

Experimental and numerical study of a pipe in pipe force limiting device (PPFLD)

Jafar Ghalejoughi¹, Mohammad Reza Sheidaii^{*2}, Saeed Tariverdilo³

1- Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran

2- Science, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran.

3- Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

ABSTRACT

The buckling behavior of compression member has a decisive role in the collapse behavior of a structure. The buckling and sudden capacity loss of the compression member can be prevented using a proposed PPFLD and the brittle post-buckling behavior of the compression member can be converted into ductility behavior. The PPFLD consists of two pipes, one of which is placed into the other pipe and the axial force applied to the inner pipe. Thus, the outer pipe operates as a casing for the inner pipe. The present study investigated a number of experimental specimens. Next, numerical analysis of these specimens has been done using finite element software. Further, the behavior of the PPFLD have been investigated under important parameters such as the gap between two pipes, the inner pipe slenderness coefficient, and the ratio of outer pipe length to inner pipe length, by studying more numerical specimens. The results indicate this PPFLD is an effective, simple and economical method to prevent the buckling of compression member and can lead to a favorable increase in the bearing and deformability capacity of the compression member. The bearing capacity of this PPFLD is inversely related to the size of the gap, and is directly related to the ratio of the outer pipe length to inner pipe length. The bearing capacity of the member will increase significantly, if the gap size is less than 43% of the inner pipe's gyration radius, and the the ratio of the outer pipe length to inner pipe length is greater than 55%. This is more sensible especially when the outer pipe covers the entire length of the inner pipe. The proposed PPFLD has the potential of eliminating the buckling of compression member and providing adequate and sufficient restraints to make yielding at compression member with different slenderness.

ARTICLE INFO

Receive Date: 19 October 2019

Revise Date: 04 May 2020

Accept Date: 06 May 2020

Keywords:

Force limiting device (FLD)

Pipe in pipe (PP)

Non-linear analysis

Finite element

Post-buckling behavior

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.205729.1979>

*Corresponding author: Mohammad Reza Sheidaii

Email address: m.sheidaii@urmia.ac.ir

مطالعه آزمایشگاهی و عددی ابزار محدود کننده نیرو - سیستم لوله در لوله

جعفر قلعه جوقی^۱، محمدرضا شیدائی^{۲*}، سعید تارپوردیلو^۴

۱- دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی عمران-سازه، دانشگاه آزاد اسلامی ارومیه، ارومیه، ایران،

۲-استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳-استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

۴-استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

رفتار کمانشی عضو فشاری نقش تعیین کننده‌ای در رفتار خرابی سازه دارد. با استفاده از ابزار پیشنهادی محدود کننده نیرو- سیستم لوله در لوله، می‌توان از کمانش و افت ظرفیت ناگهانی عضو فشاری جلوگیری و رفتار ترد پس کمانشی آن را به رفتار شکل پذیر تبدیل نمود. این سیستم شامل دو لوله است که یکی از لوله‌ها در داخل دیگری قرار می‌گیرد. بطوریکه لوله داخلی، نیروی محوری را تحمل و لوله خارجی به عنوان غلاف عمل می‌نماید. در تحقیق حاضر، ابتدا به بررسی تعدادی نمونه آزمایشگاهی پرداخته شده و سپس تحلیل عددی آنها توسط نرم‌افزار اجزای محدود صورت گرفته است. در ادامه نمونه‌های عددی بیشتری مورد مطالعه قرار گرفت تا رفتار ابزار محدود کننده نیرو- سیستم لوله در لوله، تحت پارامترهای مهمی نظیر گپ بین دو لوله، ضریب لاغری لوله داخلی و نسبت طول لوله خارجی به طول لوله داخلی تعیین گردد. نتایج نشان می‌دهد که این سیستم روشی موثر، ساده و اقتصادی برای جلوگیری از کمانش عضو فشاری بوده و می‌تواند منجر به افزایش مطلوب ظرفیت باربری و شکل پذیری عضو فشاری شود. ظرفیت باربری این سیستم با اندازه گپ رابطه معکوس، و با نسبت طول لوله خارجی به طول لوله داخلی رابطه مستقیم دارد؛ در صورتی که اندازه گپ کمتر از ۴۳ درصد شعاع ژیراسیون لوله داخلی و نسبت طول لوله خارجی به طول لوله داخلی بیش از ۵۵ درصد باشد، ظرفیت باربری عضو با افزایش چشمگیری مواجه می‌گردد. این موضوع بویژه زمانی که لوله بیرونی سرتاسر طول لوله داخلی را دربر می‌گیرد، دارای نمود بیشتری است. سیستم پیشنهادی لوله در لوله کارایی لازم در حذف کمانش عضو فشاری و تامین قیود مناسب و کافی برای تسلیم عضو فشاری با لاغری مختلف را دارد.

کلمات کلیدی: ابزار محدود کننده نیرو، سیستم لوله در لوله، تحلیل غیرخطی، اجزای محدود، رفتار پس کمانش

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۳۹۸/۰۷/۲۷	۱۳۹۹/۰۲/۱۵	۱۳۹۹/۰۲/۱۷	۱۳۹۹/۰۲/۱۷	۱۴۰۰/۰۶/۳۱	10.22065/jsce.2020.205729.1979
*نویسنده مسئول:		محمدرضا شیدائی			
پست الکترونیکی:		m.sheidai@urmia.ac.ir			

۱- مقدمه

سازه‌های متشکل از اعضای کششی و فشاری، در کنار مزایای فراوان همچون سختی بالا و وزن کم، معمولاً به دلیل کماتش ناگهانی اعضای فشاری از مسئله خرابی پیشرونده رنج می‌برند و آسیب‌های فراوانی را متحمل می‌شوند. در این نوع از سازه‌ها، کماتش عضو فشاری نقش تعیین کننده‌ای در رفتار خرابی سازه دارد. رفتار خرابی عضو فشاری تابعی از سه پارامتر مهم شامل تنش تسلیم مصالح، نسبت لاغری و میزان ناکاملی عضو بوده و این رفتار از حالت خیلی ترد تا حالت خیلی نرم تغییر می‌نماید. خرابی ترد اعضای فشاری می‌تواند خرابی‌های گسترده‌ای را به صورت پیشرونده در سازه به دنبال داشته باشد و لذا لازم است رفتار خرابی عضو فشاری تحت کنترل قرار گیرد. برای استفاده مطلوب از ظرفیت اعضای فشاری و به تبع آن بهبود رفتار خرابی سازه‌ها، می‌توان از روش‌هایی نظیر ابزار محدودکننده نیرو و عضو کماتش‌ناپذیر استفاده نمود. کاربرد اعضای کماتش‌تاب در قاب‌های مهاربندی، موجب بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب می‌شود [۱]. این مهاربندها، با ایجاد سختی جانبی، می‌توانند با نیروی جانبی زلزله بدون کماتش مقابله نمایند و لازم است مکانیزم کماتش عضو فشاری در تحلیل مدنظر قرار گیرد [۲]. در مهاربندهای با انتهای مفصلی و ثابت، امکان توسعه مکانیسم کماتشی هسته فولادی از مدهای پایین به مدهای بالاتر وجود دارد [۳ و ۴]. در این قاب‌ها بدلیل حذف کماتش عضو فشاری، ظرفیت باربری عضو در فشار تا سطح تسلیم افزایش یافته و رفتار بار-تغییر شکل آن در فشار و کشش تقریباً یکسان می‌شود. در مهاربند کماتش‌تاب، وقتی که هسته مرکزی درون یک غلاف فلزی پر شده با بتن و ملات قرار می‌گیرد، ضمن جلوگیری از کماتش موضعی سیستم، امکان تسلیم شدن آن در حالت بارگذاری فشاری فراهم می‌گردد. بتن و محفظه لوله‌ای شکل فولادی، ضمن تامین سختی و مقاومت لازم برای جلوگیری از کماتش کلی مهاربند، امکان تحمل بار توسط هسته مرکزی را تا حد تسلیم بدون آنکه کاهش در سختی و رفتار مهاربند طی چرخه‌های بارگذاری صورت گیرد، فراهم می‌آورد. از این‌رو این سیستم قابلیت جذب انرژی بسیار بیشتری را نسبت به سیستم‌های متداول مهاربند همگرا دارد [۵]. طبق مطالعات انجام شده، محصور شدن عضو اصلی، می‌تواند توسط قوطی پر شده از بتن [۶]، پانل بتنی یا بتن مسلح [۷ و ۸] و غلاف تمام فولادی [۹ و ۱۰] باشد. با توجه به اینکه هسته مهاربند کماتش‌ناپذیر، هم در کشش و هم در فشار تسلیم می‌گردد، می‌تواند انرژی را جذب و شکل‌پذیری بالایی از خود نشان دهد، که این مسئله حاکی از مناسب بودن این سیستم برای تحمل بار زلزله است [۱۱]. ستون مرکب یک المان سازه‌ای است که هم برای تحمل بار محوری و هم برای تحمل بار محوری توام با لنگر خمشی بکار می‌رود. متداولترین آن‌ها، لوله‌های پر شده از بتن و یا پروفیل‌های فولادی که به صورت جزئی یا کامل دارای غلاف فولادی می‌باشند، که در حالت کاملاً محصور، مقاومت فشاری، پایداری و سختی لازم را فراهم می‌نمایند [۱۲].

