



## بررسی تاثیر قطر، فاصله و زاویه ریزش‌ها در پایداری شیروانی‌ها تحت اثر تراوش پایدار

فرهاد پیرمحمدی علیشاه\*<sup>۱</sup>، مهدی محمدرضایی<sup>۲</sup>

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۲۱

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۰۵

### چکیده

در مناطق شهری با توجه به محدودیت فضا، یکی از مهمترین مسائل در پایدارسازی شیروانی‌ها، انتخاب روشی مناسب برای شیروانی مورد نظر با رعایت ملاحظات فنی و اجرایی می‌باشد. این انتخاب مستلزم شناخت اصولی و جامع از روش‌های پایدارسازی شیروانی‌ها می‌باشد. با وجود طراحی و اجرای مناسب شیروانی‌ها، عوامل طبیعی و مصنوعی گوناگونی در یک دوره زمانی خاص ممکن است پایداری آنها را به شدت تحت تأثیر قرار دهند. در این پژوهش که موضوع آن بررسی تاثیر ریزش‌ها بر پایداری شیروانی‌ها تحت اثر تراوش پایدار می‌باشد، با استفاده از نرم افزار Seep/W و روش اجزاء محدود، با فرض جریان اشباع-غیراشباع و در حالت جریان پایدار، آنالیز تراوش انجام گرفته شده است. همچنین با استفاده از نرم افزار Slope/W پایداری شیب در حالات مختلف اعم از فاصله، قطر و زاویه ریزش‌ها مورد بررسی قرار گرفته و حساسیت نتایج برای نفوذپذیری و پارامتر مقاومتی خاک نیز بررسی شده است. نوآوری پژوهش حاضر در شکل قطعات به صورت قطاع است که موجب حذف شدن فرضیات متداول در روش تعادل حدی می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که روش مذکور در تعیین ضریب اطمینان، خطای کمتری داشته باشد. با توجه به نتایج موجود ملاحظه گردید تراوش در شیب، قطر و فواصل ریزش‌ها تاثیر فراوانی در پایداری شیروانی دارد که این تاثیر می‌تواند نسبت به شرایط مختلف متغیر باشد. با افزایش فاصله ریزش‌ها، ضریب اطمینان شیروانی با قطر ریزش‌های متفاوت، به ضریب اطمینان شیروانی بدون ریزش‌ها نزدیکتر شده و تا حدودی به این ضریب اطمینان همگرا می‌شوند. همچنین مقدار زاویه ریزش‌ها تاثیر چندانی در پایداری شیروانی نخواهد داشت.

**کلید واژه‌ها:** شیروانی، ریزش‌ها، تراوش، پایداری، نفوذپذیری، ضریب زاویه اصطکاک.

۱. استادیار، گروه عمران، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران Petrofarhad@iaushab.ac.ir

۲. استادیار، گروه عمران، واحد تسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، تسوج، ایران

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

ریزشمع به شمع‌های با قطر کوچک (کمتر از ۴۰۰ میلی‌متر) اطلاق می‌گردد که غالباً با تسلیح فولادی سبک و تزریق دوغاب سیمان اجرا می‌شوند و با انتقال بارهای استاتیکی و دینامیکی سازه به لایه‌های مقاوم‌تر زمین، به عنوان یک المان باربر و مقاوم در برابر نشست عمل می‌کنند. به دلیل قطر کم ریزشمع، درصد عمده انتقال بار از طریق اصطکاک بین جدار ریزشمع و خاک انجام می‌شود (Abdelaziz, 2012).

تاریخچه ابداع ریزشمع به اوایل دهه پنجاه میلادی، زمانی که اروپا با خیل عظیمی از ساختمان‌های در معرض خرابی ناشی از صدمات وارده در جنگ جهانی دوم روبرو بوده است، باز می‌گردد. در این دوره ابداع یک روش تقویت بستر که علاوه بر داشتن کارایی و قابلیت اجرا در ساختمان‌های تخریب شده، سریع و اقتصادی نیز باشد، بسیار ضروری به نظر می‌رسید که در چنین شرایطی ابداع ریزشمع توسط Fondedile پیمانکار مشهور ایتالیایی صورت پذیرفت و بدلیل ویژگی‌های منحصر به فرد این روش، گسترش فراوانی یافت (عسگری و شهپر، ۱۳۹۵). ویژگی بسیار مهمی که باعث گسترش روزافزون کاربرد ریزشمع شده است، امکان استفاده از آن جهت افزایش ظرفیت باربری در زیر پی‌های سازه‌های موجود می‌باشد و این در حالی می‌باشد که در چنین مواردی نمی‌توان از شمع‌های قطور بتنی و فولادی استفاده نمود. یکی دیگر از ویژگی‌های ریزشمع‌ها قابلیت اجرای بسیار ساده در شرایط وجود آب زیرزمینی است. همچنین اجرای شمع‌های قطور بتنی در خاک‌های ریزشی، زمین‌های سنگریزه‌ای و خاک‌های درشت‌دانه با مشکلات زیادی مواجه بوده و بدلیل نیاز به مواردی از قبیل پوشش‌گذاری جهت حفاری، زمان‌بر بوده و هزینه بالایی را نیز به پروژه تحمیل می‌کند، در حالیکه اجرای ریزشمع در این شرایط به دلیل قطر کوچک و نحوه اجرای آن براحتی امکان‌پذیر بوده و نسبت به اجرای شمع برتری دارد. ریزشمع با توجه به نحوه اجرای آن و استفاده از دوغاب تحت فشار، موجب افزایش تراکم خاک اطراف شده و این ویژگی باعث می‌شود تا نسبت به شمع درجای بتنی، مقاومت اصطکاکی بیشتری با خاک

اطراف داشته باشد و با در نظر گرفتن حجم مصالح به کار رفته جهت اجرای آن، بازدهی باربری بالاتری نسبت به شمع بتنی ارائه دهد. انجام آزمون بارگذاری ریزشمع‌ها با روش‌های ساده و ارزان یکی از مزایای قابل توجه این روش در مقایسه با اجرای شمع‌های قطور بتنی یا فولادی می‌باشد. در آزمون بارگذاری، امکان بررسی رفتار ریزشمع‌ها، میزان باربری، نشست‌های الاستیک و تغییر شکل‌های پسماند در حین بارگذاری وجود خواهد داشت. بدین ترتیب ارزیابی صحت و سقم فرضیات طراحی و در نتیجه تعدیل و تغییر طرح با توجه به مشاهده رفتار واقعی و میزان باربری نهایی آنها در محل، امکان‌پذیر خواهد بود (Guo, 2013).

در مجموع مزایای ریزشمع‌ها را می‌توان به طور خلاصه بصورت زیر برشمرد:

- حجم پایین مصالح از قبیل فولاد و سیمان در مقایسه با شمع
- هزینه‌های پائین تجهیز کارگاه
- استفاده از ماشین‌آلات سبک‌تر نسبت به اجرای شمع
- امکان اجرای عملیات در فضای محدود
- میزان لرزش کم ناشی از اجرای آن و اثرات جانبی ناچیز بر سازه‌های مجاور
- امکان استفاده از ریزشمع جهت افزایش ظرفیت باربری در زیر پی سازه‌های موجود
- اجرای آسان در شرایط وجود سطح آب زیرزمینی بالا
- اجرای آسان در خاک‌های ریزشی، زمین‌های سنگریزه‌ای و خاک‌های درشت‌دانه
- راندمان باربری بالاتر نسبت به شمع
- امکان تغییر طرح در طول انجام پروژه با توجه به نتایج آزمایش بارگذاری
- سرعت بالای اجرا

هدف از این پژوهش بررسی تاثیر ریزشمع‌ها در پایداری شیب‌ها تحت اثر تراوش پایدار می‌باشد که با استفاده از نرم افزار GeoStudio و روش اجزاء محدود و با فرض جریان

### ۳. معرفی روش تعادل حدی و روش اجزای محدود

#### ۳-۱- تعادل حدی

روش‌های تعادل حدی، بر مبنای تعیین تنش‌های اعمال شده و مقاومت متمرکز شده در یک سطح گسیختگی فرضی در داخل شیب خاکی و سپس تعیین ضریب اطمینان با توجه به نسبت این دو کمیت، استوار است (حشمتی و قدمگاهی، ۱۳۹۳). در روش تعادل حدی یک سطح گسیختگی قوسی یا غیر قوسی انتخاب و سپس نیروهای محرک و مقاوم به لغزش مقایسه شده و با توجه به شرایط مفروض ضریب اطمینان پایداری محاسبه می‌شود. در چنین شرایطی نیروی محرک لغزش معمولاً شامل نیروی ثقل و نیروی نشت در شرایط نامطلوب می‌باشند. در شرایط وقوع زلزله، افزایش مولفه محرک نیروی وزن و نیز افزایش حاصله در نیروی نشت نیز به عنوان نیروی محرک لغزش محسوب می‌شوند. نیروی مقاوم به لغزش شامل مقاومت برشی خاک در سطح لغزش است (Loehr et al., 2000).

#### ۳-۲- اجزای محدود

روش اجزای محدود، یکی از انواع روش‌های عددی برای تحلیل رفتار تنش-کرنش و جریان تراوش در سازه‌های ژئوتکنیکی است. مفهوم اساسی روش مذکور این است که هر متغیر میدانی پیوسته مثل سرعت، تنش، فشار یا دما می‌تواند با یک مدل مجزا که از مجموعه‌ای از متغیرهای میدانی پیوسته قطعه قطعه تشکیل شده، تقریب زده شده و این متغیرها روی تعداد محدودی از زیر مجموعه‌ها تعریف می‌شوند (Kourkoulis et al., 2012). در روش اجزای محدود سازه مورد نظر به اشکال گسسته که المان نامیده می‌شوند تقسیم بندی می‌شود. انواع المان‌ها شامل یک بعدی خطی، دو بعدی صفحه‌ای و سه بعدی حجمی می‌باشند که بسته به ابعاد و نوع مسئله مورد نظر استفاده می‌گردند. این المان‌ها در نقطه‌هایی مشخص به نام گره به یکدیگر متصل می‌شوند. چون تغییر واقعی متغیر میدانی در داخل محیط پیوسته شناخته شده نیست، توابع تقریب زننده‌ای برای توصیف تغییرات این میدان مورد نیاز است (Sommers et al., 2000). روش المان محدود بر پایه

اشباع- غیراشباع و در حالت جریان پایدار آنالیز تراوش انجام گرفته شده است. مهمترین ویژگی پژوهشی و نوآوری در این تحقیق آن است که در این روش عملیات حفاری، نصب و تزریق ریزش‌ها به صورت همزمان انجام می‌گردد که این امر باعث کاهش هزینه و زمان اجرای پروژه می‌گردد. همچنین به دلیل فشار تزریق بالا در این روش، مقاومت جداره در مقایسه با سایر روش‌های اجرای ریزش‌ها به مراتب بالاتر بوده که نتایج آزمون‌های بارگذاری انجام شده گویای این مطلب است.

