



## تأثیر نشت آب از لوله‌های مدفون بر پایداری گودهای مسلح شده به روش نیلینگ و انکراژ

امین منشی زاده نائین<sup>۱</sup>، علی اخترپور<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

akhtarpour@um.ac.ir

### خلاصه

تغییرات سطح آب زیرزمینی و میزان رطوبت خاک به دلیل نشت آب از لوله‌های مدفون، مشخصات خاک‌های غیر اشباع را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از طرف دیگر موارد متعددی از ریزش شیروانی‌ها و گودها ناشی از ترکیدگی لوله‌های آب و افزایش رطوبت خاک گزارش شده است. جهت پایداری گودها از روش‌های مختلفی از جمله پایداری‌سازی به روش نیلینگ و انکراژ استفاده می‌شود. در این مقاله پایداری گودهای مسلح شده به روش نیلینگ و انکراژ تحت تأثیر نشت از لوله آب مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور موقعیت‌های مکانی مختلفی از لوله آب و حالات مختلفی از نشت با شدت و زمان‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. تغییرات تنش مکشی نیز تحت اثر حالات مختلف نشت از لوله آب برای دو نوع خاک مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج مطالعه نشان داد با افزایش شدت و مدت زمان نشت ضریب اطمینان پایداری گود برای هر دو سیستم سازه نگرهان کاهش می‌یابد. با این وجود عملکرد، سیستم نیلینگ و انکراژ در خاک‌های رسی بهتر است و گود در این نوع از خاک‌ها دیرتر دچار ناپایداری می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که با تغییر هد فشاری آب، مقدار تنش مکشی نیز تغییر می‌کند.

**کلمات کلیدی:** مدلسازی عددی، خاک غیر اشباع، مکش بافتی، گود مسلح شده

### ۱. مقدمه

تاکنون گودهای بسیاری در اثر تغییر رطوبت خاک دچار ناپایداری شده‌اند. جهت تحلیل ناپایداری گودها تحت تغییرات رطوبت خاک لازم است درک کاملی از رفتار هیدرومکانیکی خاک‌های غیر اشباع و عوامل اثرگذار بر آن داشته باشیم. منحنی مشخصه آب-خاک (SWCC) از عوامل اثرگذار بر پاسخ خاک‌های غیر اشباع است که بیانگر رابطه بین رطوبت و مکش در خاک‌های غیر اشباع است. روابط تجربی متعددی توسط محققین مختلف برای منحنی مشخصه آب-خاک ارائه شده است [۱-۳]. مقاومت برشی خاک‌های غیر اشباع از دیگر عوامل اثرگذار است که بر پایه دو متغیر حالت تنش  $(\sigma - U_a)$  و  $U_a - U_w$  بیان می‌شود. اثرگذاری منحنی مشخصه آب-خاک بر توزیع فشار آب حفره‌ای و پایداری شیروانی‌های خاکی مورد مطالعه محققین گذشته بوده است. در یک مطالعه موردی اثر زمان و شدت بارش به کمک نرم افزار SEEP/W و Slope/W مورد مطالعه قرار گرفته بود [۴]. نتایج مطالعه و تحلیل جریان غیر ماندگار نشان داد که با افزایش زمان و شدت بارش ضریب اطمینان پایداری گود کاهش می‌یابد همچنین انجام مطالعه موردی دیگری در بررسی اثر درجه اشباع بر پایداری شیروانی متشکل از خاک ریزدانه نیمه اشباع نشان داد که در اثر ترشدگی لایه‌های سطحی و با افزایش عمق ترشدگی احتمال وقوع گسیختگی و لغزش‌های موضعی بیشتر خواهد شد [۵]. در زمینه گودهای مسلح شده نیز مطالعات متعددی توسط محققین گذشته انجام شده است. بررسی‌های انجام شده توسط مارشال نشان می‌دهد که زاویه‌ی قرارگیری مهارها در گود بر روی عملکرد آن‌ها و همچنین مقاومت برشی بسیار تأثیرگذار است [۶]. مطالعات جونز نیز نشان داد که مهارهای مورد استفاده در دیوار تا اعمال یک نیروی کششی معین وارد عمل نمی‌شوند بنابراین برای ایجاد نیروی کشش اولیه، می‌توان مهارها در قسمت بالایی دیوار را به صورت زاویه دار به سمت بالا مورد استفاده قرار داد [۷]. بر اساس مطالعات انجام شده توسط سابهیت، استفاده از مهار با طول بلند در قسمت‌های پایین دیوار منجر به کاهش تعداد مهارهای مورد نیاز برای پایداری دیوار می‌شود [۸]. الیاس و یوران نیز به مطالعه اثر دراز مدت خزش را بر روی عملکرد دیوارهای مسلح پرداختند [۹]. فان و لو با ارائه‌ی یک نرم افزار بر اساس روش اجزای محدود اثر زاویه، طول و فاصله افقی مهارها را مورد مطالعه قرار دادند [۱۰]. در مقاله حاضر اثر تغییر رطوبت خاک پشت دیواره گود ناشی از

ترکیدگی لوله آب بر پایداری گودهای مسلح شده با سیستم نیلینگ و انکراژ برای دو نوع خاک رسی و ماسه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تغییرات تنش مکشی در اثر نشت از لوله آب که از علل ناپایداری خاک به شمار می‌آید، مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. مشخصات مدل عددی