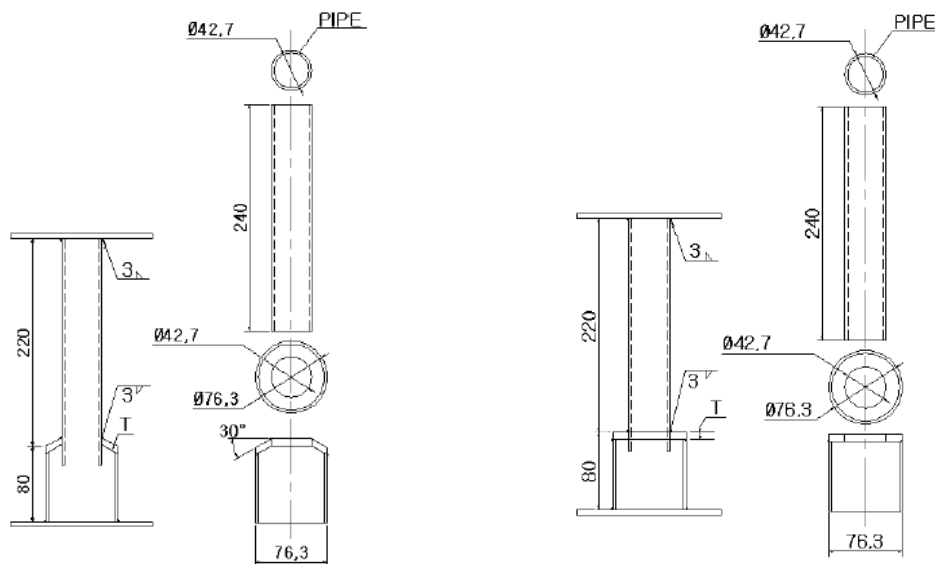
برای اصلاح رفتار خرابی اعضای فشاری، همچنین می‌توان از ابزار محدودکننده نیرو^۱ (FLD) استفاده کرد. ابزار محدودکننده نیرو برای اولین بار در سال ۱۹۷۹ توسط Hanaor و Schmidt مطرح گردید. این ابزار در اعضای فشاری مورد استفاده قرار می‌گیرد و بنحوی طراحی می‌گردد که بار تسلیم آن از بار کماتش عضو کوچکتر باشد و بدین ترتیب با تسلیم زود هنگام ابزار مزبور از بروز پدیده کماتش در عضو فشاری جلوگیری به عمل می‌آید. در سال ۱۹۸۰، Hanaor و Schmidt نشان دادند که استفاده از سیستم محدودکننده نیرو، می‌تواند ویژگی ترد و شکنندگی را در اعضای فشاری با ویژگی الاستوپلاستیک جایگزین نماید [۱۳].

EL-Sheikh در سال ۱۹۹۹ به منظور بررسی تاثیر استفاده از سیستم محدودکننده نیرو در سیستم سازه‌ای خرپاهای فضایی، مطالعه پارامتری شامل انواع پیکربندی، نسبت ابعاد و شرایط مرزی را انجام داد. ایشان در این مطالعه نشان داد که بکارگیری این سیستم - در اعضای بحرانی سازه، باعث افزایش ظرفیت باربری و بهبود شکل‌پذیری رفتار سازه گردیده و احتمال خرابی پیشرونده را کاهش می‌دهد. همچنین در اثر استفاده از تعداد بیشتری از این سیستم‌ها، ظرفیت باربری خرپا افزایش بیشتری می‌یابد [۱۴].

Kim, Cheol Hwan و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۱۵] با هدف توسعه ابزار محدودکننده نیرو جهت وقوع تسلیم قبل از کماتش ارتجاعی عضو فولادی، سیستمی را پیشنهاد نمودند که متشکل از دو لوله با قطر نابرابر، به ترتیب ۴۲٫۷ و ۷۶٫۳ میلیمتر بود. این دو لوله توسط ورقه‌ای به ضخامت‌های مختلف ۲، ۴، ۵ و ۸ میلیمتر در دو حالت تخت و با شیب ۳۰ درجه به یکدیگر اتصال داشتند (شکل ۱). آن‌ها

^۱ - Force Limited device (FLD)

ضمن بررسی تاثیر پارامترهای ضخامت و شیب ورق اتصال در کارایی و عملکرد FLD پیشنهادی، به این نتیجه رسیدند که با بکارگیری این سیستم بویژه ورق اتصال شیب دار، از پدیده کمانش اعضای فشاری بویژه اعضای لاغر که منجر به ناپایداری سازه می شود، جلوگیری شده و ظرفیت جذب انرژی سازه افزایش می یابد.



الف- ورق خارج از سطح بدون شیب

ب- ورق خارج از سطح با شیب

شکل ۱: نمای کلی از ابزار محدودگر نیروی با ورق خارج از سطح [۱۵].

Oh, Young Suk و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۱۶] ابزار محدودکننده نیرو با شکافهای مختلف به عرض b و طول L را پیشنهاد نمودند (شکل ۲). عرض شکاف در نمونه های FLD چهار و هشت شکافی به ترتیب ۴ و ۲ میلی متر و طول شکافها در هر یک از دو مدل به ترتیب ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی متر در نظر گرفته شد. آنها ضمن مطالعه رفتار پس کمانش نمونه ها و بررسی تاثیر پارامترهای تعداد و طول شکاف در کارایی و عملکرد FLD پیشنهادی، به این نتیجه رسیدند که بکارگیری این سیستم، می تواند پایداری کمانش مهارندهای فشاری را تضمین نماید.

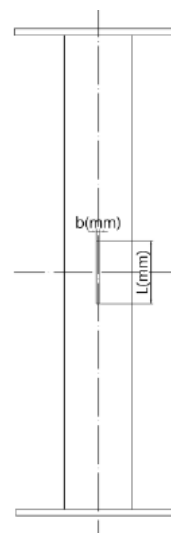


S4 Type



S8 Type

الف - مقطع طولی

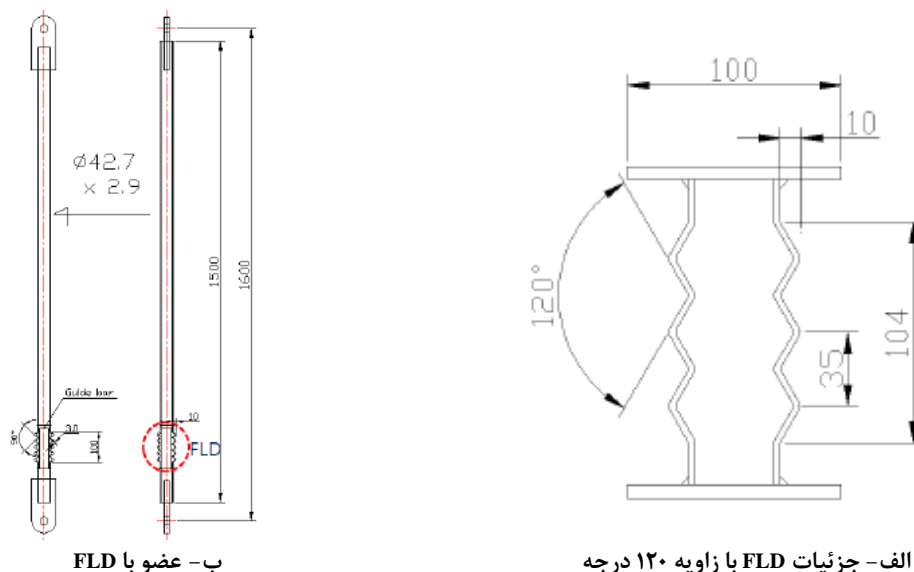


ب- سطح مقطع ۴ و ۸ شکافی

شکل ۲: نمای کلی از ابزار محدودگر نیروی با شکاف [۱۶].

Chae, Won Tak و Kim, Cheol Hwan در سال ۲۰۱۴ [۱۷] یک نوع ابزار محدودکننده نیرو از ورق قابل تاشو را پیشنهاد نمودند (شکل ۳).

نمونه‌های FLD در پنج شکل مختلف با زاویه‌های ۴۵ تا ۱۵۰ درجه به ترتیب ۴۵، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه بود. در ابتدا و انتهای FLD، یک ورق به قطر ۱۰۰ میلیمتر جهت اتصال به عضو با قطر خارجی ۴۲٫۷ و طول ۱۵۰۰ میلیمتر در نظر گرفته شد. آن‌ها با مطالعه روی این نوع ابزار محدودکننده نیرو و بررسی تاثیر پارامتر زاویه خم شدن ورق، به این نتیجه رسیدند که استفاده از آن در مهاربندهای فشاری، از کمانش ارتجاعی اعضای لاغر جلوگیری کرده و باعث تسلیم عضو لاغر قبل از کمانش الاستیک می‌شود. بررسی‌ها نشان داد، استفاده از این نوع FLD در سازه باعث افزایش جذب انرژی و پایداری سازه می‌شود.

