

مدلسازی شکست لغزش-واژگونی در رأس با روش‌های تعادل حدی و عددی

حسن سرفراز^{۱*}؛ محدثه سرلک^۲

۱- دکتری مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۷؛ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۹

(*نویسنده مسئول: sarfraz@ut.ac.ir)

چکیده

شکست واژگونی یکی از ناپایداری‌های رایج در شیروانی‌های سنگی می‌باشد. اگر شکست واژگونی تحت تأثیر یک عامل خارجی طبیعی یا مصنوعی تحریک شود، به آن شکست واژگونی ثانویه اطلاق می‌گردد. یکی از مهم‌ترین انواع شکست واژگونی ثانویه، شکست لغزش-واژگونی در رأس است که بخش فوقانی شیروانی واژگون شده و فشار ناشی از واژگونی بلوک‌های سنگی در تاج شیروانی منجر به لغزش توده خاک در پاشنه شیروانی می‌شود. در این تحقیق، ابتدا مروری به این شکست و مکانیزم آن پرداخته شده و سپس سطح لغزش بحرانی ایجاد شده در شکست لغزش-واژگونی در رأس در انواع مختلفی از نوع واژگونی بلوک‌ها در تاج شامل شکست بلوکی، بلوکی-خمشی و خمشی بررسی شده است. در این پژوهش، در یک مثال فرضی، سطوح لغزش‌های متفاوتی در نظر گرفته شده و سپس سطح لغزش بحرانی تعیین شده است. در ادامه نیز با استفاده از نرم افزار تعادل حدی SLIDE در بخش توده خاک، مدل‌های فیزیکی انجام گرفته توسط امینی و همکاران (۲۰۱۸) مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج با روش تحلیلی ارائه شده توسط این محققین نیز مقایسه شد. نتایج حاصل از نرم‌افزار تعادل حدی SLIDE تطابق قابل قبولی با نتایج مدلسازی فیزیکی و روش تحلیلی دارد. همچنین با استفاده از نرم‌افزار عددی Phase2، شکست لغزش-واژگونی در رأس مدلسازی عددی صورت گرفت و فاکتور ایمنی هر یک از مدل‌ها محاسبه شد. نتایج بدست آمده نشان داد که سطح لغزش در واژگونی بلوکی در امتداد درزه‌های متقاطع است و سطح لغزش در واژگونی خمشی در زاویه بین ۵ تا ۱۵ درجه نسبت به راستای عمود بر سطح لایه‌بندی است. سطح لغزش بحرانی در بخش توده خاک، تقریباً از حوالی میانه ارتفاع بلوک سنگی در تماس با توده خاک شروع و به پاشنه شیروانی ختم می‌شود.

شیروانی سنگی، شکست لغزش-واژگونی در رأس، سطح لغزش بحرانی، روش تعادل حدی،
نرم‌افزار Slide، نرم‌افزار عددی Phase2

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

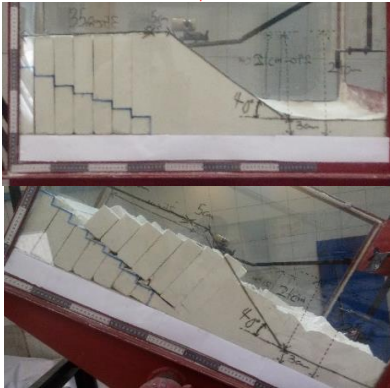
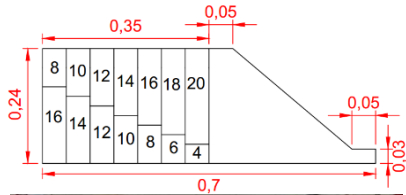
بود. لزوم مطالعه این شیروانی‌ها ضروری است؛ زیرا علاوه بر اینکه وجود سازه یا جاده دارای اهمیت سرمایه‌ای می‌باشد، طی سال‌های اخیر مطالعه‌های مناسبی روی انواع گسیختگی‌های واژگونی انجام شده است، اما پیچیدگی شکست‌های واژگونی ثانویه سبب شده تحقیقات محدودی

در مناطق کوهستانی با گسترش فعالیت‌های عمرانی و نبود زمین مطلوب برای ساخت‌وساز، احداث ساختگاه‌هایی مناسب برای تأسیس سازه‌های عمرانی امری اجتناب ناپذیر است که شیروانی‌های سنگی و خاکی بر این ساختگاه‌ها مشرف خواهند

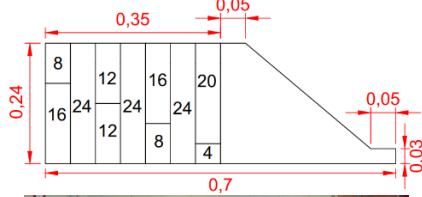
می‌باشند که به آن‌ها شکست‌های واژگونی بلوکی-خمشی می‌گویند. در سال ۲۰۱۲، امینی و همکاران با ترکیب روش گودمن و بری و روش آیدان و کاواموتو راهکار مؤثری برای ارزیابی شکست واژگونی بلوکی-خمشی پیشنهاد نمودند. کاربرد این روش در تحلیل چند مثال موردی نشان داد که نتایج آن از دقت و صحت مناسبی برخوردار است [۸]. در سال ۲۰۱۹، سرفراز و امینی شکست واژگونی بلوکی-خمشی را با استفاده از روش المان مجزا مورد ارزیابی قرار دادند [۹]. در سال ۲۰۲۰، سرفراز روش تحلیلی برای شکست واژگونی بلوکی-خمشی با در نظر گرفتن گردشگری لبه‌های بلوک ارائه داد [۱۰]. در سال ۲۰۲۳، سرفراز و همکاران، با بکارگیری روش سارما، روش تحلیلی برای شکست واژگونی بلوکی ارائه کردند و روش پیشنهادی را با نتایج موجود در مطالعات موجود مقایسه کردند [۱۱]. در سال ۲۰۱۷، ژنگ و همکاران، رابطه تحلیلی بر مبنای روش تعادل حدی برای شیروانی سنگی با پتانسیل شکست واژگونی خمشی یا لغزشی ارائه دادند و روش تحلیلی پیشنهادی خود را با دو مدل فیزیکی و روش عددی المان مجزا و همچنین روش آیدان و همکاران مقایسه نمودند [۱۲]. اگر هر یک از شکست‌های مذکور تحت تأثیر یک یا چند عامل خارجی رخ دهند به آن‌ها شکست واژگونی ثانویه می‌گویند که چندین تحقیق برای شکست واژگونی ثانویه ارائه شده است [۱۳-۲۶]. یکی از انواع رایج شکست واژگونی ثانویه، شکست لغزش-واژگونی در رأس است که در این نوع ناپایداری، ستون‌های سنگی با پتانسیل واژگونی در بخش فوقانی شیروانی قرار دارند و فشار ناشی از واژگونی این بلوک‌های سنگی، منجر به لغزش توده خاک در پاشنه شیروانی می‌شود (شکل ۱). در سال ۲۰۱۸، امینی و همکاران، مدل‌های فیزیکی برای این شکست انجام و روش تحلیلی برای آنالیز پایداری این شکست ارائه دادند [۲۵]. در این پژوهش، با استفاده از روش تعادل حدی GLE و نرم افزار Slide و نرم‌افزار عددی Phase2، سطح لغزش بحرانی شکست لغزش-واژگونی در رأس مورد ارزیابی قرار گرفته و با نتایج مدل‌سازی فیزیکی، تحلیلی مقایسه و صحت‌سنجی می‌شوند.

