



## ارزیابی عملکردی و کیفی پارامترهای مقاومتی بتن پرمقاومت و خود تراکم

حامد ترابی خداهشهری<sup>۱\*</sup>، مسعود نوروزی نژاد<sup>۲</sup>،  
سیدجلال‌الدین اعلمی<sup>۳</sup>

### چکیده

بتن یکی از مهم‌ترین، پرمصرف‌ترین و کاربردی‌ترین مصالح در صنعت ساخت‌وساز می‌باشد. امروزه با توجه به پیشرفت علم و توسعه آن در جهت‌های مختلف استفاده از نانو مواد و الیاف پلیمری در مخلوط‌های بتنی کاربرد به سزایی داشته‌اند. با توجه به اهمیت شاخصه مقاومتی به خصوص مقاومت فشاری در بتن و جلوگیری از وجود خرابی‌های کوتاه مدت و هزینه بالای نگهداری امروزه استفاده از بتن‌های ویژه‌ای همچون بتن پرمقاومت و خودتراکم به دلیل داشتن شاخصه مقاومتی و عدم نیاز به تراکم در پروژه‌های عمرانی معمولی و دارای اهمیت بسیار کاربردی می‌باشد. در این تحقیق با توجه به ارزیابی آزمایشگاهی این دو مخلوط بتنی در آزمایش‌های مقاومت فشاری، خمشی، کششی و دوام و استفاده از نانو موادی با درصد‌های مختلف وزنی همچون نانو سیلیس، نانو آهک و نانو آلومینا و استفاده از مسلح‌کننده پلیمری الیافی شاهد رشد مقاومت در مخلوط‌های بتنی پرمقاومت و خودتراکم خواهیم بود.

واژگان کلیدی: پارامترهای مقاومتی، بتن پرمقاومت، بتن خود تراکم.

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران در گرایش ژئوتکنیک (مسئول مکاتبات) ([Torabi.hamed@gmail.com](mailto:Torabi.hamed@gmail.com))

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران در گرایش سازه

۳- کارشناس ارشد عمران در گرایش ژئوتکنیک

در سال‌های اخیر، کاربرد پوزولان‌ها و مواد افزودنی مرغوب، نقش عمده‌ای در تولید بتن‌های توانمند داشته است. بتن توانمند، بتنی است که حداقل یک خاصیت غیرمعمول را نسبت به بتن معمولی دارا باشد. این بتن‌ها علاوه بر داشتن مقاومت زیاد، می‌توانند عملکرد بسیار خوبی در محیط‌های خورنده داشته باشند و دوام بالایی را نشان دهند. کاربرد پوزولان‌های خاص به همراه فوق روان‌کننده‌ها می‌توانند ضمن تولید بتن‌های با مقاومت بیش از ۵۰ مگاپاسکال دوام قابل ملاحظه‌ای نیز ایجاد نمایند. تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای در بتن‌های الیافی با بتن‌های معمولی مشاهده شده است (۱).

در اوایل دهه‌ی ۸۰ میلادی، ایده‌ی استفاده از دانه‌بندی بسیار ریز جهت تکمیل دانه‌بندی مصرفی در ساخت بتن پیشنهاد شد. این ایده از آنجا ظهور پیدا کرد که تحقیقات پژوهشگران نشان داد، ضعیف‌ترین بخش بتن در ناحیه پیوستگی بین ملات و سنگ دانه‌های درشت ایجاد می‌شود. با کم شدن سنگدانه‌های درشت و استفاده از سنگدانه ریز به عنوان فیلر یا پرکننده جهت ایجاد چفت و بست و کاهش تخلخل در ملات، این ناحیه ضعیف حذف می‌شود و ریز ترک‌های ناحیه‌ی انتقال که باعث گسیختگی نهایی بتن می‌شود، محدود خواهند شد. این بتن با نام بتن با عملکرد بسیار بالا (UHPC) معرفی شده است. این بتن تقریباً غیر قابل نفوذ است و همین امر باعث می‌شود تا بسیاری از ضعف‌های بتن معمولی مانند ضعف در برابر سیکل‌های یخ‌بندان، خوردگی آرماتور و حمله‌ی یون‌های کلر را نداشته باشد. همچنین ضعف عمده‌ی بتن یعنی مقاومت کششی پایین را تا حد زیادی مرتفع کرده است (۲). گرایبال و داویس اثر اندازه الیاف بر استحکام فشاری بتن توانمند را مورد بررسی قرار دادند و پیشنهاد نمودند که الیاف پلیمری به طول ۷ میلیمتری در بتن آزمایش شده مناسب نیست. علاوه بر این، افزایش متوسط ۴۰ درصدی در مقاومت فشاری در نگهداری گرمایی ۹۰ درجه سانتی‌گراد (۱۹۴ درجه فارنهایت) در مقایسه با نمونه‌های کنترل نشده مشاهده شد (۳).

Empelmann و همکاران در سال (۲۰۰۸) برتری اصلی بتن‌های پر مقاومت، بهبود در دوام سازه‌های بتنی است. بتن با عملکرد بسیار بالا باعث برتری سازه در برابر عوامل مخرب می‌شود و برای اجرای سازه‌هایی با طول عمر زیاد دارای اهمیت است. با توسعه‌ی بتن با عملکرد بسیار بالا، کاربردهای کاملاً نوینی در ساخت‌وسازهای صنعت بتن بدست آمد. با این وجود به دلیل رفتار ترد مصالح UHPC در مقاومت نهایی فشاری و کششی و افت قابل توجه ظرفیت تحمل بار بعد از بار حداکثر، افزودن الیاف مختلف از جمله الیاف فولادی که منجر به تولید بتن با الیاف تقویت شده و عملکرد فوق العاده بالا می‌شود جهت بهبود رفتار پس از شکست توصیه شده است (۴).

ACI<sup>۱</sup> انواع مختلف الیاف جهت استفاده در بتن پر مقاومت (توانمند یا فوق توانمند) را به چهار گروه تقسیم بندی نموده است که شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. فولادی
۲. شیشه‌ای
۳. مصنوعی
۴. طبیعی

که به جهت استفاده کاربردی در پروژه‌های عمرانی و آزمایشگاهی (پروژه‌های علمی) موجود می‌باشد (۵). Oulemonde and Resplendino در سال ۲۰۱۲ به بررسی استفاده از الیاف فولادی بصورت جایگزین میلگردهای مصرفی مورد مطالعه قرار دادند که برای بهبود در شکنندگی ناگهانی بتن استفاده می‌شود. در این تحقیق مقاومت فشاری این نوع از بتن بیش از ۱۵۰MPa و مقاومت کششی آن بیش از 7 MPa می‌باشد. طرح اختلاط UHPFRC<sup>۲</sup>، حاوی مقدار زیادی نانو چسباننده می‌باشد که باعث شده است هیچگونه تخلخل و موبینگی در این بتن وجود نداشته باشد (۶).

