



## The numerical study of the effect of the crude oil contamination on the stability of clayey soil slope

K. Rahgooy, S. Mirakhorli, A. Bahmanpour\*

Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

**ABSTRACT:** The presence of oily materials (crude oil contamination) in the clayey soil with low liquid limit (CL) causes the occurrence of changes in the stress-strain curve, wedge failure, plastic region, and strain energy of the soil slopes compared the uncontaminated soils due to the physical and chemical processes. These changes mostly cause the decrement in the safety factor against failure, the increment of the plastic region, and the decrement of the stability of the soil slopes. Yet, the effect of crude oil contamination on the parameters of the shear strength of the soil has been tested by the direct shear test as well as the bed reaction module by the plate loading test for various clayey and sandy soils. In this research, the effect of the oil contamination changes in the range of 0-16% (0-4%, 4-8%, 8-12%, 12-16%) on the safety factor of the stability of clayey soil slope has been studied by the numerical modeling of finite element method in ABAQUS software. The heights of clayey soil slopes are 10, 13, and 16 meters and the degree of the soil slope is 53. The results of this research show that the increment of the oil contamination will lead to the decrement of the stability of the clayey soil slope. It can be predicted that the safety factor value of the clayey soil slope can decrease up to 72% by increasing the oil contamination from 0 to 16%. Also, a 4% increment in the amount of crude oil contamination in clayey soil slope (12% to 16% oil contamination) can increase the horizontal displacement by 2 to 3 times, and vertical displacement by 3 to 4 times.

### Review History:

Received: May, 18, 2021  
Revised: Sep. 06, 2021  
Accepted: Nov. 19, 2021  
Available Online: Dec. 02, 2021

### Keywords:

Clayey soil  
finite element method  
crude oil contamination  
SRM method  
soil slope

## 1- Introduction

Oil contamination has various effects on the soil, including longtime change in the shear strength of the soil and direct effect on the water absorption and electrostatic charge. Therefore, it has a negative effect on the adhesion behavior of the clayey soil. Oil contamination has a direct effect on the elastic and plastic properties of the clayey soil, which can lead to a change in the stress-strain curve of the soil. It also causes a change in the special weight of the soil and, subsequently effective stress. The oil contamination can decrease the soil penetrability, which results in decreasing the velocity and discharge of the penetration. Due to the effect of the oil contamination on the soil behavior, we have studied this behavior by a comprehensive numerical study of a finite element method in ABAQUS software. Yet, the fulfilled investigations have been done by laboratory devices, but we have used numerical modeling in a finite element method regarding the previous researchers' laboratory data of soil slope with different heights and the effects of oil contamination on the stability of clayey soil slope have been investigated.

## 2- Methodology

The effects of oil contamination have been assessed in this research by using the loading of weight force on the stability of the soil slope. The modeling of the clayey soil slope with 10, 13, and 16 m height has been compared in two states of the presence and absence of the oil contamination (Figure 2).

The oil contamination percentage was 0, 4%, 8%, 12%, and 16% in this research (Table 1). All the numerical calculations were done by direct shear test [1].

The finite element software of ABAQUS was used for the modeling. In this research, the soil was in drainage condition with the behavioral model of linear elastic-perfectly plastic, and the Mohr-Coulomb failure criterion was used [2]. The safety factor was obtained by the limit equilibrium method.

For the validation of ABAQUS software, the uniaxial test of the clayey soil in two states without and with oil contamination (16%) has been modeled in the software, and the results have been compared with the real results of the laboratory uniaxial test [1]. Studying the laboratory

\*Corresponding author's email: Aminbahmanpour@srbiau.ac.ir



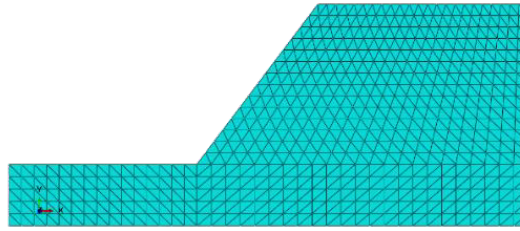


Fig. 1. Mesh geometry problem

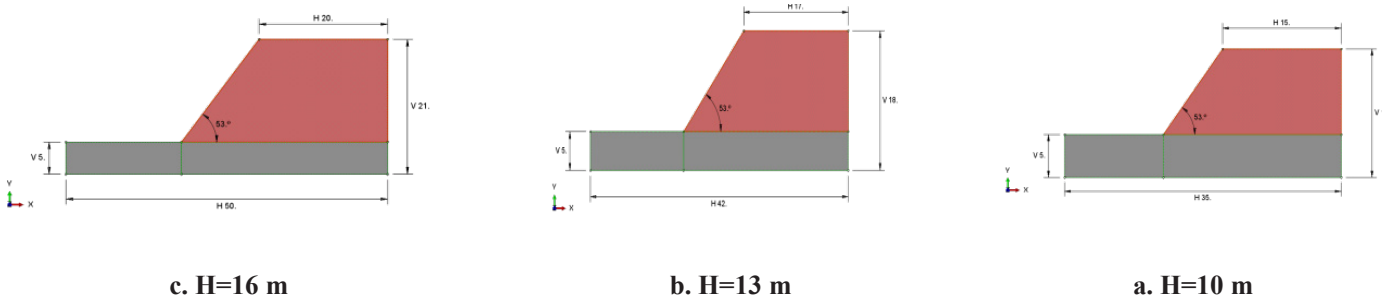


Fig. 2. The geometry of soil slope

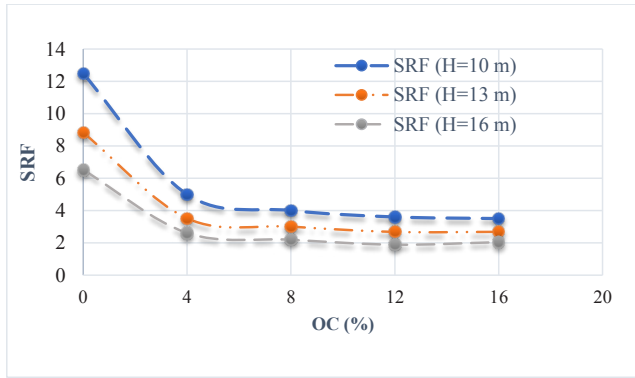
Table 1. the specifications of used materials

CL16	CL12	CL8	CL4	CL0	SOIL TYPE
16	12	8	4	0	OIL CONTENT (%)
25.52	20.57	20.33	32	35	LI
13	14.3	14.7	16.1	20	PI
1810	1800	1830	1850	1860	$\rho_d$ (kg/cm <sup>3</sup> )
0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	$\nu$
2.5	10	12.5	22.5	15	E(Mpa)
0.0175	0.018	0.022	0.0275	0.075	C(Mpa)
34.5	28.7	28	27.4	26.1	$\phi$

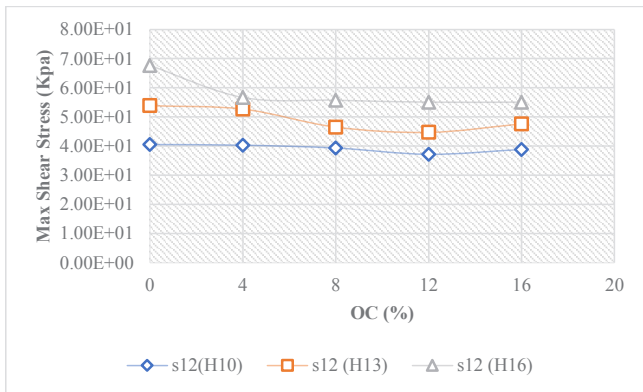
results, the uniaxial strength in the state of uncontaminated was 3.5 kg/cm<sup>2</sup>, and 0.62 kg/cm<sup>2</sup> for the 16% contaminated. Comparing these results with the data obtained by the modeling of uniaxial test modeling in the software, we can find out that the errors of these two methods in two states of uncontaminated and 16% oil contamination were 1.1% and 4%, respectively.

### 3- Results

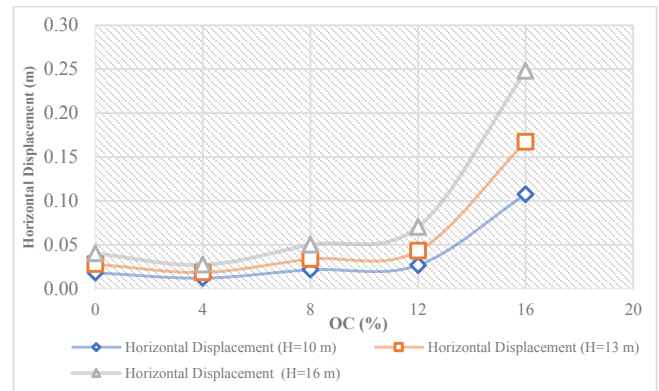
The SRF of the soil slope will decrease by increasing the oil contamination. Also, the SRF value will decrease 40% to 60% by increasing the slope height by 3 m in the constant oil contamination. The safety factor of soil slope will significantly decrease up to 60% by increasing the oil contamination in the range of 0 to 4% (Figure 3).



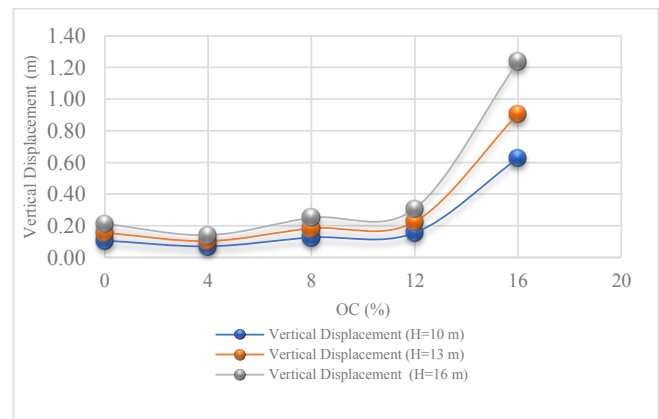
**Fig. 3.** The changes in SRF value according to the oil contamination at different heights



**Fig. 4.** The changes of maximum shear stress against the changes of oil contamination in the heights of 10, 13, and 16m



**a**



**b**

**Fig. 5.** The changes of maximum displacement against the oil contamination in the heights of 10 m, 13 m, and 16 m

The shear stress is at its maximum value at the toe of the slope, and the increment of oil contamination will make the plastic region bigger in the soil slope. So, the increment of oil contamination will lead to instability and the decrement of the safety factor of soil slope. The oil contamination will cause the decrement of the shear stress mobilized on the soil slope. The changes in maximum shear stress according to the oil contamination changes in different heights are shown in Figure 4.

One important parameter in designing the soil slope is the investigation of vertical and horizontal displacement. The increment of oil contamination in soil with different heights will lead to the increment of horizontal displacement. For example, by increasing the oil contamination (0 to 16%) at the height of 16 m, the horizontal displacement will increase from 5cm to 25cm. Also, the vertical subsidence of soil slope has been increased from 20cm to 120cm. The trend of the increment of vertical and horizontal is significant in the

range of 12% to 16% oil contamination. In this range, the increment of oil contamination will cause the increment of horizontal displacement about 2 to 2.3 times and the vertical displacement about 2.6 to 3.8 times (Figure 5).

Based on the relations proposed by various researchers, the soil slope will be stable if its safety factor is more than 1; but based on the code, the minimum safety factor of the stability of soil slope in the static mode should be 1.5 [3]. Therefore, due to the obtained safety factor by the numerical modeling, we can conclude that all the soil slopes are stable. In this research, the trend of safety factor changes and the changes in soil slope displacement due to the increment of oil contamination is nonlinear; in fact, the soil slope will become unstable and fail with the increment of only 2% to 4% oil contamination increment. This trend can be well seen in the large changes in safety factor between the state of uncontaminated and the contamination of 4%.

#### 4- Conclusion

The increment of oil contamination will lead to the reduction of clayey soil adhesion. So, the shear strength of the clayey soil will significantly decrease. It can be predicted that the amount of safety factors will decrease up to 72% (at different heights) by increasing the oil contamination from 0 to 16%.

A 4% increase in oil contamination of soil slope (compared the uncontaminated soil) can decrease the safety factor of soil slope by 60%. So, we can say that it can be said that in the range of 0 to 4% oil contamination, the safety factor has been significantly decreased and made the soil slope unstable.

By the increment of oil contamination (from 0 to 16%), the plastic strain surface will become larger. It means that the plastic strain value is zero in an uncontaminated state, but the plastic strain will start to become greater from the toe of the slope after the occurrence of contamination and the plastic strain surface will become larger.

The mobilized maximum shear stress will decrease due to the increment of oil contamination. The reason for this phenomenon is the decrement of intrinsic adhesion of the clay due to the oil contamination increment which can affect the existing stresses in the slope.

The effect of the oil contamination increment on the maximum mobilized shear stress will increase by the increment of soil slope height. The increment of slop height

up to 16 m can decrease the maximum shear stress by 14% which is so significant.

The horizontal and vertical displacement will increase about 2-2.3 and 2.6-3.8 times, respectively, by the increment of oil contamination. The increment of displacement (horizontal and vertical) is significant in the oil contamination range of 12% to 16%.

The trend of changes in displacement, shear stress, and safety factor of the soil slope under oil contamination is nonlinear. In fact, it is supposed that a 2-4% increment of oil contamination in clayey soil can cause the soil slope to become unstable and fail.

