

بررسی آزمایشگاهی تاثیر پودر کوارتز در بتن الیافی با کارایی بسیار

بالای ساخته شده با مصالح بومی

کد مقاله: ۱۹۴E

مسعود پوربابا^۱، عبدالرضا جغتائی^۲، حسن پناه پور^۳، مهشاد همابخت^۴

۱- دانشجوی دکترای سازه و زلزله دانشگاه صنعتی شریف (واحد بین الملل)

۲- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

۳- دانشجوی دکترای خاک و پی دانشگاه تبریز

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله دانشگاه تبریز

Email: mpourbaba@yahoo.com

چکیده:

در این مطالعه امکان ساخت بتن با کارایی بسیار بالا با استفاده از افزودن مقادیر مختلف پودر کوارتز و ماسه کوارتزی محلی در طرح اختلاطهای بتن‌های با مقاومت بالا (شامل سیمان پرتلند، میکروسیلیس، آب، فوق روان کننده و میکرو الیاف فلزی)، بصورت آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج حاصل از مقاومت‌های فشاری بدست آمده در سن ۷ روزه با مقاومت‌های فشاری بدست آمده معمول این نوع بتن‌ها، مقایسه شده و طرح اختلاط ایده‌آل قابل قبول این نوع بتن‌ها با مصالح بومی پیشنهاد شده است. بتن با کارایی بسیار بالا با خواص مکانیکی عالی و دوام بالا، جزو یکی از آخرین پیشرفت‌ها در تکنولوژی بتن محسوب می‌شود که در دهه‌های اخیر گسترش یافته و کاربرد گسترده‌ای در دنیا داشته است. مقاومت فشاری بیش از ۱۴۰ مگاپاسکال، دوام و غیرقابل نفوذ بودن این نوع بتن‌ها و همچنین افزایش مقاومت کششی و خمشی آن با اضافه کردن الیاف در ابعاد میکرو و ماکرو، آن را به بتنی ایده‌آل با کارایی بسیار بالا (UHPFRC)، جهت ساخت پروژه‌های مهم از جمله پل‌ها و همچنین مقاوم‌سازی سازه‌ها تبدیل نموده است. همچنین مقاومت بسیار بالای فشاری و کششی آن، امکان طراحی و اجرای المان‌های ظریف و زیبا را در سازه‌ها فراهم نموده است که در برخی کشورها اجرا شده است.

واژه‌های کلیدی:

بتن الیافی با کارایی بسیار بالا (UHPFRC)، پودر کوارتز، ماسه کوارتزی

۱- مقدمه

بتن با کارایی بالا یکی از انواع جدید بتن می‌باشد که دارای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و دوام بسیار بالا بوده و نسبت آب به سیمان و نفوذپذیری در آن بسیار کم می‌باشد [1]. طرح اختلاط بتن UHPC^۱ اغلب شامل آب، میکروسیلیس، سیمان، ماسه ریزدانه، فوق روان کننده و پودر سنگ‌هایی مانند کوارتز و ... می‌باشد. این نوع بتن از لحاظ مقاومت فشاری بسیار کارآمد بوده و دارای مقاومت فشاری بین ۱۴۰ تا ۲۲۰ مگاپاسکال و حتی بیشتر از آن می‌باشد ولی بالا بودن مقاومت فشاری دلیل بر عملکرد خوب بتن نبوده و این بتن از لحاظ شکل‌پذیری دارای ضعف و بسیار تردشکن می‌باشد. یکی از بهترین روش‌های جلوگیری از تردشکنی در بتن‌های UHPC، به کارگیری میکروالیاف فولادی در بتن بوده که منجر به ایجاد نسل دیگری از بتن به نام بتن الیافی با کارایی بسیار بالا شده است. وجود الیاف فولادی در این نوع بتن، شکل‌پذیری مصالح را در کشش و فشار بالا برده و باعث افزایش مقاومت خمشی و کششی بتن شده است. این در حالی است که تاثیر آن بر مقاومت فشاری بتن کم است [2].

