

بررسی آزمایشگاهی تأثیر محل اتصال ورقه‌های بتن توانمند الیافی پیش‌ساخته در رفتار خمشی دال‌های یک‌طرفه ضعیف

علی خیرالدین *

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

محمد افروزیا

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

احمد دالوند

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه لرستان

چکیده

بتن توانمند الیافی (HPFRC)، به مصالحی شامل ملات سیمانی با سنگ‌دانه‌های ریز و الیاف اطلاق می‌شود. ویژگی شاخص این مصالح آن است که تحت بارگذاری کششی، رفتار سخت‌شوندگی کرنش از خود بروز می‌دهند. این مصالح توانمند می‌توانند در بسیاری موارد نظیر بهسازی لرزه‌ای اعضای ساختمانی به کار رود. در برخی موارد ظرفیت سازه را افزایش می‌دهیم تا با نیاز لرزه‌ای آن برابر شود. به این افزایش ظرفیت سازه مقاوم‌سازی می‌گویند. مقاوم‌سازی می‌تواند با افزایش سختی و یا افزایش مقاومت انجام شود. از این رو در ادامه به مطالعه آزمایشگاهی ۵ نمونه دال ضعیف یک‌طرفه که یک نمونه مرجع و مابقی در نواحی مختلف (کششی، فشاری و جوانب) با استفاده از ورقه‌های بتن توانمند الیافی مقاوم‌سازی شده‌اند، می‌پردازیم. نتایج بررسی آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از ورقه بتن توانمند الیافی، باعث افزایش ظرفیت باربری تا دو برابر نمونه مرجع، جذب انرژی تا سه برابر نمونه مرجع و شکل پذیری تا بیست برابر نمونه مرجع می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مقاوم‌سازی، دال یک‌طرفه، بتن توانمند الیافی، تقویت خمشی، HPFRC.

* نویسنده مسئول: kheyroddin@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های سیمانی یا بتنی مسلح الیافی به صورت موادی مرکب با دو مؤلفه اصلی شامل الیاف و ملات تعریف می‌شوند. ملات، صرف نظر از اینکه خمیر یا بتن باشد، شامل سنگ‌دانه‌ها و مواد افزودنی ویژه است. الیاف نیز دومین مؤلفه اصلی تشکیل کامپوزیت است. الیاف و ملات به سبب وجود پیوستگی با یکدیگر کار می‌کنند که منجر به تشکیل یک کامپوزیت قوی می‌گردد. نقش اصلی الیاف کوتاه پراکنده در کامپوزیت، کنترل بازشدگی و گسترش ترک در ماترکس است. گروه‌های اصلی الیافی که در بتن سازه‌ای استفاده می‌شوند، بر اساس جنس به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

- الیاف فولادی با اشکال و قطرهای مختلف و نیز میکرو الیاف فولادی
- الیاف شیشه‌ای
- الیاف مصنوعی ساخته شده با مواد مختلف مثل پلی پروپیلن (PP^۶)، پلی اتیلن، پلی وینیل الکل (PVA^۷) و ...
- الیاف کربن، کریلونیتریل و ... [۱].

انواع دیگری از الیاف نیز وجود دارد که امروزه در کامپوزیت‌های الیافی به کار نمی‌روند. از جمله آن‌ها می‌توان به الیاف گیاهی اشاره کرد که در بتن سازه‌ای با عملکرد بالا مؤثر نمی‌باشند. همچنین الیاف آربست که به دلیل تأثیر منفی بر سلامت انسان، به طور کلی ممنوع شده است [۱].

در سال ۱۹۹۹ کورباچ و جسی و در سال ۲۰۰۳ نعمان، رینهارت و همکاران، نوع جدیدی از بتن الیافی با الیاف به هم پیوسته، تحت عنوان بتن مسلح بافته شده (TRC^۸) را ارائه نمودند [۲ و ۳]. نعمان و رینهارت در سال ۲۰۰۳ مصالحی را معرفی نمودند که جدا از بتن‌های الیافی (FRC^۹) طبقه‌بندی می‌شدند و شامل یک بخش سخت‌شوندگی کرنش در منحنی تنش-کرنش خود بودند. این مصالح در رده مصالح توانمند بانام کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC^{۱۰}) قرار گرفتند. بیشتر اعضای ساخته شده با این مصالح، شامل ملات سیمانی بدون درشت‌دانه هستند و به همین دلیل، ملات یا خمیر سیمانی مسلح شده توسط الیاف نام گرفته‌اند. در طول رفتار نرم شونده‌گی، تغییر شکل سازه

استفاده از بتن‌های توانمند الیافی (HPFRC^۱) با توجه به ویژگی‌های آن‌ها که در ادامه به بررسی آن‌ها خواهیم پرداخت، در چند دهه‌ی اخیر بشدت مورد توجه و استفاده قرار گرفته شده است. در سال‌های اخیر و با بررسی دوام سازه‌های بتنی مسلح به ویژه در مناطق خورنده و سخت برای بتن این نکته را ثابت می‌کند که مقاومت به تنهایی نمی‌تواند جوابگوی کلیه خواص مربوط به بتن از جمله دوام، بتن با مقاومت زیاد، بتن‌های با کارایی بسیار زیاد و ... باشد. در این راستا موضوع بتن‌های با عملکرد بالا (HPC^۲) مطرح شد که سه خصیصه مهم بتن: مقاومت فشاری^۳، کارایی (روانی)^۴ و دوام (پایداری)^۵ بتن را تأمین می‌کند. در بتن با عملکرد بالا علاوه بر افزایش مقاومت نسبت به بتن معمولی، کارایی و مقاومت در برابر عوامل خارجی نیز افزایش می‌یابد و ظاهر بتن بهتر می‌شود؛ اما از سوی دیگر، شکنندگی زیاد و مقاومت کششی پایین و مقاومت کم در برابر بازشدگی و انتشار ترک، عیوب عمده بتن می‌باشند [۱].

امروزه سازه‌های بتنی به دلایل زیادی آسیب‌دیده‌اند و تقویت و مقاوم‌سازی این ساختمان‌ها به عنوان راهکاری درست و به صرفه برای استفاده بهینه و حداکثری از آن‌ها مطرح می‌گردد. هدف از مقاوم‌سازی این است که حداقل شرایط ساختمان و سازه به پایین تر از سطح وظیفه تنزل نکند و غیرقابل بهره‌برداری نگردد. یکی از روش‌های مقاوم‌سازی می‌تواند رویکرد استفاده از بتن‌های ویژه با توانمندی و عملکرد بالا باشد. رفتار سخت‌شوندگی کرنش در بتن توانمند الیافی مهم‌ترین خصیصه این نوع بتن است، باعث جذب بالای انرژی این نوع بتن هنگام اعمال نیرو به آن می‌شود و این خود به معنی شکل‌پذیری بالای بتن توانمند الیافی است. به این ترتیب از بتن توانمند الیافی انتظار داشت که بحث مقاوم‌سازی نقش استهلاک‌کننده انرژی را ایفا کند. همچنین با توجه با مطالعات گذشته انجام شده بر روی این نوع خاص بتن، به راحتی می‌توان طرح اختلاط بهینه را انتخاب و تمرکز اصلی را به جای موضوع فناوری بتن این نوع بتن به سمت سازه‌ای کردن کشاند.

