مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۳۹۹)
دوره‌ی ۲-۳۶، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۱۵۱-۱۵۸، (یادداشت فنی)

Research Note

بررسی عددی رفتار پی‌های نواری روی شیب‌های ماسه‌یی آلوده به نفت سفید و نفت گاز

علیرضا جوکار (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان
علیرضا حاجیانی بوشهریان * (استادیار)
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز

آلودگی خاک، در سال‌های اخیر سبب ایجاد نگرانی در حوزه‌ی محیط زیست و مهندسی ژئوتکنیک شده است. در این مطالعه‌ی عددی به رفتار یک پی نواری مستقر بر خاک ماسه‌یی شیب‌دار و آلوده به نفت گاز و نفت سفید پرداخته شده است. متغیرهای تحقیق شامل نوع و میزان آلودگی، ضخامت لایه‌ی آلوده و فاصله‌ی پی تا لبه‌ی شیب است. نتایج نشان داده‌اند با افزایش شیب خاکی، ضخامت لایه‌ی آلوده و میزان آلودگی، ظرفیت باربری پی نواری کاهش می‌یابد. ضمن این‌که با فاصله گرفتن پی از لبه‌ی شیب، ظرفیت باربری آن افزایش می‌یابد. نتایج عددی شامل نمودارهای بار - نشست و ظرفیت باربری نهایی پی با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی گذشته اعتبارسنجی شده‌اند. میزان بیشینه کاهش ظرفیت پی نواری مستقر بر لب شیب با زاویه‌ی ۶۰ درجه، برای هر دو نوع آلاینده در حالتی اتفاق می‌افتد که ضخامت لایه‌ی آلوده با درصد آلودگی ۴، دو برابر عرض پی باشد. این مقدار برای نفت سفید ۴۲ درصد و برای نفت گاز ۴۳ درصد است.

واژگان کلیدی: آلودگی نفتی شیب خاکی، ظرفیت باربری، نمودار بار - نشست، پی نواری، مطالعه‌ی عددی.

ali.joukar94@yahoo.com
hajianib@shirazu.ac.ir

۱. مقدمه و تاریخچه‌ی تحقیقات

موارد مختلفی می‌توان از استقرار پی سازه‌ها در مجاورت شیب‌های خاکی ذکر کرد. از جمله‌ی این موارد، می‌توان به مجاورت مخازن سوخت یا مواد شیمیایی با شیروانی‌های خاکی، ساختمان‌های بلندمرتبه در حاشیه‌ی رودخانه‌ها، شالوده‌های مستقر بر خاک‌ریزها، تکیه‌گاه پل‌ها و بستر جاده‌ها اشاره کرد. در برخی موارد ممکن است بنا به دلایلی مانند تصادف تانکرهای نفتی یا نشت آلودگی در اثر شکست لوله‌های تأسیساتی از مخازن پالایشگاهی در سایت‌های استخراج و بهره برداری نفت، شیب خاکی دچار آلودگی شود. در بعضی مواقع ممکن است فرصت پاک‌سازی خاک آلوده وجود نداشته باشد و نیاز به تثبیت خاک آلوده و استفاده از همان خاک باشد که در این‌گونه موارد مشخص بودن دقیق پارامترهای مهندسی خاک آلوده، تغییرات و پیش‌بینی رفتار آنها الزامی است. یکی از بزرگ‌ترین و خطرناک‌ترین آلاینده‌ها، هیدروکربن‌ها هستند.[۱] در مورد اثر این آلاینده‌ها مطالعات زیادی صورت گرفته است که بیشتر آنها در مورد آلودگی با نفت خام و تأثیر آن بر ظرفیت باربری پی‌های سطحی مستقر بر آن بوده است. از این رو هنگامی که یک پی نواری در مجاورت یک شیب آلوده به مواد نفتی قرار می‌گیرد، با توجه به احتمال ناپایداری شیب، اثر آلودگی بر روی خاک بیشتر نمایان می‌شود و تأثیر نوع، درصد و عمق نفوذ آلاینده‌ها بر پی باید بررسی شود. به همین سبب با توجه به ضرورت تحقیق و بررسی در این زمینه، در پژوهش حاضر، محورکار بررسی میزان باربری پی نواری بر روی شیب خاکی آلوده‌ی ناشی از نشت مواد نفتی قرار داده شده است.

با مطالعه و بررسی مقالات ارائه شده در مجلات و کنفرانس‌های علمی برگزار شده، می‌توان به تنوع و گوناگونی زیاد در مطالعات رفتار بار - نشست پی‌های سطحی، حوزه‌ی آلودگی خاک‌ها و بررسی تغییر خواص ژئوتکنیکی آنها پی برد. درگذشته مطالعاتی درباره‌ی خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌های آلوده به نفت انجام شده است که برخی به بررسی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده و تعداد معدودی دیگر به رفتار خاک در معرض بارهای استاتیکی و چرخه‌یی پرداخته‌اند.

طالب‌زاده و حاجیانی بوشهریان (۱۳۹۷)، زمردیان و رحیمی حقیقی (۱۳۹۶)، محمد حاجی‌عزیزی و همکاران (۱۳۹۶)، اژدری و اسماعیل پور (۲۰۱۸)، اوگین و داس (۱۹۹۲)، السند و همکاران (۱۹۹۷)، ابیان (۱۹۹۸)، الگوم و ییلدیز (۲۰۱۰)، خسروی و همکاران (۲۰۱۳)، ابوسینا و همکاران (۲۰۱۵)، ناصحی و همکاران (۲۰۱۶) و هارش و همکاران (۲۰۱۶) از جمله مطالعاتی هستند که به بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده پرداخته‌اند.[۲-۱۳]

مطالعات متعددی در مورد تأثیر آلاینده‌های نفتی بر روی ظرفیت باربری و نشست فونداسیون‌های سطحی انجام شده است. شین و همکارانش (۱۹۹۳)، بیشینه ظرفیت باربری پی نواری سطحی متکی بر خاک آلوده به مواد نفتی را

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۹/۵، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱۲/۱۲، پذیرش ۱۳۹۸/۱/۱۸.
DOI:10.24200/G30.2019.52129.2456

