

بررسی آزمایشگاهی رفتار کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند

محمدحسین نقیی (دانشجوی دکتری)

هاشم شریعتمدار* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی

علی خیرالدین (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۷ (۱۳۹۷)
دوره‌ی ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۱/۴، ص. ۳۶-۳۷

کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند، یکی از انواع مصالح نوین در صنعت ساخت هستند، که شناسایی و بررسی مشخصات رفتاری آن‌ها به دلیل کمبود اطلاعات، نیاز به مطالعات آزمایشگاهی دارد. در پژوهش حاضر، به ارزیابی رفتار کششی، فشاری و خمشی مصالح ذکرشده با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی پرداخته شده است. در آزمایش‌های انجام‌شده از ۵ نمونه‌ی مختلف HPFRCC با ۳ نوع الیاف متفاوت به‌صورت فقط الیاف و ترکیبی با میزان حجمی ۱/۵٪، بتن در مخلوط ملات استفاده و به ارزیابی رفتار سخت‌شوندگی کرنش و مقایسه با بتن معمولی پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت کششی نمونه‌های HPFRCC بین ۵ تا ۸ برابر مقاومت کششی و کرنش نهایی بین ۷۰ تا ۱۰۰ برابر کرنش نهایی نمونه‌ی بتن معمولی افزایش یافته است. عامل طاقت حاصل از آزمایش خمش نمونه‌های HPFRCC بین ۵ تا ۹ برابر طاقت بتن معمولی محاسبه شده است. همچنین متوسط مقاومت فشاری و کرنش نهایی نمونه‌های HPFRCC به ترتیب ۱/۸۳ و ۲/۹۴ برابر مقاومت فشاری و کرنش نهایی بتن معمولی است.

واژگان کلیدی: کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC)، آزمایش
کشش مستقیم، سخت‌شوندگی کرنش، ضریب طاقت خمشی.

۱. مقدمه

یک نوع خاص از کامپوزیت‌های سیمانی الیافی هستند که علامت مشخصه‌ی آن‌ها، رفتار سخت‌شوندگی کرنش در کشش پس از اولین ترک‌خوردگی است که با ترک‌های چندگانه تا رسیدن به کرنش‌های نسبتاً زیاد همراه می‌شود.

افزودن الیاف به‌صورت گسسته در بتن باعث افزایش ظرفیت کرنش کششی می‌شود که این امر به دلیل ایجاد عملکرد پل‌زدگی الیاف در مقایسه با بتن‌های معمولی است.^[۱] اما با افزایش تغییرشکل، بتن الیافی ترک‌خورده قادر به تحمل تنش‌های ایجادشده در اطراف ترک‌ها نخواهد بود و پس از رسیدن به مقاومت اولین ترک‌خوردگی از خود رفتار نرم‌شدگی کرنش کششی مطابق شکل ۲ نشان می‌دهد. بنابراین عملکرد کلی عناصر بتن الیافی به نحوه‌ی توزیع الیاف در بتن وابسته است. در واقع، الیافی که به‌طور مناسبی توزیع نشده باشند، در تحمل تنش‌های کششی ناشی از بارهای اعمالی مؤثر نخواهند بود.^[۲] همچنین افزایش میزان الیاف فولادی در بتن بیش از ۲٪ می‌تواند باعث جداسازی الیاف و افزایش میزان هوای داخل بتن شود. از این‌رو کارآمدی الیاف در تحمل تنش‌های کششی و خمشی تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. از دیدگاه مفهومی می‌توان این چنین بیان کرد که افزودن الیاف به‌تنهایی، روشی کارآمد جهت دستیابی به مقاومت کامپوزیت نیست.^[۱] در HPFRCC وجود درشت‌دانه‌ها و میزان زیاد الیاف با توزیع مناسب، منجر

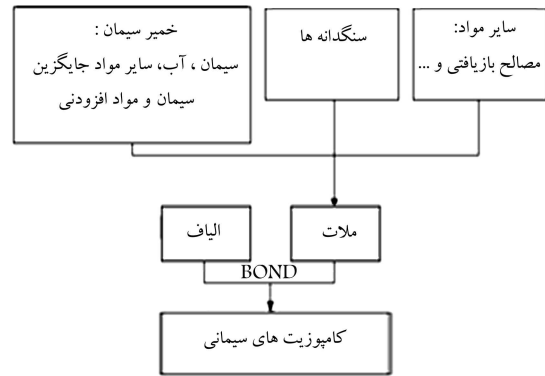
کامپوزیت‌های سیمانی الیافی به‌صورت موادی مرکب با دو مؤلفه‌ی اصلی، شامل الیاف و ملات تعریف می‌شوند (شکل ۱). ملات، صرف‌نظر از اینکه خمیر یا بتن باشد، شامل سنگ‌دانه‌ها و مواد افزودنی ویژه است. حفره‌های هوا نیز که در طول عمل اختلاط در ملات محبوس می‌شوند، جزئی از آن به‌حساب می‌آیند. الیاف نیز دومین مؤلفه‌ی اصلی تشکیل کامپوزیت است. الیاف و ملات به سبب وجود پیوستگی با یکدیگر کار می‌کنند که منجر به تشکیل یک کامپوزیت قوی می‌شود. روشی که برای تعریف کامپوزیت سیمانی الیافی در رده‌ی مصالح توانمند به کار می‌رود، بر مبنای شکل منحنی تنش - کرنش کششی آن قرار دارد (شکل ۲). اگر منحنی تنش - کرنش، نشان‌دهنده‌ی رفتار سخت‌شوندگی کرنش بعد از مرحله‌ی ترک‌خوردگی اولیه باشد، در رده‌ی مصالح توانمند قرار می‌گیرد. در غیر این صورت، برای یک کامپوزیت سیمانی الیافی معمولی، منحنی تنش - کرنش با رفتار نرم‌شوندگی، کرنش بلافاصله پس از نخستین ترک‌خوردگی است. این موضوع در شکل ۲ مشاهده می‌شود. لذا می‌توان گفت که کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC)،^[۱]

* نویسنده مسئول

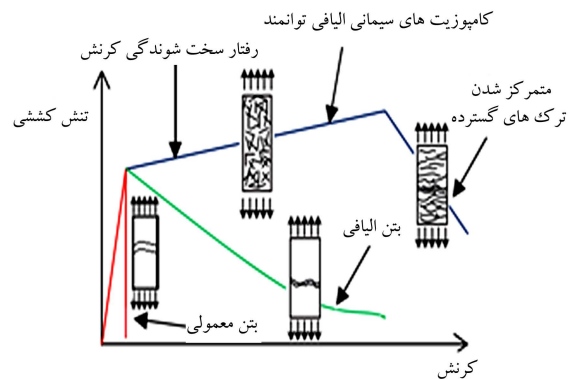
تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۸/۸، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۰/۱۹، پذیرش ۱۳۹۵/۱۱/۱۱.

DOI: 10.24200/J30.2019.1425

saghafi.mh@st u.um.ac.ir
shariatmadar@um.ac.ir
kheyroddin@semnan.ac.ir



شکل ۱. دو مؤلفه‌ی اصلی تشکیل‌دهنده‌ی کامپوزیت شامل ملات و الیاف.



شکل ۲. مقایسه‌ی رفتار کششی بتن معمولی، بتن الیافی و HFRCC.

