

مطالعه آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای وصله‌های مکانیکی

با جوشکاری اصطکاکی دورانی



فریبرز ناطقی الهی
استاد تمام، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی
و مهندسی زلزله



محمد رضا شکرزاده
پژوهشگر پسادکتری
پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

چکیده

در این مطالعه، رفتار لرزه‌ای وصله‌های مکانیکی با استفاده از جوشکاری اصطکاکی دورانی در سازه‌های بتن مسلح به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور ارزیابی عملکرد این وصله‌ها، نمونه‌های مختلفی از میلگردهای رزوه‌ای و ترکیب آن‌ها با جوشکاری اصطکاکی دورانی (RFWTC) تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای آزمایش شدند. نتایج نشان داد که وصله‌های RFWTC، با بهبود توزیع تنش و کاهش تمرکز تنش در ناحیه رزوه، نسبت به نمونه‌های رزوه‌ای معمولی (TC) عملکرد لرزه‌ای بهتری دارند. این وصله‌ها توانستند الزامات استانداردهای بین‌المللی نظیر ACI 318-19 را از لحاظ مقاومت کششی و شکل‌پذیری برآورده کنند و برای استفاده در نواحی بحرانی لرزه‌ای مناسب تشخیص داده شدند. در مقابل، وصله‌های رزوه‌ای معمولی نیز با وجود استحکام کمتر، برای استفاده در نواحی با لرزه‌خیزی کم تا متوسط قابل قبول هستند. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از جوشکاری اصطکاکی دورانی در وصله‌های مکانیکی می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح ایجاد کند.

واژگان کلیدی: رفتار لرزه‌ای، وصله مکانیکی رزوه‌ای، جوش اصطکاکی دورانی، شکل‌پذیر

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

در صنعت ساختمان، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین به منظور افزایش کیفیت سازه‌ها و کاهش هزینه‌های تولید، نه تنها یک نیاز، بلکه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر به شمار می‌رود. یکی از چالش‌های اساسی در ساخت و ساز، اتصال مناسب میلگردها در سازه‌های

بتن مسلح است؛ چرا که اجرای نادرست این اتصالات می‌تواند تاثیر مستقیم و جدی بر عملکرد کلی سازه داشته باشد. نحوه عملکرد وصله‌های مکانیکی به شدت بر رفتار سازه‌های بتن مسلح تأثیرگذار است و عدم اتصال صحیح می‌تواند منجر به ضعف سازه در مقابل نیروهای وارده شود [1-3] بر اساس آیین‌نامه‌ها، دو نوع وصله وجود دارد: وصله

نوع اول که استفاده از آن در نقاط بحرانی سازه‌های بتن مسلح ممنوع است، و وصله نوع دوم که به دلیل قابلیت ایجاد اتصال یکپارچه، در هر بخشی از سازه قابل اجرا است [۴]. روش‌های مختلف وصله کردن میلگردها شامل سه نوع اصلی وصله‌های پوششی، جوشی و مکانیکی می‌باشند که هر کدام دارای نقاط قوت و ضعف خاص خود هستند [۵].

وصله‌های پوششی با مشکلاتی همچون تجمع بیش از حد میلگردها در یک منطقه، عدم امکان استفاده برای میلگردهای با قطر بیش از ۳۶ میلی‌متر، و نیاز به طول‌های زیاد میلگردهای انتظار مواجه هستند. این وصله‌ها تحت بارهای متناوب و چرخه‌ای در محدوده الاستیک قابل اطمینان نیستند، و این عدم اعتماد در میلگردهای قطر بالا مانند قطرهای ۲۵، ۲۸، ۳۲ و ۳۶ میلی‌متر، افزایش می‌یابد [۱]. از آنجایی که این میلگردها اعضای اصلی سازه‌های بتنی را تشکیل می‌دهند، عملکرد ضعیف آن‌ها می‌تواند نگرانی‌های زیادی برای مهندسين و مجریان پروژه ایجاد کند. بر اساس آیین‌نامه ACI 318-19 ، استفاده از این نوع وصله برای میلگردهای با قطر ۳۶ به بالا ممنوع شده است و همچنین در میلگردهایی که تحت کشش هستند و یا در محل‌هایی که احتمال تشکیل مفصل پلاستیک وجود دارد، مجاز نمی‌باشد [۱].

روش جوش سربه‌سر (فورجینگ) نیز به دلیل دقت پایین در کنترل دما و خواص مکانیکی، گزینه‌ای قابل اعتماد به شمار نمی‌آید. علاوه بر این، خطاهای انسانی و محیطی، به ویژه خطاهای ماشین‌آلات،

باعث می‌شوند این روش در شرایط واقعی، نتایج مطلوبی ارائه ندهد. پس از زلزله کوبه در ژاپن، ضعف‌های جدی در عملکرد میلگردهای وصله شده به روش فورجینگ مشاهده شد، به طوری که حتی نظارت دقیق و اجرای آن توسط افراد ماهر نیز نتوانست مانع از بروز مشکلات شود. [6-10]

در روش وصله‌های مکانیکی، کوپلرها نقش کلیدی در اتصال میلگردها به یکدیگر ایفا می‌کنند. این اتصالات را می‌توان بر اساس نحوه انتقال تنش بین میلگردها و کوپلرها به پنج دسته کلی تقسیم‌بندی کرد: کوپلرهای پیچی و پینی، کوپلرهای رزوه‌ای، کوپلرهای دوغابی و کوپلرهای سرد پرس شده [۲]. در این نوع اتصالات، تنش کششی از یک میلگرد به دیگری از طریق کوپلر و اجزای آن منتقل می‌شود [۱۱-۱۳]. از مزایای این روش‌ها می‌توان به نصب سریع، سازگاری با محیط زیست و عملکرد قابل قبول اشاره کرد [۳، ۱۰]. رایج‌ترین نوع وصله مکانیکی، وصله رزوه‌ای است که بزرگ‌ترین چالش آن، احتمال شکست در محل رزوه است [2,3].

بر اساس آیین‌نامه ACI 318 ، وصله‌های مکانیکی به دو نوع تقسیم می‌شوند. در نوع اول، وصله باید حداقل ۱/۲۵ برابر مقاومت تسلیم میلگرد را در کشش و فشار تحمل کند. در نوع دوم، مقاومت وصله باید حداقل برابر ۱/۶ برابر مقاومت تسلیم میلگرد یا ۰/۹۵ برابر مقاومت نهایی میلگرد باشد. وصله‌های نوع اول محدودیت‌های بیشتری در محل استفاده دارند و در مناطق با لرزه‌خیزی پایین در هر نقطه سازه قابل اجرا هستند، اما در مناطق با

لرزه‌خیزی بالا، استفاده از آنها در نزدیکی محل‌های انتظار رفتار غیرخطی یا در نواحی تشکیل مفصل پلاستیک مجاز نیست. وصله‌های نوع دوم با توجه به مقاومت بالاتر، در تمامی نقاط سازه و در هر منطقه لرزه‌ای قابل استفاده هستند.

۲- ضرورت انجام تحقیق

مطالعات انجام‌شده بر روی عملکرد وصله‌های مکانیکی را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد: (۱) از لحاظ شکل و فرم (با یا بدون پوشش بتنی)، (۲) نوع بارگذاری (یکنواخت یا چرخه‌ای)، و (۳) سرعت بارگذاری. به‌طور کلی، نتایج آزمایش‌های پیشین نشان می‌دهد که رفتار تنش-کرنش میلگردهای وصله‌شده مکانیکی با میلگردهای یکپارچه متفاوت است؛ زیرا میلگردهای وصله‌شده مکانیکی نسبت به میلگردهای یکپارچه، توانایی کمتری در تغییر شکل دارند. به عبارت دیگر، میلگردهای یکپارچه قابلیت کشش بیشتری نسبت به میلگردهایی که با وصله‌های مکانیکی به یکدیگر متصل شده‌اند، دارند. ایجاد کشش در میلگرد، منجر به بروز تنش برشی در مقطع می‌شود و از آنجا که در ناحیه رزوه قرار دارد و ایجاد رزوه به روش‌های سنتی (براده‌برداری یا رولینگ) منجر به کاهش مقطع میلگرد می‌شود، این موضوع سبب شکل‌گیری ناحیه‌ای با مقاومت کمتر و مستعد شکست می‌گردد. بررسی‌های انجام‌شده در زمینه شکست رزوه‌ها در وصله‌های مکانیکی پیچی محدود بوده و عمده‌ترین مشکل این وصله‌ها، شکست در ناحیه رزوه است. روش‌های معمول رزوه‌زنی در وصله‌های مکانیکی، مانند

براده‌برداری یا رولینگ، باعث کاهش قطر میلگرد در محل رزوه شده و در نتیجه مقاومت میلگرد کاهش می‌یابد. در آزمایش‌های رفت و برگشتی، میلگرد در ناحیه رزوه بیشتر مستعد شکست است. به‌منظور دستیابی به عملکرد مناسب لرزه‌ای برای وصله‌های مکانیکی، نیاز به انجام آزمایش‌های رفت و برگشتی بر روی اعضای بتن مسلح است. بنابراین، برای انتخاب بهینه‌ترین روش وصله، ارزیابی و بهبود نواحی مستعد شکست در طول اعضای بتن مسلح، داشتن اطلاعات کافی از عملکرد انواع وصله‌های میلگرد در سازه‌های بتن مسلح و تحلیل مناسب نوع وصله ضروری است. [۱۴، ۱۵].

در این مقاله، روشی جدید با اصلاح فرآیند ساخت وصله مکانیکی و ترکیب آن با جوشکاری اصطکاکی دوار معرفی شده است که می‌تواند در نواحی بحرانی مانند مفاصل پلاستیک اعضای شکل‌پذیر در مناطق با لرزه‌خیزی بالا به کار رود. در روش پیشنهادی، ناحیه وصله بزرگتر شده و توانایی تحمل بار بیشتری را دارا می‌باشد. در این پژوهش، ۳۶ نمونه مختلف (شامل سه نمونه تکراری از هر نوع) مورد بررسی قرار گرفت. این نمونه‌ها شامل وصله‌های مکانیکی رزوه‌ای استاندارد (TC)، وصله‌های مکانیکی رزوه‌ای به همراه جوش اصطکاکی دوار (RFWTC) و نمونه‌های مرجع یکپارچه (NS) با قطر میلگرد ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر بودند که تحت آزمایش چرخه‌ای تک‌محوری، با و بدون پوشش بتنی، قرار گرفتند. در این آزمایش‌ها، پارامترهایی چون حساسیت به قطر میلگرد، مقاومت، شکل‌پذیری، جذب انرژی و

عملکرد شکست مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین، معیارهای لرزه‌ای مربوط به وصله‌های میلگرد بر اساس استانداردهای مختلف طراحی، برای استفاده عملی در این مقاله ارائه شده است.

۳- معرفی نمونه‌ها و متغیرهای آزمایش

در تمامی نمونه‌های آزمایش، نوع میلگرد، بتن مصرفی و ابعاد نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. تنها متغیرهای مورد بررسی، نوع وصله‌های مکانیکی و قطر میلگردها هستند. در این پژوهش، از میلگردهای فولادی نوع AIII با قطرهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است که توسط کارخانه فولاد یزد تولید شده‌اند. کوپلرهای مورد استفاده نیز ساخت شرکت سه‌هند بوده و از فولادی با استاندارد DIN 1.1191 تولید شده‌اند. سختی وصله‌های مکانیکی به کاررفته در این آزمایش برابر یا بیشتر از سختی میلگردهای معمولی است و از این رو، استفاده از آنها برای اتصال میلگردها به یکدیگر، طبق استانداردها و دستورالعمل‌های موجود، مجاز است [10].

۳-۱ نمونه‌های وصله مکانیکی با و بدون غلاف بتنی

در این پژوهش، سه نوع نمونه شامل دو نوع وصله مکانیکی فشاری-کششی و یک نمونه مرجع یکپارچه ساخته و بررسی شده‌اند: وصله مکانیکی رزوه‌ای (TC)، اتصال جوشکاری اصطکاکی دورانی همراه با وصله مکانیکی رزوه‌ای (RFWTC) و نمونه‌های مرجع بدون وصله (NS). مطابق شکل (۱)، در هر نمونه از میلگردهایی با قطرهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. جزئیات کامل نمونه‌ها در شکل (۱) و جدول (۱) آمده است.

شناسه هر نمونه به سه بخش تقسیم می‌شود:

بخش اول نشان می‌دهد که نمونه بدون غلاف بتن (A) یا با غلاف بتن (C) است.

بخش دوم نوع وصله مکانیکی را مشخص می‌کند: نمونه بدون وصله مکانیکی با (NS)، نمونه دارای وصله مکانیکی رزوه‌ای با (TC)، و نمونه دارای اتصال جوشکاری اصطکاکی دورانی به همراه وصله مکانیکی رزوه‌ای با (RFWTC) مشخص شده است.

بخش سوم قطر میلگرد و پروتکل بارگذاری را تعیین می‌کند: بارگذاری کششی با (M) و بارگذاری رفت و برگشتی با (C) مشخص شده است. در این پروتکل، بارگذاری چرخه‌ای برای نمونه‌های بدون غلاف بتنی با (C1) و برای نمونه‌های دارای غلاف بتنی با (C2) نشان داده شده است (جدول ۲).

در روش TC، رزوه‌ها به صورت نورد سرد ایجاد می‌شوند و این فرآیند توسط دستگاه رولینگ رزوه‌زنی بر روی میلگردها انجام می‌شود. در روش جوشکاری اصطکاکی دورانی (RFWTC)، یک بخش به طول پنج برابر قطر میلگرد، به صورت جوش اصطکاکی به میلگرد اصلی متصل شده و سپس رزوه‌زنی می‌شود (شکل ۲). طول نمونه‌های بدون غلاف بتنی ۷۰۰ میلی‌متر است. برای نمونه‌های دارای غلاف بتنی، یک قاب پلاستیکی عمودی، همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده، استفاده شد و وضعیت عمودی قاب با پایه‌های چوبی تثبیت گردید. طول کل این نمونه‌ها ۷۰۰ میلی‌متر بود که ۶۰۰ میلی‌متر از آن داخل غلاف بتنی قرار گرفت. قطر خارجی غلاف بتنی برای نمونه‌های میلگرد با قطر ۱۶ میلی‌متر برابر ۱۲۱ میلی‌متر ($D_c=121\text{mm}$) و برای نمونه‌های میلگرد با قطر

۲۰ میلی‌متر برابر ۱۵۱ میلی‌متر ($D_c=151\text{mm}$) بود (جدول ۱).

در این پژوهش، از روشی به‌منظور افزایش سطح رزوه‌کاری استفاده شده است. برای این منظور، دو روش مورد سرد و جوشکاری اصطکاکی دورانی به‌کار رفته است تا ناحیه رزوه‌کاری بزرگ‌تر شود و مقاومت بهتری در اتصال میلگردها ایجاد کند.