#### ۲. روش تحقیق

در این تحقیق یک شیب همگن از خاک که بوسیله ریزش‌ها پایدارسازی شده است، مورد تحلیل قرار گرفته است. ریزش‌ها بصورت مایل و قائم می‌باشند. از رویکرد تعادل حدی برای تحلیل پایداری شیب استفاده شده است که با استفاده از نرم افزار Seep/W و روش اجزای محدود و با فرض جریان اشباع- غیراشباع، در حالت جریان پایدار آنالیز تراوش انجام گرفته شده است. در پژوهش حاضر، یک روش تعادل حدی جدید ارائه شده است که کلیه شرایط تعادل را ارضا می‌کند. در روش پیشنهادی، شکل سطح لغزش به صورت دایره‌ای و غیردایره‌ای و قطعات در امتداد شعاع سطح لغزش و یا خطوطی در نظر گرفته شده‌اند که به یک نقطه هم‌گرا می‌شوند. به منظور محاسبه ضریب اطمینان با استفاده از روش پیشنهادی، یک مدل عددی توسعه داده شده است، که جهت ارضاء هم‌زمان معادلات تعادل نیرو و گشتاور، از روش تکراری (سعی و خطا) استفاده می‌کند. همچنین روش ارائه شده می‌تواند مقدار نیروهای قائم و برشی را در بین قطعات محاسبه کند. همچنین شکل قطعات به صورت قطاع است که موجب حذف شدن فرضیات متداول در روش تعادل حدی می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که روش مذکور در تعیین ضریب اطمینان، خطای کمتری داشته باشد. همچنین با استفاده از نرم افزار Slope/W پایداری شیب در حالات مختلف و شرایط متفاوت برای ریزش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

این نرم افزار از جمله برنامه‌های ژئوتکنیکی مبتنی بر المان محدود بوده و از طریق آن می‌توان آنالیزهایی از قبیل تنش- کرنش، جریان، تراوش، پایداری شیب و آنالیز دینامیکی را بررسی کرد (Loehr and Bowders, 2007). لازم به ذکر است در این مقاله برای آنالیزها از قسمت‌های *Slope/W* و *Seep/W* این نرم افزار استفاده شده است که به طور خلاصه توضیح داده می‌شوند:

#### ۱-۴. *SEEP/W*

این نرم افزار برای مدل سازی تراوش و توزیع فشار آب منفذی در محیط‌های متخلخل نظیر خاک و سنگ تهیه شده است. در این نرم افزار فرمول‌بندی‌ها طوری انجام شده است که هم برای مسائل ساده و هم برای مسائل پیچیده تراوش می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این نرم افزار یک نرم افزار تحلیلی جامع می‌باشد که قادر است جریان را در هر دو حالت اشباع و غیراشباع مدل کند. توانایی این نرم افزار برای مدل کردن جریان در محیط غیراشباع، منجر گشته تا شرایط بسیار واقعی نسبت به سایر نرم افزارها حاصل گردد. در خاک‌ها ضریب نفوذپذیری مصالح و حجم آب موجود در خاک تابعی از فشار آب منفذی است که با آن تغییر می‌کند و میزان تراوش در این روابط به صورت توابعی پیوسته در نظر گرفته و در محاسبات منظور می‌کند.

#### ۲-۴. *SLOPE/W*

این برنامه از مجموعه نرم افزارهای GeoStudio برای بررسی پایداری سطوح شیبدار و تعیین ضریب اطمینان در طراحی شیب است که این فرآیند از طریق روش‌های تعادل حدی از قبیل *Ordinary*، *Bishop*، *Janbu* و به صورت پیش فرض صورت می‌گیرد و در کنار این روش‌ها از دیگر روش‌ها شامل *Morgenstern*، *Spencer* و *GLE* هم استفاده می‌کند (Xu and Huang, 2000). این نکته قابل توجه است که این قسمت از نرم افزار، بر خلاف دیگر قسمت‌ها از روش المان محدود استفاده نکرده و شامل مجموعه‌ای از روش‌های ترسیمی برای آنالیز پایداری است (Loehr and Bowders, 2007). روش *Morgenstern-Price* یک روش ترسیمی-تعادلی حدی است

مفهوم تقسیم یک محیط پیوسته به چندین تکه کوچک، توصیف رفتار و عمل هر تکه به طور مجزا و سپس وصل کردن دوباره تکه‌ها برای نشان دادن رفتار کل محیط پیوسته، که هر تکه به عنوان المان محدود شناخته می‌شود. فرمول‌بندی المان محدود برای تراوش حالت پایدار در حالت دو بعدی با استفاده از روش باقیمانده‌های وزن دار گالرکین استخراج شده است (Cheng and Lau, 2008). در این روش، ابتدا حلی برای مسئله پیشنهاد می‌شود، از آنجائی که حل پیشنهادی باید در معادله دیفرانسیل مورد نظر صدق کند، آن را در معادله دیفرانسیل قرار داده و یک عبارت مساوی با صفر پیدا کرده و آن را باقیمانده *R* می‌نامیم. سپس برای حل مسئله، باقیمانده *R* را محاسبه می‌کنند که یکی از روش‌های محاسبه روش گالرکین می‌باشد. مشخص کردن شرایط در مرزهای مسئله یکی از عوامل کلیدی در تحلیل عددی است. قادر بودن به کنترل شرایط مرزی، تحلیل عددی را بسیار قدرتمند می‌کند. حل مسائل عددی پاسخ مستقیم به شرایط مرزی است، بدون شرایط مرزی رسیدن به راه حل غیر ممکن است. عاملی که منجر به جریان آب می‌شود، وجود اختلاف هد هیدرولیکی کل بین دو نقطه یا بعضی نرخ‌های جریان مشخص به داخل سیستم می‌باشد. همانطور که در معادله زیر مشاهده می‌شود معادله حاکم بر تحلیل تراوش به قرار زیر است:

$$[K]\{H\}=\{Q\}$$

[K]: ماتریس ضرایب وابسته به هندسه و مشخصات مصالح

{H}: بردار هد هیدرولیکی کل در گره‌ها

{Q}: بردار مقدار جریان در گره‌ها

پس مشاهده می‌شود که بدون مشخص کردن *H* و یا *Q* در بعضی از گره‌ها، حل معادله میسر نیست. در یک تحلیل حالت پایدار حداقل یک نقطه در دامنه مسئله باید حد مشخص داشته باشد. *H* و یا *Q* مشخص شده همان شرایط مرزی است (Kim et al., 2004).

#### ۴. معرفی نرم افزار GeoStudio

کمترین ضریب اطمینان را انتخاب می‌کند. کمترین ضریب اطمینان به‌عنوان ضریب اطمینان نهایی معرفی می‌شود. مقطعی که کمترین ضریب اطمینان را داشته باشد مقطع بحرانی (Critical Slip Surface) نامیده می‌شود.

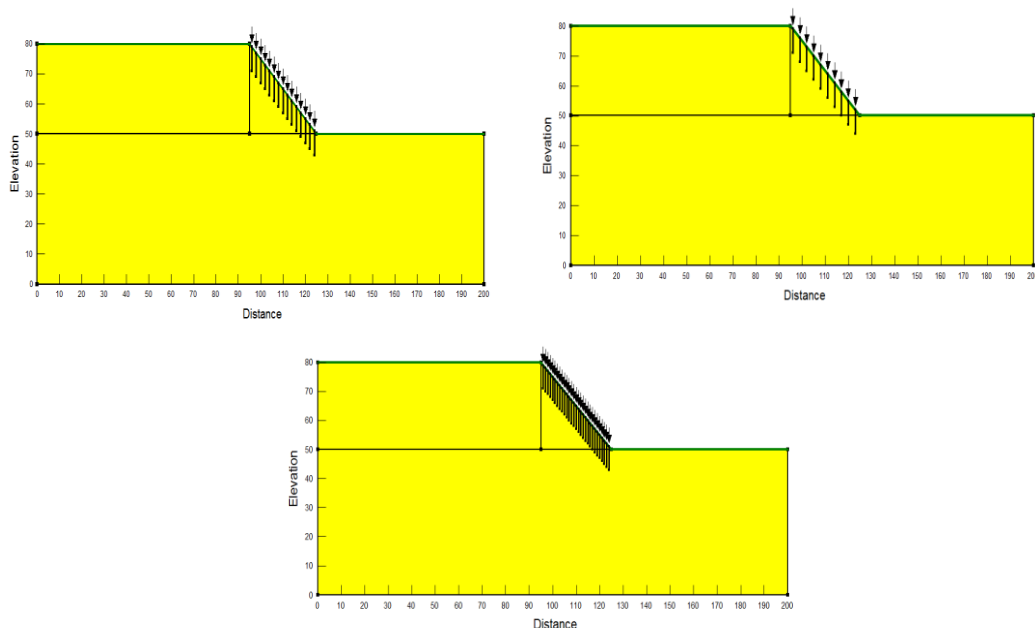
#### ۵- مدل هندسی دوبعدی از مسئله

به منظور بررسی تاثیر ریزشمع‌ها در پایداری شیروانی‌ها تحت اثر تراوش، مدل‌هایی در نرم افزار GeoStudio تهیه شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. مدل‌های مورد استفاده در شکل‌های (۱، ۲ و ۳) شامل شیبی به ارتفاع ۳۰ متر و ریزشمع‌های با زاویه‌های قائم، ۱۰ و ۲۰ درجه و با در نظر گرفتن ۳ قطر برای ریزشمع به اندازه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتیمتر و همچنین با سه فاصله مختلف به طول ۱، ۲ و ۳ متر بدست آمده است. ابعاد مدل‌های مورد استفاده طوری انتخاب شده است تا تاثیری در مقدار نتایج و توزیع فشار آب حفره‌ای نامتعارف نگردد (Huang, 1983).

