



توسعه یک مدل تجربی برای پیش‌بینی سایش دیسک برشی TBM بر پایه پارامترهای عملیاتی و ژئومکانیکی: مطالعه موردی تونل انتقال آب قمرو

میلاذ صباغی^۱؛ ابراهیم فرخ^{۱*}

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵؛ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۸

(*نویسنده مسئول: e.farrokh@aut.ac.ir)

چکیده

سایش دیسک‌های برشی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده بهره‌وری و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری در ماشین‌های حفار تمام‌مقطع سنگ سخت (TBM) محسوب می‌شود. اگرچه مدل‌های متداول پیش‌بینی سایش عمدتاً بر شاخص‌های ساینندگی سنگ و ویژگی‌های ذاتی توده‌سنگ استوار هستند، سهم پارامترهای عملیاتی ماشین در بسیاری از این مدل‌ها به‌صورت محدود یا غیرمستقیم لحاظ شده است. در پژوهش حاضر، با استفاده از داده‌های واقعی حاصل از حدود ۱۸ کیلومتر حفاری تونل انتقال آب قمرو، چارچوبی تجربی برای پیش‌بینی نرخ سایش دیسک‌های برشی توسعه داده شد که در آن اثر هم‌زمان پارامترهای ژئومکانیکی و پارامترهای عملیاتی TBM مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، داده‌های عملکردی شامل نیروی عمودی وارد بر دیسک (Fn)، سرعت دوران کله‌حفار (RPM)، موقعیت شعاعی و مشخصات هندسی دیسک‌ها به همراه پارامترهای ژئومکانیکی نظیر مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ (UCS) استخراج و تحلیل شدند. به منظور انعکاس تفاوت‌های مکانیزم بارگذاری و شرایط تنش در نواحی مختلف کله‌حفار، مدل‌های مستقل برای دیسک‌های مرکزی-میانی و محیطی توسعه یافت. نتایج تحلیل رگرسیون چندمتغیره نشان داد که مدل‌های پیشنهادی با ضرایب تعیین حدود ۰.۸۸ قادر به بازتولید مناسب رفتار سایش دیسک‌ها هستند و نقش غالب پارامترهای UCS، Fn و RPM را در کنترل نرخ سایش تأیید می‌کنند. اعتبارسنجی مستقل مدل‌ها با استفاده از آزمون‌های سایش دیسک در مقیاس کامل (FDAT) و تحت سطوح مختلف بارگذاری و سرعت دوران انجام شد که انحراف میان مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده را به کمتر از ۲۰ درصد محدود نمود. همچنین مقایسه با مدل کلاسیک Gehring نشان داد که مدل توسعه‌یافته، انطباق بهتری با داده‌های واقعی پروژه داشته و قابلیت بالاتری در بازنمایی رفتار سایش تحت شرایط عملیاتی متغیر ارائه می‌کند. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای بهینه‌سازی پارامترهای بهره‌برداری، برنامه‌ریزی مداخلات کله‌حفار و توسعه راهبردهای نگهداری پیشگیرانه در پروژه‌های حفاری مکانیزه سنگ سخت فراهم آورد.

سایش؛ دیسک برش؛ پارامترهای عملیاتی؛ آزمایش بزرگ‌مقیاس؛ ماشین حفار تمام مقطع

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

آب، انرژی و حمل‌ونقل، موجب افزایش کاربرد ماشین‌های حفار تمام‌مقطع (TBM) در پروژه‌های تونل‌سازی شده است [۲]. این ماشین‌ها به دلیل نرخ پیشروی بالا، ایمنی بیشتر مطرح است. دیسک‌ها با انتقال نیروی محوری و گشتاور به توده سنگ، فرآیند برش را انجام می‌دهند و در اثر تماس مداوم با سنگ، به‌ویژه در شرایط سنگ‌های سخت و ساینده،

گسترش زیرساخت‌های زیرزمینی در حوزه‌هایی نظیر منابع و دقت اجرایی مناسب، جایگزین روش‌های سنتی در بسیاری از پروژه‌ها شده‌اند [۱]. با این حال، سایش دیسک‌های برشی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های بهره‌برداری از TBM

نرخ سایش دیسک‌های برشی می‌پردازد. وجه تمایز اصلی مدل‌های ارائه‌شده، استفاده هم‌زمان از پارامترهای ژئومکانیکی و عملیاتی، تفکیک نواحی مختلف کله‌حفار بر مبنای مکانیزم بارگذاری، و اعتبارسنجی مستقل نتایج از طریق آزمایش‌های سایش دیسک در مقیاس کامل (FDAT) است. این رویکرد ضمن حفظ قابلیت تفسیر مهندسی مدل‌های تجربی، امکان بازنمایی واقع‌بینانه‌تر رفتار سایش در شرایط عملیاتی واقعی TBM را فراهم می‌سازد.

همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، بخش عمده مدل‌های موجود نرخ سایش دیسک را عمدتاً تابع ویژگی‌های ساینده‌گی و مقاومتی سنگ در نظر گرفته‌اند و تنها تعداد محدودی از مطالعات از پارامترهای عملیاتی TBM استفاده نموده‌اند. همچنین در اکثر مدل‌های ارائه‌شده، تفاوت شرایط بارگذاری و مکانیزم سایش در نواحی مختلف کله‌حفار به‌صورت صریح لحاظ نشده است. از سوی دیگر، مدل‌های داده‌محور و مبتنی بر یادگیری ماشین اگرچه در برخی موارد دقت بالایی ارائه می‌کنند، اما معمولاً به حجم زیادی از داده‌های آموزشی نیاز داشته و از قابلیت تفسیر مهندسی محدودی برخوردارند. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف توسعه یک مدل تجربی چندمتغیره ناحیه‌مبنا، مبتنی بر داده‌های واقعی حفاری و قابل استفاده در تصمیم‌گیری‌های عملیاتی و نگهداری TBM انجام شده است.

۲- شرح پروژه

تونل انتقال آب قمرود از اجزای اصلی طرح انتقال آب از حوضه رودخانه دز در استان لرستان به حوضه قمرود بوده و باهدف تأمین حدود ۲۳ مترمکعب بر ثانیه آب شرب مناطق مرکزی ایران طراحی شده است [۲۳]. این تونل به طول تقریبی ۳۶ کیلومتر به‌صورت ثقلی اجرا شده و قطر حفاری آن ۴.۵۲۵ متر است که پس از نصب پوشش سگمنتی بتنی، قطر نهایی داخلی به ۳.۸ متر کاهش می‌یابد. موقعیت جغرافیایی منطقه و مسیر تونل در شکل ۱ ارائه شده است.

به‌منظور تسهیل مدیریت اجرایی، مسیر تونل در مرحله پیش‌مناقصه به چهار قطعه تقریباً ۹ کیلومتری تقسیم گردید. قطعات ۳ و ۴ به‌همراه بخشی از قطعه ۲ (در مجموع حدود ۲۴.۵ کیلومتر) از جبهه شمالی با استفاده از دستگاه TBM نوع Double Shield ساخت شرکت Wirth حفاری و با

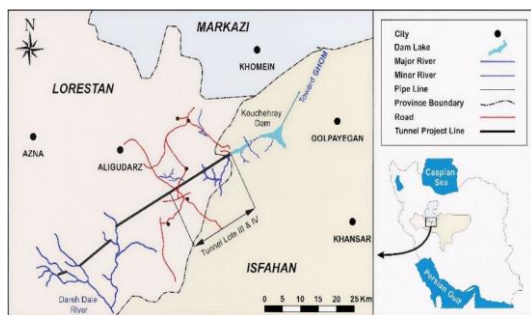
دچار سایش تدریجی می‌شوند که این امر موجب کاهش راندمان حفاری، افزایش هزینه‌های نگهداری و توقف‌های ناخواسته می‌گردد [۳].

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که سایش دیسک پدیده‌ای چندعاملی بوده و به ویژگی‌های مکانیکی و کانی‌شناسی سنگ و نیز شرایط عملیاتی ماشین وابسته است. مقاومت فشاری تک‌محوره، درصد کوارتز و اندازه دانه‌ها از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر نرخ سایش گزارش شده‌اند [۴، ۵]، به‌طوری‌که افزایش سختی و مقدار کانی‌های ساینده منجر به کاهش عمر دیسک می‌شود [۶]. همچنین پارامترهایی نظیر نرخ نفوذ، سرعت دوران کله‌حفار، تنش‌های برجا و شرایط رطوبتی بر میزان سایش اثرگذارند [۷، ۸]. در همین راستا، مدل‌های پیش‌بینی متعددی شامل مدل‌های تحلیلی مبتنی بر مکانیک تماس [۹]، مدل‌های تجربی نظیر CSM و NTNU با تکیه بر شاخص‌های ساینده‌گی [۱۰، ۱۱] و همچنین مدل‌های داده‌محور و هوشمند مبتنی بر یادگیری ماشین ارائه شده‌اند [۱۲، ۱۳].

