

ارزیابی تجربی کاربرد الیاف FRP در مقاوم سازی دال‌های بتن آرمه

پدرام باسری^۱، اشکان ترابی^۲

۱- دانشجوی دکتری عمران گرایش سازه. گروه مدیریت عمران. واحد مرودشت. دانشگاه آزاد اسلامی. مرودشت. ایران

۲- استادیار گروه مهندسی عمران. گروه مدیریت عمران. واحد مرودشت. دانشگاه آزاد اسلامی. مرودشت. ایران

p.baseri@miau.ac.ir

چکیده

دال‌ها در ساختمان، علاوه بر تحمل بارهای قائم، در اکثر مواقع وظیفه ایجاد یک کف صلب و توزیع نیروهای جانبی، بین اعضای باربر جانبی را نیز بر عهده دارند. از جمله نقاط ضعف دال‌ها و به ویژه دال‌هایی که در آن‌ها از تیر استفاده نمی‌شود، اتصالات آن‌ها به ستون‌ها است. در دال‌های تخت، در اتصال دال به ستون امکان برش منگنه‌ای وجود دارد که باید تقویت گردد. مقاوم‌سازی دال‌های تخت در برابر برش منگنه‌ای با استفاده از کامپوزیت‌های FRP، یکی از راه‌های تقویت می‌باشد. در این مقاله، نتایج یک بررسی آزمایشگاهی، که در آن دال‌های بتن آرمه با استفاده از بافت‌های مختلف کامپوزیت‌های FRP، در الگوهای مختلف در برابر برش منگنه‌ای تقویت شده بودند، آمده است. نتایج به دست آمده از بارگذاری نمونه‌ها نشان داد که استفاده از کامپوزیت‌های FRP در تقویت دال‌های دوطرفه در الگوهای مختلف، افزایش ظرفیت باربری بین کمترین مقدار ۱۱ درصد تا بیشترین مقدار ۲۰۰ درصد را به دنبال دارد.

کلمات کلیدی: ارزیابی تجربی، دال دوطرفه، برش منگنه‌ای، مقاوم‌سازی، کامپوزیت‌های FRP.

۱. مقدمه

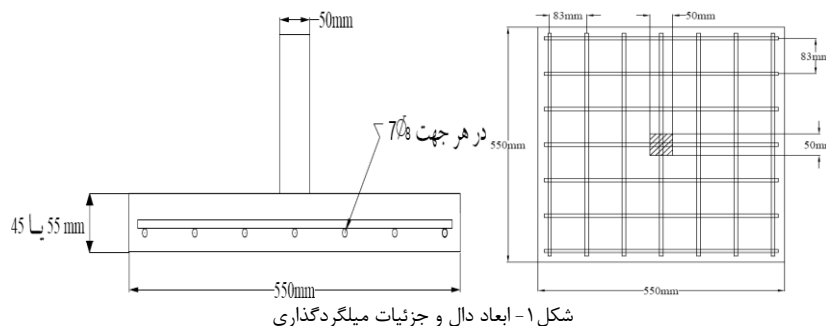
سیستم‌های FRP به صورت پوشش‌های بیرونی و به منظور افزایش مقاومت و بهسازی سازه‌های بتنی موجود، از اواسط دهه ۱۹۸۰ تاکنون در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. استفاده از کامپوزیت‌های FRP در تقویت سازه‌های بتنی طی چند سال اخیر بسیار توسعه یافته است و تحقیقات بسیاری در زمینه تقویت انواع سازه‌های بتن‌آرمه با استفاده از این کامپوزیت‌ها صورت گرفته است. تقویت به منظورهای مختلف از جمله تقویت خمشی، تقویت برشی، افزایش محصور شدگی، ترمیم آسیب‌های ناشی از خوردگی و مانند آن می‌تواند با استفاده از این کامپوزیت‌ها صورت گیرد. استفاده از این کامپوزیت‌ها به دلیل وزن کم، سهولت اجرا، مقاومت کششی بالا، عدم ایجاد تغییر زیاد در نمای عضو و مقاومت خوب در برابر شرایط محیطی سخت، تا حدود زیادی جایگزین استفاده از فولاد، که دارای مشکلات زیادی مانند سنگینی، سختی اجرا و خوردگی می‌باشد، شده است [۲]. دال‌های بتن‌آرمه نیز از این قاعده مستثنی نبوده و گاهی موارد نیاز به تقویت آن‌ها ایجاد می‌شود. تغییر در کاربری، ایجاد بازشو، تغییر در آیین‌نامه‌های طراحی، آسیب‌دیدگی بتن دال، خوردگی فولاد، و یا خطا در طراحی، از دلایلی هستند که لزوم تقویت را سبب می‌شوند. استفاده از ورق‌های FRP در ناحیه کششی اتصال دال-ستون می‌تواند تشکیل و گسیختگی ترک‌های برشی را به وسیله افزایش مقاومت خمشی دال در مجاورت ستون را به تعویق اندازد و در نتیجه باعث بهبود مقاومت برشی دوطرفه اتصال گردد [۳]. ماهیت رفتاری ویژه دال‌های دو طرفه سبب کاربرد زیاد این نوع سازه شده است؛ ولی دال دوطرفه در ضمن با مشکلاتی نیز همراه است که از جمله می‌توان به خیز زیاد و برش منگنه‌ای اشاره کرد [۴].

