



## بررسی رفتار ماسه‌های آلوده به نفت خام در آزمایش CBR

مسعود نصیری<sup>۱</sup>، محمد حاجی‌عزیزی<sup>۱\*</sup>، احمد رضا مظاهری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

<sup>۲</sup> دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آیت‌الله العظمی بروجردی، بروجرد، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۹

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۰۷

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

### کلمات کلیدی:

ماسه

نفت خام

تحمل باربری

نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

شکل ذرات

**خلاصه:** عوامل متعددی تحمل باربری خاکریزهای طبیعی و مهندسی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، از جمله نشت نفت خام که منجر به کاهش مقاومت می‌گردد. هدف از این پژوهش آن است که با استفاده از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، مقدار افت باربری و رفتار تنش-کرنش برای خاک‌های ماسه‌ای آلوده به نفت خام بررسی گردد. در این تحقیق از ۱۰ نوع ماسه‌ی مختلف با ویژگی‌های متفاوت استفاده شده است. روش کار بدین صورت است که یکسری آزمایش CBR برای ماسه‌های تمیز (غیر آلوده) انجام می‌شود و سپس ماسه‌های آلوده به ۶٪ نفت خام در شرایط و تراکم مشابه تحت آزمایش قرار می‌گیرند تا بتوان به صورت کمی مقدار کاهش باربری ماسه‌های آلوده به نفت خام را به دست آورد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که باربری ماسه‌های آلوده به ۶٪ نفت خام حداقل ۵۰٪ نسبت به ماسه‌های تمیز کاهش می‌یابد و نمودارهای تنش-کرنش این خاک‌ها نیز شدیداً دچار کاهش خواهند شد. بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌توان بیان کرد که شکل ذرات (تیز گوشه بودن)، درصد درشت‌دانه بودن ذرات در توده‌ی خاک و نوع دانه‌بندی عواملی هستند که در مقاومت ماسه‌های آلوده به نفت خام اثرگذارند. همچنین مشخص شد که ماسه‌ی استاندارد اتاوا دارای ۸۳٪ کاهش مقاومت است و ماسه‌ی با ذرات تیز گوشه دارای کاهش مقاومتی در حدود ۵۷٪ است. ماسه آلوده به نفت خام دچار افت شدید باربری می‌شود، از این رو باید در مناطقی که خطر نشت نفت خام وجود دارد، در طراحی پی‌ها و سازه‌های مهندسی، ضرایب اطمینان بیشتری را در نظر گرفت.

### ۱- مقدمه

می‌شود. نشت نفت خام یکی از خطرات جدی در مناطقی که در نزدیکی چاه‌های نفت قرار دارند، محسوب می‌شود. نشت نفت و آلوده کردن مناطق مذکور به دلایل شکست و آسیب دیدن خطوط مدفون لوله انتقال نفت، فوران نفت از چاه‌های حفاری، عملیات تروریستی و خرابکارانه امکان‌پذیر است. در صورت بروز این مشکل، علاوه بر جنبه‌های ژئوتکنیکی، مشکلات زیست‌محیطی را نیز به همراه خواهد داشت. بر همین اساس، آگاهی و دانش در زمینه‌ی میزان کاهش تحمل باربری این مناطق از اهمیت دو چندان برخوردار است. محمدی و همکاران [۱] به کمک سه نوع آلاینده (گازوئیل، نفت خام و روغن موتور) به بررسی اثر آلاینده‌های نفتی بر اندرکنش بین شمع-خاک ماسه‌ای پرداختند. نتایج پژوهش آنان نشان داد

تحمل باربری یکی از مفاهیم کلاسیک مهندسی پی می‌باشد که تابع شرایط متعددی است. افزایش تحمل باربری به کمک تکنیک‌ها و روش‌های فنی همواره مورد توجه محققین ژئوتکنیک بوده است. کاهش تحمل باربری و جوابگو نبودن بستر مورد نظر یکی از خطرات جدی در ساخت و ساز است و این موضوع نه تنها با سازه‌های ژئوتکنیکی بلکه با بسیاری از زیر شاخه‌های مهندسی عمران از جمله راهسازی نیز در ارتباط تنگاتنگ است. اگر خاک بستر مورد نظر به هر دلیلی دچار کاهش مقاومت شود، تحمل باربری آن منطقه کاهش می‌یابد که در نتیجه ایمنی سازه‌ها با تهدید جدی مواجه

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mhazizi@razi.ac.ir



و افزایش مقدار CBR توسط محققین مختلف انجام شده است [۱۰-۱۶]. هوشیار و رستمی [۱۷] نشان دادند که با قرار دادن ضایعات پلاستیکی در خاک ماسه‌ای مقدار CBR افزایش می‌یابد و ضریب الاستیسیته‌ی خاک تسلیح شده تا ۲۳۰ درصد بیشتر خواهد شد. نتایج آزمایش‌های CBR نشان داد که با افزودن مقدار مناسب خرده لاستیک می‌توان تحمل باربری را به خوبی افزایش داد [۱۸]. نتایج پژوهش‌های مکارچیان و الیاس [۱۹] به کمک آزمایش CBR نشان داد که ژئوتکستایل سبب افزایش تحمل باربری می‌شود و این افزایش باربری با افزایش میزان نشست، بیشتر خواهد شد. افزودن خاکستر بادی به خاک بستر در آزمایش CBR سبب افزایش میزان تحمل باربری می‌شود [۲۰]. در زمینه‌ی آزمایش‌های CBR روابط همبستگی متعددی نیز توسط پژوهشگران ارائه شده است [۲۱-۲۲].

علیرغم تحقیقات متعدد انجام شده در زمینه تحمل باربری و آزمایش CBR، همچنان اطلاعات اندکی در رابطه با میزان کاهش تحمل باربری خاک‌های ماسه‌ای آلوده به نفت خام در دسترس است. از این رو در پژوهش پیش‌رو سعی شده است تا با انجام سری آزمایش‌های CBR بر روی انواع مختلف ماسه‌ها در حالت تمیز (غیر آلوده) و در شرایط آلوده به ۶٪ نفت خام به این پرسش پاسخ داد که کاهش میزان تحمل باربری ماسه‌ها در شرایط آلودگی با نفت خام به چه صورت خواهد بود. همچنین به کمک نمودارهای تنش- کرنش این خاک‌ها، میزان کاهش نشست این خاک‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در انتهای این پژوهش می‌توان به این پرسش‌های اساسی پاسخ داد که شکل ذرات، اندازه ذرات و نوع دانه‌بندی ماسه‌ها چه نقشی در کاهش تحمل باربری در خاک آلوده به نفت خام دارند.

