

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

پس از وقوع زلزله، ستون‌های بتن آرمه آسیب‌دیده به‌عنوان اجزای اصلی باربر سازه، نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری کلی ساختمان و امکان ورود ایمن برای عملیات امدادی، ارزیابی و اقدامات اولیه دارند. در چنین شرایطی، استفاده از سیستم‌های مقاوم‌سازی موقت که قابلیت نصب سریع، اجرا بدون نیاز به بتن‌ریزی، استفاده از مواد چسباننده یا جوشکاری در محل، و امکان جمع‌آوری پس از پایان عملیات امداد، بازرسی و ایمن‌سازی اولیه را داشته باشند، ضروری است. در این پژوهش، عملکرد سه سیستم مقاوم‌سازی موقت مبتنی بر ژاکت فولادی پیچ‌ومهره‌ای برای ستون‌های بتن آرمه شدیداً آسیب‌دیده مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفته است. بدین منظور، نمونه‌هایی از ستون‌های بتن آرمه در مقیاس یک‌سوم، ابتدا تا سطح آسیب شدید تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیکی قرار داده شده و سپس با استفاده از سه پیکربندی مختلف شامل ژاکت فولادی مجهز به صفحات جذب انرژی، ژاکت فولادی همراه با ورق موج‌دار و ژاکت فولادی دارای دستک جانبی، به‌صورت موقت مقاوم‌سازی شدند. نمونه‌های مقاوم‌سازی شده مجدداً تحت بارگذاری چرخه‌ای همراه با بار محوری ثابت آزمایش گردیدند. نتایج نشان می‌دهد که هر سه سیستم قادرند شدت خرابی در ناحیه مفصل پلاستیک را کاهش داده، کماتش آرماتورهای طولی را کنترل کرده و پایداری چرخه‌ای ستون‌های آسیب‌دیده را به‌طور معناداری بهبود بخشند. در میان سیستم‌های بررسی شده، روش مجهز به صفحات جذب انرژی عملکرد بهتری در حفظ سختی مؤثر و افزایش ظرفیت اتلاف انرژی از خود نشان داد، درحالی‌که دو سیستم دیگر بیشتر در بهبود محصورشدگی بتن هسته و افزایش پایداری تغییر مکان‌های بزرگ مؤثر بودند. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که سیستم‌های مقاوم‌سازی موقت فولادی می‌توانند به‌عنوان راهکاری عملی و مؤثر برای افزایش ایمنی اولیه ستون‌های بتن آرمه آسیب‌دیده در شرایط پس‌اززلزله مورد استفاده قرار گیرند.

واژگان کلیدی: مقاوم‌سازی موقت، ستون بتن آرمه آسیب‌دیده، ژاکت فولادی، رفتار چرخه‌ای، جذب انرژی.

ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد سیستم‌های مقاوم‌سازی موقت ستون‌های بتن آرمه آسیب‌دیده پس از زلزله

محمدرضا شکرزاده

پسادکتری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

فریبرز ناطقی الهی (نویسنده مسئول)

استاد، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، nateghi@iiees.ac.ir

۱- مقدمه

(Hu et al., 2023; Iervolino et al., 2020; Shokrzadeh, 2025) در این میان، ستون‌های بتن آرمه به‌عنوان عناصر اصلی باربر ثقلی و جانبی، نقشی تعیین‌کننده در پایداری کلی سازه دارند؛ به‌گونه‌ای که تخریب آنها می‌تواند منجر به فروریزش تدریجی یا ناگهانی کل سازه شود (Shokrzadeh et al., 2025; Shokrzadeh & Nateghi-Alahi, 2025b). روش‌های متداول

زلزله یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که می‌تواند با ایجاد نیروهای جانبی شدید، عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها را به‌شدت مختل کند. بسیاری از سازه‌های موجود به‌دلیل ضعف‌های طراحی و اجرا، فرسودگی مصالح، تغییر کاربری و عدم انطباق با آیین‌نامه‌های لرزه‌ای جدید، فاقد ظرفیت لازم برای پاسخ‌گویی به نیازهای کنونی بوده و نیازمند ارتقا هستند

مقاوم سازی ستون های بتن آرمه بر بهسازی دائمی متمرکز بوده است؛ رویکردی که معمولاً برای بازگرداندن ظرفیت سازه در شرایط عادی و بلندمدت به کار می رود. با این حال، این روش ها به دلیل پیچیدگی اجرا، نیاز به عملیات زمان بر و محدودیت های اجرایی، برای استفاده به عنوان مقاوم سازی موقت در شرایط اضطراری پس از زلزله مناسب نیستند. از این رو، مرور مطالعات پیشین ضروری است تا مشخص شود چه روش هایی ارائه شده، چه محدودیت هایی دارند و کدام خلأها همچنان بدون پاسخ مانده اند. روش های رایج مقاوم سازی شامل بزرگ کردن مقطع و استفاده از ژاکت فولادی یا پوشش های کامپوزیتی FRP است (Dehghani et al., 2015; Ji et al., 2023; Nateghi-Alahi & Khazaei-Poul, 2013; Shokrzadeh & Nateghi-Alahi, 2022). بزرگ کردن مقطع ظرفیت باربری ستون را افزایش می دهد، اما به فضای اجرایی زیاد و زمان عمل آوری طولانی نیاز دارد که همین موضوع کاربرد آن را در شرایط اضطراری محدود می کند (Ahmadi & Nateghi-Alahi, 2022; Bett et al., 1988; Ji et al., 2023; Rodriguez & Park, 1994; Shokrzadeh & Nateghi-Alahi, 2022). اگرچه ژاکت فولادی در بهسازی ستون های آسیب دیده و افزایش شکل پذیری عملکرد موفقی دارد، کارایی آن در مقاطع چهارگوش به واسطه بروز کماتش موضعی صفحات و عدم ایجاد محصورشدگی یکنواخت کاهش می یابد (Wu et al., 2003; Xiao & Wu, 2003). در این راستا، ژاکت های فولادی پیش تنیده به منظور ارتقای کیفیت محصورشدگی معرفی شده اند؛ با این حال، نیاز به نیروی پیش تنیدگی، تجهیزات اختصاصی و دقت اجرایی، کاربرد آنها را در مقاوم سازی موقت که سرعت نصب اولویت اصلی است، محدود می کند (Zhang et al., 2021). محصورسازی با FRP به دلیل وزن کم، مقاومت بالا و سهولت اجرا یکی از روش های رایج مقاوم سازی ستون های بتن آرمه است. این روش بدون افزایش قابل توجه در ابعاد مقطع، موجب بهبود ظرفیت فشاری و شکل پذیری ستون می شود و تأثیر محدودی بر رفتار دینامیکی سازه دارد. (Capani et al., 2017; He et al., 2015; Obaidat

مقاوم سازی از قبیل ژاکت بتنی، ژاکت فولادی و ورق های FRP، طی دهه های اخیر عملکرد موفقی در افزایش ظرفیت و شکل پذیری اعضای بتن آرمه داشته اند (Li et al., 2024). با این حال، این روش ها معمولاً زمان بر بوده و نیازمند تجهیزات، نیروی متخصص و عملیات اجرایی گسترده هستند.

افزون بر این، افزایش وزن مرده در ژاکت های بتنی (Shokrzadeh & Nateghi-Alahi, 2022)، مشکلات کماتش و ضعف در آتش سوزی در ژاکت های فولادی (Wu et al., 2003; Xiao & Wu, 2003)، وابستگی سیستم های FRP به چسب اپوکسی و عملکرد ضعیف آنها تحت حرارت (Shokrzadeh et al., 2022; Zerbe et al., 2024) از جمله محدودیت های مهم این روش ها است. پس از وقوع زلزله، سازه های آسیب دیده همچنان در معرض خطر پس لرزه ها قرار دارند و ورود به این سازه ها برای عملیات امدادی، بازرسی، یا اجرای اقدامات اولیه، بدون اتخاذ تدابیر ایمنی مناسب، بسیار خطرناک است (Maheswaran et al., 2022). در چنین شرایطی، هدف اصلی نه مقاوم سازی دائمی، بلکه مقاوم سازی موقت، سریع، کم هزینه و قابل اجرا در محیط پرخطر پس از زلزله است. این نوع مقاوم سازی باید به گونه ای باشد که در کوتاه ترین زمان نصب شده، ایمنی لازم برای ورود محدود و کنترل شده به ساختمان را فراهم کرده و بدون نیاز به تجهیزات پیچیده اجرا شود. با توجه به این نیاز، پژوهش حاضر به بررسی عملکرد چند روش مقاوم سازی موقت مبتنی بر ژاکت فولادی و اجزای اتلاف انرژی پرداخته است. این سیستم ها با هدف ایجاد محصورشدگی مناسب، کنترل ناحیه مفصل پلاستیک و افزایش جذب انرژی در ستون های آسیب دیده، طراحی و در مقیاس آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته اند. نتایج حاصل می تواند دیدگاه روشن تری نسبت به کارایی روش های موقت در مقابله با بارهای شبه لرزه ای و افزایش ایمنی سازه های آسیب دیده ارائه دهد.

۲- تاریخچه تحقیقات

در سال های اخیر، بخش عمده پژوهش ها در زمینه

این روش‌ها عملکرد مناسبی در برخی شرایط نشان داده‌اند، اما هزینه بالا، محدودیت فضا و ناسازگاری احتمالی با اجزای موجود سازه، استفاده گسترده از آنها را محدود می‌کند (Shokrzadeh et al., 2024). با این وجود، روش‌های مبتنی بر محصورسازی پیش‌تنیده نشان داده‌اند که می‌توانند بخشی از محدودیت‌های روش‌های سنتی را جبران کرده و در شرایط بارگذاری سنگین عملکرد مطلوبی ارائه دهند. افزون بر روش‌های مرسوم، استفاده از مواد و روش‌های نوینی مانند آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) و محصورسازی با نوار CFRP نیز به‌عنوان راهکارهای جایگزین مطرح شده است. این سیستم‌ها در بهبود مقاومت و شکل‌پذیری ستون‌ها، به‌ویژه تحت بارهای شدید، عملکرد قابل قبولی نشان داده‌اند؛ اما هزینه بالا، محدودیت‌های فضایی و چالش‌های مربوط به سازگاری با اجزای موجود سازه مانع به‌کارگیری گسترده آنها می‌شود (Jin et al., 2021). در این میان، روش‌های مبتنی بر محصورسازی پیش‌تنیده (که در آنها فشار جانبی اولیه پیش از آغاز بارگذاری فراهم می‌شود) توانسته‌اند بخشی از محدودیت‌های روش‌های سنتی را برطرف کنند و در شرایط بارگذاری سنگین عملکرد مؤثرتری ارائه دهند.

۳- اهمیت تحقیق

با وجود پژوهش‌های گسترده در زمینه بهسازی لرزه‌ای، مطالعات موجود درباره رفتار ستون‌های بتن‌آرمه که پس از تجربه آسیب شدید تحت یک مقاوم‌سازی کوتاه‌مدت قرار می‌گیرند، همچنان محدود است. بیشتر مطالعات انجام شده، بر مقاوم‌سازی دائمی تمرکز دارد. در چنین شرایطی مشخص نیست که یک روش موقت تا چه اندازه می‌تواند از گسترش خرابی جلوگیری کند، آیا قادر است بخشی از سختی از دست‌رفته ستون را بازیابی کند، تمرکز تغییر شکل‌ها در ناحیه پایه ستون را کنترل نماید، یا توان جذب انرژی ستون را در چرخه‌های بارگذاری بهبود بخشد. نبود داده‌های تجربی معتبر در این زمینه باعث شده که ارزیابی عملکرد روش‌های موقت در شرایط

(et al., 2020; Shokrzadeh & Nateghi-Alahi, 2025a). با این حال، عملکرد FRP در عمل با دو محدودیت اساسی مواجه است: نخست آنکه رفتار محصورشدگی آن وابسته به تغییر شکل است و الیاف تنها پس از بروز تغییر شکل‌های جانبی قابل توجه در بتن وارد عمل می‌شوند؛ دوم و مهم‌تر، ضعف اتصال چسب-بتن-الیاف است که معمولاً منجر به جداشدگی زود هنگام، قله‌کن شدن پوشش سطحی بتن و در نتیجه عدم بسیج کامل ظرفیت الیاف می‌گردد (Zerbe et al., 2022). این محدودیت‌ها باعث می‌شود تنها بخش محدودی از مقاومت واقعی FRP مورد استفاده قرار گیرد. بر همین اساس، پژوهش‌های اخیر استفاده از نوارها یا الیاف پیش‌تنیده را جهت اعمال فشار جانبی اولیه و بهبود کارایی محصورشدگی از ابتدای بارگذاری پیشنهاد کرده‌اند (Janke et al., 2009; Moghaddam et al., 2010; Zhou et al., 2012). در سال‌های اخیر، روش‌های ترکیبی نیز برای بهبود عملکرد ستون‌های آسیب‌دیده توسعه یافته‌اند. یکی از این رویکردها، استفاده هم‌زمان از الیاف FRP نصب‌شده در عمق مقطع (NSM)^۲ در امتداد طولی ستون و محصورسازی بیرونی (EB)^۳ است. این ترکیب در مطالعات آزمایشگاهی توانسته است مقاومت، سختی و شکل‌پذیری ستون‌های آسیب‌دیده تحت بارهای محوری را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد (Chellapandian et al., 2019; Chinthapalli et al., 2020). با این حال، کاربرد FRP در برابر بارهای جانبی با چالش‌هایی همراه است؛ زیرا سیستم‌های EB-CFRP برای انتقال مؤثر نیرو میان تقویت طولی و فونداسیون به جزئیات اتصال پیچیده یا انکرها نیاز دارند. روش NSM-FRP می‌تواند بخشی از این مشکل را کاهش دهد، اما ایجاد حفره‌های مستقیم در فونداسیون برای نصب میلگردهای FRP (به‌ویژه در ستون‌هایی با محدودیت فضایی) هنوز یک مانع اجرایی جدی محسوب می‌شود (Humairy et al., 2026; Shokrzadeh et al., 2022). علاوه بر این، مواد نوینی مانند آلیاژهای حافظه‌دار (SMA) و روش‌های محصورکننده خارجی نظیر CFRP یا طناب‌های الیافی نیز به‌عنوان روش‌های جایگزین پیشنهاد شده‌اند.

ستون‌های مقاوم‌سازی شده، بعد نوآورانه دیگری است که پیش‌تر در ادبیات گزارش نشده بود.

۴- معرفی نمونه‌ها و متغیرهای آزمایش

برنامه آزمایشگاهی پژوهش حاضر بر اساس ساخت و آزمون ستون‌های بتن آرمه در مقیاس یک‌سوم تدوین شده است؛ به گونه‌ای که ابعاد هندسی، جزئیات آرماتورگذاری و نسبت بار محوری آنها، بازنمایی قابل‌اتکایی از ستون‌های رایج در سازه‌های بتنی شهری واقع در مناطق لرزه‌خیز باشد. در گام نخست، سه ستون شاهد بدون هرگونه تقویت تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند تا منحنی‌های نیرو-جابجایی، الگوی ترک‌خوردگی، سختی مؤثر، سطوح تخریب و ظرفیت اتلاف انرژی آنها به‌عنوان مبنای ارزیابی عملکرد ثبت شود. در گام بعد، همین ستون‌ها پس از ایجاد آسیب قابل‌ملاحظه در ناحیه مفصل پلاستیک، با استفاده از سه روش مقاوم‌سازی موقت مبتنی بر ژاکت فولادی و اجزای جذب انرژی، ترمیم شده و مجدداً تحت همان پروتکل بارگذاری آزمایش شدند.

