



دوام ملات‌های ژئوپلیمری با درصد‌های پیشنهادی از سرباره و کائولن حاوی پلیمر

سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد*، آرین درویشعلی نژاد

دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۰
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۹/۰۲

کلمات کلیدی:

دوام
ملات ژئوپلیمری
سرباره
کائولن
RCMT

خلاصه: ژئوپلیمرها به عنوان یک بتن بدون سیمان توجه پژوهشگران را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. در ساخت این نوع بتن‌ها به جای سیمان از مواد مختلفی مانند میکروسیلیس، متاکائولن، زئولیت و ... استفاده می‌شود. برای تشکیل ماده چسباننده به کار گرفتن محلول‌های شیمیایی برای تکمیل فرآیند ژئوپلیمریزاسیون ضروری است. پژوهش حاضر به بررسی دوام ملات‌های ژئوپلیمری بر مبنای سرباره کوره آهنگدازی (GGBFS) و جایگزینی با درصد‌هایی از کائولن در چند مولار مختلف می‌پردازد. در این تحقیق از GGBFS به عنوان جایگزین سیمان و از محلول سدیم هیدروکسید (سود) با غلظت ۴ و ۸ مولار و سدیم سیلیکات (آب شیشه) به عنوان محلول‌های شیمیایی استفاده شد. مواد پایه به صورت منفرد و ترکیبی با اجزای دیگر مخلوط بررسی شدند. بدین منظور پودر سرامیک کائولن در ۵۰٪ و ۷۵٪ با GGBFS مخلوط شده‌اند که در مجموع ۱۲ طرح اختلاط ساخته شد. خصوصیات مورد مطالعه عبارتند از: مقاومت فشاری، نفوذ وجود یون کلر در بتن (RCMT)، مقاومت الکتریکی، درصد جذب آب، افت مقاومت فشاری و افت وزن پس از قرار گرفتن در محلول اسید سولفوریک. از مطالعه موارد مذکور نتایج زیر حاصل شد: استفاده از پودر کائولن و سرباره موجب کاهش مقاومت فشاری می‌شود و کمترین مقدار ۲۳٪ در ۵۰-SC4 مشاهده شد؛ همچنین نتایج نفوذ وجود یون کلر در بتن و کاهش وزن نمونه‌های ملات در محلول اسید سولفوریک حاکی از آن است که استفاده از پودر کائولن و سرباره، باعث افزایش دوام ۳۸٪ در نمونه‌های بتنی ۵۰-SC4 تحت شرایط تهاجم کلرایدی ناشی از کاهش نفوذپذیری می‌شود.

۱- مقدمه

سیمان پرتلند پرکاربردترین ماده چسباننده هیدرولیکی برای تولید بتن در دنیا است. تولید سیمان پرتلند فرآیندی بسیار انرژی بر دارد؛ به طوری که برای تولید هر تن سیمان حدود ۴ گیگاژول انرژی مصرف می‌شود. تولید هر تن سیمان تقریباً یک تن دی اکسید کربن ایجاد می‌کند. هزینه‌های بالای انرژی مصرفی و آلاینده‌های ناشی از تولید سیمان پرتلند سبب شده که برای کاهش میزان تولید کلینکر سیمان پرتلند تالاش‌های بسیاری انجام گیرد [۱]. در این راستا به پوزولان‌ها به عنوان جایگزین سیمان پرتلند در بتن با هدف تولید سیمان‌ها و بتن‌های ژئوپلیمری سبز توجه شد. ژئوپلیمرها به دلیل خواص خوب و عملکرد مناسب شان، از اواخر قرن بیستم به عنوان جایگزین مصالح ساختمانی مورد توجه قرار گرفتند [۱].

ژئوپلیمرها گروهی از مواد سیمانی مقاوم و بادوام هستند که در دمای زیر ۱۰۰°C سخت می‌شوند. اصطلاح ژئوپلیمر را اولین بار جوزف دیویدو

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: h.mosavi@guilan.ac.ir

ویتس در سال ۱۹۷۹ مطرح کرد. او ژئوپلیمرها را به عنوان شاخه‌ای جدید از مواد آلومیناسیلیکاتی با ساختار سه بعدی معرفی نمود. به دنبال توسعه تکنولوژی پلیمرها، عرصه مناسبی برای تولید محصولات گوناگون بر پایه پلیمرها فراهم شد [۲]. بتن ژئوپلیمر بتنی است که در آن از مصالح آلومیناسیلیکاتی غنی از سیلیکون (Si) و آلومینوم (Al) و محلول قلیایی به عنوان چسباننده استفاده می‌شود. از مزایای این بتن‌ها می‌توان به تولید انرژی کمتر، خواص مکانیکی مطلوب و دوام بالا در محیط‌های خورنده اشاره کرد.

یکی از موادی که ساختار آلومیناسیلیکاتی دارد سرباره کوره بلند آهنگدازی است. استفاده از سرباره به اواخر دهه ۱۸۰۰ میلادی بر می‌گردد؛ اما استفاده از آن به عنوان یک ماده جایگزین سیمان در آفریقای جنوبی بیش از ۵۰ سال پیش آغاز شد [۲]. امروزه استفاده از این ماده جایگزین در بتن به دلیل مزایای فنی، اقتصادی و زیست محیطی آن گسترش یافته



است. بهبود خواص مکانیکی و مقاومت در برابر پوسته شدن و نفوذ یون کلراید را می‌توان به عنوان تأثیر مثبت استفاده از سرباره در بتن‌های حاوی سیمان‌های آمیخته دو و سه جزئی نام برد [۳ و ۴]. نتایج تحقیقات نشان داده است که مخلوط‌های بتنی حاوی سرباره اگر به درستی طرح و اجرا شود، می‌تواند واکنش قلیایی-سیلیسی مخرب را کنترل کند و در برابر محیط سولفاتی دوام را افزایش دهد [۲]. اثرات سودمند استفاده از سرباره در بتن، نتیجه ریزساختار اصلاح شده ماتریس سیمانی است که تعداد بیشتری از منافذ مویینه آن توسط ژل سیلیکاتی (C-S-H) کم تراکم پر شده است [۶ و ۵]. از سوی دیگر نتایج برخی مطالعات نشان داده است که مقاومت اولیه بتن حاوی سرباره می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. با این حال معمولاً با گذشت زمان مقاومت فشاری بهبود می‌یابد؛ به طوری که در سنین بعد از ۵۶ روز مقاومت فشاری آن به مقاومت بتن سیمان پرتلند می‌رسد [۸ و ۷]. ترکیبات شیمیایی اصلی سرباره شامل CaO ، SiO_2 و Al_2O_3 است. همچنین این ماده مقدار بسیار کمی FeO ، MgO و سولفید (به شکل CaS ، MnS و FeS) دارد [۴]. سرباره با آب در محیط قلیایی و سپس با $Ca(OH)_2$ واکنش می‌دهد تا محصولات هیدراسیون سیمان را از طریق واکنش پوزولانی به صورت ژل C-S-H اضافی در خمیر تبدیل کند [۹].

SBR کوتاه شده عبارت Styrene Butadiene Rubber و معادل لاستیک استایرن بوتادین است. وقتی بالغ بر ۵۰٪ بوتادین و کوپلیمر استایرن را بوتادین تشکیل دهد، آن را SBR می‌نامند. در این پژوهش از (SBR) به منظور مقاومت در مقابل آب و مقاومت در مقابل اسید استفاده شده است.

وانگ و همکاران تحقیقی با عنوان مقاومت خوردگی بتن ژئوپلیمری بر پایه مواد چسباننده و قلیایی با غلظت‌های مختلف در برابر اسید سولفوریک را مطالعه کردند و دریافتند که مقاومت پسماند این بتن بر پایه خاکستر بادی بالاتر از مواد چسباننده دیگر بعد از ۹۸ روز غوطه‌وری در اسید سولفوریک بوده است [۱۰]. مرمرداس و همکاران در سال ۲۰۱۷ پژوهشی بر روی تأثیر سنگدانه‌های ریز بر خواص مکانیکی و جذب آب ملات‌های ژئوپلیمری با خاکستر بادی انجام دادند. مطالعه اندازه‌گیری میزان کارایی، مقاومت فشاری و جذب آب در نمونه‌ها نشان داد که ملات‌ها با ماسه طبیعی کارایی بهتر و نمونه‌ها با ماسه شکسته مقاومت فشاری بیشتری داشتند در حالی که جذب آب نمونه‌ها با ماسه ترکیبی کمترین میزان بود [۱۰]. کواسنی و همکاران در تحقیقی به بررسی مقاومت ملات ژئوپلیمری در برابر اسید پرداختند و

دریافتند که ملات ژئوپلیمری نسبت به ملات سیمان پرتلند معمولی مقاومت بهتری دارد [۱۱]. این نتایج در تحقیق ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ تایید شده است [۱۲]. در سال ۲۰۱۷ مطالعات شارما و همکاران در مورد فاکتورهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی نشان داد که با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم تا ۱۶ مول، مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش بیشتر غلظت تا ۱۸ مول، تغییر چندانی در مقاومت فشاری دیده نمی‌شود [۱۳]. در سال ۲۰۱۸ پاتل و همکاران دریافتند که با افزایش غلظت محلول هیدروکسید سدیم تا ۱۲ مول در بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و افزایش غلظت به بیش از ۱۲ مول سبب کاهش مقاومت فشاری می‌شود [۱۴]. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ رفتار و خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمر را پس از اعمال حرارت بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقاومت خمشی و کششی در دمای زیاد، کاهش پیدا می‌کند؛ اما مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی کاهش کمتری می‌یابد [۱۵]. لیو و همکاران خواص مکانیکی و نفوذپذیری بتن‌های سیمان پرتلند اصلاح شده با سه نوع پلیمر استایرن بوتادین رابر، پلی آکریلیک استر و سیلیکون آلی ضد آب را بررسی کردند و دریافتند که این پلیمرها، مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد و خاکستر بادی اثر منفی آن را بهبود می‌بخشد. همچنین، این پلیمرها می‌تواند نفوذپذیری بتن را کاهش دهد [۱۶]. یانگ کوگ با بررسی چسبندگی به سطوح زیرین ملات‌های سیمان پرتلند اصلاح شده با سه نوع پلیمر اتیلن وینیل استات، استایرن بوتادین رابر و استایرن وینیل اکریلیک استر در چهار شرایط عمل‌آوری مرطوب، خشک، استاندارد و تحت دمای بالا برای تعیین چسبندگی ملات‌های اصلاح شده به سطح زیرین خود دریافت که در شرایط استاندارد و شرایط عمل‌آوری خشک به ترتیب پلیمرهای اتیلن وینیل استات، استایرن بوتادین رابر و استایرن اکریلیک استر نتایج بهتری در مقایسه با سایر شرایط عمل‌آوری داشته‌اند [۱۷]. گانسیان و همکاران تأثیر هیبرید پلیمرهای استایرن بوتادین رابر و اپوکسی را در کسب مقاومت فشاری مخلوط‌های پایه سیمان پرتلند بررسی کردند و دریافتند که ترکیب دو پلیمر مذکور با یکدیگر سبب کاهش خواص مکانیکی مخلوط‌های اصلاح شده نسبت به مخلوط کنترل (فاقد پلیمر) می‌شود [۱۸]. چهارزی و همکاران در بررسی و مقایسه مشخصات مکانیکی و دوام مخلوط پایه سیمان پرتلند اصلاح شده با اتیلن وینیل استات، استایرن اکریلیک و استایرن بوتادین دریافتند که خواص دوام با استفاده از مواد پلیمری بهبود می‌یابد و پلیمر اتیلن وینیل استات نسبت به پلیمر استایرن اکریلیک با ۵٪ به ۱۵٪ استفاده، خواص مکانیکی و دوام

جدول ۱. مشخصات هیدروکسید سدیم

Table 1. Characteristics of sodium hydroxide

| درصد خلوص | حلالیت | انحلال پذیری در آب | اسیدی | دمای ذوب | دمای جوش | چگالی | جرم مولی | فرمول شیمیایی |
|-----------|----------------------------------|--------------------|-------|----------|----------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|
| ۹۸٪-۹۹٪ | اتانول و متانول محلول در آب است. | ۲۰ °C | ۱۳ | ۳۱۸ °C | ۱۳۸۸ °C | ۲/۱۳ gr/cm ³ | ۳۹/۹۹۷ gr/cm ³ | هیدروکسید سدیم (NaOH) |

مالات ژئوپلیمری استفاده شد. ۱۲ نوع طرح اختلاط با درصد های ۵۰٪ و ۷۵٪ کائولن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه ساخته شد و تأثیر آن بر مقاومت فشاری، نفوذ وجود یون کلر در بتن (RCMT)، مقاومت الکتریکی، درصد جذب آب، افت مقاومت فشاری و کاهش وزن پس از فرارگیری در محلول اسیدسولفوریک با (pH = ۱) بررسی گردید. مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، مقاومت الکتریکی و درصد جذب آب در سن ۲۸ روزه، تست اسید نمونه های فشاری، وزن مخصوص (در اسیدسولفوریک با آب) و نفوذ یون کلر در بتن (RCMT) در سن ۹۰ روز تعیین شد.

