

بررسی اثر سرباره مس و هالوزیت بر دوام ملات قلیا فعال سرباره‌ای خودحسگر با روش تاگوچی

نوید جلالی جلال آبادی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، (سازه)، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

امیر طریقت

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، (سازه)، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

ابوالفضل سلطانی *

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، (سازه - ژئوتکنیک)، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران.

چکیده

مواد قلیایی فعال با منشأ سرباره‌ای، به‌عنوان موادی پایدار و جایگزینی سازگار با محیط‌زیست برای سیمان پرتلند، به‌دلیل تولید کمتر کربن دی‌اکسید و مصرف انرژی پایین‌تر، مورد توجه هستند. این مواد با ماهیت قلیایی و فعال شدن تحرک یون های Na^+ به‌دلیل الکترولیت شدن، همچنین خاصیت رسانایی الکتریکی بالاتر و خواص مکانیکی مطلوب‌تر نسبت به سیمان پرتلند، در پایش سلامت سازه‌ها و سیستم‌های تشخیص آسیب کاربرد دارند. سازه‌هایی مانند سدها، پل ها و سازه‌های هیدرولیکی دیگر در محیط‌های خورنده (مانند آب دریا) در معرض خطر یون‌های یون های کلرید، میکرو ارگانیزم ها و حملات سولفاتی هستند. هدف از این مقاله ارائه رویکردی نوآورانه در طراحی مواد قلیا فعال سرباره ای خودحسگر پایدار، برای کاربرد در شرایط تهاجمی سولفاتی است که پتانسیل آن را برای پایش سلامت سازه‌ها از طریق سنجش رسانایی الکتریکی بررسی می‌کند. در این تحقیق از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی به منظور بررسی سیستماتیک تأثیر شاخصهای کلیدی بر مقاومت فشاری و رسانایی الکتریکی ملات ژئوپلیمری حاوی مواد خودحسگر نظیر هالوزیت و سرباره مس استفاده شد. آزمایش‌های انجام شده شامل سنجش مقاومت فشاری، رسانایی الکتریکی و بررسی ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ الکترونی بود. نتایج نشان داد افزایش مولارته سدیم هیدروکسید، تأثیر مثبت بر میزان رسانایی ملات ژئوپلیمری دارد. همچنین افزودن پرکننده‌های رسانا جایگزین سرباره فولاد، عملکرد بهتری داشت و گسترش تبلور با کیفیت بالاتری ادامه یافت. افزایش سرباره فولاد و پرکننده‌ها، منجر به افزایش متناسب در محتوای کلسیم شد و تشکیل ژل C-A-S-H و C-S-H را در ریزساختار توسعه داد. این پدیده با کاهش تخلخل همراه شد و در نهایت به یکپارچگی بیشتر ریز ساختار منجر گردید. این ویژگی‌ها، نقش امیدوارکننده مواد قلیایی فعال سرباره ای خودحسگر را به‌گزینه‌ای ایده آل برای ساخت وسازه‌های پایدار و هوشمند تبدیل می‌کند و می‌تواند جایگزینی پیشرفته برای حسگرهای سنتی در محیط‌های مختلف قلمداد شوند.

واژه‌های کلیدی: ملات ژئوپلیمری خودحسگر، تاگوچی، محیط سولفاتی، رسانایی، مقاومت فشاری.

* نویسنده مسئول: asoltani@sru.ac.ir

۱- مقدمه

نیکل [۶] ساخته می شود. پرکننده های عملکردی با خواص ذاتی حسگری، معمولاً در طبیعت رسانای الکتریکی هستند. در مقایسه با سایر حسگرهای هوشمند مورد استفاده در فناوری نظارت بر سلامت سازه ها، بتن خودحسگر به دلیل خاصیت مبتنی بر سیمان در هنگام تعبیه در سازه های بتنی، سازگاری ذاتی و طول عمر یکسانی با بتن دارد. علاوه بر این، با تقویت پرکننده های عملکردی، بتن خودحسگر بهبود خواص مکانیکی و دوام قابل توجهی را نسبت به بتن معمولی نشان می دهد. بنابراین، این بتن هوشمند می تواند برای تولید زیرساخت های حساس و استراتژیک با قابلیت های سنجش و پایش سلامت به کار گرفته شود و قابلیت سرویس دهی، شرایط ایمنی، ضریب اطمینان و دوام زیرساخت ها را بهبود بخشد [۷، ۸]. فعال سازی قلیایی، یک فرایند شیمیایی است که اجازه می دهد ساختارهای آمورف (به طور جزئی یا به طور کلی بی شکل) به مخلوط محکم سیمانی تبدیل شوند. این فن آوری، مواد دارای خاصیت آلومینوسیلیکاتی را به ژئوپلیمر تبدیل می کند. این فرایند شامل یک واکنش شیمیایی بین آلومینوسیلیکات جامد و یک محلول فعال ساز قلیایی در دمای محیط و یا کمی بالاتر است و ساختار آمورف یا بی شکل به ساختار نیمه بلوری پلیمری با ترکیب Si-O-Si و Si-O-Al تبدیل می شود [۹]. در حین ترکیب سرباره با آب، سرباره به صورت ذرات ریز تجزیه می شود. در این واکنش لایه ای محافظ از جنس Ca^{2+} مانع از ادامه واکنش های بعدی می شود. با بالا بودن pH مخلوط، لایه محافظ شکسته و واکنش ها ادامه پیدا می کند. به صورت کلی با حضور قلیاها، یون های OH^- در مخلوط بالا نگه داشته می شود. در مخلوط سرباره با آب، یک محیط قلیایی برای شکستن پوشش روی سرباره لازم است. در سیمان سرباره ای، این محیط قلیایی به وسیله $Ca(OH)_2$ حاصل از هیدراتاسیون سیمان ایجاد می شود. چنانچه سرباره با سیمان جایگزین شود، میزان $Ca(OH)_2$ به اندازه کافی نبوده و در نتیجه یک منبع قلیایی خارجی مورد نیاز است [۱۰]. خروجی این واکنش همانند محصول هیدراتاسیون سیمان، ژل C-S-H می باشد که تفاوت اصلی در سرعت و شدت واکنش می باشد [۱۱].

مواد قلیا فعال، خواص مکانیکی مشابهی با سیمان پرتلند نشان می دهد و گزارش شده است که در دو روش عمل آوری در دمای بالا [۱۲] و در شرایط محیطی [۱۳] به استحکام بالایی در سنین پایین دست می یابد. آنها همچنین مقاومت حرارتی [۱۴] و شیمیایی [۱۵]

تولید سیمان پرتلند معمولی تقریباً ۷ تا ۱۰ درصد از کل انتشار دی اکسید کربن اتمسفر را تشکیل می دهد و سالانه شامل انتشار ۱/۳۵ میلیون تن گاز گلخانه ای می شود. سطح بالای انتشار کربن دی اکسید به تشدید گرمای گلخانه ای زمین و تغییرات آب و هوایی نامطلوب کمک می کند [۱، ۲]. جهت تولید سیمان پرتلند از مقادیر زیادی منابع طبیعی (مانند سنگ های آهکی) و سوخت های فسیلی استفاده می گردد که باعث تخریب محیط زیست می شود. برای حفظ محیط زیست باید از مواد جایگزینی به جای سیمان پرتلند استفاده کرد که سازگاری مناسب با محیط زیست و مبنای توسعه پایدار داشته باشد. یکی از موثرترین راهکارها، استفاده از مواد دارای خواص آلومینوسیلیکاتی جایگزین سیمان می باشد. از جمله مواد پوزولانی طبیعی می توان به رس های کلسینه شده (مانند متاکائولن)، زئولیت، مارن، توف و از پوزولان های صنعتی به خاکستر بادی، میکرو سیلیس و سرباره کوره آهن گدازی اشاره کرد.

نبود طراحی پیشرفته و نبود ابزاری جهت ارزیابی وضعیت سازه و نگهداری در زمانی معین (به موقع) نیز نقش مهمی در خرابی سازه های بتنی ایفا می کند. بنابراین، نظارت و ارزیابی سلامت سازه های بتنی در مراحل اولیه برای کاهش فرسودگی یا جلوگیری از حوادث ناگهانی به منظور افزایش دوام و حفظ امنیت جان و مال انسان ها از اهمیت بالایی برخوردار است. برای نظارت بر تغییرات در شرایط سلامت سازه، حسگرها یا مبدل های گران قیمت، بزرگ و ناهمگن باید به صورت خارجی یا داخلی با تعداد زیاد در سازه ها نصب شوند. از این رو، انگیزه دائمی برای توسعه فناوری های سنجش پیشرفته و سطح بالا در سلامت سازه وجود دارد. با رشد سریع علم و مهندسی مدرن، تصور اینکه یک سازه بتنی تا این حد هوشمند بوده و عملکرد حسی خود را داشته باشد، تعجب آور نیست. به عنوانیک فناوری نوظهور، بتن خودحسگر با قابلیت درک شرایط فیزیکی و تغییرات محیطی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است و پیش بینی می شود که در آینده ای نزدیک، عامل اصلی نظارت بر سلامت سازه های بتنی باشد. بتن حسگر که به عنوان بتن خودحسگر ذاتی، خودنظارتی یا خودتشخیصی نیز شناخته می شود، از طریق ترکیب برخی پرکننده های کاربردی مانند الیاف کربن [۳]، نانولوله های کربنی [۴]، گرافن [۵] و پودر

$$\bar{\sigma} = \frac{I.L}{V.A} \quad (1)$$

در این رابطه $\bar{\sigma}$ هدایت الکتریکی، V ولتاژ متغیر، I شدت جریان، L فاصله بین دو الکترود، و A سطح مقطع مشترک نمونه بین الکترودها است. علاوه بر این، اصطلاح مقاومت الکتریکی با ρ نشان داده می شود که اساساً مقدار معکوس رسانایی با علامت $\bar{\sigma}$ است [۲۸].

رسانایی مواد قلیا فعال و کامپوزیت های سیمانی مستقیماً با تحرک یون ها در محلول که عمدتاً یون های Ca^{2+} ، K^+ ، Na^+ ، Si^{4+} ، Fe^{2+} ، Al^{3+} و OH^- هستند، مرتبط است [۲۹]. تحرک یون های Ca^{2+} و OH^- در محلول منفذی عاملی است که باعث هدایت یونی در اجزای کامپوزیت ها می شود. سطح آب آزاد در ماتریس، تأثیر قابل توجهی بر هدایت یونی حاصل شده دارد. بسترهای خشک کامپوزیت های سیمانی به دلیل رسانایی یونی پایین، عایق های الکتریکی هستند، مگر اینکه خیس باشند [۳۰]. مواد قلیا فعال رسانایی یونی بالاتری نسبت به کامپوزیت های سیمانی دارند. ساختار مواد قلیا فعال منجر به کاتیون های قلیایی (Na^+ یا K^+) می شود که بار آلومینیوم (III) را در گروه چهار وجهی AlO_4^- متعادل می کند [۳۱]. یون های دارای بار مثبت که به کاتیون ها در این ماتریس معروف هستند، از طریق پیوندهای $Al-O$ یا $Si-O$ به آن متصل می شوند. همچنین ممکن است کاتیون ها در حفره های چارچوب ماتریس برای حفظ تعادل الکتریکی یافت شوند. هر یون آزاد که به ساختار متصل نیست می تواند از طریق شبکه منفذی حرکت کند و هدایت الکتریکی را بهبود بخشد [۳۲].

دوام بتن را می توان به عنوان توانایی بتن برای مقاومت در برابر عوامل محیطی، در مدت زمان طول عمر مفید خود، بدون هیچ گونه خرابی قابل توجهی مانند اثر اثرات هوازدگی شیمیایی و فیزیکی (فرایند های سایشی) تعریف کرد. زمانی که بتن بتواند عمر مفید مورد نظر خود را در محیط خود بدون هزینه نگهداری بالا برای تعمیر آن به دلیل فرسودگی فراهم کند، بتن بادوام تلقی می شود. در واقع کیفیت بتن را دوام آن در محیط های تهاجمی مشخص میکند [۳۳]. خوردگی شیمیایی عموماً در اثر عواملی مانند کربناسیون، حمله اسیدها، حمله سولفات ها به آلومینات های مخلوط بتنی و واکنش های سنگدانه با محلول های قلیایی در بتن ایجاد می شود. ترک ها، مواد ثانویه حاصل از تجزیه بتن و انبساط ناشی از تجمع مواد واکنش دهنده می تواند سرعت تخریب بتن را افزایش دهد [۳۴].

