بسمه­تعالی

پاسخ به نظرات داوران محترم

با سلام و با تشکر از دقت نظر داوران محترم؛

در فایل "مقاله اصلاح شده" بخش‌های تغییر یافته با رنگ زمینه زرد و بخش های افزوده شده با رنگ زمینه سبز مشخص شده‌اند.

پر واضح است که پس از اعمال تغییرات، شماره جداول، تصاویر و منابع تغییر یافته اند که رنگ زمینه آن ها تغییر داده نشده است.

1. *عنوان طرح اختلاط، مراحل گام به گام تعیین نسبت های مخلوط را به ذهن می‌آورد، اما در این تحقیق ، فقط جایگزینی انجام شده است و طرح اختلاطی پیشنهاد نشده است. پیشنهاد می‌شود تا عنوان به شرح زیر تغییر یابد: " تاثیر جایگزینی پودر دیاتومیت منطقه .... به جای پودر کوارتز در مشخصات مکانیکی بتن های پودر واکنشی"*

**عنوان ویرایش شد.**

1. *چکیده:  جمله " بتن‌پودری‌واکنشی یکی از بتن‌های با مقاومت و دوام بالا است که اجزای اصلی آن: سیمان، دوده سیلیسی، پودر کوارتز، ماسه سیلیسی، فوق روان کننده" ضروری نیست و اهمیت پودر کوارتز و هزینه زیاد آن بهتر است برجسته شود.*

**چکیده ویرایش شد.**

1. *مشخصات بتن پایه نیز در چکیده قید شود و اینکه برای چه مقاومت فشاری مشخصه ای تعریف شده است.*

**مقاومت فشاری و کششی بتن پایه به چکیده افزوده شد.**

 **برای بتن معمولی در طرح اختلاط بتن مثلا به روش ACI، مقاومت مشخصه در نظر گرفته می‌شود و بر اساس آن طرح اختلاط انجام می‌گیرد. ولی در بتن‌پودری‌واکنشی مقاومت بدست آمده خیلی زیادتر از مقاومت لازم می‌باشد، لذا با توجه به ملاک‌هایی که بخشی در ذیل آورده‌شده و نیز تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی و تست مقاومت‌های هفت روزه، (با روش سعی و خطا) طرح اختلاط بتن مبنا تعیین می‌شود.**

* **مقدار حدود 700 الی 1000 کیلوگرم در مترمکعب می باشدکه گاها تا 1200کیلوگرم هم مورد استفاده قرار گرفته است.**
* **مقدار دوده سیلیسی حدود 15% نسبت به مجموع دوده سیلیسی و سیمان مناسب است.**
* **مقدار فوق‌روان‌کننده (که در بتن های معمولی حداکثر 1% وزن سیمان مصرفی است) در بتن‌پودری‌واکنشی مابین 4/2 الی 4 درصد وزن سیمان، مصرف می‌شودکه اغلب حدود 3% و یا نزدیک به 3% در نظر گرفته می‌شود. در بتن‌پودری‌واکنشی اغلب از فوق‌روان‌کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر استفاده می‌شود.**
* **نسبت آب به سیمان بین 16/0 و 27/0 توصیه شده است که بهینه مقدار آن حدود 22/0 می‌باشد.**

*همینطور به دلیل اهمیت مقدار مقاومت فشاری و کششی، در چکیده افزایش به صورت درصدی نوشته نشود. به طور مثال، جایگزینی 100 درصد پودر دیاتومیت به جای پودر کوارتز، مقاومت فشاری را از 543 تا 806 مگاپاسکال افزایش داده است.*

**تغییر پیشنهادی در چکیده اعمال گردید.**

1. در قسمت برنامه آزمایشگاهی نتایج XRD پودر کوارتز، پودر دیاتومیت و دوده سیلیسی مقایسه شود.  پودر دیاتومیت واکنش پوزولانی خواهد داشت.

**از نتایج تحقیقات پیشین در این مورد، در بخش پیشینه تحقیقات درمقدمه افزوده شد.**

1. *مشخصات فیزیکی ماسه سیلیسی و پودر دیاتومیت اضافه شود.*

**افزوده شد.**

1. *در قسمت نتایج توضیح داده شود، اثر افزودن پودر دیاتومیت بر مشخصات مکانیکی به دلیل پرکنندگی است و یا به دلیل واکنش پوزولانی.  در واقع به دلیل واکنش پوزولانی دیاتومیت، در واقع با کاهش پودر کوارتز، خمیر افزایش داده می شود.*

**هر دو خمیر سیمان را افزایش می‌دهد اما مشارکت پودر میکرونیزه کوارتز کمتر است. همچنان که در بخش چکیده توضیح داده شده است: "****پودر میکرونیزه کوارتز، کریستاله می‌باشد اما بخشی از ذرات بسیار ریز آن اثر جزئی در واکنش‌های پوزولانی دارد؛ ولی در مقابل، پودر دیاتومیت که هم دارای ذرات آمورف و هم دارای ذرات کریستالی است با درصد بالایی از سیلیس آمورف، واکنش‌های پوزولانی بیشتری خواهد داشت".**

**همچنین در بخش نتیجه‌گیری به ترتیب زیر توضیح داده شده است: "پودر دیاتومیت جایگزین مناسبی برای پودر کوارتز می‌باشد چرا که با افزایش درصد جایگزینی بهبود چشمگیر مشخصات مکانیکی بتن‌پودری‌واکنشی مشاهده شد؛ علت این امر آن است که درصد بالایی از پودر دیاتومیت به‌صورت آمورف است و درنتیجه در واکنش‌های پوزولانی، سهم بیشتری نسبت به پودر کوارتز که اغلب کریستاله است، دارد".**

1. *از کلمات نرمال، بتونیر و .... که معادل فارسی دارند، استفاده نشود.*

**کلمات مورد نظر عوض شدند.**

1. *از نمونه ها، عکس الکترونی تهیه شود و روی آن تحلیل انجام شود.*

**برای خرید مصالح و هزینه‌های جانبی مانند حمل و نقل، بودجه محدودی برای پایاننامه دانشجویان کارشناسی ارشد تعیین شده است. در این آزمایش‌ها هزینه نهایی، مقداری هم از سقف تعیین شده بیشتر بوده است و امکان عکس‌برداری‌ پیشنهادی وجود ندارد.**

1. *نتایج به شکل ارائه گزارش است، نیاز است تا تحلیل های مناسب روی آنها انجام شود. عکس‌های الکترونی و همچنین XRD می تواند به تحلیل ها کمک کند.*

**تحلیل‌هایی به نتایج آزمایش‌ها در متن افزوده گردید.**

**سوال مشابه سوال قبلی می‌باشد؛ لذا همانطور که ذکر گردید: برای خرید مصالح و هزینه‌های جانبی مانند حمل و نقل، بودجه محدودی برای پایاننامه دانشجویان کارشناسی ارشد تعیین شده است. در این آزمایش‌ها هزینه نهایی، مقداری هم از سقف تعیین شده بیشتر بوده است و امکان عکس‌برداری‌های پیشنهادی وجود ندارد.**

1. *تحلیل بر توسعه مقاومت در سنین 7 ، 14 و 28 برجسته شود. در کل ضرورت انجام آزمایش در این سنین تبیین شود.*

**تحلیل‌هایی به نتایج آزمایش‌ها در متن افزوده گردید.**

**در بتن معمولی، معمولا مقاومت های 28 و 90 روزه وگاها در برخی از آزمایش 180 روزه و بیشتر مورد نظر است. اما چون RPC یک بتن با مقاومت بالا است و کسب مقاومت در هفته اول معمولا حدود 60 الی 70% می باشد، لذا اغلب مقاومت های 7، 14 و 28 روزه مد نظر بوده و کافی خواهد بود. در بیشتر مطالعات انجام شده بر روی RPC هم اغلب تا 28 روزه در نظر می گیرند و گاها 90 روزه را هم تست می کنند. و چون مقاومت فشاری بتن در سن 28 روزه جزو مشخصات اصلی یک بتن می‌باشد، لذا مقاومت های سن 28 روزه از همه مهم‌تر خواهد بود.**

1. *مشخصات مکانیکی شامل مقاومت فشاری و کششی که روی نمونه ها انجام شده است، برای بررسی بتن پودری کافی به نظر نمی رسد. مشخصات دوام حداقل درصد جذب آب و نفوذ یون کلرید بهتر است اضافه شود.*