ارزیابی کردند. نتیجه‌ی آزمایش حاکی از کاهش شدید ظرفیت باربری پی مستقر بر خاک آلوده بود.[۱۴] شین و داس (۲۰۰۱) ظرفیت باربری یک پی نواری مستقر ماسه‌ی آلوده‌ی غیر اشباع را مطالعه کردند.[۱۵] محتوای مواد نفتی در نمونه‌های آزمایشی بین صفر تا ۶ درصد متغیر بود. بر اساس نتایج آزمایش، آلودگی نفتی منجر به کاهش شدید ظرفیت باربری و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک می‌شود. ابطحی و حاجیانی بوشهریان (۲۰۱۸)، ظرفیت باربری پی‌های دایره‌یی مستقر بر ماسه‌ی آلوده به نفت سفید و نفت گاز را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند.[۱۶] حسینی و حاجیانی بوشهریان (۲۰۱۸)، رفتار پی‌های دایره‌یی مستقر بر ماسه‌ی آلوده به مواد نفتی را تحت اثر بارگذاری تناوبی مطالعه کردند. ایشان بر مبنای نتایج آزمایشگاهی و عددی روابطی ارائه کردند که به کمک آنها با داشتن درصد آلودگی، ضخامت لایه‌ی آلوده و بسامد بارگذاری و دامنه‌ی بار تناوبی و میزان نشست دائمی پی و تعداد دوره‌های بارگذاری برای رسیدن به آن را می‌توان پیش‌بینی کرد.[۱۷]

زمانی که یک پی در مجاورت یک شیب خاکی واقع می‌شود و تحت تأثیر بارهای قائم قرار می‌گیرد، ظرفیت باربری آن در مقایسه با شرایطی که خاک روی بستر افقی زمین قرار می‌گیرد، کاهش می‌یابد.[۱۸-۲۱] انگوین و همکاران (۲۰۱۲)، اشاره کردند که ظرفیت باربری یک پی مستقر بر شیب خاکی هم‌زمان تحت تأثیر گسیختگی پی و گسیختگی شیب است.[۲۲] برخی از این مطالعات که برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های سطحی در مجاورت شیب‌های خاکی انجام شده است، به صورت تحلیلی و برخی دیگر به شیوه‌ی آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته است.

ساران و همکاران (۱۹۸۹) حل تحلیلی ظرفیت باربری نهایی پی‌های نواری مجاور شیب را با استفاده از معادله‌ی تعادل حدی و روش‌های تحلیل حدی ارائه دادند.[۲۳] فرض این تحلیل به صورت شکست یک‌طرفه در سمت شیب و جزئی در سمت زمین مسطح بود. نتایج به دست آمده با مدل آزمایشگاهی دیگر محققان مقایسه شده است. کاستلی و موتا (۲۰۱۰) مدلی با استفاده از روش تعادل حدی ارائه کردند و ظرفیت باربری پی را تحت اثر فاصله از شیب و مدفون بودن آن بررسی کردند.[۲۴]

گروهی از محققان به بررسی استفاده از روش‌های بهسازی مختلف به منظور افزایش ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر شیب‌های خاکی پرداختند. سوواف و نظیر (۲۰۱۲) به بررسی شیب لغزنده‌ی ماسه‌یی تحت اثر بار هم‌زمان یکنواخت (مونوتونیک) و چرخه‌یی پرداختند.[۲۵] در این تحقیق جایگزین کردن لایه‌ی ماسه‌ی متراکم و جایگذاری مسلح‌کننده‌ی ژئوسنتتیکی بررسی شد. در این مطالعه، اثر شدت بارهای مختلف با بسامدهای متفاوت و همچنین فاصله‌ی پی تا تاج شیب بررسی شد. اثر مسلح‌کننده‌ی سه‌بعدی گرید - انکر[1] بر ظرفیت باربری یک پی نواری صلب ساخته شده بر روی شیب ماسه‌یی توسط علمشاهی و هاتف (۲۰۰۹) به دو روش آزمایشگاهی و عددی بررسی شد.[۲۶] نایینی و همکاران (۲۰۱۲)، اثر مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیکی را روی ظرفیت باربری پی نواری متکی بر شیب رسی مسلح به روش اجزای محدود بررسی کردند.[۲۷] ایشان همچنین تعداد بهینه‌ی مسلح‌کننده‌ها و اثر زاویه‌ی اصطکاک بر خاک رسی مسلح به ژئوگرید[2] را ارزیابی کردند. تأثیر استفاده از مسلح‌کننده‌ها بر ظرفیت باربری یک پی نواری مستقر بر یک شیب ماسه‌یی توسط کسکین و لامان (۲۰۱۴) نیز ارائه شده است.[۲۸] در این تحقیق متغیرهایی نظیر نوع، تعداد و مقاومت کششی لایه‌های مسلح‌کننده، فاصله‌ی بین آنها، فاصله‌ی اولین لایه‌ی مسلح‌کننده تا کف پی، میزان تراکم خاک و زاویه‌ی شیب در نظر گرفته شده است. نتایج آزمایش بر روی یک مدل آزمایشگاهی و مدل عددی یک پی نواری غلاف‌دار در مجاورت شیب ماسه‌یی در مقاله اعظم و فاروخ (۲۰۱۰)، منتشر شده است.[۲۹] پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش شامل عمق غلاف، فاصله‌ی پی تا تاج شیب، و زاویه‌ی شیب هستند.

مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات بر روی تعیین ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر شیب‌های خاکی غیرآلوده انجام شده است. یکی از معدود مطالعاتی که به بررسی ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر خاک‌های آلوده به مواد نفتی می‌پردازد، پژوهش نصر (۲۰۱۵) است. نتایج برنامه‌ی آزمایشگاهی و عددی او با هدف افزایش آگاهی در مورد رفتار پی نواری مستقر بر شیب‌های ماسه‌ای آلوده به بنزن، نفت گاز سبک و روغن موتور سنگین منتشر شد.[۳۰] در این پژوهش تأثیر میزان آلودگی از صفر تا ۴٪ وزن ماسه‌ی خشک و تغییرات پارامترهایی مانند ضخامت لایه‌ی آلوده، نوع آلودگی نفتی، زاویه‌ی شیب، فاصله لبه‌ی پی تا شیب بررسی شده است. در این برنامه به موازات مدل‌سازی آزمایشگاهی یک مدل کرنش صفحه‌یی کشسانی ـ خمیری به کمک روش اجزای محدود نیز ایجاد شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ظرفیت باربری پی با افزایش ضخامت لایه‌ی آلوده و زاویه‌ی شیب به شدت کاهش می‌یابد. در نتیجه برای طراحی پی در این شرایط باید مقدار ضریب ظرفیت باربری را بر اساس نوع و درصد آلودگی نفتی کاهش داد. در این پژوهش نیز تلاش بر این است که به کمک نتایج آزمایشگاهی و عددی، تأثیر آلاینده‌های نفتی، شامل نفت گاز و نفت سفید بر ظرفیت باربری پی‌نواری مستقر بر یک شیب خاکی بررسی شود. در انتها نیز روابطی ارائه شود که با داشتن متغیرهایی نظیر ضخامت لایه‌ی آلوده، درصد آلودگی، شیب خاک‌ریز و نوع آلودگی، بتوان ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر شیروانی خاکی را پیش‌بینی کرد. تحلیل‌های عددی توسط نرم‌افزار اجزای محدود Plaxis۲D انجام شده است (برینگرو و ورمییر، ۲۰۰۷).[۳۱]

