



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



ارزیابی عملکرد لرزه ای از قاب های خمشی فولادی چند طبقه مجهز به مهاربند بیضی

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

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

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

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

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

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

چکیده

در دهه ی اخیر، محققان رفتار لرزه ای سیستم مهاربندی نوآورانه بیضی را تنها بر پیکربندی یک دهانه یک طبقه ارزیابی کرده اند. اگرچه مطالعات عددی، رفتار پیکربندی های چند طبقه را مورد بررسی قرار داده است، عدم وجود داده های آزمایشگاهی در قابلیت اطمینان این نتایج عددی تردید ایجاد می کند. برای پرداختن به این شکاف در دانش، این مقاله عملکرد لرزه ای از قاب های خمشی فولادی چند طبقه مجهز به مهاربند بیضی را از طریق یک برنامه آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار می دهد. سهم کلیدی این تحقیق ارائه داده های تست آزمایشگاهی برای سیستم های چند طبقه است که می تواند برای اعتبارسنجی مدل های عددی و بررسی ویژگی های لرزه ای آنها استفاده شود. در این مطالعه، از تست های آزمایشگاهی برای بررسی رفتار چرخه ای و محاسبه پارامترهایی مانند مقاومت، شکل پذیری، سختی، اتلاف انرژی، عملکرد لرزه ای و مودهای شکست در نمونه های چندطبقه استفاده می شود. برای این هدف، یک تست تجربی از یک نمونه یک دهانه چهار طبقه قاب های خمشی فولادی مجهز به مهاربند بیضی در مقیاس یک ششم تحت بارگذاری شبه استاتیکی چرخه ای اجرا شد. نتایج نشان داد که تسلیم مهاربندهای بیضی، مود شکست ستون های مجاور مهاربندهای بیضی را به تأخیر می اندازد و به تحمل تغییرشکل غیرخطی قابل توجهی تا نقطه شکست نهایی کمک می کند. ضریب اصلاح پاسخ در قاب های خمشی فولادی مجهز به مهاربند بیضی برابر با ۷/۳ می باشد. رفتار متقارن، جذب انرژی بالا، سختی مناسب و شکل پذیری بالا در مقایسه با سیستم های معمولی از مزایای سیستم های پیشنهادی می باشد.

کلمات کلیدی: قاب های مهاربندی شده بیضی، ضرایب عملکرد لرزه ای، منحنی هیستریزس، اتلاف انرژی، تحلیل المان محدود.

Seismic Performance Evaluation of Multi-Story Steel Moment Frames Equipped with Elliptic Braces

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 Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran. ghasemi@sru.ac.ir

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

ABSTRACT

In recent years, researchers have mainly evaluated the seismic behavior of the innovative elliptic bracing system only for single-span single-story configurations. Although several numerical studies have investigated multi-story configurations, the lack of experimental data has raised concerns regarding the reliability of these numerical results. To address this research gap, this study experimentally evaluates the seismic performance of multi-story steel moment frames equipped with elliptic braces. The main contribution of this research is the provision of laboratory test data for multi-story systems, which can be used for validating numerical models and investigating their seismic characteristics. In this study, experimental tests are conducted to examine the cyclic behavior and to evaluate parameters such as



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



strength, ductility, stiffness, energy dissipation capacity, seismic performance, and failure modes of multi-story specimens. For this purpose, a quasi-static cyclic loading test was performed on a single-span single-story steel moment frame equipped with elliptic braces at a one-sixth scale. The experimental results indicate that yielding of the elliptical braces delays the failure of columns adjacent to the braces and allows the system to sustain significant nonlinear deformations up to the final failure stage. The response modification factor of steel moment frames equipped with elliptic braces was obtained as 7.3. Symmetric hysteretic behavior, high energy dissipation capacity, adequate stiffness, and enhanced ductility compared to conventional systems are identified as the main advantages of the proposed system.

Keywords: Elliptic-braced steel moment frames; Seismic performance factors; Hysteresis curve; Energy dissipation; Finite element analysis.

