



Stabilized Sand with Zeolite under Impact Load

Alireza Nasiry, Morteza Jiryaei Sharahi * , Ali Attarzadeh 

Department of Civil Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

ABSTRACT: Cement production has numerous environmental side effects, and it is desirable to reduce the pollutants during cement production. One way of alleviating cement production pollution is by reducing its consumption. Demand for cement can be reduced by introducing alternative materials with the same benefits but are less detrimental to the environment. A natural substitute for cement in infrastructure civil projects is a pozzolan, which is naturally found and is a side product of some industrial processes. One type of pozzolan that has wide availability in Middle Eastern countries is zeolite. Zeolite has been investigated by previous researchers as a replacement for cement for specific types of civil infrastructure development. However, no previous study has investigated zeolite as a substitute for cement for stabilizing sandy soils under impact loading. The feasibility of replacing a percentage of cement with zeolite for stabilizing the sand soil under impact loads is being assessed. Different percentages of cement are replaced with zeolite, and samples are tested under impact loads. Tests indicate that there is an optimum percentage of replacement at which the soil strength under impact loads shows the greatest increase. The optimal replacement percentage is found to be between 30% to 50%. Any replacement below or above that optimal range would hurt the impact strength of the soil samples. The positive effect at optimum replacement percentages can be attributed to the reaction of Calcium Hydroxide and silicate-aluminum structures. Calcium Hydroxide is generated by cement hydration, and silicate-aluminum structures come from the introduction of zeolite into the mix. dealing with any aspect of engineering from fundamental sciences to applications in engineering systems.

Review History:

Received: Feb. 06, 2023

Revised: Oct. 18, 2025

Accepted: Nov. 28, 2025

Available Online: Dec. 03, 2025

Keywords:

Sand

Cement

Zeolite

Strength

Impact

1- Introduction

Cement production has numerous environmental side effects, and it is desirable to reduce the pollutants during cement production. One way of alleviating cement production pollution is by reducing its consumption. Demand for cement can be reduced by introducing alternative materials with the same benefits but are less detrimental to the environment. A natural substitute for cement in infrastructure civil projects is a pozzolan, which is naturally found and is a side product of some industrial processes. One type of pozzolan that has wide availability in Middle Eastern countries is zeolite. Zeolite has been investigated by previous researchers as a replacement for cement for specific types of civil infrastructure development. The effects of zeolite on the shear strength of cement-stabilized soils have been investigated by Shushpasha et al. (2019) considering different amounts of cement and percentages of its replacement with zeolite [1]. The use of zeolite in combination with crumb rubber for sand stabilization has been studied by Soltani et al. (2014). The best combination was suggested to be 7.5 % crumb rubber in the form of granules and 30 % zeolite as a substitute for

cement [2]. In recent years, studies have been conducted on replacing cement with zeolite in soil stabilization [3-6].

This research aims to investigate the effect of replacing cement with zeolite on the impact strength of cement-stabilized sand. This issue has not been investigated in the technical literature. On the other hand, due to the impact nature of dynamic and seismic loads, the resistance to impacts in the form of the final number of impacts that can be tolerated is important. In the present study, an experiment was designed to investigate the effect of zeolite on the impact strength of sand mixed with cement. The samples have different percentages of cement and zeolite.

2- Methodology

The soil used in this study was obtained from the southeastern region of Tehran. The portion of the soil that remained on the No. 200 sieve (fine to medium sand) according to ASTM D 422-63 was used to prepare the samples. Type II Portland cement from Shahrud cement factory was used for the experiments. Clinoptilolite zeolite prepared from Semnan was used. Samples with different

*Corresponding author's email: jiryaei@qut.ac.ir



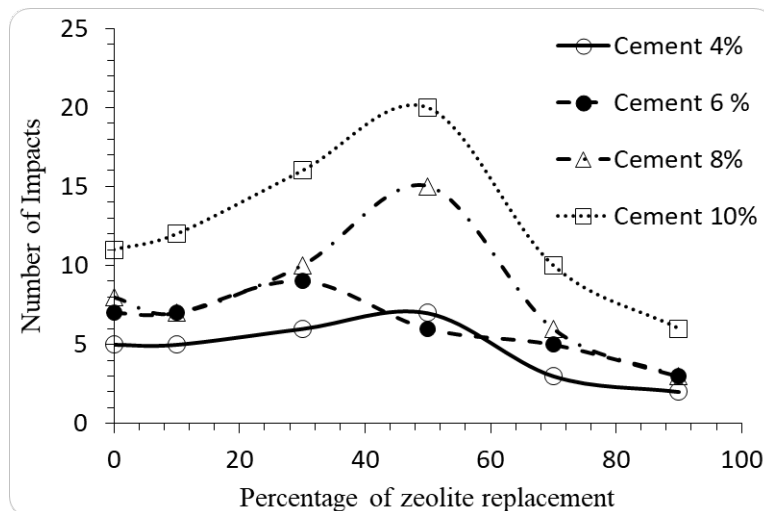


Fig. 1. Comparison of impact resistance of samples.

percentages of cement of 4, 6, 8 and 10% of the dry weight of the samples were considered. Also, the percentage of cement replacement with zeolite was selected to be 0, 10, 30, 50, 70 and 90 % of the cement weight. To determine the optimum moisture content of the samples and their optimum dry density, standard Proctor compaction tests were performed according to ASTM D698. The curing time of the samples with dimensions of 30 cm x 30 cm x 5 cm was 28 days at a temperature of 23° C.

The impact strength of each sample was considered equal to the number of impacts required to create visible cracks in the samples. The impacts are caused by the free fall of a 250 g weight from a height of 95 cm.

3- Discussion and Results

Figure 1 illustrates the results of impact strength tests for different conditions. The value of impact strength is shown on the vertical axis. The optimal amount of zeolite replacement for all samples is between 30% and 50% of cement. For all samples, replacement of more than 60% to 65% has an adverse effect on the strength. This means that the strength decreases compared to the initial sample of pure cement. For most samples, replacement of 0 to 10% of zeolite does not have a significant effect on the strength.

The results show that the amount of zeolite in combination with cement has an optimal percentage in all samples. With increasing the amount of zeolite, the strength increases and when the zeolite reaches the optimal percentage, the strength reaches a maximum. If the amount of zeolite exceeds the optimal percentage, the strength decreases. Zeolite contains silicon oxide and aluminum oxide minerals called aluminum silicates. On the other hand, the reaction process of cement and water leads to the production of calcium hydroxide particles. The reaction of aluminum silicate and calcium hydroxide increases the strength. If the amount of zeolite and consequently the amount of aluminum silicate is low, the

excess calcium hydroxide does not participate in the reaction and the strength does not increase. On the other hand, if the amount of zeolite is excessive, as a result, the excess amount of aluminum silicate remains in the mixture and reduces the strength.

4- Conclusions

In this study, the effect of zeolite additive on the impact strength of cement-stabilized sand was investigated. According to the results of the experiment designed and constructed in the present study, the optimal percentage of cement replacement with zeolite was suggested for each mixture. The results also show the range of replacement percentages of zeolite that have a negligible or adverse effect on the strength. The optimal replacement amount is between 30% and 50% zeolite. Replacement of more than 65% has an adverse effect on the impact resistance. It is observed that replacement up to 10% does not have a significant effect on the impact strength.

References

- [1] I. Shooshpasha, M. Abbasi, H. Molaabasi, The Effect of Zeolite on Shear Strength of Babolsar Sand Stabilized with Cement, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 49.1(94) (2019) 89-96.
- [2] M.S. Soltani, M. Jiryaei Sharahi, M. Amelsakhi, Effect of Zeolite and tire granules on cement stabilization of the sand, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(2) (2022) 759-774.
- [3] M. Ramezani, S. Soleimani Kutanaei, A. Seyedkazemi, A. Esfandiari Fard, Enhancing the Durability of Cement-Stabilized Clayey Sand with Zeolite and PVA Fibers Under Wet–Dry and Freeze–Thaw Cycles, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 12(5) (2025) 162.
- [4] S. Nasrollahpour, A. Tanhadoust, S. Kaur Brar, H.

- MolaAbasi, M.L. Nehdi, O. Ataei, Multi-objective optimization of sustainable cement-zeolite improved sand based on life cycle assessment and artificial intelligence, *F1000Res*, 13 (2024) 257.
- [5] L. Cao, P. Cao, Z. Wang, Z. Tan, C. Zhou, G. Zhang, S. Zhang, J. Wang, Performance and environmental impact assessment of a novel zeolite modified cement stabilized calcareous sand material for island eco-construction, *Construction and Building Materials*, 458 (2025) 139628.
- [6] W. Qu, N. Maimt, J. Qu, Effects of zeolite and palm fiber on the weathering resistance and durability characteristic of cement soil, *Scientific Reports*, 15(1) (2025) 4408.



رفتار تثبیت ماسه با سیمان و زئولیت تحت بارهای ضربه ای

علیرضا نصیری، مرتضی جیریایی شراهی*^{id}، علی عطارزاده*^{id}

گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲

کلمات کلیدی:

زئولیت
سیمان
ماسه
مقاومت
بار ضربه ای

خلاصه: یکی از راه های مقاوم سازی ماسه تثبیت آن با سیمان و آهک بوده است که با توجه به ایجاد آلودگی های زیست محیطی، عدم مقرون به صرفه بودن، ایجاد مشکلات ساختاری و عدم وجود مقاومت پایدار این مصالح، محققین بر آن هستند که مصالح جایگزین را بیابند. برای این منظور، راه های گوناگونی موضوع تحقیقات بوده است. از جمله این تحقیقات، پژوهش هایی هستند که اثر افزودن گردهای آتشفشانی - معدنی به مصالح حاکی را بررسی می کنند. از زیر مجموعه های این گردها، گرد زئولیت است. گرد زئولیت نسبتا ارزان و در دسترس است. تحقیقات پیشین نشان می دهد که این گرد، مقاومت دراز مدت ماسه را در برابر بار معمولی افزایش می دهد. اما تحقیقی برای بار ضربه ای انجام نشده است. در این تحقیق اثر افزودنی زئولیت بر مقاومت ماسه در برابر بار ضربه ای بررسی می شود. آزمایشی برای بررسی اثر زئولیت روی مقاومت ضربه ای ماسه طراحی شده است. تعداد ۲۵ نمونه در آزمایشگاه آماده شده و آزمایش روی این نمونه ها انجام شده است. نمونه ها دارای درصدهای سیمان به مقدار ۴، ۶، ۸، ۱۰ درصد وزنی ماسه خشک هستند. سیمان در هر نمونه با درصدی از زئولیت جایگزین شده است. درصدهای جایگزینی برابر ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد وزنی سیمان است. نتایج آزمایش نشان می دهد که مقدار جایگزینی بهینه برای همه ی نمونه ها بین ۳۰ تا ۵۰٪ است. برای همه ی نمونه ها، جایگزینی بیش از ۶۵٪ تاثیر معکوس روی مقاومت دارد. برای بیشتر نمونه ها، جایگزینی تا ۱۰٪ تاثیر چشمگیری روی مقاومت ندارد.

۱- مقدمه

۱-۱- مساله، راه حل و هدف

آلودگی زیست محیطی ناشی از تولید و مصرف سیمان نشان دهنده یکی از مهم ترین ضرورت های این پژوهش است. در صنعت راه و ساختمان، سیمان یکی از مواد اجتناب ناپذیر است. هرگونه کاهش استفاده از سیمان در صنعت ساخت و ساز، به کاهش آلودگی محیط زیست کمک خواهد کرد. صنعت سیمان، سومین صنعت بزرگ باعث آلودگی های زیست محیطی است. این صنعت سالانه بیش از پانصد هزار تن دی اکسید سولفور SO_2 ، اکسید نیتروژن NO_x ، و مونواکسید کربن CO در محیط زیست رها می کند [۱].

