

## نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

### مطالعه آزمایشگاهی و عددی رفتار مهاربند کمانش ناپذیر با غلاف ترکیبی فولادی و پلی آمید

مجید قلهکی<sup>۱\*</sup>، قاسم پاچیده<sup>۲</sup>، رحیم لشکری<sup>۳</sup>، امید رضائی فر<sup>۴</sup>

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

۲- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۴- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

#### چکیده

یکی از سیستم های پرکاربرد مقاوم در برابر بارهای جانبی در طراحی و مقاوم سازی سازه های بتنی و فولادی، مهاربند فولادی است. در این مقاله مطالعه آزمایشگاهی و عددی اثرات ناشی از نوع فولاد هسته و فاصله هسته از غلاف بر رفتار مهاربند کمانش ناپذیر مورد بررسی قرار گرفته است. مدل های آزمایشگاهی شامل شش مهاربند با هسته ای از جنس فولاد ST37 معمولی و ST37-n (نرم شده در دمای ۱۰۰۰ درجه به روش اونیل) است که در آن ها فاصله هسته از غلاف برابر صفر، دو و سه میلی متر است. نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که استفاده از مهاربند به روش اونیل شده تا ۳۲ درصد از نیروی کششی و فشاری مهاربند نسبت به مهاربند با فولاد ST37 کاسته می شود. افزایش فاصله هسته از غلاف در مهاربند های با جنس فولاد ST37 و ST37-n نیز به ترتیب موجب کاهش ظرفیت باربری و استهلاک انرژی مهاربند تا میزان ۲۶ و ۵۲ درصد گردید. همچنین افزایش فاصله هسته از غلاف به بیش از ۲ میلی متر، موجب از بین رفتن تقارن و پایداری رفتار هیستریزس مهاربند شده و اعوجاج های ناشی از کمانش موضعی مهاربند در فشار، شدت بیشتری یافت.

کلمات کلیدی: مهاربند کمانش ناپذیر، غلاف فولادی، غلاف پلی آمید، فاصله ی هسته از غلاف

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2017.86109.1190	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/JSCE.2017.86109.1190	۱۳۹۷/۱۲/۲۸	۱۳۹۶/۰۸/۰۲	۱۳۹۶/۰۸/۰۲	۱۳۹۶/۰۲/۲۸	۱۳۹۶/۰۲/۲۵
				*نویسنده مسئول:		مجید قلهکی
				پست الکترونیکی:		mgholhaki@semnan.ac.ir

# Experimental and Numerical Study of Buckling Restrained Bracing Behavior with Combined Steel and Polyamide Sheath

Madjid Gholhaki<sup>1\*</sup>, Ghasem Pachideh<sup>2</sup>, Rahim Lashgari<sup>3</sup>, Omid Rezayfar<sup>4</sup>

1-Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- PhD Student in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- M.Sc. in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

4-Assisstant Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

## ABSTRACT

One of the most widely used system resisting against lateral loads in the design and retrofit of concrete and steel structures is steel bracing. One of the methods developed by the researchers is the use of confining members to prevent general buckling of bracing and reducing the effects of it. In this bracing system known as "Buckling Restrained Bracing, the axial load is born by bracing core and by using surrounding sheath, its overall buckling can be avoided. In this paper, experimental and numerical study of the effects caused by steel type of core of the distance of core from sheath on buckling restrained bracing was studied. Experimental models consist of six bracings with core of conventional ST37 and ST37-n steel (softened at a temperature of 1000 degrees by O'Neill method), in which the distance of core from sheath is zero, two, and three mm. Experimental results show that the use of softer steel with lower yield stress and with equal thickness in the core reduces bearing capacity and resistance or strength of bracing. However, bracing in smaller displacements started to energy waste. Increasing distance of the core from sheath also reduces bearing capacity and energy dissipation of bracing. In addition, increasing the distance of core from sheath to more than 2 mm causes the loss of symmetry and stability in hysteresis behavior of bracing and distortions resulting from local buckling in the bracing in pressure were intensified. Polyamide filler material had good resistance against pressure from the core and no certain damage was seen in it. Therefore, due to having less specific gravity, it could be a good alternative to concrete and reduce the overall weight of the bracing.

## ARTICLE INFO

Received: 14/05/2017

Revised: 18/06/2017

Accepted: 24/10/2017

## Keywords:

Buckling Restrained Bracing, steel sheath, polyamide sheath, distance of core from sheath, strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2017.86109.1190

\*Corresponding author: Madjid Gholhaki

Email address: mgholhaki@semnan.ac.ir

## ۱- مقدمه

همواره یکی از مشکلات و دغدغه های بزرگ مهندسان سازه، جابجایی سازه ها تحت اثر بارهای جانبی مانند باد و زلزله بوده است. وجود جابجایی جانبی از یک طرف و کمانش مهاربندهای معمولی تحت این بارها از سوی دیگر، باعث اختراع نوع خاصی از مهاربندها، موسوم به مهاربندهای کمانش ناپذیر شد. در این نوع مهاربندها با استفاده از یک سری اعضاء محصور کننده، از کمانش هسته مهاربند که بخش اصلی مهاربند بوده و وظیفه تحمل بار جانبی را بر عهده دارد، جلوگیری شده و مهاربند رفتار یکسانی در کشش و فشار از خود نشان می دهد. رفتار متقارن مهاربند در حلقه های هیستریزیس، قابلیت جذب و استهلاک انرژی و مقاومت بالا در کنار شکل پذیری زیاد از دیگر خصوصیات این نوع مهاربندها می باشد که باعث افزایش کاربرد آن ها در سازه های مختلف شده است.

از مهاربندهای کمانش ناپذیر می توان به عنوان یک سیستم میرایی هیستریزیس نام برد، زیرا المان های این سیستم به گونه ای طراحی می شوند که کلیه اعضاء قاب در محدوده الاستیک باقی مانده و فقط هسته مهاربند با تغییر شکل های غیرالاستیک و رفتار پس کمانشی باعث اتلاف انرژی فراوان در سیستم می گردد. در این سیستم مهاربندی، سازه پس از تحمل کلیه تغییر شکل های بوجود آمده پس از زلزله های شدید به حالت اولیه خود بازگشته، در حالی که فقط اعضاء مهاربندی، به خصوص هسته مهاربند دچار تغییر شکل می شود [۱].

## ۲- اعضاء تشکیل دهنده مهاربندهای کمانش ناپذیر

مهاربندهای کمانش ناپذیر دارای اجزاء مختلف بوده که شناخت وظیفه و خصوصیات هر یک از آن ها کمک موثری به شناخت بیشتر رفتار آن می نماید.

**هسته فولادی محصور شده تسلیم شونده:** این قسمت عضو اصلی مهاربند محسوب شده که بار محوری را تحمل می کند. از آنجایی که ایده اساسی مهاربندهای کمانش ناپذیر تسلیم در فشار می باشد، بهتر است نوع فولاد هسته از نوع فولاد نرمه و با مقاومت پایین تر باشد تا در بارگذاری های رفت و برگشتی، تسلیم در فولاد در تغییر مکان های کوچکتر اتفاق افتاده و عمل استهلاک انرژی به خوبی صورت گیرد. معمولاً برای این بخش از هسته مهاربند، از فولادهای نرمه با مقاومت کم و شکل پذیری بالا مانند (A36) استفاده گردد. همچنین می توان از دیگر فولادهای پرمقاومت کم آلیاژ یا مصالح فولادی با مقاومت تسلیم و بدون نوسانات زیاد استفاده می گردد.

**ناحیه الاستیک محصور شده:** این ناحیه به وسیله غلاف فولادی و ملات بتنی محصور بوده و در امتداد قسمت تسلیم شونده هسته قرار می گیرد. اما برای اطمینان از الاستیک باقی ماندن رفتار این ناحیه، مساحت مقطع این ناحیه و پهنای آن در مقایسه با ناحیه تسلیم شونده، بیشتر می باشد (شکل ۱).

**ناحیه الاستیک محصور نشده:** این ناحیه امتداد قسمت الاستیک محصور شده بوده با این تفاوت که توسط غلاف و ملات بتنی محصور نشده و به منظور اتصال مهاربند به قاب، مورد استفاده قرار می گیرد (شکل ۱).

**غلاف محصور کننده و ملات پر کننده:** شکل های مختلفی از غلاف محصور کننده مورد استفاده می باشند. نوع رایج غلاف محصور کننده شامل یک غلاف فولادی مربع یا دایره ای شکل (که داخل آن از بتن پر شده است) می باشد. بر طبق گزارش پژوهشگاه ملی تایوان [۲] به غیر از بتن، مواد دیگری همچون چوب و ماسه به عنوان ماده پر کننده استفاده شده اند.