با وجود توسعه گسترده مدل‌های تجربی، نیمه‌تجربی و داده‌محور برای پیش‌بینی سایش دیسک‌های برشی TBM، بخش عمده مدل‌های موجود همچنان بر شاخص‌های ساینده‌گی سنگ نظیر CAI، درصد کوارتز، CLI و یا پارامترهای مقاومت سنگ متمرکز هستند و اثر متغیرهای عملیاتی ماشین را به‌صورت محدود یا غیرمستقیم در نظر می‌گیرند. در مقابل، مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین اگرچه در برخی مطالعات دقت پیش‌بینی بالاتری ارائه کرده‌اند، اما معمولاً به حجم بالایی از داده‌های آموزشی نیاز داشته، قابلیت تفسیر فیزیکی محدودی دارند و تعمیم‌پذیری آن‌ها به پروژه‌های جدید همواره با عدم قطعیت همراه است. علاوه بر این، در اکثر مدل‌های موجود، موقعیت دیسک بر روی کله‌حفار و تفاوت‌های مکانیزم بارگذاری میان دیسک‌های مرکزی، میانی و محیطی به‌صورت صریح در ساختار مدل لحاظ نشده است؛ در حالی که مطالعات میدانی نشان می‌دهد توزیع تنش، سرعت خطی مؤثر، نیروهای جانبی و الگوی سایش در این نواحی به‌طور معناداری متفاوت است. بر این اساس، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از داده‌های واقعی حاصل از حدود ۱۸ کیلومتر حفاری تونل انتقال آب قمرود، به توسعه مدل‌های تجربی ناحیه‌مبنا برای پیش‌بینی

جدول ۱. مقایسه مهم‌ترین مدل‌های پیش‌بینی سایش دیسک برشی TBM و جایگاه پژوهش حاضر

منابع	محدودیت‌ها	نقاط قوت	خروجی مدل	پارامترهای وردی اصلی	نوع مدل	مدل
[4]	مبتنی بر فرضیات قدیمی برش؛ های TBM عدم انطباق کامل با مدرن	اولین چارچوب تجربی برای ارتباط ویژگی‌های سنگ و سایش	نرخ سایش	درصد کوارتز، اندازه دانه، شاخص بار نقطه‌ای	تجربی	Ewendt (1992)
[14]	عدم لحاظ پارامترهای عملیاتی ماشین	کاربرد صنعتی گسترده	هزینه، تعداد تعویض دیسک، تأخیر حفاری	CAI	نیمه تجربی	CSM (Rostami, 1997)
[5]	حساسیت کم به شرایط TBM عملیاتی	سادگی و کاربرد وسیع	عمر متوسط حلقه دیسک	CAI, UCS	تجربی	Gehring (1995)
[6]	کالیبره شده برای سنگ‌های نروژ	پایگاه داده گسترده	عمر دیسک، هزینه حفاری	، درصد کوارتز، CLI	تجربی	NTNU (Bruland, 2000)
[11]	عدم توجه به تفاوت آرایش دیسک‌ها	کاربرد مهندسی مناسب	عمر دیسک	CAI, UCS	تجربی	Maidl et al. (2008)
[15]	نیازمند آزمایش‌های متعدد	در نظر گرفتن چند ویژگی مکانیکی	میزان سایش	، مقاومت کششی UCS	شاخص ترکیبی	Wang et al. (2012)
[16]	نیاز به آزمایش‌های تخصصی	دقت بهتر در سنگ‌های ساییده	عمر دیسک	، سختی ویکرز، ABI, UCS	تجربی	Hassanpour et al. (2014)
[17]	عدم لحاظ شرایط عملیاتی	توسعه بر اساس داده‌های پروژه‌های ایرانی	عمر دیسک	CAI	تجربی (ایران)	Farrokh et al. (2013)
[18]	عدم تفکیک نواحی مختلف کله‌حفار	استفاده از داده‌های واقعی TBM	نرخ سایش و عمر دیسک	، داده‌های CAI, UCS, عملیاتی	تجربی - میدانی (ایران)	Farrokh & Kim (2018)
[19]	دشواری تعیین کمی پارامتر ساختاری	لحاظ اثر ساختار زمین‌شناسی	عمر دیسک	، شاخص CAI, UCS, ساختاری	تجربی	Karami et al. (2022)
[20]	نیازمند حجم زیاد داده	توانایی تحلیل روابط پیچیده	سایش و عمر دیسک	شاخص‌های مختلف سنگ	داده محور	Farrokh (2021)
[13]	پیچیدگی اجرایی بالا	مبنای فیزیکی قوی	نرخ سایش	ضرب اصطکاک، نیروهای تماس	مکانیکی - تریبولوژیکی	Zhang et al. (2023)
[21]	یازمند اندازه‌گیری مستقیم نیروها	توجه به مکانیک برش	سایش شعاعی دیسک	نیروی غلظتی، مسافت برش	مکانیکی - میدانی	Zhou et al. (2024)
[22]	نیازمند پایگاه داده بزرگ و پایش پیوسته	دقت بالا	پیش‌بینی نرخ سایش	TBM داده‌های مانیتورینگ	یادگیری عمیق	Bai et al. (2025)
	محدود به دامنه داده‌های پروژه قمرود	لحاظ هم‌زمان پارامترهای ژئومکانیکی و عملیاتی، تفکیک دیسک‌های مرکزی - میانی و محیطی، اعتبارسنجی مستقل با FDAT	نرخ سایش دیسک	، UCS, Fn, RPM, موقعیت شعاعی، زاویه دیسک	تجربی چند متغیره ناحیه مینا	پژوهش حاضر



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی پروژه انتقال آب قمرود [۱۸]

۱-۲- مطالعات زمین‌شناسی مهندسی

تونل انتقال آب قمرود در پهنه تکتونو-دگرگونی سندانج-

با فلات ایران بوده و عمدتاً از سنگ‌های دگرگونی با درجه

سگمنت‌های بتنی پیش‌ساخته شش‌ضلعی به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر پوشش‌دهی شدند [۲۴]. در مقابل، قطعه ۱ و بخش باقی‌مانده قطعه ۲ به طول تقریبی ۱۱ کیلومتر، به دلیل شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی پیچیده‌تر، از جبهه جنوبی و با TBM نوع EPB-Hard Rock ساخت شرکت Herrenknecht اجرا گردید [۲۴].

عملیات حفاری از جبهه شمالی در سال ۲۰۰۴ آغاز و در سال ۲۰۰۸ تکمیل شد. در قطعات ۳ و ۴ به طول حدود ۱۸ کیلومتر، متوسط پیشروی ماهانه ۴۱۰ متر و حداکثر پیشروی ثبت‌شده ۱۰۰۰ متر گزارش گردید که نشان‌دهنده عملکرد عملیاتی مطلوب در بخش‌های قابل‌توجهی از مسیر تونل است [۲۵].

سیرجان قرار دارد که حاصل برخورد صفحه عربی-آفریقایی

۲-۲- مشخصات TBM

در بخش‌های ۳ و ۴ تونل قمرود از یک TBM تمام‌مقطع با شیلد تلسکوپی استفاده شد که برای شرایط زمین‌شناسی مسیر بهینه‌سازی شده بود و امکان پیشروی کنترل‌شده و پایدار را فراهم می‌کرد [۲۳]. هسته حفاری شامل ۳۵ دیسک برش با قطر اسمی ۱۷ اینچ (≈ 432 میلی‌متر) در چینش بهینه روی کله‌حفار نصب شده بود تا توزیع تنش یکنواخت در رابط سنگ-دیسک ایجاد و سایش تجهیزات کاهش یابد. مشخصات فنی کامل دیسک‌ها و پارامترهای عملیاتی مرتبط در جدول ۳ ارائه شده و به‌عنوان مبنای تحلیل‌های فنی پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۳. مشخصات اصلی دستگاه حفار تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۳ و ۴) [۱۸]

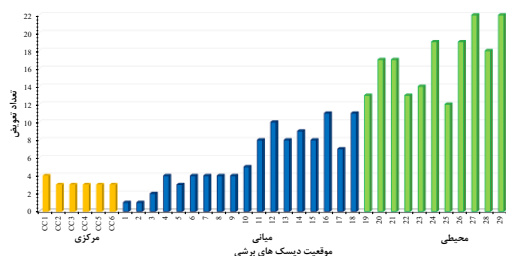
پارامترها	مقدار
طول کل پروژه	۵۰ کیلومتر
قطر حفاری	۴٫۵۳ متر
طول مورد مطالعه	۱۸ کیلومتر
نوع TBM	سپر تلسکوپی
طول سپر	۱۱ متر
حداکثر نیروی پیشران	۱۹۹۰۰ کیلو نیوتن
ظرفیت تحمل دیسک‌های برشی	۲۲۰ کیلو نیوتن
تعداد دیسک‌های برشی	۳۵ عدد
فاصله داری متوسط دیسک‌های برشی ناحیه میانی کله حفار	۷۵ میلی‌متر

۳- تحلیل و مصرف دیسک‌های برشی

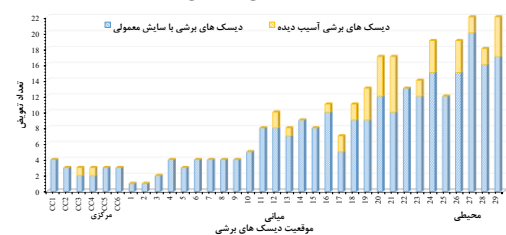
کله حفار TBM پروژه به سه ناحیه اصلی تقسیم می‌شود: دیسک‌های مرکزی، دیسک‌های میانی و دیسک‌های محیطی. برای تونل قمرود، این بخش‌ها شامل ۶ دیسک مرکزی، ۱۸ دیسک میانی و ۱۱ دیسک محیطی بودند که به‌صورت بهینه روی کله حفار چیده شده‌اند تا خردایش سنگ، راندمان حفاری و کاهش سایش به حداکثر برسد. چینش و زاویه دیسک‌ها در هر گروه متفاوت است: دیسک‌های مرکزی و میانی با زاویه ثابت ۹۰ درجه نسبت به سطح کله حفار قرار دارند، در حالی که دیسک‌های جانبی زاویه خود را از ۹۰ تا حدود ۴۰ درجه تغییر می‌دهند تا با شرایط عملیاتی هر ناحیه تطابق یافته و عملکرد بهینه حفظ شود [۲۸].

مطالعات مصرف دیسک‌ها نشان می‌دهد که میزان سایش بافاصله از مرکز کله حفار افزایش می‌یابد: بیشترین مصرف در دیسک‌های محیطی و کمترین در دیسک‌های مرکزی رخ می‌دهد شکل ۲. این روند ناشی از چند عامل اصلی

است: مسیر طولانی‌تر دیسک‌های محیطی در هر دور کله‌حفار که موجب افزایش سطح تماس و سایش می‌شود، زاویه متفاوت دیسک‌ها نسبت به سطوح منحنی محیطی که نیروی جانبی و تنش را افزایش می‌دهد، و محدودیت‌های سایش مجاز پایین‌تر در دیسک‌های محیطی که تعویض زود هنگام را ضروری می‌سازد [۲۹]. علاوه بر سایش معمول، عواملی مانند آسیب به حلقه نگهدارنده، گیرکردن دیسک، شکست یا پیچ‌شکستگی، شکستن دیسک و نشت روغن می‌تواند نیاز به تعویض دیسک را ایجاد کند؛ این موارد همراه با الگوهای سایش طبیعی در شکل ۳ ارائه شده تا مبنای تصمیم‌گیری صحیح برای نگهداری و تعویض دیسک‌ها فراهم شود.



