

## بهبود رفتار پس از کمانش مهاربندهای همگرا با استفاده از فیوز موضعی مقید شده بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی و عددی

علی کجویی<sup>۱</sup>، محمدعلی کافی<sup>۲\*</sup>، محسن گرامی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### چکیده

سیستم مهاربندی شده هم محور یکی از متداولترین سیستمهای مقاوم باربر جانبی بین سازه های فولادی می باشد. این سیستم مقاوم باربر جانبی دارای شکلهای ظاهری متنوعی می باشد که خصوصیت اصلی همه آنها سختی و مقاومت جانبی قابل ملاحظه شان است. ضعف اصلی سیستم مهاربندی شده هم محور کمانش مهاربند در فشار است. این امر سبب میشود مهاربندهای هم محور ظرفیت باربری فشاری پایین به همراه شکل پذیری نامطلوب و ظرفیت اتلاف انرژی محدود شده ای داشته باشند. به منظور حل این مشکل و بهبود پاسخ لرزه ای سازه های مهاربندی شده هم محور، در این مطالعه روشی ابتکاری ارائه شده است. در این روش از یک فیوز موضعی در ناحیه میانی مهاربند استفاده شده که محیط پیرامونی و داخلی آن بوسیله یک المان کمکی غلاف در غلاف شکل پوشانیده شده است. فیوز موضعی طوری طراحی شده که پس از تسلیم، مهاربند در این ناحیه دچار کمانش موضعی شود. اما حضور المان کمکی جا داده شده در اطراف فیوز مانع این کمانش موضعی شده و بدین وسیله مهاربند یک رفتار تقریباً متقارن در بار فشاری و کششی از خود ارائه می دهد. نتایج کارهای آزمایشگاهی و عددی انجام شده در این مطالعه بیانگر عملکرد بهتر این سیستم سازه ای به لحاظ شکل پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی نسبت به سیستم متداول مهاربندی شده همگرا می باشد. همچنین از این سیستم جدید می توان به منظور کاهش ظرفیت اتصالات مهاربندی که منجر به کاهش هزینه های پروژه نیز می شود، بهره برداری کرد.

کلمات کلیدی: سازه های فولادی، مهاربند هم محور، کمانش، فیوز موضعی، پاسخ لرزه ای، شکل پذیری، ظرفیت اتلاف انرژی

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال
۱۳۹۶/۱۲/۰۴	۱۳۹۷/۰۴/۱۷	۱۳۹۷/۰۵/۲۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	10.22065/jsce.2018.120353.1477
doi:					https://10.22065/jsce.2018.120353.1477
*نویسنده مسئول: محمدعلی کافی mkafi@semnan.ac.ir					پست الکترونیکی:

# Improving of post buckling behavior concentric braces by using of restricted fuse based on experimental and numerical studies

Ali Kachooee<sup>1</sup>, Mohammad Ali Kafi<sup>2\*</sup>, Mohsen Gerami<sup>2</sup>

1- Ph.D. Student, Faculty of civil engineering, Semnan University, Semnan, Iran  
2- Associate Professor, Faculty of civil engineering, Semnan University, Semnan, Iran

## ABSTRACT

The concentrically braced system is one of the most common lateral loadbearing systems among the steel structures. This system has various apparent forms where the main characteristic of them all is their significant stiffness and lateral strength. The weakness of these systems is buckling in compression. This issue causes that concentric bracings have low compressive loadbearing capacity together with undesirable ductility and limited energy dissipation capacity. In this study to solve this problem use has been made of a heuristic method. In this method a local fuse has been used in the middle of bracing where its periphery and inner circumference have been covered with an auxiliary casing within a casing. The local fuse is designed in a way that after yielding, the bracing undergoes local buckling at this area. But presence of an auxiliary element placed around the fuse prevents this local buckling and thus the bracing would exhibit almost a symmetric behavior during compressive and tensile loadings. The results of experimental and numerical researches of this study indicate the better performance of this structural system in terms of ductility and energy dissipation capacity compared to the common concentric braces. The suggested system can be utilized to reduce the capacity of bracing connection which results in reduced costs of the project.

## ARTICLE INFO

Receive Date: 23 February 2018

Revise Date: 08 July 2018

Accept Date: 16 August 2018

### Keywords:

Steel structures

Concentric brace

Buckling

Local fuse

Seismic response

Ductility

Energy dissipation capacity

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.120353.1477

\*Corresponding author: Mohammad Ali Kafi

Email address: m.kafi@semnan.ac.ir

## ۱- مقدمه

سختی و مقاومتی جانبی قابل ملاحظه، سهولت اجرا و همچنین داشتن شکل‌های ظاهری متنوع سازه‌های مهاربندی شده همگرا که هرکدام ویژگی‌های خاص خود را دارا می‌باشند منجر به کارگیری فراوان این سیستم‌های سازه‌ای در ساخت ساختمان‌های فولادی شده است. اما این سیستم‌های سازه‌ای دارای یک مشکل اساسی می‌باشند. زمانی که این سازه‌ها تحت زلزله‌های متوسط و شدید قرار می‌گیرند، وارد ناحیه غیرالاستیک شده و در این حالت مهاربندهای فشاری دچار کماتش می‌شوند. این موضوع سبب می‌شود که نتوان از ظرفیت کامل این مهاربندها در اتلاف انرژی وارد به سازه استفاده کرد. به منظور حل این مشکل در دهه‌های گذشته محققین مطالعات زیادی بر روی این سازه‌ها انجام داده‌اند که نتایج این مطالعات منجر به ایجاد روش‌های مختلف در جهت حل این مشکل سازه‌های مهاربندی شده همگرا شده است. در ادامه به معرفی برخی از این روش‌ها پرداخته می‌شود.

سیستم مهاربندی دارای خروج از مرکزیت (OBS) [۱] یکی از سیستم‌های ابداع شده به منظور بهبود سازه‌های مهاربندی شده همگرا می‌باشد. در این سیستم سازه‌ای المان کششی به صورت مستقیم نبوده و به همین خاطر زمانی که یک بار جانبی به این سیستم وارد می‌شود، هندسه اولیه آن تغییر می‌یابد. بنابراین منحنی بار-تغییرشکل این سیستم‌ها به صورت غیرخطی هندسی می‌باشد. درجه غیرخطی سیستم‌های OBS عمدتاً وابسته به خروج از مرکزیت قطری کششی و سختی نسبی المان‌های مهاربندی می‌باشد [۱]. مقدم و استنکاچی [۲] در مطالعه خود بر روی این سیستم‌ها دریافتند که منحنی بار-تغییرشکل OBS‌ها از یک الگوی سخت شوندگی غیرخطی با دو نقطه تسلیم پیروی می‌کند. سپس با استفاده از این الگو سازه‌های یک و دو طبقه OBS را تحت بار لرزه‌ای قرار دادند. نتایج این تحلیل‌ها بیانگر این مطلب بود که سیستم سازه‌ای OBS رفتاری همانند سیستم‌های جداساز پایه داشته و از یک مقاومت خوب در برابر بارهای جانبی برخوردار می‌باشند. بزاز و همکاران [۳-۶] به منظور بهبود رفتار این سیستم‌ها از یک المان شکل‌پذیر حلقوی فولادی در انتهای مهاربند سیستم OBS استفاده کردند و نام سیستم جدید را OBS-C<sup>۲</sup> نامیدند. نتایج این مطالعه شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی بیشتر این سیستم سازه‌ای را نسبت به سیستم OBS نشان داده است. همچنین بر اساس این مطالعات [۴،۶] این مدل با خروج از مرکزیت ۰٫۳ بهترین وضعیت قرارگیری المان‌های مهاربندی در این سیستم سازه‌ای را دارا بوده است. در مطالعه‌ای دیگر [۷] که به منظور مقایسه سیستم‌های OBS-C با سیستم‌های مهاربند قطری با حلقه فولادی شکل‌پذیر انجام شده است، رفتار بهتر سیستم OBS-C به لحاظ شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی مشاهده شده است.

یکی دیگر از سیستم‌های سازه‌ای ابداع شده به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مهاربند همگرا، استفاده از مهاربندهای کماتش ناپذیر ۳BRB [۸-۱۲] است. در این سیستم سازه‌ای سعی شده با استفاده از مهاربندهایی که از غلاف و هسته تشکیل شده‌اند نقص اصلی سیستم‌های سازه‌ای مهاربندی شده همگرا که کماتش در فشار می‌باشد برطرف شود [۸، ۹ و ۱۲]. در سازه‌های مهاربندی شده همگرا فولادی به دلیل کماتش مهاربند در فشار، منحنی هیسترسیس این سیستم‌های سازه‌ای نامتقارن بوده که این امر سبب می‌شود از ظرفیت المان‌های همگرا به طور کامل استفاده نشده و این سیستم‌های سازه‌ای عملکرد مناسبی در شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی نداشته باشند. در مقابل سازه‌های با مهاربندهای کماتش ناپذیر، منحنی‌های هیسترسیس متقارن و پایداری را از خود نشان داده که در شکل‌پذیری و اتلاف انرژی نیز ظرفیت قابل ملاحظه‌ای را دارا می‌باشند. به علاوه در سیستم سازه‌ای BRB، تغییرشکل‌های غیرالاستیک تماماً و به طور یکنواخت در طول مهاربند کماتش ناپذیر توزیع شده و از وقوع خسارت در سایر المان‌های سازه‌ای جلوگیری می‌شود.

