

**A. R. Mazaheri\***

Department of Engineering  
Faculty, Ayatollah Borujerdi  
University.

**e-mail:** A.Mazaheri@Abnu.ac.ir

**B. Tahmasebi**

Master of Science Student,  
Ayatollah Borujerdi  
University.

**e-mail:** babakkasit@yahoo.com

**M. Komasi**

University of Ayatollah  
Boroujerdi, Iran.

**e-mail:** Komasi@Abnu.ac.ir

**M. Nasiri**

Ph.D Student, Razi University.

**e-mail:** Nasiri.ma@razi.ac.ir

## **Investigation of the Effect of Crack Position and Strength Characteristics of Materials on the Stability of Homogeneous Soil Slopes**

*The complexity of the conditions and behavior of soil materials, the existence of various hypotheses in the formulation of stability analysis, and the mechanism of slip and failure of slopes are among the main factors influencing the methods of soil slope stabilization. The cracks are a common occurrence on earth slopes that require a method that includes the presence of cracks in the stability assessment based on the kinematic approach of finite element and finite-difference. While many cracks may be present on a slope, the failure mechanism typically involves a crack whose position has the greatest negative effect on stability. In the present study, the geometry of critical failure surfaces, including the most undesirable cracks for slopes with different transverse and slope constraints, has been analyzed. Based on the findings of numerical modeling, it can be concluded that the critical height of the slope decreases due to the presence of cracks. This decrease, however, decreases with the angle of slope inclination. The results showed that according to the finite difference method, the most critical crack position for homogeneous soil slopes will be at the slope toe because, in this range, crack formation creates the lowest factor of safety.*

**Keywords:** Stability Analysis, Earth Slope, Crack, Finite Difference.

---

\* Corresponding author

Received 04 May 2021, Revised 04 August 2021, Accepted 05 August 2021.

DOI: 10.22091/cer.2021.6917.1246

## بررسی اثر موقعیت ترک و مشخصات مقاومتی مصالح بر پایداری شیب‌های خاکی همگن

پهچیدگی شرایط و رفتار مصالح خاکی، وجود فرضیات متعدد در فرمول‌بندی تحلیل پایداری، مکانیسم لغزش، شکست شیب‌ها و ایجاد ترک در قسمت‌های مختلف شیب از جمله عوامل اصلی اثرگذار در پایداری شیب‌های خاکی است. در واقع، ترک‌ها یک رخداد شایع در شیب‌های خاکی بوده که نیازمند روشی هستند که شامل حضور ترک در ارزیابی پایداری براساس رویکرد سینماتیکی اجزای محدود و تفاضل محدود باشد. در حالی که بسیاری از ترک‌ها ممکن است در یک شیب وجود داشته باشند، به‌طور معمول مکانیسم شکست درگیر ترکی است که موقعیت آن دارای بیشترین اثر منفی بر پایداری است. در پژوهش حاضر، هندسه سطوح شکست بحرانی، از جمله نامطلوب‌ترین ترک‌ها، برای دامنه‌هایی با محدودیت‌های عرضی و شیبی مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. براساس یافته‌های حاصل از مدل‌سازی‌های عددی می‌توان نتیجه‌گیری کرد ضریب اطمینان در برابر پایداری به دلیل وجود ترک کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که براساس روش تفاضل محدود، بحرانی‌ترین موقعیت ترک برای شیب‌های خاکی همگن در محل پنجه شیب خواهد بود، زیرا در این محدوده، تشکیل ترک باعث ایجاد کمترین ضریب اطمینان می‌گردد.

**واژگان کلیدی:** تحلیل پایداری، شیب خاکی، ترک، روش تفاضل محدود.

احمدرضا مظاهری\*

دانشکده فنی و مهندسی،  
دانشگاه آیت الله العظمی  
بروجردی.

پست الکترونیک:

A.Mazaheri@Abbru.ac.ir

بابک طهماسبی راد

دانشجوی کارشناسی ارشد  
سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه  
آیت الله العظمی بروجردی.

پست الکترونیک:

babakkasit@yahoo.com

مهدی کماسی

دانشکده فنی و مهندسی،  
دانشگاه آیت الله العظمی  
بروجردی.

پست الکترونیک:

Komasi@Abbru.ac.ir

مسعود نصیری

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک،  
دانشگاه رازی کرمانشاه.

پست الکترونیک:

Nasiri.ma@razi.ac.ir

### ۱- مقدمه

پایداری، یعنی ایستایی شیب با درجه اطمینان قابل قبول. ناپایداری شیب به معنی حرکت و جابه‌جایی آن است. پایداری و فرآیند پایداری سازی شیب‌ها از مهمترین و اساسی‌ترین مسائل در مهندسی ژئوتکنیک است. گسیختگی و شکست شیب‌ها در طول زمان موجب خسارت و صدمات مالی و جانی زیادی شده است [۱].

بروز ترک در پی و شیروانی بالادست و پایین‌دست سدهای خاکی یکی از عوامل مهمی است که موجب

مسئله پایداری شیب‌ها از مهمترین و اساسی‌ترین مسائل مهندسی ژئوتکنیک محسوب می‌شود. منظور از

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۲/۱۴، بازنگری ۱۴۰۰/۰۵/۱۳، پذیرش ۱۴۰۰/۰۵/۱۴.

