

اصلاح مدل نظری برش پذیری سنگ برای دیسک V شکل با در نظر گرفتن شعاع لبه تیغه

محمد ایزدشناس^۱، جعفر خادمی حمیدی^{۲*}، هادی صبوری^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن دانشگاه تربیت مدرس، m.izadshenass@modares.ac.ir

۲. استادیار بخش مهندسی معدن دانشگاه تربیت مدرس، jafarkhademi@modares.ac.ir

۳. استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه خوارزمی، h_sabouri@khu.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۳۰ - پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۷)

چکیده

برش‌پذیری سنگ همواره به عنوان یکی از پارامترهای تاثیرگذار در انتخاب و طراحی ابزار برش و پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفار مکانیکی شناخته شده است. روش‌های میدانی، آزمایشگاهی و نظری از جمله روش‌هایی‌اند که در تعیین برش‌پذیری سنگ کاربرد دارند. در این تحقیق، مدل نظری برآورد نیروهای برش سنگ با دیسک‌های V شکل با لحاظ کردن شعاع لبه تیغه اصلاح شد. برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی از داده‌های واقعی آزمون برش خطی بزرگ‌مقیاس سنگ ارایه شده در تحقیق بالچی و توماچ (۲۰۱۲) و آزمون t در سطح اطمینان ۹۹ درصد استفاده شد. نتایج نشان داد که مقادیر برآورد شده نیروهای برش با مقادیر واقعی همبستگی قوی دارد و با توجه به بزرگی مقدار P از $\alpha=0.01$ هر دو روش به طور متوسط مقادیر یکسانی را اندازه‌گیری می‌کنند. برای بررسی اثر شعاع لبه تیغه‌های دیسکی بر نیروهای برش، از مدل پیشنهادی استفاده شد. نتایج نشان داد که به ازای زاویه ثابت لبه، افزایش شعاع لبه سبب افزایش نسبت نیروهای برش تیغه‌های کند به تیز می‌شود. همچنین با افزایش عمق نفوذ، تاثیر شعاع لبه تیغه‌های دیسکی بر نیروهای برش کاهش یافت و نزدیک به نیروهای برش تیغه‌های تیز شد. از سوی دیگر افزایش زاویه لبه موجب افزایش غیرخطی نیروهای برش تیغه‌های دیسکی کند به ازای عمق نفوذ ثابت شد.

کلمات کلیدی

آزمون برش خطی سنگ، مدل نظری، تیغه دیسکی V شکل، شعاع لبه، آزمون t.

۱- مقدمه و هدف

عددی و نظری برای پیش‌بینی نیروهای برش سنگ استفاده کنند.

تاکنون روابط تجربی، نیمه تجربی و نظری متعددی برای برآورد نیروهای برش سنگ با تیغه‌های دیسکی V شکل ارایه شده است که هر کدام از آن‌ها دارای مزایا و معایبی هم چون سادگی مدل، تفاوت در نظریه نحوه شکست سنگ در اثر کشش یا برش، در نظر گرفتن پارامترهای متعدد و نظایر آن بوده است.

راد^۹ در سال ۱۹۷۵ روشی برای تعیین سایش تیغه‌های دیسکی ارایه کرد که اساس آن بر اندازه‌گیری‌های پی‌درپی قطر تیغه‌های دیسکی و اختلاف آن با تیغه‌های تیز بود [۳]. بیلگین^{۱۰} در سال ۱۹۷۷ مدلی نظری بر پایه مدل راکسبورو و فیلیپس^{۱۱} برای پیش‌بینی نیروهای برش تیغه‌های دیسکی V شکل با شعاع لبه (r) مطابق روابط ۱ و ۲ ارایه کرد [۴]. در این روابط از دو ضریب A و B که تابعی وابسته به عمق نفوذ (p) است، به ترتیب برای برآورد نیروهای عمودی و غلتشی تیغه‌های دیسکی V شکل با شعاع لبه (r) استفاده می‌شود.

$$F_{N_{BL}} = F_{N_{ROX}} \cdot e^{Ar} \quad (۱)$$

$$F_{R_{BL}} = F_{R_{ROX}} \cdot e^{Br} \quad (۲)$$

$$A = 0.0354 + \frac{0.6554}{p}$$

$$B = 0.06 + \frac{0.383}{p}$$

ازدمیر^{۱۲} در سال ۱۹۷۸ روابطی را برای پیش‌بینی نیروهای برش تیغه‌های دیسکی V شکل تیز و ساییده شده، بر اساس هندسه برش (فاصله‌داری و عمق نفوذ)، مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت کششی ارایه کرد [۵]. هوارد^{۱۳} و راکسبورو در سال ۱۹۸۲ به بررسی اثر درزه‌ها بر نیروهای برش تیغه‌های دیسکی V شکل پرداختند [۶]. سانویو^{۱۴} در سال ۱۹۸۵ روابط ۳ و ۴ را بر اساس شکست کششی برای پیش‌بینی نیروهای برش سنگ با تیغه‌های دیسکی V شکل ارایه کرد که در آن از فاکتور نیروی بحرانی (k)، قطر تیغه دیسکی (D)، عمق نفوذ (p)، فاصله‌داری (s)، زاویه لبه (ε) و نسبت شعاع حفره ایجاد شده در اثر نفوذ تیغه

