

تقویت خمشی دال‌های حفره‌دار بتن مسلح با استفاده از ورق‌های آرامید (AFRP)، کربن (CFRP) و شیشه (GFRP)

مژگان آبرون *

کارشناس ارشد عمران، گرایش سازه، دانشگاه گیلان.

رحمت مدن دوست

استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان.

چکیده

مطالعات نشان داده‌اند که یکی از عوامل اصلی خسارت‌های جبران‌ناپذیر زلزله، وزن بالای سازه‌ها بوده است. استفاده از ورق‌های کامپوزیت FRP به دلیل داشتن ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مناسب برای تقویت و بهسازی اعضای بتنی در تحمل بار، برطرف کردن ضعف بتن در خمش و افزایش شکل‌پذیری بتن گزینه بسیار مناسبی است. هدف از این پژوهش تقویت خمشی دال‌های حفره‌دار بتن مسلح با استفاده از الیاف کامپوزیت آرامید (AFRP)، کربن (CFRP) و شیشه (GFRP) است. به همین منظور ۱۰ نمونه دال بتن مسلح با ابعاد $150 \times 70 \times 20$ cm توسط الیاف کامپوزیت به دو صورت نواری و شبکه‌ای تقویت و مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج نشان داده‌اند که ظرفیت تحمل بار در نمونه تقویت شده شبکه‌ای با الیاف کربن نسبت به نمونه شاهد و نسبت به نمونه کاملاً توپر به ترتیب ۱۷۵٪ و ۹۶٪ و در نمونه نواری تقویت شده با الیاف آرامید نسبت به نمونه شاهد و نسبت به نمونه کاملاً توپر به ترتیب ۱۵۳٪ و ۹۱٪ افزایش داشته است. بیشترین جابجایی در نمونه نواری تقویت شده با الیاف کربن ۲۳۶٪ و در نمونه شبکه‌ای تقویت شده با الیاف شیشه ۹۹٪ نسبت به نمونه شاهد مشاهده شده است. افزایش سختی در نمونه نواری تقویت شده با الیاف کربن ۲۲۵٪ و در نمونه تقویت شده شبکه‌ای با الیاف آرامید ۱۳۶٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش سختی داشته است.

واژه‌های کلیدی: دال حفره‌دار، CFRP، AFRP، GFRP.

* نویسنده مسئول: mozhgan.abroun95@gmail.com

۱- مقدمه

۱/۲۵×۱/۲۵ متر با شرایط آزمایشگاهی و با بتن C۳۰ ساختند. این نمونه ها به ترتیب R0 (بدون الیاف CFRP)، R1 (یک لایه الیاف CFRP در جهت محور X و یک لایه در جهت محور Y)، R2 (دال تقویت شده پس از تشکیل ترک اولیه: دو لایه الیاف CFRP در جهت محور X و دو لایه در جهت محور Y) و R3 (سه لایه الیاف CFRP در جهت محور X و سه لایه در جهت محور Y) نام گذاری شدند. سپس بر روی نمونه هایی با ابعاد ۱۶×۳۲ سانتی متر آزمون های فشاری انجام داده شد. کمترین پوشش بتن در نظر گرفته شده برای دال های ساخته شده ۲۵ میلی متر بوده است. از نوارهای CFRP به منظور تقویت دال ها استفاده شده که ابتدا این نوارها را در طول و سپس در عرض دال ها قرار داده اند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داده است که تقویت نمونه ها موجب کاهش خمش وسط دهانه دال ها به مقدار ۳۵٪ و ۴۵٪ در نمونه های R1 (که یک لایه الیاف CFRP در جهت محور X و یک لایه در جهت محور Y بوده) و R3 (سه لایه الیاف CFRP در جهت محور X و سه لایه در جهت محور Y) شده است.

سعیدیان و همکاران در سال ۱۳۸۹ [۱۴] رفتار خمشی دال های مجوف مسلح به میلگردهای FRP را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن ها در پژوهش خود از ۵ نمونه دال بتنی حفره دار که با بتن خودتراکم ساخته شده بود، استفاده نمودند. در این تحقیق عملکرد میلگردهای GFRP با نسبت های مختلف آرماتور کششی و میلگردهای فولادی با رفتار خمشی دال هایی با ابعاد ۱۵۰×۷۰×۲۰ cm بررسی شده است. دو بازشدگی به قطر ۱۰ cm توسط لوله پلیکا در سراسر امتداد محور طولی دال قرار داده شد. به گونه ای که انتهای لوله بیرون از بتن بوده است. بارگذاری مورد استفاده در این آزمایش استاتیکی بوده و دال ها بر روی تکیه گاه های ساده قرار داده شدند. نتایج آزمایشات نشان داده است که عرض ترک و گستردگی آن در دال هایی که از میلگردهای GFRP استفاده شده بود به نسبت نمونه های مرجع که با فولاد مسلح شده بودند بیشتر شده و ۴ برابر افزایش نیز داشته است.

محمد مهدی صالحی یانه سری و همکاران در سال ۱۳۹۱ [۱۵] رفتار خمشی دال های بتن آرمه مجوف را با استفاده از الیاف CFRP، GFRP و همچنین ورق های فولادی را به روش آزمایشگاهی تقویت کردند. آنها ۸ نمونه دال بتن آرمه مجوف با ابعاد ۱۵۰×۴۵×۲۰ cm را طبق آیین نامه ی آبا ساختند. مقدار

سازه های بتن مسلح به علت اشتباهات طراحی، خطاهای ساخت و ساز و سن سازه و بارهای ناشی از تغییر کاربری دچار فرسایش می شوند [۱]. سازه هایی که دچار فرسایش شده اند می توانند ظرفیت باربری خود را به وسیله تقویت کردن بهبود بخشند [۲،۳]. در سال های اخیر، آسیب به عناصر سازه ای مانند پل ها و ساختمان ها به علت کمبودهای ساختاری مانند زوال مصالح یا پیرشدگی، نگهداری ضعیف، زلزله و ... موجب تلاش های تحقیقاتی در جهت ابداع روشی کارآمد و مقرون به صرفه برای تعمیر سازه های آسیب دیده شده است. چندین روش در تقویت ساخت و ساز و افزایش ظرفیت باربری معرفی شده است که استفاده از ورق های کامپوزیت FRP یکی از این روش ها می باشد. در طول دو دهه گذشته، مزایای تقویت سازه ها با استفاده از ورق های FRP از لحاظ زمان و هزینه مشخص شده است [۴-۶]. کامپوزیت های FRP از الیاف دارای مقاومت کششی بالا تشکیل شده اند و مقاومت بالایی نسبت به خوردگی همچنین مقاومت بالای مکانیکی با توجه به وزن کم خود دارا هستند که یک روش سریع و اقتصادی برای بازسازی و یا تعمیر تیر، ستون، دال و دیوارها ارائه می کنند [۷-۱۱].

