

استفاده از پودر سنگ آهک به عنوان جایگزین بخشی از ماسه سیلیسی در بتن پودری واکنش پذیر

جاوید چاخرو^۱، بهمن شروانی تبار^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

b.shervani@yahoo.com

چکیده

در تولید بتن پودری واکنش پذیر (RPC) از مواد و مصالح پودری بسیار ریزدانه شامل ماسه کوارتزی، میکروسیلیس و پودر کوارتز به عنوان مصالح استفاده می شود. مقدار سیمان در بتن RPC مابین ۷۰۰ الی ۱۰۰۰ کیلوگرم در مترمکعب بتن در نظر گرفته می شود. از الیاف فولادی برای افزایش مقاومت خمشی و کششی می توان استفاده نمود، مقدار آب کم و در حدود ۲۰ درصد وزن سیمان می باشد و در شرایط کاربری مختلف میتوان افزودنی های مناسب استفاده نمود. این بتن دارای مقاومت فشاری بالا نسبت به بتن معمولی می باشد، که در سال های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. با استفاده از این نوع بتن می توان وزن سازه را به مقدار قابل توجهی کاهش داد و از ویژگی های مهم آن می توان به مقاومت فشاری زیاد، نفوذ پذیری کم، دوام و مقاومت سایشی بالا و شکل پذیری زیاد که می تواند جذب انرژی بیشتری در هنگام زلزله داشته باشد.

در این پژوهش می خواهیم از پودر سنگ آهک به جای قسمتی از ماسه سیلیسی استفاده نماییم. برای این منظور پس از بدست آوردن طرح اختلاط بهینه بر اساس مقاومت فشاری و روانی و قطر پخش شدگی میز جریان، ابتدا پودر سنگ آهک را بصورت جایگزین با درصدهای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ به جای ماسه سیلیسی جایگزین کرده و در ادامه از پودر سنگ آهک به عنوان جایگزینی-افزودنی با درصدها و طرح های مختلف استفاده شده است. آزمایش های انجام شده روی این نمونه ها شامل آزمایش روانی میز جریان و جذب آب حین عمل آوری و مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه می باشد. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که با افزایش پودر سنگ آهک تا ۲۰ درصد جایگزینی با ماسه سیلیسی باعث افزایش مقاومت فشاری شده، کاهش بسیار جزئی در روانی و همچنین باعث کاهش جذب آب حین عمل آوری می شود.

کلمات کلیدی: بتن پودری واکنش پذیر، مقاومت فشاری، روانی، عمل آوری، پودر سنگ آهک

۱. مقدمه

بتن پودری واکنش‌پذیر نوع جدیدی از بتن‌های توانمند است که به دلیل ریزی مواد پودری و پوزولانی مورد استفاده در آن و نیز مقدار زیاد موادی که به صورت هیدرولیکی فعال اند به آن بتن پودری واکنش‌پذیر یا واکنش‌زا می‌گویند (شیانگ گائو^۱، ۲۰۰۷). مواد اصلی تشکیل دهنده بتن پودری واکنش‌پذیر سیمان پرتلند معمولی، آب، دوده سیلیسی، ماسه کوارتزی (سیلیسی)، پودر کوارتز، فوق‌روان‌کننده و در بعضی موارد الیاف می‌باشد (ریچارد و چیریژی^۲، ۱۹۹۵). استفاده از الیاف فولادی به دلیل بهبود مقاومت خمشی برای استفاده در دهانه‌های طویل و عضوهای سازه‌ای باریک بدون آرماتوربندی سنتی مفید است (شیانگ گائو، ۲۰۰۷). RPC یا همان بتن پودری واکنش‌پذیر، یکی از آخرین پیشرفت‌ها در زمینه بتن است که بسیاری از ایراداتی که بتن معمولی دارد را رفع می‌کند. RPC، مقاومت اساتیکی و دینامیکی بسیار بالا، ظرفیت شکست بالا، افت پایین و دوام فوق‌العاده، تحت شرایط شدید را دارا می‌باشد (ال-حسینی، خلیل و دانها^۳، ۲۰۱۴).

بسیاری از محققان اصول اساسی برای بتن واکنش‌پذیر را بیان کردند که به صورت زیر است:

۱- این بتن فاقد سنگدانه‌های درشت می‌باشد و تنها از پودرهای بسیار ریز ماسه (حداکثر اندازه دانه درشت ۶۰۰ میکرومتر) و کوارتز آسیاب شده (متوسط اندازه دانه‌ها در حدود ۱۰ میکرومتر) و میکروسیلیس در حدود ۰.۲۵ وزن سیمان استفاده شده است. ۲- میتوان به این نوع بتن، الیاف فولادی در حدود ۲٪ حجمی افزود. این الیاف سبب افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت کششی و خمشی بتن می‌شوند. همچنین تحقیقات نشان داده است که با به کار بردن الیاف فولادی، علاوه بر مقاومت خمشی و کششی، مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز افزایش یافته است. این الیاف معمولاً دارای طولی در حدود ۱۳ میلی‌متر و قطری در حدود ۰.۱۵ میلی‌متر و با مقاومت کششی بالا می‌باشند. ۳- در این نوع بتن چون نسبت آب به سیمان کم است. بنابراین جهت روانی خمیر از فوق‌روان‌کننده استفاده می‌شود. سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند معمولی است. مقدار سیمان مصرفی در بتن پودری واکنش‌پذیر معمولاً بین ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم در متر مکعب می‌باشد. ۴- دانه‌بندی به منظور دستیابی به یک مخلوط با تراکم بسیار بالا بهینه‌سازی می‌شود. ۵- نمونه‌های بتنی می‌توانند قبل و در طول هیدراسیون تحت فشار قرار گیرند. ۶- نمونه‌ها می‌توانند تحت درجه حرارت‌های مختلف قرار گیرند. (معراجی و همکاران ۱۳۹۳)

بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC) از جمله مواد ساختمانی است که تا امروزه در صنعت ساخت و ساز بسیار کم مورد استفاده قرار گرفته است. این بتن به مراتب گرانتر از بتن‌های با مقاومت معمولی و بتن‌های با عملکرد بالا می‌باشد. از کاربردهای بتن پودری واکنش‌پذیر می‌توان به استفاده در تیرهای پیش تنیده X شکل و حفاظت و نگهداری از زباله‌های هسته‌ای که برای ایزوله کردن و نگهداری ضایعات هسته‌ای در چندین پروژه در اروپا استفاده شده است. درواقع بتن پودری برای قالب و تحکیم مخازن ضایعات بکار می‌رود و استفاده از آن به عنوان مخزن نگهداری ضایعات رادیواکتیو سطح بالا، توسط Torrenti مطالعه شد (معصومی و همکاران، ۱۳۹۲).

در این تحقیق با مطالعه تجربی بر روی طرح‌های مختلف با روش آزمون و خطا امکان ساخت بتن پودری واکنش‌پذیر با استفاده از مواد و مصالح تهیه شده از معادن یا تولیدات کارخانجات داخل کشور سنجیده و با انجام آزمایشاتی تاثیر پودر سنگ آهک کارخانه شرکت اسپندار واقع در نزدیکی آذر شهر بر روی مقاومت های فشاری، جذب آب حین عمل آوری و کارایی و روانی بر اساس میز جریان بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC^۴) در دمای عمل آوری ۲۳ الی ۲۵ درجه سلسیوس (به صورت غرقاب) مورد بررسی قرار گرفت.

¹ Xiang Gao

² Richard, Cheyrez

³ Al-Hassani, Khalil & Danha

⁴ Reactive Powder Concrete

۲. مواد و روش‌ها

برای تولید بتن پودری واکنش‌پذیر ابتدا مصالح مورد نیاز تهیه و انتخاب می‌شود، در این قسمت به معرفی مصالح استفاده شده پرداخته می‌شود.

۲-۱- سیمان

سیمان مورد استفاده در تهیه‌ی RPC، سیمان پرتلند نوع دو می‌باشد که حرارت‌زایی آن باید کم باشد زیرا مقدار سیمان مصرفی در بتن RPC حدوداً ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم در مترمکعب می‌باشد. از لحاظ ترکیب شیمیایی، سیمان دارای C3A کمتر، نتایج بهتری می‌دهد. سیمان مصرفی در این پژوهش از سیمان پرتلند نوع دو، تهیه شده از کارخانه سیمان صوفیان تبریز می‌باشد. که مشخصات آن در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی سیمان نوع دو صوفیان

مشخصات فیزیکی	وزن مخصوص (gr/cm ³)	بلین (gr/cm ²)	انبساط طولی	زمان گیرش اولیه (minutes)	زمان گیرش ثانویه (minutes)	مقاومت فشاری ۳روزه (kgf/cm ²)	مقاومت فشاری ۷روزه (kgf/cm ²)	مقاومت فشاری ۲۸روزه (kgf/cm ²)
میزان	3.12	2860	0.23	80	275	179	274	370

جدول ۲: مشخصات شیمیایی مواد تشکیل دهنده سیمان نوع دو صوفیان

ترکیبات شیمیایی	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
درصد	21.91	4.85	3.46	64.56	2.38	1.71	0.34	0.97
ترکیبات شیمیایی	CaO.f	Cl	LOI	I.R	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
درصد	1.08	-	0.75	0.58	49.5	25.47	7	10.53

۲-۲- دوده سیلیسی

لفظ دوده سیلیسی، میکروسیلیس و سیلیس تبخیرشده اغلب برای توصیف محصولات استخراج شده از بخار خارج شده از گازهای سیلیکون، فروسیلیکون و سایر آلیاژ فلزات کوره تصفیه، استفاده می‌شود. به هر حال، لفظ میکروسیلیس و دوده سیلیسی برای توصیف دوده سیلیسی غلیظ که کیفیت بالا برای استفاده در صنعت سیمان و بتن دارد استفاده می‌شود. از لفظ دوده سیلیسی در استاندارد اروپا استفاده شده است (نیومن و چو^۵، ۲۰۰۳). میکروسیلیس استفاده شده در این تحقیق از کلینیک بتن تهیه شده است و مشخصات آن طبق جدول ۳ و ۴ می‌باشد.

