



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 تجربی جهت ارزیابی عملکرد لرزه‌ای از قاب‌های خمشی فولادی چندطبقه مجهز به مهاربند شبه بیضی

ناصر مظفری^۱، پرهام معمارزاده^۲، سعید آقاجانیان^۳، حبیب قاسمی جونغانی^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 مسؤول: پرهام معمارزاده parham.memarzadeh@iau.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر، توسعه سیستم‌های مهاربندی رویکردهای نوآورانه‌ای را در تقویت سازه‌ها معرفی کرده است. در حالیکه قاب‌های مقاوم مهاربندی‌شده بیضی بطور گسترده در پیکربندی‌های یک‌طبقه و چندطبقه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، داده‌های تجربی مربوط به قاب‌های مقاوم مهاربندی‌شده شبه بیضی (QELBRF) همچنان محدود است. این کمبود داده، نگرانی‌هایی را در خصوص قابلیت اعتماد شبیه‌سازی‌های عددی برای سیستم‌های مهاربندی‌شده شبه بیضی ایجاد کرده است. بمنظور رفع این خلأ پژوهشی، مطالعه حاضر بصورت تجربی رفتار لرزه‌ای و مکانیسم‌های شکست قاب‌های QELBRF چندطبقه را مورد بررسی قرار داده است. تست‌های آزمایشگاهی با استفاده از مدل‌های تک‌دهانه چهارطبقه در مقیاس یک‌دهم از قاب‌های QELBRF تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیکی انجام شد. شاخص‌های مختلف عملکرد لرزه‌ای شامل سختی، شکل‌پذیری، مقاومت، مودهای شکست و ظرفیت اتلاف انرژی مورد ارزیابی قرار گرفتند. یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از مهاربندهای شبه بیضی در سیستم‌های قاب خمشی به‌طور قابل توجهی عملکرد لرزه‌ای سازه را بهبود می‌بخشد. تسلیم این مهاربندها موجب تأخیر در شکست ستون‌ها شده و امکان تحمل تغییرشکل‌های غیرخطی قابل ملاحظه پیش از فروپاشی را برای سازه فراهم می‌کند. در این سیستم، تسلیم ابتدا در طبقات پایین آغاز شده و به تدریج به سمت طبقات بالاتر گسترش می‌یابد و در نهایت ستون‌ها را درگیر می‌کند. این نتایج کارایی بالای این سیستم‌های مهاربندی را در افزایش تاب‌آوری و ایمنی سازه‌ها در برابر زلزله نشان می‌دهد. همچنین، ضرایب اصلاح پاسخ برای قاب‌های QXBRF برابر با ۶/۸ محاسبه شده است.

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

Experimental Study for Evaluating the Seismic Performance of Multi-Story Steel Moment Frames Equipped with Quasi-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, the development of bracing systems has introduced innovative approaches to structural strengthening. While elliptical-braced resisting frames have been extensively investigated in both single-story and multi-story configurations, experimental data related to quasi-elliptical-braced resisting frames (QELBRFs) remain limited. This lack of experimental evidence has raised concerns regarding the



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



reliability of numerical simulations for quasi-elliptic bracing systems. To address this research gap, the present study experimentally investigates the seismic behavior and failure mechanisms of multi-story QELBRFs. Laboratory tests were conducted on 1:6-scale, single-span, four-story QELBRF specimens subjected to cyclic quasi-static loading. Various seismic performance indicators, including stiffness, ductility, strength, failure modes, and energy dissipation capacity, were evaluated. The results demonstrate that incorporating quasi-elliptical braces into steel moment frame systems significantly enhances seismic performance. Yielding of the quasi-elliptical braces delays column failure and enables the structure to sustain considerable nonlinear deformations prior to collapse. In this system, yielding initiates in the lower stories and progressively propagates to the upper stories, ultimately involving the columns. These findings highlight the high efficiency of quasi-elliptic bracing systems in improving structural resilience and seismic safety. Moreover, the response modification factor for QXBRFs was calculated as 6.8.

