مدل‌سازی عددی تأثیر تسلیح خاک بر مقاومت برخاست خطوط لوله مدفون

مجید مهدی*، هوشنگ کاتبی؛
دانشگاه تبریز، دانشکدهٔ عمران

تاریخ: دریافت ٩٤/١٠/٢٨ **پذیرش** ٩٥/٠٦/٠٦

چکیده

تسلیح خاک به‌وسیلهٔ ژئوسنتتیک‌ها روشی مؤثر برای افزایش مقاومت برخاست[1] سازه‌های مدفون است. در این مقاله از المان مسلح‌کنندهٔ جدیدی که شامل تعدادی صفحات مهاری است و به ژئوگرید متصل می‌شود و موجب افزایش مقاومت بیرون‌کشیدگی ژئوگرید می‌شود استفاده شده است که به آن سیستم مهار- شبکه گفته می‌شود. بررسی عددی سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC-3D برای بررسی مقاومت برخاست خطوط لولهٔ مدفون در ماسهٔ مسلح‌شده با این سیستم جدید انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که به‌علت گسترده‌تر شدن سطح گسیختگی خاک، استفاده از این سیستم مهار-شبکه در تودهٔ خاک، مقاومت برخاست خطوط لولهٔ مدفون را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. طوری‌که جهت لوله با قطر خارجی ٥٠ میلی‌متر، استفاده از سیستم مسلح‌کننده مهار- شبکه موجب افزایش مقاومت برخاست لوله به‌میزان ٢٫٣ برابر حالت استفاده از ژئوگرید و ٣٫٧ برابر حالت بدون مسلح‌کننده می‌شود. در مقایسه با چند لایهٔ مسلح‌کننده، بازدهی استفاده از یک لایهٔ مسلح‌کننده بیش‌تر است. هم‌چنین بازدهی لایهٔ مسلح‌کننده در خاک‌های سست بیش‌تر از خاک‌های متراکم است. به‌علاوه، با افزایش قطر لوله، تأثیر لایهٔ مسلح‌کننده کم‌تر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: مقاومت برخاست، خطوط لولهٔ مدفون، مدل‌سازی عددی، خاک مسلح، ژئوگرید، مهار- شبکه.

***نویسنده مسئول** m.mahdi@tabrizu.ac.ir

1. Uplift Resistance

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

مقدمه

خطوط لولهٔ آب و انرژی از جمله شریان‌های حیاتی هستند و گسترش هزاران کیلومتری آن‌ها در کشور و جهان نشان از اهمیت و نیاز مبرم به این شریان‌ها دارد. آسیب به خطوط لولهٔ آب باعث اختلال در بهداشت و سلامت عمومی جامعه می‌شود. هم‌چنین خرابی در خطوط لولهٔ انرژی می‌تواند علاوه بر قطع انرژی سبب ایجاد آتش‌سوزی‌های عظیم شده و هم‌چنین به‌علت توقف فعالیت مجتمع‌های اقتصادی و صادرات فراورده‌های نفت و گاز ضررهای مالی بسیاری به دنبال داشته باشد. از این رو، اهمیت شریان‌های حیاتی باعث شده است محققان برای ارتقاء قابلیت اطمینان استفاده از خطوط لوله تحقیقات وسیعی را انجام دهند.

عوامل مخرب خطوط لوله مدفون بسیار گسترده هستند. یکی از این عوامل مهم، به‌خصوص در لوله‌های گاز، برخاست لوله است. چنان‌که کوزکی و همکاران [۱] در رابطه با زلزلهٔ سال ۱۹۹۳ کوشیرو-آکی، شینزوکا و همکاران [۲] در رابطه با زلزلهٔ هانشین-آواجی و سیتار و همکاران [۳] در رابطه با زلزلهٔ سال ۱۹۹۵ هایگوکن- نامبو، خرابی بسیاری از خطوط لوله را برخاست عنوان کرده‌اند. آن‌ها عنوان کردند که در بسیاری از غوطه‌وری‌ها، روان‌گرایی رخ نداده است بلکه در زمان زلزله و بعد از آن، به‌علت کاهش پارامترهای مقاومت برشی خاک، ضریب اطمینان نیروی مقاوم در برابر برخاست کاهش یافته و نیروی برخاست حاکم شده است. هم‌چنین در گزارش ایشان آمده که بسیاری از خطوط لوله به همراه منهول آن‌ها به علت نیروی برخاست، تا ارتفاع ۱٫۵ متر از زمین به بیرون پرتاب شده‌اند. یک عامل مهم دیگر که موجب برخاست خطوط لوله مدفون می‌شود، روانگرایی است. روانگرایی باعث کاهش مقاومت برشی خاک شده و با کاهش ضریب اطمینان باعث غوطه‌وری می‌گردد از این رو، محققان مختلف پژوهش‌های مختلفی در این رابطه انجام داده‌اند [٤].

دیگر عامل مهم برخاست لوله از ترانشه تغییرات دمایی زیاد در طول لوله است. افزایش زیاد دمای لوله باعث کمانش لوله و خارج شدن از ترانشه می‌شود که اصطلاحاً به این پدیده کمانش بالازدگی[۲] گفته می‌شود. با افزایش زیاد دمای سیال داخل لوله، دمای محوری لوله

2- Upheaval Buckling

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

می‌تواند زیاد شده و به‌وسیلهٔ اصطکاک بین لوله و خاک اطراف و هم‌چنین اتصالات انتهایی تحمل شود، اما چنان‌چه این تغییرات دمایی به حدی زیاد باشد که بر نیروهای مقاوم غلبه کند، می‌تواند منجر به کمانش لوله و در نهایت خارج شدن آن از ترانشه شود [۵].

رفتار خطوط لولهٔ مدفون در هنگام برخاست، به‌طور چشم‌گیری 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 نگرانی‌های نگه‌داری می‌شود و در نهایت نیاز به یک لوله با مقطع قویتر خواهد داشت [٦]. از این رو، استفاده از روش‌هایی غیر از افزایش عمق دفن لوله، برای افزایش مقاومت برخاست آن بسیار مفید است. در همین راستا تحقیقات گسترده‌ای درخصوص رفتار خطوط لوله مدفون هنگام برخاست انجام شده است. یکی از این پژوهش‌ها، بررسی عددی المان محدود بر کمانش بالازدگی خطوط لولهٔ مدفون در خاک رس به‌وسیلهٔ نیوسن و همکاران است. پژوهش‌های ایشان نشان دادند که عامل‌های برخاست خطوط لوله مشابه صفحات مهاری است با این تفاوت که حدود ٤/۵ تا ٦/۵ درصد بیش‌تر است [۷].

توسیانتن و همکاران نیز یک‌سری آزمایش به‌وسیلهٔ مدل‌های سانتریفیوژ انجام دادند تا مقاومت برخاست لوله‌ها را در خاک‌های چسبنده بررسی کنند. در این بررسی‌ها، جابه‌جایی قائم لوله، فشار آب حفره‌ای اضافی در بالای لوله و مقاومت خاک روی لوله اندازه‌گیری شدند. نتایج این آزمایش‌ها نشان دادند که عمق دفن لوله ارتباط خوبی با مقاومت برخاست آن دارد. به‌علاوه، ایشان نتیجه گرفتند که اثر یک لایه درشت‌دانه بر خاک چسبنده، اثر بیش‌تری بر میزان بیرون کشیده شدن لوله با سرعت زیاد و کم دارد [۸].

سلوادورای در سال ۱۹۸۹ تقریباً اولین کسی بود که تأثیر استفاده از ژئوگرید را در افزایش مقاومت برخاست خطوط لولهٔ مدفون بررسی آزمایشگاهی کرد. بررسی‌های ایشان نشان داد، استفاده از ژئوگرید باعث افزایش حدود ۱۰۰ درصدی مقاومت برخاست خط لوله می‌شود. اما هر چه قطر لوله افزایش می‌یابد، ژئوگرید سهم کم‌تری از مقاومت برخاست آن را دارد [۹].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

فیضی و همکاران نیز اخیراً در قالب یک پژوهش آزمایشگاهی، اثر تسلیح خاک کم‌تراکم به‌وسیلهٔ ژئوگرید را بر ظرفیت برخاست لوله‌های مدفون بررسی کردند. ایشان نتایج ۱۱ آزمایش انجام شده را با تحلیل عددی که به‌وسیلهٔ نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL انجام شد صحت‌سنجی کردند. یافته‌های ایشان اهمیت استفاده از ژئوگرید را در افزایش مقاومت برخاست لوله‌ها نشان می‌دهند. ایشان نشان دادند اگر چنانچه مقاومت برخاست حداکثر مدنظر باشد استفاده از چند لایه ژئوگرید، تأثیر چندانی نخواهد داشت [۱۰]، [۱۱].

استفاده از ترکیب ژئوگرید و مهار- شبکه به‌عنوان مصالح جدید مسلح کننده خاک، طی چند سال اخیر به‌صورت روشی نوآورانه مطرح شده است. تحقیقات زیادی در چند سال گذشته برای ارزیابی عملکرد این سیستم صورت گرفته است [۱۲]-[۱۸]. تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهند که استفادهٔ توأمان ژئوگرید و این میکرومهارها باعث افزایش ۲/۷٤ برابری ظرفیت باربری نهایی پی نسبت به‌حالت استفاده‌ی تنها از ژئوگرید و افزایش ٤/٤۳ برابری نسبت به‌حالت خاک غیرمسلح می‌شود [۱۷].چنان‌که تحقیقات گذشته نشان می‌دهند، استفاده از سیستم مهار- شبکه باعث افزایش فوق‌العاده راندمان ژئوگرید می‌شود. بنا براین استفاده از این سیستم می‌تواند در افزایش مقاومت برخاست خطوط لوله مدفون بسیار مفید باشد.

