



## Feasibility of Stabilization of Granular Soil with Geopolymer and Nano Polymer - Laboratory and Microstructural Study

Mojtaba Jafari Kermanipour<sup>1\*</sup>, Mohammad Hossain Bagheripour<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Department of Civil Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran.

### ARTICLE INFO

#### Article Type:

Original Research

**Received:** 19.08.2024

**Revised:** 21.09.2024

**Accepted:** 20.10.2024

#### Keyword:

Soil stabilization  
Geopolymer  
Nanoparticles  
Glass Powder  
Ground Granulated Blast-furnace Slag

#### \*Corresponding Author:

Mojtaba Jafari Kermanipour

Email: [M.jafari@eng.uk.ac.ir](mailto:M.jafari@eng.uk.ac.ir)

### ABSTRACT

This research delves into the complex dynamics of human-artificial intelligence interaction, a field that has been growing exponentially in recent years. This study is mixed-methods (quantitative-qualitative) research in the field of human interaction and artificial intelligence. It includes a methodical review of articles from the past five years in the Web of Science database to identify and understand the evolving dynamics in this field. The current research employed bibliometric analysis with a co-occurrence technique. After examining related theories, a conceptual model corresponding to co-occurrence clusters is presented. The article provides an integrated analysis that identifies artificial intelligence and its interaction with humans, and its relationship to perception, technology acceptance, behavior, and satisfaction. It offers an overview of human-artificial intelligence interaction studies' current state and prospects. The findings of this study indicated a significant shift towards human-centered artificial intelligence, emphasizing the importance of cognitive and social dimensions in the design and implementation of artificial intelligence systems. These insights are invaluable to researchers and designers of enterprise systems who aim to align AI advancements with human-centered approaches and ensure that AI advancements are in harmony with human needs and values.



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

In order to investigate the impact of nanoparticles on the mechanical behavior and strength of both stabilized and non-stabilized silty sand, sixteen groups of soil sample, samples were prepared with varying percentages of Nano PAS and Nano PCS content (0.0%, 0.5%, 1%, 1.5% and 2% by weight of soil), GGBS (18%, 18.5%, 19%, 19.5% and 20% by weight of soil) as well as RGP (18%, 18.5%, 19%, 19.5% and 20% by weight of soil). The samples that were cured at 35°C and stored in an oven for seven days were used for the unconfined compression testing.

### Methodology

In this investigation, specimens of geopolymer concrete (GPC) and cylindrical soil (natural soil) with varying nanoparticle contents and types were prepared and cured at 35°C. The names, a summary of the mixing plan, and the quantity of developed samples for each category are displayed in Table 1.

**Table 1. The composition of the materials and mixtures used in this study (%).**

samples	A1G	A2G	A3G	A4G	C1G	C2G	C3G	C4G	A1R	A2R	A3R	A4R	C1R	C2R	C3R	C4R
GGBS	19.5	19	18.5	18	19.5	19	18.5	18	0	0	0	0	0	0	0	0
RGP	0	0	0	0	0	0	0	0	19.5	19	18.5	18	19.5	19	18.5	18
PAS	0.5	1	1.5	2	0	0	0	0	0.5	1	1.5	2	0	0	0	0
PCS	0	0	0	0	0.5	1	1.5	2	0	0	0	0	0.5	1	1.5	2

### Sample preparation

GPC was mixed appropriately with silty sand to prepare the samples. By combining PCS and PAS with an alkaline activator at a 7 molar concentration, nano-geopolymer concrete was created. For five minutes, dry mix the necessary quantity of dried soil and precursor materials to achieve uniform mixing. A 37 mm diameter and 75 mm height cylindrical mold filled with the fresh mixture. After dividing the resultant mixture into three equal portions based on weight, the undercompaction method was used to cast the mixture in three layers without reduction.

### Testing

For every mixing group, three duplicate specimens were prepared to guarantee the accuracy of the test results. The samples were removed from the plastic bags and ready for testing after seven days of curing. Following curing, the samples were subjected to uniaxial compression tests at a loading rate of 1 mm/min. For every condition, three tests were performed, and the average values were computed and reported.

### Results and discussion

The test results demonstrated that the unconfined compressive strength (UCS) and failure strain increased with the addition of Nano PAS in GGBS-based soil mixtures. However, when compared to samples that were not stabilized, the increasing effects were noticeably more pronounced in stabilized samples. Furthermore, at an ideal percentage of the Nano content of 2%, the samples' maximum unconfined compressive strength was achieved. The findings showed that the presence of Nano PCS in specimens reduced sample strength, increased ductility, and resulted in a loss of post-peak strength. scanning electron microscopy (SEM), indicated the influence of

Nanoparticles to enhance the GPC structure. The findings demonstrated an adverse effect of Nano PCS on unconfined compressive strength and durability of GGBS/RGP based samples.

## Conclusion

The performance of Nano-Geopolymer concrete was studied by focusing on the effects of various Nano contents and types on a number of geotechnical properties including the compressive strength, stress-strain behavior, failure strain, and durability. According to the Scanning Electron Microscopy (SEM) images, the addition of geopolymer and Nano particles reduced the voids of soil, and the specimen was characterized by a rather well-structured matrix consequently improving the geotechnical properties of the soil. The following main conclusions were drawn:

- The ideal percentage of GGBS addition was twenty percent, and the ideal concentration of sodium hydroxide alkaline activator was seven milligrams. To prepare all of the samples, a 20 percent dry additive in a 7M alkali activator was used. All stabilized samples' uniaxial compressive strengths were found to be stronger than those of unstabilized soil, on average.
- In general, it was noted that all stabilized samples' uniaxial compressive strengths were stronger than those of unstabilized soil.
- According to studies on the use of this nanoparticle in conjunction with RGP contents, stabilized soil's strength increased up to two times when nano-aluminum silicate was added up to 2 percent. On the other hand, their strength was half that of the sample that contained only RGP.
- The strength of the samples increased up to two times compared to the GGBS sample and up to ten times compared to the natural sand, indicating a very positive effect of combining nano-aluminum silicate with GGBS.
- The performance of nano calcium silicate in combination with RGP contents had a negative effect as the strength of the samples was halved compared to the RGP control sample. However, compared to the NS sample, the strength was almost doubled. When these nanoparticles were combined with GGBS, they did not make a considerable change in the strength compared to the GGBS control samples.
- It was discovered, somewhat surprisingly, that the unconfined compressive strength of GGBS-based samples had increased following a 48-hour saturation period. That was because, after seven days of curing, chemical reactions continued, increasing humidity and contributing to strength growth.
- The strength of the samples was halved when compared to the RGP sample with non-PCS components, indicating a negative effect of Nano PCS in combination with RGP components. However, the strength was nearly twice as high as the non-stabilized sample. In comparison to the GGBS samples with non-PCS, these nanoparticles did not significantly alter the strength when mixed with GGBS.

The strength of the samples was halved when compared to the RGP sample with non-PCS components, indicating a negative effect of Nano PCS in combination with RGP components. However, the strength was nearly twice as high as the non-stabilized sample. In comparison to the GGBS samples with non-PCS, these nanoparticles did not significantly alter the strength when mixed with GGBS.



