

## تحلیل پایداری چلیک فضاکار دولایه با ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی

کریم عابدی\*<sup>۱</sup>، مریم پورشریفی<sup>۲</sup> و محمدرضا چناقلو<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

<sup>۳</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

(دریافت: ۹۷/۱۲/۱۶، پذیرش: ۹۸/۸/۱۲، نشر آنلاین: ۹۸/۸/۱۲)

### چکیده

سازه‌های فضاکار به گروهی از سازه‌ها اطلاق می‌شود که عملکرد غالب سه‌بعدی دارند. این سازه‌ها مزایای متعددی دارند که از آن جمله می‌توان به وزن کم، سرعت و سهولت اجرا و زیبایی اشاره کرد. علیرغم این مزایا، سازه‌های فضاکار از مشکل خرابی پیش‌رونده رنج می‌برند. خرابی پیش‌رونده در این نوع سازه‌ها عمدتاً به دلیل کمناش اعضای فشاری اتفاق می‌افتد. به منظور اصلاح رفتار تند پس‌کمانشی اعضای فشاری در سازه‌های فضاکار، ایده استفاده از ابزارهای محدودگر نیرو مطرح شده و نمونه‌هایی نیز در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شده است. عدم تأمین نیروی حدی کافی و همچنین صعوبت اجرا در عمل را می‌توان از جمله مواردی برشمرد که باعث شده است تا به حال استفاده عملی از ابزارهای محدودگر نیرو ممکن نشود. به منظور جبران این ناکارآمدی و همچنین بهبود مشخصه‌های رفتاری ابزار محدودگر نیرو، در این مطالعه ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی معرفی شده است. این ابزار که با الهام از بادبند ضد کمناش طراحی شده، در مطالعه حاضر مورد طراحی، ساخت و آزمایش قرار گرفته است. به منظور بررسی تأثیر ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی بر پایداری شبکه دولایه مطالعات عددی توسط نرم‌افزار المان محدود ABAQUS انجام شده است. مطالعات عددی شامل مطالعات پارامتریک با در نظر گرفتن نسبت طول به دهانه و نسبت ارتفاع به دهانه در چلیک‌های دولایه است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی در تمامی مدل‌های شبیه‌سازی شده در مطالعه حاضر، منجر به بهبود قابل‌ملاحظه در رفتار پایداری چلیک دولایه می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی، چلیک فضاکار دولایه، تحلیل پایداری، تحلیل اجزای محدود، کمناش.

### ۱- مقدمه

دریچه راحتی است که این دریچه تحت‌فشار پیش‌بینی شده و قابل تنظیم باز می‌شود. ایشان همچنین نوع دوم ابزار محدودگر نیرو موسوم به ابزار محدودگر نیروی اصطکاکی را نیز معرفی کردند. این ابزار با برشکاری فلز ایجاد می‌شود و رفتار نیرو-تغییر مکان آن نسبت به ابزار محدودگر نیروی نوع اول مناسب‌تر است. ابزار محدودگر نیروی چندلوله‌ای توسط Parke (۱۹۸۴) معرفی شد. این ابزار محدودگر نیرو از دو لوله مربعی متداخل و چهار نوار مستطیلی تشکیل شده است. مشخصات رفتاری این ابزار محدودگر نیرو تابعی از طول و سطح مقطع این چهار نوار است. نتایج این تحقیق عملی نشان داد که اعمال ابزار محدودگر نیرو در توزیع نیروی الاستیک داخل شبکه و نیز شکل‌پذیری پس‌کمانشی تأثیر قابل‌توجهی ندارد. تأثیر اعمال ابزار محدودگر نیرو بر افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری سازه‌های فضاکار توسط Hanaor و همکاران (۱۹۸۹) مورد بازنگری قرار گرفته است. در این راستا، دو شبکه دولایه مربعی روی مربعی با دو نوع مختلف اتصال ساخته

سازه‌های فضاکار بهترین گزینه برای مسقف کردن فضاهای وسیع بدون ستون‌های میانی هستند. این سازه‌ها مزایای قابل-توجهی چون وزن کم، سهولت تولید و نصب و همچنین ظاهر زیبا دارند. مشکل عمده سازه‌های فضاکار حساسیت آن‌ها نسبت به مقوله خرابی پیش‌رونده است. خرابی پیش‌رونده عمدتاً به دلیل کمناش اعضای فشاری رخ می‌دهد. علی‌رغم این‌که سازه‌های فضاکار از نظر استاتیکی نامعین هستند اما خرابی یک عضو می‌تواند منجر به خرابی کل سازه شود. درجه نامعینی بالا در سازه‌های فضاکار آن‌ها را نسبت به از دست دادن عضو حساس‌تر می‌کند (عابدی و شکسته‌بند، ۱۳۸۷).

مزایای استفاده از ابزار محدودگر نیرو برای اولین بار توسط Schmidt و Hanaor (۱۹۷۹) تشریح شد. در این راستا، Hanaor و Schmidt (۱۹۸۰) ابزار محدودگر نیروی هیدرولیکی را معرفی کردند. این ابزار محدودگر نیرو شامل یک پیستون هیدرولیکی و

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴۱۱۲۱۲۱۰

استفاده از ابزار محدودگر نیرو احتمال خرابی سقف تحت بارگذاری باد را کاهش می‌دهد.

همان‌طور که از تحقیقات فوق برمی‌آید، علی‌رغم گذشت زمان طولانی از طرح ایده ضرورت استفاده از ابزار محدودگر نیرو، تا امروز طراحی کارایی برای استفاده مؤثر و عملی از این ابزار صورت نگرفته است. در مطالعه حاضر، به منظور بهبود رفتار ابزار محدودگر نیرو و معرفی نسخه قابل اجرای آن، ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی (AFLD)<sup>۱</sup> معرفی شده است. این ابزار با الهام از عملکرد بادبند مقاوم در برابر کمانش طراحی شده است. سپس یک نمونه از آن ساخت و در آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی سهند تحت آزمایش فشار محوری قرار گرفته است. در ادامه به منظور بررسی عمیق‌تر ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی، این عضو در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مدل‌سازی شده است. پس از صحت-سنجی مدل مذکور با نتایج آزمایشگاهی نمونه ساخته‌شده توسط مؤلفین، به بررسی تأثیر اعمال ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی روی شبکه فضاکار دولایه پرداخته شده است. ابتدا مدل عددی شبکه فضاکار دولایه با مدل آزمایشگاهی Parke (۱۹۸۴) صحت-سنجی شده است. سپس تأثیر اعمال ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی بر شبکه‌های دولایه فضاکار با لحاظ کردن پارامترهای نسبت طول به دهانه و نسبت ارتفاع به دهانه مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- معرفی ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی

ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی (با الهام از بادبند ضد کمانش) که در این مقاله برای اولین بار معرفی می‌شود، نسل جدیدی از ابزارهای محدودگر نیرو است که در مقایسه با نمونه‌های پیشین، رفتار نیرو-تغییر مکان بهتر و شکل‌پذیری بالاتری دارد. همچنین این ابزار، برخلاف نمونه‌های قبلی می‌تواند بار حدی ثابتی را تأمین نماید. نکته قابل توجه در مورد ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی این است که در این ابزار، غلاف از کمانش هسته جلوگیری می‌کند. این ابزار با تمام اتصالات سازه‌های فضاکار سازگار بوده و عیناً نظیر اعضای عادی در سازه‌های فضاکار نصب می‌شود. از آنجایی که ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی در سازه‌های فضاکار استفاده خواهد شد، باید تمام الزامات مربوط به اعضای سازه‌های فضاکار را برآورده نماید. همچنین چون سازوکار کنترل کمانش در آن نظیر بادبندهای ضدکمانش است، باید ضوابط مربوط به طراحی بادبندهای ضد کمانش در آن لحاظ شود. ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی از سه قسمت مجزا تشکیل شده است که عبارتند از هسته، غلاف و اتصال. این اجزا به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود،

شده و در دو حالت مجهز به ابزار محدودگر نیرو و بدون ابزار محدودگر نیرو مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در هر دو حالت شبکه‌ها به سطح باربری پیش‌بینی شده نرسیدند. علت این مسئله در شبکه مجهز به ابزار محدودگر نیرو عملکرد نامناسب یکی از ابزارها بود.

تأثیر ابزار محدودگر نیروی چند لوله‌ای بر پایداری شبکه دو-لایه توسط Mukai و همکاران (۱۹۹۳) مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، ابزار محدودگر نیرو در دو موقعیت تمام اعضای لایه بالا و عضو وسط لایه بالا به سازه اعمال شد و نتایج با نمونه کنترل مقایسه گردید. نتایج نشان داد که اعمال ابزار محدودگر نیرو در یک عضو مؤثر نبوده اما استفاده از آن در اعضای لایه بالای شبکه منجر به افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در شکل‌پذیری می‌شود. تأثیر ابزار محدودگر نیرو در رفتار شبکه دولایه توسط El-Sheikh (۱۹۹۹) به صورت نظری مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه تأثیر سه پارامتر تاشه‌بندی، نسبت طول به عرض و شرایط مرزی مورد مطالعه قرار گرفتند. ابزارهای محدودگر نیرو به اعضای با بیشترین تنش فشاری اعمال شدند. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد تکیه‌گاه‌ها تأثیر ابزار محدودگر نیرو در افزایش ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. بنابراین شبکه‌هایی که دارای تکیه‌گاه‌های گوشه هستند برای اعمال ابزار محدودگر نیرو مناسب‌ترند. همچنین افزایش تعداد ابزار محدودگر نیرو، صرف‌نظر از شرایط تکیه‌گاهی و نسبت طول به عرض، باعث بهبود رفتار شبکه دولایه و افزایش شکل‌پذیری می‌شود.

Abedi و Parke (۲۰۰۷) تأثیر استفاده از ابزار محدودگر نیروی چند لوله‌ای و بادبند متشکل از لوله عادی در سازه قاب خمشی را به صورت نظری بررسی و مقایسه کردند. در این مطالعه رفتار چرخه‌ای ابزار محدودگر نیروی چند لوله‌ای به صورت نظری استخراج شد و سپس این ابزار به عنوان بادبند در سازه قرار گرفت. همچنین یک لوله عادی به عنوان بادبند در سازه مشابه به کار رفت که ابعاد آن برابر لوله میانی در ابزار محدودگر نیروی چند لوله‌ای بود. هر دو سازه تحت تغییر مکان افقی تا مقدار ۱۰۰ میلی-متر قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش تغییر مکان افقی مقدار تغییر شکل پلاستیک در وسط لوله میانی افزایش می‌یابد و میزان انرژی جذب‌شده در قاب مجهز به ابزار محدودگر چند لوله-ای بیش از میزان انرژی جذب‌شده در قاب مجهز به بادبند لوله عادی می‌باشد. تأثیر ابزار محدودگر نیرو بر خرابی سقف فولادی تحت بارگذاری باد توسط Zhang و Bai (۲۰۱۲) مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه عدم اطمینان مربوط به نرخ تغییرات بار باد و ناکاملی عضو در نظر گرفته شد. برای این منظور از ترکیب روش مونت کارلو و روش سطح پاسخ استفاده شد. نتایج نشان داد که

$$D_{ci} = 2 \sqrt{F/(\pi\sigma_y)} \quad (1)$$

در رابطه فوق،  $F$  بار فشاری طراحی و  $\sigma_y$  تنش تسلیم مصالح هسته می‌باشد.

شرط اصلی در طراحی غلاف آن است که غلاف بتواند جلوی کمانش هسته تحت نیروی فشاری را بگیرد. به این منظور و با استناد به قوانین حاکم بر طراحی بادبند کمانش تاب، ابعاد هندسی غلاف باید از معیار واتانابه<sup>۲</sup> مطابق رابطه زیر پیروی کند:

$$P_e/P_y \geq 1.5 \quad (2)$$

در این رابطه،  $P_e$  بار کمانش اولر غلاف و  $P_y$  بار تسلیم هسته است. در طراحی ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی، وجود فاصله بین هسته و غلاف ضروری است. فضای خالی این امکان را فراهم می‌نماید که هسته در حین اعمال بار فشاری آزادانه و بدون برخورد به غلاف انبساط جانبی داشته باشد. در این مطالعه آزمایشگاهی، فضای خالی بین غلاف و هسته برابر یک میلی‌متر لحاظ شده است. طراحی اتصالات به‌عنوان آخرین فاز طراحی ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی مورد بحث قرار می‌گیرد. وظیفه اتصالات انتقال نیرو بین اعضای سازه فضاکار و در نهایت هدایت آن‌ها به تکیه‌گاه‌های سازه می‌باشد. در این آزمایش از اتصال گوی‌سان Mero استفاده شده است. علت این مسئله در دسترس بودن اتصال Mero، سهولت نصب آن و تأمین شرایط مرزی مفصلی کامل در آن می‌باشد. با توجه به این نکته که بار حدی ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی بیش از بار حدی عضو معمولی می‌باشد، قسمت مخروطی اتصال Mero حذف گردیده است تا هنگام بارگذاری آسیب نبیند.

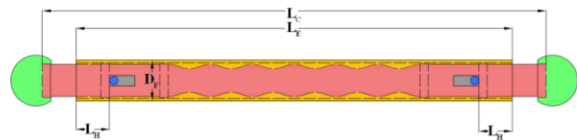
### ۳- ساخت و آزمایش

برای بررسی رفتار ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی، یک نمونه از آن ساخته شده و در آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی سهند تحت آزمایش بار محوری فشاری قرار گرفت. تمامی قطعات توسط دستگاه CNC<sup>۴</sup> ماشین‌کاری شده و سپس سرهم‌بندی شدند. در ادامه جزئیات ساخت و آزمایش به تفصیل آمده است.

