

بررسی دوام و مقاومت بتن مسلح شده با الیاف مصنوعی تحت حرارت بالا

مسلم یوسفوند^۱، یاسر شریفی^۲، سعید یوسفوند^۳

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان
M.yousefvand.vru@gmail.com
- ۲- دانشیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان
Y.sharifi@gmail.com
- ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه دانشگاه ملایر
saeid.yousefvand@stu.malayuru.ac.ir

چکیده

در گذر سال‌های اخیر شاهد تحقیقات گسترده‌ای بر روی خواص بتن مسلح شده با الیاف تحت حرارت و آتش‌سوزی بوده‌ایم. بر اساس تحقیقات رفتار بتن الیافی تحت اثر حرارت کوره و حرارت ناشی از آتش‌سوزی، متفاوت است. در مواقع آتش‌سوزی با افزایش مقاومت فشاری [۱] و در زمانی که تحت اثر حرارت کوره قرار می‌گیرد، کاهش مقاومت فشاری را شاهد هستیم [۲]. در این پژوهش، خواص بتن الیافی تحت اثر حرارت کوره، همچون دوام (جذب آب موئینه و تست غیرمخرب آلتراسونیک) و نمودار تنش-کرنش بتن مسلح شده با الیاف مصنوعی در آزمون فشار را به چالش کشیده و نتایج آن بررسی شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان داد که بتن‌های مسلح شده با الیاف مصنوعی در زمانی که در کوره تحت حرارت بالا قرار می‌گیرند خاصیت ارتجاعی و مقاومتی خود را از دست می‌دهند و شاهد افزایش میزان جذب آب موئینه همچنین افزایش مدت زمان موج عبوری آلتراسونیک و کاهش مقاومت فشاری بتن مسلح شده با الیاف در مقایسه با نمونه شاهد هستیم.

کلمات کلیدی: بتن مسلح شده با الیاف، حرارت، جذب آب موئینه، مقاومت فشاری، آلتراسونیک

مقدمه

استفاده از الیاف به جهت تقویت مواد و مصالحی که در مقاومت کششی خود ضعف دارند به دوران باستان برمی‌گردد. در حدود ۳۵۰۰ سال پیشتر، برای ساخت نماد بلند Aqar Quf از آجرهای مسلح شده با الیاف طبیعی نی استفاده شده است [۳]. نخستین ماده آمیخته شده با سیمان کامپوزیت سیمان-پنبه کوهی بوده که در سال ۱۹۰۰ ساخته شد. امروزه از انواع الیاف‌های متنوع مصنوعی و طبیعی به جهت مسلح نمودن مصالح مختلف از جمله سرامیک، لاستیک، آپوکسی استفاده می‌شود. در این پژوهش بر روی خواص دوام و مقاومت فشاری الیاف‌های مصنوعی کورتا و دوجزئی با چسباننده سیمان هیدرولیکی در تولید بتن تحت حرارت می‌پردازیم. صرف نظر از ماهیت دقیق خمیر (چسب، ملات یا بتن) از اصطلاح FRC (مصالح سیمانی مسلح الیافی) استفاده شده است. الیاف‌ها

