تحقیقات بتن
سال ششم، شمارهٔ اوّل
بهار و تابستان ۹۲
ص۱۱۴ - ۱۰۳
تاریخ دریافت: ۹۲/۲/۱۷
تاریخ پذیرش: ۹۲/۹/۱۸

بررسی اثر استفاده از ترکیب الیاف فولادی ماکرو و میکرو به همراه نانوسیلیس بر مشخصه‌های مکانیکی بتن

جمشید اسماعیلی*
دانشیار دانشگاه تبریز، دانشکدهٔ مهندسی عمران
علیرضا محمدجعفری‌صادقی
دانشجوی دکتری دانشگاه تبریز، دانشکدهٔ مهندسی عمران

چکیده:
افزودن الیاف فولادی جهت بهبود رفتار پس از شکست بتن و مصالح پوزولانی برای افزایش مقاومت ناحیهٔ انتقالی کاربرد داشته است. در این راستا ترکیب الیاف در اندازه‌های متفاوت برای پل زدن و بستن ترک‌ها در مراحل مختلف شروع تا رشد ترک و همچنین استفاده از نانوسیلیس با انرژی سطحی و واکنش‌پذیری بالا می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. استفادهٔ همزمان از افزودنی‌های ذکر شده نیز می‌تواند درصورت ترکیب مناسب به تجمیع مزایای ذکر شده در توانمندسازی بتن بیانجامد. در این تحقیق با تهیه و بررسی طرح اختلاط‌های مختلف دارای ترکیب‌های متفاوت از انواع الیاف فولادی به همراه دودهٔ سیلیسی و نانوسیلیس، ترکیب بهینه‌ای از بتن با مشخصه‌های مکانیکی بهبود یافته به‌دست آمد. از جمله این مشخصه‌های مکانیکی می‌توان به افزایش قابلیت جذب انرژی و مقاومت خمشی، مقاومت کششی و فشاری بتن اشاره کرد.

واژه‌های کلیدی: ماکرو الیاف فولادی، میکرو الیاف فولادی، نانو سیلیس، دودهٔ سیلیسی، مقاومت خمشی، قابلیت جذب انرژی.

*نویسنده مسؤول: esmailij@yahoo.co.uk

۱- مقدمه:

با توسعهٔ بتن با عملکرد بسیار بالا (UHPC) کاربردهای کاملاً نوینی در ساخت و سازهای بتن‌آرمه پدید آمده است. با این وجود، به‌دلیل رفتار ترد مصالح UHPC در مقاومت نهایی فشاری و کششی و افت قابل توجه ظرفیت تحمل بار بعد از بار حداکثر، افزودن الیاف مختلف ازجمله الیاف فولادی که منجر به تولید بتن الیافی با عملکرد بالا (UHPFRC) می‌شود جهت بهبود رفتار پس از شکست توصیه شده است [۱] .بتن الیافی با مقاومت بالا دارای کاربردهای سازه‌ای فراوانی می‌باشد که درآن انواع متفاوت الیاف برای افزایش چقرمگی بتن، شکل‌پذیری و مقاومت کششی و خمشی به‌کار می‌رود تا مقاومت سازه‌ای تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی افزایش یافته و انتشار ترک و خردشدگی کاهش یابد [۲].

انواع مختلف الیاف جهت کاربردهای تجاری و آزمایشگاهی موجود می‌باشند که در یک دسته‌بندی پایه‌ای توسط ACI در چهار گروه الیاف فولادی، شیشه‌ای، مرکب از مواد مصنوعی و طبیعی قرار می‌گیرند [۳] .هنگام بارگذاری بتن، ریزترک‌های اولیه و کوتاه در آن توزیع می‌شوند. با یکی شدن این ریزترک‌ها، ترک‌های بزرگ قابل رویت شکل می‌گیرند. الیاف به‌کار رفته در مخلوط‌های سیمانی می‌توانند با پل زدن و بستن ترک‌ها در خلال بارگذاری و باربرداری، رشد ترک را کنترل نمایند.

قابلیت ترک‌خوردگی متعدد در بتن‌های الیافی و خروج از حالت ترک‌های متمرکز در افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی سازه‌های بتنی تأثیرات چشمگیری دارد[۴].

تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای در بتن‌های الیافی با یک نوع الیاف و بتن‌های دارای ترکیبی از انواع الیاف مشاهده شده است. الیاف ریزتر به محض شروع ریزترک‌ها در بتن فعال می‌شوند و می‌توانند از رشد بیشتر ریزترک‌ها جلوگیری نمایند. بنابراین به نظر می‌رسد بتن، زمان بیشتری در فاز الاستیک باقی بماند. تحت اثر افزایش بار، سرانجام ریزترک‌ها شکل می‌گیرند، در این مرحله الیاف طویل‌تر فعال می‌شوند. می‌توان با ترکیب انواع مختلف الیاف با درصدهای حجمی متفاوت به ترکیب بهینه‌ای، برای مشخصات مکانیکی بهبود یافته، رسید [۵].

دودهٔ سیلیسی نیز به عنوان یک مصالح پوزولانی، با بهبود پیوستگی سنگدانه با خمیرسیمان منجر به افزایش مقاومت فشاری در سنین بالاتر می‌شود. با این وجود تردی بتن را نیز افزایش می‌دهد. بررسی‌ها نشانگر مزیت استفادهٔ همزمان از دودهٔ سیلیسی و الیاف در مخلوط‌های بتن می‌باشد که منجر به افزایش مؤثر در مقاومت خمشی بتن می‌گردد. این امر می‌تواند در اثر افزایش مقاومت ناحیهٔ انتقالی بتن توسط دودهٔ سیلیسی و ممانعت از رشد ترک‌ها توسط الیاف فولادی باشد. در بتن‌های دارای الیاف، الگوی رشد ترک گسیختگی از یک ترک منفرد بزرگ به گروهی از ترک‌های ریز تغییر می‌یابد [۶] . با افزودن مصالح پوزولانی مانند خاکستر بادی و دودهٔ سیلیسی ساختار ناحیهٔ انتقالی بهبود می‌یابد؛ اما واکنش دودهٔ سیلیسی در سنین اولیه، کند گزارش شده است. نانو ذراتی مانند نانوسیلیس دارای انرژی سطحی و واکنش‌پذیری بالا می‌باشند که منجر به فعالیت پوزولانی بیشتر در سنین اولیه نسبت به دودهٔ سیلیسی می‌شود. کاربرد نانوسیلیس نشانگر افزایش مقاومت فشاری، به‌ویژه در سنین اولیه است. همچنین افزایش مقاومت پیوستگی ناحیه انتقالی سنگدانه و خمیر سیمان با استفاده از نانوسیلیس بسیار مؤثرتر از دودهٔ سیلیسی می‌باشد [۷].