کاربرد ماشین‌های حفار مکانیکی مانند ماشین حفر تمام مقطع تونل^۱ در کارهای عمرانی و معدنی در سال‌های اخیر به طور مشخصی افزایش یافته است و آزمون‌های آزمایشگاهی برش سنگ نقش مهمی در انتخاب، طراحی و پیش‌بینی عملکرد ماشین پیدا کرده‌اند. برش‌پذیری^۲ یکی از مهم‌ترین پارامترهای مکانیکی سنگ است که به مقاومت سنگ در برابر برش به وسیله ابزار مکانیکی مانند نوک قلمی^۳ و غلتکی^۴ برمی‌گردد. این پارامتر به وسیله آزمون‌های بزرگ‌مقیاس^۵ و کوچک‌مقیاس برش سنگ^۶ تعیین می‌شود. آزمون‌های برش سنگ در مقیاس آزمایشگاهی نشان داده است که موفقیت، قابلیت اطمینان و کارایی خوبی برای مشاهده اندرکنش بین ابزار و سنگ دارد و همچنین وسیله‌ای برای برآورد نیروها و انرژی ویژه^۷ برش سنگ محسوب می‌شود. نیروهای برش به دست آمده از FSRCT و SSRCT به عنوان ورودی در طراحی ماشین حفار، انتخاب ابزار برش، تعیین هندسه بهینه ابزار برش، پیش‌بینی هزینه و عملکرد ماشین حفار مکانیکی به کار می‌رود [۱].

تیغه‌های دیسکی در طیف گسترده‌ای از تجهیزات تونل‌زنی، از میکرو TBM‌های دوغابی^۸ با قطر کمتر از یک متر گرفته تا TBM‌های سنگ‌های سخت با قطر ۱۵ متر استفاده می‌شود. بنابراین ابعاد و هندسه تیغه متناسب با هر ماشین و متاثر از شرایط زمین‌شناسی محل حفر تونل است [۲]. از این رو در کنار پیش‌بینی برش‌پذیری سنگ، تحلیل عملکرد ابزار برش و بهینه‌سازی هندسه آن برای افزایش راندمان و کاهش مصرف تیغه، به کمک آزمون‌های آزمایشگاهی در مقیاس‌های مختلف، امری اجتناب‌ناپذیر به شمار می‌آید که عدول از آن موجب شکست و تحمیل هزینه‌های سنگین به پروژه خواهد شد.

آزمون بزرگ‌مقیاس برش خطی سنگ که از ابزار برش واقعی استفاده می‌کند، شبیه‌ساز فرآیند برش سنگ ماشین‌های حفار مکانیکی است. گران بودن و نیاز به تهیه بلوک‌های سنگی بزرگ، محققان را بر آن داشته تا در کنار کارهای آزمایشگاهی از مدل‌های

۱-Tunnel boring machine (TBM)

۲-Cuttability

۳-Conical bit tools

۴-Rolling tools

۵-Full-scale rock cutting test (FSRCT)

۶-Small-scale rock cutting test (SSRCT)

۷-Specific energy

۸-Slurry micro-TBMs

۹-Rad

۱۰-Bilgin

۱۱-Roxborough and Phillips

۱۲-Ozdemir

۱۳-Howarth

۱۴-Sanio

غلته‌ی تیغه دیسکی کوچک (با مقیاس ۱:۸) پرداختند. نتایج کار او نشان داد که نیروی غلته‌ی با زاویه تورق صفر درجه در مقایسه با زاویه ۹۰ درجه برای هر سه نوع سنگ، تقریباً افزایشی ۲ برابری دارد [۱۳].

در این تحقیق، برای بررسی اثر شعاع لبه تیغه‌های دیسکی V شکل در برآورد نیروهای برش سنگ، به عنوان یکی از پارامترهای هندسی تاثیرگذار بر عمر تیغه، رابطه نظری راکسبورو و فیلیپس، اصلاح و درستی آن با داده‌های واقعی آزمون بزرگ‌مقیاس برش خطی سنگ بررسی شده است.

۲- تیغه‌های دیسکی

تا قبل از سال ۱۹۵۶، از ماشین‌های تونل‌زنی تمام‌مقطع در سنگ‌های سخت استفاده نشده بود. همچنین، از ابزار خراشی روی کله حفار استفاده می‌شد. برای اولین بار، شرکت رابینز^۷ برای استخراج سنگ آهک کریستالی پروژه رودخانه هامبر^۸ کانادا، تیغه‌های دیسکی را اختراع کرد و اولین تونل سنگی با موفقیت حفر شد [۱۴].

تیغه‌های دیسکی از نظر مقطع تماس با سنگ مطابق شکل ۱ به دو گروه V شکل و مقطع ثابت تقسیم می‌شود. تیغه‌های دیسکی V شکل جزو اولین ابزار برش ساخته شده برای حفر تونل‌های سنگ سخت‌اند. به دلیل تیز بودن مقطع این ابزار، سهولت برش سنگ با آن زیاد اما در مقابل عمر سایشی کوتاه بوده است. به همین دلیل در دهه ۷۰، دیسک‌های مقطع ثابت با هدف افزایش عمر سایشی و یا به تعبیری دیگر برای کاهش مصرف تیغه ساخته شد [۱۵]. امروزه استفاده از دیسک‌های با قطر بزرگ‌تر (به عنوان مثال ۲۰ اینچ) به دلیل افزایش بهره‌وری ماشین در سنگ‌های سخت و همچنین افزایش عمر تیغه‌ها رواج یافته است [۱۶].

