



## The application of geopolymerization method to modify the yellow marl soil of Tabriz

Afshin Dibamehr, Fariba Behrooz Sarand<sup>✉</sup>, Ramin Vafaipour Sorkhabi

Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Tabriz branch, Tabriz, Iran

**ABSTRACT:** Geopolymers produced by the reaction between solid aluminosilicate and an alkaline metal solution have been classified as the third-generation binders after lime and Portland cement. In the present study, the application of the above method to modify the behavior of the yellow marl soil of Tabriz has been evaluated by unconfined compression tests. For this purpose, zeolite and metaclay have been used as sources of silica-alumina, and sodium hydroxide solution have been used as an alkaline activator. The most important variables studied in this research include the weight percentages of main materials containing alumina silicate (zeolite and metaclay), the molarity of alkaline solution (NaOH), and the curing time. The results of the tests have shown the very appropriate effect of the geopolymerization mechanism in the treatment of the resistance structure of carbonated clay soil. Meanwhile, the zeolite geopolymer samples have higher resistance than the metaclay ones in all combinations and curing times. The effect of alkaline solution concentration on the strength of zeolite and metaclay geopolymer samples was not the same so that in the metaclay samples, increasing the molarity of alkali had a negative effect on the results. Also, the results show that the rate of change of resistance with respect to time depends on the concentration of alkaline solution so that the treatment effect reduces with the enhancement of alkali content. In the optimal sample of zeolite geopolymer (15% zeolite, 12 M alkaline), the uniaxial resistance is about 90.2 kg/cm<sup>2</sup>, which is about 26 times yellow marl one whereas the optimal metaclay geopolymeric matrix (15% metaclay, 4 M alkaline solution) has obtained an unconfined compression strength of about 17.86 kg/cm<sup>2</sup>. Also in the geopolymer samples, the failure strain has declined by 50% compared to the pure soil.

### Review History:

Received: Oct. 31, 2022

Revised: Aug. 23, 2023

Accepted: Apr. 20, 2024

Available Online: Apr. 27, 2024

### Keywords:

Stabilization

Yellow Marl

Geopolymerization

Zeolite

Metaclay

### 1- Introduction

For many years, soil stabilization has been used as a common technique in engineering to modify the characteristics of problematic soils. In clay soils, the addition of natural stabilizing substances is especially advantageous [1]. It is very common to use lime or cement to modify the weaknesses of clays for many years [2,3]. Currently, besides lime or Portland cement, various industrial byproducts and waste products containing the oxides involved in pozzolanic reactions are being used as soil stabilizers.

In addition to the above methods, the use of alkali-activated cement is a new type of binder that can be classified as the third generation of cement after lime and Portland cement. In recent years, alkali-activated binders have been considered as a suitable alternative to OPC (ordinary Portland cement) due to their quality, high durability, and also compatibility with the environment [4]. Indeed, from the reaction between solid aluminosilicate powder (usually metakaolin, fly ash, furnace slag, or natural pozzolans) with an alkali metal source (including hydroxide or silicate solutions), a synthetic

aluminosilicate product is obtained which Davidovits called geopolymer [5].

The purpose of this research is to use the geopolymerization technique to stabilize Tabriz yellow marl. Therefore, multiple uniaxial compressive strength tests have been done to evaluate the strength of stabilized soil. The effective parameters studied in the current paper can be referred to as the weight percentages of materials containing alumina silicate (zeolite and metaclay), curing time, and molarity of the alkaline activator (NaOH).

### 2- Methodology

The yellow marl studied in this paper was taken from a depth of 1-2 meters in Nasr region, located in the northeast of Tabriz city. According to the unified classification, this soil is named clay with low plasticity (CL). The natural zeolite and metaclay used were obtained from the zeolite mine of Amirabad and the process of calcination of carbonate clay (yellow marl), respectively. Also, sodium hydroxide has been chosen as an alkali activator because of its cheapness and

\*Corresponding author's email: sarand@iaut.ac.ir



**Table 1. Summary of the test program**

Equation	Unit	First series	Second series
Zeolit (Z)	%	5,10,15,20	0
Metaclay(M)	%	0	5,10,15,20
Alkali activator (L)	M	4,8,12,16	4,8,12,16
Curing time	day	3,7,14,28	3,7,14,28

higher efficiency in dissolution silica and alumina monomers [6]. The initial form of NaOH is prepared in the form of flakes and by dissolving in distilled water with different weight percentages based on the required molarity (M), it becomes a base activator solution.

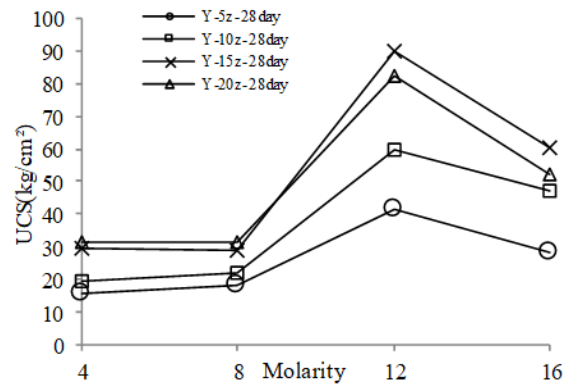
In this study, two series of tests for determining uniaxial compressive strength have been carried out to investigate the effect of factors such as additive types, percentage of additive, molarity of alkali activator, and curing time according to Table 1.

To make geopolymer samples, the yellow marl passed through sieve No. 40 and with an additive containing silica-alumina (zeolite or metaclay) in the specific weight percentage is completely mixed for 5 minutes and then alkaline activator (L) in optimal moisture content added to the ingredients and this mixture is blended by a mixer for 5 minutes until a homogeneous texture is obtained. The composition is compacted inside a cylindrical mold in three layers until reaching the maximum dry density. The samples are removed from the molds and placed inside the plastic covers and finally cured at the laboratory temperature ( $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ) until the curing time.

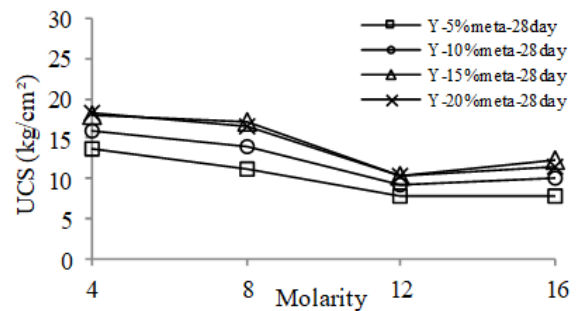
### 3- Results and discussion

#### 3- 1- Uniaxial strength of zeolite geopolymer samples

The results of tests show that in all the geopolymeric samples, for all concentrations of alkaline solution, with the increase in the weight percentage of zeolite up to 15%, the strength of the samples enhanced, and the amount of 15% can be introduced as the optimal percentage of zeolite. However, in the molarity of 4 M and 8 M, with an increment in the amount of zeolite from 15% to 20%, a growth of less than 5% in resistance is also observed. It can be said that the amount of alumina silicate in the additive (zeolite) has a major impact on obtaining the strength of geopolymeric-stabilized soil. On the other hand, it can be seen that in high concentrations of alkaline solution, the resistance reduces with the increase of zeolite percentage from 15% to 20%. In other words, to obtain higher resistance at a low molarity of alkali activator, a high weight percentage of zeolite is suitable and as the molarity increases, an appropriate resistance is obtained at a lesser weight percentage. Fig. 1 shows the changes in compressive strength of zeolite geopolymeric samples for different molarities of alkali activator for a 28-day curing time.



**Fig. 1. Variations of compressive strength of zeolite geopolymeric samples against alkaline solution concentration for different percentages of zeolite**



**Fig. 2. Variations of compressive strength of geopolymer samples against alkali solution concentration for different percentages of metaclay**

#### 3- 2- Uniaxial strength of metaclay geopolymer samples

Based on the obtained results, the weight value of 15% metaclay can be introduced as the optimal amount, but the rate of change of resistance against the percentage is not as high as the role of zeolite.

Also, the resistance obtained in all conditions in metaclay geopolymeric samples is much lower than in zeolite geopolymeric samples. It means that the type of aluminosilicate material used in geopolymer plays an important role in the strength of geopolymer modified, which is due to the different chemical compositions of zeolite and metaclay. This problem can be attributed to the high amount of silica and alumina in zeolite compared to metaclay, which leads to the generation of more cement products.

In Fig.2, the effect of alkali activator molarity on the compressive strength of geopolymeric metaclay samples during 28 days of curing time is presented as a graph. As it can be seen, for all metaclay magnitudes in yellow marl

geopolymeric samples, the concentration value of 4 M is considered as the optimal amount.

#### 4- Conclusions

In zeolite geopolymer samples for all concentrations of alkaline solution, the strength of the samples increased by growing the magnitude of zeolite up to 15%, and the amount of zeolite 15% can be introduced as the optimal percentage. In geopolymeric samples of metaclay the weight value of 15% was obtained as the optimal amount.

In zeolite geopolymeric samples, the concentration value of 12 M has been obtained as the optimal concentration of the alkali activator for all percentages of zeolite. This is the case that in the geopolymeric samples with all percentages of metaclay, the activator concentration value of 4 M is considered as the optimal concentration in the composition.

In yellow marl soil, in all magnitudes of zeolite or metaclay and for all alkaline solution concentrations, the uniaxial strength of zeolite geopolymer samples is higher than that of metaclay geopolymer samples.

#### References

- [1] A. Seco, F. Ramírez, L. Miqueleiz, B. García, E. Prieto, The use of non-conventional additives in Marls stabilization, *Applied Clay Science*, 51 (2011) 419–423.
- [2] D. F. Lin, K. L. Lin, M. J. Hung, H. L. Luo, Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil, *Journal of Hazardous Materials* 145 (2007) 58–64.
- [3] N. Degirmenci, A. Okucu, A. Turabi, Application of phosphogypsum in soil stabilization, *Building and Environment* 42 (2007) 3393–3398.
- [4] C. L. Henghu Sun, L. Li, A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements, *Cement and Concrete Research*, 40(2010) 1341–1349.
- [5] J. Davidovits, Geopolymers: inorganic polymeric new materials, *J Therm Anal*, 37(1991) 1633–56.
- [6] Y.S. Zhang, Research on structure formation mechanism and properties of high-performance geopolymer concrete, PhD Thesis, Southeast University, Nanjing (2003).
- [7] I. Phummiphon, S. Horpibulsuk, P. Sukmak, A. Chinkulkijniwat, A. Arulrajah, S. Shen, Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer, *Road Mater. Pavement Des* 17(2016) 877–891.
- [8] N. Cristelo, A. Teixeira Pinto, A. Glendinning, Deep soft soil improvement by alkaline activation. *Proc. Inst. Civ. Eng. – Ground Improv.* 164 (2011) 73–82.