## امکان سنجی تثبیت خاک دانه‌ای با ژئوپلیمر و نانوپلیمر - مطالعه آزمایشگاهی و ریزساختاری

مجتبی جعفری کرمانی پور<sup>۱\*</sup>، محمد حسین باقری پور<sup>۲</sup>

۱-۲- بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹

### کلید واژگان:

تثبیت خاک

ژئوپلیمر

نانو ذرات

پودر شیشه

سرباره فولاد

استفاده از تثبیت کننده‌های سنتی مانند آهک و سیمان علاوه بر آلودگی محیط زیستی، نیازمند صرف انرژی و منابع طبیعی فراوان جهت تولید می‌باشند. از این رو در چند دهه اخیر محققین پژوهش های فراوانی را جهت معرفی مصالح نوین سازگار با محیط زیست انجام دادند که ژئوپلیمرها یکی از این مصالح می‌باشند. اما تاکنون همه جنبه‌های این چسباننده‌های جدید جهت بهره‌برداری در پروژه‌های عمرانی مورد بررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق استفاده از دو نانو ذره پلی سیلیکات آلومینیوم و پلی سیلیکات کلسیم همراه دو باطله صنعتی پودر شیشه و سرباره فولاد برای تثبیت خاک ماسه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا مقدار بهینه ماده افزودنی خشک و غلظت بهینه محلول فعال ساز قلیایی تعیین گردید. سپس رفتار مکانیکی نمونه‌های تثبیت شده برپایه ژئوپلیمر همراه افزودنی نانو توسط آزمایش مقاومت فشاری تک محوری مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش تاثیر عواملی همچون نوع و غلظت فعال ساز قلیایی، نوع و درصد نانو ذرات و تغییر درجه اشباع بر مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. جهت مطالعه ریزساختاری نمونه‌ها از تصاویر میکروسکوپ الکترونی بهره گرفته شد. نتایج پژوهش نشان داد نانوپلی سیلیکات کلسیم و نانو پلی سیلیکات آلومینیوم مقاومت نمونه‌های تثبیت شده بر پایه پودر شیشه را کاهش دادند. همچنین نانو سیلیکات کلسیم تاثیری بر افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده بر پایه سرباره فولاد نداشت. اما نانو سیلیکات آلومینیوم توانست مقاومت نمونه تثبیت شده بر پایه سرباره فولاد را تا دو برابر افزایش دهد و دوام خود را در شرایط اشباع ۱۰۰٪ حفظ کند.

\*نویسنده مسئول: مجتبی جعفری

کرمانی پور

پست الکترونیکی:

[M.jafari@eng.uk.ac.ir](mailto:M.jafari@eng.uk.ac.ir)

## مقدمه

بررسی خواص فیزیکی و مهندسی خاک بستر یکی از موضوعات مهم در حوزه زمین شناسی و مهندسی ژئوتکنیک است [۱]. علاوه بر این، بررسی پتانسیل تغییر خصوصیات زمین شناسی و پارامترهای مقاومتی خاک و اثر آن بر عملکرد و پایداری خاک بسیار مهم هستند [۲]. در همین راستا مطالعاتی برای ارزیابی خصوصیات مهندسی خاکها شامل خصوصیات مکانیکی، فیزیکی، شیمیایی، کانی شناسی و ریزساختاری انجام شده است [۳-۵].

تحلیل ریزساختاری انجام شده توسط یو و همکاران در سال ۲۰۱۷ نشان داد که استفاده از دو نوع افزودنی فرایند تشکیل ژل در خاک را توسعه و خصوصیات مقاومتی خاک را افزایش می دهد [۶]. یوبانپوت و همکاران در سال ۲۰۲۰ با ترکیب سیمان و خاکستر بادی با خاک سیلتی با پلاستیسیته بالا مشاهده کردند بوسیله تشکیل حجم زیادی کلسیم سیلیکات هیدراته در فرایند واکنش پوزولانی خصوصیات ریز ساختاری خاک ارتقا و در نهایت مقاومت آن نیز افزایش می یابد [۷]. مطالعات ریزساختاری توسط وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ نشان داد که ترکیب سیلیس کلونیدی با ماسه و رس منجر به تشکیل یک ماتریس منسجم در ماسه و خوشه بندی ذرات رس می شود [۸].

مصالح دیگری که برای تثبیت خاک استفاده شده است نانو ذرات هستند. از فیزیکدان آمریکایی ریچارد فیمین در سال ۱۹۶۰ نقل قول معروفی منتشر شد که "در پایین اتاقهای زیادی وجود دارد." که این سخن به عملکرد ناشناخته نانوتکنولوژی اشاره می کند [۹]. ذرات با مقیاس نانو از منظر علمی و زیستی محیطی خواص مفیدی دارند که می توانند علاوه بر مقرون به صرفه بودن بهبود دهنده کیفیت محصولات باشند. اما این مزایای برجسته دلیل پیچیدگی و حوزه دانشی چند رشته‌ای آن، تاکنون در مهندسی ژئوتکنیک بطور قابل ملاحظه ای مورد استفاده قرار نگرفته است [۱۰]. به دلیل تحقیقات ناکافی در مقیاس نانو در مهندسی ژئوتکنیک، بسیاری از حقایق همچنان پنهان باقی مانده است، زیرا بسیاری از مصالح خاکی و سنگی معدنی، نانو ذراتی هستند که واکنش شیمیایی آنها در مقیاس نانو رخ می دهد. بنابراین، به راحتی می توان گفت که نانوتکنولوژی پتانسیل زیادی برای استفاده در فرآیند تزریق و تثبیت خاک دارد.

در میان همه نانوذرات، نانوسیلیکات یکی از پرکاربردترین مصالح در میان محققان بوده است. محققان نشان دادند اضافه کردن نانوسیلیکات به خاک مقاومت فشاری خاک را افزایش می دهد [۱۴-۱۱]. کالکان در سال ۲۰۰۹ نشان داد اضافه کردن سیلیکا فوم تا ۲۵٪ وزنی به خاک ریزدانه بطور قابل توجهی تاثیر سیکل های ذوب و یخبندان بر مقاومت فشاری را کاهش می دهد [۱۵].

برخی مطالعات دیگر بر روی بررسی اثر مواد افزودنی بر خواص شیمیایی، پلیمری و یا ترکیب خواص شیمیایی و فیزیکی خاک تثبیت شده تمرکز داشتند [۱۸-۱۶]. نتایج تست‌های مقاومت فشاری گزارش شده توسط دینگ و همکارانش در سال ۲۰۱۸ نشان داد که کرنش های گسیختگی و پسماند در خاک رس تثبیت شده با الیاف پلی پروپیلن بیشتر از نمونه های خاک بکر و تثبیت شده با سیمان بوده است [۱۹].

در این تحقیق، با هدف بهبود مقاومت و دوام خاک دانه‌ای تثبیت شده با دو ژئوپلیمر سرباره فولاد و پودر شیشه از دو نانو پلیمر، پلی سیلیکات آلومینیوم و پلی سیلیکات کلسیم استفاده شد. و برای مقایسه عملکرد آنها یک سری تست های مقاومت فشاری تک محوری انجام شد. در ادامه تغییرات میکروسکوپی و ریزساختاری نمونه های

منتخب بوسیله تست های طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس<sup>۱</sup> تصاویر میکروسکوپ الکترونی<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی این مطالعه مقایسه عملکرد مقاومت فشاری و دوام خاک تثبیت شده با دو ژئوپلیمر و دو نانو پلیمر در شرایط خشک و اشباع می باشد.

