

مقاوم سازی دال بتن مسلح با استفاده از کامپوزیت‌های مسلح سیمانی

الیافی توانمند

دریافت مقاله: ۱۳۹۷-۳-۲

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷-۴-۲۴

علی همتی*

استادیار، مرکز تحقیقات ژئوتکنیک لرزه‌ای و بتن توانمند، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان، ایران،
ali.hemmati@semnaniau.ac.ir

مطهره ذوالفقاری

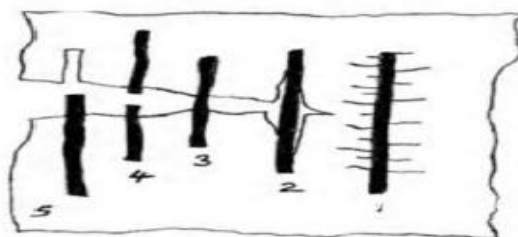
کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان، ایران،
En.m.zolfaghari@gmail.com

چکیده:

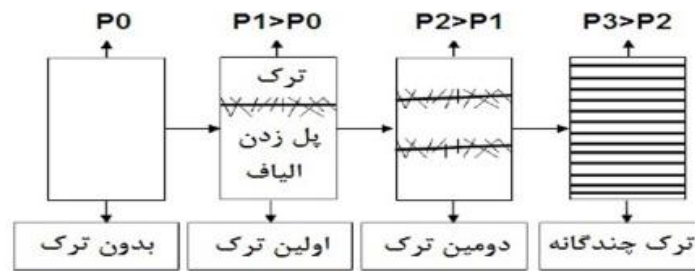
گذشت زمان، تغییر کاربری، به روز شدن آیین نامه‌های طراحی و وقوع رخداد‌های طبیعی از جمله عواملی هستند که سبب می‌شوند اعضا و یا سازه‌ها نیاز به مقاوم سازی پیدا کنند. ساختمان‌های بتنی نیز با توجه به گستردگی خود از این امر مستثنی نبوده و روش‌های مختلفی برای مقاوم سازی آنها ارائه گردیده است. یکی از روش‌های مقاوم سازی اعضای بتن مسلح، استفاده از مصالح بتنی توانمند است. کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC) مصالحی توانمند و شکل پذیر است که از ترکیب ملات سیمان و الیاف تشکیل می‌شود. سخت شونده‌گی کرنش کششی و قابلیت تشکیل ترک‌های چندگانه ناشی از ساز و کارهای الیاف داخل ملات، از مهم ترین ویژگی‌های این مصالح توانمند است که آن را برای مقاوم سازی اعضای بتن مسلح، مناسب نموده است. در این مقاله از لایه‌های HPFRCC در ضخامت‌های مختلف، برای مقاوم سازی یک دال بتن مسلح استفاده گردیده و با استفاده از روش اجزای محدود، ظرفیت دال‌های مقاوم سازی شده، محاسبه و با ظرفیت دال بتن مسلح مبنا مقایسه شده است. نتایج نشان داد که استفاده از مصالح HPFRCC در مقایسه با بتن مسلح معمولی، باعث افزایش بیشتری در میزان بار نهایی و شکل پذیری دال‌ها می‌گردد. در مدل‌هایی که با افزودن لایه HPFRCC به آنها، ضخامت دال افزایش یافته، پس از وقوع بار نهایی، منحنی‌های ظرفیت دچار افت شده و نرم شونده‌گی در آنها رخ داده است. این افت بار در مدل‌های بتنی و مدل‌های دارای HPFRCC به طور متوسط به ترتیب حدود ۱۵/۴ و ۸/۵۵ درصد می‌باشد. اما در مدل‌هایی که لایه HPFRCC جایگزین بتن معمولی گردیده و افزایش ضخامت دال ایجاد نشده، افت بسیار کمی در منحنی ظرفیت آنها ایجاد شده است.

واژه‌های کلیدی: شکل پذیری، HPFRCC، دال، مقاوم سازی، بار نهایی

گسترش روز افزون استفاده از بتن در صنعت ساختمان و ضرورت مقاوم سازی سازه‌ها و اعضای که به دلایل مختلف نیاز به تقویت دارند، سبب شده تا روش‌های مختلفی برای مقاوم سازی پیشنهاد گردد. مصالح بتنی توانمند که دارای ویژگی‌های مناسبی باشند از مدت‌ها پیش برای مقاوم سازی این سازه‌ها مد نظر بوده است. یکی از این مصالح بتنی توانمند، کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC) هستند که از ترکیب ملات سیمان و الیاف تشکیل شده و برای تقویت سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساز و کارهای مختلف رفتار الیاف داخل بتن در شکل (۱) نشان داده شده که شامل آسیب دیدگی ملات، جدا شدن الیاف و ملات، پل زدن الیاف، پارگی الیاف و بیرون کشیده شدن الیاف است. استفاده از انواع مختلف الیاف برای بهبود ویژگی‌های بتن شامل کنترل ترک و افزایش شکل پذیری از مدت‌ها پیش مورد توجه پژوهشگران بوده است و بتن مسلح الیافی (FRC) به طور گسترده در پروژه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. رفتار بتن‌های الیافی در کشش شبیه بتن معمولی است اما بخش نرم شونده منحنی تنش کرنش کششی آنها با شیب ملایم تری نسبت به بتن معمولی همراه است. نامان و رینهارت در سال ۲۰۰۳ مصالحی نوین را معرفی نمودند که برخلاف FRC ها شامل یک بخش سخت شوندگی کرنش در منحنی تنش-کرنش کششی خود بودند و در رده مصالح توانمند HPFRCC قرار گرفتند [۱]. در مصالح HPFRCC، پس از وقوع اولین ترک کششی، الیاف شروع به پل زدن می‌کنند (حالت ۳ در شکل ۱) و با این ساز و کار از گسترش ترک، جلوگیری می‌نمایند. با افزایش نیروی کششی، این ترک دیگر رشد نمی‌کند و ترک جدیدی در نقطه‌ای دیگر تشکیل می‌شود و این رفتار تا تشکیل چندین ترک در محل‌های مختلف نمونه HPFRCC ادامه می‌یابد. تشکیل ترک‌های چندگانه و جلوگیری از گسترش زیاد اولین ترک خوردگی، سبب می‌شود که برخلاف بتن معمولی، رفتار سخت شونده کششی در این مصالح شکل بگیرد. چگونگی تشکیل ترک‌های چندگانه در مصالح HPFRCC در شکل (۲) نشان داده شده است. الیاف مصرفی معمولا با نسبت حجمی ۱ تا ۸ درصد به مجموعه آب، سیمان و ریزدانه‌ها اضافه شده و با استفاده از فوق روان کننده‌ها، مصالح HPFRCC تولید می‌شود. باید توجه داشت که الیاف به آرامی و طی چندین مرحله به مخلوط اضافه گردد تا از پدیده گلوله شدن الیاف جلوگیری به عمل آید. بدین ترتیب که ابتدا کل سیمان و ماسه و ۲۵ درصد الیاف با حدود ۲۵ درصد آب مخلوط شود و سپس مابقی الیاف در ۷۵ درصد آب باقیمانده ریخته شده و به تدریج و به صورت مرحله‌ای به ترکیب اضافه گردد تا الیاف به شکل یکنواخت در بافت HPFRCC توزیع شود. پژوهشگران زیادی بر روی مشخصات این مصالح توانمند مطالعه نموده‌اند که خلاصه‌ای از این مشخصات در جدول (۱) ارائه شده است. ویژگی‌های این مصالح توانمند بویژه مشخصات کششی مناسب و اینکه از بافتی بسیار مشابه بتن برخوردار است، باعث شده که از آن به عنوان مصالحی مناسب برای مقاوم سازی سازه‌های بتن مسلح استفاده شود.



