

## یادداشت پژوهشی

### چکیده

امروزه وجود ستون‌های کوتاه در ساختمان‌ها و پل‌ها به‌عنوان یک چالش جدی در زلزله مطرح می‌شود. این پدیده مخرب به دلیل اختلاف طول ستون در یک تراز مشخص رخ می‌دهد که عمدتاً به دلیل ملاحظات معماری از قبیل قرارگرفتن ساختمان روی سطح شیب‌دار یا محدود شدن ستون و دیوار با عناصر غیر سازه‌ای نظیر دیوارهای آجری و بازشوها و یا وجود اختلاف تراز طبقه در سازه‌های با دوبلکسی به دلیل قرارگیری پیلوت و واحدهای تجاری در همکف می‌باشد. در این مقاله با مدل‌سازی ۹ نمونه ستون کوتاه بتن آرمه، بدون افزایش سختی، مقاومت برشی آنها به کمک الیاف کامپوزیتی و فولاد مقاومت بالا افزایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد به‌طور کلی مقاوم‌سازی نزدیک به سطح با فولاد مقاومت بالا، بر روی افزایش سطح زیر منحنی انرژی و ضریب شکل‌پذیری و مقاوم‌سازی سطحی بر روی افزایش سطح زیر منحنی بار-جابجایی و ظرفیت باربری نهایی مؤثرتر می‌باشد. **واژگان کلیدی:** بتن آرمه، ستون کوتاه، شکل‌پذیری، منحنی انرژی، فولاد مقاومت بالا، CFRP، مقاوم‌سازی سطحی، مقاوم‌سازی نزدیک به سطح.

## مقاوم‌سازی لرزه‌ای ستون‌های کوتاه بتن آرمه به روش سطحی و نزدیک به سطح با صفحات CFRP و فولاد مقاومت بالا

علی کارگران

دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

علی خیرالدین (نویسنده مسئول)

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

kheyroddin@semnan.ac.ir

### ۱- مقدمه

عرضی کافی فراهم نشده است، تحت اثر بارهای لرزه‌ای اولین و بحرانی‌ترین مود شکست ستون، شکست برشی می‌باشد. با رسیدن تنش‌های کششی ایجاد شده در بتن به مقاومت کششی بتن و ظهور ترک‌های مورب، بتن پوسته شروع به ریختن می‌کند. به دنبال آن پارگی و باز شدن آرماتورهای عرضی و در نتیجه کماتش آرماتورهای طولی اتفاق می‌افتد. روند فوق منجر به از هم پاشیدن بتن هسته و شکست ناگهانی و ترد ستون می‌شود (شکل ۱).

با توجه به اهمیت این موضوع، محققین بسیاری در این زمینه تحقیق نموده‌اند. مورتی و تاسیوس [۴-۵]، که با آزمایش روی هشت نمونه ستون کوتاه بتن آرمه تحت بارمحوری ثابت و تغییر مکان‌های استاتیکی رفت و برگشتی و اندازه‌گیری کرنش‌های بتن و فولاد، نتایج طراحی لرزه‌ای با نسبت برش کم و رفتار لرزه‌ای ستون‌های کوتاه را مورد ارزیابی و بررسی قرار داده‌اند و یک مدل خرابائی برای شبیه‌سازی رفتار ستون‌های کوتاه بتن آرمه در گسیختگی جهت فهم و درک بهتر مکانیسم خرابی و با توزیع نیروها در ستون‌ها پیشنهاد داده‌اند.

ساختمان‌ها در طول عمر خود ممکن است در برابر حوادث طبیعی و یا انسان‌ساز قرار گیرند. دانش مهندسی در مورد پدیده‌های طبیعی مانند باد، زلزله و غیره و نحوه تأثیر این پدیده‌ها بر ساختمان‌ها، همچنین واکنش عناصر سازه‌ای و غیر سازه‌ای ساختمان‌ها در برابر این پدیده‌ها گسترش یافته است. امروزه با به کار بردن آیین‌نامه‌های معتبر در ساختمان‌های متعارف و با بررسی‌های بیشتر، با هزینه معقول می‌توان به طرحی قابل اعتماد در برابر این پدیده‌ها دست یافت.

بر اساس مطالعات و تحقیقات انجام شده وجود ستون کوتاه در یک طبقه از سازه باعث افزایش سختی و کاهش تغییر مکان نسبی آن طبقه و در نتیجه کاهش تغییر مکان کل سازه می‌گردد [۱] و در خصوص نیروهای وارد بر فصل مشترک سازه‌های دوبلکسی، نیروی برشی در ستونی که دو سازه دوبلکسی را به هم متصل می‌کند (ستون کوتاه) نسبت به برش در ستون مشابه در سازه معمولی بین ۱/۵ تا ۲/۵ برابر افزایش می‌یابد [۲]. در بسیاری از ستون‌های بتن آرمه‌ی موجود که جزئیات لرزه‌ای یا آرماتورهای

بتن آرمه تقویت شده با صفحات FRP، مقاومت برشی ستون زیاد و برای حالت با شکل پذیری کم و متوسط، مقاومت برشی ستون کم است.

- برای تقویت ستون‌های کوتاه بتنی، الیاف کربنی CFRP مناسب‌تر و دارای کارایی بیشتری نسبت به الیاف شیشه‌ای GFRP هستند و باعث افزایش بیشتری در مقاومت برشی ستون کوتاه، ظرفیت اتلاف انرژی، محصورشدگی در محل مفصل خمشی، تقویت بهتر ارتفاع میانی ستون کوتاه و کاهش کرنش‌ها در محل اتصالات می‌شوند.

- با افزایش تعداد لایه‌های FRP در ستون‌های کوتاه، کرنش در محل اتصالات در انتهای ستون کاهش می‌یابد. بخشی و تابش پور [۱۴] تأثیر میان‌قاب و پدیده‌ی ستون کوتاه را تحت نگاهت زلزله طبس با شتاب بیشینه  $0.35g$  مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار داده‌اند. برقی و عباس‌نیا [۱۵]، با بررسی انواع انهدام ستون‌ها زیر اثر بار جانبی دوره‌ای یا زلزله، پارامترهایی که به لحاظ فیزیکی در نوع انهدام تأثیر دارند شناسایی و تعریف کرده و با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی و نتایج بارگذاری بر روی تعدادی نمونه، مدل جدیدی برای پیش‌بینی نوع انهدام ستون‌ها معرفی کرده‌اند. خیرالدین و میرنظامی [۲]، با تحلیل سه ساختمان فلزی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه پارامترهای لرزه‌ای اعم از تغییرات پیوند، تغییر مکان و همچنین تشکیل ستون کوتاه و عوامل تشدیدکننده‌ی آن را مورد بررسی قرار داده و روشی برای بارگذاری استاتیکی معادل ساختمان‌های دوبلکسی پیشنهاد داده‌اند.