## ۲- مشخصات مصالح

در این پژوهش از ۱۰ نوع ماسه‌ی متفاوت استفاده شده است، که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. برای هر کدام از ماسه‌ها آزمایش‌های اولیه انجام گرفت تا پارامترها و ویژگی‌های هر نوع خاک به دست آید. برای این منظور از آزمایش‌های دانه‌بندی الک (ASTM D421)، چگالی ویژه (ASTM D854-14)، نسبت تخلخل بیشینه و کمینه [۲۳] استفاده شد.

ماسه‌های مورد استفاده عبارتند از ماسه استاندارد اتاوا<sup>۱</sup>، ماسه‌های

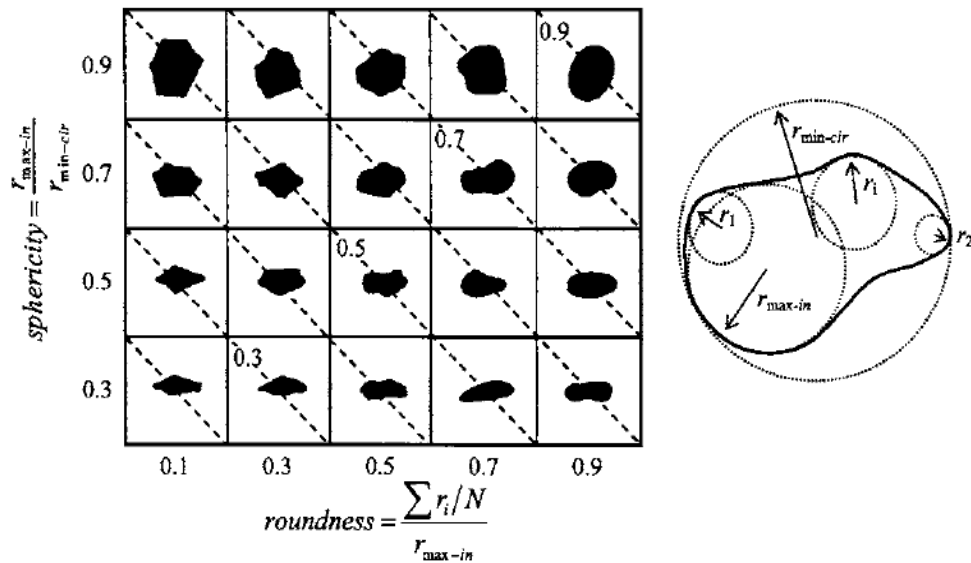
که حضور نفت بین ذرات ماسه دارای اثرات منفی چشمگیری بر کاهش تحمل باربری شمع خواهد بود. همچنین نتایج پژوهش‌های ال عدلی و همکاران [۲] نشان داد که آلودگی ماسه با نفت خام، نمودار بار-نشست را دچار تغییر کرده و تحمل باربری را شدیداً کاهش می‌دهد. نتایج آنان نشان داد که نفت خام، نوع گسیختگی برشی زیر فونداسیون را از موضعی به سوراخ کننده (پانچ) تغییر می‌دهد. زاویه اصطکاک داخلی ماسه با افزایش مقدار گازوئیل به صورت خطی کاهش می‌یابد؛ به طوری که تحمل باربری نهایی ماسه‌ی آلوده تا ۵۲٪ کاهش خواهد یافت [۳].

جوکار و حاجیانی بوشهریان [۴] با بررسی عددی تحمل باربری پی‌های نواری قرار گرفته در شیب ماسه‌ای آلوده به نفت خام به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضخامت لایه‌ی آلوده و همچنین افزایش میزان آلاینده، تحمل باربری کاهش پیدا می‌کند. خبازی و حسنلوراد [۵] مقاومت برشی خاک‌های واگرای آلوده به نفت خام را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آنان دریافتند که حضور نفت سبب می‌شود واگرایی خاک کاهش یابد تا در نهایت با افزایش تدریجی میزان نفت، خاک کاملاً واگرا به خاکی غیر واگرا تبدیل می‌شود. نوکنده و همکاران [۶] با بررسی رفتار خاک فروریزی آغشته به نفت خام نشان دادند که با افزایش مقدار نفت، پتانسیل فروریزی بودن خاک افزایش می‌یابد. شین و همکاران [۷] نشان دادند که ظرفیت باربری پی نواری قرار گرفته بر بستر ماسه‌ای آلوده به نفت به طرز چشمگیری نسبت به بستر غیر آلوده به نفت کاهش پیدا می‌کند. به طوری که با افزایش مقدار نفت از صفر به ۱/۳٪ وزنی، ظرفیت باربری نهایی تا ۷۵ درصد کاهش می‌یابد. نتایج تحقیقات محمدی و محرم‌زاده سرای [۸] نشان داد که مقدار نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) با افزایش میزان آلودگی آلکین هیدروکربن کاهش پیدا می‌کند. به طوری که اگر میزان آلاینده‌ی زیاد باشد، بستر برای پی‌سازی مناسب نخواهد بود. نصر [۹] نشان داد که میزان CBR ماسه‌های آلوده به روغن موتور سنگین<sup>۱</sup> به شدت افت پیدا می‌کند. اگر چنین ماسه‌ای آلوده‌ای به کمک سیمان تثبیت شود، مقدار CBR به صورت چشمگیری افزایش پیدا خواهد کرد و این موضوع اهمیت تثبیت ماسه‌های آلوده را نشان می‌دهد.

تثبیت خاک‌های مختلف به کمک فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی

جدول ۱. مشخصات ماسه‌های استفاده شده  
Table 1. Characteristics of used sands

نوع خاک	ضریب یکنواختی	ضریب انحنا	D50	نام خاک (روش متحد)	چگالی ویژه	تخلخل بیشینه	تخلخل کمینه	شاخص گردی ذرات ( $R$ )	شکل ذرات [۲۴]
Ottawa Sand	۷/۲۳۱	۱/۰۱۰	۰/۹۷۱	SW	۲/۶۶۰	۰/۵۶۹	۰/۳۵۲	۰/۶۰	نیمه گردگوشه
Bushehr Sand	۲/۸۷۶	۰/۹۰۹	۰/۱۹۷	SP	۲/۶۹۶	۰/۵۹۵	۰/۳۵۹	۰/۴۰	نیمه تیزگوشه
FiroozKooh#16 1 Sand	۲/۰۶۵	۱/۰۷۲	۰/۲۳۰	SP	۲/۶۴۴	۰/۸۳۳	۰/۵۳۸	۰/۸۰	گردگوشه
FiroozKooh#17 1 Sand	۱/۹۹۰	۱/۱۹۲	۰/۱۸۴	SP	۲/۵۹۲	۰/۸۲۵	۰/۵۱۷	۰/۸۰	گردگوشه
KRSS#1	۴/۷۰۱	۰/۴۸۹	۰/۹۶۳	SP	۲/۶۶۰	۰/۵۷۴	۰/۳۷۵	۰/۶۰	نیمه گردگوشه
KRSS#2	۶/۸۶۶	۰/۹۶۸	۱/۴۸۷	SP	۲/۷۸۶	۰/۷۷۴	۰/۴۷۲	۰/۴۰	نیمه تیزگوشه
KRSS#1A	-	-	-	SP	۲/۷۲۰	۰/۷۵۶	۰/۵۳۸	۰/۶۰	نیمه گردگوشه
KRSS#1B	-	-	-	SP	۲/۶۱۴	۰/۶۶۹	۰/۴۴۶	۰/۶۰	نیمه گردگوشه
KRSS#2A	-	-	-	SP	۲/۷۴۷	۰/۸۸۹	۰/۵۹۰	۰/۳۰	تیزگوشه
KRSS#2B	-	-	-	SP	۲/۷۱۱	۰/۸۶۵	۰/۵۸۱	۰/۳۰	تیزگوشه