۳-۱-۱ روش جوشکاری اصطکاکی

یکی از اولین و رایج‌ترین فرآیندهای جوشکاری اصطکاکی است که به‌صورت تجاری مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، یکی از قطعات استوانه‌ای در جای خود ثابت نگه داشته می‌شود و قطعه دیگر با سرعت بالا حول محور خود می‌چرخد. این چرخش باعث می‌شود که در اثر اصطکاک، مواد در محل اتصال دو قطعه نرم شده و در نهایت، پس از اعمال فشار، قطعات به یکدیگر جوش بخورند. از مزایای این روش، امکان اتصال فلزات هم‌جنس و غیرهم‌جنس است. در این فرآیند، گرما از طریق چرخش سریع ایجاد می‌شود و ماده نرم شده از محل اتصال به بیرون هدایت می‌شود. سپس، با متوقف کردن چرخش و اعمال فشار بیشتر قبل از کاهش دما، یک اتصال قوی در فاز جامد شکل می‌گیرد که مشکلات جوشکاری ذوبی را ندارد [۱۶-۱۹].

در روش جوشکاری اصطکاکی دورانی برای میلگردها، میلگردی با قطر بزرگ‌تر ابتدا رزوه

می‌شود و سپس از طریق این روش به میلگرد اصلی متصل می‌گردد (شکل ۲). این وصله‌های رزوه‌ای می‌توانند هم در کارخانه و هم در محل پروژه انجام شوند. به‌طور معمول، در ساختمان‌های متعارف، حدود ۵ تا ۱۰ درصد از میلگردها به دلیل محدودیت استفاده در ناحیه مفصل پلاستیک یا نیاز به اجرای وصله به‌صورت یک در میان، به عنوان پرت در نظر گرفته می‌شوند. در این روش، تنها یک دستگاه جوش اصطکاکی دورانی به تجهیزات موجود اضافه می‌شود که ابعاد و عملکرد آن مشابه دستگاه‌های رزوه‌زنی است. هزینه انجام هر جوش تقریباً برابر با هزینه رزوه‌زنی است و این روش به راحتی در کارگاه‌ها قابل اجراست. استفاده از این روش برای میلگردهای با قطر بزرگ‌تر به این صورت است که می‌توان از میلگردهای پرت کارگاهی استفاده کرد. با استفاده از این تکنیک، هزینه‌های مربوط به خرید یک کوپلر بزرگ‌تر و دو مرحله جوشکاری اصطکاکی دورانی به پروژه تحمیل می‌شود. با این حال، کاهش پرت میلگردهای کارگاهی به حداقل می‌رسد و علاوه بر افزایش حداقل ۲۰ درصدی سرعت اجرا، عملکرد سازه در برابر زلزله بهبود یافته و هزینه‌های جانبی نیز کاهش می‌یابد. این مزایا سبب می‌شود که روش پیشنهادی به عنوان یک راهکار اقتصادی و کارآمد در پروژه‌های ساختمانی مورد توجه قرار گیرد [10].

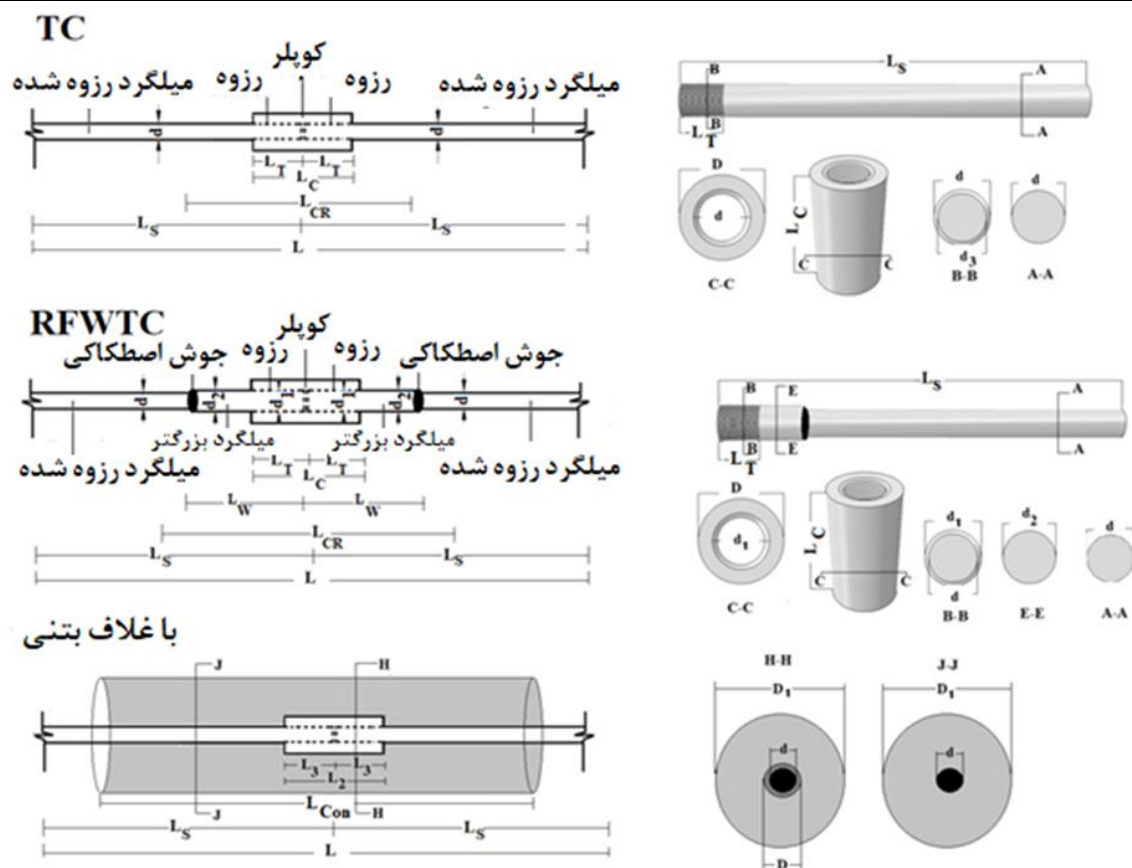
جدول ۱: جزئیات نمونه‌ها*

نمونه	b_d	L	sL	cL	T_L	wL	$ConL$	d	d'	d	D	D
مرجع یکپارچه (NS)	۱۶	۷۰۰	-	-	-	-	۶۰۰	-	-	-	-	-
وصله مکانیکی رزوه‌ای (TC)	۲۰	۷۰۰	۳۵۰	۵۰	۲۵	-	۶۰۰	۲۰	-	۱۶	۲۳	۱۵۱
اتصال جوشکاری اصطکاکی دورانی با وصله مکانیکی رزوه‌ای (RFWTC)	۲۰	۷۰۰	۳۶۰	۵۴	۲۷	۱۰۰	۶۰۰	۲۲	۲۲	۱۸	۲۸	۱۵۱

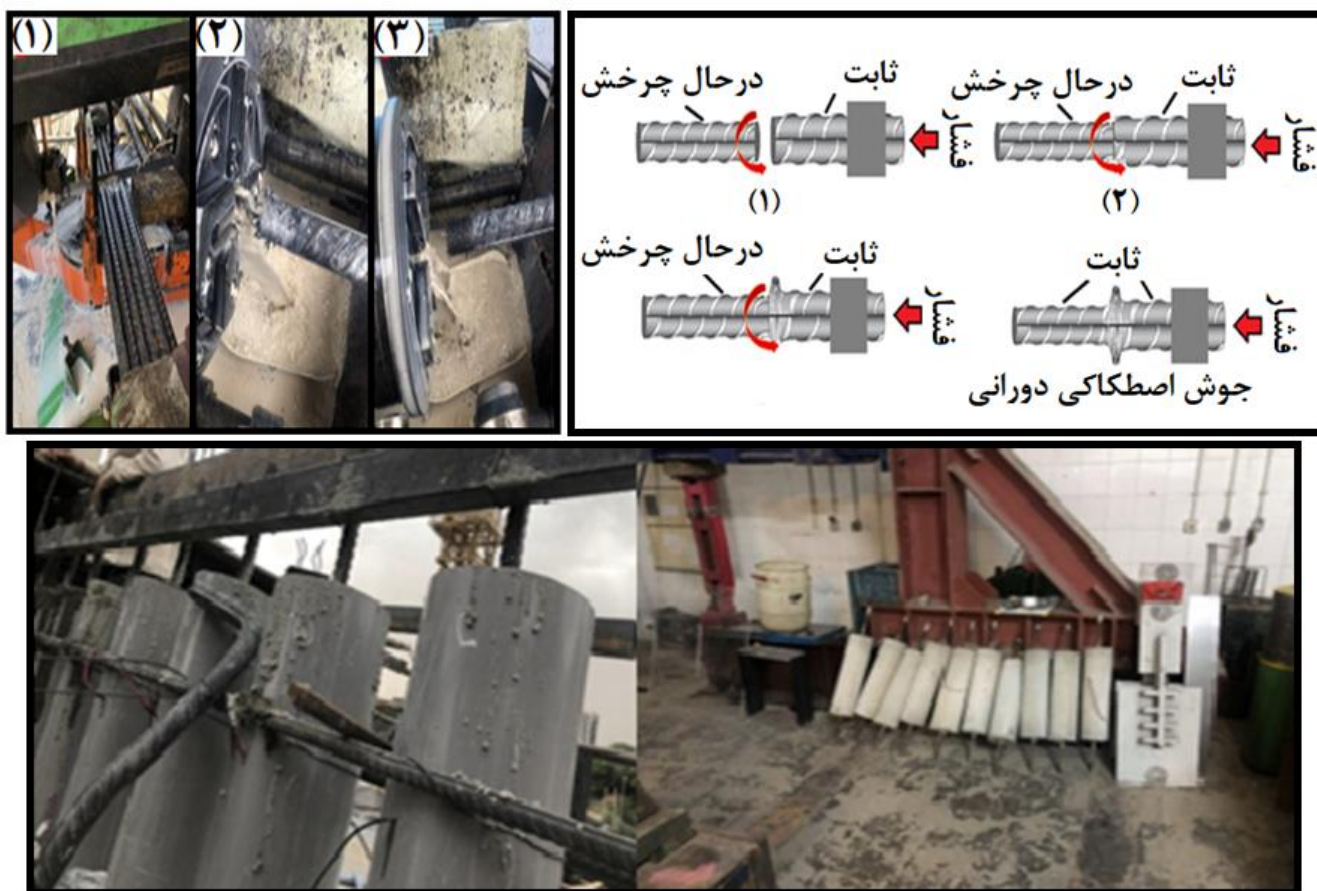
*ابعاد به میلیمتر است.

جدول ۲: شناسه نمونه‌ها

شناسه نمونه	شناسه نمونه	نمونه
با غلاف بتنی	بدون غلاف بتنی	مرجع یکپارچه (NS)
$\sqrt{C16-NS-C}$	$\sqrt{C16-NS-A}$	
$\sqrt{C20-NS-C}$	$\sqrt{C20-NS-A}$	
$\sqrt{C16-TC-C}$	$\sqrt{C16-TC-A}$	وصله مکانیکی رزوه‌ای (TC)
$\sqrt{C20-TC-C}$	$\sqrt{C20-TC-A}$	
$\sqrt{C16-RFWTC-C}$	$\sqrt{C16-RFWTC-A}$	اتصال جوشکاری اصطکاکی دورانی با وصله مکانیکی رزوه‌ای (RFWTC)
$\sqrt{C20-RFWTC-C}$	$\sqrt{C20-RFWTC-A}$	



شکل ۱: جزئیات نمونه‌های TC و RFWTC بدون غلاف بتن و با غلاف بتنی.



شکل ۲: فرایند ساخت نمونه‌های

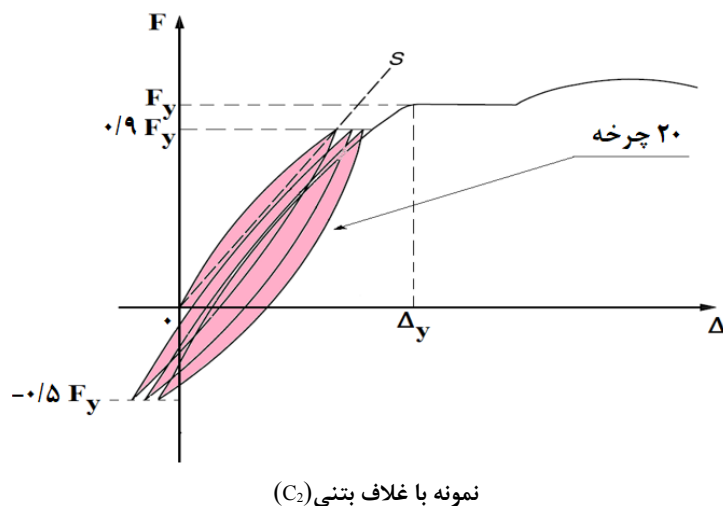
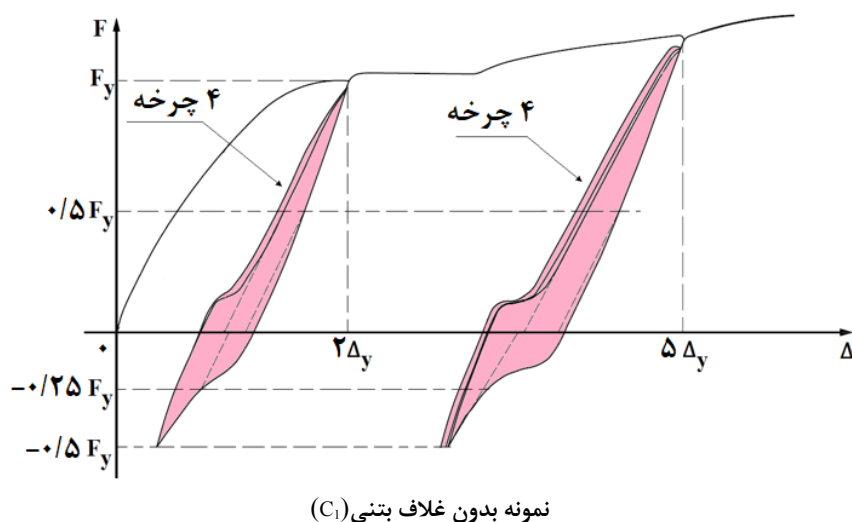
۲-۳ دستورالعمل بارگذاری برای وصله میلگرد مکانیکی پیشنهادی

دستگاه تست استفاده شده در این تحقیق ساخت کارخانه Roell Amsler آلمان است و قابلیت اعمال نیروهای کششی و فشاری به نمونه‌های گرد و تخت را به صورت استاتیکی و دینامیکی دارد. در حالت استاتیک، این دستگاه می‌تواند تا ۶۰۰ کیلونیوتن نیرو و در حالت دینامیک تا ۵۰۰ کیلونیوتن نیرو اعمال کند. این دستگاه دارای دو فک است؛ فک بالایی به عنوان تکیه‌گاه و فک پایینی به عنوان محرک عمل می‌کند. فاصله بین دو فک بالا و پایین بردن فک بالایی تنظیم می‌شود و فک پایینی

نیز قابلیت جابه‌جایی تا ۳۰ سانتی‌متر را دارد. دستگاه توسط کنترل‌کننده دیجیتال ۹۶۰۰ که بین دستگاه و کامپیوتر قرار دارد، مدیریت می‌شود. این کنترل‌کننده، کنترل دقیق فک پایین را به دو صورت کنترل جابه‌جایی و کنترل نیرو انجام می‌دهد و می‌تواند سیگنال‌های جابه‌جایی (Stroke) و نیرو (Load) را از مبدل‌های نصب‌شده روی Actuator نمونه‌برداری کرده و به کامپیوتر منتقل کند [۲۰]. در این تحقیق، وصله مکانیکی میلگردها تحت دو نوع بارگذاری کششی تک‌محوری چرخه‌ای تا شکست، مورد آزمایش قرار گرفتند و در مجموع سه نمونه آزمایش شدند. برای بررسی اینکه آیا یک کوپلر برای استفاده در نواحی مفصل پلاستیک

خارج از آن، از پروتکل بارگذاری استاندارد ISO/DIS 15835 استفاده شد (شکل ۳) [۲۱].

