

تاثیر کمیت‌های برشی بین خاک و بلوک‌ها بر پایداری شیروانی‌های مخلوط سنگی

عماد خراسانی^۱؛ مهدی امینی^{۲*}؛ محمد فاروق حسینی^۳

۱- دانشجوی دکترای مکانیک سنگ، دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه تهران

۲- استادیار، دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه تهران

*نویسنده‌ی مسئول: mamini@ut.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه تهران

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳

چکیده

محیط برخی از شیروانی‌ها از مجموعه‌ای از بلوک‌های سنگی که در میان خاک قرار گرفته‌اند تشکیل شده است که به آن‌ها شیروانی‌های مخلوط سنگی اطلاق می‌گردد. در این شیروانی‌ها، بخشی از سطح لغزش احتمالی در محیط خاکی قرار می‌گیرد و بخش دیگر آن از محل تماس بین بلوک‌های سنگی و خاک عبور می‌کند. بنابراین کمیت‌های برشی بین بلوک‌های سنگی و خاک روی پایداری شیروانی‌های مذکور تاثیر به سزایی دارند. تا کنون این موضوع به صورت کمی توسط محققین مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله با تحلیل حساسیت، تاثیر ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک سطح تماس بین خاک و بلوک‌های سنگی بر روی پایداری شیروانی مخلوط سنگی بررسی می‌گردد. به این منظور از روش عددی المان محدود و ساخت ۱۴۶ مدل تئوری استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، در کل، حساسیت شیروانی به زاویه اصطکاک بین خاک و بلوک بیشتر از ضریب چسبندگی بین این واحدها است. همچنین تغییر در کمیت‌های فوق می‌تواند تا ۵۰ درصد فاکتور ایمنی شیروانی مخلوط سنگی را تغییر دهد. بنابراین برای تحلیل پایداری شیروانی‌های مذکور، کمیت‌های مذکور باید حتماً به طور خاص مورد توجه قرار گیرد.

واژگان کلیدی

محیط مخلوط سنگی، تحلیل پایداری شیروانی، کمیت‌های مقاومتی، سطح تماس، مدل‌سازی عددی

۱- مقدمه

رفتار توده‌های سنگی و خاکی از دیرباز مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این محیط‌ها، توده‌هایی در طبیعت وجود دارد که در حین تشکیل آن‌ها بلوک‌های سنگی درون توده‌ی خاک به صورت تصادفی پراکنده شده است. محققین نام "بیم‌راک"^۱ بر این توده‌ها نهاده‌اند [1] که معادل "محیط مخلوط سنگی" در فارسی برای آن انتخاب شده است. این توده‌های مخلوط سنگ و خاک به وفور در طبیعت یافت می‌شوند؛ بنابراین باید به خوبی این محیط‌ها را شناخت تا در صورت برخورد با آن‌ها در پروژه‌هایی مانند حفر شیروانی یا تونل، بتوان بر مشکلات احتمالی فائق آمد. تحلیل پایداری شیروانی‌ها یکی

از مهم‌ترین مراحل طراحی در معادن روباز و برخی از پروژه‌های عمرانی است. نتایج بررسی‌ها در خصوص پایداری شیروانی‌های محیط مخلوط سنگی نشان می‌دهد که با افزایش حجم بلوک‌ها نسبت به حجم خاک، ضریب ایمنی شیروانی افزایش می‌یابد [2]. همچنین نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده است که با توجه به عبور سطح شکست از اطراف بلوک‌ها در محیط مخلوط، کمیت‌های مقاومتی سطح تماس خاک و بلوک‌ها تاثیر قابل توجهی بر رفتار مقاومتی این محیط دارد [3].

در این مقاله، تاثیر ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک سطح تماس خاک و بلوک‌ها بر پایداری شیروانی مخلوط سنگی بررسی می‌شود.

۲- محیط مخلوط سنگی

محیط مخلوط سنگی (Bimrocks) عبارت است از "یک ترکیب

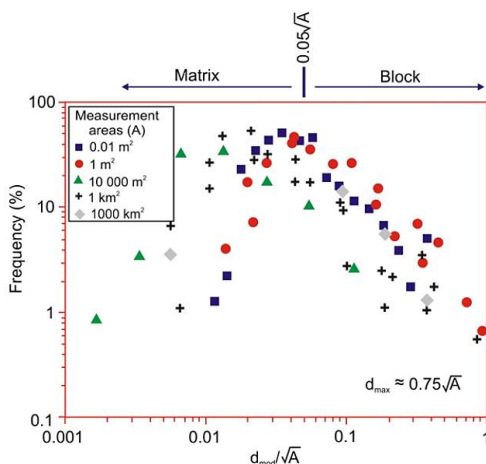
¹ Bimrocks: Block-in-matrix rocks

مهندسی مورد نظر را توصیف می‌کند. با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه‌ی محیط مخلوط سنگی، بُعد مشخصه‌های مختلفی برای انواع مسائل در نظر گرفته می‌شود که در جدول ۱ ارائه شده است. با تعیین کردن بُعد مشخصه (L_c) برای مساله، اجزایی از توده که بلوک محسوب می‌شوند مشخص می‌گردند؛ به این صورت که آستانه‌ی ابعادی بین بلوک‌ها و خاک (حداقل ابعاد بلوک‌ها) برای یک توده‌ی مخلوط سنگی با مقدار بُعد مشخصه L_c برابر با $d_{min}=0.05L_c$ می‌باشد. ذراتی با ابعاد کمتر از d_{min} خاک محسوب می‌شوند و قطعاتی با ابعاد بزرگتر، جزء بلوک‌های توده مخلوط سنگی می‌باشد.

جدول ۱- بُعد مهندسی مشخصه برای مسائل مختلف [1]

نوع مساله	بُعد مهندسی مشخصه (L_c)
نمونه‌ی سه بعدی	قطر نمونه
تونل	قطر تونل
لغزش زمین	ارتفاع شیروانی
حفاری‌ها	ارتفاع برش یا جذر مساحت حفاری
شالوده	عرض شالوده
سایت اکتشافی	جذر مساحت پروژه یا بُعد بزرگترین بلوک

با توجه به اینکه بلوک‌های سنگی در طبیعت شکل هندسی مشخصی ندارند، عموماً بزرگترین بُعد قابل دسترس بلوک d_{mod} مد نظر قرار می‌گیرد و در مباحث آماری استفاده می‌شود [6]. توزیع فراوانی ابعاد بلوک‌های محیط مخلوط سنگی، در شکل ۲ نشان داده شده است. به منظور بی‌بُعد کردن محور افقی این توزیع، ابعاد بلوک‌ها بر جذر مساحت ناحیه‌ی مورد بررسی (\sqrt{A}) تقسیم شده است. با توجه به شکل ۲، توزیع ابعاد بلوک‌ها در توده‌های مخلوط سنگی، مستقل از مقیاس است. به عبارتی نمونه‌های کوچکتر توده‌های مخلوط سنگی، یک مدل برای توده‌های بزرگتر هستند [5].



