

بررسی عددی تاثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی دسته درزه‌های متقاطع بر مساحت زون ریزش اطراف تونل

مینو فرمند^۱، رضا رحمان‌نژاد^{۲*}، غلامرضا سعیدی رشک‌علیا^۳

۱- کارشناس ارشد، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استاد، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- دانشیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت: مهر ۱۳۹۵، پذیرش: آذر ۱۳۹۶)

چکیده

طراحی سازه‌های زیرزمینی باید با توجه به شرایط ساختاری توده‌سنگ صورت گیرد. در این زمینه شرایط قرارگیری درزه‌ها، زوایه آنها نسبت به فضای زیرزمینی و زوایه درزه‌ها نسبت به هم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مطالعه پایداری ساختاری تونلی با مقطع نعل اسبی در توده‌سنگ درزه‌دار حاوی دو دسته درزه با فاصله‌داری‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. برای مدلسازی درزه‌ها پارامترهای سختی برشی درزه‌ها، شیب دسته درزه‌ها، بازشدگی و فاصله‌داری، نسبت فاصله‌داری درزه‌ها به عرض دهانه تونل (l/b) و نسبت تنش‌های برجا به عنوان متغیرهای مدلسازی در نظر گرفته شد. مساحت زون ریزش با تغییر هر یک از شاخص‌ها به طور جداگانه محاسبه شد و بهترین حالت ممکن که دارای کمترین سطح زون ریزش است، تعیین شد. نتایج نشان داد که اگر اختلاف شیب دو دسته‌درزه کمتر از ۴۰ درجه باشد بیشترین سطح زون ریزش تشکیل می‌شود و افزایش اختلاف شیب دسته درزه‌ها بیش از ۴۰ درجه موجب کاهش سطح ریزش می‌شود. همچنین افزایش نسبت فاصله‌داری درزه‌ها به عرض دهانه تونل منجر به افزایش مساحت زون ریزشی و ناپایداری بیشتر می‌شود. ناپایداری در نسبت مذکور در بازه‌های ۰/۱۱ تا ۰/۳۳ وجود دارد و برای مقادیر بیش از ۰/۳۳ برای نسبت ذکر شده به علت افزایش ابعاد بلوک و عدم امکان ریزش، ناپایداری به صفر می‌رسد. ایمن‌ترین حالت و کم‌ترین مساحت زون ریزش در نسبت $l/b = 0.11$ و بیش‌ترین مساحت در نسبت $l/b = 0.33$ اتفاق افتاد.

کلید واژه‌ها

تحلیل پایداری، درزه، پارامترهای هندسی، مدلسازی عددی، مساحت زون ریزش، UDEC

* عهده دار مکاتبات: r00.rahmannejad@gmail.com

۱- مقدمه

زمانی است که یک درزه با زاویه شیب کم عمود بر محور تونل و درزه دیگر با زاویه شیب زیاد موازی محور تونل باشد [۸]. طبق بررسی‌های صحرایی و مدل‌های عددی ایستروژین و ایناکیون^۷، در مناطقی که تنش‌های تکتونیکی افقی برای شکست سنگ بکر کافی باشند، با افزایش شیب پتانسیل شکست افزایش می‌یابد. زمانی که راستای تنش افقی موازی شیب باشد اثر شیب بیش‌تر خواهد بود [۹]. حسینی و اعتمادی با تحلیل پایداری تونل با مقطع دایره‌ای با استفاده از نرم‌افزار UDEC، تأثیر زاویه تقاطع دو ناپیوستگی بر روی پایداری تونل را مورد بررسی قرار دادند؛ مقدار جابه‌جایی اطراف تونل به ازای زاویه‌های ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت که بیش‌ترین ناپایداری به ازای زاویه ۳۰ درجه و کم‌ترین مقدار ناپایداری و جابه‌جایی به ازای زاویه ۶۰ درجه بود [۱۰]. لی^۸ و همکاران نشان دادند در اثر برخورد دو دسته‌درزه در جبهه کار تونل، بحرانی‌ترین حالت درزه‌ها زمانی است که گروهی از درزه‌های افقی (صفحات لایه‌بندی) با درزه‌های عمودی یکدیگر را قطع کنند و جابه‌جایی یک بلوک کلیدی در سقف با کاهش ابعاد بلوک افزایش می‌یابد [۱۱]. تسارسکی^۹ و هاتروز^{۱۰} نشان دادند که گسترش زون خرد شده در بالای سطح حفاری غالباً توسط فاصله‌داری درزه‌ها کنترل می‌شود و پس از آن عامل گسترش زون ناپایدار، مقاومت برشی است و ارتفاع زون ناپایدار به مقدار نسبت فاصله‌داری درزه‌ها به دهانه فضای حفاری بستگی دارد [۱۲]. زاهدی و همکاران در بررسی تأثیر بازشدگی درزه (لایه ضعیف) بر تغییر شکل قائم سقف تونل نشان دادند در هر سه حالت افقی بودن درزه، زاویه ۴۵ درجه و درزه قائم، با افزایش بازشدگی درزه، تغییر شکل قائم سقف تونل افزایش می‌یابد اما اثر بازشدگی در حالتی که درزه (لایه ضعیف) قائم باشد بسیار بیشتر از دو حالت دیگر است [۱۳]. در این مطالعه، مدلسازی عددی زون ریزشی اطراف تونل به صورت ناپیوسته در نرم‌افزار UDEC انجام شد. ابعاد تونل ثابت و شرایط تنش مختلف در نظر گرفته و با تغییر فاصله‌داری درزه‌ها میزان ناپایداری با استفاده از شاخص مساحت زون ناپایدار و ریزشی مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین پایدارترین حالتی که در اثر نحوه قرارگیری درزه‌ها نسبت به یکدیگر به وجود می‌آید و مساعدترین نسبت فاصله‌داری درزه‌ها به عرض دهانه تونل (l/b) مورد بررسی قرار گرفت.