۲- مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده برای آزمایش مورد نظر عبارتند از: سدیم هیدروکسید (سود)، سدیم سیلیکات (آب شیشه)، سرباره، کائولن و پلیمر SBR و ماسه.

۲-۱- سدیم هیدروکسید (سود)

سدیم هیدروکسید یا سود سوزآور با فرمول شیمیایی NaOH ماده ای جامد و سفید رنگ با دمای ذوب ۳۱۸ °C و چگالی ۲/۱۳ gr/cm³ است. در این پژوهش از محلول سود ۴ و ۸ مولار برای ساخت ملات های ژئوپلیمری استفاده شد.

۲-۲- سدیم سیلیکات (آب شیشه)

سدیم سیلیکات یا آب شیشه نام عمومی ترکیب سدیم متاسیلیکات (Na₂SiO₃) است که به صورت محلول آبی و جامد در دسترس است. سدیم سیلیکات طبق تعریف فون و گنر نوعی سیلیکات قلیایی حل شدنی است [۲۸]. براساس استاندارد ASTM C-۸۹-۱۸ چگالی پودر این ماده برابر ۲/۴ gr/cm³ اندازه گیری شد و میانگین چگالی محلول مورد

را به مراتب بیش از پلیمر استایرن اکریلیک بهبود می بخشد [۱۹]. مطالعه رفتار بتن های اصلاح شده پلیمری حاوی سنگدانه های بازیافتی نیز توسط اسعد و داعو نشان داد که افزودن پلیمر استایرن بوتادین به میزان ۱٪ تا ۳٪ وزن سیمان، سبب افزایش کارایی و خواص مکانیکی بتن در مقایسه با مخلوط های بتنی با سنگدانه های بازیافتی فاقد پلیمر می شود [۲۰]. مطالعات فیترا و همکاران درباره واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه در مخلوط های پایه سیمانی حاوی پلیمر (پایه آبی) نشان داد که مقاومت فشاری و خمشی به ترتیب کاهش و افزایش یافته است، همچنین در نمونه های اصلاح شده با پلیمر، ریز ترک های ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی بسیار کمتر از نمونه های فاقد پلیمر بوده است [۲۱]. دوژان و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی تأثیر کوپلیمر استایرن بوتادین رابر در بتن های با مقاومت بالا پرداختند و آثار کاهش مقاومت فشاری را نشان دادند [۲۲]. مطالعات [۲۳-۲۵] مربوط به کارپذیری، مقاومت و دوام مخلوط های پایه سیمانی حاوی هر دو مواد الیاف پلاستیکی و پلیمر (پایه آبی) استایرن بوتادین رابر به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش ها نشان دهنده بهبود مقاومت در برابر ترک خوردگی، افزایش مقاومت خمشی و کاهش میزان نفوذ آب و مواد شیمیایی به درون مخلوط سخت شده است. پژوهشگرانی [۲۶ و ۲۷] نفوذپذیری را در مخلوط های اصلاح شده پلیمری بررسی کردند و دریافتند که افزودن پلیمر می تواند سبب کاهش میزان نفوذپذیری مخلوط ها شود.

جنبه نوآوری این پژوهش وجود کائولن در خمیر ملات ژئوپلیمری است که تاکنون با توجه به بررسی تحقیقات پیشین، مطالعه ای در این زمینه انجام نشده است. پژوهش حاضر مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری با درصدهای ۵۰٪ و ۷۵٪ کائولن در مولار ۴ و ۸ در سنین عمل آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه و دوام ملات ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهنگدازی را بررسی می کند. در این راستا از سرباره (GGBFS) و کائولن به عنوان مواد اولیه ساخت

جدول ۲. مشخصات سیلیکات سدیم

Table 2. Specifications of sodium silicate.

| مشخصات | محلول سیلیکات سدیم |
|---------------|---|
| فرمول شیمیایی | Na_2SiO_3 |
| وزن مولکولی | $122/06 \text{ gr/cm}^3$ |
| دانسیته | $2/61 \text{ gr/cm}^3$ |
| نقطه ذوب | 1089°C |
| حلالیت در آب | $22/2 \text{ gr} / 100 \text{ mol} (20^\circ \text{C})$ $160/6 \text{ gr} / 100 \text{ mol} (80^\circ \text{C})$ |
| ضریب شکست | ۱/۵۲ |
| انحلال پذیری | نامحلول در الکل |

جدول ۳. مشخصات فیزیکی پودر سرباره

Table 3. Physical characteristics of slag powder.

| نمونه | درصد باقی روی الک نمره | درصد باقی روی الک نمره | درصد فاز آمورف | نرمی بلین |
|-----------------|------------------------|------------------------|----------------|-------------------------|
| | ۳۰ | ۵۰ | | cm^2/gr |
| سرباره پودر شده | ۲۷ | ۱۴ | ۸۷ | ۳۵۰۰ |

جدول ۴. آنالیز شیمیایی سرباره

Table 4. Chemical analysis of slag.

| نمونه | SiO_2 | Fe_2O_3 | CaO | MgO | Al_2O_3 | Na_2O | K_2O | SO_3 |
|------------|---------|-----------|-------|-------|-----------|---------|--------|--------|
| سرباره (%) | ۳۶/۰ | ۰/۶۰ | ۳۸/۱۰ | ۶/۶ | ۱۳/۰۰ | ۰/۵۰ | ۱/۱۰ | ۰/۶۰ |

از پودر سدیم هیدروکسید به عنوان ماده قلیایی استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و ترکیب شیمیایی سرباره در جدول ۳ و ۴ آمده است.

استفاده نیز برابر $1/6 \text{ gr/cm}^3$ به دست آمد. در جدول ۲ مشخصات سدیم سیلیکات مصرفی آمده است.

۲-۴- کائولن

کائولن از نظر صنعتی به رس‌هایی اطلاق می‌شود که دارای مقدار قابل توجهی کائولینیت باشند. از نظر کانی شناسی کائولن جزء گروهی از کانی‌های سیلیکات‌های آلومینیوم هیدراته است و کائولینیت، دیکیت، ناکریت، هالوویت، متاهالوویت و خاک نسوز را شامل می‌شود. چسبندگی

۲-۳- سرباره

برای ساخت ژئوپلیمرها از سه جزء استفاده می‌شود: جزء اول ماده آلومیناسیلیکاتی به عنوان ماده پایه، جزء دوم سدیم سیلیکات و جزء آخر ماده قلیایی است. در این پژوهش از سرباره به عنوان ماده پایه، پودر سدیم سیلیکات که با نسبت‌های مشخصی با آب ترکیب شده و محلول ساخته شده

جدول ۵. مشخصات فیزیکی پودر کائولن.

Table 5. Physical characteristics of kaolin powder.

| ضریب انبساط حرارتی | دانس ته دوغاب | ویسکوزیته دوغاب | جذب آب | انقباض پخت | سیکل کوره | دمای کوره | استحکام پخت | انقباض خشک | استحکام خشک | آزمایش فیزیکی |
|--------------------|---------------|-----------------|--------|------------|-----------|-----------|-------------|------------|-------------|---------------|
| ۷۶ | ۱/۶۰ | ۱۶ | ۸/۳ | ۶/۵ | ۶۵ دقیقه | ۱۱۵۵ °C | ۴۵۴ | ۰/۶۷ | ۲۰/۳۵ | پودر کائولن |

جدول ۶. آنالیز شیمیایی کائولن.

Table 6. Chemical analysis of kaolin.

| نمونه | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | Na ₂ O | Fe ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | Fe ₂ O ₃ | LOI |
|------------|------------------|--------------------------------|------|-------------------|--------------------------------|------|------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|------|
| کائولن (%) | ۷۰/۸۳ | ۱۹/۱۴ | ۰/۳۸ | ۰/۶۳ | ۰/۵۷ | ۰/۱۳ | ۰/۹۳ | ۰/۳۳ | ۰/۲۶ | ۰/۹۱ | ۵/۵۲ |

جدول ۷. مشخصات فیزیکی ماسه.

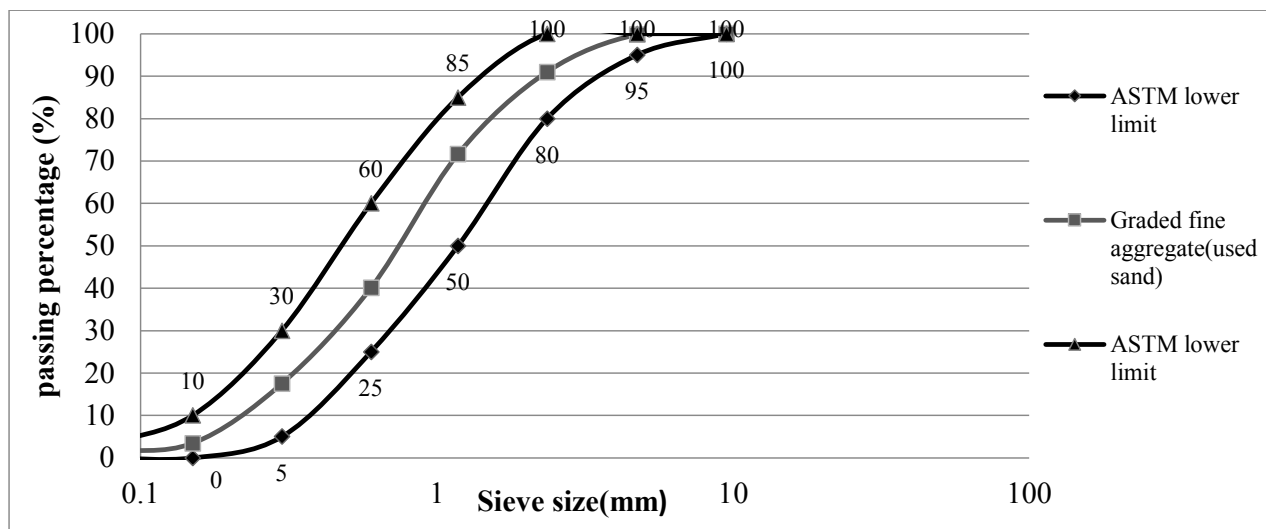
Table 7. Physical characteristics of sand.

| آزمایش فیزیکی | ماسه (۴/۷۵) |
|--|------------------------|
| وزن مخصوص (در حالت اشباع با سطح خشک SSD) | ۲۶۱۱ kg/m ³ |
| جذب آب (%) | ۲/۴ |

۲-۵- ماسه

سنگدانه به عنوان یکی از پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی در ملات و بتن شناخته می‌شود. سنگدانه به عنوان ماده پرکننده در مخلوط و یکی از اجزای اصلی تأثیر چشمگیری بر خواص محصول نهایی خواهد داشت. در پژوهش حاضر ماسه رودخانه‌ای و گردگوشه که از معدن آسمان رود رودسر تهیه شده برای ساخت ملات ژئوپلیمری به کار گرفته شد. ماسه مصرفی با بزرگترین اندازه اسمی ۴/۷۵ میلی‌متر در جدول ۷ مشاهده می‌شود. شکل ۱ نمودار دانه‌بندی ماسه مصرفی را بر اساس ASTM C33 [۲۹] نشان می‌دهد.