روی آن صورت گیرد. مولر در سال ۱۹۶۸، با بررسی ناپایداری‌های مشرف به دریاچه سد ویونت ایتالیا، چرخش بلوک‌های سنگی طبیعی را برای نخستین بار مطرح کرد [۱]. در سال ۱۹۷۶، گودمن و بری بر اساس مشاهدات منطقه‌ای و مدل‌سازی‌های فیزیکی، شکست‌های واژگونی را به دو دسته اصلی و ثانویه تقسیم‌بندی نمودند [۲]. در سال ۱۹۹۷، ادیکاری و همکارانش شکست واژگونی خمشی را با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ مدل‌سازی کردند [۳]. همچنین این محقق و همکارانش در سال ۲۰۰۷ مدل‌سازی‌های جدیدی را با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ بر نمونه‌های بتن و شیشه دارای پتانسیل شکست واژگونی خمشی انجام دادند. با استفاده از نتایج این آزمایش‌ها، شکست واژگونی خمشی به دو دسته آنی و پیش‌رونده تقسیم‌بندی می‌شوند [۴]. در سال ۲۰۰۹، الزوبی و همکارانش شکست کششی در نمونه‌های سنگی را با نرم‌افزار المان مجزای یودک مدل‌سازی کردند [۵]. شکست واژگونی خمشی یکی دیگر از شکست‌های واژگونی اصلی است. برای تفسیر این شکست فرض می‌شود تنها یک دسته ناپیوستگی با شیب تند توده سنگ را قطع کرده است، به نحوی که جهت شیب آن‌ها به طرف داخل شیروانی است. در این حالت توده سنگ شبیه به ستون‌هایی عمل می‌کند که با شیب تند روی یکدیگر قرار گرفته‌اند و در اثر نیروی وزنشان تحت خمش قرار دارند. در شرایطی که تنش کششی حاصل از خمش در این ستون‌سنگ‌ها از مقاومت کششی توده سنگ تجاوز کند، شکسته شده و واژگون می‌شوند. در سال ۲۰۰۹، امینی و همکاران بر اساس اصول سازگاری حاکم بر رفتار تیرهای یک‌سرگردار یک راهکار ساده برای تحلیل این شکست پیشنهاد کردند که با نتایج مدل‌سازی‌های فیزیکی و مطالعات موردی تطابق خوبی داشت [۶-۷]. برای تفسیر سازوکار شکست واژگونی بلوکی فرض می‌شود یک دسته ناپیوستگی اصلی و یک دسته‌درزه ثانویه عمود بر آن در توده‌سنگ ظاهر می‌شود به نحوی که جهت شیب دسته ناپیوستگی اصلی به سمت داخل شیروانی است. در این حالت، توده‌سنگ به بلوک‌هایی تبدیل می‌شود که تمایل دارند تحت تأثیر وزنشان به سمت خارج شیروانی واژگون شوند یا بلغزند. غالباً حالت‌های ایده آل فوق‌کم‌تر در طبیعت مشاهده می‌شود و شکست‌های واژگونی ترکیبی از شکست‌های بلوکی و خمشی

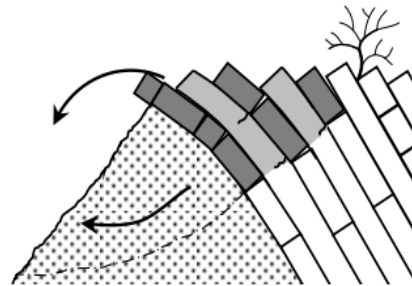
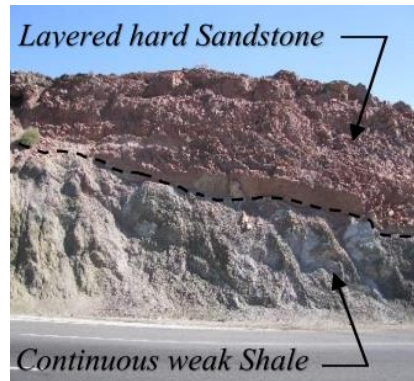
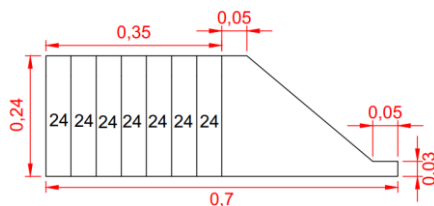
سطح کلی شکست واژگونی مدل حدود ۲۰ درجه انتخاب شد تا شکست واژگونی خمشی- بلوکی کاملاً منظم رخ دهد و تفسیر آن آسان‌تر باشد [۲۵].



الف) واژگونی بلوکی



ب) واژگونی بلوکی - خمشی



شکل ۱- شکست لغزش-واژگونی در رأس [۲۵]

۲- مروری بر مدلسازی فیزیکی و تحلیلی

شکست لغزش-واژگونی در رأس

در این بخش، به منظور ارزیابی روش تعادل حدی در تحلیل پایداری شکست لغزش-واژگونی در رأس، مروری از مدلسازی فیزیکی این شکست که توسط امینی و همکاران (۲۰۱۸) انجام شده است، ارائه شده است. این محققین تعدادی مدل فیزیکی از شکست لغزش-واژگونی در رأس از طریق میز شیب‌دار انجام دادند. این محققین سه حالت واژگونی ثانویه را مطابق شکل ۲ مدلسازی فیزیکی انجام دادند. در شکست واژگونی خمشی، بلوک‌ها کاملاً پیوسته در مدل قرار گرفتند؛ به نحوی که برای واژگون شدن شیروانی لازم است این بلوک‌ها از پایه خود تحت تنش کششی ناشی از خمش شکسته شوند. در مدل‌های بلوکی، یک درزه مصنوعی در پایه تمام بلوک‌ها ایجاد شد؛ به نحوی که در مقطع عرضی مدل، زاویه سطح کلی شکست واژگونی نسبت به کف میز (عمود بر ناپیوستگی‌های اصلی) حدود ۲۰ درجه می‌باشد تا تمام بلوک‌ها بتوانند آزادانه از پایه خود جدا شده و واژگون شوند. برای ساخت مدل بلوکی-خمشی، نصف بلوک‌ها به صورت پیوسته و نصف دیگر دارای درزه اولیه انتخاب شدند و به صورت یک‌درمیان در چند ردیف در کنار یکدیگر قرار گرفتند. در این مدل‌ها نیز زاویه

