تعیین تعداد بهینه ابزارهای محدود کننده نیرو در بهبود رفتار خرابی شبکه‌های دولایه تخت فضاکار

محمد عزیزافشاری
دانشجو، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه

محمدرضا شیدایی
دانشیار، دانشگاه ارومیه

مهدی درویش‌هاشمی
عضو هیئت علمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بناب
M.azizafshar1@yahoo.com

چکیده
برای بهبود رفتار خرابی شبکه‌های دولایه فضاکار، دو روش بهبود توزیع نیروها و بهبود شکل پذیری وجود دارد. در روش بهبود شکل‌پذیری، با اعمال تمهیداتی مانند استفاده از ابزار محدود کننده نیرو برای جلوگیری از کمانش عضو فشاری، رفتار سازه به رفتار شکل‌پذیر تبدیل خواهد شد، بنابراین تاثیر تعداد ابزار محدود کننده نیرو (FLD) در بهبود رفتار خرابی شبکه‌های دولایه فضاکار تا حدی موثر است که شکل‌پذیری و ظرفیت باربری سازه به طور چشمگیری افزایش یابد. در این مقاله تاثیر تعداد بهینه ابزارهای محدود کننده نیرو در بهبود رفتار خرابی شبکه‌های دولایه فضاکار با توجه به اینکه تعداد ابزارهای محدود کننده تا چه حدی بر افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری شبکه‌های دو لایه فضاکار موثر واقع می‌باشند، مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: شبکه‌های دولایه فضاکار تخت، بهبود رفتار خرابی، ابزار محدود کننده نیرو، خرابی پیشرونده، شکل‌پذیری

۱- مقدمه
شبکه‌های دو لایهٔ فضاکار، سیستم های خاصی متشکل از دو شبکهٔ موازی بالایی و پایینی هستند که اتصال این دو شبکه توسط اعضای مورب یا قائم جان انجام می‌گیرد و انتقال بارها به صورت سه بعدی انجام می‌شود [۱]. این نوع سازه‌ها به خاطر مزایایی از قبیل سختی بالا، می‌دهد [۲]. برای اینکه بیشترین نامعینی استاتیکی خرپاهای فضایی به نامعینی سازه‌ای تبدیل شود، لازم است یک رفتار شکل‌پذیر غالب شده و برای اینکه سازه به این نوع رفتار هدایت شود، بایستی به طور موثری از کمانش اعضای فشاری خرپا جلوگیری گردد تا این نوع رفتار مطابق با خصوصیات شکل‌پذیری اعضای کششی تحتانی باشد. برای وزن کم، نصب آسان و قابلیت پوشش دادن فضاهای وسیع در چند دههٔ اخیر به نحو گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این سازه‌ها غالبا دارای رفتار خرابی ترد هستند، رفتار خرابی ترد این نوع از خرپاهایفضایی خطر وقوعخرابی پیشرونده در این سازه‌ها را افزایش این منظور می‌توان عضو فشاری را توسط ابزار محدود کننده نیرو محافظت نمود، در نتیجه می‌توان از ناپایداری شدیدی که تحت تاثیر خصوصیات ترد فراکمانشی در عضوهای فشاری بوجود می‌آید مقابله نمود. مقدار تراز بار ابزار محدود کننده نیرو بایستی کمتر از بار کمانشی عضو فشاری باشد، در نتیجه اینگونه استنباط می‌شود که ابزار محدود

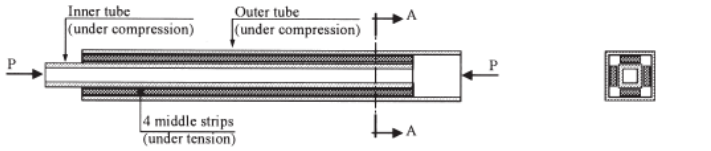
کننده نیرو می‌تواند بار کمانشی عضو را اصلاح کند. ابزار محدود کننده نیرو بایستی تحمل یک نیروی حدی ثابت را داشته و در نتیجه فرصت توزیع مجدد نیروهای ایجاد شده به عضوهای دیگرسازه های فضاکار را بدهد [۳].