استفاده از سیستم‌های کنترل دو یا چند مرحله‌ای یکی دیگر از روش‌های بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها است که اخیراً مورد توجه محققین قرار گرفته است. ایده اصلی این سیستم‌های سازه‌ای، ترکیب سیستم‌های کنترل متفاوت با مقادیر سختی و مقاومت مختلف است که منجر به جذب انرژی مطلوب سازه در حالت‌های گوناگون شدت زلزله می‌شود. بالندرا و همکاران [۱۳] سیستم کنترل غیرفعال دوگانه‌ای را معرفی کردند که شامل یک مهاربند زانویی به همراه یک اتصال شیاری بود. در این سیستم کنترل غیرفعال سازه‌ای در حالت بارهای سرویس و نیروهای کم، جذب انرژی به کمک اصطکاک و در ناحیه اتصال ایجاد می‌شود، حال آنکه تحت زلزله‌های شدید جذب انرژی از

<sup>1</sup> Off center bracing system

<sup>2</sup> Off center bracing system with circular element

<sup>3</sup> Buckling restrained brace

طریق رفتار پلاستیک المان زانویی تامین خواهد شد. همچنین زهرایی و وثوق [۱۴] به معرفی سیستم دوگانه‌ای پرداختند که در آن از ترکیب تیر پیوند قائم و المان‌های زانویی به منظور جذب انرژی استفاده شده است. در این سیستم سازه‌ای به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای، از تیر پیوند قائم به عنوان المان جاذب انرژی در ناحیه بارهای کم و از المان‌های زانویی در جذب انرژی تحت زلزله‌های شدید بهره‌گیری شده است. سیستم دیگری که با استفاده از ایده سیستم‌های کنترل دو مرحله‌ای ایجاد شده است، سیستم کنترل غیرفعال لوله در لوله می-باشد. چراغی و زهرایی [۱۵] بر روی این سیستم سازه‌ای مطالعه عددی و آزمایشگاهی گسترده‌ای انجام داده‌اند. نتایج این مطالعات بیانگر رفتار فوق‌العاده شکل‌پذیر این سیستم کنترل غیرفعال سازه‌ای بوده است به طوری که منحنی‌های هیستریسیس این سیستم توانایی آن را در جذب انرژی مطلوب تحت شدت بارهای متفاوت لرزه‌ای اثبات کرده است. همچنین ضریب شکل‌پذیری در حدود ۱۵ تا ۳۷ و ضریب میرایی ویسکوزی در حدود ۳۶٪ تا ۵۰٪ برای این سیستم سازه‌ای در این مطالعات به دست آمده است.

وارد و همکاران [۱۶، ۱۷] در مطالعه خود سیستم مهاربند شکل‌پذیر با قطعات کوچک ریخته‌گری شده CMDB<sup>۴</sup> را به عنوان جایگزینی برای سیستم‌های مهاربندی شده همگرا با شکل‌پذیری ویژه معرفی کردند. در این سیستم سازه‌ای از قطعات ریخته‌گری شده در دو انتها و میانه مهاربند استفاده می‌شود. مقطعی که برای المان‌های ریخته‌گری انتخاب شده است صلیبی شکل می‌باشد زیرا این نوع مقطع سبب افزایش اتلاف انرژی و افزایش عمر سیکل‌های کوتاه خستگی شده و بدین ترتیب احتمال شکست مهاربند را کاهش می‌دهد. در مطالعه انجام شده توسط وارد و همکاران [۱۷] همچنین به بررسی نسبت مقاومت‌های خمشی و محوری قطعه ریخته‌گری شده نسبت به قسمت المان جدارنازک مهاربند پرداخته شده است و مقدار بهینه برای این نسبت‌ها اینگونه به دست آمده است که موثرترین مقادیر طراحی برای نسبت‌های مقاومت محوری المان مهاربند جدارنازک به مقطع ریخته‌گری شده بایستی اندکی کمتر از یک و برای نسبت مقاومت خمشی نسبی این دو المان باید اندکی بزرگتر از یک باشد.

لگرون و همکاران [۱۸، ۱۹] نیز به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای و همچنین جلوگیری از تقویت اتصال قاب‌های مهاربندی شده ضربدری نبشی شکل یک مطالعه آزمایشگاهی گسترده انجام دادند. آنها در این مطالعه آزمایشگاهی در فاصله‌ای مشخص از دو سر قطری‌ها فیوزی در مهاربندها ایجاد کردند که ظرفیت کششی آن نسبت به ظرفیت کششی اتصال مهاربند پایین‌تر بود. همچنین با ایجاد دو دسته مدل آزمایشگاهی مختلف نحوه توزیع و قرارگیری مناسب و بهینه فیوزها را بر روی المان‌های مهاربندی به دست آوردند. به طور کلی نتیجه به دست آمده از این مطالعه آزمایشگاهی این مطلب را نشان داد که به علت کمتر بودن ظرفیت کششی فیوز نسبت به ظرفیت اتصال دیگری نیازی به تقویت اتصال نخواهد بود. این موضوع به لحاظ اقتصادی و اجرا سازه بسیار مقرون به صرفه می‌باشد. به علاوه نتیجه حاصل شده دیگر از این مطالعه نشان داد که در صورت طراحی صحیح مهاربندهای نبشی ضربدری مجهز به این فیوزها، این مهاربندها تحت بارگذاری سیکلی پاسخ پایداری را از خود نشان داده و در ضمن از یک شکل‌پذیری مطلوب به همراه مقاومت فشاری مناسب برخوردار خواهند بود. در همین راستا و با استفاده از ایده به کارگیری المان فیوز در مهاربندهای همگرا به منظور بهبود رفتار آنها بونتی [۲۰] دو مدل مختلف به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده همگرا جدارنازک حلقوی ارائه کرده است. در یکی از این مدل‌ها در انتهای المان مهاربندی از یک فیوز اول شکل استفاده شده است. در این نمونه مقاومت کششی وابسته به سطح مقطع المان فیوز و مقاومت فشاری آن علاوه بر سطح مقطع فیوز وابسته به طول فیوز نیز می‌باشد. مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط بونتی عملکرد محدود شده این المان را در ظرفیت اتلاف انرژی نشان داده است. در مدل دوم بونتی از یک المان مرکب مهاربندی استفاده شده است که شامل میلگردهای فولادی مدفون در یک قالب پلیمری می‌باشد که بوسیله پلیمر تقویت شده فیبر کربن محصور شده است. در این مدل ظرفیت کششی توسط سطح مقطع میلگردهای فولادی تامین می‌شود و ظرفیت فشاری نیز وابسته به لاغری میلگردها است. در این مطالعه نتایج آزمایشگاهی نشان‌دهنده این امر بود که این مدل قادر به تحمل تغییرشکل‌های غیرالاستیک بزرگ می‌باشد و توانایی اتلاف انرژی بالایی را دارد.

در این مطالعه نیز به منظور بهبود عملکرد رفتار مهاربندهای همگرا یک روش جدید معرفی شده است. در این روش از یک فیوز مقید شده جانبی با عنوان اختصاری LF-AECB<sup>۵</sup> در میانه مهاربند استفاده شده تا از این طریق بتوان رفتار پس از کمانش مهاربند همگرا را

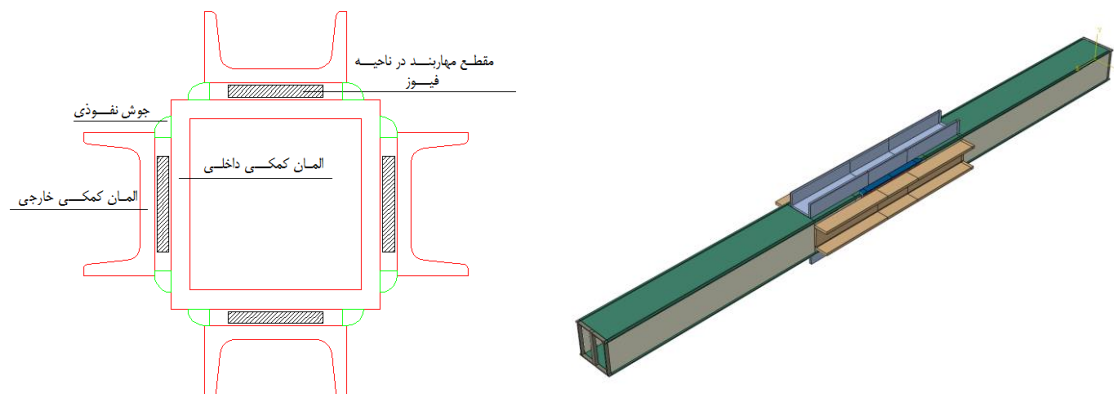
<sup>۴</sup> Cast modular bracing system

<sup>۵</sup> Local fuse auxiliary element concentric brace

بهبود بخشید. از این روش هم در جهت بهبود رفتار مهاربندهای همگرا و هم به عنوان روشی به منظور کاهش ظرفیت اتصالات مهاربندی در سازه‌های مهاربندی شده همگرا می‌توان استفاده کرد. در ادامه به معرفی کامل این روش جدید، ارائه نتایج به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام شده در این مطالعه و همچنین مقایسه رفتار مهاربندهای مجهز شده بوسیله فیوزهای LF-AECB با رفتار مهاربندهای همگرا معمول پرداخته شده است.

## ۲- معرفی فیوز LF-AECB

در مهاربندهای مجهز شده بوسیله فیوزهای LF-AECB از یک فیوز مقید شده جانبی همانند شکل ۱ در میانه مهاربند استفاده می‌شود.

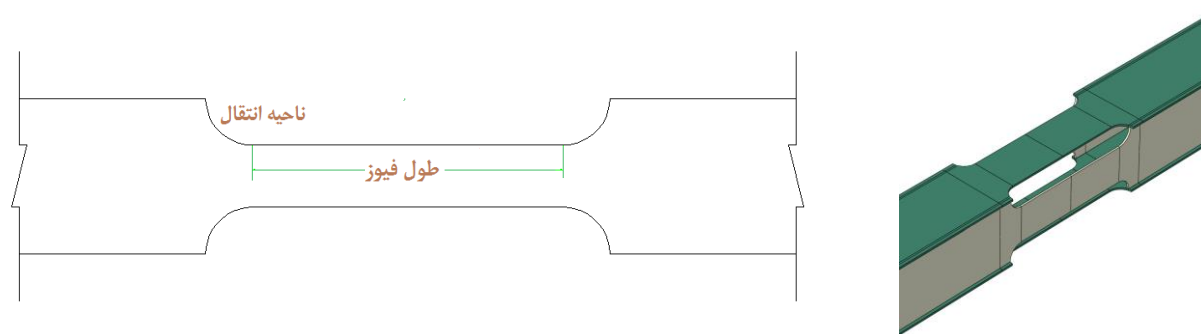


ب. مقطع مهاربند در ناحیه فیوز

آ. نمای کلی مهاربند مجهز شده با فیوز LF-AECB

شکل ۱. مهاربند مجهز شده با فیوز LF-AECB

مهاربندهای LF-AECB از دو قسمت تشکیل می‌شوند. قسمت اول فیوز موضعی به کار رفته در ناحیه میانی مهاربند و قسمت دوم المان کمکی جا داده شده در ناحیه فیوز به منظور جلوگیری از کمانش موضعی آن است. فیوز موضعی به کار رفته در مهاربند همانند شکل ۲ از طریق کاهش سطح مقطع مهاربند بوجود آمده و دارای یک ناحیه انتقال ربع دایره شکل جهت جلوگیری از تمرکز تنش است.



