

## تعیین آزمایشگاهی خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند

محمدحسین ثقفی

دانشجوی دکتری سازه، گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

هاشم شریعتمدار \*

دانشیار، گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

علی خیرالدین

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

### چکیده

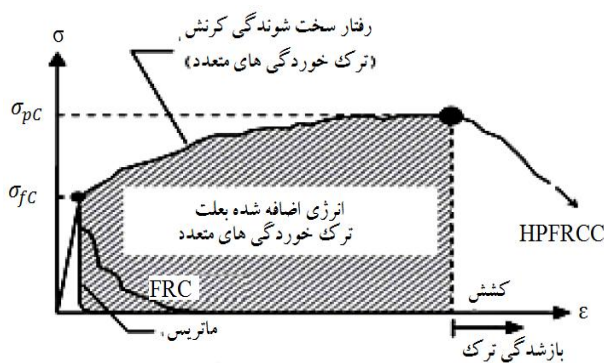
کامپوزیت‌های سیمانی الیافی به صورت موادی مرکب با دو مؤلفه اصلی شامل الیاف و ملات تعریف می‌شوند. الیاف و ملات به سبب وجود پیوستگی با یکدیگر کار می‌کنند که منجر به تشکیل یک کامپوزیت قوی می‌گردد. کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC) یک نوع خاص از کامپوزیت‌های سیمانی الیافی هستند که علامت مشخصه آن‌ها رفتار سخت‌شوندگی کرنش در کشش پس از اولین ترک خوردگی است. هدف از این مقاله درک بهتر رفتار سخت‌شوندگی کرنش در کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند تحت بارهای فشاری تک‌محوری، خمش چهار نقطه‌ای و برش خالص است. پارامترهای مؤثر در این پژوهش نوع الیاف و مسیر بارگذاری است. در این آزمایش‌ها از سه نوع الیاف شامل الیاف فولادی قلاب‌دار، الیاف فولادی موج‌دار، الیاف پلی‌پروپیلن، به صورت الیاف تنها و ترکیبی با میزان حجمی ۱/۵٪ در مخلوط ملات استفاده شده است. جهت دستیابی به رفتار سخت‌شوندگی کرنش قابل قبول نسبت‌های اختلاطی مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است و بهترین طرح اختلاط معرفی گردیده است. مسیرهای بارگذاری انتخاب‌شده شامل بارگذاری فشاری تک‌محوری، خمش چهار نقطه‌ای و برش خالص است. خصوصیات مکانیکی در فشار با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای تعیین شده است. آزمایش‌های خمش چهار نقطه‌ای بر روی نمونه‌های منشوری بدون شکاف و آزمون‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های شکاف دار (جهت کاهش سطح مقطع با گسیختگی اجباری) انجام شده است. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها، جهت ارزیابی تأثیر نوع الیاف، بر طاقت خمشی، برشی و شکل‌پذیری در فشار مورد آنالیز بیشتر قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که خصوصیات مکانیکی HPFRCC، افزایش قابل توجهی نسبت به بتن معمولی در آن‌ها ایجاد می‌گردد. استفاده از HPFRCC با توجه به عملکرد مناسب در فشار، کشش و برش می‌تواند به‌عنوان راهکاری به‌منظور جلوگیری از تراکم آرماتور، کاهش میزان زیاد آرماتورهای عرضی در اتصالات تیر به ستون و افزایش ظرفیت برشی و شکل‌پذیری اعضا باشد.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC)، سخت‌شوندگی کرنش، ضریب طاقت خمشی، ضریب طاقت برشی.

\* نویسنده مسئول: shariatmadar@um.ac.ir

## ۱- مقدمه

مشترک در کامپوزیت‌های سیمانی الیافی<sup>۴</sup> (FRCC) اثر زیادی بر مشخصات مکانیکی دارد [۳]. مقاومت پیوستگی فصل مشترک به‌طور قابل ملاحظه‌ای متأثر از نسبت آب به سیمان و مقدار سیمان است [۴].



شکل ۱- نمونه پاسخ تنش - کرنش در کشش برای

کامپوزیت‌های HPFRCC [۱]

در دهه‌ی ۱۹۶۰، رامولدی<sup>۵</sup> و همکاران بررسی تأثیر الیاف فولادی بر کاهش شکنندگی بتن را در دستور کار قراردادند [۵]. این روند با کاربرد سایر انواع الیاف ادامه یافت و در سال‌های اخیر ترکیب انواع الیاف با طول‌های مختلف در دستور کار قرار گرفت. گسترش دانش در خصوص چگونگی تأثیر الیاف بر ملات، منجر به تدوین توصیه‌هایی در مورد طراحی سازه‌ای توسط موسسه RILEM گردید [۶]. در سال ۲۰۱۰ سیریارونچای<sup>۶</sup> و همکاران به‌منظور درک بهتر رفتار سخت‌شوندگی کرنش HPFRCC تحت بارهای فشاری تک‌محوری، دو‌محوری و سه‌محوری، آزمایش‌هایی انجام دادند. نتایج آزمایش حاکی از آن است که استفاده از الیاف کوتاه‌تر می‌تواند به‌طور عمده‌ای مقاومت و شکل‌پذیری را تحت مسیره‌های بارگذاری تک‌محوری و دو‌محوری افزایش دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که اثرات محصورشدگی به‌واسطه الیاف در آزمایش‌های فشاری سه‌محوری که در آن‌ها فشارهای محصورشدگی خارجی نسبتاً بالایی هست، اندک است [۷]. در سال ۲۰۱۲ کانگ<sup>۷</sup> و همکاران به بررسی اثرات اندازه ذرات سنگ‌دانه‌ها بر رفتار HPFRCC پرداختند. چهار نوع سنگ‌دانه با اندازه ذرات مختلف با استفاده از طرح اختلاط مشابه

کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند<sup>۱</sup> (HPFRCC) نوعی از کامپوزیت‌های سیمانی الیافی است که در صورت اعمال کشش مستقیم از خود پاسخ سخت‌شوندگی کرنش پس از ترک خوردگی نشان می‌دهند. هنگامی که این کامپوزیت‌ها تحت رفتار سخت‌شدگی قرار می‌گیرند، پیش از بازشدگی ترک، ترک‌های متعددی ایجاد می‌گردد [۱]. مزایای HPFRCC در قیاس با بتن معمولی و بتن الیافی متعارف<sup>۲</sup> (FRC) شامل شکل‌پذیری، دوام و ظرفیت جذب انرژی بالا است.

در HPFRCC به دلیل عدم وجود درشت‌دانه‌ها و میزان زیاد الیاف با توزیع مناسب منجر به تأمین خاصیت سخت‌شوندگی کرنش و افزایش شکل‌پذیری سازه می‌گردد. هم‌چنین مشکلات ناشی از خاصیت شکنندگی بتن‌های متعارف نظیر خردشدگی، قلوه‌کن شدن و گسیختگی پیوند بتن می‌تواند مرتفع گردد. خاصیت کرنش کششی کامپوزیت‌های HPFRCC نه‌تنها باعث بهبود رفتار پس از ترک خوردگی می‌گردد، بلکه باعث افزایش پیوند تماسی بتن و آرماتورها می‌گردد.

در شکل ۱ مقایسه کیفی پاسخ تنش-کرنش FRC و HPFRCC نشان داده شده است. با توجه به (شکل ۱) ملاحظه می‌گردد که در FRC پس از رسیدن به مقاومت ترک‌خوردگی کامپوزیت ( $\sigma_{fc}$ )، نرم‌شدگی حاصل می‌گردد. برخلاف آن در HPFRCC در کرنش‌های ۰/۵٪ یا بیشتر پاسخ سخت‌شدگی پس از ترک‌خوردگی تا حداکثر تنش  $\sigma_{pc}$  مشاهده می‌شود. این ویژگی‌ها توانمند منجر به افزایش استفاده از HPFRCC به‌منظور دستیابی به بهبود دوام در سازه‌های زیربنایی و افزایش عملکرد سازه‌ای تحت بارهای شدید شده است [۲].