**ماده نجسب:** مکانیزم نجسبیده بودن مهاربند به وسیله این ماده فراهم می گردد. ماده نجسب، اصطکاک بین فولاد هسته و ماده ی محصور کننده را از بین برده و یا به حداقل می رساند و فقط تغییر شکل جانبی فولاد هسته را به ماده ی محصور کننده انتقال داده و مانع از انتقال نیروی محوری به ماده ی محصور کننده می شود. محققان مختلف ماده های نجسب متفاوتی را در آزمایشات خود به کار برده اند. به طور مثال روکش لاستیکی به ضخامت ۱/۵ الی ۲ میلی متر [۳ و ۲]، پوششی از صفحات پلی اتیلن به ضخامت ۰/۱۵ الی ۰/۲ میلی متر [۴ و ۵]، فوم استیروول [۶] و پوششی از لایه های سیلیکون با ضخامت های مختلف [۷] از جمله موادی هستند که به عنوان ماده نجسب مورد استفاده قرار گرفته اند.

**ناحیه اتصال:** معمولاً اتصال مهاربندهای کمانش ناپذیر به وسیله ی پیچ صورت می پذیرد. ولی می توان از اتصالات جوشی و پرچی نیز استفاده نمود. مزیت استفاده از اتصال پیچی آن است که نصب و تعویض مهاربند راحت تر صورت می گیرد [۸].



شکل ۱: نمایش قسمت محصور شده و محصور نشده ی هسته ی فولادی [۹]

### ۳- تاریخچه تحقیقات

ایده استفاده از عضو فولادی تسلیم شونده برای جذب انرژی بیش از ۴۰ سال پیش برای اولین بار در ژاپن توسط یاشینو و همکاران (۱۹۷۱) مطرح شد. رویکرد جدید به این صورت بود که عضو فشاری قبل از کمانش، جاری شده و علاوه بر آنکه دچار تسلیم شدگی موضعی شده، توزیع آن در سراسر عضو نیز مناسب و یکنواخت باشد؛ به طوری که انرژی مستهلک شده طی یک بارگذاری رفت و برگشتی مانند زلزله به حداکثر خود برسد. این مهاربندها شامل یک صفحه فولادی تخت بود که توسط غلاف های بتن آرمه از دو سمت محصور گردیده بود. در نمونه اول یک فاصله ۱/۵ میلی متری بین صفحه فولادی و غلاف بتنی وجود داشت اما در نمونه دوم هیچ فاصله‌ای بین صفحات مهاربند وجود نداشت. نتایج بارگذاری چرخه‌ای بر روی آن‌ها نشان داد که در نمونه اول ظرفیت تغییرشکل و اتلاف انرژی بالاتر از نمونه دوم است [۱۰].

اولین مهاربند کمانش‌ناپذیر به شکل متعارف توسط کیمورا [۱۱] مطرح شد؛ این مهاربند شامل یک لوله فولادی مربعی شکل پر شده با ملات روکش شده بود. برای این مهاربند مشخصات هیستریزس پایدار بسیار کمی گزارش شد، با این حال مشخص شد که تغییرشکل عرضی (مقاطع) ملات به دنبال چرخه بارگذاری منجر به ایجاد یک فضای خالی دائمی بزرگ شده که باعث شروع کمانش محلی در طول بارگذاری می‌شود.

موچیزوکی [۱۲] آزمایش‌هایی بر روی مهاربندهای مشابه با انجام داد که با بتن مستحکم محصور شده بود که با استفاده از قطعات ضربه-گیر از اتصال آن با مهاربند داخلی ممانعت بعمل می‌آمد. با این حال ثابت شد که تحت بارگذاری متناوب، بتن شکاف برداشته و اثر کمانش-ناپذیری آن شدیداً کم شده است.

هانگ و همکاران [۱۳] آزمایش‌هایی با بارگذاری استاتیکی و دینامیکی بر روی سازه‌هایی با مهاربند کمانش‌ناپذیر انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که ظرفیت اتلاف انرژی یک سازه با نصب مهاربند کمانش‌ناپذیر افزایش پیدا می‌کند و اسکلت اصلی سازه در حالت ارتجاعی باقی می‌ماند.

بلک و همکاران [۱۴] تحلیل پایداری بر روی کمانش خمشی-پیچشی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر انجام دادند؛ آزمایش‌های آن‌ها بر روی پنج مهاربند کمانش‌ناپذیر با اشکال مختلف بود. مطالعه آن‌ها نشان داد که مهاربندهای کمانش‌ناپذیر یک جایگزین قابل اطمینان و عملی برای سیستم‌های متعارف مقاوم در برابر بار جانبی هستند.

تاکوچی [۱۵] و همکاران نتیجه گرفتند که برای اینکه مهاربندهای کمانش‌ناپذیر عملکرد مناسب و چرخه هیستریزس پایداری داشته باشند، ۵ شرط زیر باید رعایت شود:

الف) غلاف باید سختی کافی برای ممانعت از کمانش خمشی مهاربند را داشته باشد.

ب) بخش ورق هسته وقتی که در ناحیه پلاستیک به دلیل اثر پواسون فشرده می‌شود گسترده می‌گردد. بنابراین یک مقدار مشخصی فاصله باز باید فراهم شود تا از اصطکاک بین ورق هسته و غلاف جلوگیری کند و همچنین از اینکه ورق هسته نیروی محوری را به غلاف منتقل کند ممانعت بعمل آورد.

ج) فاصله باز بین ورق هسته و غلاف ممکن است سبب شود که ورق هسته مقدار کمی کمانش پیدا کند. در محل برخورد موج‌های کمانشی هسته مهاربند به غلاف مؤلفه‌های نیروی عمودی به غلاف منتقل می‌شود. از این رو دیواره‌های غلاف باید از سختی و قدرت کافی برای مهار مؤلفه نیروی عمودی و صفحه هسته برخوردار باشند.

د) اتصال‌ها در هر دو سر مهاربند باید سختی و قدرت کافی داشته باشند تا مهاربند کمانش ناپذیر بتواند تحت بیشترین مقدار نیرو و تغییر شکل مورد انتظار عملکرد مؤثری داشته باشد.

سابلی و همکاران [۱۶] تحقیقات تحلیلی گسترده‌ای بر روی واکنش لرزه‌ای سیستم‌ها با مهاربندهای کمانش ناپذیر که به شکل ۷ معکوس چیده شده انجام دادند. به منظور برآورد عملکرد مهاربندها، یک سری ساختمان‌ها به شکل قاب مهاربندی شده سه طبقه و شش طبقه برای مکانی در شهر نیویورک طراحی شدند. طراحی این سازه‌ها بر طبق توصیه‌های برنامه ملی کاهش خطر زلزله (NEHRP) و آیین نامه زمین لرزه‌ها (FEMA312/313) صورت گرفته بود. نتایج نشان داد که مهاربندهای کمانش ناپذیر نسبت به مهاربندهای هم مرکز ممتازترند.

کیم و همکاران [۱۷] ظرفیت اتلاف انرژی و پاسخ زمین لرزه‌ای مهاربندهای کمانش ناپذیر را در سازه‌های فولادی بوسیله انجام یک تحقیق پارامتری (سطح مقطع عرضی و استحکام تسلیم مهاربندها) را مورد ارزیابی قرار دادند. بر اساس نتایج تحقیق پارامتریک آن‌ها یک فرآیند طراحی آسانی تدوین کردند تا تغییر مکان هدف را در قالب روش طیف ظرفیت (CSM) به دست آورند. سرانجام یک تحلیل استاتیکی و دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شد تا میرایی (استهلاک ارتعاش) معادل و عملکرد زمین لرزه‌ای سازه‌های مدل را بررسی کند. این تحقیق به این نتیجه رسید که:

الف) به طور کلی نسبت‌های میرایی معادل سازه‌های دارای یک درجه آزادی با مهاربند کمانش ناپذیر با افزایش سختی مهاربند افزایش پیدا می‌کند. نقاط تنش تسلیم بهینه‌ای در مهاربند وجود دارند که میرایی معادل را به حداکثر می‌رساند. تنش تسلیم بهینه با افزایش سختی مهاربند و با کاهش تقاضای شکل پذیری کاهش پیدا می‌کند.

ب) حداکثر تغییر مکان سازه‌ها به طور کلی با افزایش سختی مهاربند کاهش پیدا می‌کند.

پ) استفاده از فولاد کم استحکام برای مهاربند کمانش ناپذیر چون دچار تغییر شکل پلاستیکی وسیعی قرار می‌گیرد و انرژی بیشتری تلف می‌کند، برای آسیب سازه موثر است.

در سال ۲۰۰۲ برای ساخت یک مرکز تحقیقاتی در دانشگاه برکلی، آزمایش‌هایی بر روی مهاربندهای کمانش ناپذیر توسط لویز و همکارانش انجام داد. نتایج حاصل نشان داد که عملاً صفحات اتصال باعث ایجاد یک دهانه صلب می‌شوند و باید چرخش گره‌ها به علت صلبیت بالای اتصال را در تحلیل و طراحی لحاظ کرد [۱۸].

تحلیل پایداری مهاربندهای کمانش ناپذیر توسط بلک و همکارانش در سال ۲۰۰۲ به طور کامل مورد بررسی قرار گرفت. بلک و همکارانش نشان دادند که در شروع کمانش پلاستیک به سبب فشار تک محوری، تنش برشی و کرنش برشی به مدول مماسی  $G_T$  بستگی دارند [۱۹].