⁵ Newman & Choo

جدول ۳: مشخصات فیزیکی دوده سیلیسی مصرفی

مشخصات فیزیکی	شکل	شکل ذرات	وزن مخصوص انبوهی (gr/cm ³)	وزن مخصوص مطلق (gr/cm ³)	سطح مخصوص (m ² /kg)	اندازه متوسط (میکرومتر)
	بی شکل (آمورف)	کروی و غیر کریستاله	0.367	2.0	20000	0.1

جدول ۴: مشخصات شیمیایی دوده سیلیسی مصرفی

ترکیبات شیمیایی	H ₂ O	Sic	C	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO
	0.08 %	0.5 %	0.3 %	96.4 %	0.87 %	1.32 %	0.49 %
ترکیبات شیمیایی	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	CL	-
	0.97 %	0.31 %	1.01 %	0.16 %	0.10 %	0.04 %	-

۲-۳- ماسه سیلیسی

قسمت اعظم ترکیب بتن پودری واکنش پذیر از ماسه ریز دانه تشکیل شده است که جایگزین مصالح دانه ای بتن معمولی شده است. ماسه سیلیسی می تواند در افزایش مقاومت بتن پودری واکنش پذیر نقش بسزایی ایفا کند. ماسه مصرفی در این تحقیق از معدن ماسه سیلیسی صنعتی قوم تپه در نزدیکی شهر تبریز با وزن مخصوص ۲/۶۳ و ۰/۲ درصد رطوبت و با هفت دهم الی یک درصد جذب آب SSD و با حداکثر اندازه دانه ۰/۶ میلی متر و به رنگ طوسی می باشد که در حالت SSD مورد استفاده قرار گرفته است. ترکیبات شیمیایی ماسه به کار رفته در این تحقیق در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: ترکیب شیمیایی ماسه مصرفی

Constutes ترکیبات	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	K ₂ O(%)	Fei(%)
	61.84	15.2	3.51	3.53	3.73
	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe ₃ O ₄ (%)	Na ₂ O(%)	MgO(%)	Other(%)
	3.92	1.37	4.83	1.32	0.75

۲-۴- پودر سنگ آهک

از پودر سنگ آهک اخیراً به عنوان یک پودر معدنی در جهت بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن استفاده شده است. پودرهای معدنی مثل پودر سنگ آهک در بتن، به عنوان پرکننده حفره ها عمل کرده و موجب کاهش تخلخل می شود و از جدایی مواد جلوگیری می کند؛ در نتیجه می توان از آن ها در جهت بهبود مقاومت بتن استفاده نمود. چنانچه از پودر سنگ آهک در بتن بتوان خواص مناسبی را به دست آورد، با توجه به فراوانی پودر سنگ آهک در ایران به عنوان زائدات، مزایای

اقتصادی مهمی به دنبال خواهد داشت (حبیبی، ۲۰۰۹). پودر سنگ آهک از کارخانه شرکت اسپندار تهیه شده که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶: مشخصات فیزیکی و شیمیایی پودر سنگ آهک

Identifications	
Name	Calcium Carbonate, Limestone, Calcite
Linear Formula	CaCO_3
Molecular weight	100.09 g/mol
Form	Powder
Specific Gravity	(2.5 - 2.72)
Density	N.A (depend on size Limestone)
Solubility in Water	0.13 g/L (25 °C)
Chemical Analysis	
$97\% < \text{CaCO}_3 < 99\%$	$\text{P}_2\text{O}_5 < 0.03\%$
$54.5\% < \text{CaO} < 55.5\%$	$\text{MnO} < 0.02\%$
$42.0 < \text{L.O.I} < 43.7$	$\text{Na}_2\text{O} < 0.1\%$
$\text{MgO} < 0.5\%$	$\text{K}_2\text{O} < 0.1\%$
$\text{SiO}_2 < 0.7\%$	$\text{SiO}_2 + \text{insoluble matter} < 1.5\%$
$\text{Al}_2\text{O}_3 < 0.5\%$	$\text{SO}_3 = \text{Trace}$
$\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.2\%$	

۲-۵- پودر کوارتز

کوارتز آسیاب شده یک جزء اصلی در بتن پودری واکنش پذیر می باشد. قطر ذرات آن بین ۵ تا ۲۵ میکرون است (ریچارد و چیریزی، ۱۹۹۵). پودر کوارتز به کار رفته در این پژوهش از معدن اصفهان تهیه شده است و مشخصات فنی آن طبق جدول ۷ می باشد.

جدول ۷: مشخصات فنی پودر کوارتز مصرفی

مشخصات	اندازه (میلیمتر)	میزان رطوبت	SiO_2
فنی	< 0.05	< 1.0	96 %

۲-۶- فوق روان کننده

در این تحقیق از ابر روان کننده و کاهنده قوی آب (Power Plast-PM) شرکت آبادگران که فوق روان کننده ای بر پایه پلی کربوکسیلاتی می باشد استفاده شده است. این فوق روان کننده بر اساس استاندارد ASTM C1017/C1017M و ASTM C494/C494M TYPEF تهیه شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی این فوق روان کننده در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸: مشخصات فیزیکی و شیمیایی فوق روان کننده استفاده شده

میزان مصرف (بر حسب وزن مواد سیمانی)	یون کلر	رنگ	وزن مخصوص	حالت فیزیکی	بنیان شیمیایی
(۰.۳-۱)٪	ندارد	قهوه‌ای	$1.11 \text{ (g/cm}^3\text{)}$	مایع	پلی کربو کسيلات

تحقیقات نشان داده است که موثرترین نوع فوق روان کننده‌ها بر خواص RPC، فوق روان کننده‌هایی با پایه پلی کربکسیلات اتر می‌باشند (ویل و همکاران، ۲۰۱۱). مقدار مصرف این فوق روان کننده از طریق آزمایشهای کارگاهی بر اساس روانی و میزان جریان مشخص خواهد شد اما بر اساس طرح اختلاط بتن معمولی مقدار مصرف در حدود ۰/۳ تا ۱ درصد وزن سیمان و مواد جایگزین سیمان مصرفی می‌باشد. در شکل ۱ چند قطره از آن روی کاغذ سفید ریخته شده است که زرد رنگ دیده می‌شود ولی در داخل استوانه مدرج و ظرف استیل، قهوه‌ای دیده می‌شود.