روش‌های مورد بررسی عبارت‌اند از:

– ژاکت فولادی مجهز به المان‌های $^{\text{Y}}\text{ADAS}$ (SJADAS)،

– ژاکت فولادی همراه با ورق فولادی موج‌دار (SJCSS)،

– ژاکت فولادی همراه با دستک (SJAKB).

وجه مشترک این روش‌ها ماهیت موقت، پیچ‌ومهره‌ای و نیمه‌فعال آنهاست؛ به گونه‌ای که قابلیت نصب سریع، عدم نیاز به جوشکاری گسترده، اتصالات مکانیکی قابل‌حذف و امکان استفاده در محیط‌های ناایمن پس از زلزله را فراهم می‌کنند. بهره‌گیری از ژاکت فولادی دوبخشی پیش‌ساخته، گروت زودگیر و اجزای تقویتی اختصاصی، علاوه بر تسهیل فرایند اجرا، به کنترل کماتش میلگردهای طولی، محصورشدگی هسته بتن و محدودسازی ناحیه مفصل پلاستیک کمک می‌کند.

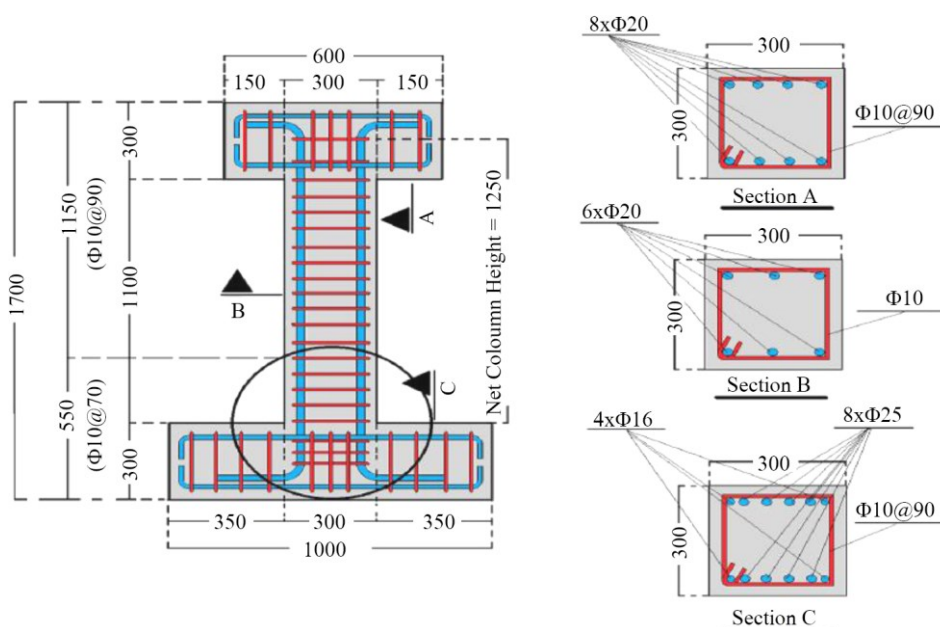
۴-۱- مشخصات نمونه‌ها

در این پژوهش، نمونه‌ها به‌صورت ستون‌های بتن آرمه با

واقعی با عدم قطعیت همراه باشد. این خلأ پژوهشی نشان می‌دهد که آگاهی دقیق از رفتار ستون آسیب‌دیده پس از اجرای یک مقاوم‌سازی سریع برای تصمیم‌گیری مهندسی در شرایط پس‌اززلزله ضروری است. آنچه مورد نیاز است شناختی روشن از این موضوع است که این روش‌ها چگونه بر روند پیشرفت آسیب، پایداری اولیه و شاخص‌های لرزه‌ای مؤثرند و تا چه حد می‌توانند شرایط لازم برای ورود کوتاه‌مدت به ساختمان را فراهم کنند. هدف اصلی این پژوهش، توسعه و ارزیابی آزمایشگاهی سه روش مقاوم‌سازی موقت، سریع و قابل‌نصب با اتصالات پیچی برای ستون‌های بتن آرمه شدیداً آسیب‌دیده در سناریوی پس‌لرزه است؛ به گونه‌ای که میزان بازیابی سختی، کنترل تمرکز تغییر شکل، بهبود شکل‌پذیری و افزایش ظرفیت اتلاف انرژی ستون‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای در حضور بار محوری ثابت به‌صورت دقیق اندازه‌گیری و مقایسه شود. پژوهش حاضر با هدف پاسخ‌گویی به این نیاز، سه روش مقاوم‌سازی موقت مبتنی بر ژاکت فولادی را مورد بررسی قرار می‌دهد که همگی با اتصالات پیچی و بدون تجهیزات پیچیده قابل‌نصب‌اند. ارزیابی ستون‌هایی که پیش از مقاوم‌سازی تا سطح آسیب شدید بارگذاری شده‌اند، امکان تحلیل واقعی اثر این روش‌ها بر رفتار چرخه‌ای ستون را فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که هر روش چگونه بر کنترل خرابی، بازیابی نسبی سختی، بهبود تغییر شکل‌پذیری و افزایش توان انرژی‌گیری ستون تأثیر می‌گذارد. نوآوری این پژوهش در آن است که برای نخستین بار مقاوم‌سازی موقت ستون‌های بتن آرمه شدیداً آسیب‌دیده را با استفاده از سه روش ژاکت فولادی پیچی ($^{\text{Y}}\text{ADAS}$)^۴، SJCSS^۵ و SJAKB^۶ به‌صورت آزمایشگاهی بررسی می‌کند. این روش‌ها برخلاف روش‌های دائمی، امکان نصب سریع و خشک را برای شرایط اضطراری پس‌اززلزله فراهم می‌کنند. این پژوهش بینش جدیدی در خصوص بازیابی سختی ستون، کنترل تمرکز تغییر شکل در پای ستون و افزایش توان اتلاف انرژی تحت بارگذاری چرخه‌ای ارائه می‌دهد. همچنین توسعه و اعتبارسنجی یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی رفتار غیرخطی

نمایش داده شده است. جزئیات آرماتورگذاری نمونه‌ها بر اساس آیین‌نامه ACI 318-19 طراحی شد؛ آیین‌نامه‌ای که بر تأمین شکل‌پذیری کافی در ستون‌ها و به‌ویژه ناحیه اتصال تأکید دارد. ابعاد پایه صلب برابر $300 \times 300 \times 100$ میلی‌متر و ابعاد کلاهک ستون $300 \times 300 \times 600$ میلی‌متر در نظر گرفته شد تا سختی مرزی مناسب فراهم شده و ناحیه مفصل پلاستیک به‌طور مشخص در پایین‌ترین بخش ستون تشکیل شود. برای آرماتور طولی، تعداد شش میلگرد با قطر ۲۰ میلی‌متر در دو وجه موازی محور خمش مطابق جدول (۱) استفاده شد.

مقطع مربعی به ابعاد 300×300 میلی‌متر و ارتفاع کلی ۱۲۵۰ میلی‌متر ساخته شدند. انتخاب مقطع مربعی و ابعاد مذکور با هدف بازنمایی هندسه ستون‌های متداول در سازه‌های بتن‌آرمه شهری و هماهنگی با محدودیت‌های تجهیزات آزمایشگاهی انجام گرفت. نسبت ارتفاع به عرض مقطع به گونه‌ای تعیین شد که تشکیل مفصل پلاستیک در پای ستون تحت بارگذاری چرخه‌ای امکان‌پذیر باشد و رفتار خمشی - شکل‌پذیر کنترل‌کننده پاسخ سازه باقی بماند. هندسه کلی ستون‌ها شامل ابعاد مقطع، ارتفاع آزاد، ابعاد پایه صلب و کلاهک در شکل (۱)



شکل (۱): هندسه کلی ستون‌ها، ابعاد مقطع، نسبت ارتفاع به عرض و موقعیت کلاهک و پایه.

جدول (۱): نام‌گذاری و جزئیات نمونه‌های شاهد و مقاوم‌سازی شده.

نام نمونه	ابعاد ستون (میلی‌متر)	ابعاد فونداسیون (میلی‌متر)	ابعاد کلاهک (میلی‌متر)	جزئیات تعمیر/مقاوم‌سازی
CS1	$300 \times 300 \times 1100$	$300 \times 300 \times 1000$	$300 \times 300 \times 600$	نمونه شاهد
CS2	$300 \times 300 \times 1100$	$300 \times 300 \times 1000$	$300 \times 300 \times 600$	نمونه شاهد
CS3	$300 \times 300 \times 1100$	$300 \times 300 \times 1000$	$300 \times 300 \times 600$	نمونه شاهد
CS1-SJADAS	$300 \times 300 \times 1100$	$300 \times 300 \times 1000$	$300 \times 300 \times 600$	نمونه تعمیر شده با گروت سیمانی و ژاکت فولادی همراه با المان ADAS
CS2-SJCSS	$300 \times 300 \times 1100$	$300 \times 300 \times 1000$	$300 \times 300 \times 600$	نمونه تعمیر شده با گروت سیمانی و ژاکت فولادی همراه با ورق فولادی موج‌دار
CS3-SJAKB	$300 \times 300 \times 1100$	$300 \times 300 \times 1000$	$300 \times 300 \times 600$	نمونه تعمیر شده با گروت سیمانی و ژاکت فولادی همراه با دستک

نسبت آرماتور طولی در محدوده مجاز آیین نامه و بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۶ انتخاب گردید تا علاوه بر تأمین مقاومت مورد نیاز، از بروز رفتار ترد ناشی از درصد بالای فولاد جلوگیری شود. آرماتور عرضی از خاموت های قطر ۱۰ میلی متر با فواصل فشرده در ناحیه پای ستون اجرا شد تا وقوع خرابی برشی کنترل شده و ستون تحت بارگذاری چرخه ای عمدتاً رفتار خمشی داشته باشد. این آرایش آرماتوری تضمین می کند که مکانیسم تشکیل مفصل پلاستیک مطابق هدف طراحی، قابل پیش بینی و قابل کنترل باشد.

۴-۲- معرفی روش های مقاوم سازی موقت

روش مقاوم سازی موقت مورد استفاده در این پژوهش بر پایه یک ژاکت فولادی دو بخشی پیش ساخته توسعه یافته است؛ سیستمی که برای شرایط اضطراری پس از زلزله و با هدف فراهم کردن مداخله ای سریع، خشک، ایمن و بدون نیاز به عملیات سنگین کارگاهی طراحی شده است. ژاکت در آزمایشگاه ساخته شده و در محل پروژه تنها با پیچ های پرمقاومت نصب می شود. پس از قرارگیری دو نیمه آن در اطراف ستون، فاصله حلقه ای میان سطح ستون و جداره داخلی ژاکت با گروت سیمانی پر می شود تا پیوستگی مکانیکی لازم برای انتقال نیرو تأمین گردد. کارکردهای اصلی این ژاکت شامل افزایش محصورشدگی بتن هسته، کنترل کماتنش آرماتورهای طولی و ارتقای سختی و انرژی پذیری چرخه ای ستون آسیب دیده است.

بر این مبنای، سه پیکربندی مختلف از این ژاکت ارزیابی شده است که هر سه از منطق سازه ای مشابهی پیروی می کنند، اما مکانیسم انتقال نیرو و میزان انرژی پذیری متفاوتی ایجاد می کنند. نخستین پیکربندی که در شکل (۲-الف) نمایش داده شده است، مبتنی بر استفاده از صفحات فولادی انرژی بر در ارتفاع ناحیه مفصل پلاستیک است. این صفحات با رفتار چرخه ای پایدار خود عملکردی مشابه میراگرهای ADAS ایجاد کرده و با افزایش سختی اولیه سیستم، دامنه تغییر شکل های ستون آسیب دیده را محدود می کنند. اگرچه

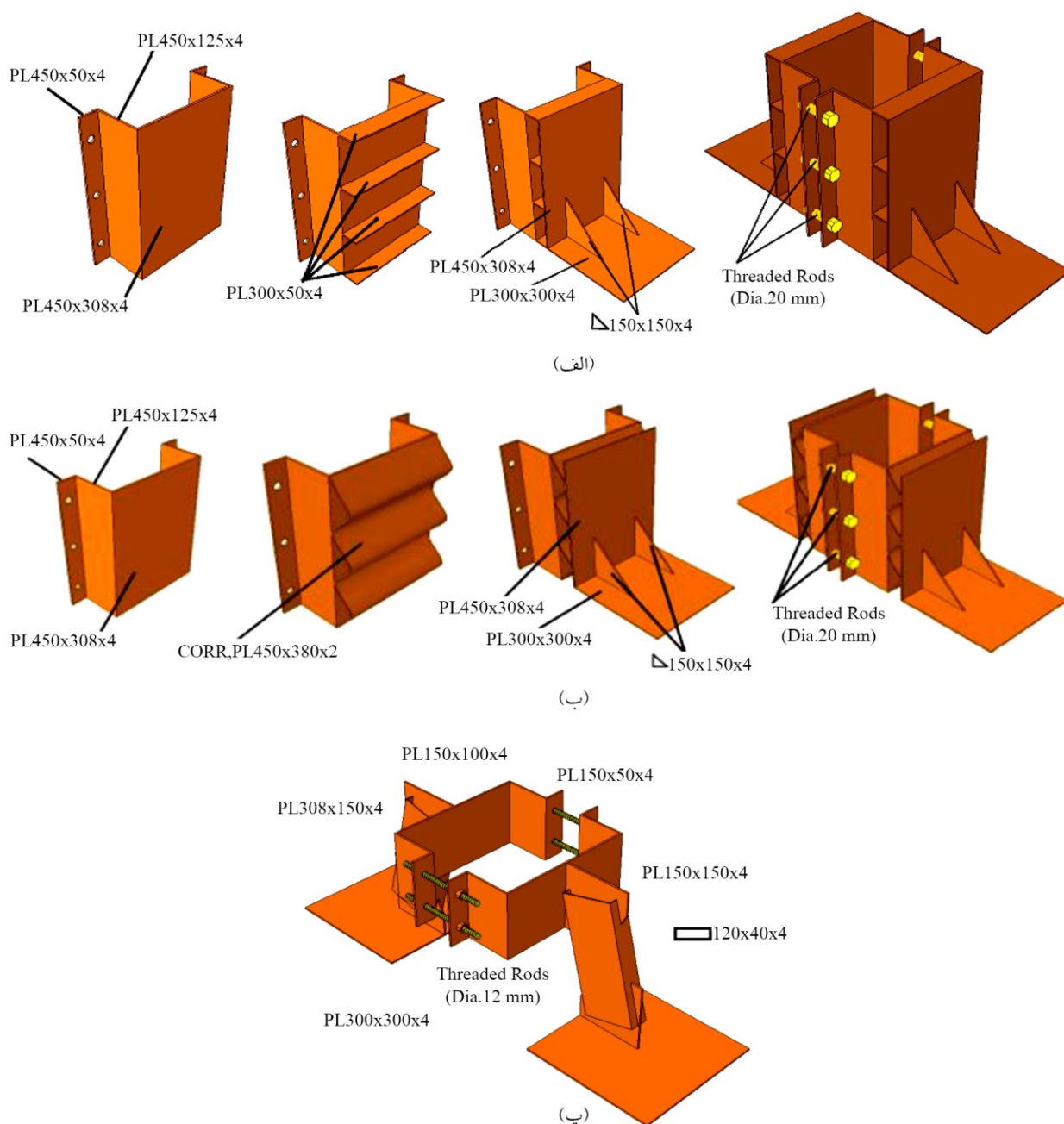
قابلیت تنظیم و تعویض این صفحات مزیت مهمی محسوب می شود، اما رفتار آنها نسبت به کیفیت نصب و نحوه درگیری مکانیکی حساس است. در پیکربندی دوم که نمونه آن در شکل (۲-ب) نشان داده شده است، از یک آرایش مرکب شامل ورق فولادی موج دار قرار گرفته میان دو ورق فولادی صاف استفاده شده است. این چیدمان سه لایه به گونه ای طراحی شده است که ورق موج دار در مرکز، ضمن فراهم کردن درگیری مکانیکی بهتر با گروت و افزایش تنش های اصطکاکی - فشاری، موجب افزایش سختی جانبی موضعی در ناحیه مفصل پلاستیک شود. قرارگیری ورق موج دار بین دو صفحه صاف باعث می شود تغییر شکل های موضعی ایجاد شده در موج ها تحت بارگذاری چرخه ای، به صورت کنترل شده محدود شده و از رفتارهای ناخواسته نظیر کماتنش یا لهیدگی موضعی زود هنگام جلوگیری شود. این آرایش برخلاف سیستم های انرژی بر مستقل مانند ADAS، به دنبال ایجاد حلقه های هیستریزیس گسترده نیست؛ بلکه هدف آن تقویت محصورشدگی بتن هسته، کنترل کماتنش آرماتورهای طولی، افزایش پیوستگی میان گروت و ژاکت و تأمین سختی جانبی افزوده در محدوده رفتار غیرخطی است. موج های فولادی، با ایجاد مسیر انتقال تنش های فشاری و برشی به صورت چند جهته، یک رفتار پیوسته و پایدار در ناحیه بحرانی ستون فراهم می کنند. مهم ترین کارکرد این سیستم، پایداری بیشتر ناحیه مفصل پلاستیک و کاهش تمرکز تغییر شکل هاست، هر چند ظرفیت اتلاف انرژی آن نسبت به پیکربندی مبتنی بر صفحات ADAS پایین تر است و به کیفیت گروت ریزی و فشردگی مناسب آن حساسیت دارد. در پیکربندی سوم که نمونه آن در شکل (۲-پ) نشان داده شده است، یک دستک فولادی جانبی به ژاکت افزوده می شود و مسیری جدید برای انتقال نیرو ایجاد می کند. این دستک بخشی از تغییر مکان جانبی ستون را جذب کرده و تقاضای دوران در ناحیه مفصل پلاستیک را کاهش می دهد. نتیجه این آرایش، شکل گیری یک رفتار ترکیبی خمشی-محوری-برشی است که پایداری چرخه ای و سختی