یکی دیگر از خواص مهم فیزیکی کائولن است که با درجه خلوص آن نسبت مستقیم دارد. یعنی هر چه میزان چسبندگی در کائولن بیشتر باشد به همان نسبت درجه خلوص آن نیز افزایش می‌یابد. پودر کائولن استفاده شده در این آزمایش‌ها با نیازهای مختلف در صنایع خاصیت انطباق پذیری بالایی دارد. هم‌اکنون از آن در ۹۰٪ کارخانجات تولید آجر اصفهان برای تولید آجر نسوز نما در رنگ‌های کرم تا شاموتی استفاده می‌شود. رنگ کلوخه این ماده، کرم تا زرد و رنگ پودر آن، سفید مایل به کرم است. با توجه به رنگ روشن کائولن این ماده می‌تواند در معماری دارای جذابیت‌هایی باشد. مشخصات فیزیکی پودر کائولن در جدول ۵ و ترکیب شیمیایی آن با استفاده از آنالیز XRF در جدول ۶ آمده است.



شکل ۱. منحنی دانه بندی ماسه مصرفی بر اساس ASTM C33 [۲۹].

Fig. 1. Grading curve of used sand based on ASTM C33 [29].

۳- طرح مخلوط‌های ساخته شده با کائولن و سرباره کوره آهنگدازی (GGBFS)

در جدول ۸ طرح اختلاط‌های مختلف برای ماده کائولن بر اساس تجربیات مندرج در مرجع شماره [۳۰ و ۳۱] تعیین گردید و از همین نتایج و مرجع [۳۲ و ۳۳] برای تعیین مقدار سرباره، برای رسیدن به طرح اختلاط نهایی استفاده شد. نام گذاری نمونه‌ها به این شرح است: S نشانگر سرباره کوره آهنگدازی، CP پودر سرامیک کائولن، SBR پلیمر استایرن بوتادین رابر، BS چسب جامد، SH با فرمول شیمیایی NaOH، SS برگرفته از Styrene Butadiene Rubber و اعداد بعدی به ترتیب درصد پودر کائولن و مولاریته است.

در جدول ۹ طرح اختلاط، وزن ماسه مورد استفاده با توجه به واکنش پذیری بالای سرباره و میزان ریزی آن 1195 kg/m^3 در نظر گرفته شد. از آنجا که مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ژئوپلیمری ساخته شده از کائولن بسیار پایین بود و با افزودن مقدار کائولن در طرح اختلاط نیز در افزایش مقاومت فشاری تغییری حاصل نشد؛ درصد کائولن با سرباره یکسان در نظر گرفته شد. در طرح اختلاط استفاده شده از سرباره با ثابت نگه داشتن مقدار سدیم سیلیکات و سدیم هیدروکسید، مقاومت فشاری بهتری بدست آمد. در نهایت

۲-۶- پلیمر

در حالت کلی به کوپلیمر استایرن و بوتادین (میزان بوتادین باید بیشتر از ۵۰٪ باشد) SBR گفته می‌شود. نسبت معمولی مونومرها ۷۰٪ تا ۷۵٪ بوتادین به ۲۵٪ تا ۳۰٪ استایرن است. هر چقدر میزان استایرن به کار رفته در (SBR) از ۵۰٪ باشد محصول به پلاستیک شدن می‌رود و در تولید لاتکس کاربرد پیدا می‌کند. (SBR) به عنوان پلیمر کارایی بسیاری دارد و جزو پر مصرف‌ترین لاستیک‌ها در صنعت به شمار می‌آید. خواص مکانیکی SBR از NR (لاستیک طبیعی) پایین تر است و مانند آن بر اثر کشش بلوری نمی‌شود. استفاده از (SBR) در بتن مقاومت فرسایشی بالایی دارد. هر چه میزان سیس و وینیل بوتادین بیشتری در آن ترکیب شود، مقاومت فرسایشی (SBR) بیشتر افزایش می‌یابد. جهندگی خوب، انعطاف‌پذیری در دمای پایین، مقاومت در برابر سایش و ترک خوردگی و حرارت و ضربه از دیگر ویژگی‌های آن هستند. در این پژوهش از (SBR) به منظور مقاومت در مقابل آب و مقاومت در مقابل اسید استفاده شده است. در پژوهش حاضر از ماده پلیمری استایرن بوتادین رابر که از نوع پلیمر الاستومری محسوب می‌شود، استفاده شده است که به صورت لاتکس بوده و مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۸ آمده است.

جدول ۸. مشخصات فیزیکی و شیمیایی پلیمر مصرفی

Table 8. Physical and chemical characteristics of the used polymer.

| نام | اندازه ذرات | pH | چگالی | ظاهر | درصد جامد | لزجت معلق در آب |
|----------------------|-------------------|-----|------------------------------|---------------|-----------|-----------------|
| استایرن بوتادین رابر | ۱۵۰ μm | ۹-۷ | ۱/۰۱ gr/cm^3 | مایع سفید رنگ | ۵۰±% | ۸۰۰-۳۰۰ Mpa.s |

جدول ۹. طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری.

Table 9. Geopolymeric mortar mixing plan.

| Name | Slag | | CP | | M | Na_2SiO_3 | NaOH | SS + SH / BS | SS / SH | SBR | | Sand |
|---------|------|------------------------|-----|------------------------|-------|---------------------------|------------------------|--------------|---------|-----|------------------------|------------------------|
| | %BS | kg/m^3 | %BS | kg/m^3 | Mol/L | kg/m^3 | kg/m^3 | | | %BS | kg/m^3 | kg/m^3 |
| S4 | ۱۰۰ | ۷۰۰ | ۰ | ۰ | ۴ | ۲۵۰ | ۱۰۰ | ۰/۵ | ۲/۵ | ۰ | ۰ | ۱۱۹۵ |
| SC4-50 | ۵۰ | ۳۵۰ | ۵۰ | ۳۵۰ | ۴ | ۲۵۰ | ۱۰۰ | ۰/۵ | ۲/۵ | ۰ | ۰ | ۱۱۹۵ |
| SC4-75 | ۲۵ | ۱۷۵ | ۷۵ | ۵۲۵ | ۴ | ۲۵۰ | ۱۰۰ | ۰/۵ | ۲/۵ | ۰ | ۰ | ۱۱۹۵ |
| S8 | ۱۰۰ | ۷۰۰ | ۰ | ۰ | ۸ | ۲۵۰ | ۱۰۰ | ۰/۵ | ۲/۵ | ۰ | ۰ | ۱۱۹۵ |
| SC8-50 | ۵۰ | ۳۵۰ | ۵۰ | ۳۵۰ | ۸ | ۲۵۰ | ۱۰۰ | ۰/۵ | ۲/۵ | ۰ | ۰ | ۱۱۹۵ |
| SC8-75 | ۲۵ | ۱۷۵ | ۷۵ | ۵۲۵ | ۸ | ۲۵۰ | ۱۰۰ | ۰/۵ | ۲/۵ | ۰ | ۰ | ۱۱۹۵ |
| BS4 | ۱۰۰ | ۷۰۰ | ۰ | ۰ | ۴ | ۲۵۰ | ۱۰۰ | ۰/۵ | ۲/۵ | ۱ | ۷ | ۱۱۹۵ |
| BSC4-50 | ۵۰ | ۳۵۰ | ۵۰ | ۳۵۰ | ۴ | ۲۵۰ | ۱۰۰ | ۰/۵ | ۲/۵ | ۱ | ۷ | ۱۱۹۵ |
| BSC4-75 | ۲۵ | ۱۷۵ | ۷۵ | ۵۲۵ | ۴ | ۲۵۰ | ۱۰۰ | ۰/۵ | ۲/۵ | ۱ | ۷ | ۱۱۹۵ |
| BS8 | ۱۰۰ | ۷۰۰ | ۰ | ۰ | ۸ | ۲۵۰ | ۱۰۰ | ۰/۵ | ۲/۵ | ۱ | ۷ | ۱۱۹۵ |
| BSC8-50 | ۵۰ | ۳۵۰ | ۵۰ | ۳۵۰ | ۸ | ۲۵۰ | ۱۰۰ | ۰/۵ | ۲/۵ | ۱ | ۷ | ۱۱۹۵ |
| BSC8-75 | ۲۵ | ۱۷۵ | ۷۵ | ۵۲۵ | ۸ | ۲۵۰ | ۱۰۰ | ۰/۵ | ۲/۵ | ۱ | ۷ | ۱۱۹۵ |

شدند مخلوط محلول سود و آب شیشه به میکسر اضافه شد. ۲ تا ۳ دقیقه فرصت داده شد تا ملات با یکدیگر به خوبی ترکیب شوند. در نهایت آب به آن اضافه گردید. بعد از ۱-۲ دقیقه مخلوط یکنواختی به دست آمد. ملات بدست آمده را در سه مرحله درون قالب‌های روغن کاری شده ریخته و هر بار با چکش مخصوص کوبش انجام شد. با توجه به نوع قالب‌های استفاده شده با چند آزمون و خطای اولیه در ملات تازه تخلخل زیادی مشاهده گردید که علت آن چسبندگی بالای ملات به دیواره قالب بود. نمونه‌ها به مدت ۱ دقیقه روی دستگاه ویبره قرار گرفت و حباب‌های هوای محسوس در داخل و اطراف قالب تا حد ممکن خارج کرده شد. در انتها قالب‌ها طبق شرایط عمل‌آوری یکسان در گرمخانه قرار داده شد.

۳-۲- شرایط نگهداری نمونه‌ها در محلول اسید سولفوریک

برای بررسی عملکرد نمونه‌های ساخته شده در برابر تهاجم اسید سولفوریک، نمونه‌های ملات پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، در محلول اسید

نمونه شماره ۱ در مولار ۴ و نمونه شماره ۴ در مولار ۸ انتخاب شد. دلایل انتخاب این طرح اختلاط از بین تمام نمونه‌ها به عوامل زیر بستگی داشت: ۱- تخلخل. ۲- افزایش حجم پس از گیرش اولیه ملات. ۳- میزان چسبندگی. ۴- زمان گیرش در مقایسه با سایر طرح اختلاط‌های ملات. برای مثال در نمونه طرح ۳ و ۶، تخلخل نمونه‌ها به طور محسوس با بقیه طرح اختلاط‌های سرباره، تفاوت فاحشی داشت. به طور کلی در بتن ژئوپلیمر معیار چشمی و مقایسه طرح اختلاط‌ها با هم نقش مهمی دارد و علت آن تشکیل نشدن پیوندهای ژئوپلیمراسیون در طرح اختلاط‌های معیوب به دلیل رتولوزی نامناسب است.

