

## **Sensitivity analysis of operating parameters of mechanized tunneling in granite**

**M. Alikahi\***

### **Abstract**

Investigating and improving the performance of the tunnel boring machines is very important because of its impact on drilling costs. In this regard, it is necessary to identify effective excavation parameters and study their impact. Of the most effective parameters on mechanized tunneling are operator parameters. Accordingly, this study investigates the influence of parameters such as penetration depth, rotational speed, and distance between disc cutters. In order to examine these parameters, linear cutting machine (LCM) modeling has been used in the Abaqus software. After constructing the initial geometry, several analyzes were performed with different values of each parameters, and in this way, the parameters' effect on the device's performance and the energy required for drilling was determined. By conducting sensitivity analysis, it is found that in the granite, the penetration depth of 5 mm and the distance-to-depth ratio of 12.5 significantly reduce the energy required for drilling. Moreover, it can be seen that the effect of rotational speed on the energy changes required for drilling is low.

**Keywords:** Tunnel Boring Machine, Linear Cutting Test, Operating Parameters, Specific Energy, Numerical Modeling

---

\*Corresponding author E-mail: [alikaehosseini@gmail.com](mailto:alikaehosseini@gmail.com)

## آنالیز حساسیت پارامترهای اپراتوری حفاری مکانیزه در سنگ گرانیت

محمدحسین علیکاهی<sup>\*۱</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱)

### چکیده

بررسی و بهبود عملکرد دستگاه حفاری مکانیزه تونل‌ها به دلیل تأثیر آن بر هزینه‌های حفاری از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. بدین منظور نیاز است تا پارامترهای مؤثر بر حفاری شناسایی و اثر آنها مورد مطالعه قرار گیرد. یکی از دسته پارامترهای مؤثر بر حفاری مکانیزه تونل‌ها پارامترهای اپراتوری می‌باشند. در این پژوهش تأثیر پارامترهای عمق نفوذ، سرعت دورانی و فاصله بین تیغه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. برای بررسی پارامترهای بیان شده از مدلسازی دستگاه برش خطی سنگ (LCM)، در محیط نرم‌افزار آباکوس بهره گرفته شده است. پس از ساخت هندسه اولیه آنالیزهای متعددی با مقادیر متفاوت از هر یک از پارامترها صورت پذیرفته و از این طریق تأثیر پارامترها بر عملکرد دستگاه و انرژی لازم برای حفاری مشخص شد. با انجام آنالیزهای حساسیت مشخص می‌شود که در محیط گرانیتی عمق نفوذ ۵ میلی‌متر و نسبت فاصله به عمق ۱۲/۵ بیشترین اثر را بر کاهش انرژی لازم برای حفاری دارد. همچنین مشاهده می‌شود که اثر سرعت دورانی بر تغییرات انرژی لازم برای حفاری اندک می‌باشد.

### کلیدواژه‌ها: دستگاه TBM، آزمون برش خطی سنگ، پارامترهای اپراتوری، انرژی ویژه، مدل‌سازی عددی

### ۱. مقدمه

نمود ولی در محل کارگاه این پارامترها غیرقابل تغییر می‌باشند و در کارگاه تنها پارامترهای اپراتوری غیرتحمیلی بوده و می‌توان با تغییر مقادیر این پارامترها راندمان حفاری را تغییر داد.

در چند دهه اخیر به کمک انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی بزرگ مقیاس مانند آزمون برش خطی سنگ (Linear Cutting Test, LCT) و آزمون‌های کوچک مقیاس مانند برش خطی سنگ (Small Scale LCT) و آزمون برش مغزه (Core Cutting Test) و همچنین انجام مدل‌سازی‌های عددی به کمک نرم‌افزارهای مهندسی مختلف، محققان به بررسی عملکرد دستگاه حفاری مکانیزه تونل پرداخته‌اند.

از مهم‌ترین تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده برای تعیین عملکرد دستگاه TBM می‌توان به تحقیقات [۱-۳] اشاره کرد.

از مهم‌ترین تحقیقات انجام شده به کمک مدل‌سازی عددی نیز می‌توان به پژوهش [۴] اشاره کرد. در این پژوهش محققین از دو روش المان محدود (FEM) و المان گسسته (DEM) به صورت همزمان برای مدل‌سازی بهره برده‌اند. بدین صورت که بخشی از سنگ که در تماس با تیغه دیسکی بوده و به عبارت دیگر در معرض برش قرار دارد به روش المان گسسته مدل شده و سایر

یکی از عوامل مهم در پروژه‌های بزرگ عمرانی، بودجه و هزینه‌های پروژه می‌باشد. افزایش بازدهی حفاری مکانیزه باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های حفاری، تعمیر و نگهداری دستگاه و کاهش زمان حفاری و جلوگیری از آسیب و خرابی به تونل نهایی می‌شود. علیرغم اهمیت افزایش بازدهی حفاری و کاهش هزینه‌ها به خصوص در پروژه‌های بزرگ عمرانی، دستورالعمل مشخصی برای رسیدن به حداکثر بازدهی در محیط‌های سنگی مختلف وجود ندارد.