---

<sup>۱</sup>Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

<sup>۲</sup>Scanning electron microscope (SEM)

## ۲- مصالح و روش‌ها

### ۱-۲- خاک

خاک مورد مطالعه در این پروژه از کیلومتر ۱ حاشیه اتوبان هفت باغ علوی که از محورهای مواصلاتی اصلی شهر کرمان است برداشته شد. برای طبقه بندی نوع خاک طبق استاندارد ASTM-D422 [20] آزمایش دانه بندی خاک انجام گرفت و خاک ماسه سیلت دار<sup>۱</sup> طبقه بندی شد. در ادامه به منظور مشخص نمودن رطوبت بهینه خاک، با توجه به استاندارد ASTM-D698 [۲۱] آزمایش تراکم استاندارد روی نمونه ای از خاک مورد مطالعه صورت گرفت و رطوبت بهینه در حدود ۱۳٪ و وزن مخصوص خشک آن  $1/68 \text{ gr/cm}^3$  تعیین گردید. شکل ۱، منحنی دانه بندی خاک را نشان می‌دهد.

### ۲-۲- پودر شیشه

در این تحقیق پودر شیشه بازیافتی به عنوان ماده خام اصلی ژئوپلیمر مورد استفاده قرار گرفته است. پودر شیشه بازیافتی<sup>۲</sup> از کارخانه گلس بید فراهان واقع در شهر فراهان استان اراک تهیه شد. پودر شیشه تهیه شده بدلیل وجود ناخالصی ابتدا از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شده و ذرات با اندازه دانه‌های کمتر از ۷۵ میکرون برای ترکیب با خاک جمع آوری گردیده است. دانه بندی پودر شیشه به روش لیزری و منحنی آن در شکل ۱ آورده شده است. ترکیب شیمیایی پودر شیشه بوسیله آزمایش طیف سنج فلوروسانس اشعه ایکس<sup>۳</sup> تعیین گردیده و در جدول ۱ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیش از ۷۰٪ پودر شیشه را سیلیس تشکیل می‌دهد که منبع مناسبی برای تشکیل فرآیند ژئوپلیمراسیون به حساب می‌آید.

### ۲-۳- سرباره فولاد

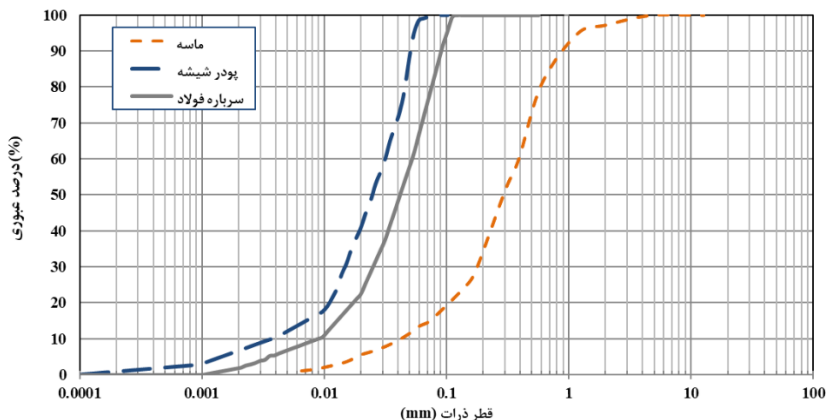
سرباره دانه‌ای کوره بلند فولاد<sup>۴</sup> بعنوان دیگر ماده پایه ژئوپلیمری که از پسماند کارخانه فولاد زرنند واقع در استان کرمان تهیه شده مورد استفاده قرار گرفته است. ترکیبات شیمیایی سرباره فولاد که در جدول ۱ آورده شده، نشان می‌دهد آهک و سیلیس به ترتیب با ۳۹٪ و ۳۶٪ بیشترین عناصر تشکیل دهنده سرباره فولاد را تشکیل می‌دهند. وجود درصد بالای آهک و سیلیس در سرباره فولاد می‌تواند به انجام واکنش‌های پوزولانی و ژئوپلیمری کمک کند. منحنی دانه بندی این ژئوپلیمر نیز در شکل ۱ آورده شده است. مطابق نمودار دانه بندی ۸۰٪ ذرات آن کوچکتر از ۷۵ میکرومتر هستند.

<sup>۱</sup> Silty sand (SM)

<sup>۲</sup> Recycled Glass Powder (RGP)

<sup>۳</sup> X-ray fluorescence (XRF)

<sup>۴</sup> Ground granulated blast-furnace slag (GGBS)



شکل ۱. منحنی دانه بندی ماسه، پودر شیشه و سرباره فولاد

جدول ۱. ترکیب شیمیایی پودر شیشه و سرباره فولاد (%)

Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	ترکیب شیمیایی
0	0	0.78	0	0.281	11.5	2.1	8.87	0.031	1.9	73.77	پودر شیشه
0.3	0.01	1.76	0.11	0.31	0.11	8.7	38.9	0.3	13	36.5	سرباره فولاد

#### ۲-۴- نانوسیلیکات کلسیم

نانوسیلیکات کلسیم<sup>۱</sup> از یک شرکت دانش بنیان ایرانی تهیه شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و درصد عناصر تشکیل دهنده آن براساس اطلاعات گرفته شده از شرکت تولید کننده در جدول ۲ آورده شده است. حداکثر اندازه این ذرات ۵۰nm ذکر شده است.

#### ۲-۵- نانوسیلیکات آلومینیوم

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و درصد عناصر تشکیل دهنده نانوسیلیکات آلومینیوم<sup>۲</sup> براساس اطلاعات گرفته شده از شرکت تولید کننده در جدول ۲ آورده شده است. حداکثر اندازه این ذرات ۱۰۰nm ذکر شده است.

<sup>۱</sup>Poly Calcium Silicate (PCS)

Poly Aluminum Silicate (PAS)

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مصالح نانو

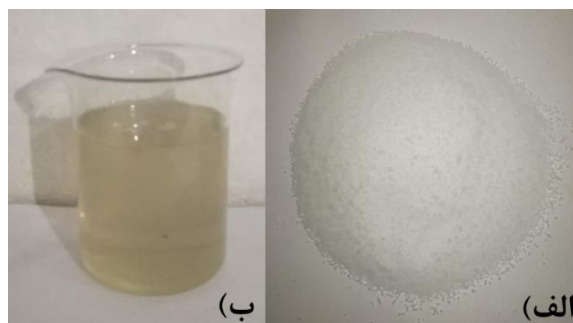
PAS	PCS	ترکیبات/مشخصات
۵۴/۳۳	۵۴/۱	SiO <sub>2</sub> (%)
۱۴/۷۳	-	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
-	۱۸/۵	CaO (%)
۱	۱	رطوبت (%)
۰/۵	۰/۵	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )
۶۰	۵۰	میانگین اندازه ذرات (nm)

## ۲-۶- هیدروکسید سدیم

در این مطالعه از پودر هیدروکسید سدیم آزمایشگاهی با خلوص ۹۹٪ و pH=۱۴ بصورت محلول در آب بعنوان رایج ترین فعال ساز قلیایی برای فرایند تولید ژئوپلیمر مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۲ تصویر پودر هیدروکسید سدیم<sup>۱</sup> را نشان می دهد.

