

بررسی آزمایشگاهی رفتار ستون‌های بتنی غیر مسلح تقویت شده با شیوه نوین کاربرد ترکیبی ژاکت‌های فولادی - پلیمری

محمد رضا نوری شیرازی^۱، حسن افشین^۲ و کریم عابدی^{۳*}

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

^۳ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

(دریافت: ۹۵/۵/۳۱، پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۲، نشر آنلاین: ۹۵/۱۲/۲۳)

چکیده

در این مقاله شیوه نوین تقویت، محصورکنندگی ترکیبی با استفاده هم‌زمان از عناصر فولادی مسلح کننده و الیاف FRP، به منظور تقویت ستون‌ها و پایه‌های بتنی غیرمسلح پیشنهاد و کفایت آن با انجام مطالعه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های استوانه‌ای از بتن با مقاومت پایین ساخته شده و تحت بارگذاری فشاری در شرایط آزمایشگاهی، برخی مشخصه‌های مکانیکی از قبیل میزان جذب انرژی، تغییر شکل محوری، سختی اولیه و رفتار بار- تغییر شکل برای آنها تعیین گردید. دو نمونه تقویت نشده به عنوان نمونه معیار انتخاب شده و ۱۸ نمونه دیگر با استفاده از روش‌های مرسوم تقویت از قبیل دورپیچ کردن با CFRP، GFRP، دورپیچ کردن با استفاده هم‌زمان پوشش FRP و میلگردهای فولادی نصب شده در سطح بتن (NSM) و در نهایت دو روش پیشنهادی در این تحقیق تقویت شدند. بر مبنای نتایج آزمایش مشخص گردید که با استفاده از شیوه تقویت پیشنهادی ظرفیت باربری فشاری، میزان جذب انرژی و تغییرشکل محوری نسبت به استفاده از سایر روش‌های تقویت بهبود یافته، هرچند در میزان سختی الاستیک نمونه‌ها افزایش ایجاد شده است. از روش تقویتی پیشنهاد شده می‌توان برای تقویت برشی و خمشی ستون‌ها و پایه‌های بتنی غیر مسلح پل‌های جاده‌ای و راه‌آهن استفاده کرد. **کلیدواژه‌ها:** مقاوم سازی، ژاکت‌های ترکیبی، مقاومت محوری، شکل‌پذیری، جذب انرژی.

۱- مقدمه

(۲۰۰۳). متداول‌ترین روش تقویت ستون‌ها دورپیچ کردن سطح خارجی آنها می‌باشد. اساس این روش که در واقع محصور کردن ستون و اعمال فشار جانبی بر بتن است این بوده که وجود فشار محیطی بر عضو بتنی سبب تأخیر در ترک خوردگی بتن، افزایش مقاومت فشاری و شکل‌پذیری آن می‌شود. در این حالت مقطع ستون به صورت جانبی منبسط شده و تحت فشار محیطی محصورکننده یکنواختی قرار می‌گیرد (کبیر و کاشانی، ۱۳۸۷). مصالح مختلفی برای تقویت با استفاده از روش محصورکنندگی مورد استفاده قرار گرفتند که از آن جمله می‌توان به استفاده از فولاد و FRP در فرم‌های مختلف اشاره کرد (Li, ۲۰۰۷). پوشش‌های بیرونی FRP می‌توانند ظرفیت برشی و شکل‌پذیری ستون را افزایش دهند. این پوشش‌ها را می‌توان در اطراف ستون هم به صورت صفحات و ورقه‌های FRP پیش ساخته و هم با کمک رزین مناسب و پیچیدن الیاف دور ستون به روش چسباندن تر استفاده

در طی سال‌های گذشته وقوع زمین لرزه‌های متعدد در نقاط مختلف دنیا باعث بروز خسارات مالی و جانی فراوانی گردیده است. سازه‌های مختلف از جمله پل‌ها از قاعده آسیب‌ها مستثنی نبوده و اجزای بتنی مسلح و غیرمسلح آنها از جمله پایه‌ها و ستون‌ها آسیب‌های مختلفی را تجربه کردند. از جمله نقایص مشاهده شده در ستون‌ها می‌توان به مقاومت خمشی ناکافی، شکل‌پذیری کم، جذب انرژی پایین و در برخی موارد مقاومت برشی ناکافی به دلیل نامناسب بودن کیفیت اجرای بتن اشاره کرد (Dionysios و همکاران، ۲۰۰۹؛ Xiong و همکاران، ۲۰۱۱). روش‌های متعددی برای تقویت و ترمیم سازه‌ها و اجزای آنها توسعه یافته است. تکنیک‌های مقاوم‌سازی به طور عمده شامل روش‌هایی برای افزایش نیروهای محصورکنندگی در نواحی تشکیل مفصل پلاستیک و یا سایر نقاط ستون می‌شود (Abdullah و Takiguchi،

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴۱۱۲۱۲۱۰

استوانه‌ای و یک لایه نازک پوشش پلیمری FRP را برای تقویت استوانه بتنی ارائه داد. Li و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی تأثیر استفاده هم‌زمان از ورقه‌های پلیمری کربنی و ژاکت فولادی برای ترمیم ستون‌های بتن مسلح آسیب دیده در اثر خوردگی پرداختند. Choi و همکاران در سال ۲۰۱۱ به ارائه راهکاری برای حل مسئله واژگونی و ظهور ترک‌های کششی در پایه‌های بتنی غیر مسلح پل‌های راه‌آهن پرداختند. آزمایش نمونه‌های مقیاس شده برای مطالعه رفتار اعضای بتن مسلح یک روش مرسوم در تحقیقات می‌باشد زیرا تجهیزات مورد نیاز برای آزمایش مدل‌های واقعی (مقیاس کامل) در عمل کمیاب و بسیار هزینه‌بر می‌باشند. در حالی که مقیاس کردن اعضای واقعی تأثیر کمی بر روی پاسخ آن در طی آزمایشات دارد، این اثرات اغلب در وضعیت‌های بارگذاری استاتیکی و دینامیکی با دقت مناسب قابل محاسبه می‌باشد. بدین منظور دو جنبه مهم ساخت مدل و تحلیل پاسخ‌ها، شبیه‌سازی هندسه و مصالح می‌باشد و هر دو می‌بایست ملزومات لازم را برای یک مدل مشخص اقتاع کنند. آنالیز ابعادی شاخه‌ای از ریاضیات است که به صورت ابعادی معادلات همگن و همچنین معادلاتی که به صورت مستقل از واحدهای اساسی اندازه‌گیری می‌باشند را به یکدیگر ارتباط می‌دهد. در اصل آنالیز ابعادی به طور مستقیم منجر به تئوری شبیه‌سازی می‌شود. با به کارگیری معادلاتی که مستقل از واحدهای اندازه‌گیری هستند، ارتباطی بین یک پدیده که در یک حالت اتفاق می‌افتد را با همان پدیده در جایی دیگر برقرار کرد. در این راستا می‌توان از تئوری باکینگهام (Buckingham) استفاده نمود. این تئوری بیان می‌دارد که تعداد گروه‌های بدون بعد مستقل برابر با تعداد همه کمیت‌هایی است که از اهمیت لازم برای یک فرایند برخوردار است، اما کمتر از تعداد کمیت‌های اولیه می‌باشد. در طراحی مدل سازه‌ای بر حسب نمودار تنش بر حسب کرنش می‌توان دریافت که مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی باید دقیقاً منطبق بر مشخصات مصالح به کار رفته در نمونه واقعی باشد تا رفتار حاصله تنش بر حسب کرنش کاملاً یکسان باشد. با توجه به این که خروجی نتایج آزمایش‌ها بر حسب تنش و کرنش است، می‌توان با استفاده از مهندسی معکوس و با استفاده از روابط موجود برای مقیاس کردن نیروها و لنگرها، این نتایج را برای سازه‌های واقعی تعمیم داد.