(DOI): 10.22091/cer.2021.6917.1246 شناسه دیجیتال

محققان به تجزیه و تحلیل و مقایسه شیب‌های خاکی همگن همراه با ترک پرداختند. در این بررسی، نتایج حاصل از بررسی تحلیل عددی ارائه شده توسط دانشمندان مختلف پرداخته شده است. در این پژوهش‌ها تأثیر ایجاد ترک بر میزان کار انجام گرفته در روش تحلیل عددی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن به صورت نمودارهایی گزارش شده است [۶].

در پژوهش ژائو<sup>۵</sup> و همکاران، به بررسی پایداری شیب‌های خاکی تحت تأثیر نیروی زلزله پرداخته شده است. در این تحقیق، با استفاده از روش تحلیل عددی تأثیر عمق و محل ترک در شیب‌های خاکی همگن مورد ارزیابی قرار گرفته است. آنها نشان دادند در شیب‌های خاکی همگن همراه با ترک با افزایش زاویه اصطکاک تأثیر نیروی زلزله بر پایداری شیروانی افزایش می‌یابد [۷].

پژوهشگران به بررسی تأثیر جهت ترک در شیب‌های خاکی پرداختند. در بررسی صورت گرفته، تأثیر لایه‌بندی خاک و جهت ترک ایجاد شده بر رفتار شیب خاکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین آنها بیان نمودند که ترک ایجاد شده در وسط شیب در صورتی که عمیق باشد، می‌تواند در کاهش ضریب اطمینان تأثیرگذار باشد [۸].

لی و یانگ<sup>۶</sup> به بررسی اثر آب را در پایداری و ضریب اطمینان شیب‌های خاکی ترک‌خورده مورد ارزیابی قرار دادند. آنها بر مبنای تحلیل حدی، مکانیسم گسیختگی جدیدی جهت بررسی ضریب اطمینان در شیب‌های خاکی ترک‌خورده و با حضور آب پیشنهاد نمودند [۹].

محققان به بررسی تأثیر ترک در شیب‌های خاکی در شرایط زهکشی نشده پرداختند. آنها رنج وسیعی از شیب‌های خاک ایجاد شده در خاک رس در شرایط زهکشی نشده (زاویه اصطکاک صفر) را مورد بررسی قرار

تخریب و شکست چنین سدهایی شده و در نتیجه خسارات مالی و جانی جبران‌ناپذیر در پایین‌دست سدها به دنبال خواهد داشت. لزوم بررسی پدیده ترک‌خوردگی که معمولاً به صورت لغزش بروز می‌کند و در صورت لغزش، تهدید جدی برای پایداری سد و حتی شکست سد را به دنبال دارد، موضوعی بسیار مهم است [۲]. ژانگ<sup>۱</sup> و همکاران به بررسی اثرات ترک‌ها بر رفتار شیب‌های خاکی در شرایط بارندگی پرداختند. لغزش‌های عمیق در شیب‌ها اغلب ناشی از بارندگی به واسطه ترک‌های موجود از قبل و یا لایه‌های ضعیف هستند. مجموعه‌ای از آزمایش‌های مدل سانتریفیوژ تحت شرایط بارندگی در دامنه‌های مختلف با انواع ترک‌ها انجام شد [۳].

اگلی و فیلات‌پولات<sup>۲</sup> به بررسی مکانیسم و مدل‌سازی پایداری شیب خاکی کم‌عمق در طی بارندگی با شدت بالا و زمان کوتاه پرداختند. نتایج نشان داد که تمام شیب‌های ۳۵ درجه، دچار گسیختگی موازی سطح شیب<sup>۳</sup> شده‌اند. برای دیگر زوایای شیب‌ها (۲۵ و ۱۵ درجه)، هیچ خرابی مشاهده نگردید [۴]. سان<sup>۴</sup> و همکاران به تجزیه و تحلیل پایداری شیب خاکی غیراشباع خاک در طی نفوذ باران با استفاده از مدل کوپل سه فاز مایع، گاز و جامد پرداختند. در این پژوهش از نرم افزار FLAC<sup>3D</sup> برای تجزیه و تحلیل مکانیکی استفاده شد. نتایج نشان داد که ابتدا ضریب اطمینان برای سطح لغزش داده شده کاهش یافته، سپس افزایش می‌یابد و مجدداً کاهش خواهد یافت تا بارندگی متوقف شود. در نتیجه، ضریب اطمینان دچار افزایش ناگهانی خواهد شد. پس از آن، ضریب اطمینان به‌طور مداوم کاهش یافته و به کمترین مقدار خود می‌رسد و سپس به آرامی تا مقدار ثابتی افزایش می‌یابد [۵].