کیم و چو در سال ۲۰۰۶ روشی را برای طراحی قاب‌های دارای مهاربند کمانش ناپذیر با استفاده از طیف انرژی هیستریتیک ارائه کردند که در این روش فرض شده است که تیرها و ستون‌ها تحت بار ثقلی در حالت الاستیک باقی می‌مانند و استهلاک انرژی و خسارت ناشی از آن فقط در مهاربند کمانش ناپذیر اتفاق می‌افتد [۲۰].

با مطالعه‌ی تحقیقات گذشته و مشاهده‌ی مشکلات اجرایی در اجرای بتن اطراف عضو تسلیم شونده، ایده‌ی استفاده از یک غلاف غیر بتنی مطرح گردید. بر این اساس ماده‌ی پلی‌آمید به عنوان یک ماده‌ی مقاوم و در دسترس پیشنهاد و بررسی رفتار آن و همچنین اثرات فاصله‌ی غلاف تا عضو تسلیم شونده و مقاومت تسلیم عضو تسلیم شونده بر مقاومت سیستم، به عنوان اهداف تحقیق، تعیین گردیدند. از

نوآوری‌های این تحقیق استفاده از غلاف پلی‌آمید به عنوان ماده ی پرکننده است که جایگزین بتن شده و با توجه به این که نسبت به بتن وزن مخصوص کمتری داشته و قابلیت برش کاری و ماشین کاری مناسبی دارد، می‌تواند باعث کاهش وزن مهاربند و راحتی در ساخت آن شود. در این تحقیق ۶ مدل آزمایشگاهی با نوع فولاد و فاصله هسته از غلاف های متفاوت در آزمایشگاه ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است. سپس مقادیر بدست آمده از آزمایشات، با نرم افزار ABAQUS مدل سازی گردیده و مقایسه شده است.

#### ۴- مدل آزمایشگاهی

برای بررسی آزمایشگاهی مهاربندهای کمانش ناپذیر، بر اساس نوع فولاد عضو تسلیم شونده و فاصله ی آن تا غلاف، ۶ مدل ساخته و در آزمایشگاه سازه ی دانشگاه سمنان مورد آزمایش قرار گرفت. جدول ۱ مشخصات نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه و نام گذاری آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات نمونه های آزمایش شده

نام مدل	نوع فولاد هسته	فاصله هسته از غلاف (mm)
ST37-G0		۰
ST37-G2	ST37	۲
ST37-G3		۳
ST37-n-G 0		۰
ST37-n-G 2	ST37-n	۲
ST37-n-G 3		۳

نمونه های آزمایشگاهی شامل یک هسته سپری شکل نمره ۳، قطعه پلی‌آمید (جرم مخصوص پلی آمید حدود ۱/۱۴ گرم بر سانتی مترمکعب می باشد که این مقدار حدود ۲/۲ برابر سبک تر از بتن است. از مزایای پلی آمید نسبت به بتن می توان به استحکام و چقرمگی خوب، ضربه پذیری، مقاومت عالی در برابر خستگی و قابلیت انعطاف پذیری بالا اشاره نمود). به عنوان ماده پرکننده، ناودانی فولادی نمره ۱۰ و یک ورق فولادی ۱۰ میلی‌متری می باشد که همراه با قطعه ناودانی به عنوان غلاف فولادی استفاده می‌شود. سه عدد از نمونه‌ها شامل هسته‌ای از نوع فولاد ST37 بوده، اما در سه نمونه دیگر، فولاد هسته از جنس ST37 ی است که به روش اونیبل در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره حرارت دیده و پس از نرم شدن به آرامی سرد گردیده است. بدین ترتیب نقطه ی تسلیم شدگی نمونه کاهش یافته است.

پارامتر دیگری که در نمونه‌ها تغییر می‌کند، فاصله هسته از اعضای محصور کننده است که تعداد دو نمونه با فاصله صفر میلی‌متر، دو نمونه با فاصله دو میلی‌متر و دو نمونه با فاصله سه میلی‌متر می‌باشند. در هر دو نمونه با فاصله یکسان، نوع فولاد هسته از دو نوع انتخاب شده است. همچنین قابل ذکر است که برای جلوگیری از اصطکاک میان هسته و غلاف و به حداقل رساندن انتقال نیروی تماسی از هسته به غلاف، سطح سپری هسته به ماده گریس آغشته شده است. شکل ۲ مهاربند کمانش ناپذیر ساخته شده در آزمایشگاه و جدول ۲ مشخصات نمونه‌ها به همراه نحوه نام‌گذاری آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمونه مهاربند کمانش ناپذیر ساخته شده در آزمایشگاه

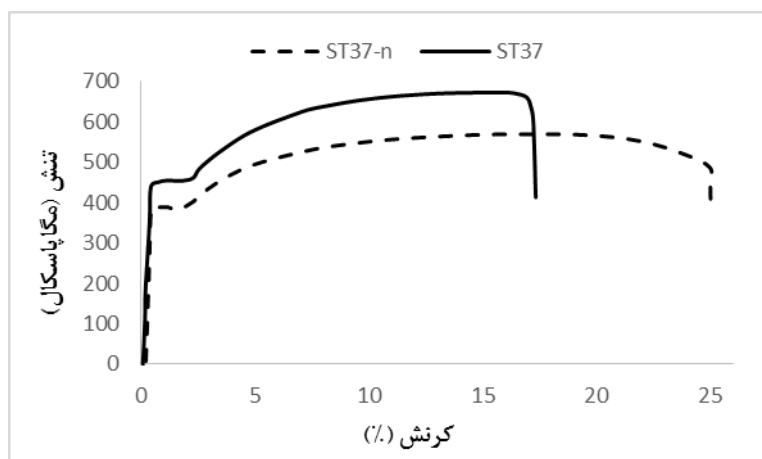
جدول ۲: مشخصات مکانیکی فولاد ST37-n و ST37

نمونه	نسبت پواسون		مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	
	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	کرنش شکست (درصد)	تنش نهایی (مگاپاسکال)	تنش شکست (مگاپاسکال)
ST37	۰/۳	۱۷/۶۰۷	۴۴۹/۸۴	۶۵۲/۰۵
ST37-n	۰/۳	۲۴/۶۳	۳۸۸/۵۲	۵۵۹/۹۲

پروفیل هسته یک پروفیل T شکل نمره ۳ بوده که در قسمت دو انتهای خود قسمت پایه ی آن به صورت پلکانی در دو مرحله چیده شده تا این که بخش تسلیم شونده هسته قسمت پایه سپری به طور کامل چیده شده و به صورت تخت در آمده است. طول کل هسته مهاربند ۷۰ سانتی متر بوده که یک بخش تسلیم شونده به طول ۳۰ سانتی متر در وسط و دو بخش انتهایی هر کدام به طول ۲۰ سانتی متر در دو طرف هسته به عنوان ناحیه اتصال قرار دارند. شکل ۳ تصویری از هسته را نمایش می دهد. مشخصات رفتاری فولادهای هسته در شکل ۴ و جدول ۲ مشاهده می شود. این پارامترها از آزمایش کوپن تست کششی بدست آمده است.



شکل ۳: هسته سپری شکل به همراه ورق های اتصال



شکل ۴: منحنی تنش-کرنش فولاد ST37 و ST37-n (اونیل شده)

#### ۴-۱- ماده پرکننده (پلی آمید)

این ماده با نام تجاری PA66 بوده و از مزایای آن می‌توان به مقاومت مناسب در برابر ضربه، کاهش عالی صدا و لرزش، خواص لغزشی مناسب، مقاومت سایشی بالا، قابلیت ماشین‌کاری خوب، جوش پذیری مناسب و جذب رطوبت تا ۳٪ در شرایط استاندارد اشاره کرد. به دلیل سهولت در ماشین‌کاری و امکان آماده‌سازی آن قبل از نصب و همچنین مقاومت فشاری و سایشی بسیار بالا برای قطعاتی که در معرض فشار بالا می‌باشند (مانند غلاف در مهاربندهای کمانش‌ناپذیر) بسیار مناسب به نظر رسیده و می‌تواند جایگزین مناسبی برای بتن در این نوع از مهاربندها باشد. شکل ۵ تصویر غلاف پرکننده پلی‌آمید را که ماشین‌کاری شده و در نمونه‌های آزمایشگاهی به کار برده شده است، نشان می‌دهد. طول این غلاف ۵۰ سانتی متر می‌باشد. جدول ۳ مشخصات مکانیکی پلی‌آمید را نشان می‌دهد.



شکل ۵: غلاف پرکننده ی پلی آمید ماشین‌کاری شده



جدول ۳: مشخصات مکانیکی پلی آمید PA66

نمونه	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	کرنش شکست (درصد)	تنش نهایی (مگاپاسکال)
Polyamid (PA66)	۱۲۴۶/۳۷	۸۳/۹۲	۱۱/۵۰	۹۱/۴۸

#### ۴-۲-غلاف فولادی

غلاف فولادی شامل یک ناودانی نمره ۱۰ و یک ورق فولادی ۱۰ میلی متری به طول ۵۰ سانتی متر است. به لبه‌های ناودانی یک سری ورق سوراخ دار جوش شده است که بتوان ورق فولادی مسطح را به آن پیچ کرد. شکل ۶ تصویر ناودانی و ورق فولادی را نشان می‌دهد.