ارکی و هفرنان در سال ۱۹۹۵ [۱۲] به بررسی مقاوم سازی دال ها با استفاده از الیاف کامپوزیت پرداختند. آن ها اولین کسانی بودند که از الیاف FRP برای مقاوم سازی دال ها استفاده کردند. تعداد نمونه های مورد بررسی آن ها ۸ نمونه دال بتنی بوده است که بر روی سطح کششی ۶ نمونه ورق های FRP را چسبانند و دو نمونه را به عنوان مرجع در نظر گرفتند. آنها از بارگذاری متمرکز در پژوهش خود استفاده نمودند تا شرایط برش پانچ را برای دال فراهم نمایند. ترک های ظاهر شده بر روی دال از ترک های خمشی آغاز شده است و با افزایش بار، ترک های به وجود آمده از نوع برشی بوده است. در نهایت بارگذاری، ترک های برشی باعث شکست نمونه شده است. نتایج حاصل از این پژوهش افزایش در میزان سختی خمشی و بار نهایی قابل تحمل دال تا ۶۲٪ و همچنین کاهش میزان ترک خوردگی بوده است.

آگبوسو و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۱۳] رفتار تجربی و عددی دال های مقاوم سازی شده با الیاف پلیمری کربنی را مورد بررسی قرار دادند. آن ها در پژوهش تجربی خود چهار دال بتنی با ابعاد

میلگرد کششی ۶۴۱۲، میلگرد فشاری ۶۴۰۸، خاموت ۵۴۰۶، میلگرد حرارتی در جهت افقی ۶۴۰۶ و میلگرد حرارتی در جهت عمود بر راستای میلگرد کششی ۱۱۴۰۶ می‌باشند. مشخصات مکانیکی میلگردهای استفاده شده در این پژوهش در جدول (۱) و همچنین وزن و ویژگی هندسی میلگردهای مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شده است.

نمونه‌های ساخته شده شامل ۲ نمونه دال بتنی کاملاً توپر، ۴ نمونه دال بتنی دارای یونولیت نواری که یک نمونه به عنوان شاهد و ۳ نمونه دیگر تقویت شده به ترتیب با الیاف آرامید (AFRP)، کربن (CFRP) و شیشه (GFRP) و همچنین ۴ نمونه دال بتنی دارای یونولیت شبکه‌ای که یک نمونه به عنوان شاهد و ۳ نمونه دیگر تقویت شده به ترتیب با الیاف آرامید (AFRP)، کربن (CFRP) و شیشه (GFRP) ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است. بتن مورد استفاده در این پژوهش، بتن خودتراکم می‌باشد که تنها جهت سهولت در اجرای عملیات بتن‌ریزی از این نوع بتن استفاده شده است. در هر نمونه نواری ۲ عدد یونولیت به ابعاد $10 \times 20 \times 130$ سانتی‌متر و در هر نمونه شبکه‌ای ۸ عدد یونولیت به ابعاد $20 \times 20 \times 10$ سانتی‌متر به صورت مدفون در دال بتنی و در داخل شبکه آرماتور قرار داده شده است. مشخصات نحوه آرماتورگذاری و یونولیت نواری و شبکه‌ای در شکل (۱) و شکل (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی میلگردهای آج دار مصرف شده در این پژوهش^۱

نسبت	مقاومت		علامت مشخصه	آج دار مارپیچ
	مقاومت کششی	تسلیم کششی		
R_m	R_{eH}	R_m		
N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2		
R_m/R_{eH}				
استاندارد استاندارد				
	حداقل	حداقل	GOST ISIRI 5781 3132	
	۶۰۰	۴۰۰	A3	آج ۴۰۰
	۱/۲۵			

آرماتور کششی در این دال‌ها معادل $\rho_b = 0.25$ بوده و در همه‌ی آن‌ها دو سوراخ سرتاسری به قطر ۱۰ cm ایجاد شده است. یک نمونه از ۸ دال به عنوان مرجع (تقویت نشده) و ۷ دال دیگر به وسیله ورق و لامینیت CFRP، ورق GFRP و ورق فولادی تقویت و آزموده شده‌اند. در زمان آزمایش نیرو، کرنش و تغییر مکان ثبت شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش مقاومت خمشی ایجاد شده در دال‌های تقویت شده با لامینیت FRP حدود ۴۳٪، ورق CFRP حدود ۵۷٪، ورق GFRP ۴۵٪ و ورق فولادی ۱۵٪ است.

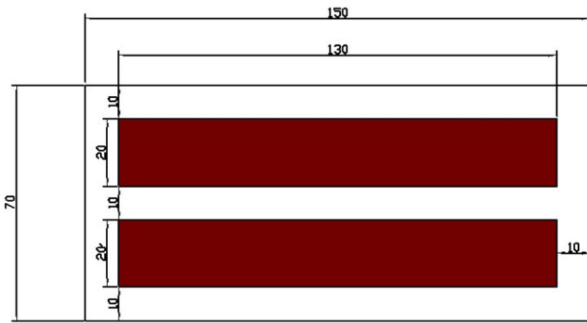
قورزایی و توکلی زاده در سال ۱۳۹۴ [۱۶] با استفاده از تحلیل المان محدود به بررسی عددی رفتار خمشی دال‌های بتنی مجوف تقویت شده با پلیمرهای مسلح شده الیاف FRP پرداختند. در این نوع مدل‌سازی پنج جنبه در نظر گرفته شد که شامل: اثر مقاومت‌های فشاری بتن متفاوت، تأثیر قطر و مقاومت کششی متفاوت کابل پیش‌تنیده، اثر انواع ضخامت‌ها و مساحت‌های متفاوت FRP می‌باشند. بتن نیز با مقاومت دارای کیفیت نرمال فرض شده است. تمامی مدل‌ها بر اساس مطالعه آزمایشگاهی الگباس مدل شدند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با افزایش ضخامت و مساحت ورق، میزان ظرفیت خمشی افزایش می‌یابد و به دنبال آن تنش‌های موجود در اجزا و خیز نیز کاهش می‌یابد.

لی و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۱۷] به بررسی تجربی و تحلیلی رفتار خمشی دال‌های بتن مسلح تقویت شده با الیاف بازالت در خمش با ملات سیمان پرداختند. بدین منظور ۱۳ نمونه برای ارزیابی رفتار خمشی دال‌های بتنی مسلح با الیاف کامپوزیت بازالت تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای در نظر گرفته شد. نوع فیبر، نسبت تقویت کششی و تعداد لایه‌های بافت به عنوان متغیرهای آزمایش انتخاب شدند. بیشترین بار وارده به نمونه‌های تقویت شده از ۱۱٫۲٪ تا ۹۸٫۲٪ نسبت به نمونه مرجع بوده است.

