

تاثیر مکش بافتی بر پایداری گود در خاک غیر اشباع

نرگس سلیمانیان^۱، امین اکرامی فرد^۲، امیرعباس ریاحی خو^۳، علی اخترپور^{۴*}

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۷

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۸

چکیده

در سالهای اخیر بلند مرتبه سازی به طور وسیعی در شهرها افزایش یافته و نیاز به حفر گودهای عمیق به جهت استفاده‌ی حداکثری از فضاهای موجود به شدت افزایش یافته است. یکی از روش‌های پایدارسازی گود، استفاده از سیستم شمع‌های فلزی و انکراژ می‌باشد. در بسیاری از موارد گسیختگی گودها بر اثر بارش‌های شدید، ترکیدگی لوله‌ی آب، وجود چاه‌های جذبی و لایه‌های آرتزین رخ می‌دهد. بر اثر این عوامل میزان مکش بافتی کاهش یافته و فشار آب حفره‌ای افزایش می‌یابد در نتیجه مقاومت برشی خاک تضعیف می‌گردد و باعث ناپایداری می‌گردد. در این پژوهش با استفاده از شبیه سازی‌های عددی توسط نرم افزارهای SEEP/W و Slope/W و با در نظر گیری دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی، اثر ترکیدگی لوله‌ی آب، وجود یک چاه جذبی و لایه آرتزین بر پایداری یک گود پایدارسازی شده به وسیله‌ی انکراژ و شمع فلزی با گذشت زمان مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر تغییر در موقعیت لوله‌ی آب، چاه جذبی و لایه آرتزین بر ضریب اطمینان گود بررسی شده است. نتایج نشان داد با دور شدن موقعیت لوله‌ی آب و چاه جذبی از گوه گسیختگی ضریب اطمینان افزایش می‌یابد. همچنین دور شدن موقعیت لایه آرتزین نسبت به کف گود، باعث افزایش ضریب اطمینان شده است.

کلید واژه‌ها: خاک غیر اشباع، تحلیل پایداری، ترکیدگی لوله، چاه جذبی، لایه آرتزین.

۱. دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲. دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
۳. دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، دانشکده مهندسی مشهد
۴. دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد akhtarpour@um.ac.ir

۱. مقدمه

تاکنون گودهای بسیاری بر اثر تغییر در رطوبت خاک که ناشی از عوامل مختلفی مانند ترکیب لوله، بارندگی و چاه‌های جذبی می‌باشد فروریخته است. لازم به ذکر است که همواره تحلیل این مساله از دشواری‌های بسیاری برخوردار بوده است. برای مطالعه رفتار هیدرومکانیکی در محیط‌های چند فازی مانند خاک‌های غیر اشباع، شناخت کاملی از خصوصیات مصالح همچون رابطه‌ی بین رطوبت و مکش و مقاومت برشی خاک‌ها مورد نیاز است. منحنی مشخصه‌ی آب-خاک (SWCC) بیانگر رابطه‌ی بین رطوبت و مکش در خاک‌های غیر اشباع می‌باشد. در این راستا تاکنون محققین متعددی با ارائه معادلات تجربی، منحنی مشخصه آب-خاک را ارائه داده‌اند (Fredlund and Xing, 1994, Ning and William, 2004, Vanapalli and Fredlund, 1999). همچنین، پژوهشگران روابطی بر پایه‌ی دو متغیر حالت تنش ($\sigma - U_a, U_a - U_w$) برای تخمین مقاومت برشی خاک‌های غیر اشباع ارائه کردند (Fredlund and Rahardjo, 1993).

اندازه‌گیری مستقیم نفوذپذیری خاک‌های غیر اشباع در آزمایشگاه اغلب وقت گیر و هزینه بر است. از این رو می‌توان از توابع هدایت هیدرولیکی برای این منظور بهره گرفت. میزان درصد رطوبت حجمی و هدایت هیدرولیکی اشباع توسط محققین بسیاری با استفاده از منحنی توزیع اندازه‌ی حفرات تخمین زده شده است. همچنین توابع هدایت هیدرولیکی متعددی جهت پیش‌بینی نفوذپذیری خاک‌ها ارائه گردیده است (Lam et al., 1987, Van, 1980).

محققین به منظور بررسی میزان تأثیرگذاری منحنی مشخصه آب-خاک بر توزیع فشارهای حفره‌ای و پایداری گودهای غیر اشباع در طی بارش باران، در یک مطالعه‌ی موردی توسط نرم-افزارهای SEEP/W و Slope/W اقدام به انجام تحلیل‌های جریان غیر ماندگار و تعادل حدی نمودند. نتایج بررسی‌های انجام شده توسط آن‌ها نشان داد با گذشت زمان و طولانی شدن مدت زمان بارش، ضرایب اطمینان کاهش پیدا می‌کنند (Ng and Pang, 2000). همچنین، به منظور بررسی تأثیر درجه اشباع در میزان پایداری شیروانی‌های تشکیل شده از خاک‌های ریزدانه

نیمه اشباع، مطالعه‌ای بر روی شیروانی به ارتفاع ۱۰ متر و نسبت شیب افقی به قائم ۱/۵ انجام شده است. این کار با استفاده از نرم‌افزار Slope/W برای یک لایه خاک ریزدانه در اعماق مختلف و با درصد رطوبت‌های ۲۰ تا ۴۰ درصد انجام پذیرفته است. همچنین، پایداری شیروانی از نوع تعادل حدی به روش بیشاپ (Bishop) و جانبو (Jumbo) به ازای مقادیر مختلف درصد رطوبت مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی تر شدگی لایه‌های سطحی نشان داد که در صورت افزایش عمق تر شدگی احتمال وقوع گسیختگی و لغزش‌های موضعی بیشتر خواهد شد (Ahmadi et al., 2007).

شرایط آب زیرزمینی در طراحی دیوارهای میخکوبی شده از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در این راستا، کیم و همکاران (Kim et al., 2005)، با استفاده از تحلیل‌های سری زمانی به ارزیابی و تجزیه و تحلیل تخلیه‌ی آب زیرزمینی در ایستگاه مترو پرداختند. همچنین، بررسی‌های انجام شده توسط مارشال (Marchal, 1984) نشان می‌دهد که زاویه‌ی قرارگیری مهارها در گود بر روی عملکرد آن‌ها و همچنین مقاومت برشی بسیار تأثیر گذار است. لازم به ذکر است، مهارهای مورد استفاده در دیوارهای میخکوبی شده پیش از اعمال یک نیروی کششی معین وارد عمل نمی‌شوند. بر اساس پژوهش جونز (Jones, 1991)، برای ایجاد نیروی کشش اولیه، مهارها می‌توانند در قسمت بالایی دیوار به صورت زاویه دار به سمت بالا مورد استفاده قرار گیرند. سابهیت (Sabahit et al., 1995) نیز نشان داد استفاده از مهار با طول بلند در قسمت‌های پایین دیوار باعث کاهش تعداد مهارهای مورد نیاز برای پایدار سازی دیوار می‌گردد. تأثیر دراز مدت خزش بر عملکرد دیوارهای مسلح نیز در پژوهش انجام شده توسط الیاس و یوران (Elias and Juran, 1991) قابل مشاهده است. فان و لو (Fan and Luo, 2008) با ارائه‌ی یک نرم‌افزار بر اساس روش اجزای محدود به بررسی زاویه، طول و فاصله افقی مهارها پرداختند. روش ارائه شده در این مقاله می‌تواند در تخمین ضرایب اطمینان و بررسی احتمال ناپایداری گودها در موارد رایجی که باعث ناپایداری می‌شود مورد استفاده قرار گیرد.

که در این رابطه h_m هد متناظر با مکش بافتی‌های مختلف و β برابر با $\frac{1}{h_a}$ می‌باشد که h_a نشان دهنده‌ی هد نظیر با نقطه ورود هوا می‌باشد که در شکل ۱ نشان داده شده است. منحنی‌های مورد استفاده برای نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ای و رسی در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که پس از محاسبه تابع نفوذپذیری می‌توان آن را به صورت دستی از روش Data point function وارد نرم افزار نمود.