## کاربرد روش ژئوپلیمریزاسیون برای اصلاح خاک مارن زرد تبریز

افشین دیبامهر، فریبا بهروز سرند\*<sup>id</sup>، رامین وفایی پور سرخابی

گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸

### کلمات کلیدی:

مارن زرد

ژئوپلیمریزاسیون

ژئولیت

متارس

آزمایش تک محوری

**خلاصه:** ژئوپلیمرها که از واکنش بین پودر جامد آلومینوسیلیکاتی با یک محلول فلزی بازی تولید میشوند بعنوان نسل سوم پیوند دهنده‌ها بعد از آهک و سیمان پرتلند جهت بهسازی خاکهای مساله دار مطرح شده اند. در پژوهش حاضر کاربرد روش فوق برای اصلاح رفتار خاک مارن زرد بستر تبریز به کمک آزمایشات تک محوری مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور از ژئولیت و متارس بعنوان منابع آلومینا سیلیکات و از محلول هیدروکسید سدیم بعنوان فعال کننده بازی استفاده شده است. نتایج آزمایشات حاکی از تاثیر بسیار مناسب مکانیسم ژئوپلیمریزاسیون در اصلاح مشخصات مقاومتی خاک رسی کربناته بوده در ضمن نمونه های ژئوپلیمری ژئولیتی نسبت به نمونه های ژئوپلیمری متارسی در تمامی ترکیبها و زمانهای عمل آوری کسب مقاومت بالاتری دارند. اثر غلظت محلول بازی بر مقاومت نمونه های ژئوپلیمری ژئولیتی و متارسی یکسان نبوده بطوریکه در نمونه های متارسی افزایش غلظت محلول اثر منفی بر نتایج گذاشته است. همچنین نتایج نشان میدهد که نرخ تغییرات مقاومت نسبت به زمان، به غلظت محلول بازی بستگی داشته و با افزایش غلظت اثر عمل آوری کاهش می یابد. در نمونه بهینه ژئوپلیمری ژئولیتی (۱۵٪ ژئولیت، غلظت ۱۲ مولار محلول بازی) مقاومت تک محوری در حدود  $9.0/2 \text{ kg/cm}^2$  بدست آمده که حدود ۲۶ برابر مقاومت نمونه مارن زرد خالص است این در حالیست که نمونه بهینه ژئوپلیمری متارسی (۱۵٪ متارس، غلظت ۴ مولار محلول بازی) مقاومت تک محوری در حدود  $\text{kg/cm}^2$  ۱۷/۸۶ کسب کرده است. همچنین در نمونه های ژئوپلیمری کرنش گسیختگی نسبت به نمونه مارن زرد خالص تا ۵۰ درصد کاهش یافته است.

### ۱- مقدمه

و همچنین CaO هستند، بسیار سودمند است [۳]. امروزه علاوه بر آهک یا سیمان پرتلند، انواع محصولات جانبی صنعتی و مواد زائد حاوی اکسیدهای موثر در واکنش های پوزولانی به عنوان تثبیت کننده خاک استفاده می شوند. این محصولات نظیر خاکستر بادی [۴ و ۵]، MgO [۶]، خاکستر و مواد ناشی از سوزاندن ضایعات گیاهی [۷] به تنهایی و یا بصورت ترکیبی مورد استفاده قرار می گیرند. تثبیت خاکهای رسی از جمله مارن‌ها با نانو مواد نیز یک رویکرد دیگر برای اصلاح مشخصات این نوع خاکها مطرح می باشد [۸]. علاوه بر موارد فوق استفاده از سیمانهای فعال شده بازی که از سال ۱۹۴۰ مطرح بوده و نوع جدید از پیوند دهنده ها می باشد را می توان بعنوان سومین نسل از سیمانها بعد از آهک و سیمان پرتلند معمول طبقه بندی نمود. امروزه پیوند دهنده های فعال شده بازی بعلت کیفیت، دوام بالا و هم چنین سازگاری با محیط زیست بعنوان جایگزین مناسبی برای OPC (سیمان پرتلند معمول) مطرح می باشند [۹]. در واقع از واکنش بین

در طول سالیان متمادی تثبیت خاک بعنوان یک تکنیک معمول در مهندسی برای اصلاح مشخصات خاکهای مساله دار مورد استفاده قرار گرفته است. برای نیل به این هدف در خاکهای رسی افزودن مواد تثبیت کننده با پایه طبیعی بشدت توصیه شده است [۱]. آهک  $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$  یکی از رایج ترین این نوع مواد است که با اضافه شدن به محیط باعث ایجاد لخته شدگی ورقه های رسی بصورت جایگزینی یونهای تک ظرفیتی توسط  $\text{Ca}^{2+}$  شده و در نتیجه خاکی با خواص مهندسی بهبود یافته ایجاد می شود [۲]. در خاک هایی که مقادیر کافی Si و Al در آنها در دسترس نیست تا امکان وقوع واکنش های پوزولانی را فراهم کند، این یون ها باید با تثبیت کننده ترکیب شوند. در این موارد استفاده از تثبیت کننده هایی که مانند سیمان پرتلند (متداول ترین تثبیت کننده بعد از آهک)، سرشار از  $\text{SiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: sarand@iaut.ac.ir



این مسأله کاملاً با انواع دیگری از پیوند دهنده‌ها مثل سیمان که حداکثر مقاومت آنها طی ۲۸ روز بدست می‌آید متفاوت است. هم‌چنین در طولانی مدت مخلوط‌های فعال سازی شده بازی در مقایسه با سیمان مقاومت بالاتری نشان می‌دهند، با این وجود در کوتاه مدت سیمان نرخ افزایش مقاومت سریعتری دارد. علاوه بر موارد فوق نتیجه اصلی دیگر حاصله از این تحقیق نشان می‌دهد که روش فعال سازی بازی برای تثبیت خاک مخصوصاً در صورت استفاده به صورت ستون‌های جت گروتینگ تکنیکی معتبر بوده و با اکثر مصالح سنتی مثل سیمان قابل رقابت می‌باشد.

در پژوهش دیگری خاک رس دریایی منطقه ملبورن استرالیا (CIS) با استفاده از کربید کلسیم (CCR) و خاکستر بادی به روش ژئوپلیمریزاسیون تثبیت شده است. فعال کننده بازی مورد استفاده در این پژوهش از مخلوط کردن محلول سیلیکات سدیم (NaSiO<sub>3</sub>) و هیدروکسید سدیم (NaOH) بدست آمده است. بر اساس نتایج بدست آمده مقاومت تک محوری با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم افزایش می‌یابد که این مسأله قبلاً توسط محققان متعددی نیز گزارش شده است [۱۸-۲۱]. بیشترین مقاومت در آزمایشات در مقدار خاکستر بادی ۳۵٪ گزارش است. بنابراین نتایج حاصله نشان می‌دهد که افزایش هر دو پارامتر درصد خاکستر بادی و غلظت NaOH اثر مثبتی بر مقاومت تک محوری دارد. هم‌چنین نتیجه حاصله دیگر حاکی از افزایش مقاومت با زمان عمل آوری در یک مقیاس لگاریتمی به صورت خطی می‌باشد [۱۵]. Coudert و همکاران [۲۲] از خاکستر بادی با کلسیم بالای فعال سازی شده برای بهبود خصوصیات مهندسی خاک‌های رس کائولینی استفاده نموده‌اند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که واکنش‌ها در طی ۱۱ الی ۲۸ روز روی می‌دهند. واکنش بین پیوند دهنده و خاک انتخابی مانند کائولین حاکی از غیرفعال بودن کائولین می‌باشد. در مورد خاک‌های فعال‌سازی شده بازی فازهای زنجیره‌ای کلسیم سیلیکونی بسیار پایدارتر از هیدرات‌های آلومینات کلسیم در سیستم پایه آهک می‌باشد بنابراین این روش برای اهداف بلند مدت تثبیت مفیدتر می‌باشد.

در بعضی از کشورها نظیر کلمبیا تثبیت خاک با استفاده از مکانیزم ژئوپلیمریزاسیون برای راه‌های کم‌اهمیت نقش مهمی در شبکه راه‌ها بازی می‌کنند. در ترکیبات ژئوپلیمرهای مذکور از خاکستر بادی کلسیم دار و محلول بازی ساخته شده از سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم برای تثبیت ماسه سیلت دار کلمبیا استفاده شده است. طبق نتایج بدست آمده از آزمایشات مقاومت فشاری تک محوری و امواج لرزه‌ای به ترتیب مقاومت و سختی افزایش یافته است [۲۳]. در تحقیق دیگری عوامل موثر بر افزایش مقاومت

پودر جامد آلومینوسیلیکاتی (معمولاً متاکائولن، خاکستر بادی، سرباره کوره و یا پوزولان‌های طبیعی) با یک منبع فلزی بازی (از جمله هیدروکسید بازی و یا محلول‌های سیلیکاتی بازی) یک ماده آلومینوسیلیکاتی مصنوعی حاصل می‌شود که Davidovits آنرا ژئوپلیمر نامید [۱۰]. بسته به انتخاب نوع مصالح مبنای حاوی آلومینا سیلیکا و هم‌چنین شرایط واکنش، محصولات ژئوپلیمری می‌توانند دارای بازه گسترده‌ای از مشخصات از جمله مقاومت فشاری بالا، انقباض پذیری پایین، مقاومت در برابر اسید، مقاومت در برابر آتش سوزی و انتقال پذیری حرارت کم باشند [۱۱]. مکانیسم ژئوپلیمرها شامل واکنش تراکمی پیش ماده ژئوپلیمری مانند اکسید آلومینا سیلیکات با پلی‌سیلات‌های قلیایی با پیوند Si-O-Al پلیمری می‌شود که دارای فرمول تجربی زیر می‌باشد:



که در آن M، کاتیون (+K، +Na، یا ++Ca)، n درجه پلیمری و Z برابر با نسبت مولار Si/Al می‌باشد که در محدوده ۱ تا ۱۵ و یا ۱ تا ۳۲ می‌تواند قرار بگیرد [۱۲ و ۱۳]. در واقع ژئوپلیمریزاسیون بر مبنای پیوندهای غیر آلی فعال شده بازی استوار است [۱۴]. بسته به مقدار Z، ژئوپلیمر می‌تواند یکی از چندین سیستم اصلی را بخود بگیرد [۱۵]، بطوریکه برای  $Z > 3$  یک ژئوپلیمر انعطاف پذیر از یک شبکه دویعدی متصل خطی تولید می‌شود و در شرایط  $Z < 3$  محصول سیمانی شکننده از یک اتصال متقاطع بصورت شبکه سه بعدی مناسب برای تثبیت خاک حاصل می‌گردد [۱۲]. اگرچه استفاده از روش مذکور در صنایع ساختمانی نظیر صنعت ساخت سرامیک، کاشی و هم‌چنین تولید بتن در دهه‌های اخیر تا حدودی رواج یافته است ولی استفاده از این تکنیک در مهندسی ژئوتکنیک بسیار نوپا بوده و نیاز به مطالعات گسترده‌تر دارد [۱۶]. در ادامه به برخی از مطالعات ژئوتکنیک انجام شده در این زمینه پرداخته شده است.