۱- مقدمه

در اغلب آیین‌نامه‌های ساختمانی، فلسفه طراحی لرزه‌ای سیستم‌های مقاوم در برابر بار جانبی بر تأمین مقادیر مناسب سختی، مقاومت و شکل‌پذیری همراه با توالی مهندسی‌شده مکانیسم‌های خرابی است [۵-۱]. سازه باید ضمن محدود کردن دریافت طبقات و کاهش آسیب به اجزای غیرسازه‌ای، از مقاومت کافی برخوردار باشد و هم‌زمان با شکل‌پذیری مناسب، توانایی تحمل بارهای ثقیل و اتلاف انرژی تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای شدید را داشته باشد [۸-۶]. همچنین، تشکیل مفاصل پلاستیک باید به‌صورت تدریجی و از المان‌های مهاربندی به تیرها و در نهایت ستون‌ها منتقل شود تا از فروپاشی زودهنگام سازه جلوگیری گردد. بر این اساس، انتخاب صحیح ضرایب عملکرد لرزه‌ای نقش کلیدی در ارزیابی و طراحی لرزه‌ای سازه‌ها دارد. در دهه‌های اخیر، مطالعات متعددی به بررسی ضرایب لرزه‌ای، عملکرد لرزه‌ای و مکانیسم‌های شکست سیستم‌های مختلف سازه‌ای تحت بارگذاری زلزله پرداخته‌اند که مبنای مناسبی برای ارزیابی مدل‌های موجود فراهم کرده‌اند [۱۳-۹].

در دو دهه اخیر، تعامل بین سازه و معماری منجر به معرفی سیستم‌های نوین مقاوم لرزه‌ای شده است که نه تنها از منظر سازه‌ای، سختی و شکل‌پذیری مناسب را در سازه ایجاد کنند بلکه بدون ایجاد محدودیت در معماری سازه، فضای کافی برای در نظر گرفتن بازشو را فراهم کنند. در سال ۲۰۱۶، برای اولین بار در دنیا، عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی مجهز به مهاربند بیضی با مطالعات تجربی و عددی توسط قاسمی جونغانی و همکاران [۱۴]. مورد ارزیابی قرار گرفت. قاب مقاوم در برابر مقاوم خمشی مهاربندی شده بیضی (ELBRF)، که به عنوان یک سیستم مهاربندی جانبی جدید عمل می‌کند، وقتیکه در دهانه میانی قاب‌ها اضافه می‌شود، هیچ مانعی برای ایجاد بازشو در نمای ساختمان ایجاد نمی‌کند. علاوه بر این مزیت ویژه، رفتار سازه‌ای را تقویت می‌کند. این سیستم سختی مناسب و شکل‌پذیری بالایی را نشان می‌دهد که به افزایش ضریب اصلاح پاسخ کمک می‌کند. علاوه بر این، دارای قابلیت اتلاف انرژی بالایی است [۱۵ و ۱۶]. در مطالعات قبلی، نویسندگان رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی ۳، ۵ و ۷ طبقه مجهز به مهاربند بیضی (ELBRF) را از طریق تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) ارزیابی کردند [۱۷]. آنها دریافتند که ضریب اصلاح پاسخ برای روش حالت حد نهایی و روش تنش مجاز به ترتیب ۶.۵ و ۹.۵ است. با مقایسه رفتار ELBRFs در ارتفاع‌های مختلف در منحنی‌های IDA، استنباط می‌شود که قاب‌ها با افزایش ارتفاع، با ظرفیت‌های کمتری به سرعت وارد یک ناحیه غیرخطی می‌شوند. در سایر مطالعات تجربی و تحلیلی، آنها عملکرد لرزه‌ای، رفتار هیستریتیک و مکانیسم‌های شکست قاب‌های خمشی فولادی با مهاربند بیضی را ارزیابی کردند و آن‌ها را با سایر قاب‌های مهاربندی جانبی در مدل پایه طبقاتی مقایسه کردند [۲۰-۱۸]. قاسمی جونغانی و همکاران [۲۱] رفتار لرزه‌ای غیرخطی از قاب مقاوم خمشی با مهاربند بیضی را با استفاده از قاب مهاربندی شده معادل ارزیابی کردند. آنها تقاضای لرزه‌ای از قاب‌های مقاوم خمشی مهاربندی شده بیضی را از طریق تحلیل پشاور برآورد کردند [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 قاب‌های 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].



