

## ارائه مدل پیش‌بینی مقاومت فشاری ژئوپلیمر ساخته شده با متاکائولن و سرباره با استفاده از روش سطح پاسخ

وجیهه صادقی پناه

دانشجوی دکتری فرآورده‌های چندسازه چوبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

محراب مدهوشی\*

دانشیار، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.

تقی طبرسا

استاد گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران.

مرتضی ناظریان

دانشیار، گروه سامانه‌های زیستی، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس زیرآب، مازندران، ایران.

ابراهیم نجفی کانی

دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، ایران.

زهرآ عبدالله نژاد

استادیار، گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه کانتکتیکات، آمریکا.

### چکیده

این مطالعه با هدف بررسی و ارائه مدل پیش‌بینی مقاومت فشاری ژئوپلیمرهای مبتنی بر متاکائولن و سرباره فعال شده با فعال‌سازهای قلیایی با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) و طرح مرکب مرکزی (CCD) مدل‌های پیش‌بینی مقاومت فشاری نمونه‌ها ارائه و شرایط بهینه ساخت بررسی گردید. نسبت‌های (متاکائولن به سرباره، نسبت فعال‌ساز به پیش‌ماده، مولار سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم و درصد آب) به‌عنوان عوامل مستقل در ۵ سطح و ۶ نقطه مرکزی تکرار شده ( $C_0=6$ ) بررسی شدند. نمونه‌های ژئوپلیمری در ابعاد  $20 \times 20 \times 20$  میلی‌متر ساخته شدند، سپس در دوره‌های زمانی ۳، ۷ و ۲۸ روز مقاومت فشاری آنها اندازه‌گیری شد. همچنین ارزیابی خواص مواد با استفاده از آزمون (XRD) و (FT-IR) برای بررسی اثر هر کدام از متغیرهای مستقل بر مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری انجام گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از روش سطح پاسخ می‌تواند برآورد مناسب از پاسخ را ارائه دهد، به طوری که مقدار  $R^2$  بزرگتر از ۹۰ درصد برای هر پاسخ به دست آمد. بیشترین مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمری پس از ۳ روز ۱۰ مگاپاسکال و پس از ۷ و ۲۸ روز به ترتیب ۱۶/۵۷ و ۲۲ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. با افزایش نسبت مولار سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم تا سطح ۲/۵ و کاهش نسبت متاکائولن به سرباره باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمر گردید. نتایج FTIR نشان داد که هنگام تشکیل ژئوپلیمرها ساختارشان نسبت به مواد اولیه به علت تشکیل مونومرها و بسپارش تراکمی تغییر می‌کند. نتایج آنالیز XRD نشان دهنده وجود حالت قله‌مانند در اثر تشکیل محصول آمورف بود.

واژه‌های کلیدی: ژئوپلیمر، روش سطح پاسخ، متاکائولن، سرباره، مقاومت فشاری.

\* نویسنده مسئول: madhoushi@gau.ac.ir

## ۱- مقدمه

به خود جلب کرده است [۱۲-۱۳]. باتوجه به اینکه ژئوپلیمرها با توجه به مطالعات انجام شده قبلی رفتار شکننده‌ای از خود نشان می‌دهند، برای رفع این معایب و بهبود خواص مکانیکی آنها طیف وسیعی از مواد طبیعی استفاده شده است [۸]. خاصیت شکست ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولن تقویت شده با مقادیر ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی نانوالیاف کربن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوطه نشان داد که نانوالیاف کربنی مقاومت در برابر شکست را افزایش می‌دهند و چقرمگی شکست به ترتیب ۴۸، ۴۰ و ۴۵ درصد افزایش می‌یابد [۱۴، ۱۵].

برای تولید سیمان‌های ژئوپلیمری، به مصرف انرژی کمتری نیاز است و تولید آن‌ها سبب انتشار کمتر گازهای گلخانه‌ای نسبت به سیمان‌های معمولی تا ۷۲-۲۲ درصد می‌شود. این امر به این دلیل است که سیمان ژئوپلیمر برای اتصال به سطح و تکمیل فرآیند چسبندگی به کربنات کلسیم نیاز ندارد [۱۶، ۱۷]. اگرچه ژئوپلیمرها یک جایگزین بسیار قدرتمند به‌عنوان یک ماده پایدار هستند، اما در برخی موارد کاربرد آن‌ها در ساختمان‌ها و سایر اجزای سازه به دلیل عدم وجود استانداردها و کدهای طراحی مرتبط با سازه محدود است [۱۸]، زیرا تدوین کدهای استاندارد برای ژئوپلیمرها هنوز در مرحله آزمایشات اولیه قرار دارد [۱۹، ۲۰].

طیف گسترده‌ای از مواد معدنی، مواد بازیافتی و ضایعات صنایع مختلف (کشاورزی و خانگی) برای ترکیب با سیمان پرتلند به‌عنوان جایگزین سیمان در جهت تولید سیمان سبز و ایجاد یک اتصال‌دهنده مناسب می‌توان استفاده کرد [۲۱].

هدف اصلی تحقیق حاضر، ارزیابی و تحلیل تأثیر مواد و شرایط مختلف ساخت در سنتز ژئوپلیمر و ارتباط آن‌ها با مقاومت فشاری ژئوپلیمر تولیدی و ارائه مدل پیش‌بینی و تعیین ترکیب بهینه ژئوپلیمر با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) برای ساخت این نوع محصول است. هدف اصلی در استفاده از این روش ترکیبی آماری-ریاضی تعیین نقطه بهینه است ولی قابلیت کاهش هزینه‌ها و زمان آزمون را نیز با کاهش تعداد تست‌ها فراهم می‌کند. برنامه نویسی در نرم افزار متلب و با استفاده از شبکه عصبی-فازی آنفیس، مدلی جهت پیش‌بینی خواص ترکیبات جدید و همچنین پیشنهاد ترکیبات بهینه به دست آورده شد [۲۲]. در این مطالعه همچنین از طیف‌سنجی FTIR و ارزیابی XRD برای بررسی ساختار مولکولی ژل ژئوپلیمرهای طبیعی برپایه متاکائولن و سرباره

در سال‌های اخیر، تقاضای جهانی صنعت ساختمان برای بتن به‌طور پیوسته در حال افزایش است؛ و این در حالی است که تولید سیمان برای کاربرد در تولید بتن به‌طور قابل‌توجهی به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای به محیط‌زیست منجر می‌شود [۱]. این موضوع ضرورت تحقیق و ساخت و استفاده از مواد ساختمانی جدید با مقاومت‌ها و خواص کاربردی مناسب به‌عنوان جایگزین بتن معمولی و در عین حال سازگار با محیط‌زیست را نشان می‌دهد [۲]. در همین زمینه، به‌تازگی ژئوپلیمرها که به‌عنوان بتن سبز شناخته می‌شوند با خواص مختلف قابل‌توجه به‌عنوان یک ماده جدید جایگزین برای سیمان متداول (پرتلند) و در عین حال سازگار با محیط‌زیست معرفی شده‌اند و تحقیقات متعددی درباره آن‌ها انجام گرفته است [۳]. این مواد مقرون‌به‌صرفه هستند و تولید آن‌ها نیاز به انرژی نسبتاً کمتری دارد. همچنین از مقاومت فشاری، دوام و خواص حرارتی خوبی برخوردارند و در برابر شعله و گرما بسیار مقاوم هستند [۴، ۵]. در مقایسه با سیمان پرتلند، ژئوپلیمر دوام بیشتری در مقابل خوردگی دارد و در زمان طولانی‌تری تخریب می‌شود. بنابراین، برای سازه‌ای که در آن ژئوپلیمر (بتن سبز) استفاده شده است، عمر مفید بیشتری در مقایسه با سیمان معمولی می‌توان انتظار داشت [۶].

