

# تحلیل تنش قائم وارد بر مجاری مدفون در خاک مسلح

ندا افشارکاوه (کارشناس ارشد)

سید ناصر مقدس نفرشی\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۴)  
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۱/۳، ص. ۶۳-۵۱

در این نوشتار، روشی تحلیلی جهت تعیین تنش وارد بر مجاری مدفون در خاک با در نظر گرفتن اثر توأم پدیده‌ی قوس‌زدگی و اثر تسلیح خاک با یک لایه‌ی تسلیح ارائه شده است. به منظور ارائه‌ی عملکرد این روش، مطالعات پارامتری در خصوص بررسی نحوه‌ی تأثیر عوامل مختلف در میزان تنش وارد بر حفره و کارایی سیستم انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مصالح نرم با مدول کشسانی پایین در محدوده‌ی بین ۳۵° تا ۷۰° کیلوپاسکال در بالای حفره و افزایش ضخامت این نوع مصالح روی حفره تا میزان حدود عرض تراشه، موجب عملکرد قوسی بهتر، کاهش تنش وارد بر حفره و افزایش کارایی سیستم می‌شود. همچنین مقایسه‌ی نتایج حاصل از خاکریز غیرمسلح و خاکریز مسلح نشان می‌دهد که استفاده از یک لایه‌ی تسلیح با سختی کششی در محدوده‌ی بین ۱۰° تا ۲۰۰° کیلونیوتن بر متر می‌تواند سبب کاهش تنش روی حفره و در نتیجه افزایش کارایی سیستم شود. روش تحلیلی موردنظر علاوه بر رفع محدودیت‌های موجود در روش‌های دیگر پژوهشگران، تطبیق قابل قبولی در مقایسه با آن‌ها در شرایط یکسان دارد.

واژگان کلیدی: پدیده‌ی قوس‌زدگی، ژئوسنتتیک، لایه‌ی تسلیح، تنش قائم، مجاری مدفون.

n.afsharkaveh@gmail.com  
nas\_moghaddas@kntu.ac.ir

## ۱. مقدمه

خاک و بررسی عملکرد قوسی خاک پرداخته‌اند.<sup>[۹-۷]</sup> آن‌ها استفاده از خاک نرم روی حفره را برای کاهش تنش روی آن توصیه کرده‌اند. پژوهشگران دیگری (۱۹۹۴)<sup>[۱۰]</sup> نیز از مدل قوس نیمه استوانه‌یی برای مدل‌کردن پدیده‌ی قوس‌زدگی براساس روش هولت و راندولف،<sup>[۱۱]</sup> استفاده کردند، و بدین نتیجه رسیدند که المان بحرانی در تاج قوس نیمه استوانه‌یی قرار دارد. در پژوهش دیگری نیز در زمینه‌ی مجراهای مدفون در خاک و همچنین بررسی پدیده‌ی قوس‌زدگی روابطی برای حفره‌های صلب و انعطاف‌پذیر ارائه شده است.<sup>[۱]</sup> همچنین پژوهشگرانی در مطالعه‌ی خود به بررسی عملکرد قوسی برای حفره‌های فولادی در اعماق مدفون زیاد توسط روش‌های المان محدود پرداخته‌اند،<sup>[۱۲]</sup> و در تحلیل‌های خود، با توجه به نتایج آزمایشگاهی ارائه‌شده در مطالعه‌ی دیگری،<sup>[۱۳]</sup> مدول کشسانی مصالح نرم را بین ۳۴۵ کیلوپاسکال (برای ژئوفوم<sup>۵</sup>) و ۲۷۵۶ کیلوپاسکال (برای یونجه) در نظر گرفته‌اند. مرور مطالعات برخی پژوهشگران در خصوص عملکرد قوسی خاک روی مجاری مدفون نشان می‌دهد که این مطالعات عمدتاً بر کاهش تنش وارد بر روی مجاری مدفون (حفره) در خاک غیرمسلح متمرکز هستند.<sup>[۱۴-۱۶]</sup> با توجه به اهمیت کاهش هرچه بیشتر تنش وارد بر حفره‌های مدفون، استفاده از ایده‌ی خاک مسلح در این خصوص می‌تواند نقش مهمی را در کاهش تنش ایفا کند (شکل ۱).

از این رو در این نوشتار، به منظور توسعه و اصلاح روش تحلیلی ارائه‌شده توسط شاکلا و سیواکوان،<sup>[۱۴]</sup> یک روش تحلیلی جهت ارزیابی تنش وارد بر تاج حفره در

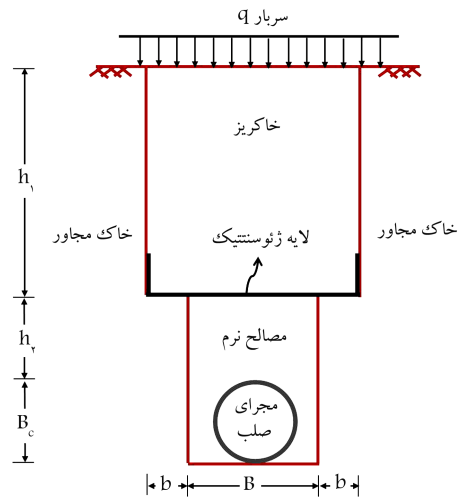
عملکرد قوسی<sup>۱</sup> خاک یکی از پدیده‌های مهم در مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌رود، که امکان وقوع آن در سازه‌های خاکی به خصوص در سازه‌های مدفون نظیر مجراهای زیرزمینی وجود دارد. در صورتی که سختی ستون خاک روی مجاری مدفون از سختی خاک مجاور آن کمتر باشد، به علت تمایل ستون خاک بالای مجرا به نشست‌های بیشتر در مقایسه با خاک مجاور و ایجاد تنش‌های برشی به سمت بالا در دیواره‌ی ستون خاک بالای حفره و در نتیجه بروز پدیده‌ی قوس‌زدگی، کاهش تنش قائم وارد بر تاج حفره رخ خواهد داد.<sup>[۵-۱]</sup> به عبارت دیگر، به علت عملکرد قوسی خاک بالای یک حفره یا مجاری مدفون، بخشی از وزن ستون خاک به بخش‌های مجاور منتقل می‌شود و این امر کاهش بار وارد بر روی حفره را به همراه خواهد داشت.<sup>[۱]</sup> اولین مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی در زمینه‌ی عملکرد قوسی خاک‌ها توسط ترزاقی با انجام آزمایش در ریجه انجام شده است. وی براساس نتایج آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های خود، یک تئوری برای عملکرد قوسی در خاک‌های ماسه‌یی تحت شرایط کرنش مسطح بیان کرده است. او اثر عملکرد قوسی را به عنوان انتقال فشار بین توده‌ی آزاد از خاک و قسمت‌های ثابت و ساکن مجاور آن تعریف کرده است.<sup>[۲]</sup> در ادامه، پژوهشگران مختلف با روش‌های عددی نظیر: تفاضل محدود<sup>۲</sup>، اجزاء محدود<sup>۳</sup> و اجزاء مجزا<sup>۴</sup> به مطالعه‌ی رفتار و عملکرد مجاری مدفون در

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۴/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۰/۳۰، پذیرش ۱۳۹۲/۱۱/۲۰.

- خاکریز و مصالح نرم همگن، ایزوتروپ و فاقد چسبندگی هستند؛
- مصالح نرم و خاکریز فقط در جهت قائم تغییرشکل می‌دهند؛
- با فرض استفاده از لوله‌های بتنی، حفره به صورت کاملاً صلب در نظر گرفته شده است. بنابراین هیچ‌گونه تغییرشکلی در برابر بارهای قائم وارد بر آن رخ نخواهد داد؛
- طول مجرا و خاکریز زیاد است، به طوری که شرایط کرنش سطح برقرار است؛
- بارهای قائم در طول کمان ژئوستتیک به صورت یکنواخت توزیع می‌شوند.

در این روش فرض بر آن است که لایه‌ی تسلیح روی لایه‌ی مصالح به عمق  $h_2$  قرار گیرد و با کوبیدن خاک روی لایه‌ی تسلیح در عرض  $b$  شرایط گیرداری آن فراهم شود. همچنین به منظور بروز هرچه بهتر عملکرد قوسی خاک روی حفره و کاهش تنش وارد بر حفره‌ی مدفون در خاک، استفاده از مصالح نرم بر روی حفره‌ی مدفون مدنظر است.



شکل ۱. تصویر شماتیک از حفره‌ی مدفون در خاک مسلح و پارامترهای موردنظر.

شرایط خاکریز غیرمسلح و خاکریز مسلح به منظور بررسی میزان کاهش تنش وارد بر حفره‌ی مدفون در خاکریز مسلح در مقایسه با خاکریز غیرمسلح ارائه شده است. برخلاف روش شاکلا و سیواکوان،<sup>[۱۴]</sup> در این مطالعه:

۱. برای شکل‌گیری بهتر پدیده‌ی قوس‌زدگی در قسمت خاکریز به جای المان مستطیلی از المان قوسی نیمه استوانه‌یی به دلیل عملکرد بهتر و نزدیک‌تر به پدیده‌ی قوسی استفاده شده است،<sup>[۱۵]</sup>

۲. اصطکاک خاک با لایه‌ی تسلیح لحاظ شده است،

۳. به جای فرض یک مقدار ثابت برای مقدار خیز لایه‌ی تسلیح ( $t$ ) بر حسب عرض ترانشه، مقدار آن با ارائه‌ی روابط تحلیلی در شرایط مختلف از هندسه‌ی مسئله و خصوصیات مصالح محاسبه شده است. همچنین مطالعه‌ی پارامتری به منظور بررسی اثر عوامل مختلف نظیر: سختی کششی لایه‌ی تسلیح ( $kg$ )، سختی مصالح نرم در بالای حفره ( $E_2$ )، ارتفاع خاکریز ( $h_1$ ) و ارتفاع مصالح نرم ( $h_2$ ) بر تنش قائم وارد بر تاج حفره‌ی مدفون در خاک، کارایی سیستم، میزان کشش و کرنش محوری لایه‌ی تسلیح انجام شده است.