چالش اصلی که در حل آن تلاش می شود عبارت است از افزایش مقاومت ماسه در برابر بار ضربه ای وارده. بار لرزه ای در هنگام زلزله، بارهای وارده در حمل و نقل جاده ای، بارهای وارده از فعالیت جراثیل ها، آسانسورها و بارهای وارده بر باند فرودگاه ناشی از نشست و برخاست هواپیما همگی از نوع بارهای ضربه ای و دینامیکی هستند که در طراحی و ساخت مورد

توجه قرار میگیرند. از طرف دیگر بهای سیمان پرتلند بالا است و تولید آن خراب کننده محیط زیست است و منابع آن در حال محدود شدن است. برای حل این مساله، به جای سیمان پرتلند، گرد آتشفشانی - معدنی از خانواده پوزولان ها به ماسه افزوده می شود. افزودن پوزولان به جای سیمان پرتلند به بتن به سه دلیل انجام می شود. اول، بهای ارزان پوزولان ها نسبت به سیمان است. حتی پوزولان های مصنوعی از سیمان پرتلند ارزان تر هستند. دومین دلیل، جلوگیری از تخریب محیط زیست در جریان تولید سیمان پرتلند است. تولید سیمان مقدار زیادی گاز گلخانه ای به جو زمین تزریق می کند. سومین دلیل، افزایش دوام بتن است. با پوزولان ها، بتن دوام مدت بالاتری خواهد داشت. مواد پوزولانی به خاطر دو ویژگی مورد توجه قرار گرفته است. اول توزیع جغرافیایی زیاد این مواد در ایران، مخصوصا ماده ی زئولیت. دوم خواص مشخصه ویژه و یکتای این مواد. گرد خاصی که مورد تمرکز این پژوهش است، ماده ای به نام زئولیت است. زئولیت خانواده ای از گردهای آتشفشانی - معدنی است و به عنوان زیر مجموعه ای از پوزولان ها به شمار می رود. می توان زئولیت را به جای سیمان پرتلند در مقاوم سازی ماسه به

* نویسنده عهده دار مکاتبات: jiryaei@qut.ac.ir



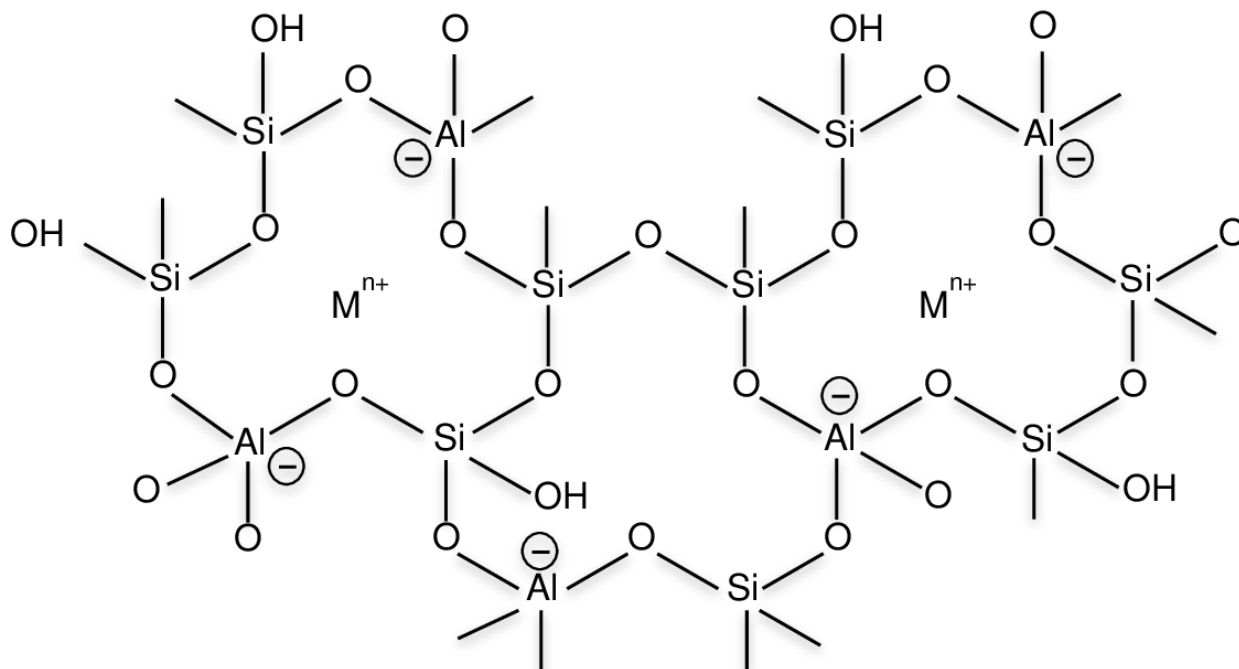
اما مولکول‌های بزرگ در شبکه آن گیر می‌کنند و به دام انداخته می‌شوند. ساختار مولکولی زئولیت و خصوصیات شیمیایی عناصر تشکیل دهنده آن باعث این پدیده هستند. ساختار مولکولی چهار پهلوی مثلثی یا تتراهدرال برای زئولیت در شکل ۱ نمایش داده شده است.

مولکول انواع زئولیت ساختار کریستالی از آلومینیوم و سیلیسیم دارد که شامل فلزات قلیایی یا قلیایی خاکی است مانند سدیم، پتاسیم، منیزیم، استرانسیم، باریم و کلسیم. زئولیت اولین بار در سال ۱۷۵۹ توسط معدن شناس سوئدی به نام کرونستد کشف شد. واژه زئولیت به معنای سنگ جوشان است و علت این نام گذاری، خروج مقدار زیادی آب به صورت بخار در زمان حرارت دادن به زئولیت است. در شکل ۲ واحد ساختار مولکولی زئولیت نشان داده شده است.

خصوصیات اصلی فیزیکی و شیمیایی زئولیت‌ها مربوط به ترکیب شیمیایی و ساختار بلورین آن‌هاست. به عبارت دیگر خواص آن‌ها به طبیعت شیمیایی و فیزیکی آب موجود در ساختار زئولیت‌ها و همچنین نحوه قرار گرفتن آب درون شبکه‌های مولکولی بستگی دارد. وجود فلزات قلیایی، قلیایی خاکی، فضاهای خالی و مواد معدنی متعدد به هم مرتبط در آن‌ها از

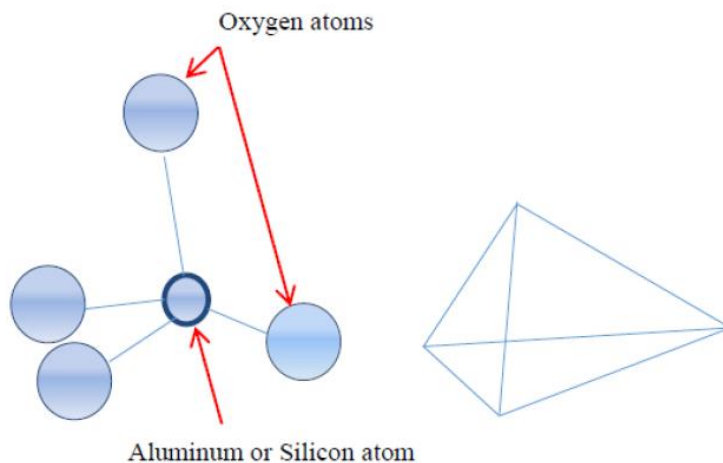
کار برد. زئولیت به دو صورت طبیعی و مصنوعی قابل خریداری است. کشور ایران دارای معادن زئولیت است که انواعی از خانواده زئولیت طبیعی را تولید می‌کنند. بهای آن نسبت به سیمان پرتلند بسیار ارزان تر است. زئولیت طبیعی یکی از فراورده‌های جانبی معادن است. تولید آن، برعکس سیمان پرتلند، خرابی محیط زیست را به دنبال ندارد. زئولیت در صنایع گوناگون کاربرد دارد مانند صنعت تصفیه آب، دارو و درمان و صنعت ساخت و ساز.

یکی از نظریه‌هایی که در مورد شرایط و علت تشکیل زئولیت‌ها در طبیعت، ارائه شده است عبارت است از این که زئولیت‌ها اغلب در لایه‌های رسوبی، بعد از تشکیل و دفن رسوبات در اثر واکنش آلومینیم سیلیکات با آب حفره‌ای در درزها و شکستگی‌ها تشکیل شده‌اند. تمامی کانی‌های زئولیت که تا به حال شناسایی شده‌اند، کانی‌های ثانویه بوده و از تخریب یا دگرسانی کانی‌های اولیه‌ای نظیر فلدسپات، رس‌ها و در نهایت از ژل‌های سیلیکاته طبیعی به وجود می‌آیند. ساختار مولکولی زئولیت از سیلیس و آلومینیم ساخته شده است. ساختار خاص آن باعث می‌شود که به راحتی مولکول‌های کلسیم را جذب خود کند. همچنین شکل ساختار آن به گونه‌ای است که اجازه عبور مولکول‌های کوچک از درون شبکه خود را می‌دهد.



شکل ۱. ساختار مولکولی زئولیت [۳].

Fig. 1. Mineral structure of zeolite [3].



شکل ۲. واحد ساختار مولکولی زئولیت [۴].

Fig. 2. A unit of mineral structure of zeolite [4].

۱-۲- پژوهش های پیشین

شی و همکاران (۲۰۱۲) به منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از سیمان پرتلند در تثبیت خاک، زئولیت به عنوان جایگزین درصدی از سیمان پرتلند انتخاب کردند. آنها مقاومت فشاری تک محوری مخلوط زئولیت-سیمان در سه دوز (۲/۵٪، ۵٪ و ۱۰٪) زئولیت و در سه دوره عمل‌آوری (۷ روز، ۲۸ روز و ۹۰ روز) برای خاک ماسه‌ای شنی آزمایش کردند. نتایج آنها نشان داد که بالاترین مقدار مقاومت تک محوری برای مخلوط‌های زئولیت-سیمان در ۹۰ روز، در دوز ۱۰٪ زئولیت بدست می‌آید [۷]. شانگ در سال ۲۰۱۵ ویژگی‌های ژئوتکنیکی مخلوط ماسه و زئولیت شامل تراکم پذیری، نفوذپذیری و تحکیم یک بعدی مخلوط را با در نظر گرفتن درصد‌های وزنی مختلف زئولیت، ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ مورد بررسی قرار داد [۸]. همچنین اثرات زئولیت بر مقاومت برشی ماسه‌های سیمانی، پارامترهای مقدار سیمان و درصد جایگزینی زئولیت به جای سیمان، تنش سربار و زمان عمل‌آوری توسط شوش پاشا و همکاران (۱۳۹۸) بررسی شده است [۹]. ایده‌ی به کارگیری یک قطعه‌ی زئولیتی در زیر پی‌های سطحی توسط سلامت پور و همکاران (۱۳۹۹) پیشنهاد شده است. آنها با در نظر گرفتن پی‌های سطحی بر روی ماسه‌های ساحل بابلسر نشان دادند که نرخ ظرفیت باربری بیشتر از حالت بدون قطعه‌ی زئولیتی است [۱۰]. کاربرد زئولیت در ترکیب با خرده لاستیک برای تثبیت ماسه توسط سلطانی و همکاران (۱۴۰۱) مطالعه و بررسی شده است. بهترین ترکیب، ۷/۵٪ خرده لاستیک به صورت گرانول و

دیگر دلایل تنوع خواص زئولیت‌ها است. کاربرد زئولیت‌ها در صنایع مختلف بستگی به خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها دارد. برخی از این خصوصیات شامل چگالی، اندازه، شکل، تخلخل، سختی، جذب سطحی و تبادل یونی است [۲].

به طور کلی زئولیت‌ها دارای خواصی از جمله جذب آب بالا بدون تغییر فیزیکی و شیمیایی، چگالی کم و حجم زیاد در جذب آب، ثبات ساختار بلوری، توانایی تبادل یونی، وجود کانال‌های مولکولی یکنواخت، توانایی جذب گاز و بخار، خواص کاتالیزوری و هدایت الکتریکی هستند [۵]. ظرفیت تبادل کاتیون مهم‌ترین خاصیت زئولیت‌هاست. این خاصیت به عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های کاتیون‌ها، اندازه آن‌ها در فرم‌های هیدراته و غیر هیدراته، بار آن‌ها، دما، غلظت کاتیون‌ها در محلول، نوع آنیون وابسته به کاتیون در محلول و حلال بستگی دارد. ویژگی‌های ساختار زئولیت می‌تواند نقش مهمی در توانایی تبادل کاتیون ایفا نماید. ظرفیت تبادل کاتیون زئولیت همچنین به ترکیب شیمیایی آن و نسبت سیلیکا به آلومینا بستگی دارد و هر چه این نسبت کوچکتر باشد ظرفیت تبادل یون بیشتر خواهد بود [۶].

این پژوهش اهدافی را پیگیری می‌کند که حداقل شامل سه مورد هستند. هدف اول، بررسی امکان سنجی افزایش مقاومت ضربه ای خاک به وسیله جایگزینی سیمان با زئولیت است. هدف دوم، بدست آوردن درصد بهینه جایگزینی سیمان با زئولیت است. هدف سوم، بدست آوردن بیشینه افزایش مقاومت ضربه ای خاک ناشی از جایگزینی سیمان با زئولیت است.

