نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۶، سال ۱۴۰۱، صفحات ۲۲۵۹ تا ۲۲۸۰
DOI: 10.22060/ceej.2021.20067.7334

بررسی عددی تاثیر آلودگی نفت خام بر پایداری شیروانی خاک رسی

کامران رهگوی، سعید میرآخورلی، امین بهمن‌پور*

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

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 غیرآلوده 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 نرم‌افزار 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.

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

۱– مقدمه

آلاینده‌های نفتی در طول زمان توسط دریا، خلیج یا رودخانه به سواحل وارد می‌شوند و خاک اطراف خود را آلوده می‌کنند. که این آلاینده‌ها پیغامی از صنعتی شدن جامعه به ما می‌دهد. از دلایل عمده آلودگی خاک می‌توان به نشت آلاینده از لوله‌های اتومبیل‌های حامل مواد نفتی یا سرریزی از مخازن ذخیره آن و پسماند پالایشگاه‌ها و رها کردن ضایعات در محیط اشاره کرد. آلاینده‌های نفتی باعث زیان در دراز مدت طولانی بر روی مقاومت برشی خاک‌ها می‌شوند، به گونه‌ای که خصوصیات شیمیایی خاک آلوده شده با مواد نفتی تغییر می‌کند و این اثرات شیمیایی تاثیر مستقیمی بر روی جذب آب و شارژ الکترواستاتیکی خاک دارد، در نتیجه تاثیر منفی بر خواص چسبندگی خاک رسی می‌گذارد. همچنین آلودگی نفتی بر روی اصطکاک دانه‌های خاک اثرگذار است. به عبارتی آلودگی نفتی اثر مستقیم بر روی مقاومت برشی و پارامترهای آن دارد و باعث تغییر شکل گوه گسیختگی می‌شود.

آلاینده‌های نفتی تاثیر مستقیم بر خواص الاستیک و پلاستیک خاک رسی دارد، در نتیجه باعث تغییر در نمودار تنش-کرنش خاک‌ها می‌شوند. در حالت کلی خاک در یک محیط ۳ فازی متشکل از دانه‌های جامد، آب و هوا است و با توجه به این که ماده نفتی یک سیال غیرقطبی است، در آب حل نمی‌شود، در نتیجه یک فاز جدید در خاک ایجاد کرده و خاک را به یک محیط ۴ فازی تبدیل می‌کند. این امر موجب تغییرات در وزن مخصوص خاک و در نتیجه تغییر در تنش موثر می‌شود. در اثر اضافه شدن مواد نفتی به خاک به دلیل غیرقطبی بودن آن و لزجت بالای آن نفوذپذیری در خاک کاهش می‌یابد، در نتیجه از سرعت و دبی تراوش کاسته می‌شود. اهمیت بررسی تاثیر آلودگی نفتی بر خاک باعث شده است که به یک بررسی جامع عددی به روش اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS انجام گیرد. این نرم‌افزار یک نرم‌افزار اجزاء محدود می‌باشد که به وسیله المان‌های مختلفی که در این نرم‌افزار وجود دارد می‌توان مدل‌سازی دقیق‌تری از هندسه و حل مسئله انجام داد. همچنین در این نرم‌افزار به علت وجود اندرکنش‌های مناسب میان المان‌ها،

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Aminbahamanpour@srbiau.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

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، شیروانی خاکی 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 شیروانی خاکی از روش SRM[1] 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 فشردگی 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 اتربرگ 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 کائولنیت 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].

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

ناصحی و همکاران دریافتند که اضافه کردن ۵٪ نانو هیدارت 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 میکرو ارگانیزم‌ها، میزان نفت خام تا ۵۰٪ تا ۸۰٪ 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 4° تا 12° می‌شود، همچنین افزودن آلودگی نفتی باعث افزایش چسبندگی تا ۵ kPa می‌شود [۱۴].

---
1 [1] Strength Reduction Method

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 کائولنیت
طالب‌زاده و حاجیانی [۸]	۲۰۱۵	آزمایش بارگذاری صفحه‌ای کوچک مقیاس در سه شرایط تراکمی مختلف بر مدول عکس العمل 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 کائولنیت
ابوسنیا و همکاران [۱۰]	۲۰۱۵	تاثیر آلودگی نفتی بر رفتار ساختمان‌های مستقر	ماسه ریزدانه
ناصحی و همکاران [۱۱]	۲۰۱۶	مطالعه صحرایی بر روی خاک‌های ریزدانه و درشت دانه	خاک ریزدانه و درشت‌دانه
ناصحی 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[1] 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 $۳۴/۵^{\circ}$ می‌رسد که این مقدار برای خاک رسی، مقدار قابل توجهی می‌باشد. همچنین چسبندگی خاک رسی در آلودگی ۱۶٪ به اندازه $\frac{kg}{cm^{۲}}$ ۰/۰۱ می‌رسد [۴].

