فشاری دارای مدول الاستیسیته  $2 \times 10^7 N/cm^2$  و سطح مقطع  $3/25 cm^2$  و وزن واحد طول  $0.279 N/cm$  و تنش تسلیم  $23500 N/cm^2$  و ظرفیت فشاری  $36300 N$  می‌باشند. مقاومت کمانشی

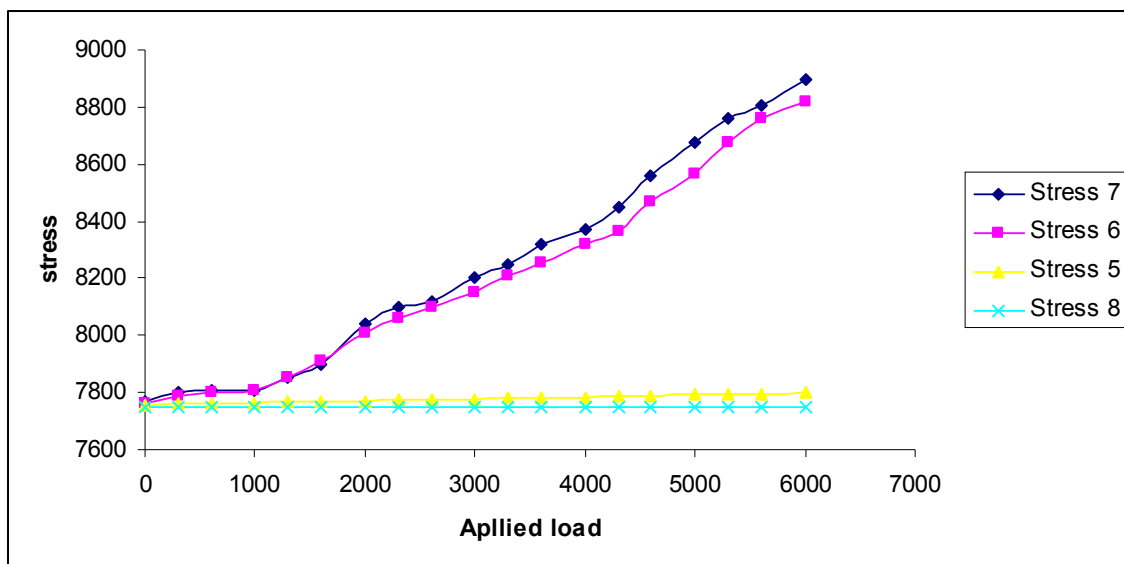
اعضای فشاری  $11169N/cm^2$  بوده که از تنش تسلیم کمتر است. بنابراین این اعضا قبل از تسلیم کمانش می‌کنند. رفتار مصالح اعضای کششی، با توجه به نتایج آزمایش که در شکل ۴۰ به صورت رابطه تنش - کرنش نشان داده شده است، به نرم‌افزار *abaqus* معرفی می‌شود.

#### ۶-۴-۱- تحلیل غیرخطی هندسی سیستم تنسگریتی

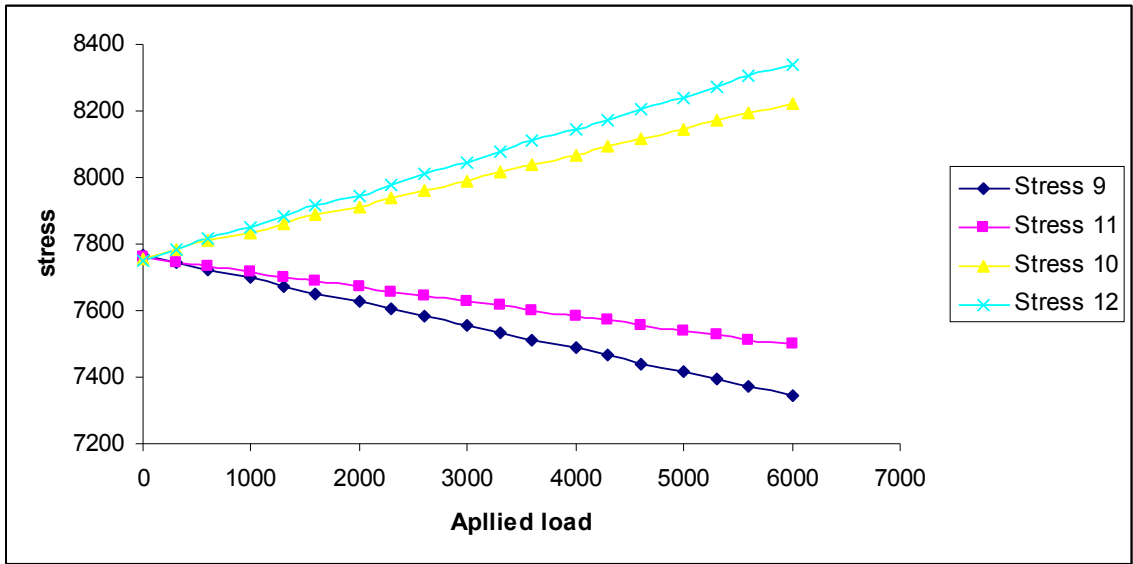
سیستم تنسگریتی که شامل ۴ عضو فشاری بوده را در برابر حرکت صلب جسمی مقید می‌کنیم. (گره ۱ در راستای  $X, Y, Z$  و گره ۲ در راستای  $X, Y$  و گره ۳ در راستای  $X$  گیردار می‌شود) این سیستم دارای مکانیزم‌های بی‌نهایت کوچک بوده و به منظور حذف این مکانیزم‌های بی‌نهایت کوچک، تحلیل پیش‌تنیدگی انجام می‌شود. با اعمال کرنش اولیه در عناصر کششی و تحلیل پیش‌تنیدگی یک سختی به سازه داده می‌شود و بدین ترتیب مکانیزم‌های بی‌نهایت کوچک موجود در سازه، حذف می‌شود. سپس با اعمال بارگذاری کششی به اندازه  $6000N$  روی گره‌های ۷ و ۸، تحلیل غیر خطی به روش نیوتن-رافسون انجام می‌شود. تغییرات نیروهای عناصر کششی و فشاری بر حسب بارگذاری خارجی در شکل‌های ۴۳ و ۴۲ و ۴۱ و ۴۰ نشان داده شده است که قابل مقایسه با نتایج هدف و شکل‌های موجود در پیوست الف می‌باشد.



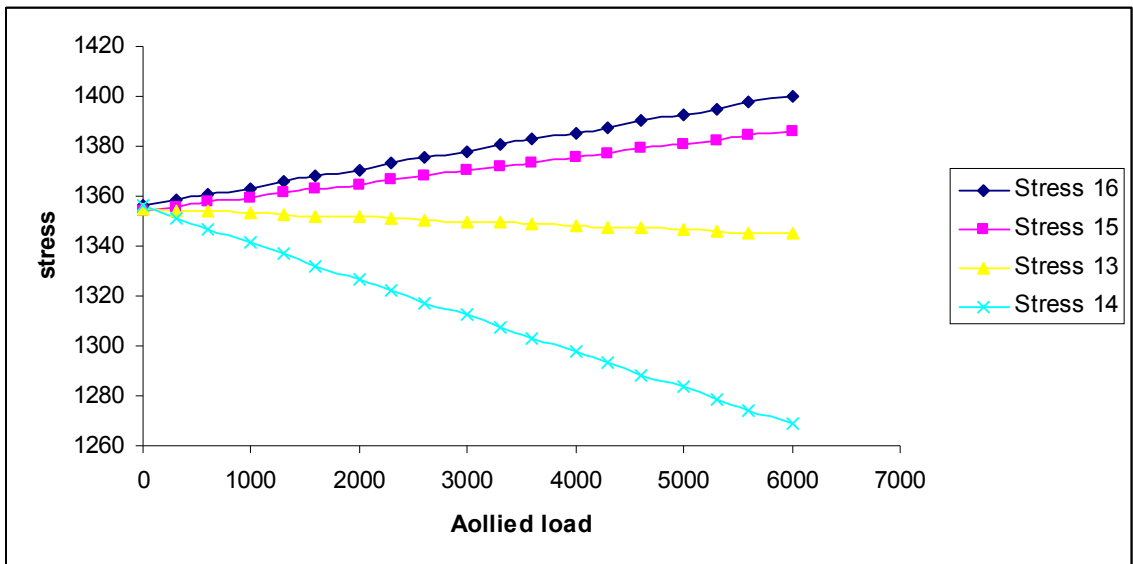
(شکل ۴۰): تغییرات نیروهای اعضای کششی لایه تحتانی (اعضای کابلی ۱ و ۲ و ۳ و ۴)



(شکل ۴۱): تغییرات نیروهای اعضای کششی لایه فوقانی (اعضای کابلی ۵ و ۶ و ۷ و ۸)



(شکل ۴۲): تغییرات نیروهای اعضای کششی قطری (اعضای کابلی ۹ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲)

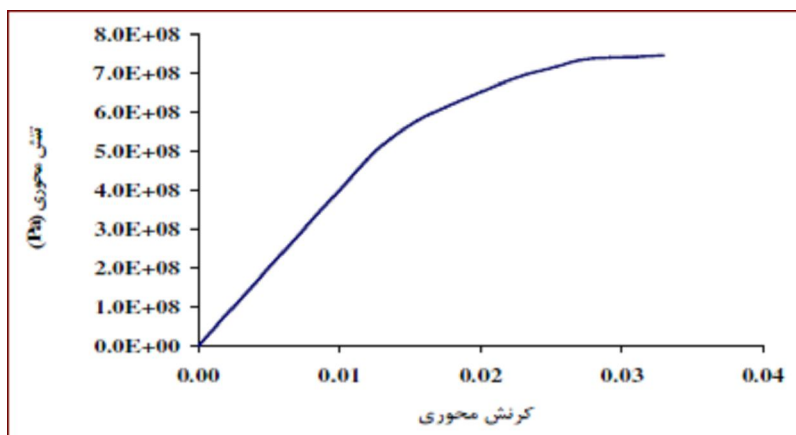


(شکل ۴۳): تغییرات نیروهای اعضای فشاری (اعضای فشاری ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶)

## ۶-۵- مدل سازی و ارزیابی آن با کار آزمایشگاهی

### ۶-۵-۱- مدل سازی پلاستیسیته برای عناصر کششی

رفتار تنش- کرنش مصالح کششی ، به صورت چند خطی با سخت شدگی ایزوتروپیک به برنامه *abaqus* وارد می‌شود. که تا نقطه تسلیم، رابطه تنش- کرنش به صورت خطی و پس از آن به صورت غیرخطی غیرارتجاعی می‌باشد. (شکل ۴۸)



(شکل ۴۴): رفتار تنش- کرنش مصالح کششی

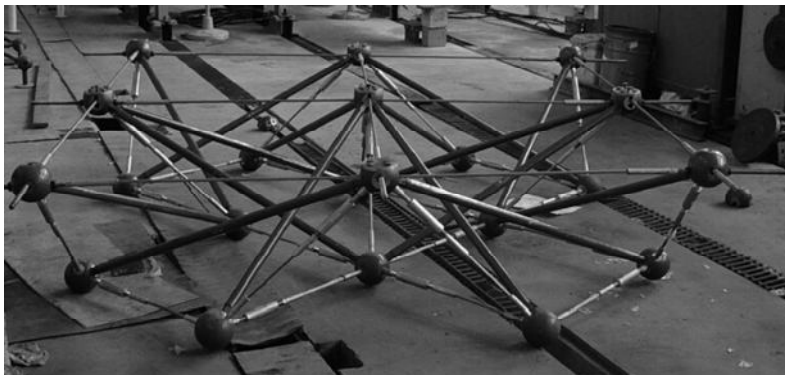
### ۶-۵-۲- مدل سازی پلاستیسیته برای عناصر فشاری

به جهت رسیدن به نتایج دقیق تر هر عضو فشاری به ۲۰ المان تقسیم شده است. در ضمن انحنای اولیه به عنوان نقص در نظر گرفته شده است. برای اعضای فشاری نقص اولیه به مقدار  $0.001L$  در نظر گرفته شده است. همچنین برای مدل کردن رفتار عضو فشاری در تحلیل غیرخطی، از پاسخ بار محوری-تغییرمکان محوری عضو فشاری استفاده می‌شود. یک تحلیل استاتیکی غیرخطی (الاستوپلاستیک، تغییرمکان‌های بزرگ) برای یافتن پاسخ بار محوری- تغییرمکان اعضای فشاری انجام می‌گیرد.

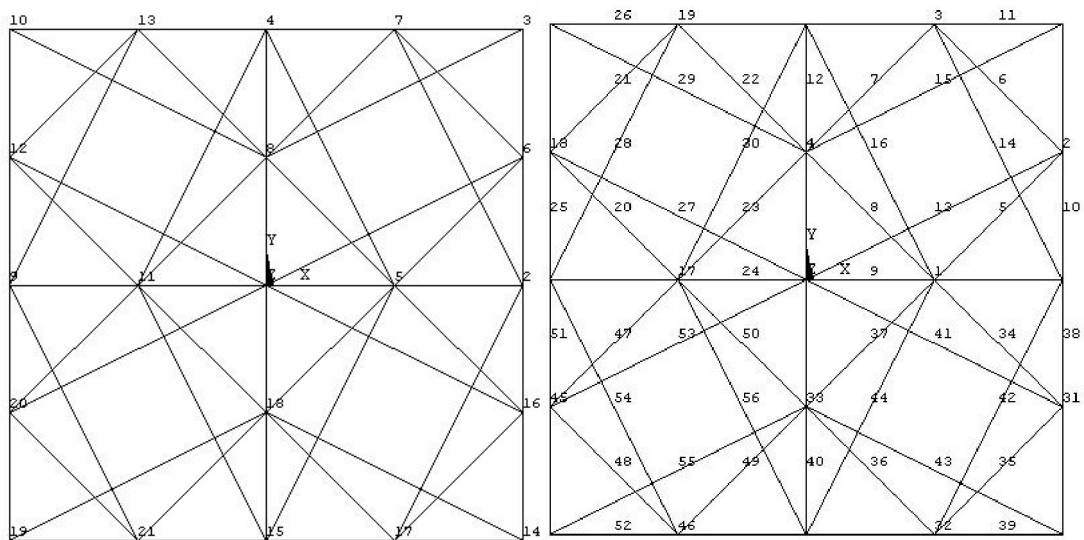
### ۶-۵-۳- ساختار مورد نظر

مشخصات هندسه و مصالح این سازه‌ها به صورت زیر می‌باشد:

سازه‌ای متشکل از ترکیب ۴ سیمپلکس هرمی که ۶ گره در راستای  $Z$ ، ۱۲ گره در راستای  $X, Z$ ، گره ۱۶ در راستای  $Z, Y$ ، گره ۲۰ در راستای  $X, Y, Z$  مقید شده‌اند. عناصر فشاری دارای مدول الاستیسیته  $210 \text{ GPa}$  و سطح مقطع  $273,32$  میلی‌متر مربع است. عناصر کششی دارای مدول الاستیسیته  $210 \text{ GPa}$  و سطح مقطع  $59,69$  میلی‌متر مربع است. {۲۱}



(شکل ۴۵): شبکه تنسگریتی مورد آزمایش در آزمایشگاه مونته‌پلیه فرانسه {۲۱}



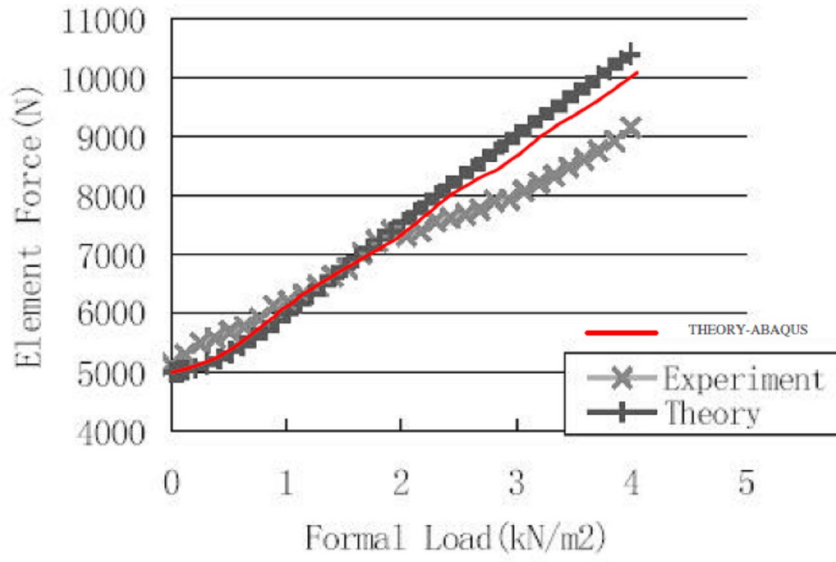
ب: شماره گذاری گره‌ها

الف: شماره گذاری اعضا

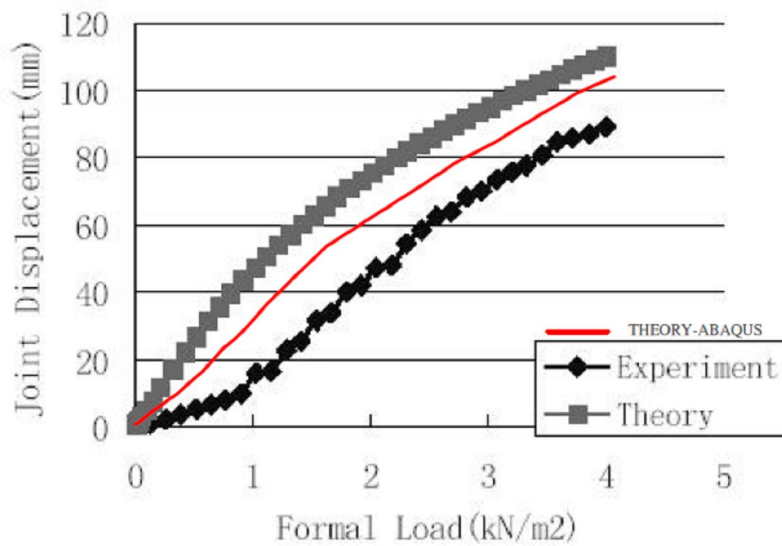
(شکل ۴۶): شماره گذاری شبکه تنسگریتی مورد آزمایش در آزمایشگاه مونته‌پلیه فرانسه {۲۱}



نتایج گرفته شده با مدل سازی که در *abaqus* انجام گرفته است به همراه نتایجی که *Y.Z.LOU* و همکارانشان بدست آورده‌اند در شکل ۴۷ و ۴۸ آمده است.



شکل ۴۷: نمودار تغییرات نیروی محوری المان کابل ۳



شکل ۴۸: نمودار بار تغییر- مکان گره ۱ در راستای Z

با مقایسه نتایج بدست آمده آزمایشگاهی و نتایج بدست آمده توسط abaqus تفاوت‌هایی مشاهده می‌شود. میزان درصد خطا از نتایج بدست آمده به صورت جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱: مقایسه نتایج

load	experimen	abaqus joint displacement	estemait	average
1	12.5302	29.1357	-132.524	
2	44.892	61.637	-37.3006	-49.8596
3	71.1678	82.2184	-15.5275	
4	88.7094	101.2054	-14.0864	
load	experimen	abaqus element force	estemait	average
1	5.1415	5.091	0.982204	
2	5.6741	5.7139	-0.70143	-2.98726
3	6.0647	6.4039	-5.59302	
4	6.6523	7.0938	-6.6368	

## فصل 7:

### تحلیل‌های ناپایداری استاتیکی

## ۷-۱- تحلیل های ناپایداری استاتیکی

در این مبحث تحلیل ناپایداری استاتیکی بر روی ساختارهای مختلف انجام گرفته و رفتار آنها با هم مقایسه شده است. پدیده ناپایداری در سازه‌های فضاکار رامی توان در سه گروه فروجهش گرهی<sup>۵</sup> کمانش عضوی و خرابی پیشرونده طبقه بندی نمود.

فروجهش گرهی: انحراف قابل توجهی که در هندسه سازه در یک ناحیه محلی در یک گره رخ می دهد، فروجهش گرهی نامیده می شود.

