

## شبیه سازی عددی برای تعیین نوع دایره لغزش و ضریب اطمینان پایداری در شیب های محدود به روش تعادل حدی

فرزین سلماسی<sup>۱\*</sup>، بهرام نورانی<sup>۲</sup>، حسین حکیمی خانسر<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری سازه های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۲-۲۳

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۵-۰۲

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۵-۰۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۵-۲۰

### کلمات کلیدی:

تراز سطح آب

شکست شیب

شیب خاکی

ضریب اطمینان لغزش

فشار هیدرو استاتیک

**خلاصه:** در این تحقیق به بررسی تاثیر پارامترهای مصالح خاکی شامل وزن مخصوص ( $\gamma$ )، چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) و پارامترهای هندسی شیب شامل زاویه نسبت به افق ( $\beta$ ) و ارتفاع شیب (H) بر ضریب اطمینان پایداری شیب خاکریز در حالت خاک خشک و اشباع با افت سطح آب پرداخته می شود. به علاوه نوع دایره لغزش نیز بررسی می گردد. برای این منظور از روش تعادل حدی (LEM) استفاده شد. نتایج نشان داد که ضریب اطمینان با کاهش تراز سطح آب، به دلیل حذف فشار هیدرواستاتیک روی شیب کاهش پیدا می کند. بدین ترتیب که با پایین آمدن ۵/۵ متری سطح آب، میزان ضریب اطمینان به اندازه ۴۱/۴۲٪ کاهش را نشان داد و نوع دایره لغزش نیز تغییر نمود. همچنین روش لغزش صفحه ای با روش لغزش دایروی نیز مقایسه گردید و مشاهده شد روش لغزش صفحه ای نتایج قابل قبولی برای شیب های ملایم ارائه نمی کند. در صورتی که ( $\beta < 60^\circ$ ) باشد، احتمال وجود هر سه نوع دایره لغزش با توجه به عدد پایداری ( $m$ ) و زاویه شیب ( $\beta$ ) وجود دارد. ولی برای حالتی که ( $\beta > 60^\circ$ ) باشد، دایره لغزش از نوع دایره عبوری از پنجه می باشد. در روش تعادل حدی بیشاب ضریب تبیین ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۱۲۱ به دست آمد که خطای این روش نسبت به روش های دیگر ۱/۳ درصد می باشد که این در مقایسه با کاربرد روش های و پیچیده قابل چشم پوشی است.

### ۱- مقدمه

عوامل مختلفی بر پایداری شیب ها تأثیر دارند. این پارامترها شامل

چسبندگی خاک، ضریب اصطکاک خاک، تنش های موجود و تراز آب هستند. این پارامترها به نوعی در مقاومت برشی سطح لغزش موثر می باشند [۲].

روش های تعادل حدی از جمله قدیمی ترین روش ها در تعیین سطح لغزش بحرانی و کمینه ضریب اطمینان می باشند. اکثر روش های محاسبه پایداری شیب بر اصول تعادل خمیری پایه گذاری شده اند. در این روش فرض می شود شکست در یک سطح گسیختگی معین رخ می دهد، لذا تنش برشی لازم برای حفظ تعادل با مقاومت برشی خاک مقایسه شده و ضریب اطمینان پایداری شیب محاسبه می گردد. این فرآیند برای چندین سطح مختلف انجام و سطحی که دارای ضریب اطمینان کمتری باشد به عنوان سطح گسیختگی احتمالی و ضریب

گسیختگی شیب ها پدیده طبیعی است که در بسیاری از کشورهای دنیا رخ می دهد. با توجه به ساخت جاده ها و منازل مسکونی بسیاری بر روی شیب های خاکی در مناطق مختلف جهان، حفظ پایداری این شیب ها امری ضروری به حساب می آید. در مجموع علت شکست شیب های خاکی را می توان بیشتر شدن نیروی تنش برشی از نیروی مقاومت برشی در سطح شکست دانست و در حقیقت محاسبات پایداری در شیب های خاکی مقایسه نیروهای مؤثر در ایجاد گسیختگی و نیروهای مؤثر در مقابله با گسیختگی می باشد. ضریب اطمینان نشان دهنده میزان پایداری یک توده خاکی در برابر گسیختگی های احتمالی می باشد [۱].

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: salmasi@tabrizu.ac.ir



ورما و همکاران [۱۶] مشاهده نمود. میچالوفسکی [۱۷] یک روش نموداری برای بررسی پایداری شیب های ساده ارائه نمود که می تواند ضریب اطمینان را به صورت مستقیم با داشتن خصوصیات هندسی و مصالح مربوطه ارائه نماید. در مطالعات او سطح گسیختگی قوسی از نوع غیر دایروی (مارپیچ لگاریتمی) انتخاب شده است. استوارت و همکاران [۱۸] با استفاده از نرم افزار SLOPE/W پایداری شیب های متفاوت از نظر هندسه و مصالح را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که سطوح گسیختگی اکثرا به صورت Toe circle می باشند ولی با وجود آن در برخی موارد می تواند به صورت Midpoint circle نیز باشند و در نهایت یک نمودار برای تعیین ضریب اطمینان نیز استخراج کردند که می تواند ضریب اطمینان را به صورت مستقیم و بدون هیچ روش سعی و خطایی ارائه نماید. ارزین و ستین [۱۹] به بررسی تخمین ضریب اطمینان بحرانی در شیب های همگن محدود با استفاده از شبکه عصبی و رگرسیون غیر خطی روی ۶۷۵ نوع خاک مختلف، پرداختند. مقدار ضریب اطمینان بحرانی محاسبه شده به روش بیشاب اصلاح شده و مقدار ضریب اطمینان برای هر شیب به روش شبکه عصبی و رگرسیون غیر خطی بدست آمد و مقدار بدست آمده به روش شبکه عصبی بهتر از رگرسیون خطی بود. ساکیلاریو<sup>۷</sup> و فرنتینو<sup>۸</sup> [۲۰] پایداری شیب ها را با روش شبکه عصبی ANN پیش بینی و نتایج خود را با داده های واقعی و روش های تحلیلی موجود مورد ارزیابی قرار دادند. تانگ گاپنگ و همکاران [۲۱] نمودارهایی برای بدست آوردن ضریب اطمینان برای شیب محدود برای خاک های رسی ارائه دادند. در روش آن ها ابتدا N که ضریب پایداری بدون بعد می باشد محاسبه شده و بعد ضریب اطمینان با توجه به جداول ارائه شده محاسبه می گردد. لئو و همکاران [۲۲] تاثیر بالا آمدن سطح آب زیرزمینی در اثر بارندگی بر شیب ها را با استفاده از یک مدل فیزیکی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. سلماسی و جعفری در سال ۲۰۱۹ یک روش مستقیم و ساده را برای تخمین ضریب اطمینان پایداری شیب های خاکی ارائه کردند، که برای این منظور ۲۵۰ مجموعه داده توسط نرم افزار SLOPE/W تولید و سپس از این مجموعه داده ها برای توسعه مدل های رگرسیونی و شبکه عصبی (ANN) استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل (ANN) با  $R^2$  و RMSE به ترتیب ۰,۹۹ و ۰,۰۸ در مقایسه با روش رگرسیون کلاسیک در تخمین عدد پایداری عملکرد بهتری دارد. همچنین پیشنهاد کردند

اطمینان مربوط به آن به عنوان جواب مسئله پذیرفته می شود. شکل سطح گسیختگی بسته به نوع مصالح تشکیل دهنده شیب، متفاوت می باشد و می تواند مستوی، دایره ای، منحنی یا لگاریتمی یا ترکیبی از آن ها باشد. در صورتیکه مصالح تشکیل دهنده همگن باشند، سطح گسیختگی نزدیک به دایره خواهد بود. از سوی دیگر به دلیل سادگی تعیین روابط هندسی برای شکل دایره ای نسبت به سایر شکل ها، در اکثر مسائل کاربردی فرض می شود که سطح گسیختگی دایره ای است. همچنین در اکثر مدل های کامپیوتری تهیه شده برای تحلیل پایداری شیب محاسبات گسیختگی در چنین سطحی انجام می شود. در اغلب روش های تعادل خمیری حدی، فقط اصول استاتیک به کار برده می شود و بجز در تعدادی حالت های بسیار ساده، مسئله از نظر استاتیکی نامعین بوده و در نهایت فرضیاتی برای معین نمودن مسئله و بدست آوردن ضریب اطمینان در نظر گرفته می شود. بدین ترتیب بسته به فرضیات مورد استفاده روش های متعددی که ضرایب اطمینان متفاوتی را بدست می دهند ارائه شده است که از جمله این روش ها می توان به روش فلنیوس<sup>۱</sup> [۳]، روش بیشاب<sup>۲</sup> اصلاح شده [۴]، روش تعادل نیروهای لاو و کارافه [۵]، روش جامبو اصلاح شده [۶]، روش گروه مهندسی ارتش آمریکا [۷] روش اسپنسر<sup>۳</sup> [۸]، روش مورگنسترن-پرایس<sup>۴</sup> [۹] و روش شارما<sup>۵</sup> [۱۰] اشاره کرد. سینک<sup>۶</sup> [۱۱] یک روش نموداری برای تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب ها ارائه داد و بررسی حاصل نشان داد که برای زاویه های اصطکاک تقریباً بزرگتر از ۳ درجه ( $\theta > \sim 3^\circ$ ) دایره های لغزش بحرانی اکثرا از نوع Toe circle می باشند. اسپنسر [۸] یک روشی برای تعیین ضریب اطمینان ارائه نمود که در آن همه نیروهای جانبی در نظر گرفته شده بود که روش پیشنهاد شده برای تعیین ضریب اطمینان بر مبنای شرط تعادل نیروها و لنگرها استوار شده است. در طول سال های اخیر، ابزار و تکنیک های مختلف تحلیل مانند تجربی، تحلیلی و آماری توسعه یافته است. این روش ها عبارتند از تعادل حدی، المان های محدود، تفاضلات محدود، روش های المان مجزا، شبکه های عصبی و GIS. برخی از مطالعات معتبر را در این زمینه می توان در مطالعات پرادهان [۱۲] و علوی و گندومی [۱۳]، کایندولا و همکاران [۱۴]، راماکریشا و همکاران [۱۵]،