فناوری ژئوپلیمر امکان تبدیل ضایعات صنعتی به سیمان‌سبز را فراهم کرده است [۷]. صنعت ساخت‌وساز نه تنها مسئولیت مصرف منابع طبیعی، بلکه مسئول انتشار مقادیر زیادی CO<sub>2</sub> را نیز بر عهده دارد. ژئوپلیمرها به‌عنوان جایگزین سازگار با محیط‌زیست برای مصالح ساختمانی معمولی پدید آمده‌اند زیرا می‌توانند از پسماندهای صنعتی تولید شوند. همچنین مشابه بتن معمولی، ژئوپلیمرها می‌توانند با استفاده از الیاف تقویت‌شده و ویژگی‌های مکانیکی آنها بهبود یابد [۸]. سازه‌هایی که پایداری خوبی با محیط‌زیست دارند، را سازه‌های سبز می‌نامند. به‌طور کلی مواد ساختمانی سبز دارای حداقل تأثیر یا فاقد تأثیر منفی بر روی محیط‌زیست هستند و در برخی موارد ممکن است اثر مثبت نیز داشته باشند [۹]. ژئوپلیمر ترکیبی از مواد زمین‌شناختی طبیعی مانند سیلیکات و آلومینا است [۱۰-۱۱]. همچنین، در سال‌های اخیر کاربرد و توسعه ژئوپلیمرها به‌عنوان مصالح ساختمانی پایدار و پلیمرهای غیرآلی غیرقابل احتراق، توجه بسیاری از پژوهشگران را

مرکب مرکزی (CCD)<sup>۳</sup> برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی مقاومت فشاری ژئوپلیمرها در سه بازه زمانی (۳، ۷ و ۲۸ روز) استفاده گردید. در این تحقیق علاوه بر تأثیر مستقل هر پارامتر، اثر متقابل متغیرها بر مقاومت فشاری مشخص شد. جدول ترکیب شرایط برای ساخت نمونه‌ها با روش سطح پاسخ (RSM) و طرح مرکب مرکزی (CCD) طراحی گردید. جهت دستیابی به مقادیر بهینه ترکیب ژئوپلیمر، چهار متغیر در پنج سطح تعریف گردید (جدول ۲). متغیرها شامل (۱) نسبت وزنی متاکائولن به سرباره، (۲) نسبت مولی فعال‌سازها، (۳) نسبت فعال‌سازها به پیش‌ماده و (۴) درصد آب بود. سپس براساس هر یک از ترکیب شرایط تعریف شده توسط روش آماری مورد استفاده، ساخت ژئوپلیمرها انجام گرفت.

### ۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌های ژئوپلیمر

حلال قلیایی هیدروکسید سدیم به‌طور جداگانه ۲۴ ساعت قبل از استفاده تهیه گردید، سپس به مایع سیلیکات سدیم اضافه و محلول آماده شد. در ابتدا متاکائولن و سرباره با یکدیگر ترکیب شدند تا یک ترکیب همگن به‌دست آید. سپس، محلول قلیایی به پیش‌ماده‌ها اضافه گردید و ترکیب حاصله به‌صورت دستی مخلوط شد. ترکیب آماده‌شده در قالب‌هایی به ابعاد  $20 \times 20 \times 20$  میلی‌متر به تدریج قالب‌گیری شد، سپس به مدت دو دقیقه تحت ارتعاش لرزشی قرار گرفت تا حفره‌های هوا خارج گردد. در مرحله بعد، جهت جلوگیری از تبادل رطوبتی، درون پوشش‌های پلاستیکی قرار گرفتند. زمان گیرایی اولیه ژئوپلیمرها بسیار کوتاه است (تقریباً ۴ ساعت)، که طی آن مقاومت فشاری آنها به حدود ۷۰ درصد می‌رسد [۲۳]. سپس نمونه‌های ژئوپلیمر در دردمای اتاق ( $20 \pm 2$ ) درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۵ درصد قرار داده شدند تا در بازه‌های زمانی ۳، ۷ و ۲۸ روز آزمون شوند.

### ۲-۴- ارزیابی مقاومت فشاری

نمونه‌های ساخته‌شده در سه دوره زمانی ۳، ۷ و ۲۸ روز پس از ساخت نمونه و در ۳ تکرار برای هر تیمار مورد آزمون قرار گرفتند. این آزمون براساس استاندارد ASTM C109 با سرعت بارگذاری ۲ میلی‌متر در دقیقه اندازه‌گیری و با استفاده از رابطه‌ی

استفاده شد. از طرفی ژئوپلیمرها به دلیل ساختار درونی خاص خود، در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی، شکننده‌تر هستند و دچار شکست بیشتری می‌شوند. بنابراین، بهبود خواص شکنندگی، عملکردی و دوام ژئوپلیمرها برای کاربردهای ساختمانی عملی بسیار ضروری است. از این‌رو، در این تحقیق سعی شده است. ساخت نمونه‌های ژئوپلیمری با استفاده از پیش‌ماده‌های مختلف و ترکیبی یک ژئوپلیمر با مقاومت فشاری در حد استاندارد ارائه شود تا بتوانیم از آن به‌عنوان، ماده زمینه یا ماتریس یک کامپوزیت سبز ژئوپلیمری استفاده کنیم.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد اولیه

متاکائولن: کائولن از شرکت خاک چینی ایران (شهرستان مرنند، استان آذربایجان شرقی) تهیه شد. به منظور سنتز متاکائولن، پودر کائولن به مدت ۴ ساعت در یک کوره الکتریکی با دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد تحت عملیات حرارتی قرار گرفت. در جدول ۱، مشخصات خاک متاکائولن (گزارش شده توسط شرکت خاک چینی ایران) مصرفی ارائه شده است.

سرباره: سرباره فولاد (GGBFS)<sup>۱</sup> از شرکت سیمان سپاهان (اصفهان، استان اصفهان) تهیه شد. آنالیز شیمیایی GGBFS ارزیابی شده توسط (XRF)<sup>۲</sup> در جدول ۱ ارائه شده است.

فعال‌کننده‌های قلیایی: از سیلیکات سدیم مایع به‌عنوان فعال‌کننده قلیایی استفاده شد. سیلیکات سدیم تجاری با چگالی ۱/۵۷ گرم بر سانتی‌مکعب از شرکت سیلیکات گستر سپاهان (استان اصفهان) به صورت محلول تهیه شد. ترکیب شیمیایی فعال‌کننده (درجه D) شامل ۳۲/۴ درصد جرم  $\text{SiO}_2$ ، ۱۳/۹ درصد جرم  $\text{Na}_2\text{O}$  و ۵۳/۱ درصد جرم  $\text{H}_2\text{O}$  و نسبت مولی  $(\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O})$  ۲/۵ بود. همچنین در این تحقیق، از هیدروکسید سدیم با خلوص ۹۸ درصد از شرکت مرک آلمان استفاده شد.