جهت مدل‌سازی اثر نشست لوله آب بر پایداری گود از بسته‌های SEEP/W و Slope/W نرم افزار Geostudio2012 استفاده شده است. مدل‌سازی ترکیدگی لوله آب با کمک تحلیل transient بسته SEEP انجام شده است و شرایط هیدرولیکی حاکم بر مساله در نرم افزار تعریف شده است. منحنی مشخصه آب-خاک بر اساس پیش فرض نرم افزار و با توجه به نوع خاک در نظر گرفته شده است. تابع نفوذپذیری نیز بر اساس رابطه گاردنر [۱۱] در نرم افزار تعریف شده است. رابطه گاردنر به شرح زیر است:

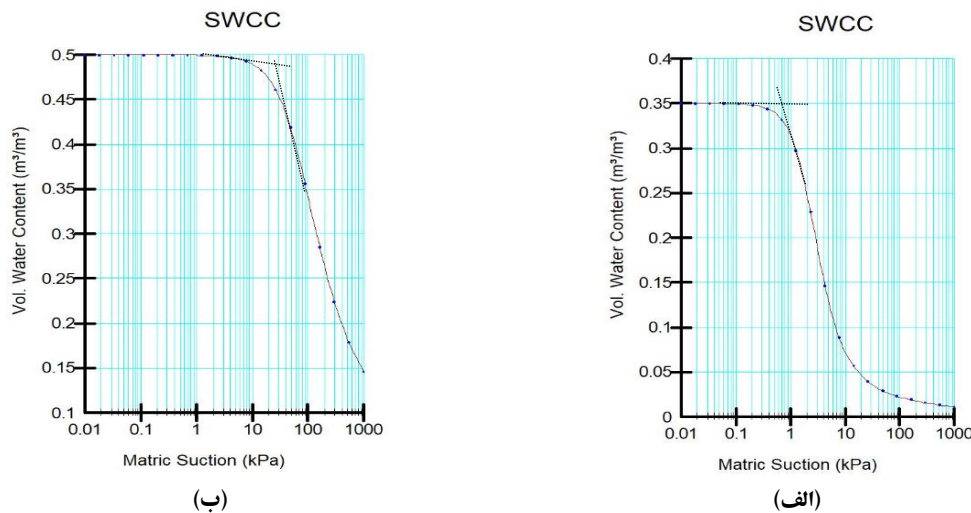
$$K = K_s \exp(\beta h_m) \quad (۱)$$

که در آن،  $K$  نفوذپذیری و  $K_s$  نفوذپذیری اشباع،  $h_m$  هد متناظر با مکش بافتی‌های مختلف و  $\beta$  برابر با  $1/h_a$  است.  $h_a$  نیز ارتفاع نظیر نقطه ورود هوا در منحنی SWCC است. حداکثر ارتفاع موئینگی ( $h_c$ ) را می‌توان با یک تابع خطی از  $D_{10}$  (قطر دانه ای که ۱۰ درصد ذرات از آن کوچکتر هستند) و به صورت رابطه ۲ تعریف نمود [۱۲]. که در آن  $h_c$  و  $D_{10}$  بر حسب میلی‌متر هستند و  $D_{10}$  در محدوده بین ۰/۰۰۶ تا ۰/۲ قرار دارد. اختلاف بین ارتفاع صعود موئینگی و ارتفاع حاشیه موئینگی، تابعی کاهشی از جذر شعاع منفذ معادل  $r$  است [۱۳] که در رابطه ۳ ارائه شده است. در این رابطه  $h_c$  و  $h_a$  بر حسب سانتی‌متر بوده و  $r$  بر حسب میکرومتر می‌باشد.

$$h_c = -990(\ln D_{10}) - 1540 \quad (۲)$$

$$h_c = h_a + 134.48 - 5.16\sqrt{r} \quad (۳)$$

مطالعات آزمایشگاهی گذشته نشان داده است که نسبت  $h_c/h_a$  بین ۲ تا ۵ متغیر است [۱۴]. لذا در صورت استخراج ارتفاع نقطه ورود هوا از منحنی مشخصه آب-خاک، حداکثر ارتفاع صعود موئینگی قابل محاسبه است. با توجه به منحنی SWCC ارائه شده در شکل ۱ برای خاک ماسه‌ای و رسی، مقدار  $h_a$  برای خاک ماسه‌ای در حدود ۶ سانتی‌متر و برای خاک رسی در حدود ۳ متر می‌باشد. بنابراین در مدل‌سازی، مقدار  $h_c$  برای خاک ماسه‌ای و رسی به ترتیب برابر ۱۵ سانتی‌متر و ۱۵ متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- منحنی SWCC برای خاک‌های (الف) ماسه‌ای و (ب) رسی