Kiln Dust یا به اختصار CKD که یک ماده‌ی پوزولان در دسترس است پرداختند. همچنین ژئولیت طبیعی به خاک افزوده گردیده است. این پژوهش متفاوت از دیگر مطالعات است، از این نظر که CKD با ژئولیت جایگزین نشده است، بلکه درصدی از خاک با ژئولیت جایگزین گردیده است. به این معنی که مقدار بهینه ی CKD ثابت نگاه داشته شده و ژئولیت به جای درصدی از خاک افزوده شده است. نتایج آنها نشان داده است که افزودن ۱۵٪ ژئولیت به خاک پایدار شده با مقدار بهینه ی CKD، باعث ۲۱٪ افزایش مقاومت شده است [۱۸]. شیر محمدی و همکاران (۲۰۲۱) اثر پایدار کننده‌ی مخلوط آهک-ژئولیت بر روی رفتار خاک طبیعی با پلاستیسیته کم را مورد مطالعه قرار دادند. آنها آزمایش‌های استاندارد تراکم و همچنین آزمایش‌های فشاری برای بررسی مقاومت نمونه‌ها انجام دادند. خاک طبیعی با درصد‌های گوناگون آهک و ژئولیت را تحت اثر چرخه‌های پی در پی یخ زدن و ذوب شدن قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که وقتی درصدی از آهک با ژئولیت جایگزین می‌شود، مقاومت، دوام و بازدهی مکانیکی خاک به مراتب بیشتر می‌شود. همچنین، بر پایه تصاویر میکروسکوپی اسکن الکترونی، ساختار نمونه‌های تحت تغییرات شدید دما را بررسی کردند [۱۹]. اکبری و همکاران (۲۰۲۱) مطالعه‌ای آزمایشگاهی برای بررسی اثر آهک، نانو-ژئولیت، و فیبرهای پلی پروپیلن بر روی انواع خواص خاک رسی کائولن انجام دادند. از جمله این خواص، مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم هستند. نتایج آنها نشان می‌دهد که جایگزینی آهک با نانو-ژئولیت اثر مفیدی بر روی مشخصه‌های مکانیکی خاک دارد. تا ۴۰٪ جایگزینی آهک با ذرات نانو-ژئولیت، بیشترین بازدهی را برای افزایش مقاومت نمونه‌های پایدار شده در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد داشته است. نتایج تحلیل‌های XRD و SEM نشان می‌دهد که افزودن افزودنی‌ها در خاک رس کائولن، ساختار خاک را تغییر می‌دهد و کمک می‌کند به ساخته شدن ژل‌های کلسیم سیلیکات هیدراته در حین واکنش‌های پوزولانی [۲۰]. مطالعه‌ی دیگری نیز توسط آنها ارائه شده است که نتایج بسیار نزدیک و شبیه به نتایج قبلی است [۲۱]. علی و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی نانوذرات ژئولیت برای ارتقای خصوصیات خاک پرداختند. مطالعات آزمایشگاهی آنها بر روی رفتار مکانیکی و ریزساختار خاک بهبود داده شده با نانوزئولیت انجام گردیده است. آنها آزمایش برش مستقیم و آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های خاک با درصد‌های گوناگون نانوزئولیت را انجام دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که با افزودن نانوزئولیت، مقاومت برشی نمونه‌های خاک به شدت افزایش پیدا کرده است. مقاومت فشاری نیز در برخی نمونه‌ها بیش از ۱۰ برابر بهتر شده

۳۰٪ ژئولیت جایگزین سیمان پیشنهاد شده است [۱۱]. سعادت و همکاران (۱۴۰۰) نشان دادند که با جایگزینی ژئولیت بجای سیمان به میزان ۳۰٪ در نمونه‌های سیمانته، مقادیر مدول برشی افزایش یافته است. همچنین افزایش ترکیبات سیلیس و اکسید آلومینیم تا مقادیر مشخص، تاثیر قابل توجهی در افزایش سختی نمونه سیمانته شده دارد [۱۲]. ژئولیت به کاهش مصرف سیمان کمک می‌کند. از این رو، در توسعه پایدار از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مشارکت دارد. یوسفی و همکاران (۱۳۹۸) با جایگزینی ژئولیت به جای سیمان، نشان دادند که رفتار خاک در موقع گسیختگی از حالت ترد به حالت خمیری میل می‌کند [۴]. عباسی و همکاران (۱۳۹۶) با آزمایش تراکم بر روی نمونه‌ها مشاهده کردند که با افزایش درصد جایگزینی ژئولیت به جای سیمان، بیشینه تراکم خشک نمونه‌ها کاهش و مقاومت کششی تا ۳۰٪ افزایش یافته است [۱۳].

رجبی و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی تاثیر ژئولیت بر روی خاک رسی و مخلوط ماسه ای-رسی نشان دادند که درصد افزودنی ژئولیت بر روی مشخصات خاک مقاوم سازی شده اثر گذار است [۱۴]. در پژوهش دیگری چنارینی و همکاران (۲۰۲۱) به پایدار سازی رس‌های تغییر حجم دهنده پرداختند. آنها برای کنترل تغییر حجم در شرایط تناوب خشک و تر، درصدی از سیمان با ژئولیت جایگزین شده و اثر آن اندازه گیری گردید. نتایج آنها نشان داد که جایگزینی ۳۰٪ سیمان با ژئولیت، بیشترین اثر مثبت را بر روی رفتار رس دارد [۱۵]. شهریار کیان و همکاران (۲۰۲۱) به انجام آزمایش‌های اندازه گیری مقاومت فشاری بر روی خاک رسی-ماسه ای پرداختند. اثر درصد سیمان، درصد ژئولیت، درصد رطوبت اولیه، تعداد چرخه‌های یخ زدن و آب شدن، و زمان عمل آوری بر روی مقاومت فشاری را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که ژئولیت می‌تواند به همراه سیمان به عنوان پایدار کننده به کار برده شود تا رفتار مکانیکی خاک ارتقا یابد. افزودن ژئولیت نه تنها به افزایش مقاومت فشاری کمک کرده است، بلکه بر مقدار کرنش نهایی قابل تحمل نیز افزوده است [۱۶]. جمشیدوند و همکاران (۲۰۲۲) به مطالعه اثر چرخه‌های متعدد یخ و ذوب شدن بر روی انواع رفتار مکانیکی و دیگر رفتار خاک پایدار شده با سیمان پرداختند. این بررسی نشان داده است که در نمونه‌های ۲۸ روزه، جایگزینی سیمان با ژئولیت، مقاومت فشاری را بهبود داده است. با افزایش درصد ژئولیت به بیشتر از درصد بهینه، مقاومت فشاری کاهش پیدا کرده است. پیشنهاد شده که این امر به خاطر به هم خوردن تعادل بین مولفه‌های موثر واکنش‌های هیدراسیون و پوزولان است [۱۷]. شارو و همکاران (۲۰۲۱) به مطالعه خاک پایدار شده با Cement

است. در مورد شکل پذیری خاک، نانوزئولیت باعث کاهش شکل پذیری خاک شده است. به این صورت که کرنش نهایی گسیختگی خاک کاهش یافته است. بررسی ریز ساختار خاک توسط آنها نشان می دهد که تولید محصولات سیمانی توسط واکنش های نانوزئولیت، دلیل افزایش مقاومت خاک است [۲۲]. در مطالعه دیگری که توسط خواجه و همکاران (۲۰۲۲) انجام شد به کاهش مصرف آهک در ارتقای خاک رسی مساله دار با جایگزینی آهک با زئولیت پرداخته شده است. بر روی نمونه های تثبیت شده با آهک و زئولیت، آزمایش هایی از جمله آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش سه محوری تحکیم نشده و زهکشی نشده انجام شد. نتایج آنها نشان می دهد که افزودن زئولیت باعث افزایش بیشینه وزن مخصوص خشک و باعث کاهش رطوبت بهینه می شود. در ۲۵٪ جایگزینی آهک با زئولیت، مقاومت فشاری دارای بیشترین مقدار و شاخص پلاستیسیته دارای کمترین مقدار است. بنابراین، مقدار ۲۵٪ به عنوان جایگزینی بهینه پیشنهاد شده است [۲۳]. هدف پژوهش دیگری که توسط ربابه و همکاران (۲۰۲۱) انجام شد، ارزیابی آزمایشگاهی پایدار سازی خاک تغییر حجم دهنده با آهک، زئولیت، و ترکیب آنها بوده است. نتایج حاکی از اثر مطلوب زئولیت است. افزودن زئولیت کمک کرده است به کاهش پلاستیسیته، کاهش خزش خطی، کاهش پتانسیل تورم. همچنین زئولیت به افزایش وزن مخصوص بیشینه ی خشک، افزایش مقاومت فشاری، و افزایش سی بی آر کمک کرده است. نتایج عددی آزمایش ها با تحلیل های ریز ساختار انجام شده هماهنگ است. این تحلیل ها شامل روش های SEM و X-ray می باشد [۲۴]. اثر ترکیب زئولیت و سیمان بر روی لایه های زیرسازی راه ها، توسط شیخ و همکاران (۲۰۲۲) مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی این تاثیر آنها از مقاوم فشاری نمونه ها استفاده کردند. لایه های خاک راهسازی نمونه گیری شده و نمونه ی کنترل دارای ۵٪ سیمان بوده است. سیمان با زئولیت جایگزین شده و این درصد جایگزینی معادل ۲۰، ۳۰، ۴۰، و ۶۰ درصد وزن سیمان بوده است. برای بیشترین مقاومت فشاری، درصد بهینه جایگزینی برابر ۳۰٪ گزارش شده است. آزمایش های آنها نشان می دهد که به کار بردن زئولیت به جای سیمان، مقدار کرنش گسیختگی را به اندازه ی ۳۳٪ افزایش می دهد. به عبارت دیگر، زئولیت رفتار خاک را از خشک و ترد به سمت نرم و شکل پذیر تغییر می دهد [۲۵]. پژوهش دیگر توسط خواجه و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی کاهش وزن خاک های پایدار شده با سیمان و زئولیت توسط دانه های پلی استرن می پردازد. رفتار تنش-کرنش، مقاومت فشاری، انرژی کرنشی، و ظرفیت سی بی آر با انجام آزمایش های مکانیکی اندازه گیری شدند. در نتایج عددی آنها شان

داده شده است که افزودن زئولیت به اندازه بهینه ی ۳۰٪، مقاومت فشاری و همین طور ظرفیت سی بی آر را به شدت ارتقا می دهد و کاهش این مقادیر به خاطر استفاده از دانه های پلی استرن به خوبی توسط زئولیت جبران می شود. ترکیب فعال شاخصی است از کمترین مقدار CaO و به عبارت دیگر شاخصی است از مجموع Al_2O_3 و SiO_2 در مخلوط. آنها نشان دادند که این شاخص می تواند در پیش بینی مقاومت فشاری و ظرفیت سی بی آر به کار رود و تخمین های خوبی ارائه کند [۲۶]. رفتار ترکیب ماسه با ۱۵٪ رس کائولینیت توسط حسین زاده و همکاران (۲۰۲۳) بررسی شده است. آنها هم در شرایط وجود آلودگی نیترات سرب در خاک و هم در شرایط عدم وجود آلودگی درصدهای گوناگون زئولیت به مخلوط افزودند. سپس به اندازه گیری مشخصه های خاک مانند ظرفیت جذب و پارامترهای مقاومتی خاک پرداختند. بر پایه نتایج آزمایش های گزارش شده توسط آنها، زئولیت تاثیری مطلوب روی مشخصه های خاک، حتی رفتار دینامیکی آن دارد [۲۷]. در پژوهشی توسط شاه منصوری و همکاران (۲۰۲۱) به اندازه گیری مقاومت فشاری پس از افزودن فوم سیلیکا و زئولیت طبیعی به بتن پرداخته شده است. نتایج آزمایش های آنها نشان می دهد که افزایش NaOH باعث کاهش مقاومت فشاری و افزودن فوم سیلیکا و زئولیت طبیعی باعث افزایش مقاومت فشاری خواهد شد. به علاوه، این پژوهش یک روش شبکه عصبی مصنوعی پیشنهاد می دهد که با آن می توان مقاومت فشاری پس از افزودن پوزولان ها را تخمین زد. برخی از متغیرهایی که به عنوان ورودی در شبکه عصبی مصنوعی در نظر گرفتند عبارت است از سن نمونه، مقدار NaOH در نمونه، مقادیر افزودنی های فوم سیلیکا و زئولیت طبیعی در نمونه [۲۸]. رضانی و همکاران در سال ۲۰۲۵ نقش الیاف زئولیت و پلی وینیل الکل بر دوام خاک ماسه رسی تثبیت شده با سیمان تحت چرخه های انجماد-ذوب و تر-خشک را مورد بررسی قرار دادند. آنها آزمایش های آزمایشگاهی، شامل مقاومت فشاری تک محوری، میکروسکوپ الکترونی و سرعت پالس اولتراسونیک را برای ارزیابی تأثیر نسبت جایگزینی زئولیت و میزان الیاف بر دوام و ویژگی های مکانیکی خاک تثبیت شده بکار بردند. نتایج آنها نشان داد که خواص مکانیکی نمونه های سیمانی شده در چرخه های تر-خشک در مقایسه با چرخه های انجماد-ذوب به طور قابل توجهی کاهش یافته است. نسبت جایگزینی بهینه سیمان برای دستیابی به مناسب ترین رفتار دوام ماسه رسی تثبیت شده با زئولیت ۲۰٪ بود. نتایج آنها حاکی از تاثیر مثبت الیاف در بهبود دوام خاک است. نمونه های حاوی زئولیت و الیاف، در شرایط تر-خشک و انجماد-ذوب، کاهش جرم کمتری نسبت به نمونه های بدون زئولیت و الیاف



شکل ۳. ماسه ی مورد استفاده در آزمایشگاه.

Fig. 3. Sand used in this study.

شده است.