۲- بتن الیافی با کارایی بسیار بالا

۱-۲- تعریف

بتن‌های الیافی با کارایی بسیار بالا، حاصل تحقیقاتی هستند که در اوایل سال ۱۹۳۰ آغاز شده‌اند. هدف این تحقیقات یافتن راهکاری برای تولید بتن‌هایی با مقاومت فشاری بیشتر بوده است. این نوع بتن با ویژگی‌های زیر تعریف می‌شود [2-4]:

- مقاومت فشاری و کششی بالا
 - نسبت آب به مواد سیمانی کمتر از ۰/۲۵ و عموماً بین ۰/۱۶ و ۰/۲۰
 - مقادیر زیادی از مواد سیمانی که باعث پر شدن منافذ مویی می‌شود
 - مشخصات بهبود یافته در مواد سیمانی با اضافه کردن افزودنی‌های پوزولانی مانند میکروسیلیس
 - وجود الیاف برای تامین شکل‌پذیری بتن
 - فراهم بودن شرایط مناسب عمل‌آوری
 - دانه‌بندی بهینه برای دستیابی به بیشترین چگالی مصالح
- بتن الیافی با کارایی بسیار بالا ماده‌ای کامپوزیتی می‌باشد که در مشخصه‌های فراوانی متفاوت با بتن معمولی می‌باشد. مقاومت‌های فشاری و کششی آن در مقایسه با بتن معمولی بسیار بالا بوده و این ویژگی امکان ساخت اعضای با سطح مقطع کمتر را فراهم می‌کند. نشان داده شده است که این نوع بتن در مقابل حملات سولفاتی و سایر مواد شیمیایی و همچنین سائیدگی و آتش‌سوزی پایدار می‌باشد. به دلیل کارایی، مقاومت و دوام افزایش‌یافته، این بتن مناسب برای کاربردهای مختلف می‌باشد [2]. شکل ۱ شکل‌پذیری این بتن را در تیری پس از اعمال بارگذاری بسیار زیاد نشان می‌دهد [5].



شکل ۱. شکل‌پذیری در تیر ساخته شده با UHPFRC [33]

^۱ Ultra High Performance Concrete

۲-۲- مصالغ مصرفی

مصالح مصرفی در بتن UHPFRC یکسان با مصالح به کار رفته در ساختار بتن UHPC می‌باشد؛ با این تفاوت که در ساخت بتن UHPFRC از میکروالیاف فولادی نیز استفاده شده است. طرح اختلاط این نوع بتن طبق تعریف، شامل آب، مواد افزودنی و مصالح جامد با ابعاد کمتر از ۰/۱۲۵ میلی‌متر می‌باشد. این مصالح جامد شامل سیمان، مواد پوزولانی و مواد پرکننده می‌باشد. در نتیجه طرح اختلاط بتن به دو قسمت مصالح واکنش‌دهنده و مصالح پرکننده تقسیم شده است و برخی از این مصالح دارای هر دو عملکرد یاد شده می‌باشند [2].

طرح اختلاط بتن UHPFRC شامل سیمان پرتلند، سنگدانه، میکروالیاف فولادی، میکروسیلیس، پودر کوارتز، فوق روان‌کننده و آب می‌باشد که مشخصات آن‌ها به شرح زیر است:

۱-۲-۲- سیمان پرتلند

در این پژوهش مطابق با استاندارد EN197-1، از سیمان پرتلند نوع II سیمان صوفیان استفاده شده است این نوع سیمان، نوع مرغوب‌تری نسبت به نوع I بوده و به سیمان پرتلند اصلاح شده معروف است که به هنگام احتمال نفوذ سولفات و همچنین در سازه‌های نسبتاً حجیم مانند پایه‌های بزرگ پل‌ها و دیوارهای حایل سنگین به کار برده می‌شود. سیمان پرتلند نوع II عمدتاً گرمای کمتری نسبت به نوع یک تولید می‌کند که این امر یک مزیت برای به تاخیر افتادن گیرش اولیه بتن به شمار می‌رود. سیمان پرتلند مصرفی در این تحقیق در شکل ۲-الف نشان داده شده است.

