

مدلسازی رشد درزه در شیب سنگ های درزه دار

(مطالعه موردی: دیواره بلوک تکتونیکی ۲-۴ معدن چغارت)

زهرا پیرنیا^۱ رقیه عزیزی^۲ علیرضا یاراحمدی بافقی^{۳*} محمد فاتحی مرجی^۴

پذیرش مقاله: ۹۷/۰۶/۳۱

دریافت مقاله: ۹۴/۰۷/۰۵

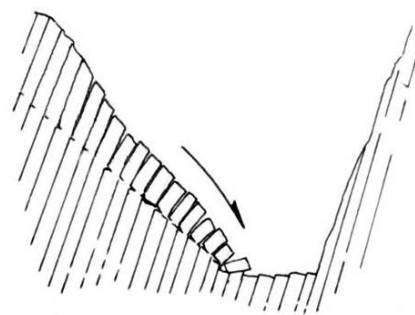
چکیده

سنگ‌ها در طبیعت دارای دسته درزه‌های ناممتد هستند و در تحلیل پایداری سنگ‌ها عموماً درزه‌ها بصورت ممتد بررسی می‌گردند در حالیکه نوک درزه‌های ناممتد محل تمرکز تنش می‌باشد و این تمرکز تنش در اندازه و جهت رشد درزه‌های موجود در سنگ و پایداری سازه‌های ایجاد شده در آن مثل شیب‌های سنگی موثر است. مکانیک شکست سنگ علمی است که امکان رشد ترک و تعیین جهت انتشار آن را مطالعه می‌کند. توسعه این علم امکان استفاده از مدل‌های درزه‌ای واقعی ناممتد در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی و کنترل رفتار مکانیکی ناپیوستگی‌ها بخصوص پیرامون نوک ترک را فراهم می‌کند. با ایجاد شیب‌های سنگی و تغییر ماتریس تنش منطقه‌ای، در نوک درزه‌ها تمرکز تنش بوجود می‌آید. در صورت غلبه این تنش بر پارامترهای مقاومتی درزه رشد می‌کند و با انتشار درزه‌ها بلوک‌های سنگی تشکیل می‌گردند. این مطالعه برآنست با استفاده از اصول مکانیک شکست، رشد و توسعه درزه‌های ناممتد و تصادفی در شیب سنگ‌های درزه‌دار را مدل‌سازی نماید. روش عددی قابل قبول مدل‌سازی مکانیسم شکست درزه‌ها، روش المان مرزی با عنوان روش ناپیوستگی جابجایی (DDM) انتخاب گردید. بعنوان مطالعه موردی مدل هندسی ۳ بعدی ناپیوستگی‌های دیواره بلوک تکتونیکی ۲-۴ معدن چغارت بروش دیسک‌های تصادفی توسط برنامه 3DGM یاراحمدی - گودرزی در محیط نرم‌افزاری ممتیکا ساخته و مقطع ۲ بعدی مورد نظر تهیه گردید. با اعمال شرایط مرزی، تنش‌های برجا، ماتریس سختی، مقدار و جهت انتشار درزه‌ها محاسبه گردید. پارامترهای مکانیکی توده مورد مطالعه بر اساس ویژگی‌های ژئومکانیکی گزارش شده در تحلیل‌های پایداری شیب این دیواره استفاده شد. مش‌بندی ناپیوستگی‌ها با ابعاد ۳ متر و گام انتشار ۰/۲ طول درزه در نظر گرفته شد و مدل برای ۴ مرحله رشد ترک اجرا گردید. مدل هندسی بوجود آمده شامل درزه‌های اولیه و رشد یافته قابل استفاده در نرم‌افزارهایی است که مدل‌های هندسی ناپیوستگی‌ها در آنها پایه اصلی تحلیل بوده ولی قابلیت انتشار ترک را ندارند. پس کد تهیه شده به عنوان مکمل روش‌های تحلیلی مثل گروه‌های کلیدی و عددی مثل روش‌های المان مجزا (نرم افزار UDEC) در تحلیل توده‌سنگ‌های درزه‌دار ناممتد قابل استفاده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شیب سنگی، روش ناپیوستگی جابجایی، انتشار درزه.

۱. مقدمه

ریزش‌ها یکی از اصلی‌ترین ریسک‌های معدنکاری و ایجاد شیب‌های خاکی و سنگی است و در بین آنها ریزش‌های ساختاری و وابستگی شدیدی به سیستم ناپیوستگی‌ها دارد. این بدین معنی است که هندسه دیواره اعم از توپوگرافی، ابعاد، مرزها، عوامل ساختاری و سیستم‌های شبیه‌سازی آن در تحلیل‌های پایداری اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. در اغلب روش‌های تحلیلی و عددی طراحی شیب‌های سنگی، روش‌های شبیه‌سازی ناپیوستگی‌ها ممتد و نامحدودند و گسترش درزه‌ها که از خط اثر آنها بدست می‌آید را مورد توجه قرار نمی‌دهند. لذا ناپیوستگی‌ها بطور کامل یکدیگر را قطع کرده و بلوک‌های تعریف شده، کاملاً قابل تفکیک و شناسایی هستند. این روش‌های شبیه‌سازی علاوه بر افزایش چگالی درزه‌داری، به دلیل عدم توجه به پل‌های سنگی بین درزه‌ها و مقاومت ناشی از آنها تحلیل‌هایی محافظه‌کارانه از پایداری یا عدم پایداری دیواره‌ها ارائه می‌نمایند. از طرفی مکانیزم بعضی از مدل‌های ریزش مثل ریزش واژگونی خمشی^(۱) (شکل ۱) به گونه‌ای است که بدون شکستن پشت بلوک‌ها و انتشار آنها بلوک‌ها تشکیل نشده و ریزش حتی از منظر هندسی نیز بوقوع نمی‌پیوندد.