به‌منظور دستیابی به رفتار سخت‌شوندگی کرنش کششی با استفاده از مقادیر کم الیاف، مقاومت پیوستگی در فصل مشترک بین الیاف و مخلوط کامپوزیت (سطح تماس) بسیار مهم است. مقاومت پیوستگی فصل مشترک به‌طور قابل توجهی متأثر از ویژگی‌های ناحیه انتقالی فصل مشترک<sup>۳</sup> (ITZ) بین الیاف و مخلوط کامپوزیت است. از این‌رو ویژگی‌های ناحیه انتقالی فصل

<sup>4</sup> Fiber-Reinforced Cement Composites

<sup>5</sup> Romauldi

<sup>6</sup> Sirijaroonchai

<sup>7</sup> Kang

<sup>1</sup> High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite

<sup>2</sup> Fiber-Reinforced Concrete

<sup>3</sup> Interfacial Transition Zone

الکل<sup>۳</sup> (PVA) و پلی اتیلن<sup>۴</sup> (PE)، الیاف پلی پروپیلن<sup>۵</sup> (PP) نرم‌تر، ارزان‌تر بوده و همچنین سریع‌تر پخش شده که منجر به کارایی بهتر آن‌ها می‌گردد. علاوه بر این با توجه به طبیعت آب‌گریزی و غیر قطبی الیاف PP، مصالح HPFRCC-PP دوام بهتری در محیط‌های قلیایی از خود نشان می‌دهند [۱۱]. ویژگی‌های الیاف به کاررفته در (جدول ۱) ارائه شده است. این سه نوع الیاف در میزان حجمی، برابر ۱/۵٪ حجم بتن در نظر گرفته شده است و در حالت‌های ترکیبی دو نوع الیاف، به نسبت ۰/۷۵٪ از هر الیاف و در مجموع ۱/۵٪ حجمی الیاف استفاده شده است. جهت دستیابی به رفتار سخت‌شوندگی کرنش قابل قبول نسبت‌های اختلاطی مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است و بهترین طرح اختلاط ملات نمونه‌ها با نسبت اختلاط وزنی مطابق جدول ۲ مخلوط شده است.

جهت ساخت نمونه‌های HPFRCC ابتدا آب، سیمان و ماسه را در همزن به مدت ۵ دقیقه مخلوط می‌گردد. پس از شکل‌گیری واکنش هیدراتاسیون سیمان تقریباً نیمی از مواد فوق روان‌کننده به مخلوط اضافه می‌گردد و به مدت ۵ دقیقه دیگر مصالح مخلوط می‌شوند، در مرحله بعد میکروسیلیس و مابقی فوق روان‌کننده به مخلوط اضافه می‌گردد تا ملات با کارایی مناسب ایجاد گردد، در مرحله آخر الیاف به آرامی با مقادیر کم به ملات اضافه می‌گردد. با توجه به ثابت بودن طرح اختلاط تنها تفاوت بین نمونه‌های HPFRCC نوع و درصد الیاف بکار رفته است. مطابق جدول ۳، از هر مخلوط، ۲ نمونه منشوری به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۳۵۰ میلی‌متر، ۳ نمونه منشوری به ابعاد ۷۵×۷۵×۲۵۰ میلی‌متر و ۲ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر، تهیه گردیده است. نمونه‌ها ۲۴ ساعت پس از بتن‌ریزی قالب برداری شده‌اند و تحت شرایط کنترل‌شده در دمای ۳ ± ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۱۰۰ درصد طی ۲۷ روز نگهداری شده‌اند.

به‌منظور تسهیل در شناسایی، هر یک از نمونه‌ها به‌صورت منحصربه‌فرد با استفاده از یک نام شامل دو بخش در نظر گرفته شده است. مؤلفه اول نمایانگر شرایط بارگذاری (UXC) برای فشار تک‌محوری نمونه استوانه‌ای<sup>۶</sup>، 4PBT برای خمش چهار نقطه‌ای<sup>۷</sup>، DST برای برش خالص<sup>۸</sup> است. مؤلفه دوم در نام نمونه

حاوی ۲٪ حجمی الیاف قلاب شکل و پیچشی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد مقاومت فشاری در سنگ‌دانه‌های ریزتر به‌طور قابل‌توجهی بیشتر بوده است [۸]. در سال ۲۰۱۶ «چوی»<sup>۱</sup> و همکاران مطالعات آزمایشگاهی درباره ویژگی‌های کامپوزیت‌های پایه سیمانی و روبراه‌های گدازه‌ای قلیایی<sup>۲</sup> (GGBS) مسلح با الیاف پلی اتیلن با مقاومت بالا انجام دادند که به‌منظور تعیین ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها شامل آزمایش تعیین چگالی، فشار و کشش تک‌محوری انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن است که کامپوزیت GGBS نسبت به کامپوزیت پایه سیمانی ظرفیت کرنش کششی بالاتری با عرض و فواصل ترک‌های کمتر از خود نشان داده است [۹]. دهقانی و ناطق الهی در سال ۲۰۱۴ به طراحی، ساخت و بررسی ویژگی‌های کششی، فشاری و خمشی کامپوزیت‌های سیمانی توانمند با الیاف پلی ونیل الکل پرداختند، نتایج نشان‌دهنده رفتار منحصربه‌فرد این ماده در کشش، خمش و ظرفیت کرنشی بسیار زیاد ناشی از ترک‌خوردگی متعدد است [۱۰]. تحقیقات گذشته به‌طور خاص بر روی درک پاسخ‌های کششی و فشاری کامپوزیت‌های سیمانی متمرکز است و مطالعات بسیار کمتری در خصوص پاسخ برشی و خمشی HPFRCC انجام شده است. همچنین مطالعات کمی بر تأثیر الیاف ترکیبی بر رفتار HPFRCC موجود است. هرچند HPFRCC دارای ویژگی‌هایی است که در بتن معمولی و FRC وجود ندارد اما به علت مسائل اقتصادی و اجرایی، کاربرد آن‌ها بیشتر به امور تحقیقاتی و کاربردهای خاص محدود گشته است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- پارامترهای آزمایشگاهی و مشخصات نمونه

مهم‌ترین پارامترهای آزمایشگاهی در این مطالعه عبارت‌اند از: نوع الیاف و مسیر بارگذاری، همچنین سه نوع الیاف به‌صورت تنها و ترکیبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که عبارت‌اند از (۱) الیاف فولادی قلاب شکل، (۲) الیاف فولادی موجدار (۳) الیاف پلی پروپیلن. در مقایسه با الیاف‌های پلیمری دیگر نظیر پلی ونیل

<sup>۵</sup> Poly Propylene

<sup>۶</sup> Uniaxial Compression Of Cylinder

<sup>۷</sup> 4 Point Of Flexural Test

<sup>۸</sup> Direct Shear Test

<sup>۱</sup> Choi




<sup>۲</sup> Ground-Granulated Blast Furnace Slag

<sup>۳</sup> Poly-Vinyl Alcohol

<sup>۴</sup> Polyethylene

نمایانگر نوع الیاف (H برای الیاف فولادی دو انتها قلاب، S برای الیاف فولادی موجدار، PP برای الیاف پلی پروپیلن و NC برای بتن معمولی) است. به طور مثال UXC-H، معرف نمونه استوانه‌ای HPFRCC با الیاف فولادی دو انتها قلاب تحت آزمایش فشار تک‌محوری است. از طرفی دیگر، 4PBT-H-PP معرف نمونه ترکیبی HPFRCC با ۰/۷۵٪ الیاف فولادی دو انتها قلاب و ۰/۷۵٪ الیاف پلی پروپیلن تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای است.