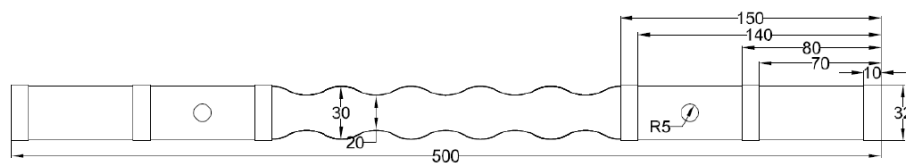


ب- عضو با FLD

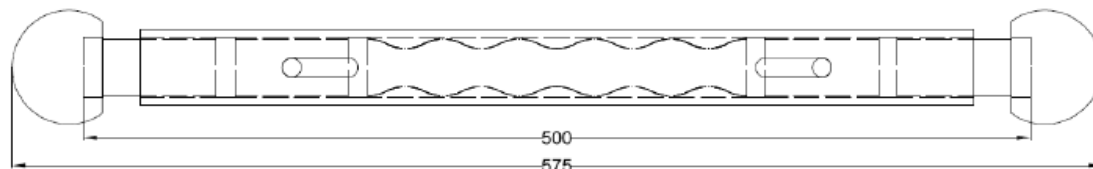
الف- جزئیات FLD با زاویه ۱۲۰ درجه

شکل ۳: نمای کلی از ابزار محدودگر نیرو با ورق قابل تاشو [۱۷].

همچنین آن‌ها با توسعه ابزار محدود کننده نیرو، نشان دادند که رفتار نوع جدیدی از FLD با سطح مقطع کاهش یافته متفاوت از مطالعات قبلی بوده و دارای کارایی بیشتری می‌باشد [۱۸]. در سال ۲۰۱۷ پورشرفی و همکاران [۱۹] ابزار محدودکننده نیروی آکاردیونی را پیشنهاد نمودند. این ابزار از سه قسمت اصلی شامل هسته مرکزی، غلاف فولادی و اتصال انتهایی از نوع Mero (یکی از متداولترین انواع اتصال در سازه‌های فضاکار) تشکیل یافته است. هسته مرکزی به صورت آکاردیونی طراحی شده و جزئیات آن در شکل ۴-الف آمده است. در این ابزار از غلاف فولادی به قطر خارجی ۳٫۵ اینچ و ضخامت ۵ میلیمتر استفاده شده و فاصله بین غلاف و هسته مرکزی ۱٫۵ میلیمتر در نظر گرفته شد (شکل ۴). آن‌ها با بکارگیری این ابزار محدودگر نیروی آکاردیونی در چلیک‌های دولایه، نشان دادند که این ابزار تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار خرابی چلیک‌ها دارد که پس از افزودن این ابزار، ظرفیت باربری سازه فضاکار چلیکی دو تا سه برابر افزایش می‌یابد. همچنین الگوی خرابی از حالت خرابی ناگهانی با فرو جهش عضوی خارج می‌شود.



الف - دتایل هسته مرکزی (واحد: میلیمتر)



ب - جزئیات کلی (واحد: میلیمتر)

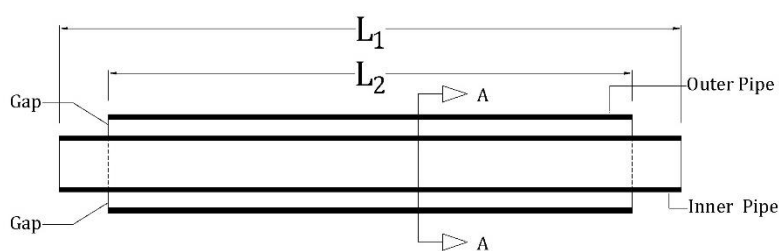
شکل ۴: ابزار محدود کننده نیروی آگار دیونی [۱۹].

عمده تحقیقات صورت گرفته در زمینه ابزار محدود کننده نیرو و سایر سیستم‌های بهبود دهنده رفتار کمانش اعضا، حول محور رفتار و معرفی نوع جدیدی از این ابزار می‌باشد. در مطالعه حاضر نیز ابزار جدید محدود کننده نیرو تحت عنوان سیستم لوله در لوله معرفی شده و در ادامه به صورت آزمایشگاهی و عددی به بررسی رفتار و عملکرد سیستم پیشنهادی تحت تاثیر پارامترهای مختلف هندسی طراحی عضو پرداخته شده است.

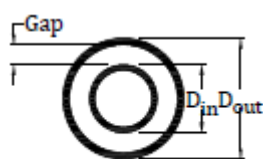
۲- معرفی و مشخصات ابزار محدود کننده نیرو - سیستم لوله در لوله

با استفاده از ابزار محدود کننده نیرو - سیستم لوله در لوله، با اعمال واکنشی شکل پذیر به عضو فشاری از کمانش آن جلوگیری به عمل می‌آید و می‌توان از حداکثر ظرفیت باربری عضو استفاده کرد. شمای کلی از ابزار محدود کننده نیرو - سیستم لوله در لوله و جزئیات آن در شکل ۵ نشان داده شده است. ابزار محدود کننده نیرو - سیستم لوله در لوله، شامل یک عضو اصلی داخلی تحت نیروی محوری وارده و یک لوله خارجی است که به عنوان غلافی برای عضو داخلی عمل می‌نماید. مقاومت خمشی لوله خارجی، مقید کننده حرکت جانبی و به تبع آن کمانش لوله داخلی تحت اثر نیروی محوری فشاری می‌باشد، در حقیقت لوله خارجی به صورت یک قید ممتد بیرونی برای عضو فشاری داخلی عمل می‌کند.

در این سیستم به واسطه ایجاد قیود جانبی توسط لوله خارجی، شکل مد کمانش عضو فشاری از شکل مد اول به شکل مدهای بالاتر ارتقا می‌یابد. بنابراین به واسطه افزایش ظرفیت کمانشی، نیروی قابل تحمل توسط عضو فشاری بیش از نیرویی خواهد بود که عضو در حالت بدون لوله خارجی تحمل می‌نمود و تا نیروی تسلیم عضو افزایش می‌یابد. بر اساس اصول حاکم بر مهاربندهای کمانش ناپذیر، در این سیستم نیز، عضو اصلی به گونه‌ای طراحی می‌شود که تحت نیروی محوری وارده تسلیم گردد و لوله خارجی فقط به عنوان قید جانبی عمل نموده و وظیفه تحمل نیروی محوری وارده را نداشته باشد. مبانی اصلی عملکرد این سیستم، جلوگیری از وقوع کمانش کلی عضو و کنترل حرکت جانبی آن به منظور فراهم آوردن امکان وقوع پدیده تسلیم آن است. برای این منظور لوله خارجی به صورتی طراحی می‌شود که بار کمانش اولر لوله خارجی بیشتر از بار تسلیم لوله داخلی باشد تا جلوی کمانش کلی ابزار محدود کننده نیروی پیشنهادی را بگیرد [۲۰].



الف - مقطع طولی



Section A-A

ب- مقطع عرضی

شکل ۵: جزئیات سیستم لوله در لوله.

در این سیستم وظیفه تحمل نیروی فشاری بر عهده عضو اصلی (لوله داخلی) است و وظیفه تامین قید حرکت جانبی به منظور مقابله با کمانش و به تبع آن تامین شکل پذیری لازم به عهده لوله خارجی می باشد. این در حالی است که در اعضای فشاری معمولی و متداول، هر دو وظایف بر عهده خود عضو فشاری می باشد. در رابطه با مزایای این سیستم، می توان به موارد زیر اشاره کرد:

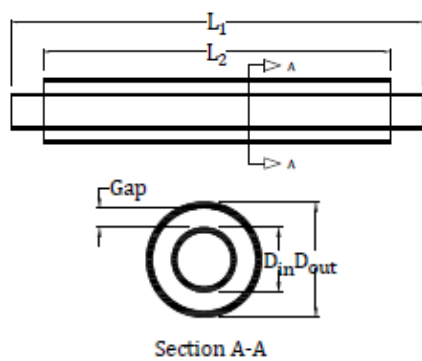
- ۱- حمل و نقل و نصب و اجرای آن به آسانی امکان پذیر است.
- ۲- نوع سادگی طرح، می تواند مقبولیت عمومی را به همراه داشته باشد و نیازی به استفاده از مواد و مصالح گران قیمت نیست. این امر می تواند حمایت و پشتیبانی سازندگان را فراهم آورد.
- ۳- دارای تکنولوژی پیچیده در تولید نبوده و امکان تولید قطعات به سادگی در محل را فراهم می نماید.
- ۴- امکان بازبینی عضو اصلی فشاری پس از وقوع خرابی به راحتی فراهم می گردد.
- ۵- سیستم معرفی شده با توجه به ویژگی های آن، اقتصادی بودن طرح را به دنبال دارد.
- ۶- سیستم مزبور می تواند به راحتی برای بهبود رفتار خرابی قاب های ساختمانی مهاربندی شده و سازه های خرپائی، بهسازی و مقاوم سازی لرزه ای سازه ها، جلوگیری از وقوع خرابی پیشرونده در سازه های فضاکار، و نیز مهار نمودن کمانش آرماتورهای طولی فشاری در سازه های بتن آرمه بکار برده شود.