بلایت [۱۵] و اسکاریو [۱۶]، دو روند کلی برای رفتار مقاومت برشی خاک‌های غیر اشباع ارائه دادند. در روند اول با افزایش تنش قائم خالص، مقاومت برشی افزایش می‌یابد. این رفتار مشابه با خاک‌های اشباع می‌باشد. در روند دوم نیز با افزایش مکش بافتی، مقاومت برشی افزایش می‌یابد. فردلانگ و همکاران در سال ۱۹۷۸ [۱۷]، معیار بسط داده شده مور-کولمب را برای توصیف رفتار مقاومت خاک‌های غیر اشباع ارائه نمودند. که مطابق رابطه ۴ است. طبق این رابطه، پوش گسیختگی یک صفحه مسطح در فضای متغیرهای وضعیت تنش قائم خالص ( $\sigma - u_a$ )، مکش بافتی ( $u_a - u_w$ ) و مقاومت برشی رسم می‌شود. در نتیجه، غیر اشباع شدن خاک باعث ایجاد یک چسبندگی ظاهری شده و مقاومت برشی ( $T_f$ ) را افزایش می‌دهد.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \phi' + \chi_f (u_a - u_w) \tan \phi' \quad (4)$$

طبق رابطه ۵، پارامتر  $\chi_f$  نشان دهنده درصدی از مکش بافتی است که به تنش مکشی تبدیل شده است. با توجه به اینکه تغییرات  $\chi_f$  وابسته به درصد رطوبت می‌باشد، نرم افزار با استفاده از رابطه ۵ و منحنی مشخصه آب-خاک، مقدار  $\chi_f$  در مکش‌های مختلف را محاسبه می‌کند.

$$\chi_f = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (5)$$

در این رابطه،  $\theta_s$  و  $\theta_r$  به ترتیب، مقدار رطوبت اشباع و مقدار رطوبت پسماند هستند. با فرض وجود تبخیر سطحی در سطح زمین و تخلیه آب داخل گود با پمپ، شرایط مرزی فشار صفر برای سطح زمین، کف و دیواره گود در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط دو نوع خاک رسی و ماسه‌ای در نظر گرفته شده در فرآیند مدل‌سازی در جدول ۱ آمده است تراز آب زیر زمینی در عمق ۳۶ متری از سطح زمین در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- اطلاعات مربوط به نوع خاک بکار رفته در مدل‌سازی عددی [۱۸-۲۰]

نوع خاک	تخلخل، n	نفوذپذیری، K (m/s)	رطوبت پسماند، $\theta_r$	وزن مخصوص (kN/m <sup>3</sup> )	زاویه اصطکاک، $\phi$ (درجه)	ضریب چسبندگی، c (KPa)
ماسه	۰/۳۵	۶-۱۰	۰/۰۲۷	۱۸	۳۳	۴
رس	۰/۵	۸-۱۰	۰/۱	۱۷	۲۰	۲۰

مدل ساخته شده در بسته نرم افزاری SEEP، به محیط Slope منتقل می‌شود تا اثر نشت لوله آب بر پایداری گودهای مسلح شده با سیستم نیلینگ و انکراژ مورد بررسی قرار گیرد. در طراحی سیستم نیلینگ و انکراژ برای گودی به ارتفاع (H) ۱۰ متر و با مشخصات خاک مندرج در جدول ۱ از ضوابط مندرج در آیین نامه FHWA نیلینگ [۲۱] و FHWA انکراژ [۲۲] استفاده شده است. جزئیات سیستم انکراژ و نیلینگ استفاده شده در مدل‌سازی به ترتیب در جدول ۲ و ۳ آمده است.

جدول ۲- مشخصات انکرها در خاک رسی و ماسه‌ای

ردیف	طول کل (m)	طول مهار شده (m)	زاویه انکر با افق (درجه)	تعداد استرند	قطر ناحیه باند (cm)	فاصله از سطح زمین (m)	فواصل افقی (m)
اول	۱۵	۷	۱۵	۳	۱۰	۱/۵	۲
دوم	۱۴	۷	۱۵	۳	۱۰	۴	۲
سوم	۱۳	۶	۱۵	۳	۱۰	۶/۵	۲
چهارم	۱۲	۶	۱۵	۳	۱۰	۹	۲

جدول ۳- مشخصات نیل‌ها در خاک رسی و ماسه‌ای

ردیف	طول کل (m)	مشخصات میلگرد مهاری	زاویه نیل با افق (درجه)	قطر ناحیه باند (cm)	فاصله از سطح زمین (m)	فواصل افقی (m)
اول	۱۲	۳۲Φ	۱۵	۱۰	۱	۲
دوم	۱۱	۳۲Φ	۱۵	۱۰	۳	۲
سوم	۱۰	۳۲Φ	۱۵	۱۰	۵	۲
چهارم	۹	۳۲Φ	۱۵	۱۰	۷	۲
پنجم	۸	۳۲Φ	۱۵	۱۰	۹	۲

در سیستم انکراژ، مقدار مقاومت بیرون کشش برای خاک رسی برابر ۸۰ kPa و برای خاک ماسه‌ای ۲۰۰ kPa در نظر گرفته شده است [۲۲]. نیروی هر استرند نیز ۱۵۶ کیلو نیوتن در نظر گرفته شده است. در سیستم نیلینگ نیز مقدار مقاومت بیرون کشش برای خاک رسی برابر ۸۰ kPa و برای خاک ماسه‌ای ۱۴۰ kPa در نظر گرفته شده است [۲۱]. حداقل ضریب اطمینان پایداری گود برای سیستم نیلینگ برابر ۱/۵ و برای سیستم انکراژ با فرض موقت بودن برابر ۱/۳ در نظر گرفته شده است. سرباری معادل ۱۰ کیلونیوتن بر متر مکعب در سطح زمین در نظر گرفته شده است. طراحی شمع برای هر