اعضای انعطاف‌پذیر تحت بارگذاری زلزله مناسب است، تحلیل رفتار چرخه‌ای آن ضروری است. برای بارگذاری چرخه‌ای نمونه‌های داخل غلاف بتنی و



شکل ۳: تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای [۳۶].

حداقل مقاومت تسلیم کششی برای میلگردهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متری به ترتیب ۵۱۱ و ۵۱۰ مگاپاسکال و مقاومت نهایی آنها ۶۱۸ و ۶۵۴ مگاپاسکال بود (جدول ۳ و شکل ۴). حداقل کرنش نهایی (ϵ_u) برای هر دو قطر، ۰٫۰۹۰ اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که سیستم RFWTC تحت بارگذاری‌های یکنواخت و چرخه‌ای عملکردی مشابه

۴- مشاهدات، تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۴-۱ نمونه بدون غلاف بتنی

در این پژوهش، ۱۸ نمونه وصله مکانیکی میلگرد و ۶ نمونه مرجع یکپارچه با قطرهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر تحت بارگذاری چرخه‌ای C1 بررسی شدند. برنامه آزمایشی شامل دو نوع کوپلر مختلف و RFWTC و TC) نمونه‌های مرجع (NS) بود.

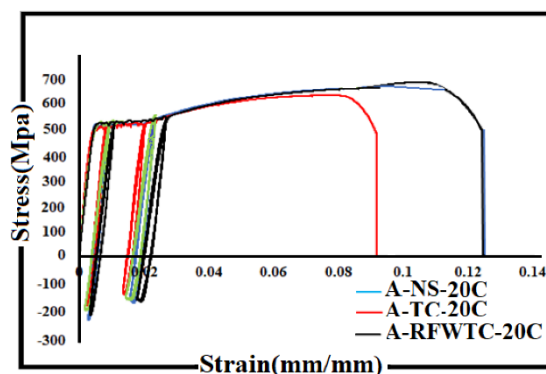
نمونه‌های یکپارچه دارد. در حالی که در نمونه TC کاهش ϵ_u در ناحیه اتصال TC ممکن است به دلیل تمرکز تنش باشد که منجر به شکست در محل وصله می‌شود. این مسئله در اعضای خمشی و نقاط با گرا دیان لنگر بالا، به کاهش شکل‌پذیری و افزایش خطر شکست منجر خواهد شد. توجه به این نکات در طراحی و تحلیل سازه‌ها برای بهبود دوام و عملکرد آنها ضروری است.

نمونه‌های TC به دلیل کاهش سطح مقطع در ناحیه رزوه، دچار شکست زودرس شدند (شکل ۵).

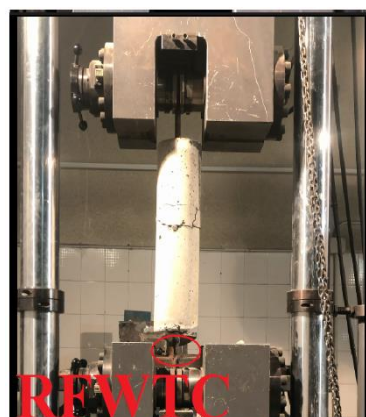
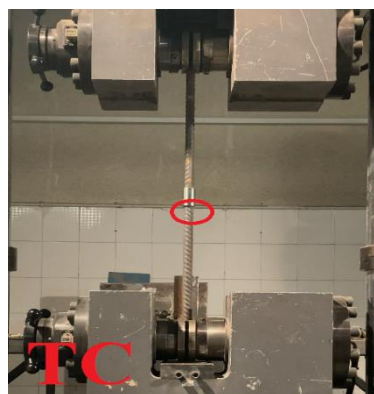
جدول ۳: نتایج آزمایش نمونه بدون غلاف بتنی*

Ry (%)	Ru (%)	μ (ϵ_u / ϵ_y)	μ_ϵ ($\epsilon_{usp} / \epsilon_{ub}$)	ϵ_u (mm/mm)	ϵ_y (mm/mm)	f_u (MPa)	f_y (MPa)	F_u (kN)	F_y (kN)	میانگین سه تکرار نمونه
-	-	۳۰/۰۰	۱	0.132 ± 0.002^{de}	0.044 ± 0.0005^{de}	$628 \pm 1/3^{de}$	$524 \pm 8/5^d$	123 ± 0.5^{de}	104 ± 0.5^{df}	C16-NS-A
۹۸/۴۷	۱۱۷/۹۴	۲۳/۶۸	۰/۶۸	0.090 ± 0.003^e	0.038 ± 0.0002^e	$618 \pm 3/8^e$	$516 \pm 6/4^d$	121 ± 0.8^e	$102 \pm 3/1^d$	C16-TC-A
۱۰۰/۰۰	۱۲۵/۲۰	۲۹/۶۰	۰/۹۹	0.130 ± 0.006^d	0.044 ± 0.00018^d	$656 \pm 17/8^d$	524 ± 11^d	$129 \pm 3/6^d$	$112 \pm 3/7^g$	C16-RFWTC-A
-	-	۲۷/۸۰	۱	0.128 ± 0.003^j	0.046 ± 0.00016^j	$686 \pm 2/9^{jl}$	$514 \pm 5/4^j$	196 ± 0.8^j	$161 \pm 1/3^j$	C20-NS-A
۹۲/۲۲	۱۲۴/۵۰	۲۲/۵۰	۰/۷۰	0.090 ± 0.003^k	0.040 ± 0.00020^k	$641 \pm 3/6^k$	$510 \pm 7/1^j$	$187 \pm 2/1^k$	$160 \pm 2/1^j$	C20-TC-A
۱۰۵/۰۵	۱۳۴/۸۲	۲۸/۰۰	۰/۹۹	0.126 ± 0.003^j	0.045 ± 0.00026^{jk}	$693 \pm 6/0^l$	$540 \pm 7/0^k$	$198 \pm 1/7^j$	$168 \pm 2/6^k$	C20-RFWTC-A

*حروف مختلف در یک ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری است ($p < 0.05$)



شکل ۴: نمودار σ - ϵ نمونه‌های بدون غلاف بتنی (NS, TC, RFWTC) تحت بارگذاری چرخه‌ای



شکل ۵: ناحیه شکست نمونه‌های (NS, TC, RFWTC) تحت بارگذاری چرخه‌ای (میلگرد ۱۶ و ۲۰ میلیمتر)

۲-۴ نمونه با غلاف بتنی

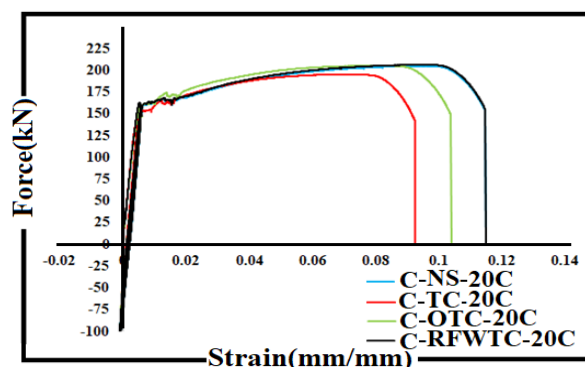
در این بخش از مطالعه، ۱۸ نمونه وصله مکانیکی میلگرد ۶ و ۲۰ میلی‌متر، تحت بارگذاری چرخه‌ای (NS) و با قطرهای ۱۶ و ۲۰ میلی‌متر، درون غلاف بتنی مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در نمونه‌های با غلاف بتنی، مقدار کرنش نهایی (ε_u) بسته به نوع وصله و بارگذاری کاهش یافته است. همچنین، آزمایش‌های تک‌محوری نشان دادند که نمونه‌های دارای غلاف بتنی، کرنش کمتری نسبت به نمونه‌های بدون غلاف دارند، که این امر به عنوان یک حد پایین محافظتی برای عملکرد وصله‌ها در نظر گرفته می‌شود. در برخی موارد، عملکرد وصله‌ها در نمونه‌های با غلاف بتنی کمتر از نمونه‌های بدون غلاف است، به این معنی که

استفاده از حد پایین محافظتی مبتنی بر نمونه‌های بدون غلاف ممکن است برای این نوع وصله‌ها کافی نباشد و خطر شکست و خرابی وجود داشته باشد. این یافته‌ها اهمیت توجه به محدودیت‌های عملکردی در هنگام استفاده از وصله‌های مکانیکی در اعضای دارای غلاف بتنی را نشان می‌دهد (جدول (۴) و شکل (۵)). عملکرد وصله در حالت بدون غلاف بتنی به عنوان یک حد پایین محافظتی محسوب می‌شود، اما نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که عملکرد اتصالات در غلاف بتنی کمتر از حالت بدون غلاف بتنی است، به این معنی که با استفاده از حد پایین محافظتی مبتنی بر عملکرد در حالت بدون غلاف بتنی، ممکن است وصله در با غلاف بتنی به درستی عمل نکنند و خطر شکست و خرابی وجود داشته باشد [۲۲].

جدول ۴: نتایج آزمایش نمونه با غلاف میلگرد*

Ry (%)	Ru (%)	μ (ϵ_u / ϵ_y)	μ_ϵ ($\epsilon_{usp} / \epsilon_{ub}$)	ϵ_u (mm/mm)	ϵ_y (mm/mm)	f_u (MPa)	f_y (MPa)	F_u (kN)	F_y (kN)	Specimen Average
-	-	۲۱/۸۰	۱	0.098 ± 0.003^e	0.045 ± 0.0008^e	630 ± 41^e	$538 \pm 3/3^e$	$125 \pm 0/8^e$	$105 \pm 0/5^e$	C۱۶-NS-C
۹۶/۰۹	۱۱۵/۰۶	۲۳/۳۰	۰/۹۲	0.091 ± 0.003^f	0.039 ± 0.00021^f	$619 \pm 0/5^e$	$517 \pm 6/4^f$	$120 \pm 0/8^f$	$104 \pm 1/4^e$	C۱۶-TC-C
۹۷/۰۲	۱۲۵/۰۹	۲۴/۳۰	۱/۰۴	0.102 ± 0.003^e	0.042 ± 0.00012^f	$673 \pm 1/0^f$	$522 \pm 1/4^f$	$129 \pm 1/4^g$	$112 \pm 0/5^g$	-RFWTC-C C۱۶
-	-	۰۲/۳۰	۱	0.110 ± 0.003^j	0.048 ± 0.00013^{jk}	$688 \pm 1/9^{jl}$	$521 \pm 3/3^j$	$198 \pm 0/8^j$	$164 \pm 1/4^{jk}$	C۲۰-NS-C
۹۹/۰۴	۱۲۴/۰۰	۲۰/۷۵	۰/۷۳	0.081 ± 0.003^k	0.039 ± 0.00013^l	$649 \pm 1/0^k$	$516 \pm 0/9^j$	$184 \pm 1/4^k$	$161 \pm 1/9^j$	C۲۰-TC-C
۱۰۳/۴۶	۱۳۳/۰۱	۲۵/۲۰	۱/۰۱	0.111 ± 0.001^m	0.044 ± 0.00027^{il}	$693 \pm 6/1^l$	$539 \pm 6/9^l$	$199 \pm 1/7^l$	$168 \pm 2/7^l$	-RFWTC-A C۲۰

*حروف مختلف در یک ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری است ($p < 0.05$)



شکل ۵: نمودار F- ϵ نمونه‌های با غلاف بتنی (NS, TC, RFWTC) تحت بارگذاری چرخه‌ای

برآورده کند. در مقابل، اگر این نسبت کمتر از ۰٫۶۵ باشد، میلگرد وصله‌شده برای اعضای که در معرض تغییر شکل‌های غیرالاستیک قرار دارند، مناسب نخواهد بود.

همچنین، شکل‌پذیری میلگرد وصله‌شده (μ_{sp}) باید برابر یا بیشتر از میلگرد یکپارچه (μ_b) باشد. برای اجزای سازه‌ای که تحت تنش‌های لرزه‌ای هستند، این نسبت باید حداقل برابر ۱٫۰ باشد. نتایج نشان می‌دهد که نمونه RFWTC به دلیل شکل‌پذیری مشابه با میلگرد یکپارچه، برای استفاده در مناطق لرزه‌ای مناسب است. در حالی که

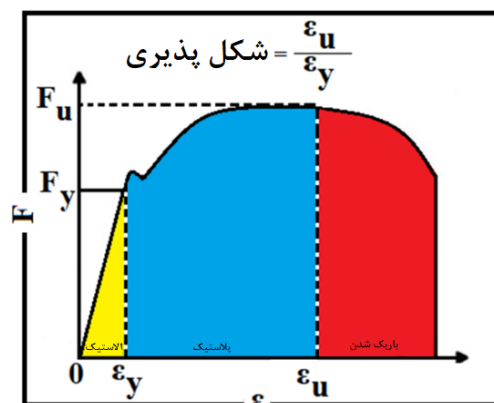
۳-۴ شکل‌پذیری نمونه‌های با و بدون غلاف بتنی

μ و μ_ϵ هر نمونه در جدول (۳) با استفاده از شکل (۶) و معادله (۱) تعیین شد. لازم به ذکر است که می‌توان از نسبت کرنش نهایی به کرنش تسلیم برای محاسبه نسبت شکل‌پذیری استفاده کرد [۲۲].

$$(1) \quad \mu_\epsilon = \frac{\epsilon_{usp}}{\epsilon_{ub}} = \frac{\text{کرنش نهایی میلگرد وصله شده}}{\text{کرنش نهایی میلگرد یکپارچه}}$$

نسبت شکل‌پذیری بیشتر از ۰٫۶۵ می‌تواند الزامات استاندارد های EC2 و EC8 را برای شکل‌پذیری متوسط

میلگردهای وصله‌شده با TC برای مقاومت در برابر نیروهای لرزه‌ای کم تا متوسط می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۶: تعریف کرنش تسلیم و کرنش نهایی [۲۳، ۲۴]

۴-۴ ارزیابی رفتار مکانیکی وصل مکانیکی

بررسی‌ها نشان داد که مکانیزم اتصال میلگرد رزوه‌شده و کوپلر دارای استحکام قفل‌شوندگی کافی برای جلوگیری از جابجایی لغزشی است. قطر مناسب رزوه نقش مهمی در تضمین عملکرد مطلوب وصله مکانیکی دارد و سطح مقطع بزرگ‌تر از میلگرد می‌تواند به توزیع یکنواخت تنش در سطح اتصال کمک کند. استانداردهای ACI 318-19، ACI 439، AC-133 و ISO 15835-Part 1 & 2، معیارهای مورد نیاز برای استحکام و عملکرد این اتصالات را تعیین کرده‌اند.