شکل ۲- توزیع فراوانی ابعاد بلوک‌ها در مقیاس‌های گوناگون [5]

همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، ابعاد بلوک‌ها برای

سنگی، شامل بلوک‌های قابل توجه ژئوتکنیکی درون یک خاک متصل شده با بافت ریزتر [1]. در این تعریف، بلوک‌های قابل توجه ژئوتکنیکی با بررسی معیارهایی از جمله مقیاس، ابعاد بلوک‌ها و تفاوت مقاومت بلوک و خاک مشخص می‌گردند. در حالت کلی، توده‌هایی از بلوک‌های مجزا وجود دارند که در محل‌های تماس از خاک جدا هستند و حتی ممکن است ضعیف‌تر از خاک باشند. توده‌های ژئوتکنیکی زیادی در دامنه‌ی تعریف محیط مخلوط سنگی قرار می‌گیرند که از آن جمله می‌توان به زون‌های گسله، سنگ‌های هوازه، ملانژ^۲، سنگ‌های پیروکلاستیک درشت‌دانه، برش‌ها و سرپانتین‌های خردشده اشاره نمود [4]. چنین محیط‌هایی به خاطر وضعیت زمین‌شناسی، توزیع فضایی و ویژگی‌های مکانیکی ناهمگن می‌تواند مشکلات متعددی برای مهندسان ژئوتکنیک، زمین‌شناسان و پیمانکاران ایجاد نماید. در ایران پروژه‌های متعدد عمرانی وجود دارد که با محیط مخلوط سنگی مواجه هستند. در شکل ۱ رخنمون این محیط در ساختگاه سد صیدون نشان داده شده است.



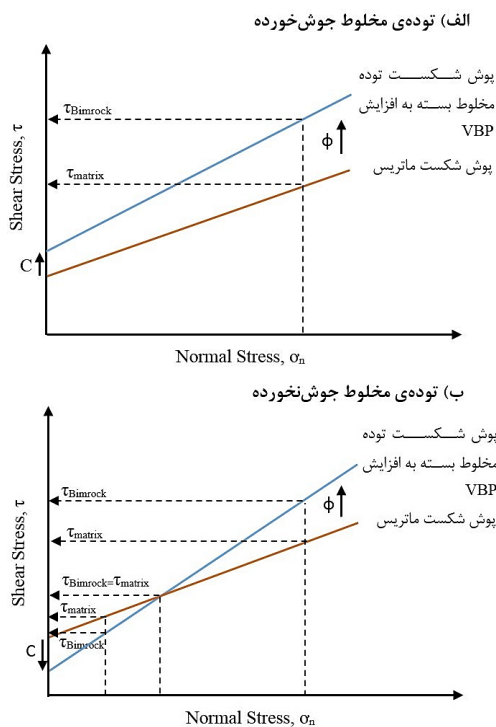
شکل ۱- رخنمون محیط مخلوط سنگی، ساختگاه سد صیدون

۱-۲- برخی ویژگی‌های محیط مخلوط سنگی

محیط مخلوط سنگی، بسیار پیچیده ولی تا حدودی قابل مشخصه‌سازی^۳ است. مشخصات مکانیکی خاک، مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را می‌توان در آزمایشگاه اندازه‌گیری نمود. اما تعیین ویژگی‌های مربوط به بلوک‌ها با توجه به هندسه و آرایش تصادفی آن‌ها نسبتاً مشکل است. از جمله ویژگی بلوک‌ها می‌توان به نحوه‌ی توزیع ابعاد، حجم، مقاومت و جهت‌یافتگی آن‌ها اشاره نمود. در برخورد با مسائل ژئوتکنیکی واقع شده در محیط مخلوط سنگی، ابتدا باید مرز ابعاد بین خاک و بلوک تعیین شود. به عبارتی بایستی مشخص گردد که ذرات و قطعات، با چه ابعادی خاک محسوب می‌شوند و از چه ابعادی بزرگتر جزء بلوک‌ها هستند. پاسخ این سوال بستگی به مقیاس مهندسی مورد نظر دارد که می‌تواند به وسیله‌ی "بُعد مهندسی مشخصه"^۴ (L_c) و [1] و [5]. به عبارتی بُعد مهندسی مشخصه، طولی است که هندسه‌ی مساله‌ی

² Mélange³ Characterization⁴ Characteristic Engineering Dimension⁵ Maximum observed dimension

سطوح تماس، چسبندگی توده کاهش یابد [13].



شکل ۳- نمایش شماتیک رفتار مقاومت برشی محیط مخلوط سنگی: (الف) جوش خورده و (ب) جوش نخورده [13]

۳- مدل سازی عددی

برای بررسی تاثیر کمیت‌های مقاومتی سطح تماس خاک و بلوک‌ها بر پایداری شیروانی‌های مخلوط سنگی از روش عددی المان محدود (نرم‌افزار Phase² 8.0) استفاده می‌شود. به این منظور، یک شیروانی مخلوط سنگی با هندسه‌ی مشخص مدل شده است (شکل ۴). سپس با تغییر مقادیر کمیت‌های چسبندگی و زاویه اصطکاک سطوح تماس، تحلیل حساسیت نسبت به آن‌ها انجام می‌گیرد. با توجه به انجام تحلیل دوبعدی در این پژوهش، نسبت بلوک سطحی^{۱۰} (ABP) برابر با نسبت بلوک حجمی (VBP) فرض گردیده و ۴۰ درصد در نظر گرفته شده است. به عبارتی ۴۰ درصد از سطح (پروفیل عرضی) این شیروانی، شامل بلوک سنگی می‌باشد. شکل هندسی بلوک‌ها به صورت بیضی بوده و توزیع ابعاد حداکثر بلوک‌ها نیز مطابق توزیع فراوانی شکل ۲ لحاظ شده است؛ با توجه به ارتفاع شیروانی، ابعاد حداکثر بلوک‌ها از ۰/۵ متر تا ۷/۵ متر متغیر می‌باشد. نسبت بُعد بزرگتر به کوچکتر این بلوک‌ها برابر با عدد طلایی (۱/۶۱۸) در نظر گرفته شده است که کاربرد زیادی در طبیعت دارد [14] و [15]. همچنین جانمایی بلوک‌ها به صورت تصادفی و در تمامی مدل‌ها