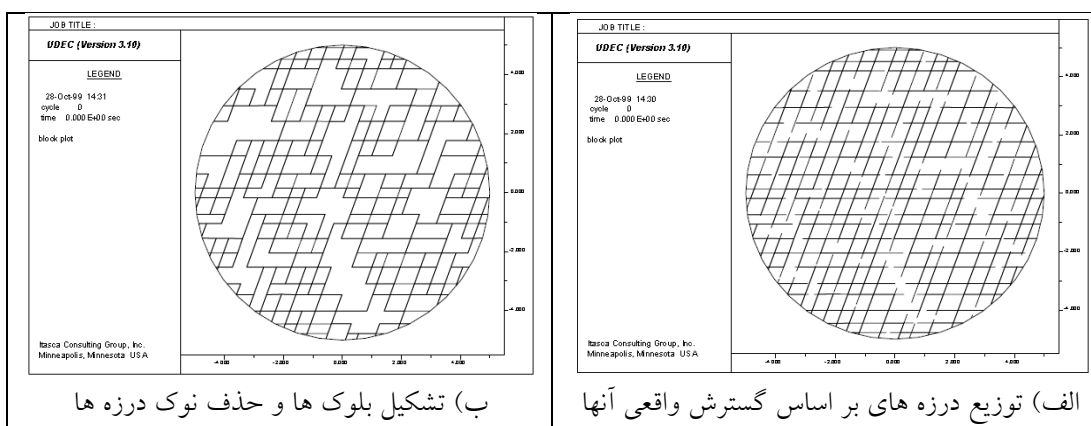


شکل ۱. ریزش واژگونی - خمشی

در میان روش‌های عددی تحلیل پایداری، روش‌های المان مجزا توده‌سنگ را به صورت مجموعه‌ی بلوکی در نظر می‌گیرد که وجود درزه‌ها به عنوان شرایط مرزی بلوک‌ها، امکان

مدلسازی رفتارهای وابسته به درزه را فراهم می‌آورد. نرم افزار دو بعدی UDEC^۲ که بر اساس روش المان مجزای صریح^۳ عمل می‌نماید، قابلیت تولید دسته درزه‌ها، محاسبه تغییرشکل بلوکی، حرکت سیال در درزه‌ها، تغییر شکل بزرگ مقیاس درزه‌ای و چرخش بین بلوکی و بعلاوه پیاده‌سازی مدل‌های متنوع رفتاری درزه و ماده‌سنگ را فراهم می‌آورد. اما مشکل اساسی در این نرم افزار حذف ناپیوستگی‌هایی است که یا به ناپیوستگی دیگری برخورد نکرده و یا تنها در یک نقطه برخورد کرده باشند (شکل ۲). راهکار اساسی در خصوص این مشکل مجهز نمودن نرم افزارهای المان مجزا به مکانیک شکست سنگ است تا علاوه بر مدل‌سازی جابجایی‌ها، همزمان امکان انتشار درزه‌های ناممتد بوجود آید.

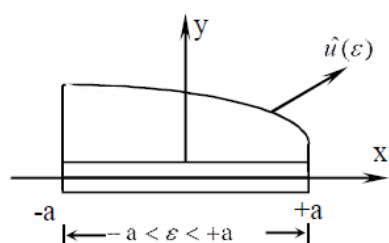
اغلب روش‌های عددی که در مکانیک محیط‌های پیوسته استفاده می‌شوند، بر پایه این اصل استوارند که می‌توان معادلات و روابطی را که به صورت دقیق رفتار یک المان دیفرانسیلی کوچک از یک جسم را توصیف می‌کنند، از فیزیک مسئله استخراج نمود. سپس با تقسیم کل جسم به تعداد زیادی از این المان‌های کوچک و استفاده از روابط مکمل و یا فرآیند تلفیق این المان‌ها در کنار هم، می‌توان برای مقادیر متغیرها مانند تنش‌ها، تغییرشکل‌ها و جابجایی‌ها در هر نقطه از جسم یک پیش‌بینی دقیق و معقولانه به دست آورد. (موسوی و دیگران، ۱۳۹۲). روش المان مرزی غیرمستقیم، بیان ریاضی مفاهیم کلاسیک نظری است. تفاوت بین فرمولهای ریاضی و فیزیکی در روش المان مرزی میتواند توسط حل مسئله مقدار مرزی مشخص شود. در رویکرد فیزیکی، ابتدا شرایط مرزی برای نقاط منفرد تعیین شده، سپس پارامترهای مرزی در عباراتی از راه‌حل‌های مقدار مرزی در نقاط منفرد محاسبه میشود. چون پارامترهای مرزی به صورت غیرمستقیم در این روش محاسبه میشوند، این فرآیند با عنوان روش المان مرزی غیرمستقیم شناخته شده است. (نظری ۱۳۹۳)



ب) تشکیل بلوک ها و حذف نوک درزه ها

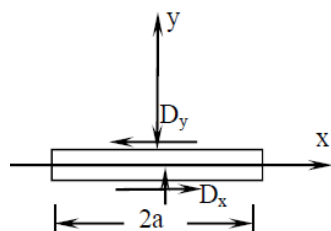
الف) توزیع درزه های بر اساس گسترش واقعی آنها

شکل ۲. شبیه سازی شبکه ناپیوستگی ها در نرم افزار UDEC (Itasca, 2000)



شکل ۳. المان ناپیوستگی - جابجایی به همراه توزیع

(Marji et al. 2006) $u(\epsilon)$



شکل ۴. المان ثابت در روش ناپیوستگی جابجایی

(Marji et al. 2006)

در عبور از یک طرف سطح به طرف دیگر مقدار ثابتی را متحمل می شود. و مقادیر ثابت تغییر شکل D_x و D_y به صورت رابطه ۱ خواهد بود: (Marji et al. 2006)

$$D_i = u_i(x_1, 0_-) - u_i(x_1, 0_+) \quad (1)$$

$$D_x = u_x(x_1, 0_-) - u_x(x_1, 0_+)$$

$$D_y = u_y(x_1, 0_-) - u_y(x_1, 0_+)$$

روش ناپیوستگی - جابجایی^۲ (DDM) که از زیر شاخه های روش عددی المان مرزی و المان مجزاست، یکی از متداولترین روش ها در مسائل مربوط به انتشار ترک در مکانیک شکست سنگ می باشد... اخیرا برای افزایش دقت محاسبات، روش ناپیوستگی - جابجایی با المان مرتبه بالا مورد استفاده قرار گرفته است (Marji et al. 2006). برای پیش بینی مسیر انتشار ترک در این روش معیار تنش ماکزیمم مماسی بکاررفته است.