۳-۴- فرایند ساخت نمونه‌ها و اجرای تعمیر موقت

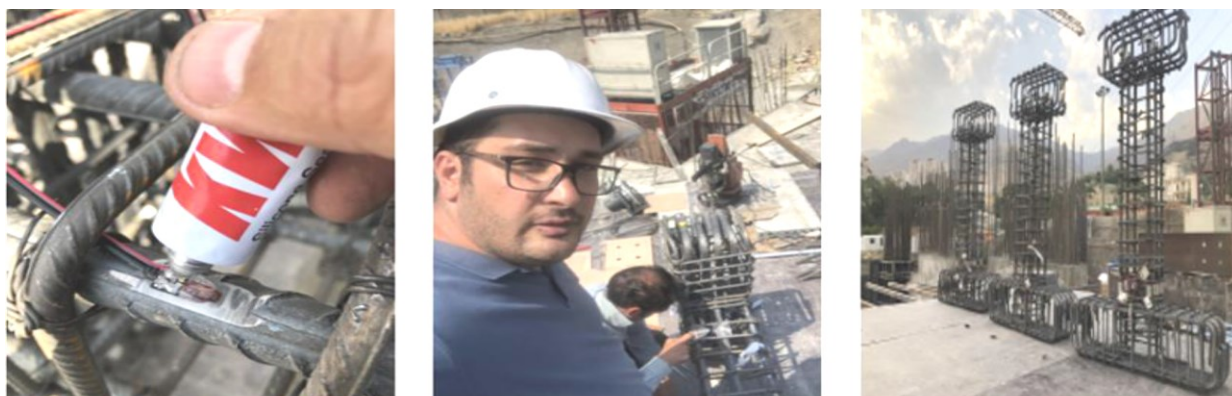
فرایند ساخت نمونه‌ها و آماده‌سازی آنها برای آزمون چرخه‌ای با هدف ایجاد شرایطی کنترل‌شده و قابل اعتماد تدوین شد تا پاسخ واقعی ستون‌های بتن‌آرمه در وضعیت آسیب‌دیده و پس از اعمال تعمیر موقت قابل ارزیابی باشد.

در شکل (۳) مشاهده می‌شود، ابتدا قفسه‌های آرماتورگذاری در قالب مستقر شدند و پس از اطمینان از هم‌محوری و سختی کافی، گچ‌های کرنش بر روی میلگردهای انتخابی نصب شد.

پس تسلیم ستون را افزایش می‌دهد. این پیکربندی به ویژه در ستون‌هایی که دچار تغییر مکان ماندگار قابل ملاحظه هستند اثربخش‌تر است، هر چند تنظیم موقعیت و درگیری مناسب دستک نسبت به خطاهای اجرایی حساس‌تر است. با وجود تفاوت‌های یادشده، هر سه پیکربندی بر اصول مشترکی تکیه دارند: نصب سریع و مکانیکی، ایجاد محصورشدگی موضعی مؤثر، کنترل کماتش آرماتورهای طولی و ارتقای رفتار غیرخطی ستون در ناحیه مفصل پلاستیک است.



شکل (۲): اجزای سه روش مقاوم‌سازی موقت: (الف) روش SJADAS، (ب) روش SJCSSD و (پ) روش SJAKB.

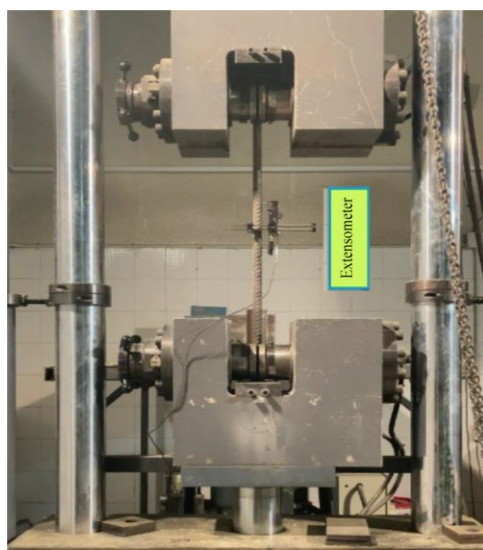


(الف)

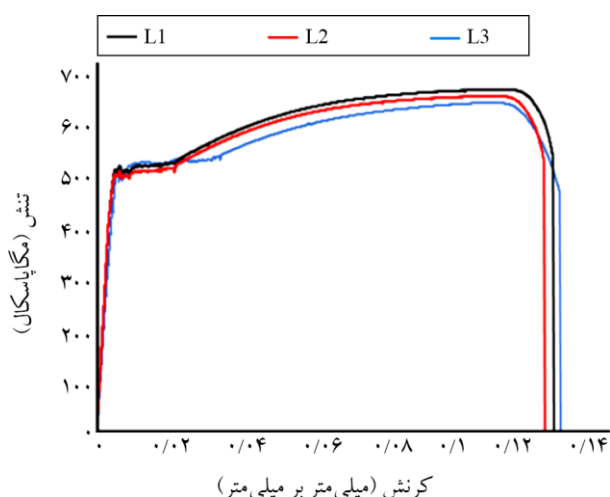


(ب)

شکل (۳): مراحل ساخت نمونه‌ها و روش‌های مقاوم‌سازی موقت دو بخشی پیش‌ساخته.



شکل (۴): آزمایش کشش میلگرد.



شکل (۵): نمودار تنش-کرنش میلگرد با قطر ۲۰ میلی‌متر تحت بارگذاری یکنواخت کششی.

هم‌محوری و سختی کافی، گنج‌های کرنش بر روی میلگردهای انتخابی نصب شد. برای اندازه‌گیری کرنش‌ها، از کرنش‌سنج‌های TML مدل FLA-3-11 استفاده شد. نصب این حسگرها پیش‌نیاز تحلیل دقیق رفتار موضعی ستون، به‌ویژه در محدوده مفصل پلاستیک، محسوب می‌شود. پس از آن، بتن‌ریزی پایه صلب و سپس بتن‌ریزی بخش ستون انجام شد تا نمونه‌ها رفتاری مشابه ستون‌های واقعی داشته باشند. به‌منظور تعیین دقیق ویژگی‌های مکانیکی فولادهای مصرف‌شده در ستون‌های بتن‌آرمه و همچنین در اجزای فولادی سیستم‌های مقاوم‌سازی موقت، مجموعه‌ای از آزمایش‌های استاندارد کشش بر روی میلگردهای طولی، میلگردهای عرضی و کوپن‌های استخراج‌شده از ورق‌های فولادی ژاکت‌ها هر کدام سه تکرار انجام شد. این داده‌ها مبنای اصلی تحلیل رفتار چرخه‌ای ستون‌ها، تعیین ظرفیت خمشی و برشی، بررسی کمانش میلگردهای طولی و ارزیابی عملکرد اجزای انرژی‌بر در سیستم‌های مقاوم‌سازی هستند (جدول ۲). برای میلگردهای طولی و عرضی، نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM A370 (ASTM International, 2020) آماده و در دستگاه کشش یونیورسال مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل‌های ۴ و ۵). علاوه بر میلگردها، تمامی ورق‌های فولادی به‌کاررفته در ژاکت‌های نیز تحت آزمایش کوپن تست قرار گرفتند. برای هر مجموعه، کوپن‌هایی مطابق استانداردهای ASTM A370 از ورق‌ها بریده شده و در دستگاه کشش آزمایش شدند (جدول ۲).

جدول (۲): میانگین خواص مکانیکی میلگردهای و ژاکت فولادی.

	Specimen	Thickness (Diameter) (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)
Longitudinal	L ₁	20	532	691	1.97×10^5
	L ₂	20	530	683	1.98×10^5
	L ₃	20	534	686	2.04×10^5
Average Value	L	20	532	687	2.00×10^5
Transverse	T ₁	10	480	622	2.02×10^5
	T ₂	10	478	621	2.04×10^5
	T ₃	10	481	622	1.98×10^5
Average Value	T	10	480	622	2.02×10^5
Steel Jacket	S ₁	4	349	490	1.93×10^5
	S ₂	4	340	502	1.87×10^5
	S ₃	4	326	481	1.90×10^5
Average Value	S	4	338	491	1.90×10^5

فضای بین ستون و ژاکت فولادی، نمونه‌های مکعبی مطابق استانداردهای رایج ساخته و پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۶). در این آزمایش، نیروی فشاری یکنواخت توسط دستگاه بر نمونه اعمال شده و مقاومت فشاری در لحظه شکست ثبت شد. این آزمایش علاوه بر تعیین مقاومت نهایی، امکان استخراج بخشی از پارامترهای منحنی تنش‌کشش و بررسی رفتار مصالح در محدوده ترد را نیز فراهم ساخت. نتایج مقاومت فشاری بتن در جدول (۵) و نتایج مربوط به گروت در جدول (۶) ارائه شده‌اند. این داده‌ها برای تحلیل اثر محصورشدگی، مقایسه عملکرد ستون‌های شاهد و تقویت‌شده و بررسی تغییرات سختی در چرخه‌های رفت‌و برگشتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

بتن مصرفی در تمامی نمونه‌های ساخته شده یکسان بوده است و با طرح اختلاط موجود در جدول (۳) ساخته شدند. در نمونه‌های مقاوم‌سازی‌شده، فضای بین ستون و ژاکت فولادی دو بخشی توسط گروت سیمانی زودگیر و غیرانقباضی پر شد. این گروت نقش کلیدی در انتقال نیرو، پر کردن حفرات، تأمین محصورشدگی موضعی و ایجاد پیوستگی میان ستون آسیب‌دیده و سیستم مقاوم‌سازی دارد. طرح اختلاط گروت مصرف‌شده مطابق جدول (۴) بوده است. به‌منظور تعیین مشخصات مکانیکی مصالح مصرف‌شده در نمونه‌های آزمایشگاهی، مجموعه‌ای از آزمون‌های استاندارد بر روی بتن و گروت شامل مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم انجام شد. برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن مصرف‌شده در ستون‌ها و گروت مورد استفاده در

جدول (۳): طرح اختلاط استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها بتن.

Components	Cement	Gravel	Sand	Water	Additives(PS10)
Kg/m ³	420	515	1188	176	3.5

جدول (۴): طرح اختلاط استفاده شده برای ساخت نمونه‌های گروت.

Material	Pure Water	P.II.52.5 Portland Cement	Fine Sand	Steel Slag	Fly Ash	Polycarboxylic Water-Reducing Agent	Expansive Agent
Mix Ration (Kg/m ³)	339.3	910.9	729.6	482.4	217.9	47.5	15.9

جدول (۵): خصوصیات بتن مصرفی در نمونه‌ها

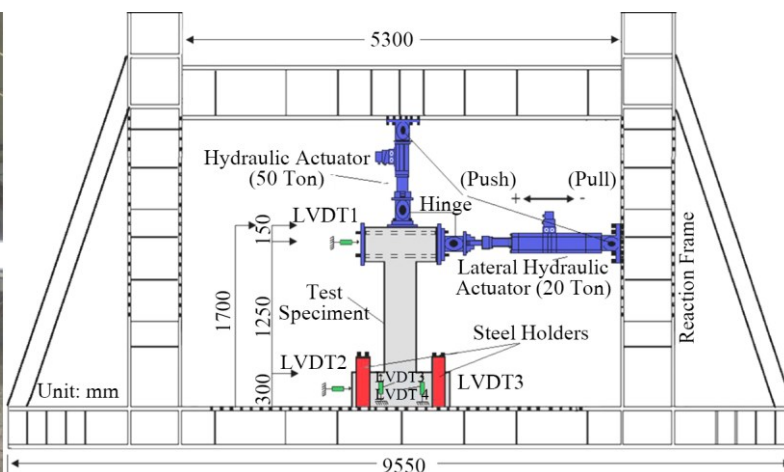
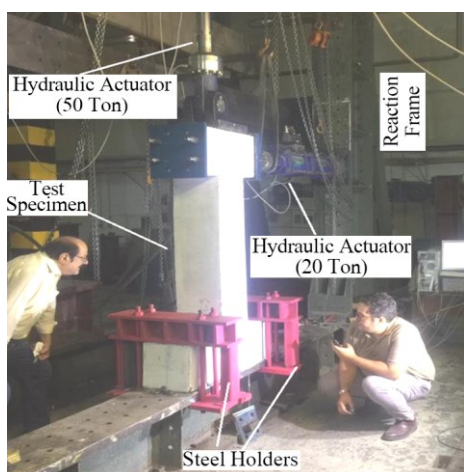
Specimen	Compressive Strength of Cubic Specimens (MPa)	f'c(MPa)	ε _{c0} (%)	ε _{cu} (%)	Weight (Kg)	Mass (Kg/m ³)
A	50.42	43.14	0.230	0.386	7.2	2150
B	51.23	44.28	0.225	0.376	7.3	2160
C	50.95	43.86	0.241	0.401	7.25	2140
Average Value	50.86	43.34	0.232	0.388	7.25	2150
Standard Deviation	0.2	0.16	0.012	0.038	7.3	2.160



شکل (۶): آماده‌سازی نمونه‌های بتنی و آزمایش فشاری و کششی.