بمنظور افزایش بازدهی حفاری باید مقادیر بهینه پارامترهای اثرگذار بر حفاری را تعیین نمود. پارامترهای اثرگذار بر حفر مکانیزه تونل شامل پارامترهای مقاومتی و سایش توده سنگ و همچنین پارامترهای مربوط به دستگاه حفاری می‌باشند. در این میان پارامترهای دستگاه نیز به دو گروه پارامترهای اپراتوری حین حفاری و مشخصات ماشین و ابزارهای برشی تقسیم‌بندی می‌شوند. برخلاف پارامترهای مربوط به توده سنگ، پارامترهای مربوط به دستگاه حفاری غیرتحمیلی می‌باشند. اگرچه پارامترهای مربوط به هندسه دستگاه غیرتحمیلی می‌باشند و می‌توان این دسته از پارامترها را در مرحله طراحی دستگاه بهینه

دیگر محققین [۶] به کمک مدل‌سازی عددی تعدادی از آزمایش‌های LCM در نرم‌افزار انسیس AUTODYN-3D به بررسی فرآیند برش سنگ به وسیله تیغه دیسکی دستگاه TBM پرداخته‌اند. هدف نهایی از این پژوهش یافتن مقدار بهینه فاصله میان تیغه‌ها می‌باشد. پیش از انجام آنالیزهای عددی اصلی بمنظور رسیدن به هدف پژوهش نیاز است تا اثر سرعت بر راندمان حفاری مشخص شود و سرعت بهینه حفاری تعیین شود؛ بدین جهت تعدادی آنالیز عددی با سرعت‌های مختلف انجام می‌گیرد. با بررسی نتایج بدست آمده از این آنالیزها مشاهده می‌شود که انرژی ویژه وابستگی اندکی به سرعت حفاری دارد. علیرغم این نتیجه مشاهده می‌شود که زمان لازم برای حفاری با افزایش سرعت کاهش می‌یابد. در این تحقیق حرکت تیغه به صورت غیرهمزمان می‌یابد؛ به بیان دیگر ابتدا تیغه یک خط برش در نمونه سنگی ایجاد می‌کند سپس به میزان فاصله میان تیغه‌ها جابجا شده و خط برش دوم را ایجاد می‌نماید. برای تعیین نسبت فاصله به عمق بهینه از عمق نفوذ ۴ میلی‌متر و فواصل ۲۸، ۴۰، ۴۸، ۶۰، ۷۲ و ۸۰ میلی‌متر (نسبت فاصله به عمق ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۰) استفاده شده است. با بررسی‌های انجام شده نتیجه گرفته می‌شود که برای نسبت فاصله به عمق ۷ تا ۱۲ عبور خط برش اول باعث تأثیر بر سنگ‌های کنده شده در خط برش دوم می‌شود ولی برای نسبت فاصله به عمق‌های بیشتر از ۱۵ اثر خط برش اول کاسته می‌شود. برای تعیین مقدار بهینه نسبت فاصله به عمق باید مقداری از این نسبت که به ازای آن انرژی ویژه حداقل می‌شود را گزارش نمود که این مقدار برابر ۱۲ می‌باشد.

از دیگر پژوهش‌های عددی انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیقات [۷] که به بررسی فاصله بهینه بین تیغه‌ها در سنگ‌های درزه‌دار در محیط نرم‌افزار آباکوس پرداخته‌اند، تحقیقات [۸] که در مورد بهینه‌سازی و طراحی دستگاه حفاری مکانیزه به روش DEM می‌باشد، تحقیقات [۹] در زمینه بررسی عملکرد کاترهد دستگاه TBM در نرم‌افزار AUTODYN-3D اشاره نمود.

پژوهش حاضر با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود فرآیند حفاری تونل به کمک دستگاه TBM به بررسی مقادیر بهینه هر یک از پارامترهای اپراتوری در شرایط مختلف زمین‌شناسی می‌پردازد.

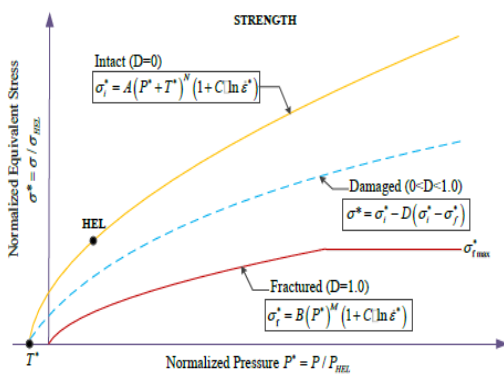
تفاوت پژوهش حاضر نسبت به پژوهش‌های پیشین، بررسی اثر پارامترهای اپراتوری دستگاه و انجام آنالیزهای حساسیت برای تعیین مقادیر بهینه هر پارامتر در شرایط مختلف می‌باشد.

## ۲. روش تحقیق

بخش‌های محیط سنگی به صورت پیوسته و به کمک روش المان محدود مدل‌سازی می‌شود. در پژوهش حاضر برای بررسی فرآیند برش سنگ به مطالعه اثر عمق نفوذ و فاصله میان تیغه‌ها بر نیروهای وارد بر تیغه و انرژی ویژه لازم برای حفاری پرداخته شده است. با بررسی نتایج این پژوهش مشاهده می‌شود که با افزایش عمق نفوذ نیروی عمودی و نیروی غلتشی وارد بر تیغه دیسکی نیز افزایش می‌یابد. این اثر با وضوح بیشتری در مورد نیروی غلتشی نمایان است و از آنجایی که نیروی غلتشی با انرژی لازم برای حفاری در ارتباط است می‌توان از این رابطه برای بررسی اثر عمق نفوذ بر انرژی لازم برای حفاری بهره جست. همچنین با بررسی نتایج حاصل از این پژوهش به این نتیجه دست یافته می‌شود که عمق نفوذ و فاصله میان تیغه‌ها دو عامل بسیار مهم و اثرگذار بر چگونگی پیش‌بینی عملکرد حفاری می‌باشند.