بالاتری را در مقایسه با سیستم های سیمانی معمولی نشان می دهند. کاربردهای مواد قلیا فعال سرباره ای در خواص خود ترمیم شوندگی [۱۶] و خود متراکم شدن [۱۷] نیز نشان داده شده است. در حوزه مواد هوشمند، مواد قلیا فعال در ابتدا به عنوان عامل اتصال [۱۸] و به عنوان محصور کننده [۱۹] برای حسگرهای معمولی استفاده شد. با این حال با پیشرفت فناوری، نیاز به حسگرهای اضافی کاهش یافته است که بررسی تغییرات در رسانایی الکترولیتی مواد قلیا فعال سرباره ای به آنها اجازه می دهد که مستقیماً به عنوان ابزار سنجش مورد استفاده قرار گیرند [۲۰]. در نتیجه، نقش مواد قلیا فعال در نظارت و نگهداری سلامت سازه افزایش یافته است، که هم به عنوان عناصر خود حسگر سازه ای (مانند مکعب ها و تیرهای بتنی) [۲۱-۲۳] و هم به عنوان روکش های خود حسگر بر روی لایه های بتن سیمانی استفاده می شود [۲۴، ۲۵].

از آنجایی که مواد قلیا فعال به دلیل یونیزه شدن، ماهیت فوق یونی دارند و تبدیل ساختارهای آمورف (شبکه نامنظم) به یک کامپوزیت پایدار و فشرده رسانا هستند، نیازی به ایجاد یک ماده خود حسگر در این مواد نیست. با این حال، افزودنی های رسانای الکتریکی را می توان به چسباننده های مواد قلیا فعال اضافه کرد تا هدایت الکتریکی افزایش یابد. پرکننده های رسانا باید به خوبی در مخلوط پراکنده شوند تا یک ماده همگن ایجاد شود و از تجمع آنها جلوگیری شود [۲۶]. تجزیه و تحلیل تأثیر شاخص های شاخص مختلف حیاتی بر مقاومت فشاری و خواص الکتریکی ملات ژئوپلیمر و به دست آوردن نتیجه مطلوب در شرایط محیطی سولفاتی، کاری چالش برانگیز و پیچیده است. به منظور ارائه راهکاری مناسب و رسیدن به نتیجه مطلوب، از روش تاگوجی برای تعیین تأثیر چهار شاخص بر مقاومت فشاری و خواص الکتریکی ملات ژئوپلیمری در محیط تهاجمی استفاده شد. روش مهندسی کیفیت تاگوجی از طراحی آزمایش ها استفاده می کند و یکی از مهمترین ابزارهای آماری برای مدیریت کیفیت جامع در ایجاد سیستم های با کیفیت بالا با هزینه کمتر است. این روش ها یک رویکرد مؤثر و سازمان یافته برای بهینه سازی طرح ها برای عملکرد، کیفیت و هزینه بهینه ارائه می دهند [۲۷].

برای تعیین رسانایی ژئوپلیمر، یک جریان الکتریکی (یا ولتاژ) در سراسر نمونه اعمال می شود و پاسخ ولتاژ (یا جریان) اندازه گیری می شود. با استفاده از رابطه (۱)، هدایت الکتریکی را تعیین می کند.

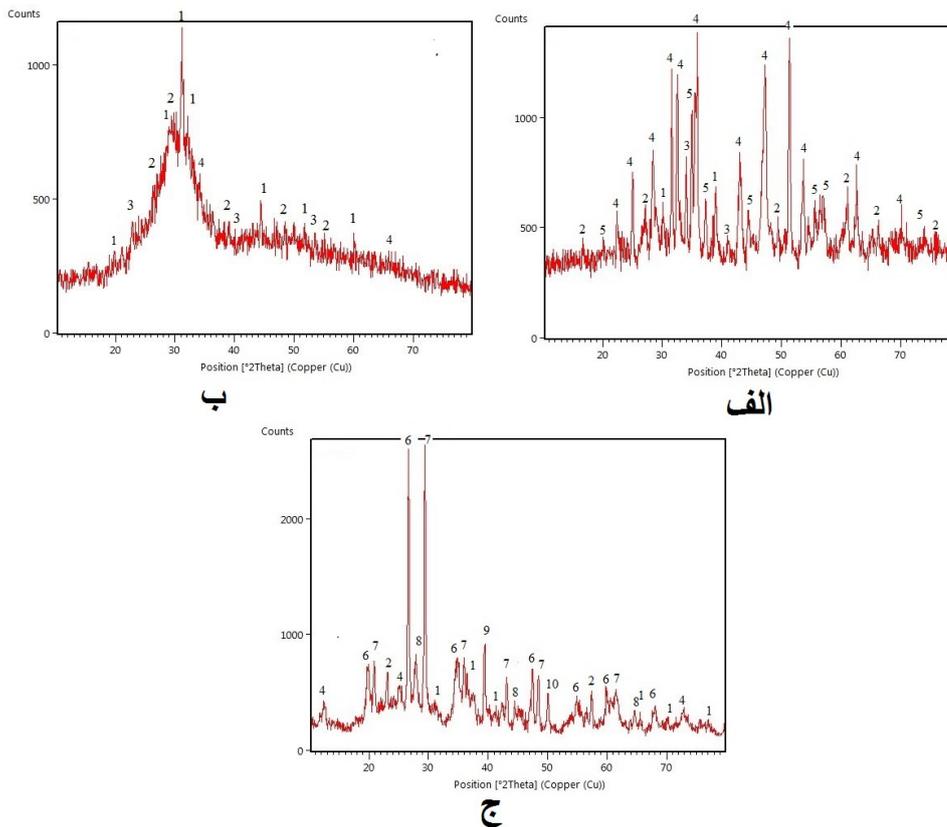
۲- مصالح و روش انجام آزمایش

فرایند آسیاب شدن مواد منجر به افزایش تعداد بلورهای درون دانه‌ها و همچنین تکثیر صفحات بلوری موازی به صورت چند برابری در جهات مختلف می‌شود. این پدیده باعث ناهمگن تر شدن ذرات و در نتیجه کاهش تمرکز بازتاب و پراش در آنالیز XRD می‌گردد. از آنجا که این تغییرات ساختاری بر الگوی پراش تأثیر می‌گذارد، کاهش شدت و افزایش دامنه پیک‌ها مشاهده می‌شود. برای دستیابی به یک محیط قلیایی و شروع واکنش در طرح‌های مخلوط ملات ژئوپلیمر خود حسگر مورد بحث در این مقاله، سدیم هیدروکسید (NaOH) به صورت پولکی شکل با خلوص ۹۹ درصد از کارخانه نفیس سیلیکات اصفهان تامین شد. سه غلظت مولی مختلف از محلول‌های سدیم هیدروکسید (۴ مولار، ۸ مولار و ۱۲ مولار) تهیه و به مخلوط‌ها اضافه شد. همچنین از سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) به عنوان فعال کننده‌های قلیایی برای فعال سازی مواد آلومینوسیلیکاتی در واکنش به صورت محلول استفاده گردید که از کارخانه نفیس سیلیکات اصفهان تهیه شد و ترکیب شیمیایی آن حاوی ۴۳ درصد H_2O ، ۱۱ درصد Na_2O و ۲۸ درصد SiO_2 می‌باشد. در این پژوهش، ماسه سیلیسی از کارخانه شیشه سازی یزد در ایران تهیه گردید و قبل از استفاده در طرح‌های مخلوط تاگوجی، سیلیسی با گذر از الک ۲۰۰ یکنواخت شده است. ظرفیت جذب آب ماسه سیلیسی ۲/۱ درصد و چگالی حجمی آن ۲۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد. محیط سولفاتی جهت سنجش دوام نمونه‌ها با محلول کردن ۵ درصد وزنی سولفات سدیم در آب به دست آمد. شرایط نگهداری نمونه‌ها در این محیط به صورت غوطه وری ثابت در طول مدت زمان آزمایش، قرارگیری نمونه‌ها در دمای معمولی اتاق (23 ± 2 درجه سانتیگراد) و همچنین تعویض محلول ۵٪ سولفات سدیم به صورت ماهیانه انجام گرفت. نمونه‌های مخصوص آزمایش دوام به مدت ۱۸۰ و ۳۶۰ روز در این محیط مخرب مستغرق شدند و آزمایش‌های فشاری و الکتریکی بر روی آن‌ها انجام گردید.

سرباره کوره بلند مورد استفاده در این تحقیق از کارخانه ذوب آهن اصفهان تامین شده است. برای ایجاد ملات ژئوپلیمری، سرباره در کارخانه سیمان سپاهان اصفهان به صورت پودر هم‌وزنه ریز با بلین ۴۰۰۰ خرد شد. سرباره مس از معدن مس سرچشمه به دست آمد. سرباره در ابتدا در قطعات بزرگ بود، اما برای اطمینان از سطح ویژه بهتر و توزیع خوب در ملات و بهبود رسانایی، آن را آسیاب کرده و از طریق الک شماره ۲۰۰ (۷۵ میکرون) عبور داده شد. هالوزیت طبیعی با ساختار نانولوله‌ای از معادن کرمان که یکی از منابع کانی‌های رسی هالوزیتی واقع در ایران است به دست آمد. ترکیبات شیمیایی سرباره فولاد، سرباره مس و هالوزیت از طریق آنالیز پراش اشعه ایکس (XRF) به وسیله دستگاه PHILIPS PW 1480 تجزیه و تحلیل شد و در جدول ۱ ارائه شده است. ترکیب کانی شناسی سرباره فولاد، سرباره مس و هالوزیت با استفاده از الگوهای پراش اشعه ایکس (XRD) اندازه‌گیری شد. الگوهای XRD با استفاده از پراش سنج فیلیس با تشعشع $\text{CuK}\alpha$ انجام شد و اسکن نمونه‌ها بین ۵ درجه و ۸۰ درجه (2θ) با اندازه گام ۰/۰۲ به دست آمد. مطابق شکل ۱، تجزیه و تحلیل XRD، وجود کوارتز (SiO_2)، آلومینا (Al_2O_3)، فایالیت $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ ، و کلسیت (CaCO_3) را به عنوان فازهای کریستالی مهم در سرباره فولاد تأیید کرد. ماهیت آمورف سرباره فولاد برای فرایند پلیمریزاسیون سودمند است، زیرا افزایش انحلال یون‌های SiO_2 و Al_2O_3 بسیار واکنش‌پذیر در مواد آلومینوسیلیکات پلیمریزاسیون را تسهیل می‌کند و منجر به محصولات نهایی پایدار می‌شود. علاوه بر این، الگوهای XRD از پرکننده‌های مورد استفاده در ملات ژئوپلیمری وجود فازهای مهم فایالیت، کرومیت، کوارتز، آلومینا و کلسیت را در سرباره مس و همچنین آاناتاز، کلسیت، هالوزیت، فایالیت، کوارتز و کائولینیت را در فاز هالوزیت تأیید کرد. توجه به این نکته ضروری است که

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی حاصل از آنالیز پراش اشعه ایکس (XRF) سرباره فولاد، سرباره مس و هالوزیت

ترکیب شیمیایی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	MnO	P_2O_5
سرباره فولاد	۳۲/۳۲	۸/۳۲	۰/۱۶	۲۶/۵۲	۸/۸۷	۰/۶۹	۱/۰۶	۱/۱۶	۰/۹۲	۰/۰۰۵
سرباره مس	۱۶/۰۶	۱/۶۷	۴۱/۵۸	۱/۶۹	۱۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۶۴	۰/۳۱	۰/۰۷	۰/۰۵
هالوزیت	۳۹/۱۲	۱۱/۶۳	۷/۱۵	۱۲/۳۰	۵/۹۸	۱/۶۰	۲/۹۶	۰/۷۶	۰/۱۳	۰/۲۱