<sup>1</sup>- Zhang

<sup>2</sup>- Egeli and Firat Pulat

<sup>3</sup>- translational failure

<sup>4</sup>- Sun

<sup>5</sup>- Zhao

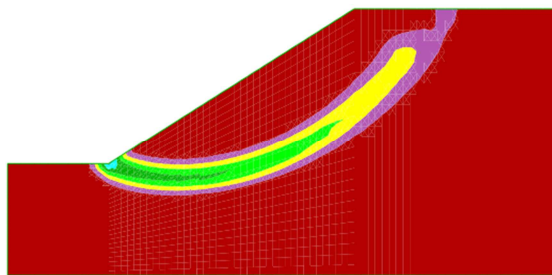
<sup>6</sup>- Li and Yang

پرداخته شده است. در این پژوهش، با استفاد از روش تحلیل عددی، پایداری شیب‌های خاکی و ایجاد ترک در آنها، مورد ارزیابی قرار گرفته است. روش انجام شده با استفاده از مدل‌سازی تفاضل محدود توسط نرم‌افزار  $FLAC^{2D}$  در بحث تأثیر محل و فاصله ترک بر پایداری شیب‌های خاکی و مدل‌سازی ترک در نرم‌افزار مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

## ۲- تعریف مساله

### ۲-۱- شیب مورد بررسی

شیروانی مورد بررسی در این پژوهش، یک شیروانی با خاک همگن است که ارتفاع آن ۳۰ متر و زاویه آن ۳۰ درجه می‌باشد. مشخصات مصالح با تغییر زاویه اصطکاک و تغییر چسبندگی مصالح تغییر یافته است. شکل ۱- الف، هندسه شیروانی مورد نظر را نشان می‌دهد. در این پژوهش برای بررسی ترک در شیب‌های خاکی از نرم‌افزار تفاضل محدود  $FLAC^{2D}$  استفاده شده است. در شکل ۱- ب، مدل نمونه‌ای از مدل‌سازی در نرم‌افزار تفاضل محدود دو بعدی  $FLAC$  برای چسبندگی ۲۰ کیلوپاسکال و زاویه اصطکاک ۳۰ درجه نشان داده شده است. در جدول ۱ نیز مشخصات مصالح برای هر دو نوع شیب ارائه شده است.



(ب)

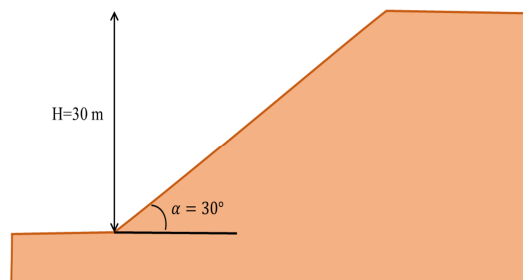
شکل ۱- (الف) هندسه شیب مدل شده و (ب) شیب مدل شده در نرم‌افزار  $FLAC^{2D}$

مشخص گردیده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش میزان چسبندگی خاکریز، عمق سطح لغزش افزایش یافته است.

دادند و بیان نمودند که ترک در شیب‌های تند، تأثیر بیشتری بر کاهش ضریب اطمینان دارد. علاوه بر آن، پژوهشگران دریافته‌اند که در شیروانی‌های خاکی ملایم وجود ترک در وسط شیروانی، تأثیر محسوسی بر مقاومت شیب نخواهد داشت [۱۰].

محققان با استفاده از تحلیل عددی به بررسی شیب‌های خاک همگن ترک خورده پرداخت. در این بررسی سه نوع مختلف از ترک و شیب با شرایط مختلف عمق مورد بررسی واقع گردید و در هر روش با استفاده و روابط تحلیلی، میزان کار انجام شده در روش تحلیل حدی محاسبه شد [۱۱]. پژوهشگران دیگری نیز ترک در شیب‌های خاکی را با استفاده از روش تحلیل حدی مورد ارزیابی قرار دادند. آنها ایجاد ترک در شیب‌های خاکی را در حالت‌های مختلفی مورد ارزیابی قرار دادند و با در نظر گرفتن یک بلوک لغزش، مکانیزم ایجاد ترک در شیب خاک با استفاده از روش تحلیل حدی را نشان دادند [۱۲]. به‌طور کلی، موضوع پایداری شیب‌های خاکی و نیز ترک ایجاد شده در شیب‌ها از جمله مسائل کاربردی بوده که در کانون توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۱۳-۱۷].

در اکثر روش‌های ذکر شده که موضوع ترک را در شیب مورد بررسی قرار داده‌اند، از روش تحلیلی و با استفاده از روش تحلیل حدی به بررسی این موضوع

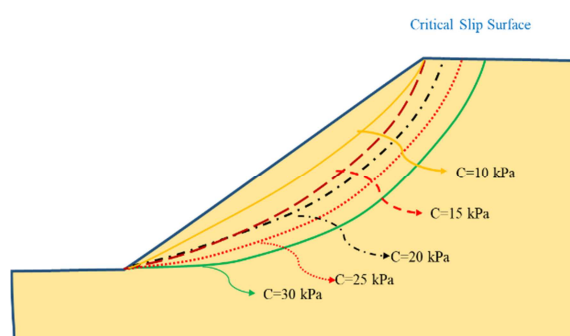


(الف)

شیب‌ها با مشخصات بیان شده در جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفته و ضرایب اطمینان اولیه آنها تعیین شده است. در شکل ۲ سطوح گسیختگی اولیه آنها