در پژوهشی دیگر، محققین [۵] به بررسی فرآیند برش سنگ به وسیله تیغه دیسکی دستگاه TBM پرداخته‌اند. این محققین با استفاده از مدل رفتاری دراگر-پراگر به همراه مدل آسیب Lemaitre به مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس پرداخته‌اند. مدل ساخته شده در نرم‌افزار در واقع مدلی از آزمایش RCM با استفاده از دو تیغه دیسکی می‌باشد. دو تیغه دیسکی علاوه بر دوران نسبت به محور Z در دستگاه مختصات کلی نسبت به محور X در دستگاه مختصات محلی تیغه نیز دوران می‌کنند. تیغه اول به اندازه ۵ درجه جلوتر از تیغه دوم قرار دارد که بیانگر حفاری غیرهمزمان تیغه‌ها در واقعیت می‌باشد. بمنظور تعیین بهینه‌ترین مقدار فاصله میان تیغه‌های دیسکی از ۸ مدل عددی با فاصله میان تیغه‌های ۴۰، ۴۸، ۵۶، ۶۴، ۷۲، ۸۰، ۸۸ میلی‌متر استفاده شده است. با بررسی نیروهای عمودی و غلتشی وارد بر تیغه در حین برش مشاهده می‌شود که میان تغییر فاصله و این نیروها رابطه خطی وجود دارد. با توجه به نتایج موجود مشاهده می‌شود که برای خط برش اول نیروهای وارد بر تیغه بدون تغییر می‌ماند. ولی برای خط برش دوم نیروهای وارد بر تیغه با افزایش فاصله میان تیغه‌ها افزایش می‌یابد. در حین برش عبور اول باعث ایجاد آسیب در سنگ شده که باعث عبور راحت‌تر تیغه در عبور دوم می‌شود ولی هرچه فاصله میان تیغه‌ها افزایش می‌یابد اثر خط برش اول کاسته می‌شود که باعث افزایش نیروهای وارد بر تیغه می‌شود. با بررسی تغییرات انرژی ویژه در مقابل فاصله میان تیغه‌ها برای تعیین بهینه‌ترین فاصله مشاهده می‌شود که نمودار حاصل سینوسی شکل بوده و فاصله ۷۲ میلی‌متر کمترین میزان انرژی ویژه را به خود اختصاص داده است. به بیان دیگر برای داشتن حداکثر بازدهی در حین حفاری در سنگ ماسه‌ای سخت باید از فاصله ۷۲ میلی‌متری میان تیغه‌ها استفاده نمود.

در این پژوهش برای شبیه‌سازی محیط سنگی که شامل سه محیط گرانیتی، ماسه‌سنگی و دولومیتی می‌شود از مدل رفتاری جانسون-هلمکوئیست (JH-2) استفاده شده است. مدل رفتاری جانسون-هلمکوئیست ابتدا برای شبیه‌سازی خصوصیات مواد شکننده مانند سرامیک‌ها استفاده می‌شد ولی امروزه از آن برای مدل کردن خصوصیات سنگ و بتن نیز استفاده می‌شود [۱۰]. در این مدل خصوصیات نرم‌شدگی نیز در نظر گرفته می‌شود و شامل مقاومت متناسب با فشار، آسیب، خرابی و اثر نرخ کرنش می‌باشد. در شکل ۱ خلاصه‌ای از مفاهیم مدل جانسون-هلمکوئیست آورده شده است.



شکل (۱). مدل مقاومتی مدل جانسون-هلمکوئیست [۱۰]

مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی سنگ گرانیت و ماسه سنگ و دولومیت به کمک مدل جانسون-هلمکوئیست در جدول ۲ آمده است.

جدول (۲). پارامترهای محیط‌های سنگی برای شبیه‌سازی با مدل جانسون-هلمکوئیست [۱۰]

Constants	Granite	Constants	Granite
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.66	Hugoniot elastic limit HEL (GPa)	4.5
Shear modulus (GPa)	21.9	HEL pressure (GPa)	2.93
Intact strength coefficient A	1.248	Bulk factor β	1.0
Fractured strength coefficient B	0.68	Damage coefficient D <sub>1</sub>	0.008
Strain rate coefficient C	0.0051	Damage coefficient D <sub>2</sub>	0.435
Fractured strength exponent M	0.83	Bulk modulus K <sub>1</sub> (GPa)	25.7
Intact strength exponent N	0.676	Second pressure coefficient K <sub>2</sub> (GPa)	-386
Maximum tensile strength T (GPa)	57	Third pressure coefficient K <sub>3</sub> (GPa)	12800
Maximum normalized fractured strength σ <sub>f max</sub>			0.16

در این پژوهش سعی بر آن است که با مدل‌سازی عددی فرآیند برش سنگ به وسیله تیغه دیسکی کاترهد دستگاه TBM در نرم‌افزار ABAQUS و بررسی اثر پارامترهای مختلف بر نتایج فرآیند برش، عملکرد دستگاه TBM در شرایط مختلف تعیین شود.

در این پژوهش به منظور مدل‌سازی فرآیند برش سنگ از دستگاه برش خطی سنگ (LCM) که در تحقیقات [۱] گزارش شده استفاده شده است. این دستگاه قادر است تا فرآیند برش سنگ به وسیله تیغه‌های دیسکی را در شرایط محل حفاری شبیه‌سازی کند. همچنین به کمک این دستگاه می‌توان اثر پارامترهای اپراتوری مختلف را در محدوده گسترده‌ای از سنگ‌ها مورد مطالعه قرار داد.