جدول (۶): خصوصیات گروت مصرفی در نمونه‌ها.

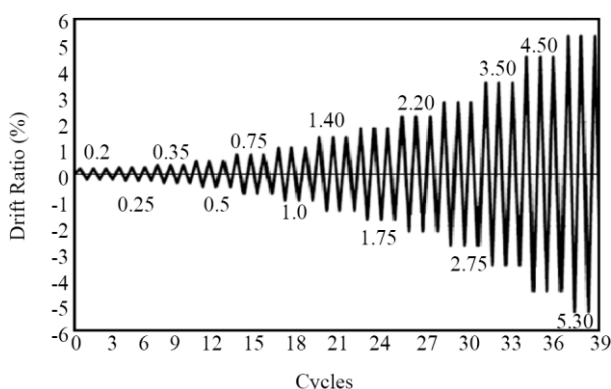
Specimen Groups	1d Compression Strength (MPa)	3d Compression Strength (MPa)	28d Compression Strength (MPa)	Fluidity Initial (mm)	Fluidity 30 min (mm)	Elasticity Modulus (MPa)
G1	28.6	39.2	57.2	319	291	35780.9
G2	31.1	44.8	59.3	319	291	36321.3
G3	35.3	46.5	64.8	319	291	36259.8
Average Value	30.7	43.5	60.4	319	291	36120.7



شکل (۷): تنظیمات آزمایشگاهی نمونه‌های ستون

۴-۴- تنظیمات آزمایشگاهی و پروتکل بارگذاری

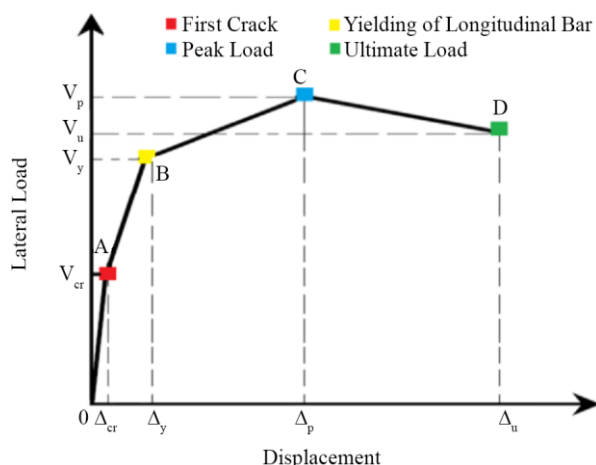
شکل (۸) دو مؤلفه تأثیرگذار در این آزمایش موجود است. مؤلفه اول میزان افزایش تغییر مکان و مؤلفه دوم تعداد تکرار در هر سطح تغییر مکان است. حداقل سه سیکل در هر سطح تغییر مکان در نظر گرفته شد. نمونه‌های شاهد ابتدا تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی چرخه‌ای با کنترل جابه‌جایی مطابق پروتکل ACI 1/374-05 (ACI Committee 374.1 et al., 2005) تا رسیدن به حداکثر دریفت ۵/۳ درصد بارگذاری شدند تا سطح آسیب شدید ایجاد گردد.



شکل (۸): پروتکل بارگذاری به صورت جابه‌جایی کنترل (ACI Committee 374.1, 2005).

پس از ساخت نمونه و انتقال آن به آزمایشگاه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله برای انجام آزمایش ابتدا نمونه با استفاده از جرثقیل موجود در آزمایشگاه به محل مورد نظر انتقال یافت و سپس توسط تجهیزاتی که برای گیردار کردن نمونه استفاده می‌شود، گیردار شد. بعد از حصول اطمینان از ثبات نمونه در فریم آزمایشگاه جک هیدرولیکی به بالای نمونه انتقال یافته و سپس بست‌های پیچی آن بسته شد. همچنین برای نیروی جانبی جک توسط میلگرد مخصوص بارگذاری (پین) به کلاهک بارگذاری متصل شد. سپس تغییر مکان‌سنج‌ها در جای مخصوص خود قرار گرفت. سیم‌های مخصوص دستگاه ثبت اطلاعات به کرنش‌سنج‌ها، تغییر مکان‌سنج‌ها و نیروسنج‌ها متصل و نمونه جهت بارگذاری آماده شد (شکل ۷).

نیروی محوری اعمال شده برابر با ۰.۱ FC Ag (ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2019) و نیروی جانبی اعمال شده به صورت جابه‌جایی کنترل و مطابق پروتکل نشان داده شده در



شکل (۹): نمودار چهار خطی نیرو- تغییر مکان و نمودارهای نیرو- جابه‌جایی.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در ستون‌های بتن آرمه معمولی، بار نهایی غالباً در محدوده ۸۰ تا ۸۵ درصد بار پیک مشاهده می‌شود (Anagnostou et al., 2019; Shokrzadeh et al., 2024). با این حال، چنانچه افت بار به این مقدار در طول آزمایش محقق نشود، آخرین مقدار ثبت‌شده تغییر مکان به عنوان تغییر مکان نهایی در نظر گرفته می‌شود؛ رویکردی که در تحلیل ستون‌هایی با ظرفیت باقیمانده مناسب قابل قبول است (Barrera et al., 2012; Shokrzadeh et al., 2025). نتایج رفتار چرخه‌ای، سیر گسترش ترک‌ها و خرابی تدریجی نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای در شکل (۱۰) به صورت منحنی‌های بار جانبی-تغییر مکان (دیرفت) ارائه شده است. دیرفت نسبت تغییر مکان جانبی به ارتفاع خالص ستون است و شاخص اصلی ارزیابی عملکرد چرخه‌ای ستون‌ها محسوب می‌شود. برای افزایش دقت در تحلیل روند تخریب، نقاط بحرانی شامل ترک‌خوردگی اولیه، تسلیم میلگردهای طولی، رسیدن به بار پیک و بار نهایی، بر اساس مشاهدات عینی، مقادیر کرنش، و تاریخچه بارگذاری استخراج و روی منحنی‌های شکل (۱۰) نشانه‌گذاری شده‌اند. جدول (۷) مجموعه نتایج آزمایش را شامل بار و تغییر مکان متناظر با ترک اولیه (V_{cr} و Δ_{cr})، بار و تغییر مکان متناظر با تسلیم (V_y و Δ_y)، بار و تغییر مکان پیک (V_p و Δ_p)، بار و تغییر مکان نهایی (V_u و Δ_u)، و همچنین مقادیر لنگر و دوران متناظر با این نقاط (M_p , θ_p , M_u , θ_u) ارائه می‌کند.

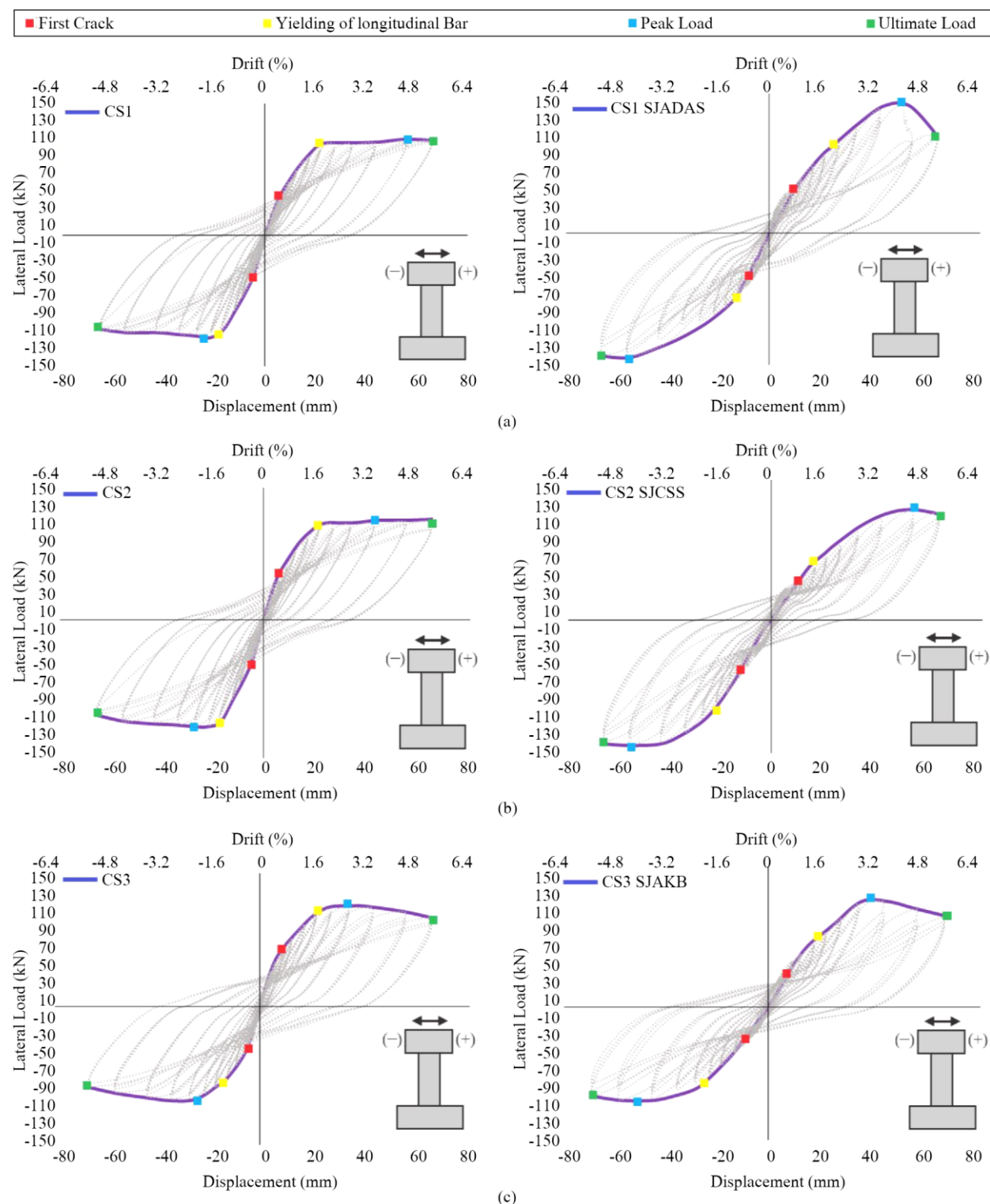
در این مرحله، بار محوری ثابت معادل $0.1 F_c A_g$ به‌طور پیوسته اعمال و توسط لودسل در هر لحظه پایش می‌شد. نوسانات بار محوری در حین اعمال دیرفت‌های جانبی تا ۵/۳ درصد، همواره کمتر از ± 1 درصد مقدار اسمی بوده که در محدوده خطای استاندارد ASTM E4 قرار دارد و تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج ندارد. پس از اتمام بارگذاری اولیه، بار جانبی به صفر کاهش یافت (بدون قطع بار محوری) و عملیات مقاوم‌سازی موقت انجام شد. پس از عمل‌آوری گروت (۷ روز)، نمونه‌های مقاوم‌سازی شده مجدداً تحت همان پروتکل از دیرفت صفر تا حداکثر دیرفت ۵/۳ درصد بارگذاری شد و بار محوری ثابت در کل فرآیند بدون تغییر باقی ماند.

۵- مشاهدات، تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

به‌منظور ارزیابی اثر روش‌های مقاوم‌سازی موقت بر عملکرد لرزه‌ای ستون‌های بتن آرمه آسیب‌دیده، رفتار چرخه‌ای نمونه‌ها تحت بارگذاری جانبی شبه‌استاتیکی و بار محوری ثابت مورد بررسی قرار گرفت. تمامی آزمایش‌ها مطابق پروتکل بارگذاری نشان داده شده در شکل (۸) (ACI Committee 374.1, 2005) اجرا شد و داده‌های نیرو، جابه‌جایی، کرنش، و الگوی خرابی در هر سیکل بارگذاری به‌طور کامل ثبت گردید. نتایج این بخش مبنای تحلیل رفتار چرخه‌ای، استخراج پارامترهای کلیدی مانند نیروی ترک‌خوردگی، تسلیم، مقاومت نهایی، تغییر مکان نهایی، افت سختی، ویژگی‌های پسماندی و شاخص‌های خرابی نمونه‌ها است. پیش از ارائه تحلیل‌های کمی، ویژگی‌های کلی رفتار چرخه‌ای نمونه‌های اصلی و مقاوم‌سازی شده در ادامه تشریح می‌شود.

۵-۱- رفتار چرخه‌ای ستون‌های بتنی قبل و بعد از تقویت

نمودار چهار خطی بار جانبی-تغییر مکان ستون‌ها در شکل (۹) ترسیم شده است. مطابق این مدل، نقطه تغییر شیب اولیه منحنی به‌عنوان نقطه آغاز ترک‌خوردگی تعریف می‌شود و نقطه تسلیم نیز بر اساس روش انرژی معادل تعیین می‌گردد (Deng et al., 2022; Sharifi et al., 2025; Yan et al., 2020).



شکل (۱۰): نمودارهای نیروی جانبی - تغییر مکان (دریخت) برای نمونه‌ها: (الف) CS1 و CS1-SJADAS، (ب) CS2 و CS2-SJCSS، و (پ) CS3 و CS3-SJAKB. نشانه‌گذاری‌های شکل، نقاط مهم فرایند کاهش ظرفیت نظیر آغاز ترک خوردگی، تسلیم میلگردهای طولی، بار بیشینه و بار نهایی را مشخص می‌کنند.

لازم به ذکر است که نمودارهای شکل (۱۰) پس از اصلاح (Shokrzadeh et al., 2025). نیروی برشی اصلاح شده طبق رابطه (۱) (Pettinga & Priestley, 2008) قابل محاسبه است:

اثرات ثانویه $P-\Delta$ (ناشی از برون مرکزی بار محوری) ارائه شده‌اند

جدول (۷): مقایسه مقادیر مربوط به رفتار چرخه‌ای ستون‌ها.

