

مدل سازی عددی انتشار ترک در شیب سنگ های درزه دار به روش ناپیوستگی جابجایی

سهیلا نظری^۱، علیرضا یاراحمدی بافقی^{۲*}، محمد فاتحی مرجی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد nazari.s.n@gmail.com

۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد ayarahmadi@yazduni.ac.ir

۳- دانشیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد mfatehi@yazduni.ac.ir

(دریافت ۱۹ فروردین ۱۳۹۲، پذیرش ۶ مرداد ۱۳۹۳)

چکیده

در توده سنگ های درزه دار مانند شیب سنگ ها، نوک درزه ها به عنوان نقاط ضعیف سنگ به شمار می روند با این وجود، کدهای تحلیل عددی پایداری توده سنگ های درزه دار تنها حرکت بلوک بر سطوح موجود ناپیوستگی ها را مورد توجه قرار می دهند و امکان ایجاد شکست و ناپیوستگی جدید در نقاطی که دارای شدت تنش بالا و یا دارای حالت پلاستیک است را ندارند. هدف از این تحقیق ارائه مدلی است که بتواند با استفاده از تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی سنگ، مکانیسم انتشار ترک پایدار یا ناپایدار در ناحیه پل سنگی و اتصال آن تا تشکیل بلوک های سنگی در شیب سنگ های درزه دار شامل چند دسته درزه را شبیه سازی کند. برای دستیابی به این هدف، تلفیق روش عددی المان مرزی غیرمستقیم با عنوان ناپیوستگی جابجایی مرتبه سوم و معیار حداکثر تنش مماسی، در محیط نرم افزاری **Mathematica** برنامه نویسی شده و با نتایج تحقیقات در این زمینه اعتبارسنجی شده است. نتایج این برنامه، پیش بینی حالت شکست، زاویه شروع رشد ترک و مدل سازی مسیر انتشار و اتصال ترک ها در ناحیه پل سنگی دیواره خواهد بود. پس از انتشار و اتصال ترک ها، حرکت و جابجایی برشی بلوک ها روی ناپیوستگی های جدید به عنوان نقاطی با شدت تنش بالا یا نواحی دارای حالت پلاستیک، با روش اجزای مجزا بوسیله نرم افزار **UEDC**، تحلیل شده است.

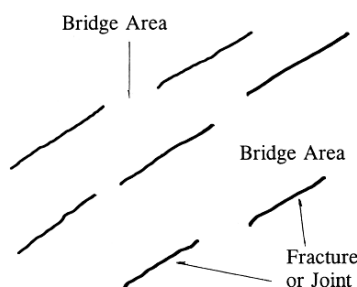
کلمات کلیدی

مدل سازی عددی، شیب سنگ درزه دار، مکانیسم انتشار ترک، روش ناپیوستگی جابجایی

۱- مقدمه

و معیار شکست حداکثر تنش مماسی تعمیم یافته توسط آلیها و همکارانش در سال ۲۰۱۲ مدل سازی شده است [۹].

در نهایت، مکانیک سنگ مرسوم اغلب از اثر شدت تنش نوک ترکها چشم پوشی می کند و اغلب ناپیوستگیها، ساختارها و بلوکهای ایجاد شده را تا انتهای تحلیل ثابت فرض کرده و تحلیل های استاتیکی، شبه استاتیکی و دینامیکی را انجام می دهد، غافل از اینکه پایداری شیب سنگهای درزه دار تابع ضرایب شدت تنش در نوک درزههاست. در واقع، شکست در شیب سنگهای درزه دار، به علت شروع رشد ترک از نوک درزهها در ناحیه پل سنگی با توجه به شرایط تنش در همسایگی نوک درزه اتفاق می افتد (شکل ۱).



شکل ۱: ناحیه پل سنگی در توده سنگ درزه دار ناپیوسته

۲- فرآیند مدل سازی به روش عددی المان مرزی

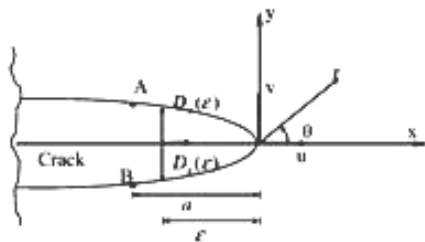
روش المان مرزی غیرمستقیم، بیان ریاضی مفاهیم کلاسیک نظریه است. تفاوت بین فرمول های ریاضی و فیزیکی در روش المان مرزی می تواند توسط حل مسئله مقدار مرزی مشخص شود. در رویکرد فیزیکی، ابتدا شرایط مرزی برای نقاط منفرد تعیین شده، سپس پارامترهای مرزی در عباراتی از راه حل های مقدار مرزی در نقاط منفرد محاسبه می شود. چون پارامترهای مرزی به صورت غیرمستقیم در این روش محاسبه می شوند، این فرآیند با عنوان روش المان مرزی غیرمستقیم شناخته شده است. روش ناپیوستگی جابجایی یکی از تکنیک های المان مرزی غیرمستقیم است که براساس راه حل تحلیلی برای مسأله با مقدار ثابت ناپیوستگی جابجایی در اطراف جزء خطی در صفحه X, Y داخل جسم جامد الاستیک نامحدود، اولین بار توسط کروچ تعریف شده است [۱۰].

۲-۱- روش ناپیوستگی جابجایی

در روش ناپیوستگی جابجایی به راه حل تحلیلی ناپیوستگی جابجایی ثابت $D_i(\varepsilon)$ در عبور یک سطح به سطح دیگر المان خطی به طول $2a$ در فضای جامد الاستیک نامحدود می توان نوشت (شکل ۲) [۱۰]:

$$D_i = u_i(x_1 - 0_-) - u_i(x_1 - 0_+) \quad (۱)$$

امروزه، کارکرد اصول مکانیک شکست در حل مسائل مهندسی شیب سنگ، بهبود روش های تحلیل پایداری و تعیین ضریب ایمنی موضوع قابل توجه محققین و مهندسين شیب های سنگی است. به علت وجود ناپیوستگی های ذاتی در سنگ، مانند ترکها و درزهها، شدت تنش می تواند موجب افزایش پتانسیل شرایط شکست شود. با این وجود، مکانیسم انتشار ترک در توده سنگ های درزه دار ناپیوسته به روشنی قابل درک نیست. در این زمینه، بابت و انیشتین در سال ۱۹۹۸ مدل سازی عددی به هم پیوستگی و اتصال ترکها در موادی با رفتار مشابه سنگ ارائه دادند که نتایج آن با مطالعات آزمایشگاهی مطابقت بالایی داشت [۱]. ثراف و کوفین در سال ۱۹۸۵ تحقیقاتی در زمینه روش تحلیل تعادل حدی ناپایداری شیب سنگ های کوچک شامل ترک های منفرد تحت شرایط بارگذاری حالت ترکیبی کششی-برشی یا ترک لبه ای در شرایط بارگذاری حالت کششی خالص انجام دادند [۲]. اسکاویا در سال ۱۹۹۰ تاثیر توزیع تنش غیریکنواخت، آنالیز پایداری شیب سنگ هایی شامل ترک منفرد تحت بارگذاری حالت ترکیبی و ترک لبه ای تحت بارگذاری حالت خالص کششی و برشی توسط عملکرد مکانیک شکست مورد مطالعه قرار داده است [۳]. همچنین وجود یک ردیف از درزه های منظم در شیب سنگ با استفاده از تئوری مکانیک شکست توسط اسکاویا در سال ۱۹۹۰ بررسی شده است. در مورد مشابهی، پایداری شیب سنگ کوچکی شامل ترک منفرد با استفاده از اصول مکانیک شکست و روش المان محدود بررسی شده است [۴]. در سال ۱۹۹۰ کای و همکارانش مدل سازی انتشار ترک کششی در شیب سنگ قائم با استفاده از روش المان محدود و معیار شکست چگالی انرژی کرنشی انجام دادند [۵]. بعلاوه، ابرهارد و همکارانش در سال ۲۰۰۴ شکست ترد و ریزش مرحله ای شیب سنگها را با استفاده از روش ترکیبی المان محدود و مجزا مدل سازی کردند [۶]. همچنین، در مورد آنالیز پایداری شیب سنگی تحت تاثیر بار دینامیکی، اصول مکانیک شکست توسط چن و وانگ در سال ۲۰۰۷ به کار گرفته شده است [۷]. با در نظر گرفتن روش ناپیوستگی جابجایی، رشد ترک های ثانویه در شرایط بارگذاری کششی و فشاری در شیب سنگها توسط فاتحی مرجی و اقبال در سال ۲۰۱۱ مدل سازی شده است [۸]. مسیر شکست حالت ترکیبی کششی-برشی در یک شیب سنگ دارای ترک لبه ای با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته



شکل ۴: تکنیک ضریب جابجایی برای المان ویژه نوک ترک

۲-۲- معیار شکست شروع ترک و جهت انتشار ترک

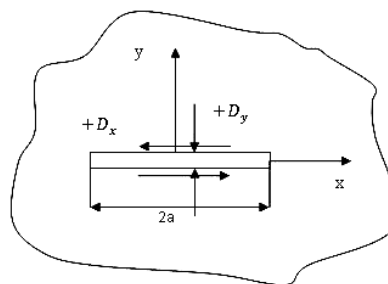
به علت شکست برشی غالب در ریزش‌های صفحه‌ای، براساس معیار شکست حداکثر تنش مماسی، شروع رشد ترک در جهت عمود بر جهت حداکثر تنش مماسی، با تساوی مقدار حداکثر تنش با مقدار بحرانی آن در سنگ اتفاق می‌افتد [۱۱]. حالت کشش و برش خالص شکست در ناحیه پل سنگی می‌تواند توسط ضرایب شدت تنش تعیین شود که K_{IIC} , K_{IIC} مقادیر چگرمگی شکست مود کششی و برشی، K_{IImax} , K_{IIImax} حداکثر مقدار ضرایب شدت تنش حالت-های کششی و برشی و θ_{IC} مقدار بحرانی زاویه شروع شکست می‌باشند [۱۲]:

$$\frac{K_{IIImax}}{K_{IImax}} > \frac{K_{IIC}}{K_{IIC}}, K_{IImax} = K_{IIC} \text{ at } \theta_{IIC}$$

$$1 < \frac{K_{IIImax}}{K_{IImax}} < \frac{K_{IIC}}{K_{IIC}}, K_{IImax} = K_{IIC} \text{ at } \theta_{IC}$$

۲-۳- روندنمای مدل‌سازی انتشار ترک و اعتبارسنجی آن

در شیب‌های سنگی، وجود تنش‌های فشاری روی ترک در نتیجه وزن بالای آن باعث بسته شدن ترک می‌شود. بعد از بسته شدن کامل ترک باز، حالت بازشدگی شکست در نوک ترک از بین می‌رود. بنابراین مقدار ضریب شدت تنش K_I برابر با صفر بوده و حالت کششی در نوک ترک فقط در اثر ضریب شدت تنش برشی می‌تواند ایجاد شود. بعلاوه، وجود یک نیروی اصطکاکی در ترکی با سطح زبر ممکن است باعث تغییر تنش‌های برشی روی سطح ترک شود و مقدار ضریب شدت تنش برشی کاهش یابد. در نتیجه مقاومت پل سنگی در مقابل انتشار ترک و پایداری شیب سنگ افزایش می‌یابد. با توجه به شرایط مرزی در شیب سنگ، پارامترهای الاستیک و شکست سنگ، فرآیند عددی رشد ترک در شیب سنگ فراهم شده است (شکل ۵). درستی کارکرد معیار حداکثر تنش مماسی در این برنامه با نتایج معیار نرخ‌رهای انرژی کرنشی مقایسه شده است. در تعمیم حالت ترکیبی شکست I-II یک ترک زاویه‌دار در موقعیت تنش کششی یکنواخت در بی‌نهایت انتخاب شده است (شکل ۶) [۱۳].



شکل ۲: اجزای ناپیوستگی جابجایی ثابت

u_i : مقدار جابجایی در المان زام ترک

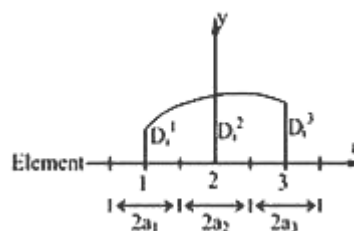
D_i : ناپیوستگی جابجایی المان زام ترک

مقدار مثبت جزء نرمال و برشی ناپیوستگی جابجایی وقتی اتفاق می‌افتد سطوح ترک به سمت هم و سطح بالای ترک به سمت چپ سطح پائین حرکت می‌کند. در روش ناپیوستگی جابجایی مرتبه بالا برای المان‌های کوادراتیک رابطه (۲) حاکم است (شکل ۳):

$$D_i(\varepsilon) = \sum_{j=1}^k N_j(\varepsilon) D_i^j, i = x, y \quad (2)$$

k : برای المان‌های کوادراتیک مقادیر ۱، ۲ و ۳ را دارد و پارامترهای D_i^j و $N_j(\varepsilon)$ ناپیوستگی جابجایی گره‌ای و تابع شکل المان‌ها را تعریف می‌کنند. در المان‌های چهارضلعی با برقراری ارتباط $a_1 = a_2 = a_3$ می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} N_1(\varepsilon) = \varepsilon(\varepsilon - 2a_1) / 8a_1^2 \\ N_2(\varepsilon) = -(\varepsilon^2 - 4a_1^2) / 4a_1^2 \\ N_3(\varepsilon) = \varepsilon(\varepsilon + 2a_1) / 8a_1^2 \end{cases} \quad (3)$$



شکل ۳: المان‌های کوادراتیک در روش ناپیوستگی جابجایی

مرتبه سوم

به علت وجود مقادیر موهومی برای تنش‌ها و جابجایی‌ها در نوک ترک، درستی روش ناپیوستگی جابجایی در نوک ترک کاهش می‌یابد. با استفاده از المان ویژه نوک ترک به طول $2a$ می‌توان ناپیوستگی جابجایی را در طول این المان ویژه به دست آورد (شکل ۴) [۱۰]:

(۴)

$$D_i(\varepsilon) = D_i(a) (\varepsilon/a)^{1/2}, i = x, y$$

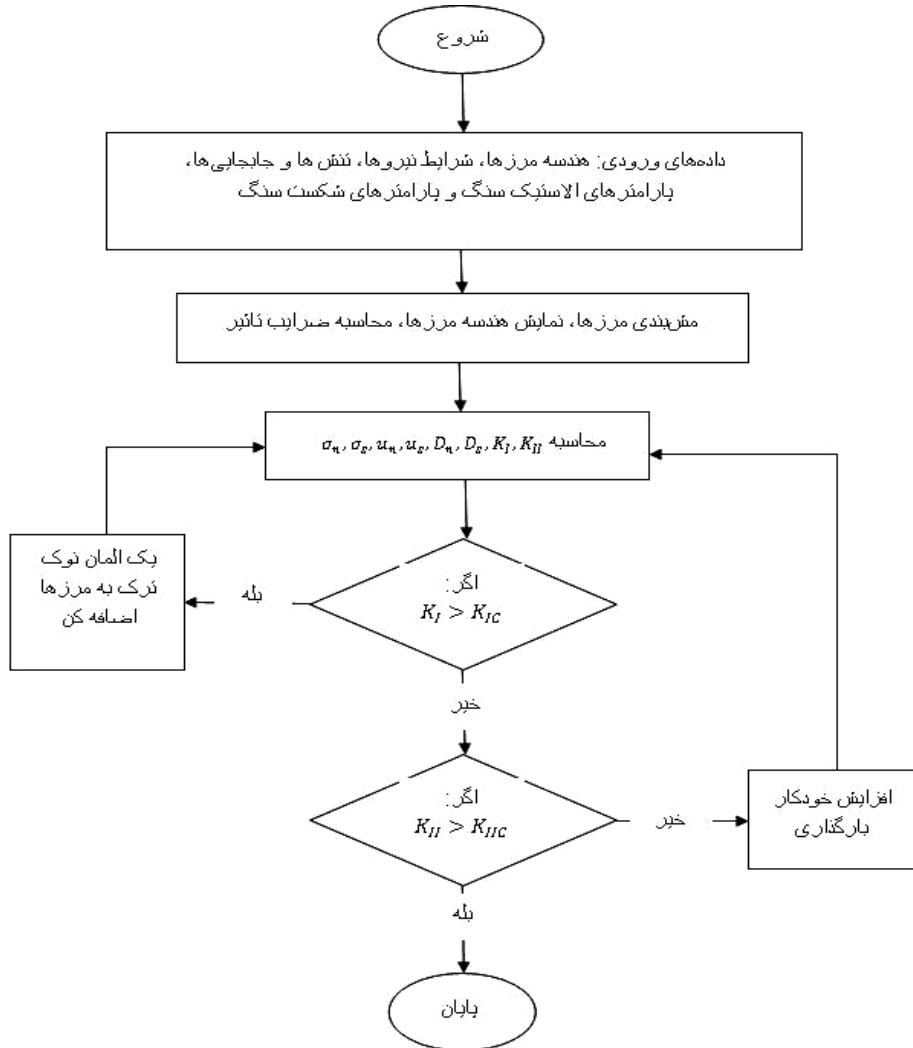
بعد $(K_{DI} = \frac{K_i}{\sigma\sqrt{\pi a}}, i = I, II)$ تابعی از زاویه جهت گیری ترک نسبت به تنش کششی دوردست است.

ضرایب شدت تنش با استفاده از روش تحلیلی و بر طبق اصل برهم‌نهی برابر است با [۱۴]:

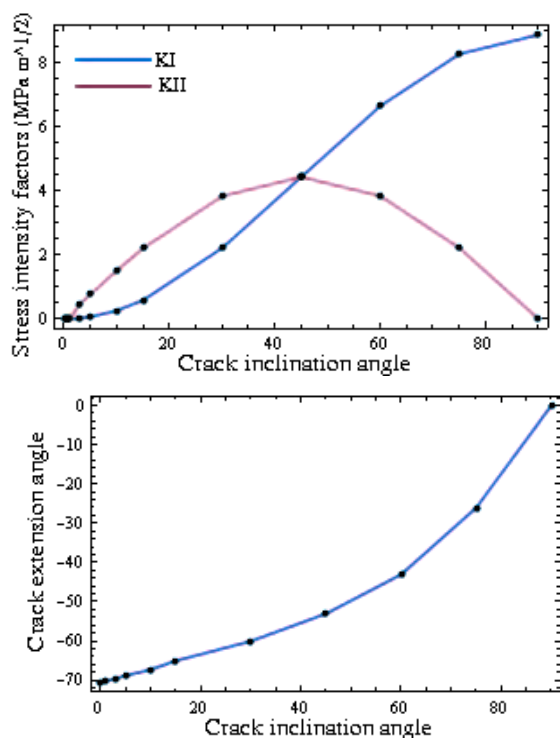
$$\begin{cases} K_I = \sigma(\pi b)^{1/2} \sin^2 \beta \\ K_{II} = \sigma(\pi b)^{1/2} \sin \beta \cos \beta \end{cases}$$

β : زاویه بین ترک و جهت بارگذاری

بنابراین با در نظر گرفتن ترکی با شرایط موجود در شکل (۶) ضریب شدت تنش بدون



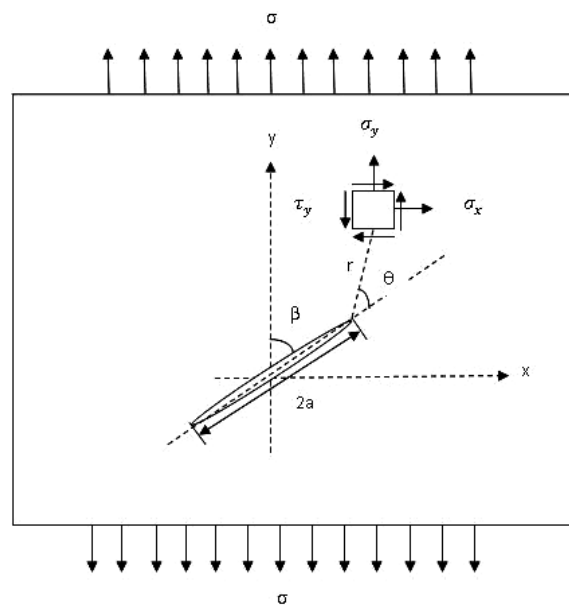
شکل ۵: روندنمای رشد ترک در شیب سنگ براساس ترکیب روش ناپیوستگی جابجایی و معیار حداکثر تنش



شکل ۷: ضرایب شدت تنش و زاویه شروع شکست بر اساس زاویه جهت‌گیری ترک پیش‌بینی شده توسط معیار حداکثر تنش مماسی

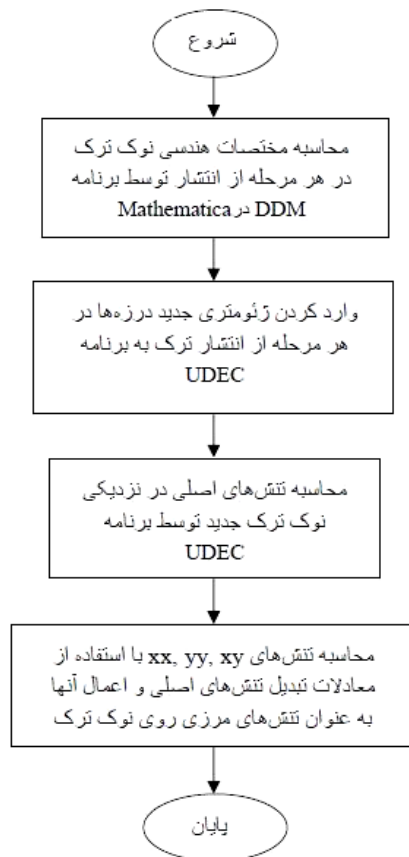
۳- مدل‌سازی مکانیسم انتشار ترک در شیب سنگ‌های درزه‌دار

