

مطالعه عددی تغییرات نیروهای جانبی وارده بر تیغه‌ها در ماشین‌های حفاری مکانیزه تونل

منصور صبری^{۱*}، حسن وحیدی^۲، علی ذنوبی^۳، محمد رستمی^۴، محسن هوشنگ^۵

- ۱- دکتری مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس
- ۲- کارشناسی ارشد معدن، دانشگاه علوم و تحقیقات
- ۳- کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه امام حسین
- ۴- کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه آزاد اسلامی
- ۵- کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه صنعتی شریف

Email: m.sabri@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۱۲/۰۹

تاریخ دریافت ۱۴۰۲/۰۴/۲۰

چکیده

تعیین نیروهای وارد شده بر تیغه‌ها در دستگاه‌های حفاری مکانیزه تونل از اهمیت بالایی برخوردار است چرا که از این نیروها در طراحی و ساخت ماشین استفاده می‌شود. در این میان نیروهای جانبی کمتر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. پس در این مقاله به مطالعه عددی نیروهای جانبی وارده بر تیغه‌ها و ارتباط آن با شعاع نصب روی کله حفار و پهنای لبه تیغه پرداخته شده است. همچنین نتایج به دست آمده با اطلاعات دستگاه حفاری قطعه دوم تونل انتقال آب کانی سیب اعتبارسنجی شده است. بدین منظور سه نوع تیغه ۱۷ اینچی با پهنای لبه‌های ۱۸.۵ میلی‌متر، ۱۹.۶ میلی‌متر و ۲۰.۸ میلی‌متر در شعاع‌های نصب ۰.۳ متر، ۱ متر و ۲ متر مدلسازی عددی شده است. نتایج مدل‌های عددی نشان می‌دهد اندازه نیروهای جانبی وارد شده بر تیغه‌های مرکزی با شعاع نصب پایین بسیار بیشتر از تیغه‌های میانی و لبه‌ای می‌باشد. همچنین این نیروها بیشتر به صورت نامتقارن بوده و با افزایش شعاع نصب، متقارن می‌شود. این شرایط با افزایش پهنای لبه تیغه‌ها تشدید نیز می‌شود. با بررسی الگوی خرابی تیغه‌ها در دستگاه حفاری قطعه دوم کانی سیب نیز این نتیجه‌گیری به صورت مشابه تکرار می‌شود. در این پروژه بیش از ۷۴ درصد خرابی تیغه‌های مرکزی با شعاع نصب پایین، ناشی از مشکلات داخلی و شکست در سیستم باربری و یاناقان است. علت این نوع خرابی، وارد آمدن نیروهای نامتقارن و بزرگ جانبی است این در حالی است که تنها ۲۶ درصد تیغه‌های میانی با شعاع نصب بالا دچار این نوع خرابی شده است که تأیید کننده نتایج مدل‌های عددی می‌باشد.

واژگان کلیدی: تیغه حفاری، نیروی جانبی، تونل کانی سیب، روش المان محدود.

۱- مقدمه

توسعه روز افزون جوامع بشری و رشد فزاینده جمعیت، سبب افزایش نیاز به ساخت فضاهای بزرگ زیرزمینی شده است. انواع نیروگاه‌ها، سالن‌ها، انبارها و تونل‌های حمل و نقل و انتقال آب از جمله این سازه‌ها می‌باشد. بدیهی است که با توجه به افزایش شدید تقاضا، سرعت ساخت این سازه‌ها نیز به تناسب باید افزایش یابد تا پاسخگوی نیازهای جدید باشد. در این میان انواع ماشین‌های حفر مکانیزه تونل^۱ متناسب با شرایط مختلف زمین‌شناسی، ساخت و بکارگیری شده است. تیغه‌های حفاری^۲ نصب شده روی کله حفار^۳، یکی از اصلی‌ترین اجزاء این ماشین‌ها می‌باشد. تخمین صحیحی از نیروهای وارد شده بر تیغه‌های حفاری به عنوان یکی از پارامترهای اصلی طراحی ماشین‌های حفر مکانیزه تونل می‌باشد. شکل (۱)، انواع نیروهای وارده به تیغه‌ها به عنوان نیروهای مورد نیاز برش سنگ را نشان می‌دهد. نیروی عمودی^۴ برای نفوذ دادن تیغه در سنگ، نیروی غلتشی^۵ برای غلبه بر نیروی اصطکاکی در برابر غلطش تیغه‌ها که سبب ایجاد گشتاور مقاوم نیز می‌شود و در نهایت نیروی جانبی^۶ که بر اثر تشکیل تراشه در یک سمت تیغه و ایجاد بارگذاری نامتقارن تولید می‌شود.

شکل ۱. نیروهای برش سنگ [1]

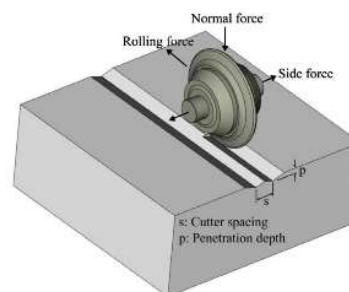


Fig. 1. Rock cutting forces [1]