#### ۳-۱- ساخت ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی

برای ساخت هسته فولاد CK45 انتخاب شده است. علت این مسئله قابلیت ماشین‌کاری مناسب، مقاومت بالا و در دسترس بودن این نوع فولاد می‌باشد. برای دستیابی به مشخصات رفتاری هسته، سه آزمایش کشش کوپن از هسته انجام گرفت. برای افزایش دقت، تست کوپن با بهره‌گیری از دستگاه اکستنسیومتر<sup>۵</sup>

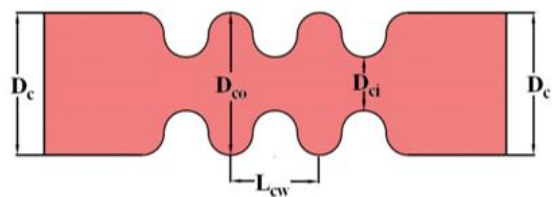
هسته‌ای به طول  $L_c$  درون غلافی به طول  $L_E$  و قطر  $D_E$  قرار می‌گیرد. دو سوراخ لوبیایی بر روی غلاف تعبیه شده است تا هسته توسط دو پیچ مونتاژ در محل خود تثبیت شود. وجود سوراخ لوبیایی اجازه می‌دهد هسته در طول آزمایش و حین تجربه کردن بار فشاری بتواند آزادانه تغییر طول دهد. هسته با دو پیچ پر مقاومت به اتصال دو انتها مرتبط می‌شود. در این طراحی به دلیل سهولت و در دسترس بودن از اتصال گوی‌سان از نوع Mero<sup>۲</sup> استفاده شده است، هرچند ابزار محدودگر نیرو قابلیت انطباق با تمامی اتصالات سازه‌های فضاکار را دارد. شایان ذکر است که استفاده از اتصالات پیچی این امکان را فراهم می‌کند تا سازه سریع سرهم‌بندی و باز شود.



شکل ۱- تصویر شماتیک ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی

#### ۳-۲- طراحی ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی

همان‌طور که پیشتر اشاره شد ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی از سه قسمت هسته، غلاف و اتصالات تشکیل شده است. به دلیل ایجاد هماهنگی و حفظ زیبایی سازه فضاکار، شکل غلاف و به تبع آن شکل هسته استوانه‌ای انتخاب شده است. پارامترهای مؤثر در طراحی هسته عبارتند از: قطر داخلی هسته ( $D_{ci}$ )، قطر خارجی هسته ( $D_{co}$ ) و قطر هسته در طول آزاد غیر آکاردئونی آن ( $D_c$ ). این عوامل به صورت شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است.

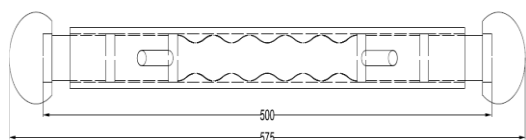


شکل ۲- پارامترهای مؤثر در طراحی هسته

پارامتر  $D_{co}$  به قطر غلاف و مقدار فاصله آزاد بین هسته و غلاف بستگی دارد. فاصله آزاد بین هسته و غلاف باعث می‌شود تا هسته نیروی اصطکاکی به غلاف وارد نکند. همچنین امکان تغییر شکل جانبی آزادانه هسته در اثر بار فشاری را فراهم می‌کند. پارامتر  $D_{ci}$  براساس ظرفیت باربری ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی و همچنین جنس هسته برحسب رابطه زیر تعیین می‌شود:

جدول ۲- مشخصات مکانیکی مصالح غلاف

شماره نمونه	مدول یانگ (Gpa)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	ازدیاد طول قبل از شکست (%)
۱	۱۹۵	۶۴۰	۶۹۶	۲۰
۲	۹۵/۵	۶۳۷	۶۹۲	۲۱
۳	۱۹۵	۶۳۷	۶۹۴	۲۱



شکل ۴- تصویر ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی (میلی متر)

## ۲-۳- مراحل آزمایش

برای انجام آزمایش ابتدا ابزار محدودگر نیرو سرهم‌بندی شد. برای این منظور هسته کاملاً با گریس آغشته شد و درون غلاف قرار گرفت (لازم به یادآوری است که سطح داخلی غلاف سنگزنی شده و کاملاً صیقلی بود تا اصطکاک به کم‌ترین حد خود برسد). سپس دو پیچ مونتاژ روی غلاف بسته شد. دیواره‌های سوراخ لوبیایی نیز برای تسهیل در حرکت پیچ هنگام کاهش طول گریس- کاری شد. دو اتصال گوی‌سان به دو انتهای هسته پیچ گردید. سپس کرنش‌سنج‌ها و سیم‌های رابط دیتا لاگر<sup>۸</sup> روی عضو نصب شد. برای تأمین عملکرد کاملاً مفصلی در دو انتهای ابزار محدودگر نیرو، اتصال گوی‌سان در داخل عضو رابطی قرار گرفت که امکان دوران آزادانه را برای اتصال گوی‌سان تأمین می‌کرد. تصویر قطعه رابط در شکل (۵) آمده است. این قطعه شامل یک پایه، بدنه اصلی و دو قطعه روبه مسطح فولادی می‌باشد که با هشت پیچ به بدنه متصل می‌گردند. داخل بدنه به صورت حجمی از کره برای قرار گرفتن اتصال گوی‌سان تراش داده شده است.

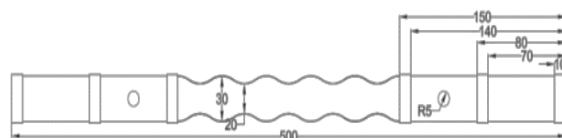


شکل ۵- تصویر عضو رابط اتصال گوی‌سان

انجام شده است. نتایج آزمایش کوپن در جدول (۱) آمده است. با استناد به نتایج آزمایش اسپکترومتری نشری<sup>۹</sup> برای فولاد هسته، جنس فولاد هسته Ck 40/1.1186 می‌باشد. تصویر هسته طراحی شده در شکل (۳) آمده است. سه رینگ به قطر ۳۲ میلی- متر و طول ۱۰ میلی‌متر در طرفین هسته قرار داده شده است. وجود این رینگ‌ها باعث می‌شود هسته در داخل غلاف خروج از مرکزیت نداشته و بار تنها به صورت فشاری و بدون لنگر خمشی به هسته وارد شود.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مصالح هسته

شماره نمونه	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	ازدیاد طول قبل از شکست (%)
۱	۱۹۵	۳۸۹	۶۵۰	۲۴
۲	۱۹۴	۳۸۵	۶۵۲	۲۴
۳	۱۹۵	۳۸۵	۶۵۴	۲۵



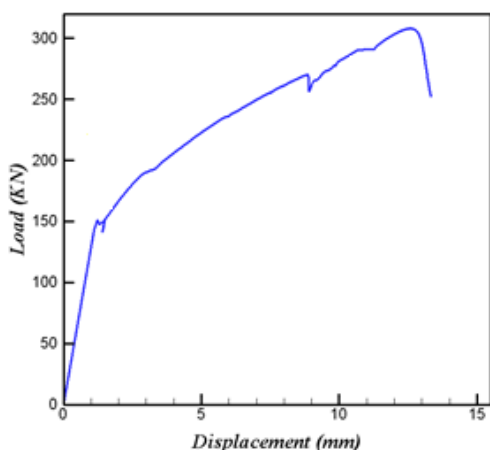
شکل ۳- جزئیات هسته طراحی شده (میلی متر)

غلاف به نحوی طراحی می‌شود که جلوی کمانش هسته را بگیرد. در این آزمایش از لوله مانیسمن<sup>۶</sup> بدون درز به عنوان غلاف استفاده شده است. در این حالت ضعف‌های جوشکاری نظیر خوردگی جوش حذف شده و اطمینان از ضخامت ثابت جداره در کل طول لوله حاصل می‌شود. همچنین داخل لوله مانیسمن سطح صیقلی مطلوبی دارد که اصطکاک بین غلاف و هسته را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. سه تست کشش کوپن با بهره‌گیری از اکستنسیومتر برای مصالح غلاف انجام گرفته است که نتایج آزمایش در جدول (۲) آمده است. همچنین طبق نتایج آنالیز اسپکترومتری نشری نمونه فولاد غلاف مطابق با API 5L Gr.70 می‌باشد. اتصالات Mero به منظور افزایش سختی تحت عملیات حرارتی قرار گرفته و آبکاری شدند. تصویر ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی پس از سرهم‌بندی به همراه اتصالات در شکل (۴) آمده است.