نمودار دانه بندی ماسه استفاده شده در شکل ۴ ارائه شده است. قابل ذکر است که نمونه ای یک کیلوگرمی از ماسه مورد نظر برای آزمایش دانه بندی مطابق با استاندارد ASTM C136، مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۲- سیمان

برای آزمایش ها از سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان شاهرود استفاده شد. این سیمان در پاکت های پلی پروپیلنی ۵۰ کیلوگرمی خریداری شده است. کاربرد این نوع سیمان در مکان های با حرارت هیدراسیون متوسط است که حمله سولفات ها به آنها در حد متوسط باشد. نکته قابل توجه این است که در مشخصه ی شیمیایی سیمان مورد استفاده، مقدار درصد اکسید سیلیسیم و درصد اکسید آلومینیم به ترتیب برابر ۲۱/۱۱ و ۴/۴۸٪ ذکر شده است. قابل ذکر است که اکسید سیلیسیم و اکسید آلومینیم دو مورد از عناصر اصلی در ژئولیت استفاده شده از آزمایش ها نیز هستند.

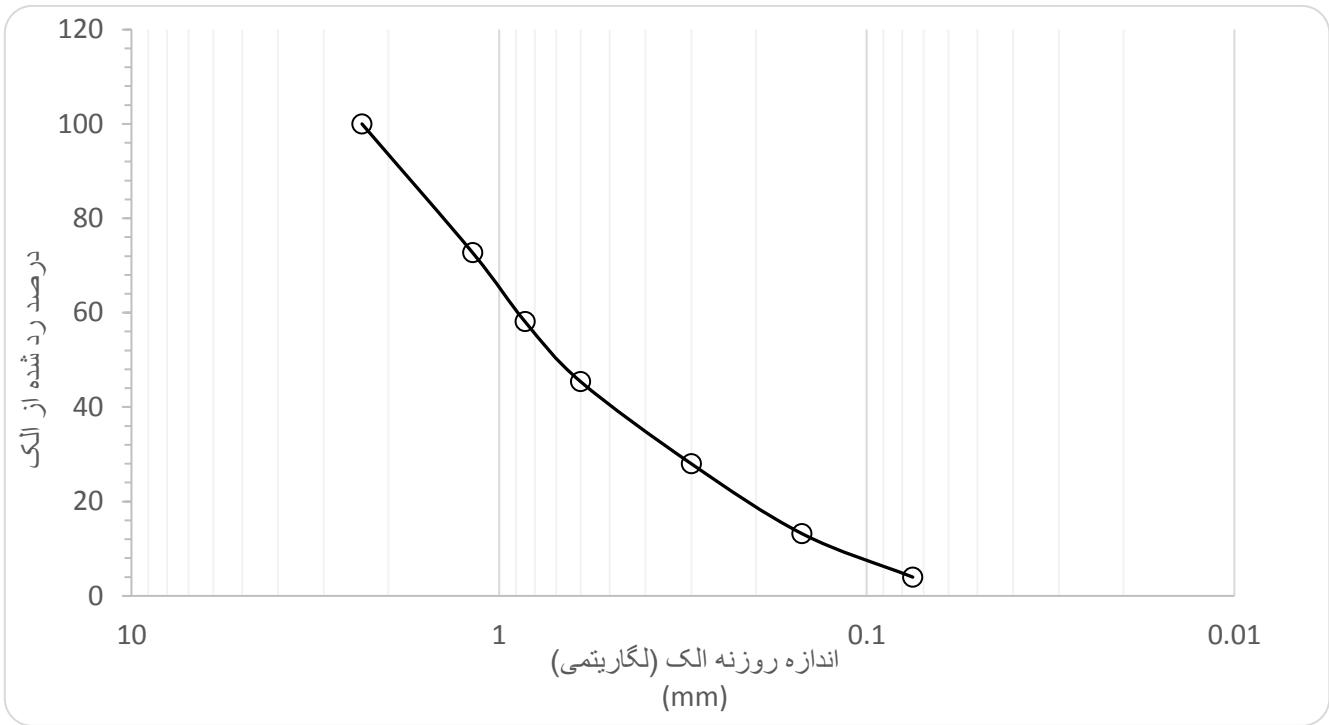
داشتند [۲۹]. نصران. پور و همکاران (۲۰۲۴) برای دستیابی به بهترین مقاومت مکانیکی، کمترین هزینه و کمترین تأثیر زیست محیطی از رویکرد بهینه سازی چند هدفه با استفاده از شبکه عصبی پس انتشار برای پیش بینی مقاومت مکانیکی، همراه با یک الگوریتم تکاملی چند هدفه مبتنی بر تخمین هندسه تطبیقی برای شناسایی بهترین پارامترها برای ماسه بهبود یافته با سیمان-ژئولیت استفاده کردند [۳۰]. کاو و همکاران (۲۰۲۵) به طور نوآورانه یک ماده جدید ماسه آهکی تثبیت شده با سیمان اصلاح شده با ژئولیت را معرفی کردند. خواص فیزیکی و شیمیایی آنها برای بررسی این ماده از طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، مقاومت فشاری تک محوری و توموگرافی کامپوتری استفاده کردند. علاوه بر این، آنها تأثیر زیست محیطی این ماده را از نظر عملکرد جذب Pb²⁺ و ارزیابی چرخه عمر آینده نگر (LCA) ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که ژئولیت می تواند فعالیت خود را در این ماده تحت نسبت های اختلاط طراحی شده مواد اولیه حفظ کند و به طور کلی، نتایج آنها پتانسیل استفاده از این ماده را در ساخت و ساز سازگار با محیط زیست نشان داد [۳۱]. نتایج تحقیق آزمایشگاهی ویکینگ کو و همکاران (۲۰۲۵) نشان می دهد که کامپوزیت خاک سیمانی ژئولیت و الیاف نخل، هنگامی که در نسبت های بهینه ترکیب شوند، صرف نظر از اینکه در معرض آب تمیز یا فرسایش نمکی قرار گیرند، و همچنین در طول چرخه های خشک-مرطوب یا انجماد-ذوب، بهترین دوام و حداقل کاهش مقاومت و جرم را نشان می دهند [۳۲].

هدف اصلی تحقیق بررسی تأثیر جایگزینی ژئولیت با سیمان بر مقاومت ضربه ای تثبیت ماسه با سیمان است. در ادبیات فنی تا کنون این مساله مورد بررسی قرار نگرفته است. از طرف دیگر با توجه به ماهیت ضربه ای بارهای دینامیکی و لرزه ای موضوع مقاومت در برابر ضربات وارده بصورت تعداد ضربات قابل تحمل، اهمیت دارد. در تحقیق حاضر، آزمایشی برای بررسی اثر ژئولیت روی مقاومت ضربه ای ماسه مخلوط با سیمان طراحی شده است. نمونه ها دارای درصد های سیمان متفاوت که همین مقدار سیمان در هر نمونه با درصد های متفاوت از ژئولیت جایگزین شده است.

۲- مواد و مصالح

۲-۱- ماسه

خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر از منطقه جنوب شرقی تهران تهیه شده است. پس از خشک کردن خاک طبیعی در دمای اتاق، از خاک مانده روی الک ۲۰۰ و عبوری از الک ۲ (ماسه ریز تا متوسط) برای ساخت نمونه ها استفاده شد. شمایی از ماسه ی به کار برده شده در شکل ۳ نشان داده



شکل ۴. نمودار دانه بندی ماسه استفاده شده در آزمایش.

Fig. 4. Sand particle size distribution curve.

این شرکت گزارش شده است، نشان داده شده است. توجه شود که در آنالیز شیمیایی جدول درصد اکسید سیلیسیم برابر ۶۶ تا ۶۸٪ و درصد اکسید آلومینیم برابر ۱۰ تا ۱۱/۸٪ ذکر شده است. از بخش های قبل توضیح داده شد که اکسید سیلیسیم و اکسید آلومینیم در عناصر تشکیل دهنده ی سیمان نیز حضور داشتند. مقدار اکسید سیلیسیم و اکسید آلومینیم در زئولیت به مراتب بیشتر از سیمان است.

۳- روش تحقیق و آزمایش ضربه

۳-۱- طرح اختلاط نمونه ها

برای مطالعه اثرات زئولیت بر مقاومت ماسه تثبیت شده با سیمان و بخصوص بررسی مقاومت آن در برابر ضربه، نمونه هایی با طرح اختلاط مشخص ساخته شد بگونه ای که درصدهای مختلف سیمان و درصدهای گوناگون جایگزینی زئولیت با سیمان استفاده شد. درصد سیمان برابر با ۴، ۶، ۸ و ۱۰٪ از وزن خشک کل نمونه در نظر گرفته شد. همچنین درصد جایگزینی زئولیت با سیمان برابر با ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰٪ از سیمان تعیین شد. در مجموع ۲۴ نمونه ساخته شد و این نمونه ها به گونه ای عمل

۲-۳- زئولیت

زئولیت استفاده شده در آزمایش ها در شکل ۵ نشان داده شده است. زئولیت مورد استفاده در آزمایش ها از شرکت معدنی افزاند در استان سمنان تهیه شده است. مشخصات فنی زئولیت مورد استفاده در جدول ۱ که توسط



شکل ۵. گرد زئولیت استفاده شده در آزمایشگاه.

Fig. 5. Zeolite powder used in this study.

آوری شده اند که به مقاومت ۲۸ روزه خود برسند. برای تعیین درصد رطوبت بهینه مخلوط از آزمایش تراکم پراکتور استاندارد ASTM D698 استفاده شده است. هر نمونه با مقدار وزنی یکسان ماسه برابر ۳۳۰۰ گرم ساخته شده است. درصد رطوبت استفاده شده برای نمونه‌ی با ۴٪ سیمان برابر ۱۱٪، نمونه‌ی با ۶٪ سیمان برابر ۱۱/۴٪ و نمونه‌ی با ۸٪ سیمان برابر ۱۱/۷٪ و نمونه‌ی با ۱۰٪ سیمان برابر ۱۲/۱٪ بر اساس تعریف رطوبت بهینه آزمایش تراکم پراکتور استاندارد تعیین شده است. با اضافه شدن سیمان درصد رطوبت اندکی افزایش می‌یابد زیرا واکنش هیدراسیون سیمان نیاز به درصدی از آب موجود در مخلوط دارد. آب لازم برای واکنش هیدراته شدن ذرات سیمان با نسبت آب به سیمان واحد در نظر گرفته شد. یعنی هر چه درصد سیمان بالاتر باشد، مقدار رطوبت کمی بیشتر می‌شود تا آب کافی برای واکنش سیمان وجود داشته باشد.

نمونه‌های آماده شده در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. توجه شود که در تصویر ۲۵ نمونه وجود دارد. یعنی یکی بیشتر از ۲۴ تایی مورد نیاز. دلیل این است که یک نمونه تنها با خاک بدون سیمان و پوزولان تهیه شده است.

جدول ۱. آنالیزهای شیمیایی - عناصر اصلی زئولیت استفاده شده در آزمایش (توسط شرکت افرازند).

Table 1. Chemical analyses - main zeolite minerals used in the experiment (by Afrazand Company).

المان های اصلی	درصد
SiO ₂ (silicon Dioxide)	۶۶-۶۸
Al ₂ O ₃ (Aluminum Oxide)	۱۰/۵ - ۱۱/۷۵
Fe ₂ O ₃ (Iron Oxide)	۰/۵
Na ₂ O (Sodium Oxide)	۳ - ۳/۵
K ₂ O (Potassium Oxide)	۴ - ۴/۵
CaO (Calcium Oxide)	۰/۲ - ۰/۶
MgO (Magnesium Oxide)	۰/۵۸
TiO ₂ (Titanium Oxide)	۰/۸
MnO (Manganese Oxide)	۰/۰۳
P ₂ O ₅ (Phosphorus Pentoxide)	۰/۰۲۶
SrO (Strontium Oxide)	۰/۲۴
Loss on Ignition	۱۱-۱۲



شکل ۶. نمونه‌های آماده شده برای آزمایش مقاومت ضربه ای.

Fig. 6. Samples prepared for impact strength testing.



شکل ۸. کوبش لایه های مخلوط در هنگام آماده سازی نمونه های آزمایش.

Fig. 8. Compaction of mixture during preparation of specimens.



شکل ۷. دستگاه ساخت نمونه ها در آزمایشگاه.

Fig. 7. Sample making device in the laboratory.

کننده داشته باشد. برای پخش شدن انرژی بصورت یکنواخت روی سطح مخلوط از صفحه فلزی استفاده شد بگونه ای که وزنه ابتدا روی صفحه فلزی برخورد کند سپس انرژی ضربه از صفحه به مخلوط وارد شود. صفحه فلزی در تصویر برداشته شده است تا نمونه خاک تثبیت شده در تصویر دیده شود.

