



بررسی رفتار خاک ماسه اهواز تثبیت شده با متاکائولین

پوریا دانشگر، سعید غفارپور جهرمی*، حامد ارزانی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

کلمات کلیدی:

تثبیت خاک

بهسازی خاک

ژئوپلیمر

متاکائولین

مقاومت فشاری محصور نشده

خلاصه: با توجه به رشد جمعیت جهت توسعه زیرساخت‌های کشور، تثبیت و اصلاح زمین‌های نامرغوب به منظور ایجاد بستر مقاوم و مستحکم بیش از هر زمانی مورد نیاز است. تاکنون روش‌های بهسازی زیادی در دنیا پیشنهاد شده است که از عمده‌ترین روش‌های رایج تثبیت شیمیایی با استفاده از آهک یا سیمان است که با محیط زیست سازگاری مناسبی ندارند. لذا امروزه استفاده از پوزولان‌ها و سیمان‌های ژئوپلیمری به جای سیمان پرتلند مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است. در این مطالعه تثبیت خاک ماسه شهر اهواز با کمک متاکائولین به عنوان نوعی ماده افزودنی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق به تأثیر مقادیر متفاوت متغیرهایی همچون مقدار درصد متاکائولین، نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید، غلظت سدیم هیدروکسید و نسبت محلول فعال کننده قلیایی به ماده افزودنی در سنین عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز پرداخته شده است. نمونه‌ها تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری محصور نشده (UCS) ارزیابی و جهت بررسی ریزساختاری، از آنالیزهای پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد برای رسیدن به مقاومت بهینه باید از اختلاط ۲۰٪ متاکائولین، نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید ۲/۵، غلظت سدیم هیدروکسید ۱۲ مولار و نسبت محلول فعال کننده به ماده افزودنی ۰/۵ استفاده کرد. مقاومت نمونه با عمل‌آوری ۲۸ روزه به حدود ۵ مگاپاسکال یعنی حدود ۳ برابر بیشتر از نمونه‌های سیمانی و ۲۳ برابر بیش از خاک تثبیت نشده می‌رسد که در آنالیز ریزساختاری وجود ژل N-A-S-H به عنوان عامل اصلی افزایش مقاومت در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون قابل مشاهده است.

۱- مقدمه

قابلیت‌ها و محدودیت‌هایی دارند که با توجه به شرایط و نیاز پروژه، هزینه اقتصادی، مشکلات زیست محیطی و دیگر موارد قابل انتخاب هستند.

یکی از روش‌های بهبود خواص مهندسی خاک‌ها استفاده از روش تثبیت شیمیایی است. تثبیت و بهسازی خاک به معنای اصلاح خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک برای رسیدن به اهداف پیش‌بینی شده است. در همین راستا روش‌های بهسازی زیادی در دنیا در حال اجرا هستند که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. از عمده‌ترین معایب روش‌های رایج بهسازی، عدم سازگاری آن‌ها با محیط زیست، مشکلات و معضلات زیست محیطی در قرن اخیر است. سیمان، آهک، انواع افزودنی‌های طبیعی و صنعتی و پلیمرهای متداول که امروزه از پالایش نفت خام حاصل می‌شوند، از منظر محیط زیست برای طبیعت نامساعد هستند و زیان‌هایی را

امروزه با توجه به رشد جمعیت و لزوم استفاده بهتر از منابع موجود، تثبیت زمین‌های نامرغوب و ایجاد بسترهای مستحکم بیش از هر زمانی مورد نیاز است. جایگزینی خاک نامرغوب با مصالح و خاک مناسب یکی از راهکارهای پیشنهادی می‌تواند باشد که هزینه جایگزینی و تراکم و اجرا بسیار پرهزینه است. بهسازی خاک با روش‌های متفاوت چون تراکم سطحی یا دینامیکی، پیش بارگذاری، روش‌های ارتعاشی، اختلاط عمیق (عمقی)، مسلح‌سازی، اجرای ریزشمع و همچنین تزریق و تثبیت شیمیایی استفاده از مواد افزودنی مختلف نظیر آهک، سیمان، مواد پلیمری، بیوپلیمر، نانو مواد و پوزولان‌ها^۱ بسیار رایج است. هر کدام از روش‌های بهسازی خاک

Pozzolan - 1

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Saeed_ghf@ru.ac.ir



تأثیر عوامل وابسته به منبع تشکیل، ماهیت محلول فعال کننده قلیایی و شرایط عمل‌آوری است. هنگام تهیه ژئوپلیمرها متغیرهای مختلفی تأثیر بر نتیجه می‌گذارند که می‌توان به تعدادی از مهم‌ترین آن‌ها از قبیل نوع و غلظت فعال کننده قلیایی، نوع و اندازه ماده افزودنی، دما، مدت زمان عمل‌آوری، نسبت وزنی بین فعال کننده قلیایی و منبع آلومینوسیلیکاتی (ماده افزودنی) اشاره کرد [۱۴ و ۱۳]. به طور کلی می‌توان فرآیند ژئوپلیمریزاسیون را به این صورت بیان کرد: (الف) آلومینوسیلیکات‌های موجود در مواد پوزولانی به وسیله محلول‌های قلیایی با PH بالا حل شده. (ب) در محلول قلیایی ساخته شده، ژلی شامل الیگومرها تشکیل شده و در بین حفرات خاک این ژل قرار می‌گیرد که زمان این فرآیند با توجه به مواد و محلول‌های مختلف می‌تواند با یکدیگر متفاوت باشد. (ج) در مرحله پلی‌کندانسیون، ژل تهیه شده به یک شبکه و زنجیره‌ای طولانی‌تر تبدیل می‌شود که یک شبکه ۳ بعدی از آلومینوسیلیکات‌ها را تشکیل می‌دهد [۱۵]. برخی از خصوصیات ژئوپلیمرها عامل برتری این مواد نسبت به سیمان است مانند ساختار به هم پیوسته، مقاومت بالا نسبت به دمای بالا و مقاومت بیشتر در مقابل اسیدها و سولفات‌ها که برخی از این ویژگی‌ها است [۱۶ و ۱۷]. محصول اصلی واکنش ژئوپلیمریزاسیون که غنی از Si و Al است، ژل هیدروآلومینوسیلیکات سدیم یا به عبارتی $N-A-S-H$ نام دارد. فرمول شیمیایی آن $Na_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$ است که از یک ساختار سه بعدی از (SiO_4) و چهار وجهی (AlO_4) تشکیل شده که از طریق اتم‌های اکسیژن مشترک به یکدیگر متصل شده‌اند که در شکل‌های ۲ و ۱ نشان داده شده است [۱۸ و ۱۹]. بار منفی در گروه‌های (AlO_4) با حضور کاتیون‌های قلیایی (معمولاً Na^+ یا K^+) جبران می‌شود.

مواد خام ژئوپلیمر باید منبع آلومینوسیلیکات^۶ باشند که پوزولان‌های طبیعی این چنین هستند که توانایی واکنش مطلوب را دارند [۲۰]. برخی از پوزولان‌ها را می‌توان بدون فرآوری خاصی به عنوان ماده‌ای برای تولید سیمان ژئوپلیمری استفاده کرد. می‌توان گفت کشف و شروع فعالیت با پوزولان‌ها در ایران به سال ۱۳۲۰ شمسی باز می‌گردد که انواع مختلفی دارند. پوزولان‌ها را از نظر منشأ می‌توان به پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی تقسیم‌بندی کرد. پوزولان‌ها یکی از افزودنی‌های سازگار با محیط زیست هستند که

به انسان و محیط زیست وارد می‌کنند که از جمله آن‌ها آلودگی و تولید CO_2 و ایجاد گرمایش و اثرات نامطلوب فرآیند گلخانه‌ای زمین می‌باشد. به عنوان نمونه به ازای تولید هر تن سیمان پرتلند^۲ تقریباً یک تن CO_2 تولید می‌شود [۱]. از طرفی با افزایش روزافزون جمعیت در جهان، نیاز انسان‌ها به تولید سیمان در حال افزایش است زیرا سیمان ماده‌ای است که در انواع فعالیت‌های عمرانی از جمله ساخت ساختمان‌ها، جاده‌ها، فرودگاه‌ها، پل‌ها، متروها و ... کاربرد دارد [۳ و ۲]. سهم تولید CO_2 صنعت سیمان حدود ۵ الی ۸٪ از کربن دی‌اکسید تولید شده در جهان است [۴-۶]. سیمان پرتلند که به عنوان یکی از رایج‌ترین مواد در صنعت ساختمان و بهسازی خاک شناخته می‌شود، به ازای تولید هر تن از این ماده به ۵۰۰۰ مگاژول انرژی و ۱/۵ تن منابع شیمی مانند سنگ آهک و رس نیاز است [۷]. با توجه به انرژی و منابع لازم جهت تولید سیمان و مقدار سهم صنعت سیمان در انتشار گازهای گلخانه‌ای که در حدود ۷ درصد هست و افزایش روزافزون هزینه تولید آن، محققان به دنبال تولید و استفاده از مواد جایگزین با هزینه و آلودگی کمتر برآمدند [۸]. با توجه به محدود بودن منابع نفتی و ضررهایی که این افزودنی‌ها برای محیط زیست دارند یکی از موارد قابل جایگزین، استفاده از پوزولان‌ها و سیمان‌های ژئوپلیمری است. پیدایش شیمی ژئوپلیمر در دهه ۱۹۷۰ میلادی بوده و مهندسی عمران در دهه ۱۹۹۰ میلادی به استفاده از آن روی آوردند زیرا مزیت‌هایی همچون کاهش تولید CO_2 در مقایسه با تولید سیمان و استفاده از مواد طبیعی و ضایعاتی برای تولید آن را به همراه داشت [۹].

ژئوپلیمرها مواد معدنی هستند که از پلیمریزاسیون معدنی بین یک منبع آلومینوسیلیکاتی مانند خاکستر بادی^۳ یا خاک رس کائولینیت و یک محلول فعال کننده قلیایی مانند سدیم هیدروکسید^۴، سدیم سیلیکات^۵ و یا ... تشکیل می‌شوند [۱۰]. این مواد به دلیل ویژگی‌های عالی مانند کارایی و انعطاف بالا، کاهش شدید انتشار CO_2 و مصرف انرژی پایین، توانایی زیادی در جایگزینی با مواد سنتی از قبیل سیمان، بتن، کامپوزیت‌ها، مواد آجری و کاشی که مواد اصلی ساختمانی هستند را دارند [۱۱ و ۱۲]. ویژگی‌های ژئوپلیمرها تحت

- 1 - Carbon dioxide
- 2 - Portland Cement
- 3 - Fly ash
- 4 - Sodium Hydroxide
- 5 - Sodium Silicate

- 6 - Sodium aluminosilicate hydrate (N-A-S-H) gel
- 7 - Aluminosilicate

ASTM D۴۲۲-۶۳ انجام شد. نتایج بیانگر آن است که خاک مصرفی دارای ۷۱/۸۱٪ ماسه، ۸/۰۲٪ سیلت و ۲۰/۱۷٪ رس است. طبق آزمایشات اولیه بر روی خاک مورد مطالعه در این پژوهش، خاک مصرفی بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید (USCS)، در طبقه SC-SM قرار می‌گیرد. آزمایش تراکم پروکتور استاندارد بر روی خاک مورد مطالعه بر اساس استاندارد ASTM D۶۹۸-۰۰ صورت گرفت. طبق نتایج این آزمایش حداکثر وزن مخصوص خشک برابر ۱/۸۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و رطوبت بهینه ۱۵/۵ درصد به دست آمد. منحنی دانه‌بندی در شکل ۱ و منحنی تراکم در شکل ۲ ارائه شده است.