Specimen	Region	V_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	V_y (kN)	Δ_y (mm)	V_p (kN)	Δ_p (mm)	V_u (kN)	Δ_u (mm)	$\frac{\Delta_u}{\Delta_y}$
CS1	Pos..	40.00	5.10	106.00	25.20	110.00	40.00	100.00	65.00	-
	Neg.	-49.00	-5.50	-110.00	-17.20	-118.00	-26.00	-108.00	-66.00	-
	Avg	44.50	5.30	108.00	21.20	114.00	33.00	104.50	65.50	3.09
CS1 SJADAS	Pos.	26.00	5.00	91.00	21.00	145.00	55.00	110.00	66.00	-
	Neg.	-30.00	-5.20	-97.00	-21.60	-142.00	-55.20	-140.00	-65.00	-
	Avg.	28.00	5.10	94.00	21.30	143.50	55.10	125.00	65.50	3.08
CS2	Pos.	45.00	5.30	109.00	25.10	113.90	43.00	105.00	66.00	-
	Neg.	-50.00	-5.10	-115.00	-17.10	-120.10	-27.00	-107.00	-66.00	-
	Avg.	47.50	5.20	117.00	21.10	117.00	35.00	96.75	66.00	3.13
CS2 SJCSS	Pos.	20.00	5.00	75.00	21.00	125.00	55.30	120.00	66.00	-
	Neg.	-20.20	-5.20	-80.00	-17.00	-142.00	-55.10	-140.00	-66.00	-
	Avg.	20.10	5.10	77.50	19.00	133.50	55.20	130.00	66.00	3.47
CS3	Pos.	45.00	4.90	112.00	20.00	112.00	40.00	99.10	66.00	-
	Neg.	-50.00	-5.10	110.00	-21.00	-110.00	-34.00	-94.50	-64.00	-
	Avg.	47.50	5.00	111.00	20.50	111.00	37.00	96.80	65.00	3.17
CS3 SJAKB	Pos.	25.00	5.10	85.00	21.10	125.00	45.00	104.00	66.00	-
	Neg.	-20.00	-5.10	-80.00	-22.10	-105.00	-55.00	-100.00	-65.80	-
	Avg.	22.50	5.10	82.50	21.60	115.00	50.00	102.00	65.90	3.05

اختلاف‌های جزئی در ثبت کرنش‌ها نیز عمدتاً ناشی از ناهمخوانی‌های کوچک در محل نصب کرنش‌سنج‌ها بوده و تأثیر ماهوی بر روند تخریب نداشته است. در مقابل، سه نمونه تعمیر و مقاوم‌سازی شده رفتار متفاوت و کنترل‌شده‌تری از خود نشان دادند. در نمونه CS1-SJADAS، صفحات عرضی ADAS نقش مؤثری در محدودسازی گسترش مفصل پلاستیک و ایجاد سختی ثانویه ایفا کردند. این صفحات با جذب انرژی در سیکل‌های رفت و برگشتی موجب کاهش نرخ افت بار و افزایش پایداری منحنی چرخه‌ای شدند. در نمونه CS2-SJCSS، ورق فولادی موج‌دار با افزایش سطح تماس و محصورشدگی جانبی، از گسترش لهیدگی بتن و کماتش میلگردها جلوگیری کرده و باعث شد کاهش ظرفیت ستون در سیکل‌های بزرگ با شیب ملایم‌تری رخ دهد. این موضوع بیانگر عملکرد مناسب محصورشدگی در حفظ یکپارچگی هسته بتن بود. در نمونه CS3-SJAKB، عضو دستکی عملکرد چرخه‌ای سیستم را به‌صورت چشمگیری تحت تأثیر قرار داد. وجود این عضو سبب انتقال بخشی از نیروهای جانبی به مسیر فولادی، کاهش تقاضای خمشی ستون، و به‌تبع آن کاهش شدت آسیب در ناحیه مفصل پلاستیک شد. مکانیسم ترکیبی

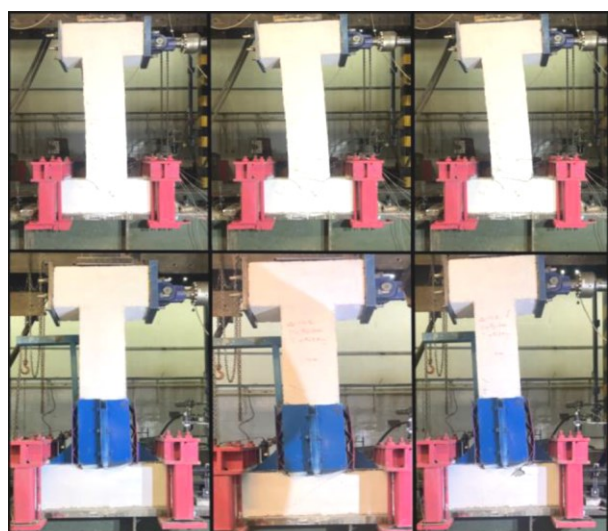
$$V_{exp} = V_{0exp} + \frac{P\Delta}{L} (P = 0.1A_g f'_c) \quad (1)$$

که در آن V_{0exp} نیروی جانبی اعمال شده را بدون در نظر گرفتن اثر $P-\Delta$ نشان می‌دهد، P نشان‌دهنده نیروی محوری اعمال شده، Δ نشان‌دهنده جابه‌جایی جانبی فعلی، و L نشان‌دهنده ارتفاع نمونه (ستون خالص) است. از منظر رفتار سازه‌ای، تمامی نمونه‌ها الگوی کلاسیک عملکرد خمشی - چرخه‌ای ستون‌های بتن آرمه را نشان دادند: ایجاد ترک‌های خمشی نسبتاً یکنواخت در ناحیه مفصل پلاستیک، ورود میلگردهای کششی به مرحله تسلیم، آغاز لهیدگی بتن در وجه فشاری، پوسته‌پوسته شدن بتن پوششی و در نهایت، کماتش میلگردهای طولی در سمت فشاری. این روند در نمونه‌های شاهد CS1، CS2 و CS3 با افزایش تدریجی دیررفتگی تشدید شد و ترکیب «کوماتش میلگردهای فشاری + لغزش بتن در سطوح مجاور مفصل پلاستیک» به‌عنوان مکانیسم اصلی کنترل‌کننده تخریب به‌وضوح قابل تشخیص بود. تمرکز کرنش در ناحیه مفصل پلاستیک و لغزش نسبی بخش فوقانی و تحتانی آن، بیانگر کاهش شانس بازیابی سختی و افزایش نرخ افت ظرفیت در سیکل‌های پایانی بود.

۵-۲- تحلیل ترک‌خوردگی بتن و مودهای خرابی

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که هر سه نمونه شاهد (CS1، CS2 و CS3) به‌طور مشخص دچار خرابی خمشی شدند؛ خرابی‌ای که با ترک‌خوردگی بتن پوششی در مراحل اولیه بارگذاری آغاز شده و پس از ورود میلگردهای طولی به ناحیه تسلیم، به لهیدگی موضعی بتن و در نهایت کمانش میلگردهای فشاری در محدوده مفصل پلاستیک منتهی گردید. نخستین ترک‌های خمشی مطابق شکل (۱۱) در تمام نمونه‌ها در محدوده اتصال ستون به فونداسیون ظاهر شد و با افزایش دیررفت، ترک‌ها عمدتاً در یک‌سوم پایین

فشاری-کششی در دستک موجب شد ستون در دیررفت‌های بزرگ رفتار پایدارتر و بدون فروپاشی ناگهانی از خود نشان دهد. به‌طور کلی، بررسی منحنی‌های شکل (۱۰) نشان می‌دهد که رفتار چرخه‌ای نمونه‌های مقاوم‌سازی‌شده نه تنها از نظر ظرفیت باربری، بلکه از منظر دوام سختی، کاهش پینچینگ، و افزایش توان اتلاف انرژی نسبت به نمونه‌های شاهد بهبود یافته است. این تفاوت به‌ویژه در سیکل‌های با دیررفت بالا برجسته‌تر است؛ جایی که نقش اجزای تقویتی در جلوگیری از کمانش و محدودسازی خرابی بتن هسته بیشترین اهمیت را دارد.

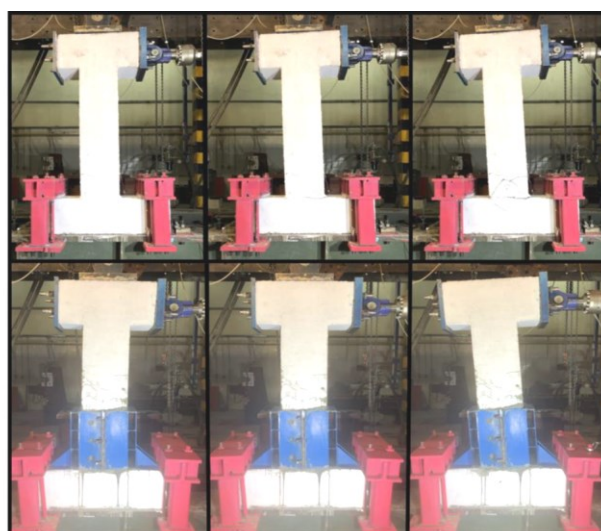


Drift = 1.4%

Drift = 3.5%

Drift = 5.3%

(ب)

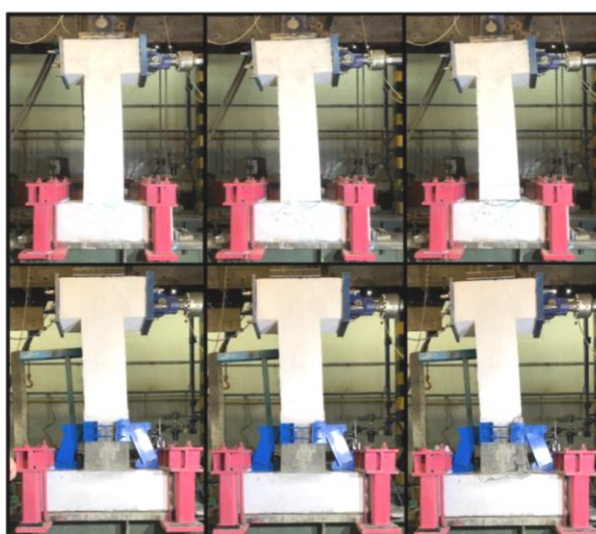


Drift = 1.4%

Drift = 3.5%

Drift = 5.3%

(الف)



Drift = 1.4%

Drift = 3.5%

Drift = 5.3%

(پ)

شکل (۱۱): الگوهای ترک و انتشار آسیب در تمام نمونه‌ها. (الف) CS1 و CS1 SJADAS و (ب) CS2 و CS2 SJCSS و (پ) CS3 و CS3 SJAKB.

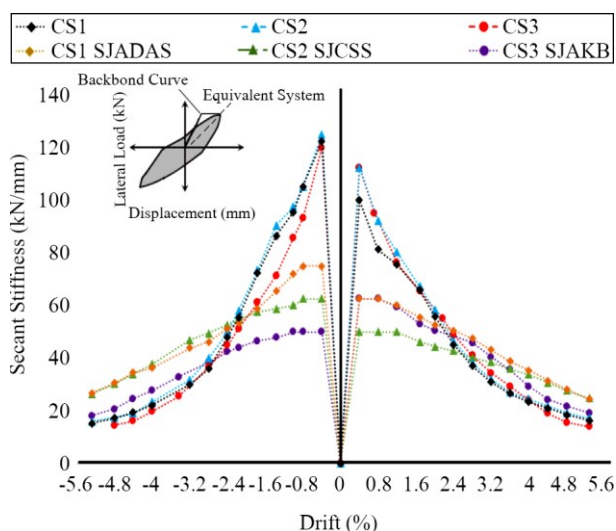
موج‌دار در تحمل تغییر شکل‌های چرخه‌ای و اتلاف انرژی، ستون CS2-SJCSS افت سختی کمتری نسبت به نمونه شاهد تجربه کرد و رفتار نزولی منحنی چرخه‌ای با شیب ملایم‌تری مشاهده شد. گروت، همانند نمونه قبلی، نقش مکمل در انتقال تنش فشاری و بازیابی یکپارچگی مقطع را ایفا کرد. در نمونه CS3-SJAKB، دستک رفتار ستون را به‌طور بنیادی تحت تأثیر قرار داد. این عضو با ایجاد مسیر باربری جانبی و محوری جدید، بخشی از نیروهای وارد بر ستون را از طریق سیستم فولادی منتقل کرد و بدین ترتیب تقاضای خمشی و برشی ستون به‌طور محسوسی کاهش یافت. این توزیع مجدد نیرو سبب شد که مفصل پلاستیک دیرتر شکل بگیرد و شدت خرابی در ناحیه پای ستون به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کند. افزایش پایداری جانبی ناشی از حضور دستک، باعث شد نمونه CS3-SJAKB، ظرفیت تغییر مکان بیشتری قبل از بروز خرابی جدی از خود نشان دهد. گروت در این سیستم نیز با پر کردن حفرات و انتقال تنش‌های فشاری به ژاکت فولادی، زمینه را برای پایداری بهتر نمونه فراهم کرد؛ با این حال نقش اصلی کنترل خرابی را دستک بر عهده داشت. به‌طور کلی، جمع‌بندی رفتار خرابی نمونه‌ها نشان می‌دهد که سه سیستم مقاوم‌سازی موقت توانستند شدت خرابی بتن، احتمال کماتش میلگردها، میزان تمرکز کرنش و نرخ افت ظرفیت را به‌صورت مؤثری کاهش دهند. درحالی‌که نمونه‌های شاهد در دیررفت‌های بزرگ دچار افت سریع ظرفیت می‌شدند، نمونه‌های مقاوم‌سازی شده روند خرابی کندتر، رفتار چرخه‌ای پایدارتر و کنترل بهتری بر ناحیه مفصل پلاستیک داشتند. نتایج مقایسه‌ای مربوطه در جدول (۷) ارائه شده است.