دیسکی در سنگ به عمق نفوذ (q) استفاده شده بود [۷]. ساتو و همکاران^۱ در سال ۱۹۹۱ روش کار سانپو را برای ماشین برش دورانی ادامه دادند و روابطی برای برآورد نیروهای برش سنگ ارایه کردند [۵].

$$F_{N_{SAN}} = \frac{2k}{3q} \sqrt{\frac{D}{2}} \cdot s \cdot p \cdot \tan \frac{\epsilon}{2} \quad (3)$$

$$F_{R_{SAN}} = \frac{4}{5} \sqrt{\frac{2p}{D}} \cdot F_{N_{SAN}} \quad (4)$$

بیلگین و همکاران در سال ۲۰۱۰ ماشین برش خطی قابل حمل^۲ را طراحی کردند. در این ماشین از تیغه‌های دیسکی V شکل به قطر ۵/۶ اینچ استفاده و عمق برش ثابت (۵ میلی‌متر) در نظر گرفته شده بود. آن‌ها بیان کردند که استفاده از نتایج و نمودارهای PLCM، اطلاعات خوبی را برای تخمین نیروهای برش تیغه‌های دیسکی واقعی TBM و پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفر بازویی^۳ فراهم می‌کند [۸]. توماچ و همکاران^۴ و بالچی^۵ و توماچ در سال ۲۰۱۲ به مقایسه مقادیر نیروهای برش تیغه‌های دیسکی V شکل به دست‌آمده از روابط نظری و داده‌های واقعی آزمون برش خطی بزرگ‌مقیاس سنگ پرداختند. آن‌ها برای ارزیابی برش‌پذیری سنگ از تیغه‌های دیسکی V شکل با قطر (D) ۳۳۰ میلی‌متر، زاویه لبه (φ) ۹۰ درجه و شعاع لبه (r) ۱/۴ میلی‌متر استفاده کردند [۹، ۱۰]. انتاگر و همکاران^۶ در سال ۲۰۱۲ یک روش نوین اندازه‌گیری نیرو برای تعیین سه مولفه بارگذاری تیغه‌های دیسکی TBM ارایه و آن را در سه تیغه دیسکی پروژه‌های در استرالیا تعبیه کردند. البته ساختار سیستم طراحی شده آن‌ها تنها برای تیغه‌های دیسکی واقعی TBM کاربرد داشت [۱۱]. همچنین، این محققان در سال ۲۰۱۴ برای پیش‌بینی عملکرد TBM آزمون برش سنگ کوچک شده‌ای را طراحی کردند که در آن از نصف مغزه‌های عمود برش خورده به قطر ۱۰ سانتی‌متر و تیغه دیسکی فولادی مقطع ثابت با نسبت ۱:۸ تیغه‌های دیسکی ۱۷ اینچی استفاده می‌شد. آن‌ها در نهایت به این نتیجه رسیدند که آزمون برش سنگ کوچک شده یک پارامتر ورودی برتر برای پیش‌بینی عملکرد TBM در مقایسه با آزمون‌های رایج مکانیک سنگی است [۱۲]. انتاگر و همکاران همچنین در سال ۲۰۱۸ به بررسی اثر زاویه تورق سه نوع سنگ دگرگونی بر نیروی

۱-Sato et al.

۲-Portable linear rock cutting machine (PLCM)

۳-Roadheaders

۴-Tumac et al.

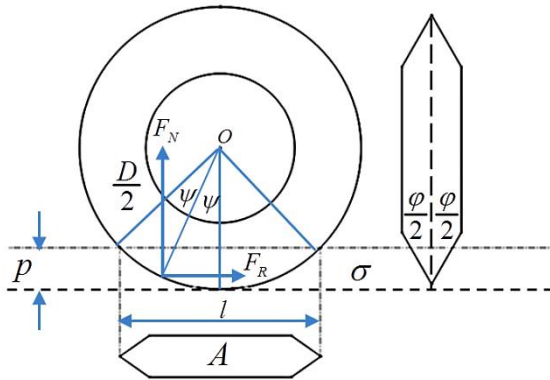
۵-Balci

۶-Entacher et al.

۷-Robbins company

۸-Humber river

$$F_{R_{ROX}} = 4\sigma p^2 \tan \frac{\varphi}{2} \quad (8)$$



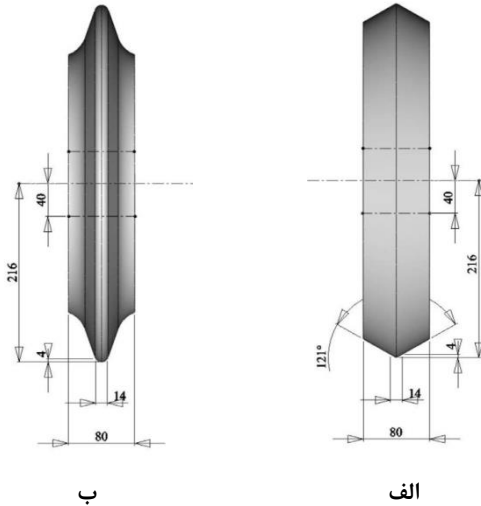
شکل ۲- هندسه نفوذ تیغه دیسکی
(اقتباس از راکسبورو و فیلیپس ۱۹۷۵).

۴- اصلاح مدل نظری راکسبورو و فیلیپس

در فرآیند برش سنگ با تیغه‌های دیسکی V شکل به دلیل تیز بودن لبه این ابزار، مقدار نیروی برش کم و به عبارتی سهولت برش‌دهی سنگ با این ابزار زیاد است اما به دلیل سرعت بالای سایش و کند شدن لبه و در نتیجه کوتاه بودن عمر تیغه استفاده از آن در سنگ‌های ضعیف تا متوسط و با درجه ساینده‌گی پایین توصیه شده است. به همین منظور در این تحقیق مدل نظری راکسبورو و فیلیپس برای برآورد نیروهای برش سنگ در حالتی که لبه این ابزار گرد شده و از حالت تیزی درآمده، اصلاح شده است. فرض این مدل نظری مانند مدل راکسبورو و فیلیپس ۱۹۷۵ و بیلگین ۱۹۷۷، غلبه کردن مؤلفه قائم نیرو بر مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ است که باعث شکست سنگ می‌شود. این نیرو به سطح مقطعی از سنگ که برابر سطح تماس تیغه دیسکی با آن است وارد می‌شود. بنابراین طبق رابطه ۹ محاسبه دقیق سطح مقطع حایز اهمیت است.

