

## یادداشت فنی

## مدلسازی احتمالاتی-ژئوتکنیکی گودبرداری در حاشیه شهر قائن

محمد امین فرشادمهر<sup>۱</sup>، ایوب حاذق<sup>۲</sup>، حسین نوفرستی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

۳- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

(دریافت: فروردین ۱۳۹۴، پذیرش: آذر ۱۳۹۶)

## چکیده

عملیات گودبرداری یکی از فعالیت‌های پرخطر در ساختمان‌سازی به حساب می‌آید که معمولاً به منظورهای مختلف مانند رسیدن به سطح تراز مناسب خاک برای اجرای فونداسیون، یا احداث طبقات زیرین انجام می‌شود. امروزه گزارش‌های متعددی از خسارات مالی و بعضاً جانی در شهرهای بزرگ کشور منتشر می‌شود، که ناشی از عدم توجه به پایداری دیواره‌ی گود و نیز نگهداری مورد نیاز آن است. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار Slide، ابتدا به بررسی پایداری دیواره‌ی گود در یکی از نقاط حاشیه‌ای شهر قائن پرداخته‌شده و سپس بررسی و تحلیل نگهداری دیواره‌ی گود با استفاده از روش میخ‌گذاری خاک در شرایط مختلف انجام شده است. این پژوهش یک بررسی تقریباً کامل گودبرداری است که با استفاده از تحلیل برگشتی، تحلیل حساسیت و تحلیل احتمالی، در شرایط قطعی و احتمالاتی انجام شده است. طبق نتایج به دست آمده از این مطالعه، خاک منطقه‌ی مورد نظر برای گودبرداری ناپایدار است و به کارگیری روش میخ‌گذاری تا عمق مورد مطالعه (۱۰ متر) و شیب‌دار کردن دیواره‌های گود، راهکارهای مناسب برای رسیدن به ضریب ایمنی قابل قبول هستند. در انتها چند روش مختلف که دارای ضریب ایمنی قابل قبول هستند برای اجرای گود پیشنهاد شده است. این تحقیق الگوی جامعی را برای تحلیل دیواره‌های گودبرداری ارائه می‌کند که برای اجرای گودبرداری در مناطق هم‌جوار نیز مفید خواهد بود.

## کلید واژه‌ها

تحلیل پایداری احتمالاتی شیب، تحلیل حساسیت، تحلیل برگشتی، نرم‌افزار Slide، میخ‌گذاری

\* عهده دار مکاتبات: [hnoferesty@birjand.ac.ir](mailto:hnoferesty@birjand.ac.ir)

## ۱- مقدمه

روش میخ‌گذاری و محاسبه‌ی ضرایب ایمنی با استفاده از روش تحلیل قطعی و احتمالاتی در شرایط مختلف، پرداخته شده است. میخ‌گذاری عبارت است از قرار دادن میخ در خاک توسط چالزنی، که در آن یک میلگرد نقش میخ را ایفا کرده و پس از قرار گرفتن میخ در چال ایجاد شده توسط مته، روی آن دوغاب ریخته می‌شود. دوغاب تنش را از زمین به میخ منتقل کرده و نیز از میخ در برابر خوردگی محافظت می‌کند. یکی از اولین کاربردهای میخ‌گذاری در سال ۱۹۷۲ برای یک پروژه‌ی عریض‌سازی خط آهن در منطقه‌ای در فرانسه بوده است. پس از آن چون این روش ارزان و نسبتاً سریع بود، در فرانسه و سایر نقاط اروپا رونق یافت. در آلمان اولین کاربرد این روش در سال ۱۹۷۵ بود. در آمریکا نیز از اواخر دهه‌ی ۱۹۶۰ و اوایل ۱۹۷۰ این روش به کار گرفته شد. کاربرد دیوارهای میخ‌گذاری شده در خاک در آمریکا طی دهه‌ی گذشته افزایش یافته است، زیرا ثابت شده که دیوارهای میخ‌گذاری شده از نظر فنی، عملی هستند و در بسیاری از موارد جایگزین اقتصادی دیوارهای حائل هستند [۸].

در این پژوهش امکان گودبرداری در منطقه‌ی مورد نظر و در عمق مفروض ۱۰ متری، در شرایط بار مجاور فرضی و حضور و عدم حضور سیستم نگهدارنده با استفاده از تحلیل‌های بازگشتی و قطعی و احتمالی، بررسی شده است. نتایج این تحقیق ضمن ارائه‌ی الگویی برای تحلیل تقریباً جامع یک گودبرداری و نگهداری آن با قطعیت بالا، برای اجرای گودبرداری در مناطق همجوار نیز مفید خواهد بود.

## ۲- ویژگی‌های ژئوتکنیکی منطقه‌ی مورد مطالعه

زمین مورد مطالعه در شهر قائن در استان خراسان جنوبی واقع شده است و طول و عرض جغرافیایی تقریبی نقطه‌ی مرکزی آن به ترتیب  $59^{\circ}11'12''$  شرقی و  $33^{\circ}41'20''$  شمالی است (شکل ۱).

به منظور تعیین نوع و ضخامت لایه‌های خاک، عملیات حفاری گمانه‌های ماشینی با استفاده از دستگاه حفاری به روش ضربه‌ای و گمانه‌های دستی با استفاده از مقنی و سه‌پایه انجام گرفته است. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش نفوذ استاندارد<sup>۱</sup> خاک دانه‌ای محل گمانه‌ها از نظر تراکم نسبی در رده‌ی خیلی متراکم قرار داشته به طوری که تراکم نسبی آن بیش از ۸۵ درصد بوده است. خاک محل مورد

با توجه به روند رو به رشد جمعیت شهرها بحث کاربری اراضی و ساخت‌وساز در شهرها و نیز منطقه‌های در حال توسعه بیش از پیش مورد توجه است. یکی از ابتدایی‌ترین مسائل مورد بحث در این ساخت‌وسازها، پایداری گودبرداری و نگهداری دیواره‌ی گود است [۱]. گودبرداری عبارت است از حفر کانال و ایجاد فضاهای مناسب در زمین جهت احداث یک سازه‌ی مشخص (پی‌کنی) و یا لوله‌گذاری برای خدمات مختلفی چون خطوط انتقال گاز یا مواد در صنایع مختلف که به طور عمده با خاک‌برداری یا سنگ‌برداری و یا ترکیبی از این دو و نیز تخلیه‌ی خاک و سنگ از محل، همراه است [۲]. افزایش روزافزون ساخت‌وساز و به دنبال آن خبرهای ناراحت‌کننده‌ی خسارات و صدمات ناشی از عدم توجه به پایداری گود و نگهداری مناسب آن، پژوهش در این زمینه را ضروری می‌کند [۳].

در ابتدای این تحقیق با استفاده از روش‌های تعادل حدی، به بررسی پایداری دیواره‌ی گود در عمق ۱۰ متری زمین مورد مطالعه پرداخته شده است. تحلیل‌های پایداری شیب معمولاً با روش‌های تعادل حدی صورت می‌گیرد، که این روش‌ها غالباً قبل از اختراع کامپیوتر توسعه داده شده‌اند. در روش‌های تحلیل به روش تعادل حدی موقعیت سطح لغزش بحرانی و مقدار ضریب پایداری حداقل در تعدادی سطح لغزش محتمل، بررسی می‌شوند. از جمله روش‌های تعادل حدی روش‌های ارائه‌شده توسط بیشاپ [۴] و نیز جانبو [۵] است. دقت استفاده از این روش‌ها بستگی به فرضیات آنها از جمله همسانگرد بودن خاک دارد، که هرچند فرضیات واقعی نیستند، اما نتایج حاصل از این مفروضات مناسب است [۶].

در بیشتر مناطق ایران گودبرداری به صورت قائم انجام می‌گیرد و برای محافظت ساختمان کنار گود از مهار مایل که یک سر آن در کف گود قرار دارد و سر دیگر آن متکی به دیوار ساختمان مجاور است، استفاده می‌شود. اغلب این مهارها به دلیل اتصال به عضو غیر سازه‌ای و نیز پی غیر اصولی آنها، هیچ‌گونه عملکرد سازه‌ای در راستای پایدارسازی گود نخواهند داشت [۷].

