



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



مطالعه آزمایشگاهی از رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی چندطبقه مجهز به مهاربند مگاییضی

ناصر مظفری^۱، پرهام معمارزاده^۲، سعید آقاجانیان^۳، حبیب قاسمی جونغانی^۴

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی سازه، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی Engineer.mozafari@yahoo.com

^۲دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران parham.memarzadeh@iau.ac.ir

^۳استادیار دانشکده مهندسی عمران گروه مهندسی سازه دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی aghajanian_s@alumni.iust.ac.ir

^۴پژوهشگر، دانشکده مهندسی عمران، گروه مهندسی سازه، دانشگاه شهید رجایی تهران ghasemi@sru.ac.ir

* نویسنده مسؤول: پرهام معمارزاده parham.memarzadeh@iau.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر، توجه محققان به سیستم‌های مهاربندی نوآورانه بیضی عمدتاً محدود به قاب‌های یک طبقه و یک دهانه بوده است. هرچند مطالعات عددی رفتار قاب‌های چندطبقه را نیز بررسی کرده‌اند، کمبود داده‌های آزمایشگاهی باعث تردید در اعتبار این نتایج شده است. به منظور پر کردن این خلأ علمی، این مقاله عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی چندطبقه مجهز به مهاربند مگاییضی را از طریق یک برنامه آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار می‌دهد. سهم اصلی این پژوهش ارائه داده‌های آزمایشگاهی برای سیستم‌های چندطبقه است که می‌تواند به اعتبارسنجی مدل‌های عددی و تحلیل ویژگی‌های لرزه‌ای آن‌ها کمک کند. در این مطالعه، از تست‌های آزمایشگاهی برای بررسی رفتار چرخه‌ای و تعیین پارامترهایی همچون مقاومت، شکل‌پذیری، سختی، اتلاف انرژی و عملکرد لرزه‌ای در نمونه‌های چندطبقه استفاده شد. برای این منظور، یک نمونه دو دهانه چهارطبقه قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند مگاییضی در مقیاس یک‌ششم تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی چرخه‌ای آزمایش شد. نتایج نشان داد که تسلیم مهاربندهای بیضی، وقوع مود شکست در ستون‌های مجاور را به تأخیر انداخته و امکان تحمل تغییرشکل غیرخطی قابل توجه تا رسیدن به نقطه شکست نهایی را فراهم می‌کند. ضریب اصلاح پاسخ برای قاب‌های مجهز به مهاربند مگاییضی برابر با ۶/۵ به دست آمد. رفتار متقارن، ظرفیت بالای جذب انرژی، سختی مناسب و شکل‌پذیری بالا در مقایسه با سیستم‌های معمولی از جمله مزایای برجسته این سیستم‌ها است.

کلمات کلیدی: قاب‌های خمشی فولادی مجهز به مهاربند مگاییضی، ضریب اصلاح پاسخ، ضریب اضافه مقاومت، تحلیل المان محدود، منحنی هیستریزس، اتلاف انرژی.

Experimental Study on the Seismic Behavior of Multi-Story Steel Moment Frames Equipped with Mega-Elliptic Bracing

Naser Mozafari¹, Parham Memarzadeh², Saeid Aghajanian³, Habib Ghasemi Joneghani⁴

¹M.Sc. Student, Structural Engineering, Shahid Ashrafi Esfahani University, Isfahan, Iran.

Engineer.mozafari@yahoo.com

²Associate Professor, Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

parham.memarzadeh@iau.ac.ir

³Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Department of Structural Engineering, Shahid Ashrafi Esfahani University, Iran. Aghajanian_s@alumni.iust.ac.ir

⁴Researcher, Faculty of Civil Engineering, Department of Structural Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran. ghasemi@sru.ac.ir

* Corresponding author: Parham Memarzadeh, parham.memarzadeh@iau.ac.ir

ABSTRACT

In recent years, research on innovative elliptic bracing systems has largely been limited to single-story, single-span frames. Although numerical studies have examined multi-story frames, the scarcity of experimental data has raised concerns regarding the reliability of these results. To address this knowledge gap, the present study evaluates the seismic performance of multi-story steel moment frames equipped with mega-elliptic braces through a comprehensive experimental program. The main



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



contribution of this research is the provision of experimental data for multi-story systems, which can serve to validate numerical models and assess their seismic characteristics. Cyclic quasi-static tests were conducted to investigate the cyclic behavior and determine key parameters including strength, ductility, stiffness, energy dissipation, and overall seismic performance. A two-span, four-story steel moment frame with mega-elliptic braces was tested at a 1:6 scale under cyclic quasi-static loading. Results demonstrated that the yielding of the elliptic braces delayed the occurrence of failure modes in adjacent columns and enabled significant nonlinear deformations up to ultimate failure. The response modification factor for frames equipped with mega-elliptic braces was determined as 6.5. Symmetrical behavior, high energy absorption capacity, adequate stiffness, and enhanced ductility compared to conventional systems were identified as the main advantages of this bracing configuration.

Keywords: Mega-Elliptic-braced steel moment frames; Response modification factor, Overstrength factor, Finite element analysis, Hysteresis curves, Energy dissipation.

