

آثار تسلیح خاک توسط ژئوگرید و سیستم مهار - شبکه در مقاومت برکنش خطوط لوله‌ی مدفون

Original Article

مجید مهدی (دانشجوی دکتری)

هوشنگ کانی * (دانشیار)

غلام مرادی (دانشیار)

سید رضا ملجایی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

تسلیح خاک، روشی مؤثر جهت افزایش مقاومت برکنش لوله‌های مدفون است. در نوشتار حاضر، از المان مسلح‌کننده‌ی جدیدی که شامل تعدادی صفحات مهار است و به ژئوگرید معمولی متصل می‌شود جهت تسلیح خاک استفاده شده است. سیستم مذکور که موجب افزایش مقاومت بیرون‌کشیدگی ژئوگرید می‌شود، مهار شبکه نامیده می‌شود. یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی جهت بررسی مقاومت برکنش خطوط لوله‌ی مدفون در ماسه‌ی مسلح‌شده با سیستم مهار - شبکه انجام شده است. نتایج حاصل از روش PIV نشان می‌دهند که به علت گسترده‌تر شدن گوه‌ی گسیختگی خاک، استفاده از سیستم مهار - شبکه، مقاومت برکنش لوله‌ی مدفون را به‌طور قابل ملاحظه‌ی افزایش می‌دهد. به‌طوری که استفاده از سیستم مذکور موجب افزایش مقاومت برکنش لوله به میزان ۲/۵ برابر حالت استفاده از ژئوگرید معمولی و ۴ برابر حالت بدون مسلح‌کننده می‌شود. جهت مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و تکمیل مطالعات از نرم‌افزار FLAC-۳D استفاده و درنهایت مشخص شد که نتایج آزمایشگاهی و عددی مطابقت خوبی با هم دارند.

m.mahdi@tabrizu.ac.ir
kat@tabrizu.ac.ir
g.moradi@tabrizu.ac.ir
sr.maljaei93@ms.tabrizu.ac.ir

واژگان کلیدی: مقاومت برکنش، خطوط لوله‌ی مدفون، مطالعات آزمایشگاهی، مدل‌سازی عددی، PIV، مهار - شبکه.

۱. مقدمه

لوله‌ی مدفون به‌طور قابل ملاحظه‌ی متأثر از اندرکنش بین لوله و زمین اطراف آن است. افزایش عمق دفن لوله باعث به‌وجود آمدن فشارهای قائم و افقی زیادی به لوله می‌شود و همچنین منجر به افزایش هزینه‌ها، زمان اجرا و سختی‌های نگهداری خواهد شد و درنهایت نیاز به یک لوله با مقطع قوی‌تر خواهد داشت.^[۱]

مطالعات زیادی درخصوص ظرفیت برکنش خطوط لوله و صفحات مهار مدفون صورت گرفته است. یک مطالعه‌ی عددی المان محدود بر روی کماتش بالازدگی^۲ خطوط لوله‌ی مدفون در خاک رس در سال ۲۰۰۶ انجام و نشان داده شد که عوامل برکنش خطوط لوله، اعم از تأثیر عمق دفن، قطر و سایر پارامترها، مشابه صفحات مهار است، با این تفاوت که حدود ۴/۵ الی ۶/۵ درصد بیشتر است.^[۲]

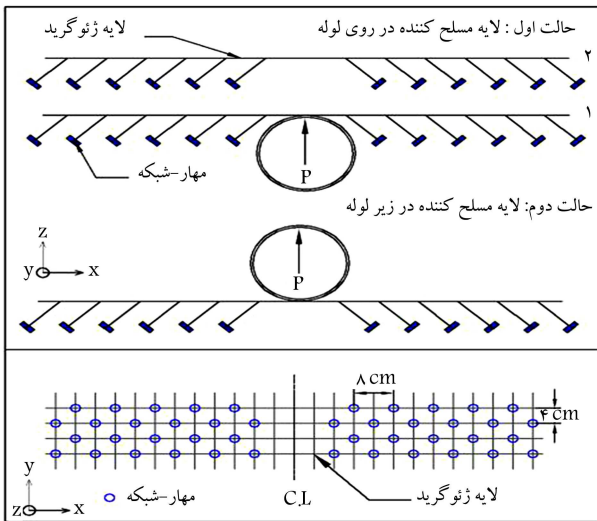
برخی پژوهشگران (۲۰۰۸) نیز یک‌سری آزمایش توسط مدل‌های سانتیفریوژ انجام دادند تا مقاومت برکنش لوله‌ها را در خاک‌های چسبیده بررسی کنند. در مطالعات مذکور، جابه‌جایی قائم لوله، فشار آب حفره‌ی اضافی در بالای لوله و مقاومت خاک روی لوله اندازه‌گیری شدند. نتایج آزمایش‌های مذکور نشان دادند که

خطوط لوله‌ی آب و انرژی از جمله شریان‌های حیاتی هستند و گسترش هزاران کیلومتری آن‌ها در کشور و جهان، نشان از اهمیت و نیاز مبرم به شریان‌های مذکور است. آسیب به خطوط لوله‌ی آب باعث اختلال در بهداشت و سلامت عمومی جامعه می‌شود. همچنین خرابی در خطوط لوله‌ی انرژی می‌تواند علاوه بر قطع انرژی، سبب ایجاد آتش‌سوزی‌های عظیم شود و همچنین به علت توقف فعالیت مجتمع‌های اقتصادی و صادرات فرآورده‌های نفت و گاز، ضررهای مالی بسیاری به دنبال داشته باشد. لذا اهمیت شریان‌های حیاتی باعث شده است پژوهشگران جهت ارتقاء قابلیت اطمینان استفاده از خطوط لوله، مطالعات وسیعی انجام دهند. علت خرابی بسیاری از خطوط لوله‌ی مدفون، بخصوص لوله‌های گاز، برکنش^۱ لوله است.^[۳] برای رسیدن به مقاومت برکنش کافی و جلوگیری از بالا آمدن لوله، عمق قرارگیری لوله و پوشش خاک باید به‌طور مناسب انتخاب شود. رفتار خطوط

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۱/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۶/۲/۲۲، پذیرش ۱۳۹۶/۲/۱۷.

DOI:10.24200/J30.2018.1945.2032



شکل ۱. نحوه‌ی به‌کارگیری سیستم مهار - شبکه به‌طور شماتیک.



شکل ۲. استفاده از سیستم مهار - شبکه در آزمایشگاه.

جدول ۱. مشخصات مصالح به‌کار رفته در آزمایشگاه و مدل‌سازی عددی.

زاویه اصطکاک داخلی ماسه شل	۲۸ درجه
زاویه اصطکاک داخلی ماسه متراکم	۴۰ درجه
زاویه اصطکاک داخلی ماسه سیلتی	۲۶ درجه
زاویه اصطکاک داخلی شن	۳۵ درجه
چسبندگی خاک‌ها	۰
وزن مخصوص ماسه شل (kN/m^3)	۱۴٫۲
وزن مخصوص ماسه متراکم (kN/m^3)	۱۸
وزن مخصوص ماسه سیلتی (kN/m^3)	۱۳٫۵
وزن مخصوص شن شل (kN/m^3)	۲۰
مقاومت کششی ژئوگرید (kN/m)	۲۸
مقاومت کششی مهارها (kN)	۰٫۰۸
طول مهارها (mm)	۸۰
زاویه افقی قرارگیری مهارها	۴۵ درجه
مساحت صفحات مهار (mm^2)	۷۰۶
قطر لوله‌ها (mm)	۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰

می‌دهد. مشخصات مصالح پرکننده‌ی جعبه، ژئوگرید و مهار - شبکه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. مشخصات ارائه‌شده در مدل‌سازی عددی نیز استفاده شده‌اند. در مطالعه‌ی حاضر، ۳۷ آزمون آزمایشگاهی جهت بررسی ظرفیت برکنش خطوط لوله‌ی مدفون در خاک‌های دانه‌بندی انجام شده است. به همین منظور، مجموعه‌ی آزمایشگاهی شامل یک جعبه‌ی مکعبی با ابعاد $1 \times 1 \times 1$ متر، یک

عمق دفن لوله، تأثیر قابل توجهی در مقاومت برکنش آن دارد. به علاوه، نتیجه گرفته شده که اثر یک لایه‌ی درشت‌دانه بر روی خاک چسبنده، اثر بیشتری در نرخ بیرون کشیده شدن لوله با سرعت بالا و پایین خواهد داشت.^[۵]

در سال ۱۹۸۹، طی یک پروژه‌ی تحقیقاتی، تقریباً برای اولین بار تأثیر استفاده از ژئوگرید در افزایش مقاومت برکنش خطوط لوله‌ی مدفون بررسی آزمایشگاهی شد و نتایج نشان داد که استفاده از ژئوگرید باعث افزایش حدود ۱۰۰ درصدی مقاومت برکنش خط لوله می‌شود. اما هر چه قطر لوله افزایش می‌یابد، ژئوگرید سهم کمتری از مقاومت برکنش آن را دارد.^[۶] اخیراً نیز در قالب یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی، اثر تسلیح خاک کم تراکم توسط ژئوگرید در ظرفیت برکنش لوله‌های مدفون بررسی و نتایج ۱۱ آزمایش صورت‌گرفته توسط تحلیل عددی که با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS ۳D TUNNEL انجام شده بودند، صحت‌سنجی شدند و نتایج به‌دست آمده، اهمیت استفاده از ژئوگرید در افزایش مقاومت برکنش لوله‌ها را نشان می‌دادند. همچنین نتیجه‌گیری شد که چنانچه مقاومت برکنش بیشینه^۳ مدنظر باشد، استفاده از چند لایه‌ی ژئوگرید، تأثیر چندانی نخواهد داشت.^[۷،۸]