به منظور مدل‌سازی فرآیند برش سنگ به کمک دستگاه LCM ابتدا باید هندسه مدل در نرم‌افزار رسم شود. تیغه دیسکی در نظر گرفته شده در این مدل‌سازی، یک برش دهنده مقطع ثابت با قطر ۴۳۱ میلی‌متر (۱۷ اینچ) ساخته شرکت رابینز واشنگتن است. نوع برش دهنده B-49225 می‌باشد که به برش دهنده سخت معروف است. ضخامت لبه رینگ حدوداً ۱۱/۵ میلی‌متر (۰/۴۵ اینچ) است که با زاویه ۵ درجه از لبه به سمت توپی به تدریج این ضخامت افزایش می‌یابد. خصوصیات مکانیکی برای تیغه دیسکی، فولاد از نوع AISI-4340 در نظر گرفته شده است و در جدول ۱ آورده شده است. چون مطالعه حاضر بر مکانیسم خردشدگی سنگ بیشتر از ماندگاری نوک تیغه می‌پردازد، سایش تیغه دیسکی در این مدل لحاظ نمی‌شود و بنابراین مدل تسلیم و شکست برای فولاد در خصوصیات مکانیکی آن در نظر گرفته نشده است.

جدول (۱). خصوصیات مکانیکی در نظر گرفته شده برای تیغه دیسکی

نوع مواد	مدول الاستیسیته		تنش تسلیم		ضریب پواسون
	GPa	ksi	MPa	ksi	
فولاد-AISI-4340	۲۰۰	۲۹۰۰۰	۸۶۰	۱۲۳۸۴۰	۰/۲۹

ابعاد هندسه بلوک سنگ در آزمایش برش خطی معمولاً حداکثر تا ۱×۱×۰/۷ متر انتخاب می‌شود؛ اما در این تحقیق به منظور کاهش زمان محاسبات با اندازه ۰/۲×۰/۲×۰/۱ متر در نظر گرفته شده است. این شرایط برای هندسه مدل سنگ به گونه‌ای انتخاب شده است که بر نتایج تحلیل‌ها اثری نداشته باشد.

می‌شود. سپس در قسمت میانی که فرآیند برش و عبور تیغه دیسکی در آن اتفاق می‌افتد اندازه المان‌ها را کوچکتر و برابر ۳ میلی‌متر در نظر گرفته و اندازه المان‌ها را در دو بخش جانبی بزرگتر و برابر ۶ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

به منظور دست یافتن به هدف این پژوهش باید از آنالیز حساسیت پارامترهای اپراتوری دستگاه حفاری در شرایط مختلف استفاده کرد. برای انجام آنالیز حساسیت هر پارامتر باید حداقل انرژی صرف شده برای حفاری به ازای مقادیر مختلف آن پارامتر را بدست آورد. بدین منظور در این پژوهش به ازای مقادیر مختلف هر یک از پارامترها آنالیز عددی انجام می‌شود. برای یافتن مقدار بهینه هر پارامتر باید از انرژی ویژه استفاده کرد و مقداری از پارامتر که به ازای آن انرژی ویژه کمینه می‌شود را به عنوان مقدار بهینه پارامتر برای داشتن حداکثر بازدهی گزارش کرد.

برای تعیین انرژی ویژه طبق رابطه (۱) با داشتن جرم اولیه نمونه سنگی و جرم باقی‌مانده از سنگ پس از اتمام فرآیند برش، جرم سنگ کنده شده در طی فرآیند برش بدست می‌آید. با داشتن چگالی نمونه سنگی و جرم سنگ کنده شده، حجم سنگ کنده شده تعیین می‌شود. برای یافتن میانگین نیروی غلتشی وارد بر تیغه دیسکی نیز پس از پایان آنالیز عددی با داشتن نمودار نیروی غلتشی وارد بر تیغه در طول فرآیند برش و حذف قسمت‌های ابتدایی و انتهایی که تحت تأثیر شرایط مرزی می‌باشد و با میانگین‌گیری از مقادیر باقی‌مانده نتیجه مطلوب بدست می‌آید.

به طوری که در آن SE انرژی ویژه، MRF میانگین نیروی غلتشی وارد بر تیغه،  $I_x$  اندازه برش،  $m$  جرم برش خورده از سنگ و  $\rho$  دانسیته سنگ خواهد بود.

در این پژوهش از پارامترهای عمق نفوذ و فاصله بین تیغه‌ها (نسبت فاصله به عمق) و سرعت دورانی برای آنالیز حساسیت در محیط سنگی گرانیته استفاده شده است.

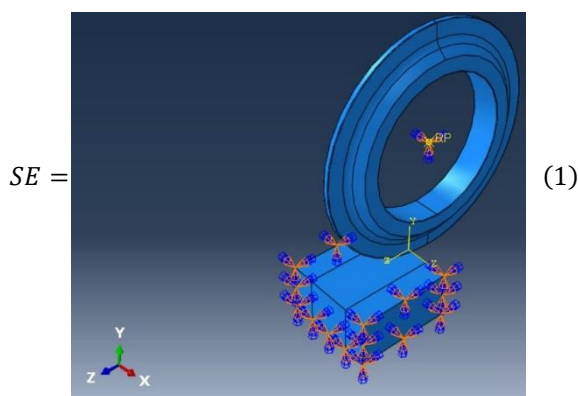
### ۳. نتایج و بحث

هدف از این پژوهش بررسی عملکرد دستگاه TBM و بهبود آن می‌باشد. بدین منظور در محیط سنگی گرانیته پارامترهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و با تعیین مقدار هر یک از این پارامترها که به ازای آن انرژی ویژه حداقل می‌شود به عنوان مقدار بهینه، روشی برای بهبود عملکرد دستگاه ارائه می‌شود.