۵-۳- سختی نمونه‌ها

کاهش سختی نمونه‌ها پس از آسیب و پس از اجرای روش‌های مقاوم‌سازی، بر اساس منحنی‌های سختی سکانت-دیررفت نشان داده شده در شکل (۱۲) مورد ارزیابی قرار گرفت. این منحنی‌ها روند کلی کاهش سختی را هم‌زمان با افزایش دیررفت نمایش می‌دهند؛ روندی که در تمامی ستون‌های

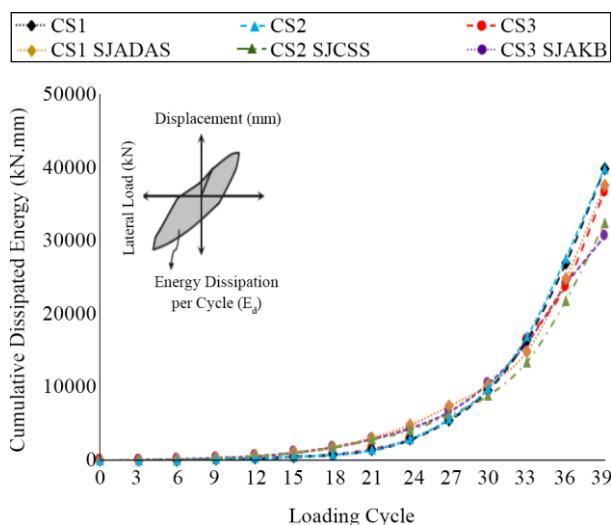
ارتفاع ستون متمرکز شدند. این تمرکز آسیب تأیید می‌کند که ناحیه پای ستون مهم‌ترین منطقه در کنترل رفتار غیرخطی و پایداری چرخه‌ای ستون است. لازم به ذکر است، تشخیص نخستین ترک خمشی به‌صورت چشمی با پوشش سفید سطح بتن، پایش هم‌زمان توسط دو ناظر مجرب، استفاده از ذره‌بین ۱۰X و ثبت لحظه وقوع توسط سیستم داده‌برداری انجام شد. پس از توسعه شبکه ترک‌ها، نمونه‌های شاهد با افزایش تدریجی لهیدگی بتن و ناپایداری فزاینده میلگردهای فشاری، ظرفیت خود را در سیکل‌های بزرگ با شیب نسبتاً تندی از دست دادند. لغزش نسبی بتن در سطوح فوقانی و تحتانی مفصل پلاستیک، همراه با تمرکز کرنش در میلگردهای تسلیم‌شده، از نشانه‌های اصلی نزدیک شدن ستون‌ها به مرحله گسیختگی نهایی بود. در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده، روند خرابی به‌طور قابل توجهی تغییر یافت و شدت تخریب کنترل شد. در نمونه CS1-SJADAS، صفحات عرضی نصب‌شده در ژاکت فولادی رفتار مشابه المان‌های ADAS داشتند و توانستند بخشی از نیروهای کششی ایجادشده در میلگردهای آسیب‌دیده را جذب و مستهلک کنند. به‌محض ترک خوردگی بتن و افزایش تقاضای کششی در میلگردهای طولی، این صفحات مسیر باربری جانبی جدیدی فراهم کردند که موجب کاهش تنش‌های منتقل‌شده به میلگردها و کند شدن روند تخریب شد. از سوی دیگر، گروت تزریق‌شده در فضای بین ستون و ژاکت نیز افت مقاومت فشاری بخش آسیب‌دیده بتن را جبران و امکان انتقال مؤثر تنش‌های فشاری به ژاکت را فراهم کرد. این ترکیب سبب شد نمونه CS1-SJADAS حتی در دیررفت‌های بزرگ نیز از افت شدید ظرفیت اجتناب کند و رفتار چرخه‌ای پایاتری نشان دهد. در نمونه CS2-SJCSS، نقش کنترل‌کننده خرابی عمدتاً بر عهده ورق‌های فولادی موج‌دار بود. فرم موج‌دار این ورق‌ها موجب افزایش سطح تماس، درگیری مکانیکی و محصورشدگی جانبی بتن در ناحیه بحرانی شد. این محصورشدگی باعث شد روند لهیدگی و خردشدگی بتن با سرعت بسیار کمتری پیش برود و میلگردهای طولی دیرتر به کماتش وارد شوند. به سبب توانایی ورق‌های

کنترل لهیدگی بتن شد، اما توان محدود آن در استهلاک انرژی سبب شد در دیررفت‌های بالا، سختی با سرعت بیشتری کاهش یابد. در نمونه SJAKB نیز حضور دستک موجب توزیع مناسب نیرو و افزایش پایداری جانبی شد، اما با افزایش تغییر مکان، پدیده‌هایی نظیر خوردگی موضعی بتن، لغزش برشی، یا ناپایداری موضعی عضو فولادی باعث کاهش سریع‌تر سختی نسبت به سیستم ADAS شد. روندهای مشاهده‌شده در کاهش سختی، بیانگر تعامل میان میزان محصورشدگی، توان جذب انرژی، و شدت تخریب مصالح است. در نمونه‌های شاهد، از دست رفتن سختی عمدتاً ناشی از ترک‌خوردگی اولیه، تسلیم زود هنگام میلگردها، و نبود محصورشدگی کافی در ناحیه مفصل پلاستیک بود. در مقابل، در سیستم SJADAS، تأخیر در تسلیم کنترل بازشدگی ترک‌ها و محدودسازی تغییرشکل‌های پلاستیک باعث شد سختی طی سیکل‌های متعدد پایدارتر بماند. سیستم‌های SJAKB و SJCSS عملکرد میانی داشتند؛ هرچند محصورشدگی ایجادشده در آنها قابل قبول بود، اما در مراحل پیشرفته بارگذاری، مکانیسم‌های محلی تخریب موجب تسریع کاهش سختی شدند. به‌طور کلی، مقایسه منحنی‌های شکل (۱۲) نشان می‌دهد که وجود یک سیستم جذب انرژی مؤثر به‌همراه محصورشدگی مناسب مهم‌ترین عامل در جلوگیری از افت شدید سختی تحت بارگذاری چرخه‌ای است.

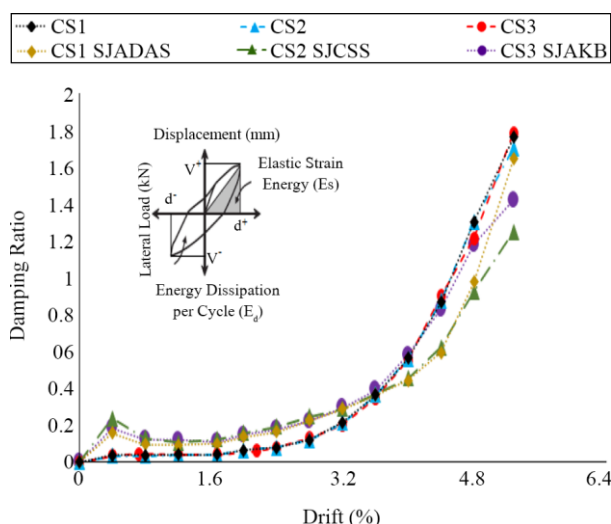


شکل (۱۲): سختی محاسبه شده برای تمام نمونه‌ها.

بتن آرمه تحت بارگذاری چرخه‌ای گزارش شده و عمدتاً ناشی از انباشت ترک‌های خمشی در مراحل اولیه و ایجاد ترک‌های برشی و لهیدگی موضعی بتن در سطوح بالاتر تغییر مکان است. این مشاهدات با نتایج گزارش‌شده در پژوهش‌های پیشین درباره ستون‌های بتن‌آرمه تحت بارگذاری رفت‌وبرگشتی کاملاً هم‌خوان است (Villar-Salinas et al., 2021; Zhang et al., 2021). در نمونه‌های شاهد (CS1، CS2 و CS3)، کاهش سختی با سرعت زیادی رخ داد؛ به‌گونه‌ای که هم‌زمان با آغاز ترک‌خوردگی و گسترش سریع آسیب در سیکل‌های اولیه، سختی اولیه ستون به‌صورت ناگهانی افت کرد. این روند تند کاهش سختی، ویژگی رایج ستون‌های بدون مقاوم‌سازی تحت بارگذاری چرخه‌ای است (Ding et al., 2024; Hou et al., 2024) و نشان می‌دهد که در غیاب محصورشدگی مؤثر، ستون‌ها پس از شکل‌گیری مفصل پلاستیک، به‌سرعت وارد ناحیه رفتار غیرخطی شده و ظرفیت سختی خود را از دست می‌دهند. این پدیده اهمیت وجود یک سیستم مداخله‌گر را در مراحل ابتدایی پس‌لرزه به‌خوبی برجسته می‌کند. در مقابل، نمونه‌های مقاوم‌سازی‌شده رفتار متفاوتی از خود نشان دادند و میزان حفظ سختی در آنها وابسته به نوع سیستم تقویتی بود. از میان روش‌های به‌کار رفته، نمونه CS1-SJADAS بهترین عملکرد را در کنترل کاهش سختی ارائه کرد. در این نمونه، سختی سکانت در مراحل مختلف بارگذاری با نرخ بسیار کمتری کاهش یافت و ستون توانست برای مدت طولانی‌تری در محدوده سختی مؤثر باقی بماند. این رفتار برتر را می‌توان حاصل ترکیب محصورشدگی ژاکت فولادی با عملکرد جذب انرژی صفحات ADAS دانست؛ صفحاتی که با ایجاد چرخش‌های کنترل‌شده و مستهلک کردن بخشی از انرژی ورودی، مانع از بروز تغییرشکل‌های پلاستیک گسترده و گسترش ترک‌ها شدند. نمونه‌های CS2-SJCSS و CS3-SJAKB نیز نسبت به نمونه‌های شاهد بهبود قابل توجهی در حفظ سختی نشان دادند، اما در دیررفت‌های بزرگ‌تر، افت سختی آنها محسوس‌تر از نمونه SJADAS بود. در نمونه SJCSS، هرچند ورق‌ها موجب افزایش محصورشدگی و



شکل (۱۳): ظرفیت اتلاف انرژی محاسبه شده برای تمامی نمونه‌ها.



شکل (۱۴): ضرایب میرایی محاسبه شده برای تمامی نمونه‌ها.

جدول (۸): مقادیر انرژی تجمعی نرمال شده و میرایی معادل (۵) برای نمونه‌های شاهد و مقاوم‌سازی شده.

نمونه	انرژی تجمعی نرمال شده (درصد)	میرایی ξ (درصد)
CS1 (شاهد)	۱۰۰	۳/۱
CS1-SJADAS	۱۲۵ تا ۱۳۰	۴/۰
CS2 (شاهد)	۱۰۰	۳/۱
CS2-SJCSS	۱۳۰ تا ۱۳۵	۴/۲
CS3 (شاهد)	۱۰۰	۳/۱
CS3-SJAKB	۱۰۳ تا ۱۰۵	۳/۲

(Rodrigues et al., 2015; Zhang et al., 2021). در مقابل، در سیکل‌های پایانی پس از سیکل ۳۳، نمونه‌های CS1 و CS2

از این منظر، سیستم SJADAS بالاترین کارایی، و سیستم‌های SJCSS و SJADAS عملکرد رضایت‌بخش اما با نیاز به بهینه‌سازی بیشتر در دیررفت‌های بالا داشته‌اند.

۴-۵- ظرفیت‌های اتلاف انرژی و میرایی چرخه‌ای معادل

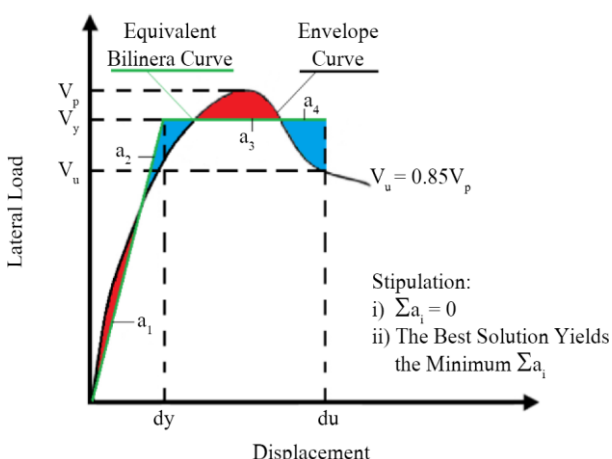
ارزیابی کارایی اتلاف انرژی نمونه‌ها بر اساس محاسبه مساحت محصور در حلقه‌های چرخه‌ای نیرو-تغییر مکان در تمامی سیکل‌های بارگذاری انجام شد. این مساحت شاخص مستقیم انرژی مکانیکی تلف شده از طریق تغییر شکل‌های غیرالاستیک است و معیار پذیرفته شده‌ای در مطالعات رفتار چرخه‌ای ستون‌های بتن آرمه محسوب می‌شود (Barrera et al., 2012; Shokrzadeh et al., 2025). برای امکان مقایسه دقیق، انرژی تلف شده هر نمونه نسبت به حداکثر انرژی ثبت شده در نمونه‌های بدون مقاوم‌سازی نرمال‌سازی گردید. نتایج حاصل از انرژی تجمعی و نسبت میرایی معادل نمونه‌ها در شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و جدول (۸) ارائه شده‌اند و رفتار واقعی ستون‌ها را در دو حالت «نمونه شاهد بدون تقویت» و «مقاوم‌سازی شده موقت» تحت بارگذاری چرخه‌ای آشکار می‌سازند.

لازم به ذکر است که اختلاف ظرفیت اتلاف انرژی میان نمونه‌های مقاوم‌سازی شده و نمونه‌های شاهد از نظر عددی قابل توجه است؛ به‌طور مثال، نمونه CS1-SJADAS حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد، نمونه CS2-SJCSS حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد و نمونه CS3-SJAKB حدود ۳ تا ۵ درصد افزایش انرژی تجمعی نسبت به نمونه‌های شاهد دارند، اگرچه در نمودار اولیه ممکن است به دلیل مقیاس محور کمتر مشهود باشد. نتایج انرژی تجمعی تفاوت‌های شاخصی را میان نمونه‌ها، به‌ویژه در سیکل‌های پایانی بارگذاری، نشان می‌دهد. در سیکل‌های ابتدایی، نمونه CS1-SJADAS بیشترین اتلاف انرژی را ثبت کرد. این رفتار ناشی از عملکرد مناسب سیستم ADAS در ایجاد چرخش‌های کنترل شده و جذب انرژی قبل از ورود ستون به ناحیه خرابی گسترده است. نتایج مشابهی در پژوهش‌هایی که از ژاکت فولادی و سیستم‌های جذب انرژی استفاده کرده‌اند نیز گزارش شده است

مقاوم‌سازی شده داشت که این موضوع به محدودیت دستک در جذب انرژی و ماهیت «سختی‌افزا»ی این سیستم نسبت داده می‌شود. در مجموع، نتایج بیانگر این است که انتخاب روش مناسب مقاوم‌سازی موقت تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر قابلیت اتلاف انرژی و میرایی سازه دارد. روش SJADAS بیشترین توانایی را در کاهش تقاضای پلاستیک، حفظ پایداری چرخه‌ای، و افزایش میرایی مؤثر داشته است، درحالی‌که روش‌های SJCSS و SJAKB عملکرد میانی ارائه کرده‌اند. این یافته‌ها اهمیت انتخاب صحیح سیستم مقاوم‌سازی موقت را در شرایط پس‌لرزه و در ستون‌هایی که نیاز به پایداری سریع و افزایش ظرفیت میرایی دارند، برجسته می‌کند. در پایان، قابل ذکر است که برخلاف پژوهش‌های مواد محور که بهبود رفتار محلی بتن را از طریق افزودن الیاف یا عوامل منبسط‌شونده بررسی کرده‌اند (Chu et al., 2023)، تمرکز پژوهش حاضر بر سطح سازه‌ای و ارائه یک راهکار سریع، عملیاتی و قابل اجرا برای ترمیم موقت ستون‌های بتن‌آرمه در مقیاس واقعی بوده است.

۵-۵- شکل‌پذیری جابه‌جایی نمونه‌ها

مطابق شکل (۱۵)، منحنی دوخطی^۸ شده رفتار نیرو-جابه‌جایی برای استخراج شکل‌پذیری جابه‌جایی هر نمونه مورد استفاده قرار گرفت. در این روش، جابه‌جایی تسلیم d_y از محل تقاطع



شکل (۱۵): نمای شماتیکی از تعریف نمودار دو خطی مربوطه به منظور محاسبه شاخص شکل‌پذیری - جابه‌جایی (Shokrzadeh & Nateghi, 2022; Alahi, 2022).