شکل (۱) ساز و کارهای مختلف رفتار الیاف داخل بتن [۲]



شکل (۲) تشکیل ترک‌های چندگانه در مصالح HPFRCC [۲]

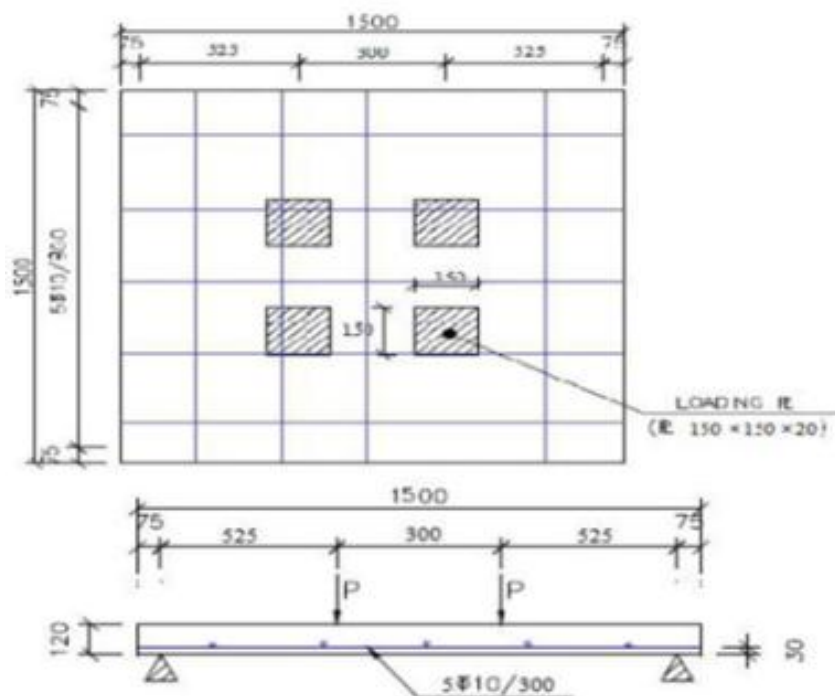
جدول (۱) مشخصات مصالح HPFRCC [۲، ۳ و ۴]

مقاومت فشاری (MPa)	ضریب پواسون	مقاومت کششی (MPa)	کرنش کششی نهایی (%)	کرنش فشاری نهایی (%)	ضریب ارتجاعی (GPa)	چگالی ($\frac{ton}{m^3}$)
۲۰-۹۵	۰/۲۲۶-۰/۲۳	۴-۱۲	۱-۸	۰/۵-۱	۱۸-۳۴	۰/۹۵-۲/۳

در سال ۲۰۰۸ بونالدو و همکاران به بررسی مقاوم سازی دال‌های بتن مسلح مقاوم سازی شده با CFRP در وجه کششی و بتن الیافی FRC در وجه فشاری پرداختند. این روش نسبت به استفاده از CFRP تنها در وجه کششی دال، موثرتر بود. زیرا کرنش فشاری نهایی بالاتر بتن الیافی نسبت به بتن معمولی باعث می‌شد که از ظرفیت CFRP استفاده بیشتری به عمل آید [۵]. تریانتافیلو و پاپانیکیولا در سال ۲۰۱۳ مقاوم سازی دال‌های دوطرفه با تیر پیرامونی توسط ملات مسلح بافته شده (TRM) را مطالعه کردند. این لایه تقویتی تحتانی، روی سه نمونه بتنی نصب شد و به همراه یک نمونه بتنی مینا تحت بارگذاری قرار گرفت. نتایج نشان دهنده افزایش بار ترک خوردگی، شکل پذیری و ظرفیت دال‌های مقاوم سازی شده بود که به جهت قرار گیری الیاف بافته شده و تعداد لایه‌های آن هم بستگی داشت [۶]. خرم و شریبتدار به بررسی تحلیلی مقاوم سازی دال‌های بتن مسلح با HPFRCC پرداخته و به رفتار شکل پذیرتر و بار نهایی بیشتری نسبت به دال بتنی مینا دست یافتند. در این پژوهش تحلیلی، لایه‌های HPFRCC به ضخامت ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۲۰ میلی‌متر جایگزین بتن معمولی دال گردید (بدون افزایش ضخامت دال) و منحنی ظرفیت آنها با هم مقایسه شد [۷]. غلامحسینی و همکاران در سال ۲۰۱۶ شانزده دال بتنی الیافی (FRC) را در مقیاس واقعی تحت آزمایش قرار دادند که نتایج نشان داد بتن الیافی باعث کاهش ۵۰ درصدی عرض ترک‌ها در دال، نسبت به دال بتن مسلح معمولی می‌گردد [۸]. کوتاس و همکاران در سال ۲۰۱۶ مقاوم سازی دال دوطرفه بدون تیر پیرامونی را با مصالح TRM بررسی نموده و معادلاتی نیز برای آن ارائه کردند [۹]. فاکونی و همکاران در همین سال یازده دال بتن الیافی (FRC) ساخته و مورد آزمایش قرار دادند که این دال‌ها بار ترک خوردگی بیشتری نسبت به دال بتن معمولی داشتند و رفتار شکل پذیرتری از خود بروز دادند [۱۰]. افروزنیا در سال ۲۰۱۷ مقاوم سازی دال‌های یک طرفه بتنی با ضخامت‌ها و چیدمان‌های مختلف HPFRCC را در دستور کار قرار داد. ۱۵ دال یک طرفه مقاوم سازی و آزمایش شدند که نتایج نشان داد استفاده از این مصالح توانمند سبب افزایش شکل پذیری و جذب انرژی بیشتر می‌گردد [۱۱]. در سال ۲۰۱۷ عباس زاده و همکاران مقاوم سازی دال دوطرفه با نوارهای HPFRCC که داخل شیارهایی قرار می‌گرفتند را مطالعه نمودند تا از ظرفیت HPFRCC استفاده بیشتری به عمل آید و پیوستگی بهتری بین بتن و HPFRCC ایجاد شود [۱۲]. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقاوم سازی دال‌های بتن مسلح عمدتاً با انواع مختلف FRP و شیارزنی انجام شده و مقاوم سازی با مصالح HPFRCC موضوعی است که در سالیان اخیر، مورد توجه قرار گرفته است. لذا در این مقاله، بر مبنای یک کار آزمایشگاهی که در دانشگاه سمنان، توسط به زرد انجام شده، مقاوم سازی یک دال بتنی با لایه‌های HPFRCC مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۳].