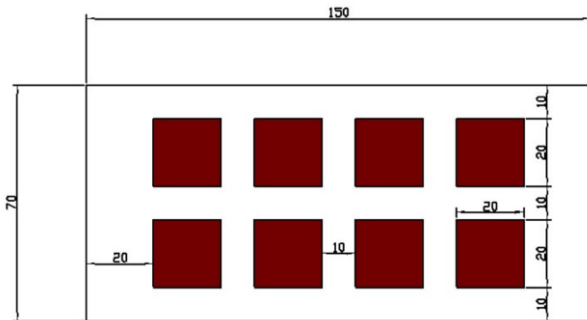
۲- روش آزمایشگاهی

در این پژوهش، ۱۰ نمونه دال بتن آرمه به ابعاد $150 \times 70 \times 20$ سانتی‌متر با نسبت آرماتور کششی معادل $\rho_b = 0.127 \rho_{Max}$ ساخته شده است. مشخصات میلگردهای استفاده شده شامل:

^۱ www.anahitasteel.com



شکل ۱- نحوه قرارگیری یونولیت نواری در داخل دال بتنی



شکل ۲- نحوه قرارگیری یونولیت شبکه‌ای در داخل دال بتنی

دال‌های نواری تقویت شده پس از شیارزنی به روش EBROG به صورت یک طرفه و دال‌های شبکه‌ای نیز پس از شیارزنی دوطرفه با روش EBROG به صورت دوطرفه با الیاف FRP تقویت شده است. همچنین عرض ورق‌های کامپوزیت مورد استفاده در این پژوهش ۵ سانتی‌متر و ضخامت آنها ۱/۲ میلی‌متر بوده است. تقویت دال‌ها تنها در ناحیه خمش بوده که در شکل (۳) نحوه‌ی تقویت دال‌ها ارائه شده است.



شکل ۳- نمونه‌های تقویت شده با الیاف کربن (الف) نمونه

شبکه‌ای، (ب) نمونه

جدول ۲- وزن و ویژگی هندسی میلگردها^۱

حداقل ارتفاع آج عرضی (mm)	پهنای آج عرضی (mm)	آج طولی (mm)	رواداری وزن (%)	وزن واحد طول (kg/m)	سطح مقطعی اسمی (mm ²)	قطر اسمی میلگرد (mm)				
در وسط	حداکثر	پهنای اسمی	حداکثر ارتفاع							
۱/۴	-	-	-	۰/۲۲۲	۲۸/۳	۶				
در وسط	۰/۳۶	۰/۵۲	۱/۶	۰/۸	۱/۲۵	۱/۲	±۸	۰/۳۹۸	۵۰/۳	۸
	۷/۲	۰/۵۴	۰/۷۸	۲/۴	۱/۲	۲/۰	±۶	۰/۸۸۸	۱۱۳	۱۲

۳- نحوه‌ی تقویت دال‌ها

دال‌ها از جهت نوع الیاف FRP به سه گروه الیاف، آرامید (A)، کربن (C) و شیشه (G) تقسیم‌بندی شده‌اند. نحوه نام‌گذاری دال‌های نواری با نام L و دال‌های شبکه‌ای با N مشخص شده است. در هر گروه ۴ نمونه دال قرار گرفته که به منظور سهولت در مقایسه نمونه شبکه‌ای و نواری بر اساس شماره‌گذاری مشخص شده‌اند. نمونه‌های شاهد به نام نمونه CONTROL یا NORMAL و نمونه‌های تقویت نشده کاملاً توپر نیز با S مشخص شده است که به منظور میانگین‌گیری دو نمونه مرجع کاملاً توپر با مشخصات یکسان ساخته شده‌اند. توضیحات ارائه شده به صورت خلاصه در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳- نحوه نام‌گذاری دال‌ها

ردیف	نام نمونه	توضیحات
۱	SCC-S-1	نمونه مرجع ساخته شده از بتن خودتراکم شماره ۱
۲	SCC-S-2	نمونه مرجع ساخته شده از بتن خودتراکم شماره ۲
۳	NORMAL-L-1 (CONTROL)	نمونه شاهد تقویت نشده نواری
۴	SCC-1-L-C	نمونه نواری تقویت شده با الیاف کربن
۵	SCC-2-L-G	نمونه نواری تقویت شده با الیاف شیشه
۶	SCC-3-L-A	نمونه نواری تقویت شده با الیاف آرامید
۷	NORMAL-N-1 (CONTROL)	نمونه شاهد تقویت نشده شبکه‌ای
۸	SCC-1-N-C	نمونه شبکه‌ای تقویت شده با الیاف کربن
۹	SCC-2-N-G	نمونه شبکه‌ای تقویت شده با الیاف شیشه
۱۰	SCC-3-N-A	نمونه شبکه‌ای تقویت شده با الیاف آرامید

² Externally Bonded Reinforcement On Grooves

¹ www.anahitasteel.com

تقویت خمشی دال‌های حفره‌دار بتن مسلح با استفاده از...

ترک (ترک اولیه) ادامه یافته است، بلافاصله پس از مشاهده اولین ترک خوردگی با ذره‌بین، بارگذاری متوقف شد کلیه تغییرات (جابجایی، مسیر ترک، عرض ترک ایجاد شده، مقدار بار) بر روی سطوح دال ثبت و مشخص شد. سپس طی بارگذاری‌های آتی گسترش ترک به طور تدریجی ادامه یافته و گام‌های توقف بعدی در هر ۱۰ کیلونیوتن تا زمان ایجاد ترک سازه‌ای ادامه یافته است.



شکل ۵- نمونه مرجع کاملاً توپر شماره ۱



شکل ۶- نمونه مرجع کاملاً توپر شماره ۲



شکل ۷- نمونه شاهد نواری



شکل ۸- نمونه نواری تقویت شده با الیاف کامپوزیت کربن (CFRP)



شکل ۹- نمونه نواری تقویت شده با الیاف کامپوزیت شیشه (GFRP)



شکل ۱۰- نمونه نواری تقویت شده با الیاف کامپوزیت آرامید (AFRP)

مقادیر بار بر روی دال یادداشت گردید تا مکانیزم مسیر و شکل ترک‌ها جهت ارزیابی‌های بعدی در دسترس باشد.

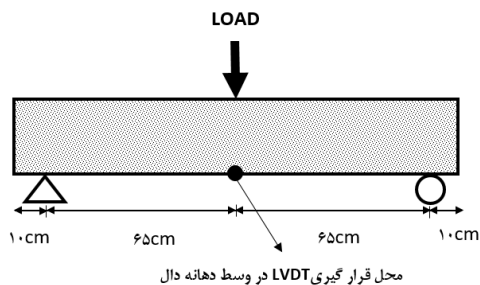
جدول ۴- مشخصات الیاف FRP

رنگ الگوی بافت کششی الیاف	مقاومت کششی طولی (Mpa)	مقاومت فشاری طولی الیاف (Mpa)	عرض الیاف تقویتی (cm)	مصالح
مشکی تک جهته	۲۰۹۳	۱۰۶۰	۵	Carbon
زرد تک جهته	۱۴۲۰	۳۱۲	۵	Glass
سفید تک جهته	۹۸۳	۴۸۰	۵	Aramid

داده‌های حاصل از بارگذاری و تغییرات جابجایی به صورت دیجیتال در دیتالاگر ذخیره شدند. بارگذاری تا مرحله گسیختگی دال ادامه یافت و با ثبت حالت گسیختگی و تهیه تصاویر (شکل های ۵-۱۴) از این حالت، آزمایش به پایان رسید. مقاومت فشاری بتن خودتراکم نمونه مکعبی (ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ cm) ۲۸ روزه ۵۲ Mpa حاصل گردیده است. در جدول (۴) خواص و مشخصات ورق‌های کامپوزیت طبق گزارش کارخانه‌ی سازنده ارائه شده است.

