تحقیقات بتن
سال یازدهم، شمارهٔ چهارم
زمستان ۹۷
ص ۴۸ – ۳۳
تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۲
تاریخ پذیرش: ۹۷/۵/۲۷

تاثیر پودر شیشه، نانو سیلیس، الیاف شیشه‌ای و پلی‌پروپیلن بر خصوصیات مکانیکی بتن پودری واکنش‌پذیر

مهرداد حجازی *
دانشیار مهندسی سازه، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان
حسین عبدالهی
کارشناس ارشد سازه

چکیده

در بتن پودری واکنش پذیر با حذف درشت دانه‌ها و جایگزینی آن‌ها با ماسه سیلیسی و به کار بردن مقدار زیادی میکروسلیس و با نسبت آب به سیمان پایین و همچنین استفاده از الیاف و افزودنی‌ها می‌توان به خواص فوق العاده‌ای از جمله مقاومت فشاری و خمشی بسیار بالا، چگالی تراکمی، شکل پذیری و جذب انرژی زیاد، نفوذپذیری کم و دوام بسیار بالا دست یافت. در این مقاله اثر پودر شیشه، نانو سیلیس، الیاف شیشه‌ای و پلی پروپیلن بر خصوصیات مکانیکی بتن پودری واکنش پذیر مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا به منظور به دست آوردن طرح اختلاط نمونه شاهد مناسب، تأثیر نوع، مقدار و حداکثر بعد ماسه، مقدار و بعد پودر کوارتز و نسبت میکروسیلیس به سیمان بر مقاومت فشاری ۷ روزه بررسی گردید. سپس به بررسی تأثیر استفاده از پودر شیشه به عنوان جایگزین ماسه و سیمان، نانوسیلیس به عنوان جایگزین سیمان، ترکیب پودر شیشه و نانو سیلیس به صورت هم زمان به عنوان جایگزین سیمان و همچنین اثر استفاده از الیاف شیشه‌ای و الیاف پلی پروپیلن بر مقاومت‌های فشاری و خمشی ۷ و ۲۸ روزه ۱۹ طرح اختلاط بتن پودری واکنش پذیر پرداخته شد. نتایج حاصل نشان داد که افزودن پودر شیشه به عنوان جایگزین ماسه باعث کاهش ٪۸/۵ مقاومت فشاری و افزایش ٪۵ مقاومت خمشی گردید. همچنین افزودن پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان تأثیر چندانی بر مقاومت خمشی و فشاری نداشت. افزودن نانو سیلیس به جای سیمان باعث افزایش ٪۴ مقاومت فشاری و ٪۱۷ مقاومت خمشی گردید. افزودن نانو سیلیس و پودر شیشه به صورت هم زمان به عنوان جایگزین سیمان باعث افزایش ٪۱۲ مقاومت فشاری گردید ولی تأثیر چندانی بر مقاومت خمشی نداشت. افزودن الیاف شیشه‌ای باعث کاهش ٪۶ مقاومت فشاری و افزایش چشمگیر مقاومت خمشی تا ٪۳۰ شد. الیاف پلی پروپیلن باعث کاهش ٪۱۲ مقاومت فشاری و افزایش ٪۱۵ مقاومت خمشی گردید.

واژه‌های کلیدی: بتن پودری واکنش پذیر، پودر شیشه، نانوسیلیس، الیاف شیشه، الیاف پلی پروپیلن، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی.

* نویسنده مسئول: m.hejazi@eng.ui.ac.ir

۱- مقدمه

بتن به هر ماده که از یک ماده چسبنده با خاصیت سیمانی شدن تشکیل شده باشد اتلاق می‌شود. این ماده چسبنده عموماً حاصل فعل و انفعالات سیمان‌های هیدرولیکی و آب می‌باشد. امروزه چنین تعریفی از بتن شامل طیف وسیعی از محصولات می‌شود. بتن ممکن است از انواع مختلف سیمان و نیز پوزولان‌ها، سرباره کوره‌ها، مواد مضاف، گوگرد، مواد افزودنی، پلیمرها، الیاف و غیره تهیه شود [۱]. همچنین در نحوه ساخت و عمل آوری آن ممکن است از حرارت، بخار آب، اتوکلاو، فشارهای هیدرولیکی و متراکم‌کننده‌های مختلف استفاده شود [۲، ۳].

بتن معمولی یکی از مصالح معمول در ساخت و ساز است که با مشکلاتی نظیر مقاومت و دوام پایین در برابر خوردگی ناشی از نفوذ یون کلروسولفور در شرایط خاص مواجه است. به همین دلیل محققان اقدام به جایگزین کردن بتن مقاوم‌تر به نام بتن با عملکرد بالا[1] نمودند. سپس بتن‌های با عملکرد فوق‌العاده[2] طراحی شد و در نهایت تلاش محققان دانش بتن، منجر به ساخت بتن پودری واکنش پذیر[3] گردید [۴]. بتن پودری واکنش پذیر نوع جدیدی از بتن‌های فوق توانمند است که بدلیل ریزی مواد پودری و پوزولانی مورد استفاده در آن و نیز مقدار زیاد موادی که به صورت هیدرولیکی فعالاند به آن بتن پودری واکنش پذیر می‌گویند. اولین سازه ساخته شده با این نوع بتن پلی است در شربروک کبک است که این امر باعث کاهش قابل توجه مقاطع بتنی از لحاظ ابعاد و وزن شده است. مصالح متداول مورد کاربرد در ساخت این بتن عبارتند از سیمان پرتلند، پودر کوارتز، دوده سیلیسی، فوق روان کننده و الیاف فولادی. در این نوع بتن با حذف سنگدانه‌های درشت به یک بتن همگن با ساختار میکروسکوپی عالی رسیدند که تخلخل پایین و دوام بسیار بالایی از خود نشان می‌دهد و از بتن‌های خود متراکم محسوب می‌شود [۵]. این بتن تقریباً غیر قابل نفوذ می‌باشد و همین مسئله باعث شده است خیلی از ضعف‌های بتن معمولی مثل ضعف در برابر سیکل‌های یخبندان، خوردگی آرماتور و حمله یون‌های مضر را نداشته باشد [۶]. مزیت اصلی بتن پودری واکنش پذیر بهبود دوام سازه‌های بتنی می‌باشد. گسترش استفاده از بتن در محیط‌های مختلف با شرایط متفاوت و وجود عوامل مهاجم محیطی نظیر سیکل‌های یخبندان، حمله سولفات‌ها، کلرایدها و دیگر مشکلات باعث شده است که امروزه دوام نیز در کنار مقاومت فشاری بتن یکی از پارامترهای اصلی و تعیین کننده طراحی در نظر گرفته شود. همچنین به دلیل ساختار متراکم و استفاده از الیاف، این نوع بتن مقاومت بسیار بالایی در برابر حرارت و آتش از خود نشان می‌دهد [۷، ۸]. دوام فوق العاده بتن پودری واکنش پذیر در برابر عوامل مختلف، آن را به ماده‌ای ایده آل برای اجرای سازه‌های با طول عمر بالا تبدیل نموده است [۹].

خالو و همکاران [۱۰] در سال ۱۳۹۱ به مطالعه آزمایشگاهی تأثیر مقدار دوده سیلیسی بر روی عملکرد بتن پودری واکنش پذیر پرداختند و از سه روش مختلف عمل آوری استفاده کردند. این آزمون‌ها نشان دادند که عمل آوری حرارتی در آب $90^{\circ}C$ به تولید مقادیر بیشتری ژل کلسیم-سیلیکات-هیدرات (C-H-S) منجر گردیده، که به بهبود شرایط هیدراتاسیون منجر می‌شود. زمانی که مقادیر زیادی دوده سیلیسی در ماتریس استفاده می‌شود، بخش قابل توجهی از این ذرات تنها نقش پر کننده (فیلر) را ایفا می‌کنند و نه تنها سبب تولید ژل پر مقاومت کلسیم-سیلیکات-هیدرات (C-H-S) نمی‌شوند بلکه با کلوخه شدن به یکدیگر سبب به وجود آمدن نواحی ضعیف و کم مقاومت نیز در ماتریس بتن پودری واکنش پذیر نیز می‌گردند، به همین دلیل مقادیر بیش از حد بهینه دوده سیلیسی باعث کاهش مقاومت بتن پودری واکنش پذیر می‌شوند.

یازیچی[4] و همکاران [۱۱] درسال ۲۰۱۳ به بررسی مشخصات مکانیکی بتن پودری واکنش پذیر تحت روش‌های عمل آوری پرداختند. آن‌ها از دو روش عمل آوری معمولی در آب و اتوکلاو[5] استفاده کردند. در عمل آوری اتوکلاو با متغیر قرار دادن فشار، دما و زمان ،تاثیر آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق عملکرد سیلیکا فوم و الیاف فولادی تحت این دو روش عمل آوری ارزیابی گردید. با بررسی نتایج این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که عمل آوری اتوکلاو می‌تواند باعث افزایش مقاومت فشاری و خمشی بتن پودری واکنش پذیر شود به طوری که

[1] High Performance Concrete (HPC)
[2] Ultra High Performance Concrete (UHPC)
[3] Reactive Powder Concrete (RPC)
[4] Yazici
[5] Autoclave

مقاومت فشاری این بتن با استفاده از عمل آوری اتوکلاو به بیش از MPa ۲۰۰ رسید. استفاده از سیلیکا فوم و الیاف فولادی نیز باعث افزایش مقاومت این نوع بتن گردید.