^۱ Fiber Reinforced Cementations Materials

به صورت طبیعی و مصنوعی وجود دارند از انواع الیاف‌های پر کاربرد در FRC می‌توان به فولاد، شیشه، کربن، الیاف‌های پلیمری و سلولزی اشاره کرد. الیاف‌های کورتا و دو جزئی در دسته الیاف‌های مصنوعی و ساختار پلیمری و دارای مدول بسیار بالایی در قیاس با سایر الیاف‌های مصنوعی می‌باشند. در حالت کلی الیاف مسلح کننده نمی‌تواند جایگزین میلگرد در قطعات سازه‌ای شود بلکه نقش متفاوتی را در بتن بازی می‌نماید. مهم‌ترین نقش الیاف کنترل ترک در FRC و تغییر رفتار بتن هنگامی که خمیر آن دچار ترک می‌شود است. الیاف در واقع مصالح را شکل پذیرتر کرده و قابلیت جذب انرژی را در مصالح بالاتر می‌برد که جهت اثبات این فرضیه می‌توان به ارزیابی نمودارهای منحنی تنش - کرنش پرداخت. برهم کنش میان الیاف و سیمان به صورت چسبندگی فیزیکی و شیمیایی، اصطکاکی، مهارمکانیکی ناشی از تغییر شکل در الیاف و یا تغییر شکل هندسه آن (الیاف‌های شکل دار و موج دار) می‌باشد [۴]. به نظر می‌رسد زمانی که بتن تحت اثر حرارت بالا قرار می‌گیرد در مولفه‌های فوق تغییرات قابل توجهی ایجاد شده و باعث تغییر در خواص مقاومتی و دوام FRC می‌شود. به نظر می‌رسد زمانی که تحت اثر حرارت های بالا در خصوصیات ناحیه انتقال میانی ITZ (سطح مشترک)، در FRC تغییرات قابل ملاحظه ای صورت می‌گیرد. همچنین ماتریس خمیر در نواحی مجاور الیاف بسیار مخدول شده و این موضوع می‌تواند بر بسیاری از خواص ریزساختاری تاثیر گذار باشد. ناحیه انتقال میانی، به فراوری و ماهیت خمیر بسیار حساس است [۵]. در صورتی که سطح مقطع الیاف به طور کافی کوچک باشد باعث یک پیوند مستحکم در خمیر هستیم. در محدوده الیاف‌هایی که قطر کوچک دارند (کمتر از ۱ میکرون)، سطح مقطع سیمان و الیاف بسیار شبیه به هم بوده و ذرات سیمان به خوبی فضای بین الیاف‌ها را پر کرده و در نتیجه آن یک ریزساختار متراکم بدون هیچ ناحیه انتقال می‌باشد [۶]. در پژوهش حاضر خواص دوام همچون جذب آب موئیه و سرعت امواج فراصوت (التراسونیک) که یک رابطه مستقیم با توپری و میزان تخلخل FRC دارند و همچنین مقاومت فشاری FRC تحت اثر حرارت ارزیابی شده‌است.

روش تحقیق

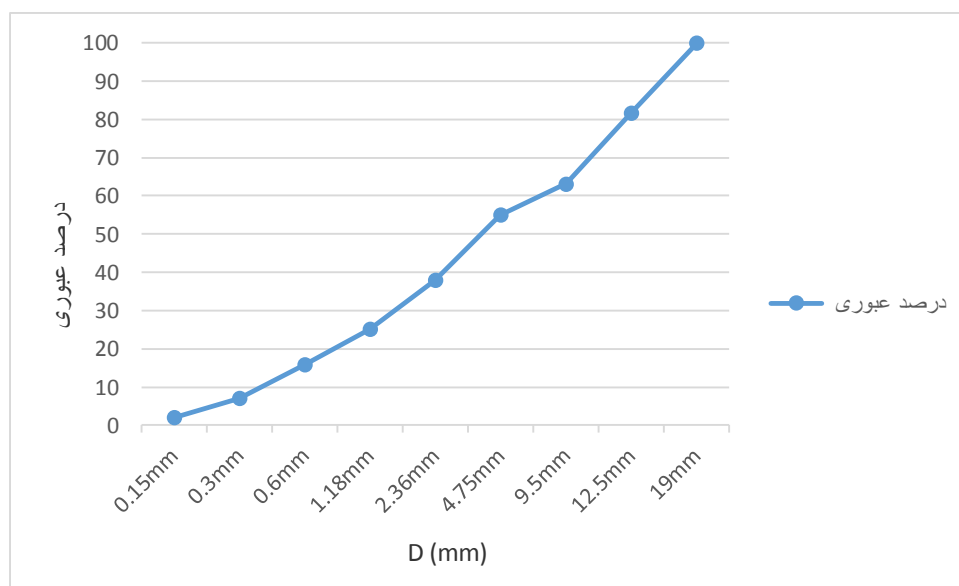
۱. مصالح

سنگدانه‌های مصرفی (شن و ماسه) در این پژوهش از مصالح بومی منطقه رفسنجان استان کرمان می‌باشند (شکل ۱)، (نمودار ۱)، دانه‌بندی کل مخلوط سنگدانه‌ها است. مقدار نرمی کل سنگدانه‌های مخلوط برابر ۵/۱۴ می‌باشد. سیمان مصرفی سیمان پرتلند تیپ ۲ کرمان است (جدول ۱). جهت رسیدن به اسلامپ مناسب از افزودنی فوق روان کننده کربوکسیلاتی استفاده شده‌است. الیاف‌های مصرفی شامل الیاف کورتا و الیاف دوجزئی هستند (شکل ۳-۲) و مشخصات

آن‌ها در (جدول ۳-۲) آورده شده است. الیاف به میزان ۱٪ وزنی سیمان استفاده شده است. برای تمامی آزمایش‌ها سه طرح اختلاط E (شاهد)، EK (کورتا ۱٪)، ED (دوجزئی ۱٪)، که مشخصات طرح‌های اختلاط بتن در این پژوهش در (جدول ۴) آمده است.