ناحیه‌ای به مساحت A ، حداکثر برابر با مقدار $0.75\sqrt{A}$ است. در صورت وجود بلوکی با ابعاد بزرگتر از این حد، توده به عنوان سنگ بلوکی^۶ لحاظ شده و بر اساس روابط حاکم بر محیط‌های سنگی به تحلیل آن پرداخته می‌شود. بنابراین بازه‌ی ابعاد بلوک‌ها (d) در توده‌ی مخلوط سنگی، مطابق رابطه‌ی (۱) می‌باشد:

$$0.05\sqrt{A} \leq d \leq 0.75\sqrt{A} \quad (1)$$

مطالعات متعددی در ارتباط با مقاومت محیط مخلوط سنگی و به ویژه نوع ملانژ صورت پذیرفته است [4]، [7]، [8]، [9]، [10] و [11]. محققان در اکثر این پژوهش‌ها کمیت نسبت بلوک حجمی^۷ (VBP) را به عنوان مهم‌ترین عامل موثر بر مقاومت محیط مخلوط سنگی معرفی نموده‌اند. کمیت VBP، نسبت حجم بلوک‌های سنگی قرار گرفته در یک توده‌ی مخلوط سنگی به حجم کل توده می‌باشد. بسته به مقدار VBP در توده‌ی مخلوط، زاویه اصطکاک داخلی توده تا حدود ۲۵ درجه نسبت به حالت خاک خالص افزایش می‌یابد. علت این امر پیچ و خم‌دار شدن سطوح شکست است [۹].

همچنین نتایج یک پژوهش نشان داده است که افزایش VBP موجب افزایش ضریب ایمنی شیروانی مخلوط سنگی نسبت به شیروانی خاک خالص (بدون بلوک) می‌گردد [2]؛ علت این امر، افزایش طول صفحه شکست شیروانی بیان شده است. نکته‌ی قابل توجه در خصوص پژوهش فوق، صرف نظر کردن از کمیت‌های مقاومتی سطح تماس خاک و بلوک‌ها می‌باشد.

۲-۲- انواع محیط مخلوط سنگی از دیدگاه نحوه‌ی اتصال بلوک و خاک

محیط مخلوط سنگی بر اساس نحوه‌ی اتصال خاک و بلوک‌ها، به دو زیرمجموعه‌ی اصلی قابل تقسیم است [7] و [12]:

(الف) محیط مخلوط سنگی جوش خورده^۸: در شرایطی که مقاومت مرزهای (سطوح تماس) بین خاک و بلوک‌ها به طور تقریبی برابر با مقاومت خاک باشد.

(ب) محیط مخلوط سنگی جوش نخورده^۹: در شرایطی که مقاومت سطوح تماس بین خاک و بلوک‌ها کمتر از مقاومت خاک باشد. نحوه‌ی اتصال ذرات خاک به بلوک‌ها، تاثیر بسزایی بر رفتار مکانیکی محیط مخلوط سنگی دارد. در شکل ۳ رفتار مقاومت برشی توده مخلوط سنگی جوش خورده و جوش نخورده با توجه به تغییر در VBP به صورت شماتیک نشان داده شده است. برای نوع جوش نخورده در سطوح تنش عمودی پایین، ممکن است خاک مقاومت بیشتری نسبت به محیط مخلوط سنگی داشته باشد؛ به خصوص زمانی که VBP به اندازه‌ی کافی زیاد باشد تا با افزایش

⁶ Blocky Rock

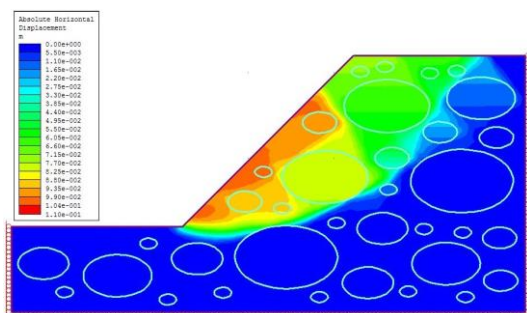
⁷ Volumetric Block Proportion

⁸ Welded Bimrock

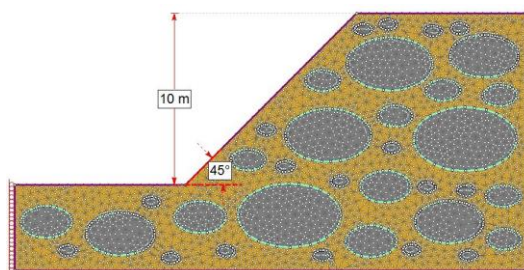
⁹ Unwelded Bimrock

¹⁰ Areal Block Proportion

مطابق شکل ۴ می‌باشد.

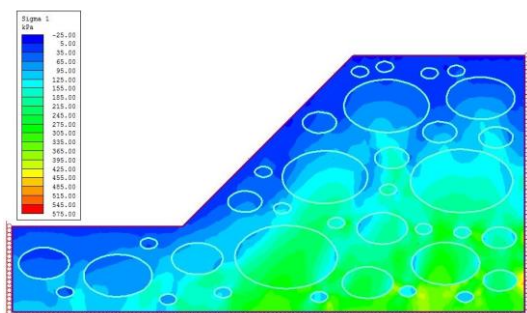


شکل ۵- توزیع جابجایی‌های افقی در شیروانی مخلوط سنگی

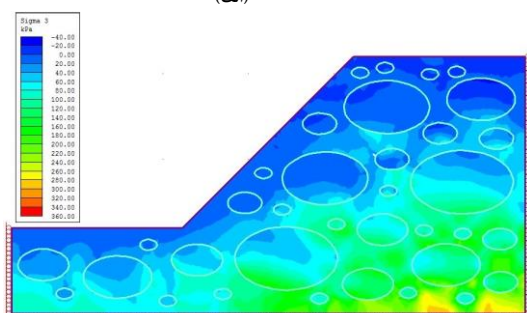


شکل ۴- مدل عددی شیروانی مخلوط سنگی با نسبت بلوک سطحی ۴۰ درصد

شکل ۶ نشان‌دهنده‌ی تنش‌های اصلی حداقل و حداکثر در مدل عددی مذکور می‌باشد. با توجه به اینکه تنش اعمالی به مدل‌ها فقط از نوع ثقلی بوده، میزان تنش‌ها با افزایش عمق بیشتر شده است. همچنین نزدیک به سطوح آزاد مدل نیز مقادیر نسبتاً کمی برای تنش‌ها ثبت شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۶- مقادیر تنش‌های اصلی در شیروانی مخلوط سنگی: (الف) حداکثر، (ب) حداقل