جدول ۱- مشخصات مصالح در تحلیل‌های عددی

| شماره | ضریب اطمینان اولیه | وزن مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ ) | مدول یانگ (kPa) | نسبت پواسون | زاویه اصطکاک داخلی | چسبندگی (kPa) |
|-------|--------------------|-------------------------------|-----------------|-------------|--------------------|---------------|
| ۱     | ۱/۶۶               | ۱۹۰۰                          | ۶۱۰۰۰           | ۰/۲۵        | ۲۸                 | ۳۰            |
| ۲     | ۱/۴۶               | ۱۹۰۰                          | ۶۱۰۰۰           | ۰/۲۵        | ۲۴                 | ۳۰            |
| ۳     | ۱/۲۸               | ۱۹۰۰                          | ۶۱۰۰۰           | ۰/۲۵        | ۲۰                 | ۳۰            |
| ۴     | ۱/۳۹               | ۱۹۰۰                          | ۶۱۰۰۰           | ۰/۲۵        | ۲۴                 | ۲۵            |
| ۵     | ۱/۳۱               | ۱۹۰۰                          | ۶۱۰۰۰           | ۰/۲۵        | ۲۴                 | ۲۰            |
| ۶     | ۱/۲۱               | ۱۹۰۰                          | ۶۱۰۰۰           | ۰/۲۵        | ۲۴                 | ۱۵            |
| ۷     | ۱/۰۹               | ۱۹۰۰                          | ۶۱۰۰۰           | ۰/۲۵        | ۲۴                 | ۱۰            |



شکل ۲- سطوح گسیختگی در شرایط چسبندگی مختلف

در این مرحله از پژوهش، اعتبارسنجی نتایج حاصل از روش تفاضل محدود که توسط نرم‌افزار  $\text{FLAC}^{2D}$  انجام شده است، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدین ترتیب که نتایج حاصله با نتایج تحقیقات یوتلی<sup>۷</sup> مقایسه خواهد شد [۱۶]. در اینجا در هر دو مدل، یعنی هم تحلیل حدی یوتلی و هم مدل تفاضل محدود در این پژوهش با زاویه اصطکاک داخلی ۲۰ درجه و زوایای شیب ۲۵، ۴۵ و ۶۰ درجه تحلیل و مقایسه شده‌اند. در شکل ۳، هندسه سطوح لغزش بحرانی و ترک‌های بالقوه حاصل از هر دو مدل نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ مشخص است، روش تفاضل محدود در شیب‌های با زاویه خوابیده، عمق سطح گسیختگی را مقداری بیشتر از روش یوتلی [۱۶] محاسبه می‌کند و این به احتمال زیاد مربوط به هندسه مش‌ها و روشی که نرم‌افزار برای سطح

این موضوع بیان می‌کند که با افزایش مقدار چسبندگی، گسیختگی محتمل چنین خاگریزی عمیق و عمیق‌تر خواهد شد، که نشان از افزایش پهنه ناحیه گسیخته شده و نیز تأثیر موقعیت ترک بر پایداری شیب دارد.

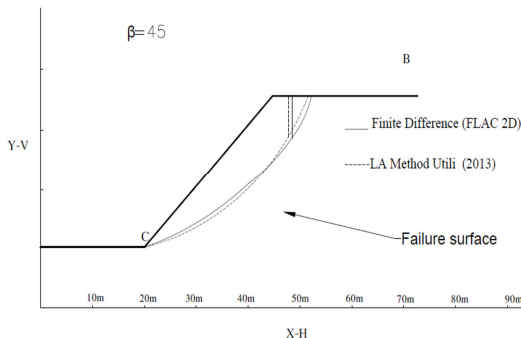
در شیب‌های خاکی، باز شدن ترک در خاک در بالای شیب قبل از فروپاشی شیب امری رایج است. بیشتر آنالیزهای معمولی، روند باز شدن ترک را شامل نمی‌شوند. در اکثر موارد، یک ترک از قبل موجود، در نظر گرفته شده و موضوع با استفاده از آنالیز روش‌های عددی مرسوم مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۸-۲۳]. در ادامه، موقعیت‌های مورد بررسی وضعیت ترک در شیب خاکی بیان می‌گردد.

## ۲-۲- صحت‌سنجی نرم‌افزار $\text{FLAC}^{2D}$

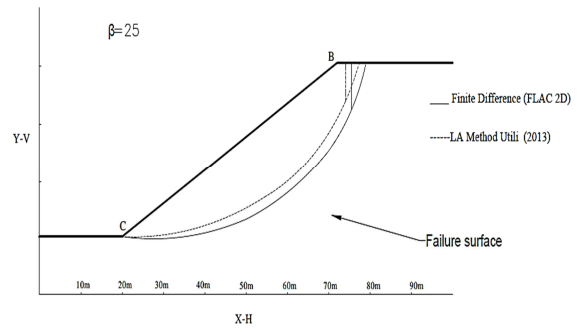
<sup>7</sup>- Utili

تفاضل محدود بسیار شبیه هم هستند و تقریباً همانند هم عمل می‌کنند.