تأثیر ناپیوستگی‌ها در رفتار توده‌سنگ و سازه‌های درگیر با محیط‌های سنگی اهمیت به‌سزایی دارد. حفاری در سنگ‌های ناپیوسته که حاوی دسته‌درزه‌های متعددی هستند موجب ریزش بلوک‌هایی با اندازه‌های مختلف می‌شود [۱]. با توجه به اهمیت تأثیر درزه‌ها در تعیین رفتار مکانیکی، هیدرولیکی و حتی دینامیکی توده‌سنگ، مطالعه ساختمان سنگ و وضعیت ناپیوستگی‌های آن ضروری است و مشخصات آنها به‌طور کمی باید محاسبه شود [۲]. مدلسازی عددی راه‌حل مناسبی برای بررسی رفتار درزه‌ها و پیش‌بینی احتمال شکست در تونل‌ها است. جیا^۱ و تانگ^۱ تأثیر زوایای شیب مختلف درزه‌ها و ضریب فشار جانبی بر روی پایداری تونل و توده‌سنگ ناپیوسته را مورد بررسی قرار دادند؛ آنالیز عددی نشان داد که پارامترهای شیب درزه‌ها و فشارهای جانبی تأثیر قابل‌توجهی بر شکست و جابه‌جایی تونل دارند [۳]. پژوهش‌های لی^۳ نشان داد که جابه‌جایی بلوک‌های کلیدی تشکیل شده در سقف تونل، با افزایش تعداد درزه‌ها، افزایش می‌یابد. در صورت برخورد دو دسته درزه در جبهه کار تونل، بحرانی‌ترین حالت، زمانی که یک دسته درزه افقی و دسته درزه دوم قائم باشد، اتفاق می‌افتد و کاهش فاصله‌داری درزه‌ها، باعث افزایش جابه‌جایی بلوک‌های کلیدی در جبهه کار می‌شود [۴]. بنیایوسکی^۴ در بررسی اهمیت جهت درزه‌ها نسبت به فضای زیرزمینی نشان داد که پایدارین حالت در امتداد حفاریات عمود بر محور تونل و در جهت شیب درزه‌ها به ازای زاویه‌های ۹۰-۴۵ درجه ایجاد می‌شود و نامطلوب‌ترین حالت در امتداد حفاریات موازی محور تونل در این بازه شیب است [۵]. دالگیچ^۵ با بررسی تونل‌ها در مناطق گسله نشان داد که گسل‌های موازی مسیر تونل اهمیت بیشتری نسبت به گسل‌های متقاطع دارند [۶]. بر اساس تحقیقات نیک‌عادت، با افزایش شیب درزه، رفتار برشی درزه اهمیت بالایی پیدا می‌کند و هر چه فاصله درزه‌ها بیشتر باشد جابه‌جایی کمتر و تمرکز تنش بالاتری به وجود می‌آید [۷]. بررسی‌های زارع رشکوئی^۶ و امامی طبق مدل ساختاری بارتون- بندیس برای شبیه‌سازی رفتار درزه‌ها، بیانگر این بود که با کاهش ابعاد بلوک، جابه‌جایی بلوک کلیدی در سقف تونل افزایش می‌یابد. هنگامی که دو دسته درزه در جبهه کار تونل حضور داشته باشد، بحرانی‌ترین حالت

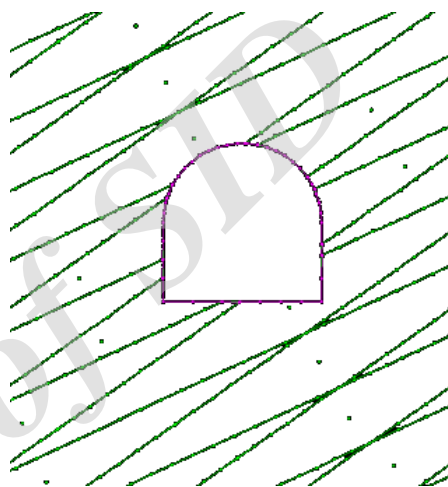
۲- شرایط مدل فرضی

شیب‌های ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه انجام شده و بررسی‌های تکمیلی بر روی این شیب‌ها ادامه یافت (جدول ۱). تاثیر اختلاف شیب دو دسته‌درزه (*Dipdiff*) نیز جداگانه مورد بررسی قرار گرفت (بخش ۳-۱).

جدول ۱: محدوده تغییرات پارامترهای مدلسازی

پارامترها	مقادیر
$k_s (Gpa/m)$	۰/۷۳، ۰/۸۸، ۱/۵
$k_n (Gpa/m)$	۰/۱۱، ۰/۲۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳، ۰/۴۰، ۰/۴۵
K	۰/۱، ۱، ۱/۵
$Dip(\circ)$	۳۵، ۴۰، ۴۵
l/b	۰/۱۱، ۰/۲۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳، ۰/۴۰، ۰/۴۵
$Dipdiff$	۰/۱۰، ۰/۲۰، ۰/۳۰، ۴۰

در مدل‌های عددی فرض شد تونلی با مقطع نعل اسبی با ابعاد $۴/۵ \times ۴/۵$ متر، در محیط درزه‌دار با وزن مخصوص ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب قرار گرفته است. دسته درزه‌های موجود در اطراف تونل دارای چسبندگی $۰/۱۵$ مگاپاسکال، زاویه اصطکاک داخلی ۲۰ درجه بوده و مقاومت کششی توده‌سنگ برابر ۲۵ مگاپاسکال است. با تغییر مشخصات درزه‌ها، ۵۵ مدل ساخته و مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱).



شکل ۱: مقطع و هندسه تونل فرضی جهت مدلسازی ناپایداری‌های ساختاری

مطابق شکل ۲، برای محاسبه مساحت زون ریزش، با ترسیم خطوطی مماس بر مرز تونل و سطوح درزه‌ها، شکل سطح ریزش ترسیم شد. با محاسبه مساحت این سطح، مقدار ریزش در حالت‌های مختلف به دست آمد.



