

Experimental Investigation of Ultra-High Performance Concrete Without utilizing vapor

Ramtin Rezakhani

PhD Student, Department of Civil Engineering, Qeshm Science and Research Branch, Islamic Azad University, Qeshm, Iran Mohammad

Mohammad Ghasem Vetr*

Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology(IIEES), Tehran, Iran Ali Ghamari

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ilam Branch, Islamic Azad University, Ilam, Iran Yousef Zandi

Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran vetr@iiees.ac.ir

Keywords

Ultra High Performance Concrete, Mix Design, Micro Steel Fibers, Silica Sand.

Abstract

With the development of the construction industry and the necessity to build tall structures with high significance, constructing elements with smaller dimensions and longer service life has become essential. This has compelled engineers to create concrete with higher strength. Studies conducted in this regard over the recent years have led to significant advancements in improving the compressive and tensile strength of concrete. This has resulted in the emergence of "ultra-high-performance" concrete with compressive strengths exceeding 150 megapascals (1500 kilograms per square centimeter). One of the most important aspects of this type of concrete is its resistance to aggressive agents such as chloride ions and freeze-thaw cycles. In this research, micro steel fibers, Type I cement with a strength class of 52.5 kilograms per square centimeter, silica sand, silica fume, a polycarboxylate-based superplasticizer, and water were used. These were examined in five different mix designs. The curing of the samples was consistent, and the concrete's age was examined at 7 and 28 days. Compressive and Brazilian tensile strength tests were performed on the samples, and the optimal sample showed a compressive strength of 154 megapascals and a tensile strength of 21 megapascals.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

بررسی آزمایشگاهی دستیابی به بتن فوق توانمند بدون بکارگیری بخار آب

رامتین رضاخانی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

محمدقاسم وتر*

استاد یار گروه مهندسی عمران، واحد پژوهشگاه بین المللی زلزله، تهران، ایران

علی قمری

دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی، ایلام، ایران

یوسف زندی

استاد گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

vetr@iiees.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۲۲ اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: ۰۴ دی ۱۴۰۳

چکیده

با توجه به توسعه صنعت ساختمان و نیاز به ساخت سازه‌هایی با ارتفاع بلند و اهمیت زیاد، ساخت المانهایی با ابعاد کوچکتر و عمر مفید بیشتر، مهندسين را ملزم به ساخت بتن‌هایی با مقاومت بالاتر نموده است. مطالعات انجام شده در این راستا طی سالیان اخیر باعث پیشرفت چشمگیری در زمینه‌ی ارتقای مقاومت فشاری و کششی بتن‌ها داشته است که باعث ظهور بتن‌های "فوق توانمند" با مقاومت فشاری بالای ۱۵۰ مگاپاسکال (۱۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) شده است. یکی از با اهمیت‌ترین نکات این بتن‌ها میتوان به مقاومت در برابر عوامل مهاجم همچون یون کلرید و سیکل‌های یخبندان اشاره نمود. در این تحقیق از الیاف میکرو فولادی، سیمان تپ یک با رده‌ی مقاومتی ۵۲/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، ماسه سیلیسی، دوده سیلیس، فوق روانکننده بر پایه پلی کربکسیلات و آب استفاده شده است که در ۵ طرح اختلاط مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. عمل‌آوری نمونه‌ها یکسان و عمر بتن‌ها در ۷ روز و ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفته است. سپس آزمایشات مقاومت فشاری و کششی برزلی از نمونه‌ها گرفته شد و نمونه‌ی بهینه مد نظر، مقاومت فشاری ۱۵۴ و کششی ۲۱ مگاپاسکال را نشان داد.

کلید واژگان: بتن فوق توانمند - طرح اختلاط - الیاف میکرو فولادی - ماسه سیلیس.

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، رشد روزافزون فعالیت‌های عمرانی و نیاز به زیرساخت‌های مقاوم، بتن را به یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان تبدیل کرده است. در کشورهایی مانند ایران، که در مسیر توسعه و نوسازی زیرساخت‌ها قرار دارند، میزان استفاده از بتن فراتر از میانگین جهانی است. با توجه به نقش حیاتی بتن در ساخت‌وساز، ضرورت دارد که نگاه جامع‌تری به ابعاد زیست‌محیطی، اقتصادی و فنی آن داشته باشیم. به‌ویژه با در نظر گرفتن نقش پررنگ سیمان در مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، بازنگری در شیوه‌های تولید و بهره‌برداری از بتن، گامی مؤثر در جهت تحقق اهداف توسعه پایدار و حفاظت از منابع طبیعی خواهد بود. با این حال هنوز مقاومت فشاری بتن در ایران در حالت بیشینه ۴۰ مگاپاسکال است. با این وجود با مصرف سیمان کیفیت بتن تغییرات زیادی نکرده است. نوع دانه بندی می‌تواند بطور غیرمستقیم بر مقاومت، آب انداختگی، جداشدگی دانه ها و پرداخت سطح بتن و جابجایی آن اثر بگذارد [۱]. تمام اجزای بتن شامل سنگدانه ریز و درشت، سیمان، آب، پوزولان ها و مواد افزودنی باید دارای نسبت مشخص برای تولید بتن توانمند باشند. این موضوع در بتن های توانمند هنوز دارای آیین نامه اجرایی نیست و طرح های اختلاط در بتن های توانمند به صورت آیین نامه ای گسترش نیافته است.