استفاده از ترکیب ژئوگرید و سیستم مهار - شبکه به‌عنوان مصالح جدید مسلح‌کننده‌ی خاک، طی چند سال اخیر به‌صورت یک روش نوآورانه مطرح و مطالعات زیادی در چند سال گذشته جهت ارزیابی عملکرد سیستم مذکور صورت گرفته است.^[۹-۱۵] پژوهش‌ها نشان می‌دهند که استفاده‌ی توأمان ژئوگرید و مهارهای ذکرشده باعث افزایش ۲٫۷۴ برابری ظرفیت باربری نهایی بی نسبت به حالت استفاده‌ی فقط ژئوگرید و افزایش ۴٫۴۳ برابری نسبت به حالت خاک غیرمسلح می‌شود. همچنین مطالعه‌ی عددی انجام‌شده‌ی در سال ۲۰۱۵، نشان می‌دهند که برای یک لوله با قطر خارجی ۵۰ میلی‌متر، استفاده از سیستم مسلح‌کننده‌ی مهار - شبکه در بالای لوله و در یک لایه، موجب افزایش مقاومت برکنش لوله به میزان ۲٫۱۸ برابر حالت استفاده از ژئوگرید معمولی و ۳٫۲۰ برابر حالت بدون مسلح‌کننده می‌شود.^[۱۶]

لذا در نوشتار حاضر، به جهت افزایش مقاومت برکنش خطوط لوله‌ی مدفون، با استفاده از ژئوگرید و مهار - شبکه‌ها، یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی شامل ۳۷ آزمون فیزیکی انجام شده است. همچنین جهت مقایسه با مدل‌های آزمایشگاهی و انجام مطالعات تکمیلی، مدل‌سازی عددی به تعداد ۳۳ مدل با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC-۳D ساخته شده است.

۲. مدل‌های آزمایشگاهی

هدف از نصب میکرومهارها، افزایش مقاومت برکنش لوله‌ی مدفون است. لذا میکرومهارها باید در پایین ژئوسینتتیک نصب شوند. شکل ۱، نحوه‌ی ساخت و به‌کارگیری سیستم مهار - شبکه جهت افزایش مقاومت برکنش لوله‌ی مدفون را به‌طور شماتیک نشان می‌دهد که حالت اول جهت تسلیح خاک روی لوله به کار می‌رود و حالت دوم با بستن لایه‌ی مسلح‌کننده به زیر لوله، باعث گیرداری بیشتر لوله می‌شود. در حالت دوم، لایه‌ی مسلح‌کننده در طول لوله و در فواصل ۱۰ سانتی‌متری به آن بسته می‌شود.

میکرومهارها از یک سری قطعات پلاستیکی به شکل استوانه ساخته شده‌اند. قطر صفحات به‌کار رفته، ۳ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۱ سانتی‌متر بوده و توسط یک نوار با طول ۸ سانتی‌متر به ژئوگرید متصل شده‌اند و به‌صورت صفحات مهار عمل می‌کنند. شکل ۲، نحوه‌ی به‌کارگیری المان‌های مذکور را در محیط آزمایشگاه نشان

به میزان پوشش برنامه‌ی آزمایش، لایه‌ی مسلح‌کننده (فقط ژئوگرید یا سیستم مهار - شبکه) بر روی لوله گسترده شده است. در تمامی آزمایش‌ها دقت شده است تا فاصله‌ی لایه‌ی مسلح‌کننده از دو طرف لوله به یک اندازه باشد و در حقیقت مرکز لایه‌ی مسلح‌کننده در مرکز لوله قرار گیرد. سپس در هر مرحله، ماسه پاش برمی‌شود و به‌طور یکنواخت بر روی نمونه پاشش می‌کند. این عمل تا جایی ادامه پیدا می‌کند که به لایه‌ی بعدی در لایه‌ی مسلح‌کننده برسد. در مرحله‌ی کنونی، لایه‌ی مسلح‌کننده جای‌گذاری می‌شود و ادامه‌ی ماسه پاشی انجام می‌گیرد.

جهت بررسی تأثیر میزان رطوبت خاک در عملکرد مسلح‌کننده‌ها، چند آزمایش در درصد رطوبت‌های مختلف، از حالت خشک تا اشباع کامل، انجام شده است تا میزان تأثیرگذاری رطوبت تعیین شود. برنامه‌ی کامل آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی همراه با پیشینه‌ی مقاومت برکنش (PUR) هر آزمون یا مدل در جدول‌های ۲ و ۳ خلاصه شده است.

۳. مدل‌سازی عددی

در نوشتار حاضر، از نرم‌افزار تفاضل محدود ۳D-FLAC جهت مدل‌سازی رفتار لوله‌ی مدفون در ماسه‌ی مسلح‌شده با ژئوگرید و مهار - شبکه استفاده شده است. در همین راستا، از آنالیز سه بعدی جهت بررسی رفتار برکنش لوله‌های مدفون و تعیین اثر پارامترهای مهم، نظیر: قطر لوله، عرض و تعداد لایه‌های مسلح‌کننده‌ی خاک، وزن مخصوص خاک، عمق دفن لوله، و محل نصب لایه‌ی مسلح‌کننده استفاده شد.

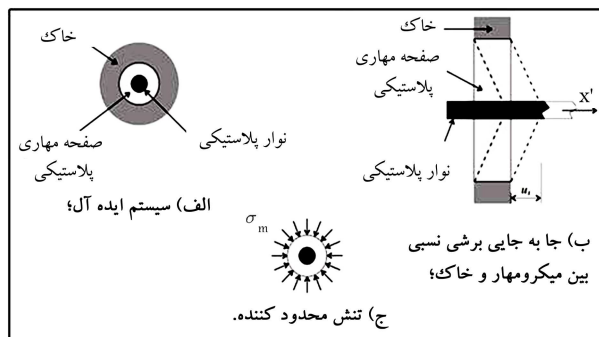
شرایط مرزی مدل‌ها طوری لحاظ شده است که جابه‌جایی گره‌های مرزی در سطوح جانبی مدل در جهات X یا Y و در کف مدل در جهات X ، Y و Z بسته شده‌اند. رفتار خاک توسط مدل موهر - کولمب مدل‌سازی شد. المان‌های مسلح‌کننده‌ی خاک توسط ژئوگرید و کابل که به صورت پیش فرض جزء المان‌های سازه‌یی موجود در نرم‌افزار هستند، مدل شدند. رفتار المان‌های مذکور فقط به صورت کششی است و هیچ‌گونه تنش خمشی یا فشاری را تحمل نمی‌کنند. اما رفتار آن‌ها به صورت قابل ملاحظه‌یی تحت تأثیر زاویه‌ی اصطکاک بین خاک و المان، مقاومت چسبندگی بین خاک و المان، و تنش مؤثر خاک در تراز المان است.

مهارها به صورت المان کابل مدل‌سازی شدند. هر المان سازه‌یی کابل به صورت یک کابل میانی و گروت اطراف آن مدل می‌شود که توسط دست‌کم دو گره ساخته می‌شود. در نوشتار حاضر، کابل طوری مدل شده است تا المان کششی آن نقش کابل و صفحه‌ی پلاستیکی اطراف آن نقش گروت اطراف آنرا ایفا کند. شکل ۴، به صورت شماتیک نحوه‌ی رفتار و هندسه‌ی مهار - شبکه‌ها را نشان می‌دهد.^[۱۷] مهارهای

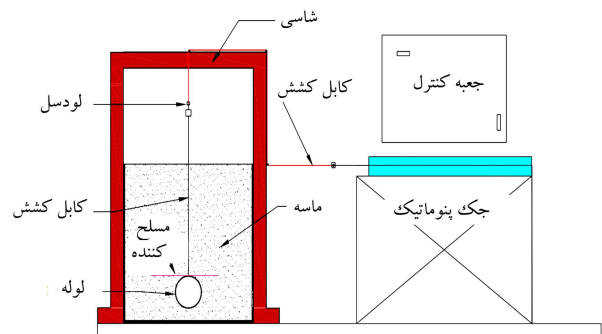
جک پنوماتیکی همراه با یک پمپ باد جهت اعمال نیروی کششی به لوله، و لودسل S شکل جهت اندازه‌گیری نیروهای برکنش به‌کار گرفته شد. با توجه به اینکه بارهای برکنش توسط یک جک پنوماتیکی به لوله اعمال می‌شود، آزمایش‌ها به صورت جابه‌جایی کنترل‌شده صورت گرفته است. لذا با کنترل دقیق سرعت جابه‌جایی اهرم کشنده‌ی جک، نرخ جابه‌جایی لوله در حین بارگذاری به صورت ثابت و به میزان ۰/۴ میلی‌متر بر ثانیه ثابت شده است. بارهای کششی ایجادشده توسط جک پنوماتیکی ابتدا توسط کابل به لودسل و از لودسل توسط میله‌های رابط به دو سر لوله وارد می‌شود. دو طرف لوله توسط درپوش‌های پلاستیکی با اصطکاک ناچیز پوشانده شده است تا اصطکاک سطحی بین لوله و جعبه به میزان کمینه کاهش یابد. سه وجه جعبه‌ی آزمایش از جنس ورق فولادی به ضخامت ۲۵ میلی‌متر ساخته شده است. وجه چهارم از ورق پلی‌کسی‌گلاس انتخاب شد تا امکان مشاهده‌ی حرکات لوله درون جعبه مهیا شود. جزئیات مجموعه‌ی تهیه‌شده جهت انجام آزمایش‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. لوله‌هایی با قطر خارجی ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر از جنس پلیکا و به طول ۱۰۰۰ میلی‌متر در آزمایش‌ها استفاده شده است. عمق دفن لوله‌ها به ترتیب برابر ۱، ۲ و ۳ برابر قطر آن انتخاب شده است. عرض ژئوگرید یا مهار - شبکه جهت تسلیخ خاک در مطالعه‌ی حاضر برابر ۵، ۳ و ۸ برابر قطر لوله تعیین شده است. در برخی از مدل‌ها نیز از مسلح‌کننده استفاده نشده است. تعداد لایه‌های مسلح‌کننده به ترتیب برابر ۱، ۲ و ۳ لایه در نظر گرفته شده است.

