

مطالعه‌ی آزمایشگاهی عملکرد خاکریز مسلح شده روی حفرة‌ی کم عمق

رضا پورحسینی* (دانشیار)

علی صالحی رضا آبادی (کارشناس ارشد)

کاوه سعیدنیا (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه یزد

در پژوهش حاضر، پایداری حفرة‌های کم عمق زیرزمینی و پوشش خاک ماسه‌ی مسلح آن به صورت آزمایشگاهی مطالعه شد. تأثیر عواملی، مانند: عمق استقرار، تعداد لایه‌ها، و طول مسلح‌کننده در نشست سطحی، معیاری از عملکرد با کاهش پیوسته‌ی فشار هوای حفرة ارزیابی شد. واکنش حفرة به شرایط محیطی با تغییر فشار هوای وارد بر پوسته‌ی نازک آن شبیه‌سازی شد. فشار هوا و نشست سطحی، یک لحظه قبل از ناپایداری حفرة و نیز نشست نهایی پس از فروریزی کامل حفرة به عنوان شاخصی از عملکرد مسلح‌سازی انتخاب شدند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده، پوشش خاکی روی حفرة، عملکرد بهتری در تحمل نشست بیشتر دارد؛ اما این بهبود وضعیت به تعداد لایه‌ی معینی محدود است. همچنین با افزایش طول مسلح‌کننده، عملکرد پوشش خاکی بهتر می‌شود؛ اما این تأثیر فقط تا طول معینی، متناسب با قطر حفرة قابل توجه است.

واژگان کلیدی: حفرة‌ی زیرزمینی، خاک مسلح، مطالعه‌ی آزمایشگاهی، نشست.

۱. مقدمه

حفرة‌های زیرزمینی، که تعداد آن‌ها به سرعت در حال افزایش است، باعث بروز مشکلات و خطرهای زیادی شده است. حفرة‌های زیرزمینی به شکل طبیعی (انحلال سنگ‌های آهکی) و یا مصنوعی (تونل‌سازی و...) ممکن است در مجاورت و یا زیر سازه‌ها و پروژه‌ها قرار گیرند. ایجاد حفرة‌های مذکور با حذف توده‌ی از خاک و سنگ محل، سبب بروز تغییرات قابل توجهی در وضعیت تعادل تنش اطراف آن‌ها می‌شود. از این رو خاک‌های اطراف حفرة جابه‌جا شدند، تا تنش در توده‌ی خاک باقی بماند و دوباره به تعادل برسد. در صورتی که تعداد حفرة‌های زیرزمینی کم عمق، کم باشد، تأثیر آن‌ها می‌تواند تا سطح زمین گسترش یابد و باعث ایجاد نشست‌های قابل توجهی در سطح زمین و در مواردی فروپاشی آن‌ها شود. موضوع دیگر در این رابطه وجود یک حفرة و یا چاله در سطح زمین و نیاز به خاکریزی بر روی آن جهت بهره‌برداری است که می‌توان از خاکریزی برای ساخت بزرگراه‌ها و یا خطوط راه‌آهن نام برد. روش‌های متعددی برای پایداری حفرة‌های زیرزمینی وجود دارد که می‌توان به تثبیت خاک، ایجاد دال بتنی مسلح روی حفرة‌ها، و شمع‌کوبی تا روی سنگ بستر سالم اشاره کرد. در حال حاضر، یکی از روش‌های مطروحه، استفاده از روش خاک مسلح است. در سال ۲۰۰۰، به عنوان قسمتی از برنامه‌ی پژوهشی RAFAEL (تقویت بستر خطوط راه‌آهن و شاهراه‌ها در برابر گودال‌های موضعی)^[۱]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۲/۳، اصلاحیه ۱۳۹۶/۵/۱۰، پذیرش ۱۳۹۶/۵/۲۴

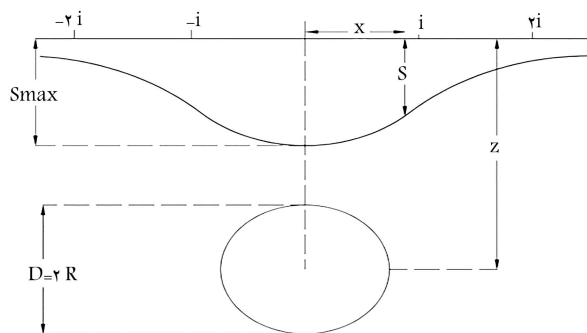
DOI:10.24200/J30.2018.2026.2070

r_porhoseini@yazd.ac.ir
a_salehi2002x@yahoo.com
k.saeidnia@yahoo.com

آزمایش‌های تمام‌مقیاسی بر روی خاکریز مسلح شده‌ی حفرة‌ها انجام و یک روش طراحی برای پوشش مسلح شده‌ی حفرة‌ها پیشنهاد شد.^[۱]