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



در مطالعات تجربی پیشین، تمرکز محققین بر روی قاب‌های یک طبقه یک دهانه مهاربندی شده بیضی بوده است، لذا در این مقاله ابتدا به بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های چند طبقه مهاربندی شده بیضی و مکانیزم‌های خرابی آنها تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی چرخه‌ای پرداخته شده است. مطالعه تجربی از قاب‌های مهاربندی شده چند طبقه در مقایسه با سازه‌های یک طبقه می‌تواند ارزیابی دقیق‌تری از رفتار لرزه‌ای آنها را ارائه دهد. علاوه بر این ضرایب عملکرد لرزه‌ای بدست آمده از سازه‌های چند طبقه می‌تواند بینش واقع‌بینانه‌تری در طراحی داشته باشند. همچنین پارامترهای سختی، شکل‌پذیری و روند تشکیل مفاصل پلاستیک از سازه‌های مهاربندی شده چند طبقه تحت بارهای لرزه‌ای می‌توانند رفتار لرزه‌ای واقع‌بینانه‌تری را ارائه دهند. این‌ها می‌توانند باعث ایجاد یک قابلیت اطمینان روی نتایج بدست آمده از سازه‌های چند طبقه با استفاده از تحلیل‌های المان محدود در ادبیات گذشته باشد. از اینرو در این مقاله، ابتدا رفتار لرزه‌ای و اتلاف انرژی از نمونه‌های یک دهانه چهار طبقه قاب خمشی فولادی با مهاربند بیضی در مقیاس یک ششم تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی چرخه‌ای ارزیابی می‌شوند. در ادامه ضرایب عملکرد لرزه‌ای محاسبه می‌شوند.

۲- قاب خمشی فولادی با مهاربند بیضی

یکی از سیستم‌های مهار جانبی در سازه‌های فولادی که رفتار لرزه‌ای آن توسط نویسندگان در سال‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است، قاب خمشی مقاوم با مهاربند بیضی (ELBRF) است. ELBRF یک نوع سیستم بار جانبی است، به گونه‌ای که در هر دهانه قاب از یک مهاربند بیضی استفاده می‌شود. در این سیستم سازه‌ای، مهاربند بیضی در طول مناسبی از تیرها و ستون‌ها اتصال دارد. مهاربند بیضی وقتی در دهانه میانی از قاب نصب می‌شود، منجر به افزایش شکل‌پذیری و سختی می‌شود. این سیستم می‌تواند بر زیبایی‌شناسی سازه بیفزاید. در این سیستم مهاربندی، شکل هندسی مهاربند بیضی نقش کلیدی را در جذب انرژی سازه بازی میکند و می‌تواند بعنوان یک فیوز انعطاف‌پذیر، شکل‌پذیری کافی را در سازه تضمین کند.

۳- برنامه آزمایشگاهی

برای ارزیابی رفتار هیستریتیک از سیستم مهارجانبی پیشنهادی، یک قاب دو بعدی یک دهانه چهار طبقه ELBRF طراحی و ساخته شده است. ضریب مقیاس نمونه‌های آزمایشی یک ششم است. قاب‌های سازه توسط یک نرم افزار المان محدود آنالیز و طراحی شد. طراحی اعضای سازه بر اساس نتایج آنالیز الاستیک است. در نتیجه پروفیل قوطی $40 \times 20 \times 2$ میلیمتر برای تیرها و ستون‌ها و پروفیل قوطی $20 \times 20 \times 0.9$ میلیمتر برای مهاربندها بدست آمد. ارتفاع کل نمونه تست ۲۱۱۵ میلیمتر و فاصله مرکز به مرکز بین دو اتصال فیکس شده پایینی 1040 میلیمتر بود. در واقع طول دهانه آزاد قاب و ارتفاع آزاد هر طبقه به ترتیب برابر با 1000 میلیمتر و 500 میلیمتر است که نشان‌دهنده ابعاد آزاد یک قاب فولادی مهاربندی شده یک دهانه یک طبقه در ساختمان با عرض 6000 میلیمتر و ارتفاع 3000 میلیمتر است. جزئیات و ابعاد نمونه‌های آزمایشی در شکل ۲ ارائه شده است. همه اتصالات تیر به ستون و مهاربند بیضی به تیر و ستون بصورت جوش نفوذی است. نمونه ELBRF، بعنوان یک قاب مرجع طراحی و تولید شد که یک سیستم مقاوم در برابر نیروی جانبی دوگانه متشکل از قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند بیضی است. سختی جانبی و اتلاف انرژی این سیستم از طریق مهاربندهای بیضی تامین می‌شود. در این سیستم سازه‌ای، در هر طبقه از یک مهاربند بیضی استفاده می‌شود. برای بدست آوردن یک فرم کاملاً دقیق در ساخت مهاربند بیضی با انحناهای دقیق همراه با کاهش تنش‌های پسماند، از چهار ربع بیضی در هر طبقه استفاده شد که در دو انتها به هم متصل شده‌اند. یک رول خمشی هیدرولیک سه غلتکی که در یک پیکربندی مثلی چیده شده بود برای شکل دادن هر مهاربند ربع بیضی استفاده شد. برای اطمینان از اتصال مناسب المان‌ها به یکدیگر از جوشکاری TIG استفاده شد، زیرا ضخامت المان‌ها نازک بود. در محور پایینی این نمونه، از یک تیر برای اتصال مهاربند بیضی به آن استفاده شده است. مهاربندهای بیضی با استفاده از صفحات کمکی به ضخامت 4 میلیمتر به تیرها و ستون‌ها متصل شدند. این صفحات کمکی بطور کامل به تیرها، ستون‌ها و مهاربندها جوش داده شدند.

