



## تحقیق در مورد مسائل پایداری و ریزش گودبرداری های ساختمانی در مناطق شهری

جلیل هادی<sup>۱\*</sup>، محمد کشاورز بخشایش<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان

۲- استادیار گروه علوم پایه، دانشکده مهندسی، دانشگاه پیام نور واحد زنجان

\*jalilhadi127@yahoo.com

ارسال: آبان ماه ۱۴۰۲ پذیرش: آذر ماه ۱۴۰۲

### چکیده

عملیات گودبرداری یکی از فعالیت های پر خطر در ساختمان سازی به حساب می آید که معمولاً به منظورهای مختلف مانند رسیدن به سطح تراز مناسب خاک برای اجرای فونداسیون، یا احداث طبقات زیرین انجام می شود. امروزه گزارش های متعددی از خسارات مالی و بعضاً جانی در شهرهای بزرگ کشور منتشر می شود، که ناشی از عدم توجه به پایداری دیواره ی گود و نیز نگهداری مورد نیاز آن است. در این مقاله با استفاده از نرم افزار Slide، ابتدا به بررسی پایداری دیواره ی گود در یکی از نقاط حاشیه ای شهر قائن پرداخته شده و سپس بررسی و تحلیل نگهداری دیواره ی گود با استفاده از روش میخ گذاری 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 منطقه مورد نظر برای گودبرداری ناپایدار است و به کارگیری روش میخ گذاری تا عمق مورد مطالعه ۱۰ متر و شیبدار کردن دیواره های 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 دیواره های گودبرداری ارائه می کند که برای اجرای گودبرداری در مناطق همجوار نیز مفید خواهد بود.

کلید واژه ها: تحلیل پایداری احتمالاتی شیب، تحلیل حساسیت، تحلیل برگشتی، نرم افزار Slide، میخ گذاری.

### ۱- مقدمه

با توجه به روند رو به رشد جمعیت شهرها بحث کاربری اراضی و ساخت و ساز در شهرها و نیز منطقه های در حال توسعه بیش از پیش مورد توجه است. یکی از ابتدایی ترین مسائل مورد بحث در این ساخت و سازها، پایداری گودبرداری و نگهداری دیواره ی گود است [۱]. گودبرداری عبارت است از حفر کانال و ایجاد فضاهای مناسب در زمین جهت احداث یک سازه مشخص (پی کنی) و یا لوله گذاری برای خدمات مختلفی چون خطوط انتقال گاز یا مواد در صنایع مختلف که به طور عمده با خاک برداری یا سنگ برداری و یا ترکیبی از این دو و نیز تخلیه خاک و سنگ از محل، همراه است [۲]. افزایش روزافزون ساخت و ساز و به دنبال آن خبرهای ناراحت کننده ی خسارات و صدمات ناشی از عدم توجه به پایداری گود و نگهداری مناسب آن، پژوهش در این زمینه را ضروری می کند [۳].

در ابتدای این تحقیق با استفاده از روش های تعادل حدی، به بررسی پایداری دیواره ی گود در عمق ۱۰ متری زمین مورد مطالعه پرداخته شده است. تحلیل های پایداری شیب معمولاً با روش های تعادل حدی صورت می گیرد، که این روش ها غالباً قبل از

اختراع کامپیوتر توسعه داده شده اند. در روش های تحلیل به روش تعادل حدی موقعیت سطح لغزش بحرانی و مقدار ضریب پایداری حداقل در تعدادی سطح لغزش محتمل، بررسی می شوند. از جمله روش های تعادل حدی روش های ارائه شده 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 می گیرد 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 می شود. اغلب این مهارها به دلیل اتصال به عضو غیر سازه ای و نیز پی غیر اصولی آنها، هیچ گونه عملکرد سازه ای در راستای پایداری 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 روش میخ گذاری و محاسبه ی ضرایب ایمنی با استفاده از روش تحلیل قطعی و احتمالاتی در شرایط مختلف، پرداخته شده است. میخ گذاری 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 می شود. دوغاب تنش را از زمین به میخ منتقل کرده و نیز از میخ در برابر خوردگی محافظت می کند. یکی از اولین کاربردهای میخ گذاری در سال ۱۹۷۲ برای یک پروژه ی عریض سازی خط آهن در منطقه ای 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 دهه ی ۱۹۶۰ و اوایل ۱۹۷۰ این روش به کار گرفته شد. کاربرد دیوارهای میخ گذاری شده در خاک در آمریکا طی دهه ی گذشته افزایش یافته است، زیرا ثابت شده که دیوارهای میخ گذاری شده از نظر فنی، عملی هستند و در بسیاری از موارد جایگزین اقتصادی دیوارهای حائل هستند [۸].

در این پژوهش امکان گودبرداری در منطقه مورد نظر و در عمق مفروض ۱۰ متری، در شرایط بار مجاور فرضی و حضور و عدم حضور سیستم نگهدارنده با استفاده از تحلیل های بازگشتی و قطعی و احتمالی، بررسی شده است. نتایج این تحقیق ضمن ارائه الگویی برای تحلیل تقریباً جامع یک گودبرداری و نگهداری آن با قطعیت بالا، برای اجرای گودبرداری در مناطق همجوار نیز مفید خواهد بود. در زمینه پایداری و ریزش گودبرداری های ساختمانی در مناطق شهری از سال ۲۰۱۰ به بعد، چند جنبه مهم و روندهای مهم وجود دارند که می توانید آنها را در نظر بگیرید:

۱- افزایش استفاده از انرژی های تجدیدپذیر: در سال های اخیر، استفاده از انرژی های تجدیدپذیر برای تأمین انرژی ترانسه های عمیق شهری در حال افزایش است. استفاده از پنل های خورشیدی، توربین های بادی و سایر منابع تجدیدپذیر می تواند به کاهش انحراف از سهم انرژی های فسیلی و کاهش تولید گازهای گلخانه ای از طریق انتشار دی اکسید کربن کمک کند.