در این مقاله، استفاده از ژئوگرید و سیستم مهار- شبکه برای افزایش مقاومت برخاست خطوط لولهٔ مدفون مورد تحقیق قرار گرفته است. به‌همین منظور، مدل‌سازی عددی به تعداد ۳۳ مدل با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC-3D ساخته شده است. هم‌چنین برای صحت‌سنجی و کالیبراسیون مدل‌های عددی، از ٤ عدد مدل آزمایشگاهی که نویسندگان مقاله در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه تبریز ساخته‌انده، استفاده شده است.

مدل‌سازی آزمایشگاهی

در صورتی‌که هدف از نصب میکرومهارها افزایش مقاومت برخاست پی یا لولهٔ مدفون باشد این مهارها باید در زیر لایهٔ ژئوسینتتیک نصب شود. شکل ۱ نحوهٔ ساخت و به‌کارگیری سیستم مهار- شبکه برای افزایش مقاومت برخاست لولهٔ مدفون را به‌طور شماتیک نشان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

می‌دهد. در شکل ۱، حالت اول برای تسلیح خاک روی لوله به‌کار می‌رود و حالت دوم با بستن لایهٔ مسلح کننده به زیر لوله، باعث گیرداری بیش‌تر لوله می‌شود. در حالت دوم، لایهٔ مسلح‌کننده در طول لوله و در فواصل ۱۰ سانتی‌متری به آن بسته می‌شود

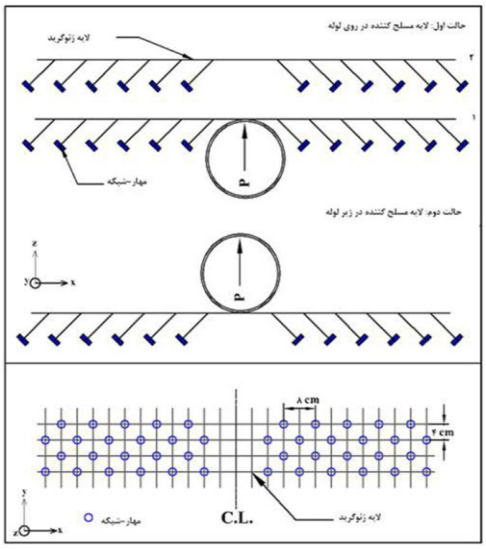
میکرومهارها از یک‌سری قطعات پلاستیکی به شکل استوانه ساخته شده‌اند. قطر صفحات به‌کار رفته ۳ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۱ سانتی‌متر است و با یک نوار به‌طول ۸ سانتی‌متر به ژئوگرید متصل شده و به‌صورت صفحات مهاری عمل می‌کنند. شکل ۲ نحوهٔ به‌کارگیری این المان‌ها را در محیط آزمایشگاه نشان می‌دهد. ژئوگرید به‌کار رفته در آزمایش‌ها دارای چشمه‌های ٤×٤ سانتی‌متر هستند. مشخصات فیزیکی ژئوگرید و مهارها در جدول ۱ ذکر شده است مجموعهٔ آزمایشگاهی شامل یک جعبه مکعبی با ابعاد ۱×۱×۱ متر، یک جک پنوماتیکی همراه با یک پمپ باد برای اعمال نیروی کششی به لوله و لودسل S شکل برای اندازه‌گیری نیروهای برخاست به‌کار گرفته شد. با توجه به این‌که بار کششی با یک جک پنوماتیکی به لوله اعمال می‌شود، آزمایش‌ها به‌صورت جابه‌جایی کنترل شده صورت گرفته است. از این رو، با کنترل دقیق سرعت جابه‌جایی اهرم کشنده جک، میزان جابه‌جایی لوله در حین بارگذاری به‌صورت ثابت و به میزان ۰/۰٤ میلی‌متر بر ثانیه ثابت شده است. دو طرف لوله با درپوش‌های پلاستیکی با اصطکاک ناچیز پوشانده شده تا اصطکاک سطحی بین لوله و جعبه به حداقل میزان کاهش یابد. سه وجه جعبه آزمایش از جنس ورق فولادی به‌ضخامت ۲۵ میلی‌متر ساخته شده است. وجه چهارم از ورق پلکسی‌گلاس انتخاب شد تا امکان مشاهده حرکات لوله درون جعبه مهیا شود. لوله‌هایی با قطر خارجی ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر از جنس پلیکا و به‌طول ۱۰۰۰ میلی‌متر در آزمایش‌ها استفاده شده است. خاک به‌کار رفته در آزمایش‌ها نیز مطابق خاک کم تراکم ذکر شده در جدول ۱ است

مدل‌سازی عددی

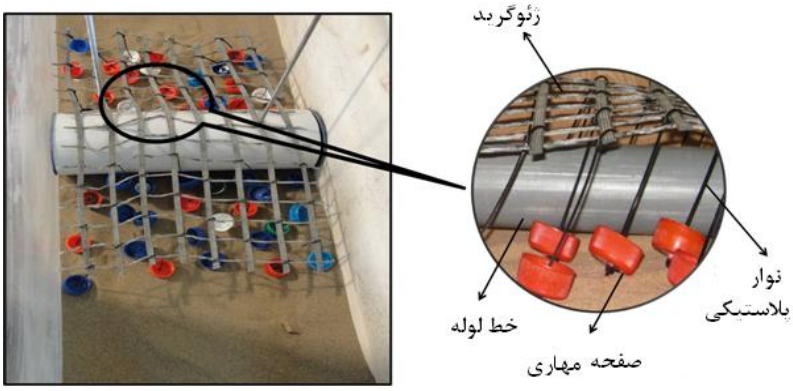
در این مقاله، از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC-3D (V5.0) برای مدل‌سازی رفتار لولهٔ مدفون در ماسهٔ مسلح‌شده با ژئوگرید و مهار- شبکه استفاده شد. در همین راستا، از آنالیز سه‌بعدی برای بررسی رفتار برخاست لوله‌های مدفون و تعیین اثر پارامترهای مهم نظیر قطر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

لوله، خشک یا اشباع بودن خاک، عرض و تعداد لایه‌های مسلح‌کنندهٔ خاک، وزن مخصوص خاک، عمق دفن لوله و محل نصب لایهٔ مسلح‌کننده، استفاده شد رفتار خاک به‌وسیلهٔ مدل موهر- کولمب مدل‌سازی شد. المان‌های مسلح‌کنندهٔ خاک با المان‌های سازه‌ای ژئوگرید و کابل که به‌صورت پیش فرض جزء المان‌های سازه‌ای موجود در نرم‌افزار هستند، مدل شدند.



شکل ۱. نحوهٔ چیدمان ژئوگرید و مهار- شبکه برای افزایش مقاومت برخاست لولهٔ مدفون در روش ابداعی



شکل ۲. استفاده از سیستم مهار- شبکه در آزمایشگاه

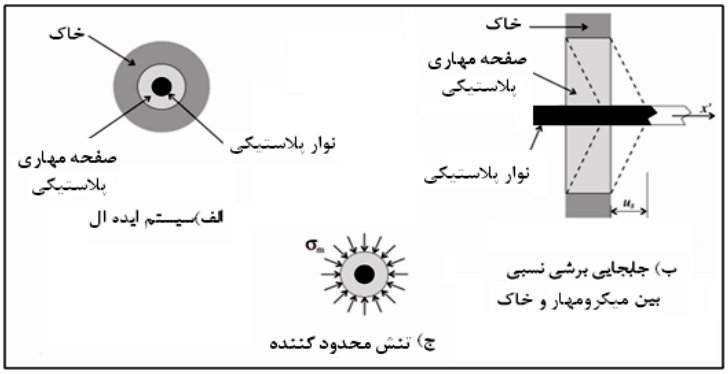
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

رفتار این المان‌ها فقط به‌صورت کششی استو هیچ‌گونه تنش خمشی یا فشاری را تحمل نمی‌کنند. اما رفتار این المان‌ها به‌صورت چشم‌گیری تحت تأثیر زاویهٔ اصطکاک بین خاک و المان، مقاومت چسبندگی بین خاک و المان و تنش مؤثر خاک در تراز المان هستند.

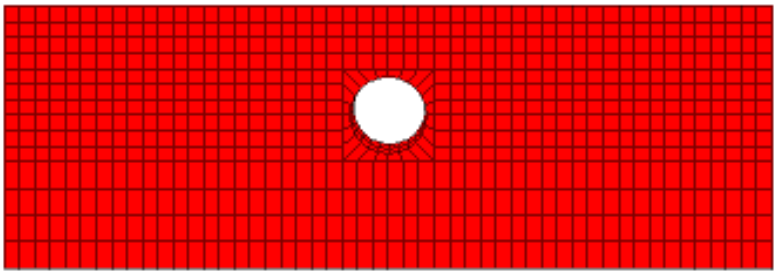
مهارها به‌صورت المان سازه‌ای کابل مدل‌سازی شدند. هر المان سازه‌ای کابل در نرم‌افزار، دارای یک المان کششی میانی و گروت تزریقی اطراف آن است که حداقل با دو گره ساخته می‌شود. در این مقاله هر میکرومهار طوری مدل شده است تا نوار پلاستیکی آن نقش المان کششی میانی و صفحهٔ مهاری پلاستیکی نقش گروت تزریقی اطراف المان کششی را ایفا نماید. البته صفحه پلاستیکی فقط در ۱ سانتی‌متر انتهایی نوار پلاستیکی مدل شده است. شکل ۳ به‌صورت شماتیک نحوهٔ رفتار، هندسه و مدل‌سازی مهارها را نشان می‌دهد [۲۰]. این مهارها پس از مدل‌سازی در نرم‌افزار به لایه‌های ژئوگرید که قبلاً ایجاد شده و در محل مورد نظر نصب شده‌اند متصل می‌شوند. همهٔ فرضیات و پارامترهای استفاده شده برای مدل‌سازی در جدول ۱ به‌صورت مختصر لیست شده‌اند. در جدول ۱، پارامترهای خاک از بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده سایر محققان، و پارامترهای سیستم مهار–شبکه از مصالح آماده شده نویسندگان مقاله برای بررسی‌های آزمایشگاهی آینده تهیه شده‌اند. برای کالیبراسیون مدل‌سازی عددی سیستم مهار–شبکه از ٤ عدد مدل‌سازی آزمایشگاهی که شرایط آن در بالا ذکر شد استفاده شده است. نویسندگان مقاله این مدل‌سازی آزمایشگاهی را در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه تبریز انجام داده‌اند. کالیبراسیون مدل‌سازی عددی حالت‌های غیرمسلح و مسلح با ژئوگرید نیز به‌وسیلهٔ پژوهش‌های وایت و همکاران [۲۱] و فیضی و همکاران [۱۰و۱۱] انجام شده است.