⁷ Polyvinyl Alcohol

⁸ Textile Reinforced Concrete (TRC)

⁹ Fiber Reinforced Concrete (FRC)

¹⁰ High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC)

¹ High Performance Fiber Reinforced Concrete (HPFRC)

² High Performance Concrete (HPC)

³ High Strength

⁴ High Workability

⁵ Durability

⁶ Polypropylene

مینلی در سال ۲۰۱۶ به بررسی دال‌های ساخته‌شده با بتن خودتراکم پرداخت. الیاف مورد استفاده در بررسی وی، شامل الیاف فولادی به طول پنجاه میلی‌متر و دو قلاب انتهایی و الیاف فولادی سی میلی‌متری با قلاب انتهایی بود. در نمونه‌های ساخته‌شده با بتن الیافی، رفتار خمشی مشاهده شد. این نمونه‌ها، جابجایی بیش از سی برابر جابجایی متناظر با اولین ترک خوردگی را تحمل کردند [۱۰]. بانیا در سال ۲۰۱۶، به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت الیافی فوق توانمند پرداخت. وی تأثیر شرایط عمل‌آوری، میزان درشت‌دانه، افزودنی‌های معدنی، مشخصات الیاف و سرعت بارگذاری را بررسی کرد. [۱۱]. لامپروپولوس در سال ۲۰۱۶، به بررسی مقاوم‌سازی تیرهای بتنی با استفاده از بتن توانمند الیافی پرداخت [۱۲]. مک‌رای در سال ۲۰۱۶، در خصوص مقاومت دال‌های پیوسته با بتن الیافی به تحقیق پرداخت. وی به بررسی عرض ترک ناشی از آب‌رفتگی پرداخت [۱۳]. هدف از این تحقیق، تمرکز بر روی رفتار خمشی دال‌های یک‌طرفه ضعیف مقاوم‌سازی شده با ورقه‌های بتن توانمند الیافی است. به این منظور، استفاده از ورقه‌های بتن توانمند الیافی در نواحی مختلف (کششی، فشاری، جوانب) دال یک‌طرفه ضعیف جهت بررسی تأثیر محل قرارگیری ورقه‌ها در رفتار خمشی دال مدنظر است.

۲- روند انجام آزمایش

۲-۱- معرفی نمونه‌ها

نام‌گذاری نمونه‌های موردبررسی در جدول ۱ نشان داده شده است. ابعاد تمامی نمونه‌ها $1 \times 0.4 \times 1$ متر است. برای آزمایش از بارگذاری سه نقطه‌ای بهره گرفته شده است.

جدول ۱- معرفی نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه	نماد	توضیحات
۱	RS1	دال شماره یک (نمونه مرجع)
۲	S1 + Lc	دال شماره یک + ورقه بتن توانمند الیافی در ناحیه فشاری
۳	S1 + L _T	دال شماره یک + ورقه بتن توانمند الیافی در ناحیه کششی
۴	S1 + Lc + L _T	دال شماره یک + ورقه بتن توانمند الیافی در ناحیه کششی و فشاری
۵	S1 + Lc + L _T + L _s	دال شماره یک + ورقه بتن توانمند الیافی در ناحیه کششی، فشاری و کناری

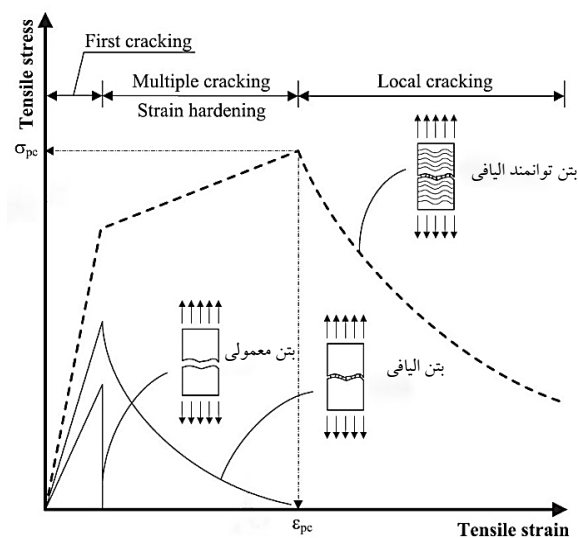
متشکل از بازشدگی ترک‌های ریز چندگانه و کشیدگی الاستیک مصالح بین این ترک‌ها است [۴].

بانیا در سال ۲۰۱۴ به بررسی مناسب بودن بتن الیافی برای استفاده در مقاوم‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه پرداخت. وی با انجام آزمایش‌های متعدد، با توجه به دلایل زیر، بتن الیافی را برای مصارف مقاوم‌سازی مناسب دانست.

- مقاومت در برابر حملات شیمیایی
- اتصال مناسب به بتن موجود
- دوام مناسب در شرایط آب و هوایی نامناسب
- انطباق شیمیایی، الکتریکی و ابعادی و ... با بتن موجود [۵].

رمضانیان پور در سال ۲۰۱۴ به بررسی تأثیر مواد پوزولانی برای از بین بردن ناحیه ضعیف بین ملات و الیاف پرداخت و نشان داد که استفاده از مواد پوزولانی مثل پومیک و کائولین باعث از بین بردن ناحیه ضعیف بین ملات و الیاف می‌شود [۶].

پوداجاس در سال ۲۰۱۴، با انجام بارگذاری چند جهتی بر نمونه بتن الیافی به بررسی تأثیر جهت الیاف در ماتریس بر خواص کششی بتن الیافی پرداخت [۷]. چی در سال ۲۰۱۴، با به کارگیری سناریوی بارگذاری چند جهتی، مدلی برای منحنی تنش-کرنش بتن الیافی تحت بارگذاری چند جهتی ارائه کرد [۸]. حسین در سال ۲۰۱۴، تأثیر نوع، اندازه و درصد الیاف و ترکیب الیاف بر خواص بتن تازه (کارایی و ...) و بتن سخت شده (انرژی شکست، مقاومت کششی، مقاومت فشاری و ...) را بررسی کرد. [۹].



شکل ۱- مقایسه رفتار کششی بتن‌های مختلف

۲-۲- مصالح مورد استفاده و طرح های اختلاط

مصالح مورد در طرح های اختلاط عبارت اند از: سیمان، الیاف فولادی، الیاف مصنوعی (پلیمری)، سنگ دانه، فوق روان کننده و آب است. همچنین برای اتصال ورقه های بتن توانمند الیافی به دال از چسب سه جزئی بر پایه اپوکسی استفاده شده است. سیمان مورد استفاده، از نوع پرتلند تیپ II است.

مشخصات کلی الیاف پلیمری در جدول ۲ نشان داده شده است. در شکل ۲ شکل ظاهری الیاف پلیمری استفاده شده در بتن توانمند الیافی مشاهده می گردد.

تمامی میلگردهای مصرفی از نوع AII و با قطر ۸ میلی متر می باشد؛ که در جدول ۳ مشخصات میلگردهای مصرفی بر اساس آزمایش کشش میلگردها ارائه شده است.