۲- بهینه سازی و پیشرفت در ساخت و ساز: با بهبود فناوری های ساخت و ساز، روش های جدیدی برای ساخت ترانسه های عمیق و پایدار معرفی شده است. استفاده از مصالح پایدار، روش های جدید ساخت و ساز و استفاده از فناوری هوشمند می تواند به کاهش هزینه ها و بهبود عملکرد ترانسه های عمیق کمک کند.

۳- استفاده از سیستم های حمل و نقل عمومی: توسعه سیستم های حمل و نقل عمومی و تشویق به استفاده از آنها می تواند به بهبود پایداری ترانسه های عمیق شهری کمک کند. این شامل بازسازی و بهبود ایستگاه های حمل و نقل عمومی، مقررات برای افزایش تردد کامیون و توسعه سیستم اتوبوسرانی و قطار شهری است.

۴- مدیریت هوشمند ترانسه ها: استفاده از فناوری هوشمند و سیستم های مدیریت ترافیک می تواند به بهبود عملکرد ترانسه های عمیق و کاهش ترافیک کمک کند.

## ۲- ویژگی های ژئوتکنیکی منطقه ی مورد مطالعه

زمین مورد مطالعه در شهر قائن در استان خراسان جنوبی واقع شده است و طول و عرض جغرافیایی تقریبی نقطه مرکزی آن به ترتیب  $33^{\circ}41'20''$  شمالی است (شکل ۱). به منظور تعیین نوع و ضخامت لایه های خاک، عملیات حفاری گمانه های

ماشینی با استفاده از دستگاه حفاری به روش ضربه ای و گمانه های دستی با استفاده از مقنی و سه پایه انجام گرفته است. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش نفوذ استاندارد خاک دانه ای محل گمانه ها از نظر تراکم نسبی در رده خیلی متراکم قرار داشته به طوری که تراکم نسبی آن بیش از ۸۵ درصد بوده است. خاک محل مورد مطالعه عمدتاً دانه ای بوده و در رده گروه GC (شن رس دار همراه با ماسه)، GM (شن لای دار همراه با ماسه)، GM-GP (شن با دانه بندی بد همراه با لای و ماسه) و GM-GC (شن رس دار و لای دار همراه با ماسه) تشخیص داده شده است. خصوصیات مکانیکی خاک منطقه در جدول ۱ آورده شده است. در حفاری های انجام شده، انتهای عمق آنها به سطح آب زیرزمینی برخورد نکرده و لذا در این تحقیق از تأثیر آب زیرزمینی چشم پوشی شده است [۹]. توسعه روزافزون ساخت و ساز به سمت مناطق با تراکم کم ساختمانی و حواشی شهر و نیز رونق احتمالی منطقه با احداث آموزشگاه و نیز ارگانهای دیگر، اجرای گودبرداری های دیگر در حواشی منطقه مورد مطالعه را در آینده ای نزدیک محتمل می کند، که این دلیلی بر ضرورت انجام این تحقیق در این منطقه بوده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد نظر برای احداث آموزشگاه فنی قائن

جدول ۱- ویژگیهای مکانیکی خاک منطقه

ویژگی	مقدار میانگین
چسبندگی C (کیلو نیوتن بر مترمربع)	۳/۹
زاویه اصطکاک داخلی $\phi$ (درجه)	۴۲
وزن مخصوص $\gamma$ (کیلو نیوتن بر مترمکعب)	۲۰/۲

### ۳- روشهای تحلیل پایداری گود

#### ۳-۱- روش تعادل حدی و مور-کولمب

تکنیکهای تعادل حدی به صورت معمول در تحلیل زمین لغزش ها که حرکات با جابجایی ها در سطوح شکستگی مشخص رخ می دهند، استفاده می شود. در خاک و سنگ های بسیار سست و هوازده عمدتاً شکست دایره ای یا چرخشی رخ می دهد. در روش تعادل حدی، خاک محل مورد نظر به قطعاتی تقسیم شده و ضریب ایمنی در طول آن ها محاسبه می شود. روشهای متعددی برای تحلیل تعادل حدی وجود دارد که تفاوت آن ها در فرضیات و نیز نحوه قرارگیری و محاسبه نیروها است. این تحلیل ها می تواند به سرعت و به خوبی اجرا شود [۱۰]. در این تحقیق از دو روش جانبو ساده شده و بیشاپ ساده شده استفاده شده است که روشهایی صحیح برای تحلیل شکستگی سطوح دایره ای هستند [۱۱]. برای همه نوع شکستگی برشی، یک توده ی خاک یا سنگ می تواند یک ماده ی مور کولمب فرض شود. مقاومت برشی مور کولمب،  $(\tau)$  برای یک تنش نرمال داده شده،  $(\sigma)$  با جانشینی مقادیر چسبندگی اشباع  $(c')$  و زاویه اصطکاک داخلی  $(\phi')$  در رابطه (۱) به دست می آید:

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

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

### ۲-۲- تحلیل حساسیت

در واقعیت، هر پارامتر دامنه ای از مقادیر را دارد. روش های 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 بازه ای بین کمینه و بیشینه مقادیر آن، تعیین می شود. در بررسی میزان حساسیت هر پارامتر نسبت به ضریب ایمنی، پارامترهای دیگر مقادیر ثابت میانگین خود را می گیرند [۱۲].

### ۳-۳- تحلیل احتمالی

تحلیل احتمالی اولین بار سال ۱۹۴۰ در زمینه های مهندسی ساختمان و هوانوردی، برای قابلیت اطمینان سیستمهای پیچیده به کار رفت. از جمله اولین استفاده های این روش، به کارگیری آن در مهندسی ژئوتکنیک و در طراحی معدن بوده است. هر پارامتر غیر قطعی، در دامنه ای از مقادیر تعیین می شود که به وسیله تابع چگالی احتمال تعریف می شود. 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 نمونه برداری برای تحلیل احتمالی مشخص می کند که چگونه از توزیع متغیرهای تصادفی که تعریف نموده ایم، داده های تصادفی انتخاب و نمونه گیری شود. یکی از این روش ها، روش نمونه برداری مونت کارلو است که از تعدادی شماره تصادفی برای نمونه گیری از توزیع احتمالی داده های ورودی استفاده می کند. روش مونت کارلو بیشترین استفاده را در دامنه ی وسیعی از مسائل مهندسی ژئوتکنیک دارد [۱۳].

