

# بررسی تأثیر فاصله‌داری و شیب دسته درزه بر عملکرد تیغه‌ی ماشین حفر تونل (TBM) به روش عددی، و مقایسه‌ی نتایج در حالت دوبعدی و سه‌بعدی

امیرعبدالله ایران‌زاده (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مصطفی شریف‌زاده (استادیار)

محسن شریفی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی معدن، مخابراتی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

عملکرد ماشین حفر تونل<sup>۱</sup> (TBM) تا حدی به عملکرد تیغه‌های آن بستگی دارد؛ این در حالی است که بسیاری از عوامل زمین‌شناسی و نیز شرایط توده‌سنگ در عملکرد تیغه‌ها مؤثرند. در این نوشتار دو مدل عددی دوبعدی و سه‌بعدی بر پایه‌ی روش اجزاء مجزا، به‌منظور بررسی اثرات شیب و فاصله‌داری دسته‌درزه‌ها بر فرایند برش سنگ به‌وسیله‌ی تیغه‌های TBM معرفی شده‌اند. متغیرهای مورد مطالعه شامل زاویه‌ی شیب متغیر درزه در حالت فاصله‌داری ثابت، و نیز فاصله‌داری متغیر در حالت شیب ثابت درزه هستند. نتایج حاصله از این دو مدل نشان می‌دهند که: اولاً زاویه‌ی بحرانی شیب دسته‌درزه بین ۴۵ تا ۶۰ درجه خواهد بود، که در آن احتمال بیشترین پیش‌روی وجود دارد؛ ثانیاً فاصله‌داری بحرانی که در آن تأثیر فاصله‌داری بر میزان تنش بحرانی کاهش چشم‌گیری می‌یابد فاصله‌ی ۲۰۰ میلی‌متری است.

A\_A.Iranzadeh@yahoo.com  
sharifzadeh@aut.ac.ir  
sharifi\_m@aut.ac.ir

واژگان کلیدی: ماشین حفر تونل، تیغه، فاصله‌داری دسته‌درزه و شیب دسته‌درزه.

## ۱. مقدمه

همین راستا و با توجه به پیشرفت مناسب روش‌های مدل‌سازی عددی و نرم‌افزارهای رایانه‌ی مبتنی بر آن طی سالیان اخیر، می‌توان از آن به‌صورت ابزاری مفید و کارا در شبیه‌سازی فرایند برش سنگ توسط تیغه و کنش متقابل سنگ و تیغه‌ی ماشین، سود برد.

ازجمله مدل‌های عددی شبیه‌سازی شده به این منظور، می‌توان از مدل‌های دوبعدی<sup>[۱]</sup> و سه‌بعدی<sup>[۲]</sup> بر مبنای روش عددی اجزاء مجزا، برای بررسی اثر فاصله‌داری و شیب درزه بر عملکرد تیغه‌ی TBM به‌کمک نرم‌افزارهای UDEC و ۳DEC نام برد. هدف این نوشتار بررسی دو مدل، مقایسه‌ی نتایج حاصل از آنها و نیز تبیین نقاط ضعف و قوت هر یک از آنها است.

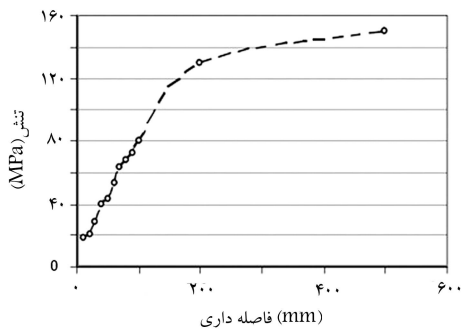
## ۲. مراحل تحلیل دوبعدی

چنان که در شکل ۱ دیده می‌شود، ابعاد تمام مدل‌های محاسباتی ۰/۶ متر و برابر با فاصله‌ی دو تیغه‌ی مجاور فرض شده است<sup>[۱]</sup>، و نیز یک سری درزه‌های زاویه‌دار یا عمودی در آن پیش‌بینی شده‌اند. سنگ از جنس گرانیت است و اثر تیغه‌ی دیسکی به‌صورت نیرویی عمودی که بر وسط بخش سمت چپ و در یک ضخامت ۱۵ میلی‌متر وارد می‌شود، مدل‌سازی شده است. به‌دلیل دوبعدی بودن مدل، نیروی