قدرتی امیری و همکاران [۱۶] و خیرالدین و کارگران [۱۷] عملکرد لرزه‌ای ستون‌های کوتاه و سازه‌های دوبلکسی ۴، ۸ و ۱۰ طبقه تحت دو رکورد زلزله طبس و ال‌سنترو را با بررسی نتایج حاصل از حداکثر پاسخ، برش، شاخص خسارت، نسبت سهم ستون کوتاه در خرابی سازه‌های دوبلکسی و... مورد ارزیابی قرار داده‌اند. همچنین خیرالدین و کارگران [۱] رفتار ستون‌های کوتاه را در سازه‌های واقع بر سطح شیب‌دار تحت تحلیل استاتیکی خطی و غیرخطی مورد مطالعه قرار داده‌اند.

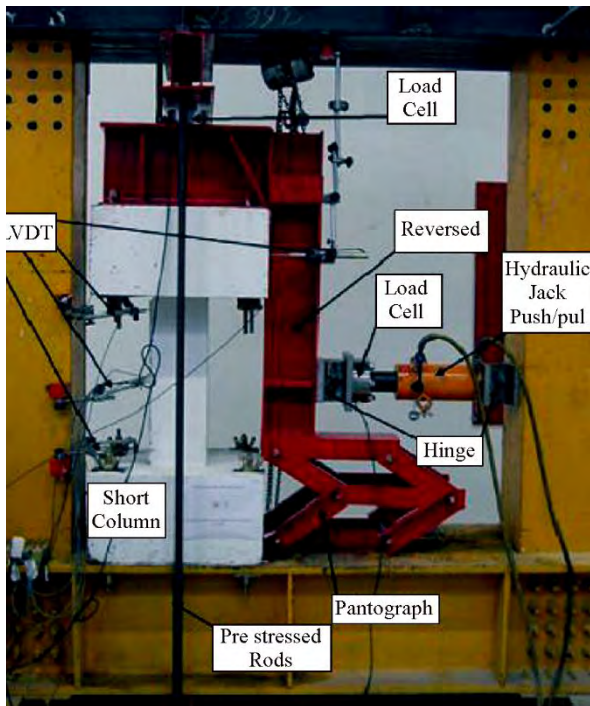
از آنجایی که در تحقیقات گذشته کار بر روی ستون‌های



شکل (۱): آسیب دیدگی و شکست برشی ستون‌های کوتاه بتن مسلح [۳].

همچنین مطالعات آزمایشگاهی بر روی رفتار غیرخطی نمونه‌های مختلف ستون کوتاه با کم و زیاد کردن میزان خاموت هنگامی که با صفحات CFRP و GFRP (الیاف کربنی) تقویت شده‌اند، تحت اثر تغییر مکان‌های سیکلی جانبی و بار فشاری ثابت بر حسب تغییرات بارگذاری و شکل‌پذیری توسط محققینی چون هایدرو و ژاو [۶]، کولمب و همکاران [۷]، پرومیس و همکاران [۸]، پرومیس و فریر [۹]، جلال و همکاران [۱۰]، قبارا و جلال [۱۱]، لیبینگ و همکاران [۱۲] و جلال و قبارا [۱۳] انجام و مشخص شده است که:

- زمانی که خاموت ستون‌ها کافی و استاندارد نباشد، صفحات CFRP باعث جبران و افزایش مقاومت برشی ستون می‌گردد.
- مقاوم‌سازی ستون‌های تحت برش با صفحات CFRP، مفید و خوب بوده و دارای ایمنی کافی می‌باشد.
- در حالت شکل‌پذیری زیاد و متوسط در یک ستون کوتاه

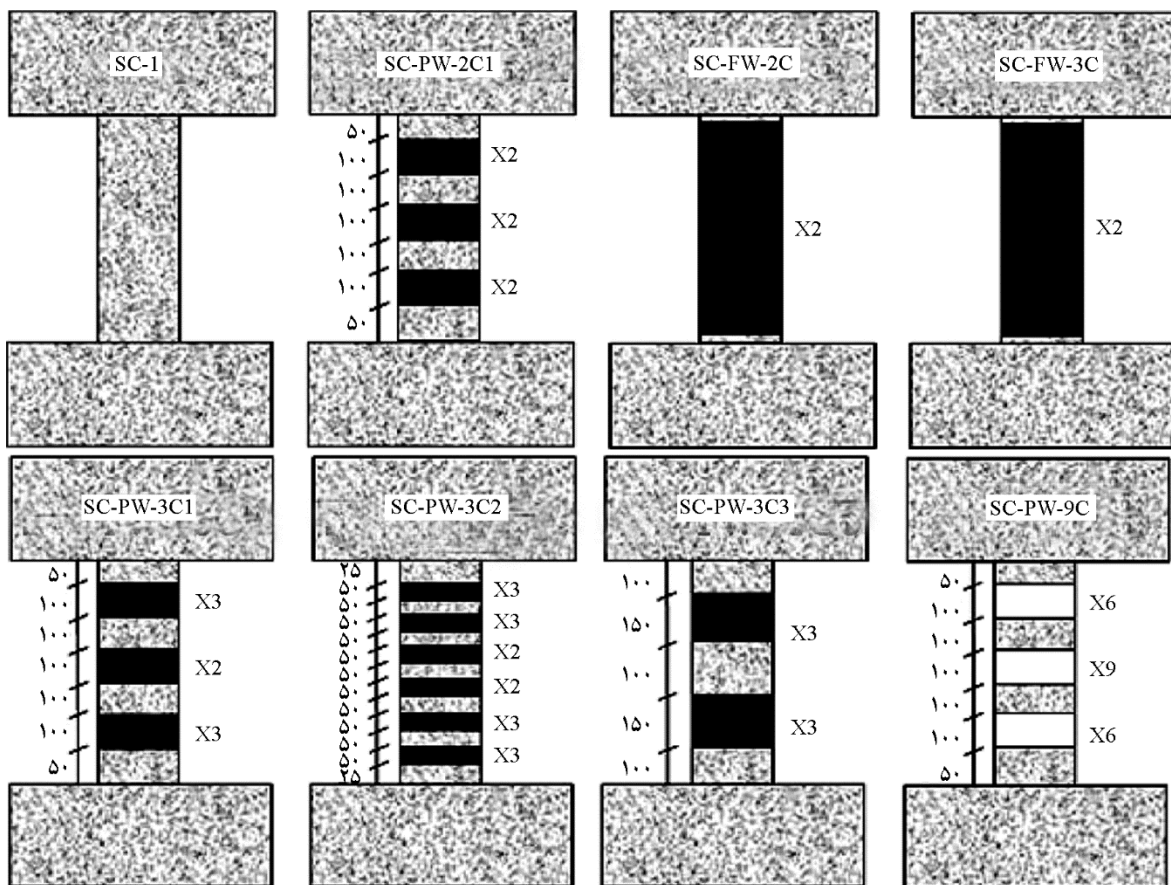


شکل (۳): دستگاه آزمایش ستون های کوتاه بتن مسلح [۷].

کوتاه با چند روش رایج (مقاوم سازی سطحی) صورت پذیرفته لذا در این تحقیق روش های دیگری مورد ارزیابی و پیشنهاد قرار می گیرد.