شکل ۱ - الگوی XRD (الف) سرباره مس، (ب) سرباره فولاد و (ج) هالوزیت {۱: کلسیت (CaCO_3)، ۲- کوارتز (SiO_2)، ۳- آلومینا (Al_2O_3)، ۴- فایالایت ($(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$)، ۵- کرومیت ($(\text{Co}, \text{Fe})\text{CrO}_4$)، ۶- هالوزیت، ۷- کائولینیت ($(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)، ۸- آنتاز (TiO_2)، ۹- اکسید پتاسیم (K_2O) و ۱۰- اکسید سدیم (Na_2O)}

برای ارجاع آسان از اختصارات در نام گذاری ها استفاده شده است. بطور مثال، طرح T1-C5-H5-M4-A35 به جایگزینی سرباره مس با سرباره فولاد برابر با ۵٪، جایگزینی هالوزیت با سرباره فولاد برابر با ۵٪، مولارته سدیم هیدروکسید برابر با ۴ و نسبت فعال کننده های قلیایی به چسباننده ها برابر با ۰/۳۵ اشاره دارد. وزن مخصوص ملات جهت تهیه همه طرح های مخلوط ۲۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. همچنین نسبت فعال کننده های قلیایی (سدیم سیلیکات + سدیم هیدروکسید) به چسباننده ها (سرباره فولاد + سرباره مس + هالوزیت) با توجه به هر طرح مخلوط تاگوجی در سه سطح (۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵) قرار گرفتند. نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید در هر طرح مخلوط تاگوجی برابر ۰/۲۵ در نظر گرفته شد. همچنین مجموع مقادیر چسباننده ها (سرباره فولاد + سرباره مس + هالوزیت) در هر متر مکعب ملات ژئوپلیمری به صورت ثابت برابر ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. جهت سنجش مقاومت فشاری پس از قرارگیری طرح های مخلوط

همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، این تحقیق تأثیر چهار شاخص را بر مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی ملات ژئوپلیمر خودحسگر در شرایط تهاجمی سولفاتی و شرایط محیطی معمولی بررسی می کند. این شاخصها شامل درصد جرم سرباره مس جایگزین جرم کل سرباره فولاد (عامل A)، درصد جرم هالوزیت جایگزین جرم کل سرباره فولاد (عامل B)، مولارته سدیم هیدروکسید (عامل C) و نسبت فعال کننده های قلیایی به چسباننده ها (عامل D) می باشد که هر عامل در سه سطح در نظر گرفته می شود. از روش آرایه متعامد تاگوجی برای معرفی شاخصها استفاده شد که منجر به ایجاد ۹ طرح مخلوط آزمایشی گردید که در جدول ۳ نشان داده شده است. علاوه بر طرح های مخلوط پیشنهادی تاگوجی، یک مخلوط شاهد (C-C0-H0-M4-A45) بدون مواد پرکننده رسانا نظیر هالوزیت و سرباره مس انتخاب شد. این مخلوط فقط حاوی سرباره فولاد بود و برای مقایسه با طرح های مخلوط دیگر بر اساس ویژگی های اندازه گیری شده مورد نظر انتخاب گردید.

پیشنهادی تاگوچی و یک طرح شاهد در سه محیط مختلف با بازه های زمانی متفاوت (محیط آبی ۲۸، ۱۸۰ و ۳۶۰ روزه/ محیط خشک ۱۸۰ و ۳۶۰ روز / محیط سولفاتی ۱۸۰ و ۳۶۰ روز)، با در نظر گرفتن ۳ تکرار برای هر آزمایش و میانگین گیری از نتایج آن در سه محیط مختلف، پس از قرار دادن چهار مش فولادی ضد زنگ به فواصل ۴ سانتی متری در هر نمونه مکعب مستطیل به ابعاد ۱۰×۱۰×۲۰ سانتی متری، در مجموع از هر طرح مخلوط ۹ نمونه و از ۱۰ طرح مخلوط به صورت کلی ۹۰ نمونه ساخته و تست لازم به ذکر است که جهت سنجش هدایت الکتریکی از ۱۰ طرح شد.

جدول ۲ - شاخصها و سطوح در طرح تاگوچی

شاخص ها	سطوح/فاکتورها	۱	۲	۳
نسبت سرباره مس به سرباره فولاد	A	۵٪	۱۰٪	۱۵٪
نسبت هالوزیت به سرباره فولاد	B	۵٪	۱۰٪	۱۵٪
مولارته سدیم هیدروکسید	C	۴ مولار	۸ مولار	۱۲ مولار
نسبت فعال کننده های قلیایی به چسباننده ها	D	۰/۳۵	۰/۴۵	۰/۵۵

جدول ۳ - روش آرایه متعامد تاگوچی برای معرفی شاخصها و سطوح

طرح های مخلوط/فاکتورها	A	B	C	D
T1-C5-H5-M4-A35	۱	۱	۱	۱
T2-C5-H10-M8-A45	۱	۲	۲	۲
T3-C5-H15-M12-A55	۱	۳	۳	۳
T4-C10-H5-M8-A55	۲	۱	۲	۳
T5-C10-H10-M12-A35	۲	۲	۳	۱
T6-C10-H15-M4-A45	۲	۳	۱	۲
T7-C15-H5-M12-A45	۳	۱	۳	۲
T8-C15-H10-M4-A55	۳	۲	۱	۳
T9-C15-H15-M8-A35	۳	۳	۲	۱

نحوه ساخت و عمل آوری ملات ژئوپلیمری به صورت زیر انجام پذیرفت:

- مرحله اختلاط خشک: ماسه سیلیسی (در شرایط اشباع با سطح خشک) در یک میکسر ریخته شد و به مدت ۱ دقیقه یکنواخت شد.
- افزودن چسب: سرباره فولاد به همراه پرکننده های رسانا (سرباره مس و هالوزیت) طبق طرح های مخلوط از پیش تعیین شده اضافه شدند. اجزای خشک به مدت ۳ دقیقه با سرعت متوسط (۱۲۰±۵ دور در دقیقه) مخلوط شدند تا ترکیبی یکنواخت حاصل شود.
- فعال سازی قلیایی: یک محلول قلیایی از پیش آماده شده (سیلیکات سدیم + سدیم هیدروکسید با مولارته مشخص) به تدریج اضافه شد. ترکیب مخلوط به مدت ۴ دقیقه با سرعت ۱۵۰±۱۰ دور در دقیقه ادامه یافت تا از شروع کامل

ژئوپلیمریزاسیون اطمینان حاصل شود.

- ۴- قالب گیری و تراکم: ملات تازه برای ارزیابی مقاومت فشاری در قالب های فولادی ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی متر و برای اندازه گیری های الکتریکی در قالب های منشوری ۱۰۰×۱۰۰×۲۰۰ میلی متر ریخته شد. هر قالب در سه لایه مساوی پر شد و هر لایه به مدت ۶۰ ثانیه روی میز ویرنه استاندارد تحت ویرنه قرار گرفت.
- ۵- روش عمل آوری: تمام نمونه ها پس از ۲۴ ساعت عمل آوری در دمای محیط (۲۳±۲ درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی ۵۰±۵ درصد) از قالب خارج شدند. نمونه های مستغرق در محیط آبی متعاقباً تا زمان آزمایش در دمای ۲۵±۱ درجه سانتیگراد در آب عمل آوری شدند. همچنین نمونه های مستغرق در محیط سولفاتی تا زمان آزمایش در دمای ۲۵±۱ درجه سانتیگراد در محلول سولفات سدیم ۵ درصد نگهداری شدند. نمونه های خشک نیز پس

به دست آمد و بیانگر این موضوع است که جایگزینی مواد خودحسگر در ملات ژئوپلیمری اثر منفی در مقاومت فشاری بلند مدت در شرایط محیطی خشک دارد.

در بعضی از طرح ها همانند طرح های T2-C5-H10-M8-A45 و T7-C15-H5-M12-A45، با گذر زمان، مقاومت کاهش پیدا کرده است. علاوه بر این با مقایسه داده های ۲۸ روزه محیط آبی، نرخ افزایش مقاومت فشاری در شرایط خشک نسبت به ۲۸ روزه محیط آبی که در آن حضور داشته است، در طرح شاهد C-C0-H0-M4-A45 بسیار بیشتر از سایر نمونه ها می باشد. شرایط عمل آوری نمونه های مستغرق در محیط سولفاتی بدین صورت بود که پس از ۲۸ روز قرارگیری در محیط آبی، به مدت ۳۶۰ روز در محیط تهاجمی سولفات سدیم ۵ درصد مستغرق شدند.

مطابق جدول ۴، طرح مخلوط T8-C15-H10-M4-A55 حاوی بیشترین مقاومت فشاری ۱۸۰ روزه و طرح شاهد C-C0-H0-M4-A45 حاوی بیشترین مقاومت فشاری ۳۶۰ روزه بود. داده ها چنان بیان می کنند که در محیط سولفاتی نیز همانند محیط آبی و خشک، جایگزینی مواد خودحسگر در ملات ژئوپلیمری اثر منفی در روند افزایشی مقاومت فشاری بلند مدت دارد. با مقایسه داده ها در محیط تهاجمی، در اکثر طرح های مخلوط، مقاومت فشاری ۳۶۰ روزه بیشتر از ۱۸۰ روزه بود، ولی در طرح های مخلوط T2-C5-H10-M8-A45 و T7-C15-H5-M12-A45 مقاومت فشاری کاهش می شد. با تجزیه و تحلیل آماری و سنجش روند افزایش نرخ مقاومت فشاری نمونه های مستغرق در شرایط سولفاتی نسبت به ۲۸ روزه محیط آبی، این نرخ در مدت زمان ۱۸۰ روز در طرح مخلوط T8-C15-H10-M4-A55 بسیار بیشتر از سایر نمونه ها می باشد. همچنین در مدت زمان ۳۶۰ روز این روند در نمونه شاهد C-C0-H0-M4-A45 بسیار بیشتر است.

نتایج نشان می دهد که جایگزینی سرباره فولاد با پرکننده های کاربردی، مانند سرباره مس و هالوزیت، مقاومت فشاری بلندمدت ۱۸۰ و ۳۶۰ روزه را در همه طرح ها به جز T2-C5-H10-M8-A45، T7-C15-H5-M12-A45 و T3-C5-H15-M12-A55 افزایش می دهد. دو طرح مخلوط T3-C5-H15-M12-A55 و T7-C15-H5-M12-A45 دارای مولاریته سدیم هیدروکسید برابر ۱۲ می باشند و نشان از تأثیر منفی قلیابیت در بلند مدت دارد. دلیل این

از ۲۸ روز عمل آوری در آب، در محیط خشک اتاق قرار گرفتند تا آزمایش های مربوط به ۱۸۰ و ۳۶۰ روز بر روی آنها انجام گیرد.

۳- نتایج و بحث

این مطالعه با هدف بررسی تأثیر افزودن پرکننده های رسانا مانند سرباره مس و هالوزیت جایگزین سرباره فولاد واقع در شرایط معمولی و تهاجمی سولفاتی طی ۹ طرح مخلوط پیشنهادی توسط تاگوچی انجام شد. نتایج آزمایش های مختلف مقاومت فشاری و رسانایی در دوره های ۲۸، ۱۸۰ و ۳۶۰ روزه ارائه می شود.