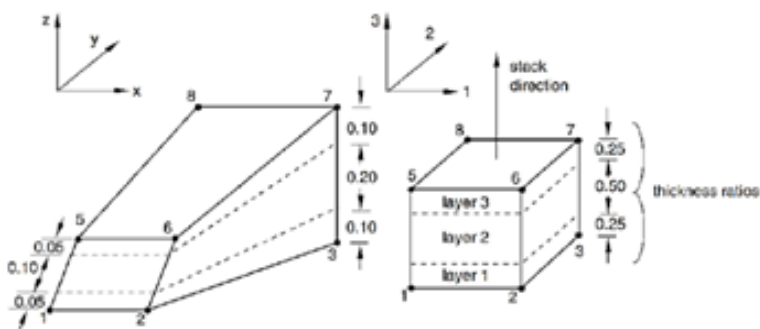
۲- نمونه آزمایشگاهی و مدل سازی

ابعاد و مشخصات دال بتن مسلح دوطرفه مورد بررسی در این مقاله در شکل (۳) نشان داده شده است. بارگذاری چهار نقطه ای به دال‌هایی مربعی به ابعاد ۱۵۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۲۰ میلی‌متر وارد شده و به صورت افزایشی اعمال گردیده است. میلگردهای کششی از میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر و به فاصله ۳۰۰ میلی‌متر از یکدیگر در وجه پایینی دال و به صورت عمود بر هم قرار داشتند. بار قائم از طریق چهار صفحه فولادی به ابعاد ۱۵۰ در ۱۵۰ در ۲۰ میلی‌متر به دال‌ها وارد گردیده است. فاصله مرکز تا مرکز محل اعمال نیرو ۳۰۰ میلی‌متر بود. مقاومت فشاری بتن مورد استفاده ۲۸ مگاپاسکال و تنش تسلیم میلگردهای فولادی ۳۵۰ مگاپاسکال بوده است. تکیه‌گاه‌های دال بتن مسلح آزمایشگاهی، مفصلی بوده و در هر چهار طرف آن قرار داشتند [۱۳].



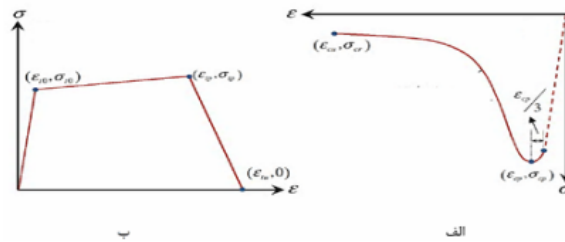
شکل (۳) ابعاد و مشخصات دال‌های مورد بررسی (ابعاد به میلی‌متر) [۱۳]

برای مدل سازی بتن و کامپوزیت‌های سیمانی از المان Solid و برای مدل سازی فولاد از المان Truss استفاده شده است. المان Solid مورد استفاده، همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده، دارای قابلیت مدل سازی بصورت لایه‌ای نیز می‌باشد.



شکل (۴) المان Solid مورد استفاده برای مدل سازی بتن و HPCFRCC [۱۴]

منحنی تنش کرنش فشاری و کششی مصالح HPCFRCC مورد استفاده برای مدل سازی، در شکل (۵) ارائه شده که این منحنی‌ها به صورت گسترده‌ای توسط محققین مختلف برای مدل سازی منحنی تنش کرنش HPCFRCC بکار برده شده است [۱۵].

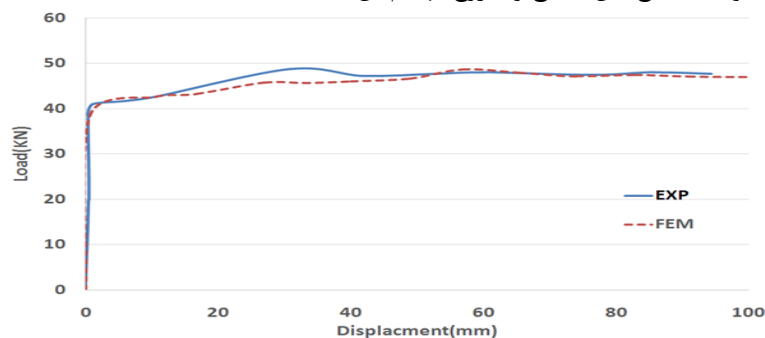


شکل (۵) منحنی تنش-کرنش مصالح HSPFRCC (الف) فشاری، (ب) کششی [۱۵]

