

ارزیابی مشخصات حالت تازه بتن‌های فراتوانمند حاوی مواد زودگیرکننده، ژئولیت و سرباره و تأثیر آنها بر مشخصات مکانیکی و دوام بلندمدت

بیژن بیژن *

دانشجوی دکتری، پردیس دانشگاهی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان.

عطاله حاجتی مدارایی

استادیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان.

چکیده

پتانسیل بتن‌های فراتوانمند به دلیل مقاومت اولیه بالا در کاربردهایی همچون تعمیرات رویه‌های بتنی و ساخت قطعات بتنی پیش ساخته به خوبی آشکار شده است. کاربرد پوزولان‌های صنعتی بومی می‌تواند علاوه بر کاهش مصرف سیمان، به دلیل بهبود مشخصات این بتن‌ها در بلندمدت، دارای اهمیت باشد. در مطالعه حاضر جهت کاربرد این بتن‌ها در تعمیرات سریع و نواحی سردسیر، پس از بهینه سازی مصرف زودگیرکننده، ۱۰ طرح اختلاط بر پایه فرمول‌های بتن فراتوانمند با درصد‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ از سرباره و ژئولیت به عنوان جایگزین دوده سیلیسی و ترکیبی از درصد‌های هر دو پوزولان مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمون‌های حالت تازه شامل تغییرات دمای درونی و زمان گیرش و آزمون‌های مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی و جذب آب نهایی در سنین مختلف در حالت سخت شده نیز بر روی نمونه‌ها صورت گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمون‌ها، مشخص شد که پوزولان‌های یاد شده به کنترل سرعت گیرش و بهبود مشخصات نمونه‌ها در حالت تازه کمک نموده و در سنین مختلف، مشخصات مکانیکی و دوام بتن را بهبود بخشیدند. سرباره و ژئولیت در درصد ۵ جایگزینی با دوده سیلیس، در هر دو حالت تازه و سخت شده منجر به بهبود مشخصات بتن فراتوانمند شدند. استفاده از درصد‌های ۱۵ این دو پوزولان در حالت منفرد و ترکیبی، به افت مشخصات مکانیکی و دوام نسبت به طرح شاهد منجر گردید. همچنین همبستگی مناسبی بین نتایج آزمون‌های مکانیکی و دوام در سنین مختلف به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: بتن فراتوانمند، ژئولیت، سرباره کوره بلند، تغییرات مقاومت الکتریکی، تغییرات دمای درونی، زمان گیرش، زودگیرکننده.

* نویسنده مسئول: bijanbijannesaz@gmail.com

۱- مقدمه

محتوای کم تخلخل به میزان زیادی انتقال یون ها را از طریق ماتریس کاهش می دهد و به نوبه خود خواص دوام را بهبود می بخشد [7]. با وجود تحقیقات زیادی که در زمینه مقاومت الکتریکی بتن سخت شده صورت گرفته است، در مورد UHPC، مطالعات تخصصی بسیار کمی را می توان یافت و اندک مطالعات صورت گرفته نشان از تأثیر قابل توجه پوزولان بر مقاومت الکتریکی، به ویژه در سنین بالا دارد [8]. توسعه تحقیقات و جمع آوری داده های آزمایشگاهی در زمینه مقاومت الکتریکی UHPC های پوزولانی، می تواند نقش مهمی در ارزیابی جامع رفتار بلند مدت این بتن ها داشته باشد و بکارگیری این روش غیر مخرب می تواند پیش بینی ویژگی های دوام و خواص مکانیکی را حتی برای چندین دهه از عمر UHPC امکان پذیر سازد. در این مطالعه سعی شده است تا با ارزیابی زمان گیرش و توسعه دمایی بتن تازه در ۲۸ ساعت اول، اثرات پوزولان ها بر رفتار بتن تازه مشخص گردد. همچنین پس از سخت شدن بتن، با مطالعه خصوصیات مکانیکی، دوام و ریزساختار این بتن ها، تأثیر این مواد افزودنی برای سنین بالاتر مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

مواد پودری استفاده شده در این تحقیق شامل سیمان تپ II هگمتان مطابق با مشخصات استاندارد ASTM-C150^۴ [9] مورد استفاده قرار گرفت. دوده سیلیسی سازگار با مشخصات استاندارد ASTM-C1240 [10] انتخاب گردید. GGBFS و زئولیت به عنوان جایگزین بخشی از سیمان تا ۱۵ درصد وزنی استفاده شدند که هر دو عبوری از الک شماره ۲۰۰ بودند. مشخصات شیمیایی مواد پودری استفاده شده بر اساس جدول ۱ می باشد. همچنین ماسه سیلیسی عبوری از الک شماره ۳۰ (کوچکتر از ۶۰۰ میکرون) به عنوان سنگ دانه ریز و فوق روان کننده مبتنی بر پلی کربوکسیلات به عنوان عامل کاهنده آب مطابق با استاندارد ASTM C-494 [11] استفاده شدند. زودگیر کننده مورد استفاده آلومینات سدیم پودری با خلوص ۹۸٪ از شرکت پتروشیمی دانشمند بوده است.

امروزه بتن فراتوانمند به عنوان یک مصالح ساختمانی استاندارد با مقاومت فشاری حداقل ۱۲۰ مگاپاسکال در صنعت مورد استفاده قرار می گیرد. رسیدن به استحکام بالا در سنین اولیه یکی از ویژگی های اساسی UHPC^۱ است. با توجه به این خاصیت UHPC، این نوع بتن برای کاربردهای سازه ای نیازمند به بهره برداری سریع نسبت به بتن معمولی دارای امتیاز منحصر بفردی است. رسیدن به مقاومت مکانیکی مطلوب سازه ای در عرض ۱ تا ۳ روز یا حتی کمتر برای این بتن در مطالعات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [1]. استفاده از زئولیت طبیعی (NZ^۲) در UHPC تحول قابل توجهی را در مشخصات این نوع بتن، ضمن کاهش مصرف سیمان ایجاد کرد [2]. در محدوده این مطالعه، همانطور که در مورد NZ گفته شد، اثرات مشابهی از سرباره آسیاب شده کوره بلند (GGBFS^۳) بر حرارت هیدراتاسیون، استحکام و ویژگی های ریزساختاری UHPC مشاهده شده است [3]. از نظر توسعه حرارتی در زمان هیدراتاسیون، UHPC می تواند به دلیل محتوای سیمان بالا دچار تحولات قابل توجهی شود. در این مورد، ضرورت استفاده از مواد پوزولانی توسط محققان برای کاهش محتوای سیمان پرتلند به منظور کنترل گرمای هیدراتاسیون با حدود مطلوب مورد بررسی قرار گرفته است [4]. مشخص شده است که GGBFS در کاهش گرمای هیدراتاسیون در آب و هوای گرم نقش مؤثری ندارد. بر اساس تحقیقات، تفاوت عملکرد در استحکام، بسته به نسبت جایگزینی GGBFS به عنوان یک جایگزین مؤثر برای سیمان پرتلند، تنها در سنین اولیه عمل آوری قابل ملاحظه است [5]. در مطالعات مختلف، مبنای نظری برای تحقق ارتباط بین خواص سخت شدن و توسعه مقاومت الکتریکی ارائه شده است. این ویژگی بتن به ریزساختار خمیر سیمان بستگی دارد که با حجم، اندازه و اتصال منافذ مشخص می شود. مقاومت الکتریکی بتن همچنین به محتوای رطوبت و ساختار شیمیایی آن بستگی دارد [6]. علاوه بر این، مقدار مواد افزودنی مانند GGBFS، خاکستر بادی و دوده سیلیسی باعث کاهش اندازه و حجم منافذ می شود. UHPC به عنوان کامپوزیتی دارای ساختار با دوام و نفوذپذیری کم شناخته می شود. چگالی بالا و