امپلمان و همکاران به مقرون به صرفه بودن و دوام مخلوط‌های بتن الیافی با عملکرد بسیار بالااشاره کرده‌اند. مجموعه آزمایش‌هایی جهت تعیین رفتار مخلوط های متفاوت UHPFRC تحت بارهای کششی و فشاری انجام شده است. رفتار بعد از بار حداکثر بتن الیافی با افزودن الیاف فولادی بهبود یافته است که پارامترهای اصلی مؤثر عبارتند از نوع الیاف فولادی، نسبت طول به قطر الیاف و مقدار الیاف بکار رفته[۱].

در پژوهشی مقاومت ضربه‌ای و مشخصات مکانیکی بتن مسلح با الیاف فولادی با نسبت های آب به سیمان 0.46 و 0.36 با افزودن دودهٔ سیلیسی و بدون ؛آن بررسی شده است. الیاف فولادی به طول 60 mm و نسبت طول به قطر 80 در سه نسبت حجمی مختلف 0% ، 0.5% و 1% به عنوان مصالح مسلح‌کننده، به‌کار برده شده است.در این مخلوط‌ها دودهٔ سیلیسی به اندازهٔ 8% وزن سیمان استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد کاربرد الیاف فولادی منجر به بهبود مقاومت بتن، بویژه مقاومت‌های کششی و خمشی می‌شود. افزایش توانمندی قابل ملاحظه‌ای در مقاومت ضربه‌ای بتن الیافی در مقایسه با مصالح مرجع مشاهده شده است. نتایج بیانگر این نکته است که

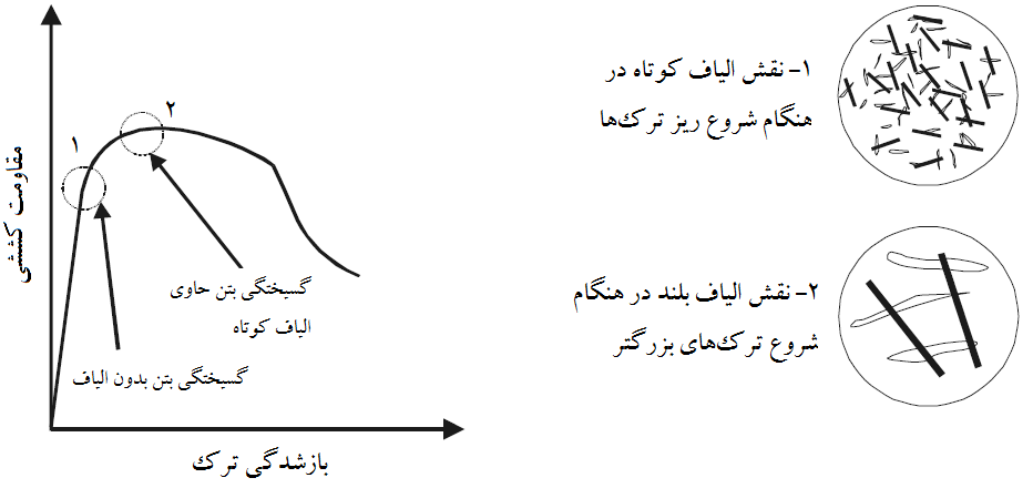
وقتی الیاف فولادی به همراه دودهٔ سیلیسی به نمونه‌ها اضافه شد، مقاومت ضربه‌ای و شکل‌پذیری بتن به‌صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت[۶].

یک پژوهش آزمایشگاهی و مطالعهٔ تحلیلی به بررسی رفتار بتن مسلح الیافی با عملکرد بالا می‌پردازد. پاسخ خمش سه و چهار نقطه‌ای نمونه‌ها تحت بارگذاری شبه استاتیکی تعیین شده است. آزمایش سقوط وزنه برای اعمال بارگذاری خمش سه‌نقطه‌ای به صفحات UHPFRC انجام شده است. به‌علاوه آزمایش‌های کشش تک محوری در نرخ‌های کرنش متفاوت نیز انجام شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که ویژگی‌های UHPFRC نظیر رفتار سخت‌شوندگی کرنشی، تحت نرخ‌های کرنش بالا نیز وجود دارد [۸].

ارگاس و کلوگ به بررسی اثر الیاف فولادی کوتاه و ترکیبی از الیاف کوتاه و بلند بر مشخصات مکانیکی بتن با عملکرد بسیار بالا، بویژه شکل‌پذیری و اثر اندازه پرداخته‌اند. محتوی الیاف بین صفر، یک و دو درصد حجمی تغییر کرده است. استفاده از ترکیب الیاف فولادی کوتاه و بلند می‌تواند منجر به افزایش مقاومت فشاری و کششی و همینطور بهبود رفتار پس از ترک‌خوردگی شود؛ که به‌علت عمل متقابل الیاف هم در سطح میکرو (الیاف کوتاه) و هم در سطح ماکرو (الیاف بلند) می‌باشد (شکل۱). مقاومت خمشی UHPC بدون سنگدانه‌های درشت بیشتر از UHPC با سنگدانه‌های درشت است. مقاومت خمشی تقریباً متناسب با افزایش حجم الیاف، افزایش یافته است. رفتار بعد از بار حداکثر شکل‌پذیر بویژه در نمونه‌های دارای الیاف ترکیبی تشکیل شده از 1% حجمی الیاف کوتاه و 1% حجمی الیاف بلند مشاهده می‌شود[۹].

بلکویتز و آرمنتراوت به بررسی نانو سیلیس در پروسهٔ هیدراسیون سیمان پرداخته‌اند. با پیشرفت نانو تکنولوژی، مصالح قابل استفاده در مخلوط‌های بتن با عملکرد بالا توسعه یافته‌اند. نانوسیلیس در واکنش با هیدروکسیدکلسیم باعث توسعهٔ بیشتر هیدرات‌های سیلیکات‌کلسیم می‌شود. در این مقاله سعی شده مزایای استفاده اندازه‌های متفاوت نانوسیلیس در خمیر سیمان بررسی شود. آزمایش‌های انجام یافته مؤید این مطلب می‌باشند که با کاهش اندازه ذرات سیلیس و افزایش توزیع برحسب اندازه، هیدرات‌های سیلیکات کلسیم، سفت‌تر شده که باعث افزایش مقاومت فشاری می‌گردد [۱۰].