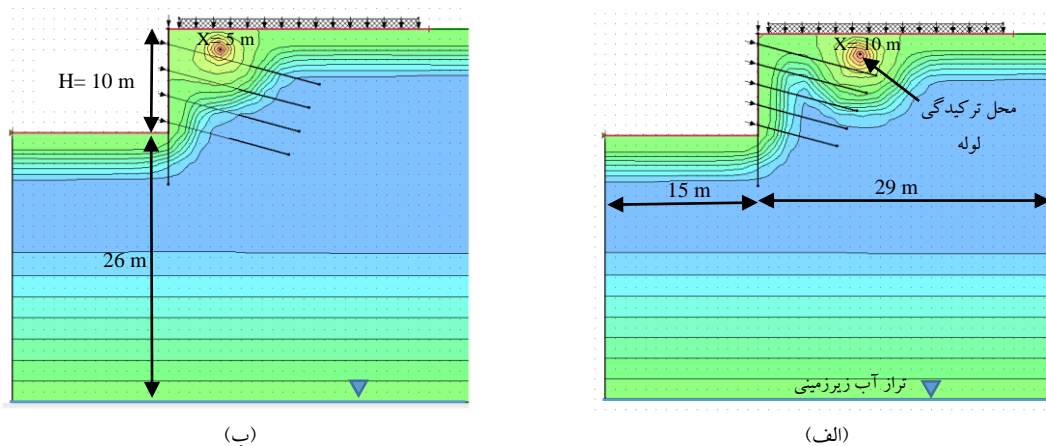
دو نوع خاک با استفاده از جدول اشتال و مقررات ملی مبحث دهم انجام شده و مشخصات آن در جدول ۴ نشان داده شده است. برای تحلیل پایداری از روش Morgen stern – Price استفاده شده است و روش Entry and Exit برای مشخص کردن سطح گسیختگی بکار رفته است.

جدول ۴- مشخصات شمع بتنی

طول کل (m)	عمق گیرداری (m)	قطر (cm)	فواصل افقی (m)
۱۵	۵	۸۰	۲

### ۳. تحلیل و بررسی نتایج

در این بخش به بررسی جداگانه هر یک از حالات ترکیب لوله آب، بر رفتار گودهای مسلح شده با سیستم نیلینگ و انکراژ و همچنین تنش مکشی ایجاد شده در خاک های رسی و ماسه‌ای پرداخته شده است. لوله آب در عمق ۲ متری از سطح زمین در نظر گرفته شده است. جهت بررسی اثر موقعیت لوله، فواصل افقی (X) مختلفی در نظر گرفته شده است که شامل فواصل ۵ متری ( $X/H=0.5$ )، ۷/۵ متری ( $X/H=0.75$ )، ۱۰ متری و ۱۲/۵ متری ( $X/H=1.25$ ) متری از لبه گود است. با توجه به فشار رایج در سیستم لوله کشی آب شهری، هد فشاری در محل ترکیبگی برابر ۱۵ متر آب در نظر گرفته شده است. مدت زمان تحلیل با توجه به مقدار نفوذپذیری خاک‌ها، به ترتیب برای خاک رسی و ماسه‌ای برابر ۱۰ روز و ۳۶۵ روز در نظر گرفته شده است. نمایی از مدلسازی انجام شده در نرم افزار در شکل ۲ نشان داده شده است. ابعاد در تمام مدلسازی‌ها یکسان در نظر گرفته شده است.