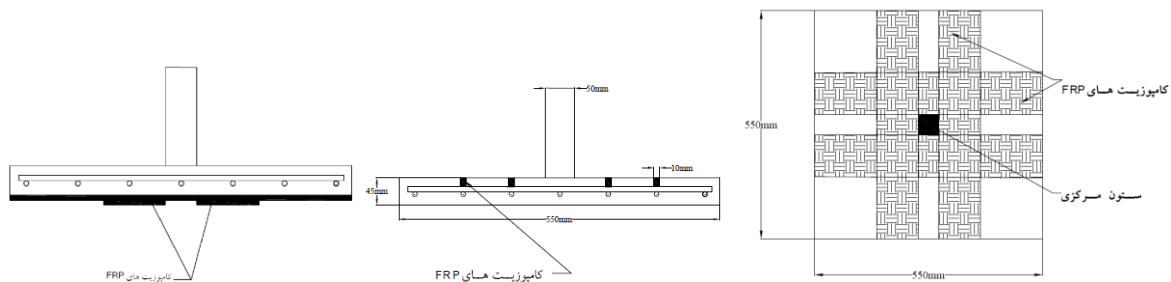
۲. پیشینه تحقیق

ارکی و هفرنان در سال ۱۹۹۵، اولین کسانی بودند که بر روی تقویت دال‌ها با استفاده از کامپوزیت‌های FRP تحقیق کردند. آنان شکست نمونه‌هایشان را این گونه بیان کردند که خرابی‌ها ابتدا از ترک‌های خمشی آغاز شده و با افزایش بار، ترک‌های برشی بوجود آمد و در نهایت ترک برشی باعث شکست نمونه‌ها گردید [۵]. به عقیده محققینی مانند هراجلی و سودکی [۳] و همچنین السالاکاوی [۶] این الیاف از گسترش ترک‌ها جلوگیری کرده و سبب افزایش بار قابل تحمل اتصال و همچنین سختی خمشی اتصال می‌شود.

