

نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

بررسی تأثیر مقدار اصطکاک بین هسته فلزی و بتن محصورکننده در عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای کمانش ناپذیر

محمود رضا شیراوند^{۱*}، آیدین شمس^۲، امیر خرمی نژاد^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه آزاد اسلامی قزوین، ایران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

سازه‌هایی با مهاربندهای کمانش ناپذیر دو خصوصیت سختی جانبی بالا و قابلیت استهلاک انرژی زیاد هنگام زلزله را به‌طور همزمان دارا می‌باشند. این مهاربندها علاوه بر بهبود چشمگیر عملکرد لرزه‌ای، موجب کاهش ابعاد المان‌های سازه و همچنین کاهش هزینه‌های تعمیر سازه‌های مسلح به این مهاربندها، پس از وقوع زلزله می‌گردند. از فرض‌های اصلی در طراحی این مهاربندهای عدم وجود اصطکاک بین هسته فلزی و ملات بین غلاف فلزی و هسته می‌باشد که از پارامترهای اساسی در ارائه رفتار چرخه‌ای مناسب و جذب انرژی بالای این‌گونه مهاربندها می‌باشد.

در این تحقیق یک نمونه مهاربند کمانش ناپذیر با استفاده از نرم‌افزار ANSYS به روش اجزاء محدود مدل‌سازی و رفتار لرزه‌ای آن با تغییر میزان اصطکاک بین هسته فولادی و ملات پرکننده با استفاده از مصالح مختلف از مقدار صفر تا حداکثر ۰/۳ تحت بارهای سیکلیک با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفته است تا میزان بهینه اصطکاک و همچنین تأثیر آن بر اتلاف انرژی و رفتار چرخه‌ای آن قبل از گسیختگی به دست آید. نتایج تحقیق نشان می‌دهد با کاهش ضریب اصطکاک ماده جداکننده، بیشترین میزان اتلاف انرژی و شکل‌پذیری رخ می‌دهد؛ به‌طوری‌که اگر استهلاک انرژی ورودی زلزله برای ضریب اصطکاک $\mu=0.001$ برابر ۱۰۰٪ لحاظ گردد، مقدار استهلاک انرژی برای ضرایب اصطکاک ۰/۳، ۰/۲، ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۲۵، ۰/۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۲۵، ۰/۰۰۱ به ترتیب برابر ۵۰٪، ۶۲٪، ۶۳٪، ۶۵٪، ۷۱٪ و ۹۰٪ خواهد بود. از طرفی تعداد سیکل‌های مقاومت مهاربند در برابر جابجایی با افزایش اصطکاک کاهش یافته و پدیده باریک شدگی که منجر به کاهش مقاومت مهاربند می‌گردد، در تعداد سیکل‌های بارگذاری کمتری رخ می‌دهد؛ به‌طوری‌که این پدیده در ضرایب اصطکاک ۰/۳، ۰/۲، ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۱ به ترتیب در سیکل‌های ۴، ۵، ۶، (۷و۶)، (۷و۸) و ۹ رخ می‌دهد.

کلمات کلیدی: کلمات کلیدی: مهاربند کمانش تاب، تحلیل دینامیکی غیرخطی، اتلاف انرژی، ماده جداکننده، ضریب اصطکاک.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:	
دریافت	۱۳۹۵/۰۸/۲۱	10.22065/jsce.2017.67341.1002	چاپ
بازنگری	۱۳۹۶/۰۵/۲۳	doi: 10.22065/jsce.2017.67341.1002	انتشار آنلاین
پذیرش	۱۳۹۶/۰۸/۱۴		۱۳۹۷/۱۰/۳۰
*نویسنده مسئول:		محمود رضا شیراوند	
پست الکترونیکی:		m_shiravand@sbu.ac.ir	

Effect of friction between the steel core and concrete on the seismic performance of Buckling Resistant Brace Frames

M. R. Shiravand^{1*}, A. Shamsi², A. Khorrami Nejad³

- 1- Department of Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran,
2- Department of Civil Engineering, Qazvin Branch of Islamic Azad University, Qazvin, Iran
3- Department of Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Structures with Buckling Resistant Braced Frames (BRBF) have two significant properties of energy dissipation and lateral stiffness during an earthquake. BRBF consists of steel core surrounded by a hollow steel section, coated with a low-friction material, and then grouted with a specialized mortar. The encasing and mortar Prohibit the steel core from buckling when in compression, while the coating prevents axial load from being transferred to the mortar, thus preventing strength loss and allowing for better symmetric cyclic performance. Using BRBF as a fuse element in seismic design of structures leads to reduction of structure's weight and consequently post-earthquake repair costs. One of the main constituents of BRBF system is the unbounded material between steel core and mortar (concrete) that should not have high friction coefficient (μ). This research is focused on the effect of friction coefficient of unbounded material on the seismic behaviour of BRBF within a range of $\mu=0$ to $\mu=0.3$. The results showed that reduction of the friction coefficient results in a greater ductility and energy dissipation. Also, the number of load cycles applied on the structures till the Occurrence of failure, have been increased by decrease in the friction coefficient. The dissipated energy of BRBF system in the case of various friction coefficients is computed about 50%, 62%, 63%, 65%, 71% and 90%, respectively, for $\mu=0.3$, $\mu=0.2$, $\mu=0.1$, $\mu=0.05$, $\mu=0.025$ & $\mu=0.01$ compared to that of low friction coefficient equal to $\mu=0.001$. It can be deduced from these paper that by reducing the friction coefficient of the unbounded material, the characteristics such as energy dissipation and ductility will be enhanced and consequently the seismic performance of the system will be improved.

ARTICLE INFO

Received: 11/11/2016
Revised: 14/08/2017
Accepted: 05/11/2017

Keywords:

BRBF,
Nonlinear dynamic
analysis,
Energy dissipation,
Un-bounded material,
Friction coefficient

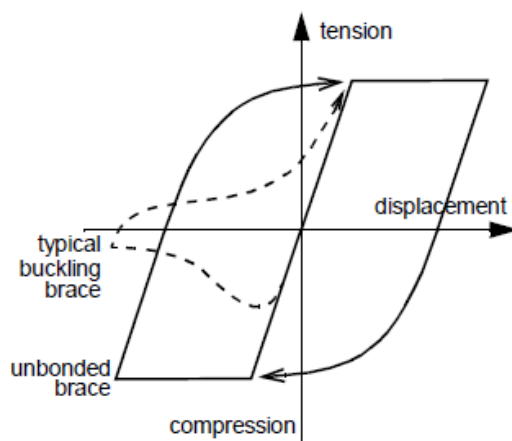
All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.67341.1002

*Corresponding author: ahmoud reza shiravand
Email address: m_shiravand@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

مهم‌ترین ویژگی سیستم‌های مهاربندی شامل دیوارهای برشی بتنی و فولادی، مهاربندهای هم‌محور و برون‌محور، سختی زیاد می‌باشد که منجر به کاهش تغییر شکل جانبی سازه و کاهش خسارت به اجزاء غیر سازه‌ای و سازه‌ای می‌گردد. مهاربندهای هم‌محور نسبت به مهاربندهای برون‌محور سختی بالا و شکل‌پذیری پایین‌تری دارند، که از نقاط ضعف اساسی این مهاربندها در مناطقی با لرزه‌خیزی زیاد می‌باشد. از آنجایی که عموماً سیستم‌های مهاربندی، نقش المان فیوز در سازه را ایفا می‌کنند، میزان شکل‌پذیری و استقامت لرزه‌ای آن‌ها تأثیر اساسی در بهبود عملکرد لرزه‌ای سایر المان‌ها خواهد داشت. مهاربندهای کم‌انرژی ناپذیر^۱ علاوه بر سختی بالا، به علت عدم کم‌انرژی در فشار، تعداد سیکل‌های بیشتری را تحت بارهای لرزه‌ای تحمل کرده که منجر به افزایش شکل‌پذیری این‌گونه مهاربندها می‌گردد. به عبارتی مکانیسم رفتاری خاص این مهاربندها که تسلیم در هر دو حالت کشش و فشار می‌باشد، ضعف عمده سیستم‌های مهاربند هم‌محور را برطرف نموده است (شکل ۱). این مهاربندها متشکل از یک هسته فولادی^۲ عموماً مستطیلی یا صلیبی شکل بوده که توسط ملات^۳ و غلاف فلزی^۴ احاطه شده است. وظیفه ملات و غلاف فلزی جلوگیری از وقوع پدیده کم‌انرژی مهاربند می‌باشد. همچنین جهت جلوگیری از مشارکت ملات در باربری محوری، بین هسته فولادی و ملات توسط یک ماده جداکننده با ضریب اصطکاک کم^۵ پر می‌گردد.



شکل ۱: رفتار نیرو-تغییر مکان مهاربند کم‌انرژی ناپذیر [۱].

مهاربندهای کم‌انرژی ناپذیر معایبی هم دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به نداشتن مکانیزم خود شاغولی و عدم وجود ضوابطی برای بررسی و تشخیص خرابی در مهاربندها اشاره کرد. خصوصیات شکل‌پذیری آن‌ها شدیداً تحت تأثیر نوع مصالح و بخش تسلیم شونده هسته فولادی است. به علاوه به دلیل سختی کم پس از تسلیم، دریافت پسماند زیادی دارند [۲].

