



University Of Qom



## Investigation of the Effect of Polymer Emulsion on the Uniaxial Compressive Strength of Aeolian Sand

Mahsa Heravi<sup>1</sup>, Akbar Cheshomi<sup>2</sup>

1. Department of Structure and Engineering Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: [mahsa.heravi@ut.ac.ir](mailto:mahsa.heravi@ut.ac.ir)
2. Corresponding author, Department of Structure and Engineering Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: [a.cheshomi@ut.ac.ir](mailto:a.cheshomi@ut.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
Received 13 Feb 2023  
Revised 15 Apr 2023  
Accepted 16 Apr 2023

**Keywords:**  
Aeolian Sand,  
Compaction Test,  
Uniaxial Compression  
Test,  
Polymer Emulsion.

### ABSTRACT

*The present study investigated the effect of vinyl acrylic polymer emulsion (VA) on maximum dry density ( $\gamma_{dmax}$ ), optimum water content ( $\omega_{opt}$ ), uniaxial compressive strength (UCS) and modulus of elasticity (E) of aeolian sands of Khuzestan plain. Polymer emulsion with percentages of 10, 20, and 30% were made and after adding to the soil, they were subjected to a compaction test, then cylindrical samples with  $\gamma_{dmax}$  and  $\omega_{opt}$  were made and at curing times 1, 7, 14, 21 and 28 days in two groups were subjected to UCS test. The samples of the first group were cured at laboratory temperature and the samples of the second group were packed with nylon in order to maintain moisture and were cured at a temperature of 20°C. The results of the tests showed that increasing the concentration of the polymer solution had no effect on the  $\gamma_{dmax}$  but it could reduce  $\omega_{opt}$ . By increasing the curing time and the concentration of the polymer solution, the UCS and E of the first group of samples increased, while the UCS of the second group is without change. Therefore, when the improved sample is tested in a dry state, the UCS increases, and when it is tested in a wet state, the UCS does not change. The electron microscope images show that when the sample is dry the polymer forms bonds and bridges between the sand grains and the UCS and E increase.*

**Cite this article:** Heravi, Mahsa., & Cheshmi, Akbar. (2023). Investigation of the Effect of Polymer Emulsion on the Uniaxial Compressive Strength of Aeolian Sand. *Civil Infrastructure Researches*, 9(1), 175-191. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.9107.1459>





## بررسی تأثیر امولسیون پلیمری بر مقاومت فشاری تک محوری ماسه بادی

مهسا هروی<sup>۱</sup>، اکبر چشمی<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی دوره کارشناسی ارشد، دانشکده زمین شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [mahsa.heravi@ut.ac.ir](mailto:mahsa.heravi@ut.ac.ir)

۲. نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده زمین شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [a.cheshomi@ut.ac.ir](mailto:a.cheshomi@ut.ac.ir)

### چکیده

تحقیق حاضر به بررسی تأثیر امولسیون پلیمری ونیل اکریلیک (VA) بر دانسیته خشک حداکثر ( $\gamma_{dmax}$ )، رطوبت بهینه ( $\omega_{opt}$ )، مقاومت تراکمی تک‌محوری (UCS) و مدول الاستیسیته (E) ماسه‌های بادی دشت خوزستان پرداخته است. محلول‌هایی با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد از محلول پلیمری ساخته و بعد از اضافه کردن به خاک تحت آزمایش تراکم قرار گرفته، سپس نمونه‌های استوانه‌ای با  $\omega_{opt}$  و  $\gamma_{dmax}$  ساخته شده و در زمان‌های ۱، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز در دو گروه عمل‌آوری و تحت آزمایش UCS قرار گرفته‌اند. گروه اول نمونه‌ها در دمای محیط آزمایشگاه عمل‌آوری شده و گروه دوم نمونه‌ها به منظور حفظ رطوبت بسته‌بندی و در دمای ۲ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شده‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد افزایش غلظت محلول پلیمری تأثیری بر  $\gamma_{dmax}$  نمونه‌ها نداشته است. لیکن در بیشترین غلظت قادر است  $\omega_{opt}$  را تا ۱۱ درصد کاهش دهد. با افزایش زمان عمل‌آوری و غلظت محلول پلیمری، UCS و E دسته اول نمونه‌ها، به بیش از ۲ برابر افزایش یافته، در حالی که تغییری در UCS دسته دوم نمونه‌ها مشاهده نشده است. بنابراین اگر به نمونه تثبیت شده در زمان عمل‌آوری اجازه خشک شدن داده نشود، افزودن پلیمر تأثیری بر مقاومت آن نخواهد داشت. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد زمانی که بعد از افزودن محلول پلیمری، به نمونه اجازه خشک شدن داده می‌شود، محلول قادر است با تشکیل باندها و پل‌هایی بین دانه‌های ماسه بادی باعث بهبود مقاومت و مدول آن شود.

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۷

### کلیدواژه‌ها:

ماسه بادی،

آزمایش تراکم،

آزمایش تک‌محوری،

امولسیون پلیمری.

استناد: هروی، مهسا؛ و چشمی، اکبر. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر امولسیون پلیمری بر مقاومت فشاری تک محوری ماسه بادی. پژوهش‌های

زیرساخت‌های عمرانی. ۱(۱)۹، ۱۷۵-۱۹۱. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.9107.1459>



## ۱- مقدمه

امروزه رشد چشمگیر زیرساخت‌های حمل‌ونقل باعث شده که در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان بسیاری از خطوط حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی از زمین‌های پوشیده شده از ماسه‌های بادی عبور کند. علاوه بر آن با توجه به نیاز پروژه‌های مختلف مهندسی به منابع قرضه، امکان‌پذیری استفاده از ماسه‌های بادی به‌عنوان منبع قرضه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به موضوع مهم در علم ژئوتکنیک تبدیل گردیده است. ماسه‌های بادی عموماً فاقد خاصیت خمیری بوده و به‌دلیل داشتن دانه‌بندی یکنواخت به سختی متراکم شده، لذا ظرفیت باربری پایینی دارند [۱]. این گروه از خاک‌ها در اثر خیس شدن مستعد فروریزش بوده و زمانی که سست و اشباع هستند و تحت بارگذاری سبکی قرار گیرند، روانگرا می‌شوند [۲] و [۳]. اندازه دانه‌ها در ماسه‌های بادی بین ۰/۰۸ تا ۰/۴ میلی‌متر، درصد رطوبت آنها بین صفر تا ۴٪، نفوذپذیری بین ۰/۰۰۰۳۴ تا ۰/۰۱ سانتیمتر بر ثانیه و حداکثر جذب آب ۱٪ می‌باشد [۴-۷]. دامنه تغییرات وزن مخصوص دانه‌های جامد ( $G_s$ ) برای ماسه‌های بادی منطقه آفریقا بین ۲/۴۴ تا ۲/۷۴ و برای ماسه‌های بادی منطقه آسیا بین ۲/۶۳ تا ۲/۸۷ گزارش شده است [۸ و ۹]. ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی ذرات تشکیل‌دهنده ماسه‌های بادی بسته به محل نمونه‌ها متغیر بوده و تابع منشاء آنها است. با این حال، کوارتز اصلی‌ترین کانی تشکیل‌دهنده ماسه‌های بادی بوده و کانی‌های دیگری نظیر فلدسپات‌ها، کلسیت هم به میزان اندک در ترکیب ماسه‌های بادی گزارش شده‌اند [۶-۱۱]. محدوده تغییرات دانسیته خشک حداکثر<sup>۱</sup> ( $\gamma_{dmax}$ ) و درصد رطوبت بهینه<sup>۲</sup> ( $\omega_{opt}$ ) ماسه‌های بادی بین ۱/۶۴۲ تا ۱/۷۶۵ گرم بر سانتیمترمکعب و ۱۱ تا ۱۴/۵ درصد گزارش شده است [۵، ۹، ۱۱ و ۱۲]. ماسه‌های بادی عموماً دارای

چسبندگی<sup>۳</sup> صفر و زاویه اصطکاک داخلی<sup>۴</sup> بین ۳۹ تا ۴۲ درجه هستند [۵-۷ و ۱۰]. ماسه‌های بادی به‌خصوص زمانی که از اطراف محصور شده نیستند عملکرد ژئوتکنیکی ضعیفی داشته و نیازمند بهسازی هستند [۱]. ویژگی‌های مهندسی ماسه‌های بادی با روش‌هایی نظیر متراکم کردن، تقویت کردن، زهکش کردن و افزودن مصالح بهبود پیدا می‌کند. افزودنی‌ها با انجام فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و یا بیولوژیکی باعث بهبود ویژگی‌های مهندسی ماسه‌های بادی می‌شوند [۱۳-۱۵]. استفاده از آهک، سیمان، ضایعات پلاستیکی، بیتومن<sup>۵</sup> و افزودنی‌های شیمیایی نمونه‌هایی از روش‌های بهبود ویژگی‌های مهندسی ماسه و ماسه‌های بادی با افزودن مصالح به آنها است. تجربیات موفقی در زمینه تثبیت ماسه‌های بادی و مصالح دانه‌ای با سیمان و آهک گزارش شده است [۱۶-۲۱]. مواردی از به‌کارگیری از بیتومن‌ها به تنهایی یا به‌همراه سیمان برای تثبیت ماسه‌های بادی گزارش شده است [۲۲-۲۴]. از بین تعداد بسیار زیاد تثبیت‌کننده‌های شیمیایی، امولسیون‌های پلیمری یکی از پرکاربردترین‌ها بوده که در دهه‌های گذشته جایگزین برخی افزودنی‌های دیگر به‌خصوص برخی افزودنی‌های سنتی نظیر سیمان شده‌اند [۲۵]. تحقیقات زیادی در خصوص استفاده از امولسیون‌های پلیمری برای تثبیت ماسه‌های بادی و خاک‌های دانه‌ای گزارش شده است [۲۵-۲۸]. امولسیون‌های پلیمری ذرات بسیار کوچک (با قطر پنج صدم تا پنج میکرومتر) هستند، در آب پراکنده شده و معمولاً با پلیمریزاسیون امولسیون تولید می‌شوند [۲۹]. این امولسیون‌ها سیستم‌های کopolymer<sup>۶</sup> از دو یا چند مونومر<sup>۷</sup> مختلف بوده که کل ذرات جامد آنها بین ۴۰ تا ۵۰ درصد جرمی است [۲۹]. امولسیون‌های پلیمری به‌دلیل چسبندگی قوی، انقباض کم در زمان گیرش،