۲- روش تحقیق

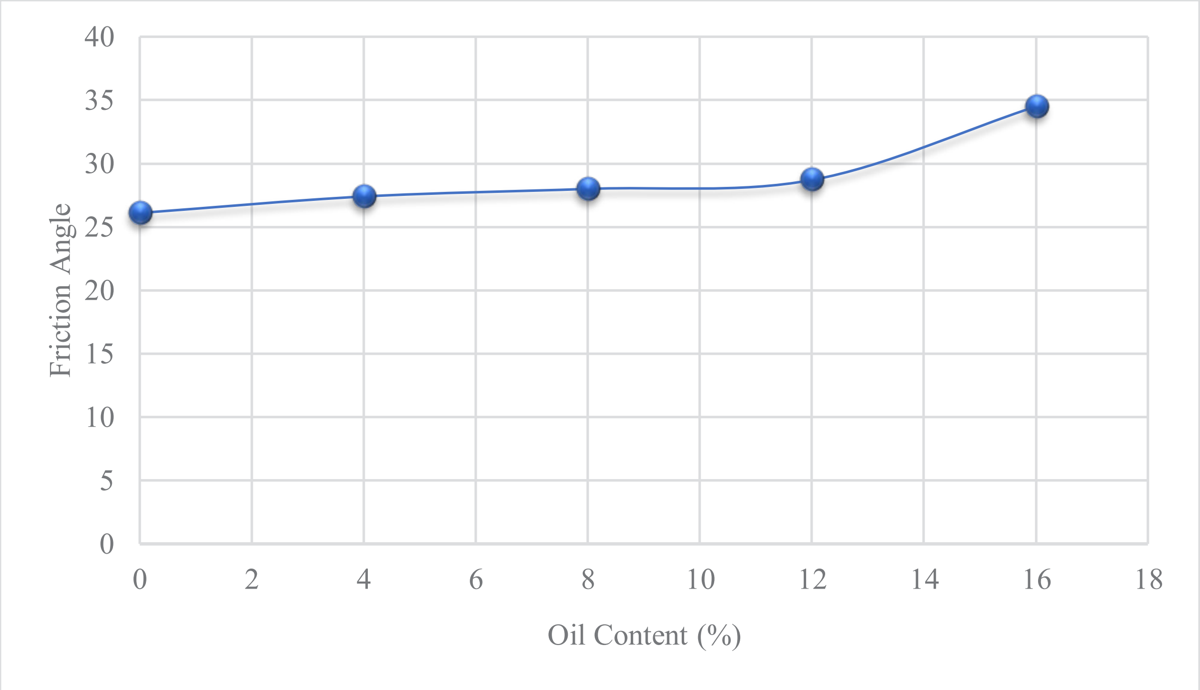
یکی از مهم‌ترین فاکتورهای طراحی شیروانی‌های خاکی، محاسبه ضریب اطمینان پایداری آن‌ها تحت اثر وزن خود می‌باشد. لذا در این پژوهش با استفاده از بارگذاری به وسیله نیروی وزن، تاثیر آلودگی نفت بر پایداری شیروانی خاکی مورد سنجش قرار می‌گیرد. با استفاده از روش SRM، ضریب اطیمنان یک شیروانی خاکی در ارتفاع‌های مختلف و بر اساس تغییر میزان آلایندگی نفتی اندازه‌گیری می‌شود. در این مدل‌سازی از پدیده انتشار آلایندگی 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 آلایندگی 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 مبنا 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 m ۱۶ افزایش می‌یابد و سپس به بررسی تاثیر آلودگی نفتی در ارتفاع‌های مختلف پرداخته می‌شود.

۲- ۱- مشخصات مصالح و هندسه مدل‌سازی

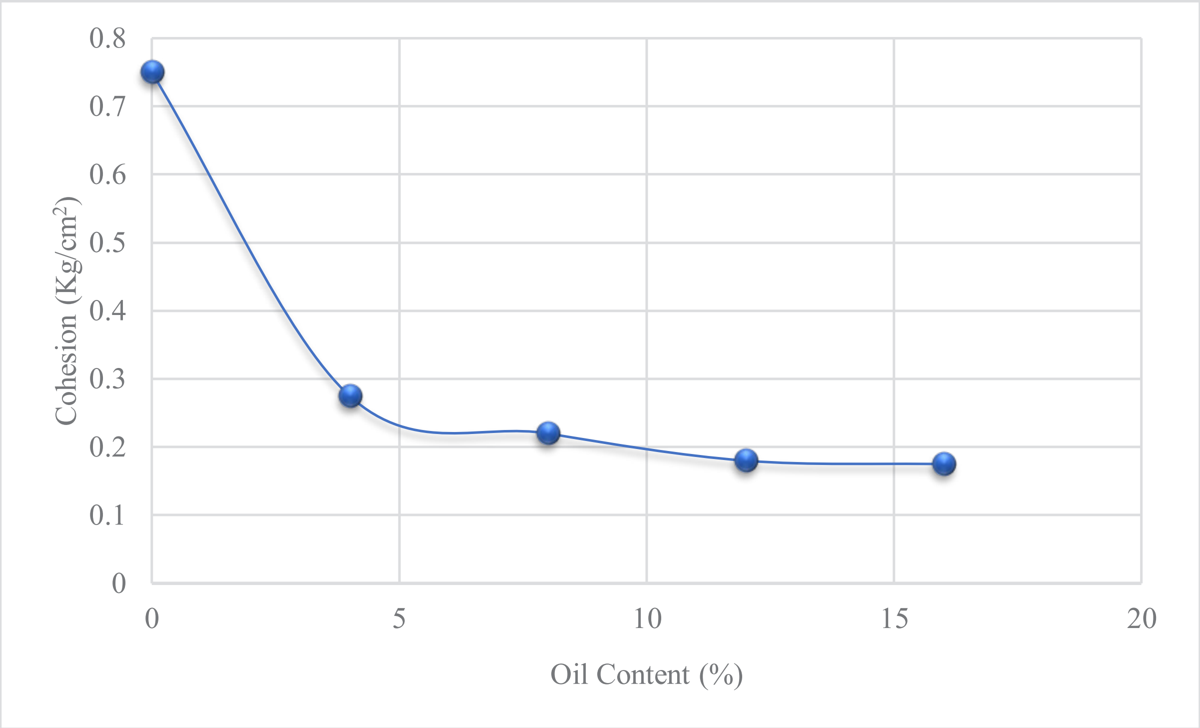
مقاومت برشی و پایداری شیروانی‌های خاک رسی تابع دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشد که در خاک رسی چسبندگی تاثیر بیشتر بر مقاومت برشی دارد. لذا با توجه آزمایشات مختلف نظیر برش مستقیم که بر روی خاک رسی با حد روانی کم (CL) انجام شده است [۴]. در پژوهش حاضر یک شیروانی خاکی از جنس خاک رس در 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 متغییر 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].

1 Water Holding Capacity



(الف)



(ب)

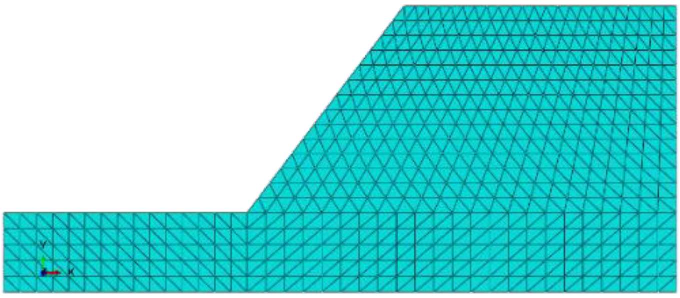
شکل ۱. نتایج آزمایش برش مستقیم [۴] الف: زاویه اصطکاک-میزان آلودگی نفتی (درصد) ب: چسبندگی- میزان آلودگی نفتی (درصد)