ب. جزئیات کلی فیوز LF-AECB

آ. نمای کلی از فیوز LF-AECB

شکل ۲. معرفی فیوز LF-AECB

برای محاسبه سطح مقطع فیوز ابتدا بایستی تقاضای بار وارده به مهاربند ( $P_u$ ) از تحلیل‌ها به دست آورده شود. پس از محاسبه  $P_u$  از رابطه ۱ داریم:

$$P_u = T_{u, \text{fuse}} \quad (1)$$

که در رابطه بالا  $T_{u,fuse}$  ظرفیت باربری کششی نهایی فیوز می‌باشد. مقدار  $T_{u,fuse}$  از رابطه ۲ قابل محاسبه است:

$$T_{u,fuse} = A_{fuse} \cdot F_u \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $F_u$  و  $A_{fuse}$  به ترتیب سطح مقطع فیوز و تنش نهایی مصالح مهاربند می‌باشند. حال با توجه به روابط ۱ و ۲ سطح مقطع فیوز از رابطه ۳ قابل محاسبه است:

$$A_{fuse} \leq \frac{P_u}{F_{u,fuse}} \quad (3)$$

پس از محاسبه سطح مقطع فیوز، سطح مقطع موردنیاز مهاربند محاسبه می‌شود. برای این منظور مطابق رابطه ۴ بایستی مقدار ظرفیت نهایی کششی فیوز را کوچکتر مساوی ۸۰٪ ظرفیت تسلیم مهاربند قرار داد:

$$A_{fuse} \cdot F_{u,fuse} \leq 0.8 \cdot A_g \cdot F_y \quad (4)$$

در رابطه فوق مقدار  $A_g$  و  $F_y$  به ترتیب سطح مقطع مورد نیاز مهاربند و تنش تسلیم مصالح مهاربند می‌باشند. علت انتخاب ضریب ۰٫۸ در رابطه فوق حصول اطمینان از عدم تسلیم کلی مهاربند قبل از رسیدن فیوز به ظرفیت نهایی‌اش است، زیرا تسلیم کلی مهاربند سبب می‌شود سختی پس از تسلیم آن به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و در نتیجه مطابق رابطه ۵ ظرفیت کمانش آن نیز به طور متناسب کاهش خواهد یافت. این امر سبب می‌شود قبل از اینکه فیوز به ظرفیت باربری نهایی خود برسد، مهاربند دچار کمانش کلی شده و در نتیجه عملکرد مورد انتظاری که از مهاربند LF-AECB به لحاظ ظرفیت اتلاف انرژی و شکل‌پذیری مورد انتظار است، رخ نخواهد داد.

$$P_{Cr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(\lambda)^2} \quad (5)$$

در رابطه فوق  $E$  مقدار مدول الاستیسیته مصالح و  $\lambda$  ضریب لاغری المان تحت فشار می‌باشد. با توجه به رابطه ۴ مقدار سطح مقطع موردنیاز مهاربند از رابطه ۶ قابل محاسبه است:

$$A_g \geq \frac{A_{fuse} \cdot F_{u,fuse}}{0.8 \cdot F_y} \quad (6)$$

ذکر این نکته حائز اهمیت است که با توجه به رابطه ۱، ظرفیت مهاربند طراحی شده براساس رابطه ۶ برابر با ظرفیت فیوز بوده و ظرفیت باربری سطح مقطع کلی مهاربند تأثیری بر ظرفیت باربری آن نخواهد داشت. در مهاربندهای LF-AECB طول فیوز نیز براین اساس محاسبه می‌شود که کمانش فیوز بعد از تسلیم آن اتفاق بیفتد تا بتوان از ظرفیت فیوز در جهت اتلاف انرژی وارده به سازه به طور کامل بهره برد. با توجه به این موضوع رابطه ۷ بایستی در مهاربندهای LF-AECB برقرار باشد:

$$P_{Cr,fuse} \geq T_{u,fuse} \quad (7)$$

در رابطه فوق  $P_{Cr,fuse}$  ظرفیت کمانش فیوز می‌باشد. مقدار  $P_{Cr,fuse}$  از رابطه ۸ قابل محاسبه است:

$$P_{Cr,fuse} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{min,fuse}}{L_{fuse}^2} \quad (8)$$

در رابطه فوق  $I_{min,fuse}$  و  $L_{fuse}$  به ترتیب ممان اینرسی حداقل فیوز و طول فیوز می‌باشند. حال با عنایت به روابط ۲، ۷ و ۸ مقدار  $L_{fuse}$  از رابطه ۹ قابل محاسبه است:

$$L_{fuse} \leq \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{min,fuse}}{A_{fuse} \cdot F_{u,fuse}}} \quad (9)$$

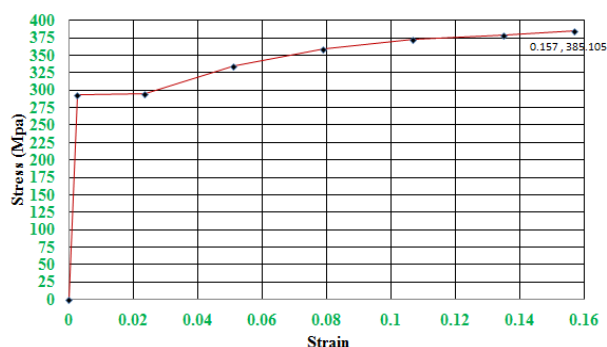
جزء دوم مهاربندهای LF-AECB المان کمکی است. المان‌های کمکی به طور کلی محیط بیرونی و داخلی فیوز را با فاصله ای ۱ میلیمتری از جداره های فیوز در بر می‌گیرند تا تأثیری بر ظرفیت باربری فیوز نداشته باشند. فلسفه وجود المان کمکی در مهاربند LF-AECB جلوگیری از کماتش موضعی مهاربند در ناحیه فیوز است. همانطور که در شکل ۱ مشخص است برای مهاربندهای با مقاطع باکس المان کمکی از یک غلاف مستطیلی شکل داخلی و چهار نودانی خارجی تشکیل شده است. طول این المان‌های داخلی و خارجی حداقل بایستی به اندازه ۱۵ سانتی متر بیشتر از طول فیوز بعلاوه نواحی انتقال آن باشد. ضخامت این المان‌ها نیز بایستی به نحوی انتخاب شوند که توانایی خنثی کردن تغییر مکان جانبی فیوز را داشته باشند. همچنین به منظور ثابت کردن موقعیت چهار نودونی خارجی بایستی یک انتهای آن‌ها به مهاربند جوش داده شده و در ناحیه فیوز نیز مطابق شکل ۱-ب به صورت سرتاسری، در دوطرف نودونی‌ها و با استفاده از جوش نفوذی به غلاف داخلی جوش داده شوند. به این طریق موقعیت غلاف داخلی نیز ثابت می‌شود.

### ۳- معرفی مدل‌های مورد مطالعه

در این مطالعه به منظور بررسی رفتار مهاربند همگرا LF-AECB و مقایسه پاسخ آن با مهاربندهای هم محور عادی دو سری مطالعه آزمایشگاهی و عددی انجام شده است. در تحقیقات آزمایشگاهی که در آزمایشگاه سازه دانشگاه سمنان انجام شده است، دو نمونه Box و BoxFBe ساخته شده و سپس تحت بارگذاری سیکلی قرار داده شده‌اند. نمونه Box نماینده مهاربندهای هم محور عادی و نمونه BoxFBe نماینده مهاربند جدید LF-AECB می‌باشد. با توجه به اینکه ظرفیت نهایی مهاربند در مدل BoxFBe در حدود ۶۰ درصد این مقدار در مهاربند مدل Box می‌باشد، با استفاده از نتایج این مطالعه به بررسی اینکه آیا می‌توان از مدل مذکور به عنوان روشی در جهت کاهش ظرفیت اتصالات مهاربندی در سازه های مهاربندی شده همگرا عادی استفاده شود یا نه، پرداخته خواهد شد. در مطالعه عددی نیز یک مدل با عنوان Numerical-Box در نرم افزار آباکوس ۶,۱۲ [۲۱] ساخته شده است. این مدل دارای ظرفیت باربری یکسان با مدل BoxFBe می‌باشد. نتایج این مدل با استفاده از نتایج مطالعات آزمایشگاهی صحت سنجی شده است. در این مطالعه با استفاده از مقایسه پاسخ مدل‌های BoxFBe و Numerical-Box تحت بارگذاری سیکلی به بررسی اینکه آیا می‌توان از مهاربندهای جدید LF-AECB به عنوان یک روش جایگزین و مطمئن به جای مهاربندهای هم محور عادی استفاده شود یا خیر، پرداخته خواهد شد.

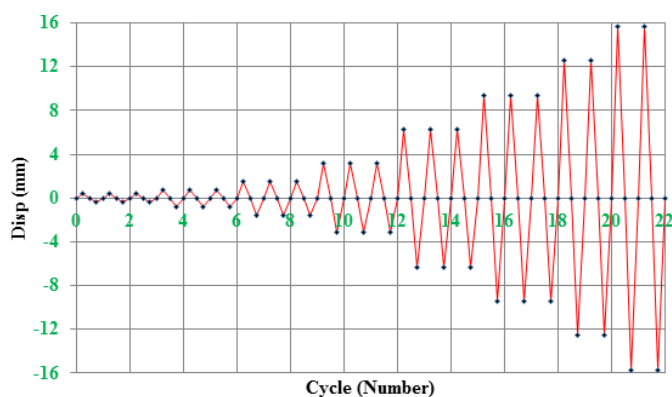
### ۴- معرفی خصوصیات مصالح و الگوی بارگذاری

به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی و عددی در این تحقیق از فولادی با منحنی تنش- کرنش نشان داده شده در شکل ۳-آ استفاده شده است. این منحنی تنش-کرنش همانطور که در شکل ۳-ب مشاهده می‌شود، از آزمون کشش استاندارد به دست آمده است. مطابق شکل ۳ مقادیر تنش تسلیم و نهایی برای این فولاد به ترتیب ۲۹۴ مگاپاسکال و ۳۸۵ مگاپاسکال و کرنش‌های متناظر با آنها ۰,۰۰۲۵ و ۰,۱۵۷۱ می‌باشد.



آ. منحنی تنش-کرنش مصالح فولادی به کار رفته در مطالعه  
 ب. آزمون کشش استاندارد برای تعیین خصوصیات مصالح فولادی  
 شکل ۳. خصوصیات مکانیکی مصالح فولادی به کار رفته در مطالعات آزمایشگاهی و عددی

همچنین به منظور بررسی رفتار مدل‌های آزمایشگاهی و عددی مطالعه شده در این مقاله و مقایسه پاسخ‌های آنها با یکدیگر از الگوی بارگذاری ATC-24 [۲۲] مطابق شکل ۴ استفاده شده است.