جدول ۱- مشخصات اصلی الیاف استفاده شده در این مطالعه

نام	الیاف	طول (میلی متر)	قطر (میلی متر)	شکل	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
H	فولادی دو انتها قلاب	۳۵	۰/۸		۲۱۲	۱۱۰۰	۷۸۵۰
S	فولادی مارپیچ	۳۵	۰/۸		۲۱۲	۱۱۰۰	۷۸۵۰
PP	پلی پروپیلن	۱۲	۰/۰۱۸		۱۰	۸۰۰	۹۱۰

جدول ۲- طرح اختلاط ملات HPFRCC

شن	ماسه	آب	میکروسیلیس	سیمان	مواد افزودنی (فوق روان کننده)	نوع بتن
-	۱	۰/۲۸	۰/۱	۱	۰/۱۶٪ وزن سیمان	HPFRCC

جدول ۳- برنامه آزمایش

آزمون فشاری	آزمون برشی	آزمون خمشی
ابعاد نمونه ۲۰۰×۱۰۰	۲۵۰×۷۵×۷۵	۳۵۰×۱۰۰×۱۰۰
ASTM C39	JSCE-G-553-199	ASTMC1609 and JSCE SF-4
۲ نمونه در هر ترکیب	۳ نمونه در هر ترکیب	۲ نمونه در هر ترکیب

### ۳- اهمیت تحقیق

اگرچه تحقیقاتی درباره مقاومت فشاری و خمشی بتن الیافی و HPFRCC انجام شده است، اما تحقیق در مورد مقاومت برشی HPFRCC بسیار محدود صورت گرفته است. به طوری که بررسی تمامی ویژگی‌های مقاومت برشی، خمشی و فشاری HPFRCC در کنار هم تاکنون صورت پذیرفته است. همچنین مطالعات بسیار محدودی در رابطه با تأثیر نوع الیاف بر این مشخصات صورت گرفته است. در ضمن مطالعات خصوصیات رفتاری کامپوزیت‌های سیمانی با الیاف پلی پروپیلن بسیار محدود انجام شده است و خصوصیات رفتاری کامپوزیت‌های سیمانی با الیاف ترکیبی مورد بررسی محدود قرار گرفته

است. در این تحقیق پاسخ فشاری HPFRCC با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای، آزمون‌های خمش بر روی نمونه‌های منشوری بدون شکاف و آزمون‌های برش بر روی نمونه‌های دارای شکاف انجام شده است. میزان الیاف مورد استفاده در این تحقیق براساس حداکثر مقادیر توصیه شده در تحقیقات قبلی [۱۲] بوده و برابر ۱/۵ درصد است.

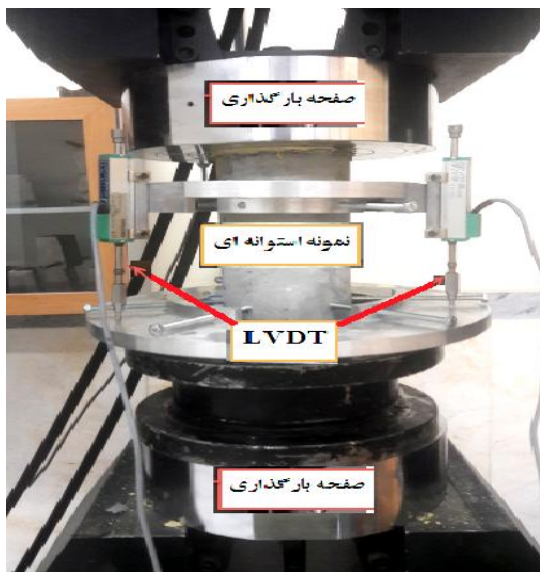
### ۴- هندسه نمونه‌ها و نحوه آزمایش

#### ۴-۱- آزمون‌های فشار استوانه‌ای

نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ میلی متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی متر طبق استاندارد ASTM C39/C39M-10 مورد آزمایش‌های فشار

در مرحله قبل از حداکثر بار متوسط کرنش با تقسیم متوسط تغییر مکان‌های دو LVDT بر طول گیج LVDT به دست آمده است. در مرحله پس از حداکثر بار، متوسط کرنش با تقسیم تغییر شکل دستگاه بر ارتفاع کلی نمونه به دست آمده است. متوسط تنش مستقیماً با تقسیم بار دستگاه بر سطح مقطع استوانه به دست آمده است. حداقل دو نمونه از هر طرح اختلاط مورد آزمایش قرار گرفته است که در این مقاله متوسط نتایج ارائه شده است.

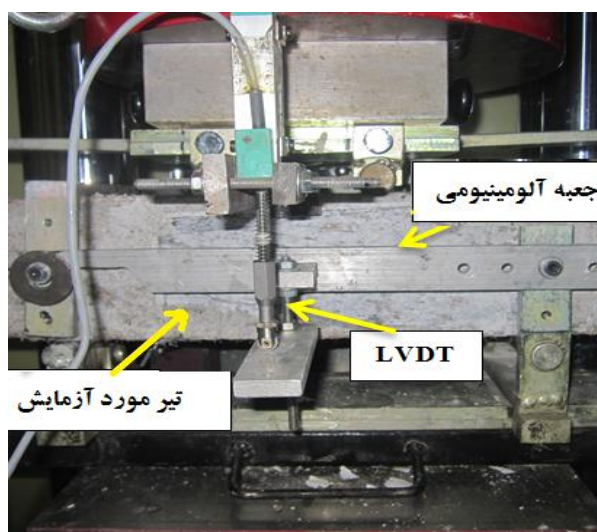
تک‌محوری قرار گرفته‌اند [۱۳]. در این پژوهش برای محاسبه کرنش نمونه‌ها از مطالعات مرجع [۷] استفاده شده است. به منظور اندازه‌گیری تغییر شکل طولی تا حداکثر بار، دو دستگاه LVDT در امتداد وجه نمونه مطابق شکل ۲ نصب شده است. به منظور جلوگیری از آسیب دیدگی LVDT ناشی از افزایش‌های سریع تغییر مکان فراتر از حداکثر بار، دستگاه‌های LVDT برداشته شده و تغییر مکان پس از بار حداکثر با استفاده از تغییر مکان دستگاه اندازه‌گیری شده است. سپس پاسخ کلی تنش - کرنش با اتصال دو رکورد به دست آمده است.



الف) نمونه‌های استوانه‌ای کلاهک‌گذاری

ب) نحوه انجام آزمایش فشار تک‌محوری

شکل ۲- آزمایش فشاری تک‌محوری



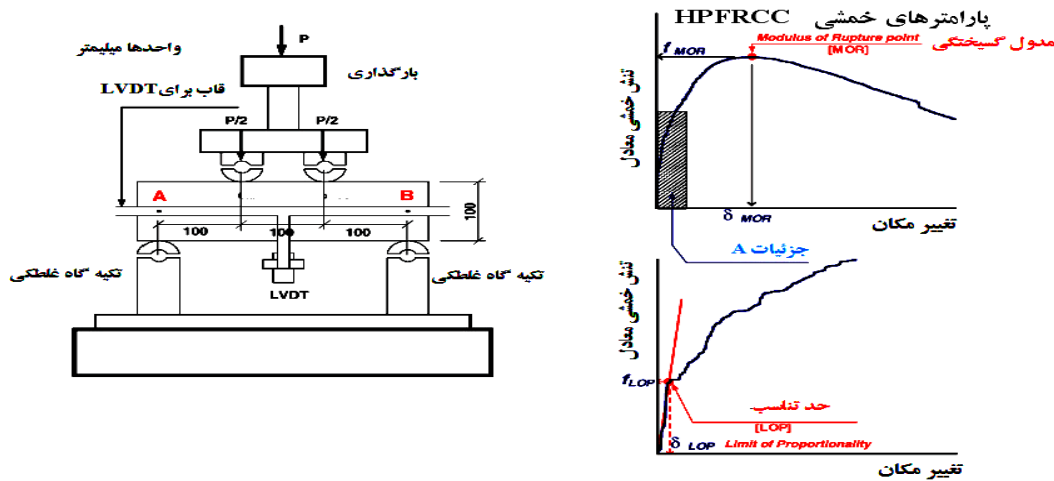
شکل ۳- نحوه آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

#### ۴-۲- آزمایش‌های خمش

همان‌گونه که در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است، نمونه آزمایش خمش و نحوه آزمایش مطابق با ASTM Standard C1609/C 1609M-05 [۱۴]. در نظر گرفته شده است. جزئیات انجام آزمایش در ASTM standard C1609 ارائه شده است. مطابق با شکل ۳، یک دستگاه LVDT در یک جعبه آلومینیومی نصب شده است و تغییر مکان مرکز نمونه اندازه‌گیری شده است. پارامترهای رفتار خمشی کامپوزیت HPRCC نیز در شکل ۴ نشان داده شده است، نقطه‌ای که پاسخ غیرخطی آغاز می‌گردد، حد تناسب<sup>۱</sup> (LOP) نقطه حداکثر بار خمشی، مدول گسیختگی<sup>۲</sup> (MOR) نامیده می‌شود.