شکل ۱- تصویر مربوط به سنگدانه‌های مصرفی (شن و ماسه) با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر



نمودار ۱- دانه بندی سنگدانه‌ها (شن و ماسه)

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲ کرمان

Component	Loss on Ignition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl	Free CaO	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Result (%)	۱/۱۹	۲۱/۵۰	۴/۹۵	۳/۹۷	۶۳/۵۲	۱/۷۵	۲/۲۰	-	۱/۴	۵۰	۲۴	۶/۴	۱۲/۱



شکل ۳- الیاف کورتا



شکل ۲- الیاف دوجزئی

جدول ۳- مشخصات کلی الیاف کورتا

پلی پروپیلن - کوپلیمر اصلاح شده	مواد سازنده
رشته درهم تابیده شده	شکل
۴۵ میلیمتر	طول
۵۷۰-۹۰۰ مگاپاسکال	مقاومت کششی
۰/۹۱ - ۰/۹۴	وزن مخصوص
ندارد	جذب آب

جدول ۲- مشخصات کلی الیاف دو جزئی

پلی الفین اصلاحی شده نانویی	مواد سازنده
تارهای شبکه ای تابیده	شکل
۱۸ میلیمتر	طول
۵۰۰-۲۵۰۰ مگاپاسکال	مقاومت کششی
۰/۹۱ - ۲/۶	وزن مخصوص
ندارد	جذب آب

جدول ۴- طرح اختلاط

طرح اختلاط (Mix)	الیاف (درصد وزنی سیمان)	فوق روان کننده (درصد وزنی سیمان) (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	آب (kg/m ³)
E	-	۰/۶	۴۰۰	۸۵۰	۹۵۷	۱۹۵
ED	۱	۰/۶	۴۰۰	۸۵۰	۹۵۷	۱۹۵
EK	۱	۰/۶	۴۰۰	۸۵۰	۹۵۷	۱۹۵

۲. جذب آب موئینه در بتن سخت شده

هدف از انجام این آزمایش تعیین نرخ جذب آب بتن بر حسب زمان با استفاده از افزایش جرم نمونه است. فلسفه نهایی این آزمایش بررسی مسئله دوام بتن است. آزمایش‌های جذب آب شامل جذب آب حجمی بلند مدت ASTM C642 و جذب آب موئینه ASTM C1585 می‌باشند. این استاندارد نمونه مورد نظر برای آزمایش را قرص‌های بتنی با ابعاد 50×100 میلیمتر عنوان کرده است. سطح قرص‌های بتنی باید برش خورده شوند تا در معرض رطوبت قرار بگیرند. در غیر این صورت نمی‌توان از نمونه آماده با ابعاد بیان شده بطور مستقیم استفاده نمود. زیرا دوغاب تجمعی در سطح رویی و زیرین نمونه حین بتن‌ریزی باعث بروز خطا در نتایج آزمایش می‌شود.

روش و فرایند آزمایش

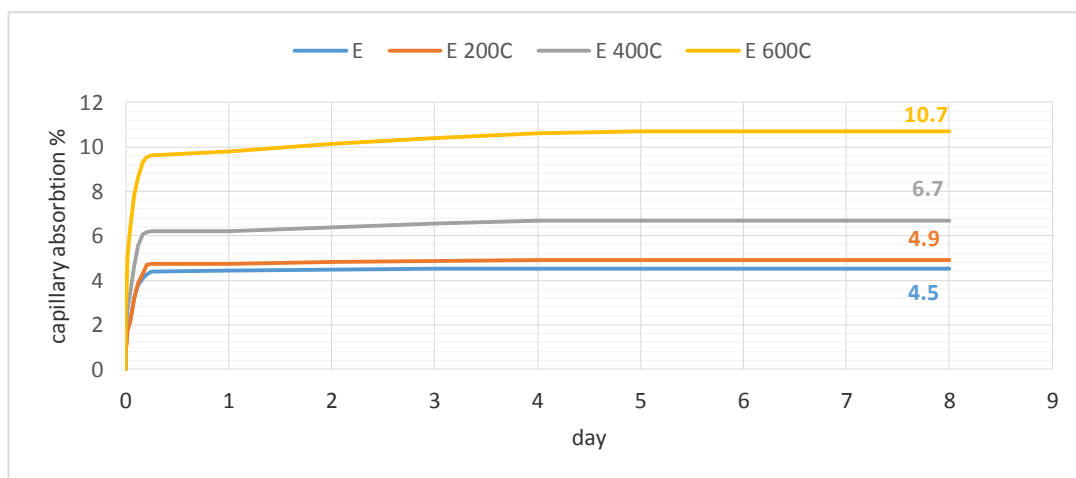
نمونه بتن تازه را مطابق ASTM C192 دستورالعمل ساخت و عمل‌آوری نمونه بتن در آزمایشگاه آماده و در قالب استوانه‌ای 20×10 سانتی متر ریخته شد و بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری نمونه استوانه‌ای، قرص‌های بتنی با ابعاد 50 در 100 میلی‌متر برش زده شدند. 50 میلی‌متر ارتفاع نمونه و 100 میلی‌متر قطر نمونه برش خورده می‌باشد. آن قسمت از سطح برش نخورده نباید برای آزمایش موئینه قرار بگیرد. برای هر آزمایش تعداد سه قرص بتنی کافی مورد نیاز می‌باشد. سطوح جانبی قرص بتنی (سطوح محیطی) را با پارافین گرم شده در کوره، آب‌بندی (شکل ۴) و وزن آن را یادداشت شد. سطحی از قرص بتنی که برش خورده است، درون وان آب قرار داده شد. ارتفاع آب از پای قرص در بهترین حالت 3 میلی‌متر است (شکل ۵). اکنون در بازه‌های زمانی 1 ، 5 ، 10 ، 20 ، 30 و 60 دقیقه و بعد از این هر یک ساعت تا 6 ساعت هر روز یک مرتبه تا 8 روز نمونه‌ها را از داخل سینی برداشته و وزن آنها یادداشت شدند. فرایند آزمایش بالا برای نمونه‌های شاهد است و جهت مقایسه جذب آب موئینه نمونه‌ها در دماهای 200 ، 400 و 600 درجه سانتی گراد محاسبه و طبق نمودار (۲-۴) قابل مشاهده است.