Cristelo و همکاران [۱۷] در مطالعه‌ای به استفاده از فعال سازی بازی خاکستر بادی (به عنوان منبع بی‌شکل آلومینات و سیلیکات) برای بهسازی خاک‌های نرم (رس ماسه دار) به روش تثبیت عمیق پرداخته‌اند. نتایج آزمایشات نشان داده که خاکستر بادی کلاس F فعال سازی شده با سدیم وقتی با خاک ترکیب شده و سخت می‌شود ماده‌ای جدید با مقاومت و شکل پذیری بسیار بهبود یافته ایجاد می‌کند که این بهسازی وابسته به زمان بوده و بعد از یکسال عمل آوری افزایش مقاومت قابل توجه بوده که

مقایسه با سیمان پرتلند می باشد. [۲۶]. در پژوهشهای دیگری متاکائولن بعنوان یک نوع رس کلسینه شده و منبع آلومیناسیلیکات در فرآیندهای تثبیت ژئوپلیمری خاکهای رسی سیلت دار مورد استفاده قرار گرفته و نتایج حاکی از تاثیر رضایت بخش این پیش ماده آلومیناسیلیکاتی در خاکهای مذکور می باشد [۲۷ و ۲۸].

همانطور که از مرور منابع مشخص است تا به امروز روش ژئوپلیمریزاسیون برای بهسازی خاکهای رسی و یا ماسه ای استفاده شده و عموماً خاکستر بادی و یا متاکائولن بعنوان منبع آلومینا سیلیکا بکار رفته است. در پژوهش حاضر تلاش شده است که از منابع موجود در طبیعت همانند ژئولیت و هم چنین خود خاک مساله دار بصورت حرارت دیده (متارس) بعنوان ماده افزودنی استفاده شود و از طرفی تا امروز پژوهشی بر روی اصلاح خاکهای رسی کربناته ( مارن زرد) به روش مذکور انجام نشده است. از آنجا که این نوع رسها جزء خاکهای مساله دار محسوب شده و بافت عظیمی از بستر شهر تبریز را نیز تشکیل می دهند این خاک بعنوان خاک مینا در آزمایشات انتخاب شده است. بدین منظور از آزمایشات متعدد مقاومت فشاری تک محوری برای ارزیابی مقاومت خاک تثبیت شده استفاده شده است. از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار مورد مطالعه در تحقیق حاضر می توان به درصد های وزنی مصالح حاوی آلومینا سیلیکات (ژئولیت و متارس)، غلظت محلول بازی مورد استفاده (NaOH) و زمان عمل آوری اشاره نمود. با توجه به توضیحات ارائه شده نوع خاک مورد مطالعه (رس کربناته- مارن)، نوع ماده افزودنی بکار رفته (ژئولیت و متارس) تا حال با این مکانیسم مورد بررسی قرار نگرفته اند و در صورت بدست آوردن نتایج مناسب، روش ژئوپلیمریزاسیون می تواند بعنوان یک روش نوین برای بهسازی خاکهای مارنی بکار برده شود.

## ۲- مواد و روش ها

### ۲-۱- خاک مورد مطالعه

خاک رسی ( مارن زرد) مورد مطالعه در مقاله اخیر از عمق ۱-۲ متری منطقه نصر واقع در شمال شرق شهر تبریز تهیه شده است. تصاویر مربوط به نمونه های استحصالی از حفاریهای انجام یافته در شکل ۱ آورده شده است. بر اساس طبقه بندی متحد این خاک در رده رس با خاصیت خمیری پایین (CL) قرار میگیرد. برخی از مشخصات اولیه مارن زرد مورد مطالعه در جدول ۱ و توزیع دانه بندی آن در شکل ۲ آورده شده است. نتایج تحلیل طیف سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) خاک مورد نظر نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

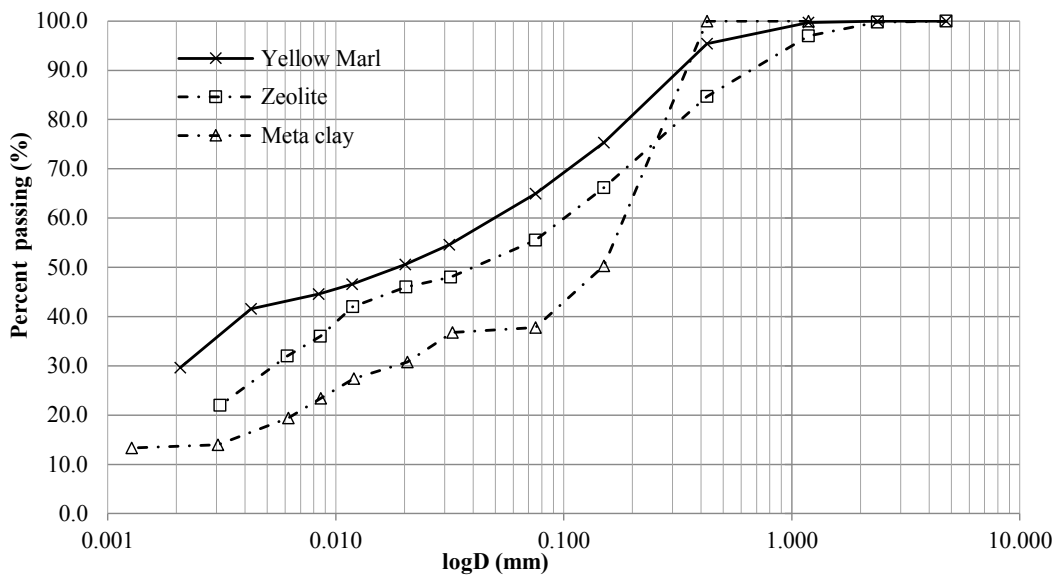
خاک تثبیت شده ژئوپلیمری بصورت پارامتریک مورد مطالعه قرار گرفته است. مصالح به کار رفته در این مطالعه شامل سرباره دانه بندی شده کوره زمینی (GGBS) و خاکستر بادی کلاس C بدست آمده از نیروگاه قدرتی گرمایی در هند می باشند. در آزمایشات انجام یافته از محلول هیدروکسید سدیم به عنوان فعال کننده بازی بهره گرفته شده است. خاک رس مورد مطالعه دارای رده بندی CL می باشد. نتایج بدست آمده حاکی از افزایش مقاومت خاک تثبیت شده با افزایش مقدار سرباره بوده در حالیکه در سرباره با مقدار کمتر از ۸٪، افزایش مقاومت قابل توجه نمی باشد. از طرفی زمانی که از خاکستر بادی به عنوان مصالح مینا برای تثبیت ژئوپلیمری استفاده می شود مقاومت UCS خیلی کمتر از زمانیست که از سرباره به عنوان مصالح منبع اصلی تثبیت ژئوپلیمری استفاده می شود. بر اساس نتایج حاصله از تحقیق فوق، تأثیر غلظت مولاری بازی، نسبت آلكالی بر پیوند دهنده و مقدار مصالح منبع بر مقاومت فشاری تک محوری (UCS) خاک تثبیت شده به صورت خطی نمی باشد [۲۳]. Khan و همکاران در سال ۲۰۱۸ به تثبیت رس مورلند با استفاده از فرآیند ژئوپلیمریزاسیون بر پایه خاکستر بادی کلاس C (CFAG) با مقادیر ۵، ۱۰، ۲۰ درصد بصورت آزمایشگاهی پرداختند و سپس نتایج آزمایشات را با روش تثبیت سنتی با ۱۰ درصد سیمان مقایسه کردند. براساس نتایج بدست آمده، CFAG مصالح قابل قبولی برای تثبیت رس مورلند بوده ولی سیمان با فاصله، بهترین مصالح برای تثبیت خاک رس مورلند از نظر مقادیر پارامترهای تورم است [۲۵].

در مقاله دیگری خصوصیات مکانیکی خاک های تثبیت شده با استفاده از ژئوپلیمر بر پایه خاکستر آتشفشانی و سیمان پرتلند (OPC) مقایسه شده و تأثیر شرایط و زمان عمل آوری، نسبت فعال کننده بررس، غلظت فعال کننده بازی و نسبت خاکستر آتشفشانی بر رس بررسی شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می دهد زمانیکه ۱۵٪ خاک را پیوند دهنده تشکیل می دهد، مقاومت فشاری نمونه های خاک رس تثبیت شده می تواند از ۰/۲ تا ۴ مگاپاسکال و ۲ تا ۱۲ مگاپاسکال به ترتیب در شرایط مرطوب و خشک افزایش یابد و این افزایش، بطور قابل توجهی به رطوبت و دمای عمل آوری بستگی دارد. خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر بر پایه خاکستر آتشفشانی (VA)، ۲۰۰٪ بهبود در مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه های OPC در شرایط خشک از خود نشان می دهد. در حالیکه خاک تثبیت شده با سیمان پرتلند در حالت مرطوب خیلی بهتر بوده و حدود ۳۴٪ مقاومت بیشتری در مقایسه با نمونه های ژئوپلیمری از خود نشان می دهد. همچنین جذب انرژی بالاتر در همه نمونه های ژئوپلیمری، حاکی از رفتار شکل پذیر این مصالح در



شکل ۱. خاک مارن زرد تهیه شده از منطقه نصر تبریز

Fig. 1. Yellow marl prepared from Nasr area



شکل ۲. توزیع دانه بندی خاک مارن زرد، متارس و زئولیت

Fig. 2. Grain size distribution of yellow marl, zeolite and meta clay

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک مارن زرد

Table 1. Physical characteristics of yellow marl

مقادیر	مشخصات
۳۲	حد روانی، LL(%)
۱۷	حد خمیری، PL(%)
۱۵	شاخص خمیری، PI(%)
۲/۶۱	چگالی ویژه، Gs

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی خاک مارن زرد و زئولیت

Table 2. Chemical compositions of yellow marl and zeolite

P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO%	TiO <sub>2</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> %	عنوان
۰/۱۷۵	۰/۰۶	۰/۵۵۹	۱/۴۴	۱/۱۳	۸/۸۱	۱۸/۳	۳/۳۵	۹/۵۱	۴۰/۰۸	مارن زرد
۰/۰۱۵	۰/۰۲۲	۰/۲۳۴	۱/۷۲	۲/۸۷	۱/۰۸	۱/۵۴	۱/۷۶	۱۱/۲۵	۶۵/۷۸	زئولیت

۲-۴- فعال کننده بازی (L)

معمول ترین فعال کننده های بازی مورد استفاده در فرایند ژئوپلیمریزاسیون هیدروکسید سدیم (NaOH)، سیلیکات سدیم و هیدروکسید پتاسیم (KOH) گزارش شده است [۳۰]. در مطالعه حاضر هیدروکسید سدیم بعلاوه ارزانتر بودن و هم چنین کارایی بالاتر در جداسازی مونومرهای سیلیکا و آلومینا بعنوان فعال کننده بازی انتخاب شده است [۳۱]. شکل اولیه NaOH تهیه شده بصورت پولکی بوده و با حل کردن در آب مقطر با درصد های وزنی مختلف بر اساس غلظت مورد نیاز (M) بصورت محلول فعال کننده بازی در می آید.