وضعیت توزیع کرنش برشی حداکثر در مدل عددی شیروانی مخلوط سنگی در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین این شکل حاوی نحوه‌ی توزیع تنش نرمال وارده به سطوح تماس یا مرزهای خاک و بلوک‌ها می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، کرنش برشی حداکثر در خاک و سطوح تماس رخ داده است. قابل توجه است که این کرنش در داخل بلوک‌ها که به مراتب قوی‌تر از اجزای دیگر است مشاهده نمی‌شود. توزیع کرنش برشی حداکثر، نشان‌دهنده‌ی سطوح شکست نیز می‌باشد. همچنین تنش نرمال وارده به سطوح تماسی که

خصوصیات مکانیکی به کار رفته برای خاک و بلوک‌ها در مدل‌های عددی این پژوهش، در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق این جدول، کمیت‌های چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک که یکی از عوامل تعیین‌کننده در مقاومت کلی توده مخلوط سنگی است، متغیر می‌باشد.

برای مدل‌سازی شیروانی مخلوط جوش خورده، مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک سطح تماس خاک و بلوک‌ها برابر با مقادیر خاک در نظر گرفته شده است. شیروانی‌های مخلوط جوش خورده به عنوان "حالت‌های مینا" لحاظ گردیده و برای مدل‌سازی شیروانی جوش نخورده، کمیت‌های چسبندگی و زاویه اصطکاک این سطوح کاهش یافته است.

جدول ۲- خصوصیات مکانیکی مدل‌های عددی

بلوک‌ها	خاک	خصوصیت
۲۳	۱۸	وزن مخصوص (kN/m^3)
۱۰۰	۳۰	مدول الاستیسیته (MPa)
۰/۲۵	۰/۲۵	نسبت پواسون
۱۰۰۰	۵-۲۰	چسبندگی (kPa)
۳۵	۱۰-۳۰	زاویه اصطکاک داخلی ($^\circ$)

در شکل ۵ تا شکل ۷، برخی خروجی‌های مدل عددی شیروانی مخلوط سنگی مربوط به حالتی که چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک به ترتیب برابر با ۱۰ کیلوپاسکال و ۲۵ درجه می‌باشد نشان داده شده است؛ همچنین این مقادیر برای سطوح تماس خاک و بلوک‌ها برابر با ۱۰ کیلوپاسکال و ۱۵ درجه می‌باشد. نحوه‌ی توزیع جابجایی‌های افقی در شیروانی مخلوط سنگی در شکل ۵ مشاهده می‌شود. با بررسی این شکل، مرز حرکت و لغزش توده نیز مشخص می‌گردد. حداکثر جابجایی افقی در دیواره‌ی این شیروانی مخلوط در حدود ۱۰ سانتیمتر محاسبه شده است.

چسبندگی آن از ۵ کیلوپاسکال تا ۲۰ کیلوپاسکال تغییر کرده است. بنابراین در مرحله اول تحلیل حساسیت، چسبندگی خاک ثابت و زاویه اصطکاک آن متغیر بوده است. مقادیر مبنای مربوط به مرحله اول در جدول ۳ ملاحظه می‌شود. این تحلیل حساسیت در سه بخش صورت پذیرفته و نتایج آن در شکل ۸ ارائه شده است.

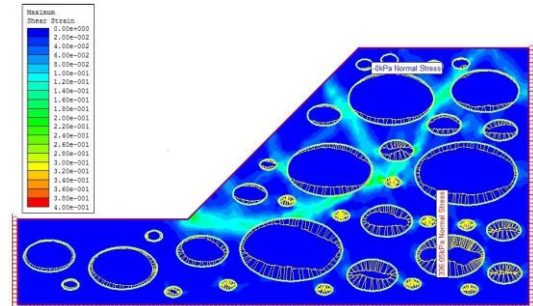
جدول ۳- مقادیر مبنای کمیت‌های مقاومتی سطح تماس برای تحلیل حساسیت مرحله اول

ردیف	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک (°)
۱	۱۰	۱۰
۲	۱۰	۱۵
۳	۱۰	۲۰
۴	۱۰	۲۵
۵	۱۰	۳۰

همانگونه که در شکل ۸ (الف) ملاحظه می‌شود، چسبندگی سطح تماس خاک و بلوک‌ها به ازای مقادیر مختلف زاویه اصطکاک، با توالی ۲۰ درصد از حالت مبنا کاهش یافته است. لازم به توضیح است که مقادیر زاویه اصطکاک نشان داده شده در این شکل، مربوط به سطح تماس و همچنین خاک می‌باشد. با توجه به شکل، به ازای کاهش چسبندگی سطح تماس، حداکثر ۱۳ درصد از ضریب ایمنی حالت مبنا کاسته شده که مربوط به زاویه اصطکاک ۱۰ درجه بوده است. همچنین با افزایش زاویه اصطکاک و غالب شدن آن، تاثیر چسبندگی سطح تماس بر پایداری شیروانی کاهش یافته است.

در نمودار شکل ۸ (ب)، مقدار چسبندگی خاک و سطح تماس برابر بوده و ۱۰ کیلوپاسکال است. در این شکل، زاویه اصطکاک سطح تماس به ازای زوایای اصطکاک داخلی مختلف خاک کاهش یافته است. در این حالت، حداکثر کاهش ضریب ایمنی شیروانی حدود ۳۰ درصد بوده است. همانگونه که در این شکل مشخص است، با کاهش زاویه اصطکاک سطح تماس به بیش از ۴۰ درصد نسبت به حالت مبنا، کاهش محسوسی در ضریب ایمنی رخ می‌دهد.

کرنش برشی زیادی را متحمل شده‌اند کاهش یافته است. مطابق شکل ۷، سطح شکست با عبور از خاک و مرزهای تماس بلوک‌ها و خاک شکل گرفته است؛ بنابراین علاوه بر مقاومت خاک، مقاومت سطوح تماس نیز باید تاثیر قابل توجهی در پایداری و ضریب ایمنی شیروانی مخلوط سنگی داشته باشد.



شکل ۷- مقادیر کرنش برشی حداکثر در شیروانی مخلوط سنگی به همراه توزیع تنش نرمال در سطوح تماس

۴- یافته‌ها

در این بخش به ارائه و بررسی یافته‌های حاصل از پژوهش حاضر پرداخته می‌شود. همانگونه که بیان گردید با تغییر کمیت‌های مقاومتی سطح تماس خاک و بلوک‌ها، پایداری شیروانی مخلوط سنگی ارزیابی شده است.