- 1 Fellenius
- 2 Bishop
- 3 Spencer
- 4 Morgenstern-Price
- 5 Sharma
- 6 Singh

7 Sakellariou  
8 Ferentinou

پایداری شیب می باشد. در حالت کلی روش های مختلف پایداری شیب را می توان به دو دسته روش توده و روش قطعه ها دسته بندی کرد که در روش اول خاک بالای سطح لغزش به صورت یکپارچه در نظر گرفته می شود در حالی که در روش دوم سطح لغزش به تعدادی قطعات موازی تقسیم می گردد و پایداری هر یک از قطعات منحصر محاسبه می گردد. روش دوم کلی تر و تا اندازه ای دقیق تر برای تحلیل پایداری می باشد از این رو در صورتی که تغییرات مهمی در خواص خاک و شرایط آب زیرزمینی روی می دهد، کاربردی تر است. نرم افزار SLOPE/W از روش دوم استفاده می کند. در نرم افزار SLOPE/W انواع مدل های مقاومتی تعریف شده که بسته به نوع مسئله می توان از آن ها استفاده کرد. در این تحقیق برای بررسی پایداری شیب خاکی از روش تعادل حدی (LEM) استفاده شده است. در این روش ضریب اطمینان ( $F_s$ ) برابر با نسبت مقاومت برشی خاک به تنش برشی لازم برای قرار دادن شیب در وضعیت تعادل حدی (آستانه لغزش) طبق رابطه ۱ می باشد.

$$F_s = \frac{C'}{C'_m} = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi'_m} \quad (1)$$

در رابطه ۱  $C'$  و  $\phi'$  پارامترهای مقاومت برشی خاک می باشند که در مدل مقاومتی مور- کولمب (Mohr- Coulomb-Law, 1773) ظاهر می شوند. همچنین  $C'_m$  و  $\phi'_m$  مقدار لازم پارامترهای مقاومت برشی برای قرار دادن شیب خاکی در آستانه لغزش می باشند.

## ۲-۲- نحوه مدل سازی عددی

در این تحقیق وزن مخصوص ( $\gamma$ )، چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) زاویه شیب نسبت به افق ( $\beta$ ) و ارتفاع شیب (H) به عنوان پارامترهای موثر در ضریب اطمینان پایداری شیب های خاکی در حالت خاک خشک مورد بررسی قرار می گیرد. برای بررسی تاثیر افت سطح آب بر ضریب اطمینان پایداری شیب، در خاک اشباع علاوه بر پارامترهای فوق الذکر از پارامتر تراز آب (h) نیز استفاده گردید. در شکل ۱ نمای شماتیکی از مدل شبیه سازی شده و پارامترهای مورد مطالعه، نشان داده شده است.

جهت انجام مدل سازی عددی تعداد هر یک از پارامترهای مورد بررسی، وزن مخصوص ( $\gamma$ )، چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) و زاویه شیب نسبت به افق ( $\beta$ ) به ترتیب ۴، ۴، ۳ و ۴ در نظر گرفته شده است و در نهایت ۱۹۲ مدل شبیه سازی گردیده است.

با توسعه این مدل ها نیاز به پیاده سازی نرم افزارهای پیچیده می تواند نادیده گرفته شد. همچنین این تحقیق نمودارهایی تولید نمود که ضرورت تکرار برای محاسبه ضریب اطمینان پایداری در شیب های خاکی همگن را حذف می کند [۲۳].

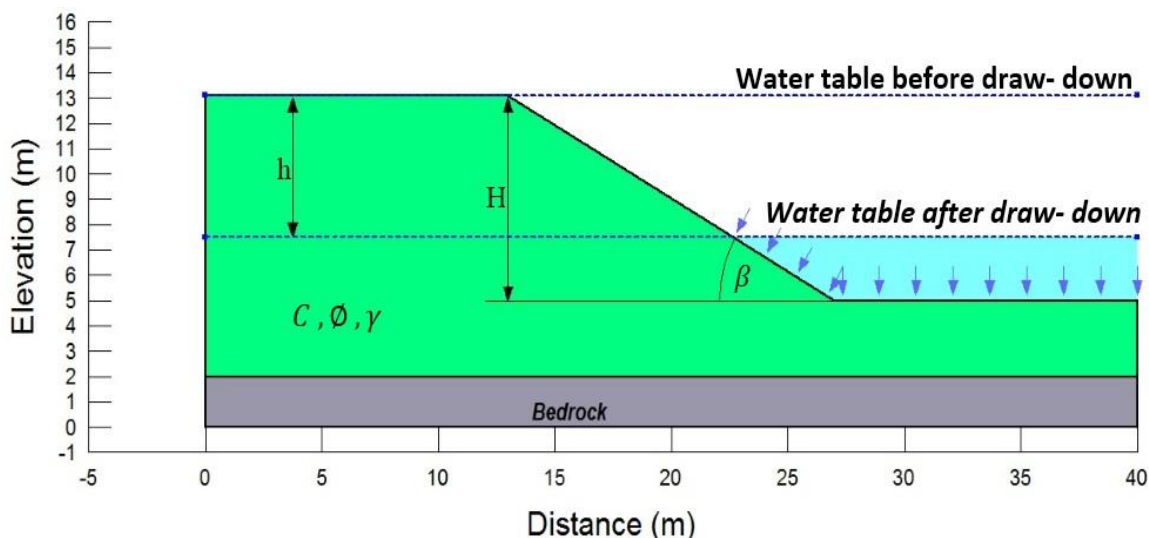
هدف اصلی از تحقیق حاضر کاربرد روش تعادل حدی برای تعیین نوع دایره لغزش و ضریب اطمینان بحرانی سطوح شیب دار است. برای صحت سنجی از چند مورد لغزش شیب های خاکی واقعی در نقاط مختلف دنیا بهره برده شده است. با توجه به مشخصات هندسی سطح شیب دار، نوع مصالح خاکی موجود در شیب، عمق لایه غیرقابل نفوذ و وجود آب یا عدم وجود آن در پشت شیب، دایره های لغزشی گوناگونی قابل اتفاق افتادن است. تفکیک دایره های لغزشی مختلف در مطالعات قبلی ملاحظه نشده است. طبقه بندی این نوع دایره های لغزش به درک بهتر پدیده شکست سطوح شیب دار کمک نموده و علاوه بر تعیین ضریب اطمینان، گستره لغزش سطوح خاکی را برای مهندسان مشخص خواهد کرد. همچنین این تحقیق به بررسی تاثیر پارامترهای مصالح شامل وزن مخصوص ( $\gamma$ )، چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) و پارامترهای هندسی شامل زاویه شیب نسبت به افق ( $\beta$ ) و ارتفاع شیب (H) بر ضریب اطمینان پایداری و ارائه روابط رگرسیونی جهت محاسبه مستقیم ضریب اطمینان می پردازد که در ابتدا مدل سازی در حالت کاملاً خشک و زهکشی شده در نظر گرفته شد و سپس به تاثیر افت سطح آب روی سطح شیب دار همگن نیز پرداخته می شود.

## ۲- الگوسازی نظری یا تجربی

### ۲-۱- روش تعادل حدی

در این تحقیق از روش معروف و شناخته شده تعادل حدی استفاده می شود. برای این هدف از نرم افزار SLOPE/W که متعلق به بسته نرم افزاری GeoStudio2012 می باشد، استفاده شده است. نرم افزار SLOPE/W جهت بررسی سطوح شیب دار و تعیین ضریب اطمینان در طراحی شیب مورد استفاده قرار می گیرد [۲۴]. این عمل در نرم افزار از طریق روش های تعادل حدی<sup>۱</sup> مانند بیشاب، جانبو و یا از طریق روش های مورگنشترن و پرایس، اسپنسر و GLE انجام می گیرد. در نرم افزار SLOPE/W برخلاف دیگر نرم افزارهای مجموعه نرم افزاری GeoStudio2012 از روش المان محدود استفاده نمی شود و شامل مجموعه ای از روش های ترسیمی و تعادل حدی (LEM) برای تحلیل

1 Limit Equilibrium Methods



شکل ۱. مقطع شیب خاکی همگن به همراه پارامترهای مورد بررسی

Fig. 1. A schematic representation of the simulated model and the studied parameters.

جدول ۱. محدوده پارامترهای مورد بررسی در مدل عددی تحقیق حاضر

Table 1. The range of parameters studied in the numerical model in this study

افت سطح آب (h) (m)	زاویه شیب (β) (°)	زاویه اصطکاک داخلی (φ) (°)	چسبندگی (C) (kN/m <sup>2</sup> )	وزن مخصوص (γ) (kN/m <sup>3</sup> )
۰	۳۰	۱۴	۱۵	۱۵
۳	۴۵	۱۸	۲۰	۱۷
۵/۵	۶۰	۲۲	۲۵	۲۱
۸	۷۵	-	۳۰	۲۵

متوسط مقدار خطا در این ۵ نمونه خاک برابر ۶/۷۵ درصد است که با در نظر گرفتن پیچیدگی های موجود در خواص ژئوتکنیکی خاک ها، این مقدار خطا در حد قابل قبول می باشد.

### ۲-۳- معیارهای ارزیابی دقت

برای ارزیابی، توانایی و دقت رابطه رگرسیون در تعیین ضریب اطمینان، از دو شاخص های آماری استفاده شده است. معیارهای ارزیابی جهت تخمین پارامتر ضریب اطمینان شامل ضریب تبیین ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب از روابط (۲) و (۳) محاسبه می گردند.

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (2)$$

لازم به ذکر است که مقدار ارتفاع شیب در کل مدل ها ثابت در نظر گرفته شده است ( $H=8$  m). همچنین علاوه بر شبیه سازی در حالت خشک اثر افت سطح آب روی شیب (h) بر ضریب اطمینان پایداری نیز بررسی شده است که مقادیر هریک از پارامترهای مورد بررسی در این شبیه سازی در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است که قبل از انجام شبیه سازی به روش تعادل حدی، ابتدا مدل عددی حاضر با نتایج داده های مشاهداتی ساح<sup>۱</sup> و همکاران [۲۵] و مدزیک<sup>۲</sup> [۲۶] مورد ارزیابی شد که نتایج این ارزیابی در جدول ۲ نشان داده شده است. در جدول ۲ تعداد ۵ شیب خاکی واقعی در نقاط مختلف دنیا گزارش شده است که خواص ژئوتکنیکی هر نمونه از دیگری متفاوت بوده است. همانطور که مشاهده می گردد نتایج مدل عددی با حداکثر خطای ۸/۶ درصد توانسته است ضریب اطمینان پایداری در برابر لغزش را تخمین بزند.

