

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

علی خیرالدین<sup>۱\*</sup>، مجید عرب حسن آبادی<sup>۲</sup>، مسعود خابوری<sup>۲</sup>

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران  
۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان

---

## چکیده

اهمیت بررسی روش‌های موجود و تحقیق بر روی روش‌های جدید در جهت افزایش مقاومت سازه‌ای ضروری می‌باشد. از این رو 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 مقرون به صرفه 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 تمام مقیاس مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه دال بتن آرمه یک‌طرفه به ابعاد  $10 \times 50 \times 114$  cm و طرح اختلاط بتن یکسان با مقاومت مشخصه  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup> و طبق آیین‌نامه ACI318 طراحی و ساخته شده است. یک دال به عنوان 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 به عنوان 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

---

## ۱- مقدمه

بتن خودتراکم<sup>۱</sup> (SCC)، بتنی است که بدون نیاز به لرزش اضافی، بر روی خود، جریان یافته و در قالب جای می‌گیرد و می‌تواند به آسانی 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 میکروتترک‌ها، مقاومت کششی و شکل‌پذیری، بهبود می‌یابد. وجود میکروالیاف‌ها 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<sup>۲</sup>، نیکولایدیس<sup>۳</sup>، کانلپولوس<sup>۱</sup> و کاریهالو<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۶ ابداع شده است و دارای مقاومت فشاری و مقاومت کششی به

---

<sup>1</sup>Self Compacting Concrete

<sup>2</sup>Farhat

<sup>3</sup>Nicolaides

ترتیب تا ۲۰۰ و ۲۷ مگاپاسکال می‌باشد. کاربرد اصلی این مصالح، در ترمیم و بهسازی المان‌های سازه‌ای می‌باشد [۲].

میشرا<sup>۳</sup> و لی (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 آرماتورگذاری تیرهای آزمایش شده در شکل ۱ نشان داده شده است. این تیرها، تحت آزمایش خمش دو نقطه‌ای قرار داده شده و الگوهای ترک-خوردگی آنها با یکدیگر مقایسه شده است. مشخص است که تفاوت چندانی در لنگر نهایی تیر بتن مسلح و تیر ساخته شده از بتن معمولی و مصالح HPFRCC وجود ندارد و هدف اصلی این محققان، بررسی بر روی دوام و عرض ترک‌های ایجاد شده در این تیرها بوده است [۳].

آزمایش‌های دیگری نیز در زمینه بررسی رفتار اعضای خمشی ساخته شده از مصالح HPFRCC توسط فیشر<sup>۴</sup> و لی، 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 هیستریزس بار جانبی-دریافت ستون‌های ساخته شده از مصالح HPFRCC و بتن معمولی، در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده، نشان می‌دهد که مقاومت جانبی و شکل‌پذیری ستون ساخته شده از مصالح HPFRCC نسبت به ستون ساخته شده از بتن معمولی، بیشتر است. همچنین با توجه به منحنی‌های هیستریزس بدست آمده، مشخص است که مقاومت جانبی ستون ساخته شده از مصالح HPFRCC نسبت به ستون ساخته شده از بتن معمولی، در دریافت‌های 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 تقویت شده 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 شود.

در این تحقیق، رفتار دال‌های بتن آرمه یک طرفه ضعیف، تقویت شده با لمینت‌های از پیش تولید شده HPFRCC با الیاف سنتتیک به روش‌های (NSM) و (EBR) به کمک مدل‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله نسبت به رفتار دال بتن آرمه یک طرفه ضعیف بدون تقویت (مرجع ضعیف) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۵]. بدین منظور دال بتن آرمه یک طرفه به ابعاد  $10 \times 114 \times 50$  cm ساخته شدند بطوری که طرح اختلاط بتن تمامی دال‌ها یکسان بوده و نمونه سالم که بعنوان 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 یک طرفه 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  $100 \times 40 \times 3$  cm با ۱/۵ و ۳ درصد الیاف سنتتیک با دو روش (NSM) با دو شیار و 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.