## ۲. روش تحلیل

شکل ۱، طرح کلی از ترانشه، حفره‌ی مدفون در خاک، لایه‌ی تسلیح و پارامترهای موردنظر را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، حفره‌ی با قطر  $B_c$  در ترانشه‌ی (از مصالح نرم یا مصالح مشابه) به عرض  $B$  و ارتفاع  $h_2$  تحت سربار  $q$  و وزن خاکریز دانه‌یی با ارتفاع  $h_1$  قرار دارد. مقدار عرض ترانشه ( $B$ ) از جمله محدودیت‌های طرح است که مقدار آن برای مجاری دایروی براساس استاندارد STM D2321-11<sup>[۱۷]</sup> برابر با بیشینه‌ی مقادیر  $(400 + B_c)$  (mm) و  $1/25B_c + 300$  (mm) براساس استاندارد AASHTO HB-17<sup>[۱۸]</sup> برابر با  $1/5B_c + 300$  (mm) توصیه می‌شود. در این نوشتار، عرض  $B_c$  براساس استاندارد ASTM D2321-11<sup>[۱۷]</sup> انتخاب شده است. همچنین لازم است مقدار مناسبی برای عرض  $b$  و مقدار بالآمدگی لایه‌ی تسلیح روی دیوارهای قائم خاکریز، به منظور گیرداری لایه‌ی مسلح در نظر گرفته شود. در این روش تحلیلی، این فرضیات موردنظر هستند:

### ۱.۲. روش تحلیل در حالت خاکریز غیرمسلح

خاکریز دانه‌یی به ارتفاع  $h_1$  و عرض  $B + 2b$  بر روی مصالح نرم با ضخامت  $h_2$  و عرض  $B$  را مطابق شکل ۲ الف در نظر بگیرید. به منظور محاسبه‌ی تنش قائم  $\sigma_s$  در تراز  $z = h_1$  (بالای لایه‌ی ژئوستتیک همانند شکل ۲ الف)، قوس نیمه استوانه‌یی به ضخامت  $b$  با شعاع داخلی  $r_i = B/2$  و شعاع خارجی  $r_o = r_i + b = B/2 + b$  تحلیل شده است.<sup>[۱۹]</sup> اگرچه در عمل قوس ایجاد شده قطعاً به صورت یک نیمه استوانه‌ی کامل (یک نیم‌دایره) نیست، اما در شکل‌گیری پدیده‌ی قوس‌زدگی تشکیل آن به صورت یک قوس نیمه‌استوانه‌یی بسیار محتمل‌تر از تشکیل آن به صورت یک المان مستطیلی است.<sup>[۱۹]</sup>

از آنجا که در مطالعه‌ی در سال ۱۹۹۴<sup>[۱۹]</sup> در مدل قوس نیمه استوانه‌یی، بحرانی‌ترین وضعیت تنش را در المان واقع در تاج قوس نیمه استوانه‌یی گزارش کرده‌اند، از این رو با در نظر گرفتن تعادل المان واقع در تاج قوس مطابق شکل ۲ ب و اعمال نیروهای وارده بر آن، معادله‌ی دیفرانسیل پایه مطابق رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = -\gamma_1 \quad (1)$$

که در آن،  $\sigma_r$  تنش شعاعی،  $\sigma_\theta$  تنش مماسی،  $\gamma_1$  وزن مخصوص لایه‌ی خاکریز و  $r$  فاصله‌ی شعاعی هستند. در این حالت ارتباط بین  $\sigma_r$  (تنش شعاعی)،  $\sigma_\theta$  (تنش مماسی)، توسط ضریب فشار مقاوم خاک ( $K_p$ ) محتمل‌تر است. علت استفاده از ضریب فشار مقاوم خاک ( $K_p$ ) به جای ضریب فشار حالت سکون یا محرک آن است که در شکل‌گیری قوس‌زدگی خاک (شکل ۲ ب)، نیروهای وارد بر المان واقع در تاج قوس نیمه استوانه‌یی) امتداد افقی یا مماسی جهت تنش‌های اصلی بزرگ‌تر و امتداد قائم یا شعاعی جهت تنش‌های اصلی کوچک‌تر هستند.<sup>[۱۹]</sup> با قراردادن  $\sigma_\theta = K_p \sigma_r$  در رابطه‌ی ۱ و حل معادله‌ی دیفرانسیل، تنش شعاعی مطابق رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$\sigma_r = Ar^{k_p-1} + \frac{\gamma_1 r}{K_p - 2} \quad (2)$$

با اعمال شرایط مرزی بالای قوس ( $r_o = b + B/2 \rightarrow \sigma_r = \gamma_1(h_1 - r_o) + q$ ) در رابطه‌ی ۲، مقدار پارامتر  $A$  محاسبه و مقدار تنش شعاعی به صورت رابطه‌ی ۳

در نهایت، با توجه به مقدار  $\sigma_i$ ، مقدار تنش  $\sigma_s$  در تراز  $z = h_1$  (  $\sigma_s = \sigma_i + \gamma_1 r$  ) و همچنین نیروی قائم  $V$  وارد بر لایه ی نرم به ترتیب مطابق رابطه های ۵ و ۶ به دست می آید:

$$\sigma_s = \gamma_1 \left( \frac{B}{2b+B} \right)^{K_p-1} \left[ \left( h_1 - b - \frac{B}{2} \right) - \frac{2b+B}{2(K_p-2)} \right] + q \left( \frac{B}{2b+B} \right)^{K_p-1} + \frac{\gamma_1 B (K_p - 1)}{2(K_p - 2)} \quad (5)$$

$$V = \sigma_s B \quad (6)$$

حال با در نظر گرفتن تعادل نیروهای وارد بر المانی مستطیل شکل به ضخامت  $dz$  و عرض  $B$  مطابق شکل ۲ ج، در ناحیه ی مصالح نرم به ضخامت  $h_2$ ، تنش روی حفره محاسبه خواهد شد. مطابق شکل ۲ ج،  $F_s$  و  $F_n$  به ترتیب عکس العمل نیروی قائم و مماسی وارده از خاک مجاور  $V$ ،  $(F_s = F_n \tan \phi_r, F_n = K(V/B)dz)$  و نیروی ناشی از سر بار موجود در بالای المان  $dw$  وزن المان هستند. معادله ی تعادل نیروهای وارد بر المان در جهت قائم مطابق رابطه ی ۷ بیان خواهد شد:

$$V + dw - (V + dV) - 2F_s = 0 \quad (7)$$

با قراردادن نیروی مماسی  $F_s = F_n \tan \phi_r$  و همچنین مقدار  $dw$  برابر با  $dw = \gamma_2 B dz$  در معادله ی ۷ و حل آن، رابطه ی ۸ حاصل می شود:

$$dz = \frac{dV}{\gamma_2 B - 2K\mu \left( \frac{V}{B} \right)} \quad (8)$$

که در آن،  $\mu$  ضریب اصطکاک  $(\mu = \lambda \tan \phi_r)$ ، ضریبی بین ۰/۷ و ۰/۹<sup>[۱۹]</sup>، نسبت فشار جانبی به فشار قائم در دیواره های جانبی مصالح نرم و زاویه ی اصطکاک داخلی مصالح نرم هستند. با انتگرال گیری از رابطه ی ۸، در فاصله ی  $z$  از  $h_1$  تا  $h_1 + h_2$  و  $V$  از  $V$  تا  $V_{total}$  مقدار نیروی حفره مطابق رابطه ی ۹ خواهد شد:

$$V_{total} = \frac{B}{2\mu K} \left[ \gamma_2 B - e^{\frac{2\mu K_p}{B}(-h_2)} \cdot (\gamma_2 B - 2\mu K \sigma_s) \right] \quad (9)$$

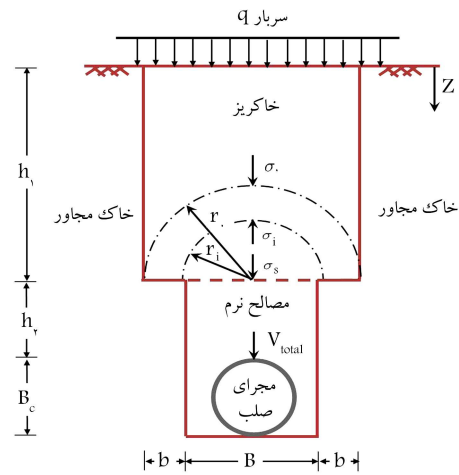
$V_{total}$  نیروی نهایی وارد بر تاج حفره ی مدفون در شرایط خاک غیرمسلح است. مقدار کارایی  $E_f$  به علت عملکرد قوسی خاک بالای حفره مطابق رابطه ی ۱۰ تعریف می شود:

$$E_f = 1 - \frac{(V_{total}/B)}{\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + q} \quad (10)$$

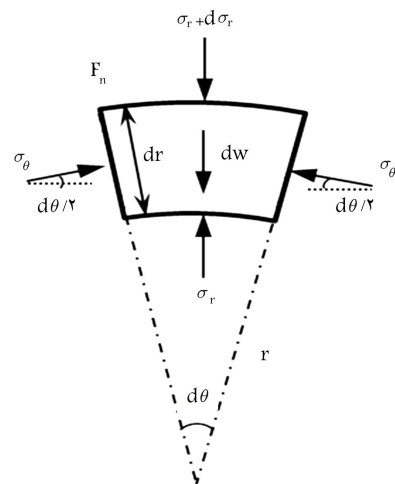
افزایش مقدار کارایی  $(E_f)$  نشان دهنده ی کاهش بیشتر تنش روی حفره در اثر پدیده ی قوس زدگی است.

## ۲.۲. روش تحلیل در حالت خاکریز مسلح با لایه ی ژئوسنتتیک

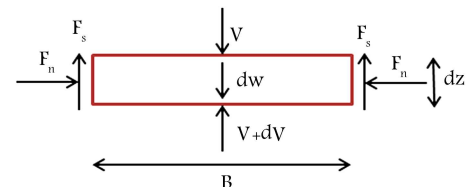
در حالت خاکریز مسلح مطابق شکل ۳، لایه ی ژئوسنتتیک زیر لایه ی خاکریز به ضخامت  $h_1$  قرار می گیرد. به منظور تأمین طول مورد نیاز لایه ی تسلیح، آن را باید روی لبه های به عرض  $b$  پهن و اقدام به کوبیدن خاک روی آن کرد. در صورت نیاز به طول بیشتر از لایه ی تسلیح می توان آن را روی دیواره های قائم خاکریز نیز ادامه داد. تغییر شکل لایه ی تسلیح مطابق شکل ۴، به صورت کمانی از دایره با شعاع  $R$ ، زاویه ی مرکزی  $2\theta$  و بیشینه ی خیز  $t$  در میانه ی لایه ی ژئوسنتتیک فرض می شود.<sup>[۱۰]</sup> در حالت خاکریز مسلح، مراحل محاسبه ی تنش تا عمق  $z = h_1$  واقع بر بالای لایه ی تسلیح  $(\sigma_s)$  مشابه و برابر با حالت خاکریز غیرمسلح است (بخش ۱.۲).