Ghafari و همکاران در سال (۲۰۱۴) بتن فوق توانمند الیافی را یک ماده‌ی ترکیبی جدید نامیدند و با اشاره به شاخصه‌هایی همچون مقدار پیوستگی بالا، نسبت آب به مواد کم و مقدار مصرفی الیاف در ساخت این نوع از بتن نتایجی همچون ایجاد ظرفیت جذب انرژی و خواص عملکردی و مکانیکی بسیار بالایی را اشاره کردند (۷).

Spiesz and Brouwers در سال (۲۰۱۵) به بررسی و مطالعات زیست محیطی در خصوص استفاده از بتن‌های فوق توانمند پرداختند. در این تحقیق رایج‌ترین اقدامات جهت کاهش معایب اقتصادی و زیست محیطی UHPFRC<sup>۲</sup>ها، عمدتاً محدود به گنجانیدن محصولات صنعتی و یا گاهی اوقات مواد زائد، بدون به خطر انداختن خواص مکانیکی و عملکردی این نوع از بتن‌ها بوده است. استفاده از تفالهی سرباره ی ذوب آهن (GGBS)، خاکستر بادی (FA)، میکروسیلیس (SF) به عنوان جایگزین کلینکر در تولید UHPFRC<sup>۲</sup> استفاده شده است. علاوه بر این، برخی از زباله و یا بازیافت موادی مثل خاکستر پوسته برنج، بازیافت خرده شیشه، خاکستر سوخته نخل، زباله سرامیک و خاکستر زباله نیز برای تولید این مخلوط‌ها استفاده شده است (۸).

1. American Concrete Institute

2. Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete

Walraven در سال (۲۰۰۹) به بررسی تاثیر ییاف بر مقاومت فشاری به جز در تغییر مود خرابی از ترد به شکل پذیر نداشته است. افزودن ییاف باعث افزایش شکل پذیری شده که به جذب انرژی در هنگام ترک خوردگی مرتبط دانسته شده است. نمونه-های حاوی ییاف طولی تر، کرنش سختی بیشتری در مقایسه با نمونه‌ها با ییاف کوتاه‌تر از خود نشان داده‌اند (۹). Nilli و همکاران در سال (۲۰۱۰) با توجه به مطالعه Qing و همکاران در سال (۲۰۰۷) به بررسی استفاده از دوده سیلیس، نانو سیلیس و استفاده توام با ییاف پرداختند و نتیجه‌ی حاصله این چنین حاصل شد که به هنگام بارگذاری بتن، ریزترک‌های اولیه و کوتاه در بتن توزیع می‌شوند. با یکی شدن این ریزترک‌ها، ترک‌های بزرگ و قابل رویت شکل می‌گیرند. ییاف به کار رفته در مخلوط‌های سیمانی می‌توانند با پل زدن و بستن ترک‌ها در خلال بارگذاری و باربرداری، رشد ترک‌ها را کنترل نمایند. ییاف 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. می‌توان با ترکیب انواع مختلف ییاف با درصد‌های حجمی متفاوت به ترکیب بهینه-ای، برای مشخصات مکانیکی بهبود یافته، رسید تنش در بتن مسلح ییافی (هیبرید) به خوبی می‌تواند توزیع شده و خواص مکانیکی را بهبود ببخشد. دوده‌ی سیلیسی نیز به عنوان یک مصالح پوزولانی، با بهبود پیوستگی سنگدانه با خمیر سیمان منجر به افزایش مقاومت فشاری در سنین بالای بتن می‌شود. با این وجود تردی بتن را افزایش می‌دهد. بررسی‌ها نشانگر مزیت استفاده‌ی هم‌زمان از دوده‌ی سیلیسی و ییاف در مخلوط‌های بتن می‌باشد که منجر به افزایش موثر در مقاومت خمشی بتن می‌گردد. این امر می‌تواند در اثر افزایش مقاومت ناحیه‌ی انتقالی بتن توسط دوده‌ی سیلیسی و ممانعت از رشد ترک‌ها توسط ییاف فولادی باشد. نانو ذراتی مانند نانو سیلیس دارای انرژی سطحی و واکنش پذیری بالا می‌باشند که منجر به فعالیت پوزولانی بیشتر در سنین اولیه نسبت به دوده‌ی سیلیسی می‌شوند. کاربرد نانو سیلیس نشانگر افزایش مقاومت فشاری، بویژه در سنین اولیه است. همچنین افزایش مقاومت پیوستگی ناحیه‌ی انتقالی سنگدانه و خمیر سیمان با استفاده از نانو سیلیس بسیار موثرتر از دوده‌ی سیلیسی است. هدف از استفاده و توسعه‌ی UHPFRC دستیابی به مقاومت کششی شکل پذیر بالا است که ییاف‌های فولادی این نقش را بر عهده دارند که بعد از ایجاد ترک در این بتن، مقاومت کششی شکل پذیر خوبی را فراهم می‌آورند و این مشخصه بتن UHPFRC است که آن را از دیگر بتن‌ها ممتازتر ساخته است (۱۰).

نظریه بتن خودتراکم تحت عنوان بتنی که خودش متراکم می‌شود و احتیاج به تراکم توسط ویراتور نداشته باشد به عنوان راه حلی برای رفع مشکل دوام سازه‌های بتنی توسط آقای اکامورا در سال ۱۹۸۶ مطرح گردید. مطابق با تعریف او کامورا: خاصیت ویژه خودتراکمی این نوع بتن به مشخصات مصالح و نسبت اختلاط وابسته می‌باشد. او کامورا در تحقیقات خود در سال ۱۹۸۶ با ثابت نگه داشتن مقدار سنگدانه‌های درشت و سنگدانه‌های ریز و با تنظیم نسبت آب به سیمان ( $\frac{w}{c}$ ) و با افزودن مقداری فوق روان‌ساز، توانست به خاصیت خودتراکمی بتن دست یابد. به جهت تکمیل مطالعه‌ی آقای اکامورا نیز تحقیقات در مورد این نوع بتن بیشتر در بحث کارایی و عملکرد می‌باشد که توسط آقای ادوارد و میکلو در دانشگاه توکیو انجام گرفت.

در تحقیق Narendra and Muthu در سال ۲۰۰۸، در برنامه‌ریزی برای شروع مطالعات آزمایشگاهی به‌طور گسترده از روش تاگوچی استفاده شده است که با تعیین ترکیب بهینه‌ی بتن خودتراکم با در نظر گرفتن ۷ عامل تاثیر گذار (سنگدانه‌های درشت، سنگدانه‌های ریز، سیمان، خاکستر بادی، آب، فوق روان‌کننده و مواد آب‌بند) در ۲ سطح مختلف از روش تاگوچی و آرایه‌ی متعامد L<sub>8</sub> استفاده شده است (۱۱). در پژوهشی دیگر توسط Tanyildizi در سال ۲۰۱۴، خصوصیات ترک و مقاومت فشاری بتن سبک سازه‌ای در برابر حرارت‌های بالا با استفاده از آرایه‌های متعامد L<sub>18</sub> و روش تاگوچی مورد ارزیابی قرار گرفته و درصد خاکستر بادی، درجه حرارت و میزان سیمان به عنوان عوامل تاثیر گذار انتخاب شده است (۱۲). در تحقیقات Hasn در سال (۲۰۱۱) (۱۳)، Jozsa و همکاران در سال (۲۰۱۰) (۱۴)، RAY Fernando در سال (۲۰۰۹) (۱۵) و روتزلرو و همکاران در سال (۲۰۰۶) (۱۶)، در مقایسه با ییاف فولادی، ییاف مصنوعی در مقدار حجم پایین تری، بین ۰/۱٪ تا ۰/۵٪، استفاده می‌شود که سبب کنترل ترک خوردگی و انقباض پلاستیک می‌شود، اما مقاومت را افزایش نمی‌دهد.