کلارک و همکاران، عملکرد لرزه‌ای قاب خمشی فولاد ویژه (SMRF) سه طبقه و قاب مهاربندی کم‌انرژی ناپذیر بازطراحی شده (BRBF) را مورد مطالعه قرار داد. قاب مهاربندی کم‌انرژی تاب با توجه به یک قاب مهاربندی واگرا با روش بار جانبی معادل طبق آیین‌نامه UBC بازطراحی شده است. بر طبق نتایج، وزن کل فولاد در قاب مهاربندی کم‌انرژی تاب نسبت به قاب خمشی فولادی ویژه حدود ۵۰٪ کاهش پیدا کرده است. نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی نشان دادند که قاب مهاربندی کم‌انرژی تاب سختی جانبی بیشتر و مقاومت تسلیم کمتری نسبت به قاب خمشی فولادی ویژه دارد. از طرفی، اضافه مقاومت قاب مهاربندی کم‌انرژی تاب، نسبت به قاب خمشی فولادی ویژه بسیار

¹ Buckling restrained brace

² Steel core

³ Mortar

⁴ Encasing

⁵ Low friction material

کوچکتر بود. زیرا طراحی SMRF بر مبنای دریافت نسبی است، درحالی که طراحی BRBF بر مبنای مقاومت است. نتایج تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی نشان دادند که دریافت ماکزیمم بام در BRBF حدود $0.70 - 0.50\%$ قاب SMRF است [۳].

سابلی و همکاران، پاسخ لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی کمانش ناپذیر و قاب‌های مهاربندی معمولی شکل V معکوس (شورن) در ساختمان‌های ۳ و ۶ طبقه موردبررسی قراردادند. هر دو ساختمان با فرض قرارگیری در لس‌آنجلس، بر طبق روش بار جانبی معادل با ضریب رفتارهای ۶ و ۸، و ضریب اضافه مقاومت ۲ طراحی شده‌اند. وسط دهانه تیرهای متصل به مهاربندها برای نیروی نامتعادل عمودی ناشی از مهاربندها طراحی شده‌اند. نتایج حاکی از رفتار بهتر BRBF نسبت به قاب‌های همگرای مهاربندی معمولی و قاب خمشی بود. همچنین دریافت پسماند قاب مهاربندی کمانش تاب حدود 0.40% تا 0.60% دریافت ماکزیمم قاب معمولی بدست آمد [۴].

یانگ و کی-گینز مطالعه‌ای در ادامه تحقیق سابلی و همکاران انجام دادند [۴]. آن‌ها با افزودن قاب خمشی فولادی ویژه (SMRF) به قاب‌های مهاربندی کمانش تاب ۳ و ۶ طبقه به‌عنوان سیستم دوگانه به مقایسه دو سیستم پرداختند. قاب‌های خمشی فولادی ویژه طوری طراحی شده بودند که 25% کل برش پایه را تحمل کنند. نتایج نشان دادند که قرار دادن SMRF درون BRBF به‌عنوان یک سیستم دوگانه واحد، حداکثر نیاز دریافت را حدود 10% تا 12% نسبت به قاب‌های مهاربندی کمانش تاب کاهش می‌دهد. همچنین تنش پسماند 46% تا 50% نسبت به حالت BRBF اولیه کاهش یافت [۵].

مرادی و همکاران، در مطالعه خود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی کمانش تاب (BRBF) و قاب‌های مهاربندی شده به‌وسیله آلیاژ حافظه‌دار (SMA-BF) را مورد مقایسه قرارداد. چهار حالت پیکربندی مختلف مهاربندی شامل قطری، ضربدری در دوطبقه متوالی، هفتی شکل و شورن، تحت بیست رکورد زمین‌لرزه مختلف با استفاده از آنالیز دینامیکی افزایشی (IDA) مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که پاسخ قاب‌های BRBF به مودهای بالاتر کمی حساس بوده و مهاربندهای SMA در کاهش دریافت میان طبقه‌ای مؤثرند. هم BRBF ها و هم SMA-BF ها محدودیت‌های دریافت طراحی را ارضاء می‌کنند. قاب‌های SMA-BF به دلیل خاصیت خود شاغولی مهاربندهای آلیاژ حافظه‌دار، دریافت پسماند بسیار کمی را تجربه می‌کنند و همچنین نسبت به محتوای فرکانسی زلزله ورودی حساس‌تر هستند [۶].

فام در تحقیق خود، امکان اضافه کردن ظرفیت خود شاغولی به BRBF ها را با استفاده از مهاربندهای آلیاژ حافظه‌دار برای بازگشت به حالت اولیه خود بعد از زلزله موردبررسی قرارداد. بدین منظور یک مدل BRBF با سه مهاربند کمانش ناپذیر را با اضافه کردن مهاربندهای SMA در چهار دهانه تقویت نمود. این مدل بهسازی شده ظرفیت باربری جانبی بیشتری از خود نشان داد. همچنین قاب‌های مهاربندی کمانش ناپذیر تقویت شده توسط مهاربندهای SMA عملکرد لرزه‌ای بهتر از جمله دریافت پسماند و دریافت میان طبقه‌ای نسبت به قاب اصلی از خود نشان دادند [۷].

سای و همکاران، جهت بررسی تأثیر ضریب پواسون و مودهای بالاتر کمانش بر مقاومت فشاری مهاربندهای کمانش تاب، چهار نمونه مختلف از مصالح متفاوت بکار رفته در ماده جداکننده، شامل فوم پلی‌اتیلن با تراکم بالا، لاستیک کلروپرن، ورق لاستیکی و ورق لاستیک سیلیکونی تحت مطالعه آزمایشگاهی قراردادند. نتایج نشان داد لاستیک کلروپرن از لحاظ کاربردی و همچنین کاهش اختلاف بین مقاومت فشاری و کششی مهاربند نسبت به سایر نمونه‌ها عملکرد مطلوب‌تری داشته است. نتایج همچنین بیانگر تأثیر مستقیم مشخصات ماده جداکننده بر عملکرد لرزه‌ای و خستگی مهاربند کمانش تاب می‌باشد [۸].

چن و همکاران، در تحقیقی آزمایشگاهی و عددی به بررسی تأثیر ماده جداکننده بر عملکرد لرزه‌ای مهاربند کمانش تاب پرداختند. آن‌ها دریافتند که نمونه‌های شامل ماده جداکننده خصوصیات خستگی کم چرخه مطلوب‌تری نسبت به نمونه‌هایی بدون ماده جداکننده دارند. همچنین نمونه‌های بدون ماده جداکننده ضریب β (نسبت حداکثر مقاومت فشاری به حداکثر مقاومت کششی) بزرگ‌تری از خود نشان دادند. از طرفی، نتایج نشان داد که ضریب β نسبت مستقیم با طول ناحیه تسلیم هسته فولادی و نسبت عکس با ضخامت ورق هسته فولادی دارد [۹].

جیانگ و همکاران، تأثیر پارامترهای مختلف طراحی را بر عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای کمانش تاب به صورت تحلیلی بررسی قرار دادند. در حالی که، نیروی تماسی به طور عمده‌ای وابسته به نسبت فضای آزاد به ضخامت می‌باشد، به علت اثر کمانش در مودهای بالاتر، آن‌ها پیشنهاد نمودند که حداکثر فاصله آزاد بین هسته فولادی و ملات بتنی از ۲ میلی‌متر تجاوز نکند. همچنین آن‌ها نشان دادند که سه پارامتر اساسی نقص اولیه عضو خارجی، ضخامت هسته فولادی و اثرات سخت‌شوندگی کرنشی مهاربند از عوامل اصلی کمانش در مودهای بالاتر می‌باشد [۱۰].

الحمیده و همکاران، به بررسی تحلیلی پارامترهای اساسی مؤثر بر عملکرد لرزه‌ای و گسیختگی مهاربند کمانش تاب پرداختند. آن‌ها پارامترهایی نظیر طول مهار نشده انتهایی، مقاومت فشاری بتن، ضخامت بتن محصورکننده، ضخامت هسته فولادی، نسبت طول ناحیه تسلیم به طول کل مهاربند (L_y/L_t) و نسبت لاغری هسته فولادی (kL_y/t) مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که حداکثر نیروی فشاری به ترتیب اهمیت وابسته به مقاومت هسته فولادی، نسبت لاغری هسته فولادی، ضخامت بتن محصورکننده و نسبت طول ناحیه تسلیم به طول کل مهاربند (L_y/L_t) می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد ضخامت کم بتن محصورکننده منجر به کاهش حداکثر مقاومت فشاری مهاربند می‌گردد. از طرف دیگر، عوامل مؤثر بر حداکثر مقاومت کششی مهاربند به ترتیب اولویت شامل نسبت لاغری هسته فولادی (kL_y/t)، تنش تسلیم هسته فولادی و نسبت طول ناحیه تسلیم به طول کل مهاربند (L_y/L_t) می‌باشد [۱۱].

