



Passive Remediation with Colloidal Silica Effect on Shear Strength Properties of oil-contaminated Bushehr Carbonate Sand

A. Shakeri¹, R. Ziaie Moayed², M. A. Nozari^{3,*}

¹ Department of Geotechnical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

² Professor Department of Geotechnical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

³ Department of Civil Engineering, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran

ABSTRACT: Crude oil is one of the soil and water pollution sources that change the geotechnical properties of the soil via both physical and chemical processes. Carbonate sand which is found in oil-rich and continental regions is exposed to oil pollution so that studying the effect of oil and petroleum product contamination is unavoidable. On the other hand, injecting a colloidal silica solution, stabilization and improvement of oil-contaminated sand has been investigated broadly. In this research, several triaxial undrained-unconsolidated tests were conducted to investigate the shear strength of carbonate sand contaminated with crude oil as well as contaminated sand stabilized by colloidal silica injection. The results showed that oil pollution reduced the maximum shear strength and the friction angle of carbonate sand, as well as a significant decrease in elasticity modulus while oil content increased. In injected specimens, colloidal silica increases the shear strength, cohesion, and stiffness significantly relative to the oil-contaminated ones.

Review History:

Received: 8/14/2017

Revised: 1/16/2018

Accepted: 1/24/2018

Available Online: 2/12/2018

Keywords:

Carbonate sand

Oil contamination

Colloidal silica

Shear strength

Passive remediation

1. INTRODUCTION

In recent decades, many investigations have been conducted to study the oil contamination effect on the soil shear strength parameters. Soil contamination by crude oil make some problems that can affect the bearing capacity of the shallow foundation which could endanger the structure's stability as well as foundation settlement. Previous researches demonstrated a dramatic decrease in elasticity modulus especially in dense specimens which could cause more settlement beneath the existing foundations [1]. Also, some investigations have reported the shear strength experiment results which show a significant decrease in internal friction angle and bearing capacity of foundations [2, 3]. Oil contamination caused the soft behavior of the soil so that the particles could slide and rotate easier.

To overcome this problem, especially beneath the existing structure with a compacted underneath polluted soil layer, a suitable stabilization method could be useful. Encapsulation and immobilization of oil contamination are achievable by adding colloidal silica as reported earlier [4]. The injection of colloidal silica into porous media has been convinced by many researchers because of its low viscosity. Moreover, passive remediation by colloidal silica is relevant as well as an increase in shear strength envelope [5]. Iran due to having 10 percent of the world's oil reserves as one of the largest oil-exporting countries is largely exposed to soil contamination

*Corresponding author's email: ziaie@eng.ikiu.ac.ir

with oil products and has always been confronted with the problem of leakage and emissions of oil on the sea bed and Land.

Therefore, in this study, the effect of oil contamination on the shear strength parameters and elastic modulus of Bushehr carbonate sand were studied, then by passive injection of the colloidal silica at a viscosity similar to water, contaminated soil stabilization was studied.

2. METHODOLOGY

Bushehr carbonate sand particle size distribution and standard protector test have been shown in Fig. 1 and Fig. 2, respectively. All specimens, included 59% CaO (measured by XRF test), were compacted up to 85% of the maximum relative density and 6% moisture content at the dry side of the proctor diagram. Crude oil was added to clean sand specimens by 3, 6, 9, and 12 percent of the dry sand mass. Stabilized specimens were prepared by injecting colloidal silica under a low hydraulic gradient. Colloidal silica particles diameter was 10 nanometers and the pH of 6 and ionic strength of 0.2 mol/lit were adjusted by adding HCl and NaCl. Also, colloidal silica dispersion was diluted to 10 percent by weight by adding distilled water. After 28days, all specimens were loaded uniaxially using triaxial apparatus. No water was injected into specimens and no consolidation has occurred. Shear strength of the specimens was measured under the confining pressure of 50, 100, and 200 kPa and the loading rate of 0.5 mm/min to



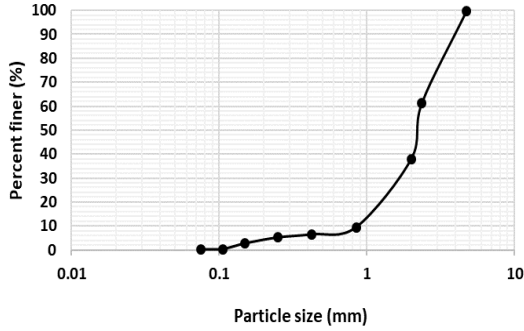


Fig. 1. Particle size distribution of Bushehr carbonate sand.

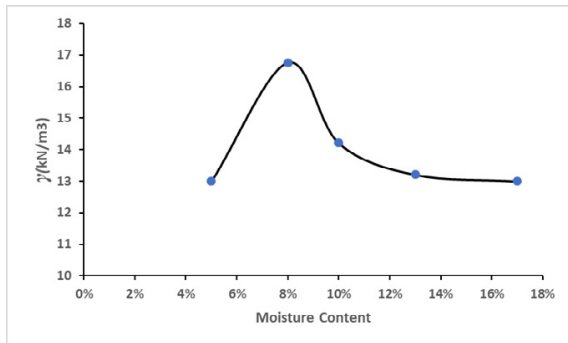


Fig. 2. Standard proctor test of Bushehr carbonate sand.

Table 1. Peak deviatoric stress of contaminated specimens

Oil contamination (%)	Peak deviatoric stress (kPa) at confining pressure of		
	50	100	200
0	253	477	933
3	238	451	867
6	212	401	768
9	202	364	700
12	185	333	645

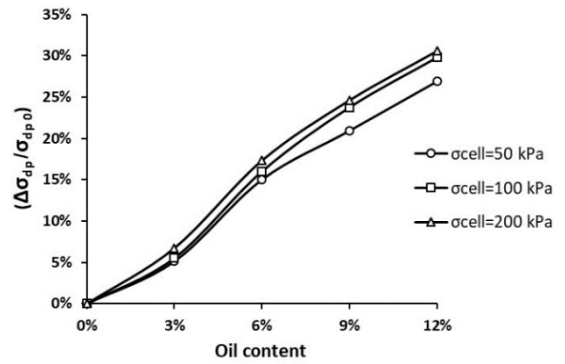


Fig. 4. Surge percentage of peak deviatoric stress after grouting relative to oil-contaminated specimens

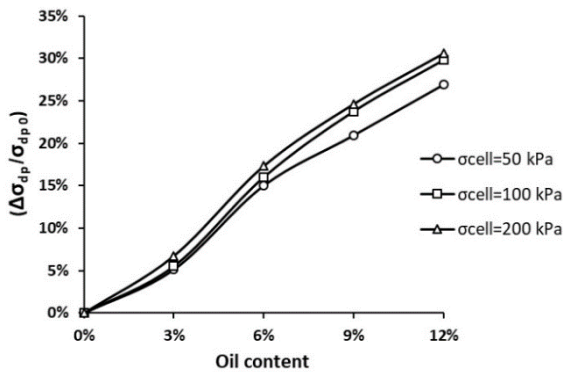


Fig. 3. Reduction percentage of peak deviatoric stress.

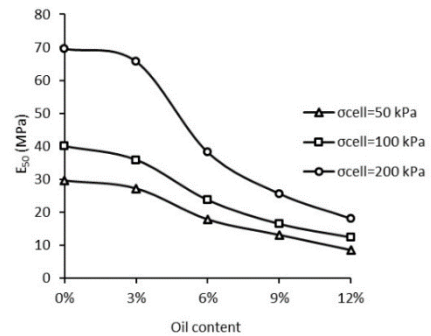


Fig. 5. Surge percentage of elasticity modulus after grouting relative to oil-contaminated specimens.

obtain the probable brittle stress-strain behavior.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Peak deviatoric stress of contaminated specimens has been enlisted in Table 1. As it is clear, an increase in oil content led to lower Peak deviatoric stress. As shown in Fig. 3, the reduction percentage steadily increases up to 30% for 12% oil contamination. After grouting, all the specimens experienced a higher value of peak deviatoric stress. Fig. 4 displays the percentage of increase for stabilized samples relative to contaminated ones.

As it is obvious from Fig. 5, the presence of crude oil in samples caused a severe drop in elasticity modulus, especially at 12% oil content, however, the reduction is gentler at the lower

values of contamination. This softening behavior originated from the fact that soil particles slide and rotate easier due to the existence of oil. The elasticity modulus of stabilized specimens surged dramatically as shown in Fig. 6 especially for higher values of oil contamination. An upward trend of the elasticity modulus with oil content stems up from more decreases at more oil content. As shown in Fig. 7, the internal frictional angle decreased about 16% due to contamination at 12% of oil content. Additionally, the cohesion of specimens increased because of the colloidal silica gelation as well as internal frictional angle. As opposed to the cohesion, the internal frictional angle after grouting is nearly equal for all specimens, whereas the obtained cohesion is higher for less

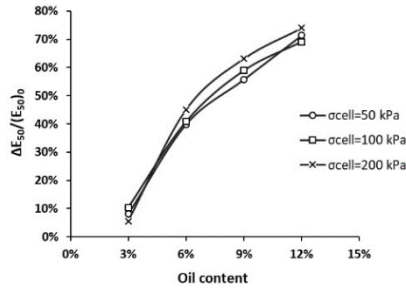


Fig. 6. Surge percentage of elasticity modulus after grouting relative to oil-contaminated specimens.

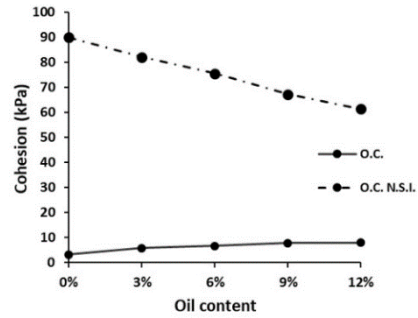


Fig. 8. Variation of cohesion after contaminating and stabilization.