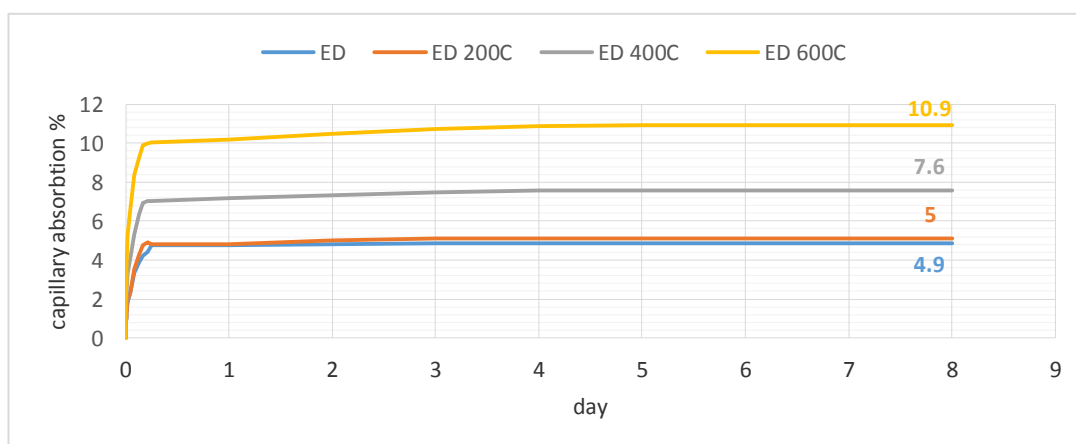
شکل ۵- طریقه قرار گیری قرص بتنی در آب



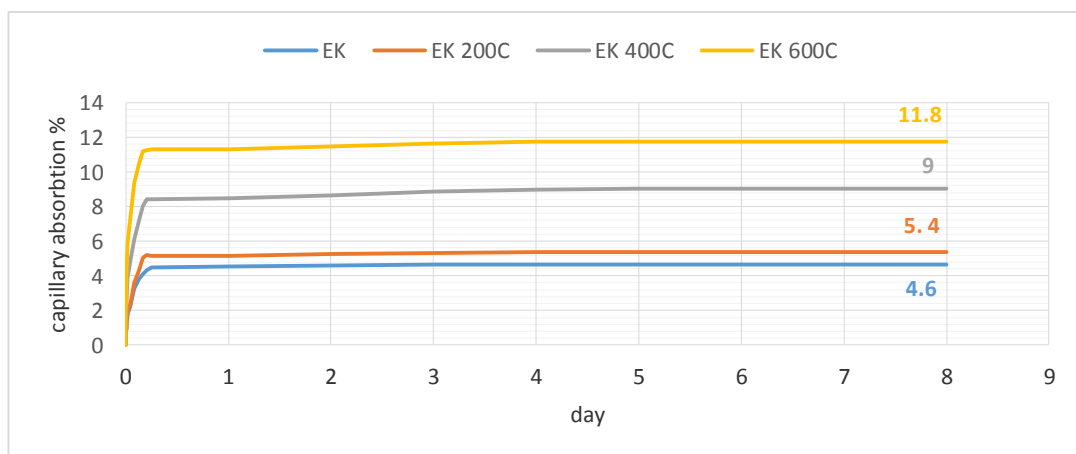
شکل ۴- آب‌بندی قرص بتنی
توسط پارافین



نمودار ۲- درصد جذب آب مویینه - روز، بتن بدون الیاف در دماهای مختلف



نمودار ۳- درصد جذب آب مویینه - روز، بتن حاوی الیاف دوجزئی در دماهای مختلف



نمودار ۴- درصد جذب آب مویینه - روز، بتن حاوی الیاف کورتا در دماهای مختلف

۳. آلتراسونیک

به منظور آشکارسازی عیوب، فضای خالی، ترک‌ها، درون سازه‌های بتنی این روش آزمایش، اطلاعاتی را در مورد هموزیستی بتن به اپراتور می‌دهد. به وسیله دستگاه، پالس‌های التراسونیک به بتن منتقل و زمان موج عبوری از بتن تعیین و در نتیجه سرعت موج عبوری از نمونه بتنی قابل محاسبه است (رابطه ۱). از دیگر کاربردهای پالس عبوری التراسونیک تعیین مدول الاستیسیته دینامیکی بتن، تخمین مقاومت فشاری، محاسبه عمق ترک در بتن است.

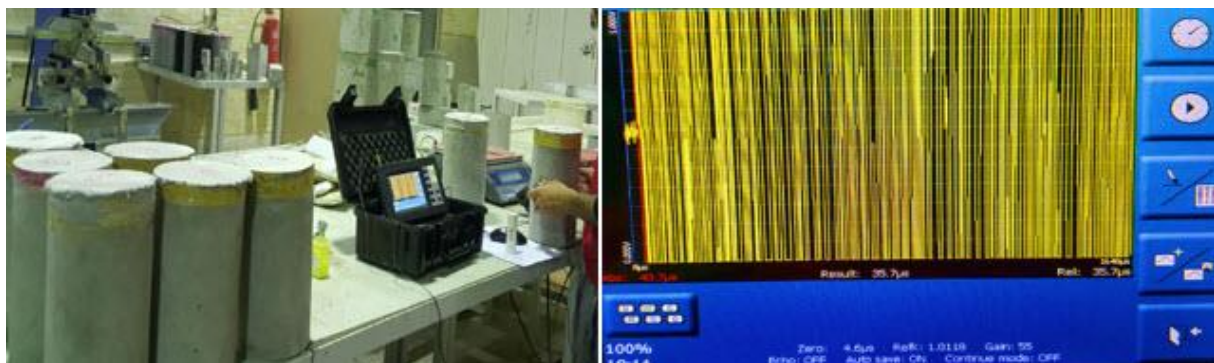
$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

V سرعت موج التراسونیک (m/s)، T مدت زمان عبور موج از نمونه (s)، L طول نمونه (m)

روش و فرآیند انجام آزمایش

برای انجام آزمایش لازم است که دستور العمل‌های توضیح داده شده و همچنین نکات مخصوص تست التراسونیک بر اساس یکی از استانداردهای UNE83308/EN12504-4/BS1881-203/ASTM C597/UN19527/NFP18-418 انجام گیرد.

در گام نخست نمونه‌های بتنی استوانه‌ای 150×300 سانتی‌متر برای طرح‌های اختلاط مورد نظر، طبق ASTM C192 ساخته و به مدت ۲۸ روز در آب با دمای ۲۶ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. سپس برای هر کدام از دماهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نمونه‌ها پس از پوشش دادن ترک‌ها در محل پراب دستگاه توسط روغن وازلین، به صورت مجزا توسط دستگاه MATEST C386N آزمایش شدند (شکل ۶). نتایج مربوط به سرعت موج عبوری در (جدول ۵) آورده شده‌است.