۲-۵- تهیه نمونه و آزمایشات

در این تحقیق دو سری آزمایشات تعیین مقاومت فشاری تک محوری برای بررسی اثر عواملی همچون نوع ماده افزودنی، درصد ماده افزودنی، غلظت فعال کننده بازی و زمان عمل آوری مطابق جدول ۳ برنامه ریزی و انجام شده است.

برای ساخت نمونه های بازسازی شده از قالب PVC به ترتیب با قطر

۲-۲- زئولیت (Z)

زئولیت طبیعی مورد استفاده در پژوهش اخیر از معدن زئولیت امیرآباد میانه تهیه شده است. توزیع دانه بندی و ترکیبات شیمیایی این ماده به ترتیب در شکل ۲ و جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۳- متارس (M)

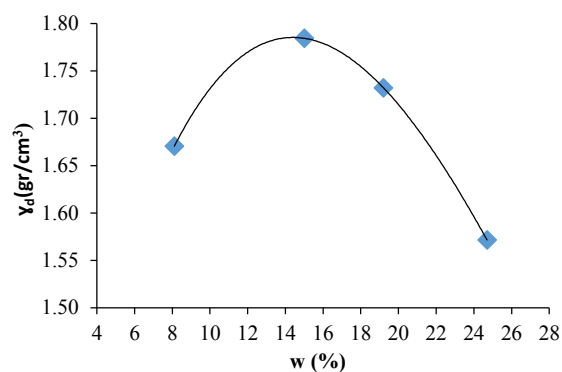
متارس بکار رفته در مطالعه اخیر از فرآیند کلسینه کردن خود رس کربناته (مارن زرد) بدست آمده است. کلسیناسیون (Calcination) یک فرایند تصفیه حرارتی است که در آن مواد بی شکل یا سایر مواد جامد در زیر نقطه ذوب تحت اتمسفر هوا و یا کنترل شده، حرارت داده می شوند. این فرایند برای ایجاد تجزیه گرمایی، حذف فازهای ناپایدار و یا انتقال فاز انجام می شود [۲۹]. در این پژوهش برای نیل به این هدف خاک مورد نظر بعد از عبور دادن از الک شماره ۴۰ در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت حرارت داده شده که با توجه به توضیحات داده شده فوق ساختار کریستالی ماده شکسته شده و یک ماده با فاز بی شکل با ذخیره انرژی و فعالیت بالا حاصل شده است. منحنی دانه بندی متارس نیز در شکل ۲ ارائه شده است.



جدول ۳. خلاصه ای از برنامه آزمایشات

Table 3. Program of tests

واحد	سری اول	سری دوم
زئولیت (Z) %	۵.۱۰.۱۵.۲۰	-
متارس (M) %	-	۵.۱۰.۱۵.۲۰
فعال کننده بازی (L) M	۴.۶.۱۲.۱۶	۴.۶.۱۲.۱۶
زمان عمل آوری day	۳.۷.۱۴.۲۸	۳.۷.۱۴.۲۸



شکل ۳. نتایج آزمایش تراکم استاندارد (ASTMD698) خاک مارن زرد

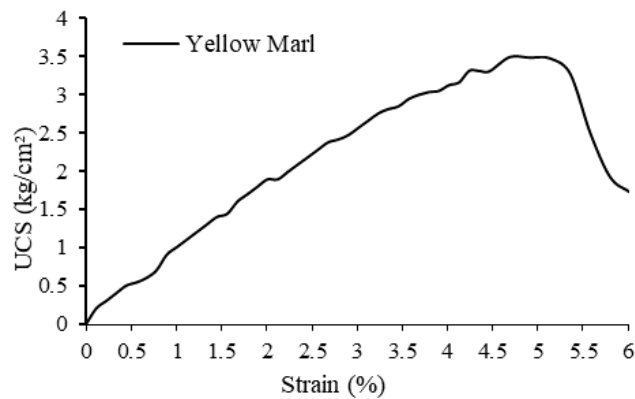
Fig. 3. Standard compaction test results (ASTMD698) of marl soil

درصد های وزنی مورد نظر بصورت خشک به مدت ۵ دقیقه کاملاً مخلوط شده و سپس فعال کننده بازی (L) با مولاریته مشخص با درصد رطوبت بهینه به مواد اضافه شده و این مخلوط توسط همزن تا جایی به هم زده می شود که یک بافت همگن حاصل گردد زمان مورد نیاز برای رسیدن به بافت مورد نظر در حدود ۵ دقیقه است. ترکیب بدست آمده در داخل قالب استوانه ای در سه لایه تا رسیدن به وزن مخصوص خشک بیشینه تراکم می گردد. نمونه های ساخته شده از درون قالب ها خارج شده و داخل پوشش های پلاستیکی قرار گرفته و در دمای آزمایشگاهی ( $25 \pm 2^\circ C$ ) تا زمان مورد نظر عمل آوری می گردد. لازم به تاکید است با توجه به اهمیت پارامتر دما و رطوبت بر روی نتایج سعی شده است که در طول فرآیند عمل آوری این دو عامل ثابت نگه داشته شود. تصویر بخشی از نمونه های ساخته شده در شکل ۵ آورده شده است.

و ارتفاع حدود ۳۸ mm و ۷۶ mm استفاده شده است. نمونه های مورد آزمایش مطابق شرایط ارائه شده در جدول ۳ و در درصد رطوبت بهینه خاک مینا (۱۴٪) که از آزمایش تراکم استاندارد حاصل شده است ساخته شده است. نمودار مربوط به آزمایش تراکم انجام شده بر روی مارن زرد در شکل ۳ ارائه شده است.

جهت مقایسه نتایج، نمونه بازسازی شده مارن زرد در رطوبت بهینه و وزن مخصوص بیشینه بدون مواد افزودنی تهیه شده و تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفته است که نمودار حاصل از این آزمایش در شکل ۴ ارائه شده است. همانطور که از نمودار قابل مشاهده می باشد مقاومت فشاری نمونه مارن زرد حدود  $3/5 \text{ kg/cm}^2$  و کرنش گسیختگی آن در حدود ۵/۱٪ بدست آمده است.

برای ساخت نمونه های ژئوپلیمری، خاک مارن زرد عبوری از الک شماره ۴۰ با ماده افزودنی حاوی آلومینا سیلیکا ( زئولیت و یا متارس) در



شکل ۴. آزمایش تک محوری نمونه مارن زرد بازسازی شده

Fig. 4. Uniaxial test of remolded marl samples



شکل ۵. بخشی از نمونه های ساخته شده برای انجام آزمایشات تک محوری و یک نمونه تحت آزمایش

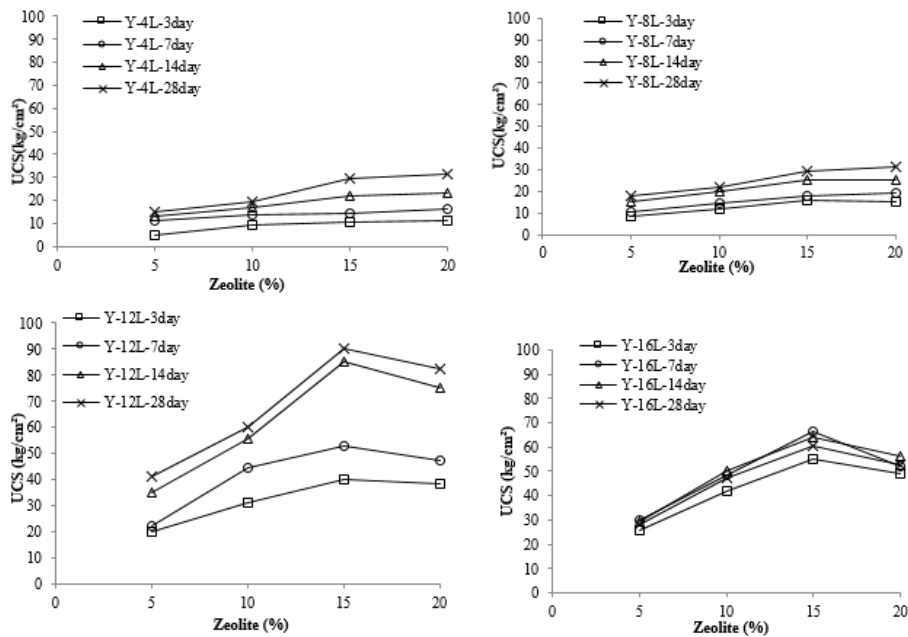
Fig. 5. Some samples prepare for uniaxial tests and samples under test

در غلظت‌های ۴ و ۸ مولار با افزایش درصد وزنی زئولیت از ۱۵٪ به ۲۰٪ افزایش کمتر از ۵٪ در مقاومت مشاهده می شود. در تفسیر نتایج فوق می توان چنین گفت که مقدار آلومینا سیلیکات موجود در ماده افزودنی ( در مطالعه اخیر- زئولیت) تاثیر عمده ای در کسب مقاومت خاک اصلاح شده زئوپلیمری دارد. افزایش مقدار زئولیت فعال شده بازی بدلیل آزاد سازی بیشتر کانیهای سیلیکات و آلومینات منجر به ساخت محصولات سمت N-A-S- H ( هیدرات سیلیکات آلومینات سدیم) در خاک بهسازی شده می گردد. این مطلب قبلا توسط محققین دیگری که از خاکستر بادی بعنوان منبع آلومینا

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مقاومت تک محوری نمونه های زئوپلیمری زئولیتی

در شکل ۶ نمودارهای تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده نمونه های زئوپلیمری در برابر درصدهای زئولیت، زمانهای عمل آوری و غلظت های مختلف فعال کننده بازی آورده شده است. همانطور که در تمامی نمودارهای ارائه شده در این شکل دیده می شود برای تمامی غلظت‌های محلول بازی با افزایش درصد وزنی زئولیت تا ۱۵٪ مقاومت نمونه ها افزایش یافته و مقدار زئولیت ۱۵٪ را می توان بعنوان درصد بهینه معرفی نمود با وجود اینکه



شکل ۶. تغییرات مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری برای درصدهای ژئولیت، زمانهای عمل آوری و غلظتهای مختلف محلول بازی

Fig. 6. Changes in compressive strength of geopolymeric samples for zeolite percentages, curing times and different molarity of alkaline solution

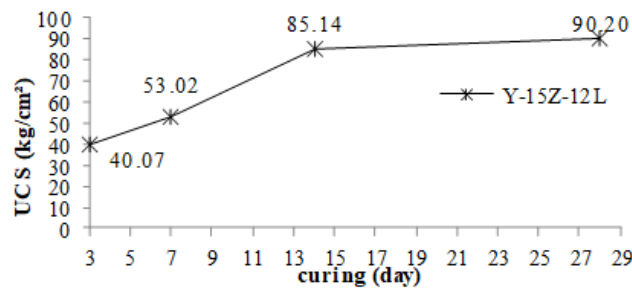
حاصل شده که در شرایط خشک عمل آوری (DC) روش ژئوپلیمریزاسیون موثرتر بوده ولی در شرایط مرطوب عمل آوری (WC) نمونه های تثبیت شده با سیمان پرتلند در حدود ۳۳٪ مقاومت فشاری محدود نشده بیشتری نسبت به نمونه های ژئوپلیمری از خود نشان می دهند [۲۶].

