

تحلیل مسیر جایگزین استاتیکی سازه‌های کش‌بستی با در نظر گرفتن اثر توزیع‌های مختلف خودتنش

بهزاد شکسته‌بند*^۱ و نوید پورمند^۱

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

^۲ کارشناس ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی ارومیه

(دریافت: ۹۵/۱/۲۹، پذیرش: ۹۵/۸/۹، نشر آنلاین: ۹۵/۸/۱۰)

چکیده

یک سیستم کش‌بستی، یک سیستم در حالت پایدار خودمتعادل است که شامل مجموعه‌ای از عناصر تحت فشار داخل محیط پیوسته‌ای از عناصر تحت کشش می‌باشد. اساس پایداری این سازه‌ها متکی بر خودتنیدگی اولیه اعضای آن می‌باشد. لذا مطالعه تأثیر توزیع‌های مختلف خودتنیدگی بر روی رفتار ناپایداری استاتیکی این سازه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مطالعه، رفتار خرابی این سازه‌ها بر اثر از دست دادن اعضای کششی و فشاری بحرانی تحت توزیع‌های مختلف خودتنش در بافتارهای تخت کش‌بستی با در نظر گرفتن اثرات غیر خطی هندسی و مصالح با استفاده از روش مسیر جایگزین مورد بررسی قرار گرفته است. ملاحظه شده است که طراحی الگوی خودتنش در این سازه‌ها می‌تواند نقش مؤثر در ظرفیت باربری، سختی، آستانه شل‌شدگی کابل‌ها، نوع مکانیزم خرابی و همچنین حساسیت این سازه‌ها به حذف اعضای بحرانی داشته باشد. نتایج حاصل از این تحقیق، به ارائه برخی توصیه‌های طراحی در رابطه با انتخاب الگوی خودتنش به منظور دستیابی به رفتار بهتر در صورت حذف اعضای بحرانی منتهی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: سازه‌های کش‌بستی، پایداری استاتیکی، تحلیل مسیر جایگزین، مکانیزم خرابی، توزیع خودتنش

۱- مقدمه

تنش‌های فشاری ایجاد می‌کند. این تنش‌های اولیه در صلبیت و پایداری این سیستم‌ها نقش مهمی دارند. ممکن است این سیستم‌ها دارای مکانیزم‌های بی‌نهایت کوچک باشند که به وسیله حالات خودتنش، پایدار می‌گردند (Wang, ۲۰۰۴؛ Motro, ۲۰۰۵).

سازه‌های کش‌بستی، سازه‌های با درجه نامعینی ایستایی بالایی هستند. شاید این تصور اشتباه پیش آید که نامعینی ایستایی باعث ضریب اطمینان بالایی در برابر خرابی این سازه‌ها خواهد بود، ولی باید توجه داشت که نامعینی سازه‌های برابر با نامعینی ایستایی نیست (Abedi و Shekastehtband, ۲۰۰۹؛ Shekastehtband و همکاران، ۲۰۱۱). از این رو در این سازه‌ها، رفتار اعضا تأثیر به‌سزایی در رفتار کلی سازه دارد؛ زیرا اعضای این سازه‌ها تحت نیروهای محوری قرار گرفته و امکان کماتش اعضا و گسیختگی کابل‌ها وجود دارد.

اگر چه مطالعاتی در زمینه رفتار پایداری سازه‌های کش-بستی انجام یافته است، اما در آن‌ها، تأثیر توزیع خودتنش بر روی رفتار ناپایداری استاتیکی این سازه‌ها، بررسی نشده است.

سازه‌های کش‌بستی نوع جدیدی از سازه‌های فضاکار هستند که به دلیل وزن کم، قابلیت گسترش‌پذیری، سادگی تنظیم کردن اعضا، تکرار پذیری بالا، مقیاس پذیر بودن و داشتن درجه نامعینی استاتیکی بالا امروزه مورد توجه مهندسان قرار گرفته‌اند (Ben Kahla و همکاران، ۲۰۰۰). این سازه‌ها متشکل هستند از هر مجموعه دلخواهی از اعضای کششی که به یک بافتار کش-بستی اعضای فشاری متصل شده باشد و بافتار کش‌بستی بافتاری است که بتوان آن را توسط برخی مجموعه اعضای کششی داخلی-که مثلاً بین عناصر فشاری وصل شده‌اند- پایدار نمود. اما اگر برای پایدارسازی این بافتار، هیچ عضو کششی مورد نیاز نباشد و یا هیچ مجموعه اعضای کششی برای پایداری بافتار وجود نداشته باشند؛ در آن صورت، این بافتار یک بافتار کش-بستی نخواهد بود (Oliveira و Skelton, ۲۰۰۹). باید اشاره کرد که اساس پایداری این سیستم‌ها متکی بر خودتنیدگی اولیه اعضای آن می‌باشد و خودتنیدگی حالتی از تنش‌های داخلی است که در عناصر کابلی، تنش‌های کششی و در دستک‌ها،

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۴-۳۳۵۵۴۱۸۰

۲- بافتارهای مورد مطالعه

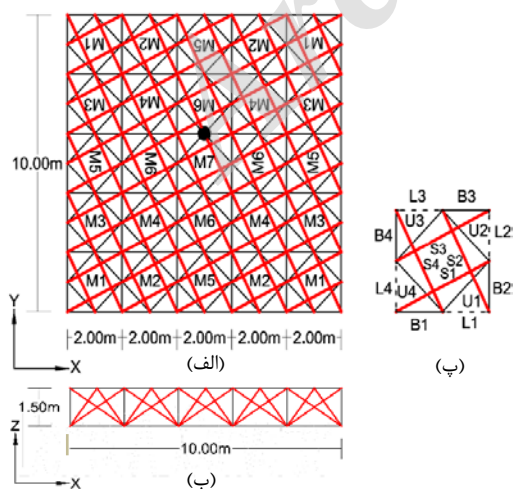
در این مطالعه، سه بافتار کش‌بستی متشکل از مدول‌های هرمی شکل به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

● بافتار ۱: این بافتار، از یک شبکه دو لایه صلب مربعی شکل 5×5 ، شامل دستک‌های ناپیوسته با آرایش هندسی منظم تشکیل شده است که نوع اتصال آن به صورت رأس و لبه می‌باشد. همچنین از نظر هندسی دارای ارتفاع $1/5$ متر و طول دهانه ۱۰ متری بوده و شامل ۲۶۰ کابل و ۱۰۰ دستک می‌باشد (شکل (۱)).

● بافتار ۲: این بافتار، از یک شبکه دو لایه انعطاف‌پذیر مربعی شکل 6×6 تشکیل شده است که شامل دستک‌های ناپیوسته با آرایش هندسی نامنظم می‌باشد و نوع اتصال آن به صورت رأس و لبه است. همچنین از نظر هندسی دارای ارتفاع $1/5$ متر و طول دهانه ۱۲ متری و شامل ۲۸۸ عضو کابل و ۱۴۴ عضو دستک می‌باشد (شکل (۲)).

● بافتار ۳: این بافتار، از یک شبکه دو لایه صلب مربعی شکل 6×6 ، شامل دستک‌های پیوسته با آرایش هندسی منظم که نوع اتصال آن به صورت لب به لب می‌باشد، تشکیل شده است. همچنین از نظر هندسی، دارای ارتفاع $1/5$ متر، طول دهانه ۱۲ متری و شامل ۳۱۲ کابل و ۱۴۴ دستک می‌باشد (شکل (۳)).

در شکل‌های (۱) - (۳)، به منظور مشخص شدن اعضا در بافتارها، هر سه بافتار نام‌گذاری شده‌اند که به دلیل شباهت مدول‌ها در بافتار ۱، تنها ۷ مدول و در بافتار ۲ و ۳، تنها یک چهارم آن نام‌گذاری شده‌اند. در این شکل‌ها، حروف L, B, S, M و U به ترتیب نشان دهنده مدول، دستک، کابل قطری، کابل پایینی و کابل بالایی در بافتار می‌باشند.



شکل ۱- شماره و نام‌گذاری بافتار ۱:

(الف) پلان بافتار ۱، (ب) نمای بافتار، (پ) مدول بافتار

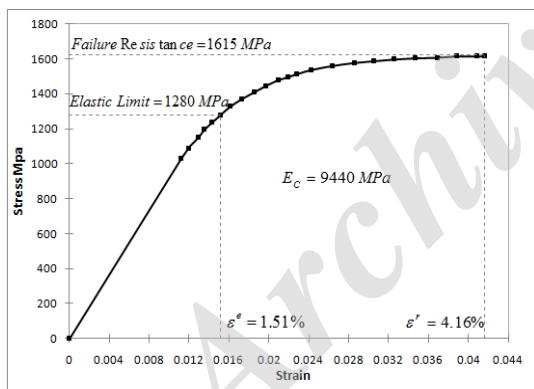
Hanaor (۱۹۹۱) نشان داد که در سیستم‌های کش‌بستی متشکل از مدول‌های منشوری جدا از هم، خرابی عضو می‌تواند منجر به خرابی موضعی شود و بر روی باربری نهایی سازه تأثیر بگذارد. Kebiche و همکاران (۱۹۹۹) به بررسی رفتار یک تیر کش‌بستی تحت بارگذاری خارجی به ازای ترازهای مختلف خودتنش که اثرات غیر خطی هندسی در آن لحاظ شده بود پرداختند. Ben Kahla و Kebiche (۲۰۰۰) یک روشی برای تحلیل غیر خطی الاستو-پلاستیک سیستم‌های کش‌بستی تحت بارگذاری استاتیکی ارائه کردند. Abedi و Shekasteband (۲۰۰۸) رفتار پایداری استاتیکی سازه‌های دو لایه کش‌بستی را مورد مطالعه قرار داده و به ازای لاغری‌ها و ناکاملی‌های مختلف دستک‌ها و نیز کرنش‌های اولیه مختلف، مکانیزم‌های خرابی این سازه‌ها را مورد بررسی قرار دادند. Ben kahla و Moussa (۲۰۰۲) به بررسی اثر گسیختگی کابل در یک تیر کش‌بستی بدون حضور نیروهای خارجی پرداختند. Shekasteband و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۴) رفتار خرابی یک سازه کش‌بستی متشکل از مدول‌های هرمی شکل، شامل دستک‌های ناپیوسته با آرایش هندسی منظم، ناشی از گسیختگی کابل و کمانش دستک را به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند و تأثیر پارامترهای مختلفی مانند ناکاملی اولیه دستک‌ها و ضرایب میرایی را بر روی رفتار پایداری سازه کش‌بستی مورد بررسی قرار دادند. Shekasteband و همکاران (۲۰۱۱) همچنین به بررسی حذف تدریجی و ناگهانی عضو در بافتارهای تخت کش‌بستی و تأثیر آن بر نوع مکانیزم خرابی پرداختند و رفتار پایداری ای-ن سازه‌ها را با در نظر گرفتن اثرات لاغری مختلف برای دستک‌ها و میرایی‌های مختلف برای سازه، مورد مطالعه قرار دادند.