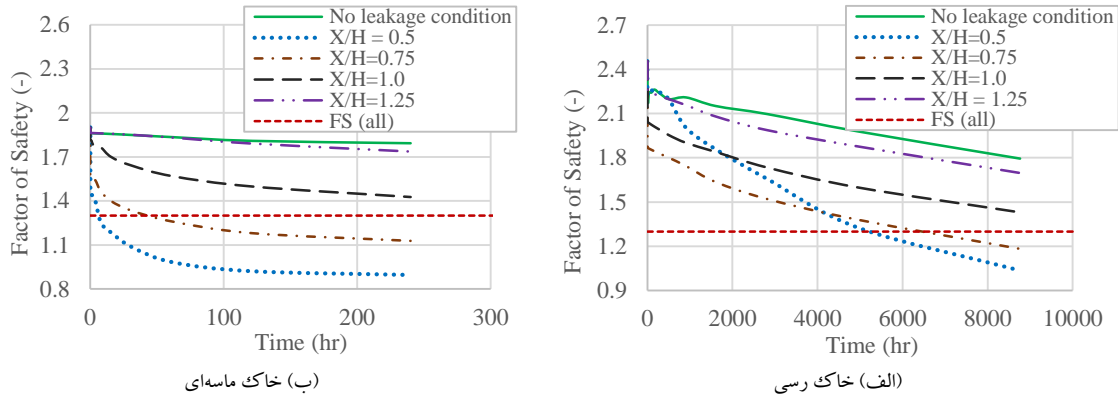


شکل ۲- ابعاد و مشخصات مدل عددی (الف) سیستم نیلینگ و (ب) سیستم انکراژ

### ۳.۱- بررسی عملکرد سیستم انکراژ در خاک رسی و ماسه‌ای برای موقعیت های مختلف لوله نسبت به گود

برای نسبت های مختلفی از  $X/H$  اثر نشت از لوله آب بر ضریب اطمینان پایداری گود مسلح شده با سیستم انکراژ مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در شکل ۳ آمده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، در هر دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی مقدار کاهش ضریب اطمینان برای نسبت  $X/H=1.25$  بسیار کمتر از سایر حالات است که این بدین معناست که برای ترکیبگی لوله در فواصل دورتر از  $X/H=1.25$  خطر کمتری گود را تهدید می‌کند. در خاک رسی و در کوتاه مدت، ترکیبگی لوله در نسبت  $X/H=0.5$  افت ضریب اطمینان کمتری در مقایسه با نسبت فواصل  $X/H=0.75$  و  $X/H=1.0$  ایجاد کرده است. این در حالی است که در خاک ماسه‌ای در کوتاه مدت نیز با نزدیک شدن منبع نشت به گود، افت پایداری شدید بوده است. در هر حال، بطور کلی با نزدیک شدن منبع نشت به دیواره گود، ناپایداری کلی زودتر رخ داده است که این امر برای هر دو نوع خاک رسی و ماسه‌ای صادق است. پس از شروع نشت آب، در همان ساعات ابتدایی، گود ماسه‌ای مسلح شده به انکراژ افت ضریب اطمینان شدیدتری در مقایسه با گود رسی تجربه می‌کند و لذا در خاک ماسه‌ای در زمان بسیار کوناهی تحت اثر تغییر رطوبت خاک پایداری از دست رفته است که این امر به خاطر نفوذپذیری بالاتر خاک‌های

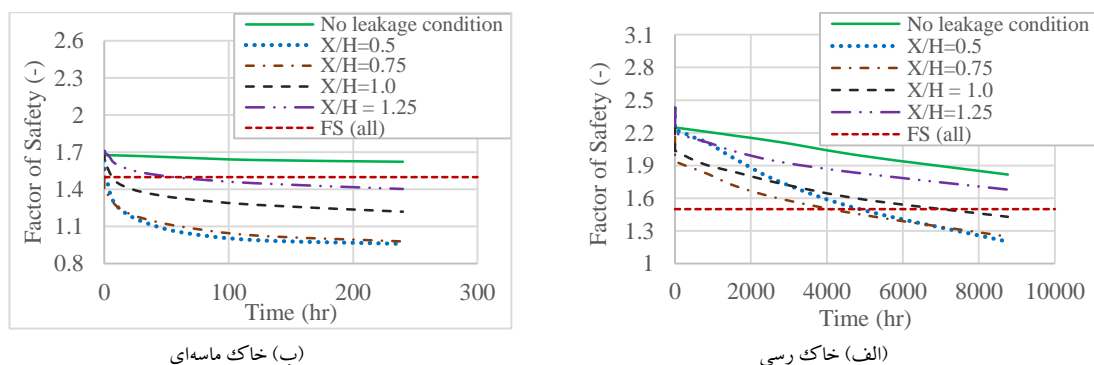
ماسه‌ای است. همچنین ملاحظه می‌گردد که در صورت استفاده از سیستم انکراژ یکسان برای گود متشکل از خاک ماسه‌ای و رسی، در بازه زمانی مشابه، گود رسی ضریب اطمینان بالاتری بدست می‌دهد و لذا عملکرد سیستم انکراژ در خاک رسی بهتر است.



شکل ۳- بررسی اثر موقعیت نشت آب بر ضریب اطمینان پایداری گود مسلح شده با انکر: (الف) در خاک رسی و (ب) در خاک ماسه‌ای

