



تأثیر استفاده از مصالح بازیافتی روی جمع‌شدگی خودزا و مقاومت بتن فوق توانمند

محمد رضا پزشکیان^۱، علی دلنواز^{۲*}، محمد دلنواز^۲

۱- گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین، ایران
۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۵

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۷/۲۳

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۹/۰۶

کلمات کلیدی:

ژئوسینتتیک

خلاصه: در این تحقیق با به‌کارگیری نسبت‌های مختلف ژئولیت طبیعی (۲۵٪ و ۵۰٪ و ۷۵٪ و ۱۰۰٪) به جای میکروسیلیس هدف بر کاهش جمع‌شدگی خودزای بتن فوق توانمند می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند با جایگزینی درصد‌های مختلف میکروسیلیس با ژئولیت طبیعی، رطوبت نسبی داخلی در محدوده بالاتری قرار می‌گیرد و میزان جمع‌شدگی خودزا کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش وزن سنجی گرمایی و آنالیز ریزساختار نشان دادند ژئولیت طبیعی فعالیت پوزولانی مناسبی دارد. با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری مشاهده گردید با جایگزینی درصد‌های مختلف میکروسیلیس با ژئولیت طبیعی مقاومت فشاری کاهش پیدا می‌کند. با جایگزینی ۵۰٪ میکروسیلیس با ژئولیت طبیعی نتایج آزمایش مقاومت فشاری اختلاف اندکی با نمونه‌های شاهد داشتند. همچنین به منظور کاهش هزینه ساخت بتن فوق توانمند ماسه شیشه‌ای جایگزین ماسه کوارتزی گردید. با جایگزینی ماسه کوارتزی با ماسه شیشه‌ای مقاومت فشاری کاهش یافت ولی نسبت هزینه به مقاومت نمونه‌ها کاهش داشته است. در تمامی طرح‌ها که از ژئولیت طبیعی و ماسه شیشه‌ای استفاده شد، هزینه ساخت نسبت به هزینه ساخت نمونه شاهد پایین تر بود.

۱- مقدمه

مقاومت و دوام این بتن‌ها، پوزولان‌ها و مواد پرکننده متعددی مورد استفاده قرار گرفته است [۴۲، ۲۹]. میکروسیلیس به دلیل خواص نظیر فعالیت پوزولانی مناسب و بهبود خواص رئولوژیکی و قابلیت پرکنندگی مناسب، از اصلی‌ترین اجزای بتن فوق توانمند می‌باشد [۲۵ و ۵]. عموماً میزان استفاده از میکروسیلیس در بتن‌های فوق توانمند ۱۰٪ تا ۳۰٪ وزنی سیمان می‌باشد [۴]. علاوه بر خواص و ویژگی‌های متعدد استفاده از میکروسیلیس در ترکیبات بتن فوق توانمند، این پوزولان دارای معایبی نظیر قیمت بالا و درخواست آب بالاتر در طرح اختلاط به دلیل سطح مخصوص بسیار بالای آن می‌باشد [۱۸]. همچنین افزایش مقدار میکروسیلیس منجر

بتن فوق توانمند (UHPC) بتنی با مشخصات مکانیکی و دوام فوق‌العاده مناسب می‌باشد. علی‌رغم هزینه بالای تولید این بتن‌ها، به دلیل کاهش مصرف آرماتور، کاهش ضخامت و وزن قطعات بتنی، افزایش عمر مفید سازه‌ای و کاهش هزینه‌های نگهداری، قابل رقابت با بتن‌های اجرایی می‌باشند [۱۱]. همچنین از بتن فوق توانمند می‌توان جهت مقاوم سازی بناها استفاده نمود [۴۸، ۴۷، ۳۷]. استفاده از سنگدانه‌های ریز و همچنین پوزولان‌های ریزدانه یکی از ملزومات ساخت بتن‌های فوق توانمند می‌باشد [۴]. به منظور ساخت و افزایش^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.delnavaz@qiau.ac.ir



را بهبود بخشد [۲۴]. زئولیت طبیعی دارای ساختار کریستالی لانه زنبوری شکل با حفرات و کانالهای ریز بوده که این عامل باعث افزایش سطح مخصوص آن گردیده است. همچنین زئولیت طبیعی قابلیت جذب و دفع آب تا ۳۰٪ وزن خشک خود را بدون تغییر در ساختار کریستالی دارا می‌باشد [۶]. تحقیقات متعددی در مورد استفاده از زئولیت طبیعی در بتن‌ها و مقایسه آن با سایر پوزولان‌ها صورت پذیرفته است. در بیشتر نتایج، زئولیت طبیعی فعالیت پوزولانی مناسبی از خود نشان دادند و استفاده از آن منجر به بهبود مشخصات مکانیکی و دوام بتن‌ها گردید [۸،۳۰،۴۴]. همچنین برخی تحقیقات از زئولیت طبیعی به عنوان ماده عمل آور داخلی جهت کاهش جمع‌شدگی خودزای بتن‌ها استفاده کردند. بیلک و همکارانش در سال ۲۰۰۲ از پودر زئولیت از پیش اشباع شده در ترکیبات بتن توانمند استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها بهبود عملکرد و کاهش جمع‌شدگی خودزا را نشان داد [۱۴]. زایچنکو در سال ۲۰۱۱ نشان داد که استفاده از سنگدانه زئولیت طبیعی در ترکیب بتن می‌تواند باعث کاهش جمع‌شدگی خودزا گردد [۳۶]. ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ به بررسی جمع‌شدگی خودزا و رطوبت نسبی داخلی بتن خودتراکم دارای الیاف پرداختند و به این نتیجه رسیدند که زئولیت طبیعی خصوصاً زئولیت کلسینه شده از پیش خیس شده می‌تواند در کاهش جمع‌شدگی خودزای این بتن‌ها موثر واقع گردد [۴۵].

عموما شیشه‌های ضایعاتی حجم زیادی از مواد دور ریز و زباله‌های جامد کشورها را تشکیل می‌دهند. شیشه ضایعاتی از منابع مختلفی نظیر شیشه‌های پنجره، بطری‌ها، لوازم الکتریکی نظیر لامپ، تلویزیون، مانیتور و غیره به دست می‌آید [۳۱،۱۲،۳]. در سال‌های اخیر به دلیل مسائل زیست محیطی و همچنین صرفه‌جویی اقتصادی، استفاده از شیشه ضایعاتی قابل بازیافت در ترکیبات بتن‌ها به عنوان ماده پوزولانی و پرکننده موثر بوده است [۵۱،۴۱،۲۸]. با توجه به این‌که هزینه تهیه ماسه شیشه‌ای بازیافتی کمتر از ماسه کوارتزی می‌باشد و همچنین تهیه آن مشکلات زیست محیطی کمتری ایجاد می‌کند، جایگزینی آنها می‌تواند به کاهش قیمت ساخت و تولید بتن فوق توانمند بیانجامد. تحقیقات در زمینه واکنش سیلیکاتی-قلیایی ناشی از استفاده شیشه در ترکیبات بتن نشان دادند که با محدود کردن حداکثر دانه‌های ماسه شیشه‌ای به کمتر از ۱ میلی‌متر، اثر انقباضی و مخرب این واکنش از بین می‌رود [۳۲].

به افزایش تعداد حفرات ریزساختار گشته که نهایتاً منجر به افزایش جمع‌شدگی خودزا و ایجاد ترک در بتن‌های فوق توانمند گردد [۷]. ترکیب‌های ناشی از جمع‌شدگی خودزا می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای روی دوام، خصوصاً بتن‌های با نسبت آب به سیمان پایین داشته باشد [۲۱]. نتایج تحقیقات نشان دادند که استفاده از مواد پوزولان و پرکننده نظیر خاکستر بادی، متاکئون، خاکستر پوسته برنج، سرپاره کوره آهنگدازی، همچنین سنگدانه‌های سبک جاذب آب و غیره در بهبود مشخصات مکانیکی و دوام و همچنین کاهش جمع‌شدگی خودزای بتن‌های فوق توانمند می‌تواند تاثیرگذار باشد [۳۵، ۴۳]. تروفی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ با جایگزینی میکروسیلیس با متاکئون، بتن فوق توانمند با مشخصات مکانیکی و دوام مناسب تولید کردند [۲۶]. سلیمان و نهدی در سال ۲۰۱۳ به بررسی استفاده از مواد شبه سیمانی نیمه هیدراته شده روی جمع‌شدگی خودزای به همراه استفاده از پلیمرهای جاذب آب پرداختند و به این نتیجه رسیدند که ترکیب این دو مصالح با هم در ترکیبات بتن فوق توانمند در کاهش جمع‌شدگی خودزای این بتن‌ها می‌تواند موثر واقع گردد [۳۸]. لی و همکارانش در سال ۲۰۱۹ نشان دادند استفاده از سنگدانه سبک پومیس اشباع شده در کاهش جمع‌شدگی خودزای بتن فوق توانمند موثر می‌باشد [۵۲]. ژی و همکارانش در سال ۲۰۱۸ به بررسی سه روش عمل آوری داخلی بتن‌های فوق توانمند شامل استفاده از یخ خرد شده، استفاده از ماده مضاف کاهنده جمع‌شدگی و کاهش مواد پوزولانی و پرکننده پرداختند و استفاده از این روش‌ها در کاهش جمع‌شدگی خودزای این بتن‌ها را موثر ارزیابی کردند [۴۹]. وان توان و همکارانش در سال ۲۰۱۱ نشان داد استفاده از خاکستر پوسته برنج در ترکیبات بتن فوق توانمند می‌تواند منجر به کاهش جمع‌شدگی خودزا و همچنین دستیابی به مقاومت فشاری بالای ۱۵۰ مگاپاسکال بتن‌های فوق توانمند گردد [۳۴]. یزیچی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ نشان دادند به منظور کاهش مقدار سیمان و میکروسیلیس بتن‌های فوق توانمند، استفاده از خاکستر بادی و همچنین سرپاره کوره آهنگدازی می‌تواند موثر باید [۲۷]. گرچه برخی تحقیقات نشان دادند که استفاده از سرپاره کوره آهنگدازی می‌تواند باعث افزایش جمع‌شدگی خودزای این بتن‌ها گردد [۲۲، ۵۰].

در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی نشان دادند که زئولیت طبیعی دارای فعالیت پوزولانی بوده و می‌تواند خواص مکانیکی و دوام بتن‌ها

در این تحقیق با جایگزینی ماسه کوارتزی با ماسه شیشه‌ای بازیافتی و همچنین میکروسیلیس با زئولیت طبیعی، هدف بر تولید بتن فوق توانمند با جمع‌شدگی خودزای پایین، هزینه ساخت کمتر و همچنین مشخصات مکانیکی مناسب می‌باشد. تاثیر این جایگزینی با توجه به اندازه‌گیری چگالی تراکم، آنالیز وزن سنجی گرمایی و ریز ساختار، مقاومت فشاری، آنالیز هزینه نسبی، جمع‌شدگی خودزا و رطوبت نسبی داخلی صورت پذیرفت.