کمانش عضوی: در عمل، عضو فشاری غالباً کمانش از نوع شکننده را به نمایش می گذارد، که در این حالت نیروی عضو به طور تدریجی کاهش پیدا کرده و یک تغییر ناگهانی در رفتار پس کمانشی عضو پدید می آید.

خرابی پیشرونده: در حالت کلی، خرابی پیشرونده رامی توان به عنوان "انتشار گسترده یک خرابی که ناشی از صدمه به بخش نسبتاً کوچکی از سازه می باشد" تعریف نمود. همچنین واژه خرابی پیشرونده را می توان به منظور انتشار تدریجی یک ناپایداری محلی نظیر، "فروجهش گرهی" و "کمانش عضوی" در سازه های فضاکار به کار برد.

در این سازه‌ها رفتار انفرادی اعضا اثر تعیین کننده در رفتار کلی آن دارد. نقش اعضای فشاری در رفتار کلی این سازه اینگونه است که: کمانش عضوی در رفتار سازه دارای اثر تدریجی می باشد. در نتیجه در اعضای سازه ای باز توزیع نیرو رخ می دهد. این باز توزیع به نوبه خود ممکن است موجب شود که اعضای نزدیک به اعضای خراب شده، رفتار غیر خطی را به نمایش بگذارند و در اعضای کششی، گسیختگی و در اعضای

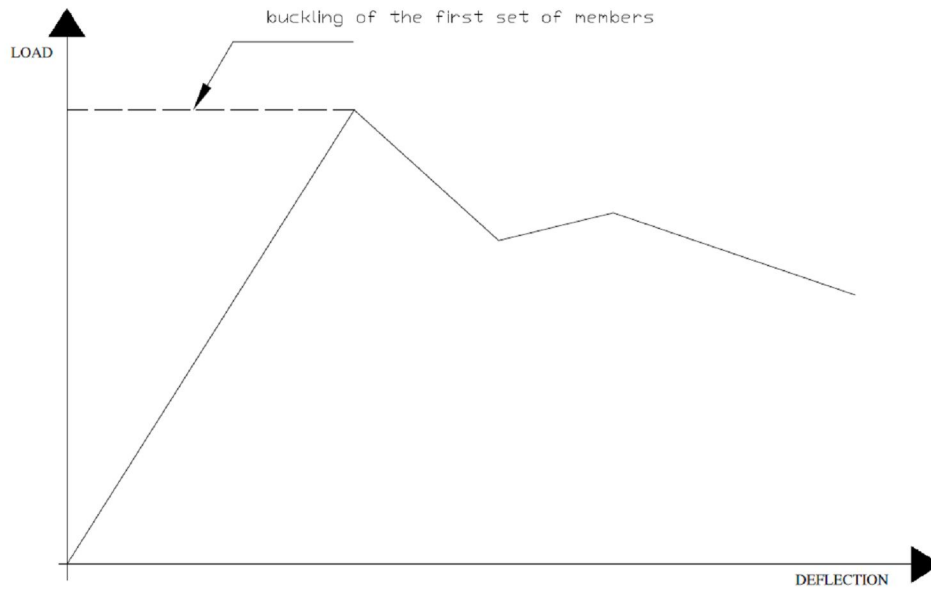
---

<sup>5</sup> nodal snap-through

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 می گردند. اگر کاهش بار در اعضای فشاری به گونه‌ای ناگهانی و شکننده باشد که سایر اعضا نتوانند بارهای توزیع شده را سریعاً جذب نمایند، این بازتوزیع موجب خواهد شد که سایر اعضا خراب شوند و بازتوزیع های دیگر ایجاد شوند. در نتیجه خرابی می تواند در سازه پیشرفت کند و موجب خرابی کل سازه شود. به دلیل اینکه اعضای کششی در سازه های تنسگریتی، برعکس دیگر سازه های فضاکار با اتصالات مفصلی، دارای مشخصه سخت شدگی کرنشی نمی- باشند، در نتیجه در این سازه ها، خرابی ناشی از گسیختگی اعضای کششی نیز مطرح می گردد. همچنین در این سازه ها، اعضای کششی به دلیل تغییر حالت (حالت "شل و سفت") نوعی رفتار غیر خطی را به نمایش می گذارند که به بارگذاری بستگی دارد.

مکانیزم های خرابی سازه فضاکار با اتصالات مفصلی، که انتظار می رود در سازه های تنسگریتی نیز این مکانیزم ها اتفاق بیفتند، با در نظر گرفتن پدیده کمانش عضوی به صورت زیر می باشند :

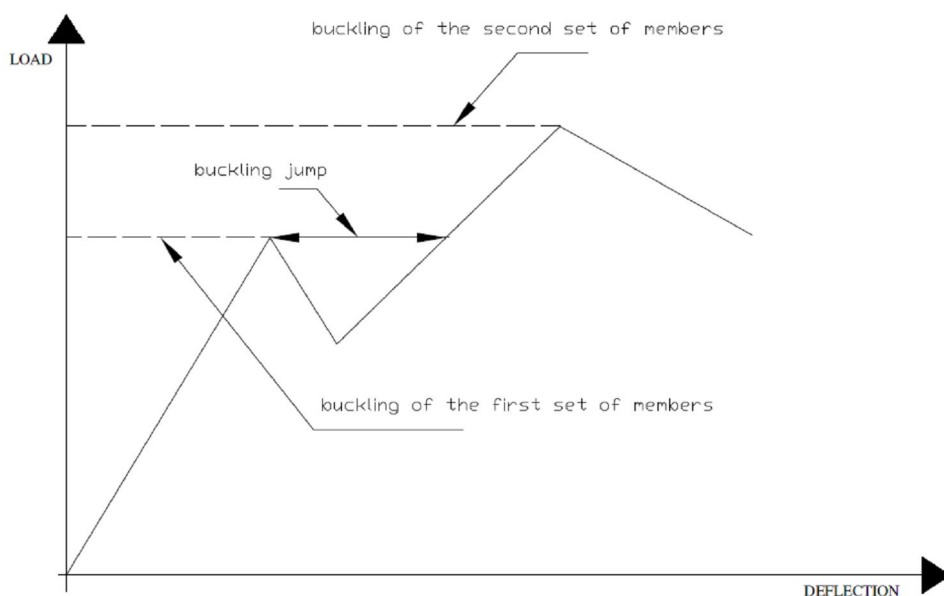
۱- خرابی کلی سازه: در این حالت، همانگونه که در شکل (۴۷) نشان داده شده است، کاهش باربری اعضای فشاری ناگهانی بوده و به هنگام فرایند باز توزیع، سایر اعضا نمی توانند بار کاهش یافته در نخستین عضو (یا در نخستین مجموعه اعضا) خراب شده را تحمل نمایند و در خودشان نیز خرابی رخ می دهد. در نتیجه، کمانش یک یا چند عضو فشاری که دارای تنش های بالایی می باشند منجر به خرابی کل سازه می شود، یا به عبارت دیگر یک مکانیزم کلی تشکیل می گردد. {۲۰}



شکل (۴۷): خرابی کلی سازه فضا کار {۱۹}

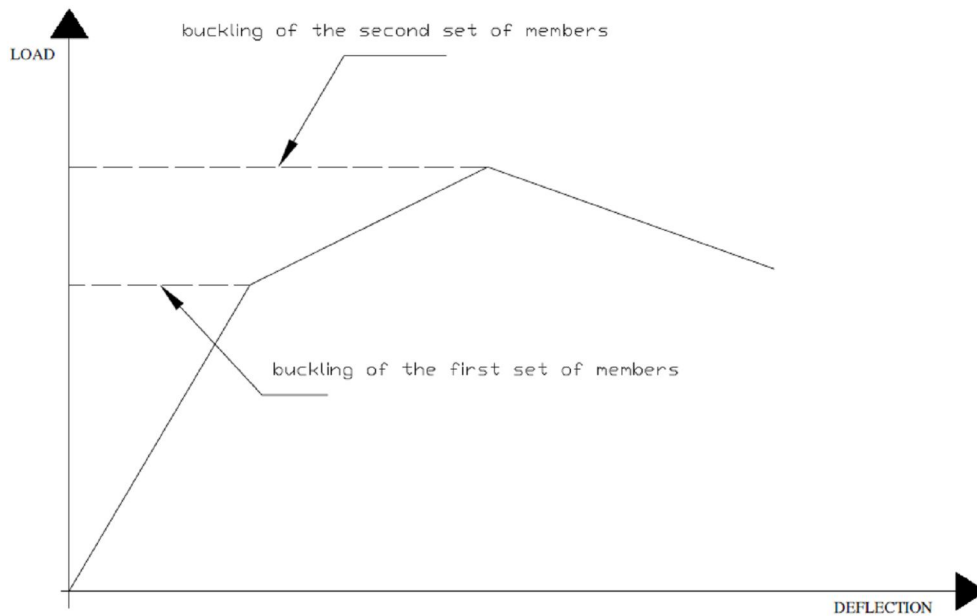
۲- خرابی موضعی سازه با یک فرو جهش گرهی: در این حالت، همانگونه که در شکل (۴۸) نشان داده شده است، مشخصه فروریزی بار اعضای فشاری به گونه‌ای ناگهانی است که در فرایند بازتوزیع، سایر اعضا نمی‌توانند بارهای باز توزیع را بدون تغییر شکل کافی جذب نمایند و ناپایداری در سازه رخ می‌دهد. تحت بارگذاری ثابت، تغییر شکل سازه افزایش یافته و ناپایداری ادامه پیدا می‌کند تا اینکه بار نخستین عضو کمانش یافته (یا نخستین مجموعه اعضای فشاری) به کمترین مقاومت پس کمانشی خود می‌رسد. در این موقعیت، سازه مجدداً پایدار می‌شود و سایر اعضا می‌توانند بار اضافی را تحمل نمایند. به عبارت دیگر هنگام کمانش نخستین عضو (یا نخستین مجموعه اعضای فشاری) به ازای کوچکترین افزایش در بارگذاری هیچگونه تعادلی در همسایگی وجود ندارد. در این حالت سازه مجبور خواهد شد حالت تعادل پایدار جدیدی را که ممکن است در این تراز بار موجود باشد، جستجو نماید. حرکت به سمت حالت تعادلی با تغییرات بزرگی در تغییر شکل همراه بوده و سازه شامل یک فروجهش گرهی خواهد بود. هنگام رسیدن عضو به بار بحرانی خود، حفظ تعادل

امکان پذیر نیست و در نتیجه تغییرمکان محوری عضو ادامه پیدا کرده و یک فروجهش عضوی اتفاق خواهد افتاد تا اینکه حالت تعادل جدیدی برقرار گردد. بنابراین هنگامی که خرابی محلی بایک فروجهش رخ می‌دهد سازه یک پدیده ترکیبی را تجربه خواهد کرد. به عبارت دیگر، فروجهش گرهی درگره‌های اعضا و نیز فروجهش عضوی دراعضا کمانش یافته رخ خواهد داد. {۲۰}



شکل (۴۸): خرابی موضعی سازه با فروجهش {۱۹}

۳- خرابی موضعی بدون فروجهش: در این حالت، همانگونه که در شکل (۴۹) نشان داده شده است، مشخصه فروریزی بار 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 بارهای اضافی را تحمل نماید. {۲۰}



شکل (۴۹): خرابی موضعی بدون فرو جهش {۱۹}

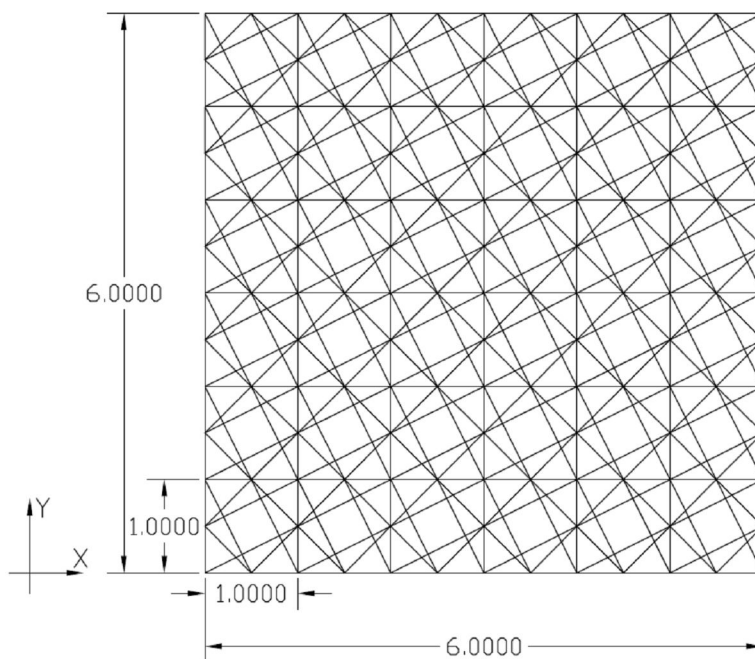
در این مطالعات دو نوع تحلیل ناپایداری مورد مطالعه قرار گرفته است: اولی تحلیل استاتیکی ناپایداری با مکانیزم های گسیختگی فشاری و دیگری تحلیل استاتیکی ناپایداری با مکانیزم های گسیختگی کششی می باشد.

## ۲-۷- ساختار مورد مطالعه

ساختار ایجاد شده به روش اتصال راس و لبه، دارای طول و عرض ۶m و ارتفاع ۰,۵m می باشند. این ساختار از کنار هم چیدن ۳۶ مدول هرمی ایجاد شده است. (شکل ۵۰) جزئیات این سازه در پیوست (ج) آمده است.



برای شرائط مرزی و بارگذاری این ساختار، می‌توان گفت که : گره های مرزی تحتانی در راستای  $X, Z$  و گره‌های فوقانی موازی محور  $Y$ ، در راستای  $X$  مقید می‌شوند. همچنین گره‌های مرزی تحتانی در راستای  $Y, Z$  و گره‌های فوقانی موازی محور  $X$ ، در راستای  $Y$  مقید می‌شوند. همه گره‌های لایه‌های فوقانی تحت بارگذاری قائم رو به پایین قرار می‌گیرند.

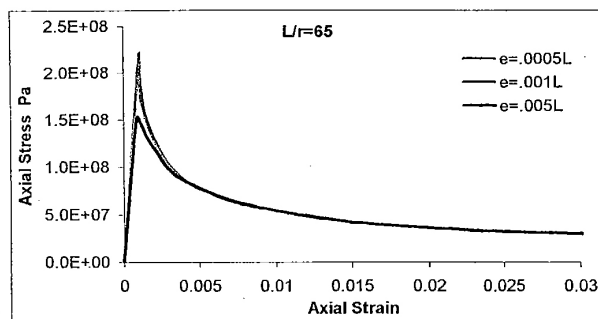


شکل (۵۰): ساختارهای تنسگریتی ایجاد شده به روش اتصال راس ولبه با آرایش نامنظم عضو فشاری

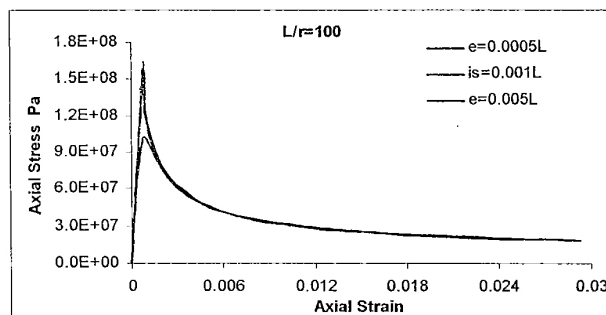
### ۷-۳- مکانیزم رفتار مصالح

در شکل‌های بعد پاسخ‌های تنش محوری - کرنش محوری اعضای فشاری برای مقادیر مختلف نقص اولیه، نشان داده شده است. قابل ذکر است که طبیعت نقص اولیه در اعضای فشاری معمولاً شامل انحنای اولیه عضو، خروج از مرکز انتهایی اجتناب‌ناپذیر در اعمال بار محوری و تنش‌های پسماند در مقطع عضو می‌باشد.

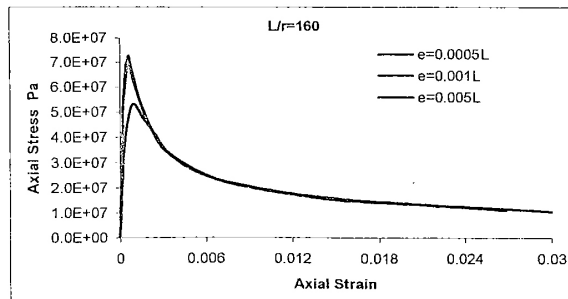
معمولاً انحناى اولیه عضو به عنوان نقص در نظر گرفته می‌شود و ماکزیمم نقص در وسط عضو می‌باشد. در ساختارهای مورد مطالعه، برای اعضای فشاری از نیمرخ های لوله ای به طول  $L = 1/2247 m$  و سطح مقطع  $A = 3/25 cm^2$  استفاده شده است. به منظور بررسی اثر نسبت لاغری بر نمودار تنش - کرنش محوری اعضای فشاری، ممان اینرسی‌های مختلفی برای اعضا در نظر گرفته شده است. نسبت های لاغری مربوط به این اعضا به ترتیب ۶۵ و ۱۰۰ و ۱۶۰ است. تنش تسلیم مصالح فشاری ۲۳۵ Mpa و مقدار مدول الاستیسیته  $2E5 Mpa$  فرض شده است. سه مقدار مختلف برای حداکثر نقص در وسط عضو در نظر گرفته شده است که عبارتند از:  $L/1000, L/100, L/1000$  (طول عضو =  $L$ ) پاسخ تنش محوری - کرنش محوری اعضای فشاری، به ازای نسبت های لاغری ۶۵ و ۱۰۰ و ۱۶۰ به ترتیب در شکل های (۵۱)، (۵۲) و (۵۳) نشان داده شده است.



شکل (۵۱): رفتار تنش محوری - کرنش محوری اعضای فشاری، به ازای  $L/r=65$

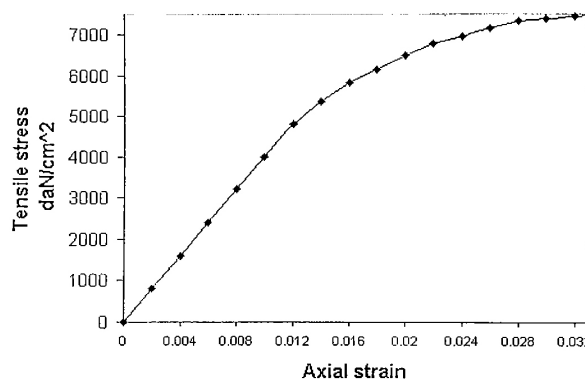


شکل (۵۲): رفتار تنش محوری - کرنش محوری اعضای فشاری، به ازای  $L/r=100$



شکل (۵۳): رفتار تنش محوری - کرنش محوری اعضای فشاری، به ازای  $L/r = 160$

پاسخ تنش محوری - کرنش محوری اعضای کششی در شکل (۵۴) نشان داده شده است، که به عنوان رفتار مشخصه مصالح کششی منظور می‌شود.



شکل (۵۴): رفتار تنش محوری - کرنش محوری اعضای کششی {۴}

#### ۷-۴- مکانیزم گسیختگی فشاری

در اینجا اثر پارامترهای مختلفی مانند مقادیر کرنش اولیه اعمال شده به اعضای کششی، نسبت‌های لاغری لحاظ شده برای اعضای فشاری، مقادیر نقص اولیه اعضای فشاری و تغییرات سطح مقطع اعضای کششی، روی رفتار ناپایداری و نوع مکانیزم خرابی بررسی شده است.

#### ۷-۴-۱- تحلیل های ناپایداری استاتیکی

این ساختار که در شکل (۵۰) نشان داده شده است، که دارای اعضای فشاری با مدول الاستیسیته  $E = 4 \times 10^4 \text{ Mpa}$ ، و سطح مقطع  $A = 3/25 \text{ cm}^2$  و مقاومت تسلیم  $235 \text{ Mpa}$  می باشد پاسخ تنش محوری - کرنش محوری اعضای فشاری در شکل های (۵۱) تا (۵۳) نشان داده شده اند. که به عنوان رفتار مشخصه مصالح فشاری در نظر گرفته می شود. اعضای کششی دارای مدول الاستیسیته  $E = 4 \times 10^4 \text{ Mpa}$  سطح مقطع متناظر با نسبت لاغری اعضای فشاری می باشد. که ذکر خواهد گردید. پاسخ تنش محوری - کرنش محوری اعضای کششی در شکل (۵۴) نشان داده شده است.