۳-۱- روش اجرای طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری

ابتدا مصالح طبق طرح اختلاط نهایی اندازه‌گیری شد. ماسه درون میکسر ریخته شد و بعد از چرخش میکسر به مدت ۱ دقیقه سرباره به میکسر اضافه شد. بعد از ۲ دقیقه که سنگدانه و سرباره به خوبی مخلوط



شکل ۲. مقاومت فشاری نمونه ملات ژئوپلیمر ساخته شده از کائولن و سرباره.

Fig. 2. Compressive strength of geopolymer mortar samples made of kaolin and slag.

آنها با قرار دادن در زیر جک بدست آمد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری سنین مختلف در شکل ۳ آمده است. با توجه به نتایج شکل ۳، کمترین مقاومت فشاری ۷ روزه مربوط به نمونه طرح SC8-75 و بیشترین مقاومت فشاری ۷ روزه مربوط به نمونه طرح S8 اختصاص یافت. در نمونه طرح SC8-75 با افزودن ۷۵٪ پودر سرامیک کائولن در کنار ۲۵٪ سرباره، افت مقاومت بسیاری مشاهده شد. مقایسه نمونه طرح SC8-75 با نمونه طرح SC4-75 با ترکیب ۷۵٪ پودر کائولن و ۲۵٪ سرباره در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در مولار ۴ نسبت به مولار ۸ مقاومت بهتری را نشان داد. در مقایسه نمونه شاهد طرح اختلاط در مولار ۸، مقاومت بهتری نسبت به مولار ۴ حاصل شد زیرا ترکیب سدیم هیدروکسید با سدیم سیلیکات محلول، بهترین فعال ساز را ایجاد می کند. محلول های سدیم هیدروکسید با غلظت ۸ مولار، مقدار بیشتری از سرباره را در خود حل کرده و مقاومت فشاری بهتری را ارائه می کنند.

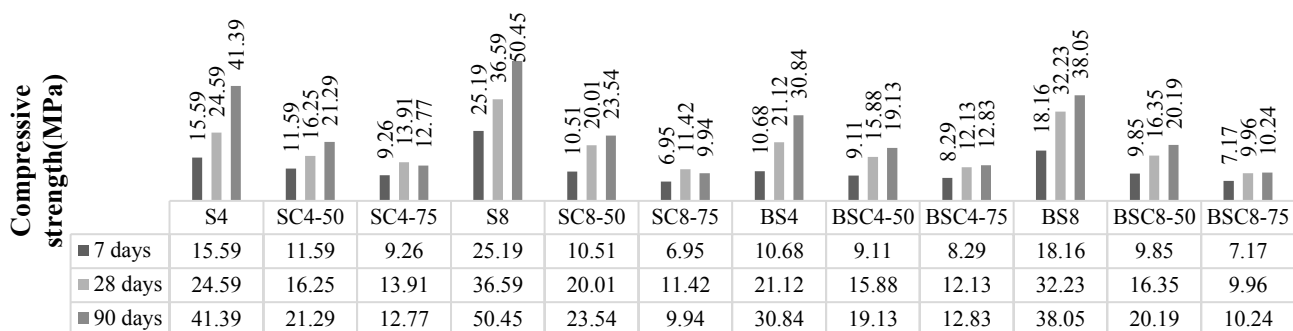
زمانی که در طرح اختلاط از پلیمر استفاده شد در مقایسه دو نمونه طرح BSC8-75 با SC8-75 در سنین ۷ و ۹۰ روزه مقاومت بهتری ایجاد شد. این امر به مقدار اضافی پودر کائولن بتن ژئوپلیمری دارای ۷۵٪ کائولن ارتباط داشت که واکنش ژئوپلیمراسیون نداده و باعث خود خشکیدن بتن شده است. البته نمونه طرح SC8-75 در سن ۲۸ روزه مقاومت بهتری را نشان داد؛ چون افت نمونه طرح BSC8-75 در سن ۲۸ روز ناشی از وجود

سولفوریک با pH برابر با ۱ قرار داده شدند. بدین منظور از دستگاه خاصی که برای این آزمایش در آزمایشگاه خاک سنجش بنیان سازه رشت موجود است، استفاده شد. مکانیزم گردشی محلول اسید سولفوریک بین مخازن حاوی نمونه ها و مخزن اصلی اسید سبب می شود که محلول اسیدی به طور همگن در اطراف نمونه ها قرار بگیرد. از طرفی به دلیل واکنش اسید با نمونه ها، قدرت اسیدیته آن کاهش می یابد. در این شرایط pH محلول به صورت هفتگی کنترل شده و در صورت نیاز با افزودن اسید تنظیم می گردد.

۴- آزمایش ها و تفسیر نتایج

۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری

یکی از رایج ترین آزمون های بتن و ملات، آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های ملات است که کیفیت بتن را از نظر خصوصیات مکانیکی نشان می دهد. مطابق شکل ۲ آزمایش تعیین مقاومت فشاری مطابق با استاندارد [۳۴] ASTM C109 روی آزمون های مکعبی به ضلع ۵۰ میلی متر و در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد. آزمون ها به مدت ۲۴ ساعت با دمای اون $110^{\circ}C$ عمل آوری شدند. سپس به مدت ۲۴ ساعت در داخل اون باقی ماندند تا کاملا سرد شوند. سپس آزمون ها از قالب ها خارج و در محیط آزمایشگاه تا سن آزمایش مقاومت فشاری نگهداری شدند. آزمون ها عمل آوری شده در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، مقاومت فشاری



شکل ۳. نمودار مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه ملات ژئوپلیمری و نمونه‌های شاهد.

Fig. 3. 7, 28 & 90 days compressive strength diagram of geopolymetric mortar and control samples.

به کار می‌رود، آزمایش RCMT است که بر اساس استاندارد [۳۶] NT BUILD 492 انجام می‌شود. در انتهای آزمایش، نمونه‌ها از سلول خارج شده و به دو قسمت تقسیم می‌شود. پس از آن با پاشش محلول ۰/۱ نرمال نیترات نقره بر روی هر یک از قطعات، عمق نفوذ یون‌های کلراید که با رنگ سفید ظاهر می‌گردد، قرائت می‌شود (شکل ۴). در نهایت ضریب مهاجرت یون‌های کلراید محاسبه می‌گردد. این آزمایش در سن ۲۸ روز بر روی نمونه‌های بتنی انجام گرفته است.

آزمایش مهاجرت تسریع شده یون‌های کلراید (RCMT) در سن ۲۸ روز بر روی نمونه‌های بتنی انجام شد. شکل ۵ مقادیر ضریب انتشار یون‌های کلراید را نشان می‌دهد. با کم کردن درصد پودر سرامیک از ۷۵٪ به ۵۰٪، از میزان ضریب انتشار یون‌های کلراید در تمامی طرح‌ها کاسته می‌شود. این مطلب نشان دهنده پیشرفت فرآیند هیدراسیون با سپری شدن زمان و کاهش نفوذپذیری در نمونه‌ها است. استفاده از مواد جایگزین موجب کاهش میزان ضریب انتشار نمونه‌ها می‌شود و نفوذپذیری در مقابل یون‌های کلراید کاهش می‌یابد. این کاهش در ضریب انتشار به علت واکنش پوزولانی و تشکیل ژل ثانویه C-S-H بوده که نقش قابل توجه این واکنش‌ها در نفوذپذیری بتن است. نمونه طرح شاهد S8 و پس از آن SC8-50 کمترین ضریب انتشار را بین نمونه‌های حاوی مواد جایگزین داشتند که دلیل آن شاخص فعالیت پوزولانی بیشتر در پودر کائولن SC8-50 است. در سن ۲۸ روز، عملکرد مناسب‌تری در نمونه‌های حاوی ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره نسبت به نمونه‌های حاوی ۷۵٪ پودر کائولن و ۲۵٪ سرباره مشاهده شد. تمامی طرح‌های حاوی مواد جایگزین (به جز BS4، BSC4-75 و

پلیمر (SBR) است. در بررسی نمونه طرح SC4-75 با BSC4-75 در مولارته ۴، مقاومت بهتری در سنین ۷ و ۲۸ روزه دیده شد. در سن ۹۰ روزه تقریباً هر دو نمونه دارای مقاومت یکسانی بودند. همچنین در مقایسه پلیمر و نسبت پودر کائولن ۵۰٪ با سرباره ۵۰٪ در دو نمونه طرح SC50 با BSC50 در مولار ۴ و ۸ مقاومت بهتری در نمونه SC50 در مولار ۴ دیده شد. از دلایل اصلی در کاهش مقاومت فشاری نمونه طرح SC8-50 و 50 نمونه طرح BSC4-50 این است که لاتکس (SBR) باعث ایجاد حباب هوا در ساختار ملات ژئوپلیمری می‌شود و همین امر سبب تخلخل بیشتر در ملات و در نتیجه باعث کاهش مقاومت فشاری می‌گردد. همچنین کاربرد پلیمر در ملات، فرآیند هیدراسیون را به تعویق می‌اندازد و مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد. نتایج نسبت طرح اختلاط ۵۰٪ پودر کائولن با ۵۰٪ سرباره مقاومت فشاری بهتری را نسبت به طرح اختلاط ۷۵٪ پودر کائولن با ۲۵٪ سرباره نشان می‌دهد. استفاده از ۷۵٪ پودر کائولن باعث افت مقاومت فشاری در نمونه‌های طرح اختلاط خواهد شد. دلیل این امر مقدار اضافی پودر سرامیک کائولن بتن ژئوپلیمری دارای ۷۵٪ کائولن است که واکنش ژئوپلیمراسیون ایجاد نکرده و باعث خودخشکیدن بتن شده است. به عبارت دیگر، آب مورد نیاز بتن توسط کائولن جذب شده و آب کافی برای انجام واکنش هیدراسیون از دست می‌رود [۳۵].

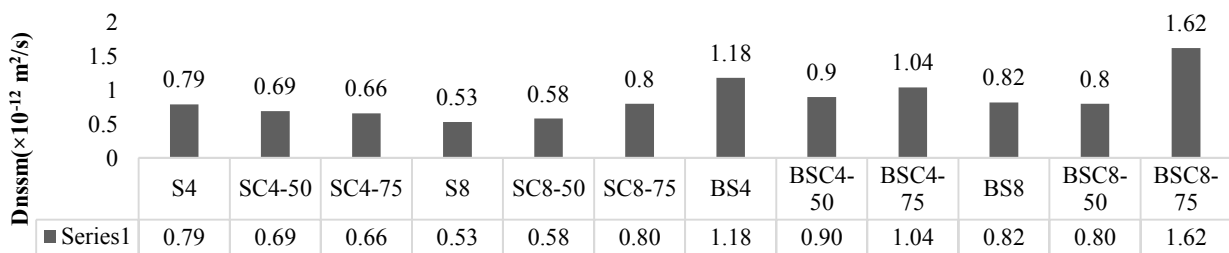
۴-۲- آزمایش مهاجرت تسریع یافته یون‌های کلراید (RCMT)

یکی از آزمایش‌هایی که برای ارزیابی ضریب انتشار یون‌های کلراید



شکل ۴. نمونه ملات ژئوپلیمری ساخته شده از کائولن و سرباره بعد از پاشش محلول نیترات نقره برای انجام آزمایش RCMT.

Fig. 4. Geopolymeric mortar sample made of kaolin and slag after spraying silver nitrate solution for RCMT test.



شکل ۵. نتایج ضریب انتشار تسریع شده یون‌های کلراید.

Fig. 5. The results of the accelerated diffusion coefficient of chloride ions.

