

بررسی عددی افزایش ظرفیت باربری قاب بتن مسلح با استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند

علی همتی* (دکتری)

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سمنان

علی خیرالدین (استاد)

محمدکاظم شربتدار (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۲)
دوری ۲-۴۹، شماره ۳، ص. ۹۷-۱۰۶

کامپوزیت‌های سیمانی مسلح با الیاف توانمند (HPFRCC)^۱ به مصالحی شامل ملات سیمانی با سنگدانه‌های ریزدانه و الیاف اطلاق می‌شود. ویژگی شاخص این مصالح آن است که تحت بارگذاری کششی، رفتار سخت‌شوندگی کرنش از خود بروز می‌دهند. این مصالح توانمند می‌توانند در بسیاری موارد نظیر بهسازی لرزه‌یی اعضای ساختمانی به‌کار رود. در این نوشتار، پس از معرفی مختصر این مصالح توانمند، قاب آزمایش شده توسط کرانستون انتخاب و مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، چشمه‌ی اتصال قاب مذکور با مصالح HPFRCC با مقاومت‌های کششی و فشاری متفاوت جایگزین شده و با قاب‌های بتنی کامل و HPFRCC کامل مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از این مصالح توانمند، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری این قاب‌ها افزایش می‌یابد. در این بررسی، با افزایش مقاومت کششی و فشاری HPFRCC ظرفیت باربری قاب به طور متوسط حدود ۴۰٪ نسبت به قاب بتن مسلح معمولی افزایش یافته است. همچنین با افزایش مقاومت فشاری و کششی این کامپوزیت، شکل‌پذیری قاب به‌طور میانگین به ترتیب حدود ۵۰ و ۷۰ درصد افزایش پیدا کرده و نحوه‌ی ترک‌خوردگی این سازه‌ها نیز با یکدیگر مقایسه شده است.

واژگان کلیدی: HPFRCC، بتن مسلح، قاب، شکل‌پذیری، ترک‌خوردگی.

۱. مقدمه

بتن یکی از مهم‌ترین مصالح ساختمانی است که استفاده از آن در همه‌ی کشورهای دنیا رو به افزایش است. به‌علاوه از حدود ۳۰ سال قبل بتن خاصی با عنوان بتن توانمند (HPC)^۲ مطرح شده است که خصوصیات آن مانند مقاومت فشاری، دوام، مقاومت در برابر عوامل مهاجم خارجی، سخت‌شوندگی کرنش زیاد، نمای ظاهری مناسب، و... برای کاربردهای خاصی توسعه یافته است. در اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰، تولید یک مصالح بتن الیافی با رفتار کششی شکل‌پذیر مورد توجه قرار گرفت. زیرا همان‌گونه که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، با تولید بتن الیافی (FRC)^۳، طاقت مصالح (سطح زیر منحنی تنش - کرنش) افزایش یافت، اما شکل‌پذیری تغییر چندانی نکرد. لذا تحقیقات زیادی در این خصوص انجام گرفت که شروع آن در سال ۱۹۷۱ بود.^۱ در سال ۱۹۸۹، نیز با کاربرد مناسب الیاف به هم پیوسته به شکل‌پذیری کششی ۱۰۰ برابر نسبت به بتن معمولی دسترسی پیدا شد.^{۱۱} در سال‌های ۱۹۹۹

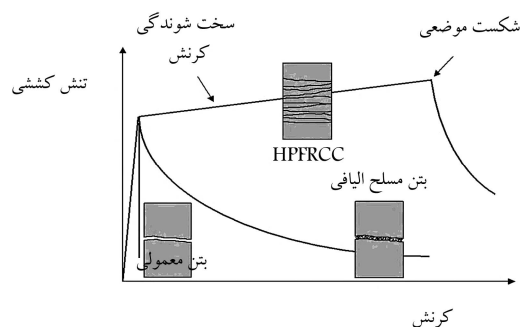
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۶/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۰/۹/۲۲، پذیرش ۱۳۹۰/۱۰/۱۷.

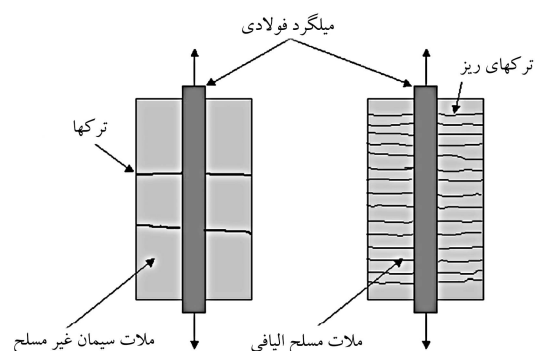
ahemmati2000@yahoo.com
kheyroddin@semnan.ac.ir
msharbatdar@semnan.ac.ir

و ۲۰۰۳ نیز نوع جدیدی از بتن الیافی با عنوان TRC^۴ ارائه شد که در آن از الیاف به هم بافته‌شده، استفاده شده بود.^{۲۳}

به موازات این پیشرفت‌ها در خصوص الیاف به هم پیوسته، استفاده از الیاف به‌صورت ناپیوسته و با توزیع تصادفی نیز در مقادیر زیاد (۴ تا ۲۰ درصد) آغاز شد. در سال ۱۹۷۱ این مصالح به‌صورت ورق‌های سیمانی استفاده شد.^۵ همچنین در سال ۲۰۰۳ مصالحی معرفی شد که جدا از FRC^۶، شامل یک بخش سخت‌شوندگی کرنش کششی در منحنی تنش - کرنش کششی خود بود و در رده‌ی مصالح HPFRCC طبقه‌بندی شد.^۶ بیشتر اعضای ساخته‌شده با این مصالح شامل ملات سیمانی بدون درشت‌دانه هستند و به همین دلیل ملات یا خمیر با کامپوزیت سیمانی مسلح‌شده توسط الیاف نام گرفته‌اند. شکل ۱، تفاوت بین بتن معمولی شکننده، FRC تقریباً شکننده با رفتار کاهنده‌ی کششی و HPFRCC شکل‌پذیر با رفتار سخت‌شوندگی کرنش کششی را نشان می‌دهد. در طول رفتار کاهنده، تغییر شکل‌ها به یک صفحه‌ی شکست سازه‌ی متمرکز می‌شود و انهدام موضعی صورت می‌گیرد؛ اما در طول رفتار سخت‌شوندگی کرنش، تغییر شکل سازه



شکل ۱. مقایسه‌ی رفتار کششی بتن معمولی، بتن الیافی و HPMFRCC [۶]



شکل ۲. چگونگی تأثیر الیاف بر ترک‌خوردگی ملات سیمانی [۶]

کاربردهای خاص محدودگشته است. در سال‌های اخیر، ۲ نوع از مصالح HPFRCC ظهور یافته‌اند که دوکتال^۸ و کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی نامیده می‌شوند. دوکتال نتیجه‌ی کار اولیه‌ی در سال ۱۹۸۱ است،^[۹] که در آن از یک ملات متراکم و سفت به‌منظور افزایش مقاومت کششی و فشاری مصالح استفاده می‌شود. سپس الیاف به این مجموعه اضافه می‌شوند تا با شکندگی بالای این ملات مقابله کنند. قدرت ملات باعث ایجاد نیروی پیوستگی قوی بین الیاف و ملات می‌شود و لذا مقاومت زیادی پس از ترک‌خوردگی حاصل می‌شود. در صورت کاربرد الیاف با مقاومت بالا، این مصالح برای کاربردهای کشسان طرح می‌شوند و عملکرد الیاف در زمان وقوع حالت‌های حدی نهایی مؤثر است و در آن زمان وارد کار می‌شوند. مطالعات انجام شده در سال ۲۰۰۳ بر روی این مصالح، مقاومت کششی ۱۲ مگاپاسکال و شکل‌پذیری کششی ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ درصد را نتیجه داده است.^[۱۰] کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی (ECC)^۹ در دانشگاه میشیگان توسعه یافته است و به‌علت شکل‌گیری و گسترش ترک‌های ریز چندگانه، شکل‌پذیری کششی آن افزایش یافته است. در حالی‌که مقدار الیاف به کمتر از ۲٪ کاهش یافته است. این مصالح برای کاربردهای کشسان و خمیری طرح می‌شوند و وجود الیاف تحت بارهای سرویس و بهره‌برداری نیز مؤثر بوده است و در آن زمان نیز وارد کار می‌شوند. طبق تحقیقات انجام شده در سال‌های ۱۹۹۳ و نیز ۲۰۰۳ مقاومت کششی ۴ تا ۶ مگاپاسکال و شکل‌پذیری کششی ۳ تا ۵ درصد را نتیجه داده است.^[۱۱] ECC می‌تواند دارای کاربردهای مختلفی باشد:

ECC خودتراکم برای استفاده در ساخت و سازهای با مقیاس وسیع و آرماتورگذاری فشرده،^[۱۳] ECC با مقاومت اولیه‌ی بالا برای استفاده در سازه‌هایی که نیازمند دستیابی سریع مصالح به مقاومت اولیه هستند، طراحی می‌شوند.^[۱۴] ECC سبک برای کاهش بار مرده‌ی سازه‌ها،^[۱۵] ECC سبک برای کاهش اثرات زیست محیطی و توسعه‌ی پایدار،^[۱۶] و ECC خود ترمیم‌شونده برای بهبود و بازیابی خصوصیات مکانیکی مصالح پس از تحمل خسارت به‌کار می‌رود.^[۱۷] بیشتر تحقیقات انجام‌گرفته بر روی ECC با الیاف PVA بوده است و لذا به‌صورت PVA-ECC ارجاع می‌شود، هر چند که کاربرد سایر الیاف نیز موفقیت‌آمیز بوده است. نوع الیاف مورد استفاده در ECC به خصوصیات طبیعی الیاف (ویژگی‌های مکانیکی، قطر، و خصوصیات سطحی) و نوع ECC مد نظر (ویژگی‌های مکانیکی، دوام، عملکرد پایدار، و اقتصاد) بستگی دارد. خصوصیات اصلی ECC در جدول ۱ ارائه شده است. در این نوشتار، تأثیر استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی HPFRCC در ظرفیت باربری و شکل‌پذیری یک قاب بتن مسلح معمولی بررسی شده است.

۲. مشخصات مدل‌های تحلیلی

۲.۱. نرم‌افزار مورد استفاده

در این نوشتار، از نرم‌افزار ABAQUS که یک نرم‌افزار غیرخطی المان محدود است، استفاده می‌شود. این نرم‌افزار به‌علت داشتن المان‌های متعدد، قابلیت مدل‌سازی بتن،

متشکل از بازشدگی ترک‌های ریز چندگانه^۵ و کشیدگی کشسان مصالح بین این ترک‌هاست. رفتار این مصالح تحت فشار، مشابه بتن معمولی است.^[۷] نقش اصلی الیاف با طول کوتاه پخش شده، کنترل بازشدگی و انتشار ترک‌هاست. گروه‌های اصلی الیاف مورد استفاده در بتن‌های سازه‌ای عبارت‌اند از: الیاف فولادی در شکل‌ها و ابعاد مختلف و نیز ریز الیاف‌ها، الیاف شیشه‌ای که در ملات‌های سیمانی فقط با عنوان الیاف مقاوم در برابر محیط قلیایی به‌کار می‌روند، الیاف مصنوعی شامل پلی پروپیلن (PP)،^۶ پلی اتیلن، پلی الفین، پلی وینیل الکل (PVA)،^۷ و الیاف کربنی.^[۸] الیاف طبیعی گیاهی برای بتن‌های توانمند مناسب نیستند. الیاف پشم شیشه نیز به‌علت اثرات مخرب بر سلامتی انسان و محیط زیست به‌طور کلی ممنوع و توسط سایر الیاف پلی مری جایگزین گشته‌اند. مطمئناً مهم‌ترین بخش در بتن سازه‌ای، الیاف فولادی هستند که با قلاب‌های انتهایی و تغییرات مختلف انجام‌شده بر روی شکل این الیاف، سبب افزایش پیوستگی بین الیاف و ملات و افزایش تأثیر الیاف می‌شوند. چگونگی تأثیر الیاف بر ترک‌خوردگی ملات سیمانی و شکل‌گیری ترک‌های ریز چندگانه در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، به‌علت وجود الیاف، ترک‌های جداگانه‌ی بزرگ توسط مجموعه‌ی متراکم از میکروتورها جایگزین می‌شوند که از دیدگاه ایمنی و دوام قابل قبول است.

هر چند HPFRCC دارای ویژگی‌هایی است که در بتن معمولی و FRC وجود ندارد، اما به‌علت مسائل اقتصادی و اجرایی، کاربرد آن‌ها بیشتر به امور پژوهشی و

جدول ۱. خصوصیات اصلی ECC.^[۱۸]

چگالی (g/cc)	مقاومت خمشی (MPa)	مدول یانگ (GPa)	کرنش کششی نهایی (%)	مقاومت کششی نهایی (MPa)	مقاومت اولین ترک‌خوردگی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)
۲/۳۵-۰/۹	۳۹-۱۰	۳۴-۱۸	۸-۱	۱۲-۴	۷-۳	۹۵-۲۰

منحنی تنش - کرنش HPFRCC تحت کشش از یک رابطه‌ی خطی تا رسیدن به تنش σ_{CC} پیروی می‌کند. سپس منحنی رفتار افزایشدهی را شروع می‌کند تا به تنش σ_{PC} برسد. از این نقطه به بعد با گسترش ترک خوردگی‌ها در کامپوزیت، شاخه‌ی نرم‌شونده منحنی آغاز می‌شود که با موضعی شدن تنش‌ها و افزایش عرض ترک در یک صفحه همراه است (شکل ۵). منحنی تنش - کرنش HPFRCC در فشار مشابه با بتن معمولی است. معادله‌های ۱ و ۲ مربوط به تنش و کرنش بتن هستند:

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_c (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \quad (1)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_c (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \quad (2)$$

که در آن‌ها، d_t و d_c ضرایب کاهش مدول کشسانی بتن تحت فشار و کشش، ε_t^{pl} و ε_c^{pl} کرنش خمیری بتن تحت فشار و کشش، و ε_t و ε_c کرنش کل بتن تحت فشار و کشش است.

منحنی تنش - کرنش استفاده‌شده برای میلگردها نیز به صورت دوخطی مطابق شکل ۶ وارد می‌شود. برای مدل‌سازی بتن و کامپوزیت‌های سیمانی از المان Solid و برای مدل‌سازی فولاد از المان Truss استفاده می‌شود. در این تحقیق از المان مکعبی ۲۰ گره‌ای Solid استفاده شده است (شکل ۷). هر گره در این المان دارای ۶ درجه‌ی آزادی شامل ۳ درجه‌ی آزادی انتقالی و ۳ درجه‌ی آزادی دورانی است. برای مدل‌سازی میلگردهای فولادی، المان دو بعدی Truss به کار می‌رود (شکل ۸). این المان دو گره‌ای، قابلیت مدل‌سازی رفتار غیرخطی فولاد را دارد.

۲.۲. مدل‌های مورد بررسی و نحوه‌ی مدل‌سازی

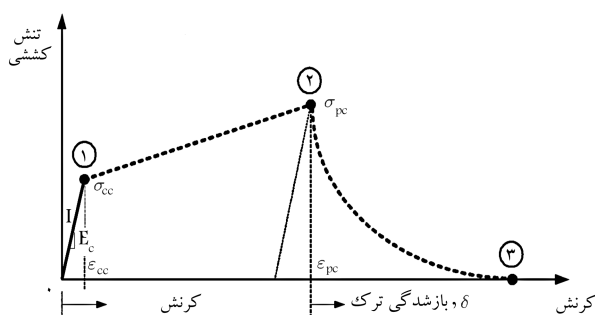
در این نوشتار، یک قاب بتن مسلح آزمون‌شده توسط کرانستون در آزمایشگاه، مورد مطالعه قرار گرفته است.^[۲۰] مشخصات مصالح مورد استفاده در این قاب در

میلگردهای فولادی، بتن مسلح، FRP و کامپوزیت‌های سیمانی را داراست. برای مدل‌سازی بتن، شیوه‌ها و گزینه‌های مختلفی در این نرم‌افزار موجود است که با عنایت به رفتار کششی ویژه کامپوزیت HPFRCC از گزینه‌ی Concrete Damage Plasticity استفاده می‌شود. در این گزینه امکان وارد کردن نقاط مختلف منحنی تنش - کرنش بتن و کامپوزیت در کشش و فشار وجود دارد.^[۱۹]

