

## مدلسازی اثر کندشوندگی تیغه های برش TBM در هنگام نفوذ سنگ با استفاده از روش المان مرزی

محمد فاتحی<sup>۱</sup>؛ هادی حائری<sup>۲</sup>؛ کوروش شهریار<sup>۳</sup>؛ حمید خان باواپور<sup>۴</sup>

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

۲-دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، hadihaeri@yahoo.com

۳-استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، k.shahriar@aut.ac.ir

۴-کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

### چکیده

دستیابی به درون زمین، شامل مراحل است که بی شک مرحله نفوذ یکی از ابتدایی ترین و مهم ترین آنهاست. وارد شدن تیغه های دیسکی TBM در سنگ و ایجاد خرده هایی از سنگ در ابعاد کوچک و بزرگ و نیز ایجاد ترک های داخلی در آن به عنوان فرآیند نفوذ شناخته شده است. در این تحقیق از علم مکانیک شکست خطی سنگ و معیار شکست تنش کششی ماکزیمم برای بررسی انتشار ترک و امتدادش تحت تیغه های دیسکی استفاده شده است. برای مدل سازی انتشار ترک ها تحت تیغه های برش TBM کند از روش ناپیوستگی جابجایی که زیرمجموعه ای از روش المان مرزی است، استفاده شده است. در مدل سازی انجام شده، به منظور بالا بردن دقت و کاهش مقدار خطا در محاسبه ناپیوستگی جابجایی ها، در تمامی المان های مرزی از المان های مرتبه بالا (المان های کوادراتیک) و برای جلوگیری از خطای ناشی از سینگلاریتی تنش و جابجایی در نزدیکی نوک ترک از سه المان مخصوص نوک ترک، کمک گرفته شده است. از آنجائیکه تیغه های دیسکی در TBM بعد از مدتی فرسایش پیدا می کنند. به همین دلیل تاثیر کندشوندگی بصورت عددی با نتایج آزمایشگاهی تست LCM مقایسه شده است. جهت مدل کندشوندگی از تیغه های صلب - ثابت (CCS با قطر 432mm و ضخامت 80mm)، استفاده شده است. به منظور تولید اتحنا در نوک ترک مدل CCS ۴ المان در نظر گرفته شده، که این اتحنا موجب کاهش راندمان و افزایش انرژی ویژه مورد نیاز می شود.

### کلمات کلیدی

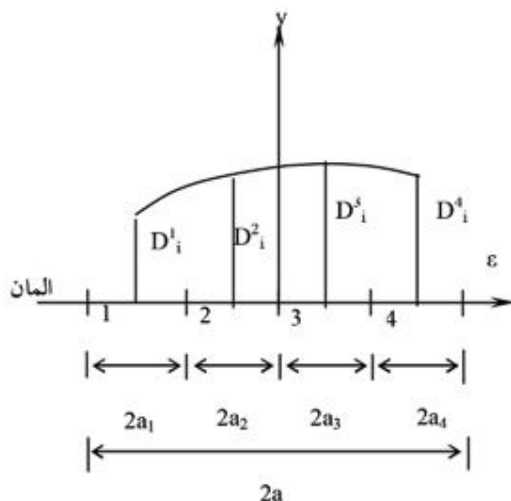
روش جابجایی ناپیوستگی یا مرتبه بالا، الاستیک خطی، المان مرزی، فرسایش

## ۱- مقدمه

یکی از مسائل پیچیده در ژئومکانیک، برش سنگ و نفوذ ابزار مکانیکی در آن است که از دیرباز مورد توجه محققین بوده است. حجم وسیع استفاده از روش های خردایش سنگ با ابزار مکانیکی در معادن و فعالیت های عمرانی مؤید با اهمیت بودن تحقیقات در این زمینه است تا با پیش بینی ها و برآوردهایی که از حل مکانیسم شکست سنگ بدست می آید، بتوان در بهینه نمودن برنامه ریزی ها و طراحی های زمانی و اقتصادی پروژه ها استفاده کرده و ریسک ها را کاهش داد [۱]. اخیراً یک سری مطالعاتی جهت بررسی مکانیزم خردایش سنگ در اثر حفر TBM با استفاده از تکنیک های اصلی شکست به کمک روش های عددی المان محدود و المان مرزی (روش جابجایی ناپیوستگی) صورت گرفته است. صفحه ی برنده یکی از مهمترین پارامترها در ساخت TBM است. پارامترهای مهم در طراحی صفحه برش، تعداد تیغه ها، نیروی فشار، نیروی چرخش، فاصله بین تیغه ها و عمق نفوذ هستند [۲-۳-۴]