در این تحقیق پس از بررسی پایداری شیب گود در عمق ۱۰ متری زمین مورد نظر، به بررسی عملکرد نگهداری به

از تأثیر آب زیرزمینی چشم‌پوشی شده است [۹]. توسعه‌ی روزافزون ساخت‌وساز به سمت مناطق با تراکم کم ساختمانی و حواشی شهر و نیز رونق احتمالی منطقه با احداث آموزش‌شده و نیز ارگان‌های دیگر، اجرای گودبرداری‌های دیگر در حواشی منطقه‌ی مورد مطالعه را در آینده‌ای نزدیک محتمل می‌کند، که این دلیلی بر ضرورت انجام این تحقیق در این منطقه بوده است.

مطالعه عمدتاً دانه‌ای بوده و در رده‌ی گروه GC (شن رس‌دار همراه با ماسه)، GM (شن لای‌دار همراه با ماسه)، GP-GM (شن با دانه‌بندی بد همراه با لای و ماسه) و GC-GM (شن رس‌دار و لای‌دار همراه با ماسه) تشخیص داده شده است. خصوصیات مکانیکی خاک منطقه در جدول ۱ آورده شده است. در حفاری‌های انجام‌شده، انتهای عمق آنها به سطح آب زیرزمینی برخورد نکرده و لذا در این تحقیق



شکل ۱: موقعیت منطقه‌ی مورد نظر برای احداث آموزشگاه فنی قائن

جدول ۱: ویژگی‌های مکانیکی خاک منطقه

مقدار میانگین	ویژگی
۳/۹	چسبندگی C (کیلو نیوتن بر مترمربع)
۴۲	زاویه‌ی اصطکاک داخلی φ (درجه)
۲۰/۲	وزن مخصوص γ (کیلو نیوتن بر مترمکعب)

قطعاتی تقسیم شده و ضریب ایمنی در طول آنها محاسبه می‌شود. روش‌های متعددی برای تحلیل تعادل حدی وجود دارد که تفاوت آن‌ها در فرضیات و نیز نحوه‌ی قرارگیری و محاسبه‌ی نیروها است. این تحلیل‌ها می‌تواند به سرعت و به خوبی اجرا شود [۱۰]. در این تحقیق از دو روش جانبی ساده‌شده و بیشاپ ساده‌شده استفاده شده است که روش‌هایی صحیح برای تحلیل شکستگی سطوح دایره‌ای هستند [۱۱].

### ۳- روش‌های تحلیل پایداری گود

#### ۳-۱- روش تعادل حدی و مور-کولمب

تکنیک‌های تعادل حدی به صورت معمول در تحلیل زمین لغزش‌ها که حرکات یا جابجایی‌ها در سطوح شکستگی مشخص رخ می‌دهند، استفاده می‌شود. در خاک و سنگ‌های بسیار سست و هوازده عمدتاً شکست دایره‌ای یا چرخشی رخ می‌دهد. در روش تعادل حدی، خاک محل مورد نظر به

استفاده را در دامنه‌ی وسیعی از مسائل مهندسی ژئوتکنیک دارد [۱۳].

### ۳-۴- تحلیل برگشتی

تحلیل برگشتی روشی برای ارزیابی اولیه‌ی مقدار نیروی مورد نیاز برای نگهداری یک شیب ناپایدار است. در این روش با مشخص کردن نقطه‌ای از سطح شیبدار، مقدار نیروی مورد نیاز برای مقاومت در برابر نیروهای محرک در آن نقطه مشخص می‌شود. سیستم نگهداری باید به گونه‌ای طراحی شود که برآیند نیروهای نگهدارنده در آن نقطه بزرگتر یا مساوی نیروی به‌دست آمده از تحلیل برگشتی باشد [۱۳].

در این تحقیق ابتدا با استفاده از ضریب ایمنی به دست آمده از شرایط مختلف، پنج ترکیب مختلف میخ‌گذاری و نگهداری پیشنهاد شده است. سپس برای اطمینان بیشتر ابتدا با استفاده از تحلیل حساسیت، حساسیت ضریب ایمنی به هر یک از مشخصات مکانیکی خاک بررسی شده است و در آخر با استفاده از تحلیل احتمالی، مطمئن‌ترین حالت‌های گودبرداری به دست آمده است. لازم به ذکر است که برای پیش بینی نگهداری مورد نیاز دیواره‌ی ناپایدار، از تحلیل برگشتی استفاده شده است.

### ۴- مبانی طراحی سیستم میخ‌گذاری

طبق گزارش اداره‌ی بزرگراه‌های آمریکا<sup>۲</sup> در مورد میخ‌گذاری [۸]، معمولاً میخ‌ها را با شیب بین ۱۰ تا ۲۰ درجه در دیواره‌های خاکی ناپایدار اجرا می‌کنند تا دوغاب به راحتی عمق و فضای داخلی چال را پر کنند. برای گودبرداری عمدتاً هر ۱/۲ تا ۲ متر که دیواره توانایی پایداری تا رسیدن به مرحله‌ی بعدی را داشته باشد، سیستم میخ‌گذاری را اجرا می‌کنند. عموماً مقاومت‌های کششی اسمی میخ‌ها در بازه‌ی بین ۴۰۰ تا ۵۲۰ مگاپاسکالی قرار دارد که برای کاربرد عملی باید ضریب ایمنی ۱/۸ را اعمال کرد. در رابطه با طول میخ‌ها نیز معمولاً از طول معادل ۰/۷ ارتفاع دیواره گود استفاده می‌کنند. طول‌های کمتر از ۰/۶ ارتفاع دیواره به علت عدم کارایی در پایدارسازی دیواره بندرت مورد استفاده قرار می‌گیرند.

قطرهای ۲۰ تا ۵۰ میلی‌متر کاربرد بیشتری دارند و مهم‌ترین عامل تصمیم‌گیری در این رابطه، انتخاب کمترین

برای همه نوع شکستگی برشی، یک توده‌ی خاک یا سنگ می‌تواند یک ماده‌ی مورکولمب فرض شود. مقاومت برشی مورکولمب ( $\tau$ )، برای یک تنش نرمال داده‌شده ( $\sigma$ )، با جانشینی مقادیر چسبندگی اشباع ( $c'$ ) و زاویه‌ی اصطکاک داخلی ( $\phi'$ ) در رابطه‌ی (۱) به دست می‌آید:

$$\tau = c' + \sigma \tan \phi' \quad (1)$$

پایداری یک سطح با ضریب ایمنی آن که نسبت نیروهای مقاوم (چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی) به نیروهای محرک (وزن توده، نیروی حاصل از لرزه و ...) است، ارزیابی می‌شود [۱۲].

### ۳-۲- تحلیل حساسیت

در واقعیت، هر پارامتر دامنه‌ای از مقادیر را دارد. روش‌های آزمایش تاثیرات این تغییرپذیری بر روی ضریب ایمنی، تحلیل حساسیت است. در این روش میزان حساسیت ضریب ایمنی به یک پارامتر خاص، با انتخاب مقادیر مختلف از این پارامتر در بازه‌ی بین کمینه و بیشینه مقادیر آن، تعیین می‌شود. در بررسی میزان حساسیت هر پارامتر نسبت به ضریب ایمنی، پارامترهای دیگر مقادیر ثابت میانگین خود را می‌گیرند [۱۲].

### ۳-۳- تحلیل احتمالی

تحلیل احتمالی اولین بار سال ۱۹۴۰، در زمینه‌های مهندسی ساختمان و هوانوردی، برای قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده به کار رفت. از جمله اولین استفاده‌های این روش، به‌کارگیری آن در مهندسی ژئوتکنیک و در طراحی معدن بوده است. هر پارامتر غیر قطعی، در دامنه‌ای از مقادیر تعیین می‌شود که به وسیله‌ی تابع چگالی احتمال تعریف می‌شود. این روش یک فرایند سیستماتیک برای امتحان تأثیر تغییرپذیری هر پارامتر بر روی پایداری شیب است. در مباحث ژئوتکنیکی، توزیع نرمال کاربرد بیشتری دارد که در آن میانگین بیشترین رخداد را دارد [۱۲].