تعداد ۳۳ مدل برای تعیین اثر پارامترهای مختلف بر مقاومت برخاست خطوط لولهٔ مدفون و تعیین مکانیزم گسیختگی آن ساخته شد. در این مدل‌ها خاک ماسه‌ای با استفاده از ژئوگرید به تنهایی و سیستم مهار– شبکه با عرض‌های ۳D، ۵D و ۸D و لایه‌های تکی، دوتایی و سه‌تایی در بالای لوله و لایهٔ تکی متصل به لوله در زیر آن، مسلح شد که D قطر لوله است.

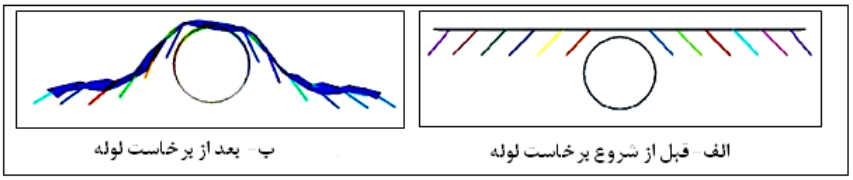
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]



شکل ۳. رفتار و هندسهٔ مهار- شبکه‌ها به‌عنوان المان مسلح‌کننده در نرم‌افزار FLAC-3D [۲۱]



شکل ٤. نحوهٔ مش‌بندی سه‌بعدی مدل‌های عددی



شکل ۵. نحوه چیدمان لوله، ژئوگرید و مهارها، قبل و بعد از برخاست لوله

جدول ۱. فرضیات و پارامترهای استفاده شده در آنالیز سه بعدی

ردیف	پارامتر	مقدار	ردیف	پارامتر	مقدار
۱	زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک	۳۱ و ٤۰ درجه	۷	مقاومت کششی ژئوگرید (kN/m)	۲۸
۲	چسبندگی خاک	۰	۸	مقاومت کششی مهار ها (kN)	۰/۰۸
۳	مدول الاستیسیته خاک (kPa)	۸۰۰۰ و ۱۲۰۰۰	۹	طول مهارها(mm)	۸۰
٤	ضریب پواسون خاک	۰/۳	۱۰	مساحت صفحات مهاری انتهای مهارها (mm^2)	۷۰٦
۵	وزن مخصوص خاک (kN/m^3)	۱۳/۵ و ۱۸			
٦	مدل رفتاری خاک	موهر-کولمب	۱۱	زاویهٔ افقی قرار گیری مهارها	٤۵ درجه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

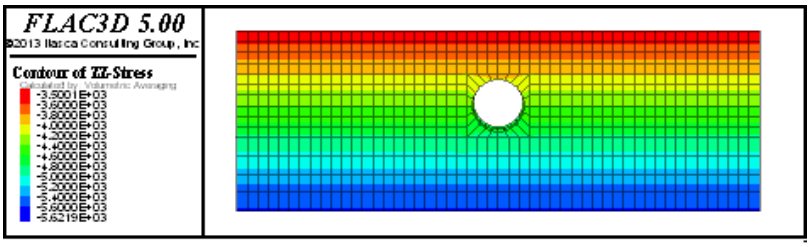
برخی از مدل‌ها نیز به‌صورت غیرمسلح بررسی شد. طول همهٔ لوله‌ها به‌صورت واحد (۱۰۰ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد و عمق دفن لوله نیز به‌صورت ضریبی از قطر لوله (h/D، که در آن D قطر لوله وh ارتفاع خاک روی لوله است) و با مقادیر ۱، ۲ و ۳ اعمال شد. برای تعیین نیروی مقاوم برخاست و میزان جابه‌جایی قائم متناظر هر نیرو، نیروی نقطه‌ای در وسط و بالای لوله وارد شد و به‌صورت تدریجی به آن افزوده شد تا جایی که خاک گسیخته شود. وزن مخصوص خاک روی لوله نیز با دو مقدار ۱۳٫۵ و ۱۸ کیلونیوتن بر مترمکعب بررسی شد و حالت آن نیز به‌صورت کاملاً خشک و یا اشباع ۱۰۰ درصد، بدون جریان آب، لحاظ شده است. مدل‌های ساخته شده با شرایط مختلف تشریح شده در بالا، به‌همراه حداکثر مقاومت برخاست (PUR[3]) هر مدل در جدول ۲ خلاصه شده است.

ساخت مدل با ایجاد مش‌بندی چارچوب کلی هر مدل شروع می‌شود. پس از ایجاد مش‌ها، شرایط مرزی مدل و خواص مکانیکی خاک به مدل افزوده می‌شود. در ادامه لوله در محل خود تعبیه شده و خواص مکانیکی آن اعمال می‌شود. سپس لایه‌های ژئوگرید در محل مورد نظر نصب شده و مشخصات مکانیکی آن تعیین می‌شوند. مهارها پس از ساخته شدن در محل مورد نظر و اعمال مشخصات، به لایه‌های ژئوگرید متصل می‌گردند تا حرکات آن‌ها با ژئوگرید منطبق باشد. در این مرحله نرم‌افزار در حالت استاتیکی اجرا می‌شود تا همه عوامل تحت تنش‌های استاتیکی قرار گیرند. سپس نیروی نقطه‌ای در وسط و بالای لوله وارد می‌شود و به‌صورت تدریجی به آن افزوده می‌شود تا جایی که خاک گسیخته شود. بیش‌ترین نیرویی که لوله قادر به تحمل آن باشد به‌عنوان حداکثر مقاومت برخاست آن یادداشت می‌شود. شکل‌های ٦ تا ۹ روند تغییرات تنش قائم در خاک را طی افزایش نیروی برخاست وارد بر لوله در مدل شماره $M_۹$ نشان می‌دهند. در شکل ٦ هنوز هیچ نیرویی به لوله وارد نشده و کامل در حالت استاتیکی قرار دارد. در شکل ۷، ۱٤۰ نیوتن نیروی برخاست به مرکز لوله اعمال شده است. شکل ۸ زمانی را نشان می‌دهد که ۲۰۰ نیوتن نیرو به لوله وارد شده است. و شکل ۹ زمانی است که حداکثر نیروی برخاست لوله، یعنی ۲٤۰ نیوتن نیرو به لوله وارد شده و پس از

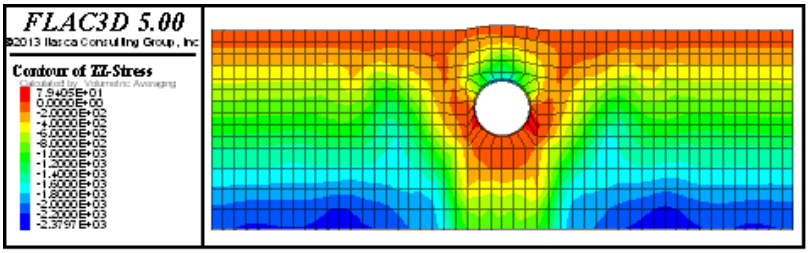
3. Peak Uplift Resistance

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

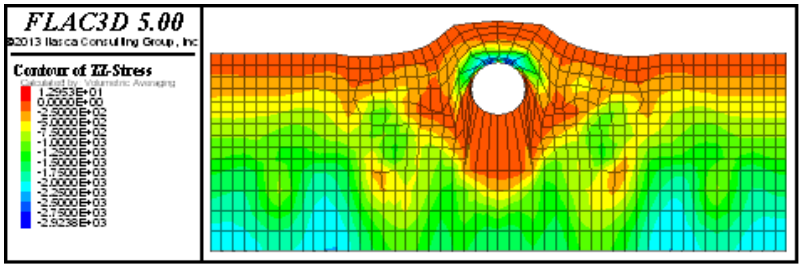
آن لوله قادر به تحمل نیرو ناست و با افت شدید مقاومت مواجه می‌شود و تغییرمکان‌های بزرگ در آن ایجاد می‌شود.