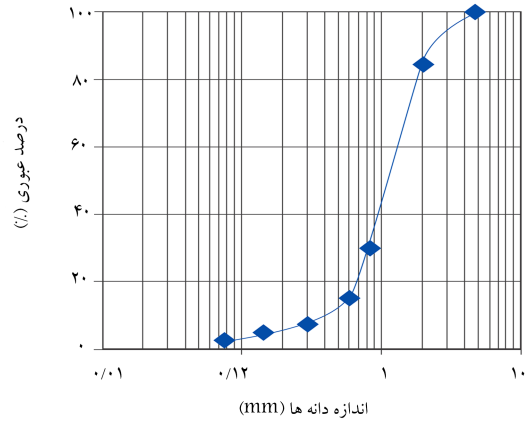
۲. مواد و روش‌ها

مطالعه‌یی تحت همین عنوان توسط جوکار و حاجیانی بوشهریان (۲۰۱۸) به‌صورت آزمایشگاهی انجام شده است.[۳۲] حال در این تحقیق و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مربوط به آن پژوهش، یک مدل عددی ایجاد و اعتبارسنجی شده است. پس از صحت‌سنجی، تأثیر متغیرهای مختلف در مدل عددی ایجاد شده بررسی می‌شود. خاک مورد استفاده در تحقیق آزمایشگاهی ماسه بد دانه‌بندی شده بوده و نام آن طبق طبقه‌بندی یونیفاید SP بود. درصد رطوبت طبیعی خاک حدود یک درصد بوده است. منحنی دانه‌بندی خاک مذکور در شکل ۱ نشان داده شده است. نمونه‌های خاک با درصدهای وزنی آلودگی ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد با نفت سفید و نفت گاز کاملاً آغشته شدند. مشخصات مواد آلوده‌کننده در جدول ۱ و مشخصات خاک استفاده شده نیز در جدول ۲ ارائه شده است. شماره‌ی استاندارد آزمایش‌های انجام شده از مجموعه‌ی استاندارد ASTM، شامل دانه‌بندی، هوا و آب‌سنجی (هیدرومتری)، چگالی ویژه‌ی توده‌ی خاک، چگالی نسبی و برش مستقیم به ترتیب، D۶۹۱۳، D۷۹۲۸-۱۷، D۸۵۴-۱۴، D۴۲۵۴-۱۶ و D۳۰۸۰ است.

تعداد ۵ آزمایش برش مستقیم نیز روی نمونه‌های خاک با درصدهای آلودگی مختلف در تحقیق آزمایشگاهی انجام شده است. جدول ۳ پارامترهای مقاومت برشی و شکل‌های ۲ و ۳ نمودارهای تنش تغییر شکل نمونه‌ها را نشان می‌دهند. مقادیر پارامترهای مقاومت برشی خاک حاصل از آزمایش برش مستقیم، در وضعیت بیشینه‌ی تنش محاسبه شده‌اند.

جدول ۱. خصوصیات آلوده‌کننده‌های نفتی.[۳۲]

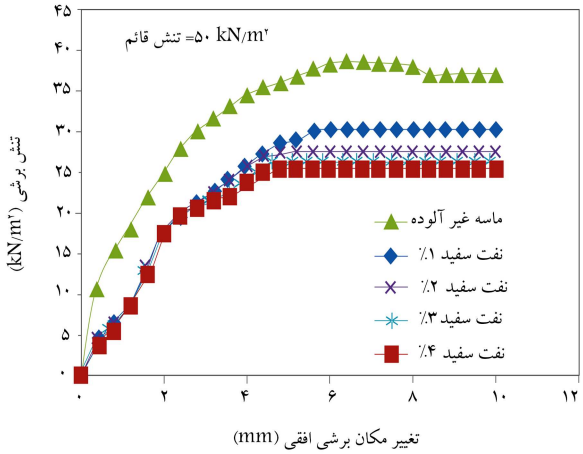
نوع آلوده‌کننده‌ی نفتی	بیشینه‌ی چگالی (kg/l)	لزجت کینماتیکی m^2/s
نفت سفید	۰/۸۲۰@۱۵°c	۲/۷۱ × ۱۰^۸ − ۶@۳۷/۸°c
نفت گاز	۰/۸۶۰@۱۵°c	۲۰۰/۰ × ۱۰^۸ − ۶mm۲/s@۳۷/۸°c



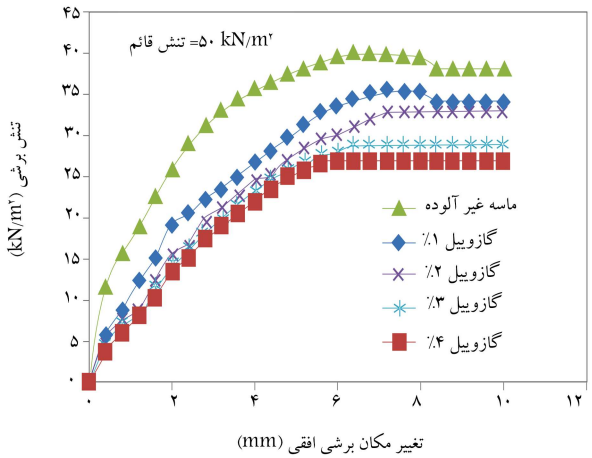
شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک ماسه‌یی.[۳۲]

جدول ۲. مشخصات خاک ماسه‌یی.[۳۲]

مقدار	مشخصه
۲/۶۵	چگالی ویژه (Gs)
۰/۴	اندازه‌ی ذرات مؤثر D_{10} (mm)
۱/۲۰	اندازه‌ی ذرات متوسط D_{50} (mm)
۳/۲۶	ضریب یکنواختی C_u
۱/۳۶	ضریب انحنا C_c
۱۷/۷۵	وزن مخصوص متوسط γ (kN/m^3)
۳۴	زاویه اصطکاک داخلی ϕ (درجه)
۳۸	چگالی نسبی متوسط D_r٪
۱۸/۷۸	بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک (kN/m^3)
۱۶/۳۰	کمینه‌ی وزن مخصوص خشک (kN/m^3)