در این مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی در تراز کف گود فرض شده است که می‌بایست ارتفاع موئینگی با توجه به مشخصات خاک تخمین زده شود. تحلیل یافته‌های آزمایشگاهی انجام شده توسط لین و همکاران (Lane et al., 1947) روی هشت نوع خاک مختلف، نشان می‌دهد که حداکثر ارتفاع موئینگی (h_c) را می‌توان با یک تابع خطی از D_{10} به صورت رابطه ۲ تعریف نمود که در آن h_c و D_{10} بر حسب میلی‌متر بوده و D_{10} در محدوده بین ۰/۰۰۶ تا ۰/۲ قرار دارد. همچنین، نتایج بررسی‌های انجام شده توسط کومار و مالیک (Kumar and Malik, 1990) نشان داد که تفاوت بین ارتفاع صعود موئینگی و ارتفاع حاشیه موئینگی تابعی کاهشی از جذر یک شعاع منفذ معادل r است 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.

$$h_c = -990(\ln D_{10}) - 1540 \quad (2)$$

$$h_c = h_a + 134.48 - 5.16\sqrt{r} \quad (3)$$

اندازه‌گیری صعود موئینگی در انواع گوناگون خاک‌ها نشان داد که نسب h_c/h_a بین ۲ تا ۵ متغیر است. با تعیین هد نقطه‌ی ورود هوا از منحنی مشخصه آب-خاک می‌توان حد کرانه‌ی بالا و پایین را برای حداکثر ارتفاع صعود موئینگی به طور منطقی برآورد کرد (Lu and Likos, 2006).

با توجه به شکل ۱ نقطه‌ی ورود هوا (h_a) در خاک ماسه‌ای برابر با ۶ سانتی‌متر می‌باشد. بنابراین نتیجه می‌شود.

۲. معرفی مدل تحلیلی و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک

در این پژوهش برای مدل‌سازی پایداری گود از نرم‌افزارهای SEEP/W و Slope/W استفاده شده است. در ادامه به روند مدل‌سازی در هریک از این نرم‌افزارها پرداخته شده است.

۲-۱. مدل‌سازی در محیط SEEP/W

جهت تحلیل و بررسی تاثیر ترکیبگی لوله، حفر چاه‌های جذبی و وجود لایه آرتزین بر پایداری گود، در بسته SEEP باید از تحلیل حالت گذرا (Transient analysis) استفاده کرد. به منظور بررسی پارامترهای مورد نظر در محیط متخلخلی مانند خاک، می‌بایست از مدلی که وظیفه‌ی اصلی آن بیان شرایط هیدرولیکی ناحیه مورد بررسی می‌باشد استفاده نمود.

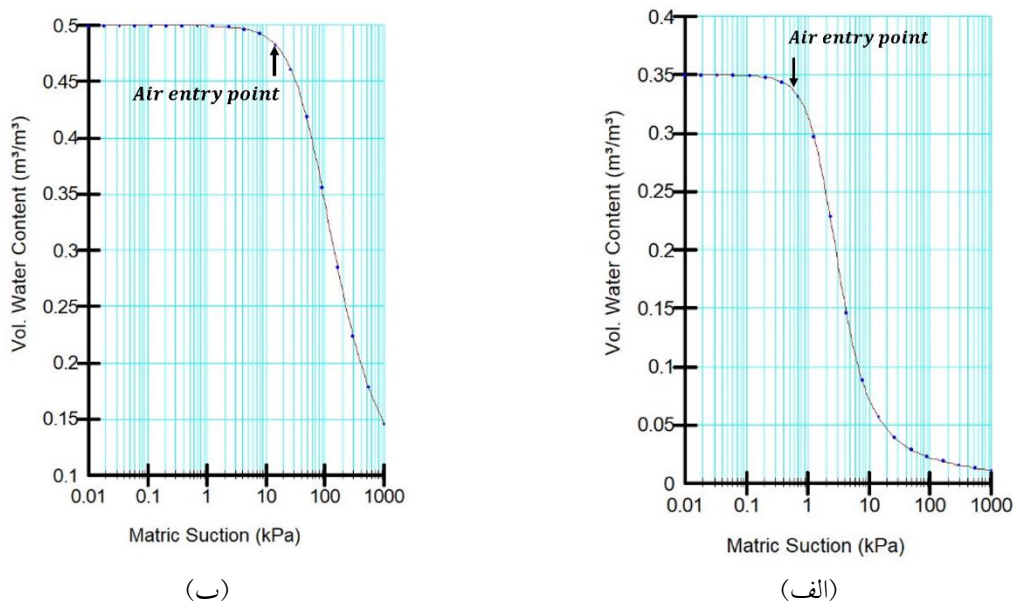
در این پژوهش، از دو نوع خاک درشت‌دانه و ریزدانه استفاده شده است. به این منظور نخست دو مدل با ابعاد متفاوت با توجه به نوع خاک در محیط SEEP ساخته شده است. شکل ۳ ابعاد در نظر گرفته شده برای مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش را نشان می‌دهد. اطلاعات مربوط به نوع خاک به کار رفته در مدل‌سازی نیز در جدول ۱ آورده شده است.

با توجه به این که بخشی از خاک مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش به صورت غیر اشباع می‌باشد، برای مدل‌سازی خاک از مصالح اشباع/غیر اشباع (Saturated/Unsaturated) بهره گرفته شده است. منحنی مشخصه آب-خاک با استفاده از منحنی‌های پیش فرض نرم افزار و با توجه به نوع خاک در نظر گرفته شده است. برای رسم این منحنی از روش Data point function استفاده گردیده است. شکل ۱ منحنی‌های مشخصه آب-خاک مربوط به خاک‌های ماسه‌ای و رسی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است تابع نفوذپذیری با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی توسط گاردنر محاسبه شده است (Lu and Likos, 2006):

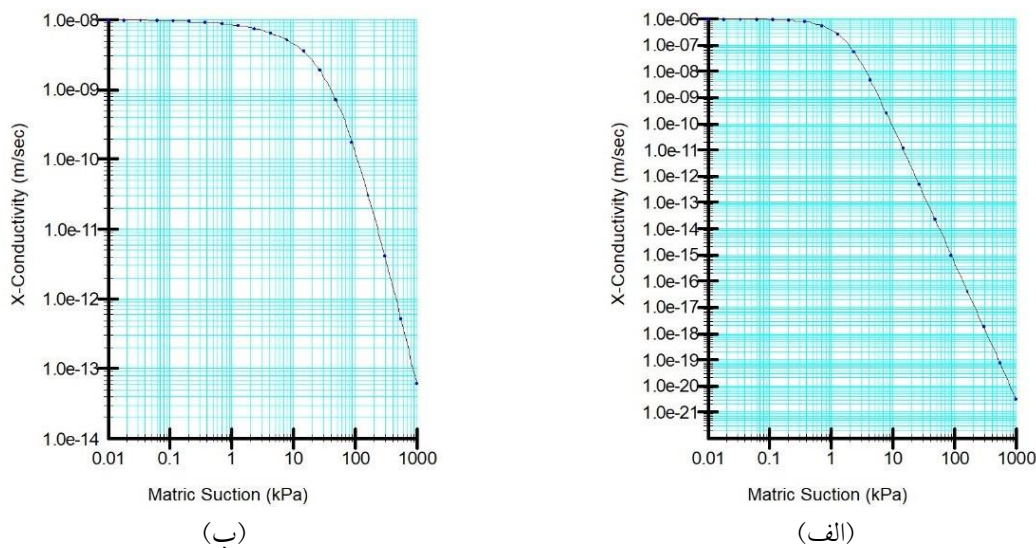
$$K = K_s \exp(\beta h_m) \quad (1)$$

جدول ۱. اطلاعات مربوط به نوع خاک بکار رفته در مدل‌سازی عددی (Carsel and Parrish, 1988)

Soil type	Saturated Kx (m/s)	Saturated water content	Residual water content (θ_r)
Sand	10^{-6}	0.35	0.027
Clay	10^{-8}	0.5	0.1