بتن فوق توانمند (UHPC)^۱ گونه جدیدی از بتن است که در سالیان اخیر، با رشد تکنیک های تولید مواد سیمانی توسعه یافته است. اگرچه میان گونه های مختلف UHPC تفاوت هایی در نحوه ساخت، مقدار مقاومت فشاری و کششی و سایر مشخصات مکانیکی وجود دارد، اما بین تمامی آنها شباهت های کلی قابل تشخیص است. یکی از کاربردهای بتن های فوق توانمند در ناحیه اتصال تیر-ستون سازه ها و گاه استفاده قطعات پیش ساخته برای اجرای ژاکت بتنی است زیرا با توجه به خصوصیات ویژه این نوع بتن، میتوان مقاومت و شکل پذیری اتصال را به نحو قابل توجهی افزایش داد.

تحقیق حاضر به منظور مطالعه و بهبود خواص مکانیکی بتن فوق توانمند با استفاده از الیاف میکرو فولادی و مواد افزودنی خاص، طراحی و اجرا شده است. نوآوری اصلی این تحقیق شامل ترکیب پنج طرح

¹ UHPC, Ultra High Performance Concrete

اختلاط مختلف با استفاده از سیمان تیپ یک با رده مقاومتی ۵۲/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، ماسه سیلیسی، دوده سیلیس و فوق روان کننده بر پایه پلی کربکسیلات می باشد. با این ترکیب ها و روش های عمل آوری مشابه، نه تنها مقاومت فشاری به ۱۵۴ مگاپاسکال رسیده، بلکه مقاومت کششی برزیلی نیز بهبود قابل توجهی یافته است.

این تحقیق نشان می دهد که با بهینه سازی طرح اختلاط بتن فوق توانمند و استفاده از مواد افزودنی و الیاف مناسب، می توان به بتن هایی با مقاومت بسیار بالا و دوام بیشتر دست یافت. نتایج این تحقیق می تواند راهنمایی موثر برای مهندسين و پژوهشگران در توسعه سازه های بلند و با دوام بیشتر در برابر عوامل مهاجم محیطی باشد.

۲- پیشینه پژوهش

تحقیقات دانشمندان در چند دهه ی اخیر منجر به پیدایش نوع جدیدی از بتن با خاصیت فوق العاده شده، که این بتن به بتن با عملکرد بسیار بالا معروف میباشد. کشورهای مختلفی مانند کره جنوبی، فرانسه، آلمان و کانادا برای اولین بار در ساخت سازه های خود از بتن با عملکرد بسیار بالا استفاده کرده اند [۲]. ضعیفترین ناحیه بتن محل اتصال خمیر سیمان و سنگدانه یا همان ناحیه انتقال است، که عمدتاً ریز ترکهایی که در این ناحیه ایجاد میگردند پس از گسترش به نواحی دیگر باعث گسیختگی بتن میشوند. حال با حذف درشت دانه در واقع این ضعف برطرف شده، و ریز ترکهای ناحیه ی انتقال که باعث گسیختگی نهایی بتن میشوند نیز محدود خواهند شد [۳ و ۴]. به بررسی عمل آوری های مختلف و تغییر در پارامترهای تشکیل دهنده ی بتن فوق توانمند پرداخته و تأثیر آنها را بر روی مقاومت فشاری بتن تعیین کرده اند. با به کار بردن انواع روش های عمل آوری برای بتن فوق توانمند، به مقاومت فشاری برابر با ۲۳۳ مگاپاسکال رسیده اند. عمل آوری های بررسی شده در این تحقیق شامل، عمل آوری استاندارد، عمل آوری بخار، عمل آوری بخار همراه با عملیات حرارتی و عمل آوری اتوکلاو همراه با عملیات حرارتی است، که عمل آوری اتوکلاو همراه با حرارت بیشترین مقاومت فشاری را برای نمونه ایجاد کرده است [۵]. تأثیر الیاف فولادی و الیاف میکرو سلولز را بر مقاومت فشاری مورد بررسی قرار داده اند. در این تحقیق الیاف به صورت تنها و ترکیبی در نمونه

استفاده شده است. در نمونه‌هایی که حاوی الیاف سلولزی به تنهایی است به دلیل کوچک بودن طول الیاف، در ترکهای بزرگ الیاف کارایی خود را از دست داده و لذا نمونه‌های بتن از مقاومت خمشی و جذب انرژی پایین برخوردارند. بر اساس نتایج تحقیق فوق، الیاف سلولز به تنهایی باعث افزایش خواص مکانیکی نمونه‌ها نمیشود، اما در نمونه‌هایی که از هر دو الیاف فولادی و سلولزی به صورت ترکیبی استفاده شده است، مقاومت خمشی و چقرمگی افزایش یافته است [۶].