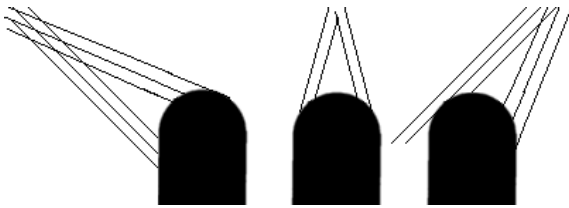
شکل ۲: نمایی از مقطع زون ریزش

برای بررسی ناپایداری حاصل از وجود درزه‌ها در محیط، با تغییر پارامترهای سختی برشی درزه (k_s)، نسبت تنش‌های منطقه (K)، شیب درزه‌ها (dip) و نسبت فاصله-داری درزه‌ها به عرض دهانه تونل (l/b) مساحت زون ریزش محاسبه شد. مزیت استفاده از پارامتر l/b به جای در نظر گرفتن تک تک پارامترهای فاصله‌داری درزه‌ها و مقدار دهانه تونل این است که می‌توان نتایج حاصل از این کار را به موارد مشابه دیگر نیز تعمیم داد. اگر مقدار فاصله‌داری درزه‌ها (l) و دهانه تونل (b) به صورت مجزا مورد بررسی قرار گیرد حجم زیادی از محاسبات باید انجام شود؛ بنابراین با انتخاب این پارامتر (l/b) هم‌زمان دو هدف دنبال می‌شود: ۱- کاهش حجم محاسبات ۲- توانایی استفاده از نتایج در پروژه‌های مشابه. با ثابت در نظر گرفتن مشخصات درزه‌ها شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت کششی و تغییر پارامترهای پیش گفته، مساحت زون ریزش محاسبه شد. با توجه به زیاد بودن تعداد حالت‌های ممکن، مدلسازی به ازای

۳- تحلیل نتایج

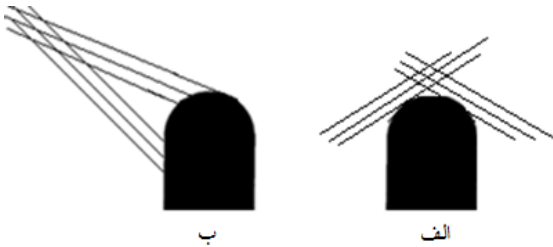
۳-۱- تاثیر شیب درزه‌ها بر مساحت زون ریزش

ریزش بلوک‌های ناپایدار ممکن است برای درزه‌های با شیب‌های مختلف اتفاق بیفتد؛ اما در برخی از شیب‌ها میزان ریزش بیشتر است. زمانی که تعداد درزه یا دسته درزه‌ها افزایش می‌یابد علاوه بر شیب تک تک درزه‌ها، شیب زون ناپایداری که در اثر تقاطع درزه‌ها ایجاد می‌شود نیز تاثیر به



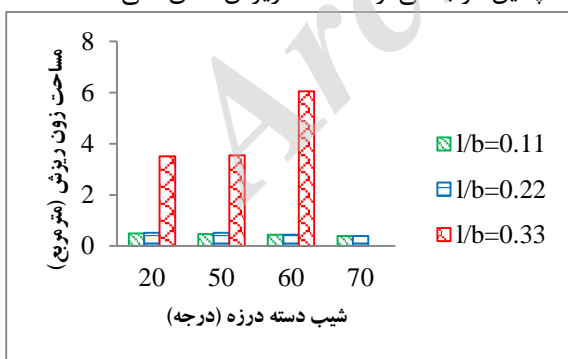
شکل ۴: نحوه قرارگیری درزه‌ها و موقعیت بلوک‌های ایجاد شده

با افزایش این اختلاف شیب، بلوک‌های حاصل از تقاطع دو دسته درزه کوچک‌تر می‌شوند و مساحت زون ریزش کاهش می‌یابد. در شکل ۵، بر اساس نحوه قرارگیری درزه‌ها در تونل "۵-الف"، درزه‌ها با اختلاف شیب زیادی نسبت به یکدیگر، سطح تونل را قطع می‌کنند؛ در شکل "۵-ب" درزه‌ها با اختلاف شیب کم یکدیگر را قطع می‌کنند.

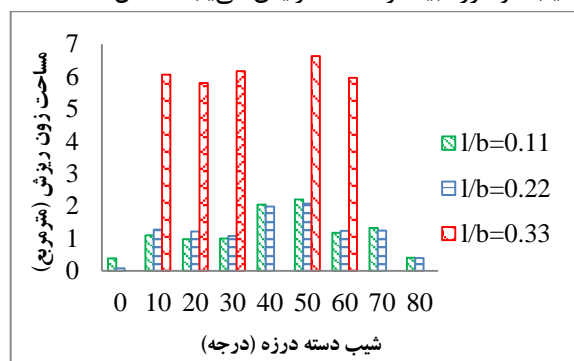


شکل ۵: مقایسه ابعاد بلوک‌های تشکیل شده در اثر تغییر اختلاف شیب دسته درزه‌ها

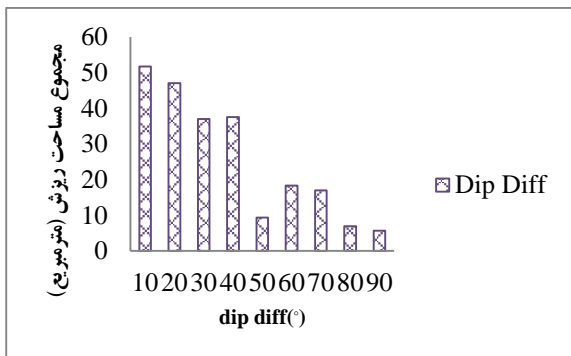
افزایش اختلاف شیب دسته درزه‌ها، باعث کاهش مساحت زون ریزش می‌شود (شکل‌های ۶، ۷، ۸). با افزایش اختلاف شیب درزه‌ها، تعداد شیب‌های مورد بررسی کم می‌شود، بنابراین تعداد حالات مورد بررسی کاهش می‌یابد. همچنین در بعضی از حالات، ریزش اتفاق نمی‌افتد.