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

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



شکل ۲. دانه‌بندی (Mesh) مسئله

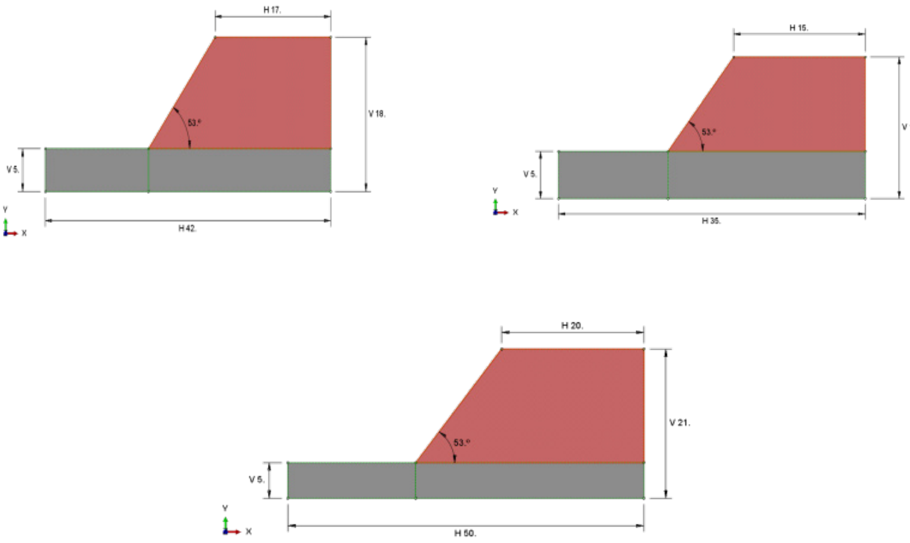
Fig. 2. problem mesh a: soil slope with 10m height, b: soil slope with 13m height, c: soil slope with 16m height

در جدول ۲، LI، حد روانی خاک رسی، PI، حد پلاستیک خاک رسی، μ، ضریب پواسون خاک، E، مدول الاستیسیته خاک بر حسب مگاپاسکال، C، چسبندگی بر حسب مگاپاسکال، φ، زاویه اصطکاک بر حسب درجه و

ρ_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 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.



شکل ۳. هندسه شیروانی خاکی

Fig. 3. the geometry of soil slope

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 داشت 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].

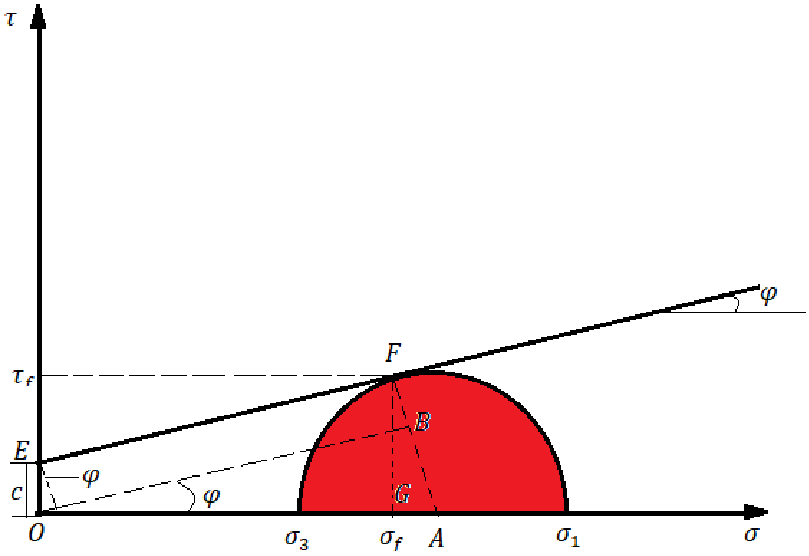
با مقیدسازی در پایین مدل در جهت Y و در کناره‌ها در جهت X، شیروانی خاکی تحت وزن خود بارگذاری می‌شود. هندسه‌های شیروانی خاکی در ارتفاع‌های ۱۰ m، ۱۳ m و ۱۶ m به صورت شکل ۲ می‌باشند. به علت ساده‌سازی در روند تحلیل و مقایسه در مدل‌های مختلف، ارتفاع پی‌های شیروانی خاکی یکسان با یکدیگر در نظر گرفته شده است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

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].

$$\tau_f = c + \sigma_N \tan\varphi \qquad (۱)$$

در رابطه) ۱(، τ_f، مقاومت برش نهایی، C، چسبندگی، σ_N، تنش نرمال وارد بر صفحه گسیختگی و φ، 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:



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

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

$$\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}=AB+BF \rightarrow \frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}= OA\sin\varphi + c\cos\varphi = \frac{\sigma_1+\sigma_3}{2}\sin\varphi + c\cos\varphi \qquad (۲)$$

در این رابطه σ_1، σ_3 تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل بوده و همانطور که مشخص است از تنش میانگین σ_2 صرف نظر شده است. با استفاده از مؤلفه‌های تانسور تنش معیار فوق را می‌توان به صورت رابطه (۳) نیز نوشت:

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

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:

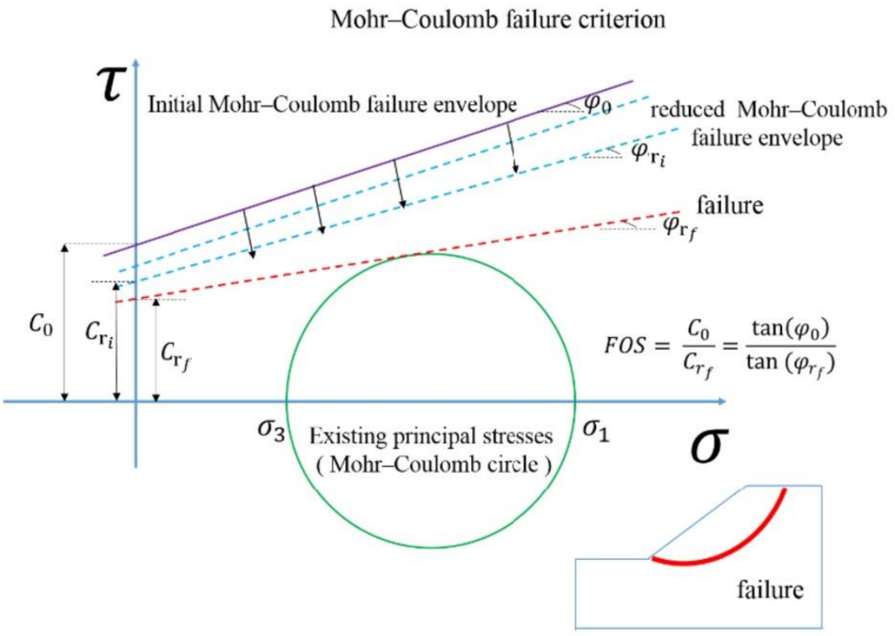
$$FOS=\frac{Shear\ strength\ available}{Shear\ trength\ mobilized}=\frac{c+\sigma_N\tan\varphi}{\tau} \qquad (۴)$$

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 [۲۶-۲۳].