روابط تجربی وسیعی از محققین مختلف در این زمینه ارائه شده است که نتایج این روابط با نتایج مدل سازی عددی مقایسه شده است. زمانی که برای تحلیل شکست از روش های عددی استفاده می شود، در کنار نوشتن معادلات سیستم، دو موضوع اصلی وجود دارد که این دو موضوع شامل ارزیابی فاکتورهای شدت تنش (SIF) و شبیه سازی رشد ترک است که اساس آن بر تعیین مدهای تغییر شکل شکست و معیارهای متفاوت رشد ترک است که می توان از هر یک از این معیارها به تنهایی و یا ترکیبی، در روش ناپیوستگی جابجایی استفاده کرد. روش ناپیوستگی جابجایی یکی از روش های المان مرزی غیرمستقیم است [۵-۶-۷]. از این روش برای یافتن اثر تقریبی پارامترهای مؤثر بر نفوذ تیغه های دیسکی TBM در سنگ استفاده شده و به ارائه مقادیر بهینه بعضی از این پارامترهای مؤثر پرداخته است؛ که مطابقت خوبی با نتایج تجربی و تئوری دیگر محققین دارد. مطالعه انتشار ترک در ارتباط با فرآیند برش سنگ پیچیده است بنابراین بطور

وسیع مورد تحقیق و بررسی قرار نگرفته و مکانیزم واقعیش (انتشار ترک) بطور کامل شناخته نشده است. نقطه آغاز ترک و مسیر انتشار آن و نیروهای مورد نیاز را می توان (بطور نسبتاً دقیق) از طریق معیارهای شکست تعیین کرد. بنابراین مکانیزم شکست سنگ، توان بهتر درک کرد. مکانیک شکست سنگ، کاربردهای وسیعی در پروژه های مهندسی ژئوتکنیک، معدن، نفت و عمران (در تکنولوژی شکست هیدرولیکی، خردایش سنگ در فرایند های حفاری و انفجار و هم چنین در کارایی ماشین های حفر تونل و سایر ماشین الات حفاری) دارد. با فرض تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) که در آن ناحیه پلاستیک نزدیک نوک ترک ناچیز است به طوری که می توان آنرا نادیده گرفت [۸-۱۲]: با فرض اینکه شروع ترک و انتشار آنها تابع یکی از سه معیار کلاسیک شکست (یعنی معیار  $G$ ، معیار  $\sigma$  و معیار  $S$ ) است نقطه آغاز شکست، زاویه شروع انتشار و مسیر انتشار ترک را می توان پیش بینی کرد. در این مطالعه، از معیار تنش مماسی ماکزیمم (معیار  $\sigma$ ) که یک معیار کلاسیک مرکب است، استفاده شده است. اردوغان و سی (۱۹۶۳)، از اولین کسانی بودند که گسترش ترک را در بارگذاری صفحه ای مورد بررسی قرار دادند و  $\sigma_0$  (تنش تانژانتی) را در نوک ترک آزمایش کردند [۱۱-۱۴]. در این مدلسازی از روش جابجایی ناپیوستگی که دارای المان های مرتبه بالا است و هم چنین از سه المان در نوک ترک که بطور کامل شرح داده می شود، استفاده شده است. در این روش عددی تنش های نوک ترک و توزیع جابجایی ها می توانند بطور نسبتاً دقیق تعیین شوند که منجر به تعیین دقیق نرخ رها سازی انرژی کرنشی و فاکتورهای شدت تنش می شود. برای اطمینان یافتن از صحت نتایج به دست آمده از این روش عددی، از روش آزمایشگاهی (LCM) که یک مدل توسعه یافته است نیز برای پیش بینی مسیر انتشار ترک استفاده شده است.