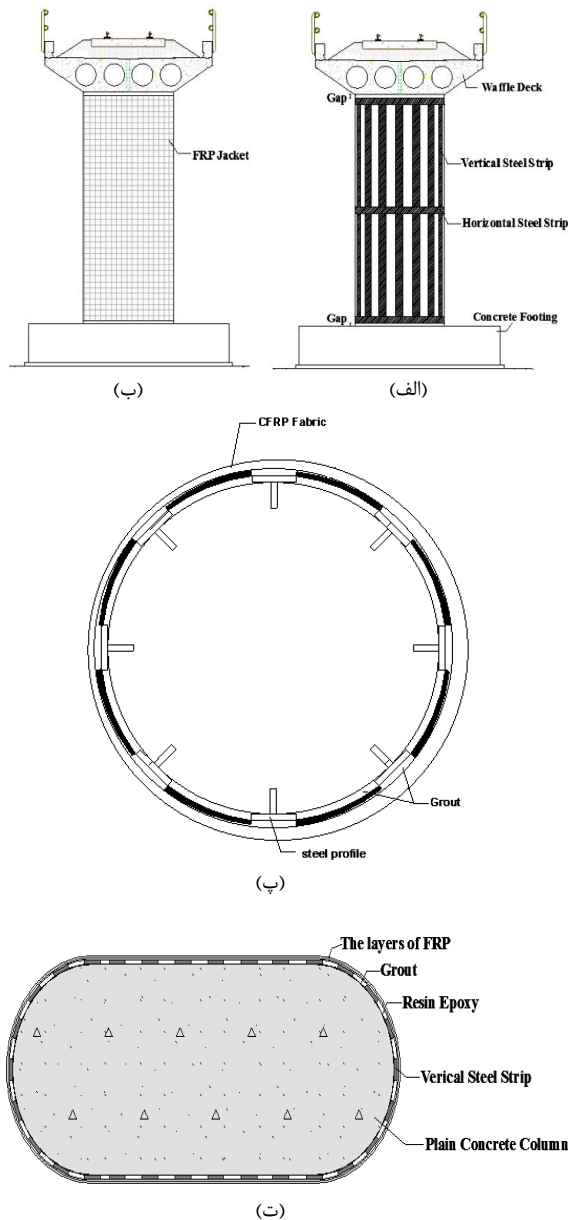
۲- اهمیت تحقیق

پل‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین ارکان در شبکه راه‌های جاده-ای و ریلی هر کشوری محسوب می‌شوند که احداث و نگهداری آنها هزینه‌های قابل توجهی را در بر خواهد داشت. در ایران تعداد قابل توجهی از پل‌های جاده‌ای و پل‌های راه‌آهن وجود دارند که پایه‌های آنها به طور عمده از مصالح بنایی و یا بتن خالص ساخته

کرد. از جمله مزایای مهم مصالح FRP داشتن نسبت مقاومت به وزن عالی، دوام زیاد، مقاومت در برابر خوردگی، سهولت نصب، سرعت ساخت و انعطاف‌پذیری در طراحی می‌باشد (Wu و همکاران، ۲۰۰۶) علی‌رغم داشتن مزایای سیستم FRP، استفاده از آنها برای تقویت باعث بهبود مشخصی در مقاومت عضو نخواهد شد (Lu و همکاران، ۲۰۰۵؛ Yau، ۲۰۰۲؛ Dritos و Vandoros، ۲۰۰۸). همچنین در سازه‌های بتنی تقویت شده با استفاده از FRP گسیختگی ترد و ناگهانی مصالح تقویت کننده امری اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. این ورق‌ها درصد بزرگی از مقاومت اولیه خود را تحت بارگذاری ثابت از دست می‌دهند که این مقدار از ۱۵ تا ۶۰ درصد متغیر می‌باشد (رهایی و نوروزی، ۱۳۸۴؛ Choi و همکاران، ۲۰۱۱). استفاده از ژاکت فولادی به عنوان یک تکنیک مرسوم تقویت باعث بهبود مقاومت خمشی، ظرفیت برشی، سختی، شکل-پذیری و ظرفیت باربری خواهد شد. اما کاربرد آن دارای معایبی چون خوردگی فولاد، مشکلات مربوط به نصب ورق‌ها و افت تدریجی مقاومت پیوند بین سطح مشترک فولاد و بتن می‌باشد (Li و همکاران، ۲۰۰۲). همچنین استفاده از ژاکت‌های فولادی سختی ستون را افزایش داده و منجر به افزایش نیروهای وارد بر ستون ناشی از زلزله می‌شود. به علت تفاوت‌های موجود در ماهیت دو ماده محصورکننده، رفتار ستون محصور شده با FRP به طور اساسی متفاوت از رفتار ستون محصور شده با فولاد می‌باشد. میزان محصورکنندگی برای بتن محصور شده با FRP متناسب با مقدار بار محوری است که در آن گسیخته شده و خرابی ناگهانی و تردی در آن اتفاق می‌افتد، در حالی که برای ستون بتنی تقویت شده با استفاده از فولاد، تنش محصورکنندگی متناسب با مقدار بار محوری می‌باشد که باعث وقوع اولین تسلیم در آن شده است. ماورای محدوده تسلیم فولاد، مقدار تنش محصورکنندگی ثابت باقی می‌ماند (Lam و Teng، ۲۰۰۳). روش‌های مقاوم‌سازی متعددی برای تقویت ستون‌های بتن مسلح تدوین یافته است اما تعداد این روش‌ها برای ستون‌ها و پایه‌های بتنی غیر مسلح با توجه به محدود بودن کاربرد آنها بسیار کم و ناچیز است. روش‌های مرسوم تقویت با کاربرد تکی ژاکت‌های فولادی و یا الیاف FRP تنها قادر خواهد بود فشار محصورکنندگی را در امتداد افقی اعمال کنند، در حالی که ستون‌ها و پایه‌های بتنی غیر مسلح علاوه بر افزایش محصورکنندگی نیاز به تقویت در امتداد محور طولی ستون برای بهبود مقاومت خمشی را دارند (Choi و همکاران، ۲۰۱۱). در نظرگیری برخی محدودیت‌ها، منجر به بررسی استفاده ترکیبی از دو مصالح مختلف در دهه اخیر توسط محققین مختلف شده است. تحقیقات به طور عمده در دو حیطة ساخت اعضای سازه‌ای مرکب فولاد-FRP و همچنین تقویت اعضای سازه‌ای برابر مانند ستون‌ها، تیرها، اتصالات تیر به ستون، دال‌ها و دیوارها می‌شود. Li در سال ۲۰۰۷ نوعی سیستم محصورکنندگی متشکل از یک شبکه فولادی

۴- برنامه آزمایشگاهی

به منظور اثبات کیفیت طرح تقویت پیشنهادی، مجموعه-ای از آزمایش‌ها در آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی سهند تبریز انجام شد. در فاز اول، آزمایشات بر روی نمونه‌های استوانه‌ای بتنی غیر مسلح تحت اثر بارگذاری فشاری یکنواخت انجام گرفت.



شکل ۱- شماتیکی از طرح تقویت پیشنهاد شده برای پایه‌های بتنی غیر مسلح: (الف) پایه پل قبل از دورپیچ کردن FRP. (ب) پایه پل بعد از دورپیچ کردن FRP. (پ) دورپیچ کردن مقطع دایروی (طرح ۱)، (ت) دورپیچ کردن برای دیوار پایه‌ها (طرح ۲)

۴-۱- جزئیات نمونه‌های آزمایش

مشخصات کامل نمونه‌های به کار رفته در آزمایش در جدول (۱) نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است، تعداد دو

شده و پتانسیل آسیب‌پذیری در برابر وقوع زلزله‌های احتمالی را دارند. با توجه به توضیحات ارائه شده در فوق و ذکر مشخصات مکانیکی و مزایا و معایب استفاده هر یک از دو مصالح فولاد و یا FRP در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده ترکیبی دو مصالح ذکر شده، شیوه‌ای مناسب برای تقویت برشی و خمشی ستون‌ها و پایه‌های بتنی غیر مسلح ارائه گردد. این شیوه با برخی شیوه‌های متداول تقویت مقایسه و کیفیت آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. استفاده از نوع تقویت برای هر عضو سازه‌ای مستلزم دانستن نقاط ضعف و نوع خرابی به وجود آمده در آن می‌باشد. پایه‌های بتنی غیر مسلح با داشتن ابعاد بزرگ مقطع به طور معمول نیازی به تقویت برشی ندارند. اما کمبود مقاومت خمشی و شکل‌پذیری از جمله نقاط ضعف آنها محسوب می‌شود. شیوه تقویت پیشنهادی از ترکیب دو مصالح سازه‌ای مناسب یعنی فولاد و FRP تشکیل می‌شود. در این تحقیق، دو حالت کلی برای تقویت در نظر گرفته شده است. در حالت اول، نخست سطح ستون آسیب‌دیده ترمیم می‌شود. با توجه به شدت خرابی، عمل ترمیم با استفاده از تزریق گروت و یا چسب رزین اپوکسی به داخل ترک‌ها انجام می‌شود. بعد از گذشت مدت زمانی برای خشک شدن گروت و یا گرفتن چسب (حداقل ۲۴ ساعت)، اجزای فولادی مانند تسمه، پروفیل سپری (T شکل) بر روی سطح بتن نصب می‌شود. نصب تسمه با عمل چسباندن روی سطح ستون انجام می‌شود، در حالی که نصب پروفیل‌های سپری با حفر شیارهای منظم و محاسبه شده بر سطح ستون ترمیم شده اجرا خواهد شد. داخل شیارها با چسب رزین اپوکسی آغشته شده و قسمت جان پروفیل سپری داخل آنها قرار می‌گیرد. شیار مابین پروفیل‌ها و سطح ستون با استفاده از بتن با مقاومت پایین پر شده و بعد از طی حداقل ۲۴ ساعت دورپیچ کردن الیاف CFRP به دور ستون انجام می‌شود. در طرح دوم بعد از ترمیم سطح پایه آسیب دیده، پوشش CFRP با استفاده از چسب رزین اپوکسی به دور ستون پیچانده می‌شود. نوارهای فولادی با ابعاد تعیین شده با استفاده از چسب به لایه نخست دورپیچ شده متصل شده و فضای خالی مابین با استفاده از بتن با مقاومت پایین پر می‌شود. در نهایت پوشش CFRP به عنوان لایه آخر به دور ستون پیچانده می‌شود. در ستون‌های واقعی می‌توان تعداد لایه‌ها و ضخامت هر لایه تقویت کننده اعم از پوشش پلیمری یا فولادی را متناسب با تقاضای مورد نیاز برای رسیدن به حداقل‌های لازم آیین‌نامه‌ای و با استفاده از روابط موجود تعیین کرد اما در نمونه‌های آزمایشگاهی این ابعاد به منظور بررسی مقایسه‌ای، به صورت تخمینی انتخاب می‌شود. به منظور انتقال بهتر تنش و در نظرگیری ناحیه هم‌پوشانید و لایه، به طور معمول طول هر لایه بزرگ‌تر از طول محیط ستون در نظر گرفته می‌شود. شماتیکی از دو طرح تقویت پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است.