در سیستم‌های کش‌بستی، آسیب به یک عضو یا بخشی از سازه تحت شرایط بهره‌برداری ممکن است دلایل مختلفی داشته باشد که از آن جمله می‌توان به نقص مصالح، خطاهای ساخت، عیب‌های اجرایی، درجه حرارت زیاد و بارهای غیر عادی اشاره کرد. همچنین ممکن است گسیختگی زود هنگام اتصالات در عناصر کابلی یا دستک‌ها، موجب حذف این عناصر می‌گردد.

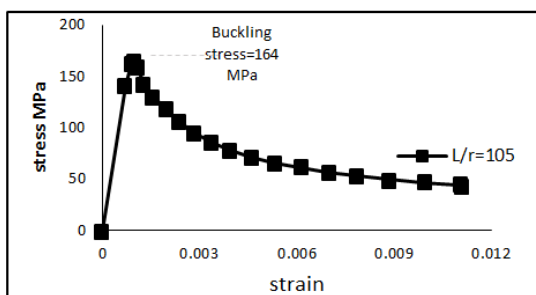
در برخی موارد، تغییرات کوچک در توزیع خودتنش، می‌تواند در رفتار خرابی این سیستم‌ها ناشی از حذف عضو تأثیر مهمی داشته باشد؛ به گونه‌ای که حتی نوع مکانیزم خرابی را تغییر دهد. بنابراین باید به طراحی خودتنش این سیستم‌ها، توجه ویژه‌ای معطوف شود. با انتخاب مناسب الگوی خودتنش می‌توان از وقوع مکانیزم‌های خرابی نامطلوب در این سیستم‌ها، ممانعت کرد. از این رو، در این مقاله، با انجام تحلیل‌های مسیر جایگزین استاتیکی، تأثیر از دست دادن اعضای بحرانی به ازای توزیع‌های مختلف خودتنش با در نظر گرفتن اثرات غیر خطی هندسی و مصالح، مورد بررسی قرار گرفته است.

در بافتارهای ۱ و ۲، تکیه‌گاه‌ها در لبه‌های کناری لایه پایینی بافتار منظور شده‌اند، در حالی که در بافتار ۳، این قیود در لایه بالایی قرار دارند. در این بافتارها، گره‌های گوشه در سه جهت X، Y و Z و بقیه گره‌ها، تنها در جهت Z مقید شده‌اند.

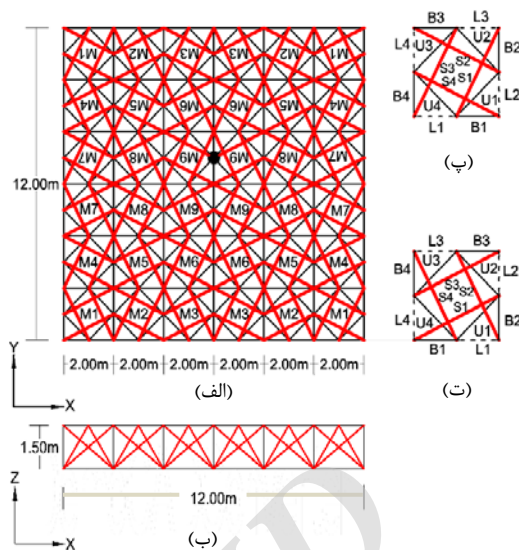
منحنی تنش-کرنش مربوط به کابل‌ها و دستک‌ها (با فرض ناکاملی اولیه ناکاملی اولیه $e=0.001L$ به عنوان انحنای اولیه عضو) به ترتیب مطابق شکل‌های (۴) - (۶) مشخص شده است (Shekastehband و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین یک سطح مقطع مناسب برای دستک‌ها با توجه به محدودیت‌های طراحی از جمله کنترل تغییر مکان مجاز سازه‌ای تحت بارهای سرویس که نباید از مقدار $\Delta_{all} = \frac{L}{200}$ تجاوز کند و همچنین عدم شل‌شدگی کابل‌ها و نیز عدم کمانش دستک‌ها تحت بارهای نهایی انتخاب شده است. سطح مقطع کابل‌ها با توجه به رابطه $\frac{EA_{STRUT}}{EA_{CABLE}} = 10$ (نسبت سختی دستک به سختی کابل) که توسط Quirant (۲۰۰۳) پیشنهاد شده است، به دست می‌آید. شایان ذکر است که تحلیل‌های غیر خطی بر روی این سیستم‌ها در محیط نرم‌افزار ABAQUS (Simulia، ۲۰۰۹) انجام می‌شود. در نرم‌افزار ABAQUS برای مدل‌سازی کابل‌ها و دستک‌ها از عنصر Truss استفاده می‌شود. در مورد کابل‌ها از گزینهٔ منحصرآ کششی استفاده می‌گردد.



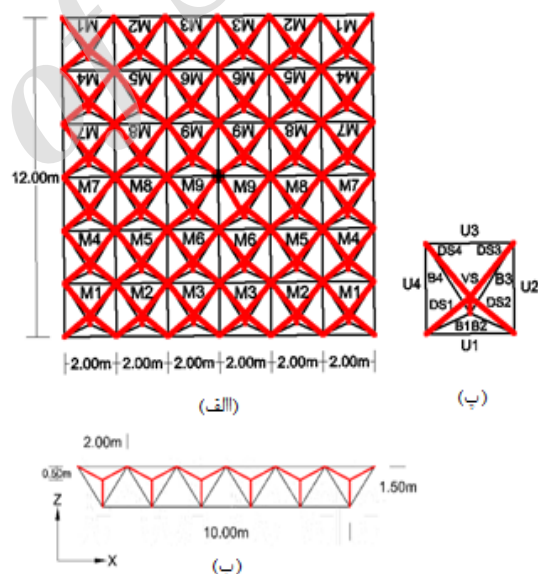
شکل ۴- منحنی تنش-کرنش مربوط به عناصر کابلی (Shekastehband و همکاران، ۲۰۱۲)



شکل ۵- منحنی تنش-کرنش مربوط به دستک‌های بافتارهای ۱ و ۲ (Shekastehband و همکاران، ۲۰۱۲)



شکل ۲- شماره و نام‌گذاری بافتار ۲: الف) پلان بافتار ۱، ب) نمای بافتار، پ) مدول زوج بافتار، ت) مدول فرد بافتار



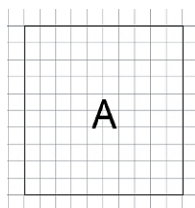
شکل ۳- شماره و نام‌گذاری بافتار ۳: الف) مدول‌های بافتار ۳، ب) نمای بافتار، پ) اعضای مدول بافتار ۳، ت) مدول‌های کابلی پایین، ث) اعضای مدول کابلی پایین

۳- توزیع‌های خودتنش

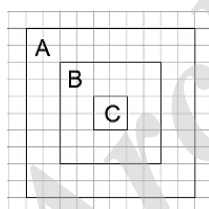
خودتنیدگی حالتی از تنش‌های داخلی است که به محض مونتاژ کردن عناصر در سیستم ایجاد می‌شود. خودتنیدگی با کوتاه کردن کابل‌ها و طولیل کردن میله‌ها از یک هندسه بدون تنش ایجاد می‌شود (Quirant و همکاران، ۲۰۰۳). در یک سیستم کشبستی با ne عضو و تعداد nn گره، معادله تعادل به صورت رابطه زیر نوشته می‌شود (Shekasteband و همکاران، ۲۰۱۳):

$$[A] \cdot \{q\} = \{f\} \quad (1)$$

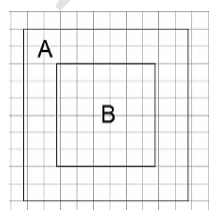
که در این رابطه، ماتریس A با ابعاد $nv \times ne$ ، یک ماتریس تعادل می‌باشد که توسط کسینوس‌های هادی اعضا تعریف می‌شود. اگر nc مربوط به تغییر مکان‌های ثابت گره‌ها باشد، در این صورت $nv = 3nn - nc$ (تعداد درجات آزادی) به صورت $nv = 3nn - nc$ به دست می‌آید. همچنین q و f به ترتیب بردارهای مربوط به ضرایب دانسیته نیرو و بارهای خارجی می‌باشد که ابعاد هر کدام از آن‌ها $ne \times 1$ می‌باشد.



شکل ۷- توزیع یکنواخت

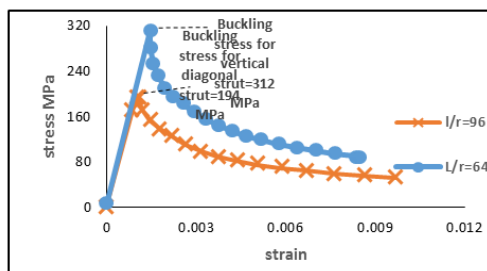


شکل ۸- توزیع غیر یکنواخت



شکل ۹- توزیع غیر یکنواخت

حالت‌های خودتنش، بردارهای پایه‌ای فضای پوچ ماتریس تعادل (ماتریس A) می‌باشند. در حقیقت با محاسبه فضای پوچ ماتریس A (محاسبه کرنل ماتریس A)، حالت‌های خودتنش به این صورت به دست می‌آید:



شکل ۶- منحنی تنش-کرنش دستک‌های بافتار

این عنصر هیچ‌گونه مقاومتی در برابر خمش ندارد. از این رو برای مدل‌سازی سازه‌های که اعضای آن به صورت تک‌محوری عمل می‌کنند، مناسب می‌باشند (Simulia، ۲۰۰۹). همچنین لازم به ذکر است که هر عنصر خرابایی در هر گره، تنها سه درجه آزادی دارد.