۳. برنامه آزمایش

۱۱ دال بتنی مسلح مربعی شکل (۵۵۰ میلی‌متر × ۵۵۰ میلی‌متر) با ضخامت‌های مختلف (۴۵ و ۵۵ میلی‌متر) برای آزمایش ساخته شدند. ۹ نمونه با استفاده از بافت‌های مختلف کامپوزیت‌های E-GFRP و انواع رزین‌ها تقویت شده بودند و دو نمونه دیگر با همان حالت اولیه کنترل شدند. تمامی نمونه‌ها برای مشاهده گسیختگی برش منگنه‌ای طراحی شده بودند و کامپوزیت‌های E-GFRP با عرض‌های متفاوت، در یک جهت و دو جهت عمود بر هم و موازی با میلگردهای کششی داخلی و تا حد ممکن نزدیک به ستون، در سطح کششی دال، در تعداد لایه‌های مختلف چسبانیده شده بودند. در دو نمونه از دال‌های فوق نیز، کامپوزیت‌های E-GFRP به صورت عمودی در سوراخ‌های تعبیه شده در دال، کار گذاشته شده بودند. ابعاد دال، جزئیات میلگردگذاری، نحوه لایه‌گذاری و تقویت نمونه‌ها در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.





شکل ۲- نحوه لایه گذاری و تقویت نمونه‌ها

دال‌ها در هر چهار وجه به طور ساده روی تکیه‌گاه قرار داشتند و توسط یک ستون (۵۰ میلی‌متر × ۵۰ میلی‌متر) که در مرکز هر دال قرار می‌گرفت، بارگذاری می‌شدند. پارامترهای آزمایش و اطلاعات مربوط به هر نمونه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- پارامترهای آزمایش و اطلاعات مربوط به هر نمونه

ردیف	نام نمونه	ضخامت نمونه (mm)	راستای تقویت	عرض الیاف (mm)	تعداد لایه	تعداد میلگرد عمودی	تعداد سوراخ عمودی	بافت الیاف (E-GFRP)	نوع رزین	نوع کاتالیزور
۱(control)	SL(۴/۵)	۴۵	—	—	—	—	—	—	—	—
۲	SL(۱و۱۵۰و۳)	۴۵	یک‌راستا	۱۵۰	سه لایه	—	—	M-N-M	X	X'
۳	SL(۲و۱۰۰و۳)	۴۵	دو راستا	۱۰۰	سه لایه	—	—	M-N-M	X	X'
۴	SL(۲و۱۵۰و۲)	۴۵	دو راستا	۱۵۰	دو لایه	—	—	M-M	X	X'
۵	SL(۲و۱۵۰و۳)	۴۵	دو راستا	۱۵۰	سه لایه	—	—	M-N-M	X	X'
۶	SL(۲۰h)	۴۵	—	—	—	—	۲۰ عدد	Q	X	X'
۷	SL(۲و۱۵۰و۳و۲۰b)	۴۵	دو راستا	۱۵۰	سه لایه	۲۰ عدد	—	M-N-M	X	X'
۸	SL(۲و۱۵۰و۳و۲۰h)	۴۵	دو راستا	۱۵۰	سه لایه	—	۲۰ عدد	M-N-M,Q	X	X'
۹	SL(۵/۵)	۵۵	—	—	—	—	—	—	—	—
۱۰	SL(۲و۱۵۰و۳و X)	۵۵	دو راستا	۱۵۰	سه لایه	—	—	M-N-M	X	X'
۱۱	SL(۲و۱۵۰و۳و Y)	۵۵	دو راستا	۱۵۰	سه لایه	—	—	M-N-M	Y	Y'