#### References

- [1] M. Khomehchiyan, A. Hossein Charkhabi, M. Tajik, Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils, *Engineering Geology*, 89(3-4) (2007) 220-229.
- [2] F. Tschuchnigg, H.F. Schweiger, S.W. Sloan, Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. Part I: Numerical studies considering non-associated plasticity, *Computers and Geotechnics*, 70 (2015) 169-177.
- [3] H. Zheng, G. Sun, D. Liu, A practical procedure for searching critical slip surfaces of slopes based on the strength reduction technique, *Computers and Geotechnics*, 36(1-2) (2009) 1-5.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

K. Rahgooy, S. Mirakhorli, A. Bahmanpour, *The numerical study of the effect of the crude oil contamination on the stability of clayey soil slope, Amirkabir J. Civil Eng., 54(6) (2022) 453-456.*

DOI: 10.22060/ceej.2021.20067.7334





## بررسی عددی تاثیر آلودگی نفت خام بر پایداری شیروانی خاک رسی

کامران رهگوی، سعید میرآخوری، امین بهمن پور\*

دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۸  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۱۵  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۸  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۱۱

### کلمات کلیدی:

خاک رسی  
روش اجزاء محدود  
آلودگی نفت خام  
روش SRM  
شیروانی خاکی

**خلاصه:** حضور مواد نفتی (آلودگی های نفت خام) در خاک رسی با حد روانی کم (CL) در اثر فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی باعث ایجاد تغییرات در منحنی تنش-کرنش، گوه گسیختگی، ناحیه پلاستیک و انرژی کرنشی شیروانی های خاکی در مقایسه با خاک غیر آلوده می شود. این تغییرات اغلب باعث کاهش ضریب اطمینان در برابر گسیختگی، افزایش ناحیه پلاستیک و کاهش پایداری شیروانی های خاکی می شود. تاکنون تاثیر آلودگی نفت خام بر روی پارامترهای مقاومت برشی خاک به وسیله آزمایش برش مستقیم و مدول عکس العمل بستر به وسیله آزمایش بارگذاری صفحه ای برای انواع خاک های رسی و ماسه ای آزمایش شده است. اکنون در این پژوهش اثر تغییرات میزان آلودگی نفتی در بازه ۰ تا ۱۶٪ (۰-۴-۸-۱۲-۱۶٪) بر روی ضریب اطمینان پایداری شیروانی خاک رسی به وسیله مدل سازی عددی روش اجزاء محدود در نرم افزار ABAQUS انجام گرفته است. ارتفاع شیروانی های خاک رسی ۱۰ m، ۱۳ m و ۱۶ m و زاویه شیب شیروانی خاکی ۵۳° می باشد. نتایج این پژوهش نشان می دهد که افزایش آلودگی نفتی، سبب کاهش میزان پایداری در شیروانی خاک رسی می شود. به طوری که پیش بینی می شود که میزان ضریب اطمینان شیروانی خاک رسی با افزایش آلودگی نفتی از ۰ تا ۱۶٪ به اندازه ۷۲٪ کاهش یابد. همچنین افزایش تنها ۴٪ در میزان آلودگی نفت خام در شیروانی خاک رسی (۱۲٪ تا ۱۶٪ آلودگی نفتی)، سبب افزایشی معادل ۲ الی ۳ برابری در جابه جایی افقی و افزایش ۳ الی ۴ برابری در جابه جایی قائم می شود.

### ۱- مقدمه

آلاینده های نفتی تاثیر مستقیم بر خواص الاستیک و پلاستیک خاک رسی دارد، در نتیجه باعث تغییر در نمودار تنش-کرنش خاک ها می شوند. در حالت کلی خاک در یک محیط ۳ فازی متشکل از دانه های جامد، آب و هوا است و با توجه به این که ماده نفتی یک سیال غیرقطبی است، در آب حل نمی شود، در نتیجه یک فاز جدید در خاک ایجاد کرده و خاک را به یک محیط ۴ فازی تبدیل می کند. این امر موجب تغییرات در وزن مخصوص خاک و در نتیجه تغییر در تنش موثر می شود. در اثر اضافه شدن مواد نفتی به خاک به دلیل غیرقطبی بودن آن و لزجت بالای آن نفوذپذیری در خاک کاهش می یابد، در نتیجه از سرعت و دبی تراوش کاسته می شود. اهمیت بررسی تاثیر آلودگی نفتی بر خاک باعث شده است که به یک بررسی جامع عددی به روش اجزای محدود در نرم افزار ABAQUS انجام گیرد. این نرم افزار یک نرم افزار اجزاء محدود می باشد که به وسیله المان های مختلفی که در این نرم افزار وجود دارد می توان مدل سازی دقیق تری از هندسه و حل مسئله انجام داد. همچنین در این نرم افزار به علت وجود اندرکنش های مناسب میان المان ها،

آلاینده های نفتی در طول زمان توسط دریا، خلیج یا رودخانه به سواحل وارد می شوند و خاک اطراف خود را آلوده می کنند. که این آلاینده ها پیغامی از صنعتی شدن جامعه به ما می دهد. از دلایل عمده آلودگی خاک می توان به نشت آلاینده از لوله های اتومبیل های حامل مواد نفتی یا سرریزی از مخازن ذخیره آن و پسماند پالایشگاه ها و رها کردن ضایعات در محیط اشاره کرد. آلاینده های نفتی باعث زیان در دراز مدت طولانی بر روی مقاومت برشی خاک ها می شوند، به گونه ای که خصوصیات شیمیایی خاک آلوده شده با مواد نفتی تغییر می کند و این اثرات شیمیایی تاثیر مستقیمی بر روی جذب آب و شارژ الکترواستاتیکی خاک دارد، در نتیجه تاثیر منفی بر خواص چسبندگی خاک رسی می گذارد. همچنین آلودگی نفتی بر روی اصطکاک دانه های خاک اثرگذار است. به عبارتی آلودگی نفتی اثر مستقیم بر روی مقاومت برشی و پارامترهای آن دارد و باعث تغییر شکل گوه گسیختگی می شود.

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: Aminbahamanpour@srbiau.ac.ir



پاسخ مناسب و دقیقی برای حل مسائل مختلف فیزیکی می‌باشد. یکی از این مسائل، مساله پایداری شیروانی‌ها است که به روش اجزاء محدود در این نرم‌افزار انجام شده است.

تاکنون بررسی‌های انجام شده توسط محققین با ابزار آزمایشگاهی بوده است، در نتیجه پژوهش‌های انجام گرفته در مقیاس آزمایشگاهی بر روی پارامترهای اساسی خاک (پارامترهای الاستیک و پلاستیک خاک) انجام شده است. در این پژوهش با مدل‌سازی عددی به روش اجزاء محدود و با توجه داده‌های آزمایشگاهی محققین پیشین، شیروانی‌های با ارتفاع‌های مختلف مدل‌سازی شده است و اثرات آلودگی نفتی بر پایداری شیروانی خاک رسی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش برای بررسی ضریب اطمینان شیروانی‌های آلودگی از روش  $SRM^{11}$  استفاده می‌شود و نتایج در قالب نمودار بر اساس آلودگی نفتی مختلف ارائه گردیده است.

۱-۱- سابقه تحقیق

۱-۲- نتایج سابقه تحقیق

**کوک و همکاران** گزارش کردند که هر چند، آلودگی نفتی تاثیر قابل توجهی روی مشخصه‌های تراکم نمی‌گذارد. با این حال باعث کاهش زاویه اصطکاک شده و همچنین به شکل قابل توجهی قابلیت فشرده‌گی ماسه را افزایش می‌دهد [۱].

**اوگین و داس** دریافتند که اشباع کامل با روغن موتور، کاهش چشم‌گیری در زاویه اصطکاک ماسه در هر دو حالت شل متراکم و افزایش شدیدی در کرنش‌های حجمی ایجاد می‌کند. علاوه بر آن آنالیز اجزای محدود آن‌ها نشان داد که نشست فونداسیون افزایش می‌یابد [۲].

**ال سند و همکاران** دریافتند که به علت آلودگی نفتی، مقاومت و نفوذپذیری ماسه به مقدار ناچیزی کاهش و قابلیت تراکم تا یک میزان خاص از آلودگی، افزایش می‌یابد [۳].

**خامه‌چیان و همکاران** دریافتند که بر اساس نتایج مقاومت، نفوذپذیری، حداکثر تراکم خشک، درصد رطوبت بهینه و حدود آتربرگ تحت تاثیر آلودگی نفتی روی پارامترهای مقاومت برشی یکنواخت نبوده و به نوع خاک بستگی داشته است و لیکن باعث کاهش مقاومت بیشینه در همه نمونه‌های مطالعاتی گردید [۴].

**نصر** بر اساس نتایج، نشان داده شده است که رفتار بارگذاری-نشست به شکل موثری توسط آلودگی نفتی می‌تواند تاثیرگذار

باشد. به گونه‌ای که با افزایش عمق و طول لایه ماسه آلوده، ظرفیت باربری کاهش یافته و نشست شالوده افزایش پیدا کرده است [۵].

**کرمانی و عبادی** دریافتند که با افزایش درصد نفت، زاویه اصطکاک داخلی، حداکثر تراکم خشک، شاخص تراکم و حدود آتربرگ افزایش می‌یابد. همچنان که با بالا رفتن میزان نفت، درصد بهینه رطوبت و چسبندگی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، اثر کهنگی باعث کاهش بیشتر در چسبندگی می‌شود. ولی تاثیر خاصی روی زاویه اصطکاک داخلی نمی‌گذارد. در سال‌های اخیر مطالعات متعددی بر روی بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های رسی و ماسه‌ای آلوده به مواد نفتی انجام شده است [۶].

**خسروی و همکاران** دریافتند که وجود نفت در خاک رسی کاتولیت باعث چسبندگی و افزایش زاویه اصطکاک داخلی و تراکم‌پذیری خاک می‌شود [۷].

**طالب‌زاده و حاجیانی** دریافتند که انتشار مواد نفتی باعث کاهش شدید ضریب عکس العمل بستر می‌شود همچنین آن‌ها دریافتند که آلودگی نفت خام نسبت به گازوئیل و نفت سفید باعث کاهش بیشتر سختی و عکس العمل بستر می‌شود [۸].

**لیو و همکاران** متوجه شدند که افزایش میزان نفت دیزل، منجر به کاهش مقاومت تک محوری خاک می‌گردد [۹].

**ابوسنیا و همکاران** دریافتند که میزان کم آلودگی نفتی در ماسه ریزدانه، نمی‌تواند تاثیر نامناسبی بر رفتار ساختمان‌های مستقر بر آن‌ها داشته باشد [۱۰].

**ناصری و همکاران** به این نتیجه رسیدند که افزایش آلودگی گازی باعث کاهش چسبندگی و افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک ریزدانه و درشت‌دانه می‌شود [۱۱].

**ناصری و همکاران** دریافتند که اضافه کردن ۰.۵٪ نانو هیدرات آهک به خاک رسی آلوده به نفت گاز، بعد از ۲۴ ساعت منجر به افزایش مقاومت تک محوره، وزن مخصوص خشک حداکثر، درصد رطوبت بهینه و پارامترهای مقاومت برشی می‌شود [۱۲].

**سلطانی و همکاران** دریافتند که با افزایش میزان میکروارگانیزم‌ها، میزان نفت خام تا ۰.۵٪ تا ۰.۸٪ در فاصله بین ۱۰ الی ۳۰ روز کاهش می‌یابد [۱۳].

**استوار و همکاران** دریافتند که افزایش آلودگی نفتی باعث کاهش میزان زاویه اصطکاک به اندازه ۳° تا ۱۳° می‌شود، همچنین افزودن آلودگی نفتی باعث افزایش چسبندگی تا ۵ kPa می‌شود [۱۴].

جدول ۱. سابقه تحقیق

Table 1. research background

نام محقق	سال تحقیق	روش تحقیق	نوع مصالح
کوک و همکاران [۱]	۱۹۹۲	بررسی آزمایشگاهی تراکم و فشردگی و مشخصه‌های مقاومت ماسه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت و آلوده شده به نفت خام	ماسه با دانه‌بندی یکنواخت
اوگین و داس [۲]	۱۹۹۲	انجام آزمایشات سه محوری و آنالیز اجزا محدود	ماسه تمیز
ال سند و همکاران [۳]	۱۹۹۵	انجام آزمایشات تراکم، نفوذپذیری، سه محوری، تحکیم و برش مستقیم	ماسه تمیز و آلوده به نفت خام
خامه چیان و همکاران [۴]	۲۰۰۷	تست آزمایشگاهی گسترده برای تاثیر آلودگی نفت خام روی خواص ژئوتکنیکی و نمونه برداری از خاک‌های ساحلی خلیج	خاک‌های رسی و ماسه‌ای نظیر SP, SM, CL
نصر [۵]	۲۰۰۹	بررسی رفتار پی نواری صلب بارگذاری شده روی ماسه به مواد نفتی	ماسه تمیز
کرمانی و عبادی [۶]	۲۰۱۲	تست‌های آزمایشگاهی با درصدهای متفاوت نفت خام جهت بررسی خواص ژئوتکنیکی و همچنین تاثیر گذر زمان و اثر کهنگی	خاک‌های ریزدانه تمیز و آلوده
خسروی و همکاران [۷]	۲۰۱۳	بر روی پارامترهای مقاومت برشی خاک	خاک رسی کائولینیت
طالب‌زاده و حاجیانی [۸]	۲۰۱۵	آزمایش بارگذاری صفحه‌ای کوچک مقیاس در سه شرایط تراکمی مختلف بر مدول عکس‌العمل بستر و تاثیر - آلودگی با استفاده از سه الاینده نفت خام و نفت سفید و گازوئیل با سه درصد مختلف اختلاط	ماسه ساحل بندرانزلی
لیو و همکاران [۹]	۲۰۱۵	بر روی آزمایش مقاومت تک محوری	خاک رسی کائولینیت
ابوسنیا و همکاران [۱۰]	۲۰۱۵	تاثیر آلودگی نفتی بر رفتار ساختمان‌های مستقر	ماسه ریزدانه
ناصری و همکاران [۱۱]	۲۰۱۶	مطالعه صحرایی بر روی خاک‌های ریزدانه و درشت دانه	خاک ریزدانه و درشت‌دانه
ناصری و همکاران [۱۲]	۲۰۱۶	اضافه کردن ۵٪ نانو هیدرات خاک در خاک رسی آلوده به نفت‌گاز و به دست آوردن مقاومت تک محوره و وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت	خاک رسی
سلطانی و همکاران [۱۳]	۲۰۱۷	استفاده از باکتری‌های مختلف تجزیه کننده نفت خام و محاسبه زاویه اصطکاک داخلی	خاک اطراف پالایشگاه نفت تبریز
استوار و همکاران [۱۴]	۲۰۲۰	مطالعات آزمایشگاهی از جمله برش مستقیم، آزمایش تراکم و...	خاک ماسه رس دار
احمدی و همکاران [۱۵]	۲۰۲۱	ترکیب رس کائولینیت بر روی خاک‌های مختلف آلوده شده به مواد نفتی و مطالعات آزمایشگاهی بر روی آن‌ها به مانند، سه محوری زهکشی نشده، تراکم استاندارد، نفوذپذیری، ظرفیت نگهداری آب (WHC)	خاک ماسه
شین و داس [۱۶]	۲۰۲۱	تاثیر چسبناکی جنبشی (ویسکوزیته) مواد نفتی روی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک	ماسه‌ی آلوده غیر اشباع

