

بررسی آزمایشگاهی مشخصات مکانیکی ملات پودری حاوی رزین پلیمری

علی حیدری* (دانشیار)

الناز قربانی سامانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۲)
دوری ۳۹، شماره ۲، صص. ۱۱-۳، (پژوهشی)

ملات‌ها مصالح ساختمانی مصنوعی و ناهمگنی هستند که مواد اولیه‌ی فرایندهای ساخت و شرایط کاربرد آنها به طور مداوم در طول تاریخ تکامل یافته است و از یک یا چند چسب معدنی تشکیل می‌شوند، وظیفه‌ی اصلی آنها اتصال دانه‌های سست با استفاده از دگرگونی‌های شیمیایی مختلف در جرم آنهاست، که به سنگدانه‌ها برای ایجاد ثبات حجمی روی توده‌ی ملات و همچنین آب برای مخلوط کردن اجزاء ملات به یک خمیر چسبناک نیاز دارند. مصالح باید به دقت اندازه‌گیری و مخلوط شوند تا تعادل مطلوبی برای برآورد خصوصیات اساسی ملات به دست آورند. بنابراین، در پژوهش حاضر، ۱۱ طرح اختلاط برای تهیه‌ی ملات، که به نوعی بتن پودری واکنش‌پذیر است، با نسبت‌های ماسه به سیمان ۴/۵، ۴/۷۵، ۵/۲۵، ۵/۵، ۵/۷۵، ۶/۲۵، ۶/۵، ۶/۷۵ و ۷ ساخته شده‌اند. سپس اثر افزایش نسبت ماسه به سیمان و تأثیر افزودن ۱٪ رزین پلیمری به ۱۱ نسبت مختلف ماسه به سیمان بررسی شده است.

heidari@sku.ac.ir
elnaz.gorbani.sa.76@gmail.com

واژگان کلیدی: ملات، رفتار مکانیکی، رزین پلیمری، نسبت ماسه به سیمان.

۱. مقدمه

در قرن اخیر، استفاده از بتن در ساخت بناهای مسکونی و اداری، پیاده‌روها، راه‌ها و جاده‌ها و نیز انواع مختلف ساختمان‌های فنی، از قبیل: کارخانه‌ها، پارکینگ‌ها، متروها، فرودگاه‌ها، پل‌ها، سدها، سیلوها، سازه‌های دریایی، راکتورهای اتمی و سازه‌های مقاوم در برابر انفجار و زلزله، مقبولیتی همگانی پیدا کرده است.^[۱] ملات و بتن هر دو مخلوطی از آب، سیمان و ماسه هستند. اما بتن عنصری اضافه، یعنی شن و سنگدانه‌ی درشت در ساختار خود دارد، که سبب دوام بیشتر آن نسبت به ملات می‌شود و همچنین موجب می‌شود که بتن در طرح اختلاط خود به آب کمتری نیاز داشته باشد.^[۲] رانو^۱ (۲۰۰۱)، قانون آبرام را روی ملات‌ها بررسی کرده است. که در آن برای مصالح بتنی در مخلوطی با قوام کارپذیر برای ملات‌های سیمانی، مقاومت بتن و ملات حاصل، تابع نسبت مقدار آب به سیمان است و با افزایش مقدار آب به سیمان، مقاومت بتن و ملات کاهش می‌یابد. او مقاومت ملات‌های مختلف در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه را با مقادیر مختلف نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳ تا ۰/۶۵ با بازه‌ی ۰/۵ و سه نوع ملات ماسه‌ی سیمانی را با عبارهای ۱ به ۲، ۱ به ۵/۲ و ۱ به ۳ * نویسنده مسئول تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۱۶، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۱/۱۴، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۲۵.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۱۶، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۱/۱۴، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۲۵.

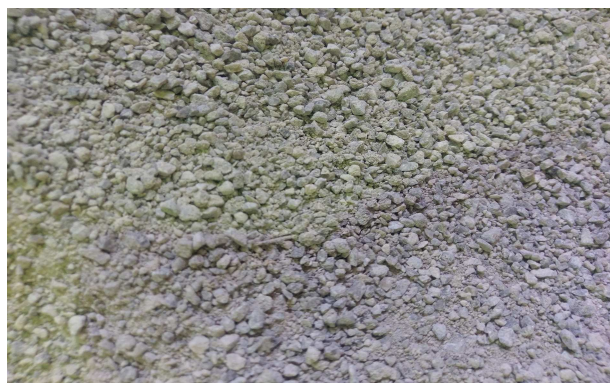
استناد به این مقاله:

حیدری، علی و قربانی سامانی، الناز، ۱۴۰۲. بررسی آزمایشگاهی مشخصات مکانیکی ملات پودری حاوی رزین پلیمری. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۳)، صص. ۱۱-۳.

DOI:10.24200.J30.2023.60959.3132

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی.

مقدار	خواص فیزیکی	درصد	ترکیب‌های شیمیایی
≥ 3000	پایین (cm ² /gr)	۲۱/۲۰	SiO ₂
۹۰	زمان گیرش اولیه (min)	۵/۲۵	Al ₂ O ₃
۱۷۰	زمان گیرش نهایی (min)	۳/۸۵	Fe ₂ O ₃
≤ 2	انبساط اتوکلاو	۶۵/۰۰	CaO
≥ 15	مقاومت فشاری ۲ روزه	$\leq 1/65$	MgO
-	مقاومت فشاری ۳ روزه	$\leq 1/7$	SO ₃
≥ 37	مقاومت فشاری ۷ روزه	$\leq 0/3$	CL
≥ 54	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	$\leq 1/30$	F.CaO
		$\leq 0/65$	I.R
		$\leq 1/20$	L.O.I
		$\leq 0/70$	Total Alkali
		۵۹	C ₇ S
		۱۵	C ₃ S
		۱۲	C ₂ A
		۸	C ₄ AF



شکل ۱. ماسه‌ی مصرفی.

جدول ۳. مشخصات رزین پلیمری.