۲- مشخصات مصالح

۲-۱- سیمان

در این مطالعه ترکیب شیمیایی مصالح مصرفی توسط و سطح مخصوص آنها نیز با توجه به آزمایش‌های بلین^۱ و برونو-امت-تالر^۲ به دست آمد. سیمان مصرفی در این مطالعه از نوع سیمان تیپ دو مطابق با استاندارد ASTM C150 می‌باشد. سطح مخصوص سیمان با توجه به آزمایش بلین برابر $3/19 \text{ g/cm}^3$ و نرمی آن g/cm^2 ۳۵۰۰ تعیین گردید. آنالیز شیمیایی سیمان و سایر مصالح توسط آنالیز آنالیز اشعه ایکس فلورسنت^۳ (XRF) مشخص گردید که در جدول (۱) آورده شده‌است. همچنین با استفاده از دستگاه لیزر منحنی دانه‌بندی ذرات مصالح به همراه متوسط و حداکثر اندازه قطر دانه‌های آنها به دست آمد که نتایج آن به ترتیب در شکل ۲ و جدول ۱ آورده شده‌است.

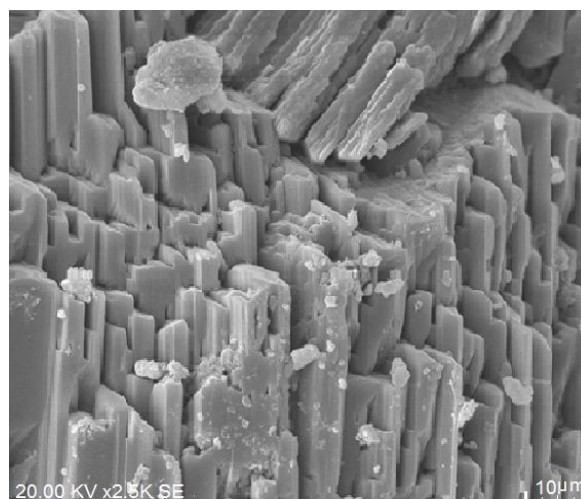
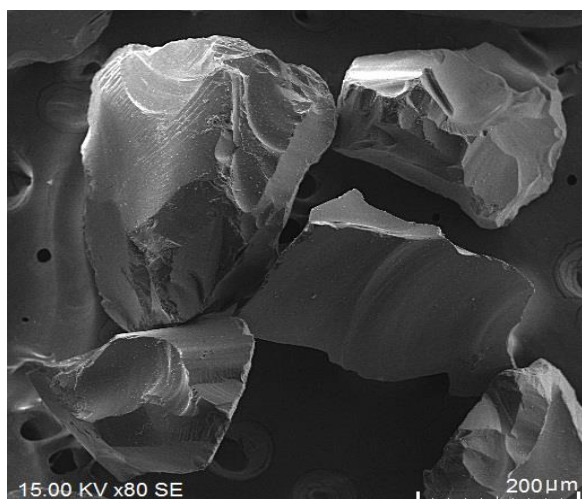
۲-۲- میکروسیلیس

میکروسیلیس مصرفی از شرکت فروسیلیس ازنا از نوع کم کربن با درجه خلوص بالا تهیه گردید. سطح مخصوص میکروسیلیس مصرفی با توجه به روش BET 196000 g/cm^2 به دست آمد.

۲-۳- زئولیت طبیعی

زئولیت مورد استفاده در این مطالعه از شرکت افرازند سمنان با درجه خلوص بالا تهیه گردید. در اشکال ۲ و ۱ به ترتیب تصویر SEM و آنالیز XRD مربوط به زئولیت طبیعی آورده شده‌است. با توجه به تصاویر SEM و پراش‌های نشان داده شده در آنالیز XRD مشخص گردید زئولیت طبیعی دارای ساختار کریستالی می‌باشد. به منظور تشخیص فاز اصلی تشکیل دهنده زئولیت طبیعی و همچنین بررسی صحت نتایج آزمایشگاهی مربوط به آزمایش XRD، با توجه به اینکه سیستم ساختار کریستال‌های زئولیت طبیعی به صورت مونوکلینیک می‌باشد با استفاده از کارت‌های استاندارد JCPDS^۴ که مشخصات اتمها و فواصل صفحات آنها برای چندین هزار کریستال موجود می‌باشد و با داشتن فواصل صفحات اتمها برای سه پیک اول منحنی XRD، مشاهده می‌گردد که منحنی XRD مربوط به کلینوپتیلولیت^۵ می‌باشد.

آنالیز دانه‌بندی دانه‌های زئولیت در شکل ۳ نشان داده شده‌است

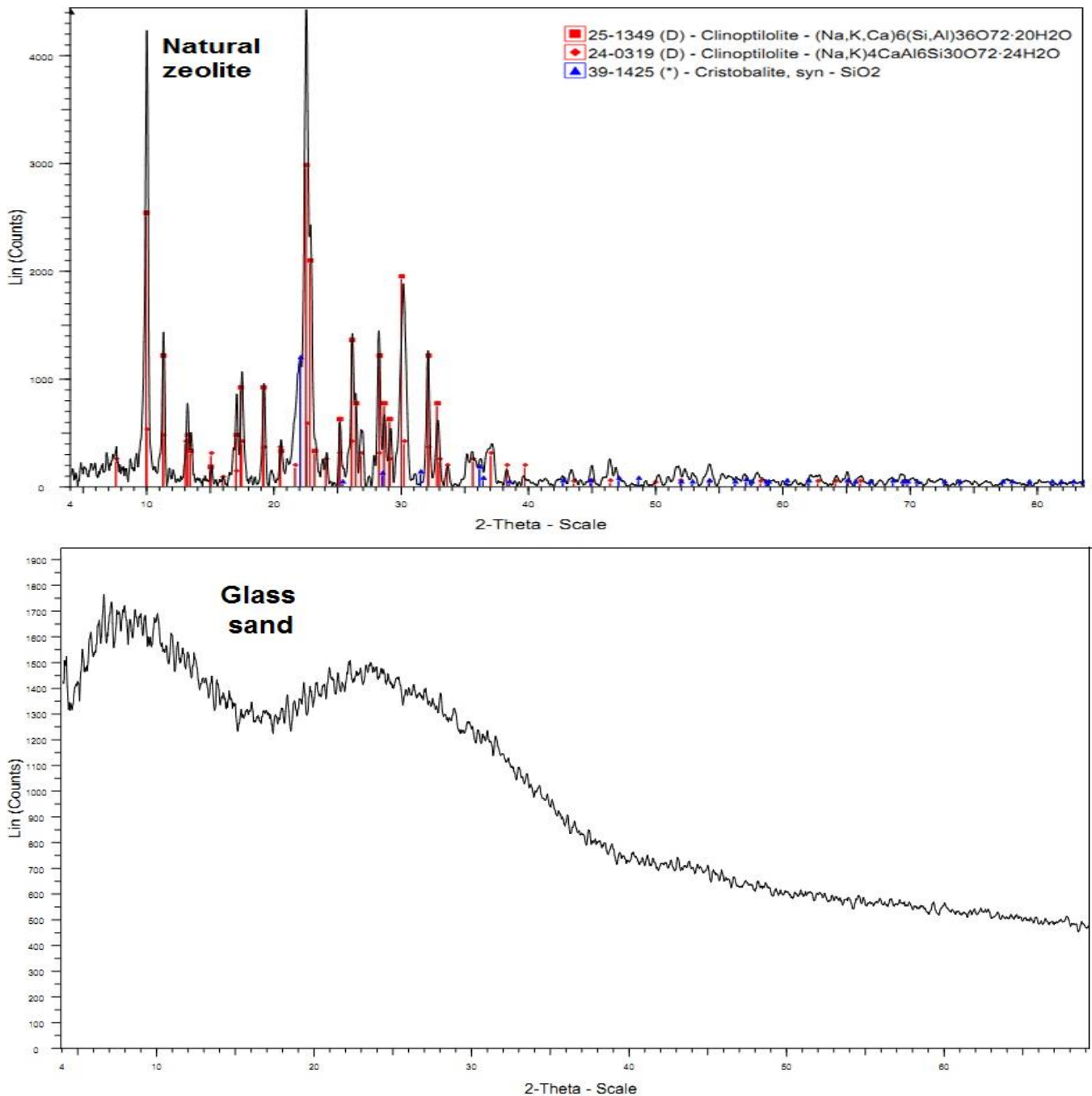


شکل ۱. تصاویر SEM از ماسه شیشه‌ای (سمت چپ) و زئولیت طبیعی (سمت راست)

Fig. 1. SEM micrograph of glass sand (left) and natural zeolite (right)

4 Joint Committee on Powder Diffraction Standards
5 Clinoptilolite

1 Blain
2 BET analysis
3 X ray diffraction



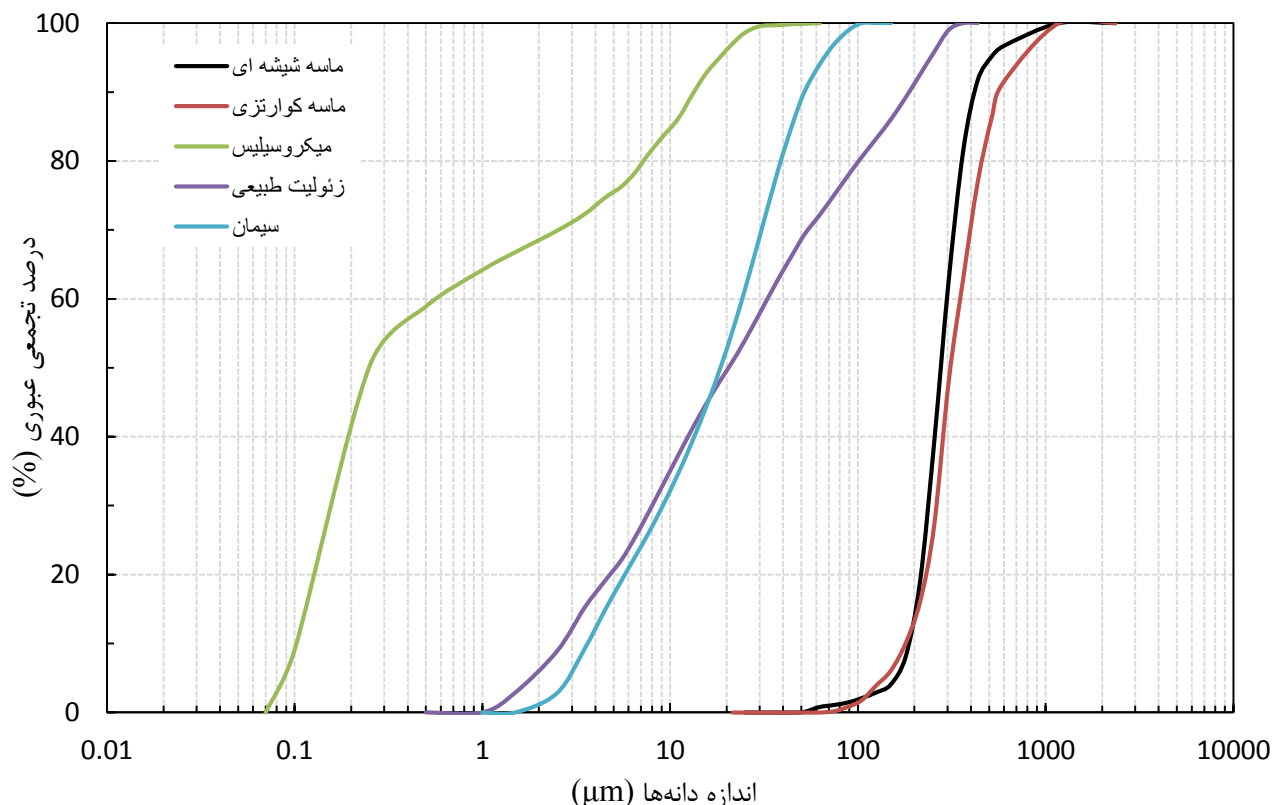
شکل ۲. تصاویر آنالیز XRD برای زئولیت طبیعی (بالا) و ماسه شیشه‌ای (پایین)
Fig. 2. XRD analysis of glass sand (left) and natural zeolite (right)

صورت پذیرفته که نتایج نشان دهنده انطباق زئولیت مصرفی با معیارهای این استاندارد می‌باشد. همچنین سطح مخصوص دانه‌های زئولیت توسط روش بلین 5700 g/cm^2 به دست آمد.