۳- بررسی آزمایشگاهی

به منظور مطالعه تجربی عملکرد سیستم پیشنهادی ابزار محدودکننده نیرو - سیستم لوله در لوله تحت تاثیر پارامترهای مختلف موثر از جمله پارامتر فاصله بین لوله خارجی و داخلی و پارامتر طول لوله خارجی، آزمایشات مختلفی بر روی نمونه ها انجام گرفته است. پنج مدل مختلف مطابق جدول ۱ شامل سیستم معمولی لوله داخلی بدون لوله خارجی (Model 1)، سیستم لوله در لوله با فاصله کم بین دو لوله (Model 2)، سیستم لوله در لوله با فاصله زیاد بین دو لوله (Model 3)، لوله خارجی با طول کم (Model 4) و لوله خارجی با طول زیاد

(Model 5)، تحت آزمایش قرار گرفته و با هم مقایسه شده‌اند. در این مدل‌ها، لوله داخلی یا عضو اصلی از نوع لوله فولادی به طول ۵۵ سانتیمتر و با ضریب لاغری متعارف در حدود ۸۰ بوده و اتصالات در دو انتهای عضو اصلی به صورت مفصلی می‌باشد. تنش تسلیم مصالح برابر با ۳۵۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون و وزن مخصوص فولاد مصرفی به ترتیب برابر با ۰,۳ و ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. جزئیات مشخصات هندسی نمونه‌های مزبور شامل طول و مشخصات عضو اصلی (لوله داخلی) و لوله خارجی، اندازه گپ بین این دو لوله در جدول ۱ آورده شده است:

جدول ۱: مشخصات هندسی مدل‌ها.

نام مدل	نام پروفیل لوله		قطر خارجی D(mm)	ضخامت T(mm)	طول		فاصله دو لوله G(mm)	سیستم لوله در لوله
	داخلی	خارجی			L_1 (mm)	L_2 (mm)		
Model 1	D22.0T3.0	-	22	3	550	-	-	
Model 2	D22.0T3.0	-	22	3	550	-	2.5	
	-	D34.0T3.5	34	3.5	-	530		
Model 3	D22.0T3.0	-	22	3	550	-	7.5	
	-	D43.0T3.0	43	3	-	530		
Model 4	D22.0T3.0	-	22	3	550	-	2.5	
	-	D34.0T3.5	34	3.5	-	183.3		
Model 5	D22.0T3.0	-	22	3	550	-	2.5	
	-	D34.0T3.5	34	3.5	-	366.6		

آزمایشات با استفاده از دستگاه تست فشار Autograph Universal Testing Machine مدل AG – 25TB ساخت کارخانه Shimadzu ژاپن با ظرفیت ۲۵ تن انجام گرفته است (شکل ۶). این دستگاه دارای قابلیت آزمایشات کشش و فشار روی انواع نمونه‌های تخت و گرد و انواع لوله‌ها می‌باشد. دستگاه دارای دو فک ثابت و متحرک می‌باشد که با قرار دادن نمونه بین آن‌ها، نیرو توسط فک متحرک به نمونه اعمال و باعث تغییرشکل نمونه می‌شود. مقادیر بار و تغییرشکل محوری به کمک کامپیوتر متصل به دستگاه آزمایش در لحظات مختلف ثبت و منحنی بار - تغییرشکل محوری رسم می‌گردد.

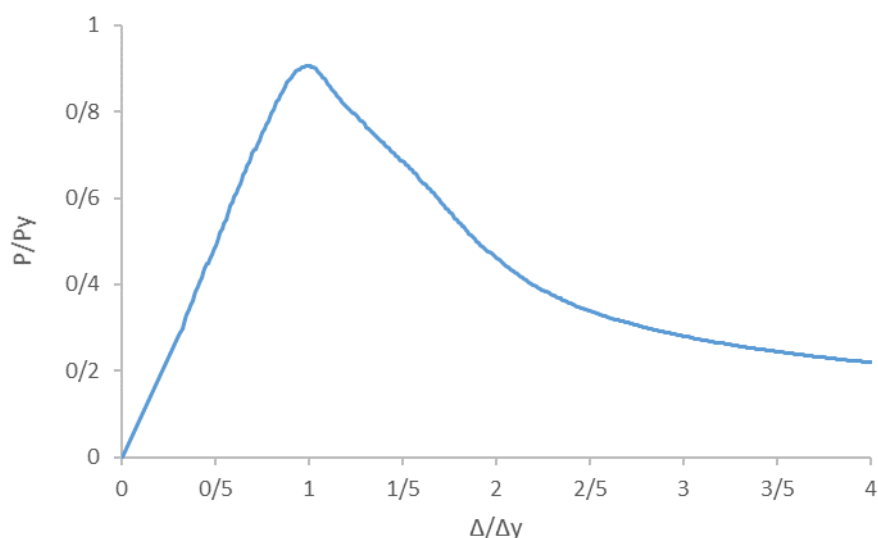


شکل ۶: دستگاه آزمایش.

در ادامه نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌های مختلف آزمایشگاهی با ذکر جزئیات آورده شده است.

۱-۳- عضو فشاری بدون لوله خارجی (نمونه ۱)

برای اینکه بتوان تاثیر سیستم پیشنهادی لوله در لوله در بهبود رفتار عضو فشاری را مورد ارزیابی قرار داد، در ابتدا لوله داخلی بدون لوله خارجی (Model 1)، تحت آزمایش قرار گرفته است. منحنی تغییرات بارمحوری فشاری- تغییر مکان محوری، منحنی Δ/Δ_y - P/P_y مربوطه در شکل ۷ نشان داده شده است. P_y و Δ_y به ترتیب نیرو و تغییر شکل محوری حالت تسلیم شدگی لوله داخلی بوده که برای عضو مزبور به ترتیب برابر با ۶۲۶۵ کیلوگرم نیرو و ۱,۷ میلی‌متر می‌باشد، شایان ذکر است که محاسبه نیروی تسلیم عضو بر اساس تنش تسلیم حاصل از آزمایش کشش عضو صورت گرفته است. شمای کلی از نمونه ۱، قبل و بعد از انجام آزمایش در شکل ۸ آورده شده است، نمونه مزبور تحت بار فشاری ۵۶۸۶,۸۷ کیلوگرم نیرو و تغییر طول محوری ۱,۶ میلی‌متر دچار کمانش خمشی شده است.



شکل ۷: منحنی بار - تغییر شکل محوری عضو فشاری بدون لوله خارجی (نمونه ۱).



ب: نمونه ۱ بعد از انجام آزمایش



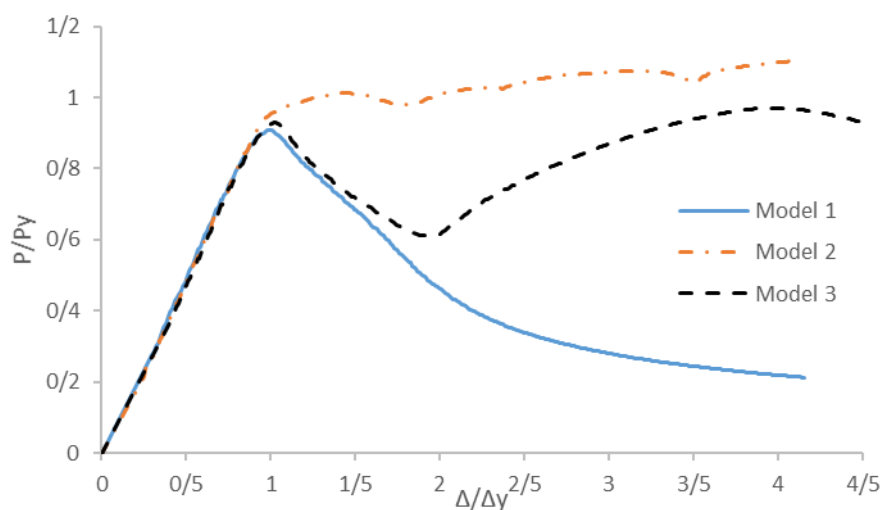
الف: نمونه ۱ قبل از انجام آزمایش

شکل ۸: سیستم لوله در لوله - نمونه ۱.

۲-۳ - عضو فشاری با لوله خارجی با گپ‌های متفاوت (نمونه‌های ۲ و ۳)

به منظور بررسی تاثیر میزان اندازه گپ بین لوله داخلی و لوله خارجی بر رفتار ابزار محدود کننده نیرو- سیستم لوله در لوله، دو نمونه آزمایشگاهی ۲ و ۳ آماده و سپس با فراهم نمودن شرایط لازم در دستگاه تست فشار به نحوی که فقط عضو اصلی تحت تاثیر نیروی محوری فشاری قرار گیرد، تحت آزمایش فشار محوری قرار گرفتند. مطابق جدول ۱، نمونه ۲ سیستم لوله در لوله با لوله خارجی به قطر خارجی ۳۴ میلیمتر و ضخامت ۳،۵ میلیمتر با گپ جزئی ۲،۵ میلیمتر بوده و نمونه ۳ سیستم لوله در لوله با لوله خارجی به قطر خارجی ۴۳ میلیمتر و ضخامت ۳ میلیمتر با گپ زیاد ۷،۵ میلیمتر تدارک دیده شده است. منحنی تغییرات بارمحوری فشاری- تغییر مکان محوری، منحنی $\Delta/\Delta_y - P/P_y$ مربوط به سه نمونه ۱، ۲ و ۳ در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، Model 2 نسبت به سایر

مدل‌ها رفتار بهتری از خود نشان داده است. در واقع زمانی که از لوله خارجی با گپ کم استفاده می‌شود، نمودار $\Delta/\Delta_y - P/P_y$ مربوط حاکی از این است که عضو فشاری قادر به تحمل نیروی بیشتری بوده و ظرفیت باربری آن افزایش می‌یابد. تصاویری از نمونه‌های ۲ و ۳، قبل و بعد از انجام آزمایش به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است.



