

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری

ارائه مدل تجربی جدید برای پیش بینی سایش سرمه های سه مخروطی معادن روباز

تهیه کننده:

سید رسول رمضان نیا

استاد راهنما:

دکتر محمد عطایی

دکتر رضا کاکایی

استاد مشاور:

دکتر سید مهدی حسینی

مشاور صنعتی:

عبدالمجید صامحی نسب

شهریور ۱۴۰۰

ज

تقدیم به

به استوارترین تکیه گاهم، دستان حمایت گر پدرم و به سبزترین نگاه زندگی ام، چشمان پر مهر مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بلو شتم قطره ای از دریای بی کران مهربانی تان را سپاس توانم گفت.

هستی امروزم به امید شماست و آرامش فردایم در رضای شما

ره دوری ارزشمندتر از این ارزان نداشتم تا به خاک میاتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم کوزه، کمی غبار محنتی را از چهره تان بزداید.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله لازم می‌دانیم از راهنمائی‌ها و الطاف اساتید ارجمندمان، جناب آقایان دکتر عطایی و دکتر کاکائی و از یاری و مشاوره جناب آقای دکتر سید هادی حسینی که مساعدت همه جانبه‌ی آنها موجب تقویت انگیزه و ثمربخشی کوششمان گردید صمیمانه سپاسگزاری نماییم.

همچنین لازم است از سایر همکاران و دوستانی که هر کدام به نحوی در تهیه‌ی این مجموعه همکاری داشته‌اند اعم از:

- شرکت ملی صنایع مس ایران به عنوان حامی مالی پروژه
- مدیران، کارشناسان و سایر کارکنان امور تحقیق و توسعه‌ی مجتمع مس سرچشمه
- آقای دکتر حسن صحرایی مدیر امور تحقیق و توسعه
- آقای مهندس اسلامی رئیس بخش تحقیقات معدنی
- آقای مهندس خسرو جردی کارشناس ارشد تحقیقات معدنی
- آقای مهندس محمدرضایی کارشناس ارشد تحقیقات معدنی
- مدیران، کارشناسان و سایر کارکنان بخش امور معدن مس سرچشمه
- آقای مهندس صالحی‌نسب رئیس واحد حفاری و انفجار امور معدن به عنوان مشاور صنعتی
- آقای مهندس جعفری کارشناس ارشد واحد حفاری امور معدن
- آقای مهندس انصاری رئیس عملیات امور معدن
- آقای مهندس اسفندیارپور کارشناس ارشد زمین‌شناسی
- آقای مهندس کرم زاده کارشناس ارشد نقشه‌برداری
- اساتید هیئت علمی گروه زمین‌شناسی دانشگاه صنعتی شاهرود

خانم دکتر آرزو عابدی

آقای دکتر مهدی رضایی

کمال تشکر و قدردانی را داشته باشیم. در انتها سپاسی بی کران را تقدیم به همه‌ی دوستان و بزرگوارانی خواهیم کرد که پژوهش حاضر را با مساعدت و یاری آنان به انجام رسانیدیم ولی نامشان از خاطرمان دور مانده است.

تعهد نامه

اینجانب سیدرسول رمضان‌نیا دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله ارائه‌ی مدل تجربی جدید برای پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی معادن روباز تحت راهنمایی پروفسور محمد عطایی و پروفسور رضا خالوکاکائی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

سرمتها به عنوان یکی از مهم‌ترین قسمت‌های حفاری در فرآیندهای عملیاتی، با توجه به نوع کاربرد و هزینه‌های بالای تمام شده از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. سایش و فرسودگی این ابزار، پارامتر مهمی برای برآورد کارایی تجهیزات حفاری در پروژه‌های معدنی است. بررسی پارامترهای مؤثر بر سایش سرمتها می‌تواند با کاهش اثرات سایش، از هدر رفتن زمان و هزینه‌های اضافی وارد بر فرآیند حفاری جلوگیری نماید. لذا در این تحقیق به منظور پیش‌بینی سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی از روش‌های آماری و یادگیری عمیق استفاده شده است. در بخش اول ابتدا سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی از طریق افت وزنی، افت ابعادی و افت حجمی محاسبه شده است و با تعیین پارامترهای مؤثر بر اساس نتایج برازش تک متغیره و تحلیل مؤلفه‌ای اصلی (PCA)، ارتباط بین این عوامل و سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی از طریق روش آماری تعیین شده است. در این تحقیق، برای پیش‌بینی مقدار سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی ۲۱ مدل که شامل ۶ مدل خطی و ۱۵ مدل غیرخطی است مورد تایید واقع شده است. همچنین به علت پیشرفت‌های اخیر استفاده از یادگیری عمیق در زمینه بینایی رایانه و عملکرد مناسب این روش‌ها، در بخش دوم تحقیق از یادگیری عمیق برای پیش‌بینی سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی استفاده شده است. با توجه به تعداد پایین تصاویر عکس‌برداری شده از سرمت‌های حفاری و عدم وجود تعادل در توزیع تصاویر از یادگیری انتقالی بر اساس ویژگی‌های استخراج شده از آموزش بر روی مجموعه داده بزرگ ImageNet استفاده شده است. سپس معماری VGG با ۱۶ لایه با توجه به عملکرد مناسب در مجموعه اعتبارسنجی و آزمون به عنوان معماری مناسب انتخاب شده است. در ادامه به علت ابعاد و تعداد نگاشت‌های بالای ویژگی‌های استخراج شده بر اساس PCA تعداد ۳۵ ویژگی برای پیش‌بینی مجموعه آزمون مورد استفاده قرار گرفته است. در انتها برای پیش‌بینی میزان سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی از مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین بر پایه رگرسیون استفاده شده است. لازم به ذکر است که عملکرد

مدل‌های آماری و یادگیری عمیق بر اساس معیارهای ارزیابی چهارگانه، مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از سه استراتژی اولویت‌بندی میانگین رتبه‌ها، روش بردا و روش کپلند و در نهایت ادغام این روش‌ها، اولویت‌بندی مدل‌ها انجام شده است. ادغام رتبه‌بندی‌ها در مدل‌های آماری نشان می‌دهد که بهترین مدل پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی مدل رگرسیون غیرخطی است که در آن متغیرهای مستقل شامل بار روی سرمته (WOB)، مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) است. همچنین بر اساس نتایج عملکرد بدست آمده از رتبه‌بندی مدل‌های پیش‌بینی یادگیری ماشین، رگرسیون فرایند گوسی (GPR) به عنوان بهترین مدل پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی انتخاب شده است.

کلمات کلیدی: حفاری، سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی، سایش، روش‌های آماری، یادگیری عمیق

لیست مقالات مستخرج از رساله

مجلات

"A new architecture to predict the tricone rotary bits wear based on deep convolutional neural networks", Acta Montanistica Slovaca, Seyed Rasol Ramezannia [Corresponding Author], Mohammad Ataei, Reza Kakaei, Seyed Hadi Hoseinie. (Under Review)

"Quantitative evaluation of the rock texture coefficient and the grain size and their effect on drilling bits wear in open-pit mines", Journal of Mining Institute, Seyed Rasol Ramezannia [Corresponding Author], Mohammad Ataei, Reza Kakaei, Seyed Hadi Hoseinie. (Under Review)

"ارزیابی عوامل موثر بر سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی دستگاه‌های حفاری در معادن روباز- مطالعه موردی"، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، اردیبهشت ۱۴۰۰. (پذیرش)

"پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی با ترکیب روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی و رگرسیون در چال‌های انفجاری معدن مس سرچشمه"، نشریه مهندسی منابع معدنی، خرداد ۱۴۰۰. (پذیرش)

"پیش‌بینی سایش سرمته‌های حفاری با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق و رگرسیون خطی"، مجله مدل‌سازی در مهندسی. (تحت داوری)

کنفرانس

"پایش وضعیت سایش و خرابی سرمته‌های حفاری کاربرد تنگستن در مهندسی سطح"، دومین کنفرانس ملی مهندسی مواد، متالورژی و معدن ایران، دی ۱۳۹۷. (پذیرش و چاپ)

"تعیین تاثیر شاخص‌های شدت هوازدگی بر پهنه‌های دگرسان‌یافته‌ی کانسار مس پورفیری سرچشمه"، بیست و ششمین همایش بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، بهمن ۱۳۹۷. (پذیرش و چاپ)

فصل اول: مقدمه و کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- ضرورت انجام تحقیق	۳
۳-۱- اهداف تحقیق	۴
۴-۱- نوآوری تحقیق	۵
۵-۱- مراحل انجام تحقیق	۵
۶-۱- ساختار کلی تحقیق	۹
فصل دوم: سایش سرمته‌های حفاری و پارامترهای موثر بر آن	۱۱
۱-۲- مقدمه	۱۲
۲-۲- حفاری	۱۲
۱-۲-۲- روش‌های حفاری دورانی	۱۳
۳-۲- تریبولوژی (سوده شناسی)	۱۹
۱-۳-۲- سایش (فرسودگی)	۱۹
۱-۳-۲-۱- سایش ساینده (خراشان)	۲۱
۲-۳-۲- سایش فرساینده	۲۲
۳-۳-۲- سایش چسبنده (چسبان)	۲۳
۲-۳-۲- حالت‌های سایش و خرابی سرمته‌های کاربرد تنگستن	۲۵
۱-۲-۳-۲- سایش ساینده و خرابی در اثر فرسایش سرمته‌های کاربرد تنگستن	۲۶
۲-۲-۳-۲- خوردگی یا حل شدن سرمته‌های کاربرد تنگستن	۲۷
۳-۲-۳-۲- لب‌پاشی / شکستن اجزای سرمته‌های کاربرد تنگستن سیمانی شده (WC/Co)	۲۷
۴-۲-۳-۲- ترک خوردگی حرارتی سرمته‌های کاربرد تنگستن سیمانی شده (WC/Co)	۲۹
۵-۲-۳-۲- تغییر شکل حرارتی سرمته‌های کاربرد تنگستن	۲۹
۳-۳-۲- پایش وضعیت سایش ابزار	۳۰
۴-۲- پارامترهای موثر در سایش سرمته‌های حفاری	۳۱
۱-۴-۲- مشخصات سنگ	۳۱
۱-۴-۲-۱- مشخصات فیزیکی سنگ	۳۲
۲-۴-۲-۱- مشخصات مکانیکی سنگ‌ها	۳۸
۳-۴-۲-۱- مشخصات ساختاری و محیطی سنگ	۴۵
۲-۴-۲- پارامترهای اجرایی	۴۷
۵-۲- جمع‌بندی	۵۱

فهرست مطالب

صفحه

فصل سوم: بررسی سابقه‌ی علمی موضوع	۵۳
۱-۳- مقدمه	۵۴
۲-۳- روش‌های پایش مستقیم	۵۶
۳-۳- روش‌های پایش غیرمستقیم	۷۳
۴-۳- روابط تجربی ارائه شده در زمینه‌ی سایش سرمته‌های حفاری	۹۰
۱-۴-۳- روابط آدبایو و همکاران	۹۱
۲-۴-۳- روابط آدبایو	۹۱
۳-۴-۳- روابط آدبایو و آکجو	۹۲
۴-۴-۳- رابطه آدبایو و بلوو	۹۳
۵-۴-۳- روابط آدبایو و آکنده	۹۳
۶-۴-۳- روابط باباتونده	۹۴
۷-۴-۳- روابط ماجد و همکاران	۹۴
۸-۴-۳- روابط پیری و همکاران	۹۵
۹-۴-۳- روابط جاپیک و باتمانخ	۹۶
۵-۳- نقد و بررسی مطالعات گذشته	۹۷
۶-۳- جمع‌بندی	۱۰۰
فصل چهارم: جمع‌آوری اطلاعات و ایجاد پایگاه داده	۱۰۱
۱-۴- مقدمه	۱۰۲
۲-۴- زمین‌شناسی عمومی منطقه‌ی مورد مطالعه (معدن مس سرچشمه)	۱۰۲
۳-۴- مشخصات دستگاه‌های حفاری	۱۰۴
۴-۴- مطالعات میدانی و آزمایشگاهی	۱۰۶
۱-۴-۴- اندازه‌گیری سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی	۱۰۶
۲-۴-۴- تعیین خواص فیزیکی سنگ‌های مورد مطالعه	۱۱۱
۳-۴-۴- تعیین خواص مکانیکی سنگ‌های مورد مطالعه	۱۱۸
۴-۴-۴- تعیین خواص ساختاری و محیطی (توده سنگ) سنگ‌های مورد مطالعه	۱۲۲
۵-۴-۴- تعیین پارامترهای عملیاتی	۱۲۲
۵-۴- جمع‌بندی	۱۲۴
فصل پنجم: روش‌های آماری و تحلیل مؤلفه‌های اصلی	۱۲۵
۱-۵- مقدمه	۱۲۶
۲-۵- روش‌های آماری	۱۲۶
۱-۲-۵- رگرسیون چند متغیره‌ی خطی	۱۲۷

۱۲۸	۲-۲-۵- رگرسیون چند متغیره‌ی غیرخطی
۱۲۹	۳-۲-۵- معیارهای ارزیابی یک رابطه‌ی رگرسیونی
۱۳۰	۳-۵- تحلیل مؤلفه‌های اصلی
۱۳۳	۴-۵- جمع‌بندی
۱۳۵	فصل ششم: ارائه‌ی مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی
۱۳۶	۱-۶- مقدمه
۱۳۶	۲-۶- مدل‌های آماری
۱۳۷	۱-۲-۶- رگرسیون تک متغیره
۱۴۲	۳-۶- تحلیل مؤلفه‌های اصلی
۱۴۵	۴-۶- تفکیک پایگاه داده به داده‌های آموزش و آزمون
۱۴۷	۱-۴-۶- تعیین متغیرهای ورودی
۱۴۹	۵-۶- رگرسیون چند متغیره‌ی خطی
۱۵۰	۶-۶- رگرسیون چند متغیره‌ی غیرخطی
۱۵۱	۷-۶- ارزیابی عملکرد مدل‌ها
۱۵۲	۸-۶- تعیین بهترین مدل‌ها
۱۵۴	۱-۸-۶- استراتژی‌های اولویت‌بندی
۱۵۵	۲-۸-۶- اولویت‌بندی مدل‌ها
۱۵۷	۹-۶- تحلیل حساسیت
۱۵۹	۱۰-۶- جمع‌بندی
۱۶۱	فصل هفتم: پیش‌بینی سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی با استفاده از یادگیری عمیق
۱۶۲	۱-۷- مقدمه
۱۶۲	۲-۷- یادگیری عمیق
۱۶۴	۱-۲-۷- شبکه‌های عصبی کانولوشن (پیچشی)
۱۶۷	۱-۱-۲-۷- رویکردهای به کارگیری شبکه‌های عصبی کانولوشن
۱۶۹	۲-۱-۲-۷- معماری‌های شبکه‌های عصبی کانولوشن
۱۷۰	۳-۷- روش پیشنهادی برای پیش‌بینی میزان سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی
۱۷۲	۱-۳-۷- مطالعات میدانی و مجموعه داده‌ها
۱۷۳	۲-۳-۷- یادگیری انتقالی
۱۷۵	۱-۲-۳-۷- معماری شبکه عصبی عمیق AlexNet
۱۷۵	۲-۲-۳-۷- معماری شبکه عصبی عمیق VGGNet
۱۷۷	۳-۲-۳-۷- معماری شبکه عصبی عمیق ResNet

فهرست مطالب

صفحه

۱۷۷	 انتخاب معماری مناسب شبکه عصبی عمیق
۱۷۸	 نمایش ویژگی‌های استخراجی
۱۷۸	 کاهش ابعاد ویژگی‌های استخراج شده
۱۸۰	 پیش‌بینی میزان سایش سرمته‌های سهمخروطی دورانی
۱۸۱	 رگرسیون خطی
۱۸۲	 رگرسیون درختی (رگرسیون درخت تصمیم دودویی)
۱۸۲	 رگرسیون بردار پشتیبان
۱۸۴	 رگرسیون فرایند گاوسی
۱۸۵	 رگرسیون جمعی (ترکیبی)
۱۸۷	 تحلیل نتایج بر اساس روش پیشنهادی
۱۹۰	 ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمته‌های سهمخروطی دورانی
۱۹۱	 اولویت‌بندی مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمته‌های سهمخروطی دورانی
۱۹۱	 جمع‌بندی
۱۹۳	 فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۹۴	 ۱-۷ نتیجه‌گیری
۲۰۰	 ۲-۷ پیشنهادها
۲۰۳	 منابع و مراجع

فهرست شکل‌ها

صفحه

- شکل ۱-۱- روندنمای مراحل اجرای تحقیق بر اساس فازهای مشخص شده ۵
- شکل ۲-۱- ایجاد پایگاه داده از مطالعات آزمایشگاهی و میدانی ۷
- شکل ۳-۱- روندنمای مراحل انجام تحقیق ۹
- شکل ۱-۲- سرمته‌ی دندان‌ه فولادی ۱۵
- شکل ۲-۲- سرمته‌ی کاربید تنگستن برای سازند نرم ۱۵
- شکل ۳-۲- سرمته‌ی کاربید تنگستن برای سازند متوسط- سخت ۱۶
- شکل ۴-۲- سرمته‌ی کاربید تنگستن برای سازند سخت ۱۶
- شکل ۵-۲- اجزای سرمته‌ی سه مخروطی دورانی با دندان‌های کاربید تنگستن ۱۷
- شکل ۶-۲- زاویه محوری پایین ۱۸
- شکل ۷-۲- منحرف‌شدگی مخروط ۱۸
- شکل ۸-۲- طبقه‌بندی سایش ساینده (a) سایش ساینده‌ی دو جسمی (b) سایش ساینده‌ی سه جسمی ۲۲
- شکل ۹-۲- نمایش شماتیک سایش فرساینده ۲۲
- شکل ۱۰-۲- تاثیر نیروهای مختلف روی یک ذره سخت در ایجاد سایش فرساینده ۲۳
- شکل ۱۱-۲- تاثیر زاویه‌ی ضربه روی نرخ سایش برای مواد ترد و شکل‌پذیر ۲۳
- شکل ۱۲-۲- فرآیند سایش چسبندگی ۲۴
- شکل ۱۳-۲- نمای شماتیک برخورد دکمه‌های سرمته‌های WC/Co با سنگ و خردکردن آنها ۲۵
- شکل ۱۴-۲- نمای شماتیک انواع شکستگی‌های مختلف دکمه‌های سرمته ۲۵
- شکل ۱۵-۲- سایش ساینده در شکل نشان داده شده ۲۶
- شکل ۱۶-۲- سایش خوردگی فرسایشی روی سطوح حل‌شده ۲۷
- شکل ۱۷-۲- لب‌پرشدن/ شکستن دکمه‌های سرمته‌های کاربید تنگستن سیمانی شده ۲۸
- شکل ۱۸-۲- پارامترهای موثر در سایش سرمته‌های حفاری ۳۱
- شکل ۱۹-۲- رابطه‌ی بین نرخ سایش با محتوای سیلیس در گرانیته هورنبلند بیوتیت ۳۵
- شکل ۲۰-۲- رابطه‌ی بین نرخ سایش با محتوای سیلیس در گرانیته فلدسپات ۳۵
- شکل ۲۱-۲- رابطه‌ی بین نرخ سایش با محتوای سیلیس در گرانیته بیوتیت درشت ۳۵
- شکل ۲۲-۲- رابطه‌ی بین نرخ سایش با تخلخل در گرانیته هورنبلند بیوتیت ۳۵
- شکل ۲۳-۲- رابطه‌ی بین تخلخل و سایش سرمته ۳۶
- شکل ۲۴-۲- رابطه‌ی بین کوارتز محتوی معادل و سایش ماتریس سرمته ۳۶
- شکل ۲۵-۲- رابطه‌ی بین عمر سرمته با کوارتز محتوی معادل ۳۶
- شکل ۲۶-۲- رابطه‌ی بین عمر سرمته و محتوای سیلیس ۳۶
- شکل ۲۷-۲- رابطه‌ی بین نرخ سایش با درصد کوارتز در گرانیته هورنبلند بیوتیت ۳۶
- شکل ۲۸-۲- رابطه‌ی بین نرخ سایش با درصد کوارتز در گرانیته فلدسپات ۳۶

فهرست شکل‌ها

صفحه

- شکل ۲-۲۹- رابطه‌ی بین نرخ سایش با میانگین اندازه دانه در گرانیتهای فلدسپات ۳۶
- شکل ۲-۳۰- رابطه‌ی بین نرخ سایش با میانگین اندازه دانه در گرانیتهای بیوتیت درشت ۳۶
- شکل ۲-۳۱- رابطه‌ی بین نرخ سایش با درصد کوارتز در گرانیتهای بیوتیت درشت ۳۷
- شکل ۲-۳۲- رابطه‌ی بین نرخ سایش با میانگین اندازه دانه در گرانیتهای هورنبلند بیوتیت ۳۷
- شکل ۲-۳۳- رابطه‌ی بین نرخ سایش با تخلخل در گرانیتهای فلدسپات ۳۷
- شکل ۲-۳۴- رابطه‌ی بین نرخ سایش با تخلخل در گرانیتهای بیوتیت درشت ۳۷
- شکل ۲-۳۵- رابطه‌ی بین نرخ سایش با چگالی انباشتگی در گرانیتهای هورنبلند بیوتیت ۳۷
- شکل ۲-۳۶- رابطه‌ی بین نرخ سایش با چگالی انباشتگی در گرانیتهای فلدسپات ۳۷
- شکل ۲-۳۷- رابطه‌ی بین نرخ سایش با چگالی انباشتگی در گرانیتهای بیوتیت درشت ۳۷
- شکل ۲-۳۸- رابطه‌ی بین کوارتز محتوی معادل و عمر سرمته ۳۷
- شکل ۲-۳۹- رابطه‌ی بین نرخ سایش با درصد کوارتز ۳۸
- شکل ۲-۴۰- رابطه‌ی بین نرخ سایش با محتوای سیلیس ۳۸
- شکل ۲-۴۱- رابطه‌ی میان عمر سرمته و مقاومت کششی برزیلی ۴۱
- شکل ۲-۴۲- رابطه‌ی میان عمر سرمته و مقاومت فشاری ۴۱
- شکل ۲-۴۳- رابطه‌ی میان نرخ سایش و مقاومت کششی برزیلی ۴۱
- شکل ۲-۴۴- رابطه‌ی میان نرخ سایش و مقاومت فشاری ۴۱
- شکل ۲-۴۵- رابطه‌ی بین سختی واجهش اشمیت و عمر سرمته ۴۳
- شکل ۲-۴۶- رابطه‌ی بین سختی ویکرز و عمر سرمته ۴۳
- شکل ۲-۴۷- رابطه‌ی میان اندیس سایش سرشار و عمر سرمته ۴۴
- شکل ۲-۴۸- رابطه‌ی میان شاخص ساینده‌ی سنگ و عمر سرمته ۴۴
- شکل ۲-۴۹- رابطه‌ی میان شاخص ساینده‌ی سنگ و عمر سرمته ۴۴
- شکل ۲-۵۰- رابطه‌ی میان شاخص ساینده‌ی سنگ و نرخ سایش دندان ۴۴
- شکل ۲-۵۱- انواع شکل دکه‌های سرمته و سایش رخ داده در آنها ۴۹
- شکل ۲-۵۲- تصویر شماتیک بار روی سرمته، چرخش و نیروهای وارد بر دندانهای سرمته ۵۰
- شکل ۳-۱- سیر صعودی و نزولی فراوانی مطالعات در زمینه‌ی سایش سرمته‌های حفاری ۵۵
- شکل ۳-۲- سهم هریک از روش‌ها در منابع مطالعاتی ۵۶
- شکل ۳-۳- سایش دکه‌های پیرامونی نسبت به دکه‌های مرکزی برای سنگ گرانیتهای ۶۱
- شکل ۳-۴- سایش دکه‌های پیرامونی در مقابل تعداد ضربات حفاری ۶۱
- شکل ۳-۵- ارتباط ساینده‌ی با سختی سرمته‌های کاربرد تنگستن ۶۲
- شکل ۳-۶- نمایش شماتیک ۵ مکانیزم سایش و جدا شدن مواد از سرمته‌های کاربرد تنگستن دکه‌ای ۶۳
- شکل ۳-۷- سایش کاربرد سیمانی‌شده در بارگذاری زیاد با ترکیب‌های مختلف اندازه دانه‌های WC ۶۶
- شکل ۳-۸- سایش کاربرد سیمانی‌شده در بارگذاری کم با ترکیب‌های مختلف اندازه دانه‌های WC ۶۶

- شکل ۳-۹- مقایسه‌ی سایش سرمته‌های کاربید تنگستن با دانه‌های نزدیک نانو با ۲۵٪ کبالت ۶۷
- شکل ۳-۱۰- مقایسه‌ی سایش سرمته‌های کاربید تنگستن با دانه‌های نزدیک نانو ۶۷
- شکل ۳-۱۱- همبستگی بین شاخص‌های سطح و اندازه‌گیری سایش سرمته‌ها ۶۸
- شکل ۳-۱۲- همبستگی پارامترهای ماتریس رخداد همزمان سطوح خاکستری و سایش سرمته‌ها ۶۸
- شکل ۳-۱۳- همبستگی شاخص‌های طبقه‌بندی‌کننده مبتنی بر حداقل فاصله و سایش سرمته‌ها ۶۹
- شکل ۳-۱۴- مقایسه‌ی پیکسل‌های تغییر یافته در سرمته‌های نو و ساییده‌شده ۷۰
- شکل ۳-۱۵- رابطه‌ی بین پارامترهای عملیاتی سرمته با سایش سرمته ۷۷
- شکل ۳-۱۶- مقایسه‌ی نرخ سایش دکمه‌های پیرامونی در حالت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ۸۴
- شکل ۳-۱۷- مقایسه‌ی نرخ سایش دکمه‌های پیرامونی در حالت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ۸۴
- شکل ۳-۱۸- ارتباط بین عمر سرمته و ضریب تنزیل تولید ۸۶
- شکل ۴-۱- کانسار معدن مس سرچشمه ۱۰۳
- شکل ۴-۲- نقشه‌ی زمین‌شناسی معدن مس سرچشمه ۱۰۳
- شکل ۴-۳- نقشه‌ی دگرسانی سنگ‌های معدن مس سرچشمه ۱۰۴
- شکل ۴-۴- دستگاه حفاری دورانی DM-H ۱۰۵
- شکل ۴-۵- دستگاه حفاری دورانی SBSH-270A ۱۰۵
- شکل ۴-۶- سرمته‌ی سه‌مخروطی شرکت سندویک ۱۰۵
- شکل ۴-۷- سرمته‌ی سه‌مخروطی شرکت اطلس کوپکو ۱۰۵
- شکل ۴-۸- جمع‌آوری، شستشو و آماده‌سازی سرمته‌های مستهلک جهت انتقال به آزمایشگاه تحقیق و توسعه ۱۰۷
- شکل ۴-۹- توزین سرمته‌های نو و مستهلک جهت تعیین میزان افت وزنی ۱۰۷
- شکل ۴-۱۰- اندازه‌گیری ابعاد قطری، ارتفاعی و دندانه‌های سرمته‌های نو و مستهلک ۱۰۸
- شکل ۴-۱۱- اندازه‌گیری افت حجمی سرمته‌های نو و مستهلک با استفاده از سطل مدرج در ۱۶ لیتر آب ۱۰۸
- شکل ۴-۱۲- جمع‌آوری نمونه‌های سنگ از معدن مس سرچشمه ۱۱۲
- شکل ۴-۱۳- رابطه‌ی میزان ساینده‌ی رزینال سنگ با استفاده از سختی موهس ۱۱۳
- شکل ۴-۱۴- تصویر مقطع نازک تهیه شده از دایک بیوتیتی ۱۱۶
- شکل ۵-۱- پراکندگی داده‌ها و تعیین جهات مؤلفه‌های اصلی ۱۳۲
- شکل ۶-۱- روندنمای توسعه‌ی مدل‌های رگرسیونی ۱۳۷
- شکل ۶-۲- برازش تک متغیره بین تخلخل و سایش سرمته ۱۳۸
- شکل ۶-۳- برازش تک متغیره بین چگالی در حالت اشباع و سایش سرمته ۱۳۸
- شکل ۶-۴- برازش تک متغیره بین ضریب بافت سنگ و سایش سرمته ۱۳۸
- شکل ۶-۵- برازش تک متغیره بین میانگین اندازه دانه‌ها و سایش سرمته ۱۳۸
- شکل ۶-۶- برازش تک متغیره بین محتوای سیلس و سایش سرمته ۱۳۹

فهرست شکل‌ها

صفحه

شکل ۶-۷- برآزش تک متغیره بین محتوای آلومینا و سایش سرمته	۱۳۹
شکل ۶-۸- برآزش تک متغیره بین شاخص دگرسانی شیمیایی و سایش سرمته	۱۳۹
شکل ۶-۹- برآزش تک متغیره بین کوارتز محتوی معادل و سایش سرمته	۱۳۹
شکل ۶-۱۰- برآزش تک متغیره بین مقاومت فشاری و سایش سرمته	۱۴۰
شکل ۶-۱۱- برآزش تک متغیره بین مقاومت کششی و سایش سرمته	۱۴۰
شکل ۶-۱۲- برآزش تک متغیره بین سختی موهس و سایش سرمته	۱۴۰
شکل ۶-۱۳- برآزش تک متغیره بین سختی واجهش اشمیت و سایش سرمته	۱۴۰
شکل ۶-۱۴- برآزش تک متغیره بین شاخص ساینده‌گی سنگ و سایش سرمته	۱۴۰
شکل ۶-۱۵- برآزش تک متغیره بین فاکتور ساینده‌گی شیمازک و سایش سرمته	۱۴۰
شکل ۶-۱۶- برآزش تک متغیره بین شاخص مقاومت زمین‌شناسی و سایش سرمته	۱۴۱
شکل ۶-۱۷- برآزش تک متغیره بین رده‌بندی توده سنگ و سایش سرمته	۱۴۱
شکل ۶-۱۸- برآزش تک متغیره بین بار روی سرمته و سایش سرمته	۱۴۱
شکل ۶-۱۹- برآزش تک متغیره بین سرعت دوران سرمته و سایش سرمته	۱۴۱
شکل ۶-۲۰- نمودار اسکری‌پلات برای کلیه مؤلفه‌ها	۱۴۳
شکل ۶-۲۱- نمای دو بعدی دو مؤلفه‌ی اصلی و متغیرهای نشان داده شده در هر مؤلفه	۱۴۴
شکل ۶-۲۲- همبستگی بین متغیرها در دو مؤلفه‌ی اصلی	۱۴۵
شکل ۶-۲۳- تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی بر روی سایش سرمته‌های حفاری سه‌مخروطی	۱۵۸
شکل ۷-۱- طرح معماری شبکه عصبی کانولوشن برای طبقه‌بندی تصویر سرمته حفاری	۱۶۶
شکل ۷-۲- آموزش کامل شبکه عصبی کانولوشن از ابتدا برای دسته‌بندی تصویر سرمته حفاری	۱۶۷
شکل ۷-۳- بازتنظیم یک مدل شبکه عصبی کانولوشن از پیش آموزش دیده برای دسته‌بندی تصویر	۱۶۸
شکل ۷-۴- ترکیب ویژگی‌های استخراج شده با مدل‌های یادگیری ماشین برای دسته‌بندی تصویر	۱۶۸
شکل ۷-۵- برندگان معماری‌های شبکه عصبی کانولوشن در چالش تشخیص بصری مقیاس بزرگ ImageNet	۱۷۰
شکل ۷-۶- روندنمای روش پیشنهادی به منظور پیش‌بینی سایش سرمته‌های حفاری	۱۷۱
شکل ۷-۷- مراحل یادگیری انتقالی در روش پیشنهادی	۱۷۴
شکل ۷-۸- معماری شبکه عصبی عمیق VGG-16	۱۷۶
شکل ۷-۹- نمایش کرنل‌های (فیلترها) لایه‌های کانولوشن در شبکه VGG-16	۱۷۹
شکل ۷-۱۰- میزان مقادیر ویژه محاسبه شده توسط PCA بر اساس مجموعه‌ی آموزش	۱۸۰
شکل ۷-۱۱- نمودار پراکندگی از نقاط داده، باقی‌مانده‌ها (خطاها) و بهترین خط رگرسیون	۱۸۱
شکل ۷-۱۲- تابع زیان "ε-insensitive"	۱۸۳
شکل ۷-۱۳- تفاوت دو روش bagging و boosting در رگرسیون جمعی	۱۸۷
شکل ۷-۱۴- پیش‌بینی میزان سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی با استفاده از مدل‌های مختلف	۱۸۸
شکل ۷-۱۵- میزان کارایی مدل‌های مختلف روش پیشنهادی در پیش‌بینی سایش	۱۸۹
شکل ۷-۱۶- نمایش بصری پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی از طریق روش پیشنهادی	۱۸۹

فهرست جدول‌ها

صفحه

جدول ۱-۲- مشخصات فیزیکی سنگ مطالعه شده توسط محققین	۳۵
جدول ۲-۲- پارامترهای مقاومتی مطالعه شده توسط محققین	۴۰
جدول ۳-۲- شاخص‌های سختی مطالعه شده توسط محققین مختلف	۴۲
جدول ۴-۲- شاخص‌های ساینده‌گی مطالعه شده توسط محققین	۴۴
جدول ۵-۲- پارامترهای اجرایی مطالعه شده توسط محققین	۵۱
جدول ۱-۳- پژوهش‌های انجام شده با روش‌های پایش مستقیم	۵۷
جدول ۲-۳- پژوهش‌های انجام شده با روش‌های پایش غیرمستقیم	۷۴
جدول ۱-۴- درصد افت وزنی سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی به ازای هر متر حفاری	۱۰۹
جدول ۲-۴- میانگین اختلاف ابعاد سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی به ازای هر متر حفاری	۱۱۰
جدول ۳-۴- اختلاف حجم سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی به ازای هر متر حفاری	۱۱۱
جدول ۴-۴- نتایج طیف‌سنجی فلورسانس اشعه‌ی ایکس (XRF) برای سنگ‌های معدن	۱۱۴
جدول ۵-۴- محاسبه‌ی شاخص شدت هوازدگی	۱۱۴
جدول ۶-۴- نتایج آنالیز پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) برای سنگ‌های معدن	۱۱۵
جدول ۷-۴- محاسبه‌ی ضریب بافت و میانگین اندازه دانه‌ها	۱۱۷
جدول ۸-۴- مقادیر چگالی و تخلخل بر اساس آزمایش‌های انجام شده	۱۱۸
جدول ۹-۴- مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری بر اساس آزمایش‌های انجام شده	۱۱۸
جدول ۱۰-۴- مقادیر مقاومت کششی برزلی بر اساس آزمایش‌های انجام شده	۱۱۹
جدول ۱۱-۴- نتایج اندازه‌گیری سختی واجهشی چکش اشمیت	۱۲۰
جدول ۱۲-۴- نتایج محاسبه‌ی فاکتورهای ساینده‌گی شیمازک و شاخص ساینده‌گی سنگ	۱۲۱
جدول ۱۳-۴- نتایج محاسبه‌ی رده‌بندی توده سنگ و شاخص مقاومت زمین‌شناسی	۱۲۲
جدول ۱۴-۴- نتایج اندازه‌گیری بار روی سرمته و سرعت دوران برای هر سرمته‌ی حفاری	۱۲۳
جدول ۱-۶- واریانس داده‌ها با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی	۱۴۳
جدول ۲-۶- اطلاعات آماری داده‌های آموزش	۱۴۶
جدول ۳-۶- اطلاعات آماری داده‌های آزمون	۱۴۶
جدول ۴-۶- انواع مدل‌های قابل بررسی	۱۴۸
جدول ۵-۶- مدل‌های رگرسیونی چند متغیره خطی	۱۵۰
جدول ۶-۶- مدل‌های رگرسیونی چند متغیره غیر خطی	۱۵۱
جدول ۷-۶- مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای روابط ارائه شده	۱۵۳
جدول ۸-۶- رتبه‌بندی هر یک از شاخص‌های ارزیابی برای روابط ارائه شده	۱۵۴
جدول ۹-۶- رتبه‌بندی مدل‌های تخمین سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی بر اساس معیارهای ارزیابی	۱۵۶
جدول ۱۰-۶- میزان تأثیر پارامترهای ورودی رابطه نهایی	۱۵۹
جدول ۱-۷- مقایسه معماری‌های مختلف شبکه عصبی عمیق در مجموعه اعتبارسنجی	۱۷۸
جدول ۲-۷- مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای مدل‌های ارائه شده	۱۹۰
جدول ۳-۷- رتبه‌بندی هر یک از شاخص‌های ارزیابی برای مدل‌های ارائه شده	۱۹۰
جدول ۴-۷- رتبه‌بندی مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی بر اساس معیارهای ارزیابی	۱۹۱

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

حفر چال‌های انفجاری اولین مرحله از چرخه‌ی تولید در معادن روباز می‌باشد که قسمت عمده‌ای از هزینه‌های استخراج را به خود اختصاص می‌دهد که اطلاع از پارامترهای مرتبط با حفاری برای هر معدنکار و متخصص مربوطه، ضروری است. عمده‌تأ حفاری در معادن روباز به منظور حفر چال‌های انفجاری صورت می‌گیرد تا به کمک انفجار، سنگ‌ها در اندازه و ابعاد مورد نیاز کارخانه خرد شود و تولید معدن و عمر ماشین‌آلات معدنی افزایش یابد و در نتیجه از هزینه‌های تعمیر و نگهداری آنها کاسته شود.

سرتمه‌های حفاری با درجه‌ی بالایی از حساسیت و آسیب‌پذیری، یکی از اساسی‌ترین اجزا در راندمان حفاری است که بیشترین هزینه‌های حفاری در معادن روباز را به خود اختصاص می‌دهند. استفاده از سرتمه‌های سه‌مخروطی دورانی به‌طور گسترده در معادن روباز به‌منظور روباره‌برداری و استخراج مواد معدنی متداول است. سرتمه‌های مورد استفاده در معادن روباز معمولاً از جنس فولاد مخصوص یا کاربید تنگستن (WC) می‌باشند. مواد کاربید تنگستن به دلیل ویژگی‌های برجسته‌ی گرمایی، شیمیایی و مکانیکی (سختی و مقاومت در برابر سایش / فرسودگی) شناخته شده هستند. مواد کاربید تنگستن سیمانی‌شده (WC/Co) به طور گسترده در صنعت برای تولید ابزارهای برش‌دهنده، سرتمه‌های حفاری، معدن‌کاری و قسمت‌هایی با مقاومت بالا در برابر سایش استفاده شده‌اند.

ابزارهای برش‌دهنده باید قادر به تحمل دما / حرارت بالا باشند و شکل‌های گرمایی، خستگی، ساییدگی، سایش و فرسایش‌های ناشی از عوامل شیمیایی را کاهش دهند. در معدن‌کاری و صنایع نفت و متالورژی، سرتمه‌های حفاری روی سنگ‌های ساینده و در کنار سیالاتی که باعث سایش، فرسایش و خوردگی شدید می‌شوند استفاده می‌شود. سرتمه‌های حفاری کاربید تنگستن معمولاً در اثر عوامل گوناگون همچون سایش ناشی از ساییدگی، خوردگی فرسایشی، سایش فرساینده، خراب شدن در اثر لب‌پر شدن، تغییر شکل ناشی از حرارت و ترک خوردن ناشی از حرارت از کار افتاده می‌شوند. عمر قسمت‌های سایشی (WC/Co) به وسیله‌ی روش‌های گوناگونی افزایش پیدا می‌کند که شامل ترکیب و مشخصات ترموفیزیکی کاربید، هندسه و طراحی اجزا، مونتاژ و کنترل شرایط فیزیکی و شیمیایی محیط عملیات می‌شود. تغییر در عوامل مذکور

تأثیر بسزایی در عمر سرمته‌ها می‌گذارد. در هنگام معدن‌کاری، قسمت‌های کاربرد تنگستنی در شرایط شدیدی از لحاظ مکانیکی، شیمیایی و حرارتی قرار می‌گیرند و طبیعت ساینده‌ی اکثر کانی‌ها می‌تواند باعث سایش قابل‌ملاحظه‌ای در سرمته‌های حفاری مورد استفاده در معادن شود.

در این پژوهش با توجه به بررسی منابع مختلف و پژوهش‌های انجام شده با به حداقل رساندن نواقص موجود، مدل‌های تجربی آماری و مدل‌های یادگیری عمیق (مبتنی بر یادگیری ماشین) به منظور پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی در معادن روباز (مطالعه موردی: معدن مس سرچشمه) با در نظر گرفتن بیشترین تعداد پارامترهای مؤثر ارائه خواهد شود. در این فصل ضرورت، اهداف، نوآوری، مراحل انجام و ساختار کلی تحقیق بیان خواهد شد.

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

حفاری بهینه در معادن روباز با توجه به پارامترهای زیادی که در آن نقش دارد می‌تواند علاوه بر افزایش تولید در معادن روباز، هزینه‌ها را نیز به نحو چشمگیری کاهش دهد. سایش سرمته‌ها که باعث فرسودگی سرمته‌ها حین حرکت نسبی آنها روی سطح ثابتی از سنگ می‌شود، تأثیر منفی بر سرعت حفاری خواهد داشت. سایش سرمته‌های حفاری تابع عوامل مختلفی است که برخی وابسته به ماشین‌آلات، پارامترهای عملیاتی و پارامترهای مدیریتی و برخی تابع شرایط و خصوصیات ماده سنگ و توده سنگ و محیط اطراف است.

سایش باعث از بین رفتن سطح سرمته‌ها می‌شود و کارایی دستگاه را کاهش می‌دهد و رسیدن به نرخ نفوذ بهینه را سخت خواهد کرد. سایش‌های شدیدتر منجر به شکستن سرمته‌ها خواهد شد و تعویض سریع سرمته‌ها را الزامی خواهد کرد. این امر باعث از دست دادن زمان زیادی در فرآیند حفاری خواهد شد که هزینه‌های بسیار زیادی در پی خواهد داشت. بررسی پارامترهای مؤثر بر سایش سرمته‌ها می‌تواند با کاهش اثرات سایش، از هدر رفتن زمان و هزینه‌های اضافی وارد بر فرآیند حفاری جلوگیری نماید. سایش سرمته‌ها از آن جهت اهمیت دارد که در بسیاری از موارد منجر به کاهش تولید می‌شود که جریمه‌ها و ضررهای اقتصادی فراوانی را به همراه دارد. بنابراین سایش به عنوان فاکتوری مؤثر در فرآیند طراحی باید مورد توجه قرار گیرد و نباید به عنوان یک چاره‌اندیشی پس از بروز یک مشکل باشد.

بنابراین پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی مرحله‌ای اساسی و بنیادی در حفاری معادن روباز است. با توجه به مطالعات کم موجود در حوزه‌ی سایش سرمته‌های حفاری، مدل جامعی برای پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی به صورت کمی که دربرگیرنده‌ی تمامی پارامترهای مؤثر در شرایط مختلف باشد، وجود ندارد. همچنین روش‌هایی که به منظور پایش وضعیت ابزار مورد استفاده قرار می‌گیرند همواره با خطای انسانی همراه بوده و دارای معایبی بسیاری می‌باشند که روش‌های یادگیری عمیق می‌تواند در پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی کمک شایانی داشته باشند. بنابراین هم از منظر اهمیت برای صنعت حفاری کشور و هم از دیدگاه کاربرد آن در سراسر جهان، مطالعه در زمینه‌ی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی، امری ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به این مطالب به طور خلاصه ضرورت انجام این تحقیق را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- اهمیت فوق‌العاده‌ی سرمته‌ها در فرآیند حفاری، استخراج و نرخ تولید معادن
- افزایش راندمان تولید، کاهش مصرف سرمته‌های حفاری و قیمت تمام شده
- افزایش اطلاعات مدیریتی و ارتقای دانش فنی اپراتورها و کارشناسان حفاری
- صرف هزینه‌های بالا و از دست دادن زمان به منظور تعویض سرمته‌های سایش یافته
- عدم وجود مطالعات کامل و دقیق به منظور ارزیابی و بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی

- گستردگی و پراکندگی مطالعات و عدم وجود یک مدل پیش‌بینی کمی در برگیرنده‌ی تمامی پارامترهای مؤثر در زمینه‌ی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی
- کاهش خطای انسانی در محاسبات و پیش‌بینی سایش سرمته‌ها با مجموعه داده‌های کوچک

۱-۳- اهداف تحقیق

هدف نهایی تحقیق، ارائه‌ی مدل کمی پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی با بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر در فرآیند حفاری و مدل‌های یادگیری عمیق با مجموعه داده‌های کوچک در معادن روباز است. بدین منظور، در این پژوهش موارد زیر دنبال می‌شود:

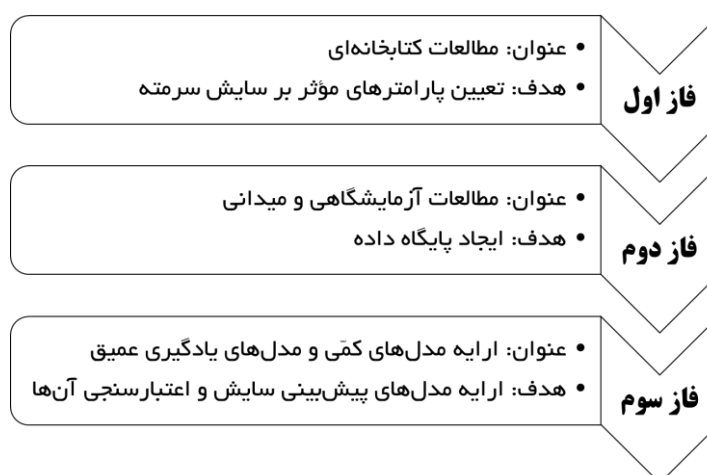
- شناسایی دسته عوامل مؤثر بر سایش سرمتها و تعیین پارامترهای هر دسته و بررسی اندرکنش آنها با یکدیگر و چگونگی تغییرات و تأثیرات آنها بر سایش سرمت
- ارائه مدل کمی پیش‌بینی مقدار سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی
- ارائه مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی با استفاده از یادگیری عمیق
- کاهش هزینه‌های استخراج به منظور استفاده در بخش‌های مختلف صنعت
- توسعه مدل‌های پیش‌بینی (تخمین‌گر) به منظور استفاده در بخش‌های تحقیقاتی و آکادمیک

۴-۱- نوآوری تحقیق

- نوآوری تحقیق را می‌توان از دیدگاه بنیادی، محتوایی و کاربردی به‌صورت زیر بیان کرد:
- ارائه مدل کمی پیش‌بینی میزان سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی با در نظر گرفتن بیشترین پارامترهای تأثیرگذار
 - ارائه مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی با استفاده از یادگیری عمیق برای اولین بار با استفاده از مجموعه داده تصاویر معدن مس سرچشمه
 - استفاده در مرحله امکان‌سنجی، طراحی و استخراج در معادن روباز

۵-۱- مراحل انجام تحقیق

مراحل اجرای تحقیق بر اساس فازهای مشخص شده در روندنمای شکل ۱-۱ نشان داده شده است:

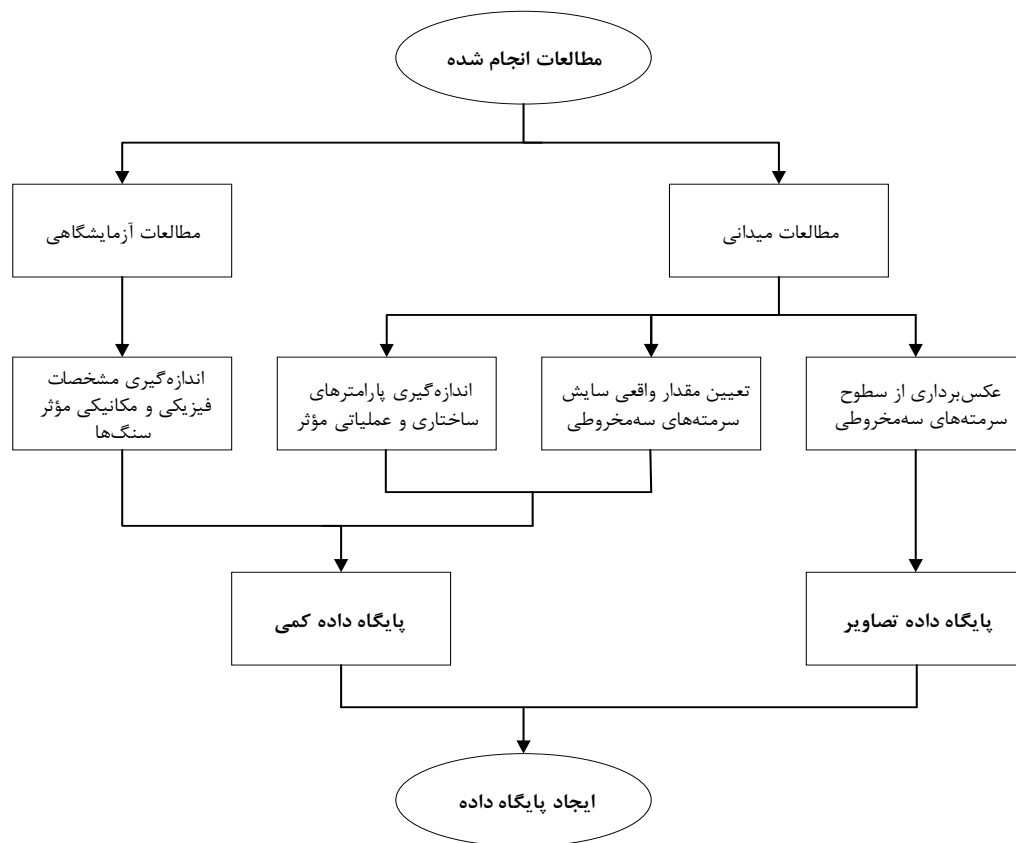


شکل ۱-۱- روندنمای مراحل اجرای تحقیق بر اساس فازهای مشخص شده

فاز اول: در ابتدا با استفاده از مطالعه منابع، گروه‌های مختلف عوامل مؤثر بر سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی مشخص می‌شوند. از این طریق با استفاده از یک روش نظام‌مند می‌توان پارامترهای هر گروه را به گونه‌ای که تمام پارامترهای مؤثر شناسایی شوند، مشخص کرد. پس از انتخاب پارامترهای مؤثر، بازه‌ی تغییرات هر یک از آن‌ها برای پوشش تمام شرایط تعیین می‌شود. سپس از سطوح سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی مستهلک پس از جمع‌آوری، شستشو و تمیزکاری و سرمته‌های نو با قرار دادن دوربین در زاویه ۴۵ درجه با تنظیمات ثابت عکس‌برداری انجام خواهد شد.

فاز دوم: در این تحقیق پایگاه داده شامل دو پایگاه داده کمی و مجموعه داده تصاویر است. به منظور ایجاد پایگاه داده کمی، مشخصات فیزیکی، مکانیکی، ساختاری و محیطی (توده سنگ) مؤثر سنگ‌ها، پارامترهای اجرایی تأثیرگذار و مقدار واقعی سایش از طریق مطالعات آزمایشگاهی و میدانی نمونه‌های جمع‌آوری شده از معدن مس سرچشمه محاسبه خواهند شد. به منظور اندازه‌گیری مشخصات فیزیکی نمونه‌ها از آنالیز شیمیایی و بررسی مقاطع نازک و برای تعیین مشخصات مکانیکی سنگ‌ها از تست‌های آزمایشگاهی با توجه به استانداردهای موجود استفاده خواهد شد. همچنین اندازه‌گیری مقدار واقعی سایش با استفاده از افت وزن، افت ابعادی و افت حجمی سرمته‌های سه‌مخروطی نسبت به حالت نو از طریق باسکول، میکرومتر و سطل مدرج تعیین خواهد شد. همچنین مجموعه داده‌ای از تصاویر سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی معدن مس سرچشمه به منظور پیش‌بینی سایش سرمته‌ها با استفاده از یادگیری عمیق ایجاد خواهد شد (شکل ۱-۲).