در تحقیق Zhong and Yao بیان شده که با ورود ییاف به بتن دو نوع وضعیت اصلی اتفاق خواهد افتاد:

۱. ترک خوردگی موازی با ییاف

۲. ترک خوردگی عمود بر ییاف

که در صورت عبور ییاف عمود بر لبه‌های ترک با پل زدن ییاف بین ترک‌ها، یکپارچگی بتن با تغییر شکل‌های زیاد حفظ شده و مقاومت کششی و خمشی به دلیل ضعف دوزندگی ییاف بالا می‌رود. استفاده از آرماتورها در مقایسه با ییاف از دیدگاه میکروسکوپی موثر واقع شده و حتی در صورت وقوع ترک با پدیده خوردگی مواجه خواهیم شد و بتن کاملاً از بین می‌رود در صورتی که با توزیع اتفاقی ییاف در فواصل بسیار کوچک‌تر از فاصله بین آرماتورها اندازه ترک‌ها کوچک‌تر شده و باعث کاهش نفوذپذیری و پایداری بتن در محیط‌های مهاجم می‌شود. در حالت کلی توزیع اتفاقی ییاف در فواصل کوچک‌تر از فاصله بین آرماتورها باعث پخش و کوچک‌تر شدن اندازه ترک‌ها شده و پس از ترک خوردن مقاومت کششی و خمشی به دلیل خاصیت دوزندگی ییاف بالا رفته و یکپارچگی بتن با تغییر شکل‌های زیاد حفظ می‌شود (۱۷).

پژوهش‌های سانچز و سابالو در سال (۲۰۱۰) نشان می‌دهد که بتن از یک فاز بی شکل، کریستال‌هایی به اندازه‌ی نانومتر تا میکرومتر و آب، تشکیل می‌شود. ویژگی‌های بتن و مکانیزم‌های تخریب در میان مقیاس‌های چندگانه‌ی طولی از نانو تا میکرو و تا ماکرو اتفاق می‌افتد (۱۸). همچنین بررسی‌های گودیر در سال (۲۰۰۳) نشان داده که در بتن حاوی نانو سیلیس، نانو ذرات، منفذهای نانو اندازه‌ی خمیر سیمان را پر می‌کند و نانو سیلیس nano-SiO<sub>2</sub> با هیدروکسید کلسیم Ca(OH)<sub>2</sub> واکنش پوزولانی می‌دهد و C-S-H اضافی تولید می‌کند که هر دو فرآیند، از اندازه‌ی ذره و پراگندگی مناسب نانوذرات در خمیر سیمان متأثر هستند (۱۹).

در پژوهشی که توسط آقای E I-Dieb و همکارانش در سال (۲۰۰۵) انجام پذیرفت ایشان به مطالعه اثر الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلین به‌طور جداگانه بر روی خواص بتن تازه خودتراکم پرداختند. یکی از مهمترین ویژگی‌های بتن خودتراکم، کارایی بالای این نوع بتن می‌باشد که الیاف می‌تواند تا حدود زیادی از این کارایی بکاهد. در نتیجه رسیدن به یک حجم بهینه از اهداف این مطالعه می‌باشد. آنها الیاف را در درصدهای مختلف به طرح شاهد اضافه نمودند. از الیاف پلی پروپیلین در این مطالعه به میزان ۶۰۰، ۹۰۰، ۱۲۰۰، ۱۵۰۰ و ۱۸۰۰ گرم بر سانتی متر مکعب استفاده شده و حجم الیاف فولادی نیز برای نوع ۰/۱۵٪، ۱٪، ۲٪، ۳٪ و برای نوع ۲ و ۳ به ترتیب ۰/۵٪، ۱٪، ۲٪، ۳٪ در نظر گرفته شد (در مجموع ۵۴ طرح). تفاوت در میزان حجم الیاف پلی پروپیلین عامل مقایسه طرح‌های این الیاف در نظر گرفته شده و به جهت مقایسه نتایج طرح‌های اختلاط حاوی الیاف فولادی با نسبت‌های طول به قطر و درصدهای حجمی متفاوت از ضریب  $\frac{V_f \times L}{D}$  بهره جستند (۲۰).

مونیتا اولیویا و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بهینه‌سازی مخلوط ژئوپلیمر خاکستر بادی با استفاده از روش تاگوچی و مطالعه بر روی خواص مکانیکی و دوام بتن تولید شده از مخلوط بهینه پرداختند و در مجموع ۹ مخلوط با در نظر گرفتن اثرات محتوای کل، نسبت محلول قلیایی به خاکستر و نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون نشان داد که خواص مکانیکی مخلوط ژئوپلیمر مورد آزمایش قرار گرفته قابل رقابت با نمونه‌هایی که از بتن OPC ساخته شده اند می‌باشد و ارائه یک جانشین بهتر و بادوام تر نسبت به بتن OPC در محیط آب دریا می‌باشد. در تحقیق آقای Erdogan ozbay و همکاران در سال ۲۰۰۹، نتایج حاصل از تحقیق به این صورت آمده است. بتن خودتراکم با مقاومت بالا HSSCC شامل اجزای بسیاری است دارای اهمیت است که باید از یک رویکرد سیستماتیک برای شناسایی مخلوط بهینه استفاده کنیم به همین دلیل در این تحقیق با استفاده از روش متعارف تاگوچی از یک آرایه آرتوگونال L18 جهت ارزیابی رتبه بندی پارامترهای موثر و بهترین ترکیب مخلوط خواص تازه و سخت شده بتن خودتراکم با مقاومت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق دیده شده که روش تاگوچی یک رویکرد امیدوار کننده برای پاسخگویی به چندین ویژگی مخلوط تازه و سخت شده، خود بتن تراکم با مقاومت بالا HSSCC است. روش آزمایشات تاگوچی می‌تواند پروتکل مورد نیاز برای بهینه‌سازی مخلوط بتن HSSCC با کاهش تعداد دسته‌های آزمایشات به سادگی انجام دهد. این مطالعه نشان داده است بتن خودتراکم سازگاری با رعایت معیارهای بتن با مقاومت بالا را داراست. همانطور که در نتایج خواص بتنی تازه و سخت شده نمونه‌های بتنی دیده می‌شود آنها خواص رضایت بخشی از بتن HSSCC که مورد انتظار است را می‌دهند (۲۱).

