

تقویت دال‌های بتن آرمه یک‌طرفه به کمک ورق‌های پیش‌ساخته کامپوزیتی سیمانی با الیاف ماکرو سنتتیک (HPFRCC) با تعبیه شیارهای سطحی



مجید عرب حسن آبادی
کارشناس ارشد مهندسی عمران
گروه مهندسی عمران
دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان



مسعود خابوری
کارشناسی ارشد مهندسی عمران
گروه مهندسی عمران
دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان



علی خیرالدین
استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه
سمنان، گروه مهندسی عمران

چکیده

اهمیت بررسی روش‌های موجود و تحقیق بر روی روش‌های جدید در جهت افزایش مقاومت سازه‌ای ضروری می‌باشد. از این‌رو تعمیر و تقویت این سازه‌ها با استفاده از مصالح نوین مهندسی مانند کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC) که از هر نظر در خصوصیات مکانیکی با بتن یکسان و همگن است، می‌تواند امری حیاتی و مقرون‌به‌صرفه باشد. در این تحقیق رفتار خمشی دال‌های تقویت‌شده با ورق‌های پیش‌ساخته کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC) با الیاف سنتتیک با تعبیه شیارهای سطحی و به کمک مدل‌های آزمایشی تمام‌مقیاس مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه دال بتن آرمه یک‌طرفه به ابعاد $114 \times 50 \times 10$ cm و طرح اختلاط بتن یکسان با مقاومت مشخصه $f_c = 210$ kg/cm² و طبق آیین‌نامه ACI 318 طراحی و ساخته شده است. یک دال به‌عنوان دال مرجع نرمال که با چهار عدد آرماتور نمره ۸ در ناحیه کششی مسلح گردید، در نظر گرفته شد. بقیه دال‌ها با کاهش ۵۰ درصد آرماتور کششی ضعیف شدند که از دال‌های ضعیف یک دال به‌عنوان دال مرجع (ضعیف تقویت‌نشده) و دو دال دیگر با ورق‌های پیش‌ساخته HPFRCC در ناحیه کششی دال تقویت شدند. لمینت‌ها با چسب اپوکسی با تعبیه شیار (توسط چار تراش) به دال متصل شدند. کلیه دال‌ها پس از آماده‌سازی مورد آزمایش خمشی خالص نقطه‌ای قرار گرفتند. در حین آزمایش نیروها و تغییر مکان‌ها ثبت شدند و وضعیت ترک‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد مقاومت خمشی دال‌های تقویت‌شده نسبت به دال ضعیف تقویت‌نشده رشدی بین ۲۰۰ تا ۳۵۰ درصدی داشت و تغییر مکان‌ها محدودتر شدند.

کلمات کلیدی: دال بتن آرمه یک‌طرفه، الیاف ماکرو سنتتیک، شیارهای سطحی، HPFRCC

بتن معمولی و مصالح *HPFRCC* وجود ندارد و هدف اصلی این محققان، بررسی بر روی دوام و عرض ترک‌های ایجادشده در این تیرها بوده است [۳].

آزمایش‌های دیگری نیز در زمینه بررسی رفتار اعضای خمشی ساخته‌شده از مصالح *HPFRCC* توسط فیشر^۷ ولی، انجام شده است. این محققین، رفتار خمشی یک ستون بتنی و یک ستون *HPFRCC* را تحت بار جانبی رفت و برگشتی، با یکدیگر مقایسه کرده‌اند [۴].

نتایج منحنی‌های هیستریسیس بار جانبی-دریفت ستون‌های ساخته‌شده از مصالح *HPFRCC* و بتن معمولی، در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده، نشان می‌دهد که مقاومت جانبی و شکل‌پذیری ستون ساخته‌شده از مصالح *HPFRCC* نسبت به ستون ساخته‌شده از بتن معمولی، بیشتر است. همچنین با توجه به منحنی‌های هیستریسیس به‌دست‌آمده، مشخص است که مقاومت جانبی ستون ساخته‌شده از مصالح *HPFRCC* نسبت به ستون ساخته‌شده از بتن معمولی، در دریفت‌های بالا، افت بسیار کمتری را تجربه کرده است؛ بنابراین ستون ساخته شده از مصالح *HPFRCC*، نسبت به ستون ساخته شده از بتن معمولی، آسیب کمتری را تحمل کرده است و از ظرفیت جذب انرژی بالاتری برخوردار می‌باشد.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی دال‌های بتنی تقویت‌شده می‌باشد. همان‌طور که مشخص است رفتار دال در خمش و تقویت آن با لمینت‌های *HPFRCC* بستگی به درصد الیاف لمینت الیاف و وجود و عدم وجود شیار دارد.