شکل ۶: غلاف فولادی ناودانی نمره ۱۰ و ورق ۱۰ میلی متری

#### ۴-۳- تجهیزات انجام آزمایش و بارگذاری

تجهیزات انجام آزمایش شامل دو پایه فولادی بسیار محکم بوده که هر دوی آن‌ها به کف صلب آزمایشگاه سازه ی دانشگاه سمنان متصل بوده و نمونه آزمایشگاهی به صورت افقی در بین دو پایه فولادی قرار می‌گیرد. ابتدا هسته مهاربند از هر دو انتها به یک سری ورق فولادی سوراخ شده جوش شده و سپس این ورق‌ها از یک سمت مستقیم به پایه فولادی وصل شده که نقش تکیه‌گاه گیردار را ایفا نموده و از سمت دیگر به جک بارگذاری متصل می‌شود (شکل ۷). برای جلوگیری از لغزش غلاف فولادی در هنگام بارگذاری، یک سمت ناودانی به تکیه‌گاه گیردار جوش گردیده و در انتهای دیگر آن که در سمت جک بارگذاری قرار دارد، آزاد باقی می‌ماند. جک مورد استفاده برای بارگذاری دارای ظرفیت ۱۰ تن بوده که توانایی اعمال بار به صورت دو طرفه (بارگذاری رفت و برگشتی) را دارد. همچنین این جک توانایی اعمال بار از هر دو روش کنترل نیرو و کنترل تغییرمکان را داشته که در این مورد، بارگذاری از طریق کنترل تغییرمکان به نمونه اعمال گردید.



شکل ۷: تجهیزات انجام آزمایش

برای بارگذاری مدل های آزمایشگاهی از پروتکل بارگذاری ATC24 [۲۱] استفاده شده است. بر این اساس تغییر مکان نقطه ی تسلیم شدگی مبنای اعمال بارگذاری چرخه ای است. جدول ۴ تعداد چرخه ها و دامنه ی تغییرمکان آن ها را نشان می دهد.

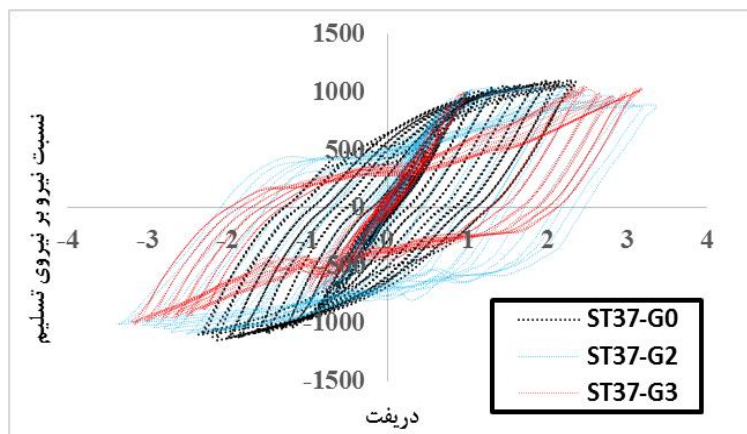
جدول ۴: مشخصات چرخه های بارگذاری آزمایشات

دامنه تغییرمکان	$0.5\Delta_y$	$1\Delta_y$	$1.5\Delta_y$	$2\Delta_y$	$3\Delta_y$	$4\Delta_y$	$5\Delta_y$	$6\Delta_y$	$7\Delta_y$	$8\Delta_y$	$9\Delta_y$	$10\Delta_y$
مقدار تغییرمکان (میلی متر)	۰/۶۲۵	۱/۲۵	۱/۸۷۵	۲/۵	۳/۷۵	۵	۶/۲۵	۷/۵	۸/۷۵	۱۰	۱۱/۲۵	۱۲/۵
تعداد چرخه	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
شماره چرخه	۱-۳	۳-۶	۶-۹	۹-۱۲	۱۲-۱۵	۱۵-۱۸	۱۸-۲۱	۲۱-۲۴	۲۴-۲۷	۲۷-۳۰	۳۰-۳۳	۳۳-۳۶

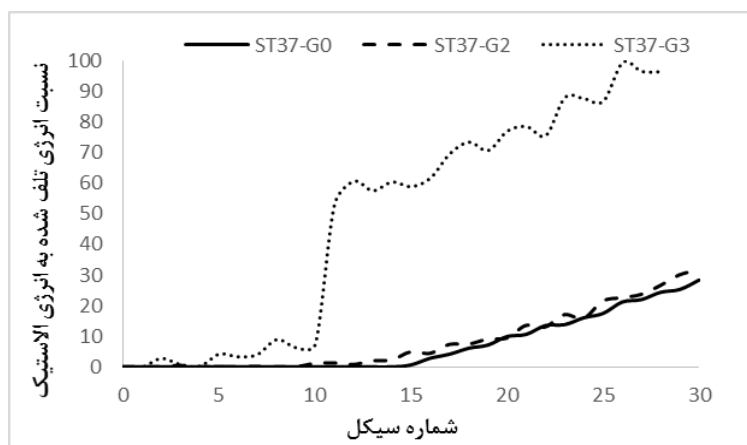
## ۵- انجام آزمایش و بررسی نتایج نمونه های آزمایشگاهی

برای بررسی رفتار مهاربند و اثر فاصله و نوع فولاد هسته، شکل های ۸ و ۹ و جدول ۵ مقایسه ی بین نتایج را نشان می دهند. در این نمودارها، پارامترهایی به شرح زیر مورد استفاده است.

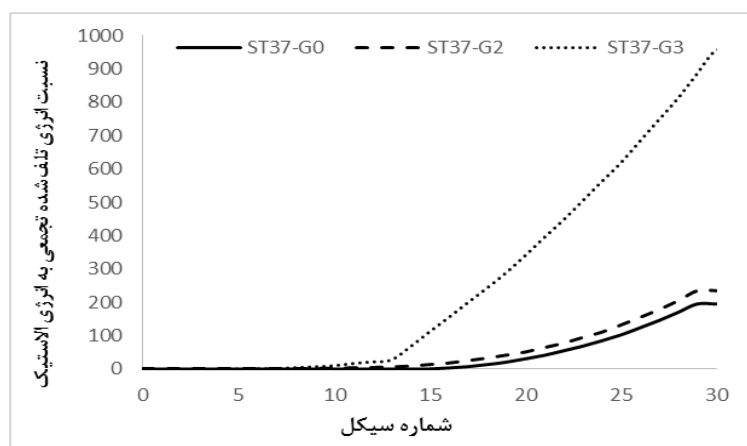
در شکل ۸-الف رفتار سه نمونه ی دارای فولاد معمولی با سه فاصله ی مختلف هسته مشاهده می شود. نتایج مقایسه ی نمودارها در جدول ۵ آورده شده است. همانطور که از شکل های ۸-ب و ۸-پ مشاهده می شود، میزان جذب انرژی مدل با فاصله ی ۲ میلی متری بین عضو تسلیم شونده و غلاف، از بقیه مدل ها بیشتر است.