<sup>2</sup> Modulus of Rupture point

<sup>1</sup> Limit of Proportionality



شکل ۴- نحوه آزمایش و هندسه نمونه خمشی

جابه‌جایی می‌باشند. روش ارائه شده توسط JSCE در مقایسه با ASTM C1609 نسبتاً از خطای انسانی کمتری برخوردار است که در این تحقیق از روش JSCE استفاده شده است.

### ۳-۴- آزمایش‌های برش مستقیم

به منظور ارزیابی ویژگی‌های HPRC در برش، نمونه‌های Z شکل فشاری به جهت سادگی در بارگذاری و آنالیز داده‌ها ارجحیت دارند، اما تنش‌های بزرگ کششی در انتهای محل‌های انتشار ترک در نمونه Z شکل فشاری وجود دارد که نشان می‌دهد رشد ترک‌ها در آزمایش‌ها تنها تحت مد برش خالص نیست بلکه در یک مد مختلط است که دربرگیرنده مدهای برشی و بازشدگی است (شکل ۵). بدین منظور، JSCE روشی برای تعیین مقاومت برشی بتن الیافی با استفاده از آزمایش برش مستقیم پیشنهاد نموده است. تنش ایجاد شده در این آزمایش، تنها به علت برش خالص است و مد ترکیبی در آن ایجاد نمی‌شود. برای ایجاد صفحه شکست برشی در این روش، باید مقطع بین زوج نیروی برشی به وسیله‌ی ایجاد شکاف و بریدگی ضعیف گردد. ایجاد شیار در مقطع برشی ضامن ثابت ماندن و یکنواختی تنش برشی بیشینه در سطح مقطع می‌گردد. لذا نمونه در حالت نزدیک به برش خالص خواهد بود. گاهی در روش پیشنهادی JSCE، ترک اغلب از مسیر موردنظر منحرف می‌گردد و به همین جهت برای پیش‌بینی صفحه گسیختگی «میرسیاه» و همکاران [۱۵] ایجاد یک شکاف سطحی گرد را پیشنهاد داده‌اند.

تنش خمشی معادل با استفاده از معادله ۱ مطابق با استاندارد ASTM تعیین گردیده است.

$$f = \frac{P.l}{b.h^2} \quad (1)$$

به طوری که  $f$  مقاومت خمشی معادل،  $P$  بار اعمالی،  $L$  طول دهانه نمونه،  $b$  عرض نمونه و  $h$  ارتفاع نمونه است.

با استفاده از منحنی بار تغییر مکان، به منظور اندازه‌گیری جذب انرژی بر اساس روش انجمن مهندسان عمران ژاپن<sup>۱</sup> (JSCE)، ضریب طاق خمشی<sup>۲</sup> ( $FT_{\delta}$ ) مطابق رابطه ۲ مورد آنالیز قرار گرفته است.

$$FT_{\delta} = \frac{T_{b,\delta}l}{\delta b d^2} \quad (2)$$

که در آن  $FT_{\delta}$  ضریب طاق خمشی در تغییر مکان  $\delta$  تیر است.  $T_{b,\delta}$  مساحت زیر منحنی از تغییر مکان صفر تا  $\delta$  تغییر مکان تیر،  $L$  دهانه،  $b$  عرض تیر و  $d$  عمق تیر است. تغییر مکان  $\delta$  تیر به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود که در آن  $m$  یک عدد ثابت است.

$$\delta = \frac{l}{m} \quad (3)$$

تغییر مکان  $\frac{L}{150}$  توسط JSCE اغلب به علت اینکه خیلی بزرگ‌تر از حدود تغییر مکان سرویس‌دهی است، مورد انتقاد است. بنابراین،  $FT_{\delta}$  برای محدوده وسیعی از این نسبت،  $m=150, 200, 300$  برای نمونه‌های محاسبه شده است، هر کدام از این شاخص‌ها بیانگر سطوح متفاوتی از سرویس‌دهی بر حسب

<sup>2</sup> Flexural Toughness Factor

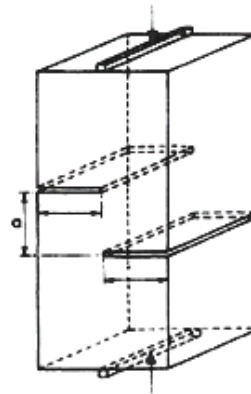
<sup>1</sup> Japan Society of Civil Engineers



منحنی‌های باربرشی - لغزش به دست می‌آید و برای تعیین مشارکت الیاف ضریب طاق برشی<sup>۱</sup> (STF) نمونه‌ها محاسبه می‌شود. (STF) بیانگر توانایی HPRC برای جلوگیری از شکست ترد برشی در اعضای سازه‌ای است. ضریب طاق برشی پیشنهاد شده توسط محققین [۱۶] جهت ارزیابی ظرفیت جذب انرژی HPRC استفاده شده است. این ضریب با مساحت زیر منحنی آزمایشگاهی باربرشی - لغزش به صورت زیر حاصل می‌شود:

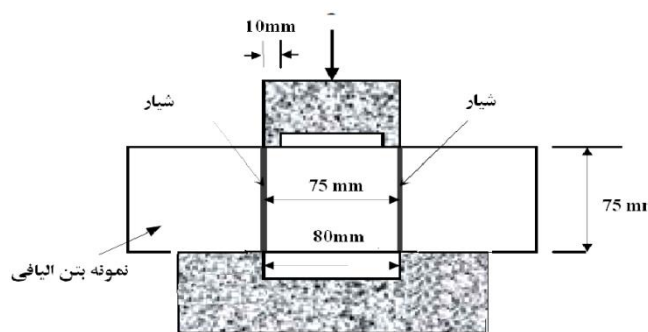
$$STF = \frac{\phi}{\left(\frac{h_n}{m}\right)W_n h_n} \quad (4)$$

که در آن  $\phi$  طاق برشی برابر مساحت زیر منحنی باربرشی - لغزش (برحسب نیوتن در میلی‌متر) تا تغییر مکان  $h/m$  (برحسب  $h$  برحسب  $m$  یا  $in$ ) است.