۲-۲-۲- الیاف فولادی

الیاف فولادی دارای مدول الاستیسیته و کرنش بالایی می‌باشند که با توجه به قابلیت شکل‌پذیری مناسب و مقاومت کششی بالا از مناسب‌ترین و اقتصادی‌ترین 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 میکرو (قطر ۰/۱۶ و طول ۱۳ میلی‌متر) بوده و از کشور چین تهیه شده‌اند که در شکل ۲-ب نشان داده شده است. با وجود مزیت‌های میکرو الیاف، باید برخی ملاحظات برای پخش یکنواخت الیاف و جلوگیری از جداشدگی یا پدیده‌ی گلوله شدن^۱ و ایجاد یک مخلوط کارا جهت بتن‌ریزی، تراکم و پرداخت بتن به عمل آید که ال‌ک کردن یکی از این روش‌ها به شمار می‌رود.

۳-۲-۲- میکروسیلیس^۲

این ماده که با نام‌های سیلیکا فوم^۳ و دوده سیلیس نیز شناخته می‌شود، محصول فرعی کوره‌های قوس الکتریکی صنایع فروآلیاژ و فروسیلیس بوده و ماده‌ای است با فعالیت پوزولانی بسیار شدید که بیش از ۸۵ درصد سیلیس بلوری نشده دارد [6]. این ماده بواسطه هر دو مکانیزم فیزیکی و شیمیایی قادر به بهبود مشخصات بتن می‌باشد که شماری از آن‌ها عبارتند از:

- کاهش آب انداختن بتن تازه
- افزایش چسبندگی
- کاهش جداشدگی بتن در نواحی زیر آرماتورها
- تسریع هیدراسیون سیمان در مراحل اولیه گیرش
- کاهش نفوذپذیری با عملکرد پرکنندگی

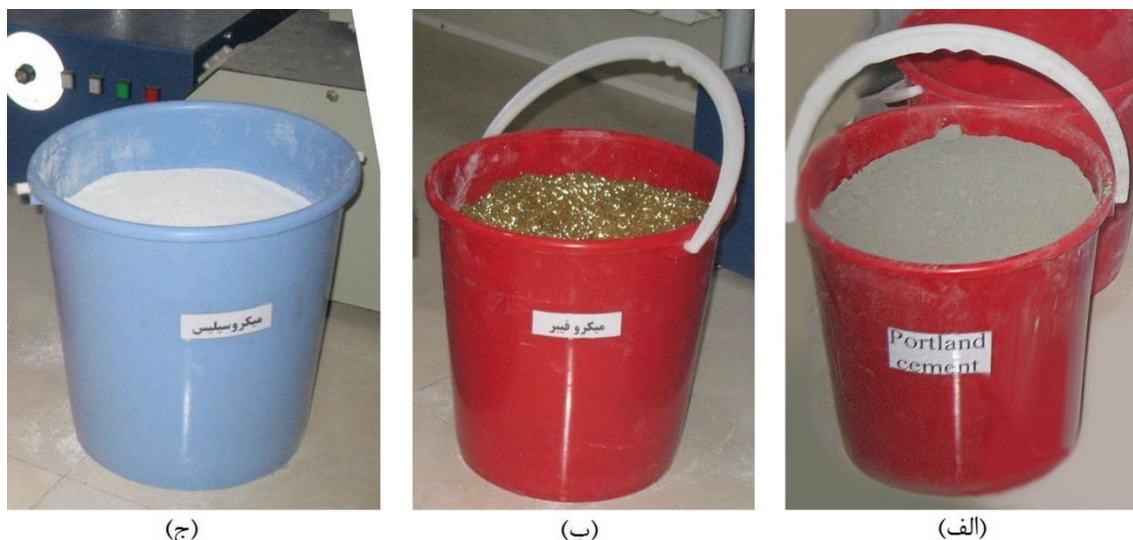
به دلیل مزایای مذکور، از میکروسیلیس می‌توان در اجرای بتن در سواحل دریا، اسکله‌ها و پل‌ها، ساخت بتن‌های با مقاومت بالا، ساخت بتن مورد استفاده در سدها، کانال‌ها، تونل‌ها، مخازن و منبع آب، کف‌سازی و ناماسازی و ساخت بتن‌های در معرض خوردگی استفاده کرد [7].