با پیشرفت ماشین‌های حفر تونل (TBM) و استفاده از آنها در شرایط مختلف زمین‌شناسی، و نیز توسعه‌ی تیغه‌های چرخشی با قطر بزرگ -- به‌خصوص تیغه‌های دیسکی -- این ماشین به‌طور گسترده و روزافزون در حفاری تونل به کار رفته، و پیش‌بینی عملکرد آن به‌دلیل حجم بالای سرمایه‌گذاری مورد نیاز، به بخش مهمی از برنامه‌ریزی پروژه‌ها و انتخاب روش تونل‌سازی تبدیل شده است. در این راستا درک چگونگی تأثیر پارامترهای توده‌سنگ، ازجمله پارامترهای درزه بر عملکرد اجزای ماشین، دارای اهمیت است<sup>[۱]</sup>. در سال‌های اخیر مدل‌های پیش‌بینی زیادی براساس مشاهدات آزمایشگاهی ایجاد شده‌اند. برخی از این مدل‌ها تک‌عاملی‌اند و فقط برای محاسبه‌ی عملکرد ماشین‌ها در سنگ‌های همگن و همسانگرد مناسب‌اند، و برخی دیگر مدل‌هایی جامع‌اند که براساس آزمون‌های آزمایشگاهی و مشاهدات محلی و برجا ایجاد شده‌اند. در این مدل‌ها بر اهمیت فاصله‌داری درزه‌ها در عملکرد ماشین حفر تونل تأکید شده است ولی نبود درک کافی از فرایند برش سنگ، به‌دلیل پیچیدگی بسیار زیاد ماهیت کنش متقابل سنگ و تیغه‌های ماشین، نقطه‌ی ضعف این مطالعات عنوان می‌شود. بر همین اساس، اهمیت و ضرورت بررسی‌های بیشتر و دقیق‌تر پیرامون (تأثیر درزه بر عملکرد ماشین و تیغه‌های آن) روشن می‌شود. در



شکل ۳. تغییر جهت گسترش ترک در فاصله‌داری ۴۰ میلی‌متر.



شکل ۴. تغییرات تنش منجر به شکست نسبت به فاصله‌داری [۲].

یا مساوی ۴۰ میلی‌متر باشد؛ دیگری ایجاد ترک از بخش خردشده و گسترش آن تا صفحه درزه، وقتی که فاصله‌ی درزه‌ها بیش از ۴۰ میلی‌متر باشد. در شکل ۳ چگونگی گسترش ترک در این دو حالت نشان داده شده است. این پدیده همانند بارگذاری یک تیر است. وقتی که فاصله‌ی درزه‌ها به ۵۰ میلی‌متر می‌رسد، روش ایجاد ترک شبیه حالت نفوذ یک تک‌تیغه در ماده‌سنگ بدون درزه خواهد شد. بنابراین، اثر درزه در خردشدن توده سنگ بسیار کوچک است. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۴ ارائه شده است.

تغییرات تنش منجر به شکست برای مقادیر مختلف فاصله‌داری درزه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. چنان‌که در این شکل ملاحظه می‌شود، فاصله‌داری ۲۰۰ میلی‌متر یک «نقطه‌ی بحرانی» است. در فاصله‌داری کم‌تر از ۲۰۰ میلی‌متر تنش لازم برای ایجاد ترک، با افزایش فاصله‌داری درزه‌ها به سرعت افزایش می‌یابد؛ این در حالی است که برای فاصله‌داری بیش از ۲۰۰ میلی‌متر، با افزایش فاصله‌داری درزه‌ها مقدار تنش به تدریج افزایش می‌یابد [۴].

### ۳.۲ اثر شیپ و امتداد درزه بر فرایند شکست

نفوذ تیغه‌ها ممکن است از دو زاویه تأثیرپذیر باشد: زاویه‌ی  $\alpha$  بین محور تونل و صفحه درزه، و زاویه‌ی حمله‌ی  $\beta$  بین امتداد تیغه‌ی دورانی و اثر درزه در سطح سینه کار تونل. تجارب قبلی نشان داده است که اثر زاویه‌ی  $\beta$  بر پیش‌روی ماشین آشکار نیست [۵] زیرا هنگام پیش‌روی ماشین، و انجام حرکت دایره‌ی متحدالمرکز تیغه،  $\beta$  بی‌اثر شده و اثر آن ناپدید می‌شود.

با توجه به اثر درزه و جهت‌یافتگی آن، درزه‌ها و ترک‌های ناشی از تیغه‌های ماشین (TBM) به‌طور متقارن گسترش نمی‌یابند بلکه با افزایش زاویه‌ی  $\alpha$  (از ۱۵ تا ۷۵ درجه)، زاویه‌ی شکست سنگ هم افزایش می‌یابد. وقتی زاویه ۹۰ درجه است، گسترش ترک‌های جانبی از جهت‌یافتگی درزه‌ها تأثیر نمی‌پذیرد و زاویه‌ی شکست در حدود ۳۰ تا ۳۵ درجه است که با ترک‌های مخروطی هارتزین (Hertzian) با