۴-۲- ماسه کوارتزی

ماسه استفاده شده در این پروژه ماسه سیلیسی با درصد خلوص ۸۵ و از معادن همدان تهیه گردید و پس از انجام آزمایش دانه بندی،

و از روی آن متوسط اندازه قطر دانه‌های آن برابر با ۲۰٫۵ میکرون استخراج گردید و آنالیز شیمیایی آن در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به استاندارد ASTM C618 مشخصات فیزیکی و شیمیایی زئولیت طبیعی باید در محدوده ارائه شده توسط این استاندارد قرار بگیرد تا مشخصات پوزولانی این مصالح تامین گردد. در جدول ۲ مقایسه بین مشخصات فیزیکی و شیمیایی زئولیت مورد استفاده در این تحقیق با مشخصات ارائه شده توسط استاندارد ASTM C618



شکل ۳. منحنی دانه بندی مصالح

Fig. 3. PSD of granular materials

نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ که مربوط به آنالیز XRD ماسه شیشه‌ای می‌باشد مشخص می‌گردد با توجه به عدم پراش در این نمودار، این مصالح آمورف می‌باشد.

۲-۶- فوق روان کننده و آب مصرفی

فوق روان کننده مورد استفاده در این تحقیق بر پایه پلی کربوکسیلات اصلاح شده می‌باشد. وزن مخصوص آن $1,09 \text{ g/cm}^3$ بوده و محتوای مواد جامد آن 40% می‌باشد. همچنین آب مصرفی از نوع آب آشامیدنی می‌باشد.

۳- بهینه سازی مخلوط‌ها و طرح اختلاط

نسبت اختلاط بتن فوق توانمند بر پایه چگالی تراکم می‌باشد. به منظور بهینه سازی چگالی تراکم بتن، مدل چگالی تراکم قابل فشرده سازی (CPM) که توسط دلارار [۹] در سال ۱۹۹۹ ارائه گردیده و روش مناسبی جهت ترکیب بهینه سیستم‌های چند جزئی می‌باشد، استفاده گردید. با توجه به روابط (۱)، کلیه روابط چگالی تراکم توسط نرم افزار MATLAB نوشته شدند. برای تمام مصالح ثابت تراکم

این ماسه در محدوده مجاز تعیین شده توسط استاندارد ASTM C778 قرار گرفت. با توجه به استفاده از روش لیزر منحنی دانه بندی ماسه کوارتزی ترسیم گردید که در شکل ۳ آمده است. اندازه متوسط دانه‌های ماسه کوارتزی 295 میکرومتر و حداکثر اندازه قطر دانه‌های آن نیز 635 میکرون می‌باشد. وزن مخصوص ماسه کوارتزی $2/62 \text{ g/cm}^3$ به دست آمد. با توجه به روش BET، سطح مخصوص ماسه کوارتزی $2/62 \text{ g/cm}^2$ می‌باشد.

۲-۵- ماسه شیشه‌ای

ماسه شیشه‌ای مورد استفاده در این تحقیق از شیشه‌های ضایعاتی بازیافتی واقع در اراک تهیه گردید. دانه بندی و حداکثر اندازه دانه‌های ماسه شیشه‌ای به گونه ای انتخاب گردید که مطابقت با اندازه دانه‌های ماسه کوارتزی داشته باشد. رنگ شیشه بازیافتی سفید بوده و با توجه به آزمایش دانه بندی لیزری اندازه متوسط دانه‌ها 276 میکرون و حداکثر اندازه آن 605 میکرون به دست آمد. با توجه به روش BET، سطح مخصوص ماسه شیشه‌ای $2/54 \text{ g/cm}^2$ به دست آمد. در شکل ۱ عکس SEM از شیشه کوارتزی با بزرگنمایی 200 میکرون

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح

Table 1. Physical and chemical properties of materials

مصالح	سیمان	میکروسیلیس	زئولیت طبیعی	ماسه کوارتزی	ماسه شیشه‌ای
Silica (SiO ₂)	21.52	95.4	68.22	99.75	71.62
Iron oxide (Fe ₂ O ₃)	2.75	1.13	1.29	0.06	0.04
Alumina (Al ₂ O ₃)	3.69	0.65	11.81	0.13	0.66
Calcium oxide (CaO)	61.51	1.00	2.29	0.11	8.80
Magnesium oxide (MgO)	4.7	0.62	1.37	0.01	3.83
Sodium oxide (Na ₂ O)	0.15	-	1.20	-	5.91
Potassium oxide (K ₂ O)	0.69	0.03	1.15	0.03	0.08
Sulfur trioxide (SO ₃)	2.39	1.14	0.10	-	0.33
Loss on ignition (LOI)	1.44	2.9	9.76	0.25	0.30
C ₃ S	58.08	-	-	-	-
C ₂ S	17.89	-	-	-	-
C ₃ A	5.13	-	-	-	-
C ₄ AF	8.37	-	-	-	-
اندازه متوسط دانه (d ₅₀) میکرون	18.52	0.25	20.50	295	276
ماکزیمم اندازه دانه (d _{max}) میکرون	-	-	-	635	605
وزن مخصوص (g/cm ³)	3.19	2.21	2.22	2.62	2.54
سطح مخصوص به روش BET (cm ² /g)	-	196000	-	-	-
سطح مخصوص به روش بلین (cm ² /g)	3500	-	5700	-	-
قیمت نسبی (نرمالیزه شده به قیمت سیمان)	1	3.33	1.17	1.54	0.86

ترکیب شیمیایی (%)

فازهای اصلی (%)

مشخصات فیزیکی

صورت حجمی در نظر گرفته شده است. میکروسیلیس با نسبت‌های مختلف ۰، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ با زئولیت طبیعی جایگزین گردیده (NZ100, NZ75, NZ50, NZ25, NZ0) و همچنین ماسه کوارتزی به طور کامل با ماسه شیشه‌ای جایگزین شده است (Q, G). جهت ساخت نمونه‌ها از میکسر سه پره با قابلیت اعمال نیروی برشی بالا استفاده گردید. مهمترین ویژگی‌های این میکسر امکان ساخت مخلوط‌های کم آب با روانی بسیار کم و همچنین امکان

(K) مطابق با پیشنهاد ژنگ و همکارش ۱۲/۵ در نظر گرفته شد [۱۵].

نسبت‌های اختلاط طرح‌ها با توجه به چگالی تراکم برای هر طرح در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به جایگزینی کامل ماسه شیشه‌ای با ماسه کوارتزی و درصدهای مختلف زئولیت طبیعی با میکروسیلیس، ده طرح اختلاط در این جدول آورده شده است. به منظور ثابت بودن نسبت خمیره موادسیمانی به سنگدانه، نسبت‌های جایگزینی به

جدول ۲. ملزومات فیزیکی و شیمیایی استاندارد ASTM برای پوزولان رده N مخصوص ژئولیت طبیعی و میکروسیلیس

Table 2. Chemical and physical requirements of natural zeolite according to Class N, ASTM C618, and silica fume according to ASTM C1240

میکروسیلیس	ASTM C1240	ژئولیت طبیعی	ASTM C618	ملزومات
97.18	Min, 85.0	81.32	Min, 70.0	ملزومات شیمیایی
-	-	0.10	Max, 4.0	SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ (%)
0.08	Max, 3.0	8.78	Max, 3.0	تری اکسید سولفید (SO ₃) (%)
2.9	Max, 6.0	9.76	Max, 10.0	میزان رطوبت (%)
-	-	80	Min, 75	درجه احتراق (%)
-	-	105	Min, 75	شاخص فعالیت مقاومت ۷ روزه (%)
130	Min, 105	-	-	شاخص فعالیت مقاومت ۲۸ روزه (%)
3.95	Max, 10.0	33	Max, 34	شاخص تسریع در فعالیت مقاومت پوزولانی ۷ روزه در ترکیب با سیمان پرتلند
0.3	Max, 5.0	-	-	درصد دانه‌های درشت تر از الک نمرة ۴۵ میکرون شاخص فعالیت مقاومت ۷ روزه (%)
-	-	108	Max, 115	بیشترین تغییرات دانه‌های درشت تر از الک نمرة ۴۵ میکرون شاخص فعالیت مقاومت ۷ روزه (%)
-	-	0.07	Max, 0.8	میزان آب مورد نیاز (%)
196000	Min, 150000	-	-	انبساط ناشی از اتوکلاو (%)
				سطح مخصوص (cm ² /g)

اسلامپ از میز سیلان مطابق با استاندارد ASTM C ۱۴۳۷ استفاده گردید. با توجه به نتایج این آزمایش اسلامپ نمونه‌ها بین ۱۲۰ تا ۱۹۰ میلی‌متر به دست آمد.

۴- آزمون‌ها و روش‌ها

۴-۱- آنالیز وزن سنجی گرمایی^۱

اندازه‌گیری میزان هیدروکسید کلسیم (CH) ناشی از واکنش پوزولانی، یکی از روشهای موثر جهت تخمین رفتار پوزولانی میکروسیلیس و ژئولیت می‌باشد. مقدار هیدروکسید کلسیم موجود

کنترل سرعت در نسبت‌های مختلف مواد و دماهای مختلف محیط با توجه به حرکت سیاره ای آن و محصور ساختن مخلوط خشک با آب و فوق روان کننده در فضای بین پره‌ها و تیغه مرکزی که فشار لازم جهت جذب آب در مخلوط خشک را فراهم می‌آورد، می‌باشد. جهت اختلاط مصالح ابتدا تمامی مواد پودری به مدت ۴ دقیقه با سرعت پایین درون دستگاه مخلوط ترکیب گردید. سپس فوق روان کننده و آب به آرامی به مخلوط اضافه می‌گردند تا مخلوط به حالت نیمه جامد در آمد. در این لحظه برای مدت سه دقیقه ترکیب داخل مخلوط کن با سرعت زیاد به گردش در آمده و پس از آن سرعت مخلوط کن کم شده و اختلاط یک دقیقه دیگر نیز ادامه می‌یابد. جهت انجام آزمایش

1 Thermogravimetry analysis

جدول ۳. مشخصات نسبت اختلاط نمونه‌ها

Table 3. Concrete mix proportions (kg/m³)

NZ100-G	NZ75-G	NZ50-G	NZ25-G	NZ0-G	NZ100-Q	NZ75-Q	NZ50-Q	NZ25-Q	NZ0-Q (شاهد)	ترکیب
896	896	896	896	896	896	896	896	896	896	سیمان
-	-	-	-	-	1019	1019	1019	1019	1019	ماسه
987.9	987.9	987.9	987.9	987.9	-	-	-	-	-	کوارتزی ماسه
-	67	141	210.8	268	-	67	134	201	268	شیشه‌ای میکروسیلیس
269.2	201.9	134.6	67.3	-	269.2	201.9	134.6	67.3	-	زئولیت طبیعی
186.2	186.2	186.2	186.2	186.2	186.2	186.2	186.2	186.2	186.2	آب
20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1	فوق روان کننده
0.7325	0.7427	0.7532	0.7640	0.7750	0.7389	0.7489	0.7550	0.7698	0.7807	چگالی تراکم
26.2	23.1	18.9	15.1	13.7	25.9	22.8	19.1	15.6	13.2	گیرش ثانویه (ساعت)

۳-۴- جمع‌شدگی خودزا

مطابق با استاندارد JIS A ۱۱۲۹-۱ قالب‌های اندازه‌گیری جمع‌شدگی خودزا از نوع فایبرگلاس به ابعاد ۱۰×۱۰×۴۰ سانتیمتر که سوراخی در دو سر آن تعبیه شده بود، می‌باشد. گیج ساعتی با دقت ۱ میکرون در دو سر قالب و در محل سوراخها که بین‌ها درون آن‌ها قرار گرفتند نصب گردید. به منظور ایجاد تغییر شکل آزاد نمونه داخل قالب، ورق تفلون به ضخامت ۱ میلی‌متر روی سطوح داخلی قالب کشیده شده و سطح آن روغن کاری گردید. سپس نمونه‌ها درون قالب‌ها ریخته شده و به منظور عدم تبادل رطوبتی و حرارتی روی آنها با ورق پلی استر پوشانده شد. اندازه‌گیری جمع‌شدگی خودزای نمونه‌ها توسط گیج‌ها در انتهای زمان گیرش نهایی هر طرح در نظر گرفته می‌شود. به منظور تعیین زمان گیرش نهایی هر طرح از روش مقاومت در برابر نفوذ سوزن ارائه شده توسط ASTM C403 استفاده گردید که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده‌است.