الف: منحنی های هیستریزس



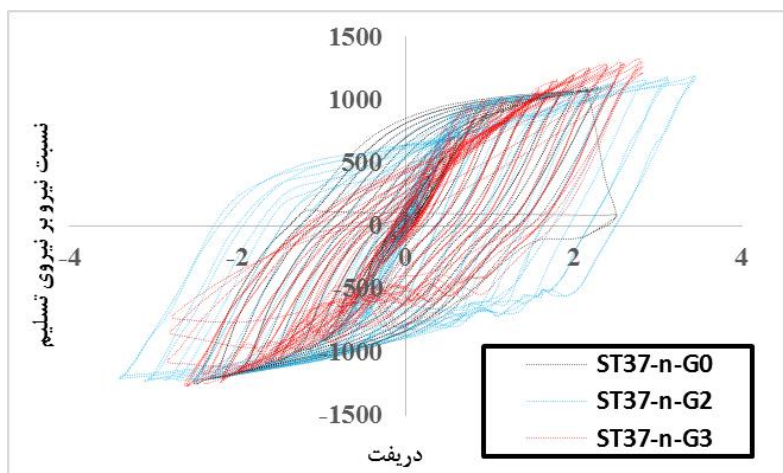
ب: انرژی تلف شده ی مدل ها



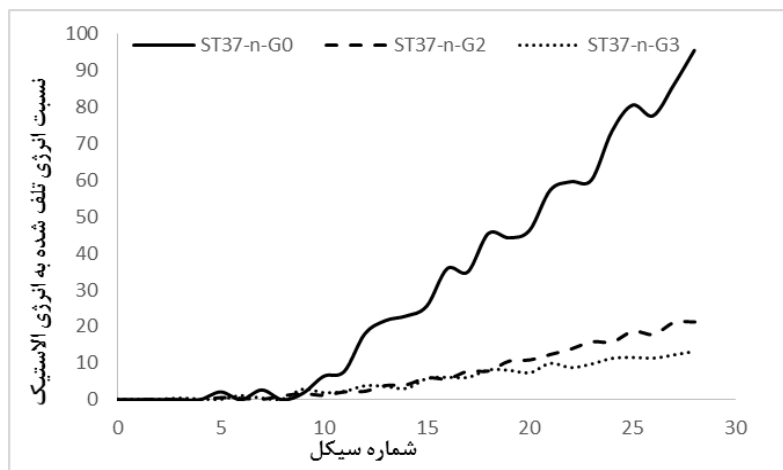
پ: انرژی تلف شده ی تجمعی مدل ها

شکل ۸: مقایسه منحنی های نمونه های ST37-G0، ST37-G2 و ST37-G3

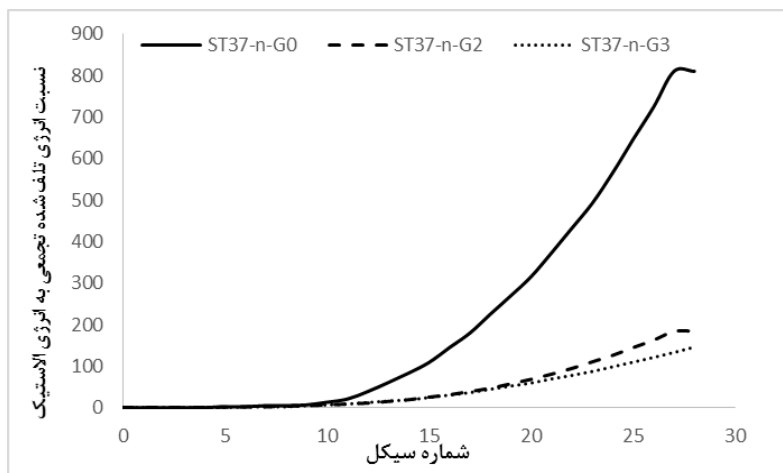
شکل ۹- الف رفتار سه مدل دارای عضو تسلیم شونده نرم تر با فواصل مختلف تا غلاف را نشان می دهد.



الف: منحنی های هیستریزس



ب: منحنی های انرژی تلف شده



پ: منحنی های انرژی تلف شده ی تجمعی

شکل ۹: مقایسه منحنی های نمونه های ST37-n-G0، ST37-n-G2 و ST37-n-G3

جدول ۵: مقایسه نتایج مهاربندها

نام مدل	$E_{tot}$ (ton.mm)	$P_u$ (ton)	$P_y$ (ton)	$\mu$	$\Delta_u$ (mm)	$\Delta_y$ (mm)	$G$ (mm)
ST37-G0	۶۹۹/۴۶	۵/۴۱	۴/۹۹	۲/۳۵	۹/۰۵	۳/۸۴	۰
ST37-G2	۹۶۹/۶۵	۴/۰۴	۴/۵۰	۳/۳۶	۱۲/۸۷	۳/۸۳	۲
ST37-G3	۸۸۵/۹۳	۴/۳۳	۴/۲۰	۳/۱۹	۱۲/۳	۳/۸۵	۳
ST37-n-G0	۹۸۹/۱۶	۵/۴۴	۴/۴۸	۲/۴۶	۹/۴۷	۳/۸۵	۰
ST37-n-G2	۷۷۴/۷۱	۳/۶۲	۴/۰۶	۳/۴۵	۱۲/۲	۳/۵۳	۲
ST37-n-G3	۶۵۱/۴۴	۳/۹۱	۳/۱۷	۳/۱۷	۹	۳/۱۸	۳

که در آن،

- $G(mm)$ : فاصله هسته از غلاف را نشان می‌دهد.
- $\Delta_y(mm)$ : تغییر مکان متناظر با نقطه تسلیم.
- $\Delta_u(mm)$ : تغییر مکان نهایی نمونه که برابر با  $\Delta_{max}(mm)$  است.
- $\mu$ : شکل پذیری که از تقسیم تغییر مکان نهایی به تغییر مکان تسلیم به دست می‌آید  $(\frac{\Delta_u}{\Delta_y})$ .
- $P_y(ton)$ : نیروی متناظر با تغییر مکان تسلیم.
- $P_u(ton)$ : نیروی متناظر با تغییر مکان نهایی.
- $E_{tot}(ton.mm)$ : مجموع انرژی اتلاف شده توسط مهاربند در کل مسیر بارگذاری.

## ۶- مدل سازی عددی در نرم افزار ABAQUS

به منظور مقایسه ی مدل سازی های عددی و نتایج آزمایشگاهی مدل ها و سپس استفاده از نتایج مقایسه جهت گسترش نتایج، مدل سازی نمونه در نرم افزار ABAQUS انجام شد.

برای مدل سازی هسته از عناصر جامد همگن 3D و برای مش بندی از المان های (C3D8R) و اندازه مش ۱/۵ سانتی متر در راستای طولی آن استفاده شد. همچنین با استفاده از روش پارتیشن بندی، هندسه اصلی هسته به بخش های مختلف تقسیم شد تا کیفیت مش بندی منظم آن افزایش یابد. جنس فولاد هسته از نوع ST37-n و ST37 است. سایر مشخصات هندسی و مکانیکی دو نمونه هسته به کار رفته شده، در جدول ۶ خلاصه شده است.

جدول ۶: مشخصات مکانیکی و هندسی هسته

نوع المان	نوع فولاد هسته	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	جرم واحد حجم (کیلوگرم بر مترمکعب)	طول ناحیه تسلیم شونده (سانتی متر)	طول کل هسته (سانتی متر)
C3D8R	ST37	۰/۳	۱۷۰/۴۷	۷۸۵۰	۳۰	۷۰
C3D8R	ST37-n	۰/۳	۱۸۴/۱۵	۷۸۵۰	۳۰	۷۰

## ۱-۶- مدل سازی غلاف پلی آمید

مدل سازی غلاف پلی آمید در نرم افزار به صورت یکپارچه صورت گرفت. برای مدل سازی آن از عناصر جامد همگن 3D و برای مش بندی از المان های (C3D8R) و اندازه مش  $1/3$  سانتی متر در راستای طولی آن استفاده گردید. سایر مشخصات هندسی و مکانیکی غلاف پلی آمید در جدول ۷ خلاصه شده است.

جدول ۷: مشخصات مکانیکی و هندسی غلاف پلی آمید

نوع المان	نسبت پواسون	مدول		طول کل غلاف پلی آمید (سانتی متر)
		الاستیسیته (گیگاپاسکال)	جرم واحد حجم (کیلوگرم بر مترمکعب)	
C3D8R	۰/۱۵	۱/۲۴۶	۱۱۳۰	۵۰

## ۲-۶- مدل سازی غلاف فولادی

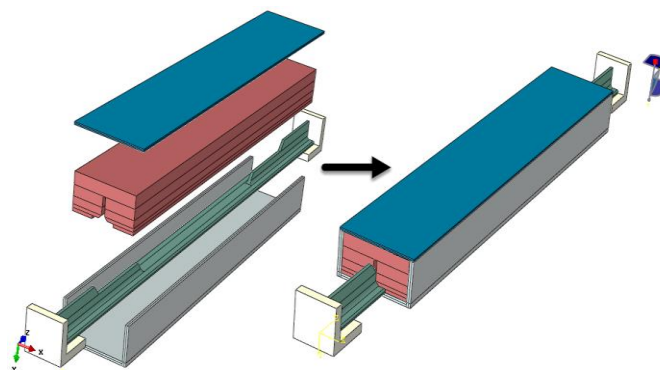
غلاف فولادی شامل یک ناودانی نمره ۱۰ و یک ورق فولادی ۱۰ میلی متری بود که مدل سازی هر یک به صورت جداگانه انجام گردید. اتصال ورق و ناودانی به یکدیگر در مدل آزمایشگاهی با استفاده از پیچ صورت گرفته اما در مدل سازی عددی با فرض مقاوم بودن پیچها و عدم وقوع خرابی در آنها، از مدل سازی پیچها خودداری گردید. سایر مشخصات هندسی و مکانیکی آنها در جدول ۸ ذکر شده است.

جدول ۸: مشخصات مکانیکی و هندسی غلاف فولادی ناودانی

نوع المان	نسبت پواسون	مدول		طول کل غلاف فولادی (سانتی متر)
		الاستیسیته (گیگاپاسکال)	جرم واحد حجم (کیلوگرم بر مترمکعب)	
C3D8R	۰/۳	۱۷۰/۴۷	۷۸۵۰	۵۰

## ۳-۶- شرایط تکیه گاهی و بارگذاریها

برای اتصال ورق فولادی به ناودانی از قید Tie استفاده شده است که موجب اتصال کامل بین دو سطح می شود. همچنین برای جلوگیری از لغزش غلاف پلی آمید نیز از قید Tie استفاده شده است که آن را کامل به ناودانی مقید می کند. شکل ۱۰ مدل تکمیل شده ای از مهاربند کمانش ناپذیر در نرم افزار را نشان می دهد.



