تحقیقات بتن
سال ششم، شمارهٔ اوّل
بهارو تابستان ۹۲
ص۶۳ ـ ۴۷
تاریخ دریافت: ۹۲/۳/۱۲
تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۱۲

تأثیر الیاف فولادی بر خصوصیات مکانیکی و عملکرد درمقابل حرارت و یخ‌زدگی بتن سبک خودتراکم

مهرداد حجازی*
دانشیار مهندسی سازه، گروه عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان
محمود هاشمی
استادیار مکانیک خاک، گروه عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان
محمود باتوانی
کارشناس ارشد سازه، گروه عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

چکیده

در این مقاله تأثیر الیاف فولادی بر خصوصیات مکانیکی و عملکرد در مقابل حرارت و یخ‌زدگی بتن سبک خودتراکم حاوی ژل میکروسیلیس و سبک‌دانهٔ لیکا مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور سه مقدار مختلف الیاف فولادی به بتن سبک خودتراکم افزوده شده و اثر آن بر خصوصیات رئولوژیکی و مکانیکی، از جمله مقاومت های فشاری، کششی و خمشی، و بر عملکرد بتن در برابر حرارت و یخ‌زدگی مطالعه شده است. در ابتدا تعداد ده طرح اختلاط مقدماتی با تغییر در مقدار مصالح به کار رفته، فیلر و فوق‌روان‌کنندهٔ مصرفی ساخته شده است. سپس آزمایش‌های بتن تازه شامل اسلامپ، حلقهٔ J، جعبهٔ U، جعبهٔ L و قیف V انجام گرفته است. پس از انتخاب طرح شاهد، آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزگی، آزمایش خمش و حرارتی در سن ۹۰ روزگی و آزمایش یخ‌زدگی در سن ۲۸ روزگی روی نمونه‌ها انجام شده است. براساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها، وجود الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت کششی تا ۹۵٪ و افزایش مقاومت فشاری تا ۱۶٪ شده است. همچنین وجود الیاف فولادی در بتن، سبب بهبود دوام بتن در حرارت‌های بالا شده و تا ۱۳٪ مانع از افت مقاومت فشاری و تا ۹۲٪ مانع از افت مقاومت کششی گردیده است. وجود الیاف فولادی، تا ۸٪ از میزان افت مقاومت فشاری و تا ۱۵٪ از مقدار افت مقاومت خمشی بتن در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی و آب‌شدگی کاسته و سبب بهبود رفتار بتن در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی و آب‌شدگی شده است.

واژه‌های کلیدی: بتن سبک خود متراکم، الیاف فولادی، لیکا، مقاومت‌های مکانیکی، یخ‌زدگی و آب‌شدگی، آزمایش حرارتی.

* نویسنده مسؤول: m.hejazi@eng.ui.ac.ir

۱- مقدمه

در سازه‌های بتنی برای رسیدن به مقاومت مورد نیاز و کاهش تخلخل و هوای درون بتن، همچنین حصول پایایی، بتن به روش‌های مختلف لرزانده می‌شود. با استفاده روزافزون از بتن و کمبود کارگران ماهر ساختمانی و مشکلات عدیده در اجرا و متراکم‌سازی بتن، از جمله سروصدا و هزینهٔ بالای امور اجرایی، تراکم بتن به طور کامل و رضایت‌بخش صورت نگرفته و سبب ایجاد مشکلاتی در مقاومت‌های مکانیکی بتن می‌گردد. لذا ساخت بتنی بدون نیاز به امور اجرایی برای متراکم کردن، رؤیای متخصصان بتن بوده تا بتوانند با استفاده از مواد افزودنی مختلف و تغییر در درصدهای مصالح به کار رفته، به این مهم دست یابند و با ایجاد بتن خودتراکم این نقص را رفع کنند [۱].

از سویی هزینه‌های بالای ساخت‌وساز، به خصوص هزینه‌های تحمیل شده از سوی بار مرده، طراحان و مجریان را به فکر کاهش بار مرده به کار رفته در سازه‌ها، به خصوص سازه‌های مرتفع، و به تبع آن کاهش هزینه‌های ساخت‌وسازانداخته است. ایجاد و استفاده از بتن سبک با استفاده از سنگ‌دانه‌های سبک، راهی برای کاهش این بار مرده می‌باشد که تلفیق این خاصیت با خاصیت خودتراکمی، سبب ایجاد بتن سبک خودتراکم می‌شود. بتن سبک خودتراکم برای اولین بار توسط Mouler و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۳ ساخته شد. این بتن همانند بتن خودتراکم معمولی بسیار روان بوده و بدون نیاز به لرزاننده و تحت وزن خود، متراکم می‌گردد. از سویی کاهش چگالی بتن سبک خودتراکم باعث کاهش انرژی لازم برای تراکم و جریان یافتن بتن در قالب‌ها خواهد شد و به همین سبب طرح اختلاط، نوع و میزان مصالح به کار رفته در این بتن، برای ارضای خاصیت خودتراکمی بتن و جلوگیری از جداشدگی ذرات، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. از آنجایی که دوام و پایایی بتن وابسته به نفوذپذیری لایهٔ بیرونی آن است، لذا استفاده از مواد پرکننده و فیلر جهت پر نمودن فضاهای خالی درون بتن و کاهش تخلخل و درصد هوای داخل بتن، لازم و ضروری می‌باشد. همچنین وجود پرکننده در بتن خودتراکم، سبب بهبود کارایی بتن و مقاومت آن در برابر جداشدگی و آب‌انداختگی می‌گردد.

یکی از معایب مهم بتن خودتراکم، مقاومت کم آن در برابر حرارت در مقایسه با بتن‌های معمولی می‌باشد [۳]. این مقاومت کم به علت تراکم بالای بتن خودتراکم، کمبود درصد هوای بتن و گازهای زیاد متصاعد شده از بتن در حین حرارت می‌باشد. نتایج آزمون‌های آتش، تفاوت‌های قابل توجهی را بین رفتار بتن خودتراکم و بتن‌های معمولی نشان داده است که نتیجهٔ مقدار تراکم، نسبت آب به سیمان ، پودرها و مواد افزودنی در این بتن‌ها می‌باشد [۴]. وجود سبک‌دانه اشباع با درصد بالای جذب رطوبت، می‌تواند با آزاد کردن بخار آب قابل توجهی در حین اعمال حرارت و اعمال فشار داخلی توسط این بخار آب، ناتوانایی بتن سبک خودتراکم در برابر حرارت را تشدید کند. بتن سبک خودتراکم به علت تنش‌های حرارتی، فشار بخار آب و فشار ناشی از گازهای متصاعد شده از تغییر ساختار سنگ‌دانه‌ها، دچار پدیدهٔ پوسته‌ای شدن می‌شود که باعث شکست اجزای بتنی می‌گردد. استفاده از الیاف پروپیلن برای جلوگیری از پدیدهٔ پوسته‌ای شدن و ترکیدن بتن‌های توانمند در دماهای بالای راه افزایش مقاومت بتن در برابر حرارت می‌باشد [۳].

Heiza و همکاران [۵] در تحقیقی به بررسی اثر حرارت بر بتن‌خودتراکم پرداخته‌اند و برای این امر، پس از بررسی ویژگی‌های دو نوع بتن‌خودتراکم (یکی حاوی میکروسیلیس و دیگری حاوی خاکستر بادی)، به بررسی اثر حرارت بر آنها تحت اثر دمایی ۲۵۰ °C تا ۶۰۰ °C پرداخته است. نتایج نشان داده که بهترین مقاومت حرارتی برای بتن حاوی ۵٪ میکروسیلیس و ۵٪ خاکستر بادی جایگزین سیمان بوده است. همچنین بتن حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان دارای بیشترین و بتن حاوی ۱۰٪ خاکستر بادی جایگزین سیمان، دارای کمترین ترک و ریزش در برابر حرارت بوده است.

کردی و همکاران [۶] در تحقیقی تغییرات مقاومت فشاری بتن مقاومت بالا در دماهای مختلف را مورد ارزیابی قرار داده است. در این تحقیق، نمونه‌های حاوی الیاف پروپیلن، تحت دماهای ۱۰۰ °C، ۲۰۰ °C، ۴۰۰ °C، ۶۰۰ °C و ۸۰۰ °C قرار گرفته‌اند. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که با افزایش دما، مقاومت فشاری به شدت شروع به کاهش کرده، تا جایی که در دمای ۸۰۰ °C، مقاومت فشاری به ۰/۱۸ مقاومت اولیه رسیده است.

Alonso و همکاران [۷] نیز با بررسی نمونه‌های مختلف بتنی با درصدهای مختلف نسبت آب به مواد پودری، با اعمال حرارت ۲۰۰ °C، ۴۰۰ °C، ۶۰۰ °C و ۸۰۰ °C، مشاهده کردند که

نمونه‌های فاقد الیـاف در ۱۵دقیقـه اولیـهٔ آزمـایش، پوسـته پوسـته شده‌اند. همچنین، علاوه بر مشاهده کاهش مقاومت با افزایش دما، به این نتیجه نیز رسیده‌اند که با افزایش نسبت آب به مواد پودری، درصد افت وزن نسبی نمونه‌ها، کاهش یافته است.