شکل ۲. تغییرات تنش برشی در برابر تغییر مکان افقی ماسه‌ی آلوده به نفت گاز.[۳۲]



شکل ۳. تغییرات تنش برشی در برابر تغییر مکان افقی ماسه‌ی آلوده به نفت سفید.[۳۲]

۳. مدل عددی

به منظور شبیه‌سازی خاک و پی واقع بر آن در مدل عددی از نرم‌افزار پلکسیس[۳] نسخه‌ی ۸/۲ استفاده شده است. مدل مورد نظر به ابعاد ۱(m) × ۱(m) (مشابه مدل واقعی آزمایشگاهی) و به صورت کرنش صفحه‌یی در نرم‌افزار ایجاد شد. پی واقع بر آن نیز به صورت یک صفحه فولادی با مقطع مستطیلی به عرض ۱۰ سانتی‌متر، طول ۶۰ سانتی‌متر و ضخامت ۵ سانتی‌متر مدل شده است. عمق آلودگی خاک مورد استفاده در نرم‌افزار به صورت یک لایه‌ی مجزا با مشخصات متفاوت مطابق جدول ۳، در نرم‌افزار تعریف شده است. برای مش‌بندی از اجزای ۱۵ گره‌یی استفاده شده است. مدل رفتاری برای خاک، مدل کشسانی خمیری کامل به کمک معیار تسلیم موهر - کلمب در نظر گرفته شده است. جدول ۴ مشخصات ۳۷ مدل مختلف تعریف شده در نرم‌افزار و شکل ۴ تصویری از مدل ساخت شده به همراه بردارهای جابه‌جایی لغزش یکی از خروجی‌ها را نشان می‌دهند. نمودارهای بار - نشست حاصل از خروجی نرم‌افزار ترسیم شده‌اند. ظرفیت باربری پی نقطه‌ی انتهایی نمودارهای مذکور است. برای بررسی و مقایسه‌ی بهتر نتایج پارامتر نسبت ظرفیت باربری BCR به شرح زیر تعریف و استفاده شده است.

$$BCR = \frac{q_{con}}{q_{uncon}} \qquad (۱)$$

که در آن q_{con} و q_{uncon} به ترتیب، ظرفیت باربری خاک آلوده و غیرآلوده‌اند.

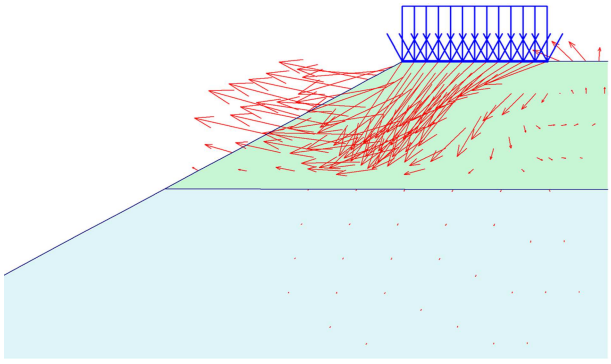
همچنین به منظور بررسی تغییرات ظرفیت باربری با عمق آلودگی از پارامتر نسبت عمق آلودگی U/B استفاده شده است. که در آن U عمق آلودگی و B قطر پی است. برای مطالعه‌ی تأثیر زاویه‌ی شیب و فاصله‌ی پی از لبه‌ی شیب، به ترتیب پارامترهای A و X به کار برده شده‌اند.

جدول ۳. پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌یی آلوده به نفت گاز و نفت سفید در درصدهای مختلف آلودگی.[۳۲]

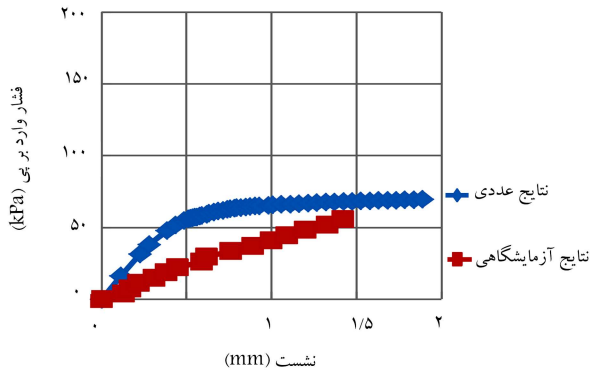
ردیف	نوع آلوده‌کننده	درصد آلودگی	چسبندگی (KPa)	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (درجه)
۰	ماسه‌ی غیرآلوده	۰	۵/۹	۳۳/۰
۱	نفت گاز	۱	۷/۰	۲۸/۰
۲	نفت گاز	۲	۷/۲	۲۷/۴
۳	نفت گاز	۳	۷/۲	۲۶/۹
۴	نفت گاز	۴	۷/۲	۲۶/۰
۵	نفت سفید	۱	۶/۷	۲۷/۴
۶	نفت سفید	۲	۶/۷	۲۶/۵
۷	نفت سفید	۳	۶/۷	۲۶/۱
۸	نفت سفید	۴	۶/۷	۲۵/۶

جدول ۴. مشخصات مدل‌های ایجاد شده در نرم‌افزار پلکسیس.

سری‌ها	پارامترهای ثابت	پارامترهای متغیر
NS00	ماسه‌ی تمیز	-
NK۰۱	نفت سفید، درصد آلودگی ۱٪	$U = ۰/۵B, ۱/۰B, ۱/۵B, ۲/۰B$
NK۰۲	نفت سفید، درصد آلودگی ۲٪	$U = ۰/۵B, ۱/۰B, ۱/۵B, ۲/۰B$
NK۰۳	نفت سفید، درصد آلودگی ۳٪	$U = ۰/۵B, ۱/۰B, ۱/۵B, ۲/۰B$
NK۰۴	نفت سفید، درصد آلودگی ۴٪	$U = ۰/۵B, ۱/۰B, ۱/۵B, ۲/۰B$
NK۰۱X	نفت سفید، درصد آلودگی ۱٪	$U = ۱/۰B, X = ۱/۰B, ۲/۰B, ۳/۰B$
NK۰۱A	نفت سفید، درصد آلودگی ۱٪	$U = ۱/۰B, A = ۱۰^{\circ}, ۳۰^{\circ}$
NG۰۵	نفت گاز، درصد آلودگی ۱٪	$U = ۰/۵B, ۱/۰B, ۱/۵B, ۲/۰B$
NG۰۶	نفت گاز، درصد آلودگی ۲٪	$U = ۰/۵B, ۱/۰B, ۱/۵B, ۲/۰B$
NG۰۷	نفت گاز، درصد آلودگی ۳٪	$U = ۰/۵B, ۱/۰B, ۱/۵B, ۲/۰B$
NG۰۸	نفت گاز، درصد آلودگی ۴٪	$U = ۰/۵B, ۱/۰B, ۱/۵B, ۲/۰B$



شکل ۴. یکی از خروجی‌های مدل عددی ایجاد شده در نرم‌افزار (بردار جابه‌جایی لغزش).