در این مدل‌سازی تیغه دیسکی به صورت یک جسم صلب مدل خواهد شد. بدین منظور نقطه مرکز تیغه به عنوان نقطه مرجع تعیین می‌شود. حال می‌توان سرعت‌های خطی و دورانی و سایر خصوصیات تیغه را به این نقطه مرجع اختصاص داد.

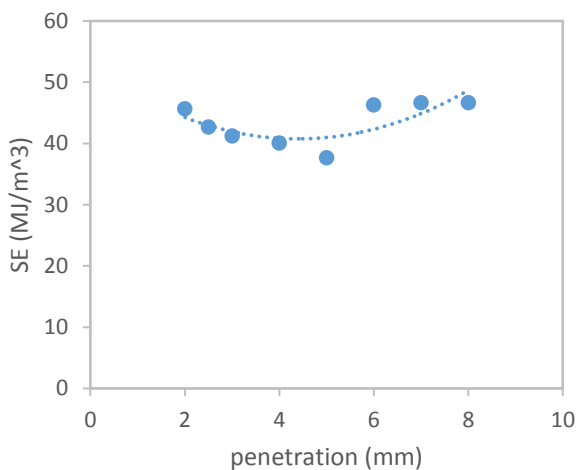
برای اعمال شرایط مرزی می‌توان از شرایط مرزی آزمایش برش خطی استفاده کرد. در این حالت تیغه دستگاه تنها در راستای برش امکان جابجایی و دوران دارد و در سایر راستاها می‌توان با اعمال قید از حرکت جلوگیری کرد. این حالت دقیقاً مشابه کاری است که بلبرینگ‌های موجود در کنار دیسک در حین آزمایش انجام می‌دهند و مانع از حرکت تیغه به چپ و راست در اثر نیروهای اعمالی حین برش می‌شوند. همچنین در این بخش می‌توان سرعت خطی ۲ متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۱۰ رادیان بر ثانیه تعیین شده برای مدل‌سازی فرآیند برش را به نقطه مرجع تیغه دیسکی اعمال کرد.

در آزمایش برش خطی نمونه سنگی در داخل یک جعبه قالب‌بندی قرار دارد و اطراف آن نیز توسط بتن پوشانده شده است به همین دلیل در مدل‌سازی عددی به جز وجه بالایی نمونه بقیه سطوح بصورت مقید تعریف می‌شوند. نحوه قرارگیری تیغه و نمونه سنگی و شرایط مرزی مدل در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل (۲). نحوه قرارگیری و شرایط مرزی مدل

موضوع مهمی که در این بخش وجود دارد اندازه المان‌ها می‌باشد. اندازه المان‌ها اگر خیلی بزرگ باشد دقت آنالیز پایین می‌آید و نتیجه دلخواه از مدل‌سازی بدست نمی‌آید. از طرف دیگر اگر اندازه المان‌ها خیلی ریز هم باشد زمان آنالیز بدون اینکه افزایش دقت و مزیتی داشته باشد افزایش پیدا می‌کند. پس نیاز است به کمک آنالیزهای مختلف و همچنین استفاده از مطالعات محققین گذشته اندازه مناسب المان‌ها را پیدا کرد؛ که در این پژوهش با انجام آنالیزهای مختلف به این نتیجه دست یافته شد که برای نمونه سنگی به منظور کاهش حجم محاسبات با استفاده از پارتیشن‌بندی نمونه به یک بخش میانی و دو بخش جانبی تقسیم



شکل (۴). تغییرات انرژی ویژه در مقابل عمق نفوذ سنگ گرانیت

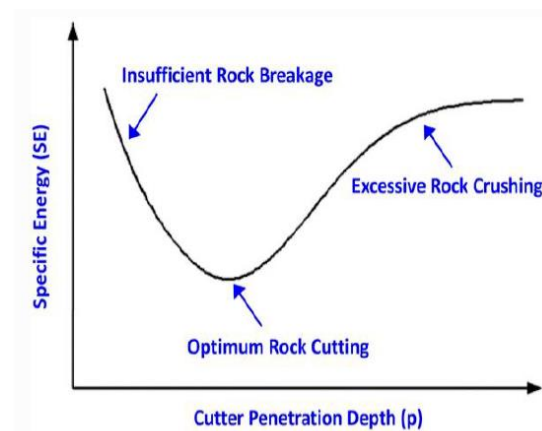
همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود به ازای عمق نفوذ ۵ میلی‌متر مقدار انرژی ویژه کمک‌ترین مقدار خود را خواهد داشت و به بیان دیگر برای شرایط ذکر شده در فرآیند برش در سنگ گرانیت مقدار نفوذ ۵ میلی‌متر، عمق نفوذ بهینه برای داشتن بهترین عملکرد دستگاه حفاری مکانیزه می‌باشد.