ترکیبات بارگذاری برای بارهای سرویس و بارهای نهایی به صورت زیر ارائه شده است:

ترکیب بارگذاری تحت بارهای سرویس:

G+Q+S

ترکیبات بارگذاری تحت بارهای نهایی:

1.35G+1.5Q+0.8S

برای خودتنش مقاوم

1.35G+1.5Q+1.2S

برای خودتنش فعال

که در ترکیبات بارگذاری فوق، منظور از G بار مرده، Q بار زنده و S تراز خودتنش می‌باشد که در طراحی‌های صورت گرفته، مقدار $G=250 \text{ N/m}^2$ ، $Q=1500 \text{ N/m}^2$ و S که تراز خودتنش می‌باشد، ۵۰٪ ظرفیت کمانشی دستک‌ها در نظر گرفته شده است (Quirant و همکاران، ۲۰۰۳). مشخصات مکانیکی مربوط به کابل‌ها و دستک‌ها در جداول (۱) و (۲) آورده شده است

جدول ۱- خصوصیات مصالح برای بافتارهای ۱ و ۲

مشخصات		عناصر
دستک	کابل	
۹/۰۶	۱/۸۵	سطح مقطع (cm^2)
۲۰۹۰۰۰	۹۴۰۰۰	مدول الاستیسیته (MPa)
۱۶۴	۱۳۳۰	بار گسیختگی/ بار کمانشی
۱۰۵	-	نسبت لاغری عضو فشاری

جدول ۲- خصوصیات مصالح برای بافتار ۳

مشخصات			عناصر
دستک	دستک مورب	کابل	
۵/۵۷	۱/۱۹	۱/۱۹	سطح مقطع (cm^2)
۲۰۹۰۰۰	۹۴۰۰۰	۹۴۰۰۰	مدول الاستیسیته
۱۳۳۰	۱۹۴	۱۳۳۰	بار گسیختگی/ بار کمانشی (MPa)
۶۴	۹۶	-	نسبت لاغری عضو

در توزیع یکنواخت (شکل (۷))، مقادیر تراز خودتنش تمامی دستک‌ها به اندازه ۵۰٪ ظرفیت کمانشی آن‌ها می‌باشد. در توزیع غیر یکنواخت،

۱- (شکل (۸))، بافتار به سه ناحیه و در توزیع غیر یکنواخت
 ۲- (شکل (۹))، بافتار به دو ناحیه تقسیم شده و هر کدام از این نواحی، بسته به نوع توزیع خودتنش انتخاب شده، درصدی از ظرفیت کمانشی دستک‌ها را دارند. شکل (۱۰)، مقایسه‌ای از توزیع‌های خودتنش یکنواخت و غیر یکنواخت را برای بافتار ۱ نشان می‌دهد.

۴- تحلیل مسیر جایگزین

باید توجه داشت که در سیستم‌های کش‌بستی با از دست دادن یک‌سری از اعضا، مقاومت نهایی و سختی سازه نسبت به از دست دادن دیگر اعضا به شدت کاسته می‌شود و به سازه آسیب جدی وارد می‌شود. بنابر این در این بخش، تأثیر از دست دادن دستک‌ها و عناصر کابلی به ازای توزیع‌های مختلف خودتنش، مورد بررسی قرار گرفته است. از دست دادن اعضا به صورت تدریجی در نظر گرفته شده و بازتوزیع نیروها نیز به صورت تدریجی خواهد بود. بنابر این برای بررسی رفتار سیستم‌ها، از تحلیل استاتیکی استفاده می‌شود. بایستی توجه داشت که اگر از دست دادن عضو، ناگهانی و در عین حال بار روی سازه، غیر صفر باشد، در آن صورت اثرات دینامیکی نیز بایستی در تحلیل در نظر گرفته شوند (Abedi و Shekastehtband، ۲۰۰۹). به هر حال، با انجام تحلیل مسیر جایگزین استاتیکی، می‌توان یک شبیه‌سازی تقریبی از رفتار خرابی سازه ناشی از حذف عضو به دست آورد (Abedi و Shekastehtband، ۲۰۰۹). برای شبیه‌سازی حذف عضو در نرم‌افزار ABAQUS، از گزینه MODEL CHANGE استفاده شده و تحلیل‌ها با استفاده از روش Riks صورت گرفته است. هنگامی که عضوی از سیستم حذف می‌شود، مشارکت آن عضو در ماتریس سختی از بین می‌رود و نیروهای داخلی آن به بقیه سازه انتقال می‌یابد (Shekastehtband و همکاران، ۲۰۱۱). در هر کدام از توزیع‌های خودتنش، اعضای بحرانی برای کابل‌ها و دستک‌ها (دو عضو بحرانی مربوط به کابل و دو عضو بحرانی مربوط به دستک‌ها) را مشخص کرده و سپس با حذف این اعضا، منحنی‌های پاسخ بار-تغییر مکان به دست آمده است. در این تحلیل‌ها، نمودارهای مربوط به بار-تغییر مکان یکی از گره‌های بالای سازه به دست می‌آید. موقعیت این گره در شکل‌های (۱) - (۳) به صورت ● نشان داده شده است. بارگذاری بافتارهای مورد نظر به صورت بار یکنواخت بر روی تمام گره‌های فوقانی سازه می‌باشد. لازم به ذکر است که توزیع‌های خودتنش انتخاب شده همگی دارای میانگین تراز خودتنش ۵۰٪ هستند.

$$S \in KerA \quad (2)$$

که در آن S عبارت است از (Shekastehtband و همکاران، ۲۰۱۳):

$$[S] = \begin{bmatrix} q_1^1 & q_1^2 & \dots & q_1^{ns} \\ q_2^1 & q_2^2 & \dots & q_2^{ns} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ q_{n_{Ca}}^1 & q_{n_{Ca}}^2 & \dots & q_{n_{Ca}}^{ns} \\ q_{n_{Ca}+1}^1 & q_{n_{Ca}+1}^2 & \dots & q_{n_{Ca}+1}^{ns} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ q_{n_E}^1 & q_{n_E}^2 & \dots & q_{n_E}^{ns} \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در اینجا، n_{Ca} تعداد کابل‌ها و ns تعداد حالت‌های خودتنش می‌باشد. به منظور به دست آوردن حالت خودتنش سازگار که در آن سختی یک طرفه مربوط به اعضا لحاظ شده است، بایستی یک بردار به صورت $\{\alpha\} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{ns}\}$ پیدا شود به طوری که (Quirant و همکاران، ۲۰۰۳):

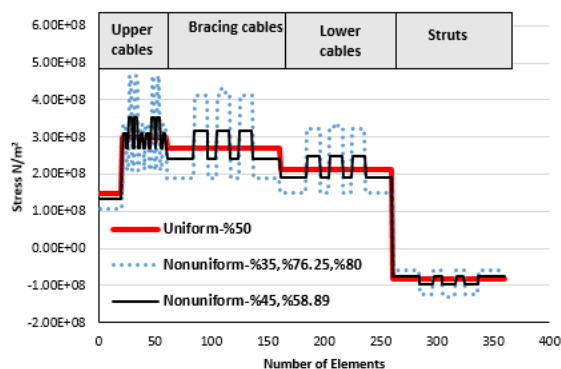
$$q_i = \sum_j^{ns} (\alpha_j q_i^j) > 0 \quad (4)$$

$i = 1, \dots, n_{Ca} \text{ for cables}$

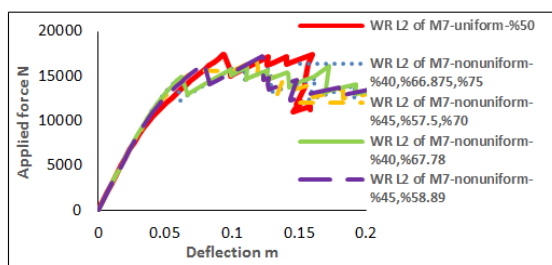
$$q_i = \sum_j^{ns} (\alpha_j q_i^j) > 0 \quad (5)$$

$i = n_{Ca} + 1, \dots, n_E \text{ for struts}$

حال مسئله اصلی، پیدا کردن یک مجموعه از α_j ها می‌باشد که این شرایط را ارضا کند و این همان مسئله شناخته شده برنامه‌ریزی خطی می‌باشد که از روش سیمپلکس برای حل آن استفاده می‌شود. در بافتارهای مورد مطالعه، توزیع‌های خودتنش مطابق شکل‌های (۷) - (۹) در نظر گرفته شده‌اند که متغیرهای A، B و C بیانگر مقادیر تراز خودتنش هستند.