### ۴-۳- تحلیل برگشتی

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

در این تحقیق ابتدا با استفاده از ضریب ایمنی به دست آمده از شرایط مختلف، پنج ترکیب مختلف میخ گذاری 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، مطمئن ترین حالت های گودبرداری به دست آمده است. لازم به ذکر است که برای پیش بینی نگهداری مورد نیاز دیواره ناپایدار، از تحلیل برگشتی استفاده شده است.

### ۴- مبنای طراحی سیستم میخ گذاری

طبق گزارش اداره بزرگراه های آمریکا در ۲ مورد میخ گذاری [۸]، معمولاً میخ ها را با شیب بین ۱۰ تا ۲۰ درجه در دیواره های خاکی ناپایدار اجرا می کنند تا دوغاب به راحتی عمق و فضای داخلی چال را پر کند. برای گودبرداری عمدتاً هر ۱/۲ تا ۲ متر که دیواره توانایی پایداری تا رسیدن به مرحله بعدی را داشته باشد، سیستم میخ گذاری را اجرا می کنند. عموماً مقاومت های کششی اسمی میخ ها در بازه بین ۴۰ تا ۵۲۰ مگاپاسکالی قرارداد که برای کاربرد عملی باید ضریب ایمنی ۱/۸ را اعمال کرد. در رابطه با طول میخ ها نیز معمولاً از طول معادل ۰/۷ ارتفاع دیواره گود استفاده می کنند. طول های کمتر از ۰/۶ ارتفاع دیواره به علت عدم کارایی در پایدارسازی دیواره بندرت مورد استفاده قرار می گیرند. قطرهای ۲۰ تا ۵۰ میلی متر کاربرد بیشتری دارند و مهمترین عامل تصمیم

گیری در این رابطه، انتخاب کمترین قطری است که عدم گسیختگی کششی میخ هنگام بارگذاری را تضمین نماید. بدین منظور ضریب  $CDRT$  که نسبت ظرفیت کششی به نیروی کششی وارده بر میخ است مطابق رابطه (۲) محاسبه می شود:

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

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 میخ های بارگذاری شده است. ظرفیت کششی میلگرد نیز از رابطه (۳) محاسبه می شود:

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

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 پوشش دار ضد خوردگی استفاده می شود. قطر چال های لازم برای نصب میخ ها نیز طوری انتخاب می شود 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 بیرون کشی میخ ۴ برحسب متر یا همان استحکام اتصال،  $q_u$  مقاومت اتصال میخ-دوغاب-خاک برحسب کیلوپاسکال و  $DDH$  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 بیرون کشی میلگرد است.

## ۵- مدل سازی گودبرداری

مرز یک مدل بستگی به طبیعت منطقه یا زمین گودبرداری شده خالی از تنش دارد. مرز را بر اساس فاصله یا تنش اعمال می کنند. در هر صورت باید مرز تا جایی ادامه پیدا کند که تنش های 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 قائم و با عمق ۱۰ متر مدل شده است. برای پیش بینی شرایط احتمالی آینده، با ناشی از ساختمان فرضی مجاور نوع مسکونی، اسکلت فولادی با کف بتنی (کف تیرچه بلوک و یا کف بتنی کامپوزیت بتن و فولاد)، ابعاد  $30 \times 30$  متر، با ۳ طبقه و در فاصله ۵ متری لب گود، در نظر گرفته شده است. ضیائیان و همکاران [۱۴] در تحقیق خود بر روی ناحیه ۱ منطقه دوتهران، پس از مشورت با گروهی از مهندسان عمران و با توجه به مبحث ۶ از مقررات ملی ساختمان، [۱۵] وزن چنین بلوکی را با تخمین های تجربی این چنین محاسبه کردند:

$$\text{بار زنده} = 200 \text{ کیلوگرم بر متر مربع در هر طبقه}$$

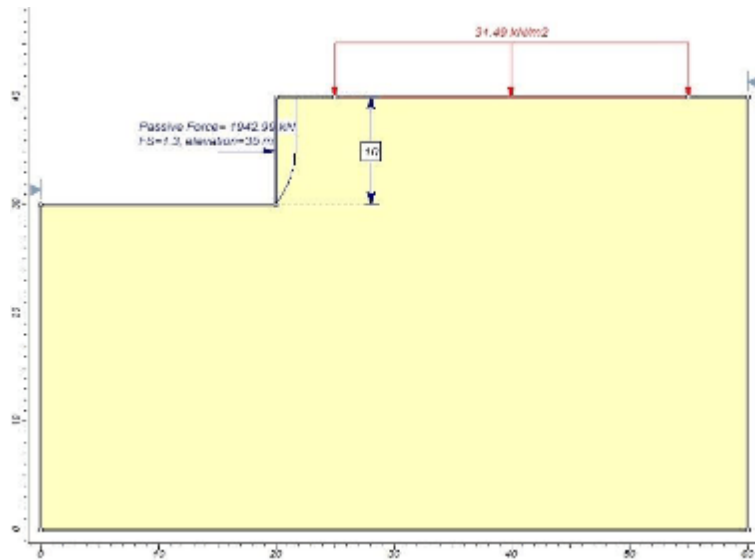
$$\text{بار مرده} = 870 \text{ کیلوگرم بر متر مربع در هر طبقه}$$

بار ناشی از ساختمان برابر است با مجموع بارهای زنده و مرده آن. پس از جمع این دو مقدار و ضرب آن در تعداد طبقات (۳ طبقه)، و تبدیل واحد آن به واحد مورد استفاده در نرم افزار Slide، نیروی گسترده ناشی از بار یکنواخت این ساختمان فرضی، مقدار  $31/488$  کیلونیوتن بر مترمربع به دست آمده است. این بار یکنواخت در فاصله ۵ متری از لب دیواره گود و به طول ۳۰ متر (طول ساختمان مفروض)، در مدل گود اعمال شده است (شکل ۲).