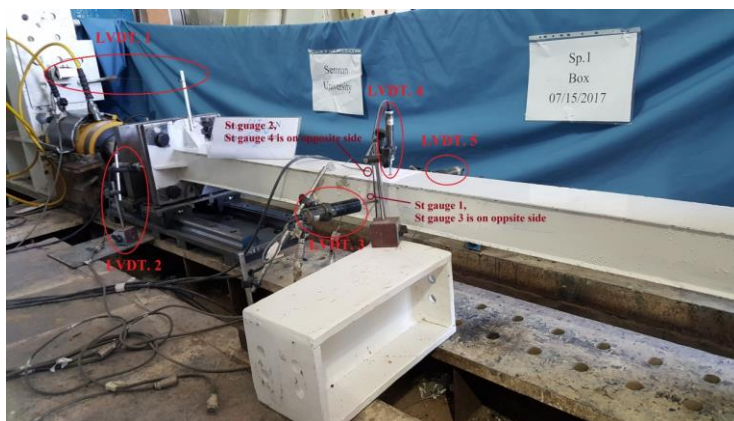


۴. الگوی بارگذاری ATC24 استفاده شده در این مطالعه

## ۵- مطالعات آزمایشگاهی

### ۵-۱ ستاپ آزمایش و خصوصیات هندسی مدل‌های آزمایشگاهی

در تحقیقات آزمایشگاهی دو نمونه Box و BoxFBe ساخته شده و سپس تحت بارگذاری سیکلی قرار داده شده‌اند. ستاپ آزمایشگاهی دو نمونه در شکل ۵ به نمایش در آمده است.



آ. نمونه Box به همراه جانمایی کرنش سنجه‌ها و تغییر مکان سنجه‌ها

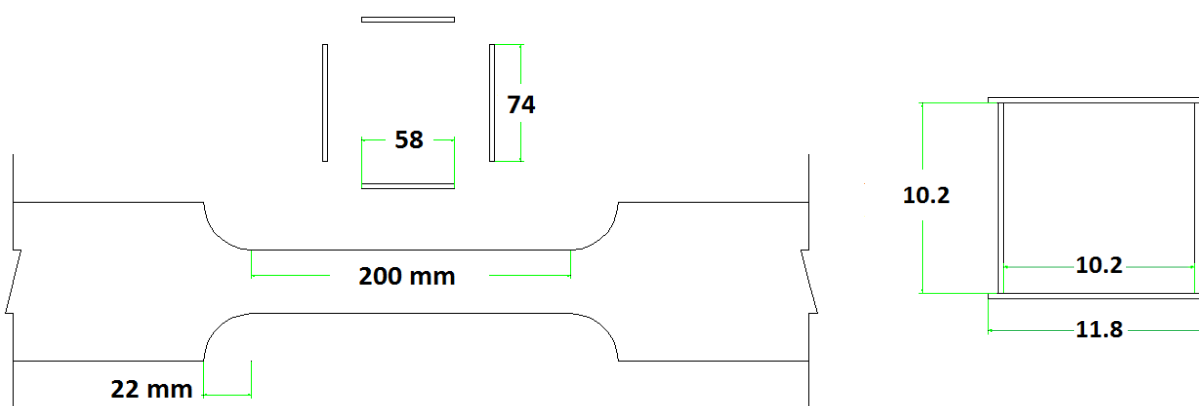


ب. نمونه BoxFBe به همراه جانمایی کرنش سنجه‌ها و تغییر مکان سنجه‌ها

۵. مدل‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه



در هر دو نمونه مقطع مهاربند از پروفیل قوطی یکسان مطابق شکل ۶.آ به طول دو متر و با استفاده از ورق ۳ میل ساخته شده‌اند. به منظور حصول اطمینان از یکپارچگی و پیوستگی عملکرد مهاربند، ورق‌های تشکیل دهنده مقطع مهاربند در تمام طول مهاربند و با استفاده از جوش گوشه CO<sub>2</sub> به یکدیگر متصل شده‌اند. سطح مقطع مهاربند در ناحیه فیوز در مدل BoxFBe (شکل ۶.ب) براساس رابطه ۴ برابر ۷۹۲ میلی‌مترمربع و طول آن نیز براساس رابطه ۹ برابر ۲۰۰ میلی‌متر انتخاب شده است. ناحیه انتقال فیوز به مهاربند نیز همانطور که در شکل ۶.ب نشان داده شده است ربع دایره‌ای به شعاع ۲۲ میلی‌متر می‌باشد. همچنین در این مدل المان کمکی داخلی، یک قوطی ۶\*۱۰۰\*۱۰۰ و المان‌های کمکی خارجی ناودانی‌های ۶۰ استاندارد می‌باشند. طول همه این المان‌ها نیز برابر ۶۰۰ میلی‌متر انتخاب شده است. شایان ذکر است به منظور جلوگیری از حضور المان‌های کمکی در انتقال بار محوری، در ساخت مدل BoxFBe فاصله‌ای یک میلی‌متری بین جداره‌های این المان‌ها با جداره‌های فیوز با استفاده از مصالحی غیرچسبیده ایجاد شده است. همچنین المان‌های کمکی داخلی و خارجی، در ناحیه فیوز، به گونه‌ای که هیچ اتصالی با مقطع مهاربند نداشته باشند به یکدیگر جوش شده‌اند تا از این طریق امکان حرکت محوری المان‌های مذکور گرفته شود.



ب. مقطع فیوز در مدل آزمایشگاهی BoxFBe

آ. مقطع مهاربند در مدل های آزمایشگاهی

شکل ۶. جزئیات مقاطع مهاربند و فیوز در مدل های آزمایشگاهی

ستاپ کلی آزمایش در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود هر دو انتهای نمونه‌ها به صورت گیردار به ورق‌های انتهایی جوش داده شده‌اند. ورق‌های انتهایی نیز با استفاده از پیچ‌های مقاومت بالا ۱۰.۹ در یک طرف به یک قاب صلب و در طرف دیگر به لودسل ۱۰۰ تنی متصل شده‌اند.



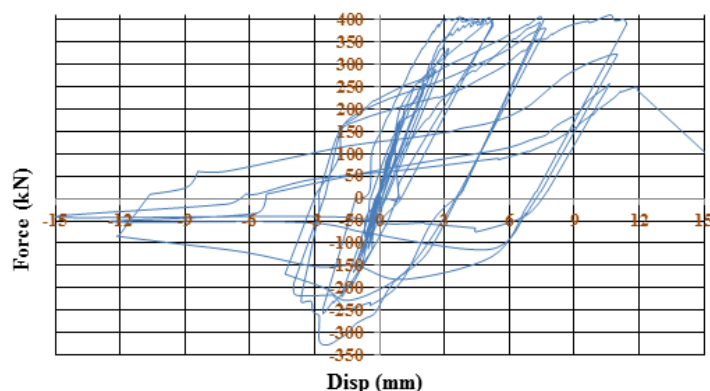
شکل ۷. ستاپ آزمایش

در این آزمایش‌ها به منظور جلوگیری از حرکت جانبی لودسل ۱۰۰ تنی و ورق‌های انتهایی متصل به آن از یک تکیه‌گاه غلطکی که در شکل ۷ مشخص شده، استفاده شده است. این امر تضمین کننده اعمال بار به صورت محوری خالص به نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

همچنین جهت اعمال بار به نمونه‌ها از یک جک ۲۰۰ تنی استفاده شده است. همانطور که در شکل ۵.۵ نیز مشاهده می‌شود برای نمونه Box از ۴ عدد کرنش سنج در ناحیه میانی مهاربند و ۵ عدد تغییرمکان سنج به منظور تخمین جابجایی‌های نقاط گوناگون مهاربند استفاده شده است. برای نمونه BoxFBe نیز مطابق شکل ۵.۵ از دو عدد کرنش سنج در فاصله میانی بین ورق انتهایی اعمال بار و وسط مهاربند استفاده شده است. همچنین در این نمونه از ۶ عدد تغییرمکان سنج در نقاط مختلف المان مطابق شکل ۵.۵ استفاده شده است.

## ۲-۵ تفسیر منحنی‌های هیستریسیس مدل‌های آزمایشگاهی

در این قسمت به بررسی منحنی‌های هیستریسیس مدل‌های آزمایشگاهی Box و BoxFBe پرداخته شده است. در شکل ۸ منحنی هیستریسیس مدل Box نشان داده شده است.

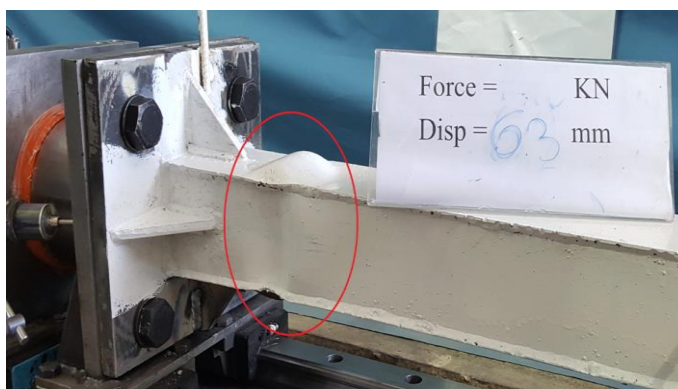


شکل ۸. منحنی هیستریسیس مدل آزمایشگاهی Box

همانطور که از این منحنی مشخص است، این مدل در بار فشاری نتوانسته رفتار مطلوبی از خود بروز دهد. مطابق این منحنی اولین خرابی در این مدل در بار فشاری ۳۲۷ کیلونیوتن و در تغییرمکان متناظر ۲,۳۸ میلی‌متر اتفاق افتاده است. این خرابی همانطور که در شکل ۸.۹ نشان داده است به صورت کماتش موضعی و در انتهای نزدیک به محل اعمال بار مهاربند رخ داده است. پس از این و مطابق انتظار مدل Box در سیکل‌های بعدی بارگذاری، در ناحیه فشاری به شدت دچار افت مقاومت شده است. در ناحیه کششی نیز اولین تسلیم در این مدل در بار ۳۳۵ کیلونیوتن و در تغییرمکان متناظر ۳,۱۸ میلی‌متر اتفاق افتاده است. حداکثر ظرفیت کششی ایجاد شده در این مدل نیز برابر ۴۱۰ کیلونیوتن و در تغییرمکان ۱۰,۶ میلی‌متر بوده است. پس از این و به علت پارگی مقطع بر اثر کماتش موضعی ایجاد شده در انتهای مهاربند، مدل Box در بارکششی نیز دچار افت مقاومت شده و در نهایت در بار ۲۴۹ کیلونیوتن و در تغییرمکان متناظر ۱۱,۸ میلی‌متر از کار افتاده است. وضعیت نهایی مدل Box در شکل ۹.۵ نشان داده شده است.