### ۲-۲- روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی تعیین مقادیر

در این مطالعه، برای ساخت نمونه‌های ژئوپلیمر با توجه به متغیرهای مستقل و سطوح بکار رفته از روش سطح پاسخ (RSM) و طرح

<sup>3</sup> Central composite design (CCD)

<sup>1</sup> Ground-granulated blast-furnace slag (GGBFS)

<sup>2</sup> Xray fluorescence

زیر محاسبه گردید:

در رابطه فوق،  $P_u = \text{تنش نهایی (Pa)}$ ؛  $F_{\max} = \text{نیروی وارده}$   
 حداکثر (N)،  $A = \text{سطح تحت بارگذاری نمونه (m}^2\text{)}$  می‌باشند.  

$$P_u = \frac{F_{\max}}{A}$$

جدول ۱- ویژگی‌های شیمیایی خاک متاکائولن مورد استفاده (درصد وزنی)\*\*\*

| ماده          | I.O.L | MgO  | AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Si <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | CaO   | ۲TiO | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | O <sub>2</sub> Na |
|---------------|-------|------|--------------------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|-------|------|--------------------------------|-------------------|
| خاک متاکائولن | ۱/۲   | ۰/۶۷ | ۲۲/۸۷                          | ۶۴/۵۱             | ۰/۱۵                          | ۱/۳۶            | ۴/۶۸             | ۰/۶۶  | ۰/۳۶ | ۲/۵۶                           | ۰/۹۷              |
| سرباره کوره   | -     | ۸/۷۵ | ۱۴/۱۵                          | ۳۲/۰۹             | -                             | ۲/۲۸            | ۰/۴۷             | ۳۲/۳۹ | -    | ۵۳/۱                           | ۰/۴۲              |

\*\*\* بر اساس اطلاعات شرکت سازنده

جدول ۲- متغیرهای تحقیق در طرح CCD

| متغیرها                         | نماد | سطوح متغیرها |     |    |     |    |
|---------------------------------|------|--------------|-----|----|-----|----|
|                                 |      | +۲           | +۱  | ۰  | -۱  | -۲ |
| نسبت متاکائولن به سرباره (%)    | A    | ۱۰۰          | ۷۵  | ۵۰ | ۲۵  | ۰  |
| نسبت مولی فعال‌سازها (%)        | B    | ۳            | ۲/۵ | ۲  | ۱/۵ | ۱  |
| نسبت فعال‌سازها به پیش‌ماده (%) | C    | ۴۵           | ۴۰  | ۳۵ | ۳۰  | ۲۵ |
| مقدار آب                        | D    | ۳۵           | ۳۲  | ۲۹ | ۲۶  | ۲۳ |

## ۲-۵- پراش اشعه ایکس (XRD)

پراش اشعه X یک روش غیرمخرب با کاربردهای مختلف است که اطلاعات بسیار جامعی درباره ساختار بلوری مواد طبیعی و صنعتی ارائه می‌دهد. به منظور تعیین میزان بلورینگی نمونه‌ها از دستگاه XRD (مدل D8 ADVANCE ساخت شرکت Bruker) و تحت زاویه  $2\theta$  برابر ۷۰-۱۰ درجه که نمونه‌ها به صورت پودر تهیه شده بودند استفاده شد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- مقاومت فشاری

اثر متغیرهای مستقل و اثر متقابل آنها بر مقاومت فشاری نمونه‌ها در بازه‌های زمانی ۳، ۷ و ۲۸ روز پس از ساخت، با استفاده از روش سطح پاسخ بررسی و سپس مقادیر بهینه برای حداکثر مقاومت فشاری ترکیب‌ها تعیین شد.

نتایج نشان داد که افزایش نسبت مولارسیلیکات سدیم به هیدروکسیدسدیم منجر به مقاومت فشاری بیشتر نمونه ژئوپلیمر می‌شود. همان‌طور که در مقادیر کلی مقاومت‌های فشاری (جدول ۳) نشان داده شده است بیشترین مقاومت‌ها مربوط به نمونه‌های با ۲ درصد نسبت مولار سیلیکات سدیم به هیدروکسیدسدیم می‌باشد. از طرفی، با افزایش مقدار آب، قابلیت کارایی ژئوپلیمر افزایش یافت. بهبود مقاومت فشاری ژئوپلیمرها به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر عواملی مانند اندازه ذرات، منبع و نوع پیش‌ماده همچون خاکستر بادی و شرایط عمل‌آوری قرار دارد [۲۴]. طرح کامل ماتریس و داده‌های مورد نیاز برای ساخت ژئوپلیمر و روابط و نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.

## ۲-۶- طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)

برای مطالعه تغییرات گروه‌های سطحی از دستگاه FTIR (مدل TENSOR II ساخت شرکت Bruker) استفاده شد. در ابتدا، نمونه‌ها آسیاب شده و در آون با دمای  $103 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. در نهایت طیف‌سنجی نمونه‌ها در محدوده طیف‌سنجی  $500 - 5000 \text{ cm}^{-1}$  با قدرت تفکیک  $\text{cm}^{-1}$  ۴ تهیه شد.

لازم به یادآوری است، همه‌ی آزمون‌های این مطالعه در آزمایشگاه‌های دانشگاه گرگان انجام شد.

جدول ۳- ترکیب شرایط ساخت نمونه‌های ژئوپلیمری

| بلوک | مقاومت فشاری (مگاپاسکال) |       |       | متغیرها    |                          |  |                         |
|------|--------------------------|-------|-------|------------|--------------------------|--|-------------------------|
|      | ۲۸ روز                   | ۷ روز | ۳ روز | آب (%) (D) | فعال ساز به پیش ماده (C) | مولار سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم (B) | متاکائولن به سرباره (A) |
| ۱    | ۱۱                       | ۱۰/۵  | ۱۰    | ۲۹         | ۳۵                       | ۲  | ۵۰                      |
| ۲    | ۸/۳                      | ۶/۲   | ۴/۷   | ۲۶         | ۳۰                       | ۱/۵                                      | ۷۵                      |
| ۳    | ۸/۸                      | ۶/۴۱  | ۵     | ۲۹         | ۳۵                       | ۱  | ۵۰                      |
| ۴    | ۸/۵                      | ۷/۲۵  | ۶/۲   | ۲۹         | ۴۵                       | ۲  | ۵۰                      |
| ۵    | ۱۰                       | ۸/۶   | ۸/۲   | ۲۹         | ۳۵                       | ۲  | ۵۰                      |
| ۶    | ۱۲                       | ۹/۷۵  | ۸/۴۵  | ۳۵         | ۳۵                       | ۲  | ۵۰                      |
| ۷    | ۱۶                       | ۱۲/۹۵ | ۱۱/۳۲ | ۳۲         | ۳۰                       | ۱/۵                                      | ۲۵                      |
| ۸    | ۱۸/۴                     | ۱۳    | ۱۰    | ۲۶         | ۳۰                       | ۲/۵                                      | ۲۵                      |
| ۹    | ۸/۳                      | ۵/۱۵  | ۳/۶   | ۲۶         | ۳۰                       | ۲/۵                                      | ۷۵                      |
| ۱۰   | ۲۰                       | ۱۶    | ۱۴    | ۲۶         | ۳۰                       | ۱/۵                                      | ۲۵                      |
| ۱۱   | ۵/۲                      | ۳/۳   | ۱/۴۲  | ۲۹         | ۳۵                       | ۲  | ۱۰۰                     |
| ۱۲   | ۹/۵۲                     | ۸/۵   | ۷/۲۵  | ۳۲         | ۴۰                       | ۱/۵                                      | ۲۵                      |
| ۱۳   | ۶/۲۴                     | ۳/۲   | ۳/۳۱  | ۳۲         | ۴۰                       | ۱/۵                                      | ۷۵                      |
| ۱۴   | ۱۲/۲۵                    | ۱۰/۲۵ | ۹/۱۴  | ۲۹         | ۳۵                       | ۲  | ۵۰                      |
| ۱۵   | ۱۴/۵                     | ۱۲/۲۵ | ۹/۵   | ۲۳         | ۳۵                       | ۲  | ۵۰                      |
| ۱۶   | ۱۴/۷                     | ۱۱/۶  | ۱۰    | ۳۲         | ۴۰                       | ۲/۵                                      | ۲۵                      |
| ۱۷   | ۱۲/۶                     | ۹/۵۶  | ۸/۵۴  | ۲۶         | ۴۰                       | ۲/۵                                      | ۲۵                      |
| ۱۸   | ۱۵                       | ۱۱/۳۵ | ۹/۷۵  | ۳۲         | ۳۰                       | ۲/۵                                      | ۲۵                      |
| ۱۹   | ۲۲                       | ۱۶/۵۷ | ۱۲    | ۲۹         | ۳۵                       | ۲  | ۰                       |
| ۲۰   | ۱۲/۶                     | ۹/۸۵  | ۸/۳   | ۲۹         | ۲۵                       | ۲  | ۵۰                      |
| ۲۱   | ۴/۰۵                     | ۳/۲۱  | ۲/۸۶  | ۳۲         | ۳۰                       | ۲/۵                                      | ۷۵                      |
| ۲۲   | ۱۳/۳۵                    | ۹/۵۴  | ۶/۵۴  | ۲۶         | ۴۰                       | ۱/۵                                      | ۲۵                      |
| ۲۳   | ۷/۲۱                     | ۵/۵۲  | ۴/۲۵  | ۳۲         | ۳۰                       | ۱/۵                                      | ۷۵                      |
| ۲۴   | ۸/۲۵                     | ۵/۵   | ۳/۵   | ۳۲         | ۴۰                       | ۲/۵                                      | ۷۵                      |
| ۲۵   | ۵/۵                      | ۳/۳   | ۲/۵   | ۲۹         | ۳۵                       | ۳  | ۵۰                      |
| ۲۶   | ۱۰/۶                     | ۶     | ۴/۵   | ۲۶         | ۴۰                       | ۲/۵                                      | ۷۵                      |
| ۲۷   | ۱۱                       | ۹     | ۸     | ۲۹         | ۳۵                       | ۲  | ۵۰                      |
| ۲۸   | ۱۰                       | ۷     | ۵/۰۲  | ۲۶         | ۳۵                       | ۲  | ۵۰                      |
| ۲۹   | ۹                        | ۸/۵   | ۴/۸۴  | ۲۶         | ۴۰                       | ۱/۵                                      | ۷۵                      |
| ۳۰   | ۱۱/۲۵                    | ۹/۸۹  | ۸/۲۵  | ۲۹         | ۳۵                       | ۲  | ۵۰                      |