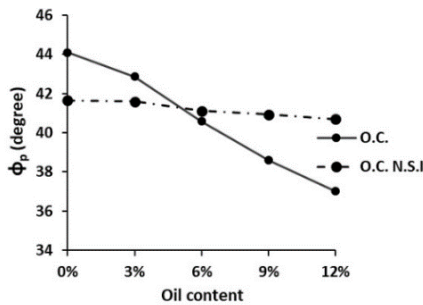


Fig. 7. Variation of the internal frictional angle after contaminating and stabilization.

polluted specimens (Fig. 8). Colloidal silica, as a stabilizer, improved the shear strength of oil-contaminated specimens so that all the shear strength parameters increased.

4. CONCLUSIONS

From the research that has been carried out, it is clearly could be determined that crude oil contamination causes a significant drop in shear strength and elasticity modulus. This reduction is caused by induced lubrication due to the presence of oil. Sliding and rotation of the soil grains would get easier if

oil content was more. Stabilizing the polluted soil by crude oil could be achievable by injecting colloidal silica. All the shear resistance properties dramatically rise especially at a higher value of oil content. Eventually, it could be concluded that colloidal silica is a suitable grout to improve characteristics of oil-contaminated soil, especially for soil layer beneath the existing buildings and structures.

REFERENCES

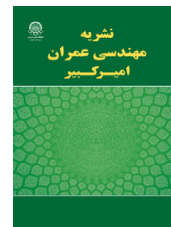
- [1] F. Wegian, M. Ismail, Assessment of bridge performance after oil contamination below foundation piles, Australian Journal of Civil Engineering, 6(1) (2010) 47-56.
- [2] H.A. Al-Sanad, W.K. Eid, N.F. Ismael, Geotechnical properties of oil-contaminated Kuwaiti sand, Journal of geotechnical engineering, 121(5) (1995) 407-412.
- [3] E.C. Shin, B.M. Das, Bearing capacity of unsaturated oil-contaminated sand, International Journal of offshore and polar Engineering, 11(03) (2001).
- [4] D. Camenzuli, D.B. Gore, Immobilization and encapsulation of contaminants using silica treatments: a review, Remediation Journal, 24(1) (2013) 49-67.
- [5] P.M. Gallagher, Y. Lin, Colloidal silica transport through liquefiable porous media, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 135(11) (2009) 1702-1712.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Shakeri, R. Ziaie Moayed, M. A. Nozari, . Passive Remediation with Colloidal Silica Effect on Shear Strength Properties of oil-contaminated Bushehr Carbonate Sand, Amirkabir J. Civil Eng., 53(1) (2021) 87-90.

DOI: [10.22060/ceej.2018.13268.5363](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.13268.5363)





تأثیر تزریق غیرمحرک سیلیس کلوئیدی بر مقاومت برشی ماسه کربناته بوشهر آلوده به نفت خام

علی شاکری، رضا ضیایی موید، محمدمین نوذری*

کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، ایران
استاد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
گروه مهندسی عمران، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامی، رشت، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۲۳
بازنگری: ۱۳۹۶/۰۵/۲۶
پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۶/۱۱/۲۳

کلمات کلیدی:

ماسه کربناته
آلودگی نفتی
سیلیس کلوئیدی
مقاومت برشی
تثبیت غیرمحرک

خلاصه: نفت خام یکی از منابع آلودگی خاک و آب است که با فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی باعث تغییر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک می‌گردد. از آنجا که ماسه کربناته در مناطق نفت خیز و قاره‌ای یافت می‌شود، در معرض آلودگی نفتی قرار دارد و در نتیجه، مطالعه آلوده شدن این ماسه به نفت و فرآورده‌های نفتی حائز اهمیت است. این پژوهش با انجام آزمایش‌های سه محوری بر روی نمونه‌های غیراشباع به بررسی خصوصیات مقاومت برشی ماسه کربناته آلوده به نفت خام و همچنین ماسه آلوده‌ی تحت تزریق سیلیس کلوئیدی پرداخته است. نتایج نشان داد که آلودگی نفتی منجر به کاهش مقاومت برشی حداکثر و زاویه اصطکاک ماسه کربناته گردیده است و همچنین کاهش چشم‌گیر مدول الاستیسیته در اثر افزایش نفت مشاهده می‌شود. با تزریق محلول سیلیس کلوئیدی مشاهده شد که مقاومت برشی حداکثر افزایش یافته و چسبندگی به طور قابل ملاحظه‌ای در نمونه‌های تزریق شده نسبت به نمونه‌های آلوده به نفت افزایش یافته است. همچنین تزریق این محلول منجر به افزایش قابل توجه مدول الاستیسیته در نمونه‌های ماسه‌ای آلوده به نفت شده است.

۱- مقدمه

ال سند و همکاران در سال ۱۹۹۵ آزمایش‌هایی را بر روی ماسه جاها را (از نوع SP) انجام دادند که هدف از آن بررسی اثرات دانسیته نسبی، نوع آلاینده و درصد آلودگی بر پارامترهای مقاومت برشی برای این نوع خاک بود. نمونه‌ها به چهار نوع آلاینده، ۲ تا ۶ درصد وزنی آلوده گردید. در این تحقیق دو سری آزمایش‌های سه محوری تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) بر روی ماسه تمیز و نیز ماسه آلوده به ۶ درصد نفت خام انجام گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده کاهش تنش انحرافی و افزایش فشار آب حفره‌ای در حضور نفت می‌باشد که دلیل این امر نرم‌شدگی نمونه در حضور نفت عنوان شده است. نتایج نشان‌دهنده این مطلب است که حداکثر میزان کاهش در پارامتر زاویه اصطکاک داخلی ۵ تا ۷ درصد و در نمونه‌های آلوده به نفت خام سنگین به وقوع پیوسته است. این کاهش در تمامی نمونه‌ها از سست تا متراکم مشاهده شده است [۱].

ایران با توجه به دارا بودن ۱۰ درصد از منابع نفتی جهان و به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین کشورهای صادرکننده نفت به میزان زیادی در معرض آلوده شدن خاک به نفت و فرآورده‌های نفتی قرار دارد و همواره با معضل نشت و انتشار آلاینده‌های نفتی در بستر دریا و نیز خشکی، روبرو بوده است. در اثر فرآیندهای فیزیکی-شیمیایی که بین خاک و آلاینده‌ها رخ می‌دهد خصوصیات مقاومتی، نفوذپذیری و تراکم‌پذیری خاک تغییر می‌کند و از این رو آلودگی خاک به مواد نفتی ممکن است مشکلاتی را به همراه داشته باشد که می‌توان به کاهش ظرفیت باربری شالوده‌های سطحی که در اثر آن احتمال گسیختگی بستر سازه وجود دارد و همچنین نشست پی که باعث به خطر افتادن پایداری سازه گردد، اشاره کرد.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mohammadaminnozari@gmail.com



شین و همکاران در سال ۱۹۹۹ با انجام آزمایش برش مستقیم بر روی ماسه جومونجین کره به بررسی تغییرات مقاومت برشی خاک مذکور در اثر آلودگی به نفت خام و در نتیجه تغییرات در ظرفیت باربری نهایی شالوده‌های سطحی پرداختند. نمونه‌های مورد مطالعه در دانسیته نسبی ۵۰ و ۷۵ درصد بوده و درجه آلودگی به نفت خام آن‌ها از صفر تا ۴/۲ درصد متغیر بوده است. نتایج این تحقیق بیانگر این است که با افزایش میزان آلودگی از صفر تا ۱/۳ درصد، زاویه اصطکاک داخلی حداکثر تا ۲۵ درصد در هر دو دانسیته کاهش یافته و افزایش بیش از این در آلودگی، تأثیر چندانی در کاهش زاویه اصطکاک داخلی ندارد. پوشیده شدن سطح ذرات ماسه توسط نفت، موجب شده اصطکاک بین ذرات به هنگام لغزیدن بر روی یکدیگر، کاهش یابد [۲].

پوری در سال ۲۰۰۰ با انجام آزمایش‌های برش مستقیم به بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه‌ای از نوع SP آلوده به نفت خام پرداخت. او دریافت نمونه‌های با ۸۵ درصد تراکم نسبی با افزایش مقدار نفت خام از صفر تا ۱۹ درصد، زاویه اصطکاک داخلی از ۴۰/۵ به ۳۰ درجه کاهش می‌یابد، که در نمونه‌های با تراکم نسبی ۴۰ درصد این مقدار از ۳۵ به ۲۸ درجه کاهش یافته است. در کل زاویه اصطکاک داخلی با افزایش مقدار نفت کاهش یافته و مشاهده می‌شود که مقدار کاهش یافته تابعی از دانسیته نسبی و درصد آلودگی می‌باشد. همچنین برای نمونه‌هایی با مقدار آلودگی یکسان، در نمونه‌هایی با دانسیته نسبی بالاتر، کاهش زاویه اصطکاک بیشتر است. تنش برشی حداکثر نیز با افزایش مقدار نفت کاهش یافته است و حداکثر کاهش در درصد آلودگی ۲۸/۵ درصد است [۳].

شین و داس در سال ۲۰۰۱ آزمایش‌های برش مستقیم روی ماسه آلوده به سه نوع نفت در درصدهای ۱، ۲، ۴ و ۶ درصد با ویسکوزیته‌های مختلف انجام دادند و همچنین با ساخت مدل آزمایشگاهی ظرفیت باربری پی‌های سطحی در خاک آلوده را نیز ارزیابی کردند. آزمایش‌ها در دو حالت سست و متراکم به ترتیب با تراکم نسبی ۴۵ و ۷۵ درصد انجام گرفت. آن‌ها دریافتند که با افزایش درصد نفت زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد، به طوری که در ۶ درصد نفت خام برای نمونه‌های متراکم زاویه اصطکاک داخلی تا ۲۵ درصد کاهش یافته است. آن‌ها پس از آزمایش‌های مدل‌سازی نتیجه گرفتند که در نمونه‌های سست و متراکم با افزایش آلودگی نفتی

ظرفیت باربری کاهش می‌یابد، که این کاهش در نمونه‌های متراکم بیشتر است. درصد کاهش ظرفیت باربری برای نمونه‌ی آلوده به ۶ درصد نفت خام در حالت سست و متراکم به ترتیب ۶۰ و ۸۰ درصد می‌باشد [۴].