در این تحقیق با افزودن الیاف فولادی به بتن سبک خودتراکم، تأثیر این الیاف بر عملکرد مقاومتی این بتن در برابر حـرارت‌هـای بالا و همچنین عملکرد مقاومتی بتن در برابر چرخه‌های یخزدگی و آب‌شدگی پرداخته می‌شود. برای این آزمایش‌هـا در کـل ۲۱۳ نمونه بتنی تهیه شده و برای تعیین مقاومت نمونـه‌هـا از میـانگین ۳ نمونه استفاده شده است. برای این منظور ابتـدا ۱۰ طـرح اخـتلاط بتن سـبک خـودتراکم اولیـه در نظـر گرفتـه شـده اسـت. پـس از سـاخت هـر طـرح اخـتلاط، بـا توجـه بـه نتـایج حاصـل شـده از آزمایش‌های بتن تازه، سعی شده تا با تغییر در میزان مصالح، طرح اختلاط بعدی نتایج مطلوب‌تری را دارا باشد. پـس از سـاخت ۱۰ طرح اولیه، طـرح اختلاطـی کـه مطلـوب‌تـرین نتـایج را از لحـاظ خواص تراکم‌پذیری و خـواص مکـانیکی دارا بـوده، بـرای ادامـهٔ آزمایش‌ها به‌عنوان طرح شاهد انتخاب شده است. پس از انتخاب طرح شاهد، الیـاف فـولادی بـه مقـدار ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ حجمـی بتن، به بتن افزوده شده و علاوه بر انجام آزمـایش‌هـای بـتن تـازه، آزمایش مقاومت فشاری بر نمونه‌های مکعبـی بـا ابعـاد ۱۵ cm و کششی بر نمونه‌های استوانه‌ای ۳۰ cm× ۱۵ cm در سـنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزگی و آزمایش خمشی بر تیرهایی با ابعـاد ۴۰ cm×cm ۱۰× ۱۰ cm در سـن ۹۰ روزگـی، بـرای بررسـی تـأثیر الیـاف فولادی بر رفتار مکانیکی بتن انجام شده اسـت. همـین‌طـور بـرای بررسی اثر الیاف فولادی بـر عملکـرد بـتن سـبک خـودتراکم در برابـر حـرارت، آزمـایش حرارتـی در سـن ۹۰ روزگـی و آزمـایش‌هـای مقاومـت فشـاری و کششـی پـس از آن، بـر روی نمونه‌هـا صـورت گرفتـه اسـت. بـرای بررسـی اثـر ایـن الیـاف بـر عملکرد بتن در برابر یخزدگی و آب‌شدگی، آزمایش یـخزدگـی و آب‌شدگی در سن ۲۸ روزگی و آزمایش‌های مقاومت فشـاری و خمشی پس از آن بر روی نمونه‌ها انجام گرفته اسـت. همچنـین برای بررسی اثر رطوبت نمونه‌ها بر مقاومت‌های مکانیکی در حین اعمال حرارت، یک نمونـهٔ فشـاری و یـک نمونـهٔ کششـی از هـر درصد از بتن الیافی، قبل از اعمـال حـرارت در آون بـا دمـای $^{\circ}C$ ۱۰۰ به مدت ۲۴ ساعت گذاشته شده و بعد از آن به کـوره منتقـل شده‌اند و یک سری از نمونه‌ها نیز مستقیماً در کوره قرار گرفته‌اند تا اثر رطوبت بر عملکـرد حرارتـی بـتن سـنجیده شـود. از سـویی دیگر وجود الیاف فولادی در بـتن سـبک خـودتراکم، مـی‌توانـد گزینهٔ مناسبی برای جبران افـت مقاومـت‌هـای مکـانیکی ناشـی از کاهش چگالی بتن سبک خودتراکم نسبت بـه بـتن‌هـای معمـولی باشد [۸].

۲- کاربرد الیاف فولادی

به‌کارگیری بتن غیر مسلح به علت تردی آن و ضعف در مقاومت کششی، کاربرد چندانی ندارد. این مشکل عمده، با مسـلح کـردن آن به وسیلهٔ آرماتورها برطرف می‌گردد. ولی استفاده از آرمـاتور نیز مشکلاتی دارد. مهمترین عیب آرمـاتور ایـن اسـت کـه بخـش کوچکی از مقطع بتن را تشـکیل مـی‌دهـد و باعـث غیـر همگنـی می‌شود. به منظور رفع ایـن نقـص و نیـز بـه منظـور ایجـاد شـرایط ایده‌آل، و نیز کـاهش ضـعف شـکنندگی، در چنـد دهـهٔ اخیـر از رشته‌های نازک و دراز که در تمام حجم بـتن بـه طـور همگـن و درهم پراکنده می‌گردد، استفاده می‌شود. طبق تعریـف آیـین‌نامـهٔ بتن آمریکا، بتن الیافی بتنی است که با سیمان هیدرولیکی، مصالح سنگی ریزدانـه، درشـت‌دانـه و الیـاف مجـزا و غیرپیوسـته سـاخته می‌شود [۹].

یکی از انواع الیاف، الیاف فولادی است که برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ به‌عنوان مادهٔ افزودنی در روسازی جاده‌ها، کف سالن-های صنعتی، جـداره کـوره‌هـا و...اسـتفاده شـد [۱۰]. ایـن الیـاف معمولاً براساس ۴ روش تولید می‌شوند.

۱- کشیدن و بریدن سیم‌های مسی (الیاف سیمی)

۲- نورد و برش ورق‌های فولادی (الیاف برشی یا نواری)

۳- با استفاده از مواد مذاب (الیاف ریخته‌گری)

۴- تراشیدن سطح ورق‌های فولادی با استفاده از دستگاه صفحه‌تراش (الیاف ماشینی)

این الیاف با شکل‌های ظاهری مختلفی در بازار یافت می‌شود که قطر آنها با یکدیگر متفاوت مـی‌باشـد. در جـدول ۱ محـدودهٔ قطر الیاف براساس شکل ظاهری آنها مشاهده می‌گردد.

جدول ۱- محدودهٔ قطر انواع الیاف فولادی [۱۱]

الیاف	محدوده قطر الیاف (μm)
الیاف فلزی صاف	۱۵۰-۴۱۰
الیاف فلزی با مقطع گرد	۲۰۰-۱۰۰۰
الیاف فلزی پیوند داده شده به‌هم	۱۳-۱۳۰۰

استفاده از این نوع الیاف، سبب افزایش مقاومت بتن در برابر سایش، ضربه و تنش‌های خستگی شده و سبب افزایش قابلیت کشش و قابلیت باربری بعد از ترک‌خوردگی می‌گردد. همین‌طور بر مشخصه‌های مکانیکی بتن اثرگذار خواهد بود که در زیر به برخی از تحقیقات انجام شده در این زمینه اشاره می‌شود.

Sheng و همکاران [۱۲] طی تحقیقی به بررسی اثر الیاف فولادی بر بتن و کاربرد آن در صنعت تونل پرداخته‌اند. وی نمونه‌های بتنی را با درصدهای مختلف این الیاف ترکیب کرده و با توجه به مقاومت فشاری و ابعاد اقتصادی و توجه به این موضوع که شیب افزایش مقاومت در بازهٔ افزودن الیاف به میزان ۰/۵٪ تا ۱٪ بیشتر از بازه ۰تا ۰/۵٪ و بازه ۱٪ تا ۱/۵٪ بوده است، به این نتیجه رسیده است که افزودن ۱٪ الیاف بهترین حالت و بهینه‌ترین حالت افزایش الیاف می‌باشد. طبق آزمایش‌ها، نیروی شکست بتن برای بازه ۰/۵٪تا ۱٪ بین ۲۰٪ تا ۷۰٪ افزایش داشته است.

Khaliq و همکاران [۱۳] در تحقیقی به بررسی خصوصیات مکانیکی و حرارتی بتن مسلح به الیاف، از قبیل هدایت حرارتی، انبساط حرارتی و مقاومت فشاری،کششی و مدول الاستیسیته، در بازهٔ دمایی بین ۲۰۰ °C تا ۸۰۰ °C پرداخته‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان داده‌اند که وجود الیاف فولادی موجب افزایش مقاومت کششی و مدول الاستیسیته در بتن شده است. همچنین نتایج نشان داده که انبساط حرارتی بتن مسلح به الیاف، بیش از بتن معمولی است. طبق نتایج این تحقیق، افزودن الیاف فولادی و پروپیلن، تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ندارد. همچنین الیاف فولادی موجب بهبود مقاومت کششی در دمای بالای ۴۰۰ °C و الیاف پروپیلن، سبب کاهش این مقاومت گشته است.

Ding و همکاران [۱۴] در تحقیقی به بررسی تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت فشاری، دورهٔ رسیدن به حداکثر مقاومت و توانایی جذب انرژی تحت فشار تک محوری در سنین کم بتن و شاتکریت پرداخته‌اند. طبق نتایج این تحقیق، افزودن الیاف به صورت دو بعدی در شاتکریت و همچنین به صورت سه بعدی در بتن، موجب تقویت و بهبود شاتکریت و بتن در برابر گسیختگی‌های مورب حاصل از برش و گسیختگی‌های قائم شده است. همچنین نشان داده است که وجود الیاف فولادی در بتن تازه و سخت شده، موجب افزایش جذب انرژی و نرمی خمشی شده است.

در جدول ۲ خصوصیات مکانیکی و در شکل ۱، تصویر الیاف فولادی به کار رفته در این تحقیق قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۲- خصوصیات الیاف فولادی استفاده شده در این تحقیق

قطر الیاف (μ)	طول الیاف (cm)	وزن مخصوص (kg/m^3)	ضریب ارتجاعی (GPa)	شکل ظاهری الیاف
۲۰۰- ۱۰۰۰	۵	۷۸۰۰	۲۰۰	

شکل ۱- الیاف فولادی استفاده شده در این تحقیق

۳- اثر حرارت بر بتن

یکی از مزیت‌های سازه‌های بتنی در برابر سازه‌های فولادی، دوام بالای آن در برابر حرارت و آتش می‌باشد. بتن سبک خودتراکم، در برابر محاسن ذکر شده، معایبی نیز دارد که یکی از این عیب-ها، مقاومت کم این نوع بتن در برابر حرارت و آتش می‌باشد. در بتن خودتراکم به علت نسبت بالای آب به مواد سیمانی و همچنین تراکم بالا و درصد هوای خیلی کم، هنگام آتش‌سوزی دمای بتن به سرعت بالا می‌رود و با افزایش دمای سریع بتن، آب هیدراته نشده و آزاد موجود در بتن تبدیل به بخار شده و به علت

نبود امکان خروج این بخار و نبود فضای کافی در درون بتن، موجب ایجاد تنش درونی می‌گردد. همچنین فشار گازهای متصاعد شده از تجزیه سنگ‌دانه‌های آهکی هنگام افزایش حرارت را نیز باید به این فشار بخار اضافه نمود.