شکل ۱۰- نمونه مقایسه‌ای از توزیع خودتنش غیر یکنواخت با یکنواخت برای بافتار ۱



شکل ۱۲- مقایسه پاسخ بار- تغییر مکان بین توزیع یکنواخت با توزیع غیر یکنواخت ناشی از حذف عنصر کابلی

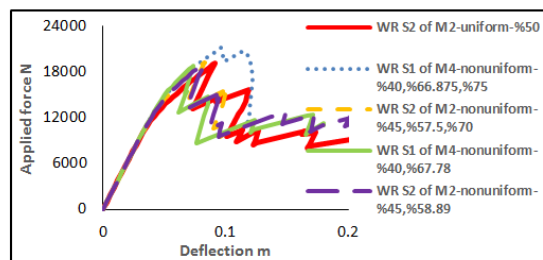
جدول ۳- نتایج رفتار بافتار ۱ با در نظر گرفتن توزیع‌های مختلف خودتنش ناشی از حذف کابل‌ها و دستک‌ها

شماره	توزیع خودتنش	اعضای بحرانی	نوع مکانیزم	بار نهایی (kN)	درصد کاهش باربری
۱	Uniform-50%	-	۱	۲۷/۱	-
		L2-M7	۱	۱۷/۴	۳۵/۷۳
		L4-M6	۲	۱۷/۴	۳۵/۸۶
		S2-M2	۱	۱۹/۱	۲۹/۶۲
		S1-M3	۱	۲۲/۹	۱۵/۷۸
۲	Nonuniform-40%,66.875%,75%	-	۱	۲۷/۰	-
		L2-M7	۲	۱۵/۹	۴۱/۱۳
		L4-M6	۱	۱۵/۴	۴۳/۰۱
		S1-M4	۱	۲۰/۸	۲۳/۱۳
		S2-M2	۱	۱۸/۷	۳۰/۷۷
۳	Nonuniform-45%,57.5%,70%	-	۱	۲۷/۲	-
		L2-M7	۲	۱۶/۹	۳۷/۷۸
		L4-M6	۲	۱۶/۳	۴۰/۰۵
		S2-M2	۱	۱۹/۲	۲۹/۴۹
		S1-M3	۱	۲۲/۵	۱۷/۱۶
۴	Nonuniform-40%,67.78%	-	۱	۲۶/۷	-
		L2-M7	۲	۱۶/۰	۴۰/۱۵
		L4-M6	۱	۱۶/۱	۳۹/۸۸
		S1-M4	۱	۱۸/۷	۲۹/۸۵
		S2-M2	۱	۲۱/۶	۱۹/۰۹
۵	Nonuniform-45%,58.89%	-	۱	۲۷/۳	-
		L2-M7	۲	۱۷/۲	۳۶/۹۹
		L4-M6	۲	۱۷/۰	۳۷/۶۴
		S2-M2	۱	۱۹/۱	۳۰/۰۴
		S1-M3	۱	۲۲/۵	۱۷/۵۰

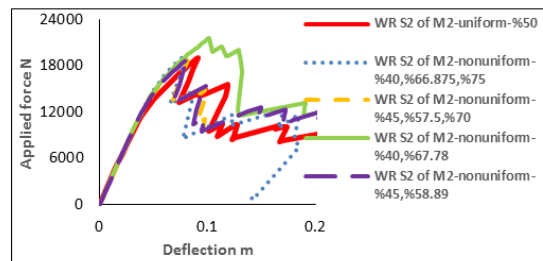
از نظر مقایسه بار نهایی ناشی از حذف دستک‌ها، بار نهایی سازه ناشی از حذف دستک S2-M2 به جز در حالت توزیع خودتنش شماره ۲، از بار نهایی سازه ناشی از حذف دستک S1-M4 کمتر می‌باشد. با توجه به شکل (۱۲) و با مراجعه به جدول (۳)، مشاهده می‌شود که درصد کاهش باربری بافتار ۱ ناشی از حذف عناصر کابلی بحرانی به ازای توزیع‌های خودتنش غیر یکنواخت (با مقدار حداکثر کاهش ۴۳٪)، بیش از مقادیر متناظر در توزیع خودتنش یکنواخت (با مقدار حداکثر ۳۶٪) است. اما، درصد کاهش باربری سازه ناشی از حذف دستک S2-M2 در توزیع غیر یکنواخت خودتنش ۴ (با مقدار کاهش ۱۹٪) کمتر از مقدار متناظر در توزیع یکنواخت (با مقدار کاهش حدود ۳۰٪)

۴-۱- نتایج تحلیل مسیر جایگزین بافتار ۱ تحت توزیع‌های مختلف خودتنش

شکل‌های (۱۱- الف) و (۱۱- ب)، مقایسه منحنی‌های پاسخ بار- تغییر مکان ناشی از حذف دستک‌های بحرانی را برای بافتار ۱ به ازای توزیع‌های یکنواخت و غیر یکنواخت نشان می‌دهد. شکل (۱۲) نیز، مقایسه بین منحنی‌های پاسخ بار- تغییر مکان توزیع یکنواخت با توزیع‌های غیر یکنواخت ناشی از حذف عنصر کابلی بحرانی را نشان می‌دهد. همچنین در جدول (۳) میزان کاهش باربری سازه و نوع مکانیزم خرابی ناشی از حذف اعضای بحرانی در توزیع‌های مختلف خودتنش، ارائه شده است. با توجه به جدول (۳)، می‌توان مشاهده نمود که عضو بحرانی کششی در تمامی توزیع‌های خودتنش، کابل L2-M4 می‌باشد، در حالی که دستک بحرانی در توزیع‌های خودتنش ۱، ۳ و ۵، دستک S2-M2 و در توزیع‌های خودتنش ۲ و ۴، دستک S1-M4 می‌باشد. از نظر تأثیر از دست دادن عضو بر روی سختی سازه، مشاهده شده است که سختی بعد از شل شدگی عناصر کابلی و نیز تأخیر در شل شدگی کابل‌ها کاهش یافته است و این میزان کاهش، ناشی از حذف عناصر کابلی بیشتر از حذف دستک‌ها می‌باشد. با توجه به جدول (۳)، مشاهده می‌شود که در تمام توزیع‌های خودتنش، بار نهایی سازه ناشی از حذف عنصر کابلی L4-M6 به جز در حالت توزیع خودتنش شماره ۴، از بار نهایی سازه ناشی از حذف عنصر کابلی L2-M7 کمتر می‌باشد.



(الف)



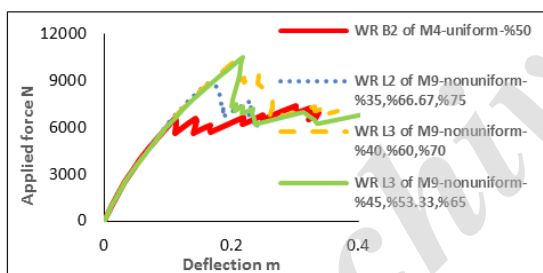
(ب)

شکل ۱۱- مقایسه پاسخ‌های بار تغییر مکان بافتار ۱ بین توزیع یکنواخت با توزیع غیر یکنواخت ناشی از حذف دستک:

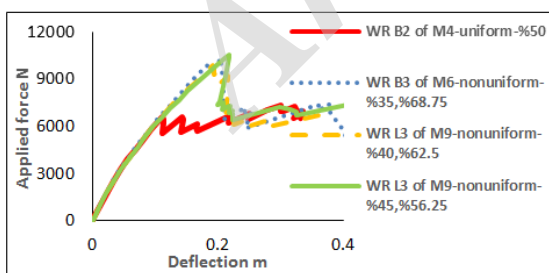
الف) دستک بحرانی مربوط به هر توزیع،
ب) دستک بحرانی مربوط به توزیع یکنواخت

۴-۲- نتایج تحلیل مسیر جایگزین بافتار ۲ تحت توزیع-های مختلف خودتنش

شکل‌های (۱۵) و (۱۶)، به ترتیب مقایسه بین پاسخ‌های بار-تغییر مکان بافتار ۲ را ناشی از حذف عناصر کابلی بحرانی به ازای توزیع‌های غیر یکنواخت ۱- و غیر یکنواخت ۲- نشان می‌دهند. شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نیز، به ترتیب این مقایسه را ناشی از حذف دستک‌های بحرانی نشان می‌دهند. در جدول (۴)، میزان کاهش باربری سازه ناشی از حذف اعضای بحرانی در توزیع‌های مختلف خودتنش و نوع مکانیزم خرابی ارائه شده است. با توجه به جدول (۴)، می‌توان مشاهده نمود که عضو بحرانی کششی در توزیع خودتنش ۱، B2-M4، در توزیع خودتنش ۲، L2-M9، در توزیع خودتنش ۵، B3-M6 و در توزیع‌های خودتنش ۳، ۴، ۶ و ۷، L3-M9 می‌باشد. به عبارت دیگر، اعضای بحرانی توزیع‌های خودتنش ۱ و ۵، کابل‌های قطری می‌باشند؛ در حالی که در سایر توزیع‌های خودتنش، اعضای بحرانی، کابل‌های پایینی می‌باشند. همچنین می‌توان مشاهده نمود که عضو بحرانی فشاری در توزیع‌های خودتنش ۱، ۵ و ۶، دستک S1-M5 می‌باشد؛ در حالی که عضو بحرانی فشاری در سایر توزیع‌های خودتنش ارائه شده در شکل‌های (۱۵) و (۱۶)، دستک S1-M7 می‌باشد.



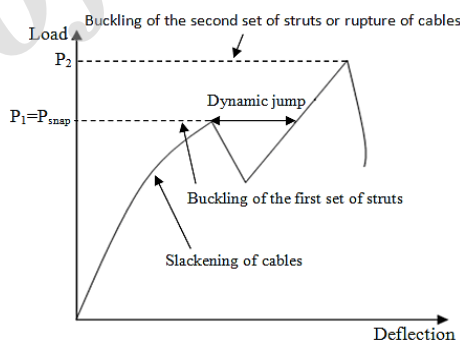
(الف)



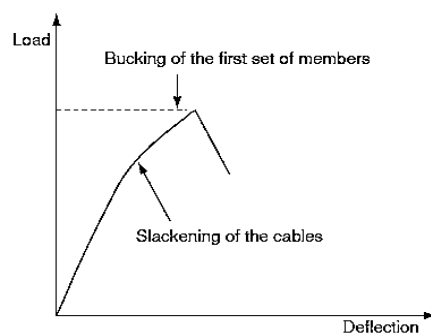
(ب)

شکل ۱۵- مقایسه منحنی‌های بار- تغییر مکان بافتار ۲ ناشی از حذف اعضای کابلی: (الف) با فرض توزیع یکنواخت و توزیع غیر یکنواخت ۱-، (ب) با فرض توزیع یکنواخت و توزیع غیر یکنواخت ۲-

می‌باشد. با توجه به شکل (۱۱-الف)، می‌توان فهمید که بار نهایی سازه تنها در توزیع خودتنش شماره ۲ که دستک بحرانی آن S1-M4 می‌باشد، نسبت به توزیع یکنواخت که دستک بحرانی آن S2-M2 می‌باشد، بیشتر است. اما از نظر مقایسه سختی، با توجه به شکل (۱۲)، سختی بعد از شل‌شدگی عناصر کابلی در توزیع‌های غیر یکنواخت از توزیع یکنواخت، بیشتر می‌باشد. همچنین از نظر نوع مکانیزم خرابی، توزیع‌های غیر یکنواخت به مکانیزم خرابی نوع ۲ و توزیع یکنواخت به مکانیزم خرابی نوع ۱ منجر می‌شوند. در شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، به ترتیب، مکانیزم-های خرابی نوع ۱ (مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی عناصر کابلی) و ۲ (ترکیب مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی عناصر کابلی و خرابی توأم با فروجهش دینامیکی) به صورت شماتیک نشان داده شده‌اند. همچنین سختی سازه در توزیع‌های غیر یکنواخت بیشتر از توزیع یکنواخت می‌باشد. نوع مکانیزم خرابی در توزیع‌های خودتنش ارائه شده در شکل (۱۱-الف)، مکانیزم خرابی نوع ۱ می‌باشد. از نظر مقایسه سختی، مطابق شکل (۱۱-ب)، توزیع خودتنش شماره ۲ دارای بیشترین سختی نسبت به توزیع یکنواخت می‌باشد.