3- Cohesion

4- Internal Friction Angle

5- Bitumen

6- Copolymer systems

7- Monomer

1- Maximum dry density

2- Optimum water content

کردند [۳۵]. کابالار<sup>۱۴</sup> و همکاران گزارش دادند که پلیمرهای آلی، ویسکوزیته سیال منفذی را در حفره‌های خاک افزایش داده و بدین طریق حرکت آب در فضاهای خالی دشوار شده و در نتیجه نفوذپذیری خاک کاهش می‌یابد [۳۶]. هانگ<sup>۱۵</sup> و همکاران نشان دادند که افزودن پلی‌ونیل استات<sup>۱۶</sup>، باعث مسدود شدن منافذ کوچک خاک شده و با تغییر ایجاد کرده در ریز ساختار خاک ظرفیت نگهداری آب در خاک را افزایش می‌دهد [۳۷]. تدین‌فر و همکاران به بررسی استفاده از پلیمر بر روی اصلاح نفوذپذیری خاک‌های سیلتی با استفاده از آزمایش‌های نفوذپذیری پرداخته و نشان دادند وجود پلیمر باعث کاهش نفوذپذیری خاک می‌گردد [۳۸]. نائینی و قربانعلی‌زاده نشان دادند رزین اپوکسی مقاومت تک‌محوری خاک‌های سیلتی تحت شرایط خشک را بهبود می‌بخشد [۳۹]. محققان با انتخاب خاک‌هایی با شاخص پلاستیسیته متفاوت تأثیر نوع خاک بر بهبود ویژگی‌های مهندسی آن با استفاده از پلیمر اکریلیک را بررسی کرده و نشان دادند افزودن پلیمر باعث بهبود وزن واحد خشک، رطوبت بهینه، مقاومت برشی و دوام خاک شده ولی مدول انعطاف‌پذیری خاک را کاهش داده است [۴۰]. در تحقیقی دیگر افزایش مقاومت برشی ماسه سیلتی و سیلت‌های ماسه‌ای با افزودن ۱/۲ و ۲ درصد لیگنوسولفونات<sup>۱۷</sup> گزارش شده است [۴۱]. چانگ<sup>۱۸</sup> و همکاران با اضافه کردن ۰/۵ تا ۵ درصد صمغ ژلان<sup>۱۹</sup> به خاک‌های ماسه‌ای مشاهده کردند مقاومت برشی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [۴۲]. پژوهشگران به مطالعه تأثیر صمغ زانتان<sup>۲۰</sup> بر مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای پرداخته و نشان دادند ۱ درصد از صمغ زانتان مقاومت

حساسیت کم آب، مقاومت در برابر تشعشعات خورشیدی و تخریب بیولوژیکی، غیرسمی، غیرآلاینده و ارزان بودن، به‌عنوان یک تقویت‌کننده موفق در نظر گرفته می‌شوند [۳۰]. استفاده از این امولسیون‌ها برای تثبیت خاک در اواخر دهه ۱۹۶۰ مورد مطالعه قرار گرفت [۳۱]. اونجیکوه و غتائورا<sup>۸</sup>، برای تثبیت خاک‌های ریزدانه معدنی از امولسیون‌های پلیمری با غلظت ۰/۲۶ تا ۱/۳۲ درصد استفاده کرده و نشان دادند که این افزودنی‌ها باعث افزایش چسبندگی، مقاومت فشاری، خمشی و کششی خاک می‌شود [۳۲]. محققان تأثیر نوع دوغاب پلیمری بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌های ماسه‌ای را با استفاده از دوغاب سیمان، رس، آب، همراه درصدهای مختلفی از امولسیون اکریلیک رزین<sup>۹</sup> و متیل متاکریلات<sup>۱۰</sup> بررسی کرده و نتیجه گرفتند افزودن این مواد باعث افزایش مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و کاهش تخلخل خاک می‌شود [۳۳]. گیلزقی<sup>۱۱</sup> و همکاران به بررسی تثبیت خاک رس با پلاستیسیته بالا با استفاده از پلیمر مایع پلی‌اورتان<sup>۱۲</sup> پرداختند. برای ارزیابی تأثیر افزودنی از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در زمان‌های عمل‌آوری ۱، ۴، ۷ و ۱۰ روز استفاده کردند. برای ساخت نمونه‌ها از دو روش متفاوت استفاده کردند. در روش اول ابتدا خاک با پلیمر مایع و سپس با آب مخلوط شد، در حالی‌که در روش دوم ابتدا پلیمر با آب مخلوط و سپس به‌طور یکنواخت با خاک ترکیب شد. نتایج نشان داد، ۹۰ درصد مقاومت نهایی پس از گذشت ۴ روز به‌دست آمده و مقاومت ایجاد شده در روش آماده‌سازی دوم بیشتر از روش اول است [۳۴]. پژوهشگران از ۳ نوع امولسیون اکریلیک<sup>۱۳</sup> برای تثبیت خاک ماسه‌ای استفاده کردند و کاهش قابل توجهی در نفوذپذیری با هر ۳ پلیمر مشاهده

<sup>14</sup>- Cabalar

<sup>15</sup>- Huang

<sup>16</sup>- Poly vinyl asetat

<sup>17</sup>- Lignosulfonate

<sup>18</sup>- Chang

<sup>19</sup>- Gellan gum

<sup>20</sup>- Xanthan gum

<sup>8</sup>- Onyejekwe and Ghataora

<sup>9</sup>- Acrylic resin

<sup>10</sup>- Methyl methacrylate

<sup>11</sup>- Gilazghi

<sup>12</sup>- Polyurethane

<sup>13</sup>- Acrylic

بادی، ماسه مصنوعی و ماسه‌های درشت) با پلیمر مایع (پلی وینیل اکریلیک) را بررسی کرده و نشان دادند که این پلیمر باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت برشی می‌شود [۴۹]. محققان با انجام آزمایش‌های تک‌محوری، اثر پلی پروپیلن<sup>۲۹</sup> بر رفتار ماسه رس‌دار را بررسی و نتیجه گرفتند که افزودن الیاف ذکر شده به این خاک منحنی تنش- کرنش خاک را در جهت افزایش مقاومت و کاهش سختی اولیه تغییر می‌دهد [۵۰]. مصطفی و همکاران به بررسی تثبیت خاک‌های ماسه، سیلت، لوم، رس و لوم ماسه‌ای توسط سه نوع ماده پلیمری (اوره فرمالدئید<sup>۳۰</sup>، فنل فرمالدئید<sup>۳۱</sup> و سیلیکات سدیم<sup>۳۲</sup>) پرداختند و نتیجه گرفتند تراکم خاک‌های آغشته به پلیمر منجر به عملکرد بهتر استحکام و دوام شده و نمونه‌های تثبیت شده در دوره‌های پخت طولانی‌تر و دمای پخت بالاتر تا ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد باعث بهبود بیشتری در مقاومت فشاری می‌شود [۵۱]. جانعلی‌زاده و همکاران نشان دادند پلیمرهای سدیم پلی‌اکریلات<sup>۳۳</sup> و پلی‌الکترولیت آنیونی<sup>۳۴</sup> باعث افزایش مقاومت فشاری و برشی رس و ماسه می‌شود [۵۲]. احمدی مطلق و سلطانی جیقه، تغییرات پارامترهای مقاومتی ماسه‌بادی را با اضافه کردن پلی‌الکترولیت کاتیونی<sup>۳۵</sup> مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که با افزودن پلیمر مذکور مقاومت فشاری و برشی خاک افزایش می‌یابد [۵۳]. پژوهشگران به طور تجربی خواص مکانیکی و رفتار ریزساختاری خاک سیلتی سیمانی تقویت شده با الیاف پلی‌ونیل‌الکل<sup>۳۶</sup> را مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند الیاف مذکور مقاومت فشاری خاک را افزایش می‌دهد [۵۴]. هاتا<sup>۳۷</sup> و همکاران با انجام آزمایش‌های تک‌محوری، اثر الیاف پلی‌ونیل‌الکل و