۲. روش ناپیوستگی - جابجایی (DDM) مرتبه بالا

المان نشان داده شده در شکل (۳) با طول $2a$ در امتداد محور x نمایشگر توزیع کلی ناپیوستگی - جابجایی $u(\epsilon)$ است. اگر u_x و u_y اجزای ناپیوستگی کلی $u(\epsilon)$ باشند. فرض ثابت بودن آنها و همچنین برابری آنها با مقادیر D_x و D_y در بازه $(-a, +a)$ که در شکل (۳) نشان داده شده است. دو سطح المان ناپیوستگی - جابجایی در امتداد محور y به دو بخش مثبت و منفی تقسیم می گردند (Marji et al. 2006).

$$\sigma_{xx} = 2\mu[2f_{,xy} + yf_{,xyy}] + 2\mu[g_{,yy} + yg_{,yyy}] \quad (۴)$$

$$\sigma_{yy} = 2\mu[-yf_{,xyy}] + 2\mu[g_{,yy} - yg_{,yyy}]$$

$$\sigma_{xy} = 2\mu[2f_{,yy} + yf_{,yyy}] + 2\mu[-yg_{,xyy}]$$

در این روابط μ مدول برشی، $f(x,y)$ ، $g(x,y)$ و بقیه توابع مشابه مشتقات جزئی توابع سازگار $f(x,y)$ و $g(x,y)$ نسبت به X و y می‌باشند. که این توابع می‌توانند به شکل رابطه ۵ محاسبه گردند:

$$f(x,y) = \frac{1}{4\pi(1-\nu)} \sum_{j=1}^3 D_x^j F_j(I_0, I_1, I_2) \quad (۵)$$

$$g(x,y) = \frac{-1}{4\pi(1-\nu)} \sum_{j=1}^3 D_y^j F_j(I_0, I_1, I_2)$$

تابع F به صورت رابطه ۶ تعریف می‌گردد

$$F_j(I_0, I_1, I_2) = \int N_j(\varepsilon) \ln[(x-\varepsilon) + y^2]^{1/2} d\varepsilon, \quad j = 1, 2, 3 \quad (۶)$$

انتگرال‌های I_0, I_1, I_2 به شکل روابط ۷، ۸ و ۹ قابل محاسبه هستند (Behnia et al 2011):

$$I_0(x,y) = \int_{-a}^a \ln[(x-\varepsilon)^2 + y^2]^{1/2} d\varepsilon \quad (۷)$$

$$= y(\theta_1 - \theta_2) - (x-a) \ln(r_1) + (x+a) \ln(r_2) - 2a$$

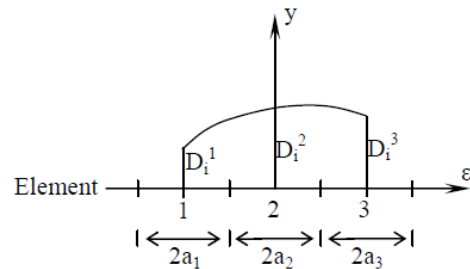
$$I_1(x,y) = \int_{-a}^a \varepsilon \ln[(x-\varepsilon)^2 + y^2]^{1/2} d\varepsilon \quad (۸)$$

$$= x y(\theta_1 - \theta_2) + 0.5(y^2 - x^2) - a^2 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) - ax$$

قرارداد علامت D_x و D_y در شکل (ع) نشان داده شده است

۳. فرمول بندی المان کوادراتیک

محاسبات المان کوادراتیک بر اساس انتگرالگیری تحلیلی از توابع شکل و با بر هم نهی کوادراتیک بر روی المان‌های خطی ناپیوستگی جابجایی صورت می‌گیرد. روابط مربوط به محاسبات به شکل رابطه ۲ می‌باشد (Behnia et al 2011).



شکل ۵. بر هم نهی مرتبه دوم برای یک المان ناپیوستگی -

جابجایی مرتبه بالا (Behnia et al 2011)

$$D_i(\varepsilon) = N_1(\varepsilon)D_i^1 + N_2(\varepsilon)D_i^2 + N_3(\varepsilon)D_i^3 \quad (۹)$$

$$i = x, y$$

$$N_1(\varepsilon) = \frac{\varepsilon(\varepsilon - 2a_1)}{8a_1^2}$$

$$N_2(\varepsilon) = \frac{-\varepsilon^2(\varepsilon - 2a_1^2)}{4a_1^2}$$

$$N_3(\varepsilon) = \frac{\varepsilon(\varepsilon + 2a_1)}{8a_1^2}$$

که در آن D_i^1, D_i^2, D_i^3 و D_i^3 گره‌های کوادراتیک در یک المان ناپیوستگی - جابجایی می‌باشند. توابع شکل بر هم نهی کوادراتیک دارند و در آن‌ها $a_2 = a_2 = a_3$ است. تغییر شکل‌ها و تنش‌های ناشی از جابجایی افقی و عمودی المان ثابت ناپیوستگی - جابجایی در یک محیط بی نهایت در امتداد محور X بر حسب توابع سازگار $f(x,y)$ و $g(x,y)$ به صورت روابط ۳ و ۴ هستند (Behnia et al 2011):

$$u_x = D_x[2(1-\nu)f_{,y} - yf_{,xx}] + D_y[-(1-2\nu)g_{,x} - yg_{,xy}] \quad (۱۰)$$

$$u_y = D_x[2(1-\nu)f_{,x} - yf_{,xy}] + D_y[-(1-2\nu)g_{,y} - yg_{,yy}]$$

شدت تنش می توان تنش موضعی در نوک ترک را به تنش دوردست مرتبط کرد.

با استفاده از روش ناپیوستگی جابجایی، یافتن فاکتورهای شدت تنش مود یک و دو (K_{II} و K_I) توسط روابط ۱۲ و ۱۳ امکان پذیر است (Bieniawski, 1967).

$$K_I = \frac{\mu}{4(1-\nu)} \left(\frac{2\pi}{a}\right)^{\frac{1}{2}} D_y(a) \quad (12)$$

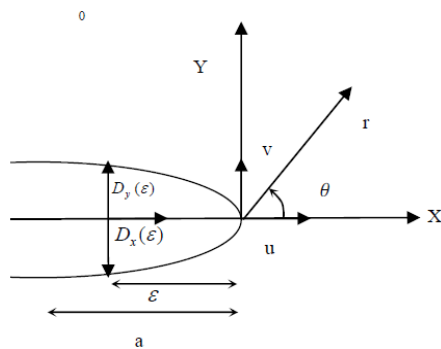
$$K_{II} = \frac{\mu}{4(1-\nu)} \left(\frac{2\pi}{a}\right)^{\frac{1}{2}} D_x(a) \quad (13)$$