در این آزمایش، دال موردنظر به‌گونه‌ای طراحی گردیده تا در خمش گسیخته گردد، بنابراین رفتار دال دربرش ناچیز بوده و بیشتر تحت خمش رفتار خواهد کرد. در نظر است که به بررسی تقویت خمشی و مقاوم‌سازی دال‌های بتنی ضعیف شده تحت بار خمشی مقاوم‌سازی آن با استفاده از لمینت *HPFRCC* پرداخته

بتن خودتراکم^۱ (*SCC*)، بتنی است که بدون نیاز به لرزش اضافی، بر روی خود، جریان یافته و در قالب جای می‌گیرد و می‌تواند به‌آسانی از میان میلگردهای فولادی متراکم، عبور نماید. با اضافه شدن الیاف به بتن خودتراکم، شکل‌پذیری آن افزایش می‌یابد. با استفاده از الیاف فولادی با اندازه‌ها و مقادیر مختلف در بتن‌های توانمند، خصوصیات ویژه بتن، نظیر کنترل میکرو ترک‌ها، مقاومت کششی و شکل‌پذیری، بهبود می‌یابد. وجود میکرو الیاف‌ها در بتن، تأثیر زیادی بر روی مقاومت فشاری آن دارد؛ اما تأثیر آن بر روی مقاومت کششی بتن، اندک است. استفاده از الیاف فولادی بلندتر، منجر به افزایش مقاومت کششی و طاقت مصالح می‌شود [۱].

مصالح *CARDIFRC* یکی از انواع مصالح *HPFRCC* می‌باشد که در دانشگاه کاردیف ولز، توسط فرهت^۲، نیکلای دیس^۳، کانلوپولوس^۴ و کاری هالو^۵ در سال ۲۰۰۶ ابداع شده است و دارای مقاومت فشاری و مقاومت کششی به ترتیب تا ۲۰۰ و ۲۷ مگا پاسکال می‌باشد. کاربرد اصلی این مصالح، در ترمیم و بهسازی المان‌های سازه‌ای می‌باشد [۲].

میشرا^۶ ولی (۱۹۹۵)، آزمایش‌هایی را بر روی یک تیر بتن مسلح و همچنین یک تیر بتن مسلح که لایه پایینی آن با مصالح *HPFRCC* ساخته شده است، انجام داده‌اند. ابعاد هندسی و جزئیات آرماتور گذاری تیرهای آزمایش شده در شکل ۱ نشان داده شده است. این تیرها، تحت آزمایش خمش دونقطه‌ای قرار داده شده و الگوهای ترک‌خوردگی آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. مشخص است که تفاوت چندانی درلنگر نهایی تیر بتن مسلح و تیر ساخته‌شده از

شود.

¹Self Compacting Concrete

²Farhat

³Nicolaidis

⁴Kanellopoulos

⁵Karihaloo

⁶Mishra

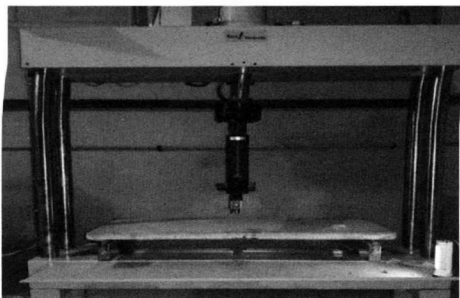
⁷Fischer

طولی به ۲ عدد میلگرد نمره ۸ از ظرفیت کششی دال سالم کاسته شده و نمونه ضعیف شده به دست آمد. مرحله سوم، ساخت نمونه‌های دال بتن آرمه یک‌طرفه آزمایشگاهی بر اساس طراحی صورت گرفته و تعبیه شیار در سطح ناحیه کششی دال جهت اتصال به روش *NSM* و ساخت ۱۰ عدد لیمیت *HPFRCC* به ابعاد $100 \times 40 \times 3 \text{ cm}$ با $1/5$ و ۳ درصد الیاف سننتیک به ازای یک مترمکعب حجم ملات.

مرحله چهارم، پر نمودن شیارها با چسب اپوکسی ۳ جزئی و اتصال لیمیت‌های *HPFRCC* با چسب اپوکسی به ناحیه کششی دال بتن آرمه ضعیف با روش‌های *NSM*. مرحله پنجم، شامل انجام تست خمش بر روی نمونه‌های آماده‌شده به روش ۳ نقطه‌ای (با دو تکیه‌گاه ثابت و اعمال بار متمرکز در وسط دهانه) و ثبت نتایج آزمایشگاهی شامل بار و تغییر مکان لحظه‌ای.