میلگردهای مورد استفاده در نمونه‌ها شامل میلگردهای آجدار با قطر ۸ میلی‌متر با تنش تسلیم (در کرنش برابر با ۰/۲) برابر با ۳۷۰ مگاپاسکال بود، که به تعداد ۷ عدد در هر ردیف و در دو جهت عمود بر هم و با عمق مؤثر میانگین ۳۳ و ۲۳ میلی‌متر در مرکز ۲ ردیف میلگرد، به ترتیب برای ضخامت‌های ۵۵ و ۴۵ میلی‌متری قرار داشتند. سطح مقطع میلگردهای به کار رفته در نمونه‌های با ضخامت ۵۵ میلی‌متر در حدود ۰/۱۹۳٪ و برای نمونه‌های ۴۵ میلی‌متر ۰/۲۷۸٪ در هر جهت بود. مخلوط بتن مذکور برای رسیدن به مقاومت فشاری ۲۰ مگاپاسکال طراحی شده بود. در این بتن از سیمان پرتلند نوع II همراه با ماسه شسته و شن با بزرگترین اندازه دانه ۱۲/۵ میلی‌متر استفاده شده بود. نسبت وزنی مصرفی سیمان، ماسه و شن به ترتیب ۰/۱۳، ۰/۴۱، ۰/۳۶ و نسبت آب به سیمان برابر ۰/۶۹ در نظر گرفته شده بود. ساخت کلیه نمونه‌ها در یک نوبت بتن‌ریزی صورت پذیرفت و سه آزمون مکعبی به اندازه بعد ۱۵۰ میلی‌متر برای تعیین مقاومت فشاری بتن گرفته شد. رزین‌های مورد استفاده در کلیه نمونه‌ها از پایه وینیل استر بود که در دو نوع مختلف X، Y و با کاتالیزورهای متفاوت X'، Y' مورد استفاده قرار گرفتند، همچنین کامپوزیت‌های E-GFRP مورد استفاده از سه نوع بافت M، N، Q و تشکیل شده بودند. مشخصات این الیاف در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- مشخصات الیاف E-GFRP

ردیف	نوع بافت E-GFRP	مدول الاستیسیته GPa	ضخامت mm	کرنش نهایی %	مقاومت کششی MPa	وزن Gr/m ²	عرض cm
۱	M	۷۰	۰/۳	۳/۲	۱۸۰۰	۴۵۰	۱۲۵
۲	N	۷۲	۰/۴	۳/۵	۲۴۰۰	۸۰۰	۱۲۸
۳	Q	۷۳	۰/۵	۳/۸	۲۶۰۰	—	—

رفتار اجزای بتنی که با مصالح FRP مقاوم‌سازی یا ترمیم می‌شوند، به طور قابل ملاحظه‌ای با وضعیت سطح بتن و آماده‌سازی مناسب و هموار شدن رویه آن مرتبط می‌باشند. در غیر این صورت می‌تواند نتایج نظیر ویرامدن FRP از سطح بتن یا جدایش لایه‌ها از سطح یکدیگر اتفاق افتد [۷]. لذا بدین منظور، چندین نمونه جهت بتونه‌کاری با انواع بتونه‌های ساخته شده، کاربرد رزین‌ها و کاتالیزورهای مختلف و همچنین کاربرد مقدار مناسب پرایمر و هاردنر، در نظر گرفته شده بودند. در نهایت بعد از بررسی این نمونه‌ها، به یک ترکیب مناسب از پرایمر و هاردنر، جهت نفوذ در نمونه‌ها و همچنین تهیه یک بتونه با چسبندگی بالا و تا حدودی انعطاف پذیر رسیده که برای سایر نمونه‌های تقویت شده، مورد استفاده قرار گرفتند.

۴. روند آزمایش و اندازه‌گیری

نمونه‌ها در بالای یک قاب فلزی قرار می‌گرفتند و از طریق یک ستون به صورت بارگذاری مرکزی و با افزایش یکنواخت بار (۳ میلی‌متر در دقیقه) تا حد گسیختگی، به وسیله یک جک الکترونیکی متصل به کامپیوتر، بارگذاری می‌شدند. اندازه‌گیری‌های این آزمایش شامل اندازه‌گیری بار اعمال شده و اندازه‌گیری تغییر مکان بود. در شکل ۳ نمونه‌ای از انواع تقویت و همچنین نحوه بارگذاری آمده است.