در آزمون‌های آزمایشگاهی از سه نوع خاک که شامل ماسه‌ی ریزدانه، شن خوب دانه‌بندی‌شده و ماسه‌ی سیلتی می‌شود، استفاده شده است. در مدل‌های عددی نیز فقط از ماسه‌ی ریزدانه استفاده شده است. همچنین همه‌ی آزمون‌های آزمایشگاهی در وضعیت تراکم متوسط انجام شده و هیچ‌گونه وسیله‌ی تراکمی جهت تراکم کردن خاک استفاده نشده است. به همین منظور جهت برگردن روی لوله از ریزش خاک توسط یک قیف از ارتفاع ثابت ۵۰ سانتی‌متری استفاده شده است. در مدل‌سازی عددی از دو حالت خاک تراکم و شل جهت بررسی تأثیر تراکم خاک در عملکرد مسلح‌کننده‌ها استفاده شده است.

سیستم جعبه، خاک و لوله به گونه‌یی طراحی شده است که می‌توان به راحتی در هر بار آزمایش قطر لوله، عمق دفن شدن، تعداد لایه‌های مسلح‌کننده و عرض آن‌ها را تغییر داد و آزمایش را تکرار کرد. برای انجام آزمایش با هر شرایط موردنظر، لازم است بستر زیر لوله با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر و به صورت متراکم آماده شود. قابل ذکر است لایه‌ی بستر در هر صورت متراکم اجرا شده است تا لوله درون ماسه فرو نرود و امکان ایجاد شرایط یکنواخت برای تمامی مدل‌ها فراهم شود. سپس لوله به همراه میله‌های متصل به آن بر روی بستر تدارک دیده‌شده قرار گرفته و سپس



شکل ۴. رفتار و هندسه‌ی مهار - شبکه‌ها به‌عنوان المان مسلح‌کننده در مدل‌سازی عددی.^[۱۷]



شکل ۳. نمای مجموعه‌ی آماده شده جهت انجام آزمون‌های آزمایشگاهی به صورت شماتیک.

جدول ۲. برنامه‌ی کامل آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی برای مدل‌های ۱ تا ۱۷.

شماره‌ی مدل	قطر لوله $D (mm)$	ضریب دفن لوله (h/D)	نوع لایه‌ی مسلح‌کننده	محل نصب عرض لایه لايه	عرض لایه $b (mm)$	تعداد لایه N	خاک γ (kN/m^3)	بیشینه‌ی مقاومت	
								نوع و میزان رطوبت خاک	عددی آزمایشگاهی PUR(N)
M1	50	3	غیرمسلح	-	-	-	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۳۳۸
M2	50	3	ژئوگرید	بالای لوله	5D	۱	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۴۴۰
M3	50	3	مهار- شبکه	بالای لوله	5D	۱	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۶۷۹
M4	50	2	غیرمسلح	-	-	-	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۱۷۶
M5	50	2	ژئوگرید	بالای لوله	5D	۱	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۲۶۴
M6	50	2	مهار- شبکه	بالای لوله	5D	۱	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۵۵۱
M7	50	1	غیرمسلح	-	-	-	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۷۰
M8	50	1	ژئوگرید	بالای لوله	5D	۱	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۱۱۶
M9	50	1	مهار- شبکه	بالای لوله	5D	۱	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۲۸۶
M10	50	2	ژئوگرید	بالای لوله	3D	۱	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۲۰۵
M11	50	2	مهار- شبکه	بالای لوله	3D	۱	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۳۸۰
M12	50	2	ژئوگرید	بالای لوله	8D	۱	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۲۹۳
M13	50	2	مهار- شبکه	بالای لوله	8D	۱	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۶۷۵
M14	100	2	ژئوگرید	بالای لوله	5D	۲	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۹۲۷
M15	100	2	مهار- شبکه	بالای لوله	5D	۲	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۱۲۲۰
M16	100	2	ژئوگرید	بالای لوله	5D	۳	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۹۵۲
M17	100	2	مهار- شبکه	بالای لوله	5D	۳	۱۴٫۲	ماسه‌ی خشک	۱۲۲۶

نتایج مطالعات عددی یا آزمایشگاهی پیشین در شرایط برابر است. روابط زیادی جهت برآورد میزان مقاومت برکنش لوله‌ی مدفون در حالت خاک غیرمسلح ارائه شده است.^[۱۸] یکی از روابط معتبر در این خصوص، رابطه‌ی ارائه‌شده در سال ۲۰۰۱ است:^[۱۸]

$$P = \gamma' HD + \gamma' H^2 K \tan \phi + \gamma' H^2 K (\tan \phi_{\max} - \tan \phi) [(1 + K_0) \cos 2\phi / 2] \quad (1)$$

که در آن، γ' وزن مخصوص مؤثر خاک، H ارتفاع خاک روی لوله، D قطر لوله، K ضریب فشار جانبی خاک، K_0 ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون، ϕ زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک و ϕ_{\max} زاویه‌ی اصطکاک داخلی بیشینه‌ی خاک هستند.

مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی انجام‌شده در نوشتار حاضر با رابطه‌ی وایت و همکاران نشان از مطابقت بسیار خوبی دارد. چنانکه برای یک لوله به قطر ۵۰ میلی‌متر که در یک خاک ماسه‌ی شل با ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر مدفون است، مقدار نیروی برکنش بیشینه از رابطه‌ی وایت و همکاران برابر ۳۲۰ نیوتن، از نتایج آزمایشگاهی نوشتار حاضر برابر ۳۲۵ نیوتن و از مدل عددی ساخته‌شده در پژوهش حاضر، برابر ۳۳۸ نیوتن شده است. لذا برای لوله‌ی مذکور و در همان شرایط، چنانچه از یک لایه‌ی ژئوگرید با عرض ۲۵۰ میلی‌متر استفاده شود، نیروی برکنش حاصل از مدل‌سازی عددی برابر ۴۴۰ نیوتن و نیروی برکنش حاصل از نتایج آزمایشگاهی برابر ۴۵۰ نیوتن است. این در حالی است که در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی در سال ۲۰۱۴،^[۷] نیروی برکنش مذکور برای ژئوگرید با

ذکرشده پس از مدل‌سازی در نرم‌افزار به لایه‌های ژئوگرید که قبلاً ایجاد و در محل موردنظر نصب شده‌اند، متصل می‌شوند.

کلیدی فرضیات و پارامترهای استفاده‌شده جهت مدل‌سازی در جدول ۱ به‌صورت مختصر، فهرست شده‌اند. تعداد ۳۳ مدل جهت تعیین اثر پارامترهای مختلف در مقاومت برکنش خطوط لوله‌ی مدفون و تعیین مکانیزم گسیختگی آن ساخته شدند که در آن‌ها خاک ماسه‌ی با استفاده از ژئوگرید معمولی به تنهایی و سیستم مهار- شبکه با عرض‌های ۳D، ۵D و ۸D و لایه‌های تکی، دوتایی، و سه‌تایی در بالای لوله و لایه‌ی تکی متصل به لوله در زیر آن مسلح شدند. برخی از مدل‌ها نیز به‌صورت غیرمسلح بررسی شدند. طول کلیه‌ی لوله‌ها به‌صورت واحد (۱۰۰ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد و عمق دفن لوله نیز به‌صورت ضریبی از قطر لوله (h/D) و با مقادیر ۱، ۲ و ۳ اعمال شد. جهت تعیین نیروی مقاوم برکنش و میزان جابه‌جایی قائم متناظر هر نیرو، نقطه‌ی در وسط و بالای لوله وارد و به‌صورت تدریجی به آن افزوده شد تا جایی که خاک گسیخته شود. وزن مخصوص خاک روی لوله نیز با دو مقدار ۱۴٫۲ و ۱۸ کیلو نیوتن بر متر مکعب بررسی شد. مدل‌های ساخته‌شده با شرایط مختلف تشریح‌شده‌ی اخیر، به همراه بیشینه‌ی مقاومت برکنش (PUR) هر مدل در جدول‌های ۲ و ۳ خلاصه شده است.