انتخاب شده است. به منظور جلوگیری از اعمال مستقیم بار به نوارهای فولادی و الیاف FRP، طول آنها به اندازه ۲ میلی‌متر کمتر از ارتفاع نمونه استوانه‌ای بتنی در نظر گرفته شده است. در جدول (۲) مشخصات مصالح به کار رفته و مشخصات هندسی عناصر تقویت کننده در آزمایش قابل مشاهده است. اطلاعات موجود برای الیاف کربن و شیشه بر طبق مدارک ارائه شده از طرف شرکت سازنده لحاظ شده است. جنس نوارهای فولادی از نوع فولاد ST37 می‌باشد. برای لحاظ کردن درصد آرماتورهای طولی مورد نظر برای تقویت و در نظرگیری تعداد آنها، به دلیل عدم دسترسی به میله‌های فولادی با قطر کم از جنس فولاد ST37 در بازار، از فولاد میل نقره (فولاد ۲۲۱۰ طبق استاندارد W.Nr آلمان) با قطر ۴ میلی‌متر به عنوان مسلح کننده‌های طولی استفاده شده است. برای دستیابی به مشخصات مکانیکی این میله‌ها، تعداد سه نمونه با ابعاد استاندارد ذکر شده در آیین‌نامه ASTM ساخته شده و تست کشش بر روی آن انجام شد.

در شکل (۲) نمودار تنش بر حسب کرنش سه نمونه آزمایش شده قابل مشاهده بوده که تنش تسلیم آن با روش تشریح شده در آیین‌نامه مربوطه محاسبه شده است. با داشتن تنش تسلیم و مساحت هر الیاف تقویت کننده فولادی ذکر شده در جدول (۲)، تعداد نوارها یا میله‌ها برای رسیدن به مقدار دو درصد آرماتورهای طولی به کار رفته در طرح تقویت، به صورت تقریبی تعیین گردید.

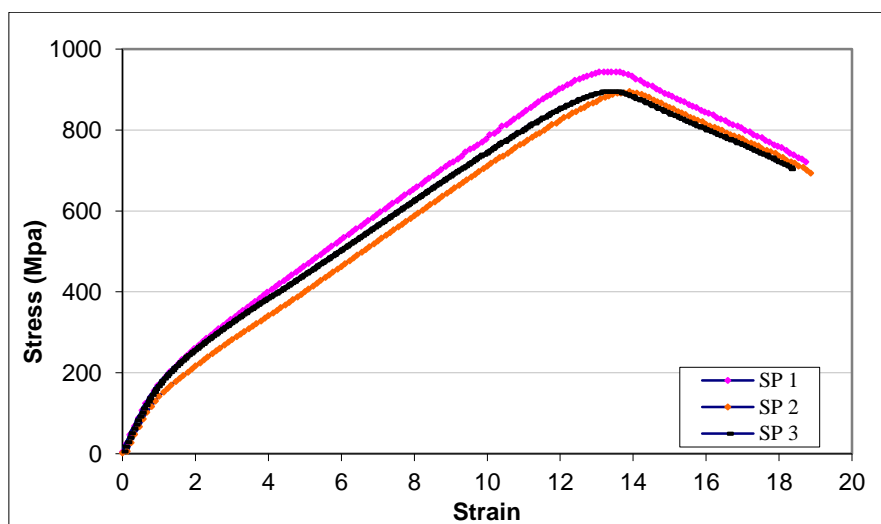
نمونه به عنوان مرجع مقایسه شونده مدنظر قرار گرفته و ساخته شده است. تعداد نمونه‌ها برای هر طرح تقویت سه عدد انتخاب شده است. نمونه‌ها مطابق با ابعاد استوانه استاندارد آیین‌نامه بتن ایران بوده که دارای قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر هستند. طبق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران، درصد مجاز میلگردهای طولی در ستون‌ها برای حصول شکل‌پذیری بین ۱ تا ۴ درصد متغیر می‌باشد. در این تحقیق برای نمونه‌هایی که در طرح تقویت آنها از الیاف فولادی استفاده شده، این مقدار برابر با ۲ درصد لحاظ شده است. بسته به ابعاد هندسی (مساحت مقطع عرضی) نوارهای فولادی معمولی (TSP)، پهن (WSP) و میلگرد (SR)، با توجه به این که مساحت مقطع عرضی نمونه استوانه‌ای بتنی برابر با $78/50$ سانتی‌متر مربع است، تعداد پروفیل‌ها محاسبه و برای تقویت مورد استفاده قرار گرفت. بسته به ترتیب لایه‌ها، اتصال نوارهای فولادی با استفاده از چسب اپوکسی دو جزئی انجام شد اما برای نصب میلگردهای فولادی، در ابتدا در محل نصب میلگردها برش‌های ارتفاعی بر روی نمونه استوانه‌ای انجام شد تا میلگرد به طور کامل روی سطح مدفون شود. اتصال میلگردهای فولادی با استفاده از چسب اپوکسی دو جزئی انجام شده است. عرض پوشش‌های پلیمری CFRP و GFRP برابر $19/80$ سانتی‌متر انتخاب شده و طول هر لایه باندازه ۱۰ سانتی‌متر بیشتر از طول محیط مقطع عرضی نمونه استوانه‌ای و به منظور رعایت هم‌پوشانی

جدول ۱- جزئیات نمونه‌های آزمایشی

نمونه	طرح تقویت به کار رفته	تعداد
PCS	نمونه تقویت نشده	۲
TSP-CFRP	چسباندن نوارهای فولادی نازک و سپس دورپیچ کردن دو لایه الیاف CFRP (طرح ۱)	۳
WSP-GFRP-CFRP	چسباندن نوارهای فولادی پهن، دورپیچ کردن یک لایه الیاف شیشه و سپس دورپیچ کردن یک لایه الیاف کربن	۳
CFRP-TSP-CFRP	دورپیچ کردن یک لایه CFRP - چسباندن نوارهای فولادی و سپس دورپیچ کردن مجدد یک لایه CFRP (طرح ۲)	۳
GFRP-CFRP	دورپیچ کردن یک لایه الیاف شیشه و سپس پیچاندن یک لایه الیاف کربن	۳
CFRP 2	دورپیچ کردن با استفاده از دو لایه الیاف کربنی	۳
SR-CFRP	میلگردهای نصب شونده روی سطح ستون و سپس دورپیچ کردن آنها با استفاده از دو لایه الیاف کربنی	۳

جدول ۲- مشخصات مکانیکی و هندسی مصالح کاربردی در طرح‌های تقویت

مصلح	مقاومت حداکثر (مگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	مقاومت مشخصه (مگاپاسکال)	طول هر لایه (میلی‌متر)	عرض هر لایه (میلی‌متر)	ضخامت هر لایه (میلی‌متر)	تعداد
CFRP	۴۹۰۰	-	۲۳۰	-	۴۵۰	۱۹۸	۰/۱۶۶	-
GFRP	۹۲۸	-	۴۱/۴	-	۴۵۰	۱۹۸	۰/۱۶۶	-
Steel Strip	۳۷۰	۲۴۰	۲۱۰۰۰۰	-	۱۹۸	۷	۲	۱۰
Wide Steel Strip	۳۷۰	۲۴۰	۲۱۰۰۰۰	-	۱۹۸	۱۱	۲	۶
Steel Rod	-	۲۱۰	-	-	۱۹۸	-	۴	۱۲
Plain Concrete	-	-	۲۳۴۵۲	۲۲	-	-	-	-



شکل ۲- نمودار تنش بر حسب کرنش میله‌های آزمایش شده در تست کشش

جدول ۳- مشخصات مصالح به کار رفته برای طرح اختلاط بتن (به ازای یک مترمکعب)

مورد	وزن مخصوص بتن	اسلامپ	شن بادامی	شن نخودی	ماسه	آب	سیمان پرتلند ۲
مقدار	۲۲۷۵	۸	۰/۲۲۴۰	۰/۲۰۲۰	۰/۳۲۲۰	۰/۰۹۸۱	۰/۱۵۳۹



شکل ۳- نمایی از مکانیزم اعمال بارگذاری فشاری

نمودارهای تنش، بر حسب تغییر شکل قائم حداکثر، سختی الاستیک نمونه‌ها و مقدار جذب انرژی به عنوان معیارهای مقایسه برای تمامی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به در نظرگیری سه نمونه برای هر طرح، نمودار برازش شده آنها ترسیم و مورد استفاده قرار گرفت.