³ Ground Granulated Blast Furnace Slag⁴ American Society for Testing and Materials¹ Ultra-high performance concrete² Natural Zeolite

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان، دوده سیلیسی، زئولیت و سرباره

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	L.O.I.
Cement	22.72	2.91	3.69	62.68	4.92	0.18	0.71	2.42	1.56
Silica Fume	93.4	1.14	0.64	1	0.62	-	0.03	1.14	2.9
Zeolite	69.12	0.29	12.81	2.31	1.42	2.29	1.25	0.2	8.99
GGBFS	36.6	0.52	11.1	35.4	1.7	0.6	0.82	1.02	2.1

۲-۲- ساخت و عمل آوری

اطراف دیگ میکسر با کاردک تراشیده شد تا مواد مخلوط نشده ساخت، قالب‌گیری و عمل آوری مطابق با الزامات روش آزمون استاندارد ASTM C109 [12] با تغییرات زیر انجام شد. جهت ساخت مخلوط تازه در ابتدا مواد پودری و ماسه سیلیسی در میکسر مخلوط شدند تا مخلوط پودری یکنواختی حاصل شود. سپس مخلوط آب و فوق روان کننده به تدریج در مدت زمان ۳۰ ثانیه اضافه شد و اختلاط به مدت ۱ دقیقه با سرعت ۳۰ RPM 30 دور در دقیقه ادامه یافت. پس از آن، بعد از یک دقیقه استراحت، در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- طرح‌های اختلاط (kg/m³)

Mix Code	Cement	Silica Fume	GBFS	Zeolite	Water	SP	SAA ¹
C	848	212	0	0	169.6	13.78	2.12
5G	848	159	53	0	169.6	13.78	2.12
10G	848	106	106	0	169.6	13.78	2.12
15G	848	53	159	0	169.6	13.78	2.12
5Z	848	159	0	53	169.6	13.78	2.12
10Z	848	106	0	106	169.6	13.78	2.12
15Z	848	53	0	159	169.6	13.78	2.12
5Z5G	848	106	53	53	169.6	13.78	2.12
10G5Z	848	53	106	53	169.6	13.78	2.12
5G10Z	848	53	53	106	169.6	13.78	2.12

۳-۲- آزمون‌ها

۳-۲-۱- توسعه دمای داخلی

فاقد سنگدانه) بر اساس طرح و روش اختلاط، ساخته شد و درون قالب ریخته شد. سنسور ترموکوپل نوع J در عمق نمونه و مرکز کره قرار گرفت و نمونه ساخته شده همراه با قالب درون عایق EPS^۲ برای اندازه‌گیری تغییرات دمای داخلی UHPC مطابق شکل ۱ نصب شد. دما در بازه‌های زمانی ۴۸۰، ۷۲۰، ۱۴۴۰ و ۱۶۸۰ دقیقه (تا ۲۸ ساعت) جهت ارزیابی تغییرات گرمای هیدراتاسیون ثبت گردید و تغییرات دمایی ناشی از توسعه حرارت در مرکز نمونه گزارش شد.

در مطالعات مختلف، شکل‌های متفاوتی از محفظه‌های نیمه آدیباتیک برای اندازه‌گیری گرمای هیدراتاسیون و توسعه دمای درونی بتن‌های مختلف از جمله UHPC به کار گرفته شده‌اند [13-16]. در مطالعه حاضر از قالب کرومی پلیمری به ضخامت ۰٫۴ میلی‌متر جهت قالب‌گیری بخش خمیر UHPC استفاده شد. خمیر UHPC

¹ Sodium Aluminate Agent

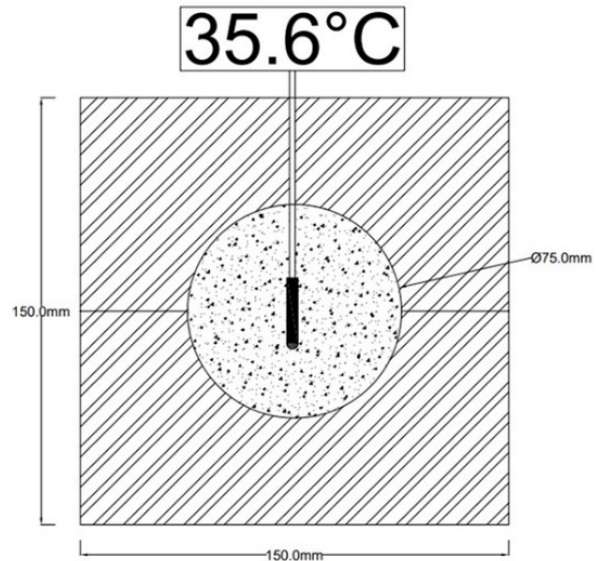
² Expanded PolyStyrene

آزمون گرفته شد. جذب آب نهایی بر روی نمونه‌های مقاومت فشاری و مطابق استاندارد ASTM C642 [21] انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تغییرات دمای داخلی

نتایج ارزیابی دمایی خمیرهای ساخته شده بر اساس طرح‌های اختلاط در شکل ۲ نشان می‌دهد که هر یک از پوزولان‌ها با تنهایی و یا به صورت همزمان آثار متفاوتی در تغییرات دمای نمونه‌ها دارند. طرح‌های حاوی سرباره (شکل ۲-ا) تا دقیقه ۵۱۰، محدوده دمایی نزدیک به طرح شاهد را دارند اما با گذشت زمان و به‌ویژه در محدوده زمانی ۱۳۹۵ دقیقه، اختلاف قابل توجهی ایجاد شده و روند رشد دما در این مقطع زمانی برای طرح‌های حاوی سرباره به مراتب سریع‌تر است. در واقع می‌توان گفت که سرباره فعالیت پوزولانی مقطعی خود را با توجه به جهش دمایی ایجاد شده و حضور زودگیر کننده در این محدوده زمانی آغاز نموده است و تأخیر ایجاد شده را می‌توان به دلیل فعالیت کند سرباره و روند نسبتاً آهسته هیدراتاسیون ذرات ثانویه پوزولانی دانست. به‌گونه‌ای که حداقل افزایش دمای ۴۶٫۹ درصد (طرح 5G) در این مقطع زمانی قابل مشاهده است. در حالی که نرخ افزایش دمای طرح شاهد در مقطع زمانی قبلی (۷۳۵ دقیقه) به مراتب بیشتر از طرح‌های حاوی سرباره می‌باشد. طرح 15G که کمترین فاصله را با طرح شاهد در این مقطع دارد (اختلاف ۱۳٫۷ درصد) در مقطع زمانی بعدی نسبت به دو طرح دیگر دچار کاهش می‌شود. به نظر می‌رسد این شتاب مقطعی در طرح‌های حاوی سرباره در محدوده ۵۱۰ تا ۱۳۹۵ دقیقه به دلیل خاصیت سیمانی سرباره و هم‌افزایی آن با سیمان به کار رفته باشد. با توجه به شکل ۲-ب، ژئولیت فعالیت اولیه بیشتری را نسبت به سرباره از خود نشان داده و در بازه ۷۳۵ دقیقه، طرح 5Z با اختلاف اندکی (۳٫۸٪) بالاتر از طرح شاهد ظاهر شده است و حتی در بازه زمانی ۱۳۹۵ دقیقه نیز حداقل اختلاف (طرح 15Z نسبت به طرح شاهد) به ۱۶٫۳٪ می‌رسد که نسبت به روند تغییرات طرح‌های حاوی سرباره، به مراتب به طرح شاهد نزدیک‌تر است. عمده تفاوت این دو پوزولان را می‌توان در فقدان فعالیت سیمانی ژئولیت نسبت به سرباره جستجو نمود.