در این پژوهش جهت تثبیت ژئوپلیمری از متاکائولن استفاده شده است. متاکائولن نوعی ماده آلومینوسیلیکاتی با فعالیت بالا است و یکی از پوزولان‌هایی است که در ابتدا جهت بهبود خواص بتن و سپس برای کمک به خواص خاک‌ها در پروژه‌های عمرانی استفاده شده است. این پوزولان از کلسینه کردن خاک کائولن در دمایی بین ۵۵۰ الی ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد ایجاد می‌شود که این مقادیر دما نیز به مدت زمان فرآیند هم وابسته است و محصول فعال‌سازی رس کائولن به وسیله حرارت است [۲۴]. عملیات حرارتی کائولینیت اشکال کریستالی را به اشکال واکنشی آمورف^۳ تبدیل می‌کند به طوری که ماده به دست آمده بسیار واکنش‌پذیر شده و قدرت ژئوپلیمر را مشخص می‌کند [۲۶ و ۲۵].

در متاکائولن مصرفی مجموع مقادیر $Fe_2O_3 + SiO_2 + Al_2O_3$ برابر ۹۸/۸۹ درصد می‌باشد. بر اساس استاندارد ASTM C۶۱۸، مقدار آلومیناسیلیکات باید حداقل ۷۰ درصد میزان کل ترکیب را تشکیل دهد و با نظر به این که این مقدار برای متاکائولین بالای ۷۰ درصد است، مقدار قابل قبولی برای ایجاد ژل ژئوپلیمر است. آنالیز ترکیبات شیمیایی متاکائولین در جدول ۱ آمده است.

محلول فعال کننده قلیایی مورد استفاده در این تحقیق از نوع سدیم هیدروکسید می‌باشد. سدیم هیدروکسید یا سود سوزآور با فرمول شیمیایی NaOH به عنوان یک ماده پرمصرف در صنایع معمولاً به کار می‌رود. سدیم هیدروکسید به صورت گرانول یا پولک‌های جامد سفید رنگ در دسترس است. شکل پولکی آن جهت کاربردهای صنعتی است و استفاده از آن در پژوهش‌های مهندسی متداول است که در این پژوهش نیز از شکل پولکی آن استفاده شده

امروزه در ایران و دیگر کشورها مورد توجه قرار گرفته‌اند. در ایران منابع مطلوبی از متاکائولن^۱ وجود دارد که می‌توان از آن‌ها به دلیل در دسترس بودن و قیمت مناسب استفاده کرد. همچنین بسیاری از تحقیقات و استفاده از موادی همچون متاکائولن در ایران و جهان، در بتن بوده است و در موارد تثبیت خاک مطالعات محدودتر بوده و عملی نوآورانه تلقی می‌شود.

جهت انجام فرآیند ژئوپلیمریزاسیون می‌بایست از محلول‌های فعال کننده قلیایی استفاده کرد. مواد آلومینوسیلیکاتی که با هیدروکسیدهای قلیایی متداول فعال می‌شوند دارای PH بالا هستند که به عنوان فعال کننده قلیایی در مواد ژئوپلیمری عمل می‌کنند [۲۱]. از رایج‌ترین فعال کننده‌های قلیایی می‌توان به سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید^۲ اشاره کرد که سدیم هیدروکسید نسبتاً رایج‌تر، با قیمت مناسب‌تر و با دسترسی بالاتر است. در زمان آماده‌سازی این فعال کننده‌های قلیایی می‌بایست به غلظت و خاصیت گرمایی آن‌ها توجه شود [۲۲]. در حالت کلی جهت فعال شدن پوزولان‌ها می‌بایست شرایط محیطی قلیایی را فراهم کرد که طبق مطالعه سارگنت و همکاران در مورد PH، به این نتیجه رسیدند که جهت انجام واکنش پوزولانی و فعال شدن این مواد، می‌بایست حداقل $PH=10$ را فراهم نمود تا انتظار فعال‌سازی مناسب را داشته باشیم [۲۳].

با توجه به این که روش تثبیت با استفاده از ژئوپلیمرها تاکنون بسیار کم انجام شده است لذا در این تحقیق خاک ماسه اهواز تهیه شده تا با عمل‌آوری در حضور افزودنی متاکائولن تغییرات مقاومت مکانیکی و رفتار ژئوتکنیکی آن مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق تلاش می‌شود تا با یافتن روشی جدید جهت تقویت ظرفیت باربری و افزایش مقاومتی خاک ماسه اهواز، خاک بهبود یابد و تغییرات ایجاد شده در خاک مورد نظر در مدت زمان طولانی‌تر نیز بررسی شود.

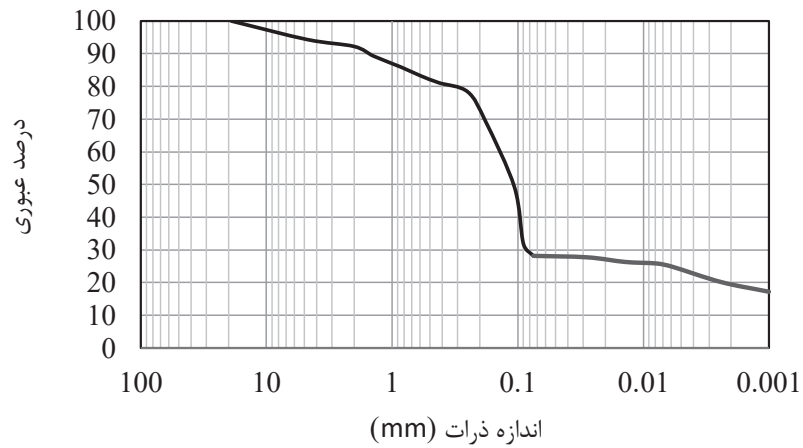
۲- مواد و مصالح مورد استفاده در پژوهش

خاک مورد مطالعه متعلق به شهر اهواز بوده و مختصات محل پروژه $N=31,37224785$ ، $E=48,72416251$ می‌باشد. آزمایش دانه‌بندی بر اساس استاندارد ASTM D۴۲۲-۲۳ و همچنین برای دانه‌بندی ذرات رد شده از الک ۲۰۰، آزمایش هیدرومتری بر اساس استاندارد

1 - Metakaolin

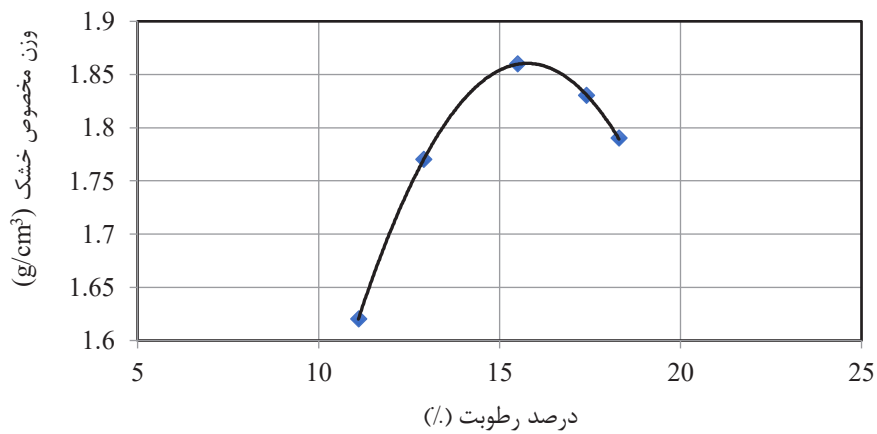
2 - Potassium hydroxide

3 - Amorphous



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک

Fig. 1. Grading curve of Ahvaz sandy soil



شکل ۲. منحنی تراکم خاک

Fig. 2. Soil compaction curve

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی متاکائولین

Table 1. Chemical composition of Metakaolin

TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	عناصر
0.69	0.08	0.14	0.07	0.13	0.89	45	53	متاکائولین (%)

جدول ۲. متغیرهای ورودی مستقل در طراحی آزمایش‌ها

Table 2. Independent input variables for design of experiments

درصد وزنی افزودنی	نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید	غلظت سدیم هیدروکسید (مولار)	نسبت فعال کننده به ماده افزودنی
5	1	6	0.2
10	1.5	8	0.3
15	2	10	0.4
20	2.5	12	0.5
25	3	14	0.6

است. همچنین تاثیر متقابل بین متغیرها نادیده گرفته شده که این امر موجب بروز خطا در نتیجه‌گیری و تفسیر خواهد شد. لذا در این تحقیق از روش سطح پاسخ^۱ (RSM) به عنوان یک روش آماری بر مبنای طراحی آزمایشات با کمترین تعداد ممکن با بهره‌گیری از نرم‌افزار Design Expert ۱۲ استفاده شده است. روش سطح پاسخ بر پایه یک مدل چند متغیر غیرخطی است که دربرگیرنده طراحی آزمایش جهت فراهم‌سازی مقادیر پاسخ کافی و مطمئن و ارائه یک مدل ریاضی با بهترین برازش از اطلاعات طراحی تجربی بوده و مقدار بهینه‌ی متغیرهای مستقل را تعیین می‌کند [۲۷].

مواد و مصالح استفاده شده در این تحقیق شامل خاک، متاکائولین، سیمان پرتلند و محلول‌های فعال کننده قلیایی می‌باشند. متغیرهای مورد بررسی در این پژوهش شامل ۴ بخش یعنی مقدار وزنی ماده افزودنی، نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید (SS/SH)، غلظت سدیم هیدروکسید (مولار) و همچنین نسبت محلول فعال کننده به ماده افزودنی (L/S) می‌باشند که جزئیات مقادیر هر متغیر در جدول ۲ ارائه شده است. طراحی مرکب مرکزی^۲ (CCD) دارای ۳۰ ترکیب از متغیرها که شامل ۲۴ آزمایش طرح اختلاط متفاوت و ۶ تکرار در نقطه مرکزی به جهت فراهم‌سازی دقت بالا در تخمین خطای آزمایش می‌باشند که جزئیات آن در جدول ۳ ارائه شده است.

است. معمولا کاربرد سدیم هیدروکسید به شکل محلول می‌باشد. سدیم هیدروکسید لازم برای آماده کردن محلول با غلظت مورد نظر توزین و آب در چند مرحله به آن اضافه و همزده می‌شود. محلول سدیم هیدروکسید حین انحلال، واکنشی به شدت گرمازا انجام داده بنابراین می‌بایست موارد ایمنی را حین تهیه آن رعایت کرد. همچنین در این راستا تا رسیدن به دمای محیط از آن استفاده نمی‌شود. سدیم هیدروکسید تهیه شده در این تحقیق از نوع داخلی (تولید شرکت مجللی) بوده که دارای چگالی 1.3 gr/cm^3 و درجه خلوص آن بیش از ۹۵٪ گزارش شده است.

سدیم سیلیکات با فرمول شیمیایی Na_4SiO_4 به شکل جامد و مایع در دسترس است که در پژوهش‌های تثبیت ژئوپلیمری استفاده از حالت مایع آن رایج است. شکل ظاهری سدیم سیلیکات دارای رنگ زرد با ویسکوزیته بالا است. محلول سدیم سیلیکات استفاده شده در این پژوهش دارای چگالی 1.56 gr/cm^3 و نسبت سیلیکا به سدیم اکسید آن ۲/۴ می‌باشد. همچنین درجه خلوص آن ۴۸٪ بوده که درصد وزنی SiO_2 ، Na_2O و آب در محلول به ترتیب ۳۳/۹، ۱۴/۱ و ۵۲ درصد گزارش شده است.