۱- مقدمه

درک عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های مقاوم جانبی برای تضمین ایمنی و تاب‌آوری سازه‌های چندطبقه مدرن امری حیاتی است. در بسیاری از آیین‌نامه‌های ساختمانی، طراحی لرزه‌ای سازه‌ها بر اساس تأمین سطح کافی از سختی، مقاومت و شکل‌پذیری، همراه با کنترل دقیق توالی مکانیزم‌های خرابی تعریف شده است [۵-۱]. هدف این است که سازه ضمن محدود کردن دریافت طبقات و کاهش آسیب به عناصر غیرسازه‌ای، مقاومت لازم را داشته باشد و همزمان با ارائه شکل‌پذیری مناسب، توانایی تحمل بارهای ثقیل و اتلاف انرژی تحت بارگذاری‌های شدید لرزه‌ای را فراهم کند [۸-۶]. همچنین، مفاصل پلاستیک باید به صورت تدریجی و از المان‌های مهاربندی به تیرها و نهایتاً ستون‌ها منتقل شوند تا از فروپاشی زود هنگام سازه جلوگیری شود. بنابراین، انتخاب صحیح ضرایب عملکرد لرزه‌ای اهمیت بالایی در طراحی و ارزیابی سازه‌ها دارد. در دو دهه اخیر، مطالعات گسترده‌ای بر ضرایب لرزه‌ای، عملکرد لرزه‌ای و مکانیزم‌های خرابی سیستم‌های مختلف سازه‌ای تحت بار زلزله انجام شده است که مبنای مناسبی برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی فراهم کرده‌اند [۱۳-۹].

تعامل سازه و معماری در سال‌های اخیر موجب معرفی سیستم‌های نوین مقاوم در برابر زلزله شده است که علاوه بر تأمین سختی و شکل‌پذیری مناسب، امکان طراحی بازشوهای معماری بدون محدودیت را فراهم می‌کنند. برای اولین بار در سال ۲۰۱۶، عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی مجهز به مهاربندهای بیضی از طریق مطالعات تجربی و عددی توسط قاسمی جوقنانی و همکاران بررسی شد [۱۴]. قاب مقاوم خمشی مهاربندی شده بیضی (ELBRF) به عنوان یک سیستم مهاربندی جانبی نوین عمل می‌کند و افزودن آن در دهانه میانی قاب‌ها مانعی برای ایجاد بازشو در نما ایجاد نمی‌کند. این سیستم علاوه بر فراهم کردن فضای کافی برای بازشو، رفتار سازه‌ای را نیز تقویت می‌کند و سختی و شکل‌پذیری بالایی ارائه می‌دهد که موجب افزایش ضریب اصلاح پاسخ می‌شود. همچنین، قابلیت اتلاف انرژی بالایی دارد [۱۵ و ۱۶]. مطالعات قبلی نشان دادند که قاب‌های خمشی فولادی ۳، ۵ و ۷ طبقه مجهز به مهاربند بیضی (ELBRF) از طریق تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند [۱۷]. نتایج نشان داد که ضریب اصلاح پاسخ برای روش حالت حد نهایی و روش تنش مجاز به ترتیب ۶.۵ و ۹.۵ است. با بررسی منحنی‌های IDA برای ارتفاع‌های مختلف، مشخص شد که قاب‌ها با افزایش ارتفاع سریع‌تر وارد ناحیه غیرخطی شده و ظرفیت کمتری دارند. در سایر مطالعات تجربی و تحلیلی، رفتار لرزه‌ای، عملکرد هیستریک و مکانیزم‌های خرابی قاب‌های ELBRF مورد بررسی قرار گرفت و با سایر قاب‌های مهاربندی جانبی در مدل‌های پایه طبقاتی مقایسه شد [۲۰-۱۸]. علاوه بر این، قاسمی جوقنانی و همکاران [۲۱] رفتار غیرخطی قاب‌های خمشی با مهاربند بیضی را با استفاده از قاب معادل مهاربندی شده تحلیل کردند و تقاضای لرزه‌ای این سیستم‌ها را از طریق تحلیل پوشاور برآورد نمودند [۲۲ و ۲۳]. در ادامه، برای اولین بار، دو فرمول نظری دقیق برای محاسبه سختی الاستیک در دو قاب یک دهانه یک طبقه و چند دهانه چند طبقه از قاب فولادی ساده و قاب‌های خمشی فولادی دو بعدی مجهز به مهاربندهای بیضی را توسعه دادند [۲۴ و ۲۵]. آنها نشان می‌دهند که تفاوت ناچیزی بین مقادیر سختی الاستیک بدست‌آمده از معادلات توسعه‌یافته و آن‌هایی که از تحلیل عددی با استفاده از روش‌های FE به دست می‌آیند وجود دارد. در سال ۲۰۲۴، ضرایب عملکرد لرزه‌ای از قاب‌های مهاربندی شده بیضی با میراگرهای اصطکاکی دورانی از طریق IDA توسط [۲۶] مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی با مهاربندهای منحنی مورد ارزیابی قرار گرفت [۳۰-۲۷].

در این مقاله ابتدا به بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های چند طبقه مهاربندی شده مگابیضی تحت بارگذاری شبه استاتیکی چرخه‌ای پرداخته شده است. مطالعه تجربی از قاب‌های مهاربندی شده چند طبقه در مقایسه با سازه‌های یک طبقه می‌تواند ارزیابی دقیق‌تری از رفتار لرزه



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



ای آنها را ارائه دهد. علاوه بر این ضرایب عملکرد لرزه ای بدست آمده از سازه های چند طبقه می تواند بینش واقع بینانه تری در طراحی داشته باشند. همچنین پارامترهای سختی، شکل پذیری و روند تشکیل مفاصل پلاستیک از سازه های مهاربندی شده چند طبقه تحت بارهای لرزه ای می توانند رفتار لرزه ای واقع بینانه تری را ارائه دهند. از اینرو در این مقاله، ابتدا رفتار لرزه ای و اتلاف انرژی از نمونه های دو دهانه چهار طبقه قاب خمشی فولادی با مهاربند مگابیضی در مقیاس یک ششم تحت بارگذاری شبه استاتیکی چرخه ای ارزیابی می شوند. در ادامه ضرایب عملکرد لرزه ای محاسبه می شوند.