میدان الکتریکی یک رفتار الکتریکی را ارائه می‌نماید. با تغییر فرکانس جریان الکتریکی می‌توان به مقاومت حقیقی بتن دست یافت و از این راه مقدار مقاومت ویژه را بدست آورد. بتن‌های با مقاومت ویژه بیشتر از $1 \text{ cm} \cdot \text{k}$ ۲۰ در برابر نفوذ یون کلر به شدت مقاوم هستند. رابطه مقاومت الکتریکی بتن با آهنگ خوردگی بر اساس پیشنهاد ACI 222 در جدول شماره ۱۰ ارائه شده است.

مقاومت الکتریکی به نفوذپذیری بتن و رسانایی آن بستگی دارد. در بتن‌های ژئوپلیمری با توجه به استفاده از محلول‌های قلیایی در ساخت بتن، رسانایی الکتریکی می‌تواند نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی به روش ورنر را تحت تأثیر قرار دهد. بدین رو این آزمایش ژئوپلیمری چندان مناسب

(BSC8-75) در سن ۲۸ روز عملکرد مناسبی داشته اند.

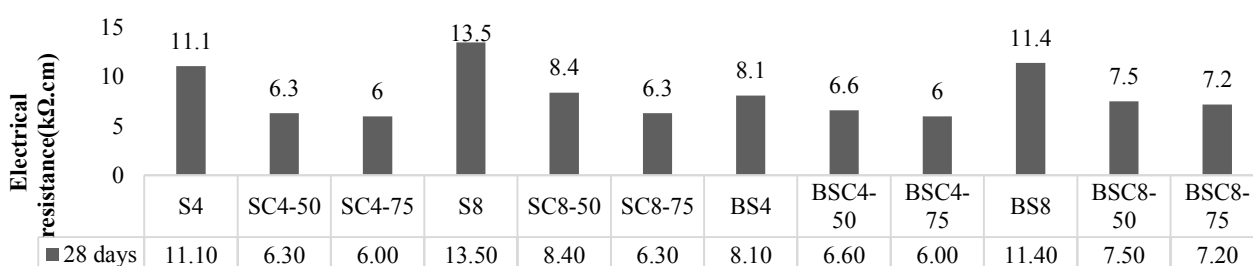
۴-۳- آزمایش مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی بتن به عنوان یکی از مؤلفه‌های شاخص در تعیین دوام بتن شناخته می‌شود. در واقع مقدار مقاومت الکتریکی بتن به نفوذپذیری، رطوبت و ساختار شیمیایی آب حفره‌ای بتن بستگی دارد. با روش ورنر می‌توان بدون مغزه‌گیری در محل، میزان مقاومت الکتریکی سطحی را به دست آورد. از روی اعداد بدست آمده مقاومت الکتریکی سطحی بتن محاسبه شد. آزمایش مطابق دستورالعمل [۳۷] FM5-578 بر روی نمونه‌های مکعبی ۵ سانتی‌متری در شرایط اشباع با سطح خشک صورت گرفت. بتن تحت تاثیر

جدول ۱۰. تاثیر مقاومت الکتریکی بتن بر آهنگ خوردگی آرماتور (ACI 222) [۳۹].

Table 10. Effect of electrical resistance of concrete on corrosion rate of reinforcement (ACI 222) [39].

| آهنگ خوردگی | خیلی زیاد | زیاد | متوسط تا کم | ناچیز |
|---------------------------------|-----------|---------|-------------|-------|
| مقاومت ویژه الکتریکی (kΩ.cm) | <۵ | ۱۰ تا ۵ | ۲۰ تا ۱۰ | >۲۰ |



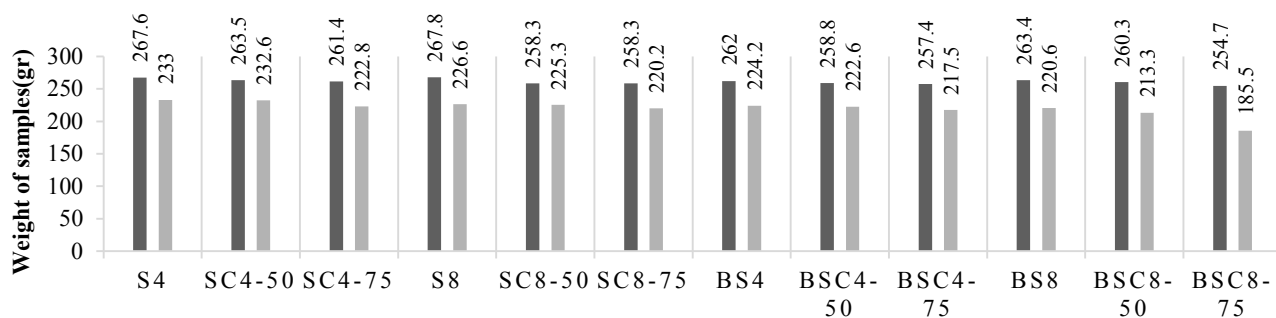
شکل ۶. نمودار مقایسه آزمایش مقاومت الکتریکی نمونه‌های عمل‌آوری شده در سن ۲۸ روز ملات ژئوپلیمری ساخته شده از کائولن و سرباره کوره آهنگدازی.

Fig. 6. Comparison chart of electrical resistance test of samples treated at the age of 28 days of geopolymetric mortar made of kaolin and slag of the blasting furnace.

طرح شاهد در مولار ۸ و نمونه شاهد S۴، با عمل‌آوری تا سن ۲۸ روز متوسط تا کم خواهد بود.

مطابق شکل ۶ بر اساس روش و نر میزان مقاومت الکتریکی در بتن‌های ژئوپلیمری حاوی سرباره و پودر کائولن که با دو محلول سود و آب شیشه فعال شده است، با افزایش مقدار ماده کائولن کاهش پیدا می‌کند. این موضوع در تحقیقات بوئنفلد و همکاران چنین بیان شده که نتایج مقاومت الکتریکی در این نوع بتن‌ها رسانایی الکتریکی را نشان می‌دهد و نفوذپذیری عامل تعیین‌کننده مقاومت برای این بتن‌ها نیست [۴۱]. تأثیر ریزتر شدن و گسسته شدن منافذ، روی مقاومت الکتریکی بسیار بالاتر از تأثیر آنها در خواص مقاومتی است. همچنین مقاومت الکتریکی بتن، علاوه بر حجم و ساختار منافذ به ساختار شیمیایی آب منفذی نیز بستگی دارد؛ در صورتی که خواص مقاومتی با این پارامترها ارتباط خاصی ندارد. کاربرد سرباره و کائولن به لحاظ رقیق‌سازی و همچنین قابلیت ترکیب یون‌های مختلف نظیر Na^+ و K^+ در فرآورده‌های واکنش، باعث یون‌های $(OH)^-$ در آب منفذی

نیست [۳۸]. بررسی نتایج به دست آمده از شکل ۶ مربوط به آزمایش مقاومت الکتریکی نشان می‌دهد بیشترین مقاومت الکتریکی به نمونه طرح شاهد در مولار ۸ و کمترین مقاومت الکتریکی به نمونه طرح SC4-BSC4-75 و 75 اختصاص دارد. نتایج نسبت طرح اختلاط ۵۰٪ پودر کائولن با ۵۰٪ سرباره، مقاومت الکتریکی بهتری را نسبت به طرح اختلاط ۷۵٪ پودر کائولن با ۲۵٪ سرباره نشان داد. در مقایسه نمونه شاهد طرح اختلاط در مولار ۸، مقاومت بهتری نسبت به مولار ۴ مشاهده شد. از آنجا که رسانایی الکتریکی بتن بر اثر سهولت ارتباط محلول حفره‌ای در ساختار بتن افزایش می‌یابد، می‌توان افزایش مقاومت الکتریکی بتن را نشانی از کاهش نفوذپذیری آن دانست. مواد جایگزین سیمان بر اثر واکنش‌های پوزولانی و تولید ژل ثانویه، ضمن پر کردن ریزساختار بتن (اصلاح اندازه و توزیع حفرات)، ارتباط بین این فضاها را قطع نموده و سبب افزایش مقاومت الکتریکی بتن می‌شوند [۴۰]. با توجه به ناچیز بودن نرخ خوردگی آرماتور در بتن‌هایی با مقاومت الکتریکی ۱۰ تا ۲۰ ($k\Omega.cm$)، می‌توان اظهار داشت که نرخ خوردگی در دو نمونه



شکل ۷. وزن قبل و بعد از اشباع با اسید برای ۹۰ روز (مکعب ۵۰×۵۰×۵۰ میلیمتر).

Fig. 7. Weight before and after saturation with acid for 90 days (cube 50×50×50 mm).

در محلول اسیدی) گزارش گردید.

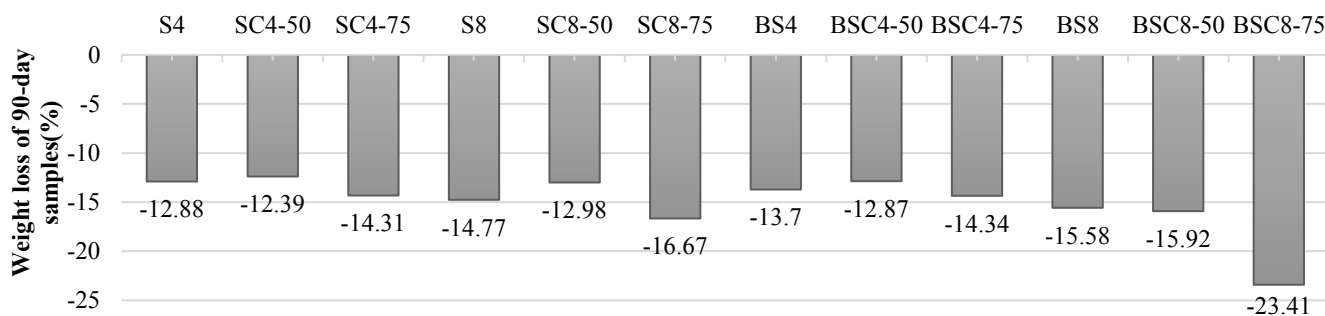
۴-۴- افت وزن نمونه‌های ملات در محلول اسید سولفوریک

پس از قرارگیری نمونه‌ها در معرض تهاجم اسیدی و اندازه‌گیری وزن آنها در سنین ۹۰ روزه، نتایج این اندازه‌گیری‌ها به صورت نسبت کاهش وزن نمونه به وزن اولیه آن در شکل ۷ و ۸ آورده شده است. با بررسی نتایج درمی‌یابیم که اثر مواد جایگزین سیمان بر شدت خوردگی و کاهش وزن نمونه‌ها در محیط اسیدسولفوریک مثبت بوده است. استفاده از این مواد عملکرد ملات را در برابر تهاجم اسیدسولفوریک بهبود می‌بخشد. این اثر مثبت را می‌توان ناشی از کاهش نفوذپذیری به علت کاهش حجم و از بین رفتن پیوستگی ریز حفرات و نیز مصرف شدن آهک به دلیل واکنش پوزولانی دانست. مقایسه اثر پوزولان طبیعی و سرباره در جایگزینی سیمان، عملکرد تقریباً یکسان این دو ماده را در بهبود مقاومت بتن در برابر تهاجم اسیدسولفوریک نمایان می‌سازد. در ملات‌های ژئوپلیمری، نمونه‌های حاوی ۵۰٪ پودر کائولن با ۵۰٪ سرباره، عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های حاوی ۷۵٪ پودر کائولن با ۲۵٪ سرباره در برابر تهاجم اسیدسولفوریک داشت که دلیل آن نفوذپذیری کمتر، مقدار کلسیم هیدروکسید کمتر ماتریس ژئوپلیمر و ساختار متراکم‌تر نمونه‌های ساخته شده با ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره است که نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه‌های حاوی ۷۵٪ پودر کائولن و ۲۵٪ سرباره دارند. نتایج حاکی از آن است که اضافه کردن پودر کائولن در بتن برای بازه ۹۰ روز غوطه‌وری در اسید، موجب افت وزنی کمتری نسبت به

می‌شود. با توجه به نقش مهم یون‌های $(OH)^-$ در هدایت الکتریکی بتن، کاهش آنها در بتن‌های حاوی مواد مکمل سیمانی می‌تواند باعث افزایش مقاومت الکتریکی شود.

