Investigation Impact of Polymer Emulsion on Shear Strength of Aeolian Sand

Mahsa Heravi (MSc student, Department of Structure and Engineering Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran)
Akbar Cheshomi (Corresponding author, Department of Structure and Engineering Geology, College of Science, University of Tehran)

1. Introduction

Nowadays, the development of transportation infrastructure in arid and semi-arid regions of the world has made aeolian sand to be used as a borrows source in these regions. The granulation of aeolian sands is uniform, they do not have plastic properties, so it is very difficult and in some cases impossible to compact them. This group of soils has a low bearing capacity due to their looseness and granular structure. In a loose and saturated state, they are potential to liquefaction under cyclic loading, and in the vicinity of water, they are wet and potential to collapse. Quartz is the main mineral of aeolian sands, which is accompanied by small amounts of feldspars and calcite. In unconfined conditions, it has poor geotechnical performance and they need improvement. Densification, Reinforcement, drainage and adding additive materials are the most important ways to improve the engineering characteristics of aeolian sands. The use of lime, cement, bitumen and chemical additives are examples of ways to improve the engineering characteristics of aeolian sands by adding additive materials to them. Many researches regarding the use of polymer emulsions for stabilization of aeolian sands and granular soils have been reported since the late 1960s. Polymer emulsions are very small polymer particles (0.05 to 5 micrometers), dispersed in water and usually produced by emulsion polymerization. Being non-toxic, non-polluting and cheap, they are considered as a successful enhancer. Large areas of Iran, including areas of the Khuzestan plain, are covered with aeolian sands, so it is necessary to improve their engineering parameters by various methods in order to use them as borrows sources. The present research has investigated the effect of different percentages of vinyl acrylic polymer (VAP) emulsion on the shear strength parameters of aeolian sands in the mentioned area.

2. Laboratory program

2.1. Material

The materials used in this research are aeolian sand from Hor al-Azim region (Khuzestan Plain) and vinyl acrylic polymer (VAP). VAP is a viscous polymer material that hardens by dissolving in water and losing moisture, it binds soil particles together and creates and increases soil strength. In this research, aeolian sand was mixed with 10, 20, 30% VAP respectively. Based on this, to determine the shear strength, 4 different samples with different percentages of sand and VAP were prepared and used for the next stages of the research.

2.2. Mathods

The methods used in this research include standard compaction test and direct shear test. These two tests were performed according to the standards of ASTM D 698-78 and ASTM D 3080-90. The compaction test was performed in order to determining the maximum dry density and the optimum water content and the direct shear test was performed in order to of determining the shear strength parameters of the samples. The VAP was dissolved in water. The weight ratio of VAP to water (P/W) 10, 20 and 30 was chosen (P/W×100=10%-20%-30%). According to the maximum dry density that was determined from the compaction test, the weight of the amount of soil to be placed inside the shear molds was determined. Then prepared VAP solutions of 10, 20 and 30% were added to the soil in such a way that the sample reaches the optimum water content. The specified amount of soil was poured in three layers into cubic steel molds with a length and width of 5.7 cm and a depth of 3.7 cm in order to provide the possibility of compacting them to reach the maximum density. To speed up the sample preparation process, 15 cubic steel molds were used. The prepared samples were placed in the molds for 1, 7, 14, 21, 28 and then subjected to direct shear test. To perform the direct shear test, the steel molds were embedded in the mold of the direct shear machine and were shear 4 vertical stresses of 0.25, 0.5, 0.75 and 1 kg/cm^2. The reason for choosing four vertical stresses in the direct shear test was to check the results more closely and to eliminate possible data. By applying horizontal load and measuring horizontal displacements, the tests continued until reaching the maximum shear force necessary to break the sample.

3. Analysis of results

The results showed that with increasing curing time, soil cohesion (C) increased and internal friction angle (φ) decreased. The increase in C with the increase in curing time is caused by filling the pore spaces between the grains with VAP solution and sticking the soil grains to each other. The reduction of the φ is due to a layer of VAP on the grains surface. This layer has been reduction of the friction between the grains. To investigate the simultaneous effect of C and φ, shear strength (S) was determined for each sample. For this purpose, the vertical stress equivalent to 1 kg/cm^2 was considered. The results of direct shear test shown the changing the percentage of the VAP for one day curing time had no effect on the shear strength. Therefore, it can be said that if the solution is not allowed to dry, it will not affect the shear strength of the sample. For the curing time equal 28 days, the effect of VAP concentration on shear strength is evident. So that the sample stabilized with 10% solution shows lower shear strength than the samples stabilized with 20 and 30%. The C and φ of the sample stabilized with 10% VAP in 1 day curing time is 0.0006 kg/cm^2 and 32.33 degrees respectively. Therefore, this sample has practically no C and its shear strength is caused by the φ of the sample. The C and φ of the same sample reached 0.76 kg/cm^2 and 9.87 degrees after 28 days. A

significant increase in C and a decrease in the φ of the sample can be seen. For this sample, the shear strength after one day was 0.63 kg/cm^2, while after 7 days, it reached 1.02 kg/cm^2 and shows a 104% increase. The C and φ when 20% VAP is used after one day curing time is 0.004 kg/cm^2 and 32.39 degrees respectively. In this case, despite the increase in the concentration of the VAP solution compared to the previous case, but due to the short curing time, there was no change in the C and φ of the sample compared to the sample without additives, but after 28 days, the C was 1.13 kg/cm^2 and the φ reaches 7.41 degrees respectively. Based on this, the shear strength after 28 days shows a 101.6% increase compared to the curing time of 1 day. The C and φ for the 30% VAP after 1 day was 0.0138 kg/cm^2 and 32.44, which is similar to the previous two cases, due to the short curing time, there was practically no change compared to the sample without additives. But after 21 days, the C of the sample becomes 1.18 kg/cm^2 and the φ becomes 6.40 degrees respectively. Based on this, the shear strength after one day curing time was 0.63 kg/cm^2, which after 21 days curing time, it reached 1.3 kg/cm^2, which shows an increase of 106.3%. This issue clearly shows the effect of curing time on increasing the shear strength of the sample, while also specifying that the effect of curing time on increasing the shear strength of sand is much higher than the concentration of the VAP solution.

4. Conclusions

The present study was conducted with the aim of investigating the effect of vinyl acrylic polymer (VAP) on the shear strength of aeolian sands in Hor al-Azim region. First, solutions with concentrations of 10, 20 and 30% of VAP were made and added to the soil sample, then samples with maximum dry density and optimum water content were made and in the curing times of 7, 14, 21 and 28 days were subjected to direct shear test in order to determine shear strength parameters and the following results were obtained.

- By increasing the curing time and the concentration of the VAP solution, the shear strength of the samples increases. The shear strength of the sample stabilized with 10, 20 and 30% VAP solution shows an increase of 104, 111.7 and 113.3%, respectively, compared to the sample without additive.
- By increasing the concentration of the VAP solution and the curing time, the cohesion of the samples increases. So that the adhesion of the sample stabilized with 10, 20 and 30% solution, at the curing time of 28, 28 and 21 days, reached its maximum value of 0.76, 1.13 and 1.18 kg/cm^2 it is arrived.
- Electron microscope images show that the formation of bridges and connections between grains with increasing VAP solution concentration and curing time is the reason for increasing cohesion. Placing the polymer between the grains has reduced the friction between them and reduced the internal friction angle of the stabilized samples.
- Increasing the curing time and increasing the concentration of the VAP solution increases the shear strength of the sample, but the effect of the curing time is greater than the concentration of the VAP solution.

بررسی تأثیر امولسیون پلیمری بر مقاومت برشی ماسه‌بادی

مهسا هروی[1] اکبر چشمی[2]

چکیده *تحقیق حاضر به بررسی تأثیر امولسیون پلیمری وینیل اکریلیک (VA) بر مقاومت برشی ماسه‌های بادی دشت خوزستان پرداخته است. بدین منظور پس از نمونه‌برداری از ماسه‌های بادی منطقه مذکور، آزمایش تراکم استاندارد روی آن انجام شده و درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر ماسه‌بادی تعیین گردید. سپس محلول‌هایی با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ از ماده پلیمری ساخته و به گونه‌ای به ماسه‌بادی اضافه گردید که به رطوبت بهینه برسد. نمونه‌های آماده شده با وزن مخصوص خشک حداکثر در قالب‌های فلزی چهارگوش قرار گرفته و به مدت ۱، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز در فضای آزمایشگاه نگهداری شد، سپس تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند. نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های تثبیت شده با پلیمر نشان داد، با افزایش زمان عمل‌آوری و افزایش غلظت محلول پلیمری، چسبندگی و مقاومت برشی افزایش و زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که محلول پلیمری با غلظت ۳۰ درصد موجب افزایش ۱۴۶ درصدی مقاومت برشی ماسه‌بادی تثبیت شده نسبت به نمونه پایه شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان دهنده ایجاد اتصال و برقراری پل‌هایی بین دانه‌های ماسه در نمونه‌های تثبیت شده بوده که این امر دلیل افزایش چسبندگی و مقاومت برشی نمونه‌ها است.*

واژه‌های کلیدی: ماسه‌بادی، مقاومت برشی، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، امولسیون پلیمری.