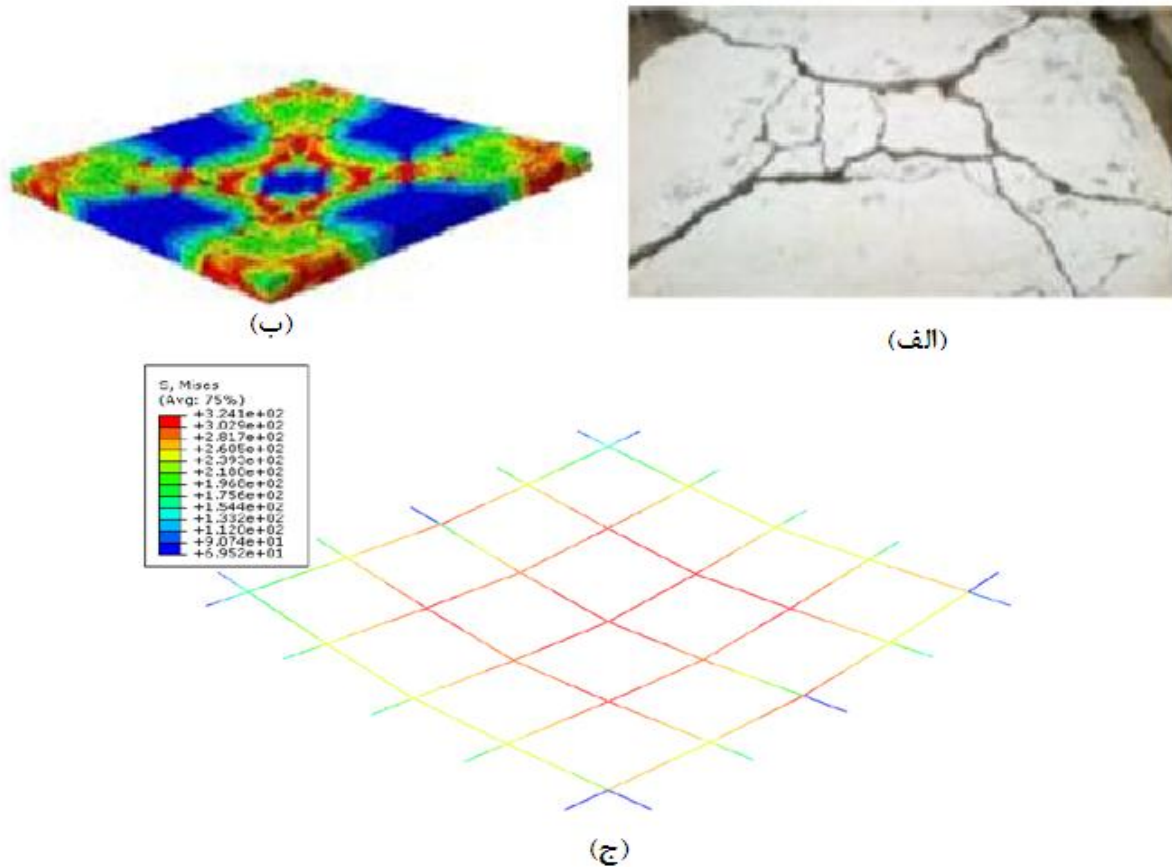
برای مدل سازی این سازه‌ها از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است که در ادامه پارامترهای مدل سازی این دو مصالح، معرفی می‌گردد. بتن مدل سازی شده دارای مقاومت فشاری و کششی ۲۸ و ۲/۸ مگاپاسکال و ضریب ارتجاعی ۲۸ گیگاپاسکال است. کرنش نهایی فشاری بتن برابر ۰/۰۰۳۵ در نظر گرفته شد. مقاومت فشاری و کششی HSPFRCC به ترتیب برابر ۲۴ و ۳/۵ مگاپاسکال، ضریب ارتجاعی معادل ۲۵ گیگاپاسکال و کرنش نهایی کششی و فشاری نیز به ترتیب برابر ۱/۳۵ و ۰/۶ درصد منظور گردید. فولادهای طولی دارای تنش تسلیم ۳۵۰ مگاپاسکال و تنش نهایی ۵۲۰ مگاپاسکال بوده و ضریب ارتجاعی آنها ۲۰۰ گیگاپاسکال در نظر گرفته شد. ماهیت و اجزای تشکیل دهنده بتن و HSPFRCC بسیار به هم نزدیک هستند. از طرف دیگر مطالعات آزمایشگاهی متعدد بر روی رفتار تیرهای بتن مسلح مقاوم سازی شده با لایه‌های HSPFRCC نشان داده که هیچ گونه جداسازی بین این دو مصالح (در نقطه اتصال آنها) رخ نداده و تیر مقاوم سازی شده، به صورت یکپارچه تحت بارگذاری قرار گرفته و تا مرحله انهدام پیش رفته است. لذا اتصال بتن و HSPFRCC در این مقاله نیز به صورت پیوستگی کامل منظور گردید [۱۶].

۳- صحت سنجی و مدل‌های مورد بررسی

منحنی نیرو-تغییر مکان دال بتن مسلح آزمایشگاهی و نمونه مدل سازی شده در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، بار نهایی و تغییر مکان نهایی نقطه میانی نمونه آزمایشگاهی و نمونه مدل سازی شده به ترتیب برابر ۴۷/۲ کیلونیوتن و ۹۹/۶۷ میلی‌متر و ۴۵/۱ کیلونیوتن و ۱۰۳/۱۲ میلی‌متر است که کمتر از ۵ درصد با یکدیگر اختلاف دارند. نحوه انهدام نمونه آزمایشگاهی و مدل مورد بررسی نیز در شکل (۷) با هم مقایسه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، بخش میانی دال دچار ترک خوردگی شده و به صورت قطری تا گوشه‌ها امتداد یافته که در هر دو نمونه مشابه است. البته منحنی ظرفیت آزمایشگاهی در تغییر مکان حدود ۳۵ میلی‌متر دارای یک فراز و سپس فرود است که عمدتاً ناشی از نحوه اعمال بار در آزمایشگاه می‌باشد. چون بارهای مونوتونیک در آزمایشگاه به صورت مرحله‌ای به نمونه وارد می‌گردند و در پایان هر مرحله، زمانی برای ثبت چگونگی ترک خوردگی نمونه، صرف می‌شود و سپس بارگذاری مجدداً شروع می‌گردد، لذا این فراز و فرودها در منحنی‌های ظرفیت آزمایشگاهی به چشم می‌خورد. اما باید توجه داشت که آخرین افت که پس از بار بیشینه رخ می‌دهد، مربوط به از دست دادن مقاومت مقطع بتن مسلح و شروع انهدام آن است.



شکل (۶) صحت سنجی دال بتن مسلح



شکل (۷) الگوی انهدام دال بتن مسلح مرجع (الف) آزمایشگاهی، (ب) مدل سازی شده، (ج) تسلیم میگردهای کششی

بعد از صحت سنجی مدل تحلیلی با نمونه‌های آزمایشگاهی، تاثیر تغییر مقاومت فشاری بتن و HPFRCC، ضخامت ناحیه مقاوم سازی شده با HPFRCC و محل قرارگیری آن بر رفتار دال بتن مسلح مورد بررسی قرار گرفت. نام گذاری مدل‌های اجزای محدود و مشخصات هر یک از آنها در جدول‌های (۲ و ۳) تشریح شده است.