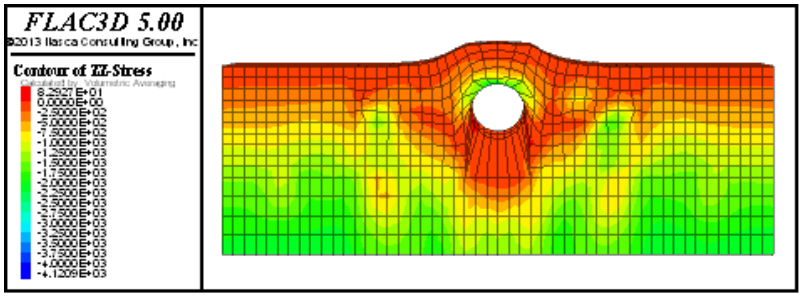
شکل ٦. کانتور تنش‌های قائم، قبل از شروع برخاست لوله



شکل ۷. کانتور تنش‌های قائم، پس از اعمال ۱٤۰ نیوتن نیروی برخاست لوله



شکل ۸. کانتور تنش‌های قائم، پس از اعمال ۲۰۰ نیوتن نیروی برخاست لوله



شکل ۹.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

جدول۲. مدل‌های ساخته شده و حداکثر مقاومت برخاست هر مدل

شمارهٔ مدل مرجع	قطر لوله D(mm)	ضریب دفن لوله (h/D)	نوع لایهٔ مسلح کننده	محل نصب لایهٔ مسلح-کننده	عرض لایهٔ مسلح-کننده، b (mm)	تعداد لایهٔ مسلح کننده، N	وزن مخصوص خاک، $\gamma(kN/m^3)$	وضعیت خاک	حداکثر مقاومت برخاست،PUR(N)
M_1	۵۰	۳	غیر مسلح	---	---	---	۱۳٫۵	خشک	۳۲۵
M_2	۵۰	۳	ژئوگرید	بالای لوله	۵D	۱	۱۳٫۵	خشک	۴۲۵
M_3	۵۰	۳	مهار-شبکه	بالای لوله	۵D	۱	۱۳٫۵	خشک	۶۵۷
M_4	۵۰	۲	غیر مسلح	---	---	---	۱۳٫۵	خشک	۱۷۵
M_5	۵۰	۲	ژئوگرید	بالای لوله	۵D	۱	۱۳٫۵	خشک	۲۴۲
M_6	۵۰	۲	مهار-شبکه	بالای لوله	۵D	۱	۱۳٫۵	خشک	۵۰۷
M_7	۵۰	۱	غیر مسلح	---	---	---	۱۳٫۵	خشک	۷۵
M_8	۵۰	۱	ژئوگرید	بالای لوله	۵D	۱	۱۳٫۵	خشک	۱۱۰
M_9	۵۰	۱	مهار-شبکه	بالای لوله	۵D	۱	۱۳٫۵	خشک	۲۴۰
M_{10}	۵۰	۲	ژئوگرید	بالای لوله	۳D	۱	۱۳٫۵	خشک	۱۹۲
M_{11}	۵۰	۲	مهار-شبکه	بالای لوله	۳D	۱	۱۳٫۵	خشک	۳۵۰
M_{12}	۵۰	۲	ژئوگرید	بالای لوله	۸D	۱	۱۳٫۵	خشک	۲۷۱
M_{13}	۵۰	۲	مهار-شبکه	بالای لوله	۸D	۱	۱۳٫۵	خشک	۶۵۰
M_{14}	۱۰۰	۲	ژئوگرید	بالای لوله	۵D	۲	۱۳٫۵	خشک	۹۰۰
M_{15}	۱۰۰	۲	مهار-شبکه	بالای لوله	۵D	۲	۱۳٫۵	خشک	۱۱۷۵
M_{16}	۱۰۰	۲	ژئوگرید	بالای	۵D	۳	۱۳٫۵	خشک	۹۲۵

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

					لوله				
$M_{۱۷}$	۱۰۰	۲	مهار- شبکه	بالای لوله	٥D	۳	۱۳٫٥	خشک	۱۱۸۷
$M_{۱۸}$	٥۰	۳	غیر مسلح	---	---	---	۱۸	خشک	٤٥۰
$M_{۱۹}$	٥۰	۳	ژئوگرید	بالای لوله	٥D	۱	۱۸	خشک	٥۲۰
$M_{۲۰}$	٥۰	۳	مهار- شبکه	بالای لوله	٥D	۱	۱۸	خشک	۸۰۷
$M_{۲۱}$	۱۰۰	۲	غیر مسلح	---	---	---	۱۳٫٥	خشک	۷۰۰
$M_{۲۲}$	۱۰۰	۲	ژئوگرید	بالای لوله	٥D	۱	۱۳٫٥	خشک	۸۷٥
$M_{۲۳}$	۱۰۰	۲	مهار- شبکه	بالای لوله	٥D	۱	۱۳٫٥	خشک	۱۱۲٥
$M_{۲٤}$	۲۰۰	۲	غیر مسلح	---	---	---	۱۳٫٥	خشک	۳۱۲٥
$M_{۲٥}$	۲۰۰	۲	ژئوگرید	بالای لوله	٥D	۱	۱۳٫٥	خشک	۳۳۷٥
$M_{۲٦}$	۲۰۰	۲	مهار- شبکه	بالای لوله	٥D	۱	۱۳٫٥	خشک	٤٤٥۰
$M_{۲۷}$	٥۰	۲	ژئوگرید	زیر لوله	۳D	۱	۱۳٫٥	خشک	۲٤۳
$M_{۲۸}$	٥۰	۲	مهار- شبکه	زیر لوله	٥D	۱	۱۳٫٥	خشک	٦٥۰
$M_{۲۹}$	٥۰	۲	مهار- شبکه	زیر لوله	۸D	۱	۱۳٫٥	خشک	۸۰۰
$M_{۳۰}$	٥۰	۲	مهار- شبکه	زیر لوله	۳D	۱	۱۳٫٥	خشک	٤۲٥
$M_{۳۱}$	٥۰	۳	غیر مسلح	---	---	---	۱۳٫٥	اشباع	۱٦۲
$M_{۳۲}$	٥۰	۳	ژئوگرید	بالای لوله	٥D	۱	۱۳٫٥	اشباع	۱۹٤
$M_{۳۳}$	٥۰	۳	مهار- شبکه	بالای لوله	٥D	۱	۱۳٫٥	اشباع	۳۰٥

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

صحت‌سنجی نتایج

روشی مرسوم برای ارزیابی میزان صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی، مقایسهٔ آن با روابط ارائه شدهٔ محققان مختلف و یا نتایج بررسی‌ها عددی یا آزمایشگاهی آن‌ها در شرایط برابر است. روابط زیادی برای برآورد میزان مقاومت برخاست لولهٔ مدفون در حالت خاک غیرمسلح ارائه شده است [۲۱]. یکی از روابط معتبر در این خصوص، رابطهٔ وایت و همکاران در سال ۲۰۰۱ است. مقایسهٔ نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی انجام شده در این مقاله با رابطهٔ وایت و همکاران نشان از مطابقت بسیار خوبی دارد. چنان‌که برای یک لوله به قطر ۵۰ میلی‌متر که در یک خاک ماسه‌ای سست با ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر مدفون است، مقدار نیروی برخاست حداکثر از رابطهٔ وایت و همکاران برابر ۳۲۰ نیوتن و از مدل ساخته شده در این تحقیق برابر ۳۲۵ نیوتن شده است. برای همین لوله و در همان شرایط، چنان‌چه از یک لایهٔ ژئوگرید با عرض ۲۵۰ میلی‌متر استفاده کنیم نیروی برخاست حاصل از مدل‌سازی برابر ۴۲۵ نیوتن است. این در حالی است که فیضی و همکاران [۱۱] در یک بررسی آزمایشگاهی، این نیرو را برای ژئوگرید با عرض ۳۰۰ میلی‌متر برابر ۵۵۰ نیوتن به‌دست آورده‌اند. این اختلاف ناچیز نیز در اثر بیش‌تر بودن عرض ژئوگرید در پژوهش ایشان است.

هم‌چنین مدل‌های عددی $M_{۳}$، $M_{۱۷}$، $M_{۲۶}$ و $M_{۲۸}$ که با استفاده از سیستم مهار–شبکه ساخته شده‌اند با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی انجام گرفته به‌وسیلهٔ نویسندگان مقاله ارزیابی شدند. حداکثر مقاومت برخاست این مدل‌ها در حالت مدل‌سازی عددی به‌ترتیب برابر ۶۵۷، ۱۱۸۷، ۴۴۵۰ و ۶۵۰ نیوتن و در حالت مدل‌سازی آزمایشگاهی به‌ترتیب برابر ۷۰۶، ۱۴۳۰، ۴۹۴۴ و ۶۹۱ نیوتن به‌دست آمد. مقایسهٔ این نتایج نشان می‌دهند که به‌طور متوسط، ۱۰ درصد نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی بیشتر از نتایج مدل‌سازی عددی است که البته نزدیک به هم هستند.

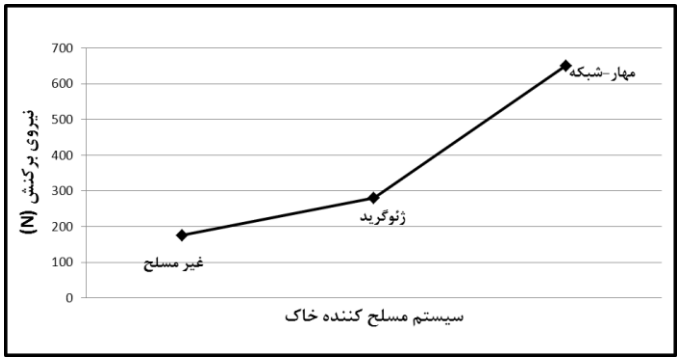
بنا براین مقایسهٔ نتایج حاصل از این مدل‌سازی با نتایج تحقیق پژوهش‌های گذشته و نتایج آزمایشگاهی، نشان می‌دهد مطابقت بسیار خوبی بین نتایج وجود دارد و نتایج مدل‌سازی دارای صحت کافی هستند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

ارزیابی میزان تأثیرگذاری سیستم مهار- شبکه

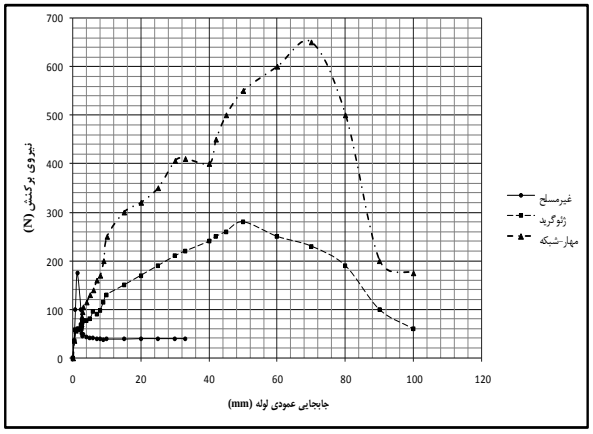
برای ارزیابی میزان کارایی سیستم مهار- شبکه در بهبود ظرفیت برخاست لولهٔ مدفون، رفتار لوله‌های مدفون در ماسهٔ غیرمسلح، ماسهٔ مسلح‌شده با ژئوگرید و ماسهٔ مسلح‌شده با سیستم مهار- شبکه در شرایط یک‌سان بررسی شد. شکل ۱۰ مقایسه بین این سه حالت را هنگامی که سیستم مسلح‌کننده در زیر لوله نصب شده باشد نشان می‌دهد که میزان اثرگذاری سیستم مهار- شبکه در افزایش مقاومت برخاست خطوط لولهٔ مدفون مشهود است. مشاهده می‌شود استفاده از این سیستم می‌تواند مقاومت برخاست حداکثر لوله را حدود ۳٫۷ برابر نسبت به حالت ماسهٔ غیرمسلح و حدود ۲٫۳ برابر نسبت به‌حالت استفاده از ژئوگرید افزایش دهد.