۲- قاب خمشی فولادی با مهاربند مگابیضی

از آنجا که وزن سازه با نیروی جانبی اعمال شده به سازه رابطه مستقیم دارد پس وزن سازه می تواند حداقل به اندازه مزایای سختی و مقاومت در طراحی سازه ها حائز اهمیت باشد، بگونه ای که انتظار می رود با کاهش وزن سازه بتوان نیروهای جانبی اعمال شده بر سازه را بخصوص در سازه های بلند کاهش داد. برای مثال در ساختمان های بلند، مهاربند بیضی می تواند با یک مهاربند ربع بیضی در هر دهانه از قاب جایگزین شود که مزیت آن کاهش وزن است، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است. استفاده از یک ربع بیضی در هر دهانه قاب در مقایسه با سیستم های مهاربند قطری، احتمال ایجاد اولین طبقه نرم و ناپایداری کلی ساختمان را به دلیل سخت شدن در تغییر شکل های بزرگ و رفتار چرخه ای پایدار کاهش می دهد.

۳- برنامه آزمایشگاهی

برای بررسی عملکرد هیسترتیک سیستم پیشنهادی، طراحی دقیق و ساخت نمونه های آزمایشی اهمیت بالایی دارد. برای ارزیابی رفتار هیسترتیک سیستم مهاربندی پیشنهادی، یک قاب دو بعدی دو دهانه چهار طبقه مگابیضی (MELBRF) طراحی و ساخته شد. نمونه های آزمایشی با ضریب مقیاس ۱:۶ تولید شدند و ابعاد آزاد قاب ۱۰۰۰ میلیمتر طول دهانه و ۵۰۰ میلیمتر ارتفاع هر طبقه بود، که معادل ابعاد یک قاب فولادی یک دهانه در ساختمان واقعی با عرض ۶۰۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۳۰۰۰ میلیمتر است. ارتفاع کل نمونه ۲۱۱۵ میلیمتر و فاصله مرکز به مرکز بین دو اتصال پایینی فیکس شده ۱۰۴۰ میلیمتر بود. جزئیات و ابعاد نمونه های آزمایشی در شکل ۲ ارائه شده است. همه اتصالات تیر به ستون و مهاربند بیضی به تیر و ستون بصورت جوش نفوذی است. طراحی اعضای سازه با استفاده از نرم افزار المان محدود و بر اساس آنالیز الاستیک انجام شد، که منجر به انتخاب پروفیل قوطی ۴۰×۲۰×۲ میلیمتر برای تیرها و ستون ها و پروفیل قوطی ۲۰×۲۰×۰/۹ میلیمتر برای مهاربندها شد. تمامی اتصالات تیر به ستون و مهاربند مگابیضی به تیر و ستون به صورت جوش نفوذی اجرا گردید. نمونه MELBRF یک سیستم مقاوم جانبی ترکیبی شامل قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند بیضی است. سختی جانبی و اتلاف انرژی سازه از طریق مهاربندهای بیضی تأمین می شود و در هر طبقه یک مهاربند استفاده شد. برای حصول انحنای دقیق و کاهش تنش های پسماند، هر مهاربند مگابیضی از چهار ربع بیضی تشکیل شد که هر کدام در یک دهانه از قاب قرار می گیرد. شکل دهی ربع بیضی ها با یک رول هیدرولیک سه غلتکی در پیکربندی مثلثی انجام شد. به منظور اتصال مطمئن المان ها، از جوشکاری TIG استفاده شد، زیرا ضخامت المان های مهاربند ربع بیضی کم بود. در محور پایینی قاب، یک تیر برای اتصال مهاربند مگابیضی تعبیه شد.

۳-۱ مشخصات مکانیکی مصالح

خواص مکانیکی مصالح فولادی از طریق تست کوپن کشش استاندارد مطابق با [۳۱] ASTM A370 برای ساختن نمونه MELBRF تعیین شد. مقاومت کششی تسلیم، f_y ، مقاومت کششی نهایی، f_u ، مدول های الاستیک، E_s ، ضخامت، t_s ، و ازدیاد طول، ϵ ، صفحات فولادی از آزمایش های کششی استاندارد بدست آمد. اطلاعات مربوط به مشخصات مکانیکی نمونه ها در جدول ۱ خلاصه شده است. نمونه های کوپن با ابعاد ۱۲/۵ میلیمتر عرض و ۵۰ میلیمتر طول گیج، با ضخامت های ۱/۰ و ۲/۰ میلیمتر، از صفحات مورد استفاده در ساخت نمونه ها استخراج شدند.

۳-۲ چیدمان آزمایش و تجهیزات ابزار دقیق

برای ارزیابی عملکرد لرزه ای قاب های خمشی مجهز به مهاربند بیضی، یک برنامه آزمایشگاهی جامع طراحی و اجرا شد. تست های آزمایشی در آزمایشگاه سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد انجام گرفت. نمونه ها با مقیاس یک ششم ساخته شدند و برای آزمایش، قاب عکس العمل اصلی از دو ستون فولادی قابل استفاده مجدد تشکیل شده بود که به کف صلب متصل شده بودند. نمونه های MELBRF در داخل این قاب عکس العمل (بین دو ستون) قرار گرفتند و با استفاده از تکیه گاه های ثابت روی کف صلب نصب شدند.