فشار بخار حاصل شده در بتن سبک خودتراکم، به علت درصد جذب رطوبت بالای سبک‌دانه‌ها، به مراتب بیشتر از بتن خودتراکم معمولی بوده و این امر بتن سبک خودتراکم را آسیب‌پذیرتر از بتن خودتراکم معمولی می‌کند. فشارهای وارد شده توسط گازها و بخار آب، سبب بروز پدیده پوسته‌ای شدن انفجاری در بتن خودتراکم می‌گردد. در این پدیدهٔ تکه‌ای از بتن شکسته شده و از روی سطح بتن پرتاب می‌شود که این پرتاب با سرعت بالایی همراه بوده و حالت انفجاری دارد.

اصلی‌ترین نظریه در مورد علت پوسته‌ای شدن انفجاری بتن‌خودتراکم و بتن پرمقاومت، نفوذپذیری پایین آنها است که بخار آب را برای خروج از سوراخ‌های مویینه بتن محدود می‌کند و در نتیجه منجر به انفجار نمونه می‌شود.

افزایش دمای بتن، سبب افزایش فشار بخار آب درون منافذ بتن تا جایی می‌شود که منجر به انفجار بتن می‌شود. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در دمای بالاتر از $^{\circ}C$ ۴۵۰، تغییرات مقاومت فشاری بسیار فاحش می‌باشد [۱۵]. چنانچه ذکر شد، این کاهش مقاومت‌ها به علت غلبهٔ تنش‌های درونی ایجاد شده توسط گازها می‌باشد. یک راه از بین بردن این تنش‌های درونی، فراهم کردن فضای خالی در داخل بتن برای گازهای متصاعد می‌باشد. استفاده از الیاف پلیمری سبب می‌شود تا پس از ذوب شدنشان در دمای بالای بتن، یک فضای منبسط شونده ایجاد شود و با ایجاد تخلخل اضافی ناشی از ذوب‌شدگی این الیاف، از فشار گازهای درونی کاسته شود. اما استفاده از این نوع الیاف باعث تأثیر منفی بر خصوصیات رئولوژیکی و مکانیکی بتن خودتراکم نیز می‌گردد [۱۶].

در این پژوهش اثر الیاف فولادی بر عملکرد بتن سبک خودتراکم در برابر حرارت بالا بررسی می‌شود. الیاف فولادی با ایجاد درگیری بین قسمت‌های مختلف بتن، باعث افزایش مقاومت آن در برابر تنش‌های درونی حاصل شده از گازهای متصاعد شده می‌گردد و مانع بروز پوسته‌ای شدن بتن می‌شود. لذا استفاده از الیاف فولادی می‌تواند سبب بهبود عملکرد حرارتی بتن گردد.

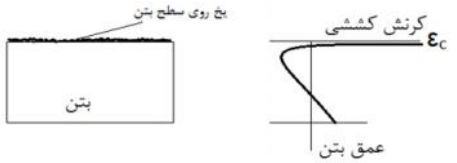
۴- اثر چرخه یخ‌زدگی و آب‌شدگی بر بتن

آسیبی که سیکل یخ‌زدگی و آب‌شدگی می‌تواند بر بتن وارد کند، تخریب سطح بیرونی با ایجاد ترک‌های داخلی می‌باشد. این ترک‌ها می‌توانند برای سطوحی که در معرض آب آزاد یا مکش مویینگی هستند، مثل دیوارهای حائل و یا سازه‌های مربوط به سد که بالای سطح آب قرار دارد، اتفاق افتد. البته این ترکها ممکن است بر اثر عوامل دیگری از جمله واکنش سنگ‌دانه‌های قلیایی نیز به وجود آید [۱۷].

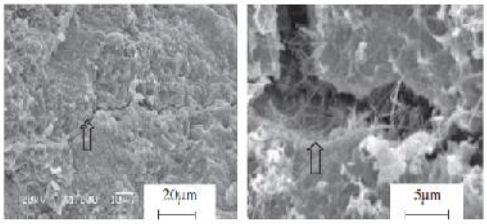
هنگامی که آب در قسمت‌های مویین بتن شروع به تبدیل شدن به یخ می‌کند، بر اثر انبساط حاصل شده، مطابق با تئوری فشار هیدرولیکی، قسمتی از آب که در این لوله‌های مویین و ژل بتن یخ نزده‌اند، فشار هیدرولیکیشان بالا می‌رود. اگر این آب راهی برای گریز به محیط غیراشباع پیدا کند (خروج آب از نمونه)، این فشار قابل دفع می‌باشد. اما اگر این امکان نباشد و درجهٔ اشباع بتن بالا باشد و مصالح مقاومت ایستادگی در برابر این فشار را نداشته باشد، نمونه ترک می‌خورد. علاوه بر فشار هیدرولیکی، ایجاد فشار تراوشی نیز در بتن مزید علت شده و بر فشار هیدرولیکی افزوده می‌شود. فشار تراوشی به این معناست که هنگامی که آب در سوراخ‌های مویین سنگ‌دانه شروع به یخ‌زدن می‌کند، املاح مختلف در قسمت آب یخ‌نزده سوراخ‌های مویینه، متمرکز می‌شود. افزایش تمرکز املاح، سبب ایجاد فشار تراوشی می‌شود، به این طریق که طبق قانون پتانسیل برای برقراری تعادل محیط، آب از قسمت یخ‌نزده به قسمت یخ‌زده برای انتقال فشار وارد می‌آورد. این فشار ایجاد شده که فشار تراوشی نام دارد، با فشار هیدرولیکی هم‌سو و هم جهت شده و عامل تخریب بتن را تشدید می‌کند [۱۷]. همچنین اگر آب درون بتن، یک محلول اشباع شده از نمک باشد، تبلور کریستالهای نمک هنگام یخ‌زدگی، نیز فشاری هم‌سو با فشارهای یاد شده ایجاد می‌کند [۱۷].

یکی دیگر از آسیب‌های چرخه‌های یخ‌زدگی، وارد کردن شوک حرارتی بر بتن می‌باشد. یخ‌زدایی از روی سطح بتن (آب کردن یخ بتن)، باعث ایجاد شوک و استرس بر سطح بتن

می‌شود. یخ زدن سطح بیرونی بتن، یک کاهش حرارتی معناداری را به وجود می‌آورد که این کاهش حرارتی به لایه‌های بیرونی محدود نمی‌شود. بنابراین بیم آن می‌رود که تنش حرارتی ایجاد شده، فراتر از مقاومت کششی بتن باشد و سبب ایجاد ترک‌های داخلی گردد. شکل ۲ و ۳، کرنش حاصل از این شـــوک و ترک‌های ایجاد شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲- کرنش حاصله در شوک حرارتی [۱۷]



شکل ۳-ترک‌های ایجاد شده در اثر سیکل حرارتی [۱۱]

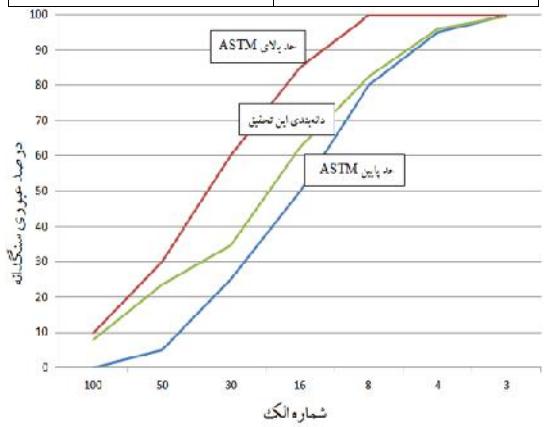
بتن سبک خودتراکم به علت جذب بیشتر رطوبت در سبک-دانه‌های خود، بیشتر از بتن خودتراکم معمولی در معرض این آسیب‌ها می‌باشد. وجود الیاف فولادی در بتن می‌تواند با ایجاد پیوستگی و درگیری اجزای بتن با یکدیگر، تنش‌های حاصل از یخ‌زدگی و آب‌شدگی و همینطور شوک‌های حرارتی حاصله را تحمل نموده و مانع از ایجاد ترک در بتن شده و عملکرد بتن در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی را بهبود بخشد.

۵- انجام طرح‌های اختلاط و تهیه نمونه‌ها

جنس و اندازه دانه‌های مصالح به کار رفته در بتن، تأثیر مستقیمی بر رفتار بتن تازه و سخت شده خواهد گذاشت. از این‌رو انتخاب مصالح مناسب برای ساخت طرح اختلاط، امری بسیار مهم می‌باشد. سیمان مصرفی در این تحقیق، سیمان تیپ دو محصول سیمان اردستان می‌باشد. ماده پوزولانی مورد استفاده، ژل میکروسیلیس و فوق‌روان‌کننده مصرفی، فوق‌روان‌کننده نوترال محصول شرکت بتن شیمی و سبک‌دانه مصرفی جهت سبک‌سازی بتن نیز سبک‌دانه لیکا، تولید شرکت لیکای ساوه می‌باشد. همچنین از پودر سنگ آهک نیز به‌عنوان فیلر استفاده شده است. در جدول ۳ و شکل ۴، مصالح مصرفی و نمودار دانه‌بندی ماسه مصرفی ملاحظه می‌گردد.