شکل ۱. شاخص گردی ذرات [۲۴]

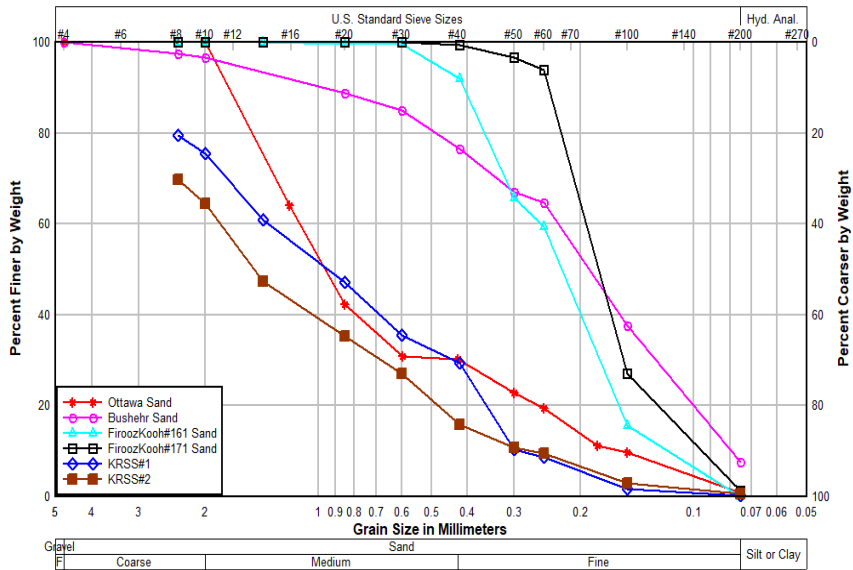
Fig. 1. Particle roundness index [24]

شاخص کمی و کیفی ذرات در جدول ۱ آمده است. این شاخص بر مبنای گردی ذرات است که گردگوشه، نیمه گردگوشه، تیزگوشه، نیمه تیزگوشه و غیره را توصیف می‌کند. مقدار شاخص کمی از رابطه‌ی گردی ذرات ( $R$ ) بدست می‌آید (رابطه (۱)) [۲۴].

$$R = \frac{\sum \left(\frac{r_i}{N}\right)}{r_{max-in}} \quad (1)$$

فیروزکوه ۱۶۱ و ۱۷۱<sup>۱</sup>، ماسه بوشهر<sup>۲</sup>، دو مدل ماسه رودخانه‌ای کرمانشاه<sup>۳</sup> و همچنین ماسه‌های رودخانه‌ای کرمانشاه با دانه‌بندی مشخص، یکی عبوری از الک شماره ۴ و مانده روی الک ۱۰<sup>۴</sup>، و دیگری عبوری از الک ۱۰ و مانده روی الک ۶۰<sup>۵</sup>.

- 1 - FiroozKooh#161 & FiroozKooh#171 Sands
- 2 - Bushehr Sand
- 3 - Kermanshah River Sand Sample (KRSS#1 & KRSS#2)
- 4 - KRSS#1A & #2A
- 5 - KRSS#1B & #2B



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک‌های ماسه‌ای  
Fig. 2. Grain size distribution of sands



شکل ۳. تصویر نمونه‌های ماسه‌ای در زیر میکروسکوپ نوری  
Fig. 3. Sand samples under optical microscope

که در این نمودار نشان داده نشدند همگی دارای دانه‌بندی مشخص هستند. چهار نموداری که در این شکل نشان داده نشدند عبارتند از: دو مدل ماسه کرمانشاه که عبوری از الک ۴ و مانده روی الک ۱۰

که شعاع ذرات مطابق با شکل ۱ اندازه‌گیری می‌شود. منحنی دانه‌بندی این خاک‌ها در شکل ۲ آورده شده است. در این شکل نمودار شش ماسه اول آورده شده است. چهار نوع ماسه‌ی دیگر

نسبی یکنواخت ۶۰٪ مورد آزمایش قرار گرفتند. علت انتخاب این عدد، نزدیکی به شرایط طبیعی سطحی در مناطق آلوده است. این موضوع توسط محققین دیگر نیز بیان شده و آنان نیز از این تراکم نسبی در پژوهش خود استفاده کرده‌اند. از جمله می‌توان به ال سند و همکاران [۲۵]، کوک و همکاران [۲۸] و خسروی و همکاران [۲۹] اشاره کرد. نکته مهم آن است که وضعیت بسترهای سطحی آلوده مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد، از این‌رو بدترین شرایط ممکن برای مشخصات خاک (از جمله درصد تراکم) و درصد آلاینده‌گی (میزان نفت خام) در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۳ مشخصات ماسه‌ها در آزمایش CBR نشان داده شده است.



شکل ۴. دستگاه CBR استفاده شده برای آزمایش  
Fig. 4. CBR apparatus used in experiments

جدول ۲. مشخصات نفت خام  
Table 2. Characteristics of crude oil

چگالی ( $N/m^3$ )	نقطه جوش ( $^{\circ}C$ )	شاخص API	ویسکوزیته ( $\times 10^{-6} m^2/s$ )
۸۰۰۰	۲۵-۴۷	۳۳/۶	۹۸/۸۰

بودند (KRSS#1A و KRSS#2A) و دو مدل دیگری که عبوری از الک ۱۰ مانده روی الک ۶۰ می‌باشند (KRSS#2B و KRSS#1B). از آنجایی که یکی از پارامترهای مورد مطالعه در این پژوهش شکل ذرات است، در شکل ۳ تصویر نمونه‌های ماسه زیر میکروسکوپ نوری نشان داده شده است تا درک بهتری از شکل ذرات هر خاک به دست آید. آزمایش CBR انجام شده در این پژوهش بر اساس استاندارد ASTM D1883 بوده و ابعاد داخلی قالب دارای قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۴). سرعت نفوذ سنبه‌ی آزمایش در نمونه‌ها، ثابت و به اندازه ۱/۲۷ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد. نفت خام مورد استفاده در این تحقیق، از واحد پژوهش شرکت نفت گاز غرب در استان کرمانشاه تهیه شده است که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه گردیده است.