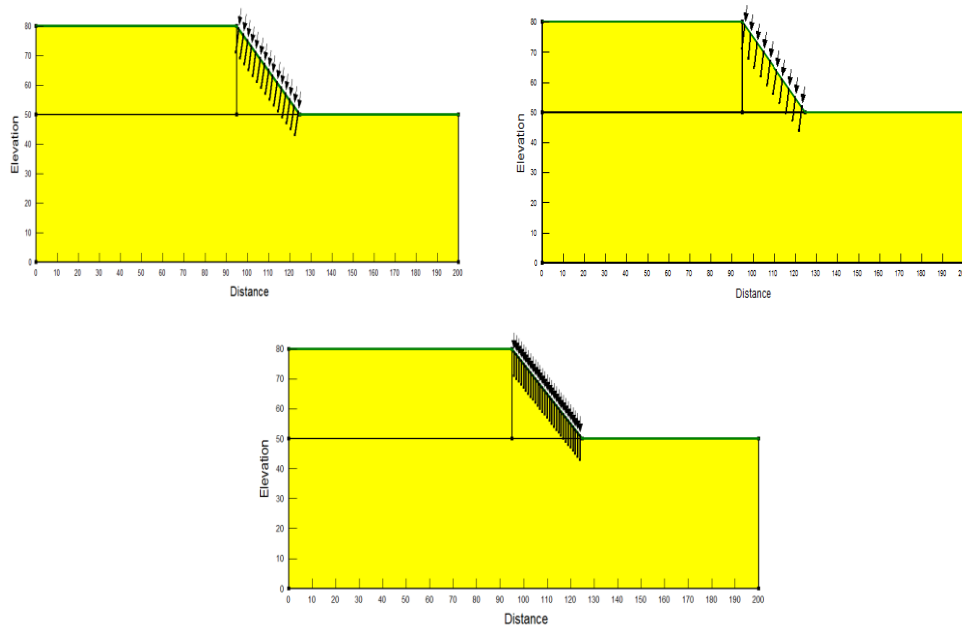
که در آن با استفاده از تعادل برقرار میان نیروها و لنگرها در هر مقطع لغزشی دلخواه ضریب اطمینان تعیین می‌گردد. در این روش هم نیروهای نرمال و هم نیروهای برشی در محاسبات اعمال می‌شوند. برای تعیین مقطع لغزشی از روش Grid and Radius استفاده می‌شود.

در روش Grid and Radius در یک طرف شیب مجموعه‌ای از نقاط با ترسیم شبکه‌ای با ابعاد دلخواه و در طرف دیگر مجموعه‌ای از خطوط رسم می‌شود. اصطلاحاً به مجموعه نقاط، Grid و به مجموعه خطوط، Radius گفته می‌شود.

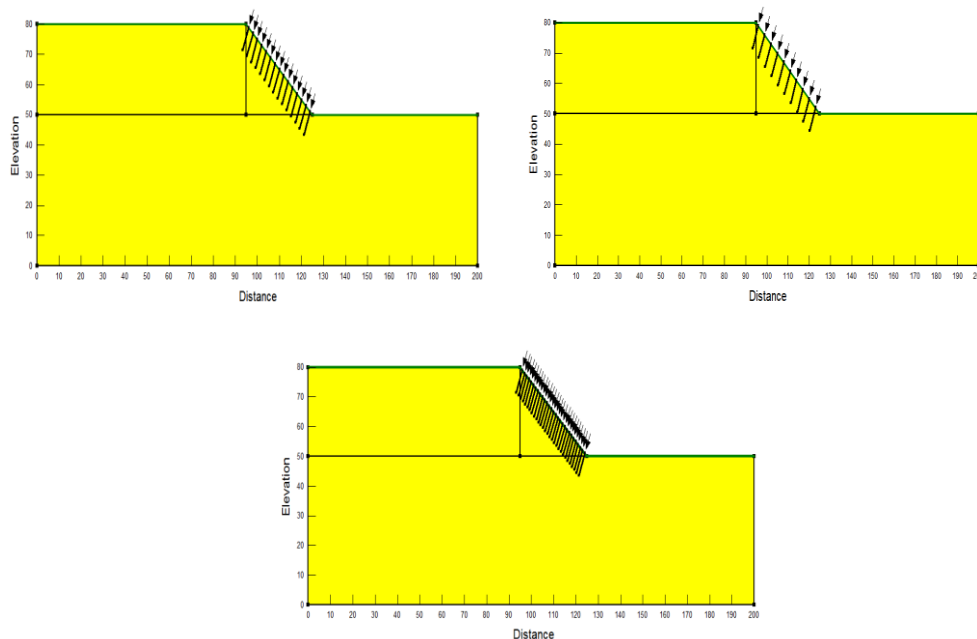
در ادامه، نرم‌افزار GeoStudio دایره‌هایی به مرکز نقاط شبکه را به خطوط Radius مماس می‌کند. فاصله عمودی میان نقاط Grid و خطوط Radius برابر با اندازه شعاع در این دایره‌ها است. با استفاده از این دایره‌ها روی شیب مد نظر یک مقطع ایجاد و در نهایت ضریب اطمینان پایداری این مقطع تعیین می‌گردد. در نرم‌افزار GeoStudio برای هر نقطه به تعداد خطوط Radius دایره رسم می‌شود. در نهایت، نرم‌افزار برای هر نقطه از میان دایره‌های رسم شده و ضرایب اطمینان به دست آمده



شکل ۱. مدل هندسی ریزشمع‌ها با زوایای قائم و فاصله‌های ۱، ۲ و ۳ متر نسبت به یکدیگر



شکل ۲. مدل هندسی ریزش‌ها با زوایای ۱۰ درجه و فاصله‌های ۱، ۲ و ۳ متر نسبت به یکدیگر



شکل ۳. مدل هندسی ریزش‌ها با زوایای ۲۰ درجه و فاصله‌های ۱، ۲ و ۳ متر نسبت به یکدیگر

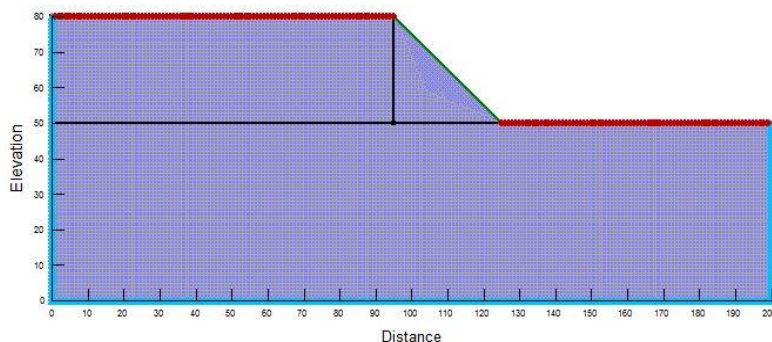
مقدار دبی ورودی و خروجی صفر می‌باشد. مش‌بندی مدل عددی به صورت اتوماتیک توسط خود نرم افزار انجام گرفته است (Moharrami et al., 2014). برای این منظور، نرم افزار از المان‌های مربعی استفاده می‌کند. مش‌بندی مدل عددی طوری

۵-۱. شرایط مرزی و مش‌بندی مدل

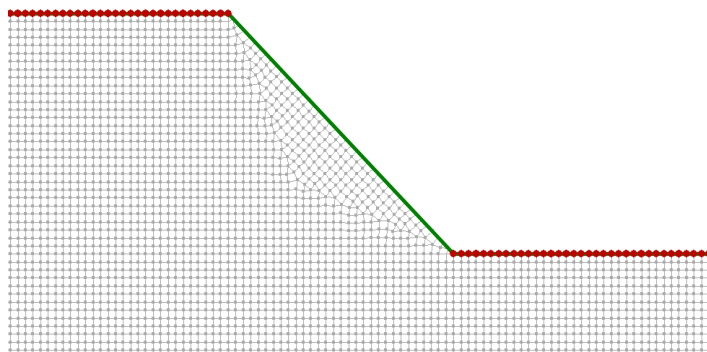
شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدل عددی نیز منطبق با شرایط مرزی استاندارد است. در این حالت، در مرزهای قائم کناری و مرز افقی پایین مدل عددی به دلیل فاصله کافی مرزها

شود. بر این اساس، ابعاد المان‌های تشکیل دهنده حداکثر برابر با یک متر انتخاب شده است (Wei and Cheng, 2010). در اشکال (۵ و ۴) به طور نمونه مدل اجزای محدود مورد استفاده برای تحلیل تراوش جهت بررسی آن در قسمت پایداری شیب نشان داده شده است.

انجام یافته است تا جواب‌های بدست آمده از حل عددی از دقت کافی برخوردار باشند. برای این منظور چندین مرحله تحلیل عددی با در نظر گرفتن ابعاد مختلف برای المان‌های محدود انجام یافته است تا حد اینکه حداکثر ابعاد المان‌های محدود مدل طوری تعیین شود تا خطای مسئله در حد قابل قبولی قرار گرفته و همگرایی به سمت جواب مساله حاصل



شکل ۴. مدل اجزای محدود (مش بندی شده) تهیه شده برای مسئله تراوش



شکل ۵. مدل مش بندی مربعی جهت تحلیل تراوش

شده است و همچنین برای قطر و فاصله ثابت ریزشمع در سه حالت برای زاویه اصطکاک داخلی خاک، پایداری شیروانی مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی تراوش شیروانی در مصالح به کار رفته از مدل نیمه اشباع استفاده شده تا اگر قسمتی از مصالح خارج از محدوده اشباع قرار بگیرد مقدار فشار آب حفره‌ای تا حد امکان نزدیک به واقعیت باشد. تابع نمودار نفوذپذیری به طور نمونه در شکل (۶) نشان داده شده است. مقادیر استفاده شده برای نفوذپذیری به ترتیب برابر با  $1E-4$ ،  $1E-6$  و  $1E-8$  می‌باشد. همچنین در شکل (۷) نمونه‌ای از تحلیل تراوش انجام گرفته در شیروانی نشان داده شده است که

۲-۵. مشخصات مصالح و مدل‌سازی انجام گرفته  
مصالح مورد استفاده در این تحقیق مطابق جداول (۱ و ۲) می‌باشد. شیروانی مورد نظر در این تحقیق دارای چسبندگی ثابت و ضریب اصطکاک و ضریب نفوذپذیری خاک نیز به طور متغیر در نظر گرفته شده است. همچنین زاویه ریزشمع‌ها، قطر و فاصله آنها نیز متغیر در نظر گرفته شده است. در این تحلیل رفتار موهر-کلمب جهت بررسی پایداری، مبنای مدل‌سازی قرار گرفته است (Sivakumar and Singh, 2010).  
در مدل‌های مربوط به حالت تراوش پایدار ۳ زاویه ریزشمع و ۳ قطر متفاوت در ۳ فاصله مختلف جهت بررسی پایداری آماده

در بالا دست شیب مقدار فشار هد آب برابر با ارتفاع شیب می‌باشد که در پایین دست شیروانی مقدار فشار آب حفره‌ای کاهش یافته است.