۴. صحت‌سنجی نتایج

یک روش مرسوم جهت ارزیابی میزان صحت نتایج مدل‌سازی عددی، مقایسه‌ی آن با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی، روابط ارائه‌شده توسط پژوهشگران مختلف و

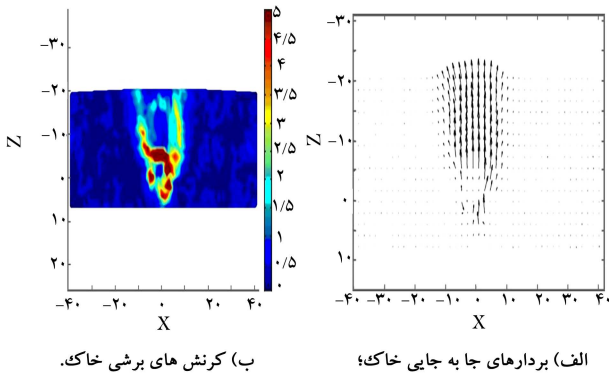
جدول ۳. برنامه‌ی کامل آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی برای مدل‌های ۱۸ تا ۴۲.

شماره‌ی مدل	قطر لوله $D (mm)$	ضریب دفن لوله (h/D)	نوع لایه‌ی مسلح‌کننده	محل نصب لایه لايه	عرض لایه $b (mm)$	تعداد لایه N	خاک γ (kN/m^3)	نوع و میزان رطوبت خاک	بیشینه‌ی مقاومت	
									عددی PUR(N)	آزمایشگاهی PUR(N)
M18	50	3	غیرمسلح	-	-	-	18	ماسه‌ی خشک	450	-
M19	50	3	ژئوگرید	بالای لوله	5D	1	18	ماسه‌ی خشک	520	-
M20	50	3	مهار - شبکه	بالای لوله	5D	1	18	ماسه‌ی خشک	807	-
M21	100	2	غیرمسلح	-	-	-	14,2	ماسه‌ی خشک	721	708
M22	100	2	ژئوگرید	بالای لوله	5D	1	14,2	ماسه‌ی خشک	901	912
M23	100	2	مهار - شبکه	بالای لوله	5D	1	14,2	ماسه‌ی خشک	1170	1360
M24	200	2	غیرمسلح	-	-	-	14,2	ماسه‌ی خشک	3218	3187
M25	200	2	ژئوگرید	بالای لوله	5D	1	14,2	ماسه‌ی خشک	3476	3513
M26	200	2	مهار - شبکه	بالای لوله	5D	1	14,2	ماسه‌ی خشک	4628	5226
M27	50	2	ژئوگرید	زیر لوله	5D	1	14,2	ماسه‌ی خشک	260	272
M28	50	2	مهار - شبکه	زیر لوله	5D	1	14,2	ماسه‌ی خشک	676	696
M29	50	2	مهار - شبکه	زیر لوله	8D	1	14,2	ماسه‌ی خشک	826	-
M30	50	2	مهار - شبکه	زیر لوله	3D	1	14,2	ماسه‌ی خشک	440	-
M31	50	3	غیرمسلح	-	-	-	14,2	ماسه‌ی اشباع	165	158
M32	50	3	ژئوگرید	بالای لوله	5D	1	14,2	ماسه‌ی اشباع	201	240
M33	50	3	مهار - شبکه	بالای لوله	5D	1	14,2	ماسه‌ی اشباع	390	463
M34	50	2	مهار - شبکه	بالای لوله	5D	1	14,2	ماسه‌ی با رطوبت ۱۵٪	-	581
M35	50	2	مهار - شبکه	بالای لوله	5D	1	14,2	ماسه‌ی با رطوبت ۲۰٪	-	600
M36	50	2	مهار - شبکه	بالای لوله	5D	1	14,2	ماسه‌ی اشباع	-	360
M37	100	2	غیرمسلح	-	-	-	13,5	ماسه‌ی سیاتی خشک	-	659
M38	100	2	ژئوگرید	بالای لوله	5D	1	13,5	ماسه‌ی سیاتی خشک	-	856
M39	100	2	مهار - شبکه	بالای لوله	5D	1	13,5	ماسه‌ی سیاتی خشک	-	1320
M40	100	2	غیرمسلح	-	-	-	20	شن خشک	-	921
M41	100	2	ژئوگرید	بالای لوله	5D	1	20	شن خشک	-	1085
M42	100	2	مهار - شبکه	بالای لوله	5D	1	20	شن خشک	-	1680

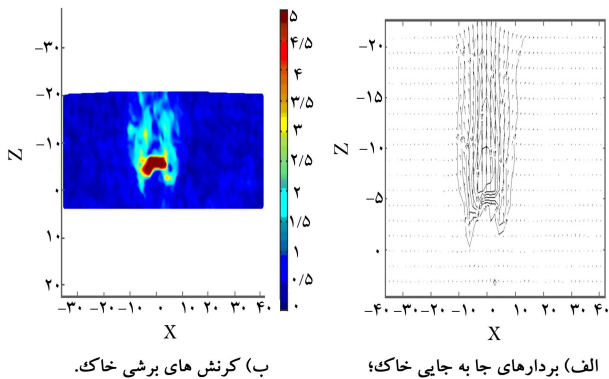
۵. ارزیابی میزان تأثیرگذاری سیستم مهار - شبکه

جهت ارزیابی میزان کارایی سیستم مهار - شبکه در بهبود ظرفیت برکنش لوله‌ی مدفون، رفتار لوله‌های مدفون در ماسه‌ی غیرمسلح، ماسه‌ی مسلح‌شده با ژئوگرید معمولی و ماسه‌ی مسلح‌شده با سیستم مهار - شبکه در شرایط یکسان بررسی شد. شکل ۵، مقایسه‌ی بین سه حالت مذکور را هنگامی که سیستم مسلح‌کننده در زیر لوله نصب شده باشد، نشان می‌دهد؛ که میزان انرژی‌گذاری سیستم مهار - شبکه در افزایش مقاومت برکنش خطوط لوله‌ی مدفون مشهود است. مطالعات آزمایشگاهی

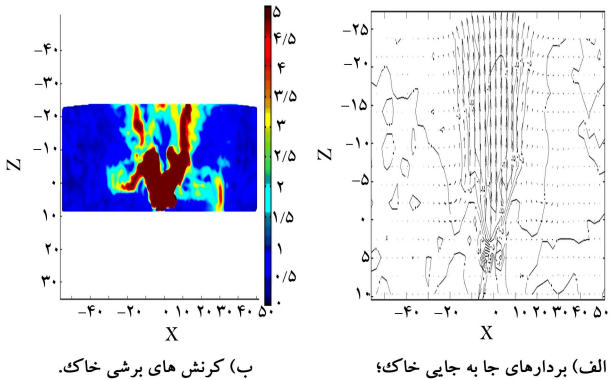
عرض ۳۰۰ میلی‌متر برابر ۴۸۰ نیوتن به دست آمده است. این اختلاف ناچیز نیز در اثر بیشتر بودن عرض ژئوگرید در مطالعه‌ی ذکر شده است. همچنین با مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی انجام‌گرفته در پژوهش حاضر، که به‌طور خلاصه در جدول‌های ۲ و ۳ گنجانده شده است، می‌توان نزدیک بودن نتایج را به‌خوبی مشاهده کرد. بنابراین مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و نتایج حاصل از مطالعات پیشین نشان می‌دهد که مطابقت بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد و نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، صحت کافی دارند.



شکل ۷. مکانیزم گسیختگی خاک در اثر برکنش لوله‌ی مدفون در ماسه‌ی غیرمسلح.

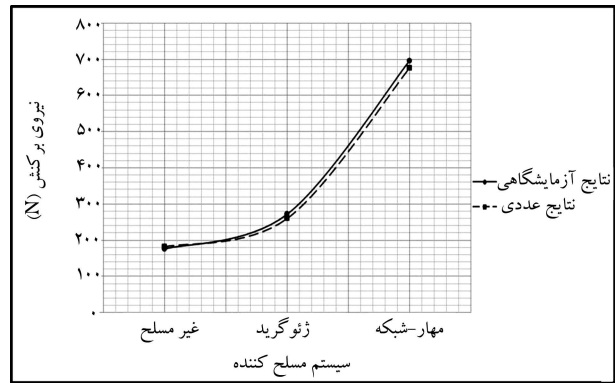


شکل ۸. مکانیزم گسیختگی خاک در اثر برکنش لوله‌ی مدفون در ماسه‌ی مسلح با ژئوگرید.

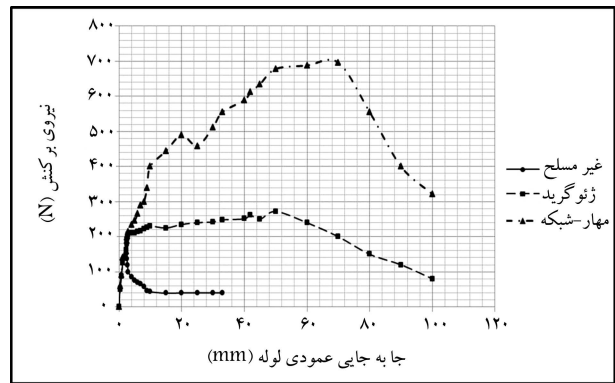


شکل ۹. مکانیزم گسیختگی خاک در اثر برکنش لوله‌ی مدفون در ماسه‌ی مسلح با سیستم مهار - شبکه.