الف) قوس نیمه استوایی به ضخامت  $b$  در خاکریز به ارتفاع  $h_1$ ؛



ب) نیروهای وارد بر المانی از تاج قوس نیمه استوایی؛



ج) نیروهای وارده بر المان افقی از مصالح نرم در بالای حفره.

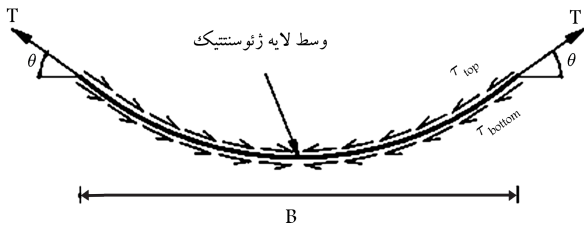
شکل ۲. حفره ی مدفون در خاکریز غیرمسلح.

خواهد شد:

$$\sigma_r = \gamma_1 \left( \frac{2r}{2b+B} \right)^{K_p-1} \left[ \left( h_1 - b - \frac{B}{2} \right) - \frac{2b+B}{2(K_p-2)} \right] + q \left( \frac{2r}{2b+B} \right)^{K_p-1} + \frac{\gamma_1 r}{K_p - 2} \quad (3)$$

با جای گذاری  $r = r_i = B/2$  در معادله ی ۳، تنش زیر قوس  $(\sigma_i)$  نیز به دست خواهد آمد (رابطه ی ۴):

$$\sigma_i = \gamma_1 \left( \frac{B}{2b+B} \right)^{K_p-1} \left[ \left( h_1 - b - \frac{B}{2} \right) - \frac{2b+B}{2(K_p-2)} \right] + q \left( \frac{B}{2b+B} \right)^{K_p-1} + \frac{\gamma_1 B}{2(K_p - 2)} \quad (4)$$



شکل ۵. تنش برشی بین خاک و ژئوستتیک [۲۰]

با قراردادن  $V = B\sigma_s$  و  $V' = tE_r/h_r$  (شکل ۳)، مقدار  $T$  خواهد شد:

$$2T \sin \theta = B(\sigma_s - \frac{tE_r}{h_r}) \quad (14)$$

$$T = (\frac{1 + 4\beta^2}{\lambda\beta}) \left[ B(\sigma_s - \frac{tE_r}{h_r}) \right] \quad (15)$$

در رابطه‌ی ۱۵،  $\sigma_s$  تنش قائم وارد بر بالای ژئوستتیک،  $E_r$  مدول کشسان مصالح نرم،  $h_r$  ضخامت مصالح نرم روی حفره و  $T$  نیروی کششی در لایه‌ی ژئوستتیک هستند. باید توجه کرد که مقدار  $T$  در رابطه‌ی ۱۵، علاوه بر مقدار تغییرشکل  $t$  به نرخ فورفتگی  $\beta = t/B$  نیز بستگی دارد. رابطه‌ی اخیر فقط در حالت بروز تغییرشکل در لایه‌ی تسلیح ( $\beta \neq 0$ ) به کار می‌رود. بدیهی است در صورت عدم بروز تغییرشکل در لایه‌ی تسلیح ( $t = 0$ )، هیچ‌گونه کششی در آن رخ نمی‌دهد ( $T = 0$ ) و نیازی به استفاده از رابطه‌ی ۱۵ نیست.

مطابق شکل ۵، تنش برشی به علت اصطکاک سطح تماس خاک - ژئوستتیک از رابطه‌ی ۱۶ به دست می‌آید: [۲۰]

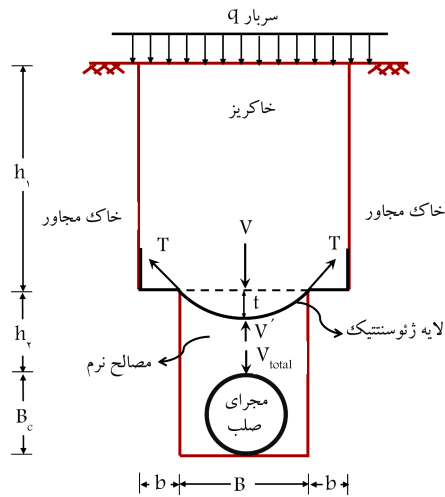
$$\tau = \tau_{top} + \tau_{bottom} = \sigma_n \tan \delta = \lambda(\sigma_s \tan \phi_1 + \frac{tE_r}{h_r} \tan \phi_2) \quad (16)$$

که در آن،  $\sigma_n$  تنش نرمال در سطح تماس،  $\phi_1$  زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاکریز،  $\phi_2$  زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح نرم و  $\delta$  زاویه‌ی اصطکاک سطح تماس ( $\tan \delta = \lambda \tan \phi$ ) هستند. باید توجه کرد که اگر چه به علت وجود نیروی کششی المان تسلیح، تنش نرمال در بالا و پایین المان تسلیح دقیقاً یکی نیست، اما با توجه به ضخامت ناچیز لایه‌ی تسلیح و کوچک بودن مقدار زاویه‌ی  $\theta$ ، ضمن صرف نظر کردن از تأثیر مؤلفه‌ی قائم نیروی کششی لایه‌ی تسلیح، میزان تنش نرمال در بالا و پایین المان تسلیح برابر فرض شده است. با در نظر گرفتن یک المان از لایه‌ی ژئوستتیک به طول  $dx$ ، ضخامت  $w$ ، طول  $L$  ( $B = L$ ) و مدول کشسانی  $E_g$  تحت نیروی کششی  $T$  و در نظر گرفتن تنش برشی  $\tau$  بین لایه‌ی ژئوستتیک و خاک (مطابق شکل ۵) و نوشتن تعادل نیروهای افقی مقدار تغییر طول  $\Delta l$  از رابطه‌ی ۱۷ به دست می‌آید:

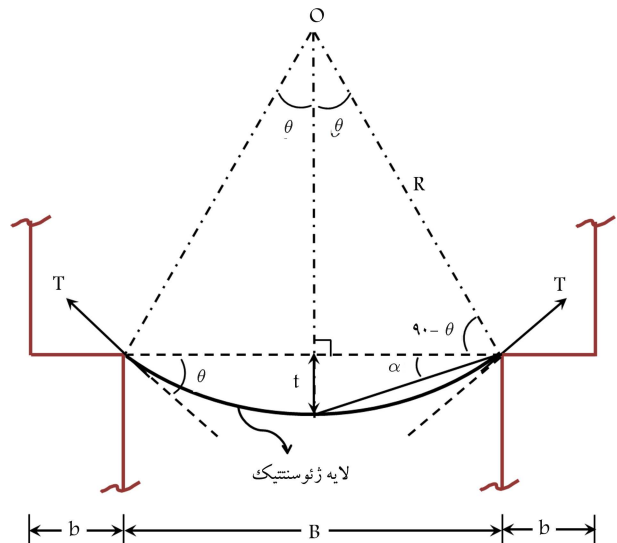
$$\Delta l = 2 \int_0^{B/2} \frac{T - \tau x}{E_g w} dx = \frac{2TB - \tau B^2}{4E_g w} \quad (17)$$

به منظور نوشتن رابطه‌ی ۱۷، محور  $x$  در امتداد ژئوتکستایل تغییرشکل یافته فرض شده است. اما با توجه به کوچک بودن مقدار زاویه‌ی  $\theta$ ، در انتگرال‌گیری از این رابطه از طول تغییرشکل نیافته‌ی ژئوتکستایل استفاده شده است. با قراردادن تنش برشی  $\tau$  از رابطه‌ی ۱۶ در رابطه‌ی ۱۷ و همچنین جای‌گذاری مقدار  $E_g = k_g/w$  در آن و حل کردن انتگرال رابطه‌ی ۱۷، مقدار تغییر طول  $\Delta l$  مطابق رابطه‌ی ۱۸ به دست می‌آید:

$$\Delta l = \frac{2TB - B^2 \lambda (\sigma_s \tan \phi_1 + \frac{t_1 E_r}{h_r} \tan \phi_2)}{4k_g} \quad (18)$$



شکل ۳. حفره‌ی مدفون در خاکریز مسلح، نیروهای وارد بر لایه‌ی ژئوستتیک و انتقال آن‌ها تا روی حفره‌ی مدفون.



شکل ۴. تغییرشکل لایه‌ی ژئوستتیک با فرض تغییرشکل دایره‌یی با شعاع  $R$ ، زاویه‌ی مرکزی  $2\theta$  و خیز بیشینه‌ی  $t$ . [۱۰]

رابطه‌ی ۵). در اثر اعمال تنش  $\sigma_s$  بر لایه‌ی تسلیح، جابه‌جایی  $t$  در وسط دهانه و نیروی کششی  $T$  در ژئوستتیک ایجاد می‌شود. با توجه به هندسه‌ی مسئله در شکل ۴، مقدار  $\sin \theta$  از طریق رابطه‌ی ۱۱ به دست می‌آید:

$$\sin \theta = \frac{2(t/B)}{1 + 4(t/B)^2} = \frac{2\beta}{1 + 4\beta^2} \quad (11)$$

که در آن،  $\beta = t/B$  نرخ فورفتگی و  $\theta = 2\alpha = 2 \tan^{-1}(2\beta) = 4\beta$  هستند. مقدار کرنش محوری در لایه‌ی تسلیح ( $\epsilon_g$ ) با توجه به تغییر طول آن ( $\Delta l$ ) تحت اثر تنش  $\sigma_s$  از رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید:

$$\epsilon_g = \frac{\Delta l}{B} = \frac{\theta - \sin \theta}{\sin \theta} = 4\beta^2 \quad (12)$$