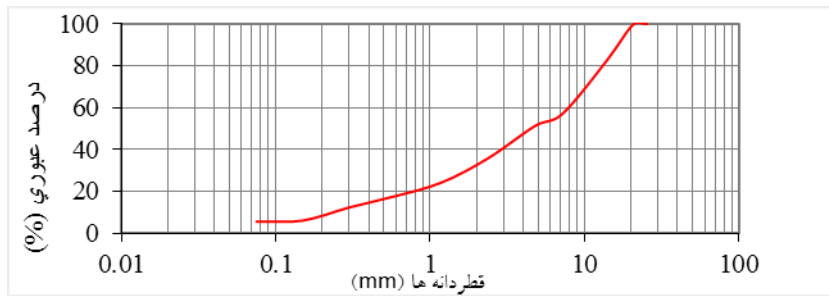
اردلان و همکاران در سال ۲۰۱۷، اثر نانوذرات سیلیس بر نفوذپذیری بتن را با استفاده از تکنیک پاشش نانوسیلیس نگهداری در اکسید نانوسیلیس رقیق شده مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج آنها مقاومت در برابر نفوذ نمونه‌ها بوسیله عمل آوری بتن در محیط پوشیده شده با نانوسیلیس به وضوح بهبود می‌یابد. مقدار مطلوب نفوذپذیری در مخلوط با نسبت آب به سیمان ۴۸٪ که در محلول نانو سیلیس ۱۲٪ که بهترین نمونه‌ها در ۲ زمان با نانو سیلیکون اسپری شده اند، دیده شده است (۲۲).

## ۲- مواد و مصالح

### ۲-۱- مصالح خاکی

سنگدانه‌ها در بتن تقریباً سه چهارم حجم بتن را تشکیل می‌دهند، از آنجا که سنگدانه‌ها از ارزان‌ترین اجزای تشکیل دهنده بتن محسوب می‌شوند و همچنین حجم بالایی از ماتریکس بتن را تشکیل می‌دهند، اصطلاحاً دانه بندی آنها در راستای رسیدن به بتن با کارایی و عملکرد مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است. پاکیزه بودن مصالح سنگی (عاری بودن مصالح سنگی از هرگونه گل و لای) و دانه‌بندی آن از مهم‌ترین عوامل در رشد این خاصیت است.

در این پژوهش برای ساخت بتن خود تراکم از مصالح سنگی با دانه‌بندی خوب (well graded) مطابق با استاندارد ASTM C33 در سال ۲۰۰۸ در دامنه دانه بندی ۱۶-۰ میلی‌متر مطابق با شکل (۱) مورد استفاده قرار گرفته است. خواص فیزیکی مصالح سنگی مورد استفاده مطابق با جدول (۱) می‌باشد. در خصوص ساخت بتن پر مقاومت نیز از مصالح سنگی با دامنه دانه بندی ۱۹-۰ میلی‌متر استفاده شده است که در جدول (۲) ارائه شده است. شایان ذکر است مصالح سنگی از کارخانه لوله سازی شمال تهیه شده است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی ۱۶-۰ میلی‌متر

جدول ۱- مشخصات فیزیکی مصالح سنگی مورد استفاده در بتن پر مقاومت

درصد عبوری از الک										
شماره الک	۱"	۳/۴"	۰/۵"	#۴	#۸	#۱۶	#۳۰	#۵۰	#۱۰۰	#۲۰۰
سایز الک (mm)	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۱/۱۸	۰/۶	۰/۳	۰/۵	۰/۷۵
درشت‌دانه	۱۰۰	۳۸	۲۳/۵	۱/۲	-	-	-	-	-	-
ریزدانه	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۷/۹	۸۲/۱	۶۲/۲	۳۱/۳	۱۴/۱	۸/۷	۲/۱۷

جدول ۲- مشخصات فیزیکی مصالح سنگی

مقدار	مشخصات فیزیکی	مقدار	مشخصات فیزیکی
۲/۴۰	جذب آب ماسه (%)	۲/۶۰	توده ویژه ماسه (ASTM D854)
۱/۱۰	جذب آب شن (%)	۲/۶۴	توده ویژه شن (ASTM D854)
۲/۷۵	مدول نرمی ماسه	۹۷	SE (%)

### ۲-۲- مصالح سیمانی

در این پژوهش از سیمان پر تلمند تیپ ۲ کارخانه هگمتان استفاده شده است. رنگ سیمان خاکستری بوده که دارای چگالی  $3115 \text{ gr/cm}^3$  می‌باشد. مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی در جدول (۳) و مشخصات شیمیایی در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۳- مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

نوع سیمان	وزن مخصوص ( $\text{gr/cm}^3$ )	سطح مخصوص ( $\text{gr/cm}^2$ )	گیرش اولیه (min)	گیرش نهایی (min)	انبساط اتوکلاو (%)
هگمتان	۳/۱۵	۲۹۱۰	۱۵۰	۲۰۵	۰/۰۷

جدول ۴- مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

ترکیب	درصد	ترکیب	درصد	ترکیب	درصد
SO <sub>3</sub>	۲/۳۲	MgO	۱/۴۸	SiO <sub>2</sub>	۲۱/۳۲
TiO <sub>2</sub>	-	K <sub>2</sub> O	۰/۶۹	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۸۱
L.O.I	۲/۰۴	Na <sub>2</sub> O	۰/۴۷	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۸۳
				CaO	۶۲/۸۵

### ۲-۳- نانوسیلیس

در این تحقیق نانو مواد از جنس نانو سیلیس از نوع آمورف بوده است که مشخصات آن در جدول (۵) آمده است. (شکل ۲)

جدول ۵- مشخصات نانوسیلیس مصرفی

چگالی واقعی	چگالی توده	رنگ	SSA	APS	درصد خلوص
۲/۴	< ۱۰	سفید	۱۸۰-۶۰۰	۲۰-۳۰	نانوذرات +۹۹%

#### ۲-۴- الیاف پلیمری

الیاف مورد استفاده در این پروژه از نوع پلی پروپیلن، الیافی با طول‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر بوده و از انواع مواد خام بازیافتی صنعتی است و در جدول (۸) مشخصات الیاف مورد استفاده نیز آورده شده است. (شکل ۳)

جدول ۶- ویژگی‌های الیاف پلی پروپیلن

مدول کششی	کرنش شکست	مقاومت کششی	نقطه ذوب	طول	سطح مقطع	وزن مخصوص	خصوصیات
ASTM D-638	ASTM D-638	-	-	-	-	ASTM D-792	استاندارد
۷/۱۰	۱۱۲/۵۰	۵۳/۰۲	۱۶۳	۱۸ و ۱۲ و ۶	دایره	۰/۹۱	مقدار



شکل ۳- الیاف پلی پروپیلن



شکل ۲- نانو سیلیکا (نانو سیلیس)

#### ۲-۵- پودر سنگ

در این پژوهش بدلیل میزان عیار سیمان مصرفی به جهت بهبود لزجت و همچنین بهبود خواص رئولوژیکی بتن، افزایش میزان پودر مخلوط و کاهش مدول نرمی ماسه، از پودر سنگ آهک بعنوان پرکننده یا فیلر استفاده شده است. پودر سنگ آهک مصرفی محصول کارخانه قم می‌باشد.