مدل‌سازی عددی انتشار ترک در محیط‌های درزه‌دار مانند شیب سنگ‌ها و تونل‌ها مستلزم استفاده از روش عددی با قابلیت استفاده در محیط‌های ناپیوسته است. از جمله می‌توان به روش‌های المان گسسته و المان مرزی اشاره کرد که روش المان مرزی به دلیل برقراری مش‌بندی تنها روی مرزهای با سرعت محاسبه بالا است. با در نظر گرفتن رشد ترک‌ها به عنوان مرزهای جدید، می‌توان مسیر انتشار و اتصال ترک‌ها را با مش‌بندی آن‌ها و معیار شکست مناسب تعیین کرد. در حالی که در استفاده از روش المان گسسته و نرم‌افزارهای مرتبط مانند UDEC، تمام فضای مدل باید مش‌بندی شده و درزه‌ها بصورت ناپیوستگی‌های ممتد و متصل به به مرزهای بیرونی قابل مدل‌سازی می‌باشند [۱۵]. در حقیقت، نرم‌افزار UDEC قابلیت استفاده از معیارهای مکانیک شکست برای مدل‌سازی انتشار ترک‌های ناممتد را ندارد. بعلاوه، به‌علت تأثیر شبکه مش‌بندی روی فضای



شکل ۶: ترک زاویه‌دار در فضای بی‌نهایت تحت تنش کششی تک محوره در دور دست

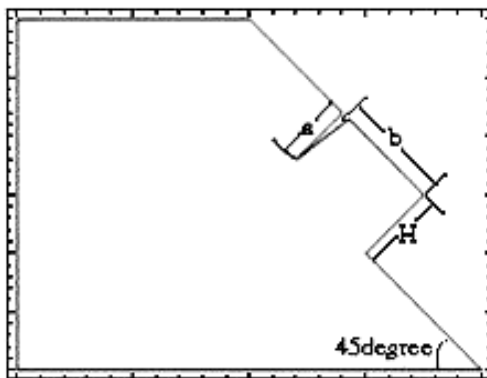
طبق معیار شکست حداکثر تنش مماسی زاویه شروع رشد ترک تابع زاویه جهت‌گیری ترک و نسبت KI/KII است. حالت کششی خالص وقتی ترک نسبت به جهت تنش زاویه ۹۰ درجه داشته باشد اتفاق می‌افتد، که در این صورت زاویه رشد ترک برابر با $\theta_m = 0^\circ$ است. در واقع حالت کششی شکست، معیار شکست گریفیث را تایید می‌کند. حالت ترکیبی بارگذاری وقتی $0^\circ < \beta < 90^\circ$ ، شروع رشد ترک در زاویه‌ای نسبت به صفحه اصلی ترک اتفاق می‌افتد. اگر زاویه $\beta = 0^\circ$ باشد، مقادیر $KIC = KII C = 0$ طبق رابطه تحلیلی شماره ۸ حاصل می‌شود و در نتیجه مقدار $\sigma_{ij} = 0$ در نوک ترک برای تنش به‌دست می‌آید و این نشان می‌دهد که در نوک ترک مقدار تکین برای تنش وجود ندارد در حالی که به‌صورت نظریه مقدار تنش در نوک ترک بی‌نهایت است. در این حالت با توجه حالت برشی خالص در نوک ترک و با توجه به نتایج آزمایشگاهی، تحلیل ریاضی زاویه رشد ترک در حالت برشی خالص برابر با $\theta_m = -70.53^\circ$ است (شکل ۷).



شکل ۸: روندنمای محاسبه تنش‌ها در هر مرحله از انتشار ترک به-

صورت ترکیبی از نرم‌افزارهای UDEC و DDM

ابتدا شیب سنگی با ترک منفرد تحت بارگذاری حالت کششی خالص فرض شده و روند تغییرات تنش، ضرایب شدت تنش و نوع حالت شکست در شرایط مختلفی از وجود ترک منفرد در سطح شیب سنگ بررسی شود (شکل ۹).



شکل ۹: ترک منفرد در شیب سنگ تحت بارگذاری حالت کششی

مدل و ناپیوستگی‌ها، مقادیر تمرکز تنش و جهت رشد ترک (در امکان محاسبه بوسیله UDEC) در نزدیکی نوک ترک‌های ناممتد دقیق نیست. بنابراین، برنامه مدل‌سازی عددی شکست و گسترش ترک در شیب سنگ درزه‌دار با توجه به روندنمای المان‌های مرتبه سوم ناپیوستگی جابجایی در نرم‌افزار Mathematica به‌عنوان نرم‌افزاری با قدرت بالای محاسباتی و گرافیکی آماده شده است [۱۶]. در این تحقیق سعی بر آن بوده است که شبیه‌سازی عددی مسأله در شرایط مرزی کرنش صفحه‌ای و در حالت استاتیکی، به‌طوری که از حرکت بلوک‌ها همزمان با رشد ترک صرف نظر شود، انجام شده است. توزیع تنش‌های برجا در ناحیه شیب سنگ با استفاده از روش عددی اجزاء مجزا (نرم افزار UDEC) تعیین شده و در هر مرحله از افزایش طول ترک فرض شده است که وضعیت تنش‌ها ثابت بماند. در هر مرحله از شکست در محیط برنامه‌نویسی Mathematica، ژئومتری جدید وارد محیط UDEC شده و پس از شناسایی موقعیت نوک ترک‌ها، مقدار تنش‌های اصلی در همسایگی نوک ترک، از زون مربوطه در نتیجه خروجی نرم‌افزار UDEC خوانده می‌شود. تنش‌ها در سه بعد x, y, z در نوک ترک با استفاده از مقادیر تنش‌های اصلی و جهت و شیب ترک محاسبه شده و به‌عنوان تنش‌های مرزی نرمال و مماسی وارد برنامه DDM می‌شود (شکل ۸) [۱۷].

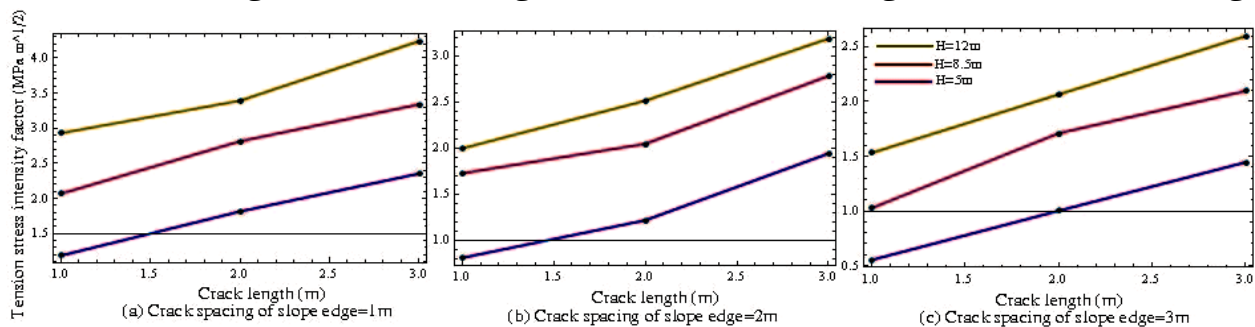
$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \pm \sqrt{(\sigma_{xy})^2 + \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2} \quad (6)$$

