

## بررسی رفتار زمین شناسی مهندسی خاک های سطحی آلوده به هیدروکربن های نفتی در محدوده پالایشگاه تبریز

سید داود محمدی<sup>۱\*</sup>، خلیل محرم زاده سرای<sup>۲</sup>

دریافت مقاله: ۹۲/۱۱/۰۵ پذیرش مقاله: ۹۳/۰۴/۰۸

### چکیده

نفوذ مواد نفتی در خاک علاوه بر اثرات زیست محیطی می تواند باعث تغییر خصوصیات زمین شناسی مهندسی خاک ها شود. در این پژوهش رفتار زمین شناسی مهندسی خاک های سطحی آلوده محدوده پالایشگاه نفت تبریز بررسی شده است. مواد نفتی آلوده کننده نمونه های خاک مورد مطالعه از نوع هیدروکربن های آلکانی جامد با بیش از ۱۴ زنجیره اتم کربن ( $C_{14}$ ) می باشند. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش های دانه بندی، نمونه ها در رده خاک های SM و CL قرار می گیرند. نتایج آزمایش حدود آتربرگ در نمونه های CL نشان می دهد که شاخص خمیری (PI) در نمونه خاک دارای آلودگی بیشتر، کمترین مقدار بوده و با کاهش غلظت آلودگی، افزایش می یابد و تمامی نمونه های آلوده SM رفتار غیرخمیری داشته اند. در آزمایش های تراکم استاندارد، نمونه های با آلودگی بیشتر با درصد رطوبت بهینه کمتری به وزن واحد حجم خشک حداکثر رسیده اند. همچنین نتایج آزمایش های نسبت باربری کالیفرنیا بیانگر کاهش مقدار CBR با افزایش میزان آلودگی بوده که این کاهش در نمونه های CL به مراتب بیشتر از نمونه های SM می باشد. بر اساس داده های حاصل از آزمایش های برش مستقیم و تحکیم، با افزایش میزان آلودگی خاک، به ترتیب پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) کاهش و نشست تحکیمی افزایش یافته است.

**کلید واژه ها:** کروماتوگرافی گازی، تراکم استاندارد، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، مقاومت برشی، نشست تحکیمی

۱. استادیار گروه زمین شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان s\_d\_mohammadi@yahoo.com

۲. کارشناس ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

رسوبات رسی افزایش درصد نفت خام باعث کاهش چشمگیر چسبندگی می‌شود. (Lekmine (1991 نشان داد که برای رس‌های فعال مانند مونتموریلونیت و بنتونیت، تراکم‌پذیری با افزایش زمان نفوذ هیدروکربن‌های نفتی افزایش می‌یابد. Acar et al. (1985) بیان نمودند که با کاهش ثابت دی‌الکتریک، نیروهای دافعه کاهش خواهد یافت و بنابراین ضخامت لایه مضاعف کاهش یافته و حد روانی کاهش می‌یابد. Meegoda and Ratnaweera (1994) مطالعاتی بر روی شاخص فشردگی خاک‌های ریزدانه آلوده شده به مواد نفتی انجام دادند. نتایج آزمایش‌های این محققین نشان می‌دهد که فاکتورهایی مثل ویسکوزیته مواد نفتی باعث روغن‌کاری و سهولت لغزش ذرات خاک شده و افزایش شاخص فشردگی را در پی دارد. در تمامی این مطالعات، ماده نفتی (معمولاً گازوئیل و نفت خام) به صورت جداگانه به خاک اضافه شده و تغییرات پارامترهای مهندسی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق روند مطالعه متفاوت بوده و خاک‌های سطحی محدوده پالایشگاه تبریز که به صورت تصادفی با مواد نفتی آلوده شده‌اند، مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف این نوشتار، تعیین نوع و مقدار آلودگی‌های هیدروکربنی موجود در خاک‌های سطحی محدوده پالایشگاه تبریز و بررسی تأثیر این آلودگی‌ها بر رفتار زمین‌شناسی مهندسی خاک‌های مزبور می‌باشد.

## ۲. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

پالایشگاه نفت تبریز در بخش جنوب غربی تبریز (جاده تبریز- سردرود) قرار گرفته است. برای دسترسی به محدوده پالایشگاه، مسیرهای متعددی وجود دارد که مسیر مستقیم از مرکز شهر از خیابان ۲۲ بهمن به سمت بلوار ملت می‌باشد که در شکل (۱) نشان داده شده است.

## ۳. مواد و روش‌ها

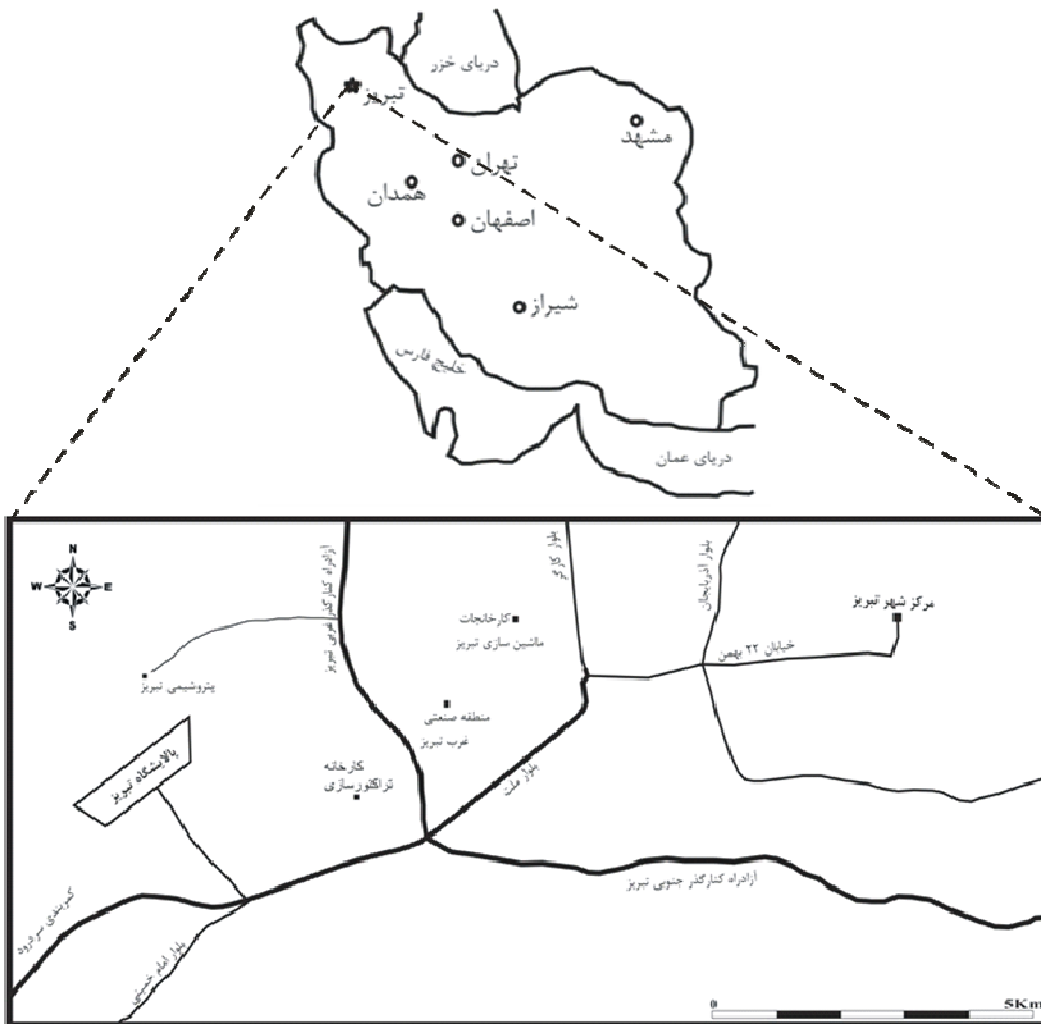
## ۳-۱. روش نمونه‌برداری و آنالیز دانه‌بندی

نمونه‌های آلوده محدوده پالایشگاه تبریز از حاشیه مخازن مواد نفتی به نحوی نمونه‌برداری شده‌اند که تقریباً نقاط