گونسوی و همکاران به بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی مسلح با الیاف فولادی با عملکرد بالا (HPFRCC) تحت تحت شرایط بارگذاری رفت و برگشتی پرداخته‌اند. این محققان به تولید HPFRCC با مقاومت بالای 200 MPa اقدام کرده اند. این بتن‌ها مقاومت خمشی قابل‌توجه و شکل پذیری بالایی دارانـد. تحت شرایط بارگذاری رفت و برگشتی، شیب‌های چرخه‌های باربرداری- بارگذاری مجدد، تقریباً برابر شیب قسمت صعودی اولیه منحنی بار- تغییرمکان (خیز) می‌باشد. اگرچه مقاومت پسماند بتدریج بعد از تنش حداکثر کاهش می‌یابد، زوال سختی معنی‌داری تحت شرایط بارگذاری چرخه‌ای وجود ندارد [۱۱].



شکل۱- نقش الیاف در مراحل مختلف ترک‌خوردگی کششی بتن [۹]

اولیویتو و زوکارلو بتن مسلح با الیاف فولادی با طرح اختلاط و طول الیاف متفاوت تهیه کرده‌اند. مقاومت‌های فشاری، کششی و ترک‌خوردگی و شکل‌پذیری ارزیابی شده‌اند. رفتار مختلف در نمونه‌های حاوی نسبت حجمی و طول الیاف متفاوت مشاهده شده است. الیاف تأثیر زیادی بر مقاومت فشاری بجز در تغییر مود خرابی از ترد به شکل‌پذیر نداشته است. افزودن الیاف باعث افزایش شکل‌پذیری شده که به جذب انرژی در هنگام ترک‌خوردگی مرتبط دانسته شده است. نمونه‌های حاوی الیاف بلندتر، کرنش سختی بیشتری در مقایسه با نمونه‌ها با الیاف کوتاهتر از خود نشان داده‌اند [۱۲].

بانتیا و نانداکومار به بررسی انتشار ترک در مخلوط‌های پایه سیمانی حاوی الیاف ترکیبی پرداخته‌اند. نشان داده شده است که ترکیب الیاف فولادی و پلی پروپیلن باعث افزایش مقاومت شروع و رشد ترک می‌شود [۱۳].

یک سری مطالعات آزمایشگاهی بر روی بتن با مقاومت بالای مسلح شده با ترکیب الیاف فولادی و غیرفلزی توسط سیواکومار و سانتانام انجام شده است. افزایش الیاف منجر به افزایش مقاومت خمشی و چقرمگی شده است. در حالت کلی، الیاف فولادی در مکانیزم جذب انرژی توسط پل زدن ترک‌ها مشارکت داشته‌اند؛ درحالی‌که عملکرد الیاف غیرفلزی در به تأخیر انداختن تشکیل ریزترک‌ها بود [۱۴].

در این پژوهش سعی شده است با بهره گیری از مزیت‌های اشاره شده در مورد کاربرد الیاف فولادی، ترکیب الیاف ماکرو و میکرو و همچنین کاربرد نانوسیلیس به عنوان مصالح پزولانی مؤثرتر از دودهٔ سیلیسی به بررسی نمونه‌های حاوی نسبت‌های حجمی مختلف الیاف فولادی با اندازه‌های متفاوت و نانوسیلیس پرداخته شود و در نهایت ترکیب بهینه‌ای از بتن مسلح الیافی به‌دست آید که مقاومت‌های خمشی، کششی و مدول الاستیسیته و قابلیت جذب انرژی در آن بهبود یافته باشد.

۲- مطالعات آزمایشگاهی:

در این تحقیق اثر به‌کارگیری دو نوع الیاف فولادی میکرو و ماکرو و همچنین نانوسیلیس و دودهٔ سیلیسی بر روی مقاومت خمشی و قابلیت جذب انرژی و مقاومت فشاری بتن با توجه به تأثیر درصدهای وزنی مختلف آنها ارزیابی شده است. همچنین مدول الاستیسیته و مقاومت کششی در ترکیب بهینهٔ نهایی نیز بررسی شده است. برای این منظور نمونه‌های مختلفی با نسبت‌ها و طرح‌های اختلاط مطابق جدول شمارهٔ (۱) آماده شده‌اند. این جدول نشانگر نمونه‌های بتن معمولی و بتن مسلح الیافی با نسبت‌های وزنی مختلف الیاف و نانوسیلیس می‌باشد. سیمان مصرفی از نوع سیمان پرتلند معمولی، شن به‌کار رفته دارای بزرگترین اندازهٔ سنگدانه 12.5 mm و ماسه با مدول نرمی 3 است. فوق‌روان‌کنندهٔ مصرفی از نوع پلی‌کربوکسیلاتی فاقد یون کلراست. مشخصات الیاف فولادی مورد استفاده در جدول شماره (۲) ارائه شده است. مشخصات نانوسیلیس مصرفی نیز مطابق جدول شماره (۳) است. همچنین شکل ظاهری الیاف در شکل شمارهٔ (۲) قابل مشاهده است.

برای آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای، نمونه‌های تیر به ابعاد 10x10x50 cm تهیه شده و برای عمل‌آوری به‌مدت یک روز در اتاق رطوبت نگهداری شده و بعد از خارج کردن از قالب تا زمان انجام آزمایش در آب آهک قرار داده شده است. جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری نیز نمونه‌های مکعبی 10 cm تهیه و به همان روش اشاره شده عمل‌آوری شده‌اند. سعی شده است با توجه به درصدهای مختلف الیاف و نانوسیلیس در نمونه‌ها، با استفاده از مقادیر متفاوت فوق‌روان‌کننده مطابق جدول شمارهٔ (۱) نمونه‌های تهیه شده دارای اسلامپ نزدیک به هم باشند. در نمونه‌های دارای الیاف فولادی، پس از مخلوط کردن شن، ماسه، سیمان و آب مصرفی بتن، در حال اختلاط با مخلوط‌کن الیاف به‌صورت تدریجی به داخل مخلوط‌کن در حال چرخش الک شده‌اند تا بصورت یکنواخت داخل بتن پخش شوند. بدیهی است نمونه‌های دارای الیاف و نانوسیلیس بیشتر، به مقدار زیادتری روان‌کننده جهت رسیدن به اسلامپ مورد نظر نیاز داشتند. چون آب مصرفی بتن برای تهیهٔ محلول نانوسیلیس در آب استفاده شده است، لذا پودر دودهٔ سیلیسی با سیمان مخلوط شده و در بتن به‌کار رفته است. اما روش افزودن نانوسیلیس به این شرح است. ابتدا نانوسیلیس به‌صورت تدریجی به آب مصرفی اضافه شده و با استفاده از همزن مخلوط شده است. افزودن درصدهای بیشتر نانوسیلیس به آب باعث تبدیل محلول به ژل می‌شود و اضافه کردن مقادیر بیشتر را ناممکن می‌سازد. از این رو برای حل این مشکل از شرایط اولتراسونیک کمک گرفته شده است و آب

