

H. Noferesti

Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

e-mail:

hnoferesty@birjand.ac.ir

A. Veiskarami

Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

e-mail:

veiskaramiali@yahoo.com

M.J. Rahimdel*

Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

e-mail:

rahimdel@birjand.ac.ir

Study and Analysis of Landslide Potential Using Numerical Modeling (A Case Study: Ghaen-Afin Roadway in Southern Khorasan)

Steep slopes developed on the loose ground, either natural or artificial, are prone to landslide phenomena. During construction activities for the development of new Qaen-Afin road in South Khorasan and adjacent to Ravoshk village, a sudden landslide occurred in a shale slope, and newly-built stone bridge for the road destructed. In this paper, using geologic conditions, satellite images, the field evidence of landslide and SLIDE6 and Phase2 programs, the type, and cause of the landslide will be examined. The survey conducted with the help of satellite images and field visits showed that the landslide occurred is a circular landslide with dimensions of approximately 50×80 m. It had happened a few months ago, but unfortunately, no attention paid to it, and continued construction activities in the rainy season stimulated the sliding mass and led to extreme conditions. The geometrical condition of the slope, just before the slope failure, was determined by using GPS, surveying meter, and satellite images. Using this information, the two-dimensional model of the natural slope, before any construction activity, created in SLIDE6. Slope stability analysis was performed using the simplified Bishop limit equilibrium method, and failure of the slope predicted successfully. Finite element analysis of the slope in Phase2 software arrived at similar results. This paper has shown that a lack of attention to first slope movements and continuing construction work was the primary cause of financial losses incurred.

Keywords: Landslide, Limit equilibrium method, Finite element method, Ravoshk village, Southern Khorasan.

* Corresponding author

Received 14 July 2019, Revised 26 August 2019, Accepted 03 September 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.4620.1160

تحلیل و بررسی پتانسیل زمین لغزش به کمک مدل سازی عددی (مطالعه موردی: محور قائن - افین در استان خراسان جنوبی)

زمین لغزش یکی از مخرب‌ترین حوادث طبیعی در زمین‌های شیب‌دار بوده که هر ساله منجر به خسارت‌های جانی و مالی فراوانی می‌شود. دامنه‌های شیب‌دار که در زمین‌های سست چه به صورت طبیعی یا مصنوعی ایجاد شده‌اند، مستعد پدیده زمین لغزش هستند. در زمستان ۱۳۹۰ در حین فعالیت‌های راهسازی برای توسعه و احداث جاده جدید قائن - افین در استان خراسان جنوبی و در مجاورت روستای روشک، رانش ناگهانی زمین منجر به تخریب پل سنگی جدیدالاحداثی در مسیر جاده گردید. در این مقاله، به بررسی این زمین لغزش و علت وقوع آن پرداخته شده است. برای این منظور، از تصاویر ماهواره‌ای، و تجربیات به دست آمده در بازدیدهای محلی استفاده شد و تحلیل پایداری دامنه و بررسی نوع زمین لغزش با بهره‌گیری از روش‌های تعادل حدی ساده شده بیشاپ و روش عددی المان محدود انجام گردید. با توجه به نتایج، عدم توجه به حرکات اولیه دامنه و ادامه کارهای ساختمانی در محدوده توده لغزشی از عوامل اصلی وقوع این زمین لغزش بوده و بارندگی نقش چندانی در بروز این پدیده نداشته است. ضریب ایمنی دامنه قبل از انجام خاکریزی جدید حدود ۱/۷ به دست آمد که پس از خاکریزی به ضخامت ۴ متر به ۰/۹۰ کاهش یافته است.

واژگان کلیدی: زمین لغزش، روش تعادل حدی، روش المان محدود، روستای روشک، خراسان جنوبی.

حسین نوفرستی

استادیار، گروه مهندسی معدن،
دانشکده مهندسی، دانشگاه
بیرجند.

پست الکترونیک:

hnoferesty@birjand.ac.ir

علی ویسکرمی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی
معدن، دانشکده مهندسی،
دانشگاه بیرجند.

پست الکترونیک:

veiskaramiali@yahoo.com

محمد جواد رحیم‌دل*

استادیار، گروه مهندسی معدن،
دانشکده مهندسی، دانشگاه
بیرجند.

پست الکترونیک:

rahimdel@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

مشاهده است، یکی از پیش‌نشانگرهای زمین لغزش‌ها هستند. دامنه‌های پرشیب شیلی از مستعدترین مکان‌ها برای وقوع زمین لغزش می‌باشند. با این وجود، زمین لغزش‌ها در مناطق دیگر و در مقیاس‌های کوچکتر نیز رخ می‌دهند. زمین لغزش‌ها غالباً پس از زمین لرزه‌ها، بارندگی‌های شدید و حتی پس از برداشت بخشی از شیب‌ها به‌ویژه در حین ساخت جاده‌ها اتفاق می‌افتند [۳]. زمین لغزش یکی از مخاطرات زمین‌شناسی است که سالانه خسارت جانی و مالی فراوانی برجای می‌گذارد. به‌عنوان مثال، در سال ۱۹۸۲، بیش از ۸۱۰۰۰ زمین لغزش در مناطق مختلف کشور چین گزارش شده است [۴]. واقع شدن بخش‌های زیادی از ایران در مناطق

حرکت و جابه‌جایی رو به پایین بخشی از مواد دامنه در امتداد یک سطح گسیختگی مشخص را زمین لغزش می‌نامند. زمین لغزش‌ها انواع مختلفی داشته و در هر زمینی ممکن است ایجاد شود [۱]. ویژگی‌های توده متحرک و شکل سطح گسیختگی معمولاً به‌عنوان عوامل طبقه‌بندی لغزش‌ها به کار گرفته می‌شوند [۲]. شکاف بالای دامنه یا ترک کششی که به راحتی قابل

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۰۴/۲۳، بازنگری ۱۳۹۸/۰۶/۰۲، پذیرش ۱۳۹۸/۰۶/۱۲.
DOI: 10.22091/cer.2019.4620.1160 شناسه دیجیتال