Investigation Impact of Polymer Emulsion on Shear Strength of Aeolian Sand

Mahsa Heravi Akbar Cheshomi

Abstract *The present study has investigated the effect of vinyl acrylic polymer emulsion (VA) on the shear strength of aeolian sands in the Khuzestan plain. For this purpose, after sampling the aeolian sands of the mentioned area, a standard compaction test was performed and the optimum water content and maximum dry density of the aeolian sand were determined. Then, solutions with percentages of 10, 20 and 30% of polymer material were made and added to the aeolian sand in such a way that it reached the optimum water content. The prepared soil with maximum dry density was placed in square metal molds kept in the laboratory for 1, 7, 14 and 21 days and then subjected to direct shear test. The results of the direct shear test on the stabilized samples showed that by increasing the curing time and the concentration of the polymer solution, cohesion and the shear strength increase and the angle of internal friction decreases. So the polymer solution with a concentration of 30% has caused a 146% increase in shear strength aeolian sand. Electron microscope images (SEM) show the creation of bridges between sand grains in the stabilized samples, which is the reason for the increased cohesion and shear strength of the samples.*

Keywords: Aeolian sand, Shear strength, Cohesion, Internal friction angle, Polymer emulsion.

[1] دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران

[2] دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران **Email:** a.cheshomii@ut.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه توسعه زیرساخت‌های حمل و نقل در مناطق خشک و نیمه خشک جهان موجب شده از ماسه‌های بادی به عنوان منبع قرضه در این مناطق استفاده کنند. دانه‌بندی ماسه‌های بادی یکنواخت بوده، فاقد خاصیت خمیری هستند، لذا متراکم کردن آنها بسیار سخت و در بعضی موارد غیرممکن است. این گروه از خاک‌ها بدلیل سست بودن و ساختار دانه‌ای ظرفیت باربری پایینی دارند [۱]. در حالت سست و اشباع، تحت بارگذاری سیکلی مستعد روانگرایی بوده و در مجاورت با آب، خیس شده و مستعد فروریزش هستند [۲و۳]. اندازه دانه‌ها بین ۰/۰۸ تا ۰/۴ میلی‌متر، درصد رطوبت بین صفر تا ۴٪، نفوذپذیری بین ۰/۰۰۰۳۴ تا ۰/۰۱ سانتی‌متر بر ثانیه، حداکثر جذب آب ۱٪، چگالی ویژه (G_s) بین ۲/۴۴ تا ۲/۸۷، وزن مخصوص خشک حداکثر بین ۱/۶۴۲ تا ۱/۷۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، درصد رطوبت بهینه بین ۱۱ تا ۱۴/۵، چسبندگی صفر و زاویه اصطکاک داخلی بین ۳۹ تا ۴۲ درجه برای ماسه‌های بادی گزارش شده است [۴-۷].کوارتز اصلی‌ترین کانی تشکیل دهنده ماسه‌های بادی بوده که با مقادیر کمی از فلدسپات‌ها و کلسیت همراه است [۴-۵].در شرایط نامحصور عملکرد ژئوتکنیکی ضعیفی داشته و نیازمند بهسازی هستند [۱].

متراکم کردن*، تقویت کردن*، زهکش کردن*، و افزودن مصالح* از مهمترین روش های بهبود ویژگی های مهندسی ماسه‌های بادی است. الیویرا* و همکاران، عباسی* و مهدیه*، الیویرا و روزا* نمونه هایی از فرایند های فیزیکی، شیمیایی، الکتریکی، مکانیکی و یا بیولوژیکی برای بهبود ویژگی‌های مهندسی ماسه‌های بادی را گزارش کردند [۸-۱۰]. استفاده از آهک، سیمان، قیر* و افزودنی های شیمیایی نمونه هایی از روش‌های بهبود ویژگی‌های مهندسی ماسه‌های بادی با افزودن مصالح به آن‌ها است. [۱۱-۱۳].

تحقیقات زیادی در خصوص استفاده از امولسیون‌های پلیمری برای تثبیت ماسه های بادی و خاک های دانه‌ای از اواخر دهه ۱۹۶۰ گزارش شده است [۱۴-۱۵]. امولسیون‌های پلیمری ذرات پلیمری بسیار کوچک (با قطر پنج صدم تا پنج میکرومتر) هستند، در آب پراکنده شده و معمولا با پلیمریزاسیون امولسیونی تولید می‌شوند [۱۶]. امولسیون‌های پلیمری به دلیل چسبندگی قوی، انقباض کم در زمان گیرش، حساسیت کم آب، مقاومت در برابر تشعشعات خورشیدی و تخریب بیولوژیکی، غیر سمی، غیر آلاینده و ارزان بودن، به عنوان یک تقویت کننده موفق در نظر گرفته می‌شوند [۱۷]. اونیجکوه و غتائورا* برای تثبیت خاک‌های ریزدانه معدنی از امولسیون‌های پلیمری با غلظت ۰/۲۶ تا ۱/۳۲ درصد استفاده و نشان دادند که این افزودنی‌ها باعث افزایش چسبندگی، مقاومت فشاری، خمشی و کششی خاک می شود [۱۸]. آناگنوستوپولوس* و پاپالیانگوس* تأثیر دوغاب سیمان، رس، آب، همراه با درصد های مختلف امولسیون اکریلیک رزین* و متیل متااکریلات* را بر بهبود مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و تخلخل ماسه بررسی و نتیجه گرفتند افزودن امولسیون به دوغاب باعث افزایش مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و کاهش تخلخل ماسه می‌شود [۱۹]. گیلازقی* و همکاران از پلیمر مایع پلی‌اور تان* برای تثبیت خاک رس با پلاستیسیته بالا استفاده و افزایش ۹۰ درصدی مقاومت نهایی نسبت به مقاومت اولیه را گزارش کردند [۲۰]. الخانباشی و عبدالله* به بررسی تأثیر ۳ نوع امولسیون اکریلیک* بر نفوذپذیری، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته خاک ماسه‌ای پرداخته و نشان دادند که استفاده از افزودنی مذکور باعث کاهش قابل توجهی در نفوذپذیری و افزایش مقاومت و مدول الاستیسیته می‌شود [۲۱]. ها تا* و همکاران با انجام آزمایش های تک‌محوری به بررسی اثر الیاف پلی‌وینیل‌الکل و سیمان پرتلند بر رفتار ماسه پرداخته و نشان دادند که افزودن پلیمر و مخلوط سیمان با پلیمر باعث افزایش مقاومت تک‌محوری شده است[۲۲]. کاهش نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ای و سیلتی در اثر افزودن پلیمرهای آلی نظیر وینیل استات و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک با افزودن پلی وینیل استات* گزارش شده است [۲۳-۲۵]. افزایش مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای با افزودن ۱/۲ و ۲ درصد لیگنوسولفونات* و اضافه کردن ۰/۵ تا ۵٪ صمغ ژلان* گزارش شده است [۲۶-۲۷]. لی* و همکاران از صمغ زانتان* برای بهبود مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای استفاده و نشان دادند ۱ درصد از صمغ زانتان مقاومت بین ذرات ماسه را تا ۱۴ برابر بهبود می‌بخشد [۲۸]. رنجبر* و همکاران به بررسی تأثیر سیمان و الیاف پت*، پلی پروپیلن* و کیسه‌های پلاستیکی بر پارامترهای مقاومتی ماسه‌ی بابلسر با انجام آزمایش‌های برش