مصرفی در حالی‌که نانوسیلیس به آن اضافه شده است به‌مدت سی دقیقه در دستگاه اولتراسونیک پروب‌دار قرارگرفته است که باعث تبدیل ژل به محلول شده و به حل کردن مقدار بیشتر نانوسیلیس در آب مصرفی بتن منجر شده است. در نهایت این محلول به ترکیب سنگدانه و سیمان داخل مخلوط‌کن اضافه شده و در آخر روان‌کننده به مقدار مناسب و الیاف فولادی حین چرخیدن مخلوط‌کن – همانطور که شرح داده شد- به مخلوط اضافه شده‌اند. در نمونه‌های دارای دودهٔ سیلیسی و نانوسیلیس به اندازهٔ وزن این ذرات از وزن سیمان کم شده است.

آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای با فاصله تکیه‌گاهی 45 cm و اعمال بار متمرکز در وسط دهانه با استفاده از دستگاه بارگذاری تحت کنترل تغییرمکان که قابلیت ثبت بار اعمالی و تغییرمکان وسط دهانه در هر لحظه را دارد، انجام شده است. نرخ اعمال بار 0.2mm/min می‌باشد که به‌صورت ثابت و یکنواخت از شروع بارگذاری تا خرابی کامل نمونه‌ها اعمال شده است. آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی با استفاده از دستگاه بارگذاری تحت کنترل بار با نرخ اعمال بار 3 KN/sec انجام شده است. آزمایش شکافت استوانه‌ای نیز بر روی نمونه‌های استوانه‌ای 15x30 cm مطابق استاندارد ASTM C496 انجام شده است. نرخ اعمال بار در آزمایش شکافت استوانه‌ای 67 KN/min می‌باشد [۱۵]، [۱۶]، [۱۷]، [۱۸].

جدول۱- نسبت‌ها و طرح‌های اختلاط بتن

نمونه‌ها	سیمان (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	شن (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	روان‌کننده (درصد وزن سیمان)	اسلامپ (cm)	الیاف فولادی ماکرو (درصد حجمی)	الیاف فولادی میکرو (درصد حجمی)	نانوسیلیس (درصد وزن سیمان)	دودهٔ سیلیسی (درصد وزن سیمان)
CB1	442	199	883	833	0.1	7	0	0	0	0
CB2	442	199	883	833	0.15	9	0.5	0	0	0
CB3	442	199	883	833	0.15	8	1	0	0	0
CB4	442	199	883	833	3.2	0	1	0	8.19	0
CB5	442	199	883	833	1.2	8	1	0	2.9	0
CB6	442	199	883	833	0.18	8	1	0.5	0	0
CB7	442	199	883	833	0.64	9	1	1	0	0
CB8	442	199	883	833	2.3	8.5	1	1	2.75	15

جدول۲- مشخصات الیاف فولادی مورد استفاده

	طول (mm)	قطر (mm)	نسبت طول به قطر	مقاومت کششی (MPa)	شکل ظاهری	کارخانهٔ سازنده
الیاف فولادی میکرو	13 ± 1	0.2 ± 0.05	65	>2500	مستقیم	Ganzhou Daye
الیاف فولادی ماکرو	36	0.8	45	1200	انتهای قلاب شده	BASF Iran

جدول ۳- مشخصات نانوسیلیس مورد استفاده

خلوص (%)	متوسط اندازهٔ ذرات اولیه (nm)	سطح ویژه (m^2/gr)	دانسیته انباشته (gr/lit)	pH	رنگ ظاهری
98.3	20-30	250	100	6-7	پودر سفید