شکل ۱۱ نحوهٔ تغییرات نیروی برخاست در برابر جابه‌جایی عمودی لوله را در سه حالت نشان می‌دهد. برای مدل‌های $M_{۵}$، $M_{۲۷}$ و $M_{۲۸}$ که وزن مخصوص ماسهٔ خشک برابر ۱۳۵۰ کیلونیوتن بر مترمکعب، قطر لوله برابر ۵۰ میلی‌متر، عمق دفن لوله برابر ۱۰۰ میلی‌متر و عرض لایهٔ مسلح‌کننده برابر ۲۵۰ میلی‌متر است، نیروی برخاست حداکثر برابر ۱۷۵، ۲۸۰ و ٦۵۰ نیوتن به‌دست آمده است. بنا براین به‌خوبی می‌توان به اهمیت استفاده از مهار- شبکه پی برد. چنان‌که مشاهده می‌شود، استفاده از ژئوگرید تنها، در زیر لوله تقریباً به میزان ٦۰ درصد و استفاده از سیستم مهار-شبکه در زیر لوله تقریباً به‌میزان ۳۷۰ درصد باعث افزایش مقاومت برخاست حداکثر لولهٔ بدون مسلح‌کننده می‌شود.



شکل ۱۰. تغییرات مقاومت برخاست حداکثر لولهٔ مدفون با نوع سیستم مسلح کننده در ماسهٔ خشک و لایهٔ مسلح کننده در زیر لوله (D=۵۰mm، N=۱، h/D=۲، b=۵D)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]



شکل ۱۱. تغییرات نیروی برخاست حداکثر در برابر جابجایی عمودی لوله در ماسهٔ خشک (D=۵۰mm، N=۱، h/D=۲، b=۵D)

بررسی مکانیزم‌های گسیختگی خاک

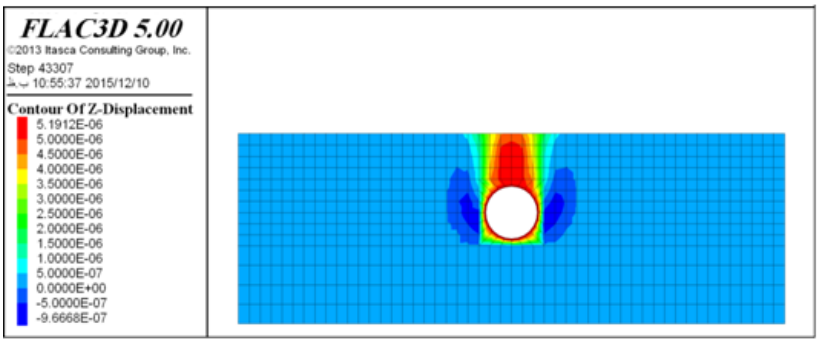
مطالعات گذشته بر روی مکانیزم‌های گسیختگی خاک نشان می‌دهند که خطوط لوله با یک سطح برشی منحنی گسیخته می‌شوند. نحوه و میزان تغییرشکل‌های قائم خاک در روش‌های مختلف تسلیح خاک در شکل‌های ۱۲ تا ١٤ نشان داده شده است. شکل ۱۲ مکانیزم گسیختگی خاک طی برخاست لوله در خاک غیرمسلح، شکل ۱۳ مکانیزم گسیختگی خاک طی برخاست لوله در خاک مسلح با ژئوگرید تنها و شکل ١٤ مکانیزم گسیختگی خاک طی برخاست لوله در خاک مسلح با سیستم مهار- شبکه را در شرایط یکسان نشان می‌دهند. عامل مشترک شکل-گیری گسیختگی منحنی شکل، ریزش خاک اطراف لوله برای پر نمودن فضای خالی تشکیل شده در زیر لوله است. افزایش مقاومت کششی خاک در حالت استفاده از ژئوگرید و مهار-شبکه، باعث تشکیل مقاومت افقی برشی در تودهٔ خاک شده و ناحیهٔ مؤثر از برخاست لوله را بسمت طرفین لوله و زیر آن گسترش می‌دهد.

مطالعات پارامتریک

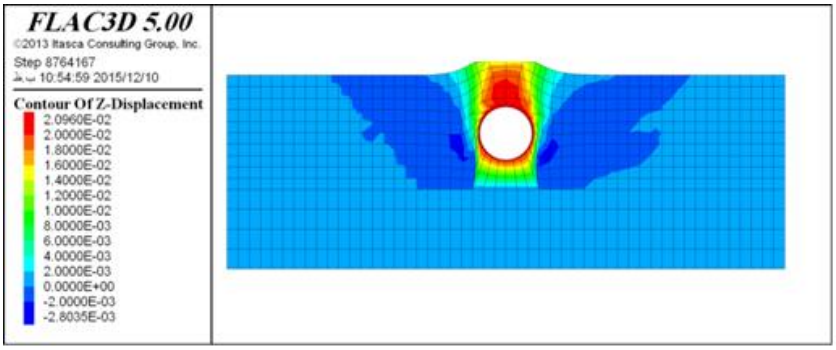
ظرفیت برخاست خطوط لولهٔ مدفون در ماسهٔ مسلح وابسته به پارامترهای مختلفی نظیر قطر لوله، خشک یا اشباع بودن خاک، عرض و تعداد لایه‌های مسلح‌کننده خاک، وزن

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

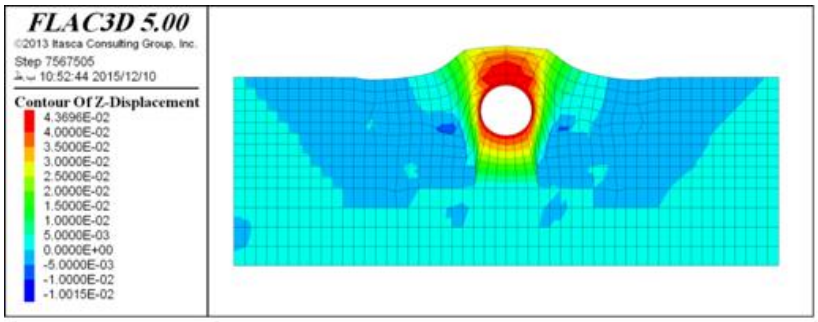
مخصوص خاک، عمق دفن لوله و محل نصب لایهٔ مسلح‌کننده است. در این تحقیق، مدل‌های مختلفی برای تجزیه میزان و نحوهٔ اثرگذاری هریک از این پارامترها بر ظرفیت برخاست خطوط لولهٔ مدفون ساخته شد که نتایج این پژوهش در ادامه ارائه می‌شود.



شکل ۱۲. مکانیزم گسیختگی خاک طی برخاست لوله در خاک غیرمسلح



شکل ۱۳. مکانیزم گسیختگی خاک طی برخاست لوله در خاک مسلح با ژئوگرید تنها



شکل ١٤. مکانیزم گسیختگی خاک طی برخاست لوله در خاک مسلح با سیستم مهار- شبکه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

اثر اشباع بودن خاک

اشباع شدن خاک باعث کاهش وزن مخصوص مؤثر خاک و پارامترهای مقاومت برشی آن شده و در نتیجه منجر به کاهش مقاومت برخاست لولهٔ مدفون می‌شود. رابطهٔ (۱) که وایت و همکاران در سال ۲۰۰۱ ارائه کرده‌اند نیز این واقعیت را به‌خوبی نشان می‌دهد [۲۱].

$$P = \gamma' HD + \gamma' H^2 K \tan\phi + \gamma' H^2 K(\tan\phi_{max} - \tan\phi)[(1+K_0)\cos 2\phi/2] \quad (۱)$$

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 زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک و ϕ_{max} زاویهٔ اصطکاک داخلی حداکثر خاک هستند.

مدل‌های ساخته شده در این پژوهش نیز مطابقت خوبی با تحقیقات گذشته دارند. اشباع بودن خاک در مدل‌های ساخته شده با فرض ساکن بودن سطح آب و حرکات بسیار ناچیز آن با حرکت لوله به سمت بالا انجام شده است. مدل M_1 در شرایط ماسهٔ خشک و غیر مسلح و مدل M_{31} در شرایط ماسهٔ اشباع و غیرمسلح ساخته شده‌اند. مقایسهٔ این دو مدل نشان می‌دهد که نیروی برخاست حداکثر در حالت خشک ۳۲۵ نیوتن و در حالت اشباع ۱۶۲ نیوتن است. یعنی در حالت خشک نیروی برخاست حداکثر لوله حدود ۲ برابر حالت اشباع است. مدل M_2 نیز در شرایط ماسهٔ خشک و مسلح با ژئوگرید و مدل M_{32} در شرایط ماسهٔ اشباع و مسلح با ژئوگرید ساخته شده‌اند. مقایسهٔ این دو مدل نیز نشان می‌دهد که نیروی برخاست حداکثر در حالت خشک ۴۲۵ نیوتن و در حالت اشباع ۱۹۴ نیوتن است. بنا براین نیروی برخاست در حالت خشک حدود ۲٫۲ برابر حالت اشباع است. هم‌چنین مدل M_3 در شرایط ماسهٔ خشک و مسلح با سیستم مهار- شبکه و مدل M_{33} در شرایط ماسهٔ اشباع و مسلح با سیستم مهار- شبکه ساخته شده‌اند. مقایسهٔ این دو مدل نیز نشان می‌دهد که نیروی برخاست حداکثر در حالت خشک ۶۵۷ نیوتن و در حالت اشباع ۳۰۵ نیوتن است. یعنی نیروی برخاست در حالت خشک حدود ۲٫۱۵ برابر حالت اشباع در سیستم مهار- شبکه است. علت این موضوع، کاهش وزن مخصوص موثر خاک در حالت اشباع و هم‌چنین کاهش زاویهٔ اصطکاک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

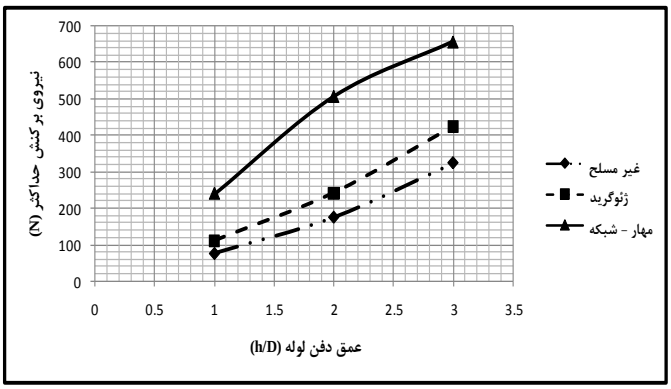
بین خاک و سیستم مهار–شبکه است. که در نهایت منجر به کاهش مقاومت برخاست خط لوله در حالت اشباع شده است.