## ۲- صحت سنجی

از آنجایی که تاکنون در خصوص رفتار و مقاوم سازی ستون های کوتاه بتن مسلح کار عددی صورت نگرفته است لذا به منظور صحت سنجی نرم افزار، از تحقیق آزمایشگاهی کولمب و همکاران [۷] استفاده شده است. در این مطالعه آزمایشگاهی، رفتار غیرخطی هشت نمونه ستون کوتاه تحت اثر تغییر مکان های رفت و برگشتی جانبی که با صفحات CFRP و GFRP (الیاف کربنی و شیشه ای) تقویت شده اند شامل ظرفیت نهایی باربری جانبی، منحنی هیستریزیس، شکل پذیری، سختی و انرژی تلف شده مورد ارزیابی قرار گرفته است (شکل های ۲ و ۳ و جدول ۱).



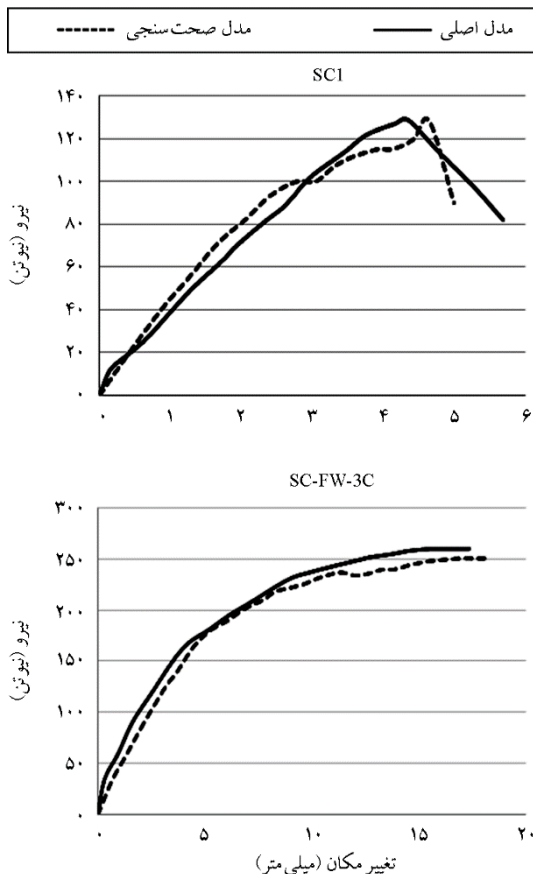
شکل (۲): نمونه های آزمایشگاهی ستون های کوتاه بتن مسلح [۷].

جدول (۲): مقایسه مدل نرم‌افزاری و آزمایشگاهی ستون کوتاه بتن مسلح SC1 و SC-FW-3C.

مدل	بیشینه بار (KN) نمونه SC1	بیشینه بار (KN) نمونه SC-FW-3C
مدل اصلی مقاله	۱۲۸/۳	۲۶۰/۱
مدل صحت‌سنجی	۱۲۸/۲۶۴	۲۵۰/۸
درصد خطا	۰/۰۳	۳/۵

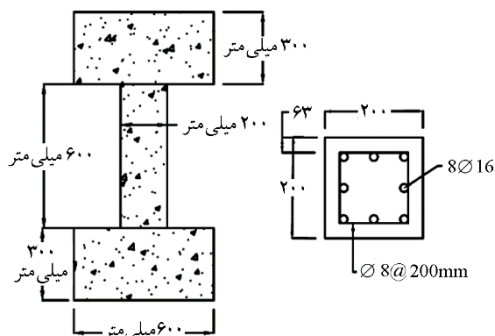
جدول (۱): بار نهایی و مد خرابی نمونه‌های آزمایشگاهی ستون‌های کوتاه بتن مسلح [۷].

نمونه	بار نهایی (KN)	مد خرابی
SC1	۱۲۸/۳	برشی
SC-PW-2C	۲۱۷/۹۰	برشی
SC-FW-2C	۲۵۶/۶۰	خمشی
SC-FW-3C	۲۶۰/۱۰	خمشی
SC-PW-3C 1	۲۱۱/۵۶	برشی
SC-PW-3C 2	۱۹۹/۱۱	برشی
SC-PW-3C 3	۲۱۸/۶۶	برشی
SC-PW-9C	۲۲۳/۴۷	برشی



به منظور صحت‌سنجی، با نرم‌افزار آباکوس و در نظر گرفتن کلیه مشخصات نمونه آزمایشگاهی SC1 (نمونه مرجع) و SC-FW-3C، ظرفیت باربری نهایی ستون حاصل از مدل نرم‌افزاری با مدل آزمایشگاهی SC1 مقایسه و مشخص می‌شود که ظرفیت نهایی ستون ۱۲۸/۲۶۴ کیلو نیوتن (با ۰/۰۳ درصد خطا) و همچنین در مدل تقویت با دورپیچ کامل سه لایه CFRP (SC-FW-3C)، ظرفیت نهایی ستون ۲۵۰/۸ کیلو نیوتن (با ۳/۵ درصد خطا) در مقایسه با مدل آزمایشگاهی حاصل شده است. لذا صحت مدل‌سازی قابل قبول بوده و برای کارهای عددی می‌توان از این مدل‌سازی بهره برد (جدول ۲ و شکل ۴).

شکل (۴): مقایسه مدل نرم‌افزاری و آزمایشگاهی نمونه‌های SC1 و SC-FW-3C.



شکل (۵): ابعاد و اندازه‌گذاری ستون کوتاه بتن آرمه.

### ۳- مشخصات نمونه‌های ستون کوتاه بتن آرمه

مطابق شکل (۵)، ستون‌های کوتاه بتن آرمه با ابعاد مقطع ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر می‌باشند که در آنها نسبت ابعادی (ارتفاع به بعد ستون)، ۳ است. تمامی ستون‌ها در دو طرف به یک پی بتن آرمه با ابعاد ۶۰۰×۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر متصل بوده که در مدل‌سازی دو سر ستون‌ها گیردار انتخاب می‌شود و تحت بار محوری ثابت (به میزان  $0.1f_c A_g$  معادل ۱۰۰ کیلو نیوتن) و بار سیکلی (بارگذاری-باربرداری در سطوح مختلفی از بار نهایی) قرار می‌گیرند.

ساختمان‌های بنایی و پل‌های قوسی نیز مستند شده است [۲۲]. از مزایای استفاده از تقویت NSM می‌توان به مقاومت در برابر خوردگی، افزایش سهولت و سرعت نصب به علت سبک بودن آن، کاهش اندازه شیار به دلیل استحکام کششی بالاتر، زیبایی سازه تقویت شده، کاهش جذب ضربه‌های تصادفی و آسیب‌های مکانیکی و مقاومت در برابر جداشدگی از بستر بتن و آتش‌سوزی اشاره کرد.