با توجه به اهمیت این نیروها هم در مرحله طراحی ماشین حفار و هم در حین عملیات حفاری، تخمین این نیروها به روش‌های مختلف به صورت وسیعی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. مدل‌های تئوریک جزئی اولین کوشش‌ها در این زمینه بودند. مدل ارائه شده توسط ایوانز^۷ [2] در سال ۱۹۷۴ جزء اولین کوشش‌ها در زمینه پیش‌بینی نیروهای برش، مبتنی بر پارامترهای مقاومتی سنگ و هندسی تیغه بوده ولی در آن پارامترهای موثر دیگری مانند قطر تیغه و فاصله‌داری لحاظ نشده است. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد مقدار نیروی پیش‌بینی شده در این روش نظری کمتر از مقدار واقعی می‌باشد [3]. یک سال بعد راکسبورگ و فیلپس^۸ [4] در سال ۱۹۷۵ مدل نظری خود را با فرض اینکه مقاومت در برابر نفوذ تیغه بیشتر به صورت فشاری بوده و نیروی عمودی، معادل تنش فشاری اعمالی روی سنگ در محل تماس تیغه حفاری می‌باشد، ارائه دادند. آن‌ها با محاسبه هندسی سطح تماس تیغه با سنگ و محاسبه تنش و معادل قرار دادن آن با مقاومت فشاری سنگ، نیروی شکست را محاسبه کردند. اوزدمیر^۹، میلر^{۱۰} و وانگ^{۱۱} [5] از مدرسه معدنی کلرادو^{۱۲} در سال ۱۹۹۷ بر اساس نتایج حاصل از یکسری آزمایش‌های جامع و گسترده‌ای، مدل CSM را پیشنهاد دادند. در این مدل علاوه بر پارامترهای لحاظ شده در مدل راکسبورگ، تاثیر برش‌های مجاور و فاصله آن نیز در نظر گرفته شده بود. در ادامه همین کار، رستمی و اوزدمیر [6] در سال ۱۹۹۳ مدل جدید CSM را ارائه دادند. بر اساس این مدل، نیروی اعمالی روی تیغه با انتگرال‌گیری از المان‌های نیروی ناشی از فشار اعمالی روی تیغه حفاری بدست می‌آید. لیزرود^{۱۳} [7] نیز در سال ۱۹۹۷ بر مبنای محاسبه سطح تماس تیغه با سنگ و توزیع تنش در آن ناحیه، مدلی برای محاسبه نیروی عمودی برش به صورت تابعی از مقاومت فشاری تک محوری سنگ، فاصله تیغه‌ها،

7 Evans

8 Roxborough and Phillips

9 Ozdemir

10 Miller

11 Wang

12 Colorado School Of Mine

13 Lislerud

1 Tunnel Boring Machines (TBMs)

2 Disc Cutter

3 Cutter Head

4 Normal Force

5 Rolling Force

6 Side Force

مصلح، تطبیق فرمول‌بندی لاگرانژی و اوپلری بعنوان یکی از قدیمی‌ترین روش‌های عددی قادر به مدل‌سازی و تحلیل فرآیندها پیچیده برش سنگ توسط تیغه است. از جمله مهمترین و قدرتمندترین کدهای تجاری مبتنی بر این روش عددی، نرم‌افزار آباکوس^۵ است که در این مطالعه از آن استفاده شده است. این نرم‌افزار بر مبنای المان‌بندی محیط و اعمال شرایط مرزی، قادر به محاسبه تغییر شکل‌ها و تعیین وضعیت تنش‌ها در مدل است.

۲-۳- فرآیند مدل‌سازی

هندسه مدل مورد استفاده متشکل از دو جزء است. جزء اول تیغه که بر اساس نقشه‌های ساخت، به صورت یک جسم صلب و بدون در نظر گرفتن هرگونه تغییر وضعیت در حین حفاری لحاظ شده است. اندازه تیغه‌ها نیز به صورت واقعی و مطابق با تیغه ۱۷ اینچی مدل‌سازی شده است. تیغه‌ها کاملاً مشابه همدیگر بوده و تنها تفاوت آن‌ها در پهنای لبه است.

شکل ۲. سطح مقطع تیغه‌ها

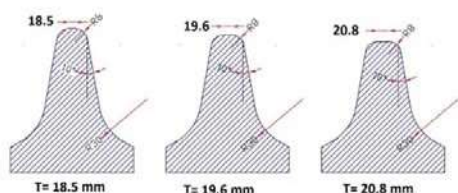


Fig. 2. Cross section of disc cutters

جزء دوم مدل نیز نمونه سنگ است. در خصوص این جزء از مدل، پارامترهای موثر زیادی باید بدقت بررسی و اعمال شود. شکل، اندازه نمونه، نوع المان، اندازه المان، مدل رفتاری، شرایط مرزی، نوع تماس‌ها و نوع حلگر از مهمترین این پارامترها می‌باشد. با توجه به شباهت بسیار زیاد آزمون RCM به فرآیند واقعی حفاری مکانیزه تونل نسبت به آزمون LCM و تعیین بهتر نیروهای جانبی در این حالت، مطابق شکل (۳)، هندسه مدل به صورت چرخشی با سه مقدار شعاع نصب برابر با ۰.۳ متر، ۱ متر و ۲ متر به نمایندگی از سه بلوک

عمق نفوذ و ضخامت لبه تیغه^۱ ارائه نموده است. به تازگی با توسعه کامپیوترها و به کمک روش‌های عددی، مطالعه فرآیند نفوذ تیغه در سنگ و تعیین نیروهای برش با استفاده از مدل‌سازی‌های عددی نیز به صورت گسترده‌ای در حال انجام است. در بیشتر این مطالعات با مدل‌سازی آزمون نفوذ تک تیغه در سنگ و یا آزمون برش خطی بزرگ مقیاس^۲ و برش چرخشی بزرگ مقیاس^۳، نیروهای برش را تحت شرایط مختلف اندازه‌گیری می‌نمایند [15]-[8]، [1]. با مروری بر مطالعات انجام شده قبلی، مشاهده می‌شود که با توجه به جنبه‌های طراحی ماشین حفاری، عمده بررسی‌ها برای محاسبه نیروی‌های عمودی و غلتشی وارد بر تیغه‌ها بوده و بررسی خاصی روی نیروی جانبی نشده است و از این نظر، نیاز به بررسی و تحقیق بیشتر در این زمینه می‌باشد.

۲- اهداف پژوهش

در این پژوهش به کمک روش عددی المان محدود^۴ نیروهای جانبی وارد شده بر تیغه‌ها، به عنوان یک جزء مهم و اثر گذار بر روی عملکرد تیغه‌ها و کله حفار، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور هندسه سه نوع تیغه ۱۷ اینچی با پهنای لبه‌های مختلف در سه مقدار شعاع نصب مختلف روی کله حفار مدل‌سازی و تغییرات نیروهای جانبی بررسی شده است. همچنین در ادامه نتایج کسب شده روی اطلاعات حاصل از قطعه دوم تونل انتقال آب کانی سیب منطبق و درستی آزمایشی خواهد شد.