به دلیل مکانیزم محصورشدگی، امکان کمانش هسته فولادی در مودهای بالاتر وجود دارد. به همین دلیل لازم است فضای خالی بین هسته فولادی و بتن به اندازه کافی بزرگ باشد تا به فولاد اجازه انبساط و تغییر شکل در مود فشاری را بدهد. در غیر این صورت اصطکاکی که توسط نیروهای تماسی بین فولاد و ملات به وجود می‌آید باعث انتقال بخشی از نیروی محوری وارده به ملات بتنی می‌گردد که موجب کاهش عملکرد لرزه‌ای هسته فولادی می‌گردد. از طرف دیگر، چنانچه این فضای خالی خیلی بزرگ باشد، کمانش و انحنای همراه با آن خیلی بزرگ می‌شود و می‌تواند مقاومت خستگی بادی را در برابر بارهای سیکلیک کاهش دهد. در تخمین مقدار فاصله خالی بین ملات و هسته فلزی باید مقدار ضریب پواسون در $0/3$ در حالت الاستیک و $0/5$ در حالت جاری شدن در نظر گرفته شود. طراحی فضای خالی همچنین بر اساس بیشینه کرنش نیز باید در نظر گرفته شود. ماده نجسب، اصطکاک بین فولاد هسته و بتن محصورکننده را از بین می‌برد و یا به حداقل می‌رساند. با توجه به این نکته ماده نجسب فقط تغییر شکل جانبی فولاد هسته را به بتن محصورکننده انتقال می‌دهد و مانع از انتقال نیروی محوری به بتن می‌شود.

از آنجایی که انرژی ورودی زلزله به صورت انرژی جنبشی، انرژی کرنشی، انرژی میرایی مودال و انرژی هیستریزس سیستم‌های کنترل غیرفعال نظیر جداگرها، میراگرها و مهاربندهای کمانش تاب جذب و اتلاف می‌شوند، در سازه‌هایی که از نظر اجرایی و یا طراحی دچار مشکل می‌باشند، می‌توان با به کارگیری مهاربند کمانش تاب درصدی از انرژی ورودی زلزله را اتلاف نمود. میزان انرژی اتلاف شده به مشخصات هندسی، مشخصات مصالح تشکیل یافته و روش ساخت مهاربند کمانش تاب وابسته بوده به همین دلیل لازم است ویژگی‌های اجزای تشکیل دهنده مهاربند بر عملکرد لرزه‌ای آن به خوبی مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

میزان اتلاف انرژی این مهاربندها وابسته به عدم کمانش هسته فولادی می‌باشد، لازم است با استفاده از ملات و غلاف دور آن از کمانش مهاربند جلوگیری گردد. عدم مشارکت ملات بتنی در باربری محوری وابستگی مستقیم به خصوصیات ماده جداکننده بکار رفته در بین هسته فولادی و ملات بتنی دارد پس لازم است میزان تأثیر اصطکاک این ماده بر رفتار لرزه‌ای مهاربند به خوبی مورد ارزیابی قرار گیرد.

همان‌طور که بیان گردید در مطالعات گذشته اهمیت ماده جداکننده بر عملکرد لرزه‌ای مهاربند کمانش تاب ارائه شده است؛ در این تحقیق به طور خاص به تأثیر میزان اصطکاک ماده جداکننده از صفر تا مقادیر متعارف که از فرض‌های اصلی در طراحی و استفاده از این نوع بادی می‌باشد پرداخته شده است تا تأثیر این ضریب بر خرابی، استهلاک انرژی، تعداد سیکل‌های بارگذاری قبل از گسیختگی تعیین گردد. بدین منظور ۷ مدل تحلیلی اجزاء محدود در نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی و با تغییر پارامتر ضریب اصطکاک ماده جداکننده رفتار لرزه‌ای مهاربند کمانش تاب مورد بررسی قرار گرفته است.

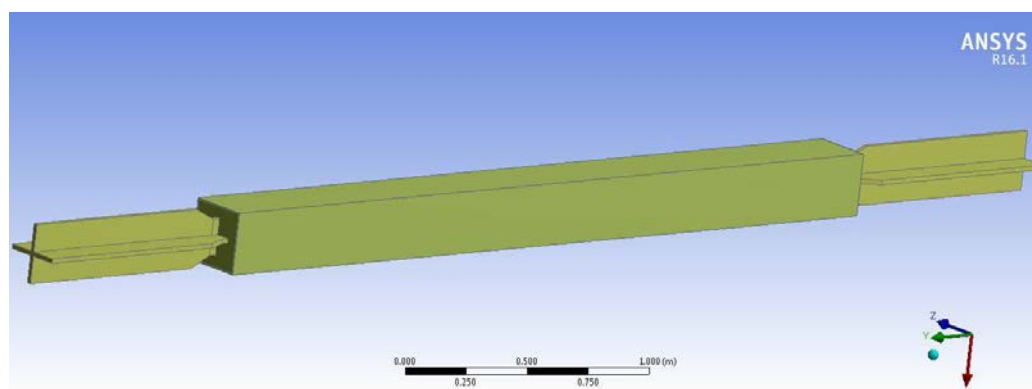
۲- انتخاب مدل تحلیلی و صحت سنجی

مدل مورد بررسی در این تحقیق مدل ۹۹-۱ در آزمایش‌های دانشگاه برکلی آمریکا می‌باشد. هندسه و مشخصات این مدل در جدول ۱ نشان داده شده است [۱۲]. علت استفاده از این مدل، صحت سنجی مدل ساخته شده در نرم افزار ANSYS با مدل آزمایشگاهی می‌باشد.

جدول ۱: مصالح نمونه ۹۹-۱ در آزمایش دانشگاه برکلی [۱۲].

پارامترهای سخت شوندگی	تنش گسیختگی	تنش تسلیم	نوع فولاد	طول گسیختگی	مساحت	ابعاد مقطع	قطعه
-	(مگا پاسکال)	(مگا پاسکال)	-	(میلی متر)	(میلی متر مربع)	(میلی متر)	واحد
$\gamma_1=116$	۵۹۲	۴۱۸.۵	JIS SM490A	۳۰۹۰	۲۹۰۷	۱۵۳×۱۹	فولاد هسته
-	۴۰۰	۳۱۷.۲	JIS STK400	۳۳۹۰	۶۱۰۰	۲۵۰×۲۵۰×۶	فولاد غلاف

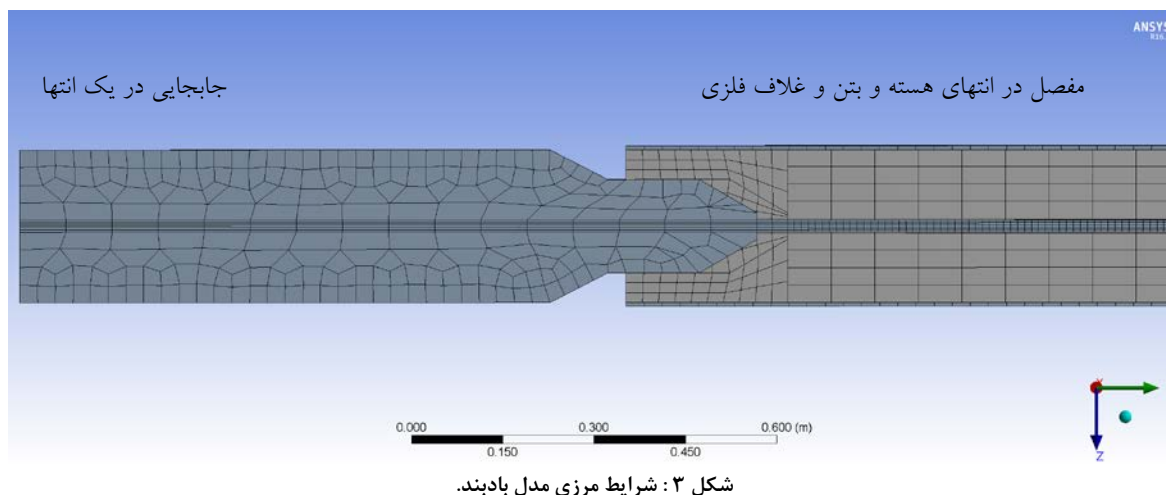
ملات مصرفی بتن با مقاومت فشاری ۳۵ مگا پاسکال و وزن مخصوص ۲۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ضریب پواسون ۰/۲ می‌باشد. مدل اجزای محدود مهاربند در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: مدل اجزای محدود مهاربند کمانش ناپذیر در نرم افزار ANSYS.

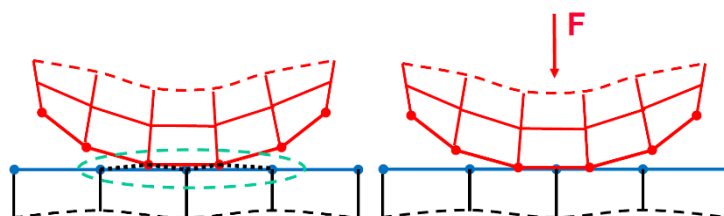
۲-۱- شرایط مرزی

شرایط مرزی مهاربند جهت بارگذاری به این صورت انتخاب شده است که در انتهای مقطع محصور نشده بارگذاری اعمال شده و در طرف دیگر، حرکت طولی تمام گره‌ها، شامل گره‌های مهاربند، بتن و غلاف با استفاده از تکیه‌گاه مفصلی مقید شده است زیرا در واقعیت بتن و غلاف هیچ‌گونه حرکتی نسبت به هسته فولادی ندارند، به همین دلیل لازم است در مدل تحلیلی نیز این درجات آزادی مقید گردد در غیر این صورت بتن نسبت به هسته فولادی جابجایی زیادی خواهد داشت (شکل ۳).