روش نمونه‌برداری برای تحلیل احتمالی مشخص می‌کند که چگونه از توزیع متغیرهای تصادفی که تعریف نموده‌ایم، داده‌های تصادفی انتخاب و نمونه‌گیری شود. یکی از این روش‌ها، روش نمونه‌برداری مونت کارلو است که از تعدادی شماره‌ی تصادفی برای نمونه‌گیری از توزیع احتمالی داده‌های ورودی استفاده می‌کند. روش مونت کارلو بیشترین

مرز یک مدل بستگی به طبیعت منطقه یا زمین گودبرداری شده‌ی خالی از تنش دارد. مرز را بر اساس فاصله یا تنش اعمال می‌کنند. در هر صورت باید مرز تا جایی ادامه پیدا کند که تنش‌های موثر دیگر اثری نداشته باشند [۱۲]. در این تحقیق با رعایت فواصل زیاد از دیواره و کف گود، مسائل ذکر شده لحاظ شده است. هدف این مقاله بررسی زمین مورد نظر برای گودبرداری در عمق فرضی ۱۰ متری بوده است. لذا ابتدا گودی با دیواره ی قائم و با عمق ۱۰ متر مدل شده است. برای پیش بینی شرایط احتمالی آینده، بار ناشی از ساختمان فرضی مجاور (نوع مسکونی، اسکلت فولادی با کف بتنی (کف تیرچه بلوک و یا کف بتنی کامپوزیت بتن و فولاد)، ابعاد ۳۰×۳۰ متر، با ۳ طبقه و در فاصله‌ی ۵ متری لب گود)، در نظر گرفته شده است. ضیائیان و همکاران [۱۴]، در تحقیق خود بر روی ناحیه‌ی ۱ منطقه‌ی دو تهران، پس از مشورت با گروهی از مهندسان عمران و با توجه به مبحث ۶ از مقررات ملی ساختمان [۱۵]، وزن چنین بلوکی را با تخمین‌های تجربی این چنین محاسبه کردند:

- بار زنده = ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع در هر طبقه
- بار مرده = ۸۷۰ کیلوگرم بر متر مربع در هر طبقه

بار ناشی از ساختمان برابر است با مجموع بارهای زنده و مرده‌ی آن. پس از جمع این دو مقدار و ضرب آن در تعداد طبقات (۳ طبقه)، و تبدیل واحد آن به واحد مورد استفاده در نرم‌افزار Slide، نیروی گسترده‌ی ناشی از بار یکنواخت این ساختمان فرضی، مقدار ۳۱/۴۸۸ کیلونیوتن بر مترمربع به دست آمده‌است. این بار یکنواخت در فاصله‌ی ۵ متری از لب دیواره‌ی گود، و به طول ۳۰ متر (طول ساختمان مفروض)، در مدل گود اعمال شده است (شکل ۲).

#### ۶- تحلیل پایداری دیواره‌ی گود

##### ۶-۱- تحلیل با استفاده از ضریب ایمنی قطعی

بر اساس گزارش اداره‌ی بزرگراه‌ها، به منظور پایداری کوتاه مدت دیواره‌ی گود میخ‌گذاری شده، ضریب ایمنی دیواره باید بیش از ۱/۳ باشد [۸]. مشخصات مکانیکی خاک منطقه به گونه‌ای است که از همان عمق دو متری، دیواره ناپایداری نشان داده‌است. در این مقاله هدف بررسی پایداری در عمق ۱۰ متری و ارائه‌ی راهکار برای رسیدن به این عمق

قطری است که عدم گسیختگی کششی میخ هنگام بارگذاری را تضمین نماید. بدین منظور ضریب  $CDR_T$  که نسبت ظرفیت کششی به نیروی کششی وارده بر میخ است مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$CDR_T = \frac{\Phi_T \times R_T}{\gamma \times T_{max}} \quad (2)$$

در اینجا  $\Phi_T$  فاکتور مقاومت کششی میلگرد،  $R_T$  ظرفیت کششی اسمی میلگرد،  $\gamma$  ضریب بارگذاری و  $T_{max}$  بیشینه نیروی کششی وارده بر میخ‌های بارگذاری شده است. ظرفیت کششی میلگرد نیز از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$R_T = A_t \times f_y \quad (3)$$

در اینجا  $A_t$  سطح مقطع میلگرد و  $f_y$  مقاومت اسمی تسلیم میلگرد است. فاکتور خوردگی نیز در انتخاب قطر موثر است ولی امروزه به جای تأثیر دادن فاکتور پیچیده خوردگی زمین بیشتر از فولادهای پوشش‌دار ضد خوردگی استفاده می‌شود.

قطر چال‌های لازم برای نصب میخ‌ها نیز طوری انتخاب می‌شود که پس از قرارگیری میخ در وسط چال حداقل ۲۵ میلی‌متر فضا در هر طرف میخ برای تزریق دوغاب باقی بماند. میزان استحکام اتصال دوغاب به خاک نیز بستگی به جنس خاک و نوع حفاری چال دارد. برای مقاصد طراحی باید مقاومت اتصال برحسب متر از طول چال و طبق رابطه (۴) محاسبه شود:

$$r_{PO} = \pi \times q_u \times D_{DH} \quad (4)$$

در اینجا  $r_{PO}$  مقاومت بیرون‌کشی میخ<sup>۴</sup> برحسب متر یا همان استحکام اتصال،  $q_u$  مقاومت اتصال میخ-دوغاب-خاک برحسب کیلوپاسکال و  $D_{DH}$  قطر چال حفاری است.

برای اطمینان از عدم گسیختگی میخ از محل اتصال دوغاب به خاک باید مشابه رابطه (۲) کنترل لازم به شرح زیر انجام شود:

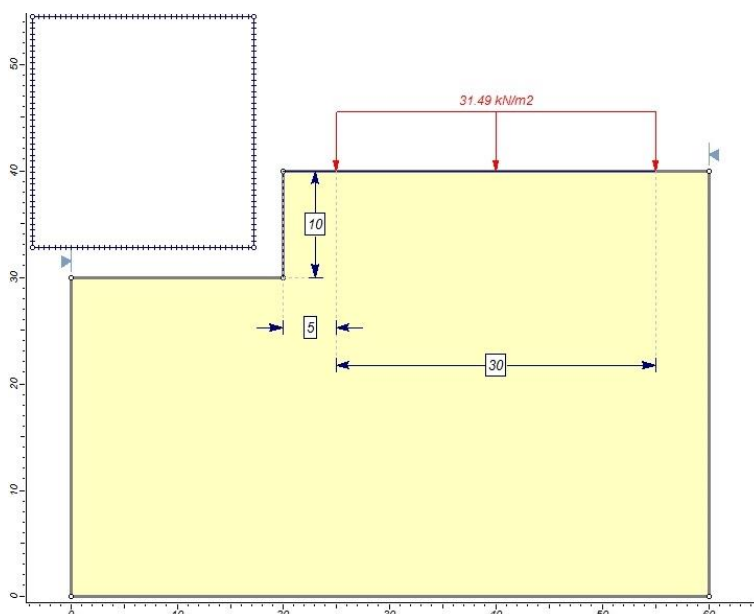
$$CDR_{PO} = \frac{\Phi_{PO} \times R_{PO}}{\gamma \times T_{max}} \geq 1.0 \quad (5)$$

در اینجا  $CDR_{PO}$  نسبت مقاومت اتصال به نیروی کششی وارده بر میخ،  $\Phi_{PO}$  فاکتور مقاومت اتصالی،  $R_{PO} = r_{PO} \times L_P$  ظرفیت اتصال اسمی میلگرد و  $L_P$  طول تحت کشش بیرون‌کشی میلگرد است.