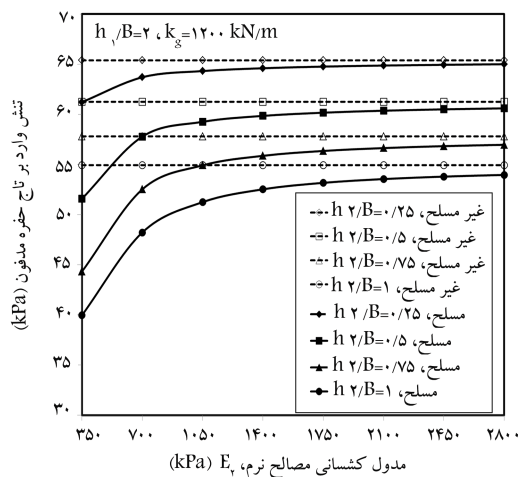
با نوشتن تعادل قائم نیروهای وارد بر لایه‌ی ژئوستتیک (شکل ۳) مطابق رابطه‌های ۱۳ و ۱۴، نیروی کششی ( $T$ ) در لایه‌ی ژئوستتیک از رابطه‌ی ۱۵ به دست می‌آید:

$$2T \sin \theta = V - V' \quad (13)$$

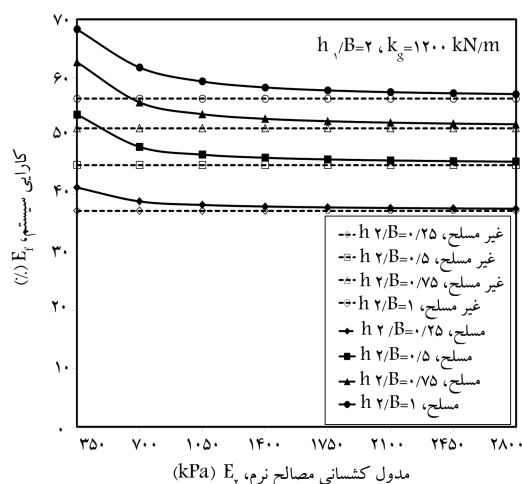
$b$  برابر  $0/3$  متر و پارامتر  $\lambda$  برابر با  $0/8$  فرض شده است. همچنین تغییرات سختی کششی لایه‌ی ژئوسنتتیک از  $100$  تا  $3600$  کیلوپاسکال و سر بار یکنواخت  $12$  کیلوپاسکال به منظور شبیه‌سازی بار ترافیک در نظر گرفته شده‌اند. [20] نتایج حاصل از این مطالعه در شکل‌های ۶ تا ۱۷ ارائه شده است.

جدول ۱. هندسه و خصوصیات ژئوتکنیکی حفره‌ی مدفون در خاک در مطالعه‌ی پارامتری.

پارامتر مورد نظر	مصلح نرم	خاکریز
وزن مخصوص (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	۱۲/۵	۱۸
زاویه‌ی اصطکاک داخلی (درجه)	۱۵	۳۰
مدول کشسانی (کیلو نیوتن بر متر مربع)	۲۸۰۰ ~ ۳۵۰۰	۲۵۰۰۰
چسبندگی (کیلو نیوتن بر متر مربع)	۰	۰
$h_1/B$	—	۱/۵ ~ ۴
$h_2/B$	۰/۲۵ ~ ۱	—



شکل ۶. اثر مدول کشسانی مصالح نرم بر تنش وارد بر تاج حفره برای حالت خاکریزهای مسلح و غیرمسلح در مقادیر مختلف از  $h_2/B$ .



شکل ۷. اثر مدول کشسانی مصالح نرم در کارایی سیستم برای حالت خاکریزهای غیرمسلح و مسلح در مقادیر مختلف از  $h_2/B$ .

حال با مساوی قراردادن مقدار  $\Delta l$  در رابطه‌ی ۱۲، یعنی  $\Delta l = \epsilon_g B = 4\beta^2 \beta$  و رابطه‌ی ۱۸، مقدار نیروی کشش  $T$  در لایه‌ی ژئوسنتتیک مطابق رابطه‌ی ۱۹ به دست می‌آید:

$$T = 4\beta^2 k_g + \frac{1}{4} B \lambda (\sigma_s \tan \phi_1 + \frac{t E_r}{h_r} \tan \phi_2) \quad (19)$$

که در آن،  $k_g = E_g w$  سختی کششی ژئوسنتتیک بر حسب کیلو نیوتن بر متر است. حال با ترکیب رابطه‌های ۱۵ و ۱۹، معادله‌ی درجه سه بر حسب پارامتر  $\beta$  به شکل رابطه‌ی ۲۰ به دست می‌آید. با حل این معادله، مقدار  $\beta$ ، خیز ژئوسنتتیک  $t$  ( $t = \beta B$ ) و در نهایت کرنش محوری آن  $\epsilon_g$  به دست خواهند آمد.

$$(32 h_2 k_g + 4 B^2 E_r) \beta^3 + (2 B^2 \lambda E_r \tan \phi_2 - 4 B h_2 \sigma_s) \beta^2 + (2 B \lambda h_2 \sigma_s \tan \phi_1 + B^2 E_r) \beta - B h_2 \sigma_s \quad (20)$$

پس از محاسبه‌ی مقادیر خیز و کرنش ژئوسنتتیک، می‌توان نیروهای وارده را به روی حفره انتقال داد. با توجه به شکل ۳ و با در نظر گرفتن کرنش مصالح نرم برابر  $t/h_2$ ، نیروی عکس‌العمل  $V'$  در زیر لایه‌ی ژئوسنتتیک مطابق رابطه‌ی ۲۱ به دست می‌آید:

$$V' = t E_r B / h_2 \quad (21)$$

نیروی نهایی  $V_{total}$  وارد بر تاج حفره همانند بخش ۱.۲. با انتگرال‌گیری از رابطه‌ی ۸ در فاصله‌ی  $z$  از  $h_1 + h_2$  تا  $h_1$  و از  $V'$  تا  $V_{total}$  (شکل ۳) مطابق رابطه‌ی ۲۲ محاسبه می‌شود:

$$V_{total} = \frac{B}{2 \mu K} [\gamma_2 B - e^{-\frac{\gamma \mu K p}{B} (t-h_2)} (\gamma_2 B - 2 \mu K \frac{V'}{B})] \quad (22)$$

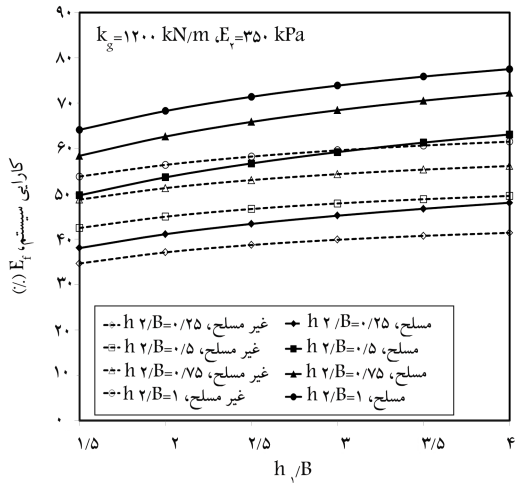
در این حالت نیز، مقدار کارایی سیستم ( $E_f$ ) از رابطه‌ی ۲۳ به دست می‌آید:

$$E_f = 1 - \frac{(V_{total}/B)}{\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + q} \quad (23)$$

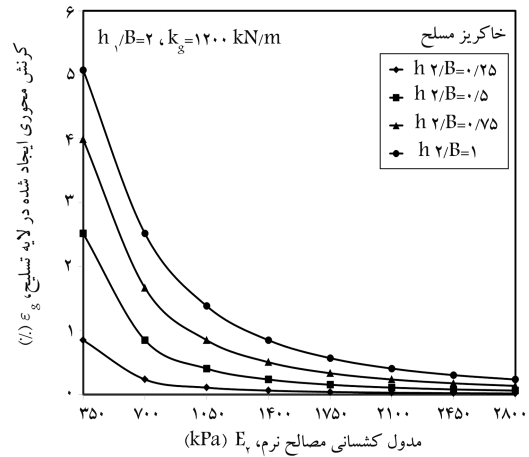
در این حالت ضریب کارایی  $E_f$ ، میزان کاهش تنش روی حفره را به علت اثر توأم پدیده‌ی قوس‌زدگی و همچنین عملکرد لایه‌ی تسلیح نشان می‌دهد. افزایش مقدار کارایی، نشان‌دهنده‌ی کاهش هر چه بیشتر تنش روی حفره است. به منظور دستیابی به جزئیات بیشتر در خصوص نحوه‌ی به دست آمدن روابط تحلیلی می‌توان به مرجع [21] مراجعه کرد.

### ۳. نتایج

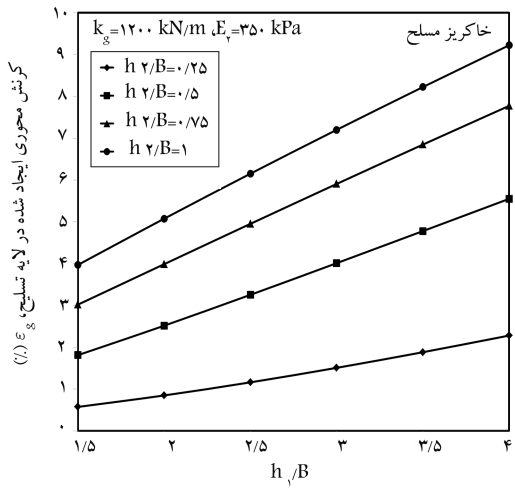
به منظور بررسی اثر پدیده‌ی قوس‌زدگی و تسلیح خاک با استفاده از روش تحلیلی مورد نظر مطالعات پارامتری نسبتاً وسیعی انجام شده است. در این مطالعات اثر پارامترهایی نظیر: مدول کشسانی مصالح نرم ( $E_r$ )، سختی کششی لایه‌ی ژئوسنتتیک ( $k_g$ )، ارتفاع خاکریز ( $h_1$ ) و ارتفاع مصالح نرم ( $h_2$ ) بر تنش نهایی وارد بر تاج حفره  $(\sigma_{total})$ ، کشش ایجاد شده در ژئوسنتتیک ( $T$ )، میزان کرنش محوری ژئوسنتتیک ( $\epsilon_g$ ) و در نهایت کارایی سیستم ( $E_f$ ) در کاهش تنش روی حفره در دو حالت مسلح و غیرمسلح بررسی شده است. محدوده‌ی پارامترهای هندسی و ژئوتکنیکی برای مصالح خاکریز و مصالح نرم روی حفره مطابق جدول ۱ هستند. با توجه به مقدار قطر حفره ( $B_c$ ) برابر  $1/65$  متر، مطابق استاندارد ASTM 2321-11، D [17]، مقدار عرض ترانشه برابر با  $2/36$  متر در نظر گرفته شده است. عرض گیرداری



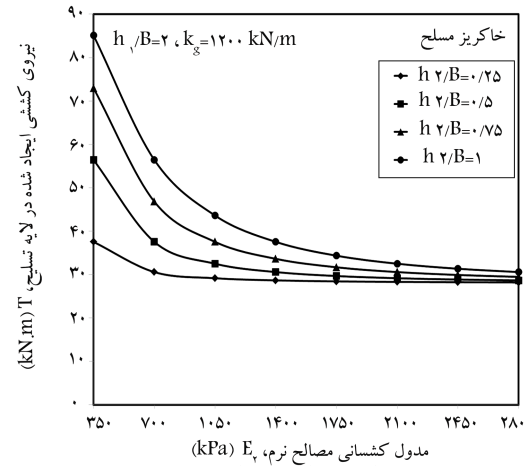
شکل ۱۱. اثر ارتفاع خاکریز در کارایی سیستم برای حالت خاکریزهای غیر مسلح و مسلح در مقادیر مختلف از  $h_v/B$ .