توابع پتانسیل و انتگرال مشترک آنها برای المان نوک ترک (شکل ۶) به صورت روابط ۱۴، ۱۵ و ۱۶ محاسبه می-گردد (Behnia et al 2011):

$$f_c(x, y) = \frac{-1}{4\pi(1-\nu)} \int_{-a}^a \frac{D_x(a)}{a^{\frac{1}{2}}} \varepsilon^{\frac{1}{2}} \ln[(x - \varepsilon)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}} d\varepsilon \quad (14)$$

$$g_c(x, y) = \frac{-1}{4\pi(1-\nu)} \int_{-a}^a \frac{D_y(a)}{a^{\frac{1}{2}}} \varepsilon^{\frac{1}{2}} \ln[(x - \varepsilon)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}} d\varepsilon \quad (15)$$

$$I_c = \int_0^{2a} \varepsilon^{\frac{1}{2}} \ln[(x - \varepsilon)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}} d\varepsilon \quad (16)$$



شکل ۶. المان نوک ترک استفاده شده در روش عددی

ناپیوستگی جابجایی (Behnia et al. 2011)

۴. معیارهای رشد ترک

بررسی ها نشان می دهد که یکی از نواقص مکانیک شکست، فقدان یک ملاک شکست جامع می باشد. معمولاً فرض می کنند که رشد ترک هنگامی رخ می دهد که مقدار تنش در نوک ترک از یک حد بحرانی معین تجاوز کند. برخی محققان کرنش و یا تنش متوسط را در یک فاصله ای از نوک ترک،

$$I_2(x, y) = \int_{-a}^a \varepsilon^2 \ln[(x - \varepsilon)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}} d\varepsilon \quad (9)$$

$$= \frac{y}{3}(3x^2 - y^2)(\theta_1 - \theta_2) + \frac{1}{3}(3xy^2 - x^3 + a^3) \ln(r_1) - \frac{1}{3}(3xy^2 - x^3 - a^3) \ln(r_2) - \frac{2a}{3}(x^2 - y^2 + \frac{a^2}{3})$$

عبارات θ_1 و θ_2 و r_1 و r_2 به شکل روابط ۱۰ و ۱۱ معرفی می-شوند:

$$\theta_1 = \arccyan\left(\frac{y}{x-a}\right) \quad (10)$$

$$\theta_2 = \arccyan\left(\frac{y}{x+a}\right)$$

$$r_1 = [(x-a)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

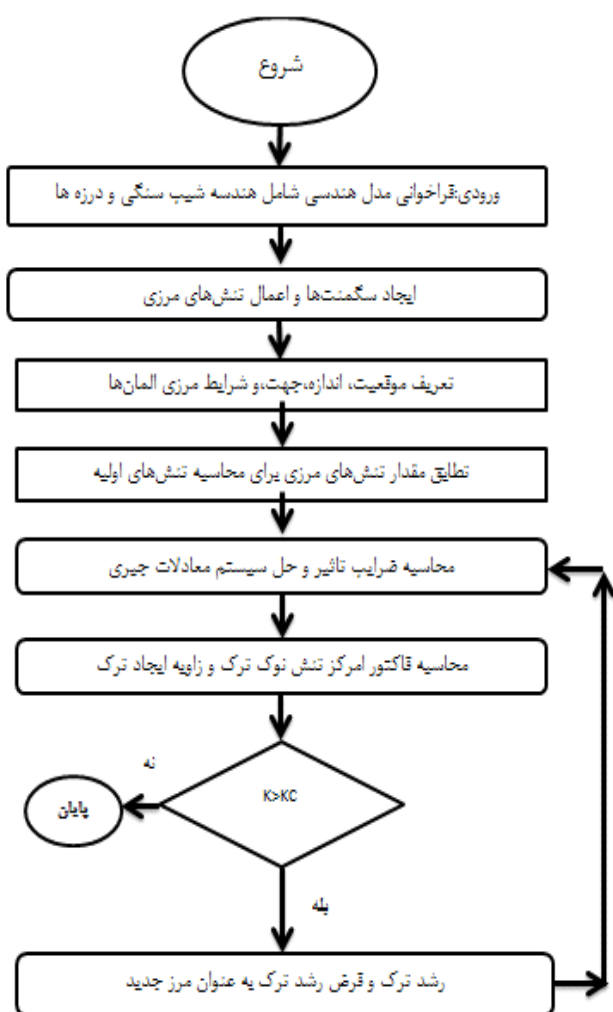
$$r_2 = [(x+a)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}}$$

طی دو دهه اخیر کاربرد مکانیک شکست در مکانیک سنگ مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. مکانیسم شکست در اغلب سنگ ها، ترد می باشد. شکست ترد که به رشد ناپایدار و سریع ترک اطلاق می شود، معمولاً در مواردی اتفاق می افتد که جسم دارای میزان نرمی پایینی (مانند سنگ) باشد و به همین علت تغییر شکل پلاستیک ناچیزی در اطراف نوک ترک بوجود می آید که می توان از آن چشم پوشی کرد، بنابراین مفاهیم مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM)^۵ برای آن قابل استفاده خواهد بود. (حسن پور، ۱۳۸۶)

(مهم ترین اصل مکانیک شکست الاستیک این است که توزیع تنش نزدیک یک ترک نوک تیز بر حسب یک کمیت به نام فاکتور شدت تنش K ، با واحد $(\text{Mpa}\sqrt{\text{m}})$ قابل بیان است که به هر دو عامل، تنش وارده به قطعه در دوردست (σ) و هندسه ی قطعه (شامل طول ترک)، بستگی دارد. توسط فاکتور

⁵Linear Elastic Fracture Mechanics

- (۱) تنش نرمال σ_n و تنش برشی σ_s مشخص باشد.
- (۲) جابجایی نرمال u_n و جابجایی برشی u_s مشخص باشد.
- (۳) تنش نرمال σ_n و جابجایی برشی u_s مشخص باشد.
- (۴) تنش برشی σ_s و جابجایی نرمال u_n مشخص باشد.



شکل ۷. فلوچارت برنامه SDDM

برای اعمال تنش و جابجایی به مرزها حالت‌های ۱ و ۳ مطابق شکل (۸) در نظر گرفته میشود. با اعمال حالت اول تنش‌های

معیار شکست قرار می‌دهند. معیارهای کلاسیک شکست ترکیبی، با فرض اینکه توسعه ترک با پارامترهایی مانند تنش، کرنش یا انرژی کنترل می‌شود، شکل گرفته است. حالت ترکیبی فاکتور شدت تنش به صورت عددی محاسبه می‌شود. چندین معیار شکست ترکیبی برای مطالعه گسترش شکستگی و یافتن جهت گسترش آن مورد استفاده قرار گرفته است. در مکانیک شکست کاربرد سه معیار شکست حداکثر تنش مماسی، حداکثر نرخ رهایی انرژی کرنشی و حداقل دانسیته انرژی کرنشی رایج است. با توجه به شکننده بودن سنگها برای یافتن چقرمگی شکست ۶ (KIC) بیشتر از معیار تنش مماسی ماکزیمم استفاده می‌شود. چقرمگی شکست عبارت از مقاومت سنگ در برابر رشد ترک است (Whittaker, 1992).