شرح	مشخصات
مایع ویسکوز	شکل ظاهری
شفاف یا شیری	رنگ
۵ ~ ۷	Ph
کمتر از ۱/۵٪	Na ₂ O
کمتر از ۱/۰٪	مقدار کلراید
$1/0 \pm 1/02 \text{ gr/cm}^2$	چگالی
۳/۰ الی ۱ درصد وزن سیمان	میزان مصرف

۲.۲. معرفی طرح اختلاط‌ها

در بخش کنونی به بررسی طرح اختلاط‌های هر گام پرداخته شده است، تا بتوان با استفاده از آنها به ملات مطلوبی چه از نظر مکانیکی و چه از نظر کارایی دست یافت. همان‌طور که پیشتر بیان شد، پژوهش حاضر در دو گام مطالعاتی انجام شده است: در گام اول مطالعات، ۱۱ طرح اختلاط با نسبت‌های ماسه به سیمان: ۴/۵، ۵/۴، ۵/۵، ۵/۶، ۶/۵، ۶/۷، ۷/۵ و ۷/۶ ساخته و مطالعه

در حالت کلی، برای آجرهای کم‌مقاومت، مقاومت برشی ناشی از کشش سطحی با افزایش مقاومت فشاری ملات افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر، افزایش مقاومت چسبندگی با افزایش مقاومت فشاری در ملات رابطه‌ی مستقیم دارد، اما رابطه‌ی بین چسبندگی آجر - ملات و مقاومت فشاری ملات چندان مشخص نیست.^[۹] سنگ و موجال^۷ (۲۰۱۷)، تأثیر انواع ملات و نوع آجر در مقاومت فشاری و مقاومت چسبندگی اتصال منشورهای آجرکار را بررسی کردند و دریافتند که مقاومت فشاری منشور آجرکار با مقاومت فشاری ملات و واحد بنایی متناسب است.^[۱۰]

ریچارد و چیرزی^۸ (۱۹۹۴)، میزان بهینه‌ی فوق روان‌کننده‌ی مورد نیاز را حدود ۱/۶٪ وزن سیمان مصرفی بیان کرده‌اند.^[۱۱] بهترین نوع فوق روان‌کننده بر پایه‌ی پلی‌کربوسیلات است؛ اما فوق روان‌کننده‌ی اخیر به دلیل خاصیت دیرگیری که دارد، ممکن است در کارهای عملی، مشکلاتی را ایجاد کند.^[۱۲]

۲. مطالعه‌ی آزمایشگاهی

پژوهش حاضر در دو گام مطالعاتی انجام شده است: در گام اول مطالعات، به منظور بررسی رفتار ملات به عنوان نوعی بتن پودری واکنش‌پذیر در برابر افزایش نسبت ماسه به سیمان، ۱۱ طرح با نسبت‌های مختلف ماسه به سیمان ساخته شده‌اند. در گام دوم، نیز ۱۱ طرح برای بررسی تأثیر افزودن ۱٪ رزین پلیمری با نسبت‌های گام اول مطالعات ساخته شده‌اند. در نهایت، بهترین نسبت از نظر رفتار مکانیکی در برابر فشار و خمش مشخص شده است.

۲.۱. مصالح مصرفی پژوهش

مصالح مصرفی در پژوهش حاضر عبارت از: آب، سیمان، ماسه و رزین پلیمری بوده است. آب مصرفی در آزمایش انجام شده، آب شرب شهری شهرکرد بوده که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق جدول مذکور، آب مصرفی به دلیل: سولفات ≥ 1000 ؛ کلرور ≥ 500 ؛ $PH < 8$ ؛ و سختی کل ≥ 1000 ، در طرح اختلاط بتن مناسب بوده است. همچنین سیمان استفاده شده از نوع تیپ ۴۲۵-۱ کارخانه‌ی سیمان شهرکرد بوده است، که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۲ ارائه شده است.

ماسه‌ی استفاده شده نیز از معادن استان چهارمحال و بختیاری تهیه شده است. با توجه به این‌که دسترسی به سنگدانه‌های کوارتزی ساده نیست و سنگدانه‌های رایج مصرفی در کشور، از نوع آهکی هستند و همچنین عدم صرفه‌ی اقتصادی استفاده از سنگدانه‌های کوارتزی و با توجه به مطالعات پیشین و عدم تأثیر زیاد آن در خواص بتن، در مطالعه‌ی حاضر از سنگدانه‌های شکسته‌ی رایج استفاده شده است.^[۱۳] در شکل ۱، تصویر ماسه‌ی مصرفی مشاهده می‌شود.

همچنین رزین پلیمری (Carboxal AS50)، که یک نوع رزین سنگ مصنوعی بر پایه‌ی پلی‌کربوسیلات اتر است، از شرکت البرز شیمی آسیا تهیه و مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است (شکل ۲).

جدول ۱. مشخصات آب مصرفی.

سولفات‌ها (mg/l)	کلرور (mg/l)	PH	سختی کل (mg/l)
۲۹	۴۰	۷/۸	۲۰۵



شکل ۳. قالب‌گیری نمونه‌ها.



شکل ۴. عمل‌آوری نمونه‌ها.

انجام شده است. برای کلیه گام‌های مطالعاتی، ۱۲ نمونه مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متری به جهت استفاده در آزمایش مقاومت فشاری برای سنین مختلف ۱، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲، ۵۶ و ۹۰ روزه ساخته شدند. برای مقاومت خمشی نیز برای سن ۲۸ روزه، سه نمونه منشوری $16 \times 4 \times 4$ سانتی‌متری قالب‌گیری شد تا دو نمونه آزمایش شوند و در صورت اختلاف ۵ درصدی، نمونه سوم نیز آزمایش شود. همچنین مراحل قالب‌گیری برای تمام نمونه‌ها بدین صورت بوده است که مخلوط ملات در سه لایه نسبتاً مساوی در قالب‌هایی که پیش از این چرب شده بودند، ریخته و عمل تراکم با میز لرزان انجام شده است (شکل ۳).

روش عمل‌آوری بدین صورت بوده است که پس از ساخت نمونه‌ها و قالب‌گیری و گذشت ۲۴ ساعت از زمان ساخت، قالب‌ها باز و نمونه‌ها پس از شماره‌گذاری و یادداشت اطلاعات زمانی، به درون حوضچه‌ی آب آهک اشباع موجود در آزمایشگاه گذاشته شدند (شکل ۴). همچنین دمای آب در محدوده‌ی ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد با تغییر بیشینه و کمینه‌ی ۳ درجه‌ی سانتی‌گراد همراه بوده است.

۳. ارائه‌ی نتایج

۳.۱. نتایج مقاومت فشاری

به منظور بررسی مقاومت فشاری، نمونه‌ها در سنین ۱، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲، ۵۶ و ۹۰ روزه از حوضچه‌ی عمل‌آوری خارج شدند و در حالت اشباع با سطح خشک



شکل ۲. تصویر رزین پلیمری تهیه شده.

شده‌اند. درگام دوم نیز رزین پلیمری به میزان ۱٪ وزنی سیمان به نسبت‌های مختلف ماسه به سیمان گام اول افزوده شده است تا تأثیر آن در مشخصات مکانیکی ملات، که به نوعی بتن پودری است، بررسی شود.