## ۲-۷- سیلیکات سدیم

سیلیکات سدیم که با نام آب شیشه<sup>۲</sup> نیز شناخت می شود محلولی تقریباً چسبناک و مایل به زرد می باشد. در این تحقیق از این محلول بصورت ترکیب با هیدروکسید سدیم در نمونه های حاوی پودر شیشه جهت مقایسه اثر افزودن SiO<sub>3</sub> بصورت پودر و محلول آب شیشه بر مقاومت فشاری نمونه ها مورد استفاده قرار گرفت. تصویری از این محلول در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲. تصویر فعال سازهای قلیایی الف) پودر هیدروکسید سدیم آزمایشگاهی ب) محلول سیلیکات سدیم

<sup>۱</sup>NaOH

<sup>۲</sup>Water Glass (WG)

جدول ۳. نام، مشخصات و درصد مواد تشکیل دهنده نمونه‌ها

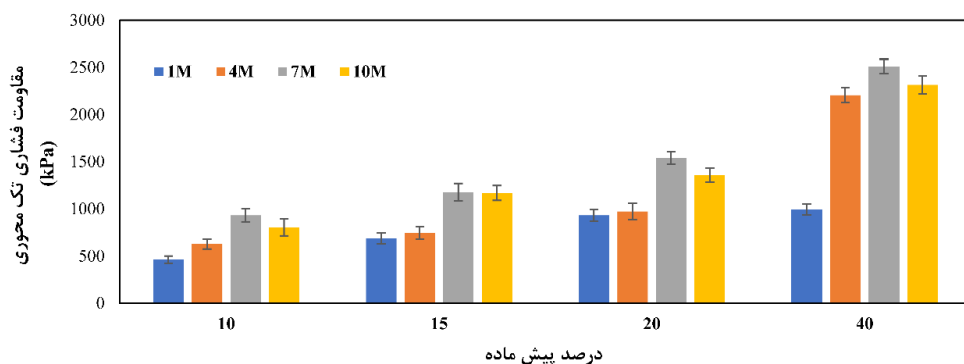
PCS (%)	PAS (%)	RGP (%)	GGBS (%)	عنوان	نوع ماده پیش ساز	نوع فعال ساز و غلظت آن
۰	۰	۰	۰	NS	ماسه بکر	آب (۱۳٪)
۰	۰	۰	۲۰	GGBS	سرباره فولاد	هیدرواکسید سدیم (۷مولار)
۰	۰	۲۰	۰	RGP	پودر شیشه	
۰	۰/۵	۰	۱۹/۵	A1G	سرباره فولاد + نانوآلومینیوم	
۰	۱	۰	۱۹	A2G		
۰	۱/۵	۰	۱۸/۵	A3G		
۰	۲	۰	۱۸	A4G		
۰/۵	۰	۰	۱۹/۵	C1G	سرباره فولاد + نانوکلسیم	
۱	۰	۰	۱۹	C2G		
۱/۵	۰	۰	۱۸/۵	C3G		
۲	۰	۰	۱۸	C4G		
۰	۰/۵	۱۹/۵	۰	A1R	پودر شیشه + نانوآلومینیوم	
۰	۱	۱۹	۰	A2R		
۰	۱/۵	۱۸/۵	۰	A3R		
۰	۲	۱۸	۰	A4R		
۰/۵	۰	۱۹/۵	۰	C1R	پودر شیشه + نانو کلسیم	
۱	۰	۱۹	۰	C2R		
۱/۵	۰	۱۸/۵	۰	C3R		
۲	۰	۱۸	۰	C4R		
۰	۲	۱۸	۰	A4RW	پودر شیشه + نانوآلومینیوم	۵۰٪ هیدرواکسید سدیم + ۵۰٪ سیلیکات سدیم

## ۲-۸- آماده سازی نمونه‌ها

در پژوهش حاضر از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بعنوان ملاک ارزیابی بهبود خواص مکانیکی خاک استفاده گردیده است. جهت ساخت نمونه‌ها از قالب استوانه‌ای فلزی جدا شونده به قطر ۳۷ میلی‌متر و ارتفاع ۷۵ میلی‌متر استفاده شد. خاک ماسه‌ای در شروع پژوهش به مدت سه روز در گرم‌خانه با دما ۳۵ درجه سانتیگراد خشک گردید. در تمامی نمونه‌ها ابتدا مقادیر مورد نیاز از خاک و ماده پیش ساز وزن گردید و بصورت خشک به مدت ۵ دقیقه مخلوط گردید تا به یک مخلوط همگن منتج شود. سپس این مخلوط با فعال ساز قلیایی به مدت ۱۰ دقیقه ترکیب شد و ترکیب نهایی با وزن کردن به سه قسمت مساوی تقسیم گردید. سپس به روش تراکم کاهش یافته در سه لایه ترکیب مورد نظر ریخته و توسط شافت فلزی با سایز منطبق بر قطر نمونه متراکم گردید [۲۲]. در روش تراکم کاهش یافته، لایه‌های متوالی ماسه تا یک چگالی از پیش تعریف شده فشرده می‌شوند و به دلیل همپوشانی تراکمی، تراکم در لایه‌های زیرین افزایش می‌یابد. از این تکنیک برای تولید نمونه با خاک

ماسه‌ای با تراکم یکنواخت استفاده می‌شود. برای هر سری نمونه حداقل ۳ نمونه یکسان ساخته شد و میانگین مقاومت فشاری آنها به‌همراه نوارهای خطا انحراف استاندارد، گزارش گردیده است.

در این پژوهش جهت تعیین مقدار بهینه فعال ساز قلیایی و ماده پیش‌ساز، نمونه‌های ۷ روزه با درصد‌های مختلف ژئوپلیمر سرباره فولاد و مولارپتیه‌های متغییر محلول قلیایی هیدروکسید سدیم ساخته شدند. درصد‌های وزنی سرباره فولاد ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۴۰ درصد بود. همچنین با توجه به درصد رطوبت بهینه ۱۳٪، محلول قلیایی هیدروکسید سدیم با مولارپتیه‌های ۱، ۴، ۷، ۱۰ به نمونه‌ها اضافه گردید. مقادیر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها در شکل ۳ آورده شده است. طبق نتایج بدست آمده مشخص شد نمونه‌های با غلظت محلول قلیایی ۷ مولار بیشترین مقاومت فشاری تک محوری را داشتند. همچنین با وجود اینکه نمونه‌های با ۴۰٪ ژئوپلیمر بیشترین مقاومت را داشتند اما در نهایت با توجه به در نظر گرفتن مسائل چون قابلیت اجرا و صرفه اقتصادی در پروژه‌های عمرانی نمونه‌های با ۲۰٪ ژئوپلیمر سرباره فولاد بعنوان درصد بهینه در ساخت همه نمونه‌های بعدی انتخاب شد. در ادامه ساخت نمونه‌های حاوی نانو ذرات، مقدار مجموع مواد خشک، ثابت و برابر با مقدار بهینه بدست آمده از مرحله قبل یعنی ۲۰٪ در نظر گرفته شد. مولارپتیه محلول قلیایی نیز ۷ مولار، بصورت ثابت در تمامی نمونه‌ها اضافه گردید. درصد‌های متغییر نانو مواد و ژئوپلیمرها به‌همراه نام گذاری نمونه‌ها در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۳. تعیین مقدار بهینه فعال ساز قلیایی و ماده پیش ساز

## ۹-۲- عمل‌آوری نمونه‌ها

قبل از ریختن نمونه‌ها در داخل قالب یک طلق پلاستیکی داخل آن قرار داده شد که پس از باز شدن قالب نمونه متراکم بصورت محصور شده گردید. سپس درون پلاستیک‌های زیپ‌دار قرارداده و هوای داخل پلاستیک تخلیه شد. سپس نمونه‌ها جهت عمل‌آوری درون گرمخانه با دمای  $1 \pm 35$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۷ روز عمل‌آوری شدند. دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد یک دمای محیطی متداول در هنگام اجرای اغلب پروژه‌های عمرانی در شهر کرمان است. در پایان زمان عمل‌آوری نمونه‌ها از درون پلاستیک زیپ‌دار خارج و طلق پلاستیکی محافظ آنها باز گردید.