الیاف سلولزی (ناشی از الیاف چوب) و الیاف ترکیبی فولادی و سلولزی پرداخته و نتایج نشان داد که HFRCC با الیاف فولادی، بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد، همچنین الیاف سلولزی، به تنهایی طاقتمندی را در بتن معمولی تغییر نمی‌دهند، ولی در نمونه‌های ترکیبی، عملکرد مشترک مثبت بین الیاف فولادی و سلولزی سبب افزایش طاقتمندی می‌شود.^[۸] در مطالعات آزمایشگاهی دیگری (۱۶ و ۲۰) نیز در خصوص مشخصات کامپوزیت‌های پایه سیمانی و روبراه‌های گدازه‌ی قلیایی (GGBS)^۲ مسلح با الیاف پلی‌اتیلن با مقاومت بالا، به منظور تعیین مشخصات مکانیکی کامپوزیت، مجموعه‌ی آزمایش‌ها شامل: آزمایش تعیین چگالی، فشار و کشش تک‌محوری انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن است که کامپوزیت GGBS نسبت به کامپوزیت پایه‌ی سیمانی، ظرفیت کرنش کششی بالاتری با عرض و فواصل ترک‌های کمتر از خود نشان می‌دهد.^[۹] در سال ۲۰۱۴ نیز به طراحی، ساخت و بررسی خصوصیات کششی، فشاری و خمشی کامپوزیت‌های سیمانی توانمند با الیاف پلی‌وینیل‌الکل پرداخته شد و نتایج نشان داد که رفتار منحصر به فرد مواد مذکور در کشش، خمش و ظرفیت کرنشی بسیار زیاد ناشی از ترک‌خوردگی متعدد است.^[۱۰] ظرفیت کرنش بالای مصالح مذکور، آن‌ها را برای استفاده در مفصل خمیری اتصالات تیر به ستون تحت تغییرشکل‌های غیرکشسان بزرگ و کاهش مقدار آرماتورهای عرضی ایده‌آل ساخته و همچنین در ساخت عناصر سازه‌ی، نیاز به آرماتورهای عرضی ویژه با استهلاک انرژی بالا و خاصیت کاهش سختی پایین‌تر را برطرف کرده است.^[۱۱] برخی پژوهشگران نیز در سال ۲۰۱۶ به بررسی آزمایشگاهی و کاربرد کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند در مقاوم‌سازی اتصالات تیر به ستون پل‌های راه‌آهن با قاب‌های صلب پرداختند و نتایج نشان داد که رفتار اتصالات تیر - ستون خارجی بهسازی‌شده با پانل‌های HFRCC سبب ۹۳٪ افزایش شکل‌پذیری، ۴۵٪ افزایش مقاومت جانبی نسبت به اتصال بتن معمولی می‌شود.^[۱۲] همچنین در پژوهش دیگری در همان سال، به بررسی اثر استفاده از مصالح HFRCC در تیرها و قاب‌های بتنی پرداخته شد و نتایج حاصل از آزمایش‌ها افزایش ظرفیت باربری و تغییرشکل نهایی تیرها و قاب‌های HFRCC را نشان داد. علاوه بر این، افزایش طول و ظرفیت دورانی مفصل خمیری در تیرها و قاب‌های HFRCC نسبت به نمونه‌های مشابه بتنی از سایر نتایج پژوهش مذکور بوده است.^[۱۳] از آنجایی که انجام آزمایش کشش مستقیم جهت بررسی رفتار سخت‌شوندگی کرنش و نیز ساخت HFRCC با مصالح موجود در کشور تاکنون انجام نشده و با توجه به اینکه پژوهش‌ها در مورد تأثیر الیاف ترکیبی در رفتار HFRCC بسیار محدود بوده است؛ لذا در پژوهش حاضر، ضمن ارائه‌ی طرح اختلاط HFRCC باهدف دستیابی به رفتار سخت‌شوندگی کرنش به انجام آزمایش کشش مستقیم جهت دریافت پاسخ تنش - کرنش بعد از بار ترک‌خوردگی و بررسی خصوصیات مکانیکی کششی، فشاری و خمشی HFRCC پرداخته شده است.

۲. اهمیت تحقیق

اگرچه مطالعاتی درباره‌ی مقاومت فشاری و خمشی بتن الیافی و HFRCC انجام شده است، اما پژوهش در مورد روش به دست آوردن پاسخ تنش - کرنش کششی HFRCC جهت بررسی رفتار سخت‌شوندگی این مصالح بسیار کم صورت گرفته است. همچنین مطالعات بسیار محدودی در رابطه با خصوصیات مقاومت کششی، فشاری، و خمشی HFRCC در کنار هم، تأثیر نوع الیاف و الیاف ترکیبی در این مشخصات صورت گرفته است. در پژوهش حاضر، پاسخ فشاری HFRCC با

به تأمین خاصیت سخت‌شوندگی کرنش با ترک‌های ریز مضاعف و ظرفیت بالای کرنش بین ۱ تا ۵٪ به همراه افزایش شکل‌پذیری سازه می‌شود.^[۱] همچنین مشکلات ناشی از خاصیت شکنندگی بتن‌های متعارف، نظیر: خردشدگی، قلوه‌کن شدن و گسیختگی پیوند بتن می‌تواند مرتفع شود. کرنش کششی HFRCC نه فقط باعث بهبود رفتار پس از ترک‌خوردگی می‌شود، بلکه باعث افزایش پیوند تماسی بتن و آرماتورها نیز می‌شود. در دهه‌ی ۱۹۶۰، بررسی تأثیر الیاف فولادی در کاهش شکنندگی بتن در دستورکار قرار داده شد،^[۴] و روند مذکور با کاربرد سایر انواع الیاف ادامه یافت و در سال‌های اخیر، ترکیب انواع الیاف با طول‌های مختلف در دستورکار قرار گرفت. گسترش دانش در خصوص چگونگی تأثیر الیاف در ملات، منجر به تدوین توصیه‌هایی در مورد طراحی سازه‌ی توسط مؤسسه‌ی RILEM شد.^[۵] در سال ۲۰۱۰،^[۶] نیز به منظور درک بهتر رفتار سخت‌شوندگی کرنش HFRCC تحت بارهای فشاری تک‌محوری، دومحوری و سه محوری، آزمایش‌هایی انجام شد و نتایج حاکی از آن بود که استفاده از الیاف کوتاه‌تر می‌تواند به طور عمده‌ی مقاومت و شکل‌پذیری را تحت مسیرهای بارگذاری تک‌محوری و دومحوری افزایش دهد. همچنین نتایج نشان داد که آثار محصورشدگی به واسطه‌ی الیاف در آزمایش‌های فشاری سه‌محوری که در آن‌ها فشارهای محصورشدگی خارجی نسبتاً بالایی هست، اندک است. همچنین در سال ۲۰۱۰، به بررسی آثار اندازه‌ی ذرات سنگ‌دانه‌ها در رفتار HFRCC پرداخته شد و ۴ نوع سنگ‌دانه با اندازه‌ی ذرات مختلف با استفاده از طرح اختلاط مشابه حاوی ۲٪ حجمی الیاف فولادی در انتها قلاب و پیچشی ارزیابی شد و نتایج نشان داد که مقاومت فشاری در سنگ‌دانه‌های ریزتر به طور قابل توجهی بیشتر بوده است.^[۷] در سال ۲۰۱۳ نیز به بررسی رفتار خمشی HFRCC با الیاف فولادی،

بتن الیاف استفاده شده است. میزان الیاف مورد استفاده در پژوهش حاضر براساس بیشینه‌ی مقادیر توصیه شده در مطالعات پیشین، بوده است.^[۱۲]

۲.۳. اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

به منظور مخلوط کردن مصالح سیمانی از همزن ملات استفاده شده است. ابتدا سیمان، میکروسیلیس، و سنگ‌دانه‌ها به مدت ۳ دقیقه به صورت خشک مخلوط شدند. سپس آب به آن اضافه شد و به مدت ۳ دقیقه مخلوط شدند و پس از آن، مواد فوق روان‌کننده به صورت تدریجی اضافه و برای ۵ تا ۱۰ دقیقه دیگر مخلوط شدند. میزان مواد فوق روان‌کننده‌ی مخلوط براساس توزیع یکنواخت الیاف و عدم جداشدگی آن‌ها حین اختلاط و ساخت به دست آمده است. پس از آن برای نمونه‌های کششی، فشاری و خمشی، مخلوط ملات با الیاف به دقت در قالب‌ها ریخته شدند. با توجه به اینکه مخلوط حاصل با الیاف به صورت خودتراکم است، لزومی به انجام عملیات تراکم نبوده است. تمامی نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت قبل از قالب‌برداری توسط صفحات پلاستیکی پوشانده و در دمای اتاق نگهداری شدند. پس از قالب‌برداری، نمونه‌ها به مدت ۳ هفته‌ی دیگر در یک مخزن آب نگهداری شدند. تمامی نمونه‌ها به مدت ۶ روز در دمای آزمایشگاه خشک و سپس در روز بیست و هشتم آزمایش شدند.