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

۱- مقدمه

در اغلب آیین‌نامه‌های طراحی سازه، یکی از جنبه‌های اساسی طراحی لرزه‌ای برای سیستم‌های مختلف مقاوم در برابر بار جانبی، تعیین ضرایب عملکرد لرزه‌ای مناسب است [۵-۱]. به‌طور خلاصه، طراحی لرزه‌ای باید دو معیار اصلی را برآورده سازد: تأمین سختی کافی و مقاومت مناسب. علاوه بر این، سازه‌ها باید از شکل‌پذیری کافی برخوردار باشند تا بتوانند در طی زلزله‌های شدید انرژی را به‌طور مؤثر مستهلک کنند [۸-۶]. تحقق این اهداف به انتخاب دقیق ضرایب عملکرد لرزه‌ای در فرآیند طراحی لرزه‌ای وابسته است. طی دو دهه گذشته، مطالعات متعددی به بررسی عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های مهاربندی جانبی یک‌طبقه و چندطبقه تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیکی پرداخته‌اند. 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].

با افزایش توجه به هم‌زمانی ایمنی لرزه‌ای و کیفیت‌های معماری در طراحی ساختمان‌ها، ضرورت توسعه سیستم‌هایی که بتوانند پاسخگوی هر دو رویکرد باشند بیش از پیش احساس می‌شود. در این راستا، 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 مهارندهای 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 هیسترتیک 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 پوشاوار 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 قاب‌های فولادی ساده و قاب‌های خمشی فولادی دو بعدی مجهز به مهارندهای 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



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



میراگرهای اصطکاکی دورانی از طریق IDA توسط [۲۶] مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه رفتار لرزه ای سازه های فولادی با مهاربندهای منحنی مورد ارزیابی قرار گرفت [۳۰-۲۷].

در دهه های اخیر، پژوهشگران عملکرد لرزه ای قاب های مقاوم جانبی مجهز به مهاربند بیضی را مورد بررسی قرار داده اند، ولی در رابطه با سیستم های مهاربندی قاب خمشی فولادی با مهاربند شبه بیضی کمبود داده های آزمایشگاهی مشهود است. به منظور جبران این خلأ دانشی، در این مقاله عملکرد لرزه ای و مکانیزم های شکست قاب های مقاوم مجهز به مهاربند شبه بیضی چندطبقه از طریق یک برنامه آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. سهم اصلی این پژوهش ارائه داده های آزمایشگاهی برای سیستم های QELBRF چندطبقه است که می تواند برای اعتبارسنجی مدل های عددی و بررسی ویژگی های لرزه ای آن ها مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، ضرایب عملکرد لرزه ای (SPFs) شامل ضریب اضافه مقاومت (Ω)، ضریب شکل پذیری (R_{μ}) و ضریب اصلاح پاسخ (R) برای سیستم های QELBRF چندطبقه محاسبه شده اند.

۲- قاب خمشی فولادی با مهاربند شبه بیضی

قاب های مقاوم مهاربندی شده شبه بیضی که در شکل ۱ نشان داده شده اند، از چهار مهاربند ربع بیضی بمنظور افزایش شکل پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی استفاده می شود. این پیکربندی، احتمال بروز پدیده طبقه نرم را کاهش داده و به حفظ پایداری سازه تحت تغییر شکل های قابل توجه کمک می کند. مهاربندی شبه بیضی بعنوان جایگزینی کارآمد برای مهاربندهای کمانش تاب عمل می کند و بدون کاهش سختی یا مقاومت، رفتار چرخه ای پایدار و ظرفیت اتلاف انرژی مناسبی را فراهم می سازد. یکی از ویژگی های متمایز این سیستم آن است که اعضای مهاربندی به صورت مستقیم به تیرها و ستون های قاب متصل نمی شوند؛ امری که این سیستم را در مقایسه با سیستم های مهاربندی دایره ای و بیضی، از مزیت عملکردی قابل توجهی برخوردار می سازد.

۳- برنامه آزمایشگاهی

برای بررسی عملکرد هیستریتیک سیستم پیشنهادی، طراحی دقیق و ساخت نمونه های آزمایشی اهمیت بالایی دارد. برای ارزیابی رفتار هیستریتیک سیستم مهارجانبی پیشنهادی، یک قاب دو بعدی یک دهانه چهار طبقه شبه بیضی (QELBRF) 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 شبه 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 شبه بیضی به تیر و ستون به صورت جوش نفوذی اجرا گردید. نمونه QELBRF یک سیستم مقاوم جانبی ترکیبی شامل قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند شبه بیضی است. سختی جانبی و اتلاف انرژی سازه از طریق مهاربندهای شبه بیضی تأمین می شود و در هر طبقه یک مهاربند شبه بیضی استفاده شد. برای حصول انحنای دقیق و کاهش تنش های پسماند، هر مهاربند شبه بیضی از چهار ربع بیضی تشکیل شد که تمامی مهاربندهای ربع بیضی در وسط دهانه قاب در هر طبقه به یکدیگر متصل می شوند. شکل دهی ربع بیضی ها با یک رول هیدرولیک سه غلتکی در پیکربندی مثلی 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 شبه بیضی تعبیه شد.