جدول ۱. مشخصات مصالح مورد استفاده

Permeability coefficient	Slope angle	Friction Angle	Cohesion	Saturation specific gravity	Dry specific gravity	Name of materials
K	$\alpha$	$\phi$	C	$\gamma_s$	$\gamma_d$	-
m/s	Degree	Degree	KPa	KN/m <sup>3</sup>	KN/m <sup>3</sup>	-
Variable	45	Variable	5	20	19	Sloping Soil

جدول ۲. مشخصات مصالح مورد استفاده

Compressive Strength of Concrete	Micropile Angle	Micropile Distance	Micropile Diameter	Micropile length	Name of Materials
KPa	Degree	m	cm	m	-
25	Variable	Variable	Variable	8	Micropile

به طور کلی تمامی مدل‌های ساخته شده برای تراوش پایدار در این مقاله شامل مدل‌های زیر می‌باشد:

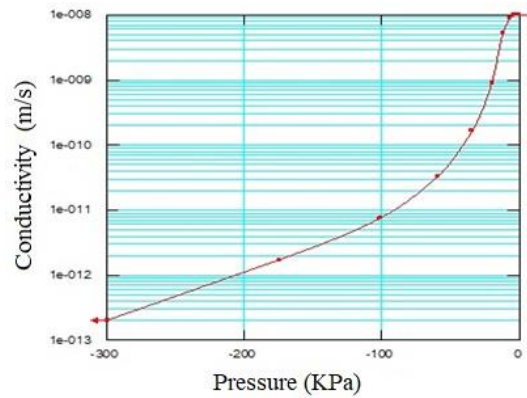
- مدل ریزشمع با زاویه قائم، قطر 10cm و فاصله یک، دو، سه متر و ضریب نفوذپذیری  $K=10^{-6}$
- مدل ریزشمع با زاویه قائم، قطر 20cm و فاصله یک، دو، سه متر و ضریب نفوذپذیری  $K=10^{-6}$
- مدل ریزشمع با زاویه قائم، قطر 30cm و فاصله یک، دو، سه متر و ضریب نفوذپذیری  $K=10^{-6}$
- مدل ریزشمع با زاویه ۱۰ درجه، قطر 10cm و فاصله یک، دو، سه متر و ضریب نفوذپذیری  $K=10^{-6}$
- مدل ریزشمع با زاویه ۱۰ درجه، قطر 20cm و فاصله یک، دو، سه متر و ضریب نفوذپذیری  $K=10^{-6}$
- مدل ریزشمع با زاویه ۱۰ درجه، قطر 30cm و فاصله یک، دو، سه متر و ضریب نفوذپذیری  $K=10^{-6}$
- مدل ریزشمع با زاویه ۲۰ درجه، قطر 10cm و فاصله یک، دو، سه متر و ضریب نفوذپذیری  $K=10^{-6}$
- مدل ریزشمع با زاویه ۲۰ درجه، قطر 20cm و فاصله یک، دو، سه متر و ضریب نفوذپذیری  $K=10^{-6}$
- مدل ریزشمع با زاویه ۲۰ درجه، قطر 30cm و فاصله یک، دو، سه متر و ضریب نفوذپذیری  $K=10^{-6}$

در مدل‌های مربوط به حالت تراوش پایدار ۳ زاویه ریزشمع و ۳ قطر متفاوت در ۳ فاصله مختلف جهت بررسی پایداری آماده شده است و همچنین برای قطر و فاصله ثابت ریزشمع در سه حالت برای زاویه اصطکاک داخلی خاک، پایداری شیروانی مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی تراوش شیروانی در مصالح به کار رفته از مدل نیمه اشباع استفاده شده تا اگر قسمتی از مصالح خارج از محدوده اشباع قرار بگیرد مقدار فشار آب حفره‌ای تا حد امکان نزدیک به واقعیت باشد. تابع نمودار نفوذپذیری به طور نمونه در شکل (۶) نشان داده شده است. مقادیر استفاده شده برای نفوذپذیری به ترتیب برابر با  $1E-4$ ،  $1E-6$  و  $1E-8$  می‌باشد. همچنین در شکل (۷) نمونه‌ای از تحلیل تراوش انجام گرفته در شیروانی نشان داده شده است که در بالا دست شیب مقدار فشار هد آب برابر با ارتفاع شیب می‌باشد که در پایین دست شیروانی مقدار فشار آب حفره‌ای کاهش یافته است.

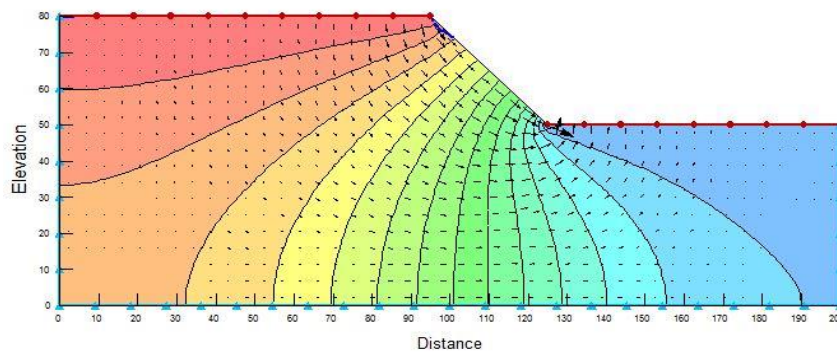
در مدل‌های مربوط به حالت تراوش پایدار مقدار ارتفاع آب تغییر نمی‌کند تا در اثر تغییرات ارتفاع آب و بررسی تراوش آن، مقدار پایداری شیروانی در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گیرد.



- مدل ریزش‌ها با زاویه قائم، قطر 20cm و فاصله دو متر و زاویه اصطکاک داخلی ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه و ضریب نفوذپذیری  $K=10^{-6}$
- مدل ریزش‌ها با زاویه ۱۰ درجه، قطر 20cm و فاصله دو متر و زاویه اصطکاک داخلی ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه و ضریب نفوذپذیری  $K=10^{-6}$



شکل ۶. تابع نفوذپذیری استفاده شده در مدل‌ها



شکل ۷. مدل تحلیل تراوش در حالت پایدار

- رفتار مصالح خاکی به صورت الاستو-پلاستیک موهر کولمب می‌باشند.
  - محیط خاکی همگن و ایزوتروپ فرض شده است.
  - فرض شده که جریان آب از قانون دارسی تبعیت می‌کند.
- ۶-۱. فرضیات مدل سازی  
به طور کلی برای مدل سازی مسئله فرضیات زیر صورت گرفته است:

### ۷. بحث و بررسی

برای بررسی پایداری شیب‌ها، اساس کار روش‌های تعادل حدی می‌باشد که این روش بر مبنای تعیین تنش‌های اعمال شده و مقاومت متمرکز شده در یک سطح گسیختگی فرضی در داخل شیب خاکی و سپس تعیین ضریب اطمینان با توجه به نسبت این دو کمیت، استوار است. در روش تعادل حدی یک سطح گسیختگی قوسی یا غیرقوسی انتخاب و سپس نیروهای محرک و مقاوم به لغزش مقایسه شده و با توجه به شرایط مفروض ضریب اطمینان پایداری محاسبه می‌شود. در شرایط وقوع زلزله، افزایش مولفه محرک نیروی وزن و نیز افزایش حاصله در نیروی نشت نیز به عنوان نیروی محرک لغزش محسوب می‌شوند (Turan et al., 2007).

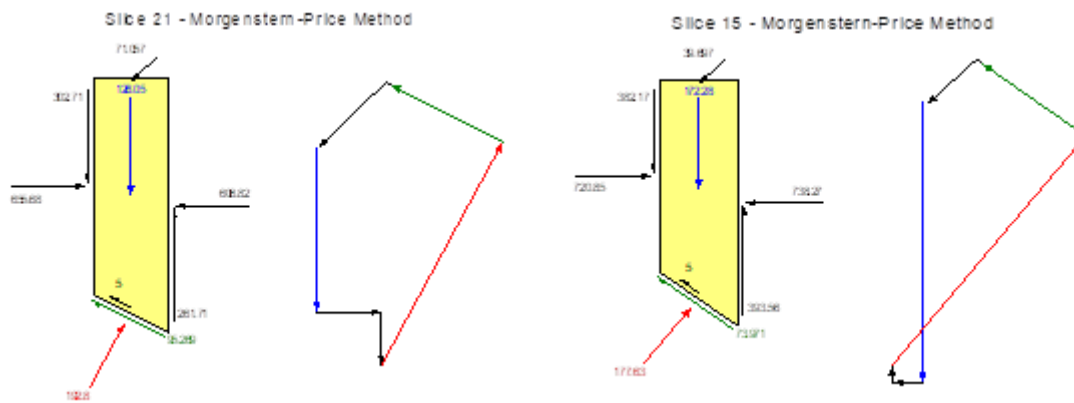
نیروی مقاوم به لغزش شامل مقاومت برشی خاک در سطح لغزش است. جهت تعیین این مقادیر لازم است این سطح گسیختگی به قطعات متداول تقسیم گردد و تعادل هر قطعه به صورت جداگانه بررسی و با کنار هم گذاشتن این قطعات متعادل به نتیجه مورد نظر دست یافته شود (Sadek and Shahrou, 2006).

در شکل (۸) به طور نمونه دو قطعه متعادل نشان داده شده است، همانطور که در شکل نیز مشاهده می‌شود یکسری نیروها به این قطعات اعمال می‌گردد که برآیند این نیروها بایستی نشانگر تعادل این قطعه گردد که علاوه بر مقادیر آنها، برآیند آنها به صورتی ترسیمی بررسی شده و مقدار آن برابر صفر می‌گردد. همچنین این نرم افزار قابلیت این را دارد که داده‌های ریز مربوط به این قطعات را نشان دهد.

• تمام تحلیل‌های انجام گرفته در این پژوهش ایزوترمال می‌باشد.

### ۲-۶. مراحل ساخت مدل

مدل‌سازی در نرم‌افزار GeoStudio بدین گونه صورت می‌پذیرد که ابتدا نوع آنالیز مشخص می‌گردد و سپس هندسه طرح مشخص گردیده و مشخصات نواحی مختلف تعیین می‌گردد. اولین قدم در هر آنالیز تنظیم پارامترهای ابتدایی مدل است که در پنجره KeyIn Analyses انجام می‌پذیرد. در مرحله بعد، پایداری شیب‌ها از بخش Slope/W نرم افزار که شامل مجموعه‌ای از روش‌های ترسیمی برای آنالیز پایداری است، محاسبه شده و مقدار نهایی ضریب اطمینان شیب بدست می‌آید. سپس از منوی KeyIn Materials مشخصات فیزیکی خاک از قبیل وزن مخصوص، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک را برای مصالح مورد نظر به تفکیک وارد نرم افزار می‌کنیم. پس از این مرحله، مشخصات ریزشمع‌ها که شامل قطر، طول، زاویه، فاصله ریزشمع‌ها و ظرفیت ریزشمع می‌باشد را محاسبه و وارد می‌کنیم. در پنجره KeyIn Analyses می‌توان تنظیمات مربوط به تحلیل تراوش پایدار را انجام داد. پس از اتمام مدل و اختصاص مشخصات مصالح، مدل آماده آنالیز است. برای این منظور ابتدا با استفاده از دکمه Verify از منوی Tools مدل مورد نظر را بازبینی و از نداشتن خطا در انجام مراحل فوق، اطمینان حاصل می‌کنیم. پس از آن با انتخاب دکمه Solve مدل تحلیل می‌شود. با انتخاب دکمه Contour در نوار ابزار حاشیه سمت چپ برنامه نتایج بررسی می‌شود. همچنین می‌توان به منظور خارج شدن از وضعیت آنالیز از دکمه Define استفاده نمود.