شکل ۴. عمل آوری نمونه‌ها در پلاستیک زیپ دار و اون با دما ۳۵ درجه سانتیگراد

### ۲-۱-۰- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

پس از پایان زمان عمل آوری، بر روی نمونه‌ها طبق استاندارد International, [ ASTM D2166-87 #25] آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده انجام پذیرفت. نرخ بارگذاری در دستگاه ۱ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم گردید. و مقادیر تنش و کرنش قرائت شد و دیاگرام مربوطه به آن رسم گردید.

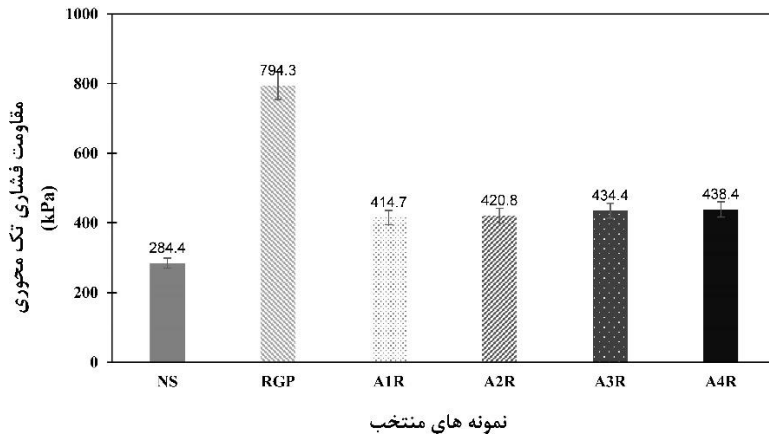


شکل ۵. شکست نمونه تثبیت شده در آزمایش فشاری تک محوری محصور نشده

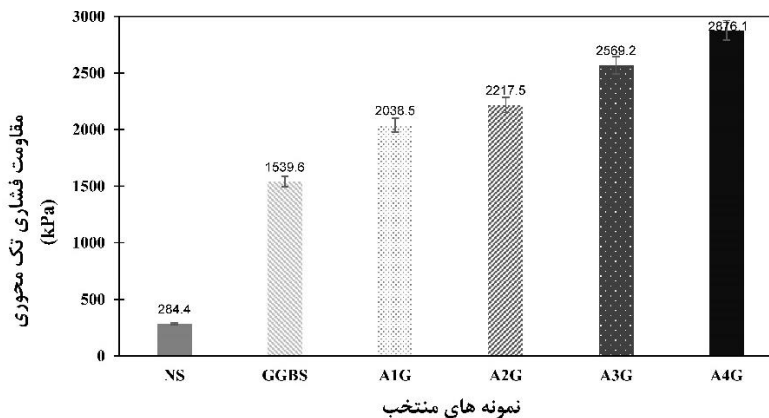
## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- تاثیر افزایش درصد نانو سیلیکات آلومینیوم بر مقاومت فشاری

اثر افزایش درصد نانو سیلیکات آلومینیوم<sup>۲</sup> در ترکیب با پودرشیشه و سرباره فولاد بر مقاومت فشاری محصور نشده به ترتیب در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است. فعال ساز قلیایی در این نمونه ها هیدروکسید سدیم ۷ مولار می باشد. برای بررسی تاثیر نانو ذرات مقدار ماده افزودنی کل مقدار ثابت ۲۰٪ استفاده شد. بطوریکه با افزایش درصد نانو ذرات از (۰٪ تا ۲٪) و مقدار ژئوپلیمر از (۲۰٪ تا ۱۸٪) تغییر یافت.



شکل ۶. مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه های تثبیت نشده، تثبیت شده با پودر شیشه و تثبیت شده با پودر شیشه و نانو سیلیکات آلومینیوم



شکل ۷. مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه های تثبیت نشده، تثبیت شده با سرباره فولاد و تثبیت شده با سرباره فولاد و نانو سیلیکات آلومینیوم

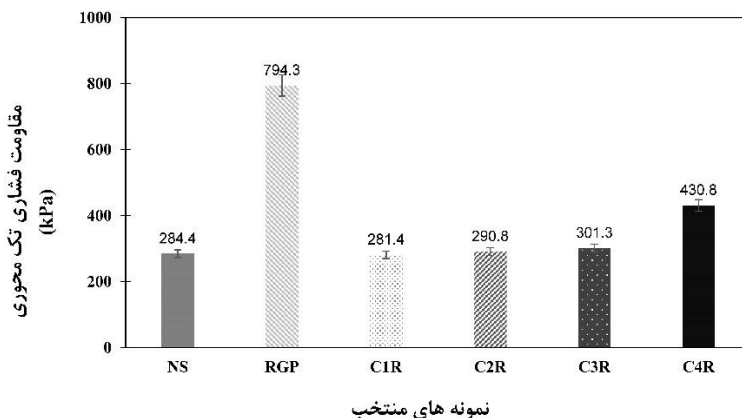
همانطور که در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است خاک ماسه تثبیت نشده، مقاومت فشاری اندکی ( ۲۸۴٫۴ کیلوپاسکال) دارد ولی با اضافه کردن ژئوپلیمر و نانوذرات مقاومت فشاری نمونه ها افزایش می یابد. در شکل ۶ مشخص شده است که با اضافه کردن ۲۰٪ پودر شیشه تنها، به خاک ماسه مقاومت فشاری تک محوری خاک را در حدود ۳ برابر افزایش می دهد. ولی این افزایش مقاومت با تغییر پیش ماده ها و اضافه شدن نانو سیلیکات آلومینیوم به ۱/۵ برابر محدود می گردد. بطوریکه نمونه A4R که شامل ۱۸٪ پودر شیشه و ۲٪ نانو سیلیکات آلومینیوم است، مقاومت فشاری آن به ۴۳۸ کیلوپاسکال می رسد. در نتیجه اضافه کردن نانو سیلیکات آلومینیوم تاثیر منفی بر مقاومت فشاری نمونه های تثبیت شده بر پایه پودر شیشه دارد.

شکل ۷ نشان می دهد که افزودن ۲۰٪ سرباره فولاد، مقاومت خاک را بطور قابل توجهی افزایش می دهد (حدوداً ۵ برابر) و با اضافه شدن نانو سیلیکات آلومینیوم روند افزایش مقاومت ادامه می یابد. لذا مشاهده می شود نمونه A4G

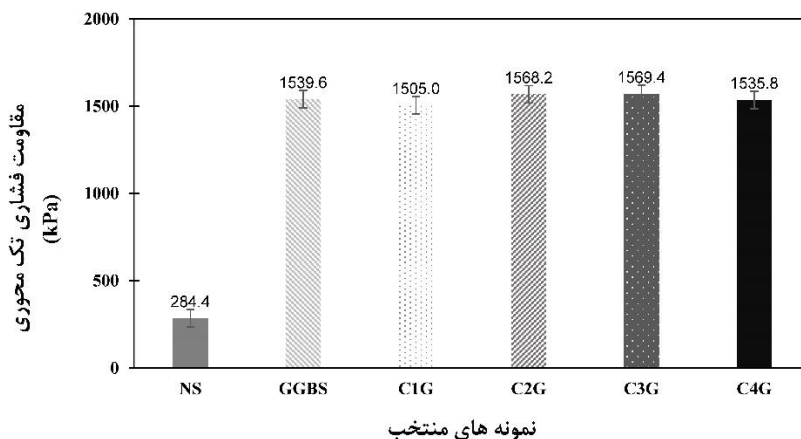
که دارای ۱۸٪ سرباره و ۲٪ نانو سیلیکات آلومینیوم است مقاومت فشاری تک محوری خاک را تا مقدار قابل توجه ۲۸۷۶ کیلوپاسکال افزایش می‌دهد. که نشان می‌دهد افزودن نانو سیلیکات آلومینیوم به سرباره فولاد مقاومت نمونه‌ها را نسبت به مقاومت فشاری نمونه‌های با ۲۰٪ سرباره تا ۲ برابر افزایش می‌دهد.