یکی از روش‌های رایج برای بهبود رفتار خرابی سازه‌های فضاکار استفاده از ابزار محدود کننده نیرو(FLD) است که استفاده از آن نخستین بار توسط اشمیت، پیشنهاد گردید [۵,۴].

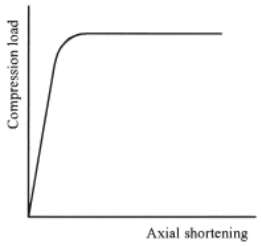
در این روش با اعمال واکنشی شکل‌پذیر به عضو فشاری از کمانش عضو جلوگیری به عمل می‌آید. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد بکارگیری ابزارهای محدود کننده نیرو بر روی شبکه‌های دولایه تخت فضاکار و چلیکی باعث افزایش چشمگیری در شکل‌پذیری و ظرفیت باربری این سازه‌ها شده که منجر به بهبود رفتار خرابی این سازه‌ها گردیده است [۶,۳].

۲- معرفی ابزار محدود کننده نیرو(FLD)

ابزار محدود کننده نیرو دارای مشخصه رفتاری صلب ـ پلاستیک بوده و بر روی عضو فشاری نصب می‌شود، وقتی که نیروی عضو فشاری به نیروی حدی ابزار مزبور (که اندکی کمتر از نیروی کمانش عضو فشاری است) می رسد این ابزار فعال شده و رفتاری الاستوپلاستیک را بر عضو اعمال می‌نماید. در نتیجه، خصوصیات فراکمانشی ترد عضو فشاری بهبود یافته و یک توزیع مجدد نیرو در سازه رخ داده و منجر به افزایش ظرفیت حمل بار و بهبود شکل‌پذیری فرا ارتجاعی در سازه خواهد شد [۶]. هدف این ابزار محدود کردن نیروی عضو فشاری است که میزان آن از قبل تعیین شده و باعث ثابت ماندن نیرو تحت افزایش تغییر شکل خواهد شد. مشخصات بار- تغییر شکل الاستیک – پلاستیک ابزار محدود کننده نیرو در شکل (۱) نشان داده شده است [۳].



(a) Detail of a member with an FLD



(b) Typical behaviour pattern of a member with an FLD

شکل ۱- مشخصات ابزار محدود کننده نیرو (FLD)

۳- مطالعه تحلیل رفتار خرابی شبکه های دو لایه فضاکار تخت

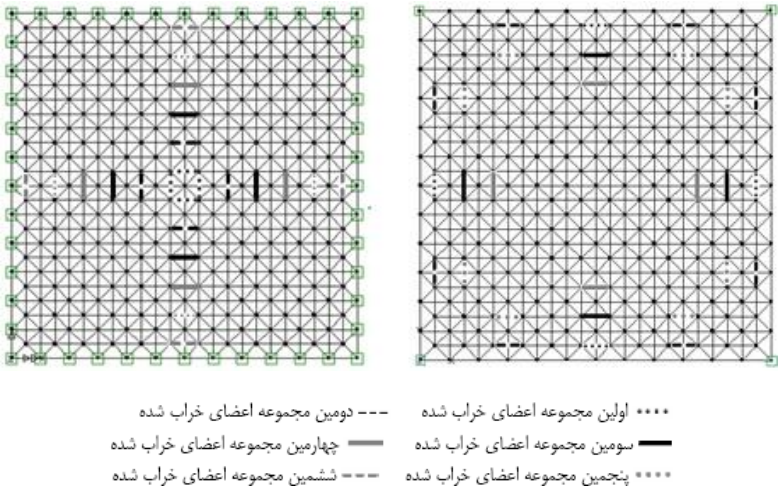
شبکه‌های دو لایهٔ فضاکار با اعضای لوله ای فولادی و با سطح مقطع یکسان برای اعضای لایهٔ بالایی، پایین و مورب انتخاب شده و تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، ضریب الاستیسیته $۲/۱ \times ۱۰^{۶}$ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، ضریب پواسون ۰/۳ و وزن مخصوص مصالح ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. بارگذاری با بارهای مرده و زنده که به ترتیب دارای مقادیر ۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع می باشند انجام شده است. طراحی بر اساس ضوابط آیین نامهٔ AISC انجام گرفته است. هر یک از اعضای سازه‌ها به صورت یک عنصر میله‌ای با مدل رفتار ایده آل و ناکاملی اولیه این اعضا $0.001L$ درنظر گرفته شده است [۷]. بار گسترده یکنواخت در مساحت بارگیر هر گره لایه بالایی ضرب شده و مقدار متناظر بر گره‌های لایه فوقانی اعمال شده است. در مدل‌های طراحی شده اعضای گوشه جان به صورت مقاطع دایره‌ای توپر در نظر گرفته شده‌اند و بدین ترتیب از خرابی موضعی اعضای گوشه جلوگیری به عمل آمده است. اما بقیه اعضا از نوع نیمرخ لوله‌ای تو خالی انتخاب شده‌اند. مشخصات ۱۶ نمونه از مدل‌های طراحی شده با تکیه گاه‌های گوشه و محیطی و نتایج تحلیل الاستیک آنها در جدول ۱ مشخص شده است. در این جدول در ستون اول، حرف G نماد شبکه، حرف C نماد تکیه گاه گوشه‌ای و حرف E نماد تکیه‌گاه محیطی می‌باشد.