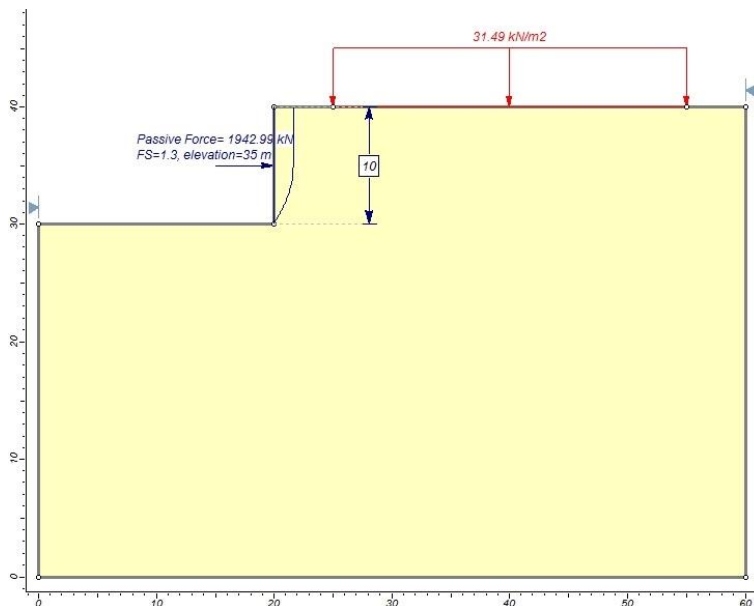
#### ۵- مدلسازی گودبرداری

عمق کف گود، برابر با ۱۹۴۳ کیلونیوتن بوده است (شکل ۳). پس از مشاهده‌ی ناپایداری در عمق ۱۰ متر، برای پایدارسازی دیواره‌ی گود، نگهداری به روش میخ‌گذاری و در شرایط مختلف بررسی شده است.

بوده است. لذا از ابتدای کار مستقیماً بر روی عمق ۱۰ متری کار شده است، تا نتیجه‌ی مطلوب حاصل شود. با استفاده از تحلیل برگشتی، مقدار نیروی مورد نیاز برای پایدارسازی دیواره‌ی گود، در نقطه‌ای واقع در عمقی برابر با نصف



شکل ۲: مدل اولیه‌ی گود به همراه بار مجاور



شکل ۳: گودبرداری در عمق ۱۰ متر و تحلیل برگشتی مربوط به آن

دیواره گود در هر یک از حالتی که در ادامه بررسی شده است، چنانچه قطر ۲۲ میلی‌متر شرط  $CDR_T \geq 1$  را تامین نکرد از قطر میخ بزرگتر و در صورتی که  $CDR$  محاسبه شده خیلی بیشتر از یک بود از قطرهای کمتر استفاده شده است. همچنین کنترل قطر چال نیز برای تامین  $CDR_{PO} \geq 1$  به روشی مشابه انجام شده است. برای محاسبه  $CDR_T$  و

با توجه به نکات مرتبط با طراحی سیستم میخ‌گذاری که پیشتر مطرح شد، در این تحقیق ابتدا از مشخصات میلگرد نوع آج ۴۰۰، با قطر ۲۲ میلی‌متر [۱۶] برای پایدارسازی دیواره گود استفاده شده است. برای تامین حداقل ۲۵ میلی‌متر دوغاب سیمانی دورتادور میخ، قطر چال‌ها نیز معادل ۷۶ میلی‌متر پیشنهاد شده است. هنگام مدل‌سازی

مقاومت بیرون‌کشی میخ‌ها محاسبه شده است. مشخصات نهایی میخ‌های ۲۲ میلی‌متری که در نرم‌افزار Slide وارد شده در جدول ۲ آمده است.

با تغییر در مشخصات گود (شیب دیواره‌ی گود) و سیستم میخ‌گذاری (فاصله افقی میخ‌ها، فاصله عمودی میخ‌ها، طول و قطر میخ‌ها و قطر چال)، ضرایب ایمنی برای هر حالت محاسبه شده است. در حالات شیب مختلف، اعمال شیب به میزان بیش از ۳ متر (افقی) به ۱۰ متر (قائم)، به دلیل نیاز به فضای بیش از حد، در نظر گرفته نشده است. با توجه به مقدار ضریب ایمنی مطلوب (۱/۳) و بهینه‌کردن گود و میخ‌گذاری، ۵ حالت مطلوب و بهینه برای اجرای گودبرداری پیشنهاد شده است (جدول ۳).

CDR<sub>PO</sub> به پارامترهای  $T_{max}$  و  $L_P$  نیاز است که پس از مدلسازی دیواره میخ‌گذاری شده و براساس سطح لغزش حاصله به روش بیشاپ ساده شده برای میخی که بحرانی‌ترین شرایط بارگذاری را دارد محاسبه شده‌اند. دیگر پارامترهای مورد نیاز برای محاسبات نیز از گزارش اداره بزرگراه‌ها [۸] و کاتالوگ شرکت سازنده میلگردها [۱۶] اقتباس شده است. با توجه به گزارش اداره‌ی بزرگراه‌های فدرال در مورد میخ‌گذاری [۸]، میانگین مقاومت اتصال<sup>۵</sup> دوغاب به یک خاک شن و ماسه‌ای مشابه گودبرداری فعلی و با فرض حفاری چرخشی چال‌ها ۱۴۱ کیلوپاسکال و ضریب ایمنی برای استحکام اتصال ۲ است. پس از تقسیم استحکام اتصال بر ضریب ایمنی مربوط به آن و استفاده از رابطه (۴)

جدول ۲: مشخصات میخ‌های ۲۲ میلی‌متری به کارگرفته شده برای مدل کردن اولیه دیواره گود [۱۶]

نوع میخ	قطر میخ (mm)	قطر چال (mm)	سطح مقطع موثر میخ (mm <sup>2</sup> )	مقاومت کششی میخ (MPa)	ظرفیت کششی موثر میخ (kN)	مقاومت اتصال دوغاب به خاک (kPa)	مقاومت اتصال موثر (kN/m)
میلگرد آجدار جنافی (آج ۴۰۰)	۲۲	۷۶	۳۴۶	۴۰۰	۷۷	۱۴۱	۱۶/۸

جدول ۳: پنج شیوه‌ی گودبرداری پیشنهادی با ضریب ایمنی، شیب و مشخصات میخ‌گذاری بهینه