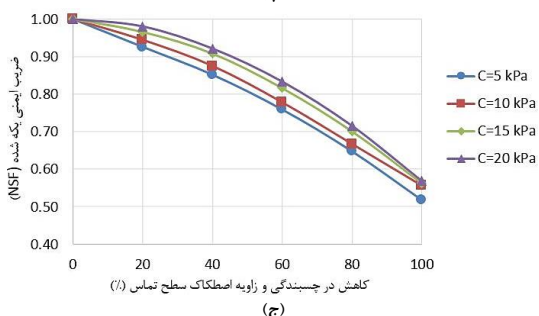
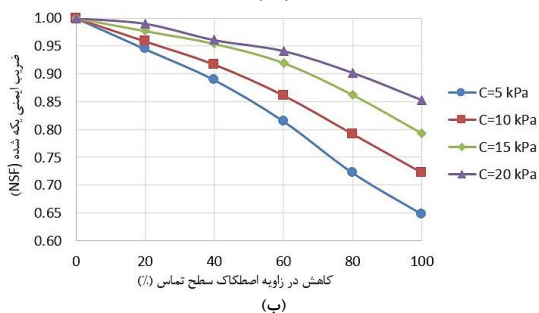
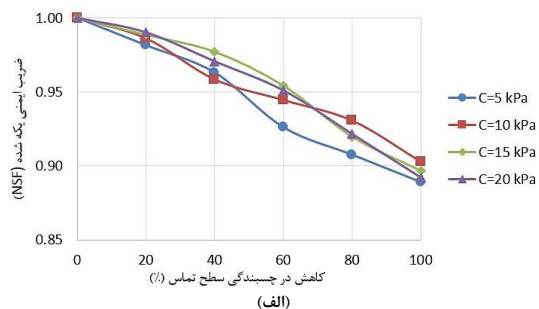
۴-۱- تحلیل حساسیت پایداری شیروانی مخلوط سنگی

نسبت به مقاومت سطوح تماس

به منظور انجام این تحلیل حساسیت، کمیت‌های چسبندگی و زاویه اصطکاک سطح تماس نسبت به حالت مبنا کاهش یافته است. در حالت مبنا (شیروانی مخلوط سنگی جوش خورده)، این دو کمیت مقاومتی برای سطوح تماس و خاک یکسان می‌باشد. در هر حالت، ضریب ایمنی یکه شده^{۱۱} (NSF) محاسبه شده است. NSF نسبت ضریب ایمنی شیروانی تحت بررسی به ضریب ایمنی حالت مبنای آن می‌باشد. به عنوان مثال، چنانچه ضریب ایمنی یک شیروانی مخلوط سنگی جوش نخورده برابر با ۰/۹۲ محاسبه شده باشد و ضریب ایمنی شیروانی مخلوط سنگی جوش خورده‌ی مشابه آن برابر با ۱/۱۳ باشد، مقدار NSF برابر با ۰/۸۱ خواهد بود.

برای بررسی دقیق‌تر موضوع، کمیت‌های مقاومتی خاک نیز در مدل‌های عددی تغییر داده شده است. در مرحله اول، مقدار چسبندگی خاک برابر با ۱۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده و زاویه اصطکاک آن از ۱۰ درجه تا ۳۰ درجه تغییر یافته است. در مرحله دوم، مقدار زاویه اصطکاک خاک برابر با ۱۵ درجه لحاظ شده و

¹¹ Normalized Safety Factor (NSF)

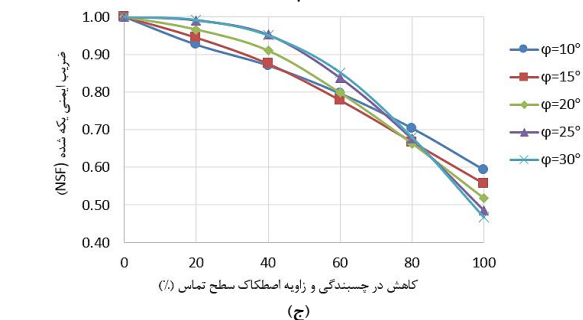
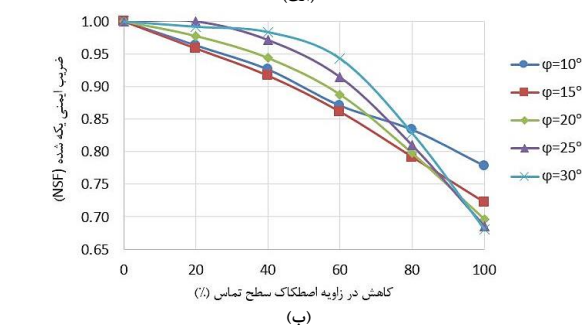
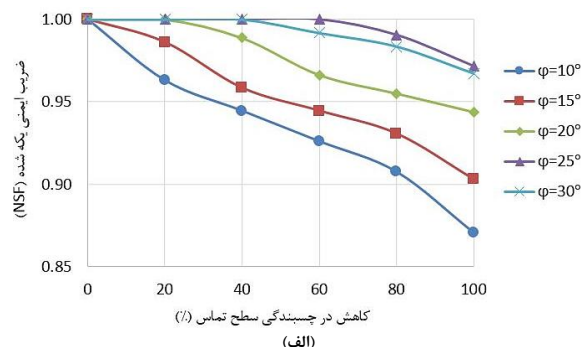


شکل ۹- وضعیت پایداری شیروانی مخلوط سنگی به ازای خاک با زاویه اصطکاک ۱۵ درجه: (الف) کاهش در چسبندگی سطح تماس، (ب) کاهش در اصطکاک سطح تماس، (ج) کاهش در چسبندگی و اصطکاک سطح تماس

با توجه به شکل ۸ و شکل ۹، پایداری شیروانی مخلوط سنگی حساسیت نسبتاً کمی به مقدار چسبندگی سطح تماس خاک و بلوک‌ها دارد؛ به نحوی که عدم وجود چسبندگی در سطح تماس، موجب کاهش ضریب ایمنی در حدود ۱۰ درصد می‌شود. اما حساسیت پایداری این شیروانی به زاویه اصطکاک سطح تماس بیشتر بوده و عدم وجود آن موجب کاهش ضریب ایمنی تا حدود ۳۵ درصد می‌گردد. چنانچه سطح تماس بلوک‌ها و خاک، فاقد چسبندگی و ضریب اصطکاک باشد، ضریب ایمنی شیروانی تا حدود ۵۰ درصد نسبت به شیروانی مخلوط جوش‌خورده کاهش می‌یابد. همانگونه که در شکل ۷ ملاحظه گردید، در شرایطی که سطح شکست محیط مخلوط سنگی نتواند از داخل بلوک‌های سنگی عبور نماید، بلوک‌ها را دور می‌زند و از مرز آن‌ها با خاک می‌گذرد. بنابراین انتظار می‌رود که کمیت‌های مقاومتی سطح تماس، تأثیر قابل توجهی بر پایداری شیروانی داشته باشد و نتایج حاصل شده مبین همین امر است.