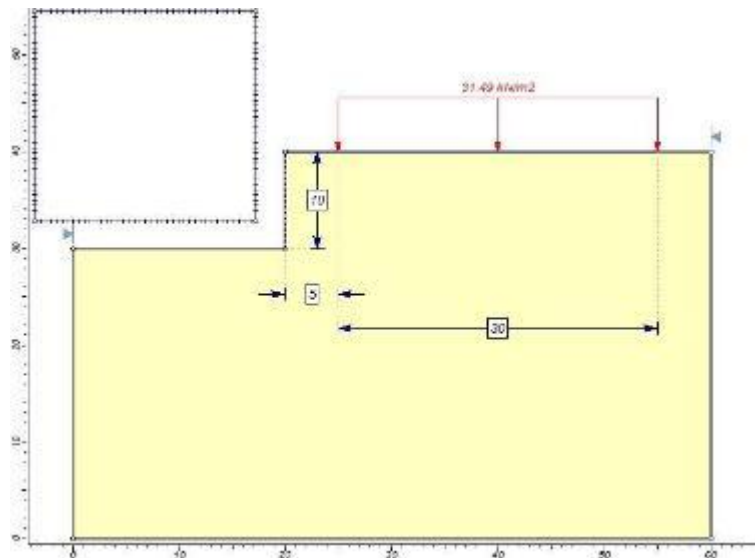
## ۶- تحلیل پایداری دیواره گود

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

بر اساس گزارش اداره بزرگراه ها، به منظور پایداری کوتاه مدت دیواره گود میخ گذاری شده، ضریب ایمنی دیواره باید بیش از ۱/۳ باشد [۸] مشخصات مکانیکی خاک منطقه به گونه ای است که از همان عمق دومتری، دیواره ناپایداری نشان داده است. در این مقاله هدف بررسی پایداری در عمق ۱۰ متری و ارائه راهکار برای رسیدن به این عمق بوده است. لذا از ابتدای کار مستقیماً بر روی عمق ۱۰ متری کار شده است، تا نتیجه مطلوب حاصل شود. با استفاده از تحلیل برگشتی، مقدار نیروی مورد نیاز برای پایداری دیواره گود، در نقطه ای واقع در عمقی برابر با نصف عمق کف گود، برابر با ۱۹۴۳ کیلونیوتن بوده است (شکل ۳) پس از مشاهده ناپایداری در عمق ۱۰ متر، برای پایدارسازی دیواره گود، نگهداری به روش میخ گذاری و در شرایط مختلف بررسی شده است.



شکل ۲- مدل اولیه گود به همراه بار مجاور



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

با توجه به نکات مرتبط با طراحی سیستم میخ گذاری که پیشتر مطرح شد، در این تحقیق ابتدا از مشخصات میلگرد نوع آج، با ۴۰۰ قطر ۲۲ میلی متر [۱۶] برای پایدارسازی دیواره گود استفاده شده است. برای تامین حداقل ۲۵ میلی متر دوغاب سیمانی دورتادور میخ، قطر چال ها نیز معادل ۷۶ میلی متر پیشنهاد شده است. هنگام مدلسازی دیواره گود در هر یک از حالاتی که در ادامه بررسی شده است، چنانچه قطر ۲۲ میلی متر شرط  $CDRT \geq 1$  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  $CDRPO \geq 1$  به روشی مشابه انجام شده است. برای محاسبه  $CDRT$  و  $CDRPO$  به پارامترهای  $T_{max}$  و  $LP$  نیاز است که پس از مدل‌سازی دیواره میخ گذاری شده و براساس سطح لغزش حاصله به روش بیشاپ ساده شده برای میخی که بحرانی ترین شرایط بارگذاری را دارد محاسبه شده اند. دیگر پارامترهای مورد نیاز برای محاسبات نیز از گزارش اداره بزرگراه ها [۸] و کاتالوگ شرکت سازنده میلگردها [۱۶] اقتباس شده است. با توجه به گزارش اداره بزرگراه های فدرال در مورد میخ گذاری، [۸] میانگین مقاومت اتصال ۵ دوغاب به یک خاک شن و ماسه ای مشابه گودبرداری فعلی و با فرض حفاری چرخشی چال ها ۱۴۱ کیلو پاسکال و ضریب ایمنی برای استحکام اتصال ۲ است. پس از تقسیم استحکام اتصال بر ضریب ایمنی مربوط به آن و استفاده از رابطه (۴) مقاومت بیرون کشی میخ ها محاسبه شده است. مشخصات نهایی میخ های ۲۲ میلی متری که در نرم افزار Slide وارد شده در جدول ۲ آمده است. با تغییر در مشخصات گود (شیب دیواره گود) و سیستم میخ گذاری (فاصله افقی میخ ها، فاصله عمودی میخ ها، طول و قطر میخ ها 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 بهینه کردن گود و میخ گذاری ۵، حالت مطلوب و بهینه برای اجرای گودبرداری پیشنهاد شده است (جدول ۳).

جدول ۲- مشخصات میخ های ۲۲ میلیمتری به کار گرفته شده برای مدل کردن اولیه دیواره گود [۱۶]