شکل ۱: المان های جابجایی ناپیوستگی با مرتبه بالاتر با استفاده از تکنیک منظم مرزی کوپیک [۲۱]

در شکل (۱) از دسته المان های چهارتایی برای حالت کوپیک استفاده شده است. ضمناً طول المان ها در هر دسته المان با هم مساوی در نظر گرفته شده است ( $a_1=a_2=a_3=a_4$ ) [۲۲].

### ۳- المان ویژه نوک ترک

برای افزایش دقت ضروری است که از المان های با مرتبه بالا (المان های کوپیک) برای محاسبه ناپیوستگی در جابجایی ها استفاده شود [۲۱]. در مطالعات قبلی معمولاً از یک یا دو المان ویژه در نوک ترک استفاده شده ولی در این تحقیق از المان های مرتبه ی بالاتری (یعنی سه المان) برای دست یافتن به دقت بالایی برای محاسبه ی جابجایی های ناپیوستگی موجود در نزدیک به انتهای طرفین ترک، استفاده شده است (شکل ۲). برای استفاده از سه المان مخصوص نوک ترک از رابطه زیر استفاده شده است:

$$D_i(\varepsilon) = C_1 \varepsilon^{\frac{1}{2}} + C_2 \varepsilon^{\frac{3}{2}} + C_3 \varepsilon^{\frac{5}{2}} \quad (5)$$

$$D_i(\varepsilon) = [N_{C1}(\varepsilon)]D_i^1(a) + [N_{C2}(\varepsilon)]D_i^2(a) + [N_{C3}(\varepsilon)]D_i^3(a) \quad (6)$$

### ۲- روش ناپیوستگی در جابجایی مرتبه بالاتر

روش ناپیوستگی جابجایی یکی از روش های المان مرزی غیر مستقیم است که در آن تنش ها و جابجایی ها در روی مرز مسئله و در داخل جسم بر حسب ناپیوستگی در جابجایی های محاسبه شده برای هر المان در طول مرز مسئله محاسبه می شوند [۵] - [۶] - [۷] - [۱۹] - [۲۰]. در این مقاله، از المان های ناپیوستگی جابجایی با مرتبه بالای کوپیک (یعنی دارای چهار زیرالمان) جهت دست یافتن به نتایج دقیق تر استفاده شده است. المان فوق بر اساس توابع پتانسیلی  $f(x,y)$  و  $g(x,y)$  برای محاسبه ناپیوستگی در جابجایی ها در طول آن المان استفاده می شود [۲۱].

$$f(x,y) = \frac{-1}{4\pi(1-\nu)} \sum_{j=1}^k D_x^j F_j(I_{j-1}) \quad (1)$$

$$g(x,y) = \frac{-1}{4\pi(1-\nu)} \sum_{j=1}^k D_y^j F_j(I_{j-1})$$

که برای المان های خطی  $k=1,2,3$  برای المان کوادراتیک و  $J=1,2,3,4$  برای المان کوپیک. جابجایی های ناپیوستگی با مرتبه بالاتر  $D_i(\varepsilon)$  را می توان از رابطه زیر بدست آورد.

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

مطابق آنچه را که در شکل ۱ نشان داده شده است و با در نظر گرفتن چهار المان در اهر المان کوپیک، تغییرات جابجایی ناپیوستگی به شکل زیر نوشته می شود [۲۱] - [۲۲].

$$D_i(\varepsilon) = N_1(\varepsilon)D_i^1 + N_2(\varepsilon)D_i^2 + N_3(\varepsilon)D_i^3 + N_4(\varepsilon)D_i^4, \quad i = x, y \quad (3)$$