۳- نحوه انتخاب ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی

از آنجایی که هدف از انجام این آزمایش بررسی رفتار خمشی دال‌ها بعد از تقویت بود، لذا الگوی بارگذاری تک نقطه‌ای؛ و تکیه‌گاه‌ها مفصلی انتخاب گردید. تکیه‌گاه‌ها به نحوی در دو طرف اجرا شدند که فاصله‌ی مرکز تا مرکز آن‌ها ۱۰۰۰ میلی‌متر باشد. این طول آزاد به دو قسمت مساوی تقسیم و نیروی متمرکز در وسط نمونه‌ها (به‌صورت متقارن) اعمال شد. نحوه قرار گرفته نمونه بر روی دستگاه تعیین مقاومت خمشی، در شکل ۱ ارائه شده است. نحوه نام‌گذاری دال‌ها در جدول ۱ اشاره شده است.



شکل (۱) دستگاه تعیین مقاومت خمش

در این تحقیق، رفتار دال‌های بتن آرمه یک‌طرفه ضعیف، تقویت‌شده با لمینت‌های از پیش تولید شده *HPFRCC* با الیاف سننتیک به روش‌های *(NSM)* و *(EBR)* به کمک مدل‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله نسبت به رفتار دال بتن آرمه یک‌طرفه ضعیف بدون تقویت (مرجع ضعیف) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۵]. بدین منظور دال بتن آرمه یک‌طرفه به ابعاد $10 \times 50 \times 114 \text{ cm}$ ساخته شدند به طوری که طرح اختلاط بتن تمامی دال‌ها یکسان بوده و نمونه سالم که به عنوان نمونه مرجع (*S*) در نظر گرفته شد با ۴ عدد آرماتور طولی نمره ۸ مسلح گردید و دو دال دیگر با کاهش آرماتورهای طولی به ۲ عدد میلگرد نمره ۸ در ناحیه کششی ضعیف شدند، یک عدد دال بتنی یک‌طرفه ضعیف شده بدون تقویت (*SW*) در نظر گرفته شد و بقیه دال‌های بتنی ضعیف شده در ناحیه کششی خود با لمینت‌های از پیش تولید شده *HPFRCC* به ابعاد $100 \times 40 \times 3 \text{ cm}$ با $1/5$ و ۳ درصد الیاف سننتیک با دو روش *(NSM)* با دو شیار تمامی دال‌ها بر روی ۲ تکیه‌گاه ساده و تحت بار متمرکز در وسط دهانه که از بالا به دال وارد می‌شود تحت بارگذاری سه نقطه‌ای قرار گرفتند. نگاه رفتار تمام دال‌ها شامل نمودار نیرو- تغییر مکان، زمان و بار معادل اولین ترک، نحوه گسترش ترک‌ها، بار نهایی شکست و پدیده جدایشگی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت [۶] و [۷] و [۸] و [۹].

۲- روش‌شناسی تحقیق

مرحله نخست، شامل مطالعات میدانی و کتابخانه‌ای جهت آشنایی با تحقیقات گذشته می‌باشد.

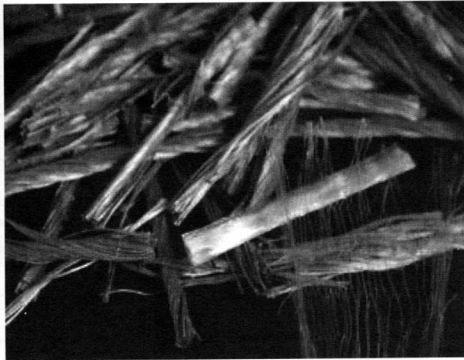
مرحله دوم، طراحی یک عدد دال بتن آرمه یک‌طرفه به ابعاد $10 \times 50 \times 114 \text{ cm}$ با دو تکیه‌گاه ساده و بار متمرکز 2 kN که در وسط دهانه دال به‌صورت متمرکز وارد می‌گردد. (مقاومت مشخصه بتن ۲۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و تنش تسلیم فولاد مصرفی ۳۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شد)، بر اساس طراحی صورت گرفته دال بتنی سالم با ۴ آرماتور طولی نمره ۸ در ناحیه کششی مسلح گردید. با کاهش آرماتورهای

جدول شماره (1) نام‌گذاری نمونه‌های دال بتنی آزمایشگاهی

ردیف	نام نمونه	ابعاد دال (a*b*h)mm	شرح نمونه
۱	S	۱۱۴۰*۵۰۰*۱۰	مرجع سالم (S)
۲	SW	۱۱۴۰*۵۰۰*۱۰	مرجع ضعیف شده (S _{II})
۳	RSWH1.5PN2G6*2	۱۱۴۰*۵۰۰*۱۰	دال تقویت‌شده با لمینت ۱/۵ درصد الیاف ۲- شیار
۴	RSWH3PN2G6*2	۱۱۴۰*۵۰۰*۱۰	دال تقویت‌شده با لمینت ۳ درصد الیاف ۲- شیار