مستقیم و سه محوری، پرداخته و نشان دادند الیاف پت باعث بیشترین افزایش مقاومت بر شی خاک‌های ماسه ای شده است [۲۹]. خالقیان و صبا* مقدار ۶ درصد آهک و ۴ نانو پلیمر استات را به عنوان مقادیر بهینه برای تثبیت خاک ماسه رسی گزارش کردند [۳۰]. حاجیان نژاد* و همکاران افزایش مقاومت برشی خاک ماسه‌ای در اثر اضافه کردن خرده‌ها و نوارهای پلی‌اتیلن ترفتالات* را گزارش کردند [۳۱]. لیو* و همکاران به بررسی اثرات نوعی پلیمر آلی مبتنی بر آب و الیاف شیشه بر روی ماسه پرداختند و گزارش کردند که خاک‌های آغشته شده با پلیمرهای آلی سنتز شده، مقاومت تک‌محوری، کششی و چسبندگی را بهبود می‌دهند [۳۲]. آریاس تروجیلو* و همکاران به مطالعه تأثیر وینیل اکریلیک* بر پارامترهای مهندسی ماسه‌های بادی عربستان پرداخته و نشان دادند رابطه خطی مستقیم بین درصد پلیمر افزوده شده و وزن مخصوص حداکثر خشک خاک وجود دارد[۱]. زندیه* و همکاران به بررسی تأثیر پلیمر پلی وینیل استات* و پلی وینیل اکریلات* بر رفتار ماسه‌بادی پرداخته و گزارش کردند پلیمرهای مذکور مقاومت فشاری محدود نشده را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند [۳۳].سلطانی جیقه* و همکاران با انجام آزمایش‌های برش مستقیم دریافتند که افزودن ۶۰ درصد ماسه به رس مقاومت برشی را بهبود می‌بخشد [۳۴]. جانعلی‌زاده* و همکاران به بررسی تأثیر استفاده از پلیمر های سدیم پلی‌اکریلات* و پلی‌الکترولیت‌آنیونی* بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک پرداختند و نشان دادند افزودن پلیمر های مذکور باعث افزایش مقاومت فشارشی و برشی رس، کائولینیت و ماسه‌بادی می شود [۳۵]. اتم* و آل- تمیمی نشان دادند الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش مقاومت برشی ماسه‌بادی می‌گردد [۳۶]. احمدی مطلق و سلطانی جیقه* به بررسی اثر پلی الکترولیت کاتیونی* بر رفتار ژئوتکنیکی ماسه‌بادی پرداخته و نشان دادند که با افزودن پلیمر مذکور مقاومت فشاری و برشی خاک افزایش می‌یابد [۳۷]. یائو* و همکاران به مطالعه الیاف پلی‌وینیل‌الکل* بر خواص مکانیکی و رفتار ریزساختاری خاک سیلتی سیمانی پرداخته و نشان دادند الیاف مذکور منجر به افزایش مقاومت فشاری و بهبود قابل توجهی در استحکام کششی و مقاومت خمشی می شود [۳۸].فاتحی* و همکاران تأثیر رزین کازئین* بر بهبود پارامترهای مقاومت برشی ماسه را بررسی و نشان دادند افزودنی مذکور باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک می شود [۳۹]. در تحقیقی تأثیر مخلوط رزین اپوکسی بر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ماسه بررسی گردید و مشخص شد، رزین اپوکسی باعث افزایش چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی ماسه شده است. کاهش زاویه اصطکاک داخلی ناشی از قرارگرفتن قشری از پلیمر روی سطح ذرات بوده که اصطکاک بین دانه‌ها را کاهش داده است [۴۰].

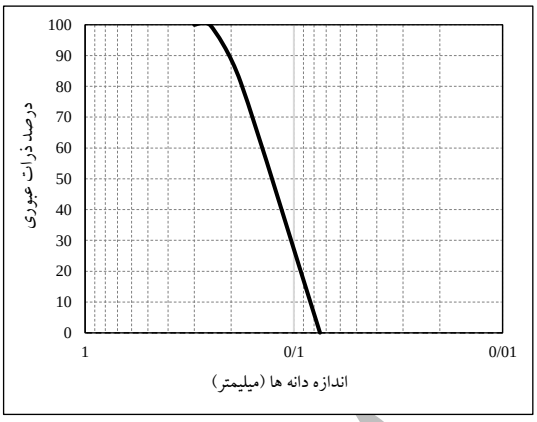
مناطق وسیعی از کشور ایران منجمله مناطقی از دشت خوزستان با ماسه‌بادی پوشیده شده، برای استفاده از آن‌ها به عنوان منابع قرضه لازم است با روش‌های مختلف پارامترهای مهندسی آن‌ها بهبود یابد. تحقیق حاضر به بررسی تأثیر درصدهای مختلف امولسیون پلیمری وینیل اکریلیک* بر پارامترهای مقاومت برشی ماسه‌های بادی منطقه مذکور پرداخته است. بدین جهت نمونه‌برداری از ماسه‌های بادی منطقه هورالعظیم صورت گرفته و بعد از تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه آن‌ها، مخلوط‌هایی از ماسه‌بادی با درصدهای مختلف امولسیون پلیمری ساخته و در زمان‌های عمل‌آوری مختلف در دمای آزمایشگاه تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفته‌اند. استفاده از ماسه‌بادی منطقه‌ای خاص بازای درصدهای مختلف امولسیون پلیمری با زمان‌های عمل-آوری مختلف می‌تواند به عنوان نوآوری تحقیق حاضر در نظر گرفته شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

مواد استفاده شده در تحقیق حاضر ماسه‌بادی منطقه هورالعظیم (دشت خوزستان) و پلیمر وینیل اکریلیک می‌باشد. منحنی دانه-بندی ماسه‌بادی در شکل (۱) ارائه شده است. وینیل اکریلیک ماده پلیمری چسبناکی است که با حل شدن در آب و از دست دادن رطوبت سخت شده، ذرات خاک را به هم چسبانده و باعث ایجاد و افزایش مقاومت خاک می‌شود. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پلیمر مذکور در جدول (۱) ارائه شده است.

در این تحقیق، ماسه‌بادی به ترتیب با ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد محلول پلیمر مخلوط گردید. بر این اساس برای تعیین مقاومت برشی، ۴ نمونه مختلف با درصدهای متفاوت ماسه‌بادی و پلیمر آماده و برای مراحل بعدی تحقیق استفاده شد.



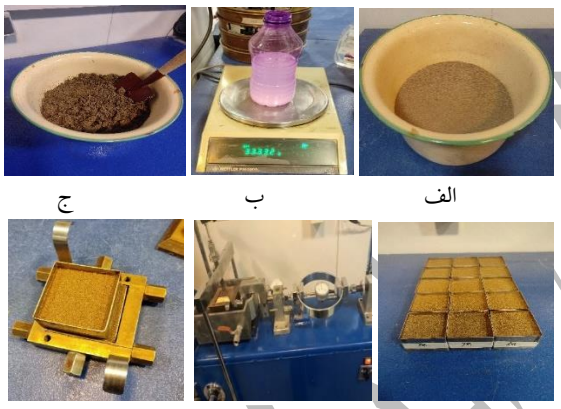
شکل ۱– منحنی دانه‌بندی ماسه‌بادی استفاده شده در تحقیق

جدول۱- خصوصیات پلیمر وینیل اکریلیک .

شکل ظاهری	رنگ	حلالیت در آب	چگالی (g/cm^3)	ویسکوزیته	pH
مایع	شیری	محلول	۱/۱-۰۲/۱	۲۰-۱۰۰	۳-۵

۲-۲- روش‌ها

روش‌های استفاده شده در تحقیق حاضر شامل آزمایش تراکم استاندارد و برش مسقیم است. این دو آزمایش بر اساس استانداردهای شماره ASTM D 698-78 و ASTM D 3080-90 انجام شد. آزمایش تراکم با هدف تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه و آزمایش برش مستقیم با هدف تعیین پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها انجام گردید. آزمایش تراکم با قالب ۴ اینچی روی نمونه ماسه‌بادی انجام شد. با توجه به این‌که بررسی تأثیر غلظت پلیمر بر پارامترهای مقاومت برشی ماسه‌بادی هدف تحقیق حاضر می‌باشد، لذا برای ترکیب پلیمر با خاک، ابتدا پلیمر در آب حل گردید. نسبت وزنی پلیمر به آب ($\frac{P}{W}$) ۱۰، ۲۰ و ۳۰ انتخاب شد ($\frac{P}{W} \times 100 = 10\% - 20\% - 30\%$). بر این اساس در تحقیق حاضر محلول‌های مذکور به عنوان محلول‌های پلیمری ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد معرفی شده است. با توجه به وزن مخصوص خشک حداکثر که از آزمایش تراکم تعیین شد، وزن مقدار خاک جهت قرارگیری در داخل قالب‌های برش تعیین گردید. سپس محلول‌های پلیمری ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد تهیه شده، به نحوی به خاک اضافه شد که نمونه به درصد رطوبت بهینه برسد. مقدار خاک مشخص شده در سه لایه داخل قالب‌های استیل مکعبی با طول و عرض ۵/۷ سانتی‌متر و عمق ۳/۷ سانتی‌متر ریخته شد تا امکان متراکم کردن آن‌ها برای رسیدن به چگالی حداکثر فراهم گردد. برای سرعت بخشیدن به فرایند آماده‌سازی نمونه‌ها از ۱۵ قالب استیل مکعبی استفاده شد. نمونه‌های آماده شده در قالب‌ها در فضای آزمایشگاه به مدت ۱، ۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸ قرار گرفته و سپس تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند. برای انجام آزمایش برش مستقیم، قالب‌های استیل داخل قالب دستگاه برش مستقیم جاسازی شده و تحت، ۴ تنش قائم ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تحت برش قرار گرفتند. دلیل انتخاب چهار تنش قائم در آزمایش برش مستقیم بررسی دقیق‌تر نتایج و حذف کردن داده‌های پرت احتمالی بوده است. با اعمال بار افقی و اندازه‌گیری جابجایی‌های افقی، آزمایش‌ها تا رسیدن به حداکثر نیروی برشی لازم برای گسیخته شدن نمونه ادامه یافت. در شکل (۲) مراحل آماده سازی نمونه ها برای انجام آزمایش برش مستقیم نشان داده شده است.