1 Sah  
2 Madzic

جدول ۲. مقایسه بین شبیه سازی عددی (SLOPE/W) با داده های مشاهداتی

Table 2. Comparison between numerical simulation (SLOPE/W) and observation data

No.	Actual data from	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	C (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	$\beta$ (°)	H (m)	Fs (Observed)	Fs (SLOPE/W)	RE%
۱	Sah et al. (1994)	۱۸.۸۴	۱۴.۳۶	۲۵	۲۰	۳۰.۵	۱.۸۷	۱.۷۲۵	۷.۷۵۴
۲		۱۸.۸۴	۵۷.۴۶	۲۰	۲۰	۳۰.۵	۲.۰۴۵	۲.۱۳۶	۴.۴۴۹
۳		۲۲.۴	۱۰	۳۵	۳۰	۱۰	۲.۰۰	۱.۸۸۲	۵.۹۰۰
۴		۲۱.۴	۱۰	۳۰.۳۴	۳۰	۲۰	۱.۷۰	۱.۵۵۳	۸.۶۴۷
۵	Madzic (1988)	۲۱	۲۰	۴۰	۴۰	۱۲	۱.۸۴	۱.۹۷	۷.۰۶۵

دایره های لغزش محتمل را محاسبه و رسم کرده و از بین آنها کمترین مقدار ممکن را به عنوان ضریب اطمینان بحرانی در نظر می گیرد. در شکل تغییرات ضریب اطمینان به ازای تمام دایره های لغزش محتمل روی شکل ۳ برای حالت ( $\phi = 14^\circ, C = 25 \frac{kN}{m^2}, \gamma = 15 \frac{kN}{m^3}, \beta = 30^\circ$ ) نشان داده شده است و همانطور که مشاهده می شود حداقل ضریب اطمینان به ازای این حالت ۲/۱۴۲ به دست آمده است که در بازه ۲/۰۵۸ تا ۲/۱۵۸ می باشد (قسمت قرمز رنگ روی شکل ۳).

شکل ۴ (الف، ب) تغییرات پارامتر بی بعد ( $\frac{C}{\gamma H \tan \phi}$ ) در مقابل ( $\frac{Fs}{\tan \phi}$ ) را نشان می دهد. با مقایسه شکل ۴ (الف و ب) به ازای شرایط زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi = 14^\circ$ ) با افزایش چسبندگی خاک، میزان ضریب اطمینان افزایش داشته و یک رابطه مستقیم بین ضریب اطمینان و چسبندگی برقرار است.

در شکل ۵ تغییرات پارامتر نسبت ضریب اطمینان (Fs) بر عدد پایداری ( $m = \frac{C}{\gamma H}$ ) در مقابل زاویه شیب ( $\beta$ ) رسم داده شده است. همانطور که مشخص است با افزایش زاویه شیب نسبت به افق، می توان گفت ضریب اطمینان کاهش می یابد. این روند کاهشی به صورت خطی نیست و از حدود شیب ۵۰ درجه به بعد از شیب آن کاسته می شود.

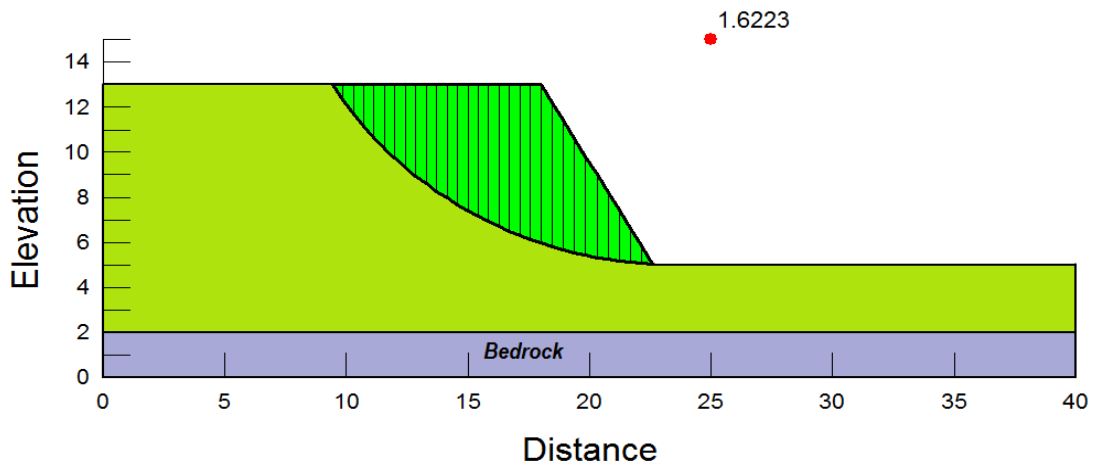
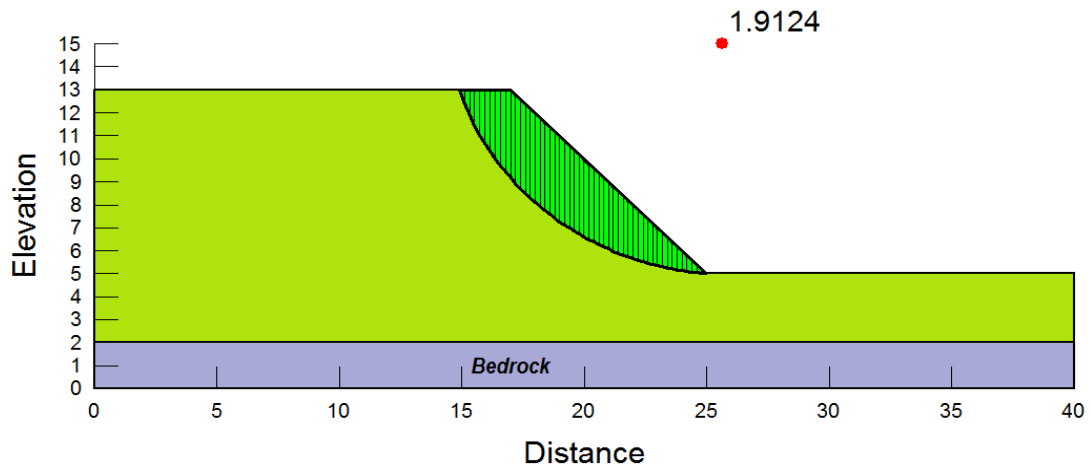
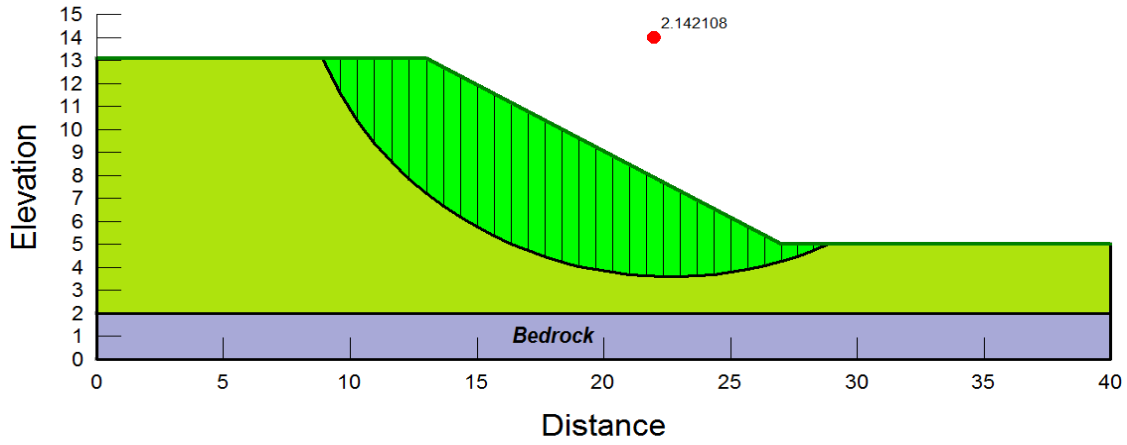
در طرح های مهندسی علاوه بر دانستن ضریب اطمینان در برابر لغزش، داشتن اطلاعاتی در خصوص نوع دایره لغزش نیز با اهمیت است. بر این اساس دایره لغزش می تواند از پنجه شیب عبور کند (Toe circle)، پنجه را در نقطه ای در پایین دست خاکریز قطع کند (Midpoint circle) و یا دایره لغزش کم عمق بوده و روی نقطه ای از شیب، خاکریز را قطع کند (Slope circle). شکل ۶ مرزهای هر کدام از دایره های لغزش را

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (3)$$

در این روابط  $O_i$  مقادیر حاصل از مدل عددی،  $P_i$  مقادیر حاصل از روش رگرسیونی،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر حاصل از مدل عددی و  $n$  تعداد داده ها می باشند.

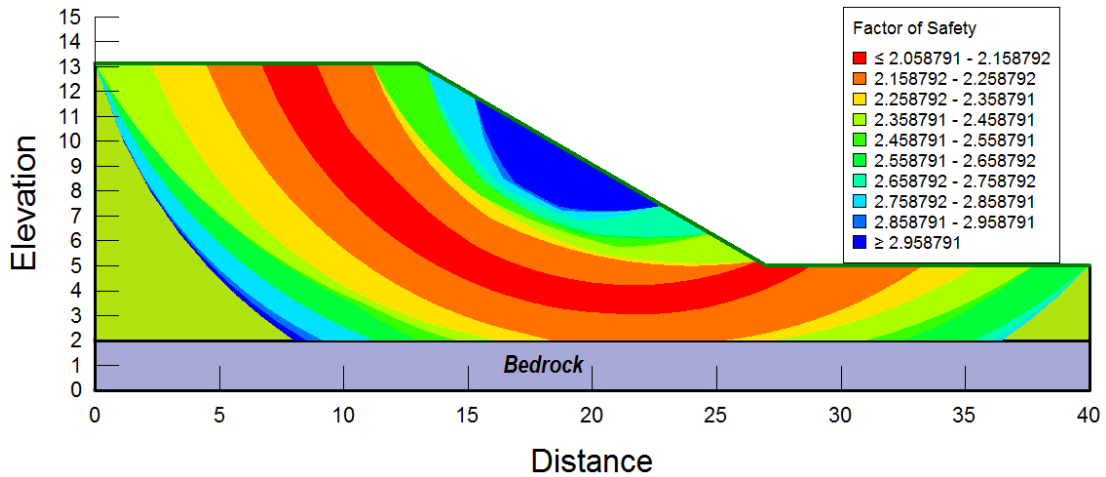
### ۳- نتایج و بحث

بعد از شبیه سازی شیب خاکی در نرم افزار، می توان سطح محتمل لغزش و همچنین ضریب اطمینان پایداری در شرایط بحرانی و همچنین نوع دایره لغزش را مشاهده کرد. در شکل ۲ (الف، ب و ج) در صورتی که وزن مخصوص ( $\gamma$ )  $15 \text{ kN/m}^3$ ، چسبندگی ( $C$ )  $25 \text{ kN/m}^2$  و زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ )  $14^\circ$  درجه باشد به ترتیب برای زاویه شیب ( $\beta$ )  $30^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $60^\circ$  درجه آورده شده است. ضریب اطمینان بعد از شبیه سازی به ازای شیب  $30^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $60^\circ$  درجه به ترتیب مقادیر ۲/۱۴۲، ۱/۹۱۲ و ۱/۶۲۲ به دست آمده است. همانطور که مشاهده می شود تغییر در شکل هندسی شیب باعث تغییر نسبی نیروهای مقاوم و مخرب شده و درجات مختلفی از ضریب اطمینان پایداری بوجود آمده است. از آنجا که ضریب اطمینان حاشیه پایداری را در برابر گسیختگی نشان می دهد، بنابراین افزایش آن منعکس کننده پایداری آن شیب به ازای شرایط معین می باشد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش شیب ضریب اطمینان کاهش پیدا کرده است. لازم به ذکر است که نرم افزار SLOPE/W برای تعیین ضریب اطمینان به ازای شرایط معین تمام