۳-۳-۲- الیاف مصرفی

طبق شکل ۳ الیاف مصرفی از نوع الیاف مصنوعی ماکرو سنتتیک کورتا هست الیاف کورتا یکی از انواع الیاف‌های ماکروسنتتیک است که متشکل از الیاف مرکب پلیمری سازه‌ای و غیر سازه‌ای به شکل تکرشته‌ای متشکل از ریزرشته‌های به هم چسبیده از جنس پلیمر و الیاف شبکه‌ای مش ماکرو و میکرو از جنس پلی الفین و پلی‌پروپیلن اصلاح‌شده نانویی می‌باشد. مشخصات این نوع الیاف طبق نظر شرکت سازنده طبق جدول ۲ می‌باشد. در این تحقیق از نوع کوتاه این نوع الیاف به طول ۱۹ میلی‌متر استفاده شده و در ساخت لمینت های HPRCC با نسبت‌های ۱/۵ و ۳ درصد وزن ملات مورد مصرف قرار گرفته است.



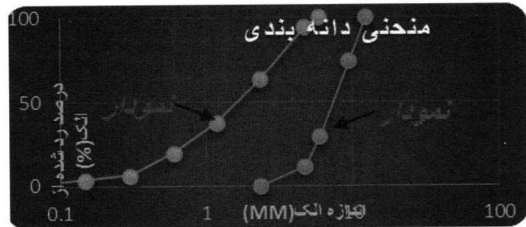
شکل (۳) الیاف ماکروسنتتیک کورتا

در جدول فوق (Slab One Way) S به معنای دال بتن آرمه یک‌طرفه؛ (Slab Weik) SW به معنای دال بتن آرمه ضعیف؛ R (Reinforcement) به معنای تقویت؛ H (HPRCC) به معنای کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند؛ N (Near Surface Mounted) به معنای روش نصب نزدیک سطح؛ عدد * عدد G عدد (Groove) به معنای تعداد شیار با ابعاد عرض * عمق می‌باشد.

۳-۳-۳- مصالح مصرفی

۳-۳-۱- شن، ماسه و سیمان مصرفی

شن مورد استفاده در این آزمایش در محدوده الک ۰/۵۱ اینچ (۱۲/۵ میلی‌متر) تا الک نمره ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر) قرار دارد. ماسه‌ی مورد استفاده در این آزمایش نیز در محدوده‌ی زیر الک نمره ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر) قرار دارد. منحنی دانه‌بندی شن و ماسه‌ی مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. سیمان مصرفی در این آزمایش از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ می‌باشد.



شکل (۲) منحنی دانه‌بندی شن و ماسه مصرفی

جدول (۲) مشخصات الباف ماکرو سنتتیک کورتا

طول (mm)	قطر (μm)	رنگ	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)	چگالی (kg/dm ³)	مقاومت شیمیایی و خوردگی	ماکزیمم ازدیاد طول (درصد)	جذب آب (درصد)
۳۸-۵۴-۱۹	۱۸	طوسی	۸۰۰	۳۵۰۰	۰/۹	کامل	۱۰	۰

۳-۳-۳- آرما تورهای مصرفی

می باشد و برای طول های بزرگ تر، میلگردها را به یکدیگر وصله می کنند و یا در صورت لزوم میلگردهایی با طول بزرگ تر به طور سفارشی تهیه می گردند. برای ساخت دال های مورد آزمایش از دو نوع میلگرد $\phi 8$ به عنوان میلگردهای طولی و از میلگرد $\phi 6$ به عنوان میلگرد عرضی استفاده شده است که جهت دستیابی به مشخصات دقیق میلگردها، آن ها را تحت آزمایش کشش قرار داده و نتایج حاصله در جدول ۳ نشان داده شده است.

میلگردهای فولادی در دو نوع ساده و آجدار تولید می شوند و به علت چسبندگی بهتر میلگردهای آجدار با بتن، امروزه آیین نامه های بتن فقط استفاده از میلگرد آجدار را مجاز می دانند. توصیه فوق مخصوصاً در ساختمان سازی در مناطق زلزله خیز قابل تأکید است. میلگردها در قطرهای ۶ الی ۳۲ میلی متر به راحتی در بازار یافت می شوند، در حالی که برای قطرهای بزرگ تر باید از سفارش مخصوص استفاده کرد. طول معمول میلگردهای تولیدی ۱۲ متر

جدول (۳) نتایج آزمایش کشش میلگردهای مصرفی

تنش نهایی (Mpa)	کرنش تسلیم	تنش تسلیم (Mpa)	قطر اندازه گیر شده (mm)	قطر اسمی (mm)
۳۴۷/۴	۰/۰۰۱۲	۲۵۱/۴	۶/۴۸	۶
۵۰۰	۰/۰۰۱۶۱	۳۵۱/۱۵	۷/۸۰	۸

۴-۳-۳- نوع چسب و مشخصات آن:

۴-۳-۳-۱- چسب اپوکسی:

از تراکم دی فنیلو پروپان و اپی کلر هیدرین حاصل می شود و در تجارت به نام های چسب دوقلو یا چند جزئی متداول است که شامل دو یا سه قسمت است، یک قسمت ماده چسب دار و قسمت دیگر یک ماده کاتالیزور است که موجب تغییر در ماده چسب دار و عمل چسباندگی آن می شود.