شکل ۱. منحنی مشخصه آب-خاک برای خاک‌های؛ (الف) ماسه‌ای و (ب) رسی



شکل ۲. منحنی نفوذپذیری برای خاک‌های؛ (الف) ماسه‌ای و (ب) رسی

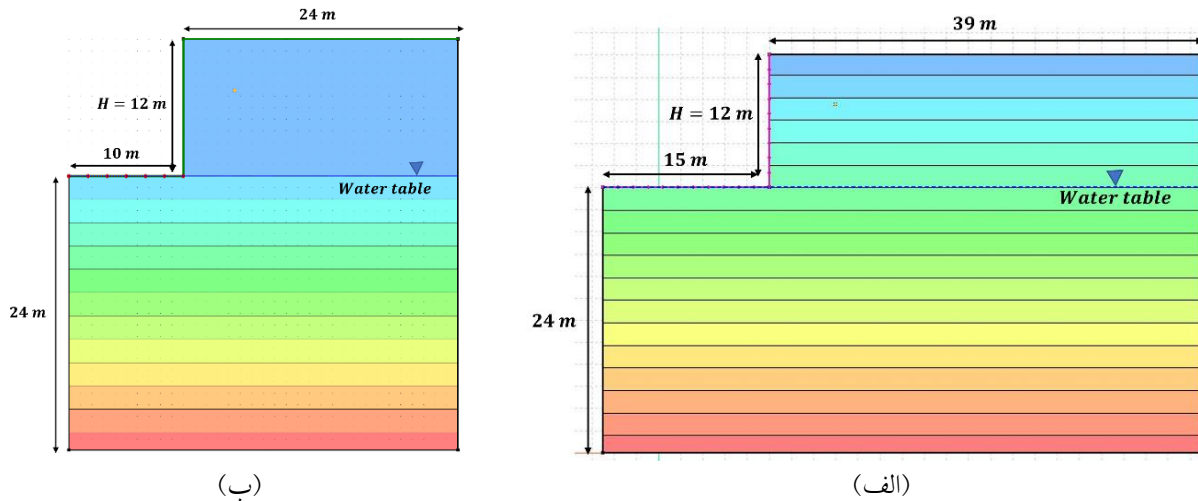
است که برابر با ۱۲ متر می‌باشد. در نتیجه در این شبیه‌سازی، بیشترین ارتفاع فشار منفی برای خاک ماسه‌ای ۱۵ سانتی‌متر و برای خاک رسی ۱۲ متر فرض شده است.

به منظور محاسبه مقدار تنش مکشی در خاک‌های غیر اشباع نیاز به تخمین پارامتر χ می‌باشد. لازم به توضیح است که مقدار تنش مکشی $(\chi(u_a - u_w))$ از حاصل ضرب مکش بافتی $(u_a - u_w)$ در پارامتر χ بدست می‌آید. با توجه به اینکه

$$2 \leq \frac{h_c}{h_a} \leq 5 \quad (4)$$

$$12 \text{ (cm)} \leq h_c \leq 30 \text{ (cm)} \quad (5)$$

بنابراین مقدار h_c برای خاک ماسه‌ای ۱۵ سانتی‌متر فرض شده است. در خاک رسی مقدار h_a حدود ۱۵ متر می‌باشد. بنابراین با توجه به ارتفاع گود در مدل مورد نظر (شکل ۳)، حداکثر ارتفاع ممکن به عنوان h_c برای خاک رسی در نظر گرفته شده



شکل ۳. ابعاد مدل عددی در نرم افزار SEEP، (الف) خاک رسی، (ب) خاک ماسه‌ای با در نظرگیری اثر غیر اشباع بودن

باعث ایجاد یک چسبندگی ظاهری در آن شده که این امر موجب افزایش مقاومت برشی می‌گردد.

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

طبق رابطه ۷، پارامتر χ_f نشان دهنده درصدی از مکش بافتی است که به تنش مکشی تبدیل می‌شود. شکل ۴ تغییرات تنش مکشی نسبت به مکش بافتی را برای دو نوع خاک مدل‌سازی شده نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، در خاک ماسه‌ای درصد کمی از مکش بافتی به تنش مکشی تبدیل شده است. این در حالی است که این درصد در خاک رسی بسیار بیشتر می‌باشد. با توجه به مطالب ارائه شده در این بخش، با افزایش رطوبت در خاک مقاومت برشی کاهش یافته و در نتیجه پارامترهای مقاومتی خاک تضعیف می‌گردد.

۲-۲. مدل‌سازی در محیط Slope/W

در این مرحله، مدل ساخته شده در بسته نرم‌افزاری SEEP، به محیط Slope منتقل می‌شود که این کار در نسخه نرم‌افزار مورد استفاده به صورت خودکار صورت می‌پذیرد. مشخصات خاک مدل‌سازی شده در این قسمت مطابق با جدول ۲ می‌باشد. در این پژوهش طراحی انکرها مطابق با آیین‌نامه ASTM صورت پذیرفته است که مشخصات انکرهای طراحی شده در خاک ماسه‌ای و رسی به ترتیب در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است. در

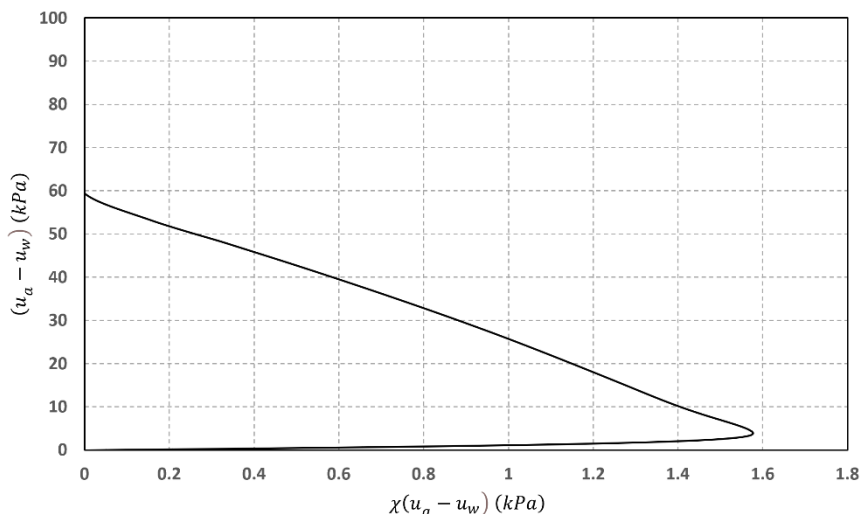
تغییرات χ وابسته به درصد رطوبت است، مقدار آن در مکش - های مختلف در نرم‌افزار SEEP با استفاده از رابطه ۶ و منحنی مشخصه آب-خاک محاسبه می‌گردد.

$$\chi_f = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6)$$

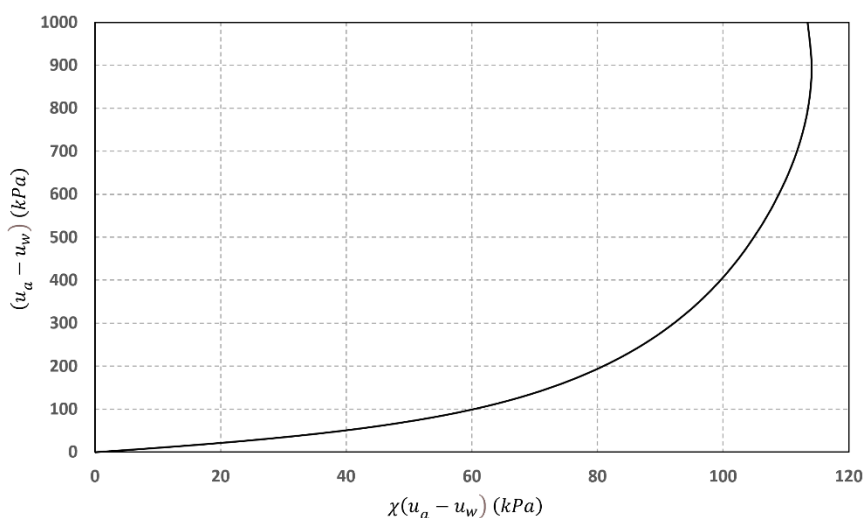
که در این رابطه θ_s و θ_r به ترتیب میزان رطوبت اشباع و رطوبت باقی مانده می‌باشد.

با فرض اینکه آب موجود در داخل گود توسط پمپ تخلیه می‌شود، شرایط مرزی فشار صفر (Zero pressure) برای کف و دیواره‌های گود در نظر گرفته شده است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده توسط بلایت (Blight, 1967) و اسکاریو (Escario, 1980) دو روند کلی برای بررسی رفتار خاک‌های غیر اشباع بدست آمده است. روند اول نشان داد با افزایش تنش قائم خالص، مقاومت برشی افزایش یافته که این نتیجه مشابه با خاک‌های اشباع می‌باشد. روند دوم نشان دهنده افزایش مقاومت برشی با افزایش مکش بافتی بود.