در حال حاضر در کشور ما به منظور حصول مقاومت فشاری بالا عمدتاً از پوزلان‌ها و بالاخص میکروسیلیس که در بازار داخل به وفور یافت میشود و تاثیر مثبت بیشتری نیز دارد، استفاده میگردد [۷ و ۸]. تحقیقات نشان میدهد استفاده از مقادیر مناسب میکروسیلیس به افزایش مقاومت و دوام انواع بتن در سنین مختلف می انجامد [۹ و ۱۰]. همچنین به منظور افزایش روانی انواع بتن از روانکننده و فوق روانکننده‌ها استفاده میگردد. ساختار شیمیایی فوق روانکننده‌ها بر عملکرد آنها تاثیر بسیاری دارد [۱۱ و ۱۲]. به بررسی تاثیر فوق روانکننده بر ساختار بتن با عملکرد بالا پرداختند. یکی از نتایج این پژوهش تاثیر فوق روانکننده بر فعالیت شیمیایی بتن بوده بطوریکه افزایش مقدار آن سبب تاخیر در فعالیت شیمیایی در بتن‌های پرمقاومت و پردوام خواهد شد [۱۳]. اثر الیاف فولادی، پلی پروپیلن و کربن را بر مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از الیاف فولادی، کربن و پلیپروپیلن به صورت تنها و ترکیبی در نمونه‌ها استفاده شده است. نتایج نشان میدهد که مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف کربن و فولاد بیشتر از نمونه‌ی حاوی الیاف پلی پروپیلن و فولاد است. مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های با الیاف فولادی و کربنی نیز بیشتر از نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و پلیپروپیلن میباشد [۱۴]. آزمایش‌های کششی بر روی نمونه‌های RPC^۱ ساخته شده از دانه‌های کوارتز و حاوی الیاف فلزی انجام دادند و دریافتند که مقاومت کششی با افزایش مقدار الیاف فلزی به صورت خطی افزایش مییابد. آنها از نظریه احتمالاتی ویبول برای پیشبینی خواص کششی نمونه‌های RPC استفاده کردند [۱۵]. تاثیر افزودن الیاف فولادی بر مقاومت فشاری و کششی RPC با انجام آزمایش‌هایی مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. مقاومت فشاری با نمونه‌های مکعبی اندازه گیری شد نتایج حاصل از

آزمایشهای انجام شده نشان میدهد که میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های با ۱، ۲ و ۳ درصد الیاف نسبت به نمونه‌های بدون الیاف به ترتیب ۲، ۶ و ۱ درصد افزایش را نشان میدهد. همچنین، میانگین مقاومت کششی RPC با اضافه کردن الیاف به میزان ۱٪، ۲٪ و ۳٪ به ترتیب ۴۶، ۷۳ و ۶۶ درصد افزایش پیدا میکند. این رخدادهای بیانگر آن است که درصد بهینه الیاف برای تاثیرگذاری بر روی نتایج حاصل، چیزی در حدود ۲ درصد حجمی بتن پودری میباشد [۱۶].

از دیگر ویژگی‌های منحصر به فرد بتن‌های فوق توانمند نیاز این ماده به عمل‌آوری حرارتی است. این روند که گاهی به جای روند عمل‌آوری، روند رفتار حرارتی نامیده میشود، یک روند ساده است و در واقع یک مرحله اضافه در ساخت بتن است که به منظور تقویت ساختار آن از نظر میکروسکوپی انجام میگردد. عمل‌آوری حرارتی برای تمام کاربری‌های بتن فوق توانمند مورد نیاز نیست زیرا بدون عمل‌آوری حرارتی نیز UHPC مقاومت و انعطاف پذیری قابل توجهی نسبت به بتن توانمند (HPC) دارد. براساس گزارشات ارائه شده، عمل‌آوری حرارتی خصوصیات مکانیکی بتن را حداقل به میزان ۱۵٪ بهبود میدهد.

۳- اجزاء تشکیل دهنده بتن فوق توانمند (UHPC)

اجزاء تشکیل دهنده بتن فوق توانمند عبارت اند از: سیمان پرتلند (با رده‌ی مقاومتی بالا)، میکروسیلیس، پودر سیلیس، ماسه سیلیس، الیاف میکروفولادی، فوق روان کننده و آب. از آنجا که هریک از اجزاء تشکیل دهنده بتن فوق توانمند، در بهینه کردن ویژگی‌های این نوع بتن مؤثرند، در ادامه به بررسی اثر هر یک از این مصالح پرداخته میشود.