بین ذرات ماسه را تا ۱۴ برابر بهبود می‌بخشد [۴۳]. رنجبر و همکاران پژوهشی بر روی ماسه بابلرس، مسلح شده با سیمان و الیاف پت<sup>۳۱</sup>، پلی پروپیلن<sup>۲۲</sup> و کیسه‌های پلاستیکی به‌طور جداگانه انجام داده و طی آن با انجام آزمایش‌های برش مستقیم و سه‌محوری، پارامترهای مقاومتی خاک را بررسی و دریافتند الیاف پت باعث بیشترین افزایش در مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای شده است [۴۴]. حاجیان‌نژاد و همکاران نشان دادند خرده‌ها و نوارهای پلی‌اتیلن ترفتالات<sup>۲۳</sup> باعث افزایش مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای می‌شود [۴۵]. لیو<sup>۲۴</sup> و همکاران گزارش کردند که خاک‌های آغشته شده با پلیمرهای آلی سنتز شده نیز چنین بهبودی را نشان می‌دهند [۴۶]. در پژوهشی، تأثیر افزودن مقادیر پایین وینیل اکریلیک<sup>۲۵</sup> بر پارامترهای مهندسی ماسه‌های بادی عربستان بررسی شده و مشاهده گردید رابطه خطی مستقیم بین درصد پلیمر افزوده شده و چگالی حداکثر خشک خاک وجود دارد ضمن اینکه افزودن پلیمر باعث کاهش رطوبت بهینه خاک می‌گردد [۱]. همچنین تحقیقات کاملی بر روی افزودنی‌های مختلف نظیر اسیدها، آسفالت، سیمان، آهک، رزین، نمک‌ها، سیلیکات‌ها و دیگر موادی که دارای پتانسیل پایدارسازی هستند، انجام داده و گزارش دادند که رزین‌های پلیمری<sup>۲۶</sup> در مقایسه با سایر پایدارسازها بیشترین مقاومت را در خاک ماسه‌ای ایجاد می‌کنند [۴۷]. زندیه و همکاران اثر پلیمر پلی وینیل استات<sup>۲۷</sup> و پلی وینیل اکریلات<sup>۲۸</sup> بر رفتار ماسه بادی را مطالعه نموده و نشان دادند این دو پلیمر مقاومت فشاری محدود نشده را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند [۴۸]. بارزی و همکاران تثبیت خاک‌های دانه‌ای (ماسه

<sup>29</sup>- Polypropylene

<sup>30</sup>- Urea formaldehyde

<sup>31</sup>- Phenol formaldehyde

<sup>32</sup>- Sodium silicate

<sup>33</sup>- Sodium polyacrylate

<sup>34</sup>- Polyelectrolyte anionic

<sup>35</sup>- Polyelectrolyte cationic

<sup>36</sup>- Poly Vinyl Alcohol

<sup>37</sup>- Hata

<sup>21</sup>- PET fibres

<sup>22</sup>- Polypropylene

<sup>23</sup>- Polyethylene terephthalate

<sup>24</sup>- Liu

<sup>25</sup>- Vinyl acrylic

<sup>26</sup>- Polymer resin

<sup>27</sup>- Polyvinyl acetate

<sup>28</sup>- Polyvinyl acrylate

## ۲-۱- مواد

مواد استفاده شده در تحقیق حاضر ماسه بادی منطقه هورالعظیم (دشت خوزستان) و پلیمر ونیل اکریلیک می‌باشد. ونیل اکریلیک ماده پلیمری چسبناکی است که با حل شدن در آب و از دست دادن رطوبت سخت می‌شود، ذرات خاک را به هم می‌چسباند و باعث ایجاد و افزایش مقاومت خاک می‌شود. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پلیمر مذکور در جدول ۱ ارائه شده است. شکل ۱ تصویری از ماسه بادی و پلیمر استفاده شده را نشان می‌دهد. در این تحقیق، ماسه بادی به ترتیب با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد محلول پلیمر مخلوط گردید. بر این اساس برای انجام آزمایش‌های تراکم و مقاومت فشاری تک‌محوری، ۴ نمونه مختلف با درصد‌های متفاوت ماسه بادی و پلیمر آماده و برای مراحل بعدی تحقیق استفاده شده است.

## ۲-۲- روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر افزودنی‌ها بر ویژگی‌های مهندسی ماسه بادی آزمایش‌های دانه‌بندی، تراکم، تعیین وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک (Gs) و مقاومت فشاری تک‌محوری براساس استانداردهای مشخص شده در جدول ۲ انجام شد. تصاویری از آزمایش‌های انجام شده در شکل ۲ ارائه شده است. برای آزمایش تراکم<sup>۳۹</sup> خاک آماده شده با محلول پلیمری ترکیب شده و سپس با استفاده از قالب تراکم ۴ اینچی متراکم شده است. مراحل انجام آزمایش تراکم در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه یکی از اهداف تحقیق بررسی تأثیر غلظت محلول پلیمری است لذا برای ترکیب پلیمر با خاک محلول‌هایی با غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد از پلیمر ساخته شد و به نسبت وزنی ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ درصد وزن ماسه بادی خشک، به ماسه بادی خشک اضافه گردید.

سیمان پرتلند را بر رفتار ماسه بررسی و نشان دادند که افزودن پلیمر و مخلوط سیمان با پلیمر باعث افزایش مقاومت تک‌محوری شده، ضمن اینکه افزایش دما باعث نرم شدن پلیمر گشته و مقاومت تک‌محوری آن را کاهش می‌دهد [۵۵]. دامیار و همکاران تأثیر پلیمر بر عملکرد قیر را بررسی کردند [۵۶].

با توجه به تحقیقات قبلی و از آنجا که بخش‌هایی از گستره ایران از جمله مناطقی از دشت خوزستان با ماسه بادی پوشیده شده که از آنها به‌عنوان منابع قرضه در ساخت‌وسازها استفاده می‌گردد. بنابراین بررسی اثر تثبیت‌کننده‌های پلیمری بر پارامترهای مقاومتی آنها حائز اهمیت است. بدین جهت، تحقیق حاضر به‌گونه‌ای طرح‌ریزی شده که تأثیر درصد‌های مختلف امولسیون پلیمری ونیل اکریلیک<sup>۳۸</sup> (VA) بر دانسیته خشک حداکثر، درصد رطوبت بهینه، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته ماسه‌های بادی منطقه مذکور بررسی گردد. بدین جهت نمونه‌برداری از ماسه‌های بادی منطقه هورالعظیم صورت گرفته و با افزودن درصد‌های مختلف امولسیون پلیمری ونیل اکریلیک، تأثیر آنها بر دانسیته خشک حداکثر و رطوبت بهینه ماسه بادی بررسی شده است. علاوه بر آن با ساخت نمونه‌های استوانه‌ای شکل با درصد‌های مختلف امولسیون پلیمری و زمان عمل‌آوری مختلف در دو حالت خشک و رطوبت بهینه تأثیر غلظت محلول، زمان عمل‌آوری و رطوبت نمونه بر مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته نمونه‌ها بررسی شده است. استفاده از ماسه بادی منطقه‌ای خاص به همراه ارزیابی نتایج آزمایش‌ها در شرایط خشک و رطوبت طبیعی به‌ازای درصد‌های مختلف امولسیون پلیمری با زمان‌های عمل‌آوری مختلف می‌تواند به‌عنوان نوآوری تحقیق حاضر در نظر گرفته شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

<sup>39</sup>- Compaction test

<sup>38</sup>- Vinyl acrylic

جدول ۱- خصوصیات پلیمر ونیل اکریلیک

شکل ظاهری	رنگ	حلالیت در آب	چگالی (gr/cc)	ویسکوزیته	pH
مایع	شیری	محلول	۱/۰۲-۱/۱	۱۰۰-۲۰	۵-۳



(ب)

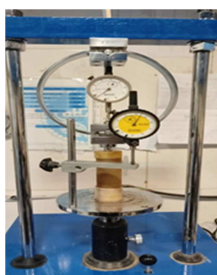


(الف)

شکل ۱- مواد استفاده شده در تحقیق (الف) ماسه بادی منطقه هورالعظیم و (ب) پلیمر ونیل اکریلیک

جدول ۲- استاندارد آزمایش‌های انجام شده

ردیف	نام آزمایش	شماره استاندارد
۱	دانه‌بندی و هیدرومتری	ASTM D 422-63 [57]
۲	Gs	ASTM D 854-14 [58]
۳	تراکم استاندارد	ASTM D 698-07 [59]
۴	تک محوری	ASTM D 2166-00 [60]



(ب)

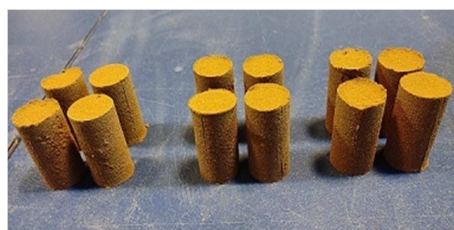


(ب)



(الف)

شکل ۲- تصاویری از آزمایش‌های انجام شده، (الف) دانه‌بندی، (ب) آزمایش تراکم و (پ) آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری



(ب)



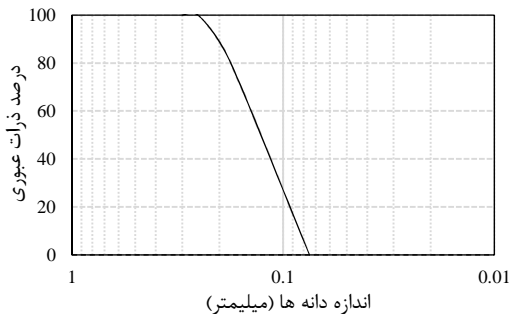
(الف)

شکل ۳- (الف) نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده با درصد‌های مختلف پلیمر داخل لوله‌های پلاستیکی و (ب) مغزه‌های ساخته شده جهت آزمایش تک محوری

خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه به ازای هر نمونه تعیین گردید.

برای انجام آزمایش تک‌محوری نیاز به نمونه‌های استوانه‌ای شکل با قطر ۳/۵ و طول ۷ سانتیمتر است.

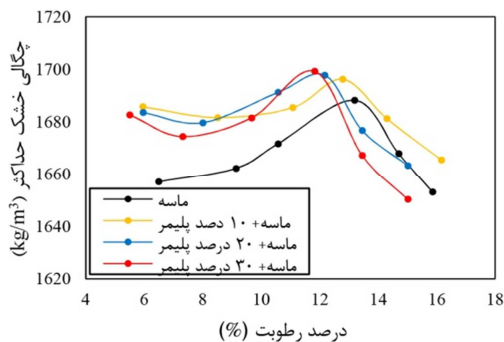
بعد از مخلوط کردن محلول با ماسه بادی، نمونه‌ها وارد قالب تراکم شده و در ۳ لایه کوبیده شدند. با رسم منحنی دانسیته خشک در مقابل درصد رطوبت، دانسیته



شکل ۴- نمودار دانه‌بندی ماسه بادی

### ۳-۲- آزمایش تراکم

شکل ۵، منحنی تغییرات چگالی خشک در مقابل درصد رطوبت به ازای درصدهای مختلف محلول پلیمری را نشان می‌دهد. هدف از انجام آزمایش تراکم تعیین چگالی خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه به ازای غلظت‌های مختلف محلول پلیمری بوده است.