$$F_N = \sigma A \quad (1)$$

در مدل‌های راکسبورو و فیلیپس ۱۹۷۵ و بیلگین ۱۹۷۷ به دلیل پیچیدگی محاسبه سطح مقطع تماس تیغه و سنگ، از تصویر ساده شده آن مطابق شکل ۲ استفاده شده است. در مدل پیش رو سعی بر این شده تا مساحت دقیق‌تری نسبت به دو مدل یاد شده در بالا با توجه به شعاع لبه تیغه ارائه شود. در شکل‌های ۳ و ۴ تصویری شماتیک از هندسه تیغه دیسکی مورد نظر و سطح تماس آن با سنگ نشان داده شده است.



شکل ۱- الف - تیغه‌های دیسکی V شکل و ب- مقطع ثابت [۱۷].

۳- مدل نظری راکسبورو و فیلیپس

در برآورد نیروهای برش سنگ با تیغه دیسکی، هندسه تیغه و هندسه برش نقش مهمی را ایفا می‌کنند. این پارامترها شامل زاویه لبه تیغه (φ)، قطر تیغه دیسکی (D)، مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ (σ)، عمق نفوذ (p)، و فاصله‌داری (s) (برای حالت شیار هم‌جوار) است.

راکسبورو و فیلیپس در سال ۱۹۷۵ مدل نظری تخمین نیروهای برش سنگ را برای تیغه‌های دیسکی V شکل ارائه کردند. آن‌ها مؤلفه قائم نیرو را که همان نیروی عمودی است، به عنوان نیرویی که بر مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ غلبه می‌کند؛ در نظر گرفتند. برای این منظور سطح مقطع ناحیه تماس سنگ- تیغه که این نیرو بر آن وارد می‌شود، محاسبه می‌شود. آن‌ها مطابق شکل ۲ مقدار طول وتر (l)، سطح مقطع (A) و در نتیجه نیروی عمودی (F_N) و غلتشی (F_R) را به ترتیب به صورت روابط ۵ تا ۸ ارائه کردند که امتداد برآیند نیروها در مرکز تیغه دیسکی با امتداد نیروی عمودی زاویه ψ را می‌سازد [۱۸].

$$l = 2\sqrt{Dp - p^2} \quad (5)$$

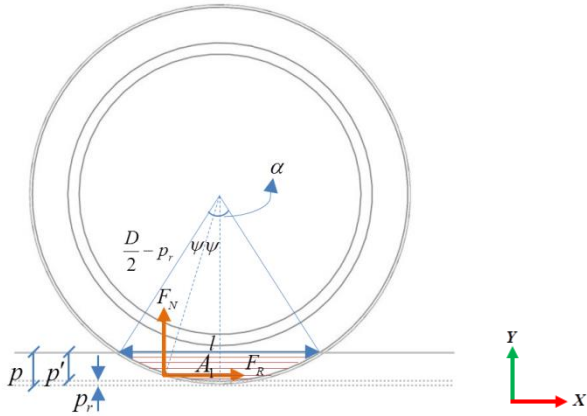
$$A = 2pl \tan \frac{\varphi}{2} \quad (6)$$

$$F_{N_{ROX}} = 4\sigma \tan \frac{\varphi}{2} \sqrt{Dp^3 - p^4} \quad (7)$$

$$\frac{F_R}{F_N} = \sqrt{\frac{p}{D-p}}$$

۱-Relieved

۲-Normal force



شکل ۵- سطح تماس مربوط به کناره‌های تیغه دیسکی و سنگ
(A1).

$$A = 2A_1 \tan \frac{\varphi}{2} + A_2 \quad (2)$$

$$A_1 = \frac{(D - 2p_r)^2 \cdot (\alpha - \sin \alpha)}{4} \quad \text{صفحه X-Y}$$

$$A_2 = \frac{r\theta D \alpha}{2} \quad \text{صفحه X-Z}$$

$$\alpha = \frac{2l}{D - 2p_r}$$

$$\sin \alpha = \frac{2l(D - 2p_r - 2p')}{(D - 2p_r)^2}$$

$$A_1 = 2p'l \quad \text{صفحه X-Z}$$

$$A_2 = 2rl \quad \text{صفحه X-Z}$$

$$A = 4\sqrt{Dp - p^2} \cdot (p' \tan \frac{\varphi}{2} + r) \quad (3)$$

$$p' = p - p_r$$

$$p_r = r \sin \frac{\theta}{2} \tan \frac{\theta}{4}$$

$$\theta = \pi - \varphi$$

که در این روابط:

p_r حداکثر عمق نفوذ دربرگیرنده شعاع لبه تیغه دیسکی

p' عمق نفوذ دربرگیرنده لبه تیز تیغه دیسکی

α زاویه قطاع مربوط به سطح A_1

θ زاویه قطاع دربرگیرنده p_r (درجه)

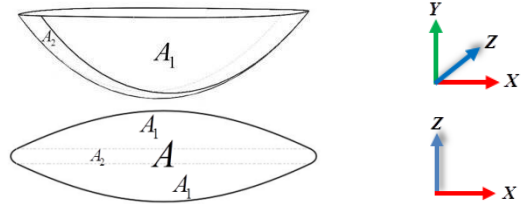
$$F_{N_B} = 4\sigma \sqrt{Dp - p^2} \cdot (p' \tan \frac{\varphi}{2} + r) \quad (12)$$

$$F_{R_B} = 4\sigma p \cdot (p' \tan \frac{\varphi}{2} + r) \quad (13)$$

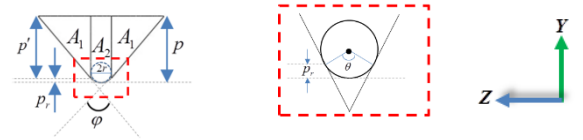
برای ساده‌سازی رابطه‌های ۱۲ و ۱۳، مقادیر نیروی عمودی



شکل ۳- شماتیک تیغه دیسکی V شکل با شعاع لبه.