۳- ابزار و روش‌ها

۳-۱- روش عددی المان محدود

در این مطالعه با توجه به مطالعه فرآیند برش سنگ در محیطی همگن و پیوسته، از روش عددی المان محدود استفاده شده است. این روش به دلیل انعطاف‌پذیری بالا در اعمال شرایط متنوع مرزی و دینامیکی، توانایی محاسبه رفتار غیر خطی

1 Tip Width

2 Liner Cutting Machine (LCM)

3 Rotary Cutting Machine (RCM)

4 Finite Element Method

5 Abaqus

در ادامه نیز به صورت گسترده‌ای در مطالعه رفتار سایر مواد شکننده مشابه مورد استفاده قرار گرفته که از جمله آن بررسی فرآیند برش سنگ بوسیله تیغه حفاری می‌باشد [8, 17-21]. این مدل رفتاری مطابق شکل (۴) به دلیل توانایی در نظر گرفتن سه حالت سالم، حالت آسیب دیده و در نهایت حالت شکسته شده نمونه، توصیف نسبتاً کاملی از وضعیت و رفتار سنگ بسته به وضعیت بارگذاری از خود نشان دهد و معیار مناسبی برای مدلسازی سنگ‌های یکپارچه با رفتار ترد همچون گرانیت‌ها است.

شکل ۴. مدل جانسون-هلمکوئیست [18]

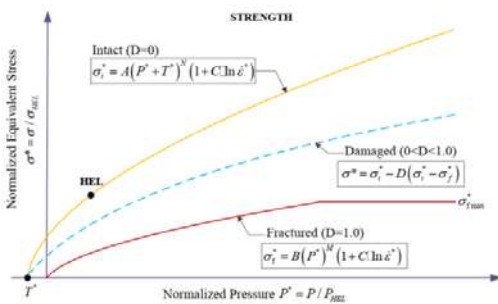


Fig. 4. JH2 model

در این مطالعه برای تخصیص مدل رفتاری JH2 به نمونه‌های سنگی، مطابق جدول (۱) از پارامترهای سنگ گرانیت قرمز کلرادو^۶، که توسط لی و همکاران^۷ گزارش شده است استفاده خواهد شد.

جدول ۱. پارامترهای مدل رفتاری JH2 سنگ گرانیت قرمز کلرادو [20]

Quantity	value	Quantity	value
ρ (kg/m ³)	2820	EF_{min}	0/01
G (GPa)	16/61	SF_{max}	15
f_c (MPa)	158/1	μ_{crush}	0/0023
T (MPa)	6/78	μ_{lock}	0/1
P_c (MPa)	46	A	0/39
P_L (GPa)	1/49	B	1/84
$ESPO$ (m/s)	1 e-4	C	0/0014
$K1$ (GPa)	20/2	N	0/79
$K2$ (GPa)	-2/62	D_1	0/04
$K3$ (GPa)	85/4	D_2	1

Table 1. The JH2 model parameters of Colorado red granite [20]

6 Colorado Red Granite
7 Li et al

تیغه‌های بترتیب مرکزی^۱ میانی^۲ و لب‌های^۳ مدلسازی شده است. عمق نفوذ تیغه در همه مدل‌ها برابر با ۵.۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است ($P=5.1$ mm).

شکل ۳. هندسه مدل در سه مقدار شعاع نصب مختلف

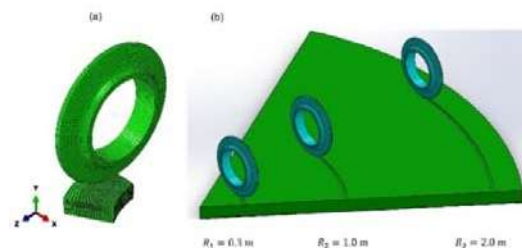


Fig. 3. The model geometry with difference installation radius

مسئله مهم و اثر گذار دیگر در نتایج، اندازه نمونه‌های سنگ است که در فرآیند مدلسازی، همواره هدف تعیین اندازه بهینه نمونه می‌باشد به طوری که با حداقل کردن خطای اثر اندازه، هزینه زمانی محاسبات نیز کمتر شود. در این مطالعه اندازه نمونه‌ها به صورت طول برابر ۱۶۰ میلی‌متر، عرض برابر ۱۵۲ میلی‌متر و ضخامت برابر ۶۰ میلی‌متر لحاظ شده است. همه ابعاد از کمترین مقادیر گزارش شده توسط چو و همکاران^۴ بیشتر می‌باشد [1]. همچنین در مرزهای نمونه سنگ از آلمان-های نامحدود^۵ و بدون انعکاس استفاده شده است تا سبب میرایی امواج تنش شود.

رفتار تیغه‌ها در مرحله اول به صورت الاستیک خطی با مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگاپاسکال و نسبت پواسون ۰.۲۸ در مدل اعمال شده است. در ادامه و به منظور افزایش سرعت حل و با توجه به صرف‌نظر کردن از تغییرات حین برش تیغه، با در نظر گرفتن رفتار صلب تیغه‌ها، این پارامترها فقط برای جلوگیری از خطای نرم‌افزار به مدل اعمال می‌شود و تأثیری در نتایج نهایی ندارد. مدل رفتاری مورد استفاده برای سنگ با توجه به ماهیت شکنندگی سنگ‌های سخت و همگن، مدل JH2 است. این مدل رفتاری اولین بار از سوی جانسون-هلمکوئیست برای بررسی پاسخ تست ضربه در سرامیک‌های بسیار شکننده ارائه شد [16].

1 center
2 Face
3 Gauge
4 Cho et al
5 Infinit Elements

نفوذهای ۳.۸، ۵.۱، ۶.۴ و ۷.۶ میلی‌متر و فاصله‌داری ۷۶ میلی‌متر با سرعت خطی ۰.۲ متر بر ثانیه و سرعت زاوی‌های ۲.۳ رادیان بر ثانیه مدل‌سازی و مقادیر نیروی‌های عمودی حاصل از مدل‌های عددی با مقادیر گزارش شده از آزمایش مقایسه شد. مطابق شکل (۵)، مشاهده می‌شود روند تغییرات مقادیر نیرو همسو با نتایج آزمایش بوده و با افزایش عمق نفوذ، افزایش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش سطح تماس تیغه می‌باشد. همچنین به دلیل افزایش سطح تماس جانبی تیغه با سنگ، مقدار نیروی اصطکاکی مقاوم نیز افزایش می‌یابد که نتیجه آن رشد نیروی عمودی برش است.