کد اختصاصی:

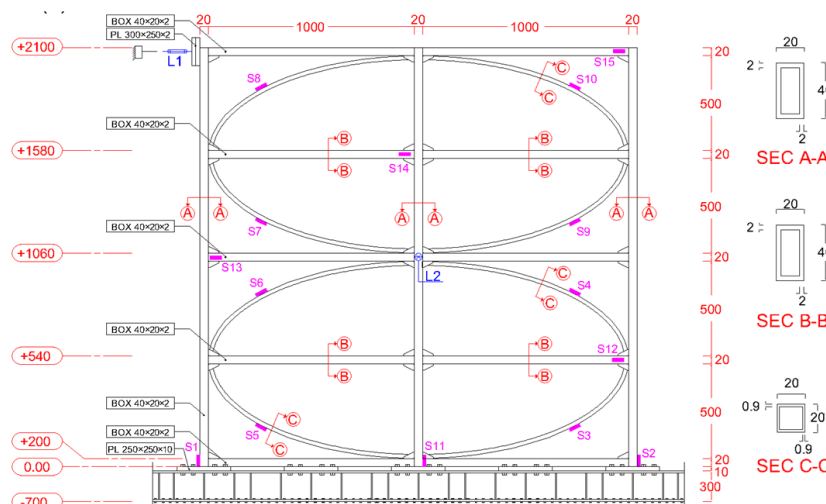
۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



شکل ۱- قاب خمشی فولادی چند طبقه مجهز به مهاربند مگابیزی

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مصالح تیر، ستون و مهاربند

ازدیاد طول، ξ (میلیمتر)	مدول الاستیسیته E (GPa)	مقاومت کششی تسلیم f_y (MPa)	طول گچ (میلیمتر)	مقطع نمونه تست کشش
۳۷	۲۰۲/۱	۲۸۹	۵۰	پروفیل قوطی ۴۰×۲۰×۲ میلیمتر
۳۴	۲۰۱/۳	۲۹۳	۵۰	پروفیل قوطی ۲۰×۲۰×۰/۹ میلیمتر

به منظور کنترل کمانش و انحراف افقی خارج از صفحه، دو قاب A در دو طرف نمونه‌ها تعبیه شد (شکل ۲). بارگذاری چرخه‌ای بر روی نمونه‌ها توسط یک جک هیدرولیک اعمال شد که در سطح مرکز تیر در بالاترین تراز نصب گردیده بود، به‌طوری که هیچ گشتاور ثانویه‌ای ناشی از خروج از مرکز جک ایجاد نشود. این جک هیدرولیک توسط یک سیستم کنترل شده کامپیوتری کار می‌کرد و قادر بود حداکثر نیروی فشاری و کششی ± 600 کیلو نیوتن و جابجایی ± 200 میلیمتر را فراهم کند. بارگذاری با سرعت ۱۰ میلی‌متر در دقیقه انجام شد. جابجایی نمونه‌ها توسط دو تبدیل دیفرانسیل متغیر خطی (LVDT) اندازه‌گیری شد. LVDT-1 جابجایی تیر اصلی در جهت بار جانبی اعمال شده در بالاترین تراز را ثبت کرد، در حالیکه LVDT-2 جابجایی خارج از صفحه نمونه‌ها را کنترل نمود. برای پایش نقاط با پتانسیل تشکیل مفصل پلاستیک، پانزده کرنش‌سنج بر روی تیرها، ستون‌ها و مهاربندهای بیضی نصب شد. مکان دقیق کرنش‌سنج‌ها با استفاده از تحلیل عددی در نرم‌افزار آباکوس تعیین گردید [۳۲]. تمام کانال‌های داده ابزار به یک سیستم جمع‌آوری داده مرکزی متصل بودند که داده‌ها را به یک کامپیوتر منتقل می‌کرد. شکل ۲ مجموعه تست و ابزار دقیق شامل مکان محرک، شرایط پشتیبانی قاب، موقعیت LVDT ها (L1 و L2) و محل کرنش سنج‌ها را نشان می‌دهد.

۴-۳ پروتکل بارگذاری

یکی از مهمترین مراحل در ارزیابی رفتار لرزه ای سازه‌ها، تعیین الگوی بارگذاری است. در این مطالعه، برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای نمونه MELBRF از بارگذاری جانبی شبه‌استاتیکی بر اساس پروتکل [۳۳] ATC-24 استفاده شد. این پروتکل با شبیه‌سازی تغییرشکل‌های غیرالاستیک شدید، رفتار نمونه را در نواحی قبل و بعد از تسلیم بررسی کرده و اثر خستگی در محدوده غیرخطی را پوشش می‌دهد. تغییر مکان تسلیم از طریق تحلیل المان محدود در نرم‌افزار آباکوس تعیین شد. بارگذاری در اتصال تیر به ستون و در جهت درون‌صفحه قاب اعمال گردید و نسبت دریافت به‌عنوان پارامتر کنترلی در آزمون در نظر گرفته شد. پروتکل بارگذاری جانبی برای تست نمونه با در نظر گرفتن جابجایی تسلیم و پیروی از پروتکل بارگذاری ATC-24، مطابق با شکل ۳ تعیین شد.