۳-۱ مشخصات مکانیکی مصالح

برای اطمینان از دقت تحلیل ها و اعتبار نتایج آزمایشگاهی، خواص مکانیکی مصالح فولادی مورد استفاده در نمونه ها به دقت تعیین شد. خواص مکانیکی فولاد مورد استفاده در ساخت نمونه QELBRF از طریق تست کوپن کشش استاندارد مطابق با [۳۱] ASTM A370 تعیین گردید. پارامترهای شامل مقاومت تسلیم کششی (f_y)، مقاومت کششی نهایی (f_u)، مدول الاستیسیته (E_s)، ضخامت صفحات (t_s) و ازدیاد طول (ϵ) از طریق آزمایش های کششی استاندارد استخراج شدند. مشخصات مکانیکی نمونه ها در جدول ۱ به صورت خلاصه ارائه شده است. نمونه های کوپن با ابعاد عرض ۱۲/۵ میلیمتر و طول گیج ۵۰ میلیمتر، با ضخامت های ۰/۱ و ۰/۲ میلیمتر، از همان صفحات فولادی مورد استفاده در ساخت نمونه های اصلی برش داده شدند.



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

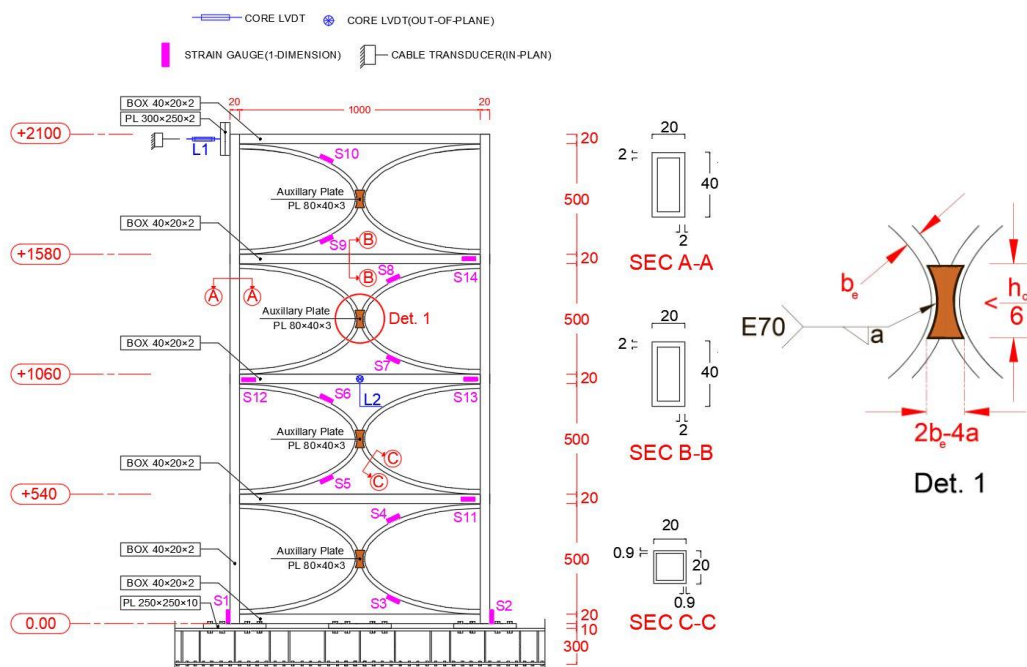
دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



۳-۲ چیدمان آزمایش و تجهیزات ابزار دقیق

به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی مجهز به مهاربند شبه بیضی، یک برنامه آزمایشگاهی نظام‌مند طراحی و اجرا گردید. آزمایش‌ها در آزمایشگاه سازه دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، انجام شد. نمونه‌های مورد مطالعه در مقیاس یک‌ششم ساخته شدند و در طی فرآیند آزمایش، از یک قاب عکس‌العمل اصلی متشکل از دو ستون فولادی قابل استفاده مجدد که به کف صلب مهار شده بودند، استفاده گردید. نمونه QELBRF درون این قاب عکس‌العمل و بین دو ستون قرار داده شده و به وسیله تکیه‌گاه‌های ثابت بر روی کف صلب نصب شدند تا شرایط مرزی مناسب برای اعمال بارگذاری فراهم شود.