قابل ذکر است که شاخص API کمیتی برای سنجش چگالی مایعات نفتی است. این کمیت بدون بعد بوده و نشان دهنده‌ی مقدار چگالی مایع مورد نظر به چگالی آب است.

## ۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها

در این پژوهش میزان آلاینده‌گی نفت خام برای ترکیب با خاک‌های پایه به مقدار ۶٪ وزن خاک خشک بوده است. مطابق تحقیقات پیشین که در زمینه‌ی آلودگی با مشتقات نفتی [۹، ۲۵-۲۶] انجام شده است، بیشترین درصد آلودگی برای خاک‌های ماسه ۶٪ انتخاب شده است. چرا که در درصد‌های بالاتر عملاً کارایی خاک از بین رفته و امکان انجام آزمایش در آن میسر نیست. همچنین در درصد‌های کمتر نیز اثر آلاینده‌گی به صورت مشخص قابل بررسی نخواهد بود.

برای ساخت نمونه‌های آلوده به نفت خام در ابتدا مقدار مشخصی خاک خشک را وزن کرده و در سطح صافی پهن می‌شود. سپس با توجه به مقدار ۶٪ وزن معادل خاک خشک، نفت خام را توزین کرده و در سطح خاک ریخته و توده‌ی مورد نظر را به مدت ۱۵ تا ۲۰ دقیقه (بسته به نوع ماسه) مخلوط کرده تا یک ترکیب همگن و یکنواخت حاصل شود. شکل ۵ نحوه‌ی ساخت ماسه‌ی فیروزکوه ۱۷۱ آلوده به ۶٪ نفت خام را نشان می‌دهد. پس از ساخت، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در محیط آزمایشگاه قرار داده می‌شوند تا اجازه انجام فرآیندهای شیمیایی به آن‌ها داده شود [۲۷]. نمونه‌ها پس از این مراحل تحت آزمایش CBR قرار می‌گیرند. همه آزمایش‌ها در تراکم



شکل ۵. نحوه‌ی ساخت ماسه آلوده به ۶٪ نفت خام (ماسه فیروزکوه ۱۷۱)  
**Fig. 5. Preparation of 6% oil contaminated sand (FiroozKooH#171 sand)**

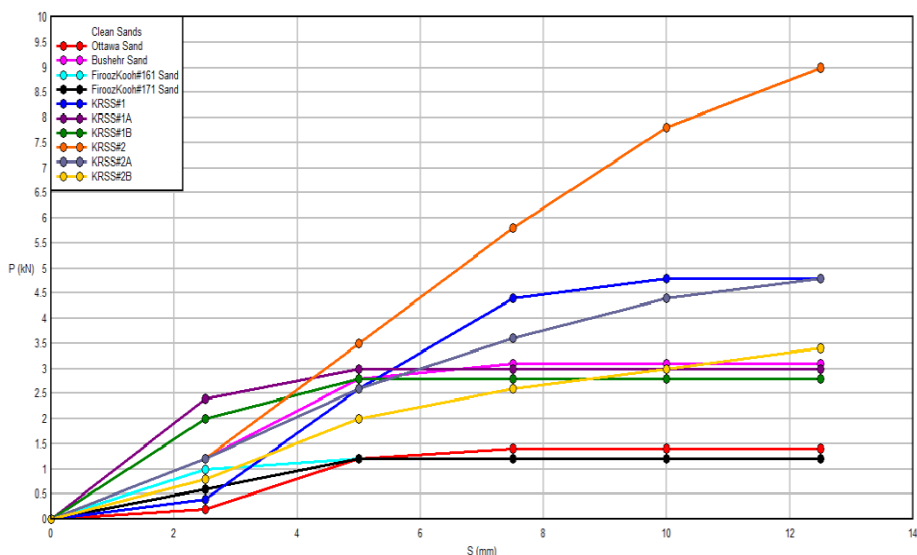
جدول ۳. مشخصات ماسه‌ها در آزمایش CBR  
**Table 3. Sand characteristics in CBR tests**

نوع خاک	تراکم نسبی	نسبت تخلخل	وزن نمونه (gr)
Ottawa Sand	٪۶۰	۰/۴۳۸۸	۳۸۴۵/۹۶
Bushehr Sand	٪۶۰	۰/۴۵۳۴	۳۸۵۸/۸۵
FiroozKooH#161 Sand	٪۶۰	۰/۶۹۵۰	۳۲۴۲/۵۵
FiroozKooH#171 Sand	٪۶۰	۰/۶۴۰۲	۳۲۸۷/۴۷
KRSS#1	٪۶۰	۰/۴۵۴۶	۳۸۰۴/۱۹
KRSS#2	٪۶۰	۰/۵۸۰۸	۳۶۶۶/۳۰
KRSS#1A	٪۶۰	۰/۶۲۵۲	۳۴۸۱/۶۶
KRSS#1B	٪۶۰	۰/۵۳۵۲	۳۵۴۲/۱۳
KRSS#2A	٪۶۰	۰/۷۰۹۶	۳۳۳۵/۳۳
KRSS#2B	٪۶۰	۰/۶۹۴۶	۳۳۷۲/۲۱