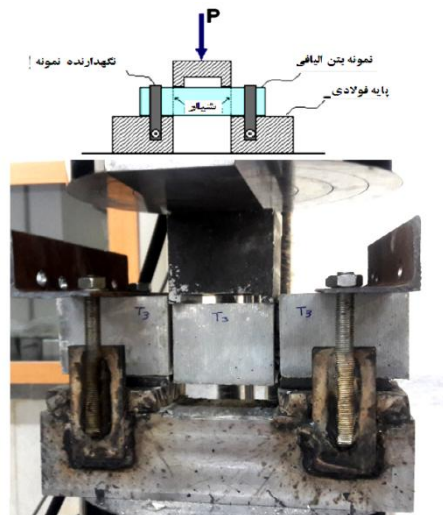
شکل ۵- نمونه بتنی و نحوه بارگذاری نمونه Z شکل [۱۵]

در این مطالعه مطابق شکل ۶ ساخت دستگاه و تجهیزات آزمایش برش مستقیم جهت آزمون، به روش استاندارد JSCEG533 بهبود یافته انجام گرفته است. نتایج آزمایش برش مستقیم به صورت



(ب) هندسه نمونه

شکل ۶- آزمایش برش بر اساس استاندارد JSCE-G



(الف) نحوه انجام آزمایش

۱/۹ برابر، نمونه با الیاف فولادی موجدار (UXC-S) ۲/۱ برابر، نمونه با الیاف ترکیبی فولادی دوانتها قلاب و الیاف پلی‌پروپیلن (UXC-H-PP) و نمونه با الیاف ترکیبی فولادی موجدار و الیاف پلی‌پروپیلن (UXC-H-PP) ۱/۷۲ برابر و نمونه با الیاف پلی‌پروپیلن (UXC-PP) ۱/۶۸ برابر نسبت به حداکثر مقاومت استوانه‌ای نمونه بتن معمولی افزایش یافته است. درحالی که کرنش متناظر در حداکثر تنش فشاری در نمونه با الیاف فولادی دوانتها قلاب (UXC-H) تقریباً ۳/۴۵ برابر، نمونه با الیاف فولادی

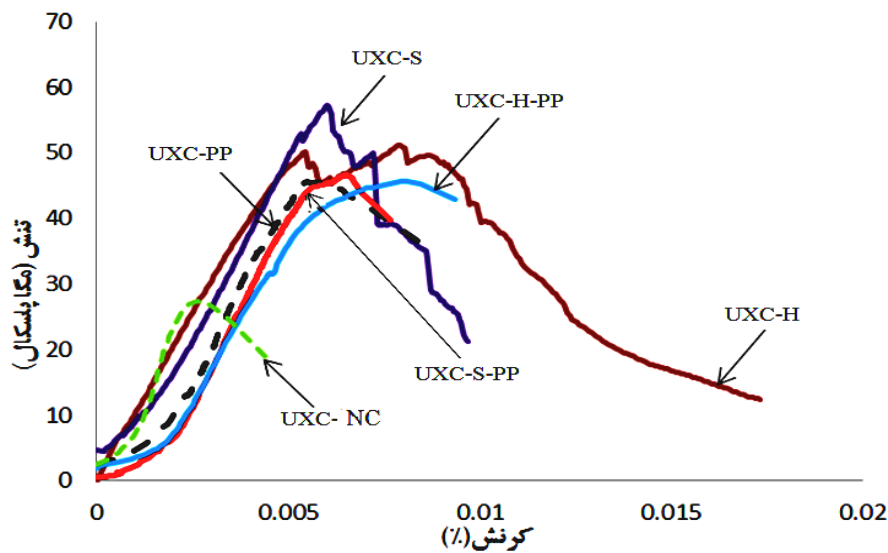
## ۵- بررسی نتایج آزمایشگاهی

### ۵-۱ پاسخ فشاری تک‌محوری

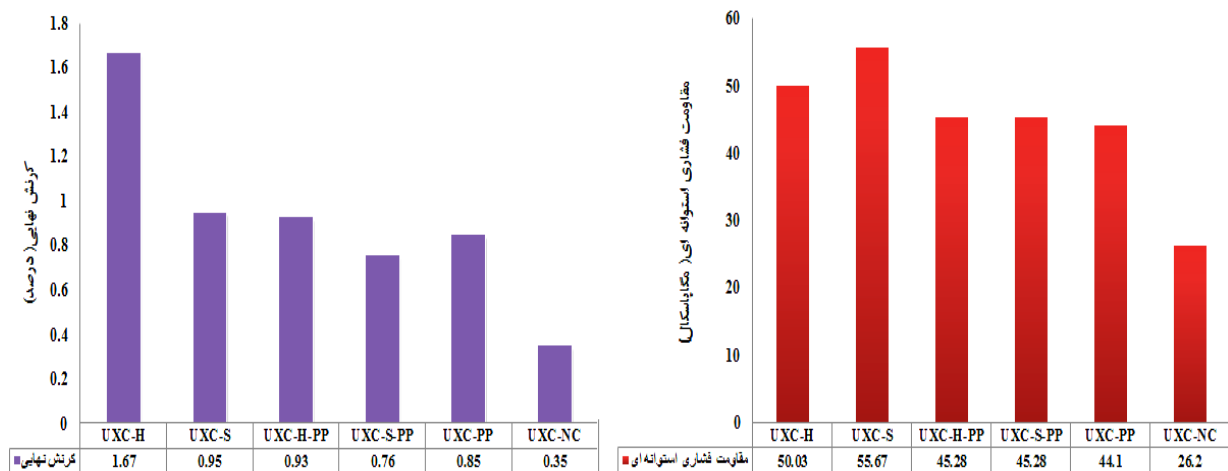
پاسخ‌های تنش-کرنش فشاری تک‌محوری بتن معمولی و نمونه‌های HPRC در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است و به صورت خلاصه در جدول ۴ ارائه شده است. حداکثر مقاومت و کرنش متناظر در نمونه‌های HPRC به وضوح بیشتر از مقادیر نمونه‌های بتن معمولی است، به طوری که حداکثر مقاومت استوانه‌ای نمونه با الیاف فولادی دوانتها قلاب (UXC-H) تقریباً

<sup>۱</sup> Shear toughness factor

موجدار (UXC-S) ۲/۶۳ برابر، نمونه با الیاف ترکیبی فولادی دوانتها قلاب و الیاف پلی پروپیلن (UXC-H-PP) ۳/۴۵ برابر و نمونه با الیاف ترکیبی فولادی موجدار و الیاف پلی پروپیلن (UXC-S-PP) ۲/۷۲ برابر و نمونه با الیاف پلی پروپیلن (UXC-PP) ۲/۵۹ برابر مقادیر متناظر بتن معمولی افزایش یافته است. برحسب پاسخ پس از حداکثر بار، کاهش تدریجی بیشتری در تنش و افزایش ظرفیت کرنش در نمونه‌های HPFRCC مشاهده شده است. بهبود مقاومت، حداکثر کرنش و شکل پذیری می‌تواند به دلیل ممانعت الیاف‌های توزیع شده از انبساط حجمی که به واسطه آن فشار محصورشدگی افزایش یافته است باشد، به طوری که



شکل ۷- پاسخ‌های فشار تک محوری (استوانه‌ای)



ب) کرنش نهایی

الف) مقاومت فشاری

شکل ۸- مقایسه مقاومت فشاری و کرنش نهایی نمونه‌ها در آزمایش فشاری تک محوری





شکل ۹- الگوی ترک خوردگی فشار تک‌محوری استوانه‌ای (نمونه UXC-H)

جدول ۴- خلاصه پارامترهای کلیدی در خصوص نتایج آزمایش فشاری تک‌محوری

نوع الیاف	حجم الیاف (%)	نام نمونه	نقطه حداکثر		
			مقاومت $f_c$ (مگاپاسکال)	کرنش (%)	کرنش نهایی بعد از بار حداکثر
فولادی دو انتها قلاب	۱/۵	UXC-H	۵۰/۰۳	۰/۷۶	۱/۶۷
فولادی موجدار	۱/۵	UXC-S	۵۵/۶۷	۰/۵۸	۰/۹۵
فولادی دو انتها قلاب- پلی پروپیلن	۱/۵	UXC-H-PP	۴۵/۲۴	۰/۷۶	۰/۹۳
فولادی موجدار- پلی پروپیلن	۱/۵	UXC-S-PP	۴۵/۲۸	۰/۶۰	۰/۷۶
پلی پروپیلن	۱/۵	UXC-PP	۴۴/۱۰	۰/۵۷	۰/۸۵
بتن معمولی	-	UXC-NC	۲۶/۲۰	۰/۲۲	۰/۳۵