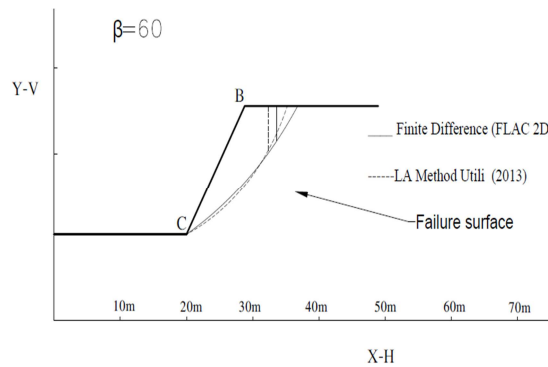
گسیختگی شیب استفاده می‌کند، مربوط باشد. اما در دیگر زوایا، نتایج حاصله از روش تحلیل حدی و روش



(ب)



(الف)



(پ)

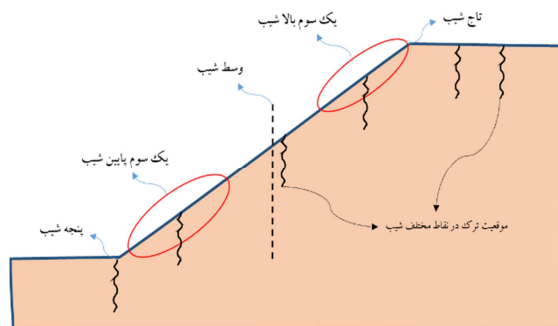
شکل ۳- سطوح لغزش و ترک‌های ایجاد شده در دو نرم‌افزار تفاضل محدود (این پژوهش) و تحلیل حدی (یوتلی [۱۶]) با زوایای (الف) ۲۵، (ب) ۴۵ و (پ) ۶۰ درجه

نشان داده شده است. در تمام تحلیل‌های صورت گرفته، عمق ترک ۴ و عرض آن ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است. به منظور مدل‌سازی ترک در نرم‌افزار پس از ساخت مدل، ترک مورد نظر با استفاده از المان Null در نرم‌افزار ایجاد شده است.

یک موضوع دیگری که در روش تفاضل محدود در شیب‌هایی با زوایای مختلف، مشاهده شد این است که در شیب‌های تند از میزان ناحیه سطح گسیختگی شیب کاسته می‌شود و عمق گوه گسیختگی نیز کمتر می‌شود. در روش تحلیل حدی که توسط یوتلی صورت گرفت، مشاهده شد که سطوح لغزش به دست آمده از شیب‌های کم‌عمق به دلیل بروز ترک‌های بسیار کوچک، مشابه هستند [۱۶].

### ۳-۲- بررسی موقعیت مختلف ترک در شیب

به منظور بررسی تأثیر ترک بر رفتار و ضریب اطمینان شیب خاکی، ترک‌هایی در سه قسمت تاج، دامنه و پاشنه شیب ایجاد شده و تأثیر هر یک از این ترک‌ها بر ضریب اطمینان شیب، مورد ارزیابی قرار گرفته است. موقعیت‌های مختلف ترک‌ها در شیب‌های خاکی شکل ۴

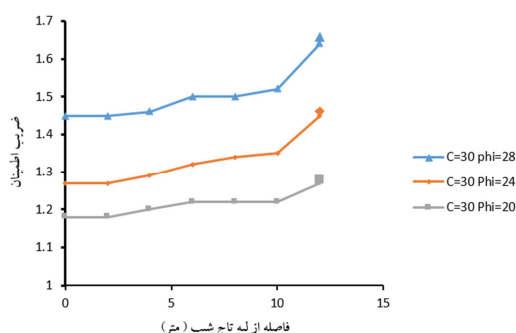


شکل ۴- موقعیت مختلف ترک‌ها در شیب خاکی

### ۳- بحث و بررسی نتایج

#### ۳-۱- بررسی تأثیر ترک در تاج شیب

با افزایش فاصله ترک بیش از ۱۰ متر، همانطور که در شکل مشخص است، ضریب اطمینان به مقدار ضریب اطمینان شیب در حالت بدون ترک نزدیک شده است.



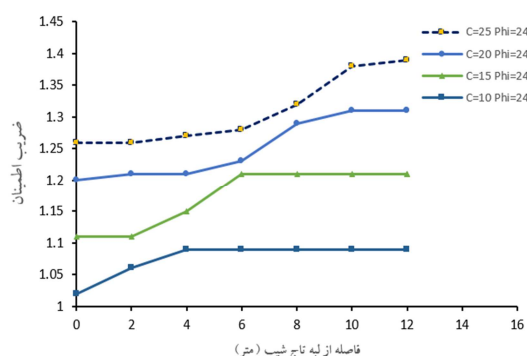
شکل ۶- اثر زاویه اصطکاک بر مقدار ضریب اطمینان (ترک در تاج)

این بدان معنی است که ایجاد ترک در فاصله بیشتر از ۱۰ متری در تاج، تأثیری بر ضریب اطمینان شیب نخواهد داشت. علاوه بر آن، همانطور که مشخص است ایجاد ترک باعث کاهش ضریب اطمینان در شیب می‌شود که این کاهش در شیب‌های با زاویه اصطکاک‌های مختلف روند یکسانی را دارد و هنگامی که ترک در تاج شیب و تا فاصله ۱۰ متری از لبه تاج رخ می‌دهد ضریب اطمینان حدود ۸۰ درصد ضریب اطمینان حالت بدون ترک می‌باشد. این روند یکسان در رفتار شیب‌های با ضریب زاویه اصطکاک‌های مختلف را می‌توان به دلیل عدم تأثیر تغییرات زاویه اصطکاک بر عمق گوه گسیختگی دانست.