در سال ۲۰۰۲، جهت تحلیل پوشش خاک مسلح روی حفرة‌ها، از روش تحلیلی - عددی که براساس روش تفاضل محدود است، استفاده شد. روش مذکور به شکل ایده‌آلی جهت تجزیه و تحلیل انواع خاص مشکلات زمین مسلح شده مناسب است.^[۲] در سال ۱۹۸۲، پایداری لایه‌ی خاک مسلح پوشاننده‌ی حفرة، با استفاده از نظریه‌ی غشاء کششی، ظرفیت حمل بار تحلیل شد. در سال ۱۹۸۷، نظریه‌ی غشاء کششی با در نظر گرفتن اثر کمپانی^۲ خاک مدل‌سازی شد. روش ذکر شده در سال ۱۹۹۰، برای تحلیل و طراحی پوشش خاک مسلح شده با ژئوسنتتیک واقع بر حفرة‌ها، بسط یافت و با استفاده از ترکیب نظریه‌های غشاء کششی و اثر کمپانی، روابط و جدول‌هایی برای طراحی پوشش خاکی مسلح روی حفرة‌های طبیعی ارائه شد.^[۳]

همچنین در سال ۲۰۰۰، نتایج آزمایش‌های تمام‌مقیاس انجام شده بر روی خاکریز مسلح حفرة‌ی زیرزمینی با روش المان محدود شبیه‌سازی شد.^[۴] برخی پژوهشگران نیز در سال ۲۰۰۴، با استفاده از نرم‌افزار FLAC به بررسی نشست سطح زمین و تغییر شکل تاج تونل پرداختند و نتایج نشان داد که تسلیح خاک تاج تونل با ژئوتکستایل می‌تواند نشست سطحی بیشینه را نزدیک به ۶٪ و تغییر مکان تاج دهانه‌ی تونل را حدود ۵٪ نسبت به حالت بدون تسلیح کاهش دهد.^[۵] همچنین در سال ۲۰۱۶، به بررسی عددی مکانیسم انتقال بار در خاکریزهای



شکل ۱. نشست سطحی با حفر تونل از رابطه‌ی ۱.



شکل ۲. نمای مدل آزمایشگاهی.

می‌توان کل پهنای چاله‌ی نشست را $6i$ در نظر گرفت.^[۱۱] مقدار i از معیارهای اتول و فارمر $(i/R = (z/2R)^{1/2})$ و کلاف و اشمیت $(i/R = (z/2R)^{0.8})$ برابر با 19.2 cm و پهنای چاله‌ی نشست 116 cm برآورد شد. با عنایت به گستردگی بیشتر گودال نشست در شرایط مسلح‌شدگی و اطمینان، طول مخزن خاک برابر با 136 cm انتخاب شد. مشاهده‌های آزمایشگاهی و نرسیدن چاله‌ی نشست به دیواره‌های مدل، کفایت طول انتخابی را نشان داد. با پیش‌بینی 10 cm فضای آزاد در بالای مخزن برای نصب ابزار اندازه‌گیری نشست (LVDT) و 20 cm ارتفاع خاک زیر حفره (برابر با قطر حفره) برای جلوگیری از تأثیر کف قالب در نتایج، ارتفاع کلی مخزن 80 cm محاسبه شد. پهنای مدل 20 cm پیشنهاد شد تا عملکرد کمائی خاک بین دو صفحه‌ی شیشه‌ی از بین رود.

برای مشاهده‌ی رفتار فروریزی خاک اطراف حفره و کاهش اصطکاک با خاک، دیواره‌ی شیشه‌ی سکوریت به ضخامت 10 mm انتخاب و با تعبیه‌ی قیدهای قائم از بیرون و مهارهای عرضی در بالای قالب وضعیت کرنش صفحه‌ی شیشه‌سازى شد. سایر وجوه جهت تحمل فشارهای خاک از ورق فولادی به ضخامت 5 mm طراحی شد. خاک درون قالب از بازشوی کشویی جانبی تخلیه می‌شود. نمای کلی مدل آزمایشگاهی در شکل ۲ مشاهده می‌شود. ابعاد مخزن و وضعیت کرنش صفحه‌ی، محدوده‌ی وسیعی از خاک را مدل‌سازی می‌کند. در شکل ۳، ابعاد مدل مشاهده می‌شود.

فضای حفره به این شرح ساخته شد:

۱. پمپ هوا جهت تأمین فشار هوای درون حفره.

۲. غشاء دولابه‌ی شامل غلاف خارجی پارچه‌ی و بادکنک داخلی که با باز شدن شیر ورودی و هدایت هوا با فشار 10 mbar به بادکنک انعطاف‌پذیر شکل غلاف پارچه‌ی، شکل استوانه‌ی با قطر 20 سانتی‌متر را به خود می‌گیرد. با تخلیه‌ی هوا و کاهش تدریجی فشار هوا، مراحل بارگذاری تا فروریزی حفره، شبیه‌سازی می‌شود.