دومین پارامتر فاصله میان تیغه‌های دیسکی (نسبت فاصله به عمق) می‌باشد. زمانیکه فاصله میان دو تیغه خیلی زیاد باشد ترک‌های ایجاد شده ناشی از عبور و برش تیغه تنها در اطراف مسیر برش تشکیل شده و با یکدیگر برخورد نداشته و با برخورد به سطح آزاد نمونه چپ‌ها و تراشه‌های کوچک مثلثی شکلی را تشکیل می‌دهند. در این حالت مصالح موجود میان تیغه سالم باقی‌مانده و یک حائل میان دو بخش آسیب‌دیده زیر تیغه را تشکیل می‌دهند. همچنین اگر فاصله میان تیغه‌ها خیلی کم باشد و یا نیروی وارد بر سنگ خیلی زیاد باشد، ترک‌های ایجاد شده گسترش یافته ولی به علت هم‌پوشانی زیادی که با هم دارند تشکیل یک کانال را داده و در واقع تراشه تشکیل شده حداکثر تراشه ممکن نخواهد بود. ولی در شرایطی که فاصله میان تیغه‌ها به مقدار بهینه خود می‌رسد ترک‌های تشکیل شده مصالح بیشتری را درگیر کرده و باعث می‌شوند در شرایط یکسان با صرف انرژی کمتر مقدار سنگ بیشتری کنده شده و بازدهی حفاری افزایش یابد.

فاصله میان تیغه‌ها بر اندازه تراشه‌های تشکیل شده نیز اثر دارد که این امر باعث تغییر در میزان بازدهی حفاری می‌شود. با افزایش فاصله نیروی عمودی وارد بر تیغه‌ها نیز افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع آن است که در این حالت تیغه‌ها باید سنگ‌های دست‌نخورده بیشتری مقابله کنند. همچنین افزایش فاصله باعث

اولین پارامتری که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است؛ عمق نفوذ می‌باشد. عمق نفوذ و فاصله (همچنین نسبت فاصله به عمق  $(S/P)$ ) از عوامل مهم و مؤثر بر انرژی ویژه و راندمان حفاری می‌باشند. مطابق شکل ۳ وقتی نسبت فاصله به عمق خیلی کم باشد سطح سنگ تحت برش قرار گرفته پودر می‌شود که باعث صرف انرژی ویژه بالایی می‌شود در مقابل وقتی این نسبت خیلی زیاد باشد تراشه‌های شکل گرفته به علت فاصله زیاد از هم امکان اتصال را نداشته که این امر باعث کاهش راندمان حفاری و در نتیجه صرف انرژی ویژه بیشتری برای حفاری سنگ می‌شود.

برای تعیین مقدار بهینه عمق نفوذ باید با انجام آنالیزهای مختلف برای عمق نفوذهای متفاوت مقدار انرژی ویژه را محاسبه نموده و مقدار عمق نفوذ متناظر با انرژی ویژه کمینه را به عنوان مقدار بهینه عمق نفوذ گزارش نمود. روند کار طبق توضیحات بخش پیشین بوده و پس از تعیین مقدار سنگ کنده‌شده و میانگین نیروی غلتشی وارد بر تیغه دیسکی طبق رابطه ۱ انرژی ویژه را محاسبه نمود. عمق نفوذهای مورد استفاده در این پژوهش برای آنالیز حساسیت، عمق‌های ۲، ۲/۵، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۸ میلی‌متر می‌باشد.



شکل (۳). انرژی ویژه در مقابل عمق نفوذ و نسبت فاصله به عمق [۸]

در شکل ۴ روند تغییرات انرژی ویژه در مقابل تغییرات عمق نفوذ تیغه دیسکی در سنگ گرانیت به منظور تعیین عمق نفوذ بهینه نمایش داده شده است.

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود مشابه توضیحات داده شده، نمودار تغییرات انرژی ویژه در مقابل نسبت فاصله به عمق دارای یک قعر بوده که متناظر با حداقل مقدار انرژی ویژه و مقدار بهینه نسبت فاصله به عمق می‌باشد. در این حالت مقدار نسبت فاصله به عمق ۱۲/۵ کمترین مقدار انرژی ویژه را به خود اختصاص داده است. همچنین با توجه به خط روند رسم شده مقدار بهینه نسبت فاصله به عمق در بازه میان مقادیر ۱۱ و ۱۲ قرار گرفته است و به بیان دیگر با داشتن نسبت فاصله به عمق بین ۱۱ تا ۱۲ در سنگ گرانیت و با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها حفاری بیشترین میزان بازدهی را داشته و می‌توان با کمترین مقدار صرف انرژی حداکثر نتیجه را کسب نمود.

بمنظور مطالعه اثر سرعت دورانی بر راندمان حفاری و تعیین مقدار بهینه این پارامتر لازم است از سرعت دورانی کاترهد استفاده شود. این موضوع به این دلیل است که تیغه‌های دیسکی دارای موتور مجزا نبوده و در اثر چرخش کاترهد و تماس با محیط سنگی مجاور تیغه دوران پیدا می‌کنند. بر روی کاترهد دستگاه TBM تعداد زیادی تیغه در شعاع‌های مختلف قرار دارند. در این پژوهش با در نظر گرفتن کاترهدی با قطر ۶/۵ متر که تیغه‌های دیسکی از شعاع ۱۰ سانتی‌متری تا ۳۲۰ سانتی‌متری بر روی آن تعبیه شده‌اند می‌توان تیغه دیسکی با شعاع قرارگیری ۱/۵ متر به عنوان نماینده تیغه‌ها استفاده نمود.