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

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مصالح تیر، ستون و مهاربند

مقطع نمونه تست کشش	طول گیج (میلیمتر)	مقاومت کششی تسلیم f_y (MPa)	مدول الاستیسیته E (GPa)	ازدیاد طول، ϵ (میلیمتر)
پروفیل قوطی ۲۰×۲۰×۴ میلیمتر	۵۰	۲۸۹	۲۰۲/۱	۳۷
پروفیل قوطی ۲۰×۲۰×۹ میلیمتر	۵۰	۲۹۳	۲۰۱/۳	۳۴

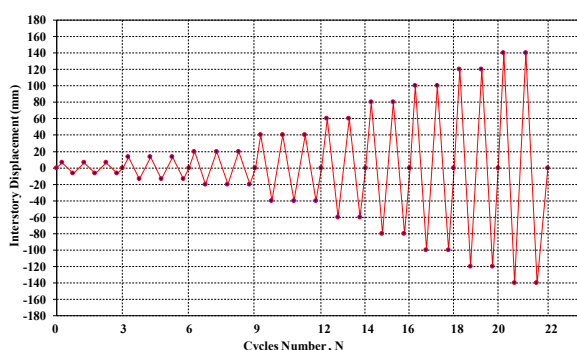
به منظور مهار کماتش و کنترل جابه‌جایی افقی خارج از صفحه، دو قاب A در دو سمت نمونه‌ها نصب گردید (شکل ۲). بارگذاری چرخه‌ای توسط یک جک هیدرولیکی اعمال شد که در تراز مرکز تیر و در بالاترین طبقه مستقر شده بود تا از ایجاد هرگونه لنگر ثانویه ناشی از خروج از مرکز جلوگیری شود. این جک هیدرولیکی تحت کنترل یک سامانه رایانه‌ای عمل می‌کرد و توانایی اعمال نیروی فشاری و کششی تا ± 600 کیلو نیوتن و جابه‌جایی تا $20 \pm$ میلی‌متر را داشت. فرآیند بارگذاری با نرخ ثابت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. جابجایی‌های نمونه‌ها به وسیله دو مبدل جابه‌جایی خطی متغیر (LVDT) اندازه‌گیری شد؛ به طوری که LVDT-1 تغییر مکان تیر اصلی در راستای بار جانبی اعمال شده در تراز فوقانی را ثبت می‌کرد، در حالی که LVDT-2 به منظور پایش تغییر مکان خارج از صفحه نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. به منظور شناسایی نواحی مستعد تشکیل مفصل پلاستیک، پانزده کرنش‌سنج بر روی تیرها، ستون‌ها و مهاربندهای بیضی نصب شد. جانمایی دقیق کرنش‌سنج‌ها بر اساس نتایج تحلیل عددی انجام شده در نرم‌افزار Abaqus تعیین گردید [۳۲]. کلیه تجهیزات اندازه‌گیری به یک سامانه مرکزی جمع‌آوری داده متصل بودند که اطلاعات ثبت شده را به رایانه منتقل می‌کرد. شکل ۲ نمای کلی مجموعه آزمایش و ابزار دقیق شامل محل محرک، شرایط تکیه‌گاهی قاب، موقعیت LVDT ها (L1 و L2) و جانمایی کرنش‌سنج‌ها را نشان می‌دهد.