اگر کف بلوک درزه طبیعی وجود داشته باشد، بلوک نمی-تواند تنش‌های خمشی را تحمل کند بنابراین یا واژگون می‌شود یا می‌لغزد که با استفاده از روابط (۱) و (۲) می‌توان لغزش یا واژگون شدن آن را بررسی کرد. اگر نیروی $P_{i-1,s}$ بزرگ‌تر از نیروی $P_{i-1,t}$ باشد، بلوک سنگی دارای خاصیت لغزشی است؛ ولی اگر نیروی $P_{i-1,t}$ بزرگ‌تر از $P_{i-1,s}$ شود، امکان واژگون شدن بلوک بیش‌تر است. اگر هر دو نیرو منفی باشند این بلوک پایدار است و هیچ نیرویی به بلوک بعدی وارد نمی‌کند ($P_{i-1}=0$). در شرایطی که بلوک گیردار باشد، بلوک توان تحمل تنش‌های خمشی را دارد. در این حالت بلوک یا تحت تنش کششی ناشی از خمش شکسته می‌شود یا در اثر برآیند نیروهای وارد بر آن برش می‌خورد که وضعیت ناپایداری آن را می‌توان از روابط (۳) و (۴) تعیین نمود. در این حالت نیز، اگر نیروی $P_{i-1,f}$ بزرگ‌تر از نیروی $P_{i-1,sh}$ شود، بلوک سنگی دارای خاصیت خمشی است؛ ولی اگر نیروی $P_{i-1,sh}$ بزرگ‌تر از $P_{i-1,f}$ شود، امکان برش بلوک بیشتر است. همچنین مشابه حالت قبلی، اگر هر دو نیرو منفی باشند این بلوک پایدار است و هیچ نیرویی به بلوک بعد از خود وارد نمی‌کند. در تمام حالت‌های مذکور فرض می‌شود بلوک‌های سنگی در حین واژگون شدن یا لغزیدن در مرزهای مشترک خود روی همدیگر سر می‌خورند. بنابراین تنش‌های برشی وارد بر طرفین هر بلوک (Q_i) به کمک معیار شکست موهر- کلمب تعیین می‌شوند. با توجه به روابط فوق، نیروهای بین بلوکی را محاسبه نموده تا نیروی وارد بر وجه آخرین بلوک سنگی تعیین گردد، بر اساس علامت این نیرو می‌توان به صورت زیر وضعیت شیروانی در قسمت رأس شیروانی (بلوک‌های سنگی) را مورد ارزیابی قرار داد (اگر P_0 بزرگ‌تر از صفر باشد، رأس شیروانی ناپایدار است، اگر P_0 کوچک‌تر از صفر باشد، رأس شیروانی پایدار است و اگر P_0 برابر با صفر شود، رأس شیروانی در مرز تعادل قرار دارد). بنابراین اگر این نیرو مثبت شود، در اثر این نیروها توده خاکی ممکن است دچار لغزش شود. سپس نیرو مذکور با فرض توزیع مثلثی به توده لغزشی وارد می‌شود. نیروهای بین قطعات در بخش توده خاکی از روش تعادل حدی مرگسترن پرایس محاسبه می‌شود که جزئیات این روابط در تحقیق امینی و همکاران (۲۰۱۸) ارائه شده است.



ج) واژگونی خمشی

شکل ۲- شماتیک و تصاویر از سه شکست لغزش-واژگونی در رأس با ارتفاع ۲۴ سانتی‌متر [۲۵]

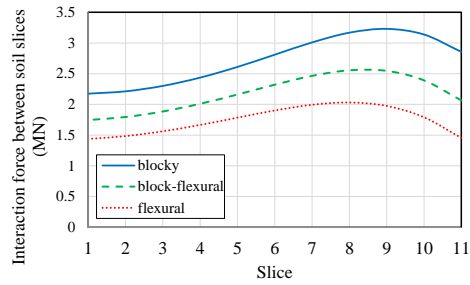
امینی و همکاران (۲۰۱۸) ابتدا اندرکنش نیروهای بین بلوک سنگی و سپس اندرکنش بین آخرین بلوک سنگی و توده لغزشی محاسبه کردند. سپس با انتقال این نیرو به توده خاک، شکست لغزشی در توده خاکی را تحلیل کردند. برای تحلیل در قسمت توده لغزشی (خاک) از روش متعارف قطعه استفاده شده است. همچنین برای این که شکل توده لغزشی عمومی باشد و حالت‌های مختلف لغزش را پوشش دهد، سطح لغزش در این بخش کاملاً تصادفی فرض شده است تا بتوان از آن برای تحلیل لغزش‌های قاشقی و غیر قاشقی استفاده نمود [۲۵]. در حالت کلی هر یک از بلوک‌های سنگی موجود در ناحیه واژگونی ممکن است دچار لغزش، واژگونی، خمش یا برش شوند که در هر یک از این حالت‌ها، به ترتیب، نیروی وارد بر وجه راست بلوک مورد مطالعه از روابط زیر به دست می‌آید [۲۵]:

$$P_{i-1,s} = P_i + \frac{W_i (\sin \psi_b - \cos \psi_b \tan \phi_c) - c_b t}{1 - \tan \phi_c \tan \phi_c} \quad (1)$$

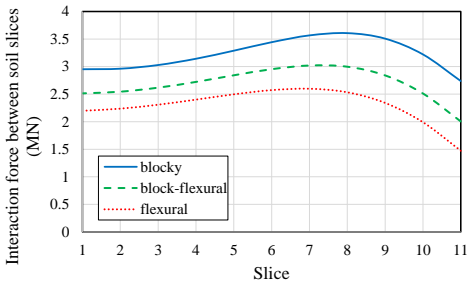
$$P_{i-1,t} = \frac{P_i [y_i - \tan \phi_c t] + 0.5 W_i [\sin \psi_b h_i - \cos \psi_b t]}{y_{i-1}} \quad (2)$$

$$P_{i-1,f} = \frac{P_i (y_i - 0.5 \tan \phi_c t) + 0.5 W_i \sin \psi_b h_i - \frac{2I}{t} \left(\sigma_i + \frac{W_i \cos \psi_b}{t} \right)}{y_{i-1} + 0.5 \tan \phi_c t} \quad (3)$$

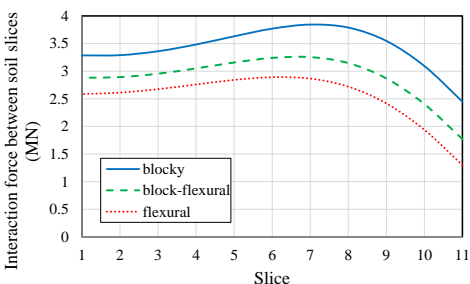
$$P_{i-1,sh} = P_i + \frac{W_i (\sin \psi_b - \cos \psi_b \tan \phi_i) - c_i t}{1 - \tan \phi_c \tan \phi_i} \quad (4)$$



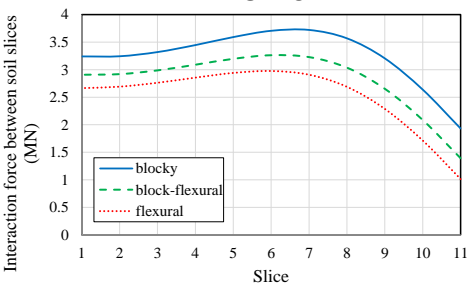
شروع سطح لغزش از e_2



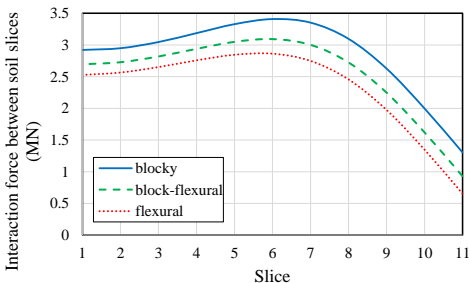
شروع سطح لغزش از e_4



شروع سطح لغزش از e_6

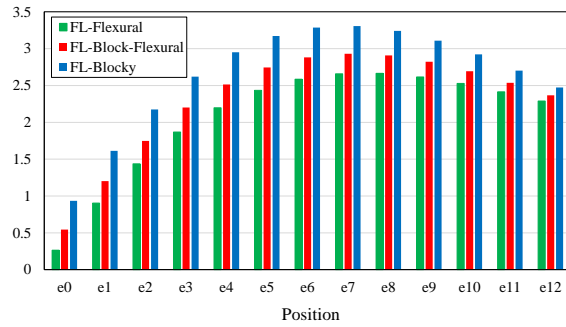


شروع سطح لغزش از e_8



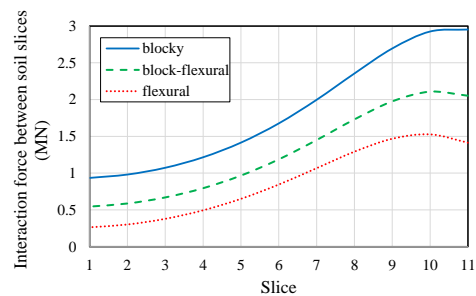
شروع سطح لغزش از e_{10}

وسط طول بلوک تماسی با توده خاک (مابین e_7 و e_8) و پاشنه شیروانی است. با بالا رفتن سطح لغزش از کف ضلع بلوکی سنگی، اختلاف بین نیروهای بلوکی، خمشی و بلوکی - خمشی در شکست لغزش واژگونی کاهش می‌یابد.