#### ۷-۴-۱-۱- تاثیر مقادیر پیش تنش

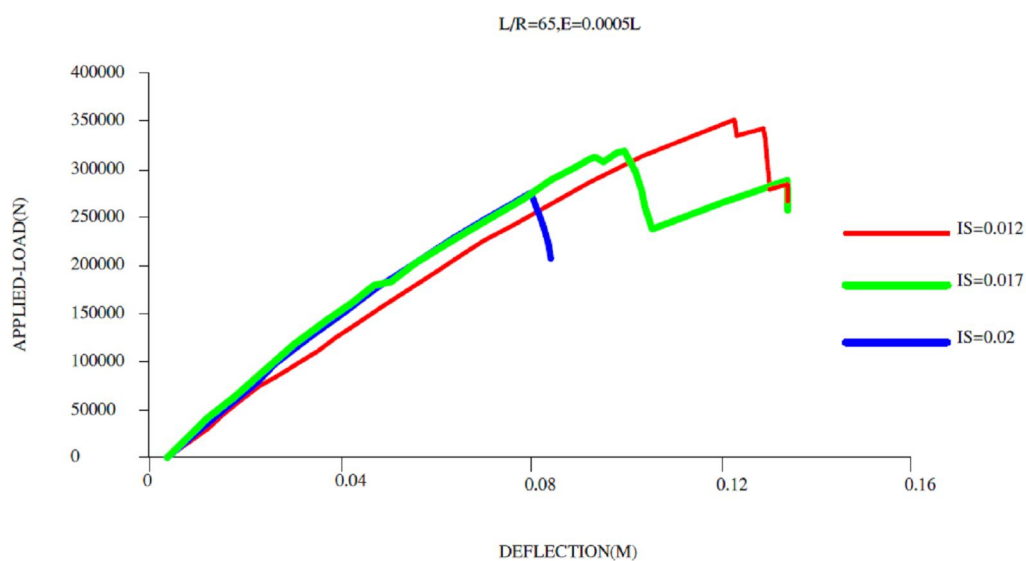
##### مطالعه تحلیلی

۱- به ازای  $L/r = 65$

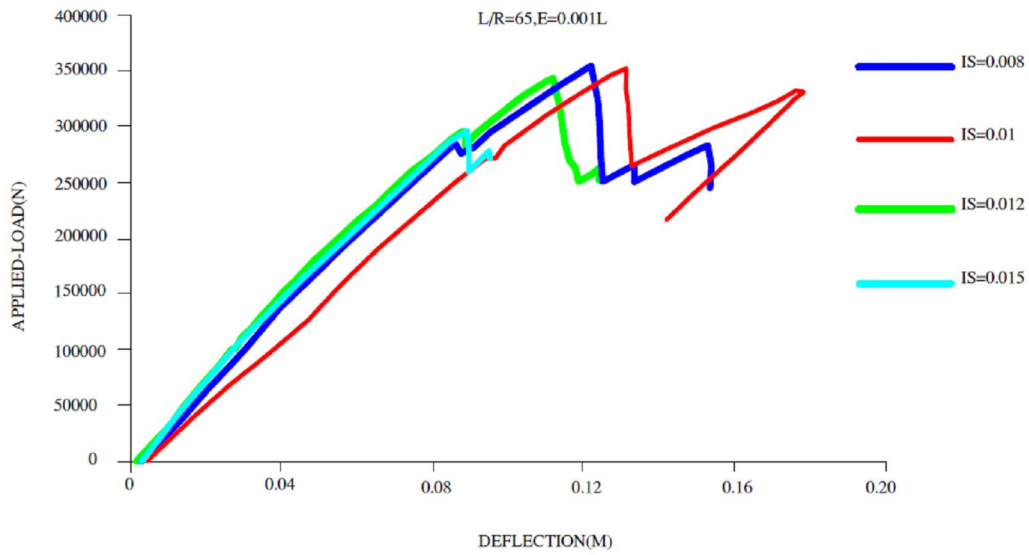
اعضای کششی با سطح مقطع  $0.8 \text{ cm}^2$  و اعضای فشاری نیز با نقص های اولیه  $0.005L, 0.01L, 0.05L$  در نظر گرفته شده اند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی که با  $\dot{\epsilon}_S$  نشان داده شده است، به ازای هر یک از این نقص ها به ترتیب در شکل های (۵۵)، (۵۶) و (۵۷) نشان داده شده است.

همانطور که در شکل (۵۵) را مشاهده می شود. این ساختار با نقص اولیه  $\epsilon = 0.005L$  به ازای کرنش های اولیه  $\dot{\epsilon}_S = 0.012, 0.017$  مکانیزم خرابی نوع ۱ که در واقع خرابی کلی می باشد، را به نمایش می گذارد. یعنی بعد از کمانش نخستین عضو (یا مجموعه اعضا) به هنگام فرایند باز توزیع، سایر اعضا، نمی توانند بار کاهش یافته در این اعضای خراب شده را تحمل نمایند و در خودشان نیز خرابی رخ می دهد.

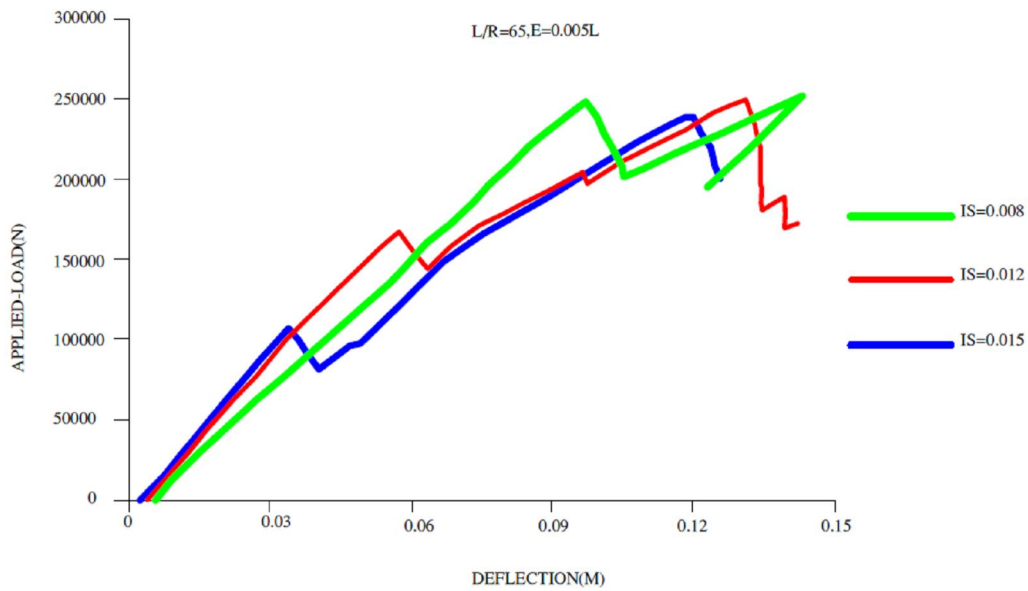
بعبارت دیگر یک مکانیزم کلی ایجاد می‌گردد. ملاحظه می‌شود که در این ساختار برای مقدار لاغری و نقص مذکور به ازای کرنش اولیه  $\epsilon_s = 0.02$ ، مکانیزم خرابی نوع ۳ (خرابی موضعی بدون فرو جهش) رخ می‌دهد. یعنی بعد از خرابی موضعی ناشی از کمانش عضوی، به هنگام فرایند بازتوزیع، سایر اعضا می‌توانند بارهای بازتوزیع شده را تحمل و جذب نمایند لذا سازه می‌تواند بار اضافی دیگری را تحمل نماید.



شکل (۵۵): تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/R = 65$  با نقص اولیه  $\epsilon = 0.0005L$



شکل (۵۶): تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/R = 65$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.001L$



شکل (۵۷): تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/R = 65$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.005L$

همانطور که در شکل (۵۶) را مشاهده می‌شود. این ساختار برای  $L/r=۶۵$  با نقص اولیه  $\varepsilon = ۰/۰۰۱L$  به ازای کرنش‌های اولیه  $i_s = ۰/۰۰۸, ۰/۰۱, ۰/۰۱۲, ۰/۰۱۵$  مکانیزم خرابی نوع ۱ را به نمایش می‌گذارد. یعنی در این حالت، کمانش نخستین عضو (یا مجموعه اعضاء) به منزله خرابی کل ساختار می‌باشد.

همانطور که در شکل (۵۷) را مشاهده می‌شود. برای  $L/r=۶۵$  با نقص اولیه  $\varepsilon = ۰/۰۰۰۵L$  به ازای کرنش‌های اولیه  $i_s = ۰/۰۰۸, ۰/۰۱۲, ۰/۰۱۵$  مکانیزم خرابی نوع ۲ را به نمایش می‌گذارد. در اینجا بعد از کمانش نخستین عضو (یا مجموعه اعضاء) یک خرابی محلی رخ می‌دهد که باعث ناپایداری سازه می‌گردد. این ناپایداری تا موقعی که بار نخستین عضو کمانش یافته (یا نخستین مجموعه اعضای فشاری) به کمترین مقاومت پس کمانشی خود برسند، ادامه پیدا می‌کند. در این موقعیت، سازه مجدداً پایدار می‌شود و سایر اعضاء می‌توانند بار اضافی را تحمل نمایند.

## ۲- به ازای $L/r = ۱۰۰$

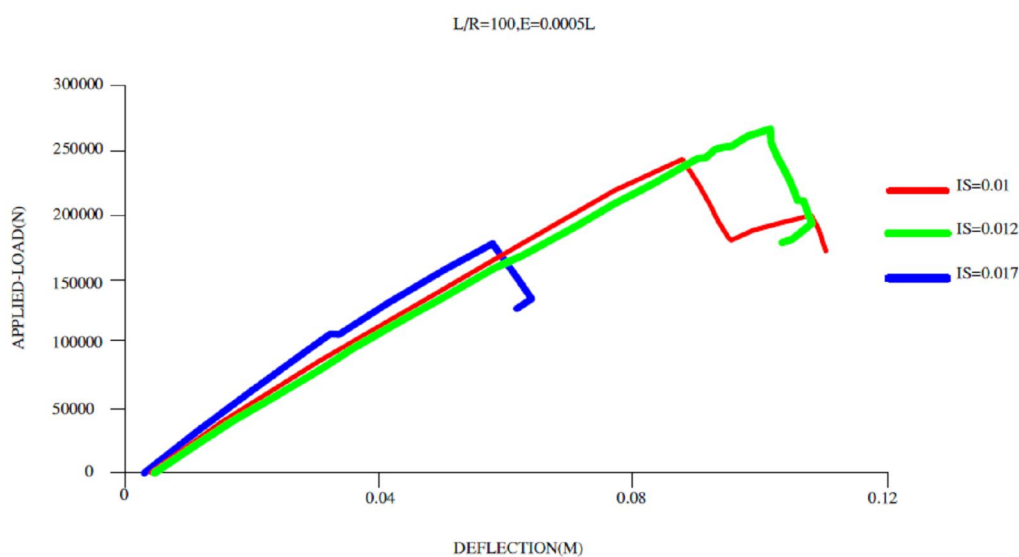
اعضای کششی با سطح مقطع  $A = ۰/۷cm^2$  و اعضای فشاری نیز با نقص‌های اولیه و  $\varepsilon = ۰/۰۰۵L, ۰/۰۰۱L, ۰/۰۰۰۵L$  در نظر گرفته شده‌اند. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی، به ازای هر یک از این نقص‌ها به ترتیب در شکل‌های (۵۸)، (۵۹) و (۶۰) نشان داده شده است.

همانطور که در شکل (۵۸) را مشاهده می‌شود. این ساختار برای  $L/r=۱۰۰$  با نقص اولیه  $\varepsilon = ۰/۰۰۰۵L$  به ازای کرنش‌های اولیه  $i_s = ۰/۰۱۲, ۰/۰۱$  مکانیزم خرابی نوع ۱ (خرابی کلی) و به ازای کرنش‌های اولیه  $i_s = ۰/۰۱۷$  مکانیزم خرابی نوع ۳ (خرابی موضعی بدون فرو جهش) را به نمایش می‌گذارد.

همانطور که در شکل (۵۹) را مشاهده می‌شود. برای  $L/r=۱۰۰$  با نقص اولیه  $\varepsilon = ۰/۰۰۱L$  به ازای کرنش‌های اولیه  $i_s = ۰/۰۰۸L$  مکانیزم خرابی نوع ۱ (خرابی کلی) و به ازای کرنش‌های اولیه

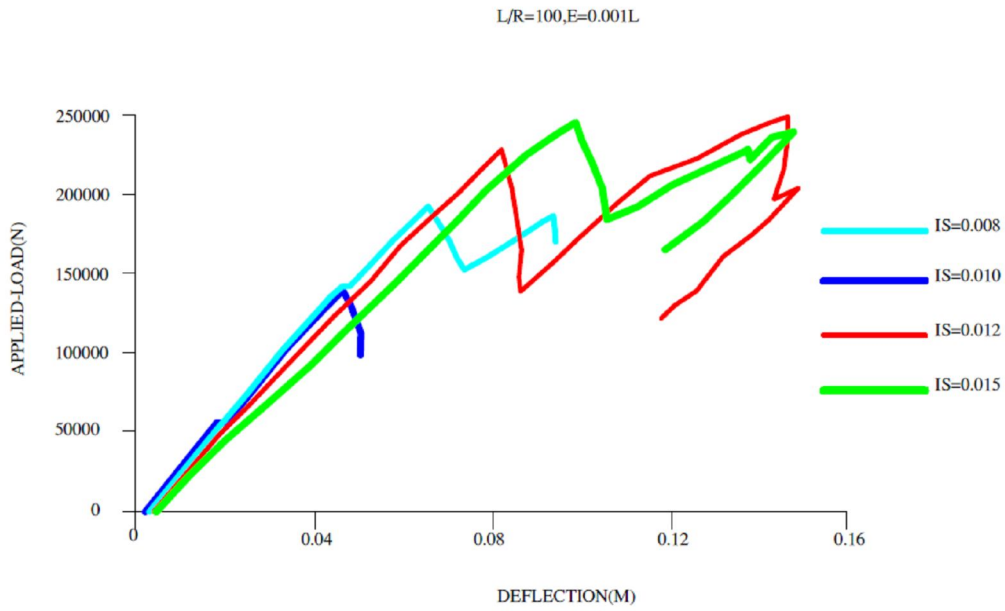
$iS = 0.012, 0.01$  مکانیزم خرابی نوع ۲ (خرابی موضعی با فروجهش) و به ازای کرنش اولیه  $iS = 0.015$  مکانیزم خرابی نوع ۳ (خرابی موضعی بدون فروجهش) را به نمایش می‌گذارد.

همانطور که در شکل (۶۰) را مشاهده می‌شود. برای  $L/r = 100$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.005 L$  به ازای کرنش‌های اولیه  $iS = 0.0066$  مکانیزم خرابی نوع ۱ (خرابی کلی) و به ازای کرنش‌های اولیه  $iS = 0.008, 0.01, 0.012$  مکانیزم خرابی نوع ۲ (خرابی موضعی با فروجهش) را به نمایش می‌گذارد.

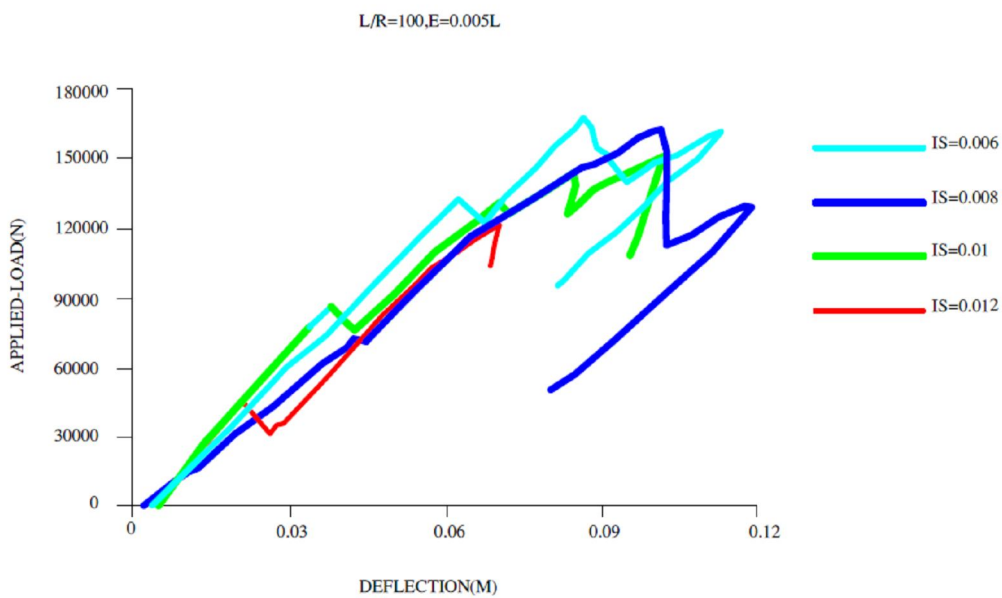


شکل (۵۸): تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/r = 100$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.005 L$





شکل (۵۹): تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/R = 100$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.001L$



شکل (۶۰): تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/R = 100$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.005L$

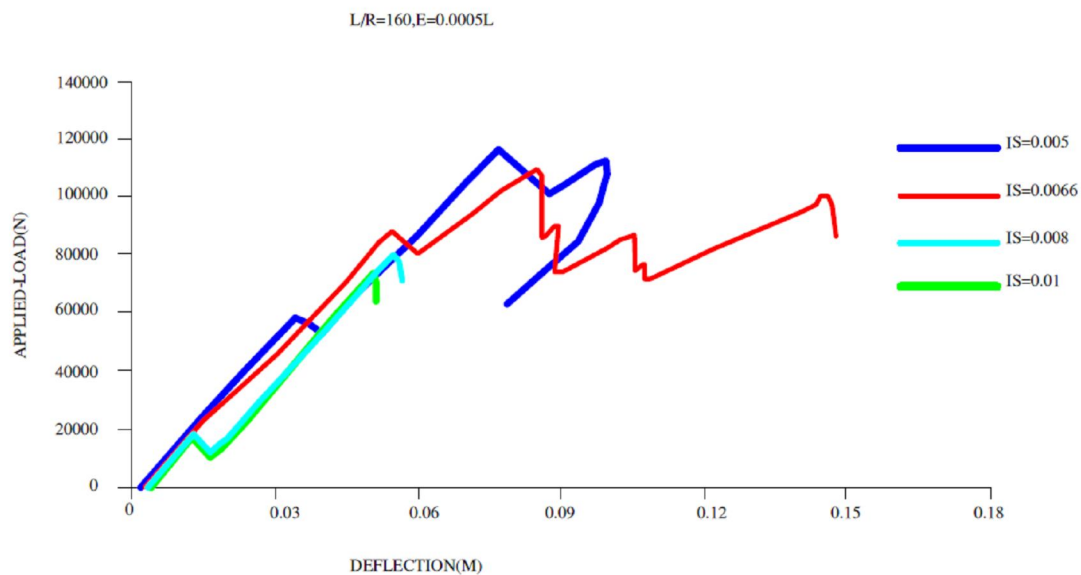
### ۳- به ازای $L/r = 160$

اعضای کششی با سطح مقطع  $A = 0.6 \text{ cm}^2$  در نظر گرفته شده است. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی به ازای هریک از این نقص‌ها به ترتیب در شکل‌های (۶۱)، (۶۲) و (۶۳) نشان داده شده‌اند.