از آنجاکه خرابی در ستون‌های کوتاه در بارهای لرزه‌ای (رفت و برگشتی) به دلیل جذب نیروی برشی زیاد به صورت ترک و انهدام قطری (مورب یا ضربدری) (مطابق شکل ۱) صورت می‌پذیرد، در این تحقیق دو مدل مقاوم‌سازی به صورت سطحی و نزدیک به سطح پیشنهاد و ارائه می‌گردد. لذا مقاوم‌سازی اعضای بتن آرمه با الیاف کامپوزیتی (FRP) (مطابق مشخصات جدول ۴) به روش سطحی (EBR) و نزدیک به سطح (NSM) صورت می‌پذیرد، در این تحقیق دو مدل ستون کوتاه به صورت یک‌لایه دورپیچ کامل (مدل EBR1-1L) و دو لایه دورپیچ کامل (مدل EBR1-2L) و دو مدل به صورت نواری یک‌لایه (مدل EBR2-1L) و دو لایه (مدل EBR2-2L) طراحی و مدل‌سازی شده‌اند که از طریق محصور کردن بتن در آرماتورهای عرضی یا دورپیچ‌های کامپوزیتی، از ریختن بتن پوسته و کماتش آرماتورهای طولی جلوگیری می‌کند و ظرفیت تغییر شکل و باربری بتن را افزایش می‌دهد. همچنین در مدل سطحی دیگری با ایجاد دو نوار قطری در دو طرف ستون به صورت یک‌لایه (مدل EBRD1) و دو لایه (مدل EBRD2) و در مدل نزدیک به سطح با کاشت میلگرد مقاومت بالا (جدول ۳) در یک طرف (مدل NHB1) و دو طرف (مدل NHB2) ستون کوتاه تقویت می‌گردد (جدول ۵).

مقاومت ۲۸ روزهی بتن ۲۵ مگا پاسکال و فولاد اصلی شامل هشت میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر (مطابق مشخصات جدول ۳) است که در صد میلگرد به کار رفته در نمونه‌ها تقریباً برابر ۲ درصد سطح مقطع ناخالص نمونه می‌باشد. برای جلوگیری از کماتش میلگردهای طولی و افزایش مقاومت برشی ستون در برابر بارهای جانبی از میلگرد به قطر ۸ میلی‌متر در فواصل مساوی ۲۰۰ میلی‌متر به عنوان خاموت استفاده شده است. در این تحقیق از این نمونه ستون به عنوان نمونه مرجع و به تعداد ۹ نمونه مدل‌سازی می‌گردد و به اختصار با R (Reference) نشان داده می‌شود که با روش‌های مختلف مورد تقویت قرار گرفته است.

در طول دهه گذشته، تحقیقات گسترده‌ای روی تقویت سازه‌های بتن مسلح با استفاده از ورق‌های مسلح پلیمری (FRP) با چسبندگی خارجی انجام شده است. فناوری مذکور همچنین در بسیاری از پروژه‌های عملی در سرتاسر جهان پیاده‌سازی شده است. اخیراً تقویت‌های FRP نصب شده در نزدیک سطح (NSM) حجم فزاینده‌ای از تحقیقات از جمله کاربردهای عملی را به خود اختصاص داده است. در روش NSM، ابتدا شیارهایی داخل پوشش عضو بتن مسلح حفر شده و تقویت‌های FRP با یک پرکننده مناسب، به داخل شیار چسبانده می‌شوند (معمولاً چسب اپوکسی یا دوغاب سیمان). آنچه در اینجا به نام تقویت‌های NSM نامیده شد، قبلاً اسامی دیگری مانند تقویت‌های دوغابی [۱۹] و یا تقویت‌های جاسازی شده [۲۰-۲۱] به آن اختصاص داده شده بود. نمونه‌هایی از استفاده از میلگردهای NSM فولادی در اروپا برای تقویت سازه‌های بتن مسلح به اوایل دهه ۱۹۵۰ بازمی‌گردد [۱۹]. اخیراً کاربرد میلگردهای از جنس فولاد ضد زنگ NSM برای تقویت

جدول (۳): مشخصات مکانیکی میلگرد [۱۸].

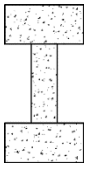
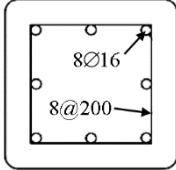
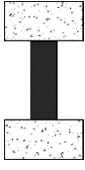
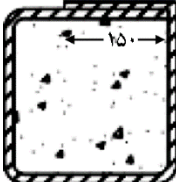
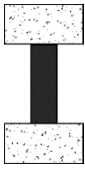


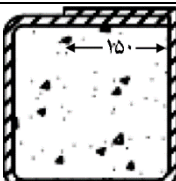


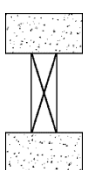
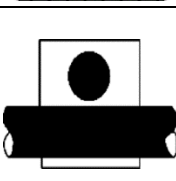
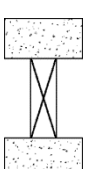
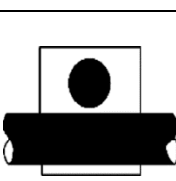
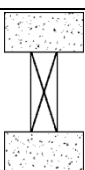
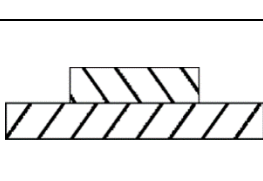
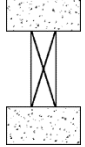
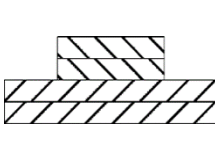
ماده	نام تجاری	ضخامت (قطر) (mm)	مقاومت تسلیم (Mpa)	مقاومت نهایی (Mpa)	کرنش نهایی (%)
میلگرد معمولی	(میلگرد A <sub>3</sub> -آ ج ۴۰۰)	۱۶ و ۸	۴۸۲	۶۴۱	۰/۲۲
میلگرد با مقاومت بالا	(آرماتور A <sub>4</sub> -آ ج ۵۰۰)	۱۲	۵۲۸	۶۶۶	۰/۲

جدول (۴): مشخصات مکانیکی مواد کامپوزیتی و رزین [۲۳].

ماده	نام تجاری	ضخامت (mm)	مقاومت کششی (Mpa)	مدول الاستیسیته کششی (Mpa)	کرنش نهایی (%)
الیاف کربن	SikaWarp-300C	۰/۱۷	۳۹۰۰	۲۳۰۰۰۰	۱/۵۰
رزین اپوکسی	Sikadur-300	---	۳۰	۴۵۰۰	۱/۵۰



جدول (۵): مشخصات نمونه‌ها.