شکل ۱- تصویر مفهومی اندازه‌گیری تغییرات دمای داخلی خمیر بتن فراتوانمند در ۲۸ ساعت نخست پس از قالبگیری

۳-۲- زمان گیرش

از باقی‌مانده خمیر ساخته شده جهت ارزیابی گرمای هیدراتاسیون، برای اندازه‌گیری زمان گیرش اولیه و نهایی توسط سوزن و یکات استفاده شد. به غیر از مشخصات و روش ساخت خمیر UHPC، بقیه مراحل آزمون و محاسبات آن بر اساس استاندارد ASTM C191 [17] انجام شد.

۳-۳- مقاومت فشاری و خمشی

آزمون‌های مقاومت فشاری در سنین ۰/۵، ۱، ۲، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز بر روی نمونه‌های مکعبی با بعد ۷/۵ سانتیمتر و مطابق شرایط استاندارد BS EN 12390-3 [18] انجام شد. همچنین آزمون مقاومت خمشی مطابق ASTM C348 [19] بر روی نمونه‌های منشوری به ابعاد ۴*۴*۱۶ سانتیمتر مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۴- مقاومت الکتریکی و جذب آب نهایی

مقاومت الکتریکی نمونه‌ها بر اساس استاندارد AASHTO TP95 [20] بر روی نمونه‌های مقاومت فشاری در سنین آزمایش مقاومت فشاری و به وسیله یک جفت الکتروود صفحه‌ای در دو طرف نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. جهت دستیابی به نتایج قابل اعتماد از هر سه نمونه برای هر طرح اختلاط در هر سن و در شرایط اشباع،

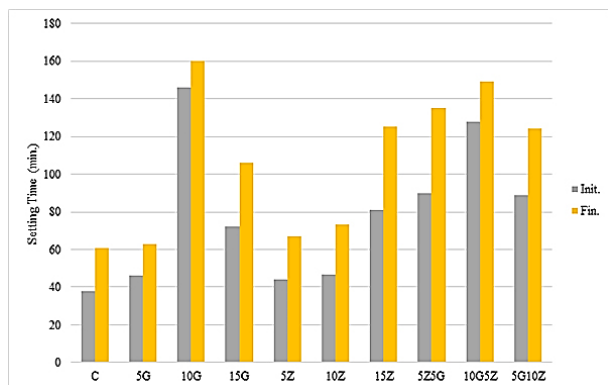
³ American Association of State Highway and Transportation Officials

¹ British Standard

² Euro Norm

۲-۳- زمان گیرش

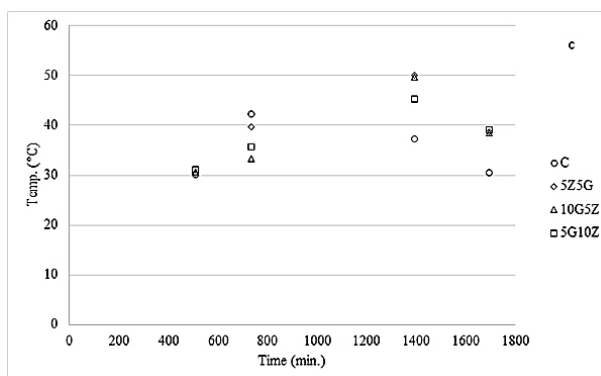
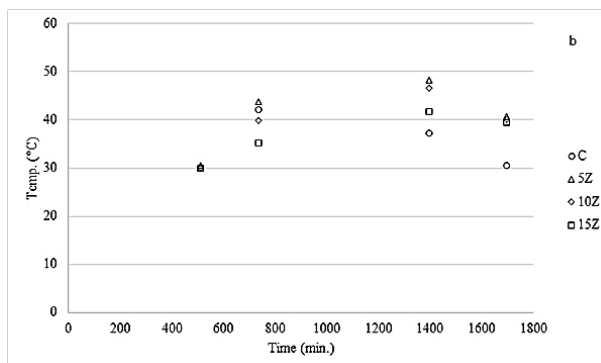
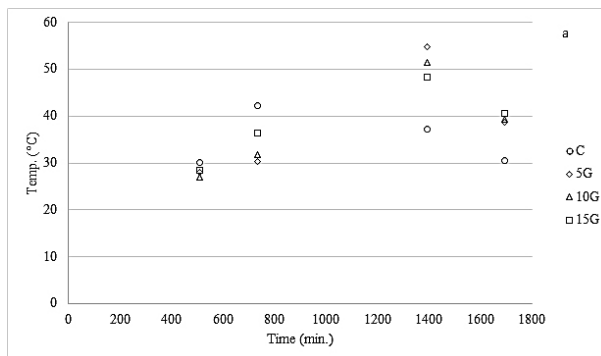
بر اساس آنچه در شکل ۳ دیده می‌شود، بیشترین افزایش در زمان گیرش در طرح 10G به دست آمده که گیرش نهایی آن نسبت به طرح شاهد ۲,۶۲ برابر بیشتر طول کشیده است. هرچند، این روند با افزایش ۵ درصد سرباره در طرح 15G نسبت به طرح قبلی به شدت نزولی شده و گیرش نهایی ۳۳,۷٪ کاهش یافته است. اختلاف ۶۰,۵٪ در طرح شاهد تا ۹,۵۹٪ در طرح 10G کاهش به همراه دارد. همچنین طرح‌های 5G، 5Z و 10Z به ترتیب با ۳,۲۸، ۹,۸۴ و ۱۹,۷٪ اختلاف نسبت به طرح شاهد در زمان گیرش نهایی، دارای کمترین فاصله از نظر سرعت گیرش با طرح شاهد هستند. افزایش درصد پوزولان‌های زئولیت و سرباره به بیش از ۱۰٪ منجر به کند شدن زمان گیرش شده و از این منظر، اثری منفی بر رفتار بتن فراتوانمند زودگیر گذاشته‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که افزایش میزان سرباره از ۱۰ به ۱۵ درصد می‌تواند اثر منفی سرباره در نرخ گیرش را تا حد زیادی جبران کند که با توجه به اثر مثبت این پوزولان بر مشخصات مکانیکی و دوام و نیاز به سرعت گیرش بالاتر، می‌توان طرح 15G را در گروه سرباره و طرح 5Z را در گروه زئولیت به‌عنوان طرح‌های بهینه از منظر نرخ گیرش معرفی نمود.