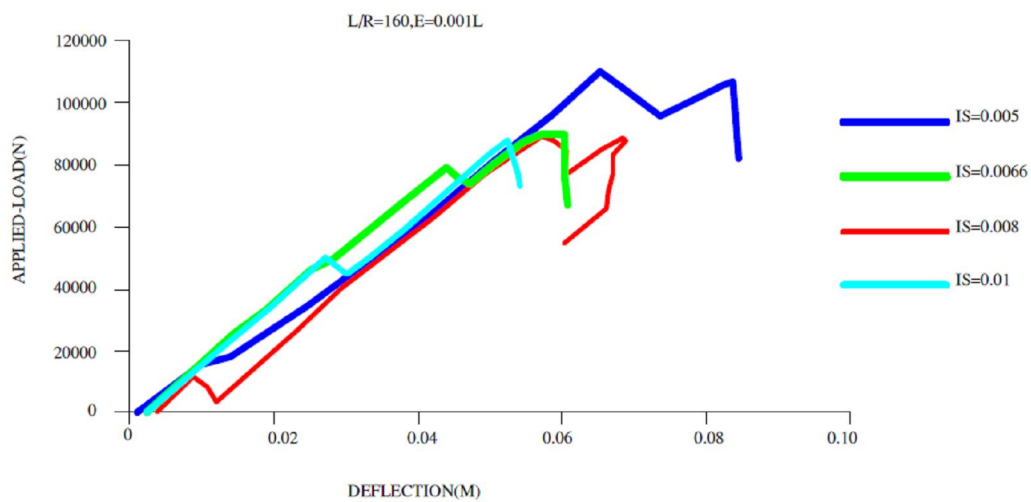
همانطور که در شکل (۶۱) را مشاهده می‌شود. این ساختار برای  $L/r = 160$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.0005 L$  به ازای کرنش‌های اولیه  $i_s = 0.005$  مکانیزم خرابی نوع ۱ (خرابی کلی) و به ازای کرنش‌های اولیه  $i_s = 0.0066, 0.008, 0.01, 0.012$  مکانیزم خرابی نوع ۲ (خرابی موضعی با فروجهش) را به نمایش می‌گذارد.

همانطور که در شکل (۶۲) را مشاهده می‌شود. برای  $L/r = 160$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.001 L$  به ازای کرنش اولیه  $i_s = 0.005$  مکانیزم خرابی نوع ۱ (خرابی کلی) و به ازای کرنش‌های اولیه  $i_s = 0.0066, 0.008, 0.01$  مکانیزم خرابی نوع ۲ (خرابی موضعی با فرو جهش) را به نمایش می‌گذارد.

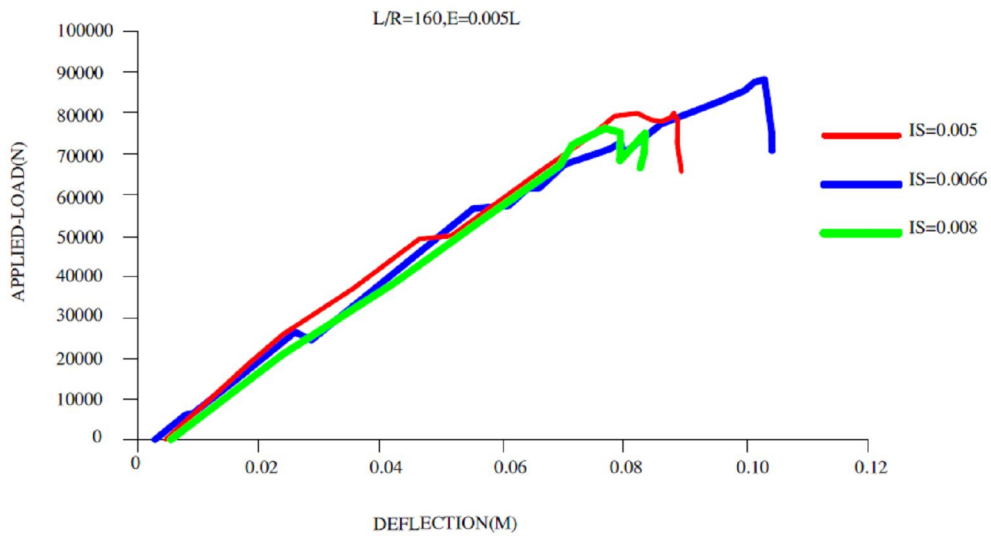
همانطور که در شکل (۶۳) را مشاهده می‌شود. برای  $L/r = 160$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.005 L$  به ازای کرنش‌های اولیه  $i_s = 0.0066, 0.008, 0.005$  مکانیزم خرابی نوع ۳ (خرابی موضعی بدون فرو جهش) را به نمایش می‌گذارد.



شکل (۶۱) : تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/r = 160$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.0005L$



شکل (۶۲) : تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/r = 160$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.001L$



شکل (۶۳): تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/r = 160$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.005L$

#### ۷-۴-۱-۲- تاثیر مقادیر نقص اولیه اعضای فشاری

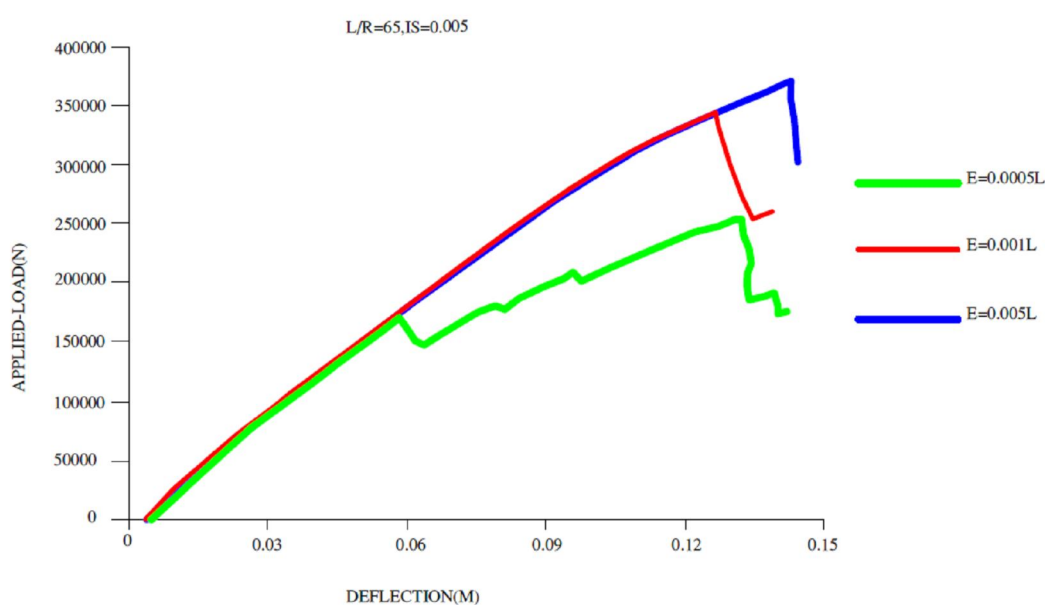
در مطالعه حاضر به بررسی تاثیر مقادیر نقص اولیه اعضای فشاری روی رفتار ناپایداری ساختارهای مورد مطالعه پرداخته می‌شود.

#### مطالعات تحلیلی

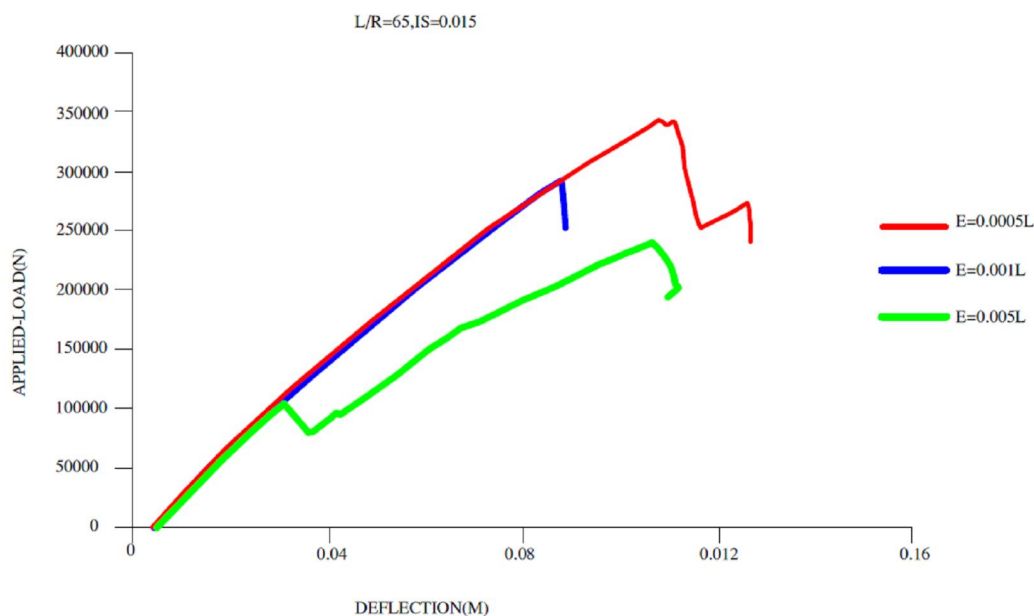
۱- به ازای  $L/r = 65$

تاثیر مقادیر نقص اولیه روی رفتار ناپایداری و نوع مکانیزم خرابی به ازای کرنش‌های اولیه  $i_s = 0.015, 0.012$  به ترتیب در شکل‌های (۶۴-الف)، (۶۴-ب) نشان داده شده‌اند.

این سیستم سازه ای به ازای کرنش‌های اولیه  $iS = 0.015, 0.012$  در نسبت لاغری  $L/r=65$  با نقص‌های اولیه  $\varepsilon = 0.0005L, \varepsilon = 0.001L$  دارای مکانیزم خرابی نوع ۱ (خرابی کلی) و با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.005L$  دارای مکانیزم خرابی نوع ۲ (خرابی موضعی با فرو جهش) می باشد.



الف : تاثیر مقادیر نقص اولیه تحت کرنش اولی  $iS = 0.012$



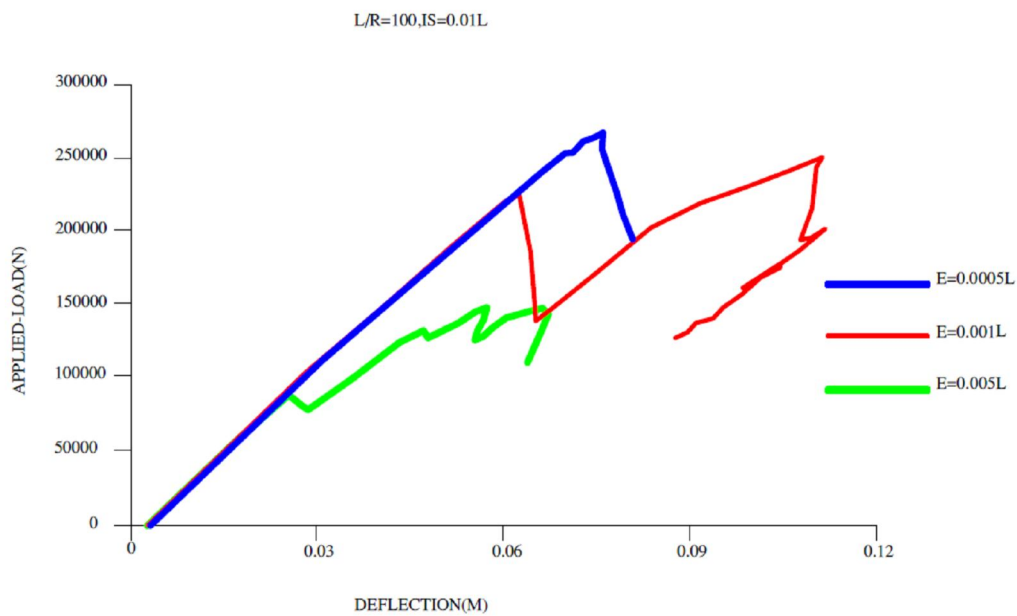
ب : تاثیر مقادیر نقص اولیه تحت کرنش اولیه  $i_s = 0.015$

شکل (64) : تاثیر مقادیر نقص اولیه مختلف روی رفتار ناپایداری سازه تنسگریتی به ازای  $L/r = 65$ .

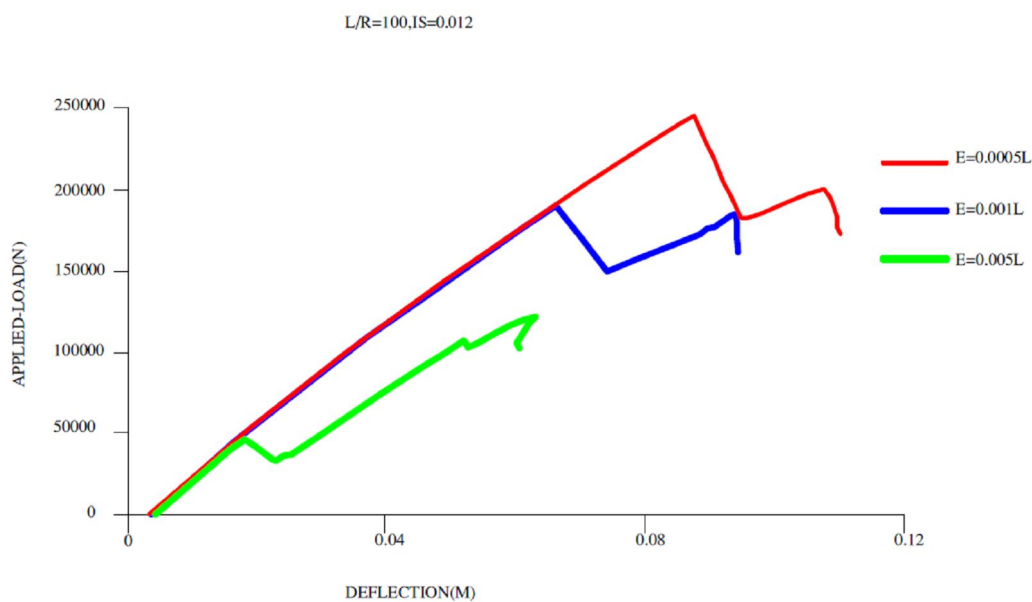
2- به ازای  $L/r = 100$

تاثیر مقادیر نقص اولیه روی رفتار ناپایداری و نوع مکانیزم خرابی به ازای کرنش‌های اولیه  $i_s = 0.01, 0.012$  به ترتیب در شکل‌های (65-الف)، (65-ب) نشان داده شده‌اند.

در نسبت لاغری  $L/r = 100$  به ازای کرنش‌های اولیه  $i_s = 0.01, 0.012$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.0005L$  این سیستم دارای مکانیزم خرابی نوع ۱ (خرابی کلی) و با نقص‌های اولیه  $\varepsilon = 0.001L, \varepsilon = 0.005L$  دارای مکانیزم خرابی نوع ۲ (خرابی موضعی با فروجهش) می‌باشد.



الف : تاثیر مقادیر نقص اولیه تحت کرنش اولیه  $is = 0.01$

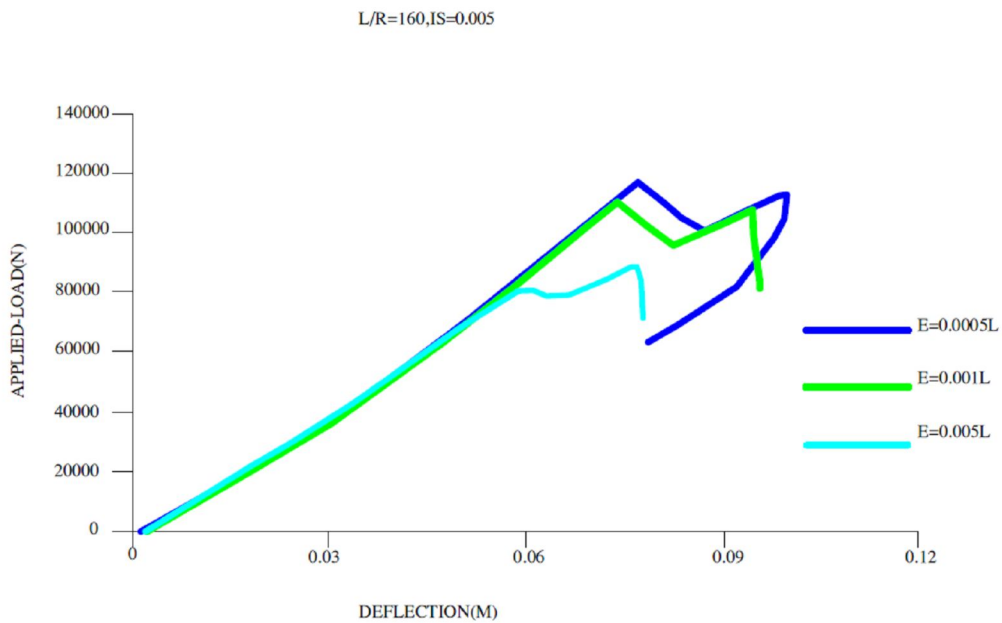


ب : تاثیر مقادیر نقص اولیه تحت کرنش اولیه  $is = 0.012$

شکل (65) : تاثیر مقادیر نقص اولیه مختلف روی رفتار ناپایداری سازه تنسگریتی به ازای  $L/R = 100$ .

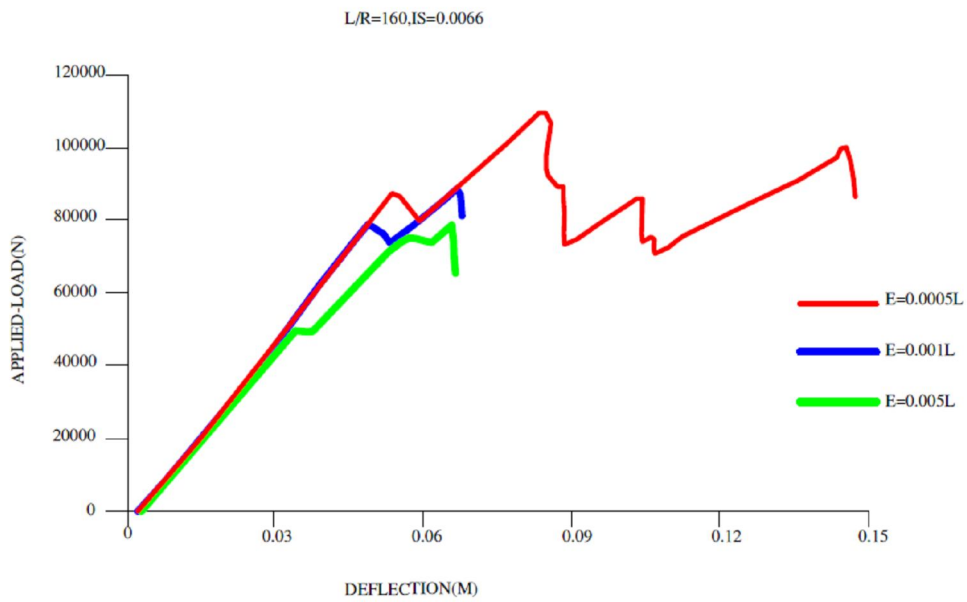
۳- به ازای  $L/r = 160$

در نسبت لاغری  $L/r = 160$  به ازای کرنش‌های اولیه  $i_s = 0.005$  به ازای نقص‌های اولیه  $\varepsilon = 0.0005L, \varepsilon = 0.001L$  این سیستم دارای مکانیزم خرابی نوع ۱ (خرابی کلی) و به ازای نقص اولیه  $\varepsilon = 0.005L$  دارای اولین مکانیزم خرابی نوع ۲ (خرابی موضعی با فرو جهش) می‌باشد. حال آنکه تحت کرنش‌های اولیه  $i_s = 0.0066, 0.008$  به ازای نقص‌های اولیه  $\varepsilon = 0.0005L, \varepsilon = 0.001L$  دارای مکانیزم خرابی نوع ۲ (خرابی موضعی با فرو جهش) و به ازای نقص اولیه  $\varepsilon = 0.005L$  دارای مکانیزم خرابی نوع ۳ (خرابی موضعی بدون فرو جهش) می‌باشد.