<sup>1</sup>Kanellopoulos

<sup>2</sup>Karihaloo

<sup>3</sup>Mishra

<sup>4</sup>Fischer

آنگاه رفتار تمام دال ها شامل نمودار نیرو- تغییرمکان، زمان و بار معادل اولین ترک، نحوه گسترش ترک ها، بار نهایی شکست و پدیده جداسدگی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت [۶] و [۷] و [۸] و [۹].

## ۲- روش شناسی تحقیق

مرحله نخست، شامل مطالعات میدانی و کتابخانه‌ای جهت آشنایی با تحقیقات گذشته می باشد. مرحله دوم، طراحی یک عدد دال بتن آرمه یک طرفه به ابعاد  $114 \times 50 \times 10$  cm با دو تکیه گاه ساده و بار متمرکز ۲KN که در وسط دهانه دال بصورت متمرکز وارد می گردد. ( مقاومت مشخصه بتن ۲۱۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و تنش تسلیم فولاد مصرفی ۳۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر 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 طولی به ۲ عدد میلگرد نمره ۸ از ظرفیت کششی دال سالم کاسته شده و نمونه ضعیف شده بدست آمد. مرحله سوم، ساخت نمونه های دال بتن آرمه یک طرفه آزمایشگاهی بر اساس طراحی صورت گرفته و تعبیه شیار در سطح ناحیه کششی دال جهت اتصال به روش NSM و ساخت ۱۰ عدد لمینت HPRCC به ابعاد  $100 \times 40 \times 3$  cm و ۳ درصد الیاف سنتتیک به ازای یک متر مکعب حجم ملات. مرحله چهارم، پر نمودن شیارها با چسب اپوکسی ۳ جزئی و اتصال لمینت های HPRCC با چسب اپوکسی به ناحیه کششی دال بتن آرمه ضعیف با روش های NSM. مرحله پنجم، شامل انجام تست خمش بر روی نمونه های آماده شده به روش ۳ نقطه ای ( با دو تکیه گاه ثابت و اعمال بار متمرکز در وسط دهانه ) و ثبت نتایج آزمایشگاهی شامل بار و تغییر مکان لحظه ای.

## ۳- نحوه انتخاب ابعاد نمونه های آزمایشگاهی

از آنجایی که هدف از انجام این آزمایش بررسی رفتار خمشی دال ها بعد از تقویت بود، لذا الگوی بارگذاری تک نقطه ای؛ و تکیه گاه ها مفصلی انتخاب گردید. تکیه گاه ها به نحوی در دو طرف اجرا شدند که فاصله ی مرکز تا مرکز آن ها ۱۰۰۰ میلی متر باشد. این طول آزاد به دو قسمت مساوی تقسیم و نیروی متمرکز در وسط نمونه ها (به صورت متقارن) اعمال شد. نحوه قرار گرفته نمونه بر روی دستگاه تعیین مقاومت خمشی، در شکل ۱ ارائه شده است. نحوه نامگذاری دال ها در جدول ۱ اشاره شده است.



دستگاه تعیین مقاومت

شکل (۱)  
خمش

جدول شماره (۱) نامگذاری نمونه های دال بتنی آزمایشگاهی

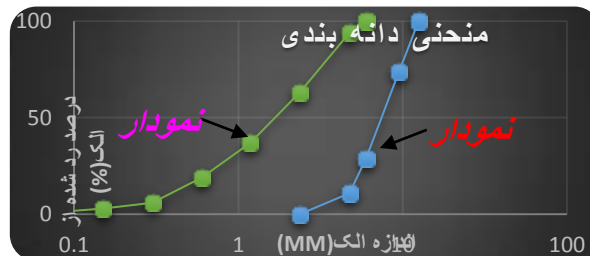
ردیف	نام نمونه	ابعاد دال (a*b*h)mm	شرح نمونه
۱	S	۱۱۴۰*۵۰۰*۱۰	مرجع سالم (S)
۲	SW	۱۱۴۰*۵۰۰*۱۰	مرجع ضعیف شده (SW)
۳	RSWH1.5PN2G6*2	۱۱۴۰*۵۰۰*۱۰	دال تقویت شده با لمینت ۱/۵ درصد الیاف ۲- شیار
۴	RSWH3PN2G6*2	۱۱۴۰*۵۰۰*۱۰	دال تقویت شده با لمینت ۳ درصد الیاف ۲- شیار