(بدون مقاوم‌سازی) انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌های مقاوم‌سازی شده جذب کردند، اما این افزایش ناشی از گسترش شدید ترک‌ها، لهیدگی بتن و تغییر شکل‌های پلاستیک ناخواسته بوده است؛ وضعیتی که معمولاً در سازه‌های بدون تقویت تحت بارگذاری چرخه‌ای مشاهده می‌شود و نشان‌دهنده ورود نمونه به مرحله نزدیک به گسیختگی است (He et al., 2018). نمونه CS3-SJAKB کمترین اتلاف انرژی را میان نمونه‌های مقاوم‌سازی شده نشان داد؛ موضوعی که بیانگر این است که دستک در مقایسه با صفحات ADAS، نقش محدودتری در جذب انرژی چرخه‌ای داشته است. اگرچه دستک رفتار جانبی ستون را پایدارتر می‌کند، اما ظرفیت اتلاف انرژی آن در مقایسه با سیستم‌های مبتنی بر تغییر شکل‌های پلاستیک کنترل‌شده کمتر است. برای تحلیل دقیق‌تر، میرایی چرخه‌ای نمونه‌ها بر اساس روش ارائه‌شده توسط شفایی و همکاران (Shafaei et al., 2014) محاسبه شد. نسبت میرایی معادل از رابطه (۲) تعیین گردید:

$$\xi = \frac{E_d}{4\pi E_s} \quad (2)$$

که در آن E_s انرژی کرنشی الاستیک و E_d انرژی اتلاف‌شده در یک سیکل بارگذاری است. مقایسه نمودارهای شکل (۱۴) نشان می‌دهد که سیستم‌های مقاوم‌سازی موقت به‌طور کلی توانسته‌اند نسبت میرایی نمونه‌ها را در مراحل اولیه بارگذاری افزایش دهند. نمونه CS1-SJADAS بالاترین مقدار میرایی معادل را در مراحل ابتدایی داشته است؛ موضوعی که نشان‌دهنده کنترل مناسب تغییر شکل‌های چرخه‌ای و کارایی بالای صفحات ADAS در جذب انرژی است. این یافته با نتایج مطالعات متعدد در زمینه تأثیر سیستم‌های افزودنی میرایی بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مقاوم‌سازی شده سازگار است (Hou et al., 2024; Kennedy-Kuiper et al., 2022). در مراحل نهایی، نمونه‌های CS1 و CS2 بدون مقاوم‌سازی دچار افزایش میرایی شدند، اما این افزایش ناشی از رفتار پلاستیک شدید و نزدیک شدن به مرحله تخریب بود و نه بهبود عملکرد سازه‌ای. در مقابل، نمونه CS3-SJAKB کمترین مقدار میرایی را میان نمونه‌های

جدول (۹): داده‌ها برای ارزیابی ضریب شکل‌پذیری جابه‌جایی.

Specimen	Region	d_y (m.rad)	d_u (m.rad)	μ	$\left(\frac{\mu_0^{NR} - \mu_0^R}{\mu_0^{NS}} \times 100 \right)$
CS1	Pos.	25.20	65.00	3.09	
	Neg.	-17.20	-66.00		
	Avg.	21.20	65.50		
CS1 SJADAS	Pos.	21.00	66.00	3.10	+0.30 %
	Neg.	-21.60	-66.00		
	Avg.	21.30	66.00		
CS2	Pos.	25.10	66.00	3.13	
	Neg.	-17.10	-66.00		
	Avg.	21.10	66.00		
CS2 SJCSS	Pos.	21.00	66.00	3.48	+11.18 %
	Neg.	-17.00	-66.00		
	Avg.	19.00	66.00		
CS3	Pos.	20.00	66.00	3.24	
	Neg.	21.00	-64.00		
	Avg.	20.05	65.00		
CS3 SJAKB	Pos.	21.10	66.00	3.06	-5.56 %
	Neg.	-22.10	-65.80		
	Avg.	21.60	65.90		

مقدار افزایش اندک، بیانگر آن است که سیستم ADAS اگرچه در کنترل سختی، جذب انرژی و کاهش پینچینگ بسیار مؤثر ظاهر شده، اما افزایش شکل‌پذیری آن محدود بوده است. علت این امر را می‌توان در افزایش سختی اولیه و کنترل تغییر مکان‌های زیاد دانست؛ موضوعی که موجب می‌شود ستون رفتار نرم‌تر و قابل تغییر شکل‌تر نمونه SJCSS را نداشته باشد. در مقابل، نمونه CS2-SJCSS بیشترین افزایش شکل‌پذیری را نشان داده و حدود ۱۱/۱۸ درصد بهبود نسبت به نمونه CS2 داشته است. این بهبود چشمگیر ناشی از افزایش انعطاف‌پذیری ناشی از ورق موج‌دار، درگیری بهتر بتن- فولاد و کاهش سرعت لهیدگی بتن است که امکان تحمل تغییر مکان‌های بزرگ‌تر را فراهم کرده است. این ویژگی‌ها سبب شده سیستم SJCSS برای شرایطی که نیاز به ظرفیت تغییر مکان بالا، انرژی‌پذیری زیاد و رفتار قابل انعطاف وجود دارد، گزینه‌ای بسیار مناسب باشد.

در نمونه CS3-SJAKB، شکل‌پذیری کاهش ۵/۵۶ درصدی داشته است. این کاهش بیانگر آن است که اگرچه دستک توانسته سختی جانبی و پایداری اولیه ستون را بهبود دهد، اما

بخش خطی و بخش غیرخطی منحنی تعیین شده و جابه‌جایی نهایی d_u نیز به‌عنوان بزرگ‌ترین جابه‌جایی ثبت‌شده پیش از افت محسوس مقاومت در نظر گرفته می‌شود. نسبت شکل‌پذیری جابه‌جایی μ_A از رابطه $\mu_A = d_u / d_y$ محاسبه شده است. مقادیر شکل‌پذیری برای نمونه‌های بدون مقاوم‌سازی μ_A^{NR} و نمونه‌های مقاوم‌سازی شده موقت μ_A^R در جدول (۹) ارائه شده‌اند. برای ایجاد دید جامع از توان عملکردی هر ستون، میانگین شکل‌پذیری جابه‌جایی در دو جهت بارگذاری مثبت و منفی محاسبه و گزارش شده است.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که روش‌های مقاوم‌سازی موقت، با ایجاد یک رفتار پایدار در مفصل پلاستیک و افزایش ظرفیت تغییر مکان، توانسته‌اند بر شکل‌پذیری تأثیرگذار باشند. یکنواختی عملکرد وصله‌های ترمیمی در تمام سیکل‌ها، همراه با افزایش محدود سطح مقطع مؤثر در ناحیه اتصال، نقش مهمی در بهبود شکل‌پذیری نمونه‌های مقاوم‌سازی شده داشته است. بر اساس نتایج جدول (۹)، نمونه CS1-SJADAS تنها ۰/۳۰ درصد افزایش شکل‌پذیری نسبت به نمونه CS1 نشان داده است. این

و قیود مرزی متنوع را بازنمایی نمی‌کند. علاوه بر این، بار محوری نمونه‌ها به صورت آگاهانه ثابت انتخاب شد تا رفتار ستون در محدوده خرابی خمشی و شکل‌پذیر باقی بماند؛ با این حال، بررسی دامنه وسیع‌تری از نسبت‌های بار محوری می‌تواند فهم جامع‌تری از محدوده عملکرد سیستم‌های SJAKB، SJCSSD و SJADAS فراهم آورد. همچنین، الگوی آسیب اولیه ستون‌ها در این پژوهش کنترل و یکنواخت بوده است، در حالی که در سازه‌های واقعی ممکن است با آسیب‌های متنوع‌تری از جمله لهیدگی شدید، کماتش اولیه میلگردها یا خردشدگی نامتقارن مواجه شویم. از این رو، برای تکمیل دامنه کاربرد نتایج، انجام آزمایش‌های شبه‌دینامیکی، مطالعه رفتار ستون‌ها در مقیاس واقعی و توسعه مدل‌های عددی کالیبره‌شده می‌تواند افق‌های جدیدی برای تعمیم و ارتقای روش‌های مقاوم‌سازی موقت ارائه‌شده فراهم سازد.

۷- نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، ارزیابی عملکرد سه روش مقاوم‌سازی موقت، سریع و پیچ‌ومهره‌ای برای تثبیت ستون‌های بتن‌آرمه شدیداً آسیب‌دیده در شرایط پس‌از زلزله بود؛ رویکردی که با تکیه بر قابلیت نصب بدون تجهیزات سنگین و بازیابی فوری پایداری اولیه طراحی شده است. نتایج آزمایش‌های چرخه‌ای انجام‌شده بر نمونه‌های مقیاس یک‌سوم نشان داد که هر سه روش، با وجود تفاوت در مکانیسم‌های مقاومتی، توانستند روند گسترش مفصل پلاستیک، تمرکز کرنش و افت ظرفیت ستون‌های آسیب‌دیده را کنترل کرده و رفتار چرخه‌ای پایداری‌تری ایجاد کنند.

– مقایسه نمونه‌های شاهد و مقاوم‌سازی‌شده: ژاکت‌های فولادی پیچ‌ومهره‌ای همراه با گروت زودگیر بخش قابل‌توجهی از سختی، مقاومت و انرژی‌پذیری ازدست‌رفته ستون را بازیابی کردند. نمونه‌های مقاوم‌سازی‌شده کاهش ظرفیت ملایم‌تر (۵ تا ۳۰ درصد)، ناپایداری موضعی کمتر و پسماندهای چرخه‌ای کنترل‌شده‌تری نسبت به ستون‌های بدون تقویت نشان دادند؛ موضوعی که نشان می‌دهد این سیستم‌ها می‌توانند

محدودیت‌های تغییر شکل، تمرکز تنش در نقاط اتصال و کاهش ظرفیت دوران باعث کاهش توان ستون در تحمل جابه‌جایی‌های بزرگ شده است. به عبارت دیگر، سیستم SJAKB بیشتر یک تقویت‌کننده سختی است تا یک افزایش‌دهنده شکل‌پذیری؛ بنابراین در شرایطی که نیاز به تغییر مکان نهایی بالا باشد، اثربخشی آن محدود خواهد بود. تحلیل کلی نتایج نشان‌دهنده یک روند معکوس میان سختی اولیه و ظرفیت شکل‌پذیری است. سیستم SJADAS که بالاترین سختی اولیه را حفظ کرده است، تنها افزایش بسیار جزئی در شکل‌پذیری داشته است؛ موضوعی که تأیید می‌کند افزایش سختی معمولاً به قیمت کاهش ظرفیت تغییر مکان نهایی تمام می‌شود. در مقابل، سیستم SJCSS با وجود افت سختی سریع‌تر در دیرپت‌های بزرگ، توانسته بیشترین شکل‌پذیری را ایجاد کند؛ زیرا انعطاف‌پذیری بیشتر و محصورشدگی مؤثرتر اجازه تغییر شکل‌های بزرگ‌تر را فراهم کرده است. سیستم SJAKB که نقش اصلی آن ایجاد مسیر باربری جانبی و محدودسازی تغییر مکان است، به‌طور طبیعی ظرفیت شکل‌پذیری را کاهش داده است. این یافته‌ها به روشنی نشان می‌دهند که انتخاب روش مقاوم‌سازی باید بر اساس اهداف عملکردی انجام شود. سیستم SJCSS برای شرایطی که شکل‌پذیری و انرژی‌پذیری بالا مورد نیاز است مناسب‌تر است؛ سیستم SJADAS گزینه‌ای متعادل با کارایی بالا در کنترل سختی و جذب انرژی اما با بهبود محدود در شکل‌پذیری است؛ و سیستم SJAKB بیشتر برای شرایطی مناسب است که سختی جانبی اهمیت بالاتر از ظرفیت تغییر مکان داشته باشد.

۶- محدودیت‌ها و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده

اگرچه نتایج این پژوهش تصویر روشنی از کارایی سه روش مقاوم‌سازی موقت در بهبود رفتار چرخه‌ای ستون‌های بتن‌آرمه آسیب‌دیده ارائه می‌کند، اما باید توجه داشت که آزمایش‌ها در یک محیط کنترل‌شده آزمایشگاهی و بر روی ستون‌های منفرد انجام شده است؛ شرایطی که الزاماً تمام پیچیدگی‌های موجود در قاب‌های واقعی شامل اندرکنش تیر-ستون، اثر سختی دیافراگم

تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIIES)، تهران، ایران، به سبب فراهم آوردن حمایت‌های اجرایی و پشتیبانی‌های لجستیکی در طول انجام این پژوهش ابراز می‌دارند. این پژوهش مبتنی بر طرح تحقیقاتی حمایت‌شده توسط بنیاد ملی علم ایران (INSF) با شماره طرح ۴۰۳۱۱۸۷ است.

References

مراجع

- ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. (2019). In *318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. <https://doi.org/10.14359/51716937>
- ACI Committee 374.1. (2005). *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary: An ACI Standard (ACI 374.1-05)*. American Concrete Institute. https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=374105&Format=DO WNLOAD&Language=English&Units=US_Units
- Ahmadi, M. H., & Nateghi-Alahi, F. (2022). Experimental investigation of strengthening of masonry-infilled RC frames using prefabricated engineered cementitious composite panels. *Engineering Structures*, 252, 113762. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113762>
- Anagnostou, E., Rousakis, T. C., & Karabinis, A. I. (2019). Seismic retrofitting of damaged RC columns with lap-spliced bars using FRP sheets. *Composites Part B: Engineering*, 167, 141-153. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.018>
- ASTM International. (2020). *ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. ASTM International.
- Barrera, A. C., Bonet, J. L., Romero, M. L., & Fernández, M. A. (2012). Ductility of slender reinforced concrete columns under monotonic flexure and constant axial load. *Engineering Structures*, 40, 430-440. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.012>
- Bett, J. B., Klingner, R. E., & Jirsa, J. O. (1988). Lateral load response of strengthened and repaired reinforced concrete columns. *ACI Structural Journal*, 85(5), 499-508. <https://doi.org/10.14359/9226>

نقش مؤثری در جلوگیری از پیشرفت خرابی در ساعات نخست پس‌اززلزله ایفا کنند.

- سیستم SJADAS بهترین عملکرد را ارائه داد؛ صفحات انرژی بر ADAS موجب کاهش نرخ افت بار (۲۵ درصد نسبت به نمونه شاهد)، افزایش میرایی معادل و بهبود پایداری ستون در دررفت‌های بزرگ شدند. این سیستم مناسب‌ترین گزینه در شرایطی است که نیاز به تثبیت سریع با تأکید بر افزایش میرایی و پایداری چرخه‌ای وجود دارد.
- سیستم SJCSSD با ایجاد محصورشدگی جانبی یکنواخت از طریق ورق موج‌دار، رفتار فشاری هسته بتن را بهبود داد و روند لهیدگی و کماتش میلگردها را به‌طور معناداری به تعویق انداخت. انرژی‌پذیری آن حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت و $\Delta\mu \approx 3.47$ مشاهده شد. این سیستم در حفظ یکپارچگی مقطع و کنترل آسیب فشاری عملکرد مطلوبی دارد و برای ستون‌هایی با خرابی فشاری غالب مناسب است.
- سیستم SJAKB با فراهم کردن مسیر باربری جانبی و کاستن از تقاضای خمشی ستون، پایداری هندسی مناسبی در دررفت‌های بزرگ‌تر ایجاد کرد. اتلاف انرژی آن حدود ۳ تا ۵ درصد افزایش یافت و $\Delta\mu \approx 3.05$ بود؛ نشان‌دهنده تمرکز این سیستم بر سختی و پایداری ستون است.
- با وجود نتایج مثبت، این مطالعه به‌طور طبیعی شامل محدودیت‌هایی نیز می‌باشد؛ از جمله انجام آزمایش‌ها بر ستون‌های منفرد در محیط کنترل‌شده آزمایشگاهی و تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی. هرچند این شرایط برای تمرکز بر رفتار خمشی ستون و ارزیابی دقیق مکانیسم‌های مقاوم‌سازی ضروری بوده است، اما برای تعمیم نتایج به سازه‌های واقعی لازم است عملکرد این سیستم‌ها در قاب‌های کامل، در مقیاس واقعی، تحت توالی پس‌لرزه‌ها و با نسبت‌های مختلف بار محوری بررسی شود. توسعه مدل‌های عددی کالیبره‌شده و مطالعات شبه‌دینامیکی می‌تواند زمینه تدوین دستورالعمل‌های کاربردی و استانداردسازی این روش‌های مقاوم‌سازی موقت را فراهم سازد.