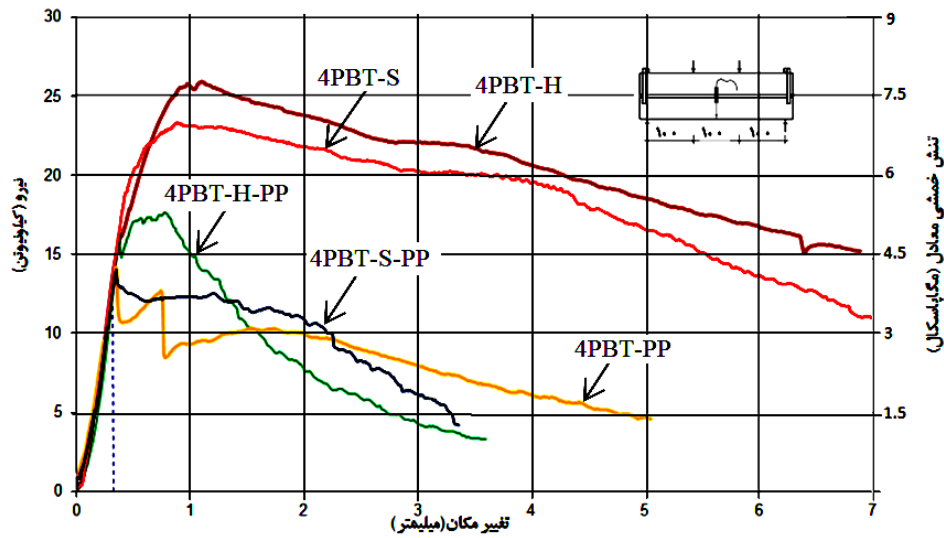
## ۲-۵- پاسخ خمش چهار نقطه ایی

مقاومت خمشی در حد تناسب ( $f_{LOP}$ ) برای الیاف فولادی دو انتها قلاب شکل ۶۷٪، الیاف فولادی موجدار ۷۱/۹۵٪، الیاف ترکیبی فولادی دو انتها قلاب و الیاف پلی پروپیلن ۶۹٪، الیاف ترکیبی فولادی موجدار و الیاف پلی پروپیلن ۶۸٪ و الیاف پلی پروپیلن ۶۴٪ مدول گسیختگی خود، به دست آمده است. مدول گسیختگی ناشی از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای 4PBT-H، 4PBT-S، 4PBT-H-PP، 4PBT-S-PP و 4PBT-PP به ترتیب ۱۹۴٪، ۱۶۴٪، ۹۷٪، ۵۸٪، ۵۰٪ درصد افزایش نسبت به مدول گسیختگی بتن معمولی داشته است. مدول گسیختگی برای حالت الیاف فولادی با انتهای قلاب شکل عملکرد خمشی بهتری نسبت به الیاف فولادی موجدار و سایر الیاف از خود نشان می‌دهند.

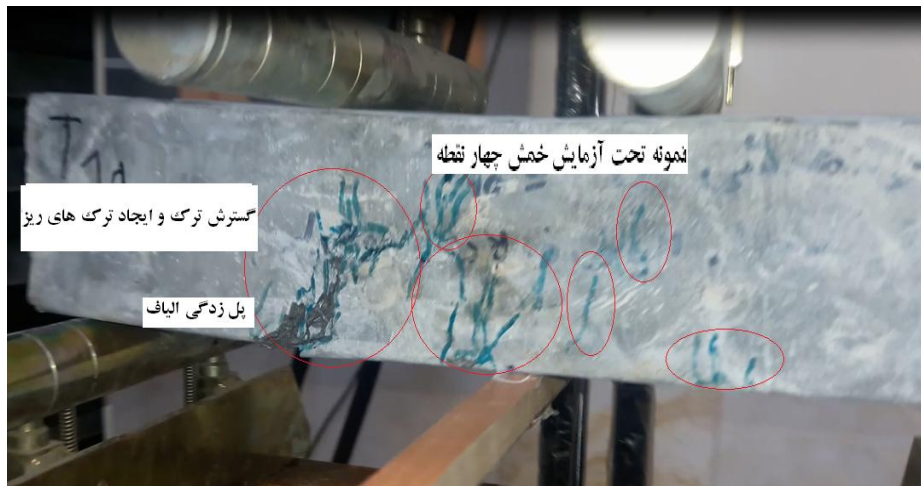
به منظور تحلیل بیشتر منحنی‌ها و تعیین تأثیر پیوند الیاف، ضریب طاقت خمشی،  $FT_8$  محاسبه گردیده است و برای تغییر مکان  $\frac{L}{m}$  (۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر) در شکل ۱۲ ترسیم شده است.

شکل ۱۰ منحنی‌های تنش خمشی معادل و بار بر حسب تغییر مکان در هر یک از مجموعه‌های آزمایش را نشان می‌دهد منحنی متوسط از حداقل دو نمونه به دست آمده است. از ابتدای آزمایش، تنش‌ها تا مشاهده اولین ترک افزایش می‌یابد. آن‌گاه هم‌زمان با اولین ترک، الیاف وارد کار شده و پل زدگی الیاف سبب افزایش باربری و رفتار سخت‌شوندگی می‌گردد، در ادامه بارگذاری با رشد ترک و متمرکز شدن ترک‌ها در ناحیه نرم شدگی نمودار بار- تغییر مکان، همراه می‌گردد. در شکل ۱۱ الگوی ترک خوردگی، رشد ترک و پل زدگی الیاف تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نشان داده شده است.

متوسط مقادیر عددی پارامترهای متعدد مربوط به پاسخ خمشی کامپوزیت‌های HPFRCC نظیر تنش خمشی معادل، تغییر مکان و سختی در حد تناسب و مدول گسیختگی به صورت خلاصه در جدول ۵ ارائه شده است.



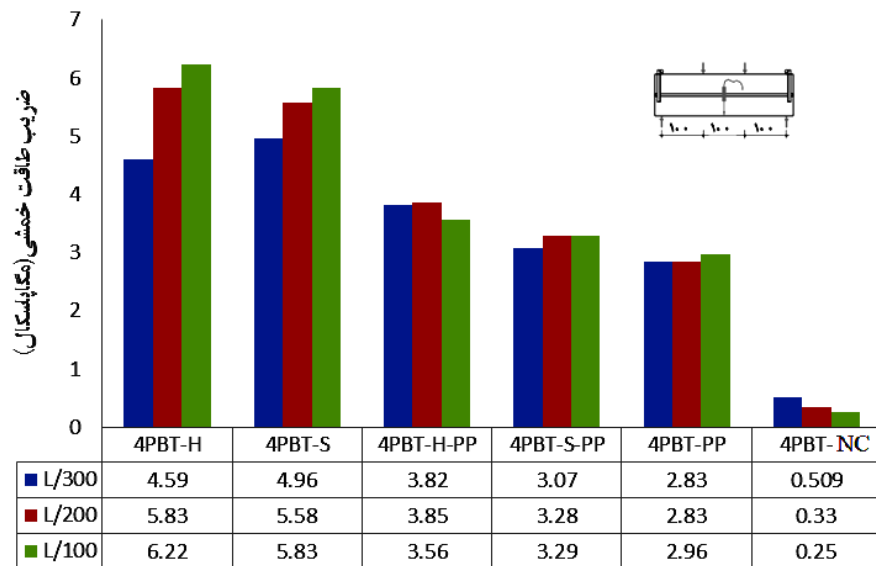
شکل ۱۰- منحنی های بار- تغییر مکان، تنش- تغییر مکان ناشی از خمش چهار نقطه ای



شکل ۱۱- رشد و ایجاد ترک به همراه پل زدگی الیاف در HPRFRC تحت آزمایش خمش چهار نقطه ای