۳-۱ مشخصات مکانیکی مصالح

خواص مکانیکی مصالح فولادی از طریق تست کوپن کشش استاندارد مطابق با [۳۱] ASTM A370 برای ساختن نمونه ELBRF تعیین شد. مقاومت کششی تسلیم، f_y ، مقاومت کششی نهایی، f_u ، مدول‌های الاستیک، E_s ، ضخامت، t_s ، و ازدیاد طول، ϵ ، صفحات فولادی از آزمایش‌های کششی استاندارد بدست آمد. اطلاعات مربوط به مشخصات مکانیکی نمونه‌ها در جدول ۱ خلاصه شده است. نمونه‌های کوپن با ابعاد $12/5$ میلیمتر عرض و 50 میلیمتر طول گیج، با ضخامت‌های $1/0$ و $2/0$ میلیمتر، از صفحات مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها استخراج شدند.



کد اختصاصی:

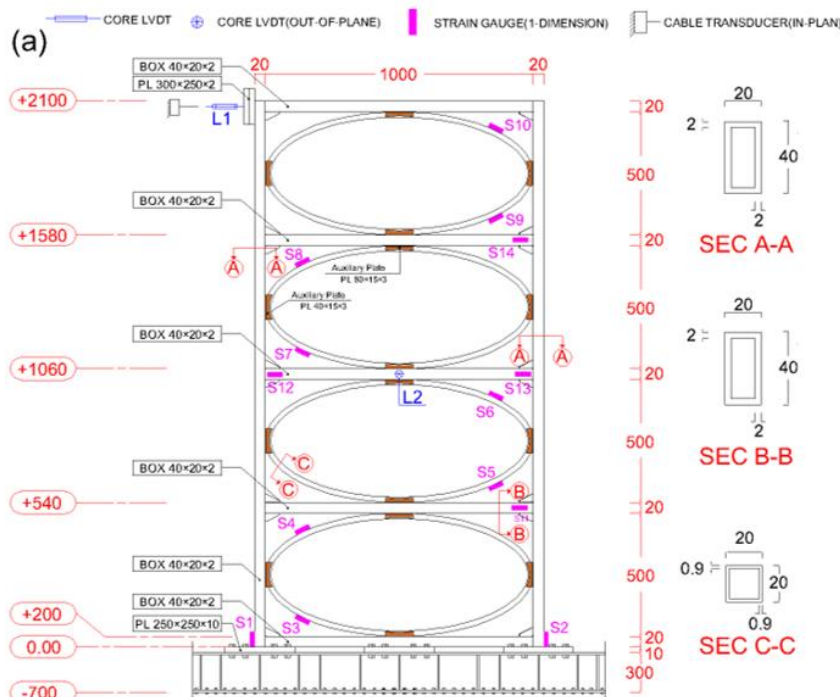
۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

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 بیضی

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مصالح تیر، ستون و مهاربند

مقطع نمونه تست کشش	طول گيج (میلیمتر)	مقاومت کششی تسلیم f_y (MPa)	مدول الاستیسیته E (GPa)	ازدیاد طول، ϵ (میلیمتر)
پروفیل قوطی $40 \times 20 \times 2$ میلیمتر	۵۰	۲۸۹	۲۰۲/۱	۳۷
پروفیل قوطی $20 \times 20 \times 0.9$ میلیمتر	۵۰	۲۹۳	۲۰۱/۳	۳۴