۴-۲- تخمین ضریب ایمنی حداقل بر اساس نسبت

مقاومت سطح تماس



شکل ۸- ضریب ایمنی یکد شده شیروانی مخلوط سنگی به ازای خاک با چسبندگی ۱۰ کیلوپاسکال: (الف) کاهش در چسبندگی سطح تماس، (ب) کاهش در اصطکاک سطح تماس، (ج) کاهش در چسبندگی و اصطکاک سطح تماس

در شکل ۸ (ج)، کمیت‌های چسبندگی و زاویه اصطکاک به صورت همزمان کاهش یافته است که نتیجه آن کاهش ضریب ایمنی شیروانی مخلوط سنگی تا حدود ۵۰ درصد می‌باشد. در مرحله دوم تحلیل حساسیت، زاویه اصطکاک داخلی خاک ثابت و چسبندگی آن متغیر بوده است. مقادیر مبنای مربوط به مرحله دوم در جدول ۴ ارائه شده است. این تحلیل حساسیت نیز در سه بخش صورت گرفته است که نتایج آن در شکل ۹ مشاهده می‌شود. توضیحات مربوط به این شکل نیز مشابه شکل ۸ می‌باشد.

جدول ۴- مقادیر مبنای کمیت‌های مقاومتی سطح تماس برای تحلیل حساسیت مرحله دوم

ردیف	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک (°)
۱	۵	۱۵
۲	۱۰	۱۵
۳	۱۵	۱۵
۴	۲۰	۱۵

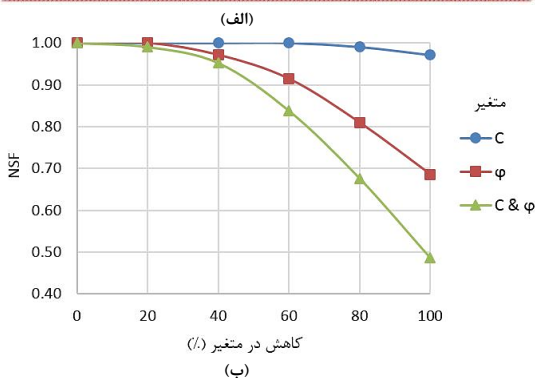
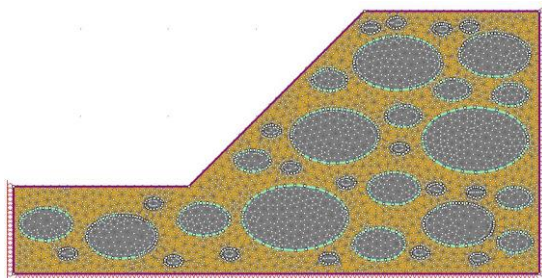
حد پایین تغییرات NSF بر حسب ISR به صورت لگاریتمی می‌باشد و رابطه‌ی (۳) برازش مناسبی بر آن است:

$$NSF = 0.16 \ln(ISR) + 0.97 \quad (3)$$

با استفاده از رابطه‌ی فوق می‌توان مقدار حداقل ضریب ایمنی یکه‌ی شیروانی مخلوط سنگی جوش‌خورده را بر اساس نسبت مقاومت سطح تماس خاک و بلوک‌ها برآورد نمود. به عنوان مثال برای یک شیروانی مخلوط جوش‌خورده با مقدار $ISR=0.4$ ، حداقل ضریب ایمنی یکه‌ی آن برابر با 0.182 می‌شود؛ به عبارتی ضریب ایمنی این شیروانی، حداکثر ۱۸ درصد نسبت به شیروانی مخلوط جوش‌خورده‌ی مشابه کاهش می‌یابد.

۴-۳- تاثیر جانمایی بلوک‌ها بر نتایج حاصل شده

نتایجی که در بخش‌های قبل ارائه گردید، با بهره‌گیری از مدل‌های عددی حاصل شده است که در همه‌ی آن‌ها موقعیت بلوک‌ها یکسان می‌باشد. به منظور بررسی تاثیر جانمایی بلوک‌ها بر این نتایج، یک مدل عددی شیروانی مخلوط سنگی با توزیع ابعاد و نسبت بلوک سطحی مشابه (۴۰ درصد) ولی با آرایش بلوک‌های تصادفی متفاوت ایجاد شده است. سپس به ازای کمیت‌های مقاومتی یکسان، تحلیل حساسیت نسبت به کاهش چسبندگی، کاهش زاویه اصطکاک و کاهش هم‌زمان هر دو انجام گرفته است. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک در هر دو هندسه مذکور مشابه و به ترتیب برابر ۱۰ کیلوپاسکال و ۲۵ درجه در نظر گرفته شده است. شکل ۱۱ نشان‌دهنده‌ی هندسه‌ی شیروانی مخلوط سنگی اولیه به همراه نتایج مربوطه می‌باشد. همچنین در شکل ۱۲ مدل عددی ثانویه و نتایج آن ارائه شده است.

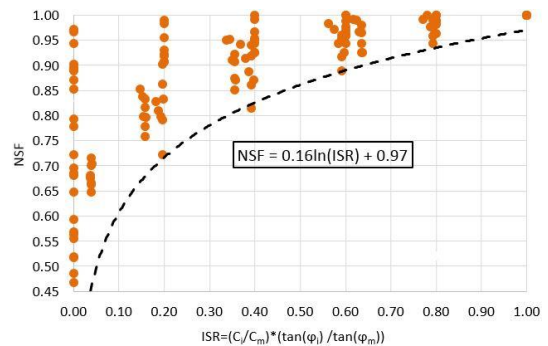


شکل ۱۱- شیروانی مخلوطی که نتایج پژوهش حاضر بر اساس آن حاصل شده است: (الف) هندسه‌ی مدل عددی، (ب) نتایج تحلیل حساسیت