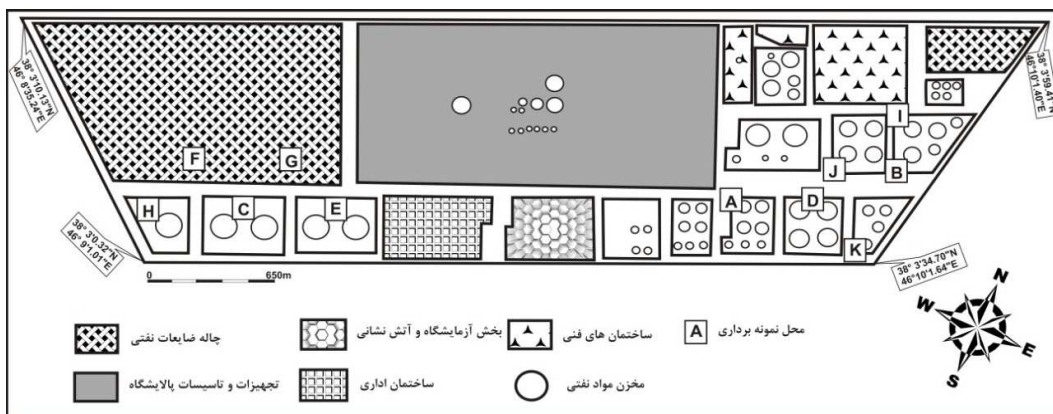
آلودگی خاک با مواد نفتی در محدوده پالایشگاه‌ها اکثراً تصادفی بوده و بر اثر نشست از مخازن و خطوط لوله آسیب‌دیده، نشست در حین حمل و نقل، تصادف تانکرها یا حتی در جنگ به صورت صدمه به مخازن اتفاق می‌افتد (Khomehchiyan et al., 2007). نفوذ مواد نفتی در خاک علاوه بر اثرات زیست‌محیطی می‌تواند باعث تغییر رفتار مهندسی خاک‌ها شود. (Alsanad and Ismael (1995 ماسه‌های جورشده را به طور مصنوعی با نفت خام مخلوط کرده و مورد آزمایش پروکتور اصلاح شده قرار دادند. ایشان نشان دادند که با افزودن نفت خام به نمونه‌های ماسه‌ای، دانسیته خشک افزایش می‌یابد. (Alsanad and Eid (1997 آزمایش‌های برش مستقیم و سه‌محوری را بر روی ماسه‌های مخلوط شده با نفت خام در محیط باز کویت انجام دادند و نشان دادند که زاویه اصطکاک داخلی هنگامی که نفت خام به ماسه ریزدانه اضافه می‌شود، کاهش می‌یابد. (Aiban (1996 نشان داد که اضافه شدن نفت خام به ماسه ریز یکنواخت، چسبندگی را کاهش و تراکم‌پذیری را افزایش می‌دهد. این موضوع به دلیل روغن‌کاری سطح ذرات خاک توسط نفت خام می‌باشد. (Shin et al. (1999 مطالعاتی در زمینه بررسی مقاومت برشی ماسه آلوده به نفت و ظرفیت نهایی شالوده واقع بر روی آن انجام دادند که بر پایه نتایج آن‌ها، آلودگی موجب کاهش چشمگیر ظرفیت باربری می‌گردد. (Vijay and Puri (2000 آزمایش‌هایی را به منظور بررسی تأثیر نفت خام بر پارامترهای تراکم‌پذیری و مقاومت برشی ماسه انجام دادند که این بررسی‌ها نشان‌دهنده کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش تراکم‌پذیری بوده است. تأثیر آلودگی نفت خام بر پارامترهای مقاومت، نشست و تراکم‌پذیری ماسه توسط صدیقیان (۱۳۸۳) مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در اثر آلوده شدن ماسه به نفت خام زاویه اصطکاک داخلی کاهش و نشست آنی افزایش می‌یابد. همچنین بر روی خاک‌های ریزدانه آلوده نیز تحقیقاتی انجام شده است. (Khomehchiyan et al. (2007 نشان دادند که در

سیلت‌دار (SM) (نمونه‌های C, E, G, F و H) و رس لاغر (CL) (نمونه‌های A, J, I, B, D و K) است که رنگ ظاهری، وضعیت جذب آب و درصد ذرات تشکیل دهنده هر یک از نمونه‌ها در جدول (۱) آمده است.

نمونه‌برداری بر روی گوشه‌های یک شبکه مربعی شکل با فواصل یکسان قرار دارد (شکل ۲). دانه‌بندی خاک با استاندارد ASTM D 422-63 انجام شده است. مطابق طبقه‌بندی یونیفاید، خاک‌های منطقه از دونوع خاک شامل ماسه



شکل ۱. راه‌های دسترسی به پالایشگاه تبریز، ترسیم شده از نقشه ماهواره‌ای Google Earth



شکل ۲. شماتیک محدوده پالایشگاه تبریز ترسیم شده از نقشه ماهواره‌ای Google Earth

جدول ۱. درصد ذرات تشکیل دهنده هر یک از نمونه‌ها (شن=G، ماسه=S، سیلت=M و رس=C)

نقطه نمونه برداری											نقطه نمونه برداری
K	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A	
۳/۴۷	۲/۶۸	۳/۱۸	۳/۴۹	۳/۱۲	۲/۲۶	۲/۳۵	۳/۵۶	۲/۷۶	۲/۱۴	۴/۰۲	G%
۳۵/۸۵	۳۱/۳۹	۲۹/۸۱	۵۸/۳۸	۵۲/۷۶	۵۲/۷۳	۵۷/۴۵	۳۳/۴۴	۵۷/۱۲	۲۸/۹۴	۳۰/۹۶	S%
۵۱/۴۳	۵۹	۶۰/۷۸	۳۰/۴۹	۳۹/۹۹	۴۰/۲۷	۳۴/۳۶	۵۵/۱۶	۳۳/۸	۶۳/۱۶	۵۷/۶	M%
۹/۲۵	۶/۹۳	۶/۲۳	۷/۶۴	۵/۱۳	۴/۷۴	۵/۸۴	۷/۸۵	۶/۳۲	۵/۷۶	۷/۴۲	C%
CL	CL	CL	SM	SM	SM	SM	CL	SM	CL	CL	رده
قهوه‌ای	قهوه‌ای	خاکستری تیره	خاکستری حالت	زرد نخودی	قهوه‌ای تیره	زرد قهوه‌ای	زرد قهوه‌ای	قهوه‌ای کم‌رنگ	قهوه‌ای تیره	قهوه‌ای	رنگ ظاهری
کم	کم	کم	آبگریز	حالت آبگریز	حالت آبگریز	حالت آبگریز	کم	حالت آبگریز	خیلی کم	کم	جذب آب

۳-۲. روش آنالیز آلودگی در نمونه‌ها

بعد از نمونه برداری از نمونه‌ها، جهت تعیین درصد و نوع مواد نفتی آلوده‌کننده، نمونه‌ها مورد آزمایش کروماتوگرافی گاز- جامد قرار گرفتند که نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است. همچنین، نمودار تغییرات درصد آلودگی و نوع هیدروکربن‌های آلوده‌کننده برای هر یک از نمونه‌ها در شکل (۳) آورده شده است. نتایج حاصل از آزمایش کروماتوگرافی نشان می‌دهد که بیشترین درصد آلودگی مربوط به

هیدروکربن‌های آلکانی با بیش از ۱۴ اتم کربن می‌باشند که جزء هیدروکربن‌های جامد هستند. این هیدروکربن‌ها با فرمول شیمیایی  $C_nH_{2n+2}$  شناخته می‌شوند (Praisler et al., 2002). این هیدروکربن‌ها اطراف ذرات خاک را احاطه کرده و به صورت یک عایق در مقابل نفوذ آب عمل می‌کنند. در این حالت نمونه‌ها به سختی با آب مخلوط شده و قطره‌های آب به صورت معلق بر روی خاک‌های آلوده قرار می‌گیرند (شکل ۴).