فاز سوم: هدف از تعیین عوامل مؤثر بر نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی، رسیدن به مدلی است که قادر به پیش‌بینی نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی با توجه به خصوصیات آن باشد. بنابراین مسئله بعدی پس از تعیین عوامل مؤثر، بررسی درصد تأثیرگذاری این عوامل بر نرخ سایش است. یکی از روش‌های مطالعه روابط بین متغیرها و تعیین نحوه‌ی وابستگی یک متغیر به متغیرهای دیگر، تحلیل رگرسیون است. الگوی روابط بین متغیرها ممکن است به صورت خطی یا غیرخطی باشد.



شکل ۱-۲- ایجاد پایگاه داده از مطالعات آزمایشگاهی و میدانی

برای حصول اطمینان از نتایج بدست آمده از مدل‌های رگرسیونی لازم است متغیرهای مستقل مدل ناهمبسته باشند چرا که مشکل اصلی در رگرسیون، وجود هم‌خطی در یک معادله رگرسیونی است که نشان‌دهنده همبستگی^۱ بالا بین متغیرهای مستقل است. بنابراین پیش از انجام رگرسیون لازم است نرمال بودن داده‌ها و عدم همبستگی بین متغیرها مورد بررسی قرار گیرد. پس از آن برای انتخاب مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترها روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۲ (PCA) معرفی شده است. این روش تکنیکی است برای یافتن ترکیبات خطی از متغیرهای اولیه همبسته، در شرایطی که با تعداد زیادی از متغیرها رو به رو هستیم. این روش به‌خصوص در شرایطی که ابعاد داده‌ها و ترکیب ساختار آن‌ها کاملاً مشخص نیست، مفید است. چرا که در تحلیل مؤلفه‌های اصلی، سعی بر آن است که ابعادی از داده‌ها را پیدا کنیم که واریانس کل داده‌ها را توضیح می‌دهد. بنابراین این روش را می‌توان به عنوان یک روش مناسب برای کاهش حجم متغیرها و

^۱ Correlation

^۲ Principal Component Analysis (PCA)

استخراج پارامترهای مؤثر استفاده کرد. پس از کاهش تعداد پارامترها توسط روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، به منظور ارائه‌ی مدل کمی برای سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی، داده‌ها در دو بخش داده‌های آموزش و آزمون مورد استفاده قرار خواهند گرفت. در ابتدا لازم است که تأثیر هر یک از متغیرهای مورد بررسی بر نرخ سایش سرمته‌های دورانی به‌طور جداگانه تعیین گردد. پس از آن پارامترهای مؤثر بر نرخ سایش، بر اساس روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی استخراج شده و پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها و عدم همبستگی بین متغیرها، معادلات پیش‌بینی نرخ سایش توسط رگرسیون چند متغیره خطی و غیرخطی ارائه می‌شوند. در نهایت بعد از کنترل و اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده، بهترین مدل بر اساس معیارهای ارزیابی، با استفاده از تکنیک‌های میانگین رتبه‌ها، بردا، کپلند و ادغام روش‌های بیان شده اولویت‌بندی می‌شوند و آنالیز حساسیت به منظور تعیین مقدار تأثیر پارامترهای ورودی بر روی هدف، برای مدل نهایی انجام خواهد شد. سپس به منظور پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی با استفاده از روش یادگیری عمیق، بعد از ایجاد پایگاه داده از تصاویر سرمته با استفاده از عکسبرداری، پیش آموزش شبکه‌های عصبی کانولوشن بر اساس مجموعه داده اعتبارسنجی، به منظور انتخاب معماری مناسب انجام خواهد شد. سپس با استفاده از معماری مناسب یادگیری انتقالی، استخراج ویژگی‌های سطح بالا در تصاویر سرمته‌های حفاری صورت خواهد گرفت. در گام بعدی ویژگی‌های چند بعدی استخراج شده مرتبط به لایه آخر کانولوشن به بردار ویژگی تبدیل خواهند شد. در همین راستا با توجه به اهمیت بسیار بالای انتخاب لایه مرتبط به نگاشت‌های ویژگی بعد از ترسیم خروجی لایه‌های مختلف به صورت بصری، لایه‌ی مناسب تعیین می‌شود. از آنجایی که تعداد و ابعاد نگاشت‌های ویژگی از شبکه‌ی عصبی کانولوشن بسیار زیاد می‌باشد و این تعداد از ویژگی‌های استخراج شده زمان محاسبات را افزایش خواهد داد، در مرحله‌ی بعد از تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) به منظور کاهش و انتخاب ویژگی‌های مؤثر در پیش‌بینی استفاده خواهد شد. در گام بعدی از مدل‌های (الگوریتم‌های) مبتنی بر یادگیری ماشین بر پایه رگرسیون برای پیش‌بینی میزان سایش سرمته‌های حفاری استفاده می‌شود. سپس بهترین مدل پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی بر اساس میزان عملکرد و کارایی آن به عنوان مدل نهایی انتخاب خواهد شد. مراحل ذکر شده در روندنمای شکل ۱-۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱-۳- روندنمای مراحل انجام تحقیق

۱-۶- ساختار کلی تحقیق

در این تحقیق در فصل اول مقدمه و کلیات بیان خواهد شد. در فصل دوم سایش سرمنه‌های حفاری و پارامترهای مؤثر بر آن مورد بحث قرار خواهد گرفت. در فصل سوم سابقه‌ی علمی موضوع از دیدگاه پژوهشگران مختلف مورد نقد و بررسی قرار خواهد گرفت. در فصل چهارم نحوه ایجاد پایگاه داده تشریح خواهد شد. در فصل پنجم روش‌های آماری و تحلیل مولفه‌های اصلی مورد بحث قرار خواهند گرفت. در فصل ششم مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمنه‌های سه‌مخروطی دورانی ارائه خواهند شد و عملکرد آنها مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. در فصل هفتم، پیش‌بینی سایش سرمنه‌های سه‌مخروطی دورانی با استفاده از یادگیری عمیق انجام خواهد شد و کارایی مدل‌های پیش‌بینی یادگیری عمیق مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در فصل هشتم، نتایج و پیشنهاد‌های تحقیق بیان خواهد شد تا در پژوهش‌های آینده مورد استفاده قرار گیرد.

فصل دوم

سایس سرمته‌های حفاری و پارامترهای مؤثر بر آن

۲-۱- مقدمه

با توجه به کاهش منابع و هزینه‌های بسیار بالای استخراج مواد معدنی و فرآورده‌های پس از آن، شرکت‌های مرتبط با این‌گونه پروژه‌ها به منظور کاهش هزینه‌های عملیاتی مجبور به استفاده از سیستم‌های بهینه از نظر فنی و اقتصادی شده‌اند. با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین مراحل معدن‌کاری در معادن روباز مرحله‌ی حفاری است، توجه به این بخش بیش از پیش زیر ذره‌بین مطالعات قرار گرفته و بهبود این واحد عملیاتی مدنظر کارشناسان بوده است. با توجه به هزینه‌های بالای عملیات حفاری، پیش‌بینی مدت زمان حفاری و ایجاد یک برنامه زمان‌بندی برای این فرآیند، می‌تواند راندمان عملیات را به نحو مؤثری افزایش و هزینه‌های مرتبط با آن را کاهش دهد. انتخاب روش مناسب حفاری با توجه به شرایط هر یک از پروژه‌ها یکی از راهکارهای افزایش دادن سرعت حفاری و کاهش هزینه‌های آن است.

با توجه به اینکه زمین از سازندهای مختلف با درجه‌های سختی متنوعی تشکیل شده است، لازمه نفوذ به این سنگ‌ها، به‌کارگیری ابزار مناسب و عملیات ویژه‌ای است. سرمته‌ها یکی از ابزارهای اصلی عملیات حفاری است که وظیفه شکستن و خرد کردن سنگ را بر عهده دارند. سرمته‌ها در حین حفاری با توجه به پارامترهای متعددی که با آن در ارتباط اند سایش^۱ یافته و نیاز به تعویض سرمته الزامی می‌گردد که این فرآیند به زمان و هزینه‌ی زیادی منجر می‌شود. تحلیل و بررسی سرمته‌های حفاری از نظر سایش می‌تواند گامی مناسب برای کاهش هزینه‌های معدن‌کاری در اولویت شرکت‌ها و سایر عوامل مرتبط با پروژه باشد.

در این فصل ابتدا انواع رایج سیستم‌های حفاری و سرمته‌های مورد استفاده در آنها به اختصار بیان شده و با بیان مفهوم سایش و انواع مختلف سایش در سرمته‌های حفاری، اثر عواملی که بر وقوع، افزایش و یا کاهش آنها نقش تعیین‌کننده‌ای دارند، مورد بحث قرار گرفته است.

۲-۲- حفاری

انسان‌ها از زمان‌های دور به منظور دسترسی به آب و مواد معدنی اقدام به حفاری کردند. اولین چاه‌های حفرشده حدود ۶۰۰ سال قبل از میلاد مسیح و به منظور دسترسی به آب توسط چینی‌ها حفر گردید. با

^۱ Wear

توجه به رشد روزافزون جمعیت در جهان، بشر برای تامین نیازهای مادی خود به دنبال راهی برای دست یافتن به منابع غنی مواد معدنی و آلی در زیرزمین بوده که با پیشرفت تکنولوژی، بشر توانست به این امر مهم دست یابد. امروزه حفاری یکی از بخش‌های مهم و جدانشدنی صنایع عمرانی، معدنی و نفتی است. با توجه هزینه‌های بالای فرآیند حفاری، محققان بسیاری به دنبال ارائه روش‌هایی برای دستیابی سریع به مواد معدنی و رفع محدودیت‌های روش‌های موجود بوده‌اند. امروزه در معدن‌کاری و مهندسی عمران عملیات حفاری تقریباً فقط با انرژی مکانیکی صورت می‌گیرد. در حوزه‌ی معدن روش‌های متنوعی برای عملیات حفاری ارائه شده است. انواع روش‌های حفاری بر اساس انرژی مکانیکی به سه دسته زیر تقسیم می‌شوند (Jimeno et al., 1995).

- ضربه‌ای^۱

- دورانی^۲

- ضربه‌ای-دورانی^۳

از میان روش‌های بیان شده روش حفاری دورانی به صورت گسترده‌ای در حفاری معادن روباز مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرمته‌ها با حرکت چرخشی روی سنگ باعث خرد شدن و سائیده شدن سنگ می‌شوند. این روش برخلاف روش حفاری ضربه‌ای دارای سرعت حفاری بالایی است. در ادامه این روش حفاری با توضیحات بیشتری بیان خواهد شد.

۲-۱- روش حفاری دورانی

رشته‌ی حفاری مورد استفاده در حفاری دورانی شامل بسیاری از موارد است که مهم‌ترین جز آن را سرمته‌ها تشکیل می‌دهند. سرمته‌ها سازندها را با دندانها یا لبه‌های برنده حفاری کرده و روند حفاری را در جهت مورد نظر قادر می‌سازند. در طی این فرآیند سرمته‌ها تحت تأثیر سایش بسیار زیادی قرار گرفته و نرخ نفوذ حفاری به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در نتیجه سرمته استفاده شده با سرمته‌ی نو تعویض خواهد

¹ Percussive drilling

² Rotary drilling

³ Rotary percussive drilling

شد که با توجه به گران بودن و حیاتی بودن سرمته‌ها در فرآیند حفاری، تعیین زمان درست تعویض آن در جهت سرعت دادن به عملیات حفاری الزامی است. سرمته‌های مورد استفاده در روش حفاری دورانی به دو دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند (Gokhale, 2010):

- سرمته‌های تیغه‌ای^۱

- سرمته‌های سه‌مخروطی^۲

با توجه به اینکه سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی دامنه وسیعی از سنگ‌ها (بسیار نرم تا بسیار سخت) را پوشش می‌دهد استفاده از این سرمته‌ها در معادن روباز نسبت به سایر سرمته‌ها بیشتر است. در ادامه سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی به اختصار بیان شده است.

سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی: امروزه تنها ۲ درصد از حفاری دورانی در معادن به‌وسیله‌ی سرمته‌های تیغه‌ای انجام می‌شود. ۹۸ درصد باقیمانده را سرمته‌های سه‌مخروطی به خود اختصاص می‌دهند. این سرمته‌ها در ابتدا فقط برای چاه‌های نفت مورد استفاده قرار می‌گرفت ولی بعد از تغییر در گردش هوای فشرده از طریق یاتاقان‌های آن برای معادن نیز توسعه یافتند. برخلاف سرمته‌های تیغه‌ای که دارای قطعات برنده ثابت بوده که با بدنه یکپارچه است و با چرخش رشته حفاری به گردش در می‌آیند، سرمته‌های سه‌مخروطی دارای اجزای برنده‌ای می‌باشند که روی مخروط‌ها چیده شده‌اند که هنگام چرخش بدنه حول محور خود می‌چرخند. سرمته‌های سه‌مخروطی به دو نوع کلی تقسیم می‌شوند (Gokhale, 2010):

- سرمته‌های دندان فولادی^۳

- سرمته‌های کاربید تنگستن (دکمه‌ای)^۴

سرمته‌های دندان فولادی دارای دندان‌های برنده‌ای می‌باشند که روی مخروط‌ها توسط تراشکاری ایجاد شده‌اند. این مخروط‌ها به طور کامل از آلیاژ فولاد ساخته شده‌اند (Gokhale, 2010).

سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی متشکل از دندان‌های کاربید تنگستن با فرمول شیمیایی WC به وسیله‌ی

¹ Drag bit

² Tricone bit

³ Milled tooth (Steel tooth)

⁴ Tungsten Carbide Insert (TCI) (Button bit)

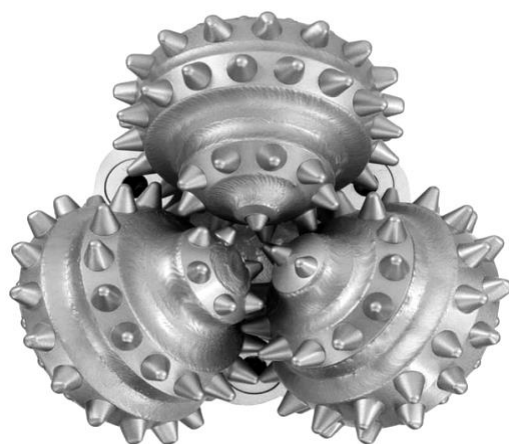
کبالت^۱ (Co) در درون مخروط به هم اتصال می‌یابند. در بیشتر موارد این سرمته‌ها به صورت کاربید سیمانی شده^۲ (کاربید تنگستن سیمانی شده^۳) هستند. به علت ترکیب ساختاری آنها در برخی منابع به اختصار

WC/Co و یا CC/WC نام‌گذاری شده‌اند (Beste et al., 2006).

طراحی این‌گونه سرمته‌ها به این صورت است که در سنگ‌های نرم طول دندان‌ها و فاصله‌ی آنها از یکدیگر زیاد شده و برای حفاری سنگ‌های سخت‌تر اندازه دندان‌ها کوتاه و نیز فاصله‌ی آنها از یکدیگر کاهش یافته است. در شکل ۱-۲ سرمته‌ی دندان‌ه فولادی و در شکل‌های ۲-۲ تا ۴-۲ سرمته‌های کاربید تنگستن برای سازندهای مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱-۲- سرمته‌ی دندان‌ه فولادی (Gokhale, 2010)



شکل ۲-۲- سرمته‌ی کاربید تنگستن برای سازند نرم (Hustrulid et al., 2013)

^۱ Cobalt binder

^۲ Cemented Carbide

^۳ Cemented Tungsten Carbide (Hardmetal)

اساس کار سرمته‌های سه مخروطی دورانی بر اساس ترکیبی از دو عمل است (Jimeno et al., 1995):

- نفوذ دندانها

دندانهای فولادی یا قطعاتی از جنس کاربید تنگستن که روی سرمته نصب شده‌اند، با اعمال تغذیه‌ای پشت سرمته در سنگ نفوذ می‌کنند. این مکانیزم شبیه شکستن سنگ است.

- برش

سنگ در اثر چرخش مخروطها در انتهای چال خراشیده شده و می‌شکند. این عمل در حقیقت ترکیبی است از برش و شکستن که به واسطه حرکت سر سرمته ایجاد می‌شود.



شکل ۲-۳- سرمته‌ی کاربید تنگستن برای سازند متوسط - سخت (Hustrulid et al., 2013)



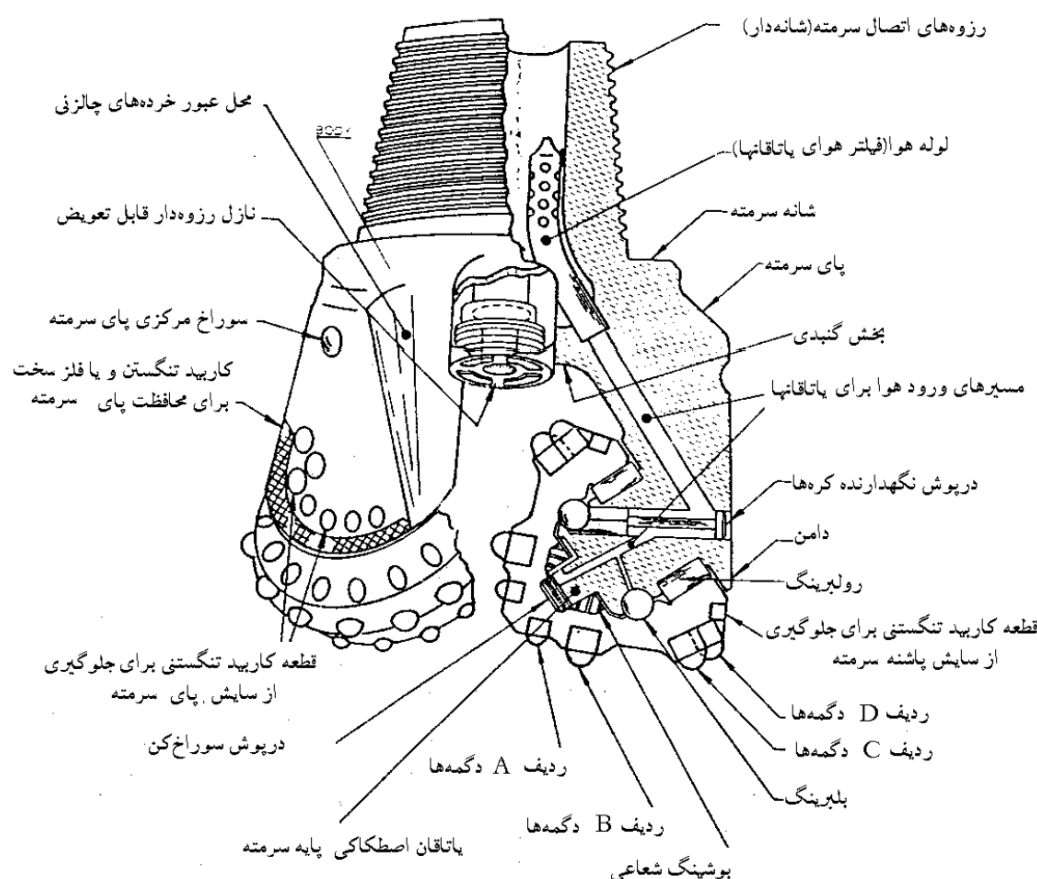
شکل ۲-۴- سرمته‌ی کاربید تنگستن برای سازند سخت

اجزای اصلی سرمته‌های سه مخروطی دورانی شامل موارد زیر است که در شکل ۲-۵ نمایش داده شده است:

- مخروط‌ها

- یاتاقان‌ها^۱

- بدنه سرمته^۲



شکل ۲-۵- اجزای سرمته‌ی سه مخروطی دورانی با دندانه‌های کاربید تنگستن (Jimeno et al., 1995)

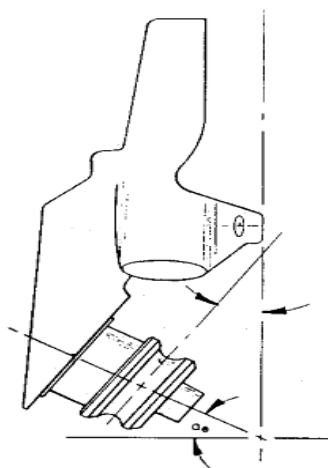
یکی از مهم‌ترین جنبه‌هایی که هنگام طراحی سرمته‌های سه مخروطی دورانی در نظر گرفته شده است زاویه‌ای است که محور خط مرکزی (محور یاتاقان) مخروط با صفحه‌ی افقی می‌سازد که به زاویه‌ی محوری^۳ (زاویه ژورنال) معروف است. این زاویه همان زاویه‌ی میان محور اصلی سرمته و یک خط عمود بر محور مرکزی مخروط است. این زاویه تعیین‌کننده‌ی قطر مخروط بر حسب قطر چال است. با افزایش این زاویه

^۱ Bearing

^۲ Bit body

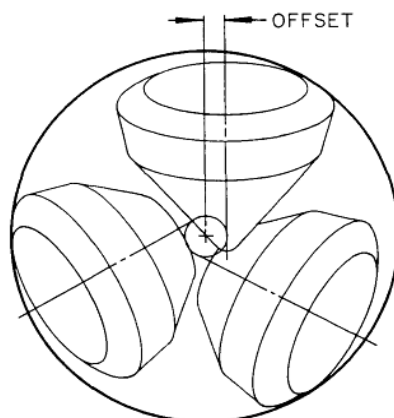
^۳ Journal angle

قطر مخروط کاهش می‌یابد و با کاهش این زاویه قطر مخروط افزایش می‌یابد (شکل ۶-۲).



شکل ۶-۲- زاویه محوری پایین (Jimeno et al., 1995)

پارامتر دیگری که در طراحی این‌گونه سرمته‌ها در نظر گرفته شده است منحرف‌شدگی (زاویه‌ی خروج از مرکز) مخروط‌ها^۱ است. تغییر مکان افقی نوک مخروط‌ها در یک صفحه‌ی عمود گذرنده از محور سرمته در مرکز قطاع ۱۲۰ درجه‌ای مربوط به خود را منحرف‌شدگی گویند، به عبارت دیگر نوک مخروط‌ها در مرکز چرخش سرمته به یکدیگر نمی‌رسند. وجود این انحراف عمل خراش را در هنگام برخورد با تشکیلات سنگی افزایش داده و در بیشتر موارد سرعت نفوذ را بهبود می‌بخشد که در شکل ۷-۲ این انحراف مخروط‌ها به تصویر در آمده است. لازم به ذکر است میزان منحرف‌شدگی مخروط سرمته‌های مختص سازند نرم به مراتب بیشتر از سرمته‌های سازند سخت است که عملیات کندن و خراشیدن در سنگ را سرعت می‌بخشد.



شکل ۷-۲- منحرف‌شدگی مخروط (McGehee et al., 1992)

^۱ Cone offset

۲-۳- تریبولوژی (سوده شناسی)^۱

تریبولوژی تکنولوژی و علمی است که پدیده‌های حاصل از حرکت دو سطح روی یکدیگر را مورد بررسی قرار می‌دهد. مجموعه‌ای از علوم شامل ریاضی، فیزیک، مکانیک، شیمی آلی و علم مواد در توسعه و گسترش تریبولوژی نقش دارند و همین امر گستردگی این دانش را نشان می‌دهد. سایش، اصطکاک و روانکاری به طور مستقیم با تریبولوژی در ارتباط هستند. در عین حال این نکته مشخص است که هدف از طرح مباحث تریبولوژیک، کنترل اصطکاک و سایش و تبعات جانبی آن می‌باشد. تحقیقات انجام شده در کشورهای صنعتی، صرف هزینه‌ای بالغ بر ۵ تا ۱۰ درصد از تولید ناخالص ملی در برخورد با مسئله سایش و اصطکاک را نشان می‌دهد (Stachowiak and Batchelor, 2013).

۲-۳-۱- سایش (فرسودگی)

سایش به عنوان یکی از مفاهیم اصلی در مهندسی سطح و تریبولوژی به لغزش، حرکت و یا تصادم دو سطح نسبت به هم که جدایش ذرات در یک یا هر دو سطح روی دهد به طوری که سطح، شکل اولیه خود را از دست دهد گفته می‌شود. سایش از آن جهت اهمیت دارد که در بسیاری موارد منجر به هزینه‌های بازسازی، تعمیر و همچنین کاهش تولید شده که جریمه‌ها و ضررهای اقتصادی به همراه دارد. بنابراین سایش به عنوان فاکتوری مؤثر در فرآیند طراحی باید مورد توجه قرار گیرد و نباید به عنوان یک چاره‌اندیشی پس از بروز یک مشکل در نظر گرفته شود (Stachowiak and Batchelor, 2013).

سایش با توجه به ماهیت سطوح لغزش، وضعیت چرب بودن دو سطح، محیط شیمیایی و شرایط عملیاتی همچون بارگذاری نرمال و سرعت لغزش با چند نوع مکانیزم مختلف رخ می‌دهد. این مکانیزم‌ها به طور کلی شامل موارد زیر می‌باشند (Carpinteri et al., 2005; Stachowiak and Batchelor, 2013).

- سایش چسبنده (چسبان)^۲

- سایش ساینده (خراشان)^۳

^۱ Tribology

^۲ Adhesive wear

^۳ Abrasive wear

- سایش فرساینده^۱

- سایش ناشی از فرسودگی سطح^۲

- سایش خورنده^۳

- سایش اکسنده^۴

- سایش نوسانی (فرتینگ)^۵

- سایش حبابی (حفره‌ای)^۶

- سایش ترد^۷

- سایش ضربه‌ای^۸

- سایش شکل‌پذیر^۹

- سایش ذوب^{۱۰}

- سایش انتشاری (دیفیوژن)^{۱۱}

در بین انواع سایش‌های بیان شده، سایش‌هایی که در فرآیندهای حفاری رخ می‌دهند عمدتاً سایش ساینده، سایش چسبنده و سایش فرساینده می‌باشند که نوع ساینده بیشتر در حفاری معادن، نوع فرساینده بیشتر در حفاری نفت و گاز و نوع چسبنده در هر دو آنها دیده می‌شود. سایش‌های خورنده و سایش‌های ناشی از فرسودگی سطح نیز گاهی به تنهایی و گاهی به همراه یکی از سایش‌های اصلی بیان شده در فرآیندهای حفاری نقش دارند. لازم به ذکر است که انواع سایش‌های بیان شده می‌توانند به صورت چند سایش همزمان رخ دهند. در ادامه سایش‌های ساینده، فرساینده و چسبنده با توجه به کاربرد بیشتر در فرآیند حفاری به طور خلاصه تشریح می‌گردند. (Carpinteri et al., 2005).

¹ Erosive wear

² Surface fatigue wear

³ Corrosive wear

⁴ Oxidative wear

⁵ Fretting wear

⁶ Cavitation wear

⁷ Brittle wear

⁸ Impact wear

⁹ Ductile wear

¹⁰ Melting wear

¹¹ Diffusive (Diffusion) wear

۲-۳-۱-۱- سایش ساینده (خراشان)

سایش ساینده زمانی پدید می‌آید که سطح سخت و زیر در مقابل یک سطح نرم‌تر، حرکتی لغزشی داشته و در آن فرو رفته و یکسری شیارهایی را به وجود آورد. در سایش ساینده مواد در برابر نیروی وارد از برخورد و لغزش به صورت خرده ذرات سخت از سطح جدا شده و یا جابجا می‌شوند و یا گاهی به صورت ذرات متورم شده‌ی سخت روی سطح برخورد دیده می‌شوند. مکانیزم سایش ساینده می‌تواند شامل هر دو جریان پلاستیک^۱ و یا شکست ترد^۲ باشد. تحت بعضی از شرایط جریان پلاستیک ممکن است به تنهایی رخ دهد اما در اغلب موارد این دو با یکدیگر اتفاق می‌افتند. مدل‌هایی برای توصیف این دو مکانیزم ارائه شده‌اند که در آنها یک مکانیزم معمولاً به طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد و امکان وقوع مکانیزم دیگر نادیده گرفته می‌شود. در واقع فرض بر این است که امکان وقوع همزمان وجود نخواهد داشت (Hutchings and Shipway, 1992; Carpinteri et al., 2005).

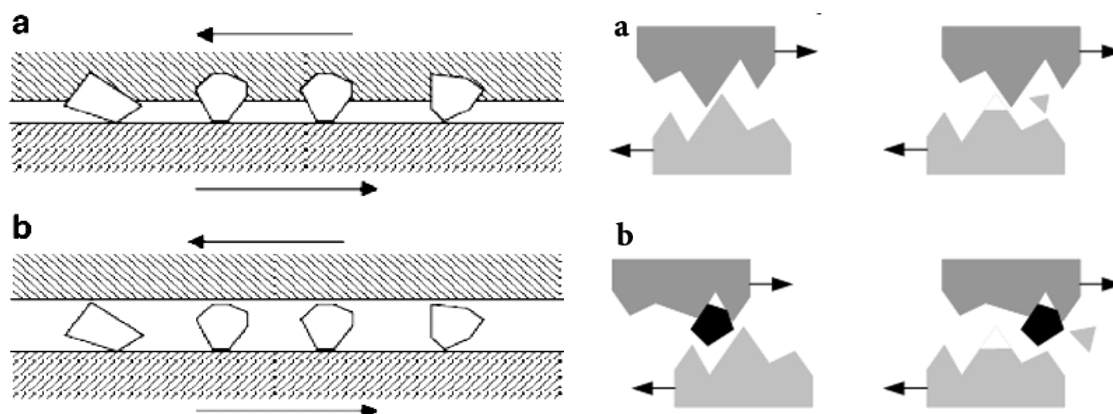
سایش ساینده نیز به دو نوع مختلف طبقه‌بندی می‌شوند. ذرات سایشی که بر اثر مکانیزم مزبور حاصل شده‌اند، به دلیل تورم در سطح برخورد می‌توانند به صورت تراشه‌ای کشیده درآیند. در این حالت سایش ساینده از نوع دو جسمی^۳ است. سایش ساینده می‌تواند در موقعیت‌های متفاوت دیگری نیز پدید آید، برای مثال وقتی ذرات ساینده در فصل مشترک دو سطح در حالت لغزش قرار گرفته و از هر سطح ذراتی را جدا می‌سازد، سایش ساینده در این صورت سه جسمی^۴ نامیده می‌شود. سایش ساینده دو جسمی در صورتی که سطح لغزنده‌ی ماده، سخت‌تر، صاف و صیقلی باشد، پدید نمی‌آید. به همین ترتیب سایش ساینده سه جسمی وقتی که ذرات ساینده کوچک بوده و نرم‌تر از مواد در حال لغزش باشد، مشاهده نگردیده است. در شکل ۲-۸ طبقه‌بندی انواع سایش ساینده در دو تصویر به نمایش درآمده است (Hutchings and Shipway, 1992; Carpinteri et al., 2005).

^۱ Plastic deformation

^۲ Brittle fracture

^۳ Two-body abrasive wear

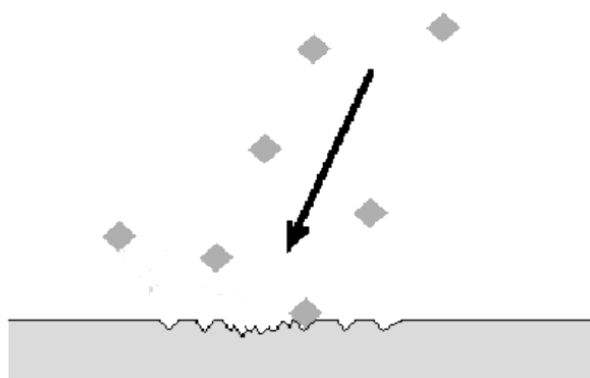
^۴ Three-body abrasive wear



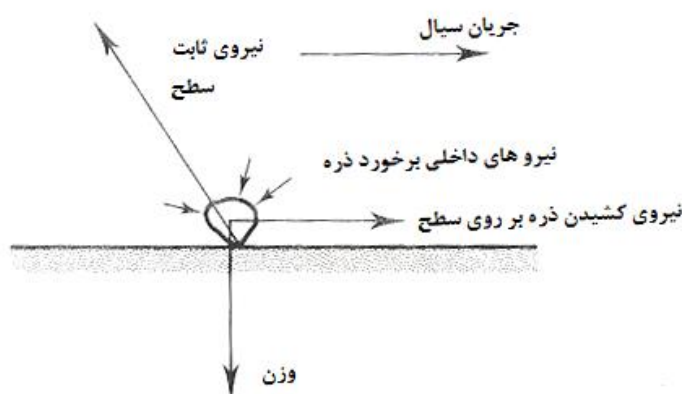
شکل ۲-۸- طبقه‌بندی سایش ساینده (a) سایش ساینده‌ی دو جسمی (b) سایش ساینده‌ی سه جسمی
(Wang et al., 2014; Kopeliovich, 2015)

۲-۳-۱-۲- سایش فرساینده

در بعضی موارد کشیده شدن و حمل ذرات سخت بر روی سطوح به وسیله‌ی نیروی بخار گاز یا جریان سیال سبب ایجاد نوعی از سایش می‌شود که سایش فرساینده نام دارد. فرآیند سایش شناخته شده تحت عنوان فرسایش ذرات جامد هنگامی رخ می‌دهد که ذرات گسسته شده‌ی جامد در طول سطح کشیده می‌شوند (شکل ۲-۹). تفاوت این مکانیزم با سایش ساینده در این است که در آن همزمان چندین نیرو مختلف اصلی بر روی ذره عمل کرده و اثر نیروی سیال به کار رفته برای کشیده شدن و فرسایش حائز اهمیت است. در شکل ۲-۱۰ تأثیر نیروهای مختلف برای ایجاد سایش فرساینده به تصویر کشیده شده است (Hutchings and Shipway, 1992).

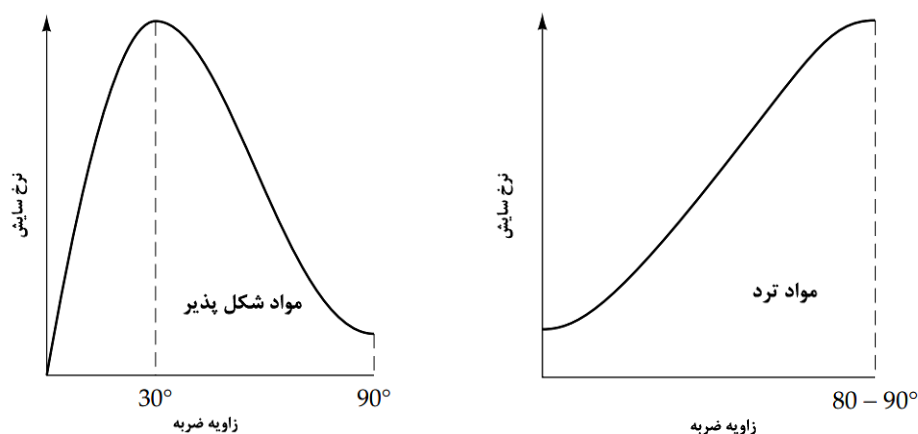


شکل ۲-۹- نمایش شماتیک سایش فرساینده (Praharaj, 2009)



شکل ۲-۱۰- تأثیر نیروهای مختلف روی یک ذره سخت در ایجاد سایش فرساینده (Hutchings and Shipway, 1992)

در سایش فرساینده میزان سایش به سرعت ضربه، تعداد و جرم توده‌ی ذرات مجزا که بر روی سطح کشیده می‌شوند بستگی دارد. در این نوع سایش همانند نوع سایندگی دو مکانیزم شکست ترد و تغییر شکل پلاستیک وجود دارد. رابطه‌ی بین زاویه‌ی ضربه، نرخ سایش و نوع ذره در شکل ۲-۱۱ آمده است. قابل مشاهده است که ماکزیمم زاویه‌ی ضربه‌ای که بیشترین نرخ سایش را در بر دارد برای مواد ترد بین ۸۰ تا ۹۰ درجه و برای مواد شکل‌پذیر ۳۰ درجه است (Stachowiak and Batchelor, 2013).

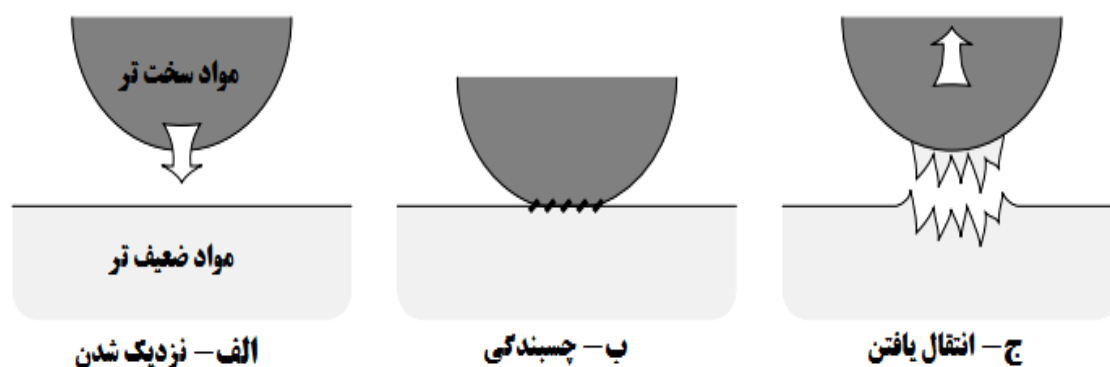


شکل ۲-۱۱- تأثیر زاویه‌ی ضربه روی نرخ سایش برای مواد ترد و شکل‌پذیر (Stachowiak and Batchelor, 2013)

۲-۳-۱-۳- سایش چسبنده (چسبان)

سایش چسبنده در صورتی پدید می‌آید که لغزش موضعی بین دو سطح درگیر موجب گسیختگی اتصالات مزبور و نهایتاً انتقال ماده از یک سطح به سطح دیگر می‌شود. گسیختگی اتصالات در فصل مشترک یا در

حالت حادثه در عمقی از محل اتصال به طور مداوم صورت می‌پذیرد. این فرآیند در حفاری هنگامی که سرعت حفاری بالا باشد رخ می‌دهد. نقش اصلی را در ایجاد این نوع سایش نیروی اصطکاکی ایفا می‌کند. طبق تعریفی که از اصطکاک ارائه شده است، نیروی اصطکاکی از طریق دو منبع نیروی چسبندگی^۱ و نیروی تغییر شکل رخ می‌دهد که در مورد سایش چسبندگی نقش نیروی اصطکاک چسبندگی بیشتر است. هر چند که این دو نوع نیرو کاملاً مستقل از یکدیگر نیستند. شکل ۲-۱۲ فرآیند سایش چسبندگی را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد (Hutchings and Shipway, 1992; Carpinteri et al., 2005).



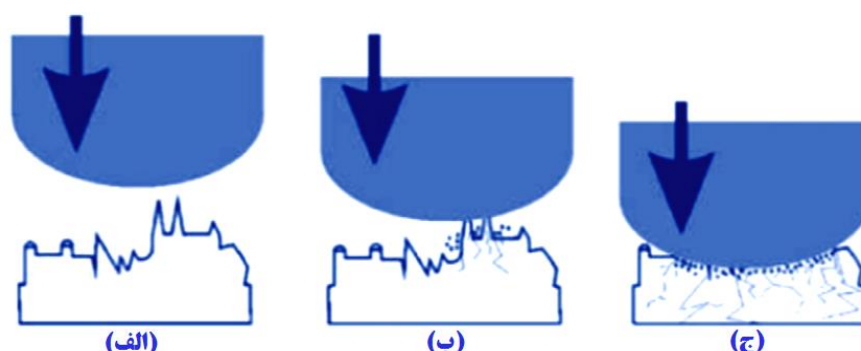
شکل ۲-۱۲- فرآیند سایش چسبندگی (Stachowiak and Batchelor, 2013)

با توجه به توضیحات بیان شده در مورد سایش و مکانیزم‌های مرتبط با آن و اهمیت این موضوع در صنعت معدن‌کاری، سایش و حالت‌های خراب شدن سرمته‌های کاربرد تنگستن و پیش‌بینی آن در شرایط محیطی مختلف و مشخصات سطح سایش یافته از اهمیت بسیار بالای برخوردار است. با توجه به اینکه قسمت‌های مختلف سرمته‌های کاربرد تنگستن سیمانی‌شده در شرایط مختلف مکانیکی، شیمیایی و حرارتی قرار می‌گیرند و طبیعت ساینده‌ی اکثر کانی‌ها می‌تواند باعث سایش و فرسودگی قابل ملاحظه‌ای در آنها شود، لذا در ادامه حالت‌های سایش و خراب شدن سرمته‌های کاربرد تنگستن و پیش‌بینی آن در شرایط محیطی مختلف و مشخصات سطح سایش یافته بیان شده است.

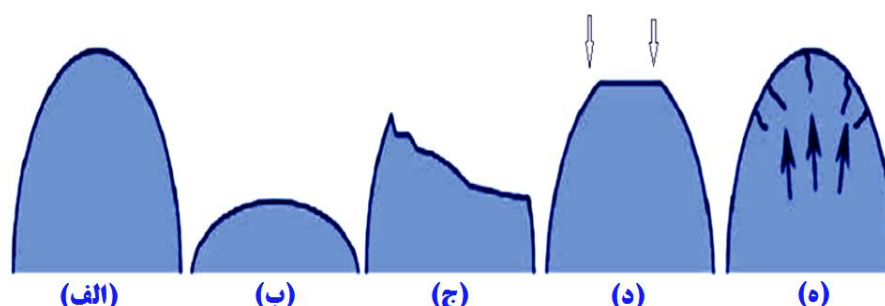
¹ Adhesive force

۲-۳-۲- حالت‌های سایش و خرابی سرمته‌های کاربید تنگستن

سرمته‌های کاربید تنگستن سیمانی شده (WC/Co) در اثر مکانیزم‌های مختلف سایش خراب شده و از کار می‌افتند. سایش سرمته‌ها ممکن است ناشی از ساییدگی، چسبندگی و خوردگی فرسایشی^۱ باشد. اجزای WC/Co به روش‌های مختلفی دچار فرسودگی و خرابی می‌شوند زیرا یک ماده نمی‌تواند در مقابل انواع سایش‌ها و خرابی‌ها مقاوم باشد. به‌طور کلی هر درجه از مواد WC/Co برای شرایط خاصی عملکرد بهتری ارائه می‌کنند. هیچ درجه خاصی از WC/Co وجود ندارد که برای تمامی موارد مورد استفاده بهترین باشد. درجه‌های کاربید تنگستن معمولاً برای شرایط خاصی انتخاب می‌شوند، بنابراین عمر مفید قسمت فرسوده و حالت شکست تا حدودی قابل پیش‌بینی است. شکل‌های ۲-۱۳ و ۲-۱۴ به‌طور شماتیک نحوه‌ی برخورد دکمه‌های سرمته‌های WC/Co با سطح سنگ و انواع مختلف شکستگی‌های آنها را نشان می‌دهند (Katiyar et al., 2016).



شکل ۲-۱۳- نمای شماتیک برخورد دکمه‌های سرمته‌های WC/Co با سنگ و خرد کردن آنها (Gupta et al., 2013)



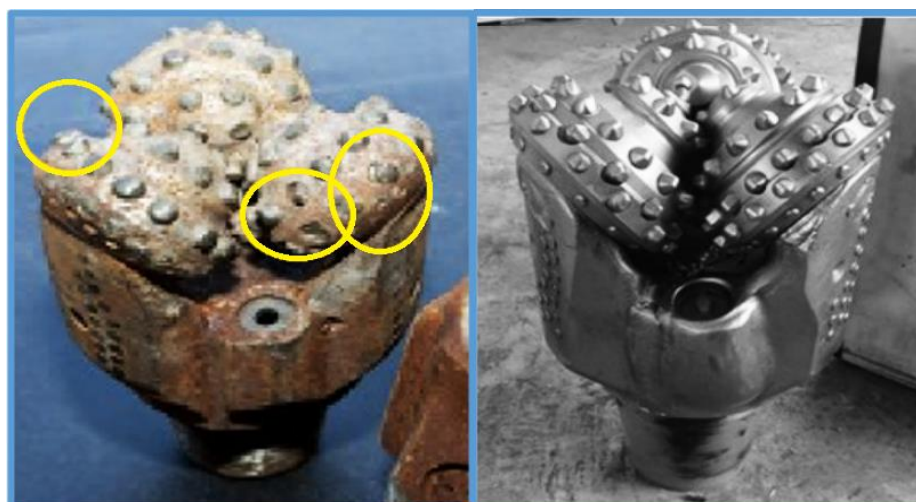
شکل ۲-۱۴- نمای شماتیک انواع شکستگی‌های مختلف دکمه‌های سرمته

الف) دکمه نو؛ ب) سایش تدریجی دکمه‌ها؛ ج) شکستگی فاجعه‌بار؛ د) تمرکز تنش بر لبه‌ها به علت سایش تدریجی؛ ه) شکستگی در مناطق توسعه‌یافته ترک‌ها (Gupta et al., 2013)

^۱ Erosion corrosion

۲-۳-۱- سایش ساینده و خرابی در اثر فرسایش سرمته‌های کاربید تنگستن

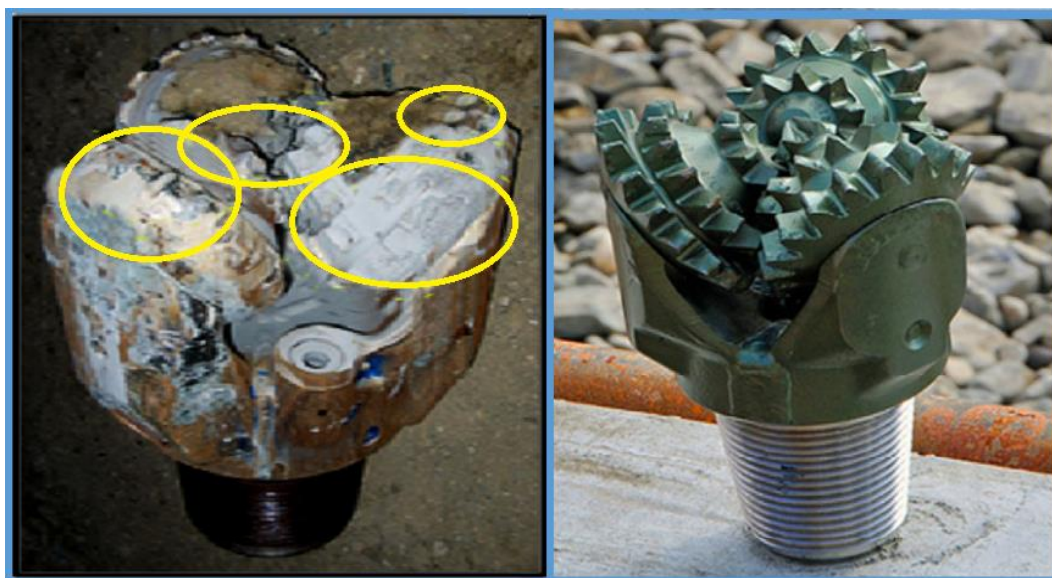
سایش ساینده و فرساینده، فشار مکانیکی زیادی را روی سطح اجزای در حال کار کاربید تنگستن WC/Co اعمال می‌کنند. در نتیجه، خرابی مواد کاربید تنگستن سیمانی‌شده در سطح کاربید به دلیل یک جریان با سرعت بالا از سیال (مایع، هوا) حاوی ذرات بسیار سخت جامد مانند کانی‌ها و سنگ‌ها رخ می‌دهد. این جریان‌ها با سرعت بالا به صورت مستقیم روی سطح سرمته‌های WC/Co برخورد کرده و یا جریان پیدا می‌کنند و باعث شکل‌گیری عمل لغزش یا مالیده شدن روی کل سطوح سرمته کاربید تنگستن می‌شوند. نرخ سایش به میزان فشار جریان و ریخت‌شناسی (مورفولوژی) ذرات ساینده بستگی دارد. همان‌طور که در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است، سایش ناشی از ساییدگی مرسوم‌ترین حالت خرابی سرمته‌های WC/Co است. از آنجایی که این موضوع به معنی خراب شدن کامل یا توقف عملیات نیست، تعویض سرمته بستگی به میزان خرابی دارد. فرسایش به طور مداوم در فشار بالای سیال هنگام عملیات معدنی رخ می‌دهد چون سختی کانی‌ها / سنگ‌ها یا خرده‌ها بسیار زیاد است. در نتیجه این موضوع باعث ایجاد سایش فرساینده زیادی می‌شود. عمل خراش هنگامی رخ می‌دهد که سرمته‌های حفاری در سرعت‌های بسیار بالایی حرکت می‌کنند. با وجود سنگ‌های سخت با لبه‌های نسبتاً تیز، اثر خراش روی دندانه‌های سرمته‌های حفاری رخ می‌دهد (Katiyar et al., 2016).



شکل ۲-۱۵- سایش ساینده در شکل نشان داده شده است، سرعت بالای جریان هوا باعث می‌شود که حرکت لغزش و مالش بیش از حد سرمته‌های کاربید تنگستن، منجر به سایش تدریجی شود (Katiyar et al., 2016)

۲-۲-۳-۲ خوردگی یا حل شدن سرمته‌های کاربید تنگستن

سایش ناشی از خوردگی در نتیجه‌ی ترکیبی از سایش و واکنش‌های الکتروشیمیایی روی سطوحی که در معرض آن است اتفاق می‌افتد. این اثر ممکن است در حضور اتصال‌دهنده‌های فلزی در ماتریس سرمته‌های کاربید تنگستن (کبالت، نیکل) رخ دهد. لازم به ذکر است که کبالت نسبت به نیکل بیشتر مستعد تهاجم شیمیایی است. با از دست دادن فاز اتصال‌دهنده‌ی سرمته (عمدتاً کبالت)، از سطوح WC/Co، پیوندهای مکانیکی که موجب استحکام دانه‌های کاربید شده است از بین می‌روند. نرخ خوردگی به ندرت در دسترس بوده و معمولاً به صورت تجربی اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۱۶-۲ سایش خوردگی فرسایشی روی سطح حل‌شده کاربیدی را نشان می‌دهد (Katiyar et al., 2016).

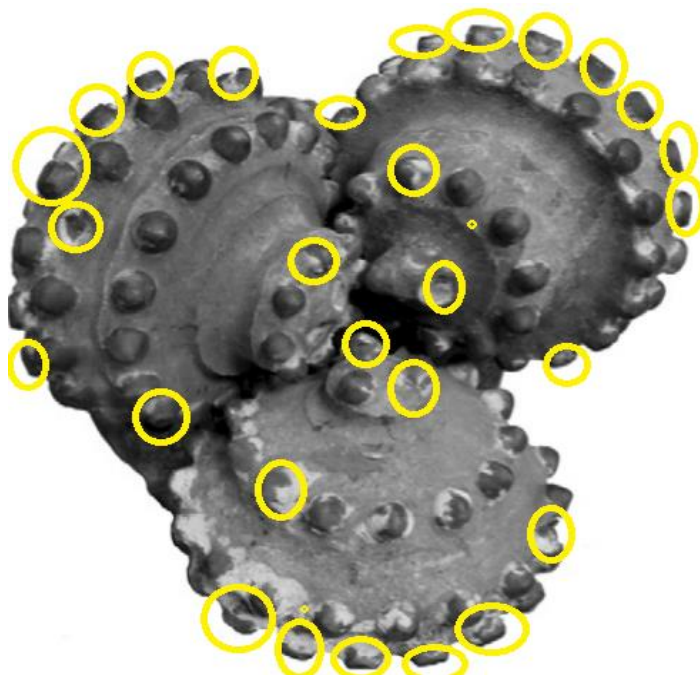


شکل ۱۶-۲- سایش خوردگی فرسایشی روی سطوح حل‌شده WC/Co (Katiyar et al., 2016)

۲-۲-۳-۳ لب‌پر شدن / شکستن اجزای سرمته‌های کاربید تنگستن سیمانی‌شده (WC/Co)

اجزای مواد کاربید تنگستن سیمانی‌شده به جز در دماهای بسیار بالا معمولاً تغییر شکل پلاستیک کمی را قبل از خراب شدن به وسیله‌ی شکست ترد تجربه می‌کنند. سرمته‌های WC/Co با توجه به نوع کاربرد با درجه‌های مختلف خصوصیات مکانیکی (مانند مقاومت کششی و سختی مربوط به خود) مورد استفاده قرار می‌گیرند. هنگامی که اجزای کاربید تنگستن دارای درصد پایینی از عنصر در برگیرنده‌ی کبالت (Co) باشد،

سختی و چقرمگی (مقاومت سنگ در برابر گسترش ترک) در برابر ضربه‌ی آنها به نسبت پایین آمده و باعث خراب شدن زودهنگام در اثر شکست یا لب‌پر شدن سرمته‌ها می‌شود. چقرمگی مواد کاربرد تنگستن باعث بالا رفتن مقاومت آنها در برابر شوک و ضربه‌های مکانیکی می‌شود. معمولاً لبه‌های تیز و محافظت نشده حساس‌ترین مکان‌ها در مقابل لب‌پر شدن هستند. همان‌طور که در شکل ۲-۱۷ مشاهده می‌شود، ترک‌ها معمولاً در نواحی که تمرکز تنش بالا بوده و سیکل‌های بارگذاری نابرابر وجود دارد، رخ می‌دهد. هنگامی که ترک با سرعت از طرفی به طرف دیگر اجزای کاربرد تنگستن گسترش پیدا کند، پدیده‌ی خرابی سرمته در اثر شکسته شدن اتفاق می‌افتد. با توجه به مقاومت فشاری بسیار بالای WC/Co، هر تغییری در هندسه‌ی سرمته و شرایط عملیاتی که منجر به تبدیل تنش‌های کششی به تنش‌های فشاری می‌شود، احتمال خراب شدن در اثر شکسته شدن را پایین می‌آورد. بهبود طراحی اجزای مختلف کاربرد تنگستن باعث کاهش حساسیت آنها در مقابل لب‌پر شدن و شکسته شدن می‌شود زیرا بار وارده روی یک نقطه‌ی خاص متمرکز نمی‌شود. در موارد خاص، لب‌پر شدن یا شکسته شدن سرمته‌ها به‌خاطر زیاد شدن تنش ناشی از فرسودگی زیاد در یک جز کاربرد رخ می‌دهد (Grady, 1999).