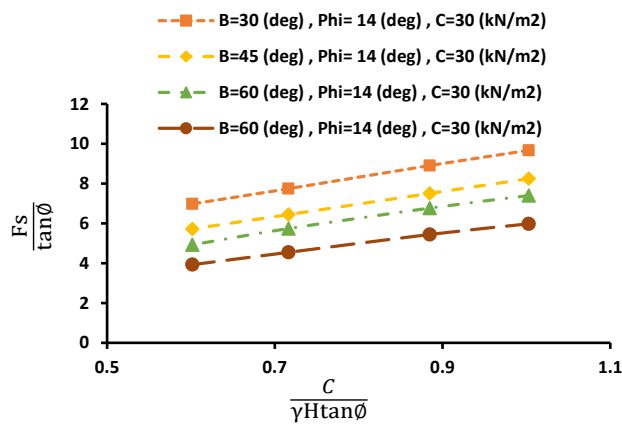
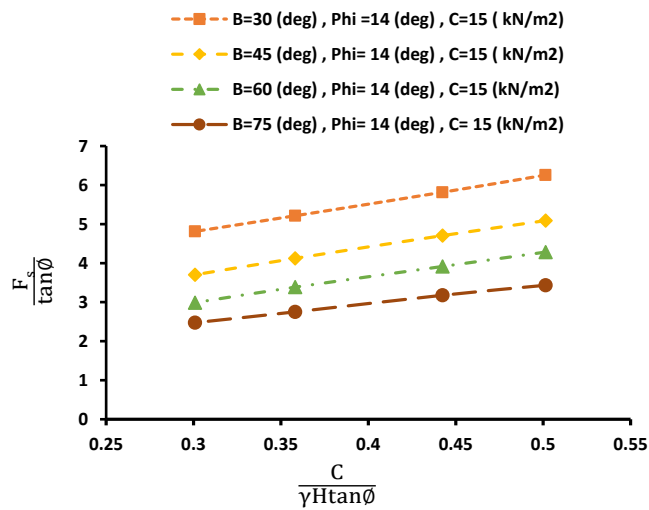


شکل ۲ الف . ضریب اطمینان و نوع دایره لغزش محتمل برای حالت (  $\varnothing=14^\circ, C=25 \frac{kN}{m^2}, \gamma=15 \frac{kN}{m^3}, \beta=30^\circ$  ) ب . ضریب اطمینان و نوع دایره لغزش محتمل برای حالت (  $\varnothing=14^\circ, C=25 \frac{kN}{m^2}, \gamma=15 \frac{kN}{m^3}, \beta=60^\circ$  ) ج . ضریب اطمینان و نوع دایره لغزش محتمل برای حالت (  $\varnothing=14^\circ, C=25 \frac{kN}{m^2}, \gamma=15 \frac{kN}{m^3}, \beta=45^\circ$  )

Fig. 2. The factor of safety and the type of slip circle A. for the state (  $\varnothing=14^\circ, C=25 \frac{kN}{m^2}, \gamma=15 \frac{kN}{m^3}, \beta=30^\circ$  ), B. for the state (  $\varnothing=14^\circ, C=25 \frac{kN}{m^2}, \gamma=15 \frac{kN}{m^3}, \beta=45^\circ$  ) and C. for the state (  $\varnothing=14^\circ, C=25 \frac{kN}{m^2}, \gamma=15 \frac{kN}{m^3}, \beta=60^\circ$  )

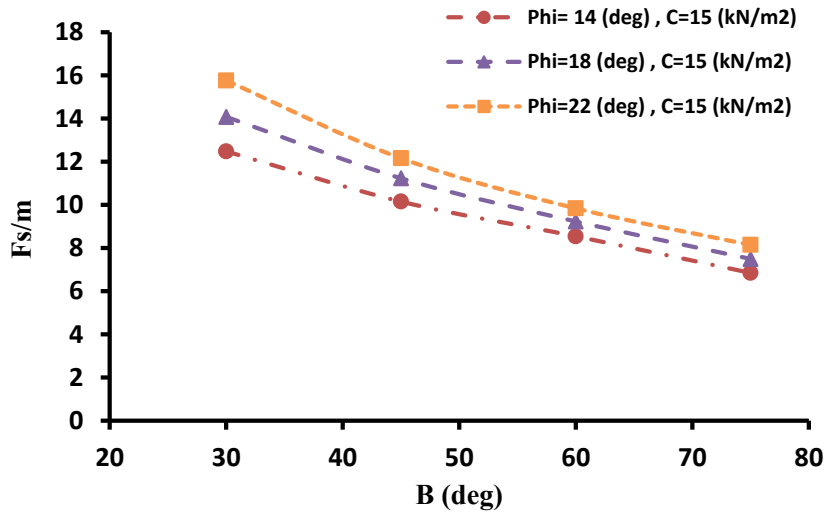


شکل ۳ - تغییرات ضریب اطمینان (Fs) به ازای دایره های لغزشی محتمل در روی شیب در حالت  $(\varphi = 14^\circ, C = 25 \frac{kN}{m^2}, \gamma = 15 \frac{kN}{m^3}, \beta = 30^\circ)$   
 Fig. 3. Variations of safety factor ( $F_s$ ) for potential slip circles on the slope in the state of  $(\varphi = 14^\circ, C = 25 \frac{kN}{m^2}, \gamma = 15 \frac{kN}{m^3}, \beta = 30^\circ)$



شکل ۴ الف . تاثیر مشخصات مصالح شیب بر روی ضریب اطمینان برای حالت  $(\varphi = 14^\circ, C = 25 \frac{kN}{m^2})$  . ب . تاثیر مشخصات مصالح شیب بر روی ضریب اطمینان برای حالت  $(\varphi = 14^\circ, C = 30 \frac{kN}{m^2})$

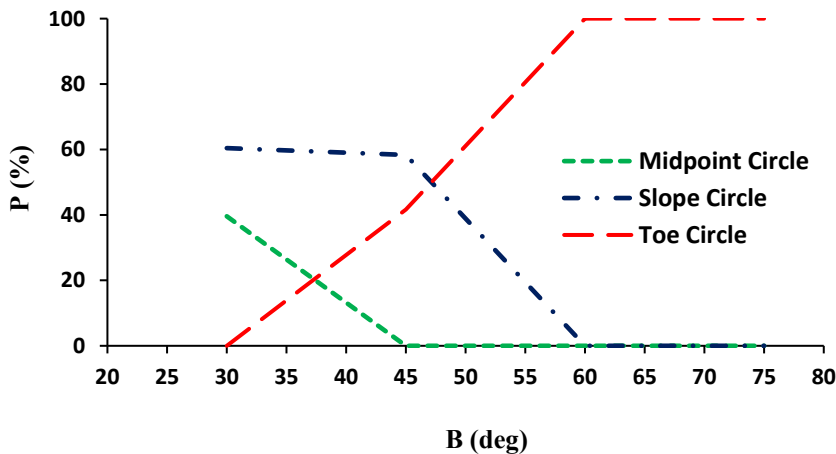
Fig. 4. The effect of slope materials on the factor of safety A. for the state  $(\varphi = 14^\circ, C = 25 \frac{kN}{m^2})$  and B. for the state  $(\varphi = 14^\circ, C = 30 \frac{kN}{m^2})$



شکل ۵. تغییرات ضریب اطمینان (Fs) در مقابل زاویه شیب (β) برای شرایط (C=15  $\frac{kN}{m^2}$ , φ=14°, 18°, 22°)

Fig. 5. Variations of factor of safety (Fs) versus slope angle (β) for the state

$$(C=15 \frac{kN}{m^2}, \phi=14^\circ, 18^\circ, 22^\circ)$$



شکل ۶. مرزهای دایره های لغزش محتمل خاکریز نسبت به زاویه شیب

Fig. 6. The boundaries of the potential slip circle slope relative to the slope angle.