شکل ۴- نحوه تغییر نیروی وارد بر سمت چپ قطعه خاکی در پاشنه شیروانی در سطح لغزش‌های متفاوت

نحوه تغییر نیروهای بین قطعات توده خاکی در سطح لغزش‌های متفاوت برحسب مگا نیوتن در شکل ۵ نشان داده شده است. نیروی بین قطعات توده خاکی ابتدا روند صعودی و سپس روند نزولی دارد. به گونه‌ای که اگر سطح لغزش از کف ضلع بلوک سنگی آغاز شود، نیروی بین قطعات ابتدا در قطعه تماسی با بلوک سنگی (قطعه ۱۱ مطابق شکل ۵) به مقدار ناچیزی افزایش یافته و سپس تا آخرین قطعه توده خاکی در پاشنه شیروانی (قطعه ۱) با شیب تندی کاهش می‌یابد. با بالا رفتن سطح لغزش به دلیل کاهش حجم توده خاکی و ارتفاع قطعات و همچنین افزایش زاویه کف قطعه با افق، ابتدا نیروی بین قطعات به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و نهایتاً با شیب ملایمی تا قطعه ۱ کاهش می‌یابد.

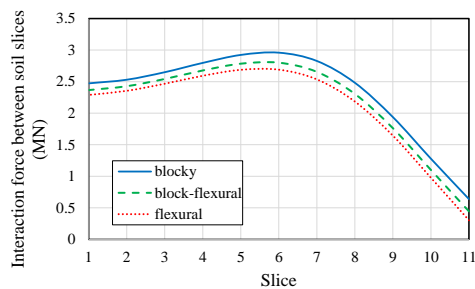


شروع سطح لغزش از e_0

جدول ۱- خواص فیزیکی و مکانیکی بلوک‌های سنگی و

خاکی [۲۵]

ماده	وزن واحد حجم (kN/m^3)	مدول ارتجاعی (MPa)	ضریب پواسون	مقاومت کششی (kPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (kPa)
بلوک	۲۱/۱	۱۰	۰/۲۷	۱۴	۳۵	۱۰۰
پودر	۱۶	۳	۰/۲۵	۰	۲۸	۰/۵۵



شروع سطح لغزش از e12

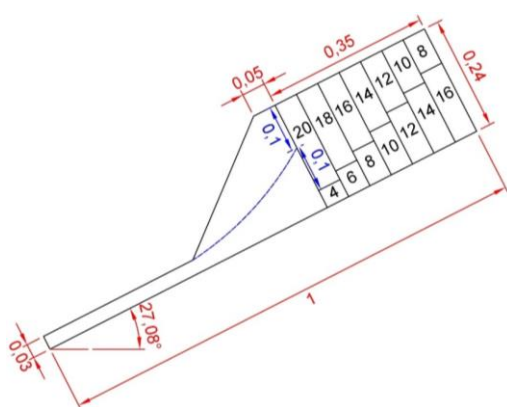
شکل ۵- نحوه تغییر نیروهای بین قطعات توده خاکی در

سطح لغزش‌های متفاوت

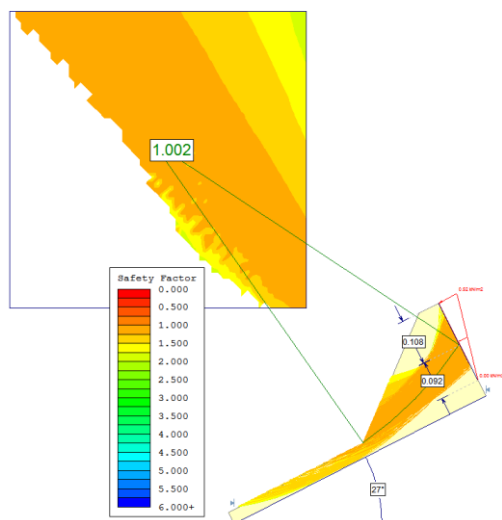
۴- تحلیل مدلسازی فیزیکی با روش تعادل

حدی

نرم‌افزار SLIDE ابزاری مفید برای تحلیل شیروانی‌های خاکی و سنگی می‌باشد و برای تحلیل شکست‌های قاشقی مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین از این روش می‌توان برای تحلیل بخش قاشقی در مدلسازی فیزیکی استفاده نمود. بدین منظور ابتدا هندسه توده خاکی (بخش قاشقی) مدل‌های فیزیکی در لحظه شکست در نرم‌افزار SLIDE آماده شده و با استفاده از روش تحلیلی پیشنهادی توسط امینی و همکاران (۲۰۱۸)، نیروی آخرین بلوک بدست آمده و این نیرو با توزیع مثلثی وارد نرم‌افزار مذکور شده است. خواص فیزیکی و مکانیکی پودرها (چگالی، چسبندگی و زاویه اصطکاک) در این نرم‌افزار مطابق جدول ۱ می‌باشد. سپس این مدل‌ها به کمک روش تعادل حدی مرگسترن و پرایس در زاویه دستگاه میز شیب‌دار در روش تحلیلی بررسی شدند و فاکتور ایمنی محاسبه گردید. همانگونه که مورد انتظار است، فاکتور ایمنی در لحظه شکست بایستی برابر با یک باشد. شماتیک سطح لغزش مدل‌های فیزیکی در روش تحلیلی امینی و همکاران (۲۰۱۸) و نرم‌افزار SLIDE در شکل ۶ تا شکل ۸ نشان داده شده است. همانطوری که در این اشکال دیده می‌شود، سطح لغزش بحرانی از حوالی وسط آخرین بلوک شروع و به پاشنه شیروانی ختم می‌شود. مطابق این اشکال، نتایج بدست آمده از نرم‌افزار SLIDE تطابق قابل قبولی با نتایج مدلسازی فیزیکی و تحلیلی وجود دارد.