۴. نحوه‌ی آزمایش و پارامترهای توصیفی نتایج آزمایش

۱.۴. آزمایش‌های فشار استوانه‌یی

جهت انجام آزمایش‌های فشار تک‌محوری از تجهیزات آزمایش یونیورسال تحت شرایط کنترل تغییرمکان با سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه و نمونه‌های استوانه‌یی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. به منظور اندازه‌گیری تغییرشکل طولی تا بیشینه‌ی بار، دو دستگاه LVDT در امتداد وجه نمونه مطابق شکل ۴ نصب شده است. به منظور جلوگیری از آسیب‌دیدگی LVDT ناشی از افزایش‌های سریع تغییرمکان فراتر از بیشینه‌ی بار، دستگاه‌های LVDT برداشته شدند و تغییرمکان پس از بار بیشینه با استفاده از تغییرمکان اندازه‌گیری شد. سپس پاسخ کلی تنش - کرنش با اتصال دو رکورد به دست آمده است. در مرحله‌ی قبل از بیشینه‌ی بار، متوسط کرنش با تقسیم متوسط تغییرمکان‌های دو LVDT بر طول گیج LVDT (۱۰۰ میلی‌متر) به دست آمده است. در مرحله‌ی پس از بیشینه‌ی بار، مطابق مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۰^[۶] متوسط کرنش با تقسیم

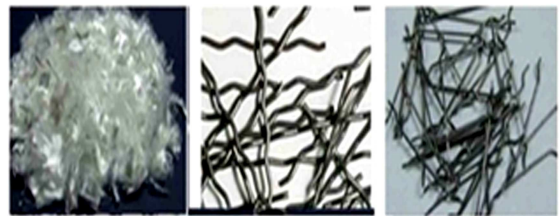
استفاده از نمونه‌های استوانه‌یی، آزمون کشش مستقیم با ارائه‌ی روشی جدید برای تعیین مقاومت کششی و آزمون‌های خمش بر روی نمونه‌های مشغوری بدون شکاف انجام شده است.

۳. مصالح و روش‌ها

۱.۳. مصالح و طرح اختلاط

در پژوهش حاضر، اجزاء مصالح و طرح اختلاط استفاده شده در نتیجه‌ی بررسی روی نمونه‌ها با نسبت‌های مختلف مصالح جهت دست‌یابی به رفتار سخت‌شوندگی است. به طوری که بهترین طرح اختلاط ملات با نسبت اختلاط وزنی مطابق جدول ۱ ارائه شده است. تمامی نمونه‌ها طرح اختلاط ملات یکسان دارند. سیمان مصرفی سیمان پرتلند تیپ II کارخانه‌ی شاهرود، فوق روان‌کننده‌ی استفاده شده بر پایه‌ی پلی کربوکسیلاتی با نام تجاری P۹-۳R محصول شرکت شیمی ساختمان، میکروسیلیس مورد استفاده از کارخانه‌ی فروسیلیس سمنان، و ماسه‌ی استفاده شده در طرح اختلاط شامل سنگ‌دانه‌های خردشده‌ی معمولی (NS) ۳ با قطر ۰/۱ میلی‌متر تا ۲/۴ میلی‌متر و به صورت میانگین ۰/۷ میلی‌متر بوده است.

در پژوهش حاضر، سه نوع الیاف شامل دو نوع فولادی محصول صنایع مفتولی زنجان و یک نوع پلیمری محصول شرکت میسون مطابق شکل ۳ استفاده شده است. مشخصات الیاف در جدول ۲ ارائه شده است. یکی از الیاف فولادی مورد استفاده، الیاف با دو انتها قلاب (HE) ۴ است که یک الیاف آجدار شناخته شده بوده و به صورت تجاری از سال ۱۹۷۰ استفاده شده است. الیاف فولادی دیگر، الیاف موجدار است که اخیراً توسعه یافته است. الیاف فولادی دو نوع تغییرشکل دارند: اولین نوع با تسلیم خودمهارها و دیگری با از بین رفتن پیوستگی است. الیاف‌های ذکر شده در میزان حجمی برابر ۱/۵٪ حجم بتن در نظر گرفته شده و در حالت‌های الیاف ترکیبی دو نوع الیاف، به نسبت ۰/۷۵٪ از هر الیاف و در مجموع ۱/۵٪ حجمی



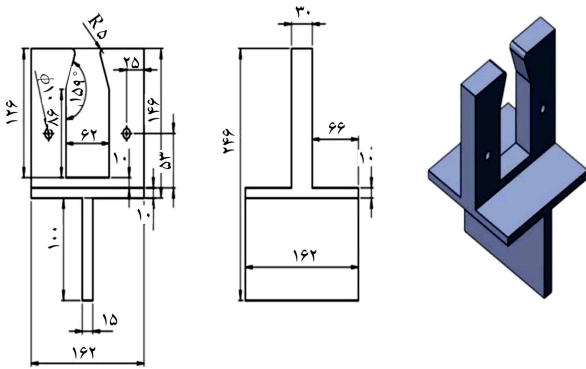
شکل ۳. الیاف استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر.

جدول ۱. طرح اختلاط ملات HPRCC.

نوع بتن	فوق روان‌کننده (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	میکروسیلیس (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)
HPRCC	۱۳,۷۷	۹۱۸	۹۱,۸	۲۵۷	۹۱۸

جدول ۲. مشخصات اصلی الیاف.

نوع الیاف	طول (mm)	قطر (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول کشسانی (GPa)	چگالی (kg/m^3)
الیاف فولادی دو انتهای قلاب	۳۵	۰/۸	۱۱۰۰	۲۱۲	۷۸۵۰
الیاف فولادی موجدار	۳۵	۰/۸	۱۱۰۰	۲۱۲	۷۸۵۰
الیاف پلی‌پروپیلن	۱۲	۰/۱۸	۴۵۰	۱۰	۹۱۰



شکل ۶. فک آزمایش کشش تک‌محوری.

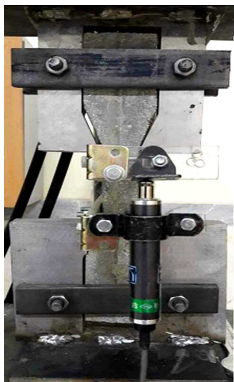


تجهیزات و دستگاه ثبت اطلاعات آزمایش مقاومت فشاری.

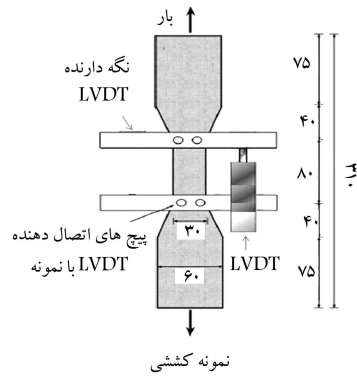


الف) نحوه اندازه‌گیری کرنش نمونه استوانه‌ای؛

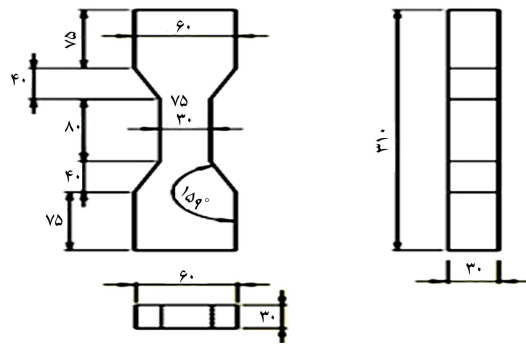
ب) تجهیزات و دستگاه ثبت اطلاعات آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری.



شکل ۷. نحوه‌ی انجام آزمایش کشش تک‌محوری.



شکل ۵. هندسه‌ی نمونه‌ی آزمایش کشش تک‌محوری.



تغییر شکل دستگاه بر ارتفاع کلی نمونه به دست آمده است. متوسط تنش نیز مستقیماً با تقسیم بار دستگاه بر سطح مقطع استوانه به دست آمد.

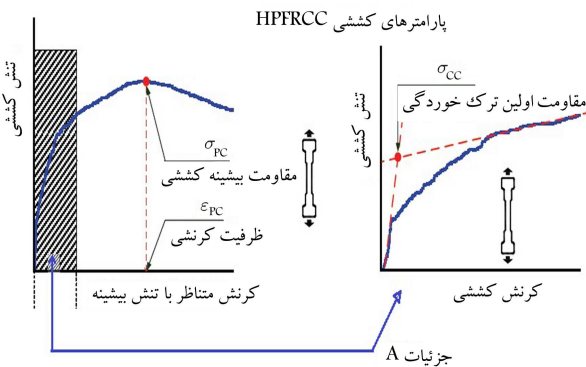
۲.۴. آزمایش‌های کشش

آزمایش‌های کشش تک‌محوری بر روی نمونه‌های دمبلی‌شکل مطابق با شکل ۵، با ابعاد توصیه‌شده توسط انجمن مهندسان عمران ژاپن (JSCE) [۱۵]، ۵ انجام شده است. با استفاده از تجهیزات آزمایش یونیورسال تحت شرایط کنترل تغییرمکان با سرعت بارگذاری ۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه و با استفاده از فک طراحی‌شده مطابق شکل ۶، نمونه در دستگاه آزمایش قرار گرفته و در طی آزمایش‌ها، نیروی بارگذاری و تغییر طول اندازه‌گیری شده است. به منظور تعیین تغییر طول از یک دستگاه LVDT در وجه مرکز نمونه‌ی کششی در راستای بارگذاری استفاده شد (شکل ۷). شمای کلی منحنی بار- تغییرمکان تحت آزمایش کشش مستقیم و پارامترها، شامل: مقاومت اولین ترک‌خوردگی (σ_{cc})، مقاومت بیشینه‌ی کششی (σ_{pc}) و کرنش متناظر با مقاومت بیشینه‌ی کششی (ϵ_{pc}) در شکل ۸ مشاهده می‌شود. [۷]