شکل ۶: مساحت زون ریزش در $(Dipdiff = 20^\circ)$

سزایی در ریزش خواهد داشت. به همین دلیل برای بررسی تاثیر همزمان دو درزه، یا دو دسته درزه پارامتر اختلاف شیب دسته درزه تعریف شد. در این بخش نتایج حاصل از مدلسازی عددی در مورد تاثیر اختلاف شیب درزه‌ها بر مساحت زون ریزش مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی تاثیر اختلاف شیب دسته‌درزه‌ها، دو دسته درزه با شیب‌های متفاوت در نظر گرفته شد. در مرحله اول، شیب یک دسته درزه ثابت (به عنوان مثال دسته درزه‌ای با شیب ۱۰ درجه) و شیب دسته درزه دوم افزایش یافت: $(Dip_1, Dip_2) = (10, 20), (10, 30), (10, 40), \dots, (10, 90)$ در مرحله دوم شیب دسته درزه اول ۱۰ درجه افزایش یافته و شیب دسته درزه دوم با اختلاف ۱۰ درجه نسبت به دسته درزه اول افزایش یافت: $(20, 30), (40, 20), (50, 20), \dots, (90, 20)$ روند مدلسازی تا مقدار شیب $(Dip_1, Dip_2) = (80, 90)$ ادامه یافت. بر اساس مدل‌های اجرا شده، بیشترین مساحت زون ریزش در حالتی اتفاق می‌افتد که اختلاف شیب دو دسته درزه کمترین مقدار $(Dipdiff = 10^\circ)$ است و بلوک‌های تشکیل شده در این حالت، بلوک‌هایی با زاویه راس تیز هستند؛ زیرا بلوک‌ها در فاصله زیادی نسبت به سطح تونل یکدیگر را قطع کرده و ارتفاع بلوک تشکیل شده نسبت به حالت‌هایی که اختلاف شیب دو درزه بیشتر است، افزایش می‌یابد (شکل ۳).

شکل ۳: مساحت زون ریزش در $(Dipdiff = 10^\circ)$

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است در شرایطی که اختلاف شیب دو دسته درزه ثابت است، با افزایش شیب تک تک دسته درزه‌ها، موقعیت قرارگیری بلوک‌های ناپایدار تغییر می‌کند و بلوک‌ها در فاصله بین گوشه‌های تاج تونل و سقف تونل جابه‌جا می‌شوند. چنانچه دسته درزه‌ها در فاصله کمی نسبت به سطح تونل یکدیگر را قطع کنند، ارتفاع بلوک تشکیل شده کمتر می‌شود.



شکل ۱۰: مجموع مساحت ریزش به ازای افزایش اختلاف شیب دسته درزه‌ها

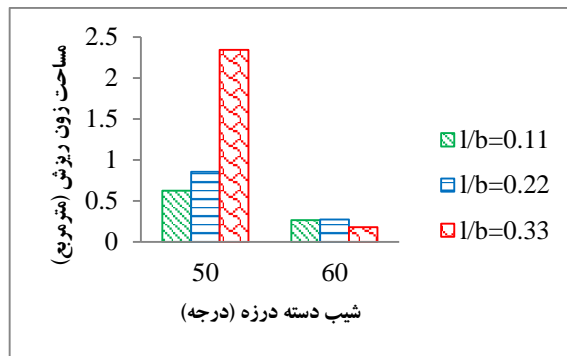
طبق مدل‌های فوق، تمامی حالات ممکن برای قرارگیری درزه‌ها، با افزایش شیب دسته درزه‌ها (روند افزایش به صورت ده تایی است) مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه مدل‌سازی برای شیب‌های بحرانی ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه که منجر به تشکیل بلوک‌های مکعبی می‌شوند، انجام می‌گردد. به دلیل کاهش احتمال ریزش و سطح زون ریزش در شیب‌های بیش از ۴۵ درجه از ادامه مدل‌سازی صرف نظر شد. در هر یک از شیب‌های ذکر شده، با ثابت در نظر گرفتن شرایط منطقه و با تغییر پارامترهای درزه‌داری شامل سختی نرمال و برشی دسته‌دوزه، فاصله‌داری و نسبت تنش‌های منطقه وضعیت مساحت زون ریزش بررسی شد (جدول ۲). طبق آزمایش‌های عددی انجام شده، شیب ۳۵ درجه پایدارترین حالت و دارای کم‌ترین مساحت زون ریزش است.

جدول ۲: مساحت زون ریزش به ازای شیب‌های مختلف

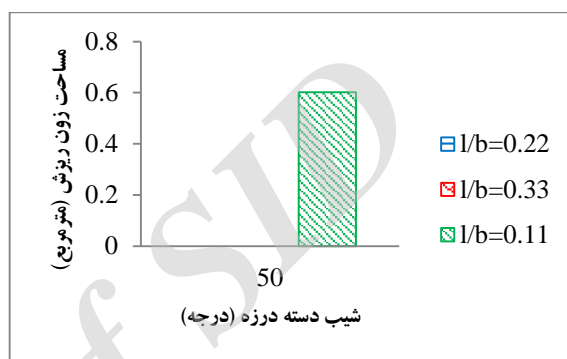
شیب دسته درزه‌ها (درجه)	مجموع مساحت زون ریزش (مترمربع)
۳۵	۱۰۳/۶۴
۴۰	۱۲۸/۸۲
۴۵	۱۲۶/۵۳

۳-۲- تاثیر نسبت l/b بر مساحت زون ریزش

یکی از فاکتورهای موثر در بررسی مساحت زون ریزش، فاصله‌داری درزه‌ها است. با توجه به رابطه بین نسبت فاصله‌داری درزه‌ها و ابعاد تونل، در صورت تناسب این دو مقدار با یکدیگر (زمانی که فاصله‌داری درزه‌ها خیلی بزرگتر از مقدار ابعاد تونل نباشد) بلوک‌ها ابعاد کوچک‌تری نخواهند داشت؛ بلکه با افزایش فاصله‌داری درزه‌ها ابعاد بلوک‌های تشکیل شده افزایش می‌یابد و اگر مقدار آن از عرض دهانه تونل بیشتر باشد اجازه حرکت به داخل تونل ندارند و باعث

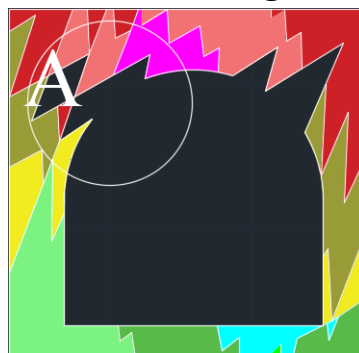


شکل ۷: مساحت زون ریزش در ($Dipdiff = 30^\circ$)



شکل ۸: مساحت زون ریزش در ($Dipdiff = 40^\circ$) ($Dip_1 = 50^\circ, Dip_2 = 90^\circ$)

بیش‌ترین ناپایداری زمانی مشاهده می‌شود که اختلاف شیب دو دسته‌دوزه کم‌تر از ۴۰ درجه باشد؛ با افزایش اختلاف شیب (اختلاف شیب بیش از ۴۰ درجه) به تدریج از میزان ناپایداری‌ها کاسته می‌شود. علی‌رغم بزرگ‌تر شدن بلوک‌ها به علت پدیده قفل‌شدگی (شکل ۹)، بلوک‌ها در هم قفل می‌شوند و اجازه حرکت پیدا نمی‌کنند و بنابراین مساحت زون ریزش کاهش می‌یابد (شکل ۱۰).