شکل ۲-۱۷- لب‌پر شدن / شکستن دکمه‌های سرمته‌های کاربرد تنگستن سیمانی شده (Saeidi et al., 2014)

۲-۳-۲-۴- ترک خوردگی حرارتی سرمته‌های کاربید تنگستن سیمانی شده (WC/Co)

قسمت‌های مختلف سرمته‌های کاربید تنگستن سیمانی شده معمولاً مقاومت نسبتاً کمی در برابر شوک‌های حرارتی دارند. تغییرات غیرمنتظره و ناگهانی در درجه‌ی حرارت معمولاً باعث خراب شدن سرمته در اثر ترک خوردگی حرارتی می‌شود. این‌گونه ترک‌ها در اثر سیکل‌های سرد و گرم شدن و تغییرات دمایی سریع و قابل توجه به وجود می‌آیند. این ترک‌ها معمولاً به شکل یک شبکه‌ی پیچیده‌ای از ترک‌های ریز تقسیم شده و در سراسر ابزار رخ می‌دهند و باعث خرابی ناگهانی سرمته‌ها می‌شوند. با ادامه این روند، ترک‌ها گسترش یافته و منجر به پوسته‌پوسته شدن کاربیدی که بین آنها قرار دارد می‌شوند. مکانیزم‌های سایش معمولاً در میانه‌های سرمته‌های WC رخ خواهند داد درحالی‌که شکستگی و کنده شدن اغلب در لبه‌ها و کناره‌های سرمته رخ می‌دهد. عمر سرمته‌های WC به مقاومت آن در برابر سایش و ضربه بستگی داشته و بهبود عملکرد سرمته‌های WC/Co با توجه به شرایط مورد نیاز در حفاری دورانی مورد نیاز است. در مواد WC/Co، فاز پراکنده‌ی WC با درجه‌ی ذوب بسیار بالا، شکننده بوده و مقاومت کافی را در برابر خستگی حرارتی دارا نیست و فاز ماتریکسی Co سخت بوده و دارای مقاومت بالایی در برابر خستگی حرارتی است. در نتیجه، ترک‌های ناشی از خستگی حرارتی ابتدا در فاز اتصال‌دهنده (ماتریس) شروع شده و در فاز سخت WC گسترش پیدا می‌کنند (Katiyar et al., 2016).

۲-۳-۲-۵- تغییر شکل حرارتی سرمته‌های کاربید تنگستن

سرمته‌های کاربید تنگستن سیمانی شده سختی و مقاومت خود را در دماهای نسبتاً بالا حفظ می‌کنند، ولی هنگامی که دمای عملیات به نقطه‌ی نرم‌شوندگی مواد در برگیرنده‌ی کبالت نزدیک می‌شود، تغییر شکل پلاستیک در آنها روی می‌دهد. در نتیجه مشخصات هندسی ماده‌ی WC/Co تغییر پیدا می‌کند (مانند تغییراتی در ابعاد و شکل) که به خراب شدن ساختار آن ابزار می‌انجامد. هنگام حفاری با سرمته‌های WC/Co درجه حرارت به اندازه‌ای افزایش می‌یابد که برای نرم کردن فلز دربرگیرنده‌ی سرمته‌های WC/Co (بالای ۹۰۰°C) کافی است. دانه‌های بسیار ریز در سطح کاربید تنگستن به‌خاطر لایه‌های نسبتاً نازک ماتریکس در برگیرنده‌ی قفل می‌شوند. از آنجایی که اندازه و شکل حفره به مرور زمان افزایش می‌یابد،

مقاومت کلی ماده WC/Co پایین آمده و باعث ضربه زدن به کل ماده می‌شود. در جایی که تنش‌های معمول عملیاتی باعث شکست مکانیکی سرمته‌ها در داخل حفره می‌شود این موضوع می‌تواند به خراب شدن مواد WC/Co منجر شود (Katiyar et al., 2016).

۲-۳-۳- پایش وضعیت سایش ابزار

عمر ابزار نشان‌دهنده‌ی عمر مؤثر و مفید ابزار است که بر حسب مدت زمان، از لحظه شروع برش تا یک نقطه پایانی که از روی معیار از کارافتادگی مشخص می‌شود بیان می‌گردد. اگر ابزار بعد از عمر مفید آن تعویض نگردد، ممکن است قطعه کار از تلورانس مجاز خارج شده و یا ابزار شکسته شود که این امر موجب آسیب به قطعه و ماشین ابزار می‌شود. از طرف دیگر اگر ابزار قبل از رسیدن به عمر واقعی آن تعویض شود هزینه‌ای غیرضروری به ماشین‌کاری اضافه خواهد شد. پایش وضعیت ابزار توسط انسان، همواره دارای خطا است. این خطاها می‌تواند موجب آسیب قابل‌توجهی به قطعه و ماشین‌ابزار شود. بنابراین نیاز به سیستمی برای پایش وضعیت سایش ابزار با قابلیت اطمینان بالا می‌باشد. تکنیک‌های پایش وضعیت ابزار به دو دسته‌ی اصلی روش‌های مستقیم و روش‌های غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. روش‌های مستقیم آنهایی هستند که اثراتی که به طور مستقیم توسط سایش ابزار ایجاد می‌شوند را تحلیل می‌نمایند؛ درحالی‌که روش‌های غیرمستقیم روش‌هایی بر اساس اندازه‌گیری پارامترهایی هستند که به عنوان نتیجه فرعی سایش ابزار تغییر می‌کنند (Teti et al., 2010). در روش‌های مستقیم اتصالات خردشده و دکمه‌های شکسته یا کنده شده کاربرد تنگستن با استفاده از ترسیم پروفایل سه‌بعدی سطح، بررسی مستقیم چشمی، میکروسکوپ اسکن الکترونی روبشی^۱، بینایی ماشین^۲ (از دوربین‌های دیجیتال، دوربین‌های هوشمند و نرم‌افزارهای پردازش تصویر^۳ برای این کار استفاده می‌کنند) و میکروسکوپ‌های نوری مورد مطالعه قرار می‌گیرند. در روش‌های غیرمستقیم، اندازه‌گیری پارامترهای عملیاتی، فیزیکی، مکانیکی و ساختاری و محیطی (توده سنگ) سنگ منجر به تعیین درجه‌ی سایش خواهد شد. استفاده از هر یک از روش‌های ذکر شده با توجه به نوع کاربرد آن متفاوت است.

^۱ Scanning Electron Microscope (SEM)

^۲ Machine vision

^۳ Image processing

۲-۴- پارامترهای مؤثر در سایش سرمته‌های حفاری

به طور کلی پارامترهای مؤثر در سایش سرمته‌های حفاری را می‌توان در سه بخش مشخصات سنگ، پارامترهای اجرایی و پارامترهای مدیریتی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. از میان این پارامترها، پارامترهای اجرایی به عنوان پارامترهای قابل کنترل و یا پارامترهای وابسته و پارامترهای مربوط به مشخصات سنگ، به عنوان پارامترهای غیر قابل کنترل یا پارامترهای مستقل در فرایند سایش سرمته‌های حفاری مطرح می‌باشند. هر کدام از این دسته پارامترها به نحو خاصی در سایش سرمته‌های حفاری تأثیرگذار می‌باشند. شکل ۲-۱۸ پارامترهای مؤثر در سایش سرمته‌های حفاری را به طور خلاصه نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۸- پارامترهای مؤثر در سایش سرمته‌های حفاری

۲-۴-۱- مشخصات سنگ

مشخصات سنگ یکی از پارامترهای مؤثر در سایش سرمته‌های حفاری می‌باشد. با توجه به گستردگی مشخصات سنگ به منظور سهولت در تجزیه و تحلیل و مطالعه‌ی این پارامترها، می‌توان آن‌ها را در سه گروه مشخصات فیزیکی، مکانیکی، ساختاری و محیطی سنگ تقسیم‌بندی کرد. در این بخش برای بررسی پارامترهای مؤثر در سایش سرمته‌های حفاری، هر یک از مشخصات مذکور مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرند.

۲-۴-۱-۱- مشخصات فیزیکی سنگ‌ها

مشخصات فیزیکی سنگ‌ها در تحلیل سایش سرمته‌های حفاری از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌ها، چگالی، تخلخل و خصوصیات بافتی سنگ است.

الف- چگالی

یکی از خصوصیات فیزیکی، چگالی سنگ‌هاست که می‌توان آن را نسبت جرم مخصوص سنگ به جرم مخصوص آب یا نسبت وزن مخصوص سنگ به وزن مخصوص آب دانست. چگالی تابع منافذ، درزه و شکاف‌ها و سایر فضاها و باز موجود در سنگ است، به طوری که چگالی یک نمونه مشخص سنگ، با افزایش عمق و در نتیجه افزایش فشار سنگ‌های فوقانی و بسته شدن درزه و ترک‌های موجود در سنگ بیشتر می‌شود. با توجه به اینکه چگالی دانه‌ای اکثر کانی‌ها نزدیک به هم است، اختلاف در چگالی سنگ‌ها بیشتر مربوط به تخلخل آن‌هاست. بنابراین همبستگی زیادی بین چگالی و تخلخل وجود دارد (فهیمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰).

پارامتر چگالی فاکتور تعیین‌کننده‌ای برای سایش به حساب نمی‌آید و چون مقدار آن به نسبت پوکی و تخلخل وابسته است؛ بنابراین عامل فرعی در افزایش یا کاهش سایش به شمار می‌رود. سنگی با چگالی کمتر عمدتاً تخلخل بالاتری دارد که این امر کاهش میزان سایش را در بر خواهد داشت.

ب- تخلخل

تخلخل عبارت است از نسبت بین حجم کل منافذ به حجم کل که با درصد مشخص می‌شود. تخلخل را می‌توان به صورت خلل و فرج و یا حفره‌های مرتبط و مجزا در سنگ‌ها دید. این حفره‌ها ممکن است در زمان تشکیل سنگ (حفره‌های اولیه) و یا در نتیجه فرآیندهایی مثل هوازدگی، دگرسانی و یا تبلور مجدد (تخلخل ثانویه) به وجود آمده باشند. بنابراین مطالعه‌ی تخلخل اهمیت زیادی در تعیین خواص مهندسی سنگ دارد؛ به طوری که هر چه سنگ متخلخل‌تر باشد مقاومت مکانیکی کمتری خواهد داشت.

پارامتر تخلخل بر سایش در سنگ‌هایی نظیر ماسه‌سنگ‌ها تأثیر قابل توجهی دارد. افزایش تخلخل در این موارد باعث کاهش نرخ سایش و افزایش عمر سرمته خواهد شد.

ج- خصوصیات بافتی

بافت یکی از فاکتورهای مهم در تعیین رفتار مهندسی سنگ است که خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ و سایش سرمته‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کیفیت و کمیت بافت سنگ به منشأ تشکیل و فرآیندهای زمین‌شناسی اعمال شده در طول عمر سنگ بستگی دارد. اندازه، جهت، شکل، فشردگی و نسبت دانه‌ها، ضریب بافت، سیمان و درجه‌ی سیمانی شدن، محتوای کانی‌ها و نوع و ماتریس مواد، به عنوان خصوصیات بافتی سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرند (Hoseinie et al., 2009). تأثیرات بافت سنگ در سایش غیر قابل انکار است. اندازه‌ی ذرات و زاویه‌دار بودن آنها در میزان سایش اهمیت دارد. ذرات گوشه‌دار سایش بیشتری نسبت به ذرات کروی به همراه دارند و هرچه اندازه دانه‌ها بیشتر باشد میزان سایش بیشتر است. زاویه‌داری و تیز بودن دانه‌ها نیز می‌تواند سایش بیشتری را ایجاد کند.

نوع و درجه‌ی سیمانی شدن (چسبندگی): نیروی به هم چسبی، حاصل نیروی جاذبه بین مولکول‌های یک جسم یا ماده است. به عبارت دیگر نیروی به هم چسبی یک نیروی درون‌زاست و در مقابل نیروهای خارجی جدا کننده مولکول‌ها، جسم را مقاوم می‌کند. ماتریس‌های سنگ‌های مختلف عمدتاً با توجه به منشأ ساخت و فرایندهای درگیر در شکل‌گیری و نیز عمر آنها متفاوت می‌باشند. ماتریس سنگ می‌تواند هم‌جنس یا غیر هم‌جنس دانه‌های سنگی باشد. در انواع سنگ‌ها عموماً ماتریس سنگ‌ها شامل گونه‌های سیلیسی، آهکی و رسی می‌باشد (اصانلو، ۱۳۸۶). شاید اثر چسبندگی در تحلیل سایش محسوس نباشد، اما چسبندگی قوی بین ذرات یک سنگ موجب افزایش مقاومت سنگ شده که نفوذ سرمته در سنگ را دشوار خواهد کرد. معمولاً سنگ‌هایی که دارای نیروی چسبندگی بالاتری هستند خاصیت ساینده‌ی بالاتری دارند بنابراین افزایش نرخ چسبندگی می‌تواند منجر به افزایش سایش شود.

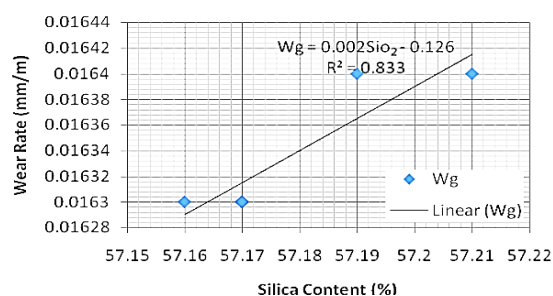
محتوای کانی‌ها: هرچه تعداد کانی‌های تشکیل‌دهنده بین سنگ‌ها بیشتر باشد سایش بیشتری اتفاق خواهد افتاد زیرا تخلخل سنگ‌ها پایین‌تر آمده و این امر موجب افزایش میزان سایش خواهد شد. به منظور تعیین عناصر تشکیل‌دهنده نمونه‌ها و بررسی تأثیر کانی‌های سخت آنالیز شیمیایی مورد نیاز است. در میان کانی‌های سخت، محتوای سیلیس (SiO_2) و آلومینا (Al_2O_3) به عنوان ساینده‌ترین عناصر تشکیل‌دهنده سنگ شناخته می‌شوند. همچنین مطالعه‌ی مقاطع نازک سنگ به کمک میکروسکوپ، اطلاعات زیادی از ویژگی‌های مینرالوژیکی سنگ نشان می‌دهد که میزان درصد کوارتز محتوی معادل، یکی از حساس‌ترین و پرکاربردترین پارامترهای مربوط به ساینده‌گی سنگ‌ها می‌باشد. این شاخص نشان خواهد داد که هر کانی با توجه به سختی مقیاس موس چه درصدی از ساینده‌گی نسبت به کوارتز را ایجاد می‌کند (Plinninger, 2008).

با توجه به توضیحات بیان شده، چگالی، تخلخل، کوارتز محتوی معادل، محتوای سیلیس، محتوای آلومینا، اندازه و شکل دانه و نوع و درجه سیمانی به نمایندگی از مهم‌ترین مشخصات فیزیکی سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. جدول ۱-۲ برخی از مشخصات فیزیکی سنگ‌ها که توسط محققین در زمینه‌ی سایش سرمته‌های حفاری مطالعه شده‌اند را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در اکثر این تحقیقات رابطه‌ی ریاضی خاصی بین مشخصات فیزیکی و سایش سرمته‌های حفاری ارائه نشده است و تنها به ذکر بااهمیت بودن این پارامتر در فرایند حفاری اکتفا شده است. مطابق نتایج ارائه شده در این جدول می‌توان به این نکته اشاره کرد که از میان پارامترهای مطالعه شده، چهار پارامتر کوارتز محتوی معادل، محتوای سیلیس، اندازه و شکل دانه‌ها و بافت سنگ در اکثر مطالعات مورد بررسی قرار گرفته و یا اهمیت آن‌ها مورد تاکید بوده است.

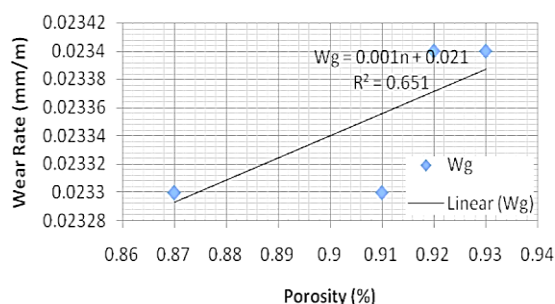
شکل‌های ۱۹-۲ تا ۴۰-۲ ارتباط میان برخی از پارامترهای فیزیکی سنگ‌ها با نرخ سایش و عمر سرمته را نشان می‌دهند.

جدول ۱-۲- مشخصات فیزیکی مطالعه شده توسط محققین

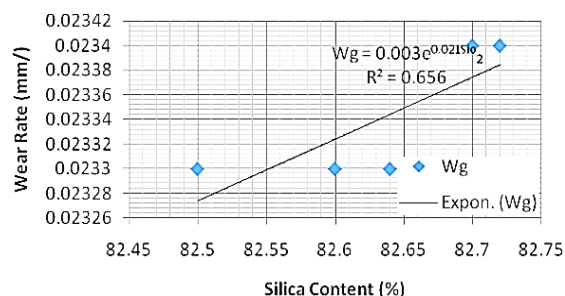
مشخصات فیزیکی سنگ							منابع
بافت	نوع و درجه سیمانی شدن	اندازه و شکل دانه	محتوای آلومینا	محتوای سیلیس	کوارتز محتوی معادل	چگالی تخلخل	
•					•		Larsen-Basse and Koyanagi 1979
•							Howarth and Rowlands 1987
		•					Miller and Ball 1990
•					•		Xuefeng and Shifeng 1994
•		•		•	•		Ersoy and Waller 1995 a
					•		Plinninger et al. 2002 a
			•	•			Plinninger et al. 2002 b
			•	•	•		Adebayo and Okewale 2007
			•	•	•		Plinninger 2008
•		•		•	•	•	Adebayo 2011
				•	•		Adebayo and Akeju 2012 a
				•	•		Adebayo and Akeju 2012 b
			•	•			Angseryd et al. 2013
•		•			•		Adebayo and Adetula 2013
			•				Yahiaoui et al. 2015
•				•	•		Adebayo and Akande 2015
		•		•	•	•	Babatunde 2015
		•			•		Saeidi et al. 2015
						•	Dogruoz et al. 2016
							Wang and Li 2018
						•	Adebayo 2019
		•			•		Piri et al. 2020
				•			Shankar et al. 2020
				•	•	•	Majeed et al. 2020
						•	Capik and Batmunkh 2021



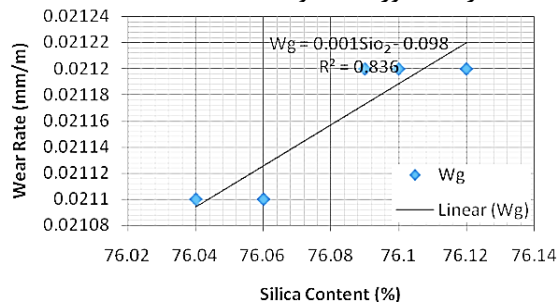
شکل ۲-۲۰- رابطه‌ی بین نرخ سایش با محتوای سیلیس در گرانیت فلدسپات (Adebayo, 2011)



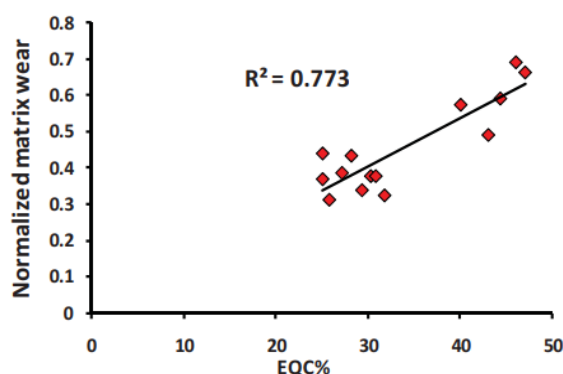
شکل ۲-۲۲- رابطه‌ی بین نرخ سایش با تخلخل در گرانیت هورنبلند بیوتیت (Adebayo, 2011)



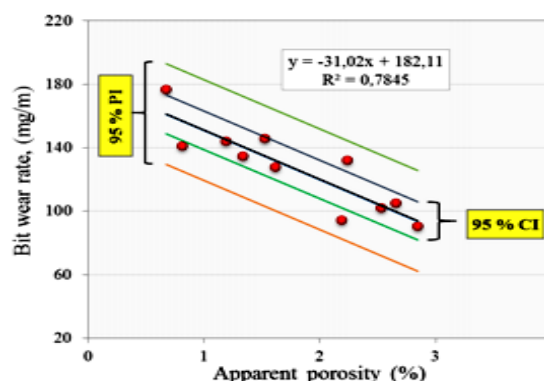
شکل ۲-۱۹- رابطه‌ی بین نرخ سایش با محتوای سیلیس در گرانیت هورنبلند بیوتیت (Adebayo, 2011)



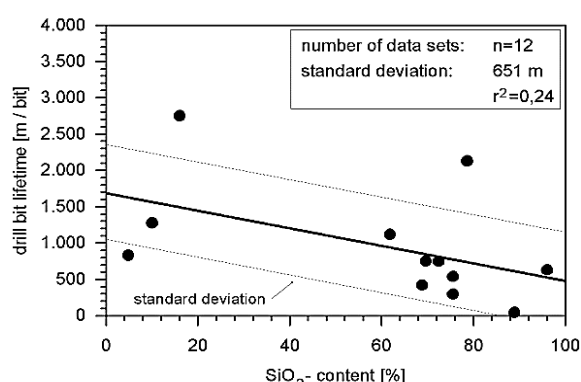
شکل ۲-۲۱- رابطه‌ی بین نرخ سایش با محتوای سیلیس در گرانیت بیوتیت درشت (Adebayo, 2011)



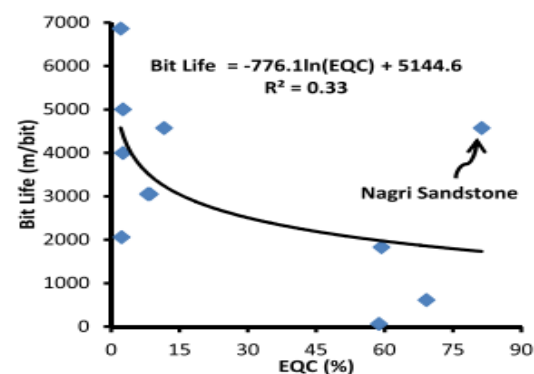
شکل ۲-۲۴- رابطه‌ی بین کوارتز محتوی معادل و سایش ماتریس سرمته (Saeidi et al., 2015)



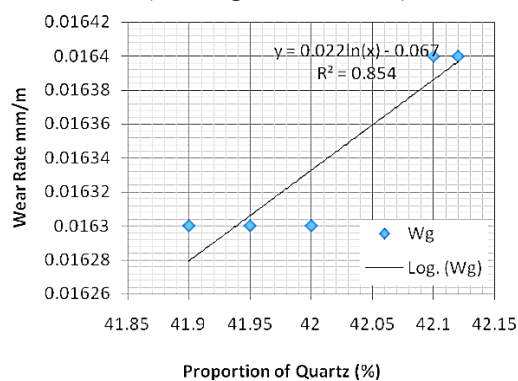
شکل ۲-۲۳- رابطه‌ی بین تخلخل و سایش سرمته (Capik and Batmunkh, 2021)



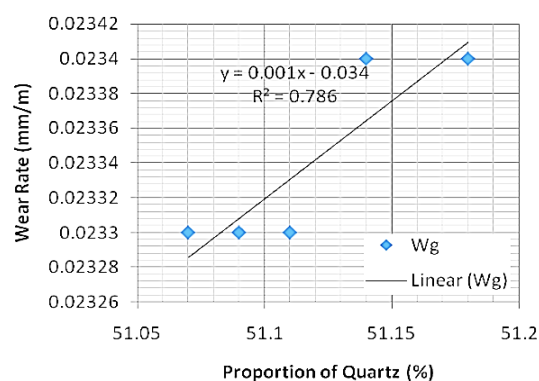
شکل ۲-۲۶- رابطه‌ی بین عمر سرمته با محتوای سیلیس (Plinninger et al., 2002a)



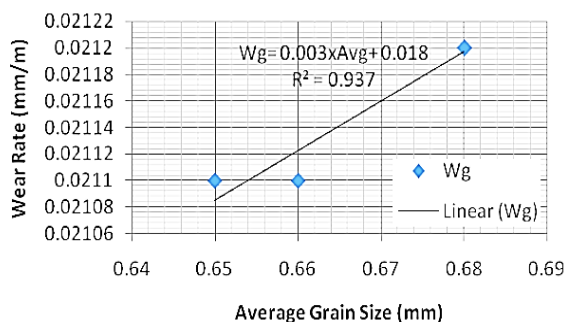
شکل ۲-۲۵- رابطه‌ی بین عمر سرمته با کوارتز محتوی معادل (Majeed et al., 2020)



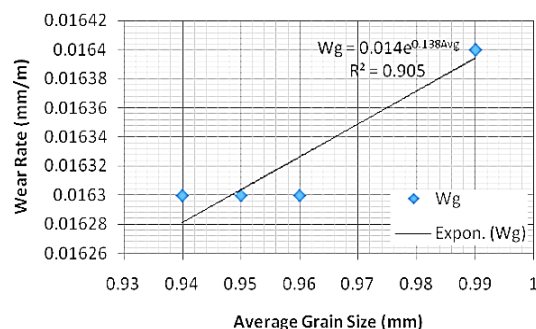
شکل ۲-۲۸- رابطه‌ی بین نرخ سایش با درصد کوارتز در گرانیت فلدسپات (Adebayo, 2011)



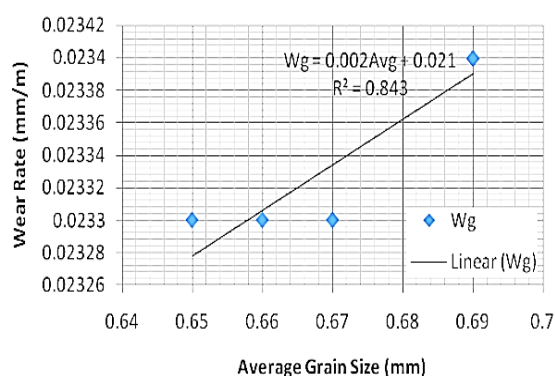
شکل ۲-۲۷- رابطه‌ی بین نرخ سایش با درصد کوارتز در گرانیت هورنبلند بیوتیت (Adebayo, 2011)



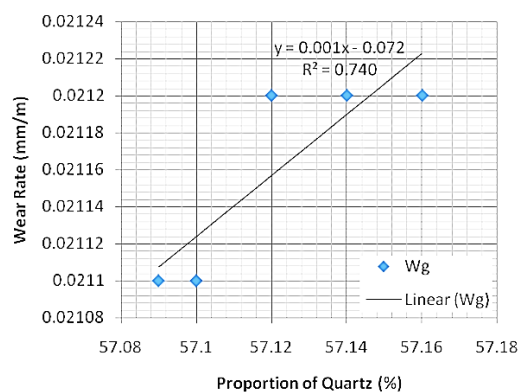
شکل ۲-۳۰- رابطه‌ی بین نرخ سایش با میانگین اندازه دانه در گرانیت بیوتیت درشت (Adebayo, 2011)



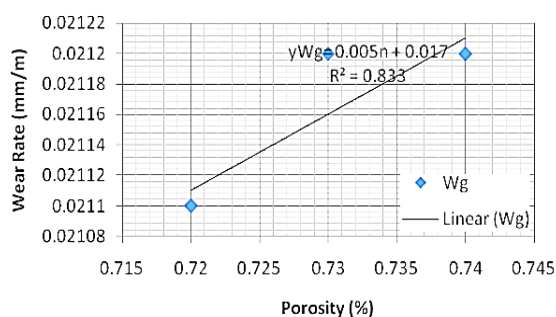
شکل ۲-۲۹- رابطه‌ی بین نرخ سایش با میانگین اندازه دانه در گرانیت فلدسپات (Adebayo, 2011)



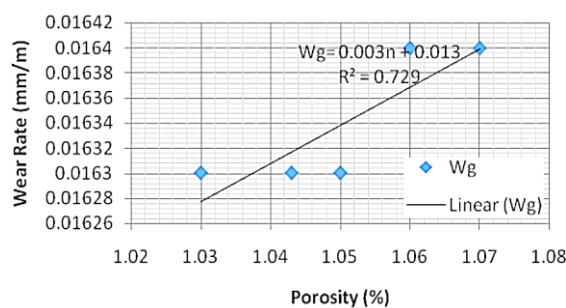
شکل ۲-۳۲- رابطه‌ی بین نرخ سایش با میانگین اندازه دانه در گرانیت هورنبلند بیوتیت (Adebayo, 2011)



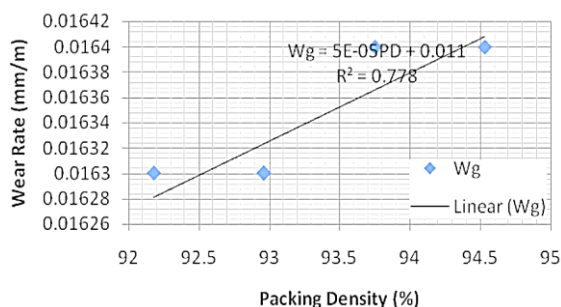
شکل ۲-۳۱- رابطه‌ی بین نرخ سایش با درصد کوارتز در گرانیت بیوتیت درشت (Adebayo, 2011)



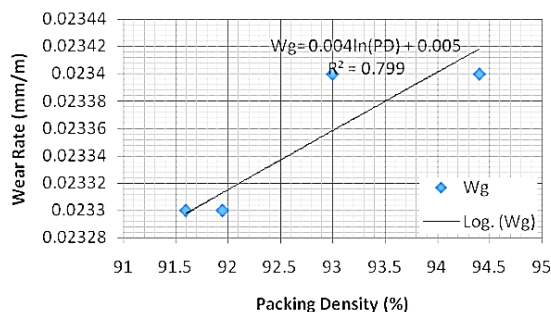
شکل ۲-۳۴- رابطه‌ی بین نرخ سایش با تخلخل در گرانیت بیوتیت درشت (Adebayo, 2011)



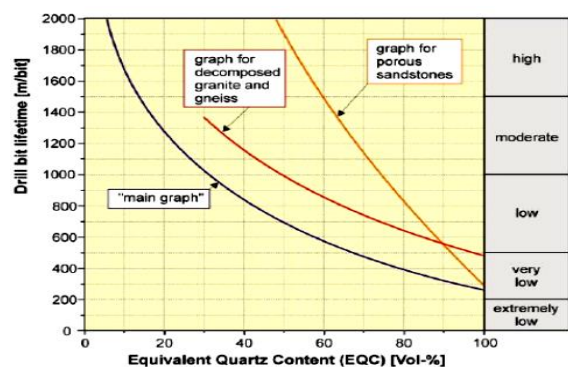
شکل ۲-۳۳- رابطه‌ی بین نرخ سایش با تخلخل در گرانیت فلدسپات (Adebayo, 2011)



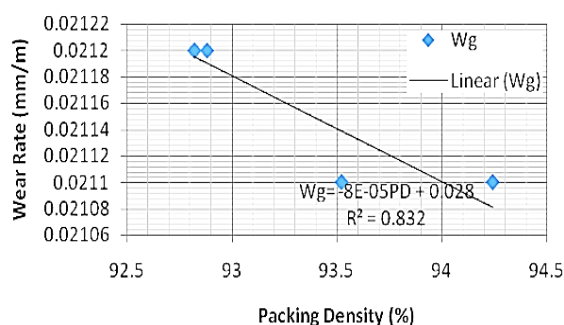
شکل ۲-۳۶- رابطه‌ی بین نرخ سایش با چگالی انباشتگی در گرانیت فلدسپات (Adebayo, 2011)



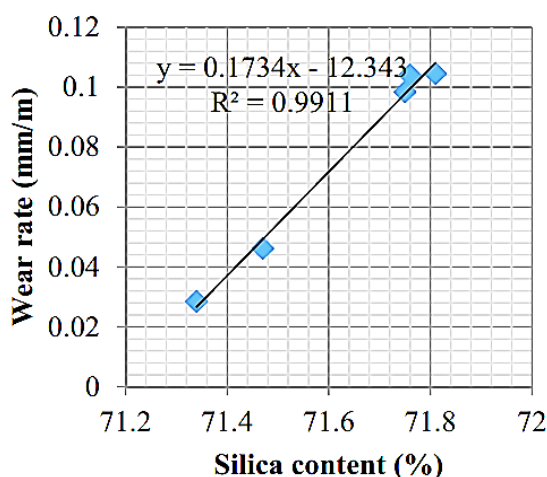
شکل ۲-۳۵- رابطه‌ی بین نرخ سایش با چگالی انباشتگی در گرانیت هورنبلند بیوتیت (Adebayo, 2011)



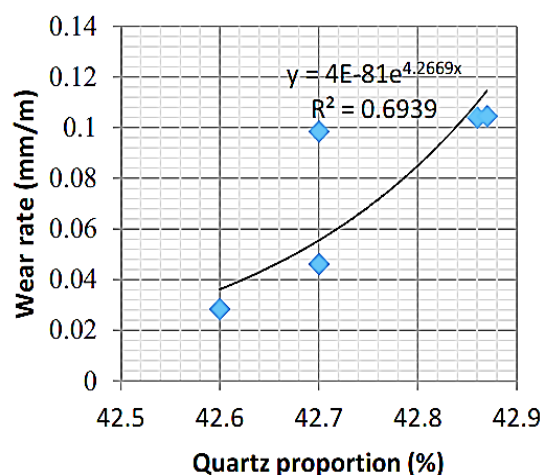
شکل ۲-۳۸- رابطه‌ی بین کوارتز محتوی معادل و عمر سرمته (Plinninger, 2008)



شکل ۲-۳۷- رابطه‌ی بین نرخ سایش با چگالی انباشتگی در گرانیت بیوتیت درشت (Adebayo, 2011)



شکل ۲-۴۰- رابطه‌ی بین نرخ سایش با محتوای سیلیس
(Adebayo and Akande, 2015)



شکل ۲-۳۹- رابطه‌ی بین نرخ سایش با درصد کوارتز
(Adebayo and Akande, 2015)

پس از بررسی مشخصات فیزیکی سنگ‌ها، شرایط هوازدهی و دگرسانی سنگ‌ها نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. ترکیب کانی‌شناسی و میزان پیشرفت هوازدهی و دگرسانی سنگ‌ها بر فرسایش‌پذیری تشکیلات زمین‌شناسی و خصوصیات مکانیکی ذاتی آنها تاثیرگذار است. هوازدهی به عنوان یک فرایند تابع زمان، با تخریب ساختار سنگ، کیفیت ماده سنگ را تا مرحله خاک‌شدگی کاهش داده و مشخصات اصلی، خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی سنگ را دچار تغییر خواهد کرد. این عمل به وسیله تابش نور خورشیدی، رطوبت، آب، باد و عناصر اقلیمی صورت می‌گیرد. بروز هوازدهی در سنگ باعث تجزیه شیمیایی و فیزیکی کانی‌ها، تخریب مرز دانه‌ها و کاهش به هم پیوستگی ساختار سنگ می‌شود که کاهش مقاومت سنگ را به همراه دارد. در نهایت با توجه به کاهش مقاومت و نیز تخریب مرز دانه‌های سنگ، از میزان ساینده‌ی آن کاسته خواهد شد.

۲-۴-۱-۲- مشخصات مکانیکی سنگ‌ها

خواص مکانیکی سنگ‌ها شاخص میزان مقاومت سنگ‌ها در مقابل نیروهای وارده، بدون ایجاد شکست یا تغییر در سنگ است. از مهم‌ترین خواص مکانیکی می‌توان به مقاومت، سختی و ساینده‌ی سنگ‌ها اشاره کرد. این خصوصیات تحلیل دقیقی را نسبت به کارایی دستگاه حفاری نشان می‌دهند.

الف - پارامترهای مقاومتی سنگ

از مهم‌ترین خواص مکانیکی سنگ‌ها می‌توان به ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری سنگ اشاره کرد. مقاومت، میزان پایداری سنگ در مقابل تنش‌های خارجی است. این تنش‌ها ممکن است در حالت سکون (استاتیک) یا متحرک (دینامیک) روی سنگ تأثیرگذار باشند. تنش‌ها ممکن است از نوع فشاری، کششی، خمشی و یا برشی باشند. مقاومت فشاری را می‌توان به عنوان مهم‌ترین و پرکاربردترین ویژگی مکانیکی سنگ‌ها دانست. به دلیل اهمیت و نقش مقاومت در رفتارهای مهندسی سنگ، مقاومت فشاری در اکثر طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ و در کاربردهای گسترده‌ی مکانیک سنگ وارد شده و جز لاینفک قضاوت‌های مهندسی در مورد یک سنگ و یک توده سنگ می‌باشد. به طور طبیعی سنگ و خاک در مقابل تنش‌های فشاری مقاومت بیشتری نشان می‌دهند. نیروی بین مولکولی ذرات تشکیل‌دهنده، نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ و شرایط استقرار آنها، درجه‌ی هوازدگی، درزه و شکاف در سنگ‌ها، الاستیسیته و پلاستیسیته و ناهمسانگردی سنگ‌ها و جهت و میزان نیروهای وارده به سنگ‌ها بر مقاومت فشاری سنگ‌ها تأثیرگذار می‌باشند. مقاومت کششی در واقع ماکزیمم تنش کششی است که یک سنگ می‌تواند تحمل کند. دو پارامتر مقاومت فشاری و کششی از جمله مهم‌ترین پارامترهایی هستند که در بیشتر مطالعات در زمینه‌ی سایش سرمته‌های حفاری مورد توجه قرار گرفته‌اند.

علاوه بر این دو پارامتر، پارامترهای مقاومتی دیگری نظیر شاخص مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت ضربه‌ای، مقاومت خمشی و مقاومت برشی نیز وجود دارند که برخی از آنها در زمینه‌ی سایش سرمته‌های حفاری مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. جدول ۲-۲ مطالعات محققین در ارتباط با پارامترهای مقاومتی سنگ به منظور بررسی و ارزیابی سایش سرمته‌های حفاری را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در اکثر تحقیقات فقط به ذکر اهمیت این پارامترها در فرآیند حفاری اشاره شده است.

مطابق نتایج ارائه شده در این جدول می‌توان به این نکته اشاره کرد که از میان پارامترهای مطالعه شده، دو پارامتر مقاومت فشاری و مقاومت کششی در اکثر مطالعات مورد بررسی قرار گرفته و یا

اهمیت آن‌ها مورد تاکید بوده است. شکل‌های ۲-۴۱ تا ۲-۴۴ ارتباط میان برخی از این پارامترها با نرخ سایش و عمر سرمته را نشان می‌دهند.

جدول ۲-۲- پارامترهای مقاومتی مطالعه شده توسط محققین

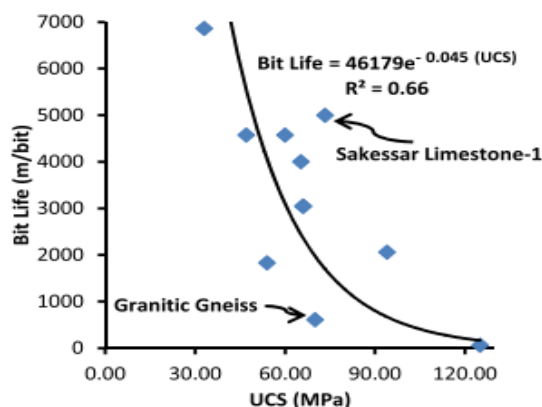
پارامترهای مقاومتی سنگ						منابع
مقاومت ضربه‌ای	مقاومت برشی	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	مقاومت خمشی	مقاومت بار نقطه‌ای	
•						Montgomery 1968
•						Bailey and Perrott 1974
		•				Miller and Ball 1990
		•				Miller and Ball 1991
	•					Xuefeng and Shifeng 1994
•		•	•			Ersay and Waller 1995 b
		•				Plinninger et al. 2002 a
		•	•		•	Adebayo and Okewale 2007
		•	•		•	Adebayo et al. 2010
		•				Rashidi et al. 2010 b
		•	•			Adebayo and Akeju 2012 a
		•	•			Adebayo and Akeju 2012 b
		•	•		•	Adebayo and Bello 2012
•						Olovsjö et al. 2013
		•	•		•	Adebayo and Adetula 2013
		•				Adebayo and Akande 2015
		•			•	Babatunde 2015
		•				Saeidi et al. 2015
	•	•	•			Dogruoz et al. 2016
		•	•			Karasawa et al. 2016
		•				Sahoo and Choudhary 2017
		•				Reitz and de Freitas 2018
		•				Ivanicová et al. 2018
		•	•		•	Adebayo 2019
		•	•			Piri et al. 2020
		•				Shankar et al. 2020
		•				Šporin 2020
		•	•			Majeed et al. 2020
		•	•		•	Capik and Batmunkh 2021
		•	•		•	Capik and Yilmaz 2021

ب- سختی

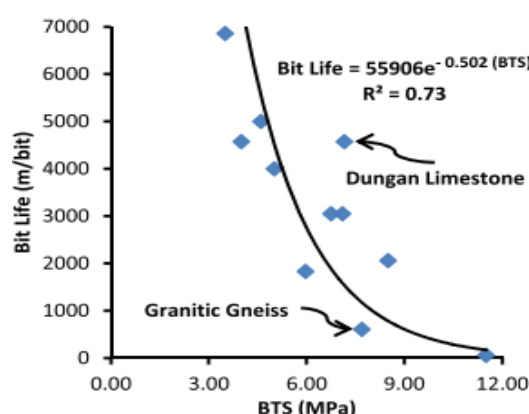
سختی، مقاومت سنگ در برابر نیروی ایجاد شده در اثر تماس، سایش و یا ضربه جسم دیگر بر آن می‌باشد.

وقتی نیرو به شکل تدریجی یا ناگهانی به سنگ وارد شود، سختی به دو صورت استاتیکی و دینامیکی

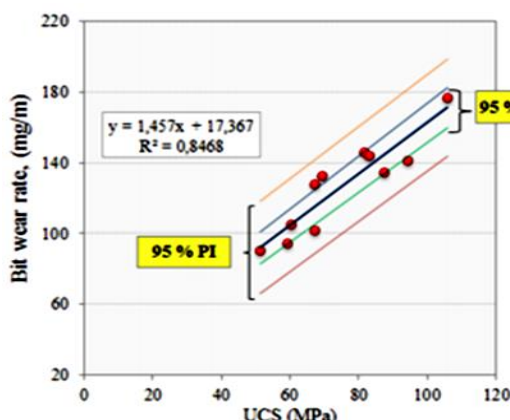
تعریف می‌شود. در حالت کلی، سختی استاتیکی و سختی دینامیکی سنگ‌ها، لزوماً با هم برابر نیستند. سختی کانی‌ها به‌طور کیفی نسبت به یکدیگر تعریف شده و بر پایه جدول استاندارد موس^۱ تعیین می‌شود.



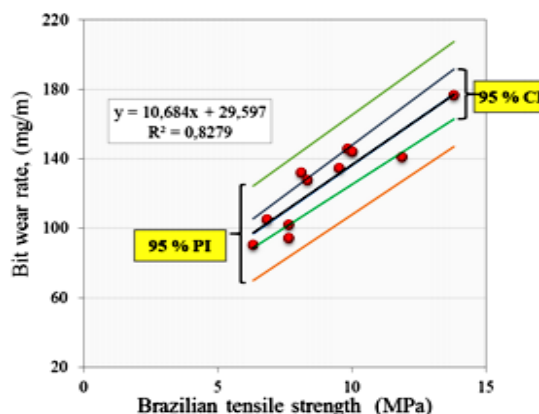
شکل ۲-۴۲- رابطه‌ی میان عمر سرمته و مقاومت فشاری (Majeed et al., 2020)



شکل ۲-۴۱- رابطه‌ی میان عمر سرمته و مقاومت کششی برزیلی (Majeed et al., 2020)



شکل ۲-۴۴- رابطه‌ی میان نرخ سایش و مقاومت فشاری (Capik and Batmunkh, 2021)



شکل ۲-۴۳- رابطه‌ی میان نرخ سایش و مقاومت کششی برزیلی (Capik and Batmunkh, 2021)

سختی استاتیکی سنگ‌ها مانند سایر جامدات، با ایجاد خراش یا نفوذ تدریجی ابزار آزمایش (جسم دیگر) تعیین می‌شود. افزون بر روش موس، آزمایش‌های براینل^۲ (نفوذ نوک نیمکره‌ای فولادی در نمونه تحت آزمایش)، ویکرز^۳ (نفوذ الماس هرمی شکل)، نوپ^۴ و راکول^۵ (نفوذ نوک‌تیز در اثر اعمال دو نوع بار به صورت متوالی) برای تعیین سختی استاتیکی، به‌ویژه در مورد فلزات و آلیاژهای صنعتی به‌کار می‌روند. سختی

^۱ Mohs scale

^۲ Brinell hardness

^۳ Vickers Hardness

^۴ Knoop Hardness

^۵ Rockwell scale

دینامیکی سنگ، واکنش آن در برابر ضربه است که با آزمایش‌هایی مانند چکش اشمیت^۱، و شور^۲، تعیین می‌شود. سرعت حفاری و فرسودگی ابزار، تابع سختی سنگ بوده و روابط تجربی متعددی در مورد رابطه‌ی بین سختی سنگ و سرعت حفاری و فرسودگی ابزار کار ارائه شده است. با استفاده از نتایج آزمایش چکش اشمیت، می‌توان مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ را به‌صورتی ساده و ارزان و به‌طور تقریبی برآورد نمود. از این روش، بیشتر در برآورد مقاومت فشاری سطوحی که دسترسی به آنها به صورت نمونه جدای از توده سنگ اصلی میسر نیست (مانند سطح ناپیوستگی‌ها) استفاده می‌شود (Güney et al., 2005; Bell, 2013).

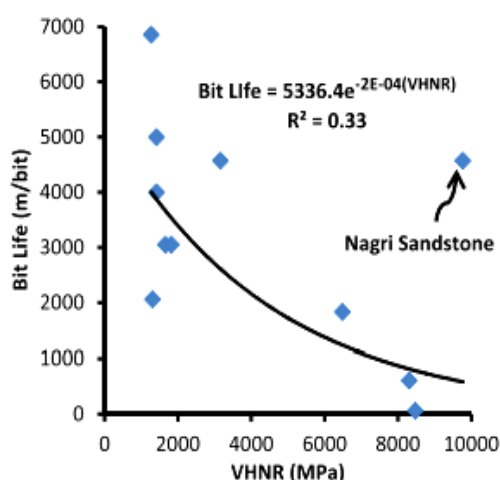
با توجه به نکات بیان شده با افزایش سختی سنگ نرخ سایشی که بر سرمته وارد می‌شود بیشتر خواهد شد، پس باید در طراحی پوشش سرمته از آلیاژی استفاده شود که سختی بالاتری را نسبت به سنگ دارا باشد.

در جدول ۳-۲ برخی از شاخص‌های سختی که توسط تعدادی از محققین در زمینه‌ی سایش سرمته‌های حفاری مورد بررسی قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است. شکل‌های ۲-۴۵ و ۲-۴۶ ارتباط میان برخی از این شاخص‌ها را با عمر سرمته را نشان می‌دهند.

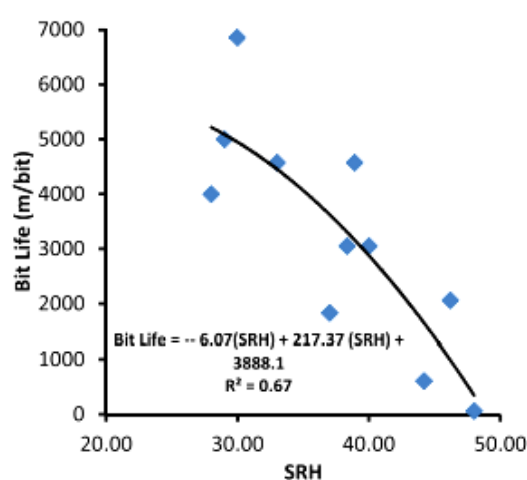
جدول ۳-۲- شاخص‌های سختی مطالعه شده توسط محققین

منابع	شاخص‌های سختی					
	عدد چکش اشمیت	موس	نوپ	ویکرز	راکول	براینل
Fink et al. 1986					•	
Ersoy and Waller 1995 b		•				•
Ersoy and Waller 1997		•				•
Plinninger et al. 2002 b				•		
Adebayo and Okewale 2007	•			•		
Plinninger 2008				•		
Adebayo et al. 2010	•			•		
Adebayo and Adetula 2013	•			•		
Adebayo and Akande 2015	•			•		
Babatunde 2015				•		
Saeidi et al. 2015		•				
Dogruoz et al. 2016	•					•
Sahoo and Choudhary 2017	•					
Piri et al. 2020		•				
Majeed et al. 2020	•			•		
Capik and Batmunkh 2021	•					
Capik and Yilmaz 2021	•					

¹ Schmidt hammer² Shore Scleroscope Hardness



شکل ۲-۴۶- رابطه‌ی بین سختی ویکرز و عمر سرمته (Majeed et al., 2020)



شکل ۲-۴۵- رابطه‌ی بین سختی واجهش اشمیت و عمر سرمته (Majeed et al., 2020)

ج- سایندگی سنگ‌ها

سایندگی معمولاً به عنوان ویژگی و یا پتانسیل یک سنگ تعریف می‌گردد که باعث سایش و خوردگی ابزار و قطعات می‌شود. سایندگی یک سنگ به سختی کانی‌ها، شکل و اندازه دانه‌ها، قفل‌شدگی دانه‌ها و ماتریس سنگ بستگی دارد. تشخیص خاصیت سایندگی سنگ‌ها بر اساس وجود سیلیس نیز امکان‌پذیر است. برای ارزیابی سایندگی سنگ‌ها شاخص‌های کیفی و کمی مختلفی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به روش‌های اندیس سایش سرشار^۱، فاکتور سایندگی شیمازک^۲، آزمون سایندگی لوس آنجلس^۳، اندیس سایش سرمته^۴ و شاخص سایندگی سنگ^۵ اشاره کرد (Plinninger et al., 2002a; Nouari et al., 2005).