شکل ۵. نمودارهای بار - نشست پی نواری واقع بر لبه‌ی شیب ماسه‌یی ۶۰ درجه و آلوده به نفت گاز با نسبت عمق آلودگی ۱/۰ و درصد آلودگی ۱٪ برای داده‌های عددی و آزمایشگاهی.

۱.۳. نتایج حاصل از مدل عددی

۱.۱.۳. بررسی تغییرات ضخامت لایه‌یی آلوده

به منظور اعتبارسنجی مدل اولیه‌ی ایجاد شده در نرم‌افزار، نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی بار- نشست پی نواری واقع بر شیب آلوده با ۱ درصد آلودگی نفت سفید در شکل ۵ مقایسه شده است. در این حالت U/B برابر ۱/۰ است و پی بر لبه‌ی شیب با زاویه‌ی ۶۰ درجه واقع شده است. همان‌گونه که از شکل‌ها مشخص است، مطابقت مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی وجود دارد. جدول‌های ۵ و ۶ خلاصه‌ی برخی نتایج مرتبط با تحلیل‌های عددی انجام شده را نشان می‌دهد. جدول‌ها مقادیر ظرفیت باربری و نسبت ظرفیت باربری پی روی شیب آلوده به نفت

جدول ۵. نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای پی دایره‌یی واقع بر خاک ماسه‌یی آلوده به نفت‌گاز در حالت درصد و عمق آلودگی متغیر.

سری‌ها	نوع آلوده‌کننده	U/B	درصد آلودگی	ظرفیت باربری (kPa)	نسبت ظرفیت باربری (BCR)
NS۰۰	ماسه‌ی غیرآلوده	۰/۰	۰	۸۰/۱۵	۱/۰۰
NG۰۱-۱	نفت گاز	۰/۵	۱	۷۴/۰۰	۰/۹۲
NG۰۲-۱	نفت گاز	۰/۵	۲	۶۴/۷۵	۰/۸۰
NG۰۳-۱	نفت گاز	۰/۵	۳	۶۰/۱۶	۰/۷۵
NG۰۴-۱	نفت گاز	۰/۵	۴	۵۵/۵۴	۰/۶۹
NG۰۱-۲	نفت گاز	۱/۰	۱	۶۹/۳۸	۰/۸۶
NG۰۲-۲	نفت گاز	۱/۰	۲	۶۴/۷۵	۰/۸۰
NG۰۳-۲	نفت گاز	۱/۰	۳	۶۰/۱۳	۰/۷۵
NG۰۴-۲	نفت گاز	۱/۰	۴	۵۵/۰۰	۰/۶۸
NG۰۱-۳	نفت گاز	۱/۵	۱	۶۴/۷۵	۰/۸۰
NG۰۲-۳	نفت گاز	۱/۵	۲	۶۰/۱۶	۰/۷۵
NG۰۳-۳	نفت گاز	۱/۵	۳	۵۵/۲۴	۰/۶۹
NG۰۴-۳	نفت گاز	۱/۵	۴	۵۰/۹۱	۰/۶۳
NG۰۱-۴	نفت گاز	۲/۰	۱	۶۰/۱۶	۰/۷۵
NG۰۲-۴	نفت گاز	۲/۰	۲	۵۵/۱۲	۰/۶۸
NG۰۳-۴	نفت گاز	۲/۰	۳	۵۰/۹۱	۰/۶۳
NG۰۴-۴	نفت گاز	۲/۰	۴	۴۶/۲۹	۰/۵۷

جدول ۶. نسبت ظرفیت باربری (BCR) برای پی دایره‌یی واقع بر خاک ماسه‌یی آلوده به نفت سفید در حالت درصد و عمق آلودگی متغیر.

سری‌ها	نوع آلوده‌کننده	U/B	درصد آلودگی	ظرفیت باربری (kPa)	نسبت ظرفیت باربری (BCR)
NS۰۰	ماسه‌ی غیرآلوده	۰/۰	۰	۸۰/۱۵	۱/۰۰
NK۰۱-۱	نفت سفید	۰/۵	۱	۷۴/۰۰	۰/۹۲
NK۰۲-۱	نفت سفید	۰/۵	۲	۶۹/۴۱	۰/۸۶
NK۰۳-۱	نفت سفید	۰/۵	۳	۶۴/۷۹	۰/۸۰
NK۰۴-۱	نفت سفید	۰/۵	۴	۶۰/۱۶	۰/۷۵
NK۰۱-۲	نفت سفید	۱/۰	۱	۶۹/۴۱	۰/۸۶
NK۰۲-۲	نفت سفید	۱/۰	۲	۶۴/۷۹	۰/۸۰
NK۰۳-۲	نفت سفید	۱/۰	۳	۶۰/۱۶	۰/۷۵
NK۰۴-۲	نفت سفید	۱/۰	۴	۵۵/۵۴	۰/۶۹
NK۰۱-۳	نفت سفید	۱/۵	۱	۶۴/۵۹	۰/۸۰
NK۰۲-۳	نفت سفید	۱/۵	۲	۶۰/۰۰	۰/۷۵
NK۰۳-۳	نفت سفید	۱/۵	۳	۵۵/۰۰	۰/۶۸
NK۰۴-۳	نفت سفید	۱/۵	۴	۵۰/۸۵	۰/۶۳
NK۰۱-۴	نفت سفید	۲/۰	۱	۶۰/۱۳	۰/۷۵
NK۰۲-۴	نفت سفید	۲/۰	۲	۵۵/۱۳	۰/۶۸
NK۰۳-۴	نفت سفید	۲/۰	۳	۵۰/۸۸	۰/۶۳
NK۰۴-۴	نفت سفید	۲/۰	۴	۴۶/۶۶	۰/۵۸

سفید و نفت گاز را برای هرکدام از مدل‌ها ارائه می‌کنند. در تمام حالت‌های ذکر شده در جدول، پی در مجاورت شیب با زاویه‌ی ۶۰ درجه واقع شده است. نتایج تحلیل مدل‌های دیگر که به بررسی اثر تغییر زاویه‌ی شیب و فاصله‌ی پی تا لبه‌ی شیب می‌پردازند، به صورت نمودار در ادامه‌ی مقاله نشان داده شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش ضخامت لایه‌ی آلوده ظرفیت باربری پی به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. به گونه‌یی که در بیشترین حالت، ظرفیت باربری خاک تا ۴۳ درصد در صورت آلوده شدن خاک با ۴ درصد نفت سفید و در U/B=۲/۰ اتفاق می‌افتد. دلیل این موضوع کاهش اصطکاک بین ذرات خاک در ناحیه‌ی تأثیر پی است. بر اساس این نتایج می‌توان گفت ضخامت لایه‌ی آلوده به طور چشمگیری می‌تواند ظرفیت باربری پی را تحت تأثیر قرار دهد.