هم‌چنین مقایسهٔ مدل‌ها نشان می‌دهند که میزان افزایش مقاومت برخاست لوله برای ماسهٔ مسلح با ژئوگرید و سیستم مهار– شبکه در حالت خشک به‌ترتیب حدود ۳۰ درصد و ۱۰۲ درصد هستند؛ در حالی‌که این مقادیر در حالت اشباع به حدود ۱۹ و ۸۷ درصد کاهش می‌یابند. بنا براین راندمان سیستم‌های مسلح‌کنندهٔ خاک نیز در خاک‌های اشباع کاهش می‌یابد. که علت آن کاهش زاویهٔ اصطکاک بین خاک و سیستم مهار– شبکه است که درنهایت منجر به کاهش تأثیرگذاری سیستم مهار– شبکه می‌شود.

اثر عمق دفن لوله

با توجه به شکل ۱۵، با افزایش عمق دفن، نیروی برخاست حداکثر لوله نیز افزایش می‌یابد. برای بررسی اثر عمق، مدل‌های M_1 تا M_9 ساخته شده‌اند. نتایج حاصل از این مدل‌ها در شکل ۱۵ آمده است. لوله‌ای به قطر ۵۰ میلی‌متر، خاک با وزن مخصوص ۱۳٫۵ کیلو نیوتن بر متر مکعب و یک لایهٔ مسلح‌کننده با عرض ۲۵۰ میلی‌متر در تمام این مدل‌ها ثابت هستند. مدل‌های M_1 ، M_4 و M_7 برای خاک غیرمسلح و به‌ترتیب دارای عمق دفن ۱۵۰، ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌متر هستند. حداکثر مقاومت برخاست اندازه‌گیری شده برای این مدل‌ها به‌ترتیب برابر ۳۲۵، ۱۷۵ و ۷۵ نیوتن به‌دست آمد. چنان‌که از شکل ۱۵ می‌توان دید، تغییرات نیروی برخاست با تغییرات عمق دفن لوله رابطه خطی ندارد؛ یعنی با افزایش عمق، نیروی برخاست با شیب تندتری افزوده می‌شود. که این مشابه یافته‌های سابویا و همکاران [۱۹] و وانگ و همکاران [۲۲] است. مدل‌های M_2 ، M_5 و M_8 نیز برای خاک مسلح با یک لایهٔ ژئوگرید در روی لوله هستند که به‌ترتیب دارای عمق دفن ۱۵۰، ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌متر هستند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]



شکل ۱۵. تغییرات نیروی برخاست حداکثر لوله با تغییر عمق دفن آن در ماسهٔ کم تراکم

حداکثر مقاومت برخاست این مدل‌ها به‌ترتیب برابر ٤٢٥، ٢٧٥ و ١١٠ نیوتن به‌دست آمده‌اند که این یافته‌ها نیز مطابقت مناسبی با یافته‌های سابویا و همکاران [١٩] و فیضی و همکاران [١٠] دارند. هم‌چنین مدل‌های $M_{۳}$ ، $M_{٦}$ و $M_{۹}$ برای خاک مسلح با یک لایه سیستم مهار- شبکه، درست در روی لوله هستند که عمق دفن آن‌ها نیز به‌ترتیب ١٥٠، ١٠٠ و ٥٠ میلی‌متر هستند. حداکثر مقاومت برخاست این مدل‌ها به‌ترتیب برابر ٦٥٧، ٥٠٧ و ٢٤٠ نیوتن به‌دست آمده‌اند. این مدل‌ها نشان می‌دهند که در ماسه‌های کم تراکم مسلح‌شده با مهار- شبکه، افزایش مقاومت برخاست نسبت به حالت غیرمسلح برای عمق دفن ٥٠ میلی‌متر برابر ٣٢٠ درصد، برای عمق ١٠٠ میلی‌متر برابر ٢٩٠ درصد و برای عمق ١٥٠ میلی‌متر برابر ٢٠٠ درصد هستند. بنا براین کارایی سیستم‌های مسلح‌کننده در عمق‌های دفن کوچک‌تر بیش‌تر از کارایی آن در عمق‌های دفن بزرگ‌تر است. چرا که در عمق‌های دفن بزرگ‌تر، سهم وزن خاک و مقاومت برشی آن بیش‌تر است ولی در عمق‌های دفن کوچک‌تر، سهم وزن خاک و مقاومت برشی آن کم‌تر بوده و در نتیجه باعث افزایش تأثیرگذاری سیستم مسلح‌کننده می‌شود.

اثر عرض و محل قرارگیری لایهٔ مسلح‌کننده

برای بررسی اثر محل نصب لایهٔ مسلح‌کننده بر مقاومت برخاست لولهٔ مدفون، علاوه بر مدل‌های ساخته شده به‌صورت نصب لایهٔ مسلح‌کننده روی لوله، تعداد ٤ مدل نیز به‌صورت نصب لایهٔ ژئوگرید و مهار- شبکه در زیر لوله به روش ارائه شدهٔ سابویا و همکاران [١٩] و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

مطابق حالت دوم شکل ١ ساخته شدند. در این مدل‌ها، لایهٔ مسلح‌کنندهٔ مهار–شبکه با عرض‌های ٣، ٥ و ٨ برابر قطر لوله استفاده شدند. هم‌چنین در یکی از مدل‌ها نیز لایهٔ ژئوگرید با عرض ٣ برابر قطر لوله به‌کار گرفته شد. نتایج حاصل از هر یک از این حالت‌ها در جدول ٢ آمده است. مقایسهٔ این نتایج با نتایج مدل‌هایی که در آن‌ها لایهٔ مسلح‌کننده روی لوله نصب شده باشد نشان می‌دهند که نصب لایهٔ مسلح‌کننده در زیر لوله باعث افزایش مقاومت برخاست آن می‌شود. این افزایش برای ژئوگریدها در حالتی که عرض آن ٣ برابر قطر لوله باشد، تقریباً ٢٦ درصد است. که این مقدار به‌دست آمده با نتایج کار سابویا و همکاران [١٩] که این مقدار را حدود ٢٣ درصد به‌دست آورده بودند، مطابقت خوبی دارد. مقدار نیروی برخاست حداکثر اندازه‌گیری شده برای هر یک از عرض‌های سیستم مهار– شبکه در دو حالت نصب در بالا و نصب در پایین در شکل ١٦ آمده است. مطابق شکل ١٦، با نصب لایهٔ مهار– شبکه با عرض ٥ برابر قطر لوله در زیر لوله می‌توان تا حدود ٢٨ درصد کارایی آن‌را افزایش داد. شکل ١٦ هم‌چنین نشان می‌دهد که با افزایش عرض لایهٔ مسلح‌کننده، مقاومت برخاست لوله نیز افزایش می‌یابد. شیب این افزایش در فاصلهٔ عرض ٣ تا ٥ برابر قطر لوله بیش‌تر است و بعد از آن شروع به کاهش می‌کند. بنا براین کارایی لایهٔ مسلح‌کننده در عرض حدود ٥ برابر قطر لوله بیش‌ترین مقدار را خواهد داشت. دلیل افزایش مقاومت برخاست خط لوله در حالت نصب لایهٔ مسلح‌کننده در زیر لوله، افزایش تنش مؤثر خاک در محل نصب لایهٔ مسلح‌کننده نسبت به نصب در بالای لوله است. افزایش تنش مؤثر نیز باعث افزایش درگیری لایهٔ مسلح‌کننده با خاک شده و در نهایت منجر به افزایش مقاومت برخاست خواهد شد.