### ۳-۲- تاثیر افزایش درصد نانو سیلیکات کلسیم بر مقاومت فشاری

اثر افزایش درصد نانو سیلیکات کلسیم<sup>۱</sup> در ترکیب با پودر شیشه و سرباره فولاد بر مقاومت فشاری محصور نشده به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. در این نمونه‌ها نیز از هیدروکسید سدیم ۷ مولار جهت تولید محیط قلیایی استفاده شد. برای بررسی تاثیر نانو سیلیکات کلسیم در اینجا نیز مقدار ماده افزودنی کل مقدار ثابت ۲۰٪ استفاده شد. بطوریکه با افزایش درصد نانو ذرات از (۰٪ تا ۲٪) و مقدار ژئوپلیمر از (۲۰٪ تا ۱۸٪) تغییر یافت.



شکل ۸. مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های تثبیت نشده، تثبیت شده با پودر شیشه و تثبیت شده با پودر شیشه و نانو سیلیکات کلسیم

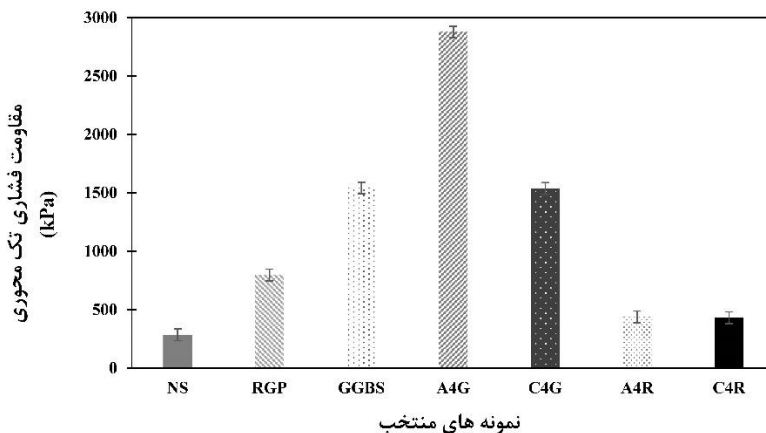


شکل ۹. مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه های تثبیت نشده، تثبیت شده با سرباره فولاد و تثبیت شده با سرباره فولاد و نانو سیلیکات کلسیم

در نمودار شکل ۸ نشان می دهد که روند افزایش مقاومت با افزایش درصد نانو ذرات سیلیکات کلسیم صعودی است اما در کل این نانو ذرات مقاومت فشاری نمونه های تثبیت شده با پودر شیشه را تا ۲/۸ برابر کاهش می دهند. که این کاهش نشان از عملکرد نامطلوب نانو سیلیکات کلسیم در ترکیب با پودر شیشه در افزایش مقاومت فشاری خاک تثبیت شده دارد. بررسی شکل ۹ نشان می دهد که افزودن نانو سیلیکات کلسیم تقریباً تاثیر چندانی در مقاومت خاک تثبیت شده با سرباره فولاد ندارد و کمکی به افزایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه ها نمی کند.

### ۳-۳- مقایسه عملکرد نانو ذرات در افزایش مقاومت فشاری محصور نشده

در نمودار شکل ۱۰ مقاومت فشاری تک محوری نمونه های منتخب با بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده جهت مقایسه آورده شده است. همانطور که در نمودار مشخص شده است نمونه تثبیت شده با ۱۸٪ سرباره فولاد و ۲٪ نانو سیلیکات آلومینیوم (A4G) بیشترین مقاومت فشاری تک محوری را نشان می دهد و این در حالیست که ترکیب ۲٪ نانو سیلیکات کلسیم با ۱۸٪ سرباره فولاد (C4G) تغییری در افزایش مقاومت فشاری نمونه تثبیت شده با ۲۰٪ سرباره (GGBS) ایجاد نمی کند. همچنین ترکیب ۲٪ از هر دو نوع نانو با ۱۸٪ پودر شیشه (A4R, C4R) مقاومت نمونه تثبیت نشده را نسبت به نمونه تثبیت شده با ۲۰٪ پودر شیشه (RGP) به نصف می رساند. لذا در این پژوهش خاص این فرض که با اضافه شدن ذرات ریزتر و ایجاد جسمی با تخلخل کمتر می توان به مقاومت فشاری بیشتر رسید رد می شود.

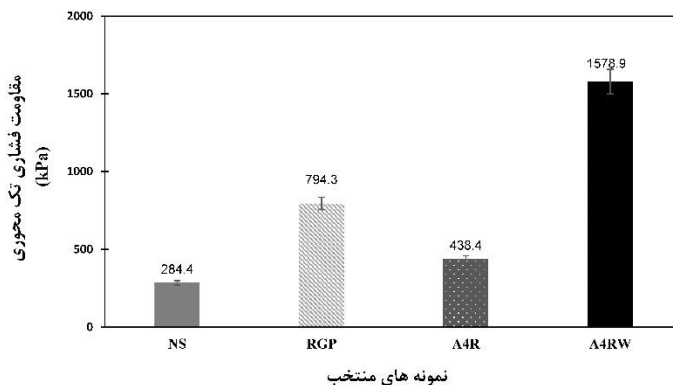


شکل ۱۰. مقایسه مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه تثبیت نشده، و نمونه های منتخب تثبیت شده

### ۳-۴- تأثیر افزودن سیلیکات سدیم به محلول قلیایی

در ادامه این تحقیق جهت بررسی و مقایسه تاثیر سیلیکات بصورت خشک (پودر شیشه) و محلول (آب شیشه) بر مقاومت فشاری، در ساخت نمونه های بر پایه پودر شیشه به میزان یکسان از ترکیب دو فعال ساز قلیایی هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم استفاده شد. در این بررسی نمونه با ۱۸٪ پودر شیشه و ۲٪ نانو سیلیکات آلومینیوم با شرایط قبل ساخته شد با این تفاوت که محلول قلیایی بصورت ۵۰٪ سیلیکات سدیم و ۵۰٪ هیدروکسید سدیم با غلظت ۷ مولار به نمونه‌ها اضافه گردید.

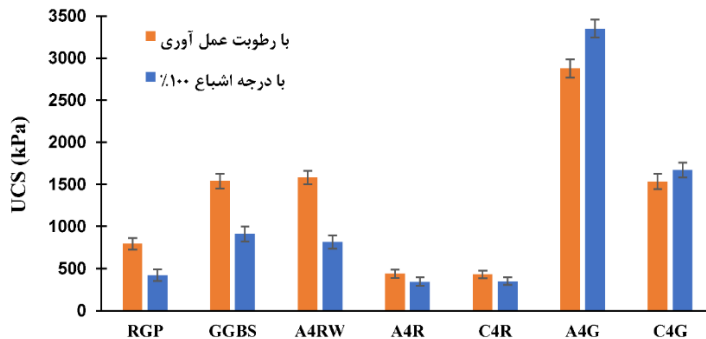
در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که نمونه (A4RW) با ترکیبات ذکر شده در جدول ۳ مقاومتی در حدود ۲ برابر نمونه (RGP) که شامل فقط پودر شیشه بود و تقریباً ۴ برابر مقاومت فشاری تک محوری نمونه (A4R) می‌باشد. همانطور که در جدول ۳ ذکر شده تنها تفاوت نمونه‌های (A4R) و (A4RW) جایگزینی ۵۰٪ از محلول قلیایی هیدروکسید سدیم با محلول سیلیکات سدیم می‌باشد. در نتیجه مشاهده می‌شود وجود عنصر  $\text{SiO}_3$  بصورت محلول در نمونه تاثیر بسیار بیشتری بر افزایش مقاومت فشاری محصور نشده نمونه های تثبیت شده دارد.