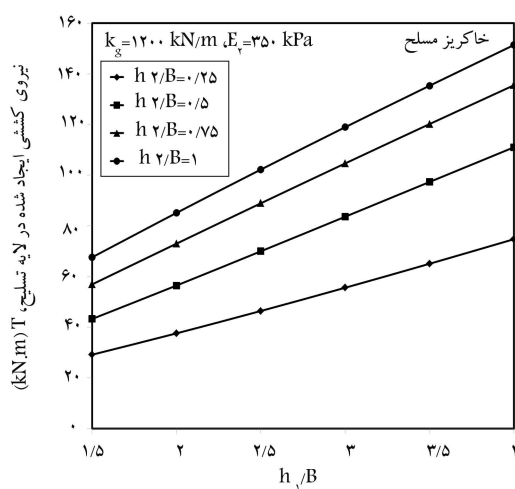
شکل ۸. اثر مدول کشسانی مصالح نرم در کرنش محوری لایه‌ی تسلیح در مقادیر مختلف از  $h_v/B$ .



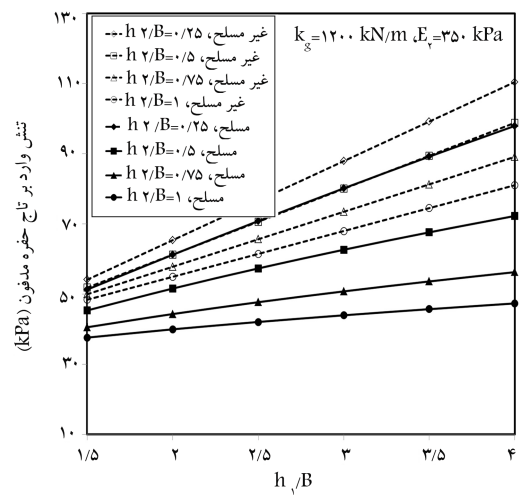
شکل ۱۲. اثر ارتفاع خاکریز در کرنش محوری ایجاد شده در لایه‌ی ژئوستنتیک در مقادیر مختلف از  $h_v/B$ .



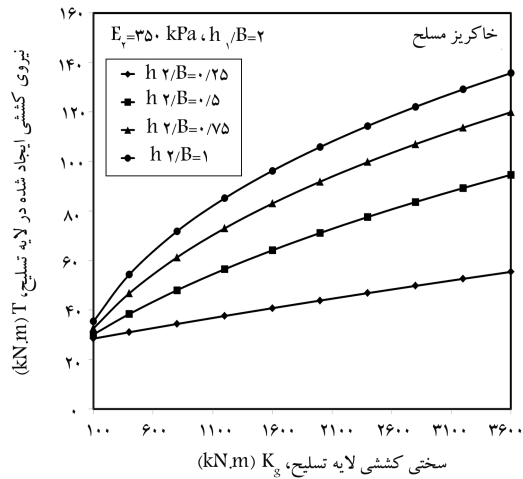
شکل ۹. اثر مدول کشسانی مصالح نرم در کشش ایجاد شده در لایه‌ی تسلیح در مقادیر مختلف از  $h_v/B$ .



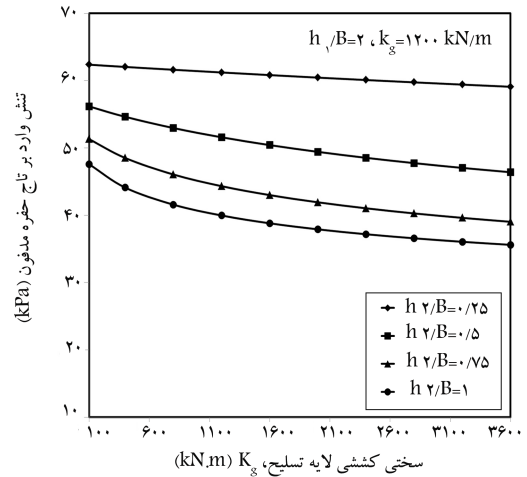
شکل ۱۳. اثر ارتفاع خاکریز در نیروی کششی حاصل در لایه‌ی ژئوستنتیک برای مقادیر مختلف از  $h_v/B$ .



شکل ۱۰. اثر ارتفاع خاکریز در تنش روی حفره برای حالت خاکریزهای غیر مسلح و مسلح در مقادیر مختلف از  $h_v/B$ .



شکل ۱۷. اثر سختی کششی ژئوسنتتیک در کاهش ایجاد شده در ژئوسنتتیک برای مقادیر مختلف از  $h_2/B$ .

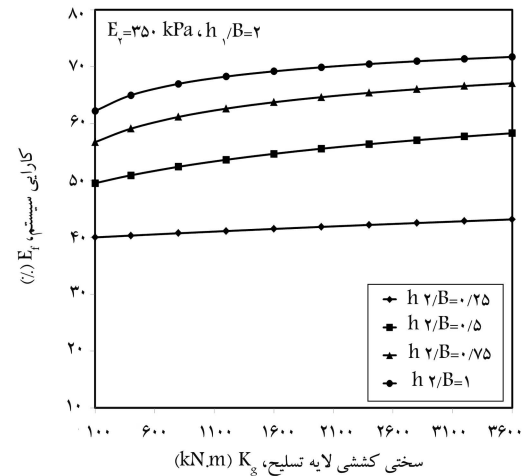


شکل ۱۴. اثر سختی کششی ژئوسنتتیک در تنش وارد بر تاج حفرة در مقادیر مختلف از  $h_2/B$ .

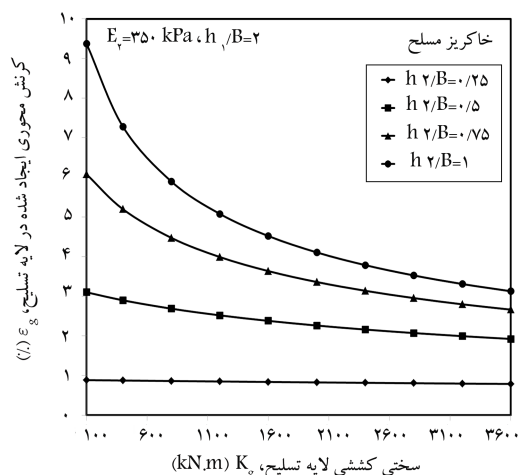
### ۱.۳. اثر مدول کشسانی مصالح نرم ( $E_2$ )

شکل ۶، تغییرات تنش روی حفرة در مقابل مدول کشسانی مصالح نرم روی حفرة را برای مقادیر مختلف  $h_2/B$  در حالت خاکریز غیرمسلح و مسلح نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییرات مدول کشسانی مصالح نرم تأثیری در تنش وارد بر روی حفرة در حالت غیرمسلح نخواهد داشت، که این امر با توجه به روابط ارائه شده در بخش ۱.۲ قابل توجیه است.

مطابق شکل ۶، در حالت خاکریز مسلح با افزایش مدول کشسانی مصالح نرم، مقدار تنش وارد بر حفرة افزایش پیدا می‌کند. همچنین ملاحظه می‌شود که نرخ افزایش در میزان تنش در مقادیر پایین مدول کشسانی مصالح نرم قابل توجه است، اما با افزایش مدول کشسانی نرخ افزایش در میزان تنش وارد ناچیز می‌شود؛ به طوری که با رسیدن مدول کشسانی مصالح نرم به حدود  $700$  کیلوپاسکال، مقدار تنش روی حفرة و میزان ضریب کارایی (شکل ۷) ثابت می‌ماند. از این رو می‌توان گفت که برای کاهش هر چه بیشتر تنش وارد بر حفرة، استفاده از مصالح نرم با مدول کشسانی پایین مناسب است. کنگ و همکاران<sup>[۱۲]</sup> با مدل‌سازی به روش اجزاء محدود مقدار مدول کشسانی حدود  $350$  کیلوپاسکال را برای مصالح نرم جهت افزایش کارایی سیستم و عملکرد قوسی بهتر توصیه کرده‌اند. این میزان از مدول کشسانی برای مصالح نرم نظیر ژئوفوم است. به‌طور کلی مقایسه‌ی دو حالت مسلح و غیرمسلح در شکل ۶ نشان می‌دهد که در یک مقدار مشخص از  $h_2/B$ ، تسلیح خاک موجب کاهش تنش روی حفرة در مقایسه با حالت خاکریز غیرمسلح می‌شود. به منظور روشن شدن هرچه بهتر این موضوع، تغییرات ضریب کارایی  $E_f$  در مقابل مدول کشسانی مصالح نرم برای مقادیر مختلف  $h_2/B$  برای خاکریز غیرمسلح و مسلح در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در یک مقدار یکسان از  $h_2/B$ ، میزان کارایی در حالت مسلح بیشتر از میزان آن در حالت غیرمسلح است. در حقیقت استفاده از لایه‌ی تسلیح علاوه بر عملکرد قوس‌زدگی خاک در حالت غیرمسلح، موجب بالارفتن کارایی سیستم به میزان حدود  $10\%$  الی  $20\%$  (در  $E_2 = 350$  kpa) در کاهش تنش روی حفرة در مقایسه با حالت غیرمسلح می‌شود. مطابق این شکل بیشینه‌ی کارایی در حالت غیرمسلح و مسلح به ترتیب حدود  $56\%$  و  $68\%$  است. همچنین با افزایش مقدار مدول کشسانی  $E_2$  برای یک مقدار از  $h_2/B$  اثر تسلیح کاهش می‌یابد و به سمت حالت غیرمسلح میل می‌کند،



شکل ۱۵. اثر سختی کششی ژئوسنتتیک در کارایی سیستم در مقادیر مختلف از  $h_2/B$ .



شکل ۱۶. اثر سختی کششی ژئوسنتتیک در کرنش محوری ایجاد شده در ژئوسنتتیک برای مقادیر مختلف از  $h_2/B$ .