شکل ۶ - روند انجام تست التراسونیک

۴. مقاومت فشاری

با توجه به اینکه مقاومت بتن ساخته شده را نمی‌توان با توجه به ویژگی اساسی و ذاتی مصالح تعیین نمود، می‌بایست به تعیین مقاومت فشاری با این روش آزمایش اهمیت خاصی داد. این آزمایش چگونگی تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای بتن همانند قالب‌های استوانه‌ای و مغزه گرفته شده را بیان می‌کند. این روش برای بتن‌هایی با وزن مخصوص بیشتر از ۸۰۰ کیلوگرم بر سانتی مترمکعب به کار می‌رود. مقادیر مقاومتی بدست آمده به اندازه و شکل نمونه، پیمان‌کردن، روش مخلوط نمودن، روش‌های نمونه‌گیری، قالب‌گیری و نحوه‌ی ساخت بتن، سن، دما و حالت رطوبتی حین عمل‌آوری، بستگی دارد. روش آزمایش مطابق با ASTM C39/C39M-03 می‌باشد. این روش آزمایش برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای که مطابق با روش‌های C42/C42M، C1231/C1231M، C617، C192/C192M، C31/C31M، C873 و آماده و عمل‌آوری شده اند مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج این آزمون به عنوان مبنای کنترل کیفیت بتن، نحوه‌ی مخلوط نمودن و ریختن بتن، تعیین مشخصات مطلوب، کنترل و ارزیابی مواد افزودنی و دیگر موارد مشابه روی بتن، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روش و فرآیند انجام آزمایش

پس از ساخت و قالب گیری نمونه ها مطابق استاندارد های اشاره شده، برای طرح اختلاط های مورد نظر، نمونه ها به مدت ۲۸ روز در آب با دمای ۲۶ درجه سانتی گراد عمل آوری شدند؛ البته در این مدت دو سطح نمونه ها با استفاده از استاندارد ASTM C617 به وسیله ملات ماسه و سیمان کیپنگ شدند. سپس نمونه ها جهت انجام تست در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ درجه سانتی گراد در کوره قرار داده شدند. برای هر طرح اختلاط حداقل دو نمونه تهیه و توسط جک بتن شکن MATEST، با سرعت بارگذاری ۰/۲۴۱ mpa/sec بارگذاری شدند (شکل ۷) و نتایج آزمایش در (جدول ۵) آمده است.



شکل ۷ - تست مقاومت فشاری

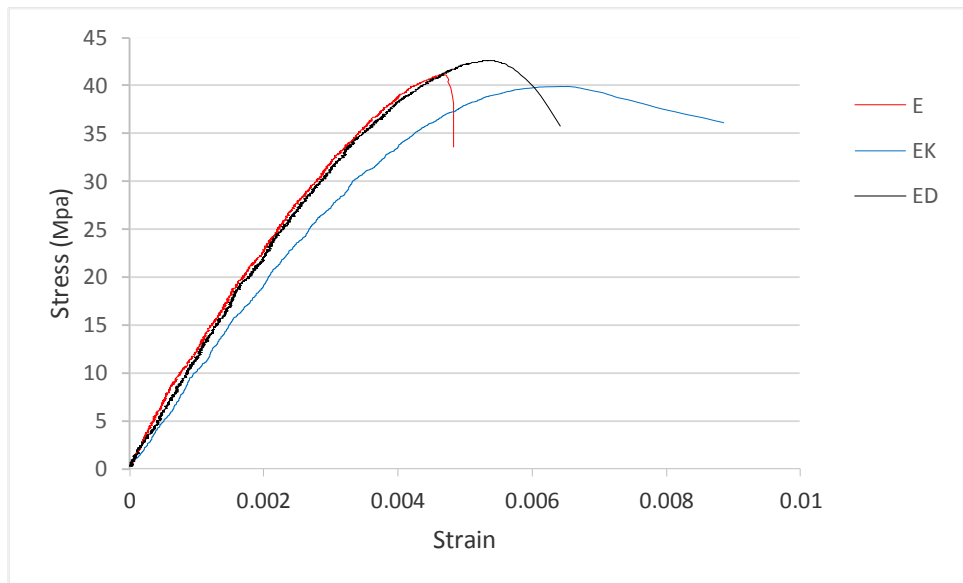
جدول ۵- نتایج مربوط به بتن سخت شده و بتن تازه

طرح اختلاط (Mix)	اسلامپ (mm)	سرعت عبور موج التراسونیک (m/s)				مقاومت فشاری (Mpa)			
		۰c	۲۰۰c	۴۰۰c	۶۰۰c	۰c	۲۰۰c	۴۰۰c	۶۰۰c
E	۱۳۰	۴۲۴۹	۴۰۰۰	۳۷۸۸	۲۲۲۲	۴۱/۱۴	۳۵/۹	۳۲	۲۴/۶
ED	۷۰	۴۳۹۸	۴۱۱۰	۳۶۴۱	۲۵۹۰	۴۲/۶	۳۰/۹	۲۷/۸	۱۷/۸
EK	۷۵	۴۳۱۰	۴۰۶۵	۳۴۴۰	۲۱۴۶	۳۹/۹	۳۲/۲	۲۸/۷	۱۸/۷