الف



ب

شکل ۴- الف- تصویر سه نما و نمای بالا و ب- نمای روبه‌رو از سطح تماس تیغه دیسکی با شعاع لبه r به ازای عمق نفوذ p.

پیچیدگی محاسبه سطح تماس تیغه و سنگ محققان را به این واداشته که از ساده‌سازی برای به دست آوردن تقریبی سطح مقطع استفاده کنند. از این رو در مدل حاضر، اندازه‌گیری سطح تماس تیغه و سنگ مطابق شکل ۴ به دو قسمت زیر تقسیم شده است:

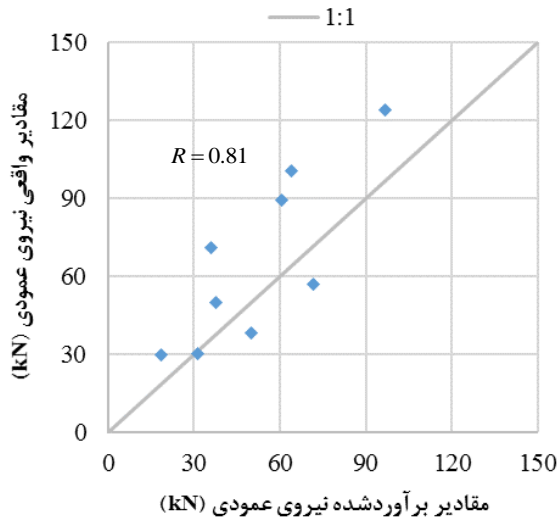
- سطح‌های تماس مربوط به کناره‌های تیغه دیسکی و سنگ (A1)

- سطح تماس مربوط به شعاع لبه تیغه (A2)

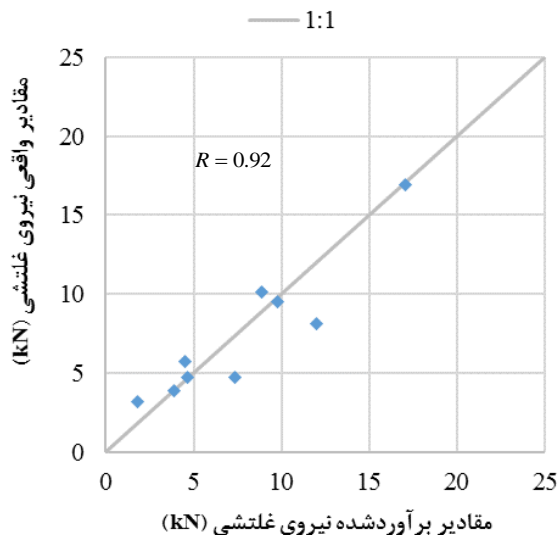
تصویر این مساحت‌ها در صفحه X-Z مطابق رابطه ۱۰، بیانگر صفحه‌ای است که بردار عمود (نرمال) آن، بردار نیروی عمودی خواهد بود. بنابراین با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ با محاسبه مساحت قطاع A_1 در صفحه X-Y و تصویر کردن آن در صفحه X-Z و همچنین جاگذاری مقادیر α و $\sin \alpha$ و در نهایت ترکیب رابطه‌های ۹ و ۱۱، مقادیر نیروی عمودی و غلتشی برای تیغه‌های دیسکی کُند (F_{R_B} و F_{N_B}) برابر با رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ خواهد بود.

کند آمده است.

مطابق نمودارهای شکل‌های ۷ و ۸ ضریب همبستگی مقادیر برآورد شده و مقادیر واقعی نیروهای عمودی و غلتشی به ترتیب برابر ۰/۸۱ و ۰/۹۲ است.



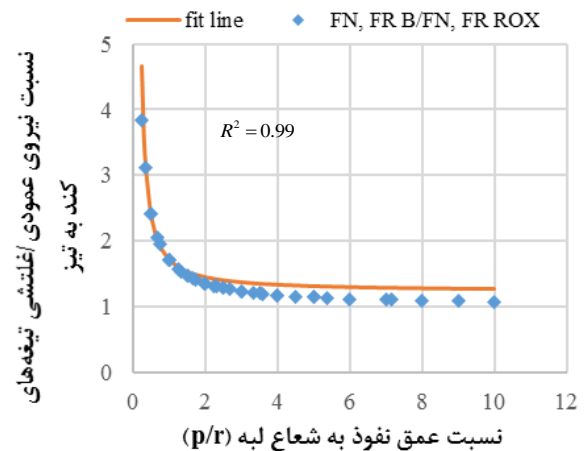
شکل ۷- نمودار مقایسه مقادیر برآورد شده مدل پیشنهادی و مقادیر واقعی برای نیروی عمودی.



شکل ۸- نمودار مقایسه مقادیر برآورد شده مدل پیشنهادی و مقادیر واقعی برای نیروی غلتشی.