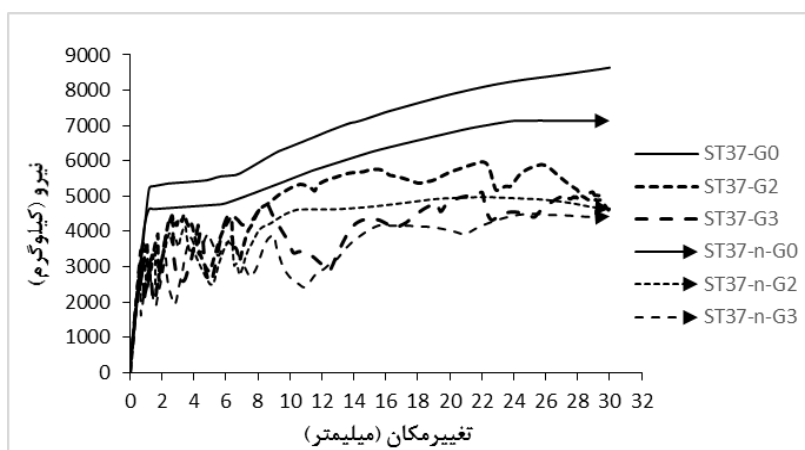
شکل ۱۰: مدل عددی تکمیل شده مهاربند کمانش ناپذیر

شرایط تکیه‌گاهی مدل عددی مشابه مدل آزمایشگاهی است و یک انتهای هسته در مدل عددی کامل در برابر تغییرمکان و چرخش در هر سه جهت مقید شده است. همچنین بارگذاری جانبی به صورت مونوتونیک به انتهای دیگر هسته که آزاد می‌باشد، وارد شده است.

## ۷- نتایج تحلیل عددی

پس از مدلسازی مدل‌ها، تمامی مدل‌ها به میزان تغییرمکان ۳۰ میلی‌متر بصورت فشاری بارگذاری جانبی شدند. با اعمال تغییرمکان، در هر لحظه از تحلیل مقدار نیروی تحمل شده توسط نمونه در محل تکیه‌گاه به عنوان خروجی ثبت و منحنی نیرو-تغییرمکان مختص به هر نمونه ثبت گردید.

شکل ۱۱ مقایسه نمودارهای حاصل از تحلیل شش مدل عددی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله هسته از غلاف و همچنین با جایگزینی فولاد ST37-n به جای فولاد ST37 در هسته مهاربند، تغییرمکان متناظر با نقطه تسلیم آن‌ها کاهش یافته اما میزان اختلاف بین آن‌ها کمتر از ۰/۵ میلی‌متر بوده و ناچیز است. بنابراین برای تعیین دستورالعمل بارگذاری یکسان برای تمامی نمونه‌ها، مقدار تغییرمکان متناظر با نقطه تسلیم تقریبی برابر با ۱/۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد.



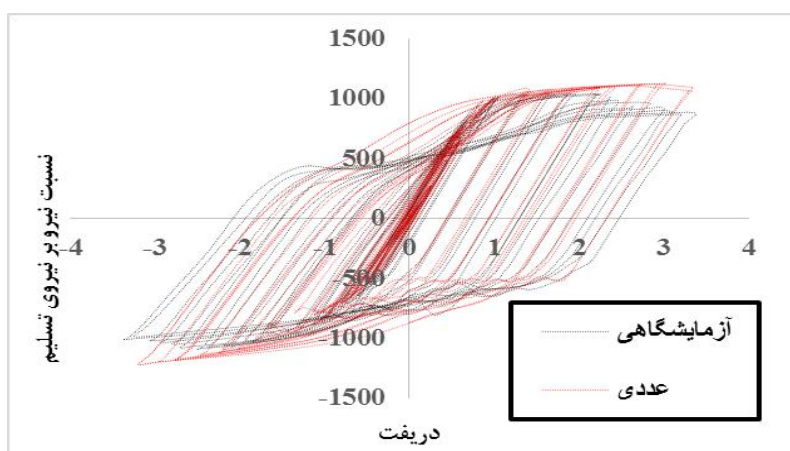
شکل ۱۱: مقایسه منحنی نیرو-تغییرمکان مدل‌های عددی

## ۸- مقایسه ی مدل‌های عددی با نمونه‌های آزمایشگاهی

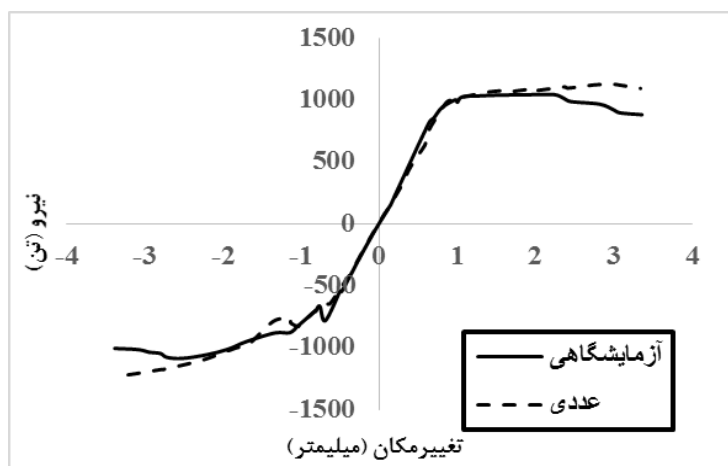
به منظور بررسی دقت مدل‌سازی‌های عددی ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس و میزان مطابقت آن‌ها با نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی، مدل‌های عددی ساخته شده تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته و نتایج حاصل از تحلیل آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. بررسی‌های انجام شده شامل مقایسه بین منحنی‌های هیستریزس، انرژی اتلاف شده و انرژی اتلاف شده تجمعی می‌باشد. همچنین مقادیر حاصل از مدل‌های عددی و آزمایشگاهی پارامترهای مختلف شامل نیروی تسلیم، تغییرمکان متناظر با نقطه تسلیم، حداکثر نیروی کششی، حداکثر نیروی فشاری و مجموع اتلاف انرژی صورت گرفته در کل مسیر بارگذاری با هم مقایسه شده و میزان اختلاف و درصد اختلاف آن‌ها محاسبه گردید. با توجه به تنوع و تعداد مدل‌ها فقط نمودارهای مدل آزمایشگاهی ST37-G2 بعنوان نمونه بصورت مفصل تشریح شده و نتایج دیگر مدل‌ها بصورت خلاصه در جدول ۱۰ ارائه می‌گردد.

## ۹- مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی مهاربند ST37-G2

شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ به ترتیب مربوط به مقایسه بین منحنی‌های هیستریزیس، نمودار پوش، انرژی اتلاف شده و انرژی اتلاف شده جمعی حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی مهاربند نمونه ST37-G2 می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود راستای حلقه‌های هیستریزیس در دو نمونه عددی و آزمایشگاهی دارای اندکی اختلاف بوده به طوری که راستای حلقه‌های هیستریزیس در مدل آزمایشگاهی نسبت به مدل عددی، به محور افقی نزدیک‌تر بوده یا به عبارتی نرم‌تر است. همچنین در مدل آزمایشگاهی پس از وارد شدن رفتار مهاربند به ناحیه پلاستیک، حلقه‌های هیستریزیس باریک‌تر شده و با افزایش تغییر مکان، انتهای حلقه‌ها رفته رفته دچار افت شده است. اما در مدل عددی باریک شدن حلقه‌ها بسیار ناچیز بوده و همچنین انتهای حلقه‌ها هیچ‌گونه افتی را نشان نمی‌دهند. اما اعوجاج بخش فشاری منحنی‌ها به دلیل کماتش موضعی هسته، در مدل عددی نیز مشاهده می‌شود.