جدول (۲) نام گذاری مدل‌های مورد بررسی

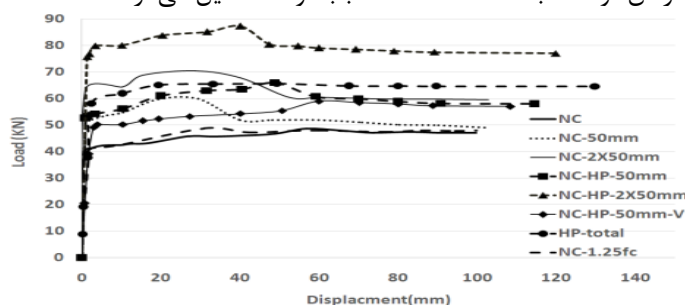
نام مدل	توضیح
NC	دال بتن مسلح مینا
NC-50mm	دال بتن مسلح با لایه بتنی تحتانی اضافه شده به ضخامت ۵۰ میلی‌متر
NC-2x50mm	دال بتن مسلح با لایه بتنی فوقانی و تحتانی اضافه شده هر کدام به ضخامت ۵۰ میلی‌متر
NC-1.25fc	دال بتن مسلح مینا با مقاومت فشاری ۱/۲۵ برابر
NC-HP-50mm	دال بتن مسلح با لایه HPFRCC تحتانی اضافه شده به ضخامت ۵۰ میلی‌متر
NC-HP-2X50mm	دال بتن مسلح با لایه HPFRCC فوقانی و تحتانی اضافه شده هر کدام به ضخامت ۵۰ میلی‌متر
NC-HP-50mm-V	دال بتن مسلح با لایه HPFRCC تحتانی جایگزین بتن به ضخامت ۵۰ میلی‌متر
HP-total	دال HPFRCC

جدول (۳) مشخصات مدل‌ها

نام مدل	مقاومت کششی HPRC (MPa)	مقاومت فشاری HPRC (MPa)	مقاومت کششی بتن (MPa)	مقاومت فشاری بتن (MPa)	ضخامت کل دال (mm)	ضخامت لایه تقویتی (mm)
NC	-	-	۲/۸	۲۸	۱۲۰	-
NC-50mm	-	-	۲/۸	۲۸	۱۷۰	۵۰
NC-2x50mm	-	-	۲/۸	۲۸	۲۲۰	۱۰۰
NC-1.25fc	-	-	۲/۸	۳۵	۱۲۰	-
NC-HP-50mm	۳/۵	۲۴	۲/۸	۲۸	۱۷۰	۵۰
NC-HP-2x50mm	۳/۵	۲۴	۲/۸	۲۸	۲۲۰	۱۰۰
NC-HP-50mm-V	۳/۵	۲۴	۲/۸	۲۸	۱۲۰	۵۰
HP-total	۳/۵	۲۴	-	-	۱۲۰	-

۴- نتایج تحلیل

منحنی نیرو-تغییرمکان مدل‌های نام گذاری شده در جدول (۳)، در شکل (۸) نشان داده شده است. خلاصه‌ای از نتایج تحلیل نیز در جدول (۴) ارائه شده است. معیار توقف تحلیل در مدل‌های مختلف، متفاوت است. در مدل‌هایی که منحنی ظرفیت آنها کاهنده است، تحلیل تا جایی ادامه می‌یابد که ظرفیت تیر به ۸۵٪ ظرفیت بیشینه (بار نهایی) آن برسد. در سایر مدل‌ها، رسیدن کرنش فشاری بتن به $\epsilon_{cu} = 0.0035$ ، رسیدن کرنش فشاری HPRC به $\epsilon_{cu} = 0.006$ یا رسیدن کرنش فولادها به $\epsilon_{su} = 0.015$ سبب توقف تحلیل می‌گردد.



شکل (۸) منحنی ظرفیت مدل‌های مورد بررسی

جدول (۴) خلاصه‌ای از نتایج تحلیل

نام مدل	P_y (kN)	δ_y (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)	$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y}$	$\frac{P_u}{P_{u(NC)}}$	$\frac{\mu}{\mu(NC)}$
NC	۴۲/۶۳	۱۰/۶۸	۴۸/۶۳	۹۹/۶۷	۹/۳۳	۱	۱
NC-50mm	۵۴/۷۳	۱۰/۴۲	۵۹/۸۸	۱۰۲/۱	۹/۸۳	۱/۲۳	۱/۰۵
NC-2x50mm	۶۴/۳۲	۱۰/۳۴	۷۰/۵	۱۰۲/۸۳	۹/۹۴	۱/۴۵	۱/۰۷
NC-1.25fc	۴۲/۷	۱۰/۶۵	۴۸/۷۳	۹۹/۸۱	۹/۳۷	۱/۰۱	۱/۰۱
NC-HP-50mm	۵۶/۱۲	۱۰/۳۹	۶۵/۹۲	۱۱۴/۶	۱۱/۰۲	۱/۳۶	۱/۱۸
NC-HP-2x50mm	۸۰/۰۵	۱۰/۱۸	۸۷/۲۴	۱۱۹/۸۷	۱۱/۸	۱/۷۹	۱/۲۶
NC-HP-50mm-V	۵۰/۲	۱۰/۴۱	۵۹/۵۷	۱۰۸/۴۷	۱۰/۴۲	۱/۲۲	۱/۱۱
HP-total	۶۱/۸۷	۱۰/۳۳	۶۵/۵۸	۱۲۹/۷۸	۱۲/۵۶	۱/۳۵	۱/۳۴

در مدل NC-50mm، بار بیشینه در تغییر مکان حدود ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر رخ داد و سپس با افتی حدود ۱۴ درصدی در نیرو، روبرو گردید که این افت، ناشی از ترک خوردگی بتن غیر مسلح اضافه شده به ناحیه کششی دال مرجع بود. پس از این افت ناگهانی، منحنی ظرفیت دال مقاوم سازی شده با شیب ملایمی به سمت پایین حرکت کرده و تحلیل پس از رسیدن ظرفیت دال به ۸۵ درصد ظرفیت بیشینه آن، متوقف گردید. در مدل NC-HP-50mm، بار بیشینه در تغییر مکان حدود ۴۹ میلی‌متر رخ داد و پس از آن با افتی حدود ۱۰ درصد که ناشی از ترک خوردگی HPFRCC اضافه شده به قسمت پایینی دال است، روبرو گردید. سپس حرکت رو به پایین منحنی ظرفیت نمونه مقاوم سازی شده، ادامه یافت و با رسیدن کرنش بتن فشاری به مقدار ۰/۰۰۳۵، روند تحلیل پایان پذیرفت.