۲.۱.۳. بررسی تغییرات درصد آلودگی

نسبت‌های ظرفیت باربری BCR در شرایط مختلف در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد آلودگی نسبت ظرفیت باربری کاهش می‌یابد، به گونه‌یی که در حالتی که خاک با ۴ درصد نفت سفید و نفت گاز آلوده می‌شود، نسبت BCR تا ۵۷ درصد افت می‌کند. دلیل این کاهش را می‌توان به کاهش ضرایب ظرفیت باربری $N_{\gamma q}$ در معادله‌ی ظرفیت باربری دانست. مطابق مطالعات نصر بیشترین میزان تغییرات ظرفیت باربری در U/B=۰/۵ اتفاق می‌افتد.[۳۰]

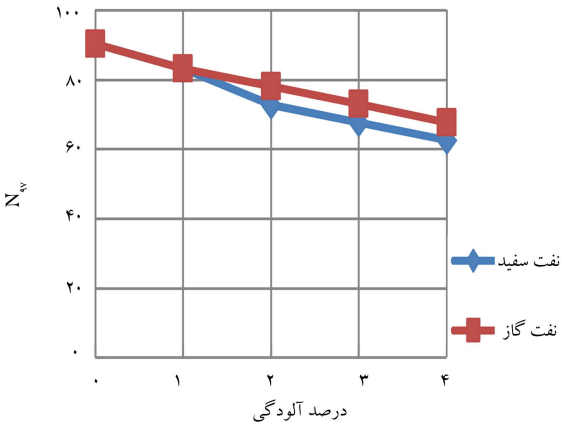
علاوه بر این، به منظور تعیین ضریب مربوط به وزن خاک($N_{\gamma q}$) در رابطه‌ی ظرفیت باربری، از نتایج ظرفیت باربری پی نواری با عرض ۱۰ cm حاصل از مدل عددی، بر اساس رابطه‌ی ۱ که توسط مایرهوف (۱۹۵۷) ارائه شده است، استفاده می‌شود.[۳۳] در این رابطه، ضریب شکل مربوط به پی نواری (S_γ) برابر با ۱/۰ و متوسط وزن مخصوص طبیعی خاک برابر با $17/75 KN/m^3$ در نظر گرفته می‌شود.

$$q_u = 0/5\gamma B N_{\gamma q} S_\gamma \qquad (۲)$$

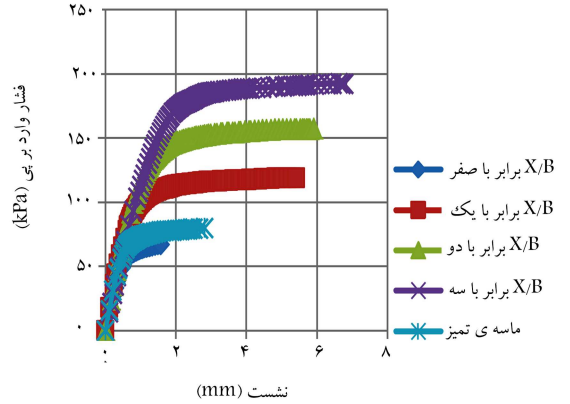
شکل ۶، مقادیر ضریب ($N_{\gamma q}$) با تغییرات درصد آلودگی را برای یک پی نواری مستقر بر شیب ماسه‌یی آلوده به نفت سفید و نفت‌گاز در نسبت U/B=۰/۵ نمایش می‌دهد. در خاک‌های آلوده به نفت سفید و نفت گاز افزایش درصد آلودگی منجر به تغییرات در چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی می‌شود و در نتیجه ظرفیت باربری تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابراین، در محاسبه‌ی ظرفیت باربری خاک‌های ماسه‌یی آلوده لازم است ضریب $N_{\gamma q}$ بر اساس درصد آلودگی و ضخامت لایه‌ی آلوده در نظر گرفته شود.

۳.۱.۳. بررسی تأثیر نوع ماده‌ی آلوده‌کننده

همان‌گونه که در جدول‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است، در همه‌ی درصدها و اعماق آلودگی تأثیر نفت گاز بر کاهش ظرفیت باربری بیشتر از نفت سفید است که با نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارد. به گونه‌یی که نفت سفید در بیشترین حالت تا ۴۲ درصد و نفت گاز تا ۴۳ درصد باعث کاهش ظرفیت باربری می‌شوند. بیشترین اختلاف تأثیر این دو نوع آلودگی درکاهش ظرفیت باربری، حدود ۶ درصد است و در نسبت U/B=۰/۵ و در ۲ درصد آلودگی رخ می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان ظرفیت باربری پی روی شیب خاکی آلوده به مواد نفتی، به طور مستقیم به درصد آلودگی و نوع آن بستگی دارد. پژوهشگران دیگر لزجت ماده‌ی آلوده‌کننده، دمای محیط و حتی خصوصیات شیمیایی خاک را نیز در رفتار خاک‌های آلوده مؤثر می‌دانند.[۳۰]



شکل ۶. مقادیر ضریب($N_{\gamma q}$) با تغییرات درصد آلودگی در نسبت U/B=۰/۵.