در شکل ۱۰ منحنی هیستریسیس مدل BoxFBe به نمایش درآمده است. در این مدل ظرفیت فیوز تعیین کننده ظرفیت مهاربند است. در واقع مدل BoxFBe همان مدل Box است که در میانه آن مقطع مهاربند به اندازه ۴۰٪ کاهش یافته و بوسیله المان‌های کمکی خارجی و داخلی به صورت جانبی مقید شده است. به عبارتی دیگر در طراحی، ظرفیت نهایی مدل BoxFBe در حدود ۶۰ درصد ظرفیت نهایی مدل Box می‌باشد. منحنی مدل BoxFBe (شکل ۱۰) به صورت چاق و دوکی شکل بوده که بیانگر عملکرد مطلوب و مناسب مدل BoxFBe در برابر بارگذاری سیکلی اعمالی می‌باشد. همانطور که در این منحنی مشاهده می‌شود در این مدل، مهاربند در بار کشش و فشار عملکرد یکسانی داشته که علت آن حضور المان فیوز مقید شده جانبی در این مدل بوده است. در واقع حضور المان کمکی در ناحیه فیوز از کماتش موضعی مهاربند در این ناحیه جلوگیری کرده و سبب شده تا مهاربند بتواند در بارگذاری فشاری همچون بارگذاری کششی عملکرد مورد قبولی از خود ارائه دهد. این موضوع در شکل ۱۱.۱۱ قابل رویت می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده از کار آزمایشگاهی این مدل در ناحیه فشاری در بار ۱۲۰ کیلونیوتن و در تغییرمکان متناظر ۰,۸۵۵ میلی‌متر دچار تسلیم اولیه شده است. همچنین حداکثر ظرفیت بار فشاری تحمل شده توسط این مدل برابر ۲۹۹ کیلونیوتن بوده که در تغییرمکان متناظر ۶,۶ میلی‌متر رخ داده است. نهایتاً این المان در

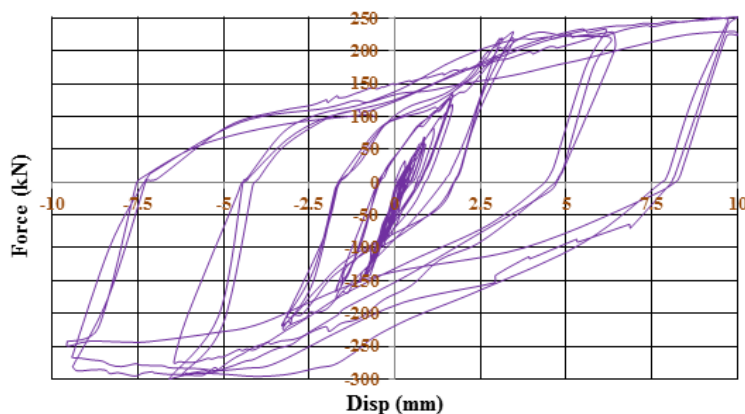
ناحیه فشاری توانسته تا تغییر مکان نهایی ۹،۴ میلی‌متر و بار متناظر ۲۸۱ کیلونیوتن به کارش ادامه دهد. در ناحیه کششی نیز این مدل در بار ۱۲۷ کیلونیوتن و تغییر مکان متناظر ۱،۵ میلی‌متر دچار تسلیم اولیه شده است. در ادامه این مدل توانسته به حداکثر ظرفیت کششی ۲۵۱ کیلونیوتن در تغییر مکان متناظر ۱۰ میلی‌متر برسد و سپس در این بار همانطور که در شکل ۱۱ ب نشان داده شده، در قسمت انتهایی فیوز دچار پارگی شده است.



ب. پارگی مهاربند در بار کششی در محل وقوع کماتش موضعی

آ. کماتش موضعی در انتهای نزدیک به محل اعمال بار مهاربند

شکل ۹. نحوه خرابی مهاربند در مدل آزمایشگاهی Box



شکل ۱۰. منحنی هیستریسیس مدل آزمایشگاهی BoxFBe



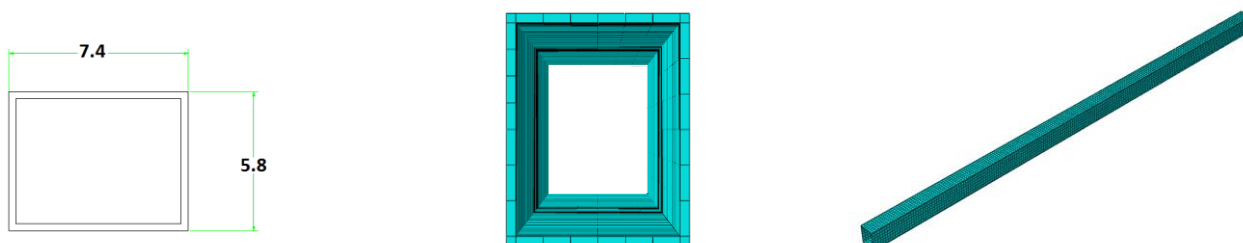
ب. پارگی مهاربند در ناحیه انتهایی فیوز در بار کششی

آ. جلوگیری از کماتش موضعی فیوز بوسیله المان کمکی

شکل ۱۱. نحوه خرابی مهاربند در مدل آزمایشگاهی BoxFBe

## ۶- مطالعات عددی

در این قسمت به منظور بررسی کارایی مهاربندهای LF-AECB به عنوان یک روش جایگزین و مطمئن به جای مهاربندهای هم محور عادی یک مطالعه عددی انجام شده است. به همین منظور مطابق شکل ۱۲.آ.ب یک مدل عددی سه بعدی با عنوان Numerical-Box در نرم افزار آباکوس ۶.۱۲ ساخته شده است. این مدل یک مهاربند هم محور عادی با مقطع باکس (شکل ۱۲.ج) و با ضخامت ۳ میلی متر می باشد. مدل Numerical-Box دارای سطح مقطع یکسان با سطح مقطع فیوز موجود در مدل آزمایشگاهی BoxFBe است. به عبارتی هر دو مدل دارای ظرفیت باربری یکسانی می باشند و به همین دلیل مقایسه این دو مدل با یکدیگر می تواند عملکرد بهتر یک سیستم مهاربندی نسبت به سیستم دیگر را نشان دهد. در ساخت پارت های مدل Numerical-Box در نرم افزار آباکوس از المان های سه بعدی Solid-Deformable استفاده شده است. مدل Numerical-Box به نحوی پارتیشن بندی شده است که شکل تمامی وجوه آن از نوع Hex و تکنیک مورد استفاده در آن از نوع Structured باشد. همچنین اندازه تمامی المان ها در این مدل برابر ۱ سانتی متر در نظر گرفته شده است. نوع المان های مورد استفاده در مش بندی نیز C3D8I یا همان المان های آجری ۸ نقطه ای خطی است که از روش Incompatible modes در



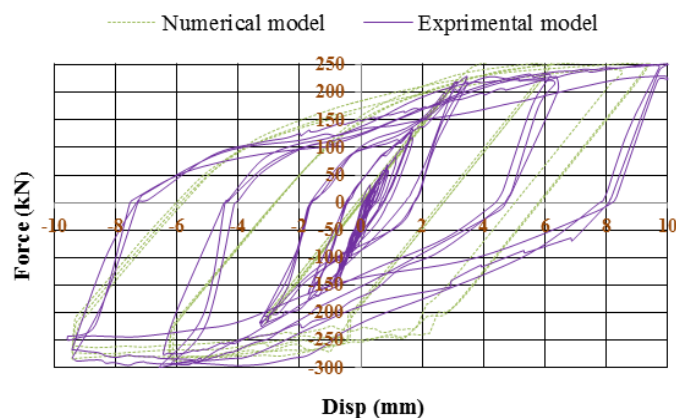
آ. نمای کلی مدل مش بندی شده Numerical-Box در نرم افزار آباکوس  
 ب. مقطع مدل مش بندی شده Numerical-Box در  
 ج. مقطع مهاربند در مدل Numerical-Box  
 شکل ۱۲. جزئیات مدل Numerical-Box

حل همگرایی آنالیز عددی این نوع المان ها استفاده می شود. منحنی تنش کرنش مصالح فولادی تعریف شده در تحلیل های عددی این مطالعه نیز همانند منحنی تنش کرنش مصالح فولادی استفاده شده در مطالعات آزمایشگاهی (شکل ۱۶.آ) است با این تفاوت که به منظور تعریف قسمت دوم منحنی که دارای شیب صفر است، و عملاً امکان تعریف این شیب در نرم افزار آباکوس میسر نمی باشد، از یک شیب بسیار کوچک و متمایل به صفر استفاده شده است.