جدول ۲-۴ برخی از شاخص‌های سایندگی سنگ‌ها را که توسط محققین مختلف در زمینه‌ی سایش سرمته‌های حفاری مورد بررسی قرار گرفته شده‌اند را نشان می‌دهد. مطالعات انجام شده پیرامون تأثیر سایندگی سنگ‌ها بر سایش سرمته‌های حفاری در بیشتر موارد بر بیان بااهمیت بودن سایندگی بر سایش سرمته‌ها متمرکز بوده است. به طور کلی نتیجه این تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش سایندگی، سرعت حفاری کاهش یافته و سایش سرمته‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به سایش به وجود آمده در سرمته‌ها، حفاری

^۱ Cerchar Abrasiveness Index (CAI)

^۲ Schmiarezek F-abrasivity factor

^۳ Los Angeles abrasion test

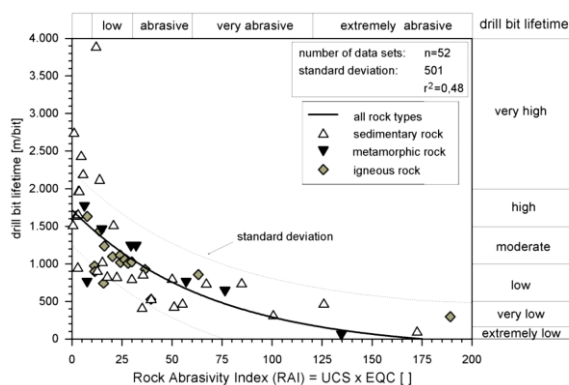
^۴ Bit Wear Index (BWI)

^۵ Rock Abrasivity Index (RAI)

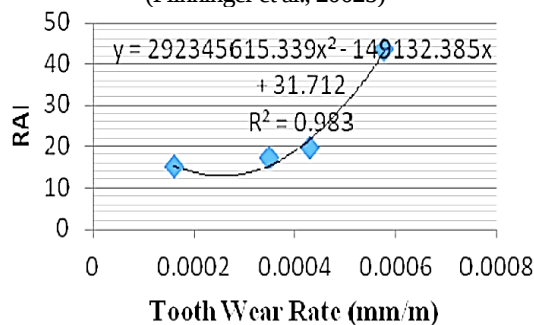
در زمان مورد نظر به پایان نخواهد رسید. به همین دلیل بررسی سایش سرمته‌ها در طول برخورد با سنگ‌ها نیز دارای اهمیت بسیار زیادی است. شکل‌های ۲-۴۷ تا ۲-۵۰ ارتباط میان شاخص ساینده‌گی سنگ و اندیس سایش سرشار را با عمر سرمته و نرخ سایش نشان می‌دهند.

جدول ۲-۴- شاخص‌های ساینده‌گی مطالعه شده توسط محققین

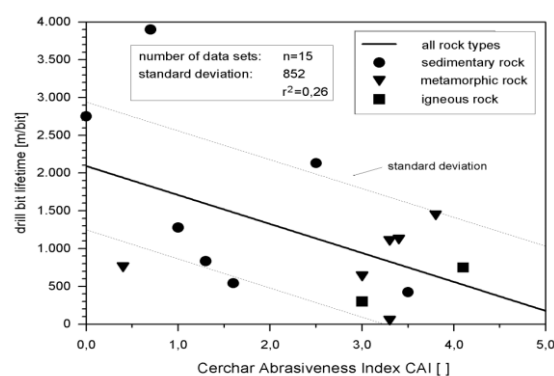
شاخص‌های ساینده‌گی					منابع
سرشار	لوس آنجلس	شیمازک	اندیس سایش سرمته	شاخص ساینده‌گی سنگ	
•		•			Suana and Peters 1982
•		•			Ersoy and Waller 1995 b
•		•		•	Plinninger et al. 2002 a
•		•		•	Plinninger et al. 2002 b
•		•		•	Plinninger 2008
			•	•	Adebayo and Akeju 2012 a
			•	•	Adebayo and Akeju 2012 b
			•	•	Adebayo and Adetula 2013
•					Babatunde 2015
•			•		Dudek and Władzielczyk 2018
•					Ivanicová et al. 2018
		•			Piri et al. 2020
•				•	Majeed et al. 2020
•					Capik and Batmunkh 2021
•					Capik and Yilmaz 2021



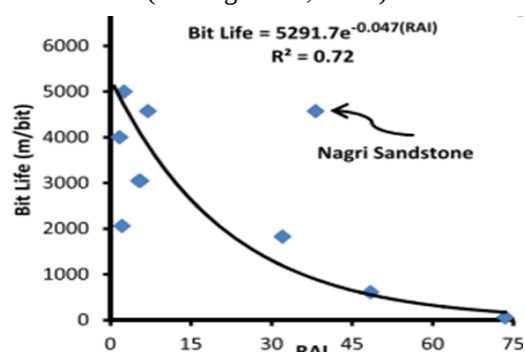
شکل ۲-۴۸- رابطه‌ی میان شاخص ساینده‌گی سنگ و عمر سرمته (Plinninger et al., 2002b)



شکل ۲-۵۰- رابطه‌ی میان شاخص ساینده‌گی سنگ و نرخ سایش دندانه (Adebayo and Akeju, 2012b)



شکل ۲-۴۷- رابطه‌ی میان اندیس سایش سرشار و عمر سرمته (Plinninger et al., 2002b)



شکل ۲-۴۹- رابطه‌ی میان شاخص ساینده‌گی سنگ و عمر سرمته (Majeed et al., 2020)

۲-۴-۱-۳- مشخصات ساختاری و محیطی سنگ

مشخصات توده سنگ، ساختار کلی و به ویژه میزان درزه‌داری آن، نقش بسیار تعیین‌کننده‌ای بر فرآیند حفاری و راندمان آن دارد. میزان نفوذپذیری توده سنگ ارتباط مستقیم با ساختار توده‌ای آن دارد. خصوصیات مهم درزه‌ها که بر حفاری توده سنگ مؤثر است، شامل فاصله‌داری، بازشدگی و مواد پرکننده و جهت‌داری (شیب) درزه‌ها می‌باشد (Hoseinie et al., 2008).

فاصله‌داری درزه‌ها: فاصله‌داری ممکن است به عنوان مهم‌ترین مشخصه‌ی سیستم درزه‌ها مطرح شود. قابلیت حفاری در توده سنگ به فاصله‌داری آن بستگی دارد. کاهش فاصله‌داری درزه‌ها منجر به کاهش پیوستگی فرآیند حفاری و تقلیل کارایی و نرخ نفوذ حفاری خواهد شد. ناپایداری دیواره‌ی چال‌های حفر شده با فاصله‌داری کمتر، محتمل‌تر خواهد بود. وجود بیش از یک دسته درزه باعث بحرانی شدن شرایط حفاری می‌شود. بحرانی‌ترین وضعیت در رابطه با حفاری، زمانی رخ خواهد داد که توده سنگ حالت بلوکی (بلوک‌هایی با ابعاد کوچک) داشته باشد. بررسی‌ها نشان داده است که با افزایش فاصله‌داری، نرخ نفوذ حفاری به صورت لگاریتمی افزایش می‌یابد و به نسبت مشابه، کارایی حفاری بیشتر خواهد شد.

بازشدگی درزه‌ها و مواد پرکننده: وجود درزه‌های باز باعث فرار جریان هوا و کاهش خروج خرده‌های حفاری درون چال و در نتیجه کاهش نرخ حفاری می‌شود. همچنین وجود مواد پرکننده در فضای درون درزه‌های باز، موجب کاهش شدید نرخ نفوذ حفاری می‌شود. در درزه‌هایی با مواد پرکننده‌ی ضعیف، سرمته گرایش به دنبال کردن مسیر درزه را (حین عبور از مواد پرکننده) دارد درحالی‌که در درزه‌هایی با مواد پرکننده‌ی سخت سرمته جهت اصلی خود را پیدا می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد که در توده سنگ‌های با مواد پرکننده‌ی دانه‌ریزتر، مشکلات حفاری افزایش می‌یابد و زمانی که اندازه‌ی این مواد بسیار ریز باشد، شرایط بحرانی خواهد شد. با کاهش اندازه‌ی ذرات پرکننده، این ذرات به جای خرد شدن، در فضای بین سرمته و سنگ تحت فشار جریان هوا حرکت می‌کنند. باقیمانده‌ی خرده‌های موجود در فضای بین سنگ و سرمته موجب کاهش نرخ نفوذ و نیز باعث هدر رفتن انرژی می‌شود.

تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش اندازه مواد پرکننده درزه‌ها، نرخ حفاری به صورت لگاریتمی افزایش خواهد یافت.

جهت‌داری (شیب) درزه‌ها: زاویه‌ی درزه‌ها باعث انحراف چال، کاهش بار حفاری و در نهایت کاهش نرخ نفوذ سیستم حفاری می‌شود. از طرفی در درزه‌های باز که دارای پرکننده نیز می‌باشند، تماس چال با درزه‌ها باعث ریزش پرکننده‌ها به چال در حین و بعد از حفاری خواهد شد. این پدیده موجب گیرکردن سرمته حین حفاری و پرشدگی چال بعد از حفاری می‌شود. لازم به ذکر است که نرخ نفوذ و قابلیت حفاری توده سنگ با توجه به زاویه‌ی بین سطح درزه و جهت چال، تغییر می‌کند به گونه‌ای که با افزایش این زاویه، نرخ حفاری به صورت خطی افزایش خواهد یافت. ذکر این نکته ضروری است که حفاری در سنگ‌های درزه‌دار به مراتب دردسرسازتر از سنگ‌های بدون درزه و شکاف است. با توجه به نکات بیان شده استفاده از حفاری دورانی برای سنگ‌های درزه‌دار توصیه می‌شود، زیرا افزایش سرعت چرخش احتمال گیر افتادن سرمته را کاهش می‌دهد.

با توجه به توضیحات بیان شده این نکته قابل بیان است که وجود درزه و ناپیوستگی‌های ساختاری بر روند حفاری و سایش سرمته تاثیرگذار است. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری پارامترهای مربوط به توده سنگ نیاز به مبانی تئوری و تجربی بسیار بالایی دارد. به منظور کاهش تعداد پارامترهای تاثیرگذار بر سایش سرمته‌های حفاری و همچنین پوشش کامل مشخصات ساختاری و محیطی (توده سنگ) بهره‌برداری از یک سیستم طبقه‌بندی کمک شایانی در ارائه مدل پیش‌بینی سایش سرمته‌های حفاری دورانی خواهد داشت. از جمله سیستم‌های طبقه‌بندی ارائه شده برای توده سنگ می‌توان به سیستم رده‌بندی توده سنگ^۱ و شاخص مقاومت زمین‌شناسی^۲ اشاره نمود.

سیستم رده‌بندی توده سنگ یا RMR، مهم‌ترین پارامترهای زمین‌شناسی را با هم ترکیب می‌کند و یک شاخص کلی و جامع را برای بیان کیفیت توده سنگ ارائه می‌دهد. شش پارامتر مورد استفاده در سیستم

^۱ Rock Mass Rating (RMR)

^۲ Geological Strength Index (GSI)

RMR برای طبقه‌بندی توده سنگ شامل مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ، شاخص کیفیت سنگ^۱، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، وضعیت ناپیوستگی‌ها (تداوم، بازشدگی، زبری، مواد پرکننده و هوازدگی ناپیوستگی)، وضعیت آب زیرزمینی، جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها می‌باشد. به هر یک از این شش پارامتر، امتیازی متناسب با خواص سنگ اختصاص می‌یابد. با جمع این امتیازها، مقدار RMR در بازه‌ی ۰ تا ۱۰۰ به دست می‌آید (Rehman et al., 2018).

اما در طبقه‌بندی توده سنگ براساس شاخص مقاومت زمین‌شناسی یا GSI، ارتباط صحیح مابین مشاهدات زمین‌شناسی و توصیفی توده سنگ و پارامترهای مهندسی در دستور کار قرار دارد. این سیستم طبقه‌بندی با مشاهده بیرون‌زدگی‌ها، اثر هوازدگی و فرسایش، میزان گسترش ساختارهایی هم چون درزه‌ها، شیب‌توزیته، سطوح لایه‌بندی و گسل‌ها به گروه‌های مختلفی تقسیم می‌شود. این گروه‌ها براساس میزان درزه‌داری و خردشدگی شامل گروه‌های سنگ‌های توده‌ای، بلوکی، بسیار بلوکی، به هم ریخته و درزه‌دار، از هم پاشیده و برشی می‌باشند. با توجه به اینکه ارزیابی مقدار GSI بر ساختار توده سنگ و میزان در هم قفل شدگی اجزای تشکیل دهنده آن و شرایط سطح درزه‌ها که توسط زبری و هوازدگی سطح درزه معین می‌شود استوار است؛ به همین جهت مقدار GSI از طریق مشاهدات صحرایی (درجه بلوکی شدن سنگ و شرایط حاکم بر ناپیوستگی‌ها)، به کمک داده‌های ارائه شده تعیین می‌گردد. لازم به ذکر است که پارامترهای وضعیت آب زیرزمینی و تنش‌های برجا در مقدار GSI در نظر گرفته نشده است. هم‌چنین در این رده بندی لازم است رخنمون‌های سنگی دست نخورده مورد ارزیابی قرار گیرند (Hussian et al., 2020).

۲-۴-۲- پارامترهای اجرایی

در سیستم اندازه‌گیری حین حفاری^۲ پارامترها به دو گروه مستقل و وابسته تقسیم می‌شوند. متغیرهای مستقل به طور مستقیم توسط اپراتور حفاری تحت کنترل می‌باشند در صورتی که متغیرهای وابسته نشان‌دهنده‌ی پاسخ سیستم به عملیات حفاری است که میزان آنها با توجه به خواص زمین‌شناسی و

^۱ Rock Quality Designation (RQD)

^۲ Measurement While Drilling (MWD)

مکانیکی تغییر می‌یابد. پارامترهای مستقل شامل نوع سرمته، بار روی سرمته^۱، سرعت دوران^۲ و فشار هوا و پارامترهای وابسته شامل نرخ نفوذ، گشتاور چرخشی و ارتعاش می‌باشند (Ghosh et al., 2016). از میان پارامترهای بیان شده، پارامترهایی بر روی سایش تأثیرگذارند که بیشتر به شرایط سیستم حفاری و خود سرمته مربوط می‌باشند و تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نرخ سایش خواهند داشت. این پارامترها شامل نوع سرمته، بار (وزن) روی سرمته، سرعت دوران سرمته خواهند بود.

الف - نوع سرمته

پس از تعیین خصوصیات سنگ، انتخاب نوع سرمته با توجه به ترکیب، اشکال، اندازه و ابعاد مختلف آن از مهم‌ترین فاکتورها در کاهش سایش سرمته‌ها است. سرمته‌ها با متلاشی کردن سنگ‌ها باعث پیشروی چال حفاری در جهت مدنظر می‌شوند. انواع سرمته‌ها بسته به روش حفاری (ضربه‌ای، ضربه‌ای-دورانی، دورانی) مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش‌های حفاری چکش بالا و چکش پایین سرمته‌های رایج به صورت ضربدری و دکمه‌ای و در روش‌های حفاری دورانی به صورت تیغه‌ای و سه‌مخروطی می‌باشند. امروزه روش‌های حفاری دورانی به دلیل وسعت به‌کارگیری در سنگ‌های نرم تا خیلی سخت و نرخ نفوذ و تولید بالا در معادن روباز از محبوبیت بالاتری برخوردار می‌باشند. در سیستم حفاری مخروطی دورانی، سرمته‌هایی با فاصله و طول دندان‌های (دکمه) زیاد در سنگ‌های نرم به‌کار می‌روند در صورتی که با افزایش سختی و ساینده‌گی سنگ از فاصله و طول دندان‌ها کاسته خواهد شد. در سیستم ضربه‌ای نیز برای رفع مشکل سایش از نوع دکمه‌ای استفاده می‌شود. تحقیقات نشان داده است که اگر تعداد دکمه‌ها بیشتر باشد نرخ حفاری بیشتر و سایش کمتر است. دکمه‌ها می‌توانند به شکل قاشقی^۳، اسکنه‌ای^۴، مخروطی^۵ و تخم‌مرغی شکل^۶ باشند. در شکل ۲-۵۱ انواع شکل دکمه‌ها و سایش رخ داده در آنها به نمایش در آمده است (Jimeno et al., 1995; Cooper, 2002; Gokhale, 2010; Wu et al., 2010).

¹ Weight On Bit (WOB)

² Revolution Per Minute (RPM)

³ Scoop

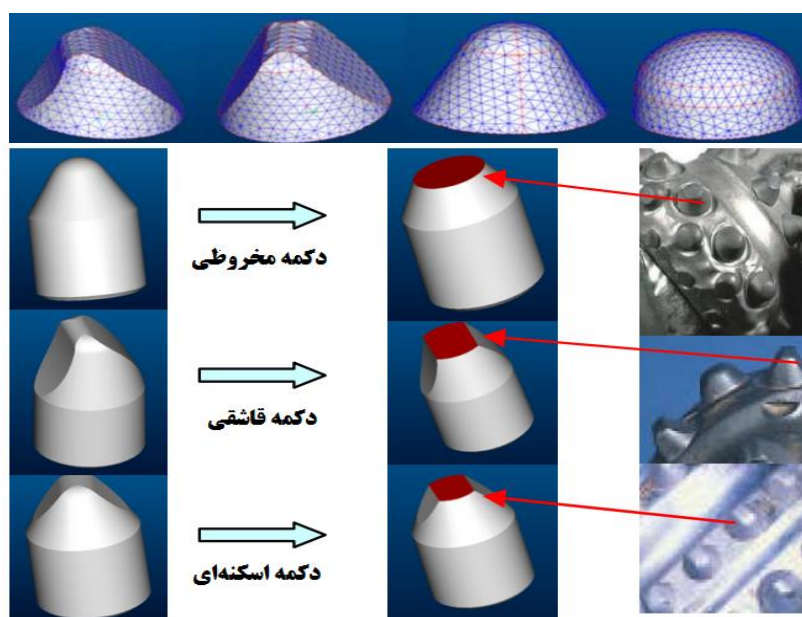
⁴ Chisel

⁵ Conical

⁶ Ovoid

ب- بار روی سرمته

بار روی سرمته یا تراست مقدار باری است که به سرمته وارد می‌شود و از این طریق، موجب کنترل انحراف مسیر حفاری و افزایش مقدار حفاری می‌شود و اندازه‌ی آن به قطر و نوع سرمته، نوع سیستم حفاری و مقاومت سنگ بستگی دارد. به طور کلی میزان بار روی سرمته بین یک مقدار حداقلی و یک مقدار حداکثری واقع شده است. کمترین بار زمانی است که دستگاه به دلیل کافی نبودن بار وارده قادر به حفاری نمی‌باشد و از این مقدار به بعد ضمن نفوذ در سنگ بین بار وارده و نرخ نفوذ رابطه‌ی خطی مستقیمی به وجود می‌آید. اگر میزان بار روی سرمته کم باشد علاوه بر افت سرعت حفاری، خسارات جدی به لوله‌ی حفاری و سرمته در اثر افزایش درجه‌ی حرارت و عدم انتقال انرژی تولید شده به سنگ (تبدیل آن به گرما) وارد شده که منجر به سایش بیشتر و کاهش عمر سرمته خواهد شد. در سنگ‌هایی با سختی و مقاومت بالا، مقدار نیروی تراست باید در حدی باشد که باعث نفوذ بهینه سرمته شود. اگر میزان بار روی سرمته بیش از حد مجاز باشد، سرمته تحرک لازم را از دست داده و منجر به کندی، توقف و افزایش هزینه‌های حفاری خواهد شد. میزان سایش رابطه‌ی مستقیمی با بار وارده دارد و هرچه این مقدار بیشتر باشد میزان سایش نیز بیشتر خواهد شد (Huang and Wang, 1997).

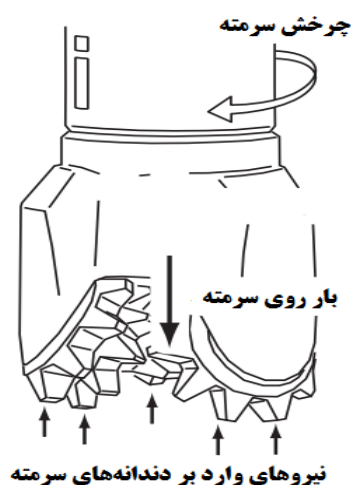


شکل ۲-۵۱- انواع شکل دکمه‌های سرمته و سایش رخ داده در آنها (Wu et al., 2010)

ج- سرعت دوران سرمته

همانند بار روی سرمته تعداد دور سرمته نیز در میزان سرعت حفاری و نرخ سایش مؤثر است. به نظر می‌رسد بین افزایش دور سرمته و سرعت حفاری رابطه کاملاً خطی وجود ندارد. تمام آزمایشاتی که در این زمینه انجام گرفته این نکته را ثابت می‌کند که کاهش تعداد چرخش موجب کاهش و افزایش تعداد چرخش موجب افزایش سرعت حفاری می‌شود. اما اگر تعداد دور سرمته در هر دقیقه بیش از حد باشد، به دلیل عدم تماس کافی سرمته‌ها با سنگ و عدم انتقال کامل انرژی، سرعت حفاری ممکن است نه تنها سیر صعودی نداشته باشد، برعکس ثابت بماند و یا کاهش یابد (اصانلو، ۱۳۸۶).

بنابراین می‌بایست تعداد دور سرمته برای رسیدن به کمترین سایش ممکن، بهینه باشد. هر تغییری در دور سرمته (کم بودن و یا افزایش بیش از حد) می‌تواند نرخ سایش را افزایش دهد. در حفاری چرخشی برای کنترل میزان دور در سرمته بار روی سرمته را افزایش می‌دهند به طوری که در سنگ‌های سخت دور سرمته کم و بار روی سرمته زیاد است و در سنگ‌های نرم تعداد دور سرمته زیاد و بار روی سرمته کم است. شکل ۲-۵۲ بار روی سرمته، چرخش و نیروهای وارد بر دندان‌های سرمته را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۵۲- تصویر شماتیک بار روی سرمته، چرخش و نیروهای وارد بر دندان‌های سرمته (Naganawa, 2012)

لازم به ذکر است به غیر از پارامترهای بیان شده پارامترهای اجرایی دیگری نیز نظیر سیستم فلاشینگ (سیال و فشار سیال) و تأثیرات دمایی بر سایش سرمته‌های حفاری تأثیرگذارند که یا قابل اندازه‌گیری

نیستند و یا تأثیر جزئی بر روند سایش سرمته‌ها خواهند داشت لذا اهمیت آنها در قیاس با پارامترهای اصلی ناچیز می‌باشد. جدول ۲-۵ برخی از پارامترهای اجرایی را که توسط تعدادی از محققین در زمینه سایش سرمته‌های حفاری مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۵- پارامترهای اجرایی مطالعه شده توسط محققین		
پارامترهای اجرایی		منابع
سرعت دوران سرمته	بار روی سرمته	
•	•	Miller and Ball 1990
•		Miller and Ball 1991
•	•	Ersoy and Waller 1995 b
•	•	Ersoy and Waller 1997
•	•	Rashidi et al. 2008
•	•	Rashidi et al. 2010 a
•	•	Rashidi et al. 2010 b
•	•	Wu et al. 2010
•	•	Adebayo and Akeju 2012 a
•	•	Adebayo and Akeju 2012 b
•	•	Adebayo and Bello 2012
•	•	Naganawa 2012
•	•	Adebayo and Akande 2015
•	•	Ghosh et al. 2016
	•	Karasawa et al. 2016
•	•	Ivanicová et al. 2018
•	•	Reitz and de Freitas 2018
•	•	Mazen et al. 2019
•	•	Majeed et al. 2020
•	•	Shankar et al. 2020
•	•	Šporin 2020
•	•	Šporin et al. 2020
•	•	Capik and Batmunkh 2021
•	•	Capik and Yilmaz 2021

۲-۵- جمع‌بندی

در این فصل پس از بیان توضیحاتی در مورد روش‌های حفاری، سایش به عنوان یکی از مفاهیم اصلی در مهندسی سطح و تریبولوژی به صورت کامل تشریح شد. سپس انواع حالت‌های سایش و خرابی سرمته‌های کاربرد تنگستن مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه پارامترهای مؤثر بر سایش سرمته‌های حفاری تعیین گردید و مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی، مکانیکی، ساختاری و محیطی (توده سنگ) سنگ و پارامترهای اجرایی تأثیرگذار بر سایش سرمته‌های حفاری دورانی بر اساس مطالعات محققین مختلف مورد نقد و بررسی قرار گرفته است. در فصل بعد سابقه‌ی علمی موضوع توضیح داده خواهد شد.

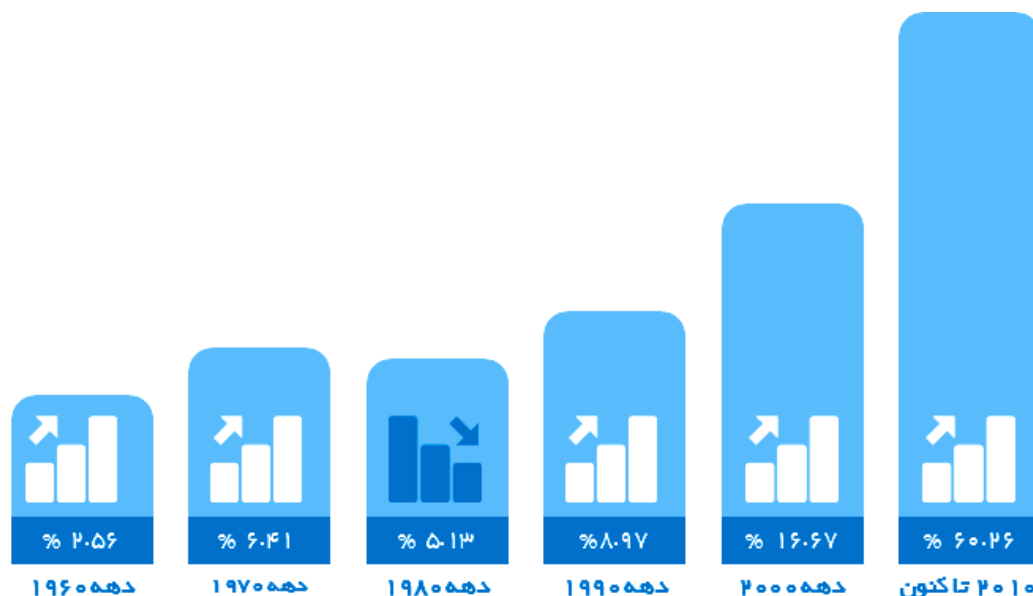
فصل سوم

بررسی ساقه‌ی علمی موضوع

۳-۱- مقدمه

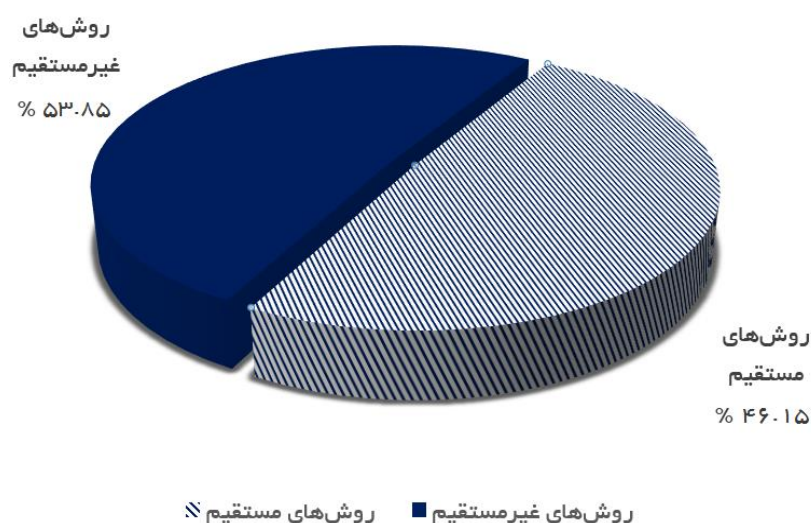
پدیده‌ی سایش قسمت عمده‌ای از تخریب در صنعت را به خود اختصاص داده است. سایش باعث افت کارایی و توقف دستگاه می‌شود، به همین علت این پدیده به عنوان یک معضل در صنعت مورد بررسی گسترده‌ای قرار گرفته است. سایش می‌تواند سازوکارهای متفاوتی داشته باشد، که از جمله می‌توان به سایش ساینده، سایش چسبنده و سایش فرساینده اشاره کرد. فرایند سایش به دو مرحله گذرا و پایا تقسیم‌بندی می‌شود. در دوره گذرا نرخ سایش متغیر است و شیبی متغیر دارد، این دوره تأثیر مهمی بر عملکرد سطوح در حالت پایا دارد. بعد از این مرحله عمر قطعه به دوره‌ی پایا وارد می‌شود که در آن نرخ سایش تقریباً ثابت خواهد ماند. پدیده‌ی سایش بر خلاف خواصی نظیر سختی و بافت خاصیت ذاتی ماده به شمار نمی‌رود، بلکه به مؤلفه‌های تریبوسیستم بستگی دارد. تریبوسیستم یک سیستم مهندسی است که بر رفتار سایشی و اصطکاکی مواد در تماس با یکدیگر تأثیر می‌گذارد. پدیده‌ی سایش متأثر از عوامل و پارامترهای متعددی است. تغییر هر یک از این پارامترها می‌تواند حالت متفاوتی از سایش را ایجاد نماید. بسته به اینکه چه نوع سایشی در یک جسم اتفاق می‌افتد، میزان آسیب ایجاد شده نیز متفاوت بوده و لذا سازوکارهای سایش نیز بستگی به واکنش و فعل و انفعال‌های بین مؤلفه‌ها و پارامترهای مختلف به عنوان یک سیستم تریبولوژی خواهد داشت. با وجود تحقیقات گسترده از نقطه‌نظرهای مختلف در طول سالیان دراز هنوز هم تحلیل سایش سرمته‌های حفاری کار دشواری است زیرا سنگ‌ها انواع گوناگونی داشته و نمی‌توان نتیجه‌ی هر تحقیقی را به هر سنگی تعمیم داد. حتی اگر سنگ‌ها از یک نوع باشند شیوه‌های سنجش سایش متعدّدند که مشکلات عدم تعمیم به مناطق مشابه نیز مطرح خواهد شد.

با توجه به مسائل ذکرشده، در این بررسی ۷۸ پژوهش منتشرشده در زمینه‌ی سایش سرمته‌های حفاری مورد مطالعه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که اکثر پژوهش‌های انجام شده به صورت کیفی و تحلیلی به بررسی موضوع مورد مطالعه پرداخته‌اند. در شکل ۳-۱ فراوانی این تحقیقات در دوره‌های مختلف زمانی نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱- سیر صعودی و نزولی فراوانی مطالعات در زمینه‌ی سایش سارمته‌های حفاری

همان‌طور که ملاحظه می‌شود از دهه ۱۹۶۰ میلادی تا ۱۹۸۰ میلادی تعداد پژوهش‌ها در هر دهه افزایش یافته است. پس از این در دهه‌ی ۱۹۸۰ تعداد پژوهش‌ها با افت چشمگیری مواجه شده است. شاید دلیل این موضوع را در تغییرات وسیع فناوری در حوزه دستگاه‌های مورد استفاده در این روش و تمرکز پژوهش‌ها بر آن حوزه بتوان جستجو کرد. با گسترش روش‌ها و مشخص شدن چالش‌ها، نیازهای طراحی و ساخت سارمته‌های مختلف با توجه با پیشرفت تکنولوژی، تعداد پژوهش‌ها در دهه ۱۹۹۰ میلادی سیر صعودی داشته و از دهه‌ی ۱۹۹۰ میلادی پژوهش‌ها با سرعت چشمگیری افزایش یافته است به طوری که از سال ۲۰۱۰ تاکنون تعداد پژوهش‌ها کمتر از هشت برابر دهه‌ی ۱۹۹۰ و بیش از چهار برابر دهه‌ی ۲۰۰۰ است. البته از سال ۲۰۰۰ به بعد این رشد چشمگیر را می‌توان مرهون پیشرفت‌های صورت گرفته در حوزه‌ی کامپیوتر دانست. پیشرفت این ابزار محاسباتی، تأثیر بسزایی در درک بهتر سایش در فرایندهای حفاری داشته است. با توجه به توضیحات بیان شده پیشرفت روند حفاری بدون پایش میزان سایش سارمته‌های حفاری امکان‌پذیر نیست. تکنیک‌های پایش وضعیت ابزار به دو دسته‌ی اصلی روش‌های مستقیم و روش‌های غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. در ادامه هر یک از روش‌ها و مطالعات انجام شده در زمینه‌ی آنها مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۳-۲ سهم هر یک از این روش‌ها در منابع مطالعه شده آورده شده است.



شکل ۳-۲- سهم هر یک از روش‌ها در منابع مطالعاتی

همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود سهم هر یک از روش‌ها در تحلیل سایش سرمته‌های حفاری تقریباً برابر است و این نشان‌دهنده‌ی توازن تحقیقات صورت گرفته بین روش‌های مستقیم و غیرمستقیم در پایش وضعیت سایش سرمته‌ها می‌باشد. دلیل این امر می‌تواند مرتبط با گستردگی علم سایش در علوم مختلف و نزدیک بودن مرز تحقیقات در رشته‌های گوناگون باشد. به همین دلیل تحقیقات صورت پذیرفته در این زمینه شامل حوزه‌های مهندسی مواد، مکانیک، معدن و نفت می‌باشد. در ادامه مطالعات انجام شده با استفاده از هر یک از روش‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. لازم به ذکر است، روابط تجربی ارائه شده توسط محققین به صورت مجزا بیان شده است.

۳-۲- روش‌های پایش مستقیم

روش‌های مستقیم اثراتی که به طور مستقیم توسط سایش ابزار ایجاد می‌شوند را تحلیل می‌نمایند یا به عبارتی دیگر سایش حقیقی خود ابزار را اندازه‌گیری می‌کنند. در روش‌های مستقیم اتصالات خردشده و دکمه‌های شکسته شده یا کنده شده کاربرد تنگستن با استفاده از تکنیک‌های بیان‌شده در فصل گذشته مورد مطالعه قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که در روش پایش مستقیم فقط تحلیل سایش سرمته به صورت کیفی انجام شده است و پارامترهای تأثیرگذار بر آن مورد توجه قرار نگرفته است. در جدول ۳-۱ مطالعات صورت گرفته با روش‌های پایش مستقیم ارائه شده است.

جدول ۳-۱- پژوهش‌های انجام شده با روش‌های پایش مستقیم

سال	محقق (محققان)	توضیحات
1968	Montgomery	مکانیزم سایش ضربه‌ای ترکیبات کاربید تنگستن
1969	Montgomery	خصوصیات سایش ضربه‌ای کاربید سیمانی شده
1973	Larsen-Basse	سایش کاربید تنگستن در حفاری سنگ: مقاله‌ی مروری
1974	Blombery et al.	سایش ساینده ترکیبات کاربید-کبالت تنگستن
1974	Bailey and Perrot	نمایش مرحله‌های سایش توسط سرمته‌های دورانی WC/Co در معادن
1979	Perrot	ابزارهای مورد نیاز حفاری و معدن کاری
1983	Larsen-Basse	تأثیر ترکیب، ریزترک‌ها و شرایط سرویس بر سایش کاربیدهای تنگستن
1986	Fink et al.	جنبه‌های الکتروشیمیایی سایش سرمته‌های کاربید تنگستن سیمانی شده (WC/Co)
1992	Swick et al.	مکانیزم سایش سرمته‌های حفاری ضربه‌ای- دورانی و تأثیر نوع سنگ بر روی سایش
1992	Tze-Pin et al.	سایش و مکانیزم شکست برای سرمته‌های PDC
2001	Beste et al.	آسیب سطح دکمه‌های سرمته‌های کاربید تنگستن
2005	Arefi et al.	تحلیل و شبیه‌سازی فرسایش در ابزارهای حفاری
2006	Beste et al.	تغییرات سایش القایی دکمه‌های سرمته‌های کاربید تنگستن سیمانی شده
2007	Gee et al.	مکانیزم سایش در ساییدگی و فرسایش WC/Co و ارتباط با کاربید تنگستن
2008	Beste and Jacobson	یک دیدگاه جدید از خرابی و سایش دکمه‌های سرمته‌ی تنگستن کاربید سیمانی شده WC/Co
2008	Beste et al.	نفوذ سنگ در سرمته‌های کاربید تنگستن-کبالت دکمه‌ای در حین حفاری
2009	Moseley et al.	مغزه‌گیری از بتن مسلح با استفاده از سرمته‌های PDC: مکانیزم‌های شکستگی و سایش
2012	Naganawa	مطالعه‌ی امکان‌سنجی در تشخیص سایش سرمته‌های سه‌مخروطی از ارتعاش محوری سرمته
2013	Olovsjö et al.	سایش و خرابی سطح دکمه‌های سرمته‌های کاربید تنگستن- اهمیت آماده‌سازی نمونه و بهینه‌سازی تنظیمات میکروسکوپی
2013	Angseryd et al.	یک آزمایش سایش برای دکمه‌های سرمته‌های حفاری
2014	Torres et al.	شکستگی و فرسودگی سرمته‌های کاربید تنگستن سیمانی شده: مکانیک و مکانیزم مقاومت در برابر رشد ترک تحت بارگذاری یکنواخت و دوره‌ای
2014a	Konyashin and Ries	آسیب سایش سرمته‌های کاربید سیمانی شده با ترکیبات مختلف اندازه‌ی میانگین دانه‌های WC و محتوای کبالت. قسمت اول: تست‌های سایش ASTM
2014b	Konyashin and Ries	آسیب سایش سرمته‌های کاربیدهای سیمانی شده با ترکیبات مختلف اندازه‌ی میانگین دانه‌های WC و محتوای کبالت. قسمت دوم: آزمون‌های آزمایشگاهی عملکرد بر روی حفاری و برش سنگ
2014	Saeidi et al.	استفاده از تکنیک پردازش تصاویر دیجیتال برای ارزیابی سایش سرمته‌های کاربید تنگستن
2015	Nahak et al.	بحث و گفتگو در مورد پدیده‌ی سایش سرمته‌های کاربید تنگستن سیمانی شده
2015	Yahiaoui et al.	مکانیزم‌های سایش دکمه‌های سرمته‌های WC/Co در برابر یک لایه از جنس آلومینا تحت اصطکاک خشک: قسمت ۱- دکمه‌های WC/Co با محتوای فاز اتصال‌دهنده‌ی همگن
2015	Shahrabi	تحلیل ساییدگی سرمته‌های حفاری با استفاده از تکنیک پردازش تصاویر دیجیتال
2016	Katiyar et al.	حالت‌های شکست سرمته‌های کاربید تنگستن سیمانی شده: مطالعه‌ی قسمت‌های سایش
2017	Heinrichs et al.	تغییر شکل اولیه و سایش سرمته‌های کاربید تنگستن در حفاری سنگ
2017	Tkalich et al.	سایش دکمه‌های سرمته‌های ضربه‌ای کاربید تنگستن: مطالعات میدانی و آزمایشگاهی
2018	Abbas	مروری بر سایش سرمته‌های حفاری نفت (روش‌های متداول برای کاهش سایش و اندازه‌گیری آن)
2018	Dudek and Władzielczyk	سایش دکمه‌های سرمته‌های مختلف در حفاری چال‌های انفجاری
2018	Jacobson	سایش و تخریب سرمته‌های کربی تنگستن سیمانی شده در برابر ماسه سنگ و گرانیب
2020	Saai et al.	تطبیق آزمون‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی مقاومت دکمه‌های سرمته در برابر سایش در حفاری
2020	Šporin	خصوصیات سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی به علت انتخاب نامناسب روش حفاری
2020	Šporin et al.	تغییر خواص مواد فولادی سرمته‌های سه‌مخروطی در اثر پارامترهای عملیاتی و خصوصیات سنگ

اولین بار مونتگومری^۱ در سال ۱۹۶۸ به منظور به دست آوردن مکانیزم سایش بر روی دکمه‌های سرشته کاربرد تنگستن، سرشته‌هایی که طی حفاری ضربه‌ای- دورانی در سنگ‌های گرانیت و آهک ساییده شده بودند را مورد مطالعه قرار داد. به منظور مشاهده‌ی فرآیند سایش، شبیه‌سازی حفاری سنگ را در آزمایشگاه انجام داد و ویژگی‌های سطح دکمه‌های سایش یافته را به سختی و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار داد. او بیان کرد که سرعت لغزش و بار وارده از اهمیت کمی برخوردار است. همه‌ی شواهد تجربی نشان داد که مکانیزم سایش از سطح کاربرد مربوط به ضربات وارده به سطح سرشته بوده و فرسودگی ناشی از ریز ترک‌ها مهم‌ترین دلیل سایش در سرشته‌های حفاری است (Montgomery, 1968).

در سال ۱۹۶۹ مونتگومری بیان کرد که درجه‌ی سایش کاربرد تنگستن سیمانی شده در گرانیت بسیار حساس به محتوای کبالت بوده و متناسب با سختی دکمه‌های کاربرد تنگستن سیمانی شده است. او بیان داشت که کمترین درجه‌ی سایش به بیشینه‌ی مقاومت فشاری در کاربرد سیمانی شده مرتبط است. در ادامه مونتگومری گزارش داد که همانند مقاومت فشاری، میانگین اندازه دانه‌های WC به عنوان یکی از متغیرهای مهم و تأثیرگذار بر سایش است (Montgomery, 1969).

لارسن-باس^۲ در مقاله‌ی مروری خود در سال ۱۹۷۳ بیان کرد که سایش سرشته‌های حفاری ممکن است با مکانیزم‌های پوسته‌پوسته شدن سطح مؤثر، فرسودگی سطح مؤثر، فرسودگی (خستگی) حرارتی و سایش ساینده همراه باشد. او بیان داشت که دو مکانیزم اول، مکانیزم غالب سنگ‌های ساینده و سخت مانند کوارتز و گرانیت هستند. همچنین مکانیزم غالب سنگ‌های غیر سخت و غیر ساینده مانند کلسیت و مگنتیت فرسودگی حرارتی و مکانیزم غالب سنگ‌های غیر سخت و ساینده مانند ماسه سنگ سایش ساینده است (Larsen-Basse, 1973).

بلومبری^۳ و همکاران با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مکانیزم سایش را در حفاری دورانی با کاربرد تنگستن در ماسه سنگ مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق جدا شدن کبالت و ریز ترک‌های

^۱ Montgomery

^۲ Larsen-Basse

^۳ Blombery

اسکلت کاربید در مکانیزم سایش مورد بررسی قرار گرفت که در نتیجه‌ی این مرحله، چاله‌های کوچک با ابعاد بین دانه‌ای به وجود آمده و جدا شدن کبالت موجب کاهش مقاومت لایه‌های سطحی و انتشار ترک بین دانه‌ها، منجر به ایجاد ریزترک در اسکلت کاربید شده است. نتایج تحقیق آنها نشان داد که محتوای کبالت، نحوه‌ی توزیع آنها، اندازه‌ی خرده‌های ساینده و فاکتورهای محیطی در کنترل مقدار سایش ساینده در حفاری سنگ بااهمیت است (Blombery et al., 1974).

بیلی و پروت^۱ در سال ۱۹۷۴ از فرایندهای میکروسکوپی به منظور تعیین سایش ترکیبات کاربید تنگستن سیمانی‌شده در حفاری دورانی استفاده کردند. فرسودگی حرارتی، ساییدگی و فرسودگی سطح مؤثر سرمته در اثر برخورد و ضربه در تمامی موارد مورد آزمایش به وسیله‌ی انتشار ترک‌های دانه‌ای اتفاق افتاد. این تحقیق نشان داد که فرسودگی حرارتی نسبت به سایر سایش‌های موجود بر ترکیبات کاربید تنگستن سیمانی‌شده در حفاری دورانی اثر می‌گذارد (Bailey and Perrott, 1974). پروت^۲ در سال ۱۹۷۹ مقاله‌ای مروری در مورد سایش سرمته‌های حفاری منتشر کرد که در آن، پنج نوع مکانیزم سایش خراش برداشتن، ساییدگی در اثر خردشدگی، ساییدگی گرم، فرسودگی (خستگی) حرارتی و پوسته‌پوسته شدن سطح را ارائه داد (Perrot, 1979).

او بیان داشت که در ساییدگی در اثر خراش، سطح به صورت صاف درآمد و در آن تعدادی حفره توسط دانه‌های ترک‌خورده‌ی تنگستن به وجود می‌آید که عمق آن دو برابر اندازه‌ی دانه‌های WC بوده و دانه‌های WC جدا یا خرد می‌شوند. او بیان کرد که در ساییدگی در اثر خردشدگی، کبالت از مکان خود جدا شده و دانه‌های WC کوتاه و در معرض شکستگی گسترده قرار می‌گیرد و ترک‌خوردگی دانه‌های WC می‌تواند مستقل از جدا شدن کبالت باشد. او همچنین ذکر کرد که در ساییدگی گرم دما منجر به تغییر شکل پلاستیک دانه‌های WC می‌شود و پوسته‌پوسته شدن سطح عمدتاً در حفاری ضربه‌ای رخ می‌دهد.

^۱ Bailey and Perrott

^۲ Perrot

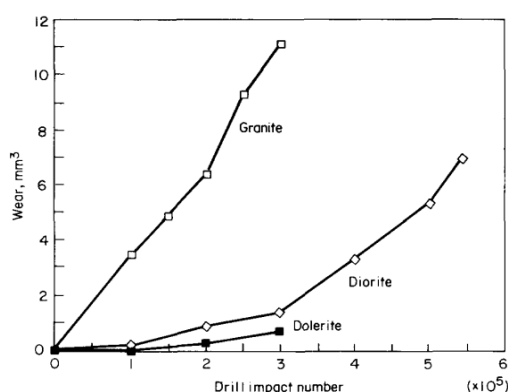
لارسن-باس در سال ۱۹۸۳ اثر مواد تشکیل‌دهنده و ریزساختارها را بر روی سایش کاربید تنگستن سیمانی‌شده مورد بررسی قرار داد. نتایج تحقیقات او نشان داد که اگر مواد تشکیل‌دهنده محکم‌تر و سخت‌تر باشند، سایش کمتری رخ خواهد داد (Larsen-Basse, 1983).

تمرکز اصلی پژوهش فینک^۱ و همکاران در سال ۱۹۸۶ طبقه‌بندی و تعیین کمیت فرآیندهای سایش بوده است. آنها بیان داشتند که در اکثر تحقیقات گذشته تمام تلاش محققین بر دانستن نوع مکانیزم سایش اتفاق افتاده و سعی در کاهش آن بوده است در صورتی که پارامترهای شیمیایی و یا الکتروشیمیایی در تحقیقاتشان نادیده گرفته شده است و یا به عنوان یک عنصر جزئی به آن توجه شده است. آنها حدود ۶۰ سرمته را بر روی بلوک‌های سنگی کوچک آهکی در آزمایشگاه تحت بار ثابت حفاری قرار دادند. آزمون سختی سرمته‌ها را برای ۹ سرمته در حالت نو و استفاده شده مقایسه کردند. آنها در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که از دست دادن زود هنگام اتصال‌دهنده کبالت منجر به سریع‌تر شدن پدیده‌ی سایش خواهد شد (Fink et al., 1986).

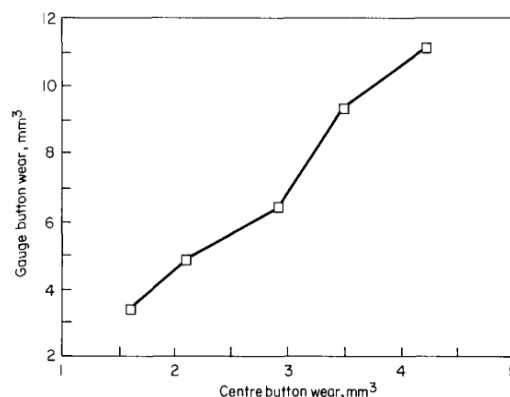
سوییک^۲ و همکاران تحت شرایط خشک آزمایش سایش را برای سنگ‌های گرانیات، دیوریت و دولریت به وسیله‌ی دستگاه حفاری ضربه‌ای- دورانی انجام دادند. طبق نتایج آنها گرانیات‌ها به مراتب بیشتر از دو سنگ دیگر در فرآیند سایش تأثیرگذارند و زودتر باعث ایجاد این پدیده می‌شوند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سرمته فرسوده نشان داد که سایش به صورت پوسته‌پوسته شدن ریز برای همه‌ی سنگ‌ها و پوسته‌پوسته شدن درشت در گرانیات اتفاق می‌افتد. همچنین با توجه به نتایج آزمایش‌ها به این نتیجه رسیدند که سایش در دکه‌های پیرامونی به صورت برابر و یا بیشتر از سایش در دکه‌های مرکزی سرمته بوده است (Swick et al., 1992) (شکل‌های ۳-۳ و ۴-۳).

^۱ Fink

^۲ Swick



شکل ۳-۴- سایش دکه‌های پیرامونی در مقابل تعداد ضربات حفاری (Swick et al., 1992)



شکل ۳-۳- سایش دکه‌های پیرامونی نسبت به دکه‌های مرکزی برای سنگ گرانیت (Swick et al., 1992)

تز-پین^۱ و همکاران در تحقیق خود حالت‌های سایش و شکست سرمته‌های الماسه را مورد بررسی قرار دادند. آنها برای این نوع سرمته‌ها ۴ نوع مکانیزم سایش ملایم، شکست درشت، لب‌پرشدن در امتداد لبه‌ی برش‌دهنده‌ها و لایه‌لایه (پوسته‌پوسته) شدن را معرفی کرده و علت آن را اضافه‌بار مکانیکی و آسیب حرارتی بیان داشتند. از میان مکانیزم‌های بیان شده در تمامی موارد بررسی شده، آسیب‌های ناشی از لب‌پرشدن را مشاهده کردند. به همین دلیل بیان داشتند که سرمته‌هایی که زاویه‌ی شیب منفی کمتری دارند به منظور کاهش این مکانیزم مناسب‌تر می‌باشند (Tze-Pin et al., 1992).

بستی^۲ و همکاران پدیده سایش را در سطح دکه‌های کاربرد تنگستن از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی، میکروسکوپ نوری و طیف‌سنجی پراکنده‌ی اشعه‌ی ایکس^۳ در مگنتیت تحت شرایط واقعی مورد آزمایش قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که مکانیزم ترک‌های سطحی و پوست‌ماری شدن^۴ بعد از گذشت زمان کمی از حفاری شروع شده و همواره یک سایش ادامه‌دار بر روی دکه‌ها وجود داشته است. آنها بیان داشتند که شکل ترک‌ها تفاوت بین ترک‌های سطحی اولیه و آسیب سطح تشکیل را نشان می‌دهد. در نهایت ذکر کردند که هیچ کاهشی در اندازه‌ی دانه و یا تغییر در WC مشاهده نشده است (Beste et al., 2001).

^۱ Tze-Pin

^۲ Beste

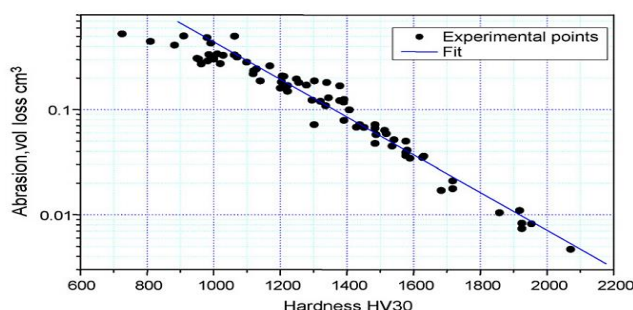
^۳ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

^۴ Reptile skin

عارفی و همکاران در سال ۲۰۰۵ مدلی را برای تحلیل و شبیه‌سازی سایش در سایش فرسایشی در ابزارآلات حفاری ارائه دادند. آنها پیشنهاد کردند که از دو نرم افزار Gambit و Fluent برای شبیه‌سازی سایش استفاده شود. هر چند که تاکنون از این روش پیشنهادی استفاده نشده است (Arefi et al., 2005).