جدول۱- مشخصات مدل‌های نمونه با تکیه گاه‌های گوشه و محیطی

نام مدل	تعداد چشمه	طول عضو (متر)	دهانه (L) (متر)	عمق (d) (متر)	دهانه / عمق (L /d)	CHS (میلیمتر)	لاغری (λ)
GC1	۸×۸	۱/۲	۹/٦	۰/۸	۱۲	٦۰/۳×٥/٦	٦۲
GC2	۸×۸	۱/۲	۹/٦	۰/٦	۱٦	۷۰×٥/٦	٥۳
GC3	۸×۸	۱/۲	۹/٦	۰/٤۸	۲۰	۸۸/۹×٦	٤۱
GC4	۱۲×۱۲	۱/۲	۱٤/٤	۱/۲	۱۲	۸۸/۰×٦/۳	٤۲
GC5	۱۲×۱۲	۱/۲	۱٤/٤	۰/۹	۱٦	۱۱٤/۳×٦/۳	۳۲
GC6	۱۲×۱۲	۱/۲	۱٤/٤	۰/۷۲	۲۰	۱۳۳×۷/۱	۲۷
GE1	۸×۸	۱/۲	۹/٦	۰/۸	۱۲	٦۰/۳×٥/٦	٦۲
GE2	۱۲×۱۲	۱/۲	۹/٦	۰/٦	۱٦	۷۰×٥/٦	٥۳
GE3	۸×۸	۱/٦	۱۲/۸	۱/۰٦٦	۱۲	۷۰×٥	۸٦
GE4	۱۲×۱۲	۱/٦	۱۹/۲	۱/٦	۱۲	۱۱٤/۳×٥	٤۱
GE5	۸×۸	۲	۱٦	۱/۳۳	۱۲	٥۷×٤/٥	٥٤
GE6	۱۲×۱۲	۲	۲٤	۱/٥	۱٦	۱۱٤/۳×۷/۱	٥۸