در مدل NC-HP-50mm-V، بار بیشینه در تغییر مکان حدود ۶۰ میلی‌متر رخ داد ولی افت ناگهانی نیرو در آن مشاهده نشد. علت آن است که ارتفاع دال با مصالح بتنی غیر مسلح افزایش نیافته است. لذا تحلیل پس از رسیدن کرنش فشاری بتن به ۰/۰۰۳۵ خاتمه یافت. در مدل HP-total، بار بیشینه در تغییر مکان حدود ۶۵ میلی‌متر رخ داد و پس از آن با روند کاهش مقاومت با شیبی بسیار ملایم ادامه یافت و با رسیدن کرنش فولاد کششی به مقدار ۰/۰۱۵، روند تحلیل پایان پذیرفت.

در مدل NC-50mm، بار بیشینه در تغییر مکان حدود ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر اتفاق افتاد و سپس با افتی حدود ۱۴ درصدی در نیرو، روبرو شد. این افت، ناشی از ترک خوردگی بتن غیر مسلح اضافه شده به ناحیه کششی دال مرجع بود. پس از این افت ناگهانی، منحنی ظرفیت دال مقاوم سازی شده با شیب ملایمی به سمت پایین حرکت کرده و تحلیل پس از رسیدن ظرفیت دال به ۸۵ درصد ظرفیت بیشینه آن، متوقف گشت. در مدل NC-HP-50mm، بار بیشینه در تغییر مکان حدود ۴۹ میلی‌متر رخ داد و پس از آن با افتی حدود ۱۰ درصد که ناشی از ترک خوردگی HPFRCC اضافه شده به قسمت پایینی دال است، روبرو گردید. سپس حرکت رو به پایین منحنی ظرفیت نمونه مقاوم سازی شده، ادامه یافت و با رسیدن کرنش بتن فشاری به مقدار ۰/۰۰۳۵، روند تحلیل پایان پذیرفت.

همان‌گونه که در این شکل و جدول دیده می‌شود، بیشترین افزایش بار نهایی نسبت به نمونه مرجع (NC) در مدل مقاوم سازی شده NC-HP-2X50mm و بیشترین شکل پذیری در مدل HP-total ایجاد گردید. به طور کلی می‌توان گفت که با جایگزینی مصالح HPFRCC به جای بتن مسلح معمولی، میزان افزایش شکل پذیری و بار نهایی نسبت به نمونه مرجع با نرخ رشد بیشتری رخ می‌دهد. به گونه ای که با استفاده از این مصالح توانمند به جای بتن معمولی در نمونه‌های مقاوم سازی شده NC-HP-50mm و NC-HP-2X50mm نسبت به نمونه‌های مشابه بتنی (NC-50mm و NC-2x50mm) بار نهایی و شکل پذیری به طور متوسط، به ترتیب حدود ۱۶/۸۵ و ۱۵/۴ درصد افزایش می‌یابند.

هر چند که مقاومت فشاری بتن مورد استفاده در این نمونه‌ها مشابه مقاومت فشاری مصالح HPFRCC می‌باشد، اما دال‌های دارای HPFRCC، بار نهایی بیشتری نسبت به نمونه کاملاً بتن مسلح تحمل کرده‌اند. از طرف دیگر با افزایش ضخامت این لایه، بار نهایی دال هم افزایش یافته است. همان‌گونه که در شکل (۹) نشان داده شده، به نظر می‌رسد که در صورت استفاده از لایه HPFRCC (به ضخامت محدود یا کل ارتفاع)، ارتفاع تار خنثی مقطع C افزایش یافته و سبب افزایش لنگر مقاوم و در نتیجه افزایش بار نهایی عضو خمشی می‌گردد. این اثر افزایش به حدی است که می‌تواند اثر کاهنده HPFRCC تحت کشش بر لنگر مقاوم تیر را جبران نموده و در کل سبب افزایش لنگر مقاوم آن گردد [۱۷].

عمق بلوک تنش فشاری معادل ($a = \beta_1 c$) و لنگر مقاوم یک مقطع HPFRCC (M_r) نشان داده شده در شکل (۹) تحت خمش، از روابط (۱) تا (۳) محاسبه می‌شوند.

$$af'_c ab + A_s' f_y - A_s f_y - \sigma_{0r} b(h - c) = 0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$a = \frac{(A_s - A_s') \cdot f_y + \sigma_{0t} b h}{\alpha f_c' b + \sigma_{0t} \frac{b}{\beta_1}} = \beta_1 c \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$M_r = \alpha f_c' a b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y (d - d') - \sigma_{0t} b (h - c) \left[\left(\frac{h - c}{2} \right) - (h - d) \right] \quad \text{رابطه (۳)}$$

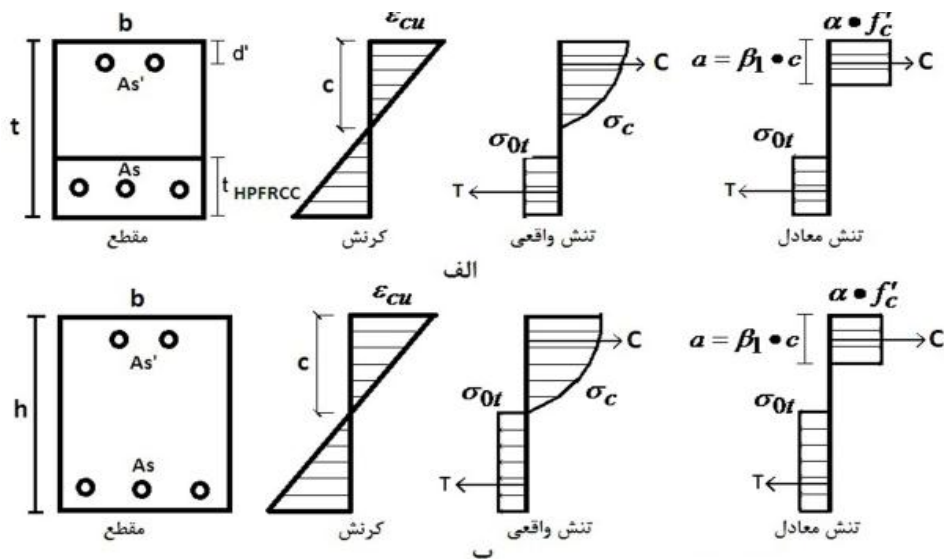
که در این معادله f_c' مقاومت فشاری HPFRCC، b عرض مقطع، f_y تنش تسلیم آرماتور، A_s مساحت فولادهای کششی، A_s' مساحت فولادهای فشاری، σ_{0t} مقاومت کششی HPFRCC، h ارتفاع عضو و d ارتفاع موثر عضو می‌باشند. علاوه بر آن، عمق بلوک تنش فشاری معادل و لنگر مقاوم یک مقطع بتن مسلح با لایه HPFRCC کششی تحت خمش از روابط (۴) تا (۶) محاسبه می‌شود.