شکل ۲- شکل ظاهری الیاف پلیمری

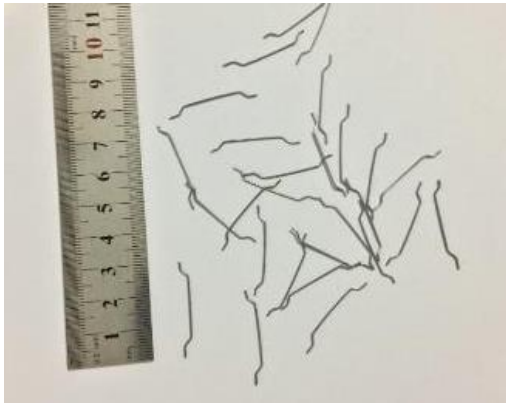
جدول ۲- مشخصات کلی الیاف پلیمری استفاده شده

مواد سازنده	پلی پروپیلن - کوپلیمر اصلاح شده
رنگ	طوسی - سفید - مشکی
طول (mm)	۵۴
مقاومت کششی (MPa)	۵۷۰-۹۰۰
وزن مخصوص (ton/m ³)	۰,۹۱-۰,۹۴
جذب آب	ندارد

جدول ۳- مشخصات میلگردهای مصرفی

نوع آرماتور	قطر آرماتور (mm)	تنش تسلیم (Kg/mm ²)	کرنش شکست %	حداکثر تنش (Kg/mm ²)
A II	8	36.35	42.79	55.87

الیاف فولادی مورد استفاده با شکل هندسی دو سر قلاب دار بوده که طبق مشخصات فنی ارائه شده توسط کارخانه تولیدی، دارای مقاومت کششی بیش از ۱۱۰۰ مگاپاسکال، طول الیاف فولادی ۳,۵ سانتی متر و قطر آن ها ۰,۶ میلی متر است، نسبت جناحی (نسبت طول به قطر) این الیاف برابر با ۵۸,۳۴ است. در شکل ۳ شکل ظاهری الیاف فولادی استفاده شده در بتن توانمند الیافی نشان داده شده است.



شکل ۳- شکل ظاهری الیاف فولادی

فوق روان کننده مورد استفاده بر پایه ی پلی کربوکسیلیک اتر بوده که موجب می شود در شروع هیدراسیون به کمک خاصیت افزایش الکتریسیته ساکن ذرات سیمان را به خوبی پخش کند و در ادامه باعث ممانعت شدید از تجمع مجدد ذرات سیمان می گردد و کماکان آن ها را به صورت مجزا و پخش شده نگه دارد.

نسبت های وزنی اختلاط مصالح در بتن معمولی مورد استفاده در جدول ۴ ارائه شده است که بر مبنای مقادیر مورد نیاز برای مخلوط ۴۰ کیلو گرمی است. این نسبت های اختلاط با استفاده از کارهای مشابه در زمینه ی استفاده ترکیبی از بتن معمولی و بتن HPRCC انتخاب شده است [۱۴].

لازم به ذکر است که به علت خیس بودن سنگ دانه های مصرفی، نسبت آب به سیمان واقعی بیشتر از مقداری است که در این جدول مشاهده می شود. کارایی بتن در حدود ۱۲۰ میلی متر اندازه گیری گردید.

لازم به ذکر است حداکثر بعد درشت دانه (شن) مورد استفاده جهت استفاده در بتن معمولی دال برابر ۹,۵ میلی متر (الک ۳/۸") است. میانگین مقاومت فشاری استاندارد نمونه ها ۱۷,۷ مگاپاسکال به دست آمده است.

جدول ۴- نسبت‌های اختلاط مصالح در بتن معمولی برای مخلوط ۴۰ کیلوگرمی استاندارد نمونه‌ها ۶۹,۹۶ مگاپاسکال به‌دست آمده است. در شکل ۴، بافت ظاهری بتن توانمند الیافی تازه مشاهده می‌گردد.



شکل ۴- شکل ظاهری بتن تازه توانمند الیافی

(Water/Cement)	Fine Agg.	Coarse Agg.	Cement
0.62	19.2kg	12.8kg	6kg

نسبت‌های وزنی اختلاط مصالح در توانمند الیافی مورد استفاده در جدول ۵ ارائه شده است که بر مبنای مقادیر مورد نیاز برای مخلوط ده کیلوگرمی است. الیاف مصرفی پلیمری با نسبت حجمی نیم درصد به مخلوط اضافه می‌شوند. باید توجه داشت که الیاف به آرامی و طی چندین مرحله به مخلوط اضافه شدند تا از پدیده‌ی گلوله شدن الیاف جلوگیری به عمل آید. در شکل ۴ شکل ظاهری بتن تازه توانمند الیافی مشاهده می‌شود. میانگین مقاومت فشاری

جدول ۵- نسبت‌های اختلاط مصالح در بتن توانمند الیافی برای مخلوط ۱۰ کیلوگرمی

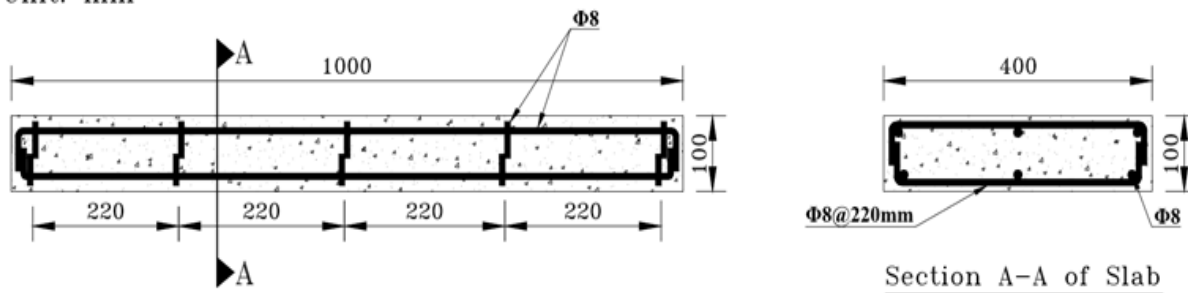
(Water/Cement)	Fine Agg.	Cement	Steel Fiber	Superplasticiser	Polymer Fiber
0.33	5kg	5kg	1%=330gr	25gr	60gr

عملیات عمل‌آوری آن‌ها طی ۲۸ روز انجام می‌شود. در شکل ۷ نحوه قالب‌بندی بتن توانمند الیافی مشاهده می‌گردد، همچنین مطابق پیشنهاد نعمان، کامپوزیت به‌صورت لایه‌ای در قالب ریخته می‌شود، ولی مرتعش نمی‌شود. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در زیر پوشش و در دمای اتاق نگهداری می‌شوند. سپس نمونه‌ها از قالب جدا شده و به مدت ۲۵ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد درون آب نگهداری می‌شوند. در ادامه به مدت دو روز در خارج از آب خشک شده و پس از ۲۸ روز بارگذاری می‌شوند [۱۴].

۳-۲- نحوه ساخت نمونه‌ها

در شکل ۵، جزییات آرماتوربندی نمونه‌ها مشخص شده است. جهت بتن‌ریزی نمونه‌ها از قالب چوبی استفاده شده است. بدین منظور لازم است با روغن کاری قالب، از نفوذ شیره بتن به داخل قالب جلوگیری نموده و با بتونه کاری، درزهای قالب را مسدود کرد. در شکل ۶، قرارگیری نمونه‌ها بر روی بستر مسطح جهت بتن‌ریزی مشاهده می‌شود. برای عمل‌آوری نمونه‌ها، نمونه‌ها توسط پلاستیک پوشانده شده و با مرطوب نگه داشتن مستمر نمونه‌ها

Unit: mm

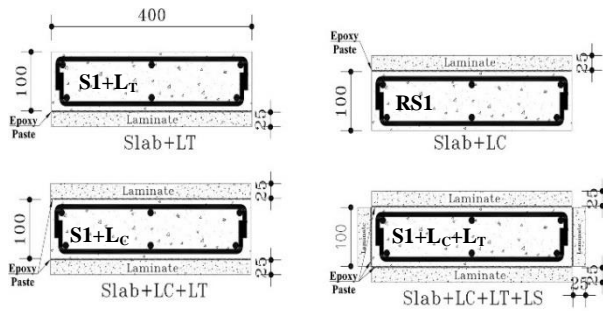


شکل ۵- نحوه آرماتورگذاری

لایه‌های بتن توانمند الیافی به دال ضعیف نشان داده شده است. برای اتصال آن‌ها به دال ضعیف، چسب سه جزئی اپوکسی بکار برده شده است، که در جدول ۶ مشخصات آن ارائه شده است لازم به ذکر است که مقاومت‌های ذکر شده در جدول ۶ بر اساس مقاومت ۷ روزه چسب می‌باشند. برای اتصال ورقه مطابق شکل ۹، ابتدا سطح دال را تمیز نموده و به صورت کامل سطح دال را به مخلوط چسب آغشته می‌کنیم.