۴-۴- رطوبت نسبی داخلی

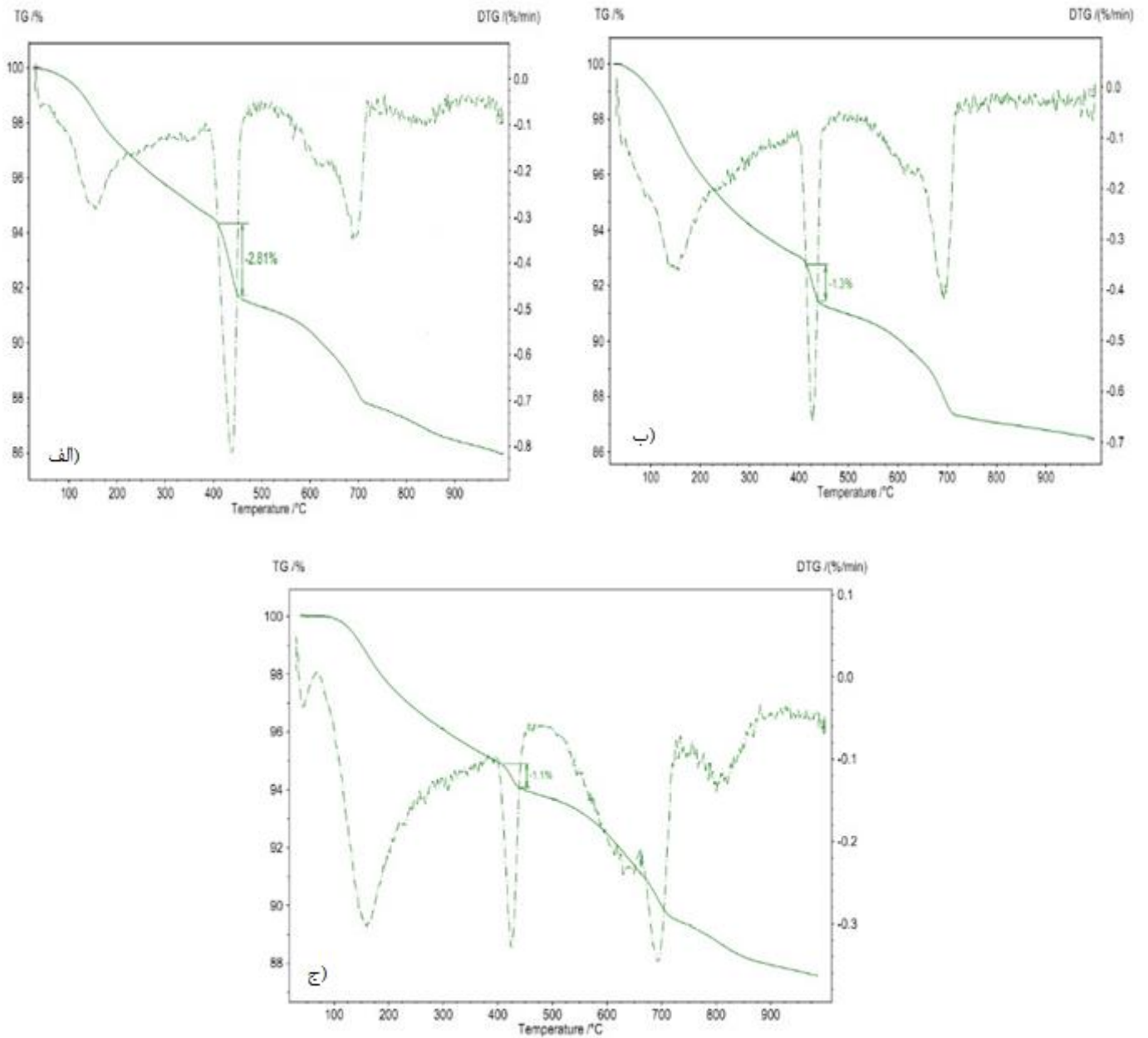
رطوبت نسبی داخلی نمونه‌ها توسط با قرار دادن سنسور رطوبتی ضد آب درون نمونه و مانیتور تغییرات رطوبتی نمونه‌ها توسط دستگاه بلوتوثی بی سیم صورت پذیرفت. به منظور کنترل اینکه

در نمونه‌ها توسط روش آنالیز وزن سنجی حرارتی که یکی از روشهای مرسوم و مورد تایید جهت تعیین فعالیت پوزولانی می‌باشد، تعیین می‌گردد.

مطابق با استاندارد ASTM E ۱۱۳۱-۰۸ آنالیز وزن سنجی گرمایی با نرخ ۱۰ °C/min و در محدوده ۳۵ °C تا ۱۰۰۰ °C تحت گاز نیتروژن صورت می‌پذیرد. مطالعه روی خمیره سیمان (CP)، خمیره سیمان-میکروسیلیس (SF-CP)، و خمیره سیمان-زئولیت (NZ-CP)، با نسبت آب به مواد سیمانی ۰٫۴ و نسبت میکروسیلیس و زئولیت به سیمان ۳۰٪ صورت پذیرفت. تمامی نمونه‌ها در دمای ۲۰ تا سن ۲۸ روز که مورد آزمایش قرار گرفتند عمل آوری شدند. وزن نمونه‌ها بین ۱۷-۲۳ mg متغیر می‌باشد.

۲-۴- مقاومت فشاری

مطابق با استاندارد ASTM C ۱۰۹ مقاومت نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵ سانتیمتر، در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه تعیین گردید. تمامی نمونه‌ها تا زمان آزمایش درون آب آهک با دمای ۲۳ °C قرار گرفتند.



شکل ۴. منحنی‌های TG و DTG برای نمونه‌های الف) CP، ب) NZ-CP و ج) SF-CP
 Fig. 4. TG and DTG curves of CP (a), NZ-CP (b), and SF-CP (c) pastes

۵- نتیجه گیری

۵-۱- آنالیز وزن سنجی گرمایی

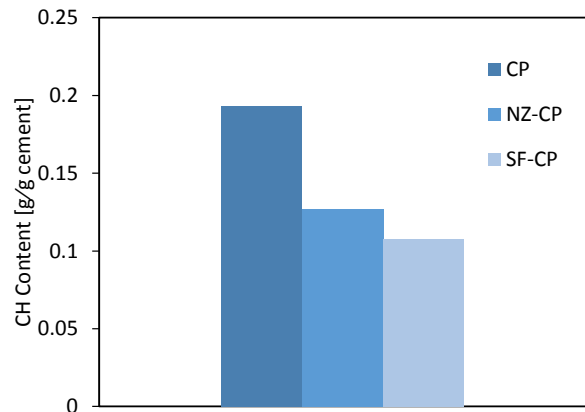
منحنی‌های TG و DTG برای نمونه‌های CP، NZ-CP و SF-CP در شکل ۴ نشان داده شده‌است. با توجه به این اشکال، در محدوده دمایی 20°C تا 120°C آب حفره‌ای نمونه‌ها تبخیر می‌گردد. در محدوده دمایی 120°C - 415°C هیدراته شدن آلومینات، سیلیکات کلسیم و آلومینوسیلیکات‌ها مشاهده می‌گردد. پیک منحنی مربوط به DTG در محدوده دمایی 420°C -

تغییرات رطوبت داخلی تنها توسط پدیده خود خشک شدگی داخلی رخ می‌دهد، نمونه‌ها توسط فیلم‌های پلی پروپیلین چند لایه پوشانده شدند. همچنین به منظور تامین شرایط رطوبتی و دمایی یکسان، نمونه‌ها درون محفظه کنترل دما با دمای 20°C و رطوبت نسبی 50% قرار گرفتند.

نتایج این شکل نشان می‌دهند که نمونه‌های NZ-CP و SF-CP به طور قابل ملاحظه ای هیدروکسید کلسیم کمتری نسبت به نمونه CP دارند. در واقع ژئولیت علیرغم ساختار کریستالی خود، به دلیل سطح مخصوص بالای خود و همچنین قابلیت تبادل و پایداری یونی، واکنش پوزولانی از خود نشان داده است [۱۶]. در واقع در صورت وجود هیدروکسید کلسیم و محلول PH، یونهای هیدروکسید (-OH)، به ساختار ژئولیت حمله کرده و شبکه‌های آلومینوسیلیکات شروع به تجزیه شدن می‌کنند [۱۷]. مواد جدید به درون محلول نفوذ کرده و با یونهای Ca^{2+} واکنش نشان داده و تشکیل ژل C-S-H و آلومینات می‌دهند [۲۳، ۴۰]. همچنین نتایج نشان می‌دهند که واکنش پوزولانی ژئولیت طبیعی کمتر از میکروسیلیس می‌باشد که این نتایج با تحقیقات [۳۳، ۸] مطابقت دارد.