شکل ۳ - نمونه‌هایی از انواع تقویت و نحوه بارگذاری

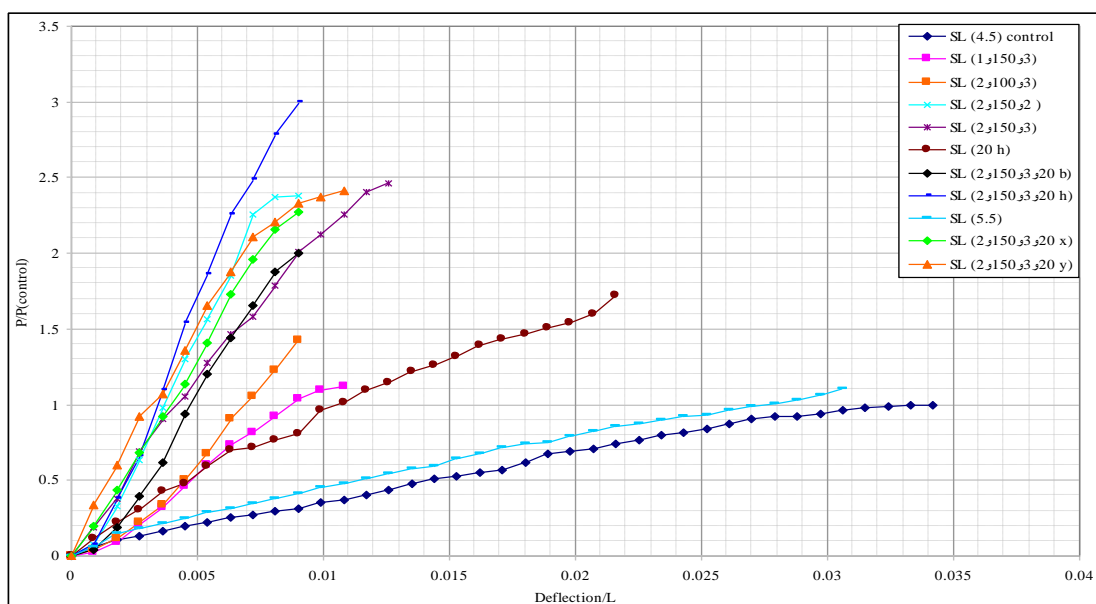
۵. نتایج آزمایش

خلاصه نتایج آزمایش، که نشان دهنده مود گسیختگی، ظرفیت مقاومت فشاری نمونه‌ها و تغییر مکان آنها می‌باشد در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- نتایج حاصل از بارگذاری نمونه‌ها

ردیف	نام نمونه	مود گسیختگی	بار P_u (kN)	تغییر مکان Δ در وسط نمونه (mm)	$P_u / P_{u(control)}$	$\Delta / \Delta_{(control)}$	افزایش بار %
۱(control)	SL(۴/۵)	برش منگنه‌ای	۱۳/۲۸	۱۹	۱/۰۰	۱/۰۰	—
۲	SL(۱و۱۵۰و۳)	برش منگنه‌ای	۱۴/۸۶	۶	۱/۱۱	۰/۳۱	٪۱۱
۳	SL(۲و۱۰۰و۳)	برش منگنه‌ای	۱۸/۹۰	۵	۱/۴۲	۰/۲۶	٪۴۲
۴	SL(۲و۱۵۰و۲)	برش منگنه‌ای	۳۱/۶۳	۵	۲/۳۸	۰/۲۶	٪۱۳۸
۵	SL(۲و۱۵۰و۳)	برش منگنه‌ای	۳۲/۷۳	۷	۲/۴۶	۰/۳۶	٪۱۴۶
۶	SL(۲۰h)	خمشی - برش منگنه‌ای	۲۲/۸۵	۱۲	۱/۷۲	۰/۶۳	٪۷۲
۷	SL(۲و۱۵۰و۳و۲۰b)	برش منگنه‌ای	۲۶/۵۷	۵	۲/۰۰	۰/۲۶	٪۱۰۰
۸	SL(۲و۱۵۰و۳و۲۰h)	برش منگنه‌ای	۳۹/۸۵	۵	۳/۰۰	۰/۲۶	٪۲۰۰
۹	SL(۵/۵)	خمشی - برش منگنه‌ای	۱۴/۶۲	۱۷	۱/۱۰	۰/۸۹	٪۱۰
۱۰	SL(۲و۱۵۰و۳و X)	برش منگنه‌ای	۳۰/۱۹	۵	۲/۲۷	۰/۲۶	٪۱۲۷
۱۱	SL(۲و۱۵۰و۳و Y)	برش منگنه‌ای	۳۲/۱۰	۶	۲/۴۱	۰/۳۱	٪۱۴۱