از طرفی با مراجعه به شکل ۶ ملاحظه می شود که در غلظتهای بالای محلول بازی با افزایش درصد ژئولیت از ۱۵٪ به ۲۰٪ مقاومت کاهش می یابد. به عبارت دیگر برای کسب مقاومت بالاتر در غلظتهای پایین محلول بازی، درصد وزنی بالای ژئولیت مناسبتر بوده و هر چه غلظت افزایش می یابد در درصد وزنی پایین تر مقاومت مناسب کسب می گردد.

نتیجه دیگری که از نمودارها حاصل می شود نشان می دهد که در غلظتهای ۴، ۸ و ۱۲ مولار با افزایش زمان عمل آوری مقاومت برای تمامی درصدها افزایش یافته ولی در غلظت محلول بازی ۱۶ مولار مقاومت بین ۳ تا ۷ روز افزایش یافته ولی پس از آن افزایش زمان نقش مثبتی در افزایش مقاومت از خود نشان نمی دهد. افزایش زمان عمل آوری منجر به تشکیل محصولات سمناسیون بیشتری در خاک اصلاح شده گردیده و این پدیده بهبود رفتار مکانیکی خاک ژئوپلیمری را بدنبال دارد [۳۲]. نرخ کسب مقاومت

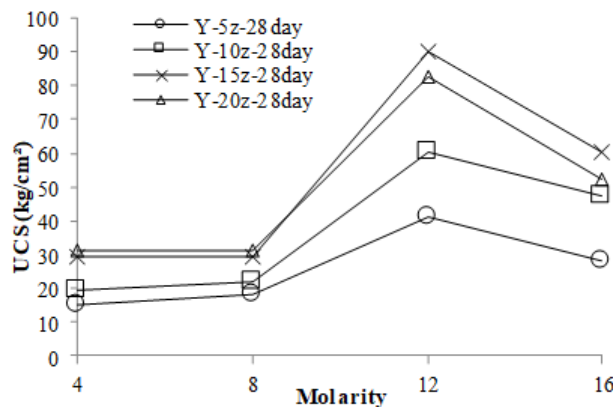
سیلیکات استفاده کرده اند نیز گزارش شده است [۳۲]. از طرفی هر اندازه مقدار محصولات سمته افزایش می یابد سطح پیوند بین دانه ها نیز افزایش یافته و این عامل منجر به افزایش مقاومت می شود [۳۳ و ۳۴]. البته تا به امروز بر اساس مطالعات انجام شده مقدار بهینه مشخصی برای منابع آلومینا سیلیکات در بهسازی خاکهای ژئوپلیمری گزارش نشده است [۳۵].

Cristelo و همکاران [۱۷] بر اساس نتایج آزمایشات تک محوری انجام شده افزایش مقاومت حدود ۱۲۰٪ برای نمونه های خاک بهسازی شده ژئوپلیمری ۲۸ روز عمل آوری نسبت به خاک مینا گزارش کرده اند. در پژوهش اخیر نیز برای نمونه بهینه ژئوپلیمری (15Z و 28day) مقاومت تک محوری در حدود ۹۰/۲ kg/cm<sup>2</sup> بدست آمده است که مقاومتی حدود ۲۶ برابر مقاومت تک محوری نمونه مارن زرد خالص می باشد. این در حالی است که برای مارن تثبیت شده با آهک شهر همدان در شرایط بهینه (۷٪ آهک) افزایش مقاومت محدود نشده ای حدود ۵/۲ برابر نمونه بهسازی نشده بعد از ۴۵ روز عمل آوری گزارش شده است [۳۶]. از طرفی در مقاله ای که به مقایسه رفتار مقاومتی خاک رس (CL) تثبیت شده با سیمان پرتلند و ژئوپلیمر پرداخته شده این نتیجه



شکل ۷. تاثیر زمان عمل آوری بر مقاومت تک محوری فشاری نمونه بهینه ژئوپلیمری زئولیتی (۱۵٪Z، ۱۲M)

Fig. 7. Effect of curing time on uniaxial compressive strength of optimal zeolite geopolymeric sample (15%z,12M)



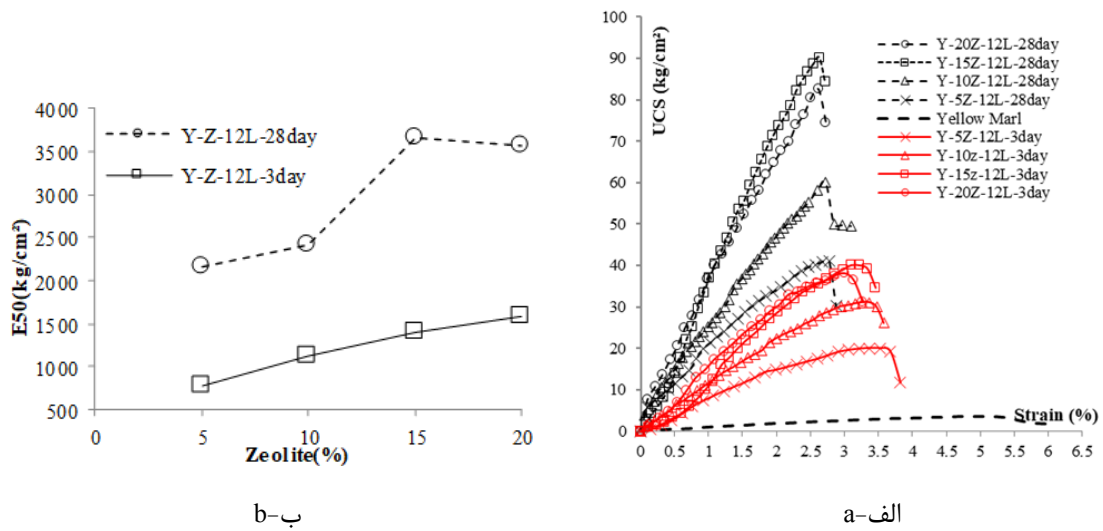
شکل ۸. تغییرات مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری در مقابل غلظت محلول بازی برای درصد های مختلف زئولیت

Fig. 8. Variations of compressive strength of zeolite geopolymeric samples against alkaline solution concentration for different percentages of zeolite

غلظت های مختلف فعال کننده بازی برای زمان عمل آوری ۲۸ روزه آورده شده است. همانطور که در این نمودارها مشاهده می شود برای تمامی درصد های زئولیت مقدار غلظت ۱۲ مولار بعنوان غلظت بهینه محسوب می شود. نتیجه مهم دیگری که از این نمودار حاصل می شود این است که در غلظت های ۴ تا ۸ مولار افزایش مقاومت تک محوری برای هیچکدام از درصد های زئولیت وجود ندارد ولی بین غلظت های ۸ تا ۱۲ مولار افزایش مقاومت بصورت چشمگیر رخ داده ولی بعد از ۱۲ مولار با افزایش غلظت

خاکهای اصلاح شده ژئوپلیمری با زمان ثابت نبوده و با افزایش زمان عمل آوری کاهش می یابد. کاهش تدریجی در میزان افزایش مقاومت را می توان به کاهش تدریجی واکنش ژئوپلیمریزاسیون به دلیل انزوال اجزای مختلف در محیط واکنش نسبت داد [۱۶]. در شکل ۷ بعنوان نمونه نمودار مربوط به نرخ تغییرات مقاومت تک محوری برای نمونه بهینه ژئوپلیمری (12M، 15Z) در برابر زمان عمل آوری ارائه شده است.

در شکل ۸ نمودار تغییرات مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری برای



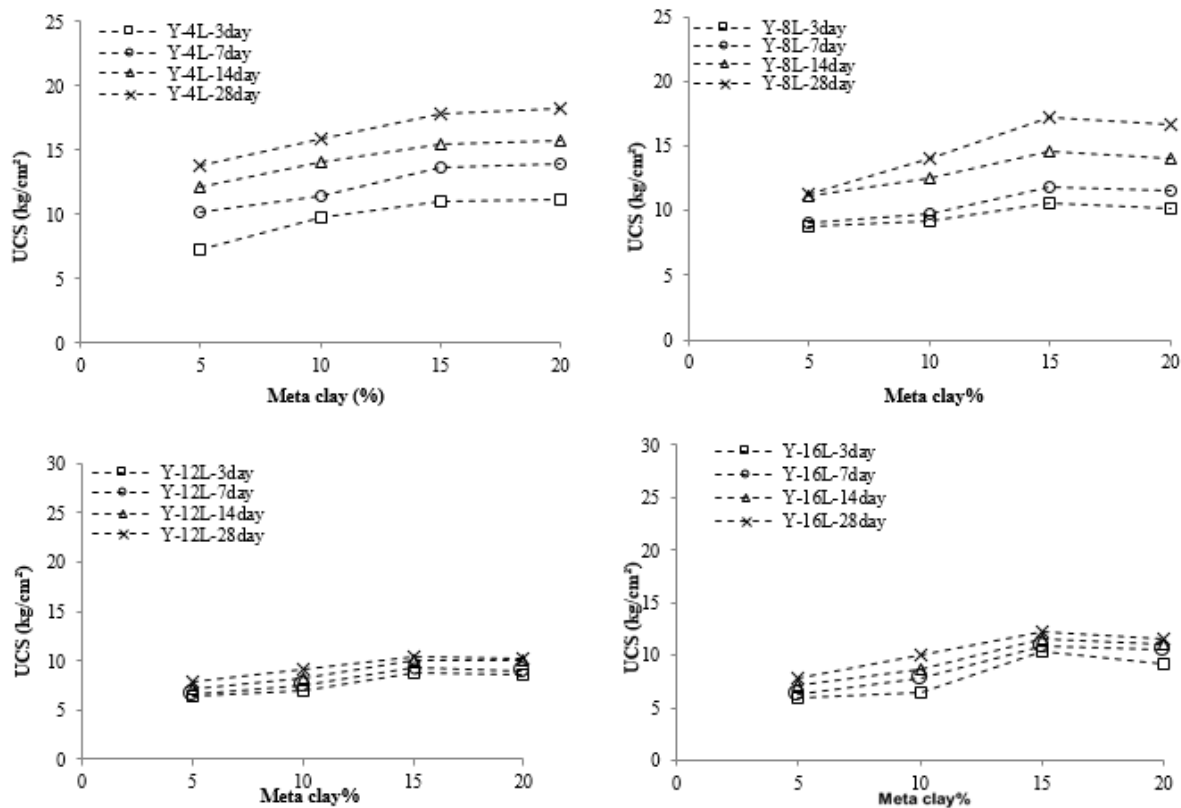
شکل ۹. الف- تغییرات کرنش گسیختگی و ب- سختی (E 50) نمونه های ۳ و ۲۸ روزه با درصدهای مختلف زئولیت در غلظت ۱۲ مولار

Fig. 9. (a) Changes in failure strain and (b) Secant modulus at 50 % strength (E 50) of 28-day samples with different amount of zeolite at a concentration of 12 M

حاصل از آزمایش تراکم (۱۴٪) ساخته شده اند لذا با افزایش غلظت محلول بازی بالاتر از ۱۲ مولار، ویسکوزیته فعال کننده افزایش یافته و روی رفتار نمونه های ساخته شده اثر منفی می گذارد و برای تاثیر گذاری موثر مولاریته های بالا بایستی در صد رطوبت نمونه ها افزایش یابد که در این مقاله این مساله بررسی نشده است. عدم افزایش مقاومت تک محوری مابین غلظتهای ۴ تا ۸ مولار می تواند بعلت ناکافی بودن غلظت فعال کننده بازی در محیط جهت انحلال بیشتر Si و Al زئولیت باشد.