فردلاند و همکاران (Fredlund et al., 1978)، معیار بسط داده شده موهر-کولمب (Mohr-coulomb) (رابطه ۷) را برای توصیف رفتار مقاومت خاک‌های غیر اشباع ارائه نمودند. طبق رابطه ۷، پوش گسیختگی به صورت یک صفحه مسطح در فضای متغیرهای وضعیت تنش قائم خالص، تنش برشی و مقاومت برشی ترسیم می‌شود. در نتیجه، غیر اشباع شدن خاک



(الف)



(ب)

شکل ۴. تغییرات تنش مکشی نسبت به مکش بافتی در خاک الف) ماسه‌ای و ب) رسی

بکار گرفته شده در مدل‌های عددی با استفاده از مبحث دهم مقررات ملی ساختمان صورت پذیرفته است و مقاومت برشی مقطع شمع با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است.

$$V = 0.6 \phi_v C_v F_y A_w \quad (۸)$$

که در این رابطه ضرایب ϕ_v و C_v برابر یک در نظر گرفته شده‌اند و مقدار ضریب کاهش مقاومت برشی در نرم‌افزار ۱/۵ اعمال گردیده است.

در این پژوهش بار مرده ثقلی اعمالی به گود مورد بررسی با

این جداول پارامتر F برابر با حاصلضرب نیروی هر رشته (Strand) در تعداد رشته‌های مورد استفاده در هر انکر و پارامتر A برابر با مساحت جانبی انکر در قسمت مهار شده می‌باشد. طبق آیین‌نامه ASTM، نوع خاک برای ماسه، ماسه متوسط (Medium sand) در نظر گرفته شده است. بر این اساس برای هر دو نوع خاک، نیروی هر رشته ۱۵۶ نیوتن در نظر گرفته شده است. طراحی شمع برای هر دو نوع خاک با استفاده از جدول اشتال و مقررات ملی مبحث دهم صورت پذیرفته است که مشخصات آن در جدول ۵ آورده شده است. طراحی شمع‌های

جدول ۲. مشخصات خاک مدلسازی شده در Slope

Soil type	Phi	Cohesion (kPa)	Unit weight (kN/m ³)
Sand	38	0	18
Clay	20	30	17

جدول ۳. مشخصات انکرها در خاک ماسه‌ای

Anchore No.	Bounded length (m)	Unbounded length (m)	Tensile capacity (kN)	Anchor angle with horizon (degree)	Pullout resistant (F/A) (kPa)
1	9.23	7.75	669.76	15	220
2	8.65	6.26	627.25	10	187.67
3	8.65	4.79	627.25	10	187.67
4	6.69	4.5	485.27	10	182.02

جدول ۴. مشخصات انکرها در خاک رسی

Anchore No.	Bounded length (m)	Unbounded length (m)	Tensile capacity (kN)	Anchor angle with horizon (degree)	Pullout resistant (F/A) (kPa)
1	12	11	450	10	100
2	12	9	450	10	100
3	12	7	450	10	100
4	12	5	600	10	132

جدول ۵. مشخصات شمع طراحی شده در نرم افزار

Pile	Pile length (m)	Pile spacing (m)	Shear force (kN)	Shear reduction factor
2IPE24	14	2	420	1.5

گود پرداخته شده است. این موارد از جمله مهمترین عوامل ناپایداری در گودها به شمار می‌آیند.

۱-۳. اثر ترکیب لوله‌ی آب بر پایداری گود

وجود لوله به صورت نقطه فشار مثبت (point) شبیه سازی و از ابعاد آن در برابر ابعاد مدل صرف نظر شده است. شرایط مرزی برای لوله‌ی آب، با توجه به فشار آب شهری ۱۵ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است. منحنی مشخصه آب-خاک بر اساس مدل‌های پیش فرض نرم‌افزار در نظر گرفته شده است که مطابق شکل ۱ می‌باشد. تابع نفوذپذیری با استفاده از منحنی مشخصه آب-خاک رسم شده است و مقدار نفوذپذیری اشباع خاک مطابق جدول ۱ می‌باشد. برای بررسی تغییرات ضریب اطمینان با تغییر در موقعیت لوله‌ی آب، وضعیت لوله در سه مختصات متفاوت بررسی شده است. موقعیت اول داخل گوه گسیختگی، موقعیت دوم روی خط گسیختگی و موقعیت سوم خارج از آن می‌باشد. شکل ۶ موقعیت قرار گیری لوله‌ی آب در سه مختصات ذکر شده را نشان می‌دهد.

فرض قرارگیری یک ساختمان ۹ طبقه و به کمک مبحث ششم مقررات ملی ساختمان محاسبه شده است. لازم به ذکر است به ازای هر طبقه مقدار بار مرده ۱۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است. بنابراین، برای مدلسازی ساختمان مورد نظر در مدل عددی، سربار ۱۰۰ کیلو پاسکال به صورت گسترده به عنوان شرایط مرزی روی سطح خاک در نظر گرفته شده است. شکل ۵ مدل ساخته شده در نرم‌افزار Slope را نشان می‌دهد.

در نرم افزار Slope برای تحلیل پایداری از روش Morgenstern-Price استفاده شده است. به همین منظور سطح لغزش به ۳۰ قسمت تقسیم بندی شده است. روش Entry and Exit برای مشخص کردن سطح گسیختگی بکار رفته است که مختصات ورودی و خروجی به صورت بازه می‌باشد.

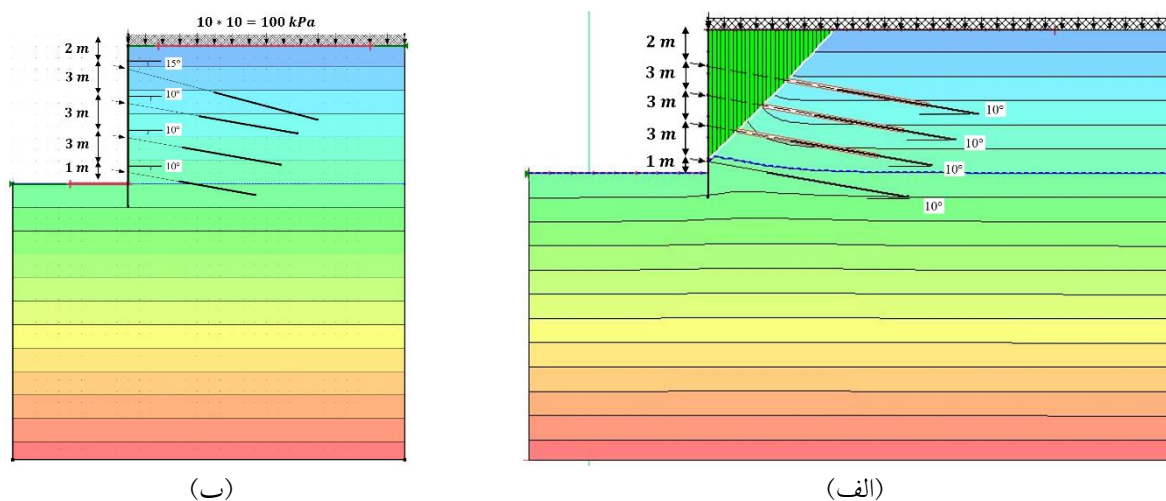
۳. تحلیل و بررسی نتایج

در این بخش به تفکیک به بررسی هر یک از حالات ترکیب لوله‌ی آب، پر شدن چاه جذبی و وجود یک لایه آرتزین در کف

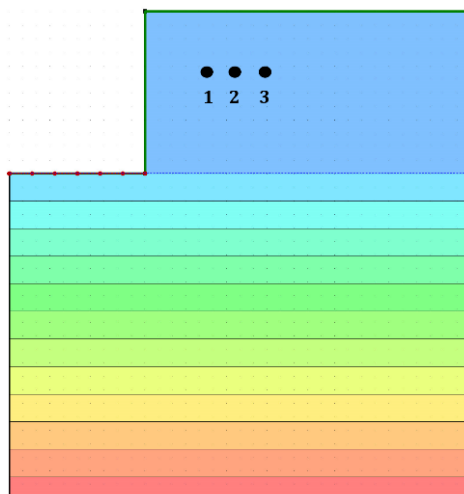
۷۳ روز، ضریب اطمینان کمتر از حد مجاز گردیده است. نمونه - ای از نحوه‌ی تشکیل گوه گسیختگی در خاک رسی در شکل ۹ نشان داده شده است.

همان‌طور که در این شکل مشخص است پایین‌ترین ضریب اطمینان مربوط به نقطه دوم بوده که موقعیت لوله روی گوه گسیختگی قرار دارد. بیشترین ضریب اطمینان نیز مربوط به موقعیت سوم بوده که خارج از گوه گسیختگی بوده است. شکل ۱۰ نیز تغییرات فشار آب حفره‌ای با گذشت زمان را برای خاک ماسه‌ای نشان می‌دهد.