۴-۳-۳-۲- مشخصات چسب اپوکسی مصرفی:

پس از ساخت دال ها و لمینت ها برای چسباندن این دو قطعه بهترین گزینه پیش رو چسب اپوکسی سه جزئی (چسب کاشت میلگرد) تولیدی شرکت شیمیایی بود که نسبت مقدار هاردنر به رزین در طرح اختلاط چسب طبق کاتالوگ شرکت سازنده بایستی رعایت گردد و مطابق جدول ۴ از مشخصات فنی مطلوب و چشمگیری برخوردار می باشد.

جدول شماره (۴) مشخصات چسب اپوکسی ۳ جزئی

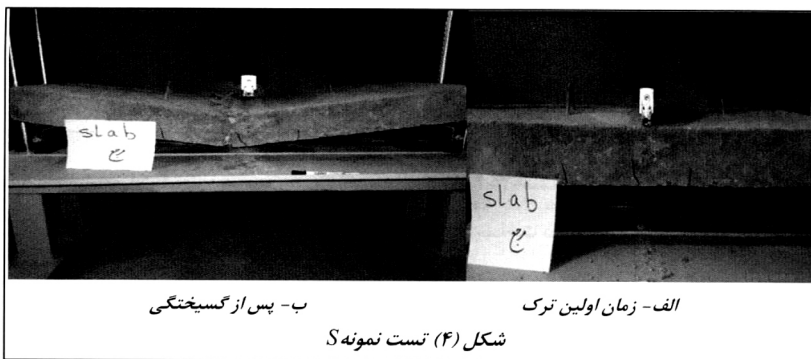
مقاومت فشاری (روزه)	مقاومت خمشی (روزه)	مقاومت کششی (روزه)	وزن مخصوص g/cm ³	حالت فیزیکی	پایه
۹۵۰ kg/cm ²	۳۸۰ kg/cm ²	۱۷۰ kg/cm ²	۱/۶۷	خمیر	اپوکسی

۴-شرح آزمایش و نتایج

۴-۱-دال مرجع نرمال (S)

کرنش سنج این لحظه به عنوان لحظه جاری شدن میلگرد (P_f) در نظر گرفته شد؛ که این مسئله با توجه به محاسبات صورت گرفته که بر اساس آن مشخص گردید کمترین بیشینه بار که تحت آن میلگرد دچار پدیده جاری شدگی می گردد، معادل بار $7/2$ کیلو نیوتن می باشد، لذا از آنجایی که بار ماکزیمم بار $16/34$ کیلو نیوتن می باشد مطمئناً عمل جاری شدن میلگرد به وقوع پیوسته است. لذا بار P_{MAX} را می توان به عنوان P_f یا جاری شدگی در نظر گرفت $\Delta_{u80\%}$ مشخص کننده تغییر مکان دال در 20 درصد افت بار پس از بار نهایی است. پس از گسیختگی نمونه تحت بارگذاری، بارگذاری تا بار گسیختگی آن که $0/80$ درصد بار P_{MAX} در نظر گرفته شده به میزان 13 کیلو نیوتن از روی نمودار بار تغییر مکان مشخص و ثبت گردید و تغییر مکان متناظر 30mm بود. شکل ۴-ب نشان دهنده گسیختگی نمونه می باشد.

دال بتن آرمه یک طرفه S که به عنوان نمونه ی مرجع نرمال در نظر گرفته شد شکل و نحوه آرماتور گذاری آن به صورت متفاوت با سایر دال ها بوده است. نمونه بر روی 2 تکیه گاه ساده قرار گرفته و از طریق جک بارگذاری دستگاه تحت بارگذاری خمش در وسط دهانه به صورت نقطه ای از سمت بالای دال قرار گرفت. پس از استقرار نسبت به شروع بارگذاری با سرعت 1Mpa اقدام گردید. در نیروی $14/92$ کیلو نیوتن تغییر مکان $6/13$ میلی متر، اولین ترک ها در وسط دهانه دال و به صورت متقارن مطابق شکل ۴-الف مشاهده گردید. پس از ادامه یافتن بارگذاری که همراه با گسترش ترک ها در نواحی اعمال بار بوده، نمونه دربار $16/34$ کیلو نیوتن بیشترین باربری را داشته و به میزان $11/85$ میلی متر تغییر مکان داشته است که در این بارگذاری به دلیل محدودیت آزمایش و عدم نصب