### ۳-۲- بررسی تأثیر ترک در دامنه شیب

در این مرحله، وضعیت شیب زمانی که ترک در قسمت‌های مختلف دامنه شیب ایجاد می‌گردد مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۷ کانتور گسیختگی شیب زمانی که ترک در دامنه شیب ایجاد شده است را نشان می‌دهد. نتایج این بررسی در شکل ۸، مقادیر ضریب اطمینان شیب با توجه به تغییرات بازه چسبندگی را مشخص می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که وجود ترک در یک سوم بالای شیب، بیشترین تأثیر را بر کاهش ضریب اطمینان دارد.

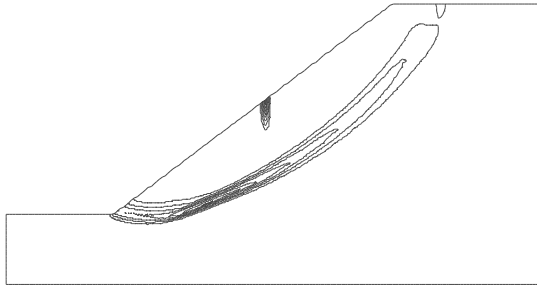
در این قسمت، تأثیر وجود ترک و تغییر فاصله ایجاد آن در تاج شیب مورد ارزیابی قرار گرفته است. همانطور که در جدول ۱ بیان گردید چسبندگی شیب از مقدار ۱۰ کیلوپاسکال تا ۳۰ کیلوپاسکال و زاویه اصطکاک از ۲۰ تا ۲۸ درجه تغییر یافته است. در شکل ۵، مقادیر ضریب اطمینان در شرایط چسبندگی مختلف با فاصله گرفتن ترک از تاج شیب نشان داده است. در این حالت، مقدار زاویه اصطکاک ثابت نگاه داشته شده و چسبندگی به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است.



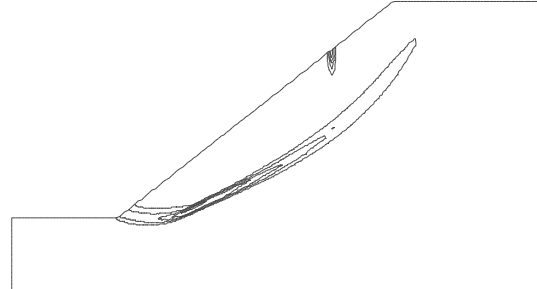
شکل ۵- اثر چسبندگی بر مقدار ضریب اطمینان (ترک در تاج)

بررسی نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد زمانی که چسبندگی مصالح ۱۰ کیلوپاسکال و به عبارتی، گوه گسیختگی کوچک و کم عمق است، فاصله بیشتر از ۴ متری ترک از لبه شیب، تأثیری بر تغییر ضریب اطمینان نخواهد داشت. این در حالی است که زمانی که چسبندگی حدود ۲۵ کیلوپاسکال است ترک ایجاد شده در فاصله ۸ متری نیز بر ضریب اطمینان شیب تأثیرگذار است و مقدار آن را کاهش می‌دهد.

در گام بعدی، با ثابت نگاه داشتن مقدار چسبندگی، مقدار زاویه اصطکاک به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است، تا بتوان مقادیر ضریب اطمینان را به دست آورد. شکل ۶، مقادیر ضریب اطمینان در شرایط زاویه اصطکاک مختلف با فاصله گرفتن ترک از تاج شیب را نشان داده است. نتایج نشان می‌دهد زمانی که چسبندگی مصالح بیشتر از ۲۵ کیلوپاسکال است و گوه گسیختگی نسبتاً عمیق است، ایجاد ترک تا فاصله ۱۰ متری از لبه شیب نیز می‌تواند بر کاهش ضریب اطمینان تأثیرگذار باشد ولی



(ب)

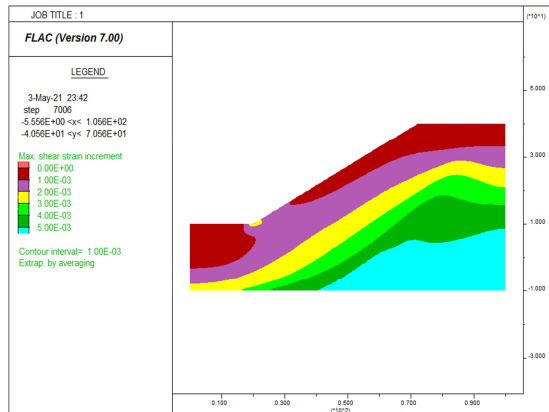


(الف)

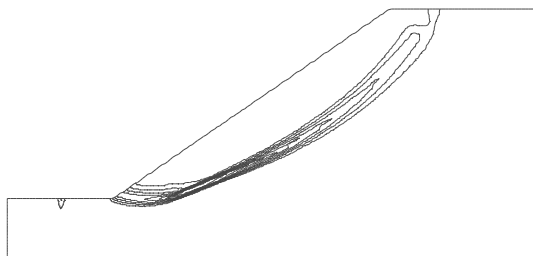
شکل ۷- کانتور گسیختگی با ترک در (الف) یک سوم بالای شیب و (ب) وسط شیب

متفاوت قابل توجه نیست، یعنی وضعیت ترک در تاج شیب، بحرانی تر بوده و منجر به ناپایداری بیشتری خواهد شد.