طبق استانداردهای BS-8110 و ACI 318-19، مقاومت کششی نهایی اتصالات مکانیکی باید حداقل ۱٫۲۵ برابر استحکام تسلیم میلگرد باشد. نسبت مقاومت نهایی (Ru) برای نمونه‌های RFWTC در این مطالعه بالاتر از ۱۲۵ درصد است و بنابراین الزامات ACI 318-19 را برآورده می‌کند. نمونه‌های TC نیز با وجود عملکرد پایین‌تر نسبت به RFWTC، حداقل‌های استاندارد را دارند.

در مقایسه با سایر نمونه‌ها، RFWTC از نظر استحکام، شکل‌پذیری، اتلاف انرژی و حالت خرابی عملکرد بهتری

دارد و برای استفاده در مناطق با لرزه‌خیزی بالا ایده‌آل است. نمونه‌های TC نیز با داشتن عملکرد قابل قبول، می‌توانند در برابر زلزله‌های با شدت کم تا متوسط مقاومت کنند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، عملکرد مکانیکی وصله‌های مکانیکی رزوه‌ای و جوشکاری اصطکاکی دورانی در مقایسه با میلگردهای یکپارچه بررسی شد. نتایج نشان داد که وصله مکانیکی رزوه‌ای (TC) و وصله ترکیبی جوشکاری اصطکاکی دورانی با رزوه‌ای (RFWTC) هر دو الزامات استانداردهای بین‌المللی نظیر ACI 318-19 و ISO 15835 را از لحاظ استحکام و شکل‌پذیری برآورده می‌کنند. نمونه‌های RFWTC، به دلیل افزایش سطح مقطع و توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها در محل رزوه، بالاترین مقاومت و شکل‌پذیری را در بین نمونه‌های آزمایش‌شده نشان دادند و برای استفاده در نواحی بحرانی لرزه‌ای پیشنهاد می‌شوند. همچنین، این نوع وصله به دلیل کاهش تمرکز تنش‌ها و بهبود اتصال در ناحیه رزوه، عملکرد بهتری در برابر بارهای لرزه‌ای دارد و به عنوان جایگزینی مطمئن برای میلگردهای یکپارچه قابل استفاده است.

در مقابل، نمونه‌های TC نیز با وجود عملکرد پایین‌تر نسبت به RFWTC، الزامات لازم برای استفاده در نواحی با لرزه‌خیزی کم تا متوسط را دارا هستند. هرچند که در این نمونه‌ها به دلیل کاهش سطح مقطع در محل رزوه، تمرکز تنش‌ها بیشتر بوده و در نتیجه مقاومت کمتری نسبت به نمونه‌های RFWTC از خود نشان می‌دهند.

به‌طور کلی، استفاده از وصله‌های مکانیکی رزوه‌ای و جوشکاری اصطکاکی دورانی، به‌ویژه در شرایطی که امکان استفاده از میلگردهای یکپارچه وجود ندارد، می‌تواند بهبود چشمگیری در عملکرد سازه‌های بتن مسلح، به‌ویژه در

۶-قدر دانی

بدینوسیله از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله بابت حمایت مالی از پروژه و فراهم نمودن کلیه امکانات پژوهشی تشکر و قدردانی بعمل می‌آید.

نواحی لرزه‌خیز، ایجاد کند. بنابراین، توصیه می‌شود از نمونه‌های RFWTC در پروژه‌های با خطر لرزه‌ای بالا استفاده شود تا علاوه بر کاهش پرت مصالح، استحکام و شکل‌پذیری سازه به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد.

۷-منابع

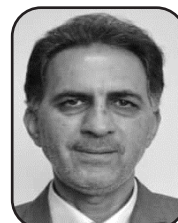
- [1] Nateghi-Alahi F, Shokrzadeh MR. Behavior considerations for mechanical rebar couplers. *Behavior considerations for mechanical rebar couplers*, University of Tokyo: 2019, p. 30–41.
- [2] Shokrzadeh MR, Nateghi Allahe F, Mansoori , Mohammad Reza, Javadi P, Mansoori, MR, Javadi P. Failure area evaluation of the coupler with threaded bar: Experimental and Numerical study. *International Journal of Advanced Structural Engineering* 2022;12:531–43. <https://doi.org/10.1007/IJASE.2022.692294>.
- [3] Shokrzadeh MR, Nateghi-Alahi F, Mansoori MR, Javadi P. The improvement of the threaded-based mechanical splice by modifying the threaded system: Study of techniques cold rolling and rotating friction welding. *Journal of Building Engineering* 2023;80:107964. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107964>.
- [4] ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary 2019. <https://doi.org/10.14359/51716937>.
- [5] Shokrzadeh MR, Nateghi-Alahi F. Experimental study of seismic behavior and modification of the failure region of mechanical bar splices. *Sharif Journal of Civil Engineering* 2025. <https://doi.org/10.24200/J30.2024.63880.3292>.
- [6] Abé M, Shimamura M. Performance of railway bridges during the 2011 Tōhoku earthquake. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 2014;28:13–23. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000379](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000379).
- [7] Saito T, Yabe Y, Fujimori T. An ultrasonic testing method for gas pressure welded joints of reinforcing steel bars. *Ultrasonics* 1985. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(85\)90060-5](https://doi.org/10.1016/0041-624X(85)90060-5).
- [8] Yamamoto RI, Fukada Y, Tatsumi M, Ueyama K. New quality inspection method for gas pressure welds. *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute) (Japan)* 2002. <https://doi.org/10.2219/rtriqr.43.7>.
- [9] Shokrzadeh M, Aziminejad A, Sarvghadmoghaddam A. Hysteretic Behavior of Concrete Connections Strengthened by X-Shape FRP Strips. *Analysis of Structure and Earthquake* 2016;12:29–40.
- [10] Shokrzadeh MR. Experimental study of seismic behavior and modification of the failure region of mechanical bar splices in reinforced concrete vertical elements. *Islamic Azad University Science and Research Branch*, 2024.
- [11] Dabiri H, Kheyroddin A, Faramarzi A. Predicting tensile strength of spliced and non-spliced steel bars using machine learning- and regression-based methods. *Construction and Building Materials* 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126835>.
- [12] Sharbatdar MK, Jafaria OM, Karimib MS. Experimental evaluation of splicing of longitudinal bars with forging welding in flexural reinforced concrete beams. *Advances in Concrete Construction* 2018. <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.5.509>.
- [13] Bompa D V., Elghazouli AY. Inelastic cyclic behaviour of RC members incorporating threaded

- reinforcement couplers. *Engineering Structures* 2019;180:468–83. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.053>.
- [14] Ghayeb HH, Razak HA, Sulong NHR, Mo KH, Abutaha F, Gordan M. Performance of mechanical steel bar splices using grouted couplers under uniaxial tension. *Journal of Building Engineering* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101892>.
- [15] Henin E, Morcous G. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction. *Engineering Structures* 2015;83:154–62. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.045>.
- [16] Seshu Kumar A, Abdul Khadeer S, Rajinikanth V, Pahari S, Ravi Kumar B. Evaluation of bond interface characteristics of rotary friction welded carbon steel to low alloy steel pipe joints. *Materials Science and Engineering A* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141844>.
- [17] Li W, Wang F. Modeling of continuous drive friction welding of mild steel. *Materials Science and Engineering A* 2011. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.001>.
- [18] Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies. *Control of Welding Distortion in Thin-Plate Fabrication*, 2014. <https://doi.org/10.1016/b978-0-85709-047-8.50016-9>.
- [19] Kuscü H, Becenen I, Sahin M. Evaluation of temperature and properties at interface of AISI 1040 steels joined by friction welding. *Assembly Automation* 2008. <https://doi.org/10.1108/01445150810904468>.
- [20] Structural Engineering Lab. - International Institute of Earthquake Engineering and Seismology n.d. <http://www.iiees.ac.ir/en/structural-laboratory/> (accessed November 28, 2021).
- [21] ISO/DIS 15835. *Steel for the Reinforcement of Concrete - Reinforcement Couplers for Mechanical Splices of Bars (Parts 1 to 3)*. International Organizationa for Standardization, Geneva, Switzerland; 2018. n.d.
- [22] Bompa D V., Elghazouli AY. Monotonic and cyclic performance of threaded reinforcement splices. *Structures* 2018;16:358–72. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.11.009>.
- [23] Shokrzadeh MR, Nateghi-Alahi F. Evaluation of hybrid NSM-CFRP technical bars and FRP sheets for seismic rehabilitation of a concrete bridge pier. *Bridge Structures* 2022;18:75–88. <https://doi.org/10.3233/BRS-290180>.
- [24] Shokrzadeh MR, Aziminejad A, Moghaddam AS. Evaluation of various FRP strengthening configurations for RC beam-column joints. *Bridge Structures* 2024;Preprint:1–21. <https://doi.org/10.3233/BRS-240223>.

بهبود رفتار خمشی تیرهای بتنی مسلح شده با میلگردهای هیبریدی کامپوزیتی FRP و فولادی با جایگزینی بتن HPFRCC بجای بتن معمولی



محمد رضا طالبیان شریف
کارشناس ارشد سازه، دانشگاه سمنان



محمد کاظم شریبندار
استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
عضو انجمن بتن ایران

چکیده

بتن توانمند الیافی که از الیاف و افزودنی‌ها ساخته شده است، نسبت به بتن معمولی توانایی تحمل کرنش‌های بیشتری دارد. میلگردهای فولادی در محیط‌های مرطوب و خورنده از بین رفته و باعث گسیختگی تیر بتنی می‌شود. یکی از راهکارهای ارائه شده استفاده از میلگردهای FRP می‌باشد. این میلگردها از دوام بالایی نسبت به میلگردهای فولادی برخوردارند. مقاومت کششی بالاتر این میلگردها نسبت به فولادی، یکی دیگر از مزایای آن می‌باشد. استفاده از میلگرد FRP در کنار میلگرد فولادی به نسبت استفاده تنها از میلگرد FRP سبب می‌شود خیز قائم وسط تیر کاهش یابد. هدف از این مطالعه بررسی تغییرات حاصل از جایگزینی بتن توانمند الیافی با بتن معمولی می‌باشد. شبیه‌سازی شرایط آزمایشگاهی در نرم افزارهای کامپیوتری سبب می‌شود تا در زمان و هزینه‌ها صرفه‌جویی شود. روش‌های عددی مانند روش اجزای محدود با بهره‌گیری از دقت قابل قبول محاسبات لازم جهت شبیه‌سازی این شرایط را فراهم می‌کند. نرم افزار آباکوس با استفاده از روش مذکور امکان مدل سازی تیر بتنی را فراهم می‌کند. در این پژوهش ۶ تیر با میلگردهای کششی فولادی، GFRP و به صورت هیبرید در این پژوهش ۶ تیر در سه حالت میلگرد فولادی تنها، GFRP تنها و هیبریدی میلگردهای فولادی-GFRP با دو نوع بتن متفاوت مدل سازی شده و تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. در این پژوهش با استفاده از منحنی نیرو-جابجایی حاصل شده از نرم افزار آباکوس تغییر پارامترهای مختلف بررسی شد. استفاده از بتن توانمند الیافی در مقایسه با بتن معمولی می‌تواند باعث افزایش جذب انرژی بین ۴۵ تا ۱۴۵٪، شکل پذیری جابجایی تا ۱۲ درصد، جابجایی ترک خوردگی بین ۲۲ تا ۱۰۸٪، نیروی حداکثر بین ۲۸ تا ۶۳٪ و جابجایی گسیختگی تیر بین ۱۵ تا ۳۰٪ شود. کلمات کلیدی: بتن توانمند الیافی، هیبریدی، میلگرد FRP، جذب انرژی، شکل پذیری

۱-مقدمه

بتن یکی از مصالح پرکاربرد در حیطه عمران می‌باشد. ضعف بتن، مقاومت کششی پایین آن

می‌باشد که با استفاده از میلگردهای کششی این مشکل رفع می‌شود. اضافه کردن الیاف به بتن سبب افزایش مقاومت کششی آن می‌شود و مقاومت

فشاری آن را بهبود می‌بخشد. بتن‌های توانمند الیافی از الیاف و افزودنی‌هایی تشکیل شده که مقاومت کششی بتن را افزایش می‌دهد. پس از ظهور ترک در بتن، دچار سخت شدگی کرنشی شده و مقاومت کششی آن با افزایش کرنش افزایش می‌یابد. جایگزینی بتن الیافی با بتن معمولی می‌تواند پارامترهایی نظیر شکل پذیری جابجایی، جذب انرژی و... را افزایش دهد. به غیر از میلگردهای فولادی، میلگردهای FRP می‌تواند به عنوان میلگرد کششی مورد استفاده قرار گیرند. استفاده توأم این دو نوع میلگرد مشخصات تیر را بهبود می‌بخشد.