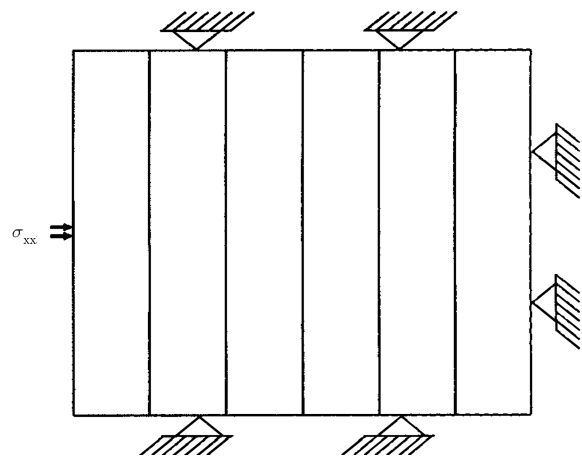
چرخشی وارد بر تیغه‌ها را نمی‌توان در نظر گرفت. همچنین مرزهای مدل، به‌جز مرزی که نیرو به آن وارد می‌شود، ثابت فرض شده‌اند.

### ۱.۲ نفوذ در ماده‌سنگ با یک تیغه

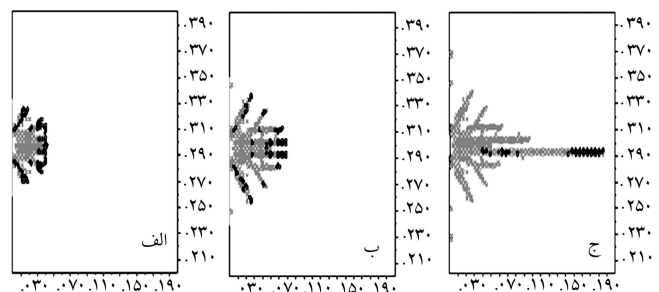
الگوی شکاف مدل‌سازی شده در ماده‌سنگ براساس عملکرد یک تیغه‌ی واحد در شکل ۲ نمایش داده شده است. برای مشخص‌کردن این فرایند (شکست و نفوذ) ناحیه‌ی‌های شکست به‌صورت گام‌به‌گام در یک نمای بزرگ‌شده (مانند شکل ۲) نشان داده شده‌اند. ایجاد شکاف و فرایند گسترش و پخش آن را می‌توان به سه بخش تقسیم‌بندی کرد: تشکیل یک ناحیه‌ی خردشده، تشکیل ناحیه‌ی ریزشکاف و توسعه‌ی ترک‌ها، و شکاف‌های بزرگ. وقتی یک تیغه برای مرتبه‌ی اول روی سنگ بارگذاری می‌شود، یک شکست بادبزنی ایجاد می‌شود (شکل ۲ الف). عقیده بر این است که مرز ناحیه‌ی شکست با شکست کششی کنترل می‌شود. بلافاصله در زیر دو گوشه‌ی تیغه ترک‌های پهلویی ایجاد می‌شوند (شکل ۲ الف و ب). چنان‌که مشاهده می‌شود، بخش زیر تیغه‌ها نسبتاً دست‌نخورده باقی می‌ماند و با افزایش مقدار نفوذ، منطقه‌ی خردشده‌ی در زیر تیغه ایجاد شده و در نهایت ترک‌های بزرگ شعاعی تولید می‌شوند (شکل ۲ ج) [۲].

### ۲.۲ اثر فاصله‌داری درزه بر فرایند شکست

در حالت کلی دو مدل برای ایجاد و گسترش ترک‌های سنگ وجود دارد: یکی ایجاد ترک از صفحه درزه و گسترش آن تا سطح آزاد، در حالتی که فاصله‌ی درزه‌ها کم‌تر



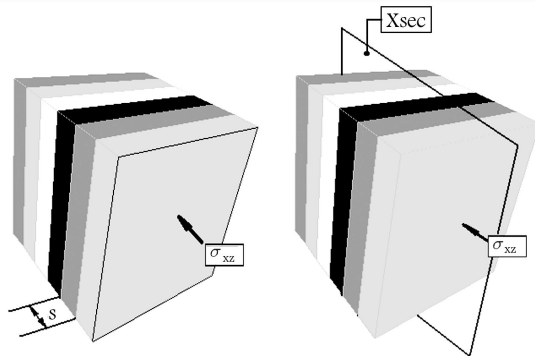
شکل ۱. مدل شبیه‌سازی عددی با فاصله‌داری [۲].