بستی و همکاران این بار در تحقیق خود با یک مطالعه متمرکز بر روی تغییرات فاز اتصال دهنده، نفوذ سنگ، ترکیب و ساختار آنها در مقیاس میکروسکوپی به بررسی درک مفهوم سایش برای سرمته‌های کاربردی سیمانی شده پرداختند. برای این منظور بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها از روش‌های باریکه یونی متمرکز^۱ (بیم)، میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ الکترونی عبوری^۲ به منظور تحلیل و بررسی سایش سرمته‌ها استفاده کردند. در نهایت یک طبقه‌بندی توصیفی برای سایش سرمته‌های کاربردی سیمانی شده بیان داشتند (Beste et al., 2006).

در سال ۲۰۰۷ گی^۳ و همکاران مکانیزم‌های سایش را با بررسی سطوح نمونه‌های کاربرد تنگستن از طریق تست‌های سایش ساینده و فرساینده در آزمایشگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. آنها وابستگی میزان سایش بر روی پارامترهای ریزساختاری کاربرد تنگستن نظیر اندازه‌ی دانه‌های WC و محتوای فاز اتصال دهنده را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها بیان داشتند که با افزایش سختی طیف وسیعی از سرمته‌های کاربرد تنگستن، طبق نتایج حاصل از آزمایش ساینده‌ی در تنش‌های بالا، میزان ساینده‌ی کاهش یافته است (Gee et al., 2007). در شکل ۳-۵ ارتباط ساینده‌ی با سختی سرمته‌های کاربرد تنگستن نشان داده شده است.



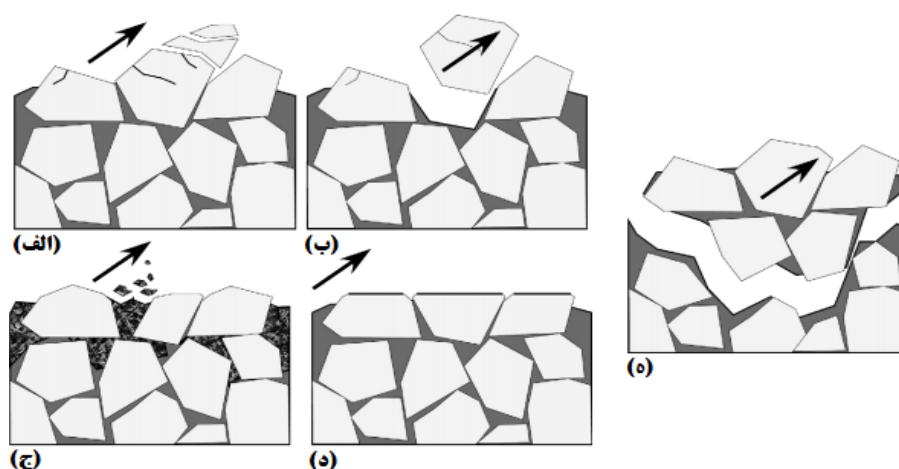
شکل ۳-۵- ارتباط ساینده‌ی با سختی سرمته‌های کاربرد تنگستن (Gee et al., 2007)

^۱ Focused ion beam (FIB)

^۲ Transmission electron microscopy (TEM)

^۳ Gee

بستی و یاکوبسن^۱ با ارائه یک دیدگاه جامع، مکانیزم سایش و خرابی مواد WC/CO را در سرمته‌های دکمه‌ای در سنگ‌های مختلف با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی کرده و آنها را در ۵ کلاس به صورت یک طبقه‌بندی ارائه کردند (شکل ۳-۶). بر اساس مطالعات آنها این مکانیزم شامل تغییر اساسی مواد و ویژگی‌های فلز به خاطر درگیر شدن سنگ و ماده CC در سطح سرمته است و بیشتر شامل تخریب در اثر خوردگی و اکسید شدن WC و تشکیل ترک‌های بزرگ مقیاس در پوسته‌ی آن می‌باشد (Beste and Jacobson, 2008).



شکل ۳-۶- نمایش شماتیک ۵ مکانیزم سایش و جدا شدن مواد از سرمته‌های کاربرد تنگستن دکمه‌ای
 الف) خرد شدن دانه WC و آزاد شدن قطعات؛ ب) جداسازی کل یا بخشی از دانه WC در ساختار؛ ج) خرد شدن اتصال‌دهنده/مخلوط سنگ و آزاد شدن قطعات؛ د) سایش اصطکاکی؛ خرد و خراشیده شدن لایه‌های سطحی خورده یا اکسید شده WC؛ ه) جدا شدن در مقیاس ترکیبی قطعات (Beste and Jacobson, 2008)

بستی و همکاران در تحقیق دیگری به منظور بررسی میزان نفوذ سنگ در ساختار دکمه‌های کاربرد تنگستن، دکمه‌های کنده شده در سیستم حفاری ضربه‌ای- دورانی را توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، طیف‌سنجی اشعه‌ی ایکس و ترکیب باریکه‌ی یونی متمرکز و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که در هر یک از دکمه‌های سرمته‌های حفاری میزان قابل توجهی از مواد سنگ به کاربرد تنگستن نفوذ کرده است (Beste et al., 2008).

موزلی^۲ و همکارانش در سال ۲۰۰۹ آزمایش‌های متنوعی را با هدف شناسایی عوامل اصلی تأثیرگذار بر

^۱ Beste and Jacobson

^۲ Moseley

عملکرد حفاری و رفتار سایش برش‌دهنده‌ها در مغزه‌گیری از بتن مسلح با استفاده از سرمته‌های PDC انجام دادند. تمرکز آنها بر روی مکانیزم شکست و سایش بوده که بدین منظور بین مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل‌سازی مکانیک شکست و پیش‌بینی عمر سرمته، به بیان برخی مقایسه‌های کیفی پرداختند. از دیدگاه آنها نتایج مدل‌سازی مکانیزم شکست با نتایج آزمایشات سازگاری مناسبی داشتند و به این نتیجه رسیدند که خصوصیات مواد و ریزساختارها در لبه و سطح برش‌دهنده‌ها بر سایش و ریزترک‌ها تأثیرگذار می‌باشند (Moseley et al., 2009).

ناگاناوا^۱ در سال ۲۰۱۲ یک مدل دینامیکی از ارتعاش محوری سرمته‌ی سه مخروطی را با توجه به مطالعات گذشته خود به منظور ارزیابی نرخ سایش سرمته‌های دندان‌های توسعه داد. او مدل خود را بر اساس سینماتیک حرکت سرمته‌ی سه مخروطی و رفتار سنگ با در نظر گرفتن هندسه فرسوده دندان و شیب نفوذ دندان توسعه داد. با استفاده از حل معادله حرکت با افزایش زاویه‌ی چرخش مخروط با توجه به محدودیت در چرخش، زمان ارتعاش محوری سرمته را شبیه‌سازی کرد. مدل توسعه یافته را برای شبیه‌سازی حالت‌های مختلف سایش سرمته‌های سه مخروطی مورد استفاده قرار داد. مطالعه شبیه‌سازی او نشان داد که سایش مخروط و دندان‌ها را می‌توان با نظارت مستمر طیف توان ارتعاش محوری سرمته‌ی مخروطی تعیین کرد (Naganawa, 2012).

اولوژو^۲ و همکارانش به منظور تعیین مکانیزم سایش و خرابی سطح سرمته‌های کاربرد تنگستن سیمانی‌شده، تعدادی از سرمته‌های استفاده شده در روش حفاری چکش پایین در سنگ گرانیت را مورد بررسی قرار دادند. برای توصیف مکانیزم سایش و شکست دکمه‌های فرسوده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، طیف‌سنجی پراکنده‌ی اشعه‌ی ایکس و طیف‌سنجی الکترونی اژه^۳ استفاده کردند و نمونه‌ها را در آزمایشگاه در معرض آزمون ضربه و خراش قرار دادند. سپس مهم‌ترین مکانیزم‌های سایش و شکست سطح شامل، تغییر شکل شدید پلاستیک، ترک‌خوردگی، خرد شدن دانه‌های WC و

¹ Naganawa

² Olovsjö

³ Auger electron spectroscopy (AES)

تخریب مکانیکی یا تریبوشیمیایی (خوردگی) فاز اتصال‌دهنده‌ی کبالت را تعیین کردند. آنها اهمیت آماده‌سازی نمونه‌ها، بهینه‌سازی تنظیمات میکروسکوپی و طیف‌سنجی را برای افزایش حساسیت سطح به منظور بررسی پدیده‌ی تریبولوژیکی در مقیاس کوچک بیان کردند (Olovsjö et al., 2013).

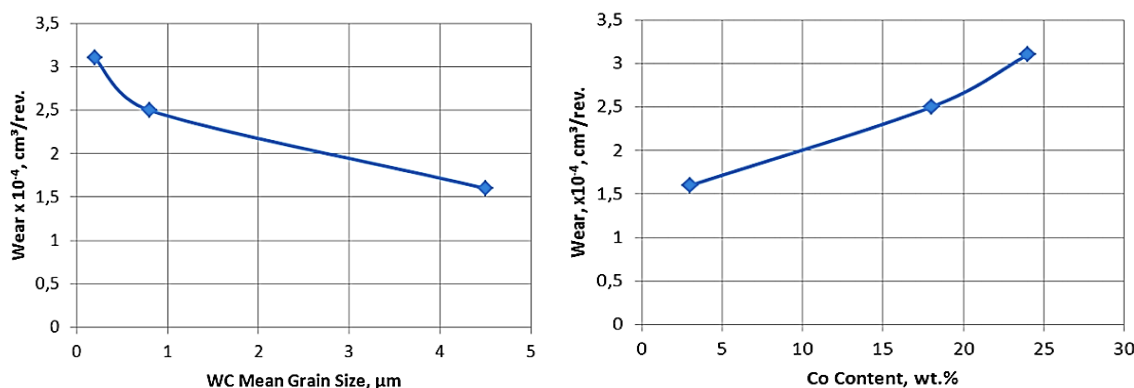
انگسرید^۱ و همکاران مکانیزم سایش WC/Co را در تماس با یک استوانه‌ی دوار با پودر حاوی سیلیس و آلومینا در مقیاس آزمایشگاهی با شرایط خشک و تر مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش، سایش در شرایط خشک نسبت به شرایط تر به میزان کمتری اتفاق می‌افتد. همچنین سایش WC/Co همانند حفاری شامل ترک‌خوردن و گسیختگی دندان‌های WC، تخلیه‌ی فاز اتصال‌دهنده‌ی کبالت و چسبیدن مواد سنگی در سرشته بوده است (Angseryd et al., 2013).

تورس^۲ و همکارانش در تلاش برای بهبود انتخاب مواد، طراحی و قابلیت اطمینان به سرشته‌های کاربرد تنگستن سیمانی‌شده به بحث در مورد شکستگی و مقاومت در برابر رشد ترک چهار سرشته‌ی مختلف (دو سرشته در معدن و دو سرشته در نفت) پرداختند. آنها توجه خاصی بر شناسایی خواص مکانیکی مواد، ریزساختارهای اولیه، ارزیابی چقرمگی شکست و سینتیک رشد ترک‌ها داشتند. در انتها تأثیر ریزساختارها بر اندازه‌گیری مکانیک رشد ترک‌ها تحت بار یکنواخت را در ارتباط مستقیم با میزان چقرمگی شکست بیان کرده و به عنوان مکانیزم برجسته معرفی کردند (Torres et al., 2014).

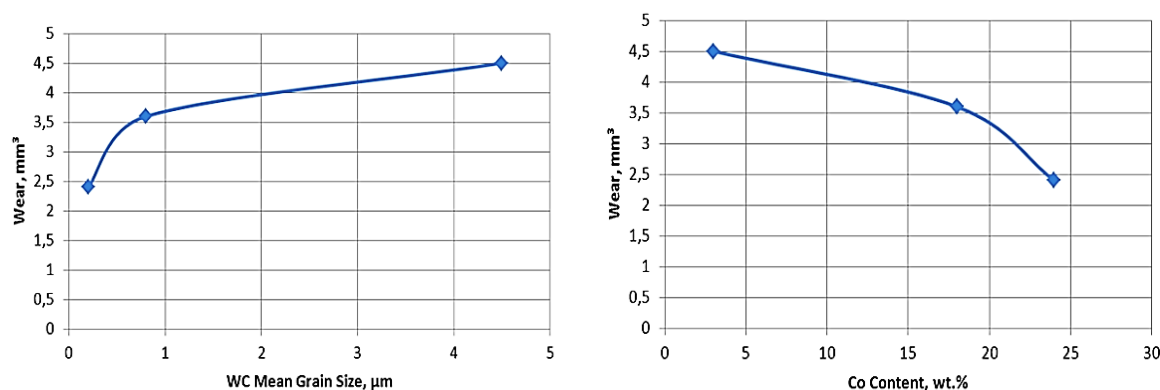
در سال ۲۰۱۴ کونیاشین و ریس^۳ سرشته‌های کاربرد سیمانی‌شده را با اندازه‌های متفاوت دانه‌های WC (از نانومتر تا میکرومتر) و محتوای کبالت مورد بررسی قرار دادند. هدف اصلی تحقیق آنها بررسی میزان آسیب سایش، رفتار سایشی و مکانیزم سایش سرشته‌های کاربرد سیمانی‌شده بوده است. میزان سختی و مقاومت سرشته‌های کاربرد سیمانی‌شده را با توجه به نقش مهم در تعیین آسیب سایش سرشته‌ها مورد آزمایش قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که مقاومت در برابر سایش با افزایش اندازه‌ی دانه‌های WC و کاهش محتوای کبالت طبق آزمایش ASTM B611 (بارگذاری زیاد) و با

^۱ Angseryd^۲ Torres^۳ Konyashin and Ries

کاهش اندازه‌ی دانه‌های WC و افزایش محتوای کبالت طبق آزمایش ASTM G65 (بارگذاری کم)، افزایش می‌یابد (شکل‌های ۷-۳ و ۸-۳) (Konyashin and Ries, 2014a).

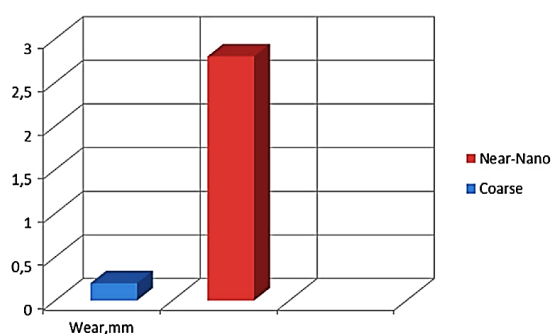


شکل ۷-۳ سایش کاربید سیمانی‌شده در بارگذاری زیاد با ترکیب‌های مختلف اندازه دانه‌های WC و محتوای کبالت (Konyashin and Ries, 2014a)

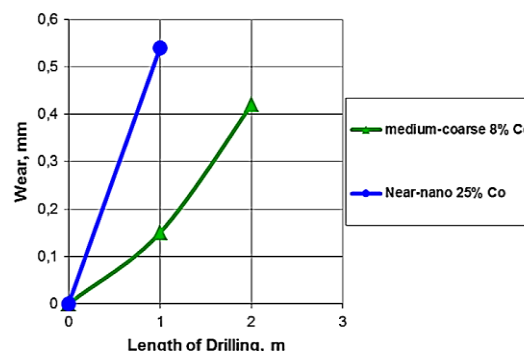


شکل ۸-۳ سایش کاربید سیمانی‌شده در بارگذاری کم با ترکیب‌های مختلف اندازه دانه‌های WC و محتوای کبالت (Konyashin and Ries, 2014a)

کونیاشین و ریس همانند تحقیق پیشین، هدف تحقیق خود را بررسی میزان آسیب سایش، رفتار سایشی و مکانیزم سایش سرمته‌های کاربید سیمانی‌شده با توجه به میزان اندازه‌ی دانه‌های WC و محتوای کبالت بیان کردند. تست‌های آزمایشگاهی عملکرد حفاری و برش سنگ را توسط سرمته‌های کاربید سیمانی‌شده با اندازه‌های بسیار متفاوت دانه‌های WC (از نانومتر تا میکرومتر) و محتوای کبالت مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج تحقیق، مقاومت در برابر سایش کاربیدهای سیمانی‌شده با دانه‌های نزدیک نانو به طور قابل توجهی پایین‌تر از کاربیدهای با دانه‌های متوسط و درشت با سختی مشابه است (شکل‌های ۹-۳ و ۱۰-۳) (Konyashin and Ries, 2014b).



شکل ۳-۱۰- مقایسه‌ی سایش سرمته‌های کاربید تنگستن با دانه‌های نزدیک نانو و دانه‌های درشت با سختی مشابه در برش گرانی (Konyashin and Ries, 2014b)



شکل ۳-۹- مقایسه‌ی سایش سرمته‌های کاربید تنگستن با دانه‌های نزدیک نانو با ۲۵٪ کبالت و دانه‌های درشت با ۸٪ کبالت با سختی تقریباً مشابه (Konyashin and Ries, 2014b)

سعیدی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ ارزیابی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی (WC/CO) را با استفاده از تکنیک پردازش تصاویر دیجیتال مورد بررسی قرار دادند. چهارده سرمته‌های استفاده شده را به آزمایشگاه انتقال داده و پس از شستن آنها، از سرمته‌ها در یک موقعیت از پیش تعیین شده و در جهت مشخص عکس‌برداری کردند. به منظور ارزیابی سایش سرمته‌ها از سه تکنیک بافت سطح^۱، ماتریس رخداد همزمان سطوح خاکستری^۲ و طبقه‌بندی‌های مبتنی بر حداقل فاصله^۳ در نرم‌افزار Matlab استفاده کردند. برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از پردازش تصویر، سایش را به صورت تجربی از دو روش اندازه‌گیری افت وزن و افت ابعاد محاسبه کرده و با نتایج به دست آمده از پردازش تصویر مقایسه کردند. نتایج تجزیه و تحلیل سرمته‌ها نشان داد که در میان شاخص‌های سطح، مساحت سرمته و محور طولی بزرگ و در میان شاخص‌های ماتریس رخداد همزمان سطوح خاکستری، کنتراست، آنتروپی و همبستگی و در میان شاخص‌های مبتنی بر حداقل فاصله، طول اقلیدسی، فاصله‌ی شهری، فاصله‌ی چبیشف^۴ و ضریب همبستگی سطوح خاکستری^۵ روابط مناسبی با میزان سایش از خود نشان دادند. روابط بین شاخص‌های معرفی شده و سایش تجربی محاسبه شده در شکل‌های ۳-۱۱ تا ۳-۱۳ به نمایش در آمده است (Saeidi et al., 2014).

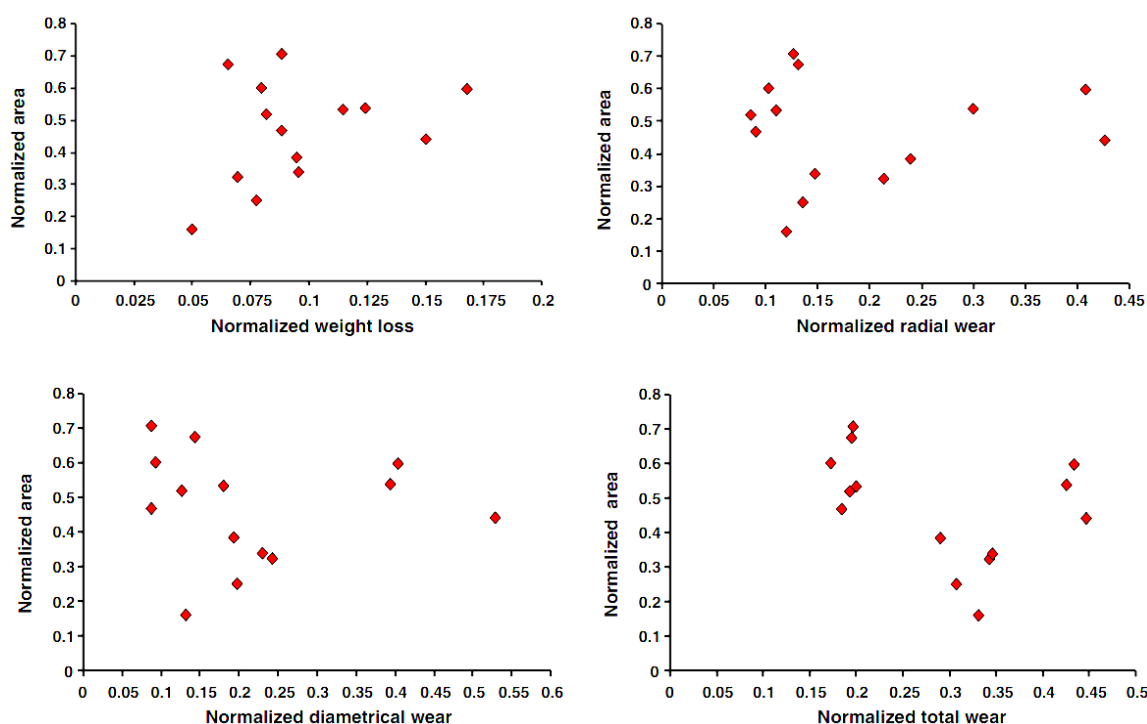
¹ Surface Texture

² Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM)

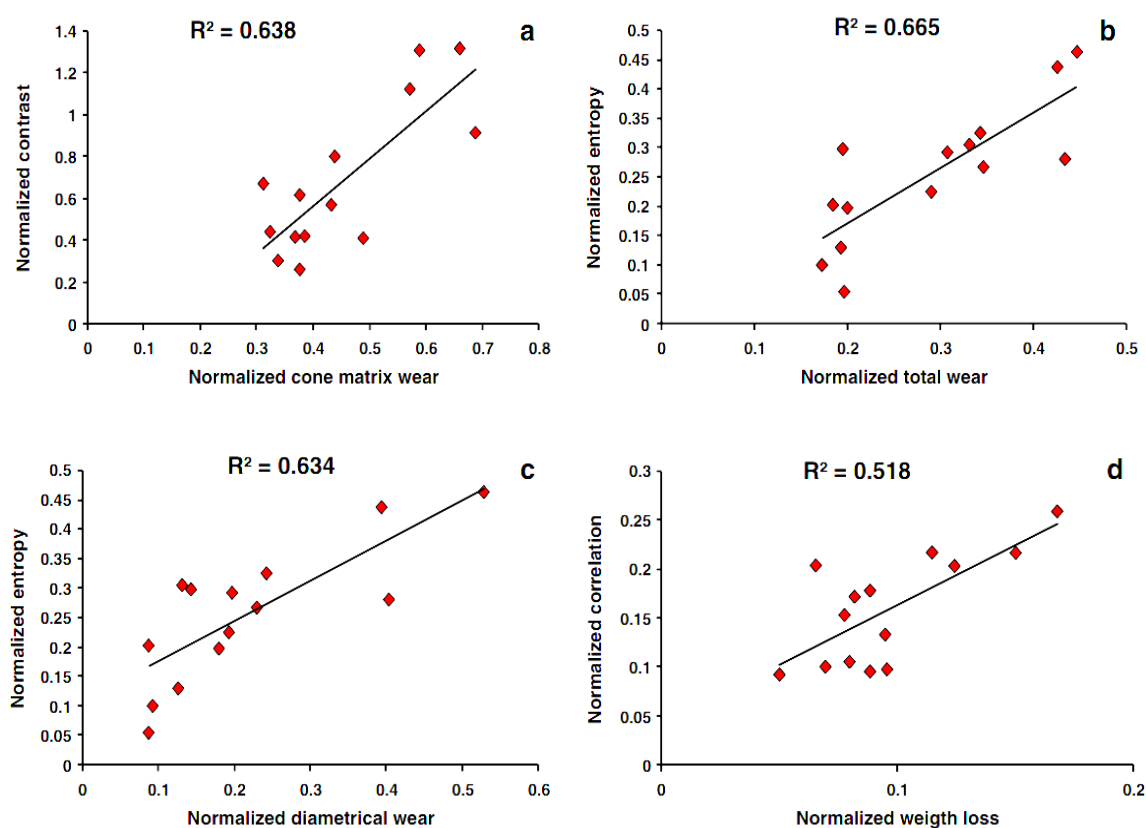
³ Minimum distance based classifiers

⁴ Chebyshev distance

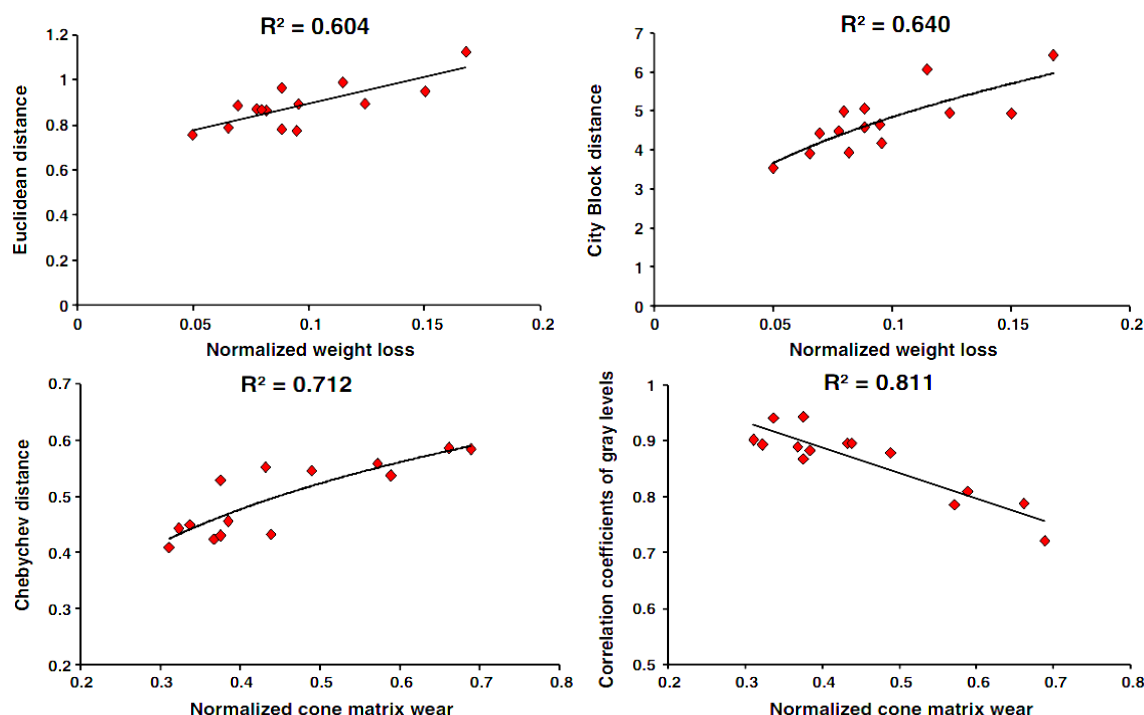
⁵ Gray-level correlation coefficient (GLCC)



شکل ۳-۱۱- همبستگی بین شاخص‌های سطح و اندازه‌گیری سایش سرمته‌ها (Saeidi et al., 2014)



شکل ۳-۱۲- همبستگی پارامترهای ماتریس رخداد همزمان سطوح خاکستری و سایش سرمته‌ها (Saeidi et al., 2014)



شکل ۳-۱۳- همبستگی شاخص‌های طبقه‌بندی‌کننده مبتنی بر حداقل فاصله و سایش سرمته‌ها (Saeidi et al., 2014)

نهایک^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۵ با توجه به سختی بالا و خصوصیات مقاومتی سرمته‌های کاربرد تنگستن سیمانی‌شده (CC) در برابر سایش به بحث در مورد مکانیزم سایش در سرمته‌های کاربرد تنگستن سیمانی‌شده پس از حفاری (زغال‌سنگ/سنگ) و بررسی پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر پدیده‌ی سایش پرداختند. انواع مختلف سرمته‌های کاربرد تنگستن سیمانی‌شده را تحت آزمایش و عملیات برجا قرار داده و از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی^۲ و طیف‌سنجی اشعه‌ی ایکس به تحلیل مکانیزم سایش پرداختند (Nahak et al., 2015).

در سال ۲۰۱۵ یاهیاوی^۳ و همکارانش رفتار تریبولوژیکی دکمه‌های سرمته‌های WC/Co را در برابر یک لایه از جنس آلومینا با استفاده از یک تریبومتر (ایزار سنجش) مورد مطالعه قرار دادند. برای این تحقیق از سه سرمته‌ی WC/Co دکمه‌ای با اندازه مختلف دانه‌های WC و محتوای کبالت استفاده کرده و به تحلیل مکانیزم سایش دکمه‌های WC/Co با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و

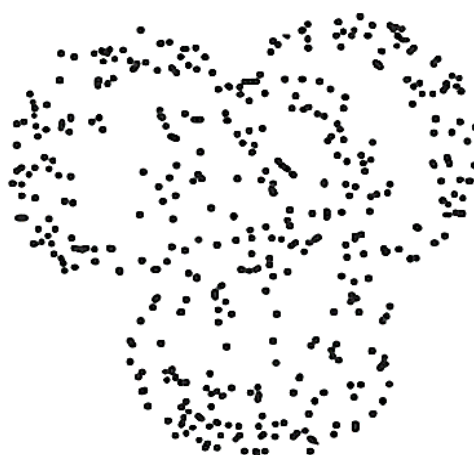
^۱ Nahak

^۲ Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)

^۳ Yahiaoui

طیف‌سنجی پراش انرژی اشعه‌ی ایکس پرداختند. خواص فیزیکی و مکانیکی را برای ایجاد روابط بین رفتار سایشی و ویژگی‌های ریزساختاری در نظر گرفتند. این اندازه‌گیری نشان داد که ضریب اصطکاک به طور عمده با محتوای کبالت کاهش می‌یابد. همچنین بعد از بارگذاری ثابت مشخص شد که حجم سایش سرمته به طور واضح با بار وارده شده متناسب بوده و نرخ سایش دکه‌ها افزایش منطقی با محتوای کبالت دارد (Yahiaoui et al., 2015).

شهرابی^۱ در سال ۲۰۱۵ با الگو گرفتن از سعیدی و همکارانش از روش پردازش تصویر دیجیتال به منظور تحلیل ساییدگی سرمته‌های حفاری بهره برد. پس از عکس‌برداری از سرمته‌ها در حالت نو و ساییده‌شده (بعد از شستن و تمیز کردن) با استفاده از نرم‌افزار Matlab ابعاد تصاویر را به ۴۰۰×۴۰۰ پیکسل تغییر داد و برای تحلیل سایش از مقایسه‌ی پیکسل به پیکسل بهره برد. بعد از تحلیل تصاویر با توجه به ابعاد تصاویر که شامل ۱۶۰۰۰۰ پیکسل خواهد بود به این نتیجه رسید که ۴۸۹۸ پیکسل تغییرات در تصویر سرمته ساییده‌شده نسبت به سرمته نو رخ داده است که نشان‌دهنده‌ی ساییدگی سرمته‌ها می‌باشد (شکل ۳-۱۴). نتایج این مطالعه نشان داد که با یک فرآیند مناسب به روش پردازش تصویر، می‌توان سطح سایش سرمته را تعیین کرد تا از طریق این اطلاعات، اپراتور درباره‌ی زمان تعویض سرمته‌ها تصمیم درستی اتخاذ کند (Shahrabi, 2015).



شکل ۳-۱۴- مقایسه‌ی پیکسل‌های تغییر یافته در سرمته‌های نو و ساییده‌شده (Shahrabi, 2015)

^۱ Shahrabi

در سال ۲۰۱۶ کاتیار^۱ و همکارانش حالت‌های خراب شدن سرمته‌های کاربرد تنگستن سیمانی شده (WC/CO) و پیش‌بینی آن در شرایط محیطی مختلف را نشان داده و مشخصات سطح خراب شده را آزمایش و تحلیل کردند. آنها بیان داشتند که طول عمر سرمته‌های کاربرد تنگستن سیمانی شده (WC/CO) بسته به خواص مکانیکی، شیمیایی، حرارتی، ترکیب، هندسه (اندازه، شکل و ابعاد)، طراحی مونتاژ کاربرد تنگستن و خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی محیط‌های که کاربرد تنگستن در آن فعالیت می‌کند، تعیین می‌شود (Katiyar et al., 2016).

هاینریکس^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ مراحل اول تغییر شکل و سایش کاربرد تنگستن سیمانی شده را در حفاری سنگ مورد بررسی قرار دادند. پس از هر مرحله، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مناطقی که دچار سایش شدند را با وضوح بالا تعیین کردند. برای مطالعه تعامل اولیه سرمته با سنگ، بخش کاربرد سیمانی شده بر روی سنگ در فاصله محدود و مشخص لغزیده می‌شود و با تکرار این عمل ناحیه برخورد بارها مورد تحلیل سایش قرار می‌گیرند. به این ترتیب می‌توان تغییر شکل تدریجی، تخریب و سایش ریز ساختارها را سرمته‌ها مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق چهار محصول تجاری کاربرد تنگستن سیمانی شده که در حفاری سنگ استفاده می‌شود، مورد ارزیابی قرار گرفته است (Heinrichs et al., 2017).

در سال ۲۰۱۷ تکالیچ^۳ و همکارانش به معرفی، ارزیابی و پیش‌بینی غیر مستقیم سایش دکمه‌های سرمته‌های ضربه‌ای کاربرد تنگستن بر اساس مدل عمق نفوذ مورد استفاده در کنترل فرآیند که باعث کاهش مصرف انرژی و کاهش سایش سرمته در ساخت و سازه‌های زیرزمینی و استخراج منابع معدنی می‌شود پرداخته‌اند. در این تحقیق از تجزیه و تحلیل سطح ریزساختار آسیب دیده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است. در مطالعه حاضر از یک دستگاه اصلاح شده برای ثبت ضربه واحد از یک سرمته کاربرد تنگستن به یک نمونه سنگ استفاده شده است تا مراحل اولیه خرابی ریز

¹ Katiyar² Heinrichs³ Tkalic

ساختار سرمته کاربرد تنگستن را ثبت کند (Tkalic et al., 2017).

عباس در سال ۲۰۱۸ به بررسی روش‌های قدیمی و فعلی سنجش سایش از نظر پارامترهای حفاری، مشخصات مکانیکی و افزایش کارایی سرمته‌های حفاری نفت و گاز پرداخته است. او مدل‌های سایش تجربی و تکنیک‌های پیش‌بینی سایش در حین حفاری را با مدل‌های شبیه‌سازی سایش با استفاده از المان محدود و روش المان مجزا مورد بحث قرار داد. هدف اصلی بررسی او، مکانیزم‌های سایش سرمته‌های سه‌مخروطی و PDC در حفاری نفت است. علاوه بر این، او روش‌های قبلی برای اندازه‌گیری سایش را مورد بررسی قرار داد و یک روش پیشنهادی برای برآورد گشتاور سرمته مطرح کرد که می‌تواند برای محاسبه پارامترهای حفاری و ارزیابی سایش مورد استفاده قرار گیرد (Abbas, 2018).

دودک و ولادزلیچک^۱ در سال ۲۰۱۸ نتایج تست سایش دکمه‌ها در انواع سرمته‌های حفاری چال‌های انفجاری با قطر ۹۵ میلی‌متر را ارائه دادند. هدف از این آزمایش تعیین نوع سایش دکمه‌های سرمته در شرایط عملیاتی و تاثیر پارامترهای فرایند حفاری بر دوام سرمته‌ها بود. سپس آزمایش بر روی سرمته‌ها برای تعیین نوع سایش سرمته نظیر سایش ساینده، کنده شدن و شکستن دکمه‌ها انجام گرفت. طبق نتایج تحقیق نوع اصلی سایش دکمه‌های سرمته‌های حفاری سایش، ساینده بوده است که بیشتر بر روی دکمه‌های جلو سرمته اتفاق افتاده است (Dudek and Władzielczyk, 2018).

ژاکوبسن^۲ در سال ۲۰۱۸ در آزمایشگاه شرکت سندویک با کشیدن سرمته کاربرد تنگستن بر روی سطوح گرانیات و ماسه سنگ سایش این نوع از سرمته‌ها را اندازه‌گیری کرد. برای این منظور او سایش سرمته را از طریق افت وزنی اندازه‌گیری کرد و دکمه‌های سایش یافته را از طریق میکروسکوپ اسکن الکترونی مورد مطالعه قرار داد (Jacobson, 2018).

هدف سایی^۳ و همکارانش، انجام یک مطالعه مقایسه‌ای برای ارزیابی مقاومت دکمه‌های سرمته در برابر سایش در حفاری ضربه‌ای-دورانی است. در این تحقیق از دو روش آزمایشگاهی سایش لغزشی و

¹ Dudek and Władzielczyk

² Jacobson

³ Saai

سایش ضربه‌ای برای ارزیابی مقاومت دکمه‌های سرمته در برابر سایش در حفاری ضربه‌ای-دورانی استفاده شده است. در این تحقیق آزمون سایش لغزشی و آزمایش سایش ضربه‌ای رفتار مشابهی را برای مقاومت دکمه‌های سرمته‌های WC-Co نشان دادند. در تمام آزمایش‌های انجام شده، کاهش وزن سرمته‌های WC-Co در اثر کسر حجم Co و اندازه متوسط دانه WC بوده است (Saai et al., 2020). اسپورین^۱ در تحقیق خود در سال ۲۰۲۰ بیان می‌کند که کاهش سرعت سرمته سه‌مخروطی ناشی از انتخاب نادرست روش حفاری، کاهش نرخ نفوذ و یا خرابی سرمته در حین فرآیند حفاری است. او در این مقاله با بیان اینکه سایش سرمته در هنگام حفاری با کاهش نرخ نفوذ همراه است سرمته‌های سه‌مخروطی را به طور کامل مورد بررسی قرار داده است. در این تحقیق با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی، تجزیه و تحلیل حرارتی و تجزیه و تحلیل ترکیب شیمیایی مواد فولادی تشکیل دهنده سرمته انجام شده است (Šporin, 2020).

اسپورین و همکارانش در تحقیق دیگری پارامترهای حفاری سرمته‌های سه‌مخروطی را در حالت برجا اندازه‌گیری کردند و پس از اتمام فرایند حفاری، سرمته را از نظر سایش مورد بررسی قرار دادند. آنها سپس از طریق میکروسکوپ نوری و الکترونی، تغییرات در هندسه، ترکیب شیمیایی و سطح سرمته را در اثر پارامترهای عملیاتی و خصوصیات سنگ مورد بررسی قرار دادند (Šporin et al., 2020).

۳-۳- روش‌های پایش غیرمستقیم

روش‌های پایش غیرمستقیم روش‌هایی بر اساس اندازه‌گیری پارامترهایی هستند که منجر به سایش ابزار می‌شوند و یا در سایش ابزار تأثیرگذارند. در روش‌های غیرمستقیم، اندازه‌گیری پارامترهای عملیاتی، فیزیکی، مکانیکی و ساختاری سنگ منجر به تعیین درجه‌ی سایش خواهد شد. لازم به ذکر است که در روش پایش غیرمستقیم پارامترهای تأثیرگذار بر سایش سرمته به صورت کمی و کیفی مورد مطالعه قرار گرفته است. در جدول ۲-۳ مطالعات صورت گرفته با روش‌های پایش غیرمستقیم ارائه شده است.

^۱ Šporin

جدول ۳-۲- پژوهش‌های انجام شده با روش‌های پایش غیرمستقیم

سال	محقق (محققان)	توضیحات
1979	Larsen-Basse and Koyanagi	ساییدگی مواد WC/Co توسط کوآرتز
1982	Suana and Peters	شاخص ساییدگی سرشار و ارتباط آن با کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی
1987	Howarth and Rowlands	ارزیابی کمی بافت سنگ و همبستگی آن با خصوصیات مقاومتی و قابلیت حفاری
1990	Miller and Ball	استفاده از دستگاه‌ها و تجهیزات آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد سרتمته‌ی حفاری
1991	Miller and Ball	سایش الماس‌ها در سرتمته‌های حاوی الماسه در حفاری
1994	Xuefeng and Shifeng	مکانیزم‌های سایش سرتمته‌های الماسی
1995b	Ersoy and Waller	خصوصیات سایش سرتمته‌های مغزه‌گیری الماس مصنوعی (PDC) پین و هیبریدی در حفاری سنگ
1997	Ersoy and Waller	خرده‌های حفاری و پارامترهای عملیاتی سرتمته‌های مغزه‌گیری تعادل گرمایی PDC
2002	Cooper	یک طرح برای اندازه‌گیری زمان واقعی سایش دندان‌های سرتمته
2002a	Plinninger et al.	پیش‌بینی سایش ابزار در حفاری و آتشباری
2002b	Plinninger et al.	پیش‌بینی و طبقه‌بندی سایش ابزار در حفاری و انفجار تونل
2007	Adebayo and Okewale	تحلیل پتانسیل برخی سنگ‌ها در نیجریه به منظور بررسی سایش سرتمته‌های حفاری
2008	Plinninger	ارزیابی ساییدگی در حفاری سنگ‌های سخت
2008	Rashidi et al.	پیش‌بینی زمان واقعی سایش سرتمته‌ی حفاری با ترکیب انرژی سنگ و مفاهیم مقاومت حفاری
2010	Adebayo et al.	قابلیت حفاری و خصوصیات مقاومتی برای سنگ‌های انتخاب شده در نیجریه
2010a	Rashidi et al.	بهینه‌سازی زمان واقعی سایش سرتمته با استفاده از سیستم مشاوره حفاری هوشمند
2010b	Rashidi et al.	رویکردی جدید در پیش‌بینی زمان واقعی سایش سرتمته
2010	Wu et al.	تأثیر انواع مختلف سنگ، نوع و سایش سرتمته‌های سه‌مخروطی دکمه‌ای بر نرخ نفوذ
2011	Adebayo	تأثیر خصوصیات بافت سنگ بر روی سایش سرتمته
2012a	Adebayo and Akeju	ارزیابی کارایی سرتمته‌های سه‌مخروطی بر سازند سنگ آهک
2012b	Adebayo and Akeju	ارتباط خصوصیات سنگ آهک با متغیرهای اجرایی سرتمته برای توسعه‌ی نرم‌افزار
2012	Adebayo and Bello	تحلیل خصوصیات سنگ به منظور بررسی همبستگی انرژی ویژه با نرخ نفوذ و نرخ سایش
2013	Adebayo and Adetula	ارزیابی خصوصیات مکانیکی و فیزیکی سنگ برای طبقه‌بندی شرایط حفاری
2014	Stupina et al.	کنترل و مدیریت به وسیله‌ی منابع سرتمته‌های سه‌مخروطی در توده سنگ حفاری
2015	Adebayo and Akande	تحلیل سایش سرتمته‌های دکمه‌ای و کارایی حفاری چکش پایین
2015	Babatunde	توسعه‌ی مدل‌های سایش سرتمته با استفاده از خواص غالب سنگ برای نمونه‌های سنگی در نیجریه
2015	Saeidi et al.	ارزیابی سایش سرتمته‌های کاربرد تنگستن سیمانی شده در معادن روباز
2016	Dogruoz et al.	یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی از کارایی برش سرتمته‌های ساییده
2016	Ghosh et al.	بررسی طول عمر سرتمته‌های سه‌مخروطی دورانی با استفاده از اندازه‌گیری داده‌ها در حین حفاری
2016	Karasawa et al.	نتایج آزمایش تأثیر سایش سرتمته بر روی پاسخ گشتاور
2017	Sahoo and Choudhary	تأثیر مقاومت فشاری سنگ بر نرخ نفوذ و سایش سرتمته حفاری
2018	Ivanicová et al.	پیش‌بینی غیر مستقیم سایش سرتمته‌های حفاری در سنگ آندزیت
2018	Reitz and de Freitas	روش شبیه‌سازی زمان واقعی سایش سرتمته حفاری با استفاده از مونت کارلو و الگوریتم خوشه‌بندی
2018	Wang and li	ارزیابی ساییدگی سنگ‌ها بر اساس مدل سایش سرتمته PDC
2019	Adebayo	ارزیابی کارایی سرتمته دورانی شرکت اطلس کوپکو در حفاری سازند آهکی در نیجریه
2019	Mazen et al.	تخمین نرخ سایش دندان و دکمه‌های سرتمته با استفاده از پارامترهای عملیاتی و ساییدگی سنگ‌ها
2020	Majeed et al.	ارزیابی ساییدگی برای پیش‌بینی سایش دکمه‌های سرتمته با استفاده از خصوصیات ژئوتکنیکی
2020	Piri et al.	بررسی مقاومت سایش سرتمته با پوشش‌های مختلف سطح با توجه به خواص مکانیکی سنگ
2020	Rafezi et al.	ارزیابی شرایط سایش سرتمته سه‌مخروطی دورانی به صورت کاربردی و عملی
2020	Shankar et al.	اندازه‌گیری دمای بین سنگ و سرتمته و میزان سایش سرتمته تنگستن در حین حفاری دوارنی
2021	Capik and Batmunkh	اندازه‌گیری، پیش‌بینی و مدل‌سازی سایش سرتمته در خلال عملیات حفاری
2021	Capik and Yilmaz	مدل‌های توسعه یافته برای پیش‌بینی طول عمر سرتمته و انواع سایش سرتمته

در سال ۱۹۷۹ لارسن-باس و کویاناگی^۱ درباره‌ی اهمیت ساییدگی WC/Co توسط کوارتز تحقیق کردند. آنها بیان داشتند که دانه‌های کاربید توسط نیروهای اصطکاکی به صورت سیکل در مکان خود جابجا شده که این امر موجب خراش در سطح آن می‌شود. آنها به این نتیجه رسیدند که کمبود مقدار کبالت به دلیل عدم فشرده‌سازی اولیه منجر به شکستن دانه‌های WC می‌شود (Larsen-Basse and Koyanagi, 1979).

سوانا و پترز^۲ در سال ۱۹۸۲ رابطه‌ی بین شاخص سایندگی سرشار و کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی را نشان دادند و این نکته را بیان داشتند که شاخص سایندگی سرشار می‌تواند به عنوان یک الگو برای توصیف سایش سرمته‌ها بکار رود. آنها بیان کردند که هرچه شاخص سایندگی سرشار بالاتر می‌رود میزان سایش سرمته‌ها بیشتر خواهد شد (Suana and Peters, 1982).

هاوارد و رولاند^۳ در سال ۱۹۸۷ نشان دادند که بافت سنگ رابطه‌ی مستقیمی با مقاومت سنگ دارد و هرچه سنگ دارای مقاومت بیشتری باشد قابلیت حفاری در آن کاهش می‌یابد که نتیجه آن افزایش سایش در سرمته‌ها خواهد بود (Howarth and Rowlands, 1987).

در سال ۱۹۹۰ میلر و بال^۴ در آزمایشگاه فرآیند حفاری سنگ‌های مختلف را با میکروسرمته‌هایی به قطر ۲۰ میلی‌متر شبیه‌سازی کردند و مقادیر سرعت چرخش، وزن روی سرمته (نیروی وارده)، گشتاور و نرخ نفوذ را ثبت کردند. آنها بیان داشتند که قابلیت سایندگی سنگ‌ها و مقاومت فشاری تک‌محوره با قابلیت حفاری در ارتباط می‌باشند و از طریق حاصل‌ضرب مقاومت در برابر سایندگی و مقاومت فشاری تک‌محوری، انرژی ویژه را پیش‌بینی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که سایش سرمته‌های حفاری که نقش بسیار اساسی در حفاری دارد به خوبی پیش‌بینی نخواهد شد زیرا عوامل دیگری نیز به مانند اندازه و ابعاد دانه‌ها و مباحث کانی‌شناسی تأثیر حیاتی بر روند عملیات خواهند داشت (Miller and Ball, 1990).

میلر و بال در ادامه‌ی تحقیق پیشین خود سایش الماس‌ها را در سرمته‌های حاوی الماس در آزمایشگاه روی

¹ Koyanagi

² Suana and Peters

³ Howarth and Rowlands

⁴ Miller and Ball

سنگ‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. آنها انواع مختلفی از سرمته‌های الماسه را با فشارها، نرخ پیشروی و سرعت چرخش مختلف مورد آزمایش قرار داده و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و نوری به تحلیل سایش سرمته‌ها پرداختند. این فشارها را به عنوان مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که ماهیت حالت سایش الماس‌ها با شرایط حفاری تغییر نمی‌کند اما ابعاد نسبی انواع مختلف الماس با عملکرد حفاری تغییر خواهد کرد (Miller and Ball, 1991).

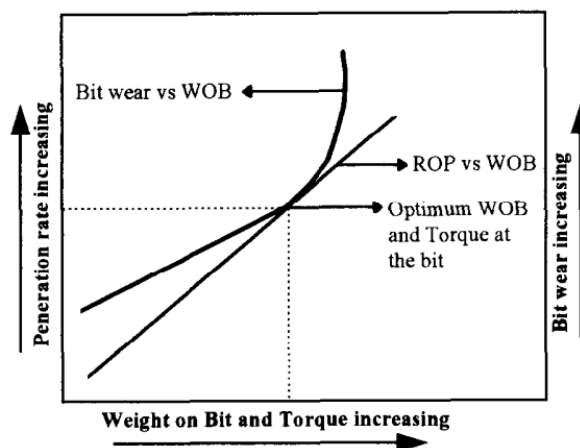
در سال ۱۹۹۴ ژوفنگ و شیفنگ^۱ در مطالعه تجربی خود، به بررسی مکانیزم سایش سرمته‌های الماسه در حفاری سنگ سخت پرداختند. آزمایش برش سنگ با یک الماس به منظور اندازه‌گیری ضریب اصطکاک و فرآیند اصطکاک‌سنجی در ارتباط با سرمته و سنگ توسط آنها انجام گرفت. آنها بیان داشتند که ضریب اصطکاک به شدت به ویژگی‌های شکستگی سنگ در تماس با سطح سنگ وابسته است. آنها هفت نمونه سنگی را در آزمایشگاه از نظر بافت، سختی و ضریب پلاستیسیته مورد مطالعه قرار داده و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی فرآیند سایش سرمته‌ها و ماتریس آنها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که خصوصیات سایش سرمته‌های الماسی نه تنها به خواص مواد و ساختار آنها بستگی دارد بلکه به پارامترهای عملیاتی در حفاری نیز وابسته است (Xuefeng and Shifeng, 1994).

ارزوی و والر^۲ سه نوع از سنگ‌های رسوبی (سنگ آهک، سیلتستون، ماسه‌سنگ) و دو نوع از سنگ‌های آذرین (گرانیت و دیوریت) را به نمایندگی از انواع سنگ‌ها مورد استفاده قرار داده و از سه نوع سرمته‌های مغزه‌گیری PDC به منظور انجام آزمایش بهره بردند. طیف وسیعی از خصوصیات بافتی، مکانیکی سنگ (بافت، اندازه دانه، شکل دانه، کوارتز محتوی معادل، محتوای سیلیس، مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی، مدول یانگ، سختی موس، سختی شور، سایش سرشار، سایش شیمازک، سایش ضربه‌ای)، پارامترهای عملیاتی (نرخ نفوذ، گشتاور، بار روی سرمته، سرعت چرخش، انرژی ویژه) و افت وزن و ابعاد سرمته‌ها را مورد محاسبه قرار دادند (شکل ۳-۱۵). آنها شایع‌ترین مکانیزم سایش در طول حفاری را سایش

^۱ Xuefeng and Shifeng

^۲ Ersoy and Waller

ساینده بیان کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که محتوای سیلیس، شکل دانه‌ها، سختی شور، موس و شاخص‌های ساینده‌ی بیشترین تأثیر را بر نرخ سایش سرمه دارند (Ersoy and Waller, 1995b).



شکل ۳-۱۵- رابطه‌ی بین پارامترهای عملیاتی سرمه با سایش سرمه (Ersoy and Waller, 1995b)

در سال ۱۹۹۷ ارزوی و والر همانند کار گذشته خود از سه نوع سرمه‌ی مغزه‌گیری الماسی در یک نمونه از سنگ رسوبی (ماسه‌سنگ) استفاده کردند. پارامترهای عملیاتی (نرخ نفوذ، وزن روی سرمه، گشتاور، انرژی ویژه، نرخ جریان فلاشینگ و سرعت چرخش) و پارامترهای مربوط به اندازه‌ی خرده‌های حفاری را در آزمایشگاه به دست آوردند. آنها از سه روش برای اندازه‌گیری سایش (افت ارتفاع ماتریس، کاهش ارتفاع سگمنت و افت وزن و کاهش قطر داخلی و خارجی) سرمه‌های الماسه بهره بردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که به منظور اندازه‌گیری نرخ سایش، رابطه‌ی مناسبی بین افت ارتفاع و افت وزن وجود داشته و نرخ نفوذ بیشترین تأثیر را بر سایش دارد (Ersoy and Waller, 1997).