شکل ۵. مقایسه مقادیر نیروی عمودی برش حاصل از مدل‌سازی عددی با

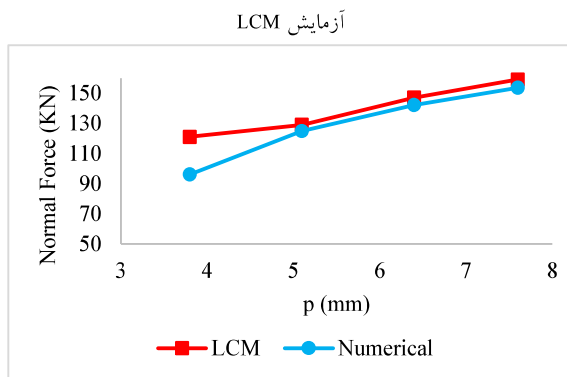


Fig. 5. Comparison between LCM normal force values and simulation results

بنابراین با توجه به تشابه روند تغییرات و نزدیکی مقادیر نیروی عمودی برش حاصل از مدل‌های عددی با مقادیر گزارش شده در آزمون آزمایشگاهی LCM، می‌توان دقت و درستی نتایج حاصل از مدل‌های عددی را قابل قبول دانست. در ادامه این مقاله و پس از اعتبار سنجی مدل‌های عددی، تغییرات نیروهای جانبی وارد شده بر تیغه‌های ۱۷ اینچی با پهنای لبه بترتیب ۱۸.۵ میلی‌متر، ۱۹.۶ میلی‌متر و ۲۰.۸ میلی‌متر در سه مقدار شعاع نصب برابر با ۰.۳ متر، ۱ متر و ۲ متر و عمق نفوذ ۵.۱ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج در ادامه گزارش شده است.

همچنین با توجه به گزارش نتایج آزمایش LCM روی این سنگ (گرانیت قرمز کلرادو) توسط گرتش و همکاران^۱، از این اطلاعات برای اعتبار سنجی مدل‌های عددی استفاده می‌شود [22]. با توجه به اینکه سه نوع تیغه از نظر جایگاه نصب (تیغه‌های مرکزی، میانی و لبه‌ای) مدل‌سازی شده است، سرعت‌های خطی و زاویه تیغه‌ها بسته به شعاع نصب مطابق با جدول (۲) اعمال شده است. همچنین در این حالت تیغه حول محور Y نیز به منظور مدل کردن چرخش کله حفار با سرعت زاوی‌های ۰.۶۲۸ رادیان بر ثانیه دوران می‌کند.

جدول ۲. شرایط مرزی تیغه‌ها

Angular velocity (disc)	linear velocity	installation radius	Angular velocity (cutter head)	Rotation of cutter head	Model type
rad/s	m/s	R(m)	rad/s	RPM	
0/9	0/19	0/30	0/628	6	RCM
2/9	0/63	1/00			
5/8	1/26	2/00			

Table 2. The boundary conditions of disc cutters

المان‌های تیغه از نوع S4R با اندازه ۱۰ میلی‌متر به تعداد ۳۹۹۹ عدد تعریف شده است. در خصوص نمونه سنگ نیز المان‌های مکعبی از نوع C3D8R و با حجمی برابر ۰.۰۲۷ مترمکعب مدل‌سازی شده است. با توجه به ماهیت دینامیکی فرآیند برش سنگ توسط تیغه‌ها در حفر مکانیزه تونل، برای حل مدل‌ها از روش حل صریح^۲ استفاده شده است چرا که نتایج حاصل در این آنالیز بر خلاف روش استاندارد به صورت خودکار برای دقت آن‌ها کنترل نمی‌شود.

۳-۳- اعتبار سنجی^۳ مدل‌های عددی

به منظور اعتبارسنجی مدل‌ها از نتایج گزارش شده توسط گرتش و همکاران روی سنگ گرانیت قرمز کلرادو استفاده شده است [22]. بدین منظور چهار آزمایش برش سنگ در عمق

1 Gertsch et al

2 Explicit

3 Validation

۴- نتایج

شکل (۶) کانتورهای آسیب و تنش ون میسر را برای سه نوع تیغه در سه شعاع نصب نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در صورت رسیدن ضریب آسیب (D) به مقدار ۱، المان‌های نمونه سنگ مطابق معیار شکست JH2 اصطلاحاً شکسته شده و از مدل حذف می‌شود. بنابراین مسیر برش سنگ به صورت یک شیار ایجاد می‌شود. همچنین تمرکز تنش‌ها در محدوده زیر تیغه اتفاق افتاده و با نزدیک شدن به مرز نمونه سنگ، از تمرکز تنش کاسته می‌شود.

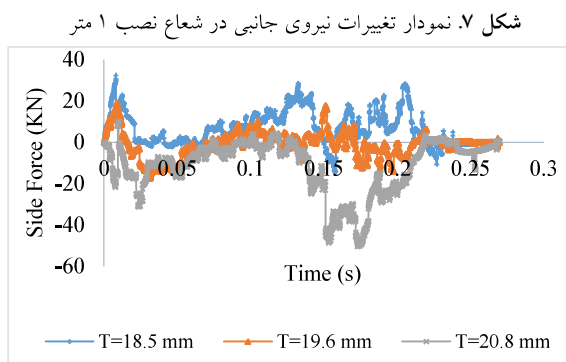


Fig. 7. Side force-time curves at 1 m installation radius

نوسانات نیروی جانبی به دلیل حذف لحظه‌ای تماس تیغه با سنگ در هر دو طرف تیغه اتفاق می‌افتد. این امر در مدل عددی بر اثر شکست المان‌ها و حذف از مدل صورت می‌پذیرد. بنابراین نیروی جانبی بر خلاف نیروی عمودی و غلتشی که تنها در یک جهت و با علامت ثابت اعمال می‌شوند، در دو جهت و با علامت‌های مثبت و منفی به تیغه اعمال می‌شوند. پس با توجه به هندسه مدل و توجیه آن نسبت به محورهای مختصات، نیروی جانبی در جهت محور $+X$ به معنای نیروی وارد شده به لبه بیرونی با نماد $FS+$ و در جهت $-X$ بیانگر نیروی وارد شده به لبه داخلی تیغه و از سمت مرکز چرخش با نماد $FS-$ در نظر گرفته شده است. در شکل (۷)، نواحی بالا و پایین محور X بیانگر همین موضوع می‌باشد که مقادیر متوسط این نیروها برای هر یک از مدل‌ها در جدول (۳) و شکل (۸) ارائه شده است. شایان ذکر است که برای هر مدل، دو عدد وجود دارد که عدد مثبت میانگین تمامی نیروهای جانبی وارد شده به لبه بیرونی تیغه و عدد منفی میانگین تمامی نیروهای جانبی وارده به لبه داخلی تیغه می‌باشد. در مجموع با توجه به ۹ مدل حل شده، ۱۸ نقطه در دو جهت مختلف نشان داده شده است که هر جفت نقطه مربوط به یک مدل می‌باشد.