شکل ۹: منحنی بار - تغییر شکل محوری سیستم لوله در لوله در مدل آزمایشگاهی.



ب- نمونه ۲ بعد از انجام آزمایش



الف- نمونه ۲ قبل از انجام آزمایش

شکل ۱۰: سیستم لوله در لوله - نمونه ۲.



ب- نمونه ۳ بعد از انجام آزمایش

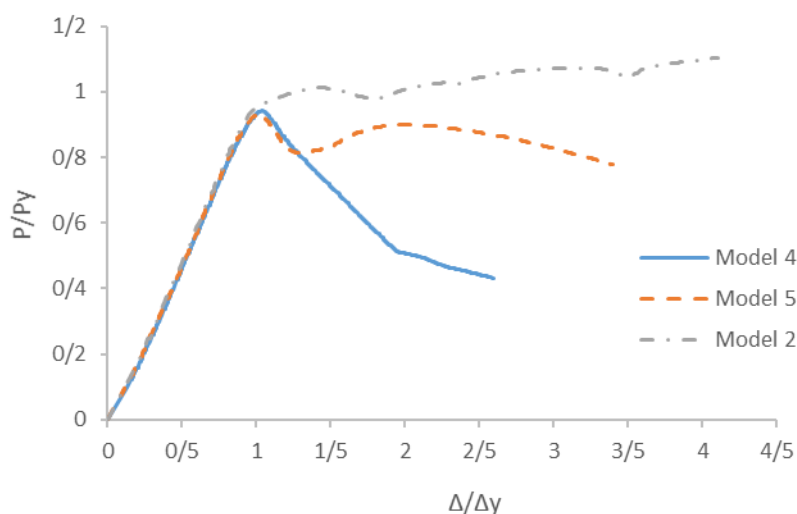


الف- نمونه ۳ قبل از انجام آزمایش

شکل ۱۱: سیستم لوله در لوله - نمونه ۳.

۳-۳- عضو فشاری با لوله خارجی با طول‌های متفاوت (نمونه‌های ۴ و ۵)

علاوه بر دو نمونه قبلی که در آنها طول مهارکننده خارجی برابر با طول عضو فشاری لوله داخلی بود، به منظور بررسی تاثیر میزان طول لوله مقیدکننده خارجی بر رفتار ابزار محدودکننده نیرو-سیستم لوله در لوله، نمونه‌های آزمایشگاهی ۴ و ۵ با طول لوله‌های خارجی به ترتیب برابر با یک سوم و دو سوم طول لوله داخلی نیز مورد آزمایش قرار گرفتند. مطابق جدول ۱ اندازه گپ در دو نمونه اخیر مقدار جزئی ۵،۲ میلیمتر مشابه با نمونه ۲ انتخاب شد. منحنی تغییرات بار محوری فشاری- تغییر مکان محوری، منحنی $\Delta/\Delta_y - P/p_y$ مربوط به دو نمونه مزبور به همراه منحنی مربوط به نمونه ۲ (که در آن طول لوله خارجی فقط به مقدار جزئی ۲۰ میلیمتر کوتاه‌تر از طول لوله داخل است) در شکل ۱۲ نشان داده شده است، ملاحظه می‌شود که با کاهش طول لوله مقیدکننده خارجی به دو سوم طول اولیه در نمونه ۵، کاهش در ظرفیت بار پس‌کمانش و شکل‌پذیری عضو اتفاق می‌افتد، این در حالی است که با کاهش طول لوله مقیدکننده خارجی به یک سوم طول اولیه در نمونه ۴ عملاً این سیستم فاقد کارایی بوده و رفتار آن کمابیش مشابه نمونه ۱ (یعنی نمونه بدون لوله خارجی) شده است. در واقع زمانیکه از لوله خارجی با طول بیشتر برای مهار جانبی عضو فشاری استفاده می‌شود، نمودار $\Delta/\Delta_y - P/p_y$ مربوط حاکی از این است که عضو فشاری قادر به تحمل نیروی بیشتری بوده و ظرفیت باربری آن افزایش می‌یابد. تصاویری از نمونه‌های ۴ و ۵ بعد از آزمایش به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ آورده شده است.



شکل ۱۲: منحنی بار - تغییر شکل محوری سیستم لوله در لوله و لوله خارجی با طول متفاوت.



شکل ۱۴: سیستم لوله در لوله - نمونه ۵ بعد از انجام آزمایش.



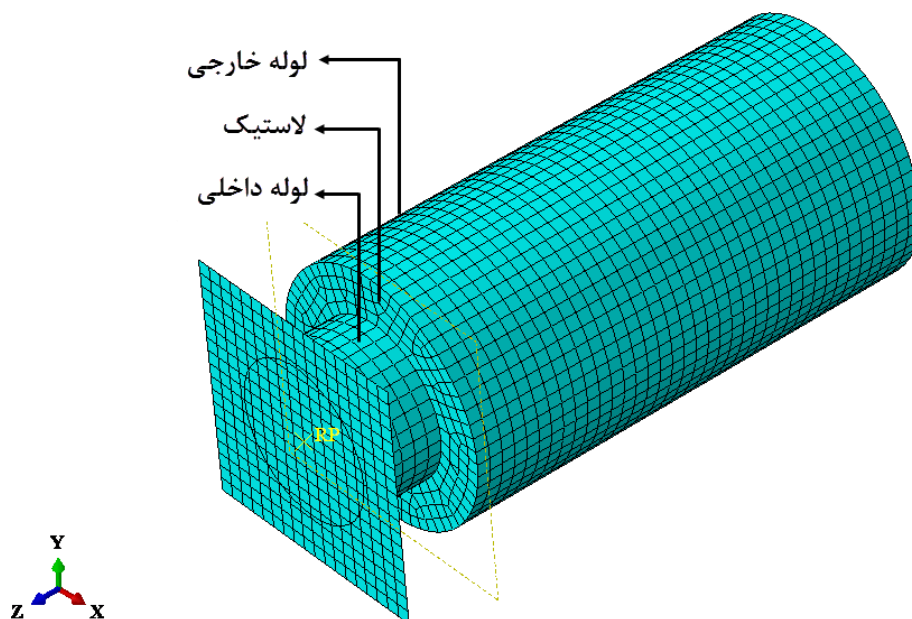
شکل ۱۳: سیستم لوله در لوله - نمونه ۴ بعد از انجام آزمایش.

ارزیابی و مقایسه نتایج حاصل از انجام آزمایشات پنج مدل مورد پژوهش، بیانگر این است که عملکرد مطلوب ضد کمانش ابزار محدود کننده نیرو- سیستم لوله در لوله با پارامتر طول لوله خارجی رابطه مستقیم و با پارامتر فاصله بین لوله داخلی و لوله خارجی رابطه معکوس دارد. در ادامه با بسط مطالعات تجربی بر روی نمونه‌های با تعداد محدود فوق‌الذکر به مطالعات عددی بر روی نمونه‌های متنوع، تلاش شده و مطالعات دقیق پارامتریک و تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای مختلف تاثیرگذار در رفتار سیستم لوله در لوله انجام می‌گیرد.

۴- بررسی عددی

نمونه‌های تحلیلی با جزئیات و مشخصات هندسی ارائه شده در جداول ۱ تا ۴ در نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus مدل‌سازی شده‌اند. مدل‌ها شامل لوله داخلی و لوله خارجی بوده و در دو انتها به صورت مفصلی مقید شده‌اند. در مدل‌سازی، مقدار ناکاملی هندسی به صورت نسبی از مد اول کمانش لوله داخلی در نظر گرفته شده است، به نحوی که حداکثر انحراف جانبی اولیه در وسط دهانه عضو برابر با

۰,۰۰۱ طول عضو باشد. در تحلیل رفتار مدل با استفاده از روش اجزاء محدود، فقط لوله داخلی تحت بار محوری فشاری بدون خروج از مرکزیت قرار گرفته و رابطه تنش- کرنش مصالح به صورت الاستو-پلاستیک کامل در نظر گرفته شده است. تنش تسلیم مصالح و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر با ۳۵۰ مگاپاسکال و ۲۰۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون برابر با ۰,۳ در نظر گرفته شده است. برای تعیین واکنش بار محوری- تغییر مکان محوری از یک تحلیل غیرخطی استفاده می‌شود، هر دو عامل غیرخطی مصالح و غیرخطی هندسی در تحلیل مدنظر قرار گرفته است. در مدل‌سازی سیستم لوله در لوله، برای تامین گپ لازم بین دو لوله و همچنین هم‌مرکز بودن دو لوله و جلوگیری از خروج از مرکزیت در مدل‌سازی، مصالح لاستیکی به ضخامت برابر با اندازه گپ دو لوله و طول ۳ میلیمتر در نظر گرفته شده است. برای تعیین رفتار تماس بین لوله داخلی و لوله خارجی (ناشی از کمانش لوله داخلی) از ویژگی‌های مدل رفتاری - Tangential Behavior Frictionless در راستای مماسی و از ویژگی‌های مدل رفتاری Normal Behavior - Hard Contact در راستای عمود بر سطح استفاده شده است. همچنین به منظور دقت کافی در حل مسئله، مدل‌های مورد پژوهش شامل لوله داخلی و خارجی با استفاده از المان پوسته‌ای چهارگره‌ای S4R^۲ ساخته شده و به منظور اعمال بار محوری در دو انتهای لوله داخلی به صورت Displacement-Control در نقطه مرجع، دو صفحه صلب فرضی به ابعاد ۳۰×۳۰ میلیمتر در مدل‌سازی بکار رفته است، که در آن‌ها، مرکز صفحه صلب فرضی به عنوان نقطه مرجع (RP) و سطح مقطع انتهایی لوله داخلی به نقطه مرجع (RP) مقید گردیده است. همچنین هیچگونه قید اضافی ناشی از تعریف صفحه صلب انتهایی به منظور مفصلی نمودن نقطه مرجع (RP) ایجاد نشده است. برای حل معادلات اجزاء محدود از روش تکراری نیوتن-رافسون استفاده شده است. برای حل مشکل غیرموثر بودن این روش در مجاورت نقطه بحرانی و دنبال نمودن مسیر تعادل و گذر از نقطه بحرانی به محدوده پس‌بحرانی از روش Riks اصلاح شده بر اساس روش طول کمان (Arc-Length) استفاده شده است [۲۱]. در شکل ۱۵ نمونه‌ای از مش‌بندی مدل با جزئیات نشان داده شده است.