در شکل ۹ - الف تغییرات کرنش گسیختگی نمونه های ۳ و ۲۸ روزه با درصدهای مختلف زئولیت در غلظت ۱۲ مولار آورده شده است. همانطور که در این نمودارها مشاهده می شود با افزایش درصد زئولیت کرنش گسیختگی نمونه ها کاهش می یابد بعبارت دیگر ثابت نگه داشتن غلظت محلول بازی و افزایش درصد زئولیت به ساخت نمونه های تردتر می انجامد بطوریکه که کرنش گسیختگی نمونه مارن زرد حدود ۵/۱٪ بوده ولی در نمونه بهینه ژئوپلیمری (15Z، 12M و 28day) مقدار کرنش گسیختگی به ۲/۶۳٪ کاهش یافته است. از طرفی با افزایش سن نمونه ها نیز کرنش گسیختگی نمونه ها کاهش یافته است. در شکل ۹ - ب نیز تغییرات سختی نمونه های ژئوپلیمری در برابر درصد های مختلف زئولیت و برای نمونه های ۳ و ۲۸ روزه مقایسه شده است. همانطور که نتایج نشان

مقاومت کاهش می یابد. بر اساس اطلاعات ارائه شده در منابع فنی موجود، ارتباط قوی بین نسبت وزنی فعال کننده به منبع آلومیناسیلیکات و افزایش مشخصات مقاومتی خاکهای بهسازی شده ژئوپلیمری وجود دارد. افزایش غلظت فعال کننده ممکن است منجر به افزایش شرایط بازی محیط واکنش (PH) شده و این مساله امکان تولید محصولات سمته را بهبود می بخشد [۳۵]. البته مطالعات موجود نشان می دهد که مقدار غلظت بالا ضرورتاً نمی تواند مقدار بهینه محسوب شود. این نتیجه توسط Cristelo و همکاران [۱۷] که محلول هیدروکسید سدیم با غلظتهای ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ مولار برای ساخت نمونه های تک محوری ژئوپلیمری بکار برده اند تایید شده است بطوریکه در بلند مدت نمونه های ساخته شده با غلظت ۱۲/۵ مولار مقاومت بالاتری نسبت به نمونه های ساخته شده با غلظت ۱۵ مولار از خود نشان داده اند. این مساله می تواند به نسبت اکسیدهای سیلیکا به سدیم در محلول بازی مرتبط باشد که منجر به ناپایدار شدن محلول بازی (کریستالی شدن) گردیده و اثر منفی بر واکنش ژئوپلیمری می گذارد [۳۷]. با این وجود در برخی مطالعات از جمله مقاله Xu and Van Deventer [۳۸] اشاره شده که مقاومت تک محوری نمونه ها با غلظت فعال کننده بازی رابطه مستقیم دارد. این مساله زمانی می تواند صحیح باشد که رطوبت نمونه ها به اندازه کافی بالا باشد. در مقاله حاضر از آنجا که نمونه ها در رطوبت بهینه



شکل ۱۰. تغییرات مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری برای درصدهای متارس، زمانهای عمل آوری و غلظتهای مختلف محلول بازی

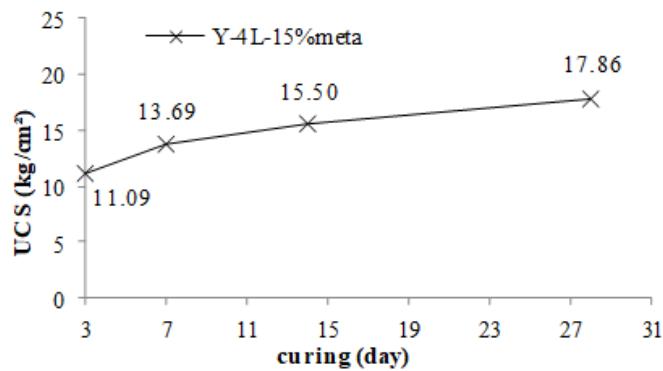
Fig. 10. Changes in compressive strength of geopolymeric samples for different percentages of meta-clay, curing times and concentrations of alkali solution

بسیار کمتر از ژئوپلیمرهای ژئولیتی می باشد. این بدین معنی است که نوع ماده آلومینوسیلیکاتی مورد استفاده در ژئوپلیمر نقش مهمی در میزان مقاومت خاک اصلاح شده ژئوپلیمری دارد که این مساله بدلیل ترکیب شیمیایی متفاوت ژئولیت و متارس می باشد که بر روی محصولات واکنش تاثیرمی گذارد [۳۵]. این مساله را می توان به وجود مقدار بالای سیلیکا و آلومینا در ژئولیت در مقایسه با متارس ( مطابق جدول ۲) نسبت داد که به تولید مقدار بیشتری از محصولات سیمانی منجر شده و در نتیجه بافت خاک تقویت می گردد. همانطور که در نمودارهای شکل ۱۰ دیده می شود برای تمامی غلظتهای فعال کننده بازی و در تمامی درصد های متارس زمان عمل آوری بعنوان پارامتر مثبت عمل کرده و با گذشت زمان مقاومت در تمامی نمونه ها افزایش یافته است ولی نرخ تغییرات مقاومت برای تمامی شرایط نسبت به زمان ثابت نیست. برای درک بهتر این مساله نمودار مربوط به نرخ تغییرات مقاومت تک محوری برای نمونه ژئوپلیمرمتارسی با ۱۵ درصد متارس و

می دهد نمونه بهینه ژئوپلیمری بیشترین سختی را در ۲۸ روز عمل آوری کسب نموده است و عمل آوری نقش موثری در افزایش سختی نمونه ها ایفا کرده است.

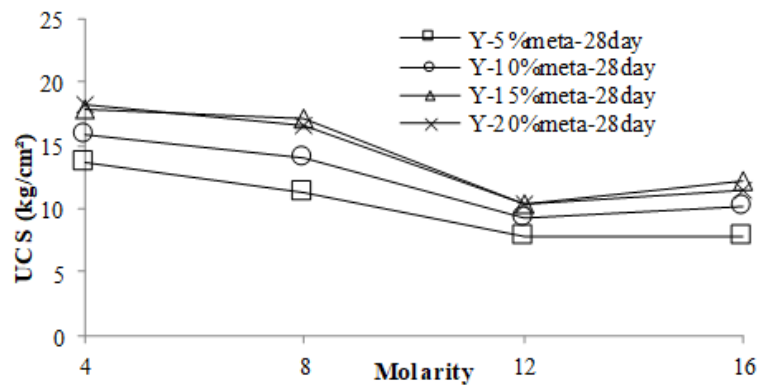
### ۳-۲- مقاومت تک محوری نمونه های ژئوپلیمری متارسی

مشابه شکل ۶، در شکل ۱۰ نیز نمودارهای تغییرات مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری متارسی برای درصدهای مختلف متارس، زمانهای عمل آوری و غلظت های مختلف فعال کننده بازی آورده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، در ژئوپلیمرهای ساخته شده بر مبنای متارس نیز مقدار وزنی ۱۵٪ را می توان بعنوان مقدار بهینه متارس معرفی نمود. از طرفی می توان گفت که با وجود اینکه این درصد بعنوان درصد بهینه محسوب می شود ولی نرخ تغییرات مقاومت در برابر درصد متارس به اندازه نقش ژئولیت نبوده و هم چنین مقاومت کسب شده در همه شرایط در ژئوپلیمرهای متارسی



شکل ۱۱. تأثیر زمان عمل آوری بر مقاومت تک محوری فشاری نمونه بهینه ژئوپلیمری متارسی (۴M, ۱۵% meta)

Fig. 11. The effect of curing time on the uniaxial compressive strength of the optimal sample of metaclayey geopolymer 15%meta)



شکل ۱۲. تغییرات مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری در مقابل غلظت محلول بازی برای درصدهای مختلف متارسی

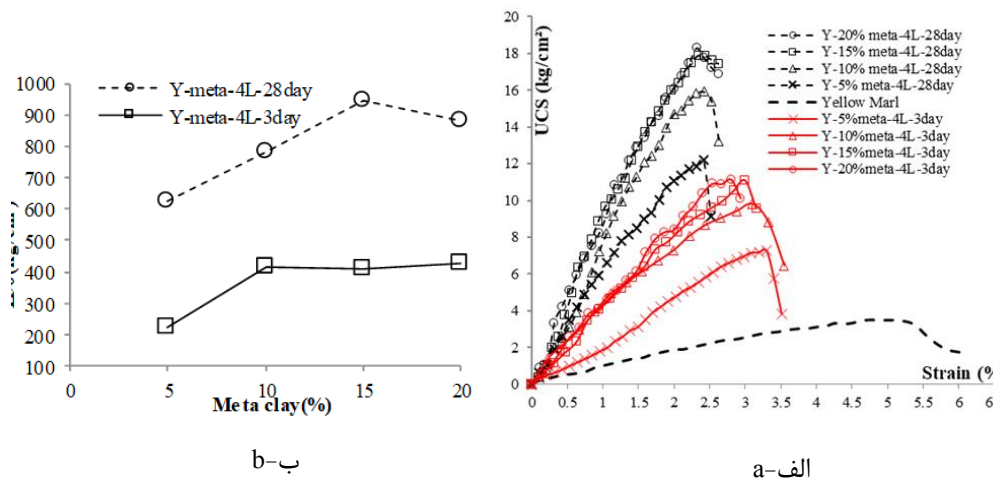
Fig. 12. Variations of compressive strength of geopolymeric samples against alkali solution concentration for different percentages of metaclay

را می توان چنین بیان نمود که زمان لازم برای تشکیل یک ژل پیوسته از محلول آلومینوسیلیکات فوق اشباع، به طور قابل توجهی با شرایط فرآوری مواد خام (در این تحقیق ژئولیت و یا متارسی)، ترکیب محلول و شرایط سنتز متفاوت است [۱۱].