۴- روش کلی آزمایش

پس از تقویت دال‌ها و عمل‌آوری رزین، جهت مشخص شدن ترک‌ها به‌طور دقیق‌تر کلیه نمونه‌ها با رنگ سفید پوشش داده شد. جهت بررسی تغییر مکان نمونه در ناحیه زیر دال و راستای اعمال بار برای اندازه‌گیری جابه‌جایی تغییر مکان سنج (LVDT)^۱ نصب شد که طرح شماتیک آن در شکل (۴) ارائه شده است.

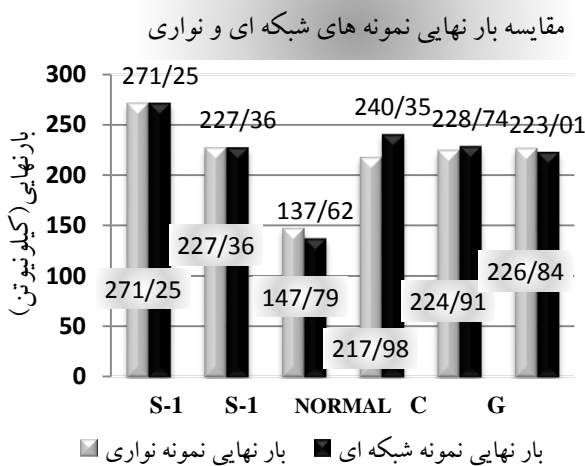


شکل ۴- طرح شماتیک بارگذاری در ناحیه وسط دال

در این آزمایش دال‌ها در مراحل مختلف تحت بارگذاری خطی قرار گرفتند. در شروع بارگذاری، افزایش بار تا زمان وقوع اولین

¹ Linear Variable Differential Transformer

آمده با پژوهش لی و همکاران [۱۷] مطابقت دارد. در پژوهش لی و همکاران نیز استفاده از الیاف کامپوزیت کربن موجب افزایش ظرفیت باربری از ۱۱/۲ درصد به ۹۸/۲ درصد نسبت به نمونه مرجع شده است.



شکل ۱۵- مقایسه بار نهایی کلیه نمونه های مرجع توپر، شاهد و نمونه های تقویت شده نواری و شبکه ای

۲-۵- بررسی بار ترک اولیه در کلیه نمونه ها

تحمل بار در نمونه شبکه ای تقویت شده با الیاف کربن با مقدار ۱۰۰ کیلو نیوتن بیشترین و در نمونه نواری تقویت شده با الیاف شیشه با مقدار ۸۵ کیلو نیوتن بیشترین مقدار تحمل بار ترک اولیه می باشند.

تحمل بار در نمونه شبکه ای تقویت شده با الیاف کربن ۲۵٪ نسبت نمونه شاهد و ۱۲۸٪ نسبت به دو نمونه مرجع توپر افزایش بار ترک اولیه حاصل شده است. در نمونه نواری تقویت شده با الیاف شیشه نیز ۴۲۵٪ افزایش بار ترک اولیه نسبت به نمونه شاهد و ۱۰۹٪ افزایش ظرفیت بار ترک اولیه نسبت به دو نمونه مرجع توپر مشاهده شده است. با توجه به نمودار بار-جابجایی می توان مشاهده کرد که در مراحل اولیه (قبل از شروع ترک های خمشی) منحنی های بار-جابجایی نمونه های نواری و شبکه ای رفتار مشابه نمونه های مرجع توپر داشته اند.

با افزایش بار نمونه های تقویت شده سختی بیشتری را نشان داده اند. نتایج به دست آمده از بار ترک اولیه با نتایج حاصل از پژوهش آگوسو و همکاران [۱۳] تطابق دارد. در پژوهش آگوسو و همکاران سختی پس از ترک خوردگی در نمونه RO (بدون الیاف



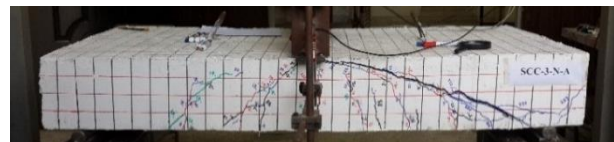
شکل ۱۱- نمونه شاهد شبکه ای



شکل ۱۲- نمونه شبکه ای تقویت شده با الیاف کامپوزیت کربن (CFRP)



شکل ۱۳- نمونه شبکه ای تقویت شده با الیاف کامپوزیت شیشه (GFRP)



شکل ۱۴- نمونه شبکه ای تقویت شده با الیاف کامپوزیت آرامید (AFRP)

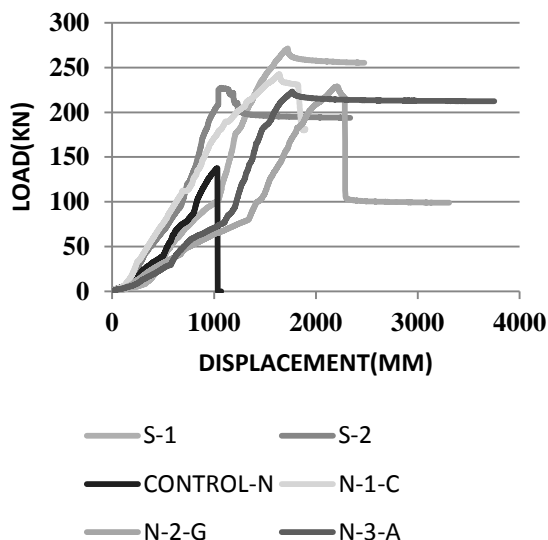
۵- نتایج آزمایشگاهی

۱-۵- بررسی بار نهایی در کلیه نمونه ها

بیشترین بار نهایی در نمونه های شبکه ای تقویت شده با الیاف کربن (C) به مقدار ۲۴۰/۳۵ کیلو نیوتن و در رده بندی نواری نمونه تقویت شده با الیاف آرامید (A) به مقدار ۲۲۶/۸۴ کیلو نیوتن بیشترین مقدار بار نهایی را ثبت کرده اند.

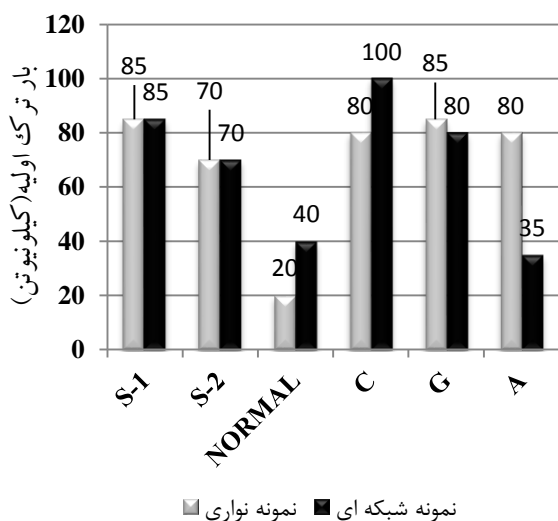
نمونه شبکه ای تقویت شده با الیاف کربن نسبت به نمونه شاهد ۱۷۵٪ و نمونه تقویت شده نواری با الیاف آرامید ۱۵۳٪ نسبت به نمونه شاهد (CONTROL) افزایش ظرفیت بار نهایی داشته است. این مقدار برای نمونه شبکه ای تقویت شده با الیاف کربن ۹۶٪ نسبت به دو نمونه مرجع توپر و برای نمونه تقویت شده نواری با الیاف آرامید مقدار ۹۱٪ درصد افزایش ظرفیت باربری داشته اند. بررسی های حاصل از مقایسه بار نهایی نمونه های تقویت شده نشان داده اند که تقویت نمونه ها با استفاده از الیاف کامپوزیت کربن در نمونه شبکه ای به دلیل استفاده از مساحت بیشتر الیاف موجب افزایش بار نهایی نمونه به مقدار ۱۷۵٪ شده است که نتایج به دست