الف ب ج

د ه و

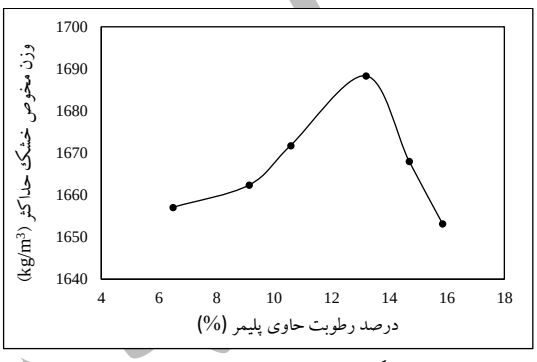
شکل ۲- آماده سازی نمونه‌ها برای آزمایش مقاومت برشی، الف) نمونه ماسه‌بادی، ب) محلول پلیمر، ج) اضافه کردن محلول پلیمر به ماسه‌بادی، د) قالب‌های مکعبی به همراه نمونه‌های آماده شده جهت قرارگیری در دستگاه برش، ه) دستگاه آزمایش برش مستقیم، و) نمونه در پایان آزمایش برش مستقیم

۳- نتایج

۳-۱- آزمایش برش مستقیم

شکل (۳)، نمودار تغییرات وزن مخصوص خشک در مقابل درصد رطوبت برای ماسه‌بادی را نشان می‌دهد. هدف از انجام این آزمایش تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه ماسه‌بادی بوده است. با توجه به شکل وزن مخصوص خشک حداکثر ماسه‌بادی ۱۶۸۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب و درصد رطوبت بهینه ۱۳/۱۸ درصد تعیین شد. تقعر مشاهده شده در بخش

اول منحنی تراکم (رطوبت ۹/۱۳ درصد) نشان می‌دهد زمانی که درصد رطوبت از ۶/۴۹ به ۹/۱۳ درصد افزایش یافته میزان جابجایی دانه‌ها برای رسیدن به وزن مخصوص بیشتر نسبت به حالتی که رطوبت از ۹/۱۳ به ۱۰/۵۷ درصد افزایش یافته کمتر بوده است. نمونه‌های ساخته شده بعدی برای آزمایش برش مستقیم با این وزن مخصوص و درصد رطوبت ساخته شدند. با توجه به اهداف تحقیق برای رطوبت‌دهی به خاک از محلول‌های پلیمری ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد استفاده شد.



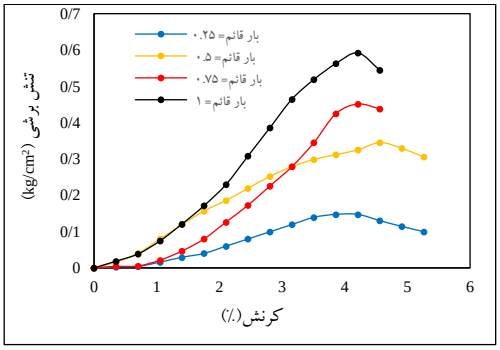
شکل ۳– منحنی تراکم ماسه‌بادی

آزمایش برش مستقیم با هدف تعیین پارامترهای مقاومت برشی ماسه‌بادی تثبیت شده با درصدهای مختلف پلیمر در زمان‌های عمل‌آوری مختلف انجام شد. جزئیات مربوط به روش آزمایش و آماده‌سازی نمونه‌ها در بخش قبل بیان شد. با انجام آزمایش نمودار تغییرات تنش برشی در مقابل کرنش بازای تنش‌های قائم ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسم و تنش برشی حداکثر بازای تنش قائم مشخص تعیین گردید. در شکل (۴) تعدادی از نمودارهای مذکور برای ماسه‌بادی تثبیت نشده، ماسه-بادی تثبیت شده با محلول‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در زمان عمل آوری ۷، ۱۴و ۲۱ روز نشان داده شده است.

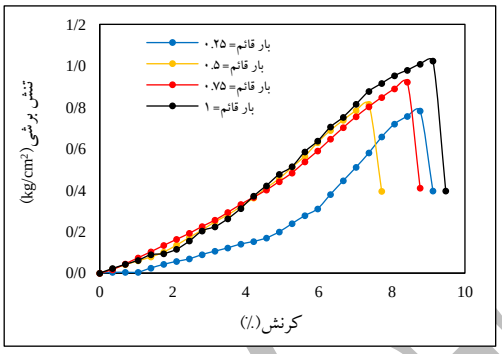
منحنی‌های ارائه شده در شکل (۴) نشان می‌دهد افزودن پلیمر به ماسه‌بادی باعث شده منحنی‌های تنش برشی–کرنش به دلیل چسبیدن دانه‌ها به یکدیگر رفتار شکننده داشته باشند. با توجه به منحنی‌های تنش برشی–کرنش مقاومت برشی حداکثر نظیر هر تنش قائم تعیین گردید. محل تغییر شیب در این منحنی‌ها معرف حداکثر تنش برشی است.

به منظور بدست آوردن پارامترهای مقاومت برشی نمودار تغییرات تنش برشی در مقابل تنش قائم بر اساس سه نقطه‌ای که بهترین همبستگی را داشته رسم گردید. با استفاده از شیب و عرض از مبدا خط مذکور زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک تعیین شد.

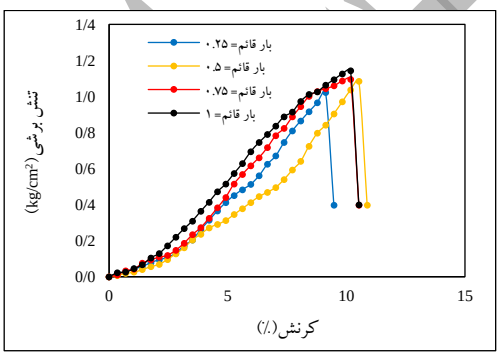
در شکل (۵) منحنی تغییرات تنش برشی در مقابل تنش قائم برای نمونه‌های بدون افزودنی و ۱۰ ، ۲۰ و ۳۰ درصد محلول پلیمر در زمان‌های عمل‌آوری مختلف ارائه شده است. بر اساس منحنی‌های مذکور مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی هر نمونه تعیین گردیده است.



الف



ب

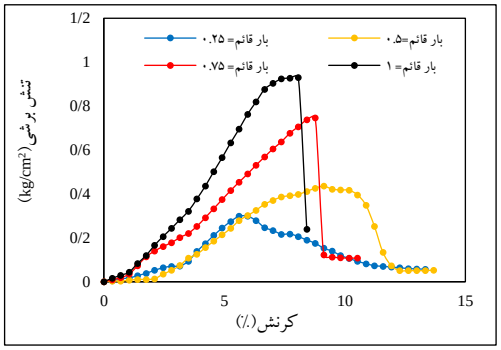


ج

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

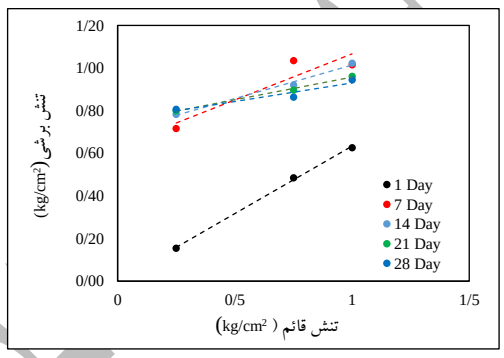
۴-۱-آزمایش برش مستقیم

در شکل (۶ الف) تا (۶ ج)، مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای زمان‌های عمل‌آوری مختلف، بازای درصدهای مختلف محلول پلیمری نشان داده شده است. به‌طور مثال شکل (۶ الف) مربوط به نمونه‌ای است که با محلول ۱۰ درصدی پلیمر تثبیت شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش زمان عمل-آوری چسبندگی خاک افزایش و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته است. این روند تغییرات برای شکل‌های (۶ ب) و (۶ ج) که مربوط به خاک تثبیت شده با محلول پلیمری ۲۰ و ۳۰ درصد است نیز مشاهده می گردد.