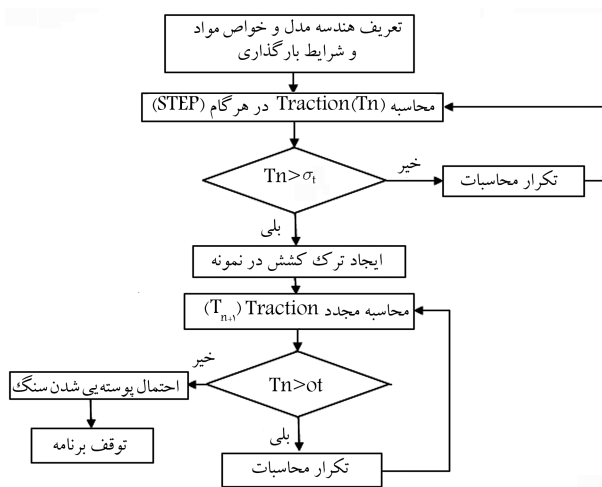
شکل ۲. فرایند نفوذ تیغه [۲].

کششی در شکست نقش مؤثری دارد. بنابراین از بین سه متغیر یادشده، مقادیر تنش کششی القایی برای تحلیل نتایج به دست آمده به صورت گام به گام و در مقاطع مرکزی (X-section) و مقاطعی به موازات آن و به فواصل  $+0/15$ ،  $-0/15$ ،  $+0/3$  و  $-0/3$  متر برای بررسی شرایط در سه بعد، ثبت شدند (شکل ۷).

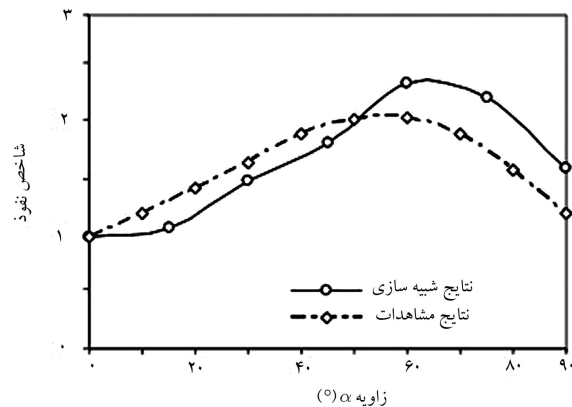
چنان که دیده می شود، تحلیل این الگوریتم به این ترتیب است که در هر گام اگر میزان تنش کششی القایی (Tn) از مقدار مقاومت کششی سنگ بیشتر باشد، از آن به عنوان ایجاد ترک کششی در نمونه یاد می شود<sup>[۸]</sup> (تنش ترک). سپس مرحله ی بعد مورد توجه قرار می گیرد و فرایند فوق تکرار خواهد شد. این فرایند تا زمانی که تنش القایی کششی افزایش یابد، صرف نظر از این که منجر به ترک شود یا خیر، ادامه می یابد و در صورتی که در یک گام، مقدار تنش ثابت بماند یا کم شود، این حالت را می توان با توجه به مفاهیم نمودار تنش- کرنش و به دلیل کاهش ناگهانی میزان تنش القایی، و نیز با توجه به این نکته که ایجاد تراشه ی سنگ باعث کاهش ناگهانی فشار بخش خردشده و در نتیجه کاهش مقدار تنش القایی و جلوگیری از گسترش ترک در سایر بخش ها می شود<sup>[۶]</sup> و<sup>[۷]</sup> به عنوان احتمال ایجاد تغییر در ساختار سنگ، پوسته یی شدن سنگ و در نهایت انتقال نیرو به سطح جدید سنگ تفسیر کرد. میزان تنشی که در آن احتمال ایجاد تراشه وجود دارد، به عنوان تنش کششی بحرانی در هر مقطع ضعیف شده و در فاصله داری ها و جهت یافتگی های مختلف درزه ها، و نیز در مقاطع مختلف با هم مقایسه می شوند تا فاصله داری و زاویه ی شیب بحرانی در سه بعد تخمین زده شوند<sup>[۳]</sup>.



شکل ۶. هندسه ی مدل شبیه سازی سه بعدی<sup>[۳]</sup>.



شکل ۷. الگوریتم تحلیل نتایج مدل سه بعدی<sup>[۳]</sup>.



شکل ۵. اثر جهت یافتگی بر شاخص نفوذ تیغه<sup>[۱]</sup>.

زاویه ی کندن  $30^\circ$  تا  $40^\circ$  درجه مطابق است. وقتی که زاویه ی  $\alpha$  صفر درجه است، زاویه ی شکست در حدود  $60^\circ$  درجه است، یعنی از وقتی که زاویه ی  $\alpha$   $90^\circ$  درجه باشد، بزرگ تر است. در شکل ۵ اثر زاویه ی جهت یافتگی درزه بر شاخص نفوذ تیغه در دو حالت اندازه گیری برجا و نیز نتایج حاصل از مدل نشان داده شده اند. شایان ذکر است که شاخص نفوذ تیغه عبارت است از نسبت نیروی هر تیغه به سرعت نفوذ آن، و بنابراین هرچه این مقدار بیشتر باشد نمایانگر مشکل تر بودن حفاری است. چنان که در شکل مشاهده می شود، نتایج به خوبی با هم مطابقت دارند و نیز با افزایش زاویه ی  $\alpha$ ، میزان نفوذ تا زمانی که مقدار  $\alpha$  به  $60^\circ$  درجه برسد افزایش می یابد، و پس از آن با افزایش بیشتر  $\alpha$  کاهش می یابد<sup>[۱]</sup>.