۴-۲-دال مرجع ضعیف شده (SW)

پذیرفته شود. در نیروی $6/77$ کیلو نیوتن تغییر مکان $5/25$ میلی متر، اولین ترک ها در وسط دهانه دال و به صورت متقارن مطابق شکل ۵-الف مشاهده گردید. پس از ادامه یافتن بارگذاری که همراه با گسترش ترک ها در نواحی اعمال بار بوده، نمونه دربار $7/97$ کیلو نیوتن بیشترین باربری را داشته و به میزان $20/8$ میلی متر تغییر مکان داشته است که در این بارگذاری به دلیل محدودیت آزمایش و عدم نصب کرنش سنج این لحظه به عنوان لحظه جاری شدن میلگرد (P_f) در نظر گرفته شد؛ که این مسئله با توجه به محاسبات صورت گرفته که بر اساس آن

دال بتن آرمه یک طرفه SW که به عنوان نمونه ی مرجع ضعیف شده در نظر گرفته شد شکل و نحوه آرماتور گذاری آن به صورت یکسان با سایر دال ها و متفاوت با دال نرمال بوده است. پس از استقرار نسبت به شروع بارگذاری با سرعت 1Mpa اقدام گردید. از آنجاکه مشاهده بصری اولین ترک خوردگی در وجه زیرین دال با دقت کافی ممکن نیست، بار اولین ترک خوردگی می تواند به عنوان نقطه ای که پاسخ بار - تغییر مکان از پاسخ الاستیک اولیه منحرف شود

درصد افت بار پس از بار نهایی است. پس از گسیختگی نمونه تحت بارگذاری، بارگذاری تا بار گسیختگی آن که $0.180 P_{MAX}$ درصد بار P_{MAX} در نظر گرفته شده به میزان $24/33$ کیلو نیوتن از روی نمودار بار تغییر مکان مشخص و ثبت گردید. شکل ۵-ب نشان دهنده گسیختگی نمونه می باشد.

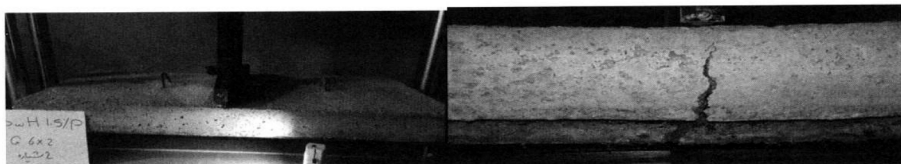
مشخص گردید کمترین بیشینه ی بار که تحت آن میلگرد دچار پدیده جاری شدگی می گردد، معادل بار $7/2$ کیلو نیوتن می باشد، لذا از آنجایی که بار ماکزیمم بار $7/97$ کیلو نیوتن می باشد مطمئناً عمل جاری شدن میلگرد به وقوع پیوسته است $\Delta_{u80\%}$ مشخص کننده تغییر مکان دال در 20



$2/89$ میلی متر، در نمونه تقویت شده، گسیختگی پس از وقوع تسلیم، فراوان ای در مصالح تقویت خمشی رخ داد و همزمان با آن نمونه نیز ترک خورد و ظرفیت باربری نمونه تا بار $13/80 KN$ سقوط کرد که این مقدار بار معادل 71 درصد بار نهایی $19/48 KN$ هست و تغییر مکان معادل این بار $5/1$ میلی متر بود مطابق شکل ۸ ترک ایجاد شده در وسط دهانه دال گسترش پیدا کرده و عرض آن نیز رشد نمود، مجدداً از ظرفیت باربری نمونه بصورت تدریجی کاسته شد به طوری که در تغییر مکان $29/01$ میلی متر میزان بار تحمل شده $8/90 KN$ بود و عرض ترک به بیشترین میزان خود یعنی $11/10$ میلی متر رسید و پس از آن نمونه دیگر از خود ظرفیت خمشی نشان نداده و بارگذاری به اتمام رسید.

۳-۴- پاسخ بار - تغییر مکان نمونه تقویت شده (RSWH1.5PN2G6×2)

دال بتن آرمه ضعیف با آرایش ۲ عدد شیار به عرض 60 میلی متر و عمق 20 میلی متر در فواصل مساوی، در سطح خمش، به منظور تأمین اتصال نزدیک سطح نصب، با لمینت HPRFRC پیش ساخته با $1/5$ درصد الیاف که با چسب اپوکسی به سطح خمش دال متصل شده بود تقویت گردید. شیارها توسط چسب اپوکسی پر شدند. نمونه در آغاز بارگذاری از خود رفتار الاستیک نشان داده و این رفتار خطی با افزایش بار ادامه یافت به طوری که تا قبل از بار $19/48 KN$ و تغییر مکان $2/89$ میلی متر تقریباً هیچ گونه تغییری در شیب منحنی رخ نداد و ترکی نیز در مقطع دال مشاهده نگردید در لحظه بار $19/48 KN$ و تغییر مکان