معیارهای مؤثر بر رخداد زمین لغزش‌ها، درجه اهمیت هریک از شاخص‌ها با بهره‌گیری از روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی تعیین شد. با توجه به نتایج این تحقیق، جنس خاک به عنوان مؤثرترین پارامتر در احتمال وقوع زمین لغزش‌ها معرفی گردید. همچنین، راهکارهایی نظیر کاهش تراکم ساختمانی و جمعیتی، ایجاد کمربند سبز، رعایت حریم اتوبان‌ها و استفاده از سازه‌های پایدار و مهندسی در محدوده‌های پرخطر به منظور کاهش احتمال وقوع مخاطرات زمین لغزش ارائه شد [۸]. بهاروند و همکاران، به پهنه‌بندی مخاطرات زیست‌محیطی زمین لغزش، زمین لرزه، سیل و فرسایش در محدود حوزه آبریز وارک واقع در استان لرستان با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی پرداختند. با توجه به نتایج این تحقیق، شاخص زمین لغزش دارای بالاترین درجه اهمیت در محدوده مورد مطالعه بود که این نتایج با مطالعات شمسی‌پور و شیخی (۱۳۸۹) [۹] در مطالعه نواحی غربی استان فارس مطابقت داشت. علاوه بر این، شیب و لیتولوژی منطقه به ترتیب دارای بالاترین اهمیت در بین عوامل مؤثر بر خطر زمین لغزش بودند [۱۰]. پژوهشگران دیگری، به بررسی مخاطرات زمین استان گلستان با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای پرداختند. با توجه به نتایج این تحقیق، تقریباً تمامی شهرستان‌های این استان در محدوده احتمال خطر زیاد تا خیلی زیاد زمین لغزش قرار داشتند که اقداماتی پیشگیرانه به منظور جلوگیری از بروز خطرات زمین لغزش پیشنهاد گردید [۱۱]. در تحقیقی دیگر نیز محققان، به پیش‌بینی پتانسیل وقوع زمین لغزش در محدوده چهارگوش قزوین- رشت پرداختند. برای این منظور، با استفاده از اطلاعات ۳۳۸ زمین لغزش رخ داده در محدوده مورد مطالعه، بهترین شبکه عصبی با میزان خطای ۴۱ درصد به منظور پیش‌بینی مناطق مستعد زمین لغزش ارائه شد [۱۲].

با توجه به موارد بالا، تاکنون تحقیقات گسترده‌ای به منظور بررسی پتانسیل وقوع زمین لغزش‌ها انجام شده

زلزله‌خیز و کوهستانی موجب گردیده که پدیده زمین لغزش سالانه خسارات قابل توجهی را به کشور وارد آورد. براساس برآوردهای اولیه، صرف‌نظر از اتلاف منابع طبیعی غیرقابل بازگشت در اثر وقوع زمین لغزش‌ها، سالیانه ۵۰۰ میلیارد ریال خسارت‌های مالی بر کشور تحمیل می‌شود [۵]. یکی از قدیمی‌ترین و مهم‌ترین زمین لغزش‌های اتفاق افتاده در ایران، لغزش بزرگ سیمره (با وسعت تقریبی ۱۰۰۰۰۰ میلیون مترمربع) در محدوده جنوب‌غربی پلدختر و در دامنه‌های شمال شرقی تاق‌دیس کبیرکوه بوده که از نظر بزرگی، قابل مقایسه با زمین لغزه‌هایی نظیر پامیر و آلپ است [۶].

جاده‌ها از مهم‌ترین شریان‌های ارتباطی به منظور توسعه مناسبات تجاری و اقتصادی مطرح هستند. مخاطرات طبیعی نظیر زمین لغزش‌ها به‌عنوان یکی از عوامل وقوع حوادث جاده‌ای و کاهش ایمنی راه‌های ارتباطی مطرح بوده و فعالیت‌های انسانی ممکن است منجر به تشدید آن شود. از اینرو، انتخاب صحیح مسیر جاده‌ها، شناخت عوامل مؤثر بر وقوع حرکت‌های دامنه‌ای و نیز شناسایی مکان‌های با قابلیت خطرپذیری بالا ضرورت دارد. زندی و همکاران، به بررسی و ارزیابی پتانسیل زمین لغزش در مسیر جاده پیشنهادی طرقله- درور در استان خراسان رضوی پرداختند. در این تحقیق، شاخص‌هایی نظیر ارتفاع، جهت و نوع شیب، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، شاخص توان آبراهه و شاخص حمل رسوب و بارش در محیط به‌عنوان عوامل مؤثر در وقوع حرکات دامنه‌ای در نظر گرفته شدند و پس از وزن‌دهی به روش آنتروپی، نقشه حساسیت زمین لغزش تهیه گردید. با توجه به نتایج این پژوهش، شاخص‌های کاربری اراضی، نوع شیب و بارش به‌عنوان مؤثرترین عوامل در رخداد زمین لغزش در محدوده مورد بررسی بوده است [۷]. قنبری و همکاران، زمین لغزش‌های احتمالی در محدوده شهر تبریز را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، ابتدا به شناسایی لغزش‌های رخ داده پرداخته شد و پس از شناسایی

آبرفت‌های کوتاه‌تر یک رودخانه فصلی واقع شده که مسیر جاده قدیمی آن پس از عبور از کنار روستا و قطع بستر رودخانه، مطابق شکل ۱، از دیواره شرقی رودخانه بالا می‌رود. این دیواره با ارتفاع تقریبی ۳۰ متر عمدتاً از یک لایه شیل ائوسن قرمز رنگ با شیب کم و روند شمالی-جنوبی تشکیل شده است. بر روی این لایه، یک لایه مقاوم کنگلومرا به ضخامت تقریبی دو متر مشاهده می‌شود. در بالاترین بخش دیواره نیز لایه‌ای آبرفتی با ضخامت چند مترج وجود دارد. در بازدید اولیه از منطقه، مشاهده شد که به علت هوازگی و ریزش‌های مداوم لایه شیلی، به تدریج قسمت‌های زیرین لایه کنگلومرا خالی شده و در نهایت، بلوک‌های بزرگی از کنگلومرا در اثر نیروی وزن بر روی دامنه سقوط کرده است (شکل ۱).