همچنین در شکل ۴ نتایج حاصل از بارگذاری نمونه‌های این تحقیق نیز به صورت گراف بی‌بعد نشان داده شده است. در این گراف، L برابر با طول نمونه (۵۵۰ میلیمتر) و $P_{control}$ ، بار قابل تحمل توسط نمونه تقویت نشده (کنترل) می‌باشد. بار قابل تحمل و همچنین تغییر مکان وسط نمونه‌های تقویت شده به ترتیب با P و Deflection مشخص شده‌اند. با مقایسه این گراف و نتایج بدست آمده در جدول شماره ۳، بهبود قابل توجه در ظرفیت مقاومت نهایی نمونه‌ها به روشنی مشخص است، این افزایش ظرفیت باربری با کاهش تغییر مکان نمونه‌ها همراه است.



شکل ۴- نتایج حاصل از بارگذاری نمونه‌های این تحقیق به صورت گراف بی‌بعد

۶. مود گسیختگی

نمونه‌های SL(5.5) و SL(20h) دچار گسیختگی ترکیبی خمشی- برش منگنه‌ای شده بودند و خطوط تسلیم خمشی و ترک‌های برشی در نمونه تشکیل شده بود. در تمامی نمونه‌های باقی مانده دیگر، به روشنی دیده می‌شد که تسلیم ناشی از برش دوطرفه اتفاق افتاده است و ترک‌های مایل که در سطح کششی دال و در مجاورت ستون تا یک فاصله از ستون گسترده شده بودند، قابل مشاهده بود، که از برش منگنه‌ای تبعیت می‌کردند. انواع ترک‌ها در اطراف محل بارگذاری در شکل ۵ نشان داده شده است.



آنچه در آزمایشگاه، مشاهده شده و توسط محققین مختلف نیز تأیید شده است، روند مشترکی است که در مکانیزم خرابی در برش منگنه‌ای وجود دارد. روند توسعه ترک‌ها به صورت زیر است:

- تشکیل ترک‌های ریز دایروی در اطراف ستون در وجه کششی دال که به تدریج به سمت وجه فشاری دال سرایت می‌کند.
- گسترش ترک‌های خمشی با افزایش تدریجی بار.
- تشکیل ترک‌های برشی که در ۵۰ تا ۷۰ درصد بار نهایی مشاهده می‌شود. این ترک‌های عمیق با افزایش بار به تدریج به وجه فشاری گسترش می‌یابند، در این مرحله نقش میلگردها نیز در باربری مهم می‌باشد و فولادهای دال تسلیم می‌شود. این اتفاق بیشتر در دال‌های با درصد میلگردها کم، رخ می‌دهد و در نهایت با خردشدگی ناحیه فشاری بتن، باربری خاتمه می‌یابد و کاهش ناگهانی در میزان باربری رخ می‌دهد [۸]. مهم‌ترین عاملی که در تعیین نوع شکست اتصال دال تخت به ستون تأثیر گذار است، میزان درصد میلگرد است [۹].