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

### ۳-۳- مصالغ مصرفی

#### ۳-۳-۱- شن، ماسه و سیمان مصرفی

شن مورد استفاده در این آزمایش در محدوده الک ۰/۵۱- اینچ (۱۲/۵ میلی متر) تا الک نمره ۴ (۴/۷۵ میلی متر) قرار دارد. ماسه مورد استفاده در این آزمایش نیز در محدوده‌ی زیر الک نمره ۴ (۴/۷۵ میلی متر) قرار دارد. منحنی دانه بندی شن و ماسه‌ی مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. سیمان مصرفی در این آزمایش از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ می باشد.



شکل (۲) منحنی دانه بندی شن و ماسه مصرفی

#### ۳-۳-۲- الیاف مصرفی

طبق شکل ۲ الیاف مصرفی از نوع الیاف مصنوعی ماکرو سنتتیک کودتا هست الیاف کودتا یکی از انواع الیاف‌های ماکروسینتتیک است که متشکل از الیاف مرکب پلیمری سازه‌ای و غیر سازه‌ای به شکل تکرشته‌ای متشکل از ریزرشته‌های به هم چسبیده از جنس کوپلیمر و الیاف شبکه‌ای مش ماکرو و میکرو از جنس پلی الفین و پلی پروپیلن اصلاح شده نانویی می باشد. مشخصات این نوع الیاف طبق نظر شرکت سازنده طبق جدول ۲ می باشد. در این تحقیق از نوع کوتاه این نوع الیاف به طول ۱۹ میلی متر استفاده شده و در ساخت لمینت های HPFRCC با نسبت های ۱/۵ و ۳ درصد وزن ملات مورد مصرف قرار گرفته است.



شکل (۳) الیاف ماکروسنتتیک کورتا

جدول (۲) مشخصات الیاف ماکرو سنتتیک کورتا

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

### ۳-۳-۳- آرما توره‌های مصرفی

میلگردهای فولادی در دو نوع ساده و آجدار تولید می‌شوند و به علت چسبندگی بهتر میلگردهای آجدار با بتن، امروزه آیین‌نامه‌های بتن فقط استفاده از میلگرد آجدار را مجاز می‌دانند. توصیه فوق مخصوصاً در ساختمان‌سازی در مناطق زلزله‌خیز قابل تأکید است. میلگردها در قطرهای ۶ الی ۳۲ میلی‌متر به راحتی در بازار یافت می‌شوند، درحالی‌که برای قطرهای بزرگ‌تر باید از سفارش مخصوص استفاده کرد. طول معمول میلگردهای تولیدی ۱۲ متر می‌باشد و برای طول‌های بزرگ‌تر، میلگردها را به یکدیگر وصله می‌کنند و یا در صورت لزوم میلگردهایی با طول بزرگ‌تر به‌طور سفارشی تهیه می‌گردند. برای ساخت دال‌های مورد آزمایش از دو نوع میلگرد  $\phi 8$  به‌عنوان میلگردهای طولی و از میلگرد  $\phi 6$  به‌عنوان میلگرد عرضی استفاده شده است که جهت دستیابی به مشخصات دقیق میلگردها، آن‌ها را تحت آزمایش کشش قرار داده و نتایج حاصله در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول (۳) نتایج آزمایش کشش میلگردهای مصرفی

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

### ۳-۳-۴- نوع چسب و مشخصات آن:

#### ۳-۳-۴-۱- چسب اپوکسی:

از تراکم دی فنیل پروپان و اپی کلر هیدرین حاصل می‌شود و در تجارت به نام‌های چسب دوقلو یا چندجزیی متداول است که شامل دو یا سه قسمت است، یک قسمت ماده چسب‌دار و قسمت دیگر یک ماده کاتالیزور است که موجب تغییر در ماده چسب‌دار و عمل چسبانندگی آن می‌شود.