- research findings. *Journal of Bridge Engineering*, 20(12), 04015010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000760](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000760)
- Hou, C., Ma, G., Hwang, H. J., Li, S., & Kang, S. M. (2024). Seismic retrofit of intact and damaged RC columns using prefabricated steel cage-reinforced UHPC jackets and NSM GFRP bars. *Engineering Structures*, 317, 118665. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.118665>
- Hu, J., Wen, W., Zhai, C., Pei, S., & Ji, D. (2023). Seismic resilience assessment of buildings considering the effects of mainshock and multiple aftershocks. *Journal of Building Engineering*, 68, 106110. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106110>
- Humairy, R. S., Sharifi, M., Amirabadi, R., & Shokrzadeh, M. R. (2026). Experimental evaluation of seismic retrofitting strategies for slab-integrated exterior RC beam-column joints: Comparative performance of BSAC, GFRP-BSB, and GFRP-NSM. *Structures*, 86, 111454. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2026.111454>
- Iervolino, I., Chioccarelli, E., & Suzuki, A. (2020). Seismic damage accumulation in multiple mainshock-aftershock sequences. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 49(10), 967-986. <https://doi.org/10.1002/eqe.3275>
- Janke, L., Czaderski, C., Ruth, J., & Motavalli, M. (2009). Experiments on the residual load-bearing capacity of prestressed confined concrete columns. *Engineering Structures*, 31(10), 2247-2256. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.04.006>
- Ji, J., Han, T., Dong, Z., Zhu, H., Wu, G., Wei, Y., & Soh, C. K. (2023). Performance of concrete columns actively strengthened with hoop confinement: A state-of-the-art review. *Structures*, 55, 1147-1165. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.038>
- Jin, W., Zhai, C., Kong, J., Liu, W., & Zhang, M. (2021). In-plane and out-of-plane quasi-static tests on RC frames with a new type of frame-isolated infills. *Engineering Structures*, 246, 113079. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113079>
- Kennedy-Kuiper, R. C. S., Wakjira, T. G., & Alam, M. S. (2022). Repair and retrofit of RC bridge piers with steel-reinforced grout jackets: An experimental investigation. *Journal of Bridge Engineering*, 27(6), 04022001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000760](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000760)
- Capani, F., D'Ambrisi, A., De Stefano, M., Focacci, F., Luciano, R., Nudo, R., & Penna, R. (2017). Experimental investigation on cyclic response of RC elements repaired by CFRP external reinforcing systems. *Composites Part B: Engineering*, 112, 55-68. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.053>
- Chellapandian, M., Jain, S., Prakash, S. S., & Sharma, A. (2019). Effect of cyclic damage on the performance of RC square columns strengthened using hybrid FRP composites under axial compression. *Fibers*, 7(10), 90. <https://doi.org/10.3390/FIB7100090>
- Chinthapalli, H. K., Chellapandian, M., Agarwal, A., & Suriya Prakash, S. (2020). Effectiveness of hybrid fibre-reinforced polymer retrofitting on behaviour of fire damaged RC columns under axial compression. *Engineering Structures*, 211, 110458. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110458>
- Chu, S. H., Unluer, C., Yoo, D. Y., Sneed, L., & Kwan, A. K. H. (2023). Bond of steel reinforcing bars in self-prestressed hybrid steel fiber reinforced concrete. *Engineering Structures*, 291, 116390. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116390>
- Dehghani, A., Nateghi-Alahi, F., & Fischer, G. (2015). Engineered cementitious composites for strengthening masonry infilled reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, 105, 31-46. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.10.013>
- Deng, Y., Yan, C., Liu, S., Wang, J., Sun, Z., & Cui, K. (2022). Curvature response of bridge pier subjected to earthquake action in a saline soil environment. *Engineering Structures*, 264, 114106. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114106>
- Ding, Y., Zeng, B., Zhou, Z., Wei, Y., & Zhu, M. (2024). Seismic retrofitting of RC columns using stainless steel grid-reinforced UHPC jackets in plastic hinge zone. *Journal of Building Engineering*, 86, 108637. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108637>
- He, A., Cai, J., Chen, Q. J., Liu, X., Huang, P., & Tang, X. L. (2018). Seismic behaviour of steel-jacket retrofitted reinforced concrete columns with recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 173, 500-514. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.053>
- He, R., Yang, Y., & Sneed, L. H. (2015). Seismic repair of reinforced concrete bridge columns: Review of

- Sharifi, M., Shokrzadeh, M. R., Ahmadi, R., & Ghoddousi, P. (2025). Experimental investigation of the cyclic behavior of full-scale beam-column connections using high-strength self-consolidating concrete with and without fiber. *Bridge Structures*. <https://doi.org/10.1177/157324872513434>
- Shokrzadeh, M. R., & Nateghi-Alahi, F. (2022). Evaluation of hybrid NSM-CFRP technical bars and FRP sheets for seismic rehabilitation of a concrete bridge pier. *Bridge Structures*, 18(3-4), 75-88. <https://doi.org/10.3233/BRS-290180>
- Shokrzadeh, M. R., Nateghi Allahe, F., Mansoori, M. R., & Javadi, P. (2022). Failure area evaluation of the coupler with threaded bar: Experimental and numerical study. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 12(1), 531-543.
- Shokrzadeh, M. R., Aziminejad, A., & Moghaddam, A. S. (2024). Evaluation of various FRP strengthening configurations for RC beam-column joints. *Bridge Structures*, 20(1-2), 17-32. <https://doi.org/10.3233/BRS-240223>
- Shokrzadeh, M. R., Sharifi, M., & Nateghi Alahe, F. (2024). Seismic retrofitting of concrete beam-column connections: Numerical study FRP strip and NSM technique. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.48303/JSEE.2024.2031006.1099>
- Shokrzadeh, M. R. (2025). *Temporary Repair and Strengthening of Damaged Reinforced Concrete Columns in Urban Areas*. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology. https://www.researchgate.net/publication/396891618_Temporary_Repair_and_Strengthening_of_Damaged_Reinforced_Columns_in_Urban_Areas
- Shokrzadeh, M. R., & Nateghi-Alahi, F. (2025a). Temporary seismic strengthening techniques for damaged RC columns: Experimental and analytical investigation. *Structures*, 82, 110496. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2025.110496>
- Shokrzadeh, M. R., & Nateghi-Alahi, F. (2025b). Temporary seismic strengthening techniques for damaged RC columns: Experimental and analytical investigation. *Structures*, 82, 110496. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2025.110496>
- Shokrzadeh, M. R., Nateghi-Alahi, F., Mansoori, M. R., 04022024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001903](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001903)
- Li, C., Wang, Q., Zhu, R., Zhu, Y., & Hu, Y. (2024). Damage identification for pile foundation in high-piled wharf using composite energy factors driven by dynamic response under wave impact excitation. *Ocean Engineering*, 291, 116286. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116286>
- Maheswaran, J., Chellapandian, M., & Arunachalam, N. (2022). Retrofitting of severely damaged reinforced concrete members using fiber reinforced polymers: A comprehensive review. *Structures*, 38, 1268-1286. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.059>
- Moghaddam, H., Samadi, M., Pilakoutas, K., & Mohebbi, S. (2010). Axial compressive behavior of concrete actively confined by metal strips; Part A: Experimental study. *Materials and Structures*, 43(10), 1381-1396. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9588-6>
- Nateghi-Alahi, F., & Khazaei-Poul, M. (2013). Analytical study on the strengthened steel plate shear walls by FRP laminate. *Procedia Engineering*, 54, 281-290. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.034>
- Obaidat, Y. T., Ashteyat, A. M., Obaidat, A. T., & Alfari, S. F. (2020). A new technique for repairing reinforced concrete columns. *Journal of Building Engineering*, 32, 101256. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101256>
- Pettinga, D., & Priestley, N. (2008). Accounting for P-Delta effects in structures when using direct displacement-based design. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Rodrigues, H., Arêde, A., Furtado, A., & Rocha, P. (2015). Seismic rehabilitation of RC columns under biaxial loading: An experimental characterization. *Structures*, 3, 76-88. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2015.03.001>
- Rodriguez, M., & Park, R. (1994). Seismic load tests on reinforced concrete columns strengthened by jacketing. *ACI Structural Journal*, 91(2), 150-159. <https://doi.org/10.14359/4593>
- Shafaei, J., Hosseini, A., & Marefat, M. S. (2014). Seismic retrofit of external RC beam-column joints by joint enlargement using prestressed steel angles. *Engineering Structures*, 81, 276-290. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.006>

واژه نامه	
۱- پلیمر مسلح به الیاف (FRP)	Fiber-Reinforced Polymer (FRP)
۲- روش نصب در شیار نزدیک سطح	Near-Surface Mounted (NSM)
۳- روش تقویت با چسباندن خارجی	Externally Bonded (EB)
۴- ژاکت فولادی همراه با میراگر افزایشده سختی و میرایی	Steel Jacket Combined with an Added Damping and Stiffness Damper (SJCADSD)
۵- ژاکت فولادی با ورق فولادی موج‌دار	Steel Jacket with a Corrugated Steel Sheet (SJCSS)
۶- ژاکت فولادی همراه با مهاربند زانویی	Steel Jacket and Knee Braces (SJAKB)
۷- سیستم افزایش سختی و میرایی	Added Damping and Stiffness (ADS)
۸- منحنی دوخطی	Bilinear Curve

& Javadi, P. (2025). Cold rolling versus rotating friction welding techniques in mechanical splices: Study of the inelastic cyclic behavior of reinforced concrete columns. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/SUCO.70065>

Villar-Salinas, S., Guzmán, A., & Carrillo, J. (2021). Performance evaluation of structures with reinforced concrete columns retrofitted with steel jacketing. *Journal of Building Engineering*, 33, 101510. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101510>

Wu, Y. F., Griffith, M. C., & Oehlers, D. J. (2003). Improving the strength and ductility of rectangular reinforced concrete columns through composite partial interaction: Tests. *Journal of Structural Engineering*, 129(9), 1183-1191. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:9\(1183\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:9(1183))

Xiao, Y., & Wu, H. (2003). Retrofit of reinforced concrete columns using partially stiffened steel jackets. *Journal of Structural Engineering*, 129(6), 725-732. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:6\(725\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:6(725))

Yan, C., Zhao, J., Liu, S., & Zhang, J. (2020). Seismic yield strength of reinforced concrete bridge piers in a saline soil environment. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(3), 04020031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001357](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001357)

Zerbe, L., Vieira, D., Belarbi, A., & Senouci, A. (2022). Uniaxial compressive behavior of circular concrete columns actively confined with Fe-SMA strips. *Engineering Structures*, 256, 113878. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113878>

Zhang, D., Li, N., Li, Z. X., & Xie, L. (2021). Rapid repair of RC bridge columns with prestressed stainless-steel hoops and stainless-steel jackets. *Journal of Constructional Steel Research*, 178, 106441. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106441>

Zhou, C., Li, J., & Lu, X. (2012). Experimental research on pre-stress loss of concrete circular columns confined with post-tensioned FRP. *Tongji Daxue Xuebao/Journal of Tongji University*, 40(12), 1775-1780. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-374x.2012.12.003>

Experimental Evaluation of the Performance of Temporary Strengthening Systems for Earthquake-Damaged Reinforced Concrete Columns

Mohamad Reza Shokrzadeh¹ and Fariborz Nateghi-Alahi^{2*}

1. Postdoctoral Fellow, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran,
2. Professor, Structural Engineering Research, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author; email: nateghi@iiees.ac.ir

Following an earthquake, damaged reinforced concrete (RC) columns, as primary vertical load-bearing components, can influence the residual stability of buildings and the safety of post-earthquake operations. In damaged structures, access is often required for emergency response, preliminary inspection, damage assessment, and initial stabilization measures. Under such conditions, conventional permanent repair or strengthening techniques may not be suitable because they can require preparation time, wet construction processes, adhesive materials, or on-site welding. Therefore, temporary strengthening systems that can be rapidly installed through dry mechanical connections and subsequently removed after the emergency, inspection, and initial stabilization stages can provide a practical alternative for restoring a level of structural safety.

This study experimentally evaluates the cyclic performance of three temporary strengthening systems based on mechanically assembled bolted steel jackets for severely earthquake-damaged RC columns. For this purpose, one-third-scale RC column specimens were first subjected to quasi-static cyclic loading until a severe level of damage was developed. The damaged specimens were then temporarily strengthened using three different steel-jacket configurations.

The first system consisted of a bolted steel jacket equipped with energy-dissipating plates intended to enhance hysteretic energy dissipation while limiting further damage concentration. The second configuration incorporated a corrugated steel sheet within the jacket system, whereas the third configuration employed a steel jacket combined with a lateral knee brace. All strengthening systems were designed to be installed without concrete casting, bonding agents, or on-site welding, thereby facilitating rapid assembly and potential removal after completion of the temporary intervention.

Following installation, the strengthened specimens were re-tested under cyclic lateral loading in combination with a constant axial load to assess their post-damage structural response. The experimental results indicate that all three temporary strengthening systems improved the behavior of the damaged RC columns under repeated cyclic loading. In particular, the jackets reduced the concentration of damage within the plastic hinge region, restrained buckling of the longitudinal reinforcement, and enhanced the cyclic stability of the previously damaged specimens. The results further showed that the three configurations did not provide identical structural benefits. Among the investigated systems, the steel jacket equipped with energy-dissipating plates demonstrated the most favorable performance in maintaining effective stiffness and increasing energy dissipation capacity during cyclic loading. By contrast, the corrugated-sheet and knee-brace configurations showed comparatively greater effectiveness in improving confinement of the core concrete and maintaining stability at large displacement demands. These differences indicate that the response of temporarily strengthened columns depends on the mechanical characteristics and load-transfer mechanism of the selected jacket configuration.

The findings demonstrate the feasibility of using mechanically connected steel-jacket systems as temporary post-earthquake strengthening solutions for severely damaged RC columns. Their rapid installation, dry assembly, avoidance of field welding and adhesive materials, and removability after the emergency stage make them particularly relevant where immediate structural stabilization is required before detailed assessment or permanent rehabilitation. The study, therefore, supports the use of temporary steel strengthening as a practical strategy for

improving the short-term safety, cyclic stability, and residual functionality of earthquake-damaged RC columns during emergency response and early recovery operations.

Keywords: Temporary Strengthening; Earthquake-Damaged RC Columns; Mechanical Steel Jacket; Cyclic Behavior; Energy Dissipation.