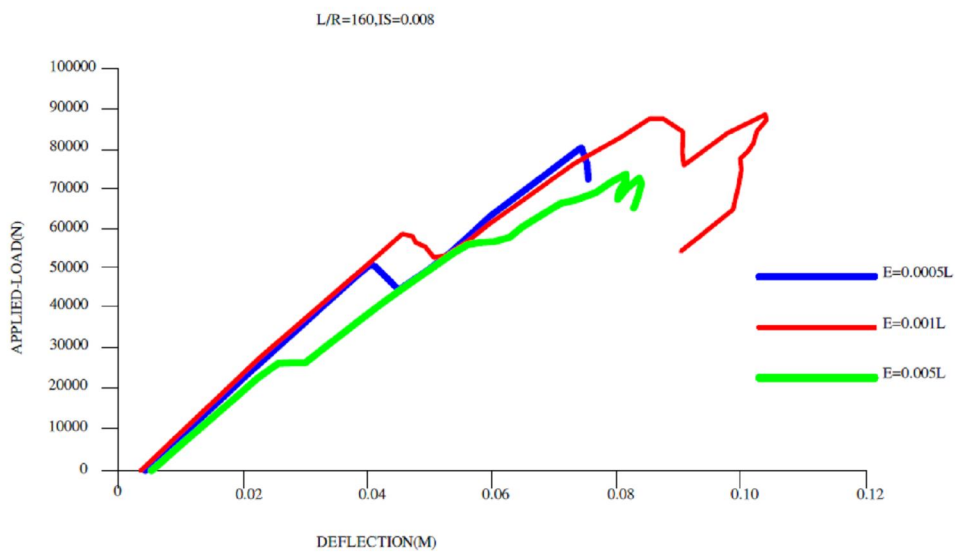


الف : تاثیر مقادیر نقص اولیه تحت کرنش اولیه  $i_s = 0.005$





ب : تاثیر مقادیر نقص اولیه تحت کرنش اولیه  $is = 0.0066$



ج : تاثیر مقادیر نقص اولیه تحت کرنش اولیه  $is = 0.008$

شکل (66) : تاثیر مقادیر نقص اولیه مختلف روی رفتار ناپایداری سازه تنسگریتی به ازای  $L/R = 160$ .

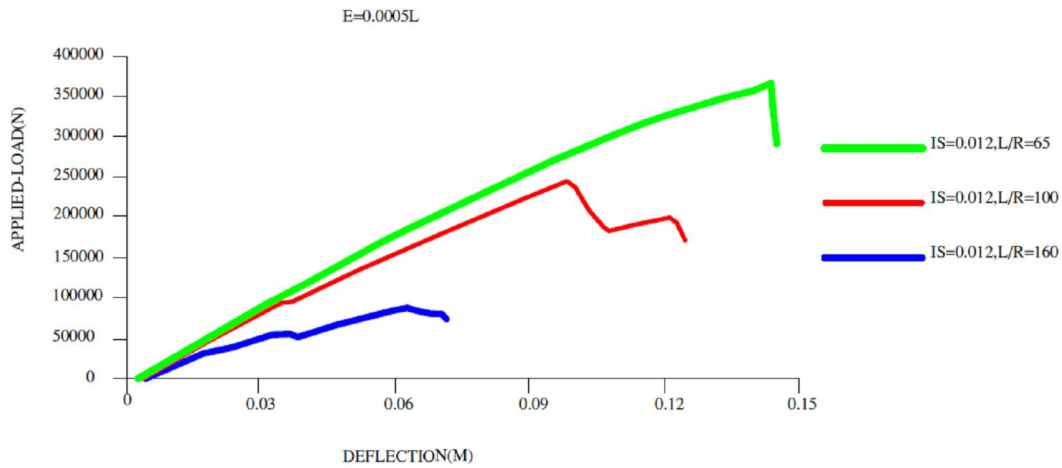
### ۷-۴-۱-۳-تاثیر نسبت های لاغری اولیه اعضای فشاری

در مطالعه حاضر به بررسی تاثیر نسبت های لاغری اعضای فشاری روی رفتار ناپایداری ساختارهای مورد مطالعه پرداخته می شود. در این مرحله، تاثیر نسبت های لاغری مختلف به ازای نقص ها و کرنش های اولیه مشخص مورد مطالعه قرار گرفته است. قابل ذکر است که به ازای نسبت های لاغری مختلف، سطح مقطع اعضای کششی فرق می کنند. اما این مسأله قابل توجیه است چرا که نسبت های لاغری  $L/r=65, 100, 160$  به ترتیب اعضای کششی دارای سطح مقطع  $0.8, 0.7, 0.6 cm^2$  می باشند. که این تغییرات سطوح مقطع متناظر با ظرفیت اعضای فشاری است.

### مطالعات تحلیلی

۱- به ازای نقص اولیه  $\varepsilon = 0.0005 L$

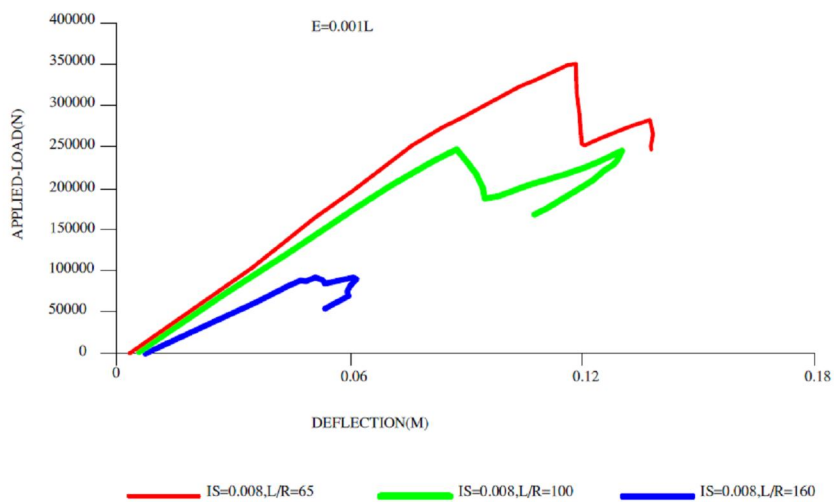
به ازای نقص فوق تاثیر نسبت های لاغری کرنش های اولیه  $\varepsilon_s = 0.012$  در شکل زیر نشان داده شده است. مشاهده می شود که به ازای نسبت های لاغری  $L/r=65$  و  $L/r=100$  مکانیزم خرابی نوع ۱ (خرابی کلی) و به ازای نسبت لاغری  $L/r=160$  مکانیزم خرابی نوع ۲ (خرابی موضعی با فرو جهش) رخ می دهد.



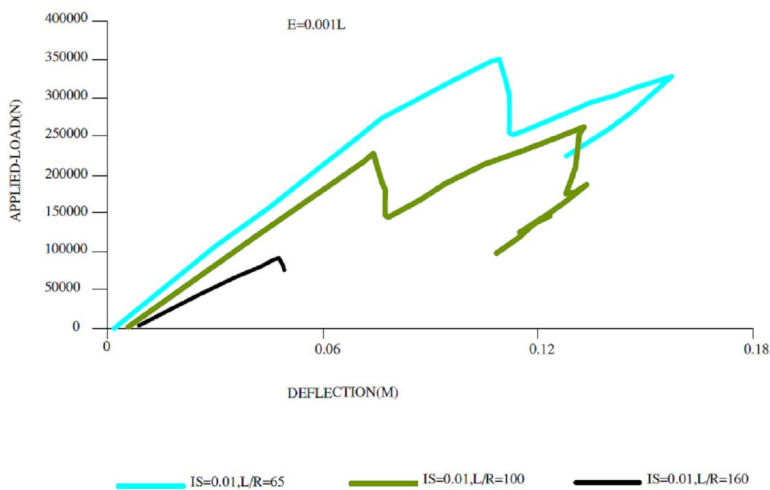
شکل (67): تاثیر نسبت های لاغری اعضای فشاری روی رفتار ناپایداری سازه به ازای کرنش اولیه  $i_s = 0.012$

2- به ازای نقص اولیه  $\varepsilon = 0.001L$

به ازای نقص فوق تاثیر نسبت های لاغری کرنش های اولیه  $i_s = 0.01, 0.008$  در شکل زیر نشان داده شده است. برای این ساختار تحت کرنش اولیه  $i_s = 0.008$  به ازای نسبت های لاغری  $L/r=65$  و  $L/r=100$  مکانیزم خرابی نوع ۱ (خرابی کلی) و به ازای نسبت لاغری  $L/r=160$  مکانیزم خرابی نوع ۲ (خرابی موضعی با فروجهش) رخ می دهد. حال آنکه تحت کرنش اولیه  $i_s = 0.01$  به ازای نسبت لاغری  $L/r=65$  مکانیزم خرابی نوع ۱ (خرابی کلی) و به ازای نسبت های لاغری  $L/r=160, 100$  مکانیزم خرابی نوع ۲ (خرابی موضعی با فروجهش) روی می دهد.



شکل (68الف): تاثیر نسبت های لاغری اعضای فشاری به ازای کرنش اولیه  $is = 0.008$

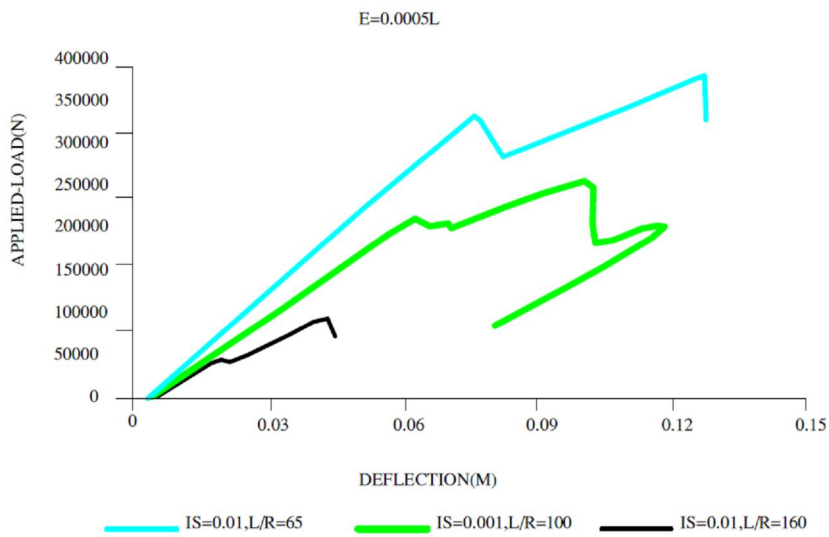


شکل (68ب): تاثیر نسبت های لاغری اعضای فشاری به ازای کرنش اولیه  $is = 0.01$

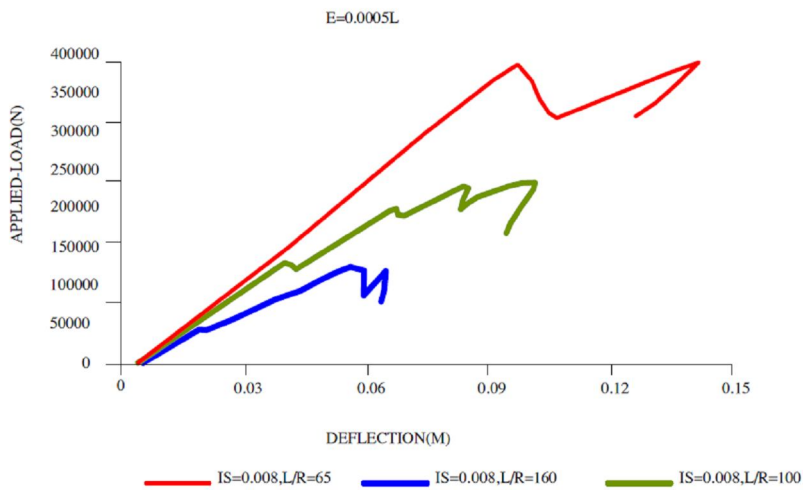
شکل (68): تاثیر نسبت های لاغری اعضای فشاری روی رفتار ناپایداری سازه به ازای کرنش اولیه  $is = 0.008, 0.01$

۳- به ازای نقص اولیه  $\varepsilon = 0/005 L$

به ازای نقص فوق تاثیر نسبت های لاغری کرنش اولیه  $iS = 0/01, 0/008$  در شکل زیر نشان داده شده است. این ساختار تحت کرنش های اولیه  $iS = 0/01, 0/008$  به ازای مقادیر لاغری  $L/r=65$  و  $100$  مکانیزم خرابی نوع ۲ (خرابی موضعی با فروجهش) و به ازای مقادیر لاغری  $L/r=160$  مکانیزم خرابی نوع ۳ (خرابی موضعی بدون فرو جهش) را از خود به نمایش می گذارد.



شکل (69الف): تاثیر نسبت های لاغری اعضای فشاری به ازای کرنش اولیه  $is = 0.01$



شکل (69ب): تاثیر نسبت های لاغری اعضای فشاری به ازای کرنش اولیه  $is = 0.008$

شکل (69): تاثیر نسبت های لاغری اعضای فشاری روی رفتار ناپایداری سازه به ازای کرنش اولیه  $is = 0.008, 0.01$

#### ۷-۴-۱-۴- نتایج تحلیل غیر خطی

این ساختار با ابعاد مشخص داده شده، برای نسبت لاغری  $L/r=65$  با نقص‌های اولیه  $\varepsilon = 0/0005L, \varepsilon = 0/001L$  به ازای کرنش‌های اولیه مختلف، مکانیزم خرابی نوع ۱ (خرابی کلی) و با نقص اولیه  $\varepsilon = 0/005L$  مکانیزم خرابی نوع ۲ (خرابی موضعی با فروجهش) را از خود نشان می‌دهد. حال آنکه برای سایر مقادیر لاغری مورد مطالعه ( $L/r=160$  و  $100$ ) چنین نیست. بطوریکه ساختار مذکور برای نسبت لاغری  $L/r=100$  با نقص‌های اولیه  $\varepsilon = 0/0005L, \varepsilon = 0/001L$  به ازای کرنش‌های اولیه مختلف، مکانیزم‌های خرابی نوع ۱ و ۲ و ۳ و با نقص اولیه  $\varepsilon = 0/005L$  مکانیزم‌های خرابی نوع ۱ و ۲ و برای نسبت لاغری  $L/r=160$  با نقص‌های اولیه  $\varepsilon = 0/0005L, \varepsilon = 0/001L$ ، مکانیزم‌های خرابی نوع ۱ و ۲ و با نقص اولیه  $\varepsilon = 0/005L$  مکانیزم‌های خرابی نوع ۲ و ۳ را به نمایش می‌گذارد. مشاهده می‌شود که در یک نقص اولیه مشخص، با افزایش مقادیر لاغری اعضای فشاری برای  $160$  و  $100$  و  $L/r=65$  مکانیزم خرابی از نوع ۱ به نوع ۲ و ۳ تبدیل می‌شود و در نتیجه سازه رفتار شکل پذیرتری را از خود به نمایش می‌گذارد. همچنین در یک نسبت لاغری مشخص با افزایش مقدار نقص نیز، مکانیزم خرابی به سمت مکانیزم خرابی موضعی پیش می‌رود. و این رفتار در نقص‌های بزرگتر بیشتر نمود پیدا می‌کند در نتیجه، با افزایش شکل پذیری رفتار اعضای فشاری، رفتار سازه از مکانیزم خرابی کلی فاصله گرفته و به مکانیزم‌های خرابی موضعی جهت می‌گیرد. همچنین ملاحظه شده است که با افزایش نقص، مقاومت نهایی سازه کاهش می‌یابد. (جدول ۱)

(جدول ۱): بررسی تأثیر مکانیزم گسیختگی فشاری

وضعیت	مکانیزم خرابی به ازای نقص اولیه			شرح وضعیت سازه
	سازه 0.0005L	0.001L	0.005L	
الف	1	1	1	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱ در مقدار لاغری $L/r=65$
ب	1	1	2	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۲ در مقدار لاغری $L/r=65$
ت	1	1	2	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۵ در مقدار لاغری $L/r=65$
ث	1	2	2	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱ در مقدار لاغری $L/r=100$
ج	1	2	2	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۲ در مقدار لاغری $L/r=100$
ح	3	3	3	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۵ در مقدار لاغری $L/r=100$
خ	2	2	3	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱ در مقدار لاغری $L/r=160$
د	2	2	3	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۲ در مقدار لاغری $L/r=160$
ذ	3	3	3	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۵ در مقدار لاغری $L/r=160$

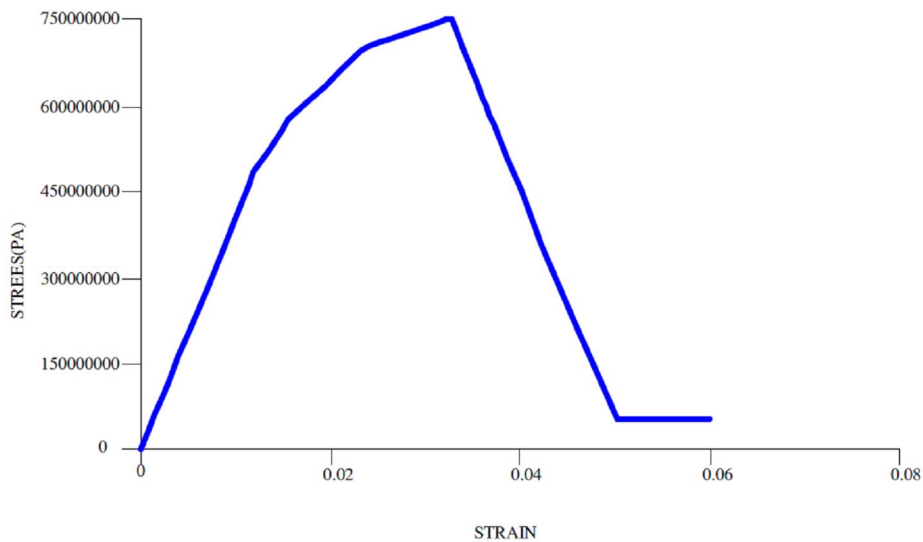


## ۷-۵- مکانیزم گسیختگی کششی

در این بخش، مکانیزم گسیختگی کششی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای منظور نمودن رفتار مشخصه اعضای کششی، از نمودار شکل (70) استفاده می‌شود.

### ۷-۵-۱- تحلیل های ناپایداری استاتیکی

در این قسمت سطح مقطع اعضای کششی چنان اختیار شده است که مکانیزم گسیختگی کششی غالب باشد رفتار مشخصه اعضای فشاری، طبق نمودارهای نشان داده شده در شکل های (۵۱) تا (۵۳)، اعمال می‌شود. برای منظور نمودن رفتار مشخصه اعضای کششی، از نمودار شکل (70) استفاده می‌شود. این نمودار همانند شکل (۵۴) است با این تفاوت که بعد از نقطه گسیختگی، منحنی تنش - کرنش محوری با شیب متوسطی به حد صفر می‌رسد.