شکل ۱: ابر روان کننده و کاهنده قوی آب، مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها

۲-۷-آب

در این پژوهش، آب مصرفی برای ساخت طرح های اختلاط، آب شرب دانشگاه شهید مدنی آذربایجان می باشد.

⁶ Wille

۳- آماده سازی و عمل آوری طرح های اختلاط

بعد از تهیه مصالح و طبق طرح اختلاط های مورد نظر مهم ترین عامل برای مطالعه بتن پودری واکنش پذیر مرحله مخلوط کردن مواد تشکیل دهنده است. این موضوع در بعضی از موارد نادیده گرفته می شود و ممکن است وقتی که نتایج آزمایشگاهی مورد تحلیل قرار می گیرند، عامل خطا باشد. در اختلاط بتن RPC، ابتدا پس از عبور دادن ماسه سیلیسی از الک ۶۰۰ میکرون، ماسه سیلیسی را در حالت SSD قرار داده و مقداری از رطوبت آنها را که بصورت آب آزاد می باشد، بدست می آوریم و در طرح اختلاط دخالت می دهیم. سپس مواد وزن شده در ترازوی دیجیتال را به مدت ۱۰ دقیقه در یک مخلوط کن تابه ای ریخته تا ابتدا مواد به صورت خشک (سیمان، میکروسیلیس، پودر کوارتز، ماسه سیلیسی و پودر سنگ آهک) مخلوط شوند. سپس نصف آب و نصف فوق روان کننده اضافه کرده و به مدت چهار دقیقه دیگر مخلوط کردیم و در آخر مابقی آب و فوق روان کننده افزوده و چهار دقیقه دیگر نیز مخلوط گردیدند تا در نهایت مخلوط کاملاً همگنی بدست آید. پس از اتمام زمان مخلوط کردن و قبل از قالب گیری، میزان قطر پخش شدگی بر حسب میلی متر بر روی میز جریان برای بررسی کارایی و روانی بتن تازه انجام شد و بعد از انجام آزمایش میز جریان، ریختن بتن در قالب در ۳ مرحله و در هر مرحله با کوبیده شدن صورت گرفته و در نهایت پس از ویبره برای کاهش هوای محبوس شده در بتن، نمونه های مکعبی ۵*۵*۵ سانتی متر برای آزمایش مقاومت فشاری ساخته شد و پس از ۲۴ ساعت قالب ها باز گردید و نمونه ها با احتیاط در داخل آب با دمای 25°C الی ۲۳ قرار گرفت. محاسبه جذب آب حین عمل آوری و تست مقاومت فشاری نمونه ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام گردید.



شکل ۲: نمونه های ساخته شده از RPC برای آزمایش مقاومت فشاری

۳-۱- طرح اختلاط

از طرح اختلاط جدول ۷ برای ساخت نمونه های آزمایش برای بتن پودری واکنش پذیر استفاده شده است. در این طرح ها پودر سنگ آهک با درصدهای ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزین ماسه سیلیسی گردیده است. نام گذاری آن ها به ترتیب، C0، C10، C20 و C30 می باشد و در طرح های دیگر به عنوان جایگزینی-افزودنی با درصدهای ۱۵، ۲۵، ۳۵ پودر سنگ آهک به جای ۵، ۱۵، ۲۵ درصد ماسه سیلیسی با نام گذاری آن ها به ترتیب، CS15، CS25 و CS35 در نظر گرفته شده است. مشخصات تمام طرح اختلاط های بررسی شده در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۹: مشخصات طرح اختلاط ترکیبات

ردیف	نام ترکیب	اجزای تشکیل دهنده بر حسب کیلوگرم							
		سیمان	دوده سیلیسی	ماسه سیلیسی	پودر سنگ آهک	پودر کوارتز	فوق روان کننده	آب	نسبت آب به سیمان
۱	C0	۷۸۰	۱۴۰	۱۰۳۰	۰	۱۹۰	۳۰	۱۹۵	۰/۲۵
۲	C10	۷۸۰	۱۴۰	۹۲۷	۱۰۳	۱۹۰	۳۰	۱۹۵	۰/۲۵
۳	C20	۷۸۰	۱۴۰	۸۲۴	۲۰۶	۱۹۰	۳۰	۱۹۵	۰/۲۵
۴	C30	۷۸۰	۱۴۰	۷۲۱	۳۰۹	۱۹۰	۳۰	۱۹۵	۰/۲۵
۵	CS15	۷۸۰	۱۴۰	۹۷۸.۵	۱۵۴.۵	۱۹۰	۳۰	۱۹۵	۰/۲۵
۶	CS25	۷۸۰	۱۴۰	۸۷۵.۵	۲۵۷.۵	۱۹۰	۳۰	۱۹۵	۰/۲۵
۷	CS35	۷۸۰	۱۴۰	۷۷۲.۵	۳۶۰.۵	۱۹۰	۳۰	۱۹۵	۰/۲۵