شکل ۶- آماده‌سازی و روغن زدن قالب‌های چوبی



Types of Strengthening the Slabs

Unit: mm

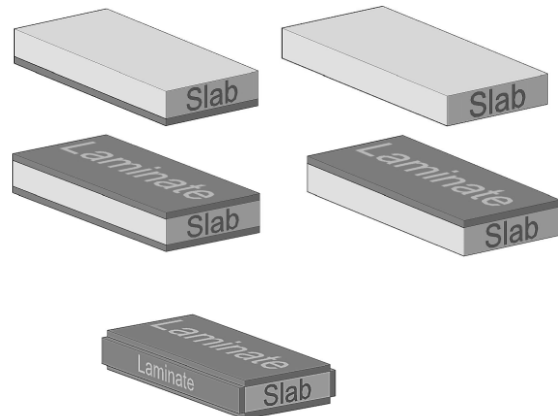
شکل ۸- محل‌های قرارگیری ورقه‌های بتن توانمند الیافی



شکل ۹- آغستن سطح دال به مخلوط چسب جهت چسباندن ورقه بتن توانمند الیافی

جدول ۶- مشخصات چسب اپوکسی مصرفی

مقاومت فشاری	مقاومت خمشی	مقاومت کششی	وزن مخصوص	حالت فیزیکی	پایه
Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	gr/cm ³		
۹۵۰	۳۸۰	۱۷۰	۱/۶۷	خمیر	اپوکسی



شکل ۷- نمای سه بعدی نمونه‌ها

۲-۴- نحوه‌ی مقاوم‌سازی

اگرچه برخی از محققین برای اتصال ورقه‌های بتن توانمند الیافی به محل مقاوم‌سازی از ترکیب چسب اپوکسی و پیچ استفاده کرده‌اند [۱۶]، اما با توجه به انطباق سختی کامپوزیت الیافی و بتن و عدم نگرانی از لغزش ورقه روی بتن، متداول‌ترین روش اتصال ورقه به بتن، استفاده از چسب اپوکسی به تنهایی است.

البته محققین برای اطمینان از کامل بودن اتصال، ایجاد یک شبکه از شیارهای نازک و کم‌عمق را پیشنهاد کرده‌اند [۱۷].

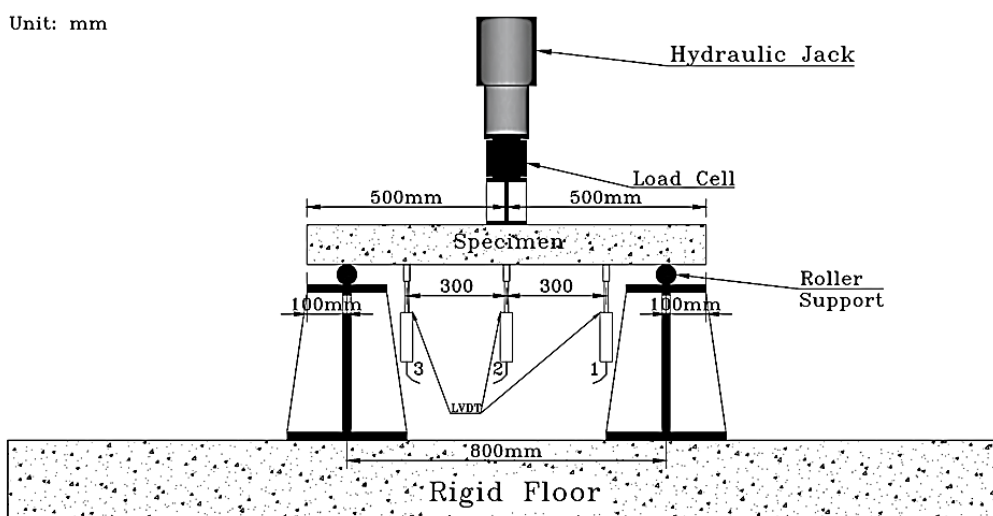
برای ضخامت ورقه‌های بتن توانمند الیافی پیش‌ساخته، محققین ضخامت‌های در محدوده $t = 0.05h$ تا $t = 0.15h$ را پیشنهاد کرده‌اند [۱۸]. همچنین یکی از ضخامت‌های مورد توجه اکثر محققین $t = 0.1h$ است [۱۷ و ۱۹]. در روابط فوق t ضخامت لایه مقاوم‌سازی و h ارتفاع کلی مقطع است.

در این بررسی آزمایشگاهی از ورقه‌های با ضخامت ۲٫۵ سانتی‌متر استفاده شده است. در شکل‌های ۷ و ۸ جزئیات و محل اتصال

۲-۵- چیدمان آزمایش

برای آزمایش نمونه‌ها از چیدمان آزمایشگاهی همانند شکل ۱۰ استفاده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌گردد از بارگذاری سه‌نقطه‌ای برای انجام آزمایش‌ها استفاده می‌شود. در شکل ۱۰ محل قرارگیری سه تغییر مکان‌سنج و فواصل بین آن‌ها ارائه شده است. بارگذاری به‌صورت استاتیکی است که توسط جک هیدرولیک صورت خواهد پذیرفت. میزان جابجایی نمونه تحت بارگذاری توسط تغییر مکان‌سنج‌ها که همان‌طور مشاهده می‌شود

در زیر نمونه قرار داده شده‌اند، کنترل و ثبت می‌شود. لازم به ذکر است که جک هیدرولیک به بارسنج متصل شده و بار جک توسط آن به دستگاه ثبات داده‌ها ارسال شده و خوانده خواهند شد. برای بررسی کرنش میلگردها با نصب کرنش‌سنج‌هایی در زیر محل بارگذاری همان‌طور که پیش‌تر ارائه گردید، کرنش‌های میلگرد فشاری و میلگردهای کششی به دستگاه ثبات داده‌ها ارسال شده و زمان تسلیم شدن آن‌ها را با توجه به نتایج آزمایش کشش مستقیم میلگردها می‌توان استخراج نمود.



شکل ۱۰- چیدمان آزمایش

۳- نتایج و بحث و بررسی

• مشاهدات اولیه

محل چسبندگی ورقه به دال مشاهده می‌شود که امکان جداشدگی دارد.

در نمونه $S1 + LT$ ، در بار ۳۰۰۰ کیلوگرم اولین ترک ناحیه کششی در زیر محل بارگذاری مشاهده می‌گردد. در بار ۳۳۰۰ کیلوگرم ترک‌های جدیدی در ناحیه کششی مشاهده و عرض ترک اولیه گسترش می‌یابد. در بار ۳۵۰۰ کیلوگرم عرض ترک زیرین در ناحیه کششی افزایش چشم‌گیری دارد.