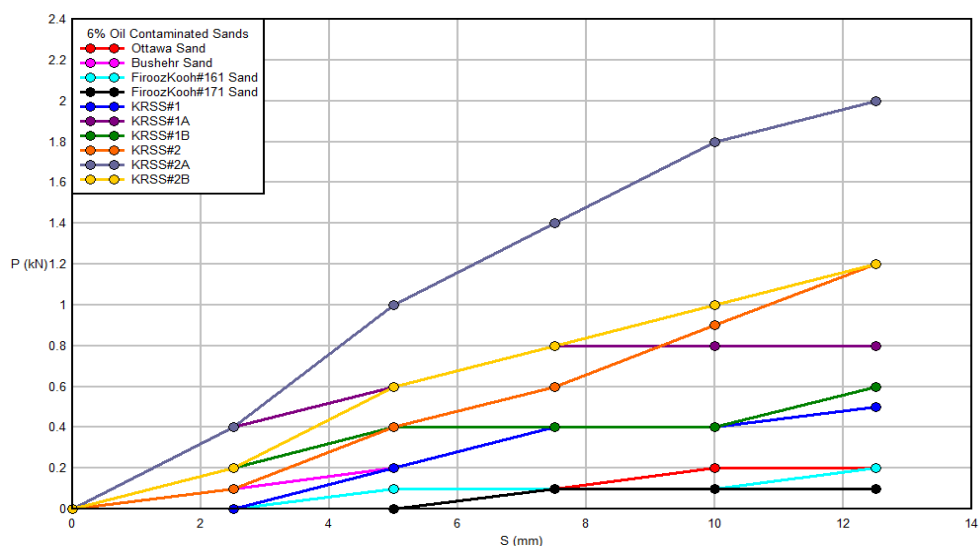
می‌شود. در همه آزمایش‌ها میزان تراکم نسبی ۶۰ درصد بوده است. به‌عبارت دیگر ماسه‌های آلوده و غیر آلوده، تراکم نسبی ۶۰ درصد داشته‌اند. بررسی اثر آلاینده‌ی نفت خام بر مقدار CBR و مقایسه‌ی آن با ماسه‌های غیر آلوده در شرایط تراکم یکسان مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از قرار دادن نمونه زیر دستگاه یک حلقه فلزی به وزن ۴۵۰۰ گرم را به عنوان سربار روی نمونه قرار داده و سنبه فولادی آزمایش را روی سطح خاک مماس کرده، گیج اندازه‌گیری کرنش را

### ۳- آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا

همان‌طور که در بخش پیشین اشاره شد، آزمایش CBR انجام شده در این پژوهش بر اساس استاندارد ASTM D1883 بوده است که قالب آن دارای قطر داخلی ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر می‌باشد. ساخت نمونه‌ها در قالب بدین ترتیب بوده است که خاک مورد نظر در پنج لایه‌ی مساوی در قالب آزمایش ریخته شده و به کمک ضربه و ارتعاش با چکش لاستیکی به تراکم مورد نظر رسانده



شکل ۶. نمودارهای آزمایش CBR روی ماسه‌های بدون آلودگی  
 Fig. 6. CBR test results on non-contaminated sands



شکل ۷. نمودارهای آزمایش CBR روی ماسه‌های نفتی  
 Fig. 7. CBR test results on oil contaminated sands

در شرایط بدون آلودگی مورد آزمایش قرار گرفتند. در شکل ۶ نمودارهای حاصل از آزمایش CBR روی ماسه‌های بدون آلودگی نشان داده شده است.

### ۳-۲- آزمایش روی نمونه‌های آلوده به نفت خام

در این قسمت آزمایش‌های انجام شده روی خاک‌های ماسه‌ای آلوده به ۶٪ نفت خام شرح داده خواهند شد. هر ۱۰ نوع خاک در شرایط آلوده با نفت خام مورد آزمایش قرار گرفتند. در شکل ۷

به لبه‌ی قالب مماس و صفر کرده و سپس با سرعت نفوذ ثابت (۱/۲۷ میلی‌متر بر دقیقه) آزمایش آغاز می‌شود. داده‌های آزمایش (میزان سرعت نفوذ سنبه و میزان نشست خاک) تا رسیدن به میزان نفوذ سنبه به اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر در خاک ثبت می‌گردند.

### ۳-۱- آزمایش روی نمونه‌های بدون آلودگی

در این قسمت آزمایش‌های انجام شده روی خاک‌های ماسه‌ای بدون آلودگی شرح داده خواهند شد. در ابتدا هر ۱۰ نوع خاک

نمونه‌های حاصل از آزمایش CBR روی ماسه‌های نفتی نشان داده شده است.

### ۳-۳- مقایسه نتایج پژوهش حاضر و مراجع [۸-۹]

در این پژوهش ماسه‌های متعددی با ۶٪ وزنی نفت خام آلوده شده و مورد آزمایش CBR قرار گرفتند. نتایج حاصل از این پژوهش مبین کاهش تحمل باربری ماسه‌ها در اثر آلودگی بوده است. تمرکز اصلی این پژوهش، که نوآوری آن نیز محسوب می‌شود، بر روی شکل ذرات (گردگوشه یا تیزگوشه)، اندازه‌ی ذرات (ریز یا درشت) و نوع دانه‌بندی (خوب یا بد دانه‌بندی) بوده است. کاهش تحمل باربری در ماسه‌های گردگوشه بیشتر از ماسه‌های تیزگوشه بوده است. یعنی ماسه‌های تیزگوشه عملکرد بهتری در شرایط آلودگی نسبت به ماسه‌های گردگوشه دارند. اندازه ذرات دیگر پارامتر اثرگذار در این مورد است. ماسه‌های با ذرات ریزدانه دچار کاهش چشمگیر تحمل باربری می‌شوند. هرچند قابل ذکر است که ترکیب شکل ذرات و اندازه ذرات بسیار مهم است. چرا که در ماسه‌ای که هم بد دانه‌بندی باشد و هم دارای ذرات ریزدانه باشد، کاهش تحمل باربری قابل توجه است. حال اگر ماسه‌ای هم دارای ذرات ریزدانه باشد، هم ذرات گردگوشه داشته باشد و هم از نوع بد دانه‌بندی باشد، شرایط بسیار بدتر خواهد شد (همانند ماسه فیروزکوه ۱۷۱ که کاهشی در حدود ۹۱ درصدی را تجربه خواهد کرد). اگر ماسه‌ای خوب دانه‌بندی بوده، اما دارای ذرات گردگوشه باشد، کاهش تحمل باربری همچنان قابل ملاحظه خواهد بود. نقش شکل ذرات بیشتر از اندازه‌ی ذرات در بحث تحمل باربری ماسه آلوده با نفت خام بوده و این اثر چشمگیرتر است.