شکل ۲. تعداد دیسک‌های برش تعویض شده در هر موقعیت



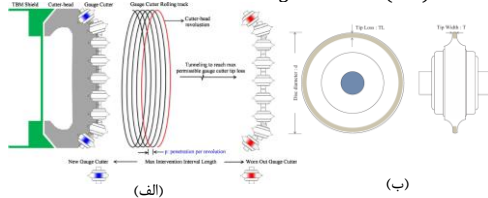
شکل ۳. تعداد دیسک‌های برش آسیب‌دیده و سایش طبیعی در هر موقعیت

در محدوده مورد مطالعه، مجموعاً ۲۶۴ دیسک در اثر سایش طبیعی و تدریجی حلقه دیسک تعویض شدند، در حالی که تعداد ۴۵ دیسک به دلیل بروز سایش‌های غیرعادی، آسیب‌دیدگی موضعی یا شرایط نامطلوب عملکردی از مدار بهره‌برداری خارج گردیدند. بدین ترتیب، بیش از ۸۵ درصد از کل دیسک‌های تعویض شده تحت تأثیر سازوکار غالب سایش تدریجی قرار داشته‌اند.

این موضوع نشان می‌دهد که مکانیزم اصلی حاکم بر مصرف ابزار در پروژه مورد مطالعه، فرسایش تدریجی وابسته به شرایط عملیاتی و ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ بوده است؛ مکانیزمی که مبنای توسعه مدل حاضر را تشکیل می‌دهد. همچنین توزیع مکانی دیسک‌های مصرف شده بر روی

پیش‌بینی دقیق عمر دیسک، بهینه‌سازی نگهداری پیشگیرانه و کاهش هزینه‌های پروژه فراهم می‌شود.

$$W \text{ (mm/km)} = \frac{\text{Cutter wear (mm)}}{\text{Cutter rolling distance (km)}}$$



شکل ۵. شماتیک حداکثر طول و فاصله تداخل؛ (ب) شرح هندسی برش‌دهنده دیسکی [۲۸]

به‌منظور توسعه پایگاه داده مورد استفاده در تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی سایش، کل محدوده ۱۸ کیلومتری مورد مطالعه به بازه‌های عملیاتی متناظر با چرخه‌های واقعی عملکرد دیسک‌های برشی تفکیک شد. مبنای تعریف هر رکورد از پایگاه داده، فاصله حفاری بین دو عملیات متوالی تعویض دیسک بوده است؛ به‌گونه‌ای که هر رکورد نماینده یک بازه مشخص حفاری با شرایط زمین‌شناسی و عملیاتی نسبتاً یکنواخت محسوب می‌شود.

برای هر بازه، اطلاعات عملکردی TBM شامل نیروی عمودی وارد بر دیسک (Fn)، نیروی برشی (Fr)، سرعت دوران کله حفار (RPM)، نرخ نفوذ (P) و سایر پارامترهای ثبت‌شده توسط سیستم مانیتورینگ دستگاه به‌صورت پیوسته و در فواصل کوتاه و منظم برداشت گردید. سپس مقادیر ثبت‌شده در طول همان بازه حفاری پردازش شده و میانگین آماری آن‌ها به‌عنوان مقدار نماینده بازه در پایگاه داده لحاظ شد.

پارامترهای ژئومکانیکی نظیر مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، شاخص کیفیت توده‌سنگ (RMR) و سایر مشخصات زمین‌شناسی از نتایج مطالعات زمین‌شناسی مهندسی، مغزه‌های اکتشافی، نگاشت‌های زمین‌شناسی تونل و آزمایش‌های آزمایشگاهی استخراج گردید. پس از تطبیق موقعیت مکانی داده‌های ژئومکانیکی با پیشروی TBM، مقادیر متناظر هر بازه حفاری تعیین و در مواردی که بیش از یک اندازه‌گیری در یک بازه وجود داشت، مقدار میانگین وزنی آن‌ها به‌عنوان مشخصه نماینده آن بازه در نظر گرفته شد.

نرخ سایش دیسک‌های برشی نیز بر مبنای میزان سایش ثبت‌شده برای هر دیسک در طول یک چرخه کامل کاری، یعنی از زمان نصب تا زمان تعویض آن، محاسبه گردید. بدین

کله حفار نشان داد که نرخ مصرف در نواحی محیطی بیشتر از نواحی مرکزی بوده است که با نتایج مدل توسعه‌یافته و نقش معنادار پارامتر موقعیت شعاعی در افزایش شدت سایش تطابق دارد.



شکل ۴. نمونه‌هایی از انواع سایش برش‌دهنده دیسک مشاهده شده در پروژه تونل قمرود: (الف) شکستگی حلقه دیسک، (ب) سایش نامتقارن، و (ج) سایش معمولی.

۴- جمع‌آوری داده‌ها و سازماندهی

جمع‌آوری و سازماندهی داده‌های جامع زمین‌شناسی و عملکرد TBM یکی از ارکان اصلی این پژوهش بود. اطلاعات ژئومکانیکی مسیر تونل، پارامترهای عملیاتی ماشین و ثبت دقیق عملکرد TBM از مراحل قبل از ساخت تا حفاری، در یک پایگاه‌داده اختصاصی ذخیره شد. این پایگاه شامل دو بخش اصلی است: داده‌های مربوط به دیسک‌های محیطی و داده‌های دیسک‌های مرکزی و میانی. هدف از ایجاد این بانک اطلاعاتی، تحلیل روابط بین ویژگی‌های زمین‌شناسی و مصرف دیسک‌ها و همچنین فراهم‌کردن مبنایی برای توسعه مدل‌های تجربی پیش‌بینی سایش بود. داده‌های جمع‌آوری‌شده شامل مقاومت فشاری تک‌محوره، شاخص ساینده‌گی (CAI)، درصد کوارتز، پارامترهای عملیاتی TBM و مشخصات طراحی دیسک‌ها بود.

پارامتر W شاخص اصلی سایش دیسک است که کاهش قطر یا عمق برش مؤثر دیسک را بر حسب میلی‌متر بر کیلومتر پیشروی تونل نشان می‌دهد و مستقیماً بیانگر عمر ابزار و بهره‌وری حفاری است. W تحت تأثیر سه گروه عامل قرار دارد: **ویژگی‌های سنگ:** مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، شاخص ساینده‌گی (CAI) و درصد کوارتز؛

پارامترهای عملیاتی TBM: نیروی عمودی، نرخ نفوذ و پیشروی ماشین؛

مشخصات طراحی دیسک: قطر، جنس فولاد و هندسه لبه برش.

با تحلیل دقیق W و ارتباط آن با این پارامترها، امکان

محوری و مقاومت لحظه‌ای سنگ باشد. این رویکرد امکان پیشروی حداکثری با حداقل سایش ابزار را فراهم کرده و کارایی حفاری و کاهش هزینه‌های عملیاتی را تضمین می‌کند. تحلیل رگرسیونی سایش دیسک‌های محیطی شکل ۷ نشان می‌دهد که الگوی مصرف آن‌ها با دیسک‌های مرکزی و سطحی متفاوت است. این تفاوت عمدتاً به موقعیت حاشیه‌ای دیسک‌ها و اعمال نیروهای جانبی (FS) مربوط می‌شود. ضریب تعیین (R^2) نشان می‌دهد که مقاومت فشاری تک‌محوره UCS ($R^2 \approx 0.74$) و نیروی محوری Fn ($R^2 \approx 0.65$)، همچنان عوامل اصلی تعیین‌کننده سایش هستند، در حالی که نیروی جانبی FS ($R^2 \approx 0.61$)، نقش مهمی در افزایش سایش محیطی ایفا می‌کند. نیروهای مماسی یا برشی (Fr) با $R^2 \approx 0.65$ و سرعت دوران کله‌حفار (RPM) با $R^2 \approx 0.57$ تأثیر متوسط دارند، در حالی که RMR با $R^2 \approx 0.57$ و پارامترهای نفوذ عمق نفوذ (p) و شاخص نفوذ شکستگی (FPI) با $R^2 = 0.40, 0.26$ تأثیر کمتری دارند.

نتایج نشان می‌دهد که در دیسک‌های محیطی، نیروهای ماکرو مکانیکی مانند Fn و FS نسبت به ویژگی‌های ریزساختاری سنگ اثرگذارتر هستند و بهینه‌سازی عملکرد این دیسک‌ها مستلزم مدیریت هم‌زمان دقیق نیروی محوری و نیروی جانبی برای کاهش سایش زود هنگام و افزایش عمر سرویس آن‌ها است.

تحلیل‌های جامع نشان می‌دهند که سایش دیسک‌ها نتیجه تعامل پیچیده بین شرایط عملیاتی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و مشخصات فنی TBM است. هر پارامتر به طور قابل توجهی شدت سایش را تحت تأثیر قرار می‌دهد و اهمیت نسبی آن‌ها در سناریوهای مختلف عملیاتی به طور سیستماتیک ارزیابی شده است. نتایج حاصل، چارچوبی دقیق برای درک مکانیزم‌های سایش دیسک و توسعه راهکارهای بهینه‌سازی عملکرد TBM فراهم می‌کند و اطلاعات عملی ارزشمندی برای طراحی برنامه‌های نگهداری پیشگیرانه و مدیریت کارآمد عملیات تونل‌سازی ارائه می‌دهد.