۲-۵- ریز ساختار

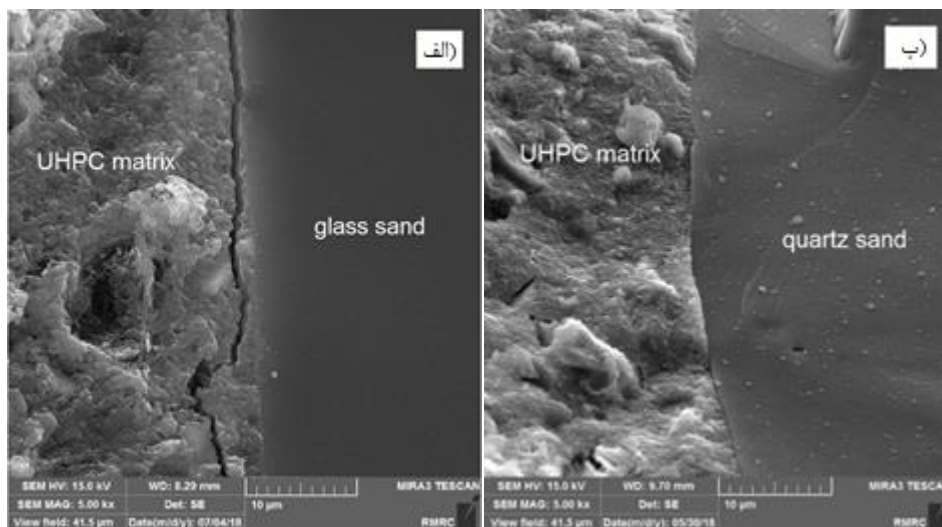
به منظور بررسی ریزساختار بتن فوق توانمند، آزمایش عکسبرداری SEM و آنالیز EDS مورد استفاده قرار گرفت. عکس‌های اشکال ۶ (الف و ب) ریزساختار نمونه‌های G-NZ0 و Q-NZ0 را نشان می‌دهند. با توجه به این اشکال مشاهده می‌گردد که نمونه‌های حاوی ماسه شیشه‌ای پیوند ضعیفتری در ناحیه انتقال نسبت به نمونه‌های حاوی ماسه کوارتزی دارند. پیوند ضعیف بین شیشه و ماتریس بتن فوق توانمند می‌تواند به دلیل جذب آب کمتر نمونه‌های حاوی ماسه شیشه‌ای نسبت به نمونه‌های حاوی ماسه کوارتزی باشد. اشکال ۶ (ج و د) ریز ساختار به همراه آنالیز EDS برای نمونه‌های Q-NZ0 و

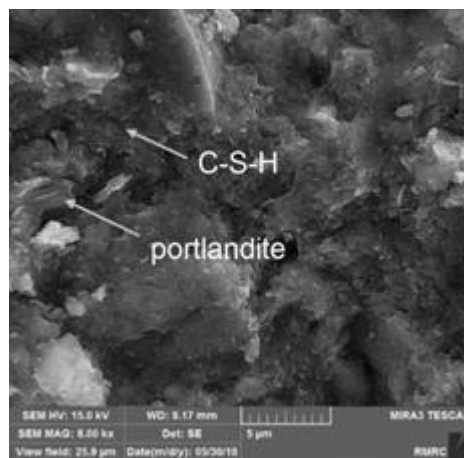
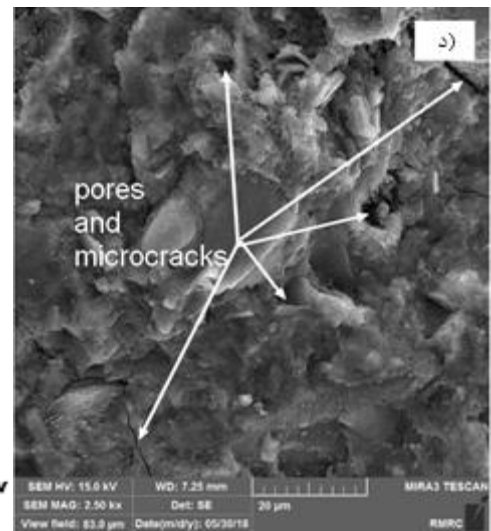
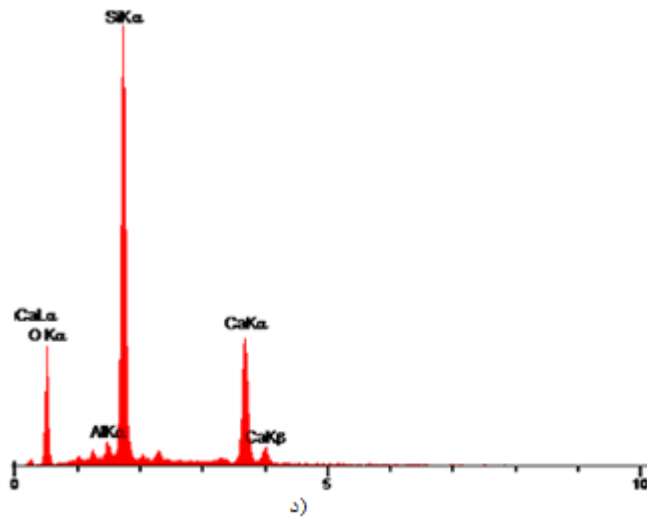
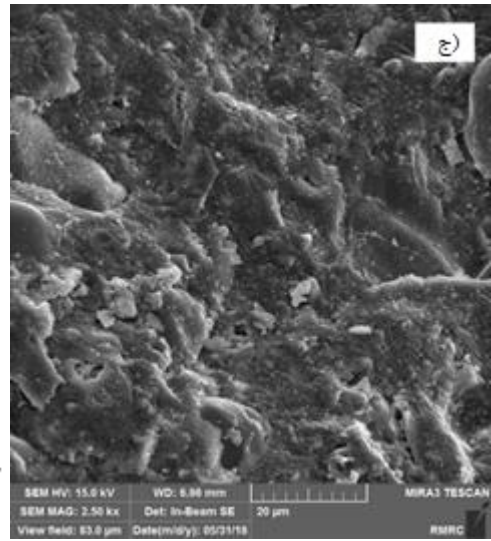
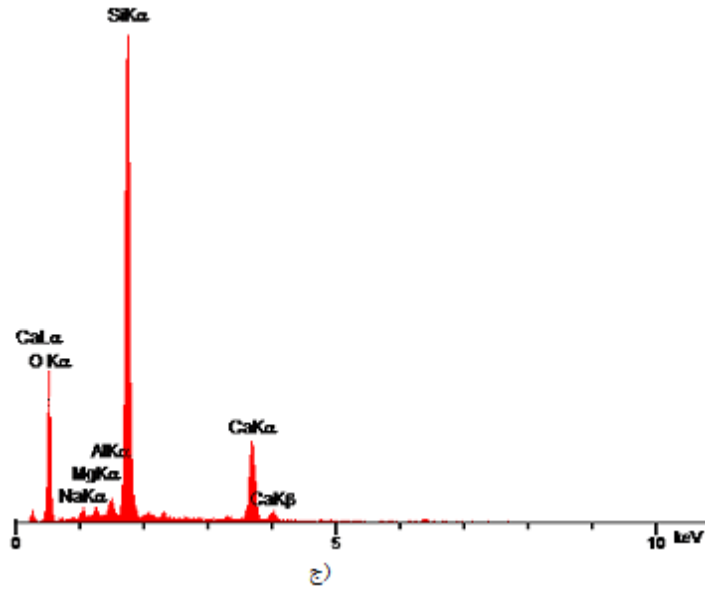


شکل ۵. مقدار هیدروکسید کلسیم برای نمونه‌های CP و NZ-CP و SF-CP

Fig. 5. CH content in CP, NZ-CP, SF-CP pastes

۴۵۰ تجزیه هیدروکسید کلسیم را نشان می‌دهد و در نهایت آخرین قسمت پیک منحنی در محدوده دمایی بین $660^{\circ}C - 710^{\circ}C$ تجزیه کربنات کلسیم را نشان می‌دهد [۲]. با توجه به این اشکال مشاهده می‌گردد که با افزایش مقدار ژئولیت و میکروسیلیس، پیک منحنی DTG مربوط به تجزیه هیدروکسید کلسیم کاهش می‌یابد. در واقع این مطلب بیانگر مصرف هیدروکسید کلسیم توسط ژئولیت و میکروسیلیس می‌باشد. کاهش وزن مربوط به تجزیه هیدروکسید کلسیم برای نمونه‌های CP، NZ-CP و SF-CP به ترتیب ۱،۱٪، ۱،۳٪، ۲،۸۱٪ در پایان ۲۸ روز می‌باشد. این کاهش در مقدار هیدروکسید کلسیم به واکنش پوزولانی میکروسیلیس و ژئولیت مربوط می‌گردد. در شکل ۵ مقدار هیدروکسید کلسیم در پایان سن ۲۸ روز برای نمونه‌ها نشان داده شده است.





شکل ۶. ریز ساختار نمونه‌های NZ0-G و NZ0-Q و NZ100-Q (به ترتیب الف و ب و ه) و ریزساختار و طیف EDS برای نمونه‌های NZ0-Q و NZ100-Q (به ترتیب ج و د)

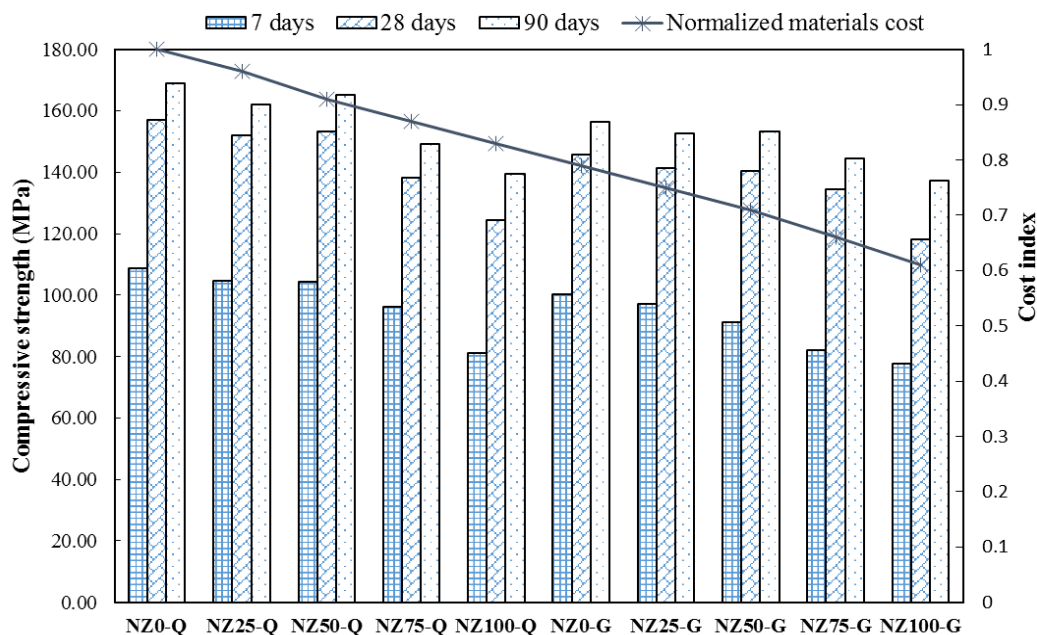
Fig. 6. Microstructure of NZ0-G, NZ0-Q, and NZ100-Q mixtures (a, b, and e respectively), and microstructure and EDS spectra of NZ0-Q and NZ100-Q mixtures (c and d, respectively)

دارای افت مقاومت ۹٪ در پایان سن ۹۰ روزه بود. یکی از دلایل افت مقاومت می‌تواند چگالی تراکم کمتر نمونه‌های حاوی ماسه شیشه‌ای نسبت به نمونه‌های دارای ماسه کوارتزی باشد. به علاوه، مقاومت کمتر این نمونه‌ها می‌تواند به دلیل شکل تیز گوشه و پولکی شکل دانه‌های شیشه و ضعف آنها در این قسمت باشد. دلیل دیگر کاهش مقاومت این نمونه‌ها می‌تواند مربوط به ضعف در ناحیه انتقال خمیره و دانه‌های شیشه به دلیل پیوند ضعیفتر آنان باشد که این موضوع در بخش ریز ساختار مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪ میکروسیلیس، (Q-NZ0 و G-NZ0) بالاترین مقاومت فشاری را از خود نشان دادند. بهترین نتایج مقاومت فشاری برای نمونه‌های حاوی زئولیت مربوط به نمونه دارای ۵۰٪ زئولیت و ۵۰٪ میکروسیلیس می‌باشد که مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه آن به ترتیب برابر با ۱۵۲،۳ و ۱۶۴،۴ مگاپاسکال می‌باشد که تنها اندکی کمتر از مقاومت نمونه شاهد با مقاومت ۲۸ روزه و ۹۰ روزه ۱۵۷،۱ و ۱۶۹،۱ می‌باشد. با افزایش میزان زئولیت طبیعی، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این مساله می‌تواند به دلیل واکنش پوزولانی بیشتر میکروسیلیس نسبت به زئولیت طبیعی و تولید بیشتر ژل C-S-H باشد که در قسمت وزن سنجی گرمایی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی آنالیز قیمت نمونه‌ها، هزینه تهیه مصالح با توجه به قیمت آنها در سال ۱۳۹۵ که مربوط به زمان انجام تحقیق می‌باشد،