٤- تحلیل استاتیکی غیرخطی و تعیین نوع خرابی مدل‌ها

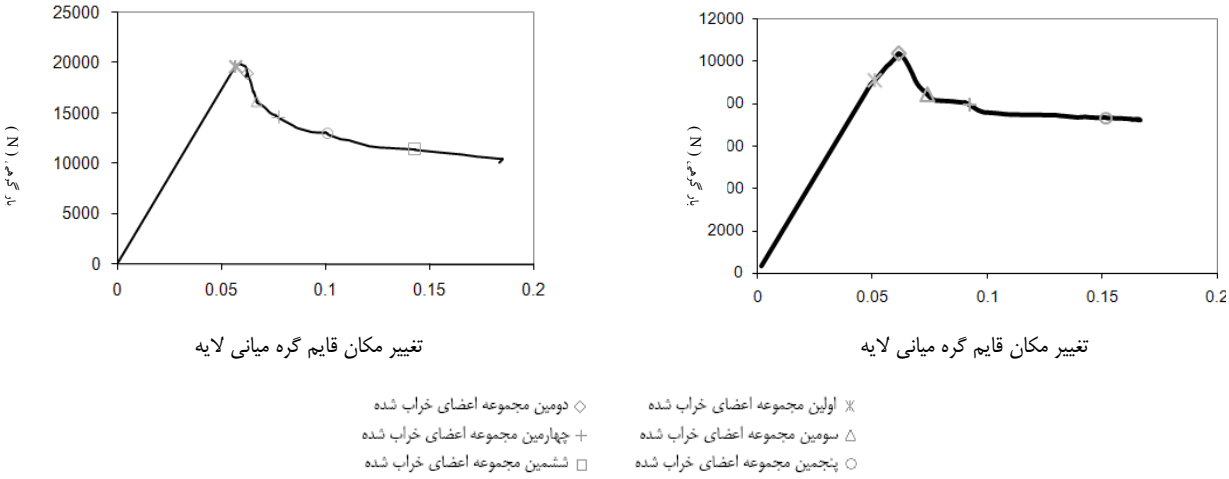
تحلیل استاتیکی غیرخطی نموی (Incremental) برای تعیین شکل‌پذیری سازه‌ها انجام گرفته است [۸]. روش کار بدین صورت است که بارهای یکنواخت متمرکز قائم وارد بر گره‌های لایه بالایی شبکه به مرور افزایش داده می‌شود تا اینکه تعدادی از اعضای سازه بر اثر کمانش در فشار و یا تسلیم در کشش خراب شوند، با ادامه بارگذاری و دنبال نمودن مسیر تعادل استاتیکی سازه، تعداد بیشتری از اعضای سازه خراب شده و این روند تا رسیدن کل سیستم به مکانیسم خرابی ادامه می‌یابد. برای آشنایی با چگونگی رفتار خرابی شبکه‌های دولایه فضاکار، تحلیل استاتیکی خرابی بر روی این سازه‌ها انجام شده است. هر دو عامل رفتار غیر خطی مصالح و غیر خطی هندسی در این تحلیل ها در نظرگرفته شده است و حل معادلات تحلیل غیرخطی تا مرحله رسیدن به نقطه حدی با استفاده از روش نیوتن – رافسون و در مرحله گذر از مجاورت نقطه حدی با روش طول کمان کریسفیلد انجام می‌شود. در این مقاله دو نمونه از مدل‌های شبکه دولایه فضاکار تخت GC 4 و GE2 با تکیه گاه‌های گوشه و محیطی بررسی شده و ترتیب و موقعیت خرابی اعضای فشاری بحرانی مدلها به ترتیب در شکل‌های (۲ – الف) و (۲– ب) نشان داده شده است.



شکل ۲ – موقعیت و ترتیب خرابی اعضای فشاری مدل‌های نمونه . (الف) مدل با تکیه گاه‌های گوشه . (ب) مدل با تکیه گاه‌های محیطی

همانطور که مشاهده می‌شود در شکل(۲ – الف) خرابی از اعضای کناری سازه شروع شده و با ادامه بار گذاری و دنبال نمودن مسیر تعادل سازه، به سوی اعضای داخلی گسترش می‌یابد و در نتیجه بحرانی‌ترین اعضا، اعضای کناری لایه بالایی خواهد بود در حالیکه در شکل (۲– ب) خرابی از داخلی‌ترین اعضای شبکه شروع شده و به سمت اعضای کناری گسترش می‌یابد و درنتیجه بحرانی‌ترین اعضا، اعضای میانی لایهٔ بالایی می‌باشند.