بر اساس این معیار، رشد نوک ترک زمانی رخ میدهد که:

$$\cos \frac{\theta_0}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \frac{\theta_0}{2} \right] = K_{IC} \quad (17)$$

θ_0 زاویه رشد ترک است که معادل رابطه‌ی ۱۸ است. (Whittaker, 1992)

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{1}{4} \frac{K_I}{K_{II}} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}} \right)^2 + 8} \right) \quad (18)$$

۵. اعمال تنش‌های اولیه و ایجاد شرایط مرزی شیب سنگ در کد SDDM^۷

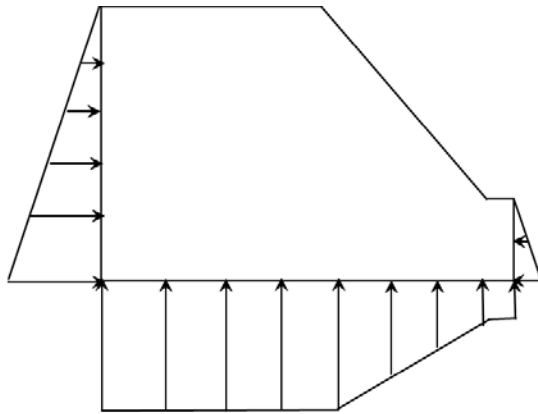
کد SDDM در محیط متماتیکا نوشته شده است و شامل بخش‌های مختلفی از جمله سگمنت بندی درزه‌ها و دیواره‌ها، بررسی امکان رشد درزه‌ها و تعیین جهت این رشد می‌باشد. الگوریتم کلی برنامه در شکل (۷) آمده است. پیش از آنکه به شرح شرایط تنش و جابجایی در یک شیب سنگی پرداخته شود ذکر این نکته ضروری است که در روش جابجایی ناپیوستگی چهار حالت با عنوان کد (KODE) از تنش و جابجایی مورد انتظار است.

^۶Fracture toughness

^۷Slope Displacement Discontinuity Method

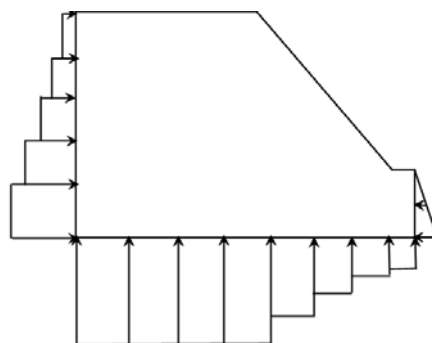
شکل ۹. هندسه مدل ساده

شماتیک تنشهای وارد بر مدل در واقعیت به صورت شکل (۱۰) است.



شکل ۱۰. شماتیک تنشهای وارد بر مدل

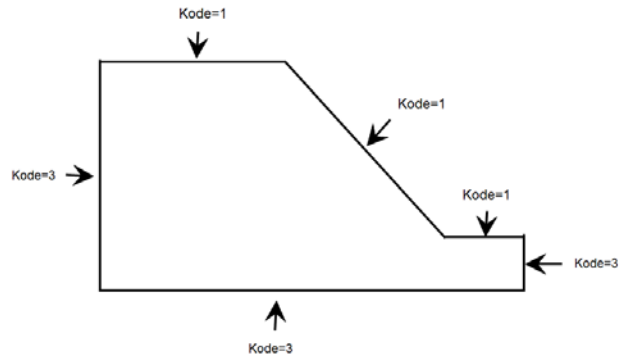
جهت اعمال تنش ها در مدل مطابق شکل (۱۱) دیواره سمت چپ به ۵ قسمت و دیواره سمت راست ۱ قسمت و کف مدل به ۵ قسمت تقسیم شده است. هر چه تعداد تقسیمات بیشتر باشد نتایج دقیق تری حاصل می گردد.



شکل ۱۱. تنشهای وارد بر مدل در برنامه

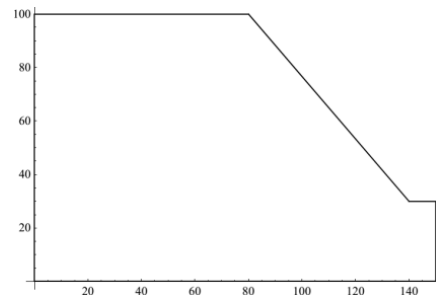
نزدیک سطح آزاد به هم نزدیک میشوند و دورتر از این محدوده تقریباً موازیند. مقدار این تنشها با وزن روباره همخوانی دارد.

برشی و نرمال سطوح آزاد صفر در نظر گرفته شده است و با اعمال حالت سوم تنش نرمال σ_h با استفاده از رابطه $\sigma_h = k\sigma_v$ به دیواره ی سمت راست و چپ و تنش نرمال σ_v با توجه به ارتفاع بار وارده به کف مدل و جابجایی برشی صفر به مرزها اعمال می شود. k نسبت تنش افقی به قائم در منطقه است.

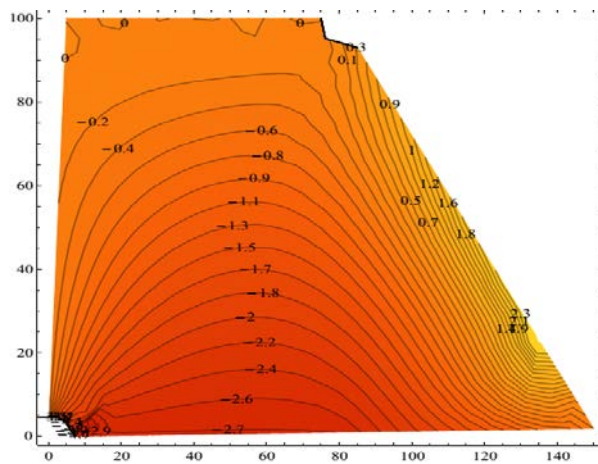


شکل ۸. کدهای تنش و جابجایی مربوط به دیواره ها و سطوح مدل

بعنوان مثال مدل ساده ای با شرایط هندسی مطابق شکل (۹) در نظر گرفته می شود.