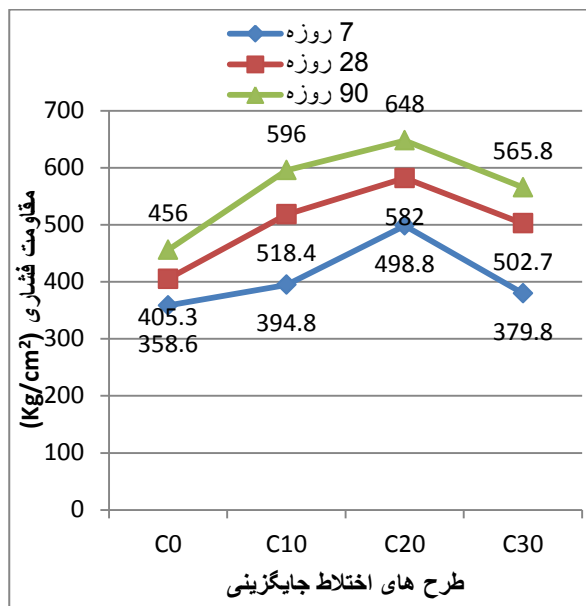
* در این آزمایش ها چون هدف مقایسه ی این طرح ها می باشد لذا نسبت آب به سیمان و مقدار فوق روان کننده بیشتر در نظر گرفته شده است تا روانی بتن بیشتر بوده و حالت SCC هم داشته باشد. لذا مقاومت های فشاری بدست آمده در حالت کلی نسبت به بتن های RPC مشابه پایین تر است.

* در ردیف های ۵ الی ۷ مقداری از پودر سنگ آهک جایگزین ماسه سیلیسی شده و مقداری بصورت افزودنی در نظر گرفته شده است. در هر کدام از این سه طرح اختلاط، مقدار پودر سنگ آهک به صورت افزودنی فقط ۱۰ درصد می باشد و مابقی به صورت جایگزین ماسه سیلیسی در نظر گرفته شده است. مثلاً برای ردیف ۶ یعنی CS25 مقدار کل پودر سنگ آهک ۲۵۷.۵ کیلوگرم یعنی ۲۵٪ وزن اولیه ماسه سیلیسی برای C0 می باشد. که از این مقدار ۱۵۴.۵ کیلوگرم (یعنی ۱۵ درصد) بجای ماسه سیلیسی جایگزین شده و ۱۰۳ کیلوگرم (یعنی ۱۰ درصد) به صورت افزودنی به ماسه سیلیسی افزوده شده است.

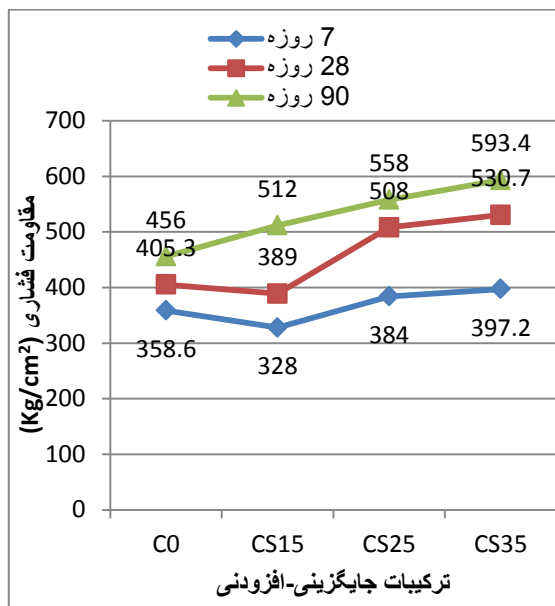
۴- بررسی نتایج آزمایش

۴-۱- تعیین مقاومت فشاری نمونه ها

در آزمایش مقاومت فشاری نمونه های مکعبی ۵*۵*۵ سانتیمتری مطابق با استاندارد ASTM C109/C109-08 که در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه (عمل آوری شده در دمای ۲۳ الی ۲۵ درجه سلسیوس به صورت غرقاب) انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری بر حسب کیلوگرم بر سانتیمترمربع، ابتدا طرح های اختلاط جایگزینی و جایگزینی-افزودنی بصورت مجزا و در نمودار شکل ۳ و ۴ تمامی ترکیبات نشان داده شده است.

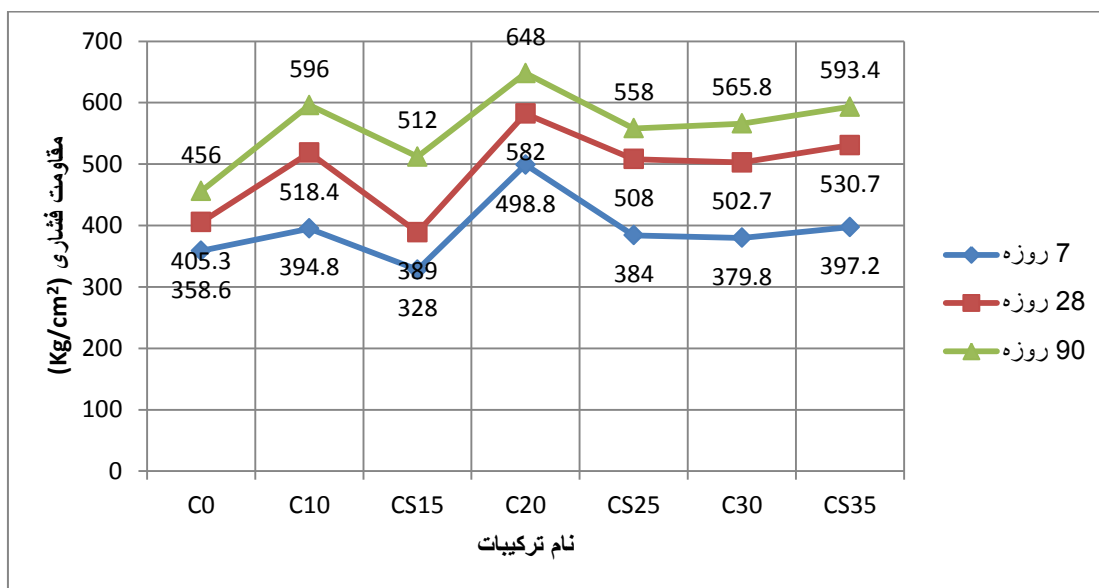


(ب)