8. Data Logger

6. Optical emission spectrometry

7. Manisman



شکل ۷- منحنی نیرو- تغییر مکان ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی

#### ۴- مدل سازی اجزای محدود

در این مطالعه از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS برای صحت سنجی رفتار ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی و نیز مطالعه پارامتریک تأثیر استفاده از ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی در شبکه های دولایه استفاده شده است.

#### ۴-۱- مدل سازی اجزای محدود ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی

مدل اجزای محدود شامل هسته، غلاف، و اتصالات است. با توجه به این که هسته تغییر مکان های بزرگ پلاستیک را تجربه می کند برای مدل سازی آن از المان C3D20 استفاده شده است. این المان سه بعدی، آجری و بیست گرهی می باشد و می تواند تمرکز تنش را در سطح خارجی عضو به خوبی مدل نماید. غلاف با استفاده از المان C3D8R مدل شده است. این المان هشت گرهی بوده و از انتگرال گیری کاهش یافته در آن استفاده می شود. این المان را می توان در تحلیل های غیرخطی پیچیده که شامل پلاستیسیته، تماس و تغییر مکان های بزرگ باشد به کار برد. برای اعمال ناکاملی از شکل مود اول کمانش با ضریب ناکاملی  $L/1000$  استفاده شد. با توجه به این که اتصال Mero سختی بالایی دارد برای مدل سازی آن از المان Discrete Rigid استفاده شده است. برای مدل سازی تماس بین هسته و غلاف از گزینه Surface to surface contact استفاده شده است. برهم کنش بین هسته و غلاف شامل برهم کنش مماسی<sup>۱۱</sup> و برهم کنش عمودی<sup>۱۲</sup> است. با استناد به مطالعات انجام گرفته توسط Genna (۲۰۱۲)، ضریب اصطکاک برهم کنش مماسی برای دو سطح فولادی صیقلی

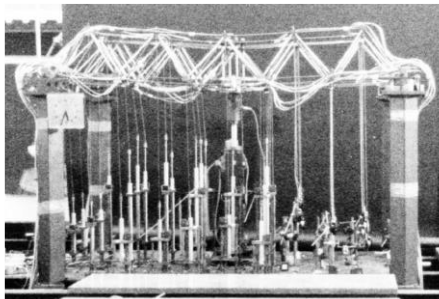
سطح داخلی بدنه قطعه رابط در محل تکیه گوی به آن گریس- کاری شده و پس از قرارگیری اتصال گوی سان هشت پیچ اتصال بین رویه و بدنه محکم گردید. کل مجموعه به صورت یک جا داخل فک دستگاه UTM قرار گرفت. پایه قطعه رابط در داخل فک دستگاه UTM قرار گرفته و برای جلوگیری از لغزش احتمالی فشار ۱۸۰ بار از طریق جک فک به پایه قطعه رابط وارد شد. فک مورد استفاده در UTM از نوع آج دار و مخصوص قطرهای ۳۰-۴۰ میلی متر بود. برای اندازه گیری تغییر مکان ها در روی هسته و غلاف از ابزار اندازه گیری LVDT<sup>۱۰</sup> و نیز Strain gauge استفاده شده است. دو LVDT با دقت هزارم میلی متر در وسط غلاف و با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم نصب شدند. دو کرنش سنج در وسط غلاف و دو کرنش سنج در دو انتهای هسته نصب شدند. شکل (۶) ابزار محدودگر نیرو را روی دستگاه UTM نشان می دهد. بارگذاری از نوع کنترل تغییر مکان و نرخ بارگذاری برابر  $0.1005$  میلی متر بر ثانیه بود.



شکل ۶- نمونه آزمایشگاهی ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی داخل جک هیدرولیکی

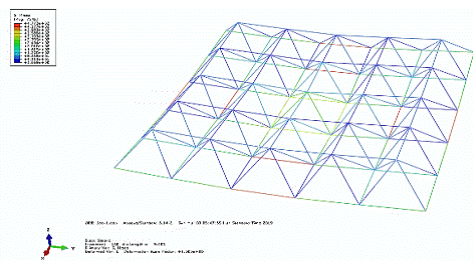
#### ۳-۳- نتیجه آزمایش

پاسخ نیرو- تغییر مکان ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی در شکل (۷) آمده است. همان طور که از شکل مشخص است، ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی رفتار تند کمانشی نداشته و رفتار الاستو- پلاستیک کامل نشان داده است.

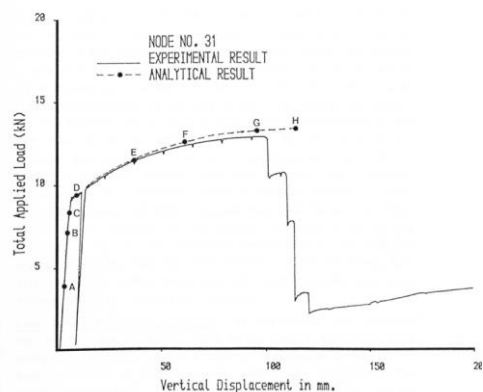


شکل ۱۱- تصویر شبکه دولایه در حین آزمایش (Parke, ۱۹۸۴)

در این سازه از سه تیپ مختلف اعضا استفاده شده است. رفتار نیرو- تغییر مکان این اعضا در فشار و کشش آزمایش گردیده است که در حالت بارگذاری فشاری پاسخ شامل فاز پس کمناشی نیز می‌باشد. برای صحت‌سنجی از نتایج آزمایش اعضا استفاده شده است. پاسخ تغییر مکان در گره مرکزی لایه بالا به دست آمده است. شبکه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS در شکل (۱۲) آمده است. رفتار نیرو- تغییر مکان مدل آزمایشگاهی شبکه دو لایه در شکل (۱۳) آمده است. با مقایسه رفتار نیرو- تغییر مکان مدل آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود انطباق بسیار خوبی بین نتایج عددی به دست آمده از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی Parke (۱۹۸۴) وجود دارد.