میکروسیلیس به کار رفته در این تحقیق که شرکت فروآلیاژ ایران تهیه شده است، در شکل ۲-ج نشان داده شده است.

^۱ Balling

^۲ Micro Silica

^۳ Silica Fume



شکل ۲. مصالح مصرفی در ساخت UHPFRC (الف)سیمان پرتلند، (ب)میکرو الیاف فولادی، (ج)میکروسیلیس.

۲-۲-۴- آب مصرفی

در بتن الیافی با کارایی بسیار بالا با توجه به بالا بودن مقاومت، که نسبت آب به سیمان بسیار کم می‌باشد، کارایی مورد نیاز بتن با اضافه کردن حجم زیادی از فوق روان کننده جبران خواهد شد. در ساخت این نوع بتن از مخلوط آب و یخ که این عمل موجب کاهش دمای هیدراسیون و افزایش خاصیت دیرگیری در بتن می‌شود. نمونه‌ای از مخلوط آب و یخ مصرفی در شکل ۳-الف نشان داده شده است.

۲-۲-۵- فوق روان کننده

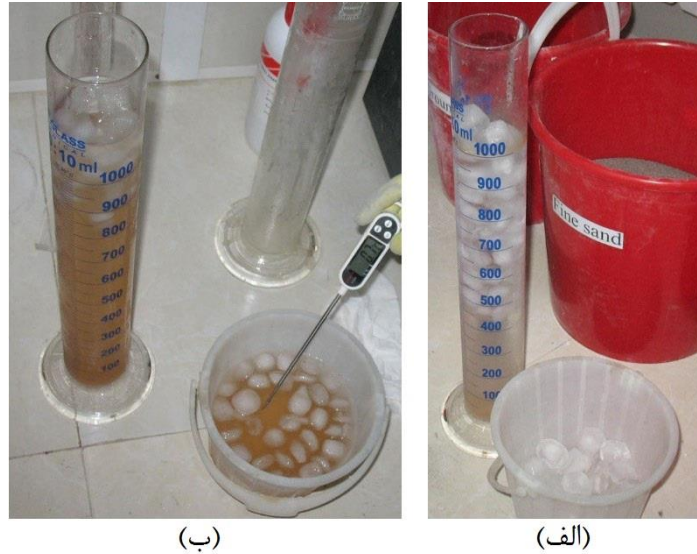
افزودنی‌های فوق کاهنده آب (HRWR)^۱ یا فوق روان کننده‌ها (SP)^۲ عموماً در بتن پرمقاومت، بتن پیش تنیده، بتن پس کشیده و بتن مصرفی با اهداف معماری (ظرافت المان‌ها) مورد مصرف واقع می‌شوند. فوق روان کننده‌ها هم در بتن تازه و هم در بتن سخت شده در کاهش کشش سطحی، جذب سطحی مولکول‌ها، کاهش تبخیر آب، آزادسازی آب محبوس در میان دانه‌های سیمان، تاخیر در هیدراسیون سیمان و تغییر بافت سیمان هیدراته شده موثر می‌باشند [8]. به دلیل نسبت آب به سیمان کم در بتن الیافی با کارایی بسیار بالا، استفاده از فوق روان کننده نقش تعیین کننده‌ای در رسیدن به کارایی مورد نظر دارد بطوریکه توسعه بتن UHPFRC بدون استفاده از فوق روان کننده امکان پذیر نمی‌باشد. در این پژوهش از فوق روان کننده AURAMIX 4450 استفاده شده است که مزایای این فوق روان کننده‌ها عبارتند از:

- افزایش مقاومت فشاری اولیه و نهایی بتن
- افزایش مقاومت خمشی بتن
- افزایش چسبندگی بتن به آرماتورها و فولادهای پیش تنیدگی
- افزایش مقاومت بتن در برابر کربناسیون
- کاهش نفوذپذیری بتن
- افزایش مقاومت بتن در مقابل عوامل جوی خورنده
- کاهش افت و خزش بتن
- افزایش دوام بتن

در ساخت این نوع بتن از مخلوط فوق روان کننده و یخ استفاده شده است که همانند مخلوط آب و یخ موجب کاهش دمای هیدراسیون و افزایش خاصیت دیرگیری در بتن می‌شود. نمونه‌ای از مخلوط آب و فوق روان کننده مصرفی در شکل ۳-ب نشان داده شده است.