جدول ۳- مصالح مصرفی این تحقیق

مصالح مصرفی	وزن مخصوص (kg/m^3)
سیمان	۳۱۵۰
پودر سنگ آهک	۲۷۰۰
لیکای ۱۰ mm-۲۵ mm	۵۳۱
لیکای ۰-۳ mm	۱۰۰۵
ماسه	۲۳۶۰
آب	۱۰۰۰
ژل میکروسیلیس	۱۴۵۰
فوق‌روان‌کننده	۱۰۷۰



شکل ۴- دانه‌بندی ماسهٔ مصرفی این تحقیق

با استفاده از مصالح فوق، در ابتدا ۱۰ طرح اختلاط بتن سبک خودتراکم ساخته شد. پس از ساخت هر طرح اختلاط، با توجه به نتایج حاصل شده از آزمایش‌های بتن تازه و سخت‌شده در سنین ۷ و ۲۸ روزگی سعی گردید تا با تغییر در میزان مصالح به کار رفته، خواص بتن در طرح اختلاط بعدی بهبود یابد. برای ارزیابی خصوصیات خودتراکمی بتن، آزمایش‌های زیادی طراحی شده است. معتبرترین آیین‌نامه برای آزمایش‌های بتن تازه خودتراکم در اروپا، آیین‌نامهٔ EFNARC [۱۸] می‌باشد. این آیین‌نامه برای هر آزمایش محدوده مجازی تعیین کرده است. آزمایش جریان اسلامپ به منظور تعیین آزادی حرکت بتن خودتراکم در سطح به هنگام نبود هیچ مانعی به جز اصطکاک صفحه، صورت می‌گیرد. آزمایش حلقهٔ J ویژگی قابلیت عبور بتن از میان میلگردها را نشان می‌دهد (شکل ۵). آزمایش قیف V

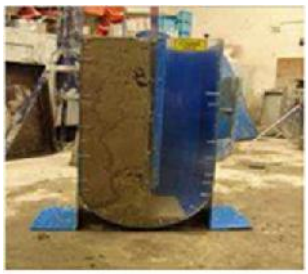
برای سنجش قابلیت پرکنندگی، لزجت و میزان جداشدگی بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۶). آزمایش جعبهٔ L نیز بیانگر قابلیت پرکنندگی و عبور بتن در سطوح صاف و با تراکم بالای آرماتور می‌باشد. آزمایش جعبهٔ U نیز به‌عنوان سختگیرانه‌ترین آزمایش تراکم‌پذیری بتن، بیانگر قابلیت پرکنندگی و قابلیت عبور بتن خودتراکم می‌باشد (شکل ۷).

شکل ۵- تصویری از حلقهٔ J

شکل۶- قیف V شکل

جدول ۴- طرح اختلاط‌های اولیه

شماره طرح	شن (kg)	ماسه (kg)	فوق‌روان‌کننده (kg)	لیکای ریز (kg)	لیکای درشت (kg)	ژل‌میکروسیلیس (kg)	پودرسنگ (kg)	آب (kg)	سیمان (kg)	وزن مخصوص (kg/m^3)
۱	۹۷	۶۶۸	۷/۵	۶۰	۸۸	۴۴	۱۴۶	۲۳۴	۴۱۸	۱۷۶۲
۲	–	۷۳۸	۸	۱۹۴	۴۵	۴۴	۱۴۸	۱۸۴	۴۲۳	۱۷۸۳
۳	–	۷۳۶	۱۱	۲۳۴	۳۹	۴۴	۱۴۷	۱۵۳	۴۲۲	۱۷۸۶
۴	–	۷۵۰	۸	۲۲۷	۳۰	۴۵	۱۵۰	۱۷۰	۴۳۰	۱۸۱۰
۵	–	۷۵۰	۸	۲۲۶	۲۰	۴۵	۱۵۰	۱۹۰	۴۳۰	۱۸۱۰
۶	–	۷۵۰	۸	۲۶۳	۰	۴۵	۱۵۰	۱۹۰	۴۳۰	۱۸۳۶
۷	–	۷۵۰	۸	۲۲۵	۰	۴۵	۲۵۰	۱۹۰	۴۳۰	۱۸۹۸
۸	–	۷۵۰	۸	۲۲۵	۰	۴۵	۲۰۰	۲۱۰	۴۳۰	۱۸۶۸
۹	–	۷۵۰	۸	۲۱۴	۰	۶۰	۲۰۰	۲۱۰	۴۳۰	۱۸۷۲
۱۰	–	۷۵۰	۸	۲۰۴	۰	۶۰	۲۰۰	۲۲۰	۴۳۰	۱۸۷۲



شکل ۷- تصویر آزمایش جعبهٔ U

چنانچه ذکر شد، با تغییر میزان مصالح به کار رفته در هر طرح اختلاط بتن سبک خودتراکم، سعی شد تا مشکلات رئولوژیکی و مکانیکی در طرح اختلاط بعدی رفع گردد. در جدول ۴، ۱۰ طرح اختلاط اولیه مشاهده می‌گردد.

مؤسسهٔ EFNARC [۱۸] برمبنای نتایج به دست آمده از آزمایش جریان اسلامپ، بتن تازه را مطابق با جدول ۵ به سه رده طبقه‌بندی می‌کند.

جدول ۵- دسته‌بندی بتن EFNARC [۱۸]

جریان اسلامپ (mm)	رده بتن
۵۵۰-۶۵۰	SF1
۶۶۰-۷۵۰	SF2
۷۶۰-۸۵۰	SF3

بتن ردهٔ SF1 برای بتن‌ریزی در مقاطع غیر مسلح یا مقاطع با آرماتور کم که بتن ریزی نیز از بالا صورت می‌گیرد، و نیز بتن‌ریزی در سطوح افقی که نیاز به جابه‌جایی طولی بتن نمی‌باشد، مناسب می‌باشد [۱۸]. بتن ردهٔ SF2 برای بتن‌ریزی در اکثر موارد مناسب می‌باشد و اگر کاربرد خاصی از بتن انتظار نداشته باشیم، این رده بتن توصیه می‌شود. رده بتن SF3 نیز، که عمدتاً از سنگ‌دانه‌هایی که اندازهٔ حداکثر آنها به ۱۶ mm محدود شده است ساخته می‌شوند، برای بتن‌ریزی در مقاطع عمودی، سازه‌های بسیار پر آرماتور و سازه‌های با شکل پیچیده قالب‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سطح نهایی بتن ردهٔ SF3 نسبت به بتن ردهٔ SF2 معمولاً بهتر می‌باشد. از سوی دیگر احتمال جداشدگی در این بتن‌ها افزایش می‌یابد.

پس از ساخت ۱۰ طرح اختلاط اولیه، آزمایش‌های بتن تازه و سخت‌شده روی طرح‌های اختلاط صورت گرفت که نتایج آن در جدول ۶ و ۷ ملاحظه می‌گردد.

جدول ۶- آزمایش‌های بتن تازه خودتراکم

شمارهٔ طرح اختلاط	جعبهٔ L	قیف V (s)	حلقهٔ J (mm)	جریان اسلامپ (mm)	T_{50} (s)	جعبهٔ U (mm)	ردهٔ بتن
۱	–	۴/۳	–	–	–	۷۰	SF2
۲	۰/۸۸	۵/۷۵	۳/۵	۶۹۰	۱/۳۸	۳۸	–
۳	۰/۲	۱۶/۲۲	۱۴	۴۵۰	–	۱۲۵	SF1
۴	۰/۴	۱۱/۵	۸/۵	۵۶۰	۱۰/۵	۳۱	SF1
۵	۰/۸	۶/۷۵	۵	۵۸۰	۳/۴۶	۲۷	SF1
۶	۰/۸	۸/۰۵	۴/۵	۵۶۰	۴/۰۹	۲۱	–
۷	–	۸/۸	۱۳	۴۸۰	–	۶۹	SF1
۸	۰/۸۳	۶/۳۲	۳	۶۰۰	۴/۸۱	۲۶	SF2
۹	۰/۸۳	۶/۲۱	۲/۵	۶۸۵	۲/۷	۱۸	SF3
۱۰	۰/۹۴	۵/۷	۱/۳	۷۶۰	۲/۰۷	۱۷	–
محدودهٔ مجاز EFNARC	۱– ۰/۸	۶–۱۲	۰–۱۰	۶۵۰ –۸۰۰	۲–۵	۰–۳۰	–

پس از بررسی نتایج حاصل شده از آزمایش‌های طرح‌های اختلاط، طرح اختلاط شمارهٔ ۱۰ که دارای بهترین نتایج از لحاظ رئولوژیکی می‌باشد و از لحاظ مکانیکی نیز در سطح قابل قبولی می‌باشد، به‌عنوان طرح شاهد برای ادامهٔ آزمایش‌ها انتخاب گردید.

جدول ۷- آزمایش‌های مکانیکی بتن در سن ۷ و ۲۸ روزگی

شمارهٔ طرح اختلاط	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	مقاومت کششی ۲۸ روزه (MPa)
۱	۷/۲	۱۴/۶	۱/۶
۲	۱۳/۱۷	۲۴	۱/۸۳
۳	۱۲/۳	۲۰/۸	۲/۴۸
۴	۱۳	۱۸	۲/۶۹
۵	۱۲/۹	۱۷/۸	۲/۸
۶	۱۴/۵	۱۹/۸	۱/۱۵
۷	۱۵/۳	۲۵/۶	۲/۸۶
۸	۱۷/۳	۲۴/۶	۲/۱۳
۹	۱۷/۸۲	۲۹	۲/۲۸
۱۰	۱۴/۵	۲۳/۵	۲/۲۶

۶- افزودن الیاف فولادی به طرح شاهد

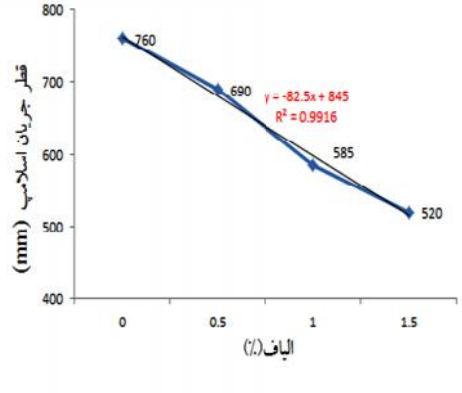
پس از انتخاب طرح شاهد، الیاف فولادی به مقدار ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ حجمی بتن، به بتن سبک خودتراکم افزوده شده و آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزگی، آزمایش خمشی و حرارتی در سن ۹۰ روزگی و آزمایش یخزدگی در ۲۸ روزگی روی نمونه‌های بتنی انجام شد. پس از افزودن الیاف فولادی، آزمایش‌های بتن تازه بر روی بتن‌های الیافی صورت گرفت که نتایج آن در جدول ۸ ملاحظه می‌گردد.