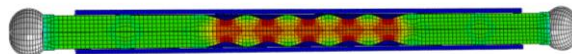


شکل ۱۲- شبکه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS

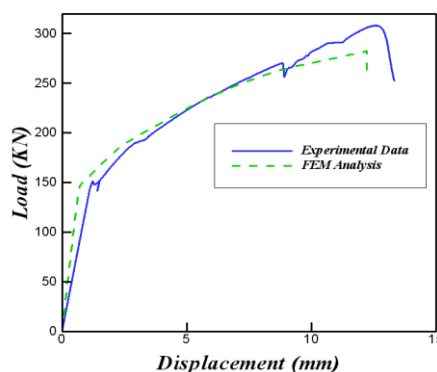


شکل ۱۳- رفتار نیرو- تغییر مکان مدل آزمایشگاهی شبکه دولایه (Parke, ۱۹۸۴)

آغشته به گریس برابر ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است. برای تعیین مشخصات مصالح فولادی هسته و غلاف به نتایج تست کوپن استناد شده است. ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ABAQUS در شکل (۸) آمده است. رفتار نیرو- تغییر مکان مدل عددی با رفتار نیرو- تغییر مکان مدل آزمایشگاهی در شکل (۹) مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد انطباق قابل قبولی بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد.



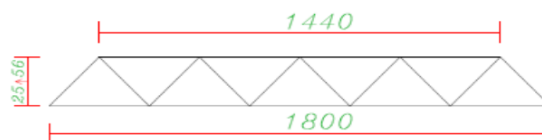
شکل ۸- ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ABAQUS



شکل ۹- مقایسه رفتار نیرو- تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی

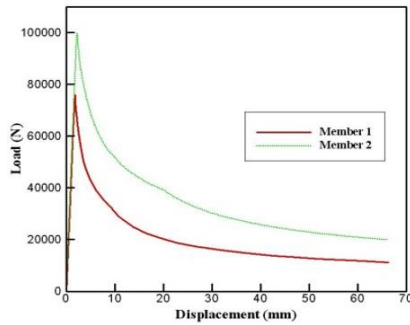
#### ۴-۲- مدل‌سازی اجزای محدود شبکه فضاکار دولایه

برای صحت‌سنجی مدل‌سازی شبکه دولایه از نتایج تست آزمایشگاهی که توسط Parke (۱۹۸۴) انجام شده بود، استفاده گردید. تاشه شبکه دولایه مورد استفاده در صحت‌سنجی، مربعی روی مربعی می‌باشد که در شکل (۱۰) آورده شده است. تصویر نمونه در حین آزمایش نیز در شکل (۱۱) آمده است. شبکه در چهارگوشه لایه پایین تکیه‌گاه مفصلی دارد که در برابر نیروی عمودی مقاومت کرده و آزادی حرکت دورانی دارند. تاشه مدل در نرم‌افزار Formian ایجاد شده و سپس به نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS منتقل شد. بارگذاری مدل از نوع کنترل تغییر مکان بوده و در گره مرکزی لایه بالا اعمال شد. نوع تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌باشد.

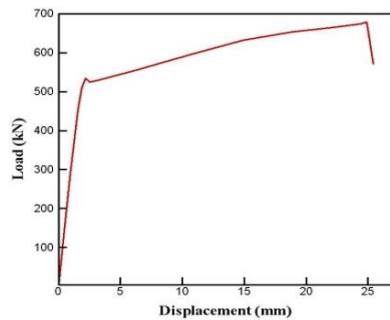


شکل ۱۰- تاشه‌بندی شبکه دولایه



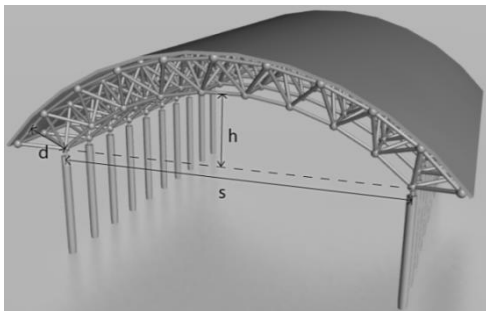


(الف)



(ب)

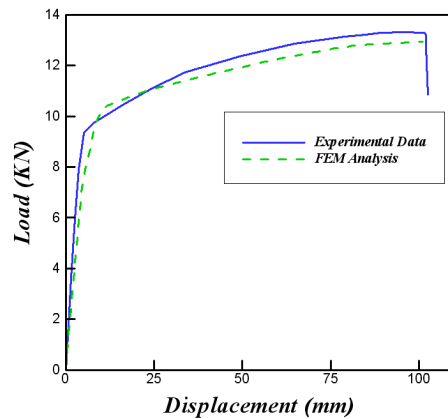
شکل ۱۵- رفتار نیرو- تغییر مکان اعضا: الف) مقایسه رفتار دو عضو، (عضو اول) طول دو متر، قطر دو اینچ، ضخامت دو میلی-متر، (عضو دوم) طول دو متر، قطر سه اینچ، ضخامت دو میلی-متر، ب) رفتار ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی طول دو متر



شکل ۱۶- تصویر شماتیک ابعاد چلیک دولایه

جدول ۳- جزئیات شبکه‌های دولایه مورد مطالعه

نام مدل	دهانه (S)	ارتفاع (h)	ضخامت (d)	طول (L)	نسبت طول به دهانه (L/s)	نسبت ارتفاع به دهانه (h/s)
مدل ۱	۲۰	۵	۱/۲۵	۵۰	۲/۵	۰/۲۵
مدل ۲	۴۰	۱۰	۲/۵	۵۰	۱/۲۵	۰/۲۵
مدل ۳	۵۰	۱۲/۵	۳/۱۲۵	۵۰	۱	۰/۲۵
مدل ۴	۲۵	۵	۱/۲۵	۵۰	۲	۰/۲
مدل ۵	۲۵	۱۰	۱/۲۵	۵۰	۲	۰/۴
مدل ۶	۲۵	۱۲/۵	۱/۲۵	۵۰	۲	۰/۵



شکل ۱۴- مقایسه رفتار نیرو- تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی شبکه دولایه

### ۳-۴- روش تحلیل و طراحی چلیک فضاکار دولایه

تاشه‌بندی شبکه‌های دولایه فضاکار توسط نرم‌افزار Formian انجام گرفته است. این نرم‌افزار بر مبنای جبر فرمکسی<sup>۱۳</sup> توسعه یافته است. سپس تاشه سازه‌ها به نرم‌افزار SAP2000 منتقل شد. تحلیل سازه‌ها در نرم‌افزار SAP2000 با استناد به آیین‌نامه سازه‌های فولادی ایران انجام گرفت. در بارگذاری سازه بار برف، بار مرده، بار باران، بار باد، بار زلزله و بار حرارتی لحاظ شده است. مقطع تمام اعضا دایروی انتخاب شدند و ضریب لاغری آن‌ها با استناد به آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ایران به کران بالای ۱۰۰ محدود شد. مدل‌ها پس از طراحی به نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS منتقل شدند. در طراحی مدل‌ها طول اجزا بین ۲ تا ۳ متر بوده و از مقاطع لوله‌ای موجود در بازار استفاده شده است. برای به‌دست آوردن رفتار اعضا، عضو به صورت دو سر مفصل در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مدل شده است. نمونه تحت تحلیل کمانشی قرار گرفته و مود اول کمانشی آن شناسایی شده است. سپس ناکاملی  $L/1000$  منطبق با مود اول به آن اعمال شده و تحت تحلیل Static Riks قرار گرفته است. همچنین ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی برای استفاده در طول‌های مختلف مدل‌سازی شده است. دو نمونه از رفتار نیرو- تغییر مکان اعضا و همچنین رفتار ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی برای طول دو متر در شکل (۱۵) آمده است. تصویر شماتیک و ابعاد مرتبط با چلیک دولایه در شکل (۱۶) آمده است. مشخصات مدل‌ها در جدول (۳) ارائه شده است. طول تمامی مدل‌ها یکسان و برابر ۵۰ متر است. در این مطالعه پارامتریک، پارامترهای نسبت طول به دهانه و نسبت ارتفاع به دهانه لحاظ شده‌اند.