- احمدی و همکاران نتایج نشان می‌دهد که به دلیل افزایش آلودگی، حداکثر چگالی خشک، مقدار مطلوب آب، نفوذپذیری و مقادیر pH کاهش یافته است. نسبت‌های مختلف خاک رس ماسه تأثیر معنی داری بر ارزش WHC<sup>۱۱</sup> و پارامترهای مقاومت برشی خاک در حضور نفت خام دارد. در حالی که در نمونه‌های شنی با مقدار کمی رس، افزودن نفت خام زاویه اصطکاک داخلی را کاهش می‌دهد، در نمونه‌هایی با مقدار رس زیاد، زاویه اصطکاک افزایش می‌یابد [۱۵].

**شین و داس** دریافتند که آلودگی نفتی، قابلیت تراکم ماسه را افزایش و قابلیت هدایت هیدرولیکی و مقاومت برشی را کاهش می‌دهد [۱۶].

**هارش و همکاران** دریافتند که به دلیل نفوذپذیری مختلف خاک، تاثیر آلودگی روی خصوصیات مختلف آن‌ها، به زمان بستگی دارد [۱۷].

نتایج تغییرات زاویه اصطکاک و میزان چسبندگی خاک رسی با حد روانی کم (CL) بر اساس نتایج آزمایشات برش مستقیم به صورت شکل ۱ می‌باشد که با توجه به آن، با افزایش میزان آلودگی نفت خاک در خاک رسی، میزان چسبندگی خاک کاهش و میزان زاویه اصطکاک خاک افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از این آزمایشات برشی مستقیم بر روی خاک رسی با حد روانی کم (CL) نشان دهنده آن است که با افزایش میزان نفت خام، زاویه اصطکاک داخلی افزایش و چسبندگی کاهش می‌یابد زاویه اصطکاک خاک رسی در آلودگی ۱۶٪ به ۳۴/۵° می‌رسد که این مقدار برای خاک رسی، مقدار قابل توجهی می‌باشد. همچنین چسبندگی خاک رسی در آلودگی ۱۶٪ به اندازه  $0.01 \frac{kg}{cm^2}$  می‌رسد [۴].

## ۲- روش تحقیق

یکی از مهم‌ترین فاکتورهای طراحی شیروانی‌های خاکی، محاسبه ضریب اطمینان پایداری آن‌ها تحت اثر وزن خود می‌باشد. لذا در این پژوهش با استفاده از بارگذاری به وسیله نیروی وزن، تاثیر آلودگی نفت بر پایداری شیروانی خاکی مورد سنجش قرار می‌گیرد. با استفاده از روش SRM، ضریب اطمینان یک شیروانی خاکی در ارتفاع‌های مختلف و بر اساس تغییر میزان آلودگی نفتی اندازه‌گیری می‌شود. در این مدل‌سازی از پدیده انتشار

---

1 Water Holding Capacity

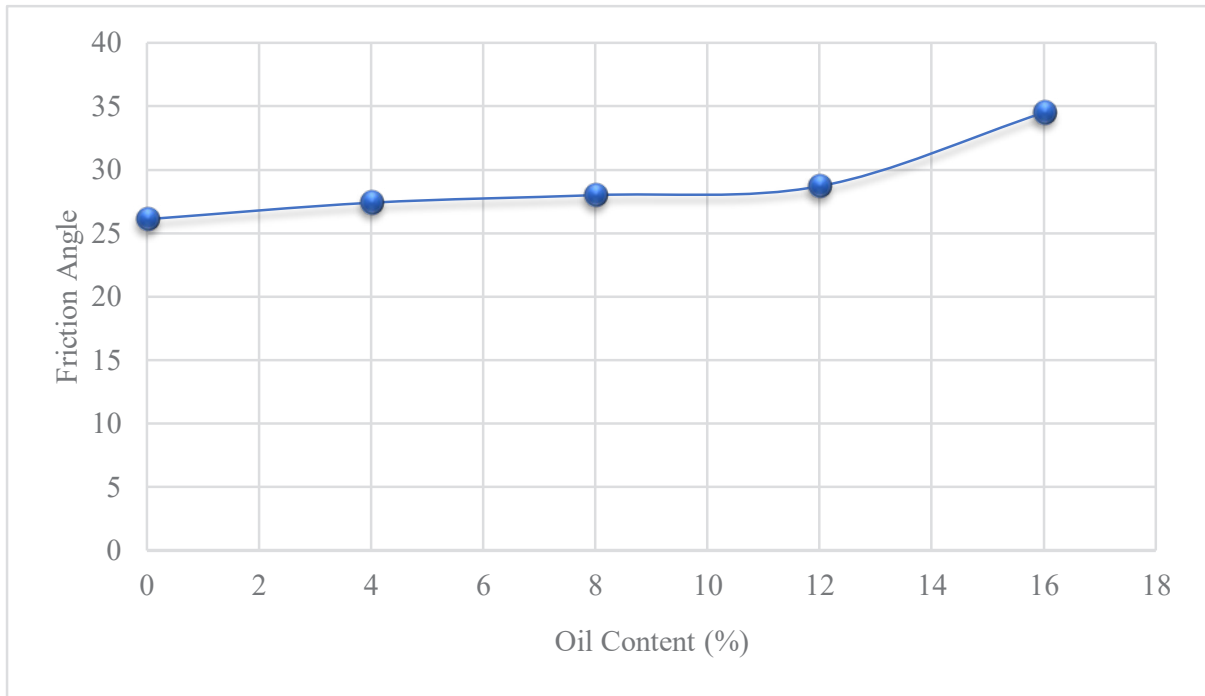
آلودگی در خاک صرف نظر شده است لذا عامل زمان در بررسی‌های صورت گرفته بی‌تاثیر می‌باشد، همچنین شیروانی خاکی به صورت همگن (بخش‌های مختلف شیروانی خاکی به مقدار مساوی دارای آلودگی نفتی می‌باشند) مدل‌سازی شده است. از آنجایی که در این پژوهش تغییرات ضریب اطمینان و مقاومت برشی در اثر آلودگی نفتی مورد بررسی قرار می‌گیرد تنها عوامل اثرگذار، چسبندگی، زاویه اصطکاک و وزن مخصوص می‌باشد لذا تنها با تغییرات در این پارامترها اثر آلودگی نفتی بر مقاومت برشی، جابه‌جایی و ضریب اطمینان شیروانی خاکی مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این پژوهش ابتدا با مدل‌سازی یک شیروانی خاک رسی مینا به ارتفاع ۱۰ m [۱۹ و ۱۸] در حالت بدون حضور آلودگی نفتی، تحت اثر وزن خود بارگذاری می‌شود و میزان ضریب اطمینان تخمین زده می‌شود. سپس با افزایش میزان آلودگی در این ارتفاع میزان تغییرات ضریب اطمینان با حالت بدون حضور آلودگی نفتی مقایسه می‌شود. در مراحل بعد با افزایش ارتفاع شیروانی خاکی با گام‌های ۳ متری ارتفاع شیروانی تا ۱۶ m افزایش می‌یابد و سپس به بررسی تاثیر آلودگی نفتی در ارتفاع‌های مختلف پرداخته می‌شود.

## ۲-۱- مشخصات مصالح و هندسه مدل‌سازی

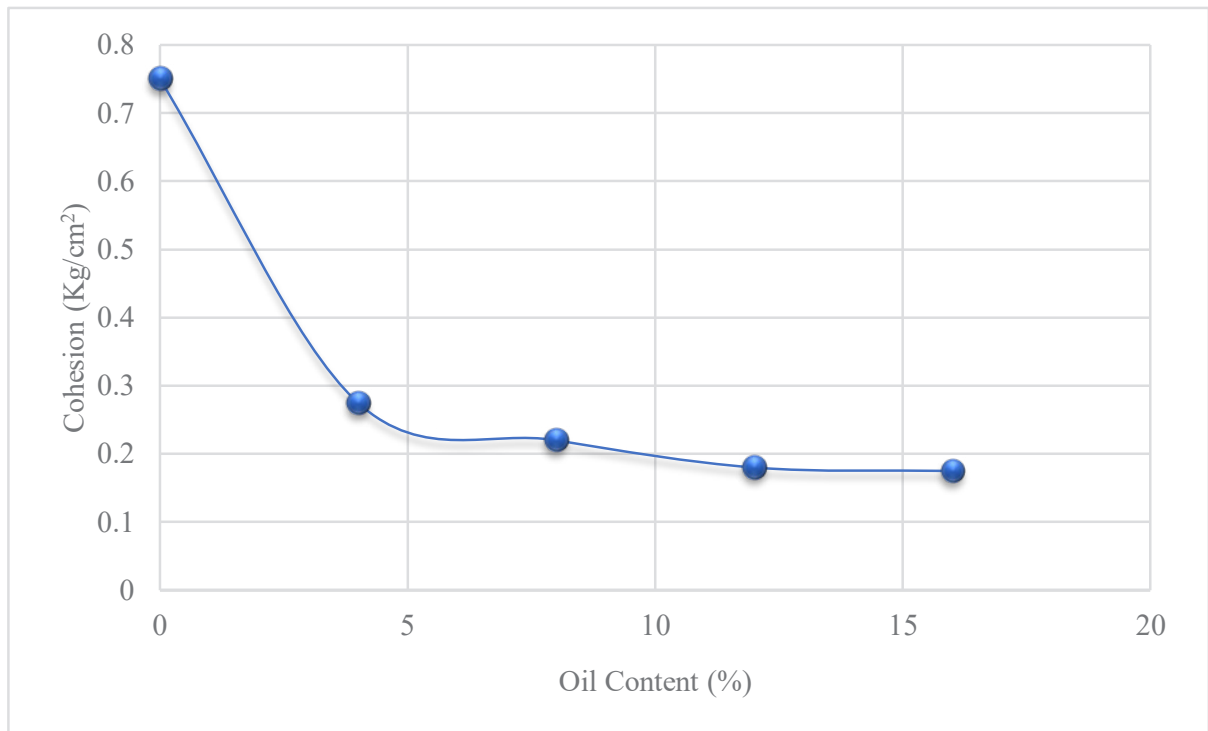
مقاومت برشی و پایداری شیروانی‌های خاک رسی تابع دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشد که در خاک رسی چسبندگی تاثیر بیشتر بر مقاومت برشی دارد. لذا با توجه آزمایشات مختلف نظیر برش مستقیم که بر روی خاک رسی با حد روانی کم (CL) انجام شده است [۴]. در پژوهش حاضر یک شیروانی خاکی از جنس خاک رس در حالت بدون آلودگی نفتی با شیروانی خاکی در حالت دارای آلودگی نفتی با درصد‌های مختلف مقایسه شده است. بر طبق آزمایشات انجام گرفته، نمونه‌ها خاک ابتدا به ۵ دسته تقسیم و سپس در دمای ۱۰۵°C خشک می‌شود و سپس با درصد‌های ۰، ۴٪، ۸٪، ۱۲٪ و ۱۶٪ از وزن خشک خاک مخلوط می‌شود [۴]. مصالح استفاده شده (خاک رس) در این پژوهش، از داده‌های آزمایشگاهی موجود می‌باشد که در جدول ۲ نتایج آن به اختصار شرح داده شده است.

در پژوهش حاضر متغیر هندسی، ارتفاع شیروانی خاکی می‌باشد و همچنین زاویه شیب شیروانی در همه مدل‌سازی‌ها ثابت است. ارتفاع شیروانی خاکی ۱۰ m، ۱۳ m و ۱۶ m با زاویه شیب ۵۳° می‌باشد [۱۹ و ۱۸].