محمدی اکبرآبادی و همکاران در سال ۲۰۱۰ به منظور بررسی میزان تأثیر نفت خام بر پارامترهای مقاومتی خاک ماسه رس دار، از آزمایش‌های برش مستقیم استفاده کردند. آزمایش بر روی نمونه‌های غیر آلوده و آلوده با درصدهای ۲، ۴ و ۶ درصد نفت خام انجام شده است. آن‌ها دریافتند که توانایی نفت خام در تحمل نیروهای برشی بیشتر از آب می‌باشد، به همین دلیل در هنگام برش، نفت خام جدا از ذرات خاک نیروی برشی تحمل کرده و همین امر باعث افزایش چسبندگی خاک می‌شود. آن‌ها همچنین گزارش نمودند که کاهش اولیه اصطکاک داخلی به دلیل این است که نفت خام سطح ذرات خاک را پوشانده و همچون یک لغزان کننده عمل کرده و در نتیجه قفل و بست بین دانه‌ها کمتر می‌شود [۵].

وگیام و اسماعیل در سال ۲۰۱۰ به بررسی نشت نفت از خط لوله‌ای که در مجاورت یک پایه پل که در زیر آن شمع وجود دارد، پرداختند. درصد آلودگی خاک محل به‌طور متوسط ۱۰ درصد تعیین گردید. آن‌ها با انجام آزمایش‌های تک‌محوری و برش مستقیم پارامترهای مقاومتی خاک تمیز و آلوده به نفت را به دست آوردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش مقدار آلودگی کرنش محوری گسیختگی افزایش یافته است. این محققین مشاهده نمودند که با افزایش مقدار آلودگی، زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین گزارش نمودند که مدول الاستیسیته با افزایش مقدار نفت و کاهش تراکم نسبی کاهش می‌یابد، که بالاترین نرخ این کاهش از صفر تا ۵ درصد آلودگی است و بعد از ۵ درصد نفت این نرخ با افت روبرو است. علاوه بر این مشخص گردید که با افزایش تراکم نسبی تأثیر آلودگی بر مدول الاستیسیته چشم‌گیرتر است [۶].

وثوقی و حسنلو در سال ۲۰۱۴ با انجام آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی شده و زهکشی نشده روی ماسه کربناته چابهار که با ۲، ۶، ۱۰ و ۱۲ درصد نفت خام آلوده شده بود، در دو حالت سست و متراکم پارامترهای مقاومت برشی آن را مورد بررسی قرار داد. او اشاره می‌کند که مقاومت برشی حداکثر و زاویه اصطکاک داخلی کل با افزایش درصد آلودگی کاهش پیدا کرده است، به طوری که در ۱۰ درصد

درصد مقاومت تک محوری و زاویه اصطکاک نمونه‌ها به ترتیب ۳۴ و ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. آنها مشاهده نمودند که با افزایش مقدار سیمان از ۶ تا ۱۶ درصد در مقدار آلودگی ثابت، مقاومت تک محوری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۱/۶، ۱/۴ و ۱/۰۵ برابر شده است. همچنین با افزایش درصد آلودگی از ۸ تا ۱۴ درصد در درصد سیمان ثابت، مقاومت تک محوری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۲، ۱/۸ و ۱/۱ برابر کاهش یافته است [۱۰].

زمردیان و همکاران در سال ۲۰۱۷ با انجام یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی خاک CL تأثیر آلودگی نفت سفید بر مقاومت خاک تمیز و همچنین بهبود مقاومت و سختی خاک تمیز و آلوده به درصد‌های مختلف نفت سفید با استفاده از نانورس و نانوسیلیس به عنوان مواد افزودنی به طور مستقل و ترکیبی از هر دو، مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند مقاومت تک محوری نمونه‌های آلوده به ۲ و ۴ درصد نفت سفید تقریباً مشابه است، اما با افزایش مقدار نفت سفید (۸ و ۱۲ درصد وزنی) مقاومت و سختی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. آنها مشاهده نمودند با استفاده از ۰/۵ تا ۲/۵ درصد نانورس یا نانوسیلیس بهبود قابل توجهی در مقاومت و سختی خاک رس تمیز رخ داد [۱۱].

استفاده از سیلیس کلئیدی در تثبیت خاک به طور گسترده‌ای در دو دهه گذشته مطالعه شده است. لیاو و همکاران در ۲۰۰۳ با انجام آزمایش برش پره مقاومت سیلیس کلئیدی خالص را اندازه‌گیری کردند. مقاومت به دست آمده از مقدار ۶ کیلوپاسکال در هفتمین روز گیرش به مقدار ۱۸ کیلوپاسکال در روز بیست و هشتم افزایش یافت. همچنین مقاومت‌های متناظر با این زمان‌ها برای خاک تزریق شده از مقدار ۱۱۳ کیلوپاسکال به ۱۴۱ کیلوپاسکال رسید [۱۲].

گالاگر و میچل در سال ۲۰۰۲، ماسه 30/0 Monterey را با سیلیس کلئیدی Ludox SM با درصد وزنی ۵ تا ۱۵ تثبیت و مقاومت فشاری محدود نشده ۳۲ تا ۱۱۰ کیلوپاسکال را اندازه‌گیری کردند. علاوه بر درصد نانوسیلیس، دومین عامل در کسب مقاومت مدت زمانی بود که نمونه پیش از آزمایش و پس از تثبیت در حال گیرش ماند [۱۳].

کمنزولی و گور در سال ۲۰۱۳ به مطالعه تحقیقات گذشته در رابطه با بی‌حرکتی^۱ و کپسوله‌سازی^۲ آلاینده‌ها با استفاده از اصلاح

آلودگی نفتی زاویه اصطکاک داخلی ۱۰ درصد کاهش یافته است. وثوقی همچنین دریافت که مدول الاستیسیته سکانتی ۵۰ درصد با افزایش مقدار نفت خام کاهش پیدا کرده است، به‌عنوان مثال، در تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال با افزایش آلودگی ۱۲ درصد در حالت متراکم مدول سکانتی ۶۳ درصد کاهش یافته است، که این موضوع نشان دهنده نشست بیشتر سازه‌ها در اثر آلوده شدن خاک به نفت خام است [۷].

ناصحی و همکاران در سال ۲۰۱۶ روی تأثیر گازوئیل بر خصوصیات سه نوع خاک SP، ML و CL مطالعه نمودند. آنها در این راستا آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت تک محوری و برش مستقیم را انجام دادند. نتایج نشان داد که با افزایش آلودگی زاویه اصطکاک کاهش و چسبندگی افزایش می‌یابد و همچنین رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک نیز کاهش می‌یابد [۸].

الرواس و همکاران در سال ۲۰۰۵ به بررسی تثبیت خاک‌های آلوده به نفت با سیمان پرداختند. آن‌ها سه نوع خاک طبیعی شمال عمان، خاک آلوده به نفت و خاک آلوده به نفتی که به روش بیولوژیکی اصلاح شده بود را برای آزمایش انتخاب کردند. آن‌ها دریافتند مقدار کمتر از ۳ درصد نفت به‌عنوان یک روان‌کننده عمل کرده و در درصد رطوبت پایین‌تر، تراکم بالاتری حاصل می‌شود، ولی مقدار زیاد نفت (حدود ۱۲ درصد) فضاهای خالی را پر کرده و باعث کاهش تراکم می‌شود. همچنین با افزودن سیمان به هر سه نمونه خاک کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک و افزایش درصد رطوبت بهینه مشاهده شد. علاوه بر این، افزودن سیمان باعث افزایش چسبندگی و در نتیجه افزایش مقاومت خاک‌ها گردید؛ ولی روند خاصی برای تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با درصد سیمان دیده نشد. آن‌ها همچنین مشاهده کردند با افزایش سیمان به هر سه نوع خاک مقاومت تک‌محوری افزایش یافته و با بیشتر شدن درصد سیمان مقاومت تک‌محوری افزایش یافته است [۹].

صابریان و خبیری در سال ۲۰۱۶ ابتدا به بررسی تأثیرات گازوئیل بر خصوصیات خاک ماسه ای منطقه حفاظت شده کلمند یزد در ایران پرداختند، و سپس این خاک ماسه ای آلوده به گازوئیل را با سیمان پرتلند معمولی اصلاح نموده و بهبود خصوصیات خاک را مورد بررسی قرار دادند. آنها با توجه به نتایج آزمایش‌های تک محوری و برش مستقیم دریافتند که با افزایش مقدار گازوئیل از صفر تا ۸

1 Immobilization
2 Encapsulation

مدول ارتجاعی خاک ماسه کربناته متراکم مورد بررسی قرار گرفت تا میزان تغییرات مشخص گردد، سپس با تزریق محلول نانوسیلیس که ویسکوزیته آن شبیه به آب است، به ارزیابی میزان افزایش مقاومت و به‌ویژه مدول ارتجاعی پرداخته شد.