مسلح شده با ژئوتکستایل پرداخته شد.^[۶] در سال ۲۰۱۵ نیز به صورت عددی و آزمایشگاهی، رفتار خاک مسلح شده بر روی یک کانال مطالعه و اعلام شد که حالت تغییرشکل داده‌ی لایه‌ی ژئوستتیک به منحنی سهمی نزدیک است و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک بر فروافتادگی و نیز کشش در ژئوستتیک نقش بارزی دارد.^[۷] همچنین در سال ۲۰۱۶، راهکار انتقال بار در یک خاکریز با استفاده از مسلح‌سازی خاکریز و تقویت با شمع به طور هم‌زمان و اندرکنش بین آن‌ها و خاک بستر به صورت پارامتری مطالعه شد.^[۸] در پژوهش حاضر، اثر مسلح‌سازی در عملکرد پوشش خاکی حفره‌های کم‌عمق زیرزمینی با مدل‌سازی فیزیکی در شرایط کرنش صفحه‌ی بررسی شد. واکنش حفره به شرایط محیطی با تغییر فشار هوای وارد بر پوسته‌ی (بادکنکی) نازک آن شبیه‌سازی شد. عملکرد خاک مسلح شده روی حفره‌ی زیرزمینی، با ساخت ۱۵ مدل مختلف و کاهش پیوسته‌ی فشار داخلی حفره تا لحظه‌ی فروپاشی اثر عمق قرارگیری، تعداد و طول مسلح‌کننده ارزیابی شد.

۲. مدل فیزیکی

در این مطالعه، مدل فیزیکی با مقیاس $N = 1 : 50$ در حالت کرنش صفحه‌ی تهیه شد. در مدل‌سازی آزمایشگاهی، سختی کششی مسلح‌کننده‌ی مورد استفاده باید N^2 برابر کوچک‌تر از نمونه‌ی مسلح‌کننده‌ی واقعی باشد.^[۹] ژئوستتیک با سختی موردنیاز در مدل آزمایشگاهی به طور صنعتی تولید نمی‌شود، بنابراین از مصالح جایگزین با سختی کمتر و شرایط مشابه مانند ورق نازک آلومینیوم پوشش شده با ماسه استفاده شد. ورق آلومینیوم انتخابی با ضخامت 4 mm و مقاومت کششی 0.15 kN/m است. مسلح‌کننده بین ۱ تا ۲ برابر قطر حفره نسبت به محور از طرفین گسترش یافته است.

۱.۲. اجزاء مدل آزمایشگاهی

- مخزن خاک: ابعاد مدل باید به اندازه‌ی بزرگ باشد که مرزهای مدل یا به بیان ساده، دیواره‌های مخزن، تأثیری در نتایج نداشته باشند.
- تعیین ابعاد مخزن: از آنجا که ایجاد تونل یا حفره در توده‌ی خاک سبب نشست در سطح می‌شود، بنابراین طول مخزن باید به گونه‌ی باشد تا گود نشست به‌صورت کامل ظاهر شود. بنابراین طول دستگاه باید بزرگ‌تر از پهنای گود نشست باشد. از این رو برای تخمین پهنای گود از روابط تجربی موجود استفاده شد. تابع توزیع نرمال (رابطه‌ی ۱) توسط پک (۱۹۶۹) جهت مشخص کردن نیمرخ نشست سطحی استفاده شده است.

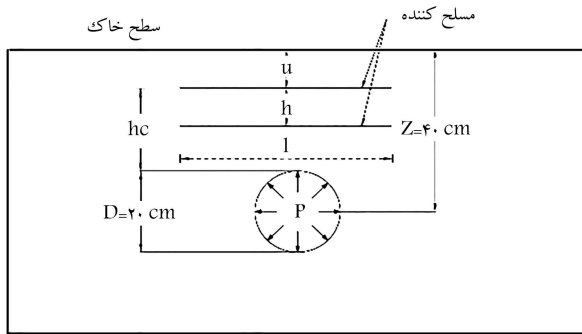
$$s = s_{\max} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

که در آن، s نشست قائم نقطه‌ی در فاصله‌ی x از محور تقارن قائم تونل، s_{\max} نشست تونل دقیقاً در بالای محور تونل، و پارامتر i پهنای گود نشست را تعریف می‌کند. منحنی توزیع نشست سطحی و پارامترهای آن در شکل ۱ معرفی شده است.

نقاط عطف منحنی با مختصات $x = \pm i$ و $s = 0.606 s_{\max}$ است و فاصله‌ی نقطه‌ی با شعاع انحنای کمیته تا محور تقارن تونل برابر $\sqrt{3}i$ بود و خط مماس بر نقطه‌ی عطف، سطح زمین را به فاصله‌ی $2i$ از محور تقارن قطع می‌کرد.^[۱۰] هر چند که حدگسترش منحنی توزیع نرمال، تا بی‌نهایت است، ولی برای مقاصد عملی

جدول ۱. نتایج آزمایش برش مستقیم.

مصالح	چسبندگی (c) (KPa)	زاویه اصطکاک داخلی (φ°)
ماسه	≈ 0	۳۸
ماسه و ورق آلومینیوم ساده	≈ 0	۳۷٫۶
ورق آلومینیوم ماسه اندود	≈ 0	۴۱٫۶

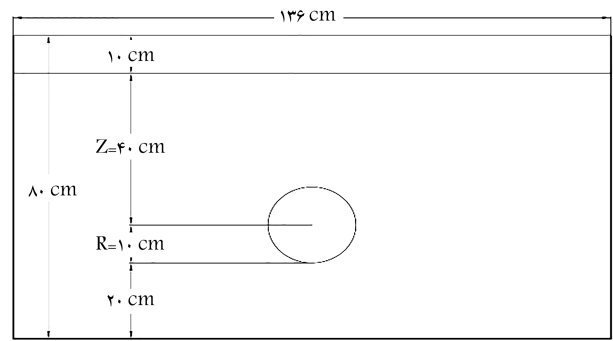


شکل ۴. پارامترهای مسلح سازی.