شکل ۱- تصویر دیواره شرقی رودخانه فصلی روشک

همانگونه که اشاره شد، جاده خاکی و قدیمی قائن به افین پس از عبور از روستای روشک، که بر روی آبرفت‌های یک رودخانه فصلی واقع شده، از یک دامنه پرشیب شیلی و به صورت مورب بالا رفته تا شیب جاده به تدریج کاهش یابد. در طرح تعریض و توسعه جاده، به منظور عبور جریانات فصلی یک پل سنگی در پای دامنه احداث و همزمان شیب دامنه اصلاح شده است. بدین ترتیب، مسیر جدید جاده پس از عبور از روی پل، بدون نیاز به ایجاد مسیری مورب و طولانی، مستقیماً به بالای دامنه منتهی گردیده است. در جریان اصلاح شیب و خاکریزی دامنه قدیمی، به منظور احداث و استحکام کافی سازه پل، عملیات راهسازی به طور موقت متوقف شده

است. با این وجود، بیشتر تحقیقات انجام شده در مقیاس‌های کلان و محدوده‌های وسیع نظیر مناطق شهری و حوزه‌های آبریز و عمدتاً با استفاده از روش‌های تحلیلی و یا مدل‌های تصمیم‌گیری انجام شده است. از طرفی، تنها تحقیقات اندکی به منظور بررسی و پیش‌بینی زمین‌لغزش‌ها در جاده‌ها و محورهای ارتباطی که به‌عنوان مهم‌ترین شریان‌های حمل‌ونقل و توسعه اقتصادی هستند، صورت گرفته است. بنابراین مقاله حاضر، به تحلیل و بررسی پتانسیل زمین‌لغزش در محور ارتباطی قائن-افین در استان خراسان جنوبی می‌پردازد. در زمستان ۱۳۹۰ در جریان راهسازی به منظور توسعه و احداث راه جدید قائن به افین در مجاورت روستای روشک، رانش ناگهانی زمین در یک دامنه شیلی به وقوع پیوست که در نهایت منجر به تخریب پل سنگی جدیداً احداثی در مسیر جاده گردید. در این مقاله، با استفاده از وضعیت زمین‌شناسی منطقه، تصاویر ماهواره‌ای و تجربیات به دست آمده، به مدل‌سازی عددی زمین‌لغزش در محیط نرم‌افزارهای SLIDE و Phase2 پرداخته شده است. با استفاده از نتایج این تحقیق، امکان پیش‌بینی لغزش‌های ناشی از ایجاد شیب‌های مصنوعی و جلوگیری از مخاطرات فاجعه‌بار وجود دارد.

ساختار این مقاله به شرح زیر است. در بخش دوم، به بررسی موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی محدوده و زمین‌لغزش مورد مطالعه پرداخته شده است. بررسی و تحلیل زمین‌لغزش روشک با استفاده از روش‌های تحلیل حدی، تنش-کرنش و نیز مدل‌سازی لغزش در بخش چهارم ارائه شده است. در نهایت در بخش پنجم، نتایج مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۲- زمین‌شناسی منطقه و توصیف زمین‌لغزش

در محدوده مورد مطالعه

روستای روشک در ۲۳ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان قاین در استان خراسان جنوبی واقع شده است. این روستا در مسیر جاده قائن به روستای افین و بر روی

است به دلیل عدم توجه به این نکته و به احتمال زیاد، به علت بارندگی های زمستانی، توده خاک سست تر شده و در اثر تحریکات ناشی از کار بولدوزر، لغزش وسیع و ویرانگری در حدود چهار ماه بعد رخ داده است. نمای از این زمین لغزش در شکل ۳ نشان داده شده است.

۳- این لغزش در مجموعه ای از خاکریزی های جدید ایجاد شده، خاک های قدیمی ریخته شده برای احداث راه قبلی و نیز رسوبات شیلی هوازده اتفاق افتاده است.

۴- مطابق شکل ۴، انتهای سطح لغزش دقیقاً در وسط پل قرار داشته که همین امر موجب دو تکه شدن پل شده است. نمایی از پل تخریب شده در شکل ۵ نشان داده شده است.

است. در بهار ۱۳۹۱ با اتمام ساخت پل، بولدوزر مجدداً به بالای دامنه منتقل شده و عملیات خاکریزی ادامه می یابد. پس از گذشت چند روز و در حین کار بولدوزر، رانش زمین تنها در چند متری بولدوزر روی داده و توده عظیمی از خاک در مسیر خود باعث تخریب پل شده است.

با توجه به بازدیدهای محلی، بررسی های میدانی و نیز تصاویر ماهواره ای، نکات زیر در رابطه با این زمین لغزش قابل توجه هستند:

- ۱- زمین لغزش رخ داده از نوع لغزش دایره ای (قاشقی) با ابعاد تقریبی 80×50 متر بوده که نمایی از آن در شکل های ۲ و ۳ (الف) نشان داده شده است.
- ۲- به علت اصلاح غیراصولی شیب دامنه، حرکت های ابتدایی و هشداردهنده ای به وقوع پیوسته که در تصویر ماهواره ای مورخ ۲۰۱۱/۱۱/۹ در نرم افزار Google Earth مطابق شکل ۲ قابل تشخیص



شکل ۲- حرکت دامنه رودخانه روشک در تصویر ماهواره ای مورخ ۲۰۱۱/۱۱/۹



(ب)



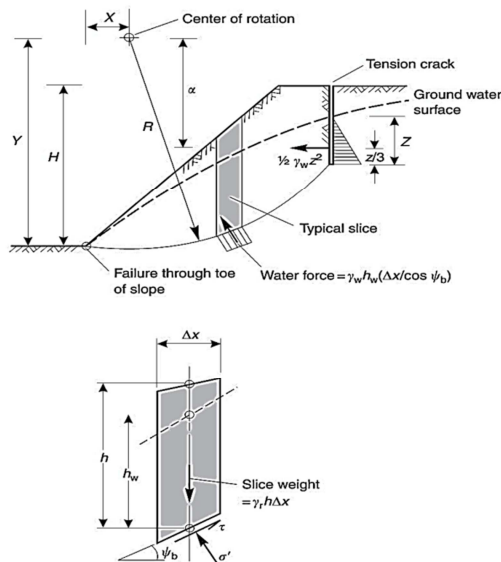
(الف)

شکل ۳- تصویر تاج زمین لغزش روشک (الف) نمای دور و (ب) نمای نزدیک

کارایی بیشتر، نسبت به روش‌های تنش- کرنش ساده‌تر و قابل فهم‌تر هستند [۱۳ و ۱۴]. این روش‌ها در ادامه تشریح شده‌اند.