شکل ۱۳- طرح شماتیک مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی عناصر کابلی (مکانیزم خرابی نوع ۱)

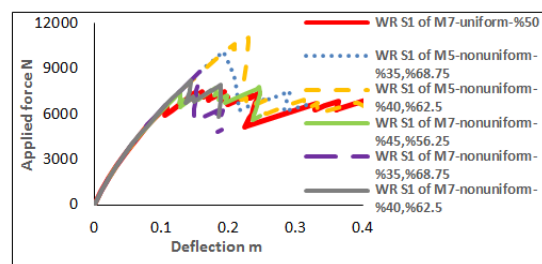


شکل ۱۴- طرح شماتیک ترکیب مکانیزم خرابی موضعی ناشی از شل‌شدگی عناصر کابلی و خرابی موضعی توأم با فروجهش دینامیکی (مکانیزم خرابی نوع ۲)

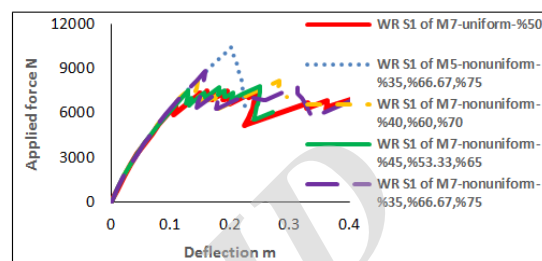
جدول ۴- نتایج رفتار بافتار ۲ با در نظر گرفتن توزیع‌های مختلف خودتنش ناشی از حذف اعضای کابلی و دستک‌ها

شماره	توزیع خودتنش	اعضای بحرانی	نوع مکانیزم	بار نهایی (kN)	درصد کاهش باربری
۱	Uniform-50%	B2-M4	۲	۷/۲	۲۸/۷۲
		L2-M3	۱	۹/۹	۲/۲۳
		S1-M7	۲	۷/۵	۲۶/۲۳
		S3-M4	۲	۶/۸	۳۳
۲	Nonuniform 35%,66.67%,75%	L2-M9	۱	۸/۸	۲۱/۹۲
		L3-M9	۱	۸/۲	۲۷/۸۵
		S1-M5	۱	۱۰/۴	۸
		S4-M8	۲	۱۰/۴	۷/۹
۳	Nonuniform -40%,60%,70%	B2-M4	۱	۹/۰	۲۰/۰۹
		S1-M7	۱	۸/۹	۲۱/۷۲
		L3-M9	۱	۱۱/۷	-
		L4-M9	۱	۱۰/۶	۹/۱۱
۴	Nonuniform -45%,53.33%,65%	S1-M7	۱	۸/۳	۲۹/۵۳
		S1-M5	۱	۱۱/۲	۴/۵۱
		B2-M4	۱	۸/۳	۲۸/۷۴
		L3-M9	۱	۱۰/۵	-
۵	Nonuniform 35%,68.75%	L4-M9	۱	۱۰/۸	۰/۱۵
		S1-M7	۲	۷/۷	۲۸/۳۴
		S3-M9	۲	۷/۸	۲۷/۴۹
		B2-M4	۱	۷/۶	۲۹/۸۲
۶	Nonuniform -40%,62.5%	L3-M9	۱	۹/۹	-
		B3-M6	۱	۱۰/۵	۱۳/۱۵
		S1-M5	۲	۱۱/۰	۷/۷۸
		S1-M7	۱	۸/۲	۲/۷۱
۷	Nonuniform 45%,56.25%	B2-M4	۱	۸/۳	۲۶/۴۷
		L3-M9	۱	۱۰/۵	-
		L4-M9	۱	۱۰/۷	۲/۹۶
		S1-M7	۲	۷/۸	۱/۴۳
		S3-M9	۲	۷/۸	۲۸/۴۴
		B2-M4	۱	۷/۶	۳۰/۰۸

بنابر این، بار نهایی بافتار ۲ ناشی از حذف کابل B2-M4 در حالت توزیع غیر یکنواخت حدود ۲۵٪ بیش از توزیع یکنواخت می‌باشد. از لحاظ نوع مکانیزم خرابی، توزیع‌های خودتنش غیر یکنواخت ۱- و غیر یکنواخت ۲- منجر به مکانیزم خرابی نوع ۱ شده‌اند؛ در حالی که توزیع خودتنش یکنواخت، منجر به مکانیزم خرابی نوع ۲ گردیده است. با توجه به جدول (۴)، می‌توان مشاهده نمود که توزیع‌های خودتنش ۱، ۵ و ۶ دارای دستک بحرانی S1-M5 می‌باشند. در حالی که دستک بحرانی در سایر توزیع‌های خودتنش، S1-M7 می‌باشد. با مقایسه این توزیع‌های خودتنش از نظر بار نهایی مشخص می‌شود که بار نهایی سازه ناشی از حذف دستک S1-M5 بیشتر از دستک S1-M7 می‌باشد. با افزایش تراز خودتنش در ناحیه C برای توزیع غیر یکنواخت ۱-



(الف)



(ب)

شکل ۱۶- مقایسه منحنی‌های بار- تغییر مکان بافتار ۲ ناشی از حذف دستک‌ها: (الف) با فرض توزیع یکنواخت و توزیع غیر یکنواخت-۱، (ب) با فرض توزیع یکنواخت و توزیع غیر یکنواخت-۲

با مقایسه این توزیع‌های خودتنش از نظر بار نهایی مشخص می‌شود که درصد کاهش باربری سازه ناشی از حذف دستک S1-M5 (با حداکثر کاهش ۴/۵٪)، کمتر از دستک S1-M7 (با حداکثر کاهش ۲۹/۵٪) می‌باشد. کمترین درصد کاهش باربری ناشی از حذف دستک S1-M7 در توزیع خودتنش غیر یکنواخت (با مقدار حداقل ۲۲٪) کمتر از مقدار متناظر در توزیع خودتنش یکنواخت (با مقدار کاهش ۲۶٪) می‌باشد. مشاهده می‌شود که با از دست دادن عضو، بار نهایی سازه کاهش یافته اما تغییر چندانی در سختی سازه ایجاد نمی‌شود.

با مقایسه اعضای بحرانی کابلی مربوط به توزیع‌های غیر یکنواخت ۱-، می‌توان مشاهده نمود که با افزایش تراز خودتنش در ناحیه C برای توزیع غیر یکنواخت ۱- تا ۷/۵٪، درصد کاهش باربری سازه نسبت به توزیع یکنواخت، افزایش می‌یابد. با مراجعه به جدول (۴)، می‌توان مشاهده نمود که با افزایش تراز خودتنش در ناحیه C برای توزیع غیر یکنواخت ۱- تا ۷۵٪ و با افزایش تراز خودتنش در ناحیه B برای توزیع غیر یکنواخت ۲- تا ۶۸/۷۵٪، بار نهایی سازه ناشی از حذف کابل B2-M4، برای توزیع غیر یکنواخت ۱-، تا ۹۰۳۸ نیوتن در توزیع خودتنش شماره ۲ و برای توزیع غیر یکنواخت ۲- تا ۹۰۳۹ نیوتن در توزیع خودتنش ۵ افزایش پیدا می‌کند، در حالی که بار نهایی سازه در توزیع یکنواخت، ۷۲۴۹ نیوتن می‌باشد.

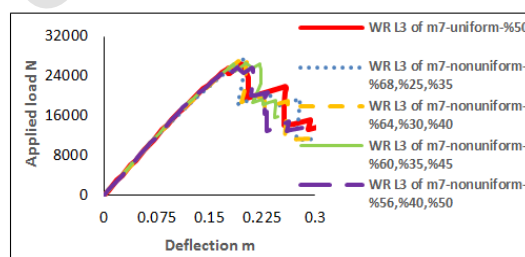
جدول ۵- مقایسه نتایج رفتار بافتار ۳ با در نظر گرفتن توزیع- های مختلف خودتنش ناشی از حذف اعضای کابلی و دستک‌ها