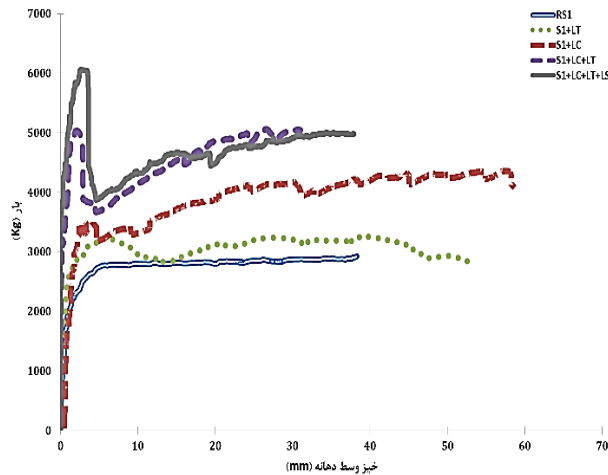
در نمونه $S1 + LC + LT$ ، در بار ۳۳۰۰ کیلوگرم، ورقه ناحیه فشاری در زیر محل بارگذاری دچار اولین ترک می‌شود. در بار ۴۰۰۰ کیلوگرم اولین ترک در ناحیه کششی رخ می‌دهد که این به‌صورت سرتاسری است.

در نمونه $S1 + LC + LT + LS$ ، در بار ۳۷۰۰ کیلوگرم، اولین ترک‌ها در ورقه کششی در زیر محل بارگذاری مشاهده می‌شود. در بار ۴۰۰۰ کیلوگرم ترک‌هایی اولیه به ورقه‌های کناری گسترش

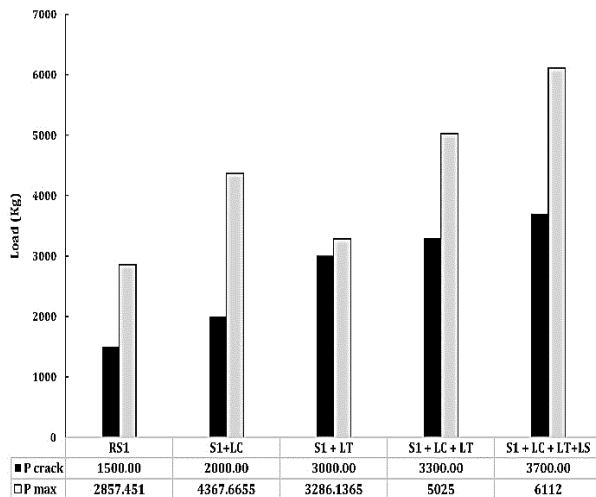
در نمونه $RS1$ ، در بار ۷۵۰ کیلوگرم، در محل اعمالی بار (در قسمت فوقانی نمونه) ترک‌هایی مشاهده می‌گردد. در بار ۱۵۰۰ کیلوگرم، در زیر محل‌های بار اعمالی، یک ترک خمشی قائم مشاهده می‌شود. در بار ۲۵۰۰ کیلوگرم، همچنان ترک‌های قبلی بازتر شده و ترک جدیدی مشاهده نمی‌شود.

در نمونه $S1+LC$ ، در بار ۲۰۰۰ کیلوگرم اولین ترک در ورقه قابل مشاهده است. در بار ۲۵۰۰ کیلوگرم ترک ورقه گسترش یافته است. در بار ۳۵۰۰ کیلوگرم، ترک‌های قبلی افزایش عرض می‌دهند و ترک جدیدی مشاهده نمی‌گردد. در بار ۳۶۰۰ کیلوگرم در ناحیه کششی دال، ترک‌های قائمی در زیر محل بارگذاری مشاهده می‌شود. در بار ۳۸۰۰ کیلوگرم ترک کششی به‌صورت سرتاسری در زیر نمونه ایجاد شده است. در این بار ترک‌هایی در

ظرفیت باربری خود را ازدست داده است. نکته قابل توجه وجود قله در منحنی نمونه‌های $S1+Lc+LT$ و $S1+Lc+LT+Ls$ است، که این رفتار به دلیل سختی بالای این نمونه‌ها است. در شکل ۱۳، مقایسه بین بار اولین ترک و بار حداکثر در نمونه‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۱۲- منحنی‌های بار-خیز نمونه‌ها



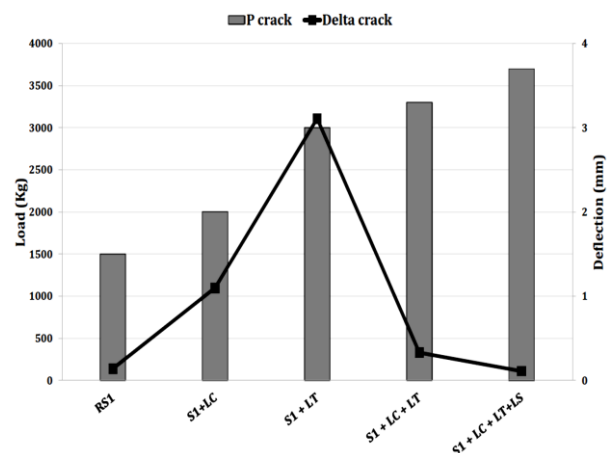
شکل ۱۳- مقایسه بار اولین ترک و بار حداکثر در نمونه‌ها

• منحنی بار- کرنش کششی

همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد، میلگردهای نمونه $S1+Lc+LT+Ls$ در بار بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. پس از نمونه مذکور به ترتیب میلگردهای نمونه $S1+Lc+LT$ ، نمونه $S1+Lc$ و نمونه $S1+LT$ با تأخیر بیشتری نسبت به نمونه شاهد وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند. نکته قابل توجه در شکل ۱۴، تأخیر چشمگیر جاری شدن میلگردهای کششی نمونه مقاوم‌سازی در ناحیه کششی، فشاری و جوانب نسبت به سایر نمونه‌ها است.

می‌بایند. تا رسیدن بار به ۵۰۰۰ کیلوگرم ترک جدیدی مشاهده نمی‌شود و تنها عرض ترک‌های اولیه افزایش می‌یابد. در بار ۵۵۰۰ کیلوگرم ترک‌های جدیدی در نزدیکی ترک‌های اولیه با زاویه ۴۵ درجه ایجاد شده‌اند. در بار ۶۰۰۰ کیلوگرم ترک سرتاسری عمیقی در زیر نمونه ایجاد شده است. در بار ۶۲۰۰ کیلوگرم، خیز میانی به صورت ناگهانی به ۵۰ میلی‌متر افزایش یافته است. همچنین در این بار احتمال جداشدگی ورقه بالایی از دال وجود دارد. پس از افت ناگهانی بارگیری نمونه، دال با سرعت بیشتری دچار افزایش خیز می‌شود.