مطابق روند نشان داده شده در شکل (۸)، مشاهده می‌شود اندازه نیروها در دو طرف تیغه برای شعاع نصب $R=0.3$ متر بزرگتر از مقادیر شعاع نصب $R=1$ متر است. این اختلاف در مقایسه با شعاع نصب $R=2$ محسوس‌تر نیز می‌باشد. این روند با برازش خطوط در میان نقاط مثبت و منفی به خوبی

شکل ۶. تغییرات کانتورهای تنش ون میسر و آسیب برای سه نوع تیغه در

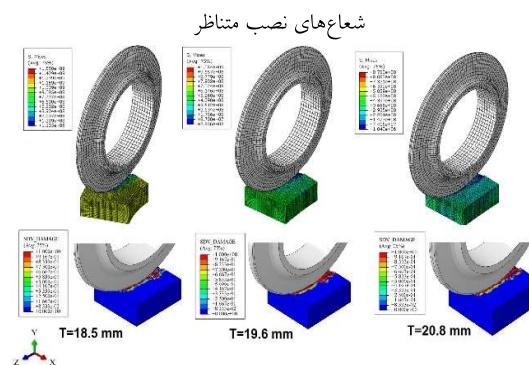


Fig. 6. Sdv-damage and mises contours of three different disc cutters

هدف اصلی در این مقاله بررسی تغییرات نیروهای جانبی وارده بر تیغه‌ها در حین برش سنگ می‌باشد. برای این منظور تیغه‌ها به صورت جسمی صلب با یک نقطه کنترلی در مرکز آن مدلسازی می‌شود. بنابراین کلیه نیروهای جانبی وارد شده بر لبه‌های تیغه در حین برش سنگ به نقطه کنترلی وارد و در تاریخچه آن ذخیره می‌شود. در پایان مدلسازی با فراخوانی اطلاعات ثبت شده، نمودار تغییرات نیروهای جانبی قابل ترسیم خواهد بود. شکل (۷) برای نمونه تغییرات نیروی جانبی را در طول زمان برای سه نوع پهنای لبه تیغه در عمق نفوذ ۵.۱ میلی‌متر و شعاع نصب ۱ متر نشان می‌دهد. مطابق این شکل شاهد تغییرات و نوسانات گسترده‌ای در این نیرو با گذشت زمان حل مسئله می‌باشیم.

و بیرونی تیغه می‌باشد و خالص نیروی وارد شده به تیغه، مستقل از جهت را نشان می‌دهد. در این نمودار نیز در شعاع نصب $R=0.3$ قدر مطلق نیروهای جانبی وارد شده بسیار بیشتر از دو شعاع نصب دیگر است و با فاصله گرفتن از مرکز دوران، این نیرو به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد.

شکل ۹. تغییرات برآیند نیروهای وارد شده به تیغه بر حسب شعاع نصب

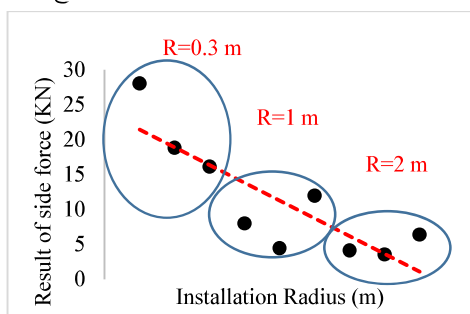


Fig. 9. Absolute side force changes with installing radius

در ادامه روند بررسی نیروهای جانبی، تاثیر پهنای لبه نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور مقادیر مثبت و منفی نیروهای جانبی به صورت مستقل از شعاع نصب و به صورت تابعی از پهنای لبه مطابق جدول (۴) و شکل (۱۰) جمع‌بندی شده است. هر نقطه در شکل بیانگر متوسط نیروهای مثبت و منفی وارد شده به تیغه‌ها در هر سه شعاع نصب می‌باشد.

جدول ۴. نیروهای جانبی وارد شده برای پهنای لبه تیغه‌های مختلف

Fs+	Fs-	T (mm)	R(M)	P (mm)
5.47	-3.37		0.3	
5.06	-2.38	18.5	1	
4.09	-4.11		2	
10.28	-22.9		0.3	
3.17	-5.93	19.6	1	5.1
3.51	-3.55		2	
17.27	-15.7		0.3	
1.29	-13.7	20.8	1	
2.02	-7.04		2	

Table 4. The side force for different tip widths

مطابق نمودار ارائه شده در شکل (۱۰)، دو نتیجه به

شرح زیر به دست می‌آید:

نتیجه اول: با افزایش پهنای لبه، اندازه نیروهای جانبی در هر دو طرف تیغه افزایش می‌یابد ولی آهنگ افزایش نیروی اعمالی به

قابل مشاهده می‌باشد. این روند عنوان می‌کند که مقادیر نیروهای جانبی وارد شده به تیغه در شعاع نصب‌های کوچکتر (تیغه‌های مرکزی)، بسیار بیشتر از تیغه‌های میانی و لبه‌ای می‌باشد. پس تیغه‌های مرکزی بیشتر متاثر از نیروهای جانبی دچار خرابی و شکست می‌شوند. این روند کاملاً مشابه با نتایج حاصل از تحلیل نوع خرابی تیغه‌ها در مطالعه موردی قطعه دوم تونل انتقال آب کانی سبب در بخش ۵ می‌باشد که پس از این تشریح خواهد شد.