شکل ۳- زمان گیرش اولیه و نهایی خمیر ساخته شده بر اساس طرح‌های مختلف اختلاط

۳-۳- مقاومت فشاری

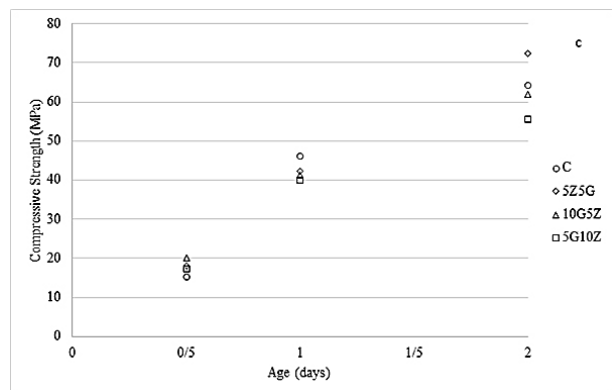
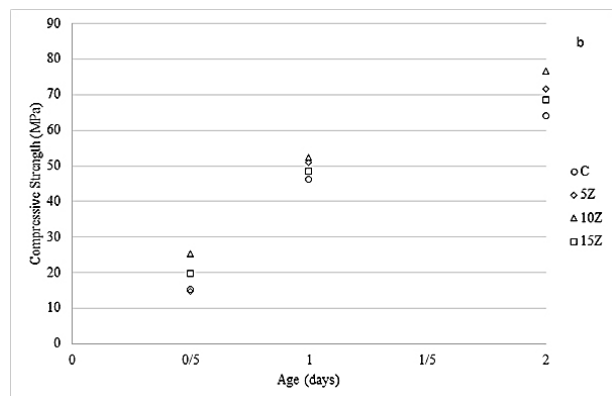
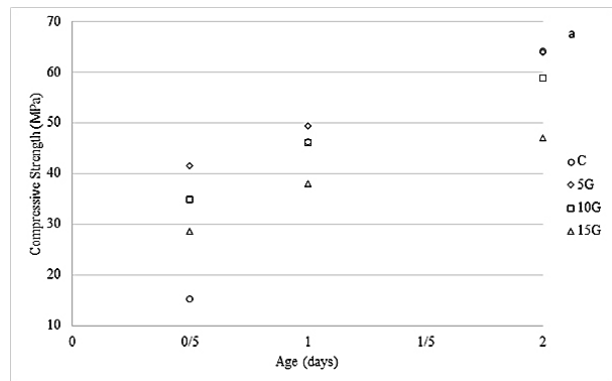
روند افزایش مقاومت فشاری در ۴۸ ساعت اول پس از قالب‌گیری برای طرح‌های حاوی سرباره (شکل ۴-۲a)، مقاومت اولیه بالاتری را نسبت به طرح شاهد نشان می‌دهد که افزایش درصد پوزولان بر کاهش مقدار مقاومت فشاری تأثیر مستقیمی دارد. در ۱۲ ساعت



شکل ۲- تغییرات دمایی طرح شاهد در ۲۸ ساعت نخست پس از قالب‌گیری و مقایسه آن با طرح‌های حاوی پوزولان، (a) مقایسه با طرح‌های حاوی سرباره کوره بلند، (b) مقایسه با طرح‌های حاوی زئولیت، (c) مقایسه با طرح‌های حاوی سرباره و زئولیت به صورت ترکیبی

با استفاده هم‌زمان دو پوزولان سرباره و زئولیت در طرح‌های ترکیبی (شکل ۲-۲c) کندی روند سرباره، تا حدودی فعالیت مطلوب زئولیت را خنثی می‌کند و حداقل اختلاف در قله حرارتی (مقطع زمانی ۱۳۹۵ دقیقه) به ۲۱,۴٪ می‌رسد که نسبت به نمودار قبلی اختلاف ۵,۱٪ افزایش را نشان می‌دهد. افزایش دمای هیدراتاسیون در بازه زمانی ۲۸ ساعت برای طرح‌های حاوی سرباره به ویژه در مناطق و فصول سرد می‌تواند مفید واقع شود و کندی گیرش ناشی از سرمای هوا را تا حدودی خنثی نماید.

اول، بالاترین مقاومت فشاری متعلق به طرح 5G می باشد که ۲,۷۴ برابر بیشتر از طرح شاهد است.



شکل ۴- مقایسه مقاومت فشاری طرح شاهد در ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ساعت پس از قالبگیری با (a) طرح های حاوی پوزولان سرباره (b) طرح های حاوی پوزولان زئولیت (c) طرح های حاوی پوزولان های سرباره و زئولیت به صورت همزمان

نرخ رشد مقاومت در ادامه برای طرح های حاوی سرباره نسبت به طرح شاهد به تدریج کندتر شده و روز دوم (۴۸ ساعت اول) طرح های 10G و 15G مقاومت پایین تری را نسبت به طرح شاهد از خود نشان دادند. این رشد سریع مقاومت که در ۱۲ ساعت نخست

قابل تشخیص است، به دلیل خاصیت سیمانی سرباره و افزایش فعالیت هیدراتاسیون ذرات سیمانی و پوزولانی رخ داده است و می تواند پتانسیل ویژه ای را در بتن های فراتوانمند زودگیر ایجاد نماید و امکان ترمیم سریع و کاربردهای مقطعی پیش از ۱۲ ساعت را امکان پذیر سازد. زئولیت از سوی دیگر (شکل ۴- b) رفتار نزدیکتری به طرح شاهد در بتن فراتوانمند ایجاد می کند و افزایش مقاومت بسیار کمتری در ۱۲ ساعت اول دیده می شود (حداکثر ۶۷,۱٪ افزایش در طرح 10Z). بر خلاف طرح های حاوی سرباره، در طرح های حاوی زئولیت، روند رشد مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد طی ۴۸ ساعت نخست همچنان بالاتر بوده و با وجود نزدیک شدن نتایج این طرح ها در سن ۲۴ ساعت به طرح شاهد، مجدداً در سن ۲ روز، فاصله نتایج بیشتر می شود.

این رفتار خاص زئولیت که بر خلاف سرباره خاصیت سیمانی نیز ندارد را می توان به تخلخل بالای آن و نقش زئولیت در عمل آوری داخلی و هیدراتاسیون نسبتاً بهتر ذرات سیمان مرتبط دانست. طرح های حاوی سرباره به ویژه طرح 5G که رشد مقاومت بسیار خوبی را در ۱۲ ساعت نخست از خود نشان می دهند، می توانند گزینه مطلوبی به عنوان جایگزین طرح شاهد در کاربردهای با زمان کوتاه محسوب شوند. در طرح های حاوی دو پوزولان به صورت همزمان (شکل ۴- c) نیز زئولیت منجر به کاهش تأثیر اولیه سرباره شده و نرخ رشد مقاومت را در ۱۲ ساعت اول کاهش داده است. در سن ۲ روزه به صورت مشخص، افزایش درصد مجموع پوزولان ها به ۱۵٪، منجر به کسب مقاومت فشاری پایین تر نسبت به طرح شاهد شده است. طرح 5G10Z که درصد زئولیت بالاتری نیز دارد، در این سن منجر به کسب پایین ترین مقاومت فشاری نسبت به سایر طرح ها (۱۳,۴٪ پایین تر از طرح شاهد) شده است. به نظر می رسد، زئولیت در کاهش فعالیت پوزولانی و سیمانی سرباره نقش مؤثری داشته است.