شکل ۵- نمودار تغییرات چگالی خشک در مقابل درصد رطوبت

بدین جهت، نمونه‌ها بعد از ترکیب با درصدهای مشخص از محلول پلیمر، تحت آزمایش تراکم در دمای آزمایشگاه قرار گرفته‌اند. باتوجه به شکل، رفتار ۴ نمونه در آزمایش تراکم مشابه است. مقادیر چگالی خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه برای هر نمونه در جدول ۳ ارائه شده است. تغییرات چگالی خشک حداکثر نمونه‌ها بین ۱۶۸۸ تا ۱۶۹۹ کیلوگرم بر مترمکعب و تغییرات درصد رطوبت بهینه نمونه‌ها بین ۱۱/۱۸ تا ۱۳/۱۸ است. بر این اساس ملاحظه می‌شود که تغییرات چگالی خشک ناچیز بوده، لیکن تغییرات درصد رطوبت بهینه قابل توجه است.

### ۳-۳- مقاومت فشاری تک محوری

بدین جهت بعد از آماده‌سازی خاک و مخلوط کردن آن با درصدهای مختلف محلول پلیمری، خاک تولید شده در داخل لوله‌های استوانه‌ای شکل ریخته شده و با درصد رطوبت بهینه به نحوی کوبیده شد که چگالی نمونه‌ها برابر ۱۶۸۸ کیلوگرم بر مترمکعب باشد. بنابراین تمام نمونه‌های آماده شده دارای چگالی یکسان هستند. نمونه‌های ماسه بادی با غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد محلول پلیمر با زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ آماده شدند.

به منظور بررسی تأثیر درصد رطوبت بر روی مقاومت تک‌محوری اندازه‌گیری شده، نمونه‌های آماده شده در دو گروه تحت آزمایش تک‌محوری قرار گرفتند. گروه اول نمونه‌ها، بعد از آماده‌سازی در محیط آزمایشگاه قرار گرفته و در زمان‌های مختلف عمل‌آوری تحت آزمایش قرار گرفتند. بنابراین، این گروه از نمونه‌ها در دمای محیط خشک شده و در شرایط خشک آزمایش شده‌اند. گروه دوم نمونه‌ها، بعد از آماده‌سازی، با نایلون کاملاً پوشیده شده و در داخل یخچال در دمای ۲ درجه سانتیگراد به منظور حفظ رطوبت قرار گرفته و در زمان‌های عمل‌آوری مشخص تحت آزمایش قرار گرفتند. بنابراین گروه دوم نمونه‌ها دارای رطوبت بهینه بوده و در شرایط مرطوب تحت آزمایش تک‌محوری قرار گرفته‌اند. در این تحقیق از نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری جهت تعیین مدول الاستیسیته ماسه بادی استفاده شد.

### ۳- نتایج و تجزیه و تحلیل آنها

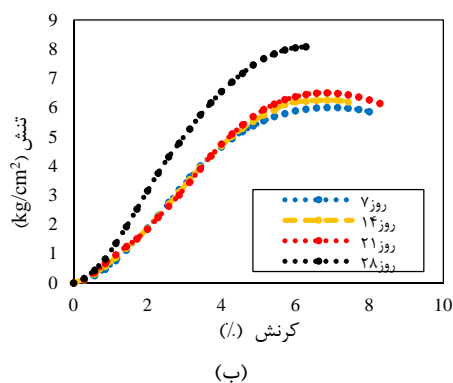
#### ۳-۱- آزمایش دانه‌بندی

منحنی دانه‌بندی ماسه بادی در شکل ۴ ارائه شده است. براساس این منحنی، خاک مورد آزمایش در سیستم طبقه‌بندی متحد از نوع ماسه بد دانه‌بندی (SP) می‌باشد. وزن مخصوص دانه‌های جامد (Gs) برای ماسه بادی برابر ۲/۶۰ تعیین شد.



زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز، برای نمونه‌هایی که در حالت خشک آزمایش شده‌اند، را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، رفتار کلی منحنی‌ها شباهت به همدیگر داشته و نمونه‌ها در کرنش بین ۴ تا ۶ درصد به حداکثر مقاومت خود رسیده‌اند.

در شکل ۷، منحنی‌های تنش-کرنش به‌ازای درصد‌های مختلف پلیمر در زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۷ روز برای نمونه‌هایی که در حالت مرطوب تحت آزمایش قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، رفتار منحنی‌ها شبیه به هم بوده و نمونه‌ها در محدوده کرنش ۳ تا ۵ درصد به حداکثر مقاومت خود رسیده‌اند.



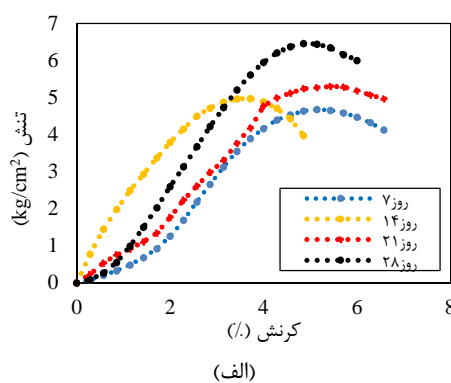
(ب)

همان‌طور که در بخش ۲-۲ بیان گردید، نمونه‌های استوانه‌ای شکل به‌سازی شده با درصد پلیمرهای مختلف و در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت به دو گروه تقسیم شدند.

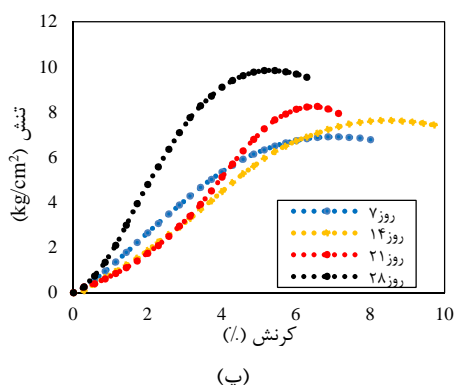
جدول ۳- نتایج آزمایش تراکم

نمونه	درصد پلیمر	$\rho_{d(max)}$ ( $kg/m^3$ )	$\omega_{opt}$ (%)
۱	صفر	۱۶۸۸	۱۳/۱۸
۲	۱۰	۱۶۹۶	۱۲/۷۸
۳	۲۰	۱۶۹۸	۱۲/۱۷
۴	۳۰	۱۶۹۹	۱۱/۸۲

گروه اول در حالت خشک و گروه دوم در حالت مرطوب تحت آزمایش قرار گرفتند. شکل ۶، منحنی‌های تنش-کرنش به‌ازای درصد‌های مختلف محلول پلیمر در



(الف)



(پ)

شکل ۶- نمودار تنش-کرنش برای ماسه بادی با (الف) ۱۰، (ب) ۲۰ و (پ) ۳۰ درصد محلول پلیمر در حالت خشک

می‌دهد، اضافه کردن محلول به ماسه بادی، به‌طور کلی باعث افزایش جزئی چگالی خشک و کاهش قابل توجه درصد رطوبت بهینه شده است. روند تغییرات کاهش رطوبت بهینه با افزایش درصد محلول پلیمری خطی بوده و بیشترین کاهش زمانی است که ۳۰ درصد محلول

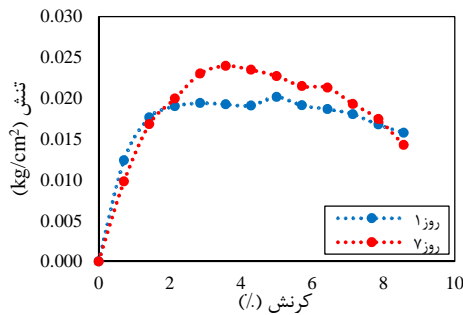
#### ۴- تجزیه و تحلیل نتایج

##### ۴-۱- آزمایش تراکم

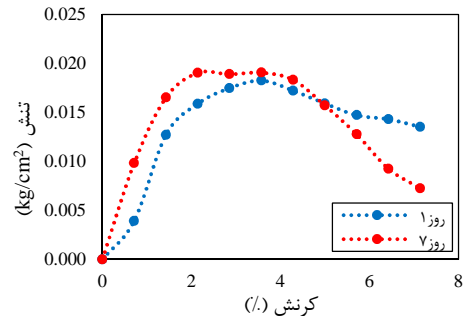
در شکل ۸، نمودار میله‌ای مربوط به چگالی خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه برای ۴ نمونه استفاده شده در تحقیق حاضر نشان داده شده است. این شکل نشان

پلیمری به ماسه بادی اضافه شده است. در این حالت

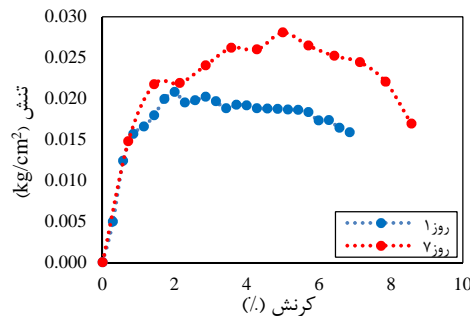
کاهش ۱۱ درصدی در رطوبت بهینه ایجاد شده است.