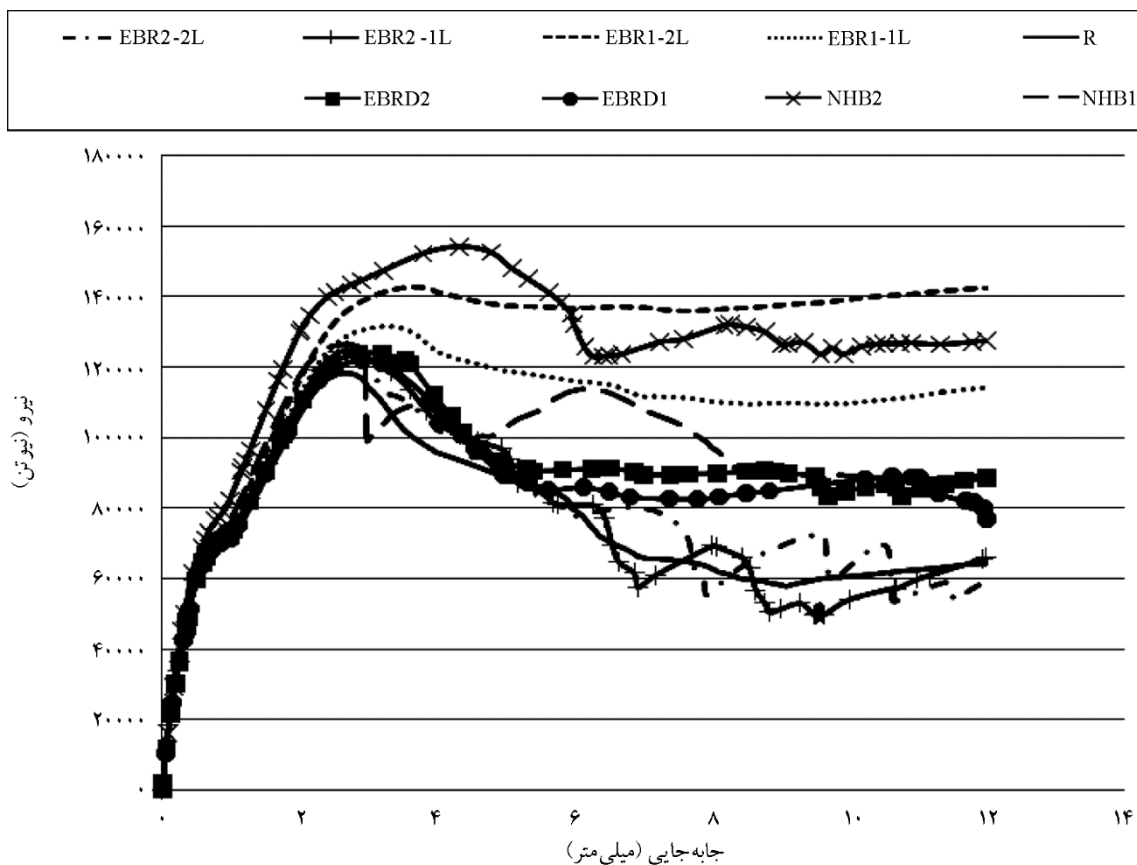
شکل	شکل شیار / مقطع	شرح نمونه	نام نمونه	نمونه
		نمونه مرجع	R (Reference)	۱
		دورپیچ کامل با الیاف CFRP	EBR1-1L (Externally banded Reinforcement)	۲
		دورپیچ کامل با دو لایه الیاف CFRP	EBR1-2L (Externally banded Reinforcement)	۳
		دورپیچ با نوارهای CFRP به عرض ۱۰۰ میلی‌متر در فواصل ۱۰۰ میلی‌متری	EBR2-1L (Externally banded Reinforcement)	۴
		دورپیچ با دو لایه نوارهای CFRP به عرض ۱۰۰ میلی‌متر در فواصل ۱۰۰ میلی‌متری	EBR2-2L (Externally banded Reinforcement)	۵
		قرارگیری دو آرماتور مقاومت بالا به قطر ۱۲ میلی‌متر به‌طور روی‌هم‌گذاری در یک طرف ستون در دو شیار قطری (مورب) به عرض ۲۵ میلی‌متر و عمق ۳۰ میلی‌متر و طول ۶۰۰ میلی‌متر	NHB1 (NSM by HSS Bar)	۶
		قرارگیری دو آرماتور مقاومت بالا به قطر ۱۲ میلی‌متر به‌طور روی‌هم‌گذاری در دو طرف ستون در دو شیار قطری (مورب) به عرض ۲۵ میلی‌متر و عمق ۳۰ میلی‌متر و طول ۶۰۰ میلی‌متر	NHB2 (NSM by HSS Bar)	۷
		دو نوار قطری (مورب) CFRP به عرض ۵۰ میلی‌متر و طول ۶۰۰ میلی‌متر به‌طور روی‌هم‌گذاری در دو طرف ستون	EBRD1 (Externally banded Reinforcement Diagonal)	۸
		دو نوار دو لایه قطری (مورب) CFRP به عرض ۵۰ میلی‌متر و طول ۶۰۰ میلی‌متر به‌طور روی‌هم‌گذاری در دو طرف ستون	EBRD2 (Externally banded Reinforcement Diagonal)	۹

#### ۴- بررسی ظرفیت باربری نمونه‌ها

در این بخش به بررسی ظرفیت باربری نمونه‌ها بر اساس تغییر شکل جانبی آنها در منحنی بارافزون پرداخته شده است. مطابق منحنی‌های شکل (۶) و جدول‌های (۶) و (۷)، با دو لایه دورپیچ کامل (نمونه EBR1-2L) ظرفیت باربری جانبی نمونه به میزان ۶۵/۷ درصد و با قابلیت اتلاف انرژی به میزان ۶۷ درصد نسبت به نمونه مرجع و با روش تقویت نزدیک (نمونه NHB2) به سطح ظرفیت باربری جانبی نمونه به میزان ۴۷ درصد و با قابلیت اتلاف انرژی به میزان ۶۴/۵ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش یک لایه CFRP، ظرفیت باربری جانبی در نمونه دورپیچ کامل حدود ۲۷ درصد، دورپیچ نواری ۱ درصد و قطری ۰/۳ درصد افزایش می‌یابد (جدول ۶). با افزایش یک لایه CFRP، سطح زیر منحنی بار-جابه‌جایی در نمونه دورپیچ کامل حدود ۱۷ درصد، دورپیچ نواری ۲/۳ درصد و قطری ۲/۸ درصد افزایش می‌یابد (جدول ۷).

جدول (۶): ظرفیت باربری جانبی و میزان افزایش نسبت به نمونه مرجع.

نمونه	بار نهایی (N)	درصد افزایش به نمونه مرجع (%)
R	۱۱۰۷۵۷	---
EBR1-1L	۱۴۴۰۲۶	۳۰
EBR1-2L	۱۸۳۴۸۸	۶۵/۷
EBR2-1L	۱۱۴۵۴۲	۳/۴
EBR2-2L	۱۱۵۶۸۱	۴/۵
NHB1	۱۲۱۲۷۱	۹/۵
NHB2	۱۶۲۴۵۹	۴۷
EBRD1	۱۱۲۸۱۳	۱/۸
EBRD2	۱۱۳۱۶۷	۱/۹



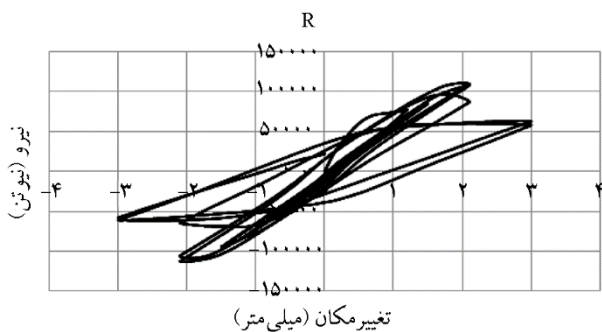
شکل (۶): منحنی بار- تغییر مکان جانبی نمونه‌ها.