در روش‌های مختلف تسلیح که از نتایج مدل‌سازی فیزیکی در مطالعه‌ی حاضر به دست آمده‌اند، در شکل‌های ۷ الی ۹ نشان داده شده است. تصاویر مذکور به کمک روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV) و با استفاده از نرم‌افزار Geopiv8 تهیه شده‌اند که در آن‌ها نمودارهای سمت راست بردارهای جابه‌جایی المان‌های خاک و نمودارهای سمت چپ کرنش‌های برشی ایجاد شده در اثر برکنش لوله‌ی مدفون در وضعیت‌های غیرمسلح، مسلح با ژئوگرید، و مسلح با سیستم مهار - شبکه را نشان می‌دهند. عامل مشترک شکل‌گیری گوه‌ی گسیختگی منحنی‌شکل، ریزش خاک اطراف لوله در جهت فضا خالی تشکیل شده در زیر لوله است. افزایش



شکل ۵. تغییرات مقاومت برکنش بیشینه‌ی لوله‌ی مدفون با نوع سیستم مسلح‌کننده در ماسه‌ی خشک و لایه‌ی مسلح‌کننده در زیر لوله‌ی حاصل از مطالعات آزمایشگاهی ($b = 5D, h/D = 2, N = 1, D = 50 \text{ mm}$)



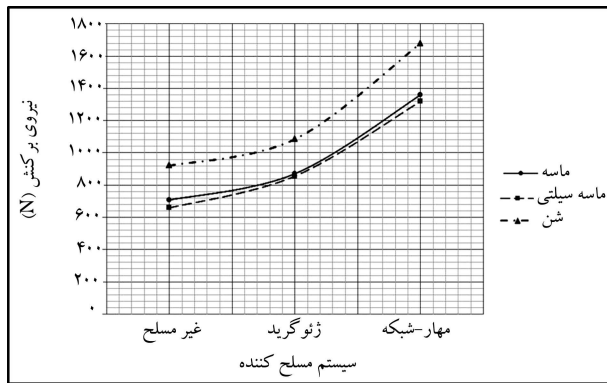
شکل ۶. تغییرات مقاومت برکنش بیشینه در برابر جابه‌جایی عمودی لوله در ماسه‌ی خشک حاصل از مطالعات آزمایشگاهی ($h/D = 2, N = 1, D = 50 \text{ mm}$) ($b = 5D$)

نشان می‌دهند که استفاده از سیستم مذکور می‌تواند مقاومت برکنش بیشینه‌ی لوله را حدود ۴ برابر نسبت به حالت ماسه‌ی غیرمسلح و حدود ۲/۵ برابر نسبت به حالت استفاده از ژئوگرید معمولی افزایش دهد. این افزایش در مدل‌سازی عددی به ترتیب ۳/۷ و ۲/۶ به دست آمده است که مطابقت خوبی را نشان می‌دهد.

شکل ۶، نحوه‌ی تغییرات نیروی برکنش در برابر جابه‌جایی عمودی لوله را از مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد. برای نمونه‌های M4، 27 و M28 که وزن مخصوص ماسه‌ی خشک برابر ۱۴۲۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب، قطر لوله برابر ۵۰ میلی‌متر، عمق دفن لوله برابر ۱۰۰ میلی‌متر و عرض لایه‌ی مسلح‌کننده برابر ۲۵۰ میلی‌متر بوده است، نیروی برکنش بیشینه برابر ۱۷۶، ۲۷۲ و ۶۹۶ نیوتن به دست آمده است. بنابراین به خوبی می‌توان به اهمیت استفاده از مهار - شبکه پی برد. چنانکه مشاهده می‌شود، استفاده از فقط ژئوگرید، در زیر لوله تقریباً به میزان ۵۴٪ و استفاده از سیستم مهار - شبکه در زیر لوله تقریباً به میزان ۳۹۵٪، باعث افزایش مقاومت برکنش بیشینه‌ی لوله‌ی بدون مسلح‌کننده می‌شود.

۶. بررسی مکانیزم‌های گسیختگی خاک

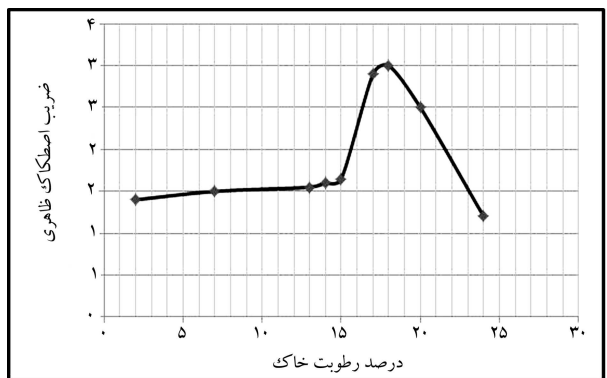
مطالعات پیشین بر روی مکانیزم‌های گسیختگی خاک نشان می‌دهند که خطوط لوله با یک سطح برشی منحنی‌شکل گسیخته می‌شوند. گوه‌ی گسیختگی خاک



شکل ۱۰. نحوه تغییر بیشینه‌ی مقاومت برکنش لوله با تغییر نوع مصالح.



شکل ۱۱. نحوه تغییر بیشینه‌ی مقاومت برکنش لوله با تغییر درصد رطوبت خاک.



شکل ۱۲. تغییر ضریب زاویه‌ی اصطکاک ظاهری خاک با افزایش میزان رطوبت آن. [۱۹]

مشاهده می‌شود، با افزایش میزان رطوبت خاک تا ۲۰٪، میزان ظرفیت برکنش لوله نیز افزایش می‌یابد. اما پس از رطوبت ۲۰٪، افزایش درصد رطوبت باعث کاهش شدید ظرفیت برکنش لوله خواهد شد. علت این پدیده را می‌توان در تغییرات زاویه‌ی اصطکاک ظاهری خاک با افزایش میزان درصد رطوبت آن بیان کرد. چرا که طبق یافته‌های برخی پژوهشگران (۱۹۶۸)، رفتار زاویه‌ی اصطکاک ظاهری خاک با افزایش میزان درصد رطوبت مطابق شکل ۱۲ است که با شکل ۱۱ مطابقت دارد. اشباع شدن خاک باعث کاهش وزن مخصوص مؤثر خاک می‌شود و در نتیجه منجر به کاهش مقاومت برکنش لوله‌ی مدفون می‌شود. رابطه‌ی ۱ که در سال ۲۰۰۱ ارائه شده است،^[۱۸] نیز این واقعیت را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین مقایسه‌ی نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی نشان می‌دهند که میزان

مقاومت کششی خاک در حالت استفاده از ژئوگرید و مهار - شبکه، باعث تشکیل مقاومت افقی برشی در توده‌ی خاک می‌شود و ناحیه‌ی مؤثر از برکنش لوله را به سمت طرفین لوله و زیر آن گسترش می‌دهند و در نهایت، باعث بزرگ‌تر شدن گوه‌ی گسیختگی خاک و در نتیجه بسیج شدن نیروهای بیشتری جهت افزایش ظرفیت برکنش لوله می‌شوند.

۱.۷. مطالعات پارامتریک

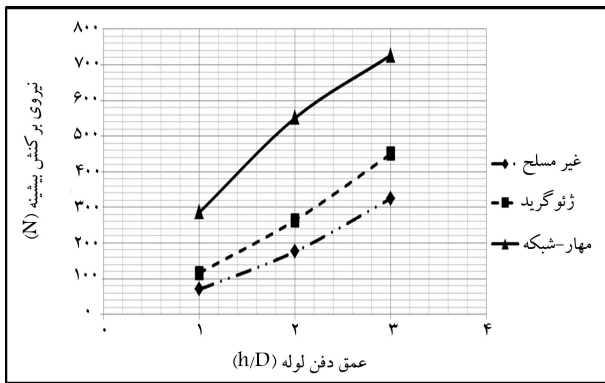
ظرفیت برکنش خطوط لوله‌ی مدفون در ماسه‌ی مسلح وابسته به پارامترهای مختلفی، نظیر: نوع مصالح پرکننده، قطر لوله، میزان رطوبت خاک، عرض و تعداد لایه‌های مسلح‌کننده‌ی خاک، وزن مخصوص خاک، عمق دفن لوله و محل نصب لایه‌ی مسلح‌کننده است. در پژوهش حاضر، مدل‌های مختلفی جهت آنالیز میزان و نحوه‌ی اثرگذاری هریک از پارامترهای مذکور در ظرفیت برکنش خطوط لوله‌ی مدفون ساخته شد، که نتایج مطالعات مذکور در ادامه ارائه شده است.