^۱ High Range Water Reducer

^۲ Superplasticizer



شکل ۳. الف) مخلوط آب و یخ، ب) مخلوط فوق روان کننده و یخ در ساخت بتن UHPFRC.

۲-۲-۶- سنگدانه

برای انتخاب نوع سنگدانه آزمایش‌های مختلف بر روی انواع ماسه کوارتزی، ماسه سرام، ماسه رودخانه‌ای آذرشهر، ماسه شکسته آذرشهر و ماسه شبستر انجام شده است و به دلیل مقاومت فشاری بالای ماسه رودخانه‌ای آذرشهر نسبت به سایر انواع سنگدانه از آن استفاده شده است. به منظور دستیابی به ابعاد و دانه‌بندی مورد نظر از الک‌های استاندارد شماره ۲۰۰ و ۱۶ استفاده شده است. بر این اساس ابعاد سنگدانه به کار رفته در این نوع بتن در محدوده ۰/۰۷۵ و ۱/۱۸ میلی‌متر قرار گرفته است. لازم به ذکر است که ماسه کوارتزی از شرکت معدن گوهران اصفهان ایران تهیه شده است و در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. ماسه کوارتزی به کار رفته در ساخت بتن UHPFRC.

۲-۲-۷- پودر کوارتز

استفاده از پوزولان‌های طبیعی در سیمان یا بتن باعث ایجاد نتایج مفیدی در خواص آن می‌شود که برخی از آن‌ها عبارتند از:

- کاهش حرارت هیدراسیون
- افزایش مقاومت نهایی
- کاهش نفوذپذیری
- افزایش مقاومت در برابر سولفات
- کاهش فعالیت قلیایی سیلیکا

علاوه بر این مشخص است که استفاده از مواد پوزولانی و سیمانی در مقادیر زیاد در پایداری صنعت سیمان و بتن بسیار مهم است. این اهمیت نه تنها مربوط به بهره‌وری انرژی و جنبه‌های زیست‌محیطی صنعت سیمان است، بلکه با پایداری و سیکل هزینه سازه‌های بتنی نیز در ارتباط می‌باشد [9]. در تحقیق حاضر در طرح اختلاط بتن الیافی با کارایی بسیار بالا از پودر کوارتز با نسبت‌های مختلف به عنوان جانشین سیمان استفاده شده است و هدف بدست آوردن تاثیر آن بر مشخصه‌های فیزیکی مانند مقاومت فشاری بتن می‌باشد. پودر کوارتز مصرفی از شرکت معدن گوهران اصفهان ایران تهیه شده است که در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. پودر کوارتز به کار رفته در ساخت بتن UHPFRC.

۳- روند انجام آزمایش

مراحل اولیه این تحقیق به منظور ساخت بتن UHPFRC در ایران و با مصالح بومی انجام پذیرفته است. بر این اساس، تمامی مصالح مصرفی در بتن به غیر از الیاف فولادی از مصالح بومی تهیه شده است. طرح اختلاط اولیه بر اساس طرح اختلاط پیشنهادی گریبل^۱ و اصلاحی جغتایی و پوربابا در ایران در نظر گرفته شده [10,11] و نمونه‌هایی بر این اساس طبق طرح اختلاط جدول ۱ در آزمایشگاه ساخته شده است. بومی بودن مصالح مصرفی مانند سیمان مورد استفاده، در مشخصات نهایی بتن ساخته شده تاثیرگذار بوده و در نتیجه به منظور اصلاح طرح اختلاط اولیه و دستیابی به نتایج مورد انتظار، اصلاحاتی در مقادیر مصالح مصرفی انجام پذیرفته است. همچنین به دلیل ریزدانه بودن، تراکم بسیار بالای بتن UHPFRC و نیاز به صرف انرژی بسیار بالا، عملیات اختلاط آن به روش دستی با دشواری مواجه شده و در نتیجه این عملیات بواسطه میکسر انجام گرفته است. لازم به ذکر است که به منظور فراهم کردن شرایط برای اختلاط یکنواخت و مناسب، اجزایی علاوه بر اجزای اصلی میکسر در آن تعبیه شده است که در شکل ۶ نشان داده شده است.