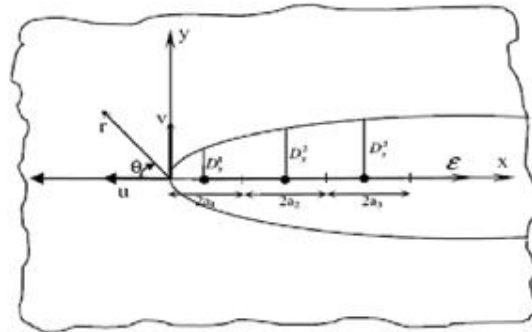
که  $D_i^1, D_i^2, D_i^3, D_i^4$  جابجایی ناپیوستگی گرهی کوپیک و

$$\begin{aligned} N_1(\varepsilon) &= -(3a_1^3 - a_1^2\varepsilon - 3a_1\varepsilon^2 + \varepsilon^3)/(48a_1^3), \\ N_2(\varepsilon) &= (9a_1^3 - 9a_1^2\varepsilon - a_1\varepsilon^2 + \varepsilon^3)/(16a_1^3), \\ N_3(\varepsilon) &= (9a_1^3 + 9a_1^2\varepsilon - a_1\varepsilon^2 - \varepsilon^3)/(16a_1^3), \\ N_4(\varepsilon) &= -(3a_1^3 + a_1^2\varepsilon - 3a_1\varepsilon^2 - \varepsilon^3)/(48a_1^3) \end{aligned} \quad (4)$$



۴- مدل تیغه دیسکی فرسایش یافته

از آنجایی که تیغه های دیسکی در TBM بعد از مدتی در اثر تماس با سنگ فرسایش می یابد، به همین دلیل تاثیر فرسایش بصورت عددی مدل شد. همانطوری که در بالا اشاره شد از تیغه های CCS با قطر 432mm و ضخامت 80mm، جهت مدل فرسودگی استفاده شد. بدین منظور به تعدادی از المان های مختلف و سه المان ویژه نوک ترک و به منظور تولید انحناء در نوک در مدل تیغه های صلب- ثابت CCS، ۴ المان در نظر گرفته شد، که این انحناء موجب کاهش راندمان و افزایش میزان انرژی ویژه مصرفی مورد نیاز می شود. در شکل (۳) مسیره های انتشار برای ترک های CR1، CR2، CR3، CR4 نشان داده شده است که معرف عمل شکستشان هستند. در این شکل مسیر انتشار ترک برای  $S/Pd=10$  و زاویه لبه ۶۰ درجه، عمق نفوذ ترک  $Pd=6$  mm و افزایش طول  $\Delta b=4$  mm (۸ تکرار) نشان داده شده است. ترک ها با یک زاویه ای نسبت به ترک اولیه انتشار پیدا می کنند و پس از چندین (۸) تکرار در محدوده ای بین تیغه ها به هم می رسند.



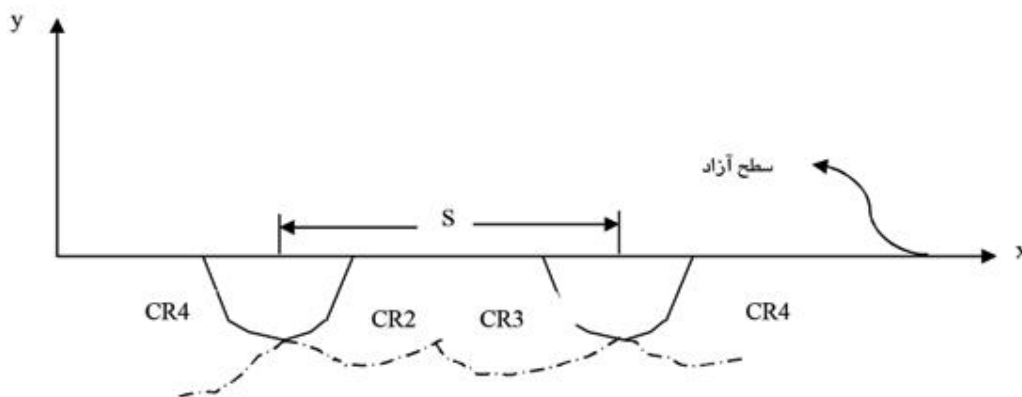
شکل ۲: طرز عمل سه المان در نوک ترک با استفاده از تکنیک منظم مرزی