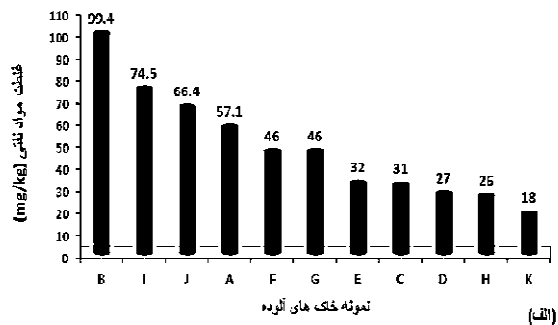
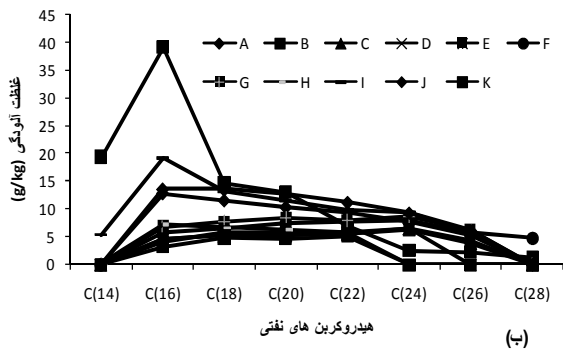
جدول ۲. نتایج حاصل از آزمایش کروماتوگرافی گاز- جامد

نقطه نمونه برداری												Carbon	نوع ماده نفتی
K	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A			
۰	۰	۵/۴	۰/۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۱۹/۴	۰	$C_{(14)}$	N-Tetradecane	
۳/۲	۱۳/۶	۱۹/۲	۷/۲	۶/۸	۵/۶	۴/۱	۴/۵	۴/۶	۳۹/۲	۱۲/۸	$C_{(16)}$	N-Hexadecane	
۴/۸	۱۳/۵	۱۳/۲	۶/۶	۷/۶	۶/۴	۵/۸	۵/۱	۵/۳	۱۴/۷	۱۱/۵	$C_{(18)}$	N-Octadecane	
۴/۷	۱۲/۷	۱۱/۵	۶/۲	۸/۴	۷/۴	۵/۷	۵/۱	۵/۳	۱۳	۱۰/۳	$C_{(20)}$	N-Eicosane	
۵/۱	۱۱/۲	۹/۸	۵/۷	۷/۸	۷/۶	۵/۸	۵/۵	۵/۵	۶/۹۹	۹/۴	$C_{(22)}$	N-Docosane	
۰	۹/۳	۹/۴	۰	۸/۶	۷/۸	۶/۴	۶/۴	۶/۳	۲/۵۱	۷/۸	$C_{(24)}$	N-Tetracosane	
۰	۶/۱	۵/۸	۰	۶/۱	۵/۷	۴/۲	۰	۳/۸	۲/۲۷	۵/۳	$C_{(26)}$	N-hexacosane	
۰	۰	۰	۰	۰	۴/۷	۰	۰	۰	۱/۳۱	۰	$C_{(28)}$	N-Octacosane	
۱۷/۹	۶۶/۴	۷۴/۵	۲۵/۹	۴۵/۴	۴۵/۴	۳۲	۲۶/۹	۳۰/۹	۹۹/۳۸	۵۷/۱	-	غلظت کل (mg/kg)	

۳-۳. برنامه آزمایش‌های زمین‌شناسی مهندسی

علاوه بر آزمایش‌های کروماتوگرافی و دانه‌بندی که نتایج آن‌ها ذکر گردید، آزمایش‌های آزمایشگاهی دیگری به

منظور بررسی رفتار زمین‌شناسی مهندسی خاک‌های مورد مطالعه انجام شده که تعداد تکرار آنها روی هر نمونه و مشخصات آن‌ها در جدول (۳) آورده شده است.



شکل ۳. نمودارهای الف: غلظت مواد نفتی در نمونه‌ها و ب: نوع هیدروکربن‌های آلوده کننده



شکل ۴. عدم اختلاط آسان آب با نمونه‌های SM آلوده به مواد نفتی

جدول ۳. برنامه آزمایش‌های زمین‌شناسی مهندسی

نوع آزمایش	استاندارد انجام آزمایش	تعداد تکرار	تعداد نمونه خاک آلوده
حدود آتربرگ	ASTMD4318-87 (2000)	۳	۱۱
تراکم استاندارد	ASTM D698-78 (2000)	۳	۱۱
نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)	ASTM D1883-87 (2000)	۳	۱۱
برش مستقیم	ASTM D3080-72 (2000)	۳	۱۱
تحکیم	ASTM D2435-80 (2000)	۱	۱۱
مجموع آزمایش‌ها			۱۴۳

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۴-۱. نتایج آزمایش حدود آتربرگ

رفتار خاک عملاً به میزان آب داخل مجموعه بستگی دارد. طبق نظر آتربرگ حالات فیزیکی خاک ریزدانه، بر اساس درصد رطوبت‌های مختلف گوناگون خواهد بود و با تغییر

رطوبت، خواص آن‌ها نیز تغییر خواهد کرد (طاحونی، ۱۳۸۱). این آزمایش بر روی نمونه‌های رسی انجام شده و نتایج آن در جدول (۴) آورده شده است. نتایج آزمایش حدود آتربرگ در نمونه‌های CL نشان می‌دهد که شاخص خمیری (PI) در نمونه خاک دارای آلودگی بیشتر (نمونه شماره ۱ از نقطه

می‌دهد و بنابراین شاخص خمیری خاک کاهش می‌یابد. در واقع کاهش ضخامت لایه آب دوگانه و ثابت دی‌الکتریک سیال منفذی باعث تغییر رفتار خاک رسی به ماسه‌ای می‌گردد (Acar et al., 1985 and Meegoda and Ratnaweera, 1994).

نمونه‌برداری (B) کمترین مقدار بوده و با کاهش غلظت آلودگی افزایش می‌یابد. در این راستا تمام نمونه‌های آلوده SM رفتار غیرخمیری داشته‌اند. علت این موضوع را می‌توان مربوط به تأثیر هیدروکربن‌ها بر ذرات خاک دانست. به عبارت دیگر این مواد باعث خنثی شدن بار ذرات رس شده و ضخامت لایه آب دوگانه در اطراف ذرات رس را کاهش

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های تعیین حدود آتربرگ نمونه‌های آلوده

رده خاک	نقطه نمونه برداری	شماره نمونه	غلظت مواد نفتی (mg/kg)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
CL	B	۱	۹۹/۳۸	۲۴	۱۴/۳	۹/۷
	I	۲	۷۴/۵	۲۵/۶	۱۵	۱۰/۶
	J	۳	۶۶/۴	۲۶/۷	۱۵/۲	۱۱/۵
	A	۴	۵۷/۱	۲۸/۸	۱۶	۱۲/۸
	D	۵	۲۶/۹	۳۱/۴	۱۸/۲	۱۳/۲
	K	۶	۱۷/۹	۳۳/۶	۱۹/۶	۱۴
SM	F	۷	۴۵/۴	NP	NP	NP
	G	۸	۴۵/۴	NP	NP	NP
	E	۹	۳۲	NP	NP	NP
	C	۱۰	۳۰/۹	NP	NP	NP
	H	۱۱	۲۵/۹	NP	NP	NP
			۲۵/۹	NP	NP	NP

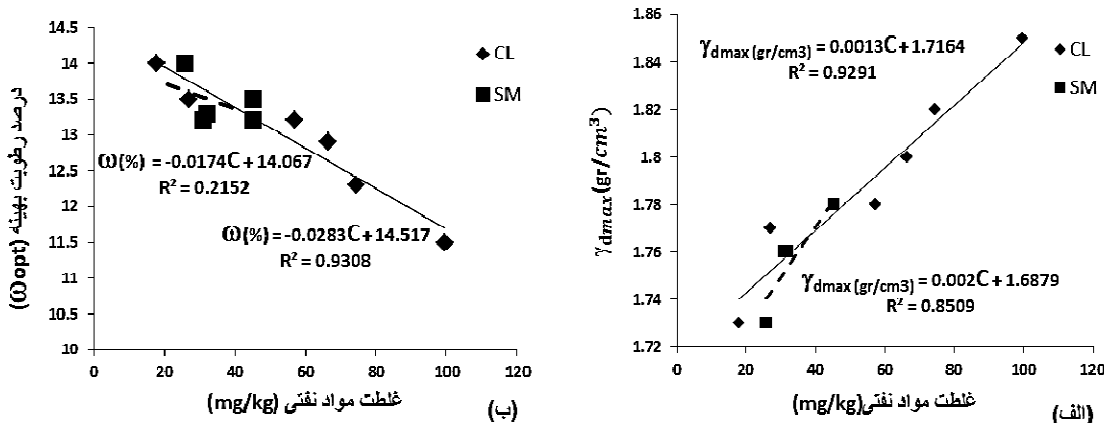
روند تغییرات وزن واحد حجم خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه بر اساس غلظت مواد نفتی برای هر نوع خاک در شکل (۵) آورده شده است.