جدول ۱. طرح اختلاط بتن UHPFRC [11].

مصالح مصرفی	درصد اختلاط مصالح
سیمان پرتلند	۲۸/۶۰
ماسه ریزدانه	۴۰/۹۰
میکروسیلیس	۹/۴۰
پودر کوارتز	۸/۵۰
فوق روان‌کننده	۱/۲۰
الیاف فولادی	۶/۲۰
آب	۵/۲۰

^۱ Graybeal



شکل ۶. میکسر مورد استفاده در ساخت بتن UHPFRC.

بر اساس این روند تعداد کثیری نمونه به منظور دستیابی به طرح اختلاط با مشخصات مطلوب از لحاظ کارایی و مقاومت فشاری و ... در قالب‌های مختلف اعم از قالب‌های مکعبی $100 \times 100 \times 100$ و $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر مکعب و همچنین قالب‌های استوانه‌ای با ارتفاع ۳۰۰ و قطر ۱۵۰ میلی‌متر بتن‌ریزی شده است و از جمله ارزیابی‌های انجام گرفته در این راستا بررسی تاثیر مقدار پودر کوارتز می‌باشد.

۴- ارزیابی پودر کوارتز

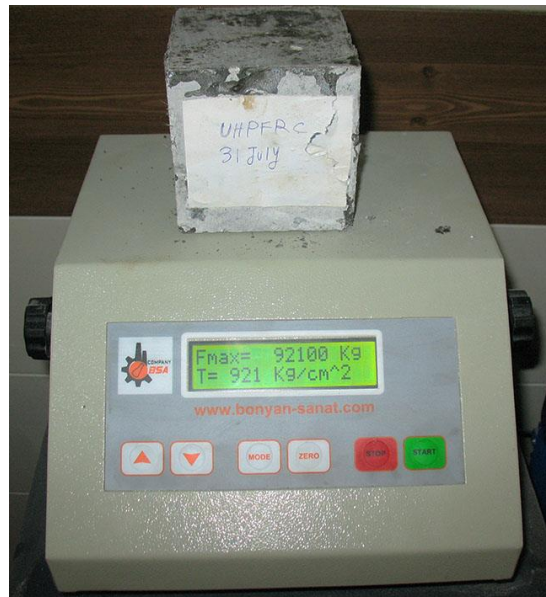
به منظور بررسی تاثیر مقدار پودر کوارتز در مقاومت فشاری بتن الیافی با کارایی بسیار بالا، ۶ طرح اختلاط مختلف با درصد‌های مختلفی از پودر کوارتز آزمایش شده‌اند. هر طرح اختلاط شامل ۲ نمونه با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر مکعب بوده و در کل ۱۲ نمونه بتن UHPFRC ساخته شده است. یکی از نمونه‌های ۷ روزه از این نمونه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. در این نمونه‌ها مقاومت‌های فشاری ۷ روزه اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. بر اساس این جدول، بیشترین مقاومت فشاری ۷ روزه برابر با ۹۲/۱ مگاپاسکال بدست آمده است که در شکل ۸ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که آزمایش مقاومت فشاری در روش ASTM روی نمونه‌های استوانه‌ای 150×300 میلی‌متری (6×12 اینچ) انجام می‌شود ولی به دلیل زیاد بودن مقاومت و تجاوز آن از حد نهایی دستگاه، دستگاه بتن‌شکن ۲۰۰ تنی قادر به شکست آن نبوده و در نتیجه ابعاد نمونه‌ها به $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر مکعب کاهش داده شده‌اند.



شکل ۷. نمونه ۷ روزه بتن UHPFRC.

جدول ۲. درصدهای پودر کوارتز و مقاومت‌های فشاری ۷ روزه بتن UHPFRC.

درصد پودر کوارتز در طرح اختلاط بتن UHPFRC	مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه مکعبی ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر مکعب (مگاپاسکال)
۵	۸۲/۷
۸/۲۵	۹۲/۱
۱۱/۵	۸۵/۴
۱۴/۷۵	۷۶/۴
۱۸	۶۱/۲
۲۱/۲۵	۵۴/۳



شکل ۸. بیشترین مقاومت حاصل از بررسی مقادیر مختلف پودر کوارتز.