همان گونه که در شکل ۵ دیده می شود، در سن ۹۰ روز اکثر طرح ها با کاهش مقاومت فشاری نسبت به سن ۲۸ روز مواجه شده اند که دلیل اصلی آن را می توان اثر منفی زودگیر کننده بر ساختار ماتریس سیمانی به دلیل ایجاد تخلخل و تبدیل فازهای Aft¹ به AFm² دانست [23]. تنها استثنا، طرح 5Z می باشد که اثر مثبت

² Aluminate Ferrite monosubstituted

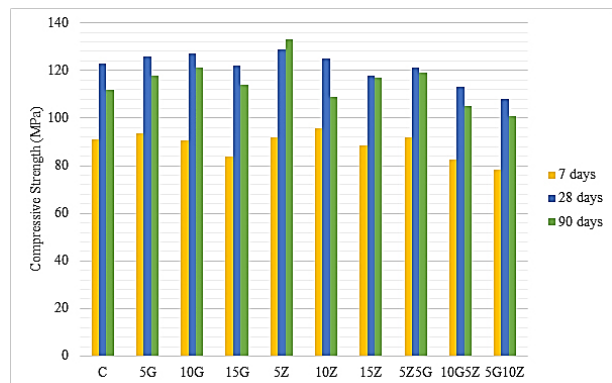
¹ Aluminate Ferrite trisubstituted

۱۷,۳ مگاپاسکال و حداکثر آن در طرح 5Z به میزان ۲۰ مگاپاسکال ثبت شده است. نتایج بسیار نزدیک در مقاومت خمشی می‌تواند بیانگر حساسیت کمتر این نتایج به اثر پوزولان‌ها در مقایسه با نتایج مقاومت فشاری باشد.

۳-۵- مقاومت الکتریکی

روند تغییرات مقاومت الکتریکی در ۴۸ ساعت اول عمل‌آوری پس از خروج از قالب برای طرح‌های حاوی سرباره (شکل ۷-ا) بیانگر اثر مثبت سرباره بر بهبود مقاومت الکتریکی در ۱۲ ساعت نخست می‌باشد. ۵٪ سرباره با ۲,۴۹ کیلوهم-سانتیمتر منجر به افزایش ۲,۰۷ برابری مقاومت الکتریکی در این سن نسبت به طرح شاهد گردید. با افزایش درصد سرباره در این سن، مقاومت الکتریکی رو به کاهش می‌گذارد، اما تا درصد ۱۵ نیز نتایج از طرح شاهد بالاتر هستند. در سن ۱ روز، مقاومت الکتریکی طرح 5G با ۳,۳۹ کیلوهم-سانتیمتر همچنان ۱۵٪ بالاتر از طرح شاهد است اما نتایج طرح‌های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد سرباره به طرح شاهد نزدیک گردید. در سن ۲ روز، طرح شاهد با ۷,۴۶ کیلوهم-سانتیمتر، افزایش قابل ملاحظه‌ای را در مقاومت الکتریکی نشان داده و با اختلاف حداقل ۱۴,۹٪ (نسبت به طرح 5G) بالاتر از سایر طرح‌ها ظاهر شد. روند تغییرات در طرح‌های حاوی سرباره، اثر مقطعی و فعالیت شدید سرباره را به ویژه در ۲۴ ساعت نخست خروج از قالب آشکار می‌سازد. در طرح‌های حاوی زئولیت (شکل ۷-ب) نتایج به طرح شاهد نزدیک تر هستند. در سن ۱۲ ساعت طرح 5Z نتیجه‌ای تقریباً یکسان با طرح شاهد دارد و طرح‌های 10Z و 15Z به ترتیب با ۱,۳ و ۱,۱۱ کیلوهم-سانتیمتر و با حداقل ۱,۶۴٪ افزایش نسبت به طرح شاهد، نتایج بالاتری را نشان می‌دهند. در سن ۲۴ ساعت، نتایج طرح‌های حاوی زئولیت از طرح شاهد فاصله گرفته و به یکدیگر نزدیکتر شده‌اند. روند تغییرات مقاومت الکتریکی این طرح‌ها پس از ۲۴ ساعت از خروج از قالب تغییر کرده و در سن ۴۸ ساعت طرح 5Z مجدداً به طرح شاهد نزدیک شد، در حالی که طرح 10Z با ۲۸٪ افزایش مجدداً اختلاف قابل توجهی را نسبت به طرح شاهد از خود نشان داد. در طرح‌های ترکیبی، طرح 5G10Z با مقدار ۱,۰۱ کیلوهم-سانتیمتر و ۱,۴۰٪ افزایش، نسبت به طرح‌های حاوی تک پوزولان، روند افزایشی پایین‌تری را در ۱۲ ساعت نخست از خود نشان دادند.

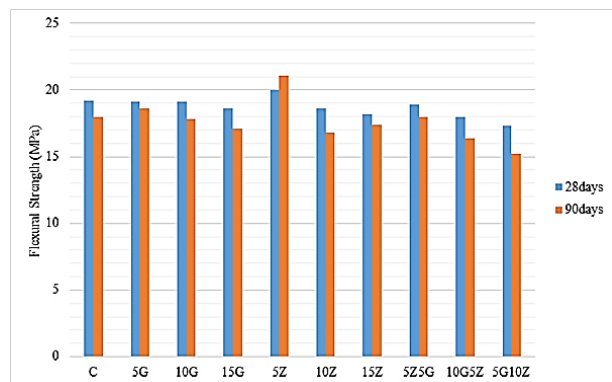
۵٪ زئولیت منجر به افزایش ۳,۱٪ مقاومت فشاری سن ۹۰ روز نسبت به سن ۲۸ روز شده است. در سنین مختلف، جایگزینی پوزولان‌های سرباره چه به صورت منفرد و چه توأم، در درصد ۱۵، منجر به کاهش مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد در اکثر طرح‌ها گردید. هر چند طرح‌های 15G و 15Z در سن ۹۰ روز، افزایش جزئی (به ترتیب ۱,۷۹٪ و ۴,۴۶٪) را نشان دادند که به اثر پوزولانهای مصرف شده بر روند افزایش مقاومت باز می‌گردد.