در شکل ۱۲ تأثیر غلظت فعال کننده بازی بر مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری متارسی در زمان عمل آوری ۲۸ روزه بصورت نمودار ارائه شده است. همانطور که دیده می شود برای تمامی درصد های متارسی مقدار

غلظت فعال کننده ۴ مولار در برابر زمان عمل آوری در شکل ۱۱ ارائه شده است. همانطور که در این نمودار مشاهده می شود نرخ کسب مقاومت با گذشت زمان کاهش یافته است. دلیل این مساله در بخشهای قبلی توضیح داده شده است.

با مقایسه شکل های ۶ و ۱۰ چنین استنباط می شود که رفتار خاکهای بهسازی شده ژئوپلیمری ژئولیتی و متارسی در کسب مقاومت نسبت به زمان کاملا مشابه نیست. با مراجعه به مطالعات قبلی انجام شده دلیل این تفاوت



شکل ۱۳. الف- تغییرات کرنش گسیختگی و ب- سختی ( $E_{50}$ ) نمونه های ۳ و ۲۸ روزه با درصد های مختلف متارس در غلظت ۴ مولار

Fig. 13. (a) Changes in uniaxial compressive strength and (b) Secant modulus at 50 % strength ( $E_{50}$ ) of 28-day samples with different percentages of metaclays in optimal concentrations

ها از لحاظ سختی مشابه نمونه های ژئولیتی بوده ولی مقدار عددی سختی در نمونه های متارسی به مراتب کمتر است.

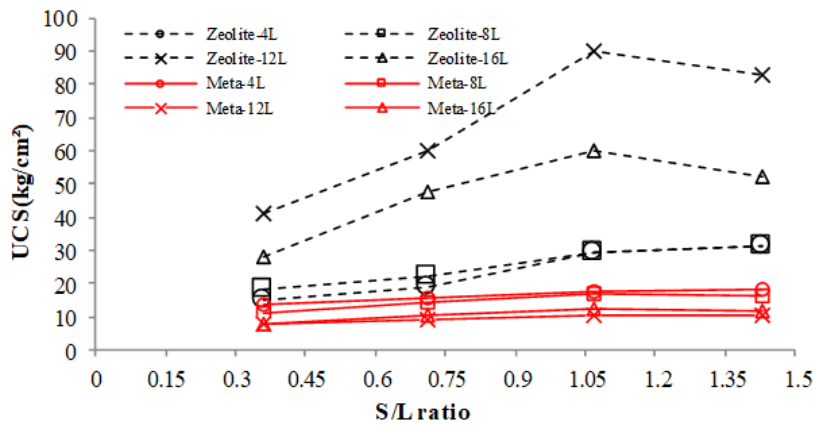
در شکل ۱۴ تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده نمونه های ۲۸ روزه ژئوپلیمری ژئولیتی و متارسی در برابر نسبت وزنی مواد جامد آلومیناسیلیکاتی به محلول بازی (S/L) آورده شده است. همانطور که از این نمودار استنباط می شود بیشترین مقاومت هر دو نوع نمونه در مقدار S/L برابر با ۱/۰۷ بدست آمده است. این نسبت بهینه در مقاله (Phetch- et al. (2016) که از خاکستر بادی بعنوان منبع آلومینا سیلیکاتی در تثبیت ژئوپلیمری خاکهای نرم دریایی استفاده کرده اند برابر ۱ گزارش شده است [۱۶]. البته لازم به توضیح است که محتوای مواد آلومیناسیلیکاتی و نوع محلول بازی در نتیجه کار بسیار تاثیر گذار می باشد.

شکل ۱۵ جهت مقایسه مقاومت فشاری تک محوری نمونه های ژئوپلیمری ژئولیتی و متارسی به ازای درصد های مختلف ژئولیت و یا متارس، غلظتهای مختلف محلول بازی در زمان های عمل آوری ۳ و ۲۸ روزه ارائه شده است. در این نمودار محور قائم نسبت مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری ژئولیتی به متارسی و محور افقی درصد وزنی ژئولیت و یا متارس بکار رفته در ساخت نمونه ها می باشد. همانطور که از این نمودار استنباط می شود در غلظت ۱۲ مولار، نسبت مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمری

غلظت ۴ مولار بعنوان غلظت بهینه در ترکیب محسوب شده و برای خلاف شرایط قبلی با افزایش غلظت محلول بازی مقاومت کاهش یافته است. همانطور که در بخشهای قبلی نیز بحث شد مقدار بهینه غلظت محلول بازی به عوامل مختلفی از جمله نسبت وزنی فعال کننده به منبع آلومیناسیلیکات، PH محیط واکنش، رطوبت نمونه ها و ... دارد. از آنجا که در صد آلومینا سیلیکات موجود در متارس کمتر از ژئولیت می باشد لذا در ترکیب متارسی نیاز به غلظت کمتر محلول بازی برای فعال سازی سیلیکا و آلومینا در مصالح مینا و انحلال ساختار شیشه ای و سپس تبدیل به ساختار بسیار متراکم منطقی می باشد [۳۹].

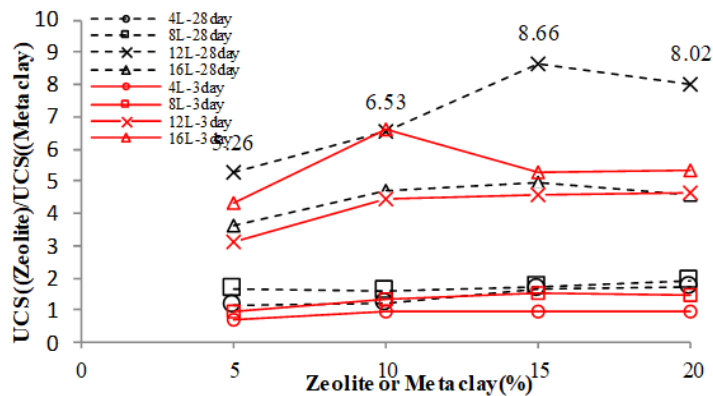
در شکل ۱۳ - الف تغییرات مقاومت فشاری تک محوری نمونه های ژئوپلیمری متارسی در برابر کرنش محوری برای غلظت بهینه (۴ مولار) و برای زمانهای عمل آوری ۳ و ۲۸ روزه آورده شده است. مشابه نمونه های ژئوپلیمری ژئولیتی، در نمونه های حاضر نیز کرنش گسیختگی با افزایش درصد متارس کاهش یافته و در مقدار متارس ۱۵٪ و نمونه ۲۸ روزه کرنش گسیختگی به ۲/۴۴٪ رسیده است. مشابه نمونه های ژئولیتی در این نمونه ها نیز با افزایش سن نمونه ها کرنش گسیختگی نمونه ها کاهش یافته است. در شکل ۱۳- ب نیز تغییرات سختی نمونه های ژئوپلیمری متارسی برای در شرایط توضیح داده شده فوق نشان داده شده است. روند رفتاری این نمونه





شکل ۱۴. تغییرات نسبت مقاومت تک محوری نمونه های ژئوپلیمری ۲۸ روزه در برابر نسبت وزنی مواد جامد آلومیناسیلیکاتی به محلول بازی (S/L)

Fig. 14. Changes in uniaxial strength ratio of 28-day geopolymeric samples against the weight ratio of aluminosilicate solids to alkaline solution(S/L)

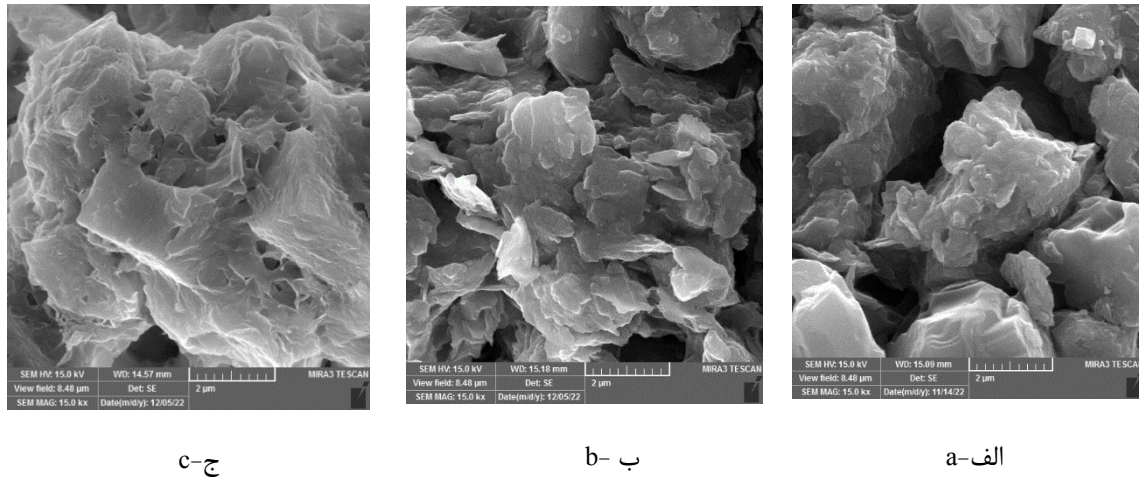


شکل ۱۵. تغییرات نسبت مقاومت تک محوری نمونه های ژئوپلیمری ۳ و ۲۸ روزه با درصد های مختلف ژئولیت یا متارنس

Fig. 15. Changes in uniaxial strength ratio of 3,28-day geopolymeric samples with different percentages of zeolite or metaclay

برای تمامی غلظتهای محلول بازی، مقاومت تک محوری ۲۸ روزه نمونه های ژئوپلیمری ژئولیتی بیشتر از نمونه های ژئوپلیمری متارسی می باشد. در شکل ۱۶ تصاویر عکس برداری الکترونی روبشی با بزرگ نمایی kx ۱۵/۰ به ترتیب مربوط به نمونه های ۲۸ روزه الف- مارن زرد خالص ب- مارن ژئوپلیمری ژئولیتی ( در ترکیب بهینه) و ج- مارن ژئوپلیمری متارسی ( در ترکیب بهینه) جهت مقایسه ارائه شده است. همانطور که از مقایسه

ژئولیتی به متارسی بین ۵/۲۶ تا ۸/۶۶ برابر می باشد. بعنوان مثال، مقاومت ۲۸ روزه نمونه ژئوپلیمری ژئولیتی که با ۱۵٪ ژئولیت و غلظت ۱۲ مولاری فعال کننده بازی ساخته شده است در حدود ۸/۶۶ برابر نمونه مشابه ۲۸ روزه ژئوپلیمری متارسی دارای ۱۵٪ متارنس و غلظت ۱۲ مولاری فعال کننده بازی می باشد. این اختلاف مقاومت در شرایط غلظت بازی ۴ و ۸ مولار به حداقل رسیده است ولی در تمامی درصد های وزنی ژئولیت و یا متارنس و



شکل ۱۶. تصاویر عکس برداری الکترونی روبشی الف- مارن زرد خالص ب- مارن ژئوپلیمری ژئولیتی ج- مارن ژئوپلیمری متارسی

Fig. 16. SEM images of (a) Pure yellow marl (b) geopolymeric marl with zeolite (c) geopolymeric marl with metaalay

تصاویر مشاهده می شود در شکل ب و ج در اثر تولید ژل آلومینوسیلیکاتی فضای خالی بین دانه ها با این ماده آمورف پر شده و سماتاسیون بین ذرات بدین صورت رخ داده است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق از روش ژئوپلیمریزاسیون برای تثبیت مارن زرد تبریز استفاده شده و اثر نوع ماده افزودنی حاوی آلومینا سیلیکا (ژئولیت و یا متارس)، اثر درصد وزنی ماده افزودنی، غلظت محلول بازی و زمان عمل آوری در کسب مقاومت فشاری نمونه ها ارزیابی شده است. عمده ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر خلاصه شده است.