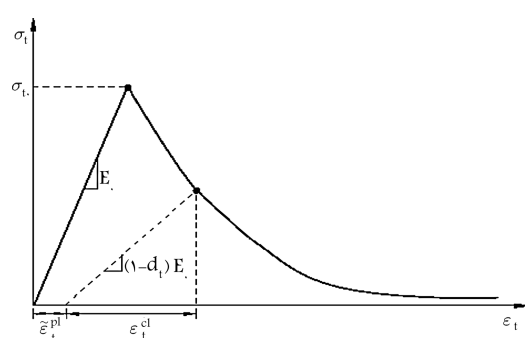
در این نرم‌افزار ۲ مکانیزم برای انهدام بتن پیش‌بینی شده است: مکانیزم اول، ترک خوردگی تحت کشش و مکانیزم دوم، خردشدگی تحت فشار است. منحنی‌های تنش - کرنش بتن معمولی و HPFRCC به این شرح و با پارامترهای اشاره‌شده تعریف می‌شوند:

منحنی تنش - کرنش بتن تحت کشش از یک رابطه‌ی خطی تا رسیدن به تنش σ_t (مقاومت کششی نهایی) پیروی می‌کند. از این نقطه به بعد با شروع ترک خوردگی‌ها در بتن، شاخه‌ی نرم‌شونده منحنی آغاز می‌شود که با موضعی شدن تنش‌ها و افزایش عرض ترک در یک صفحه همراه است (شکل ۳). منحنی تنش - کرنش بتن در فشار نیز تا تنش σ_c (تسلیم اولیه) به صورت خطی حرکت می‌کند. سپس مرحله‌ی غیرخطی و افزایشدهی منحنی شروع می‌شود و تا نقطه‌ی مربوط به تنش σ_{CU} (تنش نهایی) ادامه می‌یابد که همان نقطه‌ی مقاومت فشاری بتن است. از این نقطه به بعد شاخه‌ی نرم‌شونده منحنی آغاز می‌شود و بتن تحت فشار، خرد می‌شود (شکل ۴).

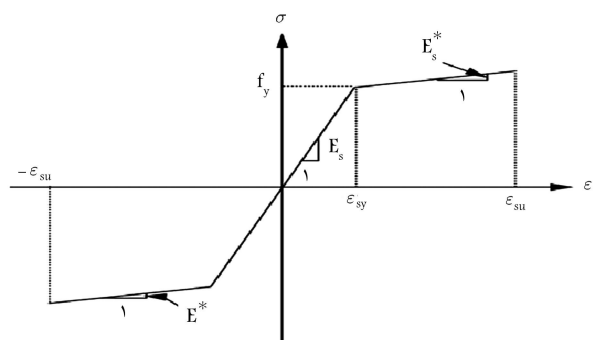
پارامترهای d_t و d_c ، پارامترهایی هستند که کاهش سختی بتن را در اثر باربرداری در شاخه‌ی نرم‌شونده نشان می‌دهند که به علت ترک خوردگی و یا انهدام بخشی از بتن اتفاق می‌افتد. در هنگام باربرداری نمونه‌های بتنی که در شکل‌های ۳ و ۴ با خط‌چین نشان داده شده است، این کاهش در سختی (مدول کشسانی) بتن رخ می‌دهد. این دو پارامتر مقادیری بین ۰ و ۱ دارند که ۰ نشان‌دهنده‌ی بتن بدون خسارت و ۱ بیان‌گر از دست رفتن تمام مقاومت بتن است. E_c نیز نشان‌دهنده‌ی مدول کشسانی بتن قبل از تحمل خسارت است.



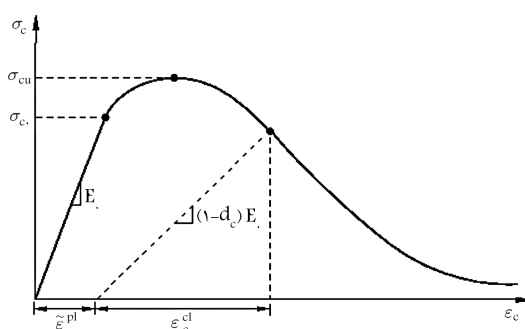
شکل ۵. منحنی تنش - کرنش HPFRCC تحت کشش.^[۱۹]



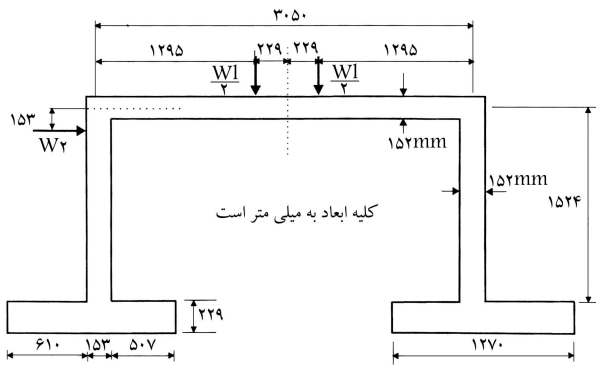
شکل ۳. منحنی تنش - کرنش بتن تحت کشش.^[۱۹]



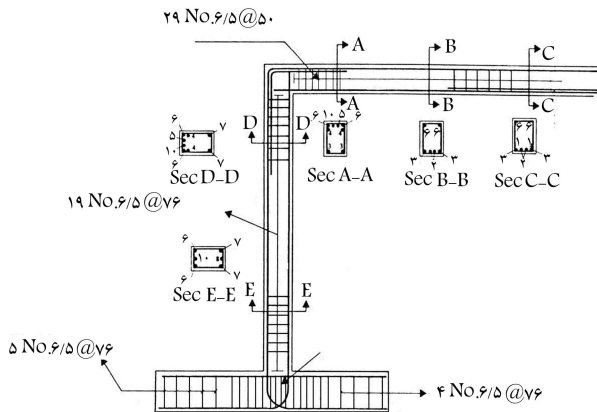
شکل ۶. منحنی تنش - کرنش فولاد.^[۱۹]



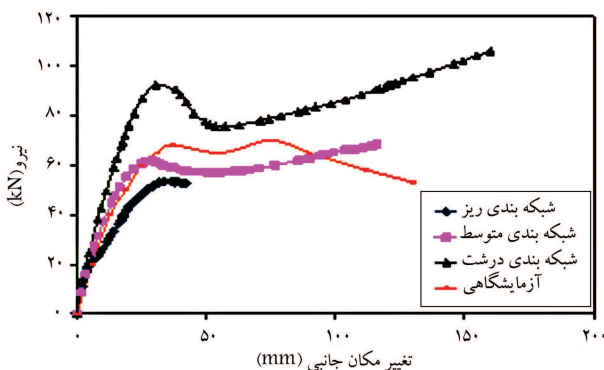
شکل ۴. منحنی تنش - کرنش بتن و HPFRCC تحت فشار.^[۱۹]



شکل ۹. جزئیات هندسی قالب کرانستون. [۲۰]



شکل ۱۰. جزئیات بارگذاری و آرماتورگذاری قالب کرانستون. [۲۰]

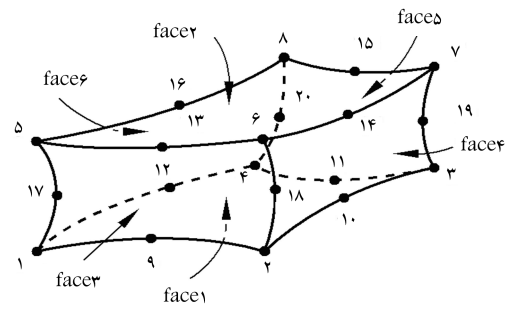


شکل ۱۱. مقایسه‌ی منحنی‌های نیرو-تغییر مکان جانبی قالب‌ها با مش‌بندی‌های مختلف و نتایج آزمایشگاهی.

۳. نتایج و نمودارها

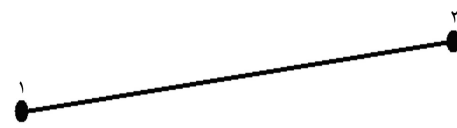
نحوه‌ی نام‌گذاری مدل‌ها و توضیحات مربوط به آن در جدول ۵ ارائه شده است. در این نام‌گذاری، RC نشان‌دهنده‌ی قالب بتن مسلح، RH نشان‌دهنده‌ی قالب HPRC مسلح، و RCH نشان‌دهنده‌ی قالب بتن مسلحی است که منطقه‌ی اتصال آن با مصالح HPRC جایگزین شده است. در این حالت یک بخش ۳۰۴ میلی‌متری در تیر ۲ (برابر ارتفاع مؤثر تیر) و یک بخش ۵۰ میلی‌متری در ستون به‌منزله‌ی منطقه‌ی اتصال منظور می‌شود.