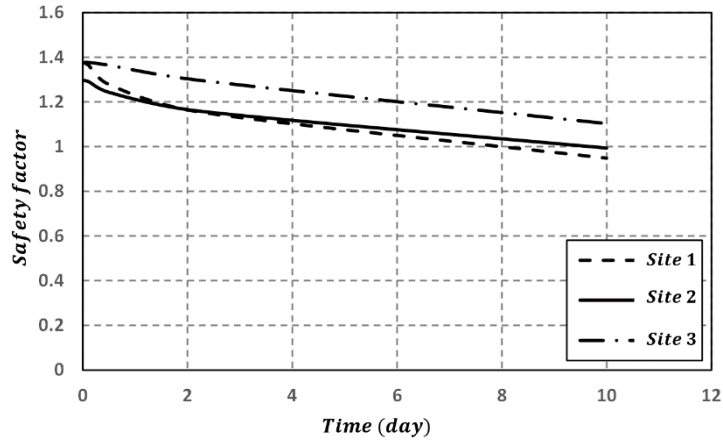
پس از ترکیدن لوله، تحلیل به صورت گذرا (Transient analysis) انجام شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده بر روی خاک‌های ماسه‌ای و رسی به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، با گذشت زمان ضریب اطمینان پایداری گود کاهش یافته و در بحرانی‌ترین حالت، بعد از گذشت ۱۰ روز برای خاک ماسه‌ای به ۰/۹۹۴ و بعد از گذشت ۳۶۵ روز برای خاک رسی به ۱/۱ رسیده است. مطابق با آیین‌نامه ASTM، ضریب اطمینان مناسب برای پایداری گود ۱/۳ می‌باشد. بر این اساس، برای خاک ماسه - ای بعد از گذشت نصف روز و برای خاک رسی بعد از گذشت



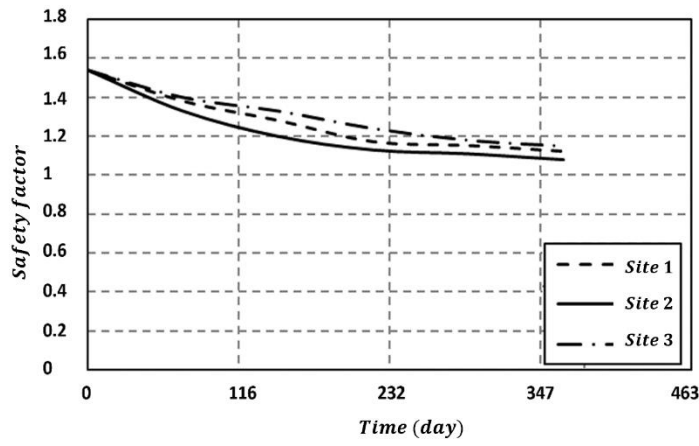
شکل ۵. مدل ساخته شده در نرم افزار Slope، الف) خاک رسی و ب) خاک ماسه‌ای



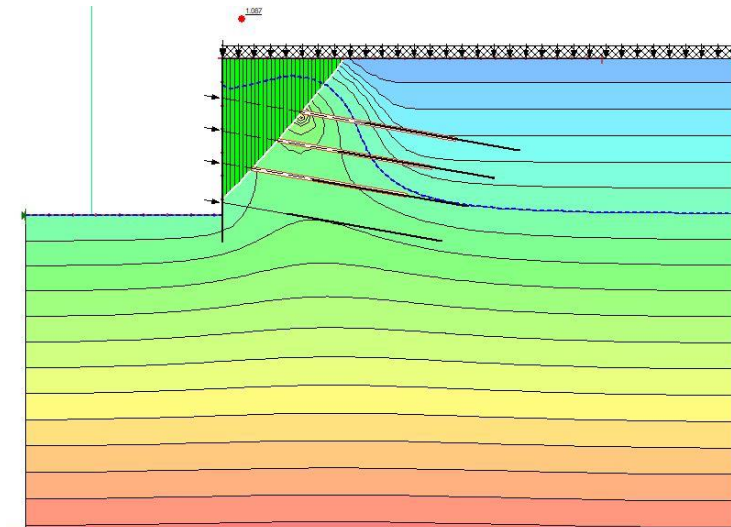
شکل ۶. موقعیت لوله‌ی آب در مختصات‌های مختلف



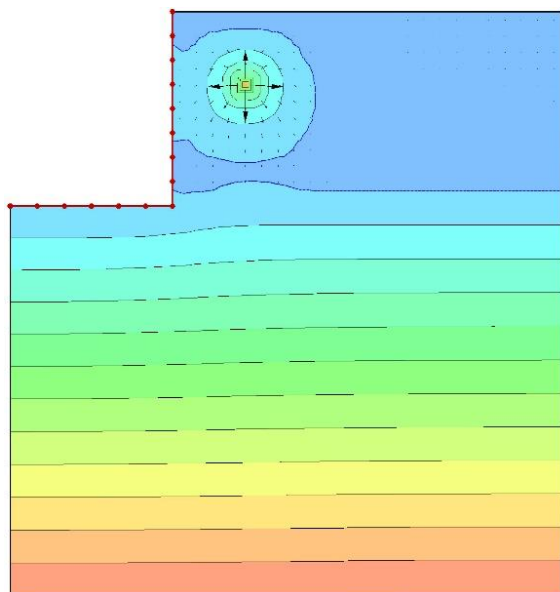
شکل ۷. بررسی تغییرات ضریب اطمینان با تغییر در موقعیت لوله‌ی آب در خاک ماسه‌ای با در نظر گرفتن اثر غیر اشباع بودن خاک



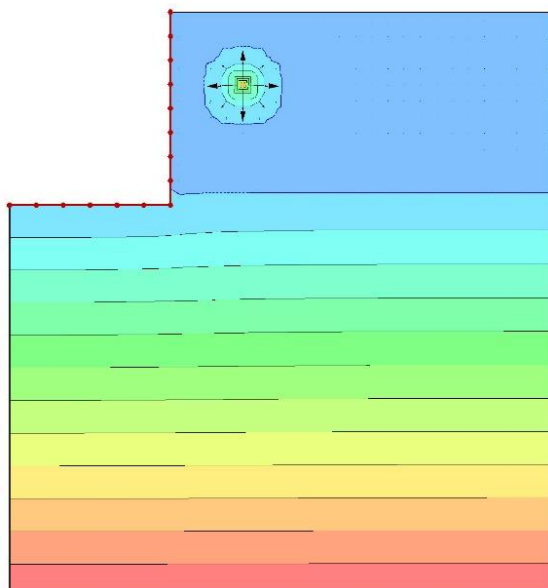
شکل ۸. بررسی تغییرات ضریب اطمینان با تغییر در موقعیت لوله‌ی آب در خاک رسی



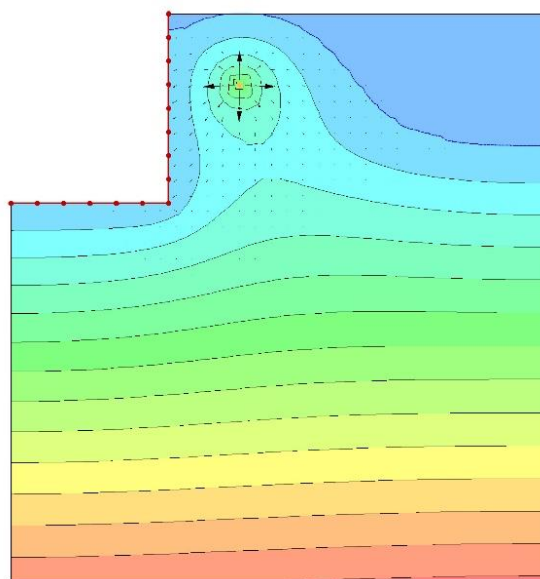
شکل ۹. نحوه تشکیل گوه گسیختگی در خاک رسی



ب) بعد از گذشت ۲/۵ روز



الف) بعد از گذشت ۱۲ ساعت



ج) بعد از گذشت ۱۰ روز

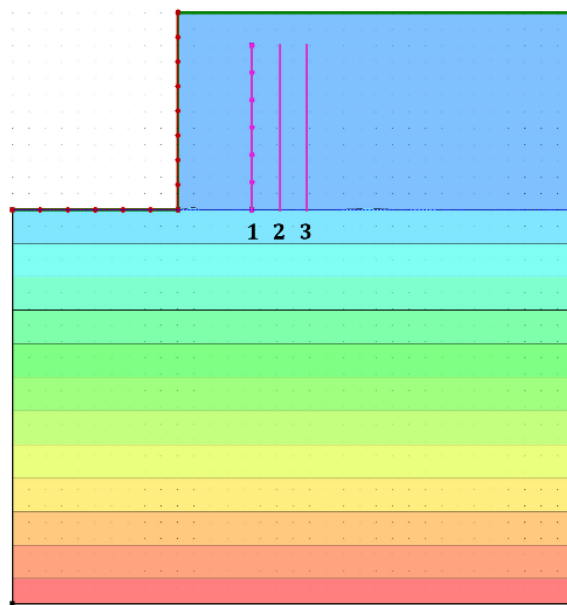
شکل ۱۰. تغییرات فشار آب حفره‌ای با گذشت زمان برای خاک ماسه‌ای در موقعیت اول