محمدی و محرم‌زاده سرای [۸] از آلکین هیدروکربن به‌عنوان آلاینده در آزمایش CBR استفاده کردند. نصر [۹] هم میزان CBR ماسه‌های آلوده به روغن موتور سنگین را مورد بررسی قرار داد. نتایج تحقیق حاضر و مقایسه با هر دو پژوهش اشاره شده، نشان‌دهنده‌ی کاهش تحمل باربری ماسه‌های آلوده به مشتقات نفتی هستند. می‌توان نتیجه گرفت هر نوع آلاینده‌ی نفتی منجر به کاهش تحمل باربری خاک‌های ماسه‌ای خواهد شد، به‌طوری که در همه‌ی حالات، کاهش تحمل باربری به بیش از ۵۰ درصد ماسه‌ی غیر آلوده می‌رسد. محمدی و محرم‌زاده سرای [۸] نشان دادند که نشانه‌ی خمیری در نمونه‌های با غلظت آلاینده‌ی بیشتر، کمتر خواهد بود. همچنین

کاهش نسبت باربری کالیفرنیا در رس آلوده، به مراتب بیشتر از نمونه‌های ماسه‌ای آلوده می‌باشد. برای ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده در پژوهش نصر [۹]، کاهش نسبت باربری کالیفرنیا ماسه‌ی آلوده نسبت به ماسه‌ی غیر آلوده حدوداً چهار برابر بوده است. به طور کلی هر نوع آلاینده‌ای منجر به کاهش تحمل باربری ماسه‌های آلوده خواهد شد. نوآوری این پژوهش در استفاده از نوع آلاینده بوده که برخلاف پژوهش‌های اشاره شده (آلکین هیدروکربن و روغن موتور سنگین) از نفت خام استفاده شده است. همچنین باید به این موضوع اشاره گردد که در تحقیق ارائه شده، از ده نوع ماسه با شرایط مختلف (شکل ذرات، اندازه ذرات و دانه‌بندی متفاوت) استفاده شده است، درحالی که در پژوهش‌های پیشین غالباً از یک یا دو خاک مختلف بهره گرفته شده است. در این پژوهش به‌صورت ویژه به شکل و اندازه ذرات و همچنین نوع دانه‌بندی آن‌ها پرداخته شده است، مسأله‌ای که در تحقیقات گذشته به آن‌ها پرداخته نشده است.

### ۴- نتایج و بحث

مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش در جدول ۵ آورده شده است. بر اساس داده‌های حاصل از آزمایش‌ها همان‌طور که مشخص است افت تحمل باربری و کاهش مقاومت خاک‌های ماسه‌ای آلوده به ۶٪ نفت خام کاملاً مشهود است. در تمامی خاک‌های آزمایش شده، کاهش CBR نمونه‌های نفتی بیش از ۵۰ درصد بوده است. این در حالی است که ماسه فیروزکوه ۱۷۱ (که ماسه‌ای ریزدانه می‌باشد) با افت ۹۱ درصدی دارای بیشترین کاهش می‌باشد که نشان می‌دهد این نوع ماسه در برابر آلودگی نفتی بسیار حساس‌تر از سایر خاک‌ها می‌باشد. اما از آنجایی که ماسه KRSS#2A دارای افت CBR حدود ۵۸٪ می‌باشد، بهترین عملکرد را به خود اختصاص داده است. علت این مسأله را می‌توان با شکل دانه‌های آن توجیه کرد. با مراجعه به شکل ۳ و مشاهده تصویر به‌دست آمده از میکروسکوپ نوری مشخص است که این خاک دارای ذرات تیزگوشه است (و میزان تیزگوشه بودن آن نیز از سایر خاک‌ها بیشتر است)، بر همین اساس می‌باشد که بهترین عملکرد را نیز به خود اختصاص داده است. ذرات تیزگوشه وقتی به نفت خام آغشته می‌شوند عملکرد بهتری نسبت به ذرات گردگوشه دارند، طوری که ماسه KRSS#1A با وجودی اینکه دارای دانه‌بندی مشابه ماسه KRSS#2A است؛ اما



جدول ۴. مقایسه نتایج پژوهش ارائه شده و تحقیقات پیشین [۸-۹]

Table 4. Comparing the results of presented paper and pervious researches [8-9]

مرجع	نوع خاک‌ها	نوع آلاینده	درصد آلاینده	تحمل باربری در ۱۲/۵ میلی‌متر نفوذ (kPa)	اثر آلاینده‌گی بر کاهش تحمل باربری
پژوهش حاضر	انواع مختلف ماسه	نفت خام	٪۶	۲۵ (ماسه فیروزکوه ۱۷۱) ۴۴۰ (KRSS#2A)	۹۱/۶۷ درصد ۵۸/۳۳ درصد
مرجع [۸]	ماسه سیلت‌دار رس لاغر	آلکین هیدروکربن	برحسب غلظت‌های مختلف	۱۰۰۰ (ماسه سیلت‌دار) ۸۰۰ (رس لاغر)	۲۸/۵۷ درصد ۴۲/۸۶ درصد
مرجع [۹]	ماسه بد دانه‌بندی	روغن موتور سنگین	٪۶	۳۰۰	۵۲/۴۹ درصد

جدول ۵. مقایسه نتایج آزمایش‌ها

Table 5. Comparing the results of CBR tests

نوع خاک	CBR نمونه غیر آلوده	CBR نمونه نفتی	درصد افت CBR	بیشینه نسبت باربری بدون آلودگی (kN)	بیشینه نسبت باربری نمونه نفتی (kN)	درصد افت بیشینه نسبت باربری
Ottawa Sand	٪۱/۶۶	٪۰/۲۴	٪۸۵/۵۴	۱/۴	۰/۲	٪۸۳/۳۳
Bushehr Sand	٪۳/۶۸	٪۰/۵۹	٪۸۳/۹۷	۳/۱	۰/۵	٪۸۳/۸۷
FiroozKooH#161 Sand	٪۱/۴۳	٪۰/۲۴	٪۸۳/۲۲	۱/۲	۰/۲	٪۸۳/۳۳
FiroozKooH#171 Sand	٪۱/۴۳	٪۰/۱۲	٪۹۱/۶۱	۱/۲	۰/۱	٪۹۱/۶۷
KRSS#1	٪۵/۷۰	٪۰/۵۹	٪۸۹/۶۵	۴/۸	۰/۵	٪۸۹/۵۸
KRSS#1A	٪۳/۵۶	٪۰/۹۵	٪۷۳/۳۱	۳/۰	۰/۸	٪۷۳/۳۳
KRSS#1B	٪۳/۳۳	٪۰/۷۱	٪۷۸/۶۸	۲/۸	۰/۶	٪۷۸/۵۷
KRSS#2	٪۱۰/۶۹	٪۱/۴۳	٪۸۶/۶۲	۹/۰	۱/۲	٪۸۶/۶۷
KRSS#2A	٪۵/۷۰	٪۲/۳۹	٪۵۸/۰۷	۴/۸	۲/۰	٪۵۸/۳۳
KRSS#2B	٪۴/۰۴	٪۱/۴۳	٪۶۴/۶۰	۳/۴	۱/۲	٪۶۴/۷۱

است. این مسأله اهمیت دانه‌بندی را در مبحث CBR (در حالت غیر آلوده) نشان می‌دهد. چون در خاک KRSS#2 با وجود بد دانه‌بندی بودن، محدوده ذرات وسیع‌تر است و همین موضوع کمک شایانی به افزایش CBR می‌کند (مثلاً در مقایسه با KRSS#2A که مقدار CBR آن نصف KRSS#2 است). حال اگر همین نمونه‌ها در شرایط آلودگی با نفت خام قرار گیرند، موضوع کاملاً متفاوت خواهد شد. در چنین شرایطی، CBR برای KRSS#2A ۴۰ درصد بیشتر از KRSS#2 است (نتیجه‌ای کاملاً معکوس در مقایسه با ماسه‌های بدون