اعداد پس از حروف به ترتیب، f'_c نشان‌دهنده‌ی مقاومت فشاری بتن معمولی



المان ۲۰ گرهی

شکل ۷. المان ۲۰ گرهی مکعبی Solid. [۱۹]



شکل ۸. المان دو بعدي Truss. [۱۹]

جدول ۲. مشخصات بتن مورد استفاده در قالب. [۲۰]

f'_c (MPa)	E_c (MPa)	f'_t (MPa)	ϵ_{cr}	ϵ_{cu}^*	ν^*
۲۸٫۵	۲۵۲۷۵	۳٫۳	۰٫۰۰۰۱۳	۰٫۰۰۰۷	۰٫۱۷

* مقادیر فرض شده

جدول ۳. مشخصات فولاد مورد استفاده در قالب. [۲۰]

f_y (MPa)	E_s (MPa)	E_s^* (MPa)	ϵ_{su}	ϵ_{sy}	$f_y(\text{stirrups})$ (MPa)
۴۴۰	۲۰۰۰۰۰	۶۲۰۰	۰٫۱۵	۰٫۰۰۰۲۲	۳۱۰

* مقادیر فرض شده

جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است. ابعاد این قالب و جزئیات بارگذاری و آرماتورگذاری آن نیز در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. تکیه‌گاه‌ها گیردار بوده و بارگذاری به صورت بار جانبی افزایشی به قالب اعمال شده است.

با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ و مشخصات ارائه شده در جدول‌های ۲ و ۳، سه مدل تحلیلی با مش‌بندی‌های مختلف برای کالیبره کردن نتایج تحلیل به کار رفت. ابعاد المان‌ها و نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی این قالب‌ها در جدول ۴ و منحنی‌های نیرو-تغییر مکان جانبی این ۳ قالب نیز در شکل ۱۱ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۴ و شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود، مدل با مش‌بندی متوسط و به ابعاد ۵۵ در ۵۵ میلی‌متر بیشترین تطابق را با کار آزمایشگاهی دارد؛ لذا به عنوان مدل مورد بررسی انتخاب می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در تحلیل غیرخطی بتن با افزایش بیش از حد المان‌ها، تعداد ترک‌ها نیز بیشتر شده است و در نتیجه سختی و بار نهایی عضو کاهش می‌یابد. این پدیده، وابستگی مش نامیده می‌شود. به همین دلیل است که در برخی از تحقیقات پیشنهاد شده است که اندازه‌ی المان با توجه به کرنش کششی نهایی بتن انتخاب شود تا این مشکل برطرف شود (رابطه‌ی ۳).

$$\epsilon_{tu} = 0.004 \times e^{-0.008h} \quad (3)$$

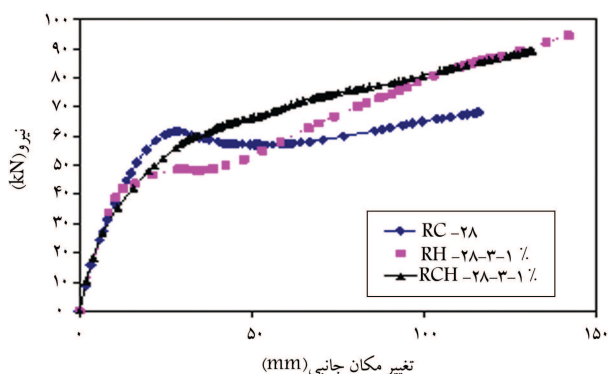
که در این رابطه، h بعد المان به میلی‌متر و ϵ_{tu} کرنش نهایی کششی بتن است. [۲۱]

جدول ۴. نتایج حاصل از تحلیل ۳ قاب با مش بندی متفاوت.

نام مدل	ابعاد المان ها (mm×mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	$\frac{P_u}{P_{u(Experimental)}}$	$\frac{\Delta_u}{\Delta_{u(Experimental)}}$
Fine Mesh	۳۵×۳۵	۵۲٫۶۵	۴۲٫۴	۰٫۷۵۲	۰٫۳۲۶
Medium Mesh	۵۵×۵۵	۶۸٫۲۳	۱۱۶٫۰۶	۰٫۹۷۵	۰٫۸۹۳
Coarse Mesh	۷۰×۷۰	۱۰۵٫۹۸	۱۶۰٫۲	۱٫۵۱۴	۱٫۲۳۲
Experimental	-	۷۰	۱۳۰	۱	۱

جدول ۵. نحوه ی نام گذاری مدل ها.

نام مدل	مصالح مصرفی	$f'_c(Concrete)$ (MPa)	$f'_c(HPFRCC)$ (MPa)	σ_{ot} (MPa)	ϵ_{tu} (%)
RC-۲۸	قاب بتن مسلح معمولی	۲۸	-	-	-
RH-۲۸-۳-۱٪	قاب HPFRCC مسلح	-	۲۸	۳	۱
RCH-۲۸-۳-۱٪	قاب بتن مسلح و HPFRCC در محل اتصال	۲۸	۲۸	۳	۱
RH-۲۸-۴-۱٪	قاب HPFRCC مسلح	-	۲۸	۴	۱
RCH-۲۸-۴-۱٪	قاب بتن مسلح و HPFRCC در محل اتصال	۲۸	۲۸	۴	۱
RH-۲۸-۵-۱٪	قاب HPFRCC مسلح	-	۲۸	۵	۱
RCH-۲۸-۵-۱٪	قاب بتن مسلح و HPFRCC در محل اتصال	۲۸	۲۸	۵	۱
RH-۳۵-۳-۱٪	قاب HPFRCC مسلح	-	۳۵	۳	۱
RH-۳۹-۳-۱٪	قاب HPFRCC مسلح	-	۳۹	۳	۱
RCH-۳۵-۳-۱٪	قاب بتن مسلح و HPFRCC در محل اتصال	۲۸	۳۵	۳	۱
RCH-۳۹-۳-۱٪	قاب بتن مسلح و HPFRCC در محل اتصال	۲۸	۳۹	۳	۱



با HPFRCC است. σ_{ot} نشان دهنده ی مقاومت کششی نهایی HPFRCC و ϵ_{tu} نشان دهنده ی کرنش کششی نهایی آن که در همه ی نمونه ها ۱٪ است.

۱.۳. قاب های RC-۲۸، RH-۲۸-۳-۱٪ و RCH-۲۸-۳-۱٪

منحنی های نیرو-تغییر مکان جانبی قاب های فوق الذکر در شکل ۱۲ نشان داده شده است. خلاصه ی نتایج حاصل از تحلیل این قاب ها نیز در جدول ۶ آمده است. همان گونه که در این جدول ملاحظه می شود، با جایگزینی مصالح HPFRCC با مقاومت کششی ۳ مگاپاسکال به جای بتن معمولی در این قاب، شکل پذیری، تغییر مکان جانبی نهایی و نیروی جانبی بیشینه افزایش می یابند. بیشترین افزایش شکل پذیری در قاب RCH با افزایشی در حدود ۷۵/۷٪، بیشترین افزایش نیروی جانبی بیشینه در قاب RH با حدود ۳۸/۴٪ و بیشترین تغییر مکان جانبی

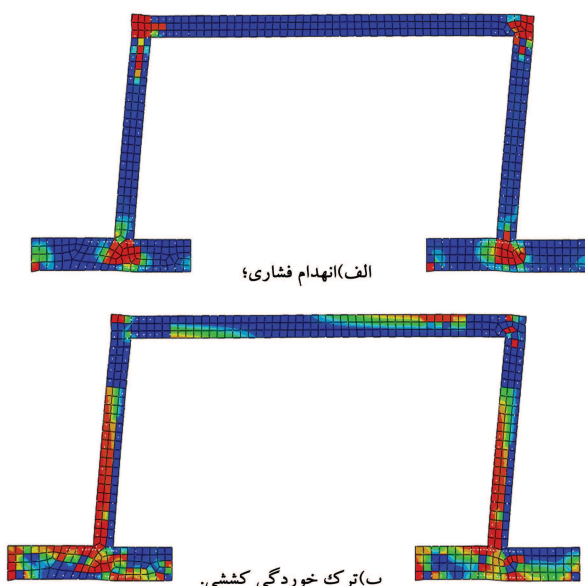
شکل ۱۲. تأثیر مصالح HPFRCC با مقاومت کششی ۳ مگاپاسکال بر منحنی نیرو-تغییر مکان جانبی قاب بتن مسلح.