شماره	توزیع خودتنش	اعضای بحرانی	نوع مکانیزم	بار نهایی (kN)	درصد کاهش باربری
۱	Uniform-50%	-	۱	۳۲/۶	-
		L3-m7	۲	۲۶/۵	۱۸/۷۳
		L3-m4	۱	۲۶/۹	۱۷/۵۳
		DS4-M5	۱	۲۲/۸	۳۰/۰۱
		DS4-M9	۱	۳۰/۳	۷/۲۷
۲	Nonuniform-68%,25%,35%	-	۱	۳۱/۶	-
		L3-m7	۱	۲۷/۴	۱۳/۳
		L3-m4	۱	۲۶/۸	۱۵/۲۲
		DS2-M2	۱	۲۴/۱	۲۳/۶۷
		DS3-M2	۱	۲۴/۷	۲۱/۸۶
۳	Nonuniform-64%,30%,40%	-	۱	۳۴/۶	-
		L3-m7	۱	۲۷/۳	۲۱/۱۱
		L3-m4	۱	۲۸/۷	۱۷/۲۰
		DS2-M2	۱	۲۶/۲	۲۴/۴۳
		DS3-M2	۱	۲۶/۵	۲۳/۳۲
۴	Nonuniform-60%,35%,45%	-	۱	۳۷/۵	-
		L3-m7	۲	۲۶/۷	۲۸/۸۲
		L3-m4	۲	۲۸/۹	۲۲/۹۹
		DS2-M2	۱	۲۶/۰	۳۰/۷۴
		DS3-M2	۱	۲۶/۳	۲۹/۸۳
۵	Nonuniform-56%,40%,50%	-	۱	۳۷/۶	-
		L3-m7	۲	۲۵/۸	۳۱/۴۲
		L3-m4	۲	۲۶/۸	۲۸/۶
		DS4-M5	۱	۲۷/۱	۲۷/۹۸
		DS4-M9	۱	۳۴/۲	۸/۸۳
۶	Nonuniform-66%,30%	-	۱	۳۳/۲	-
		L3-m7	۱	۲۸/۶	۱۳/۹۲
		L3-m4	۱	۲۷/۵	۱۷/۲۱
		DS2-M2	۱	۲۵/۵	۲۳/۳۳
		DS3-M2	۱	۲۶/۱	۲۱/۴۶
۷	Nonuniform-62%,35%	-	۱	۳۵/۹	-
		L3-m7	۱	۲۸/۵	۲۰/۷۶
		L3-m4	۱	۲۹/۳	۱۸/۳۵
		DS2-M2	۱	۲۶/۰	۲۷/۶۸
		DS3-M2	۱	۲۶/۳	۲۶/۶۹
۸	Nonuniform-58%,40%	-	۱	۲۵/۱	-
		L3-m7	۱	۲۸/۱	۲۵/۶۱
		L3-m4	۱	۲۸/۸	۲۳/۸۸
		DS4-M5	۱	۲۶/۵	۲۹/۸۳
		DS2-M2	۱	۲۵/۳	۳۳/۱۳
۹	Nonuniform-54%,45%	-	۱	۳۵/۳	-
		L3-m7	۲	۲۷/۰	۲۳/۴۶
		L3-m4	۱	۲۸/۱	۲۰/۳۴
		DS4-M5	۱	۲۷/۹	۲۰/۸۵
		DS2-M2	۱	۲۴/۱	۳۱/۵۴

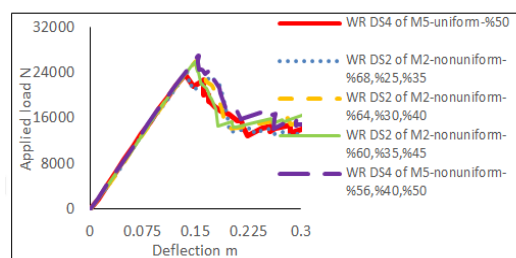
به مقدار بیش از ۶۵٪ و افزایش تراز خودتنش در ناحیه B برای توزیع غیر یکنواخت ۲- به مقدار بیشتر از ۵۶/۲۵٪، درصد کاهش باربری سازه ناشی از حذف دستک S1-M7 بیشتر از حذف کابل B2-M4 می‌باشد.

۳-۴- نتایج تحلیل مسیر جایگزین بافتار ۳ تحت توزیع- های مختلف خودتنش

شکل‌های (۱۷- الف) و (۱۷- ب)، به ترتیب، مقایسه پاسخ- های بار- تغییر مکان بافتار ۳ ناشی از حذف کابل‌ها و دستک‌ها را با فرض توزیع‌های یکنواخت و غیر یکنواخت-۱، نشان می- دهند. همچنین شکل‌های (۱۸- الف) و (۱۸- ب)، به ترتیب این مقایسه را با فرض توزیع‌های یکنواخت و غیر یکنواخت-۲ نشان می‌دهند. در جدول (۵)، مقایسه بین این توزیع‌های مختلف خودتنش از نظر بار نهایی و نوع مکانیزم خرابی ارائه شده است. با مراجعه به جدول (۵)، می‌توان مشاهده نمود که عضو بحرانی کابلی در تمامی توزیع‌های خودتنش ارائه شده، کابل L3-m7 می‌باشد و عضو بحرانی فشاری در توزیع‌های خودتنش ۱، ۵، ۸ و ۹، دستک DS4-M5 و در دیگر توزیع‌های خودتنش، دستک DS2-M2 می‌باشد.



(الف)

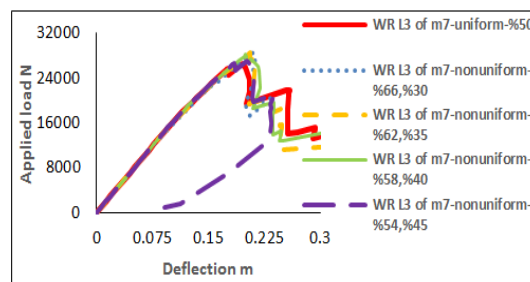


(ب)

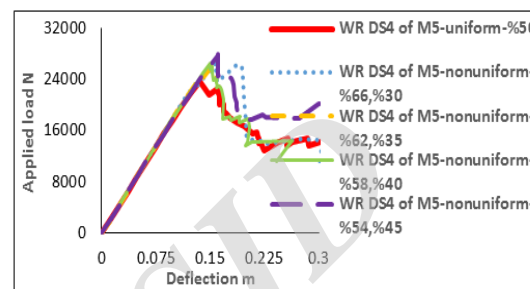
شکل ۱۷- مقایسه پاسخ‌های بار- تغییر مکان بافتار ۳ به ازای توزیع‌های یکنواخت و غیر یکنواخت (الف: ۱) ناشی از حذف کابل‌ها، (ب) ناشی از حذف دستک‌ها

یکنواخت ۲- ناشی از حذف دستک DS4-M5 را نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده نمود که توزیع‌های خودتنش غیر یکنواخت ارائه شده همگی دارای بار نهایی بیشتری نسبت به توزیع یکنواخت می‌باشند و از بین این توزیع‌های غیر یکنواخت ارائه شده، مطابق جدول (۵)، توزیع خودتنش ۵، دارای بیشترین افزایش بار نهایی و توزیع خودتنش ۲، دارای کمترین افزایش بار نهایی نسبت به توزیع یکنواخت می‌باشد. از لحاظ نوع مکانیزم خرابی، می‌توان گفت که با کاهش تراز خودتنش در ناحیه C برای توزیع غیر یکنواخت ۱- از ۵۰٪ در توزیع خودتنش ۵ تا ۳۵٪ در توزیع خودتنش ۲، نوع مکانیزم خرابی از ۱ در توزیع خودتنش ۵ به مکانیزم نوع ۲ در توزیع‌های خودتنش ۲، ۳ و ۴ تغییر پیدا کرده است. با توجه به شکل (۱۸-الف) که مقایسه بین منحنی‌های پاسخ بار- تغییر مکان با فرض توزیع‌های یکنواخت و غیر یکنواخت ۲- ناشی از حذف عضو کابلی L3-m7 را نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده نمود که با افزایش تراز خودتنش در ناحیه A تا ۶۶٪، بار نهایی سازه از ۲۶۵۲۰ نیوتن در توزیع خودتنش ۱ تا ۲۸۵۹۰ نیوتن در توزیع خودتنش ۶ افزایش پیدا می‌کند. بنابراین این بار نهایی بافتار ۳ ناشی از حذف کابل L3-m7 در توزیع خودتنش غیر یکنواخت ۲- حدود ۸٪ بیش از توزیع یکنواخت می‌باشد. همچنین از نظر مقایسه نوع مکانیزم خرابی، می‌توان گفت که با افزایش تراز خودتنش در ناحیه A از ۵۴٪ در توزیع خودتنش ۹ تا ۶۶٪ در توزیع خودتنش ۶، نوع مکانیزم خرابی از ۲ در توزیع خودتنش ۹ به مکانیزم خرابی ۱ در توزیع‌های خودتنش ۶، ۷ و ۸ تغییر پیدا می‌کند.

با توجه به جدول (۵)، می‌توان مشاهده نمود که در توزیع خودتنش ۶، بار نهایی سازه ناشی از حذف DS2-M2 کمتر از DS4-M5 می‌باشد، اما در توزیع خودتنش ۷، این موضوع برعکس می‌باشد. همچنین می‌توان مشاهده نمود که توزیع‌های غیر یکنواخت ۲- همگی بار نهایی سازه را نسبت به توزیع یکنواخت افزایش داده‌اند که از میان این توزیع‌های خودتنش، توزیع خودتنش ۹، دارای بیشترین افزایش بار نهایی و توزیع خودتنش ۷، دارای کمترین میزان افزایش می‌باشد. از لحاظ نوع مکانیزم خرابی، می‌توان گفت که با افزایش تراز خودتنش در ناحیه A تا ۶۲٪، مکانیزم خرابی سازه تغییری نمی‌کند و نوع مکانیزم خرابی همان مکانیزم خرابی نوع ۱ می‌باشد، اما هنگامی که تراز خودتنش در ناحیه A به ۶۶٪ می‌رسد، مکانیزم خرابی از نوع ۱ به نوع ۲ تغییر می‌یابد. با نگاه کلی به جدول (۵)، می‌توان گفت که بیشترین درصد کاهش باربری سازه مربوط به توزیع خودتنش ۱ ناشی از حذف دستک DS4-M5 می‌باشد و کمترین درصد کاهش باربری سازه مربوط به توزیع خودتنش ۵ ناشی از حذف دستک DS4-M9 می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۸- مقایسه پاسخ‌های بار- تغییر مکان بافتار ۳ به ازای توزیع‌های یکنواخت و غیر یکنواخت ۲- (الف: ناشی از حذف کابل‌ها، ب) ناشی از حذف دستک‌ها

با دقت در جدول (۵)، می‌توان مشاهده نمود که با افزایش تراز خودتنش در ناحیه A برای توزیع غیر یکنواخت ۱- به مقداری بیش از ۵۶٪ و برای توزیع غیر یکنواخت ۲- به مقداری بیش از ۵۸٪، عضو بحرانی فشاری از دستک DS4-M5 به دستک DS2-M2 تغییر پیدا می‌کند. با توجه به شکل (۱۷-الف) که مقایسه منحنی‌های پاسخ بار- تغییر مکان ناشی از حذف کابل L3-m7 را به ازای توزیع‌های یکنواخت و غیر یکنواخت ۱- نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده نمود که با کاهش تراز خودتنش در ناحیه C برای توزیع غیر یکنواخت ۱- تا ۴۰٪، بار نهایی سازه تا ۲۷۲۹۹ نیوتن در توزیع خودتنش ۳، افزایش پیدا می‌کند. اما با کاهش تراز خودتنش در ناحیه C تا ۳۵٪، بار نهایی سازه به ۲۷۳۸۳ نیوتن در توزیع خودتنش ۲ می‌رسد؛ در حالی که بار نهایی سازه با فرض توزیع یکنواخت ۲/۴ ۲۶۵۲۰ نیوتن می‌باشد. بنابراین بار نهایی بافتار ۳ ناشی از حذف کابل L3-m7 در توزیع خودتنش غیر یکنواخت ۱- حدود ۳٪ بیش از توزیع یکنواخت می‌باشد. از لحاظ بررسی نوع مکانیزم خرابی سازه، می‌توان مشاهده نمود که با کاهش تراز خودتنش در ناحیه C به مقداری کمتر از ۴۵٪ (توزیع‌های خودتنش ۲ و ۳) نوع مکانیزم خرابی از ۲ به ۱ تغییر پیدا می‌کند و مطابق شکل (۱۷)، توزیع‌های غیر یکنواخت تغییری در سختی سازه ایجاد نمی‌کنند.