۳-۱- مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری

با استفاده از دستگاه تست فشاری بتن با حداکثر ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن و کالیبره کردن آن قبل از انجام آزمایش، طبق استاندارد BS EN 12390-3، مخلوط های آزمایشی پیشنهادی به روش تاگوچی برای ارزیابی و اندازه گیری مقاومت فشاری نمونه های ملاتی مکعبی شکل در روزهای ۲۸، ۱۸۰ و ۳۶۰ روز، تست شدند. نتایج مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری مبتنی بر سرباره فولاد حاوی پرکننده های کاربردی سرباره مس و هالوزیت، در جدول ۴ ارائه شده است. مشاهده شد که به دلیل فرایند پلیمریزاسیون سریع در برخی از طرح های مخلوط تاگوچی، مقاومت به طور قابل توجهی از ۲۸ تا ۳۶۰ روز در محیط آبی تغییر کرد. تمامی نمونه ها تا ۲۸ روز در آب غوطه ور بودند و پس از آن در سه محیط آبی، خشک و سولفاتی تا ۳۶۰ روز نگه داری شدند. محیط تهاجمی سولفاتی حاوی سولفات سدیم ۵ درصد بود. با قرارگیری تمامی نمونه ها در محیط آبی، طرح مخلوط T2-C5-H10-M8-A45 بالاترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه، طرح مخلوط T8-C15-H10-M4-A55 بالاترین مقاومت فشاری ۱۸۰ روزه و طرح شاهد C-C0-H0-M4-A45 بالاترین مقاومت فشاری ۳۶۰ روزه را دارا هستند. همچنین با استغراق در محیط آبی، با گذر زمان روند افزایش مقاومت فشاری بلند مدت با افزودن مواد خودحسگر در ملات ژئوپلیمری، کاهش می یابد و پس از یک سال، طرح شاهد دارای مقاومت بیشتری می باشد. داده ها حاکی از آن است که مقاومت طرح های مخلوط T2-C5-H10-M8-A45 و T7-C15-H5-M12-A45 پس از ۳۶۰ روز کاهش یافته اند.

مطابق جدول ۴ با قرارگیری در محیط خشک، بیشترین مقاومت فشاری ۱۸۰ روزه و ۳۶۰ روزه در طرح شاهد C-C0-H0-M4-A45

موضوع را می توان به دلیل سرعت و شدت قلیاییت به ایجاد ترک های داخلی، تشکیل منافذ بیش از حد، افزایش محتوای منافذ مویرگی و در نتیجه توسعه مقاومت در سنین بالا کاهش می یابد. در عین حال دلیل کاهش روند مقاومت فشاری در محیط های مختلف ملات حاوی پرکننده های کابردی نسبت به ملات شاهد در بلند مدت را می توان به عواملی نظیر امکان ناکارآمدی های بالقوه ریزساختاری یا کاهش واکنش پذیری ژئوپلیمراسیون در حضور مواد پرکننده هالوزیت و سرباره مس جایگزین سرباره فولاد در بلند مدت توصیف کرد.

جدول ۴ - مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری نگهداری شده در سه محیط معمولی آبی، خشک و سولفاتی

	مقاومت ۲۸	مقاومت ۱۸۰	مقاومت ۳۶۰	مقاومت ۱۸۰	مقاومت ۳۶۰	مقاومت ۱۸۰	مقاومت ۳۶۰
مقاومت فشاری / طرح مخلوط	روزه بر حسب مگاپاسکال در محیط آبی	روزه بر حسب مگاپاسکال در محیط آبی	روزه بر حسب مگاپاسکال در محیط آبی	روزه بر حسب مگاپاسکال در محیط خشک	روزه بر حسب مگاپاسکال در محیط خشک	روزه بر حسب مگاپاسکال در محیط سولفاتی	روزه بر حسب مگاپاسکال در محیط سولفاتی
T1-C5-H5-M4-A35	۱۷/۳۶	۲۶/۸	۲۸/۵۲	۲۱/۶۷	۲۲/۷۰	۲۳/۰۰	۲۷/۸۲
T2-C5-H10-M8-A45	۲۰/۳۸	۲۵/۳۲	۲۴/۹۹	۱۸/۴۶	۱۶/۹۰	۲۰/۶۳	۱۸/۶۲
T3-C5-H15-M12-A55	۱۲/۴۴	۱۶/۸۴	۱۹/۶۶	۱۱/۶۷	۱۳/۲۰	۱۰/۰۴	۱۵/۷۴
T4-C10-H5-M8-A55	۱۴/۱۱	۲۳/۲۸	۲۵/۶۷	۱۸/۷۱	۱۹/۳۲	۱۹/۹۵	۲۲/۵۴
T5-C10-H10-M12-A35	۱۳/۶۰	۱۶/۵۵	۱۹/۲۵	۱۰/۰۹	۱۵/۴۱	۱۱/۹۱	۱۷/۲۴
T6-C10-H15-M4-A45	۱۴/۵۶	۲۳/۵۶	۲۷/۸۹	۱۵/۰۲	۱۵/۳۲	۱۹/۱۴	۲۵/۰۴
T7-C15-H5-M12-A45	۱۲/۶۴	۱۸/۶۵	۱۶/۶۷	۱۲/۵۷	۹/۴۲	۱۴/۲۳	۱۱/۰۸
T8-C15-H10-M4-A55	۱۵/۲۹	۲۸/۷۵	۲۹/۱۰	۲۴/۰۶	۲۲/۳۲	۲۵/۴۸	۲۵/۵۲
T9-C15-H15-M8-A35	۱۴/۳۴	۲۲/۲۸	۲۶/۵۵	۱۵/۹۹	۱۷/۲۳	۱۸/۰۹	۲۰/۵۲
C-C0-H0-M4-A45	۱۳/۵۵	۲۷/۱۴	۳۳/۴۲	۲۵/۸	۲۶/۳۵	۲۳/۱۵	۳۰/۸۵

کننده های قلیایی به چسباننده ها در بازه ۳۵ تا ۵۵ درصد بر مقاومت فشاری تقریباً ثابت بود، ولی با گذشت مدت زمان ۳۶۰ روز، نسبت بهینه ۳۵ درصد یافت شد.

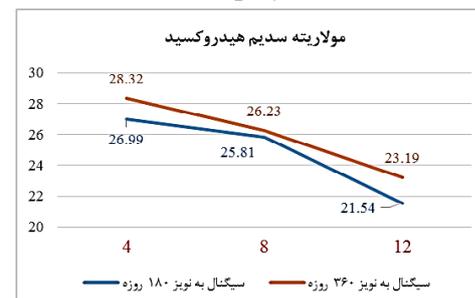
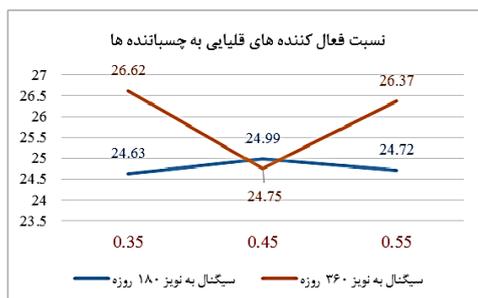
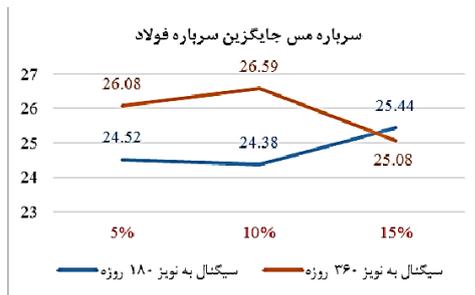
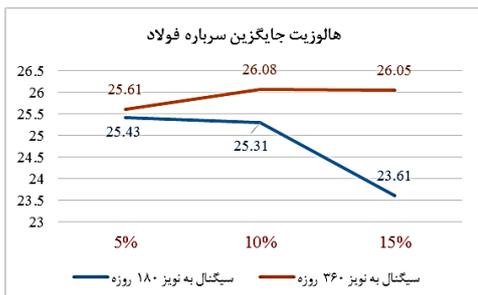
۳-۱-۲- تحلیل واریانس برای عامل پاسخ مقاومت فشاری در محیط سولفاتی

به منظور شناسایی عوامل موثر و سهم هر عامل در تغییرات پاسخ این تحلیل انجام می شود. در این مطالعه اهمیت آماری شاخص های کنترلی بر پاسخ فرضی مقاومت فشاری نمونه های مستغرق در محیط سولفاتی در دو بازه زمانی ۱۸۰ و ۳۶۰ روز با استفاده از تحلیل واریانس خطی در نرم افزار Minitab انجام گردیده است. تأثیر نسبت سرباره مس به سرباره فولاد، نسبت هالوزیت به سرباره فولاد، مولاریته سدیم هیدروکسید و نسبت فعال کننده های قلیایی به چسباننده ها بر واریانس کل نتایج برای سطح معنی داری ۰/۵ درصد (سطح اطمینان ۹۹/۵ درصد) در نظر گرفته شد. جداول ۵ و ۶ نتایج تحلیل واریانس داده های مساله را روی مقاومت فشاری ۱۸۰ و ۳۶۰ روزه نمونه های مستغرق در محیط سولفاتی نشان می دهد. مشاهده می شود که عامل کنترلی مولاریته سدیم هیدروکسید، بر روی پاسخ مقاومت فشاری اثر

۳-۱-۱- تحلیل مقاومت فشاری به روش تاگوجی مستغرق در محیط سولفاتی

شکل ۲ نتایج آزمایشات مقاومت فشاری به روش تاگوجی مستغرق در محیط سولفاتی و تأثیر بر همکنش شاخصها را با استفاده از داده های خروجی SN ratio در نرم افزار Minitab و ترسیم در نرم افزار Excel در دو دوره زمانی ۱۸۰ و ۳۶۰ روز نشان می دهد. مشاهده می شود که افزایش جایگزینی سرباره مس به جای سرباره فولاد در بازه ۵ تا ۱۵ درصد، در مدت زمان ۱۸۰ روز تأثیری بر مقاومت فشاری نداشته و مقدار بهینه جایگزینی سرباره مس ۱۵ درصد می باشد. این مقدار بهینه در مدت زمان ۳۶۰ روز، ۵ درصد به دست آمد. نسبت بهینه جایگزینی هالوزیت با سرباره فولاد در مدت زمان ۱۸۰ روز استقرار در محیط سولفاتی، ۵ درصد بوده و در مدت زمان ۳۶۰ روز، تغییر این نسبت در بازه ۵ تا ۱۵ درصد بر مقاومت فشاری ثابت بوده است. همچنین افزایش مولاریته سدیم هیدروکسید از ۴ تا ۱۲ مولار، در مدت زمان ۱۸۰ روز و ۳۶۰ روز مستغرق در محیط سولفاتی، اثر منفی بر مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری داشته است و مولاریته بهینه در این محیط ۴ مولار به دست آمده است. همچنین در مدت زمان ۱۸۰ روز، نسبت فعال

معناداری دارد ($P < 0.05$). لازم به ذکر است که تأثیر مولاریته سدیم هیدروکسید بر روی پاسخ مقاومت فشاری ۳۶۰ روزه بیشتر از ۱۸۰ روزه می باشد ($P = 0.03 < 0.04 < 0.05$). در این میان عوامل دیگر اثر معناداری بر روی پاسخ ندارند.