Q-NZ100 را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که نمونه Q-NZ0 دارای ماتریس قویتر و دارای ترک و حفرات کمتری نسبت به نمونه حاوی ۱۰۰ درصد زئولیت (Q-NZ100) می‌باشد. این نتایج منطبق با نتایج آزمایش مقاومت فشاری می‌باشد. نتایج آزمایش EDS نشان می‌دهد که عناصر اصلی تشکیل دهنده ماتریس سیلیس، اکسیژن و کلسیم می‌باشد که عناصر اصلی تشکیل دهنده ژل C-S-H می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج آنالیز EDS نسبت مولار Ca/Si برای نمونه‌های حاوی میکروسیلیس و زئولیت به ترتیب برابر با ۰،۹۷ و ۱،۲۲ می‌باشد که بیانگر تولید C-S-H بیشتر نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نسبت به نمونه‌های حاوی زئولیت می‌باشد [۴۶]. در شکل ۶ (ه) هیدروکسید کلسیم و ژل C-S-H برای نمونه زئولیت و واکنش آن با هیدروکسید کلسیم و تولید C-S-H مشخص می‌باشد.

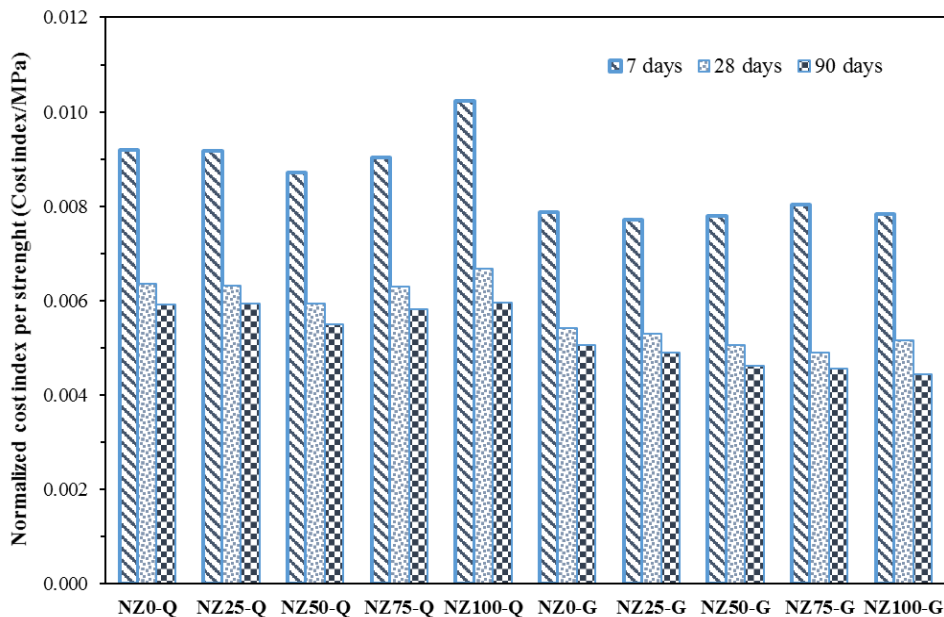
۳-۵- مقاومت فشاری و آنالیز قیمت

در شکل ۷ مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها نشان داده شده‌است. با توجه به نمودار این شکل، نمونه‌های حاوی ماسه شیشه‌ای مقاومت کمتری نسبت به نمونه‌های حاوی ماسه کوارتزی داشتند. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪ ماسه شیشه‌ای نسبت به نمونه شاهد



شکل ۷. نتایج آزمایش مقاومت فشاری و آنالیز شاخص هزینه

Fig. 7. Cost index and compressive strength of UHPC mixtures



شکل ۸. نسبت شاخص هزینه بر مقاومت نمونه‌ها

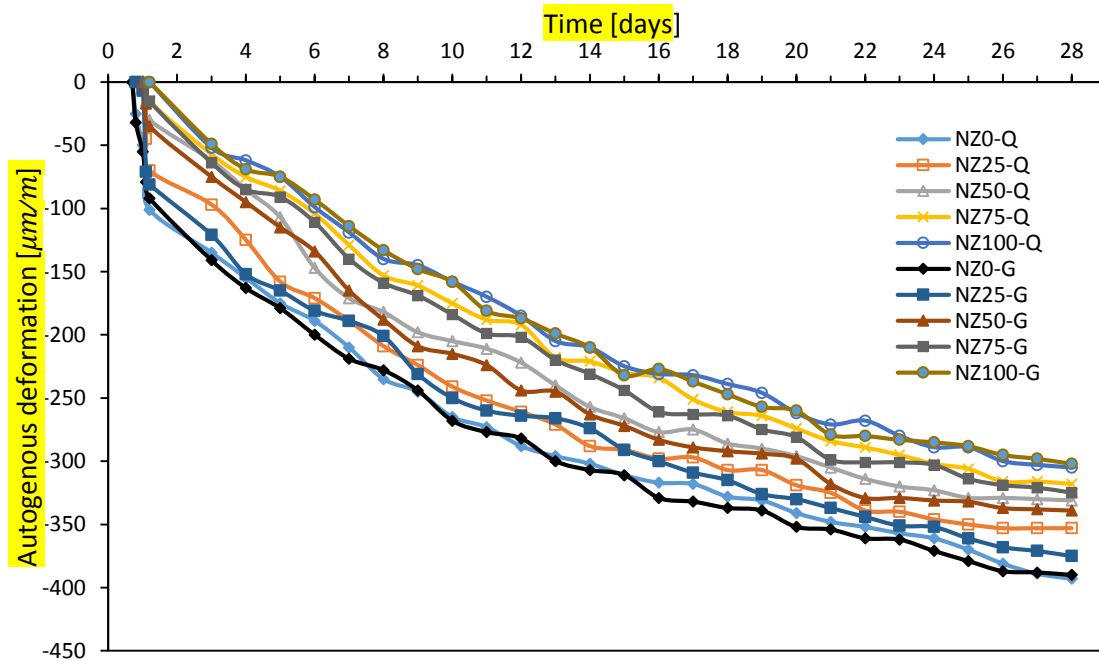
Fig. 8. Normalized Cost index per compressive strength of UHPC mixtures

داخل حفرات جامد بالا می‌آیند تا حفرات آب-بخار منیسی^۱ تشکیل گردد. این حفرات باعث افت رطوبت نسبی داخلی می‌گردند که پدیده خود خشک شونده نامیده می‌شود. کاهش رطوبت نسبی داخلی باعث افزایش انحنای حفرات منیسی شده و در نهایت منجر به تغییر شکل در خمیره سیمان می‌گردد که پدیده جمع‌شدگی خودزا نامیده می‌شود [۱]. میزان جمع‌شدگی خودزا برای تمامی نمونه‌ها در شکل ۹ آورده شده‌است. اندازه‌گیری جمع‌شدگی خودزای نمونه‌ها در پایان گیرش ثانویه نمونه‌ها شروع گردید. با توجه به جدول (۱) افزایش مدت زمان گیرش ثانویه نمونه‌ها می‌تواند به نوع و تاثیر دیرگیر کنندگی فوق روان کننده مربوط باشد [۱، ۲۰]. با توجه به نتایج، نمونه‌های Q-NZ0 و G-NZ0 که دارای ۱۰۰٪ میکروسیلیس می‌باشند مقدار قابل ملاحظه‌ای جمع‌شدگی خودزا از خود نشان دادند. با توجه به آنالیز وزن سنجی گرمایی جمع‌شدگی بیشتر نمونه‌های حاوی میکروسیلیس می‌تواند به خاطر فعالیت پوزولانی بیشتر میکروسیلیس نسبت به زئولیت طبیعی باشد. در واقع با توجه به جدول (۱)، میکروسیلیس به دلیل سطح مخصوص بالا تمایل بیشتری به جذب آب مخلوط داشته و در نتیجه باعث کاهش رطوبت نسبی داخلی شده و پدیده خود خشک شدگی و جمع‌شدگی خودزا برای این نمونه‌ها تشدید می‌شود [۳] جمع‌شدگی خودزای نمونه‌های حاوی زئولیت از

تهیه گردیده و به قیمت سیمان نرمالیزه شده‌است. این مقادیر در انتهای جدول (۱) آورده شده‌است. همچنین در شکل (۷)، شاخص هزینه تولید نمونه‌ها که با توجه به طرح اختلاط هر کدام از آن‌ها به هزینه تولید نمونه شاهد نرمالیزه شده‌است، آورده شده‌است. نتایج آنالیز هزینه نمونه‌ها نشان می‌دهد که جایگزینی میکروسیلیس با زئولیت طبیعی و ماسه کوارتزی با ماسه شیشه‌ای به کاهش هزینه ساخت نمونه‌ها کمک می‌کند. کاهش در شاخص هزینه برای نمونه‌های Q-NZ50 و G-NZ50 به ترتیب برابر با ۹٪ و ۲۹٪ بود. با جایگزینی کامل میکروسیلیس با زئولیت طبیعی و ماسه کوارتزی با ماسه شیشه‌ای، شاخص هزینه نسبت به نمونه شاهد ۳۹٪ کاهش یافت. در شکل (۸) شاخص هزینه برحسب مقاومت فشاری برای تمامی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. با توجه به نتایج این نمودار شاخص هزینه بر مقاومت نمونه‌های حاوی ماسه شیشه‌ای کمتر از نمونه‌های حاوی ماسه کوارتزی می‌باشد. همچنین جایگزینی میکروسیلیس با زئولیت تاثیر کمی روی شاخص هزینه بر مقاومت دارد. برای تمام سنین نمونه Q-NZ50 دارای کمترین شاخص هزینه به مقاومت حتی نسبت به نمونه شاهد بود.

۴-۵- جمع‌شدگی خودزا

در مراحل ابتدایی فرآیند هیدراتاسیون سیمان، حباب‌های هوا در



شکل ۹. نتایج آزمایش جمع‌شدگی خودزا
Fig. 9. Autogenous shrinkage of specimens

شکل ۱۰ آورده شده‌است. نتایج این آزمایش نشان دادند که زئولیت طبیعی به عنوان جایگزین میکروسیلیس، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در نگهداری رطوبت نسبی داخلی در محدوده بالا و در نتیجه کاهش جمع‌شدگی خودزای بتن فوق توانمند دارد. رطوبت نسبی داخلی نمونه‌های Q-NZ0 و Q-NZ25 و Q-NZ50 و Q-NZ75 و Q-NZ100 و همچنین Q-NZ0 به ترتیب ۸۷٫۱٪ و ۸۴٫۹٪ و ۸۱٫۲٪ و ۷۵٫۸٪ و ۷۳٫۳٪ بود. رطوبت نسبی داخلی نمونه دارای ۱۰۰٪ زئولیت طبیعی (Q-NZ100) ۱۳٫۸٪ بیشتر از نمونه شاهد در پایان ۲۸ روز بود. مطابق با این شکل، در سنین بالاتر که رطوبت نسبی داخلی کمتر از سنین اولیه می‌باشد، استفاده از زئولیت طبیعی به جای میکروسیلیس در نگهداری رطوبت نسبی داخلی موثرتر می‌باشد.