افت CBR آن در حدود ۲۰٪ درصد بیشتر است. علت آن را می‌توان به شکل ذرات نسبت داد. با توجه به شکل ۳ می‌توان دید که ذرات این خاک از نوع گردگوشه هستند و همین موضوع سبب کاهش ۲۰٪ بیشتر CBR شده است. محدوده‌ی تقریبی تغییرات در خاک‌های ماسه‌ای تقریباً مشابه است، درحالی‌که برای ماسه KRSS#2 و زیر شاخه‌های آن (به علت تیزگوشه بودن دانه‌ها) کاهش CBR نسبتاً کمتر است. بر اساس شکل ۵ مشخص است که ماسه KRSS#2 در شرایط غیر آلوده دارای CBR حدوداً ۲ برابر بیشتر از سایر نمونه‌ها

ذرات ماسه منجر به کاهش زاویه اصطکاک توده‌ی خاک می‌شود، که در نتیجه‌ی آن تحمل باربری و نسبت CBR کاهش پیدا خواهد کرد. نفت موجب کاهش اصطکاک می‌شود که همین موضوع عامل کاهش اتصال بین ذرات در توده‌ی خاک آلوده است.

بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌توان بیان کرد که در درجه‌ی اول نوع شکل ذرات (تیز گوشه یا گرد گوشه بودن)، و سپس درصد میزان درشت‌دانه بودن ذرات در مقاومت ماسه‌های آلوده به نفت خام اثرگذار هستند. به طوری که کمترین آفت مربوط به ماسه‌های KRSS#2A و KRSS#2B می‌باشد که خاک‌های با ذرات تیز گوشه هستند و پس از آن ماسه‌های KRSS#1A و KRSS#1B هستند که دارای ذرات گرد گوشه می‌باشند. در ماسه‌ی خوب دانه‌بندی اتاوا به علت ماهیت غالب گرد گوشه بودن ذرات، کاهش تحمل باربری همچنان قابل توجه است. از همین رو می‌توان اظهار داشت که خوب دانه‌بندی بودن (در شرایط گرد گوشه بودن ذرات) تأثیر مشخص و روشنی بر مقاومت توده‌ی خاک آلوده به نفت خام ندارد، به طوری که این ماسه‌ی خوب دانه‌بندی شده ۸۳٪ کاهش مقاومت را در اثر آلودگی به نفت خام تجربه کرده است. ماسه‌های KRSS#1 و KRSS#2 هر دو بیش از ۸۶٪ کاهش تحمل باربری داشتند. خاک بد دانه‌بندی شده‌ای که دارای ذرات گرد گوشه باشد مانند ماسه‌ی فیروزکوه ۱۷۱، بیش از ۹۱ درصد کاهش مقاومت داشته است. ماسه‌ی آلوده به نفت خام دچار آفت شدید تحمل باربری می‌شود، از این رو باید در مناطق نفت‌خیزی که خطر نشست نفت خام از چاه‌های حفاری و یا لوله‌های خطوط انتقال وجود دارد، این موضوع مدنظر قرار گیرد و در طراحی پی‌های و سازه‌های مهندسی، ضرایب اطمینان بیشتری را مدنظر قرار داد تا خطرات ناشی از این مسأله تا حد زیادی قابل پیشگیری باشد.

### مراجع

- [1] Mohammadi, A., Ebadi, T., Eslami, A., and Van der Zee, S. E. (2018). "Axial compressive bearing capacity of piles in oil-contaminated sandy soil using FCV." *Marine Georesources & Geotechnology*, 37(2): 164-179.
- [2] Al-Adly, A. I. F., Fadhil, A. I., and Fattah, M. Y. (2019). "Bearing capacity of isolated square footing resting on contaminated sandy soil with crude oil." *Egyptian Journal of Petroleum*, 28(3): 281-288.
- [3] Kererat, C. (2019). "Effect of oil-contamination and water

آلودگی). در مورد تحمل باربری هم بیشترین درصد مقاومت مربوط به ماسه 2A#KRSS است. همان‌طور که از مقایسه‌ی شکل‌های ۶ و ۷ مشخص است، نمودار تنش- کرنش KRSS#2 در حالت آلوده به ۶٪ نفت خام دچار آفتی در حدود یک هشتم حالت غیر آلوده می‌شود که در مقایسه با سایر حالات چشمگیرتر است. نمودار تنش- کرنش برای KRSS#2A در حالت آلوده به نفت خام در مقایسه با نمودار ماسه اما در شرایط غیر آلوده، حدوداً ۵۰ درصد آفت تنش خواهد داشت. همین موضوع اهمیت شکل دانه‌ها و درصد دانه‌های درشت‌تر را در مورد خاک‌های ماسه‌ای آلوده به نفت خام به روشنی نمایان می‌سازد. نکته مهم دیگر در این پژوهش آن است که نسبت باربری ماسه‌های آلوده به نفت خام (بدون توجه به نوع آن) نسبت به حالت غیر آلوده حداقل ۵۰٪ کاهش پیدا می‌کند. همین موضوع اهمیت توجه و شناخت بهتر خاک‌های مناطق در معرض خطر آلودگی به نفت خام را بیش از پیش افزایش می‌دهد. مهترین عامل فیزیکی در رفتار تنش-کرنش ماسه‌های نفتی، شکل ذرات است. از آنجایی که نفت عامل کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی توده‌ی خاک است، هر چه ذرات گرد گوشه‌تر باشند، آفت تحمل باربری نیز بیشتر خواهد بود.