### 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

پایه	حالت فیزیکی	وزن مخصوص g/cm <sup>3</sup>	مقاومت کششی (۷ روزه) kg/cm <sup>2</sup>	مقاومت خمشی (۷ روزه) kg/cm <sup>2</sup>	مقاومت فشاری (۷ روزه) kg/cm <sup>2</sup>
اپوکسی	خمیر	۱/۶۷	۱۷۰	۳۸۰	۹۵۰

### ۴- شرح آزمایش و نتایج

#### ۴-۱- دال مرجع نرمال (S)

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 ۲ 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 ۱ Mpa اقدام گردید. در نیروی ۱۴/۹۲ کیلو نیوتن تغییر مکان ۶/۱۳ میلی متر، اولین ترکها در وسط دهانه دال و به صورت متقارن مطابق شکل ۴-الف مشاهده گردید. پس از ادامه یافتن بارگذاری که همراه با گسترش ترکها در نواحی اعمال بار بوده، نمونه در بار ۱۶/۳۴ کیلو نیوتن بیشترین باربری را داشته و به میزان ۱۱/۸۵ 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<sub>Y</sub>) در نظر گرفته شد؛ که این مسئله با توجه به محاسبات صورت گرفته که بر اساس آن مشخص گردید کمترین بیشینه ی بار که تحت آن میلگرد دچار پدیده جاری شدگی می گردد، معادل بار ۷/۲ کیلو نیوتن می باشد، لذا از آنجایی که بار ماکزیمم بار ۱۶/۳۴ کیلو نیوتن می باشد مطمئناً عمل جاری شدن میلگرد به وقوع پیوسته است. لذا بار P<sub>MAX</sub> را می توان به عنوان P<sub>Y</sub> یا جاری شدگی در نظر گرفت.  $\Delta u_{80\%}$  مشخص کننده تغییر مکان دال در ۲۰ درصد افت بار پس از بار نهایی است. پس از گسیختگی نمونه تحت بارگذاری، بارگذاری تا بار گسیختگی آن که ۰/۸۰ درصد بار P<sub>MAX</sub> در نظر گرفته شده به میزان ۱۳ کیلو نیوتن از روی نمودار بار تغییر مکان مشخص و ثبت گردید و تغییر مکان متناظر ۳۰ mm بود. شکل ۴-ب نشان دهنده گسیختگی نمونه می باشد.



ب- پس از گسیختگی



الف- زمان اولین ترک

#### شکل (۴) تست نمونه S

#### ۴-۲- دال مرجع ضعیف شده (SW)

دال بتن آرمه یک طرفه SW که به عنوان نمونه‌ی مرجع ضعیف شده در نظر گرفته شد شکل و نحوه آرماتور گذاری آن به صورت یکسان با سایر دال‌ها و متفاوت با دال نرمال بوده است. پس از استقرار نسبت به شروع بارگذاری با سرعت  $1 \text{ Mpa}$  اقدام گردید. از آنجاکه مشاهده بصری اولین ترک خوردگی در وجه زیرین دال با دقت کافی ممکن نیست، بار اولین ترک خوردگی می‌تواند به عنوان نقطه‌ای که پاسخ بار- تغییر مکان از پاسخ الاستیک اولیه منحرف شود پذیرفته شود. در نیروی  $6/77$  کیلو نیوتن تغییر مکان  $5/25$  میلی‌متر، اولین ترک‌ها در وسط دهانه دال و به صورت متقارن مطابق شکل ۵-الف مشاهده گردید. پس از ادامه یافتن بارگذاری که همراه با گسترش ترک‌ها در نواحی اعمال بار بوده، نمونه در بار  $7/97$  کیلو نیوتن بیشترین باربری را داشته و به میزان  $20/8$  میلی‌متر تغییر مکان داشته است که در این بارگذاری به دلیل محدودیت آزمایش و عدم نصب کرنش‌سنج این لحظه به عنوان لحظه جاری شدن میلگرد (P<sub>y</sub>) در نظر گرفته شد؛ که این مسئله با توجه به محاسبات صورت گرفته که بر اساس آن مشخص گردید کمترین بیشینه‌ی بار که تحت آن میلگرد دچار پدیده جاری‌شدگی می‌گردد، معادل بار  $7/2$  کیلو نیوتن می‌باشد، لذا از آنجایی که بار ماکزیمم بار  $7/97$  کیلو نیوتن می‌باشد مطمئناً عمل جاری شدن میلگرد به وقوع پیوسته است.  $\Delta_{u80\%}$  مشخص‌کننده تغییر مکان دال در ۲۰ 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  $24/33$  کیلو نیوتن از روی نمودار بار تغییر مکان مشخص و ثبت گردید. شکل ۵-ب نشان‌دهنده گسیختگی نمونه می‌باشد.