استفاده از میلگرد CFRP در ستون با مقطع دایره شکل بتنی شکل پذیری و ظرفیت باربری را در مقایسه با استفاده از میلگردهای فولادی به ترتیب ۲۵/۵ و ۲۵٪ افزایش می‌دهد [1]. مقاوم سازی تیر بتنی با استفاده از میلگرد GFRP به عنوان میلگرد خمشی با استفاده از تکنیک نزدیک سطح^۱ انجام شد. نتیجه حاصل شده نشان داد نیروی ترک خوردگی ۱/۵۵ رشد داشته است. همچنین عرض ترک‌ها کاهش یافته اما تعداد آن‌ها افزایش یافته است [2]. سیجانندی و همکاران به بررسی تاثیر استفاده از میلگرد GFRP در بتنهای الیافی پرداختند. نتایج بیانگر افزایش میزان مقاومت ترک خوردگی به میزان ۶۷٪، مقاومت نهایی به میزان

۱۹٪ و جذب انرژی به میزان ۳۱٪ در بتن‌های HPFRCC با میلگرد GFRP نسبت به بتن معمولی با همان نوع میلگرد می‌باشد. مقادیر فوق در صورت استفاده از میلگرد فولادی پر مقاومت در بتنهای الیافی توانمند نسبت به بتنهای معمولی، به ترتیب ۲۰،۰ و ۱۵۰٪ افزایش می‌یابد [3]. در پژوهشی دیگر موسوی اصفهانی و همکاران با هدف دستیابی به مقاومت کششی بالاتر و رسیدن به کرنش فشاری بیشتر، اقدام به جایگذاری میلگرد GFRP در بتن HPFRCC به جای بتن معمولی کردند. الیاف موجود در بتن الیافی توانمند از جنس فولاد و طول آن برابر ۵۰ میلی‌متر و قطر آن مساوی ۱ میلی‌متر می‌باشد. مقاومت کششی این الیاف برابر ۱۰۵۰ مگاپاسکال است. همچنین درصد الیاف مورد استفاده، برابر ۱٪ حجمی می‌باشد. علاوه بر این مقاومت فشاری نمونه ۲۸ روزه بتن معمولی برابر ۵۵ مگاپاسکال و بتن HPFRCC برابر ۵۹ مگاپاسکال بود. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از میلگرد GFRP و استفاده از آن در بتن HPFRCC به جای بتن معمولی می‌توان شاهد افزایش مقاومت نهایی خمشی، جابجایی نهایی و شکل پذیری به ترتیب به میزان ۴۴، ۷۷ و ۵۱٪ بود؛ علاوه بر آن سختی موثر موجود در عضو خمشی ۱۱٪ کاهش می‌یابد که علت آن کمتر بودن مدول یانگ بتن توانمند الیافی نسبت به معمولی می‌باشد [4].

^۱ NSM= near-surface method

استفاده همزمان از دو نوع الیاف در نسبت‌های مناسب می‌تواند باعث بهبود مشخصات مکانیکی بتن شود. ترکیب الیاف برگ درخت موز^۲ که از نوع الیاف طبیعی و کولار^۳ که نوعی الیاف مصنوعی می‌باشد می‌تواند باعث افزایش مقاومت کششی بتن‌های الیافی شود. همچنین استفاده از الیاف پوسته‌ی نارگیل^۴ و کولار می‌تواند نتایج مشابهی داشته باشد [5]. در مقایسه‌ای، به بتن به صورت جداگانه الیاف فولادی و الیاف شیشه‌ای از نوع E-glass در درصد‌های ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ اضافه شد. نتیجه می‌شود اضافه کردن الیاف فولادی تا ۳٪ باعث افزایش مقاومت کششی، خمشی و فشاری می‌شود؛ اما اضافه شدن الیاف شیشه‌ای تا ۱٪ باعث افزایش و سپس کاهش مقاومت کششی، خمشی و فشاری می‌شود [6]. خیرالدین و همکاران به بررسی تاثیر استفاده از HPFRCC در تیرهای بتنی همبند در دیوارهای برشی پرداختند. الیاف مورد استفاده در بتن، از نوع الیاف فولادی قلابدار می‌باشد که به نسبت ۲٪ حجمی به بتن اضافه شده است. در این آزمایش از بارگذاری چرخه‌ای استفاده شده است. نتایج حاصل شده نشان داد که استفاده از بتن‌های توانمند الیافی در تیرهای همبند بتنی می‌تواند باعث تغییر در نوع شکست تیر شود و آن را از حالت شکست برشی-

کششی که در تیر بتن معمولی رخ داد به شکست برشی-لغزشی تبدیل کند و گسیختگی تیر ساخته شده با HPFRCC را به تاخیر بیندازد. شدن الیاف به بتن می‌تواند باعث افزایش مقاومت کششی بتن به میزان بیش از ۱۰۰٪ شود و مقاومت برشی آن نیز ۲/۱۶ برابر نمونه بتن معمولی می‌باشد و افزایش شکل پذیری سازه و افزایش ۶۰ درصدی جذب انرژی از نتایج این آزمایش هستند [7].

در مطالعه‌ای امیری سوادرودباری و همکاران در مدلسازی تیرهای بتنی کوپله در دیوار برشی با استفاده از بتن HPFRCC در نرم‌افزار ABAQUS نشان دادند، نمونه‌هایی که نسبت طول تیر به ارتفاع آن ۲ و ۳ می‌باشد، رفتار برشی در تیرها حاکم می‌باشد. در صورتی که نسبت طول تیر به ارتفاع آن ۴ شود، رفتار کاملاً خمشی در آن‌ها حاکم می‌شود. استفاده از بتن‌های الیافی توانمند منجر به افزایش شکل‌پذیری سازه و مقاومت نهایی آن می‌شود و می‌توان حجم زیادی از آرماتورهای برشی در نمونه‌هایی که نسبت طول تیر به ارتفاع آن ۴ باشد را کاهش داد [8].

ساخت و آزمایش نمونه‌ها در آزمایشگاه نیازمند صرف زمان و هزینه است. از این رو استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری سرعت را افزایش و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. روش‌های عددی مانند روش اجزا محدود در این دسته از نرم افزارها به کار گرفته شده و نتایجی با دقت قابل ارائه می‌کند. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار آباکوس، بتن معمولی و بتن

² Banana bract

³ Kevlar

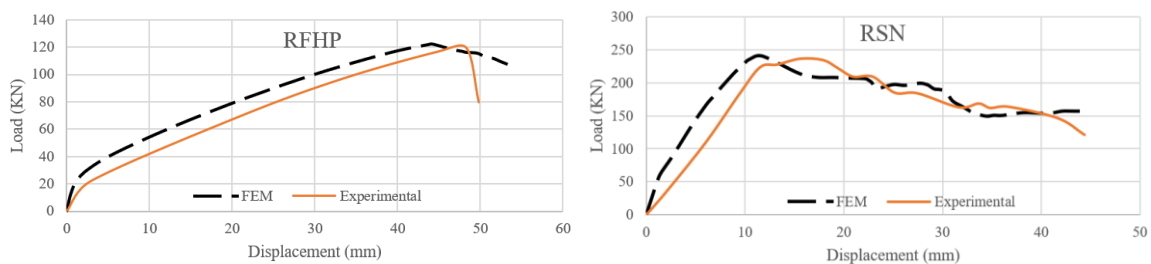
⁴ Palm fiber

توانمند الیافی با استفاده از میلگردهای مختلف برای ساخت تیرهای بتن آرمه مدل شدند.

۲. صحت سنجی

قبل از مدلسازی نمونه‌های موردنظر، ابتدا برای صحت سنجی و کالیبره کردن نرم افزار آباکوس از مطالعه آزمایشگاهی‌ای که توسط مولایی و همکاران انجام شده استفاده شد [9]. مقایسه نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی برای دو نمونه RSN و

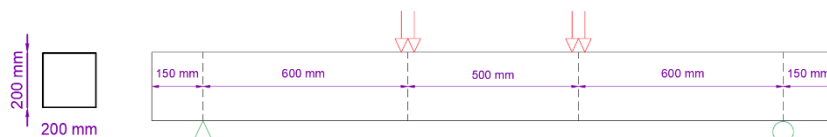
RFHP آورده شده است که در شکل ۱ آورده شده است. این مقایسه نشان از همگرایی نتایج دارد. برای مدلسازی بتن‌های مورد استفاده یعنی بتن توانمند الیافی و بتن معمولی، منحنی تنش-کرنش متناظر با آن به نرم افزار آباکوس معرفی شده است. در شکل ۲ و ۳ نحوه بارگذاری تیر و شکل شماتیک آن نمایش داده شده است.



شکل ۱ - مقایسه منحنی نیرو-جابجایی حاصل از نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی



شکل ۲ - بارگذاری تیر [9]



شکل ۳ - شکل شماتیک بارگذاری تیر

گرفته شده است. ابعاد مش با توجه با دو پارامتر زمان حل مساله و دقت نتایج ارائه شده انتخاب

برای مش‌بندی بتن تیر بتنی از مش C3D8R و برای میلگردهای مورد استفاده از مش t3d2 بهره

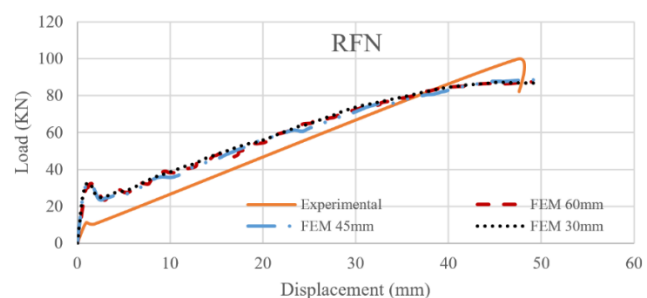
می‌شود. برای صحت سنجی و انتخاب ابعاد مش، نمونه RFN با سه اندازه متفاوت ۳۰، ۴۵ و ۶۰ میلی‌متر مش‌بندی شد و نتایج آن مقایسه شد. با ریزتر شدن ابعاد مش‌بندی دقت نتایج بالاتر می‌رود اما زمان حاکم به طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. اندازه ۴۵ میلی‌متر به عنوان ابعادی که زمان مناسبی برای حل دارد و از دقت قابل قبولی برخوردار است به عنوان اندازه مناسب اتخاذ می‌گردد. مقایسه ابعاد مش در شکل ۴ آورده شده است.

میلگردهای فولادی دارای تنش تسلیم و گسیختگی به ترتیب ۴۷۵ و ۵۳۰ مگاپاسکال و کرنش تسلیم و گسیختگی به ترتیب ۰/۰۰۲۳ و ۰/۰۳ می‌باشند. مدول الاستیسیته فولاد نیز برابر ۲۰۰ گیگاپاسکال تعیین شده است.

۲.۲ مشخصات و بارگذاری تیرها

در این پژوهش تعداد ۶ تیر به ابعاد مقطع ۴۰۰ در ۴۰۰ میلی‌متر و طول ۴۰۰۰ میلی‌متر ساخته و تحلیل شده است. در همه این تیرها از خاموت و میلگردهای فشاری فولادی استفاده شده است. خاموت‌ها به گونه‌ای طراحی شده است تا از شکست برشی جلوگیری شده و تیر بر اساس شکست خمشی گسیخته شود. مشخصات تیرها در جدول ۱ ارائه شده است.

در این جدول حروف F، H، N و S به ترتیب بیانگر بتن معمولی، بتن توانمند الیافی، میلگرد GFRP و میلگرد فولادی می‌باشند. درصد میلگردهای کششی نسبت به سطح مقطع تیر از کمتر از مقدار بالانس برای همه تیرها می‌باشد. مقدار بالانس براساس پیشنهاد آیین نامه 318-19 ACI محاسبه شده است. همچنین بارگذاری تیرها به صورت خمش چهار نقطه‌ای می‌باشد.



شکل ۴- آنالیز حساسیت ابعاد مش‌بندی

۱.۲ مصالح و مشخصات آن‌ها

برای ساخت تیرهای بتنی از دو نوع بتن استفاده شده است. نوع اول بتن معمولی با مقاومت فشاری ۲۸ روز ۳۸ مگاپاسکال و نوع دوم بتن توانمند الیافی با ۱/۵٪ الیاف فولادی و مقاومت فشاری ۲۸ روز ۳۴ مگاپاسکال می‌باشد. میلگردهای GFRP دارای مدول الاستیسیته و تنش گسیختگی به ترتیب ۴۶ گیگاپاسکال و ۶۶۴ مگاپاسکال می‌باشند.

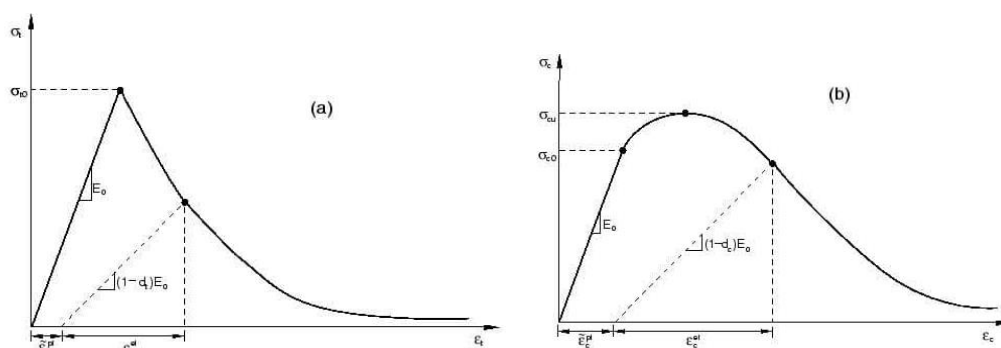
جدول ۱- مشخصات تیرها

نام نمونه	اندازه میلگرد کششی	اندازه و نوع میلگرد فشاری	نوع بتن	درصد میلگرد کششی نسبت به سطح مقطع
AFNC	2Φ20 F	2Φ20 S	معمولی	$\rho_F: 0/003927$
AFNC	2Φ20 F	2Φ20 S	توانمند الیافی	$\rho_F: 0/003927$
ASNC	3Φ28 S	2Φ20 S	معمولی	$\rho_S: 0/011545$
ASNC	3Φ28 S	2Φ20 S	توانمند الیافی	$\rho_S: 0/011545$
AFSNC	2Φ20 S + 1Φ20 F	2Φ20 S	معمولی	$\rho_S: 0/00393, \rho_F: 0/00196$
AFSNC	2Φ20 S + 1Φ20 F	2Φ20 S	توانمند الیافی	$\rho_S: 0/00393, \rho_F: 0/00196$

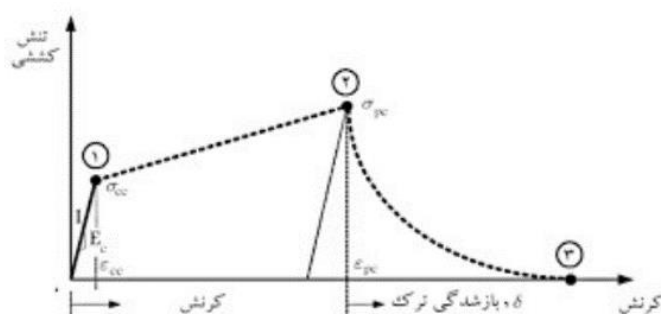
۳,۲ مدل سازی در نرم افزار آباکوس

برای مدل سازی تیرهای بتنی مسلح شده با میلگرد، از مدل CDP استفاده می شود. مشخصات مصالح و تیرها در نرم افزار وارد می شود. برای تحلیل تیرها از حلگر Static, General بهره گرفته شده است. به منظور شبیه سازی دقیق تیر ساده، یکی از تیکه گاه ها به صورت غلطک و دیگری به صورت مفصل

در نظر گرفته شد. میلگردها به صورت المان های دو بعدی و تیر بتنی به صورت المان سه بعدی ساخته شد. لذا برای مش بندی این المان ها به ترتیب از مش C3D8R و t3d2 استفاده شد. شایان ذکر است اندازه هر بعد شبکه مش برابر ۴۵ میلی متر می باشد. منحنی تنش کرنش بتن ها در شکل های ۳ و ۴ نمایش داده شده است.