کوپر^۱ در سال ۲۰۰۲ روشی را برای اندازه‌گیری در لحظه‌ی سایش بر اساس تفاوت در نرخ حفاری تئوری و نرخ حفاری واقعی پیشنهاد داد. او بیان کرد که بر اساس اطلاعات ناشی از لاگ‌های حفاری که به صورت گیت‌های الکترونیکی بر روی سیستم حفاری نصب شده‌اند و مقایسه‌ی آنها با رکوردهای حفاری با توجه به میزان مقاومت سنگ در طول عمق حفاری، میزان سایش به دست خواهد آمد (Cooper, 2002).

^۱ Cooper

پلنینگر^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۲ به بررسی ۱۲ پروژه در آلمان و استرالیا بین سال‌های ۱۹۸۹-۲۰۰۱ پرداختند. آنها روش‌های تعیین قابلیت ساینده‌ی سنگ‌ها (شاخص سایش سرمته (BWI)، اندیس سایش سرشار (CAI)، فاکتور ساینده‌ی شیمازک) و سختی و ویکرز را در پروژه‌ها مورد بررسی قرار دادند. در نهایت به بیان شاخص قابلیت ساینده‌ی سنگ (RAI)، با تعریف حاصل ضرب مقاومت فشاری تک‌محوره در کوارتز محتوی معادل پرداختند (Plinninger et al., 2002a).

پلنینگر و همکارانش در ادامه‌ی تحقیق پیشین خود در همین سال، پس از بیان ایده‌های اساسی در مورد ابزار، قطعه‌قطعه شدن سنگ و مکانیزم سایش به بحث در مورد طبقه‌بندی انواع سایش سرمته و پیش‌بینی نرخ سایش سرمته‌ها پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که شاخص سایش سرمته (BWI)، سایش سرشار (CAI) و شاخص قابلیت ساینده‌ی سنگ (RAI) تنها یک روش به منظور تعیین قابلیت ساینده‌ی سنگ‌ها می‌باشند در صورتی که هیچ رابطه‌ی مشخصی بین آنها و نرخ سایش سرمته مشاهده نشده است. همچنین آنها موفق نشدند همبستگی خاصی را بین نرخ سایش سرمته با محتوای سیلیس و آلومینا به دست آورند (Plinninger et al., 2002b).

آدبایو و اوکاله^۲ در سال ۲۰۰۷ پتانسیل سایش سرمته را برای سه نمونه‌ی سنگی مورد بررسی قرار دادند. آنها شاخص‌های تحلیل خود را به منظور ارزیابی سایش، مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت کششی، مقاومت فشاری تک‌محوره، کوارتز محتوی، سختی و ویکرز و سختی اشمیت بیان کردند. همچنین، سایر پارامترهای سایش را از طریق درصد ترکیب مواد معدنی در نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار دادند. آنها در نهایت پس از بررسی‌های انجام شده پتانسیل سایش را برای هر سه نمونه‌ی سنگی اندازه‌گیری کردند (Adebayo and Okewale, 2007). پلنینگر در سال ۲۰۰۸ در ادامه‌ی مطالعات پیشین خود به ارزیابی ساینده‌ی سنگ‌ها در حفاری پرداخت. او در ابتدا به تشریح مبانی دستگاه‌های حفاری و سایش ابزارآلات حفاری پرداخت و سپس فرایند سایش در حفاری را توصیف کرد. پلنینگر به طور خلاصه روش‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی ساینده‌ی سنگ‌ها و

^۱ Plinninger

^۲ Adebayo and Okewale

پارامترهای مؤثر بر سایش را به منظور پیش‌بینی سایش ابزار حفاری بیان کرد. به همین منظور روش‌های تعیین قابلیت ساینده‌ی سنگ‌ها (شاخص سایش سرمته (BWI)، اندیس سایش سرشار (CAI)، فاکتور ساینده‌ی شیمازک، شاخص قابلیت ساینده‌ی سنگ (RAI)، محتوای کانی‌های ساینده، سختی ویکرز، محتوای سیلیس و آلومینا و کوارتز محتوی معادل را در پروژه‌ها مورد بررسی قرار داد (Plinninger, 2008).

در سال ۲۰۰۸ رشیدی و همکارانش با هدف بیان یک روش برای پیش‌بینی زمان واقعی سایش سرمته و کمک به تصمیم‌گیری برای بیرون آوردن سرمته از چاه در هنگام سایش به بررسی داده‌های چاه‌های ایران و کانادا پرداختند. دو روش اصلی برای بهینه کردن حفاری را مدل‌های انرژی ویژه مکانیکی و معکوس نرخ نفوذ معرفی کردند. آنها بیان داشتند که هر دو این روش‌ها می‌توانند از طریق آنالیز متغیرهای حفاری نظیر بار روی سرمته و سرعت چرخش در جهت بهینه کردن حفاری مورد استفاده قرار گیرند (Rashidi et al., 2008).

در سال ۲۰۱۰ آدبایو و همکارانش در تحقیق خود به بررسی قابلیت حفاری و خصوصیات مقاومتی نمونه‌های سنگی در نیجریه پرداختند. برای این منظور هشت نمونه سنگ از مکان‌های مختلف جمع‌آوری کرده و مقاومت فشاری، مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت کششی، شاخص نرخ حفاری^۱ (DRI) و عدد چکش اشمیت را در آزمایشگاه اندازه‌گیری نموده و ارتباط آنها را با عمر سرمته بیان کردند. آنها در این تحقیق به این نتیجه رسیدند که عمر سرمته با مقاومت فشاری تک‌محوره همبستگی کمی دارد اما بین عمر سرمته و میزان سختی سنگ همبستگی بالایی وجود دارد (Adebayo et al., 2010).

رشیدی و همکاران در سال ۲۰۱۰ یک مدل توسعه یافته را برای تجزیه و تحلیل سایش سرمته تشریح کردند. مدل آنها بر اساس تفاوت بین مدل‌های انرژی سنگ، انرژی ویژه مکانیکی و قابلیت حفاری سنگ بر اساس مدل‌های نرخ نفوذ توسعه داده شد. آنها به منظور تخمین زمان واقعی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی و PDC، اطلاعات حفاری را توسط نرم‌افزار از یک سرور از راه دور برای تجزیه و تحلیل توسط سیستم مشاوره حفاری هوشمند مورد بررسی قرار دادند و کیفیت داده‌ها را قبل از محاسبه‌ی لحظه‌ای سایش سرمته

^۱ Drilling Rate Index (DRI)

کنترل کردند. طبق محاسبات نشان دادند که سایش ثبت شده در میدان عملیاتی با شبیه‌سازی انجام شده نزدیک به یکدیگرند. همچنین بیان داشتند که مدل انرژی ویژه به طور مناسبی سایش سرمرته را به مانند مدل‌های نرخ نفوذ در نظر نمی‌گیرد (Rashidi et al., 2010a).

در سال ۲۰۱۰ رشیدی و همکاران در تحقیقی دیگر مشابه تحقیق پیشین خود برای پیش‌بینی وضعیت سایش سرمرته‌های سه‌مخروطی دورانی شکل جدیدی از یک مدل توسعه یافته را با ترکیب مدل انرژی ویژه سنگ با مدل نرخ حفاری در حال حفاری بیان کردند. در مدل‌های قدیمی تخمین سایش سرمرته بر اساس ترکیب انرژی ویژه با قابلیت حفاری سنگ بوده است که در این تحقیق به جای قابلیت حفاری از مقاومت فشاری سنگ استفاده شده است (Rashidi et al., 2010b).

وو^۱ و همکارانش به معرفی مکانیزم تعامل بین سرمرته‌های مخروطی و سنگ پرداختند. آنها سه عامل مؤثر بر نرخ نفوذ، شامل انواع شکل سرمرته (قاشقی، اسکنه‌ای، مخروطی و تخم‌مرغی‌شکل)، نوع سنگ (شیل و سنگ آهک) و وضعیت سایش سرمرته‌ها را مورد بررسی قرار دادند. همه‌ی مدل‌های بیان شده در این تحقیق را با ساده کردن هندسه‌ی دندانه‌ها و تنها با استفاده از مقاومت فشاری تک‌محوره به نمایندگی از خصوصیات سنگ به دست آوردند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش سایش سرمرته، نرخ نفوذ در سنگ آهک نسبت به شیل کاهش یافته و در صورت کاهش بار روی سرمرته عکس این پدیده رخ خواهد داد. طبق نتایج به دست آمده با کاهش بار روی سرمرته، تیزی دکمه‌ها و یا ارزیابی و درجه‌بندی سرمرته‌ها بیشترین تأثیر را روی نرخ نفوذ دارند که این ارزیابی و درجه‌بندی برای انواع مختلف سنگ متفاوت است (Wu et al., 2010). آدایو در سال ۲۰۱۱ در مقاله‌ی خود به بررسی روابط بین نرخ سایش سرمرته و خصوصیات بافتی سنگ پرداخت. او ۳ نمونه سنگی (گرانیت فلدسپات، گرانیت هورنبلند بیوتیت و گرانیت بیوتیت درشت) را در آزمایشگاه از لحاظ ترکیب کانی‌شناسی، محتوای کوارتز، محتوای سیلیس و تخلخل مورد ارزیابی قرار داد و میانگین اندازه‌ی دانه‌ها و چگالی انباشتی^۲ آنها را از طریق روابط تجربی محاسبه کرد. سپس نرخ سایش

^۱ Wu

^۲ Packing density

دکمه‌های پیرامونی سرمته را در میدان عملیاتی اندازه‌گیری کرد و به بیان ارتباط آنها با خصوصیات بافتی سنگ پرداخت. نتایج تحقیق نشان داد که همه ویژگی‌های بافتی سنگ، ضریب همبستگی بالایی با نرخ سایش سرمته دارند (Adebayo, 2011).

آدبایو در تحقیق دیگری به همراه آکجو^۱ در سال ۲۰۱۲ خصوصیات مؤثر سنگ بر حفاری و عملکرد سرمته‌های سه‌مخروطی مختلف در سنگ آهک را مورد ارزیابی قرار داده و به منظور تعیین مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، شاخص ساینده‌ی سنگ و نرخ نفوذ، سنگ‌های مختلف را پس از جمع‌آوری مورد آزمایش قرار دادند. همچنین ترکیب شیمیایی نمونه‌ها را با استفاده از طیف‌سنجی فلورسانس اشعه‌ی ایکس^۲ تعیین کرده و از نتایج آن برای تعیین مقدار کوارتز معادل بهره بردند. به منظور تعیین نرخ سایش، طول دکمه‌ها را در سطح سرمته با استفاده از کولیس دیجیتال در فواصل منظم اندازه‌گیری کردند. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دندان‌های نسبت به کاربرد تنگستن در سازند آهکی بیشتر است (Adebayo and Akeju, 2012a).

آدبایو و آکجو در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۱۲ ارتباط خواص سنگ آهک انتخاب شده را با متغیرهای اجرایی سرمته‌ی کاربرد تنگستن برای توسعه‌ی نرم‌افزار مورد بررسی قرار دادند. به منظور دستیابی به این اهداف همانند تحقیق گذشته خود برای نمونه‌های سنگ جمع‌آوری شده، مقاومت کششی، مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص ساینده‌ی سنگ، ترکیب شیمیایی نمونه‌ها و کوارتز محتوی را در سنگ‌های مختلف تعیین کرده و نرخ سایش دکمه‌ها را در سطح سرمته با استفاده از کولیس دیجیتال در فواصل منظم و نرخ نفوذ را در میدان عملیاتی اندازه‌گیری کردند. علاوه بر موارد فوق نرخ سایش دندان‌ها و یاتاقان‌ها را نیز با توجه به افت ابعادی با توجه به عمق حفاری تعیین کردند. نتایج حاصل از ماتریس همبستگی آماری آنها نشان داد که مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، محتوای سیلیس، کوارتز محتوی معادل و شاخص ساینده‌ی سنگ، شاخص‌های غالب مؤثر بر عملکرد سرمته‌ها

^۱ Akeju

^۲ X-Ray Fluorescence (XRF)

بوده و ضریب همبستگی بالایی بین آنها برقرار است. در انتها یک مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی نرخ سایش دندانه‌ها بیان کردند (Adebayo and Akeju, 2012b).

در سال ۲۰۱۲ آدبایو و بلوو^۱ به منظور بررسی همبستگی انرژی ویژه با نرخ نفوذ و نرخ سایش سرشته، به ارزیابی خواص سنگ پرداختند. به منظور دستیابی به این اهداف، پنج نمونه سنگ از منطقه‌ی مورد مطالعه جمع‌آوری کرده و در آزمایشگاه برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و مقاومت بار نقطه‌ای مورد آزمایش قرار دادند. همچنین ترکیب مواد معدنی نمونه‌ها را با بررسی مقاطع نازک و سایش سرشته‌ها را با کولیس دیجیتال در فواصل منظم اندازه‌گیری کردند. انرژی ویژه را با داده‌های عملیاتی و با استفاده از معادلات تجربی محاسبه کردند. نتایج ماتریس همبستگی آماری نشان داد که نرخ نفوذ و نرخ سایش سرشته، عوامل غالب مؤثر بر پیش‌بینی انرژی ویژه با ضریب همبستگی بالای ۰/۸۹۳ می‌باشند. این بدان معنی است که ۸۹/۳ درصد از تغییرات در انرژی ویژه می‌تواند مربوط به تغییرات در نرخ نفوذ و نرخ سایش سرشته باشد (Adebayo and Bello, 2012).

آدبایو با آدتولا^۲ پس از جمع‌آوری نمونه‌های آهکی و گرانیتی به بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی این سنگ‌ها برای طبقه‌بندی شرایط حفاری پرداختند. مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت بار نقطه‌ای، شاخص نرخ حفاری، مقاومت کششی، سختی، تردی، کوارتز محتوی معادل، شاخص ساینده‌گی سنگ، نرخ نفوذ و نرخ سایش سرشته را با انجام تست‌های آزمایشگاهی و محاسبات میدانی اندازه‌گیری کردند. ویژگی‌های قابلیت حفاری سنگ‌های آزمایش شده را طبق شاخص نرخ حفاری از بسیار کم تا متوسط تعیین کردند. طبق نتایج آنها، مقاومت فشاری تک محوری، بافت و اندازه دانه، شاخص نرخ حفاری و کوارتز محتوی معادل پارامترهای مهم مؤثر بر حفاری هستند (Adebayo and Adetula, 2012).

استوپینا^۳ به همراه همکارانش عمر سرشته‌های سه‌مخروطی و سرعت حفاری را با توجه به ویژگی‌های مقاومتی و ساختاری سنگ تعیین کرده و از این نتایج برای محاسبه‌ی هزینه‌ی واحد حفاری بهره

¹ Bello

² Adetula

³ Stupina

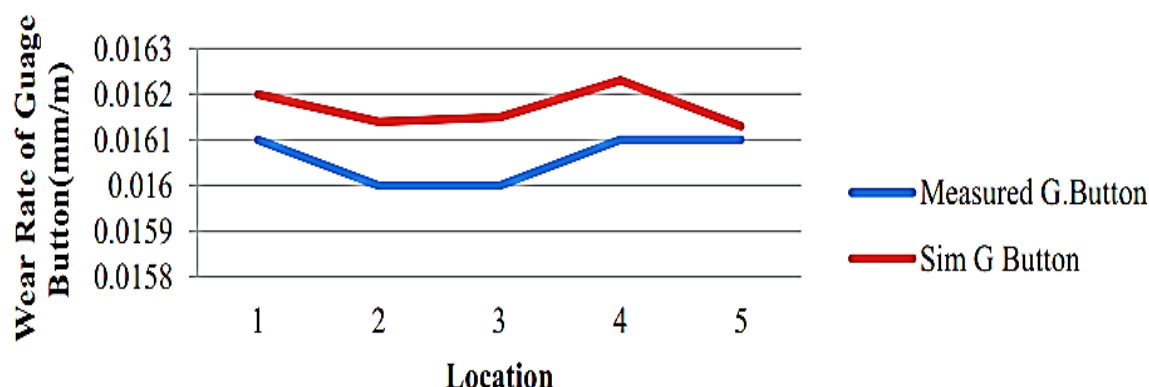
بردند. آنها به بیان رابطه‌ی بین شکل دندان‌های سرمته و میزان بارگذاری و تعریف شرایط بارگذاری در هنگام حفاری در سنگ‌های لایه‌لایه و شکسته پرداختند. طبق نتایج تحقیق، بهره‌وری تخریب سنگ با افزایش سرعت و کاهش مدت زمان تماس با سنگ، کاهش می‌یابد (Stupina et al., 2014). آدبایو و آکنده^۱ در سال ۲۰۱۵ به بررسی سایش سرمته‌های دکمه‌ای و کارایی حفاری چکش پایین در معدن طلای نامیبیا پرداختند. هدف آنها تعیین خصوصیات سنگ، ارزیابی نرخ سایش و انرژی ویژه در مقاطع مختلف سنگ و توسعه‌ی مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی نرخ سایش سرمته‌های حفاری دکمه‌ای بوده است. نمونه‌های سنگ به دست آمده در آزمایشگاه برای تعیین ترکیب شیمیایی، محتوای کوارتز معادل، میزان سیلیس و مقاومت فشاری مورد آزمایش قرار گرفتند. برای تعیین مقادیر سختی سنگ از چکش اشمیت، انرژی ویژه از روابط تجربی و اندازه‌گیری طول دکمه‌ها از کولیس دیجیتال در فواصل منظم استفاده کردند. نتایج ماتریس همبستگی آنها نشان داد که مقاومت فشاری تک محوری، محتوای کوارتز معادل و محتوای سیلیس مؤثرترین خواص غالب سنگ بر نرخ سایش دکمه‌های سرمته‌های چکش پایین می‌باشند (Adebayo and Akande, 2015).

باباتونده^۲ در سال ۲۰۱۵ به توسعه و شبیه‌سازی مدل‌های سایش سرمته با استفاده از خواص غالب سنگ برای نمونه‌های سنگی در نیجریه پرداخت. نمونه‌های سنگ به دست آمده را برای تعیین ترکیب شیمیایی، مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت فشاری تک‌محوره و تخلخل، مورد آزمایش قرار داد. نتایج حاصل از ماتریس همبستگی آماری نشان داد که محتوای سیلیس، مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت فشاری تک‌محوره، تخلخل، محتوای کوارتز معادل، مقدار سختی ویکرز، میانگین اندازه‌ی دانه‌ها، شاخص ساینده‌ی سرشار و فاکتور زاویه‌داری خواص غالب سنگ می‌باشند که ضریب همبستگی بالایی با نرخ سایش دارند. او این خصوصیات را برای توسعه‌ی مدل‌های رگرسیونی برای هر یک از سنگ‌های هورنبلند گرانیت پورفیری و بیوتیت گرانیت به منظور پیش‌بینی نرخ سایش، مورد استفاده

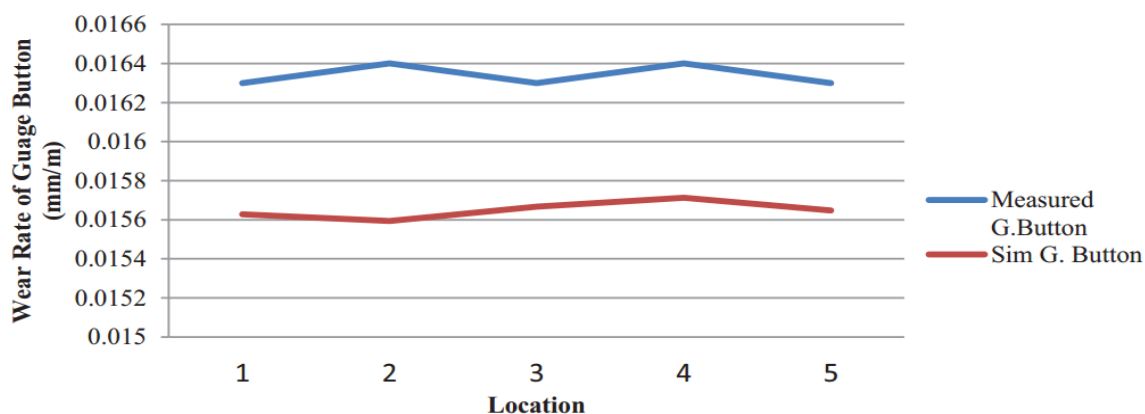
^۱ Akande^۲ Babatunde

قرار داد. مقایسه‌ی نرخ سایش اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در شکل‌های ۱۶-۳ و ۱۷-۳ نمایش داده شده است (Babatunde, 2015).

سعیدی و همکاران در سال ۲۰۱۵ با هدف ارائه یک مرور کلی از ارزیابی سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی، از طریق باسکول و میکرومتر سایش سرمته‌ها را از طریق دو رویکرد افت وزنی و افت ابعادی سرمته مستهلک نسبت به سرمته نو محاسبه کردند. سپس به منظور ارائه رابطه احتمالی بین خواص سنگ و میزان سایش سرمته‌های حفاری، کوارتز محتوی معادل، درصد کوارتز خالص، محتوی موسکویت، شاخص دانه بندی و مقاومت فشاری را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج تحقیق مقاومت فشاری هیچ ارتباط معنی داری با سایش سرمته نداشته است و با افزایش اندازه سنگ‌ها سایش افزایش پیدا کرده است (Saeidi et al., 2015).



شکل ۱۶-۳ - مقایسه‌ی نرخ سایش دکمه‌های پیرامونی در حالت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای هورنبلند گرانیات پورفیری در مکان‌های مختلف (Babatunde, 2015)



شکل ۱۷-۳ - مقایسه‌ی نرخ سایش دکمه‌های پیرامونی در حالت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای بیوتیت گرانیات در مکان‌های مختلف (Babatunde, 2015)

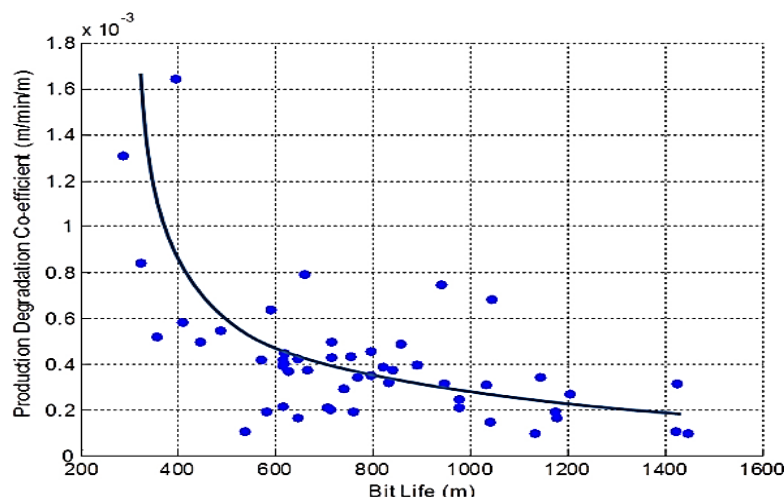
داگرز^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۶ به بررسی تأثیر سایش سرمته روی نیروهای برشی و انرژی ویژه در سنگ‌های رسوبی پرداختند. تأثیر خواص مختلف سنگ‌ها از قبیل محتوای مواد معدنی، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی، سختی شور، سختی چکش اشمیت و چگالی با انرژی ویژه لازم به منظور برش را در سطوح مختلف سایش ابزار مورد مطالعه قرار دادند. به منظور ارزیابی تغییرات انرژی ویژه، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگی را اندازه‌گیری و برای سنگ‌هایی با مقاومت کم تا متوسط، بهترین مدل‌های پیش‌بینی انرژی ویژه را بر اساس تجزیه و تحلیل آماری نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی معرفی کردند. نتایج اولیه تحقیق آنها نشان داد که انرژی ویژه با اندازه سایش افزایش می‌یابد (Dogruoz et al., 2016).

قوش^۲ و همکارانش به بررسی طول عمر سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی یک معدن روباز در سوئد با استفاده از اندازه‌گیری داده‌ها در حین حفاری پرداختند. آنها ارتباط بین ضریب تنزل تولید و طول عمر سرمته را به صورت یک روند منفی غیرخطی نشان دادند (بیشترین نرخ تنزل تولید مربوط به کمترین طول عمر سرمته و بالعکس). این بدان معنی است که نرخ نفوذ در طول حفاری کاهش خواهد یافت. آنها برای به دست آوردن یک نمای کلی از تمام پارامترهای مؤثر در طول عمر سرمته از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۳ استفاده کردند. نتایج تحلیل نشان داد که ویژگی‌های توده سنگ ارائه شده توسط نرخ نفوذ و انرژی ویژه، همبستگی خوبی با طول عمر سرمته نداشته و گشتاور و سرعت چرخش همبستگی منفی با طول عمر سرمته دارد. این همبستگی منفی نشان می‌دهد که مقدار پارامترهای عملیاتی می‌تواند به منظور افزایش طول عمر سرمته کاهش یابد. شکل ۳-۱۸ ارتباط بین عمر سرمته و ضریب تنزل تولید را نشان می‌دهد (Ghosh et al., 2016).

^۱ Dogruoz

^۲ Ghosh

^۳ Principal Component Analysis (PCA)



شکل ۳-۱۸- ارتباط بین عمر سرمته و ضریب تنزیل تولید (Ghosh et al., 2016)

کاراساوا^۱ و همکارانش در آزمایشگاه روش‌های ارزیابی وضعیت سایش دندانه‌های سرمته‌های ضربه‌ای، PDC و سه‌مخروطی دورانی را در سنگ‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. رابطه‌ی بین شرایط سایش سرمته‌ها و پارامترهای حفاری مانند نرخ نفوذ، وزن سرمته و گشتاور سرمته را بر اساس نتایج حاصل از آزمون حفاری در سنگ‌های سخت و ساینده بررسی کردند. به منظور رسیدن به اهداف تحقیق خواص مکانیکی سنگ شامل مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی، مدول یانگ و نسبت پواسون را در آزمایشگاه تعیین کردند. بر اساس نتایج به دست آمده بیان داشتند که رابطه‌ی نزدیکی بین شرایط سایش سرمته و گشتاور برای هر سرمته وجود دارد (Karasawa et al., 2016).

سahoo و چودهاری^۲ در سال ۲۰۱۷ برای نشان دادن رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری سنگ، نرخ نفوذ دستگاه حفاری و میزان سایش سرمته حفاری در یک معدن زغال سنگ سطحی تحقیقی را انجام دادند. برای این منظور از طریق تصویربرداری دیجیتال سایش سرمته‌های حفاری را محاسبه کردند. سپس با استفاده از چکش اشمیت مقاومت فشاری سنگ را در حالت برجا اندازه‌گیری کردند. نتایج بدست آمده از مشاهدات تجربی و نمودارهای گرافیکی نشان دادند که با افزایش مقاومت فشاری، نرخ نفوذ کاهش و میزان سایش افزایش یافته است (Sahoo and Choudhary, 2017).

^۱ Karasawa

^۲ Sahoo and Choudhary

ایوانیکووا^۱ و همکارانش در تحقیقشان در سال ۲۰۱۸ با بیان اینکه ارزیابی و پیش بینی غیرمستقیم سایش سرمت‌ه حفاری بر اساس مدل عمق نفوذ، باعث کاهش مصرف انرژی و کاهش سایش سرمت‌ه در ساخت و سازهای زیرزمینی و استخراج معادن می شود بیان داشتند که مکانیزم‌های مختلف شکستن سنگ در حین حفاری به نیرویی که به آن اعمال می‌شود (بار روی سرمت‌ه) بستگی دارد. آنها همچنین نقطه عطف شکستن سنگ را نقاطی معرفی کرده‌اند که انرژی لازم برای شکستن حجم واحد سنگ (انرژی ویژه) به حداقل خود می‌رسد (Ivanicová et al., 2018).

ریتز و دی‌فریتاس^۲ به منظور تخمین سایش سرمت‌ه در حین حفاری از معادله فیزیکی، تکنیک‌های تجزیه و تحلیل ریسک و داده‌کاوی برای برآورد سایش سرمت‌ه در هر متر حفاری استفاده کردند. هدف آنها ارائه راهی برای پیش‌بینی سایش سرمت‌ه در زمان واقعی با استفاده از روش مونت کارلو و الگوریتم‌های خوشه بندی است. این فرایند از داده های مبتنی بر زمان استفاده می‌کند و میزان سایش با توجه به داده‌های حفاری در حال اجرا به روز می‌شود (Reitz and de Freitas Filho, 2018).

وانگ و لی^۳ در سال ۲۰۱۸ یک مدل برای برآورد سایش سرمت‌ه‌های حفاری PDC و یک مدل برای پیش‌بینی رفتار ساینده‌ی سنگ ارائه کردند و نشان دادند که از بین مشخصات سنگ، مدول الاستیک، کوارتز محتوی معادل، زاویه اصطکاک داخلی، زبری سطح، نسبت پواسون و چسبندگی بیشترین تأثیر را بر روی سایش سرمت‌ه دارند. آنها از طریق تجزیه و تحلیل شرایط ترک‌خوردگی سنگ در حین فرآیند حفاری، نیروی وارد بر سنگ را محاسبه کردند. آنها با توجه به منطقه‌ی تماس واقعی سرمت‌ه با سنگ و مکانیزم سایش ساینده، میزان سایش سرمت‌ه‌ها در شرایطی که فشار در ته چال است را بدست آوردند (Wang and Li, 2018).

آدبایور در سال ۲۰۱۹ در تحقیق خود عملکرد سرمت‌ه‌های سه‌مخروطی دورانی را در سازند آهکی بررسی کرد. برای این منظور نمونه‌های سنگی مختلف را بعد از جمع‌آوری تحت آزمایش‌های مقاومت

¹ Ivanicová

² Reitz and de Freitas Filho

³ Wang and Li

فشاری، کششی و بار نقطه‌ای قرار داد. همچنین ترکیب شیمیایی نمونه‌ها با استفاده از طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس تعیین شد. سپس نرخ نفوذ و سایش سرمته نسبت به زمان و طول حفاری محاسبه شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که عملکرد سرمته در نقاطی که میزان مقاومت سنگ کم است بسیار خوب بوده و سایش سرمته در این نقاط کمترین میزان است (Adebayo, 2019).

مازن^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۹ با استفاده از پارامترهای عملیاتی و ساینده‌ی سنگ‌ها از رویکرد جدیدی برای بهبود تخمین سایش سرمته‌های حفاری بهره بردند. آنها از این روش برای پیش‌بینی ساینده‌ی سنگ و تعیین نرخ سایش دینامیکی سرمته در حین حفاری استفاده کردند. آنها بر اساس نتایج بدست آمده بیان داشتند که نرخ سایش دندان‌ه و دکمه‌های سرمته شاخص خوبی برای پیش‌بینی سایش سرمته در مقایسه با انرژی ویژه مکانیکی است (Mazen et al., 2019).

ماجد^۲ و همکارانش در سال ۲۰۲۰ میزان سایش سرمته‌های دکمه‌ای و نرخ نفوذ ماشین حفاری ضربه‌ای-دورانی را از طریق خصوصیات ژئوتکنیکی پروژه‌های معدنی و تونل زنی در کشور پاکستان مورد بررسی قرار دادند. آنها برای این منظور میزان مصرف سرمته و نرخ نفوذ سرمته را در ۱۱ واحد سنگی مختلف اندازه‌گیری کردند. سپس نمونه‌های جمع‌آوری شده برای سایش سنگ، قابلیت حفاری، خواص فیزیکی و مکانیکی (مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزیل، تخلخل، چگالی، سرعت موج، سختی برگشتی اشمیت و شاخص شکنندگی) مورد آزمایش‌های استاندارد قرار گرفتند. علاوه بر این با استفاده از آزمایش XRD کواتز محتوی معادل، شاخص ساینده‌ی سنگ و سختی ویکرز را اندازه‌گیری کردند. آنها به منظور پیش‌بینی عمر سرمته‌های حفاری از روش رگرسیون حداقل مربعات معمولی استفاده کردند. در نهایت، دو مدل رگرسیون خطی چندگانه برای برآورد عمر سرمته بر اساس ویژگی‌های ژئوتکنیکی سنگ‌ها ارائه دادند. سپس مدل‌های ارائه شده را از طریق آزمون F-test اعتبارسنجی کردند (Majeed et al., 2020).

^۱ Mazen

^۲ Majeed

پیری و همکارانش در سال ۲۰۲۰ با هدف بررسی اثر همزمان خواص مکانیکی سنگ و مقاومت سرمته‌های حفاری با پوشش‌های تنگستن، الماس و تیتانیوم-سیلیس-آلومینیوم، تاثیر این عوامل بر سایش سرمته را در سه نوع سنگ سخت مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق تست‌های حفاری بر روی نمونه‌های مکعبی شکل انجام گرفت. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که میزان سایش در سرمته‌های تیتانیوم-سیلیس-آلومینیوم نسبت به سرمته کاربید تنگستن در شرایط ثابت حفاری در مقیاس آزمایشگاهی به میزان کمتری بوده است. همچنین مته‌های الماسی نیز نرخ سایش کمتری را نسبت به سرمته‌های کاربید تنگستن در همان سنگ‌ها ارائه دادند. طبق نتایج تحقیق با افزایش خواص مکانیکی سنگ نظیر مقاومت فشاری تک محوری، سختی موس، شاخص ساینده‌ی شیمزاک و مدول ینگ، سایش به میزان زیادی افزایش خواهد یافت (Piri et al., 2020).

در سال ۲۰۲۰ در دانشگاه مک‌گیل رافضی و همکارانش، کار تحقیقاتی گسترده‌ای برای توسعه یک روش غیرمستقیم نظارت بر وضعیت سرمته و پیش‌بینی سایش و خرابی سرمته‌های حفاری با تکیه بر سیگنال‌های ارتعاش انجام دادند. این مقاله بر اساس شواهد تجربی اعلام می‌دارد تکنیک‌های نظارت مستقیم در پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی ناموفق بوده است (Rafezi et al., 2020).

شانکار^۱ و همکارانش در سال ۲۰۲۰ رابطه‌ی متقابل بین دما و میزان سایش سرمته کاربید تنگستن در حین عملیات حفاری دورانی را با استفاده از دستگاه کنترل عددی رایانه‌ای مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق رابطه بین دما و میزان سایش در سه نوع سنگ مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میزان سایش سرمته‌های حفاری با افزایش دما برای تمام ترکیبات سنگ و سرمته در نظر گرفته، افزایش یافته است که به علت وجود سیلیس در نمونه سنگ‌ها است که منجر به افزایش گرما و اصطکاک بین سطوح سرمته و سنگ می‌شود. علاوه بر این، در این مقاله با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی ساده، رابطه‌ی بین ویژگی‌های دما و میزان سایش توسعه یافته است. لازم به ذکر است که افت وزنی روش تعیین سایش سرمته‌های حفاری در این تحقیق بوده است (Shankar et al., 2020).

^۱ Shankar

جاپیک و باتمانخ^۱ در سال ۲۰۲۱ از روش جمعی برای تخمین فاصله اطمینان و فواصل پیش‌بینی مدل‌های رگرسیونی استفاده کردند. آنها در این تحقیق خصوصیات سنگ و مکانیزم سایش را بررسی و گزینه‌های تعیین نرخ سایش سرمرته را مورد بحث قرار دادند و به منظور توسعه‌ی رابطه‌ی احتمالی بین سایش سرمرته‌های حفاری و خصوصیات سنگ از نتایج تست‌های آزمایشگاهی و میدانی استفاده کردند. سپس مدل‌های رگرسیونی جدیدی را برای پیش‌بینی سایش سرمرته‌های حفاری بر اساس خواص سنگ ارائه دادند. آنها بر اساس نتایج تحقیق خود مدل‌های توسعه یافته را با استفاده از روش‌های آماری مورد تایید قرار دادند تا در پیش‌بینی سایش سرمرته‌های حفاری مورد استفاده قرار گیرد (Capik and Batmunkh, 2021).

در تحقیق جاپیک و ایلماز^۲ در سال ۲۰۲۱ روابط بین طول عمر سرمرته و مشخصات مکانیکی، قابلیت حفاری و ساینده‌ی سنگ‌ها ارائه شده است. علاوه بر این، در این تحقیق انواع سایش سرمرته مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، بلوک‌های سنگی از تونل‌ها جمع آوری شده است و از تجزیه و تحلیل رگرسیون برای استخراج مدل‌هایی برای برآورد عمر سرمرته بر اساس قابلیت حفاری و مشخصات مکانیکی و ساینده‌ی سنگ‌ها استفاده شده است. در این تحقیق دو نوع سایش سرمرته شامل ترک‌خوردگی بدنه و خرابی راد سرمرته مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است، این مطالعه بر روی تأثیر مشخصات سنگ بر عمر سرمرته متمرکز شده است (Capik and Yilmaz, 2021).

۳-۴- روابط تجربی ارائه شده در زمینه‌ی سایش سرمرته‌های حفاری

بر اساس بررسی سوابق تحقیقات گذشته روابط تجربی محدودی توسط محققین مختلف در زمینه‌ی پیش‌بینی و تعیین سایش سرمرته‌های حفاری ارائه شده است. لازم به ذکر است که در این تحقیقات از برازش‌های ساده و چند متغیره برای بررسی ارتباط میان پارامترهای مؤثر و سایش سرمرته‌های حفاری استفاده شده است که در ادامه، این روابط به اختصار آورده شده است.

^۱ Capik and Batmunkh

^۲ Capik and Yilmaz

۳-۴-۱- روابط آدبایو و همکاران (Adebayo et al., 2010)

آنها برای تعیین عمر سرمته در حفاری ضربه‌ای در ۸ نوع سنگ گرانیت روابط زیر را ارائه دادند:

$$B_L = -7.313RH + 566.9 \quad R^2 = 0.926 \quad (۱-۳)$$

$$B_L = -0.012Co^3 + 4.051Co^2 - 432.1Co + 15435 \quad R^2 = 0.586 \quad (۲-۳)$$

در روابط بالا داریم:

$$B_L: \text{عمر سرمته } \left(\frac{m}{bit}\right)$$

RH : مقدار سختی واجهش اشمیت

Co : مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)

۳-۴-۲- روابط آدبایو (Adebayo, 2011)

او سایش دندان‌های سرمته‌های مخروطی را در ۳ نمونه سنگی (گرانیت فلدسپات، گرانیت هورنبلند بیوتیت و گرانیت بیوتیت درشت) مورد بررسی قرار داد و روابط زیر را ارائه نمود:

$$W_G = 0.001EQC - 0.034 \quad R^2 = 0.786 \quad (۳-۳)$$

$$W_G = 0.022Ln(EQC) - 0.067 \quad R^2 = 0.854 \quad (۴-۳)$$

$$W_G = 0.001EQC - 0.072 \quad R^2 = 0.740 \quad (۵-۳)$$

$$W_G = 0.002AVG + 0.021 \quad R^2 = 0.843 \quad (۶-۳)$$

$$W_G = 0.014e^{0.138AVG} \quad R^2 = 0.905 \quad (۷-۳)$$

$$W_G = 0.003AVG + 0.018 \quad R^2 = 0.937 \quad (۸-۳)$$

$$W_G = 0.003e^{0.0215SiO_2} \quad R^2 = 0.656 \quad (۹-۳)$$

$$W_G = 0.002SiO_2 - 0.126 \quad R^2 = 0.833 \quad (۱۰-۳)$$

$$W_G = 0.001SiO_2 - 0.098 \quad R^2 = 0.836 \quad (۱۱-۳)$$

$W_G = 0.001N + 0.021$	$R^2 = 0.651$	(۱۲-۳)
$W_G = 0.003N + 0.013$	$R^2 = 0.729$	(۱۳-۳)
$W_G = 0.005N + 0.017$	$R^2 = 0.833$	(۱۴-۳)
$W_G = 0.004Ln(PD) + 0.005$	$R^2 = 0.799$	(۱۵-۳)
$W_G = -8E^{-5PD} + 0.011$	$R^2 = 0.778$	(۱۶-۳)
$W_G = -8E^{-5PD} + 0.028$	$R^2 = 0.832$	(۱۷-۳)

در روابط بالا داریم:

W_G : نرخ سایش دندانهای سرمته ($\frac{mm}{m}$)

EQC : کوارتز محتوی معادل (%)

AVG : میانگین اندازه‌ی دانه‌ها (mm)

SiO_2 : محتوای سیلیس (%)

N : تخلخل (%)

PD : چگالی انباشتگی (%)

۳-۴-۳- روابط آدبایو و آکجو (Adebayo and Akeju, 2012b)

آنها برای نرخ سایش دندانهای سرمته‌های سه‌مخروطی در سنگ آهک روابط زیر را ارائه دادند:

$W_G = -8.127 + 2.7T - 1.29EQC - 0.024SiO_2$		(۱۸-۳)
$W_G = 292345615.339RAI^2 - 149132.385RAI + 31.712$	$R^2 = 0.983$	(۱۹-۳)
$W_G = 198060637.065UCS^2 - 84054.928UCS + 94.805$	$R^2 = 0.999$	(۲۰-۳)

در روابط بالا داریم:

W_G : نرخ سایش دندانهای سرمته ($\frac{mm}{m}$)

T : مقاومت کششی (MPa)

EQC : کوارتز محتوی معادل (%)

SiO_2 : محتوای سیلیس (%)

RAI : شاخص ساینده‌ی سنگ

USC : مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)

۳-۴-۴- رابطه آدبایو و بلوو (Adebayo and Bello, 2012)

آنها برای ارتباط بین سایش سرمته و نرخ نفوذ با انرژی ویژه در حفاری ضربه‌ای چکش بالا در سنگ گرانیات رابطه‌ی زیر را ارائه دادند:

$$S.E = 909875.7 - 764663ROP - 170365BW \quad (21-3)$$

در رابطه بالا داریم:

$$S.E: \text{انرژی ویژه } \left(\frac{N.cm}{cm^2}\right)$$

$$ROP: \text{نرخ نفوذ } \left(\frac{cm}{min}\right)$$

$$BW: \text{نرخ سایش سرمته } \left(\frac{mm}{m}\right)$$

۳-۴-۵- روابط آدبایو و آکنده (Adebayo and Akande, 2015)

آنها برای نرخ سایش سرمته‌های ضربه‌ای چکش پایین در سنگ شلیست روابط زیر را ارائه دادند:

$$W_R = 102.4e^{4.8426USC} \quad R^2 = 0.5185 \quad (22-3)$$

$$W_R = 4E^{-81e^{4.2669EQC}} \quad R^2 = 0.6939 \quad (23-3)$$

$$W_R = 0.1734SiO_2 - 12.343 \quad R^2 = 0.9911 \quad (24-3)$$

در روابط بالا داریم:

$$W_R: \text{نرخ سایش سرمته } \left(\frac{mm}{m}\right)$$

USC : مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)

EQC : کوارتز محتوی معادل (%)

SiO_2 : محتوای سیلیس (%)

۳-۴-۶- روابط باباتونده (Babatunde, 2015)

او برای نرخ سایش سرمته‌های ضربه‌ای در سنگ‌های هورنبلند گرانیت پورفیری و بیوتیت گرانیت روابط زیر را ارائه داد:

$$W_G = 0.135 - 0.0001I_{s_{50}} - 0.002EQC - 0.007N \quad (۲۵-۳)$$

$$W_G = -0.316 + 0.006SiO_2 - 0.001I_{s_{50}} - 0.007C.F \quad (۲۶-۳)$$

در روابط بالا داریم:

W_G : نرخ سایش سرمته ($\frac{mm}{m}$)

$I_{s_{50}}$: شاخص مقاومت بار نقطه‌ای (MPa)

EQC : کوارتز محتوی معادل (%)

N : تخلخل (%)

SiO_2 : محتوای سیلیس (%)

$C.F$: فاکتور زاویه‌داری

۳-۴-۷- روابط ماجد و همکاران (Majeed et al., 2020)

آنها به منظور پیش‌بینی عمر سرمته‌های حفاری ضربه‌ای-دورانی در ۱۱ واحد سنگی مختلف روابط زیر را ارائه دادند:

$$B_{LIFE} = -2049Ln(CAI) + 3398.1 \quad R^2 = 0.69 \quad (۲۷-۳)$$

$$B_{LIFE} = 5291.7e^{-0.047RAI} \quad R^2 = 0.72 \quad (۲۸-۳)$$

$$B_{LIFE} = -776.1Ln(EQC) + 5144.6 \quad R^2 = 0.33 \quad (۲۹-۳)$$

$$B_{LIFE} = 46179e^{-0.045UCS} \quad R^2 = 0.66 \quad (۳۰-۳)$$

$$B_{LIFE} = 5336.4e^{-2E-04VHNR} \quad R^2 = 0.33 \quad (31-3)$$

$$B_{LIFE} = -6.07SRH + 217.37SRH + 3888.1 \quad R^2 = 0.67 \quad (32-3)$$

$$B_{LIFE} = 55906e^{-0.502BTS} \quad R^2 = 0.73 \quad (33-3)$$

در روابط بالا داریم:

$$B_{LIFE}: \text{عمر سرمه } \left(\frac{m}{bit}\right)$$

CAI: شاخص سایندهی سرشار

RAI: شاخص سایندهی سنگ

EQC: کوارتز محتوی معادل (%)

USC: مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)

VHNR: مقدار شاخص سختی ویکرز

SRH: مقدار سختی واجهش اشمیت

BTS: مقاومت کششی (MPa)

۳-۴-۸- روابط پیری و همکاران (Piri et al., 2020)

آنها با هدف بررسی اثر همزمان مشخصات مکانیکی سنگ و مقاومت سرمه‌های حفاری با پوشش‌های مختلف، روابط زیر را برای نرخ سایش سرمه در سه نوع سنگ سخت ارائه دادند:

$$W_{TiAlSi} = 0.0001e^{0.0104USC} \quad R^2 = 0.98 \quad (34-3)$$

$$W_{DLC} = 0.0001e^{0.0119USC} \quad R^2 = 1 \quad (35-3)$$

$$W_{WC} = 0.00006e^{0.0213USC} \quad R^2 = 0.89 \quad (36-3)$$

$$W_{TiAlSi} = 0.0004MH - 0.0017 \quad R^2 = 0.75 \quad (37-3)$$

$$W_{DLC} = 0.0005MH - 0.002 \quad R^2 = 0.63 \quad (38-3)$$

$$W_{WC} = 0.0021MH - 0.0108 \quad R^2 = 0.92 \quad (39-3)$$

$$\begin{aligned}
 W_{TiAlSi} &= 0.0001SF - a^{0.6627} & R^2 &= 0.99 & (40-3) \\
 W_{TiAlSi} &= 0.0001SF - a^{0.6627} & R^2 &= 0.99 & (41-3) \\
 W_{DLC} &= 0.0005SF - a^{0.7502} & R^2 &= 0.99 & (42-3) \\
 W_{WC} &= 0.00004SF - a^{1.3757} & R^2 &= 0.93 & (43-3)
 \end{aligned}$$

در روابط بالا داریم:

W_{TiAlSi} : نرخ سایش سرمته نوع $TiAlSi$

USC : مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)

W_{DLC} : نرخ سایش سرمته نوع DLC

MH : مقدار سختی موس

W_{WC} : نرخ سایش سرمته نوع WC

$SF-a$: مقدار ساینده‌ی شیمازک

۳-۴-۹- روابط جاپیک و باتمانخ (Capik and Batmunkh , 2021)

آنها به بررسی رابطه‌ی بین سایش سرمته‌های حفاری و خصوصیات سنگ پرداختند و مدل‌های رگرسیونی زیر را برای پیش‌بینی سایش سرمته‌های حفاری بر اساس خواص سنگ ارائه دادند:

$$\begin{aligned}
 B_w &= 1.457UCS + 17.367 & R^2 &= 0.8468 & (44-3) \\
 B_w &= 10.684BTS + 29.597 & R^2 &= 0.8279 & (45-3) \\
 B_w &= 17.523Is_{50} + 76.781 & R^2 &= 0.7635 & (46-3) \\
 B_w &= 315.74Ln(RH) - 1049.2 & R^2 &= 0.7382 & (47-3) \\
 B_w &= 257.72Ln(RH) - 917.62 & R^2 &= 0.7481 & (48-3) \\
 B_w &= 82.523CAI - 118.05 & R^2 &= 0.7952 & (49-3) \\
 B_w &= 77.878CAI - 18.049 & R^2 &= 0.8992 & (50-3) \\
 B_w &= -31.02N + 182.11 & R^2 &= 0.7845 & (51-3)
 \end{aligned}$$

در روابط بالا داریم:

$$B_w: \text{نرخ سایش سرمه} \left(\frac{mg}{m} \right)$$

IS_{50} : شاخص مقاومت بار نقطه‌ای (MPa)

USC : مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)

N : تخلخل (%)

RH : مقدار سختی واجهش اشمیت

CAI : شاخص ساینده‌ی سرشار

۳-۵- نقد و بررسی مطالعات گذشته

تاکنون مطالعات نسبتاً خوبی در مقیاس‌های عملیاتی و آزمایشگاهی در زمینه‌ی سایش سرمه‌های حفاری صورت گرفته است. در این میان برخی از محققین با توجه به تقسیم‌بندی انجام شده در روش پایش مستقیم به بررسی سرمه و تحلیل سایش رخ داده در آن و در روش غیرمستقیم به بررسی پارامترهای سنگ و پارامترهای اجرایی در ارتباط با سایش سرمه‌های حفاری پرداخته‌اند. روش‌های مستقیم با توجه به نزدیکی مرز مطالعات در علوم مختلف توسط محققین رشته‌های دیگری نظیر مهندسی مواد و مکانیک نیز مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. در روش مستقیم بررسی سطح سرمه‌ها و اتصالات آنها مدنظر بوده و از این طریق تحلیل فرایند سایش با بیان کیفی صورت گرفته است. اما در روش غیرمستقیم پارامترهای تأثیرگذار بر سایش سرمه‌های حفاری مورد بررسی قرار گرفته است. همانند روش مستقیم در روش غیرمستقیم نیز اکثر تحقیقات به بررسی کیفی پارامترها و بیان اهمیت آنها پرداخته‌اند و بررسی کمی موضوع کمتر موردنظر محققان بوده است. از میان پارامترهایی که در روش غیرمستقیم مورد استفاده قرار گرفته‌اند مشخصات سنگ به نمایندگی از پارامترهای تأثیرگذار بیشترین درصد تحقیقات را به خود اختصاص داده‌اند. متأسفانه در روابط تجربی بیان شده تمامی پارامترهای مؤثر در زمینه‌ی سایش سرمه‌های حفاری به خوبی پوشش داده نشده‌اند

و تعداد محدودی از پارامترها با ساده‌سازی و بدون تحلیل مناسب در روابط ارائه شده مدنظر قرار گرفته است. با این حال این قبیل مطالعات تنها در شرایط خاص آزمایشگاهی و تنها برای نمونه سنگ‌های مورد مطالعه قابل ارزیابی می‌باشند. برای رفع این مشکل، ارائه‌ی مدل‌های کمی با توجه به مشخصات سنگ و پارامترهای اجرایی به منظور ارزیابی و پیش‌بینی درست سایش سرمته‌های حفاری که در همه‌ی شرایط قابل استفاده باشد مورد نیاز است. به طور کلی مهم‌ترین انتقادهای وارد بر تحقیقات پیشین را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- عدم وجود ضرایب منطقی در برخی از معادلات ارائه شده
 - وجود هم‌پوشانی میان برخی از پارامترهای مورد استفاده
 - ساده‌سازی و تحلیل سایش به صورت توصیفی و در نظر نگرفتن تمامی عوامل تأثیرگذار
 - عدم وجود مدل کمی مناسب با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای تأثیرگذار
- یکی از مهم‌ترین مواردی که در بحث تحلیل و ارزیابی معادلات آماری می‌بایست به آن توجه کرد وجود ضرایب منطقی یا به عبارت دیگر پیروی معادله از طبیعت ذاتی و علمی موضوع است. متأسفانه در برخی از روابط ارائه شده در زمینه‌ی سایش سرمته‌های حفاری این دیدگاه مورد توجه قرار نگرفته است. برای مثال در رابطه‌ی ۳-۱۸ مقدار سایش با افزایش مقدار کوارتز محتوی معادل و محتوای سیلیس کاهش می‌یابد. یا در رابطه‌ی ۳-۲۵ میزان سایش با افزایش مقاومت بار نقطه‌ای و کوارتز محتوی معادل کاهش می‌یابد. به هر حال آنچه مسلم است با افزایش پارامترهای مقاومتی سنگ و افزایش سختی و ساینده‌ی سایش سرمته‌های حفاری افزایش می‌یابد که متأسفانه در معادلات فوق عکس این مطلب نشان داده شده است. این نکته حائز اهمیت است که در بحث تحلیل معادلات آماری یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی درستی معادله، علاوه بر آزمون‌های t و F ، بررسی منطقی بودن یا نبودن ضرایب برآزش می‌باشد که باید در مطالعات آماری به آن توجه داشت.
- از موارد مهم دیگری که باید به آن توجه کرد، عدم هم‌پوشانی میان پارامترهای مورد استفاده می‌باشد.