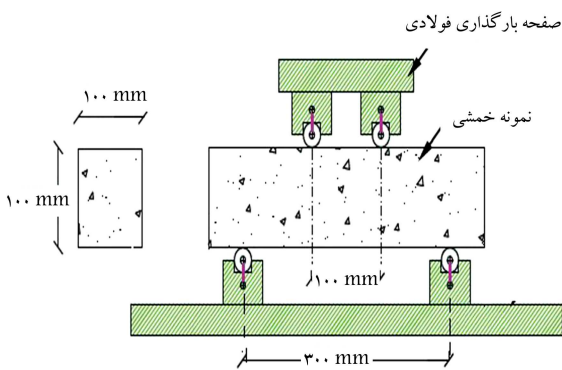
۳.۴. آزمایش‌های خمش

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، نمونه‌ی آزمایش خمش و نحوه‌ی آزمایش مطابق با استاندارد ۵-۹M-۱۶۰۹/C۱۶۰۹ ASTM در نظر گرفته شده است. [۱۶] جزئیات انجام آزمایش در استاندارد ASTM C۱۶۰۹ ارائه و تغییرمکان مرکز نمونه توسط دستگاه LVDT اندازه‌گیری شده است.

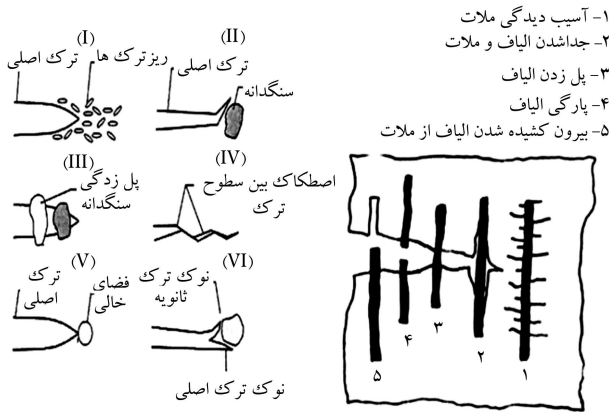
شکل کلی منحنی بار- تغییرمکان برای تیر HPRC تحت خمش ۴ نقطه‌یی براساس مطالعات روییتز [۱۰] در شکل ۱۰ الف نشان داده شده است. همان‌طور که



شکل ۸. پارامترهای آزمایش کشش. [۷]

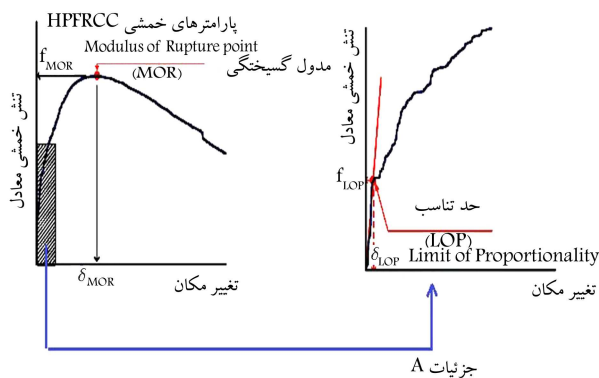


شکل ۹. نحوه‌ی آزمایش و هندسه‌ی نمونه‌ی خمشی.

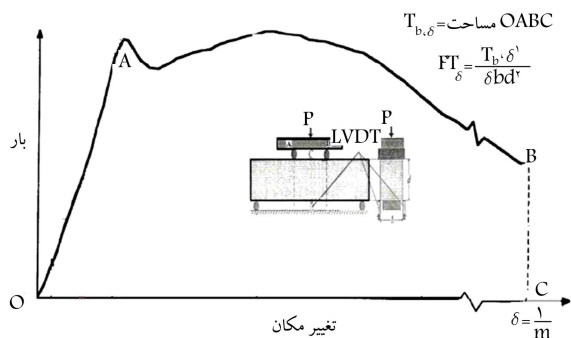


۱- آسیب دیدگی ملات
۲- جدا شدن الیاف و ملات
۳- پل زدن الیاف
۴- پارگی الیاف
۵- بیرون کشیده شدن الیاف از ملات

شکل ۱۱. مکانیزم های مختلف جذب انرژی ناشی از ماتریس و الیاف. [۱۸]



شکل ۱۲. پارامترهای آزمایش خمشی. [۷]

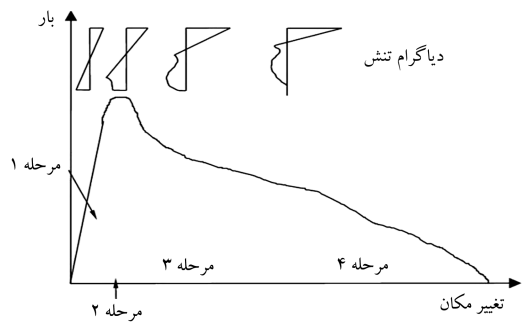


شکل ۱۳. شکل کلی منحنی بار - تغییر مکان و نحوه محاسبه ی طاق ت بر اساس استاندارد JCI-SF۴.

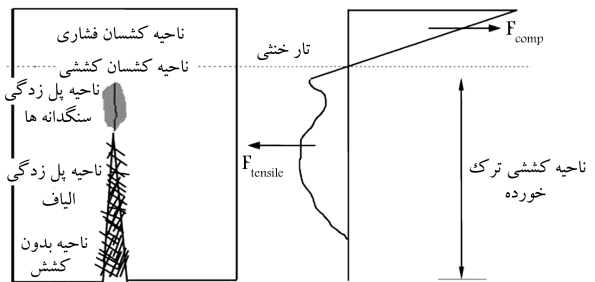
۵۰/۵ برابر δ ، تقسیم بر سطح زیر منحنی بار - تغییر مکان تا اولین ترک یعنی δ را با اندیس های $I_5, I_{10}, I_{20}, I_{30}, I_{50}$ و I_{100} نشان می دهند. یکی از مشکلات روش مذکور، تعیین مقدار قابل اعتماد محل اولین ترک δ است. لذا روش ارائه شده ی JSCE (۲۰۰۵) [۱۹] در مقایسه با روش ASTM C ۱۶۰۹ نسبتاً خطای انسانی کمتری دارد، لذا در پژوهش حاضر از روش JSCE استفاده شده است.

با استفاده از منحنی بار - تغییر مکان، به منظور اندازه گیری جذب انرژی بر اساس روش JSCE، ضریب طاق ت خمشی FT_{δ} مطابق رابطه ی ۲ و شکل ۱۳، آنالیز شده است.

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



الف) شکل کلی منحنی بار - تغییر مکان و مراحل گسترش ترک تحت خمش در تیر HSPFRCC؛



ب) دیاگرام تنش مقطع بتنی در مرحله ۴.

شکل ۱۵. شکل کلی منحنی بار - تغییر مکان و توزیع تنش در مقطع مراحل مختلف آزمایش خمش.

مشاهده می شود، ۴ مرحله ی گسترش ترک به این شرح است: [۱۷]

- مرحله ی ۱: بدون ترک خوردگی؛
- مرحله ی ۲: ایجاد ترک های ریز؛
- مرحله ی ۳: ایجاد ترک های متمرکز؛
- مرحله ی ۴: ایجاد ترک های عمیق به همراه بیرون آمدن الیاف.