با در نظر گرفتن نسبت ۱/۲۰ بین طول هر سگمنت و طول کلی دیواره ی قائم سمت چپ در شکل (۱۲)، شرایط کتورهای تنش رضایت بخش بنظر می رسد. کتورها در



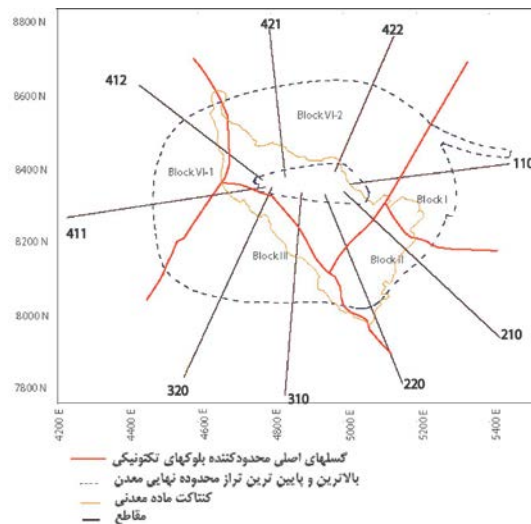
شکل ۱۲. کنتورهای تنش در شیب سنگی با اعمال تنش‌های اولیه

تکتونیکی و موقعیت مقاطع شعاعی مورد تحلیل پایداری در شکل (۱۳) آمده است.

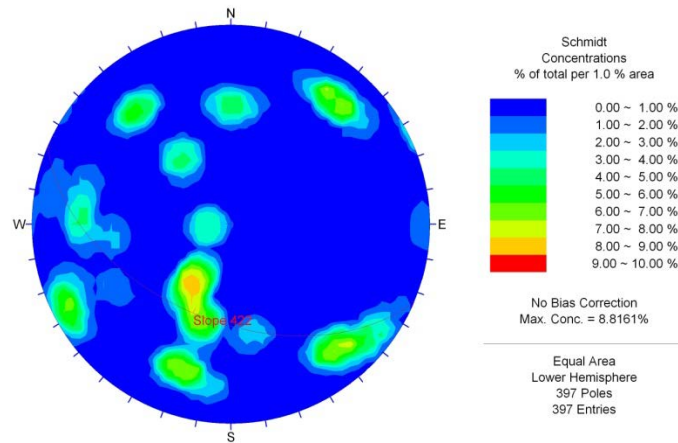
بر اساس درزه نگاری صورت گرفته، مقطع ۴۲۲ دیواره شمالی معدن دارای احتمال ریزش واژگونی - بلوکیاست. شکل های (۱۴) و (۱۵) وضعیت دسته درزه های منطقه را نسبت به دیواره مورد مطالعه نمایش می دهد. بر اساس شکل دسته درزه ۲ و به کمک دسته درزه های ۴ و ۵ این قابلیت را ایجاد می کنند.

۶. مدلسازی دیواره ی شمالی معدن چغارت با فرض درزه های ناممتد (محدود)

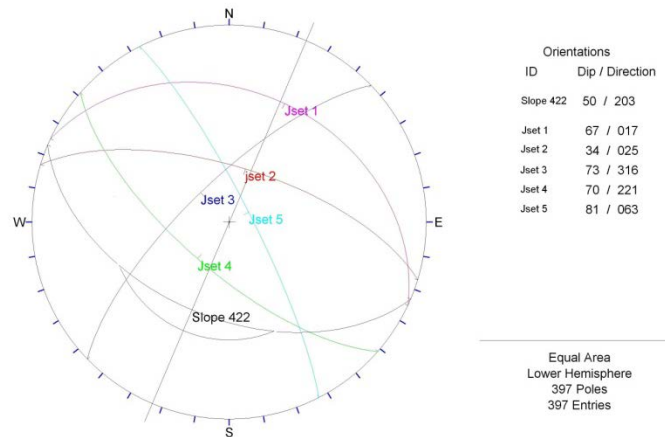
معدن سنگ آهن چغارت در پهنه دشت بافق، با طول جغرافیایی ۵۵°۲۸' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱°۴۳' شمالی قرار گرفته است بطوریکه ارتفاع اولیه آناز سطح دریا ۱۲۸۶ متر بود. محدوده نهایی معدن چغارت، گسل ها، بلوک های



شکل ۱۳. محدوده نهایی معدن چغارت، گسل ها، بلوک های تکتونیکی و مقاطع شعاعی مورد تحلیل پایداری (یاراحمدی و همکاران ، ۱۳۸۴)



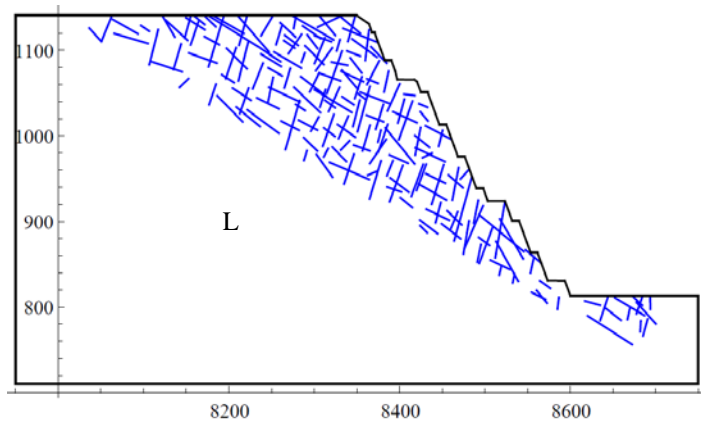
شکل ۱۴. نمایش وضعیت تمرکز درزه‌های دیواره شمالی معدن و موقعیت مقطع ۴۲۲



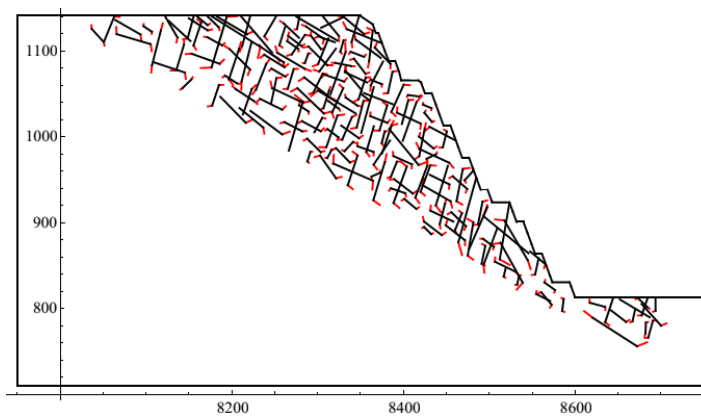
شکل ۱۵. نمایش وضعیت دسته درزه‌های دیواره شمالی معدن و موقعیت مقطع ۴۲۲