۳-۳- جزئیات نمونه سازی

روش نمونه سازی این گونه است که ابتدا مقدار محاسبه شده ی ماسه، سیمان و زئولیت به نسبت طرح اختلاط به صورت خشک با هم مخلوط می شوند. به عبارت دیگر، برای نمونه های دارای سیمان با درصد وزنی مشخص، اختلاط ماسه، سیمان و زئولیت ابتدا به صورت خشک و دستی انجام می شود. در مرحله بعد، افزودن رطوبت مورد نیاز و اختلاط مجدد در لایه های یکسان انجام می شود. توجه شود که آب به دلیل واکنش های شیمیایی سیمان و زئولیت، آخرین ماده ای است که افزوده و مخلوط می شود. به جهت رسیدن به رطوبت بهینه، نمونه ها با مقدار آب لازم مخلوط می شوند. مقدار رطوبت اولیه ی افزوده شده به همه نمونه های خاک، معادل

۳-۲- دستگاه ساخت نمونه ها

شکل ۷ دستگاه به کار برده شده برای ساخت نمونه ها در آزمایشگاه نشان می دهد. نمونه ها در قالب ریخته و سپس کوبیده شده اند تا به تراکم لازم برسند. در قسمت پایین این دستگاه قالبی مکعب شکل به ابعاد ۳۰ در ۳۰ سانتی متر طراحی شده است. این قالب از جنس یک نوع چوب مصنوعی ساخته شده است. قالب بر روی بستر بزرگ تری پایدار و ثابت شده است. این بستر بزرگ از جنس همان چوب مصنوعی قبلی است. در قسمت بالای این دستگاه، ابزار متراکم کننده قرار دارد که می توان با استفاده از آنها نمونه ها را به صورت لایه به لایه کوبید. نیروی کوبش توسط سقوط آزاد یک وزنه به جرم حدود ۲/۸ کیلوگرم تامین شد. عملیات کوبش به تعداد ۱۰ ضربه برای هر لایه انجام شد. اندازه ی نیروی کوبش توسط ارتفاع سقوط آزاد کنترل می شود. دامنه ی تغییر این ارتفاع از ۵۰ تا ۶۰ سانتی متر است. وزنه ی سقوط آزاد و همچنین سازه ی نگهدارنده ی ابزار تراکم از جنس فلز است. خاک بگونه ای در قالب ریخته شده و کوبیده شده است که انرژی وارد شده در واحد حجم با انرژی تراکم پراکتور استاندارد متناظر با رطوبت بهینه یکسان باشد به این ترتیب تراکم نمونه ها متناظر با حالت دانسیته خشک حداکثر انجام شده است. وزنه بصورت توخالی انتخاب شده است تا میله نشان داده شده در شکل های ۷ و ۸ از آن عبور کند و میله، نقش هدایت



شکل ۹. نمونه های آزمایش در حال عمل آوری در مدت زمان ۲۸ روز.

Fig. 9. Samples curing for 28 days.

رها می شود تا با سقوط آزاد بر روی نمونه ی خوابیده برخورد کند. برخورد توپ با نمونه باعث ایجاد پدیده ی ضربه می شود. وقتی توپ پی در پی روی نمونه سقوط آزاد دارد، در نهایت نمونه دچار شکست می شود. اولین ترک ایجاد شده در نمونه، نقطه ی شکست نمونه در نظر گرفته میشود. شمار سقوط های آزاد که برای شکست نمونه لازم است به عنوان معیار سنجش مقاومت نمونه ثبت می شود.

دستگاه ساخته شده برای آزمایش در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ابتدا این دستگاه طراحی شده و سپس بر اساس طرح، مصالح مورد نیاز تهیه گردیده است. این دستگاه با چوب مصنوعی موجود در بازار تهیه شده است. مصالح قطعات بیشتر از جنس چوب مصنوعی است به جز مصالح ابزار و یراق اتصالات که از جنس فلز است. بر اساس نقشه های طرح، قطعه ها با شکل های مستطیل و مربع برش زده شده اند. قطعات دستگاه به هم به صورت مستحکم توسط ابزار و یراق مخصوص متصل شده است. ارتفاع کلی دستگاه برابر ۱۱۰ سانتی متر و ارتفاع سقوط آزاد توپ برابر ۹۵ سانتی متر طراحی و ساخته شده است. ضخامت قطعات دستگاه به گونه ای طراحی شده است که توانایی تحمل بار های بسیار بیشتر از اندازه ی بار ضربه ی آزمایش را داشته باشد.

برای خنثی کردن اثر واکنش ضربه ی برخورد توپ به کف دستگاه، از یک فوم نرم پلاستیکی به ضخامت ۵ میلی متر استفاده شده است. به این صورت که در قطعه ی افقی کف دستگاه، یک فرورفتگی به ابعاد خود نمونه و ارتفاع ۵ میلی متر ایجاد شده است. فوم نرم پلاستیکی در این فرورفتگی

۵٪ وزنی است. پس از اضافه شدن ماسه به مخلوط، آب در هر لایه به صورت دستی افزوده می شود. برای رفع اثر تبخیر آب حین اختلاط ۱ میلی گرم آب اضافی به مخلوط اضافه شد. پس از افزوده شدن آب، مخلوط مورد نظر در قالب چوبی تهیه شده ریخته و به روشی که در قسمت قبل توضیح داده شد متراکم شدند.

ضمناً برای اتصال بهتر لایه های افزوده شده ی خاک، سطح لایه کوبیده شده ی قبلی پس از رسیدن به ارتفاع مورد نظر شیار زده می شود تا درگیری مناسب تری با خاک لایه بعدی در محل فصل مشترک آنها ایجاد شود. به عبارت دیگر، پس از کوبیدن هر لایه، سطح آن به اندازه ۳ میلی متر خراشیده شد تا لایه ها از هم جدا نباشند و نمونه ای همگن بدست بیاید.

جهت آسانی خارج کردن نمونه ها پس از عمل آوری، قالب به صورت چند تکه با چند قسمت جدا شونده طراحی شده است. این قسمت های جداشونده ی قالب با ابزار و یراق به هم متصل شده اند. برای استحکام بیشتر قالب در هنگام کوبش لایه های مخلوط، دور قالب با حایل های اضافی محصور و پایدار می شود. برای خارج کردن نمونه از قالب، قالب ها به صورت یک جا به همراه قاب نگهدارنده آن ها، داخل نایلون قرار داده شده است تا از خروج مصالح مخلوط جلوگیری شود.

فرایند عمل آوری نمونه های آزمایش در شکل ۹ نشان داده شده است. برای عمل آوری مناسب نمونه ها قالب را با پارچه مرطوب پوشانده و جهت جلوگیری از تبخیر آب، روی قالب ها و پارچه های مرطوب با سلفون پوشیده شد. مدت زمان عمل آوری برای هر نمونه ۲۸ روز در اتاقی با دمای کنترل شده برابر ۲۳ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. پس از عمل آوری، نمونه ها از قالب خارج شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند تا حالتی خشک پیدا کنند.

۳-۴- دستگاه آزمایش

استاندارد مشخصی برای آزمایش مقاومت ضربه ای تثبیت سیمانی ماسه یافت نشد. ایده اولیه آزمایش مقاومت ضربه ای از ACI-544.2R و همچنین از کار تحقیقاتی دهقانی و همکاران [۳۳] گرفته شده است و سپس تغییراتی که مناسب تثبیت باشد داده شده است. آزمایش با سقوط یک توپ با وزن مشخص بر روی نمونه ها انجام می شود. توپ دارای وزن یکنواخت ۲۵۰ گرم است. یک دستگاه آزمایش ساخته شده است که در آن یک مسیر عمودی برای افتادن توپ ساخته شد. دستگاه دارای یک بستر است که نمونه ها بر روی آن به حالت خوابیده قرار داده می شوند. توپ از بالای دستگاه

قرار داده می‌شود. نحوه‌ی قرار گیری فوم در زیر نمونه‌ها، در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

۴- نتایج و بحث

برای نمونه‌های خاک دارای ۴ درصد وزنی سیمان، نتایج آزمایش مقاومت ضربه‌ای در شکل ۱۲ ترسیم شده است. بیشترین مقاومت یعنی تعداد ضربات قابل تحمل هنگامی بدست می‌آید که ۵۰٪ سیمان با ژئولیت جایگزین گردد. جایگزینی سیمان با ژئولیت بیش از ۶۰٪ باعث کاهش مقاومت نسبت به سیمان خالص می‌شود. جایگزینی سیمان با ژئولیت کمتر از ۱۰٪ تاثیری روی مقاومت ندارد.

برای نمونه‌های خاک که دارای ۶ درصد وزنی سیمان بوده اند نتایج آزمایش ضربه در شکل ۱۳ ترسیم شده است. بیشترین مقاومت در ۳۰٪ جایگزینی سیمان با ژئولیت به دست می‌آید. جایگزینی بیش از ۴۴٪ سیمان با ژئولیت باعث کاهش مقاومت نسبت به سیمان خالص می‌شود. جایگزینی کمتر از ۱۰٪ تاثیری روی مقاومت ندارد.

برای نمونه‌های خاک که دارای ۸ درصد سیمان وزنی بوده اند نتایج



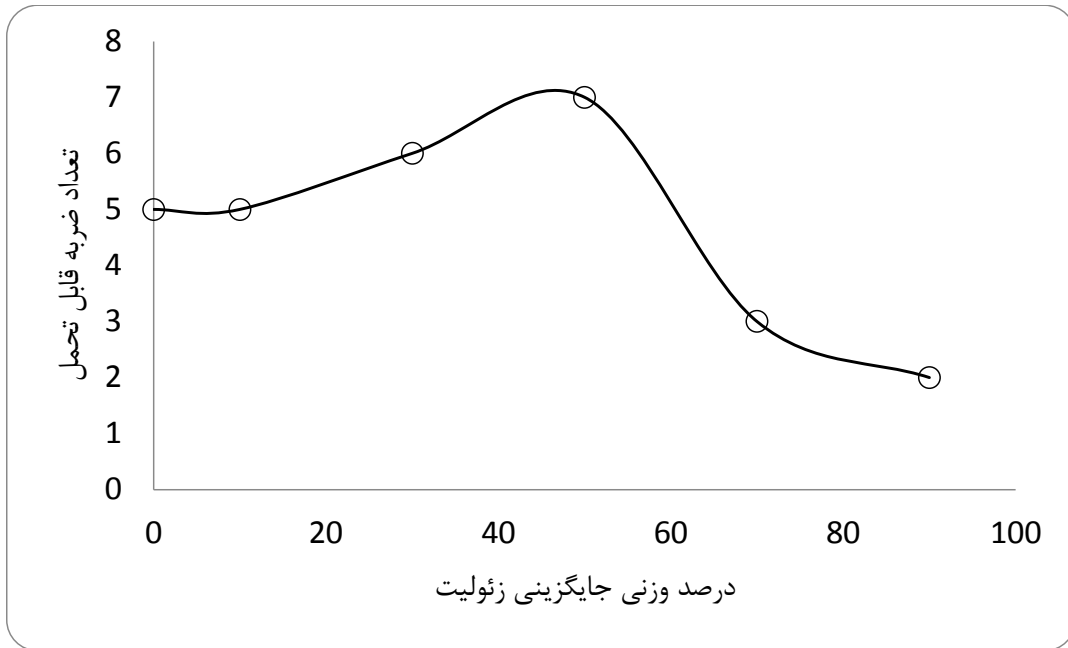
شکل ۱۰. دستگاه انجام آزمایش.

Fig. 10. Device for impact strength testing.



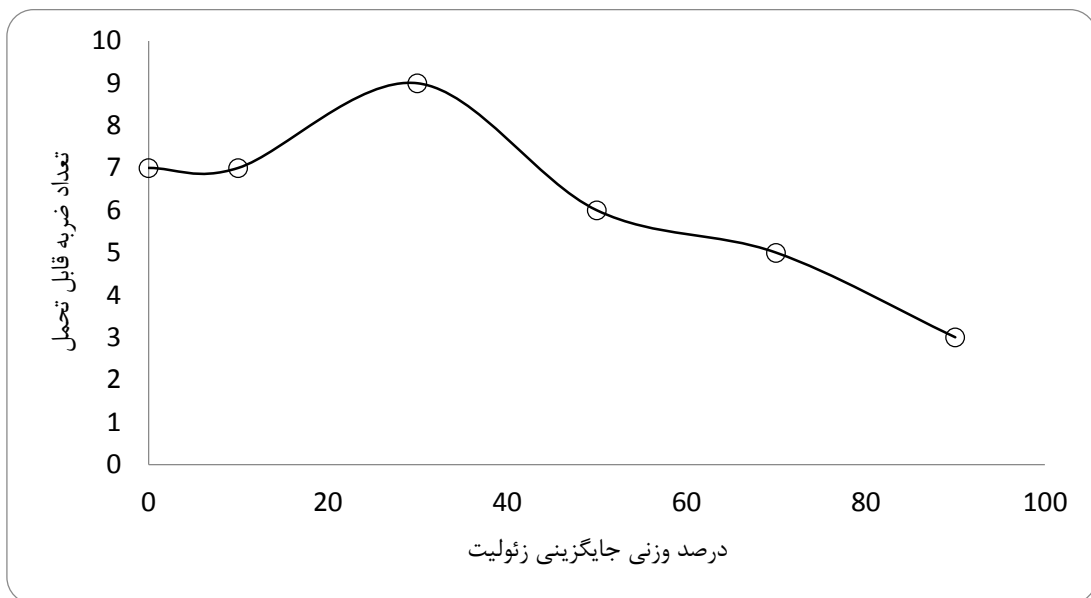
شکل ۱۱. فوم زیر نمونه آزمایش.