**نتایج جذب آب حین عمل آوری و جذب آب ASTM به متن اضافه گردید چون که قبلا انجام شده بود. در مورد آزمایش نفوذ یون کلرید، امکانات آزمایشگاهی در آزمایشگاه دانشگاه وجود ندارد و انجام نشده است.**

1. *جدول 10(نتایج مقاومت فشاری) منظورتان مقاومت در سن ذکر شده هست یا مدت زمان عمل‌آوری؟ این دو با هم فرق دارند.*

**گیرش سیمان و سایر واکنش های پوزولانی از زمان اختلاط شروع می‌شوند. در نمونه های ما مدت زمان باز کردن قالب 24 ساعت می‌باشد که این مدت زمان هم جزو زمان‌های کسب مقاومت می باشد. واضح است که با پیشرفت واکنش‌های هیدراتاسیون نیاز به جذب آب اضافه وجود دارد که این امر پس از باز کردن از قالب با انواع روش‌های عمل‌آوری ممکن خواهد شد. که در این آزمایش‌ها از روش غرقاب کردن در داخل حوضچه آب با دمای 25 درجه‌سانتی‌گراد استفاده شده‌است. لذا منظور ما در سن نمونه ها است که از لحظه اختلاط محاسبه می‌شود.**

1. *نتایج جذب آب ASTM در ازمایش ها نیست.*

**افزوده شد.**

1. *لجند رنگ سبز در شکل 3 و 5 وجود ندارد.*

**اصلاح شد.**

1. *از آنجایی که نسبت آب به سیمان مهم‌ترین فاکتور در مقایسه نهایی است، چرا با افزایش روان‌کننده به روانی لازم نرسیدید؟*

**برای افزایش روانی بایستی یا مقدار آب و یا مقدار فوق‌روان‌کننده را افزایش داد که افزایش آب بدون هزینه است. همچنین چون مقدار زیادی سیمان هیدرانه نشده در محیط وجود دارد (یعنی جدار نازکی از دانه‌ها سیمان هیدراته شده‌اند و در نتیجه سیمان هیدراته‌نشده زیادی برای واکنش با آب وجود دارد) و بنابراین افزایش آب در این حالت مشکلی از لحاظ مقاومت بتن ایجاد نخواهد کرد.**

.

با تشکر و احترام

**تاثیر جایگزینی پودر دیاتومیت ممقان به جای پودر کوارتز بر مشخصات مکانیکی بتن‌پودری‌واکنشی**

(دريافت: 00/00/00، پذيرش: 00/00/00)

**چکيده**

بتن‌پودری‌واکنشی (RPC) یکی از بتن‌های با مقاومت و دوام بالا است؛ مواد تشکیل‌دهنده آن، از جمله پودر کوارتز جزو مواد گران هستند که در منطقه آذربایجان کمیاب بوده و اغلب از معادن همدان و اصفهان تهیه می‌شود؛ که می‌توان با جایگزین کردن مصالح بومی و ارزان‌تر هزینه‌های نهایی تولید آن را کاهش داد. پودر میکرونیزه کوارتز، کریستاله می‌باشد اما بخشی از ذرات بسیار ریز آن اثر جزئی در واکنش‌های پوزولانی دارد؛ ولی در مقابل، پودر دیاتومیت که هم دارای ذرات آمورف و هم دارای ذرات کریستالی است با درصد بالایی از سیلیس آمورف، واکنش‌های پوزولانی بیش‌تری خواهد داشت. در این پژوهش جایگزینی پودر دیاتومیت به جای پودر کوارتز با درصدهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ انجام شد. آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی (آزمایش دونیم‌شدن) در سنین ۷، ۱۴، و ۲۸ روزه انجام گرفت . همچنین مقادیر جذب آب استاندارد، جذب آب حین عمل آوری، چگالی و روانی اندازه گیری شد. برای آن که عمل‌آوری شبیه به شرایط کارگاهی و معمولی فصل بتن‌ریزی باشد، از اتوکلاو استفاده نشد و نمونه‌های ساخته‌شده در داخل حوضچه‌آب در دمای ۲۵ درجه‌سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد که افزایش مقاومت در نمونه‌ها اتفاق افتاده‌است؛ به طوری که در جایگزینی ۱۰۰٪ در سن ۲۸ روزه، مقاومت فشاری را از 543 تا 806 مگاپاسکال(حدود ۴۹٪) و مقاومت کششی را از 543 تا 806 مگاپاسکال(حدود 18٪) افزایش داده‌است. همچنین باید در نظر داشت به دلیل وجود معدن دیاتومیت در منطقه، هزینه نهایی تولید بتن به دست آمده نیز کاهش می‌یابد.

**کلیدواژه­ها:** بتن‌پودری‌واکنشی، پودر کوارتز، پودر دیاتومیت، مقاومت فشاری، ‌مقاومت کششی.

**1- مقدمه**

بتن‌پودری‌واکنشی نوعی از بتن‌های با مقاومت بالا و شکل‌پذیری بالا است که برای کاربرد‌های خاص تولید شده‌است. در این نوع بتن با حذف سنگدانه‌های درشت از بتن، یک ماتریس سیمانی همگن و متراکم بدست می‌آید که عملکرد مکانیکی بالایی را از خود نشان می‌دهد [1]. البته بالا بودن مقاومت‌فشاری در بتن‌پودری‌واکنشی تنها به حذف سنگدانه‌های درشت مربوط نیست؛ چرا که نتایج مطالعات برروی جایگزینی انواع ماسه‌کوارتز ریزآسیاب‌شده (۴۰/۰ – ۱۵/۰ میلی متر) با حجم مساوی از سنگدانه‌طبیعی به خوبی درجه‌بندی‌شده (با حداکثر اندازه ۸ میلی‌متر) تغییری در مقاومت فشاری بتن‌پودری‌واکنشی، در همان نسبت آب به سیمان، نشان نداده‌است [2]. پودر کوارتز و ماسه‌سیلیسی از مهم‌ترین اجزا این نوع بتن هستند؛ ولی با توجه به تاثیرات زیست‌محیطی و همچنین کمبود این مواد در مناطق مختلف، جایگزینی آن‌ها با مواد در دسترس‌تر، ارزان‌تر و نیز با اثرات زیست‌محیطی کمتر از موضوعات مورد بحث می‌باشد.

 یکی از مصالح جایگزین پیشنهادی، نوعی پوکه‌سنگ ‌رسوبی طبیعی با تخلخل بالا و چگالی کم با نام دیاتومیت است. دیاتومیت یک ماده پوزولانی سفید رنگ، حاوی سیلیس آمورف، سیلیس کریستالی و مقادیر جزئی مواد معدنی می‌باشد [3]؛ اغلب ۸۰ الی ۹۰ درصد آن را دی‌اکسید سیلیسیوم تشکیل می‌دهد و نیز دارای مقداری آلومینیوم و آهن است. مطابق شکل 1 ساختار ذرات دیاتومیت دارای اشکال مختلف با تخلخل درون ذره‌ای است که باعث بهبود استحکام پیوند در ماتریس بتن می‌شود؛ همچنین دیاتومیت به علت همین ساختار خود، جذب آب بالایی دارد به طوری‌که در حالت عادی دو برابر حجم خود می‌تواند آب جذب کند؛ این امر باعث کاهش روانی بتن می‌شود [4].

**Fig. 1.** SEM images of the surface of diatomite particles [5].



**شکل 1.** ساختار ذرات دیاتومیت زیر میکروسکوپ[5].

شکل 2 نتایج پراش‌اشعه‌ایکس (XRD) بر روی دیاتومیت را نشان می‌دهد که توسط ابراهیم و سلیم در سال 2012 انجام شده‌است. همچنین در شکل 3 الگوی پراش اشعه ایکس بر روی دوده سیلیسی و پودر کوارتز، انجام شده توسط تاورس و همکاران در سال 2020، قابل مشاهده است.

**Fig. 2.** XRD patterns of diatomite [6].

****

**شکل 2.** الگوی XRD برای دیاتومیت [6].

**Fig. 3.** XRD patterns of quartz powder and silica fume [7].



**شکل 3.** الگوی XRD برای دوده سیلیسی و پودر کوارتز [7]

مطابق شکل‌های 2 و 3، دوده سیلیسی بیشتر دارای ساختار آمورف و پودر کوارتز بیشتر دارای ساختار کریستالی است[6]؛ پودر دیاتومیت نیز هم دارای ذرات آمورف و هم دارای ذرات کریستالی است[7] که با درصد بالایی از سیلیس آمورف، واکنش‌های پوزولانی بیش‌تری نسبت به پودر کوارتز خواهد داشت.