۲- مصالح مورد استفاده

خاک استفاده شده در این تحقیق از جنس ماسه کربناته است که از ساحل بندر بوشهر در شمال خلیج فارس به‌دست آمده است. با توجه به این‌که تهیه نمونه دست‌نخورده از ماسه‌ها بسیار مشکل و تا حدودی غیرممکن است نمونه‌گیری به‌صورت دست‌خورده انجام گرفته و سپس نمونه‌ها در آزمایشگاه بازسازی شده‌اند. با انجام آزمایش XRF درصد کربنات ماسه مورد نظر ۵۰/۳۵ بدست آمد. نتایج آزمایش XRF در جدول ۱ آمده است. منحنی دانه‌بندی مربوط به خاک ماسه کربناته در شکل ۱ نشان داده است. با استناد به منحنی دانه‌بندی مقدار ضریب یکنواختی C_{μ} و ضریب انحناء C_c خاک مورد استفاده به ترتیب ۲/۶۱ و ۱/۱۱ بدست آمد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این خاک در طبقه‌بندی یونیفاید جزء ماسه‌های با دانه‌بندی یکنواخت SP طبقه‌بندی می‌گردد. مشخصات کلی خاک ماسه کربناته بوشهر

جدول ۱. نتایج آزمایش XRF خاک ماسه کربناته مورد استفاده

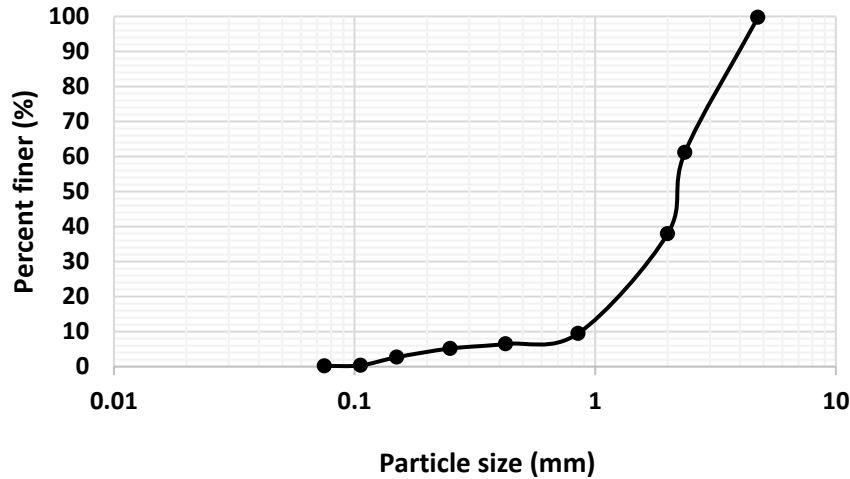
Table 1. XRF results of experiment on Bushehr carbonate sand

عناصر	درصد
SiO ₂	۲/۳۴۷
Al ₂ O ₃	۰/۳۵۴
Fe ₂ O ₃	۰/۷۶۷
CaO	۵۹/۳۴۹
Na ₂ O	۰/۷۶۹
MgO	۲/۴۵۰
K ₂ O	۰/۲۱۹
TiO ₂	۰/۰۳۸
MnO	۰/۰۵۰
P ₂ O ₅	۰/۱۲۰
LOI	۴۲/۴۷۰

سیلیس پرداختند. آن‌ها اشاره می‌کنند که بهسازی با سیلیس آلودگی را از محیط‌زیست حذف نمی‌کند، اما هر دو آلاینده (فلزات سنگین و هیدروکربن‌ها) را به اشکال کمتر خطرناک تغییر می‌دهد و آن‌ها را به دام می‌اندازد، هیدروکربن‌های محصور شده توسط بهسازی با سیلیس از لحاظ زیست‌محیطی بی‌خطر و در برابر تجزیه حتی در محیط‌های با pH پایین (به‌عنوان مثال $pH \leq 4$) مقاوم هستند. آن‌ها همچنین ذکر می‌کنند که واکنش‌های شیمیایی تشکیل کانی‌های فلزی سیلیکات و کپسوله سازی هیدروکربن‌ها که پس از اصلاح خاک آلوده رخ می‌دهد را تسریع می‌کنند، که آلودگی‌های فلزی به مواد فلزی سیلیکات و مواد هیدروکربنی توسط سطح میکروسکوپی سیلیس محصور شده و در نتیجه آلودگی بی‌حرکت و محصور می‌شود. کم‌نزولی و گور در نهایت دریافتند که این تثبیت و محصورشدگی مانع از انتشار و همچنین کاهش اثرات منفی بالقوه آلاینده‌ها در محیط‌زیست می‌شود [۱۴].

پژوهشی در رابطه با کپسوله سازی هیدروکربن‌ها با سیلیس توسط ام‌بی‌هیل در سال ۲۰۰۷ انجام شد. او در پژوهش خود دریافت که کپسوله سازی هیدروکربن‌ها در همه خاک‌ها در ظرف دو روز از عملیات بهسازی آشکار می‌شود، ولی در محیط اسیدی، خاک‌های ماسه‌ای و زمانی که قبل از بهسازی با سیلیس سورفکتانت اعمال شود، مؤثرتر می‌باشد. او همچنین متذکر می‌شود که مک داوول نتایج مشابهی را گزارش کرده است و دریافت که بهسازی با سیلیس، انتشار هیدروکربن‌های نفتی را در حدود ۹۹/۸ درصد در خاک‌های ماسه‌ای و ۹۵ درصد در خاک‌های رسی کاهش می‌دهد [۱۵].

با جمع‌بندی مطالعات انجام گرفته در گذشته، می‌توان دریافت که آلاینده‌های نفتی به عنوان یک عامل آلودگی زیست‌محیطی بر مشخصات ژئوتکنیکی خاک تأثیر می‌گذارد و موجب کاهش مقاومت و ظرفیت باری و همچنین افزایش نشست آن می‌گردد. از طرفی مواد افزودنی برای تثبیت و بهسازی خاک‌های آلوده به مواد نفتی با آن‌ها مخلوط شده است و به صورت سطحی مورد مطالعه قرار گرفته و تحقیقی در مورد اثر تزریق نانوسیلیس بر بهسازی مشخصات رفتار مکانیکی خاک‌های ماسه کربناته انجام نشده است. در تحقیق پیش رو فرض بر این است که یک لایه خاک متراکم (مانند خاک زیر مخازن نفتی) پس از انتشار آلودگی نفتی با سیلیس کلئیدی تثبیت شود. لذا در این تحقیق ابتدا تأثیر نفت بر پارامترهای مقاومت برشی و



شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک ماسه کربناته ی بوشهر
 Fig. 1. Particle size distribution of Bushehr carbonate sand

بستگی دارد [۱۷]. کوتاه‌ترین زمان ژل‌شدگی در محدوده $5 < \text{pH} < 7$ رخ می‌دهد و خارج از این محدوده به شدت این زمان می‌تواند افزایش یابد [۱۷، ۱۸]. قدرت یونی یک محلول مقیاسی از غلظت یون‌های موجود در آن محلول است. ترکیبات یونی هنگامی که در آب حل می‌شوند، به صورت یون‌های جدا شده درمی‌آیند. در واقع قدرت یونی تابعی از غلظت همه یون‌های موجود در محلول می‌باشد، نمک‌هایی مانند کلرید سدیم و کلرید آمونیوم برای کنترل ژل‌شدگی محلول سیلیس کلوئیدی استفاده شده‌اند. جوریناک و سامرز در سال ۱۹۹۱ در یک مطالعه آزمایشگاهی نشان دادند که افزایش غلظت نمک کلرید سدیم از ۰/۰۵ به ۰/۲ مول باعث کاهش زمان ژل‌شدگی از ۷/۵ ساعت به ۱/۲ ساعت برای ۱۰ درصد وزنی سیلیس کلوئیدی با $\text{pH} = 7/5$ شد [۱۸]. در جدول ۳ مشخصات دوغاب سیلیس کلوئیدی مورد

جدول ۲. خصوصیات منحنی دانه‌بندی ماسه کربناته بوشهر
 Table 2. Circumstances of Particle size distribution of Bush-
 ehr carbonate sand

G_S	C_C	C_U	D_{10}	D_{30}	D_{60}	e_{min}	e_{max}
۲/۷۴	۱/۱۱	۲/۶۱	۰/۹	۱/۷	۲/۳۵	۰/۶۵	۰/۹۸

در جدول ۲ ارائه شده است. نفت خام مورد استفاده در این تحقیق از پالایشگاه تهران تهیه شده است.

سیلیس کلوئیدی سوسپانسیونی از نانوذرات سیلیس است که در آب یا محلولی دیگر معلق است. این ماده از نظر زیست‌محیطی و شیمیایی غیرسمی بوده و دارای دوام بالایی است و ویسکوزیته‌ای شبیه به آب دارد. سیلیکای کلوئیدی، تعلیقی کلوئیدی^۱ است که فاز پیوسته‌ی آن آب و ذرات پراکنده آن نانوذرات سیلیس است، و در صورتی پایدار تلقی می‌شوند که رسوب نکنند و یا کلوخه شدن در آن‌ها با سرعت کم رخ دهد. هنگامی که ذرات کلوئیدی جامد معلق در مایعی مانند آب، زنجیره‌ی متصلی را تشکیل دهند ژل‌شدگی رخ خواهد داد و سپس شبکه‌ای سه‌بعدی و یکنواخت تشکیل می‌دهد و این روند ادامه می‌یابد تا فرآیند کامل شود [۱۶].

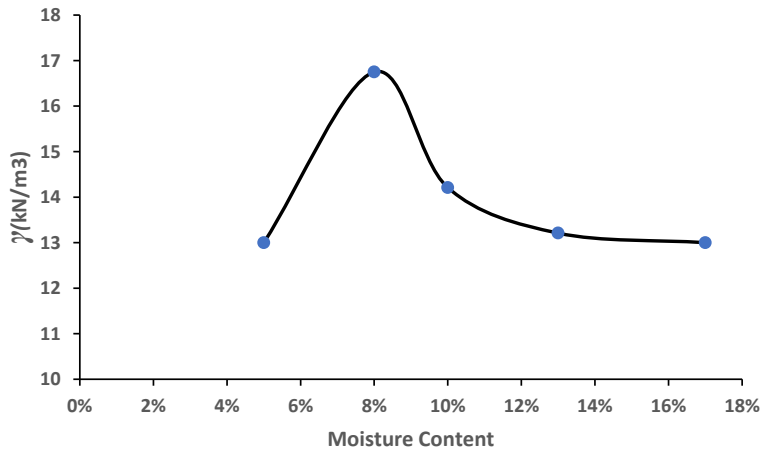
زمان ژل‌شدگی نانو سیلیس بستگی دارد به نرخ برهم‌کنش ذره به ذره آن‌که به عواملی مختلف مانند درصد سیلیس در محلول اندازه ذرات نانو سیلیس، مقاومت یونی، pH و درجه ی حرارت محلول