جدول ۸- آزمایش‌های بتن تازه الیافی

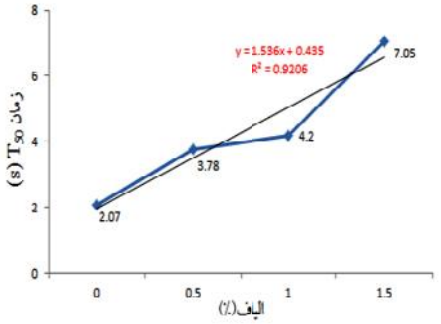
	جعبهٔ L	قیف V (s)	حلقهٔ J (mm)	جریان اسلامپ (mm)	T_{50} (s)	جعبهٔ U (mm)
طرح شاهد	۰/۹۳۸	۵/۷	۱/۳	۷۶۰	۲/۰۷	۱۷
بتن ۰/۵٪ الیافی	۰/۹	۶/۶	۳	۶۹۰	۳/۷۸	۲۰
درصد تغییر	-٪۴/۵	+٪۱۵/۸	+٪۱۳۰	-٪۹/۲	+٪۸۲/۶	+٪۱۷/۶
بتن ۱٪ الیافی	–	۷/۱۱	۲۷	۵۸۵	۴/۲	–
درصد تغییر	–	+٪۲۴/۷	+٪۱۹۰۰	-٪۲۳	+٪۱۰۳	–
بتن ۱/۵٪ الیافی	–	۹	۳۵/۵	۵۲۰	۷/۰۵	–
درصد تغییر	–	+٪۵۷/۹	+٪۲۶۰۰	-٪۳۱/۶	+٪۲۴۰	–
محدوده مجاز	۰/۸–۱	۶–۱۲	۰–۱۰	۶۵۰ –۸۰۰	۲–۵	۰–۳۰

نگاهی به نتایج حاصل شده از آزمایش‌های بتن تازه در رابطه با اثر الیاف فولادی بر رفتار رئولوژیکی بتن سبک خودتراکم، این مطلب را بیان می‌کند که اضافه شدن الیاف فولادی به مخلوط بتن، سبب کاهش معیارهای خودتراکمی و پرکنندگی بتن شده و نتایج آزمایش‌ها را از محدودهٔ مجاز خارج می‌کند و با بروز مشکلاتی مثل گلوله شدن یا انسداد، مشکلات اجرایی را بیشتر می‌کند. تعیین درصد مناسب این الیاف برای آنکه ضمن بالا بردن مقاومت‌های مکانیکی این نواقص حداقل شود، با استفاده از نتایج آزمایش‌ها، امری مهم می‌باشد.

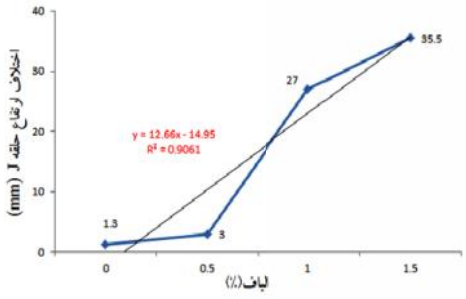
شکل ۸ تأثیر الیاف فولادی بر قطر جریان اسلامپ و شکل‌های ۹ و ۱۰ تأثیر الیاف فولادی بر زمان T_{50} و اختلاف ارتفاع حلقهٔ J را نشان می‌دهد.



شکل ۸- اثر الیاف بر قطر جریان اسلامپ



شکل ۹- اثر الیاف بر زمان آزمایش T_{50}



شکل ۱۰- اثر الیاف بر ارتفاع حلقهٔ J

شکل ۱۱ و ۱۲ انسداد بتن توسط الیاف فولادی را در آزمایش‌های بتن تاره نشان می‌دهد.

شکل ۱۱- انسداد بتن در آزمایش جعبهٔ L

شکل ۱۲- انسداد بتن در آزمایش جعبهٔ U

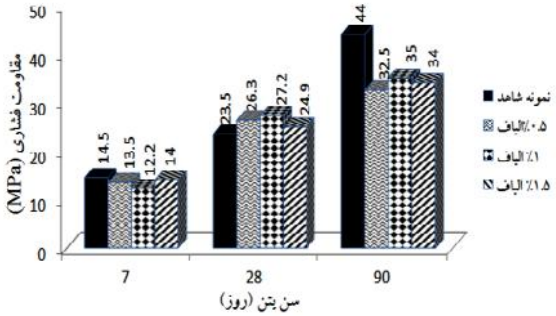
چنانچه ملاحظه می‌گردد، افزودن الیاف فولادی به طرح شاهد، به علت چگالی بالای الیاف و ایجاد جداشدگی، بتن را دچار انسداد و گرفتگی کرده و خواص خودتراکمی بتن را کاهش می‌دهد. افزودن الیاف فولادی بیش از ۰/۵٪ حجمی بتن، بتن را از حالت خودتراکمی خارج می‌کند.

افزودن الیاف فولادی به طرح شاهد، بر خواص مکانیکی بتن نیز تأثیر می‌گذارد. جدول ۹ اثرات الیاف فولادی بر خصوصیات مکانیکی بتن سبک خودتراکم شاهد را نشان می‌دهد.

جدول ۹- اثر الیاف فولادی بر مقاومت‌های مکانیکی در سنین مختلف آزمایش

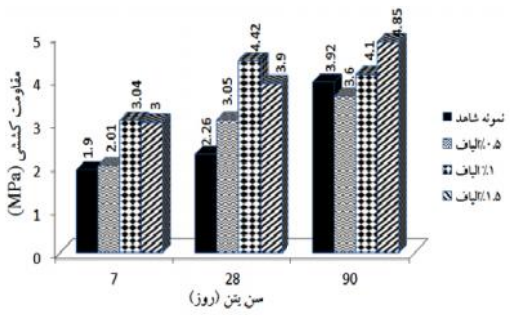
نوع آزمایش	مقاومت کششی ۷ روزه (MPa)	مقاومت کششی ۲۸ روزه (MPa)	مقاومت کششی ۹۰ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	مقاومت فشاری ۹۰ روزه (MPa)	نیروی وارده در آزمایش خمش ۹۰ روزه (kN)
طرح شاهد	۱/۹	۲/۲۶	۳/۹۲	۱۴/۵	۲۳/۵	۴۴	۳۰
بتن ٪۰/۵ الیافی	۲/۰۱	۳/۰۵	۳/۶	۱۳/۵	۲۶/۳	۳۲/۵	۳۵
درصد تغییرات	+٪۵/۷	+٪۳۵	-٪۸/۱	-٪۶/۹	+٪۱۲	-٪۲۶/۱	+٪۱۶/۷
بتن ٪۱ الیافی	۳/۰۴	۴/۴۲	۴/۱	۱۲/۲	۲۷/۲	۳۴/۳	۲۸/۵
درصد تغییرات	+٪۶۰	+٪۹۵/۶	+٪۴/۶	-٪۱۵/۹	+٪۱۵/۷	-٪۲۰/۵	-٪۵
بتن ٪۱/۵ الیافی	۳	۳/۹	۴/۸۵	۱۴	۲۴/۹	۳۴	۲۷
درصد تغییرات	+٪۵۷/۹	+٪۷۲/۶	+٪۲۳/۸	-٪۳/۴	+٪۶	-٪۲۲/۸	-٪۱۰

با توجه به شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که وجود الیاف فولادی در سن ۲۸ روزگی، سبب افزایش مقاومت فشاری تا ۱۶٪ برای بتن ۱٪ الیافی شده، در حالیکه وجود الیاف فولادی در سنین ۷ و ۹۰ روزگی، سبب کاهش مقاومت فشاری شده است که این امر می‌تواند به علت پیوند مناسب الیاف و بتن در سن ۲۸ روزگی و عدم درگیری الیاف و بتن در سن ۷ روزگی به علت تازگی بتن و در سن ۹۰ روزگی به علت زنگ‌زدگی الیاف در بتن و کاهش چسبندگی باشد که ظاهر زنگ‌زده الیاف پس از شکستن نمونه‌ها، مبین این موضوع می‌باشد.



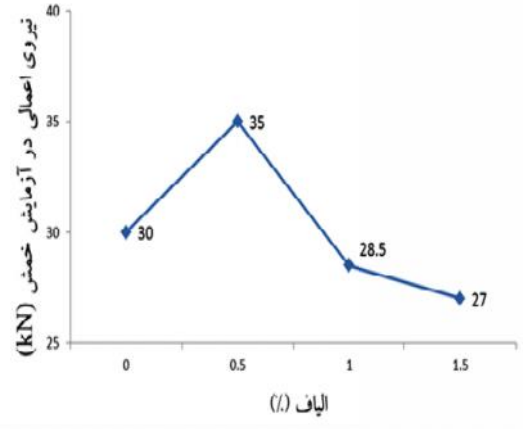
شکل ۱۳- مقاومت فشاری بتن الیافی در سنین مختلف آزمایش

شکل ۱۴ نیز مقاومت کششی بتن سبک خودتراکم الیافی در سنین مختلف را نشان می‌دهد. طبق نتایج این شکل و جدول ۱۰، وجود الیاف فولادی با درصدهای مختلف، در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزگی، سبب افزایش مقاومت کششی بتن الیافی نسبت به طرح شاهد شده است که این افزایش برای بتن ۱٪ الیافی در ۲۸ روزگی به ۹۵٪ رسیده است که حاکی از اثر مثبت الیاف فولادی بر مقاومت کششی می‌باشد.