که این امر به علت عدم تغییر شکل لایه‌ی تسلیم در مقادیر بالا از مقدار  $E_2$  است. شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهند که افزایش ضخامت مصالح نرم ( $h_2/B$ ) در هر دو حالت خاکریز مسلح و غیرمسلح سبب کاهش تنش وارد بر حفزه می‌شوند. این امر را می‌توان به افزایش کرنش این لایه و عملکرد قوسی بهتر سیستم و همچنین لایه‌ی تسلیم با افزایش  $h_2/B$  نسبت داد. به هر حال نتایج، مبین ضرورت استفاده از مصالح نرم با مدول کشسانی پایین در محدوده‌ی بین  $35^\circ$  تا  $70^\circ$  کیلوپاسکال و ضخامت حدود عرض ترانسه ( $h_2/B = 1$ ) روی حفزه است.

شکل ۸، اثر مدول کشسانی مصالح نرم در کرنش محوری ایجاد شده در لایه‌ی ژئوسنتتیک را برای ضخامت‌های مختلف از ( $h_2/B$ ) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مدول کشسانی مصالح نرم، میزان کرنش ایجاد شده در لایه‌ی تسلیم کاهش می‌یابد، که این موضوع دلیلی بر افزایش تنش روی حفزه در حالت مسلح (مطابق شکل ۶) با افزایش مدول کشسانی  $E_2$  است. همچنین با افزایش ارتفاع مصالح نرم ( $h_2/B$ )، به دلیل بروز نشست بیشتر در این لایه و تغییر طول بیشتر لایه‌ی تسلیم، میزان کرنش در لایه‌ی تسلیم افزایش می‌یابد، که این امر کاهش تنش روی حفزه (شکل ۶) را موجب می‌شود.

شکل ۹، اثر مدول کشسانی مصالح نرم را در میزان کشش ایجاد شده در لایه‌ی ژئوسنتتیک نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش مدول کشسانی  $E_2$ ، مقدار کشش ایجاد شده در لایه‌ی ژئوسنتتیک کاهش می‌یابد. کاهش میزان نیروی ایجاد شده در لایه‌ی تسلیم سبب کاهش نیروهای مقاوم رو به بالا و در نتیجه، افزایش تنش روی حفزه (مطابق شکل ۶ حالت مسلح) خواهد شد. همچنین با افزایش ضخامت مصالح نرم، نیروی کششی بیشتری در لایه‌ی تسلیم ایجاد می‌شود.

### ۲.۳. اثر ضخامت خاکریز ( $h_1/B$ )

شکل ۱۰، اثر ضخامت لایه‌ی خاکریز ( $h_1/B$ ) در تنش وارد بر حفزه‌ی مدفون در حالت خاکریزهای غیرمسلح و مسلح را برای مقادیر مختلف از  $h_2/B$  نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع خاکریز، میزان تنش وارد بر تاج حفزه، صرف‌نظر از میزان  $h_2/B$ ، افزایش می‌یابد. با مقایسه‌ی نمودارهای حالت مسلح و غیرمسلح ملاحظه می‌شود که برای یک میزان  $h_1/B$  و  $h_2/B$  مشخص، تنش‌های وارد بر حفزه در حالت غیرمسلح بیشتر از حالت مسلح هستند. به عنوان مثال، برای مقادیر  $h_1/B = 1$  و  $h_2/B = 1$ ، مقدار تنش روی حفزه به ترتیب در حالت خاکریز غیرمسلح و خاکریز مسلح برابر  $4874$  و  $3776$  کیلوپاسکال است. همچنین مشاهده می‌شود که در حالت مسلح با افزایش ضخامت مصالح نرم روی حفزه، تنش وارد بر حفزه کاهش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش ضخامت مصالح نرم، میزان کاهش تنش در حالت مسلح در مقایسه با حالت غیرمسلح افزایش می‌یابد، به طوری که با تغییر  $h_2/B$  از مقدار  $0.25$  به  $1$ ، میزان کاهش تنش به علت تسلیم به ترتیب از حدود  $1\%$  به  $32\%$  افزایش می‌یابد.

شکل ۱۱، تغییرات ضریب کارایی ( $E_f$ ) در مقابل ارتفاع خاکریز ( $h_1/B$ ) را برای دو حالت خاکریز غیرمسلح و مسلح نشان می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش ارتفاع خاکریز ( $h_1/B$ ) علی‌رغم افزایش میزان تنش روی حفزه مطابق شکل ۱۰، میزان ضریب کارایی سیستم افزایش می‌یابد. مطابق شکل مذکور، برای حالت غیرمسلح با افزایش ارتفاع خاکریز، عملکرد قوسی خاک بهبود می‌یابد و ضمن کاهش بیشتر در تنش روی حفزه، موجب افزایش میزان کارایی می‌شود. همچنین افزایش ضخامت مصالح نرم به علت افزایش اثر عملکرد قوسی خاک، موجب افزایش کارایی سیستم می‌شود، به طوری که موجب کاهش تنش از  $37\%$  تا  $57\%$  به‌ازاء

مقادیر مختلف  $h_1/B$  و  $h_2/B$  شده است. همچنین ملاحظه می‌شود که حالت مسلح تأثیر بیشتری در کاهش میزان تنش وارد بر حفزه یا به عبارتی، افزایش ضریب کارایی  $E_f$  دارد. کارایی بیشتر در حالت مسلح در مقایسه با حالت غیرمسلح به علت آن است که در حالت غیرمسلح، کاهش تنش فقط متأثر از عملکرد قوسی خاک روی حفزه است؛ در حالی که در حالت مسلح، اثر هم‌زمان عملکرد قوسی خاک و عملکرد تسلیم در میزان کاهش تنش روی حفزه تأثیر دارد.

شکل ۱۲، اثر  $h_1/B$  را روی کرنش محوری ژئوسنتتیک نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش ارتفاع خاکریز، صرف‌نظر از مقدار  $h_2/B$ ، به سبب افزایش تنش وارد بر لایه‌ی تسلیم، کرنش‌های بیشتری در آن ایجاد خواهد شد. همچنین با افزایش ضخامت مصالح نرم، ضمن افزایش نشست آن تحت بارهای وارد، موجب افزایش طول لایه‌ی تسلیم و در نهایت افزایش کرنش محوری در آن می‌شود.

شکل ۱۳، تغییرات کشش ایجاد شده در لایه‌ی تسلیم در مقابل  $h_1/B$  را برای مقادیر مختلف  $h_2/B$  نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع خاکریز ( $h_1/B$ )، بار وارد بر لایه‌ی ژئوسنتتیک افزایش می‌یابد و در نهایت کشش بیشتری در لایه‌ی تسلیم ایجاد می‌شود. همچنین با افزایش ارتفاع مصالح نرم روی حفزه، به علت ایجاد نشست‌های بیشتر در مصالح نرم، نیروی کششی در لایه‌ی تسلیم افزایش می‌یابد.

### ۳.۳. اثر سختی کششی ژئوسنتتیک ( $K_g$ )

شکل ۱۴، اثر سختی کششی ژئوسنتتیک در تنش وارد بر تاج حفزه را برای مقادیر مختلف  $h_2/B$  نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش سختی کششی ژئوسنتتیک صرف‌نظر از میزان  $h_2/B$ ، میزان تنش وارد بر حفزه کاهش می‌یابد. این امر را می‌توان به افزایش نیروی کششی ایجاد شده در لایه‌ی تسلیم به علت افزایش در سختی آن نسبت داد.

شکل ۱۵، اثر سختی کششی ژئوسنتتیک را در کارایی سیستم ( $E_f$ ) نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور با افزایش مقدار سختی کششی لایه‌ی تسلیم و در نتیجه کاهش تنش روی حفزه مطابق شکل ۱۴، مقدار کارایی سیستم افزایش می‌یابد.

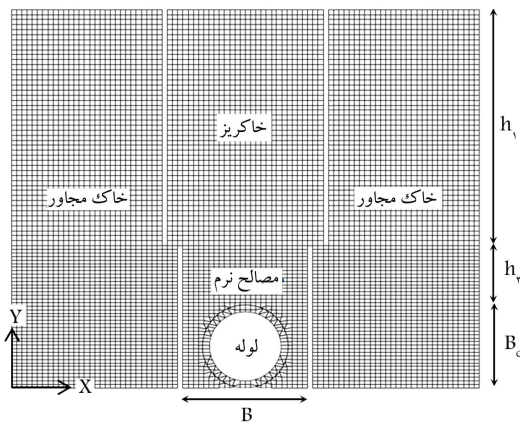
شکل ۱۶، اثر سختی کششی لایه‌ی ژئوسنتتیک در کرنش محوری آن را برای مقادیر مختلف از ضخامت مصالح نرم نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور برای یک مقدار  $h_2/B$  مشخص، با افزایش سختی کششی لایه‌ی تسلیم، کرنش محوری در لایه‌ی تسلیم کاهش می‌یابد.

شکل ۱۷، تغییرات کشش ایجاد شده در لایه‌ی تسلیم را در مقابل سختی کششی آن نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش سختی کششی لایه‌ی تسلیم علی‌رغم کاهش کرنش در لایه‌ی تسلیم (شکل ۱۶)، میزان کشش در آن (به علت افزایش سختی کششی) افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت مصالح نرم و بروز نشست‌های بیشتر در لایه‌ی نرم، کرنش محوری در لایه‌ی ژئوسنتتیک مطابق شکل ۱۶، افزایش و در نتیجه کشش محوری در لایه‌ی تسلیم مطابق شکل ۱۷ افزایش می‌یابد.

### ۴. مقایسه‌ی نتایج تحلیل حاضر با نتایج سایر پژوهشگران

جدول ۲، نیروی وارد بر حفزه‌ی مدفون در شرایط خاکریز غیرمسلح حاصل از تحلیل حاضر را با روش تحلیلی اسپنگر<sup>[۲۲]</sup> مقایسه می‌کند. ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل از دو روش، تطبیق بسیار مناسبی دارند.





شکل ۱۸. شبکه بندی المان‌ها در محیط دو بعدی FLAC و بخش‌های مختلف آن.

- برای ایجاد لغزش و برش بین خاک و لایه‌ی تسلیح از پوشش<sup>۸</sup> استفاده شده است.
- حفره‌ی مدفون در مصالح نرم از نوع لوله‌ی بتنی و صلب فرض شده است.