۳- بهینه‌سازی و طراحی آزمایشات با روش سطح پاسخ

روش رایج بررسی متغیرهای مختلف با نمونه‌سازی و انجام آزمایش به دلیل تکثر متغیرها و تعداد حالت‌ها بسیار زیاد، پرهزینه و طولانی

1 1-Response Surface Methodology

2 -Central Composite Design

جدول ۳. طرح اختلاط پیشنهادی نرم افزار Design Expert

Table 3. Suggested mixing plan of Design Expert software

Run	درصد وزنی	نسبت سدیم سیلیکات به سدیم	غلظت سدیم هیدروکسید	نسبت فعال کننده به
	افزودنی	هیدروکسید	(مولار)	افزودنی
	(A)	(B)	(C)	(D)
1	10	2.5	12	0.3
2	10	1.5	12	0.5
3	15	2	14	0.4
4	20	1.5	8	0.3
5	15	1	10	0.4
6	20	2.5	12	0.5
7	15	2	10	0.4
8	10	2.5	12	0.5
9	15	3	10	0.4
10	15	2	10	0.4
11	10	2.5	8	0.3
12	20	2.5	8	0.5
13	25	2	10	0.4
14	20	1.5	8	0.5
15	15	2	10	0.4
16	20	1.5	12	0.3
17	15	2	10	0.4
18	10	1.5	8	0.3
19	10	2.5	8	0.5
20	5	2	10	0.4
21	15	2	10	0.6
22	20	2.5	8	0.3
23	20	2.5	12	0.3
24	15	2	6	0.4
25	15	2	10	0.4
26	10	1.5	8	0.5
27	20	1.5	12	0.5
28	15	2	10	0.4
29	15	2	10	0.2
30	10	1.5	12	0.3

۴- روش ساخت نمونه‌ها و عمل‌آوری

ابتدا خاک مورد مطالعه در گرم‌خانه تا دمای حدود 105 ± 5 درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار می‌دهیم تا کاملاً خشک شود. سپس بر اساس طرح اختلاط مقداری از ماده متاکائولن به صورت کاملاً یکنواخت با خاک خشک مخلوط می‌شود. در مرحله بعد محلول فعال کننده قلیایی آماده می‌شود. به این منظور ابتدا محلول سدیم هیدروکسید تهیه می‌شود که به دلیل ایجاد محیط قلیایی و واکنش گرمازا رعایت نکات ایمنی شامل اجتناب از تماس محلول با پوست، چشم و استنشاق بخار حاصل از فرآیند آماده‌سازی الزامی است. سدیم هیدروکسید جامد مطابق با غلظت مولار محلول مدنظر و بر اساس جرم مولی سدیم هیدروکسید (40 gr/mol) در آب مقطر به میزان لازم حل می‌شود. این واکنش همان‌گونه که گفته شد حرارت‌زا است لذا محلول به مدت زمان ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه رها شده تا به دمای محیط برسد. پس از آن محلول سدیم سیلیکات و محلول سدیم هیدروکسید به نسبت مشخص شده در هر طرح اختلاط به همراه آب جهت رسیدن به درصد رطوبت بهینه با یکدیگر ترکیب شده و به مدت حداقل ۵ دقیقه توسط همزن مغناطیسی به محلول همگن تبدیل می‌شود.

در نهایت این محلول همگن به مخلوط خاک و متاکائولن در چند مرحله اضافه شده تا مخلوط همگن با رطوبت یکنواخت تشکیل شود. قالب ساخت نمونه‌ها یک استوانه با قطر ۳۸ و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر است. وزن مخلوط لازم هر نمونه را با توجه به وزن مخصوص خشک حداکثر حاصل از آزمایش تراکم و حجم قالب تعیین می‌شود که در ۳ لایه متراکم می‌شود. انرژی لازم برای تراکم هر لایه با توجه به حجم ظرف، تعداد لایه، وزن چکش، مقدار خاک و ارتفاع سقوط چکش تعیین می‌شود. پس از تراکم هر لایه روی سطح آن لایه خراش داده می‌شود تا تماس مناسب بین لایه‌ها ایجاد شود. از هر طرح اختلاط جهت کاهش خطاهای احتمالی، ۳ نمونه ساخته و تمامی نمونه‌ها در داخل طلق با ۲ لایه پوشش پلاستیکی ضخیم به منظور حفظ رطوبت موجود در دمای محیط آزمایشگاه قرار داده می‌شود تا فرآیند عمل‌آوری انجام پذیرد.

۵- بررسی‌های آزمایشگاهی تحقیق

جهت بررسی عملکرد تثبیت کننده‌ها یکی از آزمایش‌های مرسوم

در مهندسی ژئوتکنیک، اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوری محصور نشده (UCS) است. این آزمایش به دلیل هزینه کم، عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و سادگی فرآیند انجام مورد توجه است. آزمایش به وسیله دستگاه تولید کشور (شرکت آزمون کارا صنعت) و بر اساس استاندارد ASTM D1633-84 با نرخ کرنش ثابت یک میلی‌متر بر دقیقه بارگذاری بر روی نمونه انجام شده است.

در این تحقیق آنالیز ذرات و نمونه‌ها در مقیاس بسیار کوچک با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) انجام شده است. این دستگاه قادر است مواد را از نظر شیمیایی، سطوح، ریزساختاری و ترکیبات در اندازه میکرون و نانومتر بررسی کند و برای شناسایی شکل ذرات مواد تشکیل دهنده و سطح مورفولوژی استفاده می‌گردد. این دستگاه معمولاً در محیط خلاء کار می‌کند و نمونه‌های مورد بررسی باید کاملاً خشک و عاری از خواص مغناطیسی باشند تا رسانایی بالا داشته باشد. عملکرد این میکروسکوپ‌ها به دو گروه تقسیم می‌شود که گروه اول میکروسکوپی و برای بررسی مورفولوژی، فازها، شکل ذرات و غیره است و گروه دوم اسپکتروسکوپی است که جهت بررسی شیمیایی سطح بیرونی به کار برده می‌شود [۲۹ و ۲۸]. در این تحقیق از نوع اول استفاده شده است.

همچنین در این تحقیق از نتایج پراش اشعه ایکس (XRD) به عنوان نوعی روش غیرمخرب برای دریافت اطلاعات ساختار فاز بلوری مواد استفاده شده است. هر ساختار بلوری به صورت منحصر به فردی الگوی پرتو اشعه ایکس خود را دارد. این دستگاه بر اساس تابش پرتو اشعه ایکس با زوایای مختلف به نمونه‌ها و بازتابش این اشعه از اتم‌ها (اصطلاحاً پراش) می‌تواند اندازه و شکل دانه کریستال، تشخیص فاز کریستالی، فواصل بین لایه‌های کریستال، درصد کریستالیت شدن نمونه‌ها، موقعیت و جهت‌گیری بلورها و ترکیب اتم‌های کریستال و ساختار آن‌ها را نشان دهد.

۶-۶- ارزیابی برنامه آزمایشات و تناسب مدل توسط نرم‌افزار

Design Expert

در جدول ۴ نتایج جدول ANOVA خروجی نرم‌افزار حاصل از تحلیل داده‌ها برای نتایج دوره عمل‌آوری ۷ روزه و جدول ۵ برای دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه ارائه شده است. پارامترهای مربوط به هر متغیر A, B, C, D و برهم‌کنش آن‌ها (AB, AC, AD, BC, BD) در

جدول ۴. نتایج جدول ANOVA در دوره عمل‌آوری ۷ روز

Table 4. The results of the ANOVA for 7-days curing

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	0.3393	14	0.0242	25.7	<0.0001
A-Metakaolin	0.0864	1	0.0864	91.59	<0.0001
B-SS/SH	0.0088	1	0.0088	9.35	0.008
C-Concentration of SH	0.0308	1	0.0308	32.67	<0.0001
D-L/S	0.0216	1	0.0216	22.9	0.0002
AB	0.0009	1	0.0009	0.9541	0.3442
AC	0.0056	1	0.0056	5.96	0.0275
AD	0.0001	1	0.0001	0.106	0.7492
BC	0.0196	1	0.0196	20.78	0.0004
BD	0.002	1	0.002	2.15	0.1635
CD	0.0484	1	0.0484	51.31	<0.0001
A ²	0.0157	1	0.0157	16.69	0.001
B ²	0.0592	1	0.0592	62.76	<0.0001
C ²	0.034	1	0.034	36.04	<0.0001
D ²	0.05	1	0.05	53.04	<0.0001
Lack of Fit	0.0128	10	0.0013	4.74	0.0499
Pure Error	0.0014	5	0.0003		

جدول ۵. نتایج جدول ANOVA در دوره عمل‌آوری ۲۸ روز

Table 5. The results of the ANOVA for 28-days curing

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	46.62	14	3.33	115.01	<0.0001
A-Metakaolin	12.77	1	12.77	440.87	<0.0001
B-SS/SH	2.42	1	2.42	83.68	<0.0001
C-Concentration of SH	5.7	1	5.7	196.69	<0.0001
D-L/S	1.64	1	1.64	56.6	<0.0001
AB	0.0632	1	0.0632	2.18	0.1618
AC	1.22	1	1.22	42.13	<0.0001
AD	0.0382	1	0.0382	1.32	0.2702
BC	3.89	1	3.89	134.27	<0.0001
BD	0.0055	1	0.0055	0.1898	0.6697
CD	7.9	1	7.9	272.9	<0.0001
A ²	1.86	1	1.86	64.08	<0.0001
B ²	6.84	1	6.84	236.1	<0.0001
C ²	4.11	1	4.11	141.97	<0.0001
D ²	8.38	1	8.38	289.47	<0.0001
Lack of Fit	0.3542	9	0.0394	3.85	0.0759
Pure Error	0.0511	5	0.0102		

جدول ۷. روابط به دست آمده برای محاسبه مقاومت فشاری دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه

Table 7. The results of design of experiments for the compressive strength, 28 days curing

UCS	=
-3.25776	
0.179713	Metakaolin
3.48325	SS/SH
-0.738405	Concentration of SH
9.87457	L/B
0.028168	Metakaolin * Concentration of SH
0.514181	SS/SH * Concentration of SH
3.69591	Concentration of SH * L/B
-0.010345	Metakaolin ²
-1.99445	SS/SH ²
-0.096528	Concentration of SH ²
-55.23635	L/B ²

جدول ۶. نتایج طراحی آزمایش جهت مقاومت فشاری نمونه برای عمل‌آوری ۷ روزه

Table 6. The results of design of experiments for the compressive strength, 7 days curing

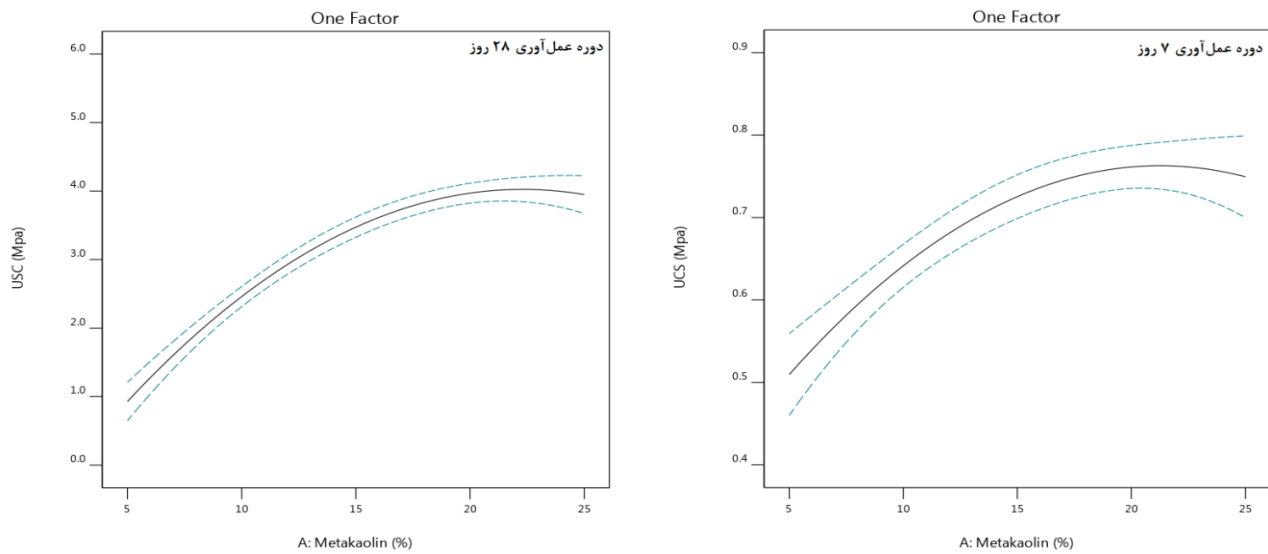
UCS	=
-0.272083	
0.022	Metakaolin
0.431667	SS/SH
-0.014167	Concentration of SH
0.966667	L/B
0.001875	Metakaolin * Concentration of SH
0.035	SS/SH * Concentration of SH
0.275	Concentration of SH * L/B
-0.000958	Metakaolin ²
-0.185833	SS/SH ²
-0.008802	Concentration of SH ²
-4.27083	L/B ²