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

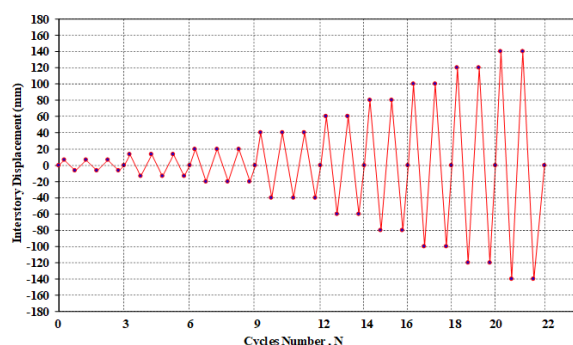
ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



شکل ۲- چیدمان آزمایش و تجهیزات ابزار دقیق در قاب خمشی فولادی چند طبقه مجهز به مهاربند مگابیضی



شکل ۳- پروتکل بارگذاری مطابق با ATC-24

۴- نتایج آزمایشگاهی

نمونه قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند مگابیضی (MELBRF) یک نمونه توسعه یافته از نمونه قاب خمشی فولادی با مهاربند بیضی است. مشاهدات تجربی در طول تست های بارگذاری از نمونه ها بطور جداگانه در ادامه مورد بحث قرار می گیرد. برای کشف نقاط تسلیم و هرگونه تغییرشکل های پلاستیک، سطوح المان های نمونه با لایه ای از رنگ سریع خشک شونده رنگ آمیزی شد. تصاویر نمونه MELBRF در طول آزمایش بارگذاری چرخه ای در شکل ۴ نشان داده شده است. همزمان با شروع تست، شکل ۴(الف)، بار به تدریج افزایش می یابد. در جابجایی ۱۳/۴ میلیمتر معادل یک درصد دیررفت، همچنان رفتار نمونه خطی است، شکل ۴(ب). با افزایش تدریجی بار جانبی، اولین نشانه های تغییرشکل در اعضای سازه در چرخه دهم، در زاویه دیررفت دو درصد، ظاهر شد و مهاربندهای ربع بیضی شروع به تغییرشکل درون صفحه ای کردند شکل ۴(ج). مقاومت جانبی به تدریج تا زاویه دیررفت سه درصد معادل با جابجایی ۶۰ میلیمتر افزایش یافت و تغییرشکل های مهاربندهای ربع بیضی در هر دو دهانه از طبقات دوم و سوم کاملاً واضح است، شکل ۴(د). تغییرشکل های دورن صفحه ای از مهاربندهای ربع بیضی در همه دهانه های نمونه تا جابجایی ۱۰۰ میلیمتر معادل ۵ درصد دیررفت ادامه داشت، شکل ۴(ه) و شکل ۴(و). نتایج تجربی در چهار چرخه ی آخر نشان دهنده شکل پذیری بالای این سیستم سازه ای بدون ایجاد کمانش ستون و کمانش جانبی-پیچشی در تیرها در حین بارگذاری جانبی بود، شکل ۴(ز) و (ح). قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند مگابیضی (MELBRF) همانند نمونه قاب خمشی فولادی با مهاربند بیضی نشان می دهد که در هر مرحله از تغییر جهت چرخه بارگذاری، تغییر نیروی داخلی مهاربندهای ربع بیضی از کشش به فشار و بالعکس با باز و بسته شدن انحنای هر ربع بیضی به سرعت اتفاق می افتد، که از ایجاد هرگونه کمانش خارج از صفحه و تغییرشکل ماندگار در مهاربندهای ربع بیضی جلوگیری می شود. این امر به دلیل شکل هندسی مهاربندهای ربع بیضی است. همانطور که در شکل ۴(ط) نشان داده شده است، بعد از توقف بارگذاری، مهاربندهای ربع بیضی به شکل هندسی اولیه خود بازگشتند.



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



(الف) شروع بارگذاری



(ب) جابجایی ۲۰ میلی‌متر، دیرفت ۱ درصد



(ج) جابجایی ۴۰ میلی‌متر، دیرفت ۲ درصد



(د) جابجایی ۶۰ میلی‌متر، دیرفت ۳ درصد



(ه) جابجایی ۸۰ میلی‌متر، دیرفت ۴ درصد



(و) جابجایی ۱۰۰ میلی‌متر، دیرفت ۵ درصد



(ز) توقف بارگذاری



(ح) جابجایی ۱۴۰ میلی‌متر، دیرفت ۷ درصد



(ط) جابجایی ۱۲۰ میلی‌متر، دیرفت ۶ درصد

شکل ۴- تغییر شکل قاب مهاربندی شده مگابیزی (MELBRF) در مراحل مختلف بارگذاری چرخه‌ای در تست بارگذاری سیکلی

۴-۱ عملکرد هیستریزیس

تحلیل پاسخ چرخه‌ای سیستم مهاربندی، نقش کلیدی در درک عملکرد لرزه‌ای و توان اتلاف انرژی آن دارد. به منظور بررسی رفتار چرخه‌ای، ارزیابی عملکرد و سنجش ظرفیت جذب انرژی سیستم پیشنهادی MELBRF در سطوح مختلف بارگذاری، منحنی‌های هیستریزیس تجربی استخراج شده از نتایج آزمایش ارائه شده‌اند که رابطه بین مقاومت برشی و جابجایی نمونه‌ها را نشان می‌دهند (شکل ۵). در این نمودارها، مقادیر مثبت و منفی نیرو به ترتیب معرف وضعیت کششی و فشاری اعضای نمونه هستند. این شیوه علامت‌گذاری برای کلیه نمودارهای نیرو - جابجایی ارائه شده در این پژوهش به‌طور یکنواخت مورد استفاده قرار گرفته است. تست MELBRF، تقریباً تا ۰/۶۷ درصد دیرفت در طول ۹ سیکل اول الاستیک باقی ماند. مقاومت برشی قاب ۲/۲ کیلونیوتن و ۳/۹۵ کیلونیوتن، در جابجایی ۱۳/۴ میلی‌متر و ۲۰ میلی‌متر، به ترتیب ۰/۶۷ درصد و یک درصد دیرفت است. مقاومت جانبی سیستم همچنان در حال افزایش است و در دیرفت‌های ۲ درصد، ۳ درصد، ۴ درصد و ۵ درصد به ترتیب به بارهای افقی ۵/۱ کیلونیوتن، ۶/۲ کیلونیوتن، ۷/۴۷ کیلونیوتن و ۷/۹ کیلونیوتن می‌رسد. مقاومت جانبی با افزایش جزئی تا پایان بارگذاری ادامه دارد. تست در سیکل ۲۲ متوقف می‌شود. تسلیم با بار کششی جانبی حدود ۱/۹۳ کیلو نیوتن شروع شد و بارگذاری با بار فشاری ۸/۶۳ کیلو نیوتن در دیرفت ۷ درصد پایان یافت، شکل ۵.