(الف)



(ب)

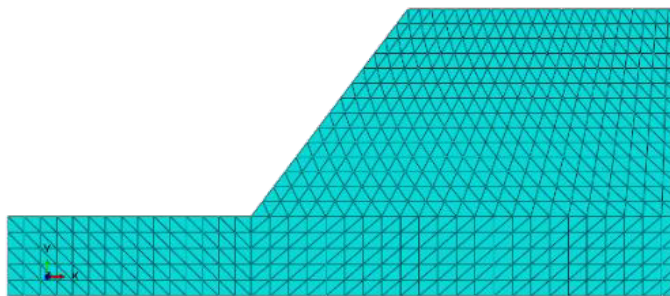
شکل ۱. نتایج آزمایش برش مستقیم [۴] الف: زاویه اصطکاک-میزان آلودگی نفتی (درصد) ب: چسبندگی- میزان آلودگی نفتی (درصد)

Fig. 1. the results of the direct shear test [4] a: friction angle- oil contamination amount (percent) b: adhesion- oil contamination amount (percent)

جدول ۲. مشخصات مصالح مورد استفاده [۴]

Table 2. the specifications of used materials

CL16	CL12	CL8	CL4	CL0	نوع خاک
۱۶	۱۲	۸	۴	۰	آلودگی نفتی (%)
۲۵/۵۲	۲۶/۵۷	۲۰/۳۳	۳۲	۳۵	LI
۱۳	۱۴/۳	۱۴/۷	۱۶/۱	۲۰	PI
۱۸۱۰	۱۸۰۰	۱۸۳۰	۱۸۵۰	۱۸۶۰	kg / cm <sup>3</sup>
۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	$\nu$
۲/۵	۱۰	۱۲/۵	۲۲/۵	۱۵	Mpa
۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۸	۰/۰۲۲	۰/۰۲۷۵	۰/۰۷۵	Mpa
۳۴/۵	۲۸/۷	۲۸	۲۷/۴	۲۶/۱	$\phi$

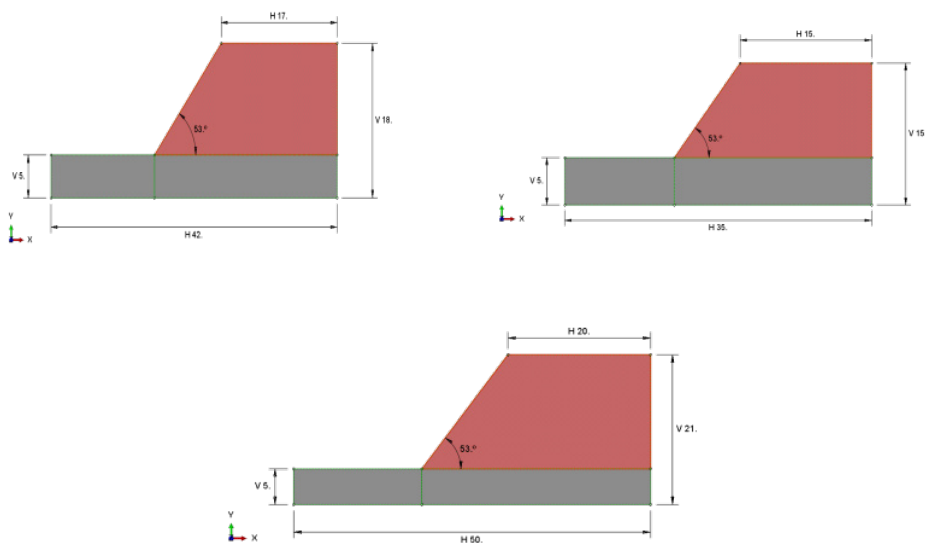


شکل ۲. دانه‌بندی (Mesh) مسئله

Fig. 2. problem mesh a: soil slope with 10m height, b: soil slope with 13m height, c: soil slope with 16m height

در محاسبه پایداری شیروانی‌های خاکی استفاده شده است [۴].  
 به وسیله نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی اجزاء محدود دو بعدی انجام گرفته شده است. با توجه شیب تند شیروانی خاکی (ارتفاع ۱۰ m و شیب ۵۳°)، همگن بودن لایه‌های خاک و به منظور شبکه‌بندی دقیق‌تر و آسان‌تر هندسه شیروانی خاکی می‌توان از اجزاء مثلثی ۳ گره‌ای استفاده نمود و از آن‌جایی که تحلیل مسئله در حالت کرنش صفحه‌ای بررسی می‌شود از اجزاء سه گره‌ای مثلثی (شکل ۲) کرنش صفحه‌ای (CPE۳) استفاده شده است.

در جدول ۲، LI، حد روانی خاک رسی، PI، حد پلاستیک خاک رسی،  $\mu$ ، ضریب پواسون خاک،  $E$ ، مدول الاستیسیته خاک بر حسب مگاپاسکال،  $C$ ، چسبندگی بر حسب مگاپاسکال،  $\phi$ ، زاویه اصطکاک بر حسب درجه و  $\rho_d$ ، چگالی خاک در حالت خشک می‌باشد.  
 در این پژوهش تمامی محاسبات عددی انجام گرفته با استفاده از داده‌های آزمایش برش مستقیم می‌باشد. مقادیر زاویه اصطکاک و چسبندگی خاک رسی آلوده به مواد نفتی از طریق این آزمایشات به دست آمده است و



شکل ۳. هندسه شیروانی خاکی

Fig. 3. the geometry of soil slope

### ۲-۲- مدل رفتاری

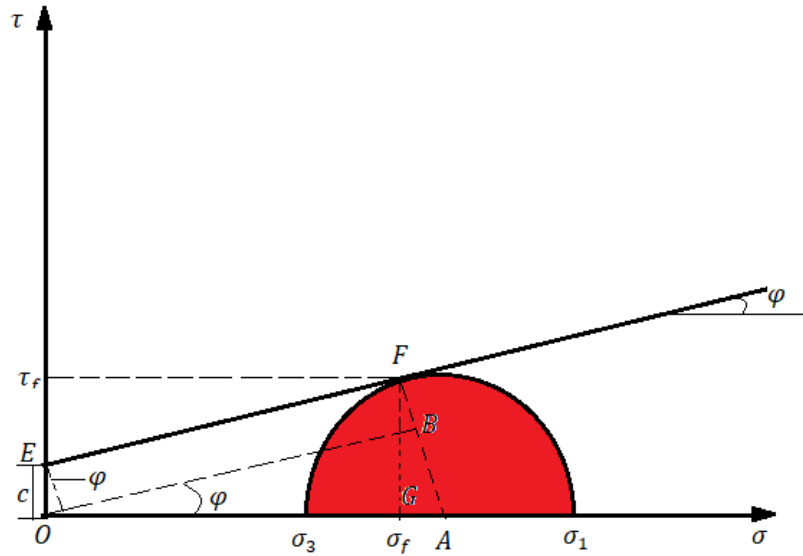
در این پژوهش خاک در شرایط زهکشی شده با مدل رفتاری الاستیک خطی- پلاستیک کامل و معیار گسیختگی موهر-کولمب استفاده شده است [۲۱]. بر اساس معیار گسیختگی موهر-کولمب، مقاومت برشی، با افزایش تنش نرمال بر صفحه گسیختگی ازدیاد می‌یابد که به صورت رابطه (۱) تعریف شده است [۲۲].

$$\tau_f = c + \sigma_N \tan \varphi \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $\tau_f$ ، مقاومت برش نهایی،  $C$ ، چسبندگی،  $\sigma_N$ ، تنش نرمال وارد بر صفحه گسیختگی و  $\varphi$ ، زاویه اصطکاک خاک خواهد بود. معیار موهر-کولمب را می‌توان در صفحه دو بعدی با استفاده از تنش‌های اصلی نیز بیان (رابطه ۲) نمود. بر اساس شکل ۴ می‌توان نوشت:

به علت نوع هندسه و چند ضلعی بودن این مسئله، بهترین تکنیک شبکه‌بندی Structure می‌باشد، زیرا در این روش می‌توان یک الگوی پیش فرض از شبکه‌بندی (Mesh) هندسه مسئله در دست داشتن همچنین در این تکنیک اجزاء (Elements) نسبت به هم مقید می‌باشند که باعث حل دقیق‌تر مسئله خواهد شد. در نرم‌افزار ABAQUS جهت تحلیل‌های استاتیکی از حلگر Standard استفاده می‌شود. از آنجایی که بارهای وارده در این مسئله بارهای استاتیکی می‌باشد بنابراین از حلگر ABAQUS-Standard استفاده شده است [۲۰].

با مقیدسازی در پایین مدل در جهت Y و در کناره‌ها در جهت X، شیروانی خاکی تحت وزن خود بارگذاری می‌شود. هندسه‌های شیروانی خاکی در ارتفاع‌های ۱۰ m، ۱۳ m و ۱۶ m به صورت شکل ۲ می‌باشند. به علت ساده‌سازی در روند تحلیل و مقایسه در مدل‌های مختلف، ارتفاع پی‌های شیروانی خاکی یکسان با یکدیگر در نظر گرفته شده است و ارتفاع پی در شیروانی خاکی مبنا (مدل هندسی مبنا) [۱۸]، برابر ۵ m می‌باشد.



شکل ۴. معیار گسیختگی موهر-کولمب در شرایط دو بعدی [۲۲]

Fig. 4. Mohr-Coulomb failure criterion in two-dimensional condition [22]

$$FOS = \frac{\text{Shear strength available}}{\text{Shear strength mobilized}} = \frac{c + \sigma_N \tan \varphi}{\tau} \quad (۴)$$

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} &= AB + BF \rightarrow \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \\ OA \sin \varphi + c \cos \varphi &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi + c \cos \varphi \end{aligned} \quad (۲)$$

### ۲-۳- روش SRM

روش‌های تعادل حدی یکی از پرکاربردترین روش‌ها در تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی هستند. از این روش می‌توان برای تعیین ضریب اطمینان انواع مختلف ناپایداری‌های محتمل در شیب‌های خاکی و سنگی استفاده کرد. روش‌های تحلیل عددی پیشرفت‌های تازه‌تری نسبت به روش تعادل حدی به منظور ارزیابی پایداری شیب‌ها و محاسبه ضریب اطمینان داشته‌اند. به طوری که طی سال‌های اخیر به طور گسترده روش‌های عددی (شامل روش اجزای محدود، روش اجزاء مجزا و روش دیفرانسیل محدود) به عنوان یک ابزار قدرتمند در شبیه‌سازی و تحلیل پایداری شیروانی خاکی و سنگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۳-۲۶].

ضریب اطمینان (FOS) یک رویکرد رایج برای ارزیابی پایداری شیب است. بیشاپ، ضریب اطمینان را به عنوان نسبت مقاومت برشی واقعی به حداقل مقاومت برشی مورد نیاز برای حفظ تعادل تعریف کرد (شکل ۵) [۲۷ و ۲۶ و ۲۳].

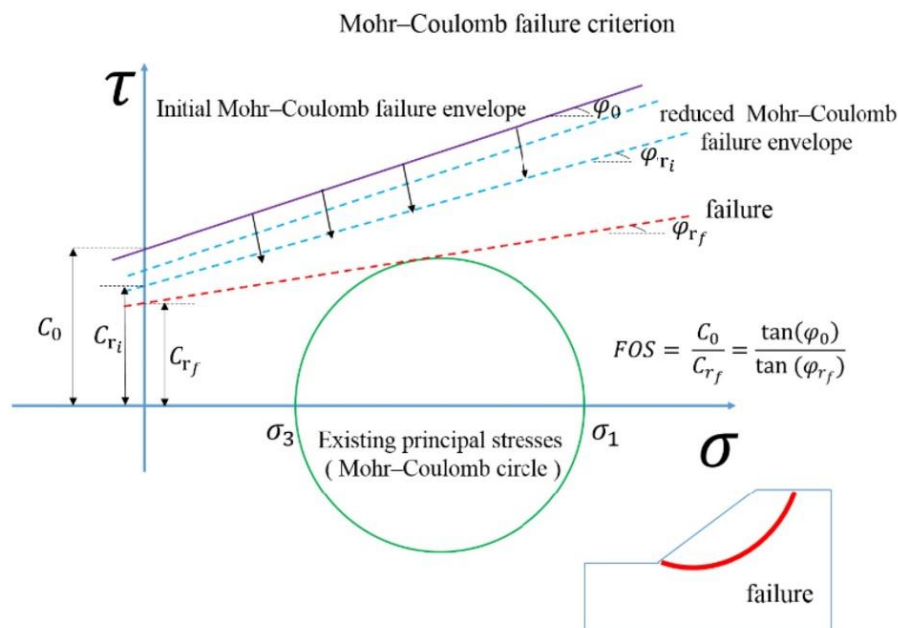
در این رابطه  $\sigma_1$ ،  $\sigma_3$  تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل بوده و همانطور که مشخص است از تنش میانگین  $\sigma_2$  صرف نظر شده است. با استفاده از مؤلفه‌های تانسور تنش معیار فوق را می‌توان به صورت رابطه (۳) نیز نوشت:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{2}\right)^2 + \sigma_{13}^2} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{33}}{2} \sin \varphi + c \sin \varphi \quad (۳)$$

با توجه به این که در نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از آزمایش برش مستقیم [۴]، تنها زاویه اصطکاک و چسبندگی تحت تاثیر آلودگی نفتی در اختیار است و با توجه به رابطه ۱، می‌توان نتیجه گرفت که بهترین مدل رفتاری جهت تحلیل پایداری شیروانی خاکی در این پژوهش، مدل رفتاری موهر-کولمب می‌باشد.

با توجه به رابطه (۴)، در روش تعادل حدی می‌توان میزان ضریب

اطمینان را به دست آورد:



شکل ۵. روش کاهش مقاومت برشی [۲۴]

Fig. 5. the method of shear strength reduction [24]

شیروانی‌های مختلف مورد سنجش و مقایسه قرار خواهد گرفت. جهت تحلیل به وسیله روش SRM با استفاده از الگوریتم شکل ۶ می‌توان ضریب اطمینان شیروانی‌های خاکی را تخمین زد [۲۸].