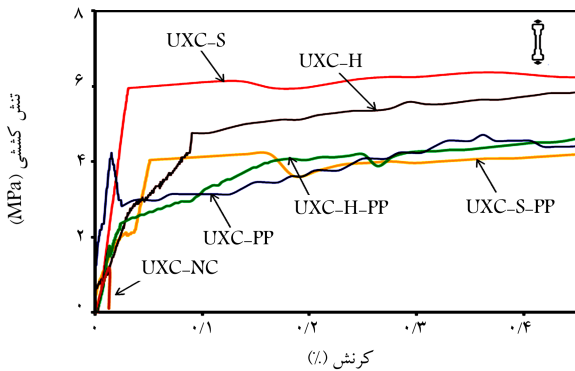
در شکل ۱۵ ب نیز دیاگرام تنش مقطع در مرحله ی ۴ بررسی شده است و در آن ناحیه ی فشاری، کششی بدون ترک خوردگی و کششی با ترک خوردگی که خود شامل ۳ بخش: پل زدگی سنگ دانه یی، پل زدگی الیاف و بخش بدون تنش است، مشخص شده است. همچنین در شکل ۱۱، مکانیزم های مختلف جذب انرژی ناشی از ماتریس و الیاف مشاهده می شود.

پارامترهای رفتار خمشی کامپوزیت HSPFRCC نیز در شکل ۱۲ نشان داده شده اند: نقطه یی که پاسخ غیرخطی آغاز می شود، حد تناسب (LOP) δ^y ، و نقطه ی بیشینه ی بار خمشی، مدول گسیختگی (MOR) δ^A نامیده می شود. تنش خمشی معادل با استفاده از رابطه ی ۱ مطابق با استاندارد ASTM C ۱۶۰۹ تعیین شده است:

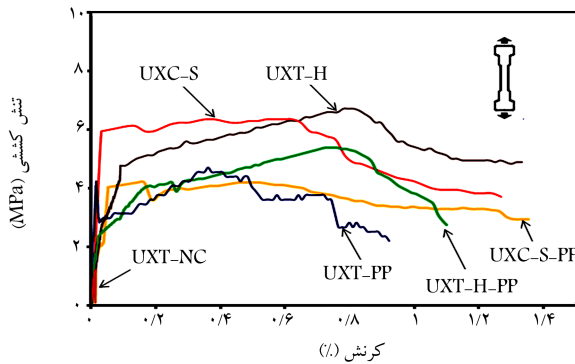
$$f = \frac{P \cdot L}{b \cdot d^2} \quad (1)$$

که در آن، f مقاومت خمشی معادل، P بار اعمالی، L طول دهانه ی نمونه، b عرض نمونه و d ارتفاع نمونه است.

با توجه به اینکه استاندارد ASTM C ۱۶۰۹ برای اندازه گیری طاق ت از روی منحنی بار - تغییر مکان ناشی از خمش چهار نقطه یی، اندیس بدون بعدی بر پایه ی انرژی ارائه می کند که اگر تغییر مکان نمونه در لحظه ی ایجاد اولین ترک برابر δ باشد به ترتیب سطح زیر منحنی بار - تغییر مکان تا ۳، ۵/۵، ۱۰/۵، ۱۵/۵ و ۲۵/۵ و



الف) پاسخ‌های کشش در محدوده سخت‌شوندگی کرنش؛



ب) پاسخ‌های کشش تک‌محوری تا لحظه شکست نهایی.

شکل ۱۴. پاسخ‌های کشش تک‌محوری.



شکل ۱۵. الگوی ترک‌خوردگی و شکست نمونه‌ی کششی UXT-H-PP.

همچنین نمونه‌های UXT-S و UXT-H در کرنش بیش از ۱٪، قادر به تحمل سطح تنش نسبت به سایر نمونه‌ها هستند. رفتار گیرداری مؤثر الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت کششی و کرنش نسبت به سایر کامپوزیت‌ها می‌شود. نتایج آزمایش براساس مقاومت اولین ترک‌خوردگی، مقاومت بیشینه‌ی کششی، کرنش متناظر با مقاومت بیشینه و کرنش نهایی در جدول ۳ خلاصه شده است. همچنین در شکل ۱۵، الگوی ترک‌خوردگی و نحوه‌ی شکست نمونه‌ی HPCRCC مشاهده می‌شود.

بررسی نتایج در برخی مطالعات صورت گرفته شده،^[۷] نشان می‌دهد که در نمونه‌ی HPCRCC با الیاف فولادی دوانتها قلاب با میزان حجمی ۲٪، محدوده‌ی کرنش سخت‌شوندگی بین ۰/۰۲ تا ۰/۴۵۱ درصد و مقاومت اولین ترک‌خوردگی برابر ۷/۸۱۴ مگاپاسکال و مقاومت بیشینه‌ی کششی برابر ۱۰/۷۴ مگاپاسکال بوده است. همچنین در مطالعه‌ی دیگری،^[۶] نمونه با الیاف فولادی قلاب‌شکل با مقاومت بالا با میزان حجمی بین ۱٪ تا ۲٪ در مخلوط ملات، محدوده‌ی کرنش سخت‌شوندگی بین ۰/۰۱ تا ۰/۳ درصد و مقاومت اولین ترک‌خوردگی بین ۱/۱۳ تا ۱/۳۳ مگاپاسکال و مقاومت بیشینه‌ی کششی بین ۳/۴۸ تا ۴/۲۴ مگاپاسکال

که در آن، ضریب طاقتم خمشی در تغییرمکان δ تیر، Tb, δ مساحت زیر منحنی از تغییرمکان صفر تا δ تغییرمکان L دهانه، b عرض تیر و d عمق تیر است. تغییرمکان δ تیر به صورت رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود که در آن m یک عدد ثابت است.

$$\delta = \frac{1}{m} \quad (3)$$

تغییرمکان $\frac{L}{10}$ توسط JSCE اغلب به علت اینکه خیلی بزرگ‌تر از حدود تغییرمکان سرویس‌دهی است، مورد انتقاد است. بنابراین، $FT\delta$ برای محدوده‌ی وسیعی از نسبت مذکور و m برابر ۱۵۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ برای نمونه‌های محاسبه شده هستند. هر کدام از شاخص‌های مذکور نیز بیانگر سطوح متفاوتی از سرویس‌دهی برحسب جابه‌جایی هستند.

به منظور تسهیل در شناسایی، هر یک از نمونه‌ها به صورت منحصر به فرد با استفاده از یک نام، شامل دو بخش در نظر گرفته شده‌اند. مؤلفه‌ی اول نمایانگر شرایط بارگذاری برای فشار تک‌محوری نمونه‌ی استوانه‌یی (UXC) ۱°، برای خمش چهار نقطه‌یی (۴PBT) ۱۱° و برای کشش مستقیم (UXT) ۱۲° است. مؤلفه‌ی دوم در نام نمونه، نمایانگر نوع الیاف (H برای الیاف فولادی دوانتها قلاب، S برای الیاف فولادی موجدار، PP برای الیاف پلی‌پروپیلن و NC برای بتن معمولی) است. به طور مثال، UXC-H معرف نمونه‌ی استوانه‌یی HPCRCC با الیاف فولادی دوانتها قلاب تحت آزمایش فشار تک‌محوری است. از طرفی دیگر، ۴PBT-H-PP معرف نمونه‌ی ترکیبی HPCRCC با ۰/۷۵٪ الیاف فولادی قلاب‌شکل و ۰/۷۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌یی است.

۵. بررسی و نتایج

۵.۱. پاسخ کشش تک‌محوری

پاسخ‌های تنش - کرنش کششی تک‌محوری بتن معمولی و نمونه‌های HPCRCC در شکل ۱۴ نشان داده شده است. به‌وضوح ملاحظه می‌شود، پاسخ بتن معمولی (UXT-NC) تحت کشش شکننده بوده است، یعنی تا ایجاد اولین ترک به صورت کشسان خطی بوده و پس از آن افت ناگهانی تنش ایجاد شده است. افزودن الیاف، پاسخ را به نحو قابل‌ملاحظه‌یی تغییر داده و آسیب‌دیدگی‌های موضعی پس از اولین ترک‌خوردگی حذف شده است. مطابق با شکل ۱۴، تمامی نمونه‌هایی که با الیاف مخلوط شده‌اند، از خود رفتار سخت‌شوندگی کرنش به همراه ترک‌های مضعف نشان داده‌اند. بهبودهای دیگری نیز مشاهده شده است؛ به‌طور متوسط، مقاومت و کرنش نمونه‌های HPCRCC نسبت به بتن معمولی افزایش قابل‌توجهی داشته است.