ضریب اطمینان (FOS [1]) 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].

1 Factor of Safety



شکل ۵. روش کاهش مقاومت برشی [۲۴]

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

فاکتور 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 گسیختکی رخ دهد با ضریب کاهش می‌یابد (شکل ۵). فاکتور کاهش مقاومت (SRF [۱]) به وسیله رابطه (۵) به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۷]:

$$FOS = SRF = \frac{C_0}{C_r} = \frac{\tan\varphi_0}{\tan\varphi_r} \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، C_0 و φ_0 به ترتیب چسبندگی اولیه و زاویه اصطکاک داخلی اولیه و همچنین C_r و φ_r به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته خاک هستند.

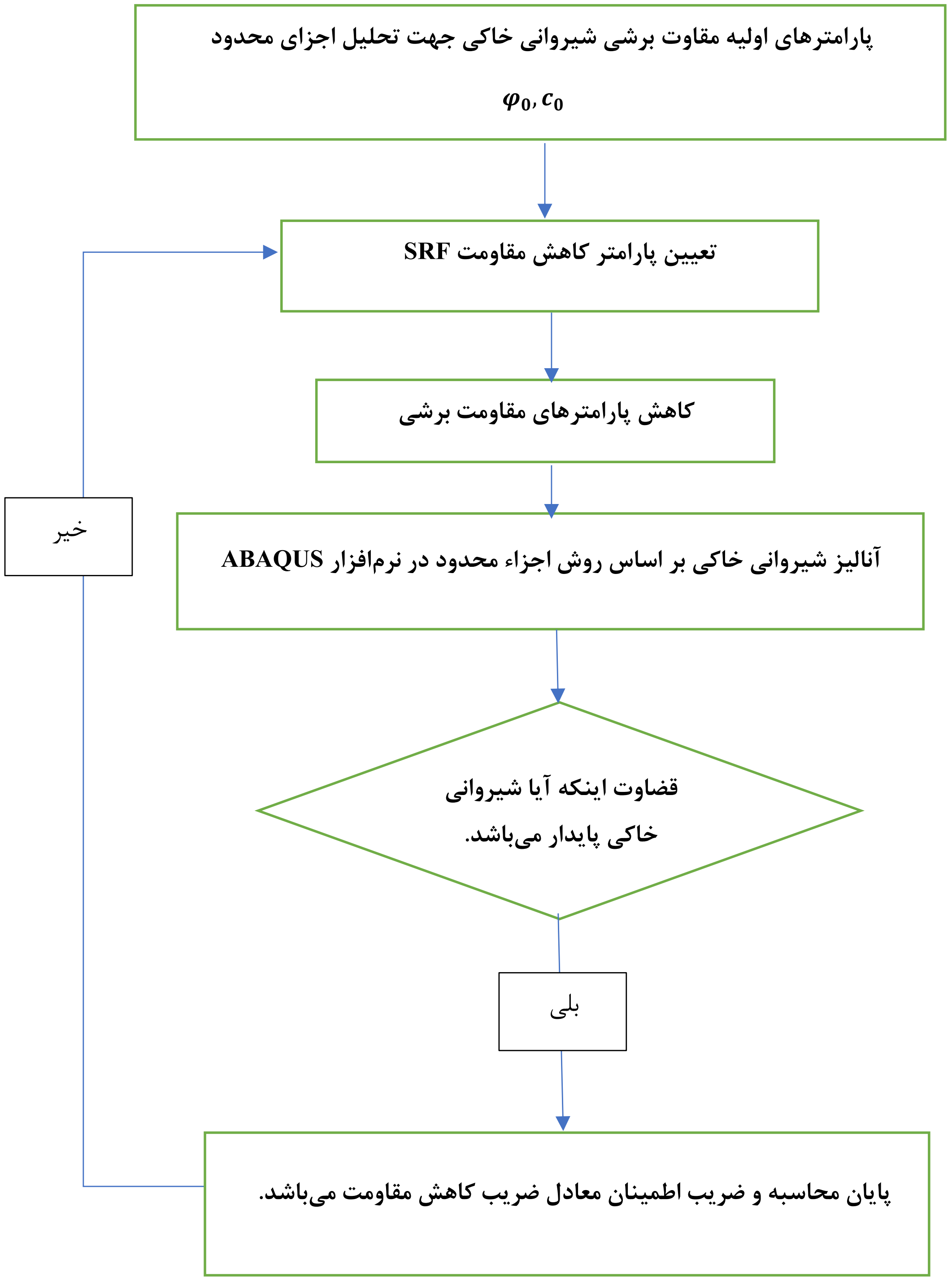
در این پژوهش به وسیله روش کاهش مقاومت و با استفاده از روش عددی اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS میزان ضرایب اطمینان شیروانی‌های مختلف مورد سنجش و مقایسه قرار خواهد گرفت. جهت تحلیل به وسیله روش SRM با استفاده از الگوریتم شکل ۶ می‌توان ضریب اطمینان شیروانی‌های خاکی را تخمین زد [۲۸].

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.

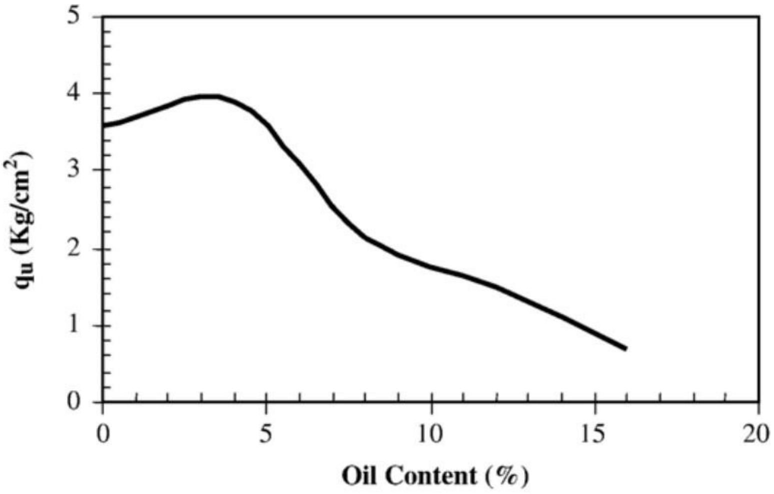
همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود که در بازه آلودگی ۰ تا ۴٪ میزان مقاومت تک محوره (q_u) افزایش کوچکی می‌یابد، سپس با افزایش آلودگی نفتی در بازه ۴٪ تا ۱۶٪ مقاومت تک محوره روند کاهشی پیدا خواهد کرد [۴].