$$0.85 f_c' a b + A_s' f_y - A_s f_y - \sigma_{0t} b t_{HPFRCC} = 0 \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0.85 f_c' b} + \frac{\sigma_{0t} b t_{HPFRCC}}{0.85 f_c' b} = \beta_1 c \quad \text{رابطه (۵)}$$

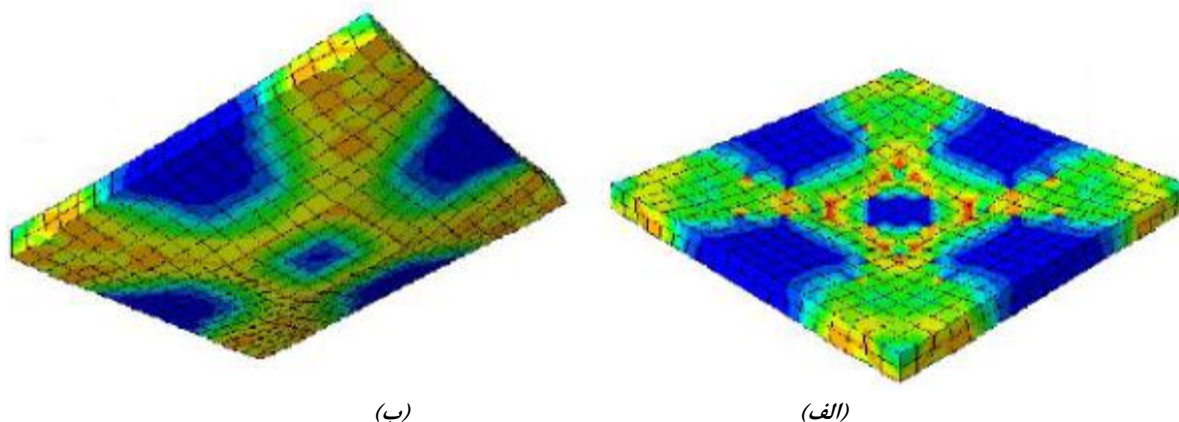
$$M_r = 0.85 f_c' a b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y (d - d') - \sigma_{0t} b t_{HPFRCC} \cdot \left[\frac{t_{HPFRCC}}{2} - (t - d) \right] \quad \text{رابطه (۶)}$$

همان‌گونه که در این مجموعه معادلات مشخص است، استفاده از HPFRCC در بخش پایینی تیر بتن مسلح معمولی سبب افزایش عمق بلوک تنش فشاری معادل ($a = \beta_1 c$) شده که این افزایش نیز به نوبه خود سبب افزایش لنگر مقاوم مقطع می‌گردد. باید توجه داشت که در این حالت اثر افزایشدهنده ($a = \beta_1 c$) از اثر کاهشدهنده عبارت ($\left[\frac{t_{HPFRCC}}{2} - (t - d) \right]$) $(\sigma_{0t} b t_{HPFRCC})$ بیشتر است.



شکل (۹) توزیع تنش و کرنش در یک مقطع تحت خمش (الف) بتنی با لایه تحتانی HPFRCC (ب) HPFRCC کامل [۱۷]

از طرف دیگر، مصالح HPFRCC به سبب رفتار سخت شونده‌گی کرنشی در کشش و کرنش نهایی فشاری بالاتر نسبت به بتن می‌تواند یکپارچگی خود را حفظ کند و در نتیجه، میلگردهای فولادی به تنش‌های بالاتری از حد تسلیم و نزدیک به تنش نهایی برسند. بنابراین چنین به نظر می‌رسد که استفاده از این مصالح توانمند می‌تواند نرم شونده‌گی منحنی ظرفیت دال‌ها را به تاخیر انداخته و سبب افزایش لنگر مقاوم و به دنبال آن نیروی نهایی گردد. مدل‌هایی که با افزودن لایه HPFRCC به آنها، ضخامت دال افزایش یافته است شامل NC-50mm، NC-2X50mm، NC-HP-50mm و NC-HP-2X50mm هستند که در این مدل‌ها، پس از وقوع بار نهایی، منحنی‌های ظرفیت دچار افت شده اند و نرم شونده‌گی در آنها رخ داده است. این افت بار در مدل‌های بتنی و مدل‌های دارای HPFRCC به طور متوسط به ترتیب حدود ۱۵/۴ و ۸/۵۵ درصد می‌باشد. لذا مشاهده می‌شود که افت بار در مدل‌هایی که با HPFRCC تقویت شده اند، با شدت کمتری اتفاق می‌افتد که می‌تواند ناشی از ساز و کار عمل الیاف داخل ملات و بخش سخت شونده‌گی کرنش منحنی تنش-کرنش کششی مصالح HPFRCC باشد. اما به طور کلی می‌توان گفت که این افت در هر چهار نمونه وجود دارد. علت اصلی کاهش ناگهانی بار این است که در این مدل‌ها، بخش تحتانی اضافه شده به دال بتن مسلح مرجع، فاقد میلگرد بوده و پس از تشکیل ترک در آن، عملاً اثر خود را از دست می‌دهد و با کاهش ارتفاع موثر دال، مقاومت آن کاهش می‌یابد. در مورد مصالح HPFRCC به علت تشکیل ترک‌های چندگانه و اثر مسلح کنندگی الیاف، این کاهش مقاومت با شیب ملایم‌تری رخ می‌دهد. اما در سایر مدل‌ها که ارتفاع دال مرجع تغییر نمی‌کند، این افت مقاومت مشاهده نمی‌شود. الگوی ترک‌خوردگی دال HP-total در شکل (۱۰) ارائه شده که نشان دهنده رفتار مناسب‌تر این دال نسبت به دال مرجع است. بعلاوه، افزایش مقاومت فشاری بتن نیز تاثیر چندانی بر نیروی نهایی قابل تحمل برای دال و شکل پذیری آن ندارد.