عدم توجه به این موضوع موجب پایین آمدن دقت در تحلیل‌ها خواهد شد. برای مثال شاخص مقاومت بار نقطه‌ای که خود معرف دو پارامتر مقاومت فشاری و کششی سنگ است (بسیاری از محققان آزمایش بار نقطه‌ای را به عنوان آزمایش کششی غیرمستقیم می‌شناسند)، در کنار دو پارامتر مقاومت فشاری و کششی سنگ به عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار در تحقیقات افرادی نظیر آدبایو و همکارانش در سال ۲۰۱۰، آدبایو و بلوو در سال ۲۰۱۲ و آدبایو و آدتولا در سال ۲۰۱۳ در نظر گرفته شده است. یا در برخی از تحقیقات از چند روش به منظور تعیین سختی سنگ استفاده شده است. برای مثال آدبایو و اوکاله در سال ۲۰۰۷ برای تعیین سختی سنگ هم از عدد چکش اشمیت و هم از سختی ویکرز بهره برده‌اند در صورتی که برای سختی یکی از این روش‌ها کافی و قابل پذیرش بود. آنچه مسلم است قبل از انتخاب پارامترهای مؤثر، بررسی هم‌پوشانی پارامترها برای سادگی و کاهش زمان و هزینه‌ی آزمایش‌ها، لازم و ضروری است.

نکته‌ای دیگری که در اکثر تحقیقات نمایان است ساده‌سازی و تحلیل سایش به صورت توصیفی و در نظر نگرفتن تمامی عوامل تأثیرگذار بر فرایند سایش بوده است. همان‌طور که در بخش‌های قبلی تشریح گردید بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی سایش سرمته‌های حفاری توصیفی و کیفی بوده و رابطه‌ی ریاضی خاصی که نشان‌دهنده‌ی ارتباط معنادار پارامترها با یکدیگر باشد ارائه نشده است و یا در صورت ارائه به علت ساده‌سازی قابل تعمیم به سایر تحقیقات نخواهد بود. لذا نتایج یک تحقیق زمانی قابل اتکا خواهد بود که تمامی موارد مورد تأثیر را در نظر گرفته و در عین حال سادگی لازم را داشته باشد.

عدم وجود مدل کمی مناسب با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مؤثر به منظور تحلیل و پیش‌بینی سایش سرمته‌های حفاری نیز از دیگر ایرادات وارد بر تحقیقات پیشین است. یک مدل یا چند مدل کمی مناسب که در عین سادگی تمامی مشخصات مؤثر سنگ و پارامترهای اجرایی را در نظر بگیرد با توجه به رعایت اصولی از قبیل عدم وجود محدودیت‌های مرزی و هم‌پوشانی میان پارامترها، برای پیش‌بینی سایش سرمته‌های حفاری خصوصاً سرمته‌های سه‌مخروطی لازم و ضروری می‌باشد.

۳-۶- جمع‌بندی

در این فصل پژوهش‌های منتشرشده در زمینه‌ی سایش سرمته‌های حفاری مورد مطالعه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که اکثر پژوهش‌های انجام شده به صورت کیفی و تحلیلی به بررسی موضوع مورد مطالعه پرداخته‌اند. سپس تکنیک‌های پایش وضعیت ابزار (روش‌های مستقیم و روش‌های غیرمستقیم) و مطالعات انجام شده در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها روابط تجربی ارائه شده در زمینه‌ی سایش سرمته‌های حفاری توسط محققین مختلف مورد نقد و بررسی قرار گرفته است. در فصل بعد نحوه‌ی جمع‌آوری اطلاعات، آماده‌سازی نمونه‌ها، مطالعات آزمایشگاهی و میدانی جهت ایجاد پایگاه داده برای توسعه مدل‌های کمی بیان خواهد شد.

فصل چہارم

جمع آوری اطلاعات و ایجاد پیکانہ دادہ

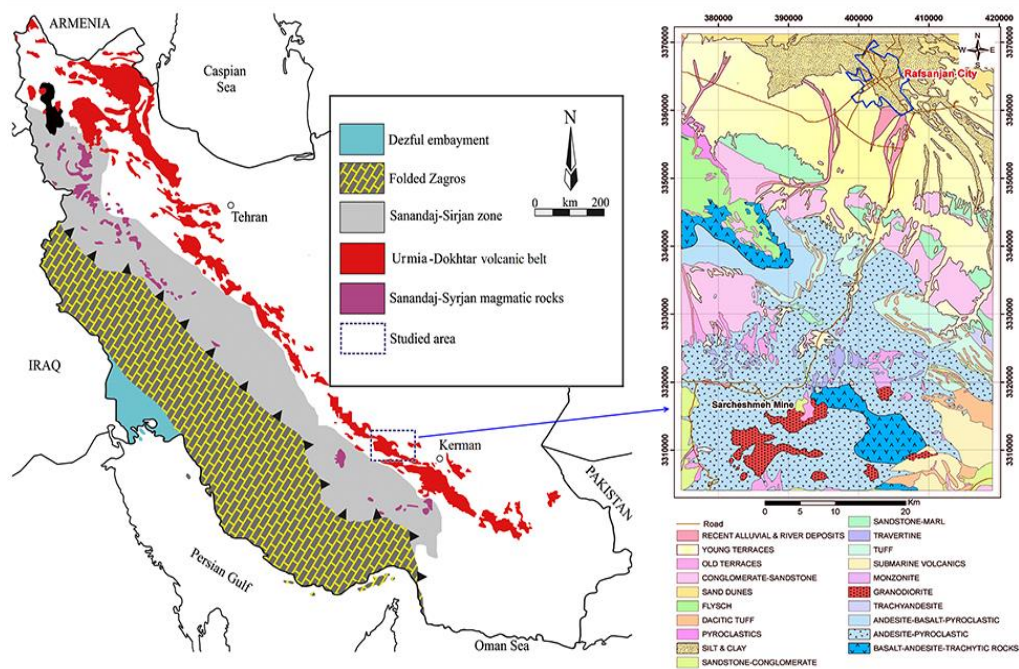
۴-۱- مقدمه

در این فصل پس از معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه و دستگاه‌های حفاری مورد استفاده در معدن مس سرچشمه، روند ایجاد پایگاه داده به منظور پیش‌بینی سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی تشریح می‌گردد. با توجه به مدت زمان حضور در معدن، از ۴۹ سرمته مورد استفاده در ۴ دستگاه حفاری تنها ۲۹ سرمته با توجه به شرایط فیزیکی سرمت‌ها (از کارافتادگی به علت سایش نه به علت شکستگی یا خرابی) انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، به منظور اندازه‌گیری سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی از روش‌های افت وزنی، افت ابعادی و افت حجمی استفاده شده است. در مرحله‌ی بعد، به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی، از ۱۴ نمونه سنگ برداشت شده، ۱۰ نمونه سنگ برای پیش‌بینی نرخ سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی در معدن مس سرچشمه مورد مطالعه قرار گرفته است. لازم به ذکر است به منظور دقت در انجام محاسبات، پدیده‌ی دگرسانی که بیشترین تاثیر را در تغییر خواص ژئومکانیکی سنگ‌ها داراست، مبنای اصلی تقسیم‌بندی واحدهای ژئوتکنیکی سنگ‌های مختلف معدن بوده است.

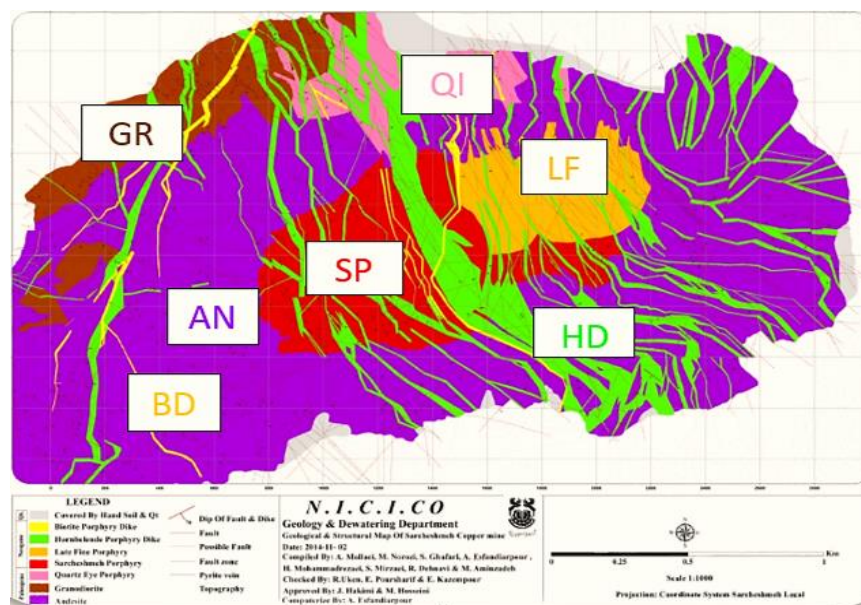
در این فصل مقادیر پارامترهای موثر بر سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی به منظور ایجاد پایگاه داده در جداول مختلف ارائه شده است تا در انجام تحلیل‌های آماری مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه هریک از این مراحل به صورت جداگانه تشریح شده است.

۴-۲- زمین‌شناسی عمومی منطقه‌ی مورد مطالعه (معدن مس سرچشمه)

کانسار مس سرچشمه به‌عنوان یکی از بزرگترین معادن مس-مولیبدن پورفیری در جهان، بر روی کمر بند آتشفشانی ارومیه - دختر و در ۶۵ کیلومتری جنوب غرب رفسنجان واقع است (شکل ۴-۱). کانسار مس سرچشمه از کانسارهای مس پورفیری نوع مونزونیتی است. توده‌ی گرانودیوریتی، استوک گرانودیوریتی سرچشمه پورفیری، توف‌های آندزیتی، کوارتز چشمی، دایک‌های گرانودیوریتی و استوک لیت‌فاین پورفیری عمده تشکیل‌دهنده‌ی معدن سرچشمه تشکیل شده‌اند و تحت هوازدگی، دگرسانی شدید، کانی‌سازی مس-مولیبدن و پیریتی شدن قرار گرفته‌اند (شکل ۴-۲) (Boomeri et al., 2010).



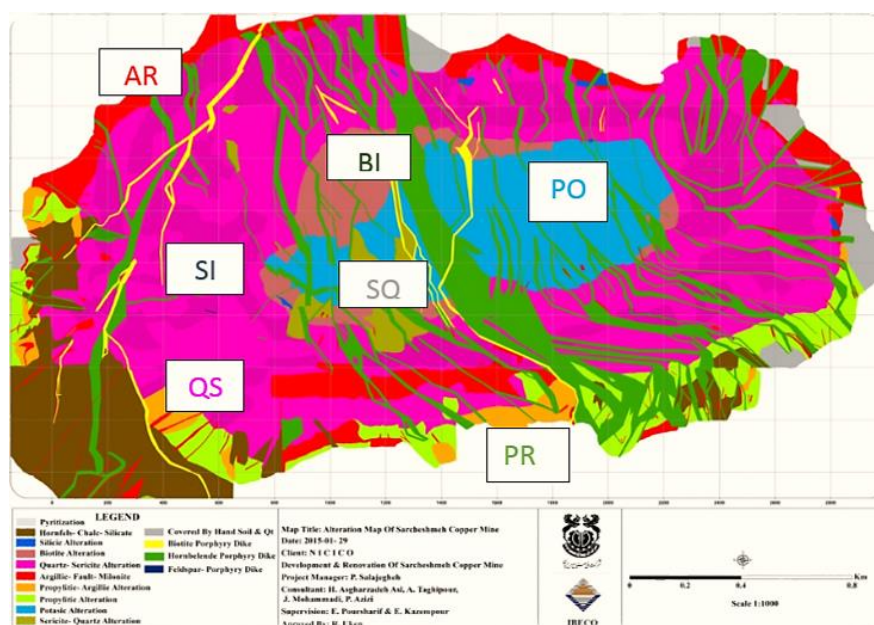
شکل ۴-۱- کانسار معدن مس سرچشمه



شکل ۴-۲- نقشه زمین‌شناسی معدن مس سرچشمه (Boomeri et al., 2010)

با وجود تنوع سنگ‌شناسی در کانسار مس سرچشمه، کانی‌سازی مس و مولیبدن و دگرسانی، عمدتاً در دو تیپ سنگ آندزیت و توده نفوذی سرچشمه پورفیری دیده می‌شود که ساخت منطقه‌ای در این سنگ‌ها از مرکز به سمت حاشیه شبیه ساختار دگرسانی است که توسط لاول و گیلبرت در سال ۱۹۷۰ برای کانسارهای مس پورفیری مطرح گردیده است (Lowell and Guilbert, 1970).

زون‌بندی دگرسانی در معدن مس سرچشمه از مرکز به سمت حاشیه شامل دگرسانی پتاسیک، بیوتیت، فیلیک (سرسیت‌کوارتز، کوارتزسرسیت، سلیسیفاید)، آرژلیک و پروپیلیتیک می‌شود (شکل ۴-۳).



شکل ۴-۳- نقشه‌ی دگرسانی سنگ‌های معدن مس سرچشمه (Boomeri et al., 2010)

در سنگ‌های آندزیتی، به سمت مرکز معدن دگرسانی بیوتیتی و فیلیک، در سنگ‌های گرانودیوریتی سرچشمه پورفیری در اعماق زیاد، دگرسانی پتاسیک و در سطح و اعماق کم، دگرسانی فیلیک و آرژلیک دیده می‌شود. تشکیلات لیت‌فاین پورفیری، کوارتزچشمی، دایک‌ها و توده گرانودیوریتی دگرسانی کمتری را متحمل شده و بیشتر در سطح تحت تاثیر هوازدگی قرار گرفته‌اند (Boomeri et al., 2010).

۴-۳- مشخصات دستگاه‌های حفاری

در صنعت معدن‌کاری به ویژه در معادن بزرگ سطحی به دلیل نیاز به نرخ تولید بالا و برنامه‌ریزی دقیق پروژه استفاده از دستگاه‌های حفاری دورانی با سرمت‌های سه‌مخروطی نسبت به سایر روش‌های حفاری نظیر حفاری ضربه‌ای یا ضربه‌ای-دورانی از محبوبیت بالایی برخوردار است. از آنجایی که دستگاه‌های حفاری دورانی چال‌های عمیق انفجاری را با قطرهای بزرگ حفاری می‌کنند بسیار مورد توجه پیمانکاران و حفران در معادن قرار گرفته‌اند. این دستگاه‌ها با داشتن مزایای بسیار زیاد دارای برخی معایب نیز می‌باشند که از جمله می‌توان به تعمیرات پرهزینه و جابجایی دشوار در مناطق ناهموار و کوهستانی خشن اشاره نمود. در

معدن مس سرچشمه، دستگاه‌های حفاری دورانی شرکت‌های اینگرسولرند^۱ آمریکا و آیزدکارتکس^۲ روسیه با نام‌های DM-H و SBSH-270A مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تحقیق سرمته‌های مورد استفاده در دو دستگاه DM-H و دو دستگاه SBSH-270A مورد استفاده قرار گرفته است (شکل‌های ۴-۴ و ۴-۵).



شکل ۴-۵- دستگاه حفاری دورانی SBSH-270A



شکل ۴-۴- دستگاه حفاری دورانی DM-H

لازم به ذکر است سرمته‌های مورد استفاده در این تحقیق از سه شرکت سندویک^۳، ولگابارماش^۴ و اطلس کوپکو^۵ با قطرهای ۸/۵، ۹، ۹/۸۷۵ اینچ می‌باشند. در شکل‌های ۴-۶ و ۴-۷ دو سرمته از شرکت‌های سندویک و اطلس کوپکو به نمایش در آمده است.



شکل ۴-۷- سرمته‌ی سه‌مخروطی شرکت اطلس کوپکو



شکل ۴-۶- سرمته‌ی سه‌مخروطی شرکت سندویک

^۱ Ingersoll-Rand

^۲ IZ-KARTEX

^۳ Sandvik

^۴ Volgaburmash

^۵ Atlas Copco

۴-۴- مطالعات میدانی و آزمایشگاهی

به منظور ایجاد پایگاه داده، مشخصات فیزیکی، مکانیکی، ساختاری و محیطی (توده سنگ) مؤثر سنگ‌ها و پارامترهای عملیاتی با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی (آنالیز شیمیایی، بررسی مقاطع نازک و تست‌های آزمایشگاهی)، مطالعات میدانی و بانک اطلاعاتی موجود در مرکز تحقیقات مس سرچشمه، تعیین و اندازه‌گیری شده است. لازم به ذکر است که مطالعات مناسبی در مقیاس آزمایشگاهی از ابتدای شروع فعالیت رسمی معدن مس سرچشمه آغاز شده و تاکنون نیز ادامه دارد. طی سال‌های اخیر گروه ژئوتکنیک معدن به صورت سیستماتیک از نقاط مختلف معدن نمونه‌گیری‌هایی انجام داده و نحوه‌ی نمونه‌گیری به نحوی بوده است که تیپ سنگ‌های اصلی معدن مس سرچشمه را شامل شود. همچنین در مطالعات میدانی بررسی ساختارهای محیطی سنگ‌های مختلف نیز مدنظر گروه ژئوتکنیک معدن بوده است. به منظور کاهش هزینه‌های اجرای این تحقیق، مقادیر برخی از این پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مورد مطالعه از طریق این بانک اطلاعاتی تعیین گردید که از جمله‌ی آن می‌توان به مقادیر چگالی، تخلخل، مقاومت فشاری (UCS)، مقاومت کششی برزیلی (BTS)، سیستم رده‌بندی توده سنگ (RMR) و شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) اشاره نمود.

۴-۴-۱- اندازه‌گیری سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی

در این تحقیق به منظور اندازه‌گیری مقدار سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی از ابزارهایی نظیر باسکول، میکرومتر و سطل مدرج برای تعیین میزان افت وزنی، افت ابعادی و افت حجمی سرمته‌های مستهلک استفاده شده است. برای انجام این فرایند سرمته‌های مستهلک پس از جمع‌آوری، شستشو و تمیزکاری به آزمایشگاه تحقیق و توسعه معدن مس سرچشمه انتقال یافتند (شکل ۴-۸). به منظور تعیین میزان افت وزنی، سرمته‌های سه‌مخروطی قبل و بعد از حفاری در حالت نو و مستهلک از طریق باسکولی با دقت ۰/۰۱ کیلوگرم توزین شدند (شکل ۴-۹). سپس به منظور تعیین افت ابعادی، قطر، ارتفاع و دکمه‌ها (دندانه‌ها) با استفاده از یک میکرومتر با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است (شکل ۴-۱۰). در اندازه‌گیری افت ابعادی، قطر بخش‌های مختلف هر مخروط، ارتفاع نوک هر مخروط تا پاشنه‌ی بخش‌های مختلف آن و ارتفاع

دندانه‌های کاربید تنگستن مدنظر قرار گرفته است. مقادیر بیان شده برای هر سه مخروط اندازه‌گیری شده و میانگین اختلاف این ابعاد نسبت به سرمته‌ی نو به عنوان افت ابعادی در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۸- جمع‌آوری، شستشو و آماده‌سازی سرمته‌های مستهلک جهت انتقال به آزمایشگاه تحقیق و توسعه



شکل ۴-۹- توزین سرمته‌های نو و مستهلک جهت تعیین میزان افت وزنی



شکل ۴-۱۰- اندازه‌گیری ابعاد قطری، ارتفاعی و دندان‌های سرته‌های نو و مستهلک جهت تعیین میزان افت ابعادی همچنین برای تعیین افت حجمی، میزان تغییرات حجم آب در زمان قرار دادن سرته‌ی نو و مستهلک در ۱۶ لیتر آب برای سرته‌های مختلف اندازه‌گیری شده است (شکل ۴-۱۱).



شکل ۴-۱۱- اندازه‌گیری افت حجمی سرته‌های نو و مستهلک با استفاده از سطل مدرج در ۱۶ لیتر آب

در جداول ۴-۱ مقادیر نهایی اندازه‌گیری شده درصد افت وزنی سرمته‌های سهمخروطی دورانی نسبت به هر متر حفاری برای ۲۹ سرمته ارائه شده است.

جدول ۴-۱ - درصد افت وزنی سرمته‌های سهمخروطی دورانی به ازای هر متر حفاری

تعداد	سرمته‌ی مستهلک	وزن سرمته مستهلك (kg)	وزن سرمته نو (kg)	متراف حفاری	درصد افت وزنی به ازای هر متر حفاری (gr/m)
1	Volga - 8.5 inch- 122	30.1	35.8	1488	3.831
2	Volga - 8.5 inch- 209	28.6	35.8	2032	3.543
3	Volga - 8.5 inch- 128	30.2	35.8	992	5.645
4	Volga - 8.5 inch- 121	29.7	35.8	1456	4.190
5	Volga - 8.5 inch- 161	31.3	35.8	1104	4.076
6	Volga - 8.5 inch- 168	30.9	35.8	816	6.005
7	Volga - 8.5 inch- 216	32.3	35.8	512	6.836
8	Volga - 8.5 inch- 129	30.3	35.8	1376	3.997
9	Volga - 8.5 inch- 127	28.9	35.8	1488	4.637
10	Volga - 8.5 inch- 118	31.05	35.8	656	7.241
11	Volga - 8.5 inch- 125	28.7	35.8	1088	6.526
12	Volga - 8.5 inch- 117	29.65	35.8	944	6.515
13	Volga - 8.5 inch- 164	29.8	35.8	1152	5.208
14	Volga - 8.5 inch- 133	32.75	35.8	816	3.738
15	Volga - 8.5 inch- 124	31.9	35.8	1008	3.869
16	Volga - 8.5 inch- 162	29.55	35.8	1664	3.756
17	Atlas - 9 inch - C95164	38.7	42.1	3152	1.079
18	Atlas - 9.875 inch - D36957	52.8	58.7	2128	2.773
19	Atlas - 9.875 inch - D62246	55.9	58.7	1808	1.549
20	Sand - 9 inch - H001932057	37.1	43.2	1664	3.666
21	Sand - 9.875 inch- 1001508015	57.7	63.5	2496	2.324
22	Sand - 9.875 inch- 1001508016	54.8	63.5	7392	1.177
23	Sand - 9.875 inch- 1001510030	60.3	63.5	1408	2.273
24	Sand - 9.875 inch- 1001510060	54.1	63.5	3456	2.720
25	Sand - 9.875 inch- 1026824011	55.7	63.5	4432	1.760
26	Sand - 9.875 inch- 1026824012	55	63.5	4768	1.783
27	Sand - 9.875 inch- 1042997037	57.85	63.5	2272	2.487
28	Sand - 9.875 inch- 1042997038	57.1	63.5	3008	2.128
29	Sand - 9.875 inch- 1042997039	54.9	63.5	2992	2.874

Volga: سرمته‌ی شرکت ولگابارماش، Atlas: سرمته‌ی شرکت اطلس کوپکو، Sand: سرمته‌ی شرکت سندویک

در جدول ۴-۲ پس از اندازه‌گیری قطر و ارتفاع بخش‌های مختلف مخروطها در هر سرمته‌ی سهمخروطی، ارتفاع دندانه‌ها یا دکمه‌ها نیز اندازه‌گیری شده و اختلاف ابعاد سرمته‌ی مستهلک نسبت به سرمته‌ی نو در این جهات تعیین شده است. به منظور رسیدن به مقداری واحد، از مقادیر اندازه‌گیری شده میانگین گرفته

شده است. در نهایت اختلاف ابعاد به ازای هر متر حفاری برای ۲۹ سرمته تعیین شده است و در محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۴-۲- میانگین اختلاف ابعاد سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی به ازای هر متر حفاری

تعداد	سرمته‌ی مستهلک	اختلاف ابعاد سرمته‌ی			متر از حفاری (m)	اختلاف ابعاد به ازای هر متر حفاری			میانگین اختلاف ابعاد
		مستهلک نسبت به نو				دکمه (mm)	ارتفاع (mm)	قطر (mm)	ابعاد (mm/m)
		دکمه (mm)	ارتفاع (mm)	قطر (mm)					
1	Volga - 8.5 inch- 122	86.7	62.4	237.18	1488	0.058	0.042	0.159	0.087
2	Volga - 8.5 inch- 209	120.26	81.32	258.86	2032	0.059	0.040	0.127	0.076
3	Volga - 8.5 inch- 128	83.72	80.08	237.2	992	0.084	0.081	0.239	0.135
4	Volga - 8.5 inch- 121	102.12	59.1	203	1456	0.070	0.041	0.139	0.083
5	Volga - 8.5 inch- 161	70.84	55.32	239.7	1104	0.064	0.050	0.217	0.110
6	Volga - 8.5 inch- 168	74.96	50.28	211.54	816	0.092	0.062	0.259	0.138
7	Volga - 8.5 inch- 216	37.68	39.02	208.16	512	0.074	0.076	0.407	0.185
8	Volga - 8.5 inch- 129	97.8	48.56	207.5	1376	0.071	0.035	0.151	0.086
9	Volga - 8.5 inch- 127	109	72.62	177.66	1488	0.073	0.049	0.119	0.080
10	Volga - 8.5 inch- 118	184.34	103.52	197.48	656	0.281	0.158	0.301	0.247
11	Volga - 8.5 inch- 125	98.28	89.76	298.62	1088	0.090	0.083	0.274	0.149
12	Volga - 8.5 inch- 117	100.78	92.58	236.2	944	0.107	0.098	0.250	0.152
13	Volga - 8.5 inch- 164	237.6	241.78	251.48	1152	0.206	0.210	0.218	0.211
14	Volga - 8.5 inch- 133	51.28	56.44	130.76	816	0.063	0.069	0.160	0.097
15	Volga - 8.5 inch- 124	64.32	66.58	221.56	1008	0.064	0.066	0.220	0.117
16	Volga - 8.5 inch- 162	125.48	79.78	249.92	1664	0.075	0.048	0.150	0.091
17	Atlas - 9 inch - C95164	93.2	81.66	62.26	3152	0.030	0.026	0.020	0.025
18	Atlas - 9.875 inch - D36957	133.86	82.86	148.01	2128	0.063	0.039	0.070	0.057
19	Atlas - 9.875 inch - D62246	77.44	77.28	129.54	1808	0.043	0.043	0.072	0.052
20	Sand - 9 inch - H001932057	66.36	44.1	324.18	1664	0.040	0.027	0.195	0.087
21	Sand - 9.875 inch-1001508015	104.44	74.86	361.72	2496	0.042	0.030	0.145	0.072
22	Sand - 9.875 inch-1001508016	135.22	93.16	405.83	7392	0.018	0.013	0.055	0.029
23	Sand - 9.875 inch-1001510030	57.84	35.2	211.26	1408	0.041	0.025	0.150	0.072
24	Sand - 9.875 inch-1001510060	124.74	122.7	420.06	3456	0.036	0.036	0.122	0.064
25	Sand - 9.875 inch-1026824011	96.84	111.44	223.32	4432	0.022	0.025	0.050	0.032
26	Sand - 9.875 inch-1026824012	104.42	93.56	239.86	4768	0.022	0.020	0.050	0.031
27	Sand - 9.875 inch-1042997037	80.72	53.58	318.78	2272	0.036	0.024	0.140	0.066
28	Sand - 9.875 inch-1042997038	72.7	50.44	362.02	3008	0.024	0.017	0.120	0.054
29	Sand - 9.875 inch-1042997039	114.88	67.5	507.68	2992	0.038	0.023	0.170	0.077

در جدول ۴-۳ اختلاف حجم سرمته نسبت به هر متر حفاری به عنوان افت حجمی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است به منظور تعیین این مقادیر از سطل مدرج به همراه ۱۶ لیتر آب استفاده شده است.

جدول ۴-۳- اختلاف حجم سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی به ازای هر متر حفاری

تعداد	سرمته‌ی مستهلک	میزان حجم سرمته در آب (l)	متر از حفاری	اختلاف حجم سرمته نسبت به هر متر حفاری (ml/m)
1	Volga - 8.5 inch- 122	21	1488	0.538
2	Volga - 8.5 inch- 209	20.40	2032	0.541
3	Volga - 8.5 inch- 128	19.80	992	0.706
4	Volga - 8.5 inch- 121	21.40	1456	0.412
5	Volga - 8.5 inch- 161	21.60	1104	0.453
6	Volga - 8.5 inch- 168	21.80	816	0.490
7	Volga - 8.5 inch- 216	22.40	512	0.195
8	Volga - 8.5 inch- 129	21.20	1376	0.509
9	Volga - 8.5 inch- 127	20.20	1488	0.806
10	Volga - 8.5 inch- 118	20.60	656	1.524
11	Volga - 8.5 inch- 125	21.20	1088	0.643
12	Volga - 8.5 inch- 117	20	944	1.377
13	Volga - 8.5 inch- 164	20.40	1152	0.955
14	Volga - 8.5 inch- 133	20.80	816	1.103
15	Volga - 8.5 inch- 124	20.60	1008	0.992
16	Volga - 8.5 inch- 162	20.20	1664	0.721
17	Atlas - 9 inch - C95164	21.80	3152	0.190
18	Atlas - 9.875 inch - D36957	25.20	2128	0.188
19	Atlas - 9.875 inch - D62246	24	1808	0.553
20	Sand - 9 inch - H001932057	20.20	1664	0.541
21	Sand - 9.875 inch-1001508015	24.20	2496	0.561
22	Sand - 9.875 inch-1001508016	23.40	7392	0.244
23	Sand - 9.875 inch-1001510030	25.80	1408	0.426
24	Sand - 9.875 inch-1001510060	23.40	3456	0.521
25	Sand - 9.875 inch-1026824011	23.80	4432	0.361
26	Sand - 9.875 inch-1026824012	23.60	4768	0.357
27	Sand - 9.875 inch-1042997037	25.40	2272	0.352
28	Sand - 9.875 inch-1042997038	24.40	3008	0.432
29	Sand - 9.875 inch-1042997039	20.80	2992	1.036

۴-۴-۲- تعیین خواص فیزیکی سنگ‌های مورد مطالعه

سرمته‌ها در فرایند حفاری از سنگ‌های مختلفی عبور خواهند کرد و پس از حفر چندین چال انفجاری دچار استهلاک و سایش می‌شوند. به همین علت در این تحقیق به منظور دقت در انجام محاسبات، میزان حفاری هر سرمته در سنگ‌های مختلف با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و با توجه به توزیع دگرسانی در آنها مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور ابتدا ۱۴ نمونه سنگ با دگرسانی‌های مختلف از معدن مس سرچشمه جمع‌آوری شده است. سپس ۱۰ نمونه سنگ با توجه به مناطقی که سرمته‌های سه‌مخروطی در

آن حفاری نموده‌اند به منظور بررسی ارتباط میان سایش سرمته‌های حفاری و خصوصیات سنگ، انتخاب شده است (شکل ۴-۱۲). سنگ‌های مورد مطالعه در این تحقیق شامل گرانودیوریت با دگرسانی فیلیک، کوارتزآی چشمی با دگرسانی فیلیک، آندزیت با دگرسانی‌های فیلیک و بیوتیت، سرچشمه پورفیری با دگرسانی‌های فیلیک و پتاسیک، لیت فاین (کوارتز مونزونیت) با دگرسانی‌های فیلیک و پتاسیک، دایک بیوتیتی و دایک هورنبلند می‌باشند.



شکل ۴-۱۲- جمع‌آوری نمونه‌های سنگ از معدن مس سرچشمه

برای انجام مطالعات آزمایشگاهی و تعیین پارامترهای موثر تحت شرایط استاندارد، ۱۰ نمونه سنگ از معدن مس سرچشمه به آزمایشگاه انتقال یافت تا از طریق تست‌های پراش^۱ و طیف‌سنجی فلورسانس^۲ اشعه‌ی ایکس، فرمول ترکیبات موجود با درصد نیمه‌کمی (شناسایی فازها، کانی‌شناسی و کریستالوگرافی) و درصد اکسید عناصر تشکیل دهنده به صورت کمی در هر نمونه تعیین شود. از طریق آزمایش XRF محتوای سیلیس و آلومینا و شاخص شدت هوازدگی و از طریق آزمایش XRD سختی موس و کوارتز محتوی معادل^۳ (EQC) برای هر نمونه سنگ تعیین گردید. لازم به ذکر است شاخص شدت هوازدگی مورد استفاده در این تحقیق، شاخص دگرسانی شیمیایی^۴ (CIA) می‌باشد که از رابطه ۴-۱ محاسبه می‌شود. در این شاخص،

^۱ X-Ray Diffraction (XRD)

^۲ X-Ray Fluorescence (XRF)

^۳ Equivalent Quartz Content (EQC)

^۴ Chemical Index of Alteration (CIA)

شدت هوازدگی با استفاده از نسبت‌های مولی اکسید عناصر تشکیل دهنده‌ی آنها تعیین می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که شدت هوازدگی در بازه‌ی ۰ تا ۱۰۰ قابل تغییر است (Nesbitt and Young, 1982).

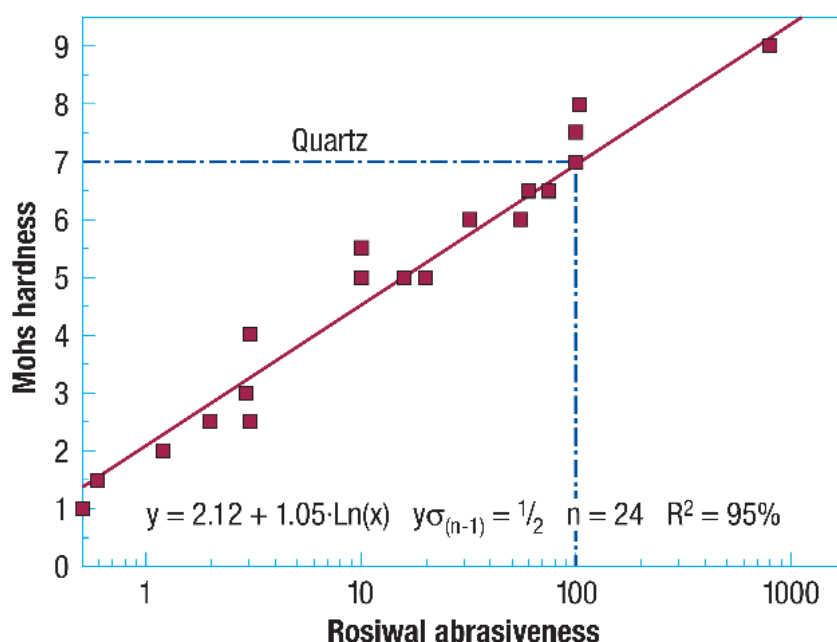
$$CIA = 100 \times \left[\frac{AL_2O_3}{AL_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O} \right] \quad (۱-۴)$$

در رابطه‌ی فوق CaO^* مقدار CaO موجود در بخش سیلیکات سنگ است.

سپس با توجه به اینکه هر کانی بر اساس سختی موس چه درصدی از ساینده‌ی ناشی از کوارتز را ایجاد می‌کند می‌توان EQC نمونه سنگ مورد مطالعه را طبق رابطه‌ی زیر محاسبه نمود.

$$EQC = \sum_{i=1}^n A_i R_i \quad (۲-۴)$$

در رابطه‌ی فوق A درصد کانی‌ها، R ساینده‌ی رزیوال^۱ و n تعداد کانی‌ها است. میزان ساینده‌ی رزیوال سنگ با استفاده از سختی موس و طبق رابطه‌ی نشان داده شده در شکل ۴-۱۳ قابل محاسبه است. طبق شکل ۴-۱۳ میزان EQC برای کانی کوارتز ۱۰۰٪ بوده و با کاهش میزان کوارتز و یا سختی دیگر کانی‌های سنگ میزان ساینده‌ی سنگ به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد (Thuro, 1997).



شکل ۴-۱۳- رابطه‌ی میزان ساینده‌ی رزیوال سنگ با استفاده از سختی موس (Thuro, 1997)

^۱ -Rosiwal

نتایج آزمایش XRF و نحوه‌ی محاسبه‌ی شاخص شدت هوازگی در جداول ۴-۴ و ۴-۵ و نتایج آزمایش XRD بر روی نمونه سنگ‌های معدن مس سرچشمه در جدول ۴-۶ ارائه شده است.

جدول ۴-۴- نتایج طیف‌سنجی فلورسانس اشعه‌ی ایکس (XRF) برای سنگ‌های معدن

% درصد وزنی اکسید عناصر در نمونه‌های معدن (سنگ-نوع دگرسانی)

	An-Ph	An-Bi	Gr-Ph	SP-Ph	SP-Po	Lf-Ph	Lf-Po	QI-Ph	BD	HD
SiO ₂	59.63	50.75	57.95	65.56	68.92	66.34	62.69	67.36	64.91	65.14
TiO ₂	0.71	1.03	1.12	0.53	0.37	0.52	0.83	0.42	0.51	0.46
Al ₂ O ₃	15.25	22.25	19.32	22.34	17.80	18.58	16.87	20.40	16.85	16.69
Fe ₂ O ₃	14.93	8.09	8.11	1.45	6.29	3.44	5.22	4.01	4.18	4.52
FeO	13.44	7.28	7.29	1.30	5.66	3.09	4.70	3.61	3.76	4.06
MgO	4.69	1.41	3.45	0.00	0.85	2.25	4.48	0.88	0.89	1.35
MnO	0.10	0.12	0.10	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.10	0.11
CaO	1.63	13.72	4.53	0.11	0.06	0.72	3.08	0.14	5.91	3.82
Na ₂ O	0.67	0.51	2.49	0.00	0.13	2.68	3.32	0.16	2.95	2.54
K ₂ O	2.25	1.91	2.62	9.88	5.52	5.26	3.19	6.54	3.49	5.23
P ₂ O ₅	0.13	0.20	0.31	0.13	0.07	0.19	0.30	0.08	0.21	0.14

An-Ph: آندزیت فیلیک، An-Bi: آندزیت بیوتیت، Gr-Ph: گرانودیوریت فیلیک، SP-Ph: سرچشمه پورفیری فیلیک، SP-Po: سرچشمه پورفیری پتاسیک، Lf-Ph: لیت‌فاین فیلیک، Lf-Po: لیت‌فاین پتاسیک، QI-Ph: کوآرتز آفی فیلیک، BD: دایک بیوتیتی، HD: دایک هورنبلند

جدول ۴-۵- محاسبه‌ی شاخص شدت هوازگی

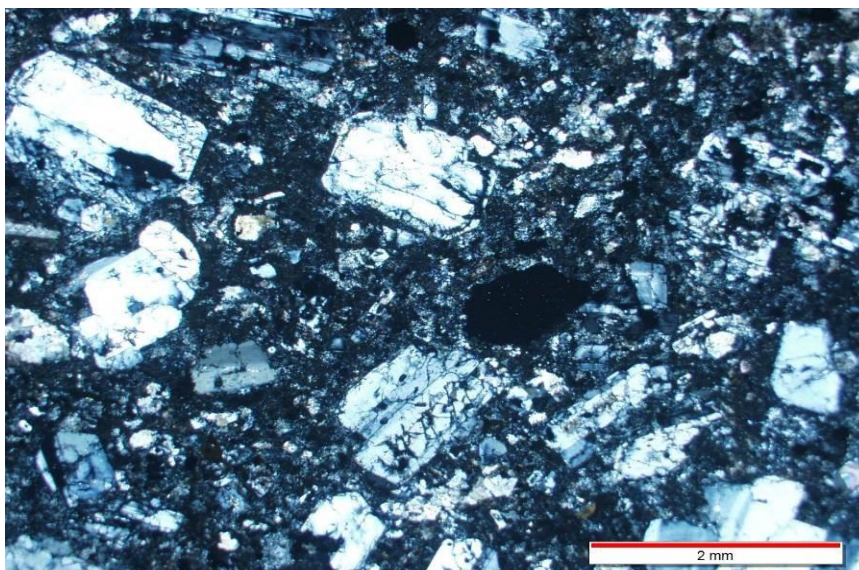
سنگ-نوع دگرسانی

	An-Ph	An-Bi	Gr-Ph	SP-Ph	SP-Po	Lf-Ph	Lf-Po	QI-Ph	BD	HD
CaO*	0.03	0.19	0.08	0.002	0.001	0.01	0.05	0.002	0.11	0.07
CIA	71.1	49.6	56.1	67.3	73.9	62.1	53.9	72.9	46.5	49.9

همچنین برای تعیین مشخصات کانی‌شناسی نظیر بافت و میانگین اندازه دانه‌ها یک مقطع نازک از بخش تیپیک هر سنگ تهیه و این مقاطع با استفاده از یک میکروسکوپ پلاریزان مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه‌ای از مقطع نازک تهیه شده از سنگ بیوتیت دایک در شکل ۴-۱۴ نمایش داده شده است. پس از تهیه تصاویر برای هر مقطع، تصاویری که دارای مرزهای مشخص‌تری بوده‌اند، انتخاب و جهت تجزیه و تحلیل وارد محیط نرم‌افزار JMicroVision شده است. سپس مقیاس تصویر با مقیاس میکروسکوپ هماهنگ شده و مرز دانه‌ها به صورت دستی و با دقت بالا به صورت پلیگون‌های مجزا در نرم‌افزار از یکدیگر تفکیک شده است.

جدول ۴-۶- نتایج آنالیز پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) برای سنگ‌های معدن

Sample	Compound Name	Formula	Semi-Quantitative (%)	Mohs	Rosival	AR (%)	EQC (%)
An-Ph	Quartz	SiO ₂	41.6		104.336	4340.389	
	Anorthite	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	7.9		40.255	318.016	
	Clinocllore	(Mg ₅ Al)(Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	33	4.876	1.005	33.158	52.149
	Muscovite	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	7.4		1.005	7.435	
	Pyrite	FeS ₂	10.1		51.077	515.877	
An-Bi	Quartz	SiO ₂	32.7		104.336	3411.796	
	Calcite	CaCO ₃	21.1		2.312	48.782	
	Anorthite	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	17.8	4.594	40.255	716.542	42.057
	Clinocllore	(Mg ₅ Al)(Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	17.8		1.005	17.885	
	Muscovite	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	10.6		1.005	10.651	
Gr-Ph	Quartz	SiO ₂	9.5		104.336	991.195	
	Albite	NaAlSi ₃ O ₈	7.4		51.077	377.969	
	Muscovite	(K,Na)Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	60.5	2.921	1.005	60.789	14.878
	Clinocllore	Mg-Fe-Fe-Al-Si-O-OH	22		1.005	22.105	
	Pyrite	FeS ₂	0.7		51.077	35.754	
SP-Ph	Quartz	SiO ₂	44.5		104.336	4642.964	
	Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	23.4		40.255	941.971	
	Muscovite	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	15.6	5.332	1.005	15.674	56.430
	Chalcopyrite	CuFeS ₂	9.5		3.722	35.360	
	Clinocllore	Mg-Fe-Fe-Al-Si-O-OH	7		1.005	7.033	
SP-Po	Quartz	SiO ₂	52.5		104.336	5477.654	
	Muscovite	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	35.2	4.975	1.005	35.368	57.672
	Pyrite	FeS ₂	4.4		51.077	224.739	
	Chalcopyrite	CuFeS ₂	7.9		3.722	29.405	
LF-Ph	Quartz	SiO ₂	33.5		104.336	3495.265	
	Clinocllore	Mg-Fe-Fe-Al-Si-O-OH	7.3		1.005	7.335	
	Muscovite	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	9.3		1.005	9.344	
	Pyrite	FeS ₂	1.5	5.717	51.077	76.615	58.217
	Chalcopyrite	CuFeS ₂	2.7		3.722	10.050	
	Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	9.8		40.255	394.501	
	Albite	NaAlSi ₃ O ₈	35.8		51.077	1828.555	
LF-Po	Quartz	SiO ₂	24.7		104.336	2577.106	
	Pyrite	FeS ₂	1.8	5.956	51.077	91.939	58.373
	Albite,calcian	(Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈	61.8		51.077	3156.556	
	Clinocllore	(Mg ₅ Al)(Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	11.6		1.005	11.655	
QI-Ph	Quartz	SiO ₂	53.3		104.336	5561.123	
	Pyrite	FeS ₂	3.2	4.855	51.077	163.446	57.683
	Muscovite	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	43.5		1.005	43.708	
BD	Quartz	SiO ₂	21.7		104.336	2264.097	
	Anorthite	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	48.5	5.384	40.255	1952.375	45.722
	Muscovite	(K,Na)Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	21.5		1.005	21.603	
	Sanidine	(K,Na)(Si ₃ Al)O ₈	8.3		40.255	334.118	
HD	Quartz	SiO ₂	21.1		104.336	2201.495	
	Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	6		40.255	241.531	
	Albite	NaAlSi ₃ O ₈	36.6	4.896	51.077	1869.416	43.489
	Clinocllore	Mg ₅ Al(Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	14.8		1.005	14.871	
	Muscovite	(K,Na)Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	21.5		1.005	21.603	



شکل ۴-۱۴- تصویر مقطع نازک تهیه شده از دایک بیوتیتی

لازم به ذکر است که تعداد دانه‌ها باید به صورتی انتخاب شود که نمونه‌ی معرفی از کل دانه‌های مقطع نازک باشد. با توجه به شکل و اندازه پلیگون‌ها اطلاعاتی نظیر مساحت، محیط، طول، عرض و زاویه‌ای که قطر بزرگتر دانه‌های کشیده با خط افق می‌سازند برای هر دانه اندازه‌گیری شده است. پس از اندازه‌گیری اطلاعات لازم، ضریب بافت سنگ^۱ (TC) از طریق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود (Howarth and Rowlands, 1987):

$$TC = AW \times \left[\left(\frac{N_0}{N_0 + N_1} \times \frac{1}{FF_0} \right) + \left(\frac{N_1}{N_0 + N_1} \right) \times AR_1 \times AF_1 \right] \quad (۳-۴)$$

در رابطه‌ی فوق، AW وزن مربوط به چگالی تراکمی دانه‌ها (مجموع مساحت دانه‌ها نسبت به مساحت مرجع)، N_0 تعداد دانه‌هایی که نسبت طول به عرض آنها کمتر از ۲ میلیمتر است، N_1 تعداد دانه‌هایی که نسبت طول به عرض آنها بیشتر از ۲ میلیمتر است، FF_0 میانگین حسابی فاکتور شکل تمام دانه‌های N_0 است، AR_1 میانگین حسابی نسبت طول به عرض دانه‌های N_1 است و AF_1 فاکتور زاویه است که کیفیت جهت‌یافتگی دانه‌ها را تعیین می‌کند.

AF_1 برای تمام دانه‌های N_1 با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$AF_1 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^9 \left(\frac{X_i}{N(N-1)/2} \right) \times i \quad (۴-۴)$$

^۱ Texture Coefficient (TC)

که در آن N تعداد کل دانه‌های دارای کشیدگی ($N_1=N$)، X_i تعداد اختلافات زاویه‌ای در هر کلاس و i فاکتور وزن‌دهی و شماره‌ی هر کلاس است. محاسبه‌ی فاکتور زاویه بر اساس یک سیستم طبقه‌بندی می‌باشد که در آن به هر رده، وزنی تعلق می‌گیرد. این طبقه‌بندی بر اساس اختلاف زاویه حاده (β) بین هر دانه با دیگر دانه‌ها (0° تا 90° درجه) بوده و این مقادیر به ۹ رده تقسیم می‌شوند. بنابراین در یک گروه N دانه‌ای، تعداد اختلاف زاویه بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$(N-1) + (N-2) + \dots + 2 + 1 = \frac{N(N-1)}{2} \quad (5-4)$$

نحوه‌ی محاسبه‌ی ضریب بافت و میانگین اندازه دانه‌ها از طریق تحلیل مقاطع نازک سنگ‌های مختلف معدن مس سرچشمه در جدول ۴-۷ ارائه شده است.

جدول ۴-۷- محاسبه‌ی ضریب بافت و میانگین اندازه دانه‌ها

Rock Type	AW	N_0	N_1	FF_0	AR_1	AF_1	GS	TC
AN-PH	0.209	11	2	0.680	1.479	1.062	0.377	0.310
AN-BI	0.297	33	4	0.775	1.510	0.986	0.349	0.390
GR-PH	0.304	26	8	0.593	1.803	0.992	1.166	0.519
QI-PH	0.232	16	2	0.567	1.648	1.021	0.442	0.408
SP-PH	0.358	8	1	0.621	1.494	0.889	1.366	0.565
SP-PO	0.402	13	0	0.637	1.509	1.010	0.993	0.631
LF-PH	0.440	14	4	0.662	1.613	0.963	1.193	0.669
LF-PO	0.395	9	0	0.679	1.381	1.078	1.037	0.582
BD	0.432	11	7	0.704	1.903	1.152	1.594	0.743
HD	0.628	10	2	0.695	1.551	1.030	2.566	0.920

AW: وزن مربوط به چگالی تراکمی دانه‌ها، N_0 : تعداد دانه‌هایی که نسبت طول به عرض آنها کمتر از ۲ میلیمتر است، N_1 : تعداد دانه‌هایی که نسبت طول به عرض آنها بیشتر از ۲ میلیمتر است، FF_0 : میانگین حسابی فاکتور شکل تمام دانه‌های N_0 ، AR_1 : میانگین حسابی نسبت طول به عرض دانه‌های N_1 ، AF_1 : فاکتور زاویه، GS: میانگین اندازه دانه‌ها، TC: ضریب بافت

با توجه به توضیحات بیان شده، در ابتدای فصل به منظور کاهش هزینه‌های اجرای این تحقیق، برای تعیین مقادیر برخی از پارامترها از داده‌های بانک اطلاعاتی مرکز تحقیق و توسعه‌ی معدن مس سرچشمه استفاده شد که از جمله‌ی آن می‌توان به مقادیر چگالی و تخلخل اشاره نمود. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی سنگ‌های مختلف به منظور تعیین چگالی و تخلخل در جدول ۴-۸ ارائه شده است.

جدول ۴-۸- مقادیر چگالی و تخلخل بر اساس آزمایش‌های انجام شده

نوع سنگ	تعداد تست‌ها	چگالی در حالت اشباع (gr/cm3)				تخلخل (%)			
		کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
AN-PH	112	2.390	3.049	2.705	0.122	0.294	14.920	4.160	3.214
AN-BI	127	2.348	2.774	2.606	0.088	0.250	15.115	5.023	3.379
GR-PH	51	2.273	2.967	2.617	0.127	0.230	21.351	5.140	5.050
QI-PH	30	2.472	2.909	2.666	0.097	0.321	7.640	1.953	1.593
SP-PH	176	2.328	2.838	2.516	0.090	0.012	15.022	3.643	2.659
SP-PO	6	2.492	2.733	2.591	0.106	0.381	4.711	2.128	1.730
LF-PH	226	2.330	2.798	2.565	0.065	0.413	8.688	2.226	1.523
LF-PO	13	2.508	2.778	2.592	0.081	0.265	4.085	1.586	1.084
BD	96	2.050	2.626	2.516	0.084	0.112	16.115	1.374	1.874
HD	333	2.330	2.848	2.628	0.080	0.044	14.843	1.547	1.812

۴-۴-۳- تعیین خواص مکانیکی سنگ‌های مورد مطالعه

همواره مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و مقاومت کششی برزیلی (BTS) در اکثر پروژه‌های مهندسی سنگ به عنوان مهمترین ویژگی مقاومتی سنگ‌ها، اندازه‌گیری می‌شوند. در این تحقیق بر اساس بانک اطلاعاتی دریافتی از مرکز تحقیق و توسعه‌ی معدن مس سرچشمه، این آزمایش‌ها بر روی تمامی واحدهای لیتولوژیکی موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه بر اساس استانداردهای ISRM انجام شده است. نتایج تحلیل نمونه سنگ‌های مختلف معدن مس سرچشمه به صورت جمع‌بندی شده در جداول ۴-۹ و ۴-۱۰ ارائه شده است.