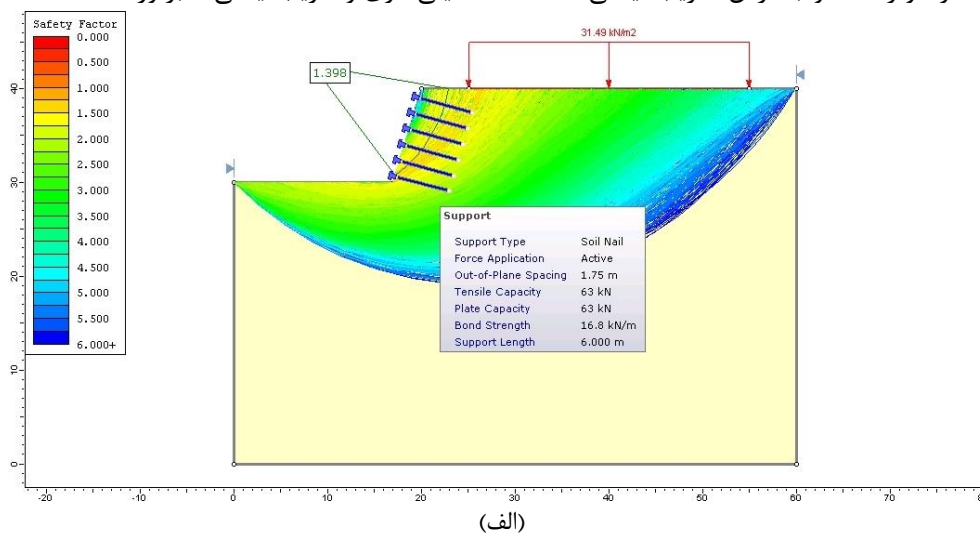
شماره	عمق (m)	شیب دیواره نسبت به افق (degree)	نیروی مورد نیاز در تحلیل برگشتی (kN)	طول میخ (m)	قطر میخ (mm)	قطر چال (mm)	فاصله افقی میخ‌ها (m)	فاصله عمودی میخ‌ها (m)	دیواره (kg)	میلگرد مورد نیاز در هر متر مربع	روش بیشاپ ساده شده	FS حداقل دیواره میخ‌گذاری شده به روش جانپو ساده شده	CDR <sub>T</sub>	CDR <sub>PO</sub>
۱	۱۰	۹۰	۱۹۴۳	۶	۲۰	۸۹	۱/۲۵	۱/۲۵	۹/۴۸	۱/۳۵	روش جانپو ساده شده	۱/۳۲	۱/۲۵	۱/۰۶
۲	۱۰	۹۰	۱۹۴۳	۷/۵	۲۲	۷۶	۱/۵	۱/۵	۹/۹۳	۱/۳۶	روش جانپو ساده شده	۱/۳۴	۱/۵	۱/۱۲
۳	۱۰	۸۴/۳	۱۳۱۵	۷	۲۰	۷۶	۱/۵	۱/۵	۷/۶۸	۱/۳۳	روش جانپو ساده شده	۱/۳۶	۱/۵	۱/۱۲
۴	۱۰	۷۸/۷	۸۹۸	۷	۲۲	۷۶	۱/۷۵	۱/۷۵	۶/۸۱	۱/۳۶	روش جانپو ساده شده	۱/۳۵	۱/۷۵	۱/۰۴
۵	۱۰	۷۳/۳	۲۹۰	۶	۲۰	۷۶	۱/۷۵	۱/۷۵	۴/۸۴	۱/۴۰	روش جانپو ساده شده	۱/۳۳	۱/۷۵	۱/۰۸

میزان میلگرد مصرفی، حاصل تقسیم طول میخ به حاصلضرب فاصله‌ی افقی و عمودی میخ‌ها در وزن یک متر میلگرد ضرب شده است. انتخاب هریک از این پنج روش بستگی به نظر کارشناس مربوطه و بررسی از جهات مختلف از قبیل مسائل اقتصادی و اجرایی دارد. با توجه به جدول ۳ بهینه‌ترین شیوه‌ی گودبرداری از لحاظ ضریب ایمنی مناسب

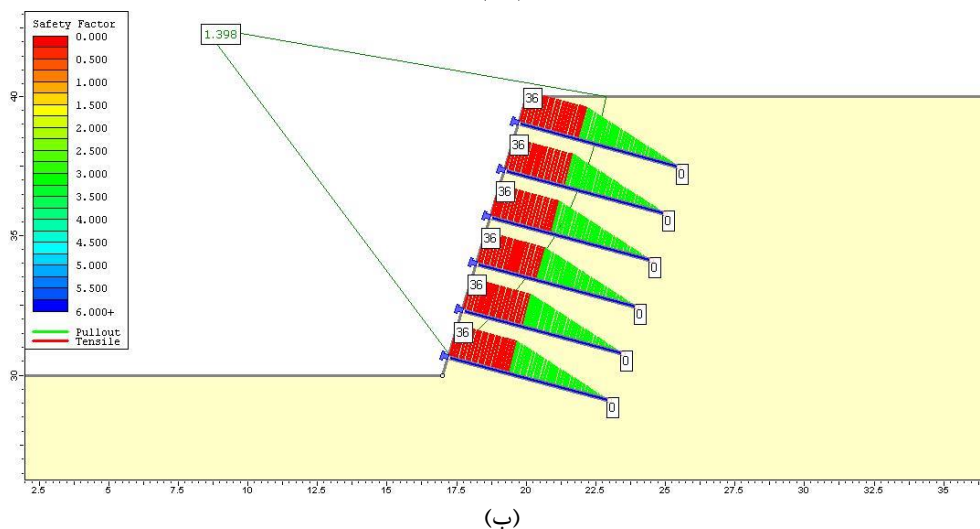
در حالت اول و دوم دیواره قائم، و در حالت‌های سوم و چهارم و پنجم به ترتیب شیب‌های ۸۴/۳ درجه (۱ متر افقی در ۱۰ متر قائم)، ۷۸/۷ درجه (دو متر افقی در ۱۰ متر قائم) و ۷۳/۳ درجه (سه متر افقی در ۱۰ متر قائم) اجرا شده است. برای هر پنج حالت گودبرداری، میزان میلگرد مورد نیاز برای هر مترمربع برحسب کیلوگرم آورده شده است. برای محاسبه

برآورد شده است. مقاومت اتصال میخ به صفحه فولادی دهانه چال<sup>۶</sup> دیگر پارامتر ورودی نرم‌افزار است که در صورت عدم انجام آزمایش معمولاً معادل ظرفیت کششی میخ‌ها برآورد می‌شود. همچنین مقاومت اتصال دوغاب به خاک ۱۶/۸ کیلونیوتن بر متر به کمک رابطه (۴) و با فرض چال ۷۶ میلی‌متری و ضریب ایمنی ۲ برآورد شده است.

و مصرف میلگرد، گودبرداری در حالت شماره ۵ بوده است (شکل ۴). در شکل ۴-الف مشخصات وارد شده در نرم‌افزار برای سیستم میخ‌گذاری حالت شماره ۵ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود ظرفیت کششی میخ‌ها ۶۳ کیلونیوتن است که طبق رابطه (۳) برای میخی به قطر ۲۰ میلی‌متر (قطر موثر ۱۹) و با فرض ضریب ایمنی ۱/۸



(الف)



(ب)

شکل ۴: نتیجه تحلیل قطعی گودبرداری حالت شماره ۵: الف- ضریب ایمنی به روش بیشاپ، ب- توزیع بار بر روی میخ‌ها ( $T_{max}=36kN$ )

هر پارامتر در ضریب تغییرات مربوط به آن پارامتر ضرب می‌شود تا انحراف معیار به دست آید.

برای محاسبه ضریب ایمنی گودبرداری، خصوصیات خاک ( $c$ ،  $\phi$  و  $\gamma$ )، و همچنین مقاومت اتصال خاک به میخ غیر قطعی فرض گردید. ضریب تغییرات پارامترهای خاک با توجه به تجربیات آزمایشگاهی [۱۷] و ضریب تغییرات مقاومت اتصال خاک به میخ نیز با توجه به گزارش اداره بزرگراه‌ها [۸] مطابق جدول ۴ انتخاب گردید. با توجه به

## ۲-۶- اجرای تحلیل حساسیت و تحلیل احتمالی

یکی از موثرترین ابزارها به‌نگام اجرای تحلیل حساسیت و تحلیل احتمالی در مسایل ژئوتکنیکی، استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو [۱۳] است. در روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای محاسبه ضریب ایمنی به‌جای استفاده از مقدار قطعی یک پارامتر خاک، از مقادیر تصادفی استفاده می‌شود که از بازه تغییرات مربوط به آن پارامتر انتخاب شده‌اند. برای تعریف این بازه تغییرات، میانگین آزمایشگاهی



شکل ۵ نمودار حساسیت ضریب ایمنی دیواره در حالت شماره ۵ جدول ۳ را نسبت به ویژگی‌های خاک در روش بیشاپ ساده‌شده نشان داده‌است. با توجه به شکل، ضریب ایمنی دیواره نسبت به ویژگی‌های خاک حساسیت نشان می‌دهد که این امر دلیلی بر ضرورت انجام تحلیل احتمالی بوده است. مطابق شکل ۵، تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و وزن مخصوص خاک تأثیر بیشتری بر مقدار ضریب ایمنی دیواره دارد و بنابراین در تعیین مقدار این دو پارامتر دقت بیشتری باید صرف شود.