(ب)



(الف)

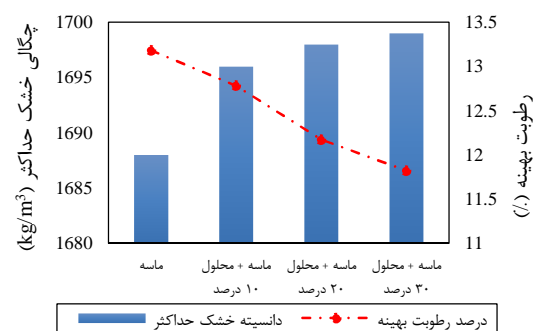


(پ)

شکل ۷- نمودار تنش-کرنش برای ماسه بادی با (الف) ۱۰، (ب) ۲۰ و (پ) ۳۰ درصد محلول پلیمر در حالت مرطوب

اضافه کردن محلول پلیمری به دلیل چسباندن دانه‌ها به همدیگر، لغزش دانه‌ها را محدود کرده است. بنابراین قادر به افزایش چگالی خشک نبوده است، اما با ایجاد لایه‌ای نازک در اطراف دانه‌ها باعث کاهش درصد رطوبت بهینه شده است.

انجام شده است. در حالت اول همانطور که در بخش ۲-۲ توضیح داده شد، بعد از آماده‌سازی، نمونه‌ها در فضای آزمایشگاه قرار گرفته و در زمان‌های عمل‌آوری مختلف تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. قرارگیری نمونه‌ها در فضای آزمایشگاه باعث کاهش رطوبت طبیعی نمونه‌ها و خشک شدن آنها گردیده است. درصد رطوبت طبیعی نمونه‌ها بعد از ۱، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز قرار گرفتن در دمای آزمایشگاه از ۱۲/۷۸ درصد به ۰/۴۸، ۰/۴۰، ۰/۳۱ و صفر درصد کاهش یافته است. بنابراین همانطور که این مقادیر نشان می‌دهد نمونه‌های گروه اول تقریباً همگی خشک هستند. گروه دوم نمونه‌ها به نحوی نگهداری شده که بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها در زمان‌های عمل‌آوری یک و ۷ روز دارای رطوبت طبیعی ۱۲/۷۸ درصد بوده و با این رطوبت تحت آزمایش قرار گرفته‌اند.



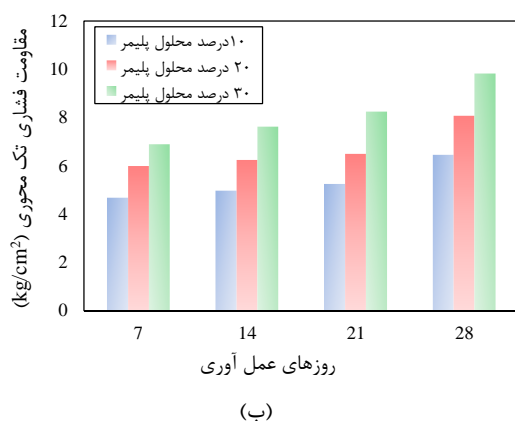
شکل ۸- تغییرات چگالی خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه برای نمونه‌های مختلف

#### ۴-۲- آزمایش تک محوری

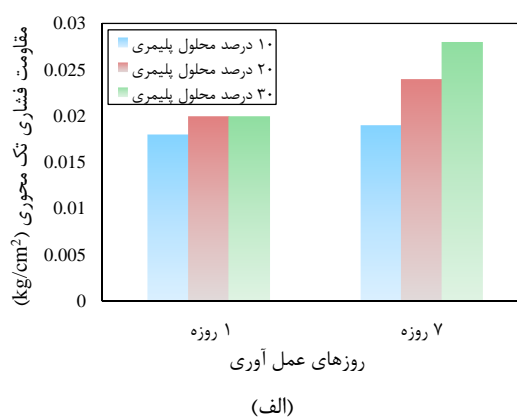
شکل ۹- الف، مقاومت فشاری تک‌محوری اندازه‌گیری شده برای زمان عمل‌آوری یک و ۷ روز برای نمونه‌های گروه دوم را نشان می‌دهد. مقاومت تک‌محوری

آزمایش‌های تک‌محوری به‌ازای زمان‌های عمل‌آوری مختلف در دو حالت خشک و مرطوب بر روی نمونه‌ها

شرایطی که خاک نتواند خشک شود، تأثیری بر بهبود مقاومت تک محوری ماسه بادی ندارد. لازم به توضیح است که اصولاً ساختن نمونه استوانه‌ای شکل از ماسه‌های بادی به دلیل عدم چسبندگی بین دانه‌ها و انجام آزمایش تک محوری روی آنها امکان پذیر نبوده، هرچند افزودن محلول پلیمری امکان ساخت نمونه استوانه‌ای را فراهم نموده است، اما مقادیر مقاومت فشاری تک محوری اندازه‌گیری شده برای درصدهای مختلف امولسیون پلیمری زمانی که نمونه با رطوبت طبیعی تحت آزمایش قرار گرفته ناچیز است.



اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های مذکور برای زمان عمل آوری یک روز و ۷ روز به ترتیب برابر با ۰/۰۱۸ و ۰/۰۱۹ کیلوگرم بر سانتیمترمربع و برای محلول ۲۰ درصد به ترتیب برابر با ۰/۰۲۰ و ۰/۰۲۴ کیلوگرم بر سانتیمترمربع و برای محلول ۳۰ درصد برابر با ۰/۰۲۰ و ۰/۰۲۸ کیلوگرم بر سانتیمترمربع است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که وقتی به نمونه اجازه خشک شدن داده نمی‌شود، افزودن پلیمر تأثیری بر مقاومت فشاری نمونه نداشته و در زمان‌های عمل آوری مختلف مقاومت فشاری نمونه تغییری نمی‌کند. بنابراین استفاده از پلیمر در



شکل ۹- مقایسه مقاومت تک محوری نمونه بازسازی شده با درصدهای مختلف محلول پلیمری برای نمونه‌های (الف) با رطوبت طبیعی ۱۲/۷۸ درصد در زمان‌های عمل آوری ۱ و ۷ روز و (ب) خشک شده در دمای آزمایشگاه

از محلول ۳۰ درصد استفاده شده افزایش ۴۲/۴ درصد را نشان داده است. این افزایش به علت قرارگیری محلول پلیمر در مرز بین ذرات ماسه بادی بوده که باعث چسبیدن ذرات خاک به همدیگر و افزایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها شده است.

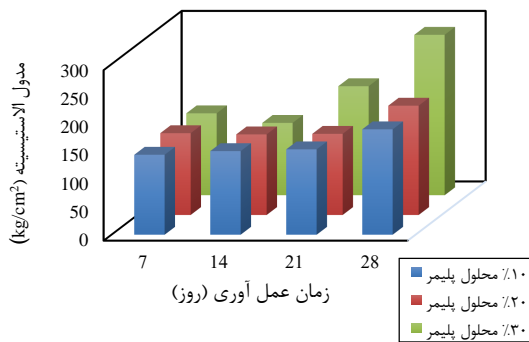
در شکل ۱۰، تصویری از نمونه استوانه‌ای شکل در آزمایش تک محوری نشان داده شده است. نمونه مذکور نمونه بهسازی شده با ۳۰ درصد محلول پلیمری بوده که بعد از ۲۸ روز تحت آزمایش قرار گرفته است. ایجاد سطح شکست با زاویه ۴۵ درجه نشان‌دهنده افزایش سختی نمونه می‌باشد.

در شکل ۱۱، تأثیر درصد رطوبت طبیعی نمونه‌ها در مقاومت فشاری تک محوری اندازه‌گیری شده برای

شکل ۹- ب، نمودار میله‌ای مقاومت فشاری تک محوری برای زمان‌های عمل آوری ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز برای نمونه‌های گروه اول را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده، افزایش غلظت محلول پلیمری و افزایش زمان عمل آوری باعث افزایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها شده است. مقاومت فشاری نمونه تثبیت شده با محلول ۱۰ درصد در زمان عمل آوری ۷ روز ۴/۶۸ کیلوگرم بر سانتیمترمربع بوده که این مقاومت در زمان عمل آوری ۲۸ روز به ۶/۴۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع رسیده که ۳۸ درصد افزایش را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری تک محوری زمانی که از محلول ۲۰ درصد استفاده شده در زمان عمل آوری ۲۸ روز نسبت به ۷ روز، ۳۴/۶ درصد افزایش را نشان می‌دهد و زمانی که

مدول الاستیسیته برای نمونه‌های بازسازی شده با غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد پلیمر که در دمای آزمایشگاه قرار داشته‌اند در زمان‌های عمل‌آوری مختلف اندازه‌گیری و نتایج آن در شکل ۱۲ ارائه شده است.