### ۲.۵. مدل هندسی و شرایط مرزی محیط ترانشه و لوله

ابعاد مدل و تعداد المان‌های آن با توجه به ضخامت مصالح نرم ( $h_2$ ) و ضخامت خاکریز ( $h_1$ ) متغیر است. به عنوان نمونه، برای حالتی که  $h_1/B = 2$  و  $h_2/B = 0.5$  هستند، مطابق شکل ۱۸، مدلی مشتمل بر ۷۸۳۰ المان و ۸۰۰۸ گره ایجاد شده است. شکل مذکور، شبکه بندی المان‌ها و بخش‌های مختلف محیط را نشان می‌دهد. همچنین سعی شده است که فرضیات محدوده‌ی مدل و شرایط مرزی تا جای ممکن به واقعیت نزدیک باشند. از این رو حرکت کف مدل در جهت Y و دیواره‌های اطراف ترانشه در جهت X مقید شده است.

### ۳.۵. خصوصیات مصالح و پارامترهای موردنظر

خصوصیات مصالح در تحلیل عددی مشابه خصوصیات مصالح نرم و خاکریز در روش تحلیلی مطابق جدول ۴ انتخاب شده‌اند. ضخامت لوله نیز براساس استاندارد موردنظر<sup>[۱۴]</sup> مطابق جدول ۴ و همچنین پارامترهای المان کابل (برای مدل سازی لایه‌ی تسلیح) و مصالح پوششی آن (Grout Material) مطابق جدول ۵ هستند.<sup>[۱۵]</sup>

### ۴.۵. مقایسه‌ی نتایج روش عددی و روش تحلیلی

شکل ۱۹، تغییرات کارایی سیستم ( $E_f$ ) با مدول کشسانی مصالح نرم ( $E_r$ ) را در حالت خاکریزهای غیرمسلح و مسلح برای مقادیر مختلف  $h_2/B$  و برای دو روش عددی و تحلیلی مقایسه می‌کند. ملاحظه می‌شود که در هر دو روش برای خاکریز مسلح با افزایش مدول کشسانی مصالح نرم از میزان کارایی کاسته می‌شود، در

جدول ۳. نیروی وارد بر حفره‌ی مدفون در خاک در حالت خاکریز مسلح (کیلونیوتن بر متر) ( $\mu K = 0.17$ ،  $q = 0$ ،  $E_r = 350 \text{ kPa}$ ،  $\gamma = 17.5 \text{ kN/m}^3$ ،  $B = 1.8 \text{ m}$  و  $\beta = 0.15$ ،  $h_1/B = 2.5$ ).

$h_2/B = 2.5$ ,	$h_2/B = 1.5$ ,	$h_2/B = 0.5$ ,	
$K_g = 1100 \text{ kN/m}$	$K_g = 900 \text{ kN/m}$	$K_g = 700 \text{ kN/m}$	
۹۷٫۵۶	۸۲٫۰۷	۶۵٫۳۶	تحلیل حاضر
۱۰۸٫۵۱	۹۱٫۶۱	۷۰٫۵۸	تحلیل شاکلا و سیواکگان <sup>[۱۴]</sup>

جدول ۲. نیروی وارد بر حفره‌ی مدفون در خاک در حالت خاکریز غیرمسلح (کیلونیوتن بر متر) ( $\mu K = 0.17$ ،  $q = 0$ ،  $\gamma = 17.5 \text{ kN/m}^3$ ،  $B = 1.8 \text{ m}$  و  $h_1/B = 2.5$ ).

$h_2/B = 2.5$	$h_2/B = 1.5$	$h_2/B = 0.5$	
۱۳۴٫۴۷	۱۲۲٫۵۴	۱۰۵٫۶۵	تحلیل حاضر
۱۳۶٫۳	۱۲۳٫۹۶	۱۰۶٫۶۳	تحلیل اسپنگار <sup>[۱۴]</sup>

همچنین جدول ۳ نیروی وارد بر حفره‌ی مدفون در شرایط خاکریز مسلح، حاصل از روش تحلیلی حاضر و روش شاکلا و سیواکگان<sup>[۱۴]</sup> در خصوص تعیین نیروی وارد بر حفره‌ی مدفون در خاکریز مسلح را در شرایط مختلف مقایسه می‌کند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از تحلیل حاضر تا حدود ۱۰٪، مقادیر تنش وارد بر حفره را کمتر از مقادیر حاصل از روش شاکلا و سیواکگان<sup>[۱۴]</sup> ارائه می‌دهد. این امر را می‌توان به:

۱. نادیده گرفتن اصطکاک بین خاک و لایه‌ی تسلیح در روش آن‌ها در مقایسه با روش حاضر؛
۲. در نظر گرفتن المان مستطیلی در روش آن‌ها در مقایسه با المان دایره‌ی در روش حاضر، جهت انتقال تنش از سطح خاکریز به روی لایه‌ی تسلیح نسبت داد.

## ۵. تحلیل عددی

در این مطالعه، به منظور ارزیابی بهتر روش تحلیلی موردنظر، یک سری تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار ۲D FLAC روی مدل مذکور انجام شده است.<sup>[۱۴]</sup>

### ۱.۵. فرضیات تحلیل

فرضیات موردنظر در تحلیل عددی عبارت‌اند از:

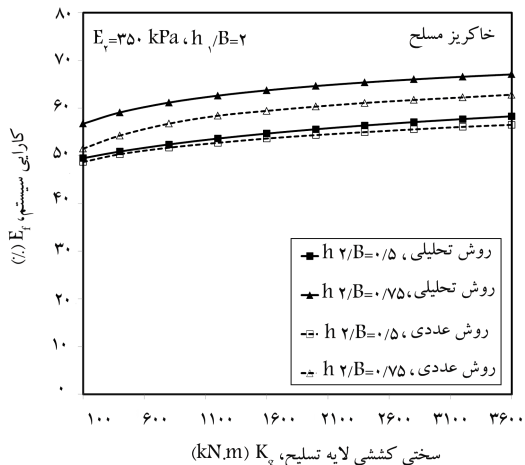
- از مدل رفتاری موهر-کولمب برای مدل کردن خاکریز و خاک مجاور در دو طرف آن استفاده شده است.
- رفتار مصالح نرم بالای حفره به صورت کشسان مدل شده است.<sup>[۱۴]</sup>
- تحلیل به صورت دو بعدی و با در نظر گرفتن شرایط کرنش مسطح انجام شده است.
- از المان واسطه<sup>۷</sup> بین مصالح خاکریز و مصالح متراکم مجاور آن در دو طرف و همچنین بین مصالح نرم و مصالح متراکم مجاور آن در دو طرف به منظور لحاظ کردن اصطکاک و همچنین عملکرد واقعی‌تر پدیده‌ی قوس زدگی استفاده شده است.
- از المان کابل برای مدل کردن لایه‌ی تسلیح استفاده شده است. این المان رفتاری کششی و فاقد مقاومت فشاری و خمشی دارد.

جدول ۴. خصوصیات مصالح نرم و خاک در تحلیل عددی.

مدل رفتاری	خاک مجاور موهر - کولمب	خاکریز موهر - کولمب	مصالح نرم کشسان	لوله کشسان
وزن مخصوص (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	۲۲	۱۸	۱۲٫۵	۲۵
مدول کشسانی (کیلو پاسکال)	—	$۲٫۵ \times ۱۰^۷$	$۳٫۵ \times ۱۰^۵$	$۲ \times ۱۰^{۱۱}$
ضریب پواسون	—	۰٫۲۵	۰٫۱	۰٫۲۵
مدول بالک (کیلو پاسکال)	$۶٫۲۵ \times ۱۰^۷$	—	—	—
مدول برشی (کیلو پاسکال)	$۳٫۴۶ \times ۱۰^۴$	—	—	—
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۴	۳۰	—	—
زاویه اتساع (درجه)	۲۰	۱۵	—	—
چسبندگی	۰	۰	—	—
قطر خارجی (متر)	—	—	—	۱٫۶۵
ضخامت (متر)	—	—	—	۰٫۱۳۷۵

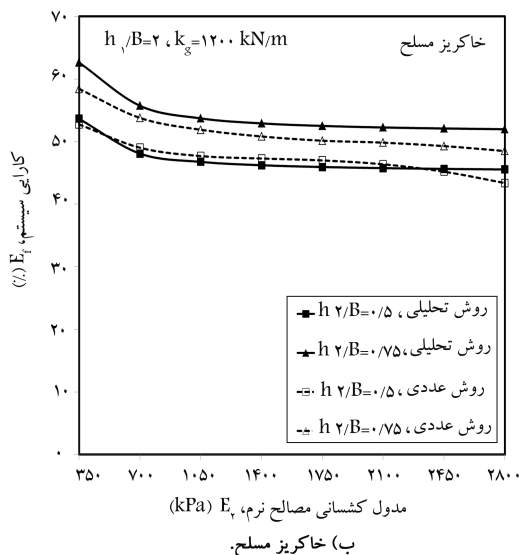
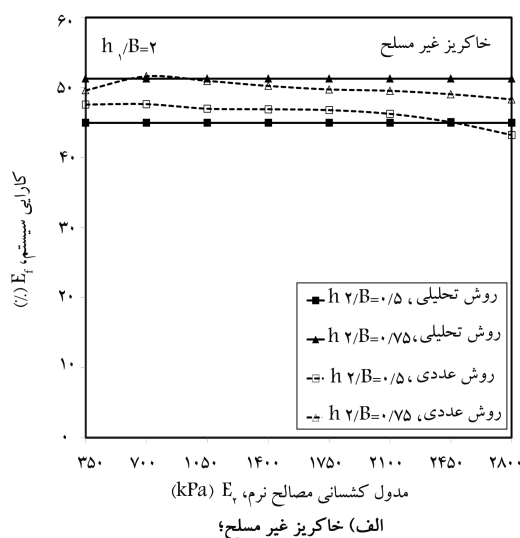
جدول ۵. مشخصات المان کابل و مصالح پوششی در تحلیل عددی.

مصالح پوششی کابل	المان کابل	
—	$۶ \times ۱۰^۵$	مدول یانگ (کیلو پاسکال)
—	$۱٫۵ \times ۱۰^۵$	مقاومت کششی تسلیم (نیوتن)
—	۰٫۰۰۲	سطح مقطع (مترمربع)
$۳٫۱۸ \times ۱۰^۲$	—	سختی اتصال (کیلو پاسکال)
۲۵۰۰	—	مقاومت اتصال (نیوتن بر متر)
۱۷	—	زاویه اصطکاک اتصال (درجه)
۰٫۰۵۰۱	—	محیط اتصال (متر)



شکل ۲۰. مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی و روش تحلیلی با بررسی اثر سختی کششی ژئوسنتتیک در کارایی سیستم.