۷. تحلیل نتایج آزمایش

به طور کل، کاربرد کامپوزیت‌های E-GFRP در تقویت دال‌های بتن‌آرمه، باعث بهبود ظرفیت باربری و کاهش تغییرمکان آنها می‌شود. کمترین میزان ظرفیت باربری در نمونه SL(1,150,3) که با کامپوزیت‌های E-GFRP در یک جهت تقویت شده بود، مشاهده شد که برابر با ۱۱ درصد بود و بیشترین میزان افزایش ظرفیت باربری در نمونه SL(2,150,3,20h) که کامپوزیت E-GFRP هم در وجه کششی و هم در سوراخ‌های عمودی تعبیه شده در آن استفاده شده بود، مشاهده شد که برابر با ۲۰۰ درصد بود. همچنین کمترین کاهش تغییرمکان در بین نمونه‌های تقویت شده، در نمونه SL(20h) مشاهده شد که برابر با ۰/۶۳ تغییرمکان نمونه کنترل بود و بیشترین کاهش تغییرمکان در نمونه‌های SL(2,100,3)، SL(2,150,2)، SL(2,150,3,20 b)، SL(2,150,3,20 h) و SL(2,150,3,x) مشاهده شد که برابر با ۰/۲۶ تغییرمکان نمونه کنترل بود.

می‌بایست این نکته ذکر شود به دلیل این که تمامی نمونه‌ها قبل از به کارگیری تقویت کننده‌های E-GFRP هیچ‌گونه ترک خوردگی و بارگذاری نداشتند، بنابراین نتایج این تحقیق برای دال‌هایی قابل اجرا است که دچار ترک خوردگی کششی سازه‌ای وسیعی نشده‌اند، یا اینکه تحت تأثیر بارهای ثقلی، بیش از اندازه خسارت ندیده‌اند، همچنین به دلیل توأم بودن اثر افزایش مقاومت خمشی و برش منگنه‌ای با کاهش شکل‌پذیری و در نتیجه ایجاد گسیختگی ترد، می‌بایست در مقاوم‌سازی اتصالات دال-ستون در مناطق دارای ریسک لرزشی، که رفتار نرم از اهمیت ویژه‌ای در سازه‌های بتنی برای مقاومت در برابر زلزله، برخوردار است، تدابیری در نظر گرفت [۳].

۸. نتیجه‌گیری

براساس نتایج بدست آمده از این تحقیق، نکات زیر قابل بیان است:

- به جز نمونه‌های SL(5.5) و SL(20h) که دچار گسیختگی ترکیبی خمشی- برش منگنه‌ای شده بود، تمامی نمونه‌های دیگر تحت برش منگنه‌ای گسیخته شدند.
- استفاده از کامپوزیت‌های E-GFRP باعث افزایش سختی خمشی، کاهش تغییرمکان و بهبود قابل توجه در مقاومت برش منگنه‌ای دال‌ها می‌شود.
- کاهش تغییرمکان در نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه کنترل با افزایش سطح کامپوزیت E-GFRP کاهش می‌یابد و مقاومت برش منگنه‌ای دال‌ها افزایش می‌یابد.
- استفاده از کامپوزیت‌های E-GFRP در تقویت دال‌ها در یک جهت، باعث کاهش تغییرمکان زیادی نسبت به نمونه کنترل شده ولی تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت برش منگنه‌ای آنها ندارد.
- افزایش تعداد لایه‌های تقویت از دو لایه به سه لایه، باعث کاهش تغییرمکان کمتری نسبت به نمونه کنترل شده ولی تأثیر چندانی نسبت به هم در افزایش مقاومت برش منگنه‌ای دال‌ها نداشت.
- ایجاد سوراخ‌های عمودی در محدوده برش منگنه‌ای در دال‌ها و تقویت آنها با استفاده از کامپوزیت‌های E-GFRP، کمترین کاهش تغییرمکان نسبت به نمونه کنترل را به دنبال داشت.
- نوع رزین و کاتالیزورهای استفاده شده، تأثیر چندانی نسبت به هم، در افزایش مقاومت برش منگنه‌ای و نیز کاهش تغییرمکان نمونه‌ها، نداشتند.
- کاهش تغییرمکان در نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه کنترل، بین کمترین مقدار ۰/۲۶ تا بیشترین مقدار ۰/۶۳ متغیر بود.
- افزایش میزان ظرفیت باربری در نمونه‌های تقویت شده بین کمترین مقدار ۱۱ درصد تا بیشترین مقدار ۲۰۰ درصد متغیر بود.
- مکانیزم اصلی که طبق آن تقویت کننده‌های E-GFRP باعث بهبودی مقاومت برش منگنه‌ای دال‌ها می‌گردد، ناشی از نقش این الیاف در محدود کردن میزان رشد ترک‌های کششی یا افزایش مقاومت خمشی اتصال است.
- افزایش مقاومت خمشی دال‌ها، ناشی از استفاده از این الیاف می‌تواند باعث تغییر مود گسیختگی از حالت مود خمشی به مود ترکیبی خمشی- برشی یا مد منگنه‌ای خالص گردد، که ناشی از کاهش شکل‌پذیری گسیختگی است.