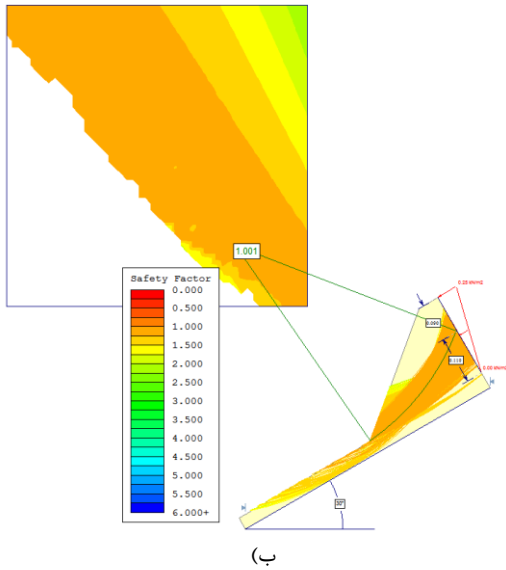


(الف)



(ب)

شکل ۶- (الف) سطح لغزش در روش تحلیلی (ب) سطح لغزش بحرانی و خطوط سطوح لغزش در نرم‌افزار SLIDE در مدل بلوکی



(ب)

شکل ۸- الف) سطح لغزش در روش تحلیلی (ب) سطح لغزش بحرانی و خطوط سطوح لغزش در نرم افزار SLIDE در مدل خمشی

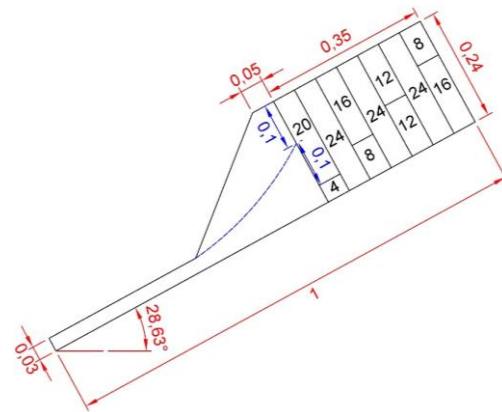
۵- مدلسازی عددی شکست لغزش-واژگونی در رأس

خصوصیات مورد استفاده در مدلسازی عددی مطابق جدول ۱ می باشد. ضریب صلبیت عمودی و برشی درزه های بین بلوک ها، به ترتیب، برابر با ۱۰ و ۰.۱ گیگا پاسکال بر متر فرض شدند. معیار رفتاری، مدل رفتاری موهر- کولمب انتخاب گردید. برای تحلیل عددی مدل های فیزیکی، ابتدا هندسه اولیه هر مدل در لحظه شکست در محیط نرم افزار Phase2 آماده و خواص پودر، بلوک ها و درزه ها به آن ها نسبت داده شد. سپس این مدل ها به کمک روش کاهش مقاومت برشی تحلیل شدند.

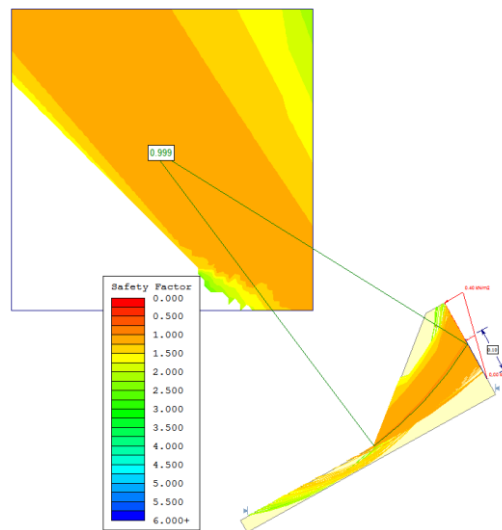
۵-۱- مدلسازی عددی شکست واژگونی خالص

در رأس شیروانی

در این نوع ناپایداری، بلوک های جامد موجود در تاج شیروانی کاملاً پیوسته می باشند و می توانند تنش های کششی را تحمل کنند. در این حالت، بلوک های سنگی در تاج شیروانی در اثر تنش کششی ناشی از خمش شکسته و واژگون می شوند و در اثر این فشار، توده خاکی دچار لغزش قاشقی می شود. کرنش برشی در مدل با پتانسیل واژگونی خمشی در رأس در شکل ۹ نشان داده شده است و فاکتور کاهش تنش برابر با ۰.۸۷۷

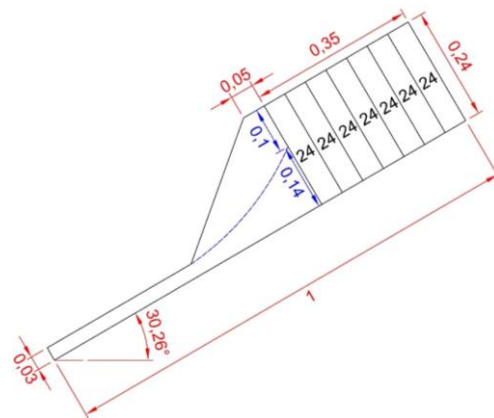


(الف)



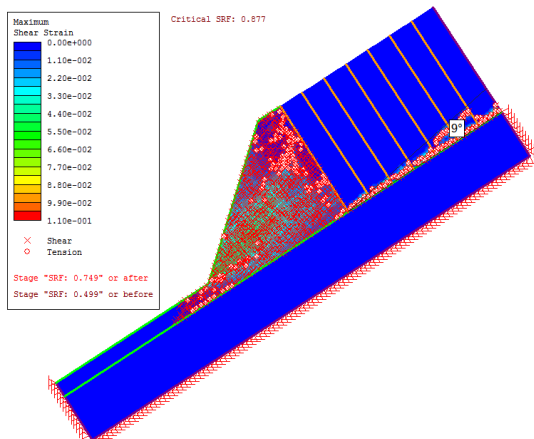
(ب)

شکل ۷- الف) سطح لغزش در روش تحلیلی (ب) سطح لغزش بحرانی و خطوط سطوح لغزش در نرم افزار SLIDE در مدل بلوکی-خمشی



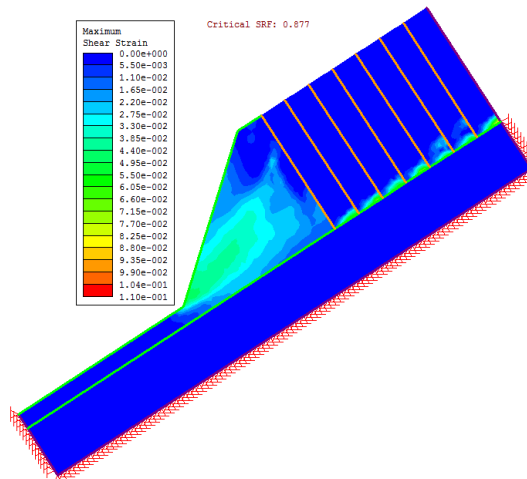
(الف)

برای بررسی صحت، نتیجه مدلسازی عددی این زاویه در مدل خمشی در رأس تعیین شد (شکل ۱۱). همان‌طوری‌که ملاحظه می‌شود در این مدل، زاویه بین سطح کلی شکست و سطح عمود بر ناپیوستگی‌ها حدود ۹ درجه به دست آمده است که در محدوده تئوری و واقعی قرار دارد.



شکل ۱۱- زاویه بین سطح کلی شکست و سطح عمود بر ناپیوستگی‌های توده سنگ

حاصل شده است. از آنجایی که شکست واژگونی خمشی به تنش‌های کششی بسیار حساس است، توزیع تنش‌های کششی موجود در شکل ۱۰ ارائه شده است. در اثر تنش‌های کششی مذکور، بخش رأس شیروانی دچار واژگونی شده است.