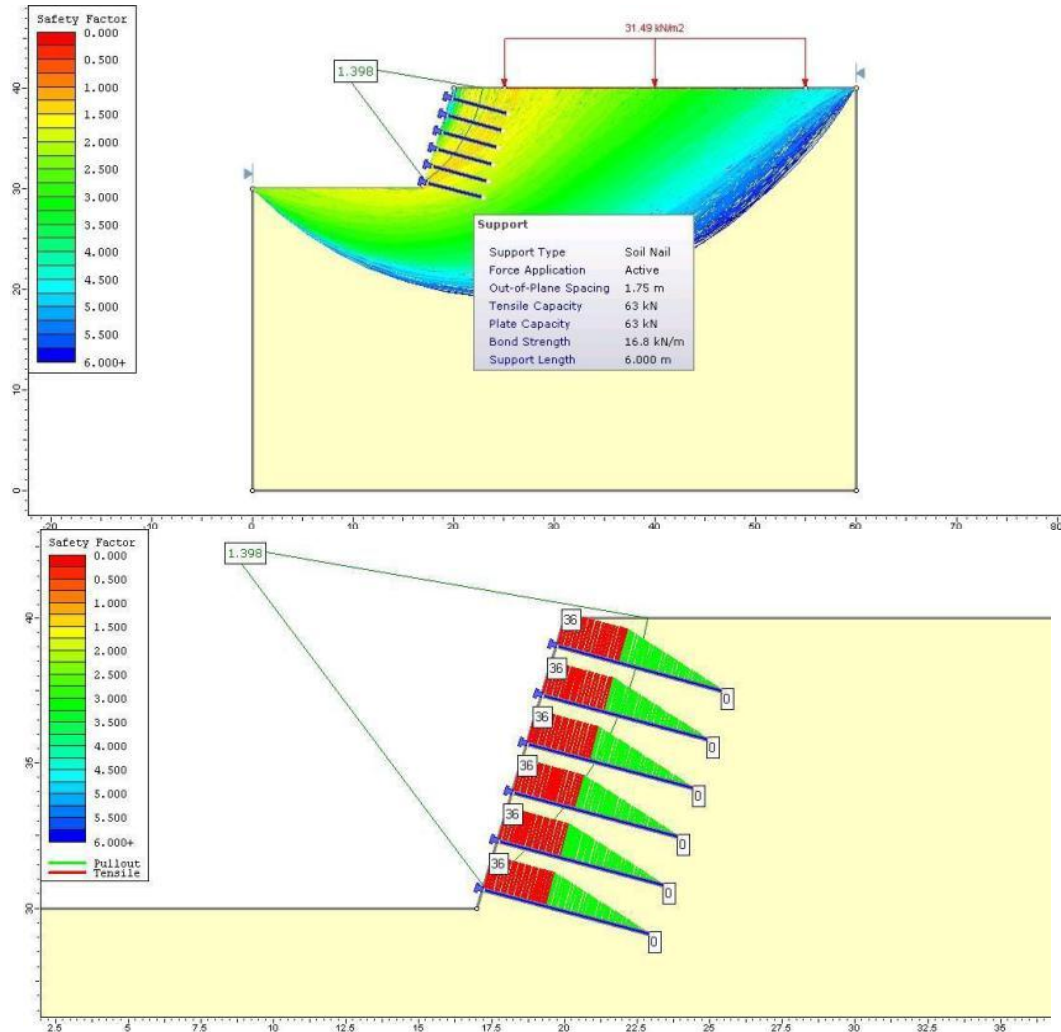
نوع میخ	قطر میخ (mm)	قطر چال (mm)	مقطع سطح موثر میخ (mm <sup>2</sup> )	مقاومت کششی میخ (MPa)	ظرفیت کششی موثر میخ (kN)	مقاومت اتصال دوغاب به خاک (kPa)	مقاومت اتصال موثر (kN/m)
آجدار میلگرد جنایی (آج) ۴۰۰	۲۲	۷۶	۳۴۶	۴۰۰	۷۷	۱۴۱	۱۶/۸

جدول ۳- پنج شیوه گودبرداری پیشنهادی با ضریب ایمنی، شیب و مشخصات میخ گذاری بهینه

شیب دیواره نسبت به افق (degree)	نیروی مورد نیاز در تحلیل برگشتی (kN)	فاصله عمودی میخ ها (m)	میلگرد مورد نیاز در هر متر مربع دیواره (kg)	روش بیشاپ ساده شده	فاصله افق میخ گذاری شده	بهره جالب ساده شده	فاصله عمودی میخ گذاری شده	شیب دیواره نسبت به افق (degree)	نیروی مورد نیاز در تحلیل برگشتی (kN)	فاصله عمودی میخ ها (m)	میلگرد مورد نیاز در هر متر مربع دیواره (kg)	روش بیشاپ ساده شده	فاصله افق میخ گذاری شده	بهره جالب ساده شده	فاصله عمودی میخ گذاری شده
۱۰	۱۹۴۳	۱/۲۵	۹/۴۸	روش بیشاپ ساده شده	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱۰	۱۹۴۳	۱/۲۵	۹/۴۸	روش بیشاپ ساده شده	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵
۱۰	۱۹۴۳	۱/۵	۹/۹۳	روش بیشاپ ساده شده	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱۰	۱۹۴۳	۱/۵	۹/۹۳	روش بیشاپ ساده شده	۱/۵	۱/۵	۱/۵
۱۰	۱۳۱۵	۱/۵	۷/۴۸	روش بیشاپ ساده شده	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱۰	۱۳۱۵	۱/۵	۷/۴۸	روش بیشاپ ساده شده	۱/۵	۱/۵	۱/۵
۱۰	۸۹۸	۱/۵	۶/۸۱	روش بیشاپ ساده شده	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱۰	۸۹۸	۱/۵	۶/۸۱	روش بیشاپ ساده شده	۱/۵	۱/۵	۱/۵
۱۰	۲۹۰	۱/۵	۴/۸۴	روش بیشاپ ساده شده	۱/۴۰	۱/۳۳	۱/۴۰	۱۰	۲۹۰	۱/۴۰	۴/۸۴	روش بیشاپ ساده شده	۱/۴۰	۱/۳۳	۱/۴۰

در حالت اول و دوم دیواره قائم و در حالت های سوم و چهارم و پنجم به ترتیب شیب ها 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 متر مربع بر حسب کیلوگرم آورده شده است. برای محاسبه میزان میلگرد مصرفی، حاصل تقسیم طول میخ به حاصلضرب فاصله افقی و عمودی میخ ها در وزن یک متر میلگرد ضرب شده است. انتخاب هر یک 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 بهینه ترین شیوه گودبرداری از لحاظ ضریب ایمنی مناسب و مصرف میلگرد، گودبرداری در حالت شماره ۵ بوده است (شکل ۴). در شکل ۴- الف مشخصات وارد شده در نرم افزار برای سیستم میخ گذاری حالت شماره ۵ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود ظرفیت کششی میخ ها ۶۳ کیلو نیوتن است که طبق رابطه (۳) برای میخی به قطر ۲۰ میلی متر (قطر

موثر ۱۹) و با فرض ضریب ایمنی ۱/۸ برآورد شده است. مقاومت اتصال میخ به صفحه فولادی دهانه چال ۶ دیگر پارامتر ورودی نرم افزار است که در صورت عدم آزمایش معمولاً "معادل ظرفیت کششی میخ ها برآورد می شود. همچنین مقاومت اتصال دوغاب به خاک ۱۶/۸ کیلونیوتن بر متر به کمک رابطه (۴) و با فرض چال ۷۶ میلی متری و ضریب ایمنی ۲ برآورد شده است.