#### ۴.۲. خلاصه ی نتایج تحلیل دوبعدی

فرایند شکست را می توان به سه پله تقسیم بندی کرد، تشکیل ناحیه ی خرد شده، تشکیل یک بخش ریزترک، و گسترش ترک های بزرگ. ایجاد و گسترش ترک ها عموماً در طول مرز ناحیه ی شکست کششی انجام می شود و با توجه به وجود صفحه درزه در زیر تیغه، میدان تنش پایه به دو سمت تیغه منحرف می شود. این موضوع باعث تغییرات در زاویه ی شکست سنگ می شود و رشد و گسترش ترک ها در صفحات جدایی درزه هایی که در سر راه توسعه ی ترک ها قرار دارند، خاتمه می یابد.

#### ۳. مراحل تحلیل سه بعدی

مدل محاسباتی به کار رفته در تحلیل سه بعدی به طور شماتیک در شکل ۶ نشان داده شده است.

هر بعد مدل ساخته شده  $1200$  میلی متر است، که این ابعاد تقریباً معادل ابعاد بلوکی است که به وسیله ی یک تیغه (TBM) نمونه تحت تأثیر قرار می گیرند. در عمل نیروی چرخشی مؤثر بر تیغه در این مدل به منظور ایجاد شرایط یکسان در شبیه سازی با مدل دوبعدی، لحاظ نشده است و تمامی مرزها، به جز مرزی که بار به آن وارد می شود، به عنوان مرزهای بدون جابه جایی و ثابت در نظر گرفته شده اند.

در تحلیل سه بعدی، برای بررسی وضعیت سنگ و چگونگی ایجاد شکست در زوایای مختلف و همچنین در حالت سه بعدی، مقادیر سه متغیر: ۱. تنش های کششی القایی؛ ۲. تنش های برشی القایی؛ ۳. بیشینه ی جابه جایی، مورد توجه قرار گرفت. در مطالعات انجام شده<sup>[۶]</sup> و<sup>[۷]</sup> این نکته به اثبات رسیده است که عامل ایجاد و گسترش شکست در زیر تیغه ها (TBM) از نوع شکست کششی بوده و مؤلفه ی تنش

### ۱.۳. بررسی اثر زاویه‌ی شیب و امتداد دسته‌دَرزه

شیب دسته‌دَرزه اثر بسیار مهمی بر مقاومت توده‌سنگ و برکارایی و بازده روش‌های حفاری دارد. در مدل استفاده‌شده فاصله‌داری ثابت و به‌میزان  $20^\circ$  میلی‌متر است و زاویه‌ی شیب بین مقادیر  $15^\circ$ ،  $30^\circ$ ،  $45^\circ$ ،  $60^\circ$  و  $75^\circ$  و  $90^\circ$  درجه و با فرض امتداد عمود بر امتداد ثابت تونل انتخاب شد، و با توجه به الگوریتم پیشنهادی (شکل ۷) مطالعات انجام شده و نتایج بررسی شدند. در این نوشتار خلاصه‌ی نتایج در زاویه‌ی شیب  $15^\circ$  درجه، به‌عنوان نمونه‌ی ارائه‌شده، و در ادامه مقایسه و بحث بین نتایج به‌دست آمده در زوایای مختلف آورده شده است.

#### ۱.۱.۳. نتایج حاصل از مدل در زاویه‌ی $15^\circ$ درجه

با توجه به نتایج حاصله و با توجه به الگوریتم ارائه‌شده در شکل ۷، میزان تنش القایی کششی در سنگ در همان ابتدای بارگذاری به حدی می‌رسد که از مقدار مقاومت کششی بیشتر باشد، و بنابراین منجر به ایجاد ترک شده است. این وضعیت تا گام  $30^\circ$  ادامه داشته و در این مرحله به یک‌باره میزان تنش ثابت مانده و دچار تغییر نمی‌شود. این حالت را می‌توان به‌عنوان احتمال ایجاد شکست در سنگ (ایجاد تراشه) و انتقال نیرو به سطح جدیدی از سنگ تعبیر کرد. در شکل ۸ وضعیت تنش‌های القایی کششی و بیشینه جابه‌جایی در مقطع مرکزی و در لحظه‌ی ایجاد تراشه و محل اثر نیرو، دیده می‌شوند [۳].