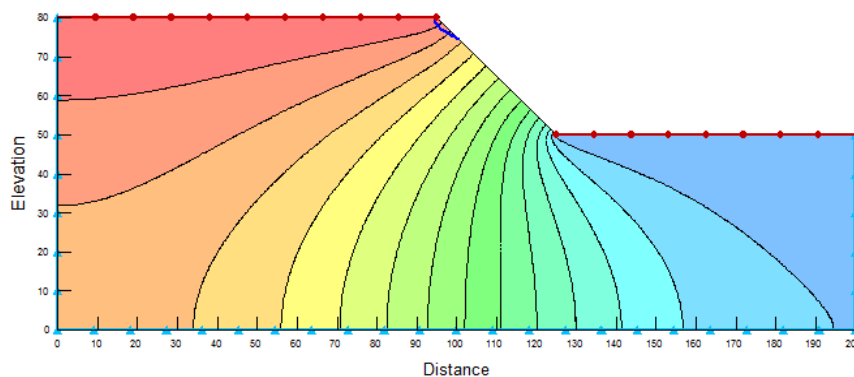


شکل ۸. نمونه‌ای از قطعات متداول جهت بررسی تعادل توسط نرم افزار

۷-۱. آنالیز شیب در حالت تراوش پایدار

قبل از شروع تحلیل پایداری شیب‌ها، بایستی شیروانی تحت تراوش قرار گیرد به همین خاطر در بالادست و پایین دست شیروانی شرایط مرزی متناسب تعریف می‌گردد ( Vandamme and Zou, 2013). شکل (۹) نمونه‌ای از تحلیل تراوش در حالت پایدار می‌باشد که در آن خطوط هم پتانسیل و خط فریاتیک نشان داده شده است (Moharrami et al., 2014). مولکول‌های آب به دلیل دارا بودن انرژی پتانسیل در محیط

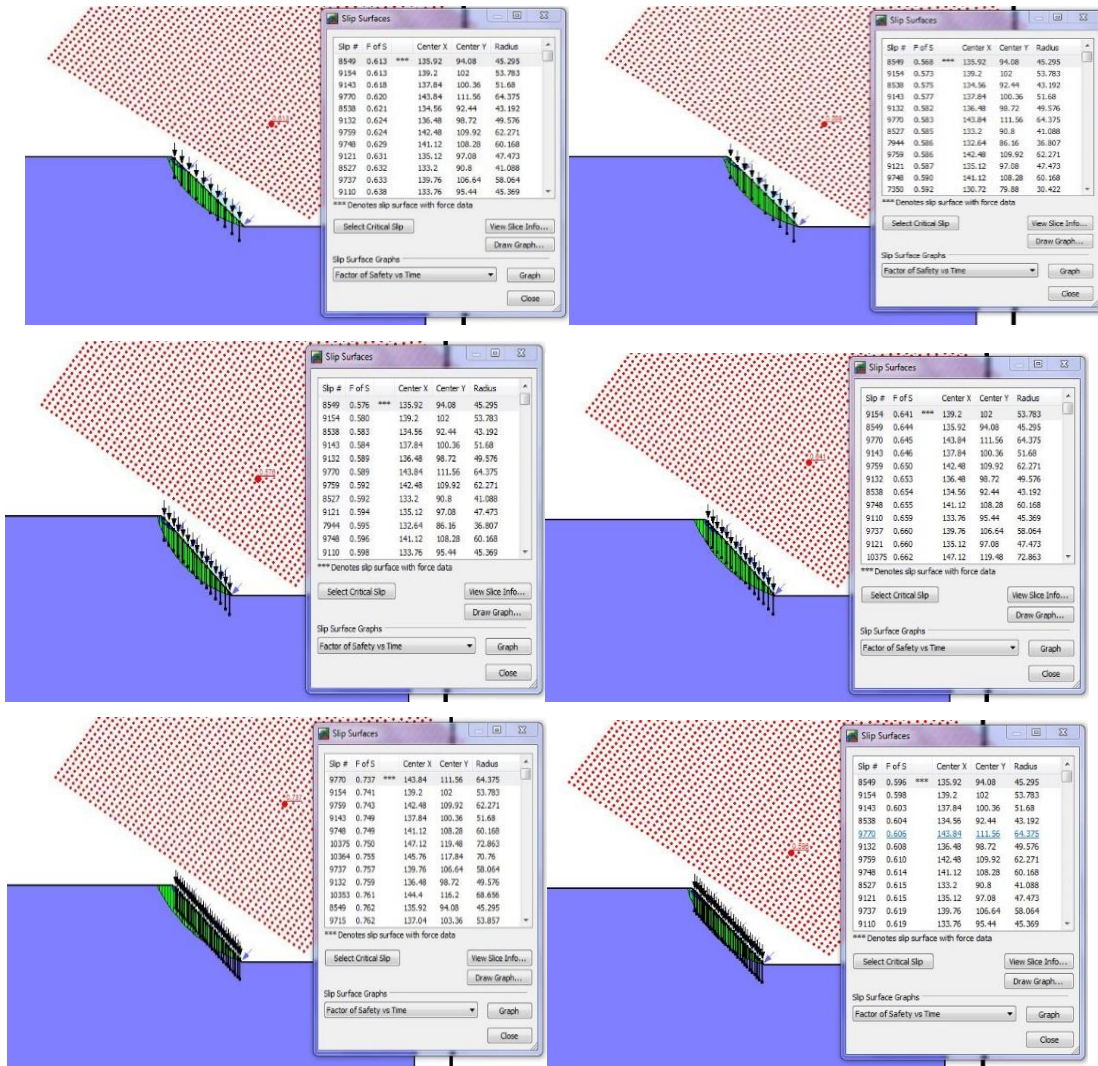
های متخلخل خاک جریان می‌یابند. آب در طی مسیر در محیط متخلخل و با حضور اصطکاک به تدریج انرژی خود را از دست داده و آثار نامطلوبی مانند: تلف شدن آب ذخیره شده در پشت سازه خاکی، ایجاد فشار منفذی و کاهش تنش موثر را به دنبال خواهد داشت. هر یک از این مسائل می‌توانند سبب کاهش مقاومت برشی، اعمال فشار بالابرنده، ایجاد پدیده فرسایش و نیروی نشت گردیده و بر پایداری شیروانی اثر منفی داشته باشند.



شکل ۹. مدل تحلیل تراوش در حالت پایدار برای ضریب نفوذپذیری  $10^{-6}$

در اشکال (۱۰ تا ۱۲) و همچنین جداول (۲ تا ۴) نتایج تحلیل پایداری شیب در حالت تراوش پایدار نشان داده شده است. این مقادیر در ۳ زاویه مختلف برای ریزشمع‌ها به صورت قائم، زاویه ۱۰ و ۲۰ درجه و با در نظر گرفتن ۳ قطر برای ریزشمع به اندازه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتیمتر و همچنین با ۳ فاصله مختلف

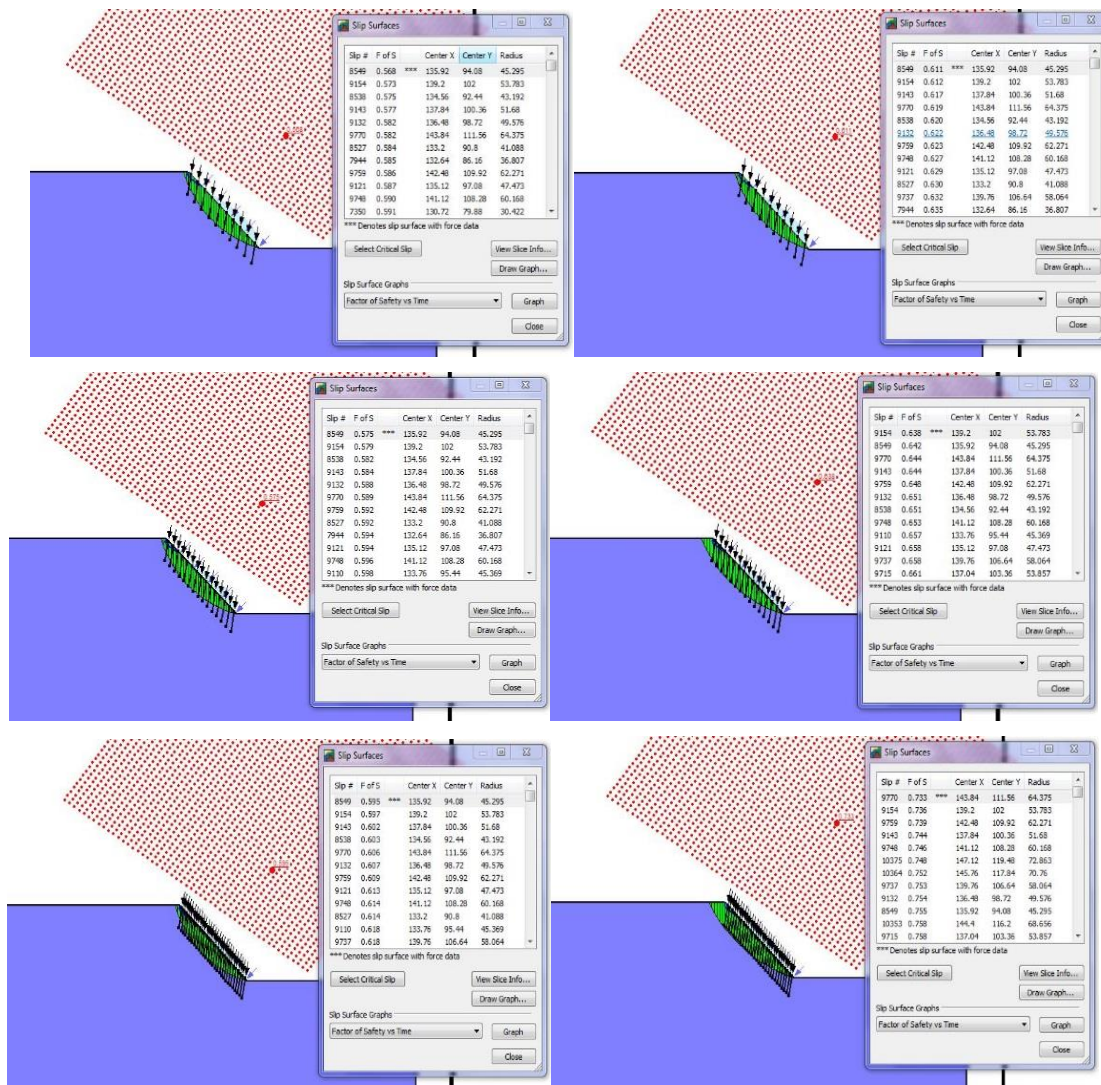
به طول ۱، ۲ و ۳ متر بدست آمده است. همچنین در شکل (۱۳) و جدول (۵) نتایج تحلیل پایداری شیب برای قطر ریزشمع ۲۰ سانتیمتر و طول ۲ متر، ۳ زاویه اصطکاک متفاوت به اندازه ۲۵ درجه، ۳۰ درجه و ۳۵ درجه و با ۳ زاویه مختلف ریزشمع در نظر گرفته شده است که در کل شامل ۳۶ مدل مختلف می‌باشد.