حال برای بررسی اثر سرعت دورانی و سرعت خطی می‌توان این پارامترها را برای تیغه‌های دیسکی معادل‌سازی کرد. بدین منظور با داشتن سرعت دورانی کاترهد دستگاه می‌توان به کمک رابطه  $V = r \cdot \omega$  و شعاع قرارگیری تیغه‌ها سرعت خطی تیغه را بدست آورد. همچنین با داشتن سرعت خطی تیغه و شعاع تیغه و استفاده دوباره از رابطه بالا سرعت دورانی تیغه را نیز بدست آورد.

سرعت دورانی‌های مورد استفاده در این پژوهش برای انجام آنالیز حساسیت نسبت به سرعت دورانی، سرعت‌های ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ دور بر دقیقه می‌باشد.

در شکل ۶ تغییرات انرژی ویژه در مقابل سرعت دورانی برای تیغه قرارگرفته در شعاع ۱/۵ متری نمایش داده شده است.

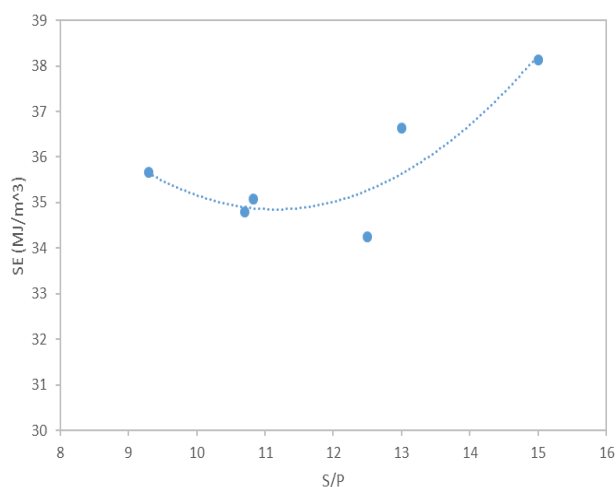
تشکیل تراشه‌های بیشتری می‌شود ولی این موضوع زمانی حداکثر تأثیر خود را دارد که همراه با افزایش عمق نفوذ باشد.

با افزایش فاصله میان تیغه‌ها نیروی غلتشی و نیروی عمودی بیشتر در طول فرآیند برش به تیغه‌ها وارد می‌شود. نرخ افزایش نیروها متناظر با افزایش فاصله، در فواصل کم زیاد است ولی هرچه فاصله بیشتر می‌شود اثر آن بر تغییرات نیروها کمتر می‌شود و در فواصل زیادتر مقادیر نیرو ثابت می‌شود. دلیل این امر را این‌گونه می‌توان تفسیر کرد که در فواصل زیاد، اثر دو تیغه بر روی یکدیگر از بین رفته و در واقع می‌توان دو تیغه را به عنوان دو تک تیغه در نظر گرفت و دیگر تغییرات فاصله اثری بر فرآیند برش و نیروهای حاصل از آن نخواهد داشت.

با انجام آنالیزهای بیشتر مشاهده می‌شود که در عمق نفوذهای کم مقدار فاصله‌ای که به ازای آن نیروهای وارد بر تیغه ثابت می‌شوند مقدار کمتری خواهد داشت. همچنین افزایش عمق نفوذ باعث افزایش فاصله موردنظر خواهد شد. به همین جهت معمولاً در تحقیقات اثر فاصله و عمق نفوذ را به صورت همزمان و با پارامتر نسبت فاصله به عمق (S/P) می‌سنجند.

به منظور مطالعه اثر فاصله بر بازدهی حفاری سنگ از ۶ آنالیز عددی با نسبت فاصله به عمق‌های مختلف استفاده می‌شود. ۶ آنالیز عددی انجام شده برای سه عمق ۵، ۶ و ۷ میلی‌متر و دو فاصله ۶۵ و ۷۵ میلی‌متری می‌باشد که در نتیجه آن ۶ نسبت فاصله به عمق ۱۵، ۱۳، ۱۲/۵، ۱۰/۸۳، ۱۰/۷ و ۹/۳ حاصل می‌شود.

نتایج مربوط به آنالیزهای عددی انجام شده در سنگ گرانیت در شکل ۵ آورده شده است.



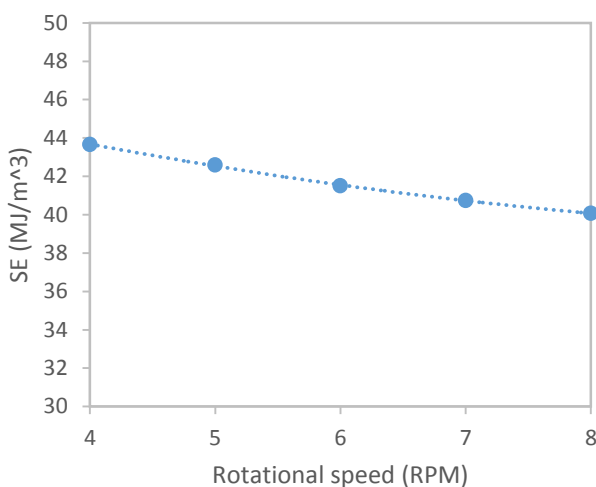
شکل (۵). تغییرات انرژی ویژه در مقابل نسبت فاصله به عمق در سنگ گرانیت