شکل ۹: قفل شدن بلوک‌ها در نقطه A

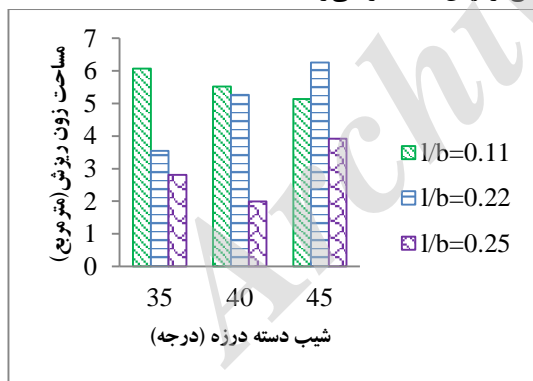
۳-۳- بررسی تاثیر تنش‌های برجا (K) بر مساحت زون ریزش

مقدار تنش‌های برجای منطقه در ناپایداری موثر است. در این بخش تاثیر تغییرات نسبت تنش‌های منطقه در شرایط متفاوت l/b بر مساحت زون ریزش مورد بررسی قرار گرفته است.

$$K = 0.5 \text{ - ۱-۳-۳ مدلسازی به ازای } K = 0.5$$

به ازای دسته‌دازه‌های با شیب ۳۵ و ۴۰ درجه، با افزایش نسبت فاصله‌داری درزه‌ها به عرض دهانه تونل (l/b) مساحت زون ریزش کاهش می‌یابد. در این شرایط، کم‌ترین مساحت زون ریزش مربوط به نسبت $l/b = 0.25$ و بیش‌ترین مساحت مربوط به نسبت $l/b = 0.11$ است.

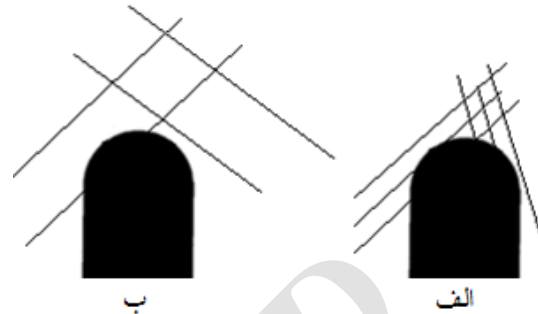
به ازای شیب درزه ۴۵ درجه، با افزایش نسبت l/b تغییرات مساحت منظم نیست؛ اما کم‌ترین مقدار ریزش در $l/b = 0.25$ و بیش‌ترین مقدار ریزش در $l/b = 0.22$ اتفاق می‌افتد (شکل ۱۲). زمانی که $l/b = 0.45, 0.4$ باشد مساحت زون ریزش تقریباً به صفر می‌رسد. زیرا افزایش نسبت l/b به معنای افزایش ابعاد بلوک‌های ناپایدار است و این افزایش از ورود بلوک به داخل فضای تونل جلوگیری می‌کند. بنابراین سطح ریزش به صفر می‌رسد.



شکل ۱۲: مساحت زون ریزش بر حسب l/b در شرایط $k_s = 0.73 \text{ Gpa/m}$

در شکل ۱۲، مساحت زون ریزش به ازای $l/b = 0.33$ صفر است. در این حالت به دلیل تاثیر همزمان بالا بودن سختی نرمال درزه ($k_n = 13.3 \text{ Gpa/m}$) و بالا بودن فاصله‌داری درزه‌ها، بلوک دارای ابعاد بالایی بوده و سختی نرمال درزه مانع از سقوط بلوک و تشکیل زون ریزش می‌شود. روند تغییرات مساحت زون ریزش برای $k_s = 0.88 \text{ Gpa/m}$ و $k_s = 1.5 \text{ Gpa/m}$ نیز مشابه شکل ۱۲ است. با افزایش شیب

ایجاد سقف پایدار و بدون ریزش می‌شود. مطابق شکل "۱۱- الف"، کم بودن فاصله‌داری درزه‌ها منجر به تشکیل بلوک‌های کوچک‌تر و مطابق شکل "۱۱- ب"، زیاد شدن فاصله‌داری درزه‌ها منجر به تشکیل بلوک‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر می‌شود.



شکل ۱۱: چگونگی تشکیل بلوک‌ها در اثر تغییر فاصله‌داری دسته درزه‌ها

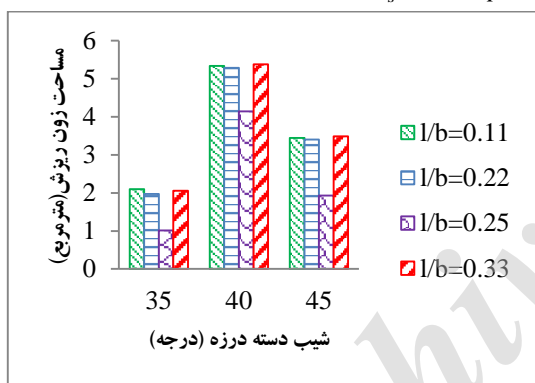
نتایج مدل‌های عددی نشان می‌دهد که کم‌ترین مساحت زون ریزش مربوط به $l/b = 0.11$ و بیش‌ترین مساحت مربوط به $l/b = 0.33$ است؛ زیرا با افزایش فاصله‌داری درزه‌ها و افزایش نسبت l/b از ۰/۱۱ به ۰/۳۳، بلوک‌های ریزشی بزرگ‌تری تشکیل می‌شوند که این امر باعث افزایش مساحت زون ریزش از ۵۳/۹۴ تا ۱۱۸/۱۶ می‌شود (جدول ۲). نتایج مدلسازی نشان داد که با افزایش نسبت l/b مساحت زون ریزش به صفر می‌رسد. مطابق جدول ۳ در نسبت‌های l/b برابر ۰/۴۰ و ۰/۴۵ زون ریزش برابر صفر است. زیرا در l/b های بیش از ۰/۳۳ به علت افزایش ابعاد بلوک‌های ناپایدار، بلوک‌ها در یکدیگر قفل می‌شوند. افزایش ابعاد بلوک در مقایسه با ابعاد دهانه تونل مانع ورود بلوک‌ها به فضای حفاری می‌شود؛ بنابراین مساحت زون ریزش به صفر می‌رسد.