۳-۱- روش تعادل حدی

معمولا در تمام روش‌های تعادل حدی، توده خاک بالای سطح لغزش، مطابق شکل ۶، به قطعاتی قائم تقسیم می‌شوند. نیروهای وارده بر هر قطعه، جداگانه در شکل ۶ نشان داده شده است. با وجود روش‌های متنوع تعادل حدی، این دسته از روش‌ها در زمینه فرضیات مربوط به معادلات تعادل نیروها و لنگرها حول نقطه مرکزی چرخش (O) اختلاف نظر دارند [۱۵].



شکل ۶- تصویر یک قطعه و نیروهای وارده بر آن [۱۶]

در این مقاله، از روش ساده شده بیشاپ^۳ استفاده شده است. در این روش، از نیروی برشی بین قطعات صرف‌نظر شده و با تغییر سایر نیروهای وارد بر هر قطعه، معادلات تعادل لنگرها و نیروهای قائم تشکیل می‌شوند. همچنین، ضریب ایمنی با روش سعی و خطا و با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌گردد [۱۶]:

علاوه بر اصلاح غیراصولی شیب، مسیری که بر روی خاکریز جاده قدیمی واقع شده، عدم توجه به شواهد اولیه حرکات و جابه‌جایی‌های زمین نیز از جمله عوامل مؤثر در وقوع این پدیده بوده است. به‌گونه‌ای که اگر عملیات احداث پل پس از آماده‌سازی مسیر و اصلاح اصولی شیب خاکریز انجام می‌گرفت، احتمال بروز چنین خسارات سنگینی به‌طور چشمگیری کاهش می‌یافت.



شکل ۴- انتهای زمین لغزش روشک در فاصله بین دو پایه پل



شکل ۵- تخریب پل سنگی در اثر لغزش زمین روشک

۳- روش تحقیق، تحلیل و مدل‌سازی

زمین‌لغزش‌ها

تاکنون روش‌های تجربی، گرافیکی و ریاضی مختلفی به منظور تحلیل زمین‌لغزش‌ها ارائه گردیده است. در این میان، روش‌های ریاضی، روش‌های تقریباً جامع‌تری هستند که به دو گروه روش‌های تعادل حدی^۱ و تنش-کرنش^۲ تقسیم می‌شوند. روش‌های تعادل حدی، علاوه بر

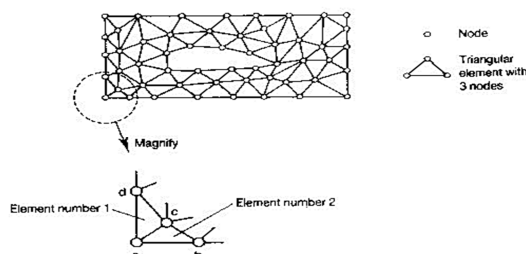
^۱- Limit equilibrium method

^۲- Stress-Strain method

^۳- Bishop's simplified method

یا خاکریزهای خاکی صورت پذیرد که در این صورت استفاده از روش های عددی نه تنها مطلوب بلکه ضروری هستند [۱۷].

در این تحقیق، از روش عددی المان محدود برای مدل سازی استفاده شده است. روش المان محدود نسبت به روش تعادل حدی دارای مزایایی نظیر مدل کردن شیب ها با درجه واقع گرایی بسیار بالا (هندسه پیچیده، بارگذاری های متناوب، حضور تقویت کننده ها، عملکرد آب، قوانینی برای رفتارهای پیچیده خاک) و نیز تصویرسازی دقیق از تغییر شکل های ایجاد شده در شیب است [۱۴]. در روش المان محدود، زمین به عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته شده و در صورت لزوم، ناپیوستگی ها به صورت مجزا و به تعداد محدود با المان های خاصی به نام المان فصل مشترک، شبیه سازی می شوند. محدوده مدل، یعنی زمین دربرگیرنده، به تعداد محدودی المان تقسیم شده که مطابق شکل ۷، از طریق نقاط گرهی در گوشه های المان ها به هم متصل هستند [۱۸].



شکل ۷- نمایش تصویری روش المان محدود [۱۹]

در روش المان محدود، ارتباط هندسی و فیزیکی بین تمام المان های یک مدل به صورت یک مسئله ریاضی با معادلات ماتریسی صورت می پذیرد. شکل کلی معادلات ماتریسی روش المان محدود براساس رابطه (۶) است [۱۹]:

$$[K] \times [D] = [F] \quad (6)$$

که در این رابطه، K ماتریس سختی، D ماتریس جابه جایی (مجهول مسئله) و F ماتریس بارهای وارده است. این ماتریس برای تک تک المان ها تشکیل و در

$$FS = \frac{\sum \frac{X}{1+Y/FS}}{\sum Z+Q} \quad (1)$$

پارامترهای رابطه فوق به صورت روابط (۲) تا (۵) بیان می شوند:

$$X = [C + (\gamma_r h - \gamma_w h_w) \tan \phi] (\Delta X / \cos \psi_b) \quad (2)$$

$$Y = \tan \psi_b \tan \phi \quad (3)$$

$$Z = \gamma_r h \Delta X \sin \psi_b \quad (4)$$

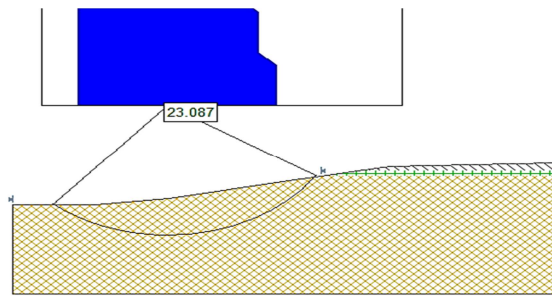
$$Q = \frac{1}{2} \gamma_w Z^2 (\alpha/R) \quad (5)$$

در این روابط، Q فشار آب منفذی در هر قطعه برحسب (MPa)، c و ϕ پارامترهای مقاومت برشی خاک، γ_r وزن مخصوص توده سنگ برحسب $(\frac{MN}{m^3})$ ، γ_w وزن مخصوص آب $(\frac{MN}{m^3})$ ، h_w ارتفاع آب در قطعه مورد بررسی برحسب (متر)، h ارتفاع قطعه مورد مطالعه برحسب (متر)، R شعاع دایره لغزش بحرانی برحسب (متر)، α فاصله قائم بین مرکز دایره لغزش بحرانی و محل اعمال نیروی آب در ترک کششی برحسب (متر)، Z ارتفاع آب در ترک کششی برحسب (متر)، ψ_b زاویه شیب قاعده قطعه و ΔX پهناهی افقی هر قطعه برحسب (متر) هستند.