 فراگلویس و همکاران در سال 2004 میلادی با هدف جایگزینی دیاتومیت به‌عنوان یک ماده پوزولانی به‌جای قسمتی از سیمان برای ساخت ملات سیمان، مطالعاتی انجام دادند. در این تحقیق به بررسی دو نوع دیاتومیت رسی و آهکی از دو ناحیه مختلف در مصر مورد بررسی قرارگرفت. نتایج حاصل از این مطالعه تجربی نشان داد که با افزایش دیاتومیت، زمان گیرش ابتدایی و نهایی، نیاز به آب و نیز مقاومت بلند مدت همه نمونه‌ها بیشتر می‌شود [8]. کاستیس و همکاران در سال 2006 میلادی، اثر افزودن دیاتومیت بر هیدراتاسیون و خواص ملات‌های سیمانی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد واکنش پوزولانی دیاتومیت باعث تولید بیشتر محصولات هیدراسیون سیمان به ویژه در سن 28 روزگی و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی ملات‌های حاوی آن شده‌است. همچنین افزودن دیاتومیت منجر به افزایش میزان آب مورد نیاز می‌شود [9]. دیرمنجی و یلماز در سال 2009 میلادی، در تحقیقات خود از پودر دیاتومیت به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان در تولید ملات سیمان استفاده کرده و آن را در در مقادیر ۰ و ۵ و ۱۰ و۱۵ درصد مورد بررسی قرار دادند. این محققین با توجه به نتایج آزمایش، جایگزینی سیمان پرتلند با دیاتومیت را تا ۵ درصد در تولید ملات سیمان پیشنهاد دادند[10].

ارگون در سال 2011 میلادی در تحقیقی بر روی جایگزینی دیاتومیت به‌جای بخشی از سیمان، خواص مکانیکی نمونه‌های بتنی مربوطه را مورد بررسی قرار داد. نتایج بررسی‌های وی حاکی ازافزایش مقاومت فشاری بتن‌های حاوی جایگزینی سیمان با دیاتومیت۵٪ و ۱۰٪ است. او به این نتیجه رسید که از نظر اقتصادی و زیست محیطی استفاده از این مواد به‌عنوان جایگزین سیمان در تولید مخلوط‌های بتن با دوام‌تر منطقی است [3]. پوکورنی و همکاران در سال 2019 طی تحقیقی نتیجه گرفت که فعالیت پوزولانی بالای دیاتومیت منجر به کاهش تخلخل و افزایش مقاومت فشاری بتن‌ می‌شود [11]. سعیدی و همکاران در سال 2020 میلادی بخاطر نبود دوده‌سیلیسی و سرباره در استان آچه اندونزی، از پودر خاک‌دیاتومه‌کلسینه شده به عنوان جایگزینی جزئی از سیمان استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که میزان اسلامپ با افزایش درصد خاک‌دیاتومیت کاهش می‌یابد. آن‌ها با جایگزین کردن دیاتومیت با ۵٪ و ۱۰٪ از سیمان به این نتیجه رسیدند که باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود که دلیل آن می‌تواند به کم شدن عیار سیمان مربوط باشد [12]. لی و همکاران در سال 2023 میلادی در تحقیقاتشان از دیاتومیت بازیافتی برای جایگزینی بخشی از سیمان برای ساخت ملات‌سیمان استفاده کرده‌اند. با توجه به نتایج مشخص شدد با افزایش مقدار دیاتومیت جایگزین، میزان آب و زمان گیرش افزایش می یابد. از نظر مقاومت فشاری، جایگزینی ۱۰ درصد دیاتومیت در ۲۸ روز مقاومت بالاتری داشته اما جایگزینی دیاتومیت ۲۰٪ در ۹۰ روز استحکام بالاتری از خود نشان داد[13].

**اهداف پژوهش:** از آن جایی که دیاتومیت دارای سیلیس‌آمورف و سیلیس‌کریستالی است لذا احتمال داده می‌شود که جایگزین مناسبی برای پودرکوارتز بوده و باعث افزایش مقاومت بتن‌پودری‌واکنشی شود. همچنین چون معدن دیاتومیت در منطقه وجود دارد، استفاده از این مصالح بومی، صرفه اقتصادی داشته و موجب کاهش هزینه نهایی تولید بتن‌پودری‌واکنشی می‌شود. این فرضیه در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

**2- مواد و روش ها**

**سیمان:** سیمان مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها از کارخانه سیمان صوفیان (در نزدیکی تبریز) تهیه شده‌است. سیمان مصرفی، سیمان پرتلند نوع دو می‌باشد که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده‌است.

**Table 1.** Properties of Sufian cement of type two

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Value** | **Unit** | **Item** |
| 3230 | $$(cm^{2}/ gr)$$ | Fineness (Blaine) |
| 3.86 | (%) | Residue on 90 µ Sieve |
| 0.18 | (%) | Autoclave Expansion |
| 1.1 | (mm) | Le Chatelier Expansion |
| 115 | (min) | Initial Setting Time |
| 185 | (min) | Final Setting Time |
| 3.16 | $$(gr/ cm^{3})$$ | Density |
| 240 | $$(kgf/ cm^{2})$$ | 3 days Compressive Strength |
| 345 | $$(kgf/ cm^{2})$$ | 7 days Compressive Strength |
| 465 | $$(kgf/ cm^{2})$$ | 28days Compressive Strength |
| 1.36 | (%) | L.O. I |
| 64.44 | (%) | Calcium oxide$ (CaO)$ |
| 21.70 | (%) | Silica$ (SiO\_{2})$ |
| 5.22 | (%) | Aluminum oxide $(Al\_{2}O\_{3})$ |
| 3.74 | (%) | Ferric oxide ($Fe\_{2}O\_{3})$ |
| 2.22 | (%) | Magnesium oxide $(MgO)$ |
| 0.58 | (%) | Potassium oxide $(K\_{2}O)$ |
| 0.22 | (%) | Sodium oxide $(Na\_{2}O)$ |
| 0.010 | (%) | Chloride Ion (Cl) |
| 0.51 | (%) | Others |

**جدول 1.** مشخصات سیمان پرتلند نوع دو صوفیان

**دوده سیلیسی:** دوده سیلیسی استفاده‌شده از معدن سمنان(کارخانه فروسیلیسیوم ایران) تهیه شده‌ که دارای خلوص بالا می‌باشد؛ خواص فیزیکی و شیمیایی آن به شرح جدول 2 است.

پودر کوارتز: پودر کوارتز مصرفی از شرکت معدنگوهران‌نیک اصفهان، تهیه شده که مطابق اطلاعات داده شده، از الک شماره 230 (75 میکرومتر) عبور داده شده‌است. همچنین در آزمایشگاه بتن مربوطه، نیز از ریزترین الک موجود یعنی الک شماره 200 (75 میکرومتر) مجددا عبور داده شده‌است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن مطابق جدول 3 می‌باشد.