- در نمونه های ژئوپلیمری ژئولیتی برای تمامی غلظتهای محلول بازی با افزایش درصد وزنی ژئولیت تا ۱۵٪ مقاومت نمونه ها افزایش یافته و مقدار ژئولیت ۱۵٪ را می توان بعنوان درصد بهینه معرفی نمود.

- در نمونه های ژئوپلیمری ژئولیتی مقدار غلظت ۱۲ مولار بعنوان غلظت بهینه فعال کننده بازی برای تمامی درصد های ژئولیت بدست آمده است.

- در غلظتهای ۴، ۸ و ۱۲ مولار فعال کننده بازی با افزایش زمان عمل آوری مقاومت نمونه های ژئوپلیمری ژئولیتی ساخته شده در تمامی درصدهای ژئولیت، افزایش یافته ولی در غلظت محلول بازی ۱۶ مولار مقاومت بین ۳ تا ۷ روز افزایش یافته ولی پس از آن افزایش زمان نقش مثبتی در افزایش

مقاومت از خود نشان نمی دهد.

- با افزایش درصد ژئولیت کرنش گسیختگی نمونه ها کاهش می یابد بعبارت دیگر ثابت نگه داشتن غلظت محلول بازی و افزایش درصد ژئولیت به ساخت نمونه های ژئوپلیمری تردتر می انجامد.

- در نمونه های ژئوپلیمری متارسی نیز مقدار وزنی ۱۵٪ بعنوان مقدار بهینه متارس بدست آمده است.

- در نمونه های ژئوپلیمری متارسی و برای تمامی درصد های متارس مقدار غلظت فعال کننده ۴ مولار بعنوان غلظت بهینه در ترکیب محسوب شده و بر خلاف نمونه های ژئوپلیمری ژئولیتی، با افزایش غلظت محلول بازی مقاومت نمونه ها کاهش می یابد.

- در نمونه های ژئوپلیمری متارسی برای تمامی غلظتهای فعال کننده بازی و در تمامی درصد های متارس زمان عمل آوری بعنوان پارامتر مثبت عمل کرده و با گذشت زمان مقاومت در تمامی نمونه ها افزایش یافته است ولی نرخ تغییرات مقاومت برای تمامی شرایط نسبت به زمان ثابت نیست.

- در نمونه های ژئوپلیمری متارسی کرنش گسیختگی با افزایش درصد متارس کاهش می یابد.

- در تمامی درصد های وزنی ژئولیت و یا متارس و برای تمامی غلظتهای محلول بازی، مقاومت تک محوری نمونه های ژئوپلیمری ژئولیتی بیشتر از نمونه های ژئوپلیمری متارسی می باشد.

- 42(2007) 2917–2933.
- [12] M. Zhang, H. Guo, T. El-Korchi, G. Zhang, M. Tao, Experimental feasibility study of geopolymers as the next-generation soil stabilizer. *Constr. Build. Mater.* 47(2013), 1468–1478.
- [13] D. Khale, R. Chaudhary, Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review, 42 (2007) 729–746.
- [14] E. Hermann, C. Kunze, R. Gatzweiler, G. Kiebig, J. Davitovits, *Proceedings of Geopolymers*, (1999) 211.
- [15] J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications*, 2nd ed., Institut Géopolymère: Saint-Quentin, France, (2008) 1–585.
- [16] C. Phetchuay, S. Horpibulsuk, A. Arulrajah, C. Suksiripattanapong, A. Udomchai, Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer, *Appl. Clay Sci.* 127–128 (2016) 134–142.
- [17] N. Cristelo, A. Teixeira Pinto, A. Glendinning, Deep soft soil improvement by alkaline activation. *Proc. Inst. Civ. Eng. – Ground Improv.* 164 (2011) 73–82.
- [18] A. Allahverdi, E.N. Khani, Construction wastes as raw materials for geopolymer binders, *Int. J. Civ. Eng.* (2009) 154–160.
- [19] D. Hardjito, S.E. Wallah, D.M.J. Sumajouw, B.V. Rangan, On the development of fly ash-based geopolymer concrete, *ACI Mater. J.* 106(2004) 467–472.
- [20] H. Yunfen, W. Dongmin, Z. Wenjuan, L. Hongbo, W. Lin, Effect of activator and curing mode on fly ash-based geopolymer, *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* 24 (5) (2009) 711–715.
- [21] X. Guo, H. Shi, W.A. Dick, Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer, *Cem. Concr. Compos.* 32(2010) 142–147.
- [22] E. Coudert, M. Paris, D. Deneele, G. Russo, A. Tarantino, Use of alkali activated high-calcium fly ash binder for kaolin clay soil stabilisation: Physicochemical evolution, *Construction and Building Materials* 201 (2019) 539–552.
- [23] S. Rios, C. Ramos, A. Viana da Fonseca, N. Cruz, and C.
- [1] A. Seco, F. Ramírez, L. Miqueleiz, B. García, E. Prieto, The use of non-conventional additives in Marls stabilization, *Applied Clay Science*, 51 (2011) 419–423.
- [2] D. F. Lin, K. L. Lin, M. J. Hung, H. L. Luo, Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil, *Journal of Hazardous Materials* 145 (2007) 58–64.
- [3] N. Degirmenci, A. Okucu, A. Turabi, Application of phosphogypsum in soil stabilization, *Building and Environment* ,42 (2007) 3393–3398.
- [4] N. Yarbasi, E. Kalkan, S. Akbulut, Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives. *Cold Regions Science and Technology* 48 (2007), 44–54.
- [5] H. Bahadori, A. Hasheminezhad, F. Taghizadeh, Experimental study on marl soil stabilization using natural pozzolans, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31 (2019), 04018363.
- [6] M.A. Garcia, J.M. Chimenos, A.I. Fernandez, L. Miralles, M. Segarra, F. Espiell, Low-grade MgO used to stabilize heavy metals in highly contaminated soils, *Chemosphere* 56 (2004), 481–491.
- [7] L. Behak, N. Perez, Characterization of a material comprised of sandy soil, rice husk ash and potentially useful lime in pavements, *Journal Ingeniería de construcción* 23 (2008), 34–41.
- [8] R. Alipour, A. Heshmati, J. Karimiazar, N. Esazadefar, E. Asghari, Resistance and swelling of Tabriz marl soils stabilised using nano-silica and nano-alumina, *ICE Proceedings Geotechnical Engineering*, 2022.
- [9] C. L. Henghu Sun, L. Li, A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements, *Cement and Concrete Research*, 40(2010) 1341–1349.
- [10] J. Davidovits, Geopolymers: inorganic polymeric new materials, *J Therm Anal*, 37(1991) 1633–56.
- [11] P. Duxson, A. Fernandez-Jime'nez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, J. S. J. van Deventer, Geopolymer technology: the current state of the art, *J Mater Sci*,

- Chinkulkijniwat, A. Arulrajah, S. Shen, Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer, *Road Mater. Pavement Des* 17(2016) 877–891.
- [33] Z. Liu, C. Cai, F. Liu, F. Fan, Feasibility Study of Loess Stabilization with Fly Ash–Based Geopolymer, *J. Mater. Civ. Eng.* 28(2016) 04016003.
- [34] H.H. Abdullah, M.A. Shahin, M.L. Walske, Geomechanical behavior of clay soils stabilized at ambient temperature with fly-ash geopolymer-incorporated granulated slag. *Soils Found.* 59(2019)1906–1920.
- [35] H.H. Abdullah, M.A. Shahin, M.L. Walske, Review of Fly-Ash-Based Geopolymers for Soil Stabilisation with Special Reference to Clay, *Geosciences*, 10(2020) 249; doi:10.3390/geosciences10070249.
- [36] M. H. Ghobadi, R. Babazadeh, Y. Abdilor, Utilization of lime for Stabilizing Marly Soils and Investigating the Effect of pH Variations on shear Strength Parameters, *Journal of Engineering Geology*, 8(2014)1939-1962.
- [37] Rethinking Cement. Available online: <https://bze.org.au/research/manufacturing-industrial-processes/rethinking-cement/> (accessed on 29 May 2020).
- [38] H. Xu, J. Van Deventer, The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *Int. J. Miner. Process.* 59(2000) 247–266.
- [39] S. Pourakbar, B. K. Huat, A review of alternatives traditional cementitious binders for engineering improvement of soils, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 11(2017) 206-16.
- Rodrigues, Colombian Soil Stabilized with Geopolymers for Low Cost Roads, *Procedia Engineering*, 143 (2016)1392–1400.
- [24] B. Singhi, A. Islam Laskar, M.A. Ahmed, Investigation on Soil–Geopolymer with Slag, Fly Ash and Their Blending, *Arab J Sci Eng* 41(2016)393–400.
- [25] M. Khan, J. Wang, D. Sarker, Stabilization of Highly Expansive Moreland Clay Using Class-C Fly Ash Geopolymer (CFAG). (2018). Conference Paper in Geotechnical Special Publication © ASCE.
- [26] P. Ghadir, N. Ranjbar, Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement, *Construction and Building Materials* 188(2018)361–371.
- [27] Sh. Wang, J. Su, Zh. Wu, W. Ma, Y. Li, H.Hui, Silty Clay Stabilization Using Metakaolin-Based Geopolymer Binder, *Frontiers in Physics*, 9(2021) 769786.
- [28] P. Luo, J. Meng, D. Wang, L. Jiao, G. Xue, Experimental study on mechanical properties and microstructure of metakaolin based geopolymer stabilized silty clay, *Construction and Building Materials*, 316( 2022)125662.
- [29] J. Pera, Metakaolin and calcined clays, *Cem. Concr. Compos* 23(6) (2001) 441-454.
- [30] M.S. Morsy, S.H. Alsayed, Y.A. Salloum, T.Almusallam, Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on strength and microstructure of fly ash geopolymer binder, *Arabian J. Sci. Eng.* 39(2014) 4333–4339.
- [31] Y.S. Zhang, Research on structure formation mechanism and properties of high-performance geopolymer concrete, PhD Thesis, Southeast University, Nanjing (2003).
- [32] I. Phummiphan, S. Horpibulsuk, P. Sukmak, A.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Dibamehr, F. Behrooz Sarand, R. Vafaipour Sorkhabi, The application of geopolymerization method to modify the yellow marl soil of Tabriz, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 56(4) (2024) 457-476.

DOI: [10.22060/ceej.2024.21897.7844](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.21897.7844)