انجام آزمایش‌ها در دو مرحله شامل: آماده سازی مدل و بارگذاری به صورت کاهش تدریجی فشار هوای درون حفره برنامه ریزی شد.

۱. آماده سازی مدل: برای هر یک از آزمایش‌ها ابتدا به روش بارشی مخزن خاک تا تراز زیر حفره (۲۰ سانتی متر از کف مخزن) از خاک ماسه‌یی پر شد، سپس با نصب مجموعه‌ی حفره‌ی دو پوسته‌یی، شامل غلاف پارچه‌یی و بادکنک و با اعمال فشار هوا تا آن‌دکی بیشتر از فشار سربار خاک اطراف حفره، حجم حفره‌ی مورد نظر ایجاد شد. مجدداً با استفاده از روش بارشی، خاک تا تراز مسلح‌کننده اضافه و مسلح‌کننده در تراز مرتبط نصب شد. لایه‌های خاک تا تکمیل مدل و رسیدن به تراز نهایی خاک، ۷۰ سانتی متر از کف مخزن ادامه یافتند و آنگاه تغییر مکان‌سنج در محور حفره روی سطح خاک نصب شد. فشار هوای درون حفره، در محدوده‌ی تنش قائم خاک روبروی حفره و مقداری بیشتر از آن در نظر گرفته شد. با توزین ماسه‌ی جای‌گرفته در ظروف نمونه‌گیری با بارش ماسه در مخزن (اعماق ۲۰ و ۴۰ سانتی متر)، وزن مخصوص متوسط خاک برابر 1676 kN/m^3 اندازه‌گیری شد. با احتساب 5 cm ارتفاع خاک تا تراز کف حفره، تنش قائم برابر 83 mbar محاسبه شد ($1676 \text{ kN/m}^3 \times 0.05 \text{ m} = 83.8 \text{ kPa}$). نهایتاً در شروع آزمایش، فشار هوا مقداری بیشتر از فشار سربار خاک و برابر با 100 mbar در مدل اعمال شد.

۲. بارگذاری: پس از آماده سازی مدل و مدرج سازی ابزارهای اندازه‌گیری، فشار داخل حفره به تدریج و آرام تا زمان فروپاشی کامل، کاهش داده شد. فشار هوا توسط فشارسنج و نشست سطحی توسط تغییر مکان‌سنج هم‌زمان ثبت شدند. این روند تا هنگامی که با خروج هوا و نشست، فشار درون حفره ثابت ماند (شروع فروپاشی حفره)، ادامه یافت. شکل ۵، فرم کلی منحنی کاهش فشار داخلی حفره - نشست سطحی خاک در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. با تخلیه‌ی کامل هوا از حفره، نشست سطحی روی تاج (بیشینه) $(S_{\text{max}} - e_0)$ از دامنه‌ی بهره‌برداری LVDT فراتر رفت و با کولیس اندازه‌گیری و میانگین آن در عرض مدل بر حسب میلی‌متر گزارش شد.



شکل ۳. ابعاد مدل فیزیکی.

۳. فشار هوای داخل حفره با حسگر فشار به حساسیت 0.1 میلی‌بار (0.1 mbar) کیلو پاسکال) و نمایشگر دیجیتال اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری نشست از یک تغییر مکان‌سنج (LVDT) با دقت $1 \text{ mm} / 0.01$ استفاده شد. پایه مغناطیسی متصل به بدنه‌ی مخزن، تغییر مکان‌سنج را در بالای محور تونل و در وسط عرض مخزن ثابت نگه می‌دارد. یک صفحه‌ی فلزی در سطح خاک از نفوذ میله‌ی LVDT، درون خاک جلوگیری می‌کند. لایه‌های خاک به طور افقی در مخزن خاک با روش بارشی پیوسته و ارتفاع سقوط 20 cm اجرا شد.

۳. مشخصات خاک

خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها از نوع ماسه‌ی سیلیسی عبوری از الک ۱۲ با چشمه‌ی 1.75 میلی‌متر انتخاب شد. مسلح سازی خاک با ورق نازک آلومینیوم انجام پذیرفت. همچنین به منظور افزایش درگیری بین ورق نازک آلومینیوم و خاک، با کمک چسب دو طرف ورق با ماسه‌ی موجود پوشش شد. آزمایش ASTM D2487، بر روی نمونه‌ی خاک انجام شد که ضریب یکنواختی (C_u) و خمیدگی (C_c) آن به ترتیب 1.62 و 0.91 و رده‌ی آن SP بود.

آزمایش برش مستقیم: جهت تعیین مقاومت چسبندگی (c) و زاویه‌ی اصطکاک داخلی (φ) خاک در معیار مقاومت برشی موهر - کلمب، آزمایش برش مستقیم (ASTM D2166 و AASHTO T208) بر روی نمونه انجام پذیرفت. همچنین به منظور تعیین اثر اندرکنش مسلح‌کننده با خاک، در آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌ی خاک مسلح‌کننده، ورق آلومینیومی دقیقاً در سطح مشترک دو قالب برش قرار داده شد. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم خاک، خاک با ورق‌های آلومینیومی ساده و پوشیده با خاک ماسه‌یی در جدول ۱ ارائه شده است. خاک با چسب به ورق آلومینیومی چسبانده و از دو طرف پوشش شد. بررسی ورق اندود شده پس از آزمایش نشان داد که دانه‌های خاک در جای خود ثابت مانده‌اند. لایه‌های خاک با ورق ماسه‌ی اندود، مسلح سازی شد.