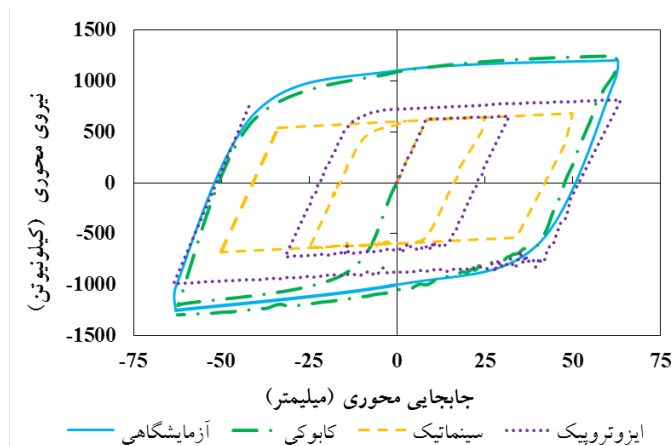
۲-۲- نحوه مدل سازی تماس بین هسته فولادی و بتن محصورکننده

یکی از مهمترین پارامترها در مدل سازی عددی انتخاب المان تماس (Contact) مناسب بین هسته فولادی و بتن می باشد چراکه المان هسته وارد ناحیه غیرخطی شده و تغییر شکل هایی رخ داده همگی غیرخطی بوده و این تغییر شکل ها باید توسط المان کانتکت به بتن انتقال یابد در نتیجه المان تماس نیز باید غیرخطی باشد، این المان به گونه ای تعریف شده که تغییر مکان های تک تک گره های هسته فولادی به بتن انتقال یابد. با تعریف این حالت نرم افزار ANSYS مکان تلاقی صفحات این دو المان را به هم به صورت خودکار مانند یک گره در نظر گرفته و جابجایی از هسته به بتن منتقل می شود (شکل ۴). برای مدل سازی ماده نجسب از المان کانتکت 178 Conta استفاده شده و با استفاده از کانتکت اصطکاک مقادیر مختلف ضرایب اصطکاک برای این ماده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.



۲-۳- انتخاب مدل سخت شوندگی

برای تعیین حالت سخت شوندگی مهاربند در مرحله پس از جاری شدن، سه مدل سخت شوندگی شامل، سخت شوندگی ایزوتروپیک دوخطی، سخت شوندگی سینماتیک دوخطی و سخت شوندگی سینماتیک کابوکی برای مدل مهاربند انتخاب و با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه شده است. در حالت سخت شوندگی ایزوتروپیک دوخطی، سطح تسلیم در تمام جهات به یک اندازه تغییر می کند یعنی سطح تسلیم با ایجاد تنش های پلاستیک در تمام جهات به یک اندازه کاهش و یا افزایش می یابد. سخت شوندگی سینماتیک فرض می کند که سطح جاری شدگی ثابت باقی می ماند اما محل آن در فضای تنش جابجا می شود. مدل سخت شوندگی سینماتیک دوخطی فرض می کند که محدوده تغییرات تنش معادل برابر $2\sigma_y$ است و به عبارتی اثر باشینگر را در نظر می گیرد، این گزینه برای شبیه سازی مصالح با کرنش کوچک با معیار جاری شدن فون-مایسز پیشنهاد می شود که در اغلب فلزات قابل استفاده است.

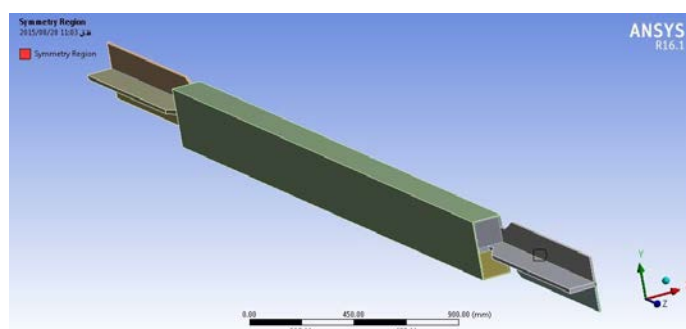


شکل ۵: مقایسه حالات مختلف سخت‌شوندگی.

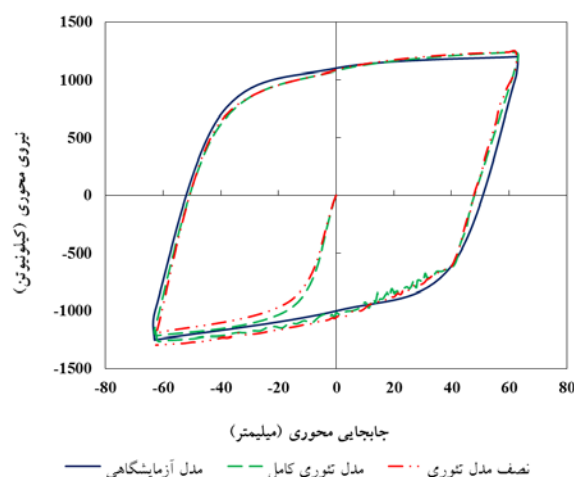
مدل سخت‌شوندگی سینماتیک کابوکی، مبتنی بر سخت‌شوندگی سینماتیکی غیرخطی چند مؤلفه‌ای است که امکان اعمال چندین مدل سینماتیکی را به‌طور همزمان فراهم می‌کند. همانند مدل‌های قبلی (دو و چندخطی) می‌توان اثر باشینگر و سخت‌شوندگی مونوتونیک را در این مدل نیز شبیه‌سازی نمود. این مدل برای شبیه‌سازی تحلیلی کرنش‌های بزرگ گزینه مناسبی است. نتایج تحلیل نشان می‌دهند مدل سخت‌شوندگی کابوکی نزدیک‌ترین نتایج را نسبت به مدل آزمایشی دارد (شکل ۵).

۲-۴- استفاده از نصف مدل جهت کاهش زمان تحلیل

با توجه به وجود دو محور تقارن در مدل نمونه موردتحقیق برای سهولت و سرعت و کاهش حجم محاسبات در تحلیل می‌توانیم از نصف مدل اصلی و درواقع از قرینگی مدل استفاده کنیم. بدین منظور با توجه به شکل ۶، نصف مهاربند در مدل‌سازی ساخته و به‌منظور صحت سنجی با نتایج واقعی ناشی از آزمایش و همچنین مدل کامل مهاربند تحت منحنی‌های نیرو-تغییر مکان نشان داده‌شده در شکل ۷ مقایسه شده‌اند. نتایج بیانگر تطابق مناسب بین مدل قرینه و نتایج حاصل از آزمایش دارد به همین علت در تحلیل از نصف مهاربند استفاده شده است. لازم به ذکر است، مهاربند کمانش تاب به علت وجود ملات بتنی و غلاف محصورکننده فاقد کمانش کلی بوده و تنها امکان کمانش موضعی برای آن وجود دارد.



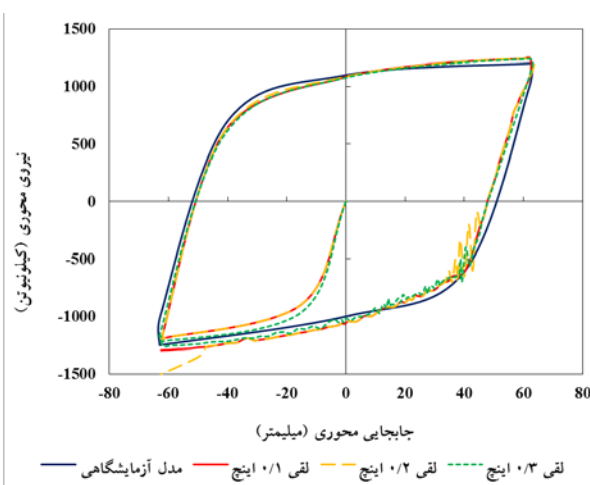
شکل ۶: استفاده از قرینگی مدل مهاربند.



شکل ۷: نمودار هیستریزیس نمونه آزمایشی و مدل اجزا محدود.

۲-۵- تعیین فاصله (لقی) بین فولاد هسته و بتن محصورکننده

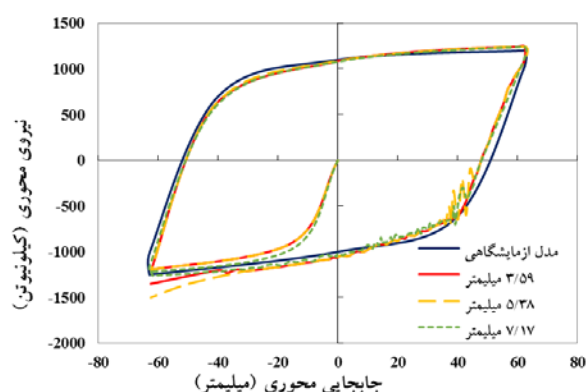
با توجه به آنکه لازم است فاصله بین هسته فولادی و بتن با استفاده از ماده پرکننده پر شود لازم است مقدار این فاصله در مدل نرم‌افزاری معرفی گردد. به منظور رسیدن به بهترین مقدار ممکن از فواصل ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ اینچ در مدل‌سازی استفاده و با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه شده است. با توجه به شکل ۸، فاصله ۰/۲ اینچ بین هسته فولادی و ملات بتنی، نزدیک‌ترین رفتار را به مدل آزمایشگاهی دارد.



شکل ۸: تأثیر میزان فاصله لقی بر نمودار هیستریزیس.