#### ۲-۶- آب و فوق روان کننده

آب مصرفی در بتن را می‌توان از آب باران، آب چاه، آب برکه و آب رودخانه (در صورتی که از پساب شیمیایی کارخانجات آلوده نباشد) استفاده نمود. بطور کلی آبی که برای نوشیدن مناسب باشد برای بتن نیز مناسب است. آب به سه صورت در بتن کاربرد دارد:

- آب مصرفی برای شستشوی سنگدانه
- آب بعنوان یکی از اجزای تشکیل دهنده بتن در هنگام ساخت
- آب مصرفی برای عمل آوری بتن

کیفیت آب از آن جهت حائز اهمیت است که ناخالصی‌های موجود در آن ممکن است در گیرش سیمان تاثیرگذار باشد و اختلالاتی را در واکنش هیدراسیون بوجود آورد. همچنین امروزه فوق روان کننده‌ها بعنوان افزودنی در بتن بمنظور رسیدن به روانی بیشتر و بهتر بصورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. فوق روان کننده مصرفی در این پژوهش بر پایه پلی کربوکسیلات اتر با نام تجاری FARCO PLAST PION محصول شرکت شیمی ساختمان استفاده شده است. مشخصات فوق روان کننده در جدول (۹) آورده شده است.

جدول ۷- مشخصات فوق روان کننده مصرفی

مشخصات فنی	
ترکیب شیمیایی	کوپلیمرهای اصلاح شده پلی کربوکسیلیک اسید
طبیعت یونی	آنیونی
رنگ	سبز تیره
حالت فیزیکی	مایع
وزن مخصوص (Kg/Lit)	(در دمای ۲۰ درجه) $1.1 \pm 1.12$
کلراید (ppm)	Max ۵۰۰

### ۳- طرح و روند اختلاط در مخلوط‌های بتنی



شکل ۴- بتونیر مورد استفاده در تحقیق

برای ساخت مخلوط‌های بتنی خود تراکم و پر مقاومت در محیط آزمایشگاه از بتونیر با ظرفیت تولید ۲۶ لیتر بتن استفاده شده است. یک روز قبل از ساخت نمونه‌های بتنی، شن مورد استفاده به وسیله آب جهت رفع خاک رس موجود در آن شسته شده و در دمای محیط آزمایشگاه قرار میگیرد. مراحل تهیه بتن به این صورت بود که در ابتدا سیمان و سنگدانه به مدت ۶۰ ثانیه مخلوط شده و پس از آن آب، فوق روان کننده، فیلر و نانو سیلیس به مخلوط اضافه شده و به مدت ۴ دقیقه با هم مخلوط شده است. اضافه کردن الیاف به مخلوط بتنی به صورت تصادفی و دستی و در زمان تقریباً یکنواخت بود.

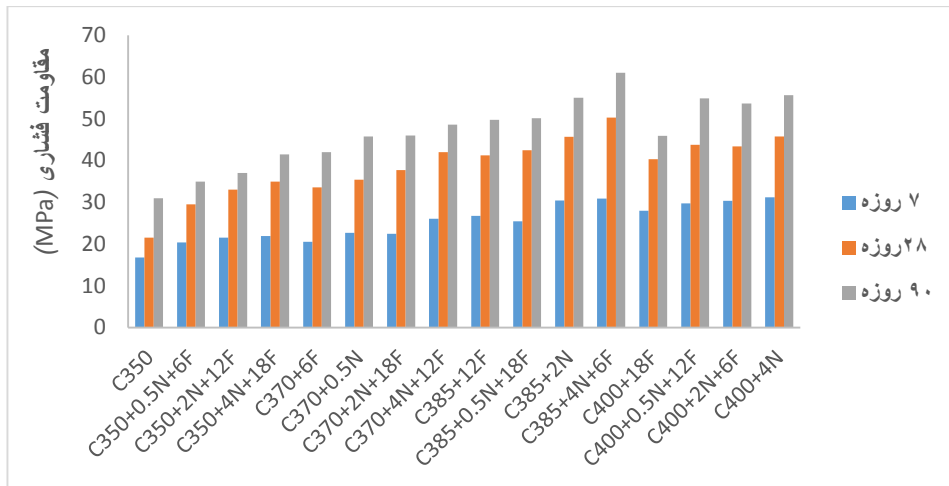
جدول ۸- طرح های اختلاط پیشنهادی برای بتن خود تراکم

ردیف	نام طرح	سیمان	نانوسیلیکا		الیاف (۰,۱ درصد حجمی)		آب		مقاومت فشاری ( $f_c$ )	مقاومت کششی ( $f_t$ )	مقاومت خمشی ( $f_{cm}$ )	کتابچه مقاومت روان
			درصد وزنی	مقدار وزنی	طول	مقدار وزنی	$\frac{W}{C}$	مقدار وزنی				
۱	C350	۳۵۰	۰	۰	۰	۰	۰,۳۶	۱۲۶	۲۹۰	۷۰,۵	۸۵۵	۱
۲	C370+0.5N+ 6F	۳۵۰	۰,۵	۱,۷۵	۶	۰,۹	۰,۳۶	۱۲۶	۲۹۰	۷۰,۵	۸۵۵	۱,۵
۳	C385+2N+ 12F	۳۵۰	۲	۷۰	۱۲	۰,۹	۰,۳۶	۱۲۶	۲۹۰	۷۰,۵	۸۵۵	۱,۶
۴	C400+4N+ 18F	۳۵۰	۴	۱۴	۱۸	۰,۹	۰,۳۶	۱۲۶	۲۹۰	۷۰,۵	۸۵۵	۱,۸
۵	C370+ 6F	۳۷۰	۰	۰	۶	۰,۹	۰,۳۶	۱۳۳,۲	۲۸۵	۶۹۰	۸۵۵	۱,۱۵
۶	C370+0.5N	۳۷۰	۰,۵	۱,۸۵	۰	۰	۰,۳۶	۱۳۳,۲	۲۸۵	۶۹۰	۸۵۵	۱,۳
۷	C370+2N+ 18F	۳۷۰	۲	۷,۴	۱۸	۰,۹	۰,۳۶	۱۳۳,۲	۲۸۵	۶۹۰	۸۵۵	۱,۲
۸	C370+4N+ 12F	۳۷۰	۴	۱۴,۸	۱۲	۰,۹	۰,۳۶	۱۳۳,۲	۲۸۵	۶۹۰	۸۵۵	۱,۳
۹	C385+12F	۳۸۵	۰	۰	۱۲	۰,۹	۰,۳۶	۱۳۸,۶	۲۸۰	۶۸۰	۸۴۰	۱,۳
۱۰	C385+0.5N+ 18 F	۳۸۵	۰,۵	۱,۹۲	۱۸	۰,۹	۰,۳۶	۱۳۸,۶	۲۸۰	۶۸۰	۸۴۰	۰,۹
۱۱	C385+2N	۳۸۵	۲	۷,۷	۰	۰	۰,۳۶	۱۳۸,۶	۲۸۰	۶۸۰	۸۴۰	۰,۸
۱۲	C385+4N+ 6F	۳۸۵	۴	۱۵,۴	۶	۰,۹	۰,۳۶	۱۳۸,۶	۲۸۰	۶۸۰	۸۴۰	۱
۱۳	C400+18F	۴۰۰	۰	۰	۱۸	۰,۹	۰,۳۶	۱۴۴	۲۷۵	۶۷۰	۸۲۵	۱,۱
۱۴	C400+0.5N+12F	۴۰۰	۰,۵	۲	۱۲	۰,۹	۰,۳۶	۱۴۴	۲۷۵	۶۷۰	۸۲۵	۰,۸
۱۵	C400+2N+6F	۴۰۰	۲	۸	۶	۰,۹	۰,۳۶	۱۴۴	۲۷۵	۶۷۰	۸۲۵	۰,۹
۱۶	C400+4N	۴۰۰	۴	۱۶	۰	۰	۰,۳۶	۱۴۴	۲۷۵	۶۷۰	۸۲۵	۱