شکل ۵- مقاومت فشاری طرح‌های مختلف بتن فراتوانمند پوزولانی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز

۳-۴- مقاومت خمشی

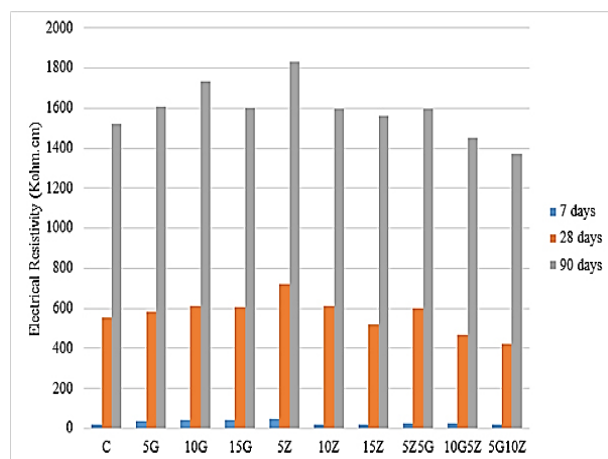
نتایج آزمایش مقاومت خمشی (شکل ۶) نیز کاهش مقادیر را در سن ۹۰ روز نسبت به سن ۲۸ روز نشان می‌دهد. این کاهش مقاومت که پیش از این، به اثر زودگیر کننده نسبت داده شد، در طرح 5Z مشاهده نمی‌شود و این استثنا در نتایج مقاومت فشاری نیز قابل مشاهده است.



شکل ۶- نتایج آزمایش مقاومت خمشی طرح‌های مختلف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز

نتایج مقاومت خمشی طرح‌های مختلف در سن ۲۸ روز نسبتاً نزدیک به هم بوده و حداقل مقاومت خمشی در طرح 5G10Z با

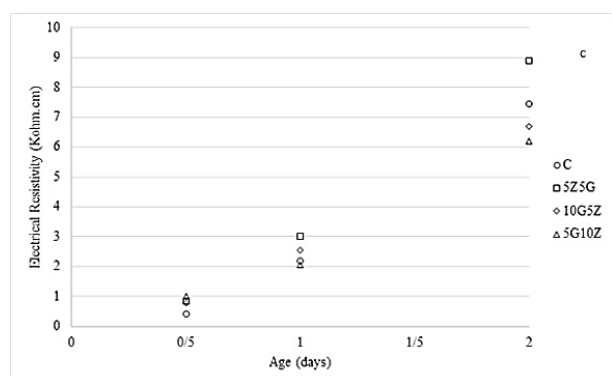
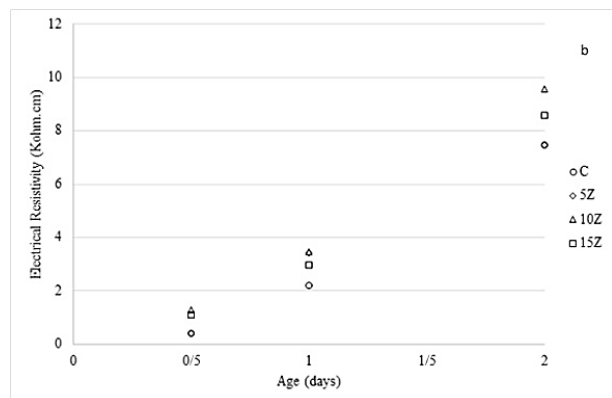
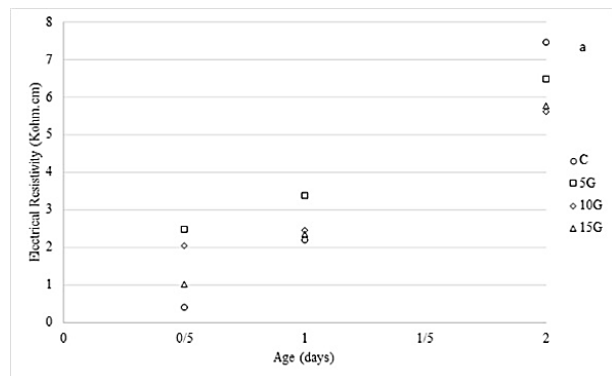
افزایش مقاومت نسبت به سن ۲۸ روز ۲,۵۴ برابر بود. این تغییرات شدید که نسبت به روند رشد مقاومت فشاری، اختلاف قابل توجهی دارد، فارغ از ساختار مکانیکی، احتمالاً به دلالت‌تغییرات شیمیایی در ماتریس سیمانی و بسته شدن مجراهای مویینه با پیشرفت هیدراتاسیون رخ داده است. همچنین در سن ۹۰ روز تمامی طرح‌های حاوی پوزولان‌های سرباره و زئولیت به صورت منفرد نتایج بالاتری نسبت به طرح شاهد داشتند که عملکرد مطلوب پوزولان‌ها را در بهبود دوام بتن فراتوانمند نشان می‌دهد. طرح‌های حاوی ۱۵٪ پوزولان ترکیبی نتایج پایین‌تری را در سن ۹۰ روز نسبت به طرح شاهد به نمایش گذاشتند که اثر نامطلوب آنها با توجه به مشاهده اثرات منفی در نتایج مقاومت فشاری، بیانگر مازاد بودن میزان این پوزولان‌ها در استفاده هم‌زمان و اثر منفی آنها بر یکدیگر در درصد‌های یاد شده است.



شکل ۸- مقاومت الکتریکی طرح‌های مختلف بتن فراتوانمند پوزولانی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز

۶-۳- جذب آب نهایی

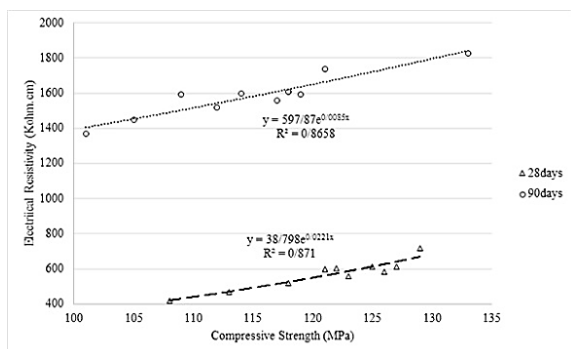
پایین‌ترین میزان جذب آب بر اساس نمودار شکل ۹ متعلق به طرح 5Z است که با سایر نتایج نیز همخوانی داشته و این طرح را به‌عنوان طرح بهینه انتخابی جهت کاربردهای ترمیمی زود هنگام می‌توان پیشنهاد نمود. این نتیجه با نتایج مقاومت الکتریکی نیز همخوانی مناسبی دارد و اثر مثبت پوزولان‌ها به غیر از طرح‌های 10G5Z و 5G10Z به خوبی در نتایج حاصله منعکس شده است. کاهش جذب آب ناشی از پیشرفت قابل توجه هیدراتاسیون که نتیجه فعالیت مطلوب سرباره و زئولیت است، دلیل منطقی این مقادیر به نظر می‌رسد.