اثر تعداد لایه‌های مسلح‌کننده (N)

آنالیز عددی نشان می‌دهد که مقاومت برخاست لوله با افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده (N)، افزایش چندانی نمی‌یابد. مدل‌های $M_{٦}$ ، $M_{٧}$ ، $M_{١٤}$ ، $M_{١٥}$ ، $M_{١٦}$ و $M_{١٧}$ برای بررسی تأثیر افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده بر مقاومت برخاست لوله‌ها در دو حالت استفاده از ژئوگرید و مهار–شبکه ساخته شده‌اند. در این مدل‌ها قطر لوله برابر ١٠٠ میلی‌متر، وزن مخصوص خاک برابر ١٣/٥ کیلونیوتن بر مترمکعب و عمق دفن آن ٢٠٠ میلی‌متر هستند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

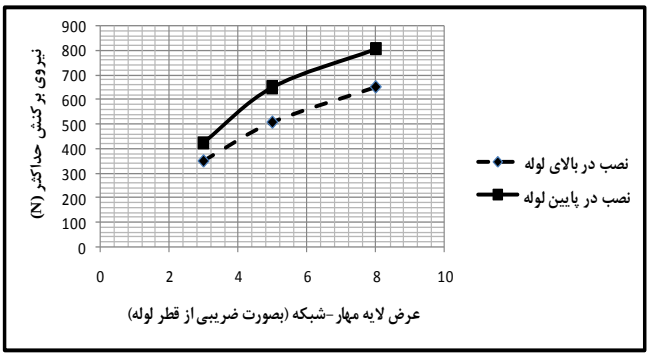
لایه‌های مسلح‌کننده با فاصلهٔ عمودی ۷۰ میلی‌متر از هم قرار گرفته‌اند که اولین لایه نیز دقیقاً روی لوله نصب شده است. تغییرات ظرفیت برخاست حداکثر لولهٔ مدفون با تعداد لایه‌های مسلح‌کننده روی آن در شکل ۱۷ به‌صورت واضح نشان می‌دهد که تعداد لایه‌های مسلح‌کننده تأثیر به‌سزایی بر مقاومت برخاست ندارد. در واقع استفاده از یک لایهٔ مسلح‌کننده درست روی لوله، تقریباً تأثیر چند لایهٔ مسلح‌کننده را ایفا می‌کند. پس می‌توان در مورد ظرفیت برخاست لوله‌ها نتیجه گرفت که استفاده از یک لایهٔ مسلح‌کننده بهتر است و به‌کارگیری چند لایه، به‌هیچ عنوان به صرفه نیست. علت این موضوع ثابت بودن شرایط زاویهٔ ناحیهٔ گسیختگی است؛ طوری‌که لایه‌های بالای لایهٔ اول که درست روی لوله نصب شده است، در ناحیه گسیختگی خاک بالای لوله قرار گرفته و دچار گسیختگی کلی می‌شوند و عملاً تاثیر چندانی بر مقاومت برخاست لوله نخواهند داشت. این مشابه یافته‌های فیضی و همکاران [۱۱] برای لوله‌های مدفون، نیرومند و همکاران [۲۳] برای صفحات مهاری و گاش و همکاران [٢٤] برای مهارها است که تأکید می‌کنند تعدد لایه‌های مسلح‌کننده تأثیر بسزایی بر مقاومت برخاست ندارند.

اثر وزن مخصوص خاک (γ)

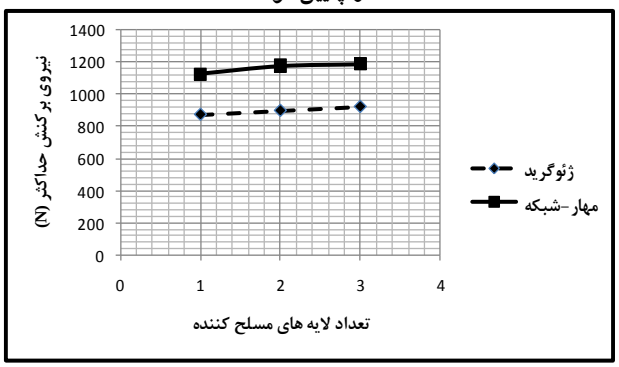
برای مدل‌های $M_۱$ ، $M_۲$ و $M_۳$ که وزن مخصوص ماسه روی لوله برابر kN/m^3 ۱۳٫۵، قطر لوله ۵۰ میلی‌متر و عمق دفن آن ۱۵۰ میلی‌متر درنظر گرفته شده بود، حداکثر مقاومت برخاست مدل‌ها به‌ترتیب برابر ۳۲۵، ٤۲۵ و ٦۵۷ نیوتن به‌دست آمده است. در همین حال، برای مدل‌های $M_{۱۸}$ ، $M_{۱۹}$ و $M_{۲۰}$ که وزن مخصوص ماسه روی لوله برابر kN/m^3 ۱۸ لحاظ شده بود، حداکثر مقاومت برخاست مدل‌ها به‌ترتیب برابر ٤۵۰، ۵۲۰ و ۸۰۷ نیوتن به‌دست آمده است. چنان‌که انتظار می‌رفت خاک متراکم‌تر، مقاومت برخاست بالاتری نیز دارد؛ که به‌علت وزن مخصوص بالاتر خاک و درگیری بیش‌تر لایهٔ مسلح‌کننده با خاک است.

چنان‌که شکل ۱۸ نشان می‌دهد، برای خاک‌های با تراکم کم‌تر، مقاومت برخاست مدل‌هایی که با ژئوگرید مسلح شده‌اند حدود ۳۰ درصد و مدل‌هایی که با مهار- شبکه مسلح شده‌اند حدود ۲۰۲ درصد بیش‌تر از حالت خاک غیرمسلح هستند. این مقادیر برای خاک‌های متراکم‌تر به‌ترتیب برابر ۱۵ و ۷۹ درصد هستند. بنا براین می‌توان نتیجه گرفت که راندمان استفاده از

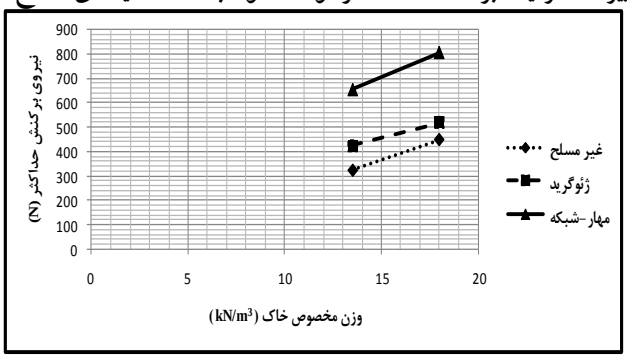
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]



شکل ۱٦. نحوهٔ تغییرات مقاومت برخاست لوله با عرض لایهٔ مهار- شبکه به‌صورت نصب در بالا و پایین لوله



شکل ۱۷. تغییرات ظرفیت برخاست حداکثر لولهٔ مدفون با تعداد لایه‌های مسلح‌کننده روی آن



شکل ۱۸. تغییرات ظرفیت برخاست حداکثر لولهٔ مدفون با تغییر وزن مخصوص ماسه اثر قطر لوله (D)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

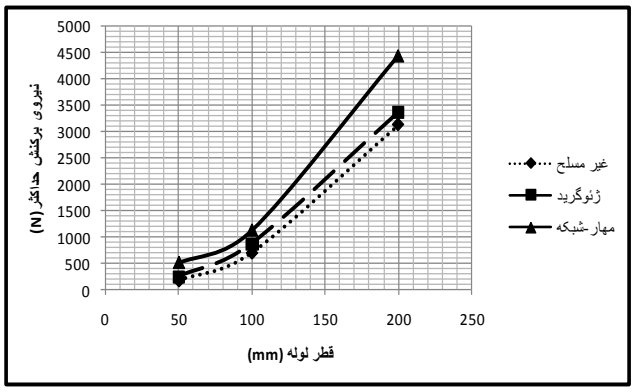
لایه‌های مسلح‌کننده در خاک‌های با تراکم کم، بیش‌تر از خاک‌های با تراکم زیاد است؛ اگرچه مقدار مقاومت برخاست در خاک‌های متراکم بیش‌تر است. این یافته مطابق یافته سابویا و همکاران [۱۹] است. علت این پدیده آن است که در خاک‌های متراکم‌تر، سهم خاک از مقاومت برخاست لوله بیش‌تر است اما در خاک‌های با تراکم کم‌تر، سهم خاک کم‌تر است و نقش لایهٔ مسلح‌کننده بیش‌تر خواهد بود.

چنان‌که از جدول ۲ مشاهده می‌شود، شرایط مدل‌های $M_{۴}$، $M_{۵}$ ، $M_{۶}$ ، $M_{۲۱}$ ، $M_{۲۲}$ ، $M_{۲۳}$ ، $M_{۲۴}$ ، $M_{۲۵}$ و $M_{۲۶}$ مشابه یک‌دیگر هستند؛ تنها تفاوت این مدل‌ها در انتخاب قطر لوله‌ها است. البته با تغییر قطر لوله، ابعاد مدل ساخته شده و عرض لایه مسلح‌کننده نیز به همان نسبت بزرگ‌تر انتخاب شده است تا بتوان اثرات مقیاس مدل را در نظر گرفت. قطر لوله‌ها برابر ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر انتخاب شده است تا تأثیر مقیاس مدل بر میزان راندمان سیستم مهار- شبکه و ژئوگرید بررسی شود. مقاومت برخاست حداکثر به‌دست آمده از هر یک از مدل‌ها در شکل ۱۹ ترسیم شده است.