شکل ۲- الیاف فولادی مورد استفاده

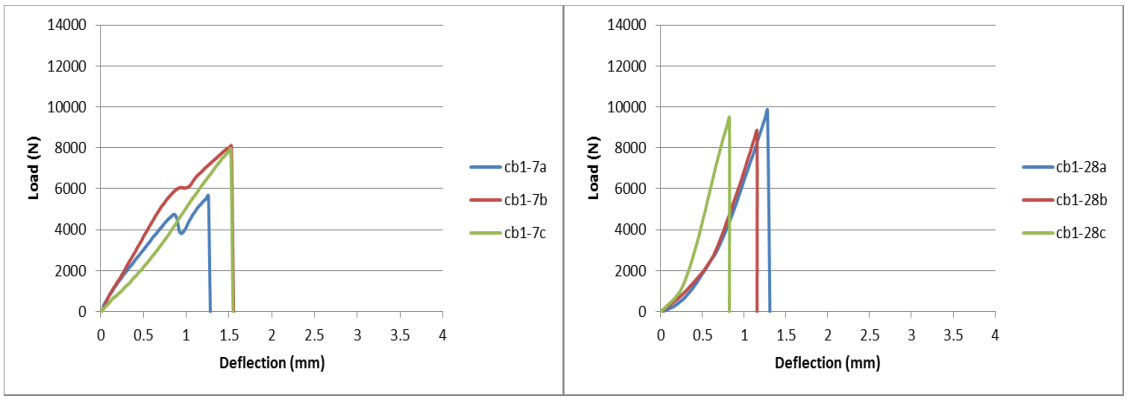
۳- نتایج و بحث

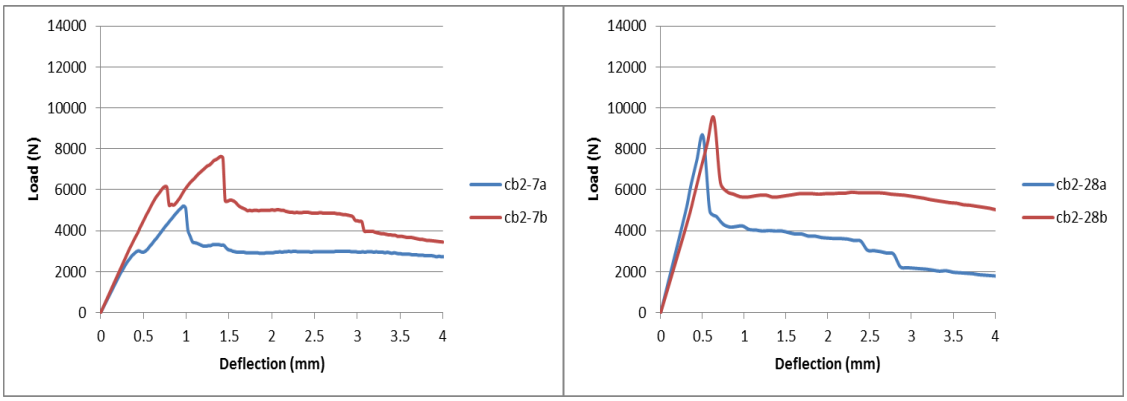
هدف عمده در این تحقیق دستیابی به بتن توانمندتر و با قابلیت جذب انرژی بیشتر می‌باشد.که این هدف در دو بخش دنبال شده است. اول: افزودن الیاف فولادی و ترکیب اندازه‌های مختلف این الیاف با هدف بهبود رفتار پس از شکست بتن و مقابله با ضعف تردشکنی آن از طریق جلوگیری از رشد ترک‌ها در مقیاس‌های مختلف توسط الیاف در اندازه‌های متفاوت؛ دوم: افزودن نانوسیلیس و دودهٔ سیلیسی و ترکیب آنها به منظور افزایش مقاومت خمشی و فشاری از طریق افزایش مقاومت ناحیهٔ انتقالی و بهبود پیوستگی سنگدانه با خمیر سیمان. در این راستا برای رسیدن به ترکیب بهینه، طرح‌های اختلاط متفاوت ارائه و آزمایش شده‌اند.

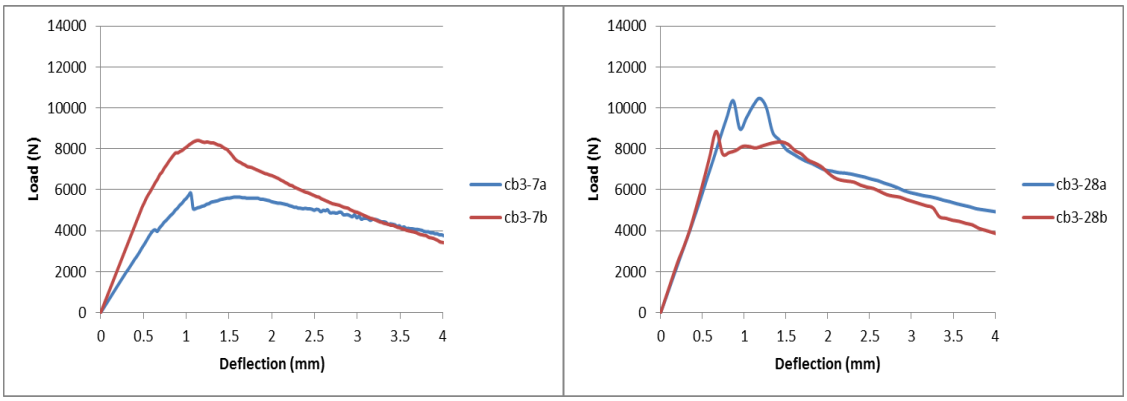
نتایج آزمایش‌های خمش سه‌نقطه‌ای و مقاومت فشاری در جدول شمارهٔ (۴) ارائه شده‌اند. هرکدام از مقادیر ذکر شده در این جدول نشان‌دهندهٔ مقدار میانگین به‌دست آمده از آزمایش بر روی سه نمونه می‌باشد. در این جدول حداکثر بار متمرکز اعمال شده در وسط دهانه و همچنین مقاومت خمشی محاسبه شده با استفاده از این بار حداکثر و ابعاد نمونهٔ تیر 10x10x50 cm آورده شده‌اند. همچنین مقادیر مربوط به چقرمگی بیان شده در این جدول مربوط به T^{D}_{150} (چقرمگی L/150) می‌باشد که مطابق استاندارد ASTM C1609 [۱۶] با استفاده از سطح زیر نمودار بار- تغییرمکان در آزمایش خمش از خیز 0 تا خیز L/150 ،که در این آزمایش برابر 3 mm می‌باشد، محاسبه شده‌اند. این مقادیر مقیاس بسیار مناسبی جهت بررسی قابلیت جذب انرژی نمونه‌های مختلف می‌باشند. نمودارهای بار- تغییرمکان مربوط به آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای نیز برای تمامی نمونه‌ها و در سنین مختلف در شکل شماره (۳) ارائه شده اند.

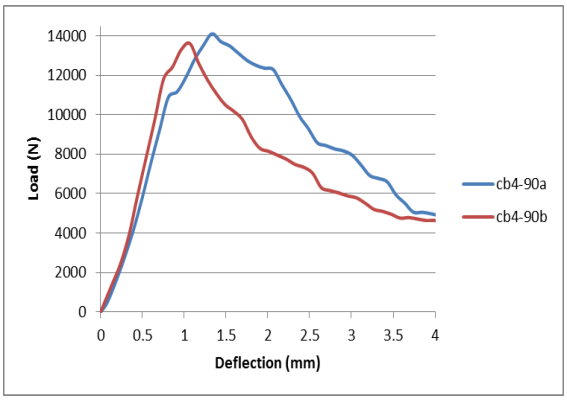
جدول ۴- مقاومت خمشی و چقرمگی و مقاومت فشاری نمونه‌ها

نمونه ها	CB1 ۷ روزه	CB1 ۲۸ روزه	CB2 ۷ روزه	CB2 ۲۸ روزه	CB3 ۷ روزه	CB3 ۲۸ روزه	CB4 ۹۰ روزه	CB5 ۷ روزه	CB5 ۹۰ روزه	CB6 ۷ روزه	CB6 ۲۸ روزه	CB7 ۷ روزه	CB7 ۲۸ روزه	CB8 ۷ روزه	CB8 ۲۸ روزه
بار حداکثر (N)	7235	8870	6418	9061	7126	9663	13857	9737	8719	9074	9283	9982	11490	14678	17327
مقاومت خمشی (MPa)	4.88	5.99	4.33	6.12	4.81	6.52	9.35	6.57	5.88	6.12	6.27	6.74	7.76	9.91	11.7
چقرمگی (N.mm)	5714	3796	11967	14380	16016	20252	26871	14369	14915	18350	18895	21651	22758	31166	37427
مقاومت فشاری (MPa)	37.3	45.2	37.1	49.2	35.9	47.7	79.9	44.1	50.7	36.2	41.8	34.4	40.8	44.1	64.2