شکل ۷- مقایسه آزمایش مقاومت الکتریکی طرح شاهد در ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ساعت پس از قالبگیری با (a) طرح‌های حاوی پوزولان سرباره (b) طرح‌های حاوی پوزولان زئولیت (c) طرح‌های حاوی پوزولان‌های سرباره و زئولیت به صورت ترکیبی

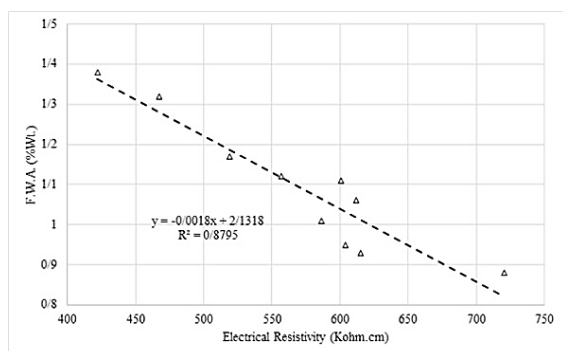
اما با افزایش سن، طرح 5Z5G به ترتیب با ۸۲ و ۱۹,۲ درصد افزایش مقاومت الکتریکی در سنین ۲۴ و ۴۸ ساعت، بهترین نتایج را در گروه ترکیبی کسب نمود که نشان دهنده عملکرد بهتر درصد‌های پایین پوزولان‌ها در استفاده هم‌زمان جهت بهبود مقاومت الکتریکی می‌باشد. بر اساس شکل ۸، روند شدید افزایش مقاومت الکتریکی پس از سن ۷ روز به خوبی قابل مشاهده است. در سن ۲۸ روز حداقل افزایش مقاومت الکتریکی (در طرح 10G) نسبت به سن ۷ روز ۱۴,۳ برابر و در سن ۹۰ روز (طرح 5Z) حداقل

برخوردار بوده و برخلاف همبستگی نتایج آزمایش‌های مکانیکی، در سن ۹۰ روز، ارتباط نتایج اندکی ضعیف‌تر شده است. این کاهش میزان همبستگی را می‌توان به تفاوت رشد مقاومت الکتریکی در مقایسه با مقاومت فشاری برای دو نوع پوزولان، نسبت داد. ایجاد یک رابطه واحد البته برای دو گروه متفاوت شامل پوزولان‌هایی با رفتار متفاوت، منجر به ایجاد گسستگی در نتایج و کاهش ضریب همبستگی می‌گردد.

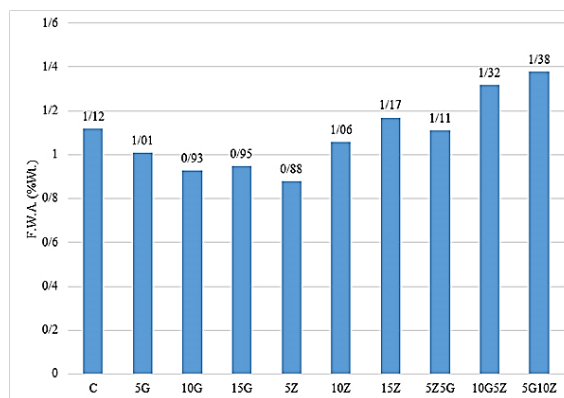


شکل ۱۱- همبستگی نتایج آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز

ارتباط خطی بسیار خوبی (با ضریب همبستگی ۰/۸۷،۹) در شکل ۱۲ بین نتایج مقاومت الکتریکی و جذب آب نهایی در سن ۲۸ روز دیده می‌شود. این رابطه خطی و معکوس، وابستگی شدید نتایج مقاومت الکتریکی به میزان جذب آب نمونه‌ها و متعاقباً تخلخل آنها را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که در بتن‌های فراتوانمند فارغ از نوع پوزولان به کار رفته، جذب آب، شاخصی بسیار مهم و تأثیرگذار بر نتایج مقاومت الکتریکی بوده و انتقال یونی ناشی از حفرات داخلی، اثرات بسیار بیشتری را نسبت به ترکیب شیمیایی و تخلخل پوزولان‌ها بر مقاومت الکتریکی می‌گذارد.



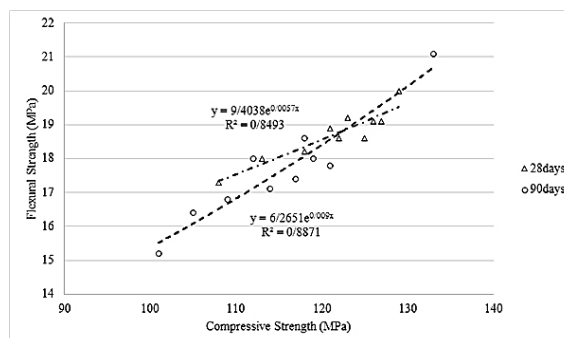
شکل ۱۲- همبستگی نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی و جذب آب نهایی در سن ۲۸ روز



شکل ۹- درصد وزنی جذب آب نهایی طرح‌های مختلف بتن فراتوانمند پوزولانی در سن ۲۸ روز

۳-۷- همبستگی نتایج آزمایشات

همبستگی با ضرایب بالای ۰/۸۵ بین نتایج آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش مقاومت خمشی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز (شکل ۱۰) رابطه‌ی نمایی معناداری را بین این دو دسته از نتایج نشان می‌دهد. شیب بیشتر نمودار در سن ۹۰ روز را می‌توان به بهبود مقاومت خمشی در مقابل مقاومت فشاری در این سن مرتبط دانست که دلیل عمده آن را می‌توان بهبود ساختار ماتریس سیمانی و در نتیجه بهبود مقاومت کششی در این نوع بتن دانست. همچنین در سن ۹۰ روز رابطه‌ی نمایی به دست آمده تطابق بیشتر با نتایج تجربی داشته و ضریب همبستگی به ۰/۸۸ رسید که ارتباط قوی‌تری را بین نتایج مقاومت فشاری و خمشی در سنین بالاتر نشان می‌دهد. این بهبود در ارتباط دو دسته نتایج به صورت عمده، به کاهش تغییرات ناشی از واکنش‌های هیدراتاسیون در ماتریس سیمانی باز می‌گردد و به عبارتی نتایج در سنین بالاتر به ثبات بیشتری می‌رسند.



شکل ۱۰- همبستگی نتایج آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت خمشی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز

روابط مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز (شکل ۱۱) از ضرایب همبستگی نسبتاً بالایی (حداقل ۰/۸۶،۶)

۴- جمع بندی

و ترکیبی، اثر سرباره در مسدودسازی مجراهای مویینه ای جسم بتن را نشان داد.

۷. رشد شدید مقاومت الکتریکی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز در مقایسه با سن ۷ روز برای طرح های پوزولانی، فارغ از تغییرات مقاومت فشاری، از نتایج قابل توجه این پژوهش بود.

۸. همبستگی بسیار خوبی در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بین نتایج مقاومت های فشاری و خمشی، مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی و همچنین مقاومت الکتریکی و جذب آب برقرار گردید.