شکل (70): رفتار مشخصه عناصر کششی در حالت مکانیزم گسیختگی کششی

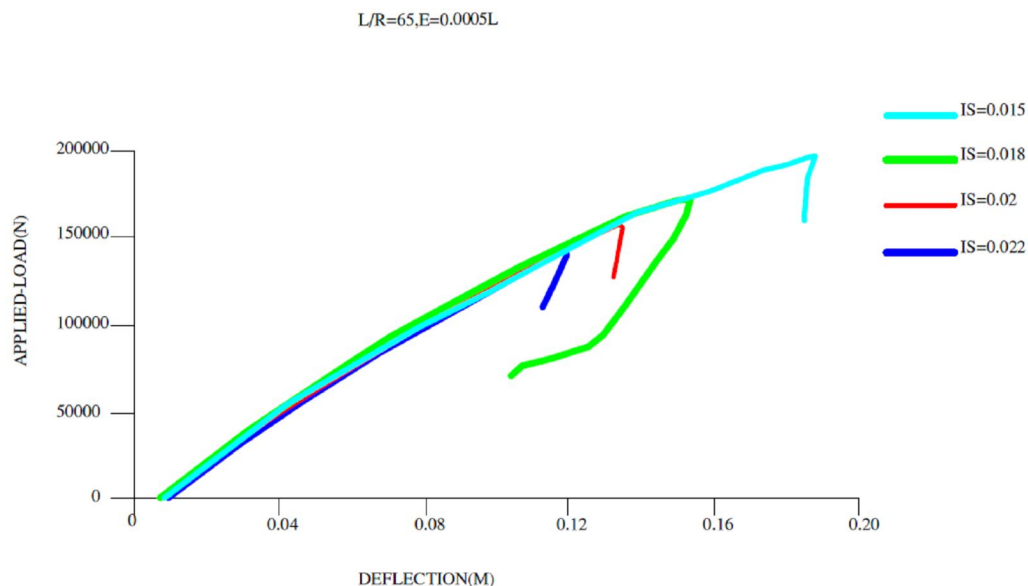
## ۷-۵-۱-۱-تاثیر مقادیر پیش تنش

### مطالعات تحلیلی

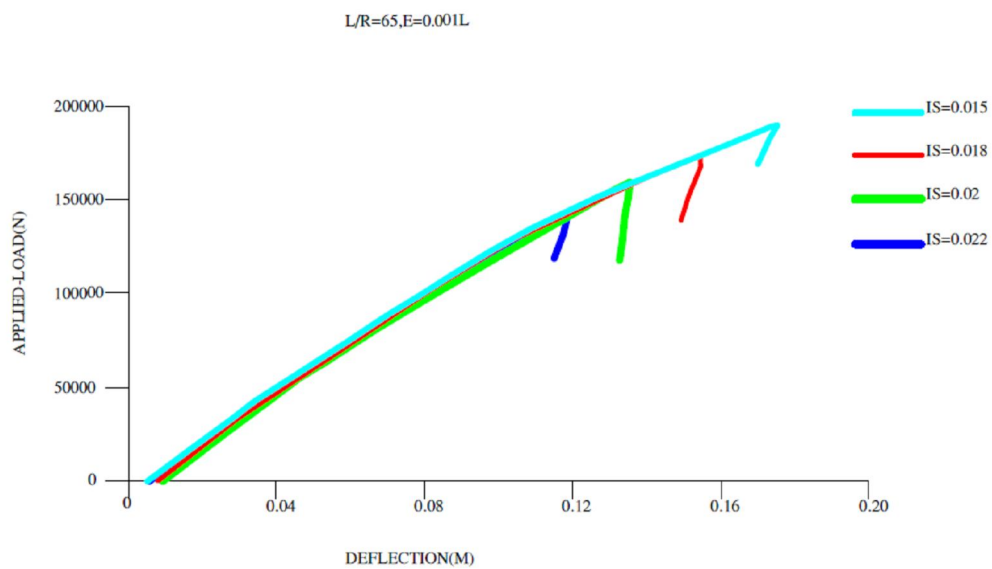
۱- به ازای  $L/r = 65$

اعضای کششی دارای سطح مقطع  $4 \text{ cm}^2$  می‌باشند. اعضای فشاری با نقص‌های اولیه  $\varepsilon = 0.0005L$ ,  $\varepsilon = 0.001L$ ,  $\varepsilon = 0.005L$  و کششی، روی مکانیزم گسیختگی کششی به ازای هریک از این نقص‌ها به ترتیب در شکل‌های (71)، (72) و (73) نشان داده شده‌اند.

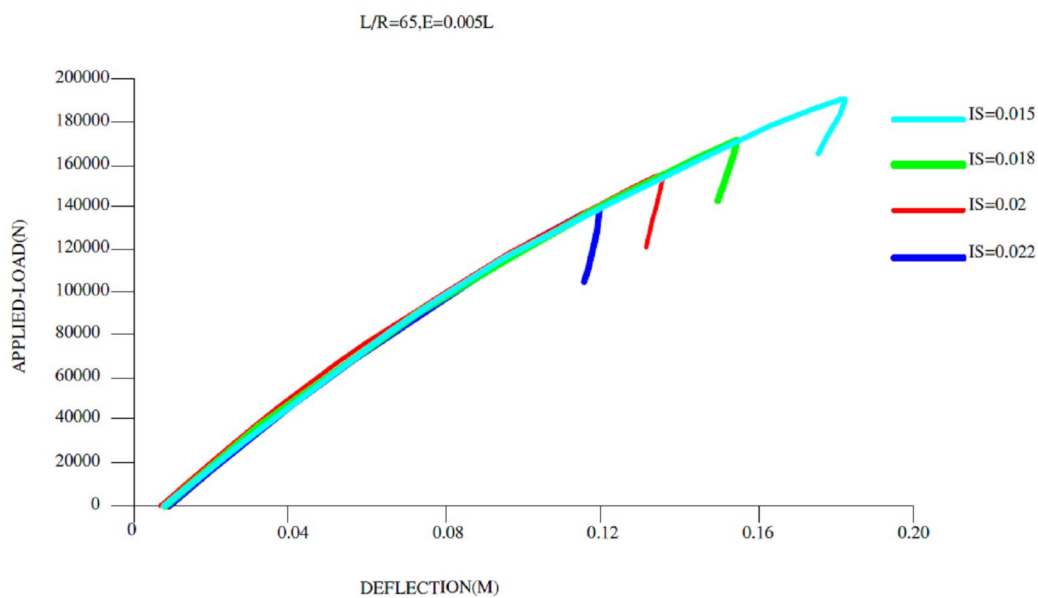
برای  $L/r = 65$  با نقص‌های اولیه  $\varepsilon = 0.0005L$ ,  $\varepsilon = 0.001L$ ,  $\varepsilon = 0.005L$  به ازای کرنش‌های اولیه  $i_s = 0.015, 0.018, 0.02, 0.022$  مکانیزم خرابی از نوع ۱ (خرابی کلی) رخ می‌دهد.



شکل (71): تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/r = 65$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.0005L$



شکل (72): تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/r = 65$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.001L$

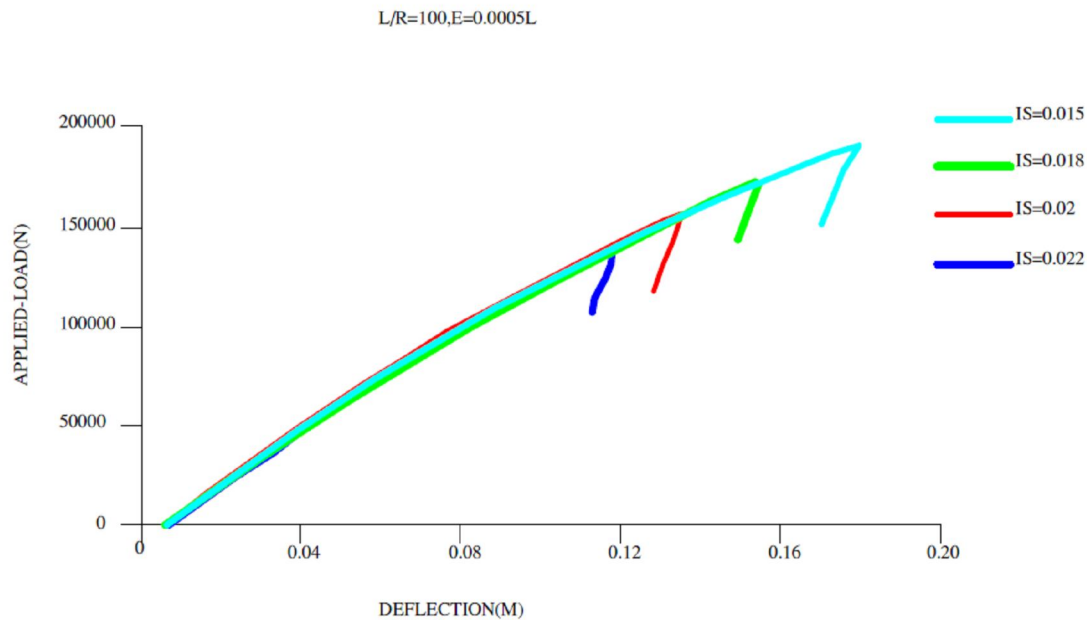


شکل (73): تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/r = 65$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.005L$

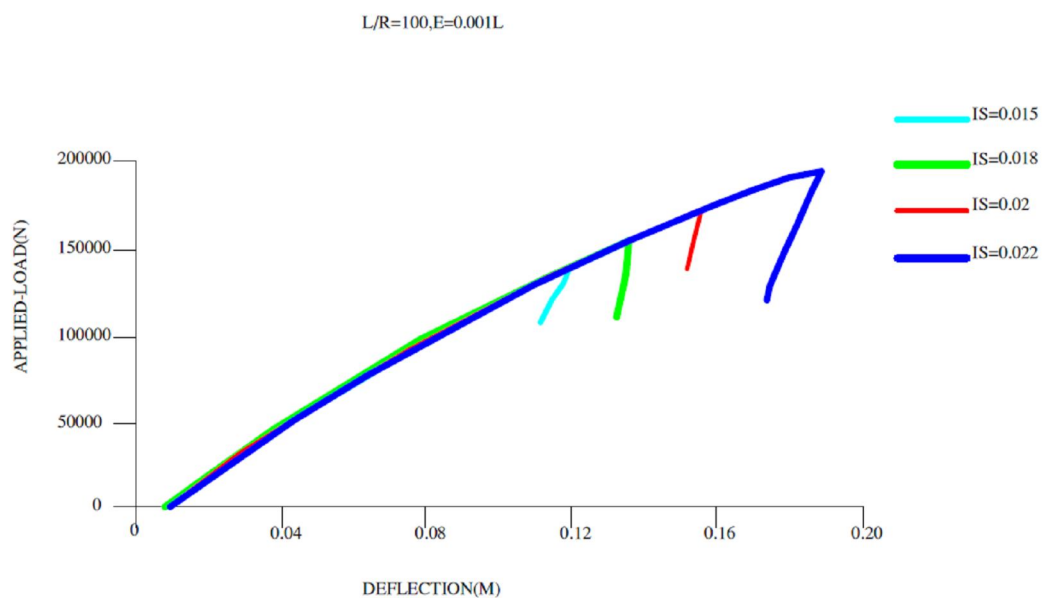
۲- به ازای  $L/r=100$

اعضای کششی به ازای نقص‌های اولیه  $L, \varepsilon = 0/001L, \varepsilon = 0/0005L$  سطح مقطع  $4\text{cm}^2$  و به ازای نقص اولیه  $L, \varepsilon = 0/005L$  با سطح مقطع  $28\text{cm}^2$  در نظر گرفته شده‌اند. چرا که استفاده از سطح مقطع  $4\text{cm}^2$  برای اعضای کششی در حالت نقص  $L, \varepsilon = 0/005L$  باعث می‌شود بجای مکانیزم گسیختگی کششی، مکانیزم گسیختگی فشاری اتفاق بیفتد. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی، روی مکانیزم گسیختگی کششی به ازای هر یک از این نقص‌ها به ترتیب در شکل‌های (۷۴) و (۷۵) و (۷۶) نشان داده شده‌اند.

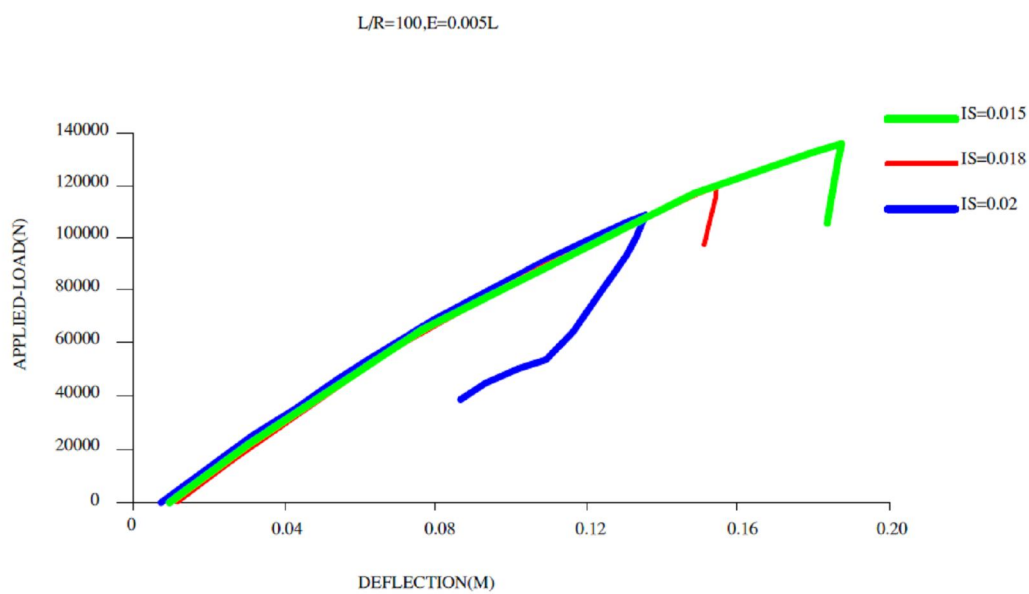
برای  $L/r=100$  با نقص‌های اولیه  $L, \varepsilon = 0/005L, \varepsilon = 0/001L, \varepsilon = 0/0005L$  به ازای کرنش‌های اولیه  $is = 0/015, 0/018, 0/02, 0/022$  مکانیزم خرابی نوع ۱ (خرابی کلی) رخ می‌دهد.



شکل (74): تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/r=100$  با نقص اولیه  $L, \varepsilon = 0/0005L$



شکل (75): تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/r = 100$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.001L$

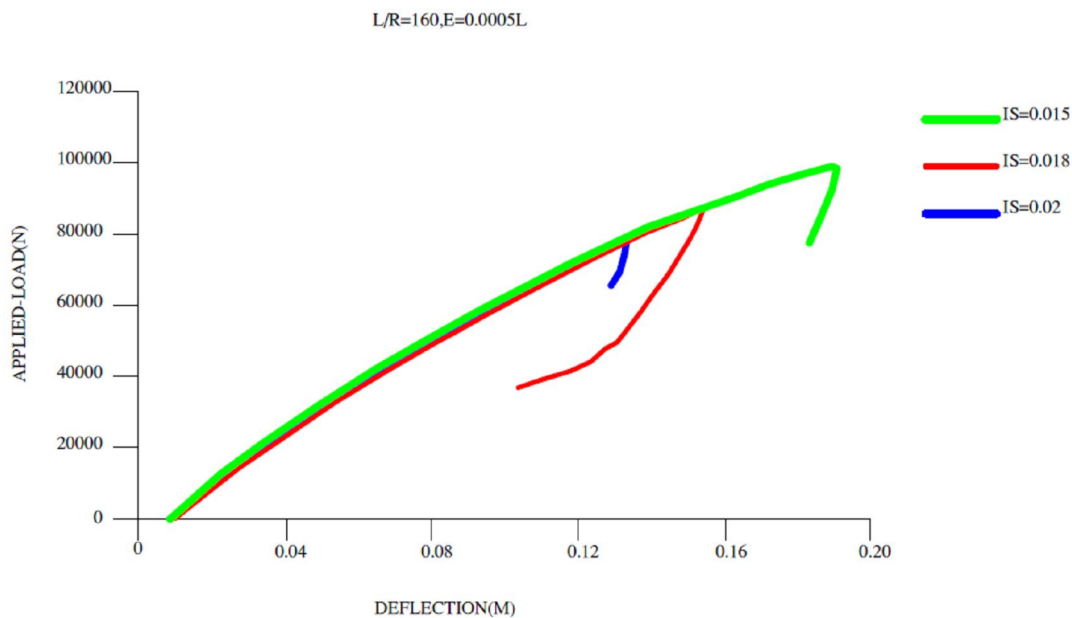


شکل (76): تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/r = 100$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.005L$

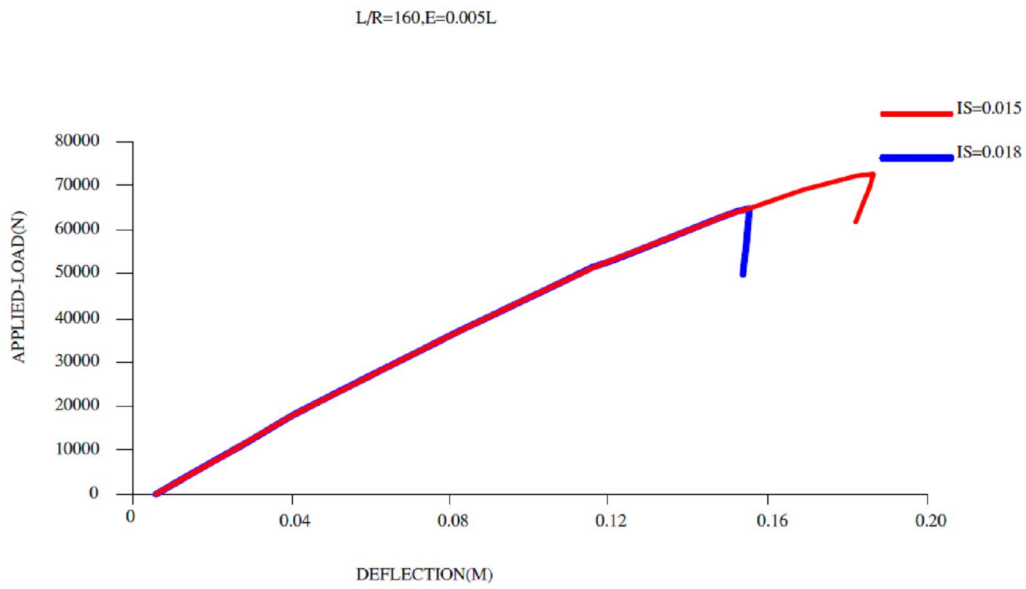
۲- به ازای  $L/r=160$

اعضای کششی به ازای نقص‌های اولیه  $\varepsilon = 0.001L$ ,  $\varepsilon = 0.0005L$  با سطح مقطع  $0.2\text{cm}^2$  و به ازای نقص  $\varepsilon = 0.005L$  با سطح مقطع  $0.15\text{cm}^2$  در نظر گرفته شده اند. چرا که استفاده از سطح مقطع  $0.2\text{cm}^2$  برای اعضای کششی در حالت نقص  $\varepsilon = 0.005L$  باعث می‌شود بجای مکانیزم گسیختگی کششی، مکانیزم گسیختگی فشاری اتفاق بیفتد. تاثیر تراز کرنش اولیه اعضای کششی، روی مکانیزم گسیختگی کششی به ازای هر یک از این نقص‌ها به ترتیب در شکل‌های (77)، (78) و (79) نشان داده شده‌اند.

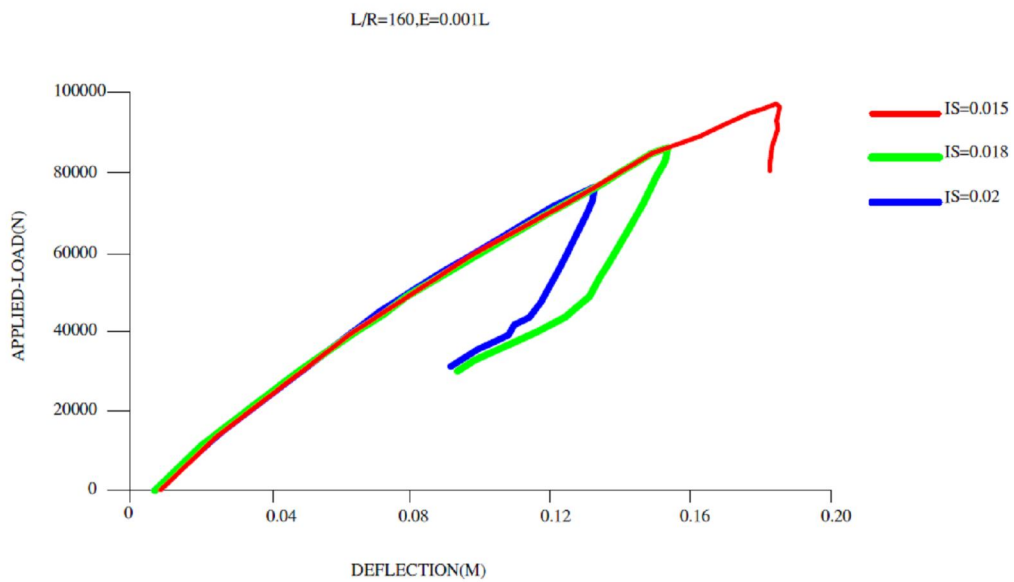
این ساختار برای  $L/r=160$  با نقص‌های اولیه  $\varepsilon = 0.005L$ ,  $\varepsilon = 0.001L$ ,  $\varepsilon = 0.0005L$  به ازای تمام مقادیر کرنش‌های اولیه مورد مطالعه، دارای مکانیزم خرابی از نوع ۱ (خرابی کلی) می‌باشد.