حالی که برای خاکریز غیر مسلح تغییرات مذکور محسوس نیست. همچنین با افزایش ضخامت مصالح نرم در هر دو روش، کارایی سیستم افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه‌ی تغییرات کارایی سیستم ( $E_f$ ) با سختی کششی ژئوسنتتیک ( $K_g$ ) برای مقادیر مختلف  $h/B$  حاصل از دو روش عددی و تحلیلی در شکل ۲۰ انجام شده است. مطابق این شکل با افزایش مقدار سختی کششی لایه‌ی تسلیح، مقدار کارایی سیستم در هر دو روش افزایش می‌یابد. این امر بیان می‌کند که استفاده



شکل ۱۹. مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی و روش تحلیلی با بررسی اثر مدول کشسانی مصالح نرم در کارایی سیستم.

- استفاده از مصالح نرم با مدول کشسانی مناسب در زیر لایه‌ی تسلیح و بالای حفره سبب کاهش تنش روی حفره و در نتیجه افزایش کارایی سیستم می‌شود.
  - با افزایش ارتفاع خاک‌رین، اگر چه میزان سربار روی لایه‌ی تسلیح و در نتیجه وزن ستون خاک بالای حفره افزایش می‌یابد، اما این امر سبب افزایش نشست مصالح نرم بالای حفره، افزایش پدیده‌ی قوس‌زدگی و در نهایت، افزایش در میزان کارایی سیستم می‌شود.
  - افزایش سختی کششی لایه‌ی تسلیح به میزان مناسب موجب افزایش میزان نیرو در لایه‌ی تسلیح، کاهش تنش وارد بر حفره و در نتیجه افزایش کارایی سیستم می‌شود.
  - با افزایش سختی کششی لایه‌ی تسلیح، کرنش محوری در لایه‌ی تسلیح کاهش می‌یابد. اما نتایج نشان می‌دهد که در مجموع به علت بالارفتن سختی لایه‌ی تسلیح میزان کشش در آن افزایش می‌یابد. این امر به دلیل ایجاد نیروهای به سمت بالا (مؤلفه‌ی قائم نیروی کششی ژئوستتیک)، در نهایت موجب کاهش تنش روی حفره می‌شود.
  - افزایش ضخامت لایه‌ی نرم در حالت غیرمسلح سبب کاهش تنش وارد بر حفره‌ی مدفون و افزایش کارایی سیستم می‌شود. همچنین در حالت مسلح، افزایش ضخامت مصالح نرم سبب افزایش نشست آن لایه، افزایش کرنش و کشش محوری لایه‌ی تسلیح و در نتیجه کاهش تنش روی حفره (افزایش کارایی) می‌شود.
  - مقایسه‌ی نتایج روش تحلیلی موردنظر با دیگر پژوهشگران، مبین صحت و عملکرد مطلوب این روش است.
  - نتایج حاصل از روش عددی و روش تحلیلی مبین یکسان بودن روند تغییرات ضریب کارایی با پارامترهایی نظیر مدول کشسانی مصالح نرم و سختی کششی لایه‌ی تسلیح حاصل از دو روش به لحاظ کیفی است، اما مقادیر ضریب کارایی حاصل از روش عددی تا حدودی محافظه‌کارانه‌تر از نتایج روش تحلیلی است.
  - به هر حال مقایسه‌ی نتایج روش تحلیلی موردنظر با نتایج دیگر پژوهشگران و همچنین روش عددی نشان می‌دهد که روش تحلیلی موردنظر می‌تواند با دقت قابل قبولی جهت تحلیل مجاری مدفون در خاک غیرمسلح و مسلح در چهارچوب فرضیات موردنظر استفاده شود.
- از لایه‌ی تسلیح با سختی کششی در محدوده‌ی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر می‌تواند موجب کاهش تنش وارد بر حفره و در نتیجه افزایش کارایی سیستم شود. همچنین استفاده از مصالح نرم با ضخامتی کمتر از عرض ترانشه، سبب افزایش کارایی و کاهش هرچه بیشتر تنش وارد بر حفره می‌شود.
- در مجموع مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که روند تغییرات ضریب کارایی در مقابل پارامترهایی نظیر مدول کشسانی مصالح نرم و سختی کششی لایه‌ی تسلیح حاصل از دو روش به لحاظ کیفی کاملاً یکسان است، اما مقادیر ضریب کارایی حاصل از روش عددی مقداری کمتر (با اختلاف بیشینه‌ی حدود ۶٪) یا به عبارتی محافظه‌کارانه‌تر از نتایج روش تحلیلی است. به هر حال مقایسه‌ها نشان می‌دهد که روش تحلیلی موردنظر در این نوشتار با دقت خوبی قادر به تحلیل مجاری مدفون در خاک مسلح در چهارچوب فرضیات موردنظر است. به هر حال علت اختلاف دو روش عددی و تحلیلی را می‌توان به این موارد نسبت داد:
- اختلاف در فرمولاسیون و فرضیات دو روش تحلیل؛
  - لحاظ نشدن مدول کشسانی لایه‌ی خاک‌رین روی لایه‌ی خاک نرم در روش تحلیلی؛
  - تفاوت در لحاظ کردن مقاومت برشی خاک با لایه‌ی تسلیح در دو روش عددی و تحلیلی؛
  - در نظر نگرفتن اثر لایه‌ی خاک طرفین خاک‌رین اصلی به‌طور کامل در روش تحلیلی.

## ۶. نتیجه‌گیری

- در این نوشتار، روشی تحلیلی برای تعیین تنش وارد بر حفره‌ی مدفون در خاک براساس تئوری عملکرد قوسی خاک در دو حالت خاک‌رین مسلح و غیرمسلح ارائه شده است. بر اساس مطالعات پارامتری انجام‌شده، این نتایج بیان می‌شود:
- استفاده از یک لایه‌ی تسلیح همراه با مصالح نرم روی حفره موجب کاهش تنش روی حفره می‌شود. میزان کاهش تنش، به پارامترهایی نظیر: مدول کشسانی مصالح نرم، سختی کششی ژئوستتیک، ارتفاع خاک‌رین و ضخامت مصالح نرم روی حفره بستگی دارد.

## پانویس‌ها

1. arching
2. finite difference method (FDM)
3. finite element method (FEM)
4. discrete element method (DEM)
5. Geofam
6. efficiency
7. interface
8. grout

## منابع (References)

1. Marston, A. "The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments", Bulletin 96, Iowa Engineering Experiment Station, Ames, Iowa (1930).
2. Terzaghi, K., *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York, pp. 66-76 (1943).
3. Ladanyi, B. and Hoyaux, B. "A study of the trap-door

- problem in a granular mass”, *Canadian Geotechnical Journal*, **6**(1), pp. 1-14 (1969).
4. Pirapakaran, K. and Sivakugan, N. “Arching within hydraulic fill stopes”, *Geotechnical and Geological Engineering*, **25**(1), pp. 25-35 (2007).
  5. Shukla, S.K.G. and Sivakugan, N. “A simplified extension of the conventional theory of arching in soils”, *International Journal of Geotechnical Engineering, USA*, **3**(3), pp. 353-359 (2009).
  6. Terzaghi, K. “Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door”, *Proceedings First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, Massachusetts, pp. 307-311 (1936).
  7. Getzler, Z., Gellert, M. and Eitan, R. “Analysis of arching pressures in ideal elastic soil”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, **96**(SM4), pp. 1357-1372 (1970).
  8. Rude, M. and Lawrence, C. “Measured performance of a laboratory culvert”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **108**(12), pp. 1624-1641 (1982).
  9. Sakaguchi, H. and Ozaki, E. “Analysis of the formation of arches plugging the flow of granular materials”, *Proceedings of the 2nd International Conference on Discrete Element Method*, MIT, Cambridge, Massachusetts, pp. 153-163 (1992).
  10. Low, B.K., Tang, S.K. and Choa, V. “Arching in piled embankments”, *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**(11), pp. 1917-1938 (1994).
  11. Hewlett, W.J. and Randolph, M.F. “Analysis of pile embankments”, *Ground Engineering*, **21**(3), pp. 12-18 (1988).
  12. Kang, J., Parker, F. and Yoo, CH. “Soil-structure interaction for deeply buried corrugated steel pipes. Part II: Imperfect trench installation”, *Engineering Structures*, **30**(3), pp. 588-594 (March 2008).
  13. McAfee, R.P. and Valsangkar, A.J. “Geotechnical properties of compressible materials used for induced trench construction”, *Journal of Testing and Evaluation*, **32**(2), pp. 143-52 (2004).
  14. Shukla, S.K. and Sivakugan, N. “Load coefficient for ditch conduits covered with geosynthetic-reinforced granular backfill”, *International Journal of Geomechanics, ASCE*, **13**(1), pp. 76-82 (January-February 2013).
  15. Kawabata, T., Uchida, K., Hirai, T., Ling, H.I. and Koyama, N. “Experiments on buried pipe using backfill of cover with geosynthetics”, *Proceedings of the ASCE International Conference on Pipeline Engineering and Construction, Baltimore, Maryland*, pp. 1271-1278 (2003).
  16. Tavakoli Mehrjardi, GH., Moghaddas Tafreshi, S.N. and Dawson, A.R. “Combined use of geocell reinforcement and rubber-soil mixtures to improve performance of buried pipes”, *Geotextiles and Geomembranes, Elsevier*, **34**(1), pp. 116-130 (2012).
  17. ASTM D2321-11, Standard Practice for Underground Installation of Thermoplastic Pipe for Sewers and Other Gravity-Flow Applications.
  18. AASHTO HB-17, Division II, Section 30 Thermoplastic Pipe.
  19. Van Santvoort, G.P.T.M., *Geosynthetics in Civil Engineering*, Balkema, Rotterdam, the Netherlands, pp. 37-39 (1995).
  20. Abusharar, S.W., Zheng, J.J., Chen, B.G. and Yin, J.H. “A simplified method for analysis of a piled embankment reinforced with geosynthetics”, *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(1), pp. 39-52 (2008).
  21. Afsharkaveh, N., “Analysis of vertical pressure acting on a ditch conduit in reinforced soil backfill. MSc thesis. Faculty of Civil Engineering, K.N.Toosi University of Technology, (in Persian) (2012).
  22. Spangler, M.G., *Culverts and Conduits*, Chapter 11, Foundation engineering, G. A. Leonards, ed., McGraw Hill, New York, pp. 965-999 (1962).
  23. Fast Lagrangian Analysis of Continua, FLAC (Version 4.0), Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, Minnesota 55415 USA (2002).
  24. Construction Standards CS 10, Storm Drain (16 Jan 2007).
  25. Ghazavi, M. and Alimardani Lavasani, A. “Interface effect of shallow foundations constructed on sand reinforced with geosynthetics”, *Geotextile and Geomembranes*, **26**(5), pp. 404-415 (2008).