شکل ۱۴- مقاومت کششی بتن الیافی در سنین مختلف آزمایش

مطابق آنچه در مقاومت فشاری دیده شد، مقاومت کششی برای بتن‌های الیافی، در سن ۲۸ روزگی بیشترین افزایش را نسبت به سایر سنین داشته است. شکل ۱۵ نیز نمودار نیروی اعمال شده در آزمایش خمش در سن ۹۰ روزگی بر تیر بتنی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- نیروی اعمالی در آزمایش خمش در سن ۹۰ روزگی

چنانچه از نمودار شکل ۱۵ ملاحظه می‌گردد، وجود الیاف فولادی به میزان ۰/۵٪ حجمی بتن، سبب افزایش نیروی اعمالی بر تیر بتنی تا ۱۷٪ می‌گردد در حالیکه افزودن الیاف به میزان ۱٪ و ۱/۵٪ حجمی بتن، این نیرو را نسبت به طرح شاهد کاهش می‌دهد که علت آن جداشدگی بتن در اثر حضور بیش از حد الیاف و چگالی بالای آنها می‌باشد.

وجود الیاف فولادی در بتن، سبب افزایش نرمی بتن می‌شود که از شکست نمونه‌های بتنی کاملاً مشهود می‌باشد. نمونه‌های فشاری حاوی الیاف برخلاف نمونه‌های فاقد الیاف قابل بارگذاری مجدد بوده و در اثر آزمایش مقاومت فشاری، آسیب جدی نمی‌بینند. همچنین نمونه‌های کششی دارای الیاف برخلاف نمونه‌های فاقد الیاف که شکستی ترد و همراه با صدای ترک ناگهانی دارند، شکستی کاملاً نرم و بدون ایجاد صدای ترک خواهند داشت. نمونه‌های خمشی دارای الیاف نیز برخلاف نمونه‌های فاقد الیاف که در اثر آزمایش از محل بارگذاری شکسته و به دو نیم تبدیل می‌شوند، به هیچ وجه گسیخته نمی‌شوند و آزمایش تنها با افزایش خیز تیر تمام می‌شود. شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸، شکست نرم نمونه‌ها بتنی را نشان می‌دهد.

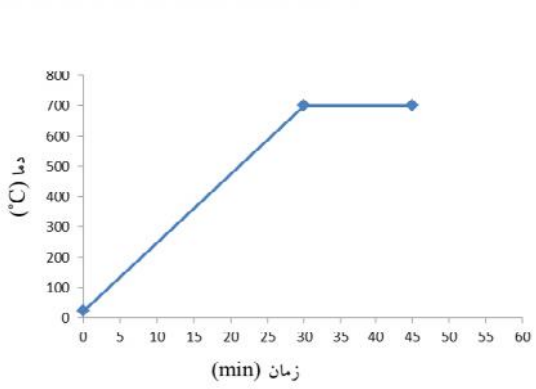
شکل ۱۶- نمونه بتن الیافی مقاومت فشاری بعد از اعمال بار

شکل ۱۷- نمونه بتن الیافی مقاومت کششی بعد از اعمال بار

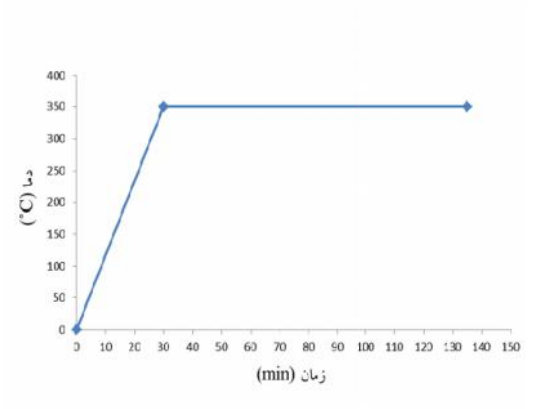
شکل۱۸- تیر بتنی الیافی با شکست نرم در آزمایش خمش

۷- آزمایش حرارتی

برای بررسی عملکرد بتن سبک خودتراکم در برابر حرارت، نمونه‌های فشاری و کششی بتن الیافی در سن ۹۰ روزگی ابتدا مطابق نمودار شکل ۱۹ تحت حرارت قرار گرفتند که پس از ۴۵ min نمونه‌ها منفجر شدند. علت این پدیده وجود بخار آب و گاز CO_2 قابل توجه حاصل از تجزیه مصالح بتن سبک خودتراکم و وقوع انفجاری پوسته‌ای شدن بود. پس از این اتفاق تصمیم گرفته شد تا نمونه‌ها مطابق شکل ۲۰ تحت حرارت قرار گرفته و پس از سرد شدن، آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی بر روی آنها صورت گیرد. برای بررسی اثر رطوبت نمونه‌ها بر عملکرد حرارتی، یک نمونه فشاری و یک نمونه کششی از هر بتن الیافی، به مدت ۲۴ h در آون با دمای $100\ ^{\circ}C$ نگهداری شده و سپس برای آزمایش حرارتی به کوره منتقل شده است.

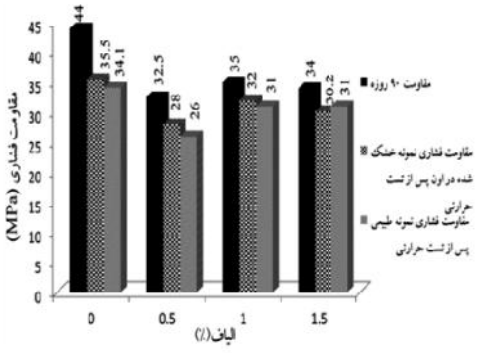


شکل ۱۹- نمودار زمان - دمای اولیه



شکل ۲۰- نمودار زمان - دمای اعمالی

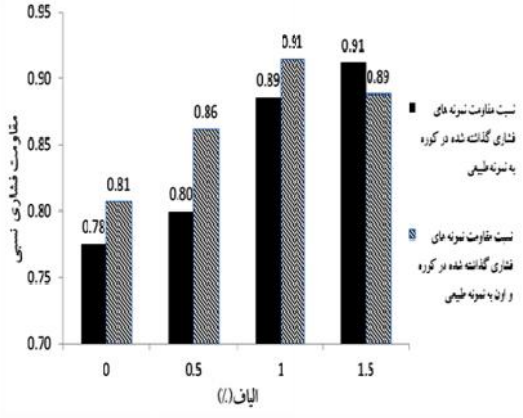
پس از اعمال آزمایش حرارت در سن ۹۰ روزگی، نمونه‌ها تحت آزمایش مقاومت فشاری و کششی قرار گرفتند. شکل ۲۱ نمودار مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از آزمایش حرارتی در مقایسه با نمونه‌های طبیعی را نشان می‌دهد.



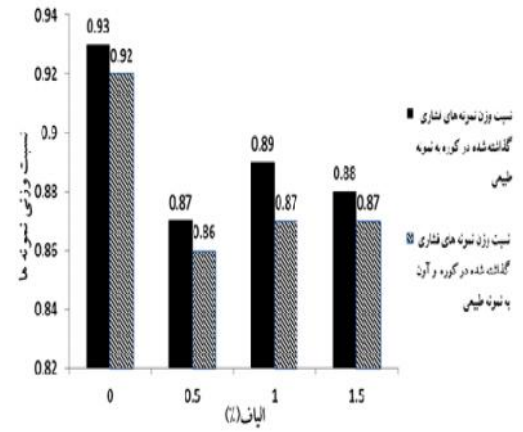
شکل ۲۱- مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از آزمایش حرارتی در سن ۹۰ روزگی

چنانچه ملاحظه می‌شود، انجام آزمایش حرارتی، سبب افت مقاومت‌های فشاری تا ۳۲٪ برای بتن فاقد الیاف شده است.

تقریباً نمونه‌های قرار گرفته در آون، نسبت به نمونه‌هایی که مستقیماً در کوره قرار گرفته‌اند، نتایج مطلوب‌تری نشان داده‌اند. شکل ۲۲ نسبت مقاومت فشاری پس از اعمال حرارت به مقاومت‌های اولیه و شکل ۲۳، درصد کاهش وزن نمونه‌ها طی اعمال حرارت را نشان می‌دهد.

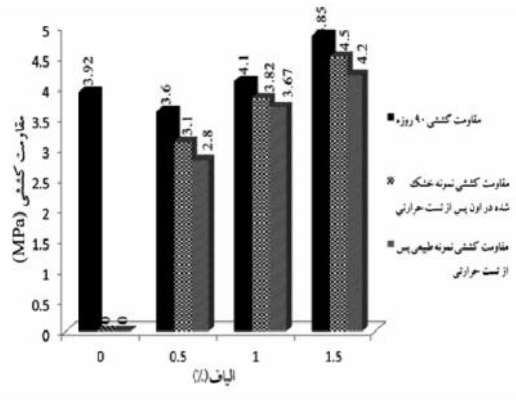


شکل ۲۲- مقاومت فشاری نسبی نمونه‌ها در سن ۹۰ روزگی



شکل ۲۳- نسبت وزنی نمونه‌ها پس از اعمال حرارت

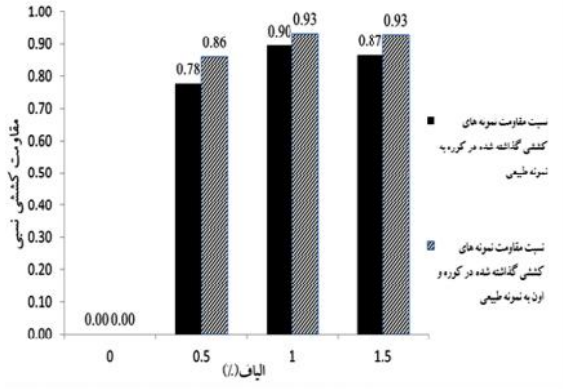
چنانچه ملاحظه می‌شود افزایش درصد الیاف فولادی در بتن سبک خودتراکم، سبب کاهش افت مقاومت فشاری بتن در برابر حرارت شده است. همینطور نزدیکی کاهش وزن نمونه‌هایی که مستقیم در کوره قرار گرفته‌اند و نمونه‌هایی که قبل از کوره در آون بوده‌اند، سبب شده تا میزان افت مقاومت‌ها نیز به یکدیگر نزدیکتر باشند. شکل ۲۴، مقاومت کششی نمونه‌های قرار گرفته تحت حرارت در سن ۹۰ روزگی را نشان می‌دهد.