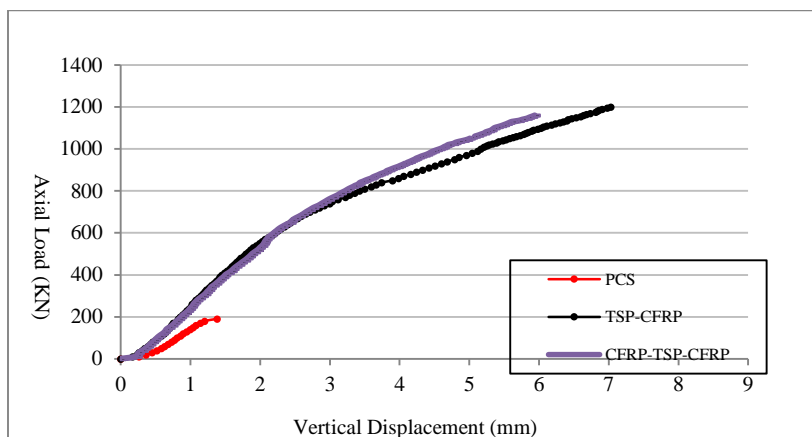
۵-۱- رفتار تنش - تغییر شکل نمونه‌ها

برای تمامی نمونه‌های مورد آزمایش، نمودارهایی به صورت تنش محوری بر حسب تغییر شکل محوری ترسیم شده است. در شکل (۴) نمودارهای تنش بر حسب تغییر شکل قائم نمونه‌های تقویت شده با دو طرح پیشنهادی نسبت به نمونه سنجش قابل مشاهده است.

در پل‌های قدیمی با توجه به عدم وجود تکنولوژی ساخت بتن‌های با مقاومت و کیفیت بالا بر طبق استانداردهای کنونی، برای شبیه‌سازی بتن‌های به کار رفته در ساخت پایه‌ها، در آزمایشگاه طرح اختلاطی برای ساخت بتن با مقاومت پایین ارائه شده است. در جدول (۳) مشخصات مصالح به کار رفته برای ساخت بتن ذکر شده است. محاسبه طرح اختلاط بر اساس یک متر مکعب حجمی انجام شده و سپس با توجه به ظرفیت حجمی دستگاه میکسر بتن، حجم ۰/۰۳ مترمکعب به عنوان حجم کلی مورد استفاده در نمونه‌ها در نظر گرفته شد.

۴-۲- راه‌اندازی آزمایش

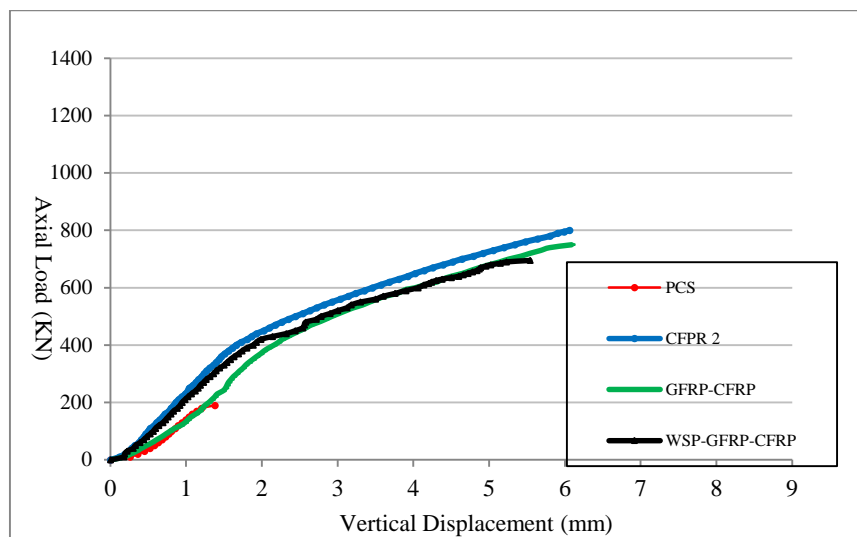
مکانیزم و دستگاه انجام آزمایش در شکل (۳) نشان داده شده است. برای اعمال بار از دستگاه جک هیدرولیکی با ظرفیت اعمال بار فشاری ۲۰۰ تن استفاده شده است که قابلیت اعمال بار با نرخ و سرعت قابل تنظیم را دارد. تغییر شکل در امتداد ارتفاع نمونه با استفاده از گیج اندازه‌گیری با دقت ۰/۰۰۲ میلی‌متر در طی آزمایشات محاسبه شده است. برای مشاهده نوع خرابی و رشد ترک‌ها در زمان‌های مختلف آزمایش، از دوربین عکاسی پیشرفته با قابلیت ثبت عکس ۶۰ فریم در ثانیه استفاده خواهد شد. مبنی اتمام آزمایشات رخداد خرابی کلی در نمونه‌ها و از بین رفتن قابلیت باربری آنها می‌باشد.



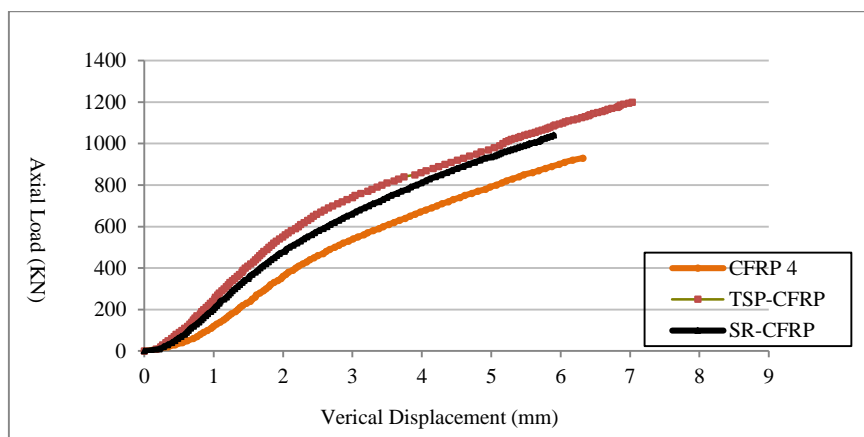
شکل ۴- نمودار مقایسه‌ای بار محوری بر حسب تغییر مکان قائم دو طرح پیشنهادی نسبت به نمونه تقویت نشده

نمونه‌های تقویت شده مشهود می‌باشد. از جنبه سختی الاستیک، نمونه‌های تقویت شده با دو طرح پیشنهادی دارای مقدار بیشتری نسبت به نمونه‌های PCS و GFRP-CFRP بودند که نشان از تأثیر مستقیم عناصر تقویت کننده فولادی بر رفتار نمونه دارند. یکی از مهم‌ترین عوامل در مبحث مقاوم‌سازی سازه‌ها، داشتن توجیه اقتصادی در کنار مؤثر بودن روش تقویت است. همان‌گونه که در شکل (۶) مشخص است، تمامی نمونه‌ها با داشتن تعداد لایه‌های برابر پوشش کربن و در نظرگیری این مطلب که هزینه به کارگیری فولاد برای تقویت در قیاس با پوشش کربنی کمتر است، نمونه TSP-CFRP علاوه بر داشتن مقاومت محوری بیشتر نسبت به دو نمونه دیگر، تغییر شکل محوری و رفتار شکل‌پذیر مناسب‌تری را از خود نشان داده است. از جنبه سختی الاستیک نمونه‌ها، تأثیر تسمه‌های فولادی بیشتر از میله‌های فولادی است. مقایسه رفتار مابین دو طرح پیشنهادی و نمونه 4 CFRP در شکل (۷) نشان داده شده است. هر دو طرح پیشنهادی نسبت به نمونه 4 CFRP عملکرد مناسب‌تری از جنبه مقاومت محوری از خود نشان دادند. همچنین سختی الاستیک نمونه‌های تقویت شده به دو روش پیشنهادی بیشتر از سختی نمونه 4 CFRP می‌باشد. فرم رفتار دو خطی در تمامی نمونه‌ها مشهود است که نشان از تأثیر غالب پوشش کربنی بر رفتار کلی نمونه در تمامی اعضا دارد. در جدول (۴)، مقادیر حداکثر ظرفیت باربری محوری و تغییر شکل متناظر با آن برای تمامی نمونه‌های آزمایشی نشان داده شده است. در دو طرح پیشنهادی TSP-CFRP و CFRP-TSP-CFRP، مقدار بهبود در میزان ظرفیت باربری محوری حداکثر نسبت به نمونه 4 CFRP برابر با ۲۹٪ و ۲۴٪ بوده است که مؤید تأثیر مناسب استفاده از نوارهای فولادی باریک است اما در میزان تغییر شکل نمونه‌ها نسبت به هم اختلاف زیادی مشاهده نمی‌شود.