### ۲.۲- بررسی عملکرد سیستم نیلینگ در خاک رسی و ماسه‌ای برای موقعیت‌های مختلف لوله نسبت به گود

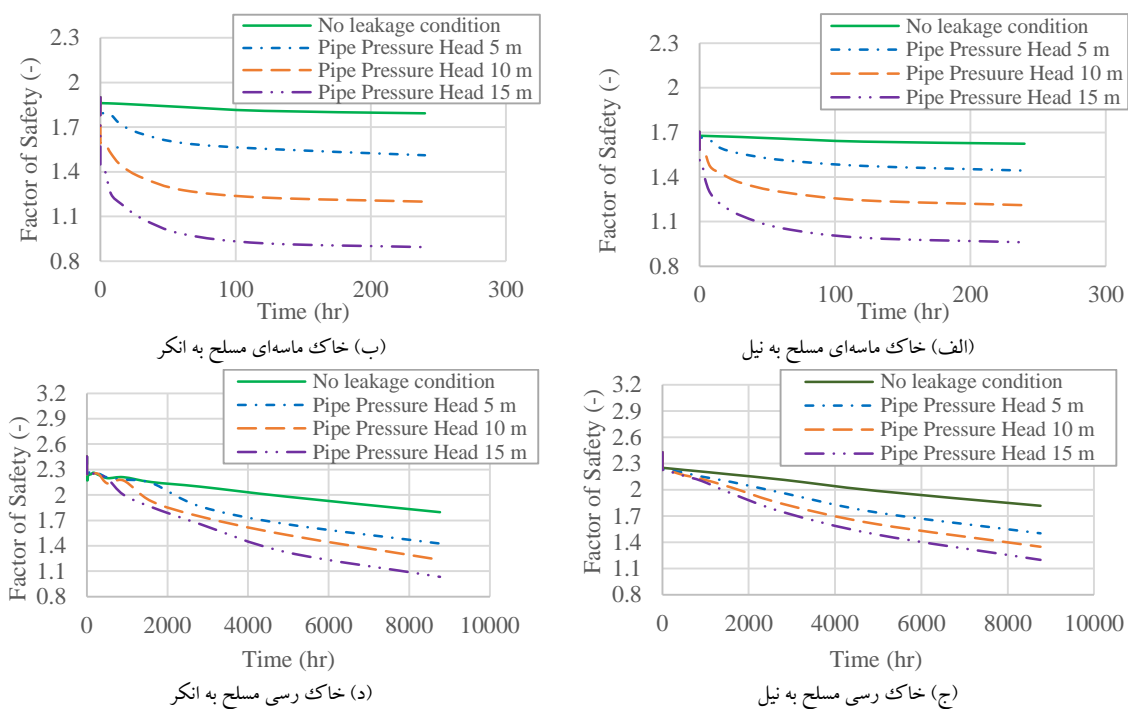
برای نسبت‌های مختلفی از  $X/H$  اثر نشت از لوله آب بر ضریب اطمینان پایداری گود مسلح شده با سیستم نیلینگ مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در شکل ۴ آمده است. همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌گردد، در گود ماسه‌ای پس از شروع نشت آب در همان ساعات ابتدایی افت ضریب اطمینان شدیدی به وجود آمده است و پایداری گود به مخاطره افتاده است این در حالی است که در گود رسی برای مدت زمان قابل توجهی پایداری گود حفظ شده است که این تفاوت رفتار به دلیل تفاوت در نفوذپذیری خاک و تغییرات رطوبت ناشی از آن است. در این بخش نیز ملاحظه می‌گردد که در خاک رس و در کوتاه مدت، ترکیب لوله در نسبت  $X/H=0.5$  افت ضریب اطمینان کمتری در مقایسه با نسبت فواصل  $(X/H) 0.75$  و  $1.0$  ایجاد کرده است. این در حالی است که در خاک ماسه‌ای در کوتاه مدت نیز با نزدیک شدن منبع نشت به گود، افت پایداری شدید بوده است. اگرچه در گود ماسه‌ای تفاوت چندانی در رفتار گود برای نسبت فواصل  $0.75$  و  $1.0$  وجود ندارد، اما بطور کلی در هر دو نوع خاک رسی و ماسه‌ای، بیشترین ضریب اطمینان در انتهای زمان تحلیل مربوط به دورترین فاصله محل نشست از گود و پایین‌ترین ضریب اطمینان مربوط به نزدیک‌ترین فاصله به گود بوده است، لذا چنین می‌توان نتیجه گرفت که در گودهای مسلح شده به سیستم نیلینگ بطور کلی با نزدیک شدن منبع نشت به دیواره گود، خطر ریزش گود افزایش می‌یابد. همچنین نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که در صورت استفاده از سیستم نیلینگ یکسان برای گود متشکل از خاک ماسه‌ای و رسی، در بازه زمانی مشابه گود متشکل از خاک رسی ضریب اطمینان بالاتری بدست می‌دهد و لذا عملکرد سیستم نیلینگ در خاک رسی بهتر است.



شکل ۴- بررسی اثر موقعیت نشت لوله بر ضریب اطمینان پایداری گود مسلح شده با نیل: (الف) در خاک رسی و (ب) در خاک ماسه‌ای

### ۳.۳- بررسی اثر شدت فشار نشت بر رفتار گود

به منظور بررسی اثر شدت فشار نشت بر رفتار گود ماسه‌ای و رسی، سه هد فشاری ۱۵، ۱۰ و ۵ متر برای لوله‌ای در فاصله ۵ متری از گود فرض شده است. سایر فرضیات مدلسازی مطابق با موارد در نظر گرفته شده در بخش‌های پیشین است. شکل ۵ نتایج مدلسازی را نشان می‌دهد. با کاهش شدت فشار نشت، ضریب اطمینان پایداری کلی در کلیه حالات مورد بررسی افزایش یافته است. همچنین ملاحظه می‌گردد که با افزایش زمان نشت ضریب اطمینان پایداری برای تمامی حالات مورد بررسی کاهش یافته است که به دلیل افزایش رطوبت خاک پشت گود می‌باشد. تاثیر شدت نشت در خاک‌های ماسه‌ای بیشتر است و در زمانی کوتاه تغییرات ضریب اطمینان بیشتری در این نوع خاک‌ها شاهد هستیم که این امر به خاطر سریع‌تر اشباع شدن خاک پشت گود ماسه‌ای در مقایسه با گود رسی است. این تفاوت بخصوص در زمان‌های اولیه بسیار چشمگیر است. همچنین ملاحظه می‌گردد که در گودهای مسلح به سیستم انکراژ، نسبت افت ضریب اطمینان در برابر شدت نشت آب اندکی بیشتر از نسبت افت رخ داده در گودهای مسلح به سیستم نیلینگ است.