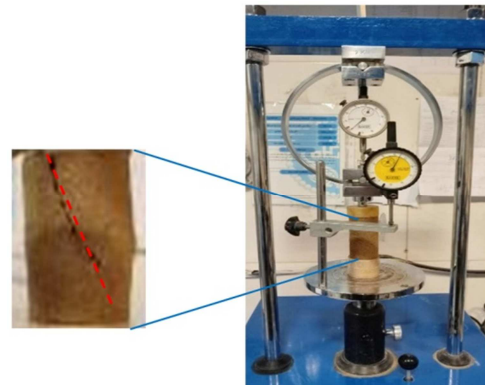
همانگونه که مشاهده می‌شود، برای یک زمان عمل‌آوری مشخص، با افزایش غلظت محلول و زمان عمل‌آوری، مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد. مدول الاستیسیته نمونه تثبیت شده با ۱۰ درصد محلول پلیمری در زمان عمل‌آوری ۷ روز معادل ۱۴۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع بوده که با افزایش زمان عمل‌آوری به ۲۸ روز این مدول به ۱۸۵ کیلوگرم بر سانتیمترمربع رسیده که حدود ۳۰٪ افزایش نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- تغییرات مدول الاستیسیته برای نمونه‌های بازسازی شده با غلظت‌های مختلف محلول پلیمری در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

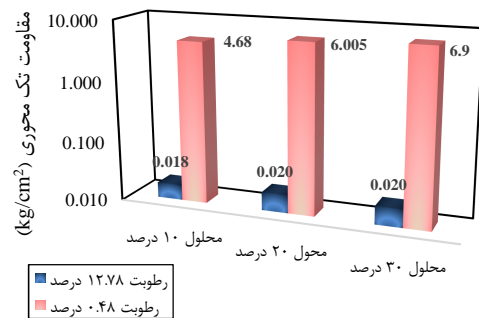
وقتی از محلول ۲۰ درصدی برای تثبیت استفاده شده، مدول الاستیسیته در زمان عمل‌آوری ۷ روز، ۱۴۴ کیلوگرم بر سانتیمترمربع بوده که با افزایش زمان عمل‌آوری به ۲۸ روز مقدار آن به ۱۹۲ کیلوگرم بر سانتیمترمربع رسیده که نشان‌دهنده افزایش ۳۳ درصدی است. وقتی از محلول ۳۰ درصدی استفاده شد، مدول الاستیسیته در زمان عمل‌آوری ۷ روز، ۱۴۴ کیلوگرم بر سانتیمترمربع بوده که با افزایش زمان عمل‌آوری به ۲۸ روز مقدار آن به ۲۸۲ کیلوگرم بر سانتیمترمربع رسیده که نشان‌دهنده افزایش ۹۶ درصدی است. مدول الاستیسیته شاخصی برای ارزیابی سختی

نمونه‌های بازسازی شده با درصد‌های مختلف محلول پلیمری بعد از ۷ روز عمل‌آوری مقایسه شده است.



شکل ۱۰- نمونه بهسازی شده با محلول ۳۰ درصد پلیمر بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری

این نمودار به خوبی نشان می‌دهد نمونه‌های بازسازی شده در صورتی که بعد از اضافه شدن پلیمر به آنها تحت شرایطی قرار گرفته و خشک شوند مقاومت بالایی را نشان خواهند داد، در حالی که اگر بعد از اضافه کردن محلول پلیمری در شرایطی باشند که امکان خشک شدن آنها وجود نداشته باشد مقاومت اندکی خواهند داشت و اضافه کردن محلول پلیمری تأثیر چندانی بر مقاومت آنها با گذشت زمان نخواهد گذاشت.



شکل ۱۱- مقایسه مقاومت تک‌محوری نمونه بازسازی شده با درصد‌های مختلف محلول پلیمری برای نمونه‌های با رطوبت طبیعی متفاوت

### ۳-۴- مدول الاستیسیته

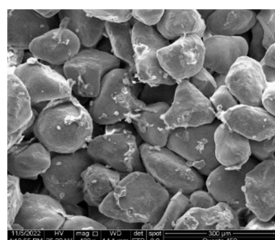
با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و ترسیم نمودارهای تنش- کرنش، با استفاده از شیب خط مماس بر بخش خطی نمودار تنش- کرنش،

کردن فاصله بین ذرات و ایجاد پل‌ها و متصل کردن دانه‌ها به یکدیگر باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته شده است. پلیمر مذکور زمانی قادر است افزایش مقاومت ایجاد کند که خشک گردد. به همین جهت برای نمونه‌هایی که با رطوبت طبیعی آزمایش شده و اجازه خشک شدن به نمونه داده نشده، مقاومت نمونه‌ها افزایش نیافته است. این موضوع به خوبی نشان می‌دهد که استفاده از این پلیمر در شرایطی که نمونه اجازه خشک شدن نداشته باشد روش مؤثری در بهبود ویژگی‌های مهندسی ماسه‌های بادی نمی‌باشد.

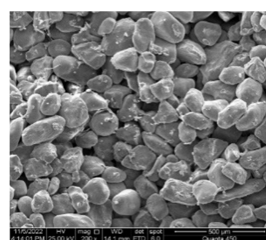
خاک‌ها بوده است و نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن درصد‌های مختلف محلول‌های پلیمری و زمان عمل‌آوری باعث افزایش سختی خاک شده است.

## ۵- بحث

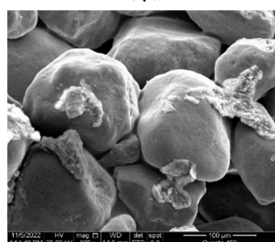
نتایج تحقیق حاضر، افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته نمونه با افزایش درصد محلول پلیمری و زمان عمل‌آوری را نشان می‌دهد. تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی از نمونه بازسازی شده با ۳۰ درصد محلول پلیمری در بزرگنمایی‌های مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است. پلیمر با پر



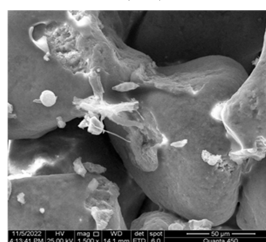
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۱۳- تصاویر نمونه ماسه بادی تثبیت شده با ۳۰ درصد پلیمر، با بزرگنمایی (الف) ۲۰۰، (ب) ۴۰۰، (پ) ۸۰۰ و (ت) ۱۵۰۰ برابر

خاکریز در داخل آب ساخته می‌شود مناسب نیست. با این حال، برای ساخت خاکریزهایی که در شرایط خشک ساخته می‌شوند، می‌تواند بعد از ارزیابی‌های اقتصادی و محیط‌زیستی توصیه شود.

تحقیقات مختلفی در مورد استفاده از مواد پلیمری در بهبود ویژگی‌های مهندسی مصالح مختلف انجام شده است. بارزی و همکاران افزایش ۱۴۱ و ۱۶۱ درصدی مقاومت تک‌محوری ماسه بادی با افزودن ۱۰ تا ۲۰ درصد محلول پلیمر اکریلیک رزین و پلی ونیل استات در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز را گزارش کرده و بیان کردند که نرخ افزایش مقاومت در ۷ روز اول بیشتر از روزهای بعدی است [۶۱]. در حالی که نتایج تحقیق حاضر، افزایش ۲۱۳

به‌طور مثال در مواردی که قرار است از ماسه بادی برای احداث خاکریز در زیر آب استفاده شود، اضافه کردن پلیمر مذکور قادر به بهبود ویژگی‌های مهندسی ماسه بادی نخواهد بود. در حالی که اگر خاکریز در شرایط خشک ساخته شود و بعد از خشک شدن در مجاور آب قرار گیرد، قادر به بهبود ویژگی‌های مهندسی ماسه بادی خواهد بود. در بعضی از مناطق هورالعظیم خاکریزهایی برای دسترسی به محل چاه‌های اکتشافی نفت ساخته می‌شود که برخی از آنها در زمان احداث داخل آب بوده و برخی از آنها در زمان احداث در شرایط خشک قرار دارند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از این پلیمر برای بهبود پارامترهای مهندسی ماسه‌های بادی زمانی که

درصد‌های مختلف مواد پلیمری و زمان‌های عمل‌آوری شده است. در تحقیق دیگری، تغییرات پارامترهای مقاومتی ماسه بادی با افزودن ۲، ۴، ۶ و ۸ گرم بر لیتر از پلیمر پلی‌الکترولیت کاتیونی برای زمان‌های عمل‌آوری ۰٫۷، ۱۴ و ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد با افزودن پلیمر مذکور مقاومت فشاری خاک تا ۲ گرم بر لیتر از ماده پلیمری افزایش و در مقادیر بیشتر از ۲ گرم بر لیتر، کاهش می‌دهد. بنابراین مقدار پلیمر بهینه برای ماسه آزمایش شده ۲ گرم بر لیتر پیشنهاد شد. ضمن اینکه پژوهشگران درصد افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها را ۸۲ درصد گزارش کردند [۵۳]. مقایسه نتایج این تحقیق با تحقیق حاضر نیز نشان‌دهنده تأثیر مثبت استفاده از مواد پلیمری در تثبیت خاک ماسه‌ای بوده لیکن روند تغییرات با روند تغییرات نتیجه شده در تحقیق حاضر تفاوت دارد. به‌طور کلی می‌توان گفت تأثیر مواد پلیمری مختلف روی خاک‌های مختلف در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت، متغیر بوده و استفاده از مواد پلیمری متناسب با شرایط واقعی برای خاک‌های هر محل قابل استفاده است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر پلیمر ونیل اکریلیک بر دانسیته خشک حداکثر، درصد رطوبت بهینه، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسته ماسه‌های بادی منطقه هورالعظیم انجام شد. ابتدا محلول‌هایی با غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد از پلیمر ونیل اکریلیک ساخته و به نمونه خاک اضافه گردید. چگالی خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه نمونه‌های ساخته شده تعیین و براساس آن، نمونه‌های استوانه‌ای شکل از ترکیب ماسه بادی با غلظت‌های مختلف محلول پلیمری ساخته و در زمان‌های عمل‌آوری ۰٫۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز در دو حالت خشک و مرطوب تحت آزمایش قرار گرفته و نتایج زیر به‌دست آمد:

درصدی مقاومت فشاری تک‌محوری در صورت استفاده از محلول پلیمر ونیل اکریلیک با زمان عمل‌آوری ۲۸ روز نسبت به نمونه تثبیت شده با محلول ۱۰ درصد پلیمری با زمان عمل‌آوری ۱۰ روز را نشان می‌دهد. ضمن اینکه نتایج تحقیق حاضر، روند تغییرات افزایش غلظت محلول و زمان عمل‌آوری با مقاومت تراکمی تک‌محوری ( $UCS^{40}$ ) را به‌صورت خطی نشان می‌دهد. تفاوت غلظت‌های استفاده شده و نوع محلول‌های پلیمری می‌تواند دلیل تفاوت‌های بین تحقیق حاضر و تحقیق بارزی و همکاران باشد. محققان دیگری، اثر رزین اپوکسی را بر خصوصیات مقاومتی خاک ماسه مطالعه نموده و نشان دادند برای زمان‌های عمل‌آوری ۰٫۳، ۰٫۷، ۲۱ و ۹۰ روز با افزودن ۰٫۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد محلول رزین اپوکسی به ماسه، مقاومت تک‌محوری از ۱/۴۴ به ۱۱/۳ مگاپاسکال رسیده که ۶۸ درصد افزایش یافته است [۳۳]. نتایج تحقیق حاضر افزایش ۲۱۳ درصدی در مقاومت را نشان می‌دهد. تفاوت در نوع پلیمر استفاده شده و زمان‌های عمل‌آوری می‌تواند دلیل تفاوت نتایج به‌دست آمده باشد؛ هرچند هر دو تحقیق روند افزایشی با افزایش غلظت و زمان را تأیید می‌کنند. جانعلی‌زاده و همکاران، تأثیر استفاده از پلیمرهای سدیم پلی‌اکریلات و پلی‌الکترولیت آنیونی را بر خصوصیات ژئوتکنیکی رس، کائولینیت و ماسه بررسی کردند و دریافتند در حالت خشک، با افزودن ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ درصد از دو نوع پلیمر به خاک کائولینیت، مقاومت برای پلیمر سدیم پلی‌اکریلات بیشتر از ۴ برابر شده و با افزودن ۰٫۳، ۴ و ۵ درصد از پلیمرهای سدیم پلی‌اکریلات و پلی‌الکترولیت آنیونی به ماسه، مقاومت به ترتیب ۴۶ و ۴۲ درصد افزایش یافته است [۵۲]. روند تغییرات ایجاد شده در مقاومت اندازه‌گیری در این تحقیق مشابه تحقیق حاضر بوده، ولی تفاوت در نوع پلیمر و نوع خاک باعث ایجاد تغییراتی در درصد مقاومت خاک تثبیت شده به‌ازای

40- Uniaxial compression test

متفاوت زمانی که نمونه بعد از افزودن پلیمر خشک نشده و در شرایط رطوبت طبیعی و زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۷ روز تحت آزمایش قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد که افزودن درصد‌های مختلف پلیمر و زمان عمل‌آوری تأثیری روی مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها ندارد. بنابراین می‌توان گفت که پلیمرها زمانی قادر به افزایش مقاومت نمونه هستند که بعد از اضافه شدن به نمونه اجازه خشک شدن به نمونه داده شود.

۴- مقادیر مدول الاستیسیته اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های با درصد‌های مختلف محلول پلیمری نشان می‌دهد که افزودن محلول پلیمری با غلظت ۳۰ درصد با زمان عمل‌آوری ۲۸ روز قادر است مدول الاستیسیته خاک را نسبت به نمونه‌ای که با محلول پلیمری با غلظت ۱۰ درصد تثبیت شده، به بیش از دو برابر برساند.

۵- مطالعه تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان‌دهنده ایجاد پل‌ها و اتصالات بین دانه‌های ماسه بادی توسط پلیمر بوده به نحوی که مواد پلیمری وقتی خشک می‌شوند مشابه یک چسب دانه‌های ماسه را به هم چسبانده و باعث افزایش مقاومت می‌شوند.

۶- مستقل از تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی، استفاده از پلیمر ونیل اکریلیک برای تثبیت ماسه‌های بادی در شرایطی که ماسه‌ها در محیط آب قرار گرفته‌اند، به دلیل عدم امکان خشک شدن نمونه‌ها، توصیه نمی‌شود.

۱- اضافه کردن محلول پلیمری باعث تغییر جزئی در چگالی خشک حداکثر و کاهش ۱۱ درصدی رطوبت بهینه ماسه بادی گردید. قرارگیری پلیمر بین دانه‌ها باعث کم شدن جابه‌جایی و لغزش آنها شده است. بدین جهت تأثیری در افزایش چگالی خشک نداشته، اما قابلیت جذب آب در نمونه را کم نموده است. بنابراین با افزایش غلظت محلول پلیمری درصد رطوبت بهینه کاهش یافته است.

۲- نتایج آزمایش‌های تک‌محوری روی نمونه‌های با درصد‌های مختلف محلول پلیمری و زمان عمل‌آوری متفاوت نشان می‌دهد زمانی که نمونه بعد از افزودن پلیمر در دمای آزمایشگاه قرار گرفته، به مرور خشک شده، سپس تحت آزمایش قرار می‌گیرد، با افزایش درصد فراوانی محلول پلیمری و زمان عمل‌آوری مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها افزایش می‌یابد؛ به طوری که کمترین مقاومت تک‌محوری برای نمونه تثبیت شده با ۱۰ درصد محلول پلیمر و زمان عمل‌آوری ۷ روز،  $4/68$  کیلوگرم بر سانتیمترمربع و بیشترین مقدار اندازه‌گیری شده مربوط به نمونه تثبیت شده با ۳۰ درصد محلول پلیمر با زمان عمل‌آوری ۲۸ روز،  $9/83$  کیلوگرم بر سانتیمترمربع است. بنابراین اضافه کردن پلیمر در محدوده تحقیق حاضر قادر است مقاومت تک‌محوری نمونه را تا بیش از دو برابر افزایش دهد.

۳- نتایج آزمایش‌های تک‌محوری روی نمونه‌های با درصد‌های مختلف پلیمر و زمان عمل‌آوری

## References

- [1] Arias-Trujillo, J., Matías-Sanchez, A., Cantero, B., & López-Querol, S. (2020). Effect of polymer emulsion on the bearing capacity of aeolian sand under extreme confinement conditions. *Construction and Building Materials*, 236, 117473. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117473
- [2] Mohamedzein, Y., Al-Hashmi, A., Al-Abri, A., & Al-Shereiqli, A. (2019). Polymers for Stabilisation of Wahiba Dune Sands, Oman. *Proc. of the Institution of Civil Engineers, Ground Improvement*, 172(2), 76-84. doi: 10.1680/jgrim.17.00063

- [3] Souza Júnior, P. L., Santos Junior, O. F., Fontoura, T. B., & Freitas Neto, O. (2020). Drained and Undrained Behavior of an Aeolian Sand from Natal, Brazil. *Soils and Rocks*, 43(2), 263-270. doi: 10.28927/SR.432263.
- [4] Das, B. M., & Sivakugan, N. (2018). *Principles of foundation engineering*. Cengage learning.
- [5] Al-Sanad, H. A., Ismael, N. F., & Nayfeh, A. J. (1993). Geotechnical properties of dune sands in Kuwait. *Engineering Geology*, 34(1-2), 45-52. doi: 10.1016/0013-7952(93)90042-B
- [6] Seif, E. S. S. A., & Sedek, E. S. (2013). Performance of cement mortar made with fine aggregates of dune sand, Kharga Oasis, Western Desert, Egypt: an experimental study. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 7(3), 270-284.
- [7] Al-Taie, A. J., Al-Shakarchi, Y. J., & Mohammed, A. A. (2013). Investigation of geotechnical specifications of sand dune soil: a case study around Baiji in Iraq. *IJUM Engineering Journal*, 14(2). doi: 10.31436/iiumej.v14i2.408
- [8] Khan, I. H. (1982). Soil studies for highway construction in arid zones. *Engineering Geology*, 19(1), 47-62. doi: 10.1016/0013-7952(82)90005-9
- [9] Al-Ansary, M., Pöppelreiter, M. C., Al-Jabry, A., & Iyengar, S. R. (2012). Geological and physiochemical characterisation of construction sands in Qatar. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1(1), 64-84. doi: 10.1016/j.ijse.2012.07.001
- [10] Padmakumar, G. P., Srinivas, K., Uday, K. V., Iyer, K. R., Pathak, P., Keshava, S. M., & Singh, D. N. (2012). Characterization of aeolian sands from Indian desert. *Engineering Geology*, 139, 38-49. doi: 10.1016/j.enggeo.2012.04.005
- [11] Abu-Zeid, M. M., Baghdady, A. R., & El-Etr, H. A. (2001). Textural attributes, mineralogy and provenance of sand dune fields in the greater Al Ain area, United Arab Emirates. *Journal of Arid Environments*, 48(4), 475-499. doi: 10.1006/jare.2000.0776
- [12] Elipe, M. G., & López-Querol, S. (2014). Aeolian sands: Characterization, options of improvement and possible employment in construction–The State-of-the-art. *Construction and Building Materials*, 73, 728-739. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.008
- [13] Venda Oliveira, P. J., da Costa, M. S., Costa, J. N., & Nobre, M. F. (2015). Comparison of the ability of two bacteria to improve the behavior of sandy soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(1), 06014025. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001138
- [14] Abbasi, N., & Mahdih, M. (2018). Improvement of geotechnical properties of silty sand soils using natural pozzolan and lime. *International Journal of Geo-Engineering*, 9, 1-12. doi: 10.1186/s40703-018-0072-4
- [15] Oliveira, P. J. V., & Rosa, J. A. (2020). Confined and unconfined behavior of a silty sand improved by the enzymatic bio cementation method. *Transportation Geotechnics*, 24, 100400. doi: 10.1016/j.trgeo.2020.100400
- [16] Al-Aghbari, M. Y., & Dutta, R. K. (2005). Suitability of desert sand cement mixes for base courses in highway pavements. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 10 D.
- [17] Moosavi, K., & Kalantari, B. (2011). Improving load bearing capacity of wind-blown sand using ordinary Portland cement. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 16, 1267-1274.
- [18] AlKarni, A., & ElKholi, S. M. (2012). Improving geotechnical properties of dune sands through cement stabilization. *Journal of Engineering and Computer Sciences*, 5(1), 1-19.
- [19] Lopez-Querol, S., Arias-Trujillo, J., GM-Elipe, M., Matias-Sanchez, M., & Cantero, B. (2017). Improvement of the Bearing Capacity of Confined and Unconfined Cement-Stabilized Aeolian Sand, *Construction and Building Materials*, 153, 374-384. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.124
- [20] Silva, J. D. J., Júnior, O. F. S., & Paiva, W. (2023). Compressive and Tensile Strength of Aeolian Sand Stabilized with Porcelain Polishing Waste and Hydrated lime, *Soils and Rocks an International Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering*, doi: 10.28927/SR.2023.002322
- [21] Khodaparast, M., Rajabi, A. M., & Kabi, A. (2017). The study of strength behavior of sandy soil mixed with plastic waste and cement slurry. *Civil Infrastructure Researches*, 2(2), 43-49. doi: 10.22091/cer.2017.828
- [22] Akili, W., & Monismith, C. L. (1978). Permanent Deformation Characteristics of Cement Emulsion Stabilized Sand, In *Association of Asphalt Paving Technologists Proc*, 47, 281-301.
- [23] Al-Abdulwahhab, H., Bayomy, F., & Al-Halhouli, A. (1998). Evaluation of Emulsified Asphalt-Treated Sand for Low-Volume Road and Road Bases. *Transportation Research Record*, No. 1106. *Fourth International Conference on Low-Volume Roads*, 1, 71-80.
- [24] Al-Abdullah, S. F. (2006). An Approach in Improving the Properties of Sand Dunes, *J. Eng.* 13, 930-939.
- [25] Onyejekwe, S., & Ghataora, G. S. (2015). Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: Sulphonated oil and a polymer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74, 651-665. doi: 10.1007/s10064-014-0667-8