$$\tau = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2} \quad (7)$$

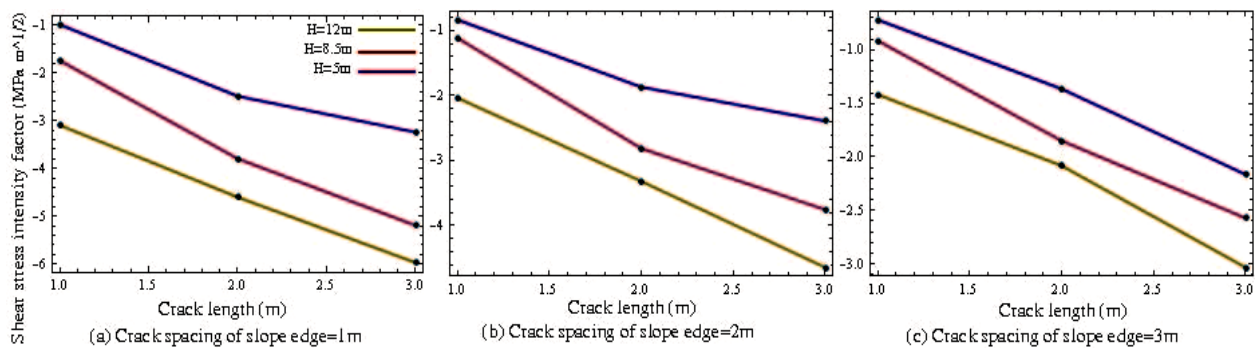
به این ترتیب، با معلوم بودن مقادیر تنش‌ها در یک محیط ناپیوسته می‌توان انتشار ترک پایدار یا ناپایدار باعث تشکیل بلوک‌های مجزا و سطح ریزش احتمالی شود بررسی کرد که در این تحقیق، شیب سنگی دارای ترک منفرد کششی و چند دسته درزه منظم هدف مدل‌سازی بوده‌اند. در نهایت، به‌علت وجود نیروی اصطکاکی و تنش فشاری موثر بر سطوح درزه، فرض شده که درزه‌ها طول محدود و بازشدگی دارند.

فاصله ترک از لبه شیب باعث کاهش ضریب شدت تنش کششی و افزایش ضریب شدت تنش برشی می‌شود ولی همواره ضرایب شدت تنش کششی مقادیر بزرگتری نسبت به ضرایب شدت تنش برشی دارند. (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). بنابراین احتمال شکست حالت کششی در شیب سنگ‌هایی با ارتفاع بیشتر و نیز در نزدیکی لبه شیب سنگ افزایش می‌یابد.

توزیع تنش در این مدل شیب سنگ با وجود درزه منفرد باز به ازای هر تغییر مقادیر a , b , H در UDEC محاسبه شده است. در هر مورد، تنش به صورت مقدار تنش نرمال مرزی روی ترک، وارد مدل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که افزایش طول ترک در هر ارتفاع از شیب سنگ، با افزایش ضریب شدت تنش کششی و کاهش ضریب شدت تنش برشی همراه است. افزایش



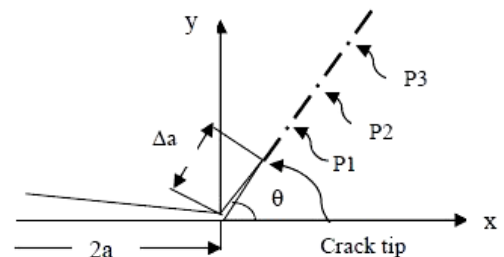
شکل ۱۰: تغییرات ضریب شدت تنش کششی به ازای تغییر طول ترک منفرد تحت بار کششی خالص



شکل ۱۱: تغییرات ضریب شدت تنش برشی به ازای تغییر طول ترک منفرد تحت بار کششی خالص

در شیب سنگی با ارتفاع ۱۲ متر، در فاصله نزدیک به لبه شیب حالت برشی شکست مشاهده می‌شود با افزایش طول ترک مقادیر تنش‌ها نیز افزایش یافته و فاصله‌های دورتر ترک از لبه شیب با رشد ضریب شدت تنش کششی و تنش‌ها احتمال شکست کششی افزایش می‌یابد (جدول ۲). در نتیجه، می‌توان گفت که طول ترک و فاصله‌داری از لبه شیب روند تنش‌ها و حالت رشد ترک را تعیین می‌کند، به‌طوری‌که با افزایش طول ترک و فاصله‌داری ترک از لبه شیب از ارتفاع پایدار شیب می‌کاهد.

مقدار تنش‌های نرمال و برشی در ۷ نقطه نزدیک نوک ترک و در راستای رشد ترک در اثر تکین بودن نوک ترک محاسبه شده‌است (شکل ۱۲). در هر طولی از ترک با افزایش ارتفاع شیب سنگ و طول ترک، مقادیر تنش‌های کششی و برشی در این نقاط بزرگتر شده و ارتفاع پایدار شیب سنگ با افزایش طول ترک کاهش می‌یابد (جدول ۱).



شکل ۱۲: نمای شماتیکی از نقاط نزدیک نوک ترک در اثر انتشار

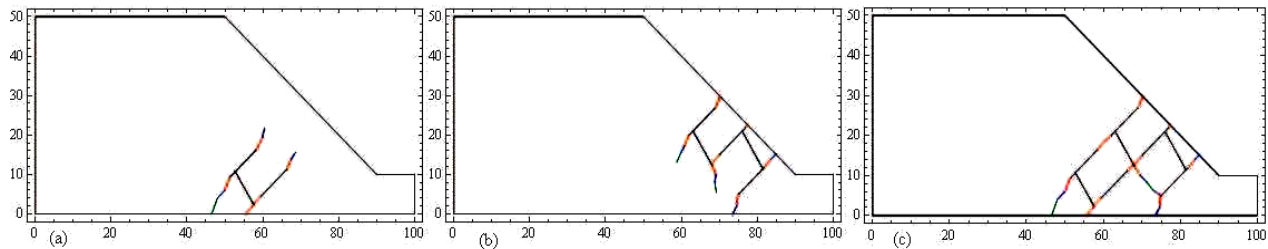
جدول ۱: تنش‌ها در ۷ نقطه نزدیک نوک ترک منفرد تحت بار کششی خالص

| ارتفاع شیب سنگ (H) | طول ترک (a) | تنش (MPa) | P_1 | P_r | P_r | P_s | P_b | P_f | P_v |
|--------------------|-------------|------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ۱۲متر | ۱متر | τ | -۳۰/۶۷ | -۲/۸۸ | -۲/۸۷ | -۲/۸۳ | -۲/۸۲ | -۲/۸ | -۲/۷۸ |
| | | σ_n | ۳۲/۱۲ | ۲/۷۶ | ۲/۶۴ | ۲/۴۵ | ۲/۴۴ | ۲/۴۱ | ۲/۴ |
| | ۲متر | τ | -۴۷/۴ | -۳/۸۷ | -۳/۶۴۴ | -۳/۵۹۲ | -۳/۵۶۲ | -۳/۵۵۳ | -۳/۴۶۲ |
| | | σ_n | ۵۶/۵ | ۴/۵۵ | ۴/۵۳ | ۴/۵۲ | ۴/۵۲ | ۴/۴۹ | ۴/۴۸ |
| | ۳متر | τ | -۵۴/۳ | -۵/۸۷ | -۵/۷۷ | -۵/۷۵ | -۵/۷۴۵ | -۵/۷۴۴ | -۵/۷۴ |
| | | σ_n | ۸۸/۷ | ۷/۶۸ | ۷/۶۵ | ۷/۶۵ | ۷/۶۳ | ۷/۶۳ | ۷/۶۱۶ |
| ۸/۵متر | ۱متر | τ | -۱۱/۶۶ | -۱/۵۵ | -۱/۵۳ | -۱/۵۲ | -۱/۵۲ | -۱/۵۱۱ | -۱/۵ |
| | | σ_n | ۲۰/۴۵ | ۱/۷ | ۱/۶۷ | ۱/۶۵ | ۱/۶۵ | ۱/۶۳ | ۱/۶۲۲ |
| | ۲متر | τ | -۳۶/۵ | -۲/۶۵ | -۲/۶۳ | -۲/۶۲ | -۲/۶۲ | -۲/۶۱ | -۲/۶ |
| | | σ_n | ۴۵/۵ | ۲/۳۳ | ۲/۲۶ | ۲/۱۸ | ۲/۱۷ | ۲/۱۷ | ۲/۱۶۶ |
| | ۳متر | τ | -۵۰/۱ | -۴/۷۲ | -۴/۷۲ | -۴/۷۰۸ | -۴/۶۵۸ | -۴/۶۲۴ | -۴/۶۰۶ |
| | | σ_n | ۷۸/۶۶ | ۶/۹۳ | ۶/۸۳ | ۶/۸۳ | ۶/۸۲ | ۶/۸۲ | ۶/۷۸ |
| ۵متر | ۱متر | τ | -۶/۹۲ | -۱/۱۵ | -۱/۱۳۹ | -۱/۱۳۸ | -۱/۱۳۴ | -۱/۱۳۴ | -۱/۱۳۱ |
| | | σ_n | ۱۲/۶ | ۱/۳۴ | ۱/۳۳ | ۱/۳۱ | ۱/۲۹ | ۱/۲۹ | ۱/۲۹ |
| | ۲متر | τ | -۱۸/۸۱ | -۱/۴۷ | -۱/۴۶ | -۱/۴۳۴ | -۱/۴۲۸ | -۱/۴۲۸ | -۱/۴۱۸ |
| | | σ_n | ۳۷/۶۲ | ۱/۹۶ | ۱/۹۴ | ۱/۹۳ | ۱/۹۱۱ | ۱/۸۹ | ۱/۸۹ |
| | ۳متر | τ | -۳۳/۸۱ | -۲/۷۱ | -۲/۷۱ | -۲/۶۸۹ | -۲/۶۷۸ | -۲/۶۷ | -۲/۶۴ |
| | | σ_n | ۵۳/۵۵ | ۲/۲۵ | ۲/۲۴۴ | ۲/۲۱ | ۲/۲۱ | ۲/۱۹۸ | ۲/۱۸ |