از آنجا که پیاده کردن روش های تعادل حدی به صورت دستی برای دیواره های شیب دار با هندسه پیچیده بسیار وقت گیر است، معمولاً از نرم افزارهای تجاری برای این منظور استفاده می شود. در مطالعه حاضر، از نرم افزار SLIDE استفاده شده است.

۳-۲- روش تنش- کرنش

در ارزیابی سازه های ژئوتکنیکی، اغلب استفاده از روش های تعادل حدی برای تحلیل مسئله کافی بوده و روش های عددی پیشرفته تنها جهت بهبود و تکمیل این ارزیابی ها استفاده می شوند. اما در برخی موارد لازم است که ارزیابی دقیقی از تنش ها و کرنش های موجود در شیب



شکل ۸- تحلیل پایداری مدل اولیه دامنه همراه با فاکتور ایمنی به روش بیشاپ ساده شده

برای تکمیل این مدل، به شیب، امتداد لایه‌بندی و خواص ژئوتکنیکی لایه‌ها نیاز بود. بنابراین شیب و امتداد لایه‌ها توسط کمپاس و مشاهدات صحرایی تعیین گردیدند. خواص ژئوتکنیکی نیز براساس برآوردهای صحرایی و همچنین با بهره‌گیری از بانک اطلاعات ژئوتکنیکی موجود در نرم‌افزار ROCKDATA انتخاب شدند. شیب، امتداد لایه‌ها و خواص ژئوتکنیکی انتخاب شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات ژئوتکنیکی اولیه انواع لایه‌های موجود در محل وقوع

لایه‌بندی	c (kN/m ²)	ϕ (درجه)	وزن مخصوص (kN/m ³)	رنگ‌بندی لایه در مدل تعادل حدی
آبرفت	۱۵	۳۳	۱۸	آبی
کنگومرا	۲۵۰۰	۴۴	۲۵	سبز
شیل	۱۰۰۰	۲۵	۲۰	زرد هاشوردار

راهسازی قدیم و جدید، سه نوع شیل یا خاک شیلی در دامنه اصلاح شده وجود داشته که شامل خاک شیلی بسیار سست جابه‌جا شده توسط بولدوزر، خاک شیلی سست و هوازده ناشی از فعالیت راهسازی قدیمی و سنگ شیل برجا و دست‌نخورده در زیر دو لایه هستند. از اینرو، خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های جدید اضافه شده به مدل مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شدند که ضعیف‌تر از لایه شیل دست‌نخورده هستند.

۳- با توجه به وقوع لغزش در انتهای فصل زمستان و اوایل بهار، حضور آب‌های زیرزمینی در دامنه محتمل بوده است. به‌همین دلیل، ضریب فشار آب زیرزمینی (RU) در لایه‌های شیل به‌میزان

نهایت ماتریس کلی مدل تشکیل شده و حل کل معادلات به‌صورت همزمان انجام می‌شود.

۴- بحث و تحلیل زمین‌لغزش روشک

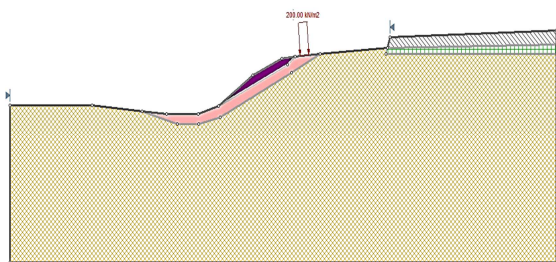
در این بخش، به مدل‌سازی و تحلیل زمین‌لغزش روشک پرداخته شده است.

برای تعیین وضعیت هندسی دامنه لغزش از تصاویر ماهواره‌ای نرم‌افزار Google Earth استفاده گردید. همچنین با مراجعه به محل و با استفاده از GPS برداشت‌های کنترلی صورت پذیرفت. وضعیت دامنه در آستانه و پس از لغزش نیز به‌کمک GPS، نقشه‌برداری و تصاویر ماهواره‌ای مشخص شدند. در ابتدا با استفاده از این اطلاعات، مدل اولیه دوبعدی دامنه که مربوط به قبل از انجام هرگونه فعالیت راهسازی است در نرم‌افزار SLIDE مطابق شکل ۸ ایجاد گردید.

با توجه به شکل ۸، ضریب ایمنی برای پایداری دامنه طبیعی و دست‌نخورده بسیار بالا بوده و لغزش کلی در دامنه طبیعی اتفاق نخواهد افتاد. در ادامه کار به‌کمک برداشت‌های صورت گرفته از محل، مدل هندسی دامنه ریزش نموده در آستانه لغزش ایجاد شد. در این مدل، وضعیت کلی هندسی و لایه‌بندی مشابه مدل قبلی است. با این وجود به‌هنگام ساخت این مدل، موارد زیر در نظر گرفته شدند:

۱- شیب دامنه به‌دلیل فعالیت‌های راهسازی قدیم و جدید به‌شدت افزایش یافته است.

۲- لایه شیلی تشکیل‌دهنده دامنه را نمی‌توان مشابه یک دامنه طبیعی یکدست و محکم در نظر گرفت. به‌عبارت دیگر، به‌علت فعالیت‌های



شکل ۹- مدل هندسی زمین لغزش روشک در نرم افزار SLIDE

با توجه به موارد بالا، تحلیل پایداری دامنه به روش تعادل حدی بیشاپ ساده شده انجام گردید که نتایج در شکل ۱۰ آورده شده است. با توجه به شکل ۱۰، از آنجا که ضریب ایمنی به اندازه ۰/۵۱ آمده است، لغزش دامنه در مدل ایجاد شده، حتمی است.