۱.۷.۱. اثر نوع خاک

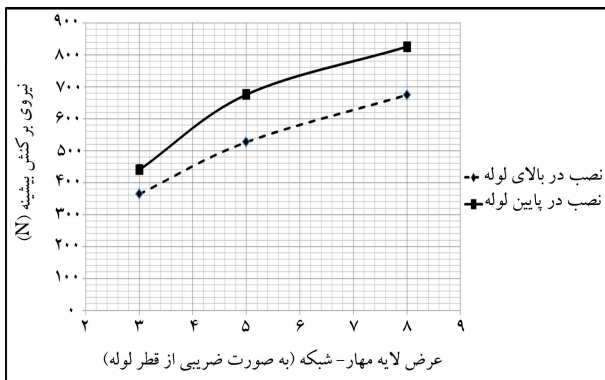
جنس مصالح پرکننده روی لوله، تأثیر بسزایی در میزان مقاومت برکنش آن و میزان بازدهی مصالح مسلح‌کننده‌ی خاک دارد. علت آن به تغییر زاویه‌ی اصطکاک خاک، چسبندگی خاک، وزن مخصوص خاک، زاویه‌ی اصطکاک بین خاک و ژئوگرید و زاویه‌ی اصطکاک بین خاک و میکرومهارها بر می‌گردد. شکل ۱۰، نحوه‌ی تغییر بیشینه‌ی مقاومت برکنش لوله با تغییر نوع مصالح را برای ۳ حالت غیرمسلح، مسلح با ژئوگرید و مسلح با سیستم مهار - شبکه نشان می‌دهد. در تمامی ۹ آزمایش صورت‌گرفته در این مرحله، نمونه‌ها از لوله به قطر ۱۰۰ میلی‌متر، عمق دفن ۲۰۰ میلی‌متر، مسلح‌کننده‌ی تک‌لایه‌ی با عرض ۵۰ میلی‌متر و روی لوله و آماده‌سازی نمونه‌ها در شرایط کاملاً یکسان انتخاب شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱۰ نیز مشهود است، هر چه مصالح درشت‌تر انتخاب شوند، مقاومت برکنش لوله افزایش خواهد یافت. مهم‌ترین علت این مسئله نیز افزایش وزن مخصوص خاک و زاویه‌ی اصطکاک داخلی آن است. اما با افزایش اندازه‌ی دانه‌های خاک، میزان کارایی مصالح مسلح‌کننده‌ی خاک کاهش می‌یابد. چنانکه بازدهی استفاده از ژئوگرید نسبت به حالت غیرمسلح برای ماسه‌ی سیلتی، ماسه، و شن به ترتیب برابر ۱۳۰، ۱۲۳ و ۱۱۷ درصد و بازدهی سیستم مهار - شبکه نسبت به حالت غیرمسلح برای ماسه‌ی سیلتی، ماسه، و شن به ترتیب برابر ۲۰۰، ۱۹۲ و ۱۸۲ درصد بوده است. علت این مسئله نیز می‌تواند کاهش زاویه‌ی اصطکاک بین مصالح مسلح‌کننده و ذرات خاک با افزایش اندازه‌ی دانه‌های خاک باشد.

۱.۷.۲. اثر میزان رطوبت خاک

جهت بررسی اثر میزان رطوبت خاک پرکننده روی لوله در مقاومت برکنش آن و میزان کارایی سیستم مهار - شبکه، تعداد ۶ آزمایش با لوله به قطر ۵۰ میلی‌متر، عمق دفن ۱۰۰ میلی‌متر و مصالح مسلح‌کننده با عرض ۲۵ میلی‌متر در درصد رطوبت‌های کاملاً خشک، ۱۵٪ رطوبت، ۲۰٪ رطوبت، و کاملاً اشباع در خاک ماسه‌ی انجام شد، که در حالت اشباع کامل، تراز آب تا روی خاک بود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که میزان مقاومت برکنش لوله برای شرایط ذکر شده به ترتیب برابر ۵۵۱، ۵۸۱، ۶۰۰ و ۳۶۰ نیوتن است. شکل ۱۱، نمودار میزان بیشینه‌ی نیروی برکنش لوله با میزان درصد رطوبت ماسه‌ی پرکننده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۱



شکل ۱۳. تغییرات نیروی برکنش بیشینه‌ی لوله با تغییر عمق دفن آن در ماسه‌ی کم تراکم.



شکل ۱۴. تغییرات مقاومت برکنش لوله با عرض لایه‌ی مهار - شبکه به صورت نصب در بالا و پایین لوله.

مذکور، لایه‌ی مسلح‌کننده‌ی مهار - شبکه با عرض‌های ۳، ۵ و ۸ برابر قطر لوله استفاده شدند. همچنین در یکی از مدل‌ها نیز لایه‌ی ژئوگرید با عرض ۳ برابر قطر لوله استفاده شد تا با نتایج کار پژوهش اخیر، مقایسه‌ی صحت‌سنجی صورت گیرد. نتایج حاصل از هر یک از حالت‌های ذکرشده در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. مقایسه‌ی این نتایج با نتایج مدل‌هایی که در آن‌ها لایه‌ی مسلح‌کننده بر روی لوله نصب شده باشد، نشان می‌دهند که نصب لایه‌ی مسلح‌کننده در زیر لوله باعث افزایش مقاومت برکنش آن می‌شود. این افزایش برای ژئوگریدها در حالتی که عرض آن ۳ برابر قطر لوله باشد، تقریباً ۲۶٪ است، که با نتایج پژوهش اخیر^[۲۰] که این مقدار را حدود ۲۳٪ به دست آورده بودند، مطابقت خوبی دارد.

مقدار نیروی برکنش بیشینه‌ی اندازه‌گیری شده توسط مدل‌سازی عددی برای هر یک از عرض‌های سیستم مهار - شبکه در دو حالت نصب در بالا و نصب در پایین در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، که مطابق آن با نصب لایه‌ی مهار - شبکه با عرض ۵ برابر قطر لوله در زیر لوله می‌توان تا حدود ۲۸٪ کارایی آن را نسبت به نصب در بالای لوله افزایش داد. شکل ۱۴ همچنین نشان می‌دهد که با افزایش عرض لایه‌ی مسلح‌کننده، مقاومت برکنش لوله نیز افزایش می‌یابد و شیب شروع مذکور در فاصله‌ی عرض ۳ تا ۵ برابر قطر لوله، بیشتر است و بعد از آن شروع به کاهش می‌کند. این رفتار دقیقاً در خصوص تسلیح خاک جهت افزایش ظرفیت باربری پی‌ها نیز تکرار می‌شود. بنابراین کارایی لایه‌ی مسلح‌کننده در عرض حدود ۵ برابر قطر لوله، بیشترین مقدار را خواهد داشت.

دلیل افزایش مقاومت برخاست خط لوله در حالت نصب لایه‌ی مسلح‌کننده در

افزایش مقاومت برکنش لوله برای ماسه‌ی مسلح با ژئوگرید و سیستم مهار - شبکه در حالت خشک به ترتیب حدود ۳۰ و ۱۰۲ درصد هستند؛ در حالی که این مقادیر در حالت اشباع به حدود ۱۹ و ۸۷ درصد کاهش می‌یابند. بنابراین راندمان سیستم‌های مسلح‌کننده‌ی خاک نیز در خاک‌های اشباع کاهش می‌یابد.

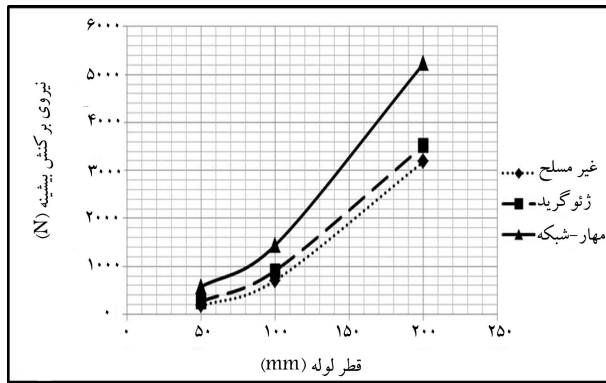
۳.۷. اثر عمق دفن لوله

جهت بررسی اثر عمق، آزمون‌ها و مدل‌های M۱ تا M۹ اجرا شده‌اند. آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، نتایج مشابهی را نشان می‌دهند. نتایج حاصل از نمونه‌های مذکور در مطالعه‌ی آزمایشگاهی در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. لوله‌ی بی به قطر ۵۰ میلی‌متر، خاک با وزن مخصوص ۱۴/۲ کیلو نیوتن بر مترمکعب، و یک لایه‌ی مسلح‌کننده با عرض ۲۵۰ میلی‌متر در تمام مدل‌های ذکرشده و نمونه‌های آزمایشگاهی ثابت هستند. مدل‌های M۱، M۴، M۷ برای خاک غیرمسلح و به ترتیب با عمق دفن ۱۵۰، ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌متر هستند. بیشینه‌ی مقاومت برکنش اندازه‌گیری شده برای مدل‌های آزمایشگاهی به ترتیب برابر ۳۲۵، ۱۷۶ و ۷۰ نیوتن به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، تغییرات نیروی برکنش با تغییرات عمق دفن لوله، رابطه‌ی خطی ندارد یعنی با افزایش عمق، نیروی برکنش با شیب تندتری افزوده می‌شود. عیناً نتایج مدل‌سازی عددی نیز همین روند را بیان می‌کنند که مشابه یافته‌های برخی پژوهشگران است.^[۲۰] نمونه‌های M۲، M۵ و M۸ نیز برای خاک مسلح با یک لایه‌ی ژئوگرید در روی لوله هستند که به ترتیب عمق دفن ۱۵۰، ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌متر دارند.

بیشینه‌ی مقاومت برکنش مدل‌های آزمایشگاهی ذکرشده به ترتیب برابر ۴۵۰، ۲۶۴ و ۱۱۶ نیوتن به دست آمده‌اند که مطابقت مناسبی با یافته‌های برخی دیگر از پژوهشگران دارند.^[۲۰] همچنین نمونه‌های M۳، M۶ و M۹ برای خاک مسلح با یک لایه‌ی سیستم مهار - شبکه، درست در روی لوله قرار دارند که عمق دفن آن‌ها نیز به ترتیب ۱۵۰، ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌متر است. بیشینه‌ی مقاومت برکنش مدل‌های آزمایشگاهی مذکور به ترتیب برابر ۷۲۷، ۵۵۱ و ۲۸۶ نیوتن به دست آمده است. آن‌ها نشان می‌دهند که در ماسه‌های کم تراکم مسلح‌شده با مهار - شبکه، مقاومت برکنش نسبت به حالت غیرمسلح برای عمق دفن ۵۰ میلی‌متر برابر ۴۰۸٪، برای عمق ۱۰۰ میلی‌متر برابر ۳۱۳٪ و برای عمق ۱۵۰ میلی‌متر برابر ۲۲۳٪ است. بنابراین کارایی سیستم‌های مسلح‌کننده در عمق‌های دفن کوچک‌تر، بیشتر از کارایی آن‌ها در عمق‌های دفن بزرگ‌تر است و به همین علت با افزایش عمق دفن، شیب نمودار حالت‌های مسلح کاهش پیدا می‌کند. علت پدیده‌ی مذکور این است که با افزایش عمق دفن لوله، مصالح مسلح‌کننده‌ی خاک سهم کمتری از مقاومت برکنش آن را بر عهده خواهند داشت و سهم بیشتر به نیروهای وزن خاک و اصطکاک داخلی آن مربوط می‌شود. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی نیز تقریباً مشابه نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی است. با این تفاوت که نتایج مدل‌سازی عددی در حالت غیرمسلح به میزان ناچیزی بیشتر از نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی است، ولی در حالت‌های مسلح به میزان حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد کمتر است.

۴.۷. اثر عرض و محل قرارگیری لایه‌ی مسلح‌کننده

جهت بررسی اثر محل نصب لایه‌ی مسلح‌کننده در مقاومت برکنش لوله‌ی مدفون، علاوه بر مدل‌های آزمایشگاهی و عددی ساخته شده به صورت نصب لایه‌ی مسلح‌کننده بر روی لوله، تعداد ۳ مدل نیز به صورت نصب لایه‌ی مهار - شبکه در زیر لوله به روش ارائه شده‌ی در سال ۲۰۱۲^[۲۰] و مطابق شکل ۱ ساخته شدند. در مدل‌های



شکل ۱۶. تغییرات ظرفیت برکنش بیشینه‌ی آزمایشگاهی لوله‌ی مدفون با تغییرات قطر لوله.

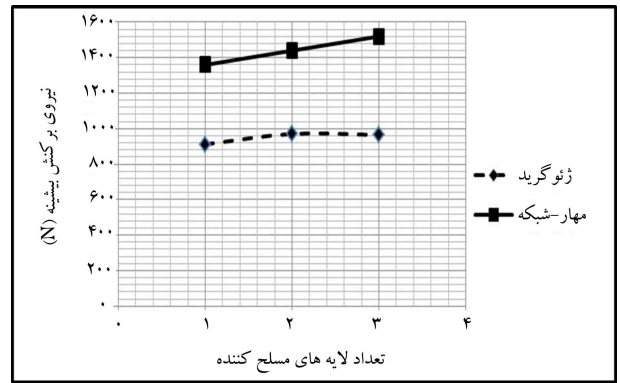
شکل ۱۵. تغییرات ظرفیت برکنش بیشینه‌ی لوله‌ی مدفون با تعداد لایه‌های مسلح‌کننده روی آن.

شکل ۱۶. تغییرات ظرفیت برکنش بیشینه‌ی آزمایشگاهی لوله‌ی مدفون با تغییرات قطر لوله. مشخصات آزمایشگاهی: M_{22} , M_{23} , M_{24} , M_{25} و M_{26} مشابه یکدیگر است و تفاوت مدل‌های مذکور فقط در انتخاب قطر لوله‌ی آن‌هاست. قطر لوله‌ها برابر ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر انتخاب شده است تا تأثیر قطر لوله در میزان راندمان سیستم مهار-شبهه و ژئوگرید بررسی شود. مقاومت برکنش بیشینه‌ی به‌دست آمده از هر یک از مدل‌های آزمایشگاهی در شکل ۱۶ ترسیم شده است.

با مراجعه به شکل ۱۶، واضح است که ظرفیت برکنش لوله با افزایش قطر آن بیشتر می‌شود؛ اما افزایش مذکور غیرخطی است. علت افزایش مقاومت برخاست با افزایش قطر لوله، بزرگ‌تر شدن حجم خاک روی لوله به تبع افزایش عرض و ارتفاع خاک روی لوله و در نتیجه افزایش وزن خاک روی لوله و بزرگ‌تر شدن منحنی گسیختگی خاک است. راندمان استفاده از لایه‌های مسلح‌کننده برای افزایش ظرفیت برکنش لوله‌ها، با افزایش قطر لوله کاهش می‌یابد. طوری که مقاومت برکنش لوله با قطر ۵۰ میلی‌متر و مسلح‌شده با ژئوگرید حدود ۵۰٪ و مسلح‌شده با مهار-شبهه حدود ۲۲۶٪ بیشتر از حالت غیرمسلح در خاک‌های با تراکم کم است. اما این مقادیر برای لوله با قطر ۱۰۰ میلی‌متر به ترتیب برابر ۲۸ و ۱۰۳ درصد و برای لوله با قطر ۲۰۰ میلی‌متر برابر ۱۰ و ۶۴ درصد هستند. به عبارتی با افزایش قطر لوله، میزان تأثیرگذاری سیستم مسلح‌کننده کاهش می‌یابد که علت آن نیز کاهش سهم مصالح مسلح‌کننده از مقاومت برکنش لوله با افزایش قطر آن است. چرا که هر چه قطر لوله افزایش می‌یابد، سهم وزن خاک و مشخصات ژئوتکنیکی آن در افزایش ظرفیت برکنش لوله بیشتر خواهد شد و نقش تسلیح خاک کاهش خواهد یافت. بنابراین استفاده از لایه‌های مسلح‌کننده در لوله‌های با قطر کمتر مؤثرتر و اقتصادی‌تر خواهد بود. نتایج مدل‌سازی عددی نیز تا حد زیادی مشابه مدل‌سازی آزمایشگاهی است؛ اما مدل‌سازی عددی، راندمان سیستم مهار-شبهه را تا حد ۲۰٪ کمتر از مدل‌سازی آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

۸. نتیجه‌گیری

یک مطالعه‌ی سه بعدی با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی در ظرفیت برکنش لوله‌های مدفون انجام شد، تا روشی جدید با استفاده از ژئوگرید و مهار-شبهه به‌عنوان المان مسلح‌کننده‌ی خاک جهت بهبود مقاومت برکنش لوله‌ها ارائه شود. با توجه به محدودیت‌های مختلف موجود در مدل‌سازی فیزیکی، نظیر: میزان نیروی برکنش اعمالی، ابعاد جعبه، نمونه‌سازی همگن و سایر محدودیت‌ها، آزمایش‌ها بر روی لوله‌های با قطر کوچک انجام شد. دستاوردهای مطالعه به این



شکل ۱۵. تغییرات ظرفیت برکنش بیشینه‌ی لوله‌ی مدفون با تعداد لایه‌های مسلح‌کننده روی آن.

زیر لوله، افزایش تنش مؤثر خاک در محل نصب لایه‌ی مسلح‌کننده، نسبت به نصب در بالای لوله است. افزایش تنش مؤثر نیز باعث افزایش درگیری لایه‌ی مسلح‌کننده با خاک می‌شود و در نهایت، منجر به افزایش مقاومت برخاست خواهد شد.

۵.۷. اثر تعداد لایه‌های مسلح‌کننده (N)

آنالیز عددی و مدل‌سازی آزمایشگاهی نشان می‌دهند که مقاومت برکنش لوله با افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده (N)، افزایش چندانی نمی‌یابد. مدل‌های M_{14} ، M_{15} ، M_{16} ، M_{17} ، M_{22} و M_{23} جهت بررسی تأثیر افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده در مقاومت برکنش لوله‌ها در دو حالت استفاده از ژئوگرید و مهار-شبهه ساخته شده‌اند. در مدل‌های ذکرشده، قطر لوله برابر ۱۰۰ میلی‌متر، وزن مخصوص خاک برابر ۱۴۷۲ کیلو نیوتن بر متر مکعب و عمق دفن آن ۲۰۰ میلی‌متر هستند. لایه‌های مسلح‌کننده با فاصله‌ی عمودی ۷۰ میلی‌متر از هم قرار گرفته‌اند که اولین لایه نیز دقیقاً روی لوله نصب شده است. تغییرات ظرفیت برکنش بیشینه‌ی لوله‌ی مدفون با تعداد لایه‌های مسلح‌کننده روی آن در شکل ۱۵ که از نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی تهیه شده است، به صورت واضح نشان می‌دهند که تعداد لایه‌های مسلح‌کننده تأثیر بسزایی در مقاومت برکنش ندارد. در واقع استفاده از یک لایه‌ی مسلح‌کننده، درست بر روی لوله، تقریباً تأثیر چند لایه‌ی مسلح‌کننده را ایفا می‌کند. مدل‌سازی عددی نیز نتایج مشابهی را نشان می‌دهد. پس می‌توان در مورد ظرفیت برکنش لوله‌ها نتیجه گرفت که استفاده از یک لایه‌ی مسلح‌کننده بهتر است و به‌کارگیری چند لایه، به هیچ عنوان به صرفه نیست. علت این موضوع ثابت بودن شرایط زاویه‌ی ناحیه‌ی گسیختگی است. طوری که لایه‌های بالایی لایه‌ی اول که درست روی لوله نصب شده‌اند، در ناحیه‌ی گسیختگی خاک بالایی لوله قرار گرفته‌اند و دچار گسیختگی کلی می‌شوند و عملاً تأثیر چندانی در مقاومت برخاست لوله نخواهند داشت. نتیجه‌ی مذکور مشابه یافته‌های برخی پژوهشگران برای لوله‌های مدفون،^[۸] برای صفحات مهاری،^[۲۲] و برای مهارهاست،^[۲۳] که تأکید می‌کنند عدد لایه‌های مسلح‌کننده تأثیر بسزایی در مقاومت برکنش ندارند. همچنین شکل ۱۵ نشان می‌دهد که تأثیر لایه‌های اضافی مسلح‌کننده در حالت مسلح با مهار-شبهه بیشتر از حالت مسلح با ژئوگرید است که علت آن بسیج شدن بخش‌های بیشتری از خاک روی لوله در حالت استفاده از مهار-شبهه است، که در شکل‌های ۸ و ۹ نیز مشهود است.