**Table 2.** Properties of the silica fume

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Value** | **Unit** | **Item** |
| Amorphous | - | Shape |
| Spherical | - | Particle shape |
| 400-600 | $$(kg/ m^{3})$$ | specific gravity |
| 20000-25000 | $$(m^{2}/ kg)$$ | specific surface area |
| Gray | - | Colour |
| 229 | $$(nm)$$ | Size |
| 96.4 | (%) | Silica$ (SiO\_{2})$ |
| 1.32 | (%) | Aluminium oxide $(Al\_{2}O\_{3})$ |
| 0.97 | (%) | Magnesium Oxide$ (MgO)$ |
| 0.87 | (%) | Ferric oxide ($Fe\_{2}O\_{3})$ |
| 0.49 | (%) | Calcium Oxide$(CaO)$ |
| 0.3 | (%) | Carbon $(C)$ |
| 0.1 | (%) | SO3 |
| 0.31 | (%) | Sodium oxide $(Na\_{2}O)$ |
| 1.01 | (%) | Potassium oxide $(K\_{2}O)$ |
| 0.08 | (%) | H2O |

**جدول 2.** مشخصات دوده‌سیلیسی

**Table3.** properties of Quartz powder

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Value** | **Unit** | **Item** |
| 2.68 | $$(gr/ cm^{3})$$ | Density |
| Crystalline | - | Shape |
| White | - | Colour |
| 0.28 | (%) | L.O. I |
| 0.7 | (%) | Calcium oxide$ (CaO)$ |
| 96.6 | (%) | Silica$ (SiO\_{2})$ |
| 0.23 | (%) | Aluminum oxide $(Al\_{2}O\_{3})$ |
| 0.03 | (%) | Ferric oxide ($Fe\_{2}O\_{3})$ |
| <0.1 | (%) | Magnesium oxide $(MgO)$ |
| 0.02 | (%) | Potassium oxide $(K\_{2}O)$ |
| <0.1 | (%) | Sodium oxide $(Na\_{2}O)$ |
| 0.04 | (%) | SO3 |

**جدول 3.** مشخصات پودر کوارتز

**پودر دیاتومیت:** دیاتومیت از میکرو فسیل‌های سیلیکاتی تک‌سلولی‌های آبزی به نام دیاتوم تشکیل شده و به‌صورت پوکه سنگ‌های رسوبی سفید رنگ و نرم در طبیعت مشاهده می‌شوند. از خصوصیات دیاتومیت می‌توان به سطح ویژه زیاد، نفوذپذیری زیاد جذب آب بالای، اندازه ریزذرات، تخلخل زیاد و انتقال گرمایی کم اشاره کرد. دیاتومیت در لایه‌های نزدیک سطح زمین تشکیل می‌شود. به سبب نرم بودن آن نیاز به‌استفاده از مواد منفجره برای رسیدن به معدن آن نیست و با ماشین‌آلاتی مانند لودر نیز به‌راحتی قابل استخراج می‌باشد. برای تهیه پودر دیاتومیت از معدن دیاتومیت‌ممقان در نزدیکی شهر ممقان (کیلومتر ۳۵ جاده تبریز – مراغه) استفاده شده‌است. دیاتومیت موجود در معدن پس از خشک‌شدن و آسیاب‌شدن از الک نمره 2۰۰ (75 میکرومتر) رد شده‌ و کاملاً به‌صورت پودر ریز در نمونه‌های ساخته شده به کار رفته‌است. جدول 4 مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن را نشان می‌دهد.

**Table 4.** Properties of Diatomite powder

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Value** | **Unit** | **Item** |
| 2.21 | $$(gr/ cm^{3})$$ | Density |
| White | - | Colour |
| 3.04 | (%) | L.O. I |
| 0.98 | (%) | Calcium oxide$ (CaO)$ |
| 90.4 | (%) | Silica$ (SiO\_{2})$ |
| 2.15 | (%) | Aluminum oxide $(Al\_{2}O\_{3})$ |
| 0.71 | (%) | Ferric oxide ($Fe\_{2}O\_{3})$ |
| 0.64 | (%) | Magnesium oxide $(MgO)$ |
| 0.2 | (%) | Potassium oxide $(K\_{2}O)$ |
| 0.45 | (%) | Sodium oxide $(Na\_{2}O)$ |

**جدول 4.** مشخصات پودر دیاتومیت معدن ممقان

**ماسه سیلیسی:** ماسه مورد استفاده از معدن قوم تپه تبریز استخراج شده که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول 5 ذکر شده‌است. دانه‌بندی آن نیز مطابق شکل 4 می‌باشد.

**Table 5.** Properties of silica sand of Qumtapeh

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Value** | **Unit** | **Item** |
| 2.63 | $$(gr/ cm^{3})$$ | Density |
| 0.7 - 1 | (%) | SSD water absorption |
| <0.6 | $$(mm)$$ | Size |
| Gray | - | Color |
| 0.2 | (%) | Moisture |
| 61.84 | (%) | Silica$ (SiO\_{2})$ |
| 15.20 | (%) | Aluminium oxide $(Al\_{2}O\_{3})$ |
| 1.32 | (%) | Magnesium Oxide$ (MgO)$ |
| 3.92 | (%) | Ferric oxide ($Fe\_{2}O\_{3})$ |
| 3.51 | (%) | Calcium Oxide$(CaO)$ |
| <0.05 | (%) | SO3 |
| 4.83 | (%) | Na2O |
| 3.53 | (%) | K2O |
| 0.08 | (%) | MnO |
| 0.43 | (%) | FeO |
| 1.37 | (%) | Fe3O4 |
| 0.11 | (%) | BaO |
| 3.73 | (%) | Fei |
| 3.36 | (%) | L.O. I |
| 0.19 | (%) | P2O5 |
| 0.69 | (%) | TiO2 |

**جدول 5.** مشخصات ماسه سیلیسی قوم تپه

همه دانه‌های این معدن از الک ٦۰۰ میکرون عبور می‌کند؛ اما در رگه های مختلف این معدن مقدار عبوری از الک 300 میکرون متفاوت می‌باشد. مطابق نمودار دانه بندی ماسه سیلیسی، تقریباً ۱۰۰٪ ماسه از الک نمره ۳۰ رد شده و ۶۵٪ ماسه روی الک نمره ۵۰ مانده‌است.

Fig. 4. Granulation curve of the used Silica sand

**شکل 4.** نمودار دانه‌بندی ماسه سیلیسی مصرفی

**فوق روان‌کننده‌ :** در این پژوهش از فوق روان‌کننده شرکت البرزشیمی استفاده شده که مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن در جدول 6 آمده‌است.

**Table 6.** Properties of the superplasticizer

|  |  |
| --- | --- |
| yellow | Colour |
| Liquid | Physical state |
| 1.1±0.02$(gr/ cm^{3})$ | Density |
| < 1.5 % | Chloride content |
| < 0.1 % | Na2O |
| 5-7 | PH |

**جدول 6.** مشخصات فنی فوق روان‌کننده

**3- طرح‌های مخلوط بتن‌پودری‌واکنشی**

 برای دستیابی به یک بتن شاهد با حداقل قیمت با حداکثر ظرفیت‌های بتن پودری واکنشی ۴ طرح مخلوط با دو نوع فوق‌روان‌کننده از دو کارخانه متفاوت ساخته و آزمایش‌ مقاومت‌ فشاری هفت روزه بر روی آن‌ها انجام شد. با مقایسه نتایج بدست‌آمده، یک طرح مخلوط به‌عنوان بتن مبنا یا بتن شاهد انتخاب گردید.

مطابق جدول 7، تعداد طرح‌های مخلوط اصلی آزمایش شده در این تحقیق ۷ می‌باشد که DP0 مربوط به بتن شاهد است. جایگزینی دیاتومیت به جای پودر کوارتز با درصدهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ انجام شد. به دلیل اینکه در جایگزینی‌های ۷۵ و ۱۰۰٪ کارایی و روانی بتن حاصل کمتر از حالت معمول شد، طرح‌ها اصلاح شدند که با پسوند R نشان داده شده‌است. برای هر طرح مخلوط ۱۰ نمونه مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر، برای تعیین هر یک از مقاومت‌های فشاری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه سه نمونه و یک نمونه برای تعیین جذب آب ASTM ساخته شد. همچنین ۹ نمونه‌استوانه‌ای با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر، برای انجام آزمایش دونیم‌شدن در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه (برای هر سن سه نمونه) ساخته شده‌است.