۴. برنامه‌ی آزمایشگاهی

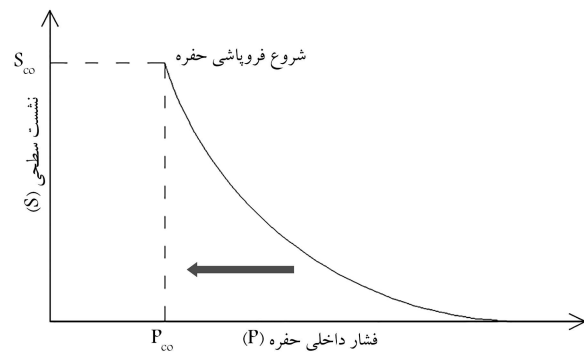
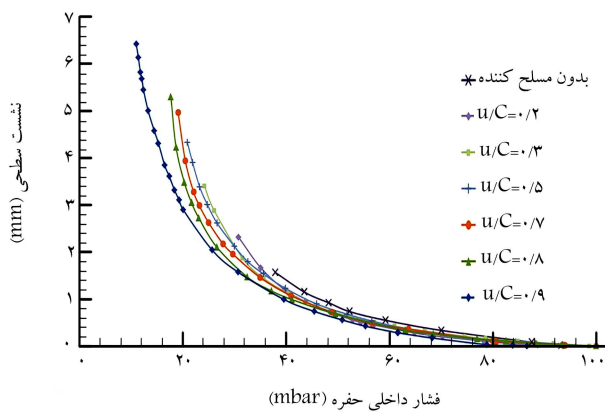
به منظور بررسی اثر شرایط مختلف مسلح سازی خاک در عملکرد حفره و نشست سطحی، ۱۵ آزمایش به‌طور مستقل و ۵ آزمایش به صورت تکرار با هدف بررسی دقت مدل و تکرار پذیری نتایج انجام شد. در شکل ۴، پارامترهای مسلح سازی معرفی شده است. وضعیت مسلح سازی خاک در آزمایش‌های مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات مسلح‌سازی در آزمایش‌ها.

آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
n	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۳	۳	۳	۳	۲٫۵	۲٫۵	۱
l/D	-	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۲	۲٫۵	۲٫۵	۴	۴
u/C	-	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۵	۰٫۷	۰٫۸	۰٫۹	۰٫۸	۰٫۷	۰٫۸	۰٫۹	۰٫۸	۰٫۹	۰٫۸	۰٫۹
h/D	-	-	-	-	-	-	-	۰٫۱	۰٫۱	-	-	-	-	-	-
h_c/D	-	-	-	-	-	-	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۳	-	-	-	-	-	-

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های بررسی تأثیر نسبت عمق.

شماره‌ی آزمایش	$\frac{u}{c}$	P_{co} (mbar)	S_{co} (mm)	S_{max-co} (mm)	ΔP_{co} (%)	ΔS_{co} (%)	ΔS_{max-co} (%)
۱	۰	۳۷٫۹	۱٫۵۷	۱۲۰	-	-	-
۲	۰٫۲	۳۰٫۸	۲٫۳۲	۹۵	۱۸٫۷	۴۷٫۸	۲۰٫۸
۳	۰٫۳	۲۴٫۲	۳٫۴۰	۷۸	۳۶٫۱	۱۱۶٫۷	۳۵٫۰
۴	۰٫۵	۲۰٫۹	۴٫۳۳	۶۰	۴۴٫۸	۱۷۶٫۱	۵۰٫۰
۵	۰٫۷	۱۹٫۱	۴٫۹۷	۵۵	۴۹٫۶	۲۱۶٫۹	۵۴٫۲
۶	۰٫۸	۱۷٫۷	۵٫۳۱	۵۱	۵۳٫۳	۲۳۸٫۳	۵۷٫۵
۷	۰٫۹	۱۱	۶٫۴۳	۴۰	۷۱٫۰	۳۰۹٫۵	۶۶٫۷



شکل ۵. فرم کلی منحنی فشار داخلی حفره به نشست سطحی.

شکل ۶. منحنی تغییرات فشار داخلی حفره - نشست سطحی با نسبت عمق‌های مختلف مسلح‌سازی.

$$\Delta S_{max-co} = \frac{S_{max-co(r)} - S_{max-co(u)}}{S_{max-co(u)}} \times 100 \quad (4)$$

که در آن‌ها، ΔP_{co} : درصد تغییر فشار داخلی حفره در لحظه‌ی شروع فروپاشی حفره نسبت به حالت غیرمسلح، ΔS_{co} : درصد تغییر نشست سطحی در لحظه‌ی شروع فروپاشی حفره نسبت به حالت غیرمسلح، ΔS_{max-co} : درصد تغییر بیشینه‌ی نشست سطحی پس از فروپاشی کامل حفره نسبت به حالت غیرمسلح، P_{co} : فشار داخلی حفره در لحظه‌ی شروع فروپاشی حفره، S_{co} : نشست سطحی در شروع فروپاشی حفره و S_{max-co} : نشست سطحی پس از فروپاشی کامل حفره هستند. زیرنویس‌های r و u به ترتیب معرف خاکریز مسلح و غیرمسلح هستند. نتایج حاصل از آزمایش‌های با نسبت عمق‌های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. منحنی تغییرات نشست سطحی - فشار داخلی حفره در مدلی‌هایی با یک لایه‌ی مسلح‌سازی و نسبت عمق‌های مختلف در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