1 Strength Reduction Factor



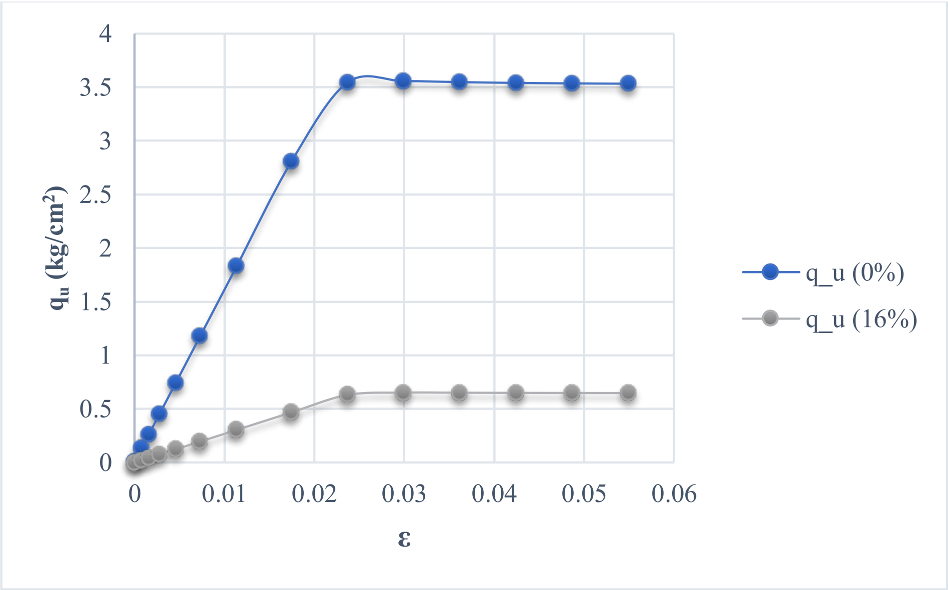
شکل ۶. فلوچارت جمع‌بندی روش کاهش مقاومت SRF [۲۸]

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]

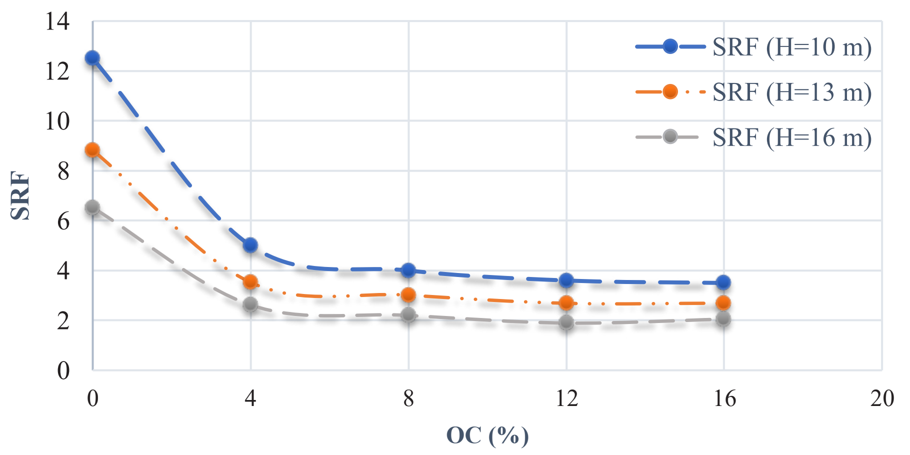


شکل ۸. نمودار آزمایش تک –محوره به کرنش محوری در حالت بدون آلودگی نفتی در نرم‌افزار ABAQUS

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

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

با بررسی نتایج آزمایشگاهی، مقاومت تک محوره در حالت بدون آلودگی نفتی (شکل ۷)، برابر با ۳٫۵ $\frac{kg}{cm^۲}$ و همچنین در آلودگی نفتی ۱۶٪ برابر با ۰٫۶۲ $\frac{kg}{cm^۲}$ به دست آمده است. با مقایسه این نتایج با نتایج داده‌های به دست آمده از مدل‌سازی آزمایش تک محوره 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 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

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

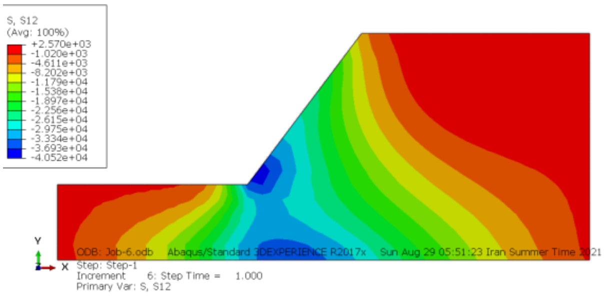
۳- نتایج و تفسیر یافته‌ها

در این بخش به تاثیر افزایش آلودگی نفتی بر روی ضریب اطمینان، تنش برشی، جابه‌جایی قائم و افقی در ارتفاع‌های مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS در قالب نمودار شرح و بسط داده شده است.

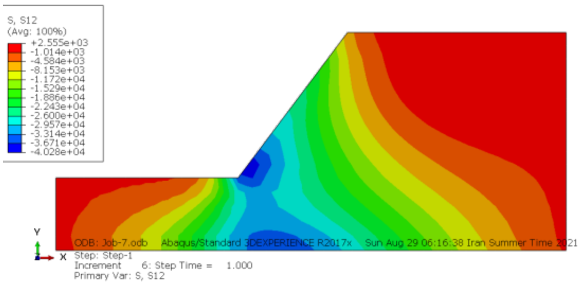
۳- ۱- نتایج تنش‌های موجود تحت اثر آلودگی نفتی