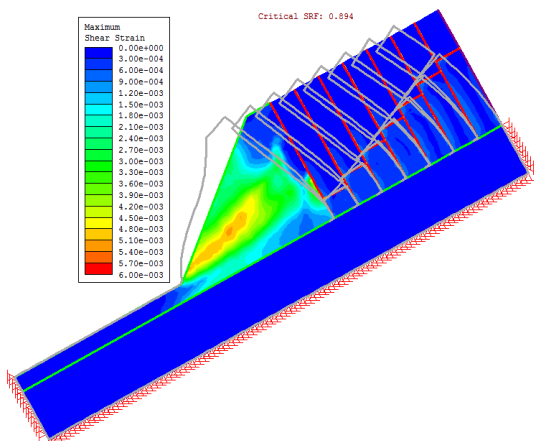


شکل ۹- پلات کرنش برشی حاصل از مدلسازی عددی شکست لغزش واژگونی در رأس

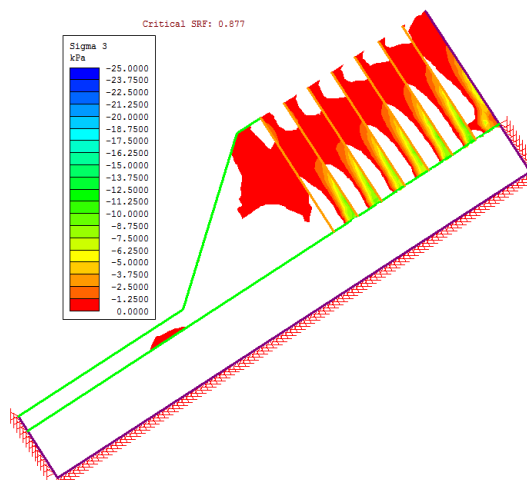
۵-۲- مدلسازی عددی شکست بلوکی خالص در

رأس شیروانی

در این نوع ناپایداری، بلوک‌ها به دلیل حضور درزه‌های ثانویه تنش‌های کششی را تحمل نمی‌کنند و در اثر فشار ناشی از بلوک‌های بالادست، دچار واژگونی یا لغزش می‌شوند. در شکل ۱۲، تصویری از نتیجه تحلیل مدل بلوکی نشان داده شده است که فاکتور کاهش تنش برابر با ۰.۸۹۴ حاصل شده است.

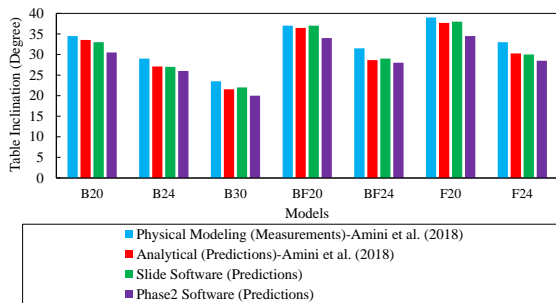


شکل ۱۲- شکست لغزش-واژگونی بلوکی در رأس



شکل ۱۰- توزیع تنش‌های کششی در بلوک حاصل از مدلسازی عددی

در شکست‌های واژگونی به‌خصوص واژگونی خمشی، تعیین سطح کلی شکست در توده‌سنگ با ابهامات زیادی همراه است. این سطح غالباً بالای صفحه عمود بر ناپیوستگی‌های غالب توده‌سنگ قرار می‌گیرد. مطالعات تئوری و تجربی زاویه بین این دو سطح (سطح کلی شکست و سطح عمود بر ناپیوستگی-های غالب توده‌سنگ) را بین ۵ تا ۱۵ درجه تخمین می‌زنند.



شکل ۱۴- مقایسه نتایج مدلسازی فیزیکی با پیش‌بینی روش تحلیلی، نرم‌افزار تعادل حدی Slide و مدلسازی عددی

۶- نتیجه‌گیری

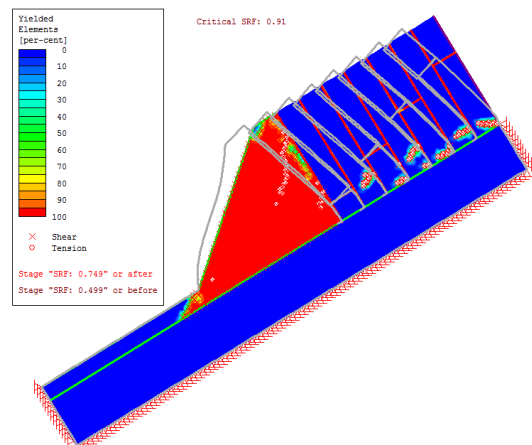
در این پژوهش، سطح لغزش بحرانی در شکست لغزش-واژگونی در رأس با استفاده از نتایج مدلسازی فیزیکی، تحلیلی و تعادل حدی مورد بررسی قرار گرفت. در این شکست، در بخش تاج شیروانی، بلوک‌های سنگی دچار واژگونی شده و در اثر فشار، لغزش قاشقی در توده خاکی رخ می‌دهد. در شیروانی از نوع شکست واژگونی خمشی خالص در رأس، بلوک‌های سنگی در بخش فوقانی شیروانی در اثر تنش کششی ناشی از خمش شکسته و واژگون می‌شوند و در اثر این فشار، توده خاکی دچار لغزش قاشقی می‌شود. در شیروانی از نوع شکست واژگونی بلوکی خالص در رأس، بلوک‌ها به دلیل حضور درزه‌های ثانویه تنش‌های کششی را تحمل نمی‌کنند و در اثر فشار ناشی از بلوک‌های بالادست، دچار واژگونی یا لغزش می‌شوند و نهایتاً شکست قاشقی خاکی در توده خاکی رخ می‌دهد. در شیروانی از نوع شکست واژگونی بلوکی-خمشی خالص در رأس، در اثر فشار ناشی از وزن بلوک‌های بالادست، نیمی از بلوک‌ها در اثر تنش کششی شکسته شده (واژگونی خمشی) و نیمی دیگر از محل درزه‌های ثانویه جدا شده (واژگونی بلوکی) و سپس همه آن‌ها با یکدیگر واژگون می‌شوند و لغزش در توده خاکی رخ می‌دهد.

ابتدا سطوح لغزش‌های متفاوتی در یک مثال فرضی در نظر گرفته شد و سطح لغزش بحرانی تعیین گردید. با استفاده از نرم‌افزار تعادل حدی SLIDE در بخش توده خاک، مدل‌های فیزیکی انجام گرفته توسط امینی و همکاران (۲۰۱۸) تحلیل شدند و نتایج حاصله با روش تحلیلی نیز مقایسه شد که نتایج بدست آمده از نرم‌افزار تعادل حدی SLIDE تطابق مناسبی با نتایج مدلسازی فیزیکی و روش تحلیلی دارد.

۵-۳- مدلسازی عددی شکست بلوکی-خمشی

در رأس شیروانی

در این ناپایداری، در اثر فشار ناشی از وزن بلوک‌های بالادست، نیمی از بلوک‌ها در اثر تنش کششی شکسته شده (واژگونی خمشی) و نیمی دیگری از محل درزه‌های ثانویه جدا می‌شوند (واژگونی بلوکی) و سپس همه آن‌ها با یکدیگر واژگون شوند. نتیجه تحلیل عددی این مدل در شکل ۱۳ ارائه شده است. فاکتور کاهش تنش در این مدل برابر با ۰.۹۱ حاصل شده است. در این شکل، المان‌ها و درزه‌هایی که تحت تنش‌های نرمال و برشی به تسلیم رسیده‌اند، مشاهده می‌شوند.