۷- تحلیل و تفسیر نتایج حاصل از یک عامل بر مقاومت فشاری تک محوری

۷-۱- تاثیر درصد وزنی متاکائولن

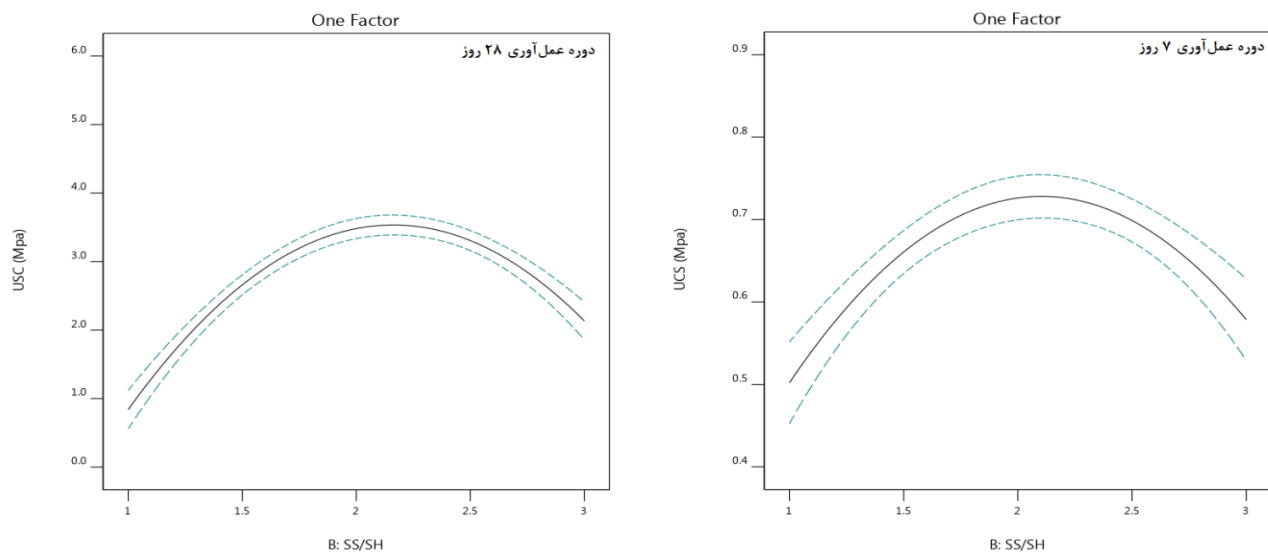
شکل ۳ نمودار تاثیر مقادیر مختلف افزودنی تثبیت کننده متاکائولن بر مقاومت فشاری تک محوری را در دوره عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه نمایش می‌دهد. با توجه به شکل‌ها، با افزایش درصد متاکائولن مقاومت نمونه‌ها افزایش یافته که نشان می‌دهد در تمامی مقادیر افزودنی، مقاومت نمونه‌ها نسبت به خاک اولیه بهبود یافته و این افزایش تا مقدار افزودنی ۲۰ درصد ادامه می‌یابد اما بعد از آن در دوره عمل‌آوری ۷ روزه مقاومت نمونه‌ها شروع به کاهش و در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد. علت این افزایش مقاومت می‌تواند به دلیل انحلال سیلیس و آلومینیوم، واکنش بیشتر مواد افزودنی و تشکیل ژل آلومیناسیلیکات باشد و مهم‌ترین دلیل مقاومت حاصل از ترکیب متاکائولن و محلول فعال کننده قلیایی وجود فاز ژل آمورف است [۳۳-۳۱].

(CD) نیز گزارش شده است. قسمت Lack of fit جهت بررسی عدم تناسب مدل است که از تکرار نقطه مرکزی آزمایش به دست می‌آید که از نتایج ۶ مرتبه تکرار نقطه مرکزی آزمایش حاصل شده است. نکته مهم بخش اصلاحاتی است که انجام می‌شود، یعنی بر اساس مقادیر مولفه p-value (میزان تاثیرگذاری پارامترها) مولفه‌هایی که تاثیرگذار نیستند حذف می‌شوند. با بررسی مطالعات قبلی، تحلیل آماری، پیشنهاد نرم‌افزار و روش سطح پاسخ، مقدار ۰/۱ به عنوان مرز اثرگذاری پارامترها انتخاب می‌شود [۳۰]. متغیرهایی که p-value آنها بیشتر از ۰/۱ هستند به منظور بهینه‌سازی مدل ناشی از تاثیر اندک متغیرها حذف می‌شوند. با توجه به جدول ۴ پارامترهای AB, AD, BD در دوره عمل‌آوری ۷ روزه و بر اساس جدول ۵ پارامترهای AB, AD, BD در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه حذف شده‌اند. پس از بررسی و ارزیابی تناسب داده‌ها با استفاده از معیارهای آماری، طراحی آزمایشات توسط نرم‌افزار برای ارتباط اثرگذار مولفه‌های مختلف بر مقاومت فشاری دوره عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب در جدول ۶ و ۷ اعلام می‌شود.



شکل ۳. تاثیر درصد افزودنی متاکائولن بر مقاومت فشاری تک محوری

Fig. 3. The effect of Metakaolin additive percentage on uniaxial compressive strength

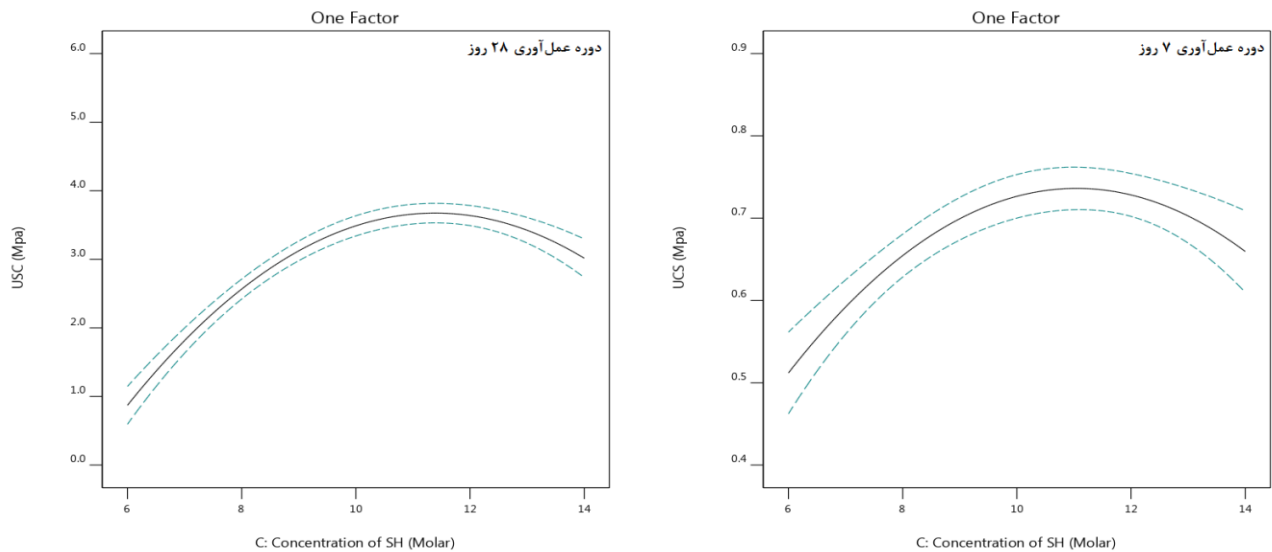


شکل ۴. بررسی اثر نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید بر مقاومت فشاری

Fig. 4. Effect of the ratio of sodium silicate to sodium hydroxide on compressive strength

اتفاق می‌افتد. این نسبت در شکل ۴ برای نمونه‌هایی که ۷ روز عمل‌آوری شده‌اند حدود ۲ و برای نمونه‌هایی که ۲۸ روز عمل‌آوری شده‌اند حدود ۲/۳۵ می‌باشد. دلیل افزایش مقاومت تا نسبت‌های ۲ الی ۲/۵ در دوره‌های مختلف را می‌توان ناشی از افزایش مقدار سیلیس دانست که می‌تواند باعث افزایش واکنش ژئوپلیمریزاسیون

۷-۲- بررسی اثر نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید
شکل ۴ نتایج تاثیر نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید بر مقاومت فشاری تک محوری در دوره عمل‌آوری ۷ روزه و ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. با افزایش این نسبت (SS/SH) تا مقدار مشخصی اثر افزایشی در مقاومت نمونه‌ها مشاهده می‌شود و پس از آن اثر کاهشی



شکل ۵. تاثیر غلظت سدیم هیدروکسید بر مقاومت فشاری

Fig.5. Effect of sodium hydroxide concentration on compressive strength

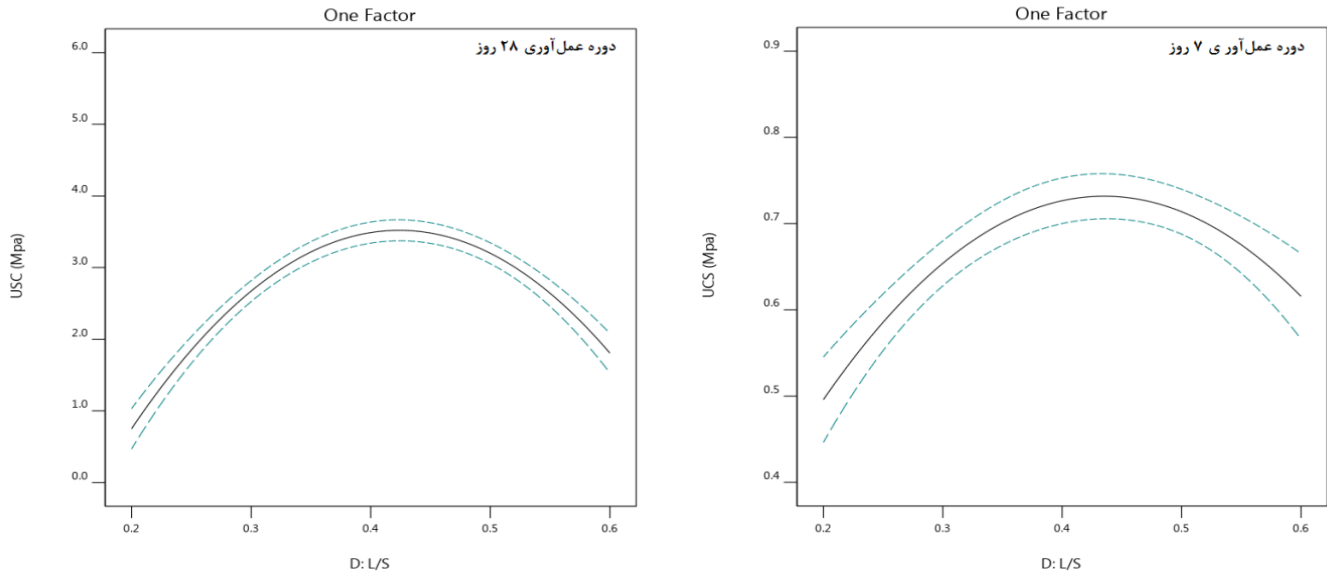
افزایشی بوده و حداکثر مقاومت فشاری خواهیم داشت و بعد از آن با شیب ملایمی کاهش می‌یابد. در نمونه‌های عمل‌آوری شده تا ۲۸ روز، نمونه‌ها با افزایش غلظت محلول در بازه ۱۰/۵ الی ۱۲ مولار افزایش مقاومت دارند و با غلظت بیشتر از ۱۲ مولار روند کاهشی مشاهده می‌شود.