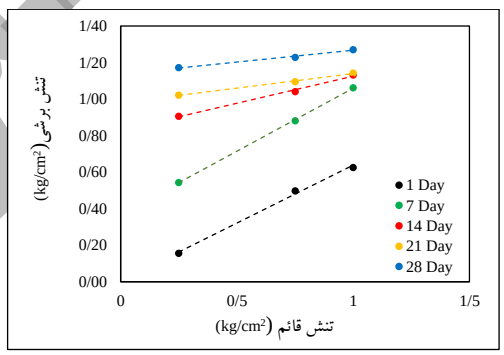


د

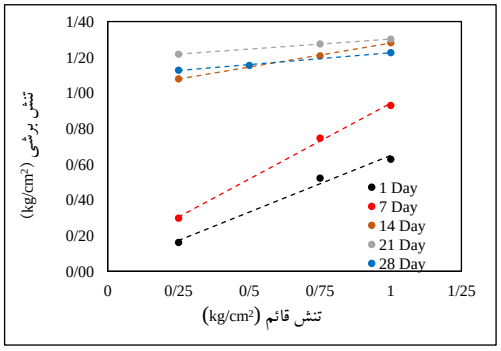
شکل ۴- نمودار تنش- کرنش، الف) ماسه‌بادی بدون افزودنی، ب) ۱۰ درصد VA بعد از ۱۴ روز، ج) ۲۰ درصد VA بعد از ۲۱ روز، د) ۳۰ درصد VA بعد از ۷ روز



الف

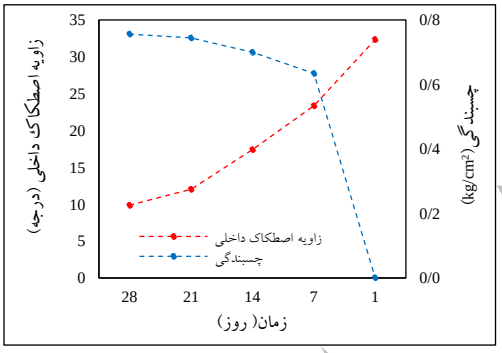


ب

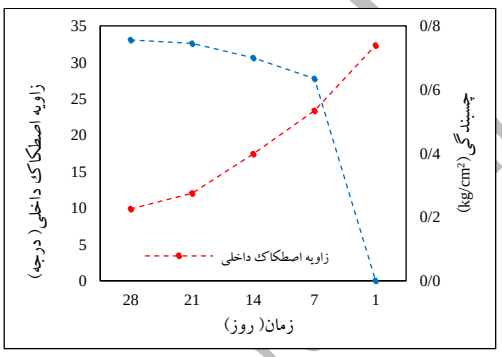


ج

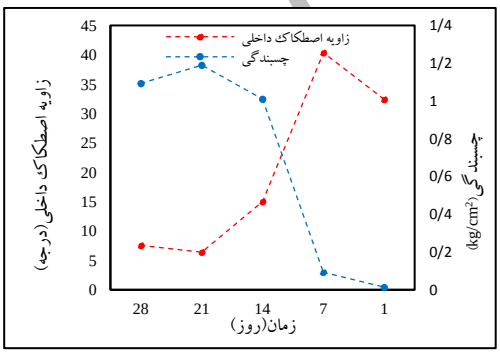
شکل ۵- نمودار زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و زمان عمل‌آوری ماسه‌بادی با (الف) ۱۰ درصد امولسیون پلیمر VA، (ب) ۲۰ درصد امولسیون پلیمر VA، (ج) ۳۰ درصد امولسیون پلیمر VA



الف



ب



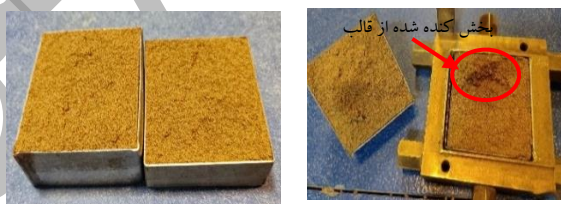
ج

شکل ۶- نمودار زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و زمان عمل‌آوری ماسه‌بادی با الف) ۱۰ درصد محلول پلیمرVA، ب) ۲۰ درصد محلول پلیمر VA، ج) ۳۰ درصد محلول پلیمر VA

افزایش چسبندگی با افزایش زمان عمل‌آوری ناشی از پر شدن فضاهای خالی بین دانه‌ها با محلول پلیمری و خشک شدن پلیمر در این فضاها و چسباندن دانه‌های خاک به همدیگر است.کاهش زاویه اصطکاک داخلی ناشی از کم شدن اصطکاک بین دانه‌ها بدلیل قرارگرفتن قشری از پلیمر روی دانه‌ها است.

در شکل (۷) تصویر سطح نمونه بعد از اتمام آزمایش برش مستقیم نشان داده شده است. شکل (۷ الف) مربوط به نمونه‌ای است که با ۳۰ درصد محلول پلیمری بعد از ۷ روز عمل‌آوری تحت بار قائم ۰/۲۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع آزمایش شده است.

همان‌طور که دیده می‌شود بدلیل چسبندگی ایجاد شده سطح برش بصورت مستقیم و صاف تشکیل نشده است. در حالی که شکل (۷ ب) مربوط به نمونه ماسه‌بادی بدون افزودنی است، سطح برش به صورت مستقیم و صاف است.



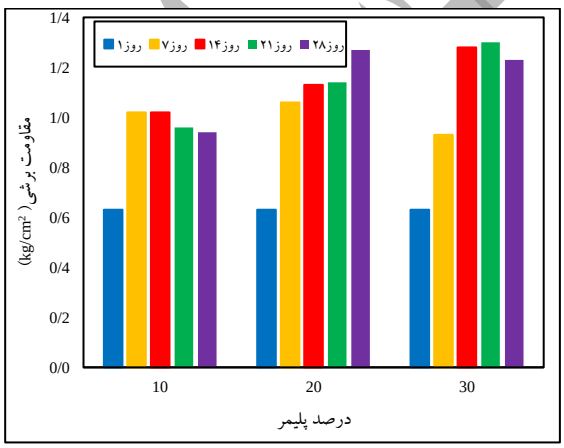
الف ب

شکل ۷- سطح نمونه بعد از اتمام آزمایش برش مستقیم، الف) نمونه تثبیت شده با ۳۰ درصد محلول پلیمر، ب) نمونه ماسه‌بادی بدون افزودنی

عدم تشکیل سطح برش صاف و مستقیم در نمونه‌های تثبیت شده باعث می‌گردد که رفتار نمونه‌های در لحظه گسیختگی حالت شکننده داشته باشد. این موضوع در منحنی‌های تنش برشی در مقابل کرنش که در شکل (۴) نشان داده شده، قابل مشاهده است. شکل (۴ الف) که مربوط به نمونه تثبیت نشده است بعد از رسیدن به نقطه حداکثر مقدار تنش برشی بازای کرنش‌های مشخص با روندی کاهشی ادامه می‌یابد اما شکل (۴ د) که مربوط به نمونه ۳۰ درصد پلیمر است بعد از رسیدن به نقطه حداکثر تنش برشی با شیب تند کاهش یافته و رفتار کاملا شکننده‌ای مشاهده می‌شود. بنابراین افزودن پلیمر باعث افزایش سختی خاک شده و رفتار خاک را شکننده می‌کند.

بر اساس معیار گسیختگی موهر– کولمب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی دو مولفه تشکیل دهنده مقاومت برشی بوده و تفکیک تأثیر هر کدام از آن‌ها بصورت مجزا ممکن است باعث ایجاد خطا گردد. بدین جهت در ادامه به تأثیر همزمان این دو پارامتر پرداخته شده است. در شکل (۸) مقاومت برشی نمونه‌های مختلف با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت مقایسه شده است.