#### ۲-۴- صحت سنجی

نتایج آزمایش تک محوره بر روی خاک‌های آلوده به مواد نفتی در آلودگی‌های مختلف به صورت شکل ۷ می‌باشد [۴]. جهت صحت‌سنجی نرم‌افزار ABAQUS، آزمایش تک محوره بر روی خاک رسی در حالت بدون آلودگی نفتی و در آلودگی نفتی ۱۶٪ در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است و سپس با نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی تک محوره [۴] مقایسه شده است.

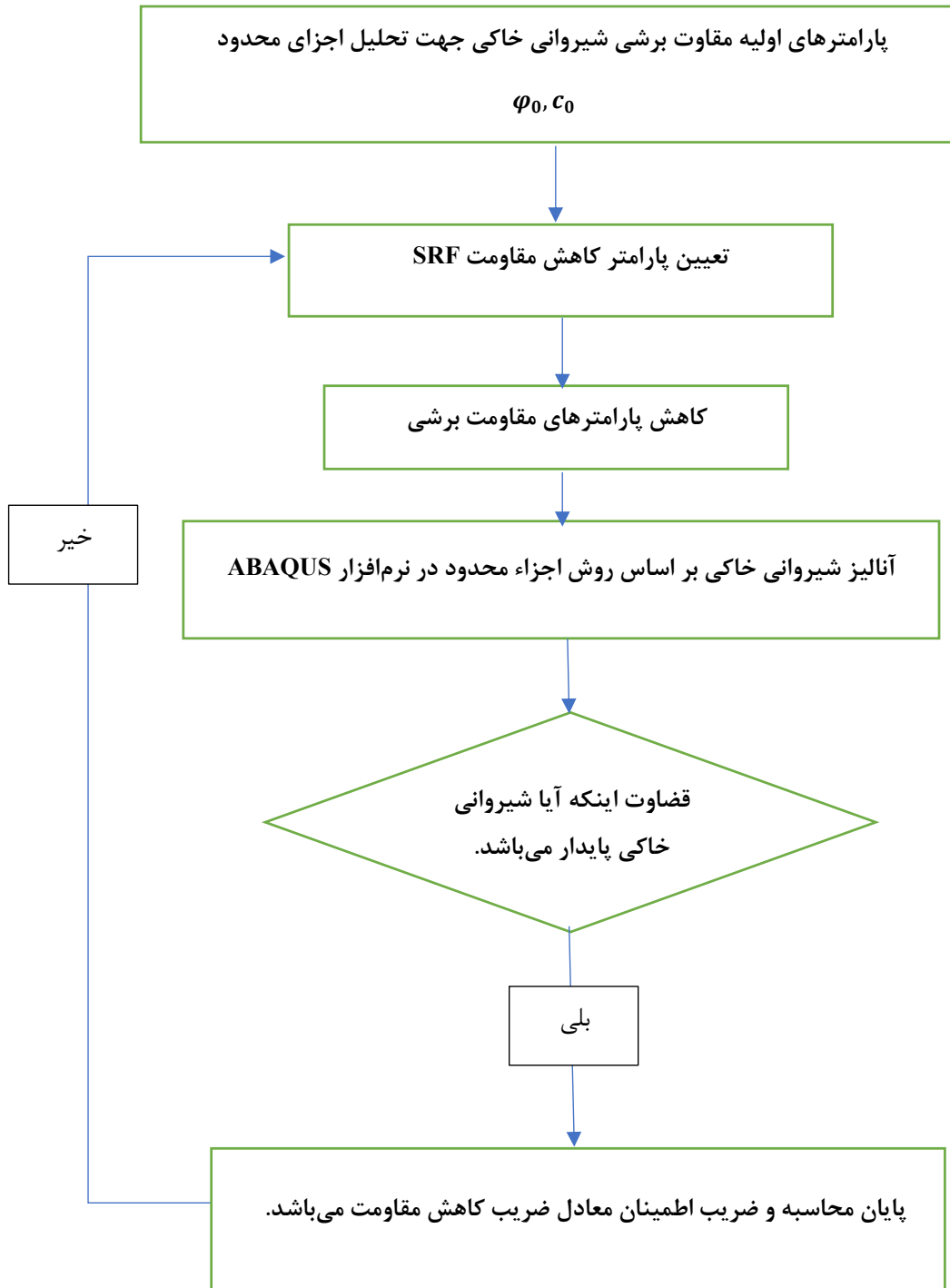
همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود که در بازه آلودگی ۰ تا ۴٪ میزان مقاومت تک محوره ( $q_u$ ) افزایش کوچکی می‌یابد، سپس با افزایش آلودگی نفتی در بازه ۴٪ تا ۱۶٪ مقاومت تک محوره روند کاهشی پیدا خواهد کرد [۴].

فکتور کاهش مقاومت (SRM) توسط موهر-کولمب برای محاسبه ضریب اطمینان به طور گسترده در تحقیقات پایداری شیب و مدل‌سازی عددی کاربرد دارد. در روش SRM، خصوصیات مقاومت برشی واقعی شیروانی خاکی (چسبندگی و زاویه اصطکاک) تا زمانی که یک گسیختگی رخ دهد با ضریب کاهش می‌یابد (شکل ۵). فکتور کاهش مقاومت (SRF<sup>۱</sup>) به وسیله رابطه (۵) به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۷]:

$$FOS = SRF = \frac{C_0}{C_r} = \frac{\tan \phi_0}{\tan \phi_r} \quad (5)$$

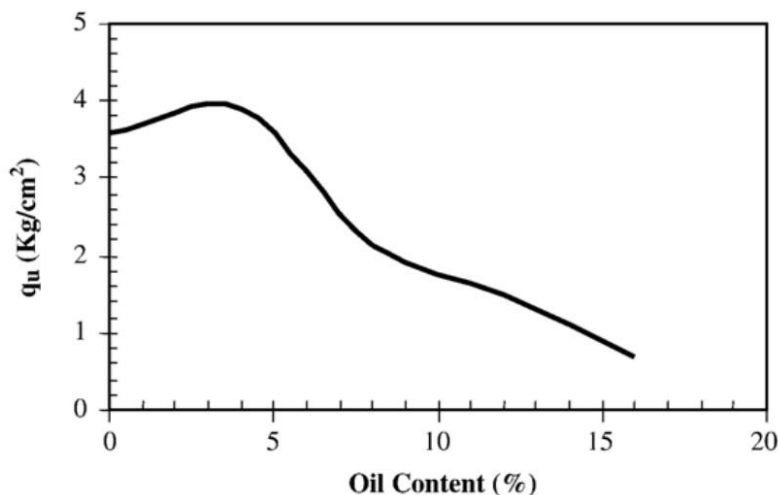
در رابطه (۵)،  $C_0$  و  $\phi_0$  به ترتیب چسبندگی اولیه و زاویه اصطکاک داخلی اولیه و همچنین  $C_r$  و  $\phi_r$  به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته خاک هستند.

در این پژوهش به وسیله روش کاهش مقاومت و با استفاده از روش عددی اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS میزان ضرایب اطمینان



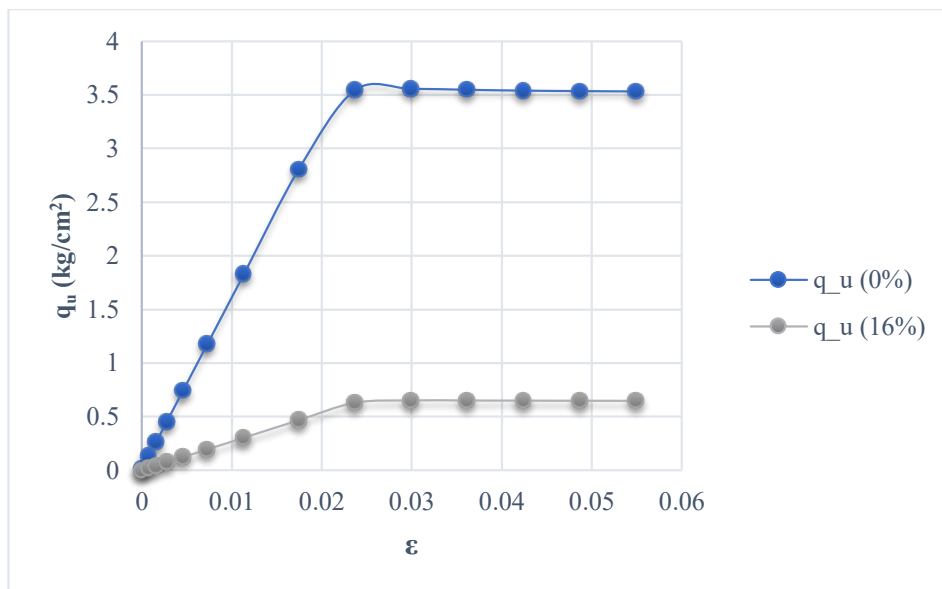
شکل ۶. فلوجارت جمع بندی روش کاهش مقاومت SRF [۲۸]

Fig. 6. the flowchart of the conclusion of the Strength reduction method (SRF) [28]



شکل ۷. نمودار فشار تک-محوره به میزان آلودگی نفتی در خاک رسی [۴]

Fig. 7. the diagram of uniaxial compression against oil content in clayey soil [4]



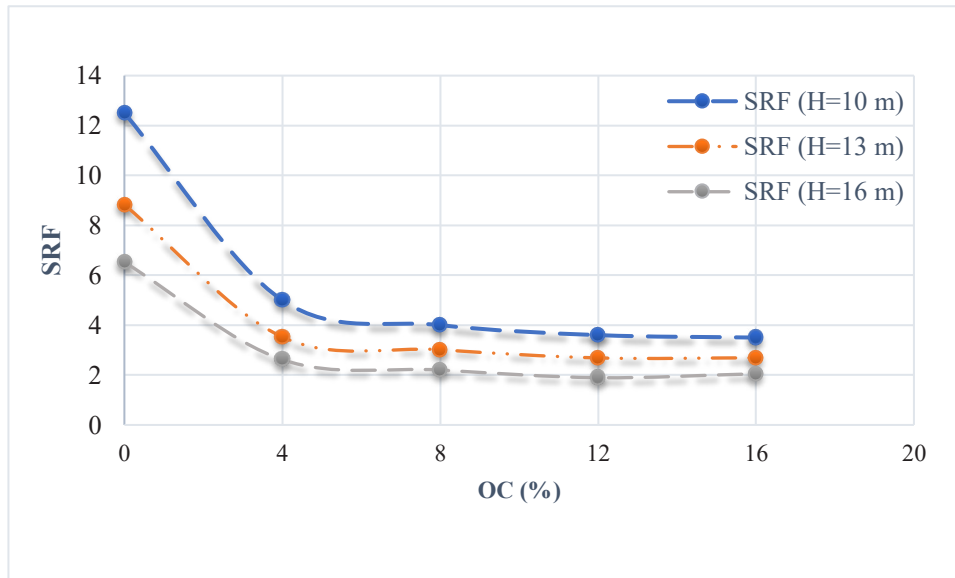
شکل ۸. نمودار آزمایش تک-محوره به کرنش محوری در حالت بدون آلودگی نفتی در نرم‌افزار ABAQUS

Fig. 8. the diagram of uniaxial test against axial strain in the uncontaminated state in ABAQUS

با  $0.62 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  به دست آمده است. با مقایسه این نتایج با نتایج داده‌های ABAQUS به دست آمده از مدل‌سازی آزمایش تک‌محوره در نرم‌افزار ABAQUS (شکل ۸) می‌توان دریافت که خطای این دو روش نسبت به یکدیگر، در حالت بدون آلودگی نفتی و در آلودگی نفتی ۱۶٪ به ترتیب برابر با ۱/۱٪ و ۴٪ به دست می‌آید. خطای به دست آمده از نتایج، نشان دهنده قابل قبول بودن میزان خطا می‌باشد.

شکل ۸، بیانگر نتایج خروجی نرم‌افزار (ABAQUS) از تغییرات مقاومت تک‌محوره بر حسب کرنش محوری در حالت بدون آلودگی نفتی و آلودگی ۱۶٪ می‌باشد.