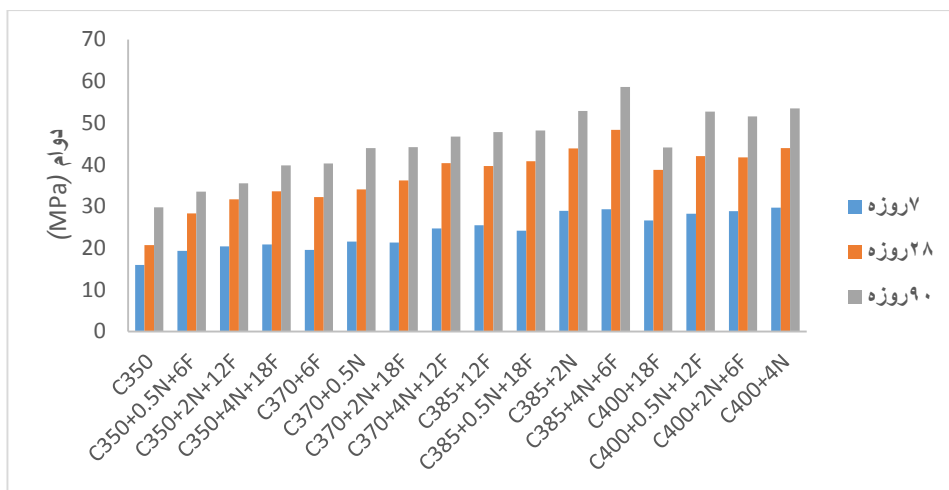
### ۴- تحلیل و بررسی در روند آزمایشگاهی

با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌گردد نمونه‌های دارای سن عمل‌آوری ۹۰ روزه با بالاترین میزان شاخصه مقاومتی به نسبت نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه می‌باشند. بالاترین مقدار مقاومت فشاری در این سن که بالاترین عملکرد را در سنین مورد ارزیابی دارد مربوط به نمونه‌ی دارای ۴ درصد استفاده از نانو مواد و الیافی با طول ۶ میلی‌متر است. مشاهده می‌گردد در نمونه‌های بتنی دارای الیاف با طول ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر مقدار شاخصه مقاومتی کاهش یافته است و این استدلال بدلیل ایجاد تخلخل ایجاد شده توسط جسم خارج از ماتریس مخلوط است که چفت و بست بین سنگدانه را مقداری کاهش داده است و این امر سبب کاهش مقاومت در طرح‌های مربوطه شده است.

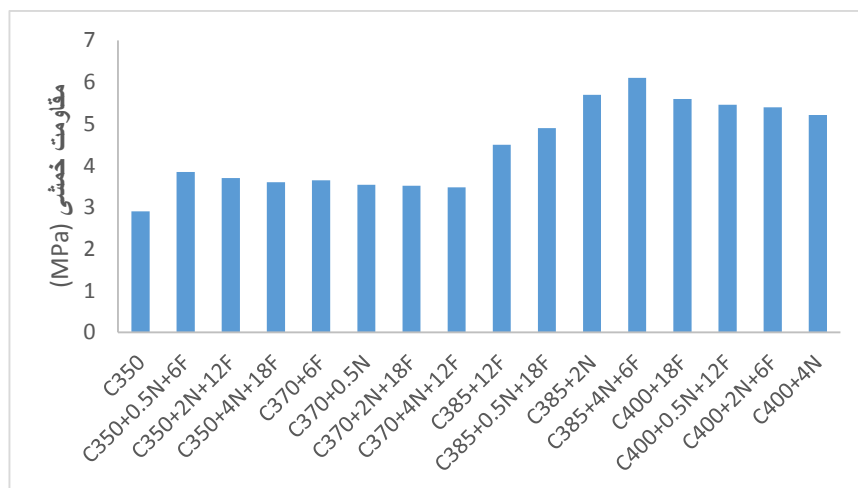
در مشاهده شکل (۶) هم می‌توان نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری را مطابق با شکل (۵) استدلال نمود اما بدلیل وجود این مخلوط‌ها در برابر محلول خورنده کلسیم کلرید، شاخصه مقاومتی به نسبت مقاومت فشاری کاهش ۴ درصدی داشته است.



شکل ۵- آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی خود تراکم در سنین ۷، ۲۸، و ۹۰ روزه



شکل ۶- آزمایش دوام مخلوط‌های بتنی خود تراکم در سنین ۷، ۲۸، و ۹۰ روزه

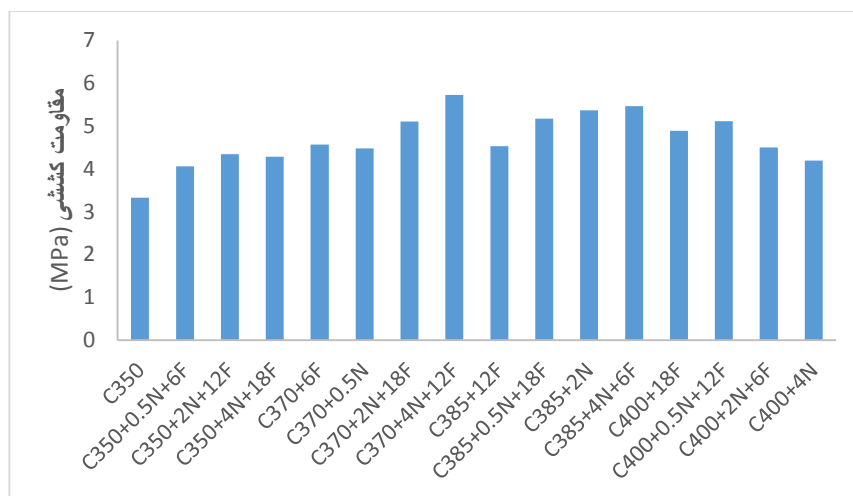


شکل ۷- آزمایش مقاومت خمشی مخلوط‌های بتنی خود تراکم ۲۸ روزه

با توجه به شکل (۷) که خروجی‌های مربوط به آزمایش مقاومت خمشی ۳ نقطه‌ای می‌باشد نیز نمونه‌ی دارای الیاف مصنوعی (پلیمری) پلی پروپیلن با طول ۶ میلی‌متر نیز حداکثر مقاومت خمشی را دارا است و نانو متریال مربوط به این مخلوط دارای