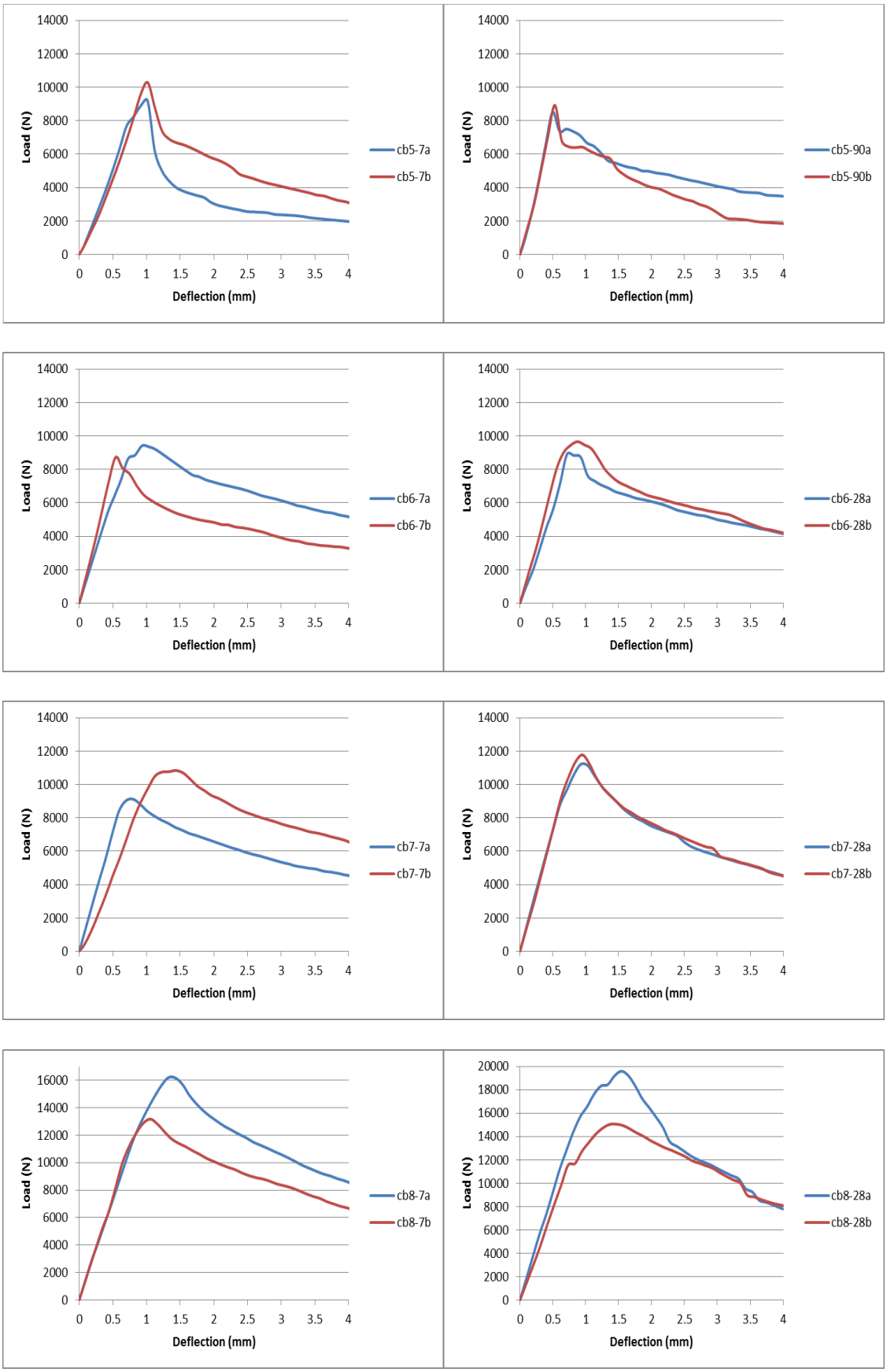








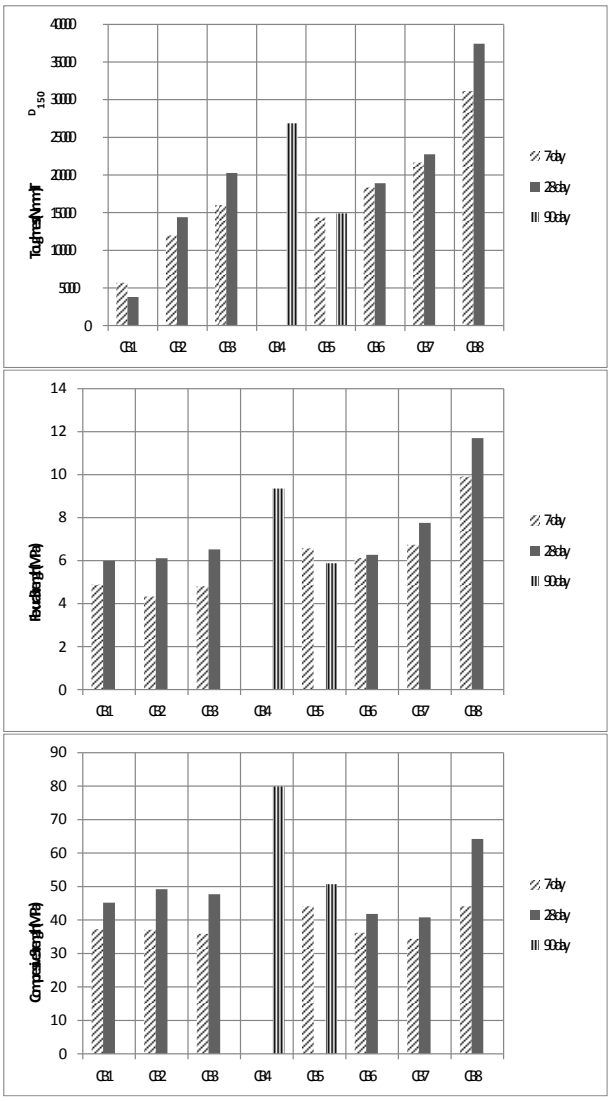
شکل ۳- نمودارهای بار- تغییرمکان وسط دهانه، مربوط به آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه



شکل۳ – ادامه: نمودارهای بار– تغییرمکان وسط دهانه، مربوط به آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه

به منظور بررسی بهتر نتایج ارائه شده، داده‌های مربوط به چقرمگی، مقاومت خمشی و فشاری به‌صورت نمودار ستونی در شکل شمارهٔ (۴) ترسیم شده‌اند.با مراجعه به شکل‌های شمارهٔ (۳) و (۴) و جدول شمارهٔ (۴) می‌توان مشاهده کرد که بیشترین مقدار چقرمگی ۲۸ روزه مربوط به نمونه‌های CB8 می‌باشد که در مقایسه با نمونه‌های بتن معمولی CB1 افزایش قابل توجه نزدیک به ۱۰ برابر دارند. همچنین این نمونه‌ها دارای بیشترین مقاومت خمشی می‌باشند که نسبت به بتن معمولی افزایشی در حدود ۲ برابر را نشان می‌دهند. نمونه‌های CB8 همانطور که در جدول شمارهٔ (۱) اشاره شد دارای ترکیب الیاف فولادی ماکرو و میکرو و همچنین ترکیب نانوسیلیس و دودهٔ سیلیسی می‌باشند. بررسی نتایج مربوط به نمونه‌های CB7 که دارای همین ترکیب الیاف ولی فاقد نانوسیلیس و دودهٔ سیلیسی هستند نشانگر افزایش ۶ برابری قابلیت جذب انرژی و افزایش ۳۰ درصدی مقاومت خمشی در نمونه‌های ۲۸ روزه در مقایسه با بتن معمولی می‌باشد. این مقادیر با اینکه در نمونه‌های فقط دارای الیاف بیشترین هستند ولی به اندازه نمونه‌های CB8 نمی‌باشند. بررسی نتایج نمونه‌های ۹۰ روزه CB4 نیز نشان می‌دهد با اینکه این نمونه‌ها دارای بیشترین درصد نانوسیلیس هستند ولی چون فقط دارای یک نوع الیاف فولادی می‌باشند و فاقد دودهٔ سیلیسی هستند مقاومت خمشی و قابلیت جذب انرژی کمتری از نمونه های ۲۸ روزه CB8 دارند. مقایسه نمونه‌های CB5 و CB8 نیز نشانگر این مطلب می‌باشد که باتوجه به اینکه هردو دارای درصد الیاف فولادی ماکرو یکسان و درصد نانو سیلیس مشابه می‌باشند ولی وجود الیاف میکرو و دوده سیلیسی در نمونه‌های CB8 منجر به مقاومت خمشی و چقرمگی بیشتر در این نمونه‌ها شده است. در تمامی آزمونه‌ها،نحوه شکست به‌صورت بیرون کشیدگی الیاف از بتن می‌باشند.

مقایسهٔ نتایج مربوط به مقاومت فشاری بیانگر این نکته است که افزودن الیاف فولادی به تنهایی تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت فشاری نداشته است و فقط باعث تغییر مود خرابی از حالت ترد به شکل پذیر شده است. بگونه‌ای که نمونه‌ها پس از رسیدن به بارحداکثر نیز قادر به حفظ یکپارچگی خود می‌باشند.



شکل ۴- نمودارستونی چقرمگی،مقاومتخمشیوفشارینمونه ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه

بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونهٔ ۹۰ روزه CB4 است که دارای درصد قابل توجهی نانوسیلیس می‌باشد. همچنین وجود ترکیب نانوسیلیس و دودهٔ سیلیسی در نمونه‌های CB8 نیز باعث افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه درحدود ۴۰ درصد در مقایسه با بتن معمولی شده است. مقایسهٔ مقاومت فشاری ۷ و ۹۰ روزه در نمونه‌های CB5 نشان می‌دهد که وجود نانوسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری در سنین اولیه می‌شود. بررسی تمام نمونه‌ها نشان می‌دهد مقاومت فشاری فقط در نمونه‌های دارای نانوسیلیس یا دودهٔ سیلیسی افزایش قابل توجهی یافته است.

آزمایش شکافت استوانه‌ای بر روی نمونه‌های ۲۸ روزهٔ بتن CB8 برای تعیین مقاومت کششی انجام شده است. نتایج در

جدول شمارهٔ (۵) نشان داده شده‌اند. مطابق این جدول طرح اختلاط بهینه CB8 دارای مقاومت کششی متوسط 8.195 MPa می‌باشد. مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتن معمولی CB1 از جدول شمارهٔ (۴) برابر 45.2 MPa می‌باشد که با تبدیل آن به مقاومت ۲۸ روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای درحدود 38 MPa خواهد بود. با استفاده از رابطه آئین نامهٔ ACI 318 [۱۹]در خصوص تخمین مقاومت شکافت استوانه‌ای از روی مقاومت فشاری برای بتن معمولی($f_{ct} = \sqrt{f_c}/1.8$) می‌توان مقاومت کششی نمونه‌های CB1 را تخمین زد که در حدود 3.42 MPa خواهد بود. بدین ترتیب مشاهده می‌شود که مقاومت کششی ۲۸ روزهٔ نمونه های CB8 افزایشی درحدود ۲/۴ برابر نشان می‌دهند.

جدول ۳- نتایج آزمایش شکافت استوانه‌ای بر روی نمونه‌های ۲۸ روزهٔ CB8

نمونه	طول متوسط (cm)	قطر متوسط (cm)	بیشترین بار اعمال شده (KN)	مقاومت کششی (MPa)
A	30.4	15.267	639.5	8.77
B	30.4	15.32	557.5	7.62

با توجه به نتایج ارائه شده، تأثیر مثبت افزودن الیاف فولادی ترکیبی ماکرو و میکرو به همراه ذرات نانوسیلیس و دودهٔ سیلیسی در افزایش توانمندی بتن قابل مشاهده است. در این میان تأکید بر قابلیت‌های مضاعف حاصل شده با استفاده از الیاف با اندازه‌های مختلف همچنین ترکیب نانوسیلیس و دودهٔ سیلیسی حایز اهمیت می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی شده است با استفاده از ترکیب اندازه‌های مختلف الیاف فولادی به همراه میکرو و نانو سیلیس بر قابلیت‌های بتن مسلح الیافی افزوده شود. در این راستا بتن چقرمه‌تر با مقاومت‌های خمشی، کششی، فشاری بهبود یافته تولید شده است. در محدودهٔ آزمایش‌های انجام‌گرفته در این تحقیق می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