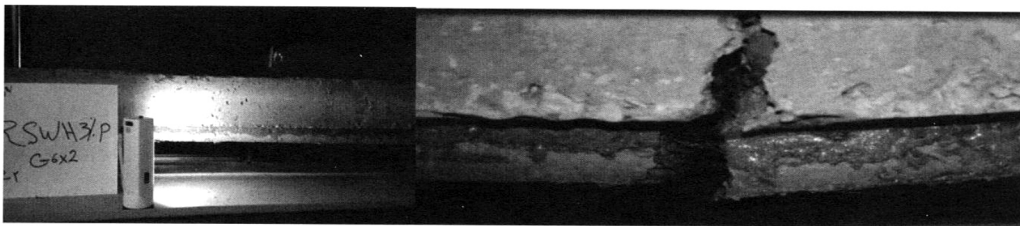
شکل (۷) کسبخته شدن نمونه و افت بار

شکل (۶) استقرار نمونه

۴-۴- پاسخ بار، تغییرمکان نمونه تقویت شده

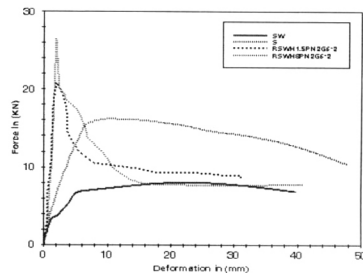
(RSWH3PN2G6×2)

دال بتن آرمه ضعیف با آرایش ۲ عدد شیار به عرض ۶۰ میلی متر و عمق ۲۰ میلی متر در فواصل مساوی، در سطح خمش، به منظور تامین اتصال نزدیک سطح نصب، با لمینت HPRCC با ۳ درصد الیاف که با چسب اپوکسی به سطح خمش دال متصل شده بود تقویت گردید. شیارها توسط چسب اپوکسی پر شدند. پس از قرارگیری بر روی دو تکیه گاه ساده و قرار گرفتن جک بارگذاری بر روی نمونه با سرعت یکنواخت 1 Mpa/min بصورت استاتیکی با بار متمرکز تک نقطه ای تحت بارگذاری قرار گرفت. نمونه در آغاز بارگذاری از خود رفتار الاستیک نشان داده و این رفتار خطی با افزایش بار ادامه یافت به طوری که تا قبل از بار $26/1 \text{ KN}$ و تغییر مکان $1/89$ میلی متر تقریباً هیچگونه تغییری در شیب منحنی رخ نداد و ترکی نیز در مقطع دال مشاهده نگردید در لحظه بار $26/1 \text{ KN}$ و تغییر مکان $1/89$ میلی متر، در نمونه تقویت شده، گسیختگی پس از وقوع تسلیم قابل ملاحظه ای در مصالح تقویت



شکل (۹) استقرار نمونه

شکل (۱۰) گسترش ترک و افزایش ترک و پل زدن الیاف



شکل (۱۰) نمودار کلی نمونه ها

۵- نتایج

رفتار سخت شونده‌گی کرنشی تحت کشش باعث شده است که الیاف به خاطر پل زدن، افزایش تعداد ترک‌ها و با عرض ترک کم، افزایش میرایی نیروی زلزله را مستهلک می‌گرداند. این الیاف در مقاومت فشاری نقش چندانی نداشته و در کشش بتن نقش دارد و کرنش آن را بالا می‌برد و تاثیر گذاری آن روی سختی کاملاً مشهود بوده و در شکل پذیری تاثیر چندانی ندارد و می‌توان به نتایج زیر به عنوان نتیجه گیری اشاره نمود.

۱. افزایش سختی نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه مرجع کاملاً مشهود است؛ با عنایت به اینکه رفتار سخت‌شونده‌گی تحت کشش مصالح *HPFRCC* باعث شده است به خاطر پل زدن الیاف نمونه‌های تقویت شده ظرفیت باربری و سختی بیشتری را تحمل نمایند.

۲. نتایج آزمایش نشان داد که استفاده از لمینت‌های *HPFRCC* یک روش قابل اجرا و سودمند برای تقویت خمشی دال‌های یک طرفه بتن مسلح با پوشش بتن کم می‌باشد.

۳. با استفاده از چسب اپوکسی سه جزئی، می‌توان از جداسدن لمینت‌های *HPFRCC* چسبیده خارجی، از سطح بتن جلوگیری نمود. لذا از این پس تقویت دال‌های بتن آرمه یک طرفه موجود با استفاده از روش‌های چسبیده خارجی و نزدیک سطح، بدون نگرانی از بابت جداسدن لمینت *HPFRCC* از سطح بتن و بهره‌گیری از ظرفیت کامل مصالح تقویت می‌تواند صورت پذیرد.