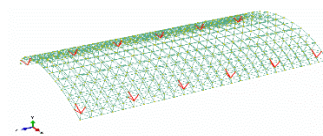
## ۵- نتایج و بحث

در این قسمت نتایج عددی حاصل از مطالعه پارامتریک با لحاظ کردن دو پارامتر نسبت طول به دهانه و نسبت ارتفاع به دهانه ارائه می‌گردد.

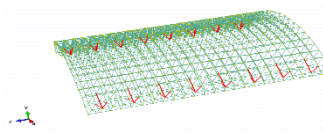
## ۱-۵- بررسی تأثیر نسبت طول به دهانه

در مدل‌های یک تا سه تأثیر افزودن ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی بر رفتار چلیک‌های دولایه با نسبت طول به دهانه ۱، ۱/۲۵ و ۲/۵ بررسی شده است. اعضای سازه فضاکاری که با ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی جایگزین شده‌اند در شکل (۱۷) با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. نتایج تحلیل‌ها در شکل (۱۸) آمده است. در این نمودارها، محور افقی تغییر مکان قائم گره مرکزی چلیک واقع در لایه بالا را نشان می‌دهد و محور قائم نشانگر مقدار  $LPF^{14}$  می‌باشد. میزان تغییر در مقدار ظرفیت باربری و سختی و همچنین درصد اعضای مجهز به ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی به کل اعضا در جدول (۴) آمده است.

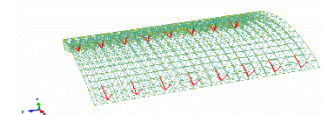
همان‌طور که در تصاویر شکل (۱۸) مشاهده می‌شود در چلیک‌ها اعضای بحرانی عمدتاً در مجاورت تکیه‌گاه‌ها ایجاد می‌شوند. با استناد به نتایج ارائه‌شده در جدول (۴) در همه مدل‌ها با افزودن ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی به اعضای بحرانی، ظرفیت باربری سازه افزایش می‌یابد. با کاهش نسبت طول به دهانه، نرخ افزایش در ظرفیت باربری چلیک‌های دولایه افزایش می‌یابد. سختی ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی به طور طبیعی بیش از سختی عضو عادی فضاکار است.



(الف)



(ب)

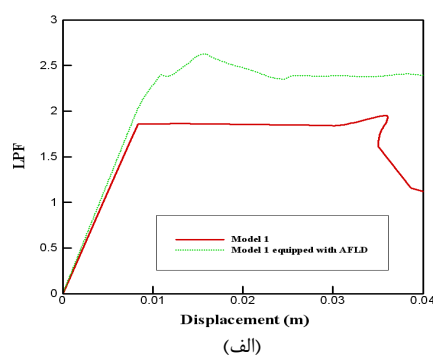


(پ)

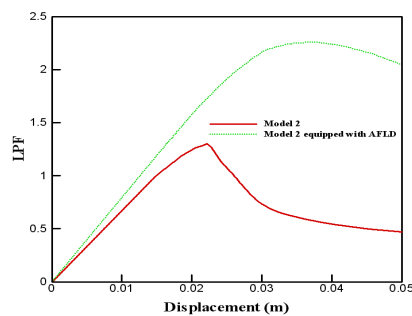
شکل ۱۷- موقعیت اعضای مجهز به ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی در مدل‌های: (الف) مدل ۱، (ب) مدل ۲، (پ) مدل ۳

## جدول ۴- نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی مدل‌های ۱ تا ۳

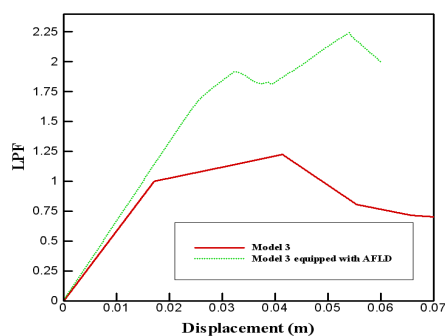
نام مدل	ظرفیت باربری (LPF)	سختی اولیه	افزایش ظرفیت باربری	نسبت افزایش سختی کل اعضا	افزایش نسبت
مدل ۱ مجهز به AFLD	۱/۸۶	۱۵۶	۲/۵۷	۳۸٪	۱۳٪
مدل ۲	۱/۲۵	۶۷	۲/۲۴	۷۹٪	۱۵٪
مدل ۳	۱/۲۲	۵۸	۲/۲۱	۸۱٪	۱۲٪



(الف)



(ب)



(پ)

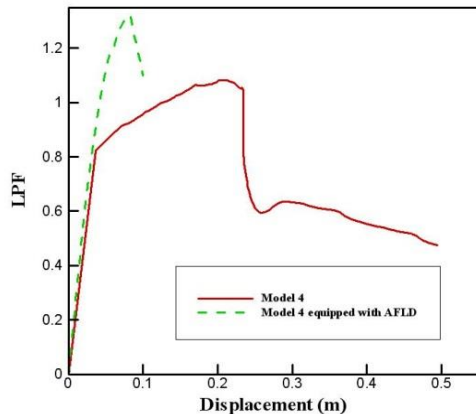
شکل ۱۸- مقایسه رفتار نیرو-تغییر مکان در دو حالت مجهز به ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی و بدون آن: (الف) مدل ۱، (ب) مدل ۲، (پ) مدل ۳



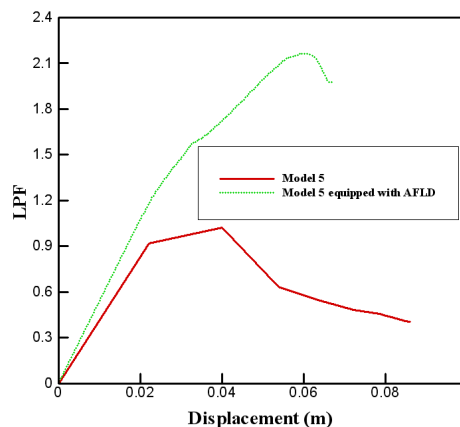
در نتیجه، افزودن این عضو به مجموعه سازه فضاکار باعث افزایش سختی مدل می‌گردد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود تعداد اعضای مجهز به ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی در مقایسه با کل اعضا در حدود یک درصد می‌باشد. میزان افزایش سختی تابع طراحی چلیک، تعداد تکیه‌گاه‌ها و پارامترهای دیگری است که در مطالعه جداگانه‌ای بحث خواهد شد. در مدل‌های ۱ تا ۳، با افزودن ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی سختی مدل‌ها افزایش یافته است. میزان افزایش سختی رابطه مستقیم با نسبت تعداد ابزار محدودگر نیرو به کل اعضا دارد.