۹. قدردانی

لازم به ذکر می‌دانیم که از مدیر عامل محترم شرکت فراپاکس شیراز و نیز سرپرست محترم واحد مخزن‌سازی شرکت فراپاکس، که در مراحل لایه‌گذاری کامپوزیتی FRP نمونه‌ها، با در اختیار گذاشتن مواد و ابزار مورد نیاز از هیچ‌گونه مساعدتی دریغ نمودند، قدردانی شود. همچنین از همکاری ریاست محترم اداره کل آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان فارس و نیز مسئولین محترم آزمایشگاه مرکز تحقیقات مهندسی فارس، جهت انجام آزمایش بر روی نمونه‌ها، تشکر و قدردانی می‌شود.

۱۰. مراجع

- [۱] باسری، پدرام، تقویت دال‌های تخت در برابر برش منگنه‌ای با استفاده از کامپوزیت‌های FRP در آزمایشگاه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه آزاد زاهدان، ۱۳۸۸.
- [2] Shaaban, A.M. and Gesund, H., 1994, Punching Shear Strength of steel Fiber Reinforced Concrete Flat Plates, ACI Structural Journal. Vol. 91, No. 4, pp. 406 – 414.
- [3] Harajli, M.H. and Soudki, K.A., 2003, “Shear Strengthening of Interior Slab – Column Connections Using Fiber – Reinforced Polymer Sheets”, Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 7, No. 2, pp. 145-153.
- [۴] مستوفی نژاد، د. و فاضلی، م.ع.، ۱۳۸۴، "تقویت دال‌های دوطرفه با استفاده از صفحات FRP برای افزایش برش منگنه‌ای،" مجموعه مقالات دومین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه علم و صنعت، عمران.
- [5] Erki, M.A. and Heffernan, P.J., 1995, “Reinforced Concrete Slabs Externally Strengthened with Fiber Reinforced Plastics Material”, Proc., 2nd Int. Symp. On Non-Metallic FRP Reinforcement for Concrete Structures, L. Taerwe, ed., pp. 509 – 516.
- [6] El-Salakawy, E. Soudki, K. and Polak, M.A., 2004, “Punching Shear Behavior of Flat Slabs Strengthened with Fiber Reinforced Polymer Laminates”, Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol. 8, No. 2, pp. 384 – 392.
- [۷] سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. دفتر امور فنی. تدوین معیارها و کاهش خطر پذیری ناشی از زلزله، ۱۳۸۵، راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی ساختمان‌های بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP، نشریه شماره ۳۴۵، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.
- [8] Theodorakopoulos, D.D. and Swamy, R.N., 2002, “Ultimate Punching Shear Strength Analysis of Slab – Column Connections”, Cement & Concrete Composites, No. 24, pp. 509 – 521.
- [9] Menetrey, Ph., 2002, “Synthesis of Punching Failure in Reinforced Concrete”, Cement & Concrete Composites, No. 24, pp. 497 – 507. Journal, Vol. 91, No. 3, pp. 303 – 313.