- قابلیت جذب انرژی در ترکیب نهایی به‌صورت قابل توجهی افزایش یافته و درحدود ۱۰ برابر بتن معمولی می‌باشد. عوامل مؤثر در این افزایش بهبود رفتار پس از بار حداکثر و افزایش بار حداکثر بوده‌اند که هردو منجر به افزایش سطح زیر نمودار بار – جابجایی تحت خمش و در نتیجه افزایش چقرمگی شده‌اند. بستن ترک‌ها توسط الیاف و بهبود مقاومت ناحیهٔ انتقالی و افزایش پیوستگی خمیر سیمان و سنگدانه توسط دودهٔ سیلیسی و نانوسیلیس می‌تواند به عنوان دلایل عمده ذکر شود.
- به‌کار بردن الیاف فولادی به‌تنهایی نتوانسته به اندازهٔ نمونه‌های دارای الیاف و ذرات سیلیس باعث افزایش چقرمگی شود.
- افزودن الیاف فولادی به‌تنهایی تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری بتن نداشته است و فقط منجر به تغییر مود خرابی ترد به شکل‌پذیر شده است.
- افزودن نانوسیلیس به مقدار بیشتر از حدود ۲ درصد وزن سیمان با توجه به تبدیل محلول به ژل مشکل می‌باشد. استفاده از شرایط اولتراسونیک برای حل مقادیر بیشتر نانوسیلیس در آب راه حل مناسبی می‌باشد. به همین روش در این تحقیق نانو سیلیس در حدود ۸ درصد وزن سیمان به مخلوط اضافه شده که باعث افزایش قابل توجه مقاومت فشاری بتن شده است.
- افزودن نانوسیلیس به‌تنهایی باعث افزایش تردی بتن می‌شود که اضافه کردن الیاف می‌تواند این نقص را بهبود بخشد.
- نانوسیلیس باتوجه به واکنش‌پذیری بیشتر باعث افزایش مقاومت در سنین اولیه شده است. ترکیب دودهٔ سیلیسی با نانوسیلیس به نتایج بهتر از نمونه‌هایی‌که فقط نانوسیلیس دارند، منجر شده است.

۵- مراجع

[1] M. Empelmann, M. Teutsch, and G. Steven, "Improvement of the Post Fracture Behaviour of UHPC by Fibres," in *Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 2008, pp. 177–184.

[2] Y. Farnam, M. Shekarchi, and A. Mirdamadi, "Experimental investigation of impact behaviour

of high strength fiber reinforced concrete panels," in *Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 2008, pp. 751–758.
[3] ACI Committee 544, "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete," 2002.
[4] ر. احمدیوم. شریفی، "معرفی ویژگی‌های بتن‌های توانمند الیافی شکل‌پذیر"،چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران ،۱۳۸۷.
[5] J. C. Walraven, "High performance fiber reinforced concrete: progress in knowledge and design codes," *Materials and Structures*, vol. 42, no. 9, pp. 1247–1260, Oct. 2009.
[6] M. Nili and V. Afroughsabet, "Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, no. 8, pp. 879–886, Aug. 2010.
[7] Y. Qing, Z. Zenan, K. Deyu, and C. Rongshen, "Influence of nano-SiO2 addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 3, pp. 539–545, Mar. 2007.
[8] K. Habel and P. Gauvreau, "Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) to impact and static loading," *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, no. 10, pp. 938–946, Nov. 2008.
[9] M. Orgass and Y. Klug, "Fibre Reinforced Ultra-High Strength Concretes," in *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 2004.
[10] J. S. Belkowitz and D. Armentrout, "An Investigation of Nano Silica in the Cement Hydration Process," *ACI Special Publication*, no. 267, pp. 87–100, 2009.
[11] G. Güvensoy, F. Bayramov, A. Ilki, C. Sengül, M. A. Tasdemir, A. N. Kocatürk, and M. Yerlikaya, "Mechanical Behavior of High Performance Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites under Cyclic Loading Condition," in *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 2004, pp. 649–660.
[12] R. S. Olivito and F. A. Zuccarello, "An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete," *Composites Part B: Engineering*, vol. 41, no. 3, pp. 246–255, 2010.
[13] N. Banthia and N. Nandakumar, "Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites," *Cement & Concrete Composites*, vol. 25, pp. 3–9, 2003.
[14] A. Sivakumar and M. Santhanam, "Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres," *Cement & Concrete Composites*, vol. 29, pp. 603–608, 2007.
[15] ASTM C293 / C293M, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)," 2002.
[16] ASTM C1609 / C1609M, "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)," 2010.
[17] ASTM C39 / C39M, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," 2003.
[18] ASTM C496 / C496M, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens," 2004.
[19] ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-05): An ACI Standard," 2005.

Investigating the Effect of Using Macro and Micro Steel Fibers with Nano Silica on the Mechanical Properties of Concrete

J. Esmaili[*]
Associate proffessor, Department of Structural Engineering, University of Tabriz
A. Mohamad Jafari
PhD. Student, Department of Structural Engineering, East Azarbaijan Science and Research Branch, Islamic Azad University

(Received: 2013/9/12 - Accepted: 2014/5/7)

Abstract:

Using fibers with different sizes and types part plays more important roles in energy absorption capability of reinforced concrete structures. The effects of different sizes and proportions of fibers on energy absorption capability, bending strength, tensile and compressive strength of concrete have been investigated in this work. Steel fibers have been used to improve the post fracture behavior of concrete and pozzolanic materials have been added to concrete to increase the strength of transition zone. In this regard, the combination of fibers in different sizes for bridging the cracks at different stages of the crack growth and also using nano silica with high surface energy and reactivity can be considered. Simultaneous use of mentioned additives can improve the properties of concrete in the case of using appropriate mix design. Different mix designs containing combinations of different types of steel fibers and micro silica and nano silica have been tested and an optimized mix design of concrete with improved mechanical properties has been reached. Energy absorption capability, bending strength, tensile and compressive strengths can be mentioned as those mechanical properties.

Keywords: Macro steel fiber, Micro steel fiber, Nano silica, Micro silica, Flexural strength, Energy absorption capability.

[*] Corresponding author**:** esmailij@yahoo.co.uk