با مراجعه به شکل ۱۹، واضح است که ظرفیت برخاست لوله با افزایش قطر آن بیش‌تر می‌شود؛ علت افزایش مقاومت برخاست با افزایش قطر لوله، بزرگ‌تر شدن حجم خاک روی لوله با افزایش قطر آن (افزایش عرض و ارتفاع خاک روی لوله) و در نتیجه افزایش وزن خاک روی لوله و بزرگ‌تر شدن منحنی گسیختگی خاک است. به‌عنوان نمونه، اگر چنان‌چه قطر لوله ۲ برابر شود، عرض توده خاک روی لوله نیز ۲ برابر و ارتفاع آن نیز چون ضریبی از قطر لوله انتخاب شده، ۲ برابر خواهد شد. بنا براین وزن خاک روی لوله تقریباً ٤ برابر می‌شود. از طرف دیگر مسیر خط گسیختگی خاک نیز ۲ برابر خواهد شد. چنان‌که رابطهٔ (۱) نیز نشان می‌دهد، با افزایش ارتفاع خاک روی لوله، مقاومت برکنش به‌صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. علت افزایش ارتفاع خاک روی لوله با افزایش قطر لوله نیز آنست که در تمامی مدل‌ها خاک روی لوله به‌صورت ضریبی از قطر لوله انتخاب شده است. بنا براین افزایش غیرخطی مقاومت برخاست لوله با افزایش قطر آن طبیعی است. راندمان استفاده از لایه‌های مسلح‌کننده برای افزایش ظرفیت برخاست لوله‌ها، با افزایش قطر لوله کاهش می‌یابد. طوری‌که مقاومت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

برخاست لوله با قطر ۵۰ میلی‌متر و مسلح شده با ژئوگرید حدود ۳۸ درصد و مسلح شده با مهار- شبکه حدود ۲۸۹ درصد بیش‌تر از حالت غیرمسلح در خاک‌های با تراکم کم است. اما این مقادیر برای لوله با قطر ۱۰۰ میلی‌متر به‌ترتیب برابر ۲۵ و ٦۱ درصد و برای لوله با قطر ۲۰۰ میلی‌متر برابر ۸ و ٤۲ درصد هستند. این یعنی این‌که با افزایش قطر لوله، میزان تأثیرگذاری سیستم مسلح‌کننده کاهش پیدا می‌کند. علت کاهش راندمان سیستم مسلح‌کننده با افزایش قطر لوله، افزایش سهم خاک روی لوله از مقاومت برخاست لوله با افزایش قطر آن است. یعنی این‌که هر چه قطر لوله افزایش می‌یابد لایه مسلح‌کننده سهم کم‌تری از مقاومت برخاست لوله را دارد و درنتیجه بازدهی آن کاهش می‌یابد. بنا براین استفاده از لایه‌های مسلح‌کننده در لوله‌های با قطر کم‌تر مؤثرتر و اقتصادی‌تر خواهد بود.



شکل ۱۹. تغییرات ظرفیت برخاست حداکثر لولهٔ مدفون با تغییرات قطر لوله

نتیجه‌گیری

یک مطالعهٔ پارامتریک سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار FLAC روی ظرفیت برخاست لوله‌های مدفون در ماسه انجام گرفت تا یک روش جدید با استفاده از ژئوگرید و مهار- شبکه به‌عنوان المان مسلح‌کنندهٔ خاک برای بهبود مقاومت برخاست لوله‌ها ارائه شود. در کنار مدل‌سازی عددی، از چند نمونه آزمایشگاهی برای صحت سنجی مدل‌ها استفاده شد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

مقایسهٔ میزان اثرگذاری استفاده از مهار- شبکه و ژئوگرید به‌عنوان سیستم مسلح‌کننده نشان می‌دهد استفاده از مهار- شبکه افزایش قابل توجهی در ظرفیت برخاست لوله‌ها ایجاد می‌کند. هم‌چنین اثرات برخی از پارامترهای مؤثر در نیروی برخاست لولهٔ مدفون که شامل قطر لوله، خشک یا اشباع بودن خاک، عرض و تعداد لایه‌های مسلح‌کنندهٔ خاک، وزن مخصوص خاک، عمق دفن لوله و محل نصب لایهٔ مسلح‌کننده هستند بررسی شد. دستاوردهای پژوهش به‌صورت این نتایج ارائه می‌شود:

- سیستم تسلیح مهار- شبکه می‌تواند ظرفیت برخاست لوله‌های مدفون را تا ۲٫۳ برابر ژئوگرید و تا ۳٫۷ برابر حالت غیرمسلح در ماسهٔ خشک افزایش دهد. این افزایش به‌علت گسترش بیش‌تر سطوح گسیختگی خاک است.
- اشباع شدن خاک باعث کاهش وزن مخصوص مؤثر خاک شده و درنتیجه منجر به کاهش مقاومت برخاست لولهٔ مدفون می‌شود. هم‌چنین راندمان سیستم‌های مسلح‌کنندهٔ خاک نیز در خاک‌های اشباع کاهش می‌یابد.
- اگرچه افزایش عمق دفن لوله موجب افزایش مقاومت برخاست آن می‌شود اما باعث کاهش کارایی سیستم‌های مسلح‌کننده می‌شود. بنا براین کارایی سیستم‌های مسلح‌کننده در عمق‌های دفن کوچک‌تر بیش‌تر از کارایی آن در عمق‌های دفن بزرگ‌تر است.
- با نصب لایهٔ مهار- شبکه در زیر لوله می‌توان تا حدود ۲۸ درصد کارایی آنرا افزایش داد. هم‌چنین با افزایش عرض لایهٔ مسلح‌کننده، مقاومت برخاست لوله نیز افزایش می‌یابد. کارایی لایهٔ مسلح‌کننده در عرض حدود ۵ برابر قطر لوله بیش‌ترین مقدار را نشان می‌دهد.
- استفاده از یک لایهٔ مسلح‌کننده درست بر روی لوله، تقریباً تأثیر چند لایهٔ مسلح‌کننده را ایفا می‌کند و به‌کارگیری چند لایه، به‌هیچ عنوان به صرفه ناست.
- راندمان استفاده از لایه‌های مسلح‌کننده در خاک‌های با تراکم کم، بیش‌تر از خاک‌های با تراکم بالا است؛ اگرچه مقدار مقاومت برخاست در خاک‌های متراکم بیش‌تر است.
- با افزایش قطر لوله، میزان تأثیرگذاری سیستم مسلح‌کننده کاهش پیدا می‌کند. بنا براین استفاده از لایه‌های مسلح‌کننده در لوله‌های با قطر کم‌تر مؤثرتر و اقتصادی‌تر است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

منابع

1. Koseki J., Matsuo O., 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, (1998) 97-108.
2. Shinozuka M., Ballantyne D., Borcherdt R., Buckle I., O'Rourke T., Schiff A., "The Hanshin-Awaji Earthquake of January 17, 1995. Performance of Lifelines", Technical Report of NCEER, Buffalo, NY, (1995).
3. Sitar N., "Geotechnical Reconnaissance of the Effects of January 17, 1995, Hyogoken-Nambu Earthquake, Japan", Report No, UCB/EERC-95/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley (1995).
4. Ling H. I., Mohri Y., Kawabata T., Liu H., Bruke C., Sun L., "Centrifugal Modeling of Seismic Behavior of Large-Diameter Pipe in Liquefiable Soil", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, (2003) 1092-1101.
5. Cheuk C. Y., White D. J., Bolton M. D., "Uplift Mechanics of Pipes Buried in Sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134(2) (2008) 154-163.
6- Mohri Y., Kawabata T., Fujita N., "Large-scale experiment on shallow cover for buried pipeline reinforced with geosynthetics", Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 52 (2001) 1-13.
7- Newson T. A., Deljoui P., "Finite element modelling of upheaval buckling of buried offshore pipelines in clayey soils", Soil and Rock Behavior and Modeling (2006) 351-358.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

8- Thusyanthan N. I., Ganesan S. A. Bolton M. D., Allan P., "Upheaval buckling resistance of pipelines buried in clayey backfill", 18th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver, British Columbia, Canada (2008) 6-11.

9. Selvadurai A. P. S., "The Enhancement of the Uplift Capacity of Buried Pipelines by the Use of Geogrids", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 124 (8) (1989).

10. Faizi K., Jahed Armaghani D., Momeni E., Nazir R., Tonnizam Mohamad E., "Uplift Resistance of Buried Pipelines Enhanced by Geogrid", Soil Mechanics and Foundation Engineering, 51 (4) (2014).

11- Faizi K., Jahed Armaghani D., Sohaei H., Rashid A. S. A., Nazir R. "Deformation model of sand around short piles under pullout test", Journal of Measurement, 63 (2015) 110-119.

12. Mosallanezhad M., Hataf N., Ghahramani A., "Experimental study of bearing capacity of granular soils reinforced with innovative grid-anchor system", Geotech. Geol. Eng. 26 (3) (2008) 299-312.

13. Alamshahi S., Hataf N., "Bearing capacity of strip footings on sand slopes reinforced with geogrid and gride-anchor", Geotext.Geomembr. 27 (3) (2009) 217-226.

14. Mosallanezhad M., Hataf N., Ghahramani A., "Three dimensional bearing capacity analysis of granular soils reinforced with innovative grid-anchor system", Iran. J. Sci. Technol. Trans. B-Eng. 34 (2010) 319-334.

15. Boushehrian A. H., Hataf N., Ghahramani A., "Numerical study of cyclic behavior of shallow foundations on sand reinforced with geogrid and grid-anchor", World Acad. Sci. Eng. Technol. 58 (2009) 607-610.

16. Boushehrian A. H., Hataf N., Ghahramani A., "Modeling of the cyclic behavior of shallow foundations resting on geomesh and grid-anchor reinforced sand", Geotext.Geomembr. 29 (3) (2011) 242-248.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]

17. Hataf N., Boushehrian A. H., 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) (2010) 1-10.
18. Mosallanezhad M., Sadat Taghavi S. H., Hataf N., Alfaro M. C., "Experimental and numerical studies of the performance of the new reinforcement system under pull-out conditions", Geotext.Geomembr. 44 (1) (2016) 70-80.
19. Saboya F. A., Santiago P. C., Martins R. R., Tibana S., Ramires R. S., Araruna J. T., "Centrifuge Test to Evaluate the Geotechnical Performance of Anchored Buried Pipelines in Sand", Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, ASCE, 3 (2012) 84-97.
20. Itasca. FLAC-3D Version 5.0. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis (2012).
21. White D. J., Barefoot A. J., Bolton M. D., "Centrifuge modeling of upheaval buckling in sand", Int. J. Phys. Model. Geotech., 21 (2001) 019-028.
22. Wang J., Haigh S. K., Forrest G., Thusyanthan N. I., "Mobilization Distance for Upheaval Buckling of Shallowly Buried Pipelines", Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, ASCE, 46 (2012) 106–114.
23. Niroumand H., Kassim K. A., Nazir R., "The Influence of Soil Reinforcement on the Uplift Response of Symmetrical Anchor Plate Embedded in Sand", Elsevier, Journal of Measurement, 46 (2013) 2608-2629.
24. Ghosh A., Bera A. K., "Effect of Geotextile Ties on Uplift Capacity of Anchors Embedded in Sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 28 (2010) 567-577.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.427]