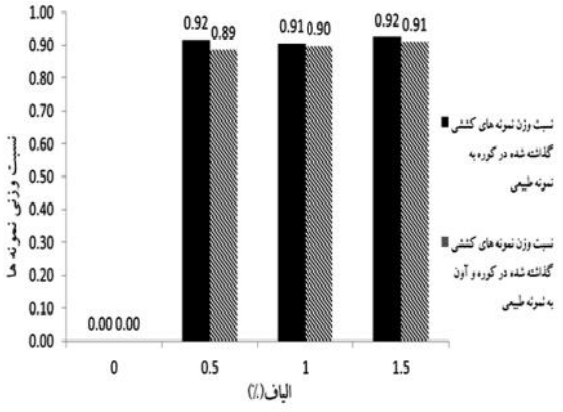
شکل ۲۴- مقاومت کششی نمونه‌ها پس از آزمایش حرارتی در سن ۹۰ روزگی

ملاحظه می‌گردد که اعمال حرارت بر بتن، سبب کاهش مقاومت‌های کششی شده است. مواردی که مقدار آنها صفر درج شده، در حین آزمایش منفجر شده‌اند. ملاحظه می‌شود که نمونه‌های قرار گرفته در آون قبل از کوره، نسبت به نمونه‌هایی که مستقیم در کوره قرار گرفته‌اند، افت مقاومت کمتری داشته‌اند. شکل ۲۵ مقاومت کششی نسبی نمونه‌های قرار گرفته تحت حرارت به نمونه‌های طبیعی و شکل ۲۶ وزن نسبی نمونه‌های قرار گرفته تحت حرارت به نمونه‌های طبیعی را نشان می‌دهد.

چنانچه از شکل ۲۵ نتیجه می‌شود، وجود الیاف فولادی در بتن، سبب کاهش افت مقاومت کششی نمونه‌های قرار گرفته تحت حرارت می‌شود. مطابق شکل ۲۶ نیز نزدیکی کاهش وزن نمونه‌های قرار گرفته در آون قبل از کوره، به نمونه‌هایی که مستقیم در کوره قرار گرفته‌اند، سبب شده تا دو نمونهٔ بتنی، کاهش مقاومت نزدیک بهم داشته باشند.



شکل ۲۵- مقاومت کششی نسبی نمونه‌ها در سن ۹۰ روزگی



شکل ۲۶- وزن نسبی نمونه‌ها پس از اعمال حرارت

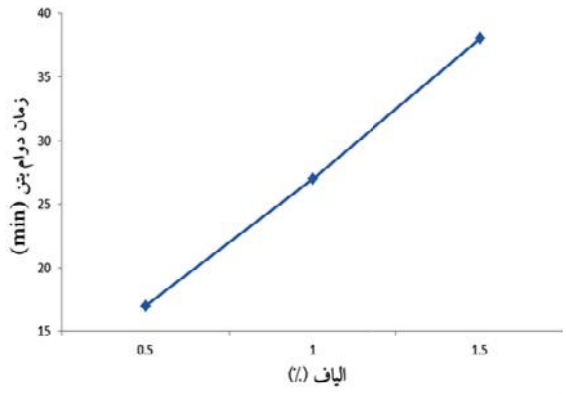
علت بهبود رفتار مکانیکی بتن در برابر حرارت با افزودن الیاف فولادی، بالا بردن مقاومت بتن در برابر ترک خوردن و پوسته‌ای شدن هنگام خروج گازهای متصاعد شده در حین آزمایش حرارتی و اعمال حرارت می‌باشد. الیاف فولادی با پیوند زدن قسمت‌های بتن به هم، کشش حاصله از خروج گازهای متصاعد شده از بتن را تحمل کرده و مانع از ایجاد ترک در برابر فشار گاز و بخار آب می‌شود.

در ادامه برای سنجش دوام بتن الیافی در برابر شوک حرارتی، نمونه‌های دارای ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ الیاف فولادی در معرض حرارت ناگهانی $^{\circ}C$ ۹۵۰ قرار گرفته و مدت زمان دوام بتن در برابر این حرارت ناگهانی اندازه گیری شده است. جدول ۱۰ مدت زمان دوام بتن الیافی در برابر حرارت را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰- زمان دوام بتن الیافی در برابر حرارت $^{\circ}C$ ۹۵۰

	بتن ۰/۵٪ الیافی	بتن ۱٪ الیافی	بتن ۱/۵٪ الیافی
زمان دوام بتن (min)	۱۷	۲۷	۳۸
توضیحات	ریزش بخش اعظم بتن	آتش گرفتن بتن	ریزش بخشی از بتن

همانطور که ملاحظه می‌شود، افزایش درصد الیاف سبب افزایش دوام بتن در برابر شوک حرارتی $^{\circ}C$ ۹۵۰ می‌شود که علت آن، همان انسجام و مقاوم شدن بتن در برابر فشارهای ناشی از خروج بخار آب و سایر گازهای متصاعد شده می‌باشد و در نتیجه آن، مقاومت بتن در برابر حرارت افزایش می‌یابد. شکل ۲۷ نیز مدت زمان مقاومت بتن را نشان می‌هد.



شکل ۲۷- زمان دوام بتن الیافی در دمای $^{\circ}C$ ۹۵۰

۸- آزمایش یخزدگی و آب‌شدگی بتن

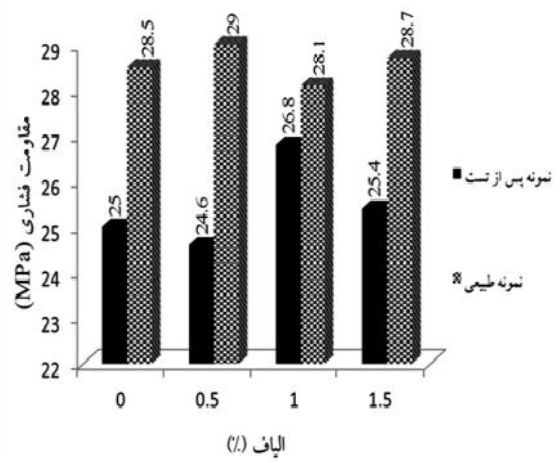
چنانچه ذکر شد، یخزدگی و آب‌شدگی و تکرار این سیکل حرارتی، باعث ایجاد تنش‌های درونی در بتن شده و سبب ایجاد ترک‌های ریز در بتن می‌گردد که موجب تهدید بتن می‌شود. در این تحقیق برای بررسی عملکرد بتن الیافی در برابر یخزدگی و آب‌شدگی، نمونه‌های بتنی به مدت ۸ h در دمای $^{\circ}C$ ۱۵- الی $^{\circ}C$ ۲۰- قرار می‌گیرند و سپس برای ۸ h، برای مرحله آب‌شدگی، در آب با دمای $^{\circ}C$ ۲۰ قرار می‌گیرند. در این تحقیق نمونه‌های مکعبی جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری و نمونه‌های منشوری جهت اندازه‌گیری مقاومت خمشی، در سن ۲۸ روزگی تحت ۵۰ سیکل حرارتی قرار گرفته و پس از پایان یافتن سیکلها مورد آزمایش فشاری و خمشی قرار گرفتند. جدول ۱۱ مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های قرار گرفته تحت چرخهٔ یخزدگی و آب‌شدگی به نمونه‌های طبیعی را نشان می‌دهد.

جدول ۱۱- مقاومت فشاری نمونه‌های تحت چرخه یخزدگی و آب‌شدگی در سن ۲۸ روزگی

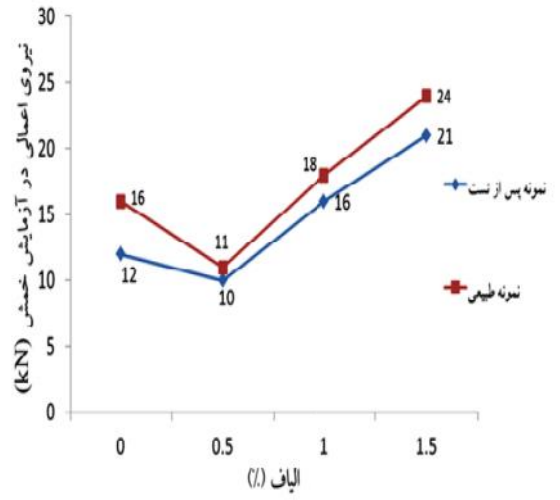
	نمونه شاهد	بتن ۰/۵٪ الیافی	بتن ۱٪ الیافی	بتن ۱/۵٪ الیافی
مقاومت فشاری نمونه طبیعی (MPa)	۲۸/۵	۲۹	۲۸/۱	۲۸/۷
مقاومت فشاری نمونه تحت سیکل (MPa)	۲۵	۲۴/۶	۲۶/۸	۲۵/۴
درصد کاهش مقاومت	٪۱۲/۳	٪۱۵	٪۴/۶	٪۱۱/۵

همانطور که ملاحظه می‌گردد، با اعمال سیکل‌های یخزدگی و آب‌شدگی، در تمامی حالات، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد،

اما برای بتن حاوی ۱٪ الیاف، اختلاف مقاومت فشاری بتن طبیعی و بتن قرار گرفته تحت سیکل حرارتی، به کمترین میزان خود خواهد رسید. در بقیهٔ حالات، وجود الیاف تغییر چندانی در اختلاف مقاومت، نسبت به نمونه فاقد الیاف ایجاد نکرده است. همچنین ملاحظه می‌شود که نمونهٔ حاوی ۰/۵٪ الیاف، تقریباً نامناسب‌ترین وضعیت (بیشترین کاهش مقاومت) را داراست. شکل ۲۸ این مطلب را نشان می‌دهد.