### ۵- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش درک بهتر رفتار ماسه‌های آلوده به نفت خام است. در این پژوهش از ۶٪ نفت خام برای آلوده کردن ۱۰ نوع ماسه استفاده شده است. به کمک انجام آزمایش‌های CBR روی ماسه‌های غیر آلوده و ماسه‌های آلوده نتایجی به دست آمد که در ادامه می‌آید. هر چند که در موضوع تحمل باربری در شرایط غیر آلوده، نوع دانه‌بندی ماسه‌ها اثر قابل توجهی دارد. اما در حالت ماسه‌های آلوده به نفت خام، مهمترین عامل اثرگذار، شکل ذرات است و ذرات تیز گوشه عملکرد چشمگیرتری نسبت به ذرات گرد گوشه دارند، به طوری که کمترین میزان کاهش تحمل باربری یا کاهش میزان تنش تحمل شده در نمودارهای تنش-کرنش، مربوط به این خاک‌هاست (در حدود ۵۰٪ کاهش برای KRSS#2A)، در حالی که برای ذرات گرد گوشه این کاهش تا ۹۰٪ هم مشاهده شد (۹۱٪ برای ماسه فیروزکوه ۱۷۱). علت این موضوع می‌تواند کاهش زاویه اصطکاک داخلی ماسه باشد. از آنجایی که خاک‌های مورد آزمایش همگی ماسه‌ای بودند، مقاومت آن‌ها تنها ناشی از زاویه اصطکاک بین دانه‌هاست. حضور نفت در بین

- Effects of Reinforced or Stabilized Coarse Surface Layer on Bearing Capacity of Soft Clays.” *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 49(96): 97-106, (In Persian).
- [14] Moayed, R., Khatami, S. M. H., and Allahyari, F. (2017). “Effect of Using Ion Exchange Solution in Increasing Bearing Capacity of Clayey Soils with Various Plasticity Index (PI).” *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(2): 305-311, (In Persian).
- [15] Araghi, M., and Noferesti, H. (2018). “Experimental Evaluations of Stabilization Methods for High Sulfate Soils in Iran Desert Roads.” *Modares Journal of Civil Engineering*, 18(3): 141-151, (In Persian).
- [16] Brahmachary, T. K., and Rokonzaman, M. (2018). “Investigation of random inclusion of bamboo fiber on ordinary soil and its effect CBR value.” *International Journal of Geo-Engineering*, 9(10).
- [17] Hooshyar, A., and Rostami, V. (2018). “Granular Soil Bearing Capacity Improvement Using Waste Plastic Materials.” *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(4): 755-764, (In Persian).
- [18] Moghadas Tafreshi, S. N., and Najafzadeh Shavaki, L. (2015). “Experimental study of the triaxial behaviour and CBR value of plastic waste-soil mixture.” *Sharif Journal of Civil Engineering*, 32(3): 73-81, (In Persian).
- [19] Makarchian, M. and Elyas, J. (2013). “Investigation on the Effect of Geotextiles on Pavement Bearing Capacity (Part 1: Experimental Studies).” *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 45(1): 43-51, (In Persian).
- [20] Sengupta, A., Mukherjee, S., and Ghosh, A. (2017). “Improvement of Bearing Ratio of Clayey Subgrade Using Compacted Flyash Layer.” *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(4): 1885-1894.
- [21] Erzin, Y., Turkoz, D., Tuskan, Y., and Yilmaz, I. (2016). “Investigations into factors influencing the CBR values of some Aegean sands.” *Scientia Iranica*, 32(2): 420-428.
- [22] Katte, V. Y., Mfoyet, S. M., Manefouet, B., Wouatong, A. S. L., and Bezeng, L. A. (2019). “Correlation of California Bearing Ratio (CBR) Value with Soil Properties of Road Subgrade Soil.” *Geotechnical and Geological Engineering*, 37: 217-234.
- saturation on the bearing capacity and shear strength parameters of silty sandy soil.” *Engineering Geology*, Article in Press.
- [4] Joekar, A., and Hajiani Bushehri, A. (2020). “Studying the behavior of strip foundation rested on the kerosene oil contaminated sand slopes.” *Sharif Journal of Civil Engineering*, Article in Press, (In Persian).
- [5] Khabbazi, H., and Hasanloorad, M. (2018). “Oil Contamination Effect on the Dispersivity Potential and Shear Strength of Dispersive Clay Soils.” *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(2): 401-408, (In Persian).
- [6] Nokande, S., Khodabandeh, M. A., Hosseini, S. S., and Hosseini, S. M. (2019). “Collapse Potential of Oil-Contaminated Loessial Soil (Case Study: Golestan, Iran).” *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-10.
- [7] Shin, E., Lee, J., and Das, B. (1999). “Bearing capacity of a model scale footing on crude oil-contaminated sand.” *Geotechnical and Geological Engineering*, 17(2): 123-132.
- [8] Mohammadi, S. D., Moharamzade Saraye, Kh. (2014). “Investigation of engineering geological behavior of surface oil hydrocarbons contaminated soils in Tabriz oil refinery area.” *Engineering Geology*, 7(1): 41-56, (In Persian).
- [9] Nasr, A. M. A. (2014). “Utilisation of oil-contaminated sand stabilised with cement kiln dust in the construction of rural roads.” *International Journal of Pavement Engineering*, 15(10): 889-905.
- [10] Arabani, M., and Veis Karami, M. (2011). “The Effect of Clay and Lime Content on CBR Strength of Lime Stabilized Clayey Sands.” *Journal of Civil Engineering*, 21(1): 143-153, (In Persian).
- [11] Sivapullaiah, P., and Moghal, A. (2011). “CBR and Strength behavior of class F fly ashes stabilized with lime and gypsum.” *International Journal of Geotechnical Engineering*, 5(2): 121-130.
- [12] Singh, B., and Kalita, A. (2013). “Influence of fly ash and cement on CBR behavior of lateritic soil and sand.” *International Journal of Geotechnical Engineering*, 7(2): 173-177.
- [13] Abdi, M. R., and Asgardun, Y. (2019). “Evaluation of the

- [27] Nasr, A. M. A. (2013). "Uplift Behavior of Vertical Piles Embedded in Oil-Contaminated Sand." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(1): 162-174.
- [28] Cook, E. E., Puri, V. K., and Shin, E. C. (1992). "Geotechnical characteristics of crude oil-contaminated sands." *Proceedings of Second International Offshore Polar Engineering Conference, San Francisco, California, USA*, 384-387.
- [29] Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M. R., and Yazdani, H. (2013). "Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite." *Engineering Geology*, 166: 11-16.
- [23] Bazyar, M. H., and Salehzade, H. (2000). "Soil Mechanics Laboratory Manual." IUST Publication, (In Persian).
- [24] Cho, G., Dodds, J., and Santamarina, J. C., (2006). "Particle shape effects on packing density, stiffness and strength: Natural and crushed sands." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 591-602.
- [25] Al-Sanad, H. A., Eid, W. K., and Ismael, N. F., (1995). "Geotechnical properties of oil-contaminated Kuwaiti sand." *Journal of Geotechnical Engineering*, 121: 407-412.
- [26] Nasr, A. M. A., and Krishna Rao, S. V. (2016). "Behaviour of laterally loaded pile groups embedded in oil-contaminated sand." *Géotechnique*, 66(1): 58-70.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Nasiri, M. Hajiazizi, A.R. Mazaheri, *The behavior of Oil-Contaminated Sands in CBR Test, Amirkabir J. Civil Eng., 53(7) (2021) 3017-3028.*

DOI: [10.22060/ceej.2020.17628.6625](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17628.6625)