مدل های شبیه سازی شده به ازای زاویه های مختلف آورده شده است. در شکل ۷ تغییرات عدد پایداری (m) در مقابل ضریب اطمینان (Fs) آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش عدد پایداری ضریب اطمینان به ازای یک زاویه شیب معین، افزایش می یابد. مزیت شکل ۷ این است که با در دست داشتن عدد پایداری، همزمان می توان مقدار ضریب اطمینان در برابر لغزش و نیز نوع دایره لغزش را تعیین نمود. برای نمونه به ازای عدد پایداری ۰/۱ و زاویه شیب ۳۰

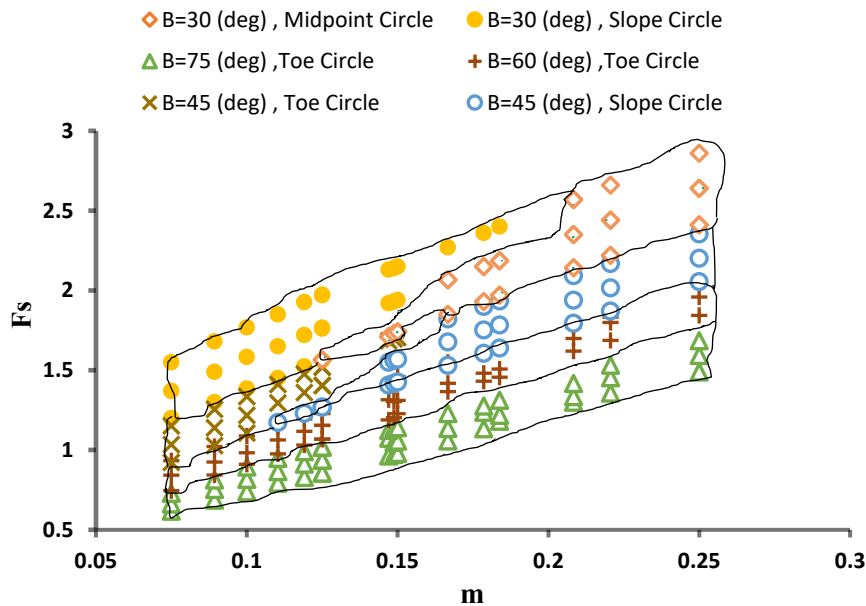
نسبت به زاویه شیب نشان می دهد. همانطور که مشخص است به ازای زاویه های کمتر از ۶۰ درجه احتمال وجود هر سه نوع دایره لغزش با توجه به عدد پایداری (m) و زاویه شیب (β) وجود دارد. برای زاویه کمتر از ۴۵ درجه فقط احتمال رخ دادن دو نوع لغزش Slope circle و Toe circle وجود خواهد داشت. برای زاویه های بزرگتر از ۶۰ درجه نوع دایره لغزش به ازای تمامی شرایط از نوع Toe circle می باشد. در جدول ۳ درصد هر یک از انواع لغزش های محتمل ممکن نسبت به کل



جدول ۳. درصد هریک از انواع دایره های لغزشی محتمل بر روی شیب برای زاویه های مختلف

Table 3. Percent of each type of potential slip circle on the slope for different angles.

Angle of Slope( $\beta$ )	Midpoint circle	Slope circle	Toe circle
۳۰	۳۹/۵۸	۶۰/۴۲	۰
۴۵	۰	۵۸/۳	۴۱/۷
۶۰	۰	۰	۱۰۰
۷۵	۰	۰	۱۰۰



شکل ۷. کلاس بندی نوع دایره لغزشی به ازای زاویه شیب و عدد پایداری مختلف

Fig. 7. Classification of slip circle type for slope angle and different stability numbers.

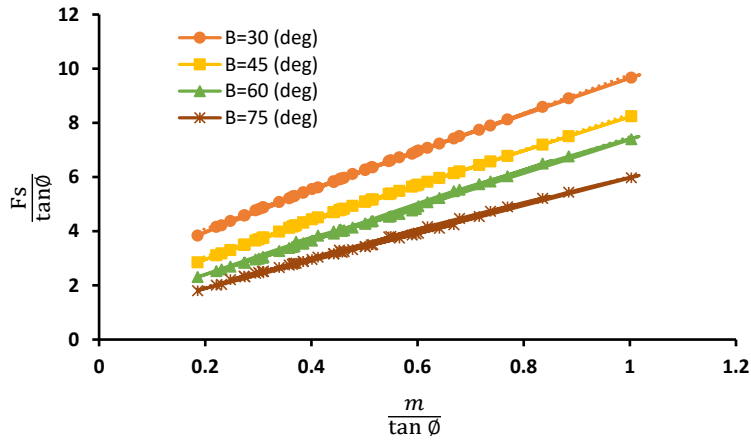
است. همانگونه که مشاهده می شود تغییر در سطح آب روی شیب باعث تغییر نسبی نیروهای مقاوم و مخرب شده و ضریب اطمینان تغییر پیدا می کند. قبل از افت سطح آب شیب به طور کامل غرقاب بوده و حالت استغراق کامل برقرار است با پایین آمدن ۵/۵ متری سطح آب، میزان ضریب اطمینان به علت حذف بار ناشی از وزن آب روی شیب که در جهت پایداری شیب قبل از افت سطح آب عمل می کرد به اندازه ۴۱/۴۲ درصد کاهش یافته است. همچنین نوع دایره لغزشی نیز از حالت Touch Midpoint Circle به Slope circle تبدیل شده است.

شکل ۱۰ نمودار محاسباتی دیگری برای بررسی پایداری و تعیین ضریب اطمینان شیب هایی که در معرض افت سطح آب قرار دارند را نشان می دهد. در این نمودار محور عمودی نسبت افت  $(\frac{h}{H})$  را نشان می دهد که در آن  $h$  مقدار افت سطح آب و  $H$  ارتفاع کل شیب می باشد.

درجه، ضریب اطمینان برابر ۱/۶ و نوع دایره لغزشی از نوع Slope circle خواهد بود.

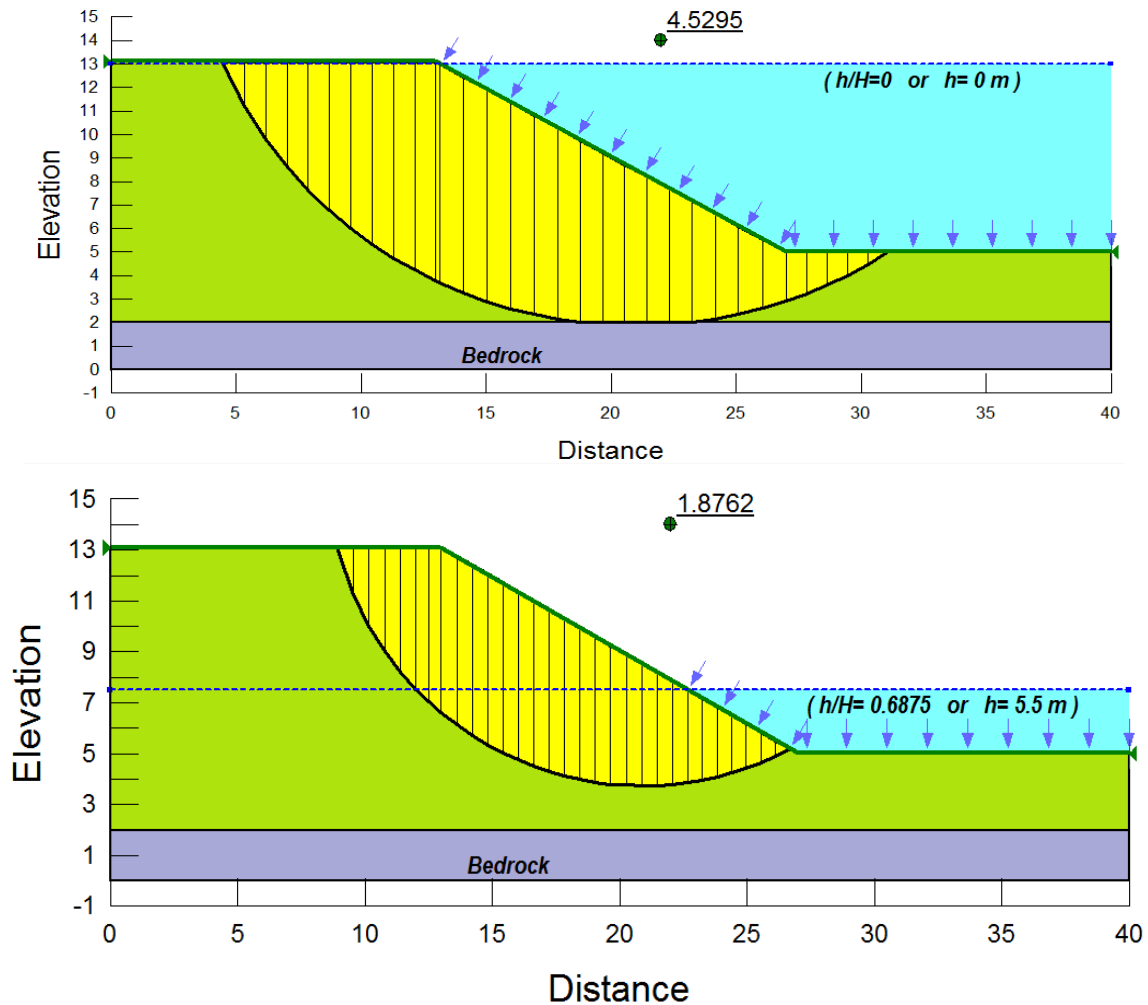
شکل ۸ حالت دیگری از تغییرات ضریب اطمینان در برابر لغزش را به صورت بی بعد نشان می دهد. استفاده از پارامترهای بی بعد  $Fs / \tan \phi$  و  $m / \tan \phi$  موجب تولید رابطه خطی بین پارامترهای موثر گردیده است.

شکل های قبلی برای تعیین ضریب اطمینان و نوع دایره لغزش در حالت خاک خشک ارائه گردید. در ادامه به بررسی رفتار لغزش خاک برای حالت خاک اشباع توام با افت تراز آب پرداخته می شود. در شکل ۹ نتایج حاصل از شبیه سازی در اثر وجود آب بر روی شیب در صورتی که نسبت افت سطح آب  $(\frac{h}{H})$  به ترتیب برابر ۰ و ۰/۶۸۷۵ بوده به ازای شرایط  $(\phi = 14^\circ, C = 25 \frac{kN}{m^2}, \gamma = 15 \frac{kN}{m^3}, \beta = 30^\circ)$  نشان داده شده



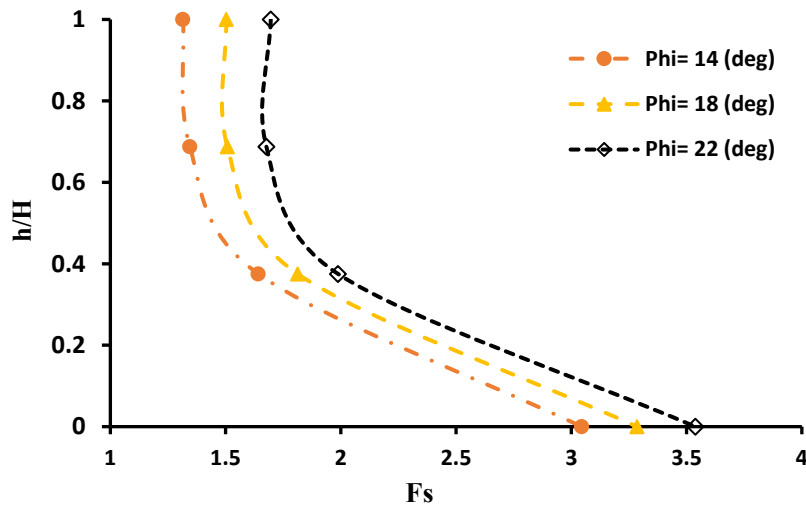
شکل ۸. تعیین ضریب اطمینان در مقابل عدد پایداری به ازای زاویه های مختلف

Fig. 8. Determine the factor of safety against the stability number for different angles.