همچنین برای صحت‌سنجی مدل پیشنهادی از آزمون t در سطح اطمینان $(1-\alpha)$ ۹۹ درصد استفاده شد. مقدار p (p -value) برای هر دو نیروی عمودی و غلتشی مطابق جدول ۲ بیشتر از مقدار $\alpha=1$ درصد است که از لحاظ آماری نشان می‌دهد، مقادیر برآورده شده با مقادیر واقعی به طور متوسط

و غلتشی نسبت به رابطه‌های ۳ و ۴ بی‌تعدد و ارتباط آن با نسبت عمق نفوذ به شعاع لبه ($\frac{P}{r}$) مورد بررسی قرار داده شد. تابع برازش شده بر نمودار شکل ۶ بر اساس تحلیل رگرسیون غیرخطی با نرم‌افزار SPSS به صورت رابطه ۱۴ با ضریب تعیین قوی ($R^2=0.99$) به دست آمد که در جدول ۱ مقادیر تخمین زده شده پارامترهای آن را می‌توان مشاهده کرد. بنابراین رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ برای برآورد نیروهای عمودی و غلتشی تیغه‌های دیسکی ۷ شکل با شعاع لبه، به صورت رابطه ۱۵ بازنویسی می‌شود.



شکل ۶- نمودار نسبت نیروهای برش مدل پیشنهادی به مدل راکسبورو و فیلیپس در برابر نسبت عمق نفوذ به شعاع لبه.

$$y = b_1 e^{\frac{b_2}{x}} \quad x > 0 \quad (14)$$

جدول ۱- تخمین پارامترهای تابع برازش شده.

پارامترها	تخمین	انحراف معیار	فاصله اطمینان ۹۵ درصد	
			حد بالا	حد پایین
b_1	۱/۲۱۳	۰/۰۲۲	۱/۱۶۹	۱/۲۵۷
b_2	۰/۳۳۷	۰/۰۰۸	۰/۳۲۰	۰/۳۵۴

$$F_{N,R_B} = 1.213 F_{N,R_{ROX}} \cdot e^{\frac{0.337r}{P}} \quad r > 0 \quad (15)$$

۵- نتایج و بحث

۵-۱- اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی از داده‌های آزمایشگاهی آزمون برش خطی بزرگ‌مقیاس در تحقیق بالچی و توماچ (۲۰۱۲)، استفاده شد. در جدول ۳ اطلاعات مربوط به خواص مکانیکی سنگ و در جدول ۴ مقادیر واقعی و برآورد شده نیروهای برش در حالت شیار منفرد برای تیغه‌های با لبه تیز و

FR	۷,۹۲	۲۲,۷۲			
برآورد شده					

یکسانند و تفاوت معناداری بین داده‌های واقعی و برآورد شده وجود ندارد.

جدول ۲- نتایج آزمون t

مقدار p	مقدار t	α	واریانس	میانگین	نیروهای برش
۰,۰۳۵	-۲,۰۹۲	۰,۰۱	۱۱۰,۸/۸۵	۶۵,۵۸	FN واقعی
۰,۲۹۰	۰,۵۷۷	۰,۰۱	۱۸,۷۲	۷,۴۲	FR واقعی

جدول ۳- خواص مکانیکی سنگ‌های آزمون شده.

نوع سنگ	UCS (MPa)	BTS (MPa)	CAI
آرکوز	۳۴,۱ ± ۱,۰۳	۴,۲ ± ۰,۸	۲,۰۰
شیل	۲۷,۶ ± ۱,۷	۵,۵ ± ۰,۶۷	۱,۲۵
سنگ‌آهک فسیلی	۳۱,۹ ± ۱,۴۸	۳,۹ ± ۱,۵	۰,۷۵

جدول ۴- مقادیر واقعی و برآورد شده نیروهای برش سنگ.

نوع سنگ	p (mm)	مقادیر واقعی بالچی و توماچ (۲۰۱۲)		مدل نظری راکسبورو و فیلیپس		مدل نظری بیلگین		مدل نظری پیشنهادی تیغه‌های کند	
		r=۱,۴ (mm)		r=۰		r=۱,۴ (mm)		r=۱,۴ (mm)	
		FN (kN)	FR (kN)	FN (kN)	FR (kN)	FN (kN)	FR (kN)	FN (kN)	FR (kN)
آرکوز	۳	۲۹/۷	۳/۲	۱۳/۵	۱/۲	۱۹/۳	۱/۶	۱۸/۷	۱/۸
	۵	۴۹/۸	۴/۷	۲۹/۰	۳/۳	۳۶/۶	۴/۰	۳۷/۶	۴/۷
	۷	۸۹/۳	۱۰/۱	۴۷/۸	۶/۶	۵۷/۳	۷/۷	۶۰/۵	۸/۹
شیل	۵	۳۰/۳	۳/۹	۲۳/۴	۲/۷	۲۹/۵	۳/۳	۳۱/۲	۳/۹
	۷	۳۸/۱	۴/۷	۳۸/۷	۵/۳	۴۶/۴	۶/۲	۵۰/۱	۷/۴
	۹	۵۶/۹	۸/۱	۵۶/۳	۸/۸	۶۵/۵	۱۰/۲	۷۱/۷	۱۲/۰
سنگ‌آهک فسیلی	۵	۷۱/۲	۵/۷	۲۷/۱	۳/۱	۳۴/۲	۳/۸	۳۶/۱	۴/۵
	۷/۵	۱۰۰/۸	۹/۵	۴۹/۶	۷/۰	۵۸/۹	۸/۲	۶۴/۰	۹/۸
	۱۰	۱۲۴/۱	۱۶/۹	۷۶/۱	۱۲/۵	۸۷/۷	۱۴/۳	۹۶/۷	۱۷/۱

۲-۵- تحلیل حساسیت

۲-۲-۵- عمق نفوذ (p) و شعاع لبه تیغه (r)