جدول (۷): سطح زیر منحنی بار - جابه جایی و میزان افزایش نسبت به نمونه مرجع.

نمونه	سطح زیر منحنی (N.mm)	درصد افزایش به نمونه مرجع (%)
R	۹/۱۸×۱۰ <sup>۵</sup>	---
EBR1-1L	۱/۳۱×۱۰ <sup>۶</sup>	۴۳/۸
EBR1-2L	۱/۵۳×۱۰ <sup>۶</sup>	۶۷
EBR2-1L	۹/۳۶×۱۰ <sup>۵</sup>	۲
EBR2-2L	۹/۵۸×۱۰ <sup>۵</sup>	۴/۳
NHB1	۱/۱۷×۱۰ <sup>۶</sup>	۲۷
NHB2	۱/۵۱×۱۰ <sup>۶</sup>	۶۴/۵
EBRD1	۱/۰۷×۱۰ <sup>۶</sup>	۱۶/۶
EBRD2	۱/۱۰×۱۰ <sup>۶</sup>	۲۰

جدول (۸): سطح زیر منحنی انرژی و میزان افزایش نسبت به نمونه مرجع.

نمونه	سطح زیر منحنی (N.mm)	درصد افزایش به نمونه مرجع (%)
R	۵۰۹۳۸۸۴۳	---
EBR1-1L	۶۳۶۱۳۳۵۰	۲۵
EBR1-2L	۷۷۱۸۳۶۰۱	۵۱
EBR2-1L	۵۲۰۵۰۲۲۳	۲/۲
EBR2-2L	۵۵۳۶۸۹۹۵	۸/۶
NHB1	۷۲۵۸۵۷۷۹	۴۲
NHB2	۹۸۸۶۶۵۷۶	۹۴
EBRD1	۵۳۳۸۶۸۴۳	۴/۸
EBRD2	۵۶۷۹۷۸۸۳	۱۱/۵



شکل (۷): منحنی هیستریزس نمونه R (مرجع).

#### ۵- بررسی منحنی اتلاف انرژی نمونه‌ها

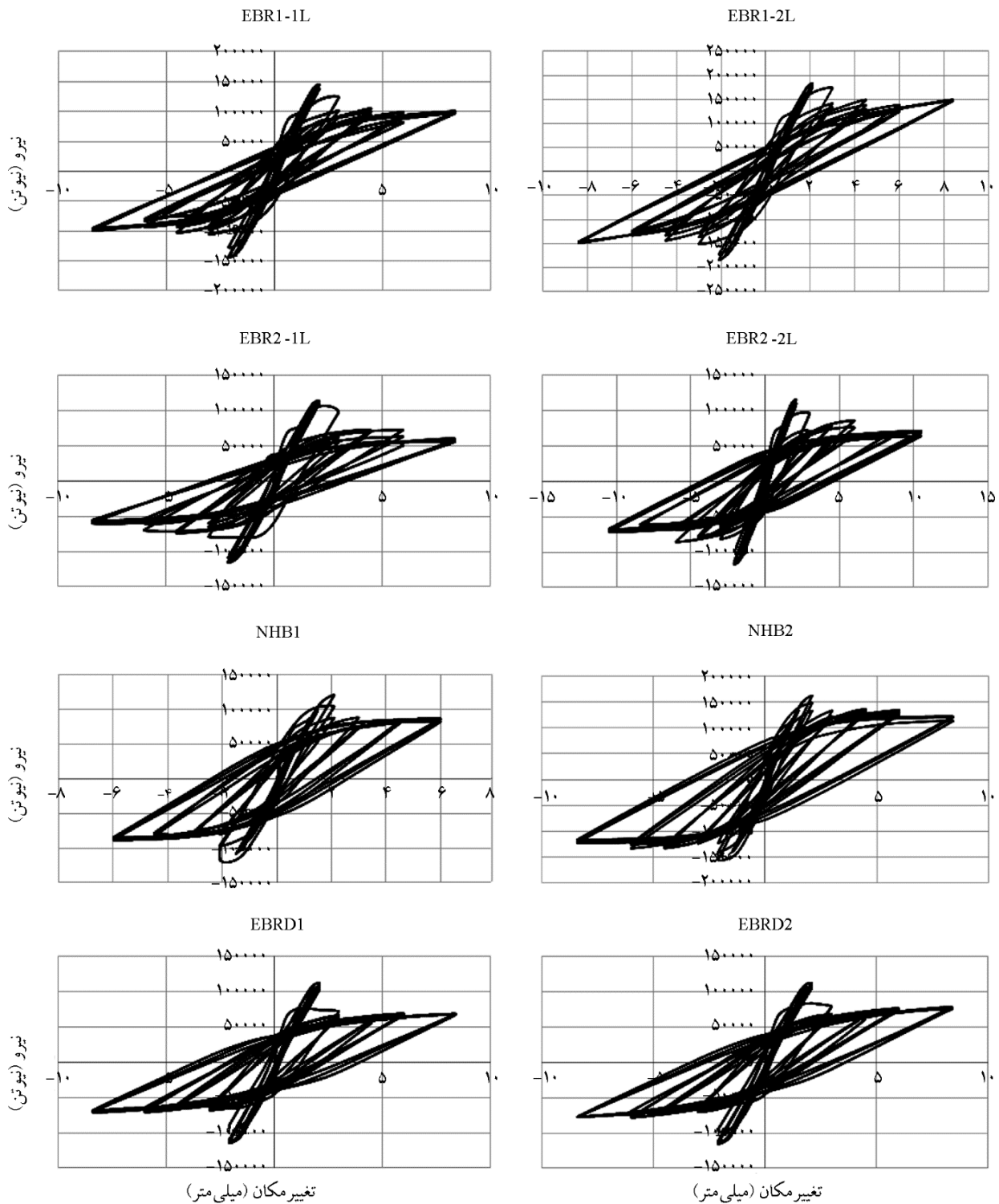
در شکل‌های (۷) و (۸) منحنی حلقه‌ای (اتلاف انرژی) نمونه‌ها نشان داده شده است. سطح داخلی منحنی حلقه‌ای شکل عبارت است از مقدار انرژی تلف شده و هر قدر این مقدار چاق تر باشد، انرژی تلف شده بیشتر خواهد بود. منحنی حلقه‌ای نمونه NHB2 (شکل ۸) نشان‌دهنده‌ی رفتار خوب و ثابت در برابر زلزله است و نشان‌دهنده‌ی شکل پذیری زیاد، ظرفیت اتلاف انرژی زیاد و چرخه‌های پسماند پایدار می‌باشد. همچنین عدم کاهش مقاومت و عدم کاهش سختی در اثر تناوب بارگذاری و جابه‌جایی‌های زیاد از خصوصیات این رفتار می‌باشد.