۲-۶- تعیین تغییر مکان اولیه برای کمانش

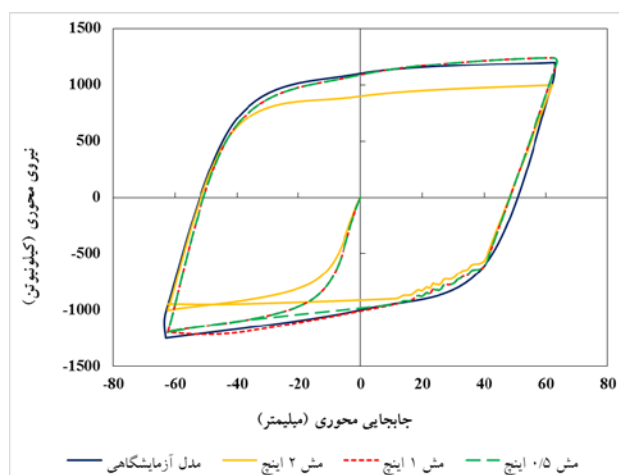
به منظور آغاز کمانش در هسته فولادی لازم است یک جابجایی کوچک در وسط هسته ایجاد می‌کنیم. برای تعیین این مقدار سه حالت به منظور آغاز کمانش در هسته فولادی لازم است یک جابجایی کوچک در وسط هسته ایجاد می‌کنیم. برای تعیین این مقدار سه حالت $L/1500=3.59 \text{ mm}$ ، $L/1000=5.38 \text{ mm}$ ، $L/750=7.17 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده و با آزمایش مقایسه شده است. با توجه به نتایج حاصل در شکل ۹، جابجایی اولیه معادل $3/59$ میلی‌متر به عنوان تغییر مکان اولیه لحاظ شده است (شکل ۹).



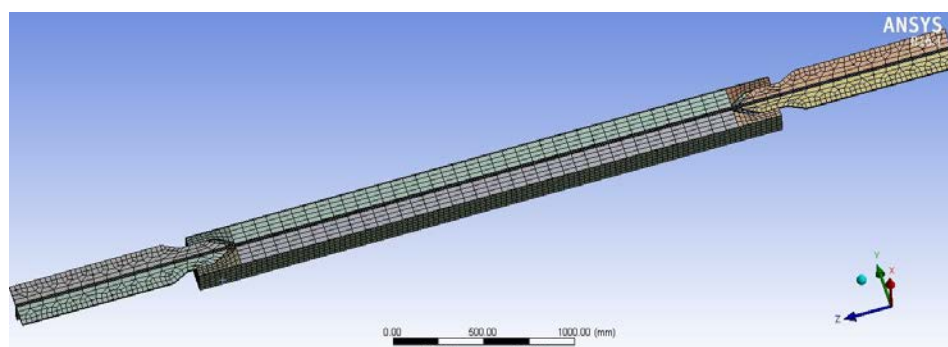
شکل ۹: تأثیر مقدار تغییر شکل اولیه در مهاربند.

۷-۲- انتخاب ابعاد مش بندی

جهت مش بندی مدل در نرم افزار از مش بندی مربعی با ابعاد ۱، ۲ و ۵/۰ اینچ استفاده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. با توجه به شکل ۱۰، ابعاد مش ۱ و ۵/۰ اینچ از دقت بالاتری برخوردار بوده و به سبب کاهش زمان تحلیل از مش بندی ۱ اینچی استفاده شده است. در شکل ۱۱، مش بندی مربعی مهاربند به ابعاد ۱ اینچ نشان داده شده است (شکل ۱۰).

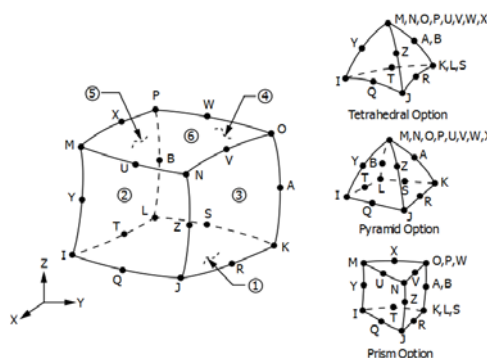


شکل ۱۰: تأثیر مش بندی بر نمودار هیستریزیس.



شکل ۱۱: مش بندی المان مهاربند به ابعاد ۱ اینچ.

در این مدل برای مدل سازی بتن و فولاد از المان پیش فرض ANSYS یعنی المان Solid 186 که المان سه بعدی می باشد استفاده شده است، این المان توانایی مدل سازی کرنش های غیرخطی بزرگ و دوران های بزرگ و خواص غیرخطی مواد را دارا می باشد.

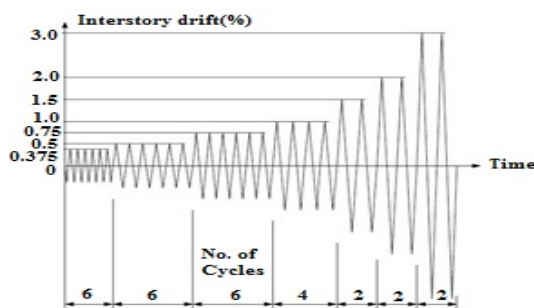


شکل ۱۲: المان Solid186 [۱۳].

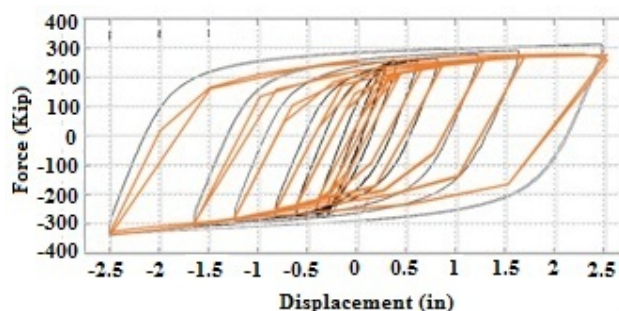
از طرفی برای مدل سازی ماده نجسب از المان کانتکت Conta178 استفاده شده و با استفاده از کانتکت اصطکاک، مقادیر مختلف ضرایب اصطکاک برای ماد جداکننده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است [۱۳].

۲-۸- تطابق مدل بارگذاری آزمایشگاه و مدل عددی

بارگذاری استفاده شده در مدل آزمایشگاهی، بارگذاری پایه زمانی سک که بر اساس آیین نامه آمریکا می باشد (شکل ۱۳). به منظور بررسی صحت بارگذاری در مدل انتخابی منحنی های نیرو-تغییر مکان ناشی از آزمایش و نتایج تحلیل در شکل ۱۴ نشان داده شده است که بیانگر صحت بارگذاری نمونه ساخته شده در نرم افزار می باشد.



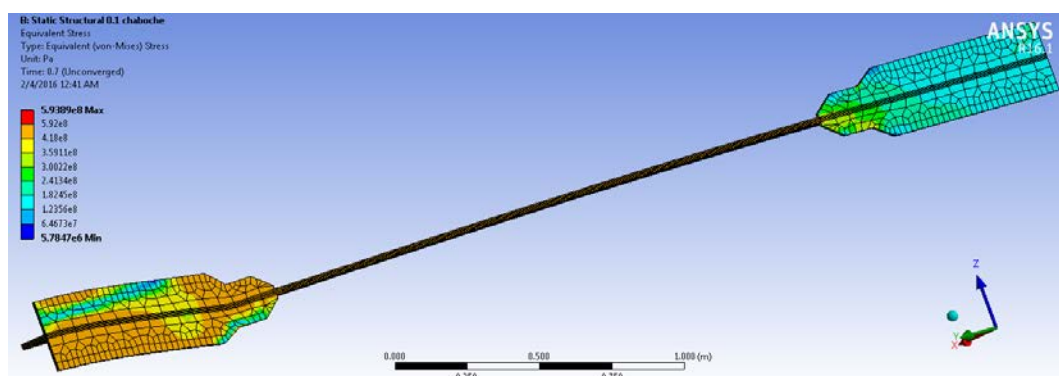
شکل ۱۳: بارگذاری پایه زمانی سک آزمایش بهار ۱۹۹۹ دانشگاه برکلی آمریکا [۱۲].



شکل ۱۴: تطابق نمودار هیستریزیس مدل آزمایش و مدل عددی کابوکی نمونه ۱-۹۹ [۱۲].

۳- بررسی تأثیر میزان اصطکاک ماده چسبنده در رفتار لرزه‌ای مهاربند

وظیفه اصلی ماده جداکننده ایجاد یک فاصله مناسب بین هسته فولادی و ملات بتنی می‌باشد تا اولاً مانع از انتقال نیروها از هسته فولادی به ملات بتنی گردد و ثانیاً فضای لازم برای ایجاد تسلیم در فشار مهاربند و عدم کمانش آن را فراهم می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است چنانچه فاصله‌ای بین هسته فولادی و ملات بتنی وجود نداشته باشد، مهاربند کمانش کرده و به حداکثر ظرفیت باربری خود نمی‌رسد. به همین دلیل لازم است فضای بین هسته فولادی و بتن با مصالح مناسب پر گردد تا اولاً مانع انتقال نیروی محوری هسته فولادی به بتن گردد ثانیاً اجازه تغییر شکل جانبی هسته فولادی در موده‌های بالاتر را فراهم کند.