نمونه شاهد کمتر بود. در واقع زئولیت سطح مخصوص پایین تری نسبت به میکروسیلیس دارد که این عامل باعث خودخشک‌شدگی کمتر می‌گردد. از طرفی زئولیت طبیعی پوزولانی با ساختار متخلخل می‌باشد که این ساختار می‌تواند به جذب آب بیشتر و حتی استفاده به عنوان ماده عمل آور داخلی کمک‌کننده باشد [۱۳]. نمونه‌های بتن فوق توانمند دارای ماسه شیشه‌ای نسبت به نمونه‌های دارای ماسه کوارتزی جمع‌شدگی بیشتری را نشان دادند. این مطلب می‌تواند به دلیل بافت سخت‌تر و مقاومت بیشتر ماسه کوارتز نسبت به ماسه شیشه‌ای باشد. در واقع مقدار جمع‌شدگی خودزا در نمونه‌های حاوی ماسه کوارتزی، تحت تاثیر سختی و صلیبیت دانه‌های کوارتزی که همانند قیده‌ای داخلی عمل می‌کنند و سختی را بالا می‌برند و مانع جمع‌شدگی می‌شوند، قرار گرفته است [۱۰].

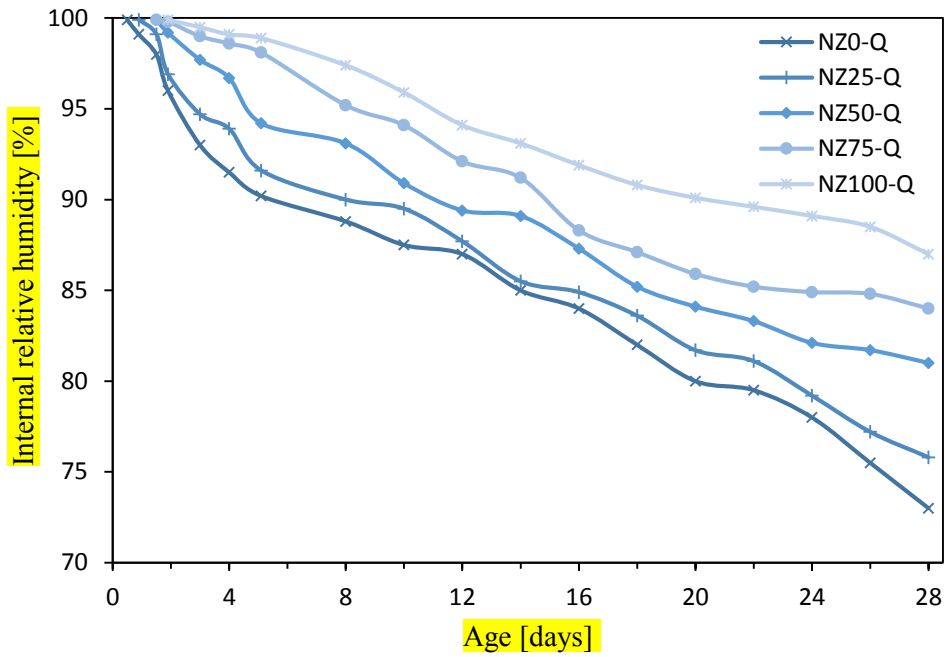
۵-۵- رطوبت نسبی داخلی

رطوبت نسبی داخلی ^۱ (RH) عامل تاثیر گذار روی جمع‌شدگی خودزای بتن فوق توانمند می‌باشد. هیدراتاسیون سیمان باعث کاهش رطوبت نسبی داخلی می‌گردد که نهایتاً منجر به جمع‌شدگی خودزا در بتن می‌گردد. تغییرات در رطوبت نسبی داخلی با توجه به زمان در

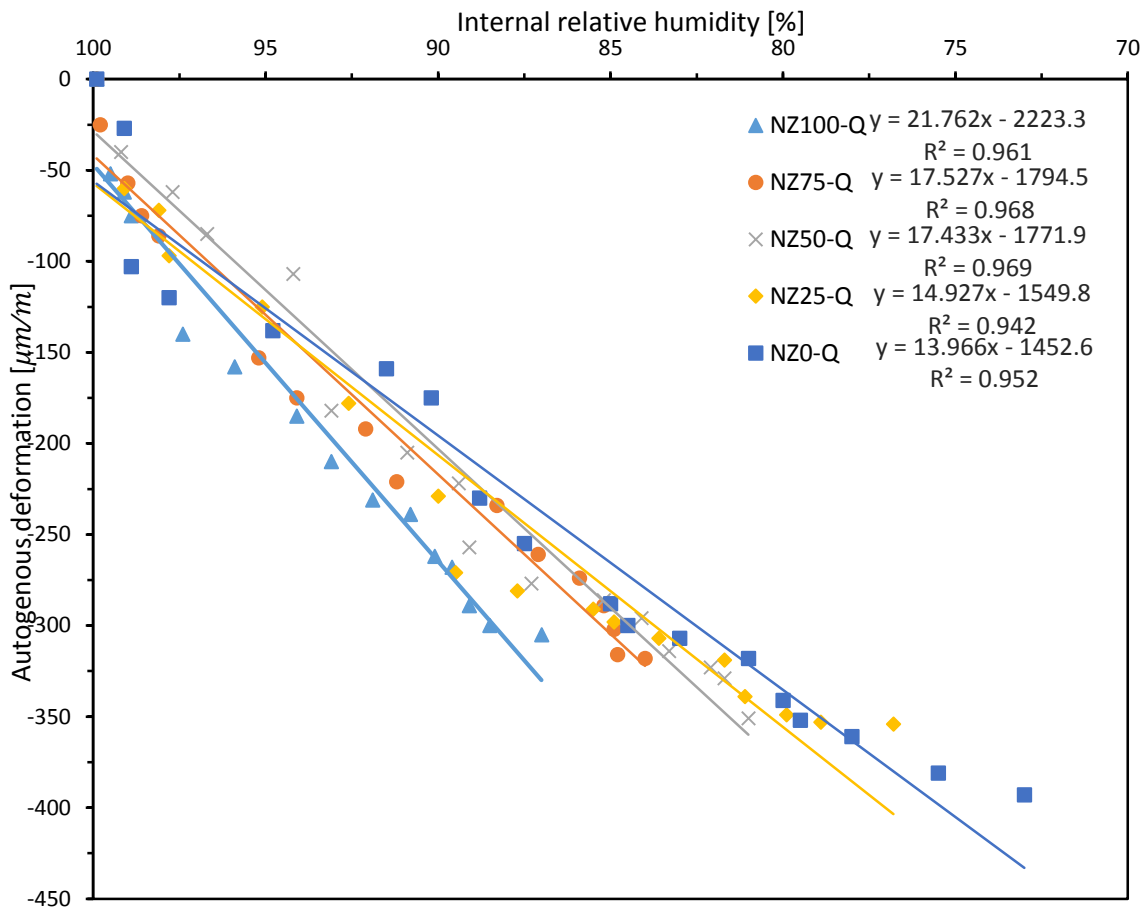
۵-۶- رابطه بین جمع‌شدگی خودزا و رطوبت نسبی داخلی

رابطه بین رطوبت نسبی داخلی و جمع‌شدگی خودزا برای تمامی نمونه‌های بتن فوق توانمند به همراه معادله رگرسیون خطی برای هر نمونه در شکل (۱۱) نشان داده شده‌است. نتایج آنالیز نشان می‌دهند که بین رطوبت نسبی داخلی و جمع‌شدگی خودزای نمونه‌ها رابطه خطی با ضریب همبستگی مناسبی از ۰٫۹۴۲ تا ۰٫۹۶۹ برقرار

1 Relative humidity



شکل ۱۰. نتایج آزمایش رطوبت نسبی داخلی
Fig. 10. Internal RH of specimens



شکل ۱۱. نمودار رگرسیون رابطه جمع‌شدگی خودزا و رطوبت نسبی داخلی
Fig. 11. Relationships between autogenous shrinkage and internal relative humidity

۱۳،۸٪ بیشتر از نمونه شاهد (Q-NZ0) بود. همچنین نمونه‌های بتن فوق توانمند با درصد‌های مختلف جایگزینی میکروسیلیس با زئولیت طبیعی، جمع‌شدگی کمتری را نسبت به نمونه شاهد نشان دادند.

نتایج آنالیز رگرسیون خطی نشان داد که ارتباط مناسبی بین رطوبت نسبی داخلی و جمع‌شدگی خودزای بتن فوق توانمند وجود دارد. نتایج نشان داد که بین رطوبت نسبی داخلی با جمع‌شدگی خودزا رابطه خطی با ضریب تعینی (R^2) بیشتر از ۰،۹۴ وجود دارد. جایگزینی ماسه کوارتزی با ماسه شیشه‌ای راه حلی اقتصادی جهت کاهش هزینه ساخت بتن فوق توانمند می‌باشد. با جایگزینی کامل ماسه کوارتزی با ماسه شیشه‌ای و همچنین ۵۰٪ جایگزینی میکروسیلیس با زئولیت طبیعی، بتن فوق توانمند با مقاومت فشاری ۹۰ روزه بالاتر از ۱۵۰ مگاپاسکال، جمع‌شدگی خودزای کم با هزینه ساخت نسبتاً پایین به‌دست آمد.

مراجع

- [1] Hagymassy, J., Brunauer, J.R., and Mikhail, R.S. (1969). Pore structure analysis by water vapor adsorption, *Journal of Colloid and Interface Science*. 29 (3), 485 – 491.
- [2] El-Jazairi, B., and J. M. Illston. A Simultaneous Semi-isothermal Method of Thermogravimetry and Derivative Thermogravimetry, and Its Application to Cement Pastes. *Cement and Concrete Research*, Vol. 7, 1977, pp. 247–257.
- [3] Paillere, A.M., Buil, M., & Serrano, J. (1989). Effect of fiber addition on the autogenous shrinkage of silica fume. *Materials Journal*, 86, 139–144.
- [4] Trombly, J. (1993). Developing Non-Traditional Glass Markets. *Resource Recycling, Secondary markets for post-consumer glass*.
- [5] Richard, P., & Cheyrezy. M. (1995). Composition of reactive powder concretes, *Cement and Concrete Research*. 25, 1501–1511.
- [6] Khayat, K.H., & Aitcin, P.C. (1996). Silica fume in concrete: an overview, *Fourth CANMET/ACI International Conference on Fly ash, Silica fume, slag and natural pozzolans in concrete*, SP-132, V.2, 835.

می‌باشد. رابطه خطی معادله جمع‌شدگی خودزا و رطوبت نسبی

$$y=ax+b \quad (1)$$

داخلی به صورت زیر می‌باشد:

که در این رابطه y جمع‌شدگی خودزا، x رطوبت نسبی داخلی و ضرایب b و a بیانگر تغییرات سرعت جمع‌شدگی خودزای نمونه‌ها با توجه به کاهش مقدار رطوبت نسبی داخلی می‌باشد. معادله خطی رگرسیون نمونه‌ها بیان می‌دارد که با افزایش میزان زئولیت طبیعی، ضرایب b و a افزایش می‌یابند که این مطلب بیانگر حساسیت بیشتر نمونه‌های حاوی زئولیت طبیعی نسبت به تغییرات رطوبت داخلی می‌باشد.