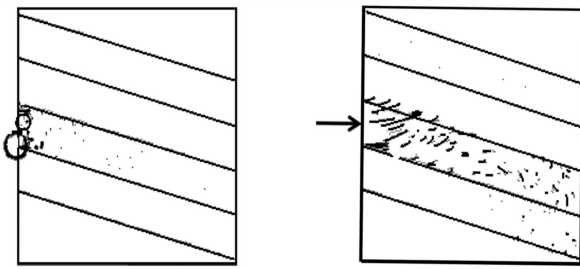
#### ۲.۱.۳. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده در زوایای مختلف

مقایسه‌ی نتایج در زوایای مختلف در مقاطع مرکزی و مقاطع موازی آنها مشخص می‌کند که تقریباً در تمامی موارد تنش بحرانی در مقطع مرکزی اتفاق می‌افتد. تغییرات مقادیر تنش‌های بحرانی در زوایای مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به این نکته که القای تنش بحرانی در تمام مقاطع در یک محدوده‌ی تقریباً ثابت اتفاق افتاده است و طبیعتاً ایجاد ترک کششی نیز در این محدوده و قبل از آن بوده است، و نیز با توجه به نتایج حاصله می‌توان دریافت که هرچند بیشترین میزان تنش بحرانی در زاویه‌ی شیب  $45^\circ$  درجه اتفاق افتاده، ولی چنان‌که در شکل ۱۰ دیده می‌شود و با دقت در تفاضل بین گام‌های ایجاد ترک و القای تنش بحرانی می‌توان به این نتیجه رسید که تنش‌های القایی در زاویه‌ی  $60^\circ$  درجه با نرخ بیشتری افزایش یافته‌اند. این موضوع را می‌توان به‌عنوان عاملی مؤثر در افزایش سرعت نفوذ تیغه‌های TBM در نظر گرفت. به‌منظور بررسی صحت نتایج به دست آمده، می‌توان به مطالعات انجام شده در رابطه با اثر ناهمسانی بافت سنگ بر سرعت نفوذ تیغه اشاره کرد [۵، ۹].

### ۲.۳. بررسی اثر فاصله‌داری دسته‌دَرزه

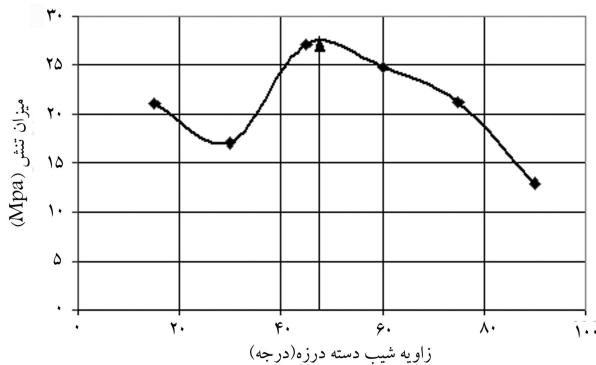
در این بخش، زاویه‌ی شیب مدل ثابت و برابر  $90^\circ$  درجه انتخاب شده و این‌بار فاصله‌داری درزه به‌عنوان متغیر و برابر  $10^\circ$ ،  $20^\circ$ ،  $40^\circ$ ،  $100^\circ$  و  $200^\circ$  میلی‌متر در نظر گرفته شد. با توجه به الگوریتم پیشنهادی (شکل ۷) و با پیروی از روند به‌کار گرفته شده در مطالعه‌ی زوایای شیب، مطالعات انجام شده و نتایج بررسی شدند. مهم‌ترین نتایج حاصل از تغییرات فاصله‌داری درزه را می‌توان چنین برشمرد [۳]:

۱. در فاصله‌داری‌های کوچک‌تر از  $10^\circ$  میلی‌متر (ضخامت سنگ کم‌تر از  $10^\circ$  میلی‌متر) شکست بسته به بار وارده ناشی از بارگذاری تیغه، به یک سطح درزه محدود نشده و چندین سطح را قطع می‌کند. با افزایش ضخامت، به دلیل کاهش سطح آزاد و شرایط محصوربودن سنگ این حالت رخ نمی‌دهد.
۲. بیشینه تنش القایی در فاصله‌داری  $40^\circ$  میلی‌متر اتفاق افتاده است. نتایج حاصله

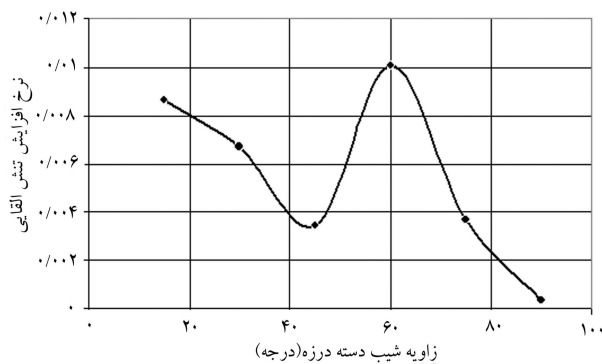


الف) حداکثر جابه‌جایی؛ ب) تنش کششی القایی.