۵- تحلیل چندمتغیره برای دیسک‌های

مرکزی، میانی و محیطی

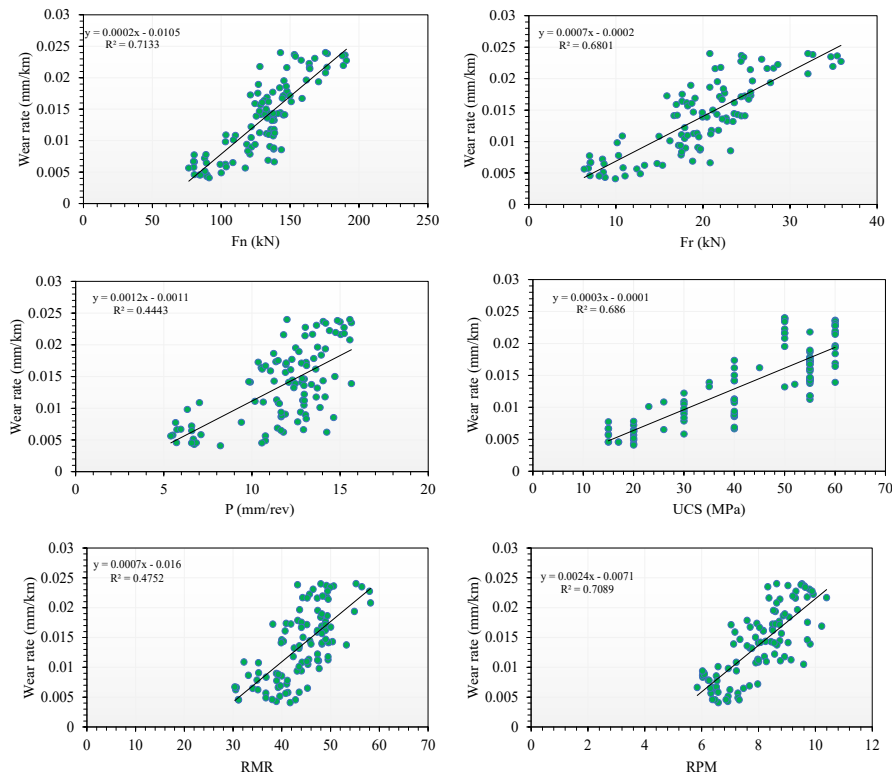
با استفاده از نرم‌افزار Minitab، مدل‌های رگرسیونی چندمتغیره برای پیش‌بینی سایش دیسک‌های TBM توسعه

ترتیب، مقدار سایش متناظر با هر رکورد حاصل تلفیق عملکرد واقعی دیسک در همان بازه حفاری با شرایط زمین‌شناسی و پارامترهای عملیاتی حاکم بر آن بخش از تونل بوده است. از آنجا که مسیر مورد مطالعه از واحدهای سنگی مختلف شامل آهک‌های دگرگون‌شده، ماسه‌سنگ‌ها، اسلیت‌ها، فیلیت‌ها و شیب‌های کوارتزیتی عبور می‌کند، ساختار پایگاه داده به‌گونه‌ای تدوین شد که تغییرات مکانی لیتولوژی، کیفیت توده‌سنگ و شرایط عملیاتی به‌صورت هم‌زمان در هر رکورد منعکس شود. این رویکرد امکان برقراری ارتباط مستقیم میان رفتار سایش دیسک و شرایط واقعی حاکم بر جبهه حفاری را فراهم ساخته و مبنای استخراج روابط تجربی ارائه‌شده در این پژوهش قرار گرفته است.

برای فرایند تحلیل‌های تک پارامتری، همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شده بود، ابتدا لازم است تمرکز بر دیسک‌های میانی و مرکزی قرار گیرد و سپس تحلیل‌ها به دیسک‌های محیطی گسترش یابد. دلیل ادغام دیسک‌های میانی و مرکزی در این بخش از تحلیل این است که حجم داده‌های به‌دست‌آمده از دیسک‌های مرکزی به‌طورکلی محدود بوده و ترکیب این دسته‌ها کمک می‌کند تا هم به نتایج دقیق‌تر دست‌یافت و هم از کمبود داده‌های موجود در دیسک‌های مرکزی تا حد امکان عبور کرد.

تحلیل داده‌ها شکل ۶ رابطه بین نرخ سایش دیسک و شش پارامتر عملیاتی کلیدی را برای دیسک‌های مرکزی و میانی نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که سایش عمدتاً تحت تأثیر مقاومت ذاتی سنگ و نیروی اعمالی توسط TBM است. بر اساس ضریب تعیین (R^2)، نیروی عمودی (Fn) و مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ (UCS) بیشترین نقش را در نرخ سایش دارند ($R^2 \approx 0.72$ و 0.68)، که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم بارهای محوری بالا بر سنگ‌های سخت و ساینده‌گی شدید دیسک‌ها است. نیروهای مماسی یا برشی (Fr) نیز با $R^2 \approx 0.68$ نقش مهمی در خردایش سنگ و کارایی دوران دیسک دارند. سرعت دوران (RPM) با $R^2 \approx 0.70$ و RMR با $R^2 \approx 0.47$ تأثیر متوسط دارند، در حالی که عمق نفوذ (p) با $R^2 \approx 0.44$ کمترین تأثیر را نشان می‌دهد.

این یافته‌ها نشان می‌دهند که برای مدل‌سازی دقیق سایش دیسک و بهینه‌سازی عملکرد TBM، تمرکز باید بر مدیریت متوازن نیروهای اعمالی و تعامل دینامیک بین بار



شکل ۶. تحلیل‌های دو متغیره برای ناحیه مرکز و میانی

$$W = -0.01387 + 0.0001049 F_n + 0.0001563 UCS + 0.0009758 RPM + 0.0000717 \alpha$$

در این مدل علاوه بر نیروی محوری، مقاومت سنگ و سرعت دوران، زاویه نصب دیسک (α) نیز لحاظ شده که افزایش آن منجر به کاهش نرخ سایش دیسک‌های محیطی می‌شود و اهمیت جهت‌گیری دیسک در کاهش سایش را نشان می‌دهد. این مدل‌ها با توجه به دقت بالای آماری و قابلیت تفسیر مهندسی، ابزار عملی و قابل‌اعتمادی برای پیش‌بینی، کنترل و بهینه‌سازی سایش دیسک‌ها تحت شرایط عملیاتی مختلف ارائه می‌کنند، اما استفاده آن‌ها محدود به شرایط مشابه داده‌های مورد مطالعه است.

۶- مقایسه با مدل‌های پیشین

مدل‌های ارائه‌شده در این پژوهش برای پیش‌بینی سایش دیسک در پروژه تونل انتقال آب قمرود، نسبت به مدل‌های پیشین، جامع‌تر و دقیق‌تر هستند. این مدل‌ها در نظر گرفتن هم‌زمان پارامترهای عملیاتی TBM و ویژگی‌های مهندسی

یافت. پس از به‌دست‌آوردن نتایج مطلوب از تحلیل تک پارامتری، مرحله بعدی شامل بررسی تأثیر هم‌زمان چندین پارامتر بر نرخ سایش بود تا روابط تجربی دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتر استخراج شود.

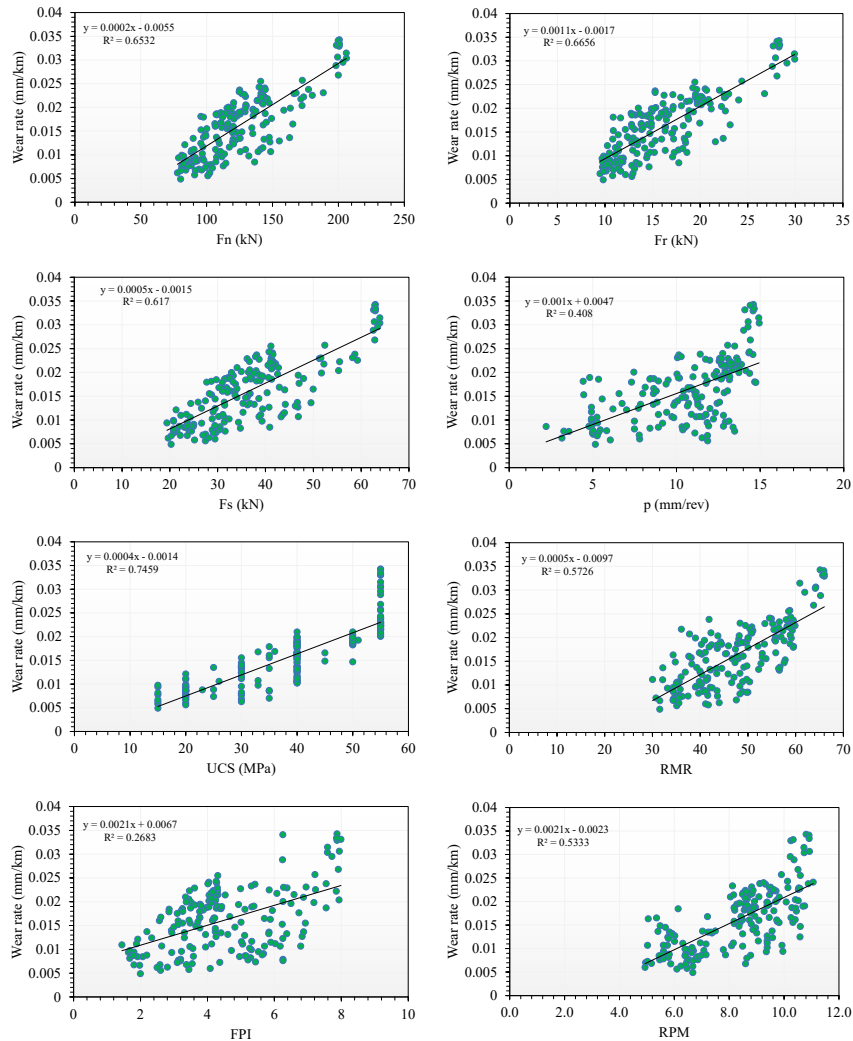
مدل‌های متنوعی برای هر ناحیه کله حفار طراحی شده است و از بین آنها بهترین مدل‌ها برای هر گروه انتخاب شدند. برای دیسک‌های مرکزی و میانی، مدل زیر بیشترین دقت را داشته و ضریب تعیین آن برابر $R^2 \approx 0.8843$:

$$W = -0.01163 + 0.0000478 F_n + 0.001332 RPM + 0.002445 R + 0.000123 UCS$$

در این مدل، نیروی محوری (F_n)، سرعت دوران کله حفار (RPM)، فاصله شعاعی دیسک (R) و مقاومت فشاری سنگ (UCS) بیشترین تأثیر را بر سایش نشان می‌دهند و افزایش آن‌ها موجب سایش بالاتر دیسک می‌شود. برای دیسک‌های محیطی، مدل زیر بهترین عملکرد پیش‌بینی را داشته و با ضریب تعیین $R^2 \approx 0.88$:

از دست دادن جرم دیسک (mg/m) و شاخص ساینده‌ی (CAI) توسعه‌یافته بود، عمدتاً به ویژگی‌های معدنی سنگ، به‌ویژه درصد کوارتز توجه دارد و تأثیر

سنگ، محدودیت‌های مدل‌های تجربی قدیمی را که معمولاً تنها به یک یا دو شاخص متکی بودند، برطرف می‌کنند. به‌عنوان مثال، مدل گهرینگ (۱۹۹۵) که بر اساس



شکل ۷. تحلیل‌های دو متغیره برای ناحیه محیطی

فراهم می‌کند و نمایی جامع‌تر نسبت به مدل گهرینگ ارائه می‌دهد.