جدول ۳. نیروهای جانبی وارد شده برای شعاع‌های نصب مختلف

Fs+	Fs-	T	R(M)	P
(KN)	(KN)	(mm)		(mm)
5.47	-3.37	18.5		
10.28	-22.9	19.6	0.3	
17.27	-15.7	20.8		
5.056	-2.375	18.5		
3.17	-5.93	19.6	1	5.1
1.29	-13.7	20.8		
4.09	-4.11	18.5		
3.51	-3.55	19.6	2	
1.29	-13.7	20.8		

Table 3. The side force for different installation radius

شکل ۸. توزیع متوسط نیروهای جانبی بر حسب شعاع نصب تیغه

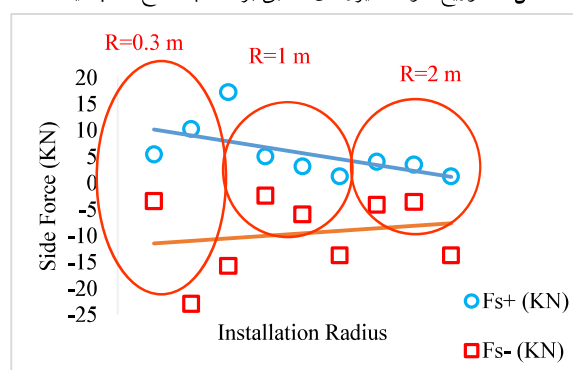


Fig. 8. The average side force changes with the install radius

بالا بودن اندازه نیروهای جانبی وارد شده بر تیغه در شعاع نصب‌های پایین در شکل (۹) نیز قابل نتیجه‌گیری می‌باشد. در این شکل هر نقطه بیانگر برآیند متوسط نیروهای وارد شده به تیغه، مستقل از جهت اعمال می‌باشد. در واقع این اعداد قدر مطلق میانگین جمع جبری نیروهای وارد شده به لبه‌های داخلی

مطابق شکل (۱۱) در مقدار $T=18.5$ میلی‌متر، در هر سه شعاع نصب مقادیر نیرو در دو طرف تیغه نسبتاً متقارن و توزیع یکنواخت دارد. اما در شکل (۱۲) مقادیر نیروی وارده به لبه داخلی بزرگتر از طرف مقابل می‌باشد. این نابرابری در نیروها و عدم تقارن مطابق شکل (۱۳) برای پهنای لبه 20.8 میلی‌متر شدیدتر می‌باشد. همچنین در هر سه پهنای لبه، بزرگتر بودن مقادیر نیروی اعمالی در شعاع نصب $R=0.3$ نسبت به دو شعاع دیگر به خوبی قابل مشاهده است.

شکل ۱۲. مقادیر نیروهای جانبی در دو جهت مختلف برای پهنای لبه $T=19.6$ میلی‌متر

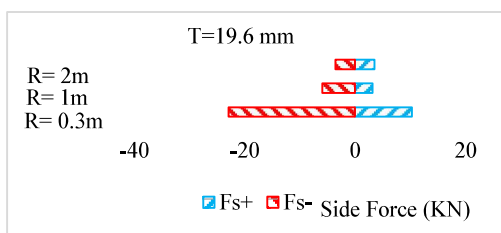


Fig. 12. Side force values in three different installation radius ($T=19.6$ mm)

شکل ۱۳. مقادیر نیروهای جانبی در دو جهت مختلف برای پهنای لبه $T=20.8$ میلی‌متر

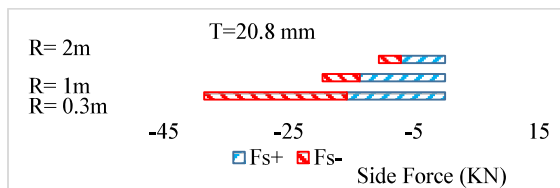


Fig. 13. Side force values in three different installation radius ($T=20.8$ mm)

۵- مطالعه موردی- قطعه دوم تونل انتقال آب کانی سب

تونل انتقال آب کانی سب به دریاچه ارومیه به طول 35.67 کیلومتر می‌باشد که مطابق شکل (۱۴) با توجه به لیتولوژی مسیر و تناوب سنگ‌ها و واحدهای زمین شناسی متفاوت، در دو قطعه مجزا به وسیله دو دستگاه حفاری مکانیزه متفاوت طرح ریزی و اجرا شده است. قطعه ۱ به طول 15.37 کیلومتر

لبه داخلی تیغه ($-X$) بسیار بیشتر از لبه بیرونی است. در مجموع می‌توان چنین نتیجه گرفت که با پهن‌تر شدن تیغه‌ها، نیروهای جانبی وارده که عمدتاً مخرب و سبب خرابی مجموعه تیغه‌ها می‌گردد، افزایش می‌یابد. سهم اصلی نیرو نیز از سمت لبه داخلی وارد می‌شود.

نتیجه دوم: نابرابر بودن نیروهای جانبی سبب بوجود آمدن شرایط نامتعادل و اعمال نیروهای نامتقارن به تیغه می‌شود. این عدم تقارن با افزایش پهنای لبه نیز افزایش می‌یابد. این امر سبب خرابی مجموعه داخلی تیغه و همچنین انتقال ارتعاشات به سایر تیغه‌های سالم و خود کله حفار می‌شود.

شکل ۱۰. تغییرات نیروی جانبی به صورت تابعی از پهنای لبه تیغه

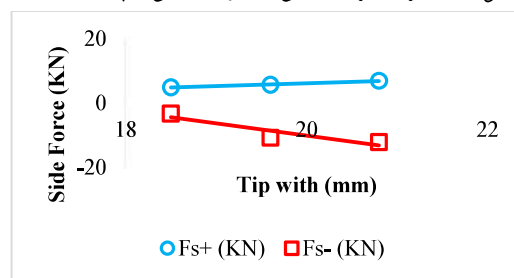


Fig. 10. Variation of side force with tip width

تقارن و عدم تقارن زوج نیروهای جانبی وارده به طرفین تیغه در شکل (۱۱ الی ۱۳) نیز به خوبی قابل مشاهده است. در این شکل‌ها مقادیر نیروهای جانبی در دو جهت مختلف برای سه مقدار پهنای لبه در سه شعاع نصب نشان داده شده است.