شکل (77): تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/r=160$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.0005L$



شکل (78): تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/r=160$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.01L$



شکل (79): تاثیر مقادیر پیش تنش روی رفتار ناپایداری برای  $L/r=160$  با نقص اولیه  $\varepsilon = 0.005L$

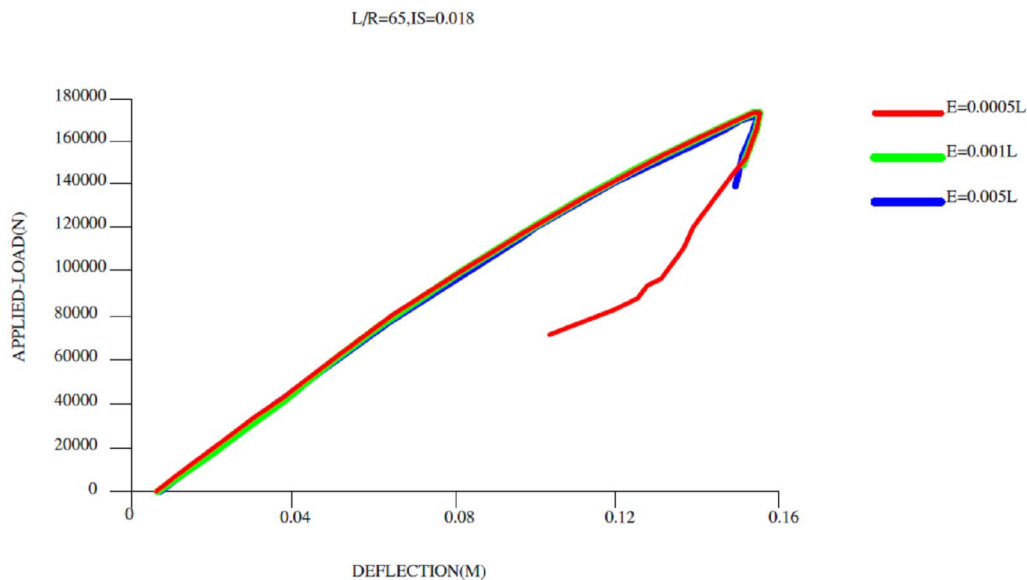
## ۷-۵-۱-۲- تاثیر مقادیر نقص اولیه اعضای فشاری

در مطالعه حاضر به بررسی تاثیر مقادیر نقص اولیه اعضای فشاری روی رفتار ناپایداری ساختار مذکور پرداخته می‌شود.

### مطالعات تحلیلی

۱- به ازای  $L/r=65$

تاثیر دامنه تغییرات نقص اولیه روی رفتار ناپایداری و نوع مکانیزم خرابی به ازای کرنش  $\epsilon_s = 0.018$  به ترتیب در شکل (80) نشان داده شده است. با تغییرات نقص، نوع مکانیزم و ظرفیت باربری تغییری نمی‌کند. که این موضوع با توجه به اینکه در مطالعه حاضر، مکانیزم گسیختگی کششی حاکم می‌باشد، کاملاً منطقی است.

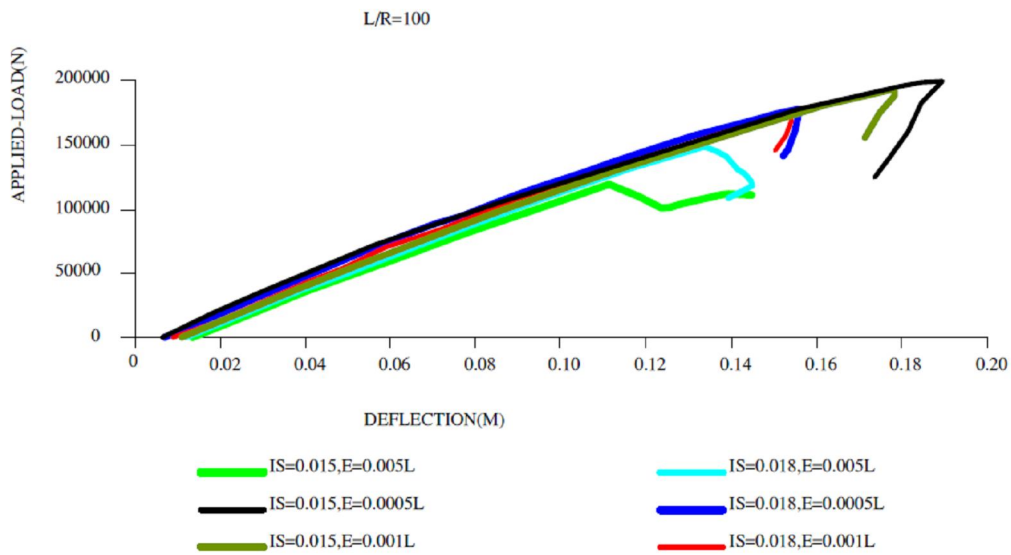


شکل (80): تاثیر مقادیر نقص اولیه مختلف روی رفتار ناپایداری سازه تنسگریتی به ازای  $L/r = 65$



۲- به ازای  $L/r = 100$

تأثیر دامنه تغییرات نقص اولیه روی رفتار ناپایداری و نوع مکانیزم خرابی به ازای کرنش  $\epsilon = 0.018$  به ترتیب در شکل (81) نشان داده شده است. برای نسبت لاغری  $L/r = 100$  به ازای نقص‌های  $\epsilon = 0.0005L$ ,  $\epsilon = 0.001L$  مکانیزم گسیختگی کششی حاکم است که با تغییرات نقص، ظرفیت باربری تغییری نمی‌کند و یا تغییراتش اندک است. حال آنکه به ازای نقص  $\epsilon = 0.005L$  مکانیزم گسیختگی فشاری حاکم است.



شکل (81): تأثیر مقادیر نقص اولیه مختلف روی رفتار ناپایداری سازه تنسگریتی به ازای  $L/r = 100$ .

### ۷-۵-۱-۳- نتایج تحلیل غیرخطی

در بحث گسیختگی کششی، قبل از گسیختگی کابل‌ها، اعضای فشاری به بارحدی خود نمی‌رسند. ملاحظه می‌شود که این ساختار با ابعاد داده شده، در حالتی که مکانیزم گسیختگی کششی حاکم است، به ازای کرنش‌های اولیه مختلف، مکانیزم خرابی نوع ۱ را از خود نشان می‌دهد. این ساختار به ازای پارامترهای مختلفی که در تحلیل خرابی در نظر گرفته شد، هرگز مکانیزم خرابی نوع ۲ (خرابی موضعی با فروجهش) را از خود نشان نداد. نکته حائز اهمیت که بایستی به آن اشاره کرد، اینست که افزایش اضافی نقص (در تراز  $\varepsilon = 0/005L$ ) باعث می‌شود نوع مکانیزم گسیختگی تغییر یابد. بطوریکه برای نسبت‌های لاغری  $L/r=100$  و  $160$  به ازای نقص‌های  $\varepsilon = 0/001L$ ،  $\varepsilon = 0/0005L$  مکانیزم گسیختگی کششی و به ازای نقص اولیه  $\varepsilon = 0/005L$  مکانیزم گسیختگی فشاری حاکم است. بنظر می‌رسد که " کاهش بار بحرانی اعضای فشاری با افزایش میزان نقص "عامل اصلی تغییر نوع مکانیزم گسیختگی باشد. (جدول ۲)

(جدول ۲): بررسی تأثیر مکانیزم گسیختگی کششی

وضعیت	مکانیزم خرابی به ازای نقص اولیه			شرح وضعیت سازه
	0.0005L	0.001L	0.005L	
ر	1	1	1	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۵ در مقدار لاغری $L/r=65$
ز	1	1	۱	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۸ در مقدار لاغری $L/r=65$
س	1	1	۱	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۲ در مقدار لاغری $L/r=65$
ش	1	۱	گ. ف	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۵ در مقدار لاغری $L/r=100$
ص	1	۱	گ. ف	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۸ در مقدار لاغری $L/r=100$
ض	۱	۱	گ. ف	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۲ در مقدار لاغری $L/r=100$
ط	۱	۱	گ. ف	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۵ در مقدار لاغری $L/r=160$
ظ	۱	۱	گ. ف	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۸ در مقدار لاغری $L/r=160$
ع	۱	۱	گ. ف	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۲ در مقدار لاغری $L/r=160$

## ۶-۷- نتایج حاصل از بررسی مکانیزم‌های گسیختگی فشاری و گسیختگی کششی

دو نوع مکانیزم گسیختگی روی ساختارهای تنسگریتی پیوسته عضو فشاری با انعطاف پذیری هندسی مورد مطالعه قرار گرفت :

الف- مکانیزم گسیختگی فشاری ب- مکانیزم گسیختگی کششی ؛

در تحلیل‌های خرابی در مبحث مکانیزم گسیختگی فشاری سه نوع مکانیزم خرابی ملاحظه می‌گردید: ۱- مکانیزم خرابی کلی ۲- مکانیزم خرابی موضعی با فرو جهش ؛ ۳- مکانیزم خرابی موضعی بدون فرو جهش در جدول (۱)، رفتار خرابی با ابعاد مشخص داده شده به ازای پارامترهای مختلف، نشان داده شده است در این جدول، اعداد ۱، ۲ و ۳ بیانگر مکانیزم‌های خرابی نوع ۱ (خرابی کلی)، مکانیزم خرابی نوع ۲ (خرابی موضعی با فرو جهش) و خرابی نوع ۳ (خرابی موضعی بدون فرو جهش) می‌باشند. با دقت در جدول ۱ ملاحظه می‌شود که به ازای مقدار نقص متداول  $L/r = 0.001L$  .  $\epsilon$  برای مقدار لاغری  $L/r = 65$  مکانیزم خرابی کلی و برای مقادیر لاغری ۱۰۰ و  $L/r = 160$  مکانیزم خرابی موضعی را به نمایش می‌گذارد. بنابراین با افزایش مقدار لاغری، رفتار ناپایداری ساختار بهبود می‌یابد. مشاهده می‌شود که در یک نقص اولیه مشخص، با افزایش مقادیر لاغری اعضای فشاری برای ۱۶۰ و  $L/r = 65$  از سمت مکانیزم خرابی نوع ۱ به سمت مکانیزم خرابی نوع ۲ و ۳ جهت می‌گیرد و در نتیجه سازه، رفتار شکل پذیرتری را از خود به نمایش می‌گذارد. همچنین در یک نسبت لاغری مشخص با افزایش مقدار نقص نیز به سمت خرابی موضعی پیش می‌رود. و این رفتار در نقص‌های بزرگتر بیشتر نمود پیدا می‌کند. در نتیجه، با افزایش شکل پذیری رفتار اعضای فشاری، رفتار سازه از مکانیزم خرابی کلی فاصله گرفته و به مکانیزم‌های خرابی موضعی جهت می‌گیرد. همچنین ملاحظه شده است که با افزایش نقص، مقاومت نهایی سازه کاهش می‌یابد.

ساختار ایجاد شده تحت مکانیزم‌های گسیختگی کششی و فشاری در مبحث مکانیزم گسیختگی فشاری به ازای پارامترهای مختلف، مکانیزم‌های خرابی کلی و موضعی با فرو جهش و بدون فرو جهش را نشان می‌دهد. در حالیکه در مبحث مکانیزم گسیختگی کششی به ازای پارامترهای مختلف، تنها مکانیزم‌های خرابی کلی را به نمایش می‌گذارد. نکته حائز اهمیت که بایستی به آن اشاره کرد، اینست که افزایش اضافی نقص- (در تراز  $\varepsilon = 0/005L$ ) باعث می‌شود نوع مکانیزم گسیختگی تغییر یابد. بطوریکه برای نسبت‌های لاغری ۱۶۰ و  $L/r=100$  به ازای نقص‌های  $\varepsilon = 0/001L$ ،  $\varepsilon = 0/0005L$  مکانیزم گسیختگی کششی و به ازای نقص اولیه  $\varepsilon = 0/005L$  مکانیزم گسیختگی فشاری حاکم است. بنظر می‌رسد که "کاهش بار بحرانی اعضای فشاری با افزایش میزان نقص" عامل اصلی تغییر نوع مکانیزم گسیختگی باشد. (جدول ۲)

(جدول ۱): بررسی تأثیر مکانیزم گسیختگی فشاری

وضعیت	مکانیزم خرابی به ازای نقص اولیه			شرح وضعیت سازه
	0.0005L	0.001L	0.005L	
الف	1	1	1	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱ در مقدار لاغری $L/r=65$
ب	1	1	2	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۲ در مقدار لاغری $L/r=65$
ت	1	1	2	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۵ در مقدار لاغری $L/r=65$
ث	1	2	2	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱ در مقدار لاغری $L/r=100$
ج	1	2	2	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۲ در مقدار لاغری $L/r=100$
ح	3	3	3	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۵ در مقدار لاغری $L/r=100$
خ	2	2	3	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱ در مقدار لاغری $L/r=160$
د	2	2	3	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۲ در مقدار لاغری $L/r=160$
ذ	3	3	3	بررسی مکانیزم گسیختگی فشاری برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۵ در مقدار لاغری $L/r=160$

(جدول ۲): بررسی تأثیر مکانیزم گسیختگی کششی

وضعیت	مکانیزم خرابی به ازای نقص اولیه			شرح وضعیت سازه
	0.0005L	0.001L	0.005L	
ر	1	1	1	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۵ در مقدار لاغری $L/r=65$
ز	1	1	۱	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۸ در مقدار لاغری $L/r=65$
س	1	1	۱	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۲ در مقدار لاغری $L/r=65$
ش	1	۱	گ. ف	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۵ در مقدار لاغری $L/r=100$
ص	1	۱	گ. ف	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۸ در مقدار لاغری $L/r=100$
ض	۱	۱	گ. ف	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۲ در مقدار لاغری $L/r=100$
ط	۱	۱	گ. ف	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۵ در مقدار لاغری $L/r=160$
ظ	۱	۱	گ. ف	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۱۸ در مقدار لاغری $L/r=160$
ع	۱	۱	گ. ف	بررسی مکانیزم گسیختگی کششی برای پیش‌تنیدگی به ازای ۰.۰۲ در مقدار لاغری $L/r=160$

## فصل ۸:

### بحث و نتیجه‌گیری



## نتیجه‌گیری

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<sup>۶</sup>، گنبدهای کروی، دکل‌ها، شبکه‌های کابلی، سیستم‌های غشایی<sup>۷</sup>، سازه‌های تاشو<sup>۸</sup> و تنسگریتهای<sup>۹</sup> هستند. سازه‌های تنسگریتهی شامل مجموعه ناپیوسته-ای از عناصر فشاری در داخل مجموعه پیوسته‌ای از عناصر کششی می‌باشند که به وسیله حالت خودتنیدگی<sup>۱۰</sup> پایدار می‌شوند.

لزوم اعمال خودتنیدگی برای ایجاد سختی، عدم وجود سخت شدگی کرنشی برای اعضای کششی بعد از ناحیه پلاستیک و مکانیزم گسیختگی، همچنین ایجاد رفتار غیرخطی سازه‌ای و محدود بودن منابع مورد دسترس، از جمله عواملی هستند که گویای اهمیت این مطالعات و بررسی‌ها می‌باشد. در این تحقیق پس از آشنایی با سازه‌های تنسگریتهی، انواع مدول‌ها مورد بررسی قرار گرفت. سپس مسئله انتخاب مناسب‌ترین آرایش برای پوشش تخت مورد بحث قرار گرفت. در مرحله بعد بارگذاری سازه‌های تنسگریتهی برای استفاده در پروژه‌های عملی جهت تعیین مقادیر بارها و ضرایب آن بررسی شد. جهت محاسبه و مدل سازی از روش اجزا محدود استفاده شد. و در نهایت تحلیل ناپایداری این سازه‌ها بررسی گردید تا توصیه‌هایی برای طراحی ملاک عمل قرار گیرد. در واقع دو نوع مکانیزم گسیختگی روی ساختارهای تنسگریتهی پیوسته عضو فشاری با انعطاف پذیری هندسی مورد مطالعه قرار گرفت :

الف- مکانیزم گسیختگی فشاری ب- مکانیزم گسیختگی کششی ؛

---

<sup>6</sup>-- Barrel Vaults

<sup>7</sup>-- Membrane Systems

<sup>8</sup>-- Foldable Structures

<sup>9</sup>-- Tensegrity Structures

<sup>10</sup>-- self stressing

در تحلیل های خرابی در مبحث مکانیزم گسیختگی فشاری سه نوع مکانیزم خرابی ملاحظه می‌گردد:

۱- مکانیزم خرابی کلی ۲- مکانیزم خرابی موضعی با فرو جهش ۳- مکانیزم خرابی موضعی بدون فرو جهش

مکانیزم گسیختگی کششی در ساختار تنسگریتی مورد بررسی قرار گرفته شده، تنها مکانیزم خرابی کلی را از خود نشان می‌دهد.

از بین مکانیزم‌های خرابی، مکانیزم خرابی کلی مطلوب نیست. چرا که این مکانیزم خرابی بدون هیچ‌گونه علائم هشدار دهنده‌ای، به صورت ترد اتفاق می‌افتد. اما مکانیزم‌های خرابی موضعی بدلیل اینکه به صورت ناگهانی و ترد رخ نمی‌دهند، نسبت به مکانیزم خرابی کلی ارجح می‌باشد. در بین مکانیزم‌های خرابی موضعی نیز، خرابی موضعی ناشی از کمانش عضوی بدلیل حالت شکل‌پذیری که نسبت به خرابی موضعی با فروجهش دارند.

در مطالعه تحلیلی ساختار مورد نظر تحت مکانیزم گسیختگی فشاری، به ازای مقادیر لاغری زیاد با در نظر گرفتن نقص‌های مختلف، مشاهده می‌گردد که با افزایش کرنش اولیه، ضمن کاهش مقاومت نهایی، نوع مکانیزم خرابی را تغییر می‌دهد. بطوریکه مکانیزم خرابی کلی به مکانیزم خرابی موضعی تبدیل می‌شود. با افزایش نقص مقاومت نهایی کاهش یافته و مکانیزم خرابی کلی به مکانیزم خرابی موضعی تبدیل می‌شود. همچنین مشاهده می‌گردد که با افزایش مقدار لاغری به ازای یک نقص مشخص، 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 با نقص اولیه متداول، مکانیزم خرابی موضعی را از خود نشان نمی‌دهد. که این مسأله با توجه به سرعت فروریزش بار عضو فشاری به ازای مقدار لاغری و نقص مذکور 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 مخصوصاً برای حالت نقص اولیه متداول،

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، مطلوب‌تر است. همچنین در محدوده لاغری زیاد و خیلی بزرگ، می‌توان با افزایش کرنش اولیه، در رفتار این ساختار، مکانیزم خرابی موضعی را مشاهده نمود.

با افزایش کرنش اولیه به سمت مکانیزم خرابی موضعی پیش می‌رویم. با افزایش نقص، مکانیزم خرابی کلی به مکانیزم خرابی موضعی جهت می‌گیرد. در طراحی سازه‌های 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 می‌شود که در مقادیر لاغری  $L/r=100$  مقادیر کرنش‌های 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.