۴-۲. نتایج آزمایش تراکم استاندارد

جهت بررسی تغییرات تراکم‌پذیری نمونه‌ها، آزمایش تراکم استاندارد پروکتور انجام گردید. نتایج برای هر دو نوع خاک آلوده CL و SM در جدول (۵) آورده شده است. همچنین

جدول ۵. وزن واحد حجم خشک بیشینه ( $\gamma_{dmax}$ ) و درصد رطوبت بهینه ( $\omega_{opt}$ ) حاصل از آزمایش تراکم استاندارد

رده خاک	نقطه نمونه برداری	شماره نمونه	غلظت مواد نفتی (mg/kg)	$\omega$ (%)	$\gamma_{dmax}$ (gr/cm <sup>3</sup> )
CL	B	۱	۹۹/۳۸	۱۱/۵	۱/۸۵
	I	۲	۷۴/۵	۱۲/۳	۱/۸۲
	J	۳	۶۶/۴	۱۲/۹	۱/۸
	A	۴	۵۷/۱	۱۳/۲	۱/۷۸
	D	۵	۲۶/۹	۱۳/۵	۱/۷۷
	K	۶	۱۷/۹	۱۴	۱/۷۳
SM	F	۷	۴۵/۴	۱۳/۲	۱/۷۸
	G	۸	۴۵/۴	۱۳/۵	۱/۷۸
	E	۹	۳۲	۱۳/۳	۱/۷۶
	C	۱۰	۳۰/۹	۱۳/۲	۱/۷۶
	H	۱۱	۲۵/۹	۱۴	۱/۷۳
			۲۵/۹	۱۴	۱/۷۳



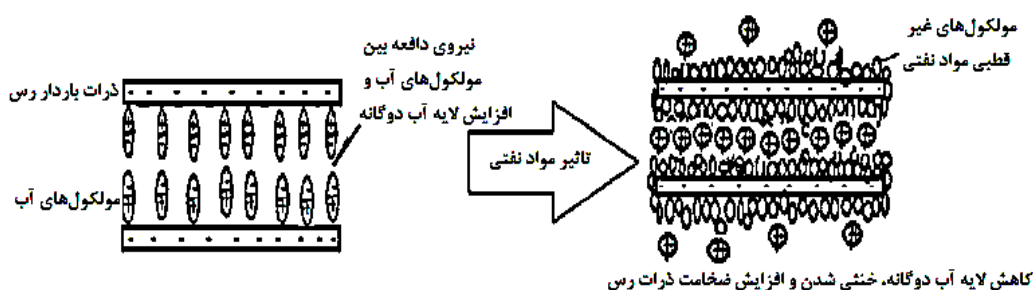
شکل ۵. تغییرات الف: وزن واحد حجم خشک حداکثر و ب: درصد رطوبت بهینه در برابر غلظت مواد نفتی

میزان ذرات در واحد حجم می‌گردند که با نتایج محققان دیگر مطابق می‌باشد (Alsanad and Ismael, 1995; Aiban, 1996; Lekmine, 1991; Vijay and Puri, 2000).

مواد نفتی با ثابت دی‌الکتریک پایین باعث کاهش نیروی دافعه بین ذرات رس و ایجاد رفتار دانه‌ای در ذرات خاک می‌شود. خاک با رفتار دانه‌ای با رطوبت کمتر به حداکثر وزن واحد حجم خشک می‌رسد. شکل (۶) نحوه تأثیر مواد نفتی بر ذرات رس را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول (۵) مشاهده می‌شود که نمونه‌های با آلودگی بیشتر با درصد رطوبت بهینه کمتری به وزن واحد حجم خشک حداکثر رسیده‌اند. در خاک‌های رسی (CL)، نمونه شماره ۱ (از نقطه نمونه‌برداری B) و در خاک‌های ماسه سیلتی (SM) نمونه‌های شماره ۷ و ۸ (از نقاط نمونه‌برداری F و G) بیشترین وزن واحد حجم خشک را دارند. دلیل این را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- احاطه شدن ذرات خاک توسط مواد نفتی حرکت ذرات خاک بر روی یکدیگر را آسان نموده و موجب افزایش



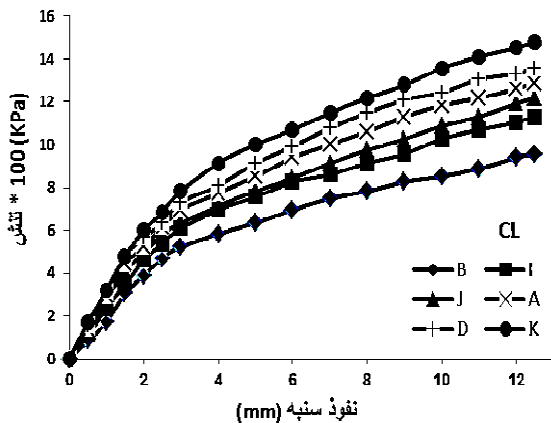
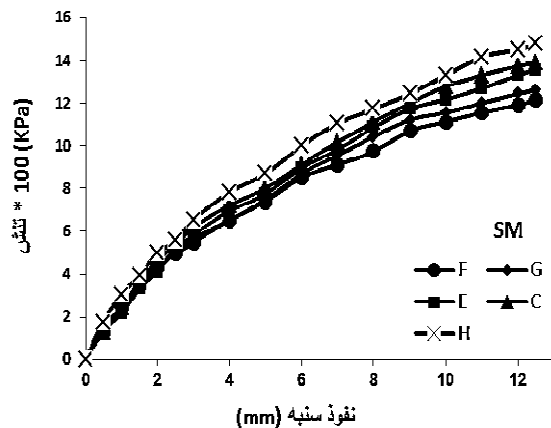
شکل ۶. تأثیر مواد نفتی بر ذرات رس و کاهش ثابت دی‌الکتریک آب منفذی بین ذرات خاک (Sivapullaiah et al., 1987 با تغییرات)

(Acar et al, 1985 and Meegoda and Ratnaweera, 1994).

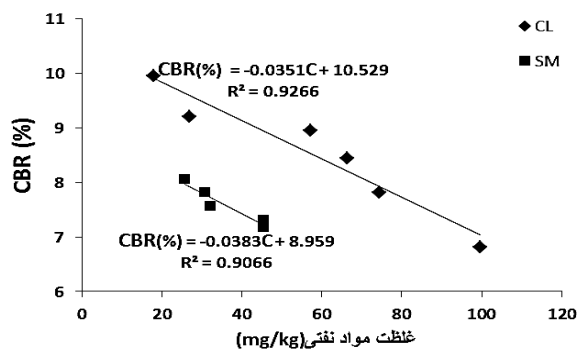
با توجه به شکل (۵) می‌توان بر اساس میزان آلودگی، مقادیر وزن واحد حجم خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه را از

- مواد نفتی با احاطه کردن ذرات خاک باعث کاهش لایه آب دوگانه می‌شود. در نتیجه میزان آب بین دانه‌ای لازم جهت لغزیدن ذرات بر روی هم کاهش می‌یابد و خاک با رطوبت کمتر به حداکثر وزن واحد حجم خشک می‌رسد

است. رابطه بین غلظت مواد نفتی و نسبت باربری کالیفرنیا در نمودار شکل (۸) ارائه شده است



شکل ۷. نمودار تنش - نفوذ سنبه در آزمایش CBR (نقاط نمونه برداری از بیشترین آلودگی به کمترین آلودگی مرتب شده‌اند)



شکل ۸. تغییرات نسبت باربری کالیفرنیا در مقابل غلظت مواد نفتی

روابط ۱ تا ۴ برای خاک‌های آلوده محدوده مورد مطالعه تعیین نمود.

برای نمونه‌های رسی (CL)

$$\gamma_{dmax}(gr/cm^3) = 0.0013C + 1.72 \quad (1)$$

$$(R^2 = 0.93)$$

$$\omega_{opt}(\%) = -0.0174C + 14.1 \quad (2)$$

$$(R^2 = 0.22)$$

برای نمونه‌های ماسه سیلتی (SM)

$$\gamma_{dmax}(gr/cm^3) = 0.002C + 1.69 \quad (3)$$

$$(R^2 = 0.85)$$

$$\omega_{opt}(\%) = -0.0283C + 14.5 \quad (4)$$

$$(R^2 = 0.93)$$

در این روابط، C، غلظت مواد هیدروکربنی آلوده کننده می باشد.

### ۴-۳. نتایج آزمایش تعیین نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) متداول‌ترین روش تعیین مقاومت نسبی خاک‌ها برای راه‌سازی است. با استفاده از نتایج این آزمایش می‌توان ظرفیت باربری خاک بستر و کلیه اجزاء راه از قبیل زیراساس و اساس را یافته، بر طبق آن ضخامت این لایه را تعیین کرد. این آزمایش مقاومت برشی خاک را تحت شرایط کنترل شده درصد رطوبت و وزن واحد حجم خشک به دست می‌دهد. این آزمایش در نهایت یک عدد را به عنوان نسبت باربری به دست می‌دهد. بدیهی است که این عدد برای یک خاک مشخص ثابت نیست و بستگی به شرایط تراکمی و رطوبتی آن خاک دارد.