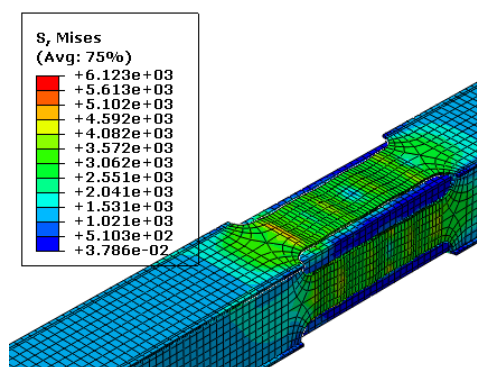
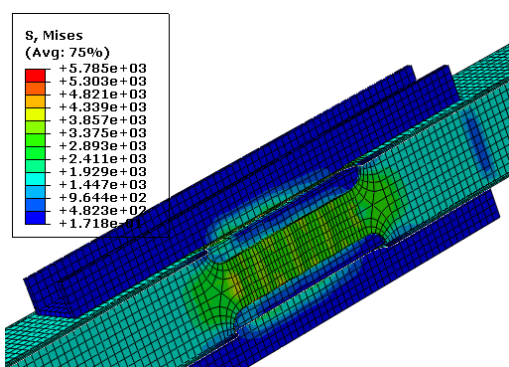
قبل از هرچیز بایستی صحت سنجی مطالعات عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گیرد. به همین منظور مطابق شکل ۱ مدل عددی سه بعدی مهاربند BoxFBe در نرم افزار آباکوس ۶.۱۲ ساخته شده و تحت بارگذاری سیکی مشابه کارهای آزمایشگاهی قرار داده شده است. در ساخت پارت های مدل عددی BoxFBe نیز از المان های سه بعدی Solid-Deformable استفاده شده است. همچنین پارتیشن بندی این المان به نوعی بوده است که شکل تمامی وجوه آن از نوع Hex و تکنیک مورد استفاده در آن از نوع Structured باشد. به علاوه اندازه المان ها در ناحیه فیوز برابر ۰.۵ و در نواحی خارج از فیوز برابر ۱ سانتی متر در نظر گرفته شده است. نوع المان های مورد استفاده در مش بندی نیز C3D8I می باشند. منحنی هیستریسیس مدل های آزمایشگاهی و عددی مهاربند BoxFBe در شکل ۱۳ با یکدیگر مقایسه شده اند. همانطور که در این شکل نیز قابل مشاهده است مدل عددی توانسته با دقت مناسبی رفتار مدل آزمایشگاهی را به لحاظ ظرفیت باربری تخمین بزند. نکته ای که در مقایسه دو منحنی قابل رویت می باشد عدم انطباق دو منحنی در نواحی باربرداری می باشد. این موضوع سبب می شود که سطح زیر دو منحنی که بیانگر میزان انرژی تلف شده بوسیله مدل های مورد مطالعه است مقداری با یکدیگر متفاوت باشند. علت عدم انطباق این دو منحنی در نواحی باربرداری نیز احتمالاً به علت تفاوت جزئی در تعریف خصوصیات مصالح فولادی مورد استفاده در مدل عددی BoxFBe مرتبط می باشد. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد منحنی تنش کرنش مصالح فولادی مورد استفاده در مطالعات عددی همانند منحنی تنش کرنش شکل ۱۶.آ می باشد که برای مدل های آزمایشگاهی استفاده شده است با این تفاوت که در تعریف قسمت دوم منحنی مذکور به علت وجود شیب صفر که در نرم افزار آباکوس قابل تعریف نیست، یک شیب اندک متمایل به



صفر استفاده شده است. همین تفاوت جزئی احتمالاً سبب عدم انطباق دو منحنی ارائه شده در شکل ۱۳ در نواحی باربرداری شده است. همچنین نحوه تغییر شکل مدل عددی تحت بارگذاری سیکلی همانند نحوه تغییر شکل مدل آزمایشگاهی اش بوده است. به عبارتی دیگر در مدل عددی نیز همانند مدل آزمایشگاهی تسلیم و کمانش موضعی در فیوز رخ داده اما المان‌های کمکی داخلی و خارجی از کمانش موضعی در این ناحیه جلوگیری کرده اند. این موضوع در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

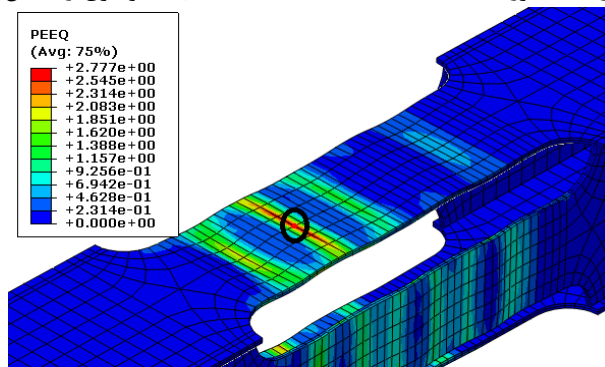


شکل ۱۳. مقایسه منحنی هیستریسیس مدل های آزمایشگاهی و عددی BoxFBe



ب. جلوگیری از کمانش موضعی توسط المان های کمکی

آ. کمانش موضعی مهاربند در ناحیه فیوز



ج. منحنی کرنش پلاستیک معادل برای در فیوز موضعی در سیکل آخر بارگذاری

شکل ۱۴. نحوه تغییر شکل مدل عددی BoxFBe

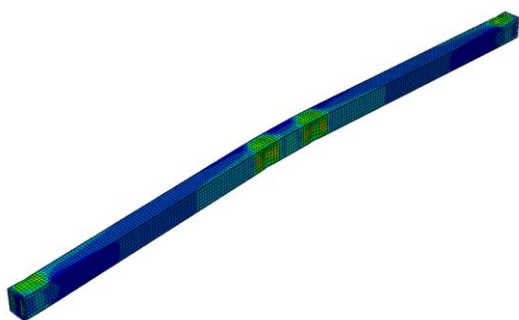
منحنی هیستریسیس مدل Numerical-Box در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مطابق انتظار این مدل به علت کمانش کلی مهاربند در بار فشاری نتوانسته عملکرد مورد قبولی از خود ارائه دهد. این مدل در ناحیه کشش در بار ۱۳۶ کیلونیوتن و تغییر مکان متناظر ۳،۱۴ میلی متر تسلیم شده است. مقادیر حداکثر ظرفیت کششی برای این مدل نیز برابر ۲۲۲ کیلونیوتن بوده و در این مدل تغییر مکان نهایی کششی ۱۲،۱۹ میلی متر رخ داده است. در ناحیه فشاری نیز مهاربند تا بار ۱۷۷ کیلونیوتن و تغییر مکان متناظر ۴،۴۷ میلی متر بدون

هیچ گونه کمانشی رفتار کرده است. اما بعد از عبور از این بار مهاربند همانند شکل ۱۵. ب دچار کمانش کلی شده و در سیکل های بعدی نیز با افت شدید در ظرفیت بار فشاری روبرو شده است.

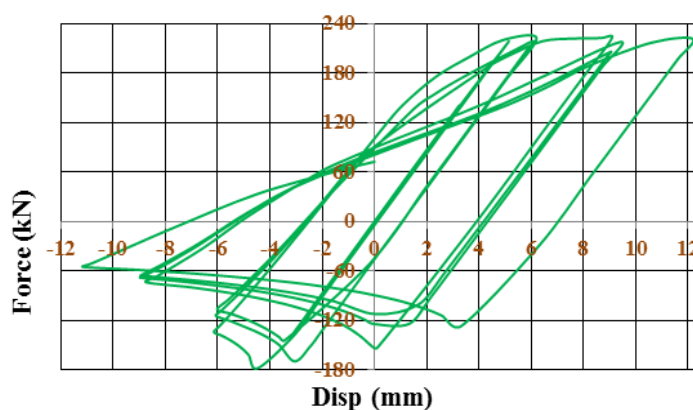
## ۷- مقایسه پاسخ مدل های مورد مطالعه با یکدیگر

در این قسمت به مقایسه پاسخ های شکل پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی مدل های سازه ای با یکدیگر پرداخته شده است. در شکل ۱۶ منحنی پوش سه مدل مورد مطالعه با یکدیگر مقایسه شده است. از این منحنی به منظور مقایسه شکل پذیری و ظرفیت باربری مدل های مورد مطالعه استفاده شده است. شکل پذیری مدل های مورد نظر در دو ناحیه کشش و فشار به صورت مجزا انجام شده است. به منظور مقایسه شکل پذیری کششی سه مدل مورد مطالعه با یکدیگر ابتدا بایستی مقادیر تغییر مکان کششی متناظر با اولین تسلیم  $\delta_F^t$  در سه مدل به دست آورده شود. سپس تغییر مکان نهایی کششی  $\delta_F^t$  مدل ها باید تخمین زده شود. در این مطالعه تغییر مکان نهایی (چه در ناحیه کششی و چه در ناحیه فشاری)  $\delta_F^t$  تغییر مکان متناظر با نیروی معادل هفتاد درصد نیروی حداکثر در شیب نزولی منحنی پوش در نظر گرفته شده است. پس از محاسبه  $\delta_F^t$  مقدار شکل پذیری کششی  $\mu^t$  از رابطه زیر قابل محاسبه می باشد:

$$\mu^t = \frac{\delta_F^t}{\delta_y^t} \quad (10)$$

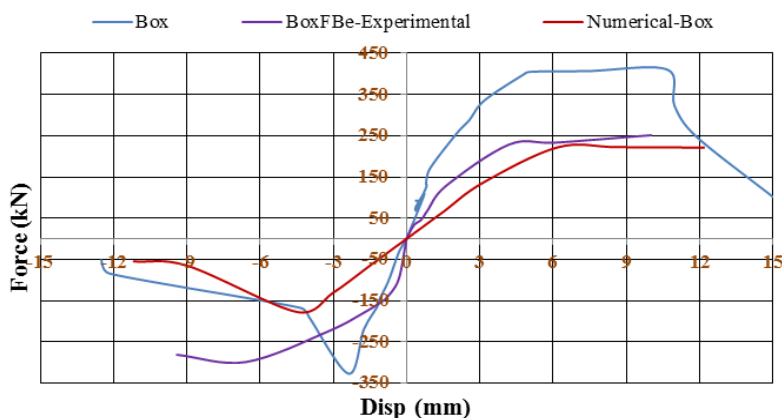


ب. کمانش کلی مهاربند در مدل Numerical-Box



آ. منحنی هیستریسیس مدل Numerical-Box

شکل ۱۵. نتایج مربوط به مدل Numerical-Box



شکل ۱۶. مقایسه منحنی های پوش مدل های مورد مطالعه با یکدیگر

در جدول ۱ به ترتیب مقادیر تغییر مکان تسلیم، نهایی و شکل پذیری کششی مدل های مورد مطالعه ارائه شده است.