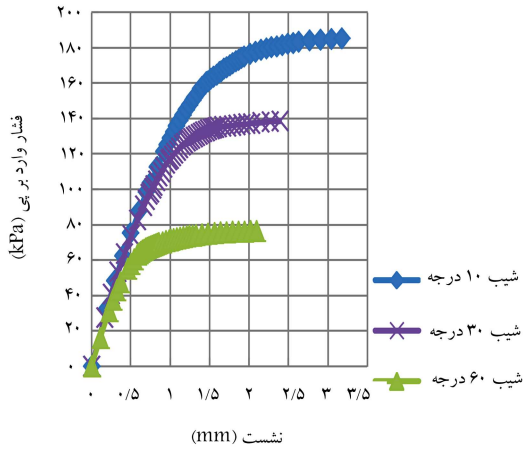
شکل ۷. تغییرات بار - نشست پی با فاصله‌های مختلف از لبه‌ی شیب در U/B=۱/۰ و ۱ درصد آلودگی نفت سفید.

۴.۱.۳. بررسی تأثیر فاصله‌ی افقی پی تا تاج شیب

یکی از عوامل تأثیرگذار بر میزان ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر شیب، موقعیت پی‌ها یا به عبارت دیگر فاصله‌ی آنها تا تاج شیب است. در شکل ۷، تاثیر قرارگیری پی با فاصله‌های ۲،۱ و ۳ برابری تا تاج شیب بررسی می‌شود. در همه‌ی حالات خاک در ضخامت برابری با عرض پی آلوده شده به نفت سفید است. همان‌گونه که از شکل پیداست، با افزایش فاصله پی تا تاج شیب، میزان ظرفیت باربری در حالتی‌که میزان ضخامت آلودگی ثابت و یک برابر عرض پی است، بیشینه تا ۲/۵ برابر افزایش می‌یابد. همان‌گونه که از شکل ۷ مشخص است، در حالتی‌که پی در لبه‌ی شیب قرار گرفته است، نمودارهای تنش - نشست برای خاک آلوده و خاک غیرآلوده تقریباً بر یکدیگر منطبق‌اند. دلیل این اتفاق این است که قبل از این‌که تأثیر آلودگی باعث کاهش ظرفیت باربری خاک شود، مجاورت با شیب به عنوان عامل غالب باعث گسیختگی خاک زیر پی می‌شود. در فاصله سه برابری پی تا تاج شیب، ظرفیت باربری خاک تا ۲/۵ برابر نسبت به حالتی که پی در مجاورت شیب قرار گرفته، افزایش می‌یابد.

۵.۱.۳. بررسی تأثیر زاویه‌ی شیب

برای بررسی اثر زاویه‌ی شیب بر ظرفیت باربری پی مستقر بر لبه‌ی آن، شیب آلوده به خاک ماسه‌یی با ۱ درصد آلودگی و ضخامتی معادل یک برابر عرض پی در نظر گرفته شد. شیب علاوه بر زاویه‌ی ۶۰ درجه، در زاویه‌های ۱۵ و ۳۰ درجه نیز مدل شد. شکل ۸ تغییرات بار بر حسب نشست را برای این سه حالت نمایش می‌دهد.



شکل ۸. تغییرات بار - نشست شیب با زاویه‌های مختلف در U/B=۰/۵ و ۱ درصد آلودگی نفت سفید.

مطابق شکل با کمتر شدن زاویه‌ی شیب میزان ظرفیت باربری پی تا حدود ۲/۲۰ برابر نسبت به شیب ۶۰ درجه افزایش می‌یابد. علت این افزایش، بیشتر شدن تأثیر وزن توده‌ی خاک در میزان ظرفیت باربری خاک است.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود پلکسیس ظرفیت باربری پی نواری واقع بر شیب ماسه‌یی در حالت‌های بدون آلودگی و آلوده به دو ماده‌ی آلوده‌کننده‌ی نفت سفید و نفت گاز با درصدها و اعماق مختلف آلودگی بررسی شد و نتایج زیر به دست آمد:

افزایش درصد و عمق آلودگی شیب ماسه‌یی با هر دو ماده‌ی آلوده‌کننده‌ی نفت سفید و نفت گاز منجر به کاهش ظرفیت باربری پی نواری واقع بر آن می‌شود. اما این کاهش برای درصدهای آلودگی بیش از ۲٪ و اعماق آلودگی بزرگ‌تر از عرض پی ($U > B$) قابل توجه نیست.

نفت سفید در بیشترین حالت تا ۴۲ درصد و نفت گاز تا ۴۳ درصد باعث کاهش ظرفیت باربری می‌شوند.

نسبت‌های ظرفیت باربری (BCR) نشان می‌دهد افزایش عمق آلودگی تأثیر بیشتری درکاهش ظرفیت باربری نسبت به افزایش درصد آلودگی دارد.

با مقایسه‌ی داده‌های مربوط به نفت سفید و نفت گاز ملاحظه می‌شود که آلودگی خاک ماسه‌یی با نفت گاز تأثیر بیشتری درکاهش ظرفیت باربری نسبت به آلودگی با نفت سفید دارد.

در همه‌ی درصدهای آلودگی افزایش عمق آلودگی از صفر به U/B=۰/۵ باعث کاهش قابل توجه ظرفیت باربری می‌شود. ولی برای اعماق با $U/B >= 1$ سرعت کاهش ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع را می‌توان خارج شدن لایه‌ی آلوده از ناحیه‌ی گسیختگی زیر پی دانست.

در حالتی‌که میزان آلودگی ۱ درصد از جنس نفت سفید باشد و ضخامت آن معادل نیم برابر عرض پی باشد، با کمتر شدن زاویه‌ی شیب تا ۱۰ درجه، به دلیل افزایش اثر وزن خاک در میزان ظرفیت باربری پی، ظرفیت باربری پی نواری واقع بر آن تا حدود ۲/۲۰ برابر نسبت به شیب ۶۰ درجه افزایش می‌یابد.

با افزایش فاصله‌ی استقرار پی تا تاج شیب، میزان ظرفیت باربری در حالتی‌که میزان آلودگی ۱ درصد از جنس نفت سفید باشد و ضخامت آن معادل یک برابر عرض پی باشد، بیشینه تا ۲/۵ برابر افزایش می‌یابد.