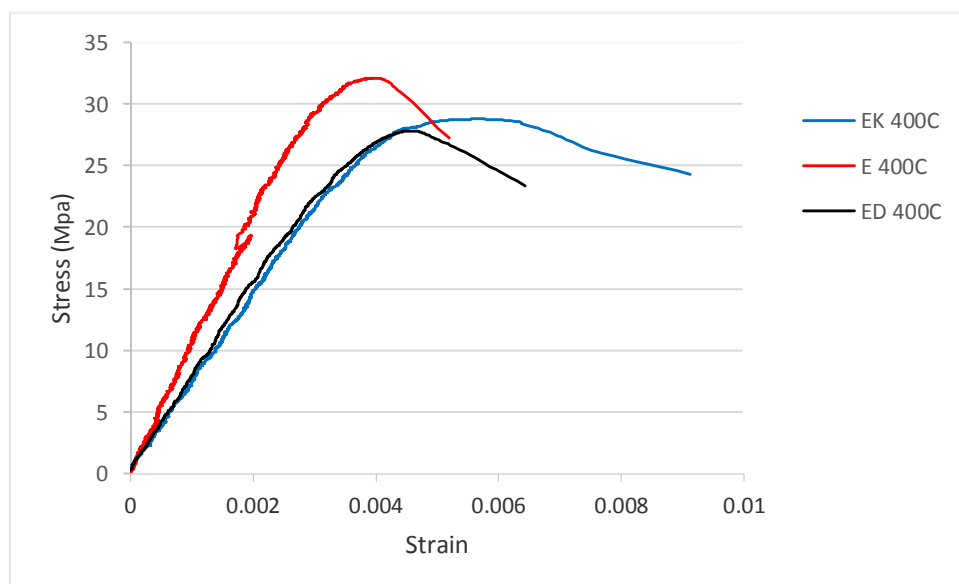
جمع بندی، بحث و نتیجه گیری

از روش استاندارد طرح اختلاط ملی بتن ایران برای طرح اختلاط در این پژوهش استفاده شده است. در این پژوهش نتایج آزمایش های دوام تا حدود بسیار زیادی صحت نتایج آزمون مقاومت فشاری را تایید می کند. به خوبی می توان دید که با افزودن میزان بهینه الیاف به بتن میزان جذب آب مویینه در نمونه های شاهد افزایش چشمگیری نداشته اما در نمونه های تحت اثر حرارت بالا تغییرات بالقوه ای صورت گرفته است (نمودار ۴-۲). تاثیر الیاف کورتا بر این کمیت بیشتر از الیاف دوجزئی است که به وضوح قابل مشاهده است. با افزایش میزان درجه حرارت یعنی با تغییر دما از ۲۰۰ به ۴۰۰ درجه سانتی گراد، افزایش چشمگیری در میزان جذب آب مویینه را شاهد هستیم. با توجه به مدل های تنش-کرنش (نمودارهای ۵-۶) به خوبی مشاهده می شود که میزان جذب انرژی و شکل پذیری بتن مسلح شده با الیاف افزایش یافته است. تاثیر الیاف بر روی نمودار تنش-کرنش بیشتر مربوط میزان جذب انرژی است و بر مقدار حداکثر مقاومت فشاری تاثیر چندانی ندارد. تحقیقات انجام گرفته نشان می دهند که وجود الیاف مقاومت فشاری بتن را تحت تاثیر قرار نمی دهد، اما به دلیل نقش الیاف در دوختن

ترک ها، از گسیختگی ترد و خرد شدن نمونه جلوگیری می کند. در واقع گسیختگی بتن الیافی در این حالت با شکل پذیری همراه بوده و نمونه یکپارچگی خود را تا حدود زیادی حفظ می کند. [۷].