حلالیت آلومینوسیلیکات‌ها در محلول‌های قلیایی به بارهای آلومینیوم و سیلیکون و غلظت هیدروکسید بستگی دارد [۳۸]. افزایش مقاومت زمانی که غلظت محلول افزایش می‌یابد، می‌تواند ناشی از فعال شدن واکنش شیمیایی اجزای داخلی Si و Al حاصل از افزایش شکستن زنجیره شیشه‌ای و تحت تاثیر درجه قلیایی بالا ناشی از افزایش مولاریته NaOH باشد [۳۹]. به عبارتی افزایش مقاومت را می‌توان به افزایش یون‌های سدیم نسبت داد زیرا این یون‌ها برای یکسان کردن بارها استفاده شده و شبکه‌های آلومینوسیلیکات را به عنوان عامل اتصال در ترکیب ایجاد می‌کنند [۴۰]. در غلظت‌های مولاریته کمتر، ژئوپلیمریزاسیون به دلیل غلظت پایین، آلومینا و سیلیکا کمتری از ماده منبع (افزودنی) لیچینگ می‌شود [۴۱]. توجه شود که ویسکوزیته بالا یا همان غلظت‌های بالای محلول سدیم هیدروکسید مانع از فرآیند لیچینگ شده و این مسأله موجب کاهش مقاومت در نمونه‌های با مولاریته بالا می‌شود [۴۲ و ۴۳].

و تشکیل ژل N-A-S-H شود که در نهایت مقاومت نمونه افزایش می‌یابد [۳۴]. در حالت کلی استفاده از سیلیس می‌تواند فرآیند ژئوپلیمریزاسیون را افزایش دهد. با تسریع انحلال سیلیس و آلومینا موجود در متاکائولن و افزایش نرخ سدیم که به عنوان یون‌های یکسان کننده بار عمل می‌کنند، نقش مهمی در تشکیل ژئوپلیمرها دارند [۳۵ و ۳۶]. دلیل کاهش مقاومت فشاری تک محوری پس از نسبت مشخص در هر دو دوره عمل‌آوری را می‌توان به افزایش بیش از حد سدیم سیلیکات و در نتیجه درجه قلیایی بیش از اندازه محلول فعال کننده ارتباط داد زیرا این اتفاق باعث رسوب فاز Al-Si شده و این امر مانع از واکنش بین ماده افزودنی و محلول فعال کننده قلیایی می‌شود که در نهایت غلظت فعال کننده موثر را کاهش می‌دهد [۳۷ و ۳۸].

۷-۳- تاثیر غلظت سدیم هیدروکسید

تاثیر غلظت سدیم هیدروکسید بر مقاومت فشاری تک محوری در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج این شکل قابل مشاهده است که افزایش غلظت سدیم هیدروکسید تا مقدار مشخصی اثر افزایشی بر مقاومت نمونه‌ها دارد ولی پس از آن اثر کاهشی مشاهده می‌شود. در نمونه‌هایی که دوره عمل‌آوری آن‌ها ۷ روزه است، مقاومت نمونه‌ها با افزایش غلظت تا ۱۱ مولار سدیم هیدروکسید به صورت



شکل ۶. تاثیر نسبت محلول فعال کننده قلیایی به افزودنی تثبیت کننده بر مقاومت فشاری

Fig. 6. Effects of alkaline activator solution ratio to stabilizer additive on compressive strength

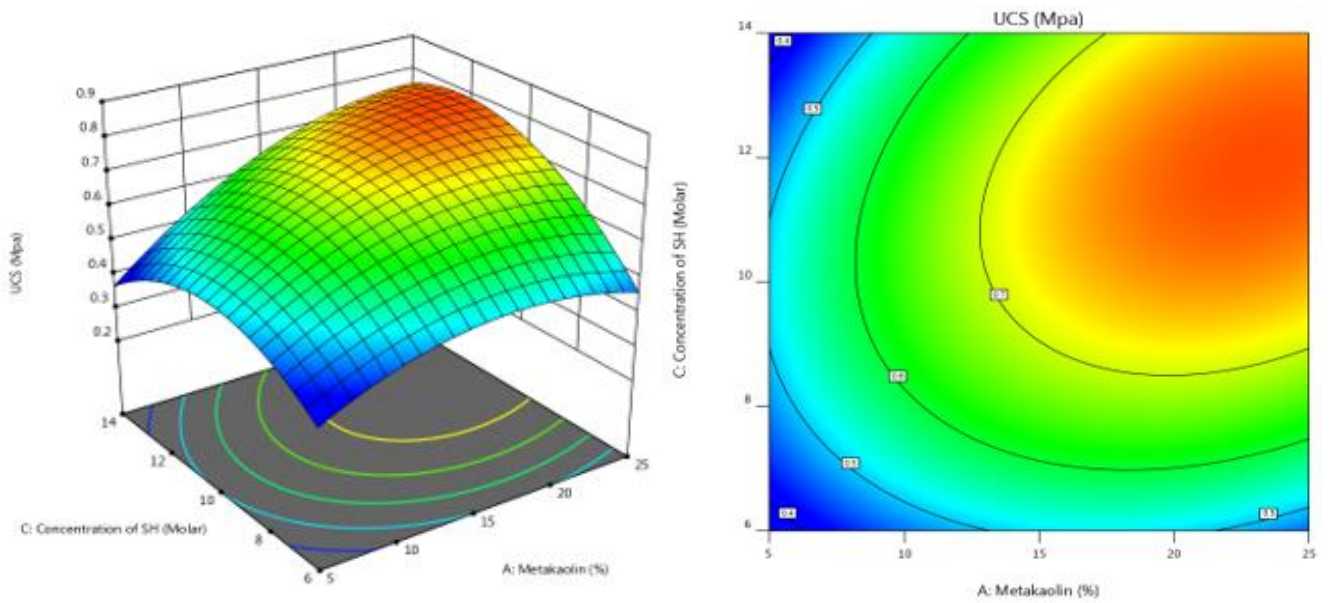
۸- تحلیل و تفسیر نتایج حاصل از دو عامل بر مقاومت فشاری تک محوری

۸-۱- بررسی برهم کنش مقدار افزودنی تثبیت کننده و غلظت محلول سدیم هیدروکسید

نتایج برهم کنش مقدار افزودنی تثبیت کننده و غلظت محلول سدیم هیدروکسید بر مقاومت فشاری تک محوری در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. این نتایج برای دوره عمل‌آوری ۷ روزه و ۲۸ روزه نشان می‌دهند با افزایش مقدار افزودنی و غلظت محلول سدیم هیدروکسید، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و به حداکثر مقدار می‌رسد. با مشاهده این نتایج می‌توان دریافت که اگر فقط یکی از عوامل افزایش داده شود، نمی‌توان به مقاومت‌های بالاتر دست یافت. لذا جهت دستیابی به مقاومت بالاتر باید هر دو عامل متناسب با یکدیگر افزایش داده شود که این موضوع از بخش‌های قبلی تحقیق (بررسی نتایج تک عاملی این دو مولفه) نیز قابل پیش‌بینی بود. در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه شیب تغییرات بیشتری مشاهده می‌شود و نحوه تغییرات شکل به خوبی تاثیر و اهمیت این دو مولفه و همبستگی آن‌ها را نشان می‌دهند.

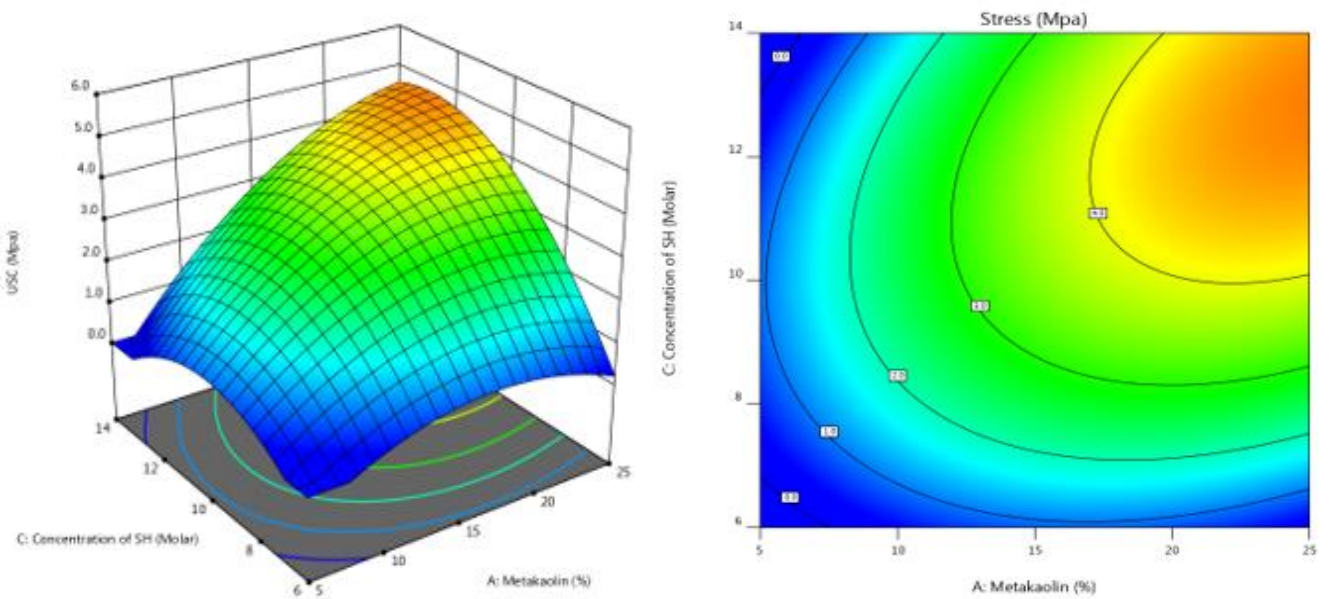
۷-۴- تاثیر نسبت محلول فعال کننده قلیایی به افزودنی تثبیت کننده (نسبت بخش مایع به جامد)

تاثیر نسبت محلول فعال کننده قلیایی به افزودنی تثبیت کننده بر مقاومت فشاری تک محوری در شکل ۶ آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهند با افزایش نسبت محلول (L/S) در هر دو دوره عمل‌آوری مقاومت نمونه‌ها ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در عمل‌آوری ۷ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌ها در نسبت تقریبی ۰/۴ به حداکثر رسیده و سپس کاهش می‌یابد. در عمل‌آوری ۲۸ روزه نیز رفتاری مشابه قابل مشاهده است. دلیل کاهشی شدن مقاومت پس از نسبت ۰/۴ را می‌توان ناشی از تغییر در محتوای فعال کننده قلیایی دانست زیرا بر مقادیر سیلیس موجود (Si) و یون‌های (Na^+) اثرگذار است [۴۴]. افزایش بیش از حد نسبت محلول فعال کننده به ماده افزودنی موجب نامتعادل شدن ماده افزودنی و محلول قلیایی شده و منجر به کاهش سرعت انحلال مواد و در نتیجه تولید ترکیبات با تخلخل بیشتر و ساختار آلومینوسیلیکات با میزان همگنی کم می‌شود [۴۵]. به معنای دیگر در فرآیند فعال‌سازی قلیایی، عامل مهم در دسترس بودن Si جهت واکنش‌پذیری است در حالی که با افزایش محلول قلیایی یون‌های Si در سیستم کاهش یافته و منجر به کاهش مقاومت می‌شود [۴۶].