معراجی و همکاران [۱۲] در سال ۱۳۹۲ در تحقیق خود تلاش کردند تا اثر استفاده از الیاف مختلف بر خواص بتن پودری واکنش پذیر، بررسی شود. بدین منظور نوعی الیاف فولادی مستقیم کوتاه و نوعی الیاف کربن ریز شده مورد استفاده قرار گرفتند. مقدار الیاف فولادی به میزان حدود ٪۲/۵ حجمی و مقدار الیاف کربن در حدود ٪۲/۵ وزن سیمان مصرفی، در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که برخلاف انتظار، افزودن الیاف کربن به بتن پودری واکنش پذیر، تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری و خمشی ندارد. ولی با افزودن الیاف فولادی در حدود ٪۲/۵ حجمی، مقاومت فشاری نمونه‌ها، حدوداً ٪۱۰ و مقاومت خمشی از MPa ۷ در نمونه بدون الیاف به MPa ۲۵ نسبت به نمونه بدون الیاف افزایش یافته است.

بیگلریگاله[1] و یازیچی [۱۳] در سال ۲۰۱۵ یافته‌های اصلی تحقیق خود را این‌چنین بیان کردند که مشخصات پیوند ماتریس الیاف با افزایش طول الیاف افزایش می‌یابد. این رفتار برای الیاف‌های صاف آشکارتر است. نسبت کم آب به سیمان که باعث ارتقا استحکام پیوند می‌شود اهمیت طول تعبیه الیاف انتهای قلابی را کم می‌کند. ساختار ریز و متراکم و نسبت کم آب به سیمان منجر به خصوصیات پیوند بهتر بین الیاف فولادی و ماتریس بتن پودری واکنش پذیر در مقایسه با مخلوط‌های دیگر می‌شود.

لی[2] و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۵ به بررسی عملکرد بتن پودری واکنش پذیر به عنوان بتن تعمیری پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد به دلیل مقاومت سایشی و دوام بالا، مقاومت بالا در برابر چرخه ذوب و یخ، مدول دینامیکی مناسب و پیوستگی بسیار خوب این نوع بتن با فولاد و بتن عملکرد خوبی به عنوان بتن تعمیری دارد.

یازیچی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۰۹ در تحقیق خود به نحوه تأثیر مواد معدنی مختلف تحت چند روش عمل آوری بر مشخصات مکانیکی بتن پودری واکنش پذیر پرداختند. در پایان مقاومت فشاری پس از عمل آوری با بخار و نیز اتوکلاو، نسبت به عمل آوری معمولی افزایش چشمگیری داشت. ولی باعث کاهش مقاومت خمشی و سختی گردید. همچنین افزودن خاکستر بادی و سرباره کوره باعث افزایش مشخصات مکانیکی بتن پودری واکنش پذیر تحت عمل آوری‌های مختلف شده است.

در تحقیق دیگر که توسط آیپک[3] و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۲ صورت گرفته است، تأثیر عمل آوری تحت فشار بر روی مقاومت خمشی و سختی بتن پودری واکنش پذیر بررسی شده است. در اثر عمل آوری تحت فشار مقاومت خمشی ٪۳۴ بهبود یافت. همچنین سختی بتن تقریباً بیش از سه برابر افزایش یافت.

ژنگ[4] و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۲ به تحقیق در مورد تاثیر الیاف فولادی و پلی پروپیلن به صورت ترکیبی بر روی خواص بتن پودری واکنش پذیر پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از الیاف فولادی می‌تواند بطور موثری به بهبود مشخصات فشاری بتن پودری واکنش پذیر بیانجامد. اضافه شدن الیاف پلی پروپیلن اثر منفی بر تقویت استحکام این نوع بتن در مواجهه با دمای کم دارد اما تاثیر مثبت آن زمانی است که بتن تحت دمای بسیار زیاد قرار گیرد. هیچ نوع انفجاری در فرایند گرمایش اتفاق نمی‌افتد که این امر به دلیل وجود الیاف در بتن می‌باشد.

هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی تأثیر استفاده از درصدهای مختلف الیاف شیشه و پلی پروپیلن به صورت درصد حجمی کل نمونه بتن، پودر شیشه به عنوان درصدی از ماسه، نانوسیلیس و پودر شیشه به عنوان درصدی از سیمان بر روی خواص مکانیکی بتن پودری واکنش پذیر بوده است. ابتدا متغیرهای زیر برای دستیابی به طرح اختلاط بتن شاهد مناسب مورد بررسی قرار گرفتند.

- نوع ماسه و نسبت میکروسیلیس به سیمان.
- حداکثر بعد ماسه.
- پودر کوارتز.
- مجموع مقدار ماسه و پودر کوارتز.
- نسبت میکروسیلیس به سیمان.

پس از بررسی موارد فوق و بدست آمدن طرح اختلاط نمونه شاهد مناسب، ۱۹ طرح اختلاط برای بررسی تأثیر موارد ذکر شده بر مقاومت فشاری و خمشی ۷ و ۲۸ روزه بتن پودری واکنش پذیر مورد آزمایش قرار گرفتند.

[1] Beglarigale
[2] Lee
[3] Ipek
[4] Zheng

۲- مصالح مورد استفاده

۲-۱- نانوسیلیس

از میان تمام نانو ذرات بکار رفته در بتن، نانوسیلیس پرکاربردترین ماده مورد استفاده در مواد سیمانی می‌باشد. با توجه به خاصیت پر کنندگی نانوسیلیس، توزیع یکنواخت این ذرات در بتن باعث افزایش تراکم مواد سیمانی و در نتیجه افزایش میکرو نانو ساختارهای تشکیل دهنده بتن و افزایش استحکام بتن پودری واکنش پذیر می‌شود [۱۷، ۱۸]. نانوسیلیس مصرف شده در این تحقیق از مجتمع فناوری‌های فدک تهیه گردید.

۲-۲- ماسه

ماسه مورد استفاده در این تحقیق از نوع ماسه سیلیسی بوده که با توجه به اینکه تقریباً نصف کل وزن بتن پودری واکنش پذیر را مصالح سنگی تشکیل می‌دهد، لذا کیفیت مصالح سنگی در خواص این نوع بتن می‌تواند از اهمیت قابل توجهی برخوردار باشد. در این رابطه نه تنها کیفیت، مقاومت و سختی مصالح سنگی در مقدار مقاومت بتن تعیین کننده است، بلکه سایر خصوصیات سنگدانه‌ها نظیر بافت سطحی، شکل هندسی و وضعیت خلل و فرج داخلی آنها می‌تواند تأثیر بسزایی بر دوام و عملکرد بتن داشته باشد. [۱۹]. در جدول شماره ۱ برخی مشخصات و ویژگی‌های ماسه مورد استفاده طبق گزارش کارخانه نشان داده شده است.

جدول۱- خصوصیات ماسه سیلیسی مناسب

مشخصات و ترکیبات شیمیایی	مواد موجود در ماسه سیلیسی
سیلیس	٪۹۶ – ٪۹۸
نمک‌های حل شدنی (سولفات‌ها، کلریدها و مواد قلیایی نظیر K_2O، Na_2O و CaO	۱٪
خاک رس و مواد آلی	۰/۵٪
افت ناشی از احتراق	۰/۵٪
رطوبت	۲٪

۲-۳- میکروسیلیس

میکروسیلیس استفاده شده در این تحقیق، محصول شرکت صنایع فرو آلیاژ ایران می‌باشد. این میکروسیلیس به میزان ٪۲۲/۵ وزنی سیمان در بتن مورد استفاده قرار گرفت.

۲-٤- الیاف

به دلیل ویژگی‌های الیاف شیشه‌ای و پلی پروپیلن، استفاده از آنها در حال توسعه است. در این تحقیق اثر این نوع الیاف بر مشخصات مکانیکی بتن پودری واکنش پذیر مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات الیاف مصرفی در این تحقیق در جدول شماره ۲ و ۳ قابل مشاهده می‌باشند

جدول ۲- مشخصات الیاف شیشه‌ای مصرف شده

مقاومت کششی (MPa)	قطر (mm)	طول (mm)	قطر/طول
۱۵۰۰	۰/۰۲	۱۲	۶۰۰

جدول ۳- مشخصات الیاف پلی پروپیلن مصرف شده

مقاومت کششی (MPa)	قطر (mm)	طول (mm)	قطر/طول
۴۰۰	۰/۰۲	۱۲	۶۰۰

۲-۵- سیمان

سیمان‌های مختلف بسته به درصد ترکیبات شیمیایی که دارند می‌توانند ویژگی‌های شیمیایی متفاوتی از خود نشان دهند. در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ یک کارخانه سیمان اصفهان استفاده شده است. میزان مورد استفاده در این نوع بتن طبق تعریف ۷۰۰–۱۱۰۰ (kg/m^3) می‌باشد.

۳- طرح اختلاط نمونه شاهد

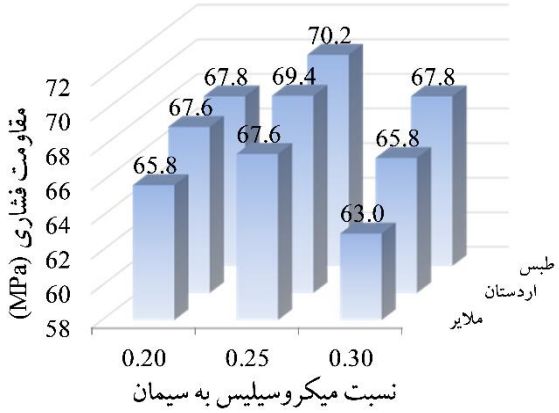
در این تحقیق برای به دست آوردن طرح اختلاط نمونه شاهد مناسب پارامترهای مختلفی از جمله نوع ماسه، حداکثر بعد ماسه، مقدار و بعد پودر کوارتز، مجموع پودر کوارتز و ماسه و نسبت میکروسیلیس به سیمان مورد آزمایش و بررسی قرار گرفتند.