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



شکل ۳- پروتکل بارگذاری مطابق با ATC-24

۴- نتایج آزمایشگاهی

نمونه قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند شبه بیضی (QELBRF) 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 تغییر شکل های پلاستیک، سطوح المان های نمونه با لایه ای از رنگ سریع خشک شونده رنگ آمیزی شد. تصاویر نمونه QELBRF در طول آزمایش بارگذاری چرخه ای در شکل ۴ نشان داده شده است. نمونه QXBRF به عنوان یک پیکربندی جایگزین قاب های مهاربندی منحنی، برای ارزیابی رفتار لرزه ای و مقایسه با قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند بیضی تحت بارگذاری چرخه ای آزمایش شد. سطوح اعضای سازه ای با رنگ زودخشک پوشش داده شد تا نقاط تسلیم و نواحی تغییر شکل پلاستیک مشخص باشند. در مراحل اولیه و تا دریافت ۱٪، نمونه رفتار کاملاً الاستیک نشان داد. مهاربند های ربع بیضی پس از هر چرخه به شکل اولیه خود بازمی گشتند. با رسیدن به جابجایی



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



δy ، تغییر رنگ و نشانه‌های اولیه تسلیم بر روی مهاربندها ظاهر شد. با افزایش بار جانبی و در چرخه دهم، تغییر شکل‌های درون صفحه‌ای در مهاربندها مشاهده شد.



(الف) شروع بارگذاری



(ب) جابجایی ۲۰ میلیمتر، دریفت ۱ درصد



(ج) جابجایی ۴۰ میلیمتر، دریفت ۲ درصد



(د) جابجایی ۶۰ میلیمتر، دریفت ۳ درصد



(ه) جابجایی ۸۰ میلیمتر، دریفت ۴ درصد



(و) جابجایی ۱۰۰ میلیمتر، دریفت ۵ درصد



(ز) جابجایی ۱۲۰ میلیمتر، دریفت ۶ درصد



(ح) جابجایی ۱۴۰ میلیمتر، دریفت ۷ درصد



(ط) توقف بارگذاری

شکل ۴- تغییر شکل قاب مهاربندی شده شبه بیضی (QELBRF) در مراحل مختلف بارگذاری چرخه‌ای در تست بارگذاری سیکلی

در مراحل بعدی، تغییر شکل‌های پلاستیک در میانه دهانه مهاربندهای ربع بیضی گسترش یافت. مقاومت جانبی سازه تا دریفت ۳٪ همچنان افزایش یافت. در این مرحله، مهاربندهای طبقات دوم تا چهارم دچار چین خوردگی و تغییر شکل قابل توجه شدند. در دریفت‌های بیشتر،



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

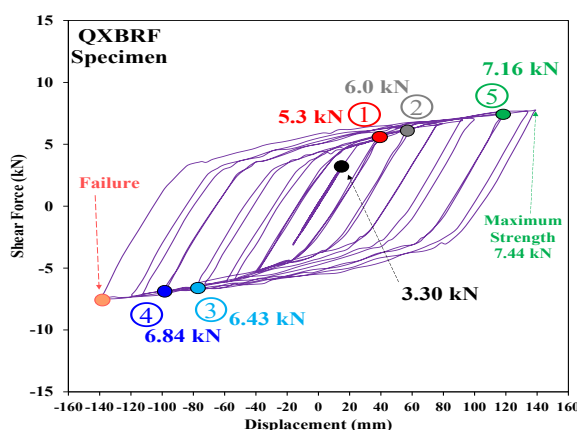
۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



برخی اتصالات دچار ترک‌خوردگی موضعی شدند، اما تیرها و ستون‌ها کمانش نکردند. تغییر شکل‌های درون‌صفحه‌ای تا دریافت ۵٪ ادامه یافت و مهاربندها کاملاً چین‌خورده شدند. در چرخه‌های نهایی، نمونه رفتار شکل‌پذیر بالایی نشان داد. مهاربندهای ربع‌بیضی سریعاً بین کشش و فشار تغییر وضعیت دادند و از کمانش خارج از صفحه جلوگیری کردند. پس از پایان بارگذاری و جدا شدن جک، مهاربندها به شکل اولیه خود بازگشتند. شکل نهایی تغییر شکل‌ها نشان‌دهنده پراکندگی تغییر شکل پلاستیک و چین‌خوردگی در تمامی طبقات بود.