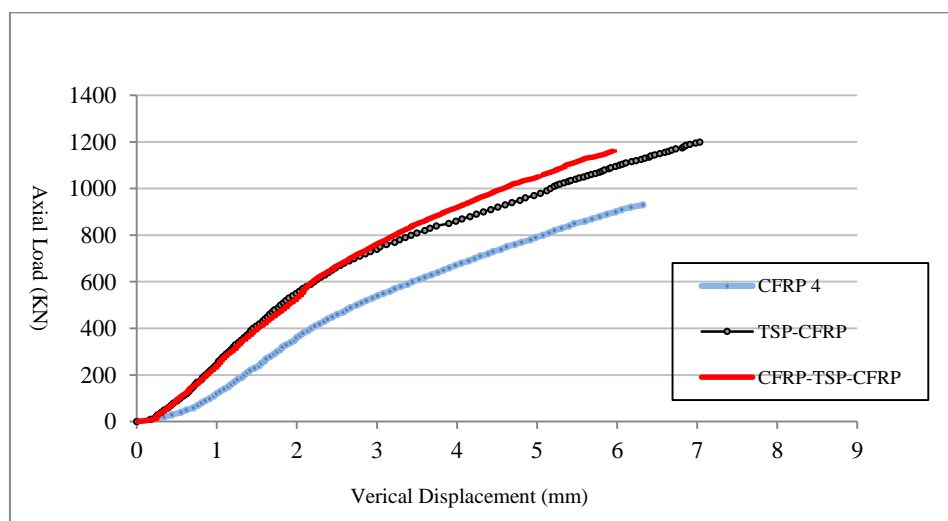
حداکثر نیروی قابل تحمل توسط نمونه TSP-CFRP برابر با ۱۲۰۰ کیلو نیوتن می‌باشد که در مقایسه با تمامی نمونه‌های آزمایش بیشترین ظرفیت باربری را از خود نشان داده است. این مقدار ظرفیت بار در تغییر مکانی برابر با ۷/۰۳ میلی‌متر رخ داده است. حداکثر نیروی قابل تحمل توسط نمونه CFRP-TSP-CFRP برابر با ۱۱۶۰ کیلو نیوتن بوده که در میزان تغییر مکان ۵/۹۴ میلی‌متر رخ داده است. حداکثر ظرفیت باربری نمونه PCS برابر با ۳۶۰ کیلو نیوتن و تغییر مکان متناظر با این نیرو برابر با ۱/۸ میلی‌متر می‌باشد. مشابه با تحقیقات صورت گرفته توسط Mirmiran و Shahamy، منحنی پاسخ بار بر حسب تغییر مکان نمونه‌های CFRP-TSP-CFRP و نمونه TSP-CFRP حالت دو خطی دارد که قسمت اول آن حالت منحنی داشته ولی در قسمت دوم فرم رفتار خطی را از خود نشان داده است. نمونه تقویت شده با طرح پیشنهادی اول توانسته میزان تغییر شکل محوری بیشتری را در طی فرایند بارگذاری از خود نشان دهد. نقطه عطف نمودار یا به عبارتی نقطه دو شاخگی برای هر دو نمونه تقریباً در میزان جابجایی یکسانی رخ می‌دهد. مؤثر بودن استفاده از این دو طرح بر روی منحنی رفتاری نسبت به نمونه تقویت نشده محرز است. در شکل (۵)، نمودارهای مقایسه‌ای بار بر حسب تغییر مکان برای گروه اول نمونه نسبت به نمونه تقویت نشده آورده شده است. آنچه که در نمودارها مشخص می‌باشد، اگر چه در نمونه WSP-GFRP از CFRP نوارهای فولادی به عنوان تسلیح کننده‌های خمشی استفاده شده، اما با توجه به تعداد کم این ورق‌ها پیرامون محیط دایروی مقطع عرضی نمونه‌ها، بخشی از بتن مابین فضای خالی نوارها تحت فشار محصورکنندگی قرار نگرفته و اثر بخشی تسلیح کننده‌های خمشی ناچیز بوده است. این مهم با مشاهده رفتار نمونه‌های 2 CFRP و GFRP-CFRP بیشتر محرز می‌شود. در بین سه نمونه تقویت شده، نمونه تقویت شده با استفاده از دو لایه CFRP دچار افت کمتر مقاومت شده است. رفتار دو خطی در



شکل ۵- نمودار مقایسه‌ای بار محوری بر حسب تغییر مکان قائم طرح‌های دارای دو لایه FRP نسبت به نمونه تقویت نشده



شکل ۶- نمودار مقایسه‌ای بار محوری بر حسب تغییر مکان قائم طرح اول و نسبت NSM به نمونه دارای چهار لایه کربن



شکل ۷- نمودار مقایسه‌ای بار محوری بر حسب تغییر مکان قائم دو طرح پیشنهادی نسبت به طرح CFRP 4

جدول ۴- مقادیر ظرفیت باربری حداکثر و تغییر شکل متناظر آن

نمونه	حداکثر بار (کیلو نیوتن)	حداکثر جابجایی (میلی متر)
PCS	۳۶۰	۱/۸
WSP-GFRP- CFRP	۶۹۵	۵/۵۴
TSP-CFRP	۱۲۰۰	۷/۰۳
CFRP-TSP-CFRP	۱۱۶۰	۵/۹۴
CFRP 4	۹۳۰	۶/۳۲
GFRP-CFRP	۸۰۰	۶/۰۶
SR-CFRP	۱۰۴۰	۵/۹

۵-۲- بررسی وضعیت خرابی نمونه‌ها

با تأمل در عکس‌های نمونه‌ها در تمام آزمایش می‌توان نوع خرابی و نحوه توزیع ترک‌ها و فرم خرابی را در تمامی نمونه‌ها مورد بررسی قرار داد. خرابی برشی در ستون‌ها به صورت ترد و ناگهانی بوده و هیچ‌گونه علائمی قبل از رخداد آن برای پیش‌بینی وجود ندارد. در مبحث طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، این‌گونه خرابی به هیچ وجه مطلوب نمی‌باشد. خرابی خمشی به دلیل رخداد تدریجی و این که قبل از وقوع علائمی در سطح عضو آسیب‌دیده مشخص می‌شود، مطلوب‌تر است. در پایه‌های بتنی غیر مسلح، مود خرابی برشی معمول است. روش تقویت مؤثر و مفید می‌تواند تا حدودی مود خرابی را از حالت شکست ترد و ناگهانی به شکستی نرم و تدریجی سوق دهد. در شکل (۸) وضعیت خرابی نمونه‌ها در پایان آزمایش نشان داده شده است. ترک‌های موجود به طور معمول ترک‌هایی عریض با طول زیاد بوده و برخی از آنها در امتداد ارتفاع استوانه و برخی زاویه ۴۵ نسبت به امتداد افق می‌سازد. در شکل (۸-الف) پوسته نمونه تقویت نشده در ابتدا کنده شده و بتدریج با توسعه ترک‌های برشی و محوری به صورت ناگهانی و انفجاری دچار خرابی شده است. علت خرابی در این حالت فزونی شدت تنش‌های کششی از مقاومت کششی حلقوی بتن و در نهایت رسیدن تنش فشاری به ماورای مقاومت فشاری حداکثر بتن می‌باشد که توأم با خردشدگی و لهیدگی بتن می‌باشد. در شکل (۸-ب) نمونه CFRP 4 در وسط ارتفاع دچار گسیختگی ترد و انفجاری پوشش CFRP در اثر رسیدن تنش حلقوی موجود به حداکثر مقاومت کششی شده و خرد شدن بتن تحت اثر تنش فشاری وارده بر آن محرز است. در شکل‌های (۸-پ) و (۸-ج) وضعیت خرابی دو طرح پیشنهادی قابل مشاهده است. در ابتدا بتن به حداکثر مقاومت فشاری خود رسیده و دچار له شدگی می‌شود. نوارهای فولادی در تحمل بار محوری فشاری سهیم هستند و با افزایش شدت بار وارده، با در نظرگیری سختی خمشی نوارها، دچار کماتش می‌شوند. در این حالت حداکثر تنش کششی در وسط ارتفاع نمونه اتفاق افتاده و پاره شدن پوشش CFRP در این ناحیه توأم با کماتش نوارهای فولادی اتفاق می‌افتد. خرابی نمونه CFRP-TSP-CFRP و نمونه SR-CFRP مشابه هم بوده و در ناحیه مشابهی

از ارتفاع ستون دچار خرابی می‌شوند. در شکل (۸-ث) خرابی نمونه GFRP-CFRP قابل مشاهده است. پوشش زیرین GFRP به دلیل سختی کمتر و کرنش قابل تحمل بالاتر نسبت به CFRP دچار کش آمدگی شدند، اما خرابی نهایی با پاره شدن انفجاری پوشش CFRP به دلیل کرنش کششی نهایی کمتر اتفاق افتاده است. مشابه با نمونه‌های بدون عناصر فولادی تقویت کننده، خرابی نمونه در وسط ارتفاع ستون رخ داده است. مشاهدات صورت گرفته در طی آزمایشات نشان داده است که ستون‌های تقویت شده می‌توانند قبل از خرابی نهایی تنش‌های محوری بیشتری را تحمل کنند.