به منظور بررسی تأثیر این پارامترها، به دلیل ریز دانه بودن مصالح مورد استفاده (حداکثر بعد ماسه ۲/۳۸ mm)، از استاندارد آزمایش فشاری ملات ماسه سیمان (ASTM C109C 109M) [۲۰] برای بدست آوردن مقاومت فشاری یک هفته‌ای استفاده شد. ابتدا تعداد سه نمونه مکعبی ۵×۵×۵ cm^3 از هر طرح ساخته و در قالب مربوطه ریخته شد سپس کلیه نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و به مدت ۶ روز در آب با دمای ۲۳ °C نگهداری شدند. در شکل ۱ تعدادی از نمونه‌های شکسته شده در مرحله تعیین طرح اختلاط نمونه شاهد قابل مشاهده می‌باشند.

شکل ۱- نمونه های شکسته شده تحت آزمایش فشاری

۳-۱- نوع ماسه و نسبت میکروسیلیس به سیمان

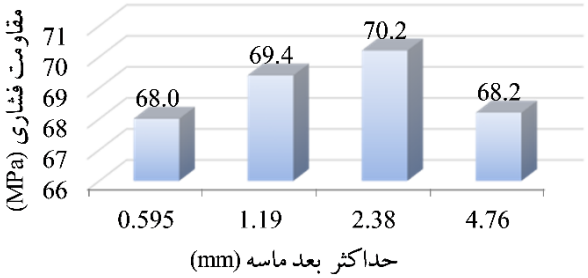
در ابتدا برای مشخص شدن نوع ماسه مورد استفاده در این تحقیق، از سه نوع ماسه با حداکثر بعد ۱/۱۹ mm از شهرستان‌های ملایر، طبس و اردستان و با نسبت میکروسیلیس به سیمان ۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۳ استفاده شد که نتایج مقاومت فشاری یک هفته‌ای آنها در نمودار شکل ۲ آمده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود ماسه شهرستان ملایر تأثیر منفی بر روی مقاومت فشاری داشته است ولی تأثیر ماسه شهرستان‌های طبس و اردستان تقریباً مشابه هم می‌باشد.



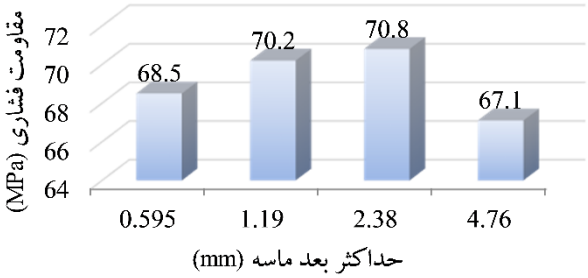
شکل ۲- تأثیر نوع ماسه و نسبت میکروسیلیس به سیمان بر روی مقاومت فشاری

۳-۲- حداکثر بعد ماسه

برای تعیین حداکثر بعد ماسه از چهار بعد مختلف ماسه (۴/۷۶ mm، ۲/۳۸ mm، ۱/۱۹ mm و ۰/۵۹۵ mm) و نسبت میکروسیلیس به سیمان ۰/۲۵ استفاده شد و به دلیل اینکه تأثیر ماسه شهرستان‌های طبس و اردستان بر روی مقاومت فشاری یک هفته‌ای بتن پودری واکنش پذیر تقریباً مشابه بود، از هر دو نوع ماسه در این مرحله از آزمایش‌ها استفاده شد. نتایج به دست آمده از این مرحله در نمودار شکل‌های ۳ و ۴ قابل مشاهده می‌باشند. استفاده از حداکثر بعد ماسه ۲/۳۸ mm در هر دو نوع ماسه باعث رسیدن به بیشترین مقاومت فشاری شده است و همچنین با توجه به اینکه مقاومت فشاری بتن ساخته شده با ماسه معادن شهرستان طبس بیشتر شد، تصمیم گرفته شد از این نوع ماسه برای ادامه استفاده شود. میانگین مقاومت فشاری یک هفته‌ای سه نمونه حاوی این نوع ماسه به ۷۰/۸ MPa رسید. این در حالی است که افزایش بعد ماسه باعث کاهش مقاومت فشاری گردید.



شکل ۳- تأثیر حداکثر بعد های مختلف ماسه اردستان بر روی مقاومت فشاری

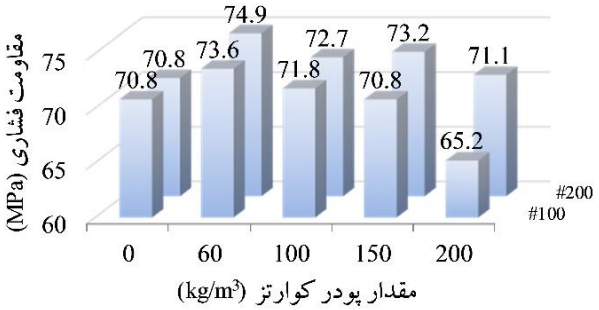


شکل ۴- تأثیر حداکثر بعد های مختلف ماسه طبس بر روی مقاومت فشاری

۳-۳- مقدار و حداکثر بعد پودر کوارتز

یکی دیگر از مصالحی که در ساخت بتن پودری واکنش پذیر استفاده می‌شود پودر کوارتز می‌باشد. مهمترین تأثیر پودر کوارتز افزایش تراکم، کاهش نفوذ پذیری و همچنین روانی این نوع بتن است که باعث افزایش مشخصات مکانیکی خواهد شد. لازم به ذکر است پودر کوارتز استفاده شده در این مرحله از معادن سنگ استان همدان تهیه شده است. در این مرحله از تحقیق به بررسی تأثیر مقدار و بعد پودر کوارتز بر مقاومت فشاری یک هفته‌ای بتن پودری واکنش پذیر پرداخته شد. به همین منظور از دو نوع محدوده دانه بندی ۰/۰۷۴ mm

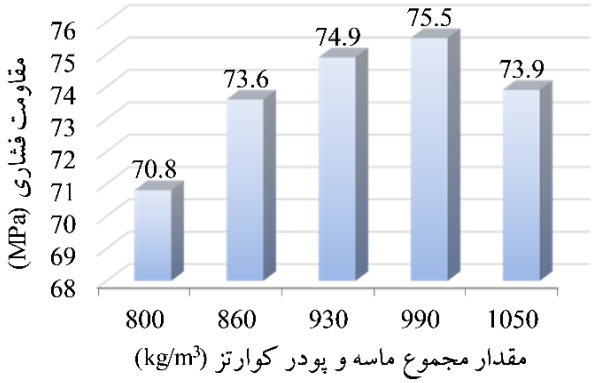
– ۰ (عبوری از الک شماره ۲۰۰) و ۰/۱۵۰ mm – ۰ (عبوری از الک شماره ۱۰۰) و همچنین پنج مقدار مختلف (kg/m^3 ۲۰۰، ۱۵۰، ۱۰۰، ۶۰ و ۰) به عنوان جایگزین ماسه با نسبت میکروسیلیس به سیمان ۰/۲۵ استفاده شد. نتایج این مرحله از آزمایش‌ها در نمودار شکل ۵ آمده است. باتوجه به نمودار شکل ۵ بیشترین مقاومت فشاری MPa ۷۴/۹ به دست آمد که با استفاده از مقدار kg/m^3 ۶۰ پودر کوارتز عبوری از الک شماره ۲۰۰ به دست آمد. نتایج نشان دهنده این است که استفاده از پودر کوارتز در بتن پودری واکنش پذیر می‌تواند باعث افزایش ٪۶ مقاومت فشاری یک هفته‌ای بتن پودری واکنش پذیر شود. همچنین افزایش مقدار پودر کوارتز باعث کاهش مقاومت گردید. بنابراین در ادامه تحقیق از مقدار kg/m^3 ۶۰ پودر کوارتز در ساخت نمونه‌ها استفاده شد.



شکل ۵- تأثیر مقدار پودر کوارتز و محدوده دانه بندی آن بر روی مقاومت فشاری

۳-٤- مجموع مقدار ماسه و پودر کوارتز

مقدار ماسه مورد استفاده در بتن پودری واکنش پذیر با بتن معمولی بسیار تفاوت دارد و به دلیل استفاده از انواع دیگر مصالح و مصرف سیمان زیاد، این مقدار کم می‌باشد. در این مرحله از آزمایش‌ها، تأثیر پنج مقدار مجموع ماسه و پودر کوارتز (kg/m^3 ۱۰۵۰، ۹۹۰، ۹۳۰، ۸۶۰ و ۸۰۰) با نسبت میکروسیلیس به سیمان ۰/۲۵ بر روی مقاومت فشاری یک هفته‌ای بتن پودری واکنش پذیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمایش‌ها در نمودار شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشند. لازم به ذکر است که در این مرحله مقدار پودر کوارتز بطور ثابت kg/m^3 ۶۰ بود. همانگونه که در شکل ۶ مشخص است مقدار مجموع ماسه و پودر کوارتز kg/m^3 ۹۹۰ تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت فشاری بتن پودری واکنش پذیر داشته است و حداکثر مقاومت فشاری یک هفته‌ای به دست آمده MPa ۷۵/۵ بود. این در حالی است که کاهش مقدار ماسه باعث کاهش مقاومت بتن پودری واکنش پذیر شد. از این کاهش ناگهانی می‌توان نتیجه گرفت که ماسه در مقاومت فشاری بسیار تأثیر گذار است. کاهش مقدار ماسه باعث افزایش محسوس سیمان می‌شود و با توجه به نتایج این مرحله مشاهده شد که افزایش مقدار سیمان نه تنها باعث افزایش مقاومت نشد بلکه باعث کاهش زیاد آن گردید.