جدول ۳. مشخصات محلول سیلیس کلوئیدی مورد استفاده در این تحقیق

Table 3. Characteristics of colloidal silica used in this study

مقادیر	کمیت
۳۰٪	درصد وزنی نانو سیلیس
۹/۵-۱۰	pH
۹/۳-۱۰/۱	متوسط قطر ذرات (نانو متر)
۱/۲	جرم مخصوص در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

1 Colloidal Suspension



شکل ۲. منحنی تراکم خاک کربناته بوشهر

Fig. 2. Standard proctor test of Bushehr carbonate sand

خاک مرطوب آلوده به نفت با کوبش خاک، ارتفاع لایه مورد نظر به علامت از پیش تعیین شده بر روی قالب رسانده شد. لذا تمامی نمونه‌ها دارای دانسیته خشک متناظر با ۸۵ درصد تراکم هستند و تنها در میزان آلودگی آن‌ها تفاوت وجود دارد. لذا نمونه‌های مختلف شرایط یکسانی از لحاظ ساخت نمونه و تراکم را دارا بودند. نمونه‌های تزریق نشده به طور مستقیم درون قالب دستگاه سه محوری ساخته شدند. همچنین نمونه‌های آلوده به نفت نیز به دلیل وجود خودایستایی ناشی از وجود نفت و وجود تلق در قالب نمونه‌سازی نیاز به تمهید خاصی جهت انتقال به قالب سه محوری نداشتند. آزمایش سه محوری در شرایط تحکیم نیافته-زهکشی نشده با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه با تنش‌های همه جانبه ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ کیلوپاسکال انجام شده است. طبق استاندارد ASTM D 2850-87، حداقل سرعت برای خاک‌های چسبنده که دارای نفوذپذیری کوچک هستند، ۰/۳ درصد طول نمونه بر دقیقه است. با توجه به ارتفاع ۱۴ سانتی‌متری نمونه و همچنین نفوذپذیری کوچک خاک تثبیت شده سرعت بارگذاری برابر با ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد تا در صورت رفتار ترد رفتار تنش-کرنش به صورت کامل ثبت شود. از طرف دیگر، برای قابل مقایسه بودن نمونه‌های مختلف، نمونه‌های ماسه ای نیز با سرعت مشابه بارگذاری شدند. پس از آماده‌سازی محلول سیلیس کلئیدی با توجه به ویسکوزیته‌ی پایین این محلول برای تزریق در نمونه‌های ماسه‌ای تمیز و آلوده به نفت از گرا دیان پایین استفاده شد تا در حد امکان بافت خاک تغییر نکنند. شکل ۲ نمایی از نحوه قالب بندی برای تزریق، محفظه‌های ورودی و خروجی و نمونه آلوده به نفت را که آماده

استفاده در این تحقیق ارائه شده که از شرکت متالورژی صنعت آسان تک تهیه گردیده است.

نمونه‌های خاک در درصدهای آلاینده‌ی صفر، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ درصد و تراکم نسبی ۸۵ درصد آماده شدند. درصدهای آلودگی به منظور مقایسه با تحقیقات گذشته انتخاب شد [۷]. برای دستیابی به مقادیر بالای آلودگی (وجود حجم حفرات کافی) و همچنین تغییر نکردن منحنی دانه‌بندی خاک کربناته محل بر اثر تراکم نمونه‌ها درصد تراکم نسبی ۸۵ درصد انتخاب شد. شکل ۲ منحنی تراکم خاک را نشان می‌دهد. رطوبت بهینه ۸ درصد و دانسیته خشک بیشینه ۱۶/۷۵ کیلونیوتن بر مترمکعب است.

برای ماسه تمیز، ابتدا ماسه به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه خشک شد. در روش نمونه سازی سعی شد که شرایط کارگاهی (نشت آلاینده نفت خام به درون خاک متراکم) مدل سازی شود. بنابراین، برای آن که امکان اضافه نمودن آلاینده نفتی در درصدهای بالا مانند ۱۲ درصد به نمونه خاک متراکم فراهم گردد؛ امکان انجام آزمایش در رطوبت بهینه میسر نبوده و لذا از درصد تراکم ۸۵ درصد برای این منظور استفاده شده است که این امر در کار سایر محققین نیز مورد توجه و استفاده قرار گرفته است [۲، ۴]. در این راستا، دانسیته خشک تمامی نمونه‌ها ثابت بوده و برای تراکم ۸۵ درصد از روی شاخه خشک منحنی تراکم برابر ۱۴/۲ کیلونیوتن بر مترمکعب در درصد رطوبت متناظر ۶ درصد به دست آمده است. سپس قالب نمونه سازی به ۷ قسمت مساوی علامت گذاری شد. وزن خشک هر قسمت جداگانه محاسبه و با ۶ درصد رطوبت و آلودگی موردنظر مخلوط شد. در ادامه پس از ریختن



شکل ۳. تصویر قالب دوتکه، محفظه‌ی قرار گرفته در دو سر قالب برای تزریق و نمونه آماده تزریق
 Fig. 3. The picture of two slice mold and two caps at the endings to inject the prepared sample

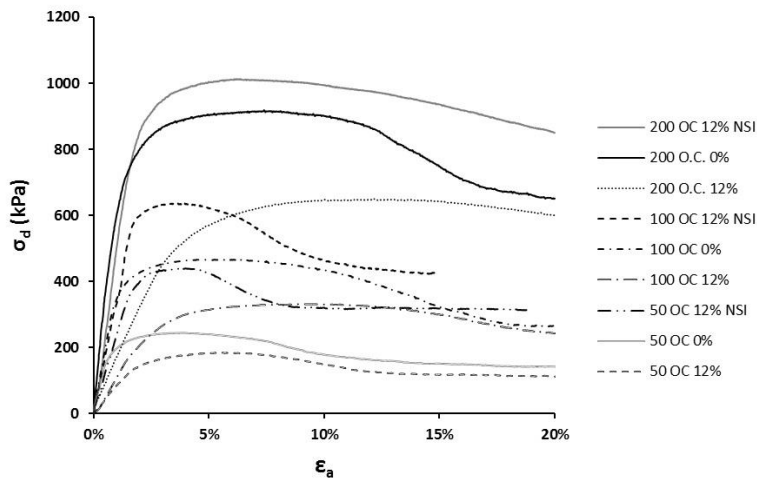
با محلول سیلیس کلئیدی) در فرآیند تزریق بود. پس از گیرش تعدادی از نمونه‌ها برای تعیین میزان آب موجود در آن گذاشته شدند که اُفت وزنی در نمونه‌ها مشاهده نشد. لذا تمامی رطوبت

تزریق است؛ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، با تنظیم شیرهای ورودی و خروجی در ابتدا و انتهای نمونه و همچنین ارتفاع هیدرواستاتیکی محلول نانو سیلیس می‌توان میزان دبی ورودی به نمونه آلوده به نفت را تا حد امکان کاهش داد. پس از تزریق، سیال خروجی در مقاطع زمانی متفاوت نمونه‌گیری شد و مدت ۲۴ ساعت در آن گذاشته شد. با توجه به آنکه نفت خام غیر قابل اشتعال بوده و نقطه جوش آن از آب بزرگتر است؛ سیال باقی مانده در ظروف پس از حرارت دیدن، نفت خام خواهد بود. در هیچ از یک نمونه‌های سیال حرارت دیده نفت باقی نمانده بود که نشان دهنده عدم خروج نفت از نمونه بوده است. برای اطمینان از یکنواختی نمونه پس از گیرش، پیش از نمونه‌های سه محوری، چند نمونه به صورت قطعه قطعه درآمد و وزن شدند. وزن قطعه‌ها اختلاف ناچیزی داشته که نشان دهنده توزیع یکنواخت سیلیس کلئیدی در طول نمونه است.



شکل ۴. نمای کلی سیستم بارگذاری نمونه‌های تزریق شده در دستگاه سه‌محوری
 Fig. 4. The general scheme of triaxial apparatus to load injected samples

برای اطمینان یافتن از اشباع بودن نمونه خاک پس از تزریق، نمونه خاک به قطعات یکسان تقسیم شده و وزن کل قطعه پس از تزریق اندازه‌گیری شده است. با توجه به اندازه‌گیری وزن نمونه ماسه اولیه و پس از آغشته شدن آن به نفت و مشخص بودن حجم نمونه؛ بر اساس محاسبات وزنی - حجمی میزان سیلیس کلئیدی موجود در هر قطعه محاسبه گردید. با توجه به مشخص بودن وزن مخصوص سیلیس کلئیدی، حجم متناظر با آن در هر قطعه محاسبه شد و با حجم حفرات وجود در نمونه قبل از تزریق مقایسه گردید. نتیجه این مقایسه نشان دهنده پر شدن کلیه منافذ خالی نمونه خاک آغشته به نفت توسط سیلیس کلئیدی (حصول شرایط اشباع نمونه



شکل ۵. نمودار تنش- کرنش نمونه‌های تمیز، آلوده به ۱۲ درصد نفت قبل از تزریق در تنش‌های همه جانبه (آلوده به ۱۲ درصد وزنی نفت 12% O.C.) و بعد از تزریق محلول سیلیس کلونیدی (O.C 12% N.S.I)

Fig. 5. Stress - Strain diagram of clean sand, contaminated sand with 12% oil and injected specimens under different confining pressure at 50, 100 and 200 kPa

جدول ۴. مقادیر تنش انحرافی حداکثر برای نمونه‌های آلوده و غیر آلوده به نفت در سه تنش همه جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال

Table 4. The peak deviatoric stresses for all clean sand and contaminated specimens under different confining pressure at 50, 100 and 200 kPa

σ_{dp} (kPa) at Oil Contamination (%)					σ_{cell} (kPa)
٪۱۲	٪۹	٪۶	٪۳	٪۰	
۱۸۵	۲۰۲	۲۱۲	۲۳۸	۲۵۳	۵۰
۳۳۳	۳۶۴	۴۰۱	۴۵۱	۴۷۷	۱۰۰
۶۴۵	۷۰۰	۷۶۸	۸۶۷	۹۳۰	۲۰۰

۳- نتایج آزمایش‌ها

۳-۱- تنش انحرافی حداکثر

در شکل ۵ نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های ماسه‌ای تمیز و آلوده به ۱۲ درصد نفت قبل و بعد از تزریق سیلیس کلونیدی در تنش‌های همه جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال ارائه شده است. در این شکل می‌توان مشاهده نمود که آلودگی نفتی باعث کاهش مقاومت حداکثر و همچنین کاهش شیب نمودار تنش-کرنش که نشان دهنده‌ی کاهش مدول الاستیسیته است، گردیده است. پس از تزریق محلول سیلیس کلونیدی در نمونه‌ی آلوده به نفت مشاهده می‌شود که علاوه بر افزایش مقاومت حداکثر این نمونه، شیب نمودار تنش-کرنش نیز نسبت به نمونه‌ی آلوده‌ی قبل از تزریق افزایش یافته است که مؤید افزایش مدول الاستیسیته است.