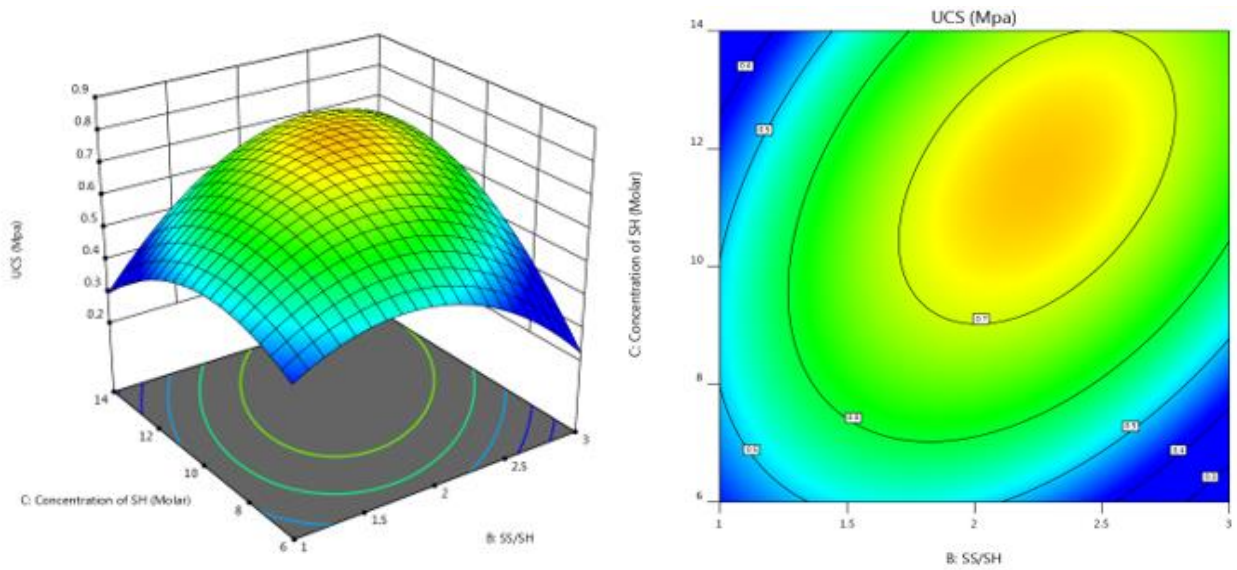
شکل ۷. تاثیر برهم کنش نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید و همچنین غلظت محلول سدیم هیدروکسید بر مقاومت فشاری با ۷ روز عمل‌آوری

Fig. 7. The interaction of sodium silicate ratio to sodium hydroxide and sodium hydroxide solution on compressive strength, 7 days curing



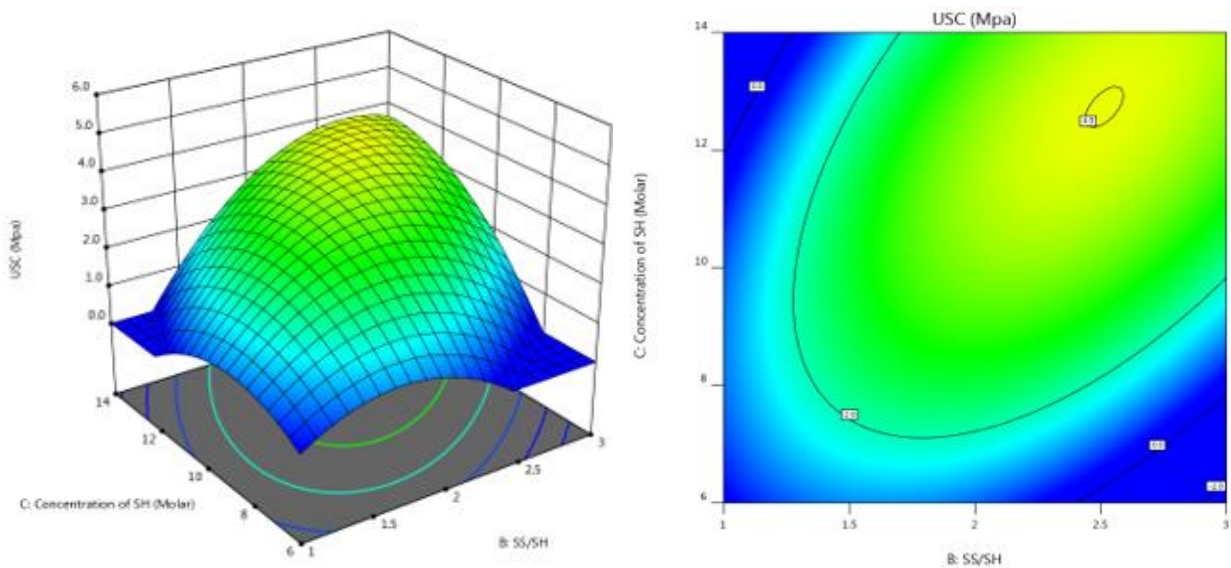
شکل ۸. تاثیر برهم کنش نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید و همچنین غلظت محلول سدیم هیدروکسید بر مقاومت فشاری با ۲۸ روز عمل‌آوری

Fig. 8. The interaction of sodium silicate ratio to sodium hydroxide and sodium hydroxide solution on compressive strength, 28 days curing



شکل ۹. تاثیر برهم کنش نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید و همچنین غلظت محلول سدیم هیدروکسید با ۷ روز عمل آوری

Fig. 9. The interaction effect of sodium silicate ratio to sodium hydroxide and concentration of sodium hydroxide solution, 7 days curing



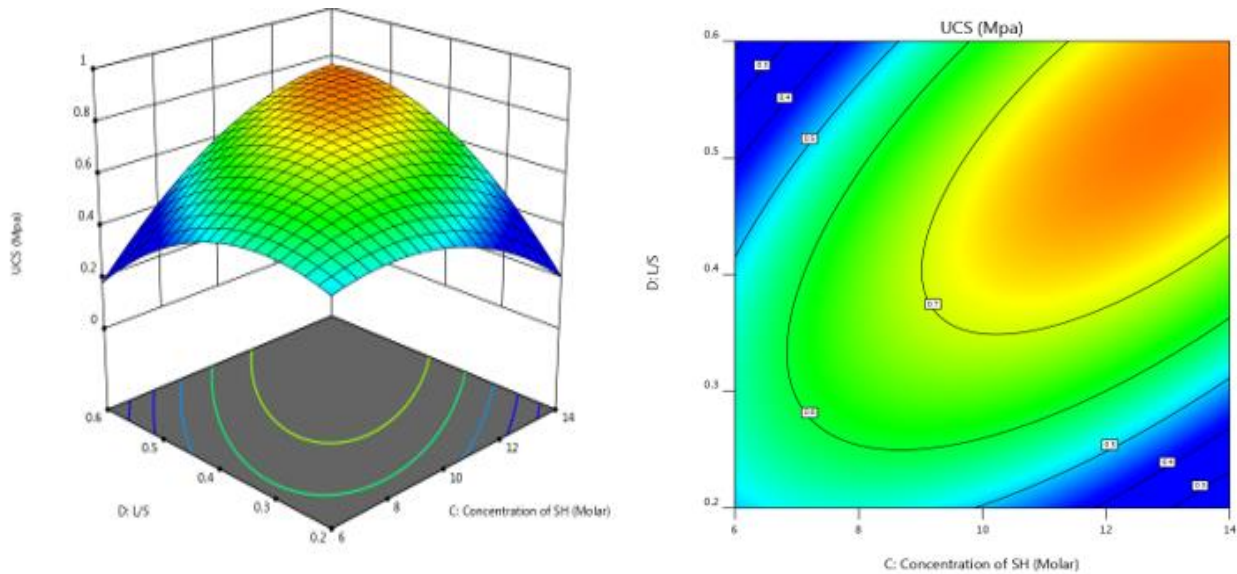
شکل ۱۰. تاثیر برهم کنش نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید و همچنین غلظت محلول سدیم هیدروکسید با ۲۸ روز عمل آوری

Fig. 10. The interaction effect of sodium silicate ratio to sodium hydroxide and concentration of sodium hydroxide solution, 28 days curing

۹ و ۱۰ برای دوره عمل آوری ۷ روزه و ۲۸ روزه نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهند افزایش این دو مولفه می‌تواند منجر به کاهش مقاومت شود لذا مقادیر این دو پارامتر باید در یک بازه میانی باشد یعنی اگر هر کدام از این مولفه‌ها به تنهایی افزایش یابد،

۸-۲ بررسی برهم کنش نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید و غلظت محلول سدیم هیدروکسید

تاثیر مقاومت فشاری از برهم کنش نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید و غلظت محلول سدیم هیدروکسید در شکل‌های



شکل ۱۱. تاثیر برهم کنش غلظت محلول سدیم هیدروکسید و همچنین نسبت محلول فعال کننده قلیایی به افزودنی با ۷ روز عمل آوری

Fig.11. The interaction of concentration of sodium hydroxide solution and alkaline activating solution ratio to additive, 7 days curing

دوره عمل آوری ۷ روزه، شیب تغییر مقاومت ملایم تر از دوره عمل آوری ۲۸ روزه بوده ولی نسبت اثرگذاری این دو مولفه در دوره عمل آوری ۲۸ روزه بیشتر است.

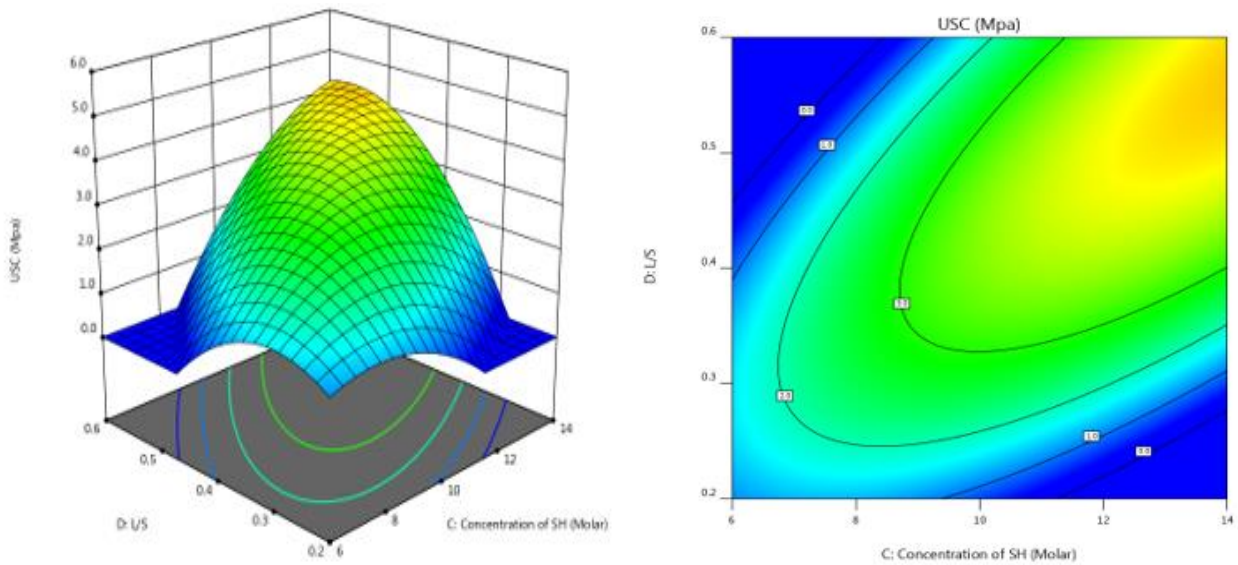
۹- پیشنهاد طرح اختلاط بهینه بر اساس تحلیل آماری

با بررسی نتایج و تحلیل آماری داده‌ها و بهره‌گیری از نرم‌افزار، طرح اختلاط بهینه با توجه به هدف طرح یعنی مقاومت فشاری قابل پیشنهاد است. شرایط بهینه هر یک از عامل‌ها جهت حصول حداکثر مقاومت فشاری تک محوری در جدول ۸ ارائه شده است. به منظور صحت‌سنجی طرح اختلاط پیشنهادی و بهینه، بررسی آزمایشگاهی با ساخت نمونه انجام و در دوره عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه مقاومت فشاری تک محوری مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه نتایج برای خاک تثبیت نشده، خاک تثبیت شده با ۳ و ۵ درصد سیمان و خاک تثبیت شده بر اساس طرح اختلاط بهینه پیشنهادی در شکل ۱۳ آمده است. مقایسه نتایج شکل ۱۳ نشان می‌دهند که مقاومت نمونه ساخته شده با طرح اختلاط بهینه با استفاده از متاکائولن در دوره عمل آوری ۷ روزه با مقاومت فشاری حدود ۰/۸ مگاپاسکال کمتر از نمونه‌های تثبیت شده با سیمان است اما در دوره عمل آوری ۲۸ روزه با کسب مقاومت ۵/۵

مقاومت فشاری کمتری خواهیم داشت. شکل ۹ نشان می‌دهد در دوره عمل آوری ۷ روزه بعد از افزایش همزمان هر دو مولفه مقاومت کاهش یافته ولی در شکل ۱۰ برای دوره عمل آوری ۲۸ روزه تقریباً یک روند ثابت با شیب کاهشی بسیار کم مشاهده می‌شود. با در نظر گرفتن نتایج تک عاملی و نتایج دو عاملی می‌توان مشاهده کرد که اثر منفی افزایش نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید بیشتر از غلظت محلول سدیم هیدروکسید می‌باشد.