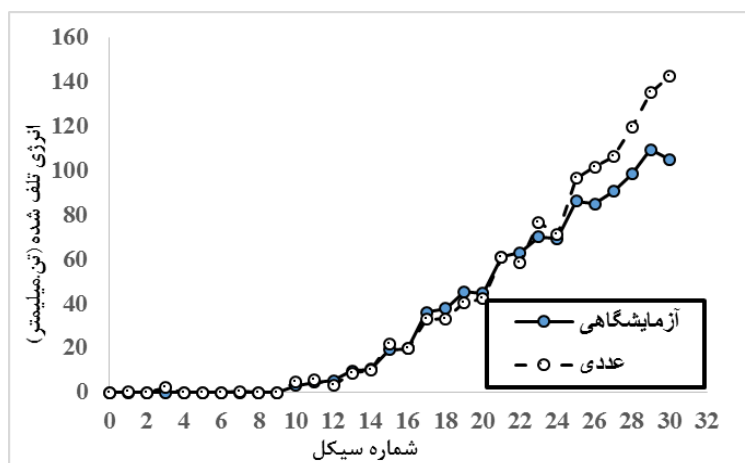


شکل ۱۲: مقایسه منحنی‌های هیستریزیس مدل آزمایشگاهی و عددی مهاربند ST37-G2

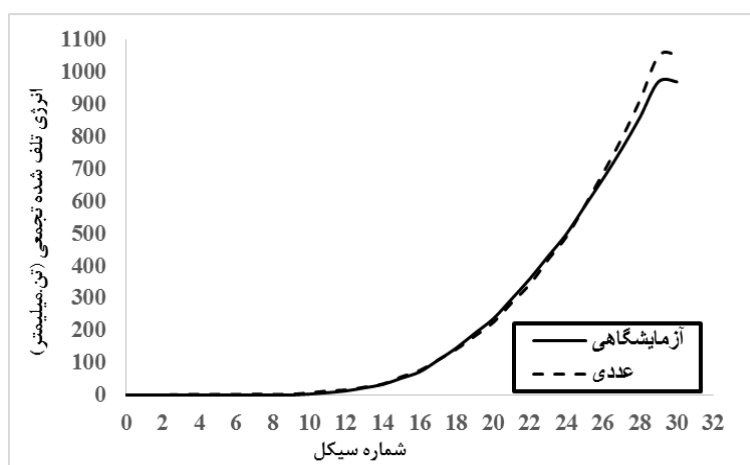


شکل ۱۳: مقایسه پوش منحنی‌های هیستریزیس مدل آزمایشگاهی و عددی مهاربند ST37-G2





شکل ۱۴: مقایسه منحنی‌های انرژی تلف شده مدل آزمایشگاهی و عددی مهاربند ST37-G2

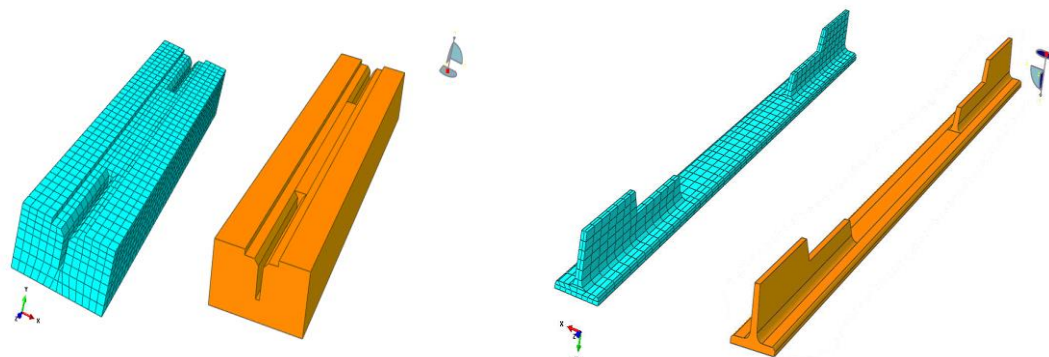


شکل ۱۵: مقایسه منحنی‌های انرژی تلف شده تجمعی مدل آزمایشگاهی و عددی مهاربند ST37-G2

پوش منحنی‌های هیستریزیس در مدل عددی و آزمایشگاهی دارای اختلاف است. به گونه ای که در مدل آزمایشگاهی هم در بخش فشاری و هم کششی، منحنی پوش پس از اوج گرفتن دچار افت شده و روند کاهشی داشته اما در منحنی پوش مدل عددی روند کاهشی وجود ندارد. همین امر باعث شده است تا بیشترین میزان اختلاف با مقدار ۴۱ درصد در نیروی کششی متناظر با تغییر مکان نهایی مهاربند رخ دهد. نیروی تسلیم نیز ۱۵/۷۳ و تغییر مکان تسلیم ۵/۴۸ درصد اختلاف را نشان می‌دهند. با وجود اختلاف زیاد بین منحنی‌های پوش، نمودار انرژی تلف شده و انرژی تلف شده تجمعی تشابه خوبی را نشان می‌دهند و به جز حلقه‌های انتهایی، که در حلقه ۲۵ به بعد اختلاف میان آن‌ها افزایش یافته است. تشابه نمودار انرژی اتلاف شده به این دلیل است که اگرچه در مدل آزمایشگاهی حلقه‌های هیستریزیس باریک‌تر می‌باشند اما نسبت به حلقه‌های هیستریزیس مدل عددی کمی کشیده تر هستند.

نمونه ی مش بندی شده ی هسته و غلاف پلی آمید در شکل های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۹ مشاهده می‌شود که میزان اختلاف بین مدل عددی و آزمایشگاهی در مجموع انرژی اتلاف شده در کل مسیر بارگذاری ۸/۳ درصد می‌باشد. شکل‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰ کانتورهای تنش فون میسز و تغییر شکل را به ترتیب در هسته، غلاف پلی آمید و غلاف فولادی ناودانی نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۱۹ دیده می‌شود، با ایجاد فاصله بین هسته و غلاف، هسته مهاربند در مدل عددی مشابه با مدل آزمایشگاهی در اثر فشار دچار کمانش موضعی شده و به صورت موج‌های سینوسی شکل تغییر شکل داده است. در اثر کمانش موضعی، هسته مهاربند به غلاف پلی آمید و

غلاف فولادی ناودانی شکل برخورد کرده و موجب انتقال نیروی عمودی بر سطح آن‌ها می‌شود. در اثر این برخورد و انتقال نیرو بین هسته و غلاف، تنش در سطح غلاف پلی‌آمید و ناودانی ایجاد شده که در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ مشاهده می‌شوند.

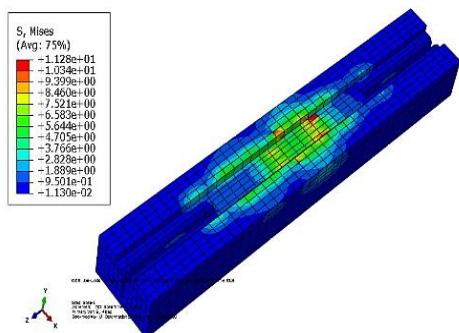


شکل ۱۶: هندسه اولیه و مش‌بندی شده هسته

شکل ۱۷: هندسه اولیه و مش‌بندی شده غلاف پلی‌آمید

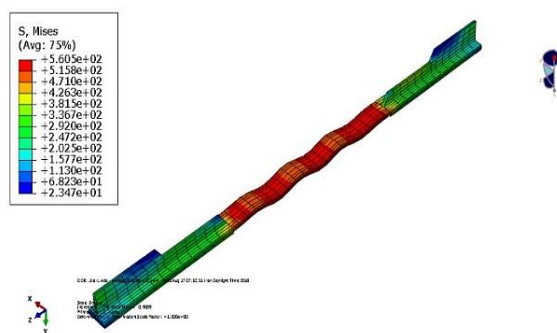
جدول ۹: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی مهاربند ST37-G2

نام مدل	$E_{tot}$ (ton. mm)	$P_{max}(\rho)$ (ton)	$P_{max}(\tau)$ (ton)	$P_u$ (ton)	$P_y$ (ton)	$\Delta_y$ (mm)
مدل آزمایشگاهی	۹۶۹/۶۵	۴/۷۹	-۵/۰۱	۴/۰۴	۴/۵	۳/۸۳
مدل عددی	۱۰۵۰/۱۳	۵/۸۶	-۶/۳۴	۵/۶۹	۵/۲۱	۳/۶۲
مقدار اختلاف	۸۰/۴۹	۱/۰۷	۱/۳۴	۱/۶۶	۰/۷۱	۰/۲۱
درصد اختلاف	۸/۳۰	۲۲/۵۰	۲۶/۷۱	۴۱/۰۱	۱۵/۷۴	۵/۴۸



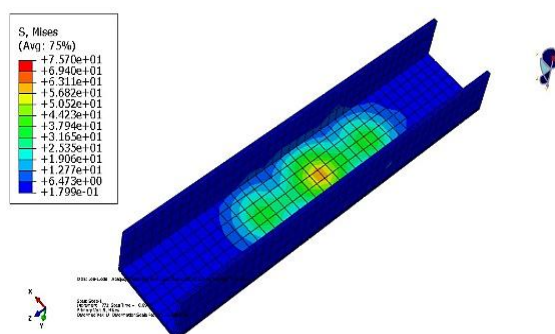
شکل ۱۹: کانتورهای تنش فون میسز و تغییر شکل غلاف پلی‌آمید

مهاربند ST37-G2



شکل ۱۸: کانتورهای تنش فون میسز و تغییر شکل هسته مهاربند ST37-G2

G2



شکل ۲۰: کانتورهای تنش فون میسز و تغییر شکل غلاف فولادی ناودانی مهاربند ST37-G2

خلاصه ی نتایج مدل های آزمایشگاهی در جدول ۱۰ نشان داده شده است. همچنین غلاف فولادی به خوبی نیروهای وارده از طرف هسته را تحمل کرده و عملکرد مناسبی داشته و فقط هسته دچار کمانش شده است.