جدول ۶. نتایج حاصل از تحلیل ۳ قاب RC-۲۸، RH-۲۸-۳-۱٪ و RCH-۲۸-۳-۱٪.

نام مدل	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{P_u}{P_{u(RC)}}$	$\frac{\Delta_u}{\Delta_{u(RC)}}$	$\frac{\mu}{\mu(RC)}$
RC-۲۸	۵۸٫۹۳	۳۷٫۷۰	۶۸٫۲۳	۱۱۶٫۰۶	۳٫۰۷۸	۱	۱	۱
RH-۲۸-۳-۱٪	۴۸٫۳۷	۳۳٫۶۸	۹۴٫۴۳	۱۴۱٫۸۱	۴٫۲۱	۱٫۳۸۴	۱٫۲۲۲	۱٫۳۶۸
RCH-۲۸-۳-۱٪	۵۲٫۴۱	۲۴٫۲۷	۸۹٫۱۴	۱۳۱٫۲۴	۵٫۴۰۸	۱٫۳۰۶	۱٫۱۳۱	۱٫۷۵۷

نهایی در همین قاب و به میزان ۲۲/۲٪ نسبت به قاب RC اتفاق می‌افتد. انهدام فشاری در این قاب‌ها از محل چشمه‌ی اتصال شروع می‌شود، سپس فونداسیون در محل اتصال به ستون دچار انهدام می‌شود. با افزایش نیروی جانبی، انهدام فشاری در چشمه‌ی اتصال گسترش می‌یابد و سپس ستون دچار انهدام می‌شود. ترک‌های کششی نیز از محل چشمه‌ی اتصال و ستون در محل اتصال به فونداسیون شروع می‌شوند. سپس این ترک‌ها در تیر و ستون‌ها گسترش می‌یابند و نهایتاً به فونداسیون می‌رسند. جاری‌شدگی آرماتورها نیز از محل اتصال ستون به فونداسیون آغاز می‌شود. الگوی انهدام فشاری و ترک‌خوردگی کششی این قاب‌ها در شکل‌های ۱۳ الی ۱۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشخص است، میزان خسارت اعم از فشاری و کششی در قاب RC-۲۸ از قاب ۱٪ RH-۲۸-۳-۲۸ و نیز از قاب ۱٪ RH-۲۸-۳-۲۸ بیشتر است که این موضوع می‌تواند ناشی از کرنش کششی نهایی HPFRCC باشد که نسبت به بتن معمولی دارای مقدار بیشتری است.

همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشخص است، به علت پایین بودن مقاومت کششی نهایی HPFRCC در قاب ۱٪ RH-۲۸-۳-۲۸، تسلیم آرماتورها سریع‌تر انجام شده

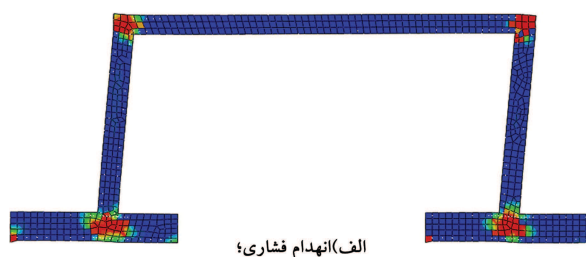


شکل ۱۵. الگوی انهدام و ترک‌خوردگی قاب ۱٪ RH-۲۸-۳-۲۸.

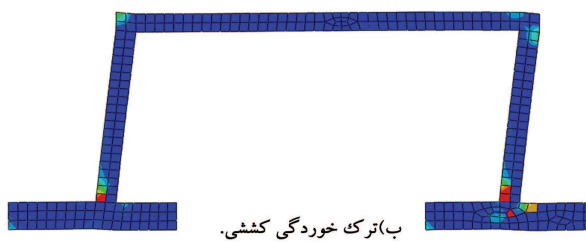
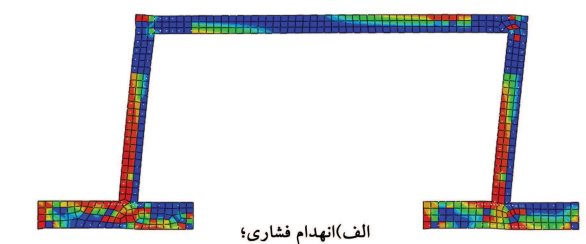
و نیروی جاری‌شدگی در این قاب از سایر مدل‌ها کمتر است. اما به سبب کرنش کششی نهایی بالای این مصالح کامپوزیتی، آرماتورها می‌توانند به کرنش خمیری خود نزدیک‌تر شوند و لذا این قاب دارای نیروی بیشینه و تغییرمکان جانبی نهایی بیشتری است.

۲.۳. قاب‌های RC-۲۸، ۱٪ RH-۲۸-۴-۲۸ و ۱٪ RCH-۲۸-۴-۲۸

منحنی‌های نیرو-تغییرمکان جانبی قاب‌های فوق‌الذکر در شکل ۱۶ نشان داده شده است. خلاصه‌ی نتایج حاصل از تحلیل این قاب‌ها نیز در جدول ۷ آمده است. همان‌گونه که در این جدول ملاحظه می‌شود، با جایگزینی مصالح HPFRCC با مقاومت کششی ۴ مگاپاسکال به جای بتن معمولی در این قاب، شکل‌پذیری، تغییرمکان جانبی نهایی و نیروی جانبی بیشینه افزایش می‌یابند. بیشترین افزایش شکل‌پذیری در قاب RCH با افزایشی در حدود ۷۸/۳٪ و بیشترین افزایش نیروی جانبی بیشینه در قاب RH با حدود ۵۰/۹٪ و بیشترین افزایش تغییرمکان جانبی نهایی در همین قاب و به میزان ۲۱/۹٪ نسبت به قاب RC اتفاق می‌افتد. با افزایش مقاومت کششی نهایی مصالح HPFRCC، نیروی جاری‌شدگی قاب



شکل ۱۳. الگوی انهدام و ترک‌خوردگی قاب RC-۲۸.



شکل ۱۴. الگوی انهدام و ترک‌خوردگی قاب ۱٪ RH-۲۸-۳-۲۸.

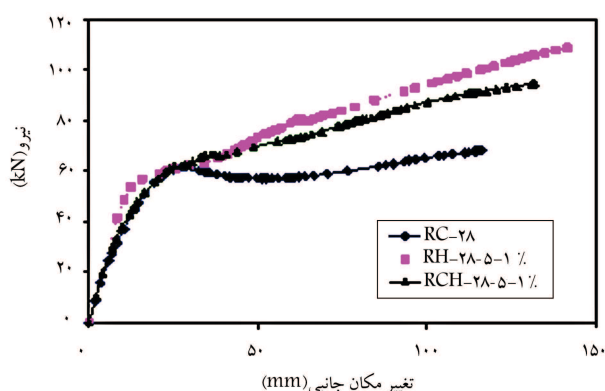
شکل ۱۶. تأثیر مصالح HPFRCC با مقاومت کششی ۴ مگاپاسکال بر منحنی نیرو-تغییرمکان جانبی قاب بتن مسلح.

جدول ۷. نتایج حاصل از تحلیل ۳ قاب RC-۲۸، RH-۲۸-۴-۱٪ و RCH-۲۸-۴-۱٪.