مقایسه بار-جابجایی نمونه های شبکه‌ای



شکل ۱۸- نمودار منحنی بار-جابجه جایی کلیه نمونه‌های مرجع توپر، شاهد شبکه‌ای و سه نمونه تقویت شده با الیاف کربن، شیشه و آرامید

مقایسه بار ترک اولیه نمونه های شبکه‌ای و نواری



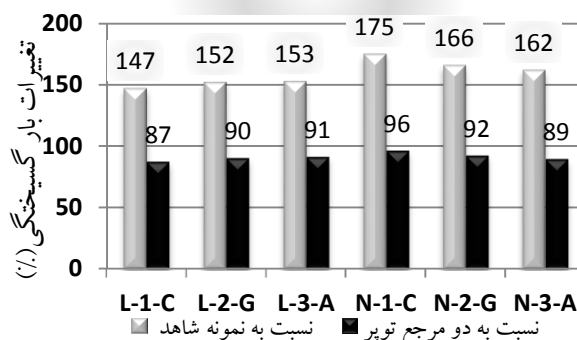
شکل ۱۹- مقایسه بار ترک اولیه کلیه نمونه‌های مرجع توپر، شاهد و نمونه‌های تقویت شده نواری و شبکه‌ای

۳-۵- بررسی عرض ترک اولیه کلیه نمونه‌ها

پس از شروع بارگذاری نمونه دال بتنی دچار ترک های ریز و مویی شده که با استفاده از ذره بین به دقت این ترک‌ها بررسی شده و اولین ترکی که در نمونه بتنی پس از بارگذاری رخ داده بر روی

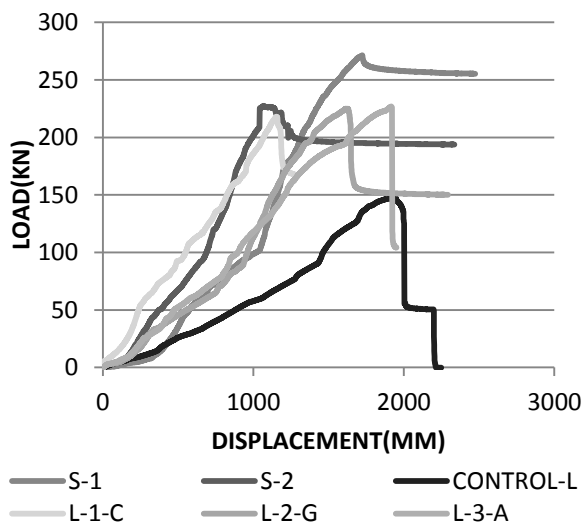
در نمونه R1 (یک لایه الیاف CFRP) $10/69 \text{ kN/mm}$ بوده که در جهت محور X و یک لایه در جهت محور Y) به CFRP در جهت محور X و سه لایه الیاف CFRP در جهت محور Y) به $17/65 \text{ kN/mm}$ و در نمونه R3 (سه لایه الیاف CFRP در جهت محور X و سه لایه در جهت محور Y) به $26/24 \text{ kN/mm}$ افزایش یافته است.

مقایسه تغییرات بار گسیختگی



شکل ۱۶- مقایسه درصد تغییرات جابجایی کلیه نمونه‌های نواری و شبکه‌ای نسبت به نمونه شاهد و دو مرجع توپر

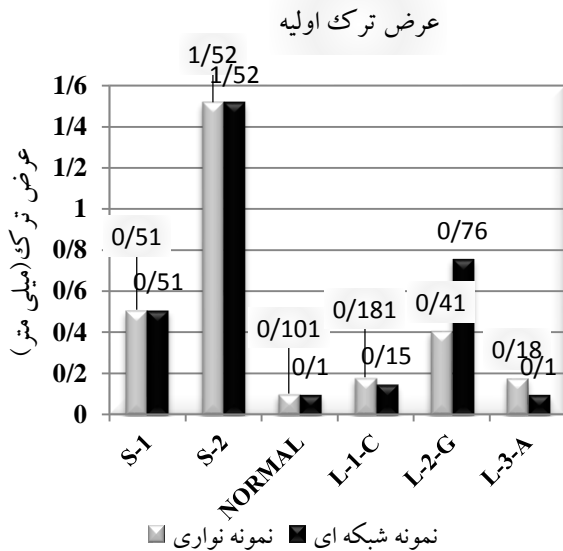
مقایسه بار-جابجایی نمونه های نواری



شکل ۱۷- نمودار منحنی بار-جابجه جایی وسط دهانه حاصل از نمونه‌های دال‌های مرجع توپر، شاهد نواری و سه نمونه تقویت شده با الیاف کربن، شیشه و آرامید

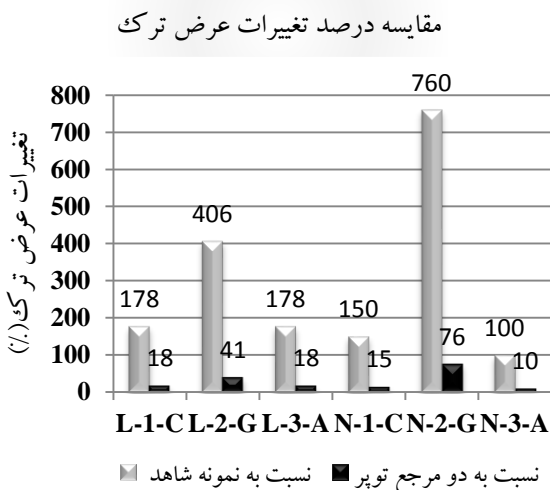
بنابراین می‌توان مشاهده کرد که استفاده از الیاف CFRP در دو جهت، که در این پژوهش نیز استفاده شده و افزایش باربری را به همراه داشته، با نتایج حاصل از پژوهش آگبوسو و همکاران تطبیق قابل قبولی دارد.

دال ثبت شده و عرض آن با استفاده از خط کش عرض ترک مطابق با آیین نامه ACI¹ اندازه گیری شده است.



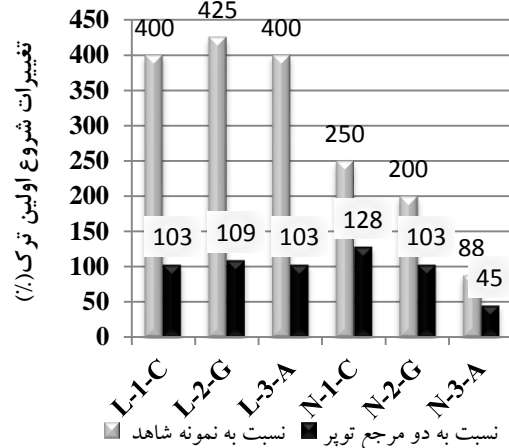
شکل ۲۱- مقایسه عرض ترک اولیه کلیه نمونه های مرجع توپر، شاهد و نمونه های تقویت شده نواری و شبکه ای

نمونه تقویت شده شبکه ای با الیاف آرامید با مقدار ۱۰٪ نسبت به نمونه شاهد و مقدار ۱۰٪ نسبت به دو نمونه مرجع توپر کمترین مقدار عرض ترک اولیه را داشته است. در نمونه نواری تقویت شده با الیاف کربن و شیشه این مقدار در مقایسه با نمونه شاهد ۱۷۸٪ و در مقایسه با دو نمونه مرجع توپر ۴۱٪ افزایش عرض ترک اولیه داشته است.