کد اختصاصی:

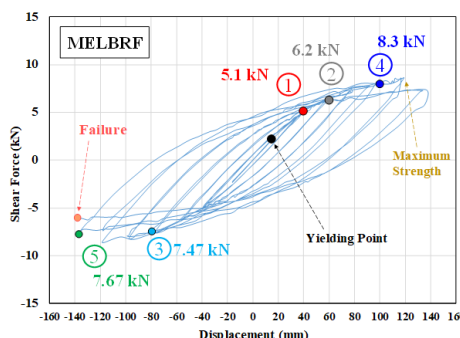
۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



شکل ۵- منحنی هیستریزس از قاب مهاربندی‌شده مگابیزی (MELBRF) در مراحل مختلف بارگذاری چرخه‌ای در تست بارگذاری سیکلی

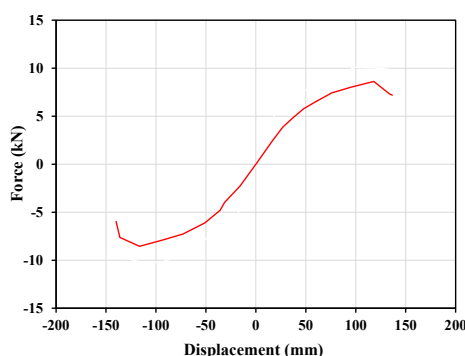
۲-۴ منحنی دوخطی و ضرایب عملکرد لرزه‌ای

به منظور استخراج پارامترهای کلیدی عملکرد لرزه‌ای سیستم مورد مطالعه، از داده‌های حاصل از آزمایش‌های چرخه‌ای استفاده شد. در این پژوهش، پارامترهای اصلی عملکرد لرزه‌ای سیستم MELBRF شامل ضریب اضافه مقاومت (Ω_0)، ضریب شکل‌پذیری (μ) و ضریب اصلاح پاسخ (R) بر اساس نتایج آزمایشگاهی و مطابق با رویه‌های پیشنهادی در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفتند. در گام نخست، منحنی پوش رفتار چرخه‌ای از روی منحنی‌های هیستریزس استخراج شد؛ به‌طوری که تنها شاخه‌های صعودی منحنی‌های هیستریزس برای ترسیم منحنی پوش در نظر گرفته شدند و شاخه‌های کاهشی حذف گردیدند. در ادامه، بر اساس دستورالعمل [۳۴] FEMA-356، یک منحنی دوخطی معادل بر منحنی پوش رفتار چرخه‌ای برازش داده شد (شکل ۶). مطابق این روش، موقعیت نقطه B به‌گونه‌ای تعیین گردید که، از یک سو، طول پاره‌خط AD معادل $0.16 V_y$ در نظر گرفته شود، و از سوی دیگر، مساحت زیر منحنی پوش رفتار چرخه‌ای (ناحیه ۱) با مساحت زیر منحنی دوخطی ایده‌آل (ناحیه ۲) برابر باشد، همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است.

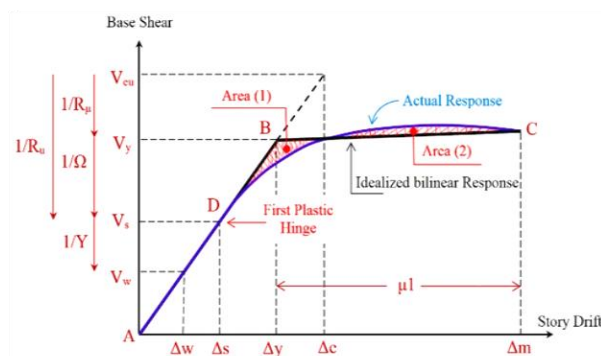
همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، ضریب اصلاح پاسخ (R) در روش طراحی بر اساس بار و مقاومت (LRFD) از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$R_{LRFD} = \frac{V_{eu}}{V_s} = \frac{V_{eu}}{V_y} \times \frac{V_y}{V_s} = R_\mu \Omega_0 \quad (1)$$

منحنی پوشاوار قاب مهاربندی‌شده مگابیزی در شکل ۷ نشان داده شده است. جابجایی تسلیم اولین داده مهم است که اغلب از طریق پوش تعیین نمی‌شود. بنابراین، خروجی کرنش سنج‌ها برای تعیین Δ_s اعمال می‌شود. با توجه به تفاوت در دوره ارتعاش (T) سیکل‌های بارگذاری مکرر در هر دو قاب، حداقل $R_{\mu 1}$ و $R_{\mu 2}$ در محاسبه ضریب R اعمال می‌شود. ضرایب عملکرد لرزه‌ای از سیستم مهاربندی MELBRF در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۷- منحنی پوشاوار قاب مهاربندی‌شده مگابیزی



شکل ۶- منحنی دوخطی حاصل از منحنی پوشاوار



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



ضریب کاهش شکل پذیری برای MELBRF برابر با $\frac{3}{82}$ محاسبه شد. ضریب اصلاح پاسخ برای MELBRF برابر با $\frac{6}{5}$ بود. ضریب اضافه مقاومت (Ω_0) نمونه MELBRF برابر با $\frac{2}{10}$ بدست می‌آید. سیستم قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند مگابیزی شکل پذیری و سختی خوبی دارند.