۴. تقویت با لمینت *HPFRCC*، مقاومت سختی خمشی دال‌های یک طرفه را افزایش داده و باعث بهبود قابل توجهی در ظرفیت خمشی آن‌ها می‌شود. تمامی نمونه‌های تقویت شده دارای ظرفیت باربری بالاتری نسبت به نمونه

کنترلی ضعیف تقویت نشده با نرخ افزایش بین ۲۰۰ تا ۳۳۰ درصد بودند.

۵. افزایش در مقاومت به میزان درصد الیاف مصرفی در ساخت لمینت *HPFRCC* بستگی داشته به طوری که نرخ افزایش مقاومت در نمونه‌های تقویت شده با لمینت ۳ درصد الیاف نسبت به نمونه‌های تقویت شده با ۱٫۵ درصد الیاف برای نمونه‌های مشابه بین ۲۰ تا ۳۵ درصد می‌باشد.

۶. افزایش بار ترک‌خوردگی مشاهده شده در دال‌های تقویت شده در مقایسه با دال کنترلی ضعیف تقویت نشده به نقش تقویت لمینت *HPFRCC* در محدود کردن گسترش ترک‌ها نسبت داده می‌شود. مقدار خیز در بار نهایی نمونه‌های تقویت شده به دلیل اثرات سخت کنندگی *HPFRCC* در محدوده بین ۱/۱ و ۴/۲۶ میلی متر قرار داشت که کاهش چشمگیری را نسبت به نمونه کنترلی نشان می‌دهد.

۷. مقدار شکل‌پذیری و نیز شکل نمودار پاسخ-بار-تغییر مکان نمونه‌ها با مد گسیختگی آن‌ها ارتباط مستقیم دارد. عموماً افزایش در ظرفیت خمشی نمونه‌ها با کاهش در شکل‌پذیری آن‌ها همراه است.

۸. با توجه به ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه کنترلی نرمال می‌توان نتیجه گرفت روش تقویت با لمینت *HPFRCC* توانسته مقاومت خمشی نمونه‌ها ضعیف را از سطح باربری خمشی نمونه نرمال هم بالاتر ببرد که این مسئله در تمامی نمونه‌های تقویت شده مشاهده گردید لذا می‌توان با لمینت *HPFRCC* ضعف خمشی ناشی از کاهش ظرفیت آرماتورهای کششی دال را جبران نمود.

- [۱] خیرالدین ع. و همتی ع. (۱۳۹۱)، "مصالح ساختمانی توانمند دانش و کاربردها"، کتاب، انتشارات دانشگاه سمنان.
- [۲] Farhat F. A., Nicolaidis D., Kanellopoulos A. and Karihaloo B. L. (2007), "High Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite (CARDIFRC)-Performance and Application to Retrofitting", *Engineering Fracture Mechanics*, 74, 151-167.
- [۳] Mishra D. and Li V. C. (1995), "Performance of Ductile Plastic Hinge Designed with ECC", UMCEE Rep. No. 9506, University of Michigan.
- [۴] Fischer G. and Li V. C. (2002), "Effect of Matrix Ductility on Deformation Behavior of Steel Reinforced ECC Flexural Members Under Reversed Cyclic Loading Conditions", *ACI Structural Journal*, 99 (6), 781-790.
- [۵] خابوری م. (۱۳۹۵). "تقویت دال‌های بتن آرمه یک‌طرفه به کمک ورق‌های پیش‌ساخته کامپوزیتی با الیاف فولادی (HPFRCC) با تعبیه شیارهای سطحی" پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه. دانشگاه آزاد سمنان.
- [۶] عرب حسن آبادی م. (۱۳۹۵). "تقویت دال‌های بتن آرمه یک‌طرفه به کمک ورق‌های پیش‌ساخته کامپوزیتی با الیاف ماکرو سنتتیک (HPFRCC) با تعبیه شیارهای سطحی" پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش زلزله. دانشگاه آزاد سمنان.
- [۷] S. R. T Hassan, "Bond mechanism of NSM FRP bars for flexural strengthening of concrete Structures", *ACI Structural Journal*, vol. 101 (6), pp. 830-839, 2004.
- [۸] خیرالدین ع. و شربتدار م. ک. و همتی ع. (۱۳۹۲)، "بررسی عددی افزایش ظرفیت قاب بتنی مسلح با استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند"، مجله مهندسی عمران شریف.
- [۹] خیرالدین ع. و دهقان م. (۱۳۹۰)، "کاربرد بتن‌های الیافی توانمند (HPFRCC) در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها"، کنفرانس بین‌المللی بتن تبریز ایران.