¹ Reactive Powder Concrete

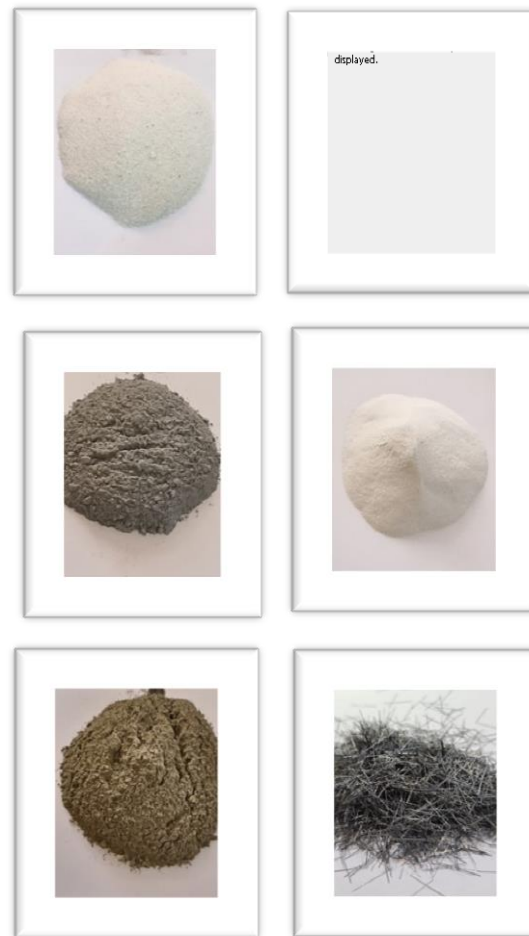
استفاده نمیشود. محققان این ضعف را با استفاده از میکروسیلیس به عنوان یکی از اجزاء بتن فوق توانمند، برطرف کردند. میکروسیلیس ریزترین جزء بکار برده شده در بتن فوق توانمند است که قطر آن به اندازه‌ای کوچک است که فضای خالی بین سیمان و پودر سیلیس را پر میکند. میکروسیلیس به کار رفته در این تحقیق از شرکت فروآلیاژ ایران تهیه شده و دارای بیشینه بعد ۲۲۹ نانو میلیمتر میباشد. میکروسیلیس، که با نام‌هایی مانند دوده سیلیسی یا سیلیکا فوم نیز شناخته می‌شود، یکی از محصولات جانبی حاصل از فرآیند تولید فروآلیاژها و فروسیلیس در کوره‌های قوس الکتریکی است. این ماده به دلیل دارا بودن بیش از ۸۵ درصد سیلیس آمورف، از قابلیت پوزولانی بسیار بالایی برخوردار است و در بهبود خواص بتن نقش مهمی ایفا می‌کند. در این پژوهش، از میکروسیلیس تولیدشده توسط شرکت شیمی ساختمان به‌عنوان ماده افزودنی استفاده شده است.

۳-۳- ماسه سیلیس

استفاده از دانه‌بندی درشت در مخلوط بتن فوق توانمند توصیه نمیشود بنابراین شن بزرگترین ذرات موجود در ماتریکس را تشکیل می‌دهد. اندازه ذرات شن براساس دستیابی به یک مخلوط همگن بهینه تعیین میشود. در بتن فوق توانمند، اندازه ذرات شن به ۰/۸ میلیمتر محدود میشود که البته از ۰/۱۵ میلیمتر کمتر نیست. در مرجع دیگری تاکید شده است که شن نرم با اندازه دانه‌های بین ۰/۱۵ تا ۰/۶ میلیمتر، بزرگترین اندازه ذرات بکار رفته در بتن فوق توانمند را تشکیل میدهد [۱۸]. این شن نرم از شن خردشده‌ای که الک میشود بدست می‌آید که به آن، شن مصنوعی نیز گفته میشود. از مزایای ماسه سیلیس^۱ میتوان به سختی بالا و دسترسی و هزینه‌ی کم اشاره نمود.

۳-۴- فوق روانکننده

یکی از خصوصیات منحصر به فرد بتن فوق توانمند اینگونه است که در اختلاط آن از کمترین مقدار آب استفاده میشود، در نتیجه کارایی آن کاهش می‌یابد. به دلیل نسبت آب به سیمان کم در بتن با کارایی بسیار بالا، استفاده از فوق روان‌کننده نقش تعیین‌کننده‌ای در رسیدن به کارایی مورد نظر دارد بطوریکه توسعه بتن فوق توانمند بدون استفاده از فوق روان‌کننده‌ها امکانپذیر نمی‌باشد. در این تحقیق از فوق روان‌کننده بر پایه پلی کربکسیلات شرکت شیمی ساختمان (P10-3R) استفاده گردیده است.



شکل ۱- مصالح مصرفی در طرح اختلاط بتن فوق توانمند

۳-۱- سیمان پرتلند

سیمان پرتلند چسباننده‌ای است که مصالح تشکیل دهنده این نوع بتن را به یکدیگر می‌چسباند. سیمان پرتلند، که از پودر کردن کلینکری که عمدتاً از اکسیدهای سیلیسی، آلومینیومی و آهنی که عامل تشکیل ترکیبات سیلیکاتی و آلومیناتی سیمان پرتلند میباشند، بدست می‌آید و دارای انواع مختلفی میباشد [۱۷]. در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع ۱ کارخانه سیمان بجنورد با رده‌ی مقاومتی ۵۲/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع استفاده شده است.

۳-۲- میکروسیلیس

چگالی بتن با استفاده از ذرات ریزدانه که به خوبی در سرتاسر ماتریکس قرار می‌گیرد، افزایش می‌یابد. ذرات کروی برای به حداکثر رساندن تراکم مخلوط، دارای ضعف هستند از اینرو عمدتاً از مواد کروی در بتن

¹ Silica Sand

۳-۵- آب

آب مصرفی در بتن مبیایست دارای PH در بازه ۶ تا ۸ باشد. تقریباً تمام آب‌های طبیعی قابل آشامیدن و بدون طعم خاص، برای ساختن بتن قابل استفاده هستند.