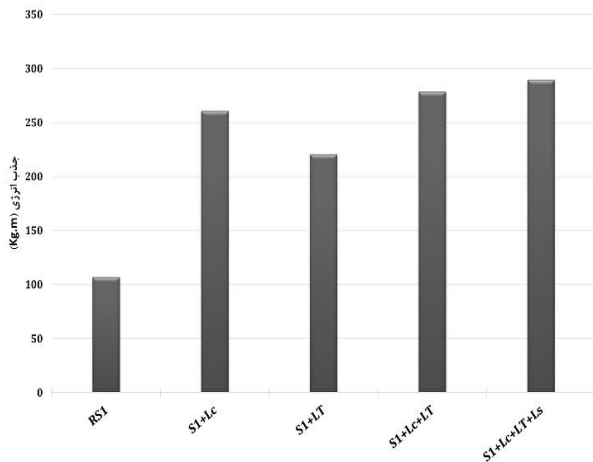
در شکل ۱۱، مقایسه بین میزان بار اولین ترک و خیز متناظر با آن در نمونه‌ها مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در نمونه مقاوم‌سازی شده در ناحیه کششی، اولین ترک در بار بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها مشاهده می‌شود.



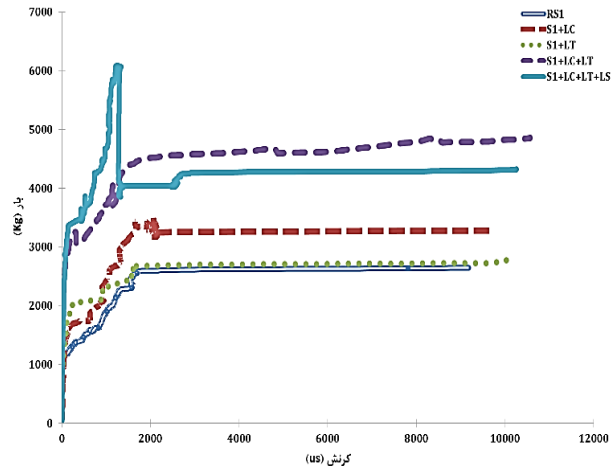
شکل ۱۱- مقایسه بار اولین ترک و خیز متناظر با آن در نمونه‌ها

• منحنی بار-خیز

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد، نمونه مقاوم‌سازی شده در نواحی کششی، فشاری و جوانب ($S1+Lc+LT+Ls$) نسبت به سایر نمونه‌ها باربری بیشتری داشته است. همچنین شاهد کم بودن خیز آن در بار معین نسبت به سایر نمونه‌ها هستیم. ظرفیت باربری نمونه $S1+Lc+LT$ حدود ۱۵ درصد از نمونه $S1+Lc+LT+Ls$ کمتر است. لازم به ذکر است که نمونه مقاوم‌سازی شده در ناحیه فشاری ($S1+Lc$) نسبت به نمونه مقاوم‌سازی در ناحیه کششی ($S1+LT$)، حدود ۱۰ درصد ظرفیت باربری بیشتری دارد. همان‌گونه که انتظار داشتیم، نمونه مرجع ($RS1$) برخلاف نمونه‌های مقاوم‌سازی شده به صورت ناگهانی



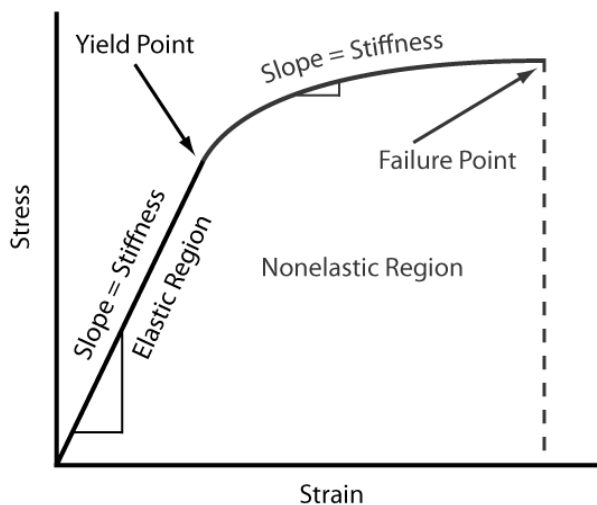
شکل ۱۶- مقایسه انرژی جذب شده در نمونه‌ها



شکل ۱۴- مقایسه منحنی‌های بار-گرنش کششی نمونه‌ها

• **سختی**

همان‌طور که در شکل ۱۷ مشخص است، شیب منحنی بار-خیز برابر با سختی نمونه است. بنابراین با استفاده از شکل ۱۲ می‌توان استنتاج نمود که نمونه $S1+LC+LT+LS$ دارای سختی بیشتری نسبت به نمونه‌ها است و بعد از نمونه $S1+LC+LT+LS$ بیشترین سختی است. ذکر این نکته ضروری است که همان‌طور که قبلاً اشاره شد، این سختی چشم‌گیر این نمونه‌ها باعث به وجود آمدن قله در منحنی بار-خیز آن‌ها شده است و این نمونه‌ها بلافاصله بعد از بار حداکثر اعمالی به‌صورت ناگهانی سختی خود را از دست می‌دهند و نمونه دچار افت زیادی در بارگیری می‌شود. اما در سایر منحنی بار-خیز نمونه‌ها شیب منحنی به‌صورت ملایم‌تری تغییر کرده به‌عبارت‌دیگر سختی آن‌ها تغییرات ملایم‌تری از خود نشان داده است.

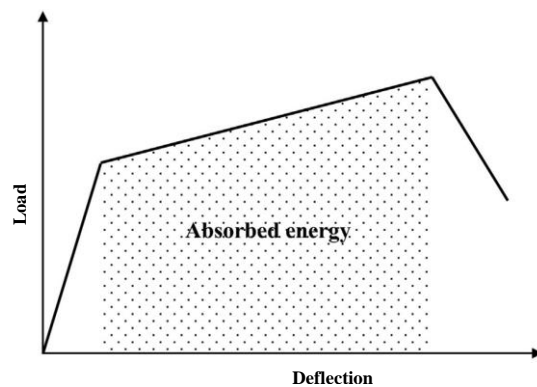


شکل ۱۷- سختی در منحنی بار-خیز

همچنین این نکته از شکل ۱۴ قابل‌برداشت است که با افزودن ورقه بتن توانمند الیافی به ناحیه فشاری، این عمل باعث می‌شود که تار خنثی مقطع به سمت پایین کشیده شود و در نتیجه آن نیروی بیشتری برای جاری کردن میلگردهای ناحیه کششی نیاز است؛ که این مورد در منحنی شکل ۱۴ کاملاً مشهود است.

• **جذب انرژی**

برای محاسبه میزان انرژی جذب‌شده در هر نمونه بایستی مساحت زیر منحنی بار-خیز آن نمونه را به دست آورد که این مساحت در شکل ۱۵ نشان داده است.



شکل ۱۵- نحوه محاسبه انرژی جذب شده

همان‌گونه که در شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد، نمونه مطابق $S1+LC+LT+LS$ بیشترین ظرفیت جذب انرژی را از خود نشان داده است. ظرفیت جذب انرژی نمونه $S1+LC+LT$ حدوداً برابر با نمونه $S1+LC+LT+LS$ است. پس از دو نمونه مذکور، نمونه $S1+LC$ بیشترین میزان جذب انرژی را دارد. نمونه مرجع $RS1$ نیز کمترین میزان جذب انرژی را دارد.

• شکل پذیری

گردیده‌اند. مطابق جدول ۷، بیشترین نسبت شکل‌پذیری مربوط به نمونه $S1+Lc+Lt+Ls$ و $S1+Lc+Lt$ است. همچنین نمونه $S1+Lc$ شکل‌پذیری تقریباً نزدیکی به دو نمونه مذکور دارد، که می‌توان گفت مقاوم‌سازی در ناحیه فشاری بیشترین تأثیر بر روی شکل‌پذیری بر نمونه‌ها را داشته است. در شکل ۱۸ مقایسه بین نسبت شکل‌پذیری و بار حداکثر در نمونه‌ها مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه در این نمودار نسبت شکل‌پذیری بیشتر نمونه مقاوم‌سازی در ناحیه کششی با توجه به ظرفیت باربری کم آن می‌باشد.