شکل ۱۳- شکست لغزش-واژگونی بلوکی-خمشی در رأس

۵-۴- مقایسه نتایج مدلسازی فیزیکی،

تحلیلی، تعادل حدی و عددی

در این بخش، نتایج مدلسازی‌های فیزیکی انجام شده توسط امینی و همکاران (۲۰۱۸) و روش تحلیلی پیشنهادی آنها و نرم‌افزار تعادل حدی SLIDE و مدل‌های عددی مقایسه می‌شوند. برای مقایسه از زاویه میز شیبدار در لحظه شکست استفاده شده است (شکل ۱۴). مطابق این شکل، نتایج بدست آمده از روش تعادل حدی، تطابق قابل قبولی با نتایج مدلسازی فیزیکی انجام شده توسط امینی و همکاران (۲۰۱۸) و روش تحلیلی پیشنهادی این محققین دارد و نرم‌افزار اجزای محدود Phase2 به دلیل حل کرنش مسطح، زاویه میز شیبدار در لحظه شکست را کمتر از روش تحلیلی پیشنهادی و مدلسازی فیزیکی و روش تعادل حدی تخمین می‌زند.

شیب صفحه عمود بر ناپیوستگی‌های غالب توده‌سنگ	ψ_b	همچنین نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که سطح لغزش در واژگونی بلوکی در امتداد درزه‌های متقاطع است و سطح لغزش در واژگونی خمشی در زاویه بین ۵ تا ۱۵ درجه نسبت به راستای عمود بر سطح لایه‌بندی است. سطح لغزش در بخش توده خاک تقریباً از حوالی وسط ارتفاع بلوک سنگی در تماس با توده خاک شروع و به پاشنه شیروانی ختم می‌شود.										
ارتفاع شیروانی	H	<p style="text-align: center;">فهرست علائم اختصاری</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>σ_i</td> <td>مقاومت کششی سنگ</td> </tr> <tr> <td>γ</td> <td>وزن واحد حجم</td> </tr> <tr> <td>h</td> <td>متوسط طول بلوک‌ها یا قطعات</td> </tr> <tr> <td>t</td> <td>ضخامت بلوک‌ها</td> </tr> <tr> <td>ψ_p</td> <td>شیب ناپیوستگی‌های اصلی توده سنگ</td> </tr> </tbody> </table>	σ_i	مقاومت کششی سنگ	γ	وزن واحد حجم	h	متوسط طول بلوک‌ها یا قطعات	t	ضخامت بلوک‌ها	ψ_p	شیب ناپیوستگی‌های اصلی توده سنگ
σ_i	مقاومت کششی سنگ											
γ	وزن واحد حجم											
h	متوسط طول بلوک‌ها یا قطعات											
t	ضخامت بلوک‌ها											
ψ_p	شیب ناپیوستگی‌های اصلی توده سنگ											
زاویه اصطکاک کف بلوک	ϕ_b											
چسبندگی کف بلوک	C_b											
زاویه اصطکاک بین بلوک‌ها	ϕ_b											
زاویه اصطکاک داخلی بلوک‌ها	ϕ_i											
چسبندگی داخلی بلوک‌ها	C_i											
وزن بلوک‌ها	W											
نیروی قائم بین بلوک‌ها	P											
نیروی برشی بین بلوک‌ها	Q											
نقطه اثر نیروی P نسبت به کف بلوک	Y											

۷- منابع

- [1] L. Müller, "New considerations on the Vaiont slide," *Rock Mech Eng Geol*, vol. 6, pp. 1–91, 1968.
- [2] D. C. Wyllie, C. W. Mah, and E. Hoek, *Rock slope engineering: civil and mining*. Spon Press, 2004.
- [3] D. P. Adhikary, A. V. Dyskin, R. J. Jewell, and D. P. Stewart, "A study of the mechanism of flexural toppling failure of rock slopes," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 30, no. 2, pp. 75–93, 1997.
- [4] D. P. Adhikary and A. V. Dyskin, "Modelling of progressive and instantaneous failures of foliated rock slopes," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 40, no. 4, pp. 349–362, Aug. 2007.
- [5] A. K. Alzo'ubi, C. D. Martin, and D. M. Cruden, "Influence of tensile strength on toppling failure in centrifuge tests," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 47, no. 6, pp. 974–982, 2010.
- [6] A. Majdi and M. Amini, "Analysis of geo-structural defects in flexural toppling failure," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 48, no. 2, pp. 175–186, 2011.
- [7] M. Amini, A. Majdi, and Ö. Aydan, "Stability Analysis and the Stabilisation of Flexural Toppling Failure," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 42, no. 5, pp. 751–782, Oct. 2009.
- [8] M. Amini, A. Majdi, and M. A. Veshadi, "Stability analysis of rock slopes against block-flexure toppling failure," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 45, no. 4, pp. 519–532, Jul. 2012.
- [9] H. Sarfaraz and M. Amini, "Numerical modeling of rock slopes with a potential of block-flexural toppling failure," *J. Min. Environ.*, vol. 11, no. 1, pp. 247–259, 2020.
- [10] H. Sarfaraz, "Stability analysis of block-flexural toppling of rock blocks with round edges," *J. Min. Environ.*, vol. 11, no. 4, pp. 1217–1229, 2020.
- [11] H. Sarfaraz, M. Sarlak, F. Ashoor, and E. Amini, "Block Toppling Stability of Rock Block with Rounded Edges using Sarma Approach," *J. Min. Environ.*, vol. 14, no. 1, pp. 341–353, 2023.
- [12] Y. Zheng, C. Chen, T. Liu, K. Xia, and X. Liu, "Stability analysis of rock slopes against sliding or flexural-toppling failure," *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 77, no. 4, pp. 1383–1403, May 2018.
- [13] E. Mohtarami, A. Jafari, and M. Amini, "Stability analysis of slopes against combined circular-toppling failure," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 67, pp. 43–56, 2014.
- [14] M. Tsesarsky and Y. H. Hatzor, "Kinematics of overhanging slopes in discontinuous rock," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 135, no. 8, pp. 1122–1129, 2009.
- [15] H. Haghoei, A. R. Kargar, M. Amini, and K. Esmaeili, "An analytical solution for analysis of toppling-slumping failure in rock slopes," *Eng. Geol.*, vol. 265, p. 105396, 2020.

- [16] H. Sarfaraz, A. R. Bahrami, and R. Samani, "Numerical Modelling of Slide-Head-Toppling Failure using FEM and DEM Methods," 2022.
- [17] H. Sarfaraz, "A simple theoretical approach for analysis of slide-toe-toppling failure," *J. Cent. South Univ.*, vol. 27, no. 9, 2020.
- [18] H. Sarfaraz and M. Amini, "Numerical Simulation of Slide-Toe-Toppling Failure Using Distinct Element Method and Finite Element Method," *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 38, no. 2, pp. 2199–2212, 2020.
- [19] M. Frayssines and D. Hantz, "Modelling and back-analysing failures in steep limestone cliffs," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 46, no. 7, pp. 1115–1123, 2009.
- [20] R. S. Evans, "An analysis of secondary toppling rock failures--the stress redistribution method," *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, vol. 14, no. 2, pp. 77–86, 1981.
- [21] S. L. Nichol, O. Hungr, and S. G. Evans, "Large-scale brittle and ductile toppling of rock slopes," *Can. Geotech. J.*, vol. 39, no. 4, pp. 773–788, Aug. 2002.
- [22] L. R. Alejano, I. Gómez-Márquez, and R. Martínez-Alegría, "Analysis of a complex toppling-circular slope failure," *Eng. Geol.*, vol. 114, no. 1–2, pp. 93–104, 2010.
- [23] M. Amini, A. Ardestani, and M. H. Khosravi, "Stability analysis of slide-toe-toppling failure," *Eng. Geol.*, vol. 228, pp. 82–96, 2017.
- [24] M. Amini and A. Ardestani, "Stability analysis of the north-eastern slope of Daralou copper open pit mine against a secondary toppling failure," *Eng. Geol.*, vol. 249, pp. 89–101, 2019.
- [25] M. Amini, H. Sarfaraz, and K. Esmaili, "Stability analysis of slopes with a potential of slide-head-toppling failure," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 112, pp. 108–121, Dec. 2018.
- [26] H. Sarfaraz, M. H. Khosravi, and M. Amini, "Numerical Analysis of Slide-Head-Toppling Failure," *J. Min. Environment*, vol. 10, no. 4, pp. 1001–1011, 2019.
- [27] M. H. Khosravi, H. Sarfaraz, M. Esmailvandi, and T. Pipatpongsa, "A Numerical Analysis on the Performance of Counterweight Balance on the Stability of Undercut Slopes," *Int. J. Min. Geo-Engineering*, vol. 51, no. 1, pp. 63–69, 2017.