برای انجام این آزمایش نمونه‌ها با وزن واحد حجم خشک بیشینه ( $\gamma_{dmax}$ ) و درصد رطوبت بهینه ( $\omega_{opt}$ ) حاصل از آزمایش تراکم استاندارد آماده‌سازی شده و مقدار تورم در این آزمایش برای آن‌ها اندازه‌گیری نشده است. نمونه‌ها در سه لایه و هر لایه ۶۵ ضربه با استفاده از چکش تراکم استاندارد در قالب CBR کوبیده شدند (ASTM D1883., 2000). نتایج حاصل از این آزمایش در شکل (۷) و جدول (۶) آورده شده



(Aiban, 1996). با توجه به شکل (۸) می‌توان مقادیر CBR را نسبت به غلظت مواد نفتی برای خاک‌های آلوده محدوده مورد مطالعه بر اساس روابط ۵ و ۶ به دست آورد:

برای نمونه‌های رسی (CL)

$$\text{CBR}(\%) = -0.035C + 10.53 \quad (5)$$

$$(R^2 = 0.93)$$

برای نمونه‌های ماسه سیلتی (SM)

$$\text{CBR}(\%) = -0.038C + 8.96$$

$$(6)$$

$$(R^2 = 0.91)$$

#### ۴-۴ نتایج آزمایش برش مستقیم

مقاومت برشی خاک، عمده‌ترین عامل در تعیین رفتار خاک‌ها می‌باشد و در مباحث پایداری خاک اهمیت و کاربرد زیادی دارد. مقاومت برشی خاک، مقاومت در واحد سطح آن است، یعنی مقاومتی که خاک می‌تواند برای تاب آوردن در برابر گسیختگی و لغزش در امتداد هر سطح دلخواه در داخل خود بسیج نماید (ASTM D3080, 2000).

انجام این آزمایش به منظور تعیین پارامترهای مقاومت خاک یعنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی از نمونه طبیعی خاک و یا از نمونه‌های بازسازی شده می‌باشد. در این آزمایش، نمونه خاک تحت فشار قائم معین (در امتداد محور نمونه) قرار می‌گیرد و فشار برشی (عمود بر فشار قائم) تا آن حد افزایش می‌یابد، تا نمونه بریده شود (ASTM D3080, 2000). جهت جلوگیری از خروج مواد نفتی در اثر نفوذ آب، این آزمایش در شرایط تحکیم نیافته-زهکشی نشده و با وزن واحد حجم خشک بیشینه ( $\gamma_{dmax}$ ) و درصد رطوبت بهینه ( $\omega_{opt}$ ) حاصل از آزمایش تراکم استاندارد انجام شده است. همچنین آزمایش برای سه فشار عمودی شامل ۱۰، ۲۰ و ۴۰ کیلوپاسگال انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل (۹) بر اساس مقادیر تنش برشی ماکزیمم-جابجایی و نمودار تنش قائم-تنش برشی آورده شده است. همچنین مقادیر

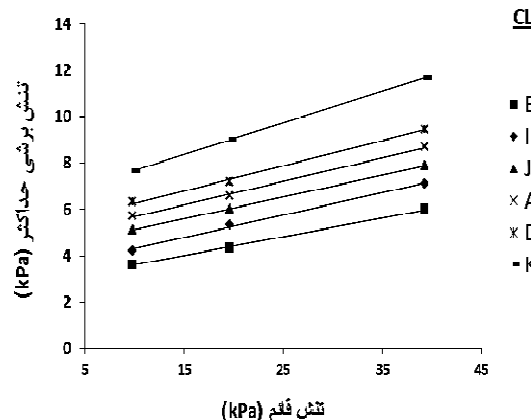
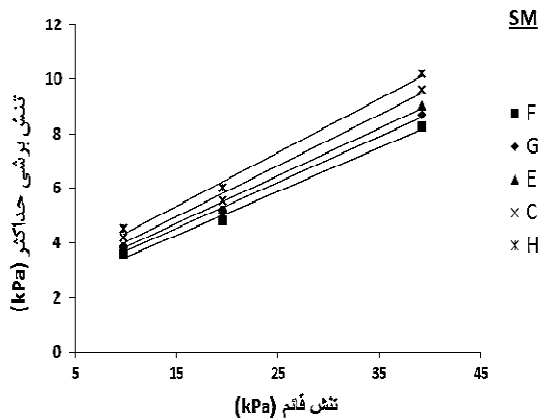
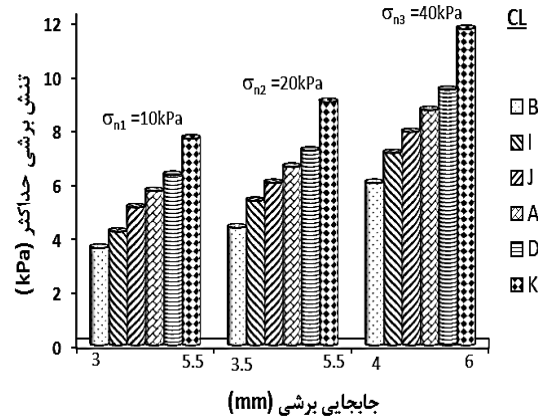
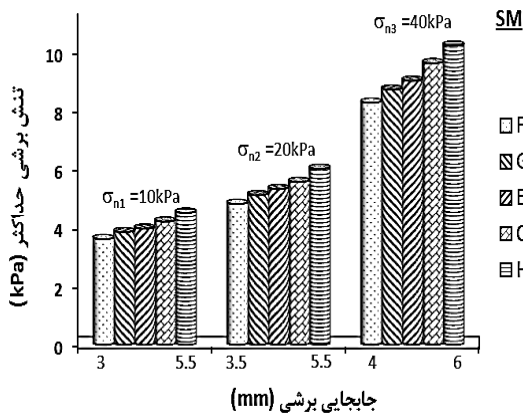
جدول ۶. مقادیر CBR برای نفوذ ۲/۵ میلی‌متر سنبه برای نمونه‌های آلوده به مواد نفتی

رده خاک	نقطه نمونه‌برداری	شماره نمونه	غلظت مواد نفتی (mg/kg)	CBR (%)
CL	B	۱	۹۹/۳۸	۶/۸۱
	I	۲	۷۴/۵	۷/۸۱
	J	۳	۶۶/۴	۸/۴۴
	A	۴	۵۷/۱	۸/۹۵
	D	۵	۲۶/۹	۹/۲
	K	۶	۱۷/۹	۹/۹۶
SM	F	۷	۴۵/۴	۷/۱۸
	G	۸	۴۵/۴	۷/۳۱
	E	۹	۳۲	۷/۵۶
	C	۱۰	۳۰/۹	۷/۸۱
	H	۱۱	۲۵/۹	۸/۰۶

با مقایسه مقادیر CBR هر یک از نمونه‌ها مشاهده می‌شود که در نمونه‌های با آلودگی بیشتر، مقدار باربری کالیفرنیا کاهش یافته است. مقدار کاهش CBR در نمونه‌های رسی (CL) به مراتب بیشتر از نمونه‌های ماسه‌ای می‌باشد. علت این امر تأثیر مواد نفتی بر چسبندگی ذرات رس می‌باشد که موجب کاهش چسبندگی خاک می‌شوند. همچنین با توجه به سطح ویژه بالای ذرات رس، میزان مواد نفتی احاطه‌کننده ذرات در واحد حجم در خاک‌های رسی بیشتر بوده و بیشترین تأثیر در لغزش ذرات نسبت به خاک‌های دانه‌ای خواهد داشت. در حالت کلی مواد نفتی با احاطه کردن ذرات خاک، لغزش ذرات در امتداد سطح یکدیگر را افزایش می‌دهند. از طرف دیگر هیدروکربن‌های نفتی خاصیت پلاستیکی داشته و با احاطه کردن ذرات خاک موجب افزایش شکل‌پذیری ذرات تشکیل‌دهنده خاک می‌شوند. همچنین با توجه به این که ذرات رسی سطح مخصوص بیشتری دارند، بنابراین باعث افزایش درصد هیدروکربن‌های موجود در خاک شده و موجب افزایش انعطاف‌پذیری خاک می‌شوند. افزایش قابلیت انعطاف پلاستیکی ذرات خاک میزان نشست و تغییر شکل خاک در برابر نفوذ سنبه را افزایش می‌دهد، در نتیجه نسبت باربری کالیفرنیا کاهش یافته است (Shin et al., 1999).

اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه‌ها نسبت به غلظت مواد نفتی آلوده‌کننده را نشان می‌دهد

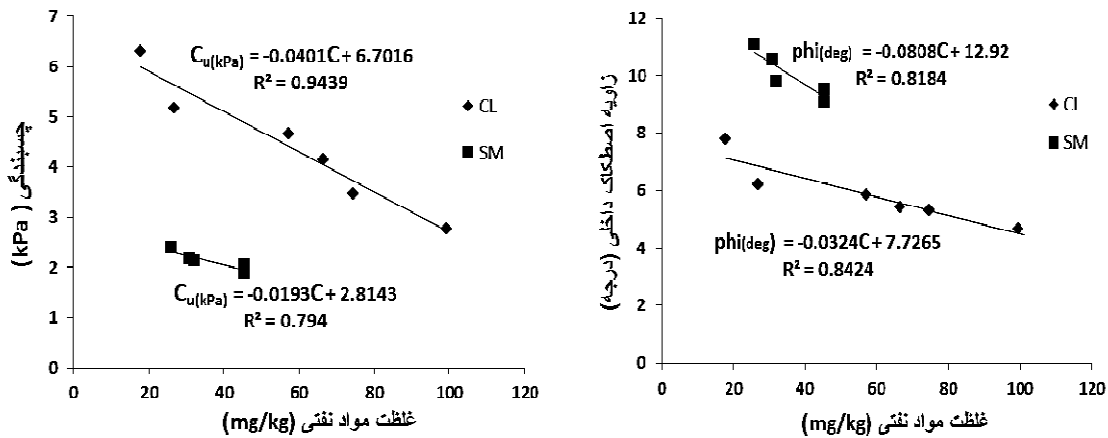
چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) در جدول (۷) آورده شده است. شکل (۱۰) نیز روند تغییرات زاویه



شکل ۹. نتایج آزمایش برش مستقیم UU بر روی نمونه‌های مورد مطالعه (نقاط نمونه‌برداری از بیشترین آلودگی به کمترین آلودگی مرتب شده‌اند)

جدول ۷. روابط حاصل از آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های آلوده

رده خاک	نقطه نمونه‌برداری	شماره نمونه	غلظت مواد نفتی (mg/kg)	C (kPa)	$\phi$ (درجه)
CL	B	۱	۹۹/۳۸	۲/۷۷	۴/۶۸
	I	۲	۷۴/۵	۳/۴۶	۵/۳۱
	J	۳	۶۶/۴	۴/۱۵	۵/۴۳
	A	۴	۵۷/۱	۴/۶۵	۵/۸۶
	D	۵	۲۶/۹	۵/۱۷	۶/۲
	K	۶	۱۷/۹	۶/۳	۷/۸
SM	F	۷	۴۵/۴	۱/۸۷	۹/۱
	G	۸	۴۵/۴	۲/۰۴	۹/۵۳
	E	۹	۳۲	۲/۱۲	۹/۸۱
	C	۱۰	۳۰/۹	۲/۱۷	۱۰/۵۴
	H	۱۱	۲۵/۹	۲/۴	۱۱/۰۹



شکل ۱۰. روند تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه‌ها نسبت به غلظت مواد نفتی آلوده‌کننده

خروج آب از حالت جذب سطحی شده و فشار آب منفذی افزایش یابد. افزایش فشار آب منفذی باعث کاهش مقاومت خاک می‌گردد (شکل ۶).

- با توجه به شکل (۱۰) مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه‌ها بر اساس غلظت مواد نفتی ( $C$ ) از روابط تبعیت می‌کنند که می‌توان بر اساس این روابط، پارامترهای مقاومت برشی برای خاک‌های آلوده محدوده مورد مطالعه را تعیین نمود:

• برای نمونه‌های رسی (CL)

$$\phi(deg) = -0.0324C + 7.7265$$

(۷)

$$(R^2 = 0.84)$$

$$C_u(kPa) = -0.0401C + 6.7016 \quad (۸)$$

$$(R^2 = 0.94)$$

برای نمونه‌های ماسه سیلتی (SM)

$$\phi(deg) = -0.0808C + 12.92$$

(۹)

$$(R^2 = 0.82)$$

$$C_u(kPa) = -0.0193C + 2.8143 \quad (۱۰)$$

$$(R^2 = 0.80)$$

بر اساس نتایج حاصل از این آزمایش‌ها مشاهده شد که با افزایش آلودگی، مقاومت برشی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در نمونه‌های با آلودگی بیشتر در خاک‌های مشابه، پارامترهای مقاومت برشی ( $C$  و  $\phi$ ) کاهش یافته است. در نمونه‌های رسی (CL) پارامتر چسبندگی بیشتر از زاویه اصطکاک داخلی تحت تأثیر بوده و کاهش بیشتری را نشان می‌دهد. برعکس، در نمونه‌های ماسه‌ای پارامتر زاویه اصطکاک داخلی بیشتر تحت تأثیر بوده و با افزایش آلودگی در آن‌ها کاهش بیشتری را نشان می‌دهد. علت این موضوع به دلایل زیر است:

- هیدروکربن‌های نفتی جامد باعث کاهش ثابت دی-الکترونیک ذرات خاک شده و با احاطه کردن ذرات رس باعث تغییر رفتار آن‌ها به رفتار خاک‌های دانه‌ای شده و بنابراین کاهش چسبندگی خاک می‌گردند (شکل ۶).
- همچنین تغییر رفتار خاک به دانه‌ای تخلخل خاک را افزایش داده و این امر باعث کاهش مقاومت خاک می‌شود (Alsana and Eid, 1997; Meegoda and Ratnaweera, 1994).
- احاطه شدن ذرات خاک با مواد نفتی لغزندگی ذرات خاک را افزایش داده و باعث کاهش اصطکاک بین ذرات خاک می‌شود (Aiban, 1996).
- هیدروکربن‌های نفتی با احاطه کردن ذرات خاک، باعث

۴-۵. نتایج آزمایش تحکیم

انجام شد. نمونه‌ها با وزن واحد حجم خشک بیشینه ( $\gamma_{dmax}$ ) و درصد رطوبت بهینه ( $w_{opt}$ ) حاصل از آزمایش تراکم استاندارد آماده‌سازی شدند. نتایج آزمایش شامل سه نمودار به قرار زیر است:

الف) نمودار نسبت تخلخل - لگاریتم فشار: با استفاده از این نمودار، پارامترهای شاخص فشردگی ( $C_c$ )، شاخص تورم ( $C_s$ ) و فشار پیش تحکیم ( $P_c$ ) محاسبه می‌شود.

ب) نمودار نسبت تخلخل - فشار: با استفاده از این نمودار، پارامترهای ضریب تراکم‌پذیری ( $av$ )، ضریب تغییر حجم ( $m_v$ ) و مدول یانگ ( $E_s$ ) محاسبه می‌شود.

ج) نمودار نشست - لگاریتم زمان  $t$ : این نمودار برای میزان نشست در واحد زمان برای یکی از فشارهای اعمالی ترسیم می‌شود. در این پژوهش نمودار نشست - لگاریتم زمان  $t$  با توجه به میزان فشار وارده از مخازن نفتی برای فشارهای اعمالی ۲۰۰ کیلوپاسکال ترسیم شده است. با استفاده از این نمودار مقادیر زمان ۵۰٪ تحکیم ( $t_{50}$ )، ضریب تحکیم ( $C_v$ ) و ضریب نفوذپذیری ( $K$ ) خاک محاسبه می‌گردد.