شکل (۳) نتایج واکنش استاتیکی بار – تغییر مکان مدل‌های نمونه را نشان می‌دهد. در این مدل‌ها خرابی موضعی (اولیه) بواسطه کمانش اولین مجموعه اعضای بحرانی ایجاد می‌شود که موقعیت آن در نمودار زیر با علامت ستاره (اولین مجموعه اعضای خراب شده) نشان داده شده است. پس از خرابی موضعی باز توزیع بار ناگهانی نبوده و فروریزی بار به آرامی انجام می‌شود، در طی روند باز توزیع بار، سایر اعضای سازه قادر به جذب و تحمل بارهای باز توزیع شده می‌باشند، از این رو وضعیت پایدار جدیدی ایجاد شده و سازه قادر به تحمل بار اضافی می‌باشد، تا اینکه در نهایت بواسطه کمانش مجموعه دیگری از اعضای بحرانی، خرابی کلی در سازه روی می‌دهد. مقادیر عددی نتایج واکنش استاتیکی بار – تغییر مکان برای تمامی مدلها در جدول ۲ نشان داده شده است.



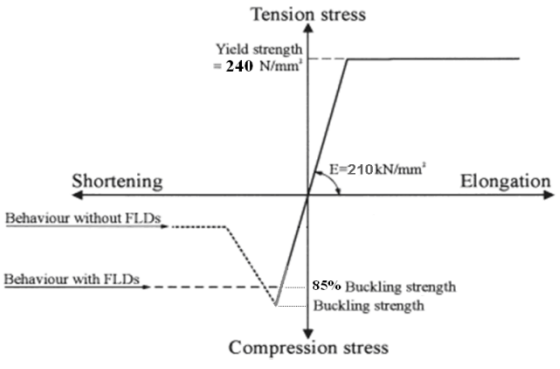
تغییر مکان قایم گره میانی لایه

تغییر مکان قایم گره میانی لایه

شکل ۳ – واکنش استاتیکی بار– تغییر مکان مدل GC4 . (الف) مدل با تکیه گاه‌های گوشه – (ب) مدل با تکیه گاه‌های محیطی

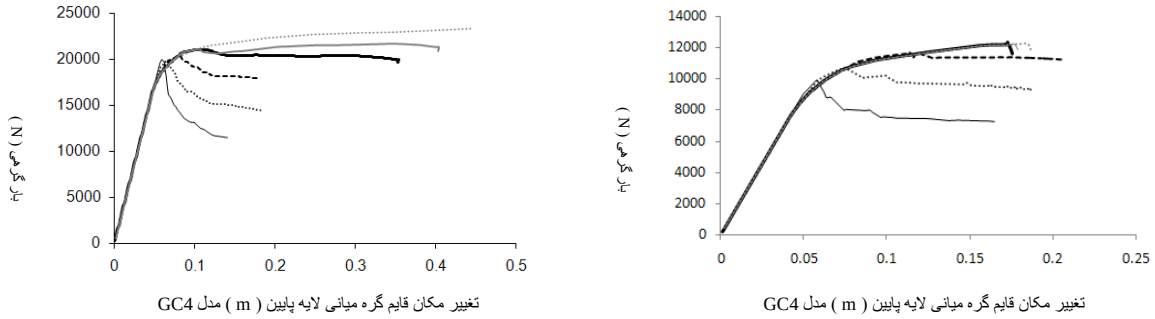
۵- بررسی تاثیر ابزار محدود کننده نیرو بر رفتار خرابی مدل‌ها

پس از مشخص کردن اعضای فشاری بحرانی در لایه بالایی سازه، ابزار محدود کننده نیرو به ترتیب در اولین، دومین، سومین و ... مجموعه اعضای بحرانی نصب می‌شود و پس از تحلیل غیر خطی مدل‌ها نمودار خرابی آنها مشخص شده و میزان افزایش شکل‌پذیری و درصد افزایش ظرفیت باربری هر یک از حالت‌ها با هم مقایسه شده و روند بهبود رفتار خرابی مدل‌ها تعیین می‌شود. برای هر کدام از مدل‌های مطرح شده در این مقاله، با توجه به بار کمانشی اعضای فشاری آنها یک ابزار محدود کننده نیرو تعریف شده است، بدین صورت که این ابزار در باری برابر با ۸۵ درصد بار کمانش اعضای فشاری تشکیل دهنده هر مدل فعال می‌شود. شکل (۴) نمودار مشخصات رفتار عضو در کشش و فشار، با و بدون FLD نشان می‌دهد.