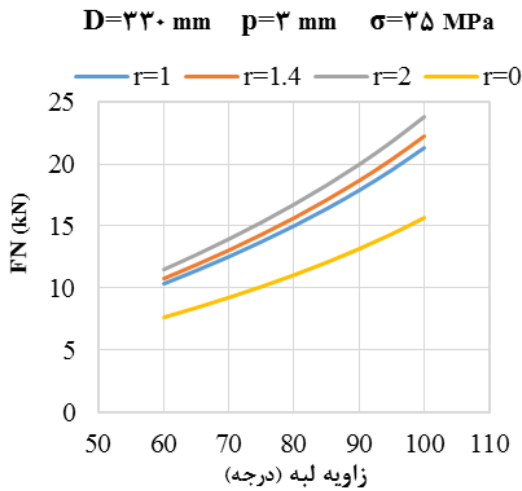
۲-۵-۱- مقایسه نتایج با مدل بیلگین

برای بررسی اثر شعاع لبه تیغه در برآورد نیروهای برش سنگ، از رابطه پیشنهادی ۱۵ استفاده شده است. مطابق نمودار شکل ۹ با افزایش شعاع لبه، نیروهای عمودی و غلتشی افزایش و به تبع آن نسبت نیروهای تیغه‌های کند به تیز به ازای یک عمق نفوذ ثابت نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق نفوذ، نسبت نیروهای برش تیغه‌های کند به تیز کاهش می‌یابد و تقریباً در عمق نفوذ ۱۰ میلی‌متر همگرا می‌شود اما کاهش شدیدتر از عمق نفوذ ۱ به ۲ میلی‌متر انجام می‌گیرد، به گونه‌ای که در این عمق نیروی عمودی و غلتشی تیغه‌های دیسکی با شعاع لبه ۱، ۱/۴ و ۲ میلی‌متر به ترتیب ۶۰,۵، ۷۶,۳ و ۹۷,۴ درصد کاهش می‌یابد. علت این امر کاهش آهنگ افزایش سطح تماس تیغه دیسکی و سنگ از عمقی به عمق دیگر است که ارتباط مستقیمی با اندازه زاویه لبه تیغه دارد.

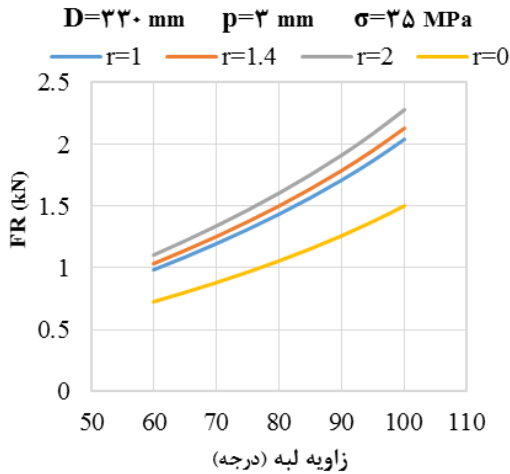
بیلگین رابطه‌های ۱ و ۲ را بر اساس مدل راکسبورو و فیلیپس برای تیغه‌های دیسکی V شکل با شعاع لبه (r) ارائه کرد. همچنین در این تحقیق، مدل نظری راکسبورو و فیلیپس برای تیغه‌های دیسکی با شعاع لبه اصلاح شد و رابطه‌ای واحد برای برآورد نیروهای عمودی و غلتشی، بر خلاف مدل بیلگین که از دو رابطه مجزا برای این امر استفاده کرده بود، به دست آمد. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، هر دو مدل دارای ضرایب همبستگی یکسان با مقادیر واقعی‌اند اما برتری و مزیت مدل پیشنهادی نسبت به مدل بیلگین حذف ضرایب برای محاسبه نیروهای عمودی و غلتشی و ارائه یک رابطه واحد به جای دو رابطه مستقل در به دست آوردن نیرو است.

جدول ۵- ماتریس همبستگی نیروهای غلتشی و عمودی مدل بیلگین و مدل پیشنهادی با مقادیر واقعی.

	FR واقعی	FR _{BIL}		FN واقعی	FN _{BIL}
FR واقعی	۱	-	FN واقعی	۱	-
FR _{BIL}	۰/۹۲	۱	FN _{BIL}	۰/۸۲	۱
	FR واقعی	FR _B		FN واقعی	FN _B
FR واقعی	۱	-	FN واقعی	۱	-
FR _B	۰/۹۲	۱	FN _B	۰/۸۱	۱



شکل ۱۰- ارتباط زاویه و شعاع لبه با نیروی عمودی.

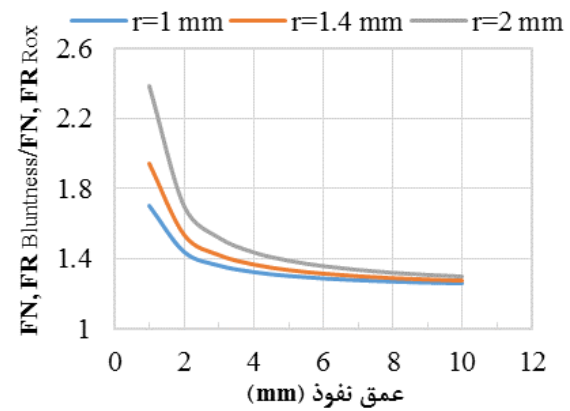


شکل ۱۱- ارتباط زاویه و شعاع لبه با نیروی غلتشی.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدلی نظری برای برآورد نیروهای برش تیغه‌های دیسکی V شکل با شعاع لبه (تیغه‌های دیسکی کند) ارائه شد. برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی از داده‌های واقعی آزمون برش خطی بزرگ‌مقیاس سنگ در تحقیق دیگران استفاده شد. نتایج نشان داد که مقدار نیروی عمودی و غلتشی برآورده شده با داده‌های واقعی ضریب همبستگی قوی به ترتیب برابر ۰/۸۱ و ۰/۹۲ دارند. همچنین نتایج آزمون t در سطح اطمینان ۹۹ درصد و مقدار p برای داده‌های واقعی و برآورده شده نشان داد که هر دو روش به طور میانگین نتایج یکسانی را ارائه می‌کند. از نتایج مهم این تحقیق ارائه یک رابطه با ضرایب یکسان برای برآورد نیروهای عمودی و غلتشی برای تیغه‌های دیسکی V شکل است که ضمن حذف ضرایب از مدل قبلی (در

D=230 mm $\phi=90$ $\sigma=25$ MPa



شکل ۹- ارتباط عمق نفوذ و شعاع لبه با نیروهای عمودی و غلتشی.