شکل ۱۵: کمانش بادبند در حالت تماس مستقیم بتن و فولاد و عدم وجود فاصله لقی

جهت تحلیل غیرخطی مهاربند از مصالح مختلف با ضرایب اصطکاک خاص بین بتن و فولاد استفاده شده است. مواد بکار رفته به‌عنوان ماده پرکننده و ضریب اصطکاک مربوط به آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

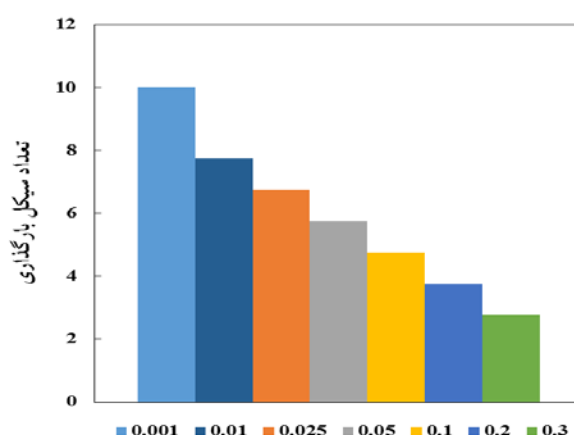
جدول ۲: مصالح بکار رفته با ضرایب اصطکاک متفاوت به‌عنوان ماده جداکننده.

ردیف	مصالح ماده جدا کننده	ضریب اصطکاک بین هسته فولادی و بتن پرکننده
۱	بدون ماده جداکننده	تماس مستقیم هسته فولادی و بتن
۲	پلی استایرن	۰/۳
۳	پلی اتیلن	۰/۲
۴	گرافیت نرم	۰/۱
۵	تفلن	۰/۰۵
۶	تفلن با روغن سیلیکون	۰/۰۲۵
۷	تفلن با روغن سیلیکون	۰/۰۱
۸	ماده بدون اصطکاک	۰/۰۰۱

۴- تحلیل دینامیکی غیرخطی سیکلیک و نتایج آن

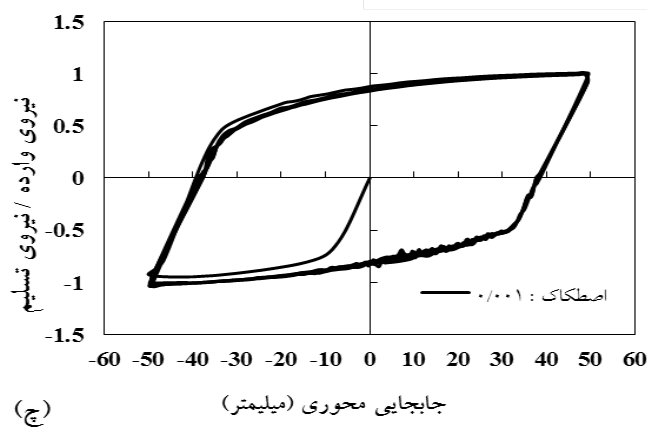
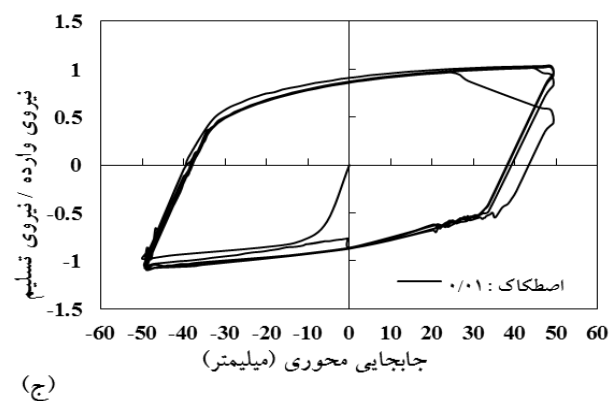
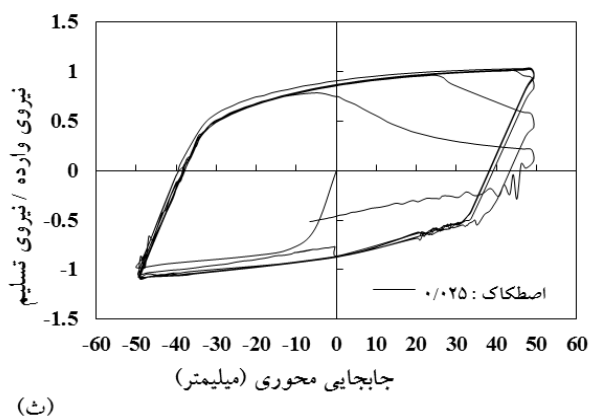
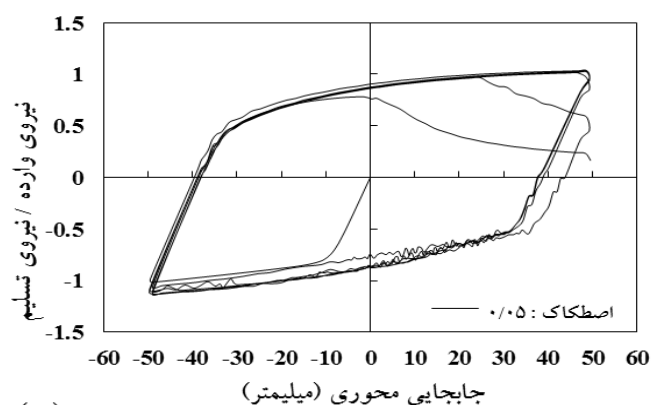
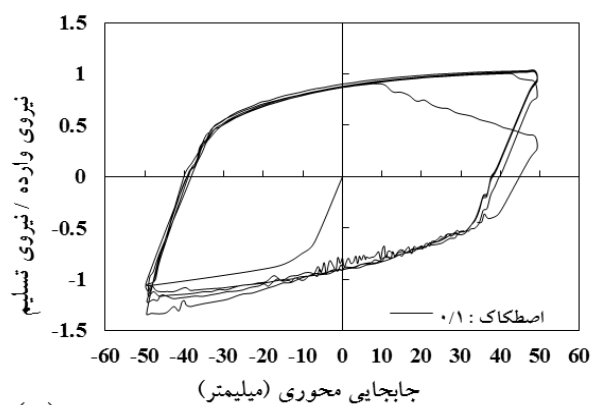
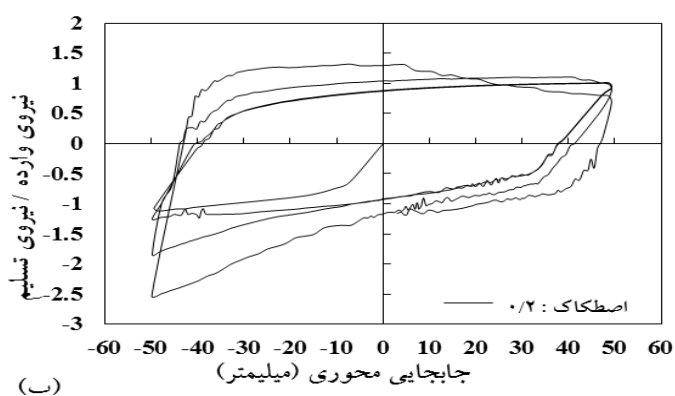
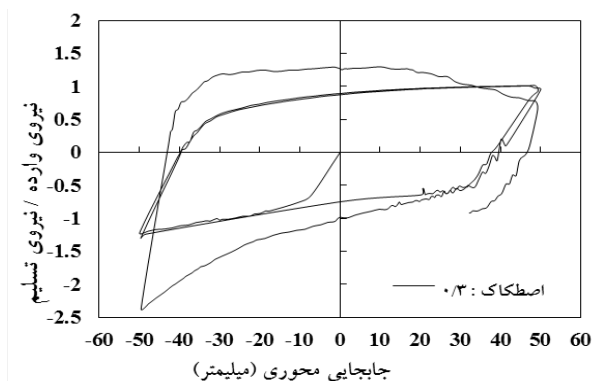
پس از صحت مدل‌سازی و اعمال بارگذاری، با اعمال ضرایب اصطکاک متفاوت برای ماده جداکننده، مهاربند کمانش تاب در ۷ نمونه مختلف با استفاده از نرم‌افزار ANSYS تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی سیکلیک طبق الگوی بار ارائه شده در شکل ۱۳ قرار گرفته است.

شکل ۱۶ تعداد سیکل‌های بارگذاری نمونه‌های مختلف قبل از گسیختگی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند با کاهش میزان ضریب اصطکاک ماده جداکننده، نمونه توانایی بیشتری در استهلاک انرژی و شکل‌پذیری داشته و در تعداد چرخه‌های بارگذاری بیشتری پایداری خود را حفظ می‌کند. علت این امر کاهش نیروی منتقل شده از هسته فولادی به ملات بتنی محصورکننده می‌باشد؛ که باعث عملکرد مطلوب‌تر مهاربند در مودهای کششی و فشاری می‌گردد. زیرا هرچه نیروی انتقالی از هسته فولادی به ملات محصورکننده کمتر باشد، ظرفیت فشاری مهاربند افزایش یافته و پدیده کمانش در مودهای ارتعاشی بالاتر رخ می‌دهد. از طرفی هرچه تعداد سیکل بارگذاری قبل از گسیختگی افزایش یابد، میزان انرژی مستهلک شده افزایش می‌یابد که این امر بیانگر آن است استفاده از مواد جداکننده با ضریب اصطکاک کمتر منجر به افزایش شکل‌پذیری و استهلاک انرژی مهاربند کمانش تاب می‌گردد.