### ۵-۲- بررسی تأثیر نسبت ارتفاع به دهانه

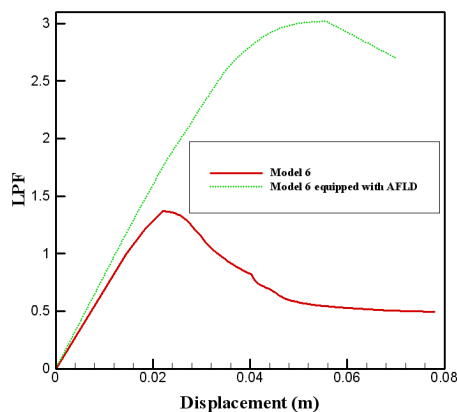
در مدل‌های چهار تا شش تأثیر افزودن ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی بر رفتار چلیک‌های دولایه با نسبت طول به دهانه ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۵ بررسی شده است. اعضای سازه فضاکار که با ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی جایگزین شده‌اند در شکل (۱۹) با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. نتیجه تحلیل مدل‌ها در شکل (۲۰) آمده است. میزان تغییر در ظرفیت باربری و شکل‌پذیری در جدول (۵) آمده است. نتایج نشان می‌دهد که در همه مدل‌ها با افزودن این ابزار ظرفیت باربری سازه و سختی آن افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه، نرخ افزایش ظرفیت باربری تندتر می‌شود. با نزدیک شدن حالت سازه از تخت به قوسی (با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه از ۰/۲ به ۰/۵)، مزایای استفاده از ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی بارزتر می‌شود.



(الف)

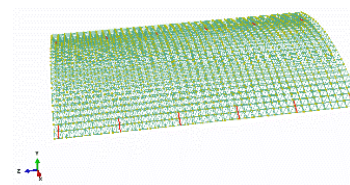


(ب)

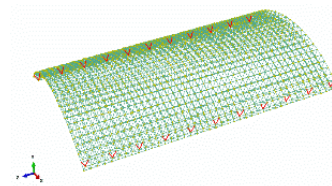


(پ)

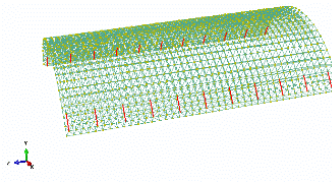
شکل ۲۰- مقایسه رفتار نیرو- تغییر مکان در دو حالت مجهز به ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی و بدون آن:  
الف) مدل ۴، ب) مدل ۵، پ) مدل ۶



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۹- موقعیت اعضای مجهز به ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی در مدل‌های: الف) مدل ۴، ب) مدل ۵، پ) مدل ۶

## ۷- مراجع

- عابدی ک، شکسته‌بند ب، "تحلیل پایداری سازه‌های فضاکار"، دانشگاه صنعتی سهند، ۱۳۸۷.
- Abedi K, Parke GAR, "Investigation into the behavior of ductile Multi- Tubular force limiting device", Iranian Journal of Science and Technology, 2007, 31 (B2) 249-255.
- Bai L, Zhang Y, "Collapse fragility assessment of Steel roof framings with Force Limiting Devices Under transient wind loading", Journal of Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2012, 6 (3), 199-209.
- El-sheikh A, "Effect of force limiting devices on behavior of space trusses", Engineering Structures, 1999, 21, 34-44.
- Genna F, Gelfi P, "Analysis of the lateral thrust in bolted steel buckling restrained braces. I: Experimental and numerical results", Structural Engineering, 2012, 138 (10), 1231-1243.
- Hanaor A, Marsh C, Parke GAR, "Modification of behavior of double-layer Grids: overview", Structural Engineering, ASCE, 115 (5), 1571-1576, 1989.
- Hanaor A, Schmidt LC, "Space truss studies with force limiting devices", Journal of Structural Division, ASCE, 1980, 106 (ST11), 2313-2329.
- Mukai H, Wada A, Watanabe A, Iwata M, "Ductile Truss Structures and Scaled Model Experiment", 4<sup>th</sup> International Conference on Space Structures, Surrey, UK, 5-10 September, 1993.
- Parke GAR, "The behavior of space trusses incorporating novel compression members", PhD Thesis, University of Surrey, Surrey, UK, 1988.
- Schmidt LC, Hanaor A, "Force limiting devices in space trusses." Journal of Structural Division, ASCE, 1979, 105 (ST5), 939-951.
- Watanabe A, Hitomi Y, Yaeki E, Wada A, Fujimoto M, "Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube", 9<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, 1988.

## جدول ۵- نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی مدل‌های ۴ تا ۶

نام مدل	ظرفیت باربری (LPF)	سختی اولیه	افزایش ظرفیت باربری	نسبت به AFLD کل اعضا	افزایش سختی اولیه
مدل ۴	۱/۰۴	۲۲/۳۲			
مدل ۴ مجهز به AFLD	۱/۳۱	۲۸/۰۷	٪۵۲	۰/۰۰۲	٪۲۴
مدل ۵	۱/۰۲	۴۱/۰۴			
مدل ۵ مجهز به AFLD	۲/۱۶	۵۳/۸۷	٪۱۱۱	۰/۰۰۵	٪۳۰
مدل ۶	۱/۳۶	۶۸/۶			
مدل ۶ مجهز به AFLD	۲/۹۷	۸۱	٪۱۱۸	۰/۰۰۷۴	٪۱۸

## ۶- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی برای اولین بار طراحی، ساخته و آزمایش شده است. این ابزار با الهام از بادبند مقاوم در برابر کمانش طراحی شده است و برای مقاوم‌سازی اعضای فشاری بحرانی در سازه‌های فضاکار به کار می‌رود. ابتدا یک نمونه ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی، پس از طراحی و ساخت، در آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی سهند مورد آزمایش قرار گرفت. سپس مدل اجزای محدود ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی ایجاد شده و نتایج با مدل آزمایشگاهی مقایسه گردید. برای بررسی تأثیر ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی در بهبود رفتار پایداری چلیک‌های دولایه ابتدا مدل اجزای محدود شبکه دولایه ایجاد شده و با نتایج آزمایشگاهی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. سپس شش تاشه مختلف چلیک دولایه با مقادیر مختلف نسبت طول به دهانه و نسبت ارتفاع به دهانه ایجاد شده و اعضای بحرانی آن‌ها مجهز به ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی گردید. اهم نتایج این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

- ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی به طرز مؤثری رفتار تند پس کمانشی عضو فشاری را اصلاح نموده و رفتار الاستو- پلاستیک کامل از خود نشان می‌دهد.
- در تمامی مدل‌ها، فارغ از مشخصات هندسی آن‌ها، اعمال ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی منجر به افزایش در ظرفیت باربری چلیک دولایه می‌شود.
- از آنجایی که سختی ابزار محدودگر نیروی آکاردئونی بیشتر از سختی عضو عادی فضاکار می‌باشد، اعمال این ابزار به سازه فضاکار منجر به افزایش سختی چلیک دولایه می‌گردد.