مدل‌های به‌دست‌آمده با استفاده از روش سطح پاسخ برای پیش‌بینی خواص فرآورده بر اساس روابط رگرسیونی، به شرح

زیر می‌باشد. به سرباره و همچنین کاهش نسبت فعال‌ساز به پیش‌ماده تاثیر معنی-داری بر مقاومت فشاری ۳ روزه داشت. با توجه به اینکه اگر ضریب  $R^2$  یک مدل بیشتر از ۰/۹۰ باشد، مدل مناسب خواهد بود. بنابراین با توجه به مقدار  $R^2=0.934$  به دست آمده مدل‌های پیش‌بینی به‌دست آمده را می‌توان معتبر تلقی کرد. همچنین با توجه به جدول تجزیه واریانس میزان عدم برازش مدل کم است که نشان‌دهنده معنی‌داری بالای مدل مورد استفاده است. در نسبت‌های مولار سیلیکات‌سدیم به هیدروکسیدسدیم ۲ و بالاتر مقاومت فشاری کاهش یافته و موقعیت پیوند اصلی Si—O—T ژئوپلیمر به پیوندهای با طول موج بیشتر مشخص می‌شود (شکل ۸). اما در نسبت مولی سیلیکات سدیم به هیدروکسیدسدیم کم، یعنی ۱/۵، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و پیوند اصلی با پیوندهای با طول موج پایین مشخص می‌شود، که در شکل ۸ قابل مشاهده است. با افزایش نسبت متاکائولن به سرباره مقاومت فشاری افزایش داشت. که با توجه به ترکیبات شیمیایی متاکائولن که دارای نسبت Al و Si کمتری نسبت به سرباره هست، می‌توان این کاهش مقاومت را توجیه کرد.

مدل نهایی برای مقاومت فشاری پس از ۳ روز:

$$Y_1 = 8.85 - 2.93A - 0.69C + 0.79AC + 0.88BC - 1.29B^2 - 0.41C^2 \quad (1)$$

مدل نهایی برای مقاومت فشاری پس از ۷ روز:

$$Y_2 = 9.7 - 3.28A - 0.39B - 0.74C - 0.55D + 0.92AC + 0.83BC - 1.24B^2 + 0.27C^2 \quad (2)$$

مدل نهایی برای مقاومت فشاری پس از ۲۸ روز:

$$Y_3 = 11.47 - 3.86A - 0.17B - 0.95 + 1.48AC - 1.08B^2 + 0.44C^2 \quad (3)$$

### ۳-۱-۱- نتایج مقاومت فشاری ۳ روزه

طبق جدول ۴، مقدار احتمال P برای مدل سطح پاسخ مقاومت فشاری پس از ۳ روز کمتر از ۰/۰۵ است و بیانگر معنادار بودن این مدل است. در همین راستا، با توجه به رابطه ۱ هر یک از متغیرها به‌طور جداگانه بر روی مقاومت فشاری تأثیر مشخصی دارند، که با توجه به مقدار F تأثیر هر کدام را می‌توان مشخص کرد. همان‌طور که از این مدل می‌توان نتیجه گرفت، کاهش (علامت منفی بر اساس ماهیت پاسخ می‌تواند نشان کاهش باشد). نسبت متاکائولن

جدول ۴- آنالیز واریانس برای مقاومت فشاری پس از ۳ روز

| منبع تغییرات   | مجموع مربعات | درجه آزادی | میانگین مربعات | مقدار F | P        | تفاوت |
|----------------|--------------|------------|----------------|---------|----------|-------|
| مدل            | ۵۷۰/۹۳       | ۱۴         | ۴۰/۷۸          | ۴۱/۲۳   | < ۰/۰۰۰۱ | **    |
| A              | ۴۱۱/۷۲       | ۱          | ۴۱۱/۷۲         | ۴۱۶/۳۰  | < ۰/۰۰۰۱ | **    |
| C              | ۲۲/۷۴        | ۱          | ۲۲/۷۴          | ۲۳      | < ۰/۰۰۰۱ | **    |
| AC             | ۲۰/۱۳        | ۱          | ۲۰/۱۳          | ۲۰/۳۵   | < ۰/۰۰۰۱ | **    |
| BC             | ۲۴/۶۸        | ۱          | ۲۴/۶۸          | ۲۴/۹۵   | < ۰/۰۰۰۱ | **    |
| B <sup>2</sup> | ۷۱/۲۵        | ۱          | ۷۱/۲۵          | ۷۲/۰۵   | < ۰/۰۰۰۱ | **    |
| C <sup>2</sup> | ۷/۱          | ۱          | ۷/۱            | ۷/۱۸    | ۰/۰۱۰۷   | *     |
| باقیمانده      | ۳۸/۵۷        | ۳۹         | ۰/۹۸           |         |          |       |
| عدم برازش      | ۱۱/۴۹        | ۱۰         | ۱/۱۵           | ۱/۲۳    | ۰/۳۱۳۹   | Ns    |
| خطای خالص      | ۲۷/۰۸        | ۲۹         | ۰/۹۳           |         |          |       |