۴-۱ عملکرد هیستریزیس

در آزمایش QXBRF، نمونه در طول شش چرخه اول و در دریافت تقریبی ۰/۶۷ درصد رفتار الاستیک از خود نشان داد، با ظرفیت برشی ۴/۲۴ کیلو نیوتن در جابه‌جایی ۲۰ میلی‌متر که معادل دریافت ۱/۰ درصد بود. مقاومت جانبی نمونه در جابه‌جایی‌های ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متر به ترتیب به ۵/۲۹، ۶/۰، ۶/۴۳ و ۶/۸۴ کیلو نیوتن افزایش یافت، که متناظر با دریافت‌های ۲/۰٪، ۳/۱۰٪، ۴/۱۰٪ و ۵/۱۰٪ است، و تا پایان بارگذاری چرخه‌ای به‌طور جزئی افزایش ادامه داشت. آزمایش در چرخه ۲۲ متوقف شد و ظرفیت برشی ثبت‌شده در حین بارگذاری ۶/۸۴ کیلو نیوتن بود (شکل ۵). مهاربندهای ربع‌بیضی در نمونه QXBRF پس از تسلیم، کاهش قابل‌توجهی در سختی نشان دادند که ناشی از شکل‌گیری مفصل‌های پلاستیک است. این امر منجر به کاهش مقاومت نمونه شد، زیرا چین‌خوردگی ایجاد شد و مفصل‌های پلاستیک اضافی در مهاربندها و ستون‌ها توسعه یافت، به‌ویژه در انتهای آزمایش مشهود بود. منحنی‌های هیستریسی حاصل از این آزمایش‌ها اطلاعات ارزشمندی در مورد مقاومت، سختی، شکل‌پذیری، بیش‌مقاومت، اتلاف انرژی، کارایی میرایی، شاخص‌های عملکرد لرزه‌ای و کاهش تدریجی مقاومت و سختی ارائه می‌دهند.



شکل ۵- منحنی هیستریزیس از قاب مهاربندی‌شده شبه بیضی (QELBRF) در مراحل مختلف بارگذاری چرخه‌ای در تست بارگذاری سیکلی

۴-۲ منحنی دوطبقی و ضرایب عملکرد لرزه‌ای

به‌منظور استخراج پارامترهای کلیدی عملکرد لرزه‌ای سیستم مورد مطالعه، از داده‌های حاصل از آزمایش‌های چرخه‌ای استفاده شد. در این پژوهش، پارامترهای اصلی عملکرد لرزه‌ای سیستم QELBRF شامل ضریب اضافه‌مقاومت (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 هیستریزیس استخراج شد؛ به‌طوری‌که تنها شاخه‌های صعودی منحنی‌های هیستریزیس برای ترسیم منحنی پوش در نظر گرفته شدند و شاخه‌های کاهشی حذف گردیدند. در ادامه، بر اساس دستورالعمل [۳۴] FEMA-356، یک منحنی دوطبقی معادل بر منحنی پوش رفتار چرخه‌ای برآزش داده شد (شکل ۶). مطابق این روش، موقعیت نقطه B به‌گونه‌ای تعیین گردید که، از یک سو، طول پاره‌خط AD معادل ۰/۶ برابر طول پاره‌خط AB باشد، به این معنا که محل تقاطع شاخه اول منحنی دوطبقی با منحنی پوش متناظر با مقدار $0.6 V_y$ در نظر گرفته شود، و از سوی دیگر، مساحت زیر منحنی پوش رفتار چرخه‌ای (ناحیه ۱) با مساحت زیر منحنی دوطبقی 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:



کد اختصاصی:

۰۴۲۵۰-۲۸۲۲۵

اولین همایش ملی

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار

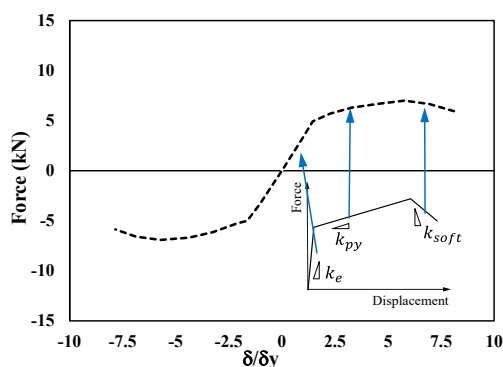
دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴

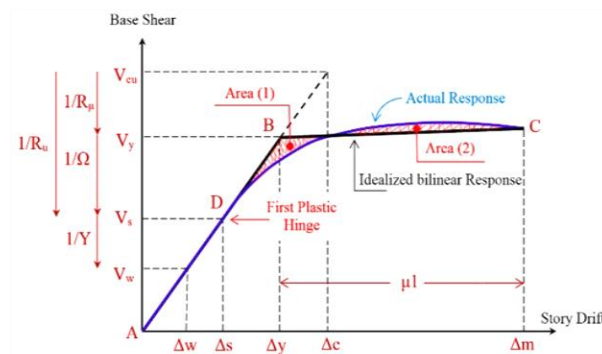


$$R_{LRFD} = \frac{V_{eu}}{V_s} = \frac{V_{eu}}{V_y} \times \frac{V_y}{V_s} = R_\mu \Omega_o \quad (1)$$

منحنی پوشاور قاب مهاربندی شده مگابیتی در شکل ۷ نشان داده شده است. جابجایی تسلیم اولین داده مهم است که اغلب از طریق پوش تعیین نمی شود. بنابراین، خروجی کرنش سنج 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 QELBRF در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۷- منحنی پوشاور قاب مهاربندی شده شبه بیضی



شکل ۶- منحنی دوخطی حاصل از منحنی پوشاور

ضریب کاهش شکل پذیری برای QELBRF برابر با ۶/۷۹ محاسبه شد. ضریب اصلاح پاسخ برای QELBRF برابر با ۶/۷۸ بود. ضریب اضافه مقاومت (Ω_o) نمونه QELBRF برابر با ۱/۷۸ بدست می آید. سیستم قاب خمشی فولادی مجهز به مهاربند شبه بیضی شکل پذیری و سختی خوبی دارند.

جدول ۲- ضرایب عملکرد لرزه ای از قاب مهاربندی شده شبه بیضی (QELBRF)

نمونه	جابجایی تسلیم Δy (میلیمتر)	برش تسلیم V_y (کیلو نیوتن)	ضریب شکل پذیری μ	ضریب اضافه مقاومت Ω_o	ضریب اصلاح پاسخ R
قاب مهاربندی شده شبه بیضی	۱۷/۶۵	۵/۵۰	۶/۷۹	۱/۷۸	۶/۷۸

۵- نتیجه و جمع بندی

به منظور گسترش دانش موجود در زمینه سیستم های نوین مهاربندی جانبی، یک برنامه آزمایشگاهی هدفمند در این پژوهش اجرا شده است. در این پژوهش، برای اولین بار رفتار لرزه ای، پاسخ هیسترتیک و توان اتلاف انرژی یک قاب خمشی فولادی چهارطبقه دودانه مجهز به مهاربند شبه بیضی (QELBRF) در مقیاس یک ششم، تحت بارگذاری چرخه ای شبه استاتیکی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش های انجام شده، مبنایی برای ارزیابی عملکرد لرزه ای این سیستم مهاربندی فراهم کرده و خلاصه ای از مهم ترین یافته های تحقیق در ادامه ارائه می شود. برخلاف مهاربند های X، V، معکوس، X دو طبقه و مهاربند قطری، با تغییر جهت نیروی جانبی، المان های ربع بیضی تحت فشار به سرعت به حالت اولیه خود بازمی گردند و تغییر شکل دائمی ایجاد نمی کنند؛ بنابراین، کماتش خارج از صفحه در مهاربند های ربعی رخ نمی دهد. در سیستم های QELBRF در طول بارگذاری جانبی هیچ گونه کماتش ستون مشاهده نشد و صاف ماندن ستون ها در تمامی مراحل آزمایش، حتی تحت جابه جایی های بزرگ، تأیید گردید. مقدار ضریب اصلاح پاسخ برای سیستم QELBRF برابر با ۶/۷۸ براساس روش حد نهایی می باشد. مقدار ضریب اضافه مقاومت برای سیستم QELBRF برابر با ۱/۷۸ بدست آمد و مقدار ضریب شکل پذیری برای سیستم QELBRF برابر با ۶/۷۹ می باشد.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد انجام شده است. از همکاری و مساعدت متخصصان آزمایشگاه سازه قردانی و



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



تشکر به عمل می‌آید.

مراجع

- [1] A. Ghayour Najafabadi, P. Memarzadeh, T. Zirkian, 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>.
- [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] C.R. Bradley, L.A. Fahnestock, E.M. Hines, J.G. 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] A.D. Sen, C.W. Roeder, D.E. Lehman, J.W. 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>.



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



- [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 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.