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه با جایگزینی میکروسیلیس با زئولیت طبیعی و همچنین ماسه کوارتزی با ماسه شیشه‌ای در بتن فوق توانمند نتایج زیر حاصل گردید:

نتایج آزمایش وزن سنجی گرمایی و ریز ساختار نشان داد که زئولیت طبیعی دارای واکنش پوزولانی مناسبی می‌باشد ولی میزان واکنش آن کمتر از نمونه‌های دارای میکروسیلیس می‌باشد. مقاومت فشاری نمونه‌های دارای زئولیت طبیعی مقداری کمتر از نمونه‌های دارای میکروسیلیس بود. با جایگزینی ۵۰٪ میکروسیلیس با زئولیت طبیعی، نمونه (Q-NZ50) مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه برابر با ۱۵۲،۳ و ۱۶۴،۴ مگاپاسکال به‌دست آمد که اندکی کمتر از مقاومت نمونه شاهد (Q-NZ0) با مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه ۱۵۷،۱ و ۱۶۹،۱ مگاپاسکال بود. در تمام سنین نسبت شاخص هزینه بر مقاومت فشاری نمونه Q-NZ50 کمتر از نمونه شاهد بود.

با جایگزینی کامل ماسه کوارتزی با ماسه شیشه‌ای با دانه بندی تقریباً مشابه، جمع‌شدگی خودزای بتن فوق توانمند افزایش، مقاومت فشاری کاهش و نسبت شاخص هزینه به مقاومت فشاری نیز کاهش داشت.

افزودن زئولیت طبیعی به عنوان جایگزینی برای میکروسیلیس تاثیر مثبتی روی نگهداری رطوبت نسبی داخلی در محدوده مناسب و همچنین کاهش جمع‌شدگی خودزا داشت. در پایان ۲۸ روز، رطوبت نسبی داخلی نمونه‌های دارای ۱۰۰ زئولیت طبیعی (Q-NZ100)

- [18] Rougeau, P., & Borys, B. (2004). Ultra High Performance Concrete with ultrafine particles other than silica fume. International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany.
- [19] Brown, J. (2006). Highway span features UHPC. *Civil Engineering*, 76(7), 24–26.
- [20] Graybeal, B. (2006). Material property characterization of ultrahigh performance concrete. FHWA-HRT-06-103, U.S.Department of Transportation, 176.
- [21] Shaheen, E., Shrive, N., G., Allena, S. & Newton, C.M., (2007), Optimization of mechanical properties and durability of reactive powder concrete. *ACI Materials Journal*, 104, 5-547
- [22] Shekarchi, M., Nejad, J.E., Ahmadi, B., & Rahimi, M. (2008). Improving concrete properties by using natural zeolite. Part I – Mechanical and durability properties. *Iran Concr Journal*, 30, 34–42.
- [23] Caputo, D., Liguori, B., and Colella, C. (2008). “Some advances in understanding the pozzolanic activity of zeolites : the effect of zeolite structure”. *Cement and Concrete Composites.*, 30(5),455–62.
- [24] Brühwiler, E., & Denarié, E. (2008). Rehabilitation of concrete structures using Ultra-HighPerformance Fiber Reinforced Concrete. Proc. Second Int. Symp. Ultra High Performance Concrete, Kassel University Press, Ed: Fehling, E., Schmidt, M., Stürwald, S., Kassel, Germany, 895-902.
- [25] Yazici, H., H. Yiğiter, A.S., Karabulut, A., & Baradan, B. (2008). Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete, *Fuel*, 87, 2401–2407.
- [26] Taffraoui, A., Escadeillas, G., Lebailli, S., & Vidal, L. (2009). Metakaolin in the formulation of UHPC, *Construction and Building Materials*. 23, 669–674.
- [27] Yazici, H., Yardimci, M.Y., Aydin, S., & Karabulut, A.S. (2009). Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. *Construction and Building Materials*. 23, 1223–1231.
- Guide for use of silica fume, 234R-96 ACI Publications.
- [7] Tazawa, E. (1999). Autogenous Shrinkage of Concrete. Proceedings of the International Workshop organized by the Japan Concrete Institute, Taylor, New York.
- [8] Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., & Lin, Z.S. (1999). A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes. *Construction and Building Materials*. 13, 427–32.
- [9]- de Larrard F. (1999). Concrete mixture proportioning: A scientific approach, Modern Concrete AATechnology Series, E&FN Spon (Eds).
- [10] Chan, Y.N., & Xihuang, Ji. (1999). Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes, *Cement and Concrete Composites*, 21, 293-300.
- [11] Aitcin, P.C. (2000). Cements of Yesterday and Today- Concrete of Tomorrow. *Cement and Concrete Research*, 30, 1349-1359.
- [12] Jin, W., Meyer, C., & Baxter, S. (2000). Concrete with glass aggregate. *ACI Materials Journal*, 97, 208–13.
- [13] Rao, G.A. (2001). “Long-term drying shrinkage of mortar—influence of silica fume and size of fine aggregate.” *Cement and Concrete Research.*, 31 (2), 171–175.
- [14] Bilek, V., Keršner, Z., Schmid, P., & Mosler, T. (2002). The possibility of self-curing concrete. Scotland, UK : Innovations and developments in concrete materials and construction
- [15] Jones, M., Zheng, L., & Newlands, M. (2002). Comparison of particle packing models for proportioning concrete constituents for minimum voids ratio. *Materials and Structures*, 35, 301-309.
- [16] Janotka, I., and Krajci, L. (2003). “Utilization of natural zeolite in Portland cement of increased sulphate resistance.” *ACI Special Publications*, 221, 223-229.
- [17] Perraki, Th., Kakali, G., and Kontoleon, F. (2003). “The effect of natural zeolites on the early hydration of Portland cement.” *Microporous and Mesoporous Materials*, 61, 205-212.

- reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, vol. 35, p.p. 1023-1033.
- [38] Soliman, A.M., & Nehdi, M.L. (2013). Effect of partially hydrated cementitious materials and superabsorbent polymer on early-age shrinkage of UHPC. *Construction and Building Materials*, 41, 270-275.
- [39] Malešev, M. (2014). Zeolite impact on basic physical and mechanical properties of cement mortars. XXVI International symposium on researching and application of contemporary achievements in civil engineering in the field of materials and structures, Vrnjačka Banja, 29-31, 225-236.
- [40] Radeka, M., Malešev, M., Radonjanin., and Tatomirović. (2014). "Pozzolanic activity of natural zeolite from one Serbian deposit." XXVI International symposium on researching and application of contemporary achievements in civil engineering in the field of materials and structures., Vrnjačka Banja, 191-201.
- [41] Kushartomo, W., Bali, I., & Sulaiman, B. (2015). Mechanical Behavior of Reactive Powder Concrete with Glass Powder Substitute. *Procedia Engineering*, 125, 617-622.
- [42] Ghafari, E., Ghahari, S.A., Costa, S.A., Júlio, H., Portugal, E.A., & Durães, L. (2016). Effect of supplementary cementitious materials on autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 127.
- [43] Erten, E., Yalçinkaya, C., Beglarigale, A., Yiğiter, H., & Yazici. (2017). Erken yaş büzülme çatlaklarının lif içeren/içermeyen ultra yüksek performanslı betona gömülü donatı korozyonuna etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32, 1347-1364.
- [44] Yalçinkaya, C. & Yazici, H. (2017). Effects of ambient temperature and relative humidity on early-age shrinkage of UHPC with high-volume mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 144, 252-259.
- [45] Zhang, J., Wang, Q., & Zhang, J. (2017). Shrinkage of internal cured high strength engineered cementitious composite with pre-wetted sand-like zeolite. *Construction*
- [28] Idir, R., Cyr, M., Tagnit-Hamou, A., (2009). Use of waste glass as powder and aggregate incement-based materials, SBEIDCO – 1st Int Conf on Sust built Env Infr in Developing Countries ENSET, Oran Algeria, 109–116.
- [29] Yazici, H., Yardimci, M.Y., Aydin, S., & Karabulut, A.S. (2009). Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. *Construction and Building Materials*. 23, 1223–1231.
- [30] Ahmadi, B., & Shekarchi M. (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composite*, 32, 134–41.
- [31] Dumitru, I., Song, T., Caprar, V., Brooks, P., & Moss, J. (2010). Incorporation of recycled glass for durable concrete. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Universita Polytechnica delle Marche, Ancona, Italy, 9 pages.
- [32] Idir, R., Cyr, M., & Tagnit-Hamou, A. (2010). Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. *Construction and Building Materials*, 24, 1309–1312.
- [33] Uzal, B., Turanlı, L., Yücel, H., Göncüoğlu, M.C., and Çulfaz, A. (2010). "Pozzolanic activity of clinoptilolite: A comparative study with silica fume, fly ash and a non-zeolitic natural pozzolan." *Cement and Concrete Research.*, 40, 398– 404.
- [34] Van Tuan, N., Ye, G., Van Breugel, K., & Copuroglu, O. (2011). Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash. *Cement and Concrete Research*, 41, 1104–1111.
- [35] Van Tuan, N., Ye, G, (2011), The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete. *Constr Build Mater*;25:2030–5
- [36] Zaichenko, N.M. (2011). Internal curing and autogenous shrinkage of high-strength concrete. *Building and Material Construction Journal. Ukrainian State Academy of Railway Transport*, 122, 236-244.
- [37] Najimi, M, (2012), An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly

- drying shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC): An experimental study. *Cement and Concrete Composites*, 91, 156-173.
- [50] Liu, Z., El-Tawil, S., Hansen, W. & Wang, F. (2018). Effect of slag cement on the properties of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 190, 830-837.
- [51] Paul, S.C., Šavija, B., & Babafemi, A.J. (2018). A comprehensive review on mechanical and durability properties of cement-based materials containing waste recycled glass. *Journal of Cleaner Production*, 198, 891-906.
- [52] Liu, K., Yu, R., Shui, Z., Li, X., ling, X., Yi, S., & Wu, S. (2019). Effects of Pumice-Based Porous Material on Hydration Characteristics and Persistent Shrinkage of Ultra-High performance Concrete (UHPC). *Materials*, 12(1), 11.
- and *Building Materials*. 134, 664–672
- [46] Kunther, W., Ferreiro, S., Skibsted, J. (2017). Influence of the Ca/Si ratio on the compressive strength of cementitious calcium–silicate–hydrate binders. *Journal of Material Chemistry A*, 5, 17401-17412.
- [47] Tanarlan, H.M., Alver, N., Jahangiri, R., Yalcinkaya, C. & Yazici, H. (2017). Flexural strengthening of RC beams using UHPERC laminates: Bonding techniques and rebar addition. *Construction and Building Materials*, 155, 45-55.
- [48] Murthy, R. A., Karihaloo, B.L., & Shanmuga Priya, D. (2018). Flexural behavior of RC beams retrofitted with ultra-high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 175, 815-824.
- [49] Xie, T., Fang, C., Mohamad Ali, M.S., & Visintin, P. (2018). Characterizations of autogenous and 2

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. R. Pezeshkian, A. Delnavaz, M. Delnavaz, Effect of Recycled Materials on Autogenous Shrinkage of Ultra-High Performance Concrete, Amirkabir J. Civil Eng., 53(4) (2021): 1383-1402.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16924.6394](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16924.6394)