با بررسی نتایج آزمایشگاهی، مقاومت تک‌محوره در حالت بدون آلودگی نفتی (شکل ۷)، برابر با  $3/5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  و همچنین در آلودگی نفتی ۱۶٪ برابر



شکل ۹. تغییرات میزان SRF بر اساس آلودگی نفتی در ارتفاع های مختلف

Fig. 9. the changes of SRF value against to the oil content in different heights

در حالت بدون آلودگی نفتی، SRF شیروانی خاکی برابر با ۱۲/۵ می باشد و با افزایش آلودگی نفتی تا ۱۶٪، SRF شیروانی به ۳/۵ تقلیل می یابد. مقاومت برشی خاک رسی وابسته به چسبندگی می باشد. در واقع در میزان آلودگی نفتی ۱۶٪، چسبندگی خاک ۷۵٪ نسبت به حالت بدون آلودگی نفتی کاهش یافته است. این روند موجب کاهش در عدد ضریب اطمینان شیروانی خاکی به اندازه ۷۲٪ می شود. بدیهی است که افزایش ارتفاع شیروانی خاکی در یک آلودگی نفتی ثابت، سبب کاهش SRF شیروانی خاکی شود. به طوری که با افزایش ارتفاع شیروانی خاکی به اندازه ۳ m، در یک آلودگی نفتی ثابت، SRF شیروانی خاکی به اندازه ۴۰٪ تا ۶۰٪ کاهش یافته است. ضریب اطمینان شیروانی خاکی در ارتفاع های مختلف با افزایش آلودگی نفتی در بازه ۰ تا ۴٪ کاهش چشمگیری داشته است به طوری که ضریب اطمینان با ۶۰٪ کاهش در این بازه مواجه خواهد شد. در واقع افزایش ۴٪ آلودگی نفتی به خاک سبب کاهش پایداری شیروانی خاکی می شود. علت این امر آن است که دانه های رس بر اثر افزایش آلودگی نفتی تجمع می کنند که قطر این ذرات تجمع یافته به اندازه لای و حتی ماسه ریز می رسد. در واقع تجمع ذرات رس می تواند موجب شبیه شدن رفتار آن به رفتار خاک های دانه ای شود و این عامل موجب کاهش سطح مخصوص و در نتیجه کاهش چسبندگی خاک رسی می شود [۲۹]. همچنین می توان از دیگر علل کاهش چسبندگی، کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی در اطراف صفحات

با بررسی شکل ۸ می توان دریافت که با افزایش میزان آلودگی نفتی مقاومت تک محوره خاک رس به طور محسوسی کاهش می یابد. به طوری که با افزایش آلودگی نفتی تا ۱۶٪ میزان مقاومت تک محوره به اندازه ۸۲٪ کاهش می یابد.

### ۳- نتایج و تفسیر یافته ها

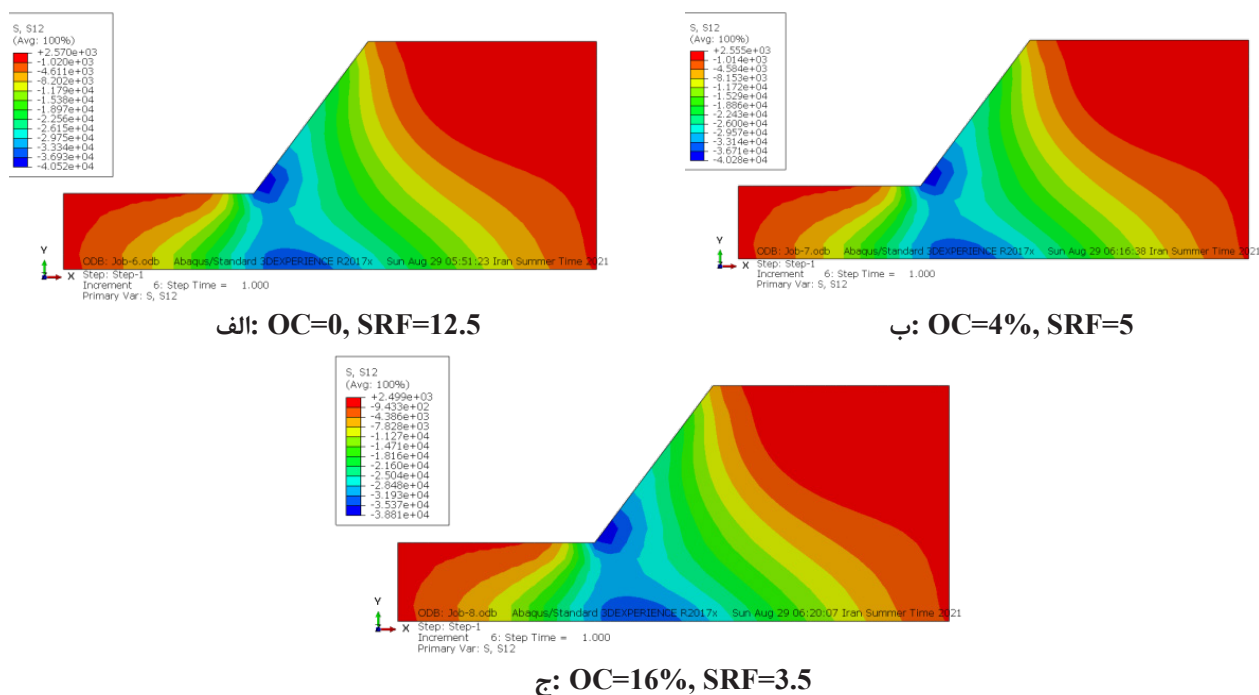
در این بخش به تاثیر افزایش آلودگی نفتی بر روی ضریب اطمینان، تنش برشی، جابه جایی قائم و افقی در ارتفاع های مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته شده است. نتایج حاصل از مدل سازی در نرم افزار ABAQUS در قالب نمودار شرح و بسط داده شده است.

#### ۳-۱ نتایج تنش های موجود تحت اثر آلودگی نفتی

همانطور که در بخش قبل (۲-۳) توضیح داده شد، ضریب اطمینان شیروانی خاکی با روش SRM به دست می آید. با استفاده از این روش، میزان تغییرات این پارامتر در آلودگی های مختلف (۴٪، ۸٪، ۱۲٪ و ۱۶٪) با شیروانی خاکی بدون وجود آلودگی نفتی در ارتفاع های مختلف مقایسه و تحلیل شده است (شکل ۹).

در شکل ۹، مشاهده می شود که با افزایش آلودگی نفتی میزان SRF شیروانی خاکی کاهش می یابد به طوری که در ارتفاع شیروانی ۱۰ m و



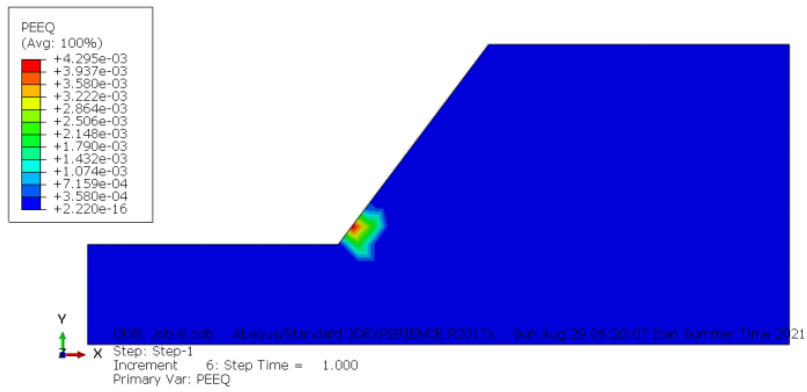


شکل ۱۰. تغییرات تنش برشی در آلودگی های نفتی ۰، ۴ و ۱۶٪ و ارتفاع ۱۰ m

Fig. 10. the changes of shear stress in the oil content of 0, 4, and 16% and the height of 10 m

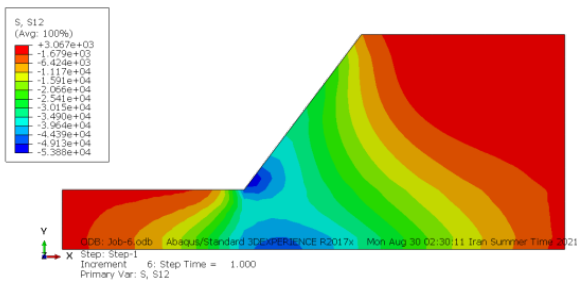
در شکل ۱۲، تنش برشی در پای شیروانی خاکی به ارتفاع ۱۳ m بیشینه می‌باشد و همان‌طور که در بخش قبلی گفته شد تنش برشی و کرنش پلاستیک در پای شیب شیروانی شروع به افزایش می‌یابد (شکل ۱۳). با مقایسه شکل‌های ۱۳-الف، ۱۳-ب و ۱۳-ج می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش آلودگی نفتی، ناحیه پلاستیک گسترش می‌یابد. با توجه به نتایج مدل‌سازی در حالت بدون آلودگی نفتی هیچ گونه کرنش پلاستیک یا ناحیه پلاستیکی ایجاد نشده است. پیش‌بینی می‌شود که افزایش آلودگی نفتی سبب گسترش ناحیه پلاستیک از پنجه شیروانی خاکی تا بالای آن شود. با مقایسه شکل ۱۱، ۱۳ و ۱۵ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش آلودگی نفتی، پایداری شیروانی خاکی کاهش و ناحیه پلاستیک در شیروانی خاکی افزایش یافته است. همچنین با مقایسه شکل‌های ۱۰، ۱۲ و ۱۴ می‌توان دریافت که تنش برشی بیشینه در شیروانی خاکی در اثر آلودگی نفتی کاهش یافته است. به عبارتی می‌توان گفت که آلودگی نفتی سبب کاهش تنش برشی بسیج شده بر روی شیروانی خاکی می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد با افزایش آلودگی نفتی عدد SRF شیروانی خاکی کاهش یافته است (شکل ۹).

رسی را برشمارد. زیرا که نفت خام، یک ترکیب غیرقطبی می‌باشد و باعث کاهش شارژ الکترواستاتیکی در رس‌ها خواهد شد [۲۹]. برای بررسی پایداری، تغییرات تنش برشی شیروانی خاکی، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بدین منظور تغییرات تنش برشی در شیروانی خاکی در ارتفاعات مختلف و بررسی نقاط بیشینه تنش برشی اهمیت دارد. شکل‌های ۱۰، ۱۲ و ۱۴، تغییرات تنش برشی و شکل‌های ۱۱، ۱۳ و ۱۵ تغییرات کرنش برشی پلاستیک (ناحیه پلاستیک) را به ترتیب در ارتفاع ۱۰ m، ۱۳ m و ۱۶ m نشان می‌دهد. در شکل ۱۰، تغییرات تنش برشی در ارتفاع شیروانی ۱۰ m نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که تنش برشی در پای شیروانی، بیشینه می‌باشد. سطح لغزش شیروانی را می‌توان مکان هندسی نقاطی در نظر گرفت که کرنش‌های اصلی پلاستیک در آن نواحی به حالت بیشینه خود می‌رسند [۳۰] و [۲۶]. در واقع افزایش آلودگی نفتی سبب بزرگ‌تر شدن ناحیه پلاستیک در شیروانی خاکی خواهد شد و در واقع گوه فعال در شیروانی بزرگ‌تر می‌شود (شکل ۱۲) که این امر سبب ایجاد ناپایداری و کاهش ضریب اطمینان در شیروانی خاکی خواهد شد.

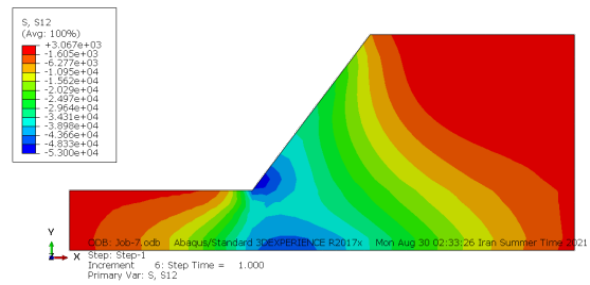


شکل ۱۱. تغییرات کرنش پلاستیک در ارتفاع ۱۰ m و  $OC=16\%$  و  $SRF=3.5$

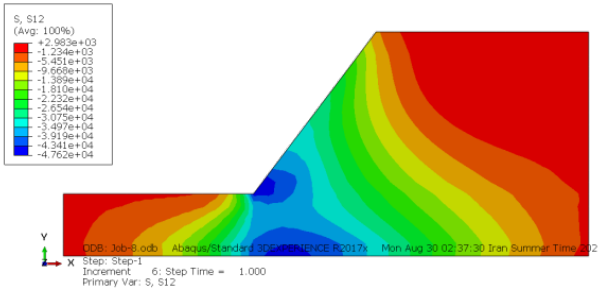
Fig. 11. the changes of plastic strain in the height of 10 m,  $OC=16\%$ , and  $SRF=3.5$