جدول ۵- متوسط مقادیر پارامترهای خمشی

نوع الیاف	نام نمونه	حد تناسب		مدول گسیختگی	
		Limit of proportionality		Modulus of rupture	
		تغییر مکان (میلی متر)	تنش (مگاپاسکال)	تغییر مکان (میلی متر)	تنش (مگاپاسکال)
دو انتها قلاب	4PBT-H	۰/۳۶	۴/۷۶	۱/۰۴	۷/۶۵
موجدار	4PBT-S	۰/۳۷	۴/۹۵	۰/۸	۶/۸۸
دو انتها قلاب- پلی پروپیلن	4PBT-H-PP	۰/۳	۳/۵۹	۰/۶۹	۵/۱۴
موجدار- پلی پروپیلن	4PBT-S-PP	۰/۲۵	۲/۸۰	۰/۳۳	۴/۱۲
پلی پروپیلن	4PBT-PP	۰/۲۳	۲/۵۳	۰/۳	۳/۹



شکل ۱۲- تغییرات ضریب طاقتم نمونه‌های HPFRCC با نسبت‌های مختلف L/m

که مقاومت ترک‌خوردگی، مقاومت برشی حداکثر و رفتار سخت شدگی کرنش در برش همگی تحت تأثیر نوع الیاف می‌باشند و سبب بهبود این خصوصیات شده‌اند. میانگین بار حداکثر ثبت شده برای ترکیبات مختلف با تقسیم آن‌ها بر سطح مقطع به مقاومت برشی تبدیل شده است و نتایج در جدول ۶ ارائه شده‌اند.

مطابق جدول ۶ نمونه الیاف فولادی موجدار ۳/۹۲ برابر، نمونه الیاف قلاب‌دار ۳/۵ برابر، نمونه ترکیبی الیاف فولادی موجدار و پلی‌پروپیلن ۲/۶۵ برابر، نمونه ترکیبی الیاف فولادی قلاب‌دار و پلی‌پروپیلن ۲/۳ برابر و نمونه پلی‌پروپیلن ۲/۱۸ برابر مقاومت برشی بتن معمولی را نشان داده است. شکل ۱۴ نحوه آزمایش و گسیختگی برشی نمونه را مطابق JSCE نشان می‌دهد.

به‌منظور درک تأثیر پیوند الیاف‌ها، به‌ویژه بر روی اتلاف انرژی تحت برش مستقیم، انرژی جذب شده برای تغییر مکان برشی،  $\frac{h}{30}$  و  $\frac{h}{40}$ ،  $\frac{h}{50}$  (ارتفاع نمونه مقطع برشی بر حسب میلی‌متر) در شکل ۱۵ ترسیم شده است.

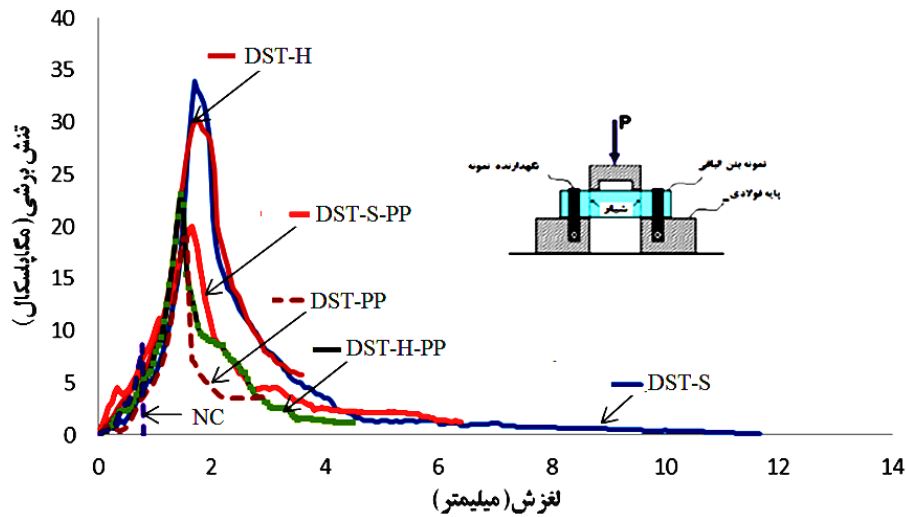
جدول ۶- مقاومت‌های برشی نمونه‌های مختلف

نمونه‌ها	تنش برشی (مگاپاسکال)
DST-H	۳۰/۳۰
DST-S	۳۴/۰۰
DST-H-PP	۱۹/۹۵
DST-S-PP	۲۳/۰۶
DST-PP	۱۸/۹۵
NC	۸/۶۷

مطابق (شکل ۱۲)، از مقایسه بین نمونه‌های HPFRCC و بتن معمولی نشان می‌دهد که طاقتم بتن می‌تواند به میزان زیادی با افزوده شدن الیاف به بتن بهبود یابد. به طوری که بتن‌های الیافی قادر به تحمل بار قابل توجهی پس از ترک خوردن بافت الیاف بوده و انرژی بار-تغییر مکان توسط پل زنی الیاف مستهلک شده و بدین وسیله طاقتم بهبود می‌یابد. همچنین در تغییر مکان  $\frac{L}{300}$  (معادل ۱ میلی‌متر) مطابق با JSCE، بیانگر سطح سرویس دهی جابه‌جایی و ترک خوردگی است. مقدار خیلی کم طاقتم برابر ۰/۵ مگاپاسکال برای نمونه بتن معمولی به علت ترک خوردگی و شکست ترد است. همچنین نمونه‌های فولادی دو انتها قلاب مطابق آزمایش فشاری تک‌محوری که دارای مناسب‌ترین رفتار بود دارای بیشترین طاقتم در بین نمونه‌های HPFRCC است.

### ۵-۳- پاسخ برش مستقیم

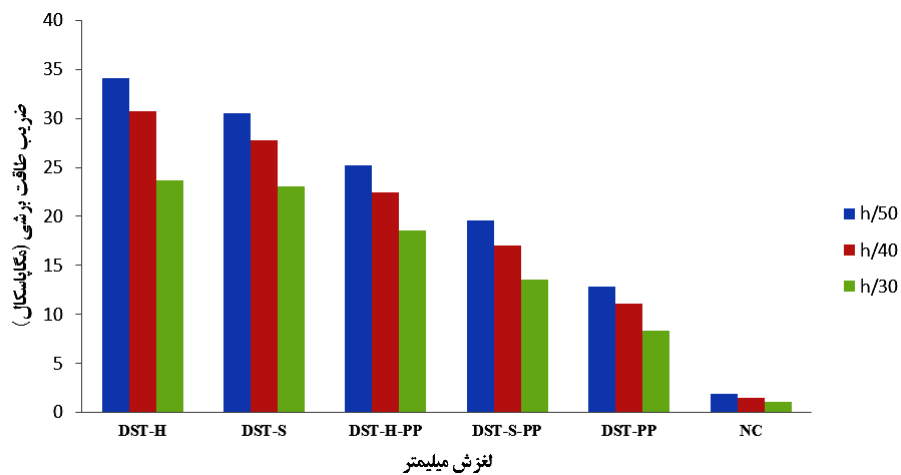
نتایج نمونه‌ها از برنامه آزمایش برش مستقیم به صورت منحنی تنش برشی-لغزش (تغییر مکان) در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. این مقادیر عددی نیز حداقل از سه نمونه برای هر حالت به دست آمده است. رفتار ترد و شکننده بتن ساده از ظرفیت تغییر مکان پایین و مقاومت برشی کم آن مشهود است. این موضوع بیانگر این است که، نمونه بتن معمولی هنگامی که مقاومت برشی زیادی مورد انتظار است، از لحاظ کاربردی نامناسب است. در عوض نمونه‌های HPFRCC رفتار شکل پذیر بیشتری، از طریق تغییر مکان‌های بزرگ‌تر پس از نقطه حداکثر، از خود نشان داده است. منحنی‌های شکل ۱۳ نشان می‌دهند