شکل ۴- نتیجه تحلیل قطعی گودبرداری حالت شماره ۵: الف- ضریب ایمنی به روش بیشاپ، ب- توزیع بار بر روی میخ ها (T max = 36kN)

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

یکی از موثرترین ابزارها بهنگام اجرای تحلیل حساسیت و تحلیل احتمالی در مسایل ژئوتکنیکی، استفاده از شبیه سازی مونت کارلو [۱۳] است. در روش شبیه سازی مونت کارلو برای محاسبه ضریب ایمنی به جای استفاده از مقدار قطعی یک پارامتر خاک، از مقادیر تصادفی استفاده می شود که از بازه تغییرات مربوط به آن پارامتر انتخاب شده اند. برای تعریف این بازه تغییرات، میانگین آزمایشگاهی هر پارامتر در ضریب تغییرات مربوط به آن پارامتر ضرب می شود تا انحراف معیار به دست آید.

برای محاسبه ضریب ایمنی گودبرداری، خصوصیات خاک (c, φ) 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 بزرگراه ها [۸] مطابق جدول ۴ انتخاب گردید. با توجه به جدول ۴ میزان انحراف معیار هر یک از مشخصات خاک، با استفاده از رابطه (۶) به دست آمده است.

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

که در این رابطه، V: ضریب تغییرات، σ: انحراف معیار و μ: میانگین است [۱۷]. برای اجرای تحلیل حساسیت، از توزیع نرمال استفاده شده و مقادیر فاصله نسبی از حداقل و حداکثر مقدار هر پارامتر توسط نرم افزار با توجه به نوع توزیع، وارد شده



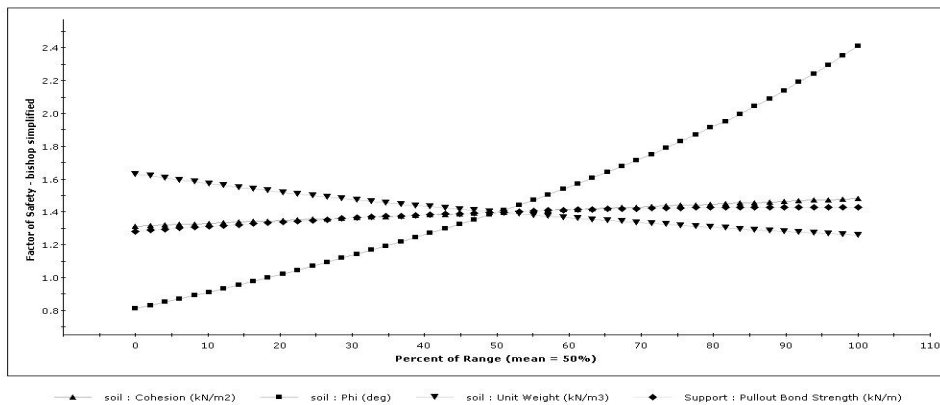
است (جدول ۵). شکل ۵ نمودار حساسیت ضریب ایمنی دیواره در حالت شماره ۵ جدول ۳ را نسبت به ویژگی های خاک در روش بیشاپ ساده شده نشان داده است. با توجه به شکل، ضریب ایمنی دیواره نسبت به ویژگی های خاک حساسیت نشان می دهد که این امر دلیلی بر ضرورت انجام تحلیل احتمالی بوده است. مطابق شکل ۵، تغییرات زاویه اصطکاک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

جدول ۴- ضرایب تغییرات مربوط به ویژگیهای خاک

ویژگی	ضریب تغییرات V (%)
چسبندگی c	۲۰
زاویهی اصطکاک داخلی φ	۱۳
وزن مخصوص γ	۷
مقاومت اتصال خاک به میخ	۹

جدول ۵- خصوصیات آماری پارامترهای تصادفی و متغیر

نام ویژگی	توزیع	میانگین، μ	انحراف معیار σ	فاصله نسبی از حداقل مقدار پارامتر	فاصله نسبی از حداکثر مقدار پارامتر
چسبندگی (کیلو نیوتن بر متر مربع)	نرمال			۲/۳۵۲	۲/۳۵۲
زاویه 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

در تحلیل احتمالی علاوه بر ضریب ایمنی (FS) دو پارامتر احتمال گسیختگی (PF) و شاخص اعتماد (RI) نیز مورد بررسی قرار می گیرد. احتمال گسیختگی (PF) طبق رابطه (۷) تعریف می شود [۱۷]:

$$PF = \left( \frac{N_F}{N_T} \right) \times 100 \quad (7)$$

در اینجا،  $N_F$  تعداد نمونه های با ضریب ایمنی کمتر از ۱ و  $N_T$  تعداد کل نمونه های تحلیل شده است. شاخص اعتماد (RI) دیگر ملاک رایج مورد استفاده برای قضاوت در تحلیل های احتمالی است که در صورت استفاده از توزیع نرمال طبق رابطه (۸) محاسبه می شود [۱۷]:

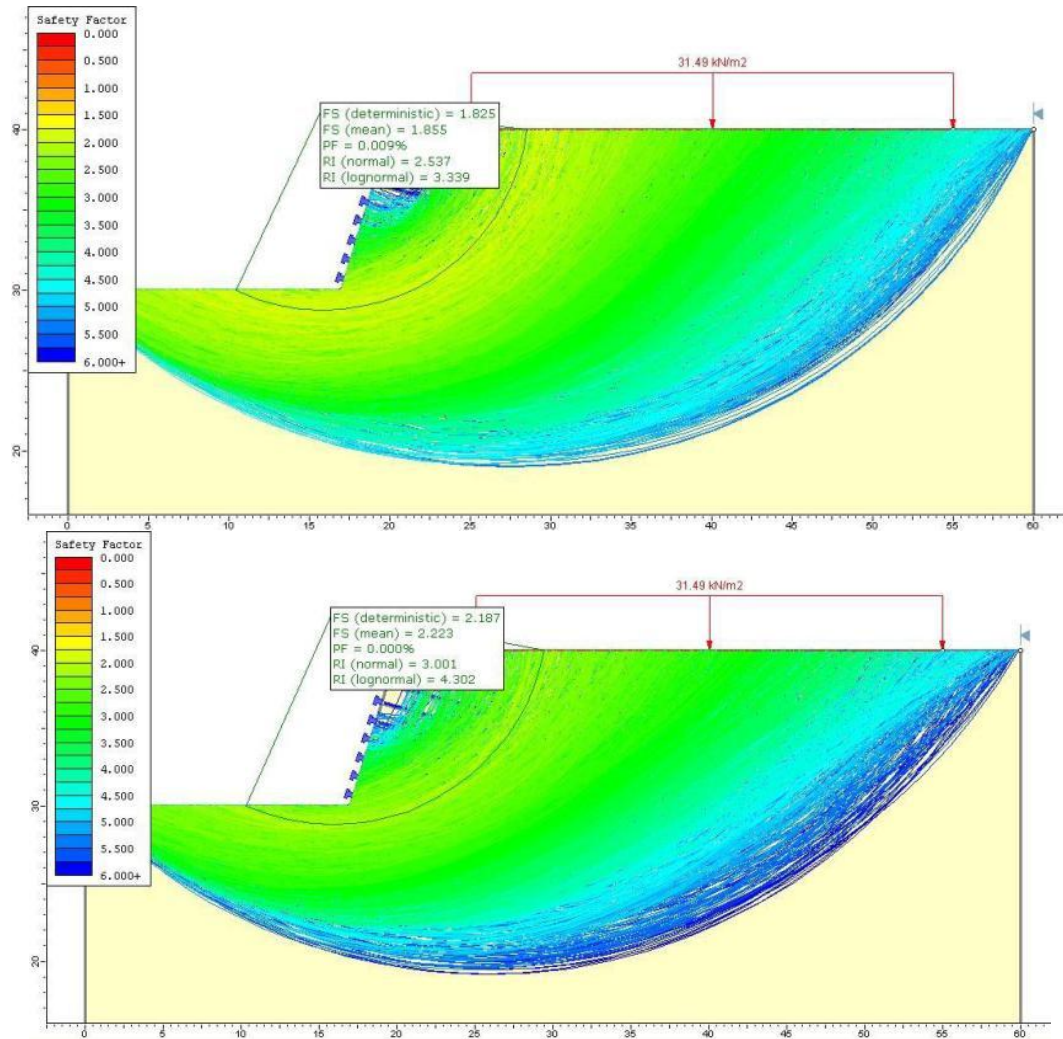
$$RI = \frac{\mu_{FS} - 1}{\sigma_{FS}} \quad (8)$$

در اینجا  $\mu_{FS}$  و  $\sigma_{FS}$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار ضریب ایمنی بدست آمده پس از  $N$  بار شبیه سازی مونت کارلو هستند. طبق استاندارد اداره مهندسی ارتش آمریکا ۷ پس از انجام یک تحلیل احتمالی در صورتی یک سازه خاکی پایدار فرض می شود که علاوه بر مقدار ضریب ایمنی، پارامتر احتمال گسیختگی بین  $10^{-4}$  تا  $10^{-6}$  و پارامتر شاخص اعتماد بین ۳ تا ۵ باشد [۱۷].

در انجام تحلیل احتمالی، مشابه تحلیل قطعی و با تغییر در شیب دیواره و مشخصات میخ ها، روش های اجرای مختلفی برای گودبرداری پیشنهاد شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. 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 حالت های پیشنهادی، مقادیر شاخص اعتماد و احتمال گسیختگی به دو روش بیشاپ ساده شده و جانبو ساده شده به دست آمده است. در اجرای تحلیل احتمالی با استفاده از نرم افزار Slide، از روش نمونه برداری مونت کارلو با تعداد نمونه های تصادفی معادل ۳۵۰۰۰ استفاده شده است. افزایش تعداد نمونه بیش از ۳۵۰۰۰ تاثیری بر احتمال شکست و شاخص اعتماد نداشته است. 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 بوده است ( 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

	حداقل پارامترهای تحلیل احتمالی در مطلوبترین حالت نگهداری														
	روش جانبو			روش بیشاپ											
	RI (normal)	(%) PF	FS	RI (normal)	(%) PF	FS									
۹/۴۸	۱/۳۹	۴/۵۰	۱/۳۴	۱/۴۷	۵/۳۱	۱/۳۷	۱/۲۵	۱/۲۵	۸۹	۲۰	۴	۹۰	۱۰	۱	
۹/۹۳	۱/۴۵	۵/۴۲	۱/۳۴	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	۴	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	



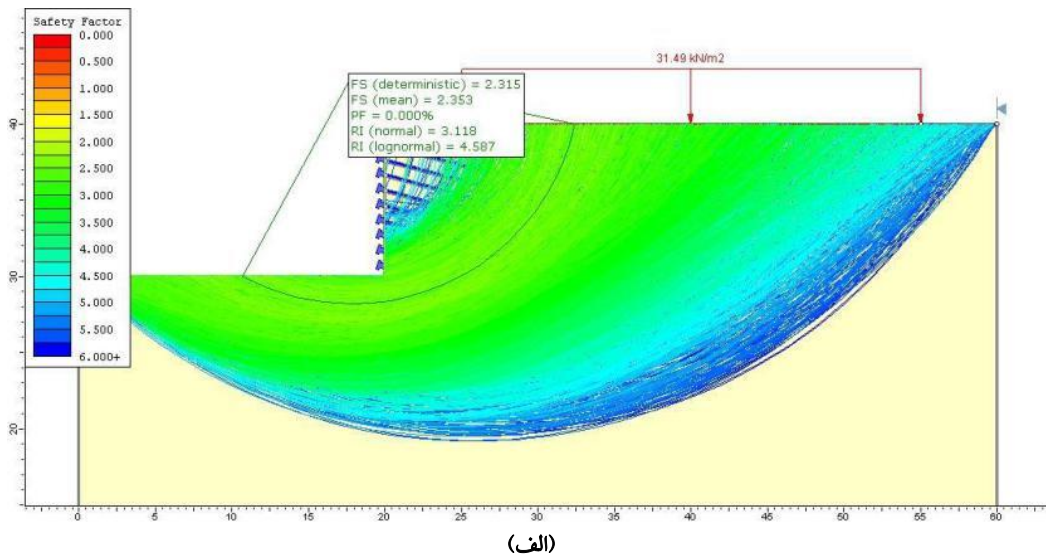
شکل ۶- نتایج تحلیل احتمالاتی گودبرداری حالت شماره ۶ به روش های الف- پیشاپ ساده شده، ب- جانبوساده شده