جدول ۲: مجموع مساحت ریزش به ازای l/b های مختلف

l/b	مجموع مساحت ریزش (مترمربع)
۰/۱۱	۵۳/۹۴
۰/۲۲	۵۸/۶۷
۰/۲۵	۶۰/۶۸
۰/۳۳	۱۱۸/۱۶
۰/۴۰	۰
۰/۴۵	۰

۳-۳-۳- مدل‌سازی به ازای $K = 1.5$

به ازای دسته‌دازه با شیب ۳۵ و ۴۰ درجه، با افزایش نسبت فاصله‌داری درزه‌ها به عرض دهانه تونل (l/b) مساحت زون ریزش با دامنه تغییرات کم‌تر از ۱۵٪ است که به علت ناچیز بودن، ثابت در نظر گرفته شد، اما همواره کم‌ترین مساحت زون ریزش مربوط به نسبت $l/b = 0.25$ است. در حالتی که شیب دسته‌دازه ۴۵ درجه و $k_s = 0.73Gpa/m$ ، با افزایش نسبت (l/b) تغییرات مساحت منظم نیست؛ اما در $k_s = 0.88, 1.5Gpa/m$ دامنه تغییرات مساحت کم‌تر از ۱۵٪ و ثابت است. در این شیب، کم‌ترین مقدار ریزش در $l/b = 0.25$ اتفاق می‌افتد. بیش‌ترین ناپایداری زمانی رخ می‌دهد که نسبت تنش‌ها مخالف یک باشد (شکل ۱۴). روند تغییرات برای $k_s = 0.73Gpa/m$ و $k_s = 1.5G p/ma$ نیز مشابه $k_s = 0.88Gpa/m$ است.



شکل ۱۴: مساحت زون ریزش بر حسب l/b در شرایط $k_s = 0.88Gpa/m, K = 1.5$

۳-۴- بررسی تاثیر سختی برشی بر مساحت زون ریزش

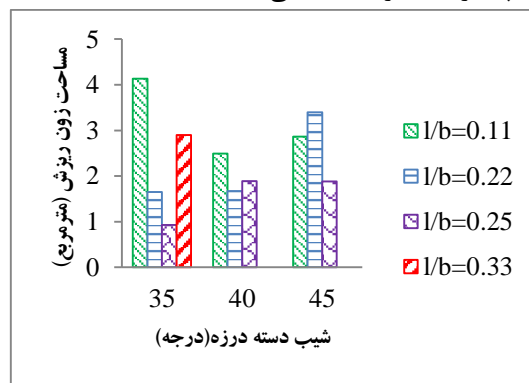
پارامترهای سختی برشی و نرمال به عنوان مولفه‌های بازدارنده حرکت بلوک‌ها نقش مهمی در مساحت منطقه ناپایدار دارند. در این بخش تاثیر تغییرات سختی برشی در شرایط مختلف تنش‌های منطقه، بر مساحت زون ریزش مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر سختی برشی و سختی نرمال به صورت یک زوج مرتب در نظر گرفته شد که مقدار آنها در شرایط مدل‌سازی به صورت یک زوج تغییر می‌کند (تغییرات به صورت همزمان انجام می‌شود). بنابراین از بررسی تاثیر آن بر مساحت زون ریزش به صورت جداگانه صرف نظر شده است.

$$(k_s, k_n) = (0.73, 13.3), (0.88, 6.3), (1.5, 8.8)$$

دسته درزه از ۳۵ به ۴۵ درجه مساحت زون ریزش افزایش می‌یابد؛ بیش‌ترین مساحت مربوط به نسبت $l/b = 0.11$ و کم‌ترین مقدار ریزش در $l/b = 0.25$ است.

۳-۳-۲- مدل‌سازی به ازای $K = 1$

به ازای دسته درزه با شیب ۳۵ درجه، با افزایش نسبت فاصله‌داری درزه‌ها به عرض دهانه تونل (l/b) مساحت زون ریزش کاهش می‌یابد. در این شرایط، کم‌ترین مساحت زون ریزش مربوط به نسبت $l/b = 0.25$ و بیش‌ترین مساحت مربوط به نسبت $l/b = 0.22$ است اما در صورت ایجاد زون ریزش در $l/b = 0.33$ بیش‌ترین مساحت ریزش در این نسبت l/b است. به ازای دسته‌دازه با شیب ۴۰ درجه، با افزایش نسبت l/b دامنه تغییرات مساحت کم‌تر از ۳۰٪ بوده و تقریباً ثابت است؛ کم‌ترین مقدار ریزش مربوط به $l/b = 0.22$ است. به ازای دسته‌دازه با شیب ۴۵ درجه، با افزایش نسبت l/b تغییرات مساحت منظم نیست؛ اما کم‌ترین مقدار ریزش در $l/b = 0.25$ و بیش‌ترین مقدار ریزش در $l/b = 0.22$ اتفاق می‌افتد (شکل ۱۳). روند مشابه برای $k_s = 1.5Gpa/m$ و $k_s = 0.88Gpa/m$ مشاهده شد. مطابق شکل ۱۳، در شیب‌های ۴۰ و ۴۵ درجه برای l/b های بیش از ۳۳٪ مساحت صفر شد؛ زیرا برخلاف افزایش همزمان سختی برشی و شیب درزه، سختی برشی بر تاثیر شیب غلبه کرده و مانع از ریزش بلوک می‌شود. با افزایش نسبت تنش‌های منطقه از ۰/۵ به ۱، کاهش زون ریزش مشاهده شد. زیرا در $K = 1$ تنش‌ها به حالت تعادل می‌رسند و ناپایداری کمتری ایجاد می‌کنند.