کف گود و نیز سایر مشخصات لازم برای تعریف منحنی‌های مشخصه آب-خاک و نفوذپذیری مطابق بخش قبل در نظر گرفته شده است. برای بررسی تغییرات ضریب اطمینان با تغییر در موقعیت چاه جذبی، وضعیت چاه جذبی در سه مختصات در نظر گرفته شده است. موقعیت اول چاه داخل گوه گسیختگی، موقعیت دوم روی خط گسیختگی و موقعیت سوم خارج از گوه گسیختگی فرض شده است. موقعیت قرار گیری

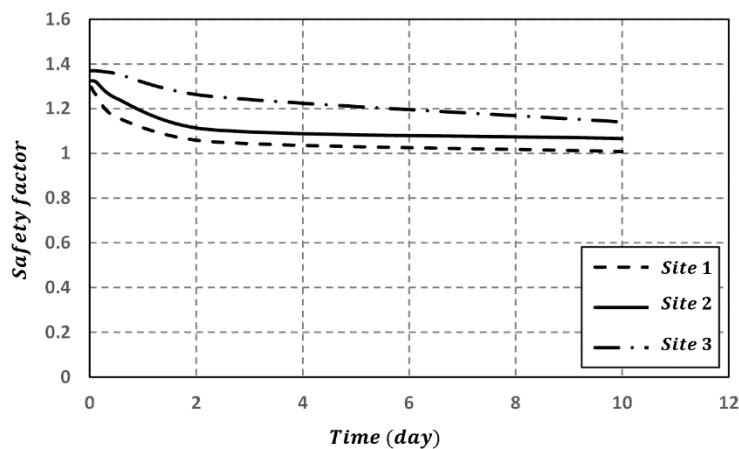
۲-۳. اثر پر شدن چاه جذبی بر پایداری گود وجود چاه جذبی به صورت خطی شکل با هد ثابت با استفاده از دستور Line مدل‌سازی شده است و از قطر چاه در برابر ابعاد مدل صرف نظر شده است. در این خصوص عمق چاه برابر با ۱۲ متر (عمق پرشدگی ۱۰ متر) فرض گردیده است. اختصاص شرایط مرزی به چاه به صورت هد ثابت می‌باشد که مقدار آن برابر با هد کل ۳۴ متر است. شرایط مرزی دیواره و

ماسه‌ای به مقدار $1/0.08$ و بعد از گذشت ۳۶۵ روز برای خاک رسی به مقدار $1/1$ رسیده است. همچنین، برای خاک ماسه‌ای بعد از گذشت حدود ۲ ساعت و برای خاک رسی بعد از گذشت ۶۰ روز ضریب اطمینان به کمتر از مقدار مجاز رسیده است. نمونه‌ای از نحوه‌ی تشکیل گوه گسیختگی در خاک رسی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. شکل ۱۵ تغییرات فشار آب حفره‌ای با گذشت زمان را برای خاک ماسه‌ای نشان می‌دهد.

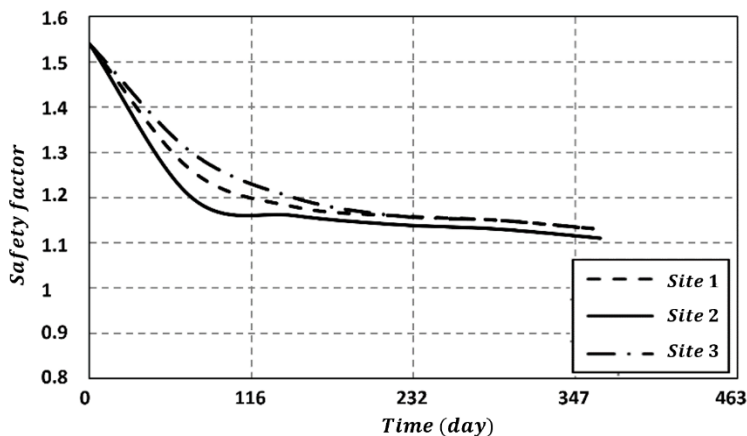
چاه جذبی در سه مختصات ذکر شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب نتایج به دست آمده در خاک‌های ماسه‌ای و رسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود پایین‌ترین ضریب اطمینان مربوط به موقعیت اول و دوم بوده که داخل و روی گوه گسیختگی قرار داشتند. بیشترین ضریب اطمینان نیز مربوط به موقعیت سوم بوده که خارج از گوه گسیختگی بوده است. در بحرانی‌ترین حالت، ضریب اطمینان بعد از گذشت ۱۰ روز برای خاک



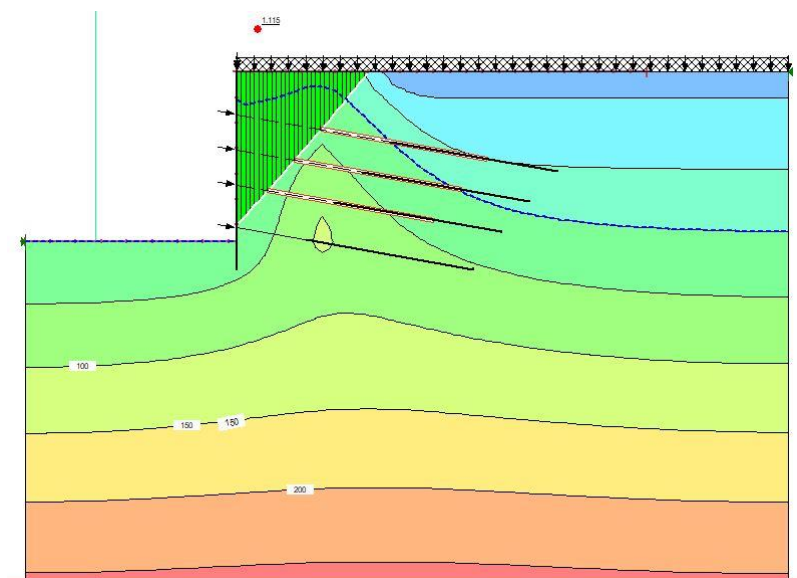
شکل ۱۱. موقعیت چاه جذبی در مختصات‌های مختلف



شکل ۱۲. بررسی تغییرات ضریب اطمینان با تغییر در موقعیت چاه جذبی در خاک ماسه‌ای با در نظر گرفتن اثر غیر اشباع بودن خاک



شکل ۱۳. بررسی تغییرات ضریب اطمینان با تغییر در موقعیت چاه جذبی در خاک رسی

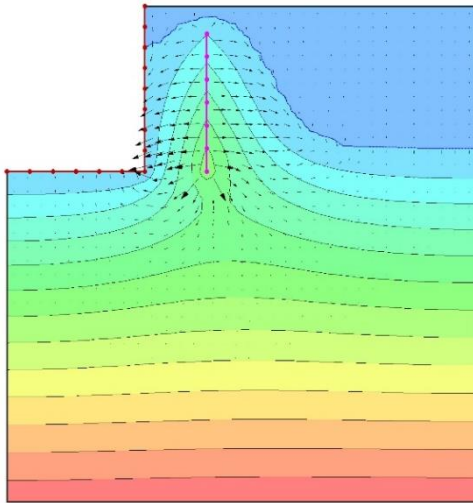


شکل ۱۴. نحوه تشکیل گویختگی در خاک رسی

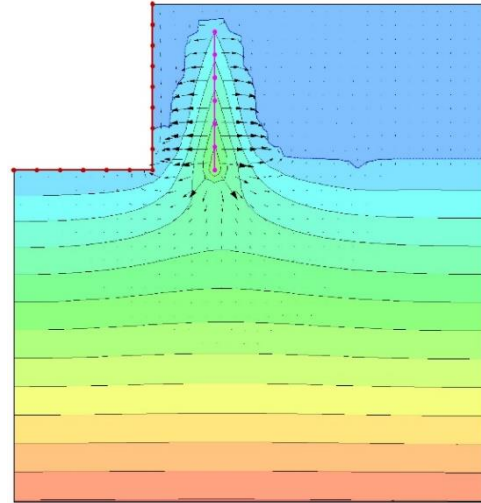
نشان می‌دهد. سایر مشخصات مربوط به مدل‌سازی مطابق با بخش ۳-۱ در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده در این بخش در خاک‌های ماسه‌ای و رسی به ترتیب در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده با نزدیکتر شدن لایه آرتزین به کف گود ضریب اطمینان کاهش یافته است. نمونه‌ای از نحوه‌ی تشکیل گویختگی در خاک رسی در شکل ۱۹ نشان داده شده است. شکل ۲۰ نیز تغییرات فشار آب حفره‌ای با گذشت زمان را برای خاک ماسه‌ای نشان می‌دهد.