همانطور که در شکل ۹ مشخص است ایجاد ترک در پاشنه شیب و بدون فاصله گرفتن از پاشنه بر کاهش ضریب اطمینان مؤثر است ولی با فاصله گرفتن ترک از پاشنه شیب، ضریب اطمینان به مقادیر اولیه و حالت بدون ترک نزدیک می‌گردد.



شکل ۹- کرنش‌های برشی در شیب با ترک در پنجه برای مدل شماره ۵



شکل ۱۰- ترک ایجاد شده در فاصله ۸ متری از پنجه شیب برای مدل شماره ۴

علاوه بر آن نکته قابل بحثی که از شکل ۸ قابل استخراج بوده این است که زمانی که چسبندگی ۲۵ کیلوپاسکال است، ایجاد ترک در وسط شیب، تأثیری بر کاهش ضریب اطمینان ندارد ولی زمانی که چسبندگی شیب به ۱۰ کیلوپاسکال کاهش می‌یابد ایجاد ترک در وسط شیب نیز سبب کاهش ضریب اطمینان می‌گردد.



شکل ۸- اثر ترک در موقعیت‌های مختلف دامنه شیب

### ۳-۳- بررسی تأثیر ترک در پنجه شیب

در این قسمت به بررسی تأثیر ایجاد ترک در پنجه شیب پرداخته می‌شود. در شکل‌های ۹ و ۱۰، کانتورهای ایجاد شده در مدل‌سازی هنگامی که ترک در پاشنه ایجاد شده است نشان داده شده است و در شکل ۱۱ مقادیر ضریب اطمینان را در شرایط چسبندگی و زاویه اصطکاک مختلف با فاصله گرفتن ترک از پنجه شیب مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک، ضریب اطمینان افزایش می‌یابد. هر چند نکته‌ای که باید بدان توجه شود، این است که برخلاف وضعیت ترک در تاج شیب، در شرایط ترک در پنجه شیب، اختلاف ضرایب اطمینان در شرایط

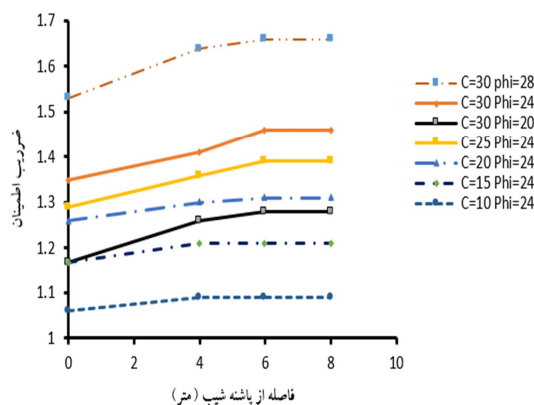


۱- با تغییر زاویه چسبندگی گوه گسیختگی عمیق‌تر می‌شود. بنابراین ایجاد ترک در تاج شیب و تغییرات محل آن در شیب‌های با چسبندگی‌های مختلف متفاوت خواهد بود.

۲- ایجاد ترک در دامنه شیب با تغییر مشخصات مصالح، رفتار متفاوتی ایجاد می‌کند. ایجاد ترک در یک سوم بالایی دامنه شیب باعث کاهش ضریب اطمینان در تمامی مشخصات مصالح می‌گردد ولی ایجاد ترک در وسط دامنه شیب فقط در شیب‌های با چسبندگی کمتر از ۱۵ کیلوپاسکال سبب کاهش ۱۵ درصدی در ضریب اطمینان می‌شود.

۳- ایجاد ترک در پاشنه شیب فقط زمانی که ترک در پاشنه و یا فواصل نزدیک به آن ایجاد می‌گردد بر کاهش ضریب اطمینان موثر خواهد بود و با ایجاد فاصله ۶ متری ترک از پاشنه هیچ‌گونه تأثیری بر ضریب اطمینان ایجاد نخواهد شد.

۴- نتایج اعتبارسنجی این پژوهش نشان داد که روش تفاضل محدود به کمک نرم‌افزار  $FLAC^{2D}$  اندکی گوه گسیختگی را در مقایسه با نتایج تحلیل حدی یوتلی عمیق‌تر نشان می‌دهد. این موضوع ممکن است مربوط به نحوه مش‌بندی مدل و یا اندازه آن‌ها باشد. اما به‌صورت کلی، این نرم‌افزار بسیار کارآمد و دارای دقت زیادی در حل اینگونه مسائل خواهد بود.