جدول ۲: تنش‌ها در ۷ نقطه نزدیک نوک ترک منفرد تحت بار کششی خالص در شیب سنگی با ارتفاع ۱۲ متر

| طول ترک (a) | فاصله از لبه شیب (b) | تنش (MPa) | P_1 | P_r | P_r | P_s | P_b | P_f | P_v |
|-------------|----------------------|------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ۱متر | ۱متر | τ | -۳۰/۶۷ | -۲/۸۸ | -۲/۸۷ | -۲/۸۳ | -۲/۸۲ | -۲/۸ | -۲/۷۸ |
| | | σ_n | ۳۲/۱۲ | ۲/۷۶ | ۲/۶۴ | ۲/۴۵ | ۲/۴۴ | ۲/۴۱ | ۲/۴ |
| | ۲متر | σ_n | ۴۲/۹۶ | ۱/۱۵ | ۱/۱۲۵ | ۱/۱۲۵ | ۱/۱۲۵ | ۱/۱۲۵ | ۱/۱۲۵ |
| | | τ | ۳۷/۹۴ | ۱/۱۱ | ۱/۱۰۲ | ۱/۱ | ۱/۱ | ۱/۱ | ۱/۱ |
| | ۳متر | σ_n | ۵۸/۴۲ | ۱/۸۸ | ۱/۸۲ | ۱/۷۵ | ۱/۷۴۵ | ۱/۷۴۴ | ۱/۷۴ |
| | | τ | ۴۸/۸ | ۰/۳۲ | ۰/۳۲ | ۰/۳۱۲ | ۰/۳۰۱ | ۰/۲۸ | ۰/۲۸ |
| ۲متر | ۱متر | σ_n | -۴۷/۴ | -۲/۸۷ | -۳/۶۴۴ | -۳/۵۹۲ | -۳/۵۶۲ | -۳/۵۵۳ | -۳/۴۶۲ |
| | | τ | ۵۶/۵ | ۴/۵۵ | ۴/۵۳ | ۴/۵۲ | ۴/۵۲ | ۴/۴۹ | ۴/۴۸ |
| | ۲متر | σ_n | ۶۲/۴ | ۱/۹۵ | ۱/۹۳۶ | ۱/۹۳۲ | ۱/۹۲ | ۱/۹۱ | ۱/۹ |
| | | τ | ۴۳/۲ | ۲/۲۳ | ۲/۱۹ | ۲/۱۸ | ۲/۱۷ | ۲/۱۷ | ۲/۱۶۶ |
| | ۳متر | σ_n | ۷۰/۱ | ۲/۱۲ | ۲/۱۲ | ۲/۱۰۸ | ۲/۰۵۸ | ۲/۰۲۴ | ۲/۰۰۶ |
| | | τ | ۵۸/۶۶ | ۱/۹۳ | ۱/۸۳ | ۱/۸۳ | ۱/۸۲ | ۱/۸۲ | ۱/۷۸ |
| ۳متر | ۱متر | σ_n | -۵۴/۳ | -۵/۸۷ | -۵/۷۷ | -۵/۷۵ | -۵/۷۴۵ | -۵/۷۴۴ | -۵/۷۴ |
| | | τ | ۸۸/۷ | ۷/۶۸ | ۷/۶۵ | ۷/۶۵ | ۷/۶۳ | ۷/۶۳ | ۷/۶۱۶ |
| | ۲متر | σ_n | ۷۸/۸۱ | ۲/۴۷ | ۲/۴۶ | ۲/۴۳۴ | ۲/۴۲۸ | ۲/۴۲۸ | ۲/۴۱۸ |
| | | τ | ۴۷/۶۲ | ۴/۹۶ | ۴/۹۴ | ۴/۹۳ | ۴/۹۱۱ | ۴/۸۹ | ۴/۸۹ |
| | ۳متر | σ_n | ۸۳/۸۱ | ۳/۹۱ | ۳/۹۱ | ۳/۸۸۹ | ۳/۸۷۸ | ۳/۸۷ | ۳/۸۴ |
| | | τ | ۵۳/۵۵ | ۲/۲۵ | ۲/۲۴۴ | ۲/۲۱ | ۲/۲۱ | ۲/۱۹۸ | ۲/۱۸ |

همچنین، محاسبه ضرایب شدت تنش در معیار حداکثر تنش مماسی تابع مقادیر ناپیوستگی جابجایی و در نتیجه ضرایب تأثیر است که از روش ناپیوستگی جابجایی حاصل می‌شود. بنابراین، در اثر وجود ترک‌های اطراف در فاصله نزدیک نوک یک ترک مشخص، مسیر حرکت ترک، مسیری مستقیم یا کوتاهی است که به نزدیکترین ترک برخورد خواهد کرد. در حالت فاصله‌داری زیاد درزه‌ها، رشد ترک، مسیر به‌طور مستقیمی را طی نمی‌کند. در نهایت، تأثیر فاصله‌داری درزه‌ها و مشخصات ژئومتری آن‌ها روی زاویه رشد ترک، معیار شکست حداکثر تنش مماسی را نفی یا نقض نمی‌کند.



شکل ۱۳: مثال ساده از رشد ترک در شیب سنگ درزه‌دار

به‌علت فاصله‌داری زیاد درزه‌ها، رشد ترک‌ها در هر مرحله بیشتر تحت تأثیر شرایط مرزی و تنش‌های اطراف قرار می‌گیرد و گسترش ترک مسیر پیچیده‌ای دارد (شکل ۱۵). مدل‌سازی نشان می‌دهد که شکست صفحه‌ای شیب سنگ‌ها نتیجه رشد ترک در حالت برشی در ناحیه پل سنگی بوده زیرا که با افزایش تنش نرمال فشاری در عمق، حالت بازشدگی درزه‌ها و در نتیجه رشد ترک‌ها در حالت شکست کششی غیرممکن می‌شود ($K_I \leq 0$). همچنین، در فاصله‌داری کم بین درزه‌ها مسیر انتشار اغلب در مسیر مستقیم و کوتاه بین درزه‌ها است.