۳-۲ چیدمان آزمایش و تجهیزات ابزار دقیق

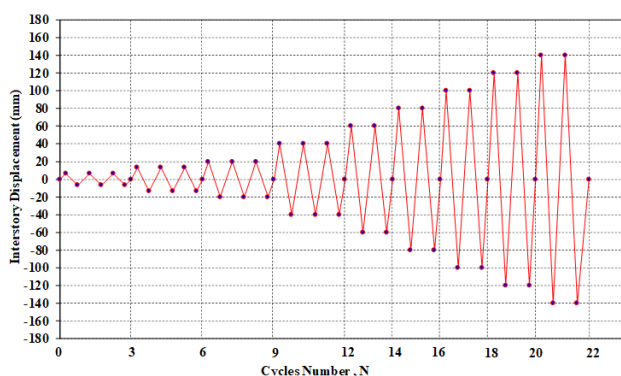
تست‌های آزمایشی در آزمایشگاه سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد انجام شد. نمونه با مقیاس یک ششم طراحی و ساخته شد. برای تست آنها، قاب عکس‌العمل اصلی از دو ستون فولادی قابل استفاده مجدداً تشکیل شده بود که به کف صلب پیچ شده بودند. ELBRF در داخل قاب عکس‌العمل (بین دو ستون) قرار گرفتند و توسط تکیه‌گاه‌های ثابت بر روی کف صلب نصب شدند. نمونه‌های قاب مهاربندی شده بر روی یک کف صلب توسط تکیه‌گاه‌های ثابت نصب شدند. دو قاب A در دو طرف نمونه‌ها به دلیل انحراف افقی خارج از صفحه و کماتش نمونه‌ها اعمال شد، شکل ۲. یک جک هیدرولیک برای اعمال بارگذاری چرخه‌ای بر روی نمونه‌ها در سطح مرکز تیر در بالاترین تراز استفاده شد، بنابراین اطمینان حاصل شد که هیچ گشتاور ثانویه ناشی از خروج از مرکز جک وجود ندارد. اکچوایتر با استفاده از یک سیستم تست هیدرولیک کنترل شده توسط کامپیوتر کار می‌کرد که می‌توانست حداکثر نیروی فشار و کشش و جابجایی را به ترتیب ± 600 کیلو نیوتن و ± 200 میلیمتر فراهم کند. این محرک با سرعت ۱۰ میلیمتر در دقیقه بارگذاری شده بود. دو تبدیل دیفرانسیل متغیر خطی (LVDTs) جابجایی نمونه‌ها را اندازه‌گیری کردند. LVDT-1 جابجایی اصلی تیر را در جهت بار جانبی اعمال شده در بالاترین تراز اندازه‌گیری کرد. LVDT-2 جابجایی نمونه‌ها را در خارج از صفحه کنترل کرد. در این نمونه یک مجموعه از پانزده کرنش سنج بر روی نقاطی از تیرها، ستون‌ها و مهاربندهای بیضی که پتانسیل تشکیل مفصل پلاستیک را دارند نصب شده است. مکان کرنش سنج‌ها از طریق تحلیل عددی در نرم افزار آباکوس [۳۲] انتخاب شد. تمام کانال‌های داده ابزار به یک سیستم جمع‌آوری داده مرکزی متصل شدند که به نوبه خود برای جمع‌آوری داده‌ها به یک کامپیوتر متصل می‌شد. 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.



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

۳-۴ پروتکل بارگذاری

یکی از مهمترین مراحل در ارزیابی رفتار لرزه ای سازه ها، تعیین الگوی بارگذاری است. در این مطالعه، برای ارزیابی رفتار لرزه ای نمونه ELBRF از بارگذاری جانبی شبه استاتیکی بر اساس پروتکل [۳۳] ATC-24 استفاده شد. این پروتکل با شبیه سازی تغییر شکل های غیرالاستیک شدید، رفتار نمونه را در نواحی قبل و بعد از تسلیم بررسی کرده و اثر خستگی در محدوده غیرخطی را پوشش می دهد. تغییر مکان تسلیم از طریق تحلیل المان محدود در نرم افزار آباکوس تعیین شد. بارگذاری در اتصال تیر به ستون و در جهت درون صفحه قاب اعمال گردید و نسبت دریافت به عنوان 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.