شکل ۲۲- مقایسه درصد تغییرات عرض ترک کلیه نمونه های نواری و شبکه ای نسبت به نمونه شاهد و دو مرجع توپر

مقایسه تغییرات شروع اولین ترک



شکل ۲۰- مقایسه درصد تغییرات شروع اولین ترک کلیه نمونه های نواری و شبکه ای نسبت به نمونه شاهد و دو مرجع توپر محل تشکیل این ترک در نمونه های مختلف متفاوت بوده است اما به طور کلی این ترک ها به صورت ترک خمشی یا خمشی-برشی در نمونه دال بتنی رخ داده اند.

نمونه تقویت شده شبکه ای با الیاف آرامید کمترین مقدار عرض بازشدگی ۰,۱۰mm داشته است. اندازه عرض ترک اولیه تقویت شده با الیاف کربن و شیشه ۰,۱۸ میلی متر بوده که کمترین اندازه عرض ترک اولیه در نمونه نواری می باشد. همچنین بررسی عرض ترک اولیه حاصل در مقایسه با نمونه شاهد در کلیه نمونه ها افزایش داشته که با نتایج حاصل از پژوهش سعیدیان و همکاران [۱۴] تطابق قابل قبولی را نشان می دهد. در پژوهش سعیدیان و همکاران عرض ترک در بار سطح سرویس از ۰,۷۸ میلیمتر در نمونه تقویت نشده به ۰,۰۹ میلیمتر در نمونه تقویت شده کاهش داشته است. همچنین توجه به مقایسه نتایج به دست آمده، بررسی ها نشان می دهند که به منظور کنترل عرض ترک اولیه، نمی توان صرفاً از الیاف کامپوزیت استفاده نمود و باید بسیار محافظه کارانه اقدام شود.

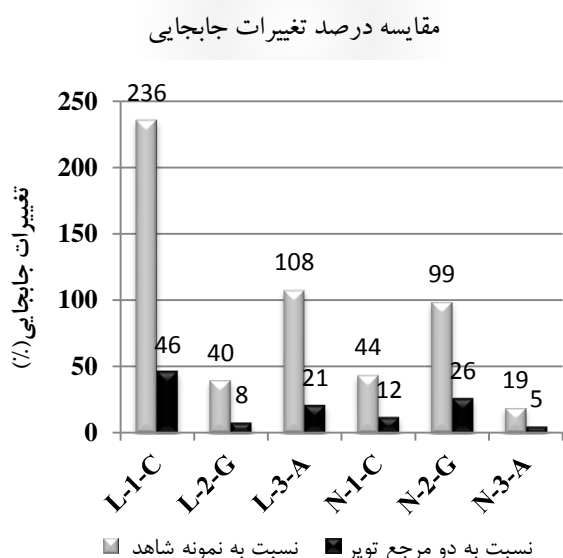
¹ American Concrete Institute

۵-۴- بررسی جابجایی کلیه نمونه‌ها

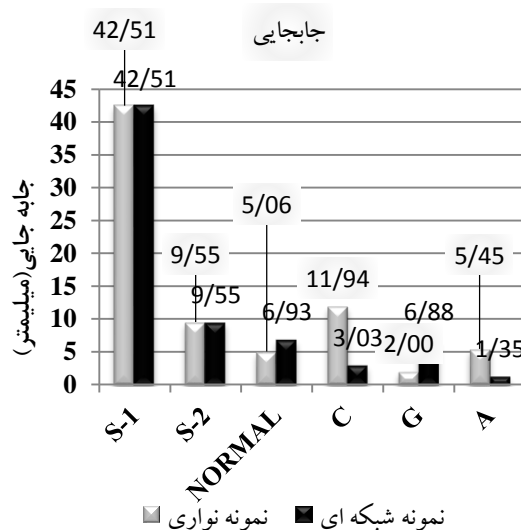
بیشترین جابجایی در نمونه شبکه‌ای تقویت شده با الیاف شیشه ۶/۸۸ میلی‌متر بوده و در نمونه نواری تقویت شده با الیاف کربن ۱۱/۹۴ میلی‌متر حاصل شده که بیشترین جابجایی ثبت شده می‌باشند. در نمونه‌های تقویت شده شاهد کاهش میزان جابجایی نسبت به نمونه شاهد (CONTROL) بوده‌ایم. در دال‌های نواری نمونه تقویت شده با الیاف کربن به میزان ۲۳۶٪ نسبت به نمونه شاهد و ۴۶٪ نسبت به نمونه مرجع توپر افزایش جابجایی داشته است. در دال‌های شبکه‌ای نمونه تقویت شده با الیاف شیشه به میزان ۹۹٪ نسبت به نمونه شاهد و ۲۶٪ نسبت به نمونه مرجع توپر افزایش سختی به همراه داشته است. مقایسه جابجایی‌های صورت گرفته نشان داده که تقویت کلیه نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد (به غیر از نمونه تقویت شده نواری کربن و نواری آرامید) موجب کاهش خیز شده است که نتایج قوزایی و توکلی زاده [۱۶] بر نتایج حاصل از این پژوهش در زمینه استفاده از الیاف کربن جهت تقویت نمونه‌ها صحه‌گذاری می‌نماید.

۵-۵- بررسی سختی کلیه نمونه‌ها

سختی عبارت است از معکوس میزان تغییر شکل یک جسم هنگامی که یک واحد نیرو (نیروی وارده می‌تواند فشاری، کششی، خمشی، برشی یا پیچشی باشد) به آن اعمال گردد. هر چقدر تغییر شکل سازه کمتر باشد، سختی آن سازه بیشتر خواهد بود [۱۸]. بررسی‌های انجام شده برای تغییر شکل نمونه‌های مورد آزمایش در این پژوهش در ناحیه وسط دهانه دال می‌باشد که بیشترین میزان جابجایی و تغییر شکل را مورد بررسی قرار داده است. تقویت دال‌های بتنی با استفاده از الیاف کامپوزیت FRP کاهش جابجایی یا به عبارتی افزایش سختی در تغییر مکان ناحیه وسط دهانه دال را به همراه داشته است.