جدول ۴ میزان انحراف معیار هریک از مشخصات خاک، با استفاده از رابطه‌ی (۶) به دست آمده‌است.

$$\sigma = V \times \mu \quad (6)$$

که در این رابطه،  $\sigma$ : انحراف معیار،  $V$ : ضریب تغییرات و  $\mu$ : میانگین است [۱۷].

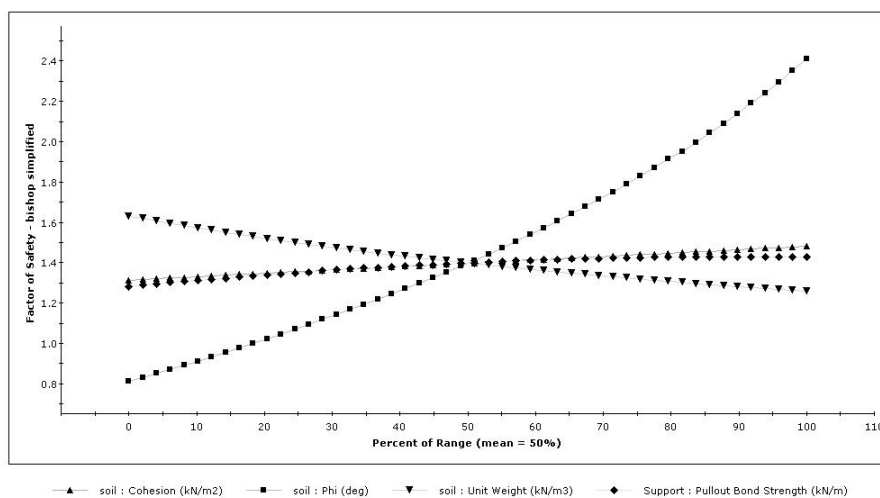
برای اجرای تحلیل حساسیت، از توزیع نرمال استفاده شده و مقادیر فاصله نسبی از حداقل و حداکثر مقدار هر پارامتر توسط نرم‌افزار با توجه به نوع توزیع، وارد شده است (جدول ۵).

جدول ۴: ضرایب تغییرات مربوط به ویژگی‌های خاک

ویژگی	ضریب تغییرات، $V = \frac{\sigma}{\mu}$ (%)
چسبندگی $c$	۲۰
زاویه‌ی اصطکاک داخلی $\phi$	۱۳
وزن مخصوص $\gamma$	۷
مقاومت اتصال خاک به میخ	۹

جدول ۵: خصوصیات آماری پارامترهای تصادفی و متغیر

نام ویژگی	توزیع	میانگین، $\mu$	انحراف معیار $\sigma$	فاصله نسبی از حداقل مقدار پارامتر	فاصله نسبی از حداکثر مقدار پارامتر
چسبندگی (کیلو نیوتن بر متر مربع)	نرمال	۳/۹۲۴	۰/۷۸۴	۲/۳۵۲	۲/۳۵۲
زاویه‌ی اصطکاک داخلی (درجه)	نرمال	۴۲	۵/۴۶	۱۶/۳۸	۱۶/۳۸
وزن مخصوص (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	نرمال	۲۰/۲	۱/۴۱۴	۴/۲۴۲	۴/۲۴۲
مقاومت اتصال خاک به میخ (کیلو نیوتن بر مترمربع)	نرمال	۱۴۱	۱۲/۶۹	۳۸/۰۷	۳۸/۰۷



شکل ۵: نمودارهای حساسیت ضریب ایمنی دیواره به مشخصات مکانیکی خاک

بررسی قرار می‌گیرد. احتمال گسیختگی (PF) طبق رابطه (۷) تعریف می‌شود [۱۷]:

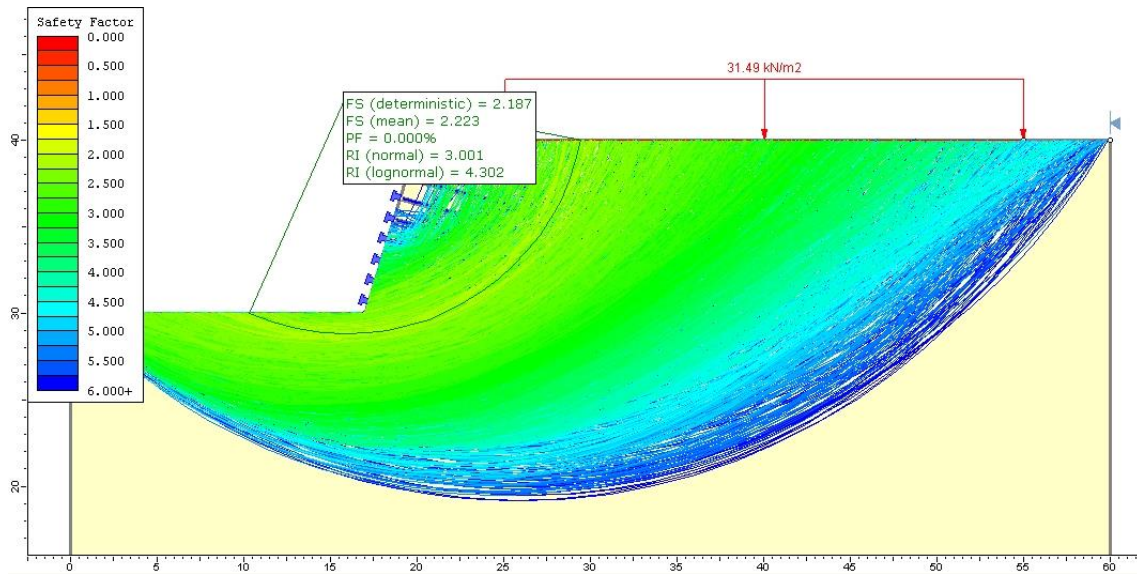
در تحلیل احتمالی علاوه بر ضریب ایمنی (FS) دو پارامتر احتمال گسیختگی (PF) و شاخص اعتماد (RI) نیز مورد

گرفته‌است. لازم به ذکر است که از اجرای شیب با بیش از ۳ متر جابجایی افقی در ۱۰ متر قائم، به دلیل نیاز به فضای بیش از حد، خودداری شده است. در هر یک از حالت‌های پیشنهادی، مقادیر شاخص اعتماد و احتمال گسیختگی به دو روش بیشاپ ساده‌شده و جانبو ساده‌شده به دست آمده‌است. در اجرای تحلیل احتمالی با استفاده از نرم‌افزار Slide، از روش نمونه‌برداری مونت کارلو با تعداد نمونه‌های تصادفی معادل ۳۵۰۰۰ استفاده شده است. افزایش تعداد نمونه بیش از ۳۵۰۰۰ تاثیری بر احتمال شکست و شاخص اعتماد نداشته‌است.