۳-۶- الیاف میکرو فولادی

الیاف به کار رفته در این تحقیق از نوع الیاف میکروفولادی مستقیم و بدون خم میباشد. الیاف میکروفولادی دارای مدول الاستیسیته و کرنش بالایی میباشد که با توجه به قابلیت شکل‌پذیری مناسب و مقاومت کششی بالا از مناسبترین نوع الیاف به شمار می‌آیند. این نوع الیاف به اشکال ظاهری گوناگون و در ابعاد مختلف جهت بهبود رفتار بتن ساخته میشوند. الیاف به کار رفته در این تحقیق از نوع مستقیم و در ابعاد طولی ۱۶ میلیمتر و ضخامت ۰/۲۵ میلیمتر میباشد. الیاف استفاده شده در این تحقیق از شرکت فراتو تهیه گردیده است.

۴- طرح اختلاط بتن

طرح‌های اختلاط زیادی برای تهیه بتن فوق توانمند در مراجع مختلف وجود دارد. اگرچه محققان و سازندگان به دنبال نوآوری برای ارائه یک طرح اختلاط بهینه هستند، اجزاء اصلی بکارگیری شده در طرح‌های اختلاط مشابه هستند. این اجزاء اصلی عبارتند از سیمان پرتلند، میکروسیلیس، پودر کوارتز، شن کوارتز، انواع الیاف‌ها، فوق روانکننده و آب.

در این تحقیق جهت بدست آوردن یک طرح اختلاط بهینه با رده مقاومتی بالا، برای تأمین مقاومت فشاری بهتر از سیمان تیپ یک با رده‌ی مقاومتی ۵۲/۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، فوق روان‌کننده بر پایه پلی کربکسیلات و دانه‌بندی متفاوت در ماسه سلیس استفاده شده و بتن بدست آمده در کلیه طرح‌های اختلاط با عمل‌آوری اشباع در آب صورت پذیرفته، نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ مورد آزمایش مقاومت فشاری و کششی قرار گرفته و نتایج استخراج شده است.

در تمامی طرح‌های اختلاط فوق روان‌کننده یکسان بوده و فقط مقدار استفاده در طرح‌ها متفاوت می‌باشد. در طرح‌های ۱ تا ۴ نسبت حجم مصرفی الیاف میکرو فولادی ۲٪ و در طرح شماره ۵ مقدار الیاف میکروفولادی ۲/۵٪ استفاده گردیده است، تمامی طرح‌های اختلاط از سیمان تیپ ۱ با رده‌ی مقاومتی ۵۲/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع استفاده گردیده است. نسبت آب به سیمان در طرح‌ها متفاوت بوده و میکروسیلیس استفاده شده در تمامی طرح‌ها یکسان است. ماسه‌های سلیسی استفاده شده با اقطار ۰/۲ و ۰/۸ میلیمتر میباشد و به تفکیک طرح‌ها میزان استفاده شده متغیر است.

روند طرح اختلاط بتن‌های فوق توانمند با بتن‌های معمولی تفاوت‌هایی دارد. برای اختلاط بتن فوق توانمند لازم است ترتیب مشخصی برای اضافه کردن عناصر و زمان معینی برای اختلاط اجزاء به کار گرفته شود. به علاوه، برای تعیین مقدار دقیق هر عنصر، به وسایل اندازه‌گیری با دقت مطلوب نیاز است. زیرا تغییر در مقدار هر یک از عناصر میتواند تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات مکانیکی این نوع بتن داشته باشد. آسان‌ترین روش برای تهیه و حمل بتن فوق توانمند استفاده از یک مخلوط‌کننده مرکزی در کارخانه است. با این حال مطالعات مختلف نشان میدهند که در صورت لزوم میتوان از تراک میکسر استفاده کرد [۱۹]. عموماً روند همگن کردن به شکلی هست که در ابتدا پودرهای خشک و الیاف را با مخلوط کرده به شکلی که کاملاً همگن شود. این روند معمولاً مدت زمانی طول خواهد کشید. سپس محلولی از آب و مقداری روانکننده آهسته به ماده‌ی خشک همگن شده اضافه خواهد شد. مخلوط کردن تا زمانی ادامه خواهد داشت که بتن یکنواخت و همگن شده باشد. به این شکل پس از مدتی بتن فوق توانمند بصورت خمیری شکل آماده استفاده قرار خواهد گرفت.