ضریب همبستگی  $(R^2) = ۰/۹۳۷$       ضریب همبستگی تصحیح شده  $(R^2) = ۰/۹۱۴$

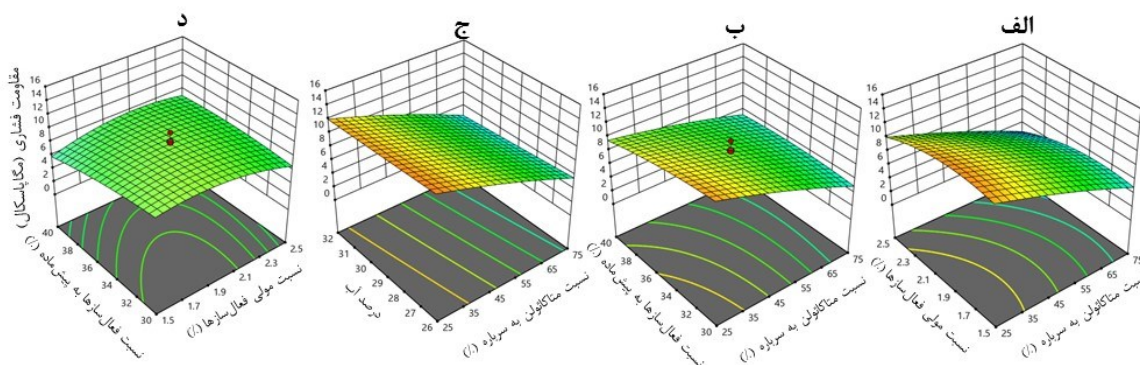
انحراف معیار = ۰/۹۹      ضریب تغییرات  $(CV\%) = ۱۴/۱۱$

\*\* معنی‌دار در سطح ۱ درصد، \* معنی‌دار در سطح ۵ درصد، ns عدم تفاوت معنی‌دار

شکل ۱، اثر متغیرهای مورد مطالعه بر مقاومت فشاری پس از ۳ روز می‌یابد و با افزایش نسبت مولار سیلیکات‌سدیم به هیدروکسیدسدیم مقاومت تا سطح ۲ مولار زیاد می‌شود و بعد از آنها مقاومت‌ها کاهش

خواهد یافت با افزایش مولار سیلیکات سدیم جذب آب و در نتیجه تخلخل افزایش یافته که باعث کاهش مقاومت فشاری خواهد می‌شود. براساس نتایج تجربی ارایه ارایه شده در جدول ۴ بیشترین میزان مقاومت فشاری ۱۴ مگاپاسکال مربوط به نمونه‌های با نسبت متاکائولن به سرباره (A) ۲۵ درصد، و میزان ۲۶ درصد آب

(D) بود، در حالی که نمونه‌های با ۱۰۰ درصد متاکائولن، ۱/۵ درصد نسبت مولار سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم و ۳۰ درصد فعال‌ساز دارای کمترین مقاومت فشاری (۱/۴۲ مگاپاسکال) پس از ۳ روز بودند. همانطور که در شکل ۱ (الف، ب و ج) مشاهده شد، با افزایش نسبت متاکائولن به سرباره مقاومت فشاری کاهش یافت.



شکل ۱- اثر متغیرهای مختلف بر مقاومت فشاری پس از ۳ روز

یک از متغیرها به‌طور جداگانه بر روی مقاومت فشاری (۷ روزه) تأثیر مشخصی دارند. همان‌طور که از مدل ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت، هر چهار متغیر مورد بررسی تأثیر معنی‌داری بر مقاومت فشاری ۷ روزه داشتند. برای این بازه زمانی نیز نسبت متاکائولن به سرباره با توجه به مقدار F در جدول (۵) بیشترین تأثیر را بر مقاومت فشاری داشت.

### ۳-۱-۲- نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه

مطابق جدول ۵، مقدار احتمال p برای مدل سطح پاسخ مقاومت فشاری پس از ۷ روز کمتر از ۰/۰۵ است و بیانگر معنادار بودن این مدل است. همچنین مقدار ضریب همبستگی ( $R^2: 0/95$ ) بالا بوده که نشان‌دهنده مناسب بودن مدل است. در همین راستا، با توجه به رابطه (۲) هر

جدول ۵- آنالیز واریانس برای مقاومت فشاری پس از ۷ روز

| منبع تغییرات   | مجموع مربعات | درجه آزادی | میانگین مربعات | مقدار F | P        | تفاوت |
|----------------|--------------|------------|----------------|---------|----------|-------|
| مدل            | ۷۱۳/۵۸       | ۱۴         | ۵۰/۹۷          | ۵۳/۶۹   | < ۰/۰۰۰۱ | **    |
| A              | ۵۱۵/۱۶       | ۱          | ۵۱۵/۱۶         | ۵۴۲/۶۳  | < ۰/۰۰۰۱ | **    |
| B              | ۷/۴۸         | ۱          | ۷/۴۸           | ۷/۸۸    | ۰/۰۰۷۸   | **    |
| C              | ۲۶/۵۷        | ۱          | ۲۶/۵۷          | ۲۷/۹۸   | < ۰/۰۰۰۱ | **    |
| D              | ۱۴/۴۴        | ۱          | ۱۴/۴۴          | ۱۵/۲۱   | ۰/۰۰۰۴   | **    |
| AC             | ۲۷/۱         | ۱          | ۲۷/۲۱          | ۲۸/۶۶   | < ۰/۰۰۰۱ | **    |
| BC             | ۲۲           | ۱          | ۲۲             | ۲۳/۱۷   | < ۰/۰۰۰۱ | **    |
| B <sup>2</sup> | ۶۶/۰۵        | ۱          | ۶۶/۰۵          | ۶۹/۵۷   | < ۰/۰۰۰۱ | **    |
| باقیمانده      | ۳۷/۰۳        | ۳۹         | ۰/۹۵           |         |          |       |
| عدم برازش      | ۱۵/۵۲        | ۱۰         | ۱/۵۵           | ۲/۰۹    | ۰/۰۵۹۰   | ns    |
| خطای خالص      | ۲۱/۵۰        | ۲۹         | ۰/۷۴           |         |          |       |

ضریب همبستگی ( $R^2 = 0/95$ )

ضریب همبستگی ( $R^2 = 0/93$ )

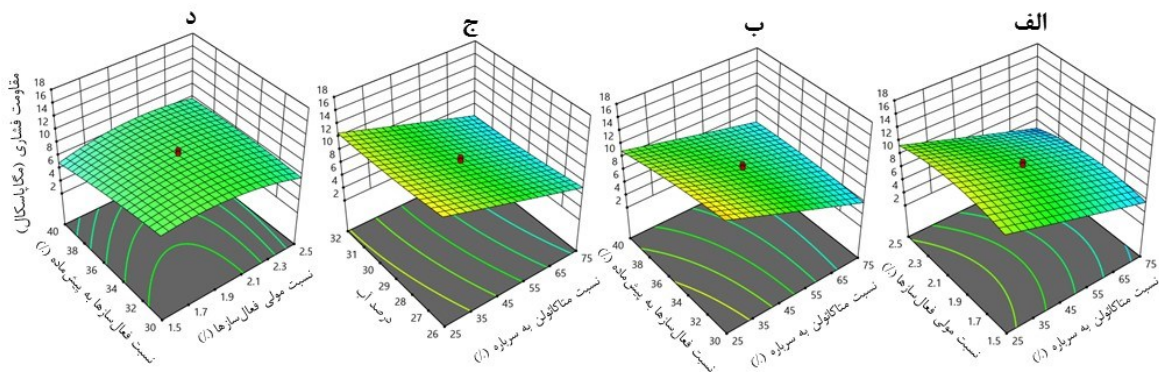
ضریب تغییرات ( $CV\% = 11/33$ )