نمودار ۵- تنش - کرنش بتن طرح شاهد



نمودار ۶- تنش - کرنش بتن در دمای ۴۰۰C

منافذ موئینه فضاهایی هستند که توسط قسمت جامد خمیر سیمان پر نمی شوند. حجم کل مخلوط آب و سیمان اساساً در طول مراحل هیدراتاسیون تغییر نمی کند. فضایی که توسط سیمان یا محصولات هیدراتاسیون پر نمی شود، فضاهای موئینه بوده و حجم و اندازه این حفرات توسط فاصله اصلی بین ذرات سیمان هیدراته نشده در خمیر سیمان تازه مخلوط شده (نسبت آب به سیمان) و درجه هیدراتاسیون معین می شود. در یک خمیر سیمان کاملاً هیدراته شده با نسبت کم آب به سیمان، فضاهای موئینه ممکن است بین ۱۰ تا ۵۰ نانومتر تغییر کنند. در خمیر با نسبت آب به سیمان بالا در اوایل هیدراتاسیون فضاهای موئینه ممکن است به بزرگی ۳ تا ۵ میکرون برسد. حفرات بزرگتر از ۵۰ نانومتر در مقاومت و نفوذپذیری تأثیر زیادی دارند در حالی که حفرات کمتر از ۵۰ نانومتر یعنی ریز حفرات خمیر سیمان بیشتر در جمع شدگی ناشی از خشک شدن و خزش تأثیر دارند [۸]. بر اساس مطلب اخیر در می یابیم که نفوذپذیری بتن با پدیده جذب آب موئینه با هم دیگر متفاوت هستند. نفوذپذیری بتن علاوه بر شبکه مرتبط منافذ در خمیر سیمان به ترک خوردگی بتن نیز بستگی دارد [۹]. تحقیقات انجام شده بر روی نفوذ یون کلر در بتن های توانمند حاوی الیاف فولادی و پروپیلن و شیشه ای در درصد های حجمی مختلف نشان می دهد که افزودن الیاف نفوذپذیری یون کلر را کاهش داده است و با افزایش درصد الیاف نفوذپذیری نیز کمتر می شود [۱۰]. در بحث نفوذپذیری یون کلر ترک های با عرض بیشتر از ۰/۲ میلی متر مورد توجه قرار می گیرند [۱۱]. در واقع مقیاس فضای موئینه (میکرون)، در برابر نفوذپذیری (میلی متر) بسیار کوچک است. طبق نتایج حاصل از پژوهش در می یابیم که فضای موئینه با افزودن الیاف مصنوعی به بتن افزایش می یابد؛ و این پدیده زمانی که بتن تحت اثر حرارت های بالا در کوره قرار می گیرد تشدید پیدا می کند. همانگونه که بیان شد با افزودن الیاف به بتن نفوذپذیری بتن کاهش اما جذب آب موئینه آن افزایش می یابد. افزودن الیاف پیوستگی منافذ و ارتباط کانال های جریان را در بتن از بین می برد [۱۲].

استفاده از الیاف در بتن مزایای زیادی دارد و پیشنهاد می شود که همواره بتن با الیاف مسلح شود تا یکپارچگی و تا حدود بسیار زیادی شکل پذیری آن در هنگام گسیختگی افزایش یابد.

مراجع

- [1] Lau, A., and M. Anson. "Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete." *Cement and Concrete Research* 36.9 (2006): 1698-1707.
- [2] Horiguchi, T., T. Sugawara, and N. Saeki. "57. Fire resistance of hybrid fiber reinforced high strength concrete." 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes. RILEM Publications SARL, 2004.
- [3] Serrano, Rubén, et al. "Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers." *Construction and building materials* 122 (2016): 302-309
- [4] Swamy, R. N. "Prospects of fibre reinforcement in structural applications." *Materials Research Society Symposium on Advances in Cement-Matrix Composites*. 1980.
- [5] Igarashi, S., A. Bentur, and S. Mindess. "The effect of processing on the bond and interfaces in steel fiber reinforced cement composites." *Cement and Concrete Composites* 18.5(1996): 313-322.
- [۶] علی معصومی، اویس افولی نئیز، بتن های مسلح الیافی، انتشارات حامیان، ۱۳۹۶
- [7] Katz, Amnon, and Arnon Bentur. "Mechanisms and processes leading to changes in time in the properties of CFRC." *Advanced Cement Based Materials* 3.1 (1996): 1-13.
- [۸] علی اکبر رمضانپور، پرویز قدوسی، اسماعیل گنجیان، ریزساختار، خواص، و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۱.
- [۹] محمد شکرچی زاده، تارا رحمانی، راهنمای کاربردی حاوی الیاف فولادی، نشر علم و ادب، ۱۳۹۳.
- [10] Ghorpade, Vaishali G., and H. Sudarsana Rao. "Strength and permeability characteristics of Fibre reinforced recycled aggregate concrete with different fibres." *Nat. Environ. Pollut. Technol* 9 (2010): ۱۷۹-۱۸۸.
- [11] Hoseini, Meghdad, Vivek Bindiganavile, and Nemkumar Banthia. "The effect of mechanical stress on permeability of concrete: a review." *Cement and Concrete Composites* 31.4 (2009): 213-220.
- [12] Singh, A. P., and Dharendra Singhal. "Permeability of steel fibre reinforced concrete influence of fibre parameters." *Procedia Engineering* 14 (2011): 2823-2829.

آیین نامه های مورد استفاده:

ASTM C642-06 "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete".
 ASTM C192/C192M "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory".
 ASTM C597-02 "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete".
 ASTM C39/C39M-05 "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens".
 ASTM C617-98 (Reapproved 2003) "Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens".
 ASTM C31/C31M-08b "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field".