شکل ۱۳ مثال ساده‌ای از رشد ترک تحت تأثیر شرایط مرزی، تنش‌ها در همسایگی نوک ترک را نشان می‌دهد. چون خصوصیات ژئومکانیکی مانند اثر تنش و جابجایی و خصوصیات ژئوتکنیکی از جمله زاویه شیب و فاصله‌داری تمام المان‌ها روی کلیه مرزها در روابط ضرایب تأثیر المان‌های مرزی لحاظ شده است، زاویه رشد ترک نه تنها تابعی از مقادیر تنش‌های نرمال و برشی در نوک ترک است، بلکه به‌صورت غیرمستقیم (با توجه به ضرایب تأثیر) تحت تأثیر فاصله‌داری درزه‌ها نیز است.

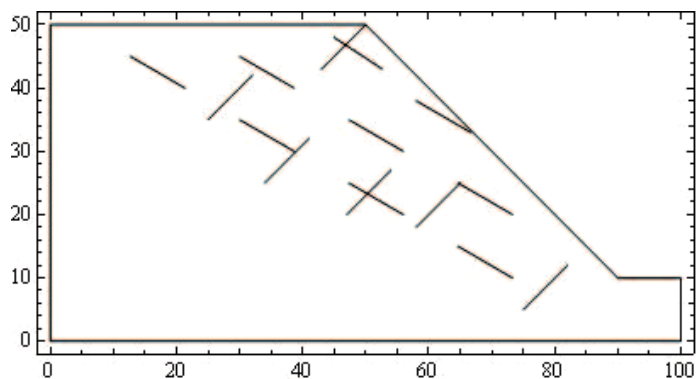
در ادامه، یک مدل شیب سنگ شامل دو دسته درزه دارای پارامترهایی مطابق جداول (۳ و ۴) در شرایط پیچیده‌تری برای شبیه‌سازی انتشار ترک در محیط نرم‌افزاری Mathematica نظر گرفته شده است که در محیط UDEC با استفاده از گپ (Gap) در درزه‌های ممتد، ترک‌های ناممتد مدل‌سازی می‌شوند (شکل ۱۴). طول رشد ترک یا گام شکست با توجه به بزرگی طول ترک اولیه، در مرحله اول 0.02 طول درزه اولیه و در دو مرحله بعدی 0.01 اندازه رشد ترک در مرحله اول فرض شده است. در این شبیه‌سازی ترک‌ها در ۴ مرحله به هم برخورد کرده و فرآیند انتشار ترک متوقف شده است.

جدول ۳: پارامترهای ژئوتکنیکی دسته درزه‌ها در دو مدل شیب سنگ با ارتفاع ۵۰ متر و شیب ۴۵ درجه

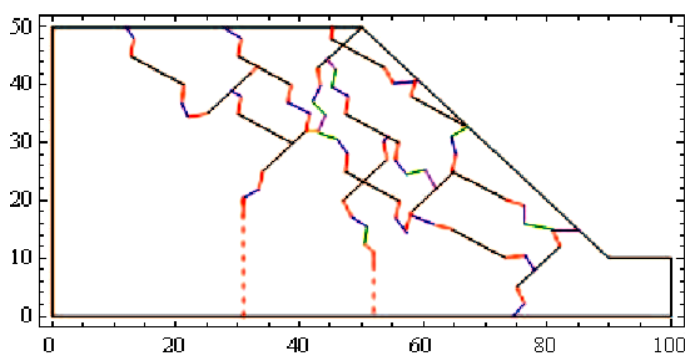
| پارامتر واحد | پل سنگی متر | فاصله‌داری درزه‌ها متر | طول ترک متر | زاویه شیب درزه درجه |
|---------------|-------------|------------------------|---------------|---------------------|
| دسته درزه اول | ۱۰ | 1.0 ± 0.4 | 1.0 ± 0.1 | ۴۵ |
| دسته درزه دوم | ۱۰ | 1.0 ± 0.2 | 1.0 ± 0.1 | -۳۰ |

جدول ۴: پارامترهای ژئومکانیکی سنگ در دو مورد مطالعاتی

| پارامتر ژئومکانیکی واحد | چغرمگی شکست $\text{MPa.m}^{0.5}$ | زاویه اصطکاک درجه | چسبندگی MPa | چگالی kg/m^3 | مدول یانگ MPa | نسبت پواسون بدون بعد |
|-------------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| مقدار | ۱ | ۳۵ | ۵ | ۲۸۰۰ | ۱۴۰۰۰ | 0.2 |



شکل ۱۴: مدل ژئومکانیکی شیب سنگ‌های درزه‌دار

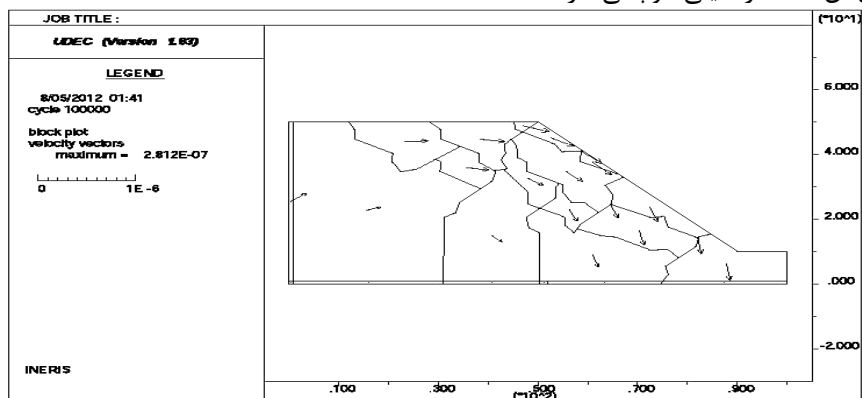


شکل ۱۵: مدل‌سازی طرح رشد ترک در مورد مطالعاتی شیب سنگ

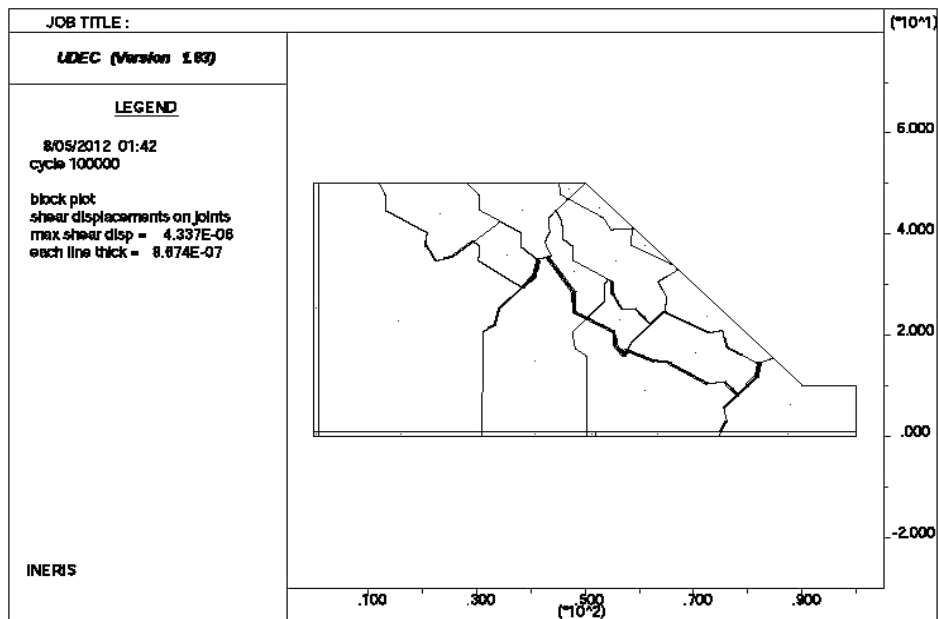
۴- تعیین جایجایی برشی بلوک‌ها در اثر اتصال ترک‌ها

حداکثر میزان حرکت بلوک‌ها و جایجایی برشی درزه‌ها به ترتیب مقادیری برابر با $۲۸ * ۱۰^{-۵}$ میلی‌متر و $۴۳ * ۱۰^{-۴}$ میلی‌متر به‌دست آمده است (شکل‌های ۱۶ و ۱۷).