با در نظر گرفتن طول کل المان نوک ترک با سه زیر المان  $N_{c2}(\epsilon)$ ،  $N_{c1}(\epsilon)$ ،  $N_{c3}(\epsilon)$  می تواند به صورت زیر بدست آید:

$$N_{c1}(\epsilon) = \frac{15\epsilon^{\frac{1}{2}}}{8a_1^{\frac{1}{2}}} - \frac{\epsilon^{\frac{3}{2}}}{a_1^{\frac{3}{2}}} + \frac{\epsilon^{\frac{5}{2}}}{8a_1^{\frac{5}{2}}}$$

$$N_{c2}(\epsilon) = \frac{-5\epsilon^{\frac{1}{2}}}{4\sqrt{3}a_1^{\frac{1}{2}}} + \frac{3\epsilon^{\frac{3}{2}}}{2\sqrt{3}a_1^{\frac{3}{2}}} - \frac{\epsilon^{\frac{5}{2}}}{4\sqrt{3}a_1^{\frac{5}{2}}}$$

$$N_{c3}(\epsilon) = \frac{3\epsilon^{\frac{1}{2}}}{8\sqrt{5}a_1^{\frac{1}{2}}} - \frac{\epsilon^{\frac{3}{2}}}{2\sqrt{5}a_1^{\frac{3}{2}}} + \frac{\epsilon^{\frac{5}{2}}}{8\sqrt{5}a_1^{\frac{5}{2}}}$$



شکل ۳: مسیر انتشار ترک برای  $S/Pd=10$  و تیغه دیسکی ۶۰ درجه فرسایش یافته،  $Pd=6$  mm و افزایش طول  $\Delta b=4$  mm (۸ تکرار).

محدوده ۱۵ - ۷/۵ قرار دارد که سازگاری خوبی با نتایج تجربی دارد.

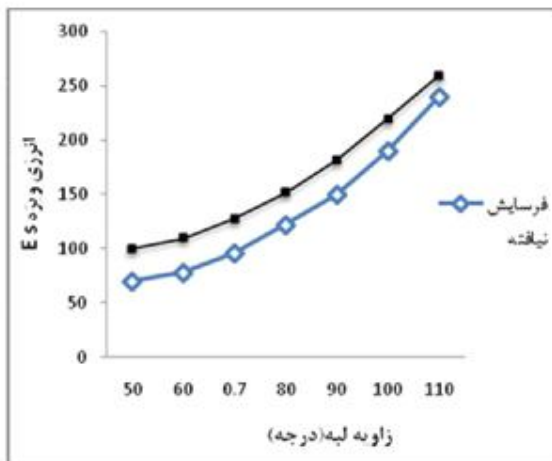
#### ۵- نتیجه گیری

مکانیزم انتشار ترک تحت تیغه های دیسکی بصورت عددی مدل سازی شد و با استفاده از روش جابجایی ناپیوستگی مرتبه بالاتر مورد مطالعه قرار گرفت. جهت افزایش دقت، از چهار المان در طول کل ترک و سه المان ویژه ی نوک ترک برای بررسی رفتار و انتشار انتهای ترک مورد استفاده قرار گرفته است. شایان ذکر است که مدل مورد بحث در این مقاله در محیط پیوسته می باشد. از معیار شکست تنش برشی ماکزیمم برای بررسی انتشار ترک و امتدادش تحت تیغه های دیسکی استفاده شد. برخی از نتایج محاسبه شده با نتایج عددی قبلی مقایسه شده اند که مطابقت خوبی با مقادیر تجربی بدست آمده داشتند.

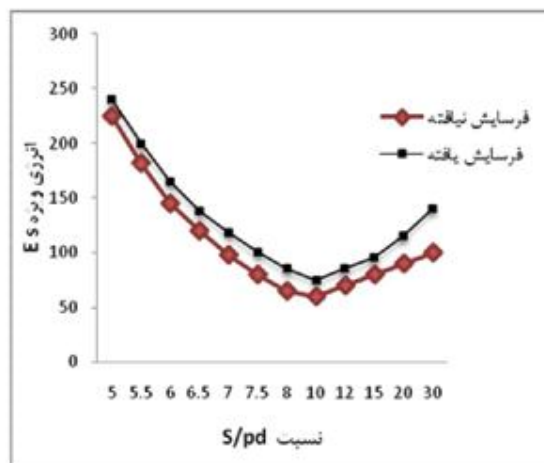
آزمایشات LCM بصورت عددی روی یک سری از سنگ های مختلف اجرا شد، نتایج با نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی مقایسه شدند. برای سنگ های ایزوتروپ و نسبتاً همگن، مسیر انتشار ترک بدست آمده از شبیه سازی های عددی سازگاری خوبی با نتایج بدست آمده از آزمایشات LCM می باشد. شبیه سازی نه تنها توصیف واقع گرایانه ای از مکانیزم شکست و انتشار ترک ارائه می دهد، بلکه مقادیر عددی قابل اعتمادی را نیز برای انتشار ترک محاسبه می کنند.