با توجه به شکل (۱۸-ب)، که مقایسه بین منحنی‌های پاسخ بار- تغییر مکان با فرض توزیع‌های یکنواخت و غیر

۶- نتیجه‌گیری

می‌شود. در بافتار ۳، هنگامی که تراز خودتنش برای دستک‌های واقع در ناحیه کناری برای توزیع‌های غیر یکنواخت ۱- و غیر یکنواخت ۲- تا ۴۰٪ کاهش می‌یابد، درصد کاهش باربری سازه ناشی از حذف دستک بحرانی نیز کاهش می‌یابد. اما هنگامی که تراز خودتنش برای دستک‌های واقع در ناحیه کناری از ۴۰٪ کمتر می‌شود و به ۳۰٪ کاهش پیدا می‌کند، به تدریج درصد کاهش باربری سازه در توزیع‌های غیر یکنواخت نسبت به یکنواخت بیشتر می‌شود.

• از میان توزیع‌های غیر یکنواخت ارائه شده در بافتارهای مورد بررسی، اگر بخواهیم بهترین توزیع را از نظر بار نهایی انتخاب کنیم می‌توان به توزیع‌های خودتنش ۲، ۶ و ۴ به ترتیب در بافتارهای ۱، ۲ و ۳ اشاره کرد.

۷- مراجع

- Abedi K, Shekastehband B, "Static stability behaviour of plane double-layer tensegrity structures", *International Journal of Space Structures*, 2008, 23 (2), 89-102.
- Abedi K, Shekastehband B, "Stability analysis of space structures", SUT Press, Iran, 2009 (In Persian).
- Ben Kahla N, Kebiche K, "Nonlinear elasto-plastic analysis of tensegrity systems", *Engineering Structures*, 2000, 23, 1552-1566.
- Ben Kahla N, Moussa B, "Effect of a Cable Rupture on Tensegrity Systems", *International Journal of Space Structures*, 2002, 17 (1), 51-65.
- Ben Kahla N, Moussa B, Pons JC, "Nonlinear dynamic analysis of tensegrity systems", *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures: IASS*, 2000, 41 (1), 49-58.
- Hanaor A, "Double-layer tensegrity grids: static load response. II: Experimental study", *Structural Engineering*, 1991, 117 (6), 1675-1684.
- Kebiche K, Kazi-Aoual MN, Motro R, "Geometrical non-linear analysis of tensegrity systems", *Engineering Structures*, 1999, 21, 864-876.
- Motro R, "Tensegrity: Structural Systems for the Future", Kogan Page Science, UK, 2005.
- Quirant J, Kazi-Aoual MN, Motro R, "Designing tensegrity systems: the case of a double layer grid", *Engineering Structures*, 2003, 25, 1121-1130.
- Shekastehband B, Abedi K, Chenaghlu MR, "Sensitivity analysis of tensegrity systems due to member loss", *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67 (9), 1325-1340.
- Shekastehband B, Abedi K, Dianat N, Chenaghlu MR, "Experimental and numerical studies on the collapse behavior of tensegrity systems considering cable rupture and strut collapse with snap-through", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2012, 47 (7), 751-768.
- Shekastehband B, Abedi K, Dianat N, "Experimental and numerical study on the self-stress design of tensegrity systems", *Meccanica*, 2013, 48 (10), 2367-2389.
- Shekastehband B, Abedi K, Dianat N, "Experimental and numerical studies on the progressive collapse

با توجه به تحلیل‌های مسیر جایگزین صورت گرفته بر روی بافتارهای مورد مطالعه مشخص می‌شود که حذف عضو از بافتار، منجر به کاهش بار نهایی و سختی سازه می‌گردد که با توجه به عضو حذف شده میزان تغییر در کاهش بار نهایی و سختی سازه متفاوت می‌باشد. در این تحلیل‌ها، دو عضو بحرانی کابلی و دو عضو بحرانی مربوط به دستک‌ها که هر کدام دارای بیشترین تنش کششی و فشاری بودند، برای حذف در تحلیل‌های مسیر جایگزین در نظر گرفته شدند. همان طوری که انتظار می‌رفت لزوماً عضو که دارای تنش کششی یا فشاری بیشتری باشد بحرانی نیست؛ چرا که ممکن است عضو دارای تنش کششی یا فشاری کمتری باشد اما با حذف آن عضو، آسیب جدی‌تری به سازه وارد گردد و بار نهایی سازه بیشتر کاهش یابد.

اگرچه نتایج و توصیه‌ها محدود به حالات در نظر گرفته شده برای تحلیل‌ها می‌باشد، ولی احتمال می‌رود که این نتایج و توصیه‌ها دارای حوزه تأثیر و کاربرد جامع‌تری از موارد در نظر گرفته شده در تحلیل‌ها باشند. با توجه به تحلیل‌های انجام یافته مشخص گردید که:

• از نظر سختی سازه‌ای، با توجه به منحنی‌های پاسخ بار- تغییر مکان، می‌توان گفت که در بافتار ۱، سختی بعد از شل شدگی عناصر کابلی ناشی از حذف عناصر کابلی، کاهش یافته است. در بافتار ۲، تغییر محسوسی در سختی سازه مشاهده نمی‌شود. در بافتار ۳، سختی بعد از شل شدگی عناصر کابلی، ناشی از حذف کابل‌ها در تمامی توزیع‌های خودتنش ناشی از حذف کابل‌ها کاهش یافته است. می‌توان مشاهده نمود که سختی سازه، ناشی از حذف عناصر کابلی نسبت به حذف دستک‌ها بیشتر کاهش پیدا می‌کند. به بیان دیگر، سختی سازه نسبت به حذف کابل‌ها در مقایسه با حذف دستک‌ها حساسیت بیشتری از خود نشان می‌دهد.

• حذف عناصر کابلی و دستک‌ها می‌تواند منجر به تغییر در نوع مکانیزم خرابی سازه گردد که با توجه به نوع بافتار و توزیع‌های مختلف خودتنش، مکانیزم خرابی می‌تواند نوع ۱ یا نوع ۲ باشد.

• با مقایسه اعضای بحرانی کابل و دستک مربوط به توزیع‌های یکنواخت و غیر یکنواخت، مشاهده می‌شود که توزیع‌های غیر یکنواخت عمدتاً توانسته‌اند که درصد کاهش باربری سازه ناشی از حذف عضو را کاهش دهند. به عبارت دیگر، بار نهایی سازه ناشی از حذف عضو در توزیع‌های غیر یکنواخت نسبت به توزیع یکنواخت، کمتر کاهش پیدا می‌کند.

• در بافتارهای ۱ و ۲، با افزایش تراز خودتنش برای دستک‌های واقع در ناحیه درونی تا ۷۵٪ برای توزیع غیر یکنواخت ۱- و نیز دستک‌های میانی برای توزیع غیر یکنواخت ۲- تا ۷۰٪، به تدریج از درصد کاهش باربری سازه ناشی از حذف عضو کاسته

- behavior of tensegrity systems", International Journal of Space Structures, 2014, 29 (1), 9-24.
- Skelton RE, Oliveira MC, "Tensegrity Systems", Springer, US, 2009.
- SIMULIA, "ABAQUS/Standard Version 6.9 analysis user's manual", Pawtucket, Rhode Island, 2009.
- Wang BB, "Free-standing tension structures-from tensegrity systems to cable-strut systems", Spon Press, US, 2004.

Archive of SID

EXTENDED ABSTRACT

Static Alternate Path Analyses on Tensegrity Systems Considering Effects of Self-Stress Distributions

Behzad Shekastehband^{*}, Navid Pourmand

Faculty of Civil Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

Received: 17 April 2016; Accepted: 30 October 2016

Keywords:

Tensegrity structures, Static stability, Alternate path analysis, Collapse mechanisms, Self-stress distribution

1. Introduction

Tensegrity systems are innovative systems in the spatial structures field and refer to a special type of tensile structures that can offer an alternative to traditional space structures. These systems are defined as any given set of cables connected to a set of struts in which cables connectivity must be able to stabilize the configuration (Skelton and Oliveira, 2009). The self-stresses contribute to the system's rigidity and stability. In tensegrity systems, a number of members are critical, with the loss of any of them likely to produce serious strength reductions. In practice, members of a tensegrity system may be lost due to a poor member node connections or geometric imperfections, e.g. lack of fit. In fact, having one or more faulty connections in a structure, containing hundreds of connections, is a realistic possibility. In such a case, it can be argued that this member has in effect been lost.

Generally, self-stress level and its distribution are determinant parameters in the mechanical behavior of tensegrity systems. Therefore, by appropriate selecting of these parameters, the system can be warranted against any undesirable collapse mechanisms (Shekastehband et al., 2012).

In this paper, static alternate path method is used to examine the vulnerability of these systems to progressive collapse considering different self-stress distributions. Static alternate path analysis is a numerical method, in which, the static response of the system in the event of gradual member loss is pursued and therefore, alternative load paths is sought to absorb localized damage and resist progressive collapse.