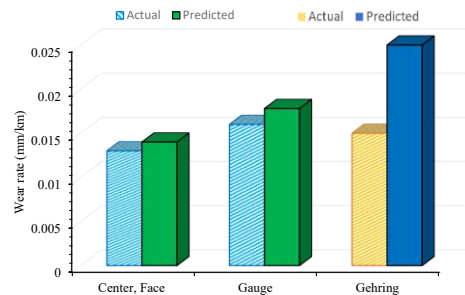
تحلیل کمی در شکل ۸ نشان می‌دهد که محدوده پیش‌بینی سایش مدل‌های قمرود حدود ۰ تا 0.17 mm/km است، در حالی که پس از تبدیل واحدهای مدل گهرینگ به mm/km مقدار پیش‌بینی آن حدود 0.25 mm/km می‌باشد. به‌طور میانگین، مدل‌های جدید نرخ سایش حدود $10\% - 30\%$

تنش‌های درجا، بارهای عملیاتی و خواص مکانیکی سنگ را نادیده می‌گیرد.

در مقابل، مدل‌های جدید برای دیسک‌های مرکزی و میانی بر اساس F_n ، UCS، فاصله شعاعی (R) و RPM و برای دیسک‌های محیطی با مجموعه‌ای گسترده‌تر از پارامترهای مؤثر ساخته شده‌اند. این رویکرد چندبعدی امکان درک هم‌زمان تأثیر کیفیت سنگ، شرایط عملیاتی و ویژگی‌های ماشین را بر سایش

دیسک در مقیاس کامل مورد استفاده در این پژوهش توسط شرکت تونل‌ساز ماشین طراحی و ساخته شده است. این سامانه با هدف شبیه‌سازی شرایط حاکم بر سایش حلقه دیسک‌های برشی TBM در مقیاس واقعی توسعه یافته و امکان اعمال بارهای نرمال کنترل‌شده، تنظیم سرعت دوران و بازتولید شرایط تماس غلته‌شی دیسک با محیط ساینده را فراهم می‌کند. طراحی دستگاه بر مبنای بازنمایی مکانیزم‌های غالب سایش دیسک در شرایط عملیاتی TBM انجام شده و پیش‌تر نیز در مطالعات مرتبط با ارزیابی رفتار سایشی دیسک‌های برشی مورد استفاده قرار گرفته است. (شکل ۹) به‌منظور افزایش اعتبار آماری نتایج و کاهش عدم قطعیت، هشت آزمایش مستقل تحت شرایط عملیاتی یکسان و با استفاده از یک دیسک برشی مشخص اجرا شد. همچنین، ماده سنگی منتخب با دانه‌بندی یکنواخت (۳ تا ۶ میلی‌متر) و ویژگی‌های ساینده‌گری نزدیک به شرایط زمین‌شناسی پروژه هدف انتخاب گردید تا بیشترین همخوانی میان داده‌های آزمایشگاهی و شرایط واقعی حفاری برقرار شود. در این پژوهش، ارزیابی سایش بر مبنای تغییرات هندسی دیسک برشی انجام گرفت؛ به‌گونه‌ای که قطر دیسک پیش و پس از هر مرحله آزمایش در ده نقطه مجزا با دقت بالا اندازه‌گیری و میانگین‌گیری شد تا اثر ناهمگنی‌های موضعی کاهش یابد. با محاسبه کاهش شعاع مؤثر و در نظر گرفتن چگالی فولاد لبه دیسک، حجم و افت جرم ناشی از سایش برآورد شد و شاخص افت وزن ویژه دیسک برشی (SCWL) به‌عنوان معیار اصلی مقایسه به کار رفت. استفاده از این شاخص امکان مقایسه یکنواخت نتایج در شرایط مختلف عملیاتی و انطباق مستقیم آن‌ها با پیش‌بینی‌های مدل ارائه‌شده در این پژوهش را فراهم کرده است. انتخاب دیسک‌های با مشخصات هندسی و متالورژیکی یکسان (قطر ۳۰۵ میلی‌متر، عرض لبه ۱۶ میلی‌متر و ظرفیت باربری ۱۲۵ کیلو نیوتن) و کنترل دقیق بارگذاری، تضمین کرده است که اختلافات مشاهده‌شده در نرخ سایش صرفاً ناشی از پارامترهای عملیاتی باشد. بدین ترتیب، چارچوب آزمایشگاهی طراحی‌شده، مبنایی علمی و فنی برای اعتبارسنجی مدل‌های توسعه‌یافته و ارزیابی میزان انطباق آن‌ها با رفتار واقعی دیسک‌های برشی در شرایط بهره‌برداری فراهم آورده است [۳۰]. یکی از عوامل کلیدی در اعتبار نتایج آزمایش‌های FDAT، انتخاب ماده سنگی‌ای است که بتواند شرایط تریبولوژیکی و سایشی حاکم بر محیط واقعی حفاری را با دقت مناسبی

کمتراز گهرینگ پیش‌بینی می‌کنند. این رویکرد محافظه‌کارانه و منطقی است، زیرا پیش‌بینی بیش از حد سایش می‌تواند منجر به برنامه‌ریزی نگهداری نادرست و هزینه‌های غیرضروری شود، در حالی که پیش‌بینی کمتر و دقیق‌تر، امکان زمان‌بندی بهینه نگهداری، کاهش توقف‌های غیرضروری و مدیریت بهتر ریسک شکست ناگهانی دیسک‌ها را فراهم می‌کند.



شکل ۸. مقایسه بین نرخ سایش واقعی تیغه‌های برش دیسکی و پیش‌بینی‌های مربوطه به‌دست‌آمده از مدل‌های تازه توسعه‌یافته و مدل سایش کلاسیک گهرینگ

مقایسه نتایج حاصل با مدل‌های تجربی متداول نشان می‌دهد که افزایش دقت پیش‌بینی در پژوهش حاضر صرفاً ناشی از افزایش تعداد متغیرهای ورودی نیست، بلکه عمدتاً به دلیل لحاظ نمودن هم‌زمان اثر شرایط عملیاتی TBM و تفکیک نواحی مختلف کله‌حفار در ساختار مدل است. در حالی که اغلب مدل‌های کلاسیک نظیر NTNU، Maidl و CSM نرخ سایش را عمدتاً تابع ویژگی‌های ساینده‌گری و مقاومتی سنگ در نظر می‌گیرند، مدل توسعه‌یافته قادر است تغییرات ناشی از نیروهای اعمالی، سرعت دوران و موقعیت عملکرد دیسک را نیز بازتاب دهد. همچنین برخلاف بسیاری از مدل‌های داده‌محور مبتنی بر یادگیری ماشین که نیازمند حجم زیادی از داده و فاقد قابلیت تفسیر مستقیم مهندسی هستند، روابط ارائه‌شده در این پژوهش از ساختار فیزیکی قابل تفسیر برخوردار بوده و امکان استفاده مستقیم در برنامه‌ریزی عملیاتی و تصمیم‌گیری‌های نگهداری را فراهم می‌کنند.

۷- اعتبارسنجی مدل

در این بخش، به‌منظور ارزیابی دقت و قابلیت اتکای مدل‌های تجربی توسعه‌یافته برای پیش‌بینی نرخ سایش دیسک‌های برشی TBM، فرایند اعتبارسنجی بر پایه آزمایش سایش دیسک در مقیاس واقعی (FDAT) انجام شده است. سامانه آزمایش سایش

ارزیابی‌ها نشان داد که ماده انتخاب‌شده از نظر رفتار سایشی، مقاومت مکانیکی و پتانسیل ایجاد سایش بر روی حلقه دیسک، تطابق مناسبی با شرایط حاکم بر لیتولوژی‌های غالب مسیر پروژه دارد و قادر است محیطی محافظه‌کارانه و در عین حال واقع‌بینانه برای ارزیابی عملکرد سایشی دیسک‌های برشی فراهم نماید.

بر این اساس، ماده منتخب به عنوان ماده مرجع تمامی آزمایش‌های FDAT مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱۰ نمای کلی نمونه سنگی پس از خردایش و آماده‌سازی را نشان می‌دهد و نیز توزیع دانه‌بندی مصالح مورد استفاده در آزمایش‌ها را ارائه می‌کند.