شکل ۳- پروتکل بارگذاری مطابق با ATC-24

۴- نتایج آزمایشگاهی

مشاهدات تجربی در طول تست های بارگذاری از نمونه ها بطور جداگانه در ادامه مورد بحث قرار می گیرد. برای کشف محل تسلیم، سطوح تیرها، ستون ها و مهاربندهای بیضی با لایه ای از رنگ سریع خشک شونده رنگ آمیزی شد که در صورت هرگونه تغییر شکل پلاستیک به راحتی از سطح نمونه جدا شود. عکس های نمونه ELBRF 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 تا زمانی که اولین نشانه های تسلیم یا کمانش در اعضا ظاهر شود. پس از آن، افزایش دریافت تا شکست نمونه اعمال شد. در جابجایی ۱۳/۴ میلیمتر معادل یک درصد دریافت، همچنان رفتار نمونه خطی است، شکل ۴(ب). در چرخه دوازدهم، در زاویه دریافت دو درصد، تغییر شکل نمونه ELBRF مشهود بود و مهاربندهای بیضی شروع به تغییر شکل درون صفحه ای کردند شکل ۴(ج). مقاومت جانبی به تدریج تا زاویه دریافت سه درصد معادل با جابجایی ۶۰ میلیمتر افزایش یافت و تغییر شکل مهاربندهای بیضی در طبقات دوم و سوم کاملاً واضح بود، شکل ۴(د). با افزایش مقاومت جانبی تا جابجایی ۸۰ میلیمتر و ۱۰۰ میلیمتر معادل چهار درصد و پنج درصد دریافت، قابل مشاهده است که مهاربندهای بیضی در همه طبقات از نمونه ELBRF.



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



بدلیل مقاومت کششی و فشاری ایجاد شده در آنها تغییر شکل می دهند و بعنوان یک فیوز شکل پذیر، شکل پذیری سیستم را افزایش می دهند، شکل ۴(ه) و ۴(و). نتایج تجربی در چرخه های آخر در جابجایی های ۱۲۰ میلی متر و ۱۴۰ میلی متر معادل شش درصد و هفت درصد دیررفت نشان دهنده شکل پذیری بالای این سیستم سازه ای بدون ایجاد کمانش ستون و کمانش جانبی-پیچشی در تیرها در حین بارگذاری جانبی بود گونه ای که صاف بودن ستون در تمام مراحل آزمایش حتی در جابجایی زیاد تأیید شد که نکته قابل توجهی در این سیستم مهاربندی است، شکل ۴(ز و ح).



(الف) شروع بارگذاری



(ب) جابجایی ۲۰ میلی متر، دیررفت ۱ درصد



(ج) جابجایی ۴۰ میلی متر، دیررفت ۲ درصد



(د) جابجایی ۶۰ میلی متر، دیررفت ۳ درصد



(ه) جابجایی ۸۰ میلی متر، دیررفت ۴ درصد



(و) جابجایی ۱۰۰ میلی متر، دیررفت ۵ درصد



(ح) جابجایی ۱۴۰ میلی متر، دیررفت ۷ درصد

(ط) توقف بارگذاری

(ز) جابجایی ۱۲۰ میلی متر، دیررفت ۶ درصد

شکل ۴- تغییر شکل قاب مهاربندی شده بیضی (ELBRF) در مراحل مختلف بارگذاری چرخه ای در تست بارگذاری سیکلی

با توجه به مشاهدات بدست آمده از آزمایش لرزه ای روی نمونه ELBRF، با توجه به شکل هندسی مهاربند بیضی که منحنی است، در هر مرحله از تغییر جهت در بارگذاری شبه استاتیکی سیکلی، نیروهای کششی داخلی در مهاربندهای ربع بیضی، بر خلاف مهاربندهای



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

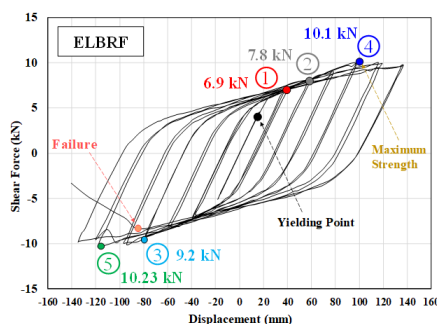
۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



خطی، به سرعت با نیروی فشاری جایگزین می شوند. پس با تغییر جهت نیروی جانبی، المان ربع بیضی تحت فشار به سرعت به حالت اولیه خود باز می گردد و تغییر شکل دائمی ایجاد نمی کند. بنابراین، هیچگونه کماتش خارج از صفحه ای در مهاربندهای بیضی رخ نمی دهد. همانطور که در شکل ۴(ط)، نشان داده شده است، بعد از توقف بارگذاری و باز کردن اتصال اکچوایاتور از نمونه، مهاربندهای بیضی به شکل هندسی اولیه خود بازگشتند.