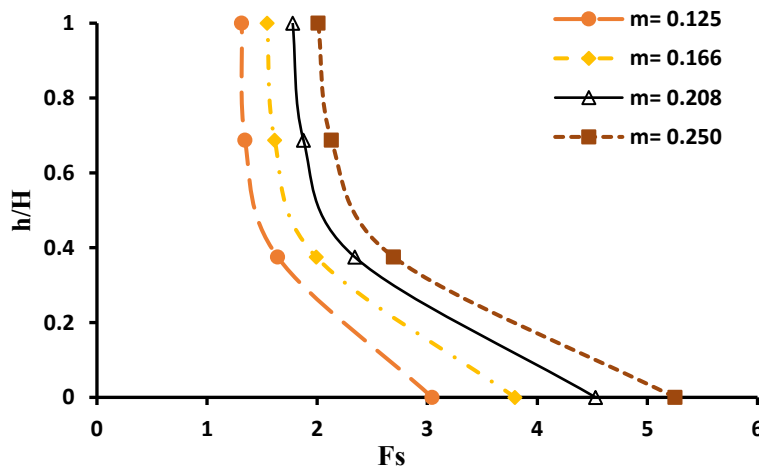
شکل ۹ الف. تغییرات نوع دایره لغزش در اثر افت سطح آب برای حالت (  $\phi = 14^\circ, C = 25 \frac{kN}{m^2}, \gamma = 15 \frac{kN}{m^3}, \beta = 30^\circ, \frac{h}{H} = 0$  ) ب. تغییرات نوع دایره لغزش در اثر افت سطح آب (  $\phi = 14^\circ, C = 25 \frac{kN}{m^2}, \gamma = 15 \frac{kN}{m^3}, \beta = 30^\circ, \frac{h}{H} = 0.6875$  ) آب

Fig. 9. Changing of slip circle type with water surface draw down A. for the state (  $\phi = 14^\circ, C = 25 \frac{kN}{m^2}, \gamma = 15 \frac{kN}{m^3}, \beta = 30^\circ, \frac{h}{H} = 0$  ) and B. for the state (  $\phi = 14^\circ, C = 25 \frac{kN}{m^2}, \gamma = 15 \frac{kN}{m^3}, \beta = 30^\circ, \frac{h}{H} = 0.6875$  )



شکل ۱۰. تغییرات ضریب اطمینان ( $F_s$ ) در مقابل افت نسبی تراز آب ( $h/H$ ) به ازای ( $m = 0.125, \beta = 30^\circ$ )

Fig. 10. Variations of factor of safety ( $F_s$ ) versus relative water level ( $h/H$ ) for the state ( $m = 0.125, \beta = 30^\circ$ )



شکل ۱۱. تغییرات ضریب اطمینان ( $F_s$ ) در مقابل تراز نسبی آب ( $h/H$ ) به ازای ( $\phi = 14^\circ, \beta = 30^\circ$ )

Fig. 11. Variations of factor of safety ( $F_s$ ) versus relative water level ( $h/H$ ) for the state ( $\phi = 14^\circ, \beta = 30^\circ$ )

کمتری داشته ولی با افزایش عدد پایداری در شرایط پایدارتری قرار خواهد گرفت.

میچالوفسکی [۱۷] برای تعیین ضریب اطمینان در برابر پایداری شیب به جای فرض لغزش دایره‌ای، از منحنی اسپیرال لگاریتمی استفاده نمود. وی برای تعیین ضریب اطمینان نموداری را به ازای عدد پایداری و زاویه شیب ارائه نمود. در عمل استفاده از نمودار مستلزم درون یابی و استفاده از خط کش است که وقت گیر و کم دقت خواهد بود. در تحقیق حاضر ابتدا داده‌های لازم از نمودار میچالوفسکی [۱۷] استخراج و سپس اقدام به تولید رابطه رگرسیونی گردید تا مشکل درون یابی رفع گردد. نتیجه

مشاهده می‌شود با کاهش سطح آب روی شیب (شیب قبل از افت در حالت استغراق بوده است) به دلیل حذف وزن آب روی شیب، ضریب اطمینان کمتر می‌گردد. به عبارت دیگر با کاهش تنش قائم آب روی شیب، از مقاومت برشی خاک کاسته می‌شود. شکل ۱۱ تغییرات  $F_s$  در برابر  $h/H$  به ازای عدد پایداری ( $m$ ) مختلف برای شرایط ( $\beta = 30^\circ, \phi = 14^\circ$ ) را ارائه می‌دهد. با توجه به شکل مشخص می‌گردد که در صورتی که سطح آب روی شیب به پنجه شیب می‌رسد ضریب اطمینان با کاهش عدد پایداری کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت شیب در هنگام پایین آمدن سطح آب ضریب اطمینان

جدول ۴. روابط رگرسیونی استخراج شده از نمودارهای ارائه شده در روش میچالوفسکی (۲۰۰۲)  
Table 4. The regression equations extracted from the Michalowski method (2002)

Equations	R <sup>۲</sup>	RMSE
$\frac{F_s}{\tan \phi} = 5.584 \times \left( \frac{c}{\gamma H \tan \phi} \right) - 0.077 \times (\beta) + 6.281$	۰.۹۵	۰.۹۹۳
$\frac{F_s}{\tan \phi} = 47.681 \times \left( \frac{c}{\gamma H \tan \phi} \right)^{0.704} \times (\beta)^{-0.452}$	۰.۹۷	۰.۷۷۶

جدول ۵. مقایسه روش عددی حاضر با روش میچالوفسکی (۲۰۰۲)  
Table 5. Comparison of the present numerical method with Michalowski method (2002)

Unit weight ( $\gamma$ ) (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (C) (kN/m <sup>2</sup> )	Angle of friction ( $\phi$ ) (deg)	Angle of Slope ( $\beta$ ) (deg)	SLOPE/W	Michalowski (Linear)	Michalowski (Non Linear)
۱۵	۱۵	۱۴	۳۰	۱/۵۶	۱/۶۹	۱/۵۷
۱۷	۱۵	۱۴	۳۰	۱/۴۵	۱/۶۱	۱/۴۴
۲۱	۱۵	۱۴	۳۰	۱/۳۰	۱/۴۹	۱/۲۴
۲۵	۱۵	۱۴	۳۰	۱/۲۰	۱/۴۱	۱/۱۰
۱۵	۲۰	۱۴	۴۵	۱/۵۳	۱/۶۳	۱/۶۰
۱۷	۲۰	۱۴	۴۵	۱/۴۱	۱/۵۲	۱/۴۷
۲۱	۲۰	۱۴	۴۵	۱/۲۳	۱/۳۷	۱/۲۶
۲۵	۲۰	۱۴	۴۵	۱/۱۱	۱/۲۶	۱/۱۲
۱۵	۲۰	۱۸	۶۰	۱/۷۷	۱/۸۳	۱/۹۰
۱۷	۲۵	۱۸	۶۰	۱/۶۴	۱/۷۰	۱/۷۴
۲۱	۲۵	۱۸	۶۰	۱/۳۹	۱/۵۰	۱/۵۰
۲۵	۲۵	۱۸	۶۰	۱/۲۳	۱/۳۷	۱/۳۳
۱۵	۳۰	۲۲	۷۵	۱/۶۹	۱/۶۰	۱/۹۵
۱۷	۳۰	۲۲	۷۵	۱/۵۳	۱/۴۴	۱/۷۹
۲۱	۳۰	۲۲	۷۵	۱/۲۸	۱/۲۰	۱/۵۴
۲۵	۳۰	۲۲	۷۵	۱/۱۴	۱/۰۴	۱/۳۶

کار دو معادله خطی و غیر خطی مطابق جدول ۴ است. مشاهده می شود که رابطه غیر خطی نتایج مناسبی را ارائه می کند که در آن جذر میانگین مربع خطا کمتر و ضریب تعیین بیشتر از رابطه خطی بدست آمده است. در مرحله بعد اقدام به مقایسه روش پیشنهاد شده توسط میچالوفسکی با

خروجی نرم افزار SLOPE/W شد (جدول ۵).  
به منظور برآورد ضریب اطمینان پایداری با هریک از روش های مورگنسترن - پرایس (Morgenstern-Price)، جانبو (Janbu)، بیشاب (Bishop) و روش مقدماتی یا فلنیوس (Ordinary) معادلات رگرسیونی

جدول ۶. معادله رگرسیونی برای به دست آوردن ضریب اطمینان پایداری شیب.  
**Table 6. Regression equation to obtain the factor of safety of slope stability**