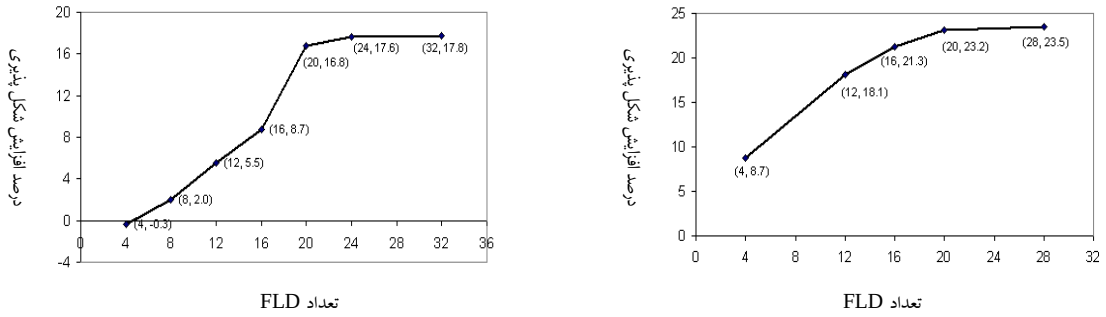


شکل ۴- مشخصات رفتار عضو در کشش – فشار با و بدون FLD

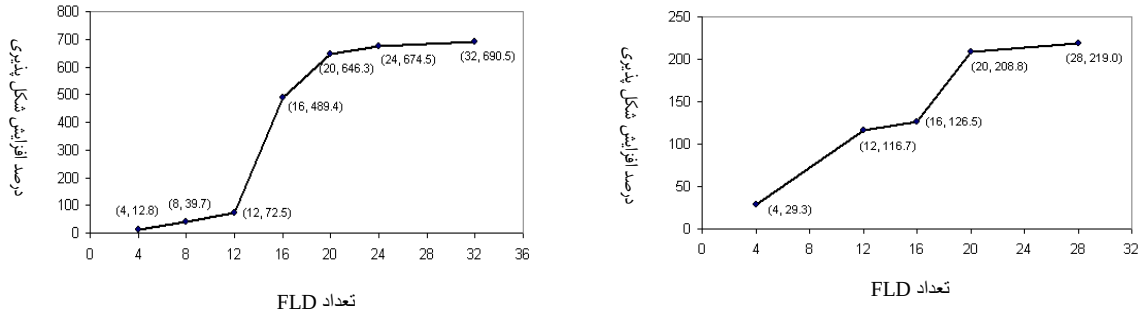
نمودار های بار- تغییر مکان مدلهای GC4 و GE2 تحت اثـر ابـزار محـدود کننده نیـرو و تاثیـر افـزایش تعـداد FLD بر شکل پذیری و ظرفیت باربری آنها در شکل های ۵ و۶ و۷ و نتایج عددی بدست‌آمده از تمامی مدل‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۵- نمودارهای بار- تغییر مکان مدل‌های نمونه تحت اثر FLD