شکل ۲- میکسر جهت اختلاط مناسب بتن فوق توانمند

جدول ۱- طرح های اختلاط مورد بررسی برحسب کیلوگرم برای دوازده لیتر حجم بتن

طرح اختلاط ۱						
آب	سیمان پرتلند تیپ ۱ رده ی مقاومتی بالا	دوده سیلیس	ماسه سیلیس ریز دانه	ماسه سیلیس درشت دانه	فوق روان کننده	الیاف میکرو فولادی
۲/۲۴۱	۱۰/۰۸۰	۲/۵۲۰	۴/۲۸۳	۷/۷۵۴	۰/۵۰۴	۱/۸۸۴
طرح اختلاط ۲						
آب	سیمان پرتلند تیپ ۱ رده ی مقاومتی بالا	دوده سیلیس	ماسه سیلیس ریز دانه	ماسه سیلیس درشت دانه	فوق روان کننده	الیاف میکرو فولادی
۲/۱۹۲	۱۱/۵۲۰	۲/۸۸۰	۳/۲۶۶	۷/۶۲۲	۰/۴۳۲	۱/۸۸۴
طرح اختلاط ۳						
آب	سیمان پرتلند تیپ ۱ رده ی مقاومتی بالا	دوده سیلیس	ماسه سیلیس ریز دانه	ماسه سیلیس درشت دانه	فوق روان کننده	الیاف میکرو فولادی
۲/۲۶۳	۹/۳۶۰	۲/۳۴۰	۴/۰۱۳	۹/۳۶۴	۰/۳۵۱	۱/۸۸۴
طرح اختلاط ۴						
آب	سیمان پرتلند تیپ ۱ رده ی مقاومتی بالا	دوده سیلیس	ماسه سیلیس ریز دانه	ماسه سیلیس درشت دانه	فوق روان کننده	الیاف میکرو فولادی
۳/۶۲۰	۱۱/۵۲۰	۲/۸۸۰	۲/۸۲۹	۶/۶۰۱	۰/۴۳۲	۱/۸۸۴
طرح اختلاط ۵						
آب	سیمان پرتلند تیپ ۱ رده ی مقاومتی بالا	دوده سیلیس	ماسه سیلیس ریز دانه	ماسه سیلیس درشت دانه	فوق روان کننده	الیاف میکرو فولادی
۲/۶۲۰	۱۱/۵۲۰	۲/۸۸۰	۲/۷۸۰	۶/۴۸۵	۰/۴۳۱	۲/۸۸۰

۵- روش انجام آزمایش

برای تمام طرح‌های اختلاط بررسی شده، نمونه مکعبی طول و عرض و ارتفاع ۱۰ سانتی متر جهت آزمایش مقاومت فشاری استفاده گردیده است. جهت آزمایش مقاومت کششی بتن فوق توانمند نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر تعبیه گردید. عمل‌آوری در تمامی طرح‌ها یکسان بوده و عمر بتن ۷ و ۲۸ روزه مورد بررسی قرار گرفته شد [۲۰]

پس از رسیدن به عمر مطلوب بتن‌ها جهت انجام آزمایشات مقاومت فشاری و کششی، نمونه‌ها از شرایط عمل‌آوری اشباع خارج شده و مدت زمانی جهت خشک شدن نسبی سطح بتن اختصاص گردیده است. تمامی آزمایشات در آزمایشگاه بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام گردید است.



الف- نمونه مکعبی تحت بار فشاری ب- نمای دور نمونه تحت بارگذاری

شکل ۴ - نحوه بارگذاری نمونه مکعبی بتن فوق توانمند

پس از آزمایشات مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی طرح‌های مختلف بتن، شرایط برای مقاومت کششی برزلی نمونه‌های استوانه‌ای فراهم گردید. بتن‌های فوق توانمند بر خلاف بتن‌های معمولی، از مقاومت کششی بالایی تا حدود ۲۵٪ مقاومت فشاری برخوردار هستند. از اینرو بهتر است آزمایشات کشش مستقیم جهت تعیین مقاومت کششی نمونه‌ها استفاده گردد. به دلیل محدودیت بعضی آزمایشگاه‌ها، امکان آزمایش به روش مستقیم مقدور نبود. به این جهت نمونه‌های استوانه‌ای به روش آزمایشات کشش برزلی مورد بررسی قرار گرفت.



الف- نمونه مکعبی ب- نمونه استوانه‌ای

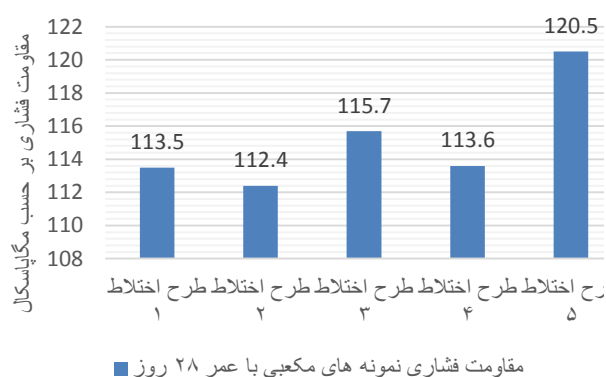


ج- مقایسه بصری ابعاد نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای

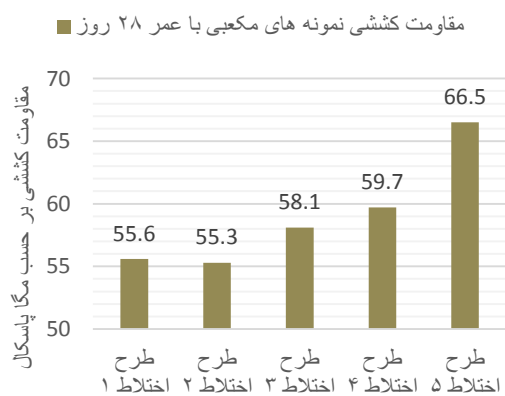
شکل ۳- نمونه مکعبی و استوانه‌ای بتن فوق توانمند

در انتها پس از خشک شدن نسبی سطوح بتن‌ها، نمونه‌ها را در محل چک مقاومت فشاری بتن قرار داده و نتایج آزمایش برداشت گردید. اشکال شماره ۴ و ۵ نحوه‌ی قرارگیری نمونه مکعبی، در محل قرارگیری چک فشاری را نمایش می‌دهد.