۵-۲-۳- زاویه لبه (ϕ) و شعاع لبه تیغه (r)

در تکمیل تحلیل حساسیت نیروهای برش برآورد شده تیغه‌های دیسکی کند، به بررسی تاثیر زاویه لبه بر آن پرداخته شده است. مطابق نمودار شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نسبت نیروهای برش تیغه‌های کند به تیز به ازای شعاع لبه ۱، ۱/۴ و ۲ میلی‌متر به ترتیب ۳۵/۷، ۴۱/۹ و ۵۱/۸ درصد افزایش می‌یابد.

- روابط ۱ و ۲)، اعتبار خوبی در مقایسه با داده‌های واقعی به دلیل داشتن ضرایب همبستگی قوی دارد. در ادامه به تاثیر شعاع لبه تیغه‌های دیسکی V شکل بر مقدار نیروهای برش سنگ پرداخته شد. نتایج نشان داد که با افزایش عمق نفوذ تا ۱۰ میلی‌متر، نسبت نیروی برش تیغه‌های دیسکی با شعاع لبه‌های ۱، ۱/۴ و ۲ میلی‌متر به تیغه‌های تیز، کاهش می‌یابد و در عمق‌های نفوذ بالاتر از ۱۰ میلی‌متر همگرا می‌شود اما کاهش شدیدتر از عمق نفوذ ۱ به ۲ میلی‌متر اتفاق می‌افتد به گونه‌ای که مقدار نیروهای عمودی و غلتشی تیغه‌های دیسکی به ترتیب ۶۰/۵، ۷۶/۳ و ۹۷/۴ درصد به ازای یک زاویه ثابت لبه کاهش می‌یابد. علت این امر شیب ملایم آهنگ افزایش سطح مقطع از عمقی به عمق دیگر است. همچنین افزایش زاویه لبه موجب افزایش ۳۵/۷، ۴۱/۹ و ۵۱/۸ درصدی نیروهای برش به ترتیب برای تیغه‌های دیسکی با شعاع لبه ۱، ۱/۴ و ۲ میلی‌متر به ازای یک عمق نفوذ ثابت می‌شود.
- منابع**
1. Balci C, Bilgin N. Correlative study of linear small and full-scale rock cutting tests to select mechanized excavation machines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2007;44(3):468-76.
 2. Roby J, Sandell T, Kocab J, Lindbergh L, editors. The current state of disc cutter design and development directions. *Proceeding of 2008 North American Tunneling Conference, SME C*; 2008: Citeseer.
 3. Rad PF, editor Bluntness and wear of rolling disk cutters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*; 1975: Elsevier.
 4. Bilgin N. Investigations into the mechanical cutting characteristics of some medium and high strength rocks. 1977.
 5. Rostami J. *Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure*: Colorado School of Mines Golden; 1997.
 6. Howarth F. Some fundamental aspects of the use of disc cutters in hard-rock excavation. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 1982;82(11):309-15.
 7. Sanio H, editor Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*;
8. Bilgin N, Balci C, Tumac D, Feridunoglu C, Copur H, editors. Development of a portable rock cutting rig for rock cuttability determination. *European rock mechanics symposium EUROCK*; 2010.
 9. Tumac D, Balci C, Bilgin N, Copur H, editors. Comparison of Cutting Forces for V-Type Disc Cutter and Performance Prediction of TBM Using Portable Linear Rock Cutting Machine (PLCM). *ISRM Regional Symposium-7th Asian Rock Mechanics Symposium*; 2012: International Society for Rock Mechanics.
 10. Balci C, Tumac D. Investigation into the effects of different rocks on rock cuttability by a V-type disc cutter. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2012;30:183-93.
 11. Entacher M, Winter G, Bumberger T, Decker K, Godor I, Galler R. Cutter force measurement on tunnel boring machines—System design. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2012;31:97-106.
 12. Entacher M, Lorenz S, Galler R. Tunnel boring machine performance prediction with scaled rock cutting tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014;70:450-9.
 13. Entacher M, Schuller E. Angular dependence of rock cutting forces due to foliation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018;71:215-22.
 14. Log S, Smading S, Mosavat K. Recent cutter technology advances to efficiently bore through extremely challenging conditions in hard rock. *White Papers of The Robbins Company*. 2018.
 15. Bilgin N, Copur H, Balci C. *Mechanical excavation in mining and civil industries*: CRC Press; 2013.
 16. Smading S, editor Large-Diameter 20-Inch Disc Cutters-A Comparison of Tool Life and Performance on Hard Rock TBMs. *The Rapid Excavation & Tunneling Conference (RETC)*; 2017; San Diego, USA.
 17. Cho J-W, Jeon S, Yu S-H, Chang S-H. Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2010;25(3):230-44.

Sciences & Geomechanics Abstracts; 1975:
Elsevier.

18. Roxborough FF, Phillips HR, editors. Rock excavation by disc cutter. *International Journal of Rock Mechanics and Mining*