# پیوست‌ها

پیوست الف



## Geometrical non-linear analysis of tensegrity systems

K. Kebiche, M.N. Kazi-Aoual, R. Motro \*

LMGC-UMR 5508, Université Montpellier 2, cc 034-Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5, France

Received 2 January 1997; received in revised form 20 October 1997; accepted 19 January 1998

K. Kebiche et al./Engineering Structures 21 (1999) 864–876

869

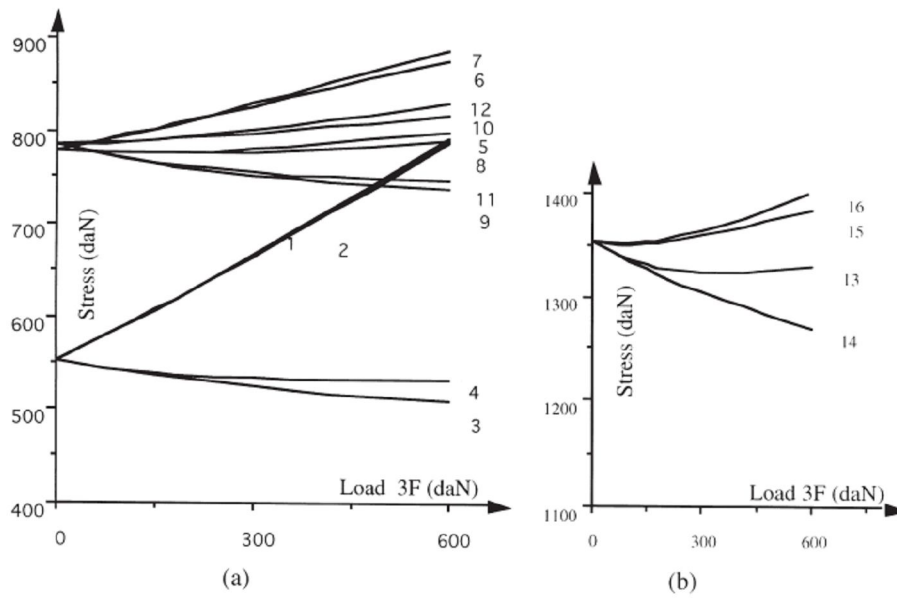
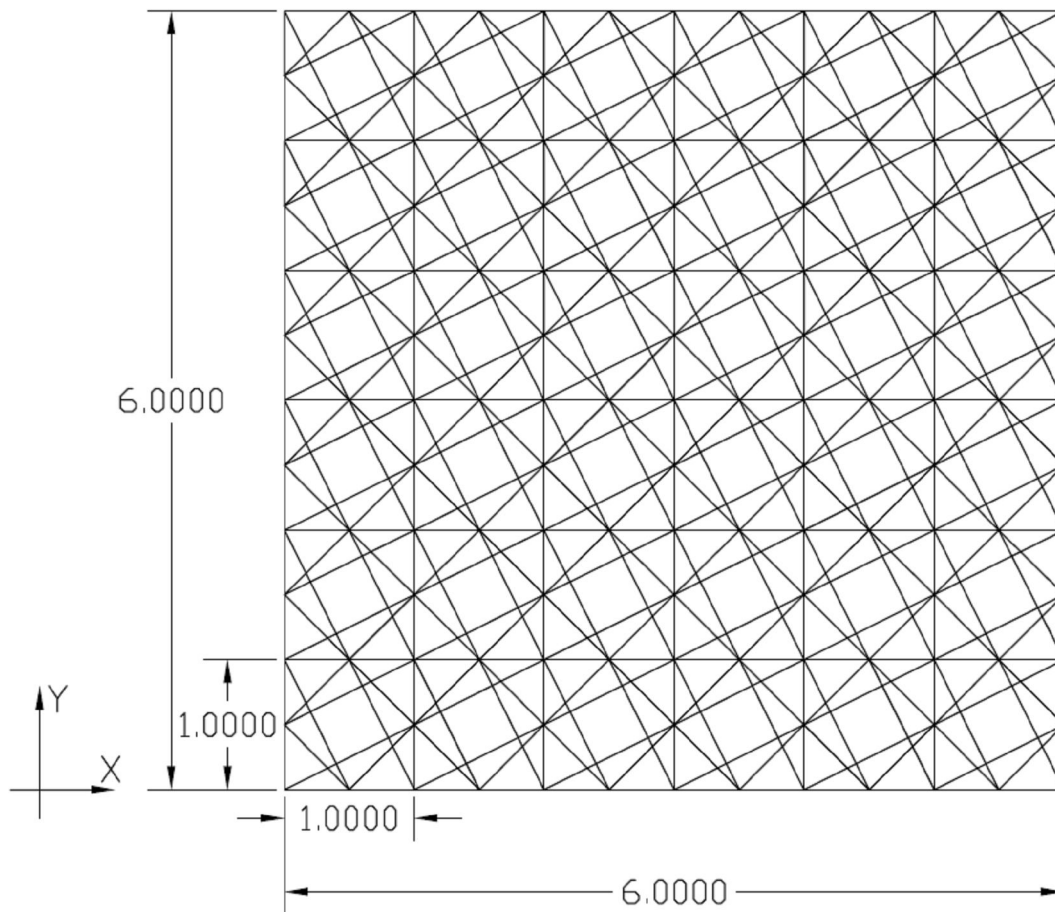


Fig. 4. Traction load: (a) tension stresses in cables; (b) compression stresses in struts.

سازه‌ای متشکل از مدول‌های مربع که هر مدول به مساحت یک متر مربع بوده و از مونتاژ ۳۶ مدول در کنار هم صفحه‌ی ۶متر در ۶متر را تشکیل داده که این صفحه به مساحت ۳۶ مترمربع می‌باشد. این صفحه دارای ۱۲۶ گره و ۱۴۴ عضو فشاری و ۲۸۸ عضو کششی می‌باشد.



۱- بار مرده

### ۱-۱- پوشانه

ابتدا وزن پوشانه محاسبه می‌گردد در اینجا پوشانه از نوع سبک بوده پس مقدار ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع انتخاب می‌شود.

وزن پوشانه برای یک متر مربع:

$$p_1 = 20 \times 9/8 = 196 N/m^2$$

وزن پوشانه کل:

$$p_{t1} = 196 \times 36 = 7056 N$$

### ۱-۲- وزن سازه:

طول هر کدام از میله‌ها ۱,۱۱۸ متر بوده، بنابراین برای اعضای فشاری خواهیم داشت:

وزن اعضای فشاری (میله‌ها) برای یک متر مربع:

$$LP = 4 \times 1/118 = 4/472 m$$

$$P = 4/472 \times 0/279 = 124/77 N$$

طول هر کدام از کابل‌های تحتانی ۱ متر بوده و طول هر کدام از کابل‌های قطری و فوقانی ۰,۷۰۷ متر بوده

بنابراین برای اعضای کششی خواهیم داشت:

وزن اعضای کششی (کابل‌ها) برای یک متر مربع:

$$Lt_1 = 8 \times 0/707 = 5/657 m$$

$$Lt_2 = 4 \times 1 = 4 m$$

$$Lt = 4 + 5/657 = 9/657 m$$

$$p = 9/657 \times 0/205 = 19/8 N$$

وزن یک مدول متشکل از کابل‌ها و میله‌ها:

$$P_r = 19/8 + 124/77 = 144/57 N/m^2$$

وزن کل صفحه متشکل از کابل‌ها و میله‌ها:

$$P = 144/57 \times 36 = 520.4/52 N$$

وزن کل متشکل از کابل‌ها و میله‌ها و پوشانه:

برای یک مترمربع:

$$P = 144/57 + 196 = 340/57 N/m^2$$

برای کل سازه:

$$P = 520.4/52 + 70.56 = 12260/52 N$$

## ۲- بار برف

منطقه اقلیمی تهران در نظر گرفته شده است. این منطقه از مناطق ۴ اقلیمی با برف زیاد محسوب می‌شود.

میزان بار برف ۱۵۰ دکانیوتن بوده که برابر با ۱۵۰۰ نیوتن بر مترمربع می‌باشد. برای کل صفحه

خواهیم داشت:

$$S = 1500 \times 36 = 54000 N$$

## ۳- بار زنده

چون در صفحه مورد نظر فرض بر این است که کاربری سقف دارد، بنابراین بار زنده‌ای نخواهیم داشت.

## ۴- بار ناشی از تغییر درجه حرارت

اگر ساخت در تهران باشد. تغییرات دما از ۳۰- درجه تا ۲۵ درجه بوده و در کارهای اجرایی برابر ۳۰ درجه

منظور می‌شود. چون تحلیل با نرم‌افزار انجام می‌شود این دما تعریف می‌گردد.

## ۵- بار باد



فشار مبنای باد:

$$q = 0.005 V^2$$

$$q = 0.005 \times 10^4$$

نیروی ناشی از باد:

$$F = P.A$$

$$P = C_e.C_q.q$$

$C_e$ : در نواحی باز خارج از شهرها و یا محلهایی که دارای ساختمانها و یا درختان پراکنده اند (۶-۶-۵)

فرض می شود صفحه در ارتفاع ۴ متری از سطح زمین است.  $C_e \geq 2$

$$C_e = 2 \times (0.4)^{1.6} = 1.727$$

$$C_e = 2$$

$C_q$ : چون صفحه تخت و برای پوشش بام مدنظر است بنابراین:

$$C_q = -1/4$$

$$P = C_e.C_q.q$$

$$P = 2 \times (-1/4) \times 50 = -140 \text{ N/m}^2$$

$$F = P.A$$

$$F = -140 \text{ (one)}$$

$$F = -140 \times 36 = 5040 \text{ N (total)}$$

۶- بار زلزله:

$$A = 0.35$$

تهران - خطر نسبی زیاد

$$I = 1$$

کاربری گروه ۲ - ساختمان با اهمیت متوسط

بار مرده به همراه بار زنده

$$W_p = 196 + 144/57 + 1500 = 184/57$$

نیروی ناشی از زلزله (قائم)

(۱۴-۷-۶)

$$F = 0.7 AIW_p$$

$$F = 0.7 \times 0.35 \times 1 \times 1840 / 57 = 45.0 \text{ N/m}^2$$

$$F_{total} = 45.0 \times 36 = 1620.0 \text{ N}$$

$$V = CW$$

$$C = \frac{ABI}{R}$$

$$T = 0.5 H^{\frac{2}{3}}$$

$$T = 0.54^{\frac{2}{3}} = 0.251$$

$$T \leq T \leq T_s$$

$$T = 0.1$$

$$T_s = 0.4$$

$$B = 1 + S\left(\frac{T}{T_s}\right) \Rightarrow 0.1 \leq T \leq T_s$$

$$B = 1 + (1/5) \left( \frac{0.251}{0.1} \right) = 1.377$$

$$C = \frac{ABI}{R} = \frac{0.35 \times 1.377 \times 1}{6} = 0.08$$

$$V = 0.08 \times 1840 / 57 = 147 / 25$$

موارد بررسی شده به طور خلاصه در جداول زیر نوشته شده است.

نتایج بررسی هر مورد

برای هر متر مربع

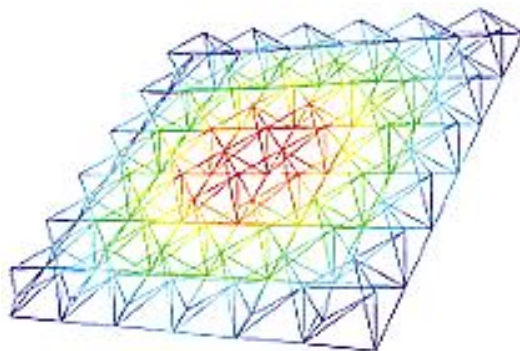
برای کل سازه

بار مرده	$D_1 = 340 / 57$	$D_t = 12260 / 52$
بار برف	$S_1 = 1500$	$S_t = 54000$
بار زنده	$L_1 = no$	$L_t = no$
بار حرارتی	$T_1 = applied - software$	$T_t = applied - software$
بار باد	$W_1 = -140$	$W_t = -5040$
بار زلزله	$E_1 = 450$	$E_t = 16200$

ترکیب بار

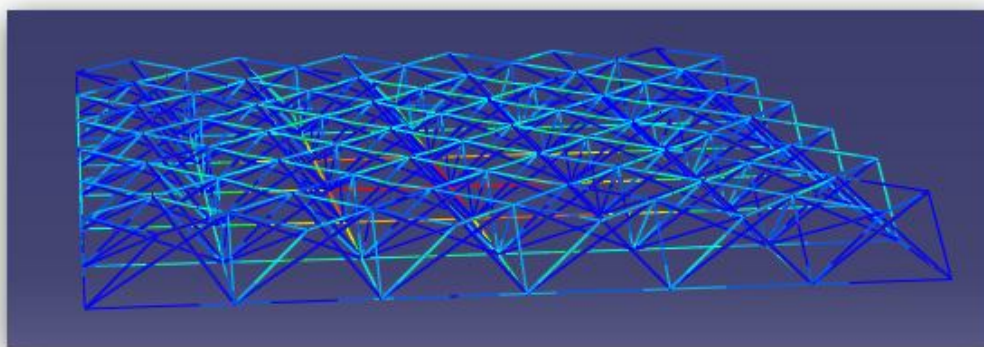
ردیف	حالت ترکیب بار	برای هر متر مربع	برای کل سازه
۱	D	340.57	12260.52
۲	D+S	1840.57	66260.57
۳	(D+W)0.75	360.43	12975.39
۵	(D+S+W)0.75	1485.43	53475.43
۶	(D+E)0.75	592.93	21345.43
۷	(D+W+E)0.75	1717.93	61845.43

با افزایش میزان بار وارده بر سازه یکی از انواع خرابی در سازه رخ می‌دهد. به عنوان مثال خرابی کلی که در نمودار ۵۵ در اولین بررسی مشاهده شده را در تاشه می‌توان بررسی نمود که در شکل ۸۲ آمده است.

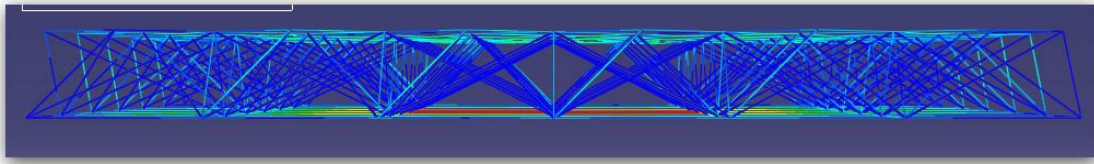


(شکل ۸۲): وقوع مکانیزم خرابی کلی در سازه تنسگریتی

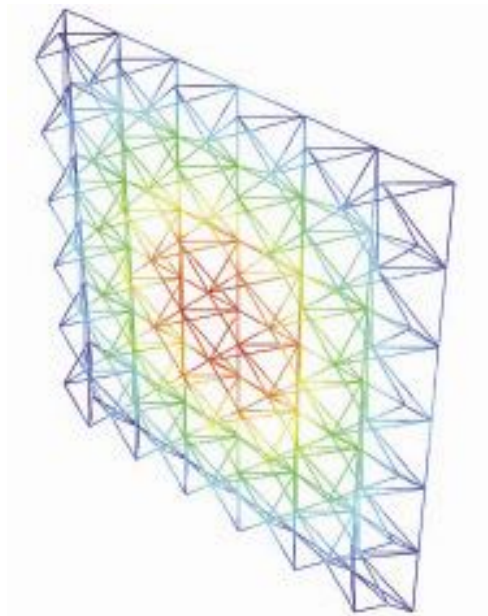
سایر مکانیزم‌های محتمل خرابی در تحلیل ناپایداری و به صورت نمودار بررسی شده است. که در تصاویر ۸۳ تا ۸۵ آمده است.



(شکل ۸۳): وقوع مکانیزم خرابی نوع ۳ در سازه تنسگریتی



(شکل ۸۴): وقوع مکانیزم خرابی نوع ۳ در سازه تنسگریتی



(شکل ۸۳): وقوع مکانیزم خرابی نوع ۲ در سازه تنسگریتی

## reference

- [1]. Stern, N. "Tensegrity Structures and their Application to Architecture" page of 10-67
- [2]. Ben kahla, N. , Moussa, B. and Pons ,J.C., "Nonlinear Dynamic Analysis of Tensegrity Systems " , 2002.
- [3]. Tibert. G , "Deployable Tensegrity Structures for Applications", Doctoral Thesis , Stockholm, Royal Institute of Technology, Department of Mechanics, 2002
- [4]. Sultan , C. Corless , M., skelton., " The Prestressability Problem of Tensegrity Structures: some Analytical Solution ;, International Journal of Solids and Structures 38 (2001) 5223-5252.
- [5]. Hanaor , A., "Geometrically Rigid Double –Layer Tensegrity Grids "International Journal of Space Structures , Vol.9, No. 4,1994.
- [6]. Motro, R., " Tensegrity : State - of – the Art", Space Structures 5 , Thomas Telford , London,2002
- [7]. Zhang , L., Wardenier , j., "Analysis of Various Type of Tensegrity Steel Roof Structures" , space Structures 5, Thomas Telford , London , 2002.
- [8]. Murtha-smith, "Alternate Path Analysis of Space Trusses for Progressive Collapse ". Dep. of Civ. Eng. Univ. of Connecticut , 1989
- [9]. Ben kahla, N. , kebiche, k., "Nonlinear Elastoplastic Analysis of Tensegrity Systems " , Engineering Structures 23 (2000)1552-1566.
- [10]. 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..
- [11]. Murakami , h. , "Static and Dynamic Analysis of C Structures. Part 2 Quasi-static Analysis " International Journal of Solids and Structures 38 (2001) 3615-3629.
- [12]. Supple , W.J. , Collins , " Limit State Analysis of Double – layer Grids. Analysis, Design and Construction of double Layer Grids". Applied Science publish escience publisher , London , 93-117 (1981)
- [13]. Wang , C.J., Qian,. R. J and Wang , R.P. , "the Geometrical Stability and Prestress Analysis for Tensegrity Elements " ,. IASS symposium 2001 , Nagoya
- [14]. Raducanu, V.and Motro, R., "New Tensegrity Grids " , IASS symposium 2001 , Nagoya.
- [15].Motro, R., " Tensegrity: State-of-the-Art", Space Structure 5 , Thomas ,Telford,London 2002
- [16]. Skelton, R.E., "Smart Tensegrity Wings", Structural Systems and Control Laboratory School of Engineering, UCSD, 2003
- [17]. Hanaor , A., "Geometrically Rigid Double –Layer Tensegrity Grids "International Journal of Space Structures , Vol.9, No. 4,1994.
- [18]. Wang bin bing "Free-standing tension structures from tensegrity systems to cable-strut systems" spon press, taylor& francis group , London and newyork.
- [19]. sheidaii, M.R., Abdi, k. and Behravaesh , A., "Collapse Behaviour of Double Layer space Trusses" , IASS symposium 2001 , Nagoya.
- [20].Abedi, k,"Instability Behavior and Collapse Analysis of Space Structures", Proceeding of the .first National Conference on Space Structures ,Iran ,Tehran ,May 15-17,2000
- [21].Luo, Y.Z., Fu Gang, Chen Ting. (2004) **The Experimental \_Research on Combined Unit of Flat-Quadrism\_ Tensegrity**. IASS Symposium, Montpellier

## **Abstract**

The space structure appositest structure for large span. The space structure is a structural system that involves three dimensions. in practice, the term Space structure is simply used to refer to a number of families of structures that include grids, barrel vaults, domes, towers, cable nets, membrane systems, foldable assemblis and tensegrity forms. Tensegrity structures are spatial reticulated systems that contain a discontinuous set of compressive members (struts) inside a continuous set of tensile members(cables) whitch are stabilized by a selfstress state. Tensegrity structures are special types of structures in which prestress should be applied in order to stiffen the structure and the analysis is based on the prestressed stats. other reasons, prerupture or slacking of tensile members, loss of strain hardening for tensile members in post pelastic region and so possibility of tension failure mechanism, and finally structural nonlinear behavior due changing statu. In this thesis, after definition of tensegrity structures and description of various configurations on these structures is reviewed. then in order to investigate the statically stability behavior of of tensegrity structures and representation of suitable responses about the rule of various parameters on reducing and increasing the feasibility of propagation of instability phenomena in the tensegrity structures, using finite elements modeling, the nonlinear analyses is performed on these structures. The modeling tensil element used multilinear isotropic. In this research, tonsion and compression failure mechanisms are studied. In each of these

mechanisms, the effects of various parameters such as: slenderness ratio and the rate of initial imperfection of compressive elements, changes in initial strain and cross section of tension elements, on the instability behavior and the type of collapse in tensegrity structures are investigated. Finally, based on the obtained results, several ways are put forward to prevent the occurrence of the overall collapse mechanisms and receiving the local collapse mechanisms and design recommendations. The overall collapse mechanism is not proper. Because it does not occur without warning previous. Local collapse mechanism is not sudden and buckling of compressive members is proper than nodal snap through. Those design recommendations are present for prevention of the overall collapse mechanism.