طرح های اختلاط بتن های فراتوانمند زودگیر پوزولانی که با هدف کاربردهای سریع در بازه های زمانی کوتاه در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفتند، علاوه بر عملکرد مطلوب در ۴۸ ساعت نخست، در سنین بالاتر نیز محدوده مشخصات مطلوب بتن های فراتوانمند را حفظ نموده و کارآیی آنها جهت استفاده در صنعت به اثبات می رسانند. با توجه به نتایج به دست آمده و تفاسیر ارائه شده، می توان موارد زیر را به صورت خلاصه در نتیجه گیری مطالعه صورت گرفته عنوان نمود:

۵- مراجع

- [1] Stein B., Kramer B., Kumar T., Pyle T., Shatnawi S., Rapid Strength Concrete for Rehabilitation and Improvement of Pavements, Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation, 2010.
- [2] Pezeshkian M., Delnavaz A., Delnavaz M., Development of UHPC mixtures using natural zeolite and glass sand as replacements of silica fume and quartz sand, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Volume 25, 2021 - Issue 11.
- Concrete, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 32 Issue 5 - May 2020
- [3] Xiao R., Deng Z.C., Shen C., Properties of Ultra High-Performance Concrete Containing Superfine Cement and without Silica Fume, Journal of Advanced Concrete Technology, Volume 12 (2014) Issue 2.
- [4] Bajaber M.A. & Hakeem I.Y., UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review, Journal of Materials Research and Technology, Volume 10, January-February 2021, Pages 1058-1074.
- [5] Yazıcı H., Yardımcı M.Y., Yiğiter H., Aydın S., Türkel S., Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag, Cement and Concrete Composites, Volume 32, Issue 8, September 2010, Pages 639-648.
- [6] GORZELAŃCZYK T., HOŁA J., Pore structure of self-compacting concretes made using different superplasticizers, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Volume 11, Issue 3, 2011, Pages 611-621.
- [7] Wang X., Yu R., Song Q., Shui Z., Liu Z., Wu S., Hou D., Optimized design of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high wet packing density, Cement and Concrete Research, Volume 126, December 2019, 105921.

۱. توسعه حرارت داخلی بتن های فراتوانمند حاوی سرباره و ژئولیت با تأخیر نسبت به طرح شاهد همراه بود و دماهای بالاتری نیز در نتیجه فرآیند واکنش پوزولانی به ثبت رسید که سرباره نسبت به ژئولیت فعالیت شدیدتری را از خود نشان داد و بالاترین دمای واکنش هیدراتاسیون متعلق به طرح های حاوی سرباره به صورت منفرد شاهد باشد.
۲. زمان گیرش طرح های حاوی پوزولان های سرباره و ژئولیت به صورت منفرد به غیر از طرح 10G نسبت به طرح شاهد اختلاف نسبتاً کمی داشتند و طرح های ترکیبی همراه با ۱۵ درصد از پوزولان های منفرد، زمان گیرش نسبتاً بالاتری را حاصل نمودند.
۳. روند رشد مقاومت فشاری در ۱۲ ساعت نخست، در طرح های حاوی سرباره، شدید و منحصراً منفرد بود و ژئولیت و همچنین طرح های حاوی دو پوزولان، اختلاف کمتری را نسبت به طرح شاهد از خود نشان دادند.
۴. در سنین ۲۴ و ۴۸ ساعت، روند رشد مقاومت فشاری برای طرح های پوزولانی کاهش یافته و طرح شاهد در اکثر موارد از طرح های پوزولانی، پیشی گرفت.
۵. در سن ۹۰ روز اثر منفی زودگیر کننده بر مقاومت فشاری محسوس بود، هرچند طرح 5Z بر خلاف سایر طرح ها، افزایش جزئی مقاومت فشاری را در این سن تجربه کرد. همچنین در سنین ۷ و ۲۸ روز، طرح های حاوی ۱۵٪ پوزولان، کاهش مقاومت فشاری را نسبت به طرح شاهد از خود نشان دادند.
۶. تغییرات شدید مقاومت الکتریکی طرح های حاوی سرباره در سنین اولیه تا ۴۸ ساعت، در مقایسه با طرح های حاوی ژئولیت

- properties, *Construction and Building Materials*, Volume 96, 15 October 2015, Pages 368-377.
- [23] Han J., Wang K., Shi J., Wang Y., Influence of sodium aluminate on cement hydration and concrete properties, *Construction and Building Materials*, Volume 64, 2014, Pages 342-349.
- [8] Mosavinejad S.H.G., Mirgozar Langaroudi M.A., Barandoust J., Ghanizadeh A., Electrical and microstructural analysis of UHPC containing short PVA fibers, *Construction and Building Materials*, Volume 235, 28 February 2020, 117448
- [9] ASTM C150-00, Standard Specification for Portland Cement.
- [10] ASTM C1240-14, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures
- [11] ASTM C494/C494M – 16, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.
- [12] ASTM C109/C109M – 16a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)
- [13] Soliman A.M., Nehdi M.L., Effect of partially hydrated cementitious materials and superabsorbent polymer on early-age shrinkage of UHPC, *Construction and Building Materials*, Volume 41, April 2013, Pages 270-275.
- [14] An G.H., Park J.M., Cha S.L., Kim J.K., Development of a portable device and compensation method for the prediction of the adiabatic temperature rise of concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 102, Part 1, 15 January 2016, Pages 640-647.
- [15] Liu Z., El-Tawil S., Hansen W., Wang F., Effect of slag cement on the properties of ultra-high performance concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 190, 30 November 2018, Pages 830-837.
- [16] Viviani M., Lanzoni L., Savino V., Tarantino A.M., An Auto-Calibrating Semi-Adiabatic Calorimetric Methodology for Strength Prediction and Quality Control of Ordinary and Ultra-High-Performance Concretes, *Materials* 2022, 15, 96, 1-15.
- [17] ASTM C191-13, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle.
- [18] BS EN 12390-3:2002, Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens
- [19] ASTM C348 – 14, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars
- [20] AASHTO TP 95, Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
- [21] ASTM C642 – 13, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
- [22] Wang D., Shi C., Wu Z., Xiao J., Huang Z., Fang Z., A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and

Evaluation of the characteristics of the fresh state of ultra-high performance concrete containing accelerating agent, zeolite and slag and their effect on the mechanical characteristics and long-term durability

Bijan Bijan *

Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Atollah Hajati Modaraci

Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Abstract

The potential of UHPC due to its high initial strength has been well revealed in applications such as repairing and precast industries. In addition to reducing cement consumption, the use of local industrial pozzolans can be important because of improving the characteristics of these concretes in the long term. In the present study, for the use of these concretes in quick repairs and cold areas, after optimizing the use of quick-setting agent, 10 mix plans based on UHPC formulas with 5, 10 and 15 percentages of slag and zeolite as a substitute for silica fume and a combination of the percentages of both pozzolans were tested. Fresh state tests, including changes in internal temperature and setting time, and tests of compressive strength, electrical resistance, and final water absorption at different ages in the hardened state also performed on the samples. Based on the results obtained from the tests, it was found that these pozzolans helped to control the setting speed and improve the characteristics of the samples in the fresh state and improved the mechanical characteristics and durability of concrete at different ages. Slag and zeolite in 5% replacement with SF, in both fresh and hardened conditions, led to the improvement of high-strength concrete characteristics. The use of 15 percent of these two pozzolans in single and combined state led to a decrease in mechanical characteristics and durability compared to the control design. Also, a good correlation was obtained between the results of mechanical tests and durability at different ages.

Keywords: Ultra-high performance concrete, Zeolite, Blast furnace slag, Electrical resistivity changes, internal temperature changes, setting time, early setting.

* Corresponding Author: bijanbijannesaz@gmail.com