الف:  $OC=0$ ,  $SRF=8.823$



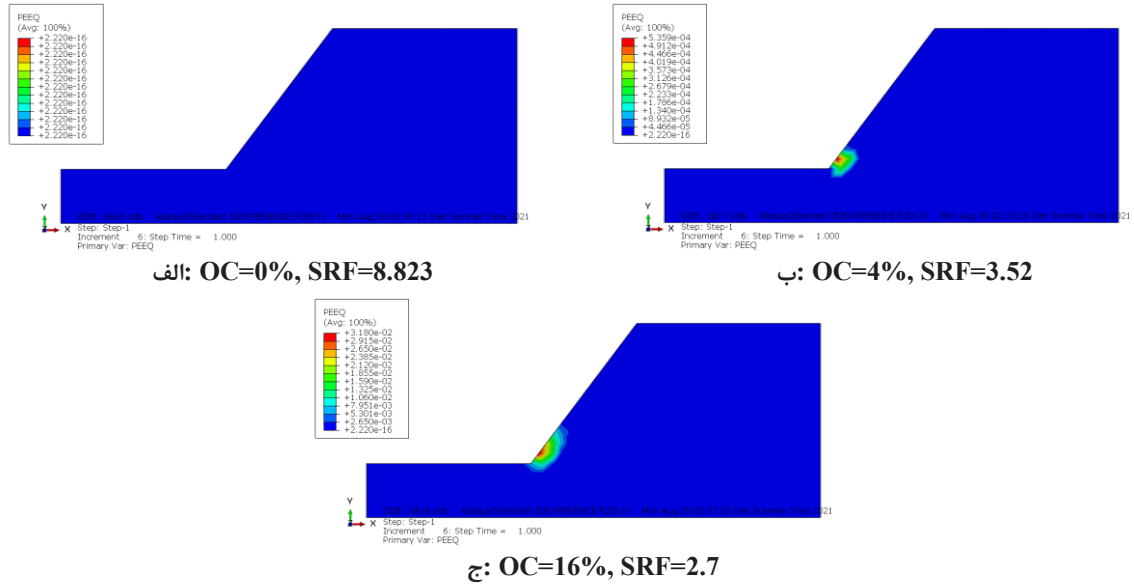
ب:  $OC=4\%$ ,  $SRF=3.525$



ج:  $OC=16\%$ ,  $SRF=2.7$

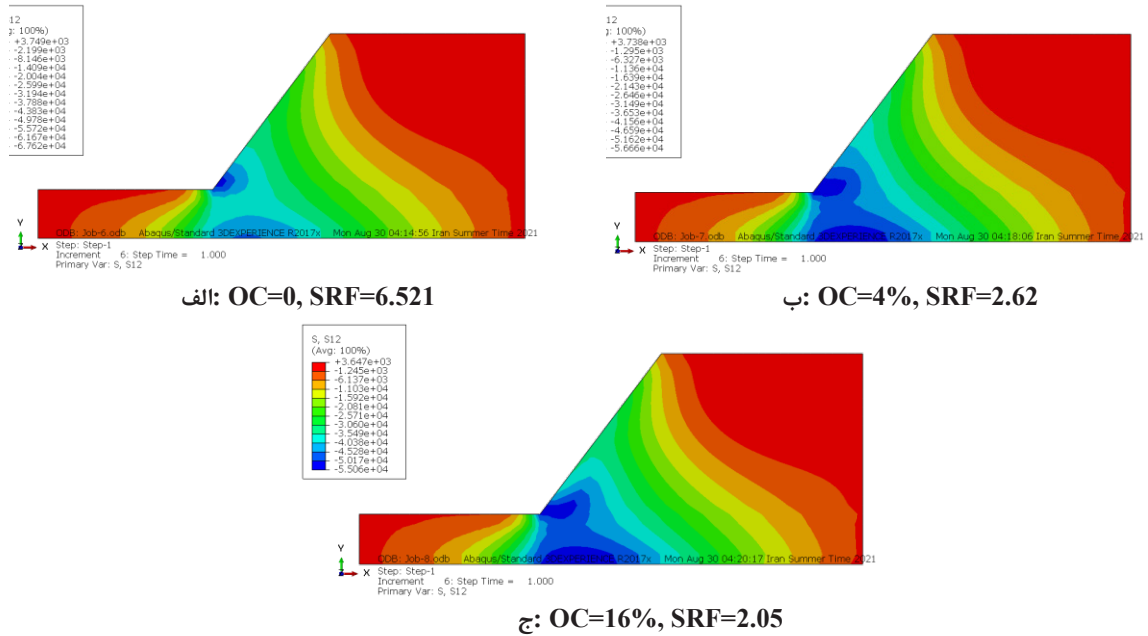
شکل ۱۲. تغییرات تنش برشی در آلودگی‌های نفتی ۰، ۴ و ۱۶٪ و ارتفاع ۱۳ m

Fig.12. the changes of shear stress in the oil content of 0, 4%, and 16% and the height of 13 m



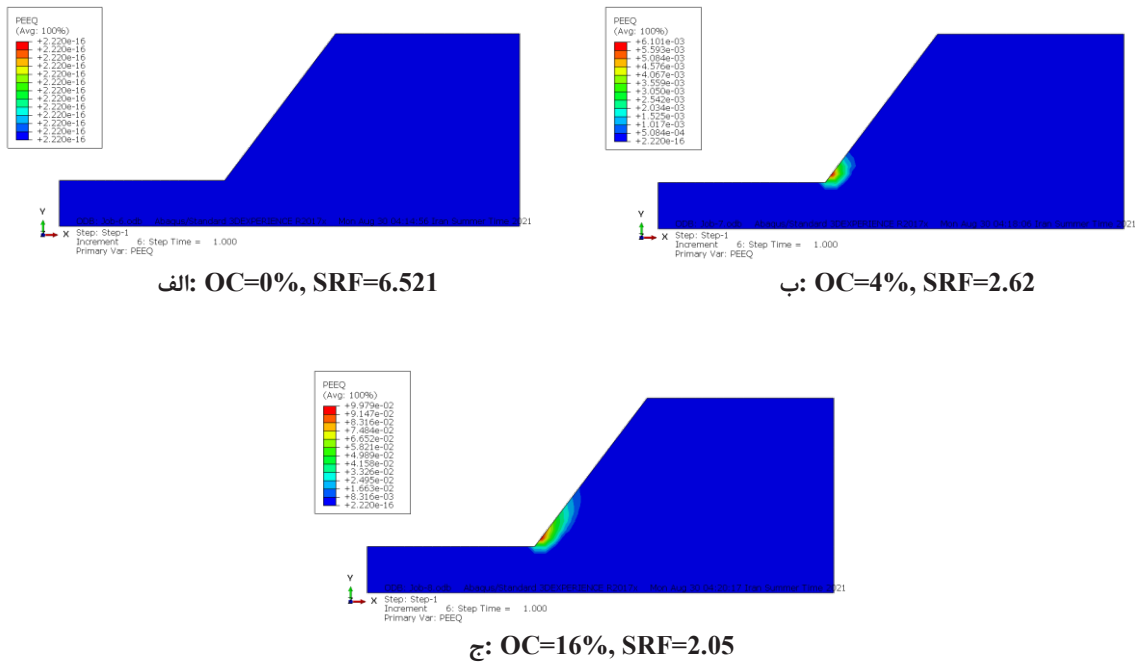
شکل ۱۳. تغییرات کرنش پلاستیک در ارتفاع ۱۳ m و آلودگی‌های نفتی ۰، ۴٪ و ۱۶٪

Fig. 13. the changes of plastic strain in the height of 13 m, and the oil content of 0, 4%, and 16%



شکل ۱۴. تغییرات تنش برشی در آلودگی‌های نفتی ۰، ۴٪ و ۱۶٪ و ارتفاع ۱۶ m

Fig. 14. the changes of shear stress in the oil content of 0, 4%, and 16% and the height of 16 m



شکل ۱۵. تغییرات کرنش پلاستیک در ارتفاع ۱۶ m و آلودگی‌های نفتی ۰، ۴٪ و ۱۶٪

Fig. 15. the changes of plastic strain in the height of 16 m, and the oil content of 0, 4%, and 16%

می‌باشد و می‌توان از آن صرف نظر کرد. اما با افزایش ۶ m ارتفاع شیروانی خاکی، کاهش تنش برشی بیشینه به بیش از ۱۰٪ می‌رسد که این میزان کاهش قابل صرف نظر نمی‌باشد.

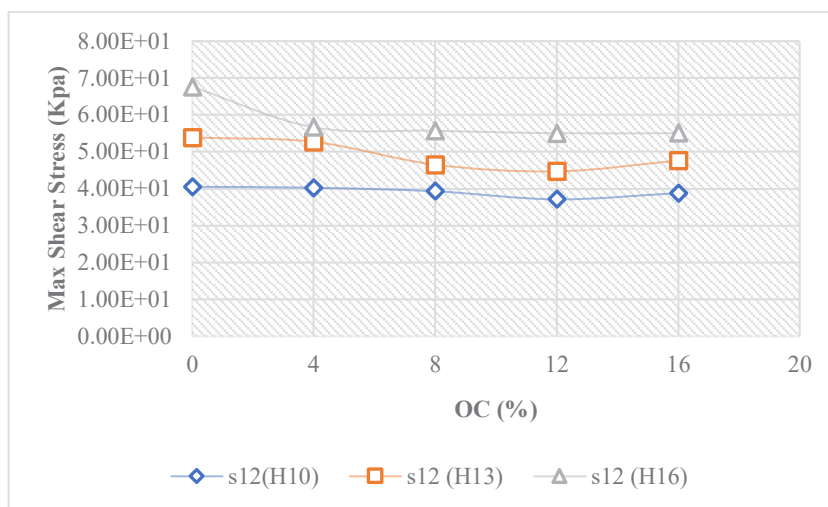
### ۳-۲- نتایج جابه‌جایی موجود تحت اثر آلودگی نفتی

یکی از پارامترهای مهم در طراحی شیروانی خاکی، بررسی جابه‌جایی قائم و افقی می‌باشد. افزایش آلودگی نفتی در شیروانی با ارتفاع‌های مختلف (شکل الف-۱۷) سبب افزایش جابه‌جایی افقی می‌شود. که به طور مثال در ارتفاع ۱۶ m، آلودگی نفتی (۰ تا ۱۶٪) جابه‌جایی افقی را از ۵ cm به ۲۵ cm افزایش داده است. همچنین در شکل ب-۱۷ مشاهده می‌شود که نشست قائم شیروانی خاکی از ۲۰ cm به ۱۲۰ cm افزایش یافته است.

روند افزایش جابه‌جایی قائم و افقی در محدوده آلودگی ۱۲٪ تا ۱۶٪ بسیار چشمگیر می‌باشد به طوری که در این محدوده افزایش آلودگی نفتی سبب افزایش جابه‌جایی افقی بین ۲ الی ۲/۳ برابر و جابه‌جایی قائم بین ۲/۶ تا ۳/۸ برابر می‌شود. بر پایه روابط ارائه شده توسط محققین ضریب اطمینان شیروانی خاکی اگر بزرگ‌تر از ۱ باشد شیروانی خاکی پایدار است اما بر طبق آیین‌نامه حداقل ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌های خاکی در حالت

از آن جایی که در شیروانی خاکی تنش برشی بسیج شده (شکل ۱۶) و عدد ضریب اطمینان نیز کاهش یافته است و همچنین با توجه به رابطه (۴) در بخش قبل، می‌توان نتیجه گرفت که در اثر آلودگی نفتی مقاومت برشی خاک (صورت کسر رابطه ۴) باید کاهش بیش‌تری نسبت به تنش برشی بسیج شده (مخرج کسر رابطه ۴) داشته باشد. در نتیجه پیش‌بینی می‌شود که افزایش آلودگی نفتی (بزرگ‌تر از ۱۶٪) سبب ناپایداری شیروانی خاکی شود. برای بیان دقیق‌تر تغییرات، تنش برشی بسیج شده به اندازه آلودگی نفتی (محور افقی) در شکل ۱۶ در ارتفاع‌های مختلف نشان داده شده است. بر اساس شکل ۱۶ با افزایش آلودگی نفتی در بازه ۰ تا ۱۶٪ کاهش تنش برشی در ارتفاع‌های مختلف متفاوت می‌باشد. با افزایش ارتفاع شیروانی خاکی تاثیر آلودگی نفتی بر تنش برشی بیشتر می‌شود (جدول ۳).

بر اساس جدول ۳ می‌توان دریافت که تحت تاثیر آلودگی نفتی، تنش برشی بیشینه در شیروانی خاکی کاهش یافته است. در واقع تنش برشی بسیج شده در شیروانی خاکی کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به داده‌های جدول ۳ می‌توان دریافت که با افزایش ارتفاع شیروانی تاثیر افزایش آلودگی نفتی بر تنش برشی بیشینه افزایش می‌یابد. در واقع در اثر افزایش آلودگی نفتی تنش برشی در ارتفاع ۱۰ m، ۴٪ کاهش یافته است که این مقدار عدد کوچکی



شکل ۱۶. تغییرات تنش برشی بیشینه بر حسب تغییرات آلودگی نفتی در ارتفاع‌های ۱۰ m، ۱۳ m و ۱۶ m

Fig. 16. the changes of maximum shear stress against in the height of 10 m, 13 m, and 16 m

جدول ۳. تغییرات تنش برشی در بازه آلودگی نفتی ۰ تا ۱۶٪ در ارتفاع‌های ۱۰ m، ۱۳ m و ۱۶ m

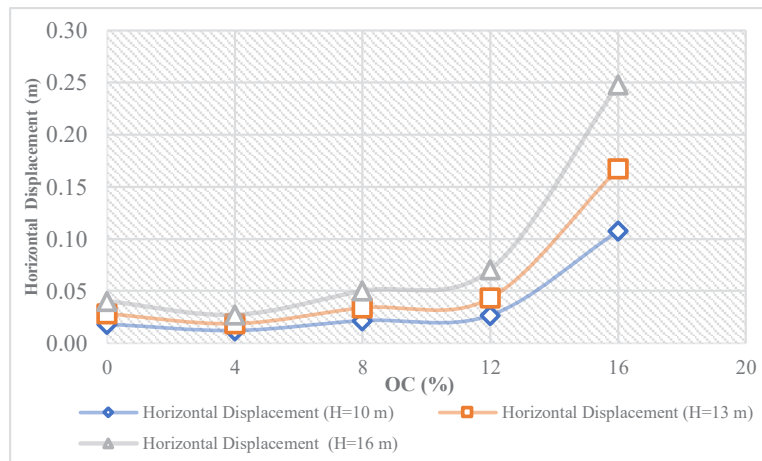
Table 3. the changes of shear stress in the oil content range of 0 to 16% in the heights of 10, 13, and 16 meters

ارتفاع شیروانی خاکی بر حسب متر (m)	تغییر تنش برشی بر حسب درصد (%)
۱۰	-۴
۱۳	-۱۱/۶
۱۶	-۱۳/۵