انحراف معیار = ۰/۹۷

\*\* معنی‌دار در سطح ۱ درصد، ns عدم تفاوت معنی‌دار

شکل ۲- الف اثر نسبت متاکائولن به سرباره (A) را به متغیر نسبت مولار سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم (B) نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، با افزایش نسبت متاکائولن به سرباره مقاومت کاهش پیدا می‌کند و با افزایش نسبت مولار مقاومت تا حدودی افزایش می‌یابد. همان‌گونه که مشخص است در درصدهای کمتر مقدار آب، مقاومت‌های کمتری در نمونه‌ها مشاهده شد که علت آن را می‌توان کمبود آب برای تکمیل واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون و همچنین اختلاط ناقص مواد زمینه عنوان کرد. پس از ۷ روز، بیشترین میزان مقاومت فشاری (۱۶/۵۷)

مربوط به نمونه‌های با سرباره ۱۰۰ درصد و میزان ۲۹ درصد آب بود، در حالی که نمونه‌های با نسبت متاکائولن به سرباره ۷۵ به ۲۵ درصد کمترین مقاومت فشاری (۳/۲۱) را نشان داد. با توجه به شکل ج که برهمکنش متقابل درصد آب و نسبت متاکائولن به سرباره را نشان می‌دهد با افزایش درصد آب مقاومت افزایش یافت است، آب موجود در محلول قلیایی هیدروکسید سدیم در مرحله انحلال ذرات آلومینوسیلیکاتی نقش مهمی داشته و در ایجاد شبکه سه بعدی ژئوپلیمر در فرایند ژئوپلیمریزاسیون که باعث تراکم بیشتر ژئوپلیمر و افزایش مقاومت فشاری موثر واقع می‌شود.



شکل ۲- اثر متغیرهای مختلف بر مقاومت فشاری پس از ۷ روز

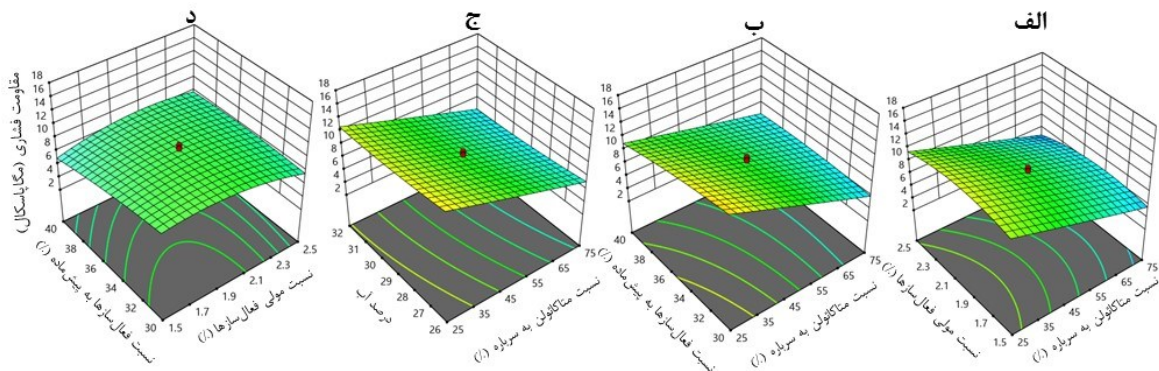
۳۲ درصد آب بود. در حالی که، نمونه‌ها با ۱۰۰ درصد سرباره بیشترین مقاومت فشاری (۲۲ مگاپاسکال) را داشتند. در این ارتباط می‌توان گفت که واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون تا حدود ۲۱ روز کامل می‌گردد و بعد از آن تغییر چندانی در مقاومت‌های فشاری ایجاد نمی‌شود که این می‌تواند یکی از دلایل یکسان بودن نمونه‌های دارای کمترین و بیشترین مقاومت برای تیمارهای زمانی ۷ و ۲۸ روزه باشد. همانطور که در شکل ۲ (ب و د) مشخص است با افزایش نسبت فعال‌ساز تا مقدار متوسط آن ۲/۵ مقاومت فشاری افزایش و بعد از آن کاهش یافت.

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مدل رگرسیونی مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ۷ روز معنی‌دار است. مقدار  $R^2: 0/95$  بدست آمد که نشان‌دهنده مناسب بودن مدل ارائه شده است.

### ۳-۱-۳- نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه

شکل ۳، اثر متغیرهای مورد استفاده بر مقاومت فشاری پس از ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. کمترین مقدار مقاومت فشاری (۴/۰۵ مگاپاسکال) مربوط به نمونه‌ها با نسبت متاکائولن به سرباره ۷۵ درصد و میزان

۲۸ روزه، بیشترین مقاومت فشاری (۱۶/۵۷ مگاپاسکال) را نشان می‌دهد. با افزایش نسبت متاکائولن به سرباره ۷۵ درصد و میزان



شکل ۳- اثر متغیرهای مختلف بر مقاومت فشاری پس از ۲۸ روز

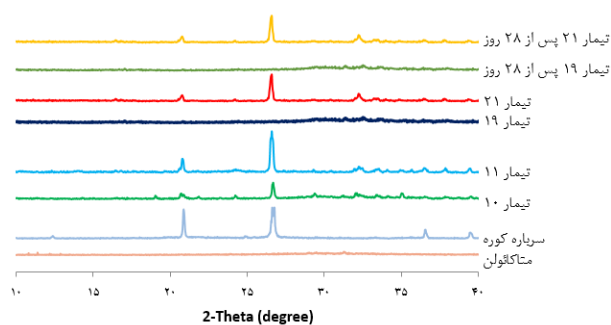


جدول ۶- آنالیز واریانس برای مقاومت فشاری پس از ۲۸ روز

| منبع تغییرات   | مجموع مربعات | درجه آزادی | میانگین مربعات | مقدار F | P        | تفاوت |
|----------------|--------------|------------|----------------|---------|----------|-------|
| مدل            | ۱۰۱۷/۹۱      | ۱۴         | ۷۲/۷۱          | ۲۹/۳۰   | < ۰/۰۰۰۱ | **    |
| A              | ۷۱۵/۵۷       | ۱          | ۷۱۵/۵۷         | ۲۸۸/۳۶  | < ۰/۰۰۰۱ | **    |
| C              | ۳۷/۱۲        | ۱          | ۳۷/۱۲          | ۱۴/۹۶   | ۰/۰۰۰۴   | **    |
| D              | ۴۳           | ۱          | ۴۳             | ۱۷/۳۳   | ۰/۰۰۰۲   | **    |
| AC             | ۷۰/۰۶        | ۱          | ۷۰/۰۶          | ۲۸/۲۳   | < ۰/۰۰۰۱ | **    |
| BC             | ۳۱/۱۵        | ۱          | ۳۱/۱۵          | ۱۲/۵۵   | ۰/۰۰۱    | **    |
| B <sup>2</sup> | ۵۰/۱۷        | ۱          | ۵۰/۱۷          | ۲۰/۲۲   | < ۰/۰۰۰۱ | **    |
| e <sup>2</sup> | ۸۶/۲۲        | ۱          | ۸۶/۲۲          | ۳۶/۳۱   | ۰/۰۰۰۱   | **    |
| باقیمانده      | ۹۶/۷۸        | ۳۹         | ۲/۴۸           |         |          |       |
| عدم برازش      | ۴۱/۰۱        | ۱۰         | ۴/۱۰           | ۲/۱۳    | ۰/۰۵۴۲   | ns    |
| خطای خالص      | ۵۵/۷۷        | ۲۹         | ۱/۹۲           |         |          |       |