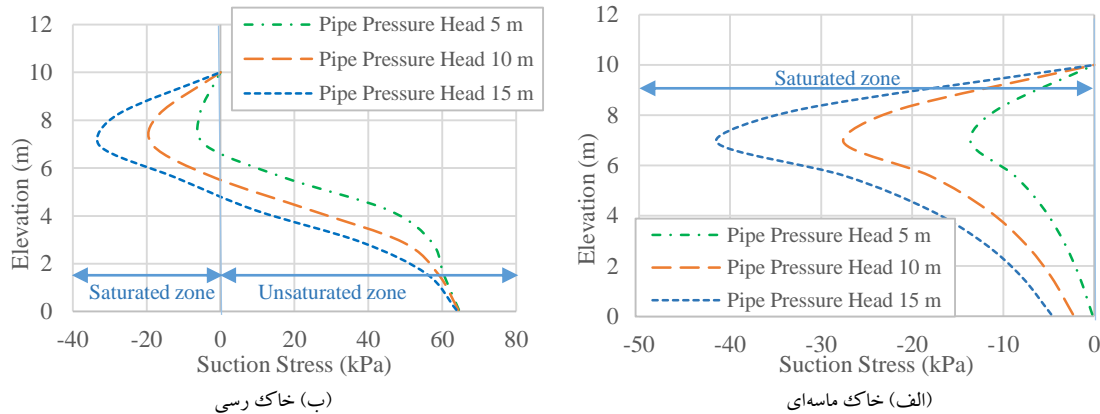


شکل ۵- تاثیر شدت هد فشاری نشت آب در (الف) خاک ماسه‌ای مسلح به نیل، (ب) خاک ماسه‌ای مسلح به انکر، (ج) خاک رسی مسلح به نیل و (د) خاک رسی مسلح به انکر

### ۴.۳- بررسی تغییرات تنش مکشی با شدت نشت آب

جهت بررسی تاثیر شدت نشت آب بر رفتار خاک غیر اشباع، تغییرات تنش مکشی یعنی  $\chi_f(u_a - u_w)$  در ارتفاع گود برای هر دو نوع خاک رسی و ماسه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در شکل ۶ قابل مشاهده است. در این قسمت نیز هد فشاری ۵، ۱۰ و ۱۵ متر برای نشت آب از لوله‌ای با عمق دفن دو متر و نسبت  $X/H=0.5$  در نظر گرفته شده است. سایر فرضیات مدلسازی مطابق با بخش‌های قبلی است. خروجی‌های نشان داده شده مربوط به فاصله دو متری از لبه گود و انتهای تحلیل یعنی زمان ۱۰ روز برای خاک ماسه‌ای و زمان ۳۶۵ روز برای خاک رسی است. همانطور که در شکل ۶ قابل مشاهده است مقدار حداکثر تنش مکشی منفی در تراز حدودی ۷ متری از کف گود رخ داده است که این امر به دلیل نزدیک بودن به تراز ارتفاعی محل نشت آب است. برگشت نمودار در ارتفاع ۱۰ متر ناشی نوع شرایط مرزی (فشار صفر) تعریف شده در سطح زمین است. همچنین ملاحظه می‌گردد که در ناحیه اشباع تنش مکشی مقادیر منفی دارد که سبب کاهش مقاومت برشی خاک می‌شود ولی در محدوده غیر اشباع، مقادیر تنش مکشی مثبت است که ایجاد چسبندگی ظاهری می‌کند و لذا مقدار مقاومت برشی خاک در این ناحیه افزایش می‌یابد. یکی از دلایل کاهش شدیدتر

ضریب اطمینان پایداری گود در خاک‌های ماسه‌ای در مقایسه با خاک‌های رسی که در بخش‌های پیشین نیز مشاهده شد همین کاهش مقاومت برشی ناشی از اشباع شدن خاک است که طبق رابطه (۴) از مقاومت برشی خاک کم می‌کند. افزایش هد فشاری آب در ناحیه اشباع مقادیر منفی تنش مکشی را افزایش می‌دهد و در مقابل در ناحیه غیر اشباع مقادیر تنش مکشی مثبت را کاهش می‌دهد. لذا با توجه به درجه اشباع خاک، مقاومت برشی متفاوتی از خاک می‌تواند بروز کند.



شکل ۶- تغییرات تنش مکشی در ارتفاع گود

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر نشت لوله آب بر پایداری گودهای مسلح شده با سیستم نیلینگ و انکراژ بصورت عددی و با کمک نرم افزار ژئواستودینو مورد بررسی قرار گرفت. دو نوع خاک رسی و ماسه‌ای و موقعیت‌های مختلف لوله نسبت به گود در مدلسازی‌های در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که:

۱- بطور کلی عملکرد سیستم نیلینگ و انکراژ در خاک‌های رسی بهتر است و در صورت مسلح شدن به سازه نگهبان یکسان ضریب اطمینان بالاتری نسبت به خاک ماسه‌ای می‌دهند.