شکل ۱۱. مقایسه نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده بر پایه پودر شیشه با دو مدل محلول قلیایی

### ۳-۵- بررسی تاثیر شرایط اشباع بر مقاومت فشاری تک محوری

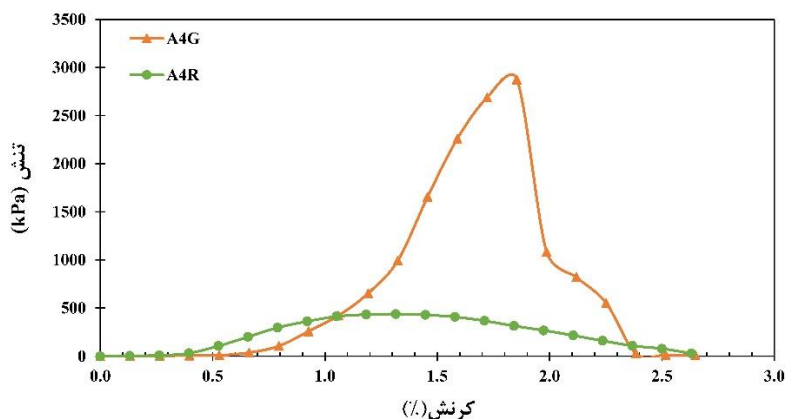
در انتهای پژوهش جهت اطلاع از دوام و عملکرد نمونه‌ها در شرایط اشباع، نمونه‌های منتخب، طبق شرایط قبل ساخته و عمل آوری شدند. نمونه‌ها پس از ۷ روز عمل آوری به مدت ۴۸ ساعت در شرایط غرقاب اشباع گردیدند و سپس از آنها در شرایط ۱۰۰٪ اشباع آزمایش مقاومت فشاری تک محوری گرفته شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۱۲ آورده شده است. همانطور که در نمودار شکل ۱۲ مشاهده می‌شود چهار سری از نمونه‌ها (RGP, GGBS, A4RW, A4R, C4R) پس از ۴۸ ساعت اشباع مقاومت شان کاهش می‌یابد. که در نمونه‌های فاقد نانو ذره این کاهش محسوس تر بود. اما با توجه به اینکه نمونه تثبیت نشده ماسه پس از ۵ ساعت اشباع متلاشی شد، مشاهده می‌شود که این نمونه‌ها همچنان از مقاومت خوبی نسبت به نمونه تثبیت نشده دارند. در نهایت مهم ترین نتیجه این پژوهش را می‌توان در نمونه‌های (A4G, C4G) مشاهده کرد جایی که ترکیب نانو ذرات با سرباره فولاد پس از ۴۸ ساعت اشباع مقاومت فشاری تک محوری آنها برخلاف انتظار افزایشی بود. بطوریکه می‌توان گفت این طرح اختلاط تثبیت خاک ماسه‌ای، توانسته بزرگترین چالش تثبیت با ژئوپلیمرها را که همان دوام اندک در شرایط اشباع هست، مرتفع نماید.



شکل ۱۲. مقایسه نمونه‌های تثبیت شده در شرایط کاملاً اشباع و شرایط شکست با رطوبت عمل آوری

### ۳-۶- بررسی نمودار تنش کرنش نمونه های تثبیت شده

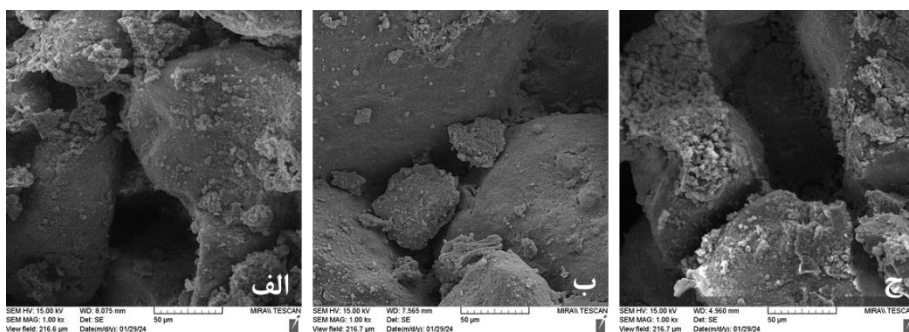
برای بررسی و مقایسه رفتار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده بر پایه پودر شیشه و سرباره فولاد به همراه ۲٪ نانو سیلیکات آلومینیوم نمودار تنش-کرنش نمونه‌های A4R و A4G در شکل ۱۳ آورده شده است. با بررسی منحنی های تنش-کرنش دو نمونه مشاهده می‌شود که نمونه تثبیت شده بر پایه سرباره فولاد بر خلاف نمونه حاوی پودر شیشه شکل پذیر نبوده و مقاومت آن پس از لحظه گسیختگی به سرعت افت می‌کند. که این امر در تمامی نمونه‌های تثبیت شده با سرباره نیز مشاهده گردید. اما نمونه های تثبیت شده بر پایه پودر شیشه یک رفتار شکل پذیر را از خود به نمایش می‌گذارند.



شکل ۱۳. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده A4R و A4G

### ۳-۷- مطالعه ریزساختاری

تجزیه و تحلیل ریز ساختاری نمونه‌های منتخب، توسط بررسی تصاویر SEM از نمونه های A4G, GGBS, و ماسه بکر (نمونه کنترل) انجام گردیده است. تصویر SEM برای سه نمونه ۷ روزه ماسه بکر، GGBS و A4G به ترتیب در اشکال ۱۴-الف-ب-ج نشان داده شده است. تصاویر SEM تشکیل ژل ژئوپلیمر را در نمونه‌های تثبیت شده (GGBS, A4G) نشان می‌دهد. همچنین بررسی تصاویر شکل ۱۴ نشان می‌دهد نمونه‌های تثبیت شده نسبت به نمونه تثبیت نشده دارای محیط متراکم‌تر و ساختار همگن با تخلخل کمتر می‌باشند.



شکل ۱۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های (الف) خاک تثبیت نشده (ب) GGBS (ج) A4G

### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق مقایسه تاثیر دو نوع ذره سیلیکات آلومینیوم و سیلیکات کلسیم بر مقاومت فشاری نمونه‌های خاکی تثبیت شده ژئوپلیمری بر پایه پودر شیشه و سرباره فولاد مورد مطالعه قرار گرفت است. همچنین دوام نمونه‌های منتخب در شرایط اشباع مورد بررسی واقع شده است و نتایج زیر به صورت خلاصه در زیر ارائه گردیده است.