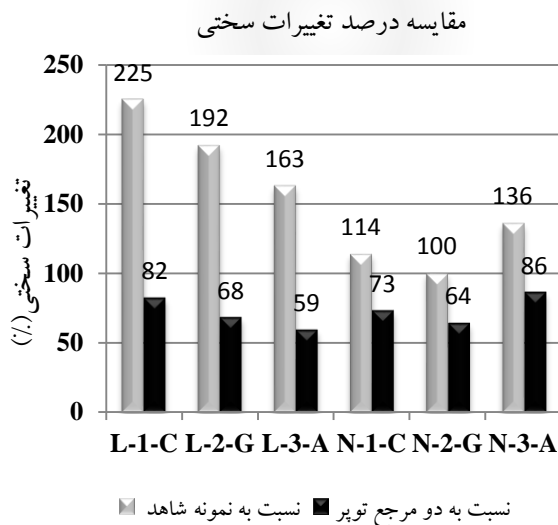
شکل ۲۴- مقایسه درصد تغییرات جابجایی کلیه نمونه‌های نواری و شبکه‌ای نسبت به نمونه شاهد و دو مرجع توپر



شکل ۲۳- مقایسه جابجایی کلیه نمونه‌های مرجع توپر، شاهد و نمونه‌های تقویت شده نواری و شبکه‌ای

قوزایی و توکلی زاده نشان دادند که با افزایش مساحت مقاوم سازی شده دال از مساحت ۰/۳ به ۰/۶ متر مربع با ضخامت الیاف یکسان ۱/۲ میلی‌متر، خیز دال ۸/۱۴ درصد کاهش داشته و با افزایش مساحت مقاوم سازی از ۰/۵۴ به ۰/۸۴ متر مربع با ضخامت الیاف

قابل تحمل دال تا ۶۲٪ و کاهش میزان ترک خوردگی می‌شود. بنابراین نتایج حاصل از این پژوهش تطابق قابل قبولی با نتایج حاصل از محققان ذکر شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲۶- مقایسه درصد تغییرات سختی کلیه نمونه‌های نواری و شبکه‌ای نسبت به نمونه شاهد و دو مرجع توپر

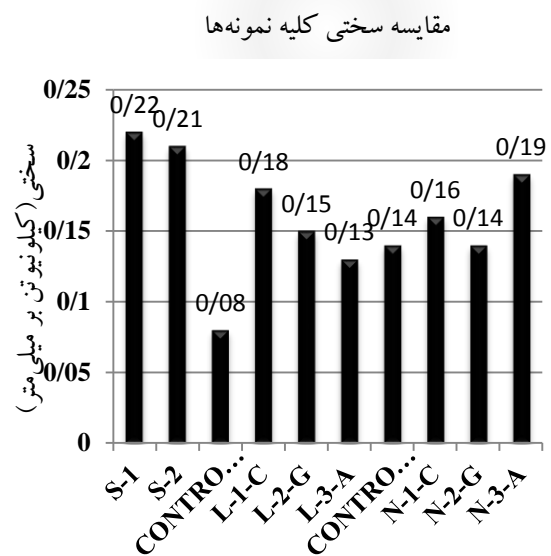
۶- نتیجه‌گیری

بررسی‌های حاصل از آزمایش‌ها و مقادیر به دست آمده نتایج زیر را به همراه داشته است:

- شروع اولین ترک در نمونه‌های تقویت شده نواری با الیاف شیشه ۴۲۵٪ نسبت به نمونه شاهد و ۱۰۹٪ نسبت به دو نمونه مرجع توپر افزایش ظرفیت باربری به همراه داشته که موجب شده اولین ترک در بار بیشتری رخ دهد. شروع اولین ترک در نمونه‌های تقویت شده شبکه‌ای با الیاف کربن ۲۵۰٪ نسبت به نمونه شاهد و ۱۲۸٪ نسبت به دو نمونه مرجع توپر افزایش ظرفیت باربری به دنبال داشته است. بنابراین تقویت نمونه‌ها موجب کاهش در تشکیل زود هنگام ترک اولیه شده است.

- عرض ترک اولیه در نمونه نواری تقویت شده با الیاف آرامید نسبت به نمونه شاهد ۱۷۸٪ و نسبت به دو نمونه مرجع توپر ۱۸٪ افزایش داشته است. همچنین در نمونه تقویت شده شبکه‌ای با الیاف آرامید شاهد افزایش عرض ترک اولیه ۱۰۰٪ نسبت به نمونه شاهد و کاهش ۱۰٪ عرض ترک اولیه نسبت به دو نمونه مرجع توپر بوده‌ایم. در نتیجه نوع الیاف در میزان بازشدگی عرض ترک اولیه تاثیر بسزایی داشته است.

نمونه تقویت شده شبکه‌ای با الیاف آرامید در مقایسه با کلیه نمونه‌ها با مقدار ۰/۱۹ کیلونیوتن بر میلی‌متر بیشترین سختی به دست آمده می‌باشد که ۱۳۶٪ در مقایسه با نمونه شاهد و در مقایسه با دو مرجع توپر ۸۶٪ افزایش سختی داشته است. پس از آرامید، نمونه کربن با مقدار ۰/۱۸ کیلونیوتن بر میلی‌متر بیشترین میزان سختی و ۲۲۵٪ نسبت به نمونه شاهد و ۸۵٪ نسبت به دو نمونه مرجع توپر افزایش سختی داشته است.



شکل ۲۵- مقایسه سختی کلیه نمونه‌های به دست آمده

کمترین سختی در مقایسه کلی نسبت به نمونه‌های شاهد ۱۰۰٪ نسبت به نمونه شبکه‌ای تقویت شده با الیاف شیشه و در مقایسه کلی نسبت به دو نمونه مرجع توپر نمونه تقویت شده نواری با الیاف آرامید به میزان ۵۹٪ کمترین سختی حاصل از نمونه‌ها می‌باشند.

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داده است که تقویت با الیاف CFRP موجب افزایش سختی خمشی دال‌های تقویت شده در هر دو گروه نواری و شبکه‌ای شده و از طرفی دیگر موجب شده تا نمونه دال‌های بتنی حفره‌دار عملکردی مشابه با عملکرد دال‌های بتنی کاملاً توپر داشته باشند. همچنین صالحی یانه سری و مدانلو [۱۵] نشان دادند که استفاده از الیاف کربن موجب افزایش ۵۷ درصد و استفاده از الیاف شیشه نیز موجب افزایش ۴۵ درصد در مقاومت خمشی شده است.

همچنین ارکی و هفرنان [۱۲] نیز در پژوهش خود بیان نمودند استفاده از الیاف FRP موجب افزایش سختی خمشی و بار نهایی