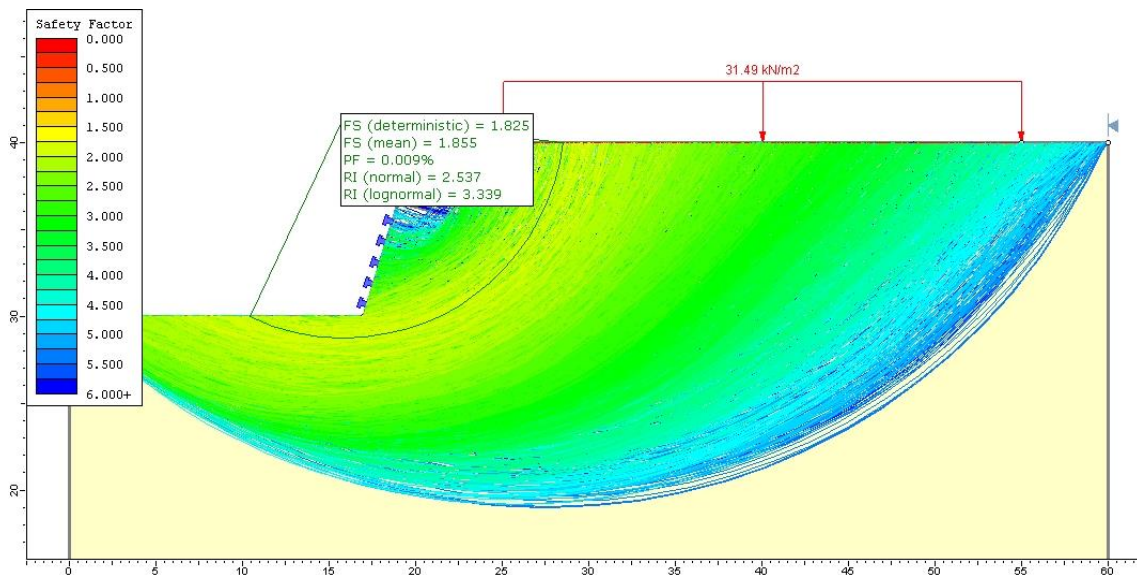
در جدول ۶ نتایج حاصل از تحلیل احتمالی به دو روش بیشاپ ساده و جانبو ساده برای ۹ حالت مختلف پیشنهاد شده (پنج حالت مشابه با تحلیل قطعی از شماره ۱ تا ۵ و چهار حالت بهینه و جدید که احتمال گسیختگی آن‌ها تقریباً برابر با صفر است از شماره ۶ تا ۹) آورده شده است. طبق جدول ۶، از بین ۴ روش پیشنهادی جدید کمترین مقدار مصرف میلگرد در روش شماره ۶ بوده‌است (شکل ۶) و نیز تنها در روش شماره ۹ گودبرداری به روش قائم اجرا شده است (شکل ۷).

جدول ۶: نتایج تحلیل احتمالی دو روش به دست آمده در تحلیل قطعی و نیز حالات پیشنهادی مطلوب و بهینه دیگر

میلگرد مورد نیاز در هر متر مربع دیواره (kg)	حداقل پارامترهای تحلیل احتمالی در مطلوب‌ترین حالت نگهداری						فاصله عمودی میخ‌ها (m)	فاصله افقی میخ‌ها (m)	قطر چال (mm)	قطر میخ (mm)	طول میخ (m)	شیب دیواره نسبت به افق (degree)	عمق (m)	شماره
	روش جانبو			روش بیشاپ										
	RI (normal)	(%) PF	FS میانگین	RI (normal)	(%) PF	FS میانگین								
۹/۴۸	۱/۳۹	۶/۵۰	۱/۳۴	۱/۴۷	۵/۳۱	۱/۳۷	۱/۲۵	۱/۲۵	۸۹	۲۰	۶	۹۰	۱۰	۱
۹/۹۳	۱/۴۵	۵/۶۲	۱/۳۶	۱/۵۱	۴/۷۷	۱/۳۹	۱/۵	۱/۵	۷۶	۲۲	۷/۵	۹۰	۱۰	۲
۷/۶۸	۱/۵۳	۴/۵۵	۱/۳۹	۱/۴۱	۶/۰۸	۱/۳۵	۱/۵	۱/۵	۷۶	۲۰	۷	۸۴/۳	۱۰	۳
۶/۸۱	۱/۴۹	۵/۰۲	۱/۳۷	۱/۵۲	۴/۶۳	۱/۳۹	۱/۷۵	۱/۷۵	۷۶	۲۲	۷	۷۸/۷	۱۰	۴
۴/۸۴	۱/۴۴	۵/۷۱	۱/۳۵	۱/۶۴	۳/۱۹	۱/۴۲	۱/۷۵	۱/۷۵	۷۶	۲۰	۶	۷۳/۳	۱۰	۵
۱۴/۳۰	۲/۵۴	۰/۰۰۹	۱/۸۶	۳	۰	۲/۲۲	۱/۲۵	۱/۲۵	۱۰۲	۲۲	۷/۵	۷۳/۳	۱۰	۶
۱۸/۴۷	۲/۶۰	۰	۱/۹۰	۳/۰۷	۰	۲/۲۹	۱/۱۰	۱/۱۰	۸۹	۲۲	۷/۵	۷۳/۳	۱۰	۷
۲۰/۸۶	۲/۶۴	۰	۱/۹۳	۲/۹۹	۰	۲/۳۲	۱	۱	۱۰۲	۲۲	۷	۸۴/۳	۱۰	۸
۲۸/۸۸	۲/۶۶	۰	۱/۹۵	۳/۱۲	۰	۲/۳۵	۱	۱	۸۹	۲۵	۷/۵	۹۰	۱۰	۹



(الف)



(ب)

شکل ۶: نتایج تحلیل احتمالاتی گودبرداری حالت شماره ۶ به روش‌های: الف- بیشاپ ساده‌شده، ب- جانبو ساده‌شده

شروط تحلیل پایداری احتمالاتی بطور نسبی برآورده شود، مشخصات سیستم میخ‌گذاری بطور قابل ملاحظه‌ای تقویت شده است. انتخاب نهایی هر یک از حالت‌های موجود در جدول ۶، همانگونه که قبلاً هم اشاره شد، بستگی به ملاحظات دیگری نظیر مسائل اقتصادی و اجرایی نیز دارد.

#### ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش تعادل حدی و نرم‌افزار Slide، ابتدا پایداری خاک منطقه‌ای در حاشیه‌ی شهر قائن، برای گودبرداری در عمق ۱۰ متر بررسی شده است که با

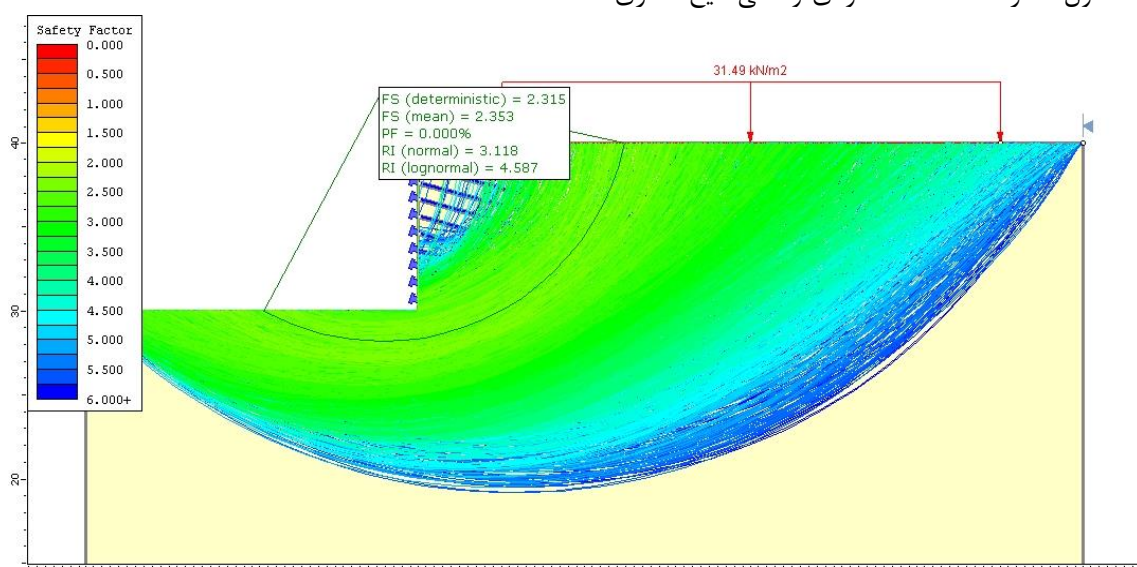
برای حالت‌های ۱ تا ۵ کنترل‌های مربوط به گسیختگی‌های کششی و بیرون‌کشی میخ‌ها قبلاً در جدول ۳ انجام شده است. در رابطه با حالت‌های ۶ تا ۹ نیز نیازی به انجام این کنترل‌ها نیست زیرا در این حالت‌ها، سیستم میخ‌گذاری نسبت به حالت‌های ۱ تا ۵ به لحاظ قطر میخ، چال و فواصل میخ‌ها تقویت شده است.