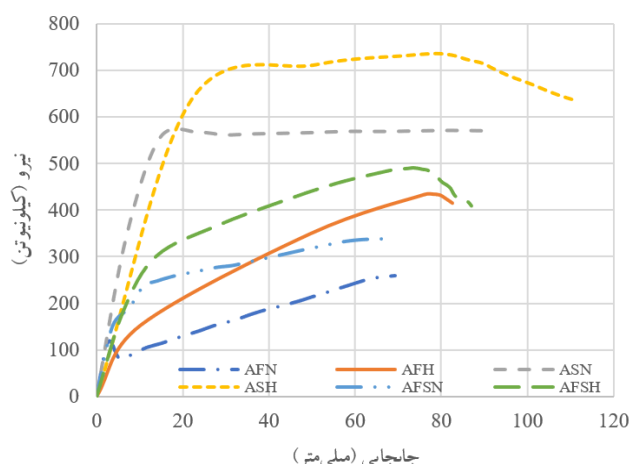
شکل ۳- منحنی تنش-کرنش بتن تحت کشش (راست) و تحت فشار (چپ)



شکل ۴- منحنی تنش-کرنش بتن توانمند الیافی در کشش

۳. نتایج تحلیل عددی

منحنی نیرو-جابجایی مقاطع ذکر شده در شکل ۵ ارائه شده است. بر اساس این منحنی به بررسی تغییرات حاصل از جایگزینی بتن توانمند الیافی به جای بتن معمولی با میلگردهای کششی مختلف پرداخته می‌شود.

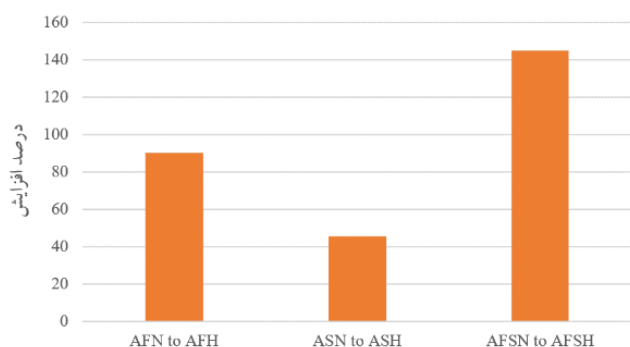


شکل ۵- منحنی نیرو-جابجایی برای همه نمونه‌ها

۳.۱ جذب انرژی

مقدار جذب انرژی از محاسبه سطح زیر منحنی نیرو-تغییر مکان به دست می‌آید. سطح زیر منحنی مذکور از آغاز بارگذاری تا شکست نمونه یا ۰/۸۵ نیرو حداکثر تعریف می‌شود. این پارامتر توانایی استهلاک انرژی به وسیله هر نمونه را نشان می‌دهد. جذب انرژی سبب می‌شود تا اجزای سازه در برابر بارهایی نظیر زلزله، به جای نشان دادن رفتار صلب، با ارتعاشات همراه شده و با ورود به ناحیه پلاستیک سبب جذب و استهلاک آن‌ها می‌شود. در شکل ۶ به درصد افزایش جذب انرژی در صورت جایگزین شدن بتن معمولی با بتن توانمند الیافی پرداخته شده

است. این جایگزینی در نمونه AFN، ASN و AFSN به ترتیب افزایش ۹۰/۱۳، ۴۵/۶۲ و ۱۴۴/۹۲ درصدی را به همراه دارد.



شکل ۶- درصد افزایش جذب انرژی با جایگزینی بتن توانمند الیافی با بتن معمولی

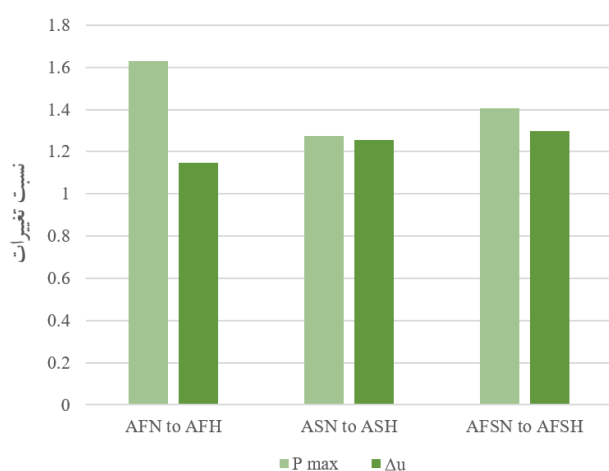
۳.۲ شکل پذیری جابجایی

شکل پذیری جابجایی عبارت است از نسبت جابجایی نهایی به جابجایی تسلیم میلگردهای فولادی؛ لذا درصد افزایش شکل پذیری جابجایی با تغییر نوع بتن، برای نمونه‌های ASN، ASH، AFSN و AFSH بررسی می‌شود. تغییرات نوع بتن سبب می‌شود تا شکل پذیری جابجایی در نمونه ASN هنگام تغییر نوع بتن از معمولی به توانمند الیافی ۱۱/۹۲٪ و در نمونه AFSN این افزایش برابر ۱۱/۸۲٪ می‌باشد.

۳.۳ نیرو و جابجایی ترک خوردگی

نیروی ترک خوردگی در نمونه AFN و AFH به ترتیب برابر ۱۱۴/۷۶ و ۱۱۶/۲۴ کیلو نیوتن می‌باشد. جابجایی ترک خوردگی برای نمونه‌های ذکر شده برابر ۲/۳۹ و ۴/۹۸ میلی‌متر می‌باشد. در نمونه‌هایی که از میلگرد فولادی به عنوان آرماتور کششی استفاده شده است یعنی نمونه‌های ASN و ASH نیروی ترک خوردگی به ترتیب برابر ۲۱۵/۶۹ و

اشاره شده به ترتیب برابر ۸۷/۷۸ و ۱۱۰/۱۸ میلی‌متر می‌باشد. در تیرهای هیبریدی در نمونه AFSN و AFSH نیروی حداکثر به ترتیب برابر ۲۵۹/۶ و ۴۲۳/۰۳ کیلونیوتن می‌باشد. جابجایی نهایی برای نمونه‌های ذکر شده برابر ۷۰/۷۵ و ۸۱/۳۲ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۸ نسبت تغییرات نیرو حداکثر و جابجایی نهایی برای نمونه‌ها با تغییر نوع بتن آورده و مقایسه شده است.



شکل ۸ - نسبت تغییرات نیرو حداکثر و جابجایی نهایی با تغییر نوع بتن

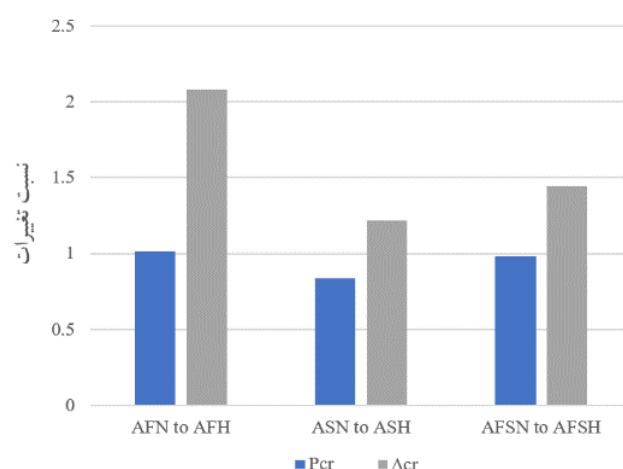
۴. جمع بندی

بررسی کلی نتایج نشان می‌دهد بتن توانمند الیافی گزینه مناسبی برای جایگزینی بتن معمولی در شرایطی که نیاز به ظرفیت‌های مختلف بیشتری باشد، می‌باشد و نتایج زیر نیز حاصل گردیده است:

- جذب انرژی در نمونه‌ها افزایشی بین ۴۵/۶۲ تا ۱۴۴/۹۲٪ و کل پذیری جابجایی افزایشی معدل ۱۱/۸۲ تا ۱۱/۹۲٪ داشت.

- نیرو ترک خوردگی در نمونه‌ای که فقط از میلگرد GFRP استفاده شده ۱/۳٪ افزایش و در دو نمونه

۱۸۰/۴ کیلونیوتن می‌باشد. جابجایی ترک خوردگی در نمونه‌های اشاره شده به ترتیب برابر ۳/۵۳ و ۴/۳۱ میلی‌متر می‌باشد. در تیرهای هیبریدی در نمونه AFSH و AFSH نیروی ترک خوردگی به ترتیب برابر ۱۵۳/۴ و ۱۵۰/۹ کیلونیوتن می‌باشد. جابجایی ترک خوردگی برای نمونه‌های ذکر شده برابر ۳/۰۸ و ۴/۴۵ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۷ نسبت تغییرات نیرو ترک خوردگی و جابجایی ترک خوردگی برای نمونه‌ها با تغییر نوع بتن آورده و مقایسه شده است.



شکل ۷ - نسبت تغییرات نیرو و جابجایی ترک خوردگی با تغییر نوع بتن

۳،۴ نیرو و جابجایی حداکثر

نیروی حداکثر در نمونه AFH و AFN به ترتیب برابر ۲۵۹/۶ و ۴۲۳/۰۳ کیلونیوتن می‌باشد. جابجایی نهایی برای نمونه‌های ذکر شده برابر ۷۰/۷۵ و ۸۱/۳۳ میلی‌متر می‌باشد. در نمونه‌هایی که از میلگرد فولادی به عنوان آرماتور کششی استفاده شده است یعنی نمونه‌های ASN و ASH نیروی حداکثر به ترتیب برابر ۵۸۲/۱۴ و ۷۴۱/۷۳ کیلونیوتن می‌باشد. جابجایی نهایی در نمونه‌های

دیگر کاهش ۱۶/۴ درصدی در تیر با میلگرد فولادی - تحمل کرنش‌های بیشتر در بتن توانمند الیافی و کاهش ۱/۷٪ در نمونه هیبرید را تجربه می‌کند
- جابجایی ترک خوردگی در نمونه ۲۱/۸ تا ۱۰۸/۳۷٪ افزایش و مقاومت حداکثر تیر به اندازه ۲۷/۴ تا ۶۲/۹٪ افزایش پیدا کرد.
- جابجایی متناظر با گسیختگی تیر ۱۴/۹۵ تا ۲۹/۸٪ افزایش پیدا کند.

۵. منابع

- [1] Zhao J, Ren W, Ruan X, Gong X, Si C. *Experimental Study on the Seismic Performance of Columns Reinforced by the CFRP Bar and Sheet*. *Appl Compos Mater*. 2021;28(4):1291–313.
<https://doi.org/10.1007/s10443-021-09914-x>
- [2] Hosen MA, Alengaram UJ, Jumaat MZ, Sulong NHR, Darain KM ud. *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Bars for Enhancing the Flexural Performance of RC Beams Using Side-NSM Technique*. *Polymers (Basel)*. 2017;9(12):180.
- [3] Sijavandi K, Sharbatdar MK, Kheyroddin A. *Experimental evaluation of flexural behavior of high-performance fiber reinforced concrete beams using GFRP and high strength steel bars*. In *Structures 2021 Oct 1 (Vol. 33, pp. 4256-4268)*. Elsevier.
- [4] Esfahani SV, Sharbatdar MK. *Substitution effects of conventional concrete with high-performance fiber-reinforced cementitious composite (HPFRCC) in beams reinforced with GFRP bars*. *Case Studies in Construction Materials*. 2020 Dec 1;13:e00440.
- [5] Ahmed A, Guo S, Zhang Z, Shi C, Zhu D. *A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete*. *Constr Build Mater*. 2020;256:119484.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119484>
- [6] Arunakanthi E, Kumar JDC. *Experimental studies on fiber reinforced Concrete (FRC)*. *Int J Civ Eng Technol*. 2016;7(5):329–36.
- [7] خیرالدین ع، دهقان م، شربتدار مک. بهبود سازه‌ای تیر رابط دیوارهای برشی همبند با جایگزینی بتن الیافی توانمند با بتن. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۱۳۹۷؛ ۵۰(۳):۵۰-۱۶.
- [8] امیری سوادرودباری ا. بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار برشی و خمشی تیرهای کوپله بتنی ساخته شده با بتن‌های الیافی توانمند (HPFRCC) در دیوار برشی کوپله. دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی عمران؛ ۱۳۹۰.
- [9] Moolaei S, Sharbatdar MK, Kheyroddin A. *Experimental evaluation of flexural behavior of HPFRCC beams reinforced with hybrid steel and GFRP bars*. *Compos Struct*. 2021;275(June):114503.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114503>

ارزیابی عملکرد ساختمان با قاب خمشی بتنی و دیوار برشی بتن مسلح مجهز

به میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی در برابر زلزله



حسین لطفی

کارشناسی ارشد مهندسی عمران-زلزله، دانشکده مهندسی
عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی



علیرضا باقرشمیرانی

عضو هیات علمی دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط
زیست، دانشگاه شهید بهشتی

چکیده

اثر میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی اغلب هنگام بررسی عملکرد ساختمان‌ها در مناطق حساس به زلزله‌های قوی رخ می‌دهد که در آن قاب خمشی بتنی مسلح ویژه به همراه دیوار برشی به طور معمول به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر نیروی جانبی استفاده می‌شوند. اگرچه عملکرد لرزه‌ای این نوع ساختمان‌ها توسط خصوصیت شکل‌پذیری از نوع ویژه بهبود یافته است، اما اثر تجهیز ساختمان‌های بتنی مسلح با قاب خمشی ویژه و دیوار برشی مجهز به میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی هنوز به خوبی بررسی نشده است؛ بنابراین بررسی اثر میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان بتنی مسلح با سیستم باربر لرزه‌ای قاب خمشی ویژه و دیوار برشی تقویت شده با انواع میلگردهای دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی ضرورت می‌یابد. در این تحقیق به مدلسازی یک ساختمان ۱۲ طبقه قاب خمشی بتنی و دیوار برشی بتنی واقع در پهنه خطرپذیری بسیار زیاد با سه نوع میلگرد آلیاژ حافظه‌دار شکلی پرداخته شده است. نتایجی نظیر میانگین کاهش وزن ساختمان به میزان تقریبی ۰,۳۲ درصد و میانگین کاهش لنگر تکیه‌گاهی ساختمان به میزان تقریبی ۹,۶ درصد و میانگین کاهش تغییر جابجایی به میزان حدود ۶۳,۹ درصد نسبت به ساختمان بدون میلگردهای با آلیاژ حافظه‌دار شکلی، از مزایای این سیستم می‌باشد.