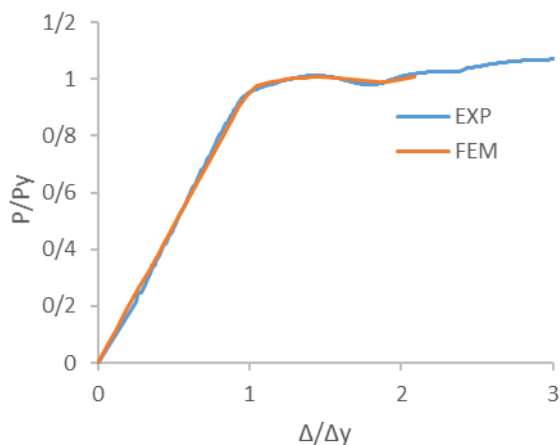


شکل ۱۵: نمونه مش‌بندی مدل.

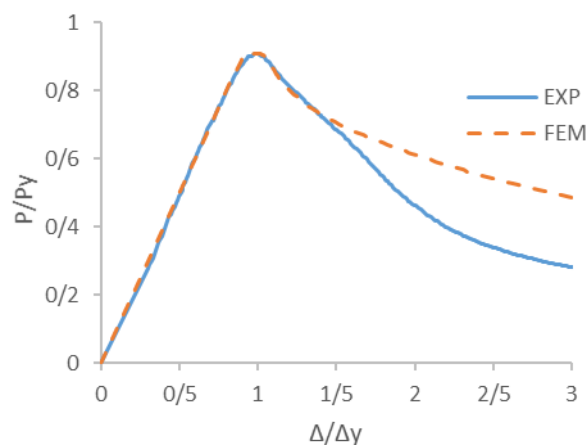
به منظور صحت‌سنجی روش مدل‌سازی اجزای محدود، مدل عددی مربوط به نمونه‌های آزمایشگاهی ۱، ۲ و ۳ (با مشخصات قید شده در جدول ۱) ایجاد و مورد تحلیل قرار گرفتند. منحنی تغییرات بار- تغییر شکل محوری، این سه نمونه مزبور در تحلیل عددی و آزمایشگاهی در شکل ۱۶ نشان داده شده و با یکدیگر مقایسه شده است. انطباق قابل قبول نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی سه مدل

^۲- 4-node shell element

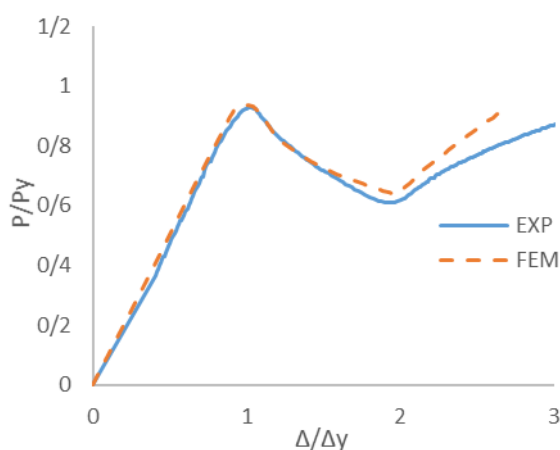
مزبور موید صحت و دقت مدل سازی اجزای محدود می باشد. بنابراین در ادامه این تحقیق با فراهم نمودن مدل عددی مناسب، می توان بدون انجام آزمایش، نمونه های مختلف با پارامترهای متفاوت را بررسی کرد.



ب- عضو فشاری با لوله خارجی سرتاسری و گپ کم (Model 2)



الف - عضو فشاری بدون لوله خارجی (Model 1)



ج- عضو فشاری با لوله خارجی سرتاسری و گپ زیاد (Model 3)

شکل ۱۶: منحنی بار - تغییر شکل محوری سیستم لوله در لوله در مدل سازی عددی و آزمایشگاهی.

۵- تحلیل حساسیت به پارامترهای گپ، ضریب لاغری و نسبت طول لوله ها

به تبع صحت سنجی مدل سازی اجزای محدود معرفی شده در بخش قبل، اینک می توان صرفاً با انجام تحلیل های عددی، رفتار بار - تغییر شکل محوری سیستم پیشنهادی لوله در لوله به ازای تغییرات در پارامترهای مختلف موثر در طراحی را مورد مطالعه قرار داد. میزان تاثیر پارامترهای زیر بر رفتار کمانشی و ظرفیت باربری سیستم لوله در لوله ارزیابی شده است:

۱- گپ بین دو لوله داخلی و لوله خارجی (Gap)

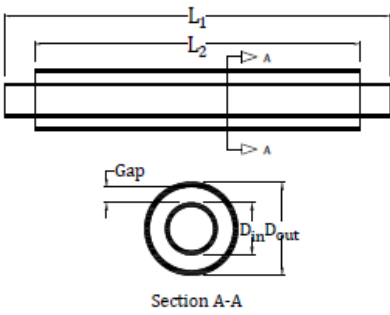
۲- ضریب لاغری لوله داخلی یا عضو اصلی (λ)

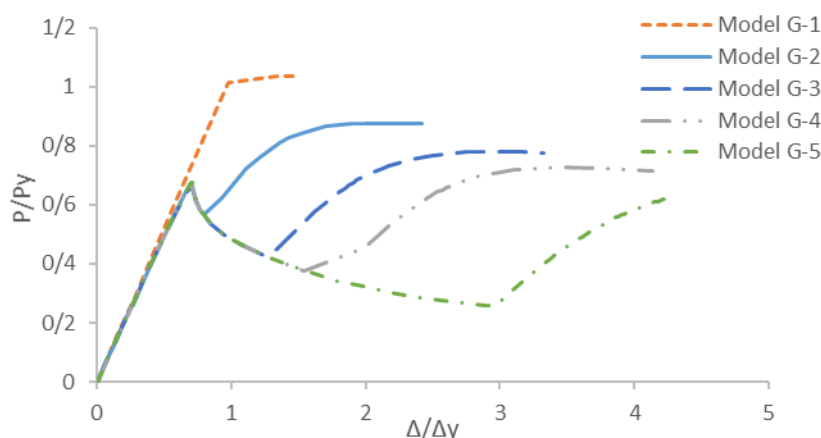
۳- نسبت طول لوله خارجی به طول لوله داخلی ($\frac{L_2}{L_1}$)

۱-۵- پارامتر گپ بین دو لوله داخلی و لوله خارجی (Gap)

برای بررسی تاثیر پارامتر گپ بین دو لوله داخلی و لوله خارجی، پنج نمونه مختلف سیستم لوله در لوله شامل Model G-1، Model G-2، Model G-3، Model G-4 و Model G-5 با مشخصات هندسی مطابق جدول ۲ که فاصله بین دو لوله داخلی و لوله خارجی بر اساس پروفیل‌های لوله‌ای موجود به ترتیب برابر ۰،۳۵، ۱،۰، ۱،۸، ۴،۲ و ۳۶،۲ میلی‌متر می‌باشد، مدل‌سازی عددی گردیده و نتایج تحلیل این نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بتوان تاثیر عامل گپ را مورد بررسی قرار داد. منحنی تغییرات بار- تغییر مکان محوری مربوط به این پنج نمونه در شکل ۱۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که با تغییر میزان گپ بین دو لوله داخلی و لوله خارجی (گپ)، در سیستم لوله در لوله، نوع رفتار کمانش، ظرفیت باربری و شکل پذیری سیستم تغییر می‌یابد. هرچه گپ بین دو لوله کاهش می‌یابد، کارایی لوله خارجی به عنوان غلاف برای لوله داخلی در سیستم بیشتر می‌شود. در نمونه ۱ با حداقل گپ، سیستم لوله در لوله عملکرد مطلوب در کنترل کمانش عضو فشاری داشته و در نمونه‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ عملکرد سیستم لوله در لوله به دلیل افزایش طول موثر کمانش لوله داخلی کمتر از نمونه ۱ است. هرچه فاصله بین دو لوله داخلی و لوله خارجی (گپ) افزایش می‌یابد، سیستم کارایی خود را از دست می‌دهد.