(الف)

شکل ۳: نمودار مقاومت فشاری ترکیبات



شکل ۴: تأثیر درصد پودر سنگ آهک در مقاومت فشاری

تأثیر زمان عمل‌آوری و همچنین تأثیر درصد پودر سنگ آهک جایگزین شده بر مقاومت فشاری طرح اختلاط ها، در نمودار شکل ۳ و ۴ قابل مشاهده است و با توجه به نمودار می‌توان بیان کرد که با افزایش زمان عمل‌آوری و درصد جایگزینی پودر سنگ آهک با ماسه سیلیسی مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته (شکل ۳ الف) و در طرح های جایگزینی-افزودنی بخاطر اضافه تر شدن حجم مخلوط بتن (با ثابت ماندن مقدار مواد چسباننده) ابتدا دچار کاهش مقاومت و در درصدهای بالاتر باعث افزایش مقاومت شده است، هر چند که مقدار مواد سیمانی ثابت می باشد (شکل ۳ ب). همچنین در تمام زمان های عمل آوری، بیش‌ترین مقاومت فشاری نیز برای بتنی با ۲۰ درصد پودر سنگ آهک جایگزین بدست آمده است.

در این آزمایش‌ها سعی شده است که عمل‌آوری در شرایط محیطی عادی انجام شود (دمای ۲۳ الی ۲۵ درجه سانتی‌گراد و بدون اعمال فشار) و همچنین از روانی کافی در حد خودتراکم برخوردار باشد (حالت SCC^۷)، تا در کارهای عملی به راحتی قابل استفاده باشد، مثلاً در اتصالاتی که تعداد آرماتورهای به هم رسیده خیلی زیاد باشد بتن معمولی کارایی لازم برای پر کردن فضاهای بسیار کوچک را نخواهد داشت در چنین اتصالاتی می‌توانیم از این مخلوط‌ها استفاده نماییم.

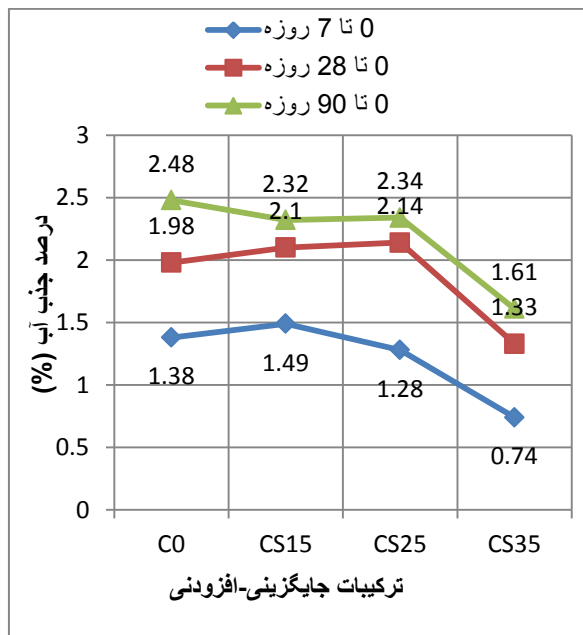
در مورد عیار سیمان ۷۸۰ کیلوگرم، باید توجه نمود که عیار سیمان در بتن پودری واکنش‌پذیر بطور متوسط ۷۰۰ الی ۱۰۰۰ کیلوگرم می‌باشد و در مخلوط‌هایی تا ۱۱۰۰ کیلوگرم هم مورد استفاده قرار گرفته است. لذا در اینجا عیار سیمان در حد متوسط و قسمت پایین این حد متوسط می‌باشد از طرفی از فشار و حرارت استفاده نشده است تا در همه جا بتوان مورد استفاده قرار داد، همچنین مقدار آب و فوق‌روان‌کننده تا حدودی زیاده‌تر از مخلوط‌های مشابه در نظر گرفته شده است تا کاملاً حالت SCC برقرار باشد. این موارد موجب شده است که مقاومت فشاری کمتر از مخلوط‌های مشابه باشد اما برای استفاده در پروژه‌های ساختمانی مقاومت لازم و کافی را دارد.

با توجه به نمودار ۱ ملاحظه می‌گردد که در سن ۲۸ روزه مقاومت آن به ۵۸۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و در سن ۹۰ روزه به ۶۴۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده است.

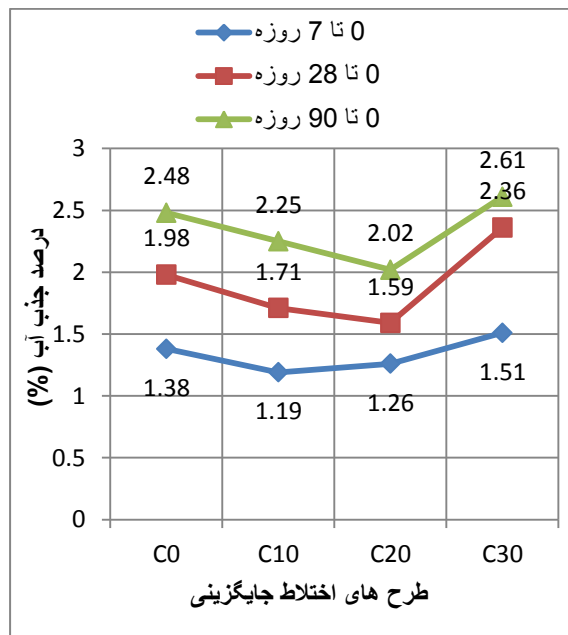
۴-۲- جذب آب در طول مدت زمان عمل‌آوری

جذب آب حین عمل‌آوری نمونه‌ها بعد از اختلاط طرح‌های مورد نظر و خارج شدن از قالب در سنین مورد نظر با اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها توسط ترازوی دیجیتال قبل و بعد از عمل‌آوری و طبق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود. نتایج حاصل از محاسبات در شکل ۵ و ۶ آورده شده است.