۲.۲.۲. طرح‌های اختلاط گام اول

در جدول ۴، نسبت‌های مورد نیاز برای ساخت هر طرح اختلاط ارائه شده است؛ که مطابق آن، با افزایش نسبت ماسه به سیمان، به دلیل عدم کارایی مناسب و تراکم نسبتاً سخت، نسبت آب به سیمان افزایش یافته است. لازم به ذکر است که برای دستیابی به نسبت آب به سیمان مناسب همه‌ی طرح‌های اختلاط، دو نسبت ماسه به سیمان ۴/۵ و ۷ در همزن با حجم پایین مخلوط شده و سپس با محاسبات ریاضی، سایر نسبت‌های آب به سیمان طرح‌های اختلاط به دست آمده‌اند.

۲.۲.۲. طرح‌های اختلاط گام دوم

در جدول ۵، نسبت‌های مورد نیاز برای ساخت هر طرح اختلاط ارائه شده است؛ که مطابق آن، با افزودن رزین پلیمری به میزان ۱٪، کارایی آن افزایش یافته و تراکم آن راحت‌تر صورت گرفته است. به همین دلیل، نسبت آب به سیمان طرح‌های مختلف اختلاط درگام دوم، نسبت‌های آب به سیمان کمتری نسبت به گام اول داشته‌اند. درگام کنونی، نیز برای دستیابی به نسبت آب به سیمان مناسب همه‌ی طرح‌های اختلاط، دو نسبت ماسه به سیمان ۴/۵ و ۷ در همزن با حجم پایین آزمون شده و سپس با محاسبات ریاضی، سایر نسبت‌های آب به سیمان طرح‌های اختلاط به دست آمده‌اند.

۳.۲. روش انجام آزمایش

درگام اول، مصالح خشک مانند ماسه و سیمان درون همزن با هم مخلوط شدند؛ سپس آب به مخلوط اضافه و به مدت ۳ دقیقه، زمان اختلاط لحاظ شده است. پس از اطمینان از اختلاط کامل، همزن خاموش و مخلوط ملات از ظرف همزن خارج شده است.

فرایند اخیر مطابق استاندارد ASTM C-۱۹۲^[۱۴] انجام شده است. روش انجام آزمایش درگام دوم، مشابه گام اول بوده است، با این تفاوت که رزین پلیمری با آب مخلوط و سپس به مصالح خشک اضافه شده است. جهت بررسی رفتار ملات در اثر افزایش نسبت ماسه به سیمان و اثر افزودن رزین پلیمری، آزمایش‌های مکانیکی نظیر مقاومت فشاری (ASTM C۳۹)^[۱۵] و مقاومت خمشی (ASTM C۲۹۳)^[۱۶]،

جدول ۴. طرح اختلاط طرح‌های گام اول.

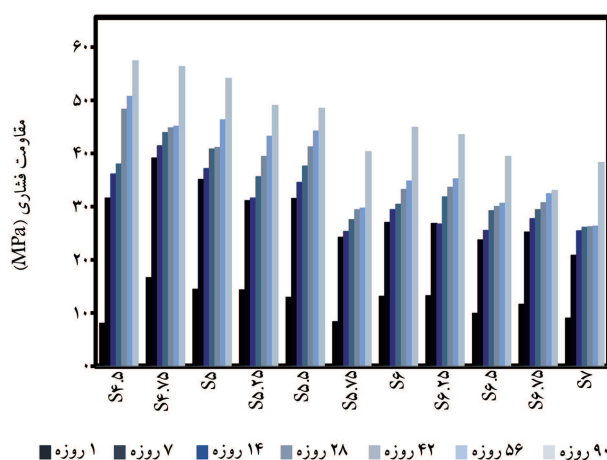
نام طرح	ماسه‌ی معمولی (نسبت به سیمان)	آب (نسبت به سیمان)	رزین پلیمری (درصد وزن سیمان)
S۴/۵	۴/۵	۵۸/۰	۰
S۴/۷۵	۴/۷۵	۶/۰	۰
S۵	۵	۶۲/۰	۰
S۵/۲۵	۵/۲۵	۶۴/۰	۰
S۵/۵	۵/۵	۶۶/۰	۰
S۵/۷۵	۵/۷۵	۶۸/۰	۰
S۶	۶	۷/۰	۰
S۶/۲۵	۶/۲۵	۷۲/۰	۰
S۶/۵	۶/۵	۷۴/۰	۰
S۶/۷۵	۶/۷۵	۷۶/۰	۰
S۷	۷	۷۸/۰	۰

لازم به ذکر است که عدد ذکر شده بعد از حرف S در نامگذاری طرح‌ها، نسبت ماسه به سیمان است.

جدول ۵. طرح اختلاط در گام دوم.

نام طرح	ماسه‌ی معمولی (نسبت به سیمان)	آب (نسبت به سیمان)	رزین پلیمری (درصد وزن سیمان)
S۴/۵P۱	۴/۵	۴۶/۰	۱
S۴/۷۵P۱	۴/۷۵	۴۸/۰	۱
S۵P۱	۵	۵/۰	۱
S۵/۲۵P۱	۵/۲۵	۵۲/۰	۱
S۵/۵P۱	۵/۵	۵۴/۰	۱
S۵/۷۵P۱	۵/۷۵	۵۶/۰	۱
S۶P۱	۶	۵۸/۰	۱
S۶/۲۵P۱	۶/۲۵	۶/۰	۱
S۶/۵P۱	۶/۵	۶۲/۰	۱
S۶/۷۵P۱	۶/۷۵	۶۴/۰	۱
S۷P۱	۷	۶۶/۰	۱

لازم به ذکر است که عدد ذکر شده بعد از حرف S در نامگذاری طرح‌ها، نسبت ماسه به سیمان و عدد ذکر شده بعد از حرف P، بیانگر درصد رزین پلیمری است.



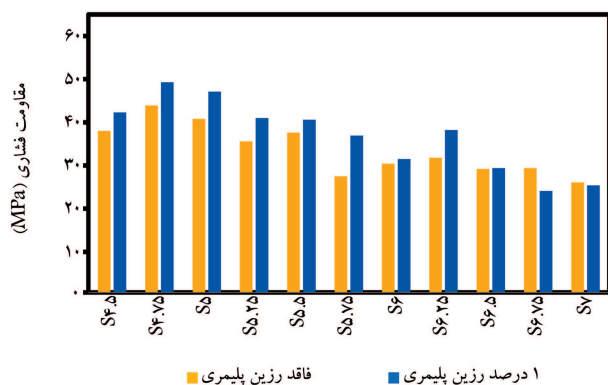
■ روزه ۱ ■ روزه ۷ ■ روزه ۱۴ ■ روزه ۲۸ ■ روزه ۴۲ ■ روزه ۵۶ ■ روزه ۹۰

شکل ۵. مقاومت فشاری نمونه‌های با نسبت ماسه به سیمان مختلف.