۲- در خاک رس و در کوتاه مدت، ترکیب لوله در نسبت  $X/H=0.5$  افت ضریب اطمینان کمتری در مقایسه با نسبت فواصل  $X/H$  ۰/۷۵ و ۱/۰ ایجاد کرده است. این در حالی است که در خاک ماسه‌ای در کوتاه مدت نیز با نزدیک شدن منبع نشت به گود، افت پایداری شدید می‌شود. در هر حال در هر دو نوع خاک، بیشترین ضریب اطمینان نهایی مربوط به دورترین فاصله محل نشست از گود و کم‌ترین ضریب اطمینان نهایی مربوط به نزدیک‌ترین فاصله به گود بوده است. این رفتار برای هر دو سیستم سازه نگهبان نیلینگ و انکراژ صادق است.

۳- در خاک‌های رسی در صورت بروز نشت آب، گود دیرتر دچار ناپایداری کلی می‌شود این رفتار برای گود مسلح شده با هر دو سیستم نیلینگ و انکراژ صادق است.

۴- با افزایش هد فشاری آب در محل ترکیب لوله، ضریب اطمینان پایداری کل کاهش می‌یابد. تاثیر شدت نشست بر خاک‌های ماسه‌ای بیشتر از خاک‌های رسی است. در گودهای مسلح به سیستم انکراژ مقدار افت ضریب اطمینان در برابر شدت نشست آب اندکی بیشتر از افت رخ داده در گودهای مسلح به سیستم نیلینگ است.

۵- با افزایش هد فشاری نشت آب، مقدار تنش مکشی منفی افزایش می‌یابد. در ناحیه اشباع تنش مکشی مقادیر منفی دارد و از میزان مقاومت برشی کم می‌کند ولی در محدوده غیر اشباع که مقادیر تنش مکشی مثبت است مقدار مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد که به پایداری کلی گود کمک می‌کند.

#### ۵. مراجع

1. Fredlund, D.G. A. and Xing, (1994), "Equations for the soil-water characteristic curve," Canadian geotechnical journal, 31 521-532.
2. Lu, N. Likos, (2004) W.J. "Unsaturated soil mechanics," Wiley.





3. Vanapalli, S.K. Fredlund, D.G. and Pufahl, D.E. (1999) "The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till," *Geotechnique*, 49, 143-159.
4. Charles WW, Ng, and Y. Pang, (2000), "Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, **126**(2): p. 157-166.
5. Kalantary.F and Ahmadi.H, (2007) "Development of Failure Criterion for Partially Saturated Cohesive Soils", *International Journal of Geotechnic Engineering*, 21.
6. Marchal, J.(1984) "Renforcement des sols par clouage—étude expérimentale en laboratoire, " in: *Renforcement en place des sols et des roches. Colloque international*, pp. 275-278.
7. Jones, C.P. (1991) "In-situ techniques for reinforced soil, in: *Performance of reinforced soil structures*, Thomas Telford Publishing, " pp. 277-282.
8. Sabhahit,N. Basudhar,P. Madhav, M.R. (1995)"A generalized procedure for the optimum design of nailed soil slopes", *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 19,437-452.
9. Elias, V., and I. Juran. (1991), "SOIL NAILING FOR STABILIZATION OF HIGHWAY SLOPES AND EXCAVATIONS". FINAL REPORT. No. FHWA-RD-89-198.
10. Fan, C.-C. and Luo, J.-H. (2008) "Numerical study on the optimum layout of soil-nailed slopes, *Computers and Geotechnics*", 35, 585-599.
11. Gardner,W. (1958) "Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table", *Soil science*, 85, 228-232.
12. Lane, K. Washburn,D. Krynine,D. (1947) "Capillarity tests by capillarimeter and by soil filled tubes", in: *Highway research board proceedings*.
13. Kumar, S. and Malik,R (1990) "Verification of quick capillary rise approach for determining pore geometrical characteristics in soils of varying texture", *Soil Science*, 150, 883-888.
14. Lu, N. and Likos, W.J. (2006) "Suction stress characteristic curve for unsaturated soil, " *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132, 131-142.
15. Blight,G. (1967) "Effective stress evaluation for unsaturated soils", *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 93 125-148.
16. Escario,V. (1980) "Suction controlled penetration and shear tests", in: *Expansive Soils*, ASCE, pp. 781-797.
17. Fredlund, D. Morgenstern, N.R. Widger, R (1978) "The shear strength of unsaturated soils", *Canadian geotechnical journal*, 15, 313-321.
18. Carsel, R.F. and Parrish, R.S. (1988) "Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics", *Water resources research*, 24, 755-769.
19. Rehman, Z., Khalid, U., and Mahmood, K. (2019) "Experimental Evaluation of Mohr Columb Strength Parameter with Grain Size of Granular Soils", *Technical Journal*, 24(03), 8-14.
۲۰. باباخانی، پ. رحیمی، ا. غروی، ه. مطهری، م و رستگاریا، ا. (۱۳۹۹)، "تخمین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک رس با پلاستیسیته کم بر اساس عدد SPT و بررسی تاثیر آهک بر مقاومت فشاری خاک رس"، یافته های نوین زمین شناسی کاربردی، دوره ۱۴، شماره ۲۸، ۱۲۹-۱۴۹
21. Lazarte, C.A. Robinson, H. Gómez, J.E. Baxter,A. Cadden, A. Berg,R. (2015) "Soil nail walls reference manual"
22. Sabatini,P. Pass,D. Bachus, R. (1999) "Geotechnical engineering circular NO. 4: Ground anchors and anchored systems".