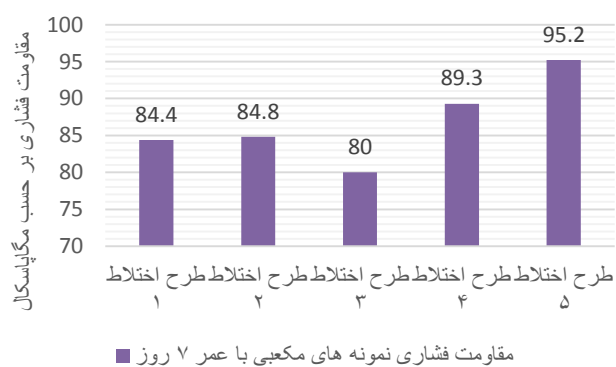
شکل ۷- مقاومت فشاری طرح اختلاط ها با عمر ۲۸ روز



شکل ۸- مقاومت کشش برزبلی طرح اختلاط ها با عمر ۲۸ روز



شکل ۵- نحوه ی بارگذاری نمونه استوانه ای (کشش برزبلی)



شکل ۶- مقاومت فشاری طرح های اختلاط ها با عمر ۷ روز

۶- نتیجه گیری

طبق آزمایشات انجام شده نتایج زیر بدست آمد.

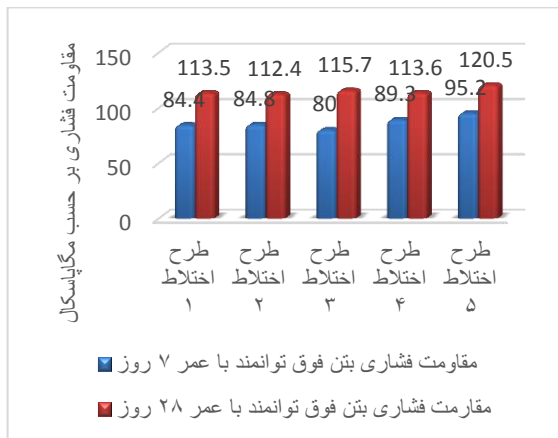
۱- با مشاهده طرح‌های اختلاط بررسی شده، با افزودن ۵٪ حجمی الیاف میکروفولادی به طرح شماره ۵ به نسبت دیگر طرح‌ها، میتوان تا بیش از ۵٪ مقاومت فشاری و تا بیش از ۱۰٪ مقاومت کششی بتن توانمند را ارتقا بخشید.

۲- هدف از انجام این تحقیق حصول به حداکثر رساندن مقاومت فشاری و کششی بتن فوق توانمند بود، نمونه بهبود یافته مد نظر، طرح اختلاط ۵ بود. بتن فوق توانمند جهت بهبود رفتار لرزه‌ای اتصال بتنی تیر-ستون بصورت ژاکت بتنی و محصور کردن المان‌های سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفته شد. از اینرو محقق پس از بدست آمدن طرح اختلاط مناسب، شرایط عمل‌آوری را بصورت گفته شده در این تحقیق (عمل‌آوری غیر اشباع و حرارت محیطی ۴۰ درجه سانتی‌گراد)، تغییر داده و توانست بیش از ۲۸٪ مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه عمل‌آوری شده با شرایط اشباع در آب بدست آورد. از اینرو در این بتن‌ها حرارت، بسیار حایز اهمیت است و میتواند ترکیبات شیمیایی را با شرایط بهتری سازگار کند.

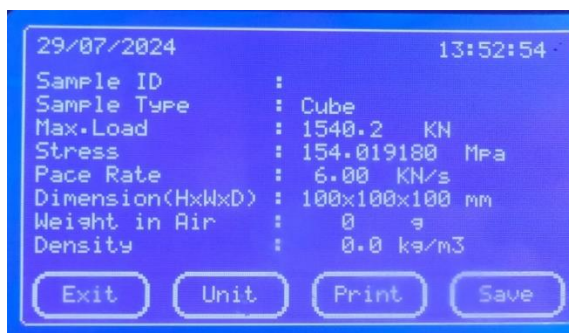
۳- با توجه به اینکه بتن فوق توانمند مورد بررسی شده، الیاف میکروفولادی دارد که در مقابل کشش از خود مقاومت بسیار زیادی نشان میدهد، میتوان انتظار داشت پدیده شریک‌یج کمتر از بتن‌های معمولی روی نمونه‌ها اثرگذار باشد.