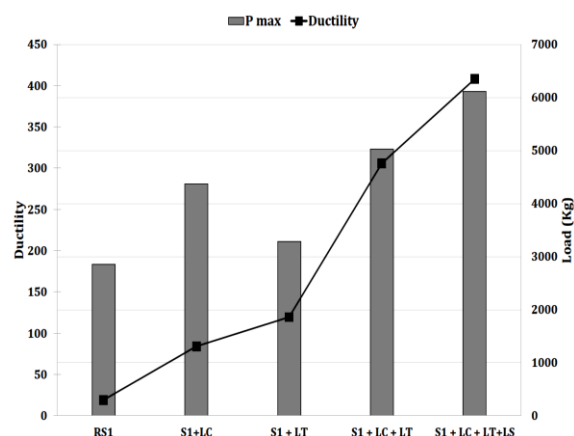
برای محاسبه شکل‌پذیری به این منوال اقدام شده که بار تسلیم P_y (باری که در آن نمونه وارد ناحیه غیرخطی می‌شود و میلگردها شروع به تسلیم شدن می‌کنند.) قرائت گردیده و جابجایی متناظر با آن (Δ_y) برداشت می‌شود. در ادامه بار نهایی $(P_u \cong 0.85P_{max})$ و جابجایی متناظر با آن (Δ_u) قرائت گردیده. نسبت شکل‌پذیری از رابطه $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ به دست می‌آید. مقادیر محاسبه‌شده برای شکل‌پذیری نمونه‌های گروه اول در جدول ۷ ارائه

جدول ۷- شکل‌پذیری نمونه‌ها

Specimen	Δ_y	P_y	Δ_u	P_u	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{P_u}{P_u(RS2)}$	$\frac{\Delta_u}{\Delta_u(RS2)}$	$\frac{\mu}{\mu(RS2)}$
RS1	2	1200	38.3	2484.74	19.15	1.00	1.00	1.00
S1+Lc	0.81	1605	68.1	3797.97	84.07	1.53	1.78	4.39
S1+Lt	0.43	2012.3	51.4	2857.51	119.53	1.15	1.34	6.24
S1+Lc+Lt	0.15	2896.2	45.9	4293.18	306.00	1.73	1.20	15.98
S1+Lc+Lt+Ls	0.1	3250.7	40.8	4335.25	408.00	1.74	1.07	21.31

الیافی در ناحیه فشاری تعداد ترک‌ها را کاهش داده اما باعث ایجاد ترک با عرض و عمق بیشتری در نمونه می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که هنگام استفاده از ورقه بتن توانمند الیافی به‌طور هم‌زمان در ناحیه کششی و فشاری همان‌طور که قبلاً بیان شد باعث افزایش سختی نمونه شد و در نتیجه آن، در بار نهایی نمونه ترک‌های در محل اتصال ورقه به دال به وجود می‌آیند و این خود باعث جدایش ورقه بتن توانمند الیافی از دال در ناحیه فشاری می‌شود.

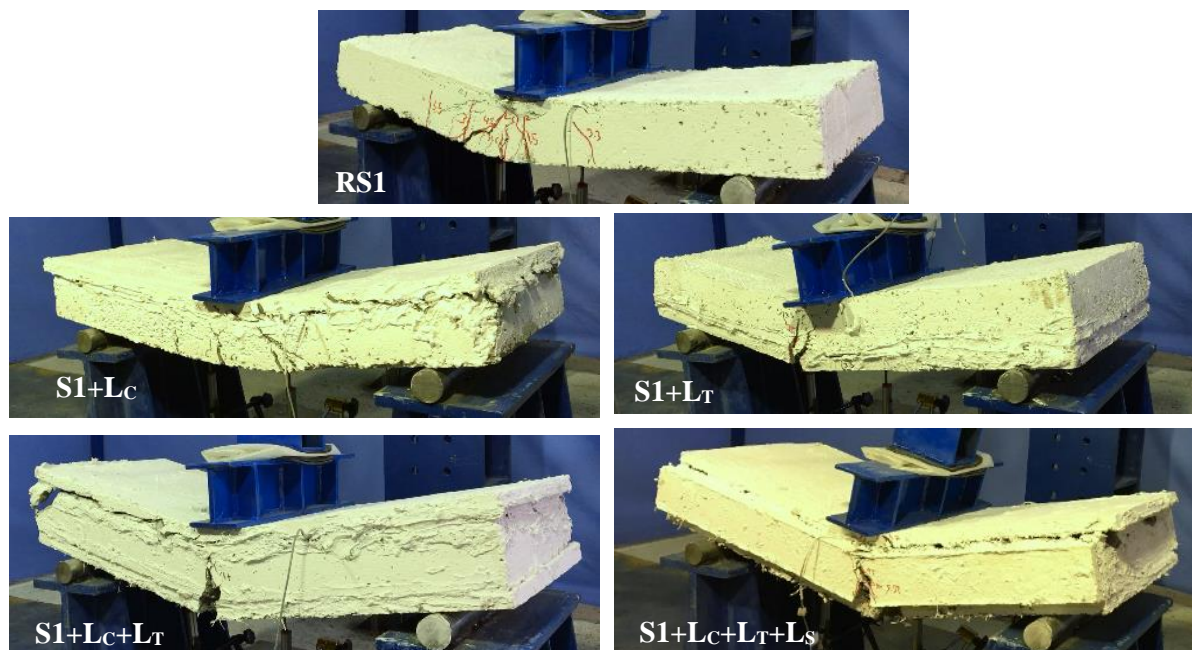
مطابق شکل ۱۹، نمونه $S1+Lc$ نسبت به سایر نمونه‌ها شکست نرم‌تری داشته است. همچنین وجود ترک در محل اتصال ورقه‌های ناحیه فشاری مشهود است. مطابق مشاهدات صورت گرفته، تنها در نمونه $S1+Lc$ ورقه بتن توانمند الیافی و دال به‌صورت سرتاسری دچار ترک شده‌اند و همان‌طور که در شکل (۴-۷) مشاهده می‌شود، در سایر نمونه‌های مقاوم‌سازی شده، ورقه بتن توانمند الیافی و دال تنها در زیر محل بارگذاری دچار ترک شده‌اند. علاوه بر این می‌توان گفت که با افزایش سختی نمونه (مقاوم‌سازی نمونه در وجه‌های مختلف)، امکان جدایش گگی بین ورقه بتن توانمند الیافی و دال افزایش می‌یابد.



شکل ۱۸- مقایسه بین شکل‌پذیری و بار حداکثر در نمونه‌ها

• مد شکست و الگوی ترک نمونه‌ها

مد شکست و الگوی ترک نمونه جهت بررسی عملکرد ورقه‌های بتن توانمند الیافی در کنترل این دو مورد، مدنظر است. همان‌طور که در شکل‌های ۱۹ مشاهده می‌شود، تمامی نمونه‌ها دچار شکست خمشی شده‌اند. همچنین استفاده از ورقه بتن توانمند الیافی در ناحیه فشاری دال ضعیف باعث می‌شود که ترک‌های با عرض کمتری در نمونه ایجاد شوند، لازم به ذکر است تعداد ترک‌ها در این حالت بیشتر است. استفاده از ورقه بتن توانمند



شکل ۱۹- مد شکست و الگوی ترک نمونه‌ها

۴- نتیجه‌گیری

- افزودن ورقه بتن توانمند الیافی در ناحیه فشاری موجب دیرتر جاری شدن میلگردهای کششی نمونه می‌شود.
- استفاده از ورقه‌های بتن توانمند الیافی به صورت هم‌زمان در تمامی نواحی دال موجب افزایش چشم‌گیر سختی آن و کاهش خیز نمونه می‌شود.