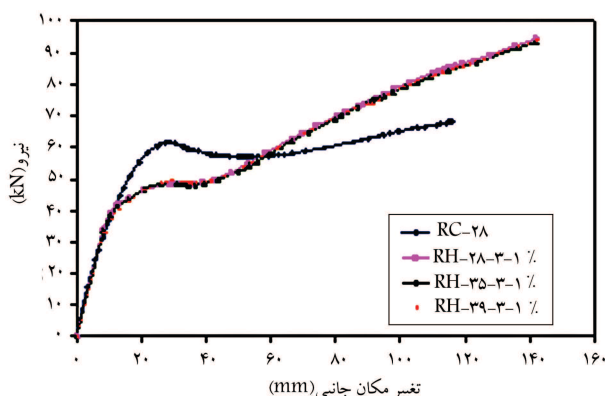
نام مدل	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{P_u}{P_u(RC)}$	$\frac{\Delta_u}{\Delta_u(RC)}$	$\frac{\mu}{\mu(RC)}$
RC-۲۸	۵۸,۹۳	۳۷,۷۰	۶۸,۲۳	۱۱۶,۰۶	۳,۰۷۸	۱	۱	۱
RH-۲۸-۴-۱٪	۵۸,۳۸	۲۸,۳۰	۱۰۳,۰۲	۱۴۱,۴۵	۴,۹۹۷	۱,۵۰۹	۱,۲۱۹	۱,۶۲۳
RCH-۲۸-۴-۱٪	۵۳,۴۷	۲۴,۳۹	۹۰,۴۹	۱۳۳,۸۴	۵,۴۸۷	۱,۳۲۶	۱,۱۵۳	۱,۷۸۳

جدول ۸. نتایج حاصل از تحلیل ۳ قاب RC-۲۸، RH-۲۸-۵-۱٪ و RCH-۲۸-۵-۱٪.

نام مدل	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{P_u}{P_u(RC)}$	$\frac{\Delta_u}{\Delta_u(RC)}$	$\frac{\mu}{\mu(RC)}$
RC-۲۸	۵۸,۹۳	۳۷,۷۰	۶۸,۲۳	۱۱۶,۰۶	۳,۰۷۸	۱	۱	۱
RH-۲۸-۵-۱٪	۶۰,۸۷	۲۵,۴۴	۱۰۸,۸۶	۱۴۱,۷۱	۵,۵۷	۱,۵۹۲	۱,۲۲۱	۱,۸۰۹
RCH-۲۸-۵-۱٪	۵۹,۳۲	۲۲,۲۴	۹۴,۵۴	۱۳۱,۹۴	۵,۹۳۳	۱,۳۸۶	۱,۱۳۷	۱,۹۲۸



شکل ۱۷. تأثیر مصالح HPFRCC با مقاومت کششی ۵ مگاپاسکال بر منحنی نیرو-تغییر مکان جانبی قاب بتن مسلح.



شکل ۱۸. تأثیر مقاومت‌های فشاری متفاوت مصالح HPFRCC با مقاومت کششی ثابت ۳ مگاپاسکال در منحنی نیرو-تغییر مکان جانبی قاب بتن مسلح.

همان‌گونه که در این جدول ملاحظه می‌شود، با جایگزینی کامل مصالح HPFRCC با مقاومت کششی ثابت ۳ مگاپاسکال به جای بتن معمولی در این قاب، شکل‌پذیری، تغییر مکان جانبی نهایی و نیروی جانبی بیشینه افزایش می‌یابند. بیشترین افزایش شکل‌پذیری در قاب با مقاومت فشاری ۳۹ مگاپاسکال با افزایشی در حدود ۳۷/۵٪، بیشترین افزایش نیروی جانبی بیشینه در قاب با مقاومت فشاری ۲۸ مگاپاسکال با حدود ۳۸/۴٪ و بیشترین افزایش تغییر مکان جانبی نهایی در هر

افزایش می‌یابد. الگوی خسارت در این قاب‌ها و ترتیب گسترش انهدام فشاری و ترک‌خوردگی‌های کششی مشابه حالت قبلی است.

۳.۳. قاب‌های RC-۲۸، RH-۲۸-۵-۱٪ و RCH-۲۸-۵-۱٪

منحنی‌های نیرو-تغییر مکان جانبی قاب‌های فوق‌الذکر در شکل ۱۷ نشان داده شده است. خلاصه‌ی نتایج حاصل از تحلیل این قاب‌ها نیز در جدول ۸ آمده است. همان‌گونه که در این جدول ملاحظه می‌شود، با جایگزینی مصالح HPFRCC با مقاومت کششی ۵ مگاپاسکال به جای بتن معمولی در این قاب، شکل‌پذیری، تغییر مکان جانبی نهایی و نیروی جانبی بیشینه افزایش می‌یابند. بیشترین افزایش شکل‌پذیری در قاب RCH با افزایشی در حدود ۹۲/۸٪، بیشترین افزایش نیروی جانبی بیشینه در قاب RH با حدود ۵۹/۲٪ و بیشترین افزایش تغییر مکان جانبی نهایی در همین قاب و به میزان ۲۲/۱٪ نسبت به قاب RC اتفاق می‌افتد. با افزایش مقاومت کششی نهایی مصالح HPFRCC، نیروی جاری‌شدگی قاب افزایش می‌یابد. الگوی خسارت در این قاب‌ها و ترتیب گسترش انهدام فشاری و ترک‌خوردگی‌های کششی مشابه حالت قبلی است. با مشاهده‌ی نتایج حاصل از جدول‌های ۷ و ۸ به نظر می‌رسد که افزایش مقاومت کششی HPFRCC بر نیروی جانبی بیشینه و شکل‌پذیری این قاب مؤثر است و روی تغییر مکان جانبی نهایی تأثیر چندانی ندارد.

علت آن است که HPFRCC تحت کشش همانند آرماتور مازاد عمل می‌کند و سبب افزایش نیروی جاری‌شدن آرماتورها می‌شود. اما هنگامی که HPFRCC کششی وارد فاز سخت‌شوندگی می‌شود و ترک‌ها شکل می‌گیرند، تغییر ایجاد شده در میزان تغییر شکل جانبی قاب کامپوزیتی با مقاومت کششی بالاتر نسبت به همان قاب با مقاومت کششی کمتر چندان قابل توجه نیست. زیرا در این مطالعه، کرنش کششی نهایی HPFRCC که پارامتر مؤثر در بحث تغییر شکل است، در تمامی حالات برابر ۱٪ منظور شده است.

۴.۳. قاب‌های RC-۲۸، RH-۲۸-۳-۱٪، RH-۳۵-۳-۱٪ و

RH-۳۹-۳-۱٪

منحنی‌های نیرو-تغییر مکان جانبی قاب‌های فوق‌الذکر در شکل ۱۸ نشان داده شده است. خلاصه‌ی نتایج حاصل از تحلیل این قاب‌ها نیز در جدول ۹ آمده است.

جدول ۹. نتایج حاصل از تحلیل ۳ قاب RC-۲۸، RH-۲۸-۳-۱٪، RH-۳۵-۳-۱٪ و RH-۳۹-۳-۱٪.

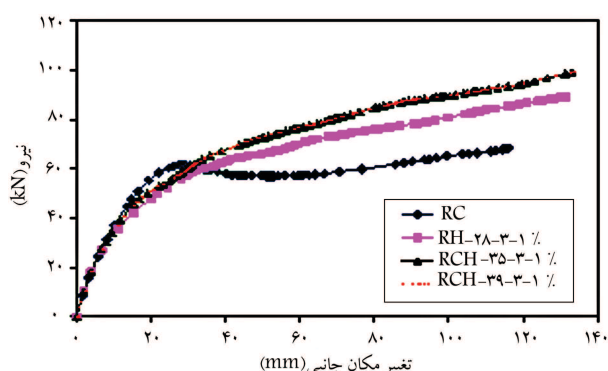
نام مدل	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{P_u}{P_{u(RC)}}$	$\frac{\Delta_u}{\Delta_{u(RC)}}$	$\frac{\mu}{\mu(RC)}$
RC-۲۸	۵۸,۹۳	۳۷,۷۰	۶۸,۲۳	۱۱۶,۰۶	۳,۰۷۸	۱	۱	۱
RH-۲۸-۳-۱٪	۴۸,۳۷	۳۳,۶۸	۹۴,۴۳	۱۴۱,۸۱	۴,۲۱	۱,۳۸۴	۱,۲۲۲	۱,۳۶۸
RH-۳۵-۳-۱٪	۴۸,۴۰	۳۳,۵۲	۹۳,۵۶	۱۴۱,۸۶	۴,۲۳	۱,۳۷۱	۱,۲۲۲	۱,۳۷۴
RH-۳۹-۳-۱٪	۴۸,۹۰	۳۳,۵۱	۹۳,۸۹	۱۴۱,۸۳	۴,۲۳۲	۱,۳۷۶	۱,۲۲۲	۱,۳۷۵

جدول ۱۰. نتایج حاصل از تحلیل ۳ قاب RC-۲۸، RCH-۲۸-۳-۱٪، RCH-۳۵-۳-۱٪ و RCH-۳۹-۳-۱٪.