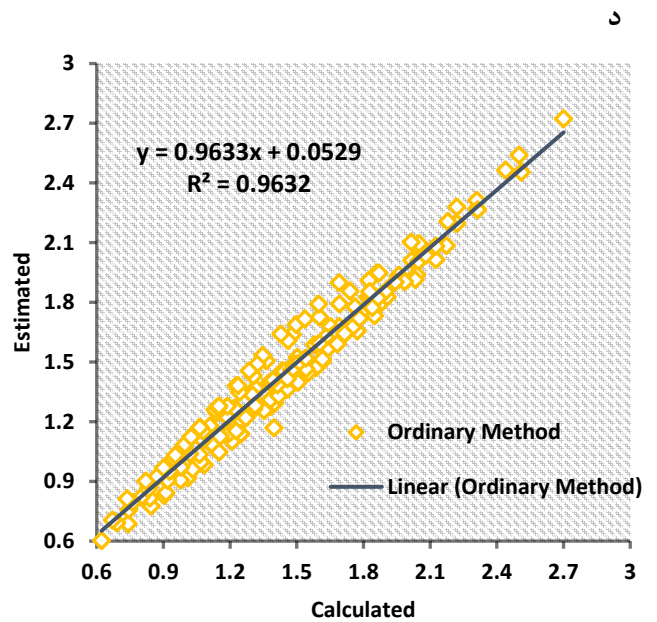
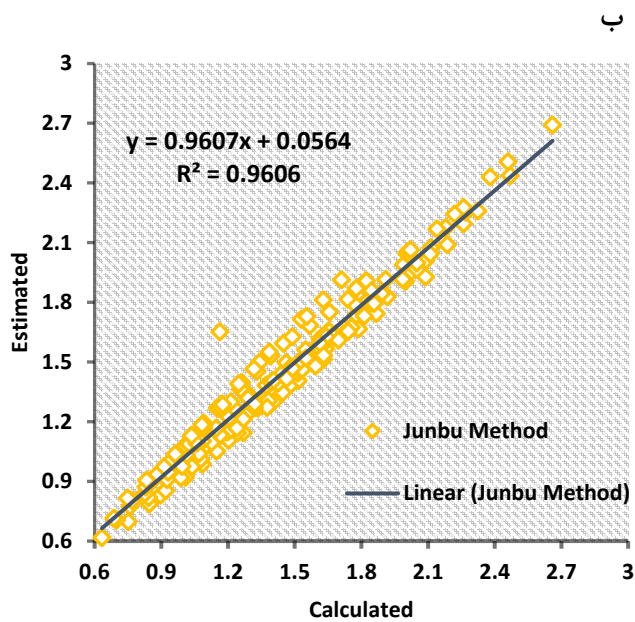
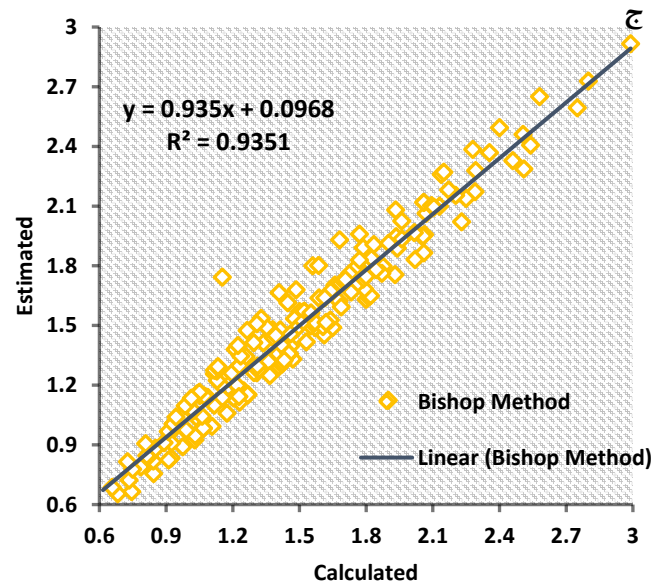
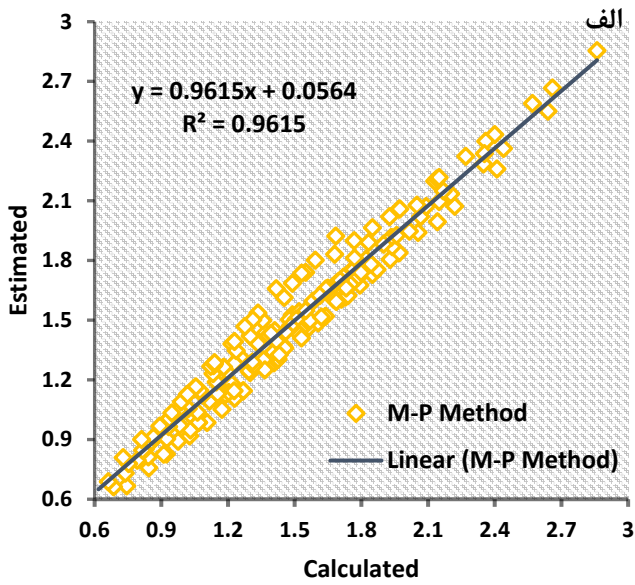
Method	Equations	R <sup>۲</sup>	RMSE
Morgenstern-Price	$F_s = 6.365 \times \left( \frac{c}{\gamma H} \right) + 2.01 \times \left( \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \right) - 0.289$	۰.۹۶۱	۰.۰۸۹۵
Janbu	$F_s = 6.365 \times \left( \frac{c}{\gamma H} \right) + 2.01 \times \left( \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \right) - 0.289$	۰.۹۶۱	۰.۰۸۲۲
Bishop	$F_s = 6.375 \times \left( \frac{c}{\gamma H} \right) + 2.12 \times \left( \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \right) - 0.320$	۰.۹۳۰	۰.۱۲۱۱
Ordinary	$F_s = 6.205 \times \left( \frac{c}{\gamma H} \right) + 1.780 \times \left( \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \right) - 0.202$	۰.۹۵۵	۰.۰۸۱۰

می باشد. بنابراین می توان روش ساده شده بیشاب را به دلیل سادگی در مقابل روش های پیچیده و دارا بودن دقت کافی در طراحی ها استفاده نمود. آژادمنش و عرفانی [۲۹] نیز در بررسی های خود پایداری شیب سد خاکی با هسته مایل رسی (سد آیدوغموش) مزایا و معایب روش های مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که اگرچه روش بیشاب ساده است ولی یک روش دقیق و سریع هست که در طراحی سدهای کوتاه کاربرد دارد. علاوه بر معیارهای فوق، برای بررسی دقت رابطه رگرسیون پیشنهادی، از نمودار پراکندگی داده ها در شکل ۱۲ استفاده گردید.

یک روش تحلیلی نیز توسط کلمن [۳۰]. برای تعیین ضریب اطمینان پیشنهاد شده است که در این روش سطح گسیختگی بر روی یک صفحه لغزشی در امتداد پنجه شیب به وجود می آید. به بیان دیگر سطح لغزش برای سادگی در حالت دو بعدی به صورت خط است و نه دایره ای. در جدول ۷ نتایج حاصل از روش قطعات و روش صفحه ای کلمن برای شرایطی که  $(\phi = 14^\circ, C = 15 \frac{kN}{m^2}, \gamma = 15 \frac{kN}{m^3}, H = 8m)$  آمده است. همانطور که مشاهده می گردد با افزایش زاویه شیب ( $\beta$ ) مقدار ضریب اطمینان ( $F_s$ ) به دست آمده با روش کلمن به روش های محاسبه ضریب اطمینان به روش قطعه ها (روش دایروی) نزدیک می گردد. بنابراین می توان گفت روش کلمن نتایج خوبی برای شیب های تند و نزدیک به قائم ارائه می دهد ولی نتایج رضایت بخشی برای شیب های نسبتاً پهن و ملایم به دست نمی دهد.

خطی با استفاده از نرم افزار SPSS22، [۲۷] نیز استخراج گردید. نتایج این محاسبات در جدول ۵ نشان داده شده است. لازم به ذکر است این معادلات برای محدوده شیب سازی شده یعنی  $0.175 < \frac{C}{\gamma H} < 0.25$  و  $0.177 < \frac{\tan(\phi)}{\tan(\beta)} < 0.19$  به دست آمده است. معیارهای ارزیابی جهت تخمین پارامتر ضریب اطمینان شامل ضریب تبیین ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب از روابط (۲) و (۳) محاسبه و در جدول ۵ آورده شده است.

با توجه به جدول ۵ ملاحظه می شود که معادلات رگرسیونی پیشنهادی در تخمین ضریب اطمینان پایداری شیب از دقت بالایی برخوردار هستند. معادله پیشنهادی برای روش جانبو و مورگنسترن - پرایس بیشترین ضریب تبیین با مقدار  $R^2 = 0.961$  را دارا می باشند، در صورتی که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در روش جانبو حدود ۸ درصد نسبت به روش مورگنسترن - پرایس کاهش داشته است، بنابراین روش جانبو دارای بیشترین دقت در محاسبه ضریب اطمینان می باشد. همانطور که در جدول ۶ مشاهده می شود، در روش بیشاب ضریب تبیین ( $R^2$ ) کمتر و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بیشتر از سایر روش ها می باشد. ولی درصد خطای نسبی (RE%) روش بیشاب نسبت به روش های مورگنسترن - پرایس، جانبو و روش مقدماتی یا فلنیوس به ترتیب  $1/3$ ،  $4/3$  و  $3/7$  درصد به دست می آید (در تحقیقات ویتمن و بیلی [۲۸] حداکثر ۷ و متوسط ۲ درصد به دست آمده است) و این خطاها در مقایسه با روش های دقیق تر و پیچیده قابل چشم پوشی



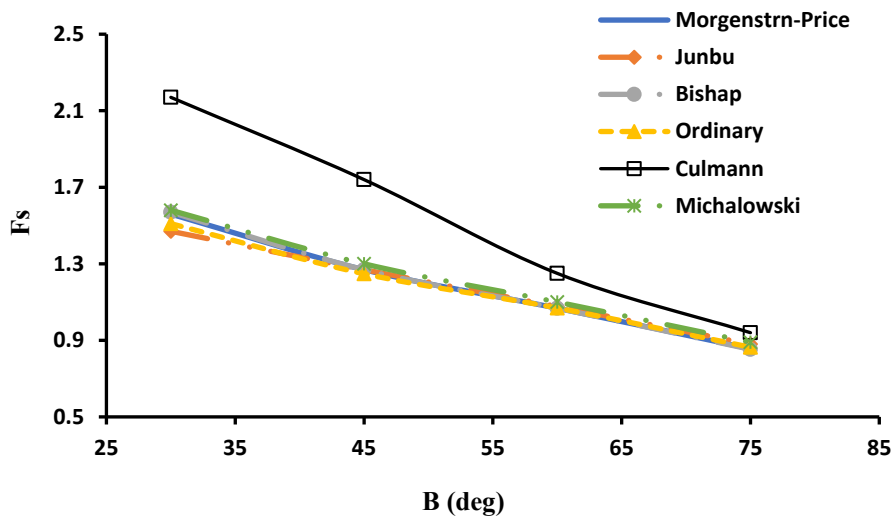
شکل ۱۲ الف. مقادیر ضریب اطمینان حاصل از روش عددی و رگرسیونی، روش مورگنشترن - پرایس (۱۹۶۵). ب. مقادیر ضریب اطمینان حاصل از روش عددی و رگرسیونی، روش بیشاپ (۱۹۵۵). ج. مقادیر ضریب اطمینان حاصل از روش عددی و رگرسیونی، روش مقدماتی (۱۹۳۹). د. مقادیر ضریب اطمینان حاصل از روش عددی و رگرسیونی، روش مقدماتی (۱۹۳۹).

Fig. 12. The safety factor of the numerical and regression method, A. Morgenstern-price method (1965), B. Janbu method (1973), C. Bishop method (1955) and D. Ordinary method (1939).

جدول ۷. مقایسه روش تحلیلی کلمن (۱۸۶۶) با سایر روش های محاسبه ضریب اطمینان پایداری.

Table 7. Comparison of Culmann's method with other methods for calculating the safety factor of stability.