نتایج نشان می‌دهد که پودر کائولن و سرباره، به طرز چشمگیری مقاومت الکتریکی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد به طوری که بتن‌های حاوی پودر کائولن و سرباره در مواردی حتی تا بیش از ۱/۵ برابر نسبت به نمونه شاهد، کاهش مقاومت الکتریکی را نشان می‌دهد. همچنین هر چه فعالیت پوزولانی کائولن و سرباره کمتر باشد مقدار مقاومت الکتریکی کمتر می‌شود. علت اصلی این امر ساختار حفرات موئینه و نفوذپذیری کم بتن است.

آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی به علت رسانایی الکتریکی بتن‌های ژئوپلیمری بر اساس روشی که در این مقاله مطرح شد برای بتن‌های ژئوپلیمری سرباره‌ای توصیه نمی‌شود. با توجه به رابطه مقاومت الکتریکی بتن با آهنگ خوردگی بر اساس پیشنهاد ACI 222 (جدول ۱۰) و نمونه طرح‌های اختلاط بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره و پودر سرامیک، این بتن کاملاً در خطر بسیار زیاد خوردگی قرار دارد. به دلیل نبودن مرجعی استاندارد برای اندازه‌گیری اثر اسید سولفوریک بر افت وزن نمونه‌های ملات ساخته شده، مطابق با روش مورد استفاده مرجع [۴۲]، نمونه‌های ملات مکعبی به ابعاد ۵۰ × ۵۰ × ۵۰ میلی‌متر پس از ۲۸ روز عمل‌آوری داخل محلول اسید سولفوریک با pH برابر با ۱ قرار داده شد. همچنین وزن نمونه‌ها در سن ۹۰ روز پس از قرارگرفتن در محلول اسید سولفوریک اندازه‌گیری شدند. در نهایت نتایج به صورت نسبت کاهش وزن نمونه به وزن اولیه آن (پیش از قرارگیری



شکل ۸. نتایج آزمایش درصد کاهش وزن نمونه‌های ملات در محلول اسید سولفوریک.

Fig. 8. Results of the weight loss test of mortar samples in sulfuric acid solution.

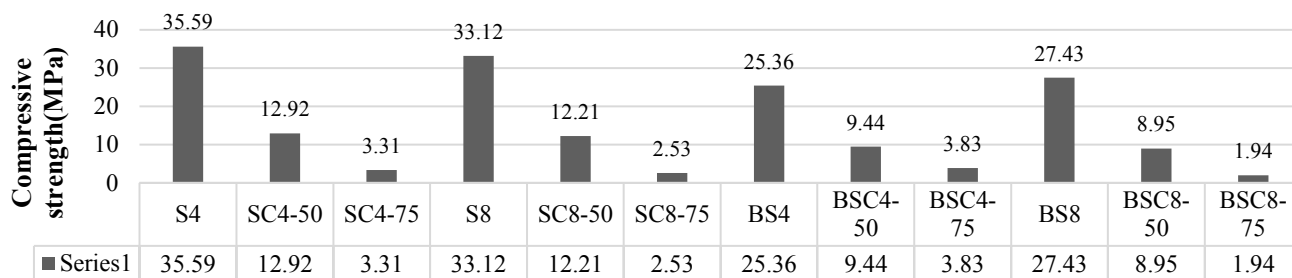
نتایج آزمایش کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ژئوپلیمری این پژوهش پس از قرارگرفتن در معرض تهاجم اسیدسولفوریک در شکل ۹ گزارش شده است. همانطور که نتایج ارائه شده نشان می‌دهد، روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در محلول اسیدسولفوریک مشابه روند کاهش وزن آنها بوده است. در مورد نمونه‌های ملات ژئوپلیمری اثر کلی استفاده از مواد جایگزین سیمان به دلیل مصرف سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات موجود در ماتریس خمیری مثبت ارزیابی می‌شود. در خصوص نتایج بتن‌های ژئوپلیمری نیز مطابق با آنچه که در آزمایش کاهش وزن نمونه‌ها در محیط اسیدسولفوریک ذکر شد، استفاده از ملات ژئوپلیمری در این پژوهش به دلیل نفوذپذیری کم، استفاده از کائولن ۰.۷۵٪ و ۰.۵۰٪، سرباره ۰.۲۵٪ و ۰.۵۰٪ و مقادیر اندک سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات سبب کاهش بیشتر مقاومت فشاری شده است.

بر اساس استاندارد ASTM-C267-12، به منظور ارزیابی نمونه بتنی در برابر تهاجم مواد شیمیایی می‌توان از تغییرات وزن، مقاومت فشاری و سیمای نمونه‌ها به عنوان معیار ارزیابی بهره برد. در این پژوهش تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتنی پس از ۹۰ روز نگهداری در محیط حاوی ۵٪ اسیدسولفوریک اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های خورده شده در شکل ۹ مشاهده می‌شود. در بین تمام نمونه‌ها، نمونه طرح شاهد با کمترین کاهش مقاومت فشاری بالاترین دوام را به خود اختصاص داد. در حالی که نمونه طرح BSC8-75 حاوی ۰.۷۵٪ پودر کائولن و ۰.۲۵٪ سرباره و پلیمر (SBR) کمترین مقاومت فشاری را

نمونه شاهد می‌شود. پس از ۹۰ روز خوردگی، مقایسه افت وزنی نمونه‌های شاهد با نمونه طرح‌های حاوی ۰.۵۰٪ پودر کائولن و ۰.۵۰٪ سرباره، افت وزنی کمتری را نشان داد. با افزایش مقدار پودر کائولن در ملات ژئوپلیمری دوام در برابر حمله اسیدسولفوریک کاهش می‌یابد که این دوام در طرح‌های حاوی ۰.۷۵٪ پودر کائولن و ۰.۲۵٪ سرباره نسبت به نمونه طرح‌های شاهد، افت وزنی بیشتری را نشان می‌دهد. از دلایل اصلی آن می‌توان به نفوذپذیری بیشتر و مقدار کلسیم هیدروکسید بیشتر ماتریس ژئوپلیمر اشاره کرد که سبب مقاومت کمتر در برابر حمله اسید سولفوریک شده است.

۴-۵- افت مقاومت نمونه‌های ملات در محلول اسید سولفوریک

کاهش مقاومت نمونه‌های ملات در داخل محیط اسیدی فاکتور مناسبی برای شناسایی و بررسی ملات مقاوم در مقابل تهاجم اسیدی است. با توجه به مکانیزم تهاجم اسیدی، اسید سولفوریک در تماس با ملات، با خمیر سیمانی آن واکنش داده و آن را به رسوب سفیدرنگ تبدیل می‌کند. این فرآیند باعث از دست رفتن مقاومت فشاری ملات شده و کل ترکیب را به خمیر سست تبدیل می‌کند و از هم می‌پاشاند. مطابق با روش مورد استفاده مرجع [۴۲]، نمونه‌های ملات مکعبی با ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر قرار گرفته در معرض اسید سولفوریک در سن ۹۰ روز تحت انجام آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. مقاومت فشاری نمونه‌هایی که همزمان ساخته و عمل‌آوری شده‌اند در این سنین اندازه‌گیری شد و در نهایت نتایج کاهش مقاومت فشاری گزارش گردید.



شکل ۹. کاهش مقاومت فشاری ۹۰ روزه در محیط حاوی محلول ۵ درصد اسید سولفوریک (MPa)

Fig. 9. Reduction of 90-day compressive strength in an environment containing 5% sulfuric acid solution (MPa).

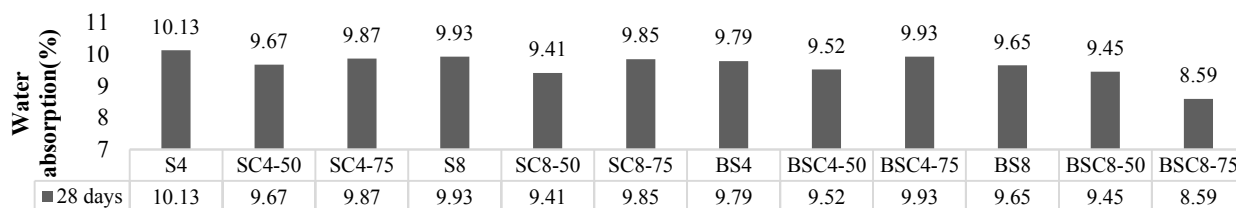
۴-۶- آزمایش جذب آب

این آزمایش طبق استاندارد [۴۶] ASTM C642 انجام شده است. هدف از این آزمایش سنجش میزان کیفیت سطحی بتن و خصوصیات دوام آن است. نمونه‌ها بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری برای جذب آب مورد بررسی قرار گرفتند. در این آزمایش ابتدا نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر ساخته شد که پس از عمل‌آوری در دمای ۱۱۰°C اون، از قالب باز شدند و بعد از قرار دادن نمونه‌ها در دمای ۲۶°C محیط، وزن آنها اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها برای حداقل ۴۸ ساعت به صورت غرقاب در داخل آب قرار گرفت و سپس وزن شد و مجدداً ۲۴ ساعت در داخل آب قرار گرفت و مجدداً وزن گردید. در صورتی که تغییرات وزن کمتر از ۰/۵ درصد باشد، نمونه به حالت اشباع رسیده و می‌توان عدد نهایی را گزارش نمود.

ژئوپلیمرها دارای جذب آب بسیار پایینی هستند که این مسأله بیانگر دوام خوب این نوع بتن‌هاست. در مطالعه نمونه طرح‌های اختلاط، جذب آب بتن بعد از گذشت ۲۸ روز نگهداری در محیط آزمایشگاه روی نمونه‌ها انجام شد. همان‌گونه که در شکل شماره ۱۰ مشاهده می‌شود، جذب آب نمونه‌های بتنی، ناشی از پدیده مویینگی در بتن است. مطابق شکل ۱۰ نمونه طرح اختلاط با مقدار ۵۰٪ و ۷۵٪ پودر کائولن، جذب آب تقریباً یکسانی را نشان داد. به عبارتی در این نمونه طرح‌های اختلاط، تفاوت معنا داری به لحاظ جذب آب بتن دیده نشد. همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود افزودن ۷۵ درصد پودر کائولن بر افزایش جذب آب بتن تأثیر مثبت دارد. علت این پدیده، تغییر در پیوستگی بتن با افزودن پودر کائولن است که راه را برای نفوذ آب به بتن فراهم می‌کند. طبق شکل ۱۰ نمونه طرح اختلاط

پس از ۹۰ روز نگهداری در محیط سولفاتی از خود نشان داد. به طور کلی خواص مواد جایگزین سیمان و پرکننده نظیر دانه‌بندی، شکل و بافت ذرات و همچنین ترکیب شیمیایی آنها بر دوام بتن در برابر محیط‌های خورنده نظیر اسیدسولفوریک تأثیرگذارند.