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

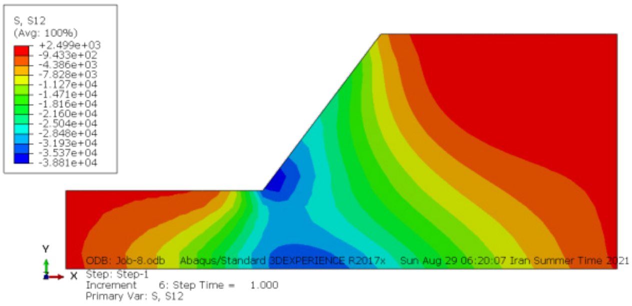
در شکل ۹، مشاهده می‌شود که با افزایش آلودگی نفتی میزان SRF شیروانی خاکی کاهش می‌یابد به طوری که در ارتفاع شیروانی ۱۰ m و در حالت بدون آلودگی نفتی، SRF شیروانی خاکی برابر با ۱۲/۵ می‌باشد و با افزایش آلودگی نفتی تا ۱۶٪، SRF شیروانی به ۳/۵ تقلیل می‌یابد. مقاومت برشی خاک رسی وابسه به چسبندگی می‌باشد. در 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٪ می‌شود. 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 به اندازه ۴۰٪ تا ۶۰٪ کاهش یافته است. ضریب اطمینان شیروانی خاکی در ارتفاع‌های 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 می‌شود. علت این امر آن است که دانههای رس بر اثر افزایش آلودگی نفتی تجمع می‌کنند که قطر این ذرات تجمعی به اندازه لای و حتی ماسه ریز می‌رسد. در واقع تجمع ذرات رس می‌تواند موجب شبیه شدن رفتار آن به رفتار خاک‌های دانه‌ای شود و این عامل موجب کاهش سطح مخصوص و در نتیجه کاهش چسبندگی خاک رسی می‌شود [۲۹]. همچنین می‌توان از دیگر علل کاهش چسبندگی، کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی در اطراف صفحات



الف: OC=0, SRF=12.5



ب: OC=4%, SRF=5



ج: OC=16%, SRF=3.5

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

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

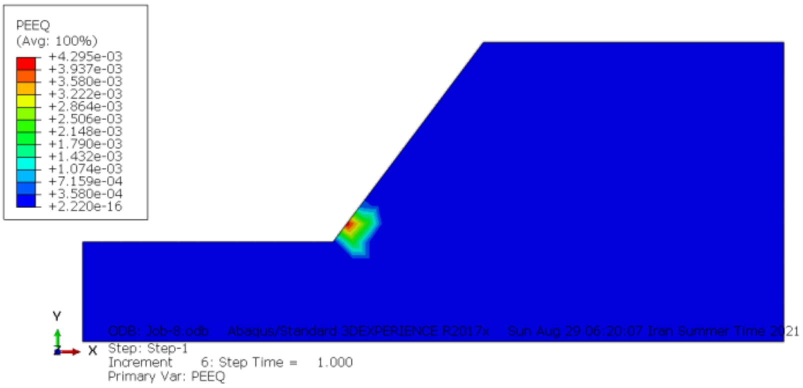
رسی را برشمارد. زیرا که نفت خام، یک ترکیب غیرقطبی می‌باشد و باعث کاهش شارژ الکترواستاتیکی در رس‌ها خواهد شد [۲۹].

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 m ۱۰، m ۱۳ و m ۱۶ نشان می‌دهد.

در شکل ۱۰، تغییرات تنش برشی در ارتفاع شیروانی m ۱۰ 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.

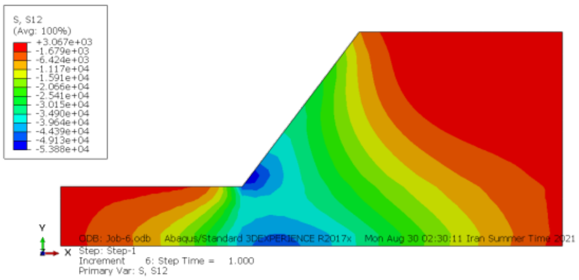
در شکل ۱۲، تنش برشی در پای شیروانی خاکی به ارتفاع m ۱۳ بیشینه می‌باشد و همان‌طور که در بخش قبلی گفته شد تنش برشی و کرنش پلاستیک در پای شیب شیروانی شروع به افزایش می‌یابد (شکل ۱۳). با مقایسه شکل‌های ۱۳–الف، ۱۳–ب و ۱۳–ج می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش آلودگی نفتی، ناحیه پلاستیک گسترش می‌یابد. با توجه به 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).

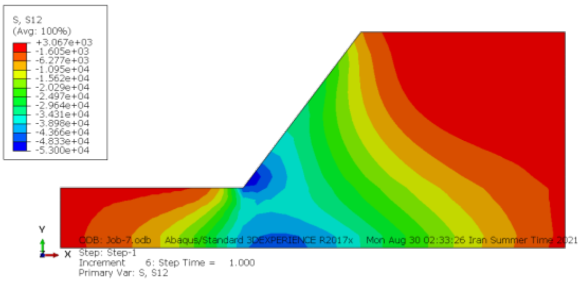


شکل ۱۱. تغییرات کرنش پلاستیک در ارتفاع ۱۰ m و OC=۱۶٪ ، SRF=۳,۵

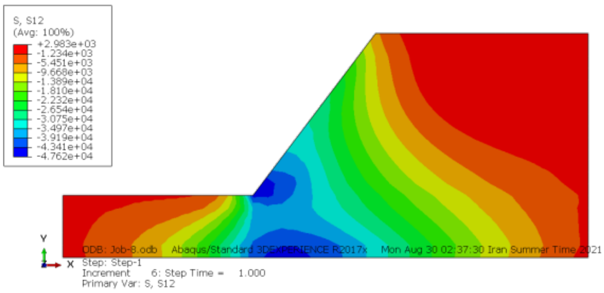
Fig. 11. the changes of plastic strain in the height of 10 m, OC=16%, and SRF=3.5