۶.۷. اثر قطر لوله (D)

همان‌طور که از جدول ۲ مشاهده می‌شود، شرایط مدل‌های M_4 ، M_5 ، M_6 ، M_{21}

خوبی بین دو روش مذکور دارد، با این تفاوت که نتایج مدل‌سازی عددی در حالت‌های غیرمسلح به میزان ناچیزی بیشتر از نتایج مطالعات آزمایشگاهی است؛ ولی در حالت‌های مسلح، نتایج آزمایشگاهی مقادیر بیشتری را نشان می‌دهند.

- با افزایش قطر لوله، میزان تأثیرگذاری سیستم مسلح‌کننده کاهش پیدا می‌کند. بنابراین استفاده از لایه‌های مسلح‌کننده در لوله‌های با قطر کمتر، مؤثرتر و اقتصادی‌تر است.
- هر چه مصالح روی لوله، درشت‌تر انتخاب شوند، مقاومت برکنش لوله افزایش خواهد یافت. اما با افزایش اندازه‌ی دانه‌های خاک، میزان کارایی مصالح مسلح‌کننده‌ی خاک کاهش می‌یابد.
- مقایسه‌ی نتایج مطالعات آزمایشگاهی و نتایج آنالیز عددی نشان از مطابقت خوبی بین دو روش مذکور دارد، با این تفاوت که نتایج مدل‌سازی عددی در حالت‌های غیرمسلح به میزان ناچیزی بیشتر از نتایج مطالعات آزمایشگاهی هستند؛ ولی در حالت‌های مسلح، نتایج آزمایشگاهی مقادیر بیشتری را نشان می‌دهند.
- استفاده از یک لایه‌ی مسلح‌کننده درست بر روی لوله، تقریباً تأثیر چند لایه‌ی مسلح‌کننده را دارد و به‌کارگیری چند لایه، به هیچ‌عنوان به صرفه نیست.

صورت ارائه می‌شود:

- مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که سیستم تسلیح مهار-شبهه می‌تواند ظرفیت برکنش لوله‌های مدفون را تا ۲/۵ برابر ژئوگرید معمولی و تا ۴ برابر حالت غیرمسلح در ماسه‌ی خشک افزایش دهد. این افزایش به علت گسترش بیشتر سطح گسیختگی خاک است. مدل‌سازی عددی نیز نتایج مشابهی را نشان می‌دهد.
- با افزایش میزان رطوبت خاک تا حدود ۲۰٪، میزان ظرفیت برکنش لوله نیز افزایش می‌یابد. اما پس از رطوبت ۲۰٪، افزایش درصد رطوبت باعث کاهش شدید ظرفیت برکنش لوله خواهد شد.
- اگرچه افزایش عمق دفن لوله موجب افزایش مقاومت برکنش آن می‌شود، اما باعث کاهش کارایی سیستم‌های مسلح‌کننده می‌شود. بنابراین کارایی سیستم‌های مسلح‌کننده در عمق‌های دفن کوچک‌تر، بیشتر از کارایی آن‌ها در عمق‌های دفن بزرگ‌تر است.
- با نصب لایه‌ی مهار-شبهه در زیر لوله می‌توان تا حدود ۲۸٪ کارایی آن را افزایش داد. همچنین با افزایش عرض لایه‌ی مسلح‌کننده، مقاومت برکنش لوله نیز افزایش می‌یابد. کارایی لایه‌ی مسلح‌کننده با عرض حدود ۵ برابر قطر لوله، بیشترین مقدار را نشان می‌دهد.
- مقایسه‌ی نتایج مطالعات آزمایشگاهی و نتایج آنالیز عددی نشان از مطابقت

پانویس‌ها

1. uplift resistance
2. upheaval buckling
3. peak uplift resistance

منابع (References)

1. Koseki, J., Matsuo, O. and Tanaka, S. "Uplift damage to sewer pipes in towada city caused by the 1994 sanriku-haruka-oki earthquake", *Proceedings of the Second Japan-UK Workshop on Implications of Recent Earthquakes on Seismic Risk, Tokyo Institute of Technology, Tokyo*, pp. 97-108 (1998).
2. Shinozuka, M., Ballantyne, D., Borchardt, R. and et al. "The hanshin-awaji earthquake of january 17, 1995, performance of lifelines", Technical Report of NCEER, Buffalo, NY (1995).
3. Mohri, Y., Kawabata, T. and Fujita, N. "Large-scale experiment on shallow cover for buried pipeline reinforced with geosynthetics", *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, **52**, pp. 1-13 (2001).
4. Newson, T.A. and Deljouy, P. "Finite element modelling of upheaval buckling of buried offshore pipelines in clayey soils", *Soil and Rock Behavior and Modeling*, pp. 351-358 (2006).
5. Thusyanthan, N.I., Ganesan, S.A., Bolton, M.D. and et al. "Upheaval buckling resistance of pipelines buried in clayey backfill", *18th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver, British Columbia, Canada*, pp. 6-11 (2008).
6. Selvadurai, A.P.S. "Enhancement of the uplift capacity of buried pipelines by the use of geogrids", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **124**(8), pp.211-216 (1999).
7. Faizi, K., Jahed Armaghani, D., Momeni E. and et al. "Uplift resistance of buried pipelines enhanced by geogrid", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **51**(4), pp. 188-195 (2014).
8. Faizi, K., Jahed Armaghani, D., Sohaei, H. and et al. "Deformation model of sand around short piles under pullout test", *Journal of Measurement*, **63**, pp. 110-119 (2015).
9. Mosallanezhad, M., Hataf, N. and Ghahramani, A. "Experimental study of bearing capacity of granular soils reinforced with innovative grid-anchor system", *Geotech. Geol. Eng.*, **26**(3), pp. 299-312 (2008).
10. Alamshahi, S. and Hataf, N. "Bearing capacity of strip footings on sand slopes reinforced with geogrid and gride-anchor", *Geotext. Geomembr.*, **27**(3), pp. 217-226 (2009).
11. Mosallanezhad, M., Hataf, N. and Ghahramani, A. "Three dimensional bearing capacity analysis of granu-

- lar soils reinforced with innovative grid-anchor system”, *Iranian Journal of Science and Technology Transaction A, Science.*, **34**(24), pp. 319-334 (2010).
12. Boushehrian, A.H., Hataf, N. and Ghahramani, A. “Numerical study of cyclic behavior of shallow foundations on sand reinforced with geogrid and grid-anchor”, *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, **3**(10), pp. 607-610 (2009).
 13. Boushehrian, A.H., Hataf, N. and Ghahramani, A. “Modeling of the cyclic behavior of shallow foundations resting on geomesh and grid-anchor reinforced sand”, *Geotext. Geomembr.*, **29**(3), pp. 242-248 (2011).
 14. Hataf, N., Boushehrian, A.H. and Ghahramani, A. “Experimental and numerical behavior of shallow foundations on sand reinforced with geogrid and grid-anchor under cyclic”, *Sci. Iran. Trans. A-Civil Eng.*, **17**(1), pp. 1-10 (2010).
 15. Mosallanezhad, M., Sadat Taghavi, S.H., Hataf, N. et al. “Experimental and numerical studies of the performance of the new reinforcement system under pull-out conditions”, *Geotextiles Geomembranes*, **44**(1), pp. 70-80 (2016).
 16. Mahdi, M. and Katebi, H. “Numerical modeling of uplift resistance of buried pipelines in sand, reinforced with geogrid and innovative grid-anchor system”, *Geomechanics and Engineering*, **9**(6), pp. 757-774 (2015).
 17. Itasca. FLAC-3D Version 5.0, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis (2012).
 18. Cheuk, C.Y., White, D.J. and Bolton, M.D. “Uplift mechanics of pipes buried in sand”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **134**(2), pp. 154-163 (2008).
 19. Gill, W.R. and Vanden Berg, G.E. “Soil dynamics in tillage and traction”, Agriculture Handbook No. 316, USDA-Agricultural Research Service, Washington. D.C. (1968).
 20. Saboya, F.A., Santiago, P.C., Martins, R.R. et al. “Centrifuge test to evaluate the geotechnical performance of anchored buried pipelines in sand”, *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, ASCE*, **3**(3), pp. 84-97 (2012).
 21. Wang, J., Haigh, S.K., Forrest, G. and et al. “Mobilization distance for upheaval buckling of shallowly buried pipelines”, *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, ASCE*, **3**(4), pp. 106-114 (2012).
 22. Niroumand, H., Kassim, K.A. and Nazir, R. “The influence response of symmetrical anchor of soil reinforcement on the uplift plate embedded in sand”, *Elsevier, Journal of Measurement*, **46**(8), pp. 2608-2629 (2013).
 23. Ghosh, A. and Bera, A.K. “Effect of geotextile ties on uplift capacity of anchors embedded in sand”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **28**(5), pp. 567-577 (2010).