۳-۳. اثر وجود لایه آرتزین بر پایداری گود

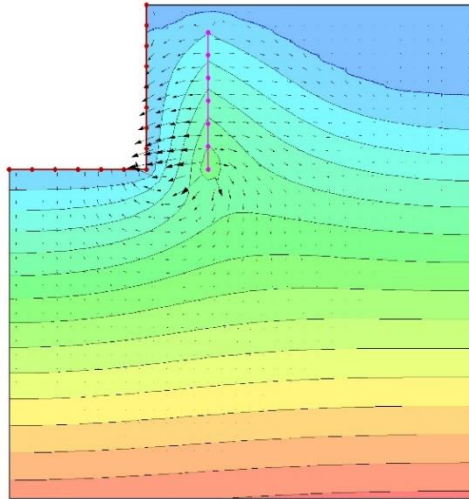
وجود لایه آرتزین نیز همانند چاه جذبی به صورت خطی شکل با هد ثابت شبیه سازی شده است. این لایه‌ها به صورت افقی بوده و اختصاص شرایط مرزی به لایه آرتزین به صورت هد کل برابر با ۳۶ متر بوده است. برای بررسی تغییرات ضریب اطمینان با تغییر در موقعیت لایه آرتزین، وضعیت لایه آرتزین در سه مختصات متفاوت در نظر گرفته شده است. در موقعیت‌های اول، دوم و سوم لایه‌ی آرتزین به ترتیب در فاصله‌ی ۸ متری، ۴ متری و ۱ متری زیر کف گود فرض شده است. شکل ۱۶ موقعیت قرارگیری این لایه در سه مختصات مذکور را



ب) بعد از گذشت ۲/۵ روز

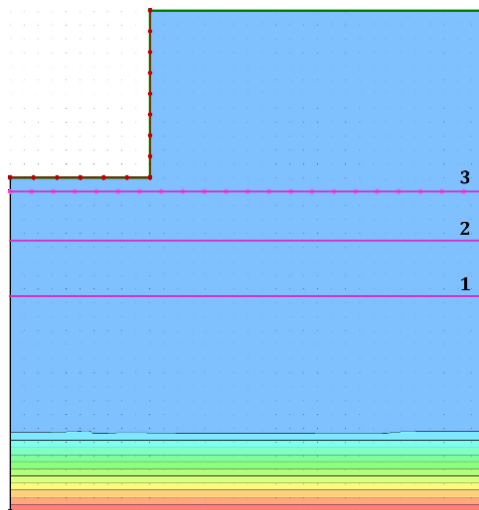


الف) بعد از گذشت ۱۲ ساعت

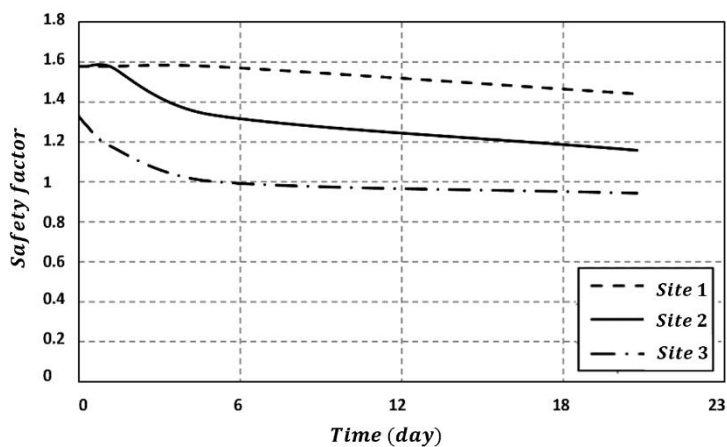


ج) بعد از گذشت ۱۰ روز

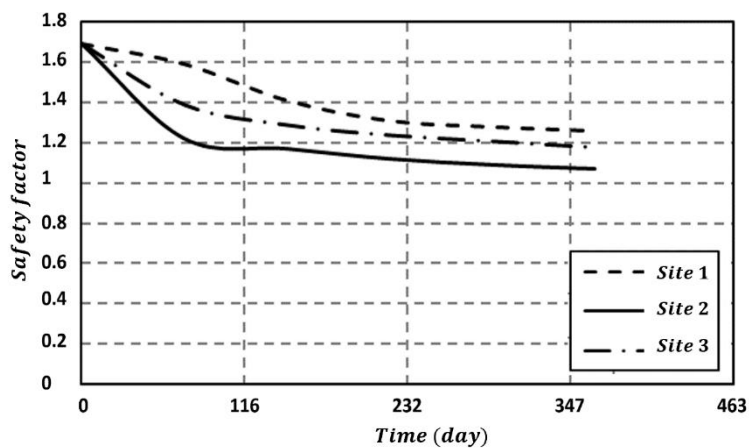
شکل ۱۵. تغییرات فشار آب حفره‌ای با گذشت زمان برای خاک ماسه‌ای در موقعیت اول



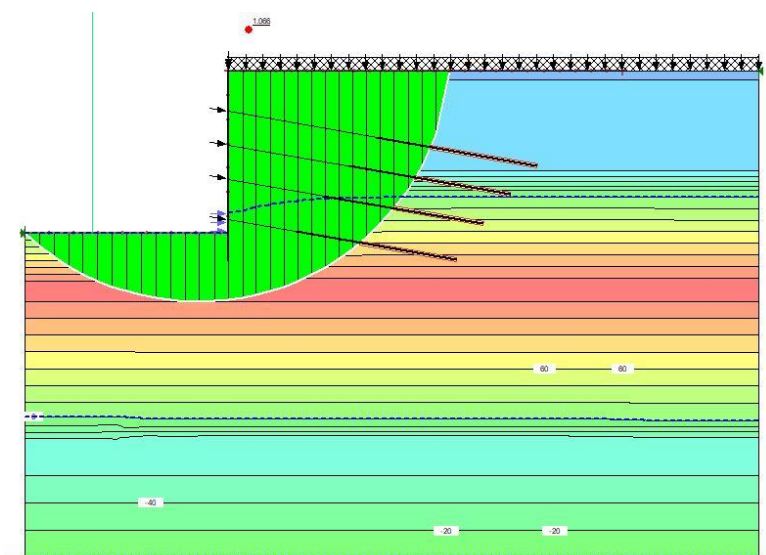
شکل ۱۶. موقعیت لایه آرتزین در مختصات‌های مختلف



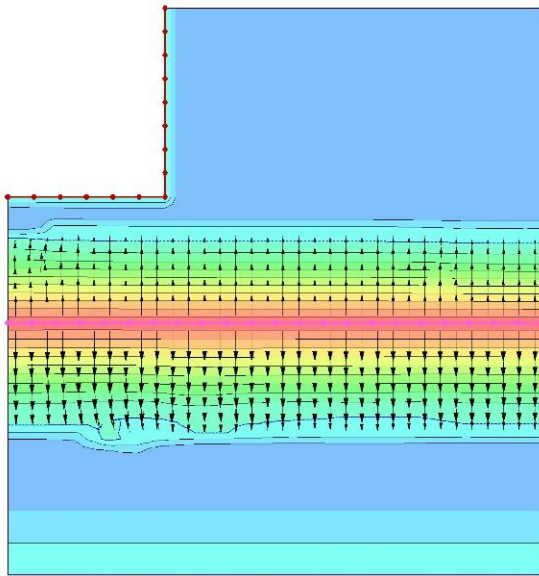
شکل ۱۷. بررسی تغییرات ضریب اطمینان با تغییر در موقعیت لایه آرتزین در خاک ماسه‌ای