پانوشت‌ها

1. Grid-Anchor
2. Geogrid
3. Plaxis

منابع (References)

1. Shroff, A.V., Shah, D.L. and Shah, S.J. "Characterization of fuel oil contaminated soil and remedial measures – a case study" *Proceedings of Indian Geotechnical Conference, New Delhi, India*, pp.49-51 (1998).
2. Talebzadeh, I. and Hajiani Boushehrian, A. "Laboratory modeling of oil contamination propagation effect on subgrade reaction modulus of fine grained sand" *Shairf Journal of Civil Engineering, Article in Press. (In Persian)* (2019).
3. Zomorodian, S. M. A. and Rahimi Haghighi, V. R. "Assessment of geotechnical characteristic of bentonite clay contaminated by gasoline", *Shairf Journal of Civil Engineering*, **2**(33), pp. 77-82 (In Persian) (2018).
4. Hajiazizi, M., Kilanehei, F. and Kilanehei, P. "a new approach for stability analysis of soil slopes using a limit equilibrium method", *Shairf Journal of Civil Engineering*, **2**(33), pp. 145-153 (In Persian) (2017).
5. Ajdari, M. and Esmail pour, A., "Experimental evaluation of the influence of the level of the ground water table on the bearing capacity of circular footings", *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering*, **39**, pp. 497-510 (2015).
6. Evgin, E. and Das, B. M. "Mechanical behavior of an oil contaminated sand", *Environmental Geotechnology, Usmen and Acar (eds), Balkema, Rotterdam, the Netherlands: Eds. Bulkema Pub.*, pp.101-108 (1992).
7. Alsanad, H.A., Eid, w.k., and Ismael, N.F. "Geotechnical properties of oil contaminated Kuwaiti sand" *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE **121**(5), pp. 407-412 (1995).
8. Aiban, S.A. "The effect of temperature on the engineering properties of oil-contaminated sands", *Environ. Int.*, **24**(1), pp. 153-161 (1998).

9. Olgun, M. and Yildiz, M. "Effect of organic fluids on the geotechnical behavior of a highly plastic clayey soil", *Appl. Clay. Sci.*, **48**(4), pp. 615-621 (2010).
10. Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M. R. and et al. "Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite" *Eng. Geol.*, **166**, pp. 11-16 (2013).
11. Abousnina, R.M., Manalo, A., Shiau, J. and et al. "Effects of light crude oil contamination on the physical and mechanical properties of fine sand", *Soil. Sediment. Contam.*, **24**(8), pp. 833-845 (2015).
12. Nasehi, S.A., Uromeihy, A., Nikudel, M.R. and et al. "Influence of gas oil contamination on geotechnical properties of fine and coarse-grained soils", *Geotec. Geolo. Eng.*, **34**(1), pp. 333-345 (2016).
13. Harsh, G., Patel, A., Himanshu, B. and et al. "Effect of rate of crude oil contamination on index properties and engineering properties of clays and sands", *Indian. J. Sci. Technol.*, **9**(30), pp.1-4 (2016).
14. Shin, E. C., Das, B. M., Puri, V. K. and et al. "Bearing capacity of strip foundation on geogrid-reinforced clay", *Geotech. Test. J.*, **16**(4), pp. 534-541 (1993).
15. Shin, E.C. and Das, B.M., "Bearing capacity of unsaturated oil Contaminated sand", *Int. J. offshore. Polar.*, **11**(3), pp. 220-227 (2001).
16. Abtahi, A., and Hajiani Boushehrian, A., *Experimental Behavior of Circular Foundations on Oil Contaminated Sand, Scientia Iranica*, **27**(1), pp.80-87 (2018).
17. Hosseini, A., and Hajiani Boushehrian, A. "laboratory and numerical study of the behavior of circular footing rested on sand contaminated with oil under the cyclic loading" *Sci. Iran., Article in press* (2018).
18. Borthakur, B.C., Nambiar, M.K.C., Biswas, A. and et al. "Studies on the bearing capacity of strip footing on slopes", *In Proceedings of the Indian Geotechnical Conference*, Bombay **1**, pp. 385-389 (1988).
19. Lu, L., Arai, K., Wang, Z. and et al. "Laboratory model test and numerical analysis of bearing capacity of rigid strip footing on slope" *J. Appl. Mech.*, **11**, pp. 399-410 (2008).
20. Moayedi, H. and Hayati, S. "Modelling and optimization of ultimate bearing capacity of strip footing near a slope by soft computing methods", *Appl. Soft. Comput.*, **66**, pp. 208-219, (2018).
21. Zhou, H., Zheng, G., Yang, X. and et al. "Ultimate seismic bearing capacities and failure mechanisms for srip footings placed adjacent to slopes", *Can. Geotech. J.*, **56**(11), pp.1729-1735 (2018).
22. Nguyen, H.C., Le, C.V., Nguyen, V.P. and et al. "Bearing capacity of footing strip resting on slope using upper bound limit analysis", *Journal of Engineering Technology and Education*, pp. 154–158 (2012).
23. Saran, S. and Handa, S.C. "Bearing capacity of footings adjacent to slopes", *Journal of geotechnical engineering.*, **115**(4), pp. 553-573 (1989).
24. Castelli, F. and Motta, E., "Bearing capacity of strip footings near slopes", *Geotech. Geol. Eng.*, **28**(2), pp. 187-198 (2010).
25. El Sawwaf, M.A. and Nazir, A.K., "Cyclic settlement behavior of strip footings resting on reinforced layered sand slope." *J. Adv. Res.*, **3**(4), pp. 315-324 (2012).
26. Alamshahi, S. and Hataf, N., "Bearing capacity of strip footings on sand slopes reinforced with geogrid and grid-anchor" *Geotext. Geomembranes.*, **27**(3), pp. 217-226 (2009).
27. Naeini, S.A., Rabe, B.K. and Mahmoodi, E., "Bearing capacity and settlement of strip footing on geosynthetic reinforced clayey slopes", *J. Cent. South. Univ.*, **19**(4), pp. 1116-1124 (2012).
28. Keskin, M. S. and Laman, M. "Experimental and numerical studies of strip footings on geogrid-reinforced sand slope", *Arab. J. Sci. Eng.*, **39**(3), pp. 1607-1619 (2014).
29. Azzam, W.R. and Farouk, A., "Experimental and numerical studies of sand slopes loaded with skirted strip footing",*Electro. J. Geotech. Eng.*, **15**, pp. 795-812 (2010).
30. Nasr, A. M., "Behaviour of strip footing on oil-contaminated sand slope", *Int. J. Phys. Model. Geo.*, **16**(3), pp. 134-151 (2015).
31. Brinkgreve, R.B.J. and Vermeer, P.A. "Plaxis 2D, V8." *Delft University of Technology and Plaxis bv Delft, The Netherlands.* (2007).
32. joukar, A. and Hajiani Boushehrian, A., "Experimental study of strip foundations rested on kerosene Oil and gas oil contaminated sand slopes", *Iranian Journal of Science and Technology*, **44**(1), pp.209-217 (2018).
33. Meyerhof, G. G., "The ultimate bearing capacity of foundations on slopes", *4th Int. Conf. on Soil Mech.And Found. Engrg.*, **1**, pp. 384-386 (1957).