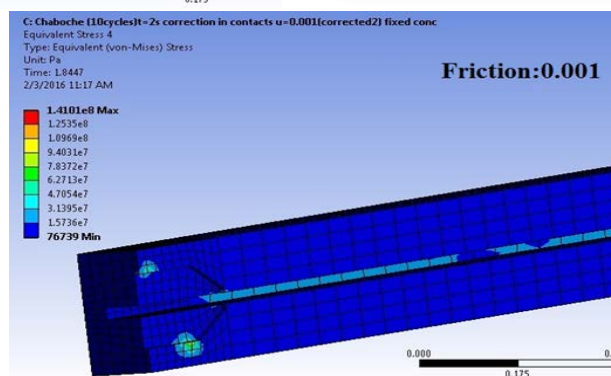
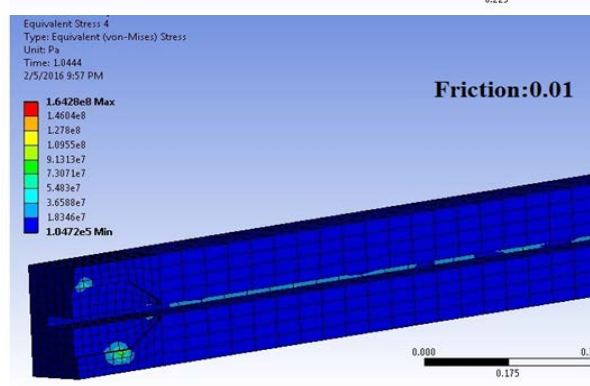
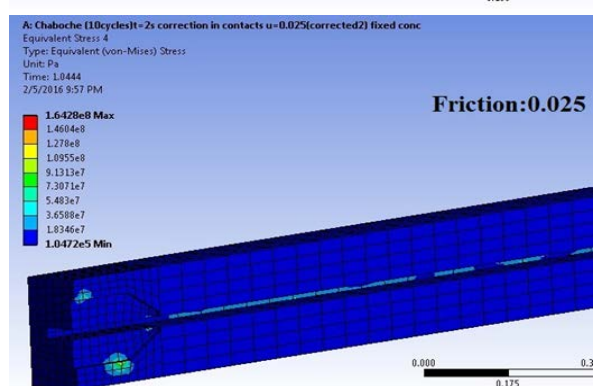
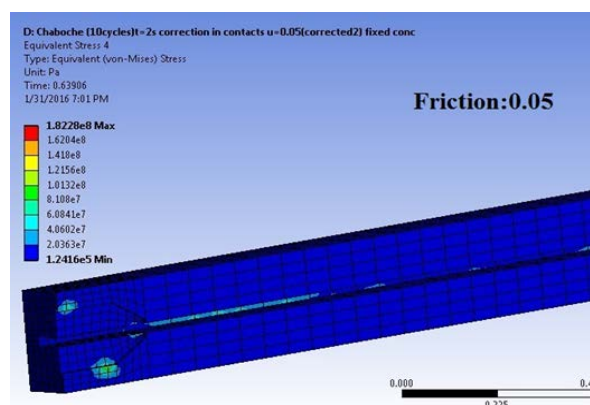
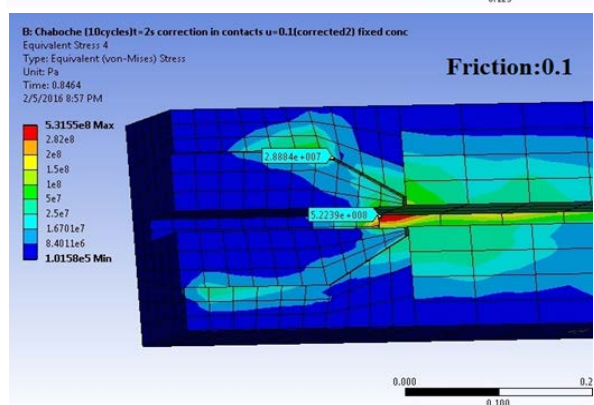
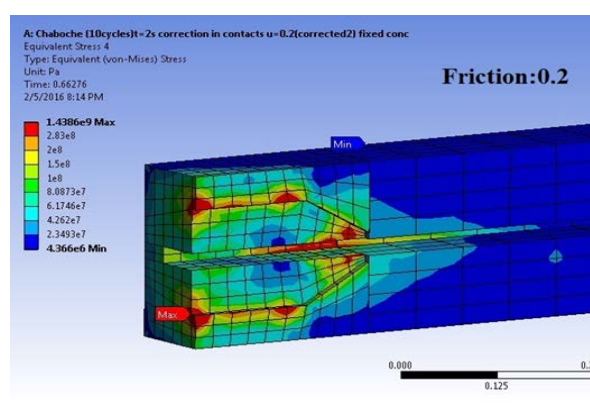
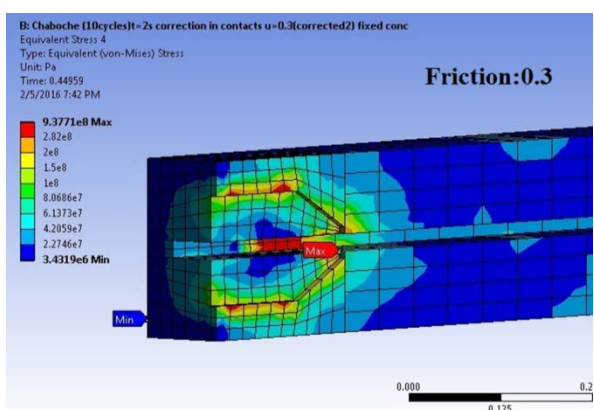
شکل ۱۶: تعداد سیکل‌های بارگذاری قبل از گسیختگی برای نمونه‌های مختلف با ضرایب اصطکاک.

همچنین در شکل ۱۷، منحنی‌های هیستریزس نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص می‌باشد، با کاهش ضریب اصطکاک ماده جداکننده، منحنی‌های هیستریزس چرخه‌های پایداری بیشتری داشته و قابلیت شکل‌پذیری و استهلاک انرژی بیشتری از خود نشان داده و پدیده باریک شدگی هسته فولادی در آن‌ها در سیکل‌های بالاتری رخ می‌دهد. این امر منجر به پایداری مهاربند در تعداد سیکل بارگذاری بیشتری می‌گردد. از طرفی، هرچه ضریب اصطکاک ماده جداکننده کاهش می‌یابد، اولاً سطح زیر منحنی‌های هیستریزس که بیانگر اتلاف انرژی ورودی می‌باشد، افزایش یافته و ثانیاً پدیده باریک شدگی هسته فولادی در سیکل‌های بالاتری رخ می‌دهد، به‌طوری‌که این پدیده در ضرایب اصطکاک ۰/۳، ۰/۲، ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۱ به ترتیب در سیکل‌های ۴، ۵، ۶، (۷و۶)، (۸و۷) و ۹ رخ می‌دهد. این امر بیانگر آن است که با کاهش ضریب اصطکاک ماده جداکننده اولاً مقاومت کششی و فشاری مهاربند حدوداً یکسان شده و رفتار لرزه‌ای آن در سیکل‌های رفت و برگشتی یکسان می‌گردد و عمده ضعف مهاربندها که کمانش در مود فشاری می‌باشد به طرز محسوسی کاهش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش مقدار ضریب اصطکاک ماده جداکننده، نیروی مقاوم مهاربند کمتر از نیروی تسلیم می‌گردد که نشان می‌دهد مهاربند به حداکثر ظرفیت باربری نرسیده است. به بیان دیگر، با افزایش ضریب اصطکاک ماده جداکننده، رسیدن به حد تسلیم نهایی در مودهای فشاری و کششی که از مفاهیم بنیادی ساخت این‌گونه مهاربندها می‌باشد، رخ نمی‌دهد.



شکل ۱۷: منحنی هیستریزیس نمونه‌ها تحت مواد جداکننده با ضرایب اصطکاک متفاوت. (الف) $\mu=0.3$ ، (ب) $\mu=0.2$ ، (پ) $\mu=0.1$ ، (ت) $\mu=0.05$ ،

(ج) $\mu=0.025$ ، (چ) $\mu=0.01$ و (ح) $\mu=0.001$

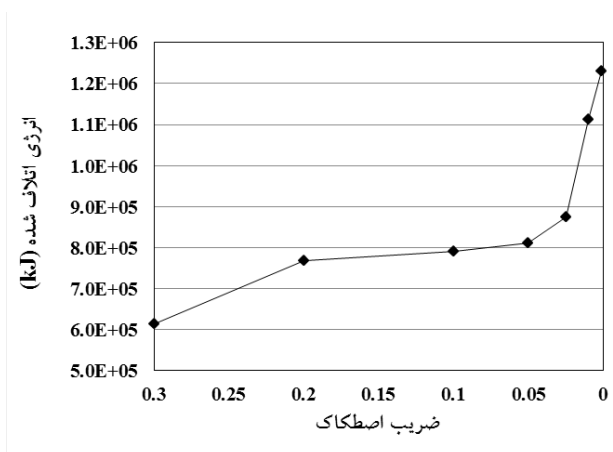


شکل ۱۸: کانتور تنش حداکثر در بتن بر اساس معیار فون مایزس.