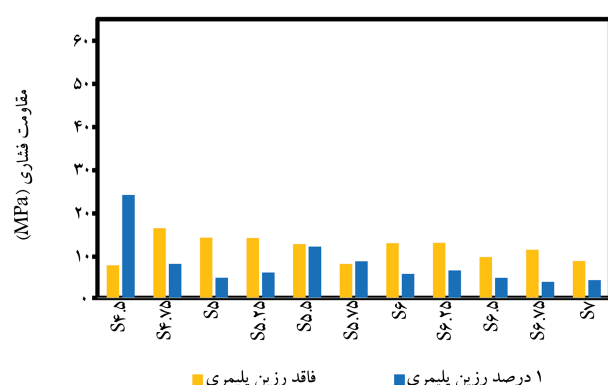
در محفظه‌ی جک بتن‌شکن قرار گرفتند. سرعت شکستن نمونه‌های مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متری، 2400 نیوتن بر ثانیه بوده است. به منظور بررسی تأثیر افزایش نسبت ماسه به سیمان در ملات، که به نوعی بتن پودری محسوب می‌شود، مقاومت فشاری در شکل ۵ و به منظور بررسی تأثیر افزودن ۱٪ رزین پلیمری در سنین ۱، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲، ۵۶ و ۹۰ روزه نسبت به نمونه‌های فاقد رزین پلیمری به ترتیب در شکل‌های ۶ الی ۱۲ مشاهده می‌شوند. همچنین تأثیر افزودن ۱٪ رزین پلیمری در سنین ۱، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲، ۵۶ و ۹۰ روزه در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود.

۱.۱.۳. نتایج مقاومت فشاری گام اول مطالعات

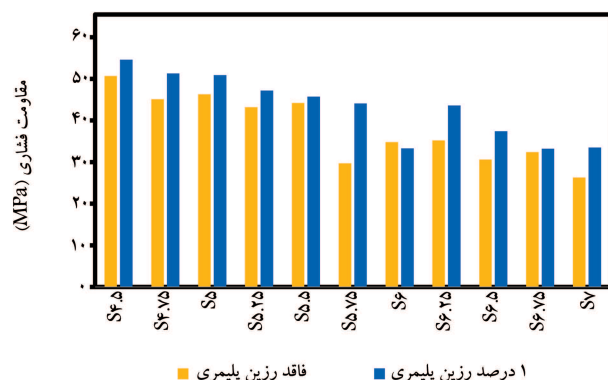
در گام اول، نتایج مقاومت فشاری حاصل از پژوهش حاضر، که به منظور بررسی تأثیر افزایش نسبت ماسه به سیمان در ملات است، با نسبت‌های ۴/۵، ۴/۷۵، ۵، ۵/۲۵، ۵/۵، ۵/۷۵، ۶/۲۵، ۶/۵ و ۶/۷۵ مطالعه شده‌اند. نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های با نسبت‌های مختلف ماسه به سیمان برای سنین ۱، ۷، ۱۴، ۲۸،



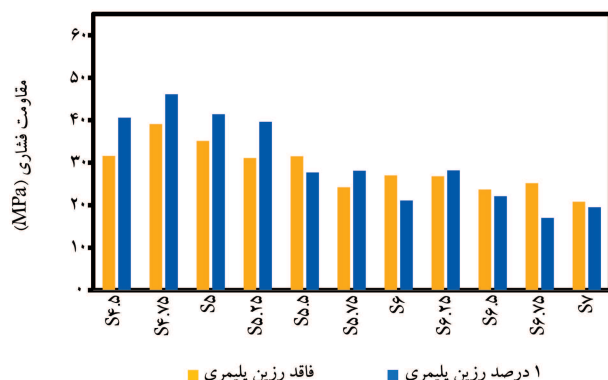
شکل ۱۰. مقایسه‌ی سن ۴۲ روزه‌ی نمونه‌ی فاقد و دارای ۱٪ رزین پلیمری.



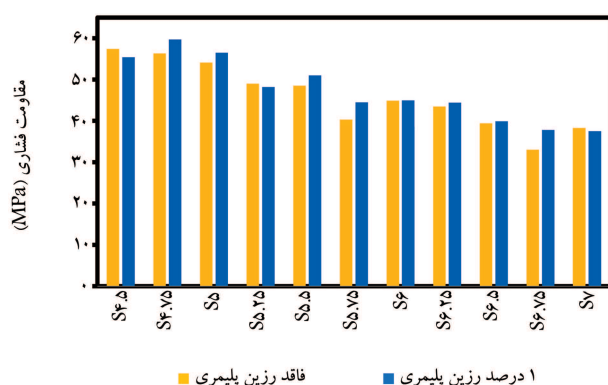
شکل ۶. مقایسه‌ی سن ۱ روزه‌ی نمونه‌ی فاقد و دارای ۱٪ رزین پلیمری.



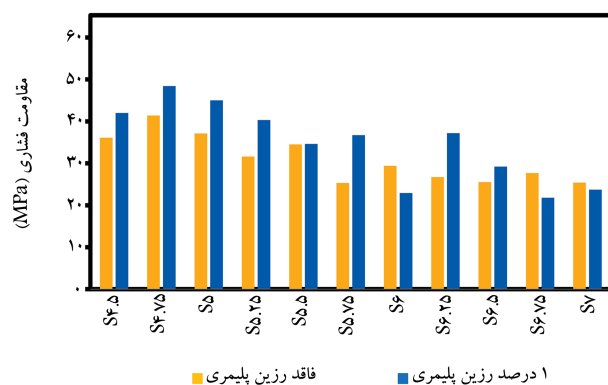
شکل ۱۱. مقایسه‌ی سن ۵۶ روزه‌ی نمونه‌ی فاقد و دارای ۱٪ رزین پلیمری.



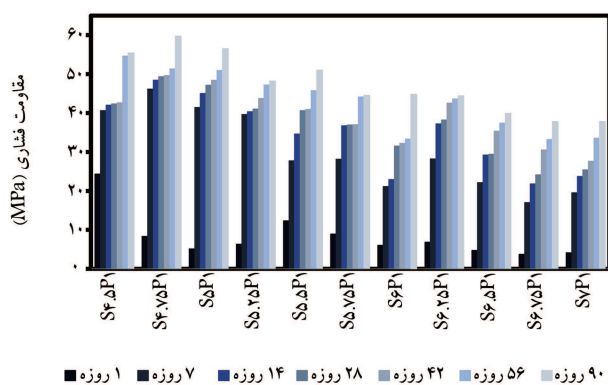
شکل ۷. مقایسه‌ی سن ۷ روزه‌ی نمونه‌ی فاقد و دارای ۱٪ رزین پلیمری.