مطابق جدول (۸) نتایج نشان می‌دهد که نمونه ستون کوتاه تقویت شده به روش نزدیک به سطح با میلگرد مقاومت بالا (NHB2) بیشترین سطح زیر منحنی را دارد و این سطح حدود ۹۴ درصد بیشتر از نمونه مرجع است و نمونه EBR1-2L دارای ۵۱ درصد و سپس نمونه NHB1 با ۴۲ درصد بیشترین سطح زیر منحنی انرژی را دارا می‌باشند. همچنین نتایج حاصل از جدول (۸) نشان می‌دهد با افزایش یک لایه CFRP، سطح زیر منحنی انرژی در نمونه دورپیچ کامل حدود ۲۱ درصد، دورپیچ نواری ۶/۴ درصد و قطری ۶/۴ درصد افزایش می‌یابد.

#### ۶- بررسی شکل پذیری نمونه‌ها

ضریب شکل پذیری، قابلیت اعتماد سازه در تحمل تغییر شکل‌های غیر الاستیک بدون اینکه سازه دچار فروریزش شود می‌باشد که از تغییر شکل پلاستیک سازه بر تغییر شکل الاستیک حاصل می‌شود. چهار فاکتور اصلی در ارزیابی همه ساختمان‌های مهندسی وجود دارد: مقاومت، شکل پذیری، سختی، و پایداری. در طراحی سازه‌ها، سیستم سازه‌ای همه چهار فاکتور را باید تأمین نماید. شرط مقاومت در طراحی سازه‌های کوتاه فاکتور مهمی است ولی با افزایش ارتفاع شکل پذیری، سختی و پایداری شروط مهمی شده و اغلب فاکتور اساسی در طراحی هستند. به‌طور کلی دو روش برای ارضا کردن این شروط در سازه وجود دارد. روش اول افزایش ابعاد اعضا است که این روش دارای محدودیت بوده و غیر عملی و غیر اقتصادی است و روش دوم که تغییر فرم سازه

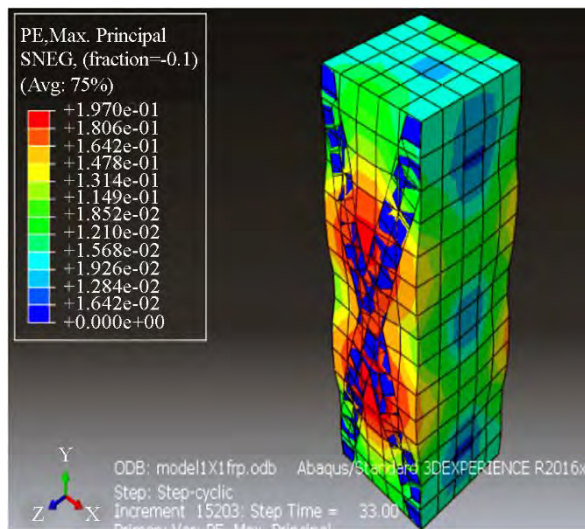




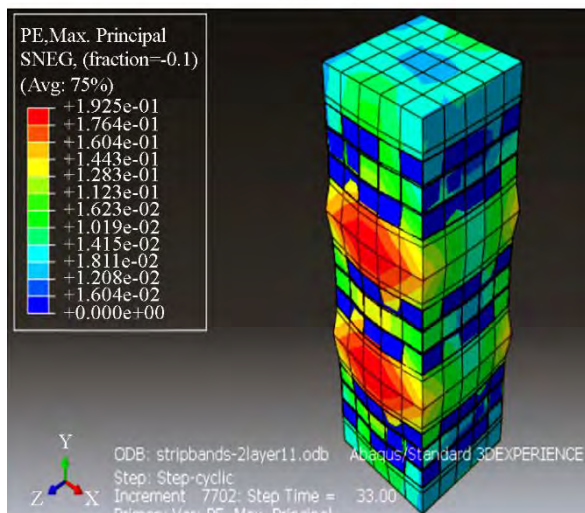
شکل (۸): منحنی هیستریزس نمونه‌های تقویت شده.

ضریب شکل‌پذیری در نمونه دورپیچ کامل حدود ۲۲ درصد، دورپیچ نواری ۲/۵ درصد و قطری ۷/۸ درصد افزایش می‌یابد. بیشترین اثر تقویت به روش نزدیک به سطح بر روی ضریب

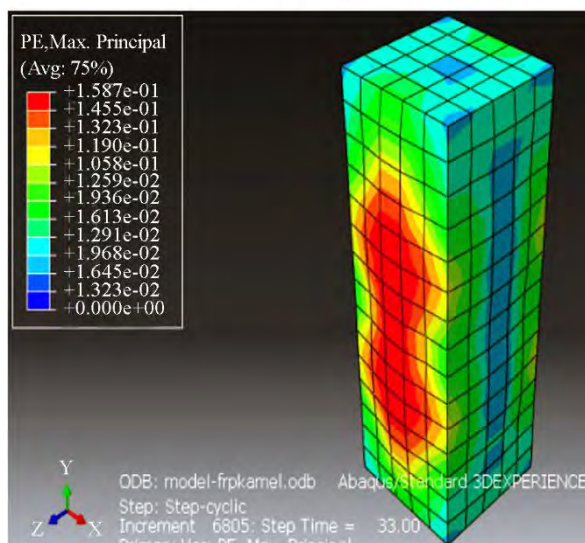
می‌باشد تا به سختی و استحکام بیشتری برای محدود کردن تغییر شکل و افزایش پایداری برسد (شکل ۹) [۲۴]. نتایج حاصل از جدول (۹) نشان می‌دهد با افزایش یک لایه CFRP،



نمونه NHB1



نمونه EBR2-2L

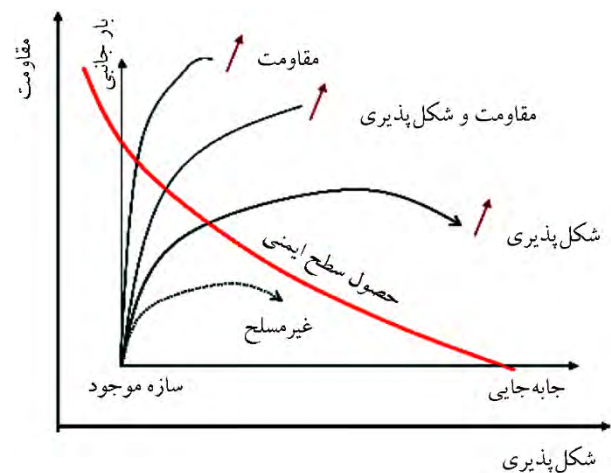


نمونه EBR1-1L

شکل (۱۰): کانتور آسیب دیدگی نمونه‌ها.

شکل پذیری می‌باشد که منجر به افزایش ۱۳۵ درصدی شکل پذیری در نمونه NHB2 شده است و ضریب شکل پذیری نمونه EBRD1 و NHB1 برابر است.

در شکل (۱۰) برای نشان دادن وضعیت و خروجی مدل سازی نمونه‌ها، کانتور آسیب دیدگی سه نمونه ارائه شده است.



شکل (۹): منحنی مقاومت - شکل پذیری سازه‌ها [۷].

جدول (۹): ضریب شکل پذیری و میزان افزایش نسبت به نمونه مرجع.