این شکل بازای تنش قائم ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، در مقابل زمان برای نمونه‌های تثبیت شده با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد محلول پلیمر رسم شده است. همان‌طور که از نمودارها مشخص است، مقاومت برشی وقتی از محلول ۱۰ درصد در زمان عمل‌آوری یک روز استفاده شده، در همه نمونه‌ها یکسان است. بنابراین تغییر درصد محلول در زمان عمل‌آوری یک روز تأثیری روی مقاومت برشی نداشته است. بنابر این می‌توان گفت که اگر به محلول اجازه خشک شدن و گیرش داده نشود تأثیری روی مقاومت برشی نمونه نخواهد داشت. وقتی زمان عمل‌آوری به ۲۸ روز می‌رسد تأثیر غلظت روی مقاومت برشی مشهود است. به‌طوری‌که نمونه‌ای که با ۱۰ درصد محلول تثبیت شده مقاومت برشی کمتری نسبت به نمونه‌هایی که با ۲۰ و ۳۰ درصد تثبیت شده‌اند نشان می‌دهد. برای مقایسه همزمان پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) و مقدار مقاومت برشی در زمان‌های عمل-آوری مختلف بازای درصدهای مختلف پلیمر شکل (۹) ترسیم شده است.



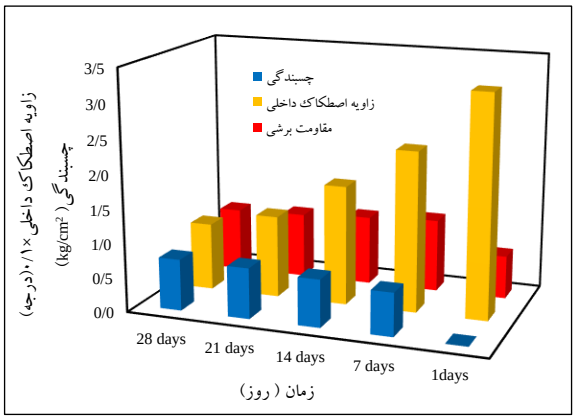
شکل ۸- مقایسه مقاومت برشی به ازای تنش قائم ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نمونه تثبیت شده با درصدهای مختلف محلول پلیمری

همان‌طور که در شکل (۹ الف) نشان داده شده است، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه تثبیت شده با محلول ۱۰ درصد

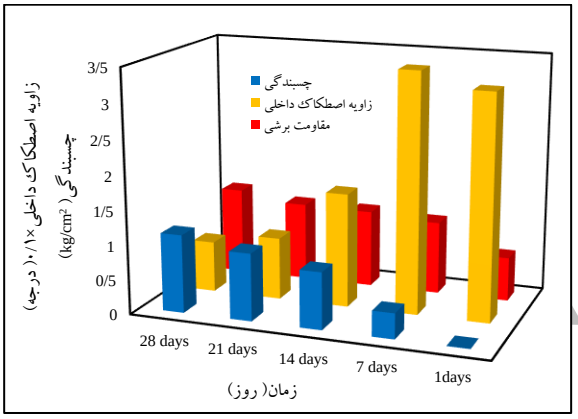
پلیمر در زمان عمل‌آوری ۱ روز ۰/۰۰۰۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و ۳۲/۳۳ درجه است. بنابراین نمونه یک روزه عملا فاقد چسبندگی بوده و مقاومت برشی آن ناشی از زاویه اصطکاک داخلی نمونه است. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی همین نمونه بعد از گذشت ۲۸ روز به ۰/۷۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و ۹/۸۷ درجه رسیده است. افزایش قابل توجهی در چسبندگی و کاهشی در زاویه اصطکاک داخلی نمونه دیده می‌شود. برای این نمونه مقاومت برشی بعد از گذشت یک روز ۰/۶۳کیلوگرم گذشت بر سانتی‌متر مربع بوده در حالی که این مقاومت بعد از ۷ روز به ۱/۰۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده و ۱۰۴ درصد افزایش را نشان می‌دهد.

در شکل (۹ ب) مشاهده می‌شود که چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی زمانی‌که از محلول ۲۰ درصد استفاده شده بعد از گذشت یک روز ، ۰/۰۰۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و ۳۲/۳۹ درجه است. در این حالت نیز با وجود افزایش غلظت محلول پلیمری نسبت به حالت قبل ولی بدلیل کم بودن زمان عمل‌آوری عملا تغییری در چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه نسبت به نمونه بدون افزودنی دیده نشده است لیکن بعد از گذشت ۲۸ روز چسبندگی به ۱/۱۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و زاویه اصطکاک داخلی به ۷/۴۱ درجه می‌رسد. بر این اساس مقاومت برشی بعد از گذشت ۲۸ روز نسبت به زمان عمل‌آوری ۱ روز، ۱۰۱/۶ درصد افزایش نشان می‌دهد.

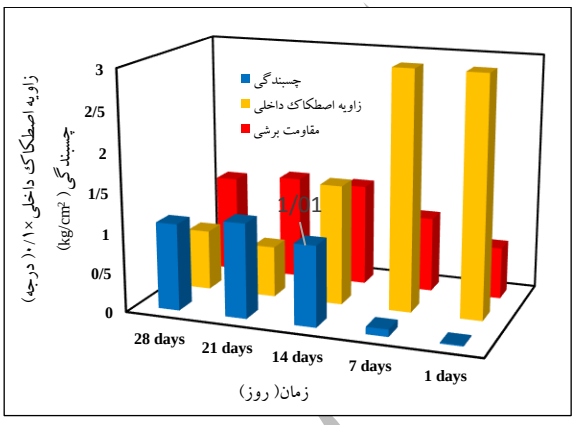
در شکل (۹ ج)، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای محلول ۳۰ درصد در بعد از ۱ روز ۰/۰۱۳۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و ۳۲/۴۴ بوده که مشابه دو حالت قبل بدلیل کم بودن زمان عمل‌آوری عملا تغییری نسبت به نمونه بدون افزودنی دیده نمی‌شود لیکن بعد از گذشت ۲۱ روز چسبندگی نمونه ۱/۱۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و زاویه اصطکاک داخلی به ۶/۴۰ درجه می‌شود. بر این اساس مقاومت برشی بعد از گذشت یک روز، ۰/۶۳کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده که این مقاومت بعد از گذشت ۲۱ روز به ۱/۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده که ۱۰۶/۳ درصد افزایش را نشان می‌دهد. این موضوع بخوبی تأثیر زمان عمل‌آوری را بر افزایش مقاومت برشی نمونه نشان داده ضمن اینکه مشخص میکند که تأثیر زمان عمل‌آوری در افزایش مقاومت برشی ماسه بمراتب بیشتر از غلظت محلول است.



الف



ب



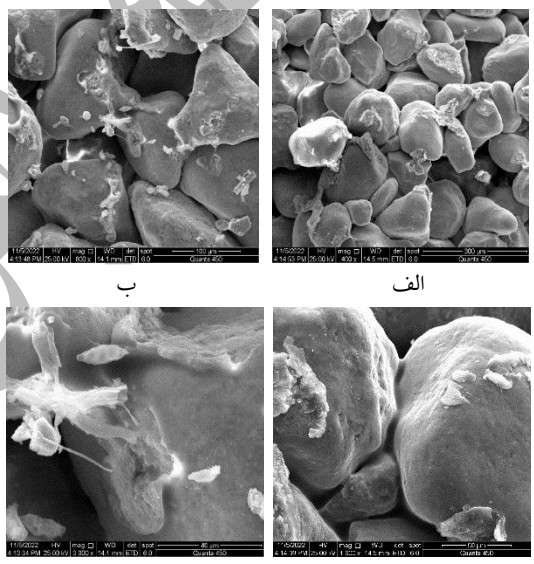
ج

شکل ۹- تغییرات چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی به ازای تنش قائم معادل ۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع برای نمونه‌های تثبیت شده در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت الف) با ۱۰ درصد محلول VA، ب) ۲۰ درصد محلول VA، ج) ۳۰ درصد محلول VA

۵- بحث

نتایج ارائه شده در بخش قبل به روشنی نشان داد که محلول پلیمری باعث افزایش مقاومت برشی ماسه‌بادی شده است. این افزایش ناشی از افزایش چسبندگی نمونه‌های تثبیت شده بوده است. برای مشاهده دقیق‌تر از وضعیت و تغییرات ایجاد شده در

نمونه های تثبیت شده، اقدام به تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی از نمونه های تثبیت شده با ۳۰ درصد محلول پلیمر به شرح ارائه شده در شکل (۱۰) گردید. مطابق شکل (۱۰) می‌توان گفت پلیمر با پر کردن فضاهای خالی و فاصله بین دانه‌ها و ایجاد پل‌ها و متصل کردن دانه‌ها به یکدیگر باعث افزایش چسبندگی و مقاومت برشی نمونه‌ها شده است. پرواضح است که گذشت زمان باعث استحکام بیشتر پلیمر شده و در نتیجه مقاومت برشی ایجاد شده بیشتر خواهد شد. این مسئله با مقایسه مقاومت برشی نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری یک روز با ۲۸ روز در شکل (۸) مشخص گردید. لیکن بعد از گذشت زمان مشخص تأثیر زمان بر استحکام بیشتر پلیمر کمتر می گردد. این موضوع نیز با مقایسه مقاومت برشی نمونه‌های عمل‌آوری شده در زمان‌های ۲۱ و ۲۸ روز با محلول ۳۰ درصد در شکل (۸) مشخص گردید.