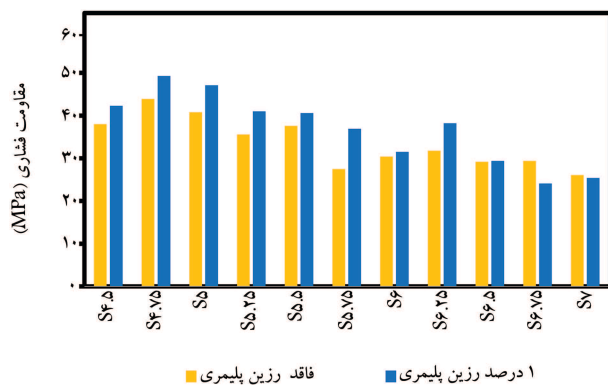
شکل ۱۲. مقایسه‌ی سن ۹۰ روزه‌ی نمونه‌ی فاقد و دارای ۱٪ رزین پلیمری.



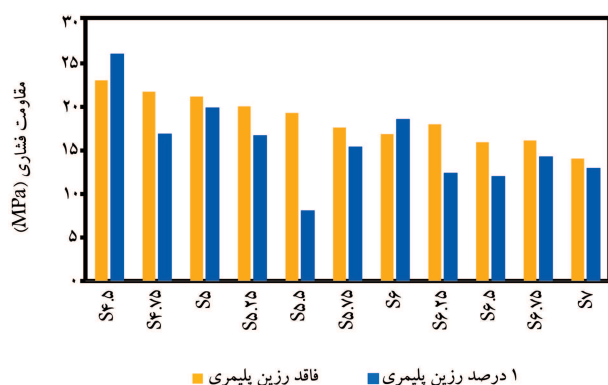
شکل ۸. مقایسه‌ی سن ۱۴ روزه‌ی نمونه‌ی فاقد و دارای ۱٪ رزین پلیمری.



شکل ۱۳. مقاومت فشاری نمونه‌های با رزین پلیمری.



شکل ۹. مقایسه‌ی سن ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ی فاقد و دارای ۱٪ رزین پلیمری.



شکل ۱۴. مقایسه‌ی مقاومت خمشی نمونه‌های فاقد و دارای ۱٪ رزین پلیمری.

افزایش ۱۳۵/۵، ۸۴/۱، ۶۲/۹ و ۶۸/۱ درصد را نسبت به طرح S۷ و برای سنین ۵۶، ۹۰ و ۹۰ روزه مربوط به طرح S۴/۵ بوده است، که افزایش ۸۴/۳، ۹۲ و ۴۹/۸ درصد را نسبت به طرح S۷ تجربه می‌کند.

۲.۱.۳. نتایج مقاومت فشاری گام دوم مطالعات

در گام دوم، به بررسی نتایج مقاومت فشاری به منظور مقایسه‌ی تأثیر افزودن ۱٪ رزین پلیمری در سنین ۱، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲، ۵۶ و ۹۰ روزه به طور جداگانه نسبت به نمونه‌های فاقد رزین پلیمری در همان سنین به ترتیب در شکل‌های ۶ تا ۱۴ پرداخته شده است. همچنین روند نمودار در اثر افزودن ۱٪ رزین پلیمری در سنین ۱، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲، ۵۶ و ۹۰ روزه در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود.

بهترین نوع فوق روان‌کننده، بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات است که خاصیت دیرگیری دارد. رزین پلیمری استفاده شده در پژوهش حاضر نیز بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات و از نوع دیرگیرکننده بوده است. رزین پلیمری پس از افزوده شدن به ملات، موجب ایجاد تأخیر در زمان گیرش بتن می‌شود و سرعت هیدراسیون را کاهش می‌دهد. به دلیل تأخیر در کسب مقاومت اولیه، مقاومت فشاری سن ۱ روزه در مقایسه با نمونه‌ی فاقد رزین پلیمری، ۸/۴۰٪ کاهش یافته است. بیشترین افت مقاومت فشاری یک روزه به مقدار ۶۸/۱٪ مربوط به طرح S۶/۷۵ بوده است. همچنین فقط در دو نسبت ماسه به سیمان ۴/۵ و ۵/۷۵ به ترتیب به میزان ۳/۰ و ۳/۱۶ مگاپاسکال، افزایش مقاومت فشاری مشاهده می‌شود.

از تحلیل سن ۷ روزه‌ی نمونه‌های فاقد و دارای رزین پلیمری نتیجه می‌شود که افزودن ۱٪ رزین پلیمری در محدوده‌ی نمونه‌های با نسبت ماسه به سیمان ۴/۵ تا ۵/۲۵، باعث افزایش مقاومت فشاری شده است (شکل ۷)، اما از نمونه‌های با نسبت ماسه به سیمان ۵/۵ تا ۷ در بیشتر نمونه‌ها، افزودن رزین پلیمری موجب کاهش مقاومت فشاری شده و فقط در دو نسبت ماسه به سیمان ۵/۷۵ و ۶/۲۵، افزایش مقاومت فشاری نسبتاً کم حدود ۳/۹ و ۱/۴ مگاپاسکال نسبت به نمونه‌های فاقد رزین پلیمری داشته است.

بنابراین به طور کلی از تحلیل نمودار نتیجه گرفته می‌شود که افزودن رزین پلیمری در نسبت‌های ماسه به سیمان پایین، تأثیر مثبت در مقاومت فشاری دارد.

در سن ۱۴ روزه، افزودن ۱٪ رزین پلیمری در مقایسه با سن ۷ روزه در نسبت‌های ماسه به سیمان بیشتری، موجب افزایش مقاومت فشاری شده است. همچنین از تحلیل نمودار نتیجه می‌شود با افزایش سن، افزودن ۱٪ رزین پلیمری در نمونه‌های با نسبت ماسه به سیمان بالاتر موجب افزایش مقاومت فشاری شده است. با افزودن ۱٪ رزین پلیمری، مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها با نسبت‌های ماسه به سیمان ۴/۵ تا ۶/۵ در مقایسه با نمونه‌های فاقد رزین پلیمری افزایش یافته

۴۲، ۵۶ و ۹۰ در شکل ۵ مشاهده می‌شود. سپس به تحلیل نتایج حاصل از پژوهش حاضر پرداخته شده است.