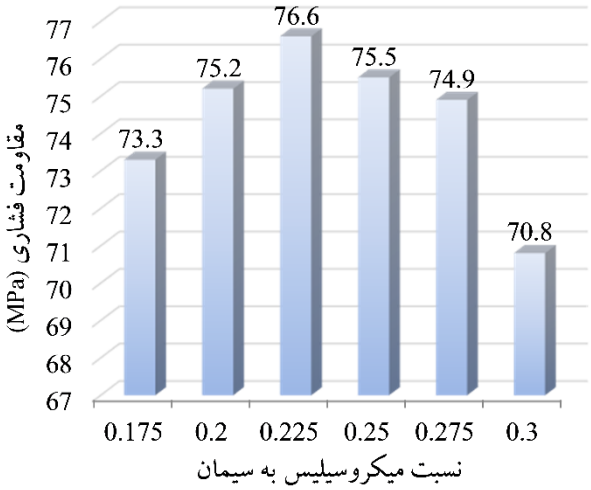
شکل ۶- تأثیر مقدار مجموع ماسه و پودر کوارتز بر روی مقاومت فشاری

۳-۵- نسبت میکروسیلیس به سیمان

تحقیقات نشان داده است که مقدار میکروسیلیس در مشخصات مکانیکی بتن پودری واکنش پذیر بسیار اهمیت دارد. به همین دلیل در این تحقیق مقدار مصرف میکروسیلیس با محدوده بیشتری مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. بدین منظور از شش درصد مختلف میکروسیلیس در نمونه بهینه مرحله قبل استفاده شد.

همانگونه که در شکل ۷ مشخص شده است مقدار ٪۲۲/۵ میکروسیلیس نسبت به سیمان تأثیر بیشتری بر روی مقاومت فشاری بتن پودری واکنش پذیر دارد. مقاومت فشاری طرح بهینه در این مرحله به MPa ۷۶/۶ رسید.این در حالی است که استفاده از میکروسیلیس زیاد باعث کاهش ناگهانی مقاومت فشاری شد.

در پایان آزمایش‌های تعیین طرح اختلاط نمونه شاهد مناسب، جدول شماره ۴ که نشان دهنده مقدار مورد استفاده کلیه مصالح در یک متر مکعب بتن پودری واکنش پذیر است، حاصل گردید. لازم به ذکر است که در مراحل فوق نسبت آب به سیمان و نسبت فوق روان کننده به سیمان ثابت در نظر گرفته شد و نسبت سایر مصالح به سیمان دستخوش تغییرات گردید.



شکل ۷- تأثیر نسبت‌های مختلف میکروسیلیس به سیمان بر روی مقاومت فشاری

نهایتاً ۱۹ طرح اختلاط برای بررسی اثر پودر شیشه (GLP) به عنوان جایگزین سیمان (C) و ماسه (S)، نانوسیلیس (NS) به عنوان جایگزین سیمان، نانوسیلیس و پودر شیشه به صورت همزمان به عنوان جایگزین سیمان، الیاف پلی پروپیلن (PPF) و الیاف شیشه‌ای (GLF) به صورت درصد حجمی بر روی مقاومت ۷ و ۲۸ روزه فشاری و خمشی بتن پودری واکنش پذیر با تغییر برخی پارامترها تعیین شد. در جدول ۵ جزئیات این ۱۹ طرح اختلاط که برای انجام آزمایش‌ها در این تحقیق به دست آمده‌اند بطور خلاصه قابل مشاهده است. لازم به ذکر است در جداول زیر (X/C) نشان دهنده نسبت وزنی مصالح به سیمان، (W) نشان دهنده مقدار آب، (MS) نشان دهنده مقدار میکروسیلیس، (SP) نشان دهنده فوق روان کننده، (QP) معرف پودر کوارتز و واحد ها (kg/m^3) است.

جدول ۴- طرح اختلاط نمونه شاهد

	C	MS	W	SP	QP	S
(kg/m^3)	۸۶۴	۱۹۴/۴	۲۱۶	۳۴	۶۰	۹۳۰
X/C	۱	۰/۲۲۵	۰/۲۵	۰/۰۳۹	۱/۱۴۶	

جدول ۵- طرح‌های اختلاط آزمایش شده در این تحقیق

شماره	C			SP	W	MS	QP	S		Fiber	
۱	۸۶۴			۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۶۰	۹۳۰		–	
–								S	GLP		
۲	۸۶۴			۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۶۰	۸۸۳/۵	۴۶/۵	–	
۳	۸۶۴			۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۶۰	۸۳۷	۹۳	–	
۴	۸۶۴			۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۶۰	۷۹۰/۵	۱۳۹/۵	–	
–	C		NS								
۵	۸۴۶/۷۲		۱۷/۲۸	۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۶۰	۹۳۰		–	
۶	۸۲۹/۴۴		۳۴/۵۶	۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۶۰	۹۳۰		–	
۷	۸۱۲/۱۶		۵۱/۸۴	۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۶۰	۹۳۰		–	
–	C		GLP								
۸	۸۳۸/۰۸		۲۵/۹۲	۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۶۰	۹۳۰		–	
۹	۸۱۲/۱۶		۵۱/۸۴	۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۶۰	۹۳۰		–	
۱۰	۷۸۶/۲۴		۷۷/۷۶	۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۶۰	۹۳۰		–	
–	C	NS	GLP								
۱۱	۸۴۲/۴	۸/۶۴	۱۲/۹۶	۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۶۰	۹۳۰		–	
۱۲	۸۲۰/۸	۱۷/۲۸	۲۵/۹۲	۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۶۰	۹۳۰		–	
۱۳	۷۹۹/۲	۲۵/۹۲	۳۸/۸۸	۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۶۰	۹۳۰		–	
–										PPF	GLF
۱۴	۸۶۴			۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۵۹/۲	۹۱۷/۶		–	۱۳
۱۵	۸۶۴			۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۵۷/۶	۸۹۲/۸		–	۳۹
۱۶	۸۶۴			۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۵۵/۲	۸۵۵/۶		–	۷۸
۱۷	۸۶۴			۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۵۹/۵۲	۹۲۲/۵۶		۲/۷	–
۱۸	۸۶۴			۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۵۸/۹۶	۹۱۳/۸۸		۵/۸۵	–
۱۹	۸۶۴			۳۴	۲۱۶	۱۹۴/۴	۵۷/۹۲	۸۹۷/۷۶		۱۱/۷	–

٤- آزمایش‌های فشاری

در این مرحله تعداد ۱۹ طرح اختلاط بتن تحت آزمایش فشاری ۷ و ۲۸ روزه قرار گرفتند، به این ترتیب که از هر طرح، شش نمونه ساخته و قالب گیری شد. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج شده، طرح‌های ۷ روزه به مدت ۶ روز و طرح‌های ۲۸ روزه به مدت ۲۷ روز درون استخر آب نگهداری شدند و پس از آن توسط جک بتن شکن شکسته شدند. در ادامه به توضیح و بررسی نتایج پرداخته شده است.

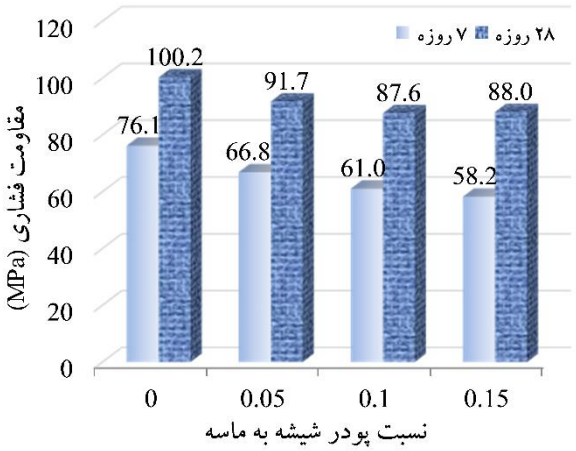
تأثیر پودر شیشه و نانو سیلیس بر روی مقاومت فشاری

امروزه در صنعت بتن همواره کوشیده می‌شود تا از مصالح مناسب با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی در بتن جهت افزایش مشخصات مکانیکی آن استفاده شود. پودر شیشه و نانوسیلیس از مصالحی هستند که می‌توان در بتن از آنها جهت بهبود مشخصات بتن استفاده کرد. در این بخش از تحقیق به بررسی تأثیر این مصالح بر روی مقاومت فشاری بتن پودری واکنش پذیر پرداخته شد.

٤-١- استفاده از پودر شیشه به عنوان جایگزین ماسه

همانگونه که اشاره شد به دلیل سختی بالای پودر شیشه ضایعاتی و قابلیت استفاده از آن به عنوان جایگزین ماسه و همچنین مزایای زیست محیطی آن در این تحقیق تأثیر استفاده از پودر شیشه بر روی مقاومت فشاری بتن پودری واکنش پذیر بررسی گردید.