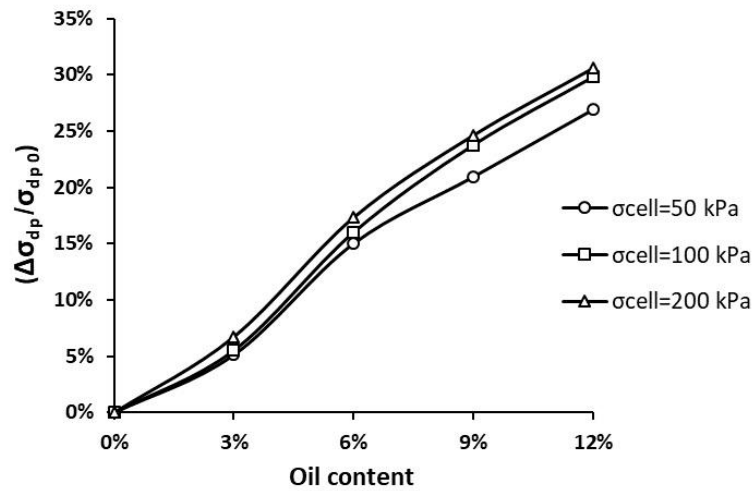
در جدول ۴ مقادیر حداکثر تنش انحرافی برای درصدهای مختلف نفت در سه تنش همه‌جانبه ارائه شده است. همان‌طور که مشخص

موجود، در فرآیند ژل شدگی مشارکت داشته است. پس از تزریق، به منظور گیرش محلول سیلیس کلونیدی نمونه‌ها به مدت یک ماه در محیط آزمایشگاه و در قالب همراه با درپوش نگه داشته شد و امکان تبادل رطوبت وجود نداشت. پس از این مدت، نمونه‌ها در دستگاه سه محوری قرار گرفته و در سه تنش همه‌جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال مورد آزمایش سه‌محوری تحکیم نیافته-زهکشی نشده قرار گرفتند. هدف از انجام آزمایش مقاومت سه محوری، دستیابی به مقاومت برشی uniaxial در فشارهای همه جانبه متفاوت بوده است. با توجه به آن که اندازه‌گیری این مقاومت برای نمونه‌های ماسه تمیز در دستگاه تک محوری و مقاومت محصور نشده وجود ندارد از دستگاه سه محوری استفاده شده است. لذا تمامی نمودارها در فضای تنش کل رسم و ارائه شدند و فشار آب حفره ای اندازه‌گیری نشده است. شکل ۴ تصویر آزمایش سه محوری را بر روی نمونه‌های تزریق شده نشان می‌دهد.

می‌توان دریافت که افزایش مقدار نفت تا ۱۲ درصد، در تنش‌های همه‌جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۲۷، ۳۰ و ۳۱ درصد کاهش در مقاومت برشی حداکثر رخ می‌دهد.

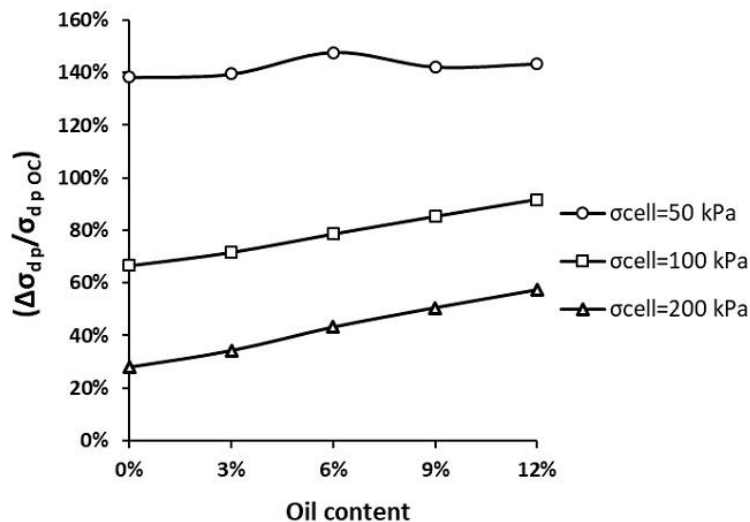
شکل ۷ نمودار درصد افزایش مقاومت برشی حداکثر در اثر تزریق محلول نانوسیلیس در سه تنش همه‌جانبه را نشان می‌دهد. با مقایسه نمونه‌های ماسه آلوده به نفت قبل و پس از تزریق می‌توان دریافت که، تزریق نانوسیلیس در نمونه‌های آلوده به درصدهای مختلف نفت خام باعث افزایش تنش انحرافی حداکثر گردیده و در نتیجه افزایش

است با افزودن شدن نفت خام به ماسه کربناته تمیز از ۳ تا ۱۲ درصد، مقدار تنش انحرافی حداکثر در هر سه تنش همه‌جانبه کاهش یافته است. برای بررسی دقیق‌تر کاهش مقاومت برشی حداکثر نمونه‌های آلوده به نفت خام نسبت به نمونه‌های تمیز شکل ۶ ارائه شده است که حاوی نمودار درصد کاهش مقاومت برشی حداکثر نمونه‌های آلوده به نفت است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که کاهش مقاومت برشی حداکثر با افزایش آلودگی از ۳ تا ۱۲ درصد دارای شیب بیشتری است. با بررسی کمی درصد کاهش تنش انحرافی حداکثر



شکل ۶. نمودار درصد کاهش مقاومت حداکثر نمونه‌های ماسه‌ای در برابر درصد نفت در تنش‌های همه‌جانبه متفاوت

Fig. 6. Reduction percentage of peak deviatoric stress after contamination



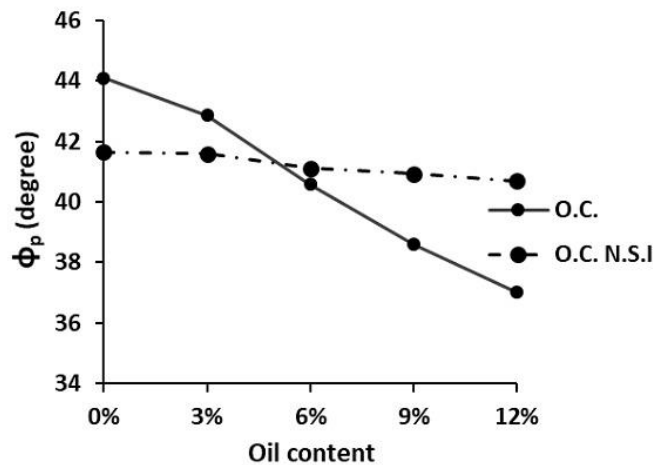
شکل ۷. نمودار درصد افزایش مقاومت برشی حداکثر نمونه‌های ماسه‌ای آلوده به نفت پس از تزریق نسبت به قبل از تزریق در برابر درصد آلودگی نفتی

Fig. 7. Surge percentage of peak deviatoric stress after injection of colloidal silica

جدول ۵. زاویه اصطکاک داخلی حداکثر برای برای نمونه‌های ماسه‌ای تمیز، آلوده به نفت پیش از تزریق و پس از تزریق

Table 5. Variation of internal frictional angle for all specimens

درصد آلودگی نفتی				
٪۱۲	٪۹	٪۶	٪۳	٪۰
۳۷/۰	۳۸/۶	۴۰/۶	۴۲/۹	۴۴/۱
۴۰/۷	۴۰/۹	۴۱/۱	۴۱/۶	۴۱/۷



شکل ۸. نمودار زاویه اصطکاک داخلی در برابر درصد نفت در نمونه‌های ماسه‌ای قبل (oc. oil contaminated) و بعد از تزریق سیلیس کلونیدی (O.C.N.S.I)

Fig. 8. Variation of internal frictional angle after contaminating and stabilization

را نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد آلاینده نفتی مقدار زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته است. این میزان کاهش در مقادیر آلاینده‌ی کمتر از ۳ درصد شیب کمتری داشته و با افزایش آلاینده از ۳ تا ۱۲ درصد با شیب بیشتر و به صورت خطی افزایش یافته است. حداکثر کاهش زاویه اصطکاک داخلی در آلودگی ۱۲ درصد با ۱۶ درصد کاهش رخ داده است. به بیان دقیق‌تر با افزودن نفت به خاک لغزش ذرات بر روی هم افزایش یافته و در نتیجه اصطکاک بین ذرات کاهش یافته است و نفت به‌عنوان یک ماده لغزاننده برای ذرات خاک عمل کرده است که موجب کاهش زاویه اصطکاک داخلی شده است.

با توجه به این شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد نفت خام مقدار زاویه اصطکاک داخلی حداکثر در نمونه‌های تزریق شده نیز مانند نمونه‌های نفتی کاهش یافته اما این کاهش اندک بوده است. با مقایسه دو حالت تزریق شده و نفتی می‌توان دریافت در نمونه تمیز و آلوده تا ۳ درصد نفت در اثر تزریق زاویه اصطکاک کمتر از نمونه‌های قبل از تزریق می‌باشد. در مقادیر بیش از ۳ درصد نفت خام، زاویه

مقاومت برشی حاصل شده است. با توجه به این نمودار می‌توان نتیجه گرفت با افزایش درصد نفت خام موجود در نمونه‌ها درصد افزایش مقاومت برشی حداکثر در اثر تزریق محلول سیلیس کلونیدی نیز افزایش یافته است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که میزان افزایش مقاومت برشی حداکثر در تنش همه‌جانبه ۵۰ کیلوپاسکال به‌مراتب بیشتر از تنش‌های همه‌جانبه ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال بوده است، این اثر به دلیل افزایش چسبندگی در تغییر مقاومت خاک است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که اثر تزریق در افزایش مقاومت خاک در عمق‌های کم بیشتر از عمق‌های زیاد است.