شکل ۱۱- اثر چسبندگی و زاویه اصطکاک بر مقدار ضریب اطمینان (ترک در پنجه)

به عنوان نمونه در شیب با چسبندگی ۳۰ کیلوپاسکال و زاویه اصطکاک ۲۰ درجه، هنگامی که ترک در پاشنه شیب ایجاد می‌گردد ضریب اطمینان شیب برابر ۱/۱۷ می‌شود ولی زمانی که ترک در فاصله چهار متری از پاشنه ایجاد می‌گردد ضریب اطمینان به ضریب اطمینان حالت بدون ترک ۱/۲۸ نزدیک می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر ترک بر ضریب اطمینان در شیب‌های خاکی پرداخته شده است. برای این منظور، شیب‌های با ویژگی‌های متفاوت از نظر زاویه اصطکاک و چسبندگی مورد بررسی قرار گرفته و محل ترک نیز در تاج، دامنه و پنجه شیب تغییر نموده و تأثیرات آن مورد ارزیابی واقع شده است. تعدادی از نتایج به‌دست آمده به شرح ذیل می‌باشد:

#### مراجع

- [1] Hajiazizi, M., Mazaheri, A., & Orense, R. P. (2018). "Analytical approach to evaluate stability of pile-stabilized slope", *Scientia Iranica*, 25(5), 2525-2536.
- [2] Li, Y. X., & Yang, X. L. (2016). "Stability analysis of crack slope considering nonlinearity and water pressure", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(6), 2289-2296.
- [3] Zhang, G., Wang, R., Qian, J., Zhang, J., & Qian, J. (2012). "Effect study of cracks on behavior of soil slope under rainfall conditions", *Soils and Foundations*, 52(4), 634-643.
- [4] Egeli, I., & Firat Pulat, H. (2011). "Mechanism and modelling of shallow soil stability during high intensity and short duration rainfall." *Scientia Iranica*, 18(6), 1179-1187.
- [5] Sun, D., Li, X., Feng, P. & Zang, Y. (2016). "Stability analysis of unsaturated soil slope during rainfall infiltration using coupled liquid-gas-solid three phase model", *Water science and Engineering*, 9(3), 183-194.
- [6] Gao, Y., Song, W., Zhang, F., & Qin, H. (2015). "Limit analysis of slopes with cracks: Comparisons of results", *Engineering Geology*, 188(7), 97-100.

- [7] Zhao, L., Cheng, X., Zhang, Y., Li, L., & Li, D. (2016). "Stability analysis of seismic slopes with cracks", *Computers and Geotechnics*, 77, 77-90.
- [8] Mukhlisin, M., & Khiyon, K. N. (2018). "The effects of cracking on slope stability", *Journal of the Geological Society of India*, 91(6), 704-710.
- [9] Li, Y. X., & Yang, X. L. (2016). "Stability analysis of crack slope considering nonlinearity and water pressure", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(6), 2289-2296.
- [10] Li, B., Zhang, F., & Wang, D. (2018). "Impact of crack on stability of slope with linearly increasing undrained strength", *Mathematical Problems in Engineering*, 2018.
- [11] Utili, S. (2013). "Investigation by limit analysis on the stability of slopes with cracks", *Geotechnique*, 63(2), 140-154.
- [12] Michalowski, R. L. (2012). "Cracks in slopes: limit analysis approach to stability assessment", In *GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, 442-450.
- [13] Kakuturu, S., & Reddi, L. N. (2006). "Evaluation of the parameters influencing self-healing in earth dams", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(7), 879-889.
- [14] Hajiazizi, M., Nasiri, M., & Mazaheri, A. R. (2018). "The effect of fixed-tip piles on stabilization of earth slopes", *Scientia Iranica*, 25(5), 2550-2560.
- [15] Löfroth, H., O'Regan, M., Snowball, I., Holmén, M., Kopf, A., Göransson, G., ... & Frogner-Kockum, P. (2021). "Challenges in slope stability assessment of contaminated fibrous sediments along the northern Baltic coast of Sweden", *Engineering Geology*, 289, 106190.
- [16] Sengani, F., Muavhi, N., & Mulenga, F. (2021). "Advanced analysis of road-slope stability in a brittle and faulted rockmass terrain by several techniques", *Transportation Geotechnics*, 28, 100545.
- [17] Cai, J. S., Yeh, T. C. J., Yan, E. C., Tang, R. X., & Hao, Y. H. (2021). "Design of borehole deployments for slope stability analysis based on a probabilistic approach", *Computers and Geotechnics*, 133, 103909.
- [18] Spencer, E. (1967). "A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces", *Géotechnique*, 17(1), 11-26.
- [19] Spencer, E. (1968). "Effect of tension on stability of embankments", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 94(5), 1159-1173.
- [20] Robertson, A. M. (1971). "Accounting for Cracks in Slope Stability Analysis", *nature*, 1, 4.
- [21] Cousins, B.F. (1980). "Stability charts for simple earth slopes allowing for tension cracks", In *Proceedings of the Third Australia–New Zealand Conference on Geomechanics, Wellington*, 2, 101-105
- [22] Baker, R., & Leshchinsky, D. (2003). "Spatial distribution of safety factors: cohesive vertical cut", *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27, 1057-1078.
- [23] Chowdhury, R. N., & Zhang, S. (1991, December). "Tension cracks and slope failure", In *Proc. International Conference*, 27-32.