شکل ۱۰. تحلیل شیب در حالت تراوش پایدار در فواصل مختلف یک، دو و سه متر در قطرهای ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ سانتیمتر با زاویه قائم ریزش‌ها

جدول ۳- مقادیر عددی تحلیل پایداری شیب با زاویه قائم ریزش و با تراوش پایدار

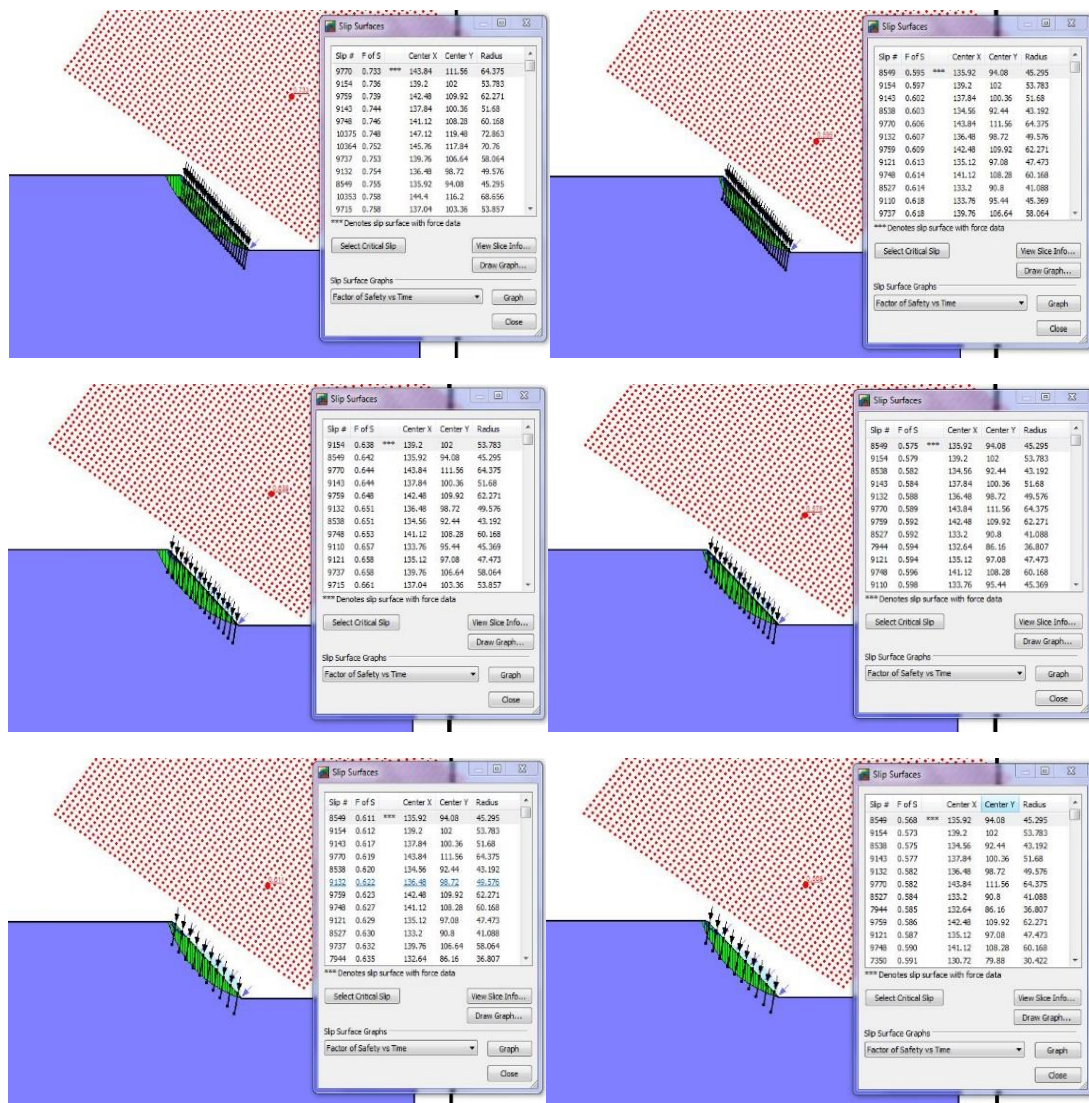
Steady State Seepage	Safety Factor			
	L=3	L=2	L=1	
Micropile Diameter	D=10	0.568	0.575	0.595
	D=20	0.611	0.638	0.733
	D=30	0.693	0.78	0.991



شکل ۱۱. تحلیل شیب در حالت تراوش پایدار در فواصل مختلف یک، دو و سه متر در قطرهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتیمتر با زاویه ۱۰ درجه ریزش‌ها

جدول ۴. مقادیر عددی تحلیل پایداری شیب با زاویه ۱۰ درجه ریزش‌ها و با تراوش پایدار

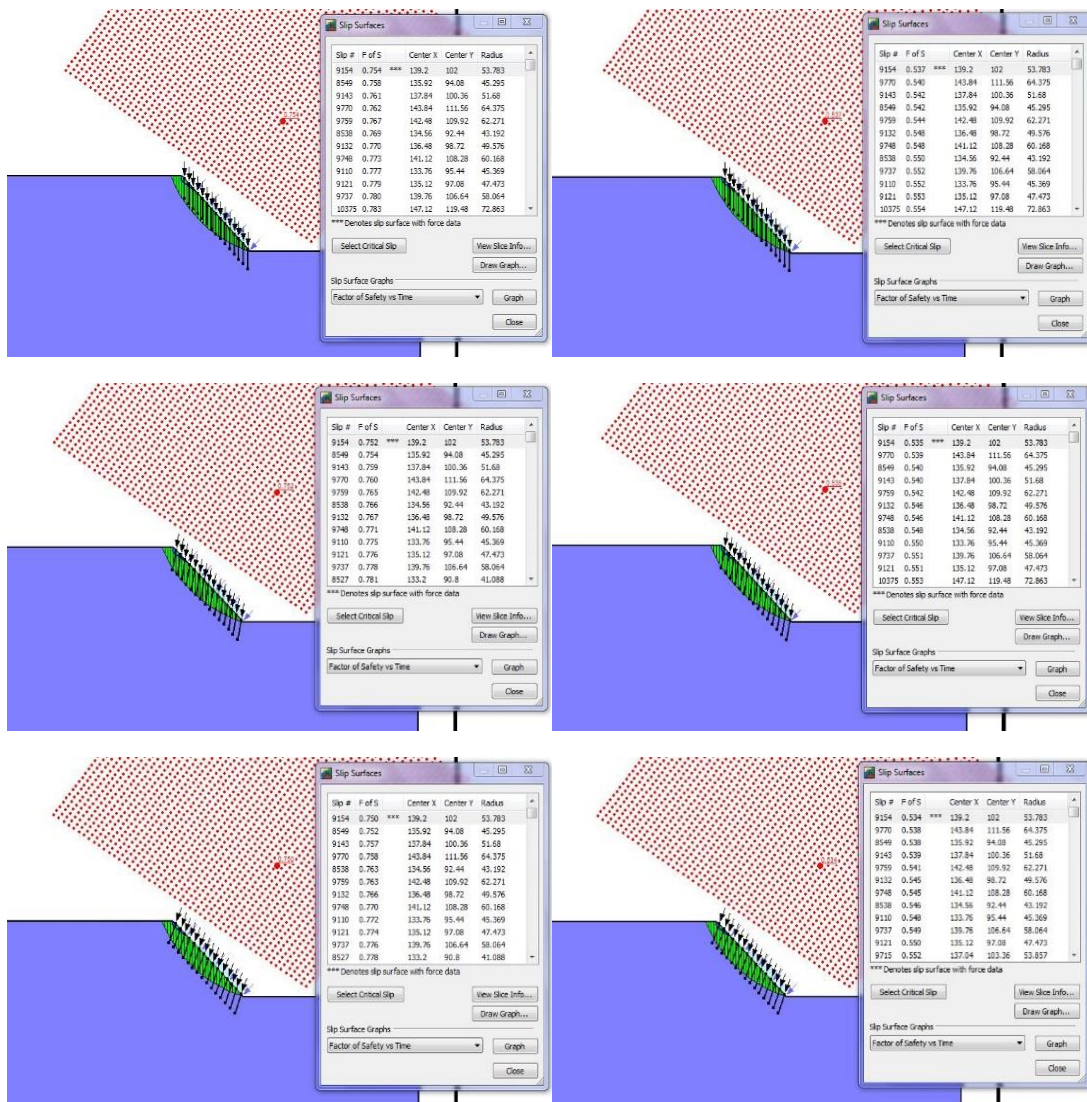
Steady State Seepage	Safety Factor		
	L=3	L=2	L=1
D=10	0.568	0.575	0.595
D=20	0.611	0.638	0.733
D=30	0.693	0.78	0.991



شکل ۱۲. تحلیل شیب در حالت تراوش پایدار در فواصل مختلف یک، دو و سه متر در قطرهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتیمتر با زاویه ۲۰ درجه ریزش‌ها

جدول ۵- مقادیر عددی تحلیل پایداری شیب با زاویه ۲۰ درجه ریزش و با تراوش پایدار

Steady State Seepage	Safety Factor			
	L=3	L=2	L=1	
D=10	0.568	0.575	0.594	
Micropile Diameter	D=20	0.609	0.637	0.73
	D=30	0.69	0.776	0.976



شکل ۱۳. تحلیل شیب در حالت تراوش پایدار در فواصل ۲ متر و با قطرهای ۲۰ سانتیمتر با زاویه ریزش‌های قائم، ۱۰ و ۲۰ درجه و زاویه اصطکاک ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه

جدول ۶. مقادیر عددی تحلیل پایداری شیب با زاویه اصطکاک مختلف و تراوش پایدار

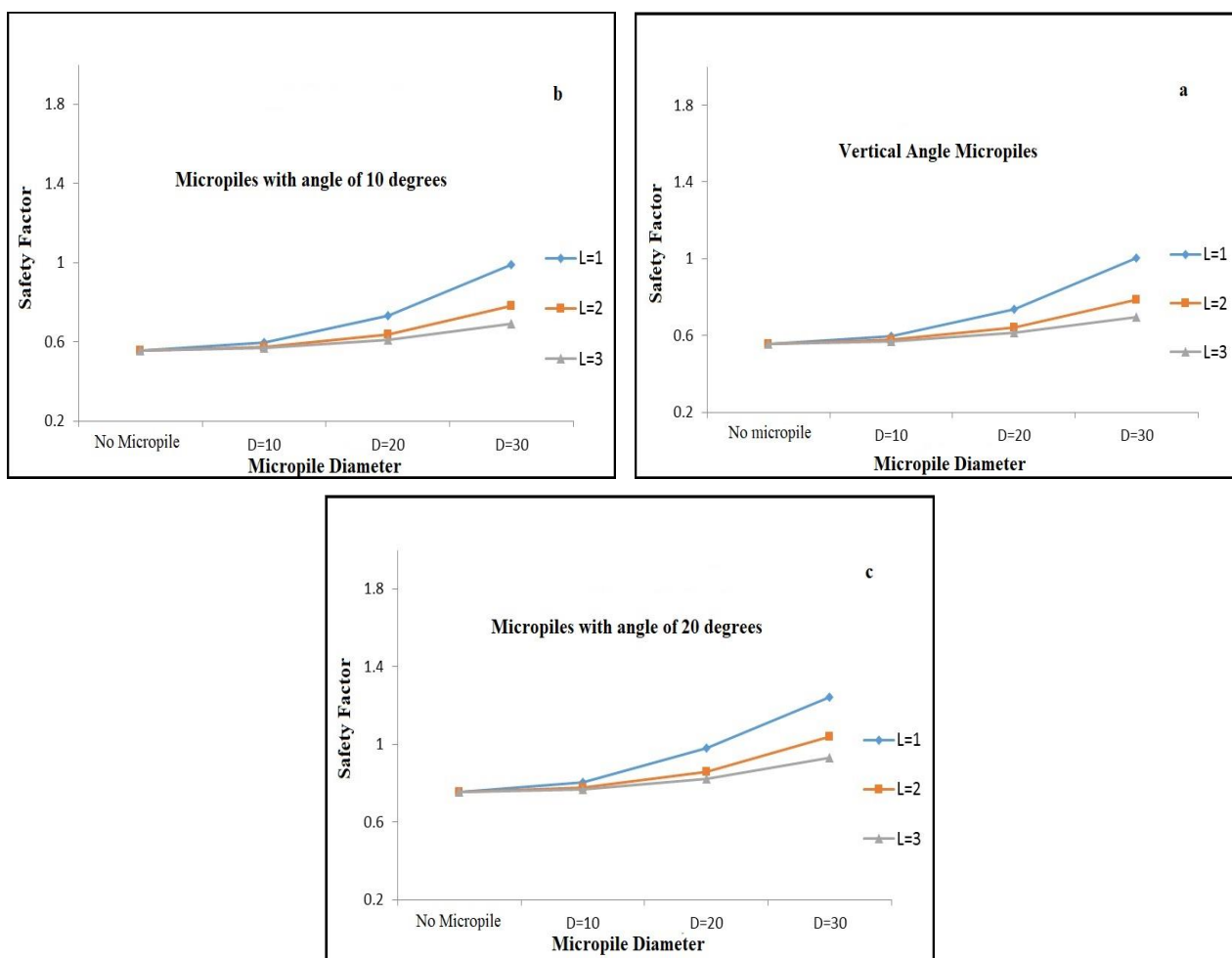
Steady State Seepage	Safety Factor		
	20 Angle	10 Angle	90 Angle
Internal Friction Angle			
$\phi=25^\circ$	0.514	0.535	0.537
$\phi=30^\circ$	0.637	0.838	0.641
$\phi=35^\circ$	0.570	0.752	0.754

۷-۲. مقایسه تحلیل‌های حاصل از آنالیزها

در این بخش، نتایج تحلیل حساسیت برای عملکرد ریزشمع‌ها بر روی شیروانی‌ها در شرایط تراوش پایدار مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، شرایط مختلفی برای زاویه ریزشمع، فاصله ریزشمع، قطر ریزشمع، مشخصات مقاومتی خاک و نفوذپذیری خاک در نظر گرفته شده است و در نهایت برای هر

مورد، مقدار ضریب اطمینان مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

۷-۲-۱. بررسی تاثیر قطر ریزشمع‌ها بر پایداری شیب‌ها  
در اشکال (۱۴ تا ۱۶) نمودار تغییرات ضریب اطمینان بر حسب قطر ریزشمع‌ها برای سه زاویه مختلف ریزشمع و در فواصل مختلف ریزشمع در حالت تراوش پایدار نشان داده شده است.

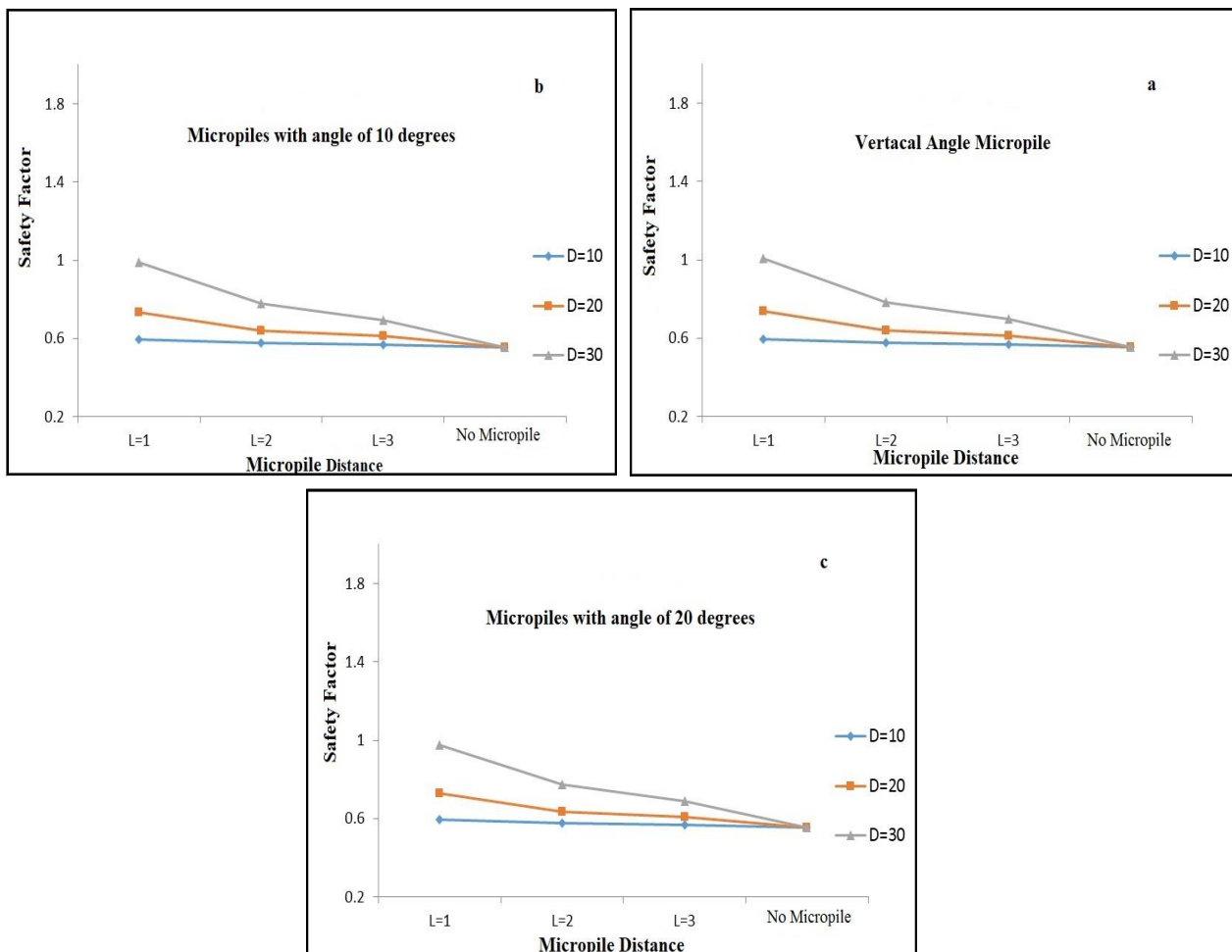


شکل ۱۴. (a) نمودار تغییرات ضریب اطمینان بر حسب قطر ریزشمع با زاویه قائم و تراوش پایدار، (b) نمودار تغییرات ضریب اطمینان بر حسب قطر ریزشمع با زاویه ۱۰ درجه و تراوش پایدار، (c) نمودار تغییرات ضریب اطمینان بر حسب قطر ریزشمع با زاویه ۲۰ درجه و تراوش پایدار.



۲-۷. بررسی تاثیر فاصله ریزشمع‌ها بر پایداری شیب‌ها  
 برای بررسی تاثیر فاصله ریزشمع‌ها در پایداری شیب‌ها در تراوش پایدار با در نظر گرفتن سه زاویه مختلف برای ریزشمع‌ها، تحلیل انجام گرفته و ضرایب اطمینان مورد مطالعه

قرار گرفته است. در اشکال (۱۷ تا ۱۹) نمودار تغییرات ضریب اطمینان بر حسب فاصله ریزشمع برای سه زاویه مختلف ریزشمع و در قطرهای مختلف ریزشمع نشان داده شده است.