برای بررسی تأثیر افزایش نسبت ماسه به سیمان در ۱۱ نسبت مختلف ماسه به سیمان انتظار می‌رود به دلیل اینکه میزان سیمان مصرفی در طرح اختلاط‌ها کاهش یافته و سیمان نقش چسب در ملات را ایفا کرده است، افزایش نسبت ماسه به سیمان موجب کاهش مقاومت فشاری شود. مطابق شکل ۵، افزایش نسبت ماسه به سیمان باعث کاهش مقاومت فشاری شده است. همان‌طور که ژونگ^۹ و همکاران^[۱۷] (۲۰۱۹)، به این نتیجه رسیدند که مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی ماتریس RPC شن و ماسه‌ی تولیدی به تدریج با افزایش نسبت ماسه به چسب کاهش یافته است. تأثیر نسبت ماسه به چسب در مقاومت فشاری ماتریس اساساً تأثیر میانگین ضخامت دوغاب در مقاومت فشاری ماتریس بوده است. هنگامی که نسبت ماسه به چسب کاهش می‌یابد، ضخامت متوسط دوغاب افزایش می‌یابد، به طوری که دوغاب کافی بین دانه‌های ماسه برای اتصال آنها به طور کلی وجود دارد. همچنین نیروی پیوند بین دانه‌های ماسه و دوغاب افزایش یافته است، به طوری که مقاومت فشاری ماتریس افزایش یافته است. در مقابل، مقاومت فشاری ماتریس با افزایش نسبت ماسه به چسب و کاهش میانگین ضخامت دوغاب کاهش یافته است.

در نسبت ۴/۵، علی‌رغم انتظار پژوهشگران حاضر، با اینکه نسبت ماسه به سیمان پایین‌تر بوده است، مقاومت فشاری کمتری در آن مشاهده شده است. با توجه به تحلیل نمودار اخیر مشاهده می‌شود که در سن ۱ روزه، مقاومت فشاری طرح S۴/۷۵ با افزایش ۱۰۷/۵٪ در مقایسه با طرح S۷ به بیشینه‌ی مقاومت ۱۶/۶ مگاپاسکال رسیده است، همچنین کمترین مقاومت فشاری ۸ مگاپاسکال بوده است، که مربوط به نمونه با نسبت ماسه به سیمان ۴/۵ است. در سن ۷ روزه نیز روند تقریباً نزولی برقرار بوده و از نسبت ماسه به سیمان ۵/۷۵ به بعد، مقاومت فشاری روند خطی را طی کرده است. بدین معنی که با افزایش نسبت ماسه به سیمان، مقاومت فشاری تا نسبت ماسه به سیمان ۵/۵ کاهش یافته و در نسبت‌های بعد از آن مقاومت نمونه‌ها در یک حدود بوده است، همچنین طرح S۴/۷۵ با رسیدن به سن ۷ روزه، افزایش ۱۳۵/۵٪ در مقاومت فشاری را نسبت به سن ۱ روزه تجربه کرده، که مقاومت فشاری آن به ۴۱/۴ مگاپاسکال رسیده است. اما در نمودار مقاومت فشاری سن ۱۴ روزه، افزایش قابل توجهی نسبت به سن ۷ روزه مشاهده نمی‌شود و نمودار سنین ۷ و ۱۴ روزه تقریباً منطبق بر هم هستند. نمودار سن ۲۸ روزه نیز روندی مشابه سن ۱۴ روزه داشته است، اما از نسبت ماسه به سیمان ۵/۷۵ به بعد، نمودار تقریباً خطی و مقاومت فشاری آنها در یک محدوده بوده است. در سن ۴۲ روزه، افزایش مقاومت فشاری نسبت به سن ۲۸ روزه، قابل توجه نیست. برای سن ۵۶ روزه در نمونه‌های با نسبت ماسه به سیمان ۴/۵ تا ۵/۵، مقاومت فشاری افزایش نسبتاً خوبی داشته است، اما از نسبت ماسه به سیمان ۵/۷۵ به بعد، افزایش مقاومت فشاری قابل ملاحظه‌ی مشاهده نمی‌شود. نتیجه می‌شود که از سنین ۱۴ تا ۵۶ روزه، مقاومت فشاری نسبت به سنین ماقبل، افزایش قابل توجه نداشته است. اما در سن ۹۰ روزه، افزایش مقاومت فشاری ۲۲٪ نسبت به سن ۵۶ روزه مشاهده می‌شود. همچنین در سن ۹۰ روزه، با افزایش نسبت ماسه به سیمان، نسبت به سنین قبل، افزایش مقاومت فشاری کمتری مشاهده می‌شود. اما بعد از نمونه‌های با نسبت ماسه به سیمان ۵/۷۵ به جز در نمونه با نسبت ۶/۷۵، افزایش مقاومت فشاری قابل ملاحظه‌ی در سن ۹۰ روزه مشاهده می‌شود. از بررسی نتایج شکل ۵ چنین ملاحظه می‌شود که بهترین نمونه از نظر رفتار مکانیکی در برابر فشار برای سنین ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مربوط به نمونه‌ی S۴/۷۵ است که به ترتیب،

است. سپس در نمونه‌های با نسبت ماسه به سیمان ۶/۷۵ و ۷، افزودن ۱٪ رزین پلیمری موجب افت مقاومت فشاری شده است.

در شکل ۱۰، مقاومت فشاری در ۱۱ نسبت ماسه به سیمان به جز نمونه با نسبت ماسه به سیمان ۴/۵ با افزودن رزین پلیمری افزایش یافته است. اگر چه در نمونه‌های با نسبت ماسه به سیمان ۵/۵ و ۶ به ترتیب افت مقاومت ۳/۰، ۲/۰ و مگاپاسکال مشاهده می‌شود، اما این مقدار اختلاف قابل صرف‌نظر کردن است.

با تحلیل شکل ۱۱ چنین نتیجه گرفته می‌شود که افزودن ۱٪ رزین پلیمری در همه‌ی نسبت‌های ماسه به سیمان، موجب افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های فاقد رزین پلیمری شده است. اگرچه در نمونه با نسبت ماسه به سیمان ۶، افت مقاومت ۱/۵ مگاپاسکالی مشاهده می‌شود که این مقدار افت قابل صرف‌نظر کردن است. همچنین از تحلیل نتایج چنین حاصل می‌شود میزان افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های با نسبت ماسه به سیمان پایین در مقایسه‌ی نمونه‌های با نسبت ماسه به سیمان بالا کمتر بوده است. به این صورت که در نمونه با نسبت ماسه به سیمان ۵/۷۵، افزایش مقاومت فشاری به ۳۳٪ رسیده است، اما به طور میانگین در همه‌ی نسبت‌ها، این میزان افزایش مقاومت فشاری حدود ۱۱٪ بوده است.

با تحلیل نتایج شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که با رسیدن سن نمونه‌ها به ۹۰ روز، افزودن ۱٪ رزین پلیمری در مقایسه با نمونه‌های فاقد رزین پلیمری موجب افزایش مقاومت فشاری قابل توجهی نشده است.