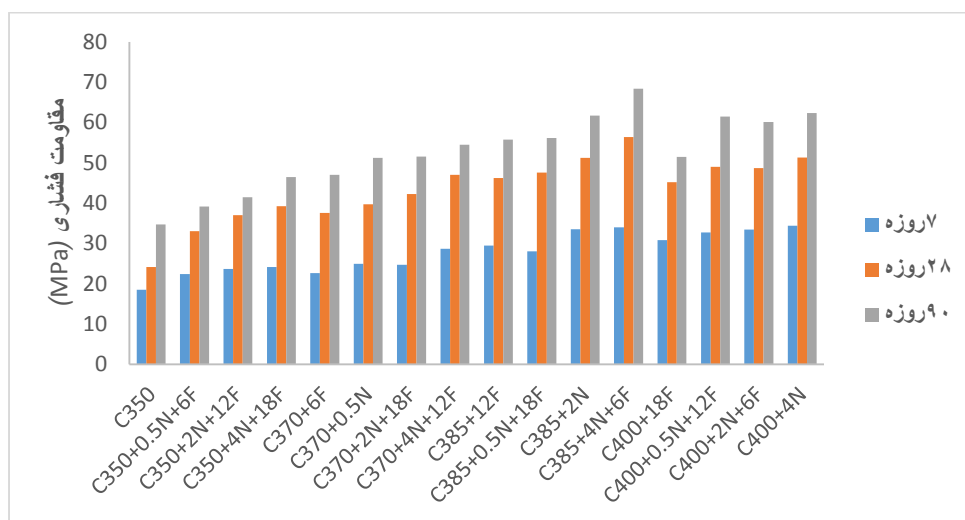


۴ درصد وزنی می‌باشد و این بدان معناست که الیاف در حال عملکرد مثبت در ماتریس بتن می‌باشد و حداکثر مقاومت خمشی را در این مخلوط‌ها در ارزیابی مقاومت خمشی به میزان ۶/۱ مگاپاسکال رسانده است.



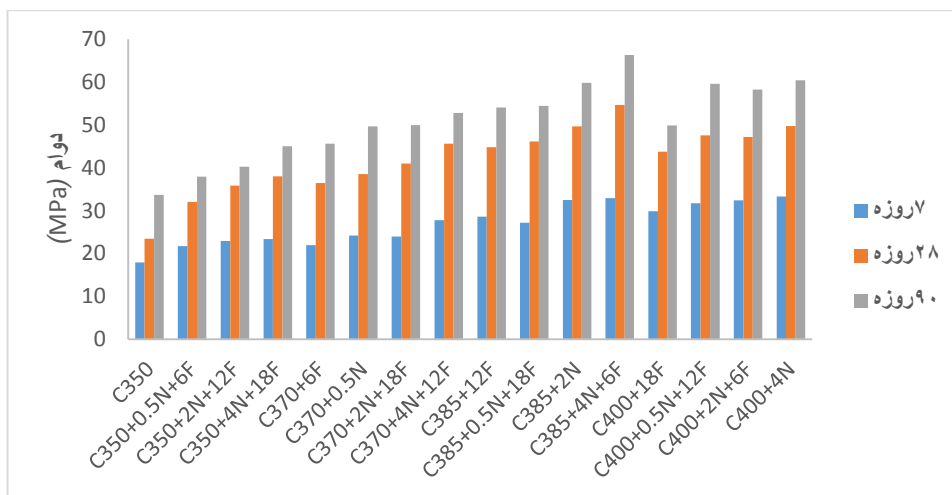
شکل ۸- آزمایش مقاومت کششی مخلوط‌های بتنی خود تراکم ۲۸ روزه

در آزمایش مقاومت کششی مطابق با شکل (۸) بدلیل داشتن مقاومت کششی بالای الیاف پلیمری پلی پروپیلن مشاهده می‌گردد که در مخلوط‌های ۲۸ روزه بتن خود تراکم و نمونه‌ی دارای ۱۲ میلیمتر از الیاف دارای حداکثر مقاومت کششی می‌باشد و این نتیجه تنها بدلیل وجود الیاف می‌باشد. در طرح مربوط به حداکثر مقاومت کششی میزان نانو مواد ۴ درصد می‌باشد.

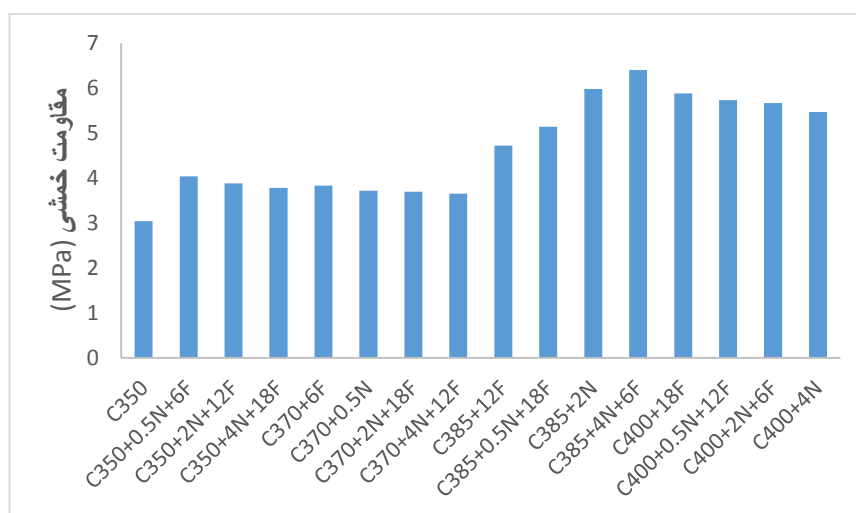


شکل ۹- آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی پر مقاومت در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ روزه

با مشاهده اشکال (۹) و (۱۰) نتایج مطابق با اشکال (۵) و (۶) حاصل می‌گردد. در بتن پر مقاومت بدلیل داشتن دانه بندی درشت به نسبت دانه بندی با سایز کمتر بتن خودتراکم می‌توان اینگونه استدلال کرد که سنگدانه بدلیل داشتن سهم بالای وجود در ماتریس بتن قطب تعیین مقاومت خواهد بود. مشاهده می‌گردد که در مقاومت فشاری بتن پر مقاومت به نسبت بتن خودتراکم رشد ۱۲ درصدی حاصل شده است.