جدول ۴-۹- مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری بر اساس آزمایش‌های انجام شده

نوع سنگ	تعداد تست‌ها	مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)			
		کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
AN-PH	26	1.486	48.989	19.712	12.335
AN-BI	17	3.000	32.000	15.631	9.699
GR-PH	6	13.649	31.179	23.843	6.796
QI-PH	17	3.000	44.665	24.818	13.277
SP-PH	41	2.000	57.000	23.171	12.371
SP-PO	18	28.240	52.953	34.109	6.613
LF-PH	7	2.000	65.000	36.571	23.487
LF-PO	2	19.000	34.000	26.500	10.607
BD	42	18.937	104.597	50.198	23.047
HD	43	11.794	155.770	53.892	31.549

جدول ۴-۱۰- مقادیر مقاومت کششی برزیلی بر اساس آزمایش‌های انجام شده

نوع سنگ	تعداد تست‌ها	مقاومت کششی برزیلی (MPa)			
		کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
AN-PH	16	1.960	4.010	2.968	0.646
AN-BI	11	1.570	2.880	2.121	0.358
GR-PH	8	1.210	6.350	3.588	1.533
QI-PH	9	3.410	4.580	3.910	0.361
SP-PH	4	1.820	8.480	4.340	2.875
SP-PO	7	1.410	4.880	3.599	1.496
LF-PH	7	2.890	10.290	6.460	2.483
LF-PO	3	1.610	4.070	2.590	1.304
BD	45	2.364	11.405	6.545	2.473
HD	55	2.220	18.325	9.843	4.355

از دیگر پارامترهای مکانیکی مهم و تاثیرگذار بر سایش سرمته‌های حفاری می‌توان به سختی سنگ اشاره نمود. با وجود این که سختی یکی از مشخصه‌های رفتاری سنگ است، تنها زمانی که سنگ تحت شرایط یکسان و طبق روش‌های آزمایشی خاص مورد بررسی قرار گیرد، امکان کمی کردن آن وجود دارد. بنابراین لازم است متناسب با طبیعت سنگ و نیاز مهندسی با توجه به اهداف مورد نظر روش اندازه‌گیری سختی سنگ تعیین گردد. آزمایش‌های خراشی، واجهشی یا دینامیکی و اثرگذاری، سه گروه از روش‌هایی هستند که به منظور تعیین سختی سنگ پیشنهاد شده‌اند. با توجه به سادگی و در دسترس بودن وسایل آزمایش چکش اشمیت و همچنین ارتباط بسیار خوب آن با سایر ویژگی‌های سنگ، این روش از متداول‌ترین روش‌ها برای تعیین سختی سنگ است که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰).

در این تحقیق آزمایش چکش اشمیت طبق استاندارد ISRM، بر روی بلوک‌هایی با ابعاد حداقل ۴۰ سانتیمتر و بر روی سطحی از بلوک که صاف و فاقد هرگونه ناپیوستگی، درزه و هوازدگی بوده است انجام شده است. با توجه به این که احتمال خطا در مقادیر پایین بیشتر است، نیمی از داده‌ها با کمترین مقدار حذف و از بقیه داده‌ها میانگین‌گیری شده است. لازم به ذکر است، با توجه به حساسیت میزان سختی به دست آمده به راستای چکش، اندازه‌گیری‌ها با قرار دادن چکش در راستای

قائم رو به پایین، بر روی بلوک مورد نظر، انجام شده است. مقادیر مربوط به سختی و اجهشی چکش اشمیت برای نمونه‌های مختلف سنگی معدن مس سرچشمه در جدول ۴-۱۱ ارائه شده است.

جدول ۴-۱۱- نتایج اندازه‌گیری سختی و اجهشی چکش اشمیت

نوع سنگ	تعداد تست‌ها	سختی و اجهشی چکش اشمیت (SH)			
		کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
AN-PH	20	13	27	18.55	5
AN-BI	20	10	28	17.85	6.49
GR-PH	20	15.5	29	22.20	4.73
QI-PH	20	15	22	17.80	2.56
SP-PH	20	13	23	18.95	3.13
SP-PO	20	17.5	31	24.65	4.40
LF-PH	20	19.5	35	26.70	5
LF-PO	20	15	30	22.15	4.93
BD	20	20	34	26.15	4.92
HD	20	20	37	26.90	5.24

به منظور ارزیابی قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها به عنوان یکی دیگر از پارامترهای مکانیکی تاثیرگذار بر سایش سرمته‌های حفاری، روش‌های کمی و کیفی مختلفی ارائه شده است. با توجه به اینکه در فاکتور ساینده‌گی شیمازک (SF-a) و شاخص ساینده‌گی سنگ (RAI) به شرایط میکروسکوپی و میکروسکوپی سنگ توجه می‌شود و مبنای آنها پارامترهای مؤثر در ساینده‌گی سنگ‌ها می‌باشد، در این تحقیق برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ‌های مورد مطالعه از این دو شاخص استفاده شده است.

در این میان شاخص ساینده‌گی شیمازک (SF-a) به دلیل در نظر گرفتن مقاومت کششی، اندازه‌ی دانه‌ها و میزان کوارتز محتوی معادل سنگ نسبت به سایر روش‌ها برتری داشته و به دلیل توجه به ترکیب میکروسکوپی از قابلیت بالایی در ارزیابی و پیش‌بینی ساینده‌گی سنگ‌ها برخوردار است. این شاخص در سال ۱۹۷۰ توسط شیمازک و ناتز^۱ ارائه شده است. رابطه‌ی کلی این شاخص به صورت رابطه‌ی ۴-۶ تعریف می‌شود (Ersoy and Waller, 1995a).

^۱ Schimazek & Natz

$$SFa = \left(\frac{EQC \times GS \times BTS}{100} \right) \quad (۶-۴)$$

در رابطه بالا EQC درصد کوارتز محتوی معادل سنگ، GS اندازه دانه‌ها بر حسب میلی‌متر و BTS مقاومت کششی غیرمستقیم بر حسب مگاپاسکال است. طبق توضیحات بیان شده با استفاده از تهیه مقاطع نازک از بخش تیپیک سنگ و میانگین‌گیری وزنی، اندازه دانه‌ها به دست می‌آید.

همچنین شاخص ساینده‌گی سنگ (RAI) به عنوان یکی دیگر از روش‌های کمی ارزیابی قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری و درصد کوارتز محتوی معادل سنگ در سال ۲۰۰۲ توسط پلنینگر^۱ و همکارانش در کشور آلمان ارائه شده است. رابطه‌ی کلی این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود (Plinninger et al., 2002a).

$$RAI = EQC \times UCS \quad (۷-۴)$$

با توجه به مطالب ذکر شده، نتایج محاسبه‌ی فاکتورهای ساینده‌گی شیمازک و شاخص ساینده‌گی سنگ در جدول ۴-۱۲ ارائه شده است.

جدول ۴-۱۲- نتایج محاسبه‌ی فاکتورهای ساینده‌گی شیمازک و شاخص ساینده‌گی سنگ

Rock Type	GS (mm)	EQC (%)	BTS (MPa)	UCS (MPa)	SF-a (N/mm)	RAI
AN-PH	0.377	52.149	2.968	19.712	0.583	10.280
AN-BI	0.349	42.057	2.121	15.631	0.312	6.574
GR-PH	1.166	14.878	3.588	23.843	0.622	3.547
QI-PH	0.442	57.683	3.910	24.818	0.998	14.316
SP-PH	1.366	56.430	3.412	23.171	2.630	13.075
SP-PO	0.993	57.672	4.957	34.109	2.838	19.671
LF-PH	1.193	58.217	5.276	36.571	3.664	21.291
LF-PO	1.037	58.373	4.161	26.500	2.520	15.469
BD	1.594	45.722	6.545	50.198	4.770	22.952
HD	2.566	43.489	9.843	53.892	10.986	23.437

GS: میانگین اندازه دانه‌ها، EQC: کوارتز محتوی معادل، BTS: مقاومت کششی غیرمستقیم برزیلی، UCS: مقاومت فشاری تک‌محوری، SF-a: فاکتور ساینده‌گی شیمازک، RAI: شاخص ساینده‌گی سنگ

^۱ Plinninger

۴-۴-۴- تعیین خواص ساختاری و محیطی (توده سنگ) سنگ‌های مورد مطالعه

همانگونه که در ابتدای فصل بیان شده است بسیاری از آزمایش‌ها و تحلیل‌های مکانیک سنگی در واحد ژئوتکنیک معدن مس سرچشمه در سال‌های مختلف انجام و مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از مواردی که در این سال‌ها توسط گروه ژئوتکنیکی معدن مس سرچشمه مورد توجه بوده است تحلیل توده سنگ‌های مختلف معدن بر اساس خصوصیات مهم توده سنگ بوده است. در این تحقیق پس از بررسی و تجمیع نتایج این مطالعات طبق بانک اطلاعاتی داده‌های موجود از واحد تحقیق و توسعه‌ی معدن مس سرچشمه، توده سنگ‌های معدن سرچشمه با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ رده‌بندی شده است. لازم به ذکر است به منظور این رده‌بندی از سیستم‌های رده‌بندی توده سنگ (RMR) و شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) استفاده شده است. نتایج تحلیل توده سنگ‌های مختلف معدن و مقادیر محاسبه شده‌ی RMR و GSI در جدول ۴-۱۳ ارائه شده است.

جدول ۴-۱۳- نتایج محاسبه‌ی رده‌بندی توده سنگ و شاخص مقاومت زمین‌شناسی

نوع سنگ	تعداد برداشت	شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)				رده‌بندی توده سنگ (RMR)			
		کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
AN-PH	41	30.000	60.000	38.512	6.823	25.000	55.000	33.463	7.534
AN-BI	16	31.000	46.000	37.875	5.018	28.000	38.000	32.313	3.156
GR-PH	15	27.000	51.000	38.933	6.933	27.000	47.000	35.133	6.312
QI-PH	15	28.000	47.000	36.067	5.444	33.000	47.000	39.600	5.082
SP-PH	16	30.000	42.000	38.125	2.630	31.000	38.000	34.250	1.612
SP-PO	11	33.000	58.000	44.455	8.407	39.000	56.000	46.545	6.378
LF-PH	43	42.000	64.000	50.535	4.891	41.000	54.000	46.279	3.712
LF-PO	13	30.000	41.000	36.231	3.320	33.000	48.000	41.615	5.363
BD	17	54.000	70.000	63.647	5.159	57.000	71.000	64.471	5.001
HD	62	51.000	76.000	65.019	5.849	53.000	77.000	66.130	6.140

۴-۴-۵- تعیین پارامترهای عملیاتی

طبق مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف، بار روی سرمه (WOB) و سرعت دوران (RPM) دو پارامتر مهم عملیاتی در حین حفاری می‌باشند که تاثیر مستقیمی بر سایش سرمه‌های حفاری خواهند داشت. به منظور تعیین این پارامترها هر سرمه با توجه به سنگی که در آن حفاری شده است مورد پایش

قرار گرفته است. به همین دلیل در این تحقیق مقادیر مختلفی از این پارامترها اندازه‌گیری شده است که به منظور استفاده از یک مقدار واحد برای تحلیل هر سرمته‌ی حفاری، با توجه به مترائ حفاری از میانگین وزنی مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت به سنگی که در آن حفاری شده استفاده شده است. نتایج اندازه‌گیری بار روی سرمته و سرعت دوران برای هر سرمته‌ی حفاری با توجه به مترائ حفاری در جدول ۴-۱۴ ارائه شده است.

جدول ۴-۱۴ - نتایج اندازه‌گیری بار روی سرمته و سرعت دوران برای هر سرمته‌ی حفاری

تعداد	سرمته‌ی مستهلک	بار روی سرمته (ton) (WOB)	سرعت دوران سرمته (r/min) (RPM)
1	Volga - 8.5 inch- 122	20.125	91.125
2	Volga - 8.5 inch- 209	19.600	85.900
3	Volga - 8.5 inch- 128	28.625	93.750
4	Volga - 8.5 inch- 121	23.250	95.875
5	Volga - 8.5 inch- 161	22.375	90.750
6	Volga - 8.5 inch- 168	28.375	98.250
7	Volga - 8.5 inch- 216	29.625	93.875
8	Volga - 8.5 inch- 129	19.625	91.375
9	Volga - 8.5 inch- 127	25.250	93.125
10	Volga - 8.5 inch- 118	29.750	93.625
11	Volga - 8.5 inch- 125	29.250	93.880
12	Volga - 8.5 inch- 117	27.750	93.375
13	Volga - 8.5 inch- 164	24.250	93.500
14	Volga - 8.5 inch- 133	22.625	92.125
15	Volga - 8.5 inch- 124	21.125	93.250
16	Volga - 8.5 inch- 162	21.875	88.125
17	Atlas - 9 inch - C95164	14.600	83.900
18	Atlas - 9.875 inch - D36957	17.778	84.222
19	Atlas - 9.875 inch - D62246	16.364	84.455
20	Sand - 9 inch - H001932057	20.909	85.909
21	Sand - 9.875 inch-1001508015	17.917	87.417
22	Sand - 9.875 inch-1001508016	4.332	82.095
23	Sand - 9.875 inch-1001510030	15.875	85.125
24	Sand - 9.875 inch-1001510060	18.364	84.909
25	Sand - 9.875 inch-1026824011	8.037	80.059
26	Sand - 9.875 inch-1026824012	6.084	81.409
27	Sand - 9.875 inch-1042997037	15.909	84.727
28	Sand - 9.875 inch-1042997038	7.621	81.947
29	Sand - 9.875 inch-1042997039	19.444	90.111

۴-۵- جمع‌بندی

در این فصل پس از بیان توضیحاتی در مورد منطقه‌ی مورد مطالعه و دستگاه‌های حفاری مورد استفاده در معدن مس سرچشمه، روند ایجاد پایگاه داده به منظور پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی تشریح شده است. در ادامه با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی، مطالعات میدانی و بانک اطلاعاتی موجود در مرکز تحقیقات مس سرچشمه، مشخصات فیزیکی، مکانیکی، ساختاری و محیطی (توده سنگ) مؤثر سنگ‌ها و پارامترهای عملیاتی تعیین و اندازه‌گیری شده است تا در انجام تحلیل‌های آماری مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است به منظور دقت در انجام محاسبات، مقادیر نهایی پارامترهای مورد مطالعه بر اساس مترائ حفاری هر سرمته و سنگی که در آن حفاری کرده است از طریق میانگین وزنی آن پارامتر محاسبه شده است. در فصل بعد روش‌های آماری و تحلیل مولفه‌های اصلی بیان خواهد شد.

فصل پنجم

روش‌های آماری و تحلیل مؤلفه‌های اصلی

۵-۱- مقدمه

هدف از تعیین عوامل مؤثر بر نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی، رسیدن به مدلی است که قادر به پیش‌بینی نرخ سایش سرمته‌ها با توجه به خصوصیات آن باشد. بنابراین مسأله بعدی پس از تعیین عوامل مؤثر، بررسی درصد تأثیرگذاری این عوامل بر نرخ سایش است. یکی از روش‌های مطالعه‌ی روابط بین متغیرها و تعیین نحوه‌ی وابستگی یک متغیر به متغیرهای دیگر، تحلیل رگرسیون است. لازم به ذکر است که الگوی روابط بین متغیرها در تحلیل رگرسیون ممکن است به صورت خطی یا غیرخطی باشد. همچنین انتخاب مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترها در روند تحلیل‌های آماری از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در شرایطی که تعداد متغیرهای ورودی بیش از مقدار باشد، روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۱ (PCA) ترکیبات خطی از متغیرهای اولیه همبسته را ارائه می‌دهد که در کاهش حجم متغیرها و استخراج پارامترهای مؤثر تأثیرگذار است. در تحلیل مؤلفه‌های اصلی، سعی بر آن است که ابعادی از داده‌ها پیدا شود که واریانس کل داده‌ها را توضیح دهد. در این فصل پس از بیان روش‌های آماری رگرسیون خطی و غیرخطی، معیارهای ارزیابی یک رابطه‌ی رگرسیونی و روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی شرح داده شده است.

۵-۲- روش‌های آماری

پربارترین روش‌های آماری به منظور توسعه مدل‌های پیش‌بینی کننده روش تحلیل رگرسیونی است. تحلیل رگرسیون شامل مجموعه‌ای از تکنیک‌ها است که برای یافتن روابط بین متغیرهای اندازه‌پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساس کار رگرسیون، بررسی و شناخت رفتار بین متغیرها است. در مدل‌های رگرسیونی یک متغیر به عنوان متغیر وابسته^۲ (متغیر پاسخ) در نظر گرفته می‌شود و دیگر متغیرها نقش متغیرهای مستقل^۳ را ایفا می‌کنند. در این مدل‌ها در ساده‌ترین حالت، تغییرات متغیر وابسته با توجه به یک متغیر مستقل پیش‌بینی می‌شود (وایزبرگ، ۱۳۷۴). در حالی که در

^۱ Principal Component Analysis

^۲ Dependent variable

^۳ Independent variable

رگرسیون چندگانه^۱ پیش‌بینی متغیر وابسته با استفاده از ترکیب خطی یا غیرخطی چند متغیر مستقل انجام می‌گیرد. رگرسیون چندگانه در واقع، توسعه یافته‌ی همان روش رگرسیون ساده است که بیش از یک متغیر مستقل در آن وجود دارد. در این روش به جای استفاده از یک متغیر مستقل برای توضیح دادن متغیر وابسته، از چند متغیر مستقل برای پیش‌بینی، توضیح و تفسیر متغیر وابسته استفاده می‌شود (والپول، ۱۳۵۷). پس با استفاده از مدل‌های رگرسیون چندگانه می‌توان تغییرات موجود در متغیر وابسته را بهتر و کامل‌تر توضیح داد و مدل دقیق‌تر و جامع‌تری به دست آورد.

۵-۲-۱- رگرسیون چند متغیره‌ی خطی

رگرسیون خطی، ممکن است ساده یا چندگانه باشد. یک مدل حاصل از رگرسیون چند متغیره‌ی خطی شکلی مانند رابطه‌ی (۵-۱) خواهد داشت. این معادله معمولاً با استفاده از روش حداقل مربعات، بر متغیرهای مستقل برازش داده می‌شود (وایزبرگ، ۱۳۷۴).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (۵-۱)$$

در این معادله Y متغیر وابسته، $X_1, X_2, \dots, X_n$ متغیرهای مستقل، $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ ضرایب متغیرهای مستقل، β_0 مقدار ثابت معادله و ε مجموع خطاهای تصادفی است. برای معادله‌ی برازش شده، مجموع مربعات خطاهای مشاهده شده^۲ (SEE) برای مقادیر Y به دست آمده از این مدل، از رابطه‌ی (۵-۲) محاسبه می‌شود. در این رابطه $\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \dots + \hat{\beta}_n X_n + \varepsilon$ مدل برازش داده شده و مقادیر $\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_n$ تخمین‌های پارامتری مدل هستند (وایزبرگ، ۱۳۷۴). به علت پیچیدگی محاسبات، برای محاسبه هر یک از این پارامترها بایستی از برنامه‌های کامپیوتری استفاده کرد. در این تحقیق از نرم‌افزار SPSS که یکی از چهار نرم‌افزار پیشرفته موجود در زمینه‌ی تحلیل آماری است، استفاده شده است.

$$SEE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n \left[y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_{1i} + \hat{\beta}_2 X_{2i} + \dots + \hat{\beta}_n X_{ni} + \varepsilon) \right]^2 \quad (۵-۲)$$

^۱ Multiple regression

^۲ Sum of Squares for Error

لازم به ذکر است که رگرسیون چند متغیره خطی دارای فرضیات زیر است (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱):

الف) خطاهای تصادفی (ε) مورد انتظار برای هر مقدار ثبت شده از متغیر وابسته y دارای مقدار صفر و واریانس ثابت است. ($V(e_i) = \sigma_\varepsilon^2$ و $E(\varepsilon) = 0$). نتیجه ی این شرط این است که توزیع خطاها باید دارای توزیع نرمال باشد.

ب) بین خطاهای مدل همبستگی وجود نداشته باشد و این یعنی $cov(e_i, e_j) = 0$.

ج) بین متغیرهای مستقل همبستگی وجود نداشته باشد.

۵-۲-۲- رگرسیون چند متغیره ی غیر خطی

اساس رگرسیون غیرخطی بر مبنای درک رگرسیون خطی است. این نوع از رگرسیون، روشی برای یافتن مدلی غیرخطی از رابطه ی بین متغیر وابسته و مجموعه ای از متغیرهای مستقل را بدون محدودیت خطی بودن آن ارائه می کند. رگرسیون غیرخطی مدل های مختلفی دارد که می توان به مدل های درجه ۲، درجه ۳ و ... و همچنین چند جمله ای های نمایی و توانی اشاره کرد. یکی از این مدل های غیرخطی، مدل لگاریتمی دوگانه است. این معادله در حالت کلی به صورت رابطه ی (۵-۳) خواهد بود (Tiryaki, 2008).

$$Y = aX_1^{b_1} X_2^{b_2} X_3^{b_3} \dots X_n^{b_n} \quad (۵-۳)$$

در این رابطه Y مقدار پیش بینی شده برای متغیر وابسته، a عرض از مبدأ، $X_1, X_2, \dots, X_n$ متغیرهای مستقل و $b_1, b_2, \dots, b_n$ ضرایب رگرسیونی هستند. با لگاریتم گرفتن از طرفین معادله، معادله به شکل خطی به صورت رابطه ی (۵-۴) تبدیل می شود که این رابطه را می توان همانند رابطه ی (۵-۵) به صورت یک تابع رگرسیون خطی نوشت (Tiryaki, 2008).

$$\log Y = \log a + b_1 \log X_1 + \dots + b_n \log X_n \quad (۵-۴)$$

$$Y' = a' + b'_1 X_1 + b'_2 X_2 + \dots + b'_n X_n \quad (۵-۵)$$

۵-۲-۳- معیارهای ارزیابی یک رابطه‌ی رگرسیونی

پس از تعیین یک رابطه‌ی رگرسیونی، برای تعیین اعتبار رابطه به دست آمده لازم است در ابتدا معنی‌داری کل مدل رگرسیون آزموده شود. برای این منظور می‌توان از جدول ANOVA استفاده کرد. در صورتی که سطح معنی‌داری (sig.) محاسبه شده در این جدول کمتر از ۵ درصد باشد، مدل رگرسیونی معنی‌دار خواهد بود. پس از آن بایستی تک‌تک ضرایب متغیرهای مستقل به کمک جدول ضرایب و مقادیر t ارائه شده برای هر متغیر، از لحاظ معنی‌داری بررسی شوند. در مرحله‌ی بعد لازم است که سه شرط زیر برای هر رابطه مورد بررسی قرار گیرد (مؤمنی و قیومی، ۱۳۹۱):

الف) بررسی استقلال خطاها: یکی از فرضیاتی که باید در روابط رگرسیونی مدنظر قرار گیرد، فرض استقلال خطاها از یکدیگر است. خطاها به صورت اختلاف مقدار واقعی از مقدار اندازه‌گیری شده تعریف می‌شوند. در نرم‌افزار SPSS، برای بررسی استقلال خطاها از یکدیگر از آزمون دوربین-واتسون^۱ استفاده می‌شود. چنانچه مقدار این آماره در بازه‌ی (۱/۲-۵/۵) قرار گیرد، می‌توان استقلال خطاها را پذیرفت. در صورتی که فرضیه استقلال خطاها رد شود و خطاها با یکدیگر همبستگی داشته باشند، امکان استفاده از مدل رگرسیون ارائه شده وجود ندارد.

ب) بررسی نرمال بودن خطاها: علاوه بر استقلال خطاها، خطاها باید دارای توزیع نرمال با میانگین صفر باشند. بدین منظور باید پس از محاسبه مقادیر استاندارد خطاها، نمودار توزیع داده‌ها و نمودار نرمال آن‌ها رسم شود و مقایسه بین این دو نمودار صورت گیرد. بدیهی است که در صورت عدم برقراری این شرط نیز نمی‌توان مدل رگرسیونی را مورد استفاده قرار داد.

ج) بررسی هم‌خطی: هم‌خطی در یک معادله رگرسیونی بدین معنا است که بین متغیرهای مستقل همبستگی بالایی وجود دارد. در این حالت ممکن است حتی با وجود بالا بودن R^2 ، مدل دارای اعتبار بالایی نباشد. وجود مسئله هم‌خطی بین متغیرها را نیز می‌توان با کنترل مقادیر ضریب تورم واریانس^۲

^۱ Durbin-Watson^۲ Variance Inflation Factor

(VIF) و تلورانس^۱ مورد بررسی قرار داد. هر چه میزان تلورانس کم باشد اطلاعات مربوط به متغیرها کم بوده و مشکلاتی در استفاده از رگرسیون ایجاد خواهد شد. ضریب تورم واریانس معکوس تلورانس است و هر چه افزایش یابد، واریانس ضرایب رگرسیون افزایش یافته و رگرسیون را نامناسب می‌سازد. می‌توان گفت در شرایطی که VIF بیشتر از ۱۰ و تلورانس کمتر از ۰/۱ باشد، وجود هم‌خطی بین متغیرهای مستقل محتمل است و مقدار VIF بیشتر از ۳۰ نشان‌دهنده جدی بودن این مشکل است.

۵-۳- تحلیل مؤلفه‌های اصلی

تحلیل مؤلفه‌های اصلی از روش‌های آماری چند متغیره و مبتنی بر مقادیر ویژه است که در آن با استفاده از مقادیر ویژه^۲ و بردارهای ویژه^۳ جهت‌هایی با حداکثر تغییرپذیری شناسایی می‌شود. سپس با تعریف مؤلفه‌های جدیدی که ترکیب خطی از متغیرهای اولیه هستند، ابعاد متغیرهای اولیه کاهش یافته و نقش هر یک از این متغیرها در تغییرپذیری مشخص می‌شود. سال‌هاست که محققان این روش را در علوم مختلف استفاده نموده‌اند. این روش ابتدا در سال ۱۹۰۱ توسط پیرسون^۴ معرفی شد و پس از آن هتلینگ^۵ در سال ۱۹۳۳ روش‌های محاسباتی آن را پیشنهاد نمود و آن را گسترش داد (فرشادفر، ۱۳۸۴). افزایش تعداد متغیرها با افزایش تعداد ضرایب همبستگی، روابط بین متغیرها را بسیار گسترش خواهد داد. از آنجایی که تحلیل داده‌های چندگانه نقش اساسی در تحلیل اطلاعات دارد، نیاز به تکنیک‌هایی در راستای کاهش ابعاد داده‌ها احساس می‌شود.

هدف از تحلیل مؤلفه‌های اصلی این است که واریانس موجود در داده‌ها توسط مؤلفه‌هایی ارائه شود که مستقل از هم بوده و هیچ همبستگی بین آن‌ها وجود ندارد. اولین مؤلفه تا آنجا که ممکن است علت بیشترین واریانس موجود در داده‌ها خواهد بود. بیشترین واریانس ممکن پس از مؤلفه اول توسط مؤلفه دوم ارائه می‌شود. تا جایی که در یک مجموعه مطالعاتی با n متغیر، اولین مؤلفه تا n امین

¹ Tolerance

² Eigenvalues

³ Eigenvectors

⁴ Pearson

⁵ Hotelling

مولفه، کل واریانس مربوط به داده‌ها را نشان می‌دهند. بنابراین PCA تنها به وسیله‌ای مجموعه‌ای از فرآیندها، داده‌های اضافی از یک مجموعه از متغیرهای دارای همبستگی را حذف می‌کند و آن متغیرها را در یک مجموعه کوچک‌تر بیان می‌کند. مهم‌ترین ویژگی بعد کاهش یافته این است که با اینکه پارامترهای زاید را حذف می‌کند، تأثیر اکثر پارامترهای مهم را به همراه دارد.

در حالت تئوری، اگر یک مجموعه p متغیری $X_1, X_2, \dots, X_p$ داشته باشیم، PCA متغیرهای اصلی را با استفاده از ماتریس همبستگی متغیرها، به p متغیر $PC_1, PC_2, \dots, PC_p$ که فاقد همبستگی با یکدیگر هستند، تبدیل می‌کند. این متغیرهای فاقد همبستگی، مؤلفه‌های اصلی مجموعه داده‌ها هستند که به صورت رابطه‌ی (۵-۶) معرفی می‌شوند (Suzuki et al., 1994).

$$PC_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1p}X_p$$

$$PC_2 = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2p}X_p$$

$$PC_p = a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2 + \dots + a_{pp}X_p \quad (۵-۶)$$

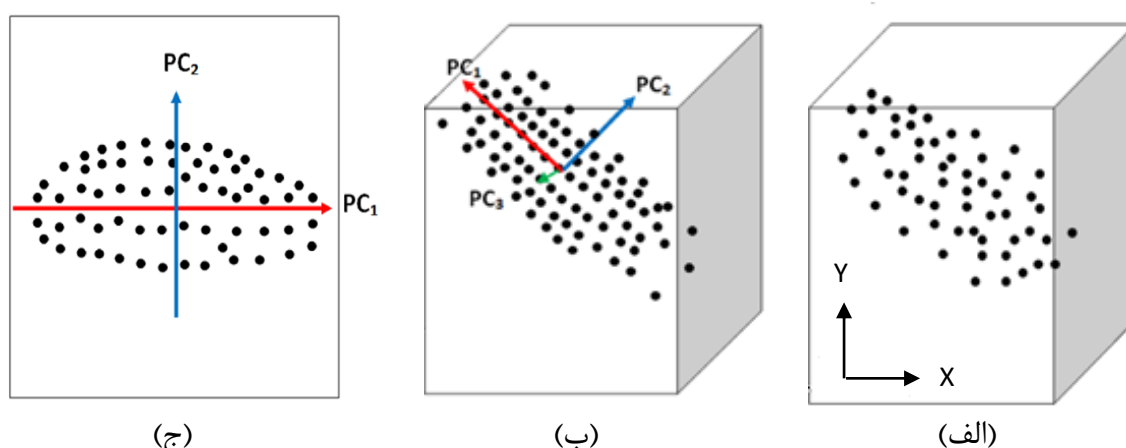
در این معادلات a_{ij} ها مقدار کواریانس بین دو متغیر هستند. بنابراین با تعریف p مؤلفه‌ی مستقل جدید، می‌توان کل واریانس موجود در داده‌ها را توجیه کرد، به‌طوریکه رابطه‌ی (۵-۷) همواره برای مؤلفه‌های ایجاد شده برقرار است. البته هنگام تجزیه متغیرها به مؤلفه‌های جدید، همواره امید بر آن است که واریانس تعدادی از مؤلفه‌ها آنقدر کم باشد که صرف نظر کردن از آن مشکلی ایجاد نکند. در این حالت، تغییرات در مجموعه داده‌ها با تعداد کمتری از متغیرهای PC و البته با برخورداری از واریانس‌های قابل توجیه، توضیح داده می‌شود.

$$Var(PC_1) \geq Var(PC_2) \geq \dots \geq Var(PC_p) \quad (۵-۷)$$

در شکل (۵-۱ الف) مجموعه‌ای از داده‌ها که در فضای مختصات پراکنده شده‌اند، نشان داده شده است. این پراکندگی در جهت دو محور X و Y قرار ندارد. بنابراین جهتی که واریانس بیشتری از داده‌ها را در بر می‌گیرد، به عنوان جهت اصلی در نظر گرفته می‌شود. جهات اصلی که داده‌ها در آن

تغییر می‌کنند با محور PC_1 به عنوان مؤلفه اصلی اول و محور PC_2 به عنوان مؤلفه اصلی دوم و عمود بر محور اول، نشان داده شده است (۵-۱-ب). پس از آن با انتقال محورها به راستای PC_1 و PC_2 ، ضمن آن که محورها در راستای بیشترین واریانس داده‌ها قرار می‌گیرند، داده‌ها مجدداً همبستگی پیدا می‌کنند (۵-۱-ج). با توجه به این که دوران^۱ به نحوی صورت می‌گیرد که محورها با زاویه ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر قرار می‌گیرند، کواریانس بین مؤلفه‌ها صفر خواهد بود (Engelbrecht, 2007).

در این مختصات جدید، واریانس در جهت محور PC_1 بزرگتر از محور PC_2 است. با توجه به اینکه PCA متغیرهای جدید را به صورت ترکیبی از متغیرهای اصلی محاسبه می‌کند، هرچقدر همبستگی متغیرهای اولیه بیشتر باشد، واریانس مؤلفه اصلی اول بیشتر است. بنابراین مؤلفه‌های اصلی با تشکیل ماتریس کواریانس داده‌های اولیه و تعیین مقادیر ویژه و بردارهای ویژه آن ماتریس، تعیین می‌شوند.



شکل ۵-۱- پراکندگی داده‌ها و تعیین جهات مؤلفه‌های اصلی (Engelbrecht, 2007)

الف) پراکندگی داده‌ها نسبت به محورهای مختصات، ب) جهت مؤلفه‌های اصلی، ج) جهت مؤلفه‌های اصلی پس از چرخش

اگر Σ ماتریس کواریانس، I ماتریس یکه، λ مقدار ویژه و A بردارهای ویژه متناظر با مقادیر ویژه باشند، مؤلفه‌های اصلی با تعیین مقادیر ویژه و بردارهای ویژه با استفاده از روابط (۵-۹) و (۵-۱۰) برای ماتریس Σ ارائه شده در رابطه‌ی (۵-۸) به دست می‌آیند (فرشادفر، ۱۳۸۴).

¹ Rotation

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \text{COV}(x_1, x_1) & \text{COV}(x_1, x_2) & \dots & \text{COV}(x_1, x_p) \\ \text{COV}(x_2, x_1) & \text{COV}(x_2, x_2) & \dots & \text{COV}(x_2, x_p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{COV}(x_p, x_1) & \text{COV}(x_p, x_2) & \dots & \text{COV}(x_p, x_p) \end{bmatrix} \quad (۸-۵)$$

$$|\Sigma - \lambda I| = 0 \quad (۹-۵)$$

$$\Sigma A = \lambda A \quad (۱۰-۵)$$

انتخاب چند مؤلفه اصلی اول که بیشترین مقدار واریانس را دارند و به عنوان مؤلفه های اصلی شناخته می شوند، از اساسی ترین اقدامات در تجزیه و تحلیل مؤلفه های اصلی است؛ چراکه با انتخاب چند مؤلفه اصلی اول، سایر مؤلفه ها از محاسبات حذف می شوند. به منظور تعیین تعداد مؤلفه های اصلی مورد نیاز که بیشترین تغییرات داده ها را در بر داشته اند، می توان از نموداری تحت عنوان اسکری پلات^۱، که در آن مقادیر ویژه در مقابل شماره مؤلفه ها رسم می شوند، استفاده کرد. در این نمودار مرز بین مؤلفه های اصلی و غیر اصلی، محلی است که شیب نمودار کم شده و نمودار میل به خطی شدن پیدا می کند و این نقطه محلی است که مقادیر ویژه در مقابل تغییر شماره مؤلفه تغییر چندانی ننماید. غیر از نمودار اسکری پلات می توان از نمودار سه بعدی، برای نشان دادن توزیع فضایی متغیرهای تعیین شده در هر مؤلفه اصلی نیز استفاده کرد. این نمودار در حقیقت اهمیت هر متغیر را در هر مؤلفه اصلی نشان می دهد.

۵-۴- جمع بندی

یکی از روش های مطالعه ی روابط بین متغیرها و تعیین نحوه ی وابستگی یک متغیر به متغیرهای دیگر، تحلیل رگرسیون است. لذا در این تحقیق به منظور بررسی رابطه ی بین نرخ سایش سرمته های سه مخروطی دورانی با متغیرهای مورد مطالعه از تحلیل رگرسیون استفاده شده است. در مرحله ی بعد، معنی داری مدل رگرسیون و ضرایب متغیرهای مستقل و سه شرط استقلال خطاها، نرمال بودن خطاها و نبود هم خطی در معادله رگرسیونی مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور پس از

^۱ Scree-plot

بیان توضیحاتی از رگرسیون چند متغیره خطی و غیر خطی، با توجه به تعداد زیاد متغیرها روش تحلیل مؤلفه های اصلی برای کاهش حجم متغیرها و انتخاب مؤثرترین آنها معرفی شده است. در فصل بعد مدل های پیش بینی نرخ سایش سرمته های سه مخروطی دورانی ارائه خواهد شد.

فصل ششم

ارائه‌ی مدل‌های پیش‌بینی سایش

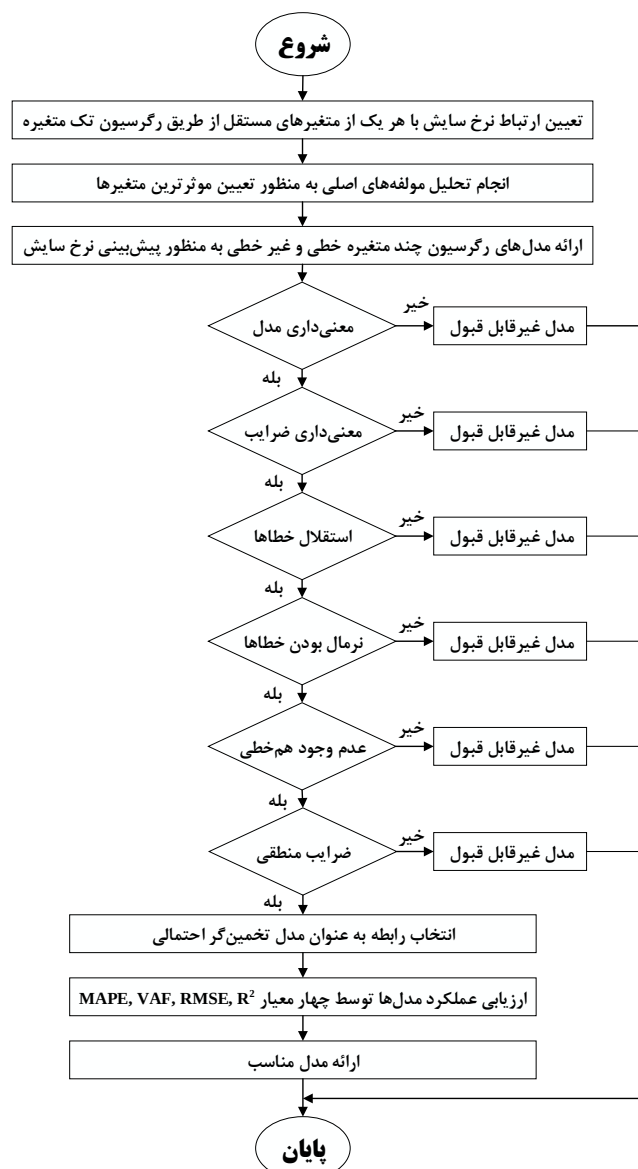
سرمه‌های سه‌محرو طی دورانی

۶-۱- مقدمه

هدف از بررسی خصوصیات فیزیکی، مکانیکی، ساختاری (توده سنگ) و اندازه‌گیری پارامترهای عملیاتی ارائه مدلی است که قادر به پیش‌بینی نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی با توجه به مشخصات آنها باشد. به همین دلیل در این فصل تأثیر هر یک از متغیرهای مؤثر بر نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی به‌طور جداگانه با استفاده از برازش تک متغیره تعیین خواهد شد. پس از آن پارامترهای مؤثر بر نرخ سایش، بر اساس روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی استخراج خواهند شد. به منظور تحلیل پارامترهای مؤثر بر نرخ سایش، داده‌ها در دو بخش آموزش و آزمون تقسیم‌بندی می‌شوند. سپس معادلات پیش‌بینی نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی توسط رگرسیون چند متغیره خطی و غیرخطی ارائه خواهند شد. در نهایت بعد از کنترل و اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده، بهترین مدل بر اساس معیارهای ارزیابی و استراتژی‌های اولویت‌بندی انتخاب و آنالیز حساسیت به منظور تعیین مقدار تأثیر پارامترهای ورودی بر روی هدف، برای مدل نهایی انجام خواهد شد.

۶-۲- مدل‌های آماری

در این بخش توسعه‌ی مدل‌ها با استفاده از روش‌های آماری رگرسیون چند متغیره خطی و غیرخطی صورت می‌پذیرد. همان‌طور که در فصل قبل اشاره شده است برای توسعه‌ی مدل‌های رگرسیونی باید مدل‌ها با استفاده از آزمون‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرند و بر اساس نتایج آزمون‌ها، مدل‌های دارای اعتبار ارزیابی شوند. نحوه‌ی توسعه‌ی این مدل‌ها در روندنمای شکل ۶-۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که روندنمای شکل ۶-۱ ملاحظه می‌شود، قسمت اول ارائه‌ی مدل‌های رگرسیونی به بررسی ارتباط تک‌تک متغیرها با خروجی‌ها اختصاص دارد. از این رو در بخش بعدی رگرسیون تک متغیره مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی مؤثرترین متغیرها تعیین می‌گردد. لازم به ذکر است که مدل‌های رگرسیون چند متغیره خطی و غیرخطی در دو بخش مجزا ارائه خواهد شد. در انتها بر اساس روندنمای توسعه‌ی مدل‌های رگرسیونی بهترین مدل بر اساس معیارهای ارزیابی انتخاب خواهد شد.

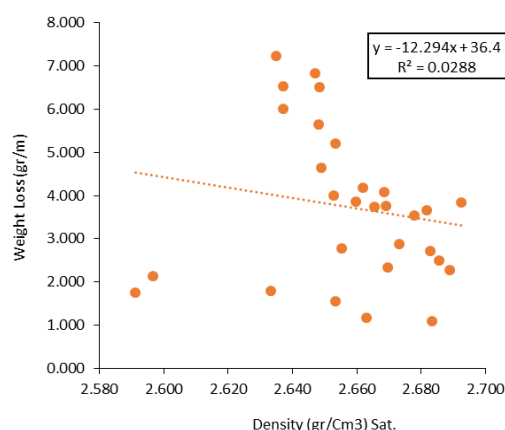


شکل ۶-۱- روندنمای توسعه‌ی مدل‌های رگرسیونی

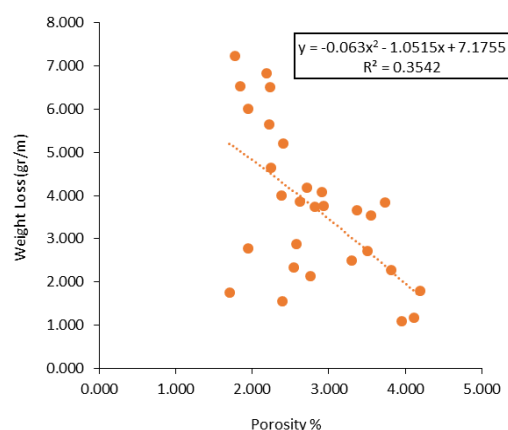
۶-۲-۱- رگرسیون تک متغیره

به منظور تعیین ارتباط میان متغیرهای وابسته با متغیرهای مستقل از رگرسیون تک متغیره استفاده می‌شود. از این طریق می‌توان علاوه بر تعیین نوع رابطه، نحوه‌ی صحیح وجود این پارامترهای مستقل را نیز مورد بررسی قرار داد. از این رو در روابط رگرسیونی خطی ضرایب مثبت باید متعلق به پارامترهایی باشند که متغیر وابسته با آن‌ها به طور مستقیم همبسته است، و ضرایب منفی به رابطه‌ی معکوس متغیر وابسته با متغیر مستقل اختصاص دارد. در رگرسیون غیرخطی نیز توان مثبت مربوط به رابطه‌ی مستقیم و توان منفی مربوط به رابطه‌ی معکوس متغیر وابسته با متغیر مستقل است.

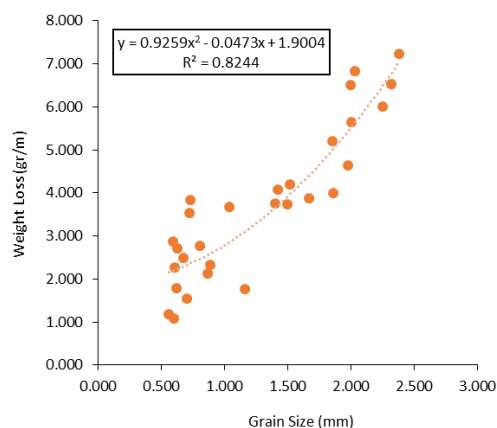
به همین منظور در این بخش، برازش‌های تک متغیره برای تعیین ارتباط تک‌تک متغیرها با نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی در معدن مس سرچشمه انجام شده است. لازم به ذکر است که در این تحلیل آماری از نتایج افت وزنی به عنوان مقادیر سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی استفاده شده است زیرا در سایر روش‌های اندازه‌گیری شده نظیر افت حجمی و افت ابعادی روند مناسب و معناداری بین متغیر وابسته و مستقل در برازش‌های تک متغیره دیده نشده است. شکل‌های ۲-۶ تا ۹-۶ نتایج این برازش‌ها را برای متغیرهای فیزیکی سنگ‌ها نسبت به سایش سرمته‌های حفاری (افت وزنی) نشان می‌دهد.



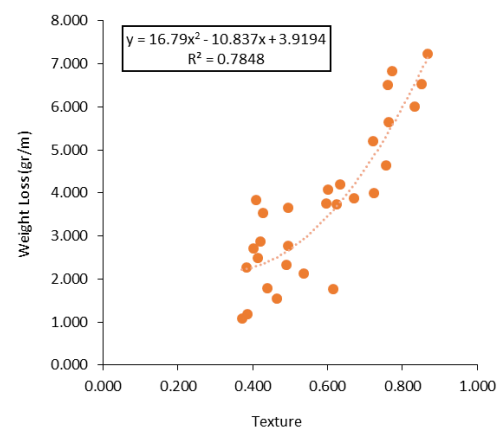
شکل ۳-۶- برازش تک متغیره بین چگالی در حالت اشباع و سایش سرمته



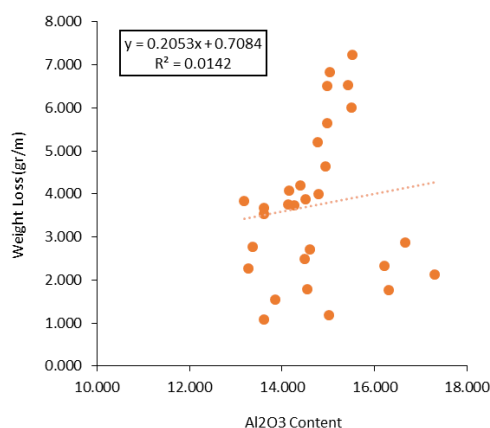
شکل ۲-۶- برازش تک متغیره بین تخلخل و سایش سرمته



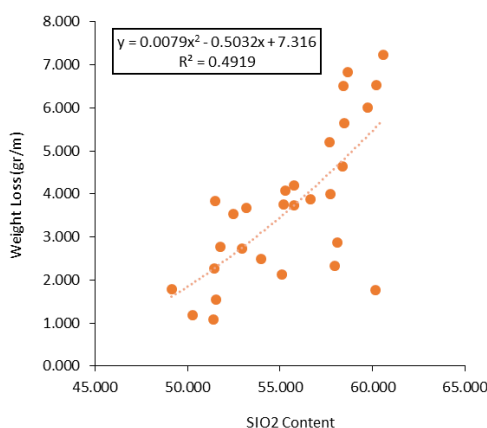
شکل ۵-۶- برازش تک متغیره بین میانگین اندازه دانه‌ها و سایش سرمته



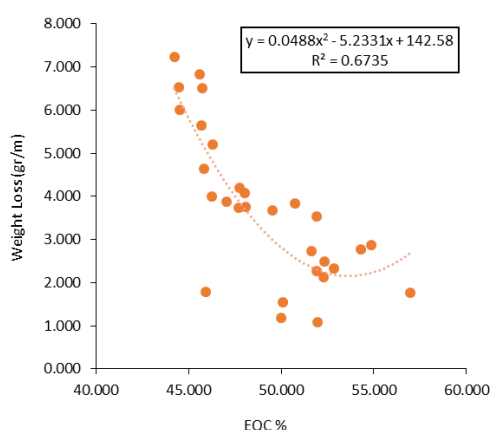
شکل ۴-۶- برازش تک متغیره بین ضریب بافت سنگ و سایش سرمته



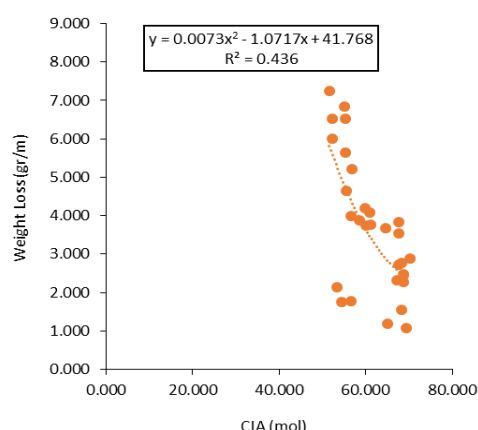
شکل ۶-۷- برازش تک متغیره بین
محتوای آلومینا و سایش سرمته



شکل ۶-۶- برازش تک متغیره بین
محتوای سیلیس و سایش سرمته



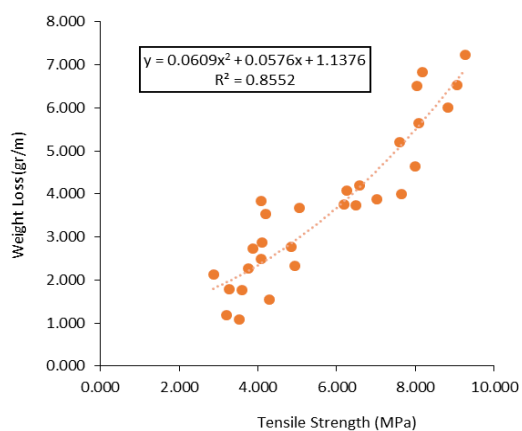
شکل ۶-۹- برازش تک متغیره بین
کوارتز محتوی معادل و سایش سرمته



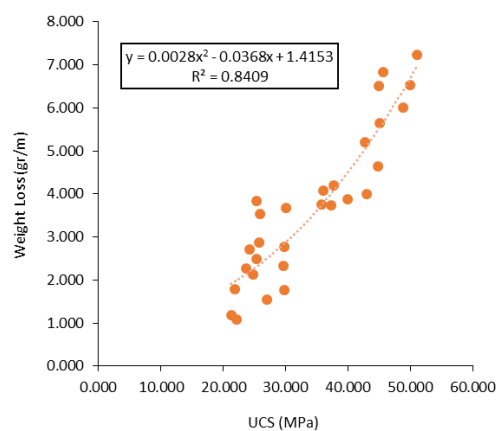
شکل ۶-۸- برازش تک متغیره بین
شاخص دگرسانی شیمیایی و سایش سرمته

همانطور که در شکل‌های ارائه شده قابل مشاهده است تمامی متغیرها ارتباط خوبی با نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی ندارند. از بین مشخصات فیزیکی سنگ‌ها، تنها میانگین اندازه دانه‌ها و ضریب بافت با پارامتر وابسته (سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی) رابطه‌ی معناداری را ایجاد کرده است. در مابقی متغیرها یا روند مشخصی مشاهده نشده است که نشان‌دهنده‌ی همبستگی پایین این پارامترها با نرخ سایش بوده است و یا دامنه‌ی تغییرات مقادیر پارامترها بسیار کوچک بوده است که این پارامترها را به یک مشخصه تبدیل خواهد کرد و نمی‌توان از آن به عنوان متغیر یاد کرد. همچنین بین نرخ سایش و پارامتری مانند کوارتز محتوی معادل رابطه‌ی معکوسی دیده می‌شود در حالی که با افزایش میزان کوارتز محتوی معادل میزان نرخ سایش نیز افزایش می‌یابد.