$$\text{جذب آب حین عمل‌آوری} = \frac{(\text{جرم قبل از عمل‌آوری} - \text{جرم بعد از عمل‌آوری})}{\text{جرم قبل از عمل‌آوری}} \times 100$$



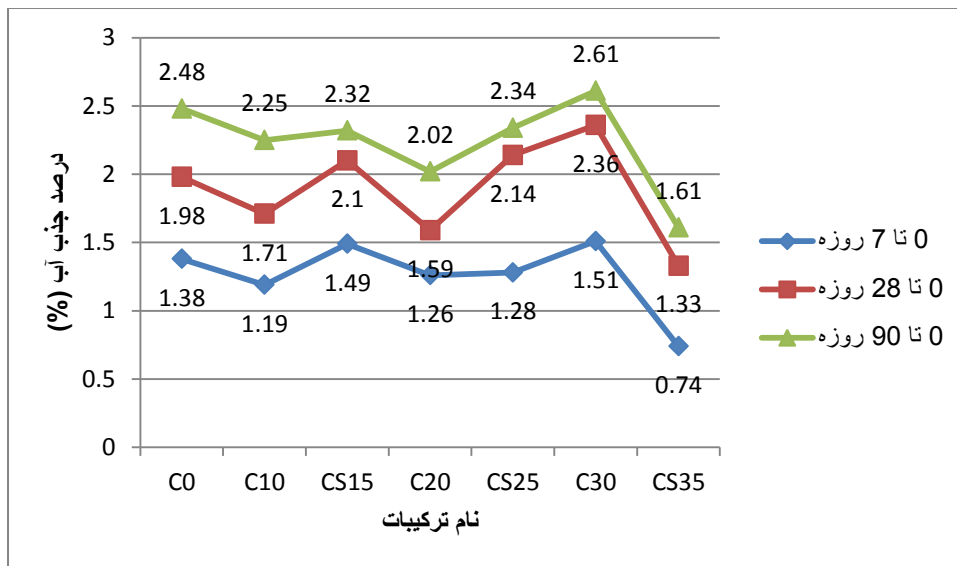
(ب)



(الف)

شکل ۵: نمودار جذب آب ترکیبات

⁷ Self Compacted Concrete

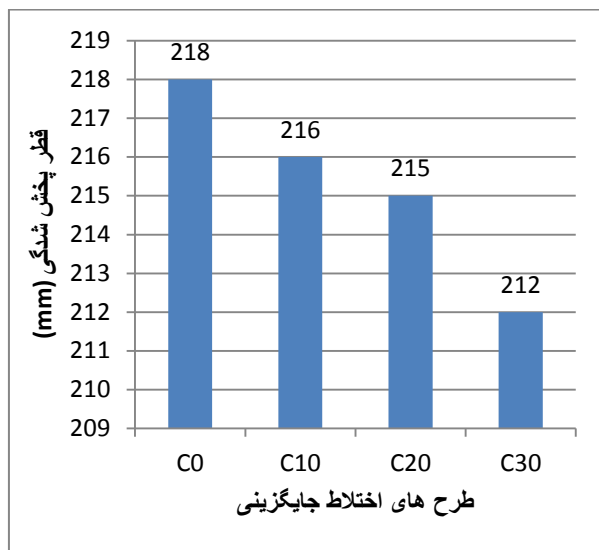


شکل ۶- نمودار جذب آب نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف پودر سنگ آهک

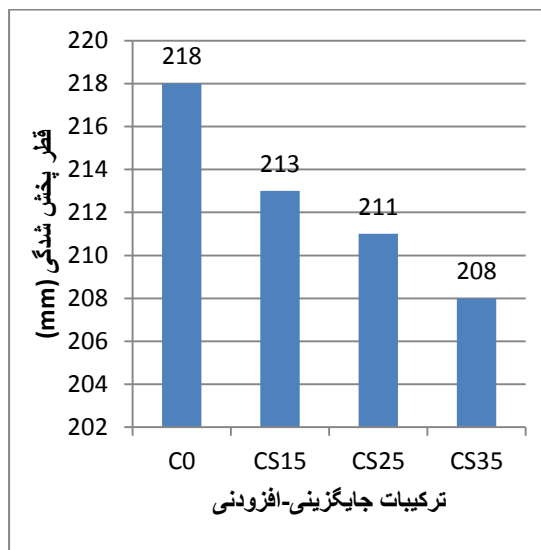
از نتایج حاصل از آزمایش تعیین درصد جذب آب در حین عمل‌آوری مشاهده می‌شود که میانگین جذب آب از زمان باز کردن قالب تا موقع انجام آزمایشات تستی و فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه با افزایش میزان پودر سنگ آهک تا ۲۰ درصد جایگزینی کاهش یافته و در طرح‌های مختلف نسبت به ترکیبات متفاوت بوده و روند نزولی و صعودی دارد. از نمودار ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش زمان عمل‌آوری جذب آب در حین عمل‌آوری بیشتر شده بطوریکه بیشترین مقدار جذب آب نسبت به سایر دوره‌ها مربوط به ترکیب C30 و کمترین آن مربوط به ترکیب CS35 می‌باشد.