از تحلیل نتایج شکل‌های ۶ تا ۱۲ مشاهده می‌شود که در سنین ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲، ۵۶ و ۹۰ روز، افزودن ۱٪ رزین پلیمری به ترتیب باعث افزایش ۲۲/۸، ۲۲/۶، ۱۳/۴، ۱۶/۳، ۱۶/۷ و ۵/۴ درصد در مقاومت فشاری شده است. با افزایش سن نمونه‌ها، درصد افزایش مقاومت فشاری، روند نزولی داشته است. در سنین پایین برای نسبت‌های ماسه به سیمان کمتر، افزودن ۱٪ رزین پلیمری موجب افزایش مقاومت فشاری شده است. زیرا در سنین پایین، افزایش مصرف سیمان تأثیر مستقیم با مقاومت فشاری دارد و واکنش‌های اولیه‌ی C_3S در سنین اولیه اتفاق می‌افتد. به طوری که با افزایش سن نمونه‌ها، رزین پلیمری در فرایند تولید با ترکیب سنگدانه‌ها در یک غشاء مولکولی، سنگدانه‌ها را در برگرفته و مانند یک چسب بسیار قوی، بخشی از عملکرد چسب سیمان را در ترکیب به عهده می‌گیرد و در نمونه‌های با نسبت ماسه به سیمان بالا، موجب افزایش مقاومت فشاری می‌شود. بتن‌های حاوی کنگدگیرکننده، به دلیل گیرش یکنواخت و کاهش ترک‌های اجرایی در مقایسه با بتن فاقد افزودنی، با وجود تأخیر در کسب مقاومت اولیه، مقاومت فشاری درازمدت بیشتری دارند.

با افزودن ۱٪ رزین پلیمری، بهترین نمونه از نظر رفتار مکانیکی در برابر فشار برای سنین ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲ و ۹۰ روزه مربوط به نمونه با نسبت ماسه به سیمان ۴/۷۵ و برای سنین ۱ و ۵۶ روزه مربوط به نمونه با نسبت ماسه به سیمان ۴/۵ بوده است.

با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که در سن ۱ روزه، مقاومت فشاری بیشتر نسبت‌ها در یک محدوده بوده است. با رسیدن به سن ۷ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش قابل توجهی را نسبت به سن ۱ روزه تجربه کرده‌اند. با افزودن ۱٪ رزین پلیمری، نمودار در سن ۷ روزه تقریباً روندی مشابه نمودار نمونه‌های فاقد رزین داشته است، به صورتی که از نمونه‌های با نسبت ماسه به سیمان ۴/۷۵ تا ۶، روند نزولی برقرار بوده و سپس با افزایش یک گام، مقاومت فشاری مجدداً روند نزولی را طی کرده است. در سن ۱۴ روزه، برای نسبت‌های ماسه به سیمان بالا، مقاومت فشاری افزایشی را در مقایسه با سن ۷ روزه تجربه نکرده است. با رسیدن به سن ۲۸ روزه نتیجه گرفته می‌شود که هر چه نسبت ماسه به سیمان افزایش یافته است،

تأثیر رزین پلیمری در افزایش مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه‌های فاقد رزین بیشتر بوده است. همچنین در سن ۴۲ روزه، افزایش مقاومت نسبت به سن ۲۸ روزه مشاهده نشده است. اما در سن ۵۶ روزه، افزایش مقاومت فشاری نسبت به سن ۲۸ روزه برای همه‌ی نسبت‌های ماسه به سیمان تقریباً در یک حدود بوده است. در اغلب نمونه‌ها مشاهده می‌شود که با رسیدن به سن ۹۰ روزه، مقاومت فشاری آنها تقریباً منطبق بر نمودار سن ۵۶ روزه بوده است.

۲.۳. نتایج مقاومت خمشی

به منظور بررسی مقاومت خمشی بتن، طبق استاندارد نمونه‌های با سن ۲۸ روزه از حوضچه‌ی عمل‌آوری خارج شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. سرعت بارگذاری جک برای نمونه‌های $16 \times 4 \times 4$ سانتی‌متر بر روی ۵۵ نیوتن بر ثانیه تنظیم شده است.

۱.۲.۳. نتایج مقاومت خمشی گام‌های اول و دوم مطالعات

در بخش کنونی، نتایج تأثیر افزایش نسبت ماسه به سیمان بر مقاومت خمشی ۱۱ نسبت مختلف ماسه به سیمان در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، افزایش نسبت ماسه به سیمان در ملات پودری موجب کاهش مقاومت خمشی شده است. کاهش میزان سیمان با افزایش نسبت ماسه به سیمان در طرح‌ها، باعث کاهش چسبندگی بین ریزدانه‌ها شده که این امر موجب پایین آمدن تحمل ریزدانه‌ها در برابر خمش ملات شده است. اما در نمونه با نسبت ماسه به سیمان ۶/۲۵، روند افزایشی بسیار کم در نتایج مقاومت خمشی مشاهده می‌شود.

همچنین در شکل مذکور مشاهده می‌شود که نمودار مقاومت خمشی در اثر افزودن ۱٪ رزین پلیمری در محدوده‌ی نسبت‌های ماسه به سیمان ۴/۵ تا ۵/۵، روند نزولی داشته است. اما از محدوده‌ی نسبت ماسه به سیمان ۵/۵ تا ۶، در نمودار مذکور روند صعودی برقرار بوده و بعد از آن با کاهش حدود ۶ مگاپاسکال در نسبت ماسه به سیمان ۶/۲۵، نمودار مقاومت خمشی، یک روند خطی داشته است.

مقاومت خمشی نمونه‌های فاقد و دارای ۱٪ رزین پلیمری نیز در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، افزودن رزین پلیمری در همه‌ی نسبت‌ها به جز در دو نسبت با ماسه به سیمان ۴/۵ و ۶، باعث کاهش مقاومت خمشی شده است. همچنین در دو نسبت ۴/۵ و ۶ به ترتیب افزایش برابر با ۳ و ۱/۶۸ مگاپاسکال دیده می‌شود. لازم به ذکر است که در نمودار مذکور، مقاومت خمشی نمونه‌های فاقد رزین پلیمری، روند نسبتاً خطی طی کرده است. ولی در نمودار دارای ۱٪ رزین پلیمری، روند نزولی مانند نمونه‌های فاقد رزین مشاهده نمی‌شود. زیرا تأثیر رزین پلیمری برای اولین بار بررسی شده است که می‌تواند نتایج غیرقابل پیش‌بینی داشته باشد.