تعداد لایه‌های مسلح‌کننده: اثر تعداد لایه‌های مسلح‌کننده در آزمایش‌های ۷

۵. نتایج آزمایش مدل‌ها

به منظور مطالعه‌ی اندرکنش خاک مسلح - حفره، پارامترهای انتخابی عبارت بودند از: u : عمق استقرار بالاترین مسلح‌کننده از سطح خاک، n : تعداد لایه‌های مسلح‌کننده، l : طول مسلح‌کننده.

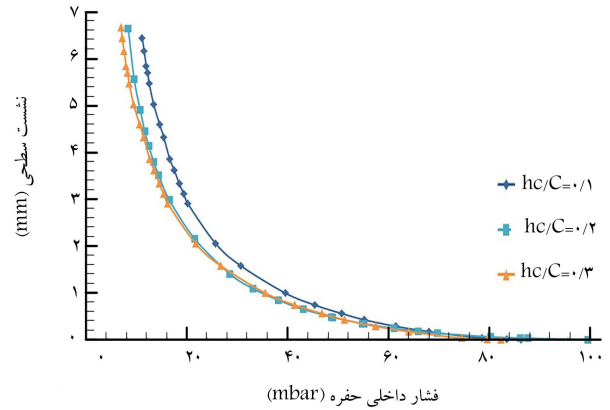
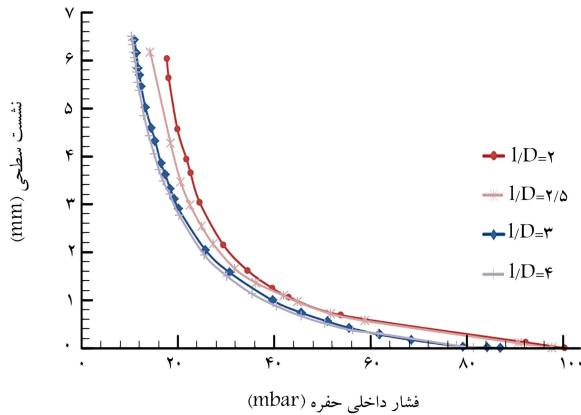
عمق قرارگیری لایه‌ی مسلح‌کننده: برای بررسی اثر عمق قرارگیری لایه‌ی مسلح‌کننده، یک لایه ورق آلومینیوم پوشیده‌شده با ماسه با طول ۳ برابر قطر حفره در عمق‌های گوناگون روی حفره قرار گرفت (آزمایش‌های ۲ الی ۸). جهت وضوح از «نسبت عمق»، نسبت عمق قرارگیری مسلح‌کننده (u) به ارتفاع خاکریز (C) استفاده شد. درصد تغییرات فشار داخلی حفره و نشست سطحی در شروع فروپاشی و فروپاشی کامل حفره در دو حالت مسلح شده و مسلح نشده، با روابط ۲ الی ۴ تعریف می‌شود:

$$\Delta P_{co} = \frac{P_{co(u)} - P_{co(r)}}{P_{co(u)}} \times 100 \quad (2)$$

$$\Delta S_{co} = \frac{S_{co(u)} - S_{co(r)}}{S_{co(u)}} \times 100 \quad (3)$$

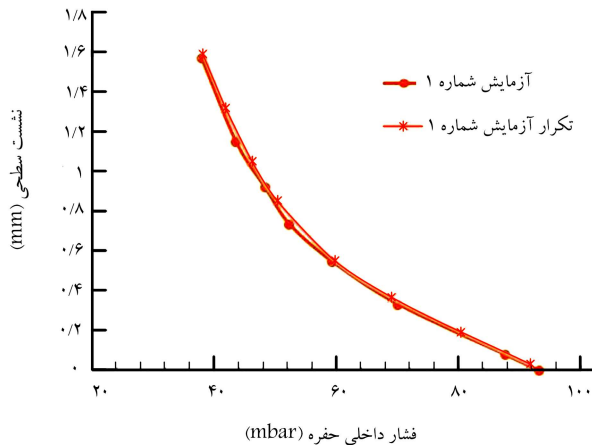
جدول ۴. نتایج آزمایش‌های تأثیر تعداد لایه‌های مسلح‌کننده.

شماره‌ی آزمایش	n	$\frac{h_c}{C}$	P_{co} (mbar)	S_{co} (mm)	S_{max-co} (mm)	ΔP_{co} (%)	ΔS_{co} (%)	ΔS_{max-co} (%)
۱	۰	۰	۳۷٫۹	۱٫۵۷	۱۲۰	-	-	-
۷	۱	۰٫۱	۱۱	۶٫۴۳	۴۰	۷۱٫۰	۳۰٫۵	۶۶٫۷
۸	۲	۰٫۲	۸٫۲	۶٫۶۴	۳۰	۷۸٫۴	۳۲٫۵	۷۵٫۰
۹	۳	۰٫۳	۶٫۸	۶٫۶۶	۲۸	۸۲٫۱	۳۲٫۴	۷۶٫۷



شکل ۷. منحنی فشار داخلی حفره - نشست سطحی با تعداد لایه‌ی مسلح‌کننده‌ی مختلف.