الف: OC=0, SRF=8.823



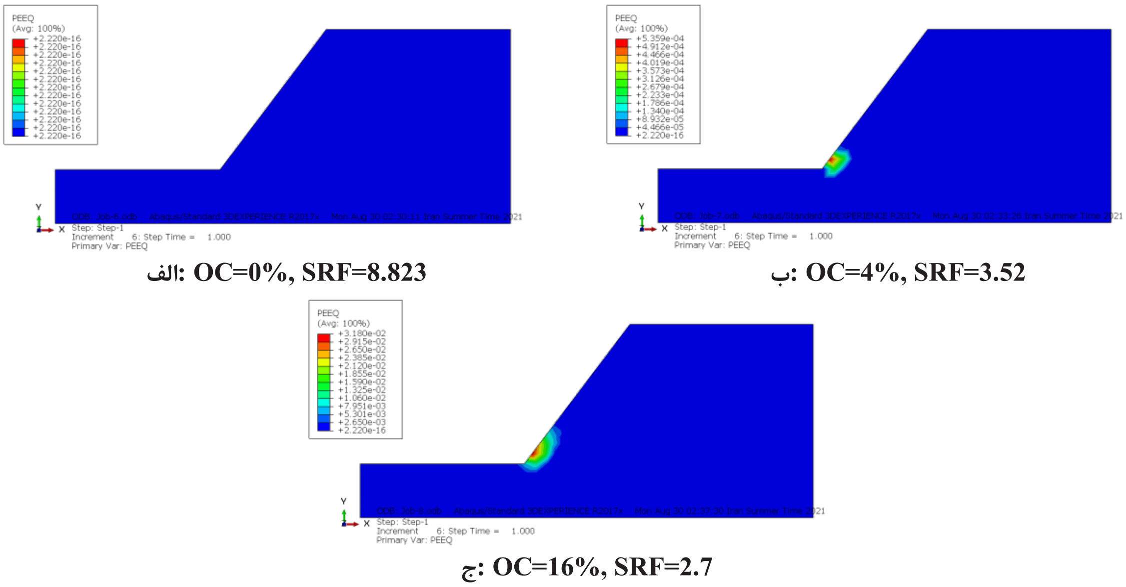
ب: OC=4%, SRF=3.525



ج: OC=16%, SRF=2.7

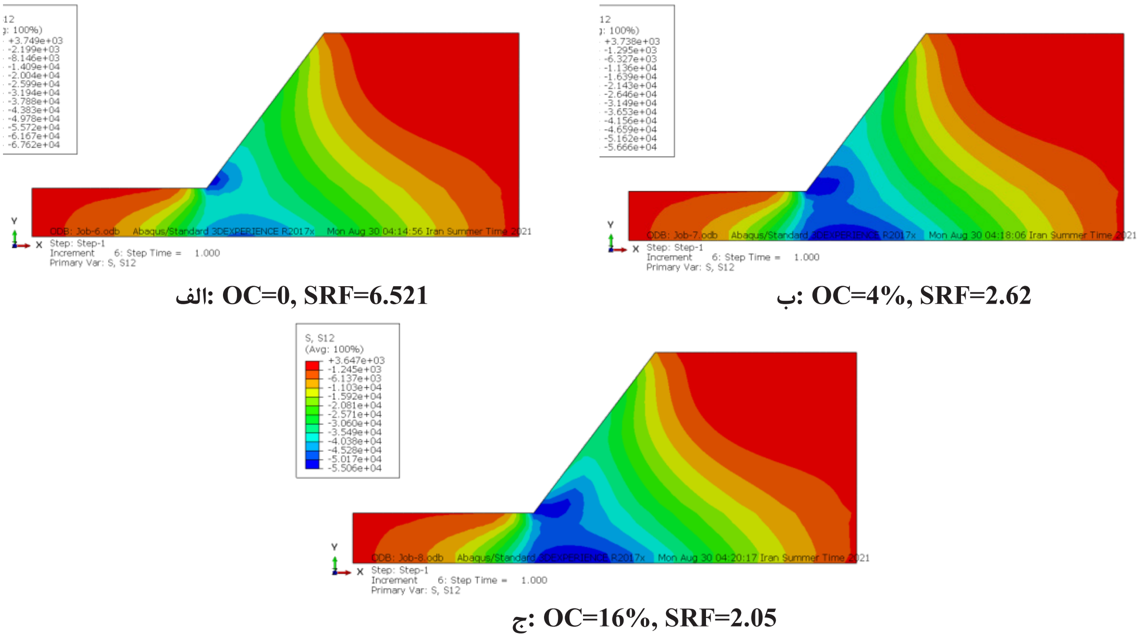
شکل ۱۲. تغییرات تنش برشی در آلودگی‌های نفتی ۰، ۴٪ و ۱۶٪ و ارتفاع ۱۳ m

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



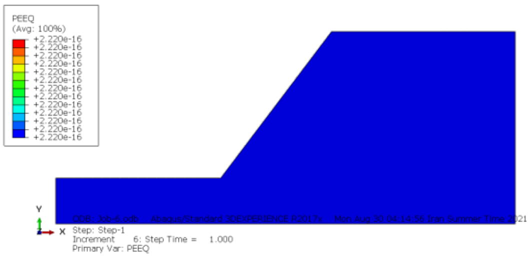
شکل ۱۳. تغییرات کرنش پلاستیک در و ارتفاع ۱۳ m و آلودگی‌های نفتی ۰، ۴٪ و ۱۶٪

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

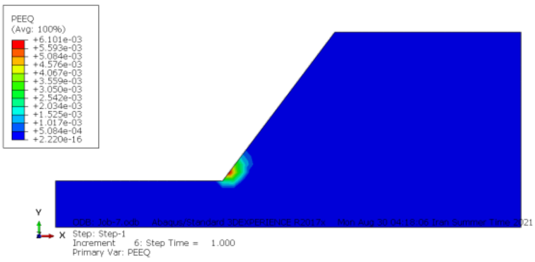


شکل ۱۴. تغییرات تنش برشی در آلودگی‌های نفتی ۰، ۴٪ و ۱۶٪ و ارتفاع ۱۶ m

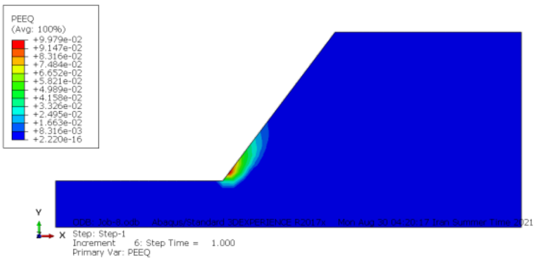
Fig. 14. the changes of shear stress in the oil content of 0, 4%, and 16% and the height of 16 m



الف: OC=0%, SRF=6.521



ب: OC=4%, SRF=2.62



ج: OC=16%, SRF=2.05

شکل ۱۵. تغییرات کرنش پلاستیک در و 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%