۴. نتیجه‌گیری

بتن از جمله مصالح جدایی‌ناپذیر سازه‌های مهندسی عمران به شمار می‌رود. از این رو، همواره مهندسان عمران تلاش‌های بسیاری در راستای ارتقاء کیفیت و بهبود خواص عملکردی انواع بتن، تجربه کرده‌اند. بنابراین در پژوهش حاضر اقدام به تهیه‌ی ۲۲ طرح اختلاط برای ساخت بتن پودری واکنش‌پذیر شده است که ابتدا رفتار مکانیکی افزایش نسبت ماسه به سیمان در ۱۱ طرح با نسبت‌های مختلف ماسه به سیمان: ۴/۵، ۴/۷۵، ۵/۵، ۵/۲۵، ۵/۵، ۵/۷۵، ۶، ۶/۲۵، ۶/۵، ۶/۷۵، ۷ در ملات بررسی و سپس به بررسی تأثیر افزودن ۱٪ رزین پلیمری به نسبت‌های مختلف ماسه به سیمان پرداخته شده و این نتایج به دست آمده است:

جز در نمونه با نسبت ماسه به سیمان ۴/۵، موجب کاهش مقاومت فشاری شده است که به دلیل کندگیرکننده بودن رزین پلیمری، باعث تأخیر در فرایند هیدراسیون شده است؛

۶. با افزایش سن نمونه‌ها و با افزودن ۱٪ رزین پلیمری در نسبت‌های ماسه به سیمان بالا، مقاومت فشاری افزایش یافته است؛

۷. با افزایش نسبت ماسه به سیمان، تأثیر افزودن ۱٪ رزین پلیمری در افزایش مقاومت فشاری برای سنین ۲۸ و ۵۶ روزه بسیار مشهود است. اما با رسیدن به سن ۹۰ روزه، افزایش مقاومت فشاری نسبت به سن ۵۶ روزه مشاهده نمی‌شود؛

۸. با رسیدن سن نمونه‌ها به ۹۰ روز، مقاومت فشاری نمونه‌های فاقد و دارای ۱٪ رزین پلیمری منطبق بر یکدیگر بوده‌اند؛

۹. با افزایش نسبت ماسه به سیمان، نمودار مقاومت خمشی نمونه‌ها به دلیل کاهش میزان سیمان، روند نزولی داشته است؛

۱۰. افزودن ۱٪ رزین پلیمری موجب افت مقاومت خمشی نسبت به نمونه‌های فاقد رزین پلیمری شده است.

۱. افزایش نسبت ماسه به سیمان با توجه به کاهش میزان سیمان مصرفی و به دنبال آن کاهش چسبندگی بین دانه‌ها موجب کاهش مقاومت خمشی شده و مقاومت فشاری به دلیل کاهش میانگین ضخامت دوغاب کاهش یافته است؛

۲. در سنین ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه، نمونه با نسبت ماسه به سیمان ۴/۷۵ و در سنین ۴۲، ۵۶ و ۹۰ روزه، نمونه با نسبت ماسه به سیمان ۴/۵، دارای بیشترین مقاومت فشاری بوده‌اند؛

۳. نمودار مقاومت فشاری فاقد رزین پلیمری در سن ۱ روزه از نمونه با نسبت ماسه به سیمان ۴/۷۵ تا ۵/۷۵، روند نزولی داشته و بعد از آن با یک گام افزایشی، تا نسبت ماسه به سیمان ۷، مقاومت فشاری مجدداً کاهش یافته است؛

۴. با افزایش نسبت ماسه به سیمان، مقاومت فشاری در سن ۹۰ روزه، افزایش قابل توجهی داشته است. روند اخیر در نمونه‌های با نسبت ماسه به سیمان ۵/۷۵ تا ۷ نیز مشاهده می‌شود؛

۵. افزودن ۱٪ رزین پلیمری به نمونه‌های فاقد رزین پلیمری در سن ۱ روزه به

پانوشته‌ها

1. Rao
2. Haach
3. Gopal Reddy
4. Neville
5. Westerholm
6. Reddy & Gupta
7. Singh & Munjal
8. Richard & Cheyrezy
9. Zhong

منابع (References)

1. Heidari, A. and Tavakoli, D., 2017. Introduction to concrete technology. *P. Shahrekord University, Chaharmahal va bakhtiyari, IR* [In Persian].
2. Rao, G.A., 2001. Generalization of Abrams' law for cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 31(3), pp.495-502. DOI:10.1016/S0008-8846(00)00473-7.
3. Haach, V.G., Vasconcelos, G. and Lourenço, P.B., 2011. Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 25(6), pp.2980-2987. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.011.
4. Gopal Reddy, M., 1997. Understanding the mix proportioning and behavior of cement mortars using 43 grade cement. Thesis Submitted for Partial Fulfillment of Master of Technology in Civil Engineering, Sri Venkateswara University, Tirupati.
5. Neville, A.M., 1996. *Properties of Concrete*. 4th Edition, John Wiley & Sons Inc., New York.
6. Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J. and Forssberg, E., 2008. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement and Concrete Composites*, 30(4), pp.274-282. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2007.08.008.
7. Reddy, B.V. and Gupta, A., 2008. Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil-cement block masonry. *Construction and Building Materials*, 22(8), pp.1614-1623. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.014.
8. Lawrence, S. and Cao, H., 1988. Microstructure of the interface between brick and mortar. *Brick and Block Masonry* (8 th IBMAC), London, Elsevier Applied Science, 1, pp.194-204.
9. Singh, S. and Munjal, P., 2017. Bond strength and compressive stress-strain characteristics of brick masonry. *Journal of Building Engineering*, 9, pp.10-16. DOI:10.1016/j.job.2016.11.006.
10. Richard, P. and Cheyrezy, M.H., 1994. Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength. *Special Publication*, 144, pp.507-518.
11. Ahmad, S. and Zubair, A. and Maslehuddin, M.M., 2015. Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 99, pp.81-73. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.09.010.
12. Yunsheng, Z., Wei, S., Sifeng, L. and et al., 2008. Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static-dynamic behaviors. *Ce-*

ment and Concrete Composites, 30(9), pp.831-838. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2008.06.008.

13. ASTM C192/C192M-19., 2016. Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
14. ASTM C39/C39 M-12., 2012. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. American Society for Testing and Materials, West Con-
- shohocken, Pennsylvania.
15. ASTM C293., 2010. Standard test method for exural strength of concrete (using simple beam with centerpoint loading). American Society for Testing and Materials.
16. Zhong, C., Liu, M., Zhang, Y. and et al., 2019. Study on mix proportion optimization of manufactured sand RPC and design method of steel fiber content under different curing methods. *Materials*, 12(11), p.1845. DOI:10.3390/ma12111845.