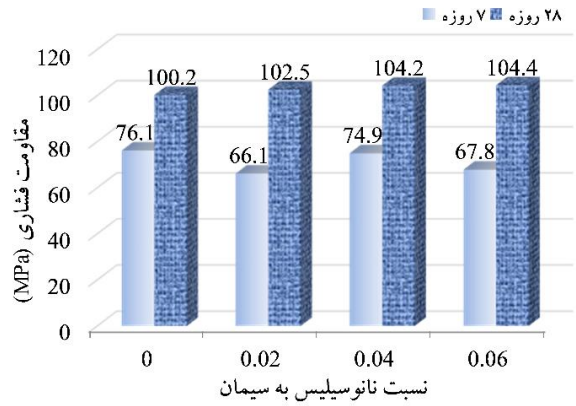
بدین منظور در این تحقیق از پودر شیشه ضایعاتی با محدوده دانه بندی mm ۰/۷-۰ استفاده شد. در این مرحله علاوه بر طرح اختلاط نمونه شاهد، سه طرح اختلاط با استفاده از ۰/۱۵، ۰/۱ و ۰/۰۵ پودر شیشه ضایعاتی به عنوان جایگزین ماسه طبق جدول ۵ به شماره طرح‌های ۲، ۳ و ۴ ساخته شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۸ قابل مشاهده می‌باشد. .بر اساس نتایج به دست آمده مشخص گردید که افزودن پودر شیشه به عنوان جایگزین ماسه تأثیر مثبتی بر روی مقاومت فشاری بتن پودری واکنش پذیر نداشته و حتی این امر باعث کاهش مقاومت فشاری گردید. افزودن ۰/۰۵ پودر شیشه به جای ماسه باعث کاهش ٪۸/۵ مقاومت فشاری بتن گردیده است.



شکل ۸- تأثیر پودر شیشه ضایعاتی به عنوان جایگزین ماسه بر روی مقاومت فشاری

٤-٢- استفاده از نانو سیلیس به عنوان جایگزین سیمان

امروزه نانو سیلیس به دلیل دارا بودن ویژگی‌های خاص فیزیکی و شیمیایی از جمله سطح مخصوص بالا و داشتن ترکیبات سیلیسی به شکل گسترده در بتن استفاده می‌شود. به همین دلیل در این تحقیق به بررسی تأثیر نانو سیلیس بر بتن پودری واکنش پذیر پرداخته شد. به این منظور از سه نسبت مختلف نانو سیلیس به سیمان ۰/۰۶، ۰/۰۴ و ۰/۰۲ در طرح‌های اختلاط طبق جدول ۵ با شماره طرح‌های۵، ۶ و ۷ استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های فشاری ۷ و ۲۸ روزه در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است.



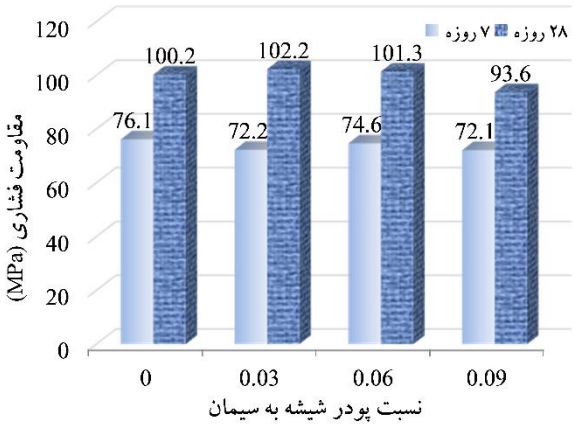
شکل ۹- تأثیر نانو سیلیس به عنوان جایگزین سیمان بر روی مقاومت فشاری

همانطور که در نمودار شکل ۹ مشاهده می‌شود افزودن ۰/۰۶ نانو سیلیس به عنوان جایگزین سیمان باعث افزایش حدود ٪۴ مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن پودری واکنش پذیر گردید. در طرح‌هایی که

از نانو سیلیس استفاده شده است نسبت مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ۷ روزه حدود ۱/۵ است. این در حالی است که در حالت معمولی در نمونه‌های قبل این نسبت در بتن پودری واکنش پذیر حدود ۱/۳ به دست آمده است. این امر به این معناست که نانو سیلیس باعث شده است که گیرش بتن در روزهای اول کم باشد و در روزهای آخر گیرش آن با سرعت بیشتری صورت گیرد.

٤-٣- استفاده از پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان

برخی از محققین علم بتن معتقدند که پودر شیشه با توجه به سیلیس موجود در آن می‌تواند به عنوان پوزولان به صورت جایگزین سیمان در بتن مورد استفاده قرار گیرد. از این رو در این تحقیق سه طرح اختلاط با ۰/۰۳، ۰/۰۶ و ۰/۰۹ جایگزینی پودر شیشه عبوری از الک شماره ۱۰۰ به جای سیمان بر اساس طرح‌های شماره ۸، ۹ و ۱۰ جدول شماره ۵ ساخته شد و تحت آزمایش فشاری ۷ و ۲۸ روزه قرار گرفت. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در نمودار شکل ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد. نتایج نشان داد که جایگزینی ۰/۰۳ پودر شیشه ضایعاتی به جای سیمان باعث افزایش حدود ٪۲ مقاومت فشاری بتن پودری واکنش پذیر گردید.



شکل ۱۰- تأثیر پودر شیشه ضایعاتی به عنوان جایگزین سیمان بر روی مقاومت فشاری

٤-٤- استفاده از ترکیب نانو سیلیس و پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان

در این بخش تأثیر افزودن پودر شیشه و نانو سیلیس به صورت ترکیبی و هم زمان به عنوان جایگزین سیمان مورد بررسی قرار گرفت. طبق طرح‌های شماره ۱۱، ۱۲ و ۱۳ جدول شماره ۵ سه طرح اختلاط با استفاده از نانو سیلیس و پودر شیشه به ترتیب با نسبت ۰/۰۱- ،۰/۰۱۵ ،۰/۰۲- ۰/۰۳ و ۰/۰۳- ۰/۰۴۵ به عنوان جایگزین سیمان تهیه و تحت آزمایش فشاری ۷ و ۲۸ روزه قرار گرفتند. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است.

شکل ۱۱- تأثیر نانو سیلیس و پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان بر روی مقاومت فشاری

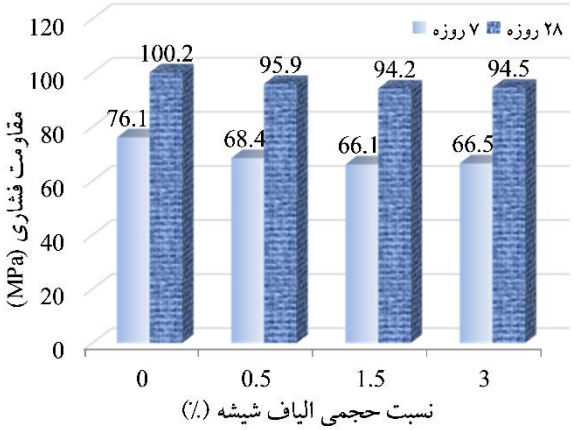
با توجه به نتایج نمودار شکل ۱۱، افزودن نانو سیلیس و پودر شیشه به ترتیب ۰/۰۱- ۰/۰۱۵ به عنوان جایگزین سیمان، باعث افزایش حدود ٪۱۲ مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن پودری واکنش پذیر گردید. در کل جایگزینی پودر شیشه و نانو سیلیس به جای سیمان در بقیه نمونه‌ها نیز باعث افزایش مقاومت فشاری شد. همچنین مشخص شد که اضافه کردن پودر شیشه باعث افزایش سرعت گیرش بتن و جبران کاهش سرعت گیرش بتن در اثر افزودن نانو سیلیس در روزهای ابتدایی می‌گردد.

تأثیر الیاف بر روی مقاومت فشاری

پژوهشگران صنعت بتن به این نتیجه رسیده‌اند که مقاومت کششی پایین بتن موجب بوجود آمدن ضعف در مقاومت فشاری و خمشی آن می‌شود و همواره این گسیختگی و از هم پاشیدگی بتن تحت بار، ناشی از این ضعف است. اصلی ترین راه حل پیشنهادی برای حل این مشکل استفاده از الیاف مناسب در بتن است. مهمترین عملکرد الیاف در بتن این است که موجب کنترل گسترش ترک در بتن می‌شوند. در این بخش از تحقیق به بررسی اثر الیاف شیشه‌ای و پلی پروپیلن بر روی مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن پودری واکنش پذیر پرداخته شد.

٤-٥- استفاده از الیاف شیشه

استفاده از الیاف شیشه‌ای به دلیل مقاومت کششی بالا یکی دیگر از گزینه‌ها برای کاهش ضعف بتن در برابر کشش می‌باشد که می‌تواند باعث افزایش مشخصات فیزیکی بتن گردد. این الیاف به صورت درصد حجمی و جایگزین ماسه در بتن پودری واکنش پذیر مورد استفاده قرار گرفت. سه طرح اختلاط با درصد حجمی ٪۰/۵، ٪۱/۵ و ٪۳ نسبت به حجم کل نمونه با استفاده از این الیاف طبق طرح‌های شماره ۱۴، ۱۵ و ۱۶ جدول ۵ ساخته شد و نمونه‌ها تحت آزمایش فشاری ۷ و ۲۸ روزه قرار گرفتند. نتایج در نمودار شکل ۱۲ قابل مشاهده می‌باشند.