بلطف معین سنگ آهن خفوق ده‌های سبب ساینده و آهن (کوارتز دیوریت)

شیل و رین شنی مورد استفاده در آزمایش‌های قبلی



شیل و ماسه دانه بندی شده از معدن شن و ماسه

شکل ۱۰. عکس‌هایی از مصالح سنگی کاندید که برای آزمایش‌های سایش در نظر گرفته شده‌اند [۳۰]

۷-۱- تحلیل نتایج آزمایش‌های FDAT و تطابق با مدل پیشنهادی

هدف از آزمایش‌های سایش دیسک در مقیاس واقعی (FDAT)، ارزیابی رفتار سایشی دیسک‌های برشی تحت تأثیر نیرو و سرعت دورانی و بررسی میزان انطباق داده‌های تجربی با مدل نرخ سایش ارائه‌شده بوده است. بدین منظور، هشت آزمایش مستقل بر روی یک دیسک و در سه سطح نیروی عمودی همراه با سه سرعت دورانی متفاوت انجام شد تا دامنه شرایط عملیاتی پروژه را پوشش بدهد. در هر آزمایش، کاهش قطر و جرم دیسک اندازه‌گیری و با محاسبه مسافت غلتش، نرخ سایش به صورت کاهش جرم بر واحد طول استخراج گردید. سپس مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل پس از تبدیل واحد از میلی‌متر بر کیلومتر به میلی‌گرم بر کیلومتر با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. جمع‌بندی نتایج مقایسه‌ای در جدول ۴ ارائه شده و روند تطابق داده‌های تجربی و مدل در قالب نمودار شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

بازنمایی کند. از آنجا که هدف اصلی این آزمایش‌ها ارزیابی رفتار سایش حلقه دیسک تحت شرایط کنترل‌شده و بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر نرخ فرسایش ابزار است، انتخاب ماده آزمایش صرفاً بر مبنای تطابق لیتولوژیکی انجام نمی‌شود، بلکه ویژگی‌های ساینده‌گی، مقاومت مکانیکی و رفتار فرسایشی آن نیز مدنظر قرار می‌گیرد [۳۰].



- 1- Driver and drive of electric motors
- 2- Power pack and hydraulic source
- 3- Control and data acquisition unit
- 4- Aggregate tank
- 5- Screw conveyor
- 6- Flywheel drive electric moto
- 7- Frame (installation of 2 hydraulic jacks)
- 8- Cutter disk location
- 9- Flywheel and gearbox

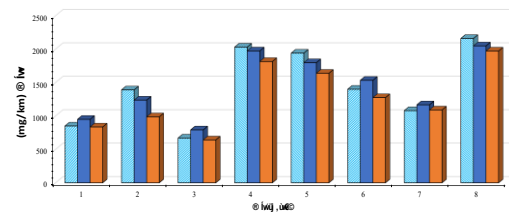
شکل ۹. سیستم تست سایش دیسک در مقیاس کامل و اجزای کلیدی آن [۳۱]

با توجه به خاتمه عملیات اجرایی پروژه و عدم امکان دسترسی مستقیم به مصالح حاصل از حفاری تونل، فرآیند انتخاب ماده آزمایش بر پایه مقایسه ویژگی‌های ژئومکانیکی و سایشی سنگ‌های مختلف با شرایط زمین‌شناسی حاکم بر مسیر پروژه انجام شد. بدین منظور، چندین نوع سنگ با ترکیبات کانی‌شناسی و پتانسیل ساینده‌گی متفاوت مورد ارزیابی اولیه قرار گرفتند تا ماده‌ای انتخاب شود که از نظر رفتار سایشی بیشترین انطباق را با محدوده سنگ‌های حفاری‌شده در پروژه قمرود داشته باشد.

به‌منظور کنترل شرایط آزمایش و حذف اثر تغییرات ناشی از ابعاد ذرات، تمامی نمونه‌ها پس از خردایش تحت فرآیند دانه‌بندی قرار گرفتند و تنها ذرات واقع در بازه ۳ تا ۶ میلی‌متر در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. انتخاب این محدوده دانه‌بندی با هدف ایجاد شرایط یکنواخت تماس، پایداری محیط ساینده و افزایش قابلیت مقایسه نتایج آزمایش‌ها انجام شد. در ادامه، به‌منظور ارزیابی کمی قابلیت استفاده از مواد منتخب، آزمون‌های تکمیلی تعیین ویژگی‌های مکانیکی و شاخص‌های ساینده‌گی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج این

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های FDAT و نتایج مدل پیشنهادی

سایش (بدست آمده) (از فاصله شعاعی ۰-۷۵ متر) mg/km	سایش (بدست آمده) (از فاصله شعاعی ۰-۵ متر) mg/km	سایش (واقعی) mg/km	RPM(TBM)		RPM (disk)	FN (dSN)	UCS (MPa)
			R2=0.75	R1=0.5			
۸۳۵	۹۸۵	۸۵۰	۷	۹	۳۱	۶۷	۳۱
۹۸۷	۱۲۳۸	۱۳۹۰	۷	۹	۳۱	۹۳	۳۱
۶۴۲	۷۹۲	۶۷۰	۷	۹	۳۱	۳۴	۳۱
۱۸۱۵	۱۹۷۳	۲۰۳۰	۸۵	۱۳	۴۰	۹۰	۳۱
۱۶۳۹	۱۷۹۸	۱۹۴۰	۸۵	۱۳	۴۰	۶۰	۳۱
۱۲۷۵	۱۵۳۳	۱۴۰۰	۸۵	۱۳	۴۰	۳۲	۳۱
۱۰۹۰	۱۱۶۷	۱۰۸۰	۱۰	۱۴	۵۲	۶۱	۳۱
۱۹۷۱	۲۰۴۸	۲۱۶۰	۱۰	۱۴	۵۲	۹۳	۳۱



شکل ۱۱. نمودار مقایسه بین مقادیر سایش واقعی و بدست آمده از مدل با فاصله شعاعی متفاوت دیسک

بلکه شبیه‌سازی مکانیزم غالب حاکم بر فرسایش حلقه دیسک در شرایط مقیاس واقعی است. در حفاری مکانیزه سنگ سخت، اگرچه شکست اولیه سنگ در اثر تمرکز تنش‌های تماسی و گسترش ترک‌های فشاری-برشی رخ می‌دهد، اما بخش عمده کاهش جرم و استهلاک تدریجی حلقه دیسک ناشی از اندرکنش مداوم سطح دیسک با ذرات سنگی خردشده، قطعات ساییده و محصولات حاصل از فرآیند خردایش در ناحیه تماس است. بنابراین، مکانیزم حاکم بر سایش دیسک عمدتاً یک فرآیند تریبولوژیکی وابسته به بار نرمال، سرعت غلتش، انرژی اصطکاکی و ویژگی‌های ساینده‌ی مواد درگیر در تماس محسوب می‌شود [۳۰].

بر همین مبنا، در سامانه FDAT تلاش شده است تا به جای بازسازی کامل فرآیند حفاری، متغیرهای کنترل‌کننده سایش شامل ابعاد واقعی دیسک، بارگذاری نرمال، شرایط تماس غلتشی، سرعت نسبی و محیط ساییده پیرامون حلقه دیسک در مقیاس واقعی بازتولید شوند. در نتیجه، اگرچه سازوکار ایجاد شکست اولیه سنگ در این سامانه مستقیماً شبیه‌سازی نمی‌شود، اما شرایط حاکم بر تکامل سایش حلقه دیسک که منبای کاهش قطر و افت جرم ابزار برشی است، با دقت مناسبی بازنمایی می‌گردد [۳۰].

این رویکرد با فلسفه توسعه آزمایش‌های Full-Scale Disc Abrasion Testing همسو بوده و مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تغییرات نرخ سایش اندازه‌گیری شده در این سامانه نسبت به تغییرات پارامترهای عملیاتی و ویژگی‌های سنگ، روندی سازگار با رفتار مشاهده شده در پروژه‌های واقعی TBM از خود نشان می‌دهد. از این رو، در پژوهش حاضر از نتایج FDAT به‌عنوان یک ابزار اعتبارسنجی مستقل برای ارزیابی قابلیت بازتولید رفتار سایش توسط مدل پیشنهادی استفاده شده است، نه به‌عنوان جایگزینی برای شبیه‌سازی کامل فرآیند حفاری مکانیزه.

۸- بحث نتایج

نتایج حاصل از مدل‌سازی، داده‌های میدانی پروژه و آزمون‌های سایش در مقیاس کامل، تصویری نسبتاً منسجم از سازوکارهای حاکم بر سایش دیسک‌های برشی در شرایط واقعی حفاری ارائه می‌دهد. تحلیل روابط توسعه‌یافته نشان داد که نرخ سایش دیسک‌ها تابعی از برهم‌کنش همزمان ویژگی‌های مقاومتی

تحلیل تطبیقی نتایج سایش واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده مدل در دو فاصله شعاعی متفاوت نشان‌دهنده انطباق کمی و کیفی قابل توجه مدل با داده‌های تجربی است؛ به‌گونه‌ای که در هر هشت آزمایش، روند تغییرات و بزرگی مقادیر سایش با دقت مناسبی بازسازی شده و میانگین اختلاف پیش‌بینی‌ها در حدود ۱۸ تا ۲۰ درصد نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده است که با توجه به ماهیت غیرخطی و پیچیده پدیده سایش، سطح خطای قابل قبول مهندسی محسوب می‌شود. نبود الگوی خطای سیستماتیک و عدم مشاهده واگرایی تجمعی، بیانگر پایداری عددی مدل در برابر تغییرات نیرو و سرعت دورانی است؛ ضمن آنکه تطابق بهتر نتایج در فاصله شعاعی ۵۰ سانتی‌متری نشان‌دهنده حساسیت مناسب مدل به تغییرات سرعت خطی مؤثر و موقعیت شعاعی دیسک است. با وجود تفاوت‌های اجتناب‌ناپذیر میان شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی و محیط واقعی حفاری از جمله فقدان تنش‌های درجا، اندرکنش چند دیسکی و سازوکارهای پیچیده توده سنگ مدل توسعه‌یافته با انحراف میانگین کمتر از ۲۰ درصد توانسته رفتار سایشی دیسک را به طور قابل‌اتکا بازتولید کند و اعتبار و قابلیت تعمیم آن برای شرایط مشابه این پژوهش را تأیید نماید.