نام مدل	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{P_u}{P_{u(RC)}}$	$\frac{\Delta_u}{\Delta_{u(RC)}}$	$\frac{\mu}{\mu(RC)}$
RC-۲۸	۵۸,۹۳	۳۷,۷۰	۶۸,۲۳	۱۱۶,۰۶	۳,۰۷۸	۱	۱	۱
RCH-۲۸-۳-۱٪	۵۲,۴۱	۲۴,۲۷	۸۹,۱۴	۱۳۱,۲۴	۵,۴۰۸	۱,۳۰۶	۱,۱۳۱	۱,۷۵۷
RCH-۳۵-۳-۱٪	۵۶,۱۶	۲۵,۷۸	۹۸,۸۹	۱۳۳,۰۶	۵,۱۶	۱,۴۴۹	۱,۱۴۶	۱,۶۷۶
RCH-۳۹-۳-۱٪	۵۶,۲۲	۲۵,۹۶	۹۸,۹۶	۱۳۳,۰۷	۵,۱۳	۱,۴۵	۱,۱۴۷	۱,۶۶۷

جدول ۱۱. خلاصه‌ی نتایج تحلیل.

نام مدل	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\frac{P_u}{P_{u(RC)}}$	$\frac{\Delta_u}{\Delta_{u(RC)}}$	$\frac{\mu}{\mu(RC)}$
RC-۲۸	۵۸,۹۳	۳۷,۷۰	۶۸,۲۳	۱۱۶,۰۶	۳,۰۷۸	۱	۱	۱
RH-۲۸-۳-۱٪	۴۸,۳۷	۳۳,۶۸	۹۴,۴۳	۱۴۱,۸۱	۴,۲۱	۱,۳۸۴	۱,۲۲۲	۱,۳۶۸
RCH-۲۸-۳-۱٪	۵۲,۴۱	۲۴,۲۷	۸۹,۱۴	۱۳۱,۲۴	۵,۴۰۸	۱,۳۰۶	۱,۱۳۱	۱,۷۵۷
RH-۲۸-۴-۱٪	۵۸,۳۸	۲۸,۳۰	۱۰۳,۰۲	۱۴۱,۴۵	۴,۹۹۷	۱,۵۰۹	۱,۲۱۹	۱,۶۲۳
RCH-۲۸-۴-۱٪	۵۳,۴۷	۲۴,۳۹	۹۰,۴۹	۱۳۳,۸۴	۵,۴۸۷	۱,۳۲۶	۱,۱۵۳	۱,۷۸۳
RH-۲۸-۵-۱٪	۶۰,۸۷	۲۵,۴۴	۱۰۸,۰۶	۱۴۱,۷۱	۵,۵۷	۱,۵۹۲	۱,۲۲۱	۱,۸۰۹
RCH-۲۸-۵-۱٪	۵۹,۳۲	۲۲,۲۴	۹۴,۵۴	۱۳۱,۹۴	۵,۹۳۳	۱,۳۸۶	۱,۱۳۷	۱,۹۲۸
RH-۳۵-۳-۱٪	۴۸,۴۰	۳۳,۵۲	۹۳,۵۶	۱۴۱,۸۵	۴,۲۳	۱,۳۷۱	۱,۲۲۲	۱,۳۷۴
RH-۳۹-۳-۱٪	۴۸,۹۰	۳۳,۵۱	۹۳,۸۹	۱۴۱,۸۳	۴,۲۳۲	۱,۳۷۶	۱,۲۲۲	۱,۳۷۵
RCH-۳۵-۳-۱٪	۵۶,۱۶	۲۵,۷۸	۹۸,۸۹	۱۳۳,۰۶	۵,۱۶	۱,۴۴۹	۱,۱۴۶	۱,۶۷۶
RCH-۳۹-۳-۱٪	۵۶,۲۲	۲۵,۹۶	۹۸,۹۶	۱۳۳,۰۷	۵,۱۳	۱,۴۵	۱,۱۴۷	۱,۶۶۷



سه قاب و به میزان ۲۲/۲٪ نسبت به قاب RC اتفاق می‌افتد. ولی شکل‌پذیری، نیروی جانبی بیشینه و تغییرمکان جانبی نهایی قاب‌های HPFRCC با مقاومت‌های فشاری متفاوت، تغییرات بسیار کمی نسبت به یکدیگر دارند. الگوی خسارت در این قاب‌ها و ترتیب گسترش انهدام فشاری و ترک‌خوردگی‌های کششی مشابه حالت‌های قبلی است.

۵.۳. قاب‌های RC-۲۸، RCH-۲۸-۳-۱٪، RCH-۳۵-۳-۱٪ و RCH-۳۹-۳-۱٪

منحنی‌های نیرو-تغییرمکان جانبی قاب‌های فوق‌الذکر در شکل ۱۹ نشان داده شده است. خلاصه‌ی نتایج حاصل از تحلیل این قاب‌ها نیز در جدول ۱۰ آمده است. همان‌گونه که در این جدول ملاحظه می‌شود، با جایگزینی مصالح HPFRCC

شکل ۱۹. تأثیر مصالح HPFRCC به‌کاررفته در اتصالات با مقاومت‌های فشاری متفاوت در منحنی نیرو-تغییرمکان جانبی قاب بتن مسلح.

می‌روند، مشاهده می‌شود. در حالی که افزایش بیشتر شکل‌پذیری در قاب‌های بتن مسلح با اتصالات HPFRCC مشاهده می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

با گسترش بتن‌های توانمند، نوع خاصی از مصالح برتر با عنوان HPFRCC برای ساخت و ساز ایجاد شده است. این مصالح توانمند می‌توانند در بسیاری موارد نظیر بهسازی لرزه‌یی اعضای سازه‌یی و نیز به منزله‌ی فیوزهای سازه‌یی به کار روند. تشکیل ترک‌های ریز چندانکه عامل اصلی تأمین شکل‌پذیری کششی این مصالح است. یکی از ویژگی‌هایی که HPFRCC را برای انجام عملیات ترمیمی و جایگزینی بتن معمولی، مناسب می‌سازد این است که با توجه به شباهت ساختاری آن با بتن، امکان ایجاد پیوستگی قوی بین بتن قبلی و این کامپوزیت وجود دارد. با جایگزینی مصالح HPFRCC به جای بتن معمولی در قاب بتن مسلح به شکل کامل یا فقط در چشمه‌ی اتصال، ظرفیت باربری و تغییرشکل نهایی این قاب افزایش می‌یابد. مقاومت کششی نهایی این مصالح کامپوزیتی بیش از مقاومت فشاری آن در بهبود خصوصیات سازه‌یی قاب بتن مسلح مؤثر است.

با مقاومت‌های فشاری متفاوت و مقاومت کششی ثابت ۳ مگاپاسکال به جای بتن معمولی در اتصالات قاب‌های بتن مسلح، شکل‌پذیری، تغییرمکان جانبی نهایی و نیروی جانبی بیشینه افزایش می‌یابند. بیشترین افزایش شکل‌پذیری در قاب ۱٪-۲۸-۳۰ RCH با افزایشی در حدود ۷۵٪، بیشترین افزایش نیروی جانبی بیشینه در قاب ۱٪-۳۰-۳۹ RCH با حدود ۴۵٪ و بیشترین افزایش تغییرمکان جانبی نهایی در ۲ قاب آخر و به میزان ۱۴٪ نسبت به قاب RC اتفاق می‌افتد. با افزایش مقاومت فشاری مصالح HPFRCC به کاررفته در اتصالات، شکل‌پذیری، نیروی جانبی بیشینه و تغییرمکان جانبی نهایی تغییرات کمی نسبت به یکدیگر دارند. ولی اختلافی حدود ۱۰٪ در بتن‌های ۳۵ و ۳۹ مگاپاسکال با بتن ۲۸ مگاپاسکال مشاهده می‌شود. الگوی خسارت در این قاب‌ها و ترتیب گسترش انهدام فشاری و ترک‌خوردگی‌های کششی مشابه حالت‌های قبلی است.