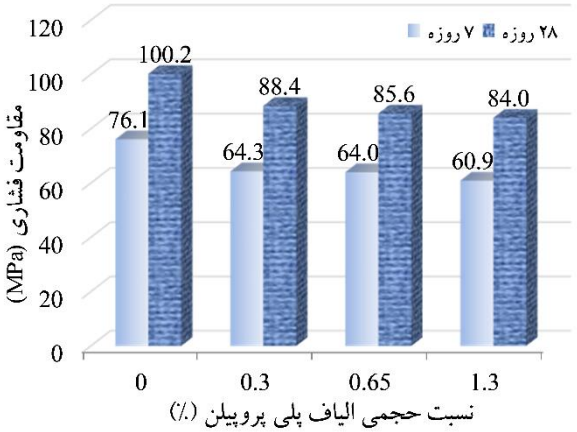


شکل ۱۲- تأثیر الیاف شیشه بر روی مقاومت فشاری

با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده در این بخش مشخص شد که بتن پودری واکنش پذیر ساخته شده با الیاف شیشه دارای عملکرد بهتری نسبت به بتن ساخته شده با الیاف پلی پروپیلن در فشار است. کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح بهینه ساخته شده با الیاف شیشه نسبت به طرح شاهد حدود ٪۴ است و این در حالیست که در طرح‌های دیگر تقریباً مقاومت فشاری ثابت و حدوداً ٪۶ کاهش داشته است.

٤-٦- استفاده از الیاف پلی پروپیلن

الیاف پلی پروپیلن که امروزه به صورت گسترده در صنعت بتن استفاده می‌شود، از مهمترین الیافی هستند که می‌توانند خواص فیزیکی، شکل پذیری و حتی دوام بتن را افزایش دهند. در این تحقیق سه طرح اختلاط با درصد حجمی ٪۰/۳، ٪۰/۶۵ و ٪۱/۳ نسبت به حجم کل نمونه با الیاف پلی پروپیلن طبق طرح‌های شماره ۱۷، ۱۸ و ۱۹ جدول ۵ ساخته شد و نمونه‌ها تحت آزمایش فشاری ۷ و ۲۸ روزه قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌های این بخش در نمودار شکل ۱۳ قابل مشاهده می‌باشد. باتوجه به نمودار افزودن الیاف پلی پروپیلن باعث کاهش چشمگیر مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن پودری واکنش پذیر گردید که در بهترین حالت این کاهش مقاومت فشاری در حدود ٪۱۲ بوده است.



شکل ۱۳- تأثیر الیاف پلی پروپیلن بر روی مقاومت فشاری

طرح بهینه فشاری

طرح اختلاط شماره ۱۱ که افزودن نانو سیلیس و پودر شیشه به ترتیب با نسبت ۰/۰۱- ۰/۰۱۵ به سیمان به عنوان جایگزین سیمان است، بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه به میزان ۱۱۱/۶ MPa را به خود اختصاص داده است. در این طرح افزایش مقاومت فشاری حدوداً ٪۱۲ است.

۵- آزمایش‌های خمشی

استاندارد مورد استفاده در این تحقیق برای آزمایش مقاومت خمشی بتن پودری واکنش پذیر که تقریباً در همه تحقیقات از آن استفاده می‌شود، استاندارد آزمایش مقاومت خمشی ملات ماسه سیمان (ASTM C 348-02) [۲۱] می‌باشد. اندازه ابعاد این نمونه‌ها طبق آیین نامه یاد شده باید cm^3 ۴×۴×۱۶ باشد. در شکل ۱۴ نمونه‌های شکسته شده دارای الیاف تحت آزمایش مقاومت خمشی قابل مشاهده می‌باشند.

تأثیر پودر شیشه و نانو سیلیس بر روی مقاومت خمشی

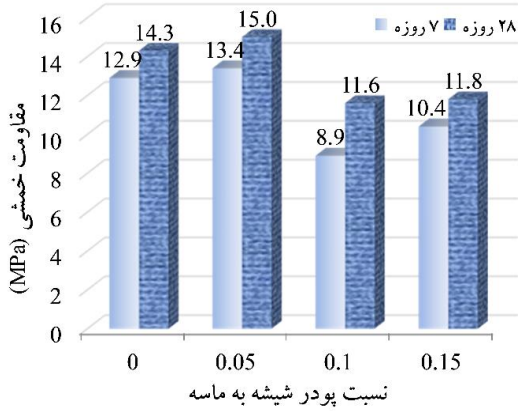
همانطورکه مشخص است ظرفیت خمشی بتن به مقاومت کششی آن وابسته است. خمیر سیمان موجود در بتن باعث چسبیدن مصالح بتن به

یکدیگر شده و نیروهای کششی بین مصالح را تحمل می‌نماید. از اینرو سیمان و مصالح سیمانی نقش مهمی در مقاومت خمشی بتن دارند. در این بخش تأثیر جایگزینی پودر شیشه و نانو سیلیس به جای سیمان و همچنین تأثیر جایگزینی پودر شیشه به جای ماسه بر روی مقاومت خمشی بتن پودری واکنش پذیر مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۱۴- نمونه های شکسته شده تحت آزمایش خمش

۵-۱- استفاده از پودر شیشه به عنوان جایگزین ماسه

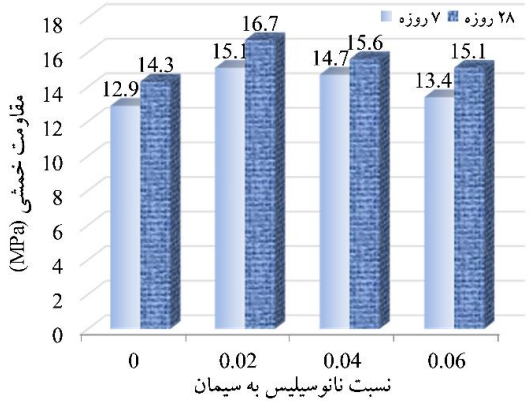
در این بخش از پودر شیشه با حداکثر بعد ۰/۷ mm طبق طرح‌های اختلاط شماره ۲، ۳ و ۴ که در جدول شماره ۵ آمده است، برای تهیه نمونه‌های خمشی استفاده شد. این نمونه‌ها پس از ۷ و ۲۸ روز تحت آزمایش مقاومت خمشی قرار گرفتند. نتایج این آزمایش‌ها در نمودار شکل ۱۵ آمده است. نتایج نشان داد که افزودن ۰/۰۵ پودر شیشه به جای ماسه در طرح اختلاط اولیه باعث افزایش مقاومت خمشی به میزان حدوداً ٪۵ شده است. ولی در نمونه‌هایی که بیشتر از پودر شیشه استفاده گردید، بتن دچار افت مقاومت خمشی به میزان حدود ٪۱۸ شد.



شکل ۱۵- تأثیر پودر شیشه به عنوان جایگزین ماسه بر روی مقاومت خمشی

۵-۲- استفاده از نانو سیلیس به عنوان جایگزین سیمان

در این بخش از تحقیق تأثیر افزودن نانو سیلیس به عنوان جایگزین سیمان بر روی مقاومت خمشی بتن پودری واکنش پذیر بررسی گردید. به همین منظور سه طرح اختلاط با شماره ۵، ۶ و ۷ مطابق جدول شماره ۵ تهیه شد و تحت آزمایش مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌های این مرحله در نمودار شکل ۱۶ قابل مشاهده می‌باشند.

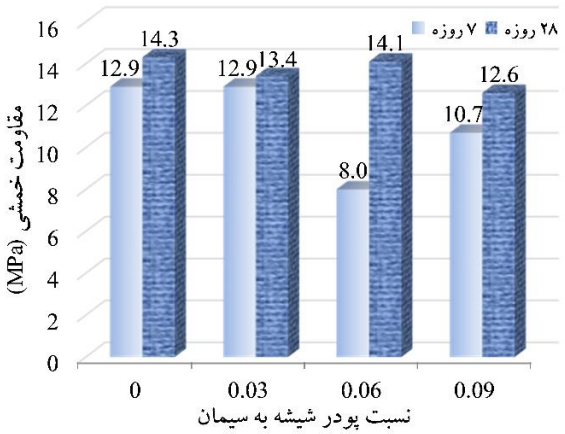


شکل ۱۶- تأثیر نانو سیلیس به عنوان جایگزین سیمان بر روی مقاومت خمشی

طبق نمودار شکل ۱۶ افزودن نانو سیلیس به عنوان جایگزین سیمان در کل باعث افزایش مقاومت خمشی بتن پودری واکنش پذیر گردید که این افزایش مقاومت در طرح بهینه که از ۰/۰۲ نانوسیلیس به جای سیمان استفاده شد به ٪۱۷ رسید.

۵-۳- استفاده از پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان

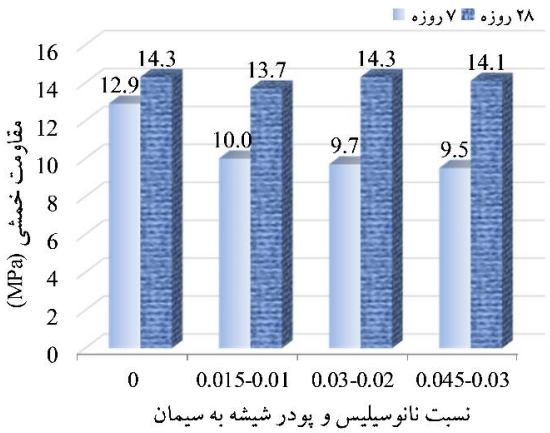
پودر شیشه به دلیل ساختار شیمیایی خود می‌تواند قابلیت چسبندگی خمیر سیمان را افزایش دهد. به همین دلیل در این تحقیق تأثیر پودر شیشه ضایعاتی به عنوان جایگزین سیمان بررسی گردید. به همین منظور از پودر شیشه ضایعاتی عبوری از الک شماره ۱۰۰ برای ساخت نمونه‌ها که طرح اختلاط آنها با شماره‌های ۸، ۹ و ۱۰ در جدول شماره ۵ آمده است، استفاده شد و این نمونه‌ها تحت آزمایش مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه قرار گرفتند. نتایج این آزمایش‌ها در نمودار شکل ۱۷ قابل مشاهده می‌باشد. با افزودن ۰/۰۶ پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان مقاومت خمشی ۷ روزه به شدت افت کرده، ولی مقاومت خمشی ۲۸ روزه تقریباً ثابت مانده است. افزودن پودر شیشه باعث شد نسبت مقاومت خمشی ۲۸ روزه به ۷ روزه در طرح بهینه بسیار افزایش یابد.