واژگان کلیدی: میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی، قاب بتنی مسلح، سیستم باربر قاب خمشی، دیوار برشی

۱-مقدمه

ایران جز مناطق لرزه‌خیز است که دارای گسل‌های فعال زیادی است. با توجه به اینکه خصوصیت‌های زلزله‌ها هم به لحاظ دامنه و هم محتوای فرکانسی

برای ساختگاه‌ها متفاوت است. بررسی تاثیر میلگردهای دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی در زلزله روی عملکرد ساختمان با قاب خمشی بتن مسلح به همراه دیوار برشی یک روش مناسب جهت بهبود

عملکرد لرزه‌ای است که خسارت مستقیم و غیرمستقیم وارد بر سازه در اثر وقوع زلزله را کاهش می‌دهد.

۲. سابقه انجام پژوهش

سیستم‌های مقاوم در برابر زلزله به دلیل پتانسیل امیدوارکننده‌ای که در کنترل تغییر مکان نسبی باقی‌مانده لرزه‌ای و در نتیجه کاهش هزینه‌های تعمیرات مرتبط دارند، توجه محققان را به خود جلب کرده است. استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی^۱ فوق ارتجاعی نیکل-تیتانیوم بخش قابل توجهی از تحقیق پاریک و همکاران^۲ [1] را تشکیل می‌دهد. آلیاژ حافظه‌دار شکلی فوق ارتجاعی مس-آلمینیم - منگنز در سالهای اخیر برای حذف هزینه بالای آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیکل-تیتانیوم و همچنین برای داشتن ویژگی‌های ماشینکاری بهتر توسعه یافته است. این پژوهش استفاده از میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی مس-آلمینیم - منگنز را برای جابجایی مفصل پلاستیک تیرهای بتنی مسلح از طریق یک مطالعه تجربی- عددی بررسی می‌نماید. محل میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی برای هر یک از تیرهای مورد بررسی متفاوت می‌باشد. بارگذاری تیرها به گونه‌ای است که نمودار لنگر در میانه دهانه صفر و در انتها حداکثر باشد تا عملکرد لرزه‌ای مورد

انتظار شبیه سازی شود. نتایج حاصل از بررسی تجربی- عددی تیرهای بتن مسلح با استفاده از میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی بیانگر این موضوع است که جابجایی مفصل پلاستیک، با قرار دادن میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی مس-آلمینیم - منگنز، دور از انتهای تیر، استحکام و اتلاف انرژی را بهبود بخشیده است. اگرچه تاثیر مدت زمان حرکت زمین ناشی از زلزله بر پایداری سازه به طور گسترده‌ای بررسی شده است، ولی تاثیر آن بر پاسخ سازه موضوعی است که مورد بحث است. با انجام تحلیل دینامیکی افزایشی بر روی مدل‌های چند درجه آزادی غیرخطی ساختمان‌های اسکلت بتنی مسلح با ویژگی‌های سازه‌ای متفاوت، تاثیر مدت زمان حرکت زمین ناشی از زلزله بر ریزش سازه‌های بتن مسلح توسط رقوناندان و همکاران^۳ [2] بررسی شده است. از روشهای رگرسیون مدل‌سازی خطی تعمیم‌یافته برای پیش‌بینی ظرفیت فروپاشی یک سازه استفاده گردیده است و مدت زمان حرکت زمین ناشی از زلزله پیش‌بینی‌کننده معیار قابل توجهی برای مقاومت فروپاشی می‌باشد. در نتیجه، در مقایسه با حرکت زمین با مدت زمان کوتاه‌تر که شدت حرکت زمین یکسان است، خطر فروپاشی ساختمان‌های مورد تجزیه و تحلیل با قرار گرفتن در معرض حرکت زمین با مدت طولانی‌تر

¹ Shape Memory Alloy (SMA)

² Pareek et al. (2018)

³ Raghunandan et al. (2013)

بیشتر است. مدت زمان حرکت زمین بر ظرفیت فروپاشی سازه‌های بتنی مسلح بسیار فرسوده و غیر شکل‌پذیر و تخریب یافته تاثیر می‌گذارد. بنابراین توصیه می‌شود در طراحی سازه و ارزیابی خطر لرزه‌ای، مدت زمان حرکت زمین علاوه بر شدت و محتوای فرکانسی آن در نظر گرفته شود. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی فوق ارتجاعی، مواد منحصر به فردی هستند که توانایی تغییر شکل‌های بزرگ را دارند و می‌توانند با حذف تنش به شکل تغییر شکل نیافته خود بازگردند. اگر چنین موادی را بتوان به‌عنوان تقویت‌کننده در نواحی مفاصل پلاستیک اجزای تیر-ستون استفاده کرد، نه تنها تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی بزرگی را در طول زلزله‌های قوی تجربه می‌کنند، بلکه می‌توانند به طور بالقوه، شکل اصلی خود را بازیابی کنند. این رفتار باعث کاهش مشکل تغییر شکل دائمی می‌شود. آلام و همکاران⁴ [3] پژوهشی را با هدف ایجاد دستورالعمل‌هایی برای پیش‌بینی رفتار لرزه‌ای عناصر تیر-ستون بتنی مسلح تقویت‌شده با میلگردهای دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی فوق ارتجاعی انجام داده‌اند. این مطالعه، تفاوت‌هایی را در رابطه لنگر-انحنای بین آلیاژ حافظه‌دار شکلی و مقاطع تقویت‌شده فولادی شناسایی نموده است. کاربرد روش‌های موجود توسعه‌یافته برای اعضای

بتن مسلح را بررسی نموده تا طول مفصل پلاستیک، عرض ترک و فاصله ترک را برای عناصر بتنی مسلح تقویت‌شده با میلگردهای دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی فوق ارتجاعی پیش‌بینی نماید. در این تحقیق، میزان بار-جابجایی پیش‌بینی‌شده، روابط لنگر-دوران و ظرفیت‌های اتلاف انرژی با نتایج تجربی مطابقت خوبی داشته‌اند. عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های اسکلت بتنی تقویت‌شده با میلگرد فوق ارتجاعی آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر حسب نسبت حاشیه فروپاشی⁵ توسط منتسیر و همکاران⁶ [4] ارزیابی گردیده است. مقدار CMR نسبت شدت حرکت زمین در فروپاشی میانه به حداکثر شدت حرکت زمین لرزه در نظر گرفته شده است. نتایج با عملکرد قاب‌های بتنی تقویت شده تنها با میلگرد فولادی معمولی مقایسه شده است. ارزیابی ایمنی فروپاشی با استفاده از بار تغییر مکان استاتیک غیرخطی و تحلیل دینامیکی افزایشی غیرخطی⁷ با بیست رکورد حرکت زمین انجام شده است. برای تجزیه و تحلیل، سه طبقه مختلف سوم و ششم و هشتم، از ساختمان‌های بتن مسلح که هر کدام دارای چهار نوع مختلف جزئیات آرماتور هستند، در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از افزایش ظرفیت فروریختن سازه‌های قاب بتنی سه و هشت طبقه در

⁵ Collapse margin ratio (CMR)

⁶ Muntasir et al. (2021)

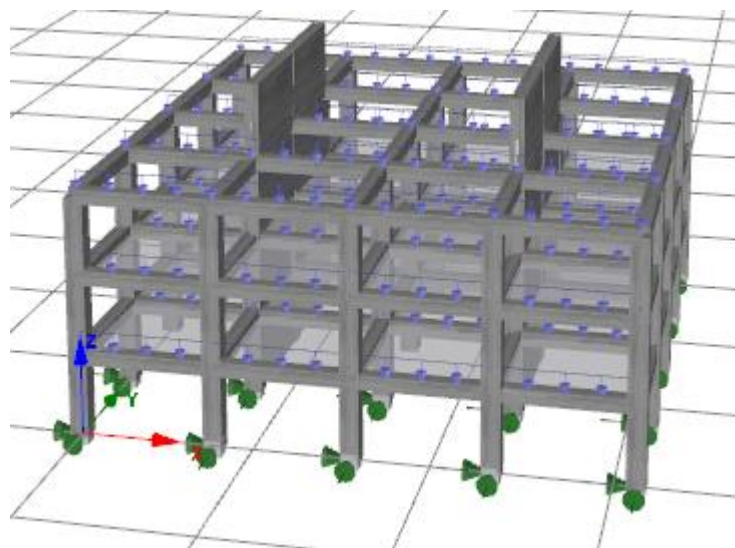
⁷ Incremental dynamic analysis (IDA)

⁴ Alam et al., 2008

حین استفاده از SMA به عنوان تقویت کننده است. ضریب اصلاح پاسخ لرزه‌ای برای قاب بتنی تقویت شده با آلیاژ حافظه دار شکلی نیز بر اساس نسبت حاشیه فروپاشی قابل قبول مطابق دستورالعمل‌های ارائه شده ارزیابی شده است.

۳. چیدمان و طراحی ساختمان

مدلسازی عددی اعضا بتنی برای تحلیل پاسخ آنها تحت بارگذاری روشی متداول است [5]. در این تحقیق از یک ساختمان بتنی ۱۲ طبقه با سیستم باربر قاب خمشی و دیوار برشی تقویت شده با

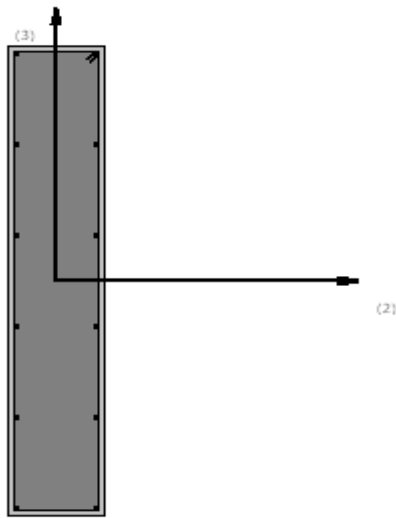


شکل ۱: طرح پلان

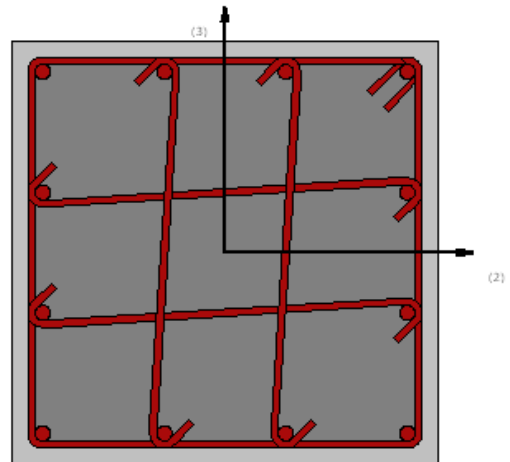
میلگردهای آلیاژ حافظه دار شکلی برای تحلیل و طراحی استفاده شده است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، پلان ساختمان ۲۰ متر در ۲۰ متر با دهانه ۵ متر می باشد. ارتفاع هر طبقه ۳ متر در نظر گرفته شده است و همچنین مقطع ستونها با ابعاد ۷۰*۷۰ سانتی متر، تیرها با ابعاد ۵۵*۵۵ سانتی متر و دیوارهای برشی با ابعاد ۵۵*۳۰۰ سانتی متر در کلیه طبقه‌ها به صورت یکسان می باشد.

مترمربع) فرض شده است. شکل ۲ مقطع ستونها، تیرها و دیوارهای برشی را نمایش می‌دهد. در این تحقیق سه مورد از SE-SMA با نامهای (SMA1) NiTi، FeNCATB (SMA2) و (SMA3) CuAlMn به عنوان تقویت کننده در ستونها، تیرها و دیوارهای برشی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که شکل ۳ مشخصات سه نوع میلگرد با آلیاژ حافظه دار شکلی را نمایش می‌دهد.

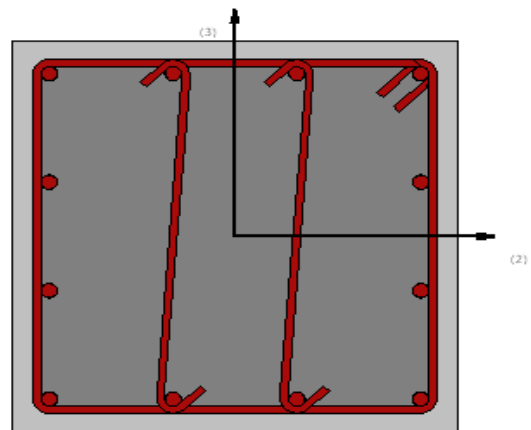
مقاومت جانبی در هر دو جهت توسط قاب خمشی ویژه به همراه دیوار برشی تامین می‌شود. این سیستم برابر به روش نیروی جانبی بر اساس آیین نامه 41-17 ASCE طراحی شده است. مقاومت فشاری بتن، ۳۵ مگاپاسکال و تنش جاری شدن فولاد در میلگردها برابر با ۴۰۰ مگاپاسکال فرض شده است. بار زنده و بار مرده به ترتیب برابر با ۱،۵ (کیلو نیوتن بر مترمربع) و ۳،۵ (کیلو نیوتن بر



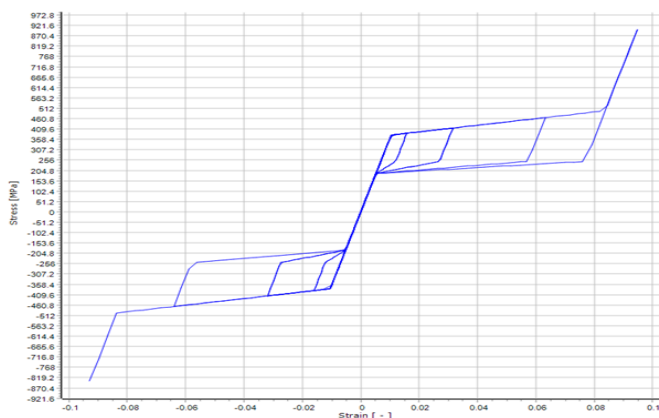
شکل ۲ ج: مقطع دیوار برشی ها (۱۲ عدد آرماتور طولی نمره ۲۰، آرماتور عرضی نمره ۱۰ (خاموت) در فواصل ۱۰ سانتیمتر)



شکل ۲ الف: مقطع ستونها (۱۲ عدد آرماتور طولی نمره ۲۵، آرماتور عرضی نمره ۱۲ (خاموت) به همراه ۴ عدد قلاب در فواصل ۱۰ سانتی-متر)