الف ب ج د

شکل ۱۰- تصاویر نمونه ماسه‌بادی تثبیت شده با ۳۰ درصد پلیمر، با بزرگنمایی: الف) ۴۰۰، ب) ۸۰۰، ج) ۱۶۰۰، د) ۳۰۰۰ برابر.

قرارگیری پوشش پلیمری روی ذرات ماسه باعث کاهش اصطکاک ناشی از تماس دانه‌ها با همدیگر شده و این موضوع باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های تثبیت شده گردیده است. کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش چسبندگی در اثر افزودن پلیمر به ماسه قبلا توسط آناگنوستوپولوس و همکاران [۳۸] گزارش شده است.

افزایش چسبندگی در اثر افزودن ۲ درصد نانوپلیمر پلی وینیل استات با زمان عمل‌آوری ۷ روزه از ۰/۳۶ به ۱/۴ [۳۹] و همچنین افزایش چسبندگی از ۰/۲۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به ۲/۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و کاهش زاویه اصطکاک داخلی از ۳۰ درجه به ۲۴ درجه در اثر افزودن رزین اپوکسی به ماسه برای زمان عمل‌آوری ۲۸ روز گزارش شده است [۳۸]. در تحقیق حاضر نیز افزایش چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی در اثر افزودن محلول پلیمری به ماسه‌بادی گزارش شده به‌طوری‌که چسبندگی ماسه‌بادی تثبیت شده با محلول پلیمری ۳۰ درصد و زمان عمل‌آوری ۲۱ روزه از ۰/۰۰۰۲ به ۱/۱۸ کیلوگرم بر سانتی-متر مربع افزایش و زاویه اصطکاک داخلی آن از ۳۰/۷۵ به ۶/۴۰ درجه کاهش یافته است. افزایش چسبندگی بقدری زیاد است که باعث شده علیرغم کاهش ایجاد شده در زاویه اصطکاک داخلی افزایش قابل توجهی در مقاومت برشی ایجاد شود.

۶- نتیجه گیری

مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر پلیمر وینیل اکریلیک بر مقاومت برشی ماسه‌های بادی منطقه هورالعظیم انجام شد. ابتدا محلول‌هایی با غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد از پلیمر وینیل اکریلیک ساخته و به نمونه خاک اضافه گردید، سپس نمونه‌هایی با وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه ساخته شده و در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز به منظور تعیین پارامترهای مقاومت برشی تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند و نتایج زیر بدست آمد.

- با افزایش زمان عمل‌آوری و غلظت محلول پلیمری، مقاومت برشی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. مقاومت برشی نمونه تثبیت شده با محلول ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، نسبت به نمونه فاقد افزودنی به ترتیب ۱۰۴، ۱۱۱/۷ و ۱۱۳/۳ درصد افزایش نشان می‌دهد.
- با افزایش غلظت محلول پلیمری و زمان عمل‌آوری چسبندگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که چسبندگی نمونه تثبیت شده با محلول ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، در زمان عمل‌آوری ۲۸، ۲۸ و ۲۱ روز به بیشترین مقدار خود ۰/۷۶، ۱/۱۳ و ۱/۱۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده است.
- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد بوجود آمدن پل‌ها و اتصالات بین دانه‌ها با افزایش غلظت محلول و زمان عمل‌آوری دلیل افزایش چسبندگی است. قرارگیری پلیمر بین دانه‌ها باعث

کاهش اصطکاک بین آن‌ها و کاهش زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های تثبت شده گردیده است.

- افزایش زمان عمل آوری و افزایش غلظت محلول پلیمری باعث افزایش مقاومت برشی نمونه شده لیکن تأثیر زمان عمل‌آوری بیشتر از غلظت محلول پلیمری می‌باشد.

نسخه پیش انتشار

مراجع

[1] J. Arias-Trujillo, A. Matías-Sanchez, B. Cantero, S. López-Querol, "Effect of polymer emulsion on the bearing capacity of aeolian sand under extreme confinement conditions", *Construction and building materials*, vol. 236, no. 10, pp. 117473, 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117473

[2] Y. Mohamedzein, A. Al-Hashmi, A. Al-Abri, A. Al-Shereiqi, "Polymers for stabilisation of wahiba dune sands", *Oman. Proc. of the institution of civil engineers, Ground improvement*, vol. 172, no. 2, pp. 76-84, 2019. http://dx.doi org/10.1680/jgrim.17.00063

[3] P.L. Souza Júnior, O.F. Santos Junior, T.B. Fontoura, O. Freitas Neto, "Drained and undrained behavior of an aeolian sand from Natal Brazil", *Soils and rocks*, vol. 43, no. 2, pp. 263-270, 2020. http://dx.doi.org/10.28927/SR.432263

[4] E.S. Abu Seif, "Performance of cement mortar made with fine aggregates of dune sand", Kharga Oasis, Western desert, Egypt, *Jordan journal of civil engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 270–284, 2013.

[5] A.J. Al-Taie, Y.J. Al-Shakarchi, A.A. Mohammed, "Investigation of geotechnical spesifications of sand dune (case study: around Baiji in Iraq)", *International journal of advanced research*, vol. 14, no. 2, pp. 121-132, 2013.

[6] M. Al-Ansary, M.C. Pöppelreiter, A. Al-Jabry, S.R. Iyengar, "Geological and physiochemical characterization of construction sands in Qatar", *International journal of sustainable built environment*, vol. 1, no. 1, pp. 64-84, 2012. https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2012.07.001

[7] M.G.M. Elipe, S. Lopez-Querol, "Aeolian sands: Characterization, Options of improvement and possible employment in construction– The state-of-the-art", *Construction and building materials*, vol. 73, pp. 728–739, 2014.

[8] P.J. Venda Oliveira, M.S. Costa, J.N.P. Costa, M.F. Nobre, "Comparison of the ability of two bacteria to improve the behaviour of a sandy soil", *Journal of materials in civil engineering*, vol. 27, no. 1, 2015. http:// dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001138

[9] N. Abbasi, M. Mahdieh, "Improvement of geotechnical properties of silty sand soils using natural pozzolan and lime", *International journal of geo-engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 1-12, 2018. http://dx.doi.org/10.1186/s40703-018-0072-4

[10] P.J. Venda Oliveira, J.A.O. Rosa, "Confined and unconfined behavior of a silty sand improved by the enzymatic bio cementation method", *Transportation geotechnics*, vol. 24, pp. 100400, 2020. http://dx.doi.org/10.1016/jtrgeo.2020.100400

[11] W. Akili, C.L. Monismith, "Permanent deformation characteristics of cement emulsion stabilized sand", *Association of asphalt paving technologists*, vol. 47, pp. 281–301, 1978.

[12] H. Al-Abdul Wahhab, F. Bayomy, A. Al-Halhouli, "Evaluation of emulsified asphalt-treated sand for low-volume road and road bases". *Fourth international conference on low-volume roads*, vol. 2, No. 1106, pp. 71–80, 1998.

[13] S.F.I. Al-Abdullah, "An approach in improving the properties of sand dunes", *J.Eng*, vol. 13, pp. 930–939, 2006.

[14] S. Onyejekwe, S. Ghataora, "Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: sulphonated oil and a polymer", *Bull. Eng. Geol. Environ*. vol. 74, pp. 651–665, 2015. http://dx.doi.org/10.1007/s10064-014-0667-8

[15] A.R. Zandieh, S.S. Yasrobi, "Study of factors affecting the compressive strength of sandy soil stabilized with polymer", *Geotechnical and geological engineering*, vol. 28, pp. 139–145, 2010. http://dx.doi.org/10.1007/s10706-009-9287-7

[16] Y. Ohama, "Polymer-based admixtures", *Cement and concrete composites*, vol. 20, no. 1-2, pp. 189-212, 1998. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00065-6

[17] R.A. Siddiqi, C.J. Moore, "Polymer stabilization of sandy soil for erosion control", *Transportation research records*, vol. 827, pp. 30-34, 1981.