شکل ۱۷- تأثیر پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان بر روی مقاومت خمشی

۵-٤- استفاده از ترکیب نانو سیلیس و پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان

در این بخش از تحقیق تأثیر نانوسیلیس و پودر شیشه به صورت هم زمان به عنوان جایگزین سیمان بر روی مقاومت خمشی بتن پودری واکنش پذیر مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور طبق سه طرح اختلاط ۱۱، ۱۲ و ۱۳ جدول شماره ۵ نمونه‌ها با استفاده از نانو سیلیس و پودر شیشه ساخته شد و تحت آزمایش خمشی ۷ و ۲۸ روزه قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های این بخش در نمودار شکل ۱۸ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۸- تأثیر نانو سیلیس و پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان بر روی مقاومت خمشی

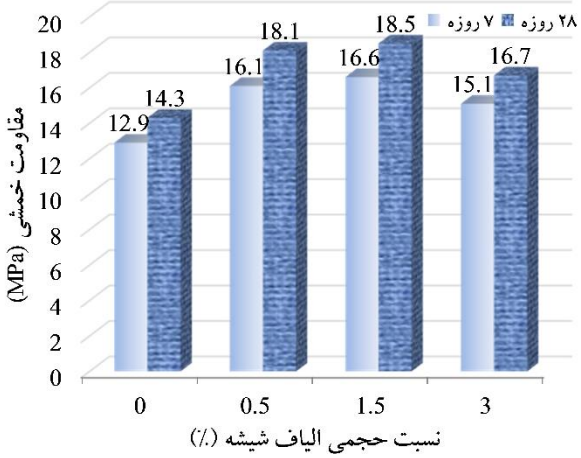
جایگزینی پودر شیشه و نانو سیلیس به صورت هم زمان به جای سیمان تأثیر چندانی بر روی مقاومت خمشی بتن پودری واکنش پذیر نداشته است ولی این جایگزینی باعث کاهش چشمگیر مقاومت خمشی ۷ روزه این بتن شده است. این امر می‌تواند به دلیل وجود نانو سیلیس در ترکیب بتن باشد زیرا در بخش‌های قبل که از نانو سیلیس به عنوان جایگزین سیمان استفاده شده بود نیز موجب افزایش نسبت مقاومت ۲۸ روزه به ۷ روزه بتن گردید.

تأثیر الیاف بر روی مقاومت خمشی

نتایج تحقیقات نشان داده است که افزودن الیاف به بتن می‌تواند با کنترل ترک‌ها، باعث افزایش مقاومت کششی، خمشی، برشی، شکل پذیری و جذب انرژی بتن به میزان قابل ملاحظه ای گردد. میزان اثر الیاف بر روی خواص ذکر شده به مقدار، جنس، طول، شکل و قطر الیاف بستگی دارد. در این تحقیق اثر استفاده از الیاف شیشه‌ای و پلی پروپیلن بر روی مقاومت ۷ و ۲۸ روزه بتن پودری واکنش پذیر مورد بررسی قرار گرفت.

۵-۵- استفاده از الیاف شیشه

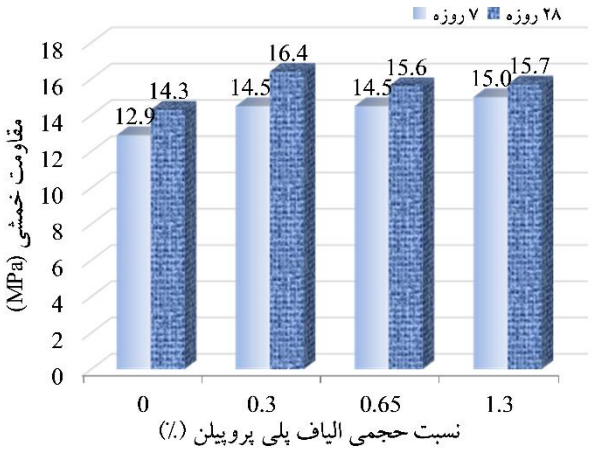
برای بررسی اثر الیاف شیشه‌ای بر روی مقاومت خمشی بتن پودری واکنش پذیر، الیاف در این تحقیق به صورت درصد حجمی کل نمونه طبق طرح‌های شماره ۱۴، ۱۵ و ۱۶ جدول شماره ۵ به بتن افزوده شد و تحت آزمایش خمشی ۷ و ۲۸ روزه قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در نمودار شکل ۱۹ قابل مشاهده می‌باشد. افزودن الیاف شیشه‌ای باعث افزایش چشمگیر مقاومت خمشی بتن پودری واکنش پذیر گردید. بطوریکه در طرح بهینه این افزایش مقاومت نسب به نمونه شاهد به حدود ٪۳۰ رسید که این طرح با افزودن ٪۱/۵ حجمی الیاف شیشه‌ای ساخته شد.



شکل ۱۹- تأثیر الیاف شیشه بر روی مقاومت خمشی

۵-٦- استفاده از الیاف پلی پروپیلن

الیاف پلی پروپیلن از دیگر الیافی است که اثر آن بر روی مقاومت خمشی ۷ و ۲۸ روزه بتن پودری واکنش پذیر در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور نمونه‌ها مطابق با طرح‌های شماره ۱۷، ۱۸ و ۱۹ جدول شماره ۵ ساخته شده و تحت آزمایش مقاومت خمشی قرار گرفتند. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در نمودار شکل ۲۰ قابل مشاهده می‌باشد. افزودن الیاف پلی پروپیلن نیز مانند الیاف شیشه‌ای باعث افزایش مقاومت خمشی بتن پودری واکنش پذیر گردید. ولی این افزایش مقاومت نسبت به بتن ساخته شده با الیاف شیشه‌ای کمتر بود. افزایش مقاومت خمشی در طرح بهینه به حدود ٪۱۵ رسید که این طرح با افزودن ٪۰/۳ حجمی الیاف پلی پروپیلن به دست آمد.



شکل ۲۰- تأثیر الیاف پلی پروپیلن بر روی مقاومت خمشی

طرح بهینه خمشی

طرح اختلاط شماره ۱۵ که با استفاده از ٪۱/۵ الیاف شیشه‌ای نسبت به حجم کل نمونه‌ها ساخته شد، بیشترین مقاومت خمشی را حاصل کرد. الیاف شیشه‌ای باعث افزایش ٪۳۰ مقاومت خمشی بتن نسبت به نمونه شاهد شدند.

٦- نتیجه گیری

ضعیف‌ترین ناحیه بتن محل اتصال خمیر سیمان و سنگدانه یا همان ناحیه انتقال بتن می‌باشد. عمدتاً ریز ترک‌هایی که در این ناحیه ایجاد می‌گردند پس از گسترش به نواحی دیگر باعث گسیختگی بتن می‌شوند. حال آنکه در بتن پودری واکنش پذیر با حذف درشت‌دانه و استفاده از مصالح واکنش پذیر در واقع این ضعف حذف می‌گردد و ریز ترک‌های ناحیه انتقال که باعث گسیختگی نهایی بتن می‌شوند نیز محدود خواهند شد همچنین محصولات ضعیف ناشی از هیدراتاسیون سیمان با مصالح واکنش پذیر واکنش داده و ترکیبات با استحکام بالا تشکیل می‌شوند.

از بررسی نتایج آزمایش‌های ۷ و ۲۸ روزه خمشی و فشاری بر روی بتن پودری واکنش پذیر در این تحقیق نتایج زیر استخراج گردید.

- استفاده از پودر شیشه ضایعاتی به عنوان جایگزین ماسه در بتن پودری واکنش پذیر باعث کاهش ٪۸/۵ مقاومت فشاری و افزایش ٪۵ مقاومت خمشی گردید. همچنین افزودن پودر شیشه به عنوان جایگزین سیمان تأثیر منفی بر روی مقاومت خمشی و فشاری نداشت. این امر ناشی از سختی بالای شیشه و همچنین وجود سیلیس در پودر شیشه می‌باشد. با توجه به این تغییرات ناچیز، بنظر می‌رسد که می‌توان از پودر شیشه ضایعاتی در این نوع بتن به جای ماسه سیلیسی و سیمان استفاده نمود.
- با توجه به اینکه جایگزینی نانو سیلیس به جای سیمان باعث افزایش ٪۴ مقاومت فشاری و ٪۱۷ مقاومت خمشی گردید، می‌توان از آن به عنوان یک افزودنی مناسب برای افزایش مشخصات مکانیکی بتن پودری واکنش پذیر استفاده نمود. نانو سیلیس باعث کاهش سرعت گیرش بتن در روزهای ابتدایی شد. نانو سیلیس به دلیل سطح مخصوص بالا و درصد سیلیس فراوان که باعث سهولت در انجام واکنش شیمیایی با محصولات ضعیف هیدراتاسیون می‌شود و همچنین ابعاد بسیار ریز که باعث افزایش تراکم بتن می‌شود، مشخصات مکانیکی این نوع بتن را افزایش می‌دهد.
- هرچند افزودن نانو سیلیس و پودر شیشه به صورت هم زمان به عنوان جایگزین سیمان باعث افزایش ٪۱۲ مقاومت فشاری گردید ولی تأثیر چندانی بر روی مقاومت خمشی بتن پودری واکنش پذیر نداشت و باعث کاهش سرعت افزایش مقاومت در روزهای ابتدایی گردید. این امر می‌تواند به دلیل سیلیس زیاد و واکنش قلیایی مصالح رخ دهد که منجر به کاهش مقاومت کششی و نهایتاً مقاومت خمشی گردید.
- بتن پودری واکنش پذیر ساخته شده با الیاف شیشه‌ای به دلیل سختی بالا و پیوستگی مناسب با بتن در مقایسه با بتن ساخته شده با الیاف پلی پروپیلن عملکرد بهتری هم در مقاومت فشاری و هم در مقاومت خمشی از خود نشان داد. با اینکه در طرح بهینه افزودن الیاف شیشه‌ای باعث کاهش ٪۴ مقاومت فشاری بتن گردید ولی