خرابی از حالت خرابی ترد و ناگهانی نمونه CFRP 4 نرم‌تر و شکل‌پذیرتر بوده و می‌توان وقوع خرابی را با بروز کماتش آرماتورهای به کار رفته در لایه داخلی متوجه شد. حالت حدی خرابی به مقدار کرنش نهایی مصالح کربن به کار رفته به عنوان محصور کننده بستگی دارد. با فرا رسیدن آستانه کرنش گسیختگی، پوشش FRP دیگر قادر نخواهد بود تا جلوی کماتش نوارهای فولادی در وسط ارتفاع ستون را بگیرد و باربری نمونه با خرابی پوشش FRP خاتمه پیدا خواهد کرد. وجود نوارهای فولادی تقویت کننده خمشی توانسته مود خرابی برشی ستون را به سمت خرابی خمشی سوق دهد.

۵-۳- سختی الاستیک

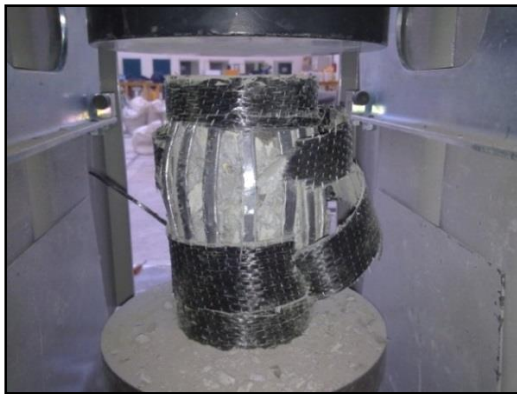
در طرح‌های مرسوم تقویت سازه‌ها، افزایش سختی اعضای تقویت شده از جمله ستون‌ها به طور معمول امری نامطلوب به نظر می‌رسد. افزایش سختی افزایش جذب نیروی تحمیل شده از زلزله و به تبع آن افزایش شدت تنش‌ها بر عضو را به همراه خواهد داشت. سختی باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا در هنگام کنترل تغییر شکل‌های نسبی (Drift) طبقات سازه، مقادیر مجاز آن برآورده شود و همچنین با محدودیت‌های تغییر شکل عناصر غیر سازه‌ای سازگار باشد (عابدی و همکاران، ۱۳۸۹) سختی نمونه‌ها با استفاده از روش سختی سکانتی (Secant) از روی منحنی بار-تغییر مکان محاسبه می‌شود.



(ث)



(الف)



(ج)



(ب)

شکل ۸- خرابی نمونه‌ها بعد از اتمام آزمایش:

الف) خرابی ترد نمونه تقویت نشده، رخداد خرابی برشی و بروز ترک‌های قطری، ب) نمونه 4 CFRP و خرابی انفجاری پوشش CFRP، پ) خرابی نمونه CFRP-TSP-CFRP، ت) خرابی نمونه SR-CFRP، کماتش میلگردهای فولادی، ث) خرابی نمونه GFRP-CFRP در پایان آزمایش، ج) خرابی نمونه TSP-CFRP بعد از متوقف شدن آزمایش

در جدول (۵) مقایسه‌ای مابین سختی الاستیک نمونه‌های تقویت شده با دو طرح پیشنهادی و NSM نسبت به نمونه CFRP 4 مشاهده می‌شود. همان‌گونه که از قبل قابل پیش‌بینی بود، وجود نوارها و میله‌های فولادی باعث افزایش سختی اولیه نمونه‌های تقویت شده گردیده است.



(پ)

۵-۴- جذب انرژی و شکل‌پذیری

وقتی ستون تحت بارهای لرزه‌ای قرار می‌گیرد، به ظرفیت جذب انرژی آن بیش از ظرفیت باربری توجه می‌شود. شکل‌پذیری عبارت است از توانایی تحمل تغییر شکل در طی سیکل‌های مختلف جابه‌جایی بزرگ‌تر از جابه‌جایی تسلیم بدون این که هیچ‌گونه افت مشخصی در مقاومت ایجاد شود مساحت محصور شده به وسیله منحنی‌های پسماند بار- جابه‌جایی به عنوان معیاری از انرژی جذب شده در هر سیکل بارگذاری در سازه تحت اثر بارهای



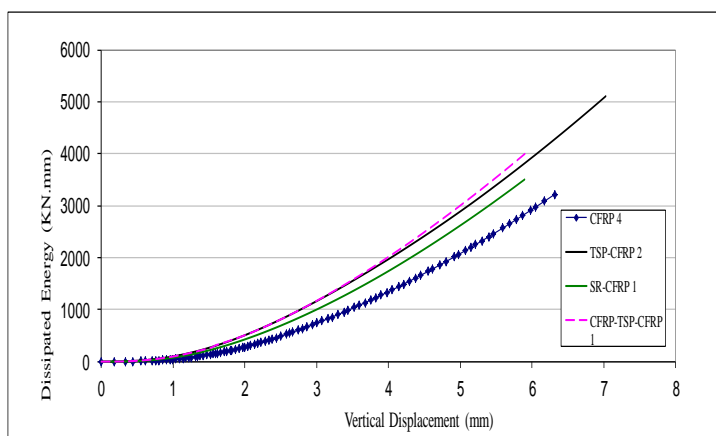
(ت)

تقویت شده با دو طرح پیشنهادی و نمونه تقویت نشده قابل ملاحظه است. همان گونه که مشخص است افزایش بیش از ده برابر در معیار جذب انرژی برای نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه مبنی به دست آمده است. در جدول (۷) مقایسه‌ای بین مقادیر جذب انرژی کل و مقدار جذب انرژی در جابجایی‌هایی برابر با ۱ و ۳ سانتی‌متر برای نمونه‌های تقویت شده با دو طرح پیشنهادی و NSM نسبت به نمونه CFRP 4 انجام شده است. افزایشی بیش از ۲۴٪ برای نمونه‌های TSP-CFRP و CFRP-TSP-CFRP نسبت به نمونه CFRP 4 قابل مشاهده است.

جانبی رفت و برگشتی محسوب می‌شود (Ghobarah و همکاران، ۱۹۹۹). بنابر این تحقیق در مورد تأثیر استفاده از محصورکنندگی ترکیبی بر روی میزان جذب انرژی و شکل‌پذیری ستون‌های تقویت شده می‌تواند به عنوان معیاری مناسب برای میزان مؤثر بودن آن‌ها تلقی گردد. در شکل (۹) نمودار مقایسه‌ای جذب انرژی برحسب تغییر شکل قائم نمونه‌های تقویت شده با دو طرح پیشنهادی، NSM و نمونه CFRP 4 مشاهده می‌شود. تمامی نمونه‌های دارای تسلیح‌کننده‌های خمشی دارای مقادیر جذب انرژی بیشتر نسبت به نمونه CFRP 4 در طی فرایند بارگذاری بودند. در جدول (۶) مقایسه‌ای مابین مقدار جذب انرژی کل نمونه‌های

جدول ۵- مقایسه سختی الاستیک دو طرح تقویت پیشنهادی و NSM نسبت به نمونه تقویت شده با چهار لایه کربن

نمونه	سختی اولیه (KN/mm)	نسبت به CFRP 4
CFRP 4	۲۳۰/۵۶	۱
TSP-CFRP	۲۹۶	۱/۲۸۴
CFRP-TSP-CFRP	۲۹۳/۹	۱/۲۷۴
SR-CFRP	۲۹۸/۰۸	۱/۲۹۳



شکل ۹- نمودار مقایسه‌ای جذب انرژی بر حسب جابجایی قائم دو طرح پیشنهادی و NSM نسبت به نمونه CFRP 4

جدول ۶- مقایسه جذب انرژی طرح‌های پیشنهادی نسبت به نمونه تقویت نشده

نمونه	جذب انرژی کلی (Kn.mm)	نسبت به نمونه PCS
PCS	۳۹۵/۱	۱
TSP-CFRP	۴۰۱۸/۳۰	۱۰/۱۷
CFRP-TSP-CFRP	۴۰۲۸/۱۷	۱۰/۱۹

جدول ۷- جذب انرژی دو طرح پیشنهادی و طرح NSM نسبت به نمونه CFRP 4 در مقادیر کلی، جابجایی‌های ۱ و ۳ سانتی‌متر