در بخش ۴-۱، نتایج مدل‌سازی عددی ۱۲۸ شیروانی مخلوط سنگی که دارای کمیت‌های مقاومتی مختلف بودند ارائه گردید. در این بخش به تخمین ضریب ایمنی حداقل شیروانی مخلوط سنگی جوش‌خورده بر اساس مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک و سطح تماس پرداخته می‌شود. به این منظور از نتایج تمام ۱۲۸ مدل عددی فوق‌الذکر استفاده گردیده است. در ابتدا کمیتی تحت عنوان "نسبت مقاومت سطح تماس" ISR مطابق رابطه‌ی (۲) تعریف شده است:

$$ISR = \frac{C_i}{C_m} \times \frac{\tan(\phi_i)}{\tan(\phi_m)} \quad (2)$$

در این رابطه، C و ϕ به ترتیب بیانگر چسبندگی و زاویه اصطکاک هستند. همچنین اندیس‌های i و m به ترتیب نشانه‌ی سطح تماس و خاک می‌باشند. با توجه به تعریف ISR ، مقدار آن همواره بین صفر تا یک خواهد بود. در حالت توده‌ی مخلوط سنگی جوش‌خورده، مقدار ISR برابر با یک می‌شود. مقادیر ضریب ایمنی یکه شده (NSF) شیروانی‌های مخلوط سنگی در مقابل ISR مربوطه در نمودار شکل ۱۰ رسم شده است. روند کلی این نمودار بدین صورت است که با کاهش مقدار ISR ، مقدار NSF نیز کاهش می‌یابد. علت اینکه به ازای یک مقدار ISR مقادیر مختلفی برای NSF وجود دارد، آرایش‌های گوناگون از چسبندگی و ضریب اصطکاک می‌باشد که منجر به مقدار ISR یکسان می‌شود.



شکل ۱۰- ارتباط ضریب ایمنی یکه‌ی شیروانی مخلوط سنگی با نسبت مقاومتی سطح تماس خاک و بلوک

همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، به ازای مقادیر کم برای ISR نیز ضرایب ایمنی یکه‌ی بالا ثبت شده است؛ این موارد مربوط به حالت‌هایی از ISR می‌باشد که علی‌رغم کوچک بودن مقدار چسبندگی یا ضریب اصطکاک سطح تماس، کمیت دیگر به حدی زیاد و غالب است که از کاهش ضریب ایمنی شیروانی مخلوط سنگی جلوگیری می‌نماید. به عنوان مثال در حالتی که سطح تماس خاک و بلوک‌ها فاقد چسبندگی ($ISR=0$) و مقدار زاویه اصطکاک آن ۳۰ درجه باشد، ضریب ایمنی فقط ۳ درصد نسبت به حالت شیروانی جوش‌خورده کاهش می‌یابد.

نسبت به شیروانی جوش خورده‌ی مشابه بررسی گردید. در پایان نیز ۱۸ مدل عددی برای ارزیابی تأثیر جانمایی بلوک‌های شیروانی مخلوط سنگی بر نتایج به دست آمده از این پژوهش ساخته شد. نتایج اصلی حاصل از این پژوهش شامل موارد ذیل می‌باشد:

- زاویه اصطکاک سطح تماس خاک و بلوک‌ها تأثیر بیشتری نسبت به چسبندگی آن بر پایداری شیروانی مخلوط سنگی دارد.
- در صورتی که از چسبندگی و ضریب اصطکاک سطوح تماس در یک شیروانی مخلوط سنگی صرف نظر شود، ضریب ایمنی آن حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.
- حداقل ضریب ایمنی یکه شده‌ی شیروانی مخلوط سنگی جوش‌نخورده (*NSF*)، به صورت لگاریتمی با نسبت مقاومتی سطح تماس خاک و بلوک‌ها (*ISR*) در ارتباط است.
- تأثیر کمیت‌های مقاومتی سطح تماس بر پایداری شیروانی مخلوط سنگی، تقریباً مستقل از موقعیت و جهت‌یافتگی بلوک‌ها می‌باشد.

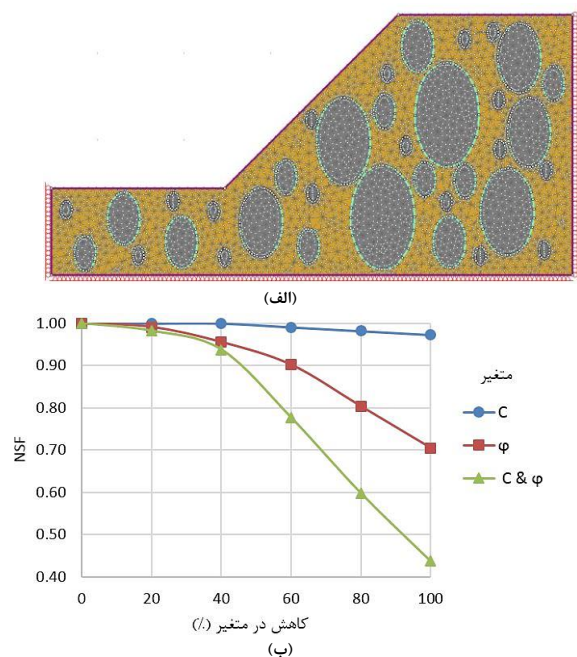
بنابراین مقاومت سطوح تماس خاک و بلوک‌ها تأثیر قابل توجهی بر پایداری شیروانی مخلوط سنگی دارد و نباید در تحلیل پایداری، نادیده گرفته شود. همان‌طور که اشاره گردید، مقدار نسبت بلوک حجمی در این پژوهش برابر با ۴۰ درصد در نظر گرفته شده است. افزایش یا کاهش این کمیت می‌تواند موجب تغییر در طول بخشی از صفحه‌ی شکست شیروانی شود که از مرز خاک و بلوک‌ها عبور می‌کند؛ بنابراین تغییر در نسبت بلوک حجمی احتمالاً تا حدودی بر نتایج حاصل شده اثر بگذارد.

۶- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
<i>Lc</i>	<i>m</i>	بُعد مهندسی مشخصه
<i>A</i>	<i>m</i> ²	مساحت پروژه
<i>VBP</i>	-	نسبت بلوک حجمی
<i>ABP</i>	-	نسبت بلوک سطحی
<i>C</i>	<i>kPa</i>	چسبندگی
ϕ	(°)	زاویه اصطکاک
<i>NSF</i>	-	ضریب ایمنی یکه‌شده
<i>ISR</i>	-	نسبت مقاومتی سطح تماس

نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ انطباق زیادی با یکدیگر دارد. این امر نشان می‌دهد که جانمایی بلوک‌ها در شیروانی مخلوط سنگی، تأثیر خاصی بر نتایج حاصل شده در این پژوهش ندارد.

نتیجه دیگری که از این مقایسه حاصل می‌شود در مورد جهت‌یافتگی بلوک‌ها می‌باشد. همان‌طور که از این دو شکل مشخص است، علاوه بر جانمایی، جهت‌یافتگی بلوک‌ها نیز نسبت به سطح شیروانی متفاوت می‌باشد. بنابراین جهت‌یافتگی بلوک‌ها هم تأثیر قابل توجهی بر حساسیت پایداری شیروانی مخلوط سنگی نسبت به مقاومت سطح تماس خاک و بلوک‌ها ندارد.