- [26] Lahalih, S. M., & Ahmed, N. (1998). Effect of New Soil Stabilizers on the Compressive Strength of Dune Sand, *Construction and Building Materials*, 12(6-7), 321-328. doi: 10.1016/S0950-0618(98)00024-5
- [27] Freer Hewish, R. J., Hewish, R. J. F., Ghataora, G. S., & Niazi, Y. (1999). Stabilization of desert sand with cement kiln dust plus chemical additives in desert road construction. In *Proceedings of the institution of civil engineers-transport*, 135(1), 29-36. doi: 10.1680/itrans.1999.31285
- [28] Zandieh, A. R., & Yasrobi, S. S. (2010). Study of Factors Affecting the Compressive Strength of Sandy Soil Stabilized with Polymer, *Geotechnical and Geological Engineering*, 28, 139-145. doi: 10.1007/s10706-009-9287-7
- [29] Ohama, Y. (1998). Polymer-based admixtures. *Cement and concrete composites*, 20(2-3), 189-212. doi: 10.1016/S0958-9465(97)00065-6
- [30] Siddiqi, R. A., & Moore, C. J. (1981). Polymer stabilization of sandy soil for erosion contro. *Transportation Research Records*, 827, 30-34.
- [31] Fungaroli, A. A., & Prager, S. R. (1969). Evaluation of some acrylic polymers as soil stabilizers. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*, 8(4), 450-453. doi: 10.1021/i360032a026
- [32] Onyejekwe, S., & Ghataora, G. S. (2016). Stabilization of quarry fines using a polymeric additive and Portland cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1), 04015070. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001324
- [33] Anagnostopoulos, C. A., & Papaliangas, T. T. (2012). Experimental investigation of epoxy resin and sand mixes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(7), 841-849. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000648
- [34] Gilazghi, S. T., Huang, J., Rezaeimalek, S., & Bin-Shafique, S. (2016). Stabilizing sulfate-rich high plasticity clay with moisture activated polymerization. *Engineering Geology*, 211, 171-178. doi: 10.1016/j.enggeo.2016.07.007
- [35] Al-Khanbashi, A., & Abdalla, S. W. (2006). Evaluation of three waterborne polymers as stabilizers for sandy soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, 1603-1625. doi: 10.1007/s10706-005-4895-3
- [36] Cabalar, A. F., Awraheem, M. H., & Khalaf, M. M. (2018). Geotechnical properties of a low-plasticity clay with biopolymer. *Journal of materials in civil engineering*, 30(8), 04018170. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002380
- [37] Huang, W., Zhou, C., Liu, Z., Sun, H., Du, J., & Zhang, L. (2021). Improving soil-water characteristics and pore structure of silty soil using nano-aqueous polymer stabilizers. *KSCE Journal for Civil Engineering*, 25(9), 3298-3305. doi: 10.1007/s12205-021-2036-z
- [38] Tadinfar, G., Tadinfar, V., & Kazemi, R. (2013). Improving the permeability of silty soils using vinyl acetate polymer, *First National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tehran. [In Persian]
- [39] Naeni, S. A. & Ghorbanalizadeh, M. (2010). Effect of wet and dry conditions on strength of silty sand soil stabilized with epoxy resin polymer, *Journal of Applied Sciences*, 10(22), 2839-2846. doi: 10.3923/jas.2010.2839.2846
- [40] Welling, G. E. (2012). *Engineering performance of polymer amended soils*. California Polytechnic State University.
- [41] Indraratna, B., Athukorala, R., & Vinod, J. (2013). Estimating the rate of erosion of a silty sand treated with lignosulfonate. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(5), 701-714. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000766
- [42] Chang, I., Im, J., & Cho, G. C. (2016). Geotechnical engineering behaviors of gellan gum biopolymer treated sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(10), 1658-1670. doi: 10.1139/cgj-2015-0475
- [43] Lee, S., Chang, I., Chung, M. K., Kim, Y., & Kee, J. (2017). Geotechnical shear behavior of Xanthan Gum biopolymer treated sand from direct shear testing. *Geomechanics and Engineering*, 12(5), 831-847. doi: 10.12989/gae.2017.12.5.8
- [44] Malidarreh, N. R., Shooshpasha, I., Mirhosseini, S. M., & Dehestani, M. (2018). Effects of reinforcement on mechanical behaviour of cement treated sand using direct shear and triaxial tests. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12(5), 491-499. doi: 10.1080/19386362.2017.1298300
- [45] Hajiannejad Z., Karamati M., Alinjad M., & Naderi, R. (2019). Investigation of the shear strength of sand soil of Bandar Anzali reinforced with polyethylene terephthalate (PET). *Amir Kabir Civil Engineering Journal*, 52(12), 3183-3202. doi: 10.22060/ceej.2019.16281.6181 [In Persian]
- [46] Liu, J., Song, Z., Lu, Y., Wang, Q., Kong, F., Bu, F., ... & Sun, S. (2018). Improvement effect of water-based organic polymer on the strength properties of fiber glass reinforced sand. *Polymers*, 10(8), 836. doi: 10.3390/polym10080836
- [47] Oldham, J. C., Eaves, R. C., & White, D. W. (1977). *Materials evaluated as potential soil stabilizers*. Department of Defense, Department of the Army, Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Soils and Pavements Laboratory.

- [48] Zandieh, A., Yasrebi, S., & Mortezaei, M. (2006). Investigation of the effect of humidity on uniaxial samples stabilized with polymer. *3th National Engineering Congress*. [In Persian]
- [49] Barezi, S., Vafaian, M., & Abtahi, M. (2009). Stabilization of granular soils with liquid polymers, *5th National Congress of Civil Engineering*, Mashhad. [In Persian]
- [50] Freitag, D. R. (1986). Soil randomly reinforced with fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(8), 823-826. doi: **10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:8(823)**
- [51] Moustafa, A., Bazaraa, A., & Nour El Din, A. (1981). Soil stabilization by polymeric materials. *Macromolecular Materials and Engineering*, 97(1), 1-12. doi: 10.1002/apmc.1981.050970101
- [52] Janalizadeh, A., Rabiei, A., & Absari, M. (2014). Investigating the effect of adding water-soluble polymer on the mechanical parameters of kaolinite clay. *2th National Conference on Soil Mechanics and Earth Engineering*. [In Persian]
- [53] Ahmadi Mutlaq, P., & Soltani Jikeh, H. (2016). Investigating the effect of liquid polymer on the undrained behavior of sandy soil using a triaxial device. Master's thesis, Shahid Madani University of Azerbaijan, Faculty of Engineering and Technology. [In Persian]
- [54] Yao, X., Huang, G., Wang, M., & Dong, X. (2021). Mechanical properties and microstructure of PVA fiber reinforced cemented soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25, 482-491. doi: **10.1007/s12205-020-0998-x**
- [55] Hata, T., Saracho, A. C., Guharay, A., & Haigh, S. K. (2020). Strength characterization of cohesionless soil treated with cement and polyvinyl alcohol. *Soils and foundations*, 62(6), 10123. doi: **10.1016/j.sandf.2022.101238**
- [56] Damyar, B., Dehnad, M.H., Zanjirani Farahani, H., (2021). "Performance investigation of modified bitumen with ethylene-vinyl acetate polymer and rubber powder by performing classical and superpave tests." *Civil Infrastructure Researches*. 6(2), 39-48. doi: **10.22091/cer.2021.6588.1229** [In Persian]
- [57] ASTM D422-63. (1998). *Standard test method for particle-size analysis of soils*. Annual Book of ASTM Standards.
- [58] ASTM D854-14. (2014). *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*. Annual Book of ASTM Standards.
- [59] ASTM D698-07. (2007). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort*. Annual Book of ASTM Standards.
- [60] ASTM D1883-16. (2016). *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil*. Annual Book of ASTM Standards.
- [61] Barzi, S., Vafaian, M., & Abtahi, M. (2009). Stabilization of granular soils with liquid polymers. *5th National Congress of Civil Engineering*, Mashhad. [In Persian]