شکل ۸. منحنی فشار داخلی حفره - نشست سطحی برای طول‌های مختلف مسلح‌کننده.



شکل ۹. نتایج آزمایش ۱ و تکرار آن.

الی ۹ بررسی شد. لایه‌های اول، دوم و سوم مسلح‌کننده به ترتیب در نسبت عمق‌های ۰٫۱، ۰٫۲ و ۰٫۳ قرار داده شدند. برای مقایسه‌ی سه حالت مسلح‌سازی ذکر شده از نسبت بدون بعد (h_c/C) استفاده شد که در آن h_c فاصله‌ی بالاترین لایه‌ی مسلح‌کننده از تاج حفره و C ، ضخامت خاکریز از سطح زمین تا تاج حفره است. میزان تغییرات فشار داخلی حفره و نشست سطحی متناظر با آن در شروع فروپاشی و بیشینه‌ی نشست سطح خاک پس از فروپاشی کامل حفره، برای تعداد لایه‌های مختلف مسلح‌کننده نسبت به حالت غیرمسلح در جدول ۴ ارائه شده است. منحنی تغییرات نشست در برابر فشار داخلی با تعداد لایه‌های مسلح‌کننده در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند با افزایش لایه‌ی مسلح از ۱، ۲ به $(h_c/C = ۰٫۲)$ ، سختی و مقاومت خاکریز افزایش در خور توجهی می‌یابد، اما بین ۲ و ۳ لایه‌ی مسلح‌سازی، عملکرد خاکریز پوششی تغییر ملموسی ندارد. با دور شدن از مرکز حفره‌ی اعوجاج و انحنای در لایه‌ی خاک کاهش می‌یابد و تسلیح لایه‌های بالاتر را کم ارزش می‌کند.

۱۱، ۱۳ و ۱۵ در نسبت عمق ۰٫۸ انجام پذیرفت و نتایج نشست سطحی و نتایج پایداری آن تا فروری حفره با مسلح‌سازی در نسبت عمق ۰٫۹ مقایسه شد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان داد که نسبت عمق ۰٫۹ با طول‌های مختلف مسلح‌کننده، عملکرد مطلوب‌تری دارد که به دلیل القاشدن تنش‌های کششی و برشی در تاج حفره و نزدیکی‌های آن و عملکرد کششی مسلح‌کننده است.

طول مسلح‌کننده: برای تعیین اثر عامل ذکر شده در پایداری و کاهش تغییرشکل‌های خاکریز روی حفره، آزمایش‌هایی با طول‌های گوناگون مسلح‌کننده و نسبت عمق ۰٫۹ بررسی شد. تغییرات فشار داخلی حفره و نشست سطحی متناظر با آن در شروع فروپاشی و بیشینه‌ی نشست سطحی پس از فروپاشی کامل حفره، نسبت به حالت غیرمسلح، برای مقادیر مختلف، نسبت (l/D) در جدول ۵ ارائه شده است. نمودار نشست سطحی - فشار داخلی حفره با طول‌های مختلف مسلح‌کننده در شکل ۸ مشاهده می‌شود که مطابق آن، با افزایش طول مسلح‌کننده از ۳ برابر قطر حفره، تغییری در نشست سطحی خاک ایجاد نشده است. لذا طول بهینه‌ی مسلح‌سازی در این شرایط به ۳ برابر قطر محدود شده است. آزمایش‌های

۱.۵. اعتبارسنجی نتایج

از بین ۱۵ آزمایش اصلی، ۵ مدل آزمایشی به منظور بررسی دقت و قابل اعتماد بودن نتایج تکرار شدند. با توجه به شکل ۹، نتایج آزمایش ۱ و تکرار آن مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از تکرار آزمایش با دقت خوب، نتایج آزمایش ۱ را تأیید

جدول ۵. اثر طول مسلح‌کننده.

شماره‌ی آزمایش	$\frac{l}{D}$	P_{co} (mbar)	S_{co} (mm)	S_{max-co} (mm)	ΔP_{co} (%)	ΔS_{co} (%)	ΔS_{max-co} (%)
۱	۰	۳۷٫۹	۱٫۵۷	۱۲°	-	-	-
۱۲	۲	۱۷٫۷	۶٫۰۳	۹۵	۵۳٫۳	۲۸۴٫۰	۲۰٫۸
۱۴	۲٫۵	۱۴٫۳	۶٫۱۷	۶۸	۶۲٫۳	۲۹۲٫۸	۴۳٫۳
۷	۳	۱۱	۶٫۴۳	۴۰	۷۱٫۰	۳۰۹٫۵	۶۶٫۷
۱۶	۴	۱۰٫۵	۶٫۵۰	۳۸	۷۲٫۳	۳۱۳٫۸	۶۸٫۳