موثر دیواره (منطقه L) بدلیل عدم تاثیر در ناپایداری، حذف گردید. با اجرای کد SDDM و پس از چهار مرحله انتشار درزه‌ها هندسه‌ی نهایی شیب سنگی شکل (۱۶) بدست آمد. در شرایطی که ۰/۱ طول درزه به عنوان ناحیه نوک ترک و گام انتشار در هر مرحله ۰/۲ طول درزه است. برای اعمال تنش متناسب با تنش واقعی، هر یک از دیواره‌ها به المانهایی به طول ۱۰ متر تقسیم‌بندی شدند. وزن مخصوص ۲/۷۴ تن بر متر مکعب و چقرمگی برشی بر اساس مطالعات صورت گرفته در منطقه ۱۴/۸۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. رشد درزه‌ها طبق قوانین مکانیک شکست منتج به یافتن هندسه‌ای جدید از ناپوستگی‌ها می‌گردد. (اشکال ۱۷ تا ۲۰)

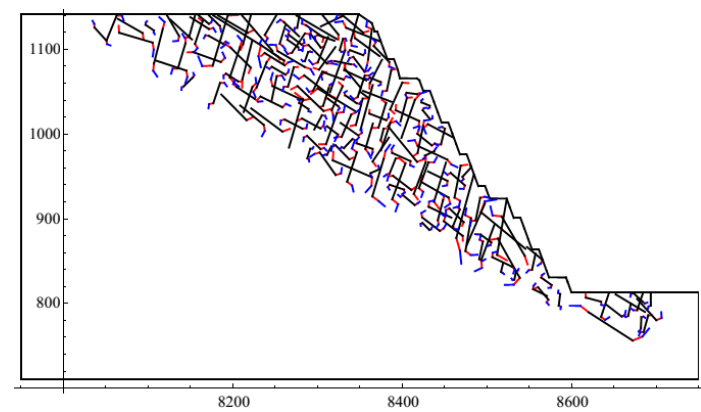
بر اساس برداشت صورت گرفته از منطقه، ویژگی‌های آماری هندسی ناپوستگی‌ها برای بلوک تکتونیکی ۲-۴ استخراج گردید. روش سیستم دیسک‌های تصادفی جهت مدل سازی هندسی انتخاب تا ناپوستگی‌ها ناممتد در نظر گرفته شوند و امکان مدل سازی واقعی تری نسبت به روش‌های نامحدود بوجود آید. از برنامه 3DGM تهیه شده توسط یاراحمدی - گودرزی (گودرزی، ۱۳۹۲) برای مدل سه بعدی و نهایتاً تهیه مقطع ۲ بعدی (شکل ۱۶)) استفاده شد. یکی از مشکلات برنامه‌تهیه شده جهت مدل سازی انتشار ترک در شیب‌های سنگی (کد SDDM) با درزه‌های ناممتد سرعت محاسبات استلذا جهت افزایش سرعت درزه‌های پایین تر از محدوده



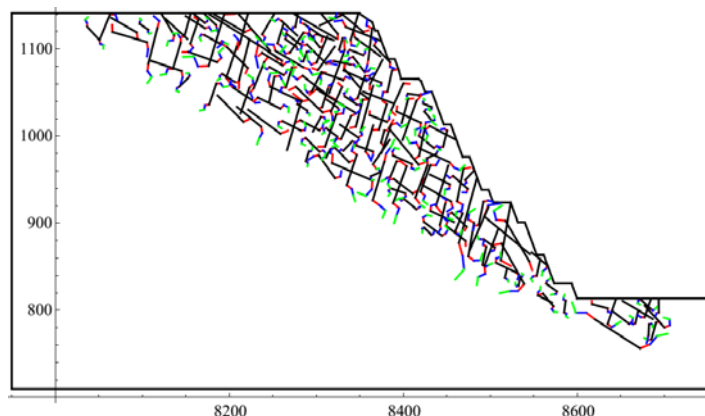
شکل ۱۶. هندسه‌ی ۲ بعدی اولیه مقطع ۴۲۲ با درزه های ناممتد



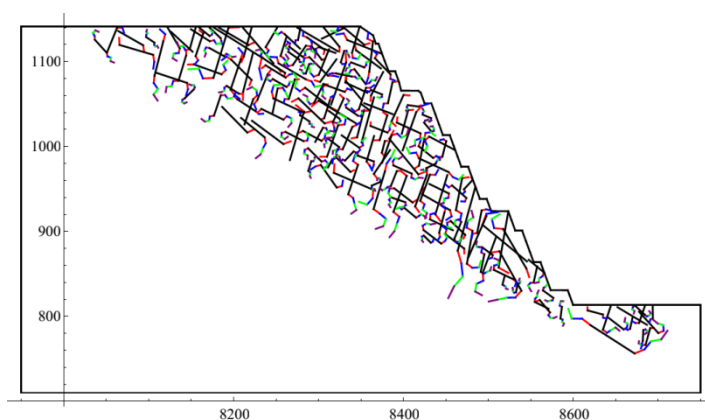
شکل ۱۷. هندسه‌ی شیب سنگ پس از یک مرحله رشد درزه