شکل ۱۳: مساحت زون ریزش بر حسب l/b در شرایط $k_s = 0.73Gpa/m$

۳-۴-۱- بررسی نتایج مدلسازی به ازای

$$k_s = 0.73 \text{Gpa} / m$$

روند تغییرات مساحت- افزایش نسبت l/b ، در شرایط $K \neq 1$ و $K = 1$ برای زوایای ۳۵ و ۴۵ درجه یکسان است اما به ازای $K = 1$ تنها در شیب ۴۰ درجه نتیجه اندکی متفاوت است. با افزایش نسبت تنش‌ها و شیب دسته درزه، مساحت زون ریزش افزایش می‌یابد؛ زیرا افزایش هم‌زمان این دو پارامتر باعث سهولت حرکت بلوک به داخل فضای حفاری می‌شود. طبق جدول ۴، پایدارترین حالت شرایط تنش هیدرواستاتیک ($K = 1$) است؛ در این نسبت تنش، تغییرات مساحت زون ریزش تقریباً مستقل از شیب است و افزایش شیب درزه تاثیر چندانی بر افزایش زون ریزش ندارد. به دلیل حاکم بودن شرایط تعادلی نسبت تنش‌های برجا، عامل موثر بر حرکت بلوک‌های ناپایدار تغییرات سختی برشی است. به ازای تنش‌های $K \neq 1$ ناپایداری بیش‌تر بوده و به ازای $K > 1$ سطح ریزش افزایش می‌یابد.

۳-۴-۲- بررسی نتایج مدلسازی به ازای

$$k_s = 0.88 \text{Gpa} / m$$

به ازای $k_s = 0.88 \text{Gpa} / m$ بیش‌ترین ناپایداری مربوط به نسبت تنش $K = 0.5$ است (جدول ۵) و حالت هیدرواستاتیک پایدارترین حالت است؛ با افزایش نسبت تنش‌های منطقه‌ای از میزان ناپایداری کاسته می‌شود.

۳-۴-۳- بررسی نتایج مدلسازی به ازای

$$k_s = 1.5 \text{Gpa} / m$$

به ازای $k_s = 1.5 \text{Gpa} / m$ بیش‌ترین ناپایداری مربوط به نسبت تنش $K = 0.5$ است، با افزایش نسبت تنش‌های برجا بلوک‌های تشکیل شده در یکدیگر قفل شده و شرایط ریزش برای آنها وجود ندارد، بنابراین به ازای $K = 1.5$ مساحت زون ریزش کاهش می‌یابد (جدول ۶).

جدول ۴: مجموع مساحت زون ریزش به ازای $k_s = 0.73 \text{Gpa} / m$

مجموع	شیب دسته درزه‌ها به ازای $k_s = 0.73 \text{Gpa} / m$			K
	۴۵	۴۰	۳۵	
۴۰/۵۲	۱۵/۳۱	۱۲/۷۷	۱۲/۴۳	۰/۵
۲۰/۸۹	۸/۱۴	۶/۰۵	۶/۷۱	۱
۴۱/۶۱	۱۲/۷۲	۱۳/۵۵	۱۵/۳۴	۱/۵

جدول ۵: مجموع مساحت زون ریزش به ازای $k_s = 0.88 \text{Gpa} / m$

مجموع	شیب دسته درزه‌ها به ازای $k_s = 0.88 \text{Gpa} / m$			K
	۴۵	۴۰	۳۵	
۴۸/۷۳	۲۰/۷۵	۲۰/۸۲	۷/۱۶	۰/۵
۲۰/۶۸	۷/۶۹	۵/۳۳	۷/۶۵	۱
۳۹/۵۵	۱۲/۲۶	۲۰/۱۵	۷/۱۴	۱/۵

جدول ۶: مجموع مساحت زون ریزش به ازای $k_s = 1.5 \text{Gpa} / m$

مجموع	شیب دسته درزه‌ها به ازای $k_s = 1.5 \text{Gpa} / m$			K
	۴۵	۴۰	۳۵	
۶۴/۰۲	۲۲/۴۵	۲۰/۲۵	۲۱/۳۳	۰/۵
۲۰/۷۱	۷/۶۳	۵/۱۴	۷/۹۴	۱
۴۳/۳۱	۵۱/۱۳	۱۸/۶۹	۱۱/۱۱	۱/۵

ناپایدار افزایش می‌یابد. برای $K > 1$ ، افزایش k_s تأثیر چندانی بر مساحت زون ریزش ندارد. زیرا افزایش تنش‌های

در جدول ۷ سطوح ریزش به ازای k_s ‌های مختلف مقایسه شده است. در $K < 1$ ، با افزایش k_s ، مساحت زون

۴- شکل زون ریزش در شرایط مختلف

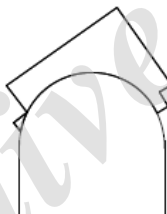
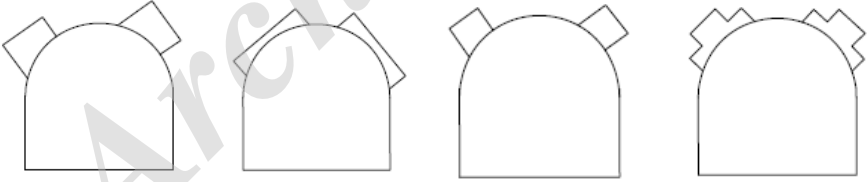
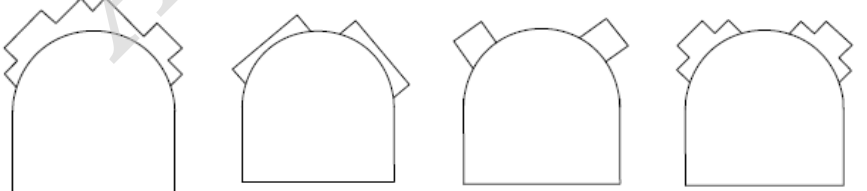
به ازای شیب‌های ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه، $k_s = 1.5, 0.73 (Gpa/m)$ و $l/b = 0.11, 0.22, 0.25, 0.33$ رایج‌ترین شکل زون ریزش در جدول (۸) ارائه شده است. به ازای $K = 0.5$ شکل زون ریزش به صورت گنبدی و به ازای $K = 1, 1.5$ ریزش به صورت بلوک‌های کوچک در گوشه‌ها اتفاق می‌افتد.

منطقه‌ای، مانع از سقوط بلوک‌ها به داخل فضای حفاری می‌شوند و پدیده قفل‌شدگی اتفاق می‌افتد. $K = 1$ پایدارترین حالت است و نسبت به سطوح تنش دیگر، کم‌ترین مساحت زون ریزش در آن مشاهده شد. برای یک k_s ثابت، تحت شرایط هیدرواستاتیک، کم‌ترین سطح زون ریزش مشاهده می‌شود (جدول ۷).