با افزایش زاویه رأس گوه ( $\phi$ )، میزان انرژی ویژه مورد نیاز (ES)، افزایش می یابد. از طرفی در زاویه رأس گوه ثابت  $\phi$  مقدار ES مورد نیاز برای تیغه فرسایش یافته نسبت به تیغه فرسایش نیافته بیشتر است و در  $\phi$  های کم اختلاف بین انرژی ویژه مصرفی در دو حالت فرسایش یافته و فرسایش نیافته در مقایسه با  $\phi$  های بزرگتر، کمتر است، چون در  $\phi$  های بزرگتر اثر فرسایش در قیاس با  $\phi$  های کم، بهتر دیده می شود. فاکتورهای شدت تنش (KI و KII) با افزایش نسبت S/P، هم در حالت تیغه ی فرسایش یافته و هم در حالت تیغه فرسایش نیافته بترتیب افزایش و کاهش پیدا می کند. همچنین مطابق با نتایج دیسک های با فواصل کم ( $S/Pd < 7$ )، به نیروی بزرگتر (انرژی بیشتر) جهت انتشار ترک برای دیسک های داخلی نیاز است و برای دیسک های با فواصل بیشتر ( $S/Pd > 15$ ) انرژی ویژه به آهستگی افزایش می یابد. اما نرخ بهینه S/Pd مطابق آنچه که بصورت تجربی انتظار می رفت در حدود ۱۵ - ۸ است. نکته

به منظور بررسی تاثیر فرسایش روی عملکرد TBM، نتایج مدل سازی در اشکال (۴) و (۵) نشان داده شده است. مطابق شکل (۴) در  $\phi$  های کم، اختلاف بین انرژی ویژه مصرفی در دو حالت فرسایش یافته و فرسایش نیافته در مقایسه با  $\phi$  های بزرگتر، کمتر است. چون در  $\phi$  های بزرگتر اثر فرسایش در قیاس با  $\phi$  های کم، بهتر دیده می شود.



شکل ۴: رابطه بین انرژی ویژه با  $\phi$  برای حالت های تیغه فرسایش یافته و فرسایش نیافته



شکل ۵: انرژی ویژه ارزیابی شده بر حسب S/P در دو حالت تیغه فرسایش یافته و فرسایش نیافته.

از طرفی مطابق شکل (۵) چون در اثر فرسایش تیغه کندتر می شود. در نتیجه به انرژی ویژه بیشتری نسبت به حالت فرسایش نیافته نیاز است. همچنین از این شکل نتیجه می شود که در هر دو حالت نسبت بهینه S/Pd در



Netherlands.

[9] Aliabadi M. H.; 1998; Fracture of rocks, Computational Mechanics Publications, Southampton, U.K.

[10] Bobet A.; 2001; A hybridized displacement discontinuity method for mixed mode I-II-III loading, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 38, pp. 1121-1134.

[11] Shen B., Stephansson O., Rinne M., Lee H-S, Jing L., and Roshoff K.; 2004; A fracture propagation code and its application to nuclear waste disposal, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 41, No 3, pp. 448-453.

[12] Marji M. F., Hosseini-Nasab H. and Kohsary A. H.; 2006; On the uses of special crack tip elements in numerical rock fracture mechanics, Int. j Solids and Structures Vol.43 pp. 1669-1692.

[13] Shen B. and Stephansson O.; 1994; Modification of the G-criterion for crack propagation subjected to compression, Engng. Fract. Mech., Vol. 47(2), pp. 177-189.

[14] Erdogan F., and Sih G. C.; 1963; On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, J. Bas. Engng, Vol. 85, pp. 519-527.