جدول ۱۰: نتایج مدل های آزمایشگاهی

نام مدل	$\Delta_y$ (mm)	$P_y$ (ton)	$P_x$ (ton)	$P_{max}(r)$ (ton)	$P_{max}(z)$ (ton)	$E_{tot}$ (ton.mm)
ST37-G0	۲/۳۴	۳/۴۶	۱۲/۶۶	۱/۸۴	۱۱/۳۳	۸/۱۶
ST37-n-G0	۹/۶۱	۴/۴۲	-۱/۱۲	۱۴/۹۹	-۰/۲۹	۱۲/۳۳
ST37-G2	۵/۴۸	۱۵/۷۳	۴۱/۰۱	۲۶/۷۱	۲۲/۵۰	۸/۳۰
ST37-n-G2	۱/۹۸	۳۰/۴۱	۲۳/۷۲	۲۵/۵۲	۲۳/۸۲	۲۹/۱۶
ST37-G3	۱۲/۷۲	۳/۴۳	۱۴/۶۴	۰/۶۸	۴/۵۴	۴۶/۳۴
ST37-n-G3	۳/۴۵	۲۴/۷۲	۶/۴۵	۰/۶۶	۱/۱۴	۱۵/۱۸

## ۱۰- نتیجه گیری

- در این تحقیق با توجه به ضعف های عمده ی ماده ی پرکننده ی اطراف هسته ی مهاربندهای کمانش ناپذیر، مهاربندی با غلاف غیر بتنی با ماده ی پلی آمید پیشنهاد شد که باعث بهبود رفتار این نوع از مهاربندها گردید. لذا مهمترین نتایج این تحقیق عبارتند از:
  - با بکار بردن غلاف غیر بتنی ( غلافی که فولادی نبوده و جنسش از بتن نیز نباشد) نیروی تسلیم و تغییرمکان تسلیم مهاربند نسبت به غلاف فولادی کاهش یافت.
  - حداکثر نیروی کششی و فشاری مهاربند با فولاد نرم شده به روش اونیل در دمای ۱۰۰۰ درجه نسبت به حالتی که از فولاد ST37 استفاده شد، تا میزان ۳۲ درصد کاهش یافت.
  - نتایج آزمایش ها و مدل های عددی نشان داد که استفاده از فولاد نرم تر با ضخامت یکسان با فولاد معمولی اگرچه مقاومت کمتری را از خود نشان داده اما در تغییرمکان کوچکتری وارد مرحله پلاستیک و اتلاف انرژی می گردد. لذا چنانچه از ضخامت معادل یک هسته با فولاد معمولی برای فولاد نرم استفاده شود به نظر می رسد جذب انرژی و مقاومت تسلیم افزایش یافته اگرچه که در تغییرمکان های کوچکتری وارد مرحله پلاستیک گردد. این مسئله تأییدی بر استفاده از فولاد نرم در اعضاء فیوز و تسلیم شونده است.
  - در حالتی که فاصله هسته از غلاف به سه میلی متر افزایش یافته، استفاده از فولاد نرم تر باعث شده تا رفتار هیستریزس مهاربند به شدت ناپایدار و نامتقارن شده و شکل پذیری و اتلاف انرژی آن افت کند.
  - با افزایش فاصله هسته از غلاف در مهاربند کمانش ناپذیر نسبت به حالت بهینه ی ۲ میلی متری، تقارن و پایداری حلقه های هیستریزس

به ویژه در بخش فشاری کاهش و همچنین میزان باریک شدن حلقه‌ها در قسمت میانی افزایش یافت.

۶- با افزایش فاصله ی هسته از مهاربند کماتش ناپذیر در حالت اونیل شده نسبت به حالتی که از فولاد ST37 استفاده شده است، مقدار انرژی تجمعی اتلاف شده در کل مسیر بارگذاری با فاصله هسته از مهاربند برابر با ۰ و ۲ میلیمتر به ترتیب ۵۰ درصد و ۳۵۰ درصد افزایش و در حالت فاصله هسته از مهاربند برابر با ۳ میلیمتر این مقدار حدود ۳۳ درصد کاهش یافت.

۷- تست‌های آزمایشگاهی هر شش نمونه مهاربند نشان داد که ماده پرکننده پلی‌آمید که به جای بتن در مهاربند استفاده می گردد، مقاومت کافی را در برابر نیروهای وارده از طرف هسته از خود نشان داده و دچار هیچ‌گونه خرابی، شکست، ترک خوردگی یا فرو رفتگی نمی شود. با توجه به این که این قطعه دارای وزن مخصوص کمتری در مقایسه با بتن است، بنابراین جایگزین کردن آن به جای بتن به عنوان ماده پرکننده در مهاربند باعث کاهش وزن مهاربند می گردد.

## مراجع

- [1] K. C. Tsai and C. H. Weng, (2002) "Experimental responses of double-tube unbonded brace elements and connections," Report No. CEER/R91-02, Center for Earthquake Engineering Research, National Taiwan University, in Chinese.
- [2] AISC 341,(2005) "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings," Chapter 16 Steel Buckling-Restrained Braced Frame, March 9.
- [3] E. Murakami, Y. Mitrai, N. Asayama and H. Narihara, (1999) "Experiment on retrofitting of exiting brace improved to unbonded brace," Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan, Structural Engineering Section, vol. 3, pp. 843-844.
- [4] M. Tada, S. Kuwahara, T. Yoneyama and K. Imai, (1993) "Horizontally loading test of the steel frame braced with double-tube members," Annual technical papers of steel structures, vol. 1, pp. 203-208.
- [5] N. Manabe, H. Simokawa, M. Kamiya, S. Morino and J. Kawaguchi, (1996) "Elasto-plastic behavior of flat-bar brace stiffened by square steel tube," Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan, C1, Structural Engineering Section, vol. 3, pp. 783-784.
- [6] M. Fujimoto, A. Wada, E. Saeki, A. Watanabe and Y. Hitomi, (1988) "A study on the unbonded brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube," Journal of Structural and Construction Engineering, vol. 34B, pp. 249-258.
- [7] N. Suzuki, R. Kono, Y. Higashibata, T. Sasaki and T. Segawa, (1994) "Experimental study on the H-section steel brace encased in RC or steel tube," Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan, C, Structural Engineering Section, vol. 2, pp. 1621-1622.
- [8] Bidokhti, A (2013) "Experimental and Numerical study of Buckling Restrained steel sheathed with stud profile" master's thesis in structure, University of Semnan.
- [9] Black, C. J., Markis, N., and Aiken, I., (2002), "Component testing, stability analysis and characterization of Buckling-Restrained Unbonded Braces ", Technical Rep. No. PEER Report 2002/8, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California at Berkeley, Berkeley, Calif.
- [10] Q. Xie, "State of the Art of Buckling-Restrained Braces in Asia,(2005) " Journal of Constructional Steel Research, vol. 61, pp. 727-748.
- [11] Y. Takeda, K. Kimura, K. Yoshioka, N. Furuya and Y. Takemoto, (1976) "An experimental study on braces encased in steel tube and mortar," in Proc, Annual Meeting of the Architectural Institute of Japan.
- [12] S. Mochizuki, Y. Murata, N. Andou and S. Takahashi, (1980) "Experimental study on buckling of unbonded braces under axial forces," Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan, pp. 2263-2264.
- [13] Y. H. Huang, A. Wada, H. Sugihara, M. Narikawa, T. Takeuchi and M. Iwata, (2000) "Seismic performance of moment resistant steel frame with hysteretic damper," in The 3th International Conference STESSA, Montreal, Canada.
- [14] C. Black, N. Makris and I. Aiken, (2001) "Component testing, stability analysis and characterization of buckling restrained braces," Final Report to Nippon Steel 149 Corporation, Japan.
- [15] T. Takeuchi, J. F. Hajjar, R. Matsui, K. Nishimoto and I. D. Aiken, (2010) "Local Buckling Restraint Condition for Core Plates in Buckling Restrained Braces," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, pp. 139-149.
- [16] R. sabelli, S. Mahin and C. Chang, (2003) "Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling restrained braces," *Engineering Structures*, pp. 655-666.
- [17] J. Kim, H. Choi and L. Chung, (2004) "Energy-based seismic design of structures with buckling restrained braces," *Steel and Composite Structures* , vol. 6, pp. 639-706.

- [18] Black, C. J., Markis, N., and Aiken, I., (2002), "Component testing, stability analysis and characterization of Buckling-Restrained Unbonded Braces ", Technical Rep. No. PEER Report 2002/8, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California at Berkeley, Berkeley, Calif.
- [19] Lopez, W. A., Gwie, D. S., Saunders, C. M., Lauck, T.W., (2002), "Lessons learned from largescale tests of unbonded braced frame subassemblages ", Proceedings 71st Annual Convention, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California.
- [20] Choi, H., Kim, J., (2006), "Energy-based seismic design of buckling-restrained braced frames using hysteretic energy spectrum ", Engineering Structures, 28, 304-311.
- [21] ATC-24, (1992). "Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures for Buildings", ATC-24, Applied Technology Council, Redwood City, CA.