ضریب همبستگی  $(R^2) = ۰/۹۱۳$   
 ضریب همبستگی تصحیح شده  $(R^2) = ۰/۸۸۲$   
 انحراف معیار = ۱/۵۸  
 ضریب تغییرات  $(CV\%) = ۱۳/۹۴$

\*\* معنی‌دار در سطح ۱ درصد، ns عدم تفاوت معنی‌دار



شکل ۴- الگوی XRD نمونه‌های بهینه (ترکیب شرایط تیمار- هادر جدول ۴ قابل مشاهده است)

### ۳-۳- طیف‌سنجی FT-IR

نتایج الگوهای FT-IR برای ژئوپلیمرهای با بیشترین و کمترین مقاومت فشاری در این بخش ارائه می‌گردد که برای دوره سه روزه شامل تیمارهای ۱۰ و ۱۱، برای دوره‌های زمانی ۷ و ۲۸ روز تیمار-های ۱۹ و ۲۱ بودند که در شکل ۵ ارائه شده است. مطالعات FT-IR نشان داد که محصولات واکنش آلومینوسیلیکات عمدتاً فازهای آمورف هستند، یعنی مواد ژل‌مانندی که ناشی از واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون می‌باشند. همچنین نتایج این طیف نشان داد فرآیند ژئوپلیمریزاسیون با توجه

### ۳-۲- پراش پرتو اشعه ایکس (XRD)

تبدیل کائولن به متاکائولن توسط الگوی پرتو پراش ایکس (XRD) بررسی شد. نتایج XRD بیانگر وجود کوارتز در متاکائولن است. در این الگو، بیشترین فازهای موجود مربوط به کائولینیت و کوارتز بوده. ساختار بلوری سرباره تقریباً آمورف است زیرا قله‌های XRD به سختی شناسایی می‌شوند.

باند زاویه‌ای بین ۲۵ و ۳۵ درجه  $(2\theta)$  را می‌توان به بخش قابل توجهی از ساختار آمورف (بلوری) نسبت داد. در این ماده معدنی، شواهدی از کوارتز، کلسیت و اکسید آهن وجود دارد. همچنین آنالیز XRD نمونه‌های ژئوپلیمر نشان داد که تشکیل مراحل بلورینگی جدید در نمونه‌های ناشی از واکنش ژئوپلیمریزاسیون ناچیز هستند.

وجود فازهای بلورین ناخالص در الگوی پراش این نمونه‌ها به وضوح دیده می‌شود. وجود این فازهای بلورین و پیک‌های موجود در الگوی آن‌ها نشان می‌دهد که این فازها باقی‌مانده‌اند و با ایجاد گسستگی در شبکه ژئوپلیمری می‌توانند باعث کاهش مقاومت آنها شوند. همانطور که مشاهده می‌شود الگوی پراش این نمونه‌ها نیز تقریباً یکسان است (شکل ۴).

پارامترهای مورد نظر نسبت متاکائولن به سرباره (A)، مولار سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم (B)، نسبت فعال ساز به پیش ماده (C) و درصد آب (D) به عنوان متغیرهای مستقل همچنین تأثیر پارامترهای شیمیایی و فعل و انفعالات آنها بر مقاومت فشاری مورد بررسی قرار گرفت. نسبت متاکائولن به سرباره بیشترین تأثیر را با توجه به مقدار F به دست آمده در جداول آنالیز واریانس بر مقاومت فشاری ژئوپلیمرها داشته است، و همچنین نسبت مولار سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم در روزهای اولیه ساخت (یعنی ۳ و ۷ روز پخت) یک پارامتر مهم در مقاومت فشاری است. نتایج نشان داد، که در این دوره، افزایش نسبت مولار سیلیکات-سدیم به هیدروکسید سدیم باعث کاهش پیوند بین ذره‌های مواد در مرحله پلی تراکم به دلیل کاهش انتشار گونه‌های سیلیکات در ژل آلومینوسیلیکات مقاومت را کاهش می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که کمترین و بیشترین مقاومت برای دوره‌های زمانی ۷ و ۲۸ روزه یکسان بوده است که علت آن را تکمیل شدن واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون تا حدود ۲۱ روز می‌توان عنوان کرد.

طیف‌سنجی FTIR نشان داد در بازده‌های زمانی بالاتر پیوند کششی Si-O-T با افزایش نسبت مولار Si/Na می‌تواند باعث کاهش انحلال پیش‌سازهای جامد شود، که باعث می‌شود پیوند-های کشش به عدد موج‌های بیشتر منتقل شود. بر اساس نتایج تجزیه واریانس، مدل‌های RSM مشتق شده از لحاظ آماری کافی هستند و می‌توان از آنها برای پیش‌بینی مقاومت فشاری نزدیک به نتایج تجربی در بازه اطمینان ۹۱ درصد به بالا استفاده کرد. همچنین، ضرایب همبستگی چندگانه ( $R^2$  پیش‌بینی شده) مدل‌های RSM به دست آمده نشان‌دهنده یک خطای آزمایشی کوچک و برازش مناسب مدل‌های پیش‌بینی شده با داده‌های تجربی است.

### سپاسگزاری

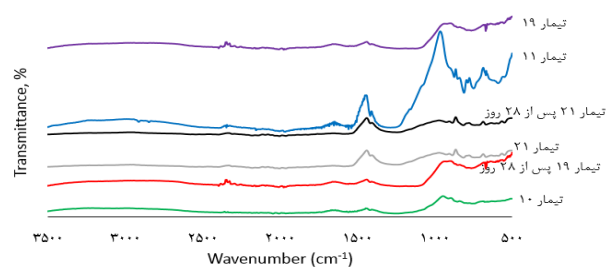
مقاله حاضر بخشی از نتایج طرح تحقیقاتی مصوب صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور به شماره ۹۸۰۰۲۵۴۵ می‌باشد که بدین وسیله از این مرکز و همچنین از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه گرگان تشکر و قدردانی می‌گردد.

### ۵- مراجع

[1] Shadab, M., Abdullah, M., Amir, M., Arham, M., & Khan, M. A. Green Concrete or Eco-Friendly

به مراحل سخت‌شده خمیر ژئوپلیمر در روزهای اول ساخت آغاز شده است، اگرچه این روند کاملاً واضح نیست؛ اما با توجه به نمودار و گذشت زمان، اوج پیوند کششی نامتقارن Si-O-T را می‌توان بیانگر تشکیل یک شبکه آلومینوسیلیکات سه بعدی دانست. در همین ارتباط، پیوندهای با باند  $975\text{ cm}^{-1}$  و  $486\text{ cm}^{-1}$  پیوندهای کششی Si-O-Si اختصاص داده شده است [۲۴]. باندهای نزدیک به طول موج‌های  $640\text{ cm}^{-1}$  و  $752\text{ cm}^{-1}$  می‌تواند به دلیل ارتعاشات Al-O در ارتعاشات جامد بدون واکنش و ارتعاشات  $\text{AlO}_3$  عنوان کرد. با مقایسه شدت Si-O-T اصلی در  $975\text{ cm}^{-1}$  و شدت پیوند  $935\text{ cm}^{-1}$ - $940\text{ cm}^{-1}$  که ناشی از ارتعاشات Si-O-Si و Si-O-Al در حال رشد ژل ژئوپلیمر است، می‌توان اطلاعات مفیدی در مورد میزان واکنش‌ها در حال توسعه در مراحل تشکیل ژئوپلیمر به دست آورد [۲۴].