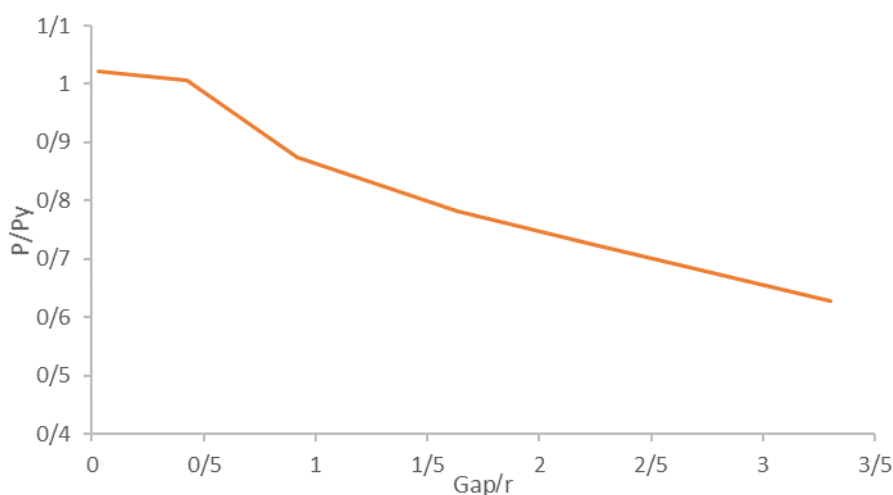
جدول ۲: مشخصات سیستم لوله در لوله و گپ بین دو لوله.

نام مدل	نام پروفیل لوله		قطر خارجی		طول		گپ بین دو لوله (mm)	سیستم لوله در لوله
	داخلی	خارجی	D(mm)	T(mm)	L_1 (mm)	L_2 (mm)		
Model G-1	D33.7T2.6	-	33.7	2.6	880	-	0.35	
	-	D42.4T4.0	42.4	4.0	-	870		
Model G-2	D33.7T2.6	-	33.7	2.6	880	-	10.1	
	-	D60.3T3.2	60.3	3.2	-	870		
Model G-3	D33.7T2.6	-	33.7	2.6	880	-	18.0	
	-	D76.1T3.2	76.1	3.2	-	870		
Model G-4	D33.7T2.6	-	33.7	2.6	880	-	24.4	
	-	D88.9T3.2	88.9	3.2	-	870		
Model G-5	D33.7T2.6	-	33.7	2.6	880	-	36.3	
	-	D114.3T4.0	114.3	4.0	-	870		



شکل ۱۷: منحنی بار - تغییر شکل محوری سیستم لوله در لوله به ازای گپ‌های مختلف.

با توجه به شکل ۱۷، می‌توان حداقل فاصله لازم بین لوله خارجی و داخلی به منظور عملکرد موثر سیستم لوله در لوله را تعیین کرد. نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت باربری ابزار محدود کننده نیرو- سیستم لوله در لوله با پارامتر فاصله بین لوله داخلی و لوله خارجی رابطه معکوس دارد. در شکل ۱۸ تاثیر و رابطه مستقیم پارامتر نسبت گپ (نسبت اندازه گپ بر شعاع ژیراسیون لوله داخلی) بر ظرفیت باربری سیستم لوله در لوله نشان داده است. زمانی که این نسبت کاهش می‌یابد، ظرفیت باربری سیستم با افزایش چشمگیری مواجه است و سیستم لوله در لوله از عملکرد مطلوب در کنترل کمانش عضو فشاری برخوردار است. براساس نتایج تحلیل نمونه‌ها، ملاحظه می‌گردد اگر این نسبت در حدود ۴۳ درصد یا کمتر از آن باشد، سیستم پیشنهادی لوله در لوله کارایی لازم در کنترل کمانش عضو فشاری و تامین قیود مناسب و کافی برای ایجاد تسلیم فشاری کامل در مقطع عضو را دارد.

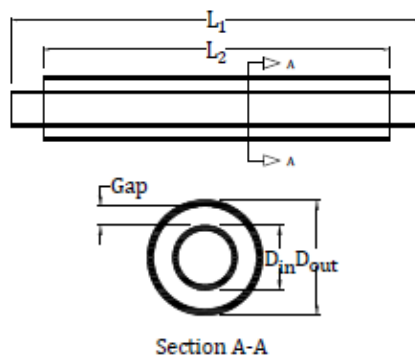


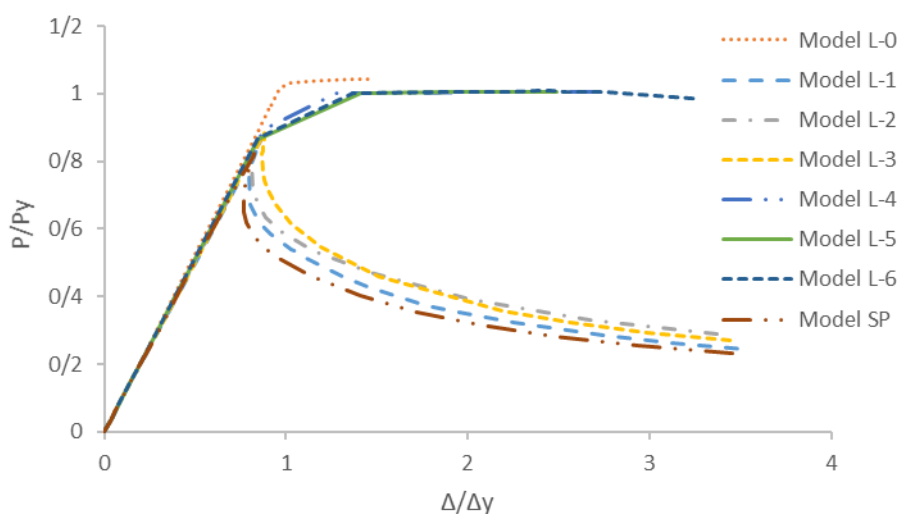
شکل ۱۸: منحنی نسبت بار و پارامتر نسبت Gap.

تغییر شکل محوری مربوط به این هشت نمونه در شکل ۲۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲۰ مشاهده می‌شود که با تغییر نسبت طول لوله خارجی به طول لوله داخلی در سیستم لوله در لوله، نوع رفتار کمانش، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سیستم دستخوش تغییرات قابل توجهی می‌گردد. همانطوریکه انتظار می‌رود، هرچه نسبت طول لوله خارجی به طول لوله داخلی در نمونه‌ها افزایش می‌یابد، کارایی لوله خارجی به عنوان غلاف برای لوله داخلی در سیستم بیشتر می‌شود. در نمونه‌های با نسبت طول لوله خارجی به لوله داخلی، به ترتیب ۶۰، ۶۷ و ۱۰۰ درصد، سیستم لوله در لوله عملکرد مطلوب در کنترل کمانش عضو دارد، ولی در نمونه‌های با نسبت طول لوله خارجی به لوله داخلی، به ترتیب ۲۵، ۳۳، ۴۲ و ۵۰ درصد، سیستم لوله در لوله اینچنین نمی‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که ظرفیت باربری ابزار محدود کننده نیرو-سیستم لوله در لوله با پارامتر نسبت طول لوله خارجی به طول لوله داخلی رابطه مستقیم دارد.

جدول ۴: مشخصات سیستم لوله در لوله و نسبت‌های مختلف طول لوله خارجی به لوله داخلی.

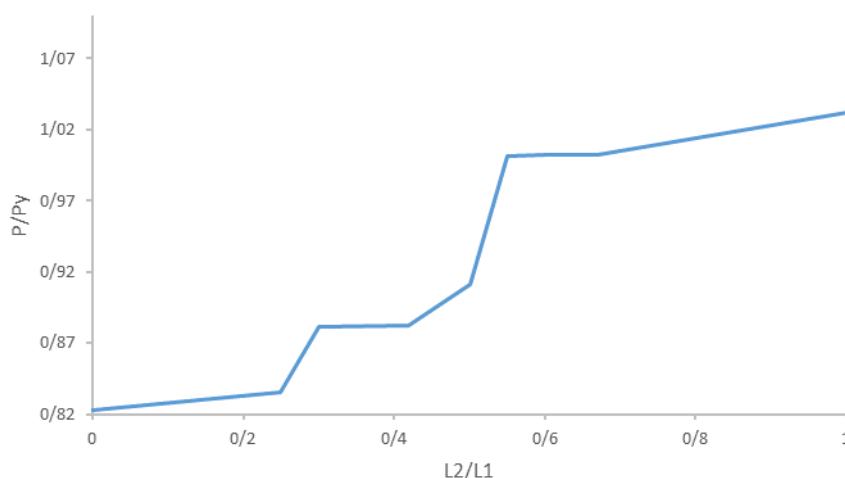
نام مدل	نام پروفیل لوله		قطر خارجی D(mm)	ضخامت T(mm)	طول		نسبت طول‌ها L_2/L_1	سیستم لوله در لوله
	داخلی	خارجی			L_1 (mm)	L_2 (mm)		
Model L-0	D33.7T2.6	-	33.7	2.6	880	-	1	
	-	D42.4T4.0	42.4	4.0	-	870		
Model L- 1	D33.7T2.6	-	33.7	2.6	880	-	0.25	
	-	D42.4T4.0	42.4	4.0	-	220		
Model L- 2	D33.7T2.6	-	33.7	2.6	880	-	0.33	
	-	D42.4T4.0	42.4	4.0	-	294		
Model L- 3	D33.7T2.6	-	33.7	2.6	880	-	0.42	
	-	D42.4T4.0	42.4	4.0	-	370		
Model L- 4	D33.7T2.6	-	33.7	2.6	880	-	0.55	
	-	D42.4T4.0	42.4	4.0	-	484		
Model L- 5	D33.7T2.6	-	33.7	2.6	880	-	0.60	
	-	D42.4T4.0	42.4	4.0	-	528		
Model L- 6	D33.7T2.6	-	33.7	2.6	880	-	0.67	
	-	D42.4T4.0	42.4	4.0	-	590		
Model SP	D33.7T2.6	-	33.7	2.6	880	-	0.00	
	-	D42.4T4.0	42.4	4.0	-	0		





شکل ۲۰: منحنی بار - تغییر شکل محوری سیستم لوله در لوله به ازای نسبت‌های مختلف طول لوله خارجی به طول لوله داخلی.