شکل ۱۸. هندسه‌ی شیب سنگ پس از دو مرحله رشد درزه



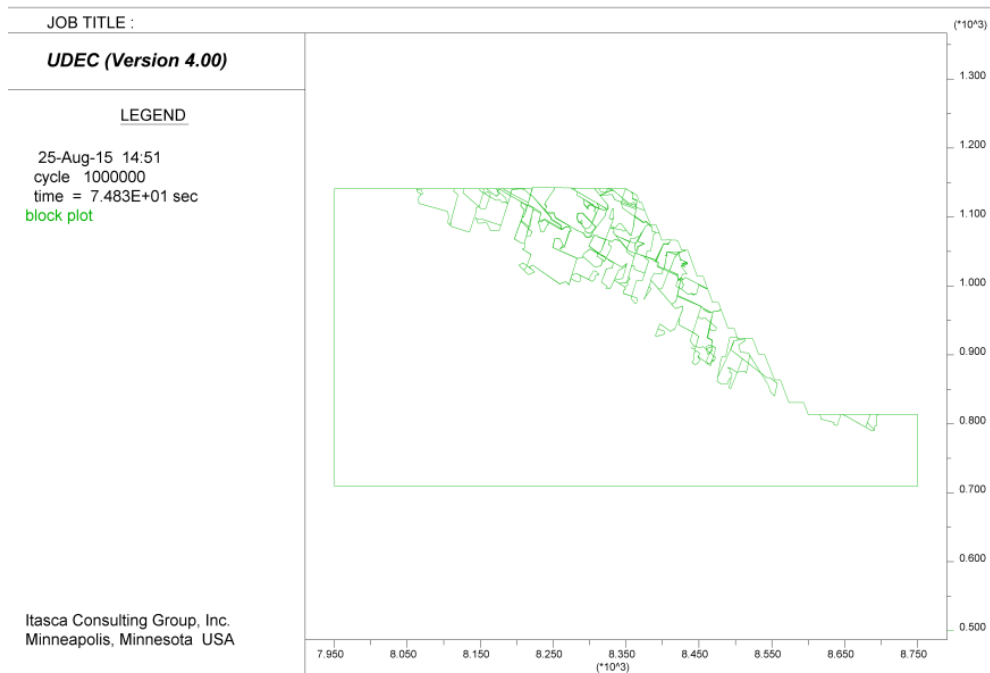
شکل ۱۹. هندسه‌ی شیب سنگ پس از سه مرحله رشد درزه



شکل ۲۰. هندسه‌ی شیب سنگ پس از چهار مرحله رشد درزه

جواب حاصل دقیق‌تر خواهد بود. از طرفی وجود درزه‌ها متقاطع امکان خطا را افزایش می‌دهد. مدل هندسی ایجاد شده جهت تحلیل پایداری با نرم افزار UDEC وارد شد و خروجی شکل (۲۱) حاصل شد و قابلیت حرکت بلوک‌ها بوجود آمد در صورتی که مدل هندسی اولیه در این نرم افزار امکان تشکیل بلوک‌ها را نیز به ما نمی‌داد.

بدین ترتیب براساس برنامه تهیه شده در محیط نرم افزاری متمتیکا (کد SDDM) قابلیت مدل سازی رشد ترک در شیب سنگ‌های درزه‌دار بوجود آمد. از آنجا که در این مدل تعداد زیادی درزه وجود دارد، ماتریس ایجاد شده در برنامه بسیار بزرگ است و سیستم‌های عادی توانایی حل آنرا ندارند لذا درزه‌ها به سگمنت‌هایی به طول کمتر از ۵ متر تقسیم شدند. لازم به ذکر است هر چه طول این سگمنت‌ها کمتر باشد



شکل ۲۱. نمایش درزه های اولیه و رشد یافته در نرم افزار یودک

۷. نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده از اصول مکانیک شکست، رشد و توسعه درزه های ناممتد و تصادفی در شیب سنگ های درزه دار مدل سازی شد. بدین منظور از روش عددی المان مرزی به نام روش ناپیوستگی جابجایی (DDM) مرتبه بالا استفاده گردید. علاوه بر مدل هندسی ناپیوستگی ها، مدل مکانیکی توسعه درزه نیز در محیط نرم افزاری متمتیکا ایجاد و تنش-های اعمالی بر مرزها متأثر از وزن شیب سنگی محاسبه گردید. نتیجه مدل سازی، کد کامپیوتری SDDM قابل کاربرد برای شیب سنگ های درزه دار است. مدل تولید شده برای

شبیه سازی توسعه درزه در مراحل بالا نیاز به سیستم های قوی تری دارد و با کامپیوترهای معمولی امکان اجرای برنامه فوق وجود ندارد. این مشکل وقتی شدت می گیرد که برای افزایش دقت و کاهش حوزه تاثیر درزه ها بر همدیگر، نیاز به المان بندی های کوچکتری است. مسئله دیگر در این مدل تاثیر درزه های متقاطع است که باعث خطا در جهت توسعه درزه می شوند.

در نهایت با این روش می توان قابلیت تحلیل شیب سنگ های با درزه های ناممتد را در نرم افزارهایی مانند یودک که تحلیل در آنها مستلزم به هم پیوستگی درزه ها است را بوجود آورد.

منابع

- حسن پور، ر.، چوپانی، ن.، ۱۳۸۶. "اندازه گیری چقرمگی شکست سنگ و بررسی خصوصیات شکست آن تحت شرایط بارگذاری مرکب با استفاده از روشهای عددی و آزمایشگاهی"، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- گودرزی، ه.، ۱۳۹۲. "مدلسازی هندسی سه بعدی دیوار شمالی معدن چغارت به روش دیسک های تصادفی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بافق.

- موسوی ، س.ا.، فاتحی مرجی، م.، لازمی، ح.ع.، ۱۳۹۲. " محاسبه ی تنش ها و جابجایی های اطراف تونل های دایره ای به روش عددی المان مرزی غیر مستقیم " اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک.
- نظری، س.، یاراحمدی بافقی، ع.، فاتحی مرجی، م.، ۱۳۹۳. " مدل سازی عددی انتشار ترک در شیب سنگ های درزه دار به روش ناپیوستگی جابجایی "، نشریه علمی پژوهشی "مهندسی معدن".
- یاراحمدی بافقی، ع.ر.، ۱۳۸۴. "تعیین قابلیت اعتماد دیوارههای نهایی معادن سطحی با مطالعه موردی روی دیواره های معدن سنگ آهن چغارت"، طرح پژوهشی، مرکز تحقیقات مواد معدنی ایران، یزد.
- Behnia, M., Goshtasbi, K., FatehiMarji, M., Golshani, A.A., 2011. On the crack propagation modeling of hydraulic fracturing by a hybridized displacement discontinuity/boundary collocation method. *Journal of Mining & Environment*, 2: p.p.1-16.
- Bieniawski, Z. T., 1967. Mechanics of brittle fracture of rock. Part I, II and III. *Int. J. RockMech. Min.Sci.* 4: 3p.95-4/
- Itasca. 2000. UDEC User's Guide (Version 3.1). Minneapolis:Itasca Consulting Group Inc.
- Marji, M. F., Hosseini_Nasab, H. Kohsary, A.H., 2006. On the uses of special crack tip elements innumerical rock fracture mechanics. *Int. J. Solids andStruct*, 43: 1669- 1692.
- Whittaker, N., Singh, R.N., Sun, G.,1992. *Rock fracture mechanics: principles, design and applications*, Elsevier, New York.