۳-۲- زاویه اصطکاک داخلی حداکثر

در جدول ۵ مقدار زاویه اصطکاک داخلی حداکثر نمونه‌های ماسه آلوده به درصد نفت و مقدار زاویه اصطکاک داخلی حداکثر این نمونه‌ها پس از تزریق ارائه گردیده است. در شکل ۸ نمودار زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های آلوده به نفت و همچنین زاویه اصطکاک داخلی این نمونه‌ها پس از تزریق، در برابر درصد‌های مختلف نفت خام

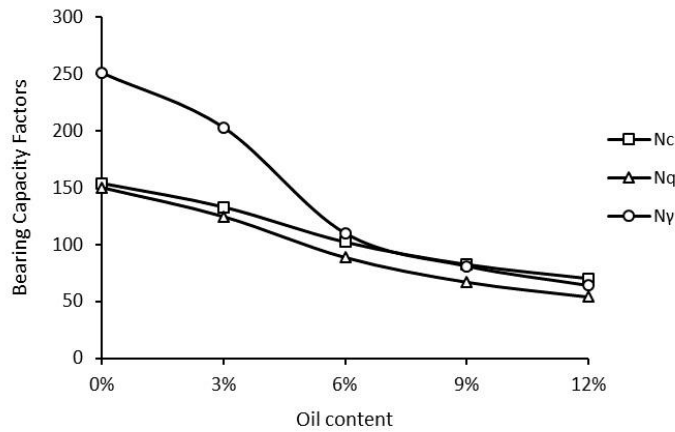
کاهش قابل توجه ظرفیت باربری شالوده‌های سطحی می‌گردد.

اصطکاک نمونه‌ها در اثر تزریق افزایش یافته است.

ترزاقی در نظریه ظرفیت باربری که در سال ۱۹۴۳ مطرح نمود، از ضرایب N_c ، N_q و N_γ که با زاویه اصطکاک داخلی خاک رابطه دارد؛ استفاده نمود. از طرفی این ضرایب در مقدار ظرفیت باربری شالوده‌های سطحی دخیل است. با کاهش زاویه اصطکاک، ضرایب باربری یاد شده کاهش یافته و در نتیجه ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. شکل ۸ ضرایب باربری N_c ، N_q و N_γ را نشان می‌دهد که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار آلودگی و در نتیجه کاهش زاویه اصطکاک، این ضرایب کاهش می‌یابند. در ۱۲ درصد آلودگی نفتی ضرایب N_c ، N_q و N_γ به ترتیب ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۹۲ درصد کاهش یافته‌اند. در مجموع می‌توان گفت افزایش نفت خام به ماسه کربناته منجر به

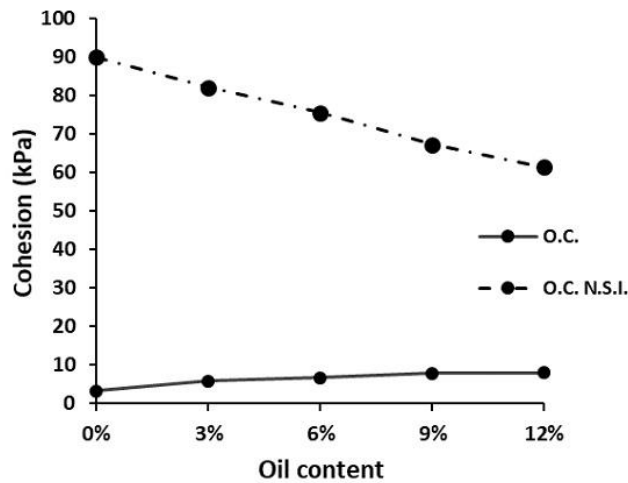
۳-۳- چسبندگی

نمودار مقدار چسبندگی نمونه‌های ماسه‌ای آلوده به نفت قبل و بعد از تزریق در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که اثر تزریق در افزایش چسبندگی نمونه‌ها با افزایش درصد آلاینده نفتی کاهش یافته است. در شکل ۱۰ همچنین می‌توان دریافت تزریق محلول نانوسیلیس در نمونه‌های تمیز و آلوده به نفت خام باعث افزایش چشم‌گیر چسبندگی آن‌ها شده است. این افزایش چسبندگی دلیل افزایش مقاومت برشی حداکثر، با وجود کاهش زاویه اصطکاک داخلی، در نمونه‌های تمیز و با ۳ درصد آلودگی نفتی است.



شکل ۹. نمودار ضرایب باربری ترزاقی در برابر درصد آلودگی

Fig. 9. Variation of Terzaghi bearing capacity factors versus contamination



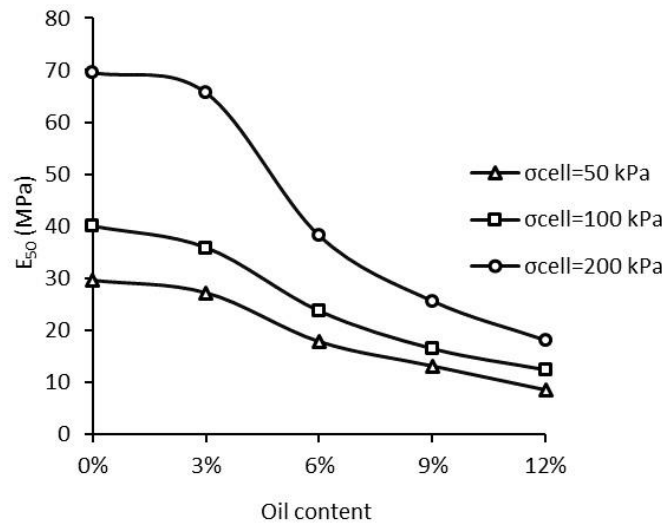
شکل ۱۰. نمودار مقدار چسبندگی در برابر درصد آلودگی در نمونه‌های قبل و بعد از تزریق

Fig. 10. Variation of cohesion after contaminating and stabilization

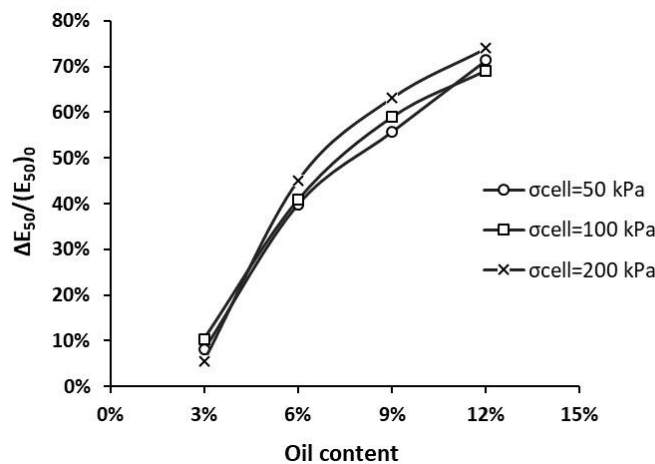
۳-۴- مدول ارتجاعی ۵۰ درصد

در تحقیق حاضر از روش مدول ارتجاعی ۵۰ درصد برای تعیین مدول ارتجاعی نمونه‌ها استفاده گردیده است. بر طبق این روش مدول ارتجاعی در ۵۰ درصد تنش انحرافی حداکثر به‌عنوان مدول خاک انتخاب می‌گردد. در شکل ۱۱ مدول ارتجاعی سکانتی برای ماسه‌های غیر آلوده و آلوده به درصدهای مختلف نفت خام و در شکل ۱۲، درصد کاهش مدول ارتجاعی در اثر آلودگی ارائه شده است. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد نفت خام، مدول ارتجاعی ماسه کاهش می‌یابد. این میزان کاهش مدول با توجه به شکل ۹، در ۳ درصد آلودگی نفتی در حدود ۱۰ درصد بوده که با افزایش درصد

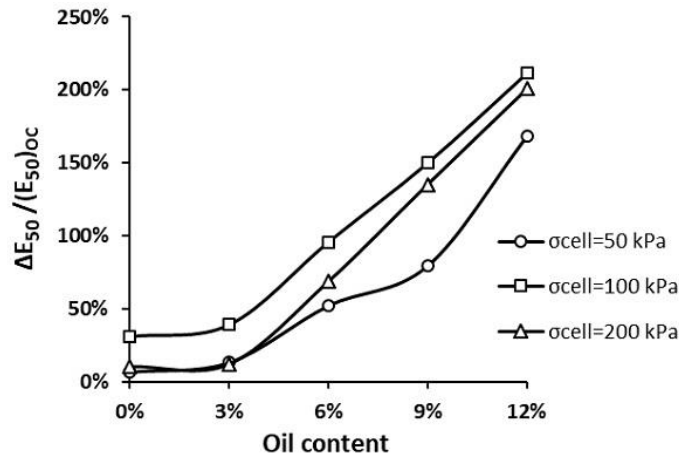
نفت به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در ۱۲ درصد نفت خام میزان کاهش مدول به ۷۴ درصد می‌رسد که این امر باعث افزایش چشم‌گیر نشست و کاهش ظرفیت باربری خاک تحت بار شالوده‌های سطحی می‌شود. با مشاهده شکل ۱۰ می‌توان دریافت که در یک درصد آلاینده نفتی ثابت، در تنش‌های همه‌جانبه مختلف درصد کاهش مدول ارتجاعی نمونه‌ها تقریباً برابر بوده است. در نهایت می‌توان گفت حضور نفت باعث نرم‌تر شدن نمونه‌ها گردیده است که این مسأله در تطابق خوبی با نتایج کار سایر محققان نظیر آل‌سند و همکاران در [۱] ۱۹۹۵، و گیام و همکاران در [۶] ۲۰۱۰ و وثوقی در [۷] ۱۳۹۳ است.