لازم به تأکید است که هدف سامانه FDAT بازتولید کامل فرآیند برش و شکست سنگ در جبهه حفاری TBM نیست،

که نقش تعیین‌کننده مقاومت سنگ در کنترل نرخ سایش با یافته‌های Farrokh & Hassanpour, Maidl, Gehring و Kim همخوانی دارد. با این حال، تفاوت اساسی پژوهش حاضر با بسیاری از مدل‌های کلاسیک در آن است که روابط متداول عمدتاً بر شاخص‌های ساینده‌گی و مقاومتی سنگ نظیر CAI، UCS و CLI استوار بوده و اثر شرایط عملیاتی TBM را به صورت محدود یا غیرمستقیم لحاظ می‌کنند. در مقابل، نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات نیروی عمودی وارد بر دیسک، سرعت دوران کله‌حفار و موقعیت عملکرد دیسک بر روی کله‌حفار می‌تواند تغییرات قابل توجهی در شدت سایش ایجاد نماید. این یافته با مطالعات جدید مبتنی بر داده‌های میدانی و تحلیل عملکرد TBM همسو بوده و بر ضرورت لحاظ نمودن پارامترهای عملیاتی در مدل‌سازی رفتار سایش تأکید می‌کند. از سوی دیگر، هرچند مدل‌های نوین مبتنی بر یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در سال‌های اخیر توانایی مناسبی در پیش‌بینی رفتار ابزارهای برشی نشان داده‌اند، اما وابستگی شدید آن‌ها به حجم زیاد داده‌های آموزشی، دشواری تفسیر روابط درونی مدل و محدودیت در انتقال‌پذیری نتایج به پروژه‌های جدید از جمله چالش‌های اصلی این رویکردها محسوب می‌شود. در مقابل، مدل‌های ارائه‌شده در این پژوهش ضمن برخورداری از مبنای تجربی و تفسیرپذیری مهندسی، قادرند تأثیر هر یک از متغیرهای اصلی را به صورت مستقل منعکس نموده و در تصمیم‌گیری‌های عملیاتی مرتبط با انتخاب پارامترهای حفاری، برنامه‌ریزی تعمیرات و پیش‌بینی مصرف ابزار مورد استفاده قرار گیرند.

در مجموع، همگرایی نتایج حاصل از داده‌های میدانی پروژه، روابط توسعه‌یافته و آزمون‌های مستقل FDAT نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی نه تنها از اعتبار آماری مناسبی برخوردار است، بلکه از منظر فیزیکی نیز قادر به بازنمایی مکانیزم غالب سایش دیسک‌های برشی در شرایط واقعی حفاری بوده و می‌تواند به عنوان ابزاری کاربردی برای مدیریت عملکرد TBM و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری مورد استفاده قرار گیرد.

۹- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با اتکا به داده‌های میدانی تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۳ و ۴) و تحلیل هم‌زمان پارامترهای ژئومکانیکی، عملیاتی و هندسی، مدل‌های رگرسیون چندمتغیره‌ای برای

سنگ و شرایط بهره‌برداری TBM است و نمی‌توان آن را صرفاً به شاخص‌های ذاتی سنگ محدود نمود. معنی‌داری آماری پارامترهایی نظیر مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ (UCS)، نیروی عمودی وارد بر دیسک (Fn) و سرعت دوران کله‌حفار (RPM) بیانگر آن است که شدت سایش نه تنها تحت تأثیر ظرفیت ساینده‌گی محیط سنگی قرار دارد، بلکه به میزان انرژی منتقل‌شده به ناحیه تماس و شرایط واقعی عملکرد ابزار نیز وابسته است. این موضوع از دیدگاه مکانیک سایش قابل انتظار بوده و با افزایش تنش‌های تماسی، تشدید فرآیند ریزشکستگی در سطح حلقه دیسک و افزایش نرخ برداشت ماده از سطح ابزار قابل توجیه است.

بررسی آمار واقعی مصرف دیسک‌های برشی نیز مؤید همین موضوع است. در محدوده مورد مطالعه، از مجموع دیسک‌های تعویض‌شده، ۲۶۴ دیسک در اثر سایش تدریجی و طبیعی و تنها ۴۵ دیسک در اثر سایش‌های غیرعادی یا خرابی‌های موضعی از مدار بهره‌برداری خارج شده‌اند. سهم غالب سایش طبیعی در الگوی مصرف ابزار نشان می‌دهد که مکانیزم اصلی کنترل‌کننده عمر دیسک‌ها در پروژه مورد مطالعه، همان فرآیند فرسایش تدریجی ناشی از اندرکنش سنگ و ابزار بوده است؛ فرآیندی که مبنای توسعه مدل‌های ارائه‌شده در این پژوهش را تشکیل می‌دهد. از این رو، همخوانی میان رفتار واقعی دیسک‌های مصرف‌شده و روندهای پیش‌بینی‌شده توسط مدل را می‌توان به عنوان شاهدهی میدانی بر اعتبار فیزیکی روابط توسعه‌یافته تلقی نمود.

نتایج حاصل از آزمون‌های FDAT نیز این برداشت را تقویت می‌کند. توانایی مدل در بازتولید نرخ سایش تحت شرایط مختلف بارگذاری و سرعت دوران و دستیابی به اختلاف کمتر از ۲۰ درصد میان مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده بیانگر آن است که متغیرهای منتخب مدل قادر بوده‌اند مهم‌ترین عوامل مؤثر بر سایش را نمایندگی نمایند. اهمیت این موضوع زمانی آشکارتر می‌شود که توجه شود داده‌های مورد استفاده در توسعه مدل از محیط واقعی حفاری استخراج شده‌اند، در حالی که اعتبارسنجی در بستری مستقل و تحت شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی انجام گرفته است. انطباق مناسب میان این دو مجموعه داده مستقل، بیانگر قابلیت تعمیم‌پذیری قابل قبول مدل در بازنمایی رفتار سایش دیسک‌های برشی است. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می‌دهد

پیش‌بینی نرخ سایش دیسک‌های برشی TBM توسعه داده شد. نتایج تحلیل‌های تک‌متغیره نشان داد که مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ (UCS) و نیروی عمودی وارد بر دیسک (Fn) غالب‌ترین پارامترهای کنترل‌کننده سایش هستند (R^2 تا حدود ۰.۷۴)، در حالی که سرعت دوران کله حفار (RPM) نیز با ضرایب تعیین در بازه ۰.۵۷ تا ۰.۷۱ نقش معناداری در تشدید سایش ایفا می‌کند. در دیسک‌های محیطی، اثر نیروهای جانبی و موقعیت شعاعی به صورت بارزتری ظاهر شده که بیانگر حساسیت بالاتر این ناحیه به شرایط سینماتیکی و تمرکز تنش در محدوده کمتر از ۲۰ درصد نشان داد که بیانگر کفایت آماری و قابلیت تعمیم مدل در شرایط مشابه است. برآیند نتایج حاکی از آن است که مدیریت هم‌زمان RPM، Fn و موقعیت شعاعی دیسک‌ها می‌تواند به صورت مستقیم در کاهش نرخ سایش، افزایش عمر ابزار و بهینه‌سازی فواصل مداخله بر روی کله حفار مؤثر باشد. مدل پیشنهادی چارچوبی کمی و کاربردی برای برنامه‌ریزی نگهداری پیشگیرانه و کنترل هزینه‌های بهره‌برداری در پروژه‌های حفاری سنگ سخت را فراهم می‌کند. با وجود عملکرد مناسب مدل‌های توسعه‌یافته و انطباق قابل قبول نتایج پیش‌بینی با داده‌های میدانی و آزمون‌های

مدل‌های چند متغیره توسعه‌یافته برای دیسک‌های مرکزی-میانی و محیطی با ضرایب تعیین حدود ۰.۸۸ توانستند رفتار سایش را با دقت بالا بازتولید کنند و نسبت به مدل‌های کلاسیک مبتنی بر شاخص‌های ساینده‌گی سنگ، برآورد واقع‌بینانه‌تری ارائه دهند. اعتبارسنجی آزمایشگاهی (FDAT) و انجام هشت آزمون مستقل در سطوح مختلف نیرو و سرعت دوران، انحراف میان مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را

FDAT، باید توجه داشت که روابط ارائه‌شده بر پایه داده‌های حاصل از پروژه تونل انتقال آب قمرود توسعه یافته‌اند و دامنه کاربرد آن‌ها به محدوده شرایط زمین‌شناسی و عملیاتی مورد مطالعه وابسته است. همچنین برخی عوامل بالقوه مؤثر بر سایش دیسک‌های برشی، از جمله ویژگی‌های کانی‌شناسی و شاخص‌های مستقیم ساینده‌گی سنگ، در ساختار نهایی مدل لحاظ نشده‌اند. از این‌رو، استفاده از داده‌های پروژه‌های متنوع‌تر و بررسی اثر سایر پارامترهای مؤثر می‌تواند به توسعه مدل‌های جامع‌تر و افزایش قابلیت تعمیم نتایج در مطالعات آتی منجر شود.

پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی

- به‌کارگیری روش‌های یادگیری ماشین و مدل‌های هیبریدی داده‌محور-مکانیکی (نظیر XGBoost، Random Forest و شبکه‌های عصبی) جهت ارتقای دقت پیش‌بینی در شرایط زمین‌شناسی متنوع؛
- لحاظ نمودن ویژگی‌های متالورژیکی و ترکیب شیمیایی متریال دیسک، سختی و عملیات حرارتی در مدل‌سازی سایش؛
- بررسی اثر تنش‌های برجاء، شرایط هیدرولوژیکی و اندرکنش دینامیکی سنگ-دیسک در مقیاس واقعی؛
- توسعه مدل‌های تعمیم‌پذیر مبتنی بر پایگاه‌داده چند پروژه‌ای به‌منظور افزایش قابلیت کاربرد صنعتی.