شکل ۸. نتایج حاصل از مدل در زاویه‌ی  $15^\circ$  درجه [۳].



شکل ۹. تغییرات تنش در زوایای مختلف شیب درزه [۳].



شکل ۱۰. نرخ افزایش تنش برحسب زاویه‌ی درزه [۳].

نیز همین این نکته است که در این ضخامت و نیز ضخامت‌های کم‌تر، شکست و ترک از سطح درزه آغاز شده و به سطح آزاد می‌رسد. در مقادیر بزرگ‌تر این روند معکوس است.

۳. مقادیر تنش القایی تا قبل از فاصله‌داری  $10^\circ$  میلی‌متر به شدت تغییر می‌کند ولی پس از آن شدت تغییرات کاهش می‌یابد و در مقادیر بزرگ‌تر از  $20^\circ$  میلی‌متر روند تقریباً ثابتی پیدا می‌کند. شکل ۱۱ نشان‌دهنده‌ی تغییرات تنش بحرانی به تنش سنگ بکر نسبت به فاصله‌داری است.

### ۳.۳. خلاصه‌ی نتایج تحلیل سه‌بعدی

ایجاد و گسترش ترک‌ها عموماً در طول مرز ناحیه‌ی شکست کششی انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که دو نوع روش برای ایجاد ترک و گسترش آن می‌توان قائل شد:

#### ۴. مقایسه‌ی نتایج مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی

با بررسی مدل‌های عددی دوبعدی و سه‌بعدی معرفی شده در این نوشتار و مقایسه‌ی نتایج حاصل از آنها، می‌توان دریافت که هرچند روش مدل‌سازی و تحلیل نتایج در ۲ مدل تا حدودی با هم متفاوت‌اند، نتایج هر دو مدل تطابق قابل توجهی دارند. از عمده‌ترین نتایج مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی می‌توان اشاره کرد به: [۳، ۲، ۱]

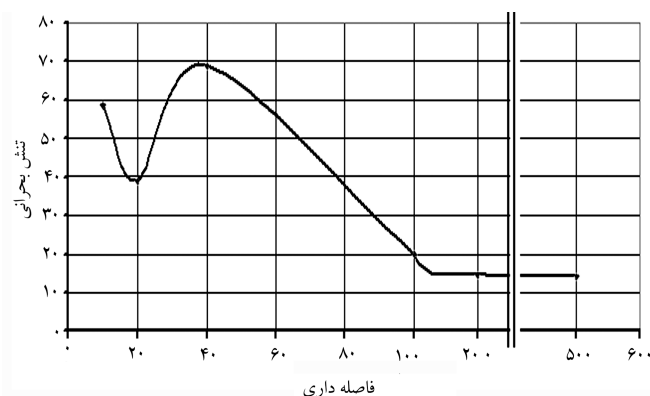
۱. در مدل دوبعدی، با افزایش زاویه‌ی شیب تا ۶۰ درجه نرخ نفوذ افزایش می‌یابد و سپس کم می‌شود. در مدل سه‌بعدی، زاویه‌ی بحرانی شیب درزه زاویه‌ی بین ۴۵ تا ۶۰ درجه است که در آن احتمال دست‌یابی به بیشترین پیش‌روی وجود دارد.

۲. در مدل دوبعدی، در فاصله‌داری کم‌تر از ۲۰۰ میلی‌متر تنش به‌سرعت با افزایش فاصله‌داری درزه افزایش می‌یابد و برای فاصله‌داری بیش از آن مقدار تنش به‌طور آهسته افزایش می‌یابد. در مدل سه‌بعدی، فاصله‌داری بحرانی که در آن تأثیر فاصله‌داری بر میزان تنش بحرانی کاهش چشم‌گیری می‌یابد، فاصله‌ی ۲۰۰ میلی‌متر است. شکل ۱۲ نشان‌دهنده‌ی تغییرات شاخص نفوذ نسبت به فاصله‌داری، و مقایسه‌ی نتایج در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی است.