نمونه	مجموع جذب انرژی (کیلو نیوتن- میلی‌متر)	نسبت به نمونه CFRP 4	جذب انرژی در جابجایی ۱ میلی‌متر	نسبت به نمونه CFRP 4	جذب انرژی در جابجایی ۳ میلی‌متر	نسبت به نمونه CFRP 4
CFRP 4	۳۲۲۲/۸	۱	۴۶/۵۵	۱	۷۲۶/۱۸۵	۱
TSP-CFRP	۴۰۱۸/۳۰	۱۱/۲۴۶	۱۰۸/۴۸	۲/۳۳	۱۰۸۸/۱۴	۱/۴۹۸
CFRP-TSP-CFRP	۴۰۲۸/۱۷	۱/۲۵	۹۷/۰۵	۲/۰۸	۱۱۶۰	۱/۵۹۷
SR-CFRP	۴۵۰۸/۹۷	۱/۰۸۸	۷۴/۷۰	۱/۶۱	۹۹۶/۴	۱/۳۷۲

۶- نتایج

تحقیقی در زمینه استفاده از محصورکنندگی ترکیبی فولاد-FRP برای تقویت لرزه‌ای ستون‌ها و پایه‌ها در آزمایشگاه سازه صورت گرفت. در ابتدا دو طرح تقویتی ترکیبی پیشنهاد و تشریح شده و در کنار طرح‌های متداول تقویت ستون‌ها، نمونه‌هایی ساخته شده و تحت اثر آزمایشات بارگذاری محوری فشاری یکنواخت قرار گرفت تا با انجام بررسی مقایسه‌ای، تأثیر طرح‌های تقویت پیشنهادی بررسی شود. بر مبنای نتایج به دست آمده از آزمایش، موارد زیر قابل ارائه است:

- استفاده از دو طرح تقویتی پیشنهادی، افزایشی بیش از ۲۴٪ در میزان جذب انرژی نسبت به حالت استفاده پوشش کربنی تنها و ۱۱٪ نسبت به روش NSM را به همراه داشته است.
- با مشاهدات صورت گرفته و بررسی تصاویر نمونه‌های تقویت شده با دو طرح پیشنهادی، تا حدودی مود خرابی از حالت خرابی ترد برشی به شکست نرم و شکل‌پذیر تغییر یافته اما کمکان به دلیل غالب بودن و ماهیت ترد پوشش‌های کربنی، گسیختگی ترد آنها در پایان آزمایش مشهود بود.
- میزان تغییر شکل قائم نمونه تقویت شده با طرح اول نسبت به نمونه تقویت شده با چهار لایه پوشش کربنی بهبود یافته در حالی که با استفاده از طرح دوم، بهبودی در تغییر شکل محوری ایجاد نشده است.
- استفاده از دو طرح پیشنهادی تقویت، افزایشی بیش از ده برابر در میزان جذب انرژی را نسبت به نمونه تقویت نشده به همراه داشته است در حالی که این مقدار نسبت به حالت کاربرد تکی پوشش کربنی بیش از ۲۴٪ بوده است.
- استفاده از نوارها و میله‌های فولادی افزایشی بیش از ۲۷ درصد در میزان سختی الاستیک برای نمونه‌های تقویت کننده ایجاد کرده است.
- مطابق تحقیقات قبلی صورت گرفته توسط محققین مختلف، استفاده از چهار لایه پوشش کربنی تقویت نسبت به دو لایه باعث بهبود مقاومت خمشی و جذب انرژی نمونه‌های تقویت شده گردیده است.
- بهبودهای حاصل شده در پارامترهای مهم رفتار سازه‌ای ستون‌های بتنی غیر مسلح با استفاده از طرح پیشنهادی در قیاس با حالت کاربرد تکی پوشش‌های پلیمری و در نظرگیری اقتصادی‌تر بودن طرح‌های پیشنهادی نسبت به استفاده تکی از پوشش‌های پلیمری، استفاده از آن را به عنوان روشی کارآمد و مؤثر برای تقویت خمشی، برشی و شکل‌پذیری ستون‌ها و پایه‌های بتنی غیر مسلح پل‌های جاده‌ای و راه‌آهن میسر می‌سازد. بدیهی است مطالعات جامع‌تر و مدون‌تری در خصوص شیوه طراحی و کاربردی‌تر کردن استفاده از این روش می‌بایست صورت گیرد.

۷- مراجع

- Ghobarah A, Biddah A, Mahgoub M, "Rehabilitation of reinforced concrete columns using corrugated steel jacketing", *Journal of Earthquake Engineering*, 1997, 1 (4), 651-673.
- Abdullah V, Katsuki T, "An investigation into the behavior and strength of reinforced concrete columns strengthened with ferrocement jackets", *Cement and Concrete Composites*, 2003, 25 (2), 233-242.
- Rahai A, Norouzi A, "Evaluation of the vulnerability and bridge improvement function", *Amirkabir University of Technology Publications, Iran*, 2005, (in Farsi).
- American Association State, "Standard test methods for tension testing of metallic materials", *Highway and Transportation Officials Standard, AASHTO*, No. T68.
- Bournas DA, Triantafillou TC, "Flexural strengthening of reinforced concrete columns with near-surface-mounted FRP or stainless steel", *ACI Structural Journal*, 2009, 106 (4).
- Choi DU, Thomas H, Kang K, Ha SS, Kim KH, Kim W, "Flexural and hybrid carbon-glass fiber-reinforced polymer sheets", *ACI Structural Journal*, 2011, 108 (1).
- Choi E, Rhee I, Park J, Cho BS, "Seismic retrofit of plain concrete piers of railroad bridges using composite of FRP-steel plates", *Composites - Part B*, 2011, 42, 1097-1107.
- Tang GG, Chen JF, Smith LM, "Strengthening of concrete structures with FRP sheets", 2008.
- Xiong GJ, Wu XY, Li FF, Yan Z, "Load carrying capacity and ductility of circular concrete columns confined by ferrocement including steel bars", *Construction and Building Materials*, 2011, 25, 2263-2268.
- Li G, "Experimental study of hybrid composite cylinders", *Composite Structures*, 2007, 78, 170-181.
- Lia J, Samali B, Ye L, Bakoss S, "Behaviour of concrete beam-column connections reinforced with hybrid FRP sheet", *Composite Structures*, 2002, 57, 357-365.
- Li J, Gong J, Wang L, "Seismic behavior of corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened using combined carbon fiber-reinforced polymer and steel", *Construction and Building Materials*, 2009, 2653-2663.
- Abedi K, Afshin H, Noori Shirazi MR, "Numerical study on the seismic retrofitting of reinforced concrete columns using rectified steel jackets", *Asian Journal of Civil Engineering (Building And Housing)*, 2010, 11 (2), 219-240.
- Lam L, Teng JG, "Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete", *Construction and Building Materials*, 2003, 17 (6 & 7), 471-489.
- Lu YY, Chen SX, Zhao GF, "An experimental study on the seismic behavior of reinforced concrete column strengthened with bonded steel hoops and carbon fiber reinforced polymer sheet", *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38 (8), 10-17.
- Mirmiran A, Shahawy M, "Behavior of concrete columns confined by fibre composites", *Journal of Structural Engineering*, 1999, 123 (5), 583-590.

- Mirmiran A, Shahawy M, Samaan M, Echary HE, Mastrapa JC, Pico O, "Effect of column parameters on FRP-confined concrete", *Journal of Composites for Construction*, 1998, 2 (4), 175-185.
- Planning and Budget Organization, "National Building Regulations of Iran: Issue 9", (in Farsi).
- Sheikh SA, Yau G, "Seismic behavior of concrete columns confined with steel and fiber-reinforced polymers", *ACI Structural Journal*, 2002, 99 (1), 72-80.
- Vandoros KG, Dritsos SE, "Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns", *Construction and Building Materials*, 2008, 22 (3), 264-276.
- Zhishen W, Wenxiao L, Sakuma N, "Innovative externally bonded FRP/concrete hybrid flexural members", *Composite Structures*, 2006, 72, 289-300.

EXTENDED ABSTRACT

Experimental Investigation about the Behavior of Retrofitted Plain Concrete Columns using a Novel Hybrid Steel-FRP Confinement

Mohammad Reza Nouri Shirazi, Hassan Afshin, Karim Abedi*

Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, 513351996, Iran

Received: 21 August 2016; Accepted: 12 March 2017

Keywords:

Retrofitting, Hybrid steel strips- FRP confinement, Axial strength, Energy dissipation, Elastic stiffness.

1. Introduction

In current study, a novel retrofitting scheme, hybrid confinement using steel reinforcement profiles and FRP wraps was presented for strengthening of columns and plain concrete piers and verified using the results of an experimental work results. Twenty cylindrical concrete specimens were produced in laboratory conditions and energy dissipation, axial deformation, initial stiffness and load-deflection curve was calculated for each specimen. Two of specimen was used as benchmark, however the other were retrofitted using CFRP wraps, GFRP wraps, near surface mounted steel rods, FRP confinement and proposed retrofitting scheme. Based on the results, axial compressive strength, energy dissipated and ductility was enhanced. The axial force-axial displacement behavior of hybrid confined specimens had two parts. In the first part a parabola curve was observed whereas in the second part the behavior was linear. The failure of specimens was brittle and had explosive nature towards CFRP or GFRP rupture. However, the results proved that we will be able to use the proposed novel confinement scheme for shear and flexural strengthening of columns and plain concrete piers of road and railroad bridges.