در مقایسه نمونه‌های S4، S8، BS4 و BS8 با سایر نمونه‌ها دو مزیت سبب کاهش کمتر مقاومت فشاری در برابر اسید سولفوریک می‌شود. این موضوع در مطالعات سبزر و همکاران بدین صورت بیان گردیده است که اول وجود ذرات دانه‌بندی که سبب کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن می‌گردد و ماتریس متراکم‌تری را به وجود می‌آورد. دوم ایجاد واکنش شیمیایی بین ذرات سرباره و اسیدسولفوریک که تا حدی محیط اسیدی بتن را خنثی می‌سازد [۴۳]. تحقیقات باسوونی و همکاران نشان داد که وجود سدیم سیلیکات و سدیم هیدروکسید در ترکیب با سرباره، سبب افزایش مقاومت ملات ژئوپلیمری در محیط‌های خورنده می‌شود. وجود ذرات ریز پودر سرباره تا حدودی ماتریس بتن را متراکم می‌سازد و دوام بتن را در برابر حمله اسید سولفوریک کنترل می‌کند [۴۴]. مطابق شکل ۹ با افزایش درصد پودر کائولن، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد. در همه طرح‌های اختلاط بتن ژئوپلیمری با افزایش درصد جایگزینی پودر کائولن، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. در همه طرح‌های ۷۵٪ پودر کائولن با ۲۵٪ سرباره، کاهش شدید مقاومت فشاری در برابر حمله اسیدسولفوریک دیده می‌شود؛ این پدیده مربوط به ذات متخلخل و سطح مخصوص بزرگ ذرات پودر کائولن است که موجب ایجاد فضای خالی در ماتریس بتن برای نفوذ یون‌های سولفور و اسیدها می‌گردد [۴۵].



شکل ۱۰. نمودار مقایسه آزمایش جذب آب نمونه‌های عمل آوری شده در سن ۲۸ روز ملات ژئوپلیمری ساخته شده از کائولن و سرباره کوره آهنگدازی.

Fig. 10. Comparison chart of water absorption test of treated samples at the age of 28 days of geopolymetric mortar made of kaolin and slag of blasting furnace.

داده کمتر خواهد بود. ارتباط بین نتایج مختلف به دست آمده در آزمایش‌های انجام شده در شکل‌های ۱۱-۱۳ دیده می‌شود. نمودارها در اشکال ۱۱ تا ۱۳ نشان می‌دهند که ارتباط مستقیم بین مقاومت‌های مختلف و دوام در این ملات‌ها وجود دارد و مقدار ضریب همبستگی بین آنها بالا است و با افزایش زمان عمل آوری ملات تا اندازه ای بیشتر می‌شود.

۵- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر با مطالعه بر روی اثر ملات‌های ژئوپلیمری بر مبنای کائولن ۰.۵٪ و ۰.۷۵٪ و سرباره ۰.۵٪ و ۰.۲۵٪ به صورت انفرادی و ترکیبی در مولار ۴ و ۸ نتایج زیر به دست آمد:

۱- نتایج نمونه طرح اختلاط ۰.۵٪ پودر کائولن با ۰.۵٪ سرباره، نسبت به نمونه طرح اختلاط ۰.۷۵٪ پودر کائولن با ۰.۲۵٪ سرباره، مقاومت فشاری بهتری را نشان داد.

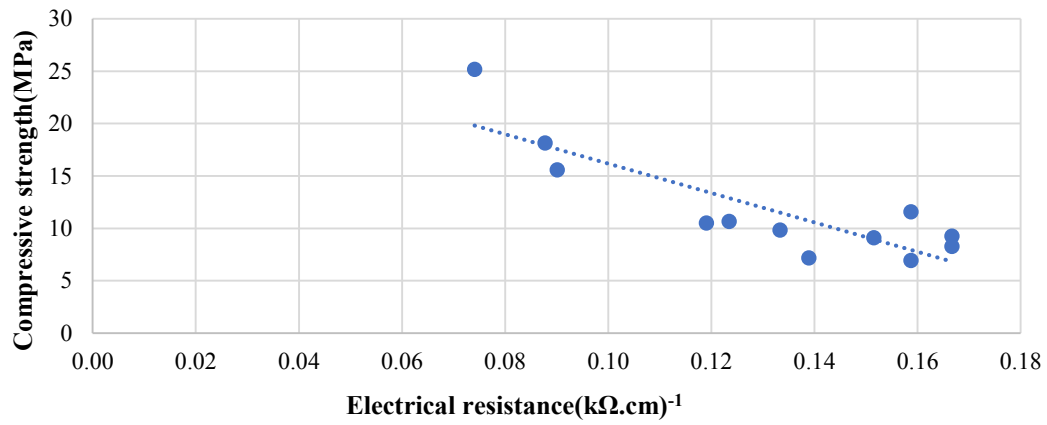
۲- جایگزینی پودر کائولن و سرباره، باعث شد میزان نفوذ یون‌های کلراید در نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد کاهش یابد به طوری که ضریب انتشار یون‌های کلراید را نسبت به مقدار شاخص فعالیت پوزولانی پودر کائولن کاهش داده است.

۳- نتایج مقاومت الکتریکی نشان می‌دهد که پودر کائولن و سرباره، به طرز چشمگیری مقاومت الکتریکی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد؛ به طوری که برای بتن‌های حاوی پودر کائولن و سرباره در مواردی حتی تا بیش از ۱/۵ برابر نسبت به نمونه شاهد، کاهش مقاومت الکتریکی مشاهده می‌شود.

BSC8-75 کمترین جذب آب و نمونه طرح اختلاط S4 بیشترین جذب آب را داشت. خاصیت جذب آب بالا در سطح ذرات پودر کائولن به دلیل وجود خلل و فرج در سطح آن می‌تواند رابطه مستقیم درصد جذب آب را با درصد اضافه کردن پودر کائولن نشان دهد. به طور کلی ریزدانه بودن پودر کائولن، حجم خمیری ملات را افزایش می‌دهد و در نتیجه سبب ایجاد فاصله بیشتر بین سنگدانه‌ها می‌شود که این خود به تخلخل بیشتر و افزایش درصد جذب آب می‌انجامد. پر نشدن فضاهای خالی به دلیل عدم تشکیل ژل‌های ثانویه سیلیکاتی حاصل از فعالیت پوزولانی مهمترین دلیل این پدیده است. علاوه بر این وجود پودر کائولن در ملات، واکنش ژئوپلیمریزاسیون را پدید می‌آورد و در نتیجه آب اضافی از بتن خارج نمی‌شود و ریز ترک‌ها کاهش نمی‌یابد که این امر به افزایش جذب آب بتن منجر می‌شود.

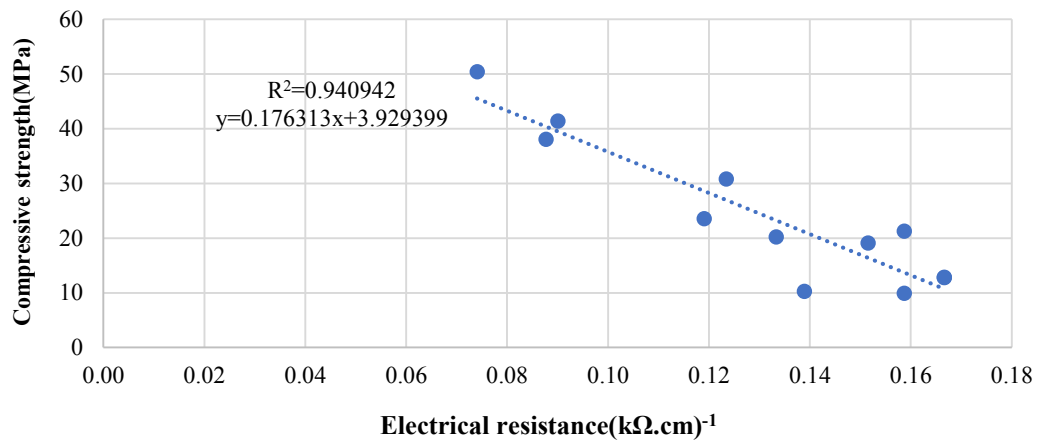
۴-۷- همبستگی بین نتایج آزمایش‌ها

در این قسمت با مقایسه نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی از منظر دوام سعی بر آن است تا رابطه بین آن‌ها و میزان همبستگی بین این دو پارامتر تعیین گردد. با این نمودارها می‌توان به ارتباط مستقیم یا معکوس و قدرت همبستگی بین دو پارامتر پی برد. به این منظور نتایج آزمایش‌ها در سنین مختلف با هم مقایسه شده‌اند و ارتباط میان داده‌ها با عبور خطی که کمترین پراکندگی را نسبت به داده‌ها داشته باشد مشخص شده است. به این منظور از بین خطوط عبوری خطی که بیشترین R^2 را داشته باشد انتخاب شد. R^2 میزان پراکندگی داده‌ها از خط برازش داده به نتایج است. هر چه R^2 به ۱ نزدیک‌تر باشد پراکندگی داده‌ها از خط برازش



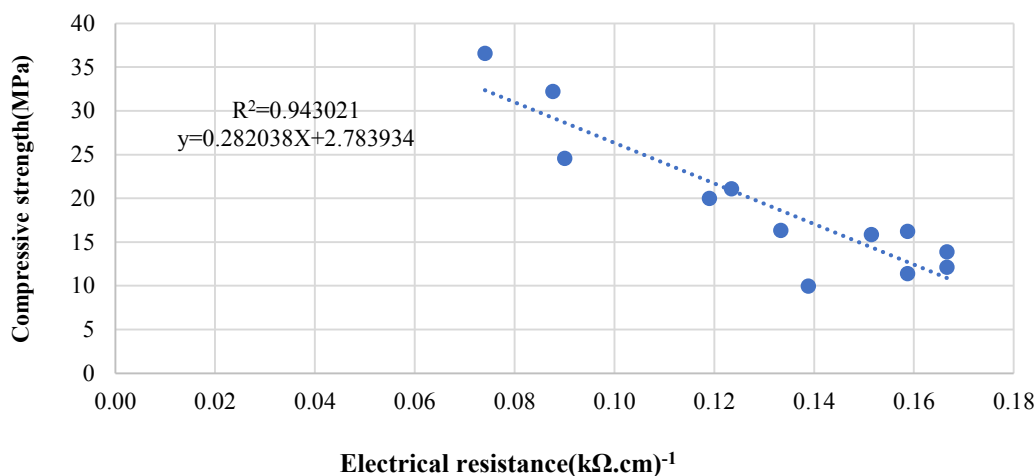
شکل ۱۱. ضریب همبستگی بین مقاومت الکتریکی (۲۸ روزه) با مقاومت فشاری (۷ روزه)

Fig. 11. Correlation coefficient between electrical resistance (28 days) & compressive strength (7 days).



شکل ۱۲. ضریب همبستگی بین مقاومت الکتریکی (۲۸ روزه) با مقاومت فشاری (۲۸ روزه).

Fig. 12. Correlation coefficient between electrical resistance (28 days) & compressive strength (28 days).



شکل ۱۳. ضریب همبستگی بین مقاومت الکتریکی (۲۸ روزه) با مقاومت فشاری (۹۰ روزه).

Fig. 13. Correlation coefficient between electrical resistance (28 days) & compressive strength (90 days).

۷۵ که در آن جذب آب کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها مشاهده گردید. خاصیت جذب آب بالا در سطح ذرات پودر کائولن به دلیل وجود خلل و فرج در سطح آن می‌تواند رابطه مستقیم درصد جذب آب را با درصد افزودن پودر کائولن نشان دهد.

۷- با توجه به نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر ترکیب ۵۰٪ کائولن و ۵۰٪ سرباره نسبت به طرح‌های شاهد توصیه می‌شود؛ چرا که ۷۵٪ پودر کائولن و ۲۵٪ سرباره باعث افت خواص مکانیکی و دوام ملات ژئوپلیمری می‌شود.