شکل ۱۱. مقادیر نیروهای جانبی در دو جهت مختلف برای پهنای لبه

$T=18.5$ میلی‌متر

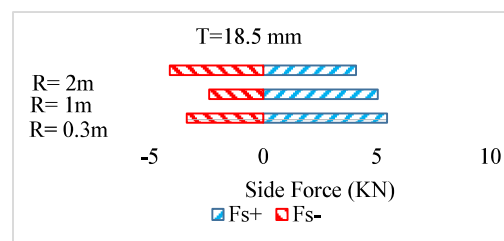


Fig. 11. Side force values in three different installation radius ($T=18.5$ mm)

یاتاقان تیغه‌ها و در کل ایراد در سیستم داخلی تیغه‌ها، وارد آمدن نیروهای جانبی نامتقارن و بیش از ظرفیت می‌باشد. با بررسی کل قطعه ۲ تونل کانی سیب، در مجموع ۳۹۴۴ حلقه تیغه به یکی از الگوهای خرابی مصرف شده است. نمودار شکل (۱۶) سهم انواع خرابی بر حسب موقعیت نصب بر روی کله حفاری را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار عمده خرابی تیغه‌های مرکزی به دلیل مشکلات داخلی و شکست در سیستم باربری و یاتاقان می‌باشد (بیش از ۷۴٪). به عبارت دیگر تیغه‌های مرکزی به دلیل در معرض بودن نیروی نامتقارن و در عین حال شدید جانبی، عمدتاً از ناحیه یاتاقان و سیستم داخلی دچار شکست و خرابی می‌شود. این مقدار برای تیغه‌های میانی و لبه‌ای به ترتیب ۲۶٪ و ۴۴٪ می‌باشد. درصد نسبتاً بالای ۴۴ برای تیغه‌های لبه‌ای می‌تواند به دلیل زاویه‌داری این تیغه نسبت به امتداد تونل و نیروهای بالای جانبی ناشی از آن باشد. بنابراین بر اساس الگوی خرابی تیغه‌های TBM قطعه دوم تونل کانی سیب مشابه آنچه از مدل‌های عددی نتیجه‌گیری شد می‌توان به بالا بودن مقادیر نیروهای جانبی نامتقارن وارد شده به تیغه‌های مرکزی با شعاع نصب پایین و کاهش آن با افزایش شعاع اشاره کرد.

شکل ۱۶. درصد خرابی تیغه‌ها بر حسب شعاع نصب روی کله حفار

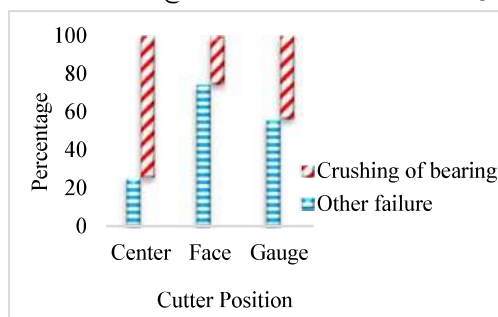


Fig. 16. Percentage of failure type according to the installation position on the cutter head

۶- جمع‌بندی

در این مقاله به بررسی تاثیر شعاع نصب و ضخامت لبه تیغه روی مقادیر نیروهای جانبی وارد بر تیغه‌ها در حفاری مکانیزه تونل پرداخته شده است. برای این کار از مدل‌های عددی المان

به دلیل برخورد با توده سنگ‌های مقاومت پایین و بخش آبرفتی به وسیله یکدستگاه سپر فشار تعادلی زمین^۱ و قطعه ۲ نیز بطول ۲۰.۳۰ کیلومتر به موجب مسیری کاملاً سنگی با پارمترهای مقاومتی بالا بوسیله یکدستگاه حفاری سنگ سخت حفاری شده است.

شکل ۱۴. مقطع زمین‌شناسی تونل کانی سیب

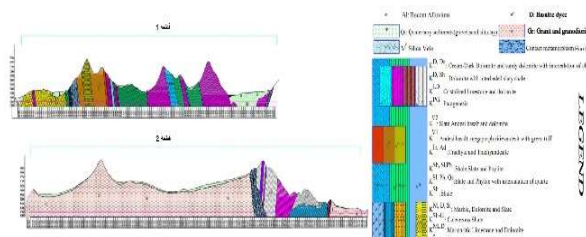


Fig. 14. The engineering geology of the Kani Sib tunnel

حدود ۸۰ درصد از مسیر تونل قطعه دوم در سنگ‌های آذرین شامل گرانیت و گرانودیوریت و مابقی در سنگ‌های رسوبی و دگرگونی قرار گرفته است پس بررسی نیروهای وارد شده بر تیغه و نمونه‌هایی از الگوی خرابی تیغه‌ها در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

شکل ۱۵. نمونه‌هایی از الگوی خرابی تیغه‌ها در قطعه دوم تونل کانی سیب



Fig. 15. Examples of disc cutter failures pattern in Lot 2 of the Kani Sib tunnel

در خصوص علت وقوع هر کدام از انواع خرابی، دلایل متفاوتی وجود دارد. برای مثال علت اصلی خرابی سیستم

1 Earth Pressure Balance (EPB)

- [9] Q. M. Gong, "Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters," *Tunn Undergr Space Technol*, vol. 20, pp. 183–191, 2005.
- [10] M. Momozu, A. Oida, M. Yamazaki, and A. J. Koolen, "Simulation of a soil loosening process by means of the modified distinct element method," *J. Terramechanics*, vol. 39, no. 4, pp. 207–220, 2002.
- [11] R. Zhang and J. Li, "Simulation on mechanical behavior of cohesive soil by Distinct Element Method," *J. Terramechanics*, vol. 43, no. 3, pp. 303–316, 2006.
- [12] Z. Asaf, D. Rubinstein, and I. Shmulevich, "Determination of discrete element model parameters required for soil tillage," *Soil Tillage Res.*, vol. 92, no. 1–2, pp. 227–242, 2007.
- [13] H. Chakeri, R. Hasanpour, M. A. Hindistan, and B. Ünver, "Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling," *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 70, pp. 439–448, 2011.
- [14] N.-A. Do, D. Dias, P. Oreste, and I. Djeran-Maigre, "Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 42, pp. 40–51, 2014.
- [15] M. Sabri, K. Goshtasbi, H. R. Nejati, and E. Taheri, "A Numerical Investigation of the Effect of Disc Cutter Wear on Rock-Cutting Forces in Mechanized Tunnel Boring Machines," *Int. J. Geomech.*, vol. 23, no. 5, p. 04023050, 2023.
- [16] G. R. Johnson, "Response of boron carbide subjected to large strains, high strain rates, and high pressures," *J. Appl. Phys.*, vol. 85(12), pp. 8060–8073, 1999.
- [17] Y. Zhao, "Effects of jointed rock mass and mixed ground conditions on the cutting efficiency and cutter wear of tunnel boring machine," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 52(5), pp. 1303–1313, 2019.
- [18] J. Wang, "Johnson-Holmquist-II (JH-2) constitutive model for rock materials: Parameter determination and application in tunnel smooth blasting," *Appl. Sci.*, vol. 8(9), 1675., 2018.
- [19] K. Liu, "Optimization of spherical cartridge blasting mode in one-step raise excavation using pre-split blasting," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 126, 104182, 2020.
- [20] X. Li, "Numerical analysis for rock cutting force prediction in the tunnel boring process," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 144, 104696, 2021.
- [21] H. Ai, "Shock-induced damage in rocks," *Appl. Impact Cratering Calif. Inst. Technol.*, 2006.
- [22] R. Gertsch, "Disc Cutting Tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM Performance Prediction," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 44(2), pp. 238–46., 2007.