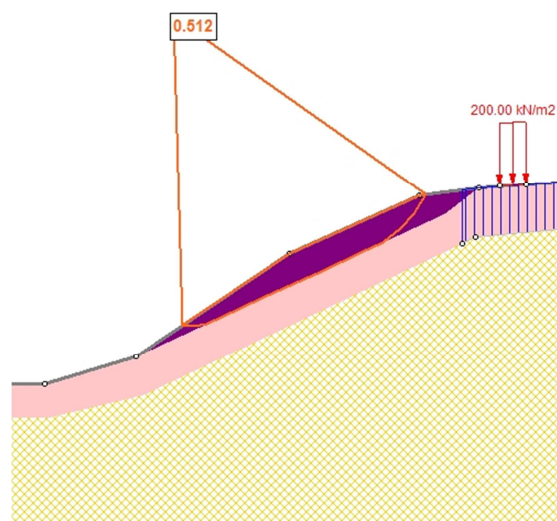
حداکثر ۰/۵ اعمال گردید. شایان ذکر است که لایه کنگلومرا، به عنوان یک لایه نفوذناپذیر منظور گردیده است.

۴- همانگونه که در قسمت توصیف لغزش بیان گردید، درست در لحظه لغزش، بولدوزر پیمانکار مشغول به کار در بالای دامنه بوده است. بنابراین، برای اینکه مدل ساخته شده به واقعیت نزدیک تر باشد، نیروی خارجی ناشی از وزن بولدوزر نیز در مدل اعمال گردید. از اینرو، با در نظر گرفتن وزن بولدوزر، نوع و محل قرارگیری آن در لحظه لغزش، مطابق شکل ۹، بار گسترده ۲۰۰ کیلو پاسکال در مدل اعمال گردید.

جدول ۲- مشخصات ژئوتکنیکی تفصیلی انواع لایه های موجود در محل وقوع

RU	رنگ لایه ها در مدل عددی	E (MPa)	وزن مخصوص (kN/m^3)	ϕ (درجه)	c (kN/m^2)	نوع لایه بندی
صفر	آبی	۱۱۱	۱۸	۳۳	۱۵	آبرفت
صفر	سبز	۴۱۲۵۰	۲۵	۴۴	۲۵۰۰۰	کنگلومرا
۰/۵	زرد	۷۳۰	۲۴/۵	۲۶	۱۱۴۰	شیل سخت
۰/۵	صورتی	۱۷/۱۵	۲۴/۵	۲۰	۳۰	شیل نیمه سخت
۰/۵	بنفش	۴/۱۷	۲۰	۱۵	۸	شیل سست

در نرم افزار SLIDE به نرم افزار Phase2 انتقال داده شد. از آنجا که به منظور تعیین ضریب ایمنی در روش های المان محدود، از روش کاهش مقاومت برشی (SSR^4) استفاده می شود، نکات مدل سازی لازم مرتبط با این روش رعایت گردید. طبق توصیه های مرجع [۲۰]، در مدل عددی از ۳۰۰۰ المان یکنواخت ۶ گرهی مثلثی استفاده شد. وضعیت تنش به صورت ثقلی با نسبت $k=1$ ، مدل رفتاری مصالح الاستوپلاستیک و معیار مقاومتی مصالح موهر کولمب فرض گردید. ضریب کاهش مقاومت بحرانی ($Critical\ SRF^5$) تقریباً معادل ضریب ایمنی دیواره در حالت تعادل حدی در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از تحلیل المان محدود دامنه در شکل ۱۱ آورده شده



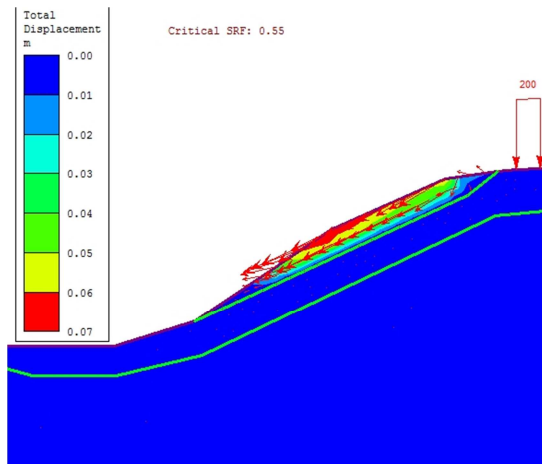
شکل ۱۰- ضریب ایمنی زمین لغزش روشک به کمک روش بیشاپ ساده شده

برای بررسی بیشتر و تکمیل نتایج حاصل از روش تعادل حدی، دامنه ریزش کرده به روش المان محدود نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، مدل ایجاد شده

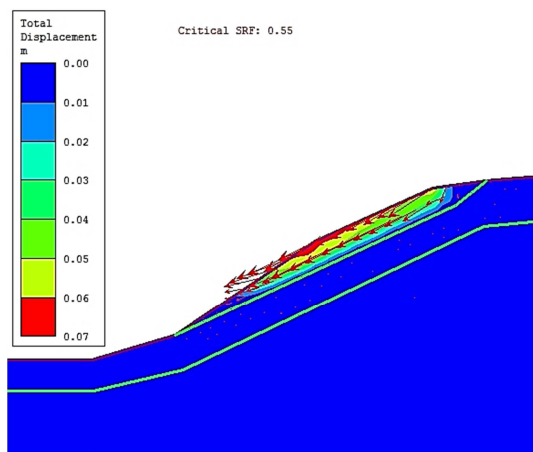
4- Shear Strength Reduction

5- Critical Strength Reduction Factor

Ruهای ممکن ناپایدار است. بنابراین می‌توان گفت که ریزش دامنه در اثر بارندگی اتفاق نیفتاده است چراکه حتی در دامنه کاملاً خشک ($Ru=0$) نیز ضریب ایمنی دامنه کمتر از ۱ به‌دست آمده است.