با نگاهی به جدول‌های ۳ و ۶ ملاحظه می‌شود که در هر دو حالت تحلیل قطعی و احتمالاتی کمترین مصرف میلگرد مربوط به دیواره‌های با کمترین شیب طراحی شده (۳ متر افقی در ۱۰ متر قائم) است که نتیجه‌ای کاملاً منطقی است. همچنین مشاهده می‌شود که در حالت‌های ۶ تا ۹ برای اینکه

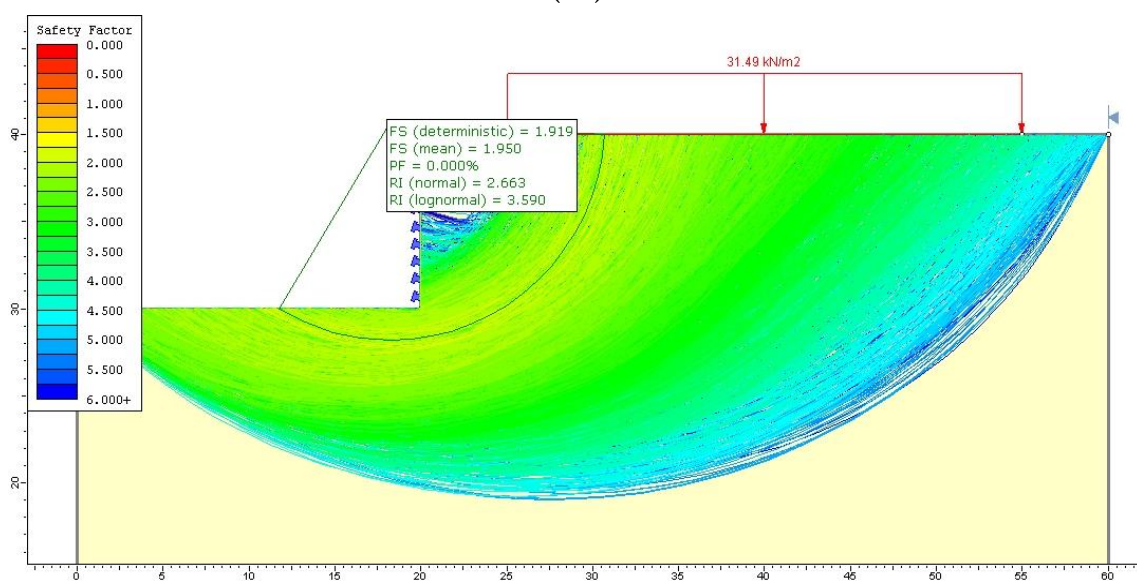
بوده‌است. در روش تحلیل قطعی، ۵ روش گودبرداری مختلف همراه با نگهداری پیشنهاد گردیده‌است. در روش تحلیل احتمالی نیز این ۵ روش به‌علاوه‌ی ۴ روش بهینه‌ی دیگر با احتمال گسیختگی صفر پیشنهاد شده‌است. استفاده از هر یک از این روش‌ها بستگی به میزان دقت و پایداری مورد نظر در پروژه و نیز نظر کارشناس متخصص و مسائل اقتصادی و اجرایی دارد. نتایج این مقاله الگوی تقریباً کاملی برای گودبرداری در منطقه‌ی مورد مطالعه ارائه می‌دهد، که می‌تواند برای اجرای گودبرداری در این منطقه و مناطق مجاور به کار رود.

توجه به ناپایداری دیواره از روش تحلیل برگشتی برای محاسبه مقدار نیروی مورد نیاز جهت رسیدن به ضریب ایمنی مجاز ۱/۳ استفاده شده‌است.

با توجه به مقدار نیروی محاسبه‌شده در تحلیل برگشتی، از ترکیبی از روش‌های میخ‌گذاری و تغییر شیب دیواره برای رسیدن به پایداری مناسب گود استفاده شده‌است. در این راستا، حالت‌های مختلفی از ترکیب میخ‌گذاری با اصلاح شیب دیواره مورد بررسی قرار گرفته که پیشنهاد این روش‌ها بر مبنای ایجاد کمترین شیب (نزدیکی دیواره به زاویه‌ی قائم) و نیز بهینه‌سازی مشخصات میخ‌ها از لحاظ طول، قطر، فاصله عمودی و افقی میخ‌گذاری



(الف)



(ب)

شکل ۷: نتایج تحلیل احتمالاتی گودبرداری حالت شماره ۹ به روش‌های: الف- بیشاپ ساده‌شده، ب- جانبو ساده‌شده

## مراجع

- [10] Eberhardt, E. (2003). Rock slope stability analysis utilization of advanced numerical techniques. Earth and Ocean Sciences at UBC, Vancouver, Canada.
- [11] Duncan, J.M. (1996). Soil slope stability Analysis. In Turner&Schaster (eds), Landslides: Investigation and Mitigation (Special Report 247), National Academy Press, Washington D.C., 337-37.
- [12] Duncan, C.W., and Christopher, W.M. (2005). Rock slope engineering. Civil and mining 4th edition, Taylor & Francis e-Library.
- [13] Rocscience Inc. (2013). Manual of the 2D limit equilibrium analysis software, Slide 6.0., Website address: <http://www.rocscience.com>.
- [14] Zeaiean Firouzabadi, P., Ghanavati, E., & Bayatisedaghat, Z. (2012). Impact of urban constructions weight on instability, case study (district 1 of region 2 municipality of Tehran). Journal of Applied Research in Geographical Sciences. 12(24):47-63 (In Persian).
- [15] Office of National Building Regulations, Ministry of Roads & Urban Development. (2009). Iran's national building regulations, Section VI, loads on buildings (In Persian).
- [16] Esfahan steel company. (2013). Steel products catalogue, website: <http://www.esfahansteel.com/Catalog1>. (In Persian).
- [17] Duncan, J.M. (2000). Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126:307-316.
- [18] SivakumarBabu, G.L., Srivastava, A., & Sahana, V. (2007). Analysis of stability of earthen dams in kachchh region, Gujarat, India. Engineering Geology 94:123-136.
- [19] USACE. (1997). Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning. U.S Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
- [1] Fathi, A. (2010). Study of the suitable excavation methods in coarse graine alluvial of Tehran. MSc Thesis, Islamic Azad University, Science and Research Branch (In Persian).
- [2] Planning & Development Division, Water & Wastewater Company, Ministry of Energy. (2011). Guidelines for safety of earth excavation. (In Persian).
- [3] Maleki, M., Baei, B., & Beiti, M. (2011). Excavation-adjacent structure interaction effect on excavation analysis in urban area. Journal of civil engineering, Vol. 21(2):25-40 (In Persian).
- [4] Bishop, A. W. (1955). The use of slip circle in the stability analysis of earth slopes. Geotechnique, 5, 7-17.
- [5] Janbu, N. (1954). Application of composite slip circles for stability analysis. In: Proc, fourth European Conference on stability of earth slopes, Vol.3, 43-49.
- [6] Razeghi, H.R., and Aghaei Araei, A. (2010). Stability analysis of access road slopes around the milad tower by numerical modeling and artificial neural networks. Vol. 3 (2):649-676 (In Persian).
- [7] Mahmoudi, M., Barkhordari K., & Vafaeian M. (2010). Study of the common stabilization methods of excavations in urban area. Proceedings of the Fifth National Conference on Civil Engineering, May 4-6, Mashhad, Iran (In Persian).
- [8] FHWA. (2003). Soil nail walls, geotechnical engineering circular no.7, Report Number FHWA0-IF-03-017. US department of transportation, Federal Highway Administration.
- [9] Technical and soil mechanics laboratory company, Ministry of Roads & Urban Development. (2009). Report of soil mechanic studies for construction site of technical and vocational institute of Qaen. (In Persian).

<sup>5</sup> Bond strength<sup>6</sup> Plate capacity<sup>7</sup> USACE<sup>1</sup> Standard Penetration Test, SPT.<sup>2</sup> FHWA<sup>3</sup> Capacity-to-demand ratio<sup>4</sup> Pullout resistance