با در نظر گرفتن نتایج آزمایشگاهی نمونه مرجع و نمونه‌های مقاوم‌سازی با استفاده از بتن توانمند الیافی، نتایج ذیل حاصل می‌گردد:
- استفاده از بتن توانمند الیافی تأثیر بسزایی در افزایش میزان ظرفیت باربری، میزان جذب انرژی و شکل‌پذیری دال یک‌طرفه دارد. به عبارت دیگر، استفاده از بتن توانمند الیافی به عنوان یک روش در مقاوم‌سازی اجزای سازه‌ای از جمله دال‌ها، در بهبود رفتار سازه‌ای دال‌های یک‌طرفه مؤثر خواهد.

۵- مراجع

- [1]. Brandt AM. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Compos Struct.* 2008;86(1):3-9.
- [2]. Curbach M, Jeese F. High-performance textile-reinforced concrete. *Struct Eng Int.* 1999;9:289-91.
- [3]. W. Reinhardt H, Krüger M, U. GroBe C. Concrete Prestressed with Textile Fabric. *Adv Concr Technol.* 2003;1(No. 3):231-9.
- [4]. Hemmati A, Kheyroddin A, Sharbatdar MK. Using HPRCC for Increasing the Capacity of a R.C. Frame. *Sci J Manag Syst.* 2013;29-2(3):97-106.
- [5]. Banthia, N., Zanotti, C., Sappakittipakorn, M. (2014). Sustainable fiber reinforced concrete for repair applications. *Construction and Building Materials*, 67, 405-12.
- [6]. Rashiddadash P, Ramezani pour AA, Mahdikhani M. Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice. *Constr Build Mater.* 2014;51:313-20.

- با توجه به بررسی‌های آزمایشگاهی انجام‌شده، بیشترین تأثیر در بهبود رفتار سازه‌ای دال یک‌طرفه مربوط به حالتی است که ورقه بتن توانمند حالتی به صورت کامل نواحی کششی، فشاری و جوانب نمونه را پوشش داده است؛ اما با توجه به هزینه‌بر بودن این روش مقاوم‌سازی و نتایج استخراج‌شده از آزمایش‌های انجام‌شده، استفاده از ورقه بتن توانمند الیافی در ناحیه فشاری به‌ویژه در دال‌های یک‌طرفه‌ای که دارای درصد فولاد کمتری می‌باشند، بجای پوشش تمامی نواحی دال یک‌طرفه توصیه می‌شود چراکه از لحاظ بهبود رفتار سازه‌ای و صرفه اقتصادی کاملاً توجیه‌پذیر است.
- استفاده از روش مقاوم‌سازی در ناحیه فشاری، باعث می‌شود نمونه به صورت نرم‌تری دچار شکست شود به نحوی که آن ترک‌های کوچک و متعددی ایجاد می‌شود.

- [7]. Pujadas P, Blanco A, Cavalaro SHP, de la Fuente A, Aguado A. Multidirectional double punch test to assess the post-cracking behaviour and fibre orientation of FRC. *Constr Build Mater.* 2014;58:214–24.
- [8]. Chi Y, Xu L, Yu H. Constitutive modeling of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete using a non-associated plasticity and its numerical implementation. *Compos Struct.* 2014;111:497–509.
- [9]. Hossain KMA, Lachemi M, Sammour M, Sonebi M. Strength and fracture energy characteristics of self-consolidating concrete incorporating polyvinyl alcohol, steel and hybrid fibres. *Constr Build Mater.* 2013;45:20–9.
- [10]. Facconi L, Minelli F, Plizzari G. Steel fiber reinforced self-compacting concrete thin slabs – Experimental study and verification against Model Code 2010 provisions. *Eng Struct.* 2016;122:226–37.
- [11]. Yoo D-Y, Banthia N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cem Concr Compos.* 2016;73:267–80.
- [12]. Lampropoulos AP, Paschalis SA, Tsioulou OT, Dritsos SE. Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Eng Struct.* 2016;106:370–84.
- [13]. Gholamhoseini A, Khanlou A, MacRae G, Scott A, Hicks S, Leon R. An experimental study on strength and serviceability of reinforced and steel fibre reinforced concrete (SFRC) continuous composite slabs. *Eng Struct.* 2016;114:171–80.
- [14]. Hemmati A, Kheyroddin A, Sharbatdar M, Park Y, Abolmaali A. Ductile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composite (HPFRCC) frames. *Constr Build Mater.* 2016;115:681–9.
- [15]. Wille K, Kim DJ, Naaman AE. Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. *Mater Struct.* 2011;44(3):583–98.
- [16]. Bedirhanoglu I, Ilki A, Kumbasar N. Precast fiber reinforced cementitious composites for seismic retrofit of deficient rc joints – A pilot study. *Eng Struct.* 2013;52:192–206.
- [17]. Alaei FJ, Karihaloo BL. Retrofitting of Reinforced Concrete Beams with CARDIFRC. *J Compos Constr.* 2003;7(3).
- [18]. Safdar M, Matsumoto T, Kakuma K. Flexural behavior of reinforced concrete beams repaired with ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). *Compos Struct.* 2016;157:448–60.
- [19]. Martinola G, Meda A, Plizzari GA, Rinaldi Z. Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete. *Cem Concr Compos.* 2010;32(9):731–9.

Experimental Study on the Effect of the Placement of Precast HPFRC Laminates on flexural behavior of Weak One-Way Slabs

Ali Kheyroddin *

Full Professor, Civil Engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran,

Mohammad Afrooznia

M.Sc. Student, Civil Engineering Faculty, Semnan University, Semnan, Iran,

Ahmad Dalvand

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran

Abstract

One of the important subjects in the concrete structure field is rehabilitation. The goal of rehabilitation is made equivalent between the structural capacity and the seismic demand of it. In some cases, the structural capacity should be increased so that it equals to the seismic demand. This increasing structural capacity is called strengthening. The strengthening is including two methods: By increasing stiffness (adding bracing, shear wall etc.) or increasing strength (steel jackets etc.). One method of strengthening is the approach of using a special concrete with high capabilities. Experimental studies have been carried lately about strengthening with HPFRCC on beams, columns, slabs and the other structural elements and the strength of this concrete has been confirmed in strengthening. In the following, the experimental study on strengthening of weak one way slabs with precast high performance fiber concrete laminates will be investigated. In this paper, we use HPFRC laminates. The location of laminates is the variable parameters, too. The aim is reaching the best method of strengthening weak one-way slabs with HPFRC. The experimental evidences show that using high-performance fiber concrete laminates is caused to increase bearing capacity (about two times larger than the reference slab), absorbed energy (about three times larger than the reference slab) and ductility (about twenty times larger than the reference slab). In addition, pasting the laminates into tensile, compression and sides' zone of the RC slabs has the best result.

Keywords: One-Way Slab, High Performance Fiber Concrete, Strengthening with HPFRC, HPFRC laminate, Flexural strength.

* Corresponding Author: kheyroddin@semnan.ac.ir