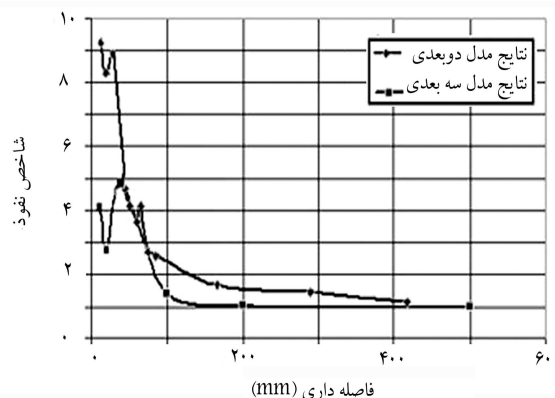
چنان‌که دیده می‌شود، روند دو منحنی بسیار قابل تطبیق است و دلیل عدم هم‌پوشانی کامل دو مدل، تفاوت در پارامترهای ورودی و اولیه‌ی هر یک از آنها است.

#### ۵. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، فرایند شکسته‌شدن سنگ به‌وسیله‌ی تیغه‌ی ماشین حفر تونل (TBM)، که با کمک روش عددی اجزاء مجزا در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده‌ی تأثیر قابل توجه فاصله‌داری و شیب درزه بر فرایند شکست هستند. همچنین نتایج دو مدل به‌خوبی با هم تطابق دارند، هرچند باید به این نکته توجه داشت که این نتایج بر پایه‌ی فرضیات مؤلفین و ساده‌سازی فرایند — همچون در نظر نگرفتن چرخش تیغه‌ها و مواد پرکننده‌ی درزه‌ها، وجود درزه‌های اتفاقی، شرایط و انواع مختلف ماشین TBM و در نظر نگرفتن تأثیر تیغه‌های مجاور — به دست آمده و می‌توان این موارد را به‌عنوان نقاط ضعف آن ذکر کرد. بدیهی است مدل‌سازی سه‌بعدی با توجه به طبیعت حفاری در سینه‌ی کار واقعی‌تر بوده و نتایج حاصله قابل استنادتر خواهند بود.



شکل ۱۱. تغییرات تنش برحسب فاصله‌داری [۳].



شکل ۱۲. مقایسه‌ی نتایج در دو مدل دوبعدی و سه‌بعدی [۳].

الف) ایجاد ترک از صفحه‌ی شکستگی و گسترش آن تا سطح آزاد، ب) ایجاد ترک از بخش خردشده و گسترش آن تا صفحه‌ی ترک. به‌طور کلی و با توجه به نتایج به دست آمده (که به آنها اشاره شد) می‌توان به مواردی، به‌عنوان نتایج اصلی، اشاره کرد.

۱. زاویه‌ی بحرانی شیب درزه، زاویه‌ی بین ۴۵ تا ۶۰ درجه است که در آن احتمال دست‌یابی به بیشترین پیش‌روی وجود دارد.

۲. فاصله‌داری بحرانی که در آن تأثیر فاصله‌داری بر میزان تنش بحرانی کاهش چشم‌گیری می‌یابد، فاصله‌ی ۲۰۰ میلی‌متر است.

#### پانویس

1. tunnel boring machine
2. cutter

#### منابع

1. Qiu-Ming gong; Zaho jian, and Jiao Yu-yong. "Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters", *Tunneling And Un-*

*derground space technology*, **20**, pp. 183-191, Elsevier (2005).

2. Qiu-Ming gong; Zaho jian, and Jiao Yu-yong. "Numerical modeling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters", *Tunneling and Underground space technology* (2005). <http://www.elsevier.com.2005>.

3. Iranzadeh, A.A. "3D numerical modeling of TBM tunnelling in jointed rock masses", MSc thesis, p139, Department of Mining & Metallurgy, Amirkabir University of Technology (2007).

4. Jaeger, J.C. "Shear failure of anisotropic rock." *Geology magazine*, Geoscience World, **97**, (1), pp. 65-72 (1960).
5. Barton, Nick. "TBM tunnelling in jointed and faulted rock", translated to Persian: Salehzadeh, H., Iran, University of science and industry, Tehran, Iran (1382).
6. Ozdemir, L., and Rostami, J. "A new model for performance prediction of hard rock TBMs", *proceeding of Proceeding of Annual Technical Meeting of The excavation engineering and Earth Mechanics Institute*, Colorado school of Mines, Colorado (1996).
7. Rostami, J.; Ozdemir. L., and Nilsen, B. "Comparison between CSM and NTH hard Rock TBM performance prediction models." *Proceeding of Annual Technical Meeting of the Institute of Shaft Drilling and Technology (ISDT)*, Las Vegas NV, p. 11 (2004).
8. Vutukuri, V.S., and Katsuyama, K. "Introduction to rock mechanics", translated to Persian: Hoseini-M.F., university books Pub. Tehran (1379).
9. Hoek, E., and Brown, E.T. "Underground excavations in rock", ? , Translated to Persian: Fahimifard-A, Soil mechanics laboratory of roads and transportation ministry of Iran (1376).