شکل ۲ - نسبت سیگنال به نوین آزمایش مقاومت فشاری ۱۸۰ و ۳۶۰ روزه، مستغرق در محیط سولفاتی در شاخص های تاگوجی (الف) جایگزینی سرباره مس به سرباره فولاد، (ب) جایگزینی هالوزیت به سرباره فولاد (ج) نسبت فعال کننده های قلیایی به چسباننده ها (د) نسبت فعال کننده های قلیایی به چسباننده ها

جدول ۵ - داده های مقدار واریانس مقدار میانگین برای عامل پاسخ مقاومت فشاری ۱۸۰ روزه نمونه های مستغرق در محیط سولفاتی

منبع داده	DF	SS	MS	F	P	R-Sq	R-Sq(Adj)
نسبت سرباره مس به سرباره فولاد	۲	۷/۸	۳/۹	۰/۱۲	۰/۸۹۱	۳/۷۷%	۰/۰۰%
نسبت هالوزیت به سرباره فولاد	۲	۲۳/۸	۱۱/۹	۰/۳۹	۰/۶۹۴	۱۱/۴۷%	۰/۰۰%
مولاریته سدیم هیدروکسید	۲	۱۷۴/۹۲	۸۷/۴۶	۱۶/۰۶	۰/۰۰۴	۸۴/۲۶%	۷۹/۰۲%
نسبت فعال کننده های قلیایی به چسباننده ها	۲	۱/۰	۰/۵	۰/۰۱	۰/۹۸۵	۰/۵%	۰/۰۰%

جدول ۶ - داده های مقدار واریانس مقدار میانگین برای عامل پاسخ مقاومت فشاری ۳۶۰ روزه نمونه های مستغرق در محیط سولفاتی

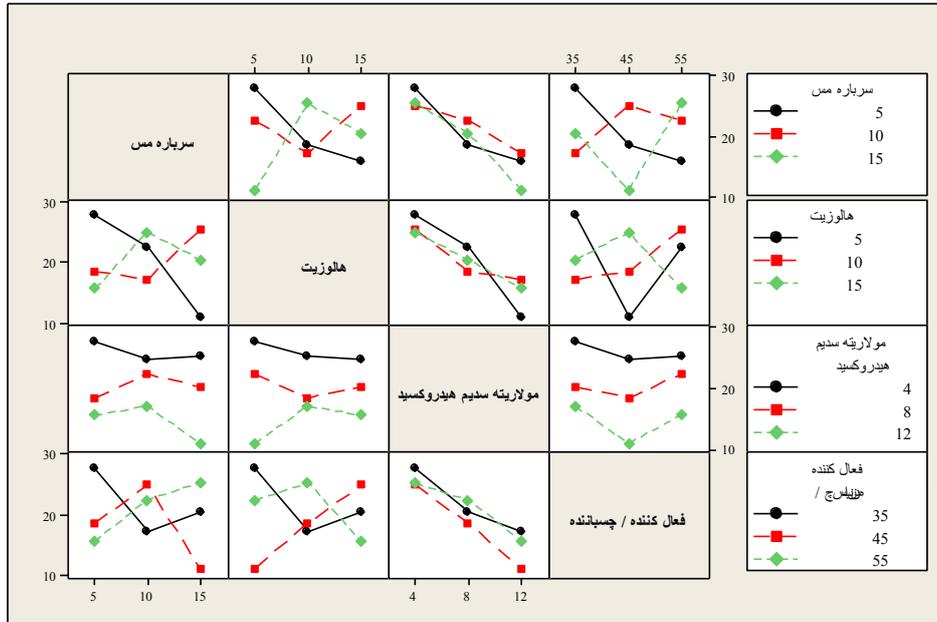
منبع داده	DF	SS	MS	F	P	R-Sq	R-Sq(Adj)
نسبت سرباره مس به سرباره فولاد	۲	۱۰/۵۰	۵/۲	۰/۱۴	۰/۸۶۸	۴/۶۰%	۰/۰۰%
نسبت هالوزیت به سرباره فولاد	۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰	۰/۰۰%	۰/۰۰%
مولاریته سدیم هیدروکسید	۲	۱۹۵/۲۳	۹۷/۶۱	۱۷/۸۲	۰/۰۰۳	۸۵/۵۹%	۸۰/۷۹%
نسبت فعال کننده های قلیایی به چسباننده ها	۲	۲۲/۴	۱۱/۲	۰/۳۳	۰/۷۳۴	۹/۸۱%	۰/۰۰%

که هر سلول ماتریس، شامل یک نمودار است که محور افقی آن برای اثر نمایش داده شده در ستونی که نمودار در آن ظاهر می شود، مقیاس بندی شده است. پاره خطها برای برهمکنش آن اثر با اثر نمایش داده شده در ردیف مربوطه رسم می شوند. بنابراین، یک نمودار

۳-۱-۳- تحلیل برهم کنش بین عوامل در مقاومت فشاری ۳۶۰ روزه

چنانچه اثرات متقابل در مدل وجود داشته باشد، ماتریسی از نمودار های برهمکنش از خروجی نتایج نرم افزار Minitab می توان یافت

مقابل، برهمکنش اثر ردیف با اثر ستون را نشان می‌دهد. برای هر سطح از اثر ردیف، یک پاره خط رسم می‌شود. مقادیر پاسخ پیش‌بینی شده توسط مدل توسط پاره خط‌ها به هم متصل می‌شوند. پاره خط‌های غیر موازی، شواهد بصری از برهمکنش‌های احتمالی را ارائه می‌دهند. در خطوط موازی هیچ برهمکنشی رخ نمی‌دهد. هرچه خطوط غیرموازی تر باشند، قدرت تعامل بیشتر است. در شکل ۳ تحلیل برهمکنش بین عوامل موثر طرح مخلوط تاگوچی، در مقاومت فشاری



شکل ۳ - ماتریس برهمکنش بین عوامل موثر در مقاومت فشاری ۳۶۰ روزه نمونه های ملاتی مستغرق در محیط سولفاتی

پیشنهادی به روش تاگوچی در طول این دوره ها را گزارش می‌کند. همچنین در شکل ۴ نحوه پروب گذاری و چیش الکترود های استیل ضد زنگ و همچنین سنجش مقاومت الکتریکی بوسیله LCR متر را نشان می‌دهد.



شکل ۴ - نحوه انجام آزمایش سنجش مقاومت الکتریکی و پروب گذاری نمونه ها

۳-۲- آزمایش مقاومت الکتریکی و رسانایی ملات ژئوپلیمر

برای تعیین مقاومت الکتریکی ملات، آزمایش هدایت الکتریکی پس از قرار دادن چهار مش فولادی ضد زنگ به فواصل ۴ سانتی متری در هر نمونه مکعب مستطیل به ابعاد $10 \times 10 \times 20$ سانتی متر انجام می‌شود. برای هر طرح مخلوط در هر دوره ۳ نمونه در شرایط معمولی و سولفاتی ساخته شد. مقاومت الکتریکی هر نمونه در طرح ترکیبی پیشنهادی تاگوچی و طرح کنترل با استفاده از LCR متر اندازه گیری شد. بر اساس فاصله و سطح مقطع هر نمونه، رسانایی بر حسب زیمنس بر متر برای دوره های زمانی ۲۸، ۱۸۰ و ۳۶۰ روز در شرایط معمولی و سولفاتی محاسبه گردید. جهت محاسبه رسانایی، LCR متر برای اندازه گیریمقاومت سری (RS) بین دو الکترود مش فولادی ضد زنگ در فرکانس ۱۰۰ هرتز تنظیم گردید. جدول ۷ هدایت الکتریکی طرح مخلوط ملات ژئوپلیمری

جدول ۷- رسانایی ملات ژئوپلیمری نگهداری شده در محیط معمولی آبی، خشک و سولفاتی

رسانایی ۳۶۰ روز	رسانایی ۱۸۰ روز	رسانایی ۳۶۰ روز	رسانایی ۱۸۰ روز	رسانایی ۳۶۰ روز	رسانایی ۱۸۰ روز	رسانایی ۳۶۰ روز	رسانایی ۱۸۰ روز
بر حسب زیمنس بر متر در محیط سولفاتی	بر حسب زیمنس بر متر در محیط سولفاتی	بر حسب زیمنس بر متر در محیط خشک	بر حسب زیمنس بر متر در محیط خشک	بر حسب زیمنس بر متر در محیط سولفاتی	بر حسب زیمنس بر متر در محیط سولفاتی	بر حسب زیمنس بر متر در محیط خشک	بر حسب زیمنس بر متر در محیط خشک
$8/6 \times 10^{-6}$	$1/0 \times 10^{-5}$	$8/0 \times 10^{-8}$	$7/0 \times 10^{-6}$	$9/0 \times 10^{-6}$	$1/2 \times 10^{-5}$	$1/8 \times 10^{-5}$	28×10^{-6}
$1/3 \times 10^{-5}$	$1/4 \times 10^{-5}$	$7/0 \times 10^{-8}$	$1/5 \times 10^{-5}$	$1/3 \times 10^{-5}$	$1/9 \times 10^{-5}$	$3/0 \times 10^{-5}$	37×10^{-6}
$2/5 \times 10^{-5}$	$4/7 \times 10^{-5}$	$4/0 \times 10^{-8}$	$5/7 \times 10^{-5}$	$2/9 \times 10^{-5}$	$6/8 \times 10^{-5}$	$1/03 \times 10^{-4}$	25×10^{-5}
$1/36 \times 10^{-5}$	$2/1 \times 10^{-5}$	$1/2 \times 10^{-7}$	$1/1 \times 10^{-5}$	$1/7 \times 10^{-5}$	$2/7 \times 10^{-5}$	$3/6 \times 10^{-5}$	$1/36 \times 10^{-5}$
$1/4 \times 10^{-5}$	$1/8 \times 10^{-5}$	$1/5 \times 10^{-7}$	$9/0 \times 10^{-6}$	$1/5 \times 10^{-5}$	$2/2 \times 10^{-5}$	$2/7 \times 10^{-5}$	$1/4 \times 10^{-5}$
$4/3 \times 10^{-6}$	$7/0 \times 10^{-6}$	$9/0 \times 10^{-8}$	$2/0 \times 10^{-6}$	$5/0 \times 10^{-6}$	$9/0 \times 10^{-6}$	$1/0 \times 10^{-5}$	$4/3 \times 10^{-6}$
$1/9 \times 10^{-5}$	$2/8 \times 10^{-5}$	$3/0 \times 10^{-8}$	$8/0 \times 10^{-6}$	$2/1 \times 10^{-5}$	$3/2 \times 10^{-5}$	$4/5 \times 10^{-5}$	$1/9 \times 10^{-5}$
$4/0 \times 10^{-6}$	$5/0 \times 10^{-6}$	$2/0 \times 10^{-7}$	$5/0 \times 10^{-6}$	$5/0 \times 10^{-6}$	$8/0 \times 10^{-6}$	$1/4 \times 10^{-5}$	$4/0 \times 10^{-6}$
$1/0 \times 10^{-5}$	$1/3 \times 10^{-5}$	$9/0 \times 10^{-8}$	$5/0 \times 10^{-6}$	$1/1 \times 10^{-5}$	$1/5 \times 10^{-5}$	$2/0 \times 10^{-5}$	$1/0 \times 10^{-5}$
$3/2 \times 10^{-6}$	$4/0 \times 10^{-6}$	$3/0 \times 10^{-8}$	$2/0 \times 10^{-6}$	$3/0 \times 10^{-6}$	$5/0 \times 10^{-6}$	$6/0 \times 10^{-6}$	$3/2 \times 10^{-6}$

نرخ کاهش رسانایی طرح مخلوط T3-C5-H15-M12-A55 بیشتر از سایر نمونه ها می باشد، در حالی که این طرح بیشترین رسانایی ۱۸۰ روزه را نشان می دهد. با استغراق نمونه ها در محیط تهاجمی سولفات سدیم ۵ درصد طی ۱۸۰ و ۳۶۰ روز، طرح مخلوط T3-C5-H15-M12-A55 حاوی بیشترین رسانایی و طرح مخلوط C-C0-H0-M4-A45 کمترین رسانایی را دارا بودند. مطابق جدول ۷ پس از گذشت ۳۶۰ روز، رسانایی تمامی نمونه ها کاهش یافتند. افزودن مواد خودحسگر نظیر سرباره مس و هالوزیت در محیط سولفاتی نیز باعث بهبود رسانایی می شود.

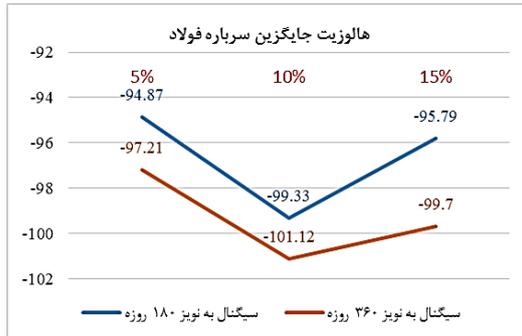
مطابق با داده های جدول ۷ با استغراق نمونه های تهیه شده در محیط آبی در مدت زمان های ۲۸، ۱۸۰ و ۳۶۰ روزه، طرح مخلوط T3-C5-H15-M12-A55 بیشترین رسانایی و طرح مخلوط C-C0-H0-M4-A45 کمترین رسانایی را دارا بودند. با گذر زمان، روند افزایش رسانایی بلند مدت با افزودن مواد خودحسگر در ملات ژئوپلیمری خودحسگر در تمامی طرح ها کاهش می است. همچنین می توان نتیجه گیری کرد که افزودن مواد خودحسگر در طرح های پیشنهادی تاگوجی نسبت به طرح شاهد در تمامی زمان های اندازه گیری، رسانایی بهتری ایجاد می شود و حضور موثر سرباره مس و هالوزیت را در رسانایی محیط سولفاتی متذکر می شود.