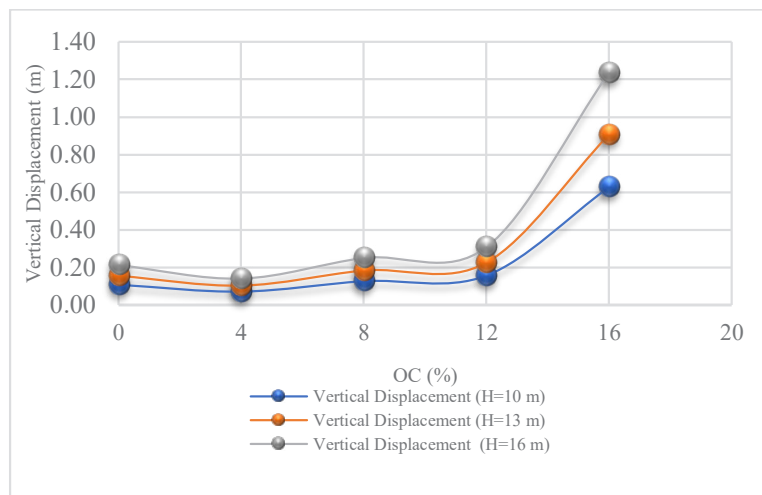
#### ۴- جمع بندی

آلودگی نفتی باعث تغییر در ساختار مکانیکی خاک رسی می‌شود که این تغییرات باعث کاهش مقاومت برشی خاک‌های رسی در شیروانی‌های خاکی و از طرفی باعث کاهش ضریب اطمینان در پایداری شیروانی‌ها خواهد گردید. از این رو با توجه به تاثیر آلودگی نفت خام بر سازه‌های مستقر بر شیروانی‌های خاکی، باید پایداری این شیروانی‌ها تحت نفوذ آلودگی نفتی بررسی شود. از آنجایی که ترکیبات هیدروکربنی به مانند نفت خام، به صورت غیرقطبی می‌باشد، باعث کاهش میزان چسبندگی در خاک رسی می‌شود زیرا که این ترکیبات غیرقطبی میزان شارژ الکترواستاتیکی موجود بر روی صفحات رسی

استاتیکی ۱/۵ می‌باشد [۳۰]، بنابراین با توجه به ضرایب اطمینان به دست آمده از مدل‌سازی عددی می‌توان نتیجه گرفت تمامی شیروانی‌های خاکی پایدار هستند. با توجه به داده‌های موجود در نمودارهای مختلف (شکل ۹، ۱۷-الف و ۱۷-ب) ارائه شده در این پژوهش، روند تغییرات ضریب اطمینان و جابه‌جایی شیروانی خاکی در اثر افزایش آلودگی نفتی روند خطی ندارد و در واقع ممکن است با افزایش حتی ۲٪ تا ۴٪ آلودگی نفتی، شیروانی خاکی دچار ناپایداری و گسیختگی شود. این روند را می‌توان در تغییرات بزرگ ضریب اطمینان میان حالت بدون آلودگی نفتی با آلودگی نفتی ۴٪ به خوبی مشاهده کرد.



الف



ب

شکل ۱۷. تغییرات جا به جایی ماکزیمم بر حسب آلودگی نفتی در ارتفاع ۱۰ m، ۱۳ m و ۱۶ m- تغییرات جابه جایی افقی بر حسب متر به آلودگی نفتی بر حسب درصد ب- تغییرات جا به جایی قائم بر حسب متر به آلودگی نفتی بر حسب درصد

Fig. 17. the changes of maximum displacement against the oil contamination in the heights of 10, 13, and 16 meters, a: the changes of horizontal displacement (m) against the oil content (%), b: the changes of vertical displacement (m) against the oil content (%),

استاتیکی قرار گرفته شده است. روش سنجش میزان ضریب اطمینان در شیروانی خاکی روش کاهش مقاومت یا SRM می باشد. در نهایت ضریب اطمینان، جابه جایی افقی، جابه جایی قائم و تنش برشی شیروانی هایی خاکی در ارتفاع ۱۰ m، ۱۳ m و ۱۶ m تحت اثر آلودگی نفتی ۰، ۰.۴٪، ۰.۸٪، ۱.۲٪ و ۱.۶٪ مورد سنجش و مقایسه قرار می گیرد. می توان به عنوان ادامه روند این پژوهش، این شیروانی های خاکی تحت بار دینامیکی قرار گرفته و پایداری شیروانی خاکی تحت اثر آلودگی نفتی مدل سازی عددی انجام شود. نتایج این

را کاهش داده و از آنجایی که آب یک ترکیب قطبی است، میزان جذب سطحی خاک رسی کاهش می یابد. پایداری شیروانی های خاک رسی، تا حد زیادی تابع چسبندگی خاک است، بنابراین میزان مقاومت برشی این نوع کانی تحت اثر آلودگی نفتی کاهش می یابد. مسیر تحقیقاتی محققین گذشته انجام آزمون های آزمایشگاهی بر روی خاک آلوده به مواد نفتی بوده است. لذا در این پژوهش بررسی عددی به روش اجزاء محدود در نرم افزار ABAQUS انجام شده است. این شیروانی های خاکی جهت بررسی پایداری، تحت بار

contaminated sand, in, pp. 101-108.

پژوهش به اختصار به شرح ذیل می‌باشد:

- [3] A.-S.H. A, E.W. K, I.N. F, Geotechnical Properties of Oil-Contaminated Kuwaiti Sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(5) (1995) 407-412.
- [4] M. Khomehchiyan, A. Hossein Charkhabi, M. Tajik, Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils, *Engineering Geology*, 89(3-4) (2007) 220-229.
- [5] N.A.M. A, Experimental and Theoretical Studies for the Behavior of Strip Footing on Oil-Contaminated Sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(12) (2009) 1814-1822.
- [6] M. Kermani, T. Ebadi, The Effect of Oil Contamination on the Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils, Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 21(5) (2012) 655-671.
- [7] E. Khosravi, H. Ghasemzadeh, M.R. Sabour, H. Yazdani, Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite, *Engineering Geology*, 166 (2013) 11-16.
- [8] A.H.B.A. talebzadeh, Laboratory Modeling of Oil Contamination Propagation Effect on Subgrade Reaction Modulus of Fine Grained Sand, *Journal of civil engineering sharif*, 4(2) (2015) 1028-1028.
- [9] Z.-b. Liu, S.-y. Liu, Y. Cai, Engineering property test of kaolin clay contaminated by diesel oil, *Journal of Central South University*, 22(12) (2015) 4837-4843.
- [10] R.M. Abousnina, A. Manalo, J. Shiau, W. Lokuge, Effects of Light Crude Oil Contamination on the Physical and Mechanical Properties of Fine Sand, Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 24(8) (2015) 833-845.
- [11] 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.
- [12] S.A. Nasehi, A. Uromeihy, M.R. Nikudel, A. Morsali, Use of nanoscale zero-valent iron and nanoscale hydrated lime to improve geotechnical properties of gas oil
- افزایش آلودگی نفتی، سبب کاهش چسبندگی خاک رسی می‌شود. لذا مقاومت برشی خاک رسی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به طوری که پیش‌بینی می‌شود که میزان ضریب اطمینان با افزایش آلودگی نفتی از ۰ تا ۱۶٪ به اندازه ۷۲٪ کاهش (در ارتفاع‌های مختلف) یابد.
  - افزایش ۴٪ آلودگی نفتی به شیروانی خاکی (به شیروانی بدون آلودگی نفتی) سبب کاهش ۶۰٪ در عدد ضریب اطمینان شیروانی خاکی می‌شود لذا می‌توان گفت در بازه ۰ تا ۴٪ آلودگی نفتی، ضریب اطمینان به طور قابل توجهی کاهش یافته و سبب ناپایداری شیروانی خاکی خواهد شد.
  - با افزایش آلودگی نفتی (۰ تا ۱۶٪)، سطح کرنش‌های پلاستیک بزرگ‌تر می‌شود، به طوری که در حالت بدون آلودگی نفتی ( $OC=0$ ) اندازه کرنش پلاستیک صفر است اما با افزایش آلودگی نفتی، کرنش پلاستیک از پنجه شیروانی شروع به افزایش می‌یابد و سطح پلاستیک بزرگ‌تر خواهد شد.
  - تنش برشی بیشینه بسیج شده در اثر افزایش آلودگی نفتی کاهش می‌یابد. علت این پدیده را می‌توان در کاهش چسبندگی ذاتی خاک رس در اثر افزایش آلودگی نفتی جست که این پدیده اثر گذار بر روی تنش‌های موجود در شیروانی می‌باشد.
  - با افزایش ارتفاع شیروانی خاکی، تاثیر افزایش آلودگی نفتی بر تنش برشی بیشینه بسیج شده بیشتر می‌شود. به طوری که افزایش ارتفاع شیروانی تا ۱۶ m باعث کاهش ۱۴٪ تنش برشی بیشینه می‌شود که این میزان کاهش مقدار قابل توجهی می‌باشد.
  - در اثر افزایش آلودگی نفتی، جابه‌جایی افقی ۲ تا ۲/۳ برابر و جابه‌جایی قائم ۲/۶ تا ۳/۸ برابر افزایش می‌یابد به طوری که افزایش جابه‌جایی (قائم و افقی) در بازه آلودگی نفتی ۱۲٪ تا ۱۶٪ چشمگیر می‌باشد.
  - روند تغییرات جابه‌جایی، تنش برشی و ضریب اطمینان شیروانی خاکی در اثر آلودگی نفتی غیرخطی می‌باشد. در واقع ممکن است با افزودن آلودگی نفتی به اندازه ۲٪ تا ۴٪ به خاک رسی، شیروانی خاکی دچار ناپایداری و گسیختگی شود.

## منابع

- [1] E.E. Cook, V.K. Puri, E.C. Shin, Geotechnical Characteristics Of Crude Oil-Contaminated Sands, in, 1992.
- [2] E. Evgin, B.M. Das, Mechanical behavior of an oil

- With emphasis on geologic materials, by C. S. Desai and H. J. Siriwardane, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1984, ISBN 0-13-167940-6. No. of pages: 468. Price: \\$40.95, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 8(3) (1984) 308-309.
- [23] T.H. Abderrahmane, B. Abdelmadjid, Assessment of Slope Stability by Continuum and Discontinuum Methods, Researchgate.Net, 10(4) (2016) 543-548.
- [24] G. You, M.A. Mandalawi, A. Soliman, K. Dowling, P. Dahlhaus, Finite Element Analysis of Rock Slope Stability Using Shear Strength Reduction Method, in: W. Frikha, S. Varaksin, A. da Fonseca (Eds.), Springer International Publishing, Cham, pp. 227-235.
- [25] B. Azarfar, B. Peik, B. Abbasi, P. Roghanchi, A discussion on numerical modeling of fault for large open pit mines, 52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, (2018).
- [26] B. Azarfar, S. Ahmadvand, J. Sattarvand, B. Abbasi, Stability Analysis of Rock Structure in Large Slopes and Open-Pit Mine: Numerical and Experimental Fault Modeling, Rock Mechanics and Rock Engineering, 52(12) (2019) 4889-4905.
- [27] W.H.R. E. M. Dawson, A. Drescher, Slope stability analysis by strength, Géotechnique, 49(6) (1999) 835-840.
- [28] L.Y.L.Y.L.X.L.P. Liu Xinrong, Numerical analysis of evaluation methods and influencing factors for dynamic stability of bedding rock slope, Journal of Vibroengineering, 19(3) (2016) 1937-1961.
- [29] S.N.A.T.A. H. Ur-Rehman, Geotechnical behavior of oil-contaminated fine-grained soils, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 12 A (2007) 15-23.
- [30] H. Zheng, G. Sun, D. Liu, A practical procedure for searching critical slip surfaces of slopes based on the strength reduction technique, Computers and Geotechnics, 36(1-2) (2009) 1-5.
- contaminated clay: a comparative study, Environmental Earth Sciences, 75(9) (2016) 733-733.
- [13] H. Soltani-Jigheh, H. Vafaei Molamahmood, T. Ebadi, A. Abolhasani Soorki, Effect of oil-degrading bacteria on geotechnical properties of crude oil contaminated sand, 2017.
- [14] M. Ostovar, R. Ghiassi, M.J. Mehdizadeh, N. Shariatmadari, Effects of Crude Oil on Geotechnical Specification of Sandy Soils, Soil and Sediment Contamination, 00(00) (2020) 58-73.
- [15] M. Ahmadi, M. Abbaspour, T. Ebadi, R. Maknoon, Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of sand-kaolinite mixtures, Engineering Geology, 283 (2021) 106021-106021.
- [16] S.E. C, D.B. M, Some Physical Properties of Unsaturated Oil-Contaminated Sand, in, 2021, pp. 142-152.
- [17] G. Harsh, A. Patel, B. Himanshu, P. Tiwari, Effect of rate of crude oil contamination on index properties and engineering properties of clays and sands, Indian Journal of Science and Technology, 9(30) (2016).
- [18] Q.X. Meng, H.L. Wang, W.Y. Xu, M. Cai, J. Xu, Q. Zhang, Multiscale strength reduction method for heterogeneous slope using hierarchical FEM/DEM modeling, Computers and Geotechnics, 115(February) (2019).
- [19] S. Wu, L. Xiong, S. Zhang, Strength Reduction Method for Slope Stability Analysis Based on a Dual Factoring Strategy, International Journal of Geomechanics, 18(10) (2018) 04018123-04018123.
- [20] Abaqus, Analysis user's manual, in, 2016.
- [21] F. Tschuchnigg, H.F. Schweiger, S.W. Sloan, Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. Part I: Numerical studies considering non-associated plasticity, Computers and Geotechnics, 70 (2015) 169-177.
- [22] S. Sture, Constitutive laws for engineering materials:



چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*K. Rahgooy, S. Mirakhorli, A. Bahmanpour, The numerical study of the effect of the crude oil contamination on the stability of clayey soil slope, Amirkabir J. Civil Eng., 54(6) (2022) 2259-2280.*

**DOI:** [10.22060/ceej.2021.20067.7334](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.20067.7334)