۴-۱ عملکرد هیستریزیس

جهت ارزیابی رفتار چرخه ای، کارایی و ظرفیت جذب انرژی از سیستم پیشنهادی ELBRF در مراحل مختلف بارگذاری، منحنی هیستریزیس تجربی حاصل از نتایج تست بر اساس مقاومت برشی در مقابل جابجایی نمونه‌ها ارائه شده است، شکل ۵. مقادیر مثبت و منفی بار به ترتیب نشان دهنده کشش و فشار در اعضای نمونه است. این قرارداد برای تمام نمودارهای بار-جابجایی در این مطالعه اعمال می شود. در تست ELBRF رفتار نمونه در طول ۹ سیکل اول خطی است. مقاومت برشی قاب در ناحیه خطی در جابجایی های ۱۳/۴ میلیمتر و ۲۰ میلیمتر معادل ۰/۶۷ درصد و ۱/۰ درصد دیریت برابر با ۳/۱ کیلونیوتن و ۵/۲ کیلونیوتن است. مقاومت جانبی سیستم در حال افزایش است و به ترتیب به بار افقی ۶/۹۰ کیلونیوتن، ۷/۸۰ کیلونیوتن، ۹/۲۰ کیلونیوتن و ۱۰/۱ کیلونیوتن در دیریت های ۲/۰ درصد، ۳/۰ درصد، ۴/۰ درصد و ۵/۰ درصد می رسد و مقدار آن تقریباً با یک افزایش جزئی تا دیریت ۶/۰ درصد ادامه دارد. تست در سیکل ۲۲ ام پایان می یابد و ظرفیت برشی آن در مرحله تسلیم و در مرحله توقف بارگذاری به ترتیب ۴/۵۰ کیلونیوتن و ۹/۷۸ کیلونیوتن است، شکل ۵.



شکل ۵- منحنی هیستریزیس از قاب مهاربندی شده بیضی (ELBRF) در مراحل مختلف بارگذاری چرخه‌ای در تست بارگذاری سیکلی

۴-۲ منحنی دوطبی و ضرایب عملکرد لرزه ای

در این مقاله، ضرایب عملکرد لرزه ای مانند ضرایب اضافه مقاومت (Ω_0) و شکل پذیری (μ) و ضریب اصلاح پاسخ (R) از سیستم ELBRF با استفاده از نتایج تجربی و روش های ارائه شده در کدهای طراحی لرزه ای ارزیابی می شوند. برای این منظور ابتدا منحنی پوش رفتار چرخه‌ای با استفاده از منحنی هیستریزیس ترسیم شد. فقط از بخش صعودی منحنی هیستریزیس برای بدست آوردن منحنی پوش رفتار چرخه‌ای استفاده شد و بخش کاهشی نادیده گرفته شد. سپس بر اساس FEMA-356 [۳۴] یک منحنی دوطبی معادل به منحنی پوش رفتار چرخه‌ای برازش داده شد، شکل ۶. بر این اساس نقطه B باید بگونه ای انتخاب شود که ابتدا طول پاره خط AD برابر با $0.6 AB$ باشد، یعنی تقاطع بین منحنی پوش رفتار چرخه‌ای و بخش اول منحنی دوطبی $0.6 V_y$ باشد و دوم، مساحت زیر منحنی پوش رفتار چرخه‌ای (ناحیه ۱) برابر با مساحت زیر منحنی دوطبی ایده آل (ناحیه ۲) باشد، شکل ۶. همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می شود، ضریب اصلاح پاسخ (R) در روش طراحی بر اساس بار و مقاومت (LRFD) از طریق رابطه (۱) محاسبه می شود:

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

منحنی پوشاوار قاب مهاربندی شده بیضی در شکل ۷ نشان داده شده است. جابجایی تسلیم اولین داده مهم است که اغلب از طریق پوش تعیین نمی شود. بنابراین، خروجی کرنش سنجه ها برای تعیین Δ_s اعمال می شود. با توجه به تفاوت در دوره ارتعاش (T) سیکل های بارگذاری مکرر در هر دو قاب، حداقل $R_{\mu 1}$ و $R_{\mu 2}$ در محاسبه ضریب R اعمال می شود. ضرایب عملکرد لرزه ای از سیستم مهاربندی ELBRF در جدول ۲ ارائه شده است. ضریب کاهش شکل پذیری برای ELBRF برابر با ۳/۷۷ محاسبه شد. ضریب اصلاح پاسخ برای