در شکل ۱۸، کانتور تنش حداکثر در بتن نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند با افزایش ضریب اصطکاک بین هسته فولادی و بتن، درصد بیشتری از نیروی اعمالی به بتن منتقل می‌گردد که اولاً موجب تخریب بتن به علت افزایش تنش‌های داخلی در آن

می‌گردد ثانیاً رفتار لرزه‌ای هسته فولادی را مختل کرده و باعث می‌گردد، هسته فولادی تعداد سیکل‌های کمتری پایدار بوده و زودتر گسیخته گردد. این امر موجب کاهش اتلاف انرژی و همچنین کاهش ظرفیت باربری هسته فولادی به علت پدیده کمایش و عدم تسلیم در مود فشاری می‌گردد و از طرفی فرض اولیه عدم کمایش مهاربند به علت خرد شدن بتن محصورکننده دچار اختلال می‌گردد که خود باعث ناکارآمدی مهاربند شده و رفتاری شبیه مهاربندهای معمولی از خود نشان می‌دهد.

در شکل ۱۹، نمودار تغییرات مقدار انرژی مستهلک‌شده بر حسب ضریب اصطکاک ماده جداکننده رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با کاهش ضریب اصطکاک ماده جداکننده، سطح زیر نمودار منحنی هیستریزیس نمونه‌ها افزایش یافته و درصد بیشتری از انرژی ورودی زلزله مستهلک می‌گردد. به‌طوری‌که اگر استهلاک انرژی ورودی زلزله برای ضریب اصطکاک $\mu=0.001$ برابر ۱۰۰٪ لحاظ گردد، مقدار استهلاک انرژی برای ضرایب اصطکاک ۰/۳، ۰/۲، ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۲۵، ۰/۰۱ به ترتیب برابر ۵۰٪، ۶۲٪، ۶۳٪، ۶۵٪، ۷۱٪ و ۹۰٪ خواهد بود. این امر نشان می‌دهد در شرایط یکسان از لحاظ شکل مقطع هسته فولادی، مشخصات غلاف و بتن محصورکننده، چنانچه به ضریب اصطکاک ماده جداکننده توجه لازم مبذول نگردد، میزان استهلاک انرژی تا نصف مقدار ایده آل کاهش خواهد یافت که با توجه به هزینه ساخت و اجرای این‌گونه مهاربندها، می‌تواند عملکرد لرزه‌ای آن را به نسبت مهاربندهای معمولی به طرز محسوسی تحت تأثیر قرار داده که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نباشد.



شکل ۱۹: مقدار انرژی مستهلک‌شده هریک از نمونه‌ها.

۵- نتیجه‌گیری

مهاربندهای کمایش تاب علاوه بر آنکه به‌عنوان سیستم لرزه بر در سازه‌هایی جدید مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌توانند به‌عنوان بخشی از راهبرد بهسازی لرزه‌ای سازه‌های آسیب‌دیده نیز بکار روند. این مهاربندها همانند میراگرهای اتلاف انرژی بخشی از انرژی ورودی زلزله را با استفاده از میرایی هیستریزیس سیستم مهاربندی اتلاف می‌کنند که میزان آن به‌طور مستقیم وابسته به مشخصات مصالح بکار رفته و کیفیت ساخت خصوصاً مصالح ماده جداکننده دارد. در این تحقیق تأثیر میزان اصطکاک ماده جداکننده در ۷ نمونه مختلف به‌صورت تحلیلی با بارگذاری سیکلیک مورد ارزیابی قرار گرفته و تأثیر آن بر رفتار لرزه‌ای مهاربند کمایش تاب، از لحاظ تعداد سیکل‌های باربری قبل از گسیختگی، میزان استهلاک انرژی، تأثیر ضریب اصطکاک بر تنش اعمالی بر بتن محصورکننده و رفتار لرزه‌ای آن در فشار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل بیانگر آن است که هرچه ضریب اصطکاک ماده جداکننده کاهش یابد، مهاربند عملکرد لرزه‌ای بهتری از خود نشان می‌دهد به‌گونه‌ای که شکل‌پذیری و اتلاف انرژی سیستم افزایش یافته و مهاربند تعداد سیکل‌های بیشتری را قبل از گسیختگی نهایی تجربه می‌کند؛ به‌طوری‌که این پدیده در ضرایب اصطکاک ۰/۳، ۰/۲، ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۱ به ترتیب در سیکل‌های ۴، ۵، ۶، (۷۰۶)، (۸۰۷) و ۹ رخ می‌دهد. همچنین میزان اتلاف انرژی نسبت به حالت ایده آل با ضریب اصطکاک صفر به ترتیب برابر ۵۰٪، ۶۲٪، ۶۳٪، ۶۵٪، ۷۱٪ و ۹۰٪ خواهد بود.

۷۱٪ و ۹۰٪ خواهد بود. به همین دلیل هرچه مواد تشکیل دهنده ماده جداکننده دارای ضریب اصطکاک کمتری باشد، عملکرد لرزه‌ای مهاربند بهبود می‌یابد. به عبارتی با کاهش ضریب اصطکاک ماده جداکننده ظرفیت فشاری مهاربند افزایش یافته و منحنی هیستریزس رفتار چرخه‌ای مطلوب‌تری از خود نشان داده که باعث می‌شود تحت نیروهای فشار مود تسلیم به‌جای مود کمانش در آن غالب می‌گردد. از طرفی با توجه به اینکه در مهاربندهای کمانش تاب امکان کمانش کلی وجود ندارد، هرچه ضریب اصطکاک افزایش یابد منجر به تخریب ملات به‌صورت موضعی شده که باعث کمانش موضعی مهاربند در سیکل‌های پایین بارگذاری می‌گردد. با استفاده از نتایج تحلیلی و مطالب ارائه‌شده، نتایج موردی زیر قابل استنباط می‌باشد:

- با افزایش اصطکاک نیرو و تنش بیشتری در مهاربند به وجود می‌آید.
- با افزایش اصطکاک شکل‌پذیری و اتلاف انرژی مهاربند کاهش می‌یابد.
- با افزایش اصطکاک افت مقاومت شدید در روند بارگذاری ایجاد می‌شود و تعداد سیکل‌های مقاومت مهاربند در برابر جابجایی کاهش می‌یابد.
- با افزایش اصطکاک، پدیده باریک شدگی در هسته مهاربند در سیکل‌های پایین‌تر رخ داده که موجب کاهش مقاومت مهاربند می‌شود.
- با افزایش اصطکاک در حالت باریک شدگی، مهاربند به تنش گسیختگی رسیده و عملاً کارایی خود را از دست می‌دهد.
- با افزایش میزان اصطکاک ماده جداکننده تخریب ملات در سیکل‌های کمتری رخ داده که منجر به کمانش موضعی و کاهش ظرفیت باربری فشاری و کاهش شکل‌پذیری می‌گردد.

مراجع

- [1] D. o. S.-R. S. B. Structures, Design of Seismic-Resistant Steel Building Structures, Design of Seismic-Resistant Steel Building Structures, 2007.
- [2] Proença L. C. M., Nsieri P. A., Rutenbrg A., Levy R., "Buckling-Restrained Braces", PROHITECH WP5 (Leader Luís Calado), Innovative Materials and Techniques
- [3] Clark, P., Aiken, I., Kasai, K., Ko, E. and Kimura, I. (1999). Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices, Proc. 69th Annual Convention of SEAOC, Sacramento, CA.
- [4] Sabelli, R., Mahin, S.A. and Chang, C. (2003). Seismic demands on steel braced-frame buildings with buckling-restrained braces, Engineering Structures, 25, 655–666.
- [5] Uang, C.M., Kiggins, S. (2006) "Reducing Residual Drift of Buckling-Restrained Braced Frames as a dual system.", Engineering Structures, 28(11), 1525-1532.
- [6] Moradi, S., Alam, M.S., Asgarian, B. (2013) "Incremental Dynamic Analysis of Steel Frames Equipped with NiTi Shape Memory Alloy Braces" The Structural Design of Tall and Special Buildings.
- [7] Huy Van Pham, "Performance-based assessment of Buckling-Restrained Braced Steel Frames retrofitted by self centering Shape Memory Alloy Braces", Master's thesis, Georgia Institute of Technology, August of 2013.
- [8] Tasi, k., Wu, A., Wei, C., Chuang, M., and Lin, P. "Welded end-slot connection and Unbonding layers for buckling-restrained braces", Journal of EARTHQUAKE ENGINEERING & STRUCTURAL DYNAMICS, 2014, DOI: 10.1002/eqe.2423.
- [9] Chen, Q., Wang, C., Meng, S., and Zeng, B. "Effect of the unbonding materials on the mechanic behavior of all-steel buckling-restrained braces". Journal of Engineering Structures, Engineering structures 111(2016) 478-493.
- [10] Jiang, Z., Gue, Y., Zhang, B., and Zhang, X. "Influence of design parameters of buckling-restrained brace on its performance". Journal of Constructional Steel Research, Journal of Constructional Steel Research 105 (2015) 139–150.
- [11] AlHamaydeh, M., Abed, F., and Mustapha, A. "Key parameters influencing performance and failure modes for BRBs using nonlinear FEA", Journal of Constructional Steel Research 116 (2016) 1–18.
- [12] C. Black, Component Testing, Stability Analysis and Characterization, Pacific Earthquake Engineering, 2002.
- [13] ANSYS, The principles of non-linear analysis, nonlinear material models in ANSYS, ANSYS, 2010.

[14] A. American Institute Of Steel Construction, Steel Construction Manual, American Institute of Steel Construction, 2005

[15] M. D. Engelhardt, buckling-restrained braced frames, American Institute of Steel Construction, 2012