محدود که با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است، استفاده شده است. در پایان نیز نتایج گرفته شده با واقعیت‌های گزارش شده از نرخ خرابی تیغه‌ها در TBM قطعه دوم تونل انتقال آب کانی سیب مقایسه و تائید شده است. نتایج حاصل از مدل‌های عددی نشان می‌دهد مقادیر نیروهای جانبی وارد شده بر تیغه‌هایی که در مرکز کله حفار با شعاع نصب پایین قرار دارند بسیار بیشتر از تیغه‌هایی با شعاع نصب بالا می‌باشد. همچنین این نیروها علاوه بر بزرگ بودن در اندازه، کاملاً نامتقارن نیز می‌باشند و سهم عمده نیز از سمت مرکز دوران و به لبه داخلی تیغه وارد می‌شود. این وضعیت با افزایش ضخامت لبه تیغه‌ها تشدید می‌شود. این پدیده سبب آسیب به سیستم باربری و یاتاقان‌های تیغه‌ها و حتی خود کله حفار می‌شود که هزینه‌های هنگفتی را به پروژه‌های اجرایی وارد می‌آورد. نتایج حاصل از نرخ مصرف و نوع خرابی تیغه‌ها در قطعه دوم تونل کانی سیب، نتایج مدل‌های عددی را تائید می‌کند.

۷- منابع

- [1] Jung-Woo Cho, Seokwon Jeon, Sang-Hwa Yu, and Soo-Ho Chang, "Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 25, pp. 230–244, 2010.
- [2] I. Evans, "Relative efficiencies of picks and discs for cutting rocks," in *Advances in rock mechanics: proceedings of the Third ISRM Congress of the International Society for Rock Mechanics*, 1974, vol. 2.
- [3] D. B. Howarth, "Microfracture beneath blunt disc cutters in rock," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, vol. 25(1), pp. 35–38, 1998.
- [4] F. F. Roxborough and H. R. Phillips, "Rock excavation by disc cutter," in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1975, vol. 12, no. 12, pp. 361–366.
- [5] L. Ozdemir, R. Miller, and F. D. Wang, "Mechanical tunnel boring prediction and machine design, Colorado School of Mine, Golden, Colorado," NSF APR73-07776-A03, 1978.
- [6] Rostami, "A new model for performance prediction of hard rock TBMs," 1993.
- [7] A. Lislerud, "Principles of mechanical excavation," *Tamrock Corp*, p. POSIVA 97-112, 1997.
- [8] M. Khosravi, "Evaluation of Disc Cutter Performance in Rock Cutting Process Using 3D Finite Element Method," *Int. J. Numer. Methods Civ. Eng.*, vol. 5(3), pp. 1–12, 2021.

A numerical investigation of side force variation on disc cutters in mechanized tunnel boring machines

M. Sabri^{1*}, H Vahidi², A. Zounubi³, M. Rostami⁴, M. Houshang⁵

1. Doctor of philosophy, Tarbiat Modares University
2. Master, Olomtahghighat University
3. Master, Emam hosian University
4. Master, Islamic azad universityMaster,
5. Sanati Sharif University

Abstract:

As the use of mechanized tunnel boring machines (TBMs) increases, the performance of these machines has become increasingly important for researchers to work on. Disc cutters, as one of the main components of the cutter head, are responsible for transmitting the thrust force to the rock and breaking it. Studying the rock-cutting process by TBM disc cutters is vital to mechanized tunnel excavation. For this reason, this issue has been widely studied by researchers in recent decades. The shape and layout design of the cutter head, disc cutters spacing, and the size and shape of cutters are the adjustable factors in improving the efficiency of rock cutting and TBM excavation. It is important to determine the forces acting on the disc cutters in mechanized tunnel boring machines because these forces are used in the design. A review of the history of studies shows that lateral forces have been studied much less than other forces. Therefore, in this article, a numerical study of the side forces on the disc cutters and their relationship with the installation radius and the tip width has been studied. Furthermore, the information of lot 2 Kani Sib water conveyance tunnel has been used to validate the results. For this, numerical simulations have been conducted with three types of 17-inch disc cutters in installation radii of 0.3 m, 1 m, and 2 m with tip widths of 18.5 mm, 19.6 mm, and 20.8 mm. The results of the numerical models show that the side forces acting on the central disc cutters with low installation radius are much higher than others. Additionally, these forces are mainly asymmetrical and become symmetrical as the installation radius increases. Central disc cutters are subjected to unbalanced and asymmetric forces because of the excessive side force. This will cause the disc cutter bearing system to malfunction and increase costs significantly. A decrease in the balance of the cutter head and increased vibrations are other consequences. Increasing the tip width aggravates this condition. The damage pattern of the disc cutters in lot 2 Kani Sib tunnel confirms this conclusion. According to this project, more than 74% of central cutters' failures with low installation radius are related to bearing problems. This type of failure is caused by large asymmetric side forces, while only 26% of the face disc cutters with a large installation radius failed in this way, which confirms the results of the numerical models.

Keywords: Disc cutter, Side force, Kani Sib tunnel, Finite element method.