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

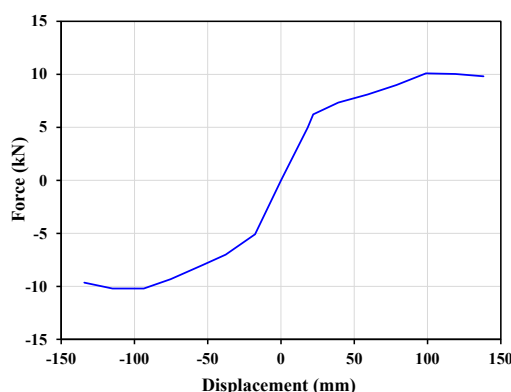
ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

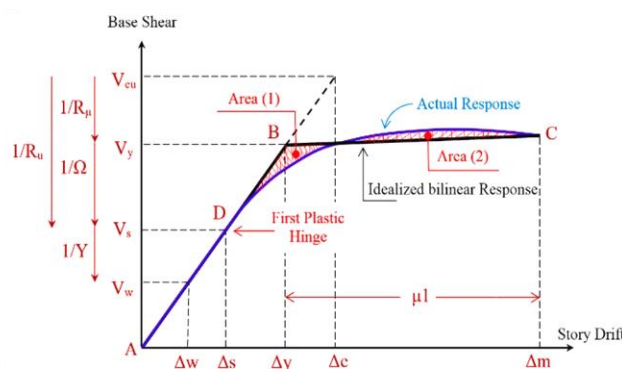
۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



ELBRF برابر با $\frac{7}{3}$ بود. ضریب اضافه مقاومت (Ω_0) نمونه ELBRF برابر با $\frac{2}{38}$ بدست می‌آید. سیستم قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند بیضی شکل پذیری و سختی خوبی دارند.



شکل ۷- منحنی پوشاوار قاب مهاربندی‌شده بیضی



شکل ۶- منحنی دوطخطی حاصل از منحنی پوشاوار

جدول ۲- ضرایب عملکرد لرزه ای از قاب مهاربندی‌شده بیضی (ELBRF)

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 مهاربندی‌شده بیضی	۱۶/۶۲	۵/۶۴	۵/۷۵	۲/۵	۷/۳

۵- نتیجه و جمع بندی

در این مقاله، برای نخستین بار عملکرد لرزه ای، رفتار هیستریزیس، ظرفیت اتلاف انرژی از یک نمونه قاب خمشی فولادی تک‌دهانه چهارطبقه مجهز به مهاربند بیضی (ELBRF) در مقیاس یک ششم تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیکی با استفاده از مطالعات تجربی و آزمایشگاهی انجام شده است. یافته‌های کلی این تحقیق بصورت خلاصه به شرح زیر ارائه می‌شود:

با بررسی تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب‌های ELBRF مشخص شد که ابتدا مهاربندهای بیضی وارد ناحیه پلاستیک شده، به مرحله گسیختگی می‌رسند و انرژی را جذب می‌کنند. سپس مفاصل پلاستیک در دو انتهای تیر تشکیل شده و در نهایت به دو انتهای ستون منتقل می‌شوند که این فرآیند از تخریب زود هنگام سازه جلوگیری می‌کند.

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

مقدار ضریب اصلاح پاسخ برای سیستم ELBRF برابر با $\frac{7}{3}$ براساس روش حد نهایی می‌باشد. مقدار ضریب اضافه‌مقاومت برای سیستم ELBRF برابر با $\frac{2}{50}$ بدست آمد و مقدار ضریب شکل‌پذیری برای سیستم ELBRF برابر با $\frac{5}{75}$ 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] 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>.



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



- [2] 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>.
- [3] 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>.
- [4] 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>.
- [5] 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>.
- [6] 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>.
- [7] A. Rigi, B. JavidSharifi, M.A. Hadianfard, T.Y. Yang. "Study of the seismic behavior of rigid and 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>.
- [8] S.S. Lee. "Performance-based design of steel moment frames using target drift and yield mechanism." University of Michigan; 2002.
- [9] 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>.
- [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.



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



- <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 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.jobbe.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.