شکل ۱۱. نمودار تغییرات مدول ارتجاعی سکانتی نمونه‌های مختلف ماسه آلوده به نفت در برابر درصدهای مختلف نفت خام
Fig. 11. Variation of E_{50} after contaminating and stabilization



شکل ۱۲. نمودار درصد کاهش مدول ارتجاعی ماسه در اثر آلودگی نفتی، در برابر درصدهای مختلف نفت خام
Fig. 12. Reduction percentage of E_{50} after contaminating



شکل ۱۳. نمودار درصد افزایش مدول ارتجاعی نمونه‌های آلوده‌ی تزریق‌شده نسبت به تزریق نشده، در برابر درصد نفت

Fig. 13. Surge percentage of E₅₀ values versus oil contamination

جدول ۶. مقادیر مدول ارتجاعی سکانتی ۵۰ درصد (برحسب MPa) نمونه‌های ماسه‌ای تحت تزریق نانوسیلیس در تنش همه‌جانبه و درصدهای مختلف نفت

Table 6. E₅₀ values versus contamination under different confining pressure at 50, 100 and 200 kPa

E ₅₀ (MPa) at Oil Contamination					σ _{Cell} (kPa)
٪۱۲	٪۹	٪۶	٪۳	٪۰	
۲۲/۷۳	۲۳/۵۱	۲۷/۱۰	۳۰/۸۴	۳۱/۶۱	۵۰
۳۸/۴۱	۴۱/۰۱	۴۶/۲۶	۴۹/۷۸	۵۲/۵۷	۱۰۰
۵۴/۴۵	۶۰/۳۵	۶۴/۴۸	۷۳/۵۹	۷۶/۷۴	۲۰۰

تنش انحرافی حداکثر در هر سه تنش همه‌جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال کاهش یافته است. به‌طور مثال در نمونه‌ی با ۱۲ درصد نفت خام، در تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال ۳۱ درصد کاهش مقاومت برشی حداکثر مشاهده شد.

۲- افزایش درصد آلاینده نفتی در ماسه کربناته مقدار زاویه اصطکاک داخلی آن را کاهش داده است، به‌طوری‌که حداکثر کاهش زاویه اصطکاک داخلی در آلودگی ۱۲ درصد با ۱۶ درصد کاهش رخ داده است. همچنین آلودگی نفتی منجر به افزایش ناچیز چسبندگی در ماسه تمیز گشته است.

۳- مدول ارتجاعی خاک با افزایش درصد نفت خام کاهش می‌یابد، این میزان کاهش در ۳ درصد آلودگی نفتی در حدود ۱۰ درصد بوده که با افزایش درصد نفت به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در ۱۲ درصد نفت خام میزان کاهش مدول به ۷۴ درصد می‌رسد که این امر باعث افزایش چشم‌گیر نشست و کاهش تنش مجاز خاک تحت بار شالوده‌های سطحی می‌شود.

با توجه به جدول ۶ مشخص است که تزریق محلول سیلیس کلونیدی در نمونه‌های نفتی باعث افزایش مدول ارتجاعی در آن‌ها شده است. در شکل ۱۳ نمودار میزان درصد افزایش مدول ارتجاعی نمونه‌های ماسه آلوده پس از تزریق نانوسیلیس نسبت به نمونه‌های آلوده پیش از تزریق، ارائه گردیده است. با مشاهده این نمودار می‌توان دریافت که در اثر تزریق محلول نانوسیلیس مدول ارتجاعی در تنش‌های مختلف افزایش یافته است، این افزایش در تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال و ۱۲ درصد آلاینده نفتی تقریباً ۲۰۰ درصد است که نشان‌دهنده افزایش ۳ برابری آن است. لذا در بحث تأثیر آلودگی نفتی در کاهش مدول ارتجاعی که باعث افزایش نشست و کاهش ظرفیت باری می‌گردد، تزریق نانوسیلیس روش مناسبی برای بهبود این مشکل می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- با افزودن شدن نفت خام به ماسه کربناته تمیز از ۳ تا ۱۲ درصد،

سلول	<i>cell</i>	۴- تزریق نانوسیلیس در نمونه‌های ماسه کربناته آلوده به درصد‌های مختلف نفت خام باعث افزایش تنش انحرافی حداکثر گردیده و در نتیجه افزایش مقاومت برشی حاصل شده است.
محوری	<i>a</i>	
۵۰ درصد تنش اوج	50	
آلوده به نفت	<i>oc</i>	۵- در نمونه‌های ماسه تمیز و آلوده تا ۳ درصد نفت در اثر تزریق، زاویه اصطکاک داخلی کمتر از نمونه‌های قبل از تزریق است. در مقادیر بیش از ۳ درصد نفت خام، زاویه اصطکاک نمونه‌ها در اثر تزریق افزایش یافته است.
چسبندگی	<i>c</i>	
سربار	<i>q</i>	
دانسیته	γ	
بیشینه	<i>max</i>	
کمینه	<i>min</i>	
	بالانویس	
شرایط مرجع	*	۶- تزریق محلول نانوسیلیس در نمونه‌های تمیز و آلوده به نفت خام باعث افزایش چشم‌گیر چسبندگی آن‌ها شده است. این افزایش چسبندگی دلیل افزایش مقاومت برشی حداکثر، با وجود کاهش زاویه اصطکاک داخلی، در نمونه‌های تمیز و با ۳ درصد آلودگی نفتی است.

مراجع

- [1] H.A. Al-Sanad, W.K. Eid, N.F. Ismael, Geotechnical properties of oil-contaminated Kuwaiti sand, *Journal of geotechnical engineering*, 121(5) (1995) 407-412.
- [2] E. Shin, J. Lee, B. Das, Bearing capacity of a model scale footing on crude oil-contaminated sand, *Geotechnical & Geological Engineering*, 17(2) (1999) 123-132.
- [3] V.K. Puri, Geotechnical aspects of oil-contaminated sands, *Soil and Sediment Contamination*, 9(4) (2000) 359-374.
- [4] E.C. Shin, B.M. Das, Bearing capacity of unsaturated oil-contaminated sand, *International Journal of offshore and polar Engineering*, 11(03) (2001).
- [5] M.M. AkbarAbadi, S.S. Yasrebi, experimental study on shear strength behavior of an unsaturated crude oil contaminated clayey sand, Tarbiat Modares University, Tehran, 2010.
- [6] F. Wegian, M. Ismail, Assessment of bridge performance after oil contamination below foundation piles, *Australian Journal of Civil Engineering*, 6(1) (2010) 47-56.
- [7] M. Vosoughi, M. Hasanlourad, The effect of oil contaminant on the shear strength of carbonate sand, Imam Khomeini International University, Qazvin, 2014.
- [8] S.A. Nasehi, A. Uromeihy, M.R. Nikudel, A. Morsali, Influence of gas oil contamination on geotechnical properties of fine and coarse-grained soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(1) (2016) 333-345.

۷- با تزریق نانو سیلیس افزایش قابل توجهی در مدول ارتجاعی نمونه‌های خاک آلوده به نفت مشاهده می‌شود. این افزایش در تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال و ۱۲ درصد آلاینده‌ی نفتی تقریباً ۲۰۰ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده افزایش ۳ برابری آن است. لذا تزریق نانوسیلیس به خاک‌های ماسه‌ای آلوده به نفت راهکار مناسبی برای افزایش مدول ارتجاعی خاک و کاهش نشست است.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

<i>A</i>	مساحت، m^2
<i>E</i>	مدول الاستیسیته، kPa
<i>N</i>	ضریب باربری پی
<i>C</i>	چسبندگی
<i>e</i>	تخلخل
<i>G</i>	توده ویژه

علائم یونانی

σ	تنش، kPa
ϕ	زاویه اصطکاک داخلی، درجه
ε	کرنش

زیرنویس

<i>d</i>	انحرافی
<i>p</i>	اوج

- [13] P.M. Gallagher, J.K. Mitchell, Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9) (2002) 1017-1026.
- [14] D. Camenzuli, D.B. Gore, Immobilization and encapsulation of contaminants using silica treatments: a review, *Remediation Journal*, 24(1) (2013) 49-67.
- [15] P.P. Mbhele, Remediation of soil and water contaminated by heavy metals and hydrocarbons using silica encapsulation, 2008.
- [16] P.M. Gallagher, Y. Lin, Colloidal silica transport through liquefiable porous media, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135(11) (2009) 1702-1712.
- [17] J. Jurinak, L. Summers, Oilfield applications of colloidal silica gel, *SPE production engineering*, 6(04) (1991) 406-412.
- [9] Al-Rawas, H.F. Hassan, R. Taha, A. Hago, B. Al-Shandoudi, Y. Al-Suleimani, Stabilization of oil-contaminated soils using cement and cement by-pass dust, *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 16(6) (2005) 670-680.
- [10] M. Saberian, M.M. Khabiri, Effect of oil pollution on function of sandy soils in protected deserts and investigation of their improvement guidelines (case study: Kalmand area, Iran), *Environmental geochemistry and health*, (2016) 1-12.
- [11] S.A. Zomorodian, M. Shabnam, S. Armina, B.C. O'Kelly, Strength enhancement of clean and kerosene-contaminated sandy lean clay using nanoclay and nanosilica as additives, *Applied Clay Science*, 140 (2017) 140-147.
- [12] H. Liao, C. Huang, B. Chao, Liquefaction resistance of a colloid silica grouted sand, in: *Grouting and ground treatment*, 2003, pp. 1305-1313.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Shakeri, R. Ziaie Moayed, M. A. Nozari, . *Passive Remediation with Colloidal Silica Effect on Shear Strength Properties of oil-contaminated Bushehr Carbonate Sand*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(1) (2021) 367-382.

DOI: [10.22060/ceej.2018.13268.5363](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.13268.5363)