۸- آزمایش مقاومت فشاری، الکتریکی و درصد جذب آب نشان داد که ترکیب سرباره و پودر کائولن ترکیب مناسبی برای یک بتن مقاوم نیست. با بررسی نتایج می‌توان گفت که ملات‌های ژئوپلیمری گزینه مناسبی برای تعمیر سازه‌های بتنی آسیب دیده در معرض اسید سولفوریک هستند؛ به شرطی که بر مشکلات اجرایی که در استفاده از این مواد وجود دارد، بتوان فائق آمد. در بین ملات‌های ژئوپلیمری، استفاده از نمونه‌هایی با درصد کم از پودر کائولن عملکرد بهتری خواهد داشت. البته نتیجه‌گیری مذکور براساس مصالح و طرح مخلوط‌های این پژوهش است و پیشنهاد می‌شود برای انتخاب مصالح و طرح مخلوط‌های جدید، برنامه آزمایشگاهی مشابه‌ای طراحی و اجرا گردد.

۴- نتایج کاهش مقاومت فشاری قرارگرفته در معرض تهاجم اسیدسولفوریک نشان می‌دهد که استفاده از پودر کائولن و سرباره اثر منفی از خود نشان داده‌اند. در این میان بین نمونه‌های شاهد با دیگر نمونه طرح‌های اختلاط ملات ژئوپلیمری، نمونه طرح دارای ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره در مولار ۴ و ۸ عملکرد بهتری نسبت به دیگر نمونه طرح‌های اختلاط در محیط اسیدی از خود نشان داده‌اند. هرچند که در مجموع عملکرد نمونه‌های شاهد به مراتب بهتر از بقیه نمونه طرح‌های اختلاط ملات ژئوپلیمری بوده است.

۵- در مورد کاهش وزن نمونه‌های قرارگرفته در معرض تهاجم اسیدسولفوریک، مواد چسباننده ترکیبی اثر مثبتی از خود نشان دادند. در بین نمونه‌های طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری، طرح دارای ۵۰٪ پودر کائولن و ۵۰٪ سرباره در مولار ۴ بهترین عملکرد را نسبت به نمونه طرح‌های شاهد در محیط اسیدی از خود نشان داد. هرچند که در مجموع کاهش وزن نمونه طرح‌های ملات ژئوپلیمری در معرض تهاجم اسیدسولفوریک، به جز نمونه طرح BSC8-75 مثبت ارزیابی می‌شود.

۶- در نمونه طرح‌های اختلاط با مقدار ۵۰٪ و ۷۵٪ پودر کائولن، تفاوت معناداری به لحاظ جذب آب بتن دیده نشد. به غیر از نمونه طرح BSC8-

- Engineering science and Technology, an international Journal, 20(6) (2017) 1642-1652.
- [11] J. Kwasny, T.A. Aiken, M.N. Soutsos, J.A. McIntosh, D.J. Cleland, Sulfate and acid resistance of lithomarge-based geopolymer mortars, *Construction and Building Materials*, 166 (2018) 537-553.
- [12] H.J. Zhuang, H.Y. Zhang, H. Xu, Resistance of geopolymer mortar to acid and chloride attacks, *Procedia engineering*, 210 (2017) 126-131.
- [13] A. Sharma, J. Ahmad, Experimental study of factors influencing compressive strength of geopolymer concrete, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(5) (2017) 1306-1313.
- [14] Y.J. Patel, N. Shah, Study on workability and hardened properties of self compacted geopolymer concrete cured at ambient temperature, *Indian Journal of Science and Technology*, 11(1) (2018) 1-12.
- [15] H.Y. Zhang, V. Kodur, B. Wu, J. Yan, Z.S. Yuan, Effect of temperature on bond characteristics of geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 163 (2018) 277-285.
- [16] B. Liu, J. Shi, M. Sun, Z. He, H. Xu, J. Tan, Mechanical and permeability properties of polymer-modified concrete using hydrophobic agent, *Journal of Building Engineering*, 31 (2020) 101337.
- [17] Y.-K. Jo, Adhesion in tension of polymer cement mortar by curing conditions using polymer dispersions as cement modifier, *Construction and Building Materials*, 242 (2020) 118134.
- [18] S. Ganesan, M.A.O. Mydin, N.M. Sani, A.I.C. Ani, Performance of polymer modified mortar with different dosage of polymeric modifier, in: *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 2014, pp. 01039.
- [19] H. Chehrazi sefid dashti, H. Madani, A. Saeedikia, INVESTIGATION AND COMPARISON OF THE PROPERTIES OF CEMENT-BACED MIXTURES CONTAINING DIFFERENT TYPE OF POLYMERS, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 36.2(3.2) (2020) 135-145.
- [1] J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications*, Geopolymer Institute, 2008.
- [2] R.D. Hooton, Canadian use of ground granulated blast-furnace slag as a supplementary cementing material for enhanced performance of concrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(4) (2000) 754-760.
- [3] S. Chidiac, D. Panesar, Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28 days, *Cement and Concrete Composites*, 30(2) (2008) 63-71.
- [4] S. Kumar, R. Kumar, A. Bandopadhyay, T. Alex, B.R. Kumar, S.K. Das, S. Mehrotra, Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement, *Cement and Concrete Composites*, 30(8) (2008) 679-685.
- [5] C. Arya, Y. Xu, Effect of cement type on chloride binding and corrosion of steel in concrete, *Cement and Concrete Research*, 25(4) (1995) 893-902.
- [6] G. Glass, B. Reddy, N. Buenfeld, Corrosion inhibition in concrete arising from its acid neutralisation capacity, *Corrosion Science*, 42(9) (2000) 1587-1598.
- [7] H. Binici, H. Temiz, M.M. Köse, The effect of fineness on the properties of the blended cements incorporating ground granulated blast furnace slag and ground basaltic pumice, *Construction and Building Materials*, 21(5) (2007) 1122-1128.
- [8] M.M. Johari, J. Brooks, S. Kabir, P. Rivard, Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete, *Construction and Building Materials*, 25(5) (2011) 2639-2648.
- [9] H.-W. Song, V. Saraswathy, Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—An overview, *Journal of Hazardous materials*, 138(2) (2006) 226-233.
- [10] K. Mermerdaş, S. Manguri, D.E. Nassani, S.M. Oleiwi, Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption characteristics of geopolymer mortar,

- I.H.A. Aziz, N.H. Jamil, Assessment of the suitability of ceramic waste in geopolymer composites: An appraisal, *Materials*, 14(12) (2021) 3279.
- [31] I. Asiwaju-Bello, O. Olalusi, F. Olutoge, Effect of salt water on the compressive strength of ceramic powder concrete, *American Journal of Engineering Research*, 6(4) (2017) 158-163.
- [32] S. Yaseri, G. Hajiaghahi, F. Mohammadi, M. Mahdikhani, R. Farokhzad, The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste, *Construction and Building Materials*, 157 (2017) 534-545.
- [33] H. Peng, C. Cui, C. Cai, Y. Liu, Z. Liu, Microstructure and microhardness property of the interface between a metakaolin/GGBFS-based geopolymer paste and granite aggregate, *Construction and Building Materials*, 221 (2019) 263-273.
- [34] Standard Test Method for Comprehensive Strength of Hydraulic Cement Mortars. Annual book of ASTM standards, in, American Society of Testing Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- [35] M. Elchalakani, M. Dong, A. Karrech, G. Li, M. Mohamed Ali, T. Xie, B. Yang, Development of fly ash-and slag-based geopolymer concrete with calcium carbonate or microsilica, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(12) (2018) 04018325.
- [36] N. Method, NT Build 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, in, Nordic Council of Ministers Finland, 1999.
- [37] Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability in, 2004.
- [38] M. Maddah, The effect of different solutions in geopolymer cement production with two types of pozzolan and evaluation of mechanical properties and chloride ion penetration in these concretes, M. Sc. Thesis, AmirKabir University of Technology, 2013.
- [39] Protection of Metals in Concrete Against Corrosion, Report No. 222R-01, in, 2010.
- [20] J. Assaad, Y. Daou, Behavior of structural polymer-modified concrete containing recycled aggregates, *Journal of adhesion science and Technology*, 31(8) (2017) 874-896.
- [21] J. Feiteira, M.S. Ribeiro, Polymer action on alkali-silica reaction in cement mortar, *Cement and Concrete Research*, 44 (2013) 97-105.
- [22] M. Doğan, A. Bideci, Effect of Styrene Butadiene Copolymer (SBR) admixture on high strength concrete, *Construction and Building Materials*, 112 (2016) 378-385.
- [23] A.C. Bhogayata, N.K. Arora, Workability, strength, and durability of concrete containing recycled plastic fibers and styrene-butadiene rubber latex, *Construction and Building Materials*, 180 (2018) 382-395.
- [24] L. Aggarwal, P. Thapliyal, S. Karade, Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions, *Construction and Building Materials*, 21(2) (2007) 379-383.
- [25] A. Bagheri, S. Hashemi, Influence of (SBR) Latex and Silica Fume on Properties and Performance of Cement-based Repair Concretes, *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, 26(2) (2008) 33-47.
- [26] M.V. Diamanti, A. Brenna, F. Bolzoni, M. Berra, T. Pastore, M. Ormellese, Effect of polymer modified cementitious coatings on water and chloride permeability in concrete, *Construction and Building Materials*, 49 (2013) 720-728.
- [27] B. Huang, H. Wu, X. Shu, E.G. Burdette, Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete, *Construction and Building Materials*, 24(5) (2010) 818-823.
- [28] N.N. Greenwood, A. Earnshaw, *Chemistry of the Elements*, Elsevier, 2012.
- [29] F. Okoye, J. Durgaprasad, N. Singh, Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete, *Ceramics International*, 42(2) (2016) 3000-3006.
- [30] I. Luhar, S. Luhar, M.M.A.B. Abdullah, M. Nabiałek, A.V. Sandu, J. Szmidla, A. Jurczyńska, R.A. Razak,

- sulphuric acid attack, Int. Congr. on the Chemistry of Cement, (2011) 436.
- [44] M. Bassuoni, M. Nehdi, M. Amin, Self-compacting concrete: using limestone to resist sulfuric acid, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, 160(3) (2007) 113-123.
- [45] J. Choudhary, B. Kumar, A. Gupta, Application of waste materials as fillers in bituminous mixes, Waste Management, 78 (2018) 417-425.
- [46] Y. Bu, R. Spragg, W. Weiss, Comparison of the pore volume in concrete as determined using ASTM C642 and vacuum saturation, Advances in Civil Engineering Materials, 3(1) (2014) 308-315.
- [40] R.A. Akbar, Cement replacement materials: properties, durability, sustainability, in, Springer London Limited, 2013.
- [41] N.R. Buenfeld, G.K. Glass, A.M. Hassanein, J.-Z. Zhang, Chloride transport in concrete subjected to electric field, Journal of Materials in Civil Engineering, 10(4) (1998) 220-228.
- [42] A. Ramezaniapour, A. Zolfagharnasab, F. Bahmanzadeh, A. Ramezaniapour, Assessment of high performance concrete containing mineral admixtures under sulfuric acid attack, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 50(1) (2018) 121-138.
- [43] Ö. Cizer, J. Elsen, D. Feys, G. Heirman, L. Vandewalle, D. Van Gemert, B. Desmet, J. Vantomme, G. De Schutter, Microstructural changes in self-compacting concrete by

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. H. Ghasemzadeh Mousavinejad, A. Darvishalinezhad, Durability of geopolymer mortars with suggested percentages of slag and kaolin containing polymer, Amirkabir J. Civil Eng., 55(11) (2024) 2243-2262.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21710.7803