ب- پس از گسیختگی

الف- زمان اولین ترک

شکل (۵) تست نمونه SW

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

دال بتن آرمه ضعیف با آرایش ۲ عدد شیار به عرض  $60$  میلی‌متر و عمق  $20$  میلی‌متر در فواصل مساوی، در سطح خمش، به منظور تأمین اتصال نزدیک سطح نصب، با لمینت HPRCC 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  $19/48 \text{ KN}$  و تغییر مکان  $2/89$  میلی‌متر تقریباً هیچ‌گونه تغییری در شیب منحنی رخ نداد و ترکی نیز در مقطع دال مشاهده نگردید در لحظه بار  $19/48 \text{ KN}$  و تغییر مکان  $2/89$  میلی‌متر، در نمونه تقویت شده، گسیختگی پس از وقوع تسلیم، فراوانی در مصالح تقویت خمشی رخ داد و همزمان با آن نمونه نیز ترک خورد و ظرفیت باربری نمونه تا بار  $13/80 \text{ KN}$  سقوط کرد که این مقدار بار معادل  $71$  درصد بار نهایی  $19/48 \text{ KN}$  هست و تغییر مکان معادل این بار  $5/1$  میلی‌متر 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  $29/01$  میلی‌متر میزان بار

تحمل شده  $8/90 \text{ KN}$  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 .



شکل (۷) کسبخته شدن نمونه و افت بار

شکل (۶) استقرار نمونه

#### ۴-۴- پاسخ بار، تغییرمکان نمونه تقویت شده ( $RSWH3PN2G6 \times 2$ )

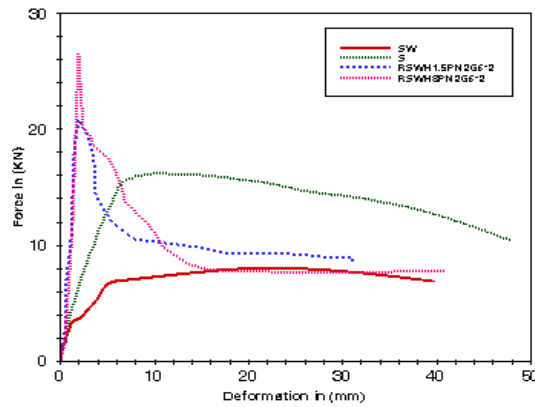
دال بتن آرمه ضعیف با آرایش ۲ عدد شیار به عرض ۶۰ میلی متر و عمق ۲۰ میلی متر در فواصل مساوی، در سطح خمش ، به منظور تامین اتصال نزدیک سطح نصب، با لمینت HPFRCC با ۳ درصد الیاف که با چسب اپوکسی به سطح خمش دال متصل شده بود تقویت گردید. شیارها توسط چسب اپوکسی پر شدند. پس از قرارگیری بر روی دو تکیه گاه ساده و قرار گرفتن جک بارگذاری بر روی نمونه با سرعت یکنواخت  $1 \text{ Mpa/min}$  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 خمشی رخ داد و همزمان با آن نمونه نیز ترک خورد، شکل (۱۰) نشان دهنده پل زدن الیاف در مصالح تقویت می باشد و ظرفیت باربری نمونه تا بار  $21/1 \text{ KN}$  سقوط کرد که این مقدار بار معادل ۸۰ درصد بار نهایی  $26/1 \text{ KN}$  می باشد و تغییر مکان معادل این بار  $2/9$  میلی متر بود مطابق شکل ۱۰ ترک ایجاد شده در وسط دهانه دال کسترش پیدا کرده و عرض آن نیز رشد نمود، مجدداً از ظرفیت باربری نمونه بصورت تدریجی کاسته شد به طوری که در تغییر مکان  $14/11$  میلی متر میزان بار تحمل شده  $8/80 \text{ KN}$  بود نمونه با همین میزان بار تا تغییر مکان  $29$  میلی متر پیش رفته و در این نقطه عرض ترک به بیشترین میزان خود یعنی  $19/80$  میلی متر رسید و پس از آن نمونه دیگر از خود ظرفیت خمشی نشان نداده و بارگذاری به اتمام رسید، و در شکل ۱۱ نمودار کلی دال ها مشهود است و مطابق نمودار دال تقویت شده با لمینت ۳ درصد الیاف بیشترین سختی را از خود نشان داده است.