شکل ۱۲- شیروانی مخلوطی که برای مقایسه با مدل پژوهش حاضر ایجاد شده است: (الف) هندسه‌ی مدل عددی، (ب) نتایج تحلیل حساسیت

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به ارزیابی تأثیر کمیت‌های مقاومتی سطح تماس خاک و بلوک‌ها بر پایداری شیروانی مخلوط سنگی پرداخته شد. به این منظور از روش عددی المان محدود استفاده گردید. برای تحلیل حساسیت ضریب ایمنی شیروانی مخلوط سنگی نسبت به چسبندگی و زاویه اصطکاک سطح تماس، ۱۲۸ مدل عددی تولید شد. متغیر هر یک از این مدل‌ها، چسبندگی و یا ضریب اصطکاک مربوط به خاک یا سطح تماس بوده است. با استفاده از نتایج حاصل از مدل‌های عددی مذکور، میزان حداکثر کاهش در ضریب ایمنی شیروانی جوش‌نخورده

۷- منابع ها

- Properties of Mélange (Ph.D. Thesis). *University of California, Berkeley*.
- [9] Lindquist, E., & Goodman, R. (1994). The strength and deformation properties of a physical model mélange. *Proc. 1st North American Rock Mech. Symp.*, (pp. 843–850). Austin, Texas.
- [10] Afifipour, M., & Moarefvand, P. (2014). Mechanical behavior of bimrocks having high rock block proportion. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 65, 40–48.
- [11] Coli, N., Berry, P., & Boldini, D. (2011). In situ non-conventional shear tests for the mechanical characterisation of a bimrock (BimTest). *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 48, 95–102.
- [12] Riedmüller, G., Brosch, F., Klima, K., & Medley, E. (2001). Engineering geological characterization of brittle faults and classification of fault rocks. *J. Eng.Geol.Geomech. Tunn.*, 19, 13–19.
- [13] Sonmez, H., Gökçeoğlu, C., Medley, E., Tuncay, E., & Nefeslioglu, H. (2006). Estimating the uniaxial compressive strength of a volcanic “bimrock”. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 43, 554–561.
- [14] Dunlap, A. (1997). *The Golden Ratio and Fibonacci Numbers*. World Scientific Publishing.
- [15] Livio, M. (2002). *The Golden Ratio: The Story of Phi, The World's Most Astonishing Number*. New York: Broadway Books. ISBN 0-7679-0815-5.
- [1] Medley, E. (1994). The Engineering Characterization of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (BIMRock's) (Ph.D. Thesis). *University of California, Berkeley*.
- [2] Medley, E., & Sanz, P. (2004). Characterization of Bimrocks (Rock/Soil Mixtures) With Application to Slope Stability Problems. *Eurock 2004 and 53rd Geomechanics Colloquium*. Salzburg, Austria, Oct.
- [3] Barbero, M., Bonini, M., & Borri-Brunetto, M. (2012). Numerical Simulations of Compressive Tests on Bimrock. *EJGE*, Vol. 17, 3397-3414.
- [4] Kalender, A., Sonmez, H., Medley, E., Tunusluoglu, C., & Kasapoglu, K. (2014). An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils. *J. of Engineering Geology*, 183, 65-79.
- [5] Medley, E. (2001). Orderly Characterization of Chaotic Franciscan Melanges. *J. Eng.Geol.Geomech. Tunn.*, 19, 20-33.
- [6] Haneberg, W. (2004). Simulation of 3D Block Populations to Characterize Outcrop Sampling Bias in Bimrocks. *J. Eng.Geol.Geomech. Tunn.*, 22, 19-26.
- [7] Altinsoy, H. (2006). A Physical Based Model Investigation for Determination of Shear Strength of Block in Matrix Rocks (MSc Thesis). *Hacettepe University, Geological Engineering Department, Ankara, Turkey*, 91 pp.
- [8] Lindquist, E. (1994). The Strength and Deformation

The Influence of Shear Parameters of Matrix-Blocks Interface on Bimslope Stability

Emad Khorasani¹; Mehdi Amini^{2*}; Mohammad Farouq Hossaini³

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

2- Assistant Professor, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran

*Corresponding Author: mamini@ut.ac.ir

3- Associate Professor, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran

Keywords

Bimrocks
Slope Stability Analysis
Strength Parameters
Matrix-Blocks Interface
Numerical Modeling

Final English Extended Abstract

Summary

Many geotechnical projects are faced with mixture masses of rock and soil (matrix). The behavior identification of these complex masses which called “bimrocks” (block-in-matrix rocks) is very considerable. The bimrocks are defined as mixtures of rocks composed of geotechnically significant blocks within a bonded matrix of finer texture such as melanges, fault rocks and weathered rocks. In terms of interface type of between matrix and blocks, the bimrocks are divided into two categories: welded and unwelded bimrocks. Unwelded bimrocks refers to an environment that the strength of interface between matrix and blocks is less than the matrix strength. Bimslopes are made from bimrocks and usually are seen in

weathered and shallow environments. In this paper, by doing sensitivity analysis, the influence of cohesion and friction angle of interface between blocks and matrix on stability of bimslopes are investigated. For this purpose, the Finite Element Method (FEM) and making of 146 theoretical models are utilized. The obtained results show that the strength parameters of interface have a significant impact on the stability bimslopes, so that regardless of cohesion and friction of interface reduce the safety factor about 50 percent rather than the identical welded bimslope.

Introduction

The process of slope stability analysis is one of the most important stages in design of some civil and mining projects. Bimslopes are made from bimrocks. The bimrocks usually have a specific block size. One of the most important factors affecting strength of bimrocks is VBP (Volumetric Block Proportion). For a bimrock mass, the VBP is defined as ratio of blocks volume to the total volume of mass. Previous studies show that the strength properties of interface between matrix and blocks have an important role on the stability of bimslopes. In this paper, The influence of cohesion and friction of this interface are surveyed.

Methodology and Approaches

The FEM by Phase² 8.0 is used to study on the strength parameters of interface between matrix and blocks. In numerical models, the values of cohesion and friction angle are changed in a bimslope with specified blocks arrangement. Also, the influence of blocks arrangement on the obtained results is investigated.

Results and Conclusions

The results show that the strength parameters of interface have a significant influence on stability of bimslopes and should be considered in the stability analysis. The minimum normalized safety factor of bimslopes has a logarithmic relation with strength ratio of interface. The obtained results are approximately independent of blocks arrangement.