شکل ۱۳- متوسط منحنی‌های تنش برشی- لغزش (تغییر مکان)



شکل ۱۴- نمونه از مقطع شکست HPCFRCC در آزمایش برش بر اساس JSCE-G



شکل ۱۵- مقادیر انرژی جذب شده در مقادیر مختلف با استفاده از منحنی‌های بار برشی- لغزش

حداکثر مقاومت نمونه‌ها با الیاف فولادی قلاب شکل تقریباً ۱/۹ و

متوسط کرنش متناظر در حداکثر بار حدوداً ۳/۴۵ برابر مقادیر متناظر بتن معمولی افزایش یافته است. بهبود مقاومت و رفتار مشخص نرم شدگی تدریجی مربوط به ممانعت الیاف از انبساط

## ۶- نتیجه گیری

تحت آزمایش فشار تک محوری، وجود الیاف تأثیر کمی بر پاسخ قبل از بار حداکثر داشته است اما این تأثیر بر پاسخ‌های بار حداکثر و پس از بار حداکثر قابل ملاحظه بوده است. برای مثال، متوسط

- [6]. Vandewalle, L., RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. *Materials and structures*, 2000. 33(225): p. 3-6.
- [7]. Sirijaroonchai, K., S. El-Tawil, and G. Parra-Montesinos, Behavior of high performance fiber reinforced cement composites under multi-axial compressive loading. *Cement and Concrete Composites*, 2010. 32(1): p. 62-72.
- [8]. Kang, S.H., T.-H. Ahn, and D.J. Kim, Effect of grain size on the mechanical properties and crack formation of HPFRCC containing deformed steel fibers. *Cement and Concrete Research*, 2012. 42(5): p. 710-720.
- [9]. Choi, J.-I., et al., Composite properties of high-strength polyethylene fiber-reinforced cement and cementitious composites. *Composite Structures*, 2011. 93: p. 116-121.
- [10]. دهقانی ایوب، ناطق الهی فریرز، "طراحی و ساخت کامپوزیت ECC با الیاف پلی‌وینیل الکل و برآورد آزمایشگاهی و تحلیلی ویژگی‌های مهندسی کامپوزیت جدید". مهندسی عمران شریف، دوره ۲-۳۰، شماره ۱.۱، بهار ۱۳۹۳، صفحه ۴۵-۵۷.
- [11]. Brown, R., A. Shukla, and K.R. Natarajan, Fiber reinforcement of concrete structures. 2002.
- [12]. Cho, C.-G., et al., Cyclic responses of reinforced concrete composite columns strengthened in the plastic hinge region by HPFRCC mortar. *Composite Structures*, 2012. 94(7): p. 2246-2253.
- [13]. ASTM, C., 349-97. Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure). Annual book of ASTM, 2002. 4.
- [14]. ASTM, C., 1609/C 1609M-06 Standard Test Method for Flexural Performance of Fibre-Reinforced Concrete (Using Beam with Three-Point Loading). USA: ASTM International, 2006.
- [15]. Mirsayah, A.A. and N. Banthia, Shear strength of steel fiber-reinforced concrete. *Materials Journal*, 2002. 99(5): p. 473-479
- [16]. Higashiyama, H. and N. Banthia, Correlating flexural and shear toughness of lightweight fiber-reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 2008. 105(3): p. 251.
- [17]. ثقفی محمد حسین، شریعتمدار هاشم، خیرالدین علی. "بررسی آزمایشگاهی و کاربرد کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند در مقاوم‌سازی اتصالات تیر به ستون پل‌های راه آهن با قاب‌های صلب." مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل دانشگاه سمنان، دوره ۲ شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۳۳-۵۱.

جانبی است که به‌واسطه آن فشار محصورشدگی افزایش یافته و به تبع آن عملکرد نمونه بهبود یافته است.

در تمام نمونه‌های HPFRCC تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای و برش خالص بهبود طاق خمشی و برشی مشاهده گردید. به طوری که طاق خمشی با توجه به نمونه‌های HPFRCC حدوداً بین ۸ تا ۱۷ برابر بتن معمولی و طاق برشی نمونه‌ها بین ۳ تا ۱۰ برابر بتن معمولی است. همچنین نمونه با الیاف تک، از نوع الیاف فولادی قلاب‌دار، در برش عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌های HPFRCC مشاهده می‌شود.

مقاومت خمشی در حد تناسب ( $f_{LOP}$ ) برای الیاف فولادی دو انتها قلاب شکل ۶۷٪، الیاف فولادی موجدار ۷۱/۹۵٪، الیاف ترکیبی فولادی دو انتها قلاب و الیاف پلی‌پروپیلن ۶۹٪، الیاف ترکیبی فولادی موجدار و الیاف پلی‌پروپیلن ۶۸٪ و الیاف پلی‌پروپیلن ۶۴٪ مدول گسیختگی خود، به دست آمده است. مدول گسیختگی ناشی از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای 4PBT-H، 4PBT-S، 4PBT-S-PP و 4PBT-PP به ترتیب ۱۹۴٪، ۱۶۴٪، ۹۷٪، ۵۸٪، ۵۰٪ درصد افزایش نسبت به مدول گسیختگی بتن معمولی داشته است.

## ۷- مراجع

- [1]. Naaman, A., Characterization of high performance fiber reinforced cement composites-HPFRCC. *High Performance Fiber Cement Composites (HPFRCC2)*, 1996. 2: p. 1-23.
- [2]. Kim, D.j., A.E. Naaman, and S. El-Tawil, Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *cement & concrete composites*, 2008. 30(10): p. 917-928.
- [3]. Bentur, A. and M. Alexander, A review of the work of the RILEM TC 159-ETC: Engineering of the interfacial transition zone in cementitious composites. *Materials and structures*, 2000. 33(2): p. 82-87.
- [4]. Igarashi, S., A. Bentur, and S. Mindess, The effect of processing on the bond and interfaces in steel fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 1996. 18(5): p. 313-322.
- [5]. Romualdi, J.P. and J.A. Mandel. Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement. in *Journal Proceedings*. 1964.

## Experimental Evaluation of Mechanical Properties of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites

Saghafi M.H

PHD Student of Structural Engineering, Faculty of Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Shariatmadar H \*

Associate Prof., Civil Eng. Dept., Faculty of Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Kheyroddin A

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

### Abstract

High Performance Fiber Reinforced Cementitious composites (HPFRCCs) are basically integrated with two main components including fiber and mortar. These two ingredients are interactively affected due to interfacial bonding which develop a strong composite. HPFRCCs are specific kinds of Fiber Reinforced cementitious composites which can undergo strain hardening behavior after initial cracks.

In the present study, it is aimed to understand the strain hardening behavior of HPFRCCs under uniaxial compression, four-point flexural loads and pure shear. The types of fibers and loading path are the effective parameters in this study. Three types of fibers including Hooked end steel fibers, wavy steel fibers and Poly propylene fibers have been solely used or compounded 1.5% by volume of fibers in mortar mixtures. Different mix ratios have been evaluated to achieve the acceptable strain hardening behavior and the best mix ratio has been introduced. Uniaxial compression, four-point flexural loads and pure shear have been chosen as loading paths. The four-point flexural tests on splitless prisms and direct shear tests on split specimens (to decrease the non-optimal failure cross section) have been applied. The test results have been more evaluated to assess the effects of types of fibers on shear and flexural toughness and ductility under compression. It is revealed that the mechanical properties of HPFRCCs have been considerably enhanced rather than normal concretes. HPFRCCs can be applied as an appropriate technique to restrain the reinforcement congestion, decrease the high value of transverse reinforcements at beam-column joints and also improve the shear capacity and ductility of the members.

**Keywords:** HPFRCC, Strain hardening, Flexural Toughness Factor, Shear toughness factor.

---

\* Corresponding Author: shariatmadar@um.ac.ir