۸- منابع‌ها

- [1] D. Apoji, B. Sheil, and K. Soga, "Shaping the future of tunneling with data and emerging technologies," Data-Centric Engineering, vol. 4, p. e29, 2023.
- [2] A. Yazitova, A. C. Adoko, J. Hassanpour, and S. Yagiz, "Empirical models for estimating penetration rate of tunnel boring machines in rock mass," Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 84, no. 1, p. 55, 2025.
- [3] W. Su, X. Li, D. Jin, Y. Yang, R. Qin, and X. Wang, "Analysis and prediction of TBM disc cutter wear when tunneling in hard rock strata: A case study of a metro tunnel excavation in Shenzhen, China," Wear, vol. 446, p. 203190, 2020.
- [4] D. Ewendt, "Erfassung der Gesteinsabrasivität und Prognose des Werkzeugverschleißes beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Diskenmeißeln," Kurzberichte aus der Bauforschung, vol. 33, no. 9, 1992.
- [5] K. Gehring, "Performance and wear prediction in mechanized tunneling," Rock engineering, vol. 13, no. 6, 1995.

- [6] A. Bruland, *Hard rock tunnel boring*. na, 1998.
- [7] R. Rauch, R. Goliash, H. Käsling, and K. Thuro, "Does the in-situ stress state have an effect on tool wear in deep TBM tunnelling? Haben Gebirgsspannungen Einfluss auf den Abrasivverschleiß im tiefliegenden TBM-Vortrieb?," *Geomechanics and Tunnelling*, vol. 11, no. 2, pp. 169–178, 2018.
- [8] X. Zhang, Y. Xia, Y. Zhang, Q. Tan, Z. Zhu, and L. Lin, "Experimental study on wear behaviors of TBM disc cutter ring under drying, water and seawater conditions," *Wear*, vol. 392, pp. 109–117, 2017.
- [9] G. Wijk, "A model of tunnel boring machine performance," *Geotechnical & Geological Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 19–40, 1992.
- [10] Q. Liu et al., "A wear rule and cutter life prediction model of a 20-in. TBM cutter for granite: a case study of a water conveyance tunnel in China," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 50, no. 5, pp. 1303–1320, 2017.
- [11] B. Maidl, L. Schmid, W. Ritz, and M. Herrenknecht, *Hardrock tunnel boring machines*. John Wiley & Sons, 2008.
- [12] B. Janc, G. Vižintin, and A. Pal, "Investigation of disc cutter wear in tunnel-boring machines (tbms): integration of photogrammetry, measurement with a caliper, weighing, and macroscopic visual inspection," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 6, p. 2443, 2024.
- [13] N. Zhang, S.-L. Shen, and A. Zhou, "A new index for cutter life evaluation and ensemble model for prediction of cutter wear," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 131, p. 104830, 2023.
- [14] J. Rostami, *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.
- [15] L. Wang et al., "The energy method to predict disc cutter wear extent for hard rock TBMs," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 28, pp. 183–191, 2012.
- [16] J. Hassanpour, S. T. Azali, and J. Rostami, "TBM performance and tool wear prediction along two lots of Dyaaba Headrace Tunnel (Uma-Oya Project, Sri Lanka)," *North American tunneling: 2014 proceedings*, 2014.
- [17] E. Farrokh, J. Rostami, and O. Askilrud, "A discussion on TBM cutter change time and cutter life," in *SME Annual Meeting*, Denver, 2013, pp. 13–105.
- [18] E. Farrokh and D. Y. Kim, "A discussion on hard rock TBM cutter wear and cutterhead intervention interval length evaluation," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 81, pp. 336–357, 2018.
- [19] M. Karami, S. Zare, and J. Rostami, "Real-scale numerical analyzing dynamic process of TBM boring in jointed Rock; a case study: Kerman Water Conveyance Tunnel in Iran," *Journal of Mining and Environment*, vol. 13, no. 3, pp. 643–666, 2022.
- [20] E. Farrokh, "Primary and secondary tools' life evaluation for soft ground TBMs," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 80, no. 6, pp. 4909–4927, 2021.
- [21] X. Zhou et al., "Enhanced wear prediction of tunnel boring machine disc cutters for accurate remaining useful life estimation using a hybrid model," *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 642–662, 2024.
- [22] L. Bai, D. Mo, H. Li, W. Huang, and Z. Cai, "Optimized Data Preprocessing and Model Selection for TBM Cutter Wear Prediction," *Coatings*, vol. 15, no. 5, p. 564, 2025.
- [23] M. M. Rouhani and E. Farrokh, "TBM performance prediction based on XGBoost models: a case study of the Ghomrud water conveyance tunnel (Lots 3 and 4)," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 84, no. 6, p. 304, 2025.
- [24] J. Hassanpour, Y. Firouzei, and G. Hajipour, "Actual performance analysis of a double shield TBM through sedimentary and low to medium grade metamorphic rocks of Ghomrood water conveyance tunnel project (lots 3 and 4)," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 80, no. 2, pp. 1419–1432, 2021.
- [25] J. Hassanpour, "Development of an empirical model to estimate disc cutter wear for sedimentary and low to medium grade metamorphic rocks," *Tunnelling and Underground Space Technology*,

- vol. 75, pp. 90–99, 2018.
- [26] S. S. Haghshenas, S. S. Haghshenas, M. Barmal, and N. Farzan, "Utilization of soft computing for risk assessment of a tunneling project using geological units," *Civil Engineering Journal*, vol. 2, no. 7, pp. 358–364, 2016.
- [27] M. H. Ahmadi, A. Mortazavi, S. M. Davarpanah, and H. Zarei, "A numerical investigation of segmental lining joints interactions in tunnels-qomrud water conveyance tunnel," *Civil Engineering Journal*, vol. 2, no. 7, pp. 334–347, 2016.
- [28] E. Farrokh, "Optimum design of the peripheral cutters' specification on the head profile for hard-rock TBMs," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 107, p. 103668, 2021.
- [29] J. Liu, T. He, X. Peng, and Y. Pan, "Evaluation of TBM cutter wear in granite and developing a cutter life prediction model for face cutters based on field data: a case study," *Buildings*, vol. 14, no. 8, p. 2453, 2024.
- [30] R. N. Nasrabadi, E. Farrokh, and P. Maarefvand, "Effects of operational parameters on TBM disc cutter wear: insights from full-scale disc abrasion testing (FDAT)," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 174, p. 107672, 2026.
- [31] Nikbakht Nasrabadi, R., Farrokh, E. and Maarefvand, P. (2023). Effect of Operating Parameters on TBM Disc Cutter Wear. *JOURNAL OF ROCK MECHANICS*, 7(3), 31-39.



Development of an Empirical Model for TBM Disc Cutter Wear Prediction Based on Operational and Geomechanical Parameters: A Case Study of the Qomroud Water Conveyance Tunnel

Milad Sabbaghi¹, Ebrahim Farrokh^{1*}

1- Dept. of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Received: 05 May 2026 Accepted: 18 June 2026

(*Corresponding author: e.farrokh@aut.ac.ir)

Keywords

**Abrasivity
Disc cutter
Operating parameters
Tunnel boring machine (TBM)**

Final English Extended Abstract

Disc cutter wear is a major factor affecting the efficiency and operational costs of hard rock tunnel boring machines (TBMs). This study presents empirical models for predicting cutter wear rate using field data obtained from approximately 18 km of excavation in the Qomroud Water Conveyance Tunnel. Geomechanical and operational parameters, including uniaxial compressive strength (UCS), normal cutter force (Fn), cutterhead rotational speed (RPM), and cutter position, were analyzed. Separate models were developed for central–intermediate and peripheral cutters to account for differences in loading conditions across the cutterhead. The proposed models achieved coefficients of determination of approximately 0.88, indicating good predictive capability. Independent validation using Full-Scale Disc Abrasion Tests (FDAT) showed

prediction errors of less than 20%. Comparison with the classical Gehring model demonstrated better agreement of the developed models with field observations. The proposed approach provides a practical tool for optimizing TBM operation, predicting cutter consumption, and supporting maintenance planning in hard rock tunneling projects.

Summary

This study develops a zone-based multivariate empirical model for predicting TBM disc cutter wear using 18 km of field data, integrating operational parameters with rock mass properties. The proposed framework achieved $R^2 \approx 0.88$ and demonstrated less than 20% deviation in large-scale validation tests, outperforming conventional rock-index-based models.

Introduction

Disc cutter wear significantly influences TBM performance, operational efficiency, and maintenance planning in hard rock tunneling. Conventional prediction models are largely based on rock abrasivity indices and often overlook the direct contribution of operational parameters and cutterhead loading conditions, resulting in limited predictive capability under variable field environments. Given the complex interaction between rock mass properties, machine-induced forces, and cutterhead geometry, this study aims to develop an integrated empirical framework that incorporates both geomechanical and operational parameters while distinguishing between different cutterhead zones. The objective is to improve prediction reliability and provide a practical foundation for operational optimization and predictive maintenance in hard rock TBM projects.

Methodology and Approaches

Field data from 18 km of TBM excavation, including operational parameters and geomechanical properties, were compiled and categorized based on cutterhead zones (center–face and gauge). Multivariate regression analysis was applied using Minitab to develop wear prediction models and evaluate their statistical performance (R^2). Independent large-scale FDAT experiments under controlled loading and rotational conditions were conducted to validate the predictive capability and robustness of the proposed models.

Results and Conclusions

The developed multivariate models demonstrated strong predictive capability, achieving coefficients of determination of approximately 0.88 for both center–face and gauge cutter zones. Results indicate that normal force and UCS are the dominant parameters controlling wear rate, while cutterhead rotation speed and radial position significantly influence



Journal of Rock Mechanics

Vol. 10, No. 1, PP. 23-40, (2026)

<https://doi.org/10.22034/IRSRM.2026.580580.1079>



wear intensity, particularly in the gauge zone. Large-scale FDAT validation tests showed less than 20% deviation between predicted and measured values, confirming the robustness of the proposed framework. Comparative analysis revealed a clear improvement over conventional rock-index-based models in terms of predictive accuracy and realistic wear estimation. The study concludes that integrating operational parameters with zone-based modeling substantially enhances wear prediction reliability and provides a practical basis for operational optimization and predictive maintenance in hard rock TBM projects.