۳-۲-۱- تحلیل رسانایی به روش تاگوجی مستغرق در محیط سولفاتی

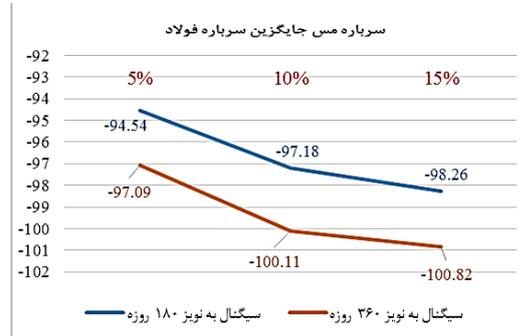
شکل ۵ نتایج آزمایش رسانایی به روش تاگوجی مستغرق در محیط سولفاتی و تأثیر بر همکنش شاخصها را نشان می دهد. ملاحظه می شود که تأثیر افزایش نسبت جایگزینی سرباره مس به جای سرباره فولاد بر رسانایی، کاهش یافته و بهینه جایگزینی این نسبت در مدت زمان ۱۸۰ روز و ۳۶۰ روز استقرار در محیط سولفاتی، ۵ درصد می باشد. همچنین نسبت بهینه جایگزینی هالوزیت با سرباره فولاد در ۱۸۰ روز و ۳۶۰ روز استقرار در محیط سولفاتی، ۵ درصد و کمترین نسبت، ۱۰ درصد عنوان شد. افزایش مولاریته سدیم هیدروکسید از ۴ تا ۱۲ مولار، در مدت زمان ۱۸۰

در نمونه های خشک، پس از خارج کردن نمونه ها در روز ۲۸ ام از آب و قرارگیری در دمای اتاق به مدت ۱۸۰ روز، طرح مخلوط T3-C5-H15-M12-A55 بیشترین و طرح مخلوط شاهد C-C0-H0-M4-A45 کمترین رسانایی را دارا بودند. در مدت زمان ۳۶۰ روز، در طرح مخلوط T8-C15-H10-M4-A55 بیشترین و در طرح شاهد C-C0-H0-M4-A45 کمترین رسانایی حاصل شد. داده ها بیانگر حضور موثر مواد خودحسگر نظیر سرباره مس و هالوزیت در ملات ژئوپلیمری در شرایط خشک بودند. نتایج رسانایی ۳۶۰ روزه با قرارگیری در محیط خشک بسیار کوچک به دست آمد که دلیل این موضوع را می توان خشک شدن آب منفذی در ریزساختار نمونه ها عنوان کرد. نکته قابل توجه اینکه در مدت زمان ۳۶۰ روز این است که

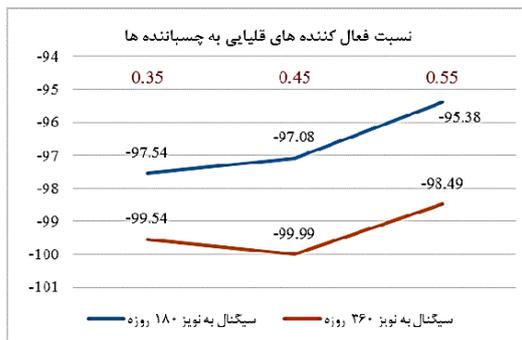
روز و ۳۶۰ روز استقرار در محیط سولفاتی، اثر مثبت بر رسانایی ملات ژئوپلیمری داشته است و مولاریته بهینه در این محیط، ۱۲ مولار به دست آمده است. در مدت زمان ۱۸۰ و ۳۶۰ روز اسقرار



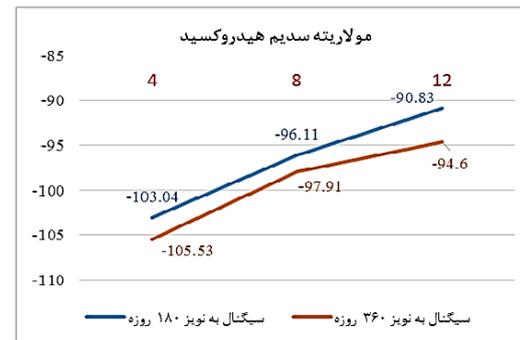
ب



الف



د



ج

شکل ۵ - نسبت سیگنال به نويز آزمایش سنجش رسانایی ۱۸۰ و ۳۶۰ روزه، مستغرق در محیط سولفاتی در شاخص های تاگوچی (الف) جایگزینی سرباره مس به سرباره فولاد، (ب) جایگزینی هالوزیت به سرباره فولاد (ج) نسبت فعال کننده های قلیایی به چسباننده ها (د) نسبت فعال کننده های قلیایی به چسباننده ها

۹۹/۵ درصد) در نظر گرفته شد. جداول ۸ و ۹ نتایج تحلیل واریانس داده های مسأله را روی رسانایی ۱۸۰ روزه و ۳۶۰ روزه نمونه های مستغرق در محیط سولفاتی نشان می دهد. مشاهده می شود که عامل کنترلی مولاریته سدیم هیدروکسید، بر روی پاسخ رسانایی اثر معناداری دارد ($P < 0/05$). لازم به ذکر است که تأثیر مولاریته سدیم هیدروکسید بر روی پاسخ مقاومت فشاری ۳۶۰ روزه بیشتر از ۱۸۰ روزه می باشد ($P = 0/021 < 0/047 < 0/05$). در این میان عوامل دیگر اثر معناداری بر روی پاسخ ندارند.

۳-۲-۲- تحلیل واریانس برای عامل پاسخ رسانایی در محیط سولفاتی

شاخص های کنترلی بر پاسخ فرضی رسانایی نمونه های مستغرق در محیط سولفاتی در دو بازه زمانی ۱۸۰ و ۳۶۰ روز با استفاده از تحلیل واریانس خطی در نرم افزار Minitab انجام گردیده است. تأثیر نسبت سرباره مس به سرباره فولاد، نسبت هالوزیت به سرباره فولاد، مولاریته سدیم هیدروکسید و نسبت فعال کننده های قلیایی به چسباننده ها بر واریانس کل نتایج برای سطح معنی داری ۰/۵ درصد (سطح اطمینان

جدول ۸ - داده های مقدار واریانس مقدار میانگین برای عامل پاسخ رسانایی ۱۸۰ روزه نمونه های مستغرق در محیط سولفاتی

منبع داده	DF	SS	MS	F	P	R-Sq	R-Sq(Adj)
نسبت سرباره مس به سرباره فولاد	۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۵	۰/۷۲۱	۱۰/۳۳ %	۰/۰۰ %
نسبت هالوزیت به سرباره فولاد	۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۴۱	۰/۶۸۲	۱۱/۹۶ %	۰/۰۰ %
مولاریته سدیم هیدروکسید	۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۵/۳۲	۰/۰۴۷	۶۳/۹۶ %	۵۱/۹۵ %
نسبت فعال کننده های قلیایی به چسباننده ها	۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۴۸	۰/۶۴۲	۱۳/۷۵ %	۰/۰۰ %

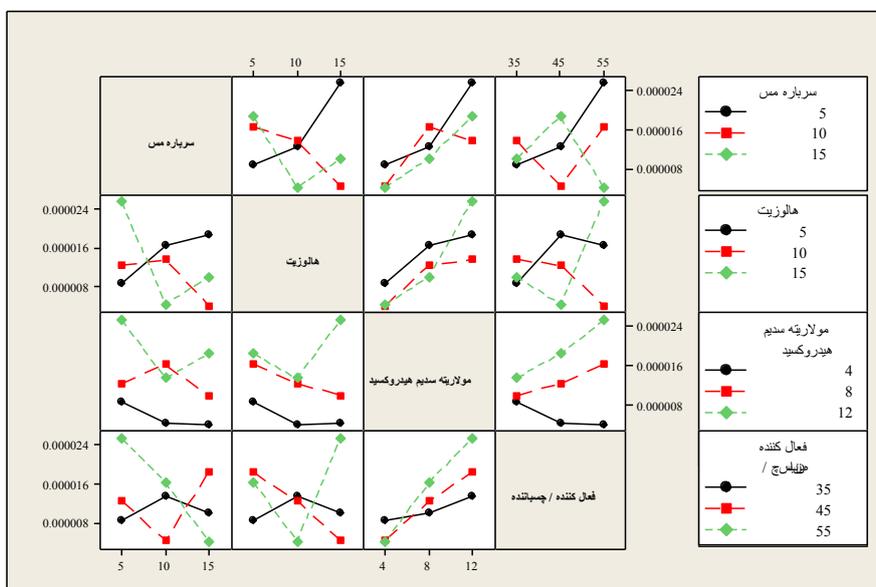
جدول ۹ - داده های مقدار واریانس مقدار میانگین برای عامل پاسخ رسانی ۳۶۰ روزه نمونه های مستغرق در محیط سولفاتی

منبع داده	DF	SS	MS	F	P	R-Sq	R-Sq(Adj)
نسبت سرباره مس به سرباره فولاد	۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۳	۰/۷۲۹	۱۰/۰۰٪	۰/۰۰٪
نسبت هالوزیت به سرباره فولاد	۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۸	۰/۷۶۶	۸/۵۲٪	۰/۰۰٪
مولارته سدیم هیدروکسید	۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۷/۸۹	۰/۰۲۱	۷۲/۴۶٪	۶۳/۲۹٪
نسبت فعال کننده های قلیایی به چسباننده ها	۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳	۰/۷۵۲	۹/۰۳٪	۰/۰۰٪

های دیگر، با بالاترین میانگین رسانی ملات ۳۶۰ روزه مرتبط است و اثر مستقیم با مقدار آن دارد. همچنین سلول های مرتبط با مقادیر هالوزیت و سرباره مس نیز در برهمکنش با شاخص های قلیایی ارتباط معناداری در درصد های جایگزینی کم نسبت به سرباره فولاد (۵ درصد) نشان می دهد. لازم به ذکر است ماتریس نمودار های برهمکنش مطابقت با تجزیه و تحلیل واریانس را نیز نشان می دهند.

۳-۲-۳- تحلیل برهم کنش بین عوامل در میزان رسانی ۳۶۰ روزه

تحلیل برهمکنش بین عوامل موثر طرح مخلوط تاگوشی، در میزان رسانی ملات ژئوپلیمری ۳۶۰ روزه، مستغرق در محیط سولفاتی در شکل ۶ نشان داده شده است. ماتریس نمودار های برهمکنش بیانگر این است که مولارته سدیم هیدروکسید در برهمکنش بین شاخص



شکل ۶ - ماتریس برهمکنش بین عوامل موثر در میزان رسانی ۳۶۰ روزه نمونه های ملاتی مستغرق در محیط سولفاتی

محیط سولفاتی هستیم. در محیط خشک با تشکیل ساختار همگن شبکه الومینوسیلیکاتی و تکامل ژئوپلیمراسیون در نمونه ها، شبکه های C-A-S-H و C-S-H تشکیل و منافذ در نمونه ها پر شده اند. نفوذ شدید سولفات سدیم در نمونه های شکل ۸ نسبت به شکل ۷ قابل مشاهده می باشد و موجب تشکیل ساختار مخرب اترینگایت و گچ و تخریب شبکه های نانو ساختاری C-A-S-H و C-S-H در نمونه ها می شود. در تصاویر ۷ و ۸ محل و تشکیل شبکه ژل های C-A-S-H و C-S-H در نمونه ها و همچنین چسب های ژئوپلیمری با شکل های پیچیده و ابری که بخش های اصلی سیمان ژئوپلیمری هستند با علامت A، محل حفره ها و تفرع های نیمه کروی و