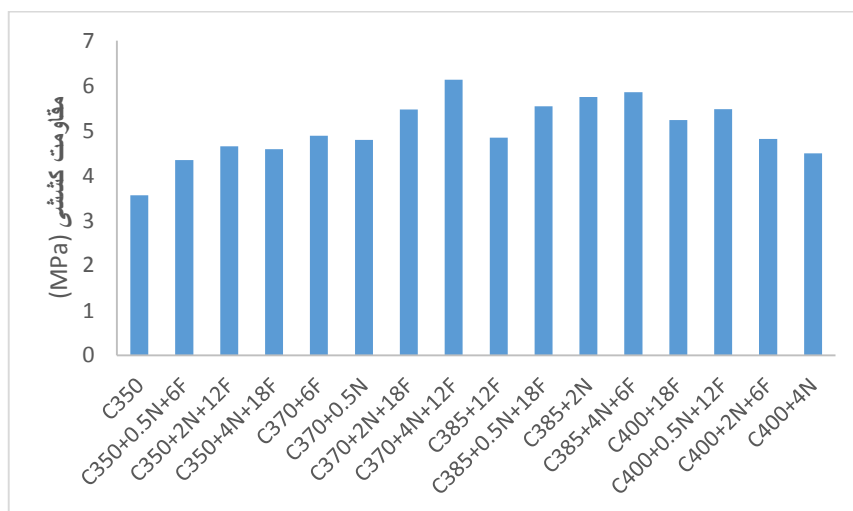


شکل ۱۰- آزمایش دوام مخلوط‌های بتنی پر مقاومت در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه



شکل ۱۱- آزمایش مقاومت خمشی مخلوط‌های بتنی پر مقاومت ۲۸ روزه

باتوجه به خروجی‌های حاصل از آزمایش مقاومت خمشی مخلوط‌های بتنی پر مقاومت در سن عمل‌آوری ۲۸ روزه مشاهده می‌گردد نمونه‌های دارای ۴ درصد نانو متریال و الیاف با طول ۶ میلی‌متر دارای بیشترین رشد به نسبت بتن معمولی (نمونه شاهد) بوده‌اند.



شکل ۱۱- آزمایش مقاومت کششی مخلوط‌های بتنی پر مقاومت ۲۸ روزه

در خروجی آزمایشگاهی مخلوط بتنی پر مقاومت با توجه به مشاهده خروجی‌های آزمایشگاهی در مخلوط‌های خود تراکم، مشاهده می‌گردد نمونه‌ی دارای الیاف ۱۲ میلیمتر بدلیل خاصیت کشسانی الیاف بالاترین مقاومت کششی را به خود تخصیص داده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

باتوجه به خروجی‌های آزمایشگاهی این تحقیق می‌توان اینگونه استدلال نمود که:

۱. همواره خصوصیات مقاومتی در بتن پر مقاومت به نسبت بتن خود تراکم بالاتر خواهد بود.
۲. استفاده بهینه از نانو مواد (نانو سیلیس) در مخلوط بتنی خود تراکم و پر مقاومت ۴ درصد پیشنهاد شده است.
۳. استفاده بهینه از الیاف در ارزیابی مقاومتی همچون مقاومت فشاری، خمشی و دوام به طول ۶ میلیمتر دارای بهترین عملکرد می‌باشد.
۴. با توجه به خروجی‌های آزمایش کششی می‌توان اینگونه استدلال کرد که بدلیل وجود الیاف با طول زیاد و داشتن خاصیت کشسانی این متریکال مقاومت کششی در مخلوط‌های دارای الیاف با طول بیشتر از طول بهینه (در این تحقیق ۱۲ میلیمتر) بالاترین میزان شاخصه کششی را خواهد داشت.

## منابع

۱. محمد کاظم شربتدار و همکاران، (۱۳۹۱)، معرفی کامپوزیت های سیمانی با الیاف، نشریه داخلی انجمن بتن ایران، شماره ۴۶ - ص ۵۴.
2. Graybeal, B. "Behavior of ultra-high performance concrete connections between precast bridge deck elements", Ductal Science library, CBC, pp. 1-13 (۲۰۱۰).
3. Graybeal B, Davis M. Cylinder or cube: strength testing of 80-200 MPa (11.6- 29 ksi) ultra high performance fibre-reinforced concrete. ACI Mater J 2008;105(6):603-9.
4. M. Empelmann, M. Teutsch, and G. Steven, (2008) "Improvement of the Post Fracture Behaviour of UHPC by Fibres," in Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, pp, 177-184.
5. ACI Committee 544, (2002) "State- of- the- Art Report on Fiber Reinforced Concrete,
6. Francois oulemonde and Jacques Resplendino, 2012, Book, Designing and Building for UHPFRC, pp, 13-21
7. Ghafari E, Costa H, Jólío E, Portugal A, Dures L. The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra-highperformance concrete. Mater Des 2014;59:1-9.
8. Yu R, Spiesz P, Brouwers HJH. Development of an eco-friendly Ultra-High
9. Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. Cem Concr Compos 2015;55:383-94.
10. 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.
11. M. Nili and V. Afrouhsabet, " 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.
12. Narenda, h. and muthu , k.u. (2008), "optimization of self copacting concrete designed by taguchi method", materials and design, 191-204.
13. Tanyildizi, h. (2014), " post-fire behavior of structural lightweight concrete designed by taguchi method" , construction and building materials, 68, pp. 565-571.
14. Hasan, m.j., afroz, m., and Mahmud, h.m.i., (2011), " an experimental investigation on mechanical behavior of macro synthetic fiber reinforced concrete" , international journal of civil and environmental engineering, vol. 11, no. 03.
15. Jozsa z. and fenyvesi, o, (2010), " early age shrinkage cracking of fiber reinforced concrete" , concrete structures, vol. 11, pp. 61-66.
16. Ray Fernando, (2009), phd " nano technology and nano materials" 22 june.
17. Roesler, j.r., altoubat, s.a., lange, d. a., rieder, k.a. and ulreich, g.r. (2006), " effect of synthetic fibers on structural behavior of concrete slabs on ground" , aci materials journal, vol. 103, no. 1, pp. 3.

18. Mehta et al, (2017), " influence of various parameters on strength and absorption properties of fly ash based geopolymer concrete designed by taguchi method", construction and building materials. 150, 817-825.
19. Olivia, m. and nikraz, k, h.(2012)" properties of fly ash geopolymer concrete designed by taguchi method" , materials and design, 191-198.
20. Goodier, c.i,(2003)," development of self-compacting concrete" , structure and building 156, issue sb4: 405-414.
21. E.i- dieb,m.m.reda taha,(2005), " flow characteristics and acceptance criteria of fiber reinforced self-compacting concrete", building and environment 40,pp.1672-1677
22. E. ozbay et al, (2009), "investigating mix proportion of self compacting concrete by using taguchi method" construction and building materials 23, 694-702.
23. R.b ardalán, n. jamshide, h. arabameri, a.joshaghani, m. mehrinejad, p. sharafi," enhaciing the permeability and abrasion resistance of concrete using colloidal nano-sio<sub>2</sub> oxide and spraying nano-silicon practices" , constr. build. Mater.146(2017) 128-135.