جدول ۲- ضرایب عملکرد لرزه ای از قاب مهاربندی شده مگابیزی (MELBRF)

نمونه	جابجایی تسلیم Δy (میلیمتر)	برش تسلیم V_y (کیلو نیوتن)	ضریب شکل پذیری μ	ضریب اضافه مقاومت Ω_0	ضریب اصلاح پاسخ R
قاب مهاربندی شده بیضی	۱۶/۵۶	۳/۹۱	۵/۵۴	۲/۱۰	۶/۵۰

۵- نتیجه و جمع بندی

به منظور گسترش دانش موجود در زمینه سیستم‌های نوین مهاربندی جانبی، یک برنامه آزمایشگاهی هدفمند در این پژوهش اجرا شده است. در این پژوهش، برای اولین بار رفتار لرزه‌ای، پاسخ هیسترتیک و توان اتلاف انرژی یک قاب خمشی فولادی چهارطبقه دودهانه مجهز به مهاربند مگابیزی (MELBRF) در مقیاس یک‌ششم، تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیکی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده، مبنایی برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای این سیستم مهاربندی فراهم کرده و خلاصه‌ای از مهم‌ترین یافته‌های تحقیق در ادامه ارائه می‌شود:

برخلاف مهاربندهای X، V، V معکوس، X دوطبقه و مهاربند قطری، با تغییر جهت نیروی جانبی، المان‌های ربع‌بیضی تحت فشار به سرعت به حالت اولیه خود بازمی‌گردند و تغییر شکل دائمی ایجاد نمی‌کنند؛ بنابراین، کمانش خارج از صفحه در مهاربندهای بیضی رخ نمی‌دهد. در سیستم‌های MELBRF در طول بارگذاری جانبی هیچ‌گونه کمانش ستون مشاهده نشد و صاف ماندن ستون‌ها در تمامی مراحل آزمایش، حتی تحت جابه‌جایی‌های بزرگ، تأیید گردید.

مقدار ضریب اصلاح پاسخ برای سیستم MELBRF برابر با $\frac{6}{50}$ براساس روش حد نهایی می‌باشد. مقدار ضریب اضافه‌مقاومت برای سیستم MELBRF برابر با $\frac{2}{10}$ بدست آمد و مقدار ضریب شکل‌پذیری برای سیستم MELBRF برابر با $\frac{5}{54}$ می‌باشد.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد انجام شده است. از همکاری و مساعدت متخصصان آزمایشگاه سازه‌های قدرانی و تشکر به عمل می‌آید.

مراجع

- [1] M.N. Naderpour, A.A. Aghakouchak. "Probabilistic damage assessment of concentrically braced frames with built up braces." Journal of Constructional Steel Research, Vol. 147, PP.191–202, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.04.011>.
- [2] A. Shabani Ammari, Y. Nouri, H. Ghasemi Jouneghani, S.A. Hosseini, A. Rayegani, M. Ebrahimi. "Flexural strengthening of corroded steel beams with CFRP by using the end Anchorage: experimental, numerical, and machine learning methods." Journal of Case Studies in Construction Materials, Vol. 23, PP. e04966, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04966>.
- [3] V. Jaber, A. Asghari. "Seismic behavior of linked column system as a steel lateral force resisting system." Journal of Constructional Steel Research, Vol. 196, PP.107428, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107428>.
- [4] A. Ghayour Najafabadi, P. Memarzadeh, T. Zirakian, H. Ghasemi Jouneghani. "A theoretical prediction for shear capacity of cellular solid shear walls." Journal of Buildings, Vol. 33, PP.1-18, 2024. <https://doi.org/10.3390/buildings15010106>.
- [5] V. Jaber. "Collapse-based design method for simple seismic design of complex structural systems such as linked column frame system." Journal of Structures, Vol.55, PP.482–97, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.06.059>.
- [6] A. Rigi, B. Javid Sharifi, M.A. Hadianfard, T.Y. Yang. "Study of the seismic behavior of rigid and