۳-۳- ارزیابی عکس های میکروسکوپ الکترونی روبشی در محیط سولفاتی

این مطالعه شامل تجزیه و تحلیل نمونه های ملات ژئوپلیمری حاوی سرباره فولاد، سرباره مس و هالوزیت بود که پس از عمل آوری ۲۸ روزه در محیط آبی، در سه محیط مختلف معمولی خشک و سولفاتی و آبی قرار گرفتند. تصاویر SEM سه نمونه بهینه با مقاومت فشاری و رسانی بالاتر و همچنین یک نمونه شاهد در سن ۳۶۰ روز، مستغرق در محیط خشک و مستغرق در محیط سولفاتی به ترتیب در شکل ۵ و در شکل ۶ ارائه شده است. با مقایسه تصاویر نمونه ها در شرایط محیطی مختلف، شاهد تغییر ریزساختار نمونه های ملاتی در

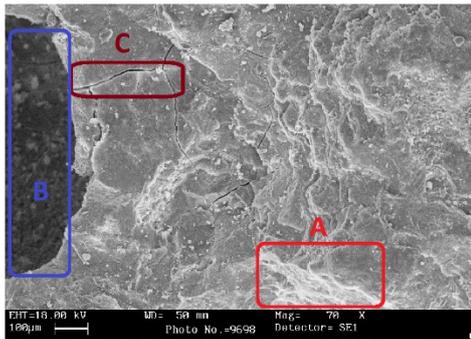
میکرو کریستال هایی تشکیل می شوند که فاقد انسجام هستند و ساختار متراکم و یکپارچه ای از خود نشان نمی دهند. وجود پرکننده ها منجر به تولید یک ریزساختار متراکم می شود و واکنش ژئوپلیمری یکنواخت تری را در سراسر ماتریس ترویج می دهد. برهمکنش بین ذرات پرکننده و مواد آلومینوسیلیکاتی پایه با فعال شدن مواد قلیایی، تشکیل خروجی مورد انتظار از واکنش را تسهیل می کند و خواص مکانیکی ملات های ژئوپلیمری را افزایش می دهد. علاوه بر این، افزایش سرباره فولاد و پرکننده ها در کامپوزیت ها، منجر به افزایش متناسب در محتوای کلسیم شده و افزایش تولید ژل C-A-S-H را به همراه دارد. این پدیده با کاهش تخلخل همراه شده و در نتیجه به ریزساختار یکپارچه تری ختم می شود.

مقایسه میزان درصد تخلخل در تصاویر SEM نمونه های مستغرق در محیط سولفاتی حاکی از آن است که نمونه C-C0-H0-M4-A45 و T3-C5-H15-M12-A55 بیشترین و کمترین میزان درصد تخلخل به ترتیب به مقدار ۱۲ درصد و ۸ درصد را دارا هستند. همچنین در محیط سولفاتی، نرخ رشد ترک و میزان قطر میکرو ترک ها در طرح مخلوط T7-C15-H5-M12-A45 مشهود تر است. لازم به ذکر است که میزان قطر میکرو ترک در محیط سولفاتی نسبت به محیط خشک در مدت ۳۶۰ روز در هر طرح مخلوط کمتر است که دلیل آن را می توان استمرار واکنش ژئوپلیمراسیون در محیط مرطوب سولفاتی در بلند مدت توصیف کرد. در محیط خشک، عملاً واکنش ژئوپلیمری به دلیل عدم رطوبت بسیار کم می شود. بیشترین میزان قطر میکرو ترک در محیط معمولی خشک در طرح T3-C5-H15-M12-A55 و در محیط سولفاتی در طرح مخلوط T7-C15-H5-M12-A45 به ترتیب به میزان ۱۸ میکرومتر و ۳ میکرومتر می باشد. علت این موضوع را می توان مولاریته بالای این دو طرح مخلوط نسبت به طرح های دیگر و سرعت و شدت واکنش ژئوپلیمری در سنین اولیه بیان کرد. مشاهده می شود که تحلیل کمی تصاویر SEM نیز تأیید کننده تحلیل کیفی می باشد. لازم به ذکر است پس از صحت سنجی نتایج نمونه های مستغرق در سولفاتی، طرح مخلوط بهینه (از نظر همه خواص به صورت هم زمان) معرفی شده به روش تاگوچی، جایگزینی سرباره مس با سرباره فولاد برابر با ۱۵٪، جایگزینی هالوزیت با سرباره فولاد برابر با ۱۵٪، مولاریته سدیم هیدروکسید برابر با ۱۲ و نسبت فعال کننده های قلیایی به چسباننده ها برابر با ۰/۵۵ پیشنهاد شد.

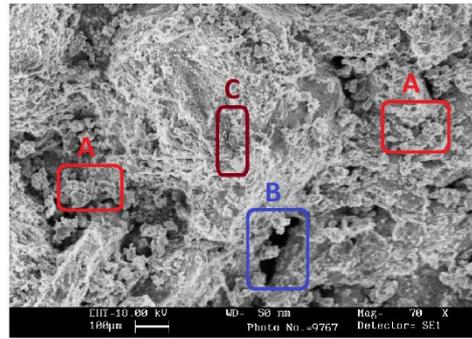
سنگ دانه های گسسته با سطح صاف و گرد با علامت B، محل و مقادیر میکرو ترک ها با علامت C در تصاویر SEM در نمونه های ملات ژئوپلیمری قابل مشاهده است.

با مقایسه نمونه ها در شکل های ۷ و ۸ در شرایط مختلف محیطی، نمونه C-C0-H0-M4-A45 ساختار یکنواخت کمتری نسبت به نمونه های دیگر دارد و با دارا بودن حفره ها و بی نظمی در ریزساختار، عدم یکپارچگی در کریستال ها قابل مشاهده است. نمونه T2-C5-H10-M8-A45 که دارای مقاومت فشاری بالاتر در روز ۲۸ ام است، ساختار متراکم تر و یکنواخت تری را با شکل گیری کریستال بهتری در ماتریس نشان می دهد. طرح های مخلوط T3-C5-H15-M12-A55 و T7-C15-H5-M12-A45 که رسانایی بالاتری دارند، ریزساختار یکپارچه تری را نشان می دهند. تشکیل آستانه نفوذ، منجر به گسترش هدایت الکتریکی در ماده می شود. این پدیده از طریق ایجاد پل های ارتباطی بین بارهای الکتریکی در ریزساختار صورت میگیرد و مسیریابی برای انتقال الکترون ها فراهم میکند. شایان ذکر است که عوامل محیطی مانند دما، رطوبت، شرایط عمل آوری و همچنین خواص ماده مانند قلیائیت و ... میتوانند در تشکیل آستانه نفوذ و پل زنی الکترون ها موثر باشند. هر دو نمونه T7-C15-H5-M12-A45 و T3-C5-H15-M12-A55 دارای مولاریته یکسان سدیم هیدروکسید (۱۲ مولار) هستند که نشان میدهد غلظت بالای سدیم هیدروکسید تأثیر قابل توجهی بر هدایت الکتریکی ملات ژئوپلیمر دارد. حضور سدیم هیدروکسید به عنوان یک الکترو لیت در محلول منفذی، جریان الکترون ها را در ماتریس تسهیل میکند و در نتیجه رسانایی را بهبود می بخشد. این اثر را می توان با افزودن پرکننده های رسانا به ماتریس تقویت کرد تا مواد خودحسگر با کارایی بالاتر توسعه یابند. از سوی دیگر، بررسی میکرو ترک ها در تصاویر SEM نشان می دهد که مولاریته بالاتر سدیم هیدروکسید سرعت واکنش را افزایش داده و موجب تشکیل ترک های بیشتر و محسوس تر می شود. این پدیده به ویژه در طرح مخلوط T7-C15-H5-M12-A45 مشهود است. انتظار می رود تنظیم دما در فرایند پخت باعث کاهش بروز این ترک ها شود.

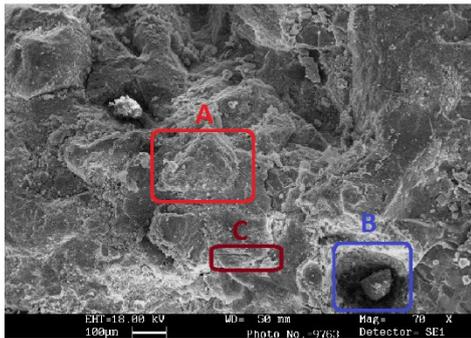
مقایسه سایر نمونه ها با نمونه شاهد نشان می دهد که افزودن پرکننده های رسانا جایگزین سرباره فولاد، عملکرد بهتر و تشکیل کریستال با کیفیت بالاتری را به همراه دارد. در نمونه شاهد،



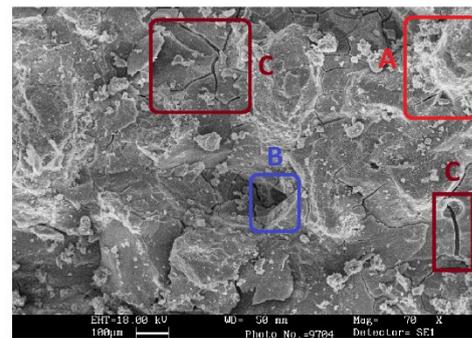
ب



الف

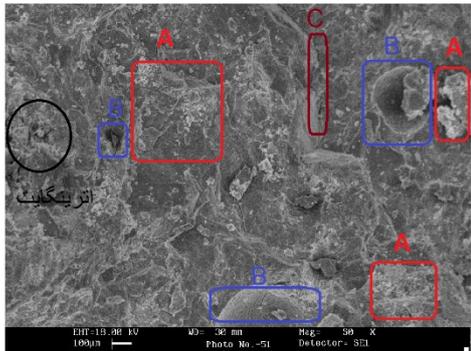


د

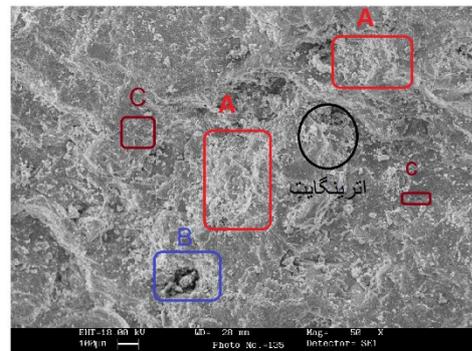


ج

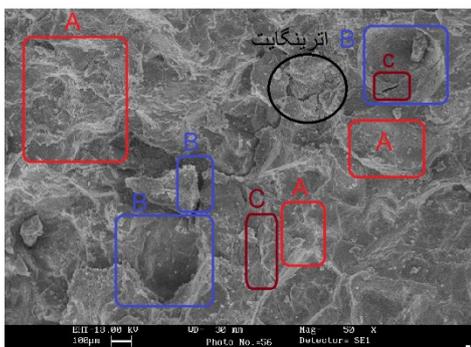
شکل ۷- تصاویر SEM طرح های مخلوط در محیط معمولی (الف) C-C0-H0-M4-A45، (ب) T2-C5-H10-M8-A45، (ج) T3-C5-H10-M8-A45 و (د) H15-M12-A55 و T7-C15-H5-M12-A45



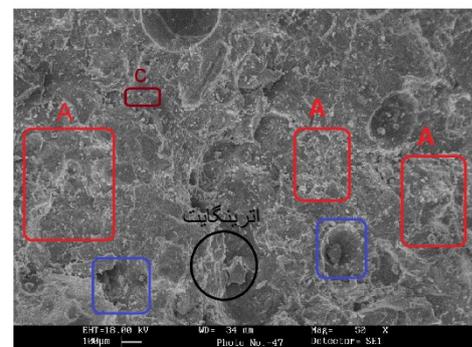
ب



الف



د



ج

شکل ۸- تصاویر SEM طرح های مخلوط در محیط سولفاتی (الف) C-C0-H0-M4-A45، (ب) T2-C5-H10-M8-A45، (ج) T3-C5-H15-M12-A55 و (د) T7-C15-H5-M12-A45

۴- نتیجه گیری

این محیط به دست آورد و از نتایج نسبت سیگنال به نویز در محیط سولفاتی استنباط شد که افزایش مولاریته سدیم هیدروکسید، تأثیر مثبت بر میزان رسانایی ملات ژئوپلیمری گذاشت. مکانیسم خودحسگری در ملات‌های فعال‌شده با قلیا را می‌توان به اثرات متقابل هم‌افزایی رسانایی یونی به دلیل ماهیت سوپر یونی مواد ژئوپلیمری، رسانایی تماسی ذرات پرکننده و اثرات تونل‌زنی الکترونی بین پرکننده‌های رسانا نسبت داد.