نمونه	ضریب شکل پذیری (II)	درصد افزایش به نمونه مرجع (%)
R	۳/۸۴	---
EBR1-1L	۴/۹۲	۲۸
EBR1-2L	۶/۰۱۷	۵۷
EBR2-1L	۴/۰۱	۴/۴
EBR2-2L	۴/۱۱	۷
NHB1	۴/۷۱	۲۳
NHB2	۹/۰۴	۱۳۵
EBRD1	۴/۷۲	۲۳
EBRD2	۵/۰۹	۳۲

2. Kheyroddin, A., and Mirnezami, A.R. (2002) Seismic behavior steel buildings with different floor. *Proc., 3<sup>rd</sup> National Conf. on Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, Tehran, Iran.
3. Bayraktar, A., CanAltunisik, A., and Pehlivan, M. (2013) Performance and damages of reinforced concrete buildings during the October 23 and November 9, 2011 Van, Turkey, earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **53**, 49-72.
4. Moretti, M., and Tassios, T.P. (2007) Behaviour of short columns subjected to cyclic shear displacements: Experimental results. *Engineering Structures*, **29**, 2018-2029.
5. Moretti, M., and Tassios, T.P. (2006) Behaviour and ductility of reinforced concrete short columns using global truss model. *ACI Structural Journal*, **103**, 319-327.
6. Haedir, J., and Zhao, XL. (2011) Design of short CFRP-reinforced steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, **67**, 497-509.
7. Colomb, F., Tobbi, H., Ferrier, E., and Hamelin, P. (2008) Seismic retrofit of reinforced concrete short columns by CFRP materials. *Composite Structures*, **82**, 475-487.
8. Promis, G., Ferrier, E., and Hamelin, P. (2009) Effect of external FRP retrofitting on reinforced concrete short columns for seismic strengthening. *Composite Structures*, **88**(3), 367-379.
9. Promis, G. and Ferrier, E. (2012) Performance indices to assess the efficiency of external FRP retrofitting of reinforced concrete short columns for seismic strengthening. *Constr. Build Mater.*, **26**, 32-40.
10. Galal, K., Arafa, A., and Ghobarah, A. (2005) Retrofit of RC square short columns. *Engineering Structures*, **27**, 801-813.
11. Ghobarah, A., and Galal, K. (2004) Seismic rehabilitation of short rectangular RC columns. *Journal of Earthquake Engineering*, **8**, 45-68.
12. Lieping, Y., Qingrui, Y., Shuhong, Zh., and Quanwang, L. (2002) Shear strength of reinforced concrete columns strengthened with carbon Fiber

## ۷- نتیجه‌گیری

با بررسی و مقایسه شکل‌ها و جداول حاصل از مدل‌سازی ستون‌های کوتاه بتن‌آرمه تقویت شده با الیاف کامپوزیتی و فولاد مقاومت بالا به روش سطحی و نزدیک به سطح، نتایج زیر حاصل شده است:

۱- تقویت برشی ستون‌های کوتاه از یک لایه CFRP به دولایه، به طور متوسط منجر به افزایش ظرفیت باربری، سطح زیر منحنی انرژی و ضریب شکل‌پذیری حدود ۲۲ درصد در نمونه دورپیچ کامل، ۳ درصد در نمونه نواری و ۴/۳ درصد در نمونه قطری می‌گردد به عبارت دیگر افزایش تعداد لایه‌ها در روش تقویت دورپیچ کامل (EBR1-2L) بیشترین تأثیر را بر پارامترهای لرزه‌ای دارد.

۲- تقویت ستون‌های کوتاه به روش نزدیک به سطح با میلگرد مقاومت بالا در دو طرف (نمونه NHB2)، به طور متوسط منجر به افزایش ۳۴ درصدی در ظرفیت باربری نهایی، ۲۹ درصدی در سطح زیر منحنی بارافزون، ۳۶ درصدی سطح زیر منحنی انرژی و ۹۲ درصدی ضریب شکل‌پذیری نسبت به روش تقویت در یک طرف می‌گردد.

۳- به طور کلی مقاوم‌سازی نزدیک به سطح با فولاد مقاومت بالا، بر روی افزایش سطح زیر منحنی انرژی و ضریب شکل‌پذیری و مقاوم‌سازی سطحی کامل بر روی افزایش سطح زیر منحنی بار-جابجایی و ظرفیت باربری نهایی مؤثرتر می‌باشد.

۴- به طور کلی عملکرد ستون‌های تقویت شده به روش دورپیچ نواری و قطری در میزان ظرفیت باربری جانبی، سطح زیر منحنی انرژی و سطح زیر منحنی بار-جابجایی تقریباً مشابه هم ولی عملکرد ستون‌های تقویت شده به روش قطری در ضریب شکل‌پذیری حدود ۲۴ درصد بیشتر از روش دورپیچ نواری است.

## مراجع

1. Kheyroddin, A., and Kargar, A. (2009) Seismic behavior of short column in RC structures on slope surface. *Journal of Modeling in Engineering*, **7**, 57-62.

- Strengthening. Zurich, Switzerland.
24. Bungale, S. and Taranath, A. (1988) *Structural Analysis and Design of Tall Building*. McGraw-Hill Book Company.
13. Galal, K., Ghobarah, A. (2003) Flexural and shear hysteretic behaviour of reinforced concrete columns with variable axial load. *Engineering Structures*, **25**, 1353-1367.
14. Bakhshi, A., and Tabeshpor, M.R. (2006) Evaluation of short column fracture calculation in earthquake. *Research Bulletin of Seismology and Earthquake Engineering*, **8**(1), spring (in Persian).
15. Barghi, M., and Abasnia, R. (2006) Augury of RC columns destruction type in cyclic lateral load. *Proceedings of 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Civil Eng.*, Tehran, Iran.
16. Ghodrati Amiri, G.R., Kheyroddin, A., and Kargaran, A. (2011) Seismic vulnerability of RC structures with different floor under earthquake. *Journal of Civil and Surveying Engineering*, **45**, 479-486.
17. Kheyroddin, A., and Kargaran, A. (2011) Seismic behavior of short column in RC structures with different floor level. *Journal of Civil Engineering*, **22**, 129-145.
18. Kavir Steel Complex, [www.kavirsteel.ir](http://www.kavirsteel.ir).
19. Asplund, S.O. (1949) Strengthening bridge slabs with grouted reinforcement. *J. Am. Concr. Inst.*, **20**(6), 397-406.
20. Warren, G.E. (1998) *Waterfront Repair and Upgrade, Advanced Technology Demonstration site No. 2: Pier 12, NAVSTA San Diego*. Site Specific Report SSR-2419-SHR, Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme (CA).
21. Warren, G.E. (2000) *Waterfront Repair and Upgrade, Advanced Technology Demonstration Site No. 3: NAVSTA Bravo 25, Pearl Harbour*. Site Specific Report SSR-2567-SHR, Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme (CA).
22. Garrity, S.W. (2001) Near-surface reinforcement of masonry arch highway bridges. *Proceedings of the 9<sup>th</sup> Canadian Masonry Symposium*, Fredericton (Canada), CD-ROM.
23. Sika Group, Product Data Sheet: SikaWrap-300C (2006) *Woven Carbon Fiber Fabric for Structural*