 **Table 7**. concrete mix-ratios for the types of samples

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| DP100-R | DP75-R | DP100 | DP75 | DP50 | DP25 | DP0 | **Mix-ratios****Unit**  | **Item** |
| 0.293 | 0.273 | 0.26 | 0.26 | 0.26 | 0.26 | 0.26 | ratio | Water/Cement |
| 0.209 | 0.195 | 0.185 | 0.185 | 0.185 | 0.185 | 0.185 | ratio | Water/Cementitious material  |
| 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | 750 | kg/m3 | Cement |
| 140 | 140 | 140 | 140 | 140 | 140 | 140 | kg/m3 | Silica fume |
| 860 | 860 | 860 | 860 | 860 | 860 | 860 | kg/m3 | Silica sand |
| 160 | 120 | 160 | 120 | 80 | 40 | 0 | kg/m3 | Diatomite powder |
| 0 | 40 | 0 | 40 | 80 | 120 | 160 | kg/m3 | Quartz powder |
| 220 | 205 | 195 | 195 | 195 | 195 | 195 | kg/m3 | Water |
| 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | kg/m3 | Super-plasticizer |

**جدول 7.** نسبت‌های مخلوط‌ بتنی برای نمونه‌ها

**4- آماده‌کردن بتن‌پودری‌واکنشی و قالب‌گیری نمونه‌ها**

برای مخلوط‌کردن بتن‌پودری‌واکنشی از مخلوط‌کن استفاده شد که کاملاً به صورت همگن بتن را مخلوط می‌کند. طبق نیاز و شرایط مصالح از روش ۳ مرحله‌ای برای مخلوط کردن مصالح استفاده شد. ابتدا یک پنجم هرکدام از مصالح خشک، یعنی ماسه، پودر کوارتز، دیاتومیت، دوده سیلیسی و سیمان داخل مخزن مخلوط‌کن ریخته شده و این کار 5 مرتبه تکرار میشود تا مصالح لایه لایه پشت سر هم در دیگ مخلوط‌کن ریخته و راحت تر مخلوط شوند. سپس به مدت ۵ دقیقه اختلاط خشک با مخلوط‌کن انجام شد. بعد از آن آب با فوق روان‌کننده مخلوط شده و نصف آن به مخلوط اضافه و ۸ دقیقه مخلوط شدند. در آخر آب باقی‌مانده به مخزن اضافه و ۸ دقیقه دیگر هم‌زدن ادامه یافت. بعد از مخلوط نمودن بتن، ابتدا آزمایش میز جریان برای تعیین روانی بتن انجام شد. سپس بتن در قالب‌های از قبل آماده و روغن‌کاری شده ریخته شد. این کار در ۳ مرحله انجام و با میله کوبی متراکم و سطح بتن‌ها با شمشه مخصوص صاف گردید. نمونه‌های داخل قالب، بر روی میز قرار داده و روی آن‌ها با نایلون و گونی، برای ازدست‌ندادن سریع آب و خشک نشدن سطح آزاد بتن زودتر از داخل آن، پوشانده شد. بعد از گذشت ۲۴ ساعت از بتن‌ریزی، نمونه‌ها از قالب خارج شده و بعد از وزن کردن، در آب با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شدند. قبل از انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی نیز، نمونه‌ها با حوله خشک و در حالت SSD وزن شدند.

**5- بررسی نتایج آزمایش‌ها**

**5-1- نتایج آزمایش میز جریان**

برای تعیین میزان کارایی بتن، آزمایش میز جریان طبق ASTM C230 انجام شد که مطابق این استاندارد قطر پخش‌شدگی برای ملات استاندارد در محدوده 5/۲۱ - 20 سانتی‌متر پیشنهاد شده‌است؛ این عدد برای بتن پودری واکنشی می‌تواند بیشتر هم در نظر گرفته شود، زیرا اولاً به علت ریزدانه بودن، یکنواختی و پیوستگی زیاد میانه دانه‌ها امکان جداشدگی ذرات وجود ندارد؛ همچنین برای بتن‌ریزی در جاهایی که تراکم آرماتور بیشتر است روانی بیش‌تری لازم است. با افزایش میزان جایگزینی پودر دیاتومیت، به دلیل خاصیت جذب آب بالای پودر دیاتومیت، کاهش کارایی محسوس می‌باشد. به‌طوری‌که برای طرح‌های DP75 و DP100 نیاز به اصلاح کارایی بتن وجود داشت تا به روانی موردنظر برسند. شکل 5 نتایج ثبت شده از این آزمایش را نشان می‌دهد.

**Fig. 5.** Flow table test results for RPC samples

**شکل 5.** نتایج بررسی روانی نمونه‌های بتنی با آزمایش میزجریان

برای افزایش روانی بایستی یا مقدار آب و یا مقدار فوق‌روان‌کننده را افزایش داد که افزایش آب بدون هزینه‌است. همچنین چون مقدار زیادی سیمان هیدرانه نشده در محیط بتن‌پودری‌واکنشی، وجود دارد (یعنی جدار نازکی از دانه‌ها سیمان هیدراته شده‌اند و در نتیجه سیمان هیدراته‌نشده زیادی برای واکنش با آب وجود دارد) و بنابراین افزایش آب در این حالت مشکلی از لحاظ مقاومت بتن ایجاد نخواهد کرد. با اصلاح طرح‌های مذکور، قطر پخش شدگی طرح مخلوط جایگزینی ۷۵٪ از ۴/۱۸ سانتی‌متر به ۲۰ سانتی‌متر و جایگزینی ۱۰۰٪ دیاتومیت از ۱۶ سانتی‌متر به ۲۲ سانتی‌متر رسیده‌است.

هردوی پودرهای دیاتومیت و کوارتز دانه‌ریز بوده و سطح مخصوص بالایی دارند؛ دانه‌های پودر کوارتز دانه‌های توپری هستند ولی دانه‌های پودر دیاتومتی اشکال مختلفی داشته و اغلب دارای حفره‌های درون ذره‌ای می‌باشند که باعث جذب آب بیشتر پودر دیاتومیت می‌شود. این آب جذب و حبس شده در درون این ذرات، در ادامه کمک شایانی به فرآیند عمل‌آوری نمونه‌های بتنی خواهند کرد. از طرف دیگر مشارکت ذرات پودر دیاتومیت در واکنش‌های پوزولانی نسبت به پودر کوارتز، خیلی بیشتر خواهند؛ لذا احتمال زیاد می‌دادیم که مقاومت بالاتر رود که در ادامه مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

**5-2- نتایج آزمایش مقاومت فشاری**

در شکل 6 یک نمونه بتنی بعد از آزمایش مقاومت فشاری توسط جک هیدرولیکی دیده می‌شود. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول 8 مشاهده می‌شود.

Fig. 6. Concrete sample after compressive strength test



**شکل 6.** نمونه بتنی بعد از انجام آزمایش مقاومت فشاری

**Table 8.** Compressive strength of RPC samples at different curing times

|  |  |
| --- | --- |
| **The compressive strength (MPa)** | **Concrete mix-ratios** |
| **28 days** | **14 days** | **7 days** |
| 543 | 520 | 345 | **DP0** |
| 632.5 | 576 | 491 | **DP25** |
| 682 | 661 | 558 | **DP50** |
| 765.5 | 745 | 722 | **DP75** |
| 806 | 788 | 758 | **DP100** |
| 754 | 633.5 | 559 | **DP75-R** |
| 811.5 | 693 | 615 | **DP100-R** |

**جدول 8.** مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف عمل‌آوری

**Fig. 7.** Compressive strength of RPC samples at different curing times

**شکل 7.** مقاومت فشاری نمونه‌ها در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

مطابق شکل 7 با افزایش درصد جایگزینی پودر دیاتومیت به جای پودر کوارتز، مقاومت فشاری نمونه‌ها به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای افزایش دارد. همچنین در تمامی طرح‌ها با افزایش سن نمونه‌ها، مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت؛ به‌طوری‌که نمونه DP100 با ۱۰۰٪ جایگزینی در سن‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب ۷/۱۱۹، ۵/۵۱ و ۴/۴۸ درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد (DP0) دارد. از این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که امکان جایگزینی پودر دیاتومیت به‌جای پودر کوارتز وجود دارد.