2. Methodology

2.1. Tensegrity systems considered

The tensegrity configurations considered are real-scale prototypes composed of square pyramid modules. These structures contain contiguous a strut configuration in which modules are connected by node to node connection type. They are classified as:

- *Configuration 1*: This model contains a regular layout in which struts are connected co-linearly in plan. This configuration is geometrically rigid which means that it does not contain infinitesimal mechanisms (Fig. 1).
- *Configuration 2*: This model possesses an irregular layout in which struts are connected in a zig-zag way in plan. This configuration is flexible and has infinitesimal mechanisms (Fig. 2).
- *Configuration 3*: This model is composed of CP modules which includes contiguous strut forms. This configuration is geometrically rigid (Fig. 3).

* Corresponding Author

E-mail addresses: b.shekastehband@uut.ac.ir (Behzad Shekastehband), pourmand.navid@gmail.com (Navid Pourmand).

In these figures, parameters M , U , L , B and S are representative of module, upper cable, lower cable, bracing cable and strut, respectively. The systems were loaded at all upper nodes. The configurations 1 and 2 are supposed to be resting on the external nodes of the lower layer while configuration 3 is constrained in the external nodes of the upper layer.

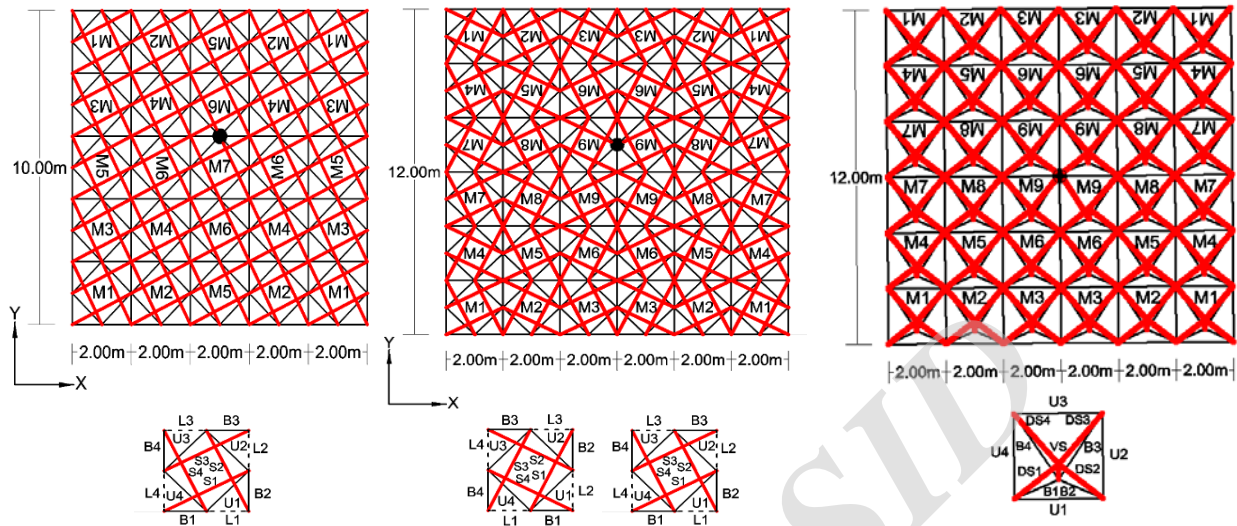


Fig. 1. Configuration 1 and member member numbering of each module

Fig. 2. Configuration 2 and member numbering of odd and even modules

Fig. 3. Configuration 3 and numbering of each module

2.2. Self-stress distribution

The pattern of self-stress distributions were considered as illustrated in Fig. 4, in which, parameters A, B and C demonstrate the self-stress level. Concerning the self-stress level in uniform distribution (Fig. 4a), 50% of the strut buckling load was selected for the struts. In the non-uniform distributions 1 and 2, the configurations were divided into 2 and 3 regions, respectively. Different self-stress levels were considered for each region. However, the average amount of self-stress of the struts was 50% of the buckling load.

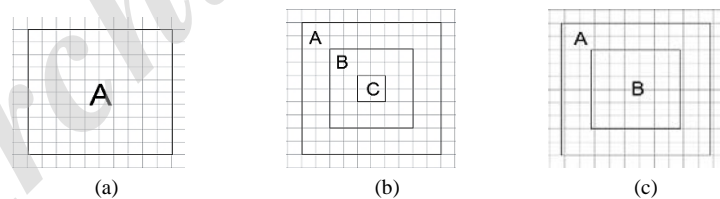


Fig. 4. Pattern of self-stress distributions: (a) Uniform distribution; (b) Non-uniform distribution-1; (c) Non-uniform distribution-2

2.3. Alternate-path analysis

Using the alternate path method, the system is analyzed for the potential of progressive collapse by removing one element from the system, and by evaluating the capability of the remaining structure to prevent subsequent damage. Therefore, in this section, results of the alternate path analysis carried out on the studied configurations are presented. In the analysis, the effects of gradual loss of cables and struts on the behavior of the tensegrity systems are investigated. In each self-stress distribution, two critical cables and two critical struts are considered successively. Figs. 7, 8 and 9 illustrate some of the load-deflection responses of configurations 1, 2 and 3, respectively, due to the gradual loss of critical cables. The nonlinear static collapse analysis was performed using ABAQUS (SIMULIA, 2009). For modeling cables and struts as pinned-end connections within the whole structure, *Truss* element was used. In cable elements, the *no compression* option was used to modify the linear elasticity of the material. To trace the equilibrium paths through limit points into the post-critical range, the 'Arc-Length-Type Method' was adopted since it is the most efficient method for this purpose

3. Results and discussion

Fig. 5(a)-(c) illustrate some of the load–deflection responses of configurations 1, 2 and 3, respectively, due to the gradual loss of critical cables. By pursuing effect of losing a member, it was observed that two kinds of collapse mechanisms, i.e. local collapse due to slacking of cables (mechanism No. 1) and combination of slacking of cables and local collapse with dynamic snap-through (mechanism No. 2) occurred.

According to the results, the maximum strength reduction of the configuration 1 due to removing critical cables was 43% and 36% for non-uniform and uniform self-stress distributions, respectively. Furthermore, non-uniform self-stress distributions caused the slackening of cables to be postponed and rigidity of the systems to be enhanced. Generally, self-stress distributions had no considerable effect on the initial stiffness of the configuration 2. Non-uniform self-stress distributions may increase the load carrying capacity of the configuration 2 due to removing critical cable up to 25% compared with uniform self-stress distribution. The maximum load carrying capacity of the configuration 3 due to gradual loss of critical lower cable for non-uniform self-stress distributions was 8% more than that of uniform self-stress distribution.

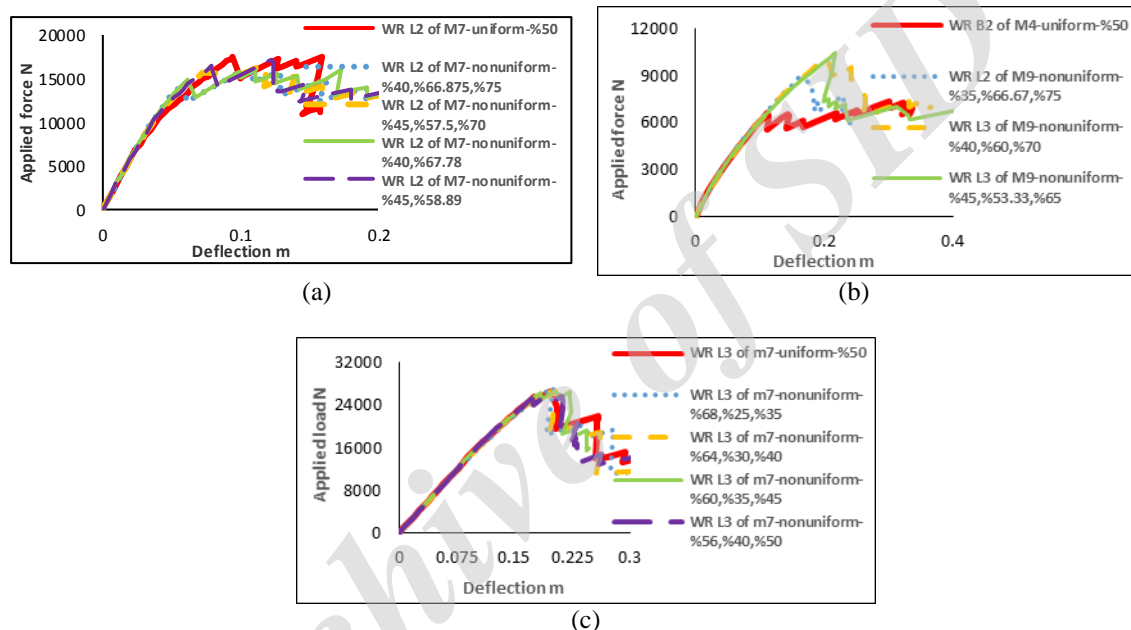


Fig. 5. Load-deflection responses of the systems due to loss of critical cables considering different self-stress distributions with average amount of 50%: (a) Configuration 1, (b) Configuration 2, (c) Configuration 3

4. Conclusions

It was shown that removing a critical cable or strut may cause severe reduction of strength. However, by selecting an appropriate self-stress distribution, it is possible to decrease the sensitivity of the system to member loss. The most critical members belonged to cable elements. Removing of these elements may lead to reduction of strength seriously. The strength reduction of the configurations 1 and 2 due to gradual loss of critical member decreased with the increase of self-stress level in the central region B and C in the non-uniform-1 and 2 self-stress distributions, up to 75% and 70%, respectively. By decreasing self-stress level in the peripheral region A to 40% in the non-uniform self-stress distributions, the strength reduction of the configuration-3 due to removing critical strut also decreased

5. References

- Skelton RE, Oliveira MC, "Tensegrity Systems", Springer, US, 2009.
 Shekastehband B, Abedi K, Dianat N, Chenaghloou MR, "Experimental and numerical studies on the collapse behavior of tensegrity systems considering cable rupture and strut collapse with snap-through", International Journal of Non-Linear Mechanics, 2012, 47 (7), 751-768.
 SIMULIA, "ABAQUS/Standard Version 6.9 analysis user's manual", Pawtucket, Rhode Island, 2009