- [3] G. Loreto, L. Leardini, D. Arboleda, and A. Nanni, "Performance of RC slab-type elements strengthened with fabric-reinforced cementitious-matrix composites," *Journal of Composites for Construction*, vol. 18, p. A4013003, 2013.
- [4] Lundqvist, J., et al. Numerical analysis of concrete beams strengthened with CFRP-A study of anchorage lengths. in *The International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures (BBFS)*. 2005.
- [5] Dai, J.-G., W.-Y. Gao, and J. Teng, Finite element modeling of insulated FRP-strengthened RC beams exposed to fire. *Journal of Composites for Construction*, 2014. 19(2): p. 04014046.
- [6] Yang, Z., J. Chen, and D. Proverbs, Finite element modelling of concrete cover separation failure in FRP plated RC beams. *Construction and Building Materials*, 2003. 17(1): p. 3-13.
- [7] Barnes, R.A. and G.C. Mays, Fatigue performance of concrete beams strengthened with CFRP plates. *Journal of Composites for Construction*, 1999. 3(2): p. 63-72.
- [8] Aboutaha, R.S. Ductility of CFRP Strengthened Concrete Flexural Members. in *Rehabilitating and Repairing the Buildings and Bridges of Americas@ sHemispheric Workshop on Future Directions*. 2002. ASCE.
- [9] Obaidat, Y.T., S. Heyden, and O. Dahlblom, The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modelling retrofitted RC beams with FEM. *Composite Structures*, 2010. 92(6): p. 1391-1398.
- [10] Toutanji, H. and G. Ortiz, The effect of surface preparation on the bond interface between FRP sheets and concrete members. *Composite structures*, 2001. 53(4): p. 457-462.
- [11] Pham, H. and R. Al-Mahaidi, Experimental investigation into flexural retrofitting of reinforced concrete bridge beams using FRP composites. *Composite structures*, 2004. 66(1): p. 617-625.
- [12] Erki, M.A. and Heffernan, P.J., 1995. Reinforced concrete slabs externally strengthened with fibre-reinforced plastic materials. In *RILEM PROCEEDINGS* (pp. 509-509). CHAPMAN & HALL.
- [13] Agbossou, A., Michel, L., Lagache, M. and Hamelin, P., 2008. Strengthening slabs using externally-bonded strip composites: Analysis of concrete covers on the strengthening. *Composites Part B: Engineering*, 39(7-8), pp.1125-1135.
- [۱۴] سهند سعیدیان، بهرام نوایی نیا، و مرتضی حسینی بیگی، «بررسی آزمایشگاهی رفتار خمشی دال‌های مجوف مسلح به

- بیشترین بار نهایی در نمونه‌های شبکه‌ای دال تقویت شده با الیاف کربن ۲۴ تن بوده که تقویت دال بتنی موجب افزایش ظرفیت باربری ۱۷۵٪ نسبت به نمونه شاهد و ۹۶٪ نسبت به دو نمونه مرجع توپر شده است. در نمونه نواری دال تقویت شده با الیاف آرامید دارای ظرفیت بار ۲۲ تن بیشترین ظرفیت باربری از آزمایشات بوده است. این مقدار نسبت به نمونه شاهد ۱۵۳٪ و نسبت به دو نمونه مرجع توپر ۹۱٪ افزایش ظرفیت باربری به همراه داشته است. نتایج نشان داده‌اند که تقویت نمونه‌های بتنی موجب بهبود رفتار باربری دال‌ها و رفتاری مشابه رفتار دال‌های مرجع توپر و افزایش تحمل بار شده است.

- میزان جابجایی نمونه تقویت شده شبکه‌ای با الیاف آرامید نسبت به دو نمونه مرجع ۲۱٪ و نسبت به نمونه شاهد شبکه‌ای ۱۰۸٪ افزایش داشته است. جابجایی نمونه شبکه‌ای تقویت شده با الیاف آرامید ۱/۳۵ mm و الیاف شیشه به میزان ۲ mm کمترین مقادیر جابجایی بوده‌اند. بیشترین جابجایی مربوط به نمونه نواری تقویت شده با الیاف کربن به میزان ۱۱/۹۴ mm، در نمونه شبکه‌ای تقویت شده با الیاف شیشه به میزان ۶/۸۸ mm بوده است.

- بیشترین سختی در نمونه‌های نواری مربوط به نمونه تقویت شده با الیاف کربن بوده که ۲۲۵٪ نسبت به نمونه شاهد و ۸۲٪ نسبت به دو نمونه مرجع توپر افزایش سختی به همراه داشته است. در نمونه‌های شبکه‌ای، نمونه تقویت شده با الیاف آرامید ۱۳۶٪ نسبت به نمونه شاهد و ۸۶٪ نسبت به دو نمونه مرجع افزایش سختی داشته است.

- در اثر تقویت دال‌ها، ترک‌های خمشی محدود شده و در هنگام شکست ترک‌های خمشی-برشی افزایش یافته است.

- به نظر می‌رسد استفاده از طرح اختلاط بتن خودتراکم و مشخصات رئولوژیکی آن بر کیفیت کار بیفزاید.

۷- مراجع

- [1] K. Kovler and V. Chernov, "Types of damage in concrete structures," in *Failure, distress and repair of concrete structures*, ed: Elsevier, 2009, pp. 32-56.
- [2] H. M. Elsanadedy, T. H. Almusallam, S. H. Alsayed, and Y. A. Al-Salloum, "Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar-Experimental and numerical study," *Composite Structures*, vol. 97, pp. 40-55, 2013.

میلگردهای FRP، کنفرانس بین‌المللی سبک‌سازی و زلزله جهاد دانشگاهی استان کرمان، ۱۳۸۹.

[۱۵] محمد مهدی صالحی یانه سری و علی مدانلو، «تقویت خمشی و خمشی - برشی دال‌های مجوف بتن مسلح با استفاده از الیاف CFRP و GFRP و ورق‌های فولادی»، ارائه شده در نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۱۳۹۱.

[۱۶] المیرا قورزایی و محمدرضا توکلی زاده، «بررسی عددی رفتار خمشی دال‌های بتنی مجوف تقویت شده با پلیمرهای مسلح شده با الیاف FRP»، ارائه شده در کنفرانس ملی مهندسی معماری، عمران و توسعه شهری، ۱۳۹۴.

[17] Lee, S., Hong, K., Yeon, Y. and Jung, K., 2018. Flexural Behavior of RC Slabs Strengthened in Flexure with Basalt Fabric-Reinforced Cementitious Matrix. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.

[۱۸] مهدی پروینی. ۱۳۹۴. آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله: استاندارد ۲۸۰۰. ادبیان روز.

Flexural Strengthening of Voided Concrete Slabs with AFRP, CFRP and GFRP

Mojgan Abroun *

Department of civil engineering, ,Guilan University,Rasht,Iran.

Rahmat Madandoust

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Guilan university, Rasht, Guilan.

Abstract

Studies have shown that one of the leading causes of earthquake inflicting irreparable damage has been the high weight of structures. Using FRP composite sheets -due to the proper mechanical and physical properties to reinforce and improve concrete members in load-bearing, removal of concrete in the deflection and increasing the ductility of concrete - is an appropriate option. The purpose of this study is to strengthen voided concrete slabs with AFRP, CFRP and GFRP. In this study, 10 specimens of reinforced concrete with dimensions of 150×70×20 cm were investigated. The results demonstrated that the amount of load capacity in the Network strengthened specimen with CFRP compare to the control sample 175% and, in Linear, strengthened specimen with AFRP in comparison with the control sample 153% increased. This value in comparison with Solid specimens increased by about 96% for samples having been strengthened with CFRP and 91% for those strengthened with AFRP. The maximum displacements have been presented in the specimen strengthened with CFRP (236%) compared to that of the control sample and in the specimen strengthened with GFRP (99%) compared to that of the control sample. The stiffness amounts in Linear specimen strengthened with CFRP 225% compared to that of the control sample and in Network specimen strengthened with AFRP 136% compared to the that of control sample also increased.

Keywords: Voided Concrete Slab, CFRP, AFRP, GFRP.

* Corresponding Author: mozhgan.abroun95@gmail.com