Fig. 11. Absorbing foam under the test specimen.



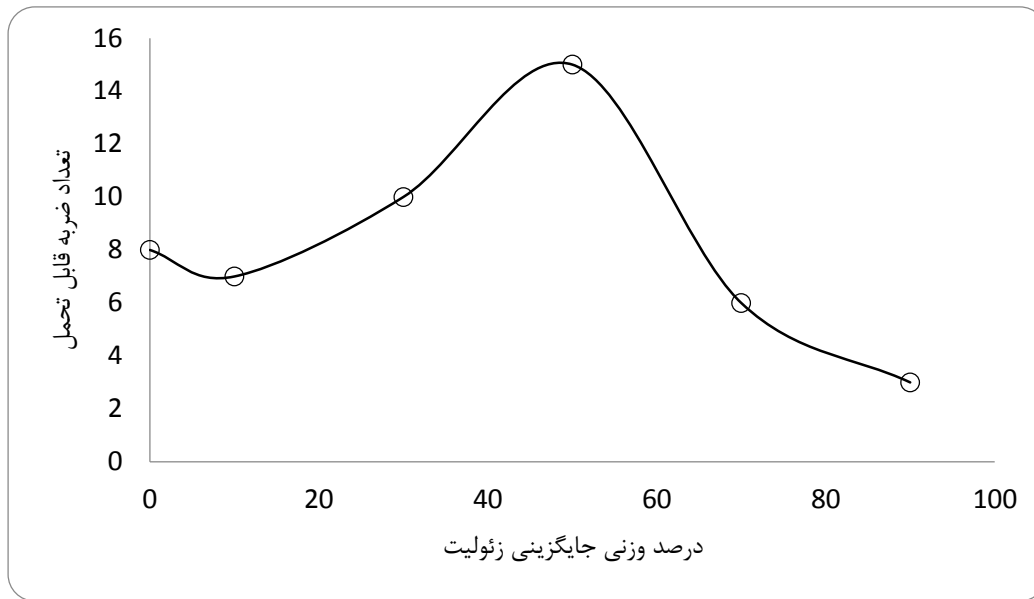
شکل ۱۲. آزمایش مقاومت ضربه ای برای ماسه با ۴٪ سیمان.

Fig. 12. Results of impact strength tests for sand with 4 % cement.



شکل ۱۳. نتیجه آزمایش مقاومت ضربه ای برای ماسه به ۶٪ سیمان.

Fig. 13. Results of impact strength tests for sand with 6 % cement.



شکل ۱۴. نتیجه آزمایش مقاومت ضربه ای برای ماسه با ۸٪ سیمان.

Fig. 14. Results of impact strength tests for sand with 8 % cement.

سیمان خالص کاهش می‌یابد. برای بیشتر نمونه‌ها، جایگزینی از صفر تا ۱۰٪ زئولیت تاثیر چشمگیری روی مقاومت ندارد.

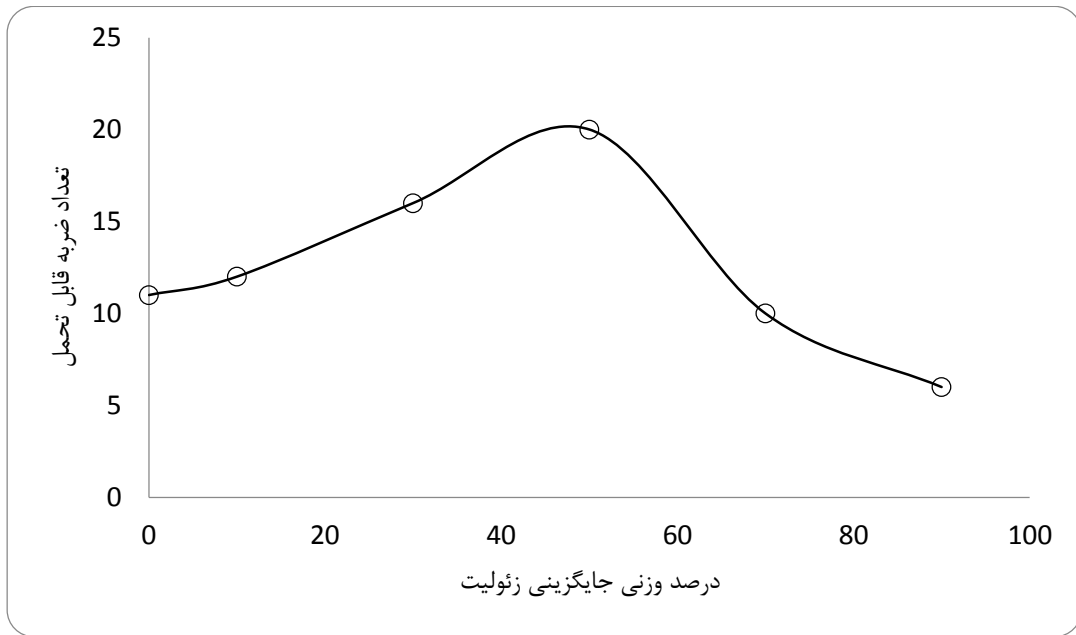
هر چه مقدار سیمان افزوده شده به ماسه بیشتر باشد، تاثیر جایگزینی زئولیت بیشتر می‌شود. به این معنی که برای ماسه با ۱۰٪ سیمان نسبت به ماسه با ۸٪ سیمان، تاثیر جایگزینی زئولیت بیشتر است. نرخ تغییر مقاومت هم برای ماسه با درصد بالاتر سیمان دارای شیب تند تر است.

از نتایج بدست آمده می‌توان دریافت که مقدار زئولیت در ترکیب با سیمان یک درصد بهینه در همه ی حالت های بررسی شده دارد. به عبارت دیگر، با افزوده شدن مقدار زئولیت، مقاومت افزایش می‌یابد و با رسیدن به درصد بهینه، مقاومت به حداکثر می‌رسد و در صورت عبور از درصد بهینه، مقاومت کاهش می‌یابد. زئولیت به دلیل دارا بودن ساختارهای سیلیکات آلومینیوم با سیمان بخوبی واکنش می‌دهد و باعث بهبود پیوستگی و بافت مخلوط می‌شود. با افزایش درصد زئولیت، ظرفیت واکنش پذیری سیمان به پایان می‌رسد و زئولیت اضافی به عنوان مواد سرگردان باعث کاهش مقاومت می‌شود. ارزش افزوده ی زئولیت در واقع واکنش پذیری آن با سیمان برای افزایش مقاومت نهایی است. با توجه به نتایج این تحقیق مقدار بهینه درصد جایگزینی زئولیت با سیمان بین ۳۰ تا ۵۰٪ وزنی سیمان است. نتایج تحقیق حاضر با نتایج شوش پاشا و همکاران [۹] سازگار است. آنها میزان

ترسیم شده در شکل ۱۴ به دست آمده است. بیشترین مقاومت در ۵۰٪ جایگزینی سیمان با زئولیت حاصل می‌شود. جایگزینی بیش از ۶۵٪ سیمان با زئولیت باعث کاهش مقاومت نسبت به حالت اولیه ی سیمان خالص می‌گردد. جایگزینی کمتر از ۱۰٪ سیمان با زئولیت باعث کاهش مقاومت ضربه ای به میزان ۱۳٪ شده است.

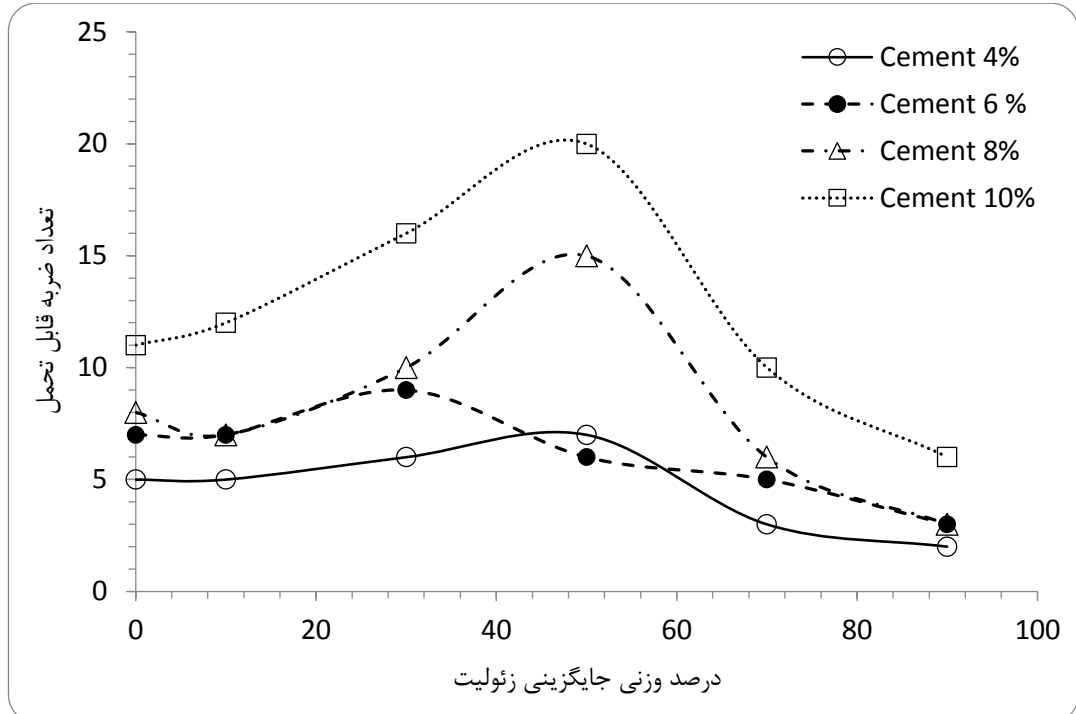
برای نمونه های خاک که دارای ۱۰ درصد وزنی سیمان بوده اند نتایج مطابق شکل ۱۵ به دست آمده است. بیشترین مقاومت در ۵۰٪ جایگزینی سیمان با زئولیت حاصل شد. جایگزینی بیش از ۶۵٪ سیمان با زئولیت مقاومت را نسبت به سیمان خالص کاهش می‌دهد. جایگزینی از صفر تا ۶۵٪ سیمان با زئولیت تاثیر مطلوبی روی مقاومت دارد بنحوی که با افزایش مقدار زئولیت جایگزین، مقاومت ضربه‌ای افزایش می‌یابد اما مقدار بهینه جایگزینی، ۵۰٪ است. با افزایش مقدار زئولیت جایگزین از ۶۵٪ مقاومت نسبت به حالت بدون زئولیت کاهش یافت.

جهت مقایسه بهتر نتایج آزمایشات مقاومت ضربه ای با یکدیگر، نمودار ۱۶ ارائه شده است. مقدار عددی مقاومت در محور عمودی نشان داده است. مقدار زئولیت جایگزینی بهینه برای همه‌ی نمونه‌ها بین ۳۰٪ تا ۵۰٪ از سیمان است. برای همه‌ی نمونه‌ها، جایگزینی بیش از ۶۰٪ الی ۶۵٪ تاثیر معکوس روی مقاومت دارد. به این معنی که مقاومت نسبت به حالت اولیه



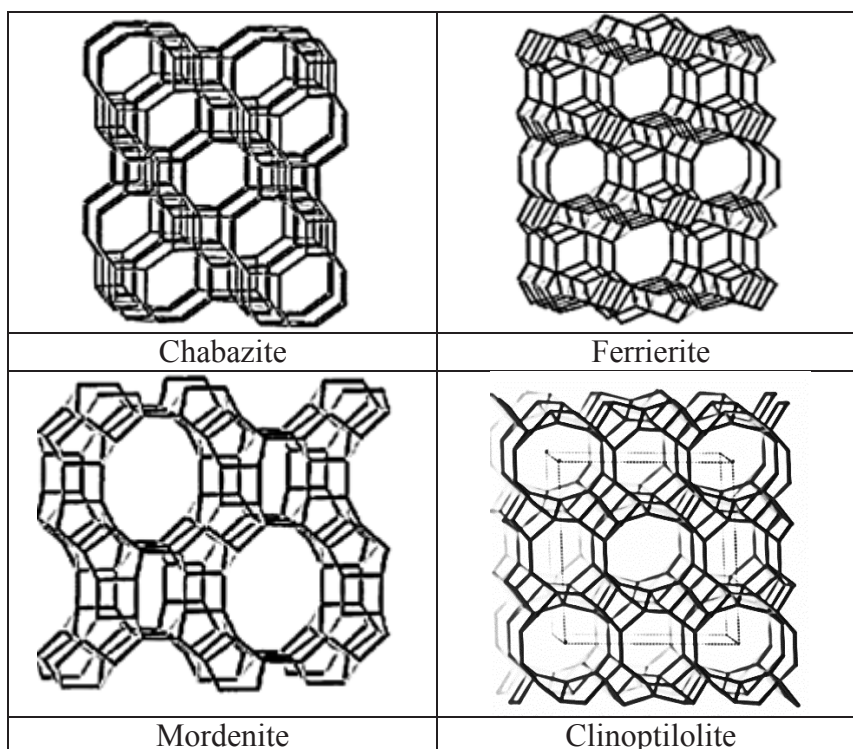
شکل ۱۵. نتیجه آزمایش مقاومت ضربه ای برای ماسه با ۱۰٪ سیمان.