**Fig. 8.** Comparing the compressive strength of the samples with 75 and 100% diatomite powder replacement instead of quartz powder, before and after correction of consistency of Concrete

 **شکل 8.** مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها با جایگزینی 75 و 100% پودر دیاتومیت به جای پودر کوارتز، قبل و بعد از اصلاح روانی

باتوجه به‌اینکه روانی و کارایی دو طرح DP75 و DP100 مطلوب نبودند، اصلاحیه طرح‌ها برای روانی بهتر انجام و دو طرح DP75-R و DP100-R ساخته شدند. مطابق شکل 8، نتایج بررسی آن‌ها نیز در سنین ۲۸ روزه افزایش مقاومت فشاری را نشان داد. DP75-R و DP100-R نسبت به DP75 و DP100 آب بیش‌تری دارند، با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی نیز مقاومت فشاری کاهش خواهد یافت. کاهش مقاومت فشاری مشاهده شده بین دو طرح مذکور در سن 7 و 14 روز، قبل و بعد از اصلاح روانی، مربوط به افزایش مقدار آب است و مربوط به جایگزینی پودر دیاتومیت نیست. البته در هیچ کدام از این نمونه ها مقاومت فشاری نسبت به بتن مبنا کاهش نیافته‌است و همواره حالت افزایشی دارد. با توجه به اینکه واکنش‌های پوزولانی با تاخیر رخ می دهد، از این رو در سن ۲۸ روزه مقاومت فشاری DP75-R تقریبا به مقاومت فشاری DP75 رسیده و مقاومت فشاری DP100-R نیز نسبت به مقاومت فشاری DP100، 9 درصد افزایش یافته‌است؛ در این نمونه قابل ‌توجه‌است که با وجود افزایش نسبت آب به مواد سیمانی افزایش مقاومت فشاری همچنان اتفاق افتاده‌است. علت این امر را می‌توان اینگونه توضیح داد که ذرات پودر دیاتومیت دارای منافذ درون‌ذره‌ای و درنتیجه، دارای سطح مخصوص و جذب آب خیلی بیش‌تری نسبت به پودر کوارتز است؛ دلیل دیگر آن است که با اصلاح روانی این دو طرح و با افزایش مقدار آب و در نتیجه افزایش نسبت آب به مواد سیمانی، واکنش های پوزولانی بین ذرات سیمان و ذرات پوزولان (دوده سیلیسی و دیاتومیت) و CaO و MgO آزاد موجود در سیمان، افزایش‌یافته‌است (واضح است که CaO و MgO آزاد موجود در سیمان در هنگام اختلاط به شکل CaOH2 و MgOH2 درآمده و یونیزه شده‌است).

**5-3- نتایج آزمایش مقاومت کششی**

نتایج آزمایش مقاومت کششی (آزمایش دونیم‎‌شدن و یا کشش برزیلی)، در جدول 9 آمده‌است.

**Table 9.** Tensile strength of RPC samples at different curing times

|  |  |
| --- | --- |
| **The** **Tensile strength (MPa)** | **Concrete mix-ratios** |
| **28 days** | **14 days** | **7 days** |
| 59.24 | 52.71 | 25.96 | **DP0** |
| 62.10 | 60.51 | 40.92 | **DP25** |
| 63.69 | 60.83 | 51.91 | **DP50** |
| 65.61 | 61.46 | 53.18 | **DP75** |
| 70.06 | 64.65 | 55.10 | **DP100** |
| 55.73 | 50.96 | 40.45 | **DP75-R** |
| 62.42 | 59.24 | 56.69 | **DP100-R** |

**جدول 9.** مقاومت‌کششی نمونه‌ها در سنین مختلف عمل‌آوری

**Fig. 9.** Tensile strength of RPC samples at different curing times

**شکل 9.** مقاومت کششی نمونه‌ها در سنین مختلف عمل‌آوری

همان‌طور که در شکل 9 قابل مشاهده‌است با افزایش جایگزینی پودر دیاتومیت به‌جای پودر کوارتز مقاومت کششی نیز مانند مقاومت فشاری افزایش یافته‌است. همچنین در تمامی طرح‌ها با افزایش سن نمونه‌ها، به طور معمول، مقاومت کششی نیز افزایش دارد.

**Fig. 10.** Comparing the tensile strength of the samples with 75 and 100% diatomite powder replacement instead of quartz powder, before and after correction of consistency of concrete

**شکل 10.** مقایسه مقاومت کششی نمونه‌ها با جایگزینی 75 و 100% پودر دیاتومیت به جای پودر کوارتز، قبل و بعد از اصلاح روانی

مطابق شکل 10 در نمونه DP100-R با ۱۰۰٪ جایگزینی پودر دیاتومیت به‌جای پودر کوارتز در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب ۱۲۲، ۲۲ و ۱۸ درصد افزایش مقاومت کششی اتفاق افتاده‌است. با توجه به مقاومت کششی طرح مخلوط DP0 در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه، مقاومت کششی ۷ روزه پایین‌تر از مقاومت ۱۴ و ۲۸ روزه می‌باشد، اما در جایگزینی‌های ۲۵٪ به بعد این فاصله کم‌تر شده‌است. دلیل این امر آن است که ذرات پودر دیاتومیت مقدار بیش‌تری از آب را در ابتدا به خود جذب کرده و نسبت آب به مواد سیمانی را کاهش داده‌است. سپس واکنش‌های هیدراتاسیون پیشرفت و کریستال‌ها رشد نموده و فضاهای خالی را پر کرده‌اند که باگذشت زمان آب حبس شده در ذرات دیاتومیت استفاده شده‌است؛ لذا ملاحظه می‌شود که مقاومت کششی ما بین DP0 و DP100 در عمر ۷ روزه اختلاف زیادتری دارند که ۱۱۲٪ افزایش اتفاق افتاده‌است اما در سنین ۱۴ و ۲۸ روزه، افزایش به ترتیب ۲۲٪ و ۱۸٪ می‌باشد.

چون در داخل بتن پودری واکنشی، دوده سیلیسی به عنوان یک پوزولان قوی وجود دارد لذا در بتن شاهد هم ذرات دوده سیلیسی با تاخیر وارد عمل شده‌اند و مقاومت بتن شاهد در عمر 14 روزه و 28 روزه خیلی افزایش یافته‌است. لذا نسبت افزایش مقاومت با جایگزینی پودر دیاتومیت به جای پودر کوارتز در عمر 7 روزه، خیلی بیشتر است ولی در عمرهای 14 روزه و 28 روزه همانطور که ذکر شد به ترتیب ۲۲٪ و ۱۸٪ می‌باشد.

**5-4- جذب آب طبق استاندارد ASTM**

در این قسمت از آزمایش‌ها طبق استاندارد ASTM C1585، نمونه‌های بتنی 28 روزه مورد نیاز است که حجم آن از ۳۵۰ سانتی‌متر مکعب یا وزن آن از ۸۰۰ گرم کم‌تر و نیز حاوی ترک‌های قابل مشاهده و یا جداشدگی و درهم‌شکسته نباشد. برای انجام این آزمایش ابتدا باید وزن خشک نمونه‌های ۲۸ روزه به دست آید که به این منظور نمونه داخل آون با دمای ۱۰۰ الی ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده و بعد از ۲۴ ساعت نمونه را از آون خارج و توزین میشود؛ اگر وزن آن نسبت به وزن اولیه نمونه تغییری کمتر از 5/0 درصد داشته باشد، این وزن ثبت می‌شود. ولی اگر این امر صادق نباشد ۲۴ ساعت دیگر نمونه در داخل آون قرار داده و تغییرات وزنی مجددا نسبت به‌روز قبل محاسبه می‌شود. بعد از به دست آوردن وزن نمونه خشک شده آن را داخل حوضچه با آب عاری از هرگونه ناخالصی و ناپاکی با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده، بعد از ۷۲ ساعت از آب بیرون آورده و با حوله خشک نموده تا وزن SSD (یعنی حالت اشباع با سطح خشک) بدست آید. سپس با استفاده از فرمول 1 مقدار جذب آب محاسبه می‌شود.

(1) $آب جذب درصد=\frac{(B ـ A)}{A }×100$

A: جرم نمونه خشک

B: جرم نمونه اشباع با سطح خشک (SSD)

در شکل 11 نمودار جذب آب ASTM برای درصد‌های مختلف جایگزینی پودر دیاتومیت به‌جای پودر کوارتز نمایش داده شده‌است. جذب آب ASTM C1585 نشان‌دهنده تخلخل داخل نمونه (حجم لوله‌های مویینه و حباب‌های اتفاقی) را نشان می‌دهد؛ لذا با افزایش جذب آب استاندارد انتظار می‌رود که مقاومت فشاری کاهش یابد. در DP75-R افزایش مقاومت فشاری مربوط به واکنش‌های پوزولانی است که البته تأثیر تخلخل جزئی بوده و اثر واکنش‌های پوزولانی غالب بوده‌اند.

Fig. 11. Water absorption (%)

**شکل 11.** جذب آب استاندارد

با توجه به نمودار شکل 11 می‌توان نتیجه گرفت که دیاتومیت باعث کاهش تخلخل شده‌است. افزایش میزان آب در نمونه‌های با طرح مخلوط اصلاح شده (DP75-R و DP100-R) باعث تخلخل بیش‌تری نسبت به نمونه‌های اصلاح نشده، می‌باشد. البته قابل ذکر است که در همان دو طرح مخلوط اصلاح شده هم افزایش درصد دیاتومیت باعث کاهش تخلخل نیز شده‌است.