با بررسی‌های صورت گرفته مشاهده می‌شود که رفتار دو پارامتر عمق نفوذ و نسبت فاصله به عمق تیغه‌های دیسکی مشابه یکدیگر بوده و نمودار تغییرات این دو پارامتر در مقابل تغییرات انرژی ویژه حالت U شکل دارد؛ به عبارت دیگر در عمق نفوذها و فاصله بین تیغه‌های کم فرآیند برش سنگ و تشکیل تراشه‌ها و پیوستن آنها به یکدیگر کامل صورت نپذیرفته که باعث هدر رفت انرژی و افزایش انرژی لازم برای حفاری می‌شود. همچنین در مقادیر زیاد نیز به دلیل نیاز بر غلبه بر المان‌های زیادی از سنگ در هر مرحله از حفاری به انرژی زیادی لازم است که عملکرد دستگاه حفاری را تضعیف می‌کند. مقادیر بهینه حفاری مقادیر میانی بازه در نظر گرفته شده (عمق نفوذ ۵ میلی‌متر و نسبت فاصله به عمق ۱۲/۵) می‌باشد که با استفاده از این مقادیر برای پارامترهای ذکر شده دستگاه بهترین عملکرد را خواهد داشت.

برخلاف دو پارامتر دیگر اثر سرعت دورانی بر تغییرات انرژی لازم برای حفاری اندک می‌باشد و نشان‌دهنده این موضوع است که اثر سرعت دورانی بر بهبود عملکرد دستگاه TBM محدود می‌باشد و می‌توان از سرعت‌های مجاز دستگاه متناسب با محیط‌های مختلف حفاری استفاده نمود.

## ۵. مراجع

- [1] Rostami, J., (1997). "Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure". PhD thesis, Department of Mining Engineering, Colorado School of Mines, USA.
- [2] Pan, Y; Liu, Q; Liu, J; Huang, X; Liu, Q; Peng, X. (2018). "Comparison between experimental and semi-theoretical disccutter cutting forces: implications for frame stiffness of the linear cutting machine." *Arabian Journal of Geosciences*, 11(11):266, 2018.
- [3] Gertsch, R; Gertsch, L; Rostami, J. (2007). "Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction". *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44 (2007), 238-246.
- [4] Labra, C.; Rojek, J; Onate, E. (2017). "Discrete/Finite Element Modelling of Rock Cutting with a TBM Disc Cutter". *Rock Mech Rock Eng* (2017) 50:621-638.
- [5] Qi, G; Zhengying, W; Hao, M; Qiao, C. (2016). "Numerical and experimental research on the rock-breaking process of tunnel boring machine normal disc cutters." *Journal of mechanical science and Technology* 30(4) (2016) 1733-1745.
- [6] Cho, J; Jeon, S; Yu, S; Chang, S. (2010). "Optimum spacing of TBM disc cutter: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing



شکل (۶). تغییرات انرژی ویژه در مقابل سرعت دورانی برای سنگ گرانیت

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش سرعت دورانی مقدار انرژی ویژه کاهش می‌یابد و به بیانی دیگر با افزایش سرعت دورانی راندمان حفاری افزایش می‌یابد. البته موضوع دیگری که در این شکل می‌توان به آن اشاره کرد این است که میزان تغییرات انرژی ویژه محدود است و هر چه سرعت دورانی افزایش می‌یابد این تغییرات کمتر می‌شود پس می‌توان نتیجه گرفت که اثر سرعت دورانی به خصوص در سرعت دورانی‌های زیاد کم است و در مقایسه با عمق نفوذ، اثر سرعت دورانی بر راندمان حفاری کمتر از اثر عمق نفوذ می‌باشد.

## ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به آنالیز حساسیت پارامترهای عمق نفوذ و فاصله میان تیغه‌های دیسکی و سرعت دورانی به منظور تعیین مقدار بهینه‌ای که به ازای آن راندمان حفاری بیشینه می‌شود در محیط سنگی گرانیت به منظور بررسی و بهبود عملکرد دستگاه TBM پرداخته شد. در این پژوهش به منظور انجام آنالیزهای عددی از مدل‌سازی دستگاه برش خطی سنگ (LCM) که در تحقیقات محققین قبلی [۱] گزارش شده استفاده شده است. برای انجام آنالیز حساسیت نسبت به سه پارامتر عمق نفوذ و فاصله میان تیغه‌ها و سرعت دورانی، با انجام چند آنالیز عددی و استخراج نتایج و تعیین انرژی ویژه متناظر با هر آنالیز؛ مقداری از پارامترها که به ازای آن مقدار انرژی ویژه حداقل می‌شود را به عنوان مقدار بهینه پارامتر که در صورت استفاده از آن دستگاه بهترین عملکرد را خواهد داشت گزارش شد.



- element method”. *Computacion y Sistemas*, Vol. 17, No. 3, pp. 329-339.
- [9] Han, M.D; Cai, Z.X; Qu, C.Y; Jin, L.S. (2017). “Dynamic numerical simulation of cutterhead loads in TBM tunneling”. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017. **70**: p. 286–298.
- [10] Wang, J; Yin, Y; Luo, Ch. (2018). “Johnson-Holmquist-II (JH-2) Constitutive Model for Rock Materials: Parameter Determination and Application in Tunnel Smooth Blasting”. *Applied Science*, 2018, 8, 1675.
- method.” *Tunnelling and underground space technology* 25 (2010) 230-244.
- [7] Zare, M; Mikaeil, R. (2016). “Optimization of tunnel boring machine (TBM) disc cutter spacing in jointed hard rock using a distinct element numerical simulation.” *Periodica Polytechnica civil engineering* 61(1), pp. 56-65.
- [8] Medel-Morales, R; Botello-Rionda, S. (2013). “Design and optimization of tunnel boring machines by simulating the cutting rock process using the discrete