تشکر و قدردانی:

بدینوسیله مولفین این مطالعات از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله خصوصاً ریاست محترم پژوهشگاه سازه و آزمایشگاه‌های پیشرفته پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و دانشگاه صنعتی امیر کبیر و همچنین اجازه استفاده از گزارشهای پژوهشی ارزشمند آن تحت عنوان بهبود رفتار لرزه‌ای اتصالات سازه‌های بتنی پیش ساخته با صفحات کناری در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله (IIIES) با شماره ۷۱۷۰ مورخ ۱۴۰۴ - کمال تشکر و قدردانی را دارند.



شکل ۹- مقایسه مقاومت فشاری بتن فوق توانمند به تفکیک عمر ۷ و ۲۸ روز در این تحقیق این است که تمامی نمونه‌ها با شرایط یکسان عمل‌آوری اشباع در آب با شرایط آزمایشگاهی انجام گردید. نکته حایز اهمیت این است، که یک نمونه مکعبی جهت بررسی و کنجکاو محقق، در شرایط عمل‌آوری غیر اشباع در دمای بیش از ۴۰ درجه سانتیگراد تابستان تهران، قرار داده شد. توسط محقق به مدت ۲۸ روز، یک روز در میان به نمونه ذکر شده آب داده شد و پس از آب‌دهی، نمونه با نایلون پلاستیکی پوشانیده شد و پس از ۲۸ روز تست مقاومت فشاری از نمونه گرفته شد. مقاومت فشاری استخراج شده از جک فشاری در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.



شکل ۱۰- تصویر برداشت شده از جک فشاری (آزمایش مقاومت فشاری بتن فوق توانمند)

cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2010;24(3):292–299.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.045>

[8] Valipour M, Pargar F, Shekarchi M, Khani S. Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. *Construction and Building Materials*. 2013;41:879–888. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.054>

[9] Saridemir M. Effect of silica fume and ground pumice on compressive strength and modulus of elasticity of high strength concrete. *Construction and Building Materials*. 2013;49:484–489. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.091>

[10] Toutanji H, Delatte N, Aggoun S, Duval R, Danson A. Effect of supplementary cementitious materials on compressive strength and durability of short-term cured concrete. *Cement and Concrete Research*. 2004;34(2):311–319. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.017>

[11] Janowska-Renkas E. The effect of superplasticizers' chemical structure on their efficiency in cement pastes. *Construction and Building Materials*. 2013;38:1204–1210. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.032>

[12] Mardani-Aghabaglou A, Tuyan M, Yilmaz G, Arioiz O, Ramyar K. Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*. 2013;47:1025–1034. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.105>

[1] Beshr H, Almusallam AA, Maslehuddin M. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*. 2003;17(2):97–103. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00097-1)

[2] Schmidt M, Fehling E. Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe. *ACI Special Publication*. 2005;228:51–78. <https://doi.org/10.14359/14460>

[3] Ipek M, Yilmaz K, Sumer M, Saribiyik M. Effect of presetting pressure applied to mechanical behaviours of reactive powder concrete during setting phase. *Construction and Building Materials*. 2011;25(1):61–68.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.056>

[4] Yazici H, Yardimci MY, Yigiter H, Aydin S, Turkel S. Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*. 2010;32(8):639–648.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.005>

[5] Mostofinejad D, Rostami Nikoo M, Hosseini SA. Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC). *Construction and Building Materials*. 2016;123:754–767. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.082>

[6] Banthia N, Majdzadeh F, Wu J, Bindiganavile V. Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear. *Cement and Concrete Composites*. 2014;48:91–97. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.018>

[7] Elahi A, Basheer PAM, Nanukuttan SV, Khan QUZ. Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary

[20] وتر، محمدقاسم- بهبود رفتار لرزه‌ای اتصالات سازه‌های پیش‌ساخته بتنی با صفحات کناری (گزارش پژوهشی ۷۱۷۰ در سال ۱۴۰۴). پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

[13] Morin V, Cohen Tenoudji F, Feylessoufi A, Richard P. Superplasticizer effects on setting and structuration mechanisms of ultrahigh-performance concrete. *Cement and Concrete Research*. 2001;31(1):63–71. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00428-2](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00428-2)

[14] Yao W, Li J, Wu K. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. *Cement and Concrete Research*. 2003;33(1):27–30. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00913-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00913-4)

[15] Richard P, Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*. 1995;25(7):1501–1511. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)

[۱۶] رحمت‌آبادی م، شهاییان ف، کاظمی ح. بررسی آزمایشگاهی مقاومت فشاری و کششی بتن پودری دارای الیاف فولادی. مهندسی سازه و ساخت. ۱۴۰۰؛۸(۲):۱۸۸–۲۰۰.

<https://doi.org/10.22065/JSCE.2019.167555.1762>

[17] Eide MB, Hisdal JM. Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – State of the art. COIN Project report no. 44. Trondheim: SINTEF; 2012. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-210.11250/2379433](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-210.11250/2379433)

[18] Graybeal B, Tanesi J. Durability of an ultrahigh-performance concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007;19(10):848–854. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:10\(848\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:10(848))

[19] Bonneau O, Lachemi M, Dallaire E, Dugat J, Aïtcin P. Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes. *ACI Materials Journal*. 1997;94(4):286–290. <https://doi.org/10.14359/310>