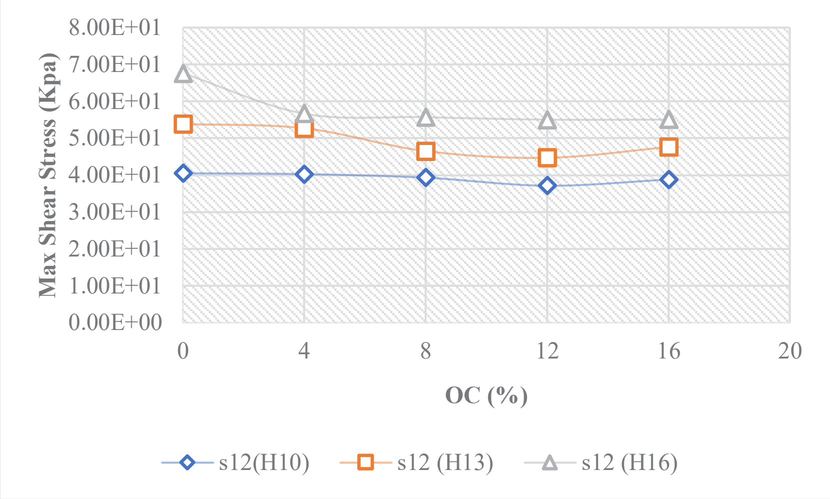
از آن‌جایی که در شیروانی خاکی تنش برشی بسیج شده (شکل ۱۶) و عدد ضریب اطمینان نیز کاهش یافته است و همچنین با توجه به رابطه (۴) در بخش قبل، می‌توان نتیجه گرفت که در اثر آلودگی نفتی مقاومت برشی خاک (صورت کسر رابطه ۴) باید کاهش بیش‌تری نسبت به تنش برشی بسیج شده (مخرج کسر رابطه ۴) داشته باشد. در نتیجه پیش‌بینی 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 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



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

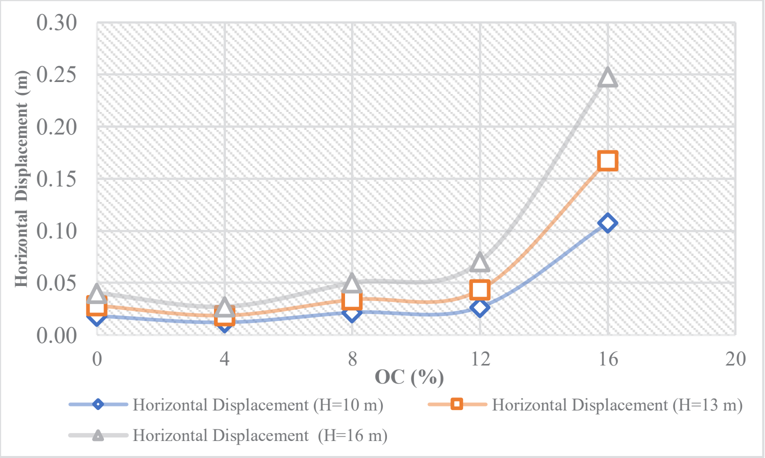
Table 3. the changes of shear stress in the oil content range of 0 to 16% in the heights of 10, 13, and 16 meters

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

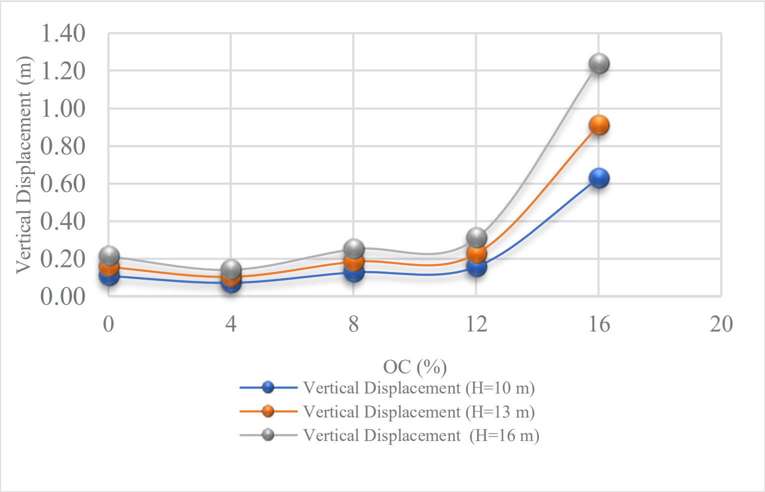
استاتیکی ۱/۵ می‌باشد [۳۰]، بنابراین با توجه به ضرایب اطمینان به دست آمده از مدل‌سازی عددی می‌توان نتیجه گرفت تمامی شیروانی‌های خاکی پایدار هستند. با توجه به داده‌های موجود در نمودارهای مختلف (شکل ۹، ۱۷–الف و ۱۷–ب) ارائه شده در این پژوهش، روند تغییرات ضریب اطمینان و جابه‌جایی شیروانی خاکی در اثر افزایش 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.

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 این‌رو 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



الف



ب

شکل ۱۷. تغییرات جا به جایی ماکزیمم بر حسب آلودگی نفتی در ارتفاع m ۱۰، m ۱۳ و m ۱۶ الف- 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 (%),

را کاهش داده و از آنجایی که آب یک ترکیب قطبی است، میزان جذب سطحی خاک رسی کاهش می‌یابد. پایداری شیروانی‌های خاک رسی، تا حد زیادی تابع چسبندگی خاک است، بنابراین میزان مقاومت برشی این نوع کانی تحت اثر آلودگی نفتی کاهش می‌یابد. مسیر تحقیقاتی محققین گذشته انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی خاک آلوده به مواد نفتی بوده است. لذا در این پژوهش بررس عددی به روش اجزاء محدود در نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. این شیروانی‌های خاکی جهت بررسی پایداری، تحت بار استاتیکی قرار گرفته شده است. روش سنجش میزان ضریب اطمینان در شیروانی خاکی روش کاهش مقاومت یا SRM می‌باشد. در نهایت ضریب اطمینان، جابه‌جایی افقی، جابه‌جایی قائم و تنش برشی شیروانی‌هایی خاکی در ارتفاع m ۱۰، m ۱۳ و m ۱۶ تحت اثر آلودگی نفتی ۰، ۴٪، ۸٪، ۱۲٪ و ۱۶٪ مورد سنجش و مقایسه قرار می‌گیرد. می‌توان به عنوان ادامه روند این پژوهش، این شیروانی‌های خاکی تحت بار دینامیکی قرار گرفته و پایداری شیروانی خاکی تحت اثر آلودگی نفتی مدل‌سازی عددی انجام شود. نتایج این

پژوهش به اختصار به شرح ذیل می‌باشد:

- 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 الودگی نفتی (OC=۰) 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 contaminated sand, in, pp. 101-108.

[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. Khamehchiyan, 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

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, Slop 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

این صفحه عمداً خالی است