- تحلیل‌های واریانس و برهمکنش بین عوامل در طرح مخلوط تاگوچی بیانگر این بود که عامل کنترلی مولاریته سدیم هیدروکسید، بر روی پاسخ رسانایی و مقاومت فشاری بلند مدت اثر معناداری دارد ($P < 0.05$).

- داده‌ها بیانگر حضور موثر مواد خودحسگر نظیر سرباره مس و هالوزیت در ملات ژئوپلیمری در شرایط محیطی آبی، خشک و سولفاتی در مدت زمان ۱۸۰ و ۳۶۰ روز بودند و باعث بهبود رسانایی آنها شدند.

- بر اساس تصاویر SEM در شرایط مختلف، ریزساختار نمونه‌های ملاتی با قرارگیری در محیط سولفاتی تغییر پیدا کرده است. در شرایط محیطی با تشکیل ساختار همگن شبکه الومینوسیلیکاتی و تکامل ژئوپلیمراسیون در نمونه‌ها و تشکیل شبکه‌های C-A-S-H و C-S-H، منافذ در نمونه‌ها پر شده‌اند. نفوذ شدید سولفات سدیم در نمونه‌ها، موجب تشکیل ساختار مخرب اترینگایت و گچ و تخریب شبکه‌های نانو ساختارهای C-A-S-H و C-S-H در نمونه‌ها می‌شود. بیشترین میزان قطر میکروتراک در محیط سولفاتی در طرح مخلوط T7-C15-H5-M12-A45 برابر ۳ میکرومتر و بیشترین و کمترین میزان درصد تخلخل به ترتیب به مقدار ۱۲ درصد و ۸ درصد در محیط سولفاتی گزارش شد.

- تصاویر SEM حاوی پرکننده‌ها در محیط سولفاتی، ریزساختارهای تراکم‌تر با رشد کریستال همگن نشان دادند که نشان‌دهنده سینتیک واکنش ژئوپلیمری بهبود یافته است. این اصلاح ریزساختاری را می‌توان به سه اثر هم‌افزایی نسبت داد: (۱) نقش پرکننده‌ها به‌عنوان مکان‌هایی که توسعه فاز کریستالی را ارتقا می‌دهند، (۲) بهبود تراکم ذرات به دلیل مورفولوژی دانه بندی آنها، و (۳) تسهیل فعال‌سازی قلیایی از طریق افزایش مساحت سطح واکنش‌پذیر.

در این مطالعه تأثیرپرکننده‌های رسانا، به‌ویژه سرباره مس و هالوزیت جایگزین سرباره فولاد برای تغییرات مقاومت فشاری، خواص الکتریکی و ریزساختار ملات خودحسگر فعال‌شده با قلیا در سه محیط آبی، خشک و تهاجمی سولفاته بررسی شد. برای بهینه‌سازی تعداد و کارایی آزمایش‌ها، از طراحی آرایه متعامد تاگوچی استفاده شد. یافته‌های صورت گرفته به شرح زیر می‌باشد:

- بر اساس نتایج مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های پیشنهادی تاگوچی در محیط سولفاتی، طرح مخلوط T8-C15-H10-M4-A55 حاوی بیشترین مقاومت فشاری ۱۸۰ روزه (۲۵/۴۸ مگاپاسکال) و طرح شاهد C-C0-H0-M4-A45 حاوی بیشترین مقاومت فشاری ۳۶۰ روزه (۳۰/۸۵ مگاپاسکال) بود. داده‌ها چنان بیان می‌کنند که در محیط سولفاتی، محیط آبی و خشک، جایگزینی مواد خودحسگر در ملات ژئوپلیمری اثر منفی در روند افزایشی مقاومت فشاری بلند مدت دارد و نرخ افزایش مقاومت فشاری در طرح شاهد بیشتر از نمونه‌های طرح پیشنهادی تاگوچی می‌باشد. در تحلیل این موضوع می‌توان به اختلال در انجام واکنش ژئوپلیمری در حضور پرکننده‌های رسانا در بلند مدت و همچنین کاهش ترکیبات آلومینوسیلیکاتی در آنالیز XRF این مواد اشاره کرد.

- با گذشت زمان تا ۳۶۰ روز پس از قرارگیری طرح‌های مخلوط T7-C15-H5-M12-A45 و T2-C5-H10-M8-A45 در محیط سولفات سدیم ۵ درصد، مقاومت فشاری این دو نمونه کاهش شد که علت آن را به تأثیرساختار اترینگایت و در نتیجه نرم شدن و آسیب رسیدن به ساختار ژئوپلیمر عنوان کرد.

- پس از صحت‌سنجی نتایج نمونه‌های مستغرق در سولفاتی، طرح مخلوط بهینه (از نظر همه خواص به‌صورت هم‌زمان) معرفی شده به روش تاگوچی، جایگزینی سرباره مس با سرباره فولاد برابر با ۱۵٪، جایگزینی هالوزیت با سرباره فولاد برابر با ۱۵٪، مولاریته سدیم هیدروکسید برابر با ۱۲ و نسبت فعال‌کننده‌های قلیایی به چسباننده‌ها برابر با ۰/۵۵ شناسایی و پیشنهاد شد.

- بر اساس نتایج سنجش رسانایی در محیط سولفاتی، طرح مخلوط T3-C5-H15-M12-A55 بیشترین رسانایی را در

[11] X. Feng, E. J. Garboczi, D. P. Bentz, P. E. Stutzman, and T. O. Mason, "Estimation of the degree of hydration of blended cement pastes by a scanning electron microscope point-counting procedure," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 10, pp. 1787-1793, 2004/10/01/ 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.014>.

[12] L. N. Assi, E. Deaver, M. K. ElBatanouny, and P. Ziehl, "Investigation of early compressive strength of fly ash-based geopolymers concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 807-815, 2016/06/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.008>.

[13] J. L. Provis et al., "RILEM TC 247-DTA round robin test: mix design and reproducibility of compressive strength of alkali-activated concretes," *Materials and Structures*, vol. 52, no. 5, p. 99, 2019/09/10 2019, doi: 10.1617/s11527-019-1396-z.

[14] M. N. N. Khan and P. K. Sarker, "Effect of waste glass fine aggregate on the strength, durability and high temperature resistance of alkali-activated fly ash and GGBFS blended mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 263, p. 120177, 2020/12/10/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120177>

[15] A. M. Aguirre-Guerrero, R. A. Robayo-Salazar, and R. Mejía de Gutiérrez, "Corrosion resistance of alkali-activated binary reinforced concrete based on natural volcanic pozzolan exposed to chlorides," *Journal of Building Engineering*, vol. 33, p. 101593, 2021/01/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101593>

[16] L.-l. Kan, J.-w. Lv, B.-b. Duan, and M. Wu, "Self-healing of Engineered Geopolymer Composites prepared by fly ash and metakaolin," *Cement and Concrete Research*, vol. 125, p. 105895, 2019/11/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105895>.

[17] G. F. Huseien and K. W. Shah, "Durability and life cycle evaluation of self-compacting concrete containing fly ash as GBFS replacement with alkali activation," *Construction and Building Materials*, vol. 235, p. 117458, 2020/02/28/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117458>

[18] J. He, G. Zhang, S. Hou, and C. Cai, "Geopolymer-based smart adhesives for infrastructure health monitoring: concept and feasibility," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 100-109, 2011.

[19] M. Suweni Muntini and H. Ahmadi, "Performance of metakaolin geopolymer ceramic for fiber optic temperature sensor," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 7, Part 1, pp. 15137-15142, 2018/01/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.071>.

- این نتایج نقش امیدوارکننده مواد خودحسگر را به‌عنوان جایگزین‌های پیشرفته برای حسگرهای سنتی در سیستم‌های پایش سلامت سازه و تشخیص آسیب در سازه‌های در معرض تهاجم نشان می‌دهد. ترکیب طراحی مواد پایدار با عملکرد هوشمند، نوآوری قابل توجهی را نشان می‌دهد که مزایای زیست‌محیطی و فناوری را ارائه می‌دهد.

۵- مراجع

[1] M. Taylor, C. Tam, and D. Gielen, "Energy efficiency and CO2 emissions from the global cement industry," *Korea*, vol. 50, no. 2.2, p. 61.7, 2006.

[2] V. Malhotra, "Introduction: sustainable development and concrete technology," *Concrete International*, vol. 24, no. 7, 2002.

[3] P.-W. Chen and D. D. L. Chung, "Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection," *Smart Materials and Structures*, vol. 2, no. 1, pp. 22-30, 1993/03/01 1993, doi: 10.1088/0964-1726/2.

[4] K. J. D. MacKenzie and M. J. Bolton, "Electrical and mechanical properties of aluminosilicate inorganic polymer composites with carbon nanotubes," *Journal of Materials Science*, vol. 44, no. 11, pp. 2851-2857, 2009/06/01 2009.

[5] S. Sun et al., "Multi-layer graphene-engineered cementitious composites with multifunctionality/intelligence," *Composites Part B: Engineering*, vol. 129, pp. 221-232, 2017/11/15/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.063>

[6] B. G. Han, B. Z. Han, and X. Yu, "Effects of the content level and particle size of nickel powder on the piezoresistivity of cement-based composites/sensors," *Smart Materials and Structures*, vol. 19, no. 6, p. 065012, 2010/04/30 2010, doi: 10.1088.065012/6/19/065012/065012

[7] B. Han, S. Ding, and X. Yu, "Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review," *Measurement*, vol. 59, pp. 110-128, 2015/01/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.048>

[8] B. Han, X. Yu, and J. Ou, *Self-sensing concrete in smart structures*. Butterworth-Heinemann, 2014.

[9] J. Davidovits, "Geopolymers: inorganic polymeric new materials," *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, vol. 37, no. 8, pp. 1633-1656, 1991.

[10] H. F. Taylor, *Cement chemistry*. Thomas Telford London, 1997.

Investigating the effect of copper slag and halloysite on the durability of self-sensing alkali-activated slag mortar using the Taguchi method

Navid Jalali Jalal Abadi

PhD Student, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

Amir Tarighat

Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

Abolfazl Soltani *

Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei University of Tarbiat of Tehran, Iran.

Abstract

Alkali-activated slag-based materials, as sustainable and environmentally friendly alternatives to Portland cement, have garnered significant attention due to their lower CO₂ emissions and reduced energy consumption. These materials, characterized by their alkaline nature and the mobility of Na⁺ ions upon electrolyte activation, exhibit higher electrical conductivity and superior mechanical properties compared to Portland cement, making them suitable for structural health monitoring (SHM) and damage detection systems. Infrastructure such as dams, bridges, and hydraulic structures in corrosive environments (e.g., seawater) are vulnerable to chloride ions, microorganisms, and sulfate attacks. This paper presents an innovative approach in designing self-sensing sustainable alkali-activated slag-based materials for applications in aggressive sulfate-rich conditions, evaluating their potential for structural health monitoring through electrical conductivity measurements. A Taguchi experimental design was employed to systematically investigate the influence of key parameters on the compressive strength and electrical conductivity of geopolymer mortar containing self-sensing materials such as halloysite and copper slag. The experimental procedures included compressive strength testing, electrical conductivity measurements, and microstructural analysis using scanning electron microscopy (SEM). The results demonstrated that increasing the molarity of sodium hydroxide positively enhanced the geopolymer mortar's electrical conductivity. Additionally, the incorporation of conductive fillers as partial replacements for steel slag improved performance, promoting higher-quality crystallization. An increase in steel slag and conductive fillers led to a proportional rise in calcium content, fostering the formation of C-A-S-H and C-S-H gels in the microstructure. This phenomenon was accompanied by reduced porosity, ultimately enhancing microstructural integrity. These findings highlight the promising role of self-sensing alkali-activated slag-based materials as an ideal solution for sustainable and smart construction. They represent an advanced alternative to traditional sensors in diverse environments, offering both structural durability and real-time monitoring capabilities.

Keywords: Self-sensing geopolymer mortar, Taguchi, durability, conductivity, compressive strength.

* Corresponding Author: asoltani@sru.ac.ir