شکل ۱۱- ضریب ایمنی معادل روشک به‌روش المان محدود



شکل ۱۲- ضریب ایمنی معادل روشک به‌روش المان محدود

بدون تأثیر فشار بولدوزر

جدول ۳- تأثیر تغییر فشار آب منفذی بر پایداری دامنه

ضریب ایمنی دامنه	نسبت فشار آب منفذی لایه شیل (Ru)	ردیف
۰/۵۵	۰/۵	۱
۰/۶۳	۰/۴	۲
۰/۷۰	۰/۳	۳
۰/۷۷	۰/۲	۴
۰/۸۴	۰/۱	۵
۰/۹۰	صفر	۶

به‌صورت مرحله‌ای انجام (شکل ۱۳) و در هر مرحله ضریب ایمنی دیواره محاسبه گردید. نتایج حاصل در

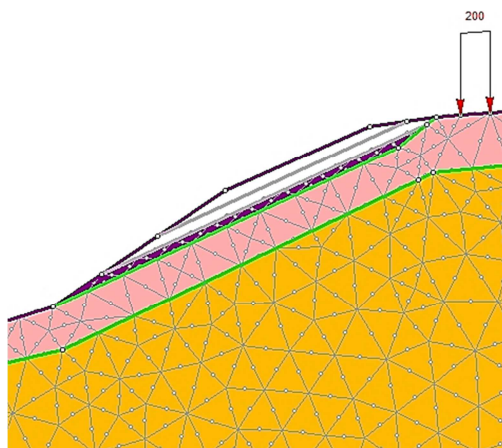
است. با توجه به ضریب SRF بحرانی که معادل ۰/۵۵ و نزدیک به ضریب ایمنی در روش تعادل حدی در نظر گرفته شده، ملاحظه می‌شود که نتایج به‌دست آمده از روش المان محدود با نتایج حاصل از روش تعادل حدی، همخوانی خوبی دارند.

۴-۱- بررسی تأثیر عوامل مختلف در وقوع ریزش

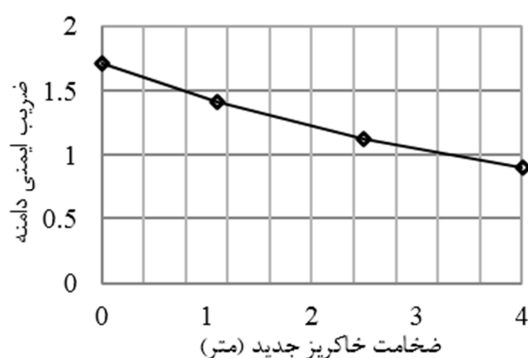
در بخش ۲ این مقاله که به توصیف زمین‌لغزش پرداخته شد سه عامل اصلاح غیراصولی شیب، بارندگی و حضور بولدوزر بر روی دامنه به‌عنوان عوامل محرک لغزش مورد بحث قرار گرفتند. در این قسمت برای بررسی میزان تأثیر هر یک از این عوامل از مدل عددی ایجاد شده کمک گرفته می‌شود. در ابتدا با حذف نیروی خارجی معادل وزن بولدوزر در مدل مطابق شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که هیچگونه تغییری در ضریب ایمنی دامنه اتفاق نمی‌افتد. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود که محدوده اعمال فشار وزنی بولدوزر خارج از محدوده توده لغزشی قرار می‌گیرد. به‌همین دلیل می‌توان گفت که صرف حضور بولدوزر در بالای دامنه، نقشی در وقوع ریزش نداشته است.

با تغییر فشار آب منفذی لایه شیل در مدل عددی، نقش این عامل نیز مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۳ خلاصه نتایج به‌دست آمده را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۳، مشاهده می‌شود که دامنه مورد بررسی در تمامی

برای بررسی تأثیر بارگذاری ناشی از خاکریزی جدید بر روی دامنه، ایجاد لایه خاکریز جدید در مدل



شکل ۱۳- ایجاد مرحله‌ای خاکریز در مدل عددی (در این شکل مرحله اول خاکریز ایجاد شده است)



شکل ۱۴- تأثیر پیشرفت عملیات خاکریزی بر پایداری دامنه روشک

جدول ۴- تأثیر خاکریزی جدید در بالای دامنه بر پایداری آن (خاکریز بصورت مرحله‌ای ایجاد شده است)

ردیف	ضخامت خاکریز جدید (متر)	ضریب ایمنی کل دامنه
۱	صفر	۱/۷۱
۲	۱/۱۰	۱/۴۱
۳	۲/۵۰	۱/۱۳
۴	۴/۰۰	۰/۹۰

احداث تأسیسات مهندسی در پای دامنه بایستی پس از اصلاح شیب یا پایدارسازی دامنه صورت گیرد.

۳- عدم توجه به حرکات اولیه دامنه، اشتباهی بسیار بزرگ است که ممکن است نتایج فاجعه‌باری را به دنبال داشته باشد. با این وجود، چنین حرکتی بر روی زمین یا به کمک عکس‌های ماهواره‌ای در مقیاس‌های بزرگ‌تر به راحتی قابل شناسایی

جدول ۴ مشاهده می‌شود. تأثیر پیشرفت کار خاکریزی بر کاهش ضریب ایمنی دامنه (شکل ۱۴) به خوبی قابل مشاهده است و بنابراین می‌توان براساس نتایج مطالعه عددی صورت گرفته، افزایش شیب دامنه در اثر خاکریزی جدید را عامل اصلی وقوع زمین لغزش روشک معرفی نمود.

۵- نتیجه گیری

پدیده زمین لغزش یکی از انواع مخاطرات زمین‌شناسی بوده که ممکن است منجر به کاهش ایمنی راه‌های ارتباطی گردد. زمین لغزش‌ها همانند دیگر مخاطرات زمین، در بسترهای زمین‌شناسی خاص و همراه با پیش نشانگرهایی رخ می‌دهند که توجه به آنها، این پدیده را مدیریت پذیر نموده و خطر آن را به شدت کاهش می‌دهد. در این مقاله، به ارزیابی و تحلیل زمین لغزش در مسیر جدید قائن-افین و در مجاورت روستای ورشک در استان خراسان جنوبی پرداخته شد. برای این منظور از روش تحلیل بیشاب و روش عددی المان محدود استفاده گردید.