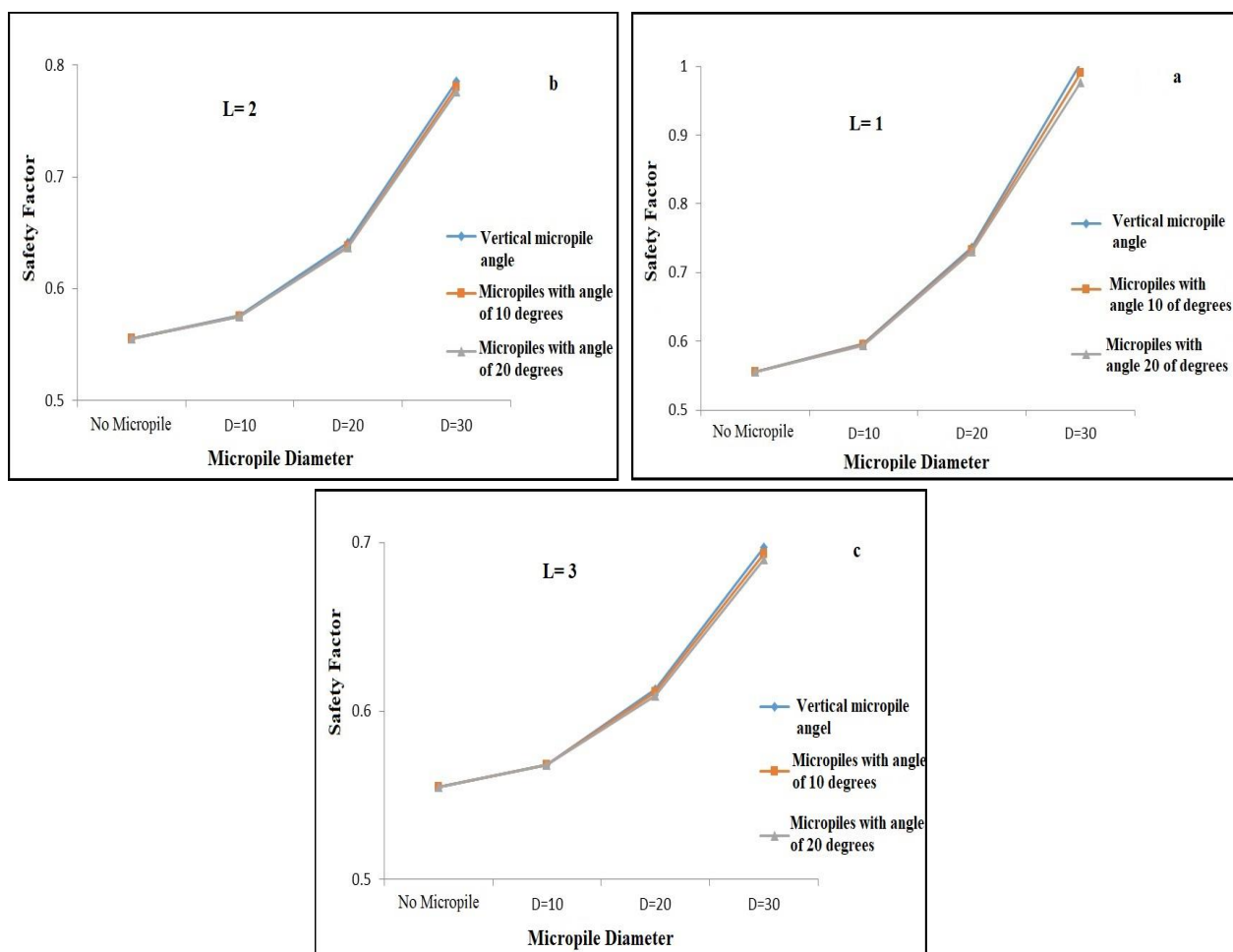


شکل ۱۵. (a) نمودار تغییرات ضریب اطمینان بر حسب فاصله ریزشمع با زاویه قائم و تراوش پایدار، (b) نمودار تغییرات ضریب اطمینان بر حسب فاصله ریزشمع با زاویه ۱۰ درجه و تراوش پایدار، (c) نمودار تغییرات ضریب اطمینان بر حسب فاصله ریزشمع با زاویه ۲۰ درجه و تراوش پایدار.

۳-۲-۷ بررسی تاثیر زاویه ریزشمع بر پایداری شیب‌ها

در این قسمت برای بررسی تاثیر زاویه ریزشمع در پایداری شیب‌ها در حالت پایدار تحلیل انجام گرفته و ضرایب اطمینان

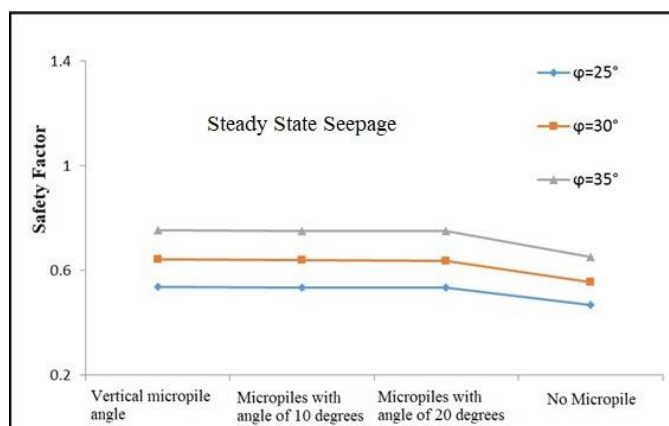
مورد مطالعه قرار گرفته است. در اشکال (۲۰ تا ۲۲) نمودار تغییرات ضریب اطمینان بر حسب قطر ریزشمع برای سه زاویه مختلف ریزشمع و در فاصله‌های مختلف ریزشمع نشان داده شده است.



شکل ۱۶. (a) نمودار تغییرات ضریب اطمینان با زوایای مختلف ریزشمع با فاصله ۱ متر و تراوش پایدار، (b) نمودار تغییرات ضریب اطمینان با زوایای مختلف ریزشمع با فاصله ۲ متر و تراوش پایدار (c) نمودار تغییرات ضریب اطمینان با زوایای مختلف ریزشمع با فاصله ۳ متر و تراوش پایدار.

زوایای مختلف ریزشمع، تحلیل انجام گرفته و ضرایب اطمینان مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل (۲۳) نمودار تغییرات ضریب اطمینان بر حسب زاویه ریزشمع برای تراوش پایدار در سه زاویه اصطکاک داخلی خاک نشان داده شده است.

۷-۲-۴- بررسی تاثیر ضریب اصطکاک داخلی خاک بر پایداری شیبها  
برای بررسی اثر زاویه اصطکاک داخلی خاک در عملکرد پایداری شیبها در حالت تحلیل تراوش پایدار با در نظر گرفتن



شکل ۱۷. نمودار تغییرات ضریب اطمینان بار بر حسب زاویه اصطکاک داخلی خاک و تراوش پایدار

## ۸. نتیجه‌گیری

افزایش فاصله ریزشمع از ۲ به ۳ متر مقدار ضریب اطمینان ۴/۵ درصد کاهش می‌یابد.

- زاویه ریزشمع‌ها تاثیر چندانی در مقدار ضریب اطمینان ندارد و با زاویه‌دار شدن ریزشمع‌ها ضریب اطمینان کاهش جزئی از خود نشان می‌دهد. این کاهش ضریب اطمینان پایدار خاک در زوایای مختلف ریزشمع در حالتی که قطر ریزشمع‌ها بیشتر است، نسبتاً چشمگیر به نظر می‌رسد.
- تاثیر ضریب اصطکاک داخلی خاک در مقدار ضریب اطمینان شیروانی در تراوش پایدار تقریباً به صورت خطی می‌باشد و می‌توان گفت این تغییرات در حالت‌های مختلف موازی هم می‌باشند.

خلاصه نتایج حاصل از بررسی تاثیر ریزشمع‌ها در پایداری شیروانی تحت اثر تراوش پایدار را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

- با در نظر گرفتن فاصله ریزشمع‌ها به اندازه ۲ متر ملاحظه می‌شود با افزایش قطر ریزشمع از ۱۰ به ۲۰ سانتیمتر مقدار ضریب اطمینان ۱۱ درصد و همچنین با افزایش قطر ریزشمع از ۲۰ به ۳۰ سانتیمتر مقدار ضریب اطمینان ۲۲ درصد افزایش می‌یابد.
- با در نظر گرفتن قطر ریزشمع‌ها به اندازه ۰/۲ متر ملاحظه می‌شود با افزایش فاصله ریزشمع‌ها از ۱ به ۲ متر مقدار ضریب اطمینان ۱۳ درصد و همچنین با

## منابع

- اسدی، م.، حشمتی، ع.ا. ۱۳۹۰. مقایسه ضریب اطمینان شیروانی خاکی مسلح به روش‌های مختلف، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران. حشمتی رفسنجانی، ع.ا.، قدمگاهی، ع. ۱۳۹۳. تحلیل پایداری شیروانی‌ها به روش اجزاء محدود، کنفرانس ملی ژئوتکنیک. عسگری، ش.، شهیر، ه. ۱۳۹۵. روشی تحلیلی برای آنالیز پایدارسازی شیب‌های خاکی با ریزشمع‌ها، چهارمین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری، تهران، دبیرخانه دائمی کنفرانس، دانشگاه شهید بهشتی.
- عسگری، ش.، شهیر، ه. ۱۳۹۵. استفاده از رویکرد تعادل حدی اصلاح شده جهت تحلیل و طراحی ریزشمع‌های پایدار کننده شیب‌ها، چهارمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- Abd Elaziz, A.Y. 2012. Performance of hollow bar micropiles under axial and lateral loads in cohesive soils. Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Western University, London,
- Cheng Y.M., Lau C.K. 2008. Slope Stability Analysis and Stabilization- New methods and insight", Taylor and Francis, London and New York, 260 p.

- Geo-slop Company. 2004. Seepage Modeling with SEEP/W, User's Guide, version, Geo-slope, Calgary, Alberta, Canada.
- Guo, W. D. 2013. Pu-based solutions for slope stabilizing piles. *International Journal of Geomechanics*, 13 (3), 292-310.
- Huang Y.H. 1983. Stability analysis of earth slopes, van nostrand reihold Co., New York.
- Kim M., Freeman M., FitzPatrick B.T., Nevius D.B., Plaut R.H. and Filz G.M. 2004. Use of an apron to stabilize geomembrane tubes for fighting floods", *Geotextiles & Geomembrane*, Vol. 239:22.
- Kourkoulis, R., Gelagoti, F., Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. 2012. Hybrid Method for Analysis and Design of Slope Stabilizing Piles, *Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineereing ASCE*.
- Loehr J. E., Bowders J. J. and Salim. 2000. Slope stabilization using recycled plastic pins, constructability, Final Report Missouri DOT RDT .07.
- Loehr J.E., Bowders J.J. 2007. Slope Stabilization Using Recycled Plastic Pins – Phase III, Missouri Department of Transportation Report, 290 p.
- Moharrami A, Hassanzadeh Y, Salmasi F, Moradi Gh, Moharrami Gh. 2014. Performance of the horizontal drains in upstream shell of earth dams on the upstream slope stability during rapid drawdown conditions. *Arabian Journal of Geoscience* 7:1957-1964.
- Sadek, M. and Shahrour, I. 2006. Influence of the head and tip connection on the seismic performance of micropiles. *Soil Dyn. Earth. Eng.* 26: 461–468.
- SivakumarBabu G.L. and Singh P.S. 2010. 2D Numerical Simulations of Soil Nail Walls," *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(4), pp. 299-903.
- Sommers L., Loehr J.E. and Bowders J.J. 2000. Construction Methods for Slope Stabilization with Recycled Plastic Pins, *Proceedings of Mid-Continent Transportation Symposium, Iowa, USA*, pp. 254-258.
- Turan, A., El Naggar, M. H. and Hinchberger, S. 2007. Seismic performance of a single micro-pile in layered soil. *8th International Workshop on Micropiles*.
- Vandamme J and Zou Q. 2013. Investigation of slope instability induced by seepage and erosion by a particle method. *Computers and Geotechnics* 48: 9-20.
- Wei, W. and Y. Cheng. 2010. Soil nailed slope by strength reduction and limit equilibrium methods. *Computers and Geotechnics*.
- Xu Y.F., Huang J. 2000. Case Study on Earth Reinforcement Using Soilbags, *Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics, Shanghai, China*, pp. 597-602.