$\beta^\circ$	SLOPE/W				Analytic	
	Morgenstern-price	Junbo	Bishop	Ordinary	Culmann	Michalowski
۳۰	۱/۵۶	۱/۴۷	۱/۵۷	۱/۵۱	۲/۱۷	۱/۵۸
۴۵	۱/۲۶۹	۱/۲۶۹	۱/۲۶۹	۱/۲۴۸	۱/۷۴	۱/۳۹
۶۰	۱/۰۶۸	۱/۰۷۷	۱/۰۶۸	۱/۰۶۹	۱/۲۵	۱/۱۰
۷۵	۰/۸۵۶	۰/۸۸	۰/۸۵۳	۰/۸۶۴	۰/۹۴	۰/۹۰



شکل ۱۳. تغییرات ضریب اطمینان در مقابل زاویه شیب برای حالت ( $\phi = 14^\circ, C = 15 \frac{kN}{m^2}, \gamma = 15 \frac{kN}{m^3}, H = 8 m$ )

Fig. 13. Variations of safety factor ( $F_s$ ) versus slope angle ( $\beta$ ) for state ( $\phi = 14^\circ, C = 15 \frac{kN}{m^2}, \gamma = 15 \frac{kN}{m^3}, H = 8 m$ )

آمده می توان به نکات زیر اشاره نمود:

- ۱- نوع دایره های لغزش مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که به ازای زاویه های کمتر از ۶۰ درجه احتمال وجود هر سه نوع دایره لغزش با توجه به عدد پایداری (m) و زاویه شیب ( $\beta$ ) وجود دارد. ولی برای زاویه های بزرگتر از ۶۰ درجه، نوع دایره لغزش به ازای تمامی شرایط از نوع Toe circle می باشد.
- ۲- هنگام افت سطح آب به دلیل حذف نیروی وزن آب روی شیب بالادست، ضریب اطمینان در برابر لغزش کاهش می یابد. دلیل آن کاهش تنش کل و سپس کاهش مقاومت برشی خاک می باشد.
- ۳- روش لغزش صفحه ای کلمن با روش لغزش دایره ای (بیشاب، مقدماتی، مورگنسترن- پرایس، جانبو و میچالوفسکی) با هم مورد

### نتیجه گیری کلی

هدف اصلی از تحقیق حاضر بررسی تاثیر پارامترهای متفاوت موثر بر ضریب اطمینان پایداری شیب شامل وزن مخصوص ( $\gamma$ )، چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) و پارامترهای هندسی شامل زاویه شیب نسبت به افق ( $\beta$ )، ارتفاع شیب (H) و تراز آب (h) است. برای این منظور تعداد ۱۹۲ مدل در نرم افزار SLOPE/W اجرا و نتایج به صورت نمودارهای بی بعد و معادلات همبستگی ارائه گردید. شبیه سازی به صورت جریان ماندگار انجام گرفت. برای صحت سنجی روش تعادل حدی بکار رفته در این تحقیق از ۵ نمونه شیب خاکی واقعی گزارش شده در دنیا استفاده گردید و متوسط خطا ۶/۷۵ درصد در برآورد ضریب اطمینان پایداری شیب بدست آمد. طبق نتایج بدست

- [2] B.M. Das Principles of geotechnical engineering, Cenage Learning, Stamford, CT., (2010).
- [3] W. Fellenius, Erdstatische Berechnungen, rev. ed., W. Ernst u. Sons, Berlin, (1927).
- [4] A.W. Bishop, N. R. Morgenstern, Stability Coefficients for Earth Slopes, Geotechnique, 10(4) (1960) 129–147.
- [5] J. Lowe, L. Karafiath, Stability of Earth Dams upon Drawdown, in: Proceedings of the First PanAmerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexican Society of Soil Mechanics, Mexico D.F, (1960) 537-552.
- [6] N. Janbu, Slope stability computations, New York, (1973).
- [7] U.S.A.C.o. Engineers, Stability of Earth and Rock-Fill Dams, Vicksburg, MS, 1970.
- [8] E. Spencer, A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces, Geotechnique, 17(1) (1967) 11–26.
- [9] N.R. Morgenstern, V.E. Price, The analysis of the stability of general slip surfaces, Geotechnique, 15(1) (1965) 79–93.
- [10] S.K. Sarma, Stability analysis of embankments and slopes, Geotechnique, 23 (1973).
- [11] Singh, Shear Strength and Stability of Man- Made Slope, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96(SM6) (1970) 1879–1892.
- [12] B. Pradha, Use of GIS-based fuzzy logic relations and its cross application to produce landslide susceptibility maps in three test areas in Malaysia, Environ Earth Sci 63(2) (2011) 329–349.
- [13] A.H. Alavi, A.H. Gandomi, Energy-based numerical models for assessment of soil liquefaction, Geosci Front 3(4) (2012) 541–555.
- [14] Kainthola, D. Verma, R. Thareja, T.N. Singh, A review on numerical slope stability analysis, Int J Sci Eng Technol Res, 2(6) (2013) Int J Sci Eng Technol Res.
- [15] D. Ramakrishnan, T.N. Singh, A.K. Verma, A. Gulati, K.C. Tiwari, Soft computing and GIS for landslide susceptibility assessment in Tawaghat area, Kuman Himalaya, India. Nat Hazards, 65(1) (2013) 315–330.
- [16] D. Verma, A. Kainthola, R. Thareja, T.N. Singh, Stability

مقایسه قرار گرفت و مشاهده گردید روش های شکست دایره ای و شکست اسپیرال لگاریتمی نتایج نسبتا یکسانی ارائه می دهند. لیکن روش لغزش صفحه ای نتایج خوبی برای شیب های تند و نزدیک به قائم ارائه می دهد ولی نتایج قابل قبولی برای شیب های ملایم به دست نمی دهد.

۴- در روش بیشاب ضریب تبیین ( $R^2$ ) کمتر و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بیشتر از سایر روش ها به دست آمد ولی خطای روش بیشاب نسبت به روش های دیگر در بیشترین حالت ۱/۳ درصد به دست می آید. به نظر می رسد که این خطا در مقایسه با کاربرد روش های دقیق تر و پیچیده قابل چشم پوشی باشد.

۵- معادله ای به جای نمودار میچالوفسکی (۲۰۰۲) برای تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب ارائه گردید که روش درون یابی و استفاده از خط کش را حذف و دقت کار را بالاتر می برد. یک نموداری (شکل ۷) مشابه کار میچالوفسکی در تحقیق حاضر تهیه گردید که علاوه بر مقدار ضریب اطمینان پایداری می توان نوع دایره لغزش را نیز به وسیله آن تعیین نمود.

۶- از آنجایی که محاسبات و تعیین دقیق شرایط اولیه مسئله در مدل های عددی زمان بر و نیاز به تخصص دارد در تحقیق حاضر یکسری روابط رگرسیونی بی بعد پیشنهاد گردید که با استفاده از این روابط و بدون استفاده از روش های تعادل حدی به راحتی و مستقیم می توان ضریب اطمینان پایداری را تخمین زد.

## علائم

$\gamma$  وزن مخصوص خاک، ( $\text{kN/m}^3$ )

$C$  چسبندگی خاک، ( $\text{kN/m}^2$ )

$\phi$  زاویه اصطکاک داخلی، ( $^\circ$ )

$\beta$  زاویه شیب نسبت به افق، ( $^\circ$ )

$H$  ارتفاع خاکریز، (m)

$h$  افت سطح آب، (m)

$F_s$  ضریب اطمینان، (-)

## منابع و مراجع

- [1] H.B. Wang, W.Y. Xu, R.C. Xu, Slope stability evaluation using back propagation neural networks, Engineering Geology, 80 (2005) 302–315.



- of Safety Factor of Homogeneous Finite Slopes, *Geotech Geol Eng* 37, 3949–3959 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10706-019-00884-3>
- [24] Geo-Studio, *Geo Slope International*, in: V.U. manual (Ed.), Calgary, (2012).
- [25] N.K. Sah, P.R. Sheorey, L.W. Upadhyama, Maximum likelihood estimation of slope stability, *Maximum likelihood estimation of slope stability*, 31 (1994) 47–53.
- [26] E. Madzic, Stability of unstable final slope in deep open iron mine, In: Bonnard (ed.) *Landslides*, Balkema, 1 (1988) 455–458.
- [27] SPSS, *Statistical package for social science in: software version 22*.
- [28] R.V. Witman, W.A. Baily, Use of computers for slope stability Analysis, *Jr. Soil Mech. And Found. Eng. ASCE*, 93(SM4) (1967).
- [29] M., N. Arafati, A Comparison on Slope Stability Analysis of Aydoghmoosh Earth Dam by Limit Equilibrium, Finite Element and Finite Difference Methods, *International Journal of Civil Engineering and Building Materials*, 2(3) (2012).
- [30] C. Culmann, *Die Graphische Statik*, Meyer and Zeller, Zurich, (1875).
- analysis of an open cut slope in Wardha valley coal field, *J Geol Soc India*, 81 (2013) 804–810.
- [17] R.L. Michalowski, *Stability Charts for Uniform Slopes*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 128(4) (2002) 351–355.
- [18] T. Steward, N. Sivakugan, S.K. Shukla, B.M. Das, *Taylor's Slope Stability Charts Revisited*, *International Journal of Geomechanics*, ASCE, 11(4) (2011) 348–352.
- [19] Y. Erzin, T. Cetin, The prediction of the critical factor of safety of homogeneous finite slopes using neural networks and multiple regressions 51 (2013) 305–313.
- [20] M.G. Sakellariou, M.D. Ferentinou, A study of slope stability prediction using neural networks, *Geotechnical and Geological Engineering*, 23 (2005) 419–445.
- [21] T. Gaopeng, Z. Lianheng, G. Liansheng, L. Wei, *Stability charts for undrained clay slopes in overload conditions based on upper bound limit analysis* Article in *Electronic, Journal of Geotechnical Engineering*, (2014).
- [22] Y. Luo, S. He, F.Z. Chen, X. Li, J.C. He, A physical model considered the effect of overland water flow on rainfall-induced shallow landslides, *Geoenviron Disasters Springer J*, 2(8) (2015) 1–11.
- [23] F. Salmasi, F. Jafari, A Simple Direct Method for Prediction

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Salmasi, B. Nourani, H. Khansar, *Numerical Simulation for Determination of Sliding Type and Stability Factor of Safety in Finite Slopes with Limit Equilibrium Method*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(12) (2021) 3203–3220.

DOI: 10.22060/ceej.2019.16332.6190