برای تحلیل روند کاهش یا افزایش تخلخل با افزایش مقدار جایگزینی دیاتومیت دو طرح مخلوط اصلاح شده باید جدا از نمونه‌های دیگر بررسی شود. با افزایش مقدار آب در نمونه‌های اصلاح شده واضح است که حجم لوله‌های مویینه افزایش خواهد یافت؛ لذا پنج طرح DP0، DP25، DP50، DP75 و DP100 باهم مقایسه می‌شوند که نشان‌دهنده کاهش تخلخل با افزایش مقدار دیاتومیت می‌باشد. در دو طرح مخلوط دیگر نیز همین روند اتفاق افتاده‌است و با افزایش مقدار دیاتومیت در نمونه‌های اصلاحی تخلخل کم شده‌است.

**5-5- جذب آب حین عمل‌آوری**

نتایج آزمایش های این بخش نمایانگر روند هیدراتاسیون نمونه‌ها می‌باشد. چون آب آزاد نسبت به آب ژل و آب ژل نیز نسبت به آب مولکولی چگالی کمتری دارد؛ لذا با پیشرفت هیدراتاسیون جذب آب ادامه خواهد داشت و باگذشت زمان کندتر خواهد شد. یعنی با افزایش واکنش‌های هیدراتاسیون و تشکیل کریستال‌ها، آب ژل موجود در نمونه به آب مولکولی تبدیل شده و حجم کم‌تری را اشغال می‌کند که منجر به تداوم جذب آب می‌شود و این روند چرخشی تا هیدراتاسیون کامل نمونه‌ها ادامه پیدا می‌کند.

Fig. 12. Cubic concrete specimens



**شکل 12.** نمونه‌های بتنی مکعبی

برای محاسبه این مولفه، ابتدا نمونه ها بعد از باز کردن از قالب، توزین شده و سپس در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بعد بیرون آوردن از حوضچه با حوله خشک شده (شکل 12) و در حالت SSD با ترازوی دقیق توزین گردید؛ در نهایت با استفاده از رابطه (2) جذب آب حین عمل‌آوری محاسبه گردید، نتایج در شکل 13 ارائه شده‌است.

(2) $آوری‌عمل حین آب جذب درصد=\frac{(عمل‌آوری از بعد جرم ـ عمل‌آوری از قبل جرم)}{عمل‌آوری از قبل جرم}×100$

Fig. 13. Water absorption during curing (%)

**شکل 13.** درصدجذب آب حین عمل آوری

با بررسی نتایج جذب آب حین عمل آوری، می‌توان دریافت که با افزایش سن نمونه‌ها هیدراتاسیون افزایش یافته‌است. در بحث روند جایگزینی نیز می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل افزایش دیاتومیت هیدراتاسیون کمی کاهش داشته‌است که احتمالا علت آن وجود واکنش های پوزولانی مابین دیاتومیت، دوده سیلیسی، سیمان و آب ‌و همچنین جذب آب اولیه ذرات پودر دیاتومیت در هنگام اختلاط، باشد؛ که این آب درون ذره ای بعدا مورد استفاده واکنش های پوزولانی قرار میگیرد. در جایگزینی 25% که مقدار ذرات پودر دیاتومیت کم است لذا آب درون ذره ای این ها هم کم است و برای نیاز واکنش های پوزولانی، جذب آب کمی افزایش یافته‌است؛ اما با افزایش مقدار پودر دیاتومیت، جذب آب حین عمل آوری، کاهش یافته‌است. البته این تغییرات خیلی جزئی هستند مثلا برای نمونه های 28 روزه برای نمونه شاهد جذب آب برابر 08/1 % و برای نمونه DP25 برابر 22/1 % می باشد. یعنی اختلاف آنها 14/0 % است.

 با اصلاح نسبت آب به سیمان در طرح‌های مخلوط DP75-R و DP100-R شاهد افزایش جزئی هیدراتاسیون نسبت به حالت قبل از اصلاح هستیم. درحالت کلی با توجه به این که با افزایش مقدار جایگزینی، مقاومت فشاری افزایش داشته‌است بنابراین واکنش‌های هیدراتاسیون نیز در واقعیت افزایشی بوده‌است. دلیل این امر آن است که مقداری از آب توسط ذرات دیاتومیت جذب شده‌است و سپس باگذشت زمان در ادامه روند هیدراتاسیون به کار برده می‌شوند چرا که جذب آب ذرات دیاتومیت به دلیل حفره‌های درون ذره‌ای، خیلی بیشتر از پودر کوارتز است. این دو روند هر دو هم‌زمان اتفاق افتاده‌است.

**5-6- نتایج وزن مخصوص**

در شکل 14 نتایج وزن مخصوص ارائه شده‌است. مطابق این شکل، زمانی که پودر دیاتومیت جایگزین پودر کوارتز می‌شود، وزن مخصوص نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در نمونه‌های اصلاح شده به دلیل افزایش مقدار آب، وزن مخصوص نسبت به طرح‌های مخلوط اصلاح نشده کاهش می‌یابد. در طرح مخلوط (DP100)، وزن مخصوص ۵/۹ درصد نسبت به (DP0) افزایش یافت. در طرح مخلوط (DP100-R)، وزن مخصوص نسبت به (DP0) ۶/۵ درصد افزایش یافت.

Fig. 14. Density of the samples

**شکل 14.** وزن مخصوص نمونه‌ها

روند افزایشی از DP0 تا DP100 کاملا مشاهده می گردد که به احتمال زیاد مربوط به واکنش های پوزولانی پودر دیاتومیت با دوده سیلیسی، آب و ذرات سیمان می باشد. دو طرح اصلاحی به خاطر افزایش مقدار آب، اندکی کاهش در چگالی را نشان می دهند اما نسبت به بتن شاهد ملاحظه می گردد که این دو طرح نیز افزایش چگالی دارند. لذا جایگزینی پودر دیاتومیت با افزایش واکنش های پوزولانی، تراکم و توپری بتن و درنتیجه آن نیز، چگالی را افزایش داده است؛ همچنین مطابق آنچه در بخش(5-2- نتایج آزمایش مقاومت فشاری) ملاحظه شد، مقاومت فشاری را نیز افزایش داده‌است.

**6- نتیجه‌گیری**

هدف تحقیق امکان‌سنجی استفاده از مصالح بومی در ساخت بتن‌پودری‌واکنشی، جهت کاهش هزینه ها و اثرات محیط زیستی در عین افزایش کارایی، بود. از این رو جایگزینی پودر دیاتومیت به‌جای پودر کوارتزدر تولید بتن‌پودری‌واکنشی برای صنعت ساخت و ساز و تاکیدا با عمل‌آوری مشابه کارگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که جایگزینی مذکور امکان‌پذیر بوده و قیمت نهایی بتن‌پودری‌واکنشی نیز کاهش می یابد. از مهم‌ترین نتایج به دست‌آمده از این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

* در شرایط کارگاهی نیز می‌توان بتن‌هایی با مقاومت بالا وفوق توانمند در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد تولید کرد.
* پودر دیاتومیت جایگزین مناسبی برای پودر کوارتز می‌باشد چرا که با افزایش درصد جایگزینی بهبود چشمگیر مشخصات مکانیکی بتن‌پودری‌واکنشی مشاهده شد؛ علت این امر آن است که درصد بالایی از پودر دیاتومیت به‌صورت آمورف است و درنتیجه در واکنش‌های پوزولانی، سهم بیش‌تری نسبت به پودر کوارتز که اغلب کریستاله‌است، دارد.
* با افزایش جایگزینی پودر دیاتومیت به‌جای پودر کوارتز، به دلیل جذب آب بالای پودر دیاتومیت، بتن برای افزایش کارایی به آب بیش‌تری نیاز دارد. بنابراین با ثابت نگه‌داشتن نسبت مقدار آب به سیمان و افزایش هم‌زمان درصد جایگزینی پودر دیاتومیت به‌جای پودر کوارتز، روانی بتن کاهش می‌یابد.
* جایگزینی پودر دیاتومیت به‌جای پودر کوارتز باعث افزایش فوق‌العاده در مقاومت فشاری می‌شود. به‌طوری‌که افزایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه، در نمونه‌های شامل 25، 50، 75 و 100 درصد پودر دیاتومیت به‌جای پودر کوارتز به ترتیب برابر 48/16، 6/25، 98/40 و 43/48 درصد است.
* در طرح‌های اصلاحی DP75-R و DP100-R هم که مقدار آب اندکی افزایش یافته‌است (جهت اصلاح روانی DP75 و DP100)، همچنان افزایش مقاومت فشاری در همه سنین وجود دارد.این افزایش مقاومت نسبت به بتن شاهد در نمونه‌های ۲۸ روزه برای DP75-R و DP100-R به ترتیب 86/38 و 36/49 درصد می‌باشد. مشاهده می‌شود در طرح مخلوط(DP100-R) که مربوط به اصلاحیه (DP100) می‌باشد، که مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح اصلاحی که آب بیش‌تری نیز داشته‌است، از مقاومت فشاری قبل از اصلاح پیشی گرفته‌است.
* روند افزایش مقاومت کششی با جایگزینی پودر دیاتومیت به‌جای پودر کوارتز هم مشابه افزایش مقاومت فشاری است به‌طوری‌که افزایش مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه در نمونه‌های شامل 25، 50، 75 و 100 درصد جایگزینی به ترتیب برابر ۸۳/۴، ۵۱/7، ۷۵/۱۰ و ۱۸/۲۶ درصد است. در دو طرح اصلاح شده DP75-R و DP100-R نیز افزایش مقاومت کششی به ترتیب 05/8٪ و ٪20/42 می‌باشد.