Fig. 15. Results of impact strength tests for sand with 10 % cement.



شکل ۱۶. مقایسه ی نتیجه آزمایش مقاومت ضربه ای برای همه ماسه ها.

Fig. 16. Comparison of results of impact strength tests.



شکل ۱۷. ساختار آلومینوسیلیکات مربوط به چهار نوع زئولیت [۳۴، ۳۵].

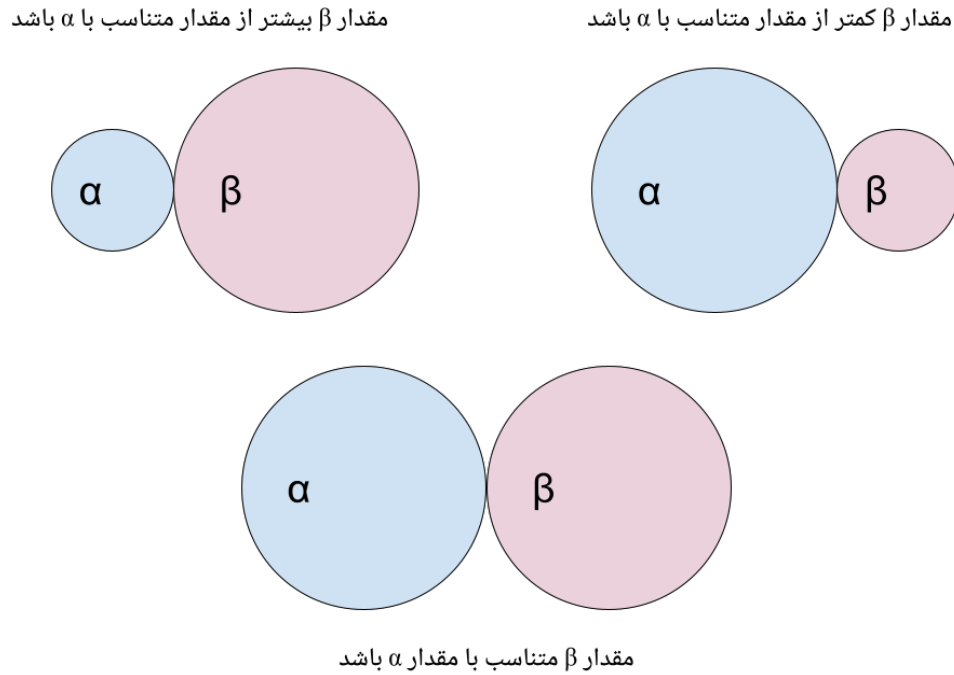
Fig. 17. Aluminosilicate structure of four types of zeolites [34,35].

در میزان بهبود مقاومت میشود. نتایج شیخ و همکاران [۲۵] نیز که گزارش کردند که افزودن ۳۰٪ زئولیت به مصالح روسازی باعث افزایش ۲۹٪ مقاومت و ۳۳٪ کرنش گسیختگی می شود، با نتایج تحقیق حاضر سازگار است زیرا افزایش کرنش گسیختگی احتمالاً باعث افزایش مقاومت در برابر بار ضربه‌ای خواهد شد.

برای تحلیل و بحث نتایج بدست آمده لازم است به ساختار شیمیایی توجه شود. پوزولان های طبیعی دارای ذرات اکسید سیلیسیم SiO_2 و اکسید آلومینیم Al_2O_3 هستند. به این ساختارهای مولکولی سیلیکات آلومینوم یا آلومینوسیلیکات گفته می شود. ساختارهای آلومینوسیلیکات برای چهار نوع زئولیت در شکل ۱۷ نشان داده شده است که در تحقیق حاضر از زئولیت نوع کلینوپتولیت استفاده شده است. از طرف دیگر فرایند واکنش سیمان و آب منجر به تولید ذرات هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2 می شود. واکنش سیلیکات آلومینوم و هیدروکسید کلسیم باعث افزایش خاصیت چسبندگی شده و در نهایت به افزایش مقاومت می انجامد [۳۴].

به طور کلی، این طور در نظر گرفته می شود که مشارکت زئولیت در افزایش مقاومت فشاری، ناشی از واکنش پوزولانی با هیدروکسید کلسیم

بهینه زئولیت را ۵۰٪ سیمان اعلام نمودند. همچنین گزارش دادند که این مقدار زئولیت باعث افزایش میانگین ۶۰٪ مقاومت برشی می شود. سلامت پور و همکاران [۱۰] نیز نتایج سازگاری با نتایج تحقیق حاضر ارائه دادند. آنها میزان بهینه زئولیت را برای افزایش مقاومت فشاری محصور نشده ۴۰٪ گزارش دادند و نشان دادند که این مقدار زئولیت باعث افزایش ۱۱۰٪ مقاومت فشاری می شود. نتایج سلطانی و همکاران [۱۱] نیز با نتایج تحقیق حاضر مطابقت نسبتاً خوبی دارد. آنها گزارش کردند که اضافه شدن ۳۰٪ زئولیت و ۷/۵٪ گرانول لاستیکی تا حداکثر ۱۰۰٪ مقاومت فشاری محصور نشده را افزایش می دهد. نتایج سعادت و همکاران [۱۲] نیز که حاکی از افزایش مدول برشی تناوبی در اثر ۳۰٪ جایگزینی سیمان با زئولیت است تطابق خوبی با نتایج تحقیق حاضر دارد. نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر با نتایج عباسی و همکاران [۱۳]. که نشان می دهد با جایگزینی ۳۰٪ زئولیت به جای سیمان، میزان مقاومت کششی آن نسبت به نمونه های بدون زئولیت به میزان ۴۰٪ افزایش می یابد، سازگاری دارد. لازم به ذکر است که تفاوت در میزان بهبود مقاومت ها قابل توجه است زیرا خلوص و فرم زئولیت بکار رفته و همچنین تفاوت در نوع فیزیکی مقاومت ها باعث تفاوت



شکل ۱۸. سه حالت بوجود آمده از مقایسه اندازه α و β .

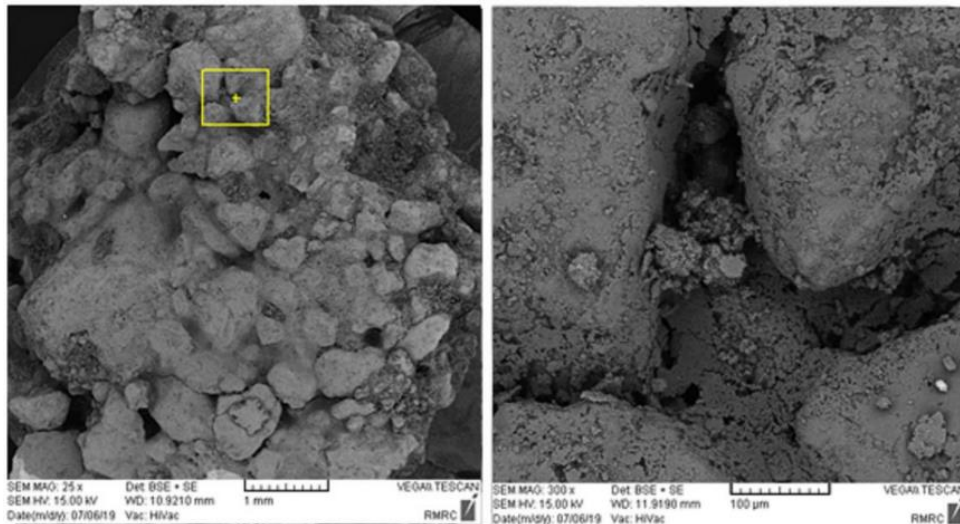
Fig. 18. Three states arise from comparing the sizes of α and β .

می‌شوند. حالت اول این است که مقدار β که ارتباط مستقیم با میزان زئولیت جایگزینی دارد متناسب با مقدار α باشد، در این صورت واکنش α و β کامل بوده و باعث نهایت افزایش خاصیت چسبندگی می‌شود. به عبارت دیگر، تعادل کافی بین اندازه‌های موجود α و β در مخلوط وجود دارد تا واکنش‌های شیمیایی بدون کم آمدن یا زیاد آمدن α و β انجام شود. حالت دوم این است که مقدار β کمتر از مقدار متناسب با α باشد. یعنی، مقدار کافی β برای واکنش با α وجود نداشته باشد. در این صورت همه ی α نمی‌تواند در افزایش خاصیت چسبندگی مشارکت کند. بنابراین نهایت افزایش چسبندگی و مقاومت به دست نمی‌آید. حالت سوم حالتی است که در آن مقدار β بیشتر از مقدار متناسب با α باشد، یعنی پس از واکنش α و β ، مقداری از β زیاد آمده و به صورت اضافی در محیط واکنش وجود خواهد داشت. در این صورت، مقدار اضافی β اثر معکوس روی مقاومت بتن دارد. بلکه خاصیت شکنندگی بتن را افزایش می‌دهد و مقاومت را کاهش می‌دهد. با افزایش مقدار زئولیت ظرفیت واکنش پذیری سیمان به پایان می‌رسد و زئولیت مازاد بعنوان مواد اضافی باعث کاهش گیرش و مقاومت تثبیت می‌شود. به عبارت دیگر، اگر هریک از این مقادیر α و β متناسب باشد این حالت متناظر با درصد جایگزینی بهینه زئولیت بجای سیمان است. اگر مقدار β کمتر از مقدار

Ca(OH)_2 است [۳۴]. مطالعات گذشته به یافته‌های متفاوتی در مورد اثر ترکیب زئولیت با سیمان بر روی مقاومت فشاری رسیده‌اند. این گوناگونی نتایج ممکن است به علت عواملی مانند ترکیب شیمیایی زئولیت استفاده شده، ریزی و درشتی بافت زئولیت، و همینطور واکنش پذیری زئولیت با Ca(OH)_2 باشد [۳۴]. هنگام واکنش زئولیت با سیمان، مقدار Ca(OH)_2 مصرف شده در واکنش بسیار بیشتر از مقدار مورد نیاز برای تبادل کاتی است. بنابراین، تبادل کاتی ممکن است که فرایند آغازین باشد و به دنبال آن فرایند اصلی دیگری رخ دهد. بلکه این فرایند اصلی محتمل است که شکسته شدن ساختارهای آلومینوسیلیکات و تشکیل شدن ساختارهای C-S-H و S-H باشد [۳۴].

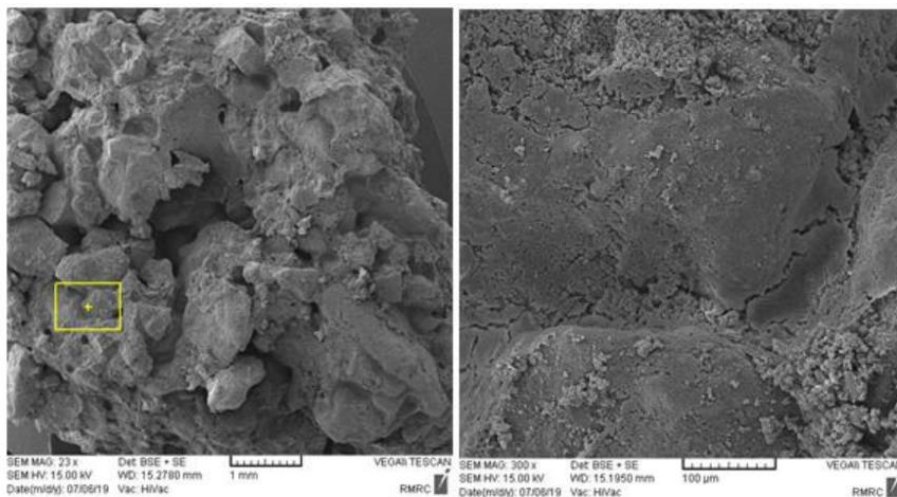
بر پایه دو فرض زیر و سه حالت متمایز که در پی آن خواهد آمد، مشاهده‌های آزمایش را می‌توان توجیه کرد:

۱. فرض می‌شود که ترکیب سیمان و آب منجر به تولید هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2 به میزان α خواهد شد.
 ۲. از طرفی دیگر فرض می‌شود که مقدار β از ساختارهای آلومینوسیلیکات در مخلوط وجود دارد که ناشی از افزودن زئولیت است.
- دو فرض بالا باعث به وجود آمدن سه حالت احتمالی در شکل ۱۸



شکل ۱۹. میکروسکوپ الکترونی: خاک پایه و سیمان ۱۰٪ [۱۱].

Fig. 19. SEM Image: soil with 10% cement [11].



شکل ۲۰. میکروسکوپ الکترونی: ترکیب خاک پایه و سیمان ۱۰٪ و زئولیت ۳۰٪ [۱۱].

Fig. 20. SEM Image: soil mixed with 10 % cement and 30 % zeolite [11].