شکل ۶- تاثیر افزایش تعداد FLD بر شکل‌پذیری و ظرفیت باربری مدل GC4



شکل ۷- تاثیر افزایش تعداد FLD بر شکل‌پذیری و ظرفیت باربری مدل GE2

جدول ۲- نتایج تحلیل استاتیکی غیر خطی خرابی مدل‌ها

نام مدل	بار اولین خرابی باFLD	حداکثر ظرفیت باربری بدون FLD	حداکثر ظرفیت باربری با FLD	تغییر شکل اولیه بدون FLD	تغییر شکل اولیه با FLD	تغییر شکل نهایی بدون FLD	تغییر شکل نهایی با FLD	درصد افزایش ظرفیت باربری	درصد افزایش شکل‌پذیری
GC1	۷۹۱٤	۹۳۸۸	۱۲۱٦۰	۰/۰۳٤	۰/۰۵۷	۰/۰٤۲	۰/۱۹٤	۲۹/۵	۱۷۰/٤
GC2	۸۱۰٦	۸۲۰۹	۱۰۷۳۱	۰/۰٤٦	۰/۰۵	۰/۰۵۵	۰/٤۸	۳۰/۷	۷۱۲/۳
GC3	۷۸۸۰	۱۰٤۱۷	۱۱٦۳۲	۰/۰٦۱	۰/۰۵۱	۰/۰۷۸	۰/۱٦	۱۱/۷	۱٤٤/۹
GC4	۸۰۷۰	۹۹۰٦	۱۲۲۳٦	۰/۰٤۵	۰/۰٤۳	۰/۰۵۸	۰/۱۷۷	۲۳/۵	۲۱۹
GC5	۷۹۱٤	۹۳۸۸	۱۲۲۸٤	۰/۰۳٤	۰/۰۵۷	۰/۰٤۲	۰/۲۳	۳۰/٦	۲۲۰/٦
GC6	۱۰٤۵۳	۱۵۵۸۹	۱٦۳۵٤	۰/۰٦۸	۰/۲٤۳	۰/۱۲۱	۰/۲٤۳	۵/۱	۱٤۰
GE1	۱۲۸۵۸	۱۵۱٦۲	۱۷۷۲۲	۰/۰۲۱	۰/۰۳۹	۰/۰۲۸	۰/۱٦	۱۷/۰	۲۲٦/۵
GE2	۱٦٦۸۹	۱۹۹٦۱	۲۳٤۸۳	۰/۰٤۸	۰/۰٤۸	۰/۰۵۸	۰/٤۵٤	۱۷/۸	٦۹۰/۵
GE3	۲٦٦۰۵	۳۱۲۵٤	۳٦۷۱۸	۰/۰۳٤	۰/۰۳۲	۰/۰٤۱	۰/۲٤۳	۱۷/۵	۵۳۷/۵
GE4	۳۰۷۰۱	۳٦۷٤۹	٤۲۵۷۳	۰/۰۵٤	۰/۰٤۹	۰/۰٦۸	۰/٦۳۱	۱٦/۱۳	۹۸۱/۹
GE5	۲۲٤٤۵	۲۷۲۸۱	٤۲٦۰۱۱	۰/۰۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۱۷	۰/۰۸۷	۵۵/۳۳	۵۰۱/۳۸
GE6	۲۰۹٤۵	۲٤٦۷٦	۳۰٤٦۲	۰/۰۸۵	۰/۰۷۵	۰/۰۸۹	۰/٦۸۱	۲۳/٦	۷۷۱/۸

با توجه به شکل های ۶،۵ و۷ و نیز نتایج عددی مدل GC4 که در جدول ۲ آمده است می‌توان نتیجه گرفت که با بکارگیری مجموع ۲۸ عدد FLD در مدل GC4 ظرفیت باربری سازه ۲۳/۵ درصد و شکل‌پذیری سازه ۲۱۹ درصد افزایش داشته است، اما با توجه به شکل و نمودارهای مربوط به مدل مذکور سیر صعودی نمودار بیانگر این است که با نصب ۲۰ عدد FLD در مدل مذکور، شکل‌پذیری و ظرفیت باربری سازه به طور چشمگیری افزایش یافته است، و بعد از آن نمودار سیر صعودی نداشته و رفته رفته به حالت افقی نزدیک‌تر می‌شود. بنابراین تاثیر بهینه ابزار محدود کننده نیرو (FLD) در بهبود رفتار خرابی مدل GC4 تا حدی موثر است که تعداد آن بیشتر از ۲۰ عدد نباشد.

همچنین در مدل GE2 با بکارگیری مجموع ۳۲ عدد FLD در مدل GE2 ظرفیت باربری سازه ۱۷/۸ درصد و شکل‌پذیری سازه ۶۹۰/۵ درصد افزایش داشته است، اما با توجه به شکل و نمودار های مربوط به مدل مذکور، سیر صعودی نمودار بیانگر این است که با نصب ۲۴ عدد FLD در مدل مذکور، شکل‌پذیری و ظرفیت باربری سازه به طور چشمگیری افزایش یافته است، و بعد از آن نمودار سیر صعودی نداشته و رفته‌رفته به حالت افقی نزدیک‌تر می‌شود. بنابراین تاثیر بهینه ابزار محدود کننده نیرو (FLD) در بهبود رفتار خرابی مدل GE2 تا حدی موثر است که تعداد آن بیشتر از ۲۴ عدد نباشد.