## EXTENDED ABSTRACT

# Stability Analysis of Double Layer Barrel Vaults Equipped with Accordion Force Limiting Device

Karim Abedi<sup>\*</sup>, Maryam Poursharifi, Mohammadreza Chenaghlou

Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz 51335-1996, Iran

Received: 08 March 2019; Accepted: 04 November 2019

---

### Keywords:

Accordion force limiting device, Double layer barrel vault, Stability analysis, FE analysis, Buckling.

---

## 1. Introduction

Space structures are the best solution for covering large areas with few or no intermediate supports. These structures have advantages such as light weight, delicate appearance and ease of erection. Despite these advantages, space structures suffer from progressive collapse due to buckling of compression members. In order to prevent the progressive collapse and improve the double layer space structure's response, several mechanisms have been developed including force limiting devices (FLDs). The available FLDs have never been practically applied to space structures due to serious drawbacks. To improve the previous FLD's performance, an innovative type of force limiting device is introduced in this study. This force limiting device which is entitled as Accordion Force Limiting Device (AFLD) is designed based on the idea of buckling restrained braces (BRB). To evaluate the efficiency of this new device, a whole steel accordion force limiting device is designed and constructed to be tested under uniaxial compressive loading. Numerical models are also developed to investigate the effect of applying AFLD on stability of double layer barrel vaults. A parametric study is carried out to study the effect of AFLD, considering Length to span ratio and rise to span ratio in double layer barrel vaults. Results indicated that applying AFLD to critical compression members improves the stability behavior noticeably.

## 2. Methodology

### 2.1. Experimental study

AFLD is consisted of core, encasing and Mero joint system. In order to assemble the AFLD, the core which was manufactured by CNC machining was placed inside encasing and Mero joints were bolted to both sides. Test program was consisted of one uniaxial compressive test. A Uniaxial testing machine (UTM) capable of exerting compressive force of 500KN was used to perform the test. The whole AFLD was connected to UTM by means of auxiliary gadget in top and bottom which provided hinge boundary conditions. Test was carried out under displacement control loading. During the test, the relative axial displacement of MERO ball joints (center to center) was monitored. The details of test setup is shown in Fig. 1.

### 2.2. FE modeling

ABAQUS finite element software was used for the numerical modeling and analysis. In this study, accordion force limiting device was modeled and verified according to the results of experimental test. Then, the double layer grid was modeled and results were compared to Parke's (1984) experimental program. In order to

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: k\_abedi@sut.ac.ir (Karim Abedi), m\_poursharifi@sut.ac.ir (Maryam Poursharifi), mrchenaghlou@sut.ac.ir (Mohammadreza Chenaghlou).

investigate the effect of applying AFLDs on space structures, six double layer barrel vaults models were developed.

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Results from experimental test

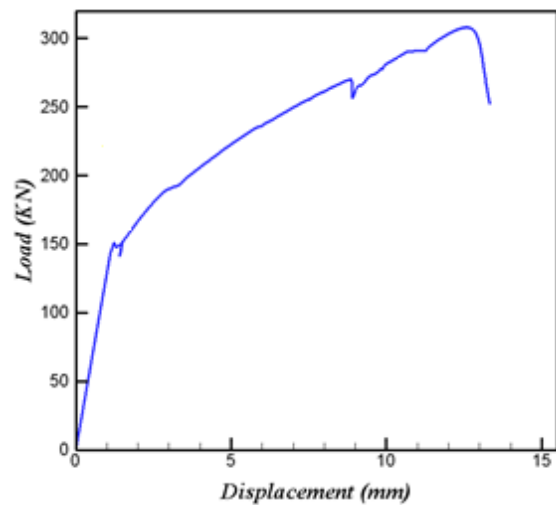
The experimental results clearly reveal that AFLD could successfully modify the brittle buckling state to elastic-perfect plastic behavior. Despite ordinary members in which the load carrying capacity has a sudden drop referred as brittle buckling, AFLD experienced no sudden drop in its load carrying capacity (as shown in Fig. 1-c) that means no brittle buckling has happened. This notion confirms that AFLD is the perfect device for improving the "brittle buckling" to "elastic-perfect plastic behavior in space structures.



(a)



(b)



(c)

**Fig. 1.** Test program: a) Universal Testing machine with AFLD, b) auxiliary grip gadget, c) force-displacement behavior of AFLD

#### 3.2. Effect of applying AFLD to double layer barrel vaults

It was found that applying AFLD to critical compression members (in all the models) increased the load carrying capacity and model's stiffness. This notion can be seen in Figure 2, which shows the effect of applying AFLD on one of the mentioned models. Results from parametric study reveal that decreasing length to span ratio and increasing the rise to span ratio, leads to an increase in load carrying capacity. As the length to span ratio decreases, the rate of increase in load carrying capacity accelerates. As the rise to span ratio increases, double layer barrel vault benefits more from applying AFLD.

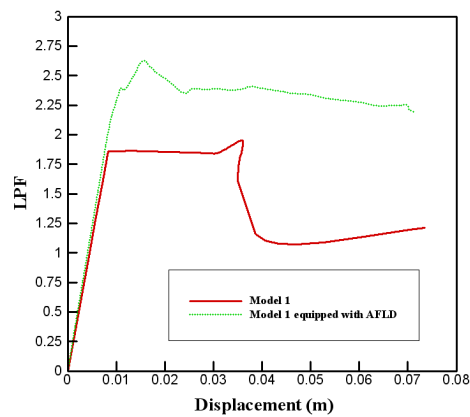


Fig. 2. Effect of applying AFLD on the stability behavior of double layer barrel vault

#### 4. Conclusions

In the present paper, an “all steel accordion force limiting device” is introduced. AFLD is an innovative force limiting device, designed based on the concept of buckling restrained braces. This device is applied to prevent buckling of compression members in space structures. The main objective of the present study was to see if by applying AFLD it is possible to control the buckling of space structures' members. To this end, an all steel AFLD specimens was designed and manufactured to be tested under uniaxial compressive loading. The experimental results obtained from uniaxial compression test reveal that it is indeed possible to alter the brittle post-buckling behavior of normal members to elastic-perfect plastic behavior. Parametric study was conducted to investigate AFLD's effect on double layer barrel vaults behavior considering length to span and rise to span ratio. According to the obtained results, applying AFLD leads to increase in load carrying capacity as well as model stiffness.

#### 5. References

- Hanaor A, Schmidt LC, “Space truss studies with force limiting devices”, *Journal of Structural Division, ASCE*, 1980, 106 (ST11), 2313-2329.
- Parke GAR, “The behavior of space trusses incorporating novel compression members”, Ph.D. Thesis, University of Surrey, May 1984.
- Hanaor A, Marsh C, Park GAR, “Modification of behavior of double-layer Grids: overview”, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1989, 115 (5).
- El-sheikh A, “Effect of force limiting devices on behavior of space trusses”, *Journal of Engineering Structures*, 1999, 21, 34-44.