مقاومت خمشی آن را به میزان ٪۳۰ افزایش داد. افزودن الیاف پلی پروپیلن نیز باعث کاهش ٪۱۲ مقاومت فشاری و افزایش ٪۱۵ مقاومت خمشی بتن گردید. در کل افزودن الیاف باعث افزایش قابل ملاحظه مقاومت خمشی بتن پودری واکنش پذیر گردید ولی در عین حال کاهش مقاومت فشاری را در پی داشت.

- افزودن الیاف باعث افزایش نسبت مقاومت خمشی به مقاومت فشاری گردید زیرا بکار بردن الیاف در صورت پیوستگی مناسب باعث افزایش مقاومت کششی و در نتیجه مقاومت خمشی می‌شود. در نمونه‌های ساخته شده با الیاف شیشه‌ای این نسبت به ۰/۲ رسید این در حالی است که در نمونه‌های شاهد این نسبت ۰/۱۴ بود. این امر نشانگر این است که از آنجایی که شکست بتن در برابر خمش، ناشی از ضعف آن در برابر نیروهای کششی است لذا استفاده از الیاف در بتن باعث افزایش مقاومت کششی و در نتیجه افزایش مقاومت خمشی می‌گردد.

- افزودن نانو سیلیس به عنوان جایگزین سیمان باعث افزایش نسبت مقاومت فشاری و خمشی ۲۸ روزه به ۷ روزه گردید یا به عبارت دیگر افزودن نانوسیلیس باعث کاهش سرعت گیرش بتن پودری واکنش پذیر در روزهای ابتدایی شد ولی در نمونه‌هایی که از نانو سیلیس و پودر شیشه به صورت هم زمان به عنوان جایگزین سیمان استفاده شد، این نسبت کاهش یافت.

- هرچند با افزودن الیاف شیشه‌ای بیشترین مقاومت خمشی بدست آمد ولی به نظر می‌رسد استفاده از نانو سیلیس به عنوان جایگزین سیمان به همراه الیاف شیشه‌ای می‌تواند باعث افزایش چشمگیر مقاومت خمشی بتن پودری واکنش پذیر گردد.

- بتن ساخته شده با نانو سیلیس و پودر شیشه به صورت هم زمان به عنوان جایگزین سیمان بهترین عمل کرد را از نظر مقاومت فشاری به همراه داشت.

۷- مراجع

[1]. [1] Yazici H., Yardimci M.Y., Aydin S., Karabulut A.S., "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes", Construction and Building Materials, Vol. 23, pp. 1223-1231, 2009.

[۲] مستوفی نژاد، د.، "تکنولوژی و طرح اختلاط بتن"، انتشارات ارکان، چاپ هشتم، ۱۳۸۴.

[3] Ipek M., Yilmaz K., Uysal M., "The effect of pre-setting pressure applied flexural strength and fracture toughness of reactive powder concrete during the setting phase", Construction and Building Materials, Vol. 26, pp. 459-465, 2012.

[4] Lee M.G., Wang Y.C., Chiu C.T., "A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material", Construction and Building Materials, Vol. 21, pp. 182– 189, 2007.

[5] Zeng W., Luo B., Wang Y., "Compressive and tensile properties of reactive powder concrete with steel fibres at elevated temperatures", Construction and Building Materials, Vol. 41, pp. 844-851, 2013.

[6] Tam C., Tam V.W., Ng K., "Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong". Construction and Building Materials, Vol. 22, pp. 97 -97, 2112.

[7] Zeng W., Li H. and Wang Y., "Compressive behaviour of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete after high temperatures", Materials and design, Vol. 41, pp. 403-409, 2012.

[8] Canbaz M., "The effect of high temperature on reactive powder concrete", Construction and Building Materials, Vol. 70, pp. 508-513, 2014.

[۹] معراجی، ل.، افشین، ح.، عابدی، ک.، "بررسی امکان تولید بتن پودری واکنش‌پذیر با مصالح موجود در ایران"، تحقیقات بتن، شماره ۲، ص ص ۱۸-۷، ۱۳۹۱.

[۱۰] خالو، ع.ر.، خداویردی زنجانی، م.م.، عزیزی، خ.، "مطالعه آزمایشگاهی تأثیر مقدار دوده سیلیسی روی عملکرد بتن پودری واکنشی RPC" تحقیقات بتن، شماره ۱، ص ص ۷۸-۶۹، ۱۳۹۱.

[11] Yazici H., Deniz E., Baradan B., "The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete", Construction and Building Materials, Vol. 42, pp. 53-63, 2013.

[۱۲] معراجی، ل.، افشین، ح.، عابدی، ک.، "اثر الیاف مختلف بر خواص بتن پودری واکنش‌پذیر"، پنجمین کنفرانس سالانه ملی بتن ایران، ۱۳۹۲.

[13] Beglarigale A., Yazici H., "Pull-out behavior of steel fiber embedded in flow able RPC and ordinary mortar", Construction and Building Materials, Vol. 75, pp.255-265, 2015.

[14] Lee M.G., Wang Y.C., Chiu C.T. "A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material", Construction and Building Materials, Vol. 21, pp. 182-189, 2007.

[15] Yazici H., Yardimci M.Y., Aydin S., Karabulut A.S., "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes", Construction and

Building Materials, Vol. 23, pp. 1223-1231, 2009.
[16] Ipek M., Yilmaz K., Uysal M., "The effect of pre-setting pressure applied flexural strength and fracture toughness of reactive powder concrete during the setting phase", Construction and Building Materials, Vol. 26, pp. 459-465, 2012.
[17] Sobolev K., Flores I., Torres- Martinez L. M., Valdez P. L., Zarazua E., Cuellar E. L., "Engineering of SiO_2 Nanoparticles for Optimal Performance in Nano Cement-Based Materials", Department of Civil Engineering, CEAS, University of Wisconsin-Milwaukee, USA, pp. 139-148, 2009.
[18] Stefanidou M., Papayianni I., "Influence of Nano-SiO_2 on the Portland Cement Pastes", Composites: Part B, Laboratory of Building Materials, Civil Engineering Department, AUTH, Greece, Vol. 43, pp. 2706-2710, 2010.
[19] Precast/Prestressed Concrete Institute, "Manual for Quality Control for Plants and Production of Glass Fiber Reinforced Concrete Products", PCI-MNL-130-09, pp. 183, 2009.
[20] ASTM C 109/C 109M – 07, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or (50-mm) Cube Specimens)", ASTM International, West Conshohoken, 2008.
[21] ASTM C 348-02, "Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars", ASTM International, West Conshohoken, 2002.

Effect of Glass Powder, Nano Silica, and Steel, Glass and Polypropylene Fibres on Mechanical Properties and Thermal Performance of Reactive Powder Concrete

M. Hjazi *
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportaiton, University of Isfahan
H. Abdollahi
M.Sc. in Structural Engineering

Abstract

In reactive powder concrete, by removing the course aggregates and replacing them with silica sand, using a large amount of microsilica with a low water to cement ratio and also using fibres and additives it is possible to achieve very high compressive and flexural strengths, packing density, ductility, energy absorption, durability and low permeability. In this paper, the effect of glass powder, nanosilica, glass fibres and polypropylene fibres on the mechanical properties of reactive powder concrete is studied. At first, in order to obtain the proper control mix design, the effect of the type, amount and the maximum dimension of the sand, the amount and dimension of the glass powder, and the microsilica to cement ratio on the 7-day compressive strength of the reactive powder concrete was studied. Then, the effect of the glass powder as a substitute for sand and cement, nanosilica as a substitute for the cement, the combination of glass powder and nanosilica as a substitute for the cement, and the use of glass fibres and polypropylene fibres on 7-day and 28-day compressive and flexural strength was studied. Obtained results showed that adding the glass powder as a substitute of sand reduced the compressive strength by 8.5% and increased the flexural strength by 5%. Replacing the cement with nanosilica increased the compressive and flexural strengths by 4% and 17%, respectively. Adding the combination of nanosilica and glass powder as a substitute of cement increased the compressive strength by 12% but it had not a considerable effect on flexural strength. Adding glass fibres reduced the compressive strength by 6% and increased the flexural strength by 30%. Polypropylene fibres decreased the compressive strength by 12% and increased the flexural strength by 15%.

Keywords: Reactive Powder Concrete, Glass Powder, Nanosilica, Glass Fibres, Polypropylene Fibres, Compressive Strength, Flexural Strength.

* Corresponding Author: m.hejazi@eng.ui.ac.ir