به طور کلی، نتایج FT-IR نشان داد که ساختار ژئوپلیمر در طول زمان شکل می‌گیرد، و با گذشت زمان تعداد موج‌های کمتر می‌شود. طیف FT-IR پیوندهای متفاوت در طول موج‌های مختلف را نشان می‌دهد. مشخص نبودن کامل پیوندها، نشان‌دهنده بی‌نظمی عمومی در شبکه سیلیکات به دلیل عدم توزیع یکنواخت و گسترده واحدهای SiQ<sup>n</sup> در شبکه ساختاری ژئوپلیمر است. از طرفی می‌توان بیان کرد که پیوندهای کششی Si-O-T در طول موج‌های پایین‌تر در نسبت‌های مولار بالا سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم تشکیل می‌شوند که در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل ۵- الگوی FTIR نمونه‌های بهینه

### ۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، یک آزمایش بر پایه طرح مرکب مرکزی (CCD) از روش سطح پاسخ (RSM) برای ارائه مدل پیش‌بینی مقاومت فشاری نمونه‌های ژئوپلیمر پس از ۳، ۷ و ۲۸ روز تحت شرایط پخت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۵۰ درصد و

- [13] Nawaz, M., Heitor, A., & Sivakumar, M. (2020). Geopolymers in construction-recent developments. *Construction and Building Materials*. 2020; 260, 120472.
- [14] Assi, L. N., Deaver, E. E., & Ziehl, P. Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*. 2018; 167: 372-380.
- [15] Najafi Kani, E., Allahverdi, A., & Provis, J. L. (2012). Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan. *Cement and Concrete Composites*. 2012; 34(1): 25-33.
- [16] Błaszczyszki, T., Król, M. Durability of Green-Concretes, *Proceedings of the International Conference AMCM, Wrocław, Poland, 2014*; 530-540.
- [17] Müller, H. S., Breiner, R., Moffatt, J. S., & Haist, M. (2014). Design and properties of sustainable concrete. *Procedia Engineering*. 2014; 95: 290-304.
- [18] Kumar, H., Prasad, R., Srivastava, A., Vashista, M., Khan, M.Z. Utilisation of Industrial waste (Fly ash) in synthesis of copperbased surface composite through friction stir processing route for wear applications. *J. Cleaner production*. 2018; 19 (20): 460-468.
- [19] Ferdous, W., Manalo, A., Khennane, A., & Kayali, O. Geopolymer concrete-filled pultruded composite beams—concrete mix design and application. *Cement and concrete composites*. 2015; 58: 1-13.
- [20] Lloyd, N., & Rangan, V. Geopolymer concrete with fly ash. In *Proceedings of the Second International Conference on sustainable construction Materials and Technologies* (pp. 1493-1504). UWM Center for By-Products Utilization. 2010.
- [21] Imbabi, Mohammed S., Collette Carrigan, and Sean McKenna. Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2012; 1: 194-216.
- [22] Mirakhorloo, F., & Najafi Kani, E. (2019). Investigation and Prediction of Physical and Mechanical Properties of Gypsum/Rice Straw Composite Using ANFIS Model. *Journal of Modeling in Engineering*, 17(58), 267-278.
- [23] Hardjito, D., Cheak, C. C., & Ing, C. H. L. (2008). Strength and setting times of low calcium fly ash-based geopolymer mortar. *Modern applied science*. 2008; 2(4): 3-11.
- [24] Hajimohammadi, A., Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. One-part geopolymer mixes from Concrete. *International Journal for Advance Research and Development*. 2017; 2(3). Paper ID: V2I3-1146.
- [2] Al-Hamrani, A., Kucukvar, M., Alnahhal, W., Mahdi, E., & Onat, N.C. Green concrete for a circular economy: A review on sustainability, durability, and structural properties. *Materials*. 2021; 14(2), 351. DOI: 10.3390/ma14020351.
- [3] Rehman, M. U., Rashid, K., Zafar, I., Alqahtani, F. K., & Khan, M. I. Formulation and characterization of geopolymer and conventional lightweight green concrete by incorporating synthetic lightweight aggregate. *Journal of Building Engineering*. 2020; 31, 101363.
- [4] Sivakrishna, A., Adesina, A., Awoyera, P. O., & Kumar, K. R. Green concrete: A review of recent developments. *Materials Today: Proceedings*. 2020; 27: 54-58.
- [5] Amran, M., Huang, S. S., Debbarma, S., & Rashid, R. S. Fire resistance of geopolymer concrete: A critical review. *Construction and Building Materials*. 2022; 324, 126722.
- [6] Katzer, J., & Kobaka, J. Harnessing waste fine aggregate for sustainable production of concrete precast elements. *Annual Set the Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska)*. 2010;12: 33-45.
- [7] Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, 2015; 85: 78-90.
- [8] Silva, G., Kim, S., Aguilar, R., & Nakamatsu, J. (2020). Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers—A review of potential eco-friendly applications to the construction industry. *Sustainable Materials and Technologies*. 2020; 23, e00132.
- [9] Madhoushi, M. *Green Building Bio-Materials* (in Persian). Iranian Students Booking Agency. 2016.
- [10] Nosrati, A., Zandi, Y., Shariati, M., Khademi, K., Aliabad, M. D., Marto, A., ... & Khorami, M. Portland cement structure and its major oxides and fineness. *Smart structures and systems*. 2018; 22(4): 425-432.
- [11] Tafheem, Z., Khusru, S., & Nasrin, S. Environmental impact of green concrete in practice. In *International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy*. 2011; (Vol. 22, p. 24).
- [12] Ayeni, O., Onwualu, A. P., & Boakye, E. Characterization and mechanical performance of metakaolin-based geopolymer for sustainable building applications. *Construction and Building Materials*. 2021; 272, 121938.

geothermal silica and sodium aluminate. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2008; 47(23): 9396-9405.

## **Presenting a prediction model for compressive strength of geopolymer made of metakaolin and slag using the response surface method (RSM)**

**Vajiheh Sadeghi Panah**

**Ph.D. student of Wood Composite Products, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.**

**Mehrab Madhoshi \***

**Associate Professor, Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.**

**Taghi Tabarsa**

**Professor, Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.**

**Morteza Nazerian**

**Associate Professor, Department of Biological Systems Engineering, Shahid Beheshti University, Zirab Campus, Mazandaran, Iran.**

**Ebrahim Najafi Kani**

**Associate Professor, Faculty of Chemical, Oil and Gas Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.**

**Zahra Abdullahnejad**

**Assistant, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Connecticut, Storrs, United States of America.**

### **Abstract**

The objective of this study was to investigate the compressive strength of metakaolin-based geopolymers and slag activated with alkaline activators during periods of 3, 7, and 28 days using the response surface method (RSM). X-ray diffraction (XRD) analysis and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) was performed to investigate the effect of each of the independent variables on the compressive strength of geopolymer samples. Geopolymer samples were made in dimensions of 20×20×20 mm, then they were kept at room temperature for periods of 3, 7 and 28 days and were subjected to mechanical evaluation at the end. The results showed that using the RSM method can provide an appropriate estimation of the response so that the  $R^2$  value greater than 90% was obtained for each response. The maximum compressive strength of geopolymer samples was measured as 10 MPa for three days and 16.57 and 22 MPa for 7 and 28 days, respectively. By increasing the molar ratio of sodium silicate to sodium hydroxide to the level of 2.5 and decreasing the ratio of metakaolin to slag, the compressive strength of geopolymer samples increased. The FT-IR results showed that when geopolymers are formed, the structure changes compared to the raw materials due to the formation of monomers and compaction. Also, the results of the XRD analysis showed the presence of a peak-like state due to the formation of an amorphous product.

**Keywords:** Geopolymer, response surface method, metakaolin, slag, compressive strength.

---

\* Corresponding Author: madhoushi@gau.ac.ir