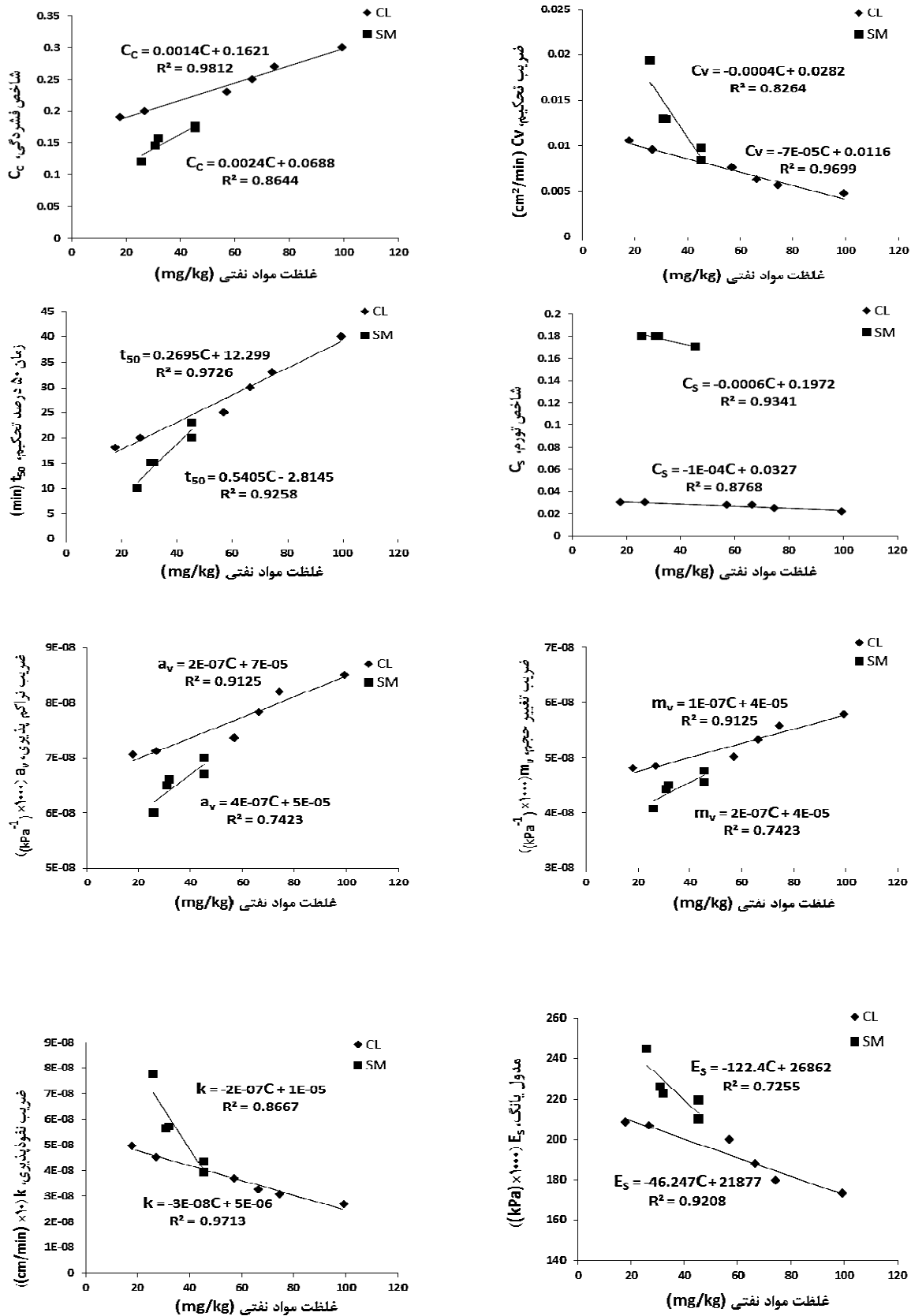
نتایج حاصل از این آزمایش به صورت نمودارهای تغییرات پارامترهای تحکیم در برابر غلظت مواد نفتی آورده شده است (شکل ۱۱). همچنین، مقادیر پارامترهای بیان شده در جدول (۸) آمده است.

آزمایش تحکیم برای تعیین میزان نشست خاک به کار می‌رود. در این آزمایش، تحت تأثیر بارگذاری محوری از تغییر شکل افقی خاک جلوگیری به عمل آمده و زهکشی نیز در جهت قائم انجام می‌شود. در این آزمایش، خاک اشباع در یک حلقه تحکیم فلزی قرار گرفته و در جهت قائم به دفعات مختلف در اثر بارگذاری فشرده می‌شود تا این که فشار منفذی ایجاد شده در هر تنش اضافی کاملاً محو شود. حلقه تحکیم فلزی مانع کرنش خاک در جهت افقی می‌گردد. طی فشرده شدن نمونه، مقدار کوتاه شدن آن ثبت می‌شود. این اطلاعات برای محاسبه ضرابی که بیان کننده رابطه بین تنش موثر و کرنش یا نسبت پوکی هستند، به کار می‌روند و بیان کننده درجه فشردگی نمونه می‌باشند. مقدار تراکم‌پذیری خاک که با این آزمایش مشخص می‌شود، از مهم‌ترین خواصی است که از طریق تجارب آزمایشگاهی حاصل می‌شود. اطلاعات به دست آمده از آزمایش تحکیم خاک می‌تواند در گسترش یا تخمین سرعت و مقدار نشست غیریکنواخت و نشست کل یک سازه یا توده خاک و نیز در انتخاب نوع پی مورد استفاده قرار گیرد (افلاکی، ۱۳۸۰). اعمال فشار در آزمایش تحکیم معمولاً به صورتی است که  $\Delta P/P=1$  باشد. بنابراین این آزمایش با فشارهای ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۶۰۰ کیلوپاسکال

جدول ۸. مقادیر پارامترهای تحکیم نمونه‌های مورد مطالعه

$k(\text{cm}/\text{min})$	$C_v(\text{cm}^2/\text{min})^*$	$E_s(\text{kPa})$	$m_v(\text{kPa}^{-1})$	$a_v(\text{kPa}^{-1})$	$C_s$	$C_c$	غلظت مواد نفتی (mg/kg)	نقطه نمونه‌برداری	رده خاک
$2/68 \times 10^{-7}$	۰/۰۰۴۷	۱۷۲۹۴/۱۲	$5/78 \times 10^{-5}$	$8/25 \times 10^{-5}$	۰/۰۲۲	۰/۳	۹۹/۳۸	B	
$3/05 \times 10^{-7}$	۰/۰۰۵۶	۱۷۹۲۶/۸۳	$5/58 \times 10^{-5}$	$8/2 \times 10^{-5}$	۰/۰۲۵	۰/۲۷	۷۴/۵	I	
$3/25 \times 10^{-7}$	۰/۰۰۶۲	۱۸۷۷۳/۹۵	$5/33 \times 10^{-5}$	$7/83 \times 10^{-5}$	۰/۰۲۸	۰/۲۵	۶۶/۴	J	CL
$3/68 \times 10^{-7}$	۰/۰۰۷۵	۱۹۹۷۲/۸۳	$5/0 \times 10^{-5}$	$7/36 \times 10^{-5}$	۰/۰۲۸	۰/۲۳	۵۷/۱	A	
$4/52 \times 10^{-7}$	۰/۰۰۹۵	۲۰۶۴۶/۰۷	$4/84 \times 10^{-5}$	$7/12 \times 10^{-5}$	۰/۰۳	۰/۲	۲۶/۹	D	
$4/96 \times 10^{-7}$	۰/۰۱۰۵	۲۰۸۲۱/۵۳	$4/80 \times 10^{-5}$	$7/06 \times 10^{-5}$	۰/۰۳	۰/۱۹	۱۷/۹	K	
$3/92 \times 10^{-7}$	۰/۰۰۸۴	۲۱۰۰۰/۰۰	$4/76 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$	۰/۰۱۷	۰/۱۷۷	۴۵/۴	F	
$4/34 \times 10^{-7}$	۰/۰۰۹۷	۲۱۹۴۰/۳۰	$4/56 \times 10^{-5}$	$7/7 \times 10^{-5}$	۰/۰۱۷	۰/۱۷۲	۴۵/۴	G	
$5/7 \times 10^{-7}$	۰/۰۱۳	۲۲۲۷۲/۸۳	$4/5 \times 10^{-5}$	$7/6 \times 10^{-5}$	۰/۰۱۸	۰/۱۵۷	۳۲	E	SM
$5/63 \times 10^{-7}$	۰/۰۱۳	۲۲۶۱۵/۳۸	$4/42 \times 10^{-5}$	$7/5 \times 10^{-5}$	۰/۰۱۸	۰/۱۴۵	۳۰/۹	C	
$7/76 \times 10^{-7}$	۰/۰۱۹۴	۲۴۵۰۰/۰۰	$4/08 \times 10^{-5}$	$7/25 \times 10^{-5}$	۰/۰۱۸	۰/۱۲	۲۵/۹	H	

برای فشار ۲۰۰ کیلوپاسکال\*



شکل ۱۱. روند تغییرات پارامترهای آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌های مورد مطالعه

غلظت‌های مختلف آلودگی نفتی برای انواع خاک‌های CL و SM به دست آورد.