شکل ۲۸- مقاومت فشاری نمونه‌های تحت چرخهٔ یخزدگی و آب‌شدگی و نمونه‌های طبیعی در سن ۲۸ روزگی



شکل ۲۹- نیروی وارد در آزمایش خمش پس از چرخه یخزدگی و آب‌شدگی در سن ۲۸ روزگی

شکل ۲۹ و جدول ۱۲، مقایسهٔ نیروی اعمالی در آزمایش خمش تیر بتنی در دو حالت طبیعی و پس از اعمال چرخهٔ حرارتی را نشان می‌دهد. نیروی ثبت شده در این آزمایش، نیروی لازم برای ایجاد اولین ترک در تیر است که پس از آن میزان نیرو کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود که اعمال چرخه‌های حرارتی سبب کاهش نیروی وارده در آزمایش خمشی در تیر بتنی به میزان به میزان ۹٪ تا ۲۵٪ می‌گردد. مطابق نتایج حاصله، افزودن الیاف فولادی سبب جلوگیری از افت نیروی وارده خمشی می‌شود. نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ ، ۱٪ و ۱/۵٪ الیاف، به ترتیب نزدیک‌ترین تحمل نیروی وارده در آزمایش خمشی را نسبت به نمونه‌های طبیعی داشته‌اند که حاکی از اثر مثبت الیاف فولادی در حفظ مقاومت خمشی در برابر یخزدگی و ذوب‌شدگی بتن می‌باشد.

جدول ۱۲- نیروی وارده در آزمایش خمش پس از چرخه یخزدگی و آب‌شدگی در سن ۲۸ روزگی

	نمونه شاهد	بتن ۰/۵٪ الیافی	بتن ۱٪ الیافی	بتن ۱/۵٪ الیافی
نیروی اعمالی در آزمایش خمش نمونه طبیعی (kN)	۱۶	۱۱	۱۸	۲۴
نیروی اعمالی در آزمایش خمش نمونهٔ تحت سیکل (kN)	۱۲	۱۰	۱۶	۲۱
درصد کاهش نیرو	٪۲۵	٪۹	٪۱۱	٪۱۳

۹- نتیجه‌گیری

۱- وجود لیکای درشت در بتن سبک خودتراکم سازه‌ای می‌تواند باعث جداشدگی و افت مقاومت‌های مکانیکی شود.

۲- وجود الیاف فولادی، سبب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های الیافی در سن ۲۸ روزگی تا ۱۶٪ شده، ولی در بقیه سنین باعث کاهش آن شده است.

۳- وجود الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت کششی در کلیهٔ سنین آزمایشی شده است، ولی افزایش مقاومت کششی در سن ۲۸ روزگی بیش از دو سن دیگر بوده و تا ۹۵٪ برای بتن ۱٪ الیافی افزایش داشته است.

۴- افزودن الیاف فولادی به میزان ۰/۵٪ حجمی بتن، سبب افزایش ۱۷ درصدی نیروی اعمالی در آزمایش خمشی شده است. افزودن الیاف فولادی بیش از این مقدار، هرچند شکست

نمونه‌های بتنی را نرمتر کرده، ولی نیروی اعمالی را کاهش داده است.

۵- وجود الیاف فولادی بیش از ۰/۵٪ حجمی بتن، سبب از بین رفتن خواص خودتراکمی بتن شده و خطر جداشدگی و بلوکاژ در بتن سبک خودتراکم را به وجود می‌آورد.

۶- وجود الیاف فولادی در بتن سبک خودتراکم، باعث افزایش ۱۳ درصدی مقاومت فشاری بتن الیافی در آزمایش حرارتی نسبت به طرح شاهد شده و مانع از افت مقاومت‌های مکانیکی بتن در آزمایش حرارتی می‌شود.

۷- الیاف فولادی زمان دوام بتن در برابر حرارت بالا را تا ۱۲۰٪ برای بتن ۱/۵٪ الیافی نسبت به بتن ۰/۵٪ الیافی بالا می‌برد.

۸- وجود الیاف فولادی باعث بهبود رفتار بتن در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی و آب‌شدگی شده و تا ۸٪ از میزان افت مقاومت فشاری و تا ۱۵٪ از میزان افت مقاومت خمشی در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی و آب‌شدگی می‌کاهد.

۱۰- مراجع

[1]. Zhu. W, Bartos. P. J. M, "Permeation Properties of Self-Compacting Concrete," Cement and Concrete Research, 33, 921-926 , 2003.

[۲]. رهایی. علیرضا، نجاتی. محمدرضا، کارآموزیان. امیر، "ارائه طرح اختلاط و خواص بتن سبک خودتراکم" اولین کنفرانس ملی بتن سبک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، ۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۲.

[۳]. فریدی. کاوه، "بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن خودتراکم و بهبود عملکرد آن در برابر آتش" پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، ایران، ۱۳۸۹.

[۴]. باتوانی. محمود، "تأثیر الیاف فولادی بر خصوصیات مکانیکی و عملکرد درمقابل حرارت و یخ‌زدگی بتن سبک خودتراکم" پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، ۱۳۹۲.

[5]. Heiza. K. M, "Performance of Self-Compacted Concrete Exposed to Fire or Aggressive Media," Concrete Research Letters, 3(2), 406-425, 2012.

[۶]. کردی. مصطفی، باغدارانی. مازیار، خیابانی. علیرضا، "بررسی تأثیر آتش‌سوزی بر مقاومت پسماند جانبی قاب بتن مسلح مقاومت بالا " ششمین کنگرهٔ ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، اردیبهشت ۱۳۹۰.

[7]. Alonso. M. C, Sanchez. M, "Durability of Scc Reinforced With Polymeric Fibers: Interaction With Enviroment and Behaviours Against High Temperatures," 11tm International Inorganic Fiber Composites Conference, 227, 2008.

[۸]. عبداله زاده. رضا، مدندوست. رحمت، "تأثیر الیاف فولادی صنعتی و بازیافتی در خواص مکانیکی بتن نیمه‌سبک" نهمین کنگرهٔ بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، اردیبهشت ماه ۱۳۹۱.

[9]. ACI 544.1R-96, "State of the Art Report on the Fiber Reinforced Concrete", American Concrete Institute, MI, USA, 1996.

[۱۰]. فرادینه. علیرضا، مقدم. بهداد، "بررسی بتن مسلح به الیاف فولادی" یازدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران، دیماه ۱۳۸۳.

[۱۱]. صنعتی منفرد. سجاد، جاهد. حسین، "بتن الیافی و کاربرد آنها" دهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی عمران، دانشگاه امیر کبیر، تهران، ایران، ۱۳۸۲.

[12]. Wang. Q. S, Xi. Bing. L, Zhao. G. Y, Shao. P, Yao. J. R, "Experiment on Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete and Application in Deep Underground Engineering," Journal of China University of Mining & Thechnology, 18, 64-81, 2008.

[13]. Khaliq. W, Kodur. V, "Thermal and Mechanical Properties of Fiber Reinforced High Performance Self-Consolidating Concrete at Elevated Temperatures," Cement and Concrete Research, 41, 1112-1122, 2011.

[14]. Ding. Y, Kusterle. W, "Compressive Stress-Strain Relationship of Steel Fibre-Reinforced Concrete at Early Age," Cement and Concrete Research, 30, 1573-1579, 2000.

[15]. Pan. L. T, Carino. N. J, "Fire Performance of High Strength Concrete," Building and Fire Research Laboratory, ASCE/SEI Structures Congress, 1-9 , 2000.

[۱۶]. منصوری. علیرضا، بیگی. مرتضی، "خصوصیات بتن تازه و سخت شده سبک خودتراکم حاوی الیاف پلی پروپیلن و فولادی" اولین کنفرانس بین‌المللی تکنولوژی بتن، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ۱۳۷۸.

[17]. Ronning, T. F, "Freeze-Thaw Resistance of Concrete Effect of : Curing Conditions, Moisture Exchange and Materials", Thesis Submitted for the Degree of PHD, The Norwegian Institute of Technology, Division of Structural Engineering, Concrete Section, 2001.

[18]. EFNARC، Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, Published by EFNARC, February 2002.

Steel Fibres Effect on the Mechanical Properties and Thermal and Freezing Performance of Lightweight Self-Compact Concrete

M. Hejazi*
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan
M. Hashemi
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan
M. Batavani
M.Sc. in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan

(Received: 2014/6/2 - Accepted: 2015/3/3)

Abstract

In this paper, the effect of steel fibres on the mechanical properties and thermal and freezing performance of lightweight self-compacting concrete consisting of Leca and microsilica gel has been studied. For this reason, the effect of three different contents of steel fibres on rheological and mechanical properties, including compressive, tensile and flexural strengths, and on concrete performance against thermal loading and freezing has been investigated. At the first stage, ten mix designs have been made by changing the amount of water, microsilica gel, stone powder and Leca contents. Then, slump, J-ring, U-box, L-box and V-funnel tests have been done. After selecting the control mix, 7-, 28- and 90-day compressive and tensile strengths tests, 90-day flexural and thermal tests, and 28-day freezing and thawing test have been performed. Obtained results indicate that steel fibres have increased tensile and compressive strengths by 95% and 16%, respectively. They have improved thermal durability at high temperatures and have prevented the loss of compressive and tensile strengths by 13% and 92%, respectively. The existence of steel fibres has enhanced the behaviour of concrete in freezing and thawing cycles by decreasing the loss of compressive and flexural strengths by 8% and 15%, respectively.

Keywords: Lightweight self-compacting concrete, Steel fibres, Leca, Mechanical strengths, Freezing and thawing, Thermal test.

*Corresponding author**:**m.hejazi@eng.ui.ac.ir