خلاصه‌ی از نتایج تحلیل‌های انجام‌شده بر روی این قاب‌ها در جدول ۱۱ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که به‌طور کلی با جایگزینی بخشی یا تمام یک قاب بتن مسلح با مصالح HPFRCC باعث افزایش شکل‌پذیری و تحمل بارهای جانبی می‌شود. تقریباً در همه‌ی موارد، جایگزینی کامل قاب بتن مسلح با این مصالح، باعث افزایش بیشتری در بار جانبی نسبت به زمانی که فقط در اتصالات به کار

پانویس‌ها

1. high performance fiber reinforced cementitious composite (HPFRCC)
2. high performance concrete (HPC)
3. fiber reinforced concrete (FRC)
4. textile reinforced concrete (TRC)
5. micro-cracking
6. Poly-Propylene
7. Poly Vinyl Alcohol
8. Ductal
9. engineered cementitious composite (ECC)

منابع (References)

1. Aveston, J., Cooper, G.A. and Kelly, A. "Single and multiple fracture" In *Conf. Proc. on the Properties of Fiber Composites*, pp. 15-24, National Physical Laboratory, IPC Science & Technology Press, Guildford, UK (1971).
2. Krenchel, H. and Stang, H. "Stable microcracking in cementitious materials", In *Brittle Matrix Composites 2*, A.M. Brandt and J.H. Marshall, eds., pp. 20-33 (1989).
3. Curbach, M. and Jesse, F. "High-performance textile-reinforced concrete", *Structural Engineering International*, **9**(4,1), pp. 289-291(3) (1999).
4. Reinhardt, H.W., Krüger, M. and Große, C.U. "Concrete prestressed with textile fabric", *Journal of Advanced Concrete Technology*, **1**(3), pp. 231-240 (2003).

5. Allen, H.G. "Stiffness and strength of two glass-fiber reinforced cement laminates", *Journal of Composite Materials*, **5**(2), pp. 194-207 (1971).
6. Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W. "Setting the stage: Toward performance-based classification of FRC composites", In *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4)*, *Proc. of the 4th Int'l RILEM Workshop*, A.E. Naaman and H.W. Reinhardt, eds. Published by RILEM S.A.R.L. (2003).
7. Fukuyama, H.Y., Matsuzaki, Y., Sato, M. Iso and Suwada, H. "Structural performance of engineered cementitious composite elements", *Composite and Hybrid Structures, 6th ASCCS International Conference on Steel-Concrete Composite Structures*, pp. 969-976 (2000).
8. Brandt, A.M., *Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance*, London, E&FN Spon, pp. 470 (1995).
9. Bache, H. "Densified cement/ultra-fine particle-based materials", CBL Rapport No. 40, Aalborg Portland, ISBN 87-89132-00-9 (1981).
10. Chanvillard, G. and Rigaud, S. "Complete characterization of tensile properties of ductal UHPFRC according to the French recommendations", In *Proc. of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4)*, A.E. Naaman and H.W. Reinhardt, eds, RILEM Publications S.A.R.L., pp. 21-34 (2003).
11. Li, V.C. "From micromechanics to structural engineering- the design of cementitious composites for civil engineering applications", *JSCE J. of Struc. Mechanics and Earthquake Engineering*, **10**(2), pp. 37-48 (1993).

12. Fischer, G., Wang, S. and Li, V.C. "Design of engineered cementitious composites for processing and workability requirements", *Seventh International Symposium on Brittle Matrix Composites*, Warsaw, Poland, pp. 29-36 (2003).
13. Kong, H.J., Bike, S. and Li, V.C. "Development of a self-compacting engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization", *Journal of Cement and Concrete Composites*, **25**(3), pp. 301-309 (2003).
14. Wang, S. and Li, V.C. "High early strength engineered cementitious composites", *ACI Materials Journal*, **103**(2), pp. 97-105 (2006).
15. Wang, S. and Li, V.C. "Materials design of lightweight PVA-ECC", *In Proc., HPFRCC*, A.E. Naaman and H.W. Reinhardt, eds., Ann Arbor, MI, pp. 379-390 (2003).
16. Lepech, M.D., Li, V.C., Robertson, R.E. and Keoleian, G.A. "Design of ductile engineered cementitious composites for improved sustainability", *ACI Materials Journal*, **105**(4), pp. 350-366 (2007).
17. Li, V.C. and Yang, E.H. "Self-healing in concrete materials", In *Self Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*, S. van der Zwaag, ed., pp. 161-193 (2007).
18. Yang, E.H. and Li, V.C. "Strain-hardening fiber cement optimization and component tailoring by means of a micromechanical model", *Journal of Construction and Building Materials*, **24**(2), pp. 130-139 (2007).
19. Ziaei, M. and Peighale, A. "A guidance to model with ABAQUS software", Tehran, Iran, (In Persain)(2009).
20. Cranston, W.B. and Cracknell, J.A. "Tests on reinforced concrete frames 2: Portal frames with fixed feet", Cement and Concrete Association, London, TRA/420 (1969).
21. Bazant, Z.P. and Oh, B.H., "Crack band theory for fracture of concrete", *Material and Structures*, **16**(93), pp. 155-177 (1983).
22. Kheyroddin, A. and Mortezaei, A.R., "The effect of element size and plastic hinge characteristics on nonlinear analysis of RC frames", *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering*, **32**(5), pp. 451-470 (2008).

USING HPFRCC FOR INCREASING THE CAPACITY OF A R.C. FRAME

A. Hemmati

ahemmati2000@yahoo.com

Islamic Azad University

Semnan Branch

A. Kheyroddin(corresponding author)

kheyroddin@semnan.ac.ir

M. K. Sharbatdar

msharbatdar@semnan.ac.ir

Dept. of Civil Engineering

Semnan University

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 3, Page 97-106, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 3 September 2011; received in revised form 13 December 2011; accepted 7 January 2012.

Abstract

High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites; HPFRCC, are cement matrices with strain hardening responses under tension loading. In these composites, the cement mortar with fine aggregates is reinforced by random distributed fibers and may be used for various applications, such as rehabilitation of structural members. In this paper, the mechanical properties of HPFRCC materials are reviewed briefly. Moreover, a one-bay and one-story reinforced concrete frame, which had been tested by Cranston, is selected and investigated, using high performance materials with different tensile and compressive strengths, instead of concrete, in the connection zone and the whole frame. Analytical results show that using HPFRCC material instead of regular concrete increases the ductility and loading capacity of the frame. In this investigation, by increasing the amount of compressive and tensile strength of HPFRCC, the loading capacity of the composite frames increased about 40% compared to the RC frame. Ductility factors of these composite frames also increased about 50% and 70% compared to the RC frame, respectively. The cracking patterns of these frames are compared to each other. Cranston's experimental investigation was undertaken to corroborate the analytical work and lend further insight into the nature of finite element items in the frame structure. The structural properties of normal concrete are constant during this investigation, but the structural properties of HPFRCC are variable, including different compressive and tensile strengths. Compressive strengths of HPFRCC are 28, 35 and 39 MPa, and tensile strengths are 3, 4 and 5 Mpa. Lateral load-deflection curves and cracking patterns of the RC (full reinforced concrete frame), RH (full reinforced HPFRCC frame) and RCH (reinforced concrete

frame with HPFRCC material in its connections) frames with $\varepsilon_{tu} = 1\%$ are investigated. Analytical results show that maximum ductility occurs in the RCH frame with compressive and tensile strengths of 28 and 5 MPa, respectively. The maximum amount of ultimate lateral load occurs in the RH frame with compressive and tensile strengths of 28 and 5 MPa, respectively. The maximum amount of ultimate lateral displacement occurs in the RH frame with compressive and tensile strengths of 35 and 3 MPa, respectively. This improvement in the lateral behavior of frames with HPFRCC materials is concluded from the large ultimate tensile strain of the HPFRCC material, which is altered instead of normal concrete with low $\varepsilon_{tu} = 1\%$ and, consequently, increases both the load and deflection capacity of the structure. In addition, another factor that has an important role to play in the ascending trend of the mentioned curves is steel reinforcements. When concrete is altered by HPFRCC, because of the higher $\varepsilon_{tu} = 1\%$ of HPFRCC, steel rebars can reach a closer amount of the plastic strain value of steel and, hence, lateral deflection and force increase simultaneously. In the other word, the main role of HPFRCC is to assist the work of steel by keeping the unity of the HPFRCC and steel as a composite material by forming multiple cracking and avoiding a concentrated failure plane. It can be used in critical parts of reinforced concrete frames to increase the capacity of the structure.

Key Words: HPFRCC, reinforced concrete, frame, ductility, cracking.