Modeling of Slide-Head-Topping Failure Using Limit Equilibrium and Finite Element Methods

Hassan Sarfaraz^{1*}; Mohadeseh Sarlak²

1- PhD in Rock Mechanics, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Bachelor of Science in Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received: 29. September. 2023 Accepted: 20. December. 2023

(*Corresponding author: Sarfaraz@ut.ac.ir)

Keywords

Rock Slope
Slide-Head- Toppling Failure
Critical Sliding Failure
Limit Equilibrium Method
Slide Software
Phase 2 Software

Extended Abstract

Toppling failure is one of the most common rock slope instabilities. If the discontinuity failure is triggered by an external natural or artificial factor, it is called a secondary toppling failure. One of the most important types of secondary toppling failure is slide-head-toppling. In this failure, in the crest region, rock blocks experience toppling, leading to sliding failure in soil mass due to the resulting pressures. In the case of pure flexural toppling failure at the crest, rock blocks in the upper crest section undergo tension-induced bending and toppling. Consequently, the underlying soil mass experiences sliding under imposed pressures. In instances of pure block toppling failure at the crest, due to the presence of secondary joints, the rock blocks cannot withstand tensile

stresses. As a result of the pressure exerted by the overlying blocks, they undergo toppling or sliding. Similarly, in cases of pure block-flexural toppling failure at the crest, under the pressure resulting from the weight of the overlying blocks, half of the blocks experience tensile-induced flexural toppling, while the remaining half separate from the secondary joint locations, leading to block toppling. Subsequently, all blocks topple against each other, resulting in sliding within the soil mass.

In this study, various levels of sliding are considered in a typical example, and the critical sliding surface is determined. Using the limit equilibrium software, SLIDE software, physical models within the soil mass are analyzed as developed by Amini et al. (2018), and the obtained results are compared with the analytical method. The outcomes from this software exhibit a commendable concurrence with the results derived from physical modeling and analytical approach. Additionally, using the numerical software Phase2, the slide-head-toppling failure was numerically modeled, and the safety factor for each model was calculated. Moreover, the findings indicate that the sliding surface within block toppling is along cross joints, and the sliding surface within flexural toppling occurs at an angle ranging between 5 to 15 degrees with respect to the perpendicular to the stratification plane. The critical sliding surface within the soil mass initiates approximately from the mid-height of the rock block in contact with the soil, extending to the toe of the slope.

Summary

Toppling failure is a common instability in rock slopes. When triggered by external factors, it becomes a secondary toppling failure. Slide-head-toppling is a significant type where rock blocks at the crest topple, causing sliding in the soil. The study analyzes different toppling failures (pure flexural, pure block, and pure block-flexural) using SLIDE software and compares results with analytical methods. Key findings show that sliding surfaces vary based on the type of toppling, with the critical sliding surface in the soil extending from mid-height of the rock block to the slope toe.

Introduction



Toppling failures represent a prevalent form of instability in rock slopes, significantly influenced by both natural and anthropogenic factors. Secondary toppling failure, a subtype of these failures, arises when an initial discontinuity failure is triggered by external influences. Among these, slide-head-toppling failure is notably critical, characterized by the toppling of rock blocks in the crest region, leading to sliding in the underlying soil mass.

Methodology and Approaches

The study examines various toppling failure mechanisms, including slide-head-toppling, pure flexural toppling, pure block toppling, and block-flexural toppling, by analyzing rock block behavior under tensile stresses and resulting pressures on the underlying soil mass. It utilizes physical models, based on Amini et al. (2018), to simulate models and validate the approaches. The limit equilibrium software, SLIDE, is employed for computational analysis to determine critical sliding surfaces within the soil mass. Results from SLIDE are compared with those from physical modeling and analytical methods to ensure accuracy and reliability. Also, slide-head-toppling failure was analyzed through numerical modeling with the Phase2 software. This approach allowed for the computation of the safety factor for each individual model. The study focuses on identifying critical sliding surfaces for each toppling failure type, investigating the angles and locations of these surfaces within both rock blocks and the soil mass.

Results and Conclusions

The analysis using the SLIDE software, along with comparisons to physical models and analytical methods, revealed several key findings:

1. *Sliding Surfaces:*

- In block toppling failures, the sliding surface occurs along cross joints. The presence of secondary joints in the rock blocks leads to this type of failure.
- In flexural toppling failures, the sliding surface is found at an angle ranging from 10 to 20 degrees relative to the perpendicular to the stratification plane. This angle is critical for understanding the mechanics of flexural toppling.
- The critical sliding surface within the soil mass begins from the mid-height of the rock block in contact with the soil and extends to the toe of the slope. This finding is vital for predicting potential failure zones within the slope.

2. *Comparison with Analytical and Physical Models:*

- The results from the SLIDE software exhibited a commendable agreement with those obtained from physical modeling and analytical approaches. This consistency validates the reliability of the SLIDE software for analyzing rock slope instabilities.
- The study highlights the importance of using multiple approaches to gain a comprehensive understanding of toppling failures. By comparing different methods, the accuracy and robustness of the findings are enhanced.

3. *Comparison with Analytical, Physical and Numerical Model:*

- The comparison is based on the angle of the inclined table at the moment of failure.
- The results obtained from the Limit Equilibrium method show a satisfactory agreement with the physical modeling results conducted by Amini and colleagues (2018) and their proposed analytical method.
- Due to plane strain solution, the Finite Element software Phase2 estimates the angle of the inclined table at the moment of failure to be lower than the analytical method, physical modeling, and Limit Equilibrium method.

4. *Implications for Slope Stability:*

- Understanding the different mechanisms of toppling failure is crucial for improving slope stability. By identifying the critical sliding surfaces and the conditions under which different types of toppling occur, engineers and geologists can develop more effective strategies for slope stabilization.
 - The study emphasizes the need for assessment of rock slopes, especially in regions prone to toppling failures. Early detection of potential failure zones can help prevent catastrophic slope failures and ensure the safety of infrastructure and communities.
-



In conclusion, this study provides a comprehensive analysis of secondary toppling failures in rock slopes. The findings underscore the importance of accurate analysis to ensure slope stability and prevent potential failures. The insights gained from this research can inform the development of more effective slope stabilization measures and contribute to the overall safety and resilience of infrastructure in topography-prone regions.