۳-۵- بررسی تأثیر استفاده از پودر سنگ آهک در کارایی بتن پودری واکنش‌پذیر

هدف از انجام آزمایش میز جریان تعیین کارایی یا روانی بتن تازه می‌باشد. به‌خاطر نوع بتن پودری واکنش‌پذیر که ریزدانه می‌باشد و در واقع نوعی ملات است، براساس استاندارد ASTM C230/C230 M از آزمون میز جریان برای اندازه‌گیری ویژگی‌های روانی این نوع بتن استفاده می‌شود. در زمان ساخت بتن پودری واکنش‌پذیر برای هر طرح اختلاط ابتدا آزمایش میز جریان انجام شده و قطر پخش شدگی اندازه‌گیری شده است که نتایج حاصل از آزمایش میز جریان در شکل ۷ آمده است.



(ب)



(الف)

شکل ۷- نمودار پخش شدگی میز جریان ترکیبات

نتایج آزمایش میز جریان نشان می‌دهد که با افزایش درصد پودر سنگ آهک در ترکیب بتن پودری واکنش‌پذیر میزان قطر پخش شدگی اندکی کاهش پیدا می‌کند و از ۲۱.۸ سانتیمتر به تدریج کاهش یافته و به ۲۰.۸ سانتیمتر رسیده است و در همه حالت‌ها روانی بالایی داشته است. و همه طرح اختلاط‌ها دارای روانی بالایی می‌باشند. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش درصد جایگزینی پودر سنگ آهک با ماسه سیلیسی سبب کاهش جزئی روانی شده و از میزان قطر پخش شدگی اندکی کاسته می‌شود.

۴- نتیجه گیری

۱- جایگزینی پودر سنگ آهک به جای ماسه سیلیسی تا ۳۰٪ و همچنین افزودن به مقدار ۱۰٪ همراه با جایگزینی تا ۲۵٪ که مورد بررسی قرار گرفت در همه موارد باعث کاهش بسیار جزئی در روانی می‌شود و می‌توان گفت که روانی تقریباً ثابت می‌ماند. احتمالاً علت این امر مربوط به وجود آب مولکولی همراه با کربنات کلسیم در ترکیبات این سنگ آهک باشد.

۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد که در مدت زمان‌های عمل‌آوری مقاومت فشاری ترکیب C20، از تمام ترکیبات حاوی مخلوط ماسه سیلیسی با پودر سنگ آهک بیشتر می‌باشد. در این تحقیق افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی ۲۰٪ پودر سنگ آهک نسبت به بتن مبنا مشاهده شد لذا علاوه بر این که امکان استفاده از پودر سنگ آهک در RPC مشخص شد همچنین اگر درصد جایگزینی مناسبی در نظر گرفته شود می‌تواند مقاومت فشاری را افزایش دهد.

۳- در این ترکیبات هم مانند سایر بتن‌ها، با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد.

۴- با افزایش درصد جایگزینی پودر سنگ آهک از میزان جذب آب حین عمل‌آوری نمونه‌های بتنی تا ۲۰ درصد جایگزینی با ماسه سیلیسی کاهش می‌یابد ولی با در نظر گرفتن تمامی طرح اختلاط‌های مورد آزمایش، ترکیب CS35 دارای کم‌ترین میزان جذب آب و ترکیب C30 دارای بیش‌ترین درصد جذب آب می‌باشد.

۵-مراجع

حبیبی، ع، خصوصیات مکانیکی بتن با پودر سنگ آهک. تحقیقات بتن، ۷۱-۸۴، ۲۰۰۹.
معراجی، لیلا؛ حسن افشین و کریم عابدی، آشنایی با بتن پودری واکنش پذیر به عنوان نوعی بتن جدید، اولین همایش منطقه ای مصالح ساختمانی و تکنولوژی های نوین در مهندسی عمران، مرنند، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرنند، ۱۳۹۰
معصومی، حسن؛ سعید نزهتی؛ حسین معصومی و فائزه نجاتی، بررسی ویژگیها و مزایای بتن پودری واکنش زا، ششمین همایش فرامنطقه ای پیشرفتهای نوین در علوم مهندسی، تنکابن، موسسه آموزش عالی آیندگان، ۱۳۹۲

ASTM C230/C230M – 03, Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, p. 6, 2003.

ASTM Standard C 109/C 109M-08, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens), American society of testing and materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

Al-Hassani, H. M., Khalil, W. I., & Danha, L. S. Mechanical properties of reactive powder concrete with various steel fiber and silica fume contents. Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering, 7(1), 47, 2014.

Newman, J., Choo, B. S., Advanced concrete technology constituent materials ,2003

Richard, P., Cheyrezy, M., Composition of reactive powder concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511, 1995.

K. Wille, A. E. Naaman, G. J. Parra-Montesions, “*Ultra High Performance Concrete With Compressive Strength exceeding 150 MPa*”, ACI Materials Journal, 2011.

Xiang Gao, B., Mix Design and Impact Response of Fibre Reinforced and Plain Reactive Powder Concrete, School of Civil, Environmental and Chemical Engineering RMIT University, 2007.