جدول ۷: مقایسه سطوح ریزش به ازای k_s های مختلف

$K_s (Gpa/m)$			K
۱/۵	۰/۸۸	۰/۷۳	
۶۴/۰۲	۴۸/۷۳	۴۰/۵۲	۰/۵
۲۰/۷۱	۲۰/۶۸	۲۰/۸۹	۱
۴۳/۳۱	۳۹/۵۵	۴۱/۶۱	۱/۵
۱۲۸/۰۴	۱۰۸/۹۶	۱۰۳/۰۲	مجموع

جدول ۸: شکل زون ریزش به ازای K /b مختلف

l/b				K
۰/۳۳	۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۱۱	
				۰/۵
				۱
				۱/۵

۵- نتیجه‌گیری

هستند که به راحتی ریزش می‌کنند. ریزش بلوک‌های ریز می‌تواند در سطح بزرگی اتفاق افتاده و منجر به افزایش سطح زون ناپایدار شود. افزایش اختلاف شیب دسته‌درزه‌ها، منجر به کاهش سطح ریزش می‌شود، زیرا با افزایش این اختلاف، ابعاد بلوک‌ها نیز افزایش می‌یابد و بلوک‌ها اجازه

با انجام مدلسازی‌ها، این نتایج حاصل شد:
 ۱- زمانی که اختلاف شیب دو دسته درزه کم‌ترین مقدار است ($Dipdiff = 10^\circ$)، بیشترین ناپایداری مشاهده می‌شود، زیرا بلوک‌های تشکیل شده دارای ابعاد کوچکی

[3] Jia, p. Tang, C.A, (2007), Numerical study on failure mechanism of tunnel in jointed rock mass, Tunneling and Underground Space Technology.

[4] Lee, D-H, 2003, A parametric study of the discontinuity in rock mass and its influence on tunnel behavior, Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy.

[5] Bieniawski, Z.T., (1984), Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A.A. Balkema, Rotterdam.

[6] Cecil, O.S., (1970), Correlations of Rock Bolt - Shotcrete Support and Rock Quality Parameters in Scandinavian Tunnels, Ph.D. thesis University of Illinois, also in Proc. Swedish Geotech. Institute, No. 27.

[7] Madkour, H, (2012), Parametric analysis of tunnel behavior in jointed rock", Ain Shams Engineering Journal.

[8] Dalgıç S., (2003), Tunneling In Fault Zones, Tuzla Tunnel, Turkey, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 18, No. 5, 453-465.

[9] NikAdat, N (2014). "Investigating the effect of the geometric properties of discontinuities on stress distribution around underground spaces by boundary element method and finite element method", Master of Science thesis, Mining and Metallurgy faculty, Rock mechanics, Yazd University, Iran. (In Persian).

[10] Zare Rashkooye, H and Emami meybodi, E. (2008). "Numerical analysis of the influence of geometrical and geomechanical properties of joints on the behavior of tunnel", the third Iranian Rock Mechanics Conference, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. (In Persian)

[11] Esterhuizen, G.S., Iannacchione, A.T, (2005), Effect of Dip and Excavation Orientation on Roof Stability in Moderately Dipping Stone Mine Workings, Alaska Rocks, Proceedings of the 40th U.S. Rock Mechanics Symposium, Anchorage, Alaska.

[12] Hoseyni and Etemadi, (2014). "The effect of Angle intersection of two discontinuities on the stability of the tunnel", Seventh Conference of geology and the environment of Iran. (In Persian)

[13] ITASCA consulting group, UDEC, (2000).

[14] Regulations of road and rail tunnels SNIP II-44-78.

حرکت به داخل فضای حفاری را پیدا نمی‌کنند در نتیجه علی‌رغم تشکیل بلوک با ابعاد بزرگ، بلوک‌ها در جای خود باقی مانده و سطح ریزش کم می‌شود. بیش‌ترین ناپایداری مربوط به اختلاف شیب‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه است؛ با افزایش این میزان اختلاف شیب ناپایداری‌ها به تدریج کم می‌شود.

۲- به ازای تمام سطوح تنش‌های برجا و k_s های مختلف، در نسبت $l/b = 0.4, 0.45$ مساحت زون ریزش صفر می‌شود و احداث تونل در محیطی با این نسبت l/b از لحاظ ایمنی بی‌خطر است. در برخی موارد ($k_n = 13.3 (Gpa/m)$) و $k_s = 0.73 (Gpa/m)$ به ازای $l/b = 0.33$ نیز مساحت زون ریزش صفر می‌شود؛ اما در صورت تشکیل زون در این نسبت l/b ، بیش‌ترین مساحت را خواهد داشت. در صورت عدم تشکیل زون ریزش به ازای $l/b = 0.33$ ، بیش‌ترین مساحت به ازای $l/b = 0.22$ است.

۳- کم‌ترین مساحت زون ریزش و پایدارترین حالت، مربوط به شیب ۳۵ درجه و $l/b = 0.25$ است.

۴- همواره تحت شرایط هیدرو استاتیک ($K = 1$)، کم‌ترین سطح زون ریزش مشاهده شده و پایدارترین حالت است و به ازای تنش‌های $K \neq 1$ ناپایداری بیش‌تر است. به ازای $K > 1$ سطح ریزش افزایش می‌یابد. به ازای $K > 1$ ، مساحت زون ریزش تقریباً مستقل از سختی درزه‌ها است و افزایش k_n و k_s تأثیر چندانی بر مساحت زون ریزش ندارد. زیرا افزایش تنش‌های منطقه‌ای، مانع سقوط بلوک‌ها به داخل فضای حفاری می‌شوند و پدیده قفل‌شدگی اتفاق می‌افتد. به ازای $K < 1$ ، با افزایش k_s ، مساحت زون ناپایدار افزایش می‌یابد.

مراجع

[1] Goodman, R.E., (1989), Introduction to rock mechanics, John Wiley & Sons.

[2] Bieniawski Z.T., (1973), Engineering classification of jointed rock masses, Trans. S. Afr. Inst. Civil Engineering; 15(12):335-44.

⁶Esterhuizen

⁷Iannacchione

⁸Lee

⁹Tsesarsky

¹⁰Hatzor

¹Jia

²Tang

³Lee

⁴Beinawski

⁵Dalgıç