۸-۳- بررسی برهم کنش غلظت محلول سدیم هیدروکسید و نسبت محلول فعال کننده قلیایی به افزودنی تثبیت کننده

تاثیر برهم کنش غلظت محلول سدیم هیدروکسید و نسبت محلول فعال کننده قلیایی به افزودنی تثبیت کننده بر مقاومت فشاری تک محوری برای دوره عمل آوری ۷ روزه در شکل ۱۱ و برای دوره عمل آوری ۲۸ روزه در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهند که افزایش غلظت محلول و افزایش نسبت محلول تاثیر مثبتی بر مقاومت نمونه‌ها خواهد داشت. در حالی که اگر فقط یکی از این دو عامل افزایش یابد موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه می‌شود لذا دست یافتن به مقاومت بیشتر مستلزم افزایش همزمان این دو مولفه است. مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد در



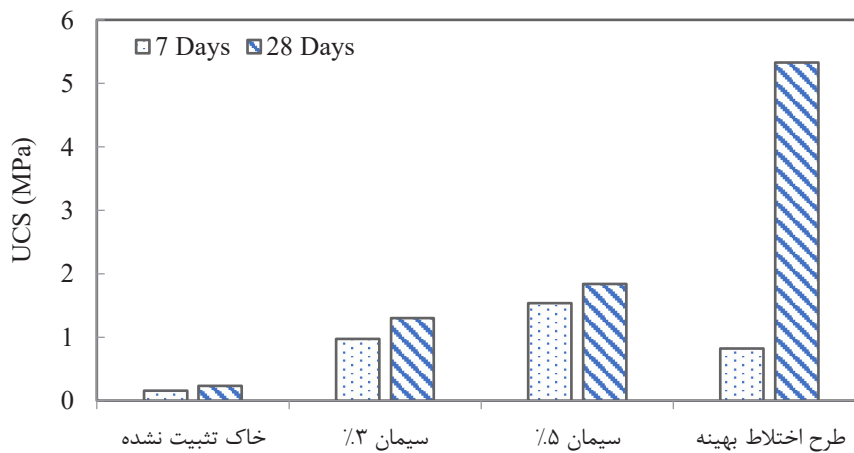
شکل ۱۲. تاثیر برهم کنش غلظت محلول سدیم هیدروکسید و همچنین نسبت محلول فعال کننده قلیایی به افزودنی با ۲۸ روز عمل‌آوری

Fig. 12. The interaction of concentration of sodium hydroxide solution and alkaline activating solution ratio to additive, 28 days curing

جدول ۸. طرح اختلاط پیشنهادی بهینه حاصل از تحلیل آماری

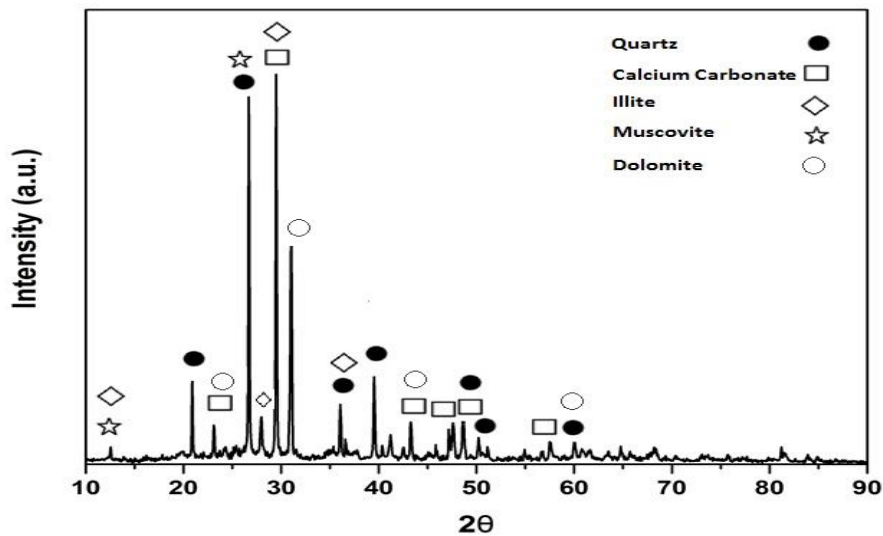
Table 8. Optimal proposed mixing plan resulting from statistical analysis

نسبت محلول فعال کننده به ماده افزودنی	غلظت سدیم هیدروکسید (مولار)	نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید	در صد وزنی متاکائولن
۰/۵	۱۲	۲/۵	۲۰



شکل ۱۳. مقایسه مقاومت فشاری تک محوری طرح اختلاط مختلف

Fig. 13. Comparison uniaxial compressive strength of different mixing designs



شکل ۱۴. الگوی پراش XRD نمونه مورد نظر و بهینه از نظر مقاومت تک محوری

Fig. 14. XRD diffraction pattern of optimal sample for uniaxial strength

نقش دارند [۴۸ و ۴۷]. عدم مشاهده الگو کائولینیت نشان دهنده کلسینه شدن کامل کائولن است. پس از فرآیند ژئوپلیمرزاسیون ساختارهای آمورف شبیه به متاکائولن در پیک محدوده بین ۲۰ الی ۴۰ درجه قابل مشاهده است. این پراکندگی به ژل آلومینوسیلیکات آمورف یعنی فاز اصلی اتصال در تثبیت کننده‌های ژئوپلیمری نسبت داده می‌شود [۵۰، ۴۹ و ۳۱]. در نمونه‌های تثبیت شده با متاکائولن، فازهای ژل ژئوپلیمری و آلومینوسیلیکات آمورف به عنوان عامل اصلی اتصال حضور دارند که در نهایت تشکیل N-A-S-H (ژل هیدرات آلومینوسیلیکات سدیم) اتفاق افتاده است [۵۲ و ۵۱].

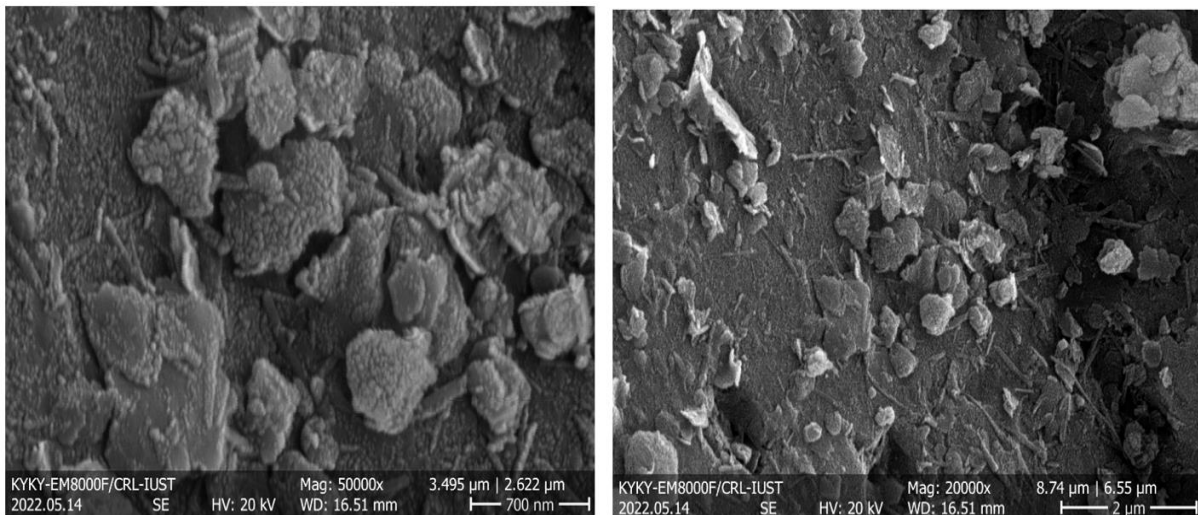
۱۱- تفسیر نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

جهت ارزیابی ریزساختار نمونه‌ها از تفسیر عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در این تحقیق استفاده شده است. در شکل ۱۵ میکروگراف SEM یک نمونه تثبیت شده با متاکائولن (بهینه از نظر مقاومت فشاری تک محوری) ارائه شده است. در این تصاویر وجود ژل نیمه کریستالی N-A-S-H که مهم‌ترین علت افزایش مقاومت نمونه و همچنین تیغه‌های الیافی شکل چسبنده به سطح قابل مشاهده است. با توجه به بزرگ‌نمایی تصاویر محصول ژل N-A-

مگاپاسکال توانست اختلاف زیادی با نمونه‌های تثبیت شده با سیمان داشته باشد. همچنین نمونه‌های ساخته شده با متاکائولن در دوره عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۵ برابر و ۲۳/۵ برابر بیش از خاک تثبیت نشده باشد.

۰۱- تفسیر نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)

از نتایج این بررسی جهت شناسایی ترکیبات شیمیایی و تغییرات در نمونه‌ها از مقایسه طیف‌های حاصل با مجموعه وسیعی از طیف‌های شناخته شده استفاده می‌شود. الگوی طیف حاصل از پراش XRD روی نمونه تثبیت شده با متاکائولن در شکل ۱۴ ارائه شده است. فازهای شناسایی شده در این نمونه از نظر بهینه مقاومت فشاری تک محوری شامل کوارتز (Q)، کلسیم کربنات ($CaCO_3$)، ایلیت (I)، موسکوویت (M) و دولومیت (D) هستند. طبق انتظار کلسیت به عنوان اساسی‌ترین ترکیب کریستالی ($CaCO_3$) در زاویه 2θ ۲۹/۴۸ درجه در 2θ قابل مشاهده است. همچنین وجود پیک‌های کوارتز و الیت نشان می‌دهند که فازهای کریستالی در محلول فعال کننده قلیایی حل نمی‌شوند و در واکنش ژئوپلیمرزاسیون دخیل نیستند بلکه در ماده افزودنی وجود دارند. این نکته تایید می‌کند که تنها فازهای آمورف در مواد خام واکنش‌پذیر هستند و در واکنش‌های ژئوپلیمرزاسیون



شکل ۱۵. میکروگراف نمونه مورد نظر و بهینه از نظر مقاومت تک محوری

Fig. 15. Micrograph of optimized sample in terms of uniaxial strength

شد. این افزایش مقاومت ناشی از افزایش سیلیس بوده که این عمل به افزایش ژل N-A-S-H منجر می‌شود اما دلیل کاهش مقاومت پس از نسبت فوق، به علت افزایش بیش از حد سدیم سیلیکات و درجه قلیایی ناشی از اندازه محلول فعال کننده می‌باشد.

در غلظت‌های مختلف محلول سدیم هیدروکسید (۶ الی ۱۴ مولار) نتایج نشان داد مقاومت حداکثری در غلظت‌های ۱۱ الی ۱۲ مولار اتفاق می‌افتد و بعد از آن شاهد کاهش مقاومت فشاری تک محوری بودیم.

نسبت محلول فعال کننده قلیایی به افزودنی تثبیت کننده در نسبت ۰/۴ حداکثر مقدار مقاومت تک محوری را باعث می‌شود و پس از آن مقاومت ابتدا روند ثابت و سپس کاهش می‌شود.

کسب مقاومت تک محوری ۵/۵ مگاپاسکال در نمونه‌های عمل‌آوری شده با متاکائولن در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه حدود ۳ برابر مقاومت نمونه تثبیت شده با سیمان پرتلند در شرایط مشابه است که می‌توان به عنوان ماده‌ای جایگزین معرفی شود.

نتایج مقاومت تک محوری دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه نشان دهنده افزایش قابل توجه مقاومت نمونه‌ها در مقایسه با دوره عمل‌آوری ۷ روزه می‌باشد که این موضوع گواه بر تأثیر زمان در تکمیل واکنش‌های ژئوپلیمری دارد.

S-H، چند ضلعی نامنظم بلوری شکل حاوی مورفولوژی خاص که با ذرات ریزتر پوشیده شده در مقیاس چند ده نانومتر قابل مشاهده است. همچنین تفسیر این شکل نشان می‌دهد توزیع ژل با ساختار سه بعدی در سطوح به شکل مناسبی انجام شده است [۵۲].