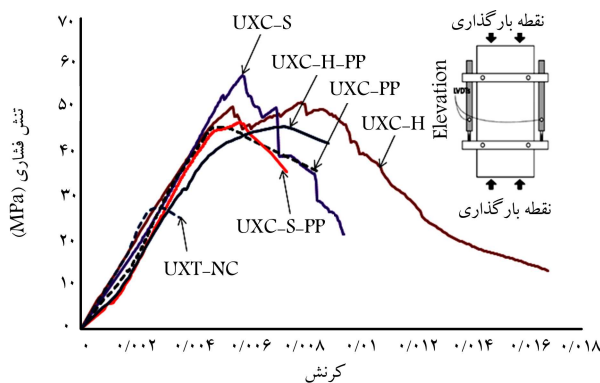
همچنین مقاومت کششی نمونه با الیاف فولادی دوانتها قلاب (UXT-H) حدوداً ۸ برابر مقاومت بتن معمولی و به‌طور مشابه، مقاومت نمونه‌های با الیاف فولادی موجدار (UXT-S)؛ نمونه‌ی ترکیبی با الیاف فولادی دوانتها قلاب و الیاف پلی‌پروپیلن (UXT-H-PP)؛ نمونه‌ی ترکیبی با الیاف فولادی موجدار و الیاف پلی‌پروپیلن (UXT-S-PP) و نمونه‌های با الیاف پلی‌پروپیلن (UXT-PP) به ترتیب تقریباً ۷/۷۴، ۵/۶۵، ۵/۷ و ۵/۱ برابر متوسط مقاومت بتن معمولی بوده است. برحسب شکل‌پذیری نیز، نمونه‌های UXT-S-PP و UXT-H شکل‌پذیری بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها نشان داده‌اند، به‌طوری‌که کرنش نهایی UXT-S، UXT-H و UXT-S-PP، UXT-H-PP، UXT-S-PP، UXT-PP به ترتیب ۱۰۰، ۹۷، ۸۳، ۱۰۳ و ۷۰ برابر کرنش نهایی نمونه‌ی بتن معمولی است.

جدول ۳. نتایج آزمایش کشش تک محوری.

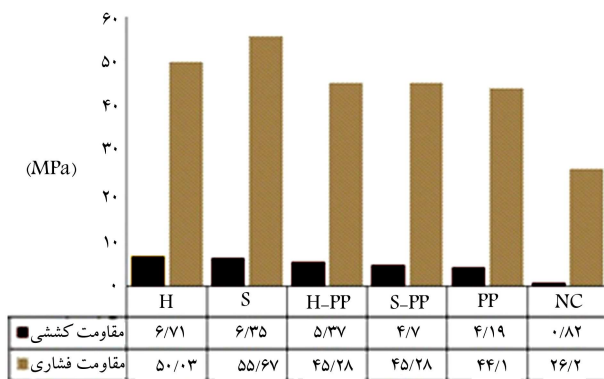
نوع الیاف	حجم الیاف (%)	نام نمونه	اولین ترک		مقاومت بیشینه		کرنش بیشینه
			تنش (مگاپاسکال)	کرنش (%)	تنش (مگاپاسکال)	کرنش (%)	
			σ_{cc}	ϵ_{cc}	σ_{pc}	ϵ_{pc}	ϵ_{uc}
فولادی دو انتها قلاب	۱٫۵	UXT-H	۲٫۹۸	۰٫۰۲۱	۶٫۷۱	۰٫۸۱	۱٫۳۱
فولادی موجدار	۱٫۵	UXT-S	۵٫۶۷	۰٫۰۲۹	۶٫۳۵	۰٫۶۲	۱٫۲۷
فولادی دو انتها قلاب - پلی پروپیلن	۱٫۵	UXT-H-PP	۲٫۳۵	۰٫۰۲۳	۵٫۳۷	۰٫۷۲	۱٫۰۸
فولادی موجدار - پلی پروپیلن	۱٫۵	UXT-S-PP	۴٫۲۳	۰٫۰۱۵	۴٫۷	۰٫۳۶	۱٫۳۵
پلی پروپیلن	۱٫۵	UXT-PP	۱٫۹۶	۰٫۰۱	۴٫۱۹	۰٫۱۵	۰٫۹۱
بتن معمولی	-	UXT-NC	۰٫۸۲	۰٫۰۱۳	-	-	۰٫۰۱۳

جدول ۴. خلاصه‌ی نتایج آزمایش فشاری تک محوری.

نوع الیاف	نام نمونه	نقطه‌ی بیشینه		کرنش نهایی بعد از بار بیشینه
		مقاومت مگاپاسکال f'_c	کرنش (%)	
فولادی دو انتها قلاب	UXC-H	۵۰٫۰۳	۰٫۷۶	۱٫۶۷
فولادی موجدار	UXC-S	۵۵٫۶۷	۰٫۵۸	۰٫۹۵
فولادی دو انتها قلاب - پلی پروپیلن	UXC-H-PP	۴۵٫۲۴	۰٫۷۶	۰٫۹۳
فولادی موجدار - پلی پروپیلن	UXC-S-PP	۴۵٫۲۸	۰٫۶۰	۰٫۷۶
پلی پروپیلن	UXC-PP	۴۴٫۱۰	۰٫۵۷	۰٫۸۵
بتن معمولی	UXC-NC	۲۶٫۲۰	۰٫۲۲	۰٫۳۵



شکل ۱۶. پاسخ‌های فشار تک محوری (استوانه‌یی).



شکل ۱۷. مقایسه‌ی مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها.

بوده است. در مطالعاتی با نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن، [۳] نیز محدوده‌ی کرنش سخت‌شوندگی بین ۰٫۰۱ تا ۳ درصد و مقاومت اولین ترک خوردگی برابر ۲٫۵ مگاپاسکال و مقاومت بیشینه‌ی کششی در محدوده‌ی ۳ تا ۴ مگاپاسکال بوده است. [۲] به طور کلی، تمامی کامپوزیت‌های بررسی شده در مطالعه‌ی حاضر، محدوده‌ی کرنش سخت‌شوندگی، مقاومت کششی و ظرفیت کرنش کششی نزدیک به کامپوزیت‌های سیمانی مسلح با الیاف، که در مطالعات پیشین گزارش شده بودند، را از خود نشان داده‌اند. [۳-۷]

۲.۵. پاسخ فشاری تک محوری

پاسخ‌های تنش - کرنش فشاری تک محوری نمونه‌ها در شکل ۱۶ و جدول ۴ ارائه شده است. بیشینه‌ی مقاومت، کرنش متناظر، و کرنش نهایی در لحظه‌ی شکست نمونه‌های فشاری HPRCC بیشتر از مقادیر بتن معمولی است، چرا که الیاف‌های توزیع شده با پل زدن و محدود کردن گسیختگی، از انبساط حجمی جلوگیری می‌کنند. همچنین متوسط مقاومت فشاری و کرنش نهایی نمونه‌های HPRCC، به ترتیب ۱٫۸۳ و ۲٫۹۴ برابر مقاومت و کرنش نهایی بتن معمولی است.

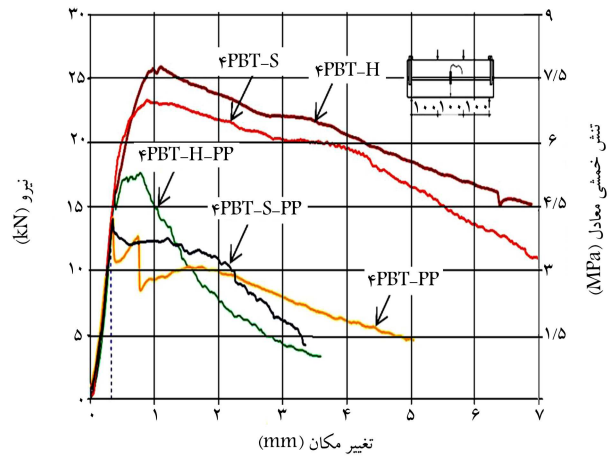
شکل ۱۷، نمودار مقاومت کششی و فشاری نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. متوسط مقاومت کششی نمونه‌های HPRCC تقریباً ۱۱۳٪ مقاومت فشاری متناظر آن است. در حالی که مقاومت کششی بتن معمولی، ۳۲٪ مقاومت فشاری آن است. به طوری که در نمونه‌های HPRCC به‌طور متوسط، نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری به میزان ۳٫۵۳ برابر این نسبت در بتن معمولی است.