- با افزایش نسبت عمق مسلح‌سازی پوشش خاکی حفره، در شرایط یکسان، نشست سطحی کاهش می‌یابد.
- با افزایش نسبت عمق مسلح‌سازی، در لحظه‌ی شروع فروپاشی حفره، نشست سطح خاک به میزان بیشتری قابل افزایش است (تا ۳ برابر نسبت به حالت غیرمسلح)، یعنی پوشش خاکی حفره می‌تواند نشست بیشتری را بدون گسیختگی تحمل کند و عملکرد خمیری خاکریز تقویت می‌شود.
- افزایش تعداد لایه‌ی مسلح‌کننده می‌تواند پایداری پوشش خاکی حفره را تقویت کند. مقایسه‌ی نتایج مدل‌های ۱، ۲، ۳ و لایه‌ی مسلح‌کننده از روی حفره نشان داد که افزایش تحمل نشست پس از فروپاشی حفره برای ۲ و ۳ لایه‌ی مسلح‌کننده نسبت به ۱ لایه به ترتیب ۲۵٪ و ۳۰٪ بوده است، که حالت اقتصادی به ۲ لایه‌ی مسلح‌کننده محدود می‌شود.
- اگر طول مسلح‌کننده از حد معینی بیشتر شود، تأثیر چندانی در عملکرد خاک مسلح واقع بر روی حفره ندارد. در اینجا بیشینه‌ی طول مؤثر برای مسلح‌سازی، تقریباً ۳ برابر قطر تعیین شد.

می‌کند. تکرارپذیری نتایج آزمایش‌ها بیانگر دقت در ساخت مدل‌ها و اعتبار نتایج به دست آمده است. اعتبارسنجی نتایج از ضروریات یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی است. از آنجا که عوامل گوناگونی، مانند: تراز تنش، نوع و بافت مسلح‌کننده و شرایط فیزیکی خاک، اندرکنش بین خاک و مسلح‌کننده را تحت الشعاع قرار می‌دهند، در این موارد باید با ساخت مدل‌های با مقیاس بزرگ و یا مدل‌سازی عددی به حل موضوع پرداخت.

۶. نتیجه‌گیری

با ساخت مدل آزمایشگاهی، شرایط مختلف مسلح‌سازی بر عملکرد پوشش خاک روی حفره‌ی استوانه‌یی مطالعه شد. با توجه به نتایج بارگذاری مدل‌ها، تعداد لایه‌های تسلیح، نسبت عمق و طول مسلح‌کننده از عوامل تأثیرگذار در عملکرد خاکریز واقع بر روی حفره‌ها هستند. براساس نتایج آزمایشگاهی در شرایط مختلف تسلیح می‌توان گفت:

پانوشته‌ها

1. reinforcement des assises ferroviaires et autoroutieres contre les effondrements localises (reinforcement of rail and motorway foundations against localized sinkholes)
2. arching

منابع (References)

1. Blivet, J.C., Khay, M., Villard, P. and et al. "Experiment and design of geosynthetic reinforcement to prevent localized sinkholes", *International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, Australia, pp. 1-6 (2000).
2. Poorooshasb, H.B. "Subsidence evaluation of geotextile-reinforced gravel mats bridging a sinkhole", *Geosynthet-*

ics International, **9**(3), pp. 259-282 (2002).

3. Giroud, J.P., Bonaparte, R., Beech, J.F. and et al. "Design of soil layer-geosynthetic systems overlying voids", *Geotextiles and Geomembranes*, **9**(1), pp. 11-50 (1990).
4. Villard, P., Gourc, J.P. and Giraud, H. "A geosynthetic reinforcement solution to prevent the formation of localized sink holes", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(5), pp. 987-999 (2000).
5. Hashim-Alhosseini, H., Shayanfard, M., Roshanzamir, M.A. and et al. "Reduce in deformations of shallow tunnels with geotextiles", First National Congress of Civil Engineering, Sharif University of technology (In Persian) (2004).
6. Villard, P., Huckert, A. and Briancon, L. "Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids: Numerical approach and design", *Geotextiles and Geomembranes*, **44**(3), pp. 381-39 (2016).

7. Huange, J., Le, V., Bin-Shafique, S. and et al. "Experimental and numerical study of geosynthetic reinforced soil over a channel", *Geotextiles and Geomembranes*, **44**(3), pp. 382-392 (2015).
8. Liu, W., Qu, S., Zhang, H. and et al. "An integrated method for analyzing load transfer in geosynthetic reinforced and pile supported embankment", *KSCE J. Civil Eng.*, Springer, **21**(3), pp. 687-702 (2016).
9. Fakher, A. "Research methods in geotechnical engineering", Tehran University Press (In Persian) (2008).
10. Aoyagi, T. "Representing settlement for soft ground tunneling", M.Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology (1995).
11. Tan, W.L. and Ranjith, P.G. "Parameters and considerations in soft ground tunneling", *The Electronic. J. Geotechnical Engineering*, **8**(4), pp.1-16 (2003).
12. Attewell, P.B. and Farmer, I.W. "Ground disturbance caused by shield tunneling in a stiff, over consolidated clay", *Eng. Geol.*, **8**(4), pp. 361-381 (1974).
13. Clough, G.W. and Schmidt, B. "Excavation and tunneling", *Soft Clay Engineering*, chapter 8, Elsevier (1981).