2. Methodology

2.1. Experimental study

Our proposed hybrid confinement scheme was constructed of steel elements and FRP wraps. In the first scheme, the damage surface of column will be repaired. Then steel elements will be attached to the column surface using two part epoxy adhesive. The remained space between steel elements and column surface fills using low strength concrete. Finally, the FRP wrap will be attached around the perimeter of column. A schematic view of proposed scheme illustrated in the Fig. 1.

2.2 laboratory tests

Experimental tests of cylindrical specimens under uniform axial pressure were conducted in the structure laboratory. The detail of specimens was illustrated in Table 1.

* Corresponding Author

E-mail addresses: m_noori@sut.ac.ir (Mohammad Reza Nouri Shirazi), H_Afshin@sut.ac.ir (Hassan Afshin), k-abedi@tabrizu.ac.ir (Karim Abedi).

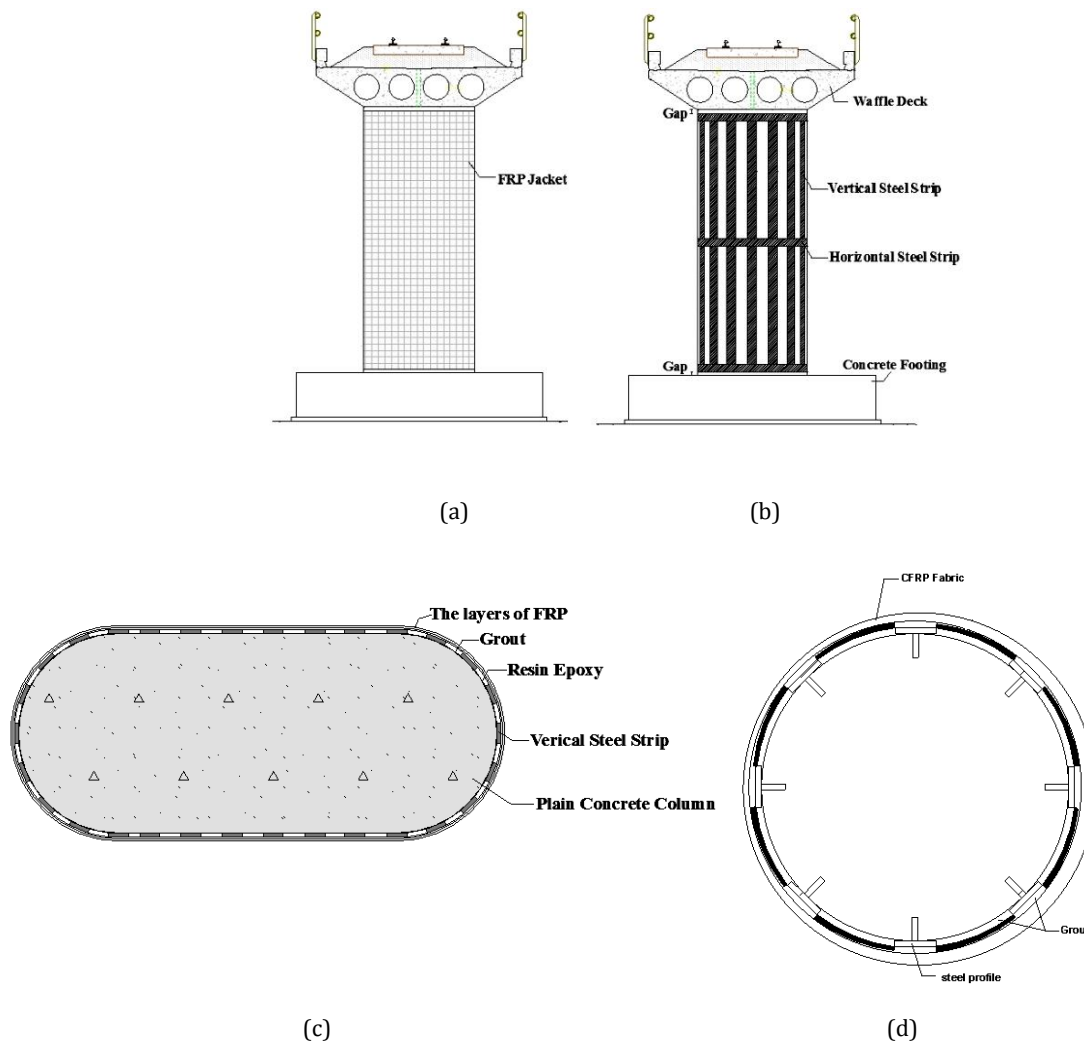


Fig. 1. A schematic view of retrofitted scheme: a) after wrapping of FRP, (b) before wrapping of FRP c) Retrofitting detail for wall type pier, d) Retrofitting scheme for circular section column

Table 1. the detail of experimental specimens

specimen	Retrofitting Technique	Number of Specimen
PCS	Benchmark specimen	2
TSP-CFRP	Thin steel strips + two layers of CFRP (Scheme 1)	3
WSP-GFRP-CFRP	Wide steel strips + one layer GFRP + one layer CFRP	3
CFRP-TSP-CFRP	One layer CFRP + Steel strips + one layer CFRP (Scheme 2)	3
GFRP-CFRP	One layer GFRP + One layer CFRP	3
CFRP 2	Two layers of CFRP only	3
SR-CFRP	Steel rods + two layer of CFRP	3

3. Results and discussion

In order to comparative study of proposed retrofitting scheme, the number of FRP layer, type of FRP and the structure of scheme was studied. For all specimens, the axial force- axial deformation curve was drawn. The energy dissipation, axial compressive strength and elastic stiffness were considered as measure parameters. All of the retrofitted specimens had two part behavior such as curve behavior in the first part and straight behavior in the last part considering strain hardening behavior. This behavior is same as FRP wraps retrofitted specimens. The steel element increases the axial load carrying of specimens; also it is very convenient for enhancement of flexural

strength however the confinement enhancement on the concrete surface is negligible. In the Fig. 2, the comparative behavior of TSP-CFRP, CFRP-TSP-CFRP and benchmark specimens was illustrated. The elastic stiffness of retrofitted specimens increased considering the steel elements effects; however the axial compressive strength and energy dissipation was increased.

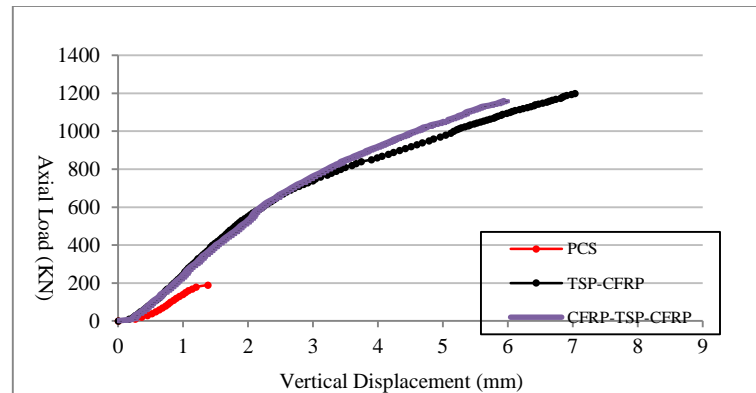


Fig. 2. Axial load-vertical deformation of three tested specimens

4. Conclusions

Based on the result, energy dissipation in proposed retrofitted scheme was enhanced about 24% and 11% ratio to CFRP only and NSM retrofitted specimens. The failure mode of specimens retrofitted using hybrid steel-FRP, was inclined to flexural mode however the most failure mode is shear failure considering negligible effect of steel element onto confinement of concrete. The axial deformation of retrofitted specimen using scheme 1 was increased ratio to CFRP 4 specimen, however this item was constant about the scheme 2 retrofitted specimens. About the energy dissipation measure, enhancement was more than 10 time than benchmark specimen, however this item was 24% more than CFRP 4 specimen. Elastic stiffness was increased about 27% ratio to benchmark specimen using steel elements. Enhancement in structural behavior of retrofitted specimens using proposed schemes and considering economical aspect of retrofitting, it is advisable to use these schemes for strengthening of plain concrete columns and railroad bridge piers for enhancement of shear strength, flexural strength, and ductility.

References

- Choi E, Rhee I, Park J, Cho BS, "Seismic retrofit of plain concrete piers of railroad bridges using composite of FRP-steel plates", *Composites- Part B*, 2011, 42, 1097-1107.
- Dionysios A, Triantafillou TC, "Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Columns with Near-Surface-Mounted FRP or Stainless Steel", *ACI Structural Journal*, 2009, 106 (4).
- Jinbo L, Jinxin G, Licheng W, "Seismic behavior of corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened using combined carbon fiber-reinforced polymer and steel", *Construction and Building Materials*, 2009, 23, 2653-2663.
- Katsuki T, Abdullah V, "An investigation into the behavior and strength of reinforced concrete columns strengthened with ferrocement jackets", *Cement and Concrete Composites*, 2003, 25 (2), 233-242.