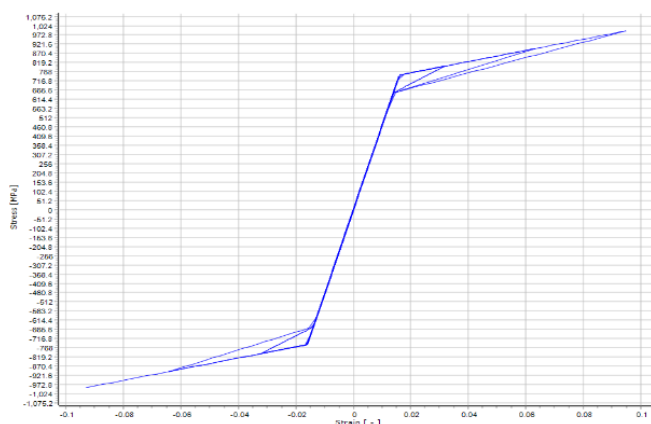


شکل ۲ ب: مقطع تیرها (۱۲ عدد آرماتور طولی نمره ۲۰، آرماتور عرضی نمره ۱۰ (خاموت) به همراه ۲ عدد قلاب در فواصل ۱۰ سانتیمتر)



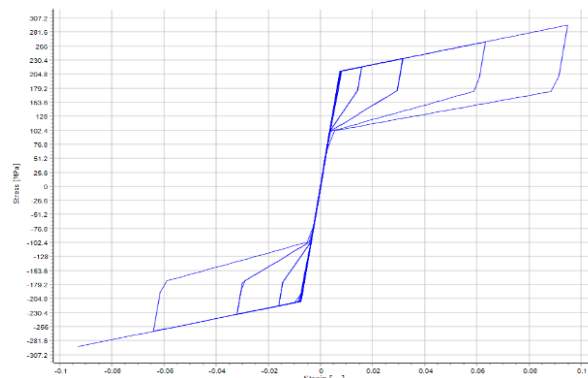
Modulus of elasticity E (kPa)	3.6459E+007
Austenite-to-martensite starting stress (kPa)	380000.00
Austenite-to-martensite finishing stress (kPa)	500000.00
Martensite-to-austenite starting stress (kPa)	250000.00
Martensite-to-austenite finishing stress (kPa)	190000.00
Superelastic plateau strain length (%)	7.00
Specific Weight (kN/m3)	65.00

شکل ۳- مشخصات سه نوع آلیاژ حافظه دار شکلی الف: مشخصات SMA1



ب: مشخصات SMA2

Modulus of elasticity E (kPa)	4.6900E+007
Austenite-to-martensite starting stress (kPa)	750000.00
Austenite-to-martensite finishing stress (kPa)	1.2000E+006
Martensite-to-austenite starting stress (kPa)	1.1000E+006
Martensite-to-austenite finishing stress (kPa)	650000.00
Superelastic plateau strain length (%)	13.50
Specific Weight (kN/m ³)	65.00



ج: مشخصات SMA3

Modulus of elasticity E (kPa)	2.8000E+007
Austenite-to-martensite starting stress (kPa)	210000.00
Austenite-to-martensite finishing stress (kPa)	300000.00
Martensite-to-austenite starting stress (kPa)	175000.00
Martensite-to-austenite finishing stress (kPa)	100000.00
Superelastic plateau strain length (%)	9.00
Specific Weight (kN/m ³)	65.00

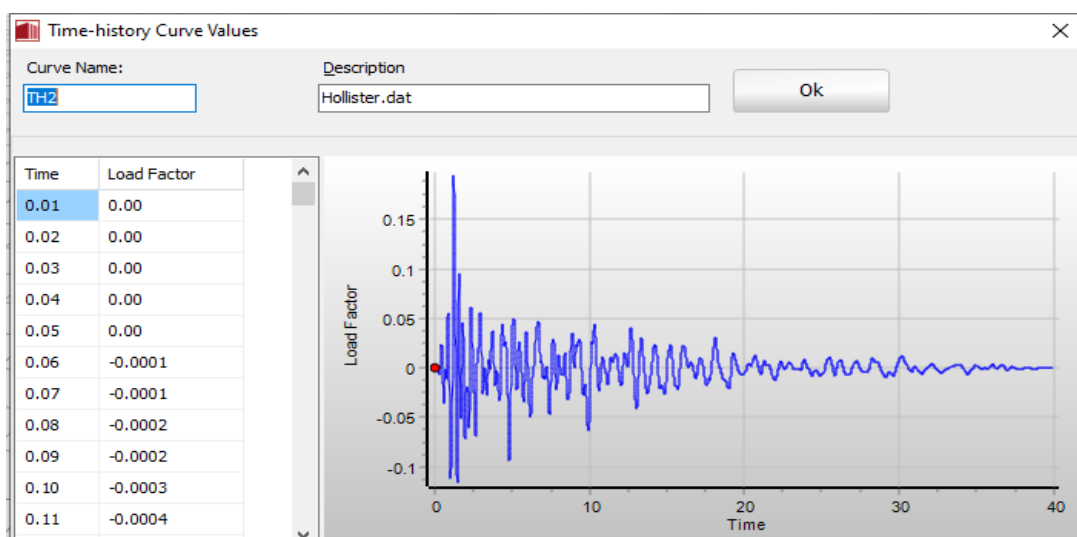
ساختمان بتنی و محل استقرار دیوار برشی در در شکل ۵ موجود می‌باشد.

پس از تحلیل تاریخچه زمانی دینامیکی ساختمان فوق، تغییر مکان نسبی در دو حالت تجهیز نمودن ستونها، تیرها و دیوارهای برشی به سه نوع میلگرد حافظه دار شکلی و بدون آن ها به صورت جدول ۱، محاسبه گردید.

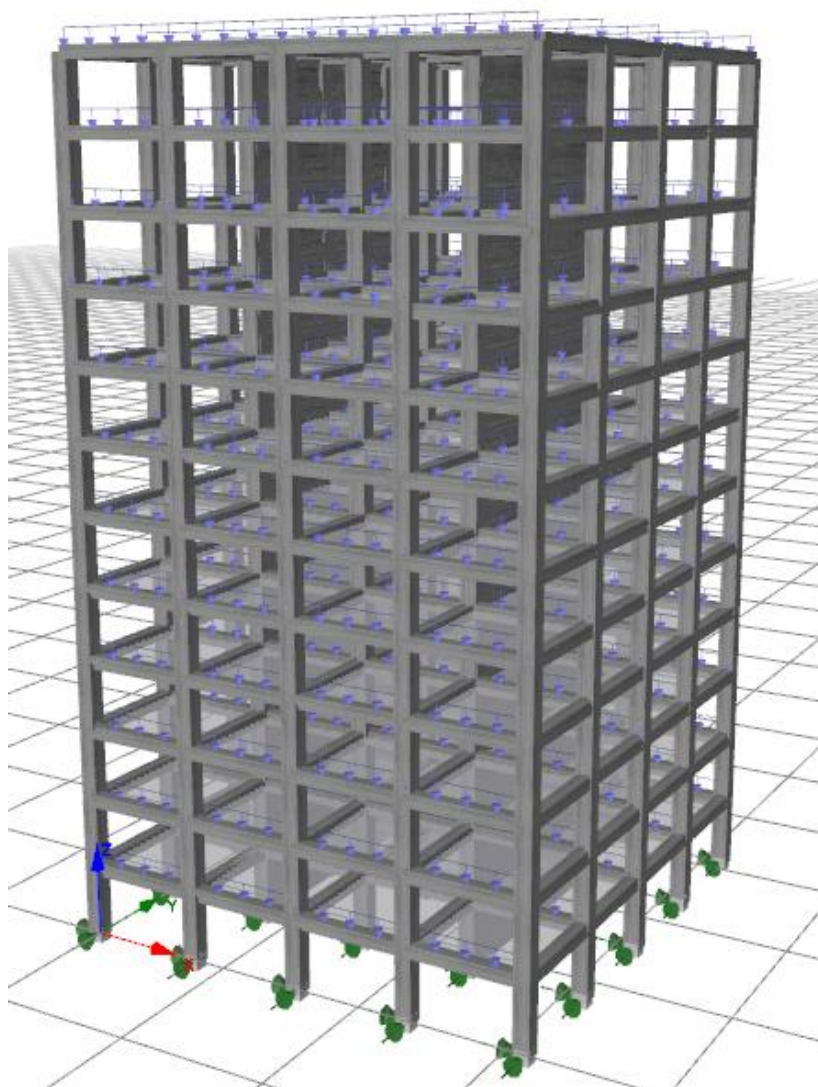
۴. مدلسازی عددی

ساختمان مورد مطالعه توسط نرم افزار Seismostruct مدلسازی شده است. المانهای آن با استفاده از جابجایی یک عنصر تیر- ستون با یک فایبر ۱۵۰ در ۵ معادل شده است. ساختمان مورد مطالعه تحت رکورد زلزله هالیستر^۸ به صورت تاریخچه زمانی دینامیکی، مطابق شکل ۴، تحلیل و آنالیز شده است، لازم به ذکر است تعداد طبقات

⁸ Holister USA., April 09, 1961



شکل ۴: رکورد زلزله هالیستر



شکل ۵- مشخصات سه نوع آلیاژ حافظه دار شکلی

جدول ۱: تغییر مکان نسبی طبقات در حالت‌های تجهیز شده با و بدون میلگرد حافظه‌دار شکلی

نوع میلگرد حافظه- دار شکلی	وزن سازه (کیلو نیوتن)	لنگر تکیه گاهی (کیلو نیوتن-متر)	برش پایه (کیلو نیوتن)	طبقه	جابجایی نسبی
بدون میلگرد حافظه دار شکلی	۶۲۳۳۵,۷	۱۹۵۲۶,۵۱	۸۱۹۲,۶۰	۱	۰,۰۰۶
				۲	۰,۰۰۹
				۳	۰,۰۰۹
				۴	۰,۰۰۸
				۵	۰,۰۰۹
				۶	۰,۰۰۹
				۷	۰,۰۰۸
				۸	۰,۰۰۸
				۹	۰,۰۰۹
				۱۰	۰,۰۰۹
				۱۱	۰,۰۰۷
				۱۲	۰,۰۰۵
SMA1	۶۲۱۳۷,۳۸	۱۷۶۲۶,۴۱	۸۰۵۹,۹۶	۱	۰,۰۰۸
				۲	-۰,۰۱۱
				۳	۰,۰۱۱
				۴	۰,۰۱۱
				۵	-۰,۰۱۱
				۶	۰,۰۱۱
				۷	۰,۰۱۲
				۸	-۰,۰۱۳
				۹	-۰,۰۱۳
				۱۰	-۰,۰۱۳
				۱۱	-۰,۰۱۱
				۱۲	-۰,۰۰۸
SMA2	۶۲۱۳۷,۳۹	۱۸۴۲۳,۷۵	۸۷۹۷,۵	۱	-۰,۰۰۷
				۲	-۰,۰۰۱۱
				۳	۰,۰۱۱
				۴	۰,۰۱۱
				۵	۰,۰۱
				۶	۰,۰۱۱

نوع میلگرد حافظه - دار شکلی	وزن سازه (کیلو نیوتن)	لنگر تکیه گاهی (کیلو نیوتن - متر)	برش پایه (کیلو نیوتن)	طبقه	جابجایی نسبی
				۷	۰,۰۱۲
				۸	۰,۰۱۲
				۹	۰,۰۱۲
				۱۰	-۰,۰۱۲
				۱۱	۰,۰۱
				۱۲	-۰,۰۰۶
SMA3	۶۲۱۳۷,۳۷	۱۶۸۷۱,۶۵	۷۹۱۴,۲۱	۱	۰,۰۰۷
				۲	۰,۰۱۱
				۳	۰,۰۱۲
				۴	۰,۰۰۱۲
				۵	-۰,۰۱۱
				۶	-۰,۰۱
				۷	۰,۰۱۲
				۸	-۰,۰۱۳
				۹	-۰,۰۱۴
				۱۰	-۰,۰۱۳
				۱۱	-۰,۰۱۱
				۱۲	-۰,۰۰۸

۵. نتیجه گیری

در این مقاله عملکرد ساختمان بتنی با قاب خمشی و دیوار برشی مسلح شده با میلگردهای حافظه دار شکلی مختلف SMA-RC و بدون آنها، مقایسه و ارائه شده است. عملکرد ساختمان ۱۲ طبقه دارای سیستم باربر قاب خمشی بتن مسلح به همراه دیوار برشی مجهز به میلگرد حافظه دار شکلی از نظر تغییر مکان نسبی طبقات و برش پایه مورد ارزیابی قرار گرفت. با بررسی پاسخهای لرزه‌ای آنها نتایج زیر حاصل شده است:

(۱) میانگین تغییر مکان نسبی طبقات در حالت تجهیز با میلگرد آلیاژ حافظه دار شکلی شماره یک، دو و سه، به طور تقریبی برابر با ۰,۰۰۰۰۶ می‌باشد.

(۲) میانگین تغییر مکان نسبی طبقات در حالت بدون تجهیز با میلگرد آلیاژ حافظه دار شکلی، به طور تقریبی برابر با ۰,۰۰۸ می‌باشد.

۳) نتایج نشان می‌دهد در صورت استفاده از میلگرد آلیاژ حافظه دار شکلی، میانگین تغییر مکان نسبی طبقات به میزان حدود ۶۳٫۹ درصد نسبت به ساختمان بدون میلگردهای با آلیاژ حافظه دار شکلی کاهش یافته است.

۴) کاهش وزن ساختمان به میزان تقریبی ۰٫۳۲ درصد نسبت به ساختمان بدون میلگردهای با آلیاژ حافظه دار شکلی و کاهش لنگر تکیه گاهی ساختمان به میزان تقریبی ۹٫۶ درصد نسبت به ساختمان بدون میلگردهای با آلیاژ حافظه دار شکلی از مزایای این سیستم می‌باشد.

البته با توجه به در نظر نگرفتن تغییرات فشاری و کششی مواد آلیاژ حافظه دار در برابر تغییر درجه دما، تحقیق بیشتر در این مطالعه مورد نیاز است.

۶- فهرست منابع

- [1] Pareek, S., Suzuki, Y., Araki, Y., Youssef, M.A., Meshaly, M., (2018), "Plastic hinge relocation in reinforced concrete beams using Cu-Al-Mn SMA bars", *Engineering Structures*, 175, p. 765-775, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.072>
- [2] Raghunandan, M., Liel, A.B., (2013), "Effect of ground motion duration on earthquake-induced structural collapse", *Structural Safety*, 41, p. 119-133, <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2012.12.002>
- [3] Alam, M.S., Youssef, M.A., Nehdi, M., (2008), "Analytical prediction of the seismic behaviour of superelastic shape memory alloy reinforced concrete elements", *Engineering Structures*, 30(12), p. 3399-3411, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.05.025>.
- [4] Muntasir Billah, A.H.M., Siddiquee, K.N., Issa, A., (2021), "Seismic collapse safety and response modification factor of concrete frame buildings reinforced with superelastic shape memory alloy (SMA) rebar", *Journal of building engineering*, 42(12), p. 102468, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102468>.
- [5] Bagher Shemirani, A. (2022), "Experimental and numerical studies of concrete bridge decks using ultra high-performance concrete and reinforced concrete", *Computers and Concrete*, 29(6), p. 407-418, <https://doi.org/10.12989/cac.2022.29.6.407>.