۱۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق تثبیت ژئوپلیمری ماسه اهواز با استفاده از متاکائولن و تحت تاثیر متغیرهای مختلف در دوره عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه با ارزیابی مقاومت فشاری تک محوری مورد تحقیق قرار گرفته است. همچنین بررسی ترکیبات شیمیایی با کمک پراش XRD و بررسی ریزساختاری با تفسیر عکس‌های میکروسکوپ SEM بر روی نمونه‌ها انجام شده است که نتایج حاصل به شرح زیر خلاصه می‌شود.

نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند با افزایش متاکائولن از ۵ الی ۲۰ درصد مقاومت فشاری تک محوری محصور نشده متناسب با مقدار افزودنی افزایش یافته و پس از آن با افزایش متاکائولن، افزایش مقاومت بیشتری حاصل نمی‌شود. این افزایش مقاومت حاصل از ایجاد ژل آمورف در نمونه است.

بررسی تاثیر نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید نشان داد مقاومت نمونه تا نسبت ۲ افزایشی بوده و بعد از آن کاهش مشاهده

geopolymer cement/concrete published in scientific papers, Technical paper, 24 (2015) 1-9.

- [10] M. Abdullah, L.Y. Ming, H.C. Yong, M. Tahir, Clay-based materials in geopolymer technology, *Cement Based Materials*, 239 (2018).
- [11] A.K. Thakur, A. Pappu, V.K. Thakur, Resource efficiency impact on marble waste recycling towards sustainable green construction materials, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13 (2018) 91-101.
- [12] T.A. Garcí, M. de Lourdes Chávez-Garcí, Compressive strength of metakaolin-based geopolymers: influence of koh concentration, temperature, time and relative humidity, *Materials Sciences and Applications*, 7(11) (2016) 772-791.
- [13] A.L. Wijaya, J.J. Ekaputri, Factors influencing strength and setting time of fly ash based-geopolymer paste, in: *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 2017, pp. 01010.
- [14] A. Nazari, H. Khanmohammadi, M. Amini, H. Hajjallahyari, A. Rahimi, Production geopolymers by Portland cement: designing the main parameters' effects on compressive strength by Taguchi method, *Materials & Design*, 41 (2012) 43-49.
- [15] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo, J.S. van Deventer, Geopolymer technology: the current state of the art, *Journal of materials science*, 42(9) (2007) 2917-2933.
- [16] S. Andini, R. Cioffi, F. Colangelo, T. Grieco, F. Montagnaro, L. Santoro, Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products, *Waste management*, 28(2) (2008) 416-423.
- [17] J.L. Provis, S.A. Bernal, Geopolymers and related alkali-activated materials, *Annual Review of Materials Research*, 44 (2014) 299-327.
- [18] A. Palomo, M. Grutzeck, M. Blanco, Alkali-activated fly ashes: A cement for the future, *Cement and concrete research*, 29(8) (1999) 1323-1329.
- [19] D. Hardjito, S.E. Wallah, D.M. Sumajouw, B.V. Rangan, On the development offly ash-based geopolymer

در این تحقیق با بررسی عوامل مختلف با دامنه تغییرات گسترده جهت حصول مقاومت فشاری حداکثر منجر به ارائه و پیشنهاد یک طرح اختلاط بهینه بر اساس تحلیل‌های آماری شد (جدول ۸) که در مطالعات پیشین به ندرت وجود داشت.

منابع

- [1] R. Rehan, M. Nehdi, Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry, *Environmental Science & Policy*, 8(2) (2005) 105-114.
- [2] F. Gouny, F. Fouchal, O. Pop, P. Maillard, S. Rossignol, Mechanical behavior of an assembly of wood-geopolymer-earth bricks, *Construction and Building Materials*, 38 (2013) 110-118.
- [3] A. Pappu, V.K. Thakur, R. Patidar, S.R. Asolekar, M. Saxena, Recycling marble wastes and Jarosite wastes into sustainable hybrid composite materials and validation through Response Surface Methodology, *Journal of Cleaner Production*, 240 (2019) 118249.
- [4] K.L. Scrivener, R.J. Kirkpatrick, Innovation in use and research on cementitious material, *Cement and concrete research*, 38(2) (2008) 128-136.
- [5] R.M. Andrew, Global CO₂ emissions from cement production, *Earth System Science Data*, 10(1) (2018) 195-217.
- [6] M.E. Alouani, S. Alehyen, M.E. Achouri, A. Hajjaji, C. Ennawaoui, M.h. Taibi, Influence of the Nature and Rate of Alkaline Activator on the Physicochemical Properties of Fly Ash-Based Geopolymers, *Advances in Civil Engineering*, 2020 (2020).
- [7] D. Higgins, *Briefing: GGBS and sustainability*, in, Thomas Telford Ltd, 2007.
- [8] G. Vijayakumar, H. Vishaliny, D. Govindarajulu, Studies on glass powder as partial replacement of cement in concrete production, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(2) (2013) 153-157.
- [9] J. Davidovits, False values on CO₂ emission for

- [31] B. Aouan, S. Alehyen, M. Fadil, M.E. Alouani, A. Khabbazi, A. Atbir, M.h. Taibi, Compressive strength optimization of metakaolin-based geopolymer by central composite design, *Chemical Data Collections*, 31 (2021) 100636.
- [32] A. Arulrajah, M. Yaghoubi, M.M. Disfani, S. Horpibulsuk, M.W. Bo, M. Leong, Evaluation of fly ash and slag-based geopolymers for the improvement of a soft marine clay by deep soil mixing, *Soils and foundations*, 58(6) (2018) 1358-1370.
- [33] H. Jiang, Z. Qi, E. Yilmaz, J. Han, J. Qiu, C. Dong, Effectiveness of alkali-activated slag as alternative binder on workability and early age compressive strength of cemented paste backfills, *Construction and Building Materials*, 218 (2019) 689-700.
- [34] S. Hanjitsuwan, S. Hunpratub, P. Thongbai, S. Maensiri, V. Sata, P. Chindapasirt, Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste, *Cement and Concrete Composites*, 45 (2014) 9-14.
- [35] A. Hameed, R. Rawdhan, S. Al-Mishhadani, Effect of various factors on the manufacturing of geopolymer mortar, *Archives of Science*, 1(3) (2017) 1-8.
- [36] H. Xu, J. Van Deventer, The geopolymerisation of alumino-silicate minerals, *International journal of mineral processing*, 59(3) (2000) 247-266.
- [37] C. Villa, E.T. Pecina, R. Torres, L. Gómez, Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite, *Construction and Building Materials*, 24(11) (2010) 2084-2090.
- [38] H.A. Gasteiger, W.J. Frederick, R.C. Streisel, Solubility of aluminosilicates in alkaline solutions and a thermodynamic equilibrium model, *Industrial & engineering chemistry research*, 31(4) (1992) 1183-1190.
- [39] G.S. Ryu, Y.B. Lee, K.T. Koh, Y.S. Chung, The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators, *Construction and building materials*, 47 (2013) 409-418.
- [40] A. Sathonsaowaphak, P. Chindapasirt, K. Pimraksa, Workability and strength of lignite bottom ash concrete, *Materials Journal*, 101(6) (2004) 467-472.
- [20] C. Shi, R.L. Day, Chemical activation of blended cements made with lime and natural pozzolans, *Cement and Concrete Research*, 23(6) (1993) 1389-1396.
- [21] Á. Palomo, E. Kavalerova, A. Fernández-Jiménez, P. Krivenko, I. García-Lodeiro, O. Maltseva, A review on alkaline activation: new analytical perspectives, (2015).
- [22] J.L. Provis, J.S.J. Van Deventer, *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*, Elsevier, 2009.
- [23] P. Sargent, P.N. Hughes, M. Rouainia, M.L. White, The use of alkali activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils, *Engineering geology*, 152(1) (2013) 96-108.
- [24] M. Bellotto, A. Gualtieri, G. Artioli, S. Clark, Kinetic study of the kaolinite-mullite reaction sequence. Part I: kaolinite dehydroxylation, *Physics and chemistry of minerals*, 22(4) (1995) 207-217.
- [25] L.R. Caballero, M.d.D.M. Paiva, E.d.M.R. Fairbairn, R.D. Toledo, Thermal, mechanical and microstructural analysis of metakaolin based geopolymers, *Materials Research*, 22 (2019).
- [26] H. Xu, J. Van Deventer, Geopolymerisation of multiple minerals. vol. 15, *Miner Eng*, (2002) 00255-00258.
- [27] M. Woodbridge, Use of soft limestone for road-base construction in Belize, *Transportation research record*, 1652(1) (1999) 181-191.
- [28] S.G. Maryam Alizadeh, Ali Almasi, Basics of sample preparation for scanning electron microscope, in: *Iranian Journal Of Laboratory Knowledge*, 1392. (In Persian)
- [29] A.H.b. Somaye Mirjalili, The process of implementing a quality management system based on ISO/IEC 17025 in testing laboratories, *Iranian Journal Of Laboratory Knowledge*, (1394). In Persian
- [30] Y. Nazir, S. Shuib, M.S. Kalil, Y. Song, A.A. Hamid, Optimization of culture conditions for enhanced growth, lipid and docosahexaenoic acid (DHA) production of *Aurantiochytrium SW1* by response surface methodology, *Scientific reports*, 8(1) (2018) 1-12.

- of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements ☆, Fuel, 82(18) (2003) 2259-2265.
- [47] M. Choquette, M.-A. Berube, J. Locat, Behavior of common rock-forming minerals in a strongly basic NaOH solution, The Canadian Mineralogist, 29(1) (1991) 163-173.
- [48] P. Palmero, A. Formia, P. Antonaci, S. Brini, J.-M. Tulliani, Geopolymer technology for application-oriented dense and lightened materials. Elaboration and characterization, Ceramics International, 41(10) (2015) 12967-12979.
- [49] A. Palomo, F. Glasser, Chemically-bonded cementitious materials based on metakaolin, British ceramic. Transactions and journal, 91(4) (1992) 107-112.
- [50] H. Rahier, B. Van Mele, M. Biesemans, J. Wastiels, X. Wu, Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses, Journal of materials science, 31(1) (1996) 71-79.
- [51] M. Zhang, H. Guo, T. El-Korchi, G. Zhang, M. Tao, Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer, Construction and building materials, 47 (2013) 1468-1478.
- [52] M. Yang, Y. Zheng, X. Li, X. Yang, F. Rao, L. Zhong, Durability of alkali-activated materials with different C-S-H and NASH gels in acid and alkaline environment, Journal of Materials Research and Technology, 16 (2022) 619-630.
- geopolymer mortar, Journal of Hazardous Materials, 168(1) (2009) 44-50.
- [41] S. Alonso, A. Palomo, Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio, Materials Letters, 47(1-2) (2001) 55-62.
- [42] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, U. Rattanasak, Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers, Waste management, 29(2) (2009) 539-543.
- [43] A. Palomo, M.T. Blanco-Varela, M. Granizo, F. Puertas, T. Vazquez, M. Grutzeck, Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin, Cement and Concrete research, 29(7) (1999) 997-1004.
- [44] A. Mustafa Al Bakri, O.A. Abdulkareem, H. Kamarudin, I. Khairul Nizar, R. Abd Razak, Y. Zarina, A. Alida, Microstructure studies on the effect of the alkaline activators of fly ash-based geopolymer at elevated heat treatment temperature, in: Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ, 2013, pp. 342-348.
- [45] M. Ibrahim, M.A.M. Johari, M.K. Rahman, M. Maslehuddin, Effect of alkaline activators and binder content on the properties of natural pozzolan-based alkali activated concrete, Construction and building materials, 147 (2017) 648-660.
- [46] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, Characterisation

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

P. Daneshgar, S. Ghaffarpour Jahromi, H. Arzani, Investigation of the behavior of Ahvaz sand soil stabilized with metakaolin, Amirkabir J. Civil Eng., 55(2) (2023) 337-358.

DOI: 10.22060/ceej.2022.21851.7838