جدول ۱: مقایسه شکل پذیری کششی مدل های مورد مطالعه

مدل های مورد مطالعه	Box	BoxFBe	Numerical Box
$\delta_y^c$	۳,۱۸۵	۱,۵	۳,۱۴
$\delta_f^c$	۱۱,۴	۱۰,۰۲	۱۲,۱۸۵
$\mu^c$	۳,۵۸	۶,۶۸	۳,۸۸

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می شود مدل BoxFBe نسبت به دو مدل دیگر از شکل پذیری کششی به مراتب بهتری برخوردار می باشد. علت این امر نیز مرتبط با تغییر مکان تسلیم کمتر در این مدل نسبت به سایر مدل ها است. در مدل BoxFBe علیرغم اینکه ظرفیت کششی مدل در حدود ۴۰٪ کمتر از مدل Box می باشد اما مقدار  $\mu^c$  در این مدل در حدود ۸۷٪ بیشتر است همچنین در مقایسه دو مدل BoxFBe و Numerical Box که دارای ظرفیت کششی برابری می باشند مقدار  $\mu^c$  برای مدل اول در حدود ۷۲٪ بیشتر می باشد. با توجه به موارد گفته شده این مطلب به دست می آید که مهاربندهای همگرا LF-AECB به لحاظ شکل پذیری کششی المان های قابل اعتماد و مورد قبولی به عنوان جایگزین مهاربندهای هم محور عادی می باشند. همچنین استفاده از این المان ها به منظور کاهش ظرفیت اتصالات مهاربندی نه تنها شکل پذیری کششی مهاربند را دچار مشکل نخواهد کرد بلکه به مراتب آن را بهبود خواهد بخشید. برای محاسبه شکل پذیری در ناحیه فشاری نیز ابتدا باید مقادیر تغییر مکان تسلیم  $\delta_y^c$  و نهایی فشاری  $\delta_f^c$  به دست آورده شوند. سپس مقدار شکل پذیری فشاری  $\mu^c$  از رابطه زیر قابل محاسبه می باشد:

$$\mu^c = \frac{\delta_f^c}{\delta_y^c} \quad (11)$$

مقادیر تغییر مکان تسلیم، نهایی و شکل پذیری فشاری مدل های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مقایسه شکل پذیری فشاری مدل های مورد مطالعه

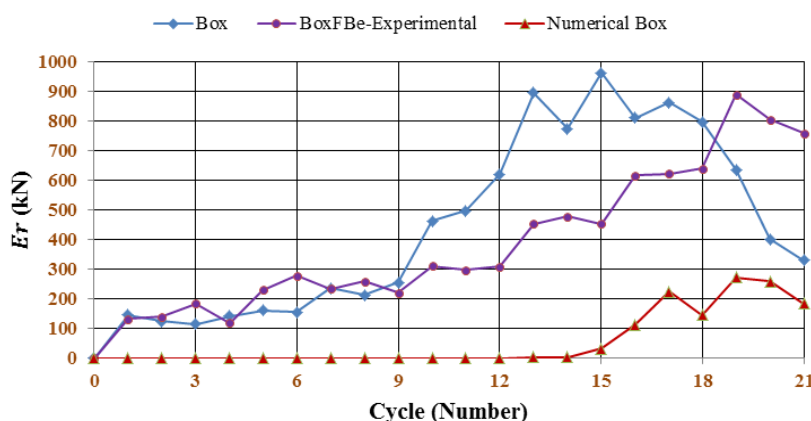
مدل های مورد مطالعه	Box	BoxFBe	Numerical Box
$\delta_y^c$	۲,۳۷۵	۰,۸۵۵	۴,۴۶
$\delta_f^c$	۳,۵۴	۹,۴۰۵	۵,۹
$\mu^c$	۱,۴۹	۱۱	۱,۳۲

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می شود مقدار شکل پذیری فشاری در مدل BoxFBe به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از این مقدار در دو مدل دیگر است. این موضوع به وضوح در منحنی پوش مدل های مورد مطالعه نیز قابل فهم است. در مدل های Box و Numerical که نماینده های مهاربندهای همگرا عادی هستند، به علت کماتش مهاربند نتوانسته عملکرد قابل قبولی در ناحیه فشاری از خود ارائه دهد. این در حالی است که مهاربند مدل BoxFBe در ناحیه فشاری همانند ناحیه کششی توانسته یک شکل پذیری مطلوب و رضایتبخش از خود نشان دهد. مقدار  $\mu^c$  در مدل BoxFBe نسبت به مدل های Box و Numerical Box به ترتیب ۷,۳۸ و ۸,۳۳ برابر می باشد. این موضوع این مطلب را نتیجه می دهد که در ناحیه فشاری مهاربندهای LF-AECB به طور باورنکردنی از شکل پذیری فشاری بهتری نسبت به مهاربندهای همگرا عادی برخوردار می باشند که علت آن نیز عدم کماتش فشاری این نوع مهاربندها است. به عبارتی دیگر در مهاربندهای جدید LF-AECB ضعف اصلی مهاربندهای همگرا عادی که کماتش در فشار است، به درستی رفع شده است. این ویژگی خصوصیت تحسین برانگیز مهاربندهای جدید LF-AECB می باشد. پس از مقایسه شکل پذیری مدل های مورد مطالعه با یکدیگر حال به مقایسه ظرفیت اتلاف انرژی این مدل ها پرداخته می شود. در جدول ۳ مقدار انرژی تلف شده کلی مدل ها  $E^t$  با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۳ مقدار انرژی تلف شده کلی بوسیله مدل های مورد مطالعه

مدل های مورد مطالعه	Box	BoxFBe	Numerical Box
$E^t$	43442.6994	43131.63034	12137.9

همانطور که در این جدول مشاهده می شود مدل BoxFBe با اینکه ظرفیت باربری در حدود ۶۰٪ مدل Box دارد اما توانسته به علت عملکرد یکسان در فشار و کشش و داشتن یک منحنی هیستریسیس چاق و دوکی شکل (شکل ۱۳) میزان انرژی تلف شده ای برابر با مدل Box داشته باشد. با عنایت به این موضوع می توان نتیجه گرفت که به لحاظ ظرفیت اتلاف انرژی، استفاده از مهاربندهای LF-AECB برای کاهش ظرفیت باربری مهاربندهای همگرا عادی به منظور کاهش هزینه های ساخت اتصالات این سیستم های سازه ای مشکلی برای ساختمان بوجود نخواهد آورد. در مقایسه میزان انرژی تلف شده مدل BoxFBe نسبت به مدل Numerical Box که دارای ظرفیت باربری یکسان می باشند، مشاهده می شود مدل اولی ظرفیت اتلاف انرژی در حدود ۳،۵۵ برابر این مقدار نسبت به مدل دوم دارد. این موضوع به وضوح نشان دهنده این است که مهاربندهای LF-AECB به لحاظ ظرفیت اتلاف انرژی به طور قابل ملاحظه ای از مهاربندهای همگرا عادی مشابه شان (به لحاظ ظرفیت باربری)، عملکرد به مراتب بهتری را از خود نشان می دهند. همچنین در شکل ۱۷ منحنی مقدار انرژی نسبی مدل های مورد مطالعه با یکدیگر مقایسه شده اند. هر نقطه در این منحنی نشان دهنده نسبت میزان انرژی مستهلک شده در هر سیکل به میانگین حداکثر تغییر مکان کششی و فشاری در آن سیکل می باشد. به طور کلی تحت بارگذاری سیکلی المانی به خوبی جذب انرژی را انجام می دهد که با افزایش تغییر مکان در آن، مقدار انرژی مستهلک شده اش نیز افزایش یابد. همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می شود، مدل های Box و Numerical Box به علت کماتش کلی مهاربند که به ترتیب در سیکل های بارگذاری ۱۵ و ۱۷ در این مدل ها اتفاق افتاده، دچار افت در انرژی مستهلک شده شان در سیکل های بعدی بارگذاری شده اند. اما در نمونه BoxFBe شیب منحنی صعودی بوده و با افزایش سیکل بارگذاری تغییر مکانی مقدار جذب انرژی نیز افزایش یافته است. این امر به خاطر عدم کماتش مهاربند در این مدل و رفتار یکسان مهاربند در فشار و کشش می باشد. همچنین مطابق جدول ۳ همانطور که گفته شده مقدار جذب انرژی کلی در دو مدل Box و BoxFBe یکسان بوده است، این در حالی است که اگر مصالح فولادی استفاده شده در مهاربندها از شکل پذیری بیشتری برخوردار بودند و توانایی تحمل تغییر شکل های بیشتری داشتند چه بسا جذب انرژی در مدل BoxFBe به مراتب بیشتر می شد. در این حالت جایگزینی این مدل به جای مدل Box نه تنها ظرفیت بار وارده به اتصالات مهاربندی را کاهش می داد بلکه با جذب بیشتر انرژی در آن نیز همراه می شد. در این خصوص بایستی مطالعات بیشتر در تحقیقات بعدی صورت پذیرد تا صحت این موضوع بررسی شود.



شکل ۱۷. مقایسه منحنی های انرژی نسبی مدل های مورد مطالعه



## ۸- نتایج

در این مطالعه به منظور بهبود رفتار مهاربندهای همگرا عادی و افزایش شکل پذیری و جذب انرژی لرزه ای این مهاربندها یک سیستم مهاربندی جدید با عنوان مهاربندهای همگرا LF-AECB معرفی شده است. به همین منظور سه مدل آزمایشگاهی و عددی ساخته و پاسخ های آنها تحت بارگذاری سیکلی مورد مطالعه قرار گرفته است. دو مدل Box و BoxFBe مدل های آزمایشگاهی مورد مطالعه و مدل Numerical Box مدل عددی ساخته شده در نر افزار آباکوس ۶،۱۲ می باشند. مدل های Box و Numerical Box نماینده مهاربندهای همگرا عادی و مدل BoxFBe نماینده سیستم مهاربندی جدید هستند. ظرفیت باربری دو مدل Numerical Box و BoxFBe با یکدیگر برابر و ۶۰٪ ظرفیت باربری مدل Box است. با توجه به پاسخ این مدل ها و مقایسه آنها با یکدیگر نتایج زیر حاصل شد:

۱- با توجه به منحنی های هیستریسیس به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی و عددی برای مدل های Box و Numerical Box، مطابق انتظار مدل های مذکور در ناحیه فشاری عملکرد خوبی به لحاظ شکل پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی از خود ارائه نکرده اند که علت آن کماتش کلی مهاربند در این مدل ها بوده است. اما بر خلاف مدل های گفته شده منحنی هیستریسیس مدل BoxFBe یک منحنی چاق و دوکی شکل بوده است. این منحنی نشان دهنده جذب انرژی بالا به همراه رفتار یکسان مهاربند در فشار و کشش و عدم وقوع کماتش کلی در این مدل می باشد. با توجه به این مطلب می توان گفت سیستم فیوز مقید شده جانبی به کارگیری شده در مهاربندهای LF-AECB به خوبی می تواند از وقوع کماتش در مهاربند جلوگیری کرده و به همین علت در این سیستم های مهاربندی به خوبی از ظرفیت باربری فشاری مهاربند همانند ظرفیت کششی آن بهره برداری می شود.