از لحاظ مورفولوژی نیز می‌توان به بحث و تحلیل نتایج بخصوص وجود درصد بهینه جایگزینی سیمان با زئولیت پرداخت. بر اساس تحلیل‌های میکروسکوپ الکترونی در شکل‌های ۱۹ و ۲۰، مورفولوژی با افزودن سیمان و زئولیت تغییر می‌کند [۱۱]. در خاک بدون سیمان و زئولیت، حفره‌ها و فضاهای خالی بسیاری وجود دارد. وقتی سیمان و آب به خاک افزوده می‌شود، فضاهای خالی خاک به صورت نسبی پر می‌شود و فواصل خالی بین

α باشد در اینصورت درصد زئولیت جایگزین سیمان کم است و مقداری از هیدروکسید کلسیم مازاد که در واکنش شرکت نکرده وجود خواهد داشت. بعنوان مثال حالت تا ۱۰٪ زئولیت که جا دارد زئولیت بیشتری اضافه شود تا مقاومت بیشتری حاصل شود. در نهایت اگر مقدار β بیشتر باشد در اینصورت مقداری از سیلیکات‌های زئولیت وارد واکنش نمیشوند و این سیلیکات‌ها مقاومت را کاهش می‌دهند.

۶- فهرست علائم

- α میزان هیدروکسید کلسیم در مخلوط.
فرض است که ترکیب سیمان و آب منجر به تولید هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2 به میزان α می‌شود.
- B مقدار ساختارهای سیلیکات آلومینیوم در مخلوط.
فرض است که افزودن پوزولان منجر به حضور مقدار β از ساختارهای آلومینوسیلیکات می‌شود.

منابع

- [1] Cement Manufacturing Enforcement Initiative, in: EPA (Ed.), United States Environmental Protection Agency, 2022.
- [2] B. Bogdanov, D. Georgiev, K. Angelova, Y. Hristov, Synthetic Zeolites and Their Industrial and Environmental Applications Review, in: International Science Conference, Economics and Society Department on the Base of Knowledge, Stara Zagora Bulgaria., 2009.
- [3] P. Baile, E. Fernández, L. Vidal, A. Canals, Zeolites and zeolite-based materials in extraction and microextraction techniques, *Analyst*, 144(2) (2019) 366-387.
- [4] R. Yousefi, A.A. Amouei, M. Amelsakhi, Investigating the structure of zeolite and its effect on soil improvement, in: 6th National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, 2019.
- [5] P. Misaelides, Application of natural zeolites in environmental remediation: A short review, *Microporous and Mesoporous Materials*, 144(1) (2011) 15-18.
- [6] A. Rahma, H. Jomaa, Modeling the cementitious effect of the Pozzolana on the compressive strength of concrete, *Cogent Engineering*, 5(1) (2018) 1548002.
- [7] J.X. Shi, The Applications of Zeolite in Sustainable Binders for Soil Stabilization, *Applied Mechanics and Materials*, (2012) 112-115.
- [8] H. Shang, Geotechnical laboratory characterization of sand-zeolite mixtures., *Electronic Theses and*

دانه های خاک کمتر می‌شود. وقتی درصدی از سیمان با زئولیت جایگزین می‌شود، اگر این درصد بهینه باشد، فضاهای خالی بیش از پیش پر می‌شود و فاصله های خالی بین دانه های خاک نیز کمتر از قبل می‌شود. بافت خاک بیشتر به صورت توده و یکپارچه در می‌آید. به خاطر پیوستگی حاصل شده برای بافت خاک، مقاومت خاک بیشتر می‌شود. این پیوستگی ناشی از واکنش های اکسید سیلیسیم، اکسید آلومینیم، و اکسید کلسیم است. زئولیت در حین هیدراتاسیون، بدلیل دارا بودن سیلیکاتهای آلومینیوم با سیمان بخوبی واکنش می‌دهد و باعث بهبود بافت و پیوستگی می‌شود.

۵- جمع بندی

افزایش مقاومت ماسه زیر بار ضربه تاثیر زیادی بر رفتار و دوام سازه های ژئوتکنیکی بخصوص تحت بارهای دینامیکی دارد. برای افزایش طول عمر سازه های ژئوتکنیکی می توان مقاومت ماسه در برابر ضربه را افزایش داد. یکی از راههای مقاوم سازی ماسه تثبیت آن با سیمان و آهک بوده است که با توجه به ایجاد آلودگی های زیست محیطی، عدم مقرون به صرفه بودن، ایجاد مشکلات ساختاری و عدم وجود مقاومت پایدار این مصالح، محققین بر آن هستند که مصالح جایگزین مناسب مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور، راه های گوناگونی موضوع تحقیقات بوده است. از جمله این تحقیقات، پژوهش هایی هستند که در آن ها اثر افزودن گردهای آتشفشانی-معدنی به مصالح خاکی بررسی می شود. از زیر مجموعه های این گردها، گرد زئولیت است. گرد زئولیت نسبتا ارزان است. در کشور ایران، معادن تولید کننده این گرد وجود دارند. تحقیقات پیشین نشان می دهد که این گرد مقاومت فشاری و برشی ماسه را در برابر بار معمولی افزایش می دهد. اما تحقیقی برای بار ضربه ای انجام نشده بود. در این تحقیق، تلاش شد اثر افزودنی زئولیت بر روی مقاومت ماسه در برابر بار ضربه ای بصورت آزمایشگاهی بررسی شود. بر اساس نتایج آزمایش ضربه ای که در تحقیق حاضر طراحی و ساخته شد، برای هر مقدار سیمان مخلوط شده، درصد بهینه جایگزینی سیمان با زئولیت پیشنهاد شد. همچنین نتایج نشان داد که دامنه ی درصد های جایگزینی که اثر ناچیز و یا معکوس روی مقاومت دارد نیز مشخص گردیده است. مقدار جایگزینی بهینه بین ۳۰٪ تا ۵۰٪ زئولیت است. جایگزینی بیش از ۶۵٪ تاثیر معکوس روی مقاومت ضربه ای دارد. به این معنی که مقاومت نسبت به حالت اولیه سیمان خالص کاهش می یابد. مشاهده می شود که جایگزینی تا ۱۰٪ تاثیر چشمگیری روی مقاومت ضربه ای ندارد.

- Strength of CKD — Stabilized Expansive Clayey Soil Using Natural Zeolite, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(4) (2021) 1204-1213.
- [19] S. Shirmohammadi, S. Ghaffarpour Jahromi, M. Payan, K. Senetakis, Effect of Lime Stabilization and Partial Clinoptilolite Zeolite Replacement on the Behavior of a Silt-Sized Low-Plasticity Soil Subjected to Freezing–Thawing Cycles, *Coatings*, 11(8) (2021) 994.
- [20] H.R. Akbari, H. Sharafi, A.R. Goodarzi, Effect of polypropylene fiber inclusion in kaolin clay stabilized with lime and nano-zeolite considering temperatures of 20 and 40 °C, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(2) (2021) 1841-1855.
- [21] H.R. Akbari, H. Sharafi, A.R. Goodarzi, Effect of polypropylene fiber and nano-zeolite on stabilized soft soil under wet-dry cycles, *Geotextiles and Geomembranes*, 49(6) (2021) 1470-1482.
- [22] A. Ali, B.A. Mir, N. Gul, F.Z. Malik, Strength and Microstructural Behavior of Soft Soil Treated with Zeolite Nanoparticles, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 10(6) (2023) 1239-1254.
- [23] A. Khajeh, R.J. Chenari, H. MolaAbasi, M. Payan, An experimental investigation on geotechnical properties of a clayey soil stabilised with lime and zeolite in base and subbase courses, *Road Materials and Pavement Design*, Volume 23 - Issue 12 (2022).
- [24] S.R. Rabab'ah, M.M. Taamneh, H.M. Abdallah, O.K. Nusier, L. Ibdah, Effect of Adding Zeolitic Tuff on Geotechnical Properties of Lime-Stabilized Expansive Soil, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(12) (2021) 4596-4609.
- [25] A. Sheikh, M. Akbari, G. Shafabakhsh, Laboratory Study of the Effect of Zeolite and Cement Compound on the Unconfined Compressive Strength of a Stabilized Base Layer of Road Pavement, *Materials*, 15(22) (2022) 7981.
- [26] A. Khajeh, S.A. Ebrahimi, H. MolaAbasi, R.J. Chenari, M. Payan, Effect of EPS beads in lightening a typical zeolite and cement-treated sand, *Bulletin of Engineering Dissertations*, 2015.
- [9] I. Shooshpasha, M. Abbasi, H. Molaabasi, The Effect of Zeolite on Shear Strength of Babolsar Sand Stabilized with Cement, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 49.1(94) (2019) 89-96.
- [10] S. Salamatpoor, Y. Jafarian, A. Hajiannia, Experimental investigation into the influence of zeolite addition on shallow foundations behavior placed on coastal sand of Mazandaran Sea, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(4) (2021) 114-128.
- [11] M.S. Soltani, M. Jiryaei Sharahi, M. Amelsakhi, Effect of Zeolite and tire granules on cement stabilization of the sand, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(2) (2022) 759-774.
- [12] M. Saadati, M. Derakhshandi, A. Bahmanpour, N. Ganjian, Experimental investigation of cyclic behavior of zeolite cemented sand, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(12) (2022) 5441-5456.
- [13] M. Abbasi, E. Shooshpasha, H. MolaAbasi, INVESTIGATION OF ZEOLITE EFFECT ON TENSILE STRENGTH OF BABOLSAR SAND STABILIZED WITH CEMENT, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33.2(1.1) (2017) 117-120.
- [14] A.M. Rajabi, S.B. Ardakani, Effects of Natural-Zeolite Additive on Mechanical and Physicochemical Properties of Clayey Soils, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(10) (2020) 04020306.
- [15] H.A. Chenarboni, S.H. Lajevardi, H. Mola Abasi, E. Zeighami, The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils, *Construction and Building Materials*, Volume 272 (2021).
- [16] M. Shahriar Kian, S. Kabiri, M. Bayat, Utilization of Zeolite to Improve the Behavior of Cement-Stabilized Soil, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* 7, Article number: 35, (2021).
- [17] S. Jamshidvand, A. Ardakani, A. Kordnaeij, Effect of cement and zeolite on silty sand samples under freeze–thaw cycles, *Road Materials and Pavement Design*, 23(8) (2022) 1836-1859.
- [18] A.A. Sharo, F.M. Shaqour, J.M. Ayyad, Maximizing

- Zhang, J. Wang, Performance and environmental impact assessment of a novel zeolite modified cement stabilized calcareous sand material for island eco-construction, *Construction and Building Materials*, 458 (2025) 139628.
- [32] W. Qu, N. Maimt, J. Qu, Effects of zeolite and palm fiber on the weathering resistance and durability characteristic of cement soil, *Scientific Reports*, 15(1) (2025) 4408.
- [33] M. dehghani ashkezari, g. dehghani ashkezari, Investigation of Impact Behavior of High Strength Concrete and Ultra-High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete under Impact of Projectile, *Journal of Advanced Defense Science & Technology*, 9(3) (2018) 337-348.
- [34] K. Luke, The Effect of Natural Zeolites on the Composition of Cement Pore Fluids at Early Ages, in: *International Congress on the Chemistry of Cement*, ICCI, 2007.
- [35] A. Mastinu, A. Kumar, G. Maccarinelli, S.A. Bonini, M. Premoli, F. Aria, A. Gianoncelli, M. Memo, Zeolite Clinoptilolite: Therapeutic Virtues of an Ancient Mineral, *Molecules*, 24(8) (2019) 1517.
- Geology and the Environment, 80 (2021) 8615–8632.
- [27] M. Hosseinzade, M. Hassanlourad, S.A. Naeini, Investigating the zeolite and bentonite adsorbent effect on different parameters of soil, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 176(4) (2023) 261-272.
- [28] A.A. Shahmansouri, M. Yazdani, S. Ghanbari, H. Akbarzadeh Bengar, A. Jafari, H. Farrokh Ghatte, Artificial neural network model to predict the compressive strength of eco-friendly geopolymer concrete incorporating silica fume and natural zeolite, *Journal of Cleaner Production*, 279 (2021) 123697.
- [29] M. Ramezani, S. Soleimani Kutanaei, A. Seyedkazemi, A. Esfandiari Fard, Enhancing the Durability of Cement-Stabilized Clayey Sand with Zeolite and PVA Fibers Under Wet–Dry and Freeze–Thaw Cycles, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 12(5) (2025) 162.
- [30] S. Nasrollahpour, A. Tanhadoust, S. Kaur Brar, H. MolaAbasi, M.L. Nehdi, O. Ataei, Multi-objective optimization of sustainable cement-zeolite improved sand based on life cycle assessment and artificial intelligence, *F1000Research*, 13 (2024) 257.
- [31] L. Cao, P. Cao, Z. Wang, Z. Tan, C. Zhou, G. Zhang, S.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. R. Nasiry, M. Jiryaei Sharahi, A. Attarzadeh, *Stabilized Sand with Zeolite under Impact Load*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(8) (2025) 1481-1504.

DOI: [10.22060/ceej.2025.22174.7921](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.22174.7921)