#### ۵. نتیجه‌گیری

به طور کلی با توجه به نتایج آزمایش‌های صورت گرفته بر روی خاک‌های آلوده به مواد نفتی در محدوده پالایشگاه تبریز نتایج زیر به دست آمده است:

- نوع هیدروکربن‌های نفتی آلوده‌کننده خاک‌های محدوده پالایشگاه تبریز از C14 (N-Tetradocane) تا C28 (N-Octacosane) متغیر بوده و غلظت مواد نفتی آلوده‌کننده از ۵۷/۱ تا ۹۹/۳۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر است.
- شاخص خمیری ذرات در نمونه‌های با آلودگی بیشتر، کاهش یافته است. علت این موضوع احاطه شدن ذرات خاک توسط هیدروکربن‌ها و ختنی شدن بار ذرات رس و عدم تأثیر آب بر ذرات رسی می‌باشد.
- با افزایش آلودگی خاک‌ها به هیدروکربن‌های نفتی جامد، وزن واحد حجم خشک حداکثر افزایش و درصد رطوبت بهینه کاهش می‌یابد.
- افزایش آلودگی در خاک به مواد نفتی، لغزندگی ذرات خاک را بر روی هم افزایش داده و موجب کاهش نسبت باربری کالیفرنیا می‌گردد و خاک را برای پی‌سازی نامناسب می‌کند.
- هیدروکربن‌های نفتی با کاهش ثابت دی‌الکتریک سیال منفذی، افزایش لغزندگی ذرات خاک و تأثیر بر بارالکتریکی ذرات رس باعث کاهش پارامترهای مقاومت برشی خاک شده و مقاومت گسیختگی را کاهش می‌دهند.
- افزایش مقادیر هیدروکربن‌های نفتی در خاک باعث افزایش شکل‌پذیری ذرات خاک شده و شاخص فشردگی و میزان نشست خاک را افزایش می‌دهد. با توجه به ویسکوزیته بالای هیدروکربن‌های نفتی جامد آلوده‌کننده نمونه‌ها، زمان تحکیم

با توجه به نتایج این آزمایش مشاهده شد که با افزایش آلودگی در نمونه‌ها میزان نشست افزایش یافته است، که این پارامتر در نمونه‌های رسی (CL) بیشتر بوده است. به عبارت دیگر مقادیر شاخص فشردگی ( $C_c$ )، ضریب تراکم‌پذیری ( $a_v$ ) و ضریب تغییر حجم ( $m_v$ ) با افزایش آلودگی در نمونه‌ها افزایش یافته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه‌های با آلودگی بیشتر، شیب منحنی شاخص فشردگی افزایش یافته است. دلیل این امر خاصیت پلاستیکی و تغییر شکل‌پذیری هیدروکربن‌های جامد است که با احاطه کردن ذرات خاک موجب افزایش انعطاف‌پذیری و تغییر شکل‌پذیری ذرات خاک می‌شود؛ همین امر باعث کاهش مقدار مدول یانگ خاک ( $E_s$ ) نیز شده است. همچنین با توجه به نتایج، میزان ضریب تحکیم ( $C_v$ ) با افزایش آلودگی کاهش یافته است که با توجه به افزایش انعطاف‌پذیری و شکل‌پذیری ذرات خاک با افزایش آلودگی قابل توجیه می‌باشد (طاحونی، ۱۳۸۱). افزایش مقادیر شاخص فشردگی و ضرایب تحکیم ( $a_v$ ،  $m_v$ ) در اثر افزایش آلودگی، موجب افزایش نشست‌های تحکیمی و به خطر افتادن مخازن نفت خواهد شد. با توجه به این که مواد نفتی ویسکوزیته بالایی دارند، این امر زمان تحکیم را افزایش می‌دهد به طوری که در هر دو نوع خاک با افزایش آلودگی، زمان ۵۰٪ تحکیم ( $t_{50}$ ) نیز افزایش یافته و ضریب تحکیم و ضریب نفوذپذیری کاهش یافته است. این امر نشست‌های تحکیمی وابسته به زمان را افزایش می‌دهد. این نتایج مطابق با نتایج Shin et al. (1994) و Meegoda and Ratnaweera (1999) و صدیقیان (۱۳۸۳) می‌باشد. دلیل این محققین ویسکوزیته بالا، کاهش ثابت دی‌الکتریک سیال منفذی، افزایش شکل‌پذیری، انعطاف‌پذیری و روغن کاری ذرات خاک می‌باشد. بر اساس شکل (۱۱) می‌توان تغییرات پارامترهای تحکیم را برای

## تشکر و قدردانی

بدین وسیله از مدیر محترم پژوهش و فن‌آوری پالایشگاه تبریز جناب آقای مهندس رحیم غبرائی و همکاری صمیمانه جناب آقای مهندس محمد کاظم کنگری تشکر و قدردانی می‌گردد.

افزایش یافته و این امر زمان نشست تحکیمی را افزایش می‌دهد.

در این پژوهش رابطه بین هر یک از پارامترهای مهندسی با غلظت مواد نفتی آلوده‌کننده برای خاک‌های CL و SM به دست آمده که با استفاده از آن می‌توان پارامترهای مهندسی خاک‌های آلوده محدوده پالایشگاه را تخمین زد.

## منابع

- افلاکی، ا.، ۱۳۸۰، آزمایشگاه مکانیک خاک، نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- صدیقیان، م.ح.، ۱۳۸۳، بررسی آزمایشگاهی تأثیر آلودگی به نفت خام بر پارامترهای مقاومت، نشست و تراکم پذیری ماسه، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۷۵۲-۸۳.
- طاحونی، ش.، ۱۳۸۱، اصول مهندسی ژئوتکنیک، جلد اول، مکانیک خاک (ترجمه)، انتشارات امیرکبیر.
- Acar, Y.B., Hamidon, A., and Field, S.D., 1985. The Effect of organic fluids on hydraulic conductivity of compacted kaolinite. American Society for Testing and Materials, 874: 171 – 187.
- Alsanad, I., Esmaeel, K., 1995. Aging effect on oil Contaminated Kuwaiti sand. Journal of Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering, ASCE, 123(3): 290-294.
- Alsanad.H.A., Eid.W. K. I., 1997. Geotechnical properties of oil contaminated Kuwaiti sand. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 121(5): 407-412.
- Aiban, A., 1998. The effect of temperature on the engineering properties of oil contaminated sand. Journal of Environmen International, 24(1- 2): 153-161.
- ASTM D422., 2000. Standard test methods for particle size analysis of soils. Annual Books of ASTM Standards.
- ASTM D4318., 2000. Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soil. Annual Books of ASTM Standards.
- ASTM D698., 2000. Standard test methods for laboratory compaction characteristic. Annual Books of ASTM Standard.
- ASTM D1883., 2000. Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils. Annual Books of ASTM Standards.
- ASTM D2435., 2000. Standard test method for one dimensional consolidation properties of soils. Annual Books of ASTM Standard.
- ASTM D3080., 2000. Standard test method for direct shear test of soils. Annual Books of ASTM Standards.
- Khamehchiyan, M., Charkhabi, A. H., Tajik, M., 2007. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils method. Engineering Geology, 89: 220 –229.
- Lekmine, D.E., 1991. Effect of petroleum hydrocarbons on the shear strength and compressibility of soil. Ph.D Thesis, Steven Institute of Technology, Castle Point, Hoboken, New Jersey.
- Meegoda, N. I., Ratnaweera, K., 1994. Compressibility of contaminated fine soil. Journal Geotechnical Testing, 17(1): 101-112.
- Praisler, M., Gosav, S., Van Bocxlaer, J., De Leenheer, A., and Massart, D. L., 2002. Exploratory analysis for the identification of Amphetamines using neural networks and GC-FTIR data. The Annals of the University Dunarea de Jos, Fascicle II, p. 83-96, ISSN 1221-4531.
- Shin, E.C., Lee, I. B., Das, B. M., 1999. Bearing capacity of a model seal footing on crude oil contaminated sand. Journal of Geotechnical and Geological Engineering, Kluwer Academic Publishers, 17: 123-132.

- Sivapullaiah, P.V., Sitharam, T.G. Subbareo, K.S., 1987. Clay-organic molecule interaction: consolidation behaviour. Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore 560 012, Clay Research, 6(2): 76-80.
- Vijay, K., Puri, A. D., 2000. Geotechnical aspects of oil contaminated sands, soil and sediment contamination, 9(4):359-374.