نتایج این تحقیق را می‌توان به طور خلاصه در موارد زیر بیان نمود:

۱- اگرچه وقوع زمین لغزش در هر نوع زمینی محتمل است، اما در مواجهه با دامنه‌های رسی (نظیر شیل، مارن، آرژیلیت و مادستون) یا خاکریزهای قدیمی مشابه مطالعه حاضر، باید دقت زیادی به خرج داد.

۲- در محلهایی که احتمال ریزش دامنه وجود دارد،

حدود ۱/۷ به‌دست آمد که پس از خاکریزی به

ضخامت ۴ متر به ۰/۹۰ کاهش یافته است.

با توجه نتایج این تحقیق، فعالیت غیراصولی در جریان عملیات راهسازی بر دامنه‌های سست شیلی، از عوامل اصلی وقوع زمین‌لغزش در محدوده مورد مطالعه بوده است. نتایج حاصل از این مقاله، نمونه عبرت‌آموزی از عدم توجه به هشدارهای طبیعی زمین نسبت به انجام تغییراتی فراتر از تحمل آن است. از اینرو، پیشنهادهای نظیر ایجاد بانک‌های اطلاعاتی زمین‌لغزش در محدوده‌های مورد مطالعه، پهنه‌بندی مناطق مستعد زمین‌لغزش پیش از آغاز عملیات راهسازی و پرهیز از هرگونه تحرکات مصنوعی و نیز ارائه طرح‌هایی جهت مقابله با لغزش‌های احتمالی به‌عنوان راهکارهایی عملی به‌منظور کاهش احتمال بروز چنین مخاطراتی ارائه می‌گردد.

هستند.

۴- چنانچه دامنه‌ای دچار حرکات لغزشی بسیار جزئی گردد، باید از هرگونه کار تحریک‌آمیز نظیر حرکت ماشین‌آلات راهسازی بر روی آن اجتناب نمود و در صورت لزوم، پایدارسازی را هرچه سریع‌تر و قبل از فصل بارندگی انجام داد.

۵- در بررسی اولیه که پس از بازدید صحرایی صورت گرفت سه عامل اصلاح شیب غیراصولی، بارندگی و وجود بولدوزر در بالای دامنه عوامل مؤثر در لغزش شناخته شدند.

۶- در بررسی دقیق عددی مشخص شد که عامل اصلی وقوع روشک اصلاح شیب غیراصولی دامنه بوده و بارندگی و بارگذاری ناشی از ماشین‌آلات نقش چندانی در لغزش زمین نداشته است.

۷- ضریب ایمنی دامنه قبل از انجام خاکریزی جدید

مراجع

- [1] Hencher, S. (2013). "Practical engineering geology", CRC Press.
- [2] Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). "The Varnes classification of landslide types, an update". *Landslides*, 11(2), 167-194.
- [3] Cruden, D. (2017). *Landslide risk assessment*. Routledge.
- [4] Yin, Y., Huang, B., Wang, W., Wei, Y., Ma, X., Ma, F., & Zhao, C. (2016). "Reservoir-induced landslides and risk control in Three Gorges Project on Yangtze River, China". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 577-595.
- [5] Parsaei, L., Salarian, F., & Sheraeni, M. (2009). "Landslides of Golestan Province". *5th National conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran*, Gorgan, Iran.
- [6] Baharvand, S., Pourkermani, M., Arian, M., Ajalloian, R., & Nouryazdan, A.R. (2009). "Seymareh Landslide and its role in environmental and geomorphologic changes of the Pole-Dokhtar area", *Quarterly Iranian Journal of Geology*, 4(4), 13-24.
- [7] Zandi, R., Amirahmadi, A., & Mohamadnia, M. (2018). "Use of entropy model to assess the risk of landslide in the proposed road route of Torqabeh-Dorood (Mashhad-Neyshabur)". *Geography and Human Relationships*, 1(2), 37-58
- [8] Ghanbari, A., Karami, F., & Saleki, M.A. (2017). "An evaluation of feasibility of potential landslide in City of Tabriz". *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 4(1), 1-16.
- [9] Shamsipour, A., & Shekhi, M. (2010). "Zoning of Sensitive Area and Environment Vulnerable in West of Fars Province using Fuzzy and AHP Claassification", *Physical Geography Research Quarterly*, 42(73), 53-67.
- [10] Baharvand, S., Soori, S., & Rahnama Rad, J. (2017). "Environmental hazards zonation landslide, earthquake, flood and erosion using AHP Fuzzy method (Case study: Vark Basin)". *RS & GIS for Natural Resources*, 8(3), 89-103.
- [11] Farajzadeh, M., Servati, M.R., & Taheri, V. (2011). "Analysis of the Geomorphological hazards in Golestan Province", *Journal of Physical Geography*, 4(11), 45-62.
- [12] Pasha, A.H., Sorbi, A., Behzadi, S. (2018). "Landslide risk assessment in Qazvin-Rasht quadrangle zone (North of Iran)". *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCE*, 27(106), 89-98.
- [13] Cheng, Y. M., & Lau, C. K. (2014). *Slope stability analysis and stabilization: new methods and insight*. CRC Press.
- [14] Matthews, C., Farook, Z., & Helm, P. (2014). "Slope stability analysis-limit equilibrium or the finite element method". *Ground Engineering*, 48(5), 22-28.

- [15] Rickard, O. C., & Sitar, N. (2012). bSLOPE: "A Limit Equilibrium Slope Stability Analysis Code for iOS". *Geotechnical Engineering Report no. UCB/GT/12-01. Geotechnical Engineering Department of Civil and Environmental Engineering, University of California-Berkeley, CA, 94720.*
- [16] Duncan C. W., (2017). *Rock Slope Engineering: Civil Applications*. 5th ed. CRC Press.
- [17] Chowdhury, R., Flentje, P., & Bhattacharya, G. (2010). *Geotechnical slope analysis*. CRC Press.
- [18] Scheldt, T. (2003). "Comparison of continuous and discontinuous modelling for computational rock mechanics", Doctoral Thesis, *Norwegian University of Science and Technology*.
- [19] Hutton, D. V., (2017). *Fundamentals of finite element analysis*. 4th ed. New York: McGraw-hill.
- [20] Rocscience Inc. (2019). "RS² online help, Shear strength reduction (SSR) analysis", https://www.rocscience.com/help/rs2/#t=tutorials%2F03_Shear_Strength_Reduction_Analysis.htm.