۳.۵. پاسخ خمش چهار نقطه‌یی

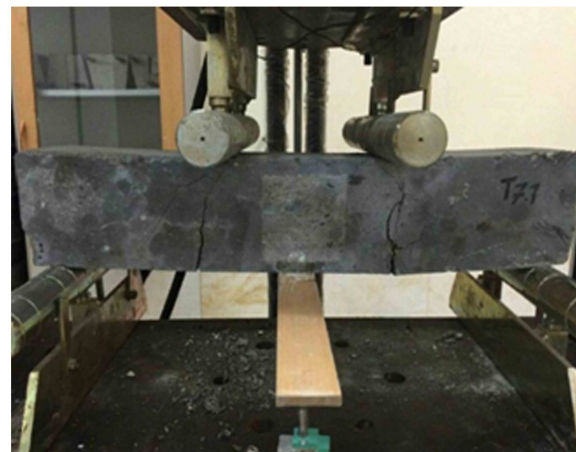
شکل ۱۸، منحنی‌های تنش خمشی معادل و بار بر حسب تغییرمکان در هر یک از مجموعه‌های آزمایش را نشان می‌دهد. منحنی متوسط از کمینه‌ی دو نمونه به‌دست آمده است. از ابتدای آزمایش، تنش‌ها تا مشاهده‌ی اولین ترک افزایش یافتند و آنگاه بعد از ایجاد اولین ترک در نمونه، کاهش نسبتاً کم سختی روی داد. هم زمان با رشد ترک و پل‌زدگی الیاف، شاخه‌های جدید ایجاد شد. همچنین ترک‌های دیگری در ناحیه‌ی یک‌سوم میانی تیر ایجاد شد، در این حالت افزایش باربری بر روی نمونه‌ها مشاهده شد. هم‌زمان متمرکز شدن ترک‌ها و بازشدگی زیاد ترک‌ها، سبب کاهش باربری و قرار گرفتن در شاخه‌ی نرم‌شدگی منحنی بار - تغییرمکان می‌شود. الگوی ترک‌خوردگی، رشد ترک و پل‌زدگی الیاف تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌یی در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود.

متوسط مقادیر عددی پارامترهای متعدد مربوط به پاسخ خمشی کامپوزیت‌های HSPFRCC نظیر تنش خمشی معادل، تغییرمکان در حد تناسب و مدول گسیختگی به‌صورت خلاصه در جدول ۵ ارائه شده است.

مقاومت خمشی در حد تناسب (f_{LOP}) برای الیاف فولادی دواتها قلاب‌شکل



شکل ۱۸. منحنی‌های بار - تغییرمکان، تنش - تغییرمکان ناشی از خمش.



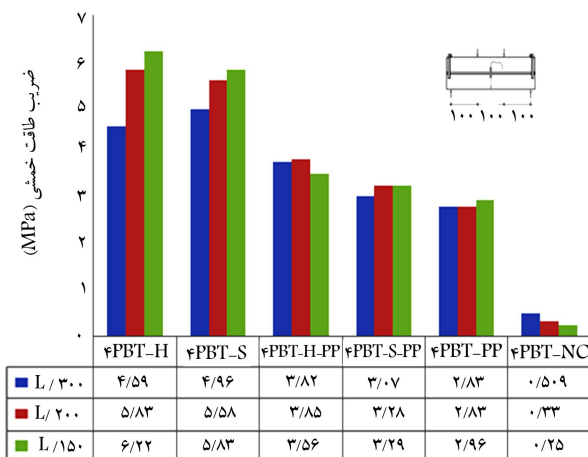
شکل ۱۹. رشد و ایجاد ترک به همراه پل‌زدگی الیاف در HSPFRCC تحت آزمایش خمش.

۶۲٪ الیاف فولادی موجدار ۷۱/۹۴٪، الیاف ترکیبی فولادی دواتها قلاب و الیاف پلی‌پروپیلن ۶۹٪، الیاف ترکیبی فولادی موجدار و الیاف پلی‌پروپیلن ۶۸٪ و الیاف پلی‌پروپیلن ۶۴٪ مدول گسیختگی خود به‌دست آمده است. مدول گسیختگی ناشی از آزمایش خمش چهار نقطه‌یی 4PBT-H-PP، 4PBT-S، 4PBT-H، 4PBT-PP و 4PBT-S-PP به ترتیب ۲/۹۴، ۲/۶۴، ۱/۹۷، ۱/۵۸ و ۱/۵ برابر مدول گسیختگی بتن معمولی به‌دست آمده است.

مدول گسیختگی برای حالت الیاف فولادی با انتهای قلاب‌شکل، عملکرد خمشی بهتری نسبت به الیاف فولادی موجدار و سایر الیاف از خود نشان داده‌اند. به‌منظور تحلیل بیشتر منحنی‌ها و تعیین تأثیر پیوند الیاف، ضریب طاقت خمشی (FT_{δ}) محاسبه و برای تغییرمکان $\frac{L}{m}$ (۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر) در شکل ۲۰ ترسیم شده است.

مطابق شکل ۲۰، مقایسه بین نمونه‌های HSPFRCC و بتن معمولی نشان می‌دهد که طاقت بتن می‌تواند به میزان زیادی با افزوده‌شدن الیاف به بتن بهبود یابد. به‌طوری‌که HSPFRCC قادر به تحمل بار قابل توجهی پس از ترک‌خوردن بافت الیاف است و انرژی بار - تغییرمکان توسط پل‌زنی الیاف مستهلک می‌شود و بدین‌وسیله طاقت بهبود می‌یابد.

همچنین در تغییرمکان $\frac{L}{300}$ (معادل ۱ میلی‌متر) مطابق با JSCE بیانگر سطح سرویس‌دهی جابه‌جایی و ترک‌خوردگی است. مقدار خیلی کم طاقت برابر ۰/۵ مگاپاسکال برای نمونه بتن معمولی به علت ترک‌خوردگی و شکست ترد است. به‌طوری‌که در سطح سرویس‌دهی مذکور، نمونه‌های 4PBT-H، 4PBT-S، 4PBT-H-PP، 4PBT-S-PP و 4PBT-PP به ترتیب ۵/۱۸، ۵/۲، ۵/۳۸ و ۵/۳ مگاپاسکال و برای بتن معمولی به ازاء تغییرمکان‌های $\frac{L}{300}$ و $\frac{L}{150}$ به ترتیب ۰/۳ و ۰/۲۲ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است که نتایج نمونه‌های آزمایش‌شده نزدیک به مطالعه‌ی حاضر است.



شکل ۲۰. تغییرات طاقت نمونه‌های HSPFRCC با نسبت‌های مختلف L/m .

جدول ۵. متوسط مقادیر پارامترهای خمشی.

نوع الیاف	نام نمونه	حد تناسب		مدول گسیختگی	
		تغییر مکان (میلی متر)	تنش (مگاپاسکال)	تغییر مکان (میلی متر)	تنش (مگاپاسکال)
دو انتها قلاب	۴PBT-H	۰٫۳۶	۴٫۷۶	۱٫۰۴	۷٫۶۵
موجدار	۴PBT-S	۰٫۳۷	۴٫۹۵	۰٫۸	۶٫۸۸
دو انتها قلاب - پلی پروپیلن	۴PBT-H-PP	۰٫۳	۳٫۵۹	۰٫۶۹	۵٫۱۴
موجدار - پلی پروپیلن	۴PBT-S-PP	۰٫۲۵	۲٫۸۰	۰٫۳۳	۴٫۱۲
پلی پروپیلن	۴PBT-PP	۰٫۲۳	۲٫۵۳	۰٫۳	۳٫۹
بتن معمولی	۴PBT-NC	۰٫۲۹	۲٫۶	۰٫۲۹	۲٫۶

۶. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، به ارزیابی مشخصات رفتاری کامپوزیت های سیمانی الیافی توانمند با استفاده از آزمایش های کششی، فشاری، و خمشی پرداخته شده است. طرح اختلاط ملات به کار رفته در نمونه ها براساس نتایج بهینه ای انجام آزمایش های مقدماتی به دست آمده و در پژوهش حاضر از آن استفاده شده است. پس از آن، تعداد ۳۶ نمونه ای آزمایشگاهی با الیاف تک و ترکیبی برای بررسی رفتارهای کششی تک محوره، فشاری تک محوره و خمشی چهار نقطه ای ساخته شده است. با انجام آزمایش ها، نتایج مشخصات رفتاری کامپوزیت های سیمانی الیافی توانمند با نتایج بتن معمولی و نتایج مطالعات سایر پژوهشگران ارزیابی شده است. بررسی نتایج نشان می دهد:

همراه ترک های متعدد نشان داده اند، به طوری که مقاومت کششی HSPFRCC با الیاف فولادی دو انتها قلاب حدوداً ۸ برابر مقاومت بتن معمولی بوده است. به طور مشابه، مقاومت نمونه های HSPFRCC با الیاف فولادی موجدار ۰٫۷۷۴، HSPFRCC ترکیبی با الیاف فولادی قلاب دار و الیاف پلی پروپیلن ۰٫۶۷۵، HSPFRCC ترکیبی با الیاف فولادی موجدار و الیاف پلی پروپیلن ۰٫۵۷ و HSPFRCC با الیاف پلی پروپیلن ۰٫۵۱ برابر متوسط مقاومت بتن معمولی است.

- نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری HSPFRCC با الیاف فولادی قلاب دار ۱٫۳۴٪، الیاف فولادی موجدار ۱٫۱۱/۳۳٪، الیاف ترکیبی فولادی دو انتها قلاب و پلی پروپیلن ۱٫۸۷/۱۱٪، الیاف ترکیبی فولادی موجدار و پلی پروپیلن ۱٫۰۳۷٪ و الیاف پلی پروپیلن ۰٫۹۵٪ بوده است. همچنین نمونه های HSPFRCC به طور متوسط نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری به میزان ۳٫۵ برابر این نسبت در بتن معمولی دارند.
- در تمام نمونه های HSPFRCC تحت آزمایش خمشی چهار نقطه ای، بهبود طاقتم خمشی مشاهده شد. عامل طاقتم نمونه های ۴PBT-S، ۴PBT-H، ۴PBT-H-PP، ۴PBT-S-PP، ۴PBT-PP در تغییر مکان $\frac{L}{3}$ (معادل ۱ میلی متر) در سطح سرویس دهی به ترتیب ۹٫۷، ۷٫۵، ۶٫۰۳، ۵٫۵۶ برابر طاقتم بتن معمولی داشته است.
- مدول گسیختگی ناشی از آزمایش خمشی چهار نقطه ای ۴PBT-H، ۴PBT-S، ۴PBT-H-PP، ۴PBT-S-PP، ۴PBT-PP به ترتیب ۲٫۹۴، ۲٫۶۴، ۱٫۹۷، ۱٫۵۸ و ۱٫۵ برابر مدول گسیختگی بتن معمولی به دست آمده است.
- نمونه های با فقط الیاف (فولادی دو انتها قلاب و موجدار) بهترین عملکرد و نیز بیشترین مقاومت فشاری، کششی، کرنش نهایی کششی و طاقتم خمشی را در بین نمونه های HSPFRCC داشته است.
- با مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش های انجام شده بر روی نمونه های HSPFRCC و سایر مطالعات انجام شده ی مشابه دنیا مشخص شده که خصوصیات مکانیکی و نیز رفتار سخت شوندگی به دست آمده ی مصالح مورد بررسی نزدیک به سایر مطالعات است و نتایجی قابل قبول برای کامپوزیت های سیمانی توانمند هستند.

- تحت آزمایش فشار تک محوری، مقاومت فشاری و کرنش نهایی نمونه های HSPFRCC نسبت به بتن معمولی افزایش یافته است، به طوری که مقاومت فشاری نمونه های الیاف فولادی دو انتها قلاب و الیاف فولادی موجدار به ترتیب ۱٫۹ و ۲٫۱۲ افزایش و کرنش نهایی آن ها به ترتیب ۴٫۷۷ و ۲٫۷۱ نسبت به بتن معمولی افزایش یافته است. همچنین مقاومت فشاری نمونه های با الیاف ترکیبی، شامل الیاف فولادی قلاب دار و الیاف پلی پروپیلن ۱٫۷۲ و مقدار کرنش نهایی آن ۲٫۶۵ نسبت به بتن معمولی افزایش داشته است. در نمونه ای ترکیبی دیگر، شامل الیاف فولادی موجدار با الیاف پلی پروپیلن، مقاومت فشاری و مقدار کرنش نهایی به ترتیب ۱٫۷۲ و ۲٫۱۷ نسبت به بتن معمولی افزایش دارد، همچنین مقاومت فشاری و کرنش نهایی نمونه های با الیاف پلی پروپیلن به ترتیب ۱٫۶۸ و ۲٫۴۲ نسبت به بتن معمولی افزایش دارد.

- وجود الیاف تأثیر کمی در پاسخ قبل از بار بیشینه در بین نمونه های HSPFRCC داشته است، اما این تأثیر در پاسخ های بار بیشینه و پس از بار بیشینه قابل ملاحظه بوده است. به طوری که متوسط مقاومت فشاری و کرنش نهایی HSPFRCC به ترتیب ۱٫۸۳ و ۲٫۹۴ برابر مقاومت و کرنش نهایی بتن معمولی بوده است.
- تمامی نمونه ها که با الیاف مخلوط شده اند، از خود رفتار سخت شوندگی کرنش به

پانویس ها

1. high performance fiber reinforced cementitious composite

2. ground-granulated blast furnace slag
3. normal sand
4. hooked ended
5. Japan society of civil engineers

6. Robins
7. limit of proportionality
8. modulus of rupture point
9. flexural toughness factor
10. uniaxial compression of cylinder
11. point of flexural test
12. uniaxial tension

منابع (References)

1. Holschemacher, K., Mueller, T. and Ribakov, Y. "Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete", *Materials & Design*, **31**(5), pp. 2604-2615 (2010).
2. Chidambaram, R.S. and Agarwal, P. "The confining effect of geo-grid on the mechanical properties of concrete specimens with steel fibre under compression and flexure", *Construction and Building Materials*, **71**, pp. 628-637 (2014).
3. Zhang, R., Matsumoto, K., Hirata, T. and et al. "Application of PP-ECC in beam-column joint connections of rigid-framed railway bridges to reduce transverse reinforcements", *Engineering Structures*, **86**, pp. 146-156 (2015).
4. Romualdi, J.P. and Mandel, J.A. "Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement", *In Journal Amer. Concr. Inst.*, **61**, pp. 657-670 (1964).
5. Vandewalle, L. "RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete", *Materials and Structures*, **33**(225), pp. 3-6 (2000).
6. Sirijaroonchai, K., El-Tawil, S. and Parra-Montesinos, G. "Behavior of high performance fiber reinforced cement composites under multi-axial compressive loading", *Cement and Concrete Composites*, **32**(1), pp. 62-72 (2010).
7. Kang, S.H., Ahn, T.-H. and Kim, D.J. "Effect of grain size on the mechanical properties and crack formation of HPFRCC containing deformed steel fibers", *Cement and Concrete Research*, **42**(5), pp. 710-720 (2012).
8. Bantia, N., Majdzadeh, F., Wu, J. and et al. "Fiber synergy in hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC) in flexure and direct shear", *Cement and Concrete Composites*, **48**, pp. 91-97 (2014).
9. Choi, J.-I., Song, K., Song, J.-K. and et al. "Composite properties of high-strength polyethylene fiber-reinforced cement and cementless composites", *Composite Structures*, **138**, pp. 116-121 (2016).
10. Dehghani, A. and Nateghi elahi, F. "Experimental and analytical estimation of mechanical properties of engineered cementitious composites (ECC) with polyvinyl alcohol fibers", *Civil Engineering Sharif*, **30-2**(1.1), pp. 45-57 (2014).
11. Hemmati, A., Kheyroddin, A. and Sharbatdar, M.K. "Plastic hinge rotation capacity of reinforced HPFRCC beams", *Journal of Structural Engineering*, **141**(2), pp. 04014111 (2013).
12. Saghafi, M.H., Shariatmadar, H. and et al. "Experimental study and application of high performance fiber reinforced cementitious composites for retrofitting beam-column joints in rigid-framed railway bridges", *Transportation Infrastructure Engineering (JTIE)*, **2**(1), pp. 33-51 (2016).
13. Hemmati, A., Kheyroddin, A., Sharbatdar, M. and et al. "Ductile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composite (HPFRCC) frames", *Construction and Building Materials*, **115**, pp. 681-689 (2016).
14. Cho, C.-G., Kim, Y.-Y., Feo, L. and et al. "Cyclic responses of reinforced concrete composite columns strengthened in the plastic hinge region by HPFRCC mortar", *Composite Structures*, **94**(7), pp. 2246-2253 (2012).
15. Japan Society of Civil Engineers, "Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC)", Concrete Engineering Series (2008).
16. 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).
17. Robins, P. and et al., "Flexural strain and crack width measurement of steel-fibre-reinforced concrete by optical grid and electrical gauge methods", *Cement and Concrete Research*, **31**(5), pp. 719-729 (2001).
18. Shah, S.P., Swartz, S.E. and Ouyang, C., *Fracture Mechanics of Concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and other Quasi-Brittle Materials*, John Wiley & Sons (1995).
19. JSCE-G 552-1999, "Test method for bending strength and bending toughness of steel fiber reinforced concrete", Standard Specification for Concrete Structures, Test Methods and Specifications, JSCE, 362 p. (2005).