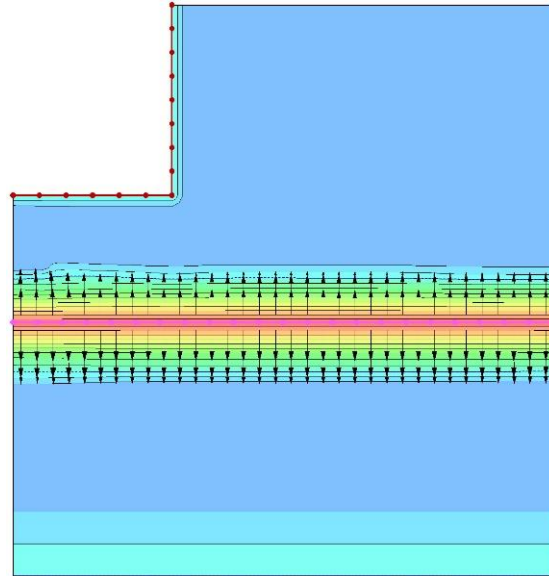
شکل ۱۸. بررسی تغییرات ضریب اطمینان با تغییر در موقعیت لایه آرتزین در خاک رسی



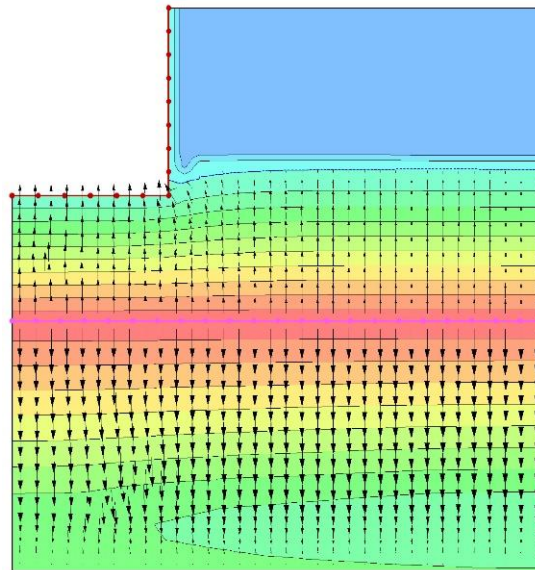
شکل ۱۹. نحوه تشکیل گوه گسیختگی در خاک رسی



ب) بعد از گذشت ۲/۵ روز



الف) بعد از گذشت ۱۲ ساعت



ج) بعد از گذشت ۱۰ روز

شکل ۲۰. تغییرات فشار آب حفره‌ای با گذشت زمان برای خاک ماسه‌ای با وجود لایه آرتزین در موقعیت اول

۴. نتیجه گیری

امروزه با افزایش ساخت و سازهای شهری عملیات گود برداری در محدوده‌ی ساختمان‌های بلندمرتبه امری اجتناب ناپذیر است. ترکیدگی لوله‌ی آب در زیر ساختمان، پر شدن چاه‌های جذبی و وجود لایه‌ی آرتزین از عواملی است که می‌تواند پایداری گودها را تحت تأثیر قرار داده و نهایتاً منجر به وقوع خساراتی شدید گردد. از این رو در این پژوهش اثر این عوامل

بر پایداری گود مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش به طور کلی در ادامه آورده شده است:
 ۱- به طور کلی نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد با توجه به نوع خاک مدت زمان رسیدن به گسیختگی متفاوت بوده به طوری که گسیختگی در خاک‌های درشت دانه بسیار سریع‌تر از خاک‌های ریزدانه رخ داده است.
 ۲- نتایج نشان داد مدت زمان رسیدن به گسیختگی در خاک‌ها به شدت به موقعیت ترکیدگی لوله، چاه جذبی و نیز لایه آرتزین

۵- با نزدیک شدن لایه آرتزین به کف گود ضریب اطمینان کاهش یافته است. با تغییر تراز لایه آرتزین از ۱۲ متر به ۲۰ متر ضریب اطمینان گود با فرض درشت دانه بودن خاک بعد از گذشت ۱۰ روز حدود ۳۰ درصد افزایش یافته است. این ضریب با فرض ریزدانه بودن خاک بعد از گذشت یک سال حدود ۵ درصد افزایش یافته است. تغییرات ضریب اطمینان در خاک‌های درشت دانه نسبت به خاک‌های ریز دانه بیشتر بوده است.

۶- در خاک‌های رسی درصد بیشتری از مکش بافتی به تنش مکشی تبدیل شده است. بر این اساس با غیر اشباع شدن خاک مقاومت برشی در خاک‌های رسی نسبت به خاک‌های ماسه‌ای افزایش بیشتری داشته است. در نتیجه در یک مکش بافتی یکسان، تنش مکشی و ضریب اطمینان در برابر گسیختگی در خاک‌های رسی نسبت به خاک‌های ماسه‌ای بیشتر بوده است.

نسبت به خط گسیختگی وابسته است. در تمامی عوامل تاثیرگذار بر پایداری گود مورد بررسی در این پژوهش، بحرانی‌ترین حالت زمانی رخ داده است که گوه گسیختگی از محل ترکیدگی لوله‌ی آب، چاه جذبی و لایه آرتزین عبور کرده است. ۳- بر اثر ترکیدگی لوله‌ای با فشار ۱۵ کیلو پاسکال، گود با خاک درشت دانه در نظر گرفته شده در این مطالعه بعد از گذشت نصف روز به ناپایداری رسیده است. این در حالی است که با ریزدانه شدن خاک، این مدت زمان به بیش از ۲ ماه افزایش یافته است.

۴- بر اثر پر شدن چاه‌های جذبی، با فرض درشت دانه بودن خاک، گود پس از گذشت چند ساعت ناپایدار شده است. این اتفاق در خاک ریزدانه پس از گذشت حدود ۲ ماه رخ داده است. در خاک‌های ریزدانه، کاهش ضریب اطمینان با گذشت زمان با افت شدیدتری همراه بوده است. از طرف دیگر تغییر در ضریب اطمینان گود با تغییر در موقعیت چاه جذبی در خاک‌های درشت دانه محسوس تر بوده است.

منابع

- Ahmadi, H., Arabani, M. and Kalantary, F., 2007. Development of Failure Criterion for Partially Saturated Cohesive Soils. *International Journal of Geotechnic Engineering*, 21.
- Blight, G.E., 1967. Effective stress evaluation for unsaturated soils. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 93(2): 125-148.
- Carsel, R.F. and Parrish, R.S., 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water resources research*, 24(5): 755-769.
- Elias, V. and Juran, I., 1991. SOIL NAILING FOR STABILIZATION OF HIGHWAY SLOPES AND EXCAVATIONS. FINAL REPORT (No. FHWA-RD-89-198).
- Escario, V., 1980. Suction controlled penetration and shear tests. In *Expansive Soils*. ASCE. 781-797.
- Fan, C.C. and Luo, J.H., 2008. Numerical study on the optimum layout of soil-nailed slopes. *Computers and Geotechnics*, 35(4): 585-599.
- Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. and Widger, R.A., 1978. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian geotechnical journal*, 15(3): 313-321.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H., 1993. *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- Fredlund, D.G. and Xing, A., 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal*, 31(4): 521-532.
- Jones, C.P., 1991. In-situ techniques for reinforced soil. In *Performance of reinforced soil structures*. Thomas Telford Publishing, 277-282.
- Kim, S.J., Hyun, Y. and Lee, K.K., 2005. Time series modeling for evaluation of groundwater discharge rates into an urban subway system. *Geosciences Journal*, 9(1): 15-22.

- Kumar, S. and Malik, R.S., 1990. Verification of quick capillary rise approach for determining pore geometrical characteristics in soils of varying texture. *Soil Science*, 150(6): 883-888.
- Lam, L., Fredlund, D.G. and Barbour, S.L., 1987. Transient seepage model for saturated-unsaturated soil systems: a geotechnical engineering approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(4): 565-580.
- Lane, K.S., Washburn, D.E. and Krynine, D.P., 1947. Capillarity tests by capillarimeter and by soil filled tubes. In *Highway research board proceedings* (Vol. 26).
- Lu, N. and Likos, W.J., 2006. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132(2): 131-142.
- Marchal, J., 1984. Renforcement des sols par clouage-étude expérimentale en laboratoire. In *Renforcement en place des sols et des roches. Colloque international*, 275-278.
- Ng, C.W. and Pang, Y.W., 2000. Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(2): 157-166.
- Ning, L. and William, L., *Unsaturated Soil Mechanics*, New York: John Wiley, 2004.
- Sabhahit, N., Basudhar, P.K. and 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(6): 437-452.
- 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(2): 143-159.
- Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5): 892-898.