برای حالت های ۱ تا ۵ کنترل های مربوط به گسیختگی های کششی و بیرون کشی میخ ها قبلاً در جدول ۳ انجام شده است. در رابطه با حالت های ۶ تا ۹ نیز نیازی به انجام این کنترل ها نیست زیرا در این حالت ها، سیستم میخ گذاری نسبت به حالت های ۱ تا ۵ به لحاظ قطر میخ، چال و فواصل میخ ها تقویت شده است. با نگاهی به جدول های ۳ و ۶ ملاحظه می شود که در هر دو حالت تحلیل قطعی و احتمالاتی کمترین مصرف میلگرد مربوط به دیواره های با کمترین شیب طراحی شده (۳ متر قائم) است که نتیجه ای کاملاً منطقی است. همچنین مشاهده می شود که در حالت های ۶ تا ۹ برای اینکه شروط تحلیل پایداری احتمالاتی بطور نسبی برآورده شود، مشخصات سیستم میخ گذاری بطور قابل ملاحظه ای تقویت شده است. انتخاب نهایی هر یک از حالت های موجود در جدول ۶، همانگونه که قبلاً هم اشاره شد، بستگی به ملاحظات دیگری نظیر مسائل اقتصادی و اجرایی نیز دارد.

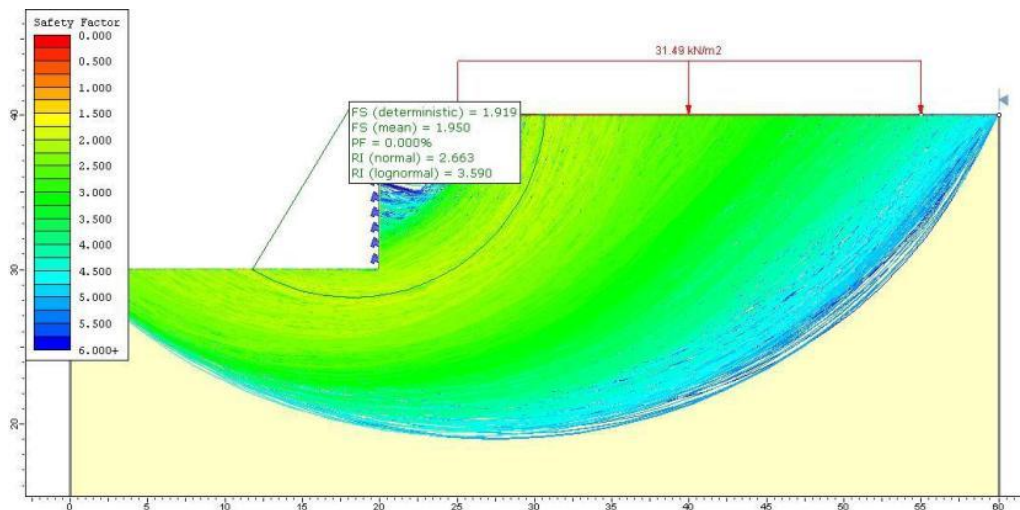
#### ۷- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش تعادل حدی و نرم افزار Slide، ابتدا پایداری خاک منطقه ای در حاشیه شهر قائن، برای گودبرداری در عمق ۱۰ متر بررسی شده است که با توجه به ناپایداری دیواره از روش تحلیل برگشتی برای محاسبه مقدار نیروی مورد نیاز جهت رسیدن به ضریب ایمنی مجاز ۱/۳ استفاده شده است. با توجه به مقدار نیروی محاسبه شده در تحلیل برگشتی، از ترکیبی از روش های میخ گذاری و تغییر شیب دیواره برای رسیدن به پایداری مناسب گود استفاده شده است. در این راستا، حالت های مختلفی از ترکیب میخ گذاری با اصلاح شیب دیواره مورد بررسی قرار گرفته که پیشنهاد این روش ها بر مبنای ایجاد کمترین شیب (نزدیکی دیواره به زاویه ی قائم) و نیز بهینه سازی مشخصات میخ ها از لحاظ طول، قطر، فاصله عمودی و افقی میخ گذاری

بوده است. در روش تحلیل قطعی ۵، روش گودبرداری مختلف همراه با نگهداری پیشنهاد گردیده است. در روش تحلیلی احتمالی نیز این ۵ روش بعلاوه ی ۴ روش بهینه ی دیگر با احتمال گسیختگی صفر پیشنهاد شده است. استفاده از هر یک از این روش ها بستگی به میزان دقت و پایداری مورد نظر در پروژه و نیز نظر کارشناس متخصص ومسائل اقتصادی و اجرایی دارد. نتایج این مقاله الگوی تقریباً کاملی برای گودبرداری در منطقه مورد مطالعه ارائه می دهد، که می تواند برای اجرای گودبرداری در این منطقه و مناطق مجاور به کار رود.



(الف)



(ب)

شکل ۷- نتایج تحلیل احتمالاتی گودبرداری حالت شماره ۹ به روش های الف-یشاپ ساده شده، ب-جانوساده شده

## ۸- مراجع

1. Fathi, A. (2010). Study of the suitable excavation methods in coarse graine alluvial of Tehran. MScThesis, 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.
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).
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 Tuerner&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.
14. Zeaiean Firouzabadi, P., Ghanavati, E., & Bayatishedaghat, 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:
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 Geology94:123-136.
19. USACE. (1997). Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning. U.S Army Corps of Engineers, Washington, D.C.