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



- semi-rigid steel moment-resisting frames." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 186, PP. 106910, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106910>.
- [7] S. Wu, H. He, B. Lan, Y. Chen. "Seismic optimization design of buckling-restrained braced frames for uniform damage criterion." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 208, PP. 107992, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107992>.
- [8] N. Fanaie, B. Mohammadzade, S.A. Gharebaghi, O.S. Sarkhosh. "Design procedure of a shear fuse system for steel moment-resisting frames." *Journal of Structures*, Vol. 63, PP.106473, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106473>.
- [9] S.S. Lee. "Performance-based design of steel moment frames using target drift and yield mechanism." University of Michigan; 2002.
- [10] J.W. Fisher, J.M. Ricles, L-W. Lu, C. Mao, E.J. Kaufmann. "Steel moment frame connections that achieve ductile performance." *Journal of Advances in Building Technology*, Vol. 33, PP. 415–22, 2000. <https://doi.org/10.1016/B978-008044100-9/50054-1>.
- [11] CR. Bradley, LA. Fahnestock, EM. Hines, JG. Sizemore. "Full-Scale Cyclic Testing of Low-Ductility Concentrically Braced Frames." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 143(6), 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001760](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001760).
- [12] AD. Sen, CW. Roeder, DE. Lehman, JW. Berman. "Nonlinear modeling of concentrically braced frames." *J Constr Steel Res*, Vol. 157, PP.103–20, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.02.007>.
- [13] C-H. Chen, H-K. Hu. "Evaluation of loading sequences on testing capacity of concentrically braced frame structures." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 130, PP.1–11, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.11.017>.
- [14] H. Ghasemi Jouneghani, A. Haghollahi, H. Moghaddam, A. Sarvghad Moghadam. "Study of the seismic performance of steel frames in the elliptic bracing." *Journal of Vibroengineering*, Vol. 18, PP.2974–85, 2016. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.16858>.
- [15] H. Ghasemi Jouneghani, A. Haghollahi, H. Moghaddam, A. Sarvghad Moghadam. "Assessing Seismic Performance of the Elliptic Braced Moment Resisting Frame through Pushover Method." *Journal of Rehabilitation Civil Engineering*, Vol. 7, PP.68–85, 2018. <https://doi.org/10.22075/JRCE.2018.13030.1232>.
- [16] H. Ghasemi Jouneghani, A. Haghollahi. "Assessing the seismic behavior of steel moment frames equipped by elliptical brace through incremental dynamic analysis (IDA)." *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 19, PP. 435–449, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11803-020-0572-z>.
- [17] H. Ghasemi Jouneghani, A. Haghollahi. "Experimental study on hysteretic behavior of steel moment frame equipped with elliptical Brace." *Journal of Steel and Composite Structures*, Vol. 34, PP.891–907, 2020. <https://doi.org/10.12989/scs.2020.34.6.891>.
- [18] H. Ghasemi Jouneghani, A. Haghollahi. "Experimental and analytical study in determining the seismic performance of the ELBRF-E and ELBRF-B braced frames." *Journal of Steel and Composite Structures*, Vol. 37, PP.571–87, 2020. <https://doi.org/https://doi.org/10.12989/scs.2020.37.5.571>.
- [19] H. Ghasemi Jouneghani, A. Haghollahi, S.B. Beheshti-Aval. "Experimental study of failure mechanisms in elliptic-braced steel frame." *Journal of Steel and Composite Structures*, Vol. 37, PP.175–91, 2020. <https://doi.org/10.12989/scs.2020.37.2.175>.
- [20] H. Ghasemi Jouneghani, A. Haghollahi, M. Talebi Kalaleh. "Nonlinear seismic behavior of elliptic-braced moment resisting frame using equivalent braced frame." *Journal of Steel and Composite Structures*, Vol. 40, PP.45-64., 2021. <https://doi.org/10.12989/scs.2021.40.1.045>.
- [21] H. Ghasemi Jouneghani, A. Haghollahi, M. Mortazavi. "Pushover analysis for estimating seismic demand of elliptic braced moment resisting frames." *Journal of Građevinar*, Vol. 74, PP.941–955, 2022. <https://doi.org/10.14256/JCE.2311.2017>.
- [22] H. Ghasemi Jouneghani, A. Haghollahi, M. Mortazavi. "Analiza postupnog guranja za procjenu seizmičkih zahtjeva okvira s eliptičnim vezovima." *Journal of Građevinar*, Vol. 74, PP.941–955, 2022. <https://doi.org/10.14256/JCE.2311.2017>.
- [23] H. Ghasemi Jouneghani, N. Fanaie, A. Haghollahi. "Theoretical formulation for calculating elastic



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



- lateral stiffness in a simple steel frame equipped with elliptic brace." *Journal of Steel and Composite Structures*, Vol. 45, PP.445–462, 2022. <https://doi.org/10.12989/scs.2022.45.3.445>.
- [24] H. Ghasemi Jouneghani, N. Fanaie, M. Talebi Kalaleh, M. Mortazavi. "Determining elastic lateral stiffness of steel moment frame equipped with elliptic brace." *Journal of Steel and Composite Structures*, Vol. 46, PP.293-318, 2023. <https://doi.org/https://doi.org/10.12989/scs.2023.46.3.293>.
- [25] H. Ghasemi Jouneghani, Y. Nouri, M. Mortazavi, A. Haghollahi, P. Memarzadeh. "Seismic Performance Factors of Elliptic-Braced Frames with Rotational Friction Dampers through IDA." *Journal of Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Vol. 29, PP.1–24, 2024. <https://doi.org/10.1061/PPSCFX.SCENG-1540>.
- [26] H. Ghasemi Jouneghani, Y. Nouri, R. Roudbaraki, A. Haghollahi, E. Hemati. "Evaluating seismic performance factors of mega elliptic-braced moment resisting frames (MEL BRFs) with FEMA P695 methodology." *Journal of Building Engineering*, Vol.111, PP.113511, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.113511>.
- [27] Nouri Y, H. Ghasemi Jouneghani, A. Haghollahi, E. Hemati, S.A. Hemati, M. Mortazavi. "Experimental and numerical investigation of a steel yielding arc and ring damper." *Journal of Structures*, Vol. 68, PP.107140, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107140>.
- [28] Nouri Y, H. Ghasemi Jouneghani, A. Shirkhani, E. Hemati, S.A. Hemati, I. Hajirasouliha. "Seismic retrofit of steel moment frames with arc and ring yielding dampers: A probabilistic loss assessment using FEMA P-58." *Journal of Structures*, Vol. 76, PP.108898, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108898>
- [29] Nouri Y, Shirkhani A, H. Ghasemi Jouneghani, E. Hemati, D.D. Domenico. "Seismic performance assessment of steel MRFs retrofitted with arc and ring dampers." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 236, PP.109949, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109949>
- [30] "ASTM A370: standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. Mater. Am." Soc. Test., ASTM West Conshohocken; 2014.
- [31] Hibbitt, Karlsson, Sorensen. ABAQUS/Standard: User's Manual. vol. 1. Hibbitt, Karlsson & Sorensen; 1997.
- [32] "Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures." (ATC), Appl Technol Counc 1992.
- [33] "FEMA 356 FE." Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Fed Emerg Manag Agency Washington, DC, USA 2000.