با توجه به نتایج شکل ۲۰، می‌توان به منظور بررسی عملکرد موثر سیستم لوله در لوله، حداقل طول لازم برای لوله خارجی را تخمین زد. برای این منظور، لازم است رابطه پارامتر نسبت طول لوله خارجی به طول لوله داخلی و ظرفیت باربری سیستم لوله در لوله تعیین گردد که در شکل ۲۱ نشان داده است.



شکل ۲۱: منحنی نسبت بار و پارامتر نسبت طول لوله خارجی به طول لوله داخلی.

مطابق شکل ۲۱، زمانی که نسبت طول لوله خارجی به طول لوله داخلی بیش از ۵۵ درصد است، ظرفیت باربری سیستم با افزایش چشمگیری مواجه است و سیستم لوله در لوله از عملکرد مطلوب در کنترل کماتش عضو فشاری که همان لوله داخلی می‌باشد، برخوردار است. اگر نسبت طول لوله خارجی به طول لوله داخلی کمتر از ۵۵ درصد باشد، سیستم پیشنهادی لوله در لوله، فاقد کارایی لازم در کنترل کماتش لوله داخلی می‌باشد و قیود مناسب و کافی برای ایجاد تسلیم فشاری کامل لوله داخلی را تامین نمی‌نماید.

۶- نتیجه گیری

در اثر کمانش عضو فشاری در سازه‌ها تحت اثر نیروی محوری فشاری وارده، ظرفیت باربری عضو کاهش می‌یابد و این عضو تمام یا بخشی از مقاومت خود را از دست داده و بار خود را به سایر اعضای سازه توزیع می‌کند. این امر می‌تواند منجر به گسترش خرابی به سایر اعضای سازه و حتی در مواردی به ایجاد خرابی کلی در سازه گردد. بنابراین جلوگیری از کمانش عضو فشاری نقش کلیدی در بهبود رفتار خرابی سازه‌ها دارد. در این تحقیق ابزار جدید محدود کننده نیرو-سیستم لوله در لوله برای جلوگیری از کمانش و افت ظرفیت ناگهانی عضو فشاری معرفی گردید. سیستم لوله در لوله، شامل یک لوله داخلی و یک لوله خارجی است که لوله خارجی به عنوان یک غلاف برای عضو فشاری (لوله داخلی) عمل نموده و مقاومت خمشی لوله خارجی مقیدکننده حرکت جانبی و به تبع آن کمانش لوله داخلی می‌باشد. رفتار و عملکرد سیستم لوله در لوله به ازای تغییرات در پارامترهای موثر نظیر گپ بین دو لوله داخلی و خارجی (Gap)، ضریب لاغری لوله داخلی یا عضو اصلی (λ) و نسبت طول لوله خارجی به طول لوله داخلی ($\frac{L_2}{L_1}$) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد، زمانی که نسبت اندازه گپ به شعاع ژیراسیون لوله داخلی در حدود ۴۳ درصد یا کمتر از آن و نسبت طول لوله خارجی به لوله داخلی بیش از ۵۵ درصد طول عضو فشاری باشد، سیستم لوله در لوله باعث حذف پدیده کمانش و وقوع تسلیم‌شدگی در لوله داخلی شده و باعث افزایش ظرفیت باربری آن می‌شود، این موضوع بویژه زمانی که لوله بیرونی سرتاسر طول لوله داخلی را در بر می‌گیرد، دارای نمود بیشتری است. استفاده از ابزار محدودکننده نیرو-سیستم لوله در لوله، برای جلوگیری از کمانش عضو فشاری و به تبع آن بهبود رفتار خرابی سازه، یک روش موثر است. از سایر مزایای سیستم لوله در لوله، مواردی نظیر سادگی طرح، تهیه و نصب آسان، اقتصادی بودن، عدم نیاز به مواد گران قیمت و تکنولوژی ساخت پیچیده می‌باشد. با توجه به مطلوبیت نتایج حاصل از بررسی نمونه‌ها در این تحقیق، با بکارگیری سیستم لوله در لوله، می‌توان از کمترین خرابی‌ها بویژه در سازه‌هایی نظیر سازه‌های فضاکار (خرابی پیش‌رونده)، جلوگیری نمود. همچنین از این ابزار می‌توان برای مهار نمودن کمانش آرماتورهای طولی فشاری در مواردی که این آرماتورها تحت اثر کرنش‌های ناشی از تغییر شکل‌های زیاد قرار می‌گیرند، استفاده نمود.

مراجع

- [1] ANSI/AISC 341-16. (2016), *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, Chicago: American Institute of Steel Construction.
- [2] Wu, B., & Mei, Y. (2015). Buckling mechanism of steel core of buckling-restrained braces. *Journal of Constructional Steel Research*, 107, 61-69.
- [3] Wu, B., Lu, J., Mei, Y., & Zhang, J. (2017). Buckling mechanism and global stability design method of buckling-restrained braces. *Journal of Constructional Steel Research*, 138, 473-487.
- [4] Lu, J., Wu, B., & Mei, Y. (2018). Buckling mechanism of steel core and global stability design method for fixed-end buckling-restrained braces. *Engineering Structures*, 174, 447-461.
- [5] Iwata, M., Katoh, T. and Wada, A., (2001). "Performance Evaluation of Buckling-Restrained Braces on Damage Controlled Structures: Parts 1 and 2". In *Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan, Structural Engineering Section (III)*, 658-662. Tokyo: Architectural Institute of Japan. (in Japanese).
- [6] Ozelik, R., Dikiciasik, Y., & Erdil, E. F. (2017). The development of the buckling restrained braces with new end restrains. *Journal of Constructional Steel Research*, 138, 208-220
- [7] Ding, Y., Zhang, Y., & Zhao, J. (2009). Tests of hysteretic behavior for unbonded steel plate brace encased in reinforced concrete panel. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(5), 1160-1170.
- [8] Iwata, M., & Murai, M. (2006). Buckling-restrained brace using steel mortar planks; performance evaluation as a hysteretic damper. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35(14), 1807-1826.
- [9] Satake N., Mase S., Terada T., Isoda K., (2001). "Development of unbonded brace damper restrained by channel section steel (Part 2 static loading test using full-scale specimens)", In: *Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan*. Volume 9, 665- 666. Tokyo: Architectural Institute of Japan.
- [10] Mateus, J. A. S., Tagawa, H., & Chen, X. (2019). Buckling-restrained brace using round steel bar cores restrained by inner round steel tubes and outer square steel tube. *Engineering Structures*, 197, 109379.
- [11] Dehghani, E., Babaei, N., & Zarrineghbal, A. (2019). Investigation of the Distribution of Cumulative Ductility Demand Parameter in Various Storeys of Buckling Restrained Braced Frames. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineerin*, 7(3), 148-161.

- [12] Md. Soebur Rahman, Mahbuba Begum, Raquib Ahsan, (2016), Comparison between Experimental and Numerical Studies of Fully Encased Composite Columns, *International Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol:10, No:6.
- [13] Hanaor, A., & Schmidt, L. C. (1980). Space truss studies with force limiting devices. *Journal of the Structural Division*, 106(11), 2313-2329.
- [14] El-Sheikh, A. (1999). Effect of force limiting devices on behaviour of space trusses. *Engineering structures*, 21(1), 34-44.
- [15] Kim, C. H., Chae, W. T., Oh, Y. S., & Kim, C. Y. (2013). A Study on the Development of Force Limiting Devices (FLD) which Induce Yielding before Elastic Buckling. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 25(3), 279-287. (in Korean).
- [16] Oh, Y. S., Kim, C. H., Kim, C. Y., & Chae, W. T. (2013). A Study on the Post-Buckling Behavior of Slit Type FLD (Force Limiting Device). *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 25(5), 475-486. (in Korean).
- [17] Kim, C.H., Chae, W.T., and Do, C.G. (2014). "A Study on the Development of the Force Limiting Device with Folded types" In: *Annual Conference Korean Society of Steel Construction, KSSC*. Korea, 113-114 (in Korean).
- [18] Kim, C. H., & Chae, W. T. (2015). A Study on the Development of Force Limiting Devices of Cross-Section Cutting Types. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 27(1), 77-85.
- [19] Poursharifi, M., Abedi, K., & Chenaghloou, M. (2017). 05.32: Experimental and numerical study on the collapse behavior of an all-steel accordion force limiting device. *ce/papers*, 1(2-3), 1315-1324.
- [20] Mukai, H., Wada, A., Watanabe, A., & Iwata, M. (1993). Ductile truss structures and scaled model experiments. In *Space structures 4* (pp. 1841-1850).
- [21] Riks, E. (1979). An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems. *International journal of solids and structures*, 15(7), 529-551.