۷- نتیجه گیری

استفاده از ابزارهای محدود کننده نیروFLD در شبکه‌های دو لایه فضاکار با انواع حالتهای ارائه شده (تکیه گاه‌های متفاوت، تعداد چشمه‌ها و ...) باعث افزایش مقاومت، شکل‌پذیری و بهبود رفتار خرابی آنها شده است، به همین دلیل رفتار خرابی این سازه‌ها نسبت به حالت بدون FLD به میزان بیشتری بهبود یافته است.

در شبکه های دو لایه فضاکار با افزایش تعداد ابزارهای محدود کننده شکل‌پذیری و ظرفیت باربری آنها افزایش می‌یابد، اما با توجه به گران قیمت بودن FLD، این ابزار فقط بر روی اعضای بحرانی لایه بالایی شبکه های دو لایه فضاکار نصب می‌شود. به همین دلیل مطابق نتایج بررسی‌های به عمل آمده بر روی مدل‌ها با تکیه گاه‌های گوشه و محیطی، تاثیر ابزار محدود کننده نیرو در بهبود رفتار خرابی مدل‌ها تا حدی موثر است که باعث افزایش بیشتری در ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سازه شود.

۸- مراجع

1- Makowski, Z.S., Review of the Development of Various Types of Double Layer Grids. Applied Science publishers London England, 1986, pp 93-117.

2-Schmidt et al., Dynamic response and progressive, J., Struct, Eng, ASCE, Vol. No. 9, 1980.

3- El- Sheikh, A., Effect of force limiting devices on behavior of space trusses, Engineering Structures 21, 1999, pp 34-44.

4- Schmidt, L.C., Morgan, P,R., and Clorkson, J.A., Space trusses with brittle type strut buckling J. Struct. Div, ASCE, Vol. 102.9, 1976, PP 1479-1492.

5-Hanaor, A., Marsh, C., Parke GAR, Modification of behavior of double-layer grids: overview. J Struct Engng, ASCE;115(5), 1989, pp 1021–37.

۶- درویش‌هاشمی، م.، رفتار خرابی شبکه های دولایه فضاکار چلیکی با استفاده از ابزار محدود کننده نیرو، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، دانشکده مهندسی عمران، ۱۳۸۷.

۷- شیدایی، م.، پایان نامه دکتری تحت عنوان بررسی رفتار شبکه های دو لایه فضاکاردر برابر کمانش پیشرونده، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی عمران، ۱۳۸۰.

8-Hanaor, A., and Ong, A.F., On structural redundancy in Space trusses, Int.J, of Space Struct, Vol. 3, No. 4, 1988, pp 237-241.

Determining Optimum Number Force Limiting Devices in Improving Collapse Behavior of Double Layer SPACE GRIDS

M.Afshari

Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Maragheh Branch, Iran

M.R.Sheydayi

Department of Civil engineering, Islamic Azad University, Urmia Branch, Iran

M.Darvish Hashemi

Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Bonab Branch, Iran

Abstract

There are two methods of force distribution and ductility improvement for improving collapse behaviour of double-layer space grids. In the method of ductility improvement, by applying strategies like using force limiting devices for preventing buckling of stress device, structure behaviour will change into ductility behaviour, so the impact of the number of force limiting devices in improving double-layer space grids collapse behaviour is effective until ductility and bearing capacity of structure has a considerable increase. In this article, the optimum effect of force limiting devices number in improving double-layer space grids collapse behaviour is considered according to the effectiveness of limiting devices in increasing ductility and bearing capacity of double-layer space grids from their aspect of number.

Keywords: optimum number force limiting device, improving collapse behaviour, double layer SPACE GRIDS