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

شکل (۹) استقرار نمونه





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 ترک ها و با عرض ترک کم، افزایش میرایی نیروی زلزله را مستهلک می گرداند. این الیاف در مقاومت فشاری نقش چندانی نداشته و در کشش بتن نقش دارد و کرنش آن را بالا می برد و تاثیر گذاری آن روی سختی کاملاً مشهود بوده و در شکل پذیری تاثیر چندانی ندارد و می توان به نتایج زیر به عنوان نتیجه گیری اشاره نمود.

۱. افزایش سختی نمونه های تقویت شده نسبت به نمونه مرجع کاملاً مشهود است؛ با عنایت به اینکه رفتار سخت شونده‌گی تحت کشش مصالح HPFRCC باعث شده است به خاطر پل زدن الیاف نمونه های تقویت شده ظرفیت باربری و سختی بیشتری را تحمل نمایند.
۲. نتایج آزمایش نشان داد که استفاده از لمینت های HPFRCC یک روش قابل اجرا و سودمند برای تقویت خمشی دال های یک طرفه بتن مسلح با پوشش بتن کم می باشد.
۳. با استفاده از چسب اپوکسی سه جزئی، می توان از جدا شدن لمینت های HPFRCC چسبیده خارجی، از سطح بتن جلوگیری نمود. لذا از این پس تقویت دال های بتن آرمه یک طرفه موجود با استفاده از روش های چسبیده خارجی و نزدیک سطح، بدون نگرانی از بابت جدا شدن لمینت HPFRCC از سطح بتن و بهره گیری از ظرفیت کامل مصالح تقویت می تواند صورت پذیرد.
۴. تقویت با لمینت HPFRCC، مقاومت سختی خمشی دال های یک طرفه را افزایش داده و باعث بهبود قابل توجهی در ظرفیت خمشی آن ها می شود. تمامی نمونه های 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 نمونه های تقویت شده با لمینت ۳ درصد الیاف نسبت به نمونه های تقویت شده با ۱,۵ درصد الیاف برای نمونه های مشابه بین ۲۰ تا ۳۵ درصد می باشد.
۶. افزایش بار ترک خوردگی مشاهده شده در دال های تقویت شده در مقایسه با دال کنترلی ضعیف تقویت نشده به نقش تقویت لمینت HPFRCC در محدود کردن گسترش ترک ها نسبت داده می شود. مقدار خیز در بار نهایی نمونه های 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 می دهد.
۷. مقدار شکل پذیری و نیز شکل نمودار پاسخ بار- تغییر مکان نمونه ها با مد گسیختگی آن ها ارتباط مستقیم دارد. عموماً افزایش در ظرفیت خمشی نمونه ها با کاهش در شکل پذیری آن ها همراه است.
۸. با توجه به ظرفیت باربری نمونه های تقویت شده نسبت به نمونه کنترلی نرمال می توان نتیجه گرفت روش تقویت با لمینت HPFRCC توانسته مقاومت خمشی نمونه ها ضعیف را از سطح باربری خمشی نمونه نرمال هم بالاتر ببرد که این مسئله در تمامی نمونه های تقویت شده مشاهده گردید لذا می توان با لمینت

HPFRCC ضعف خمشی ناشی از کاهش ظرفیت آرماتورهای کششی دال را جبران نمود.

## ۶-مراجع

[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

کامپوزیت های سیمانی مسلح الیافی توانمند"، *مجله مهندسی عمران شریف*.

[۹] خیرالدین ع. و دهقان م. (۱۳۹۰)، "کاربرد بتن های الیافی توانمند (HFRCC) در طراحی لرزه ای سازه ها"، *کنفرانس*

*بین المللی بتن تبریز ایران*.