علت افزایش مقاومت در نمونه های اصلاحی، با وجود افزایش نسبت آب به سیمان را می‌توان اینگونه بیان کرد که پودر دیاتومیت جذب آب بیش‌تری نسبت به پودر کوارتز دارد؛ در نتیجه آب اضافی مخلوط را در خود نگه‌داشته و در مراحل سخت شدن آن را به مرور پس می‌دهد. همچنین در بتن‌پودری‌واکنشی، جدار نازکی از ذرات سیمان هیدراته شده و بخش داخلی آن هیدراته نشده‌است؛ که با افزایش آب، در بخشی از قسمت‌های هیدراته‌نشده ذرات سیمان، می‌تواند واکنش‌های هیدراسیون انجام گیرد. همچنین احتمال ایجاد واکنش‌های پوزولانی جدید مابین ذرات سیمان، دوده سیلیسی و پودر دیاتومیت وجود دارد.

* جذب آب نمونه‌های ۲۸ روزه بر اساس آیین‌نامه ASTM C1585 بررسی شد و نتایج حاکی از آن است که جذب آب با افزایش درصد جایگزینی پودر دیاتومیت به‌جای پودر کوارتز کاهش می‌یابد؛ این موضوع حاکی از کاهش تخلخل و حفره‌ها در بتن است.
* با افزایش جایگزینی پودر دیاتومیت به جای پودر کوارتز، وزن مخصوص نمونه‌ها افزایش می‌یابد که به احتمال زیاد مربوط به واکنش های پوزولانی پودر دیاتومیت با دوده سیلیسی، آب و ذرات سیمان می باشد. دو طرح اصلاحی به خاطر افزایش مقدار آب، اندکی کاهش در چگالی را نشان می دهند اما نسبت به بتن شاهد ملاحظه می گردد که این دو طرح نیز افزایش چگالی دارند. لذا این موجب افزایش تراکم و توپری بتن و درنتیجه آن نیز، چگالی و مقاومت فشاری بتن شده است.

منابع

[1] Richard, P. and M. Cheyrezy, Composition of reactive powder concretes. Cement and concrete research, 1995. 25(7): p. 1501-1511.

[2] Collepardi, S., et al., Mechanical properties of modified reactive powder concrete. ACI Special Publications, 1997. 173: p. 1-22.

[3] Ergün, A., Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. Construction and building materials, 2011. 25(2): p. 806-812.

[4] Fragoulis, D., et al., The physical and mechanical properties of composite cements manufactured with calcareous and clayey Greek diatomite mixtures. Cement and Concrete Composites, 2005. 27(2): p. 205-209.

[5] Li, X., Sanjayan, J. G., & Wilson, J. L. (2014). Fabrication and stability of form-stable diatomite/paraffin phase change material composites. Energy and Buildings, 76, 284-294.

[6] Ibrahim, S. S., & Selim, A. Q. (2012). Heat treatment of natural diatomite. *Physicochem. Probl. Miner. Process*, *48*(2), 413-424.

[7] Tavares, L. R. C., Tavares Junior, J. F., Costa, L. M., Bezerra, A. C. da S., Cetlin, P. R., & Aguilar, M. T. P. (2020). *Influence of quartz powder and silica fume on the performance of Portland cement*. *Scientific Reports, 10*, Article 21461. https://doi.org/10.1038/s41598-020-78580-4

[8] Kastis, D., et al., Properties and hydration of blended cements with calcareous diatomite. Cement and concrete research, 2006. 36(10): p. 1821-1826.

[9] Duxson, P. and J. Provis, Low co₂ concrete: are we making any progress? Environment Design Guide, 2008: p. 1-7.

[10] Degirmenci, N. and A. Yilmaz, Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars. Construction and Building Materials, 2009. 23(1): p. 284-288.

[11] Pokorny, J., et al. Properties of fine-grained concrete with admixture of diatomite powder. in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. IOP Publishing.

[12] Saidi, T., et al., Mix design and properties of reactive powder concrete with diatomaceous earth as cement replacement. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. 933(1): p. 012007.

[13] Lee, M.-G., et al., Mechanical and thermal insulation performance of waste diatomite cement mortar. Journal of Materials Research and Technology, 2023. 25: p. 4739-4748.

**Investigating The Effect of Replacing Diatomite Powder with Quartz Powder on The Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete**

**ABSTRACT**

Reactive Powder Concrete (RPC) is recognized as one of the most innovative types of concrete, notable for its exceptional strength and durability. This type of concrete is composed of essential components such as cement, silica fume, quartz powder, silica sand, superplasticizer, and water. Due to its superior mechanical properties, RPC is widely utilized in specialized projects and structures that require outstanding strength and durability. However, the high cost of its components, particularly quartz powder, significantly increases the overall production cost, limiting its widespread application in larger, cost-sensitive projects. Quartz powder is scarce in the Azerbaijan region of Iran and is often sourced from mines in Hamedan and Isfahan. By replacing it with more locally available, affordable materials, final production costs can be reduced. To address this issue and optimize the use of available resources, the possibility of substituting quartz powder with local, cheaper, and more accessible materials has been explored. Micronized quartz powder is crystalline, though some of its finer particles have a minor pozzolanic effect. In contrast, diatomite powder, which contains both amorphous and crystalline particles with a high percentage of amorphous silica, exhibits significantly greater pozzolanic activity. These enhanced reactions contribute to the formation of a denser and stronger concrete matrix, improving its mechanical properties. The purpose of this study was to investigate the feasibility of replacing quartz powder with diatomite powder in different proportions—specifically 25%, 50%, 75%, and 100%. The goal was to evaluate how this substitution affects the concrete's strength while also reducing overall production costs. In this research, concrete samples were tested at various curing ages, including 7, 14, and 28 days. Mechanical tests such as compressive strength and tensile strength were conducted to assess the effects of the substitution on the concrete's performance. Additionally, parameters such as standard water absorption, water absorption during curing, density, and consistency were measured. To simulate real-world construction conditions and avoid the use of specialized equipment, the samples were cured in a water tank at 25°C. This curing method not only eliminated the need for expensive equipment like autoclaves but also made the concrete more applicable to typical site conditions, further lowering production costs. The test results were promising. The strength of the modified concrete mixtures improved significantly when diatomite powder replaced quartz powder. In samples where 100% of the quartz powder was substituted with diatomite, the compressive strength increased from 543 MPa to 806 MPa (approximately 49%), and the tensile strength increased from 543 MPa to 806 MPa (approximately 18%) at 28 days. In addition to the improvements in mechanical properties, the use of diatomite powder offers significant economic advantages. Diatomite is abundantly available in various regions, and its accessibility reduces both production and transportation costs. As a result, the overall production cost of the concrete is significantly lowered, which is especially beneficial for large-scale construction projects where cost efficiency is critical. In conclusion, replacing quartz powder with diatomite powder is a practical solution that brings both technical and economic benefits. The enhanced strength of the concrete, coupled with reduced production costs and the efficient utilization of local resources, makes this approach a practical and effective method for producing high-performance concrete.

**Keywords:** Reactive Concrete Powder, Quartz Powder, Diatomite Powder, Compressive Strength, Tensile Strength.