در هر دو شیب سنگ، مدل رفتاری درزه‌ها، مدل تماس سطحی- لغزشی کولمب همراه با تنش باقیمانده و مدل رفتاری بلوک‌ها نیز صلب در نظر گرفته شده و مقدار چسبندگی درزه‌ها به علت فرض اولیه باز بودن آن‌ها مقدار خیلی کوچکی دارد.



شکل ۱۶: محاسبه حرکت بلوک‌های تشکیل شده در اثر رشد ترک در مورد مطالعاتی شیب سنگ دوم



شکل ۱۷: محاسبه جابجایی برشی درزه‌ها در اثر رشد ترک در مورد مطالعاتی شیب سنگ دوم

۵- بحث و نتیجه‌گیری

شیب سنگ‌هایی شامل چند دسته‌دوزه شرایط مرزی، هندسه مسئله و مرزهای همسایه نوک ترک در اندازه زاویه رشد ترک مؤثر می‌باشند. در نتیجه مسیر رشد ترک در ناحیه پل سنگی با بزرگتر شدن این ناحیه پیچیده‌تر شده و رشد ترک از مسیر مستقیم بین درزه‌ها خارج می‌شود.

لازم به ذکر است که استفاده از مکانیسم انتشار ترک در مقیاس بزرگ سازه‌ها مانند معادن که درزه‌هایی بزرگ مقیاس دارند ممکن است راه‌حل صحیحی نباشد چون تئوری مکانیک شکست بر اساس ابعاد کوچک ترک و ریز ترک تعریف و توسعه داده شده است.

در این تحقیق سعی شده است انتشار ترک در محیط ناپیوسته شیب سنگ‌های درزه‌دار در شرایط واقعی تنش با روش ناپیوستگی جابجایی مرتبه سوم به‌عنوان روشی مفید و سریع در تحلیل محیط‌های ناپیوسته شبیه‌سازی شود. از معیار شکست حداکثر تنش مماسی مبتنی بر ضرایب شدت تنش به‌عنوان راه حل مناسبی در تعیین حالت رشد ترک آن در این تحقیق از مقایسه با معیار نرخ‌رهایی انرژی کرنشی سنجدیده شد. نتایج این تحقیق ابتدا در مورد افزایش طول ترک منفرد تحت بارگذاری خالص کششی، نشان‌دهنده حالت کششی رشد ترک در نزدیکی لبه شیب سنگ و حالت کششی غالب در نواحی دور از لبه شیب سنگ و کاهش ارتفاع پایدار با افزایش طول ترک است. در مورد

۶- تقدیر و تشکر

پژوهشکده مهندسی معدن دانشگاه یزد و شرکت سنگ آهن مرکزی ایران تشکر و قدردانی نماییم.

این تحقیق با توجه به مباحث و مسائل موجود در مکانیک شکست سنگ و کارکرد آن در پایداری سازه‌های سنگی همانند شیب سنگ‌های درزه‌دار سعی شده است با استفاده از روش‌های مفید و سریع، مکانیسم شکست با توجه به شرایط تنش واقعی مدل‌سازی شود. بنابراین لازم می‌دانیم از حمایت‌های

مراجع

- [1] Einstein.H and Bobet.A , 1998, *Numerical Modeling of Fracture Coalescence in a model rock material*, International journal of fracture, 92: 221-252.
- [2] Tharp,T.M and Coffin.D.F, 1985, *Field Application of Fracture Mechanics Analysis to Small Rock Slopes*, 26th U.S. symp. On rock mech, pp667-674.
- [3] Scavia,C, 1990, *Fracture Mechanics Approach to Stability Analysis of Rock Slopes*, Eng.Fract.Mech.,35,No.4-5, 899-910.
- [4] Singh,R.N and Sun,G.X, 1989, *Fracture Mechanics Applied to Slope Stability Analysis*, Int. Symp. On Surface Mining-Fracture Concepts, University of Nottingham, England,pp93-97.
- [5] Cai.W.M, Murti.V, and Valliappan.S, 1990, *Slope Stability Analysis Using Fracture Mechanics Approach*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 12, pp 261-281.
- [6] Eberhardt.E, Stead.D, Karami.A and Coggan.J, 2004, *Numerical Analysis of Brittle Fracture Propagation and Step-path Failure in Massive Rock Slopes*, 57th Canadian Geotechnical Conference.
- [7] Chen.C.H and Wang.C.L, 2007, *A Fracture Mechanics Stability Analysis of a Rock Slope with a Tensile Crack*, The electronic journal of geotechnical engineering, Volume 12.
- [8] Fatehi Marji.M and Eghbal.M, 2011, *Simulation the Failure Mechanism of Rock Slopes (Due to Kinked and Secondary Cracks Propagation) by a Higher Order Displacement Discontinuity Method*, Harmonizing rock engineering and environmental conference, China.
- [9] Aliha.M.R.M, Mousavi.M and Ayatollahi.M.R, 2012, *Mixed mode I/II fracture path simulation in a typical jointed rock slope*, The 4th international conference on crack paths, Italy.
- [10] S.L.Crouch, A.M.Starfield, 1983, *Boundary Element Methods in Solid Mechanics with Application in Rock Mechanics and Geological Engineering*, London George Allen and Unwin.
- [11] Erdogan,F., and Sih,G.C. 1963, *On the crack extension in plates under loading and transverse shear*,*J.Basic Eng.*,86,519-527.
- [12] Dobroskok, A. Ghassemi,A and Linkov, A, 2005, *Extended Structural Criterion for Numerical simulation of Crack Propagation and Coalescence under Compressive Loads*, International Journal of Fracture, 133:233-246.
- [13] Nazari.S, Yarahmadi.A.R, Fatehi Marji.M, 2012, *Determination of critical failure surface in fractured rock slopes by using rock fracture mechanics theory*, Thesis of master research project, Mine Exploitation Engineering Department, University of Yazd, Iran.
- [14] H.Guo, N.I.Azizi and R.A.Schmidt, 1990, *Linear elastic tip crack modeling by the displacement discontinuity method*, Eng, Fract. Mech, 933-943.
- [15] Itasca Consulting Group, Inc. 1990, *UDEC (Universal distinct element code)*, Version 2.0, USA.
- [16] Wolfram S. 1999, *The Mathematica Book*, 4th Ed., Wolfram Media - Cambridge University Press.
- [17] Whittaker.B.N, Singh.R.N and Sun.G (1992) *Rock fracture mechanics: Principles, Design and Application*, Developments in Geotechnical Engineering 71, Elsevier, and Amster