[15] Ingraffea A. R.; 1983; Numerical modeling of fracture propagation, Rock Fracture Mechanics; Rossmannith H. P. (Ed); Springer Verlagwien; New York, pp. 151-208.

[16] Stephansson O.; 2002; Recent rock fracture mechanics developments, 1st Iranian Rock Mechanics Conference, pp. 675-698.

[17] Whittaker B. N., Singh R. N., and Sun G.; 1992; Rock fracture mechanics, Principles, Design and Applications, Elsevier, Netherlands.

[18] Erdogan F., and Sih G. C.; 1963; On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, J. Bas. Engng, Vol. 85, pp. 519-527.

[19] Bobet A.; 2001; A hybridized displacement discontinuity method for mixed mode I-II-III loading, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 38, pp. 1121-1134.

[20] Carpinteri A., and Yang G.; 1997; Size effects in brittle specimen with microcrack interaction, Computers and Structures, 63, pp. 429-437.

[21] FatehiMarji, M., Hosseini-nasab, H. and Kohsary, A. H.; 2007; A new cubic element formulation of the displacement discontinuity method using three special crack tip elements for crack analysis, JP Journal of Solids and Structures, Vol. 1, pp. 61-91

[22] Marji M. F., and Dehghani E.; 2010; Kinked crack analysis by a hybridized boundary element / boundary collocation method, Int. j Solids and Structures Vol.47 pp. 922-933.

قابل توجه این است که با افزایش زاویه گوه، انرژی ویژه ES افزایش می‌یابد. با افزایش عمق نفوذ، تنش برشی افزایش می‌یابد. از طرفی در یک عمق نفوذ معین، تنش برشی با افزایش  $\phi$ ، افزایش می‌یابد. رابطه بین عمق نفوذ و تنش نرمال در  $\phi$ های مختلف نیز به همین صورت است. با افزایش عمق نفوذ، اولاً میزان نیروی مورد نیاز برای نفوذ نیز بیشتر می‌شود. چون با افزایش عمق نفوذ به نیروی غلطشی  $F_r$  بیشتری جهت چرخش مورد نیاز دیسک و نیز به نیروی فشاری  $F_t$  بیشتری جهت حفظ تعادل تیغه در عمق نفوذ زیاد نیاز داریم. ثانیاً در یک عمق نفوذ ثابت با افزایش  $\phi$  به نیروی غلطشی و نیز به نیروی فشاری بیشتری نیاز داریم. چراکه با افزایش  $\phi$  (کند شدن نوک تیغه)، از خاصیت نفوذ پذیری تیغه کاسته می‌شود.

#### ۶- مراجع

[1] Tan, X.C., Kou, S.Q and Lindqvist, P. A.; 1998; Application of the DDM and fracture mechanics model on the simulation of rock breakage by mechanical tools, Engineering Geology, 49, 277-284

[2] Rostami, J. and Ozdemir, L.; 1993; A new model for performance prediction of hard rock TBMs. In: Proceedings, Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), pp. 793-809

[3] Acaroglu, O., Ozdemir, L. and Asbury, B.; 2008; A fuzzy logic model to predict specific energy requirement for TBM performance prediction. Tunn. Undergr. Space Technol. 23 (5), pp. 600-608.

[4] Jung-Woo Cho, Seokwon Jeon, Sang-Hwa Yu and Soo-Ho Chang; 2010; Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method, Tunnelling and Underground Space Technology 25 230-244

[5] Guo H., Aziz N. I., and Schmidt R. A.; 1992; Rock cutting study using linear elastic fracture mechanics; Engng. Fract. Mech., Vol. 41, pp. 771-778.

[6] Scavia C.; 1992; A numerical technique for the analysis of cracks subjected to normal compressive stresses, Int. j. Numer. Meth. Engng., Vol. 33, pp. 929-942.

[7] Shen B. and Stephansson O.; 1994; Modification of the G-criterion for crack propagation subjected to compression, Engng. Fract. Mech., Vol. 47(2), pp. 177-189.

[8] Rosmanith H. P.; 1983; Rock fracture mechanics, springer verlagwien, New York Applications, Elsevier,