- ۱- مقدار غلظت بهینه فعال ساز قلیایی هیدروکسید سدیم ۷ مولار بدست آمد و نیز درصد بهینه افزودنی سرباره فولاد ۲۰٪ بود که برای ساخت تمامی نمونه‌ها از ۲۰٪ افزودنی خشک استفاده شد.
- ۲- مقایسه مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها تثبیت شده با خاک تثبیت نشده بیانگر افزایش مقاومت در تمامی نمونه‌های تثبیت شده بود.
- ۳- بررسی اثر افزودنی نانو سیلیکات آلومینیوم در ترکیب با پودر شیشه نشان داد این نانو ذرات هرچند با افزایش ذرات تا ۲٪، مقاومت خاک تثبیت شده را نسبت به خاک تثبیت نشده تا ۲ برابر افزایش می‌دهند ولی نسبت به نمونه صرفاً با پودر شیشه (RGP) مقاومت شان تا نصف کاهش یافت.
- ۴- تاثیر نانو سیلیکات آلومینیوم به همراه سرباره فولاد در افزایش مقاومت نمونه‌ها بسیار مثبت بود بطوریکه مقاومت نمونه‌ها را نسبت به نمونه با ۲۰٪ سرباره (GGBS) تا دو برابر و نسبت به خاک خالص تا ۱۰ برابر افزایش داد.
- ۵- عملکرد نانو سیلیکات کلسیم در ترکیب با پودر شیشه نتیجه منفی داشت و مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه (RGP) نصف شد هرچند نسبت به خاک خالص (NS) مقاومت شان تا دو برابر رشد داشت. این نانو ذرات در ترکیب با سرباره نیز تاثیر در افزایش مقاومت نمونه‌ها نداشت و تقریباً مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها نسبت به نمونه (GGBS) ثابت باقی ماند.
- ۶- ترکیب کردن سیلیکات سدیم (آب شیشه) به نسبت ۵۰-۵۰ با هیدروکسید سدیم و اضافه کردن این محلول قلیایی جدید به نمونه بر پودر شیشه و نانوسیلیکات آلومینیوم (A4RW) توانست مقاومت فشاری آن را نسبت به نمونه‌های پودر شیشه خالی (RGP)، پودر شیشه با نانو سیلیکات آلومینیوم (A4R) و نمونه خاک خالص (NS) به ترتیب ۲، ۴ و ۵/۵ برابر افزایش دهد.
- ۷- بررسی دوام نمونه‌های منتخب که جهت بررسی دوام به مدت ۴۸ ساعت غرقاب شده بودند نشان داد اکثر نمونه‌ها پس از اشباع شدن مقاومت شان کاهشی یافت ولی همچنان در مقایسه با خاک تثبیت نشده که پس از ۵ ساعت اشباع شدن متلاشی شد همچنان از مقاومت قابل قبولی برخوردار بودند. اما این امر در خصوص مقاومت فشاری نمونه‌های (A4G,C4G) برعکس بود، بطوریکه پس از ۴۸ ساعت غرقاب شدن بر خلاف انتظار مقاومت فشاری محصور نشده آنها تا ۲۰٪ رشد داشت.
- ۸- با توجه به ضعف عمده ژئوپلیمرها در کاهش مقاومت آنها در شرایط رطوبتی گزارش شده است و مانع از کاربرد آنها در پروژه های اجرایی شده است. لذا بنظر می رسد با توجه به دوام خوب نمونه‌های (A4G,C4G) در شرایط اشباع می‌توان بر روی طرح اختلاط این نمونه‌ها جهت اجرا در پروژه های عمرانی تحقیقات گسترده‌تری انجام داد.
- ۹- نمونه‌های تثبیت شده بر پایه سرباره فولاد علی‌رغم مقاومت فشاری تک محوری بالا و دوام خوب شان در شرایط اشباع رفتار ترد و شکل پذیری پایینی داشتند که برای استفاده در سازه‌های ژئوتکنیکی مانند دیوارهای حایل باید راهکاری برای شکل پذیری آنها پیدا کرد.

## References

1. Touch, S., S. Likitlersuang, and T. Pipatpongsa, *3D geological modelling and geotechnical characteristics of Phnom Penh subsoils in Cambodia*. Engineering geology, 2014. 178: p. 58-69.

- 2.Lin, B., et al., *Accumulative plastic strain of thawed saturated clay under long-term cyclic loading*. Engineering Geology, 2017. **231**: p. 230–237.
- 3.Jafari, M.M., M.H. Bagheripour, and M. Lakzadeh, *Experimental Study of the Effect of Polypropylene Fiber on Mechanical Properties of Lime and Cement Stabilized Soil*. Karafan Journal, 2022. **19**(1): p. 59–81.(In persian)
- 4.Vali, R. and M. Parsamanesh, *Statistical Analysis of the Skirted Ring Footings Located on Sandy Soil*. Karafan Journal, 2022. **19**(1): p. 35–58.(In persian)
- 5.Yousefi, H. and S.M. Marandi, *The Effect of Geo-grid Plates on Vertical Displacement and Shearing Force on Foundation Using Finite Element Method and Two-dimensional PLAXIS Software*. Karafan Journal, 2022. **19**(3): p. 461–476.(In persian)
- 6.Zhang, X., et al., *Engineering geology of basaltic residual soil in Leiqiong, southern China*. Engineering Geology, 2017. **220**: p. 196–207.
- 7.Yoobanpot, N., et al., *Multiscale laboratory investigation of the mechanical and microstructural properties of dredged sediments stabilized with cement and fly ash*. Engineering Geology, 2020. **267**: p. 105491.
- 8.Wong, C., et al., *A study on the mechanical interaction between soil and colloidal silica gel for ground improvement*. Engineering geology, 2018. **243**: p. 84–100.
- 9.Feynman, R., *There's plenty of room at the bottom*. Science, 1991. **254**(5036): p. 1300–1301.
- 10.Booker, R.D. and E. Boysen, *Nanotechnology for dummies*. 2011: John Wiley & Sons.
- 11.Arora, A., B. Singh, and P. Kaur, *Performance of Nano-particles in stabilization of soil: a comprehensive review*. Materials Today: Proceedings, 2019. **17**: p. 124–130.
- 12.Changizi, F. and A. Haddad, *Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO<sub>2</sub> and recycled polyester fiber*. Journal of rock mechanics and Geotechnical Engineering, 2015. **7**(4): p. 367–378.
- 13.Changizi, F. and A. Haddad, *Improving the geotechnical properties of soft clay with nano-silica particles*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2017. **170**(2): p. 62–71.
- 14.Bahmani, S.H., et al., *Stabilization of residual soil using SiO<sub>2</sub> nanoparticles and cement*. Construction and Building Materials, 2014. **64**: p. 350–359.
- 15.Kalkan, E., *Effects of silica fume on the geotechnical properties of fine-grained soils exposed to freeze and thaw*. Cold Regions Science and Technology, 2009. **58**(3): p. 130–135.
- 16.Ghasemzadeh, H. and M. Tabaiyan, *The effect of diesel fuel pollution on the efficiency of soil stabilization method*. Geotechnical and Geological Engineering, 2017. **35**(1): p. 475–484.
- 17.Ghasemzadeh, H. and F. Modiri, *Application of novel Persian gum hydrocolloid in soil stabilization*. Carbohydrate polymers, 2020. **246**: p. 116639.
- 18.Ghasemzadeh, H., et al., *Effects of curing method and glass transition temperature on the unconfined compressive strength of acrylic liquid polymer-stabilized kaolinite*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020. **32**(8): p. 04020212.
- 19.Ding, M., et al., *Effects of freeze-thaw cycles on mechanical properties of polypropylene fiber and cement stabilized clay*. Cold Regions Science and Technology, 2018. **154**: p. 155–165.
- 20.Soil, A.C.D.-o. and Rock, *Standard test method for particle-size analysis of soils*. 2007: ASTM International.

21. Standard, A., *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort*. ASTM International, 2007.
22. Ladd, R., *Preparing test specimens using undercompaction*. Geotechnical testing journal, 1978. **1**(1): p. 16-23.