شکل (۱۰) الگوی ترک‌خوردگی مدل HP-total (الف) وجه فشاری (ب) وجه کششی

۵- نتیجه گیری

استفاده از مصالح HPFRCC برای تقویت دال‌های بتن مسلح مناسب به نظر می‌رسد. تقویت دال‌های بتن مسلح با این مصالح توانمند در صورت افزایش یا ثابت ماندن ضخامت دال، سبب افزایش بار نهایی و شکل پذیری این دال‌ها می‌گردد. هر چند که افزایش ضخامت دال منجر به افزایش بار مرده آن می‌شود اما این اثر بهبود بخش قابل ملاحظه می‌باشد. مصالح HPFRCC به دلیل ماهیت آن که بسیار نزدیک به بتن است می‌تواند پیوستگی مناسبی را با بتن ایجاد نموده و مسائلی نظیر جداشدگی در آن وجود ندارد. افزایش مقاومت فشاری بتن تاثیر چندانی بر منحنی ظرفیت دال مرجع ندارد اما با جایگزینی بخشی از بتن معمولی با HPFRCC (بدون افزایش در ضخامت دال) می‌توان به رفتار مناسب‌تری دست یافت.

- [1] Naaman, A.E., and Reinhardt, H.W., (2003), *High performance fiber reinforced cement composites, HFRCC- 4, France.*
- [2] Li, V.C., (2007), *Engineered cementitious composites (ECC)-material, structural, and durability performance, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109.*
- [3] JSCE, (2008), *Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites.*
- [4] Qian, S., and Li, V.C., (2007), *Simplified inverse method for determining the tensile strain capacity of strain hardening cementitious composites, Journal of Advanced Concrete Technology, 5(2): 235-246.*
- [5] Bonaldo, E., Barros, J., and Lourenco, P.B. (2008), *Efficient strengthening technique to increase the flexural resistance of existing RC slabs, Journal of Composites for Construction, Vol. 12(2): 149-159.*
- [6] Triantafyllou, T., and Papanicolaou, C., (2013), *Innovative applications of textile-based composites in strengthening and seismic retrofitting as well as in the prefabrication of new structures, Advanced Materials Research, 639: 26-41.*
- [۷] خرم، نگین، شربتدار، محمدکاظم، (۱۳۹۳)، بررسی تقویت خمشی دال‌های ضعیف بتن آرمه با لایه‌های متفوات کامپوزیت‌های الیافی توانمند"، تحقیقات بتن، سال هفتم، ۲: ۸۱-۹۱.
- [8] Gholamhoseini, A., Khanlou, A., MacRae, G., Scott, A., Hicks, S., and Leon, R., (2016), *An experimental study on strength and serviceability of reinforced and steel fiber reinforced concrete continuous composite slabs, Engineering Structures, 114: 171-180.*
- [9] Koutas, L.N., and Dionysios, A.B., (2016), *Flexural strengthening of two-way RC slabs with textile reinforced mortar: experimental investigation and design equations, Journal of Composites for Construction, 21(1): 149-159.*
- [10] Facconi, L., Minelli, F., and Plizzari, G., (2016), *Steel fiber reinforced self compacting concrete thin slabs-experimental study and verification against Model Code 2010 provisions, Engineering Structures, 122: 226-237.*
- [۱۱] افروزنیا، محمد، (۱۳۹۶)، بررسی آزمایشگاهی مقاوم سازی دال‌های ضعیف بتن آرمه یک طرفه با استفاده از ورقه‌های بتن توانمند الیافی پیش ساخته"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان.
- [12] Abbaszade, M., Sharbatdar, M.K., and Kheyroddin, A., (2017), *Performance of two-way RC slabs retrofitted by different configurations of high performance fiber reinforced cementitious composite strips, The Open Civil Engineering Journal, 11(1): 650-663.*
- [۱۳] به زرد، پژمان، (۱۳۹۴)، مقاوم سازی دال‌های دو طرفه با استفاده از الیاف مسلح پلیمری به روش نزدیک سطح"، پایان نامه دکتری، دانشگاه سمنان.
- [14] *Help of ABAQUS, (2008), Getting started with ABAQUS.*
- [15] Gencturk B., and Elnashai A.S., (2012), *Numerical modeling and analysis of ECC structures, materials and structures, 46(4): 663-682.*
- [16] Hemmati, A., Kheyroddin, A., and Sharbatdar, M.K., (2015), *Plastic hinge rotation capacity of reinforced HFRCC beams, Journal of Structural Engineering (ASCE), 141 (2).*
- [17] Hemmati, A., Kheyroddin, A., and Sharbatdar, M.K., (2014), *Proposed equations for estimating the flexural characteristics of reinforced HFRCC beams, Iranian Journal of Science and Technology IJST, Transactions of Civil Engineering, 38 (C2): 395-407.*

Strengthening of Reinforced Concrete Slab by HPFRCC Material

Ali Hemmati*

Assistant Professor, Seismic Geotechnical and High Performance Concrete Research Center, Civil Engineering Department, Islamic Azad University, Semnan Branch, Semnan, Iran
ali.hemmati@semnaniau.ac.ir

Motahhare Zolfaghari

MSc, Civil Engineering Department, Islamic Azad University, Semnan Branch, Semnan, Iran

Abstract

A great part of the structures in the world must be strengthened due to some reasons including age of the structures, changed of their use revisions in the structural codes and occurrence of natural disasters. Reinforced concrete buildings are widely constructed in the world., different methods have been proposed for strengthening of these buildings. High performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCC) are cement matrices with strain hardening behavior under tension loading. In these composites, the cement mortar with only fine aggregates is reinforced by randomly distributed fibers and may be used for various applications, such as rehabilitation of structural members. Multiple cracking in the HPFRCC occurs due to bridging and pull out mechanisms of the fibers in this material and subsequently, the strain hardening response is observed. In this paper, HPFRCC layers with different thicknesses have been used for strengthening of the existing reinforced concrete slab. Capacity curves of these strengthened slabs are determined using finite element method and compared with that of reinforced concrete slab. Results show that using HPFRCC material in these members leads to higher ultimate load and ductility compared to those of reinforced concrete slab. With increasing the total height of the strengthened models by HPFRCC, softening occurred in the capacity curves of these models. This softening behavior leads to decrease in ultimate loads of the strengthened models by HPFRCC and concrete by 15.4 % and 8.55 % respectively. In the strengthened models with no variation in the total height, this softening behavior is negligible.

Key words: Ductility, HPFRCC, Slab, Strengthening, Ultimate Load.