۲- در مقایسه مقدار ضریب شکل پذیری کششی ( $\mu^t$ ) مدل های مورد مطالعه، این مقدار در مدل BoxFBe نسبت به مدل های Box و Numerical Box به ترتیب ۸۷٪ و ۷۲٪ بیشتر بوده است. این مطلب عملکرد به مراتب بهتر مهاربندهای جدید LF-AECB نسبت به مهاربندهای همگرا عادی را به لحاظ شکل پذیری کششی نشان می دهد. همچنین بیانگر این است که استفاده از مهاربندهای LF-AECB به منظور کاهش ۴۰٪ ظرفیت اتصالات مهاربندی نه تنها مشکلی به لحاظ شکل پذیری کششی برای مهاربند ایجاد نمی کند بلکه به طور قابل ملاحظه ای آن را نیز افزایش می دهد.

۳- همانطور که در متن مقاله نیز ذکر شده است، مقدار ضریب شکل پذیری فشاری ( $\mu^c$ ) از تقسیم تغییرمکان متناظر با نیرو معادل ۷۰٪ نیروی حداکثر فشاری در قسمت نزولی منحنی، به تغییرمکان متناظر با اولین کماتش در مهاربند به دست می آید. مقایسه مقادیر ضریب شکل پذیری فشاری ( $\mu^c$ ) مدل های مورد مطالعه بیانگر عملکرد به مراتب بهتر مهاربندهای LF-AECB نسبت به مهاربندهای هم محور عادی بوده است. در این مطالعه مدل BoxFBe به علت عدم وقوع کماتش فشاری توانسته مقدار  $\mu^c$  در حدود ۱۷ از خود ارائه دهد که این مقدار به ترتیب ۱۱،۳۷ و ۱۲،۸۳ برابر مقدار  $\mu^c$  در مدل های Box و Numerical Box بوده است. به عبارت دیگر با توجه به تعریف پارامتر  $\mu^c$  و نتایج ذکر شده در بالا می توان گفت که مهاربندهای LF-AECB بر خلاف مهاربندهای هم محور عادی قادرند در ناحیه فشاری همانند ناحیه کششی تغییرمکان های قابل ملاحظه بدون افت قابل توجه در ظرفیت باربری تحمل نمایند.

۴- مقدار انرژی کلی تلف شده  $E^t$  در دو مدل Box و BoxFBe با یکدیگر برابر و حدود ۳،۵۵ برابر این مقدار در مدل Numerical Box بوده است. از این مطلب این نتیجه گرفته می شود که مهاربندهای LF-AECB به عنوان یک جایگزین مطمئن و مناسب به جای مهاربندهای همگرا عادی می توانند به کارگیری شوند. همچنین با توجه به این نتایج می توان گفت استفاده از مهاربندهای LF-AECB به منظور کاهش ظرفیت ۴۰ درصدی اتصالات مهاربندی هیچ مشکلی به لحاظ جذب انرژی در سیستم مقاوم سازه ای ساختمان ایجاد نخواهد کرد.

- ۵- از مقایسه منحنی انرژی نسبی  $E^T$  مدل‌های مورد مطالعه این مطلب نتیجه گرفته می‌شود که در مهاربندهای همگرا عادی پس از وقوع کمانش در مهاربند، مقدار جذب انرژی در هر سیکل بارگذاری کاهش می‌یابد و با افزایش مقدار تغییرشکل المان، دیگر افزایش نخواهد یافت. این در حالی است که در مهاربندهای LF-AECB تا لحظه خرابی المان مقدار جذب انرژی در هر سیکل بارگذاری با افزایش تغییرشکل المان مهاربندی افزایش می‌یابد. علت این موضوع نیز عدم وقوع کمانش مهاربند و استفاده از ظرفیت کامل جذب انرژی آن در سیستم‌های مهاربندی LF-AECB می‌باشد.
- ۶- باتوجه به منحنی هیستریسیس پهن و پایدار به دست آمده برای مدل BoxFBe (شکل ۱۰) و عملکرد بهتر این مدل به لحاظ شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی نسبت به مدل آزمایشگاهی Box و مدل عددی Numerical Box (در شکل-های ۱۶ و ۱۷ به همراه جداول ۱ تا ۳ در بخش ۷ مقاله ارائه شده‌اند)، که هر دو نماینده مهاربندهای هم‌محور عادی می‌باشند، می‌توان گفت که مهاربندهای همگرا LF-AECB به عنوان یک جایگزین مطمئن و مناسب مهاربندهای همگرا عادی می‌توانند در نظر گرفته شوند، زیرا این مهاربندها با رفع نقص کمانش فشاری مهاربندهای همگرا عادی، هم به لحاظ شکل‌پذیری و هم به لحاظ جذب انرژی از ظرفیت به مراتب بزرگتری برخوردار می‌باشند.
- ۷- با توجه به نتایج ارائه شده در بندهای ۲ تا ۴ این بخش از مطالعه، می‌توان گفت برای کاهش ۴۰ درصدی ظرفیت باربری اتصالات مهاربندی به منظور کاهش هزینه ساخت این اتصالات، استفاده از مهاربندهای LF-AECB با ظرفیت باربری ۴۰ درصد کمتر نسبت به مهاربندهای همگرا عادی به عنوان جایگزین این مهاربندها، هیچ مشکلی به لحاظ ظرفیت اتلاف انرژی برای سیستم سازه‌ای ایجاد نخواهد کرد و همچنین شکل‌پذیری سیستم مذکور را نیز به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد داد. به علاوه با توجه به منحنی انرژی نسبی  $E^T$  مدل‌های مطالعه شده که در بخش ۷ مقاله ارائه شده است (شکل ۱۷)، می‌توان گفت که در صورت استفاده از فولاد با ظرفیت شکل‌پذیری بیشتر در ساخت مهاربندهای همگرا به منظور تحمل سیکل‌های بارگذاری تغییرمکانی بزرگتر، چه بسا مقدار انرژی تلف شده کلی  $E^T$  در مهاربندهای LF-AECB در مقایسه با مهاربندهای هم‌محور عادی با ظرفیت باربری ۴۰٪ بزرگتر، بیشتر نیز شود. البته بررسی صحت این موضوع نیازمند انجام یک کار آزمایشگاهی دقیق می‌باشد.

## مراجع

- [1] Moghaddam, H. and Estekanchi, H. (1995). On the characteristics of off-centre bracing system. *J. Construct. Steel Res.*, 35(3), 361-376.
- [2] Moghaddam, H. and Estekanchi, H. (1999). Seismic behavior of off-centre bracing systems. *J. Construct. Steel Res.*, 51(2), 177-196.
- [3] Bazzaz, M., Kheyroddin, A., Kafi, M.A. and Andalib, Z. (2011). Evaluating the performance of steel ring in special bracing frame. In: *6th International Conference of Seismology and Earthquake Engineering*. Tehran, Iran, May.
- [4] Bazzaz, M., Kheyroddin, A., Kafi, M.A. and Andalib, Z. (2012). Evaluation of the seismic performance of off-centre bracing system with ductile element in steel frames. *Steel Compos. Struct., Int. J.*, 12(5), 445-464.
- [5] Bazzaz, M., Kheyroddin, A., Kafi, M.A., Andalib, Z. and Esmaeili, H. (2014). Evaluating the seismic performance of off-centre bracing system with circular element in optimum place. *Int. J. Steel Struct.*, 14(2), 293-304.
- [6] Bazzaz, M., Andalib, Z., Kafi, M.A. and Kheyroddin, A. (2015a). Evaluating the performance of OBS-C-O in steel frames under monotonic load. *Earthq. Struct., Int. J.*, 8(3), 697-710.
- [7] Bazzaz, M., Andalib, Z., Kheyroddin, A. and Kafi, M.A. (2015b). Numerical comparison of the seismic performance of steel rings in off-centre bracing system steel rings in off-centre bracing system. *Steel Compos. Struct., Int. J.*, 19(4), 917-937.
- [8] Iwata, M., Kato, T. and Wada, A. (2000). Buckling-restrained braces as hysteretic dampers. In: *3rd International Conference STESSA*. Montreal, Canada, August.
- [9] Sabelli, R., Mahin, S. and Chang, C. (2003). Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces. *J. Eng Struct.*, 25(5), 655-66.
- [10] Kiggins, S. and Uang, C.M. (2006). Reducing residual drift of buckling-restrained braced frames as a dual system. *J. Eng. Struct.*, 28 (11), 1525-1532.

- [11] Hoveidae, N., Tremblay, R., Rafezy, B. and Davaran, A. (2015) .Numerical investigation of seismic behavior of short-core all-steel buckling restrained braces. *J.Construct. Steel Res.*, 114, 89-99.
- [12] Maurya, A., Eatherton, M.R., Matsui, R. and Florig, S.H. (2016) .Experimental investigation of miniature buckling restrained braces for use as structural fuses. *J.Construct. Steel Res.*, 127, 54-65.
- [13] Balendra, T., Yu, C.H. and Lee, F.L. (2001) .An economical structural system for wind and earthquake load. *J. Eng.Struct.*, 23, 491-501.
- [14] Zahrai, S.M. and Vosooq, A.K. (2013) .Study of an innovative two-stage control system: Chevron knee bracing & shear panel in series connection. *J. Struct Eng.*, 47 (6), 881-898.
- [15] Cheraghi, A. and Zahrai, S.M. (2016) .Innovative multi-level control with concentric pipes along brace to reduce seismic response of steel frames. *J.Construct. Steel Res.*, 127, 120-135.
- [16] Federico, G., Fleischman, R. and Ward, K. (2012) .Buckling control of cast modular ductile bracing system for seismic-resistant steel frames. *J.Construct. Steel Res.*, 71, 74-82.
- [17] Ward, K.M., Fleischman, R.B. and Federico, G. (2012) .A cast modular bracing system for steel special concentrically braced frames. *J. Eng. Struct.*, 45, 104-116.
- [18] Legeron, F., Desjardins, E. and Ahmed, E. (2014) .Fuse performance on bracing of concentrically steel braced frames under cyclic loading. *J.Construct. Steel Res.*, 95, 242-255.
- [19] Desjardins, E., Legeron, F. and Ahmed, E. (2012) .Performances of ductile fuses in reducing seismic demand on connections of concentrically steel braced frames. In: *15th World conference on Earthquake Engineering*. Lisbon, Portugal, September.
- [20] Bonetti, S. (2012) .*Ductile fuses for special concentrically braced frames*. Ph.D. Dissertation; Kansas University, Kansas, US of America.
- [21] ABAQUS Ver .6.12 (2012), *User's Manual*. RI, USA.
- [22] ATC24, Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures, Applied technology council, 1992.