۵- نتیجه‌گیری

مقادیر مصالح به کار رفته، در رفتار بتن UHPFRC بسیار تاثیرگذار می‌باشد، از این رو یافتن مقادیر بهینه برای هریک از آن‌ها الزامی بوده و آزمایش‌های متعددی در این راستا و بر روی مصالح مختلف برای یافتن طرح اختلاط بهینه با مصالح بومی انجام گرفته است. از جمله این مصالح پودر کوارتز می‌باشد که بر اساس آزمایش‌های انجام شده در مورد مقادیر مختلف پودر کوارتز به منظور بررسی تاثیر آن در بتن UHPFRC نتیجه‌گیری شده است که درصد بهینه آن در طرح اختلاط برای دست‌یابی به مقاومت حداکثر برابر با ۸/۲۵ درصد و مقاومت بدست آمده از این مقدار برابر با ۹۲/۱ مگاپاسکال می‌باشد. افزایش یا کاهش مقدار پودر کوارتز باعث کاهش مقاومت فشاری آن می‌شود بطوریکه بر اساس نتایج حاصل، با افزایش درصد این ماده از ۸/۲۵ به ۲۱/۲۵، تغییرات مقاومت فشاری سیر نزولی پیدا می‌کند.

لازم به ذکر است که در این مقاله فقط مقاومت فشاری بدست آمده با مقاومت فشاری معمول این نوع بتن‌ها مقایسه شده است و سایر مشخصات مکانیکی مهم بتن از جمله مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و ... در حال بررسی می‌باشد و در فرصت‌های آتی نتایج بدست آمده منتشر خواهد شد.

۶- مراجع و منابع

- [1] Jianxin, Ma. and Schneider, H., "Properties of ultra-high-performance concrete", Leipzig Annual Civil Engineering Report, no. 7, pp. 25-32, 2002.
- [2] Bøhnsdalen Eide, M. and Hisdal, J.M., "Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – State of the art", COIN Project report 44, pp. 4-21, 2012.
- [3] Richard, P. and Cheyrezy, M., "Composition of reactive powder concretes", Cement and Concrete Research, vol. 25, no. 7, pp. 1501–1511, 1995.
- [4] Papadakis, V.G., "Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete", Cement and Concrete Research, vol. 29, no. 1, pp. 79–86, 1999.
- [5] "Ultra-High Performance Concrete", A State-of-the-Art Report for the Bridge Community Publication No. FHWA (Federal Highway Administration)-HRT-13-060, 2013.
- [۶] وزارت راه و شهرسازی، معاونت مسکن و ساختمان، "مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمان‌های بتن‌آرمه"، ویرایش چهارم، چاپ نهم، صفحه ۲۱، ۱۳۹۲.
- [7] ACI 234R-06, "Guide for the Use of Silica Fume in Concrete", Reported by ACI Committee 234, pp. 2-10.
- [8] Shah, A., Khan, S., Khan, R. and Jan, I.U., "Effect of high range water reducers (HRWR) on the properties and strength development characteristics of fresh and hardened concrete", Transactions of Civil Engineering, Vol. 37, No. C+, pp. 513-517, 2013.
- [۹] صدر ممتازی، ع.، سعیدی‌فر، ن. و بلالایی، ف.، "بررسی تاثیر پودر کوارتز بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملات سیمان"، کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، معماری و زیرساخت‌های شهری، ۷ و ۸ مرداد ۱۳۹۴.
- [10] Graybeal, B., "Ultra-High Performance Concrete", TechNote, FHWA-HRT-11-038, Federal Highway Administration, McLean, VA, 2011.
- [۱۱] جغتائی، ع. و پوربابا، م.، "ساخت آزمایشگاهی بتن الیافی با کارایی بسیار بالا (UHPFRC) با مصالح ریزدانه بومی کشور و ارائه طرح اختلاط بهینه در ایران"، اولین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت، دانشگاه صنعتی شریف، ۱ و ۲ مهر ۱۳۹۵.