[18] S. Onyejekwe, S. Ghataora, "Stabilization of quarry fines using a polymeric additive and portland cement", *J. Mater. Civil Eng*. Vol. 28, no. 1, 2016. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001324

[19] C. Anagnostopoulos, T. Papaliangas, "Experimental investigation of epoxy resin and sand mixes", *Journal of geotechanical and geoenvironmental engineering*, vol. 138, pp. 841-849, 2012. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000648

[20] Simon T. Gilazghi, Jie. Huang, Sepehr. Rezaeimalek, Sazzad. Bin-Shafique, "Stabilizing sulfate-rich high plasticity clay with moisture activated polymerization", *Engineering geology*, vol. 211, pp. 171-178, 2016. http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.07.007

[21] A. Al-Khanbashi, S.W. Abdalla, "Evaluation of three waterborne polymers as stabilizers for sandy soil". *Geotechnical and geological engineering*, vol. 24, pp. 1603–1625, 2006. http://dx.doi.org/10.1007/s10706-005-4895-3

[22] T. Hata, A.C. Saracho, A. Guharay, S.K. Haigh, "Strength characterization of cohesionless soil treated with cement and polyvinyl alcohol", *Soils and foundations*, vol. 62, no. 6, pp. 101238, 2020. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101238

[23] A.F. Cabalar, M.H. Awraheem, M.M. Khalaf, "Geotechnical properties of a low- plasticity clay with biopolymer", *Journal of material in civil engineering*, vol. 30, no. 8, 2018. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002380

[24] W. Huang, C. Zhou, Z. Liu, H. Sun, J. Du, L. Zhang, "Improving soil-water characteristics and pore structure of silty soil using nano-aqueous polymer stabilizers", *KSCE Journal for civil engineering*, vol. 25, no. 9, pp. 3298– 3305, 2021. http://dx.doi.org/10.1007/s12205-021-2036-z

[25] G. Tadayonfar, V. Tadayonfar, R. Kazemi, "Improving the permeability of silty soils using vinyl acetate polymer", *First national conference on soil mechanics and foundation engineering*, Tehran, 2013, (in Persian).

[26] B. Indraratna, R. Athukorala, J. Vinod, "Estimating the rate of erosion of a silty sand treated with lignosulfonate", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 139, no. 5, pp. 701-714, 2013. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000766
[27] I. Chang, J. Im, G.C. Cho, "Geotechnical engineering behaviors of gellan gum biopolymer treated sand" *Canadian geotechnical journal*, vol. 53, no. 10, pp. 1658–1670, 2016. http://dx.doi.org/10.1139/cgj-2015-0475
[28] S. Lee, I. Chang, M.K. Chung, Y. Kim, J. Kee, "Geotechnical shear behavior of Xanthan gum biopolymer treated sand from direct shear testing", *Geomechanics and engineering*, Vol. 12, no. 5, pp. 831–847, 2017. http://dx.doi.org/10.12989/gae.2017.12.5.831
[29] N. Ranjbar, I. Shooshpasha, S. Mirhosseini, M. Dehestani, "Effects of reinforcement on mechanical behaviour of cement treated sand using direct shear and triaxial tests", *International journal of geotechnical engineering*, vol. 12, no. 5, pp. 491499, 2018. https://doi.org/10.1080/19386362.2017.1298300
[30] M. Khaleghian, and H. Saba, "Investigation of the parameters of clayey sand soils stabilized with lime and polyvinyl acetate nanopolymer", *the second conference on civil engineering*, architecture and urban planning in the countries of the Islamic world, Tabriz, 2018, (in Persian).
[31] Z. Hajiannejad, M. Karamati, M. Alinjad, R. Naderi, "Investigation of the shear strength of sand soil of Bandar Anzali reinforced with polyethylene terephthalate" (PET), *Amir Kabir civil engineering journal*, vol 52, no 12, pp 14-14, 2019, (in Persian).
[32] J. Liu, Z. Song, Y. Lu, Q. Wang, F. Kong, F. Bu, D.P. Kanungo, S. Sun, "Improvement effect of water based organic polymer on the strength properties of fiber glass reinforced sand", *Polymers* vol. 10, no. 8, pp. 836, 2018. https://doi.org/10.3390/polym10080836
[33] A. Zandieh, S. Yasrebi, M. Mortezaei, "Investigation of the effect of humidity on uniaxial samples stabilized with polymer", *The third national engineering congress*, 2006, (in Persian).
[34] H. Soltani jigheh, "Behavior of clay-sand mixtures under undrained triaxial conditions", *Journal of civil engineering*, vol. 31, no. 20, pp. 113-126, 2018. Available from: https://sid.ir/paper/195845/en, https://doi.org/10.22067/civil.v31i1.35474
[35] A. Janalizadeh, A. Rabiei, M. Absari, "Investigating the effect of adding water-soluble polymer on the mechanical parameters of kaolinite clay", *Second national conference on soil mechanics and earth engineering*, 2014, (in Persian).
[36] M. Attom, and A. Al-Tamimi, "Effects of polypropylene fibers on the shear strength of sandy soil", *International journal of geosciences*, vol. 1, no. 1, pp. 44-50, 2010. doi: 10.4236/ijg.2010.11006
[37] P. Ahmadi Motlagh, H. Soltani Jigheh, "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*, 2016, (in Persian).
[38] X. Yao, G. Huang, M. Wang, X. Dong, "Mechanical properties and microstructure of PVA fiber reinforced cemented soil", *KSCE J Civ Eng*, vol. 25, pp. 482–491, 2021. http://dx.doi.org/10.1007/s12205-020-0998-x
[39] H. Fatehi, M. Abtahi, H. Hashem Al-Hosseini, "Improving the strength parameters of granular soil using casein biopolymers and carinat sodium salt", *Master's thesis*, *Isfahan university of technology*, *Faculty of engineering construction*, 2016, (in Persian).
[40] C.A. Anagnostopoulos, P. Kandiliotis, M. Lola, and S. Karavatos, "Effect of Epoxy Resin Mixtures on the Physical and Mechanical Properties of Sand", *Research journal of applied sciences*, *Engineering and technology*, Vol. 7, no. 17, pp. 3478-3490, 2014. http://dx.doi.org/10.19026/rjaset.7.700

واژه نامه

Additive	افزودن مصالح
Abbasi	عباسی
Acrylic resin	اکریلیک رزین
Acrylic	اکریلیک
Ahmadi motlagh and Soltani jigheh	احمدی مطلق و سلطانی جیقه
Al- Khanbashi and Abdalla	الخانباشی و عبدالله
Anagnostopoulos	آناگنوستوپولوس
Arias-Trujillo	آریاس تروجیلو
Attom and Al-tamimi	اتم و آل تمیمی
Bitumen	قیر
Casein	کازئین
Densigication	متراکم کردن
Drainage	زهکش کردن
Fatehi	فاتحی
Gellan gum	صمغ ژلان
Gilazghi	گیلازقی
Hajian Nezhad	حاجیان نژاد
Hata	هاتا
Janalizadeh	جانعلی زاده
Khaleghian and saba	خالقیان و صبا
Lee	لی
Lignosulfonate	لیگنوسولفونات
Liu	لیو
Mahdieh	مهدیه
Methyl methacrylate	متیل متا اکریلات
Oliveira	الیویرا
Onyejekwe and Ghataora	اونیجکوه و غتائورا
Papaliangas	پاپالیانگوس
Poly vinyl Alchohol	پلی وینیل الکل
Polyvinyl acetate	پلی وینیل استات
Polyelectrolyte anionic	پلی الکترولیت آنیونی
Polyelectrolyte cationic	پلی الکترولیت کاتیونی
Polyethylene tereohthalate	پلی اتیلن ترفتالات

نسخه پیش انتشار

Polyethylene terephthalate (PET) fibers	الیاف پت
Polypropylene	پلی پروپیلن
Polyurethane	پلی اورتان
Poly vinyl asetat	پلی ویتیل استات
Polyvinyl acrylate	پلی وینیل اکریلات
Ranjbar	رنجبر
Reinforcement	تقویت کردن
Rosa	روزا
Sodium polyacrylate	سدیم پلی اکریلات
Soltani jigheh	سلطانی جیقه
Vinyl acrylic	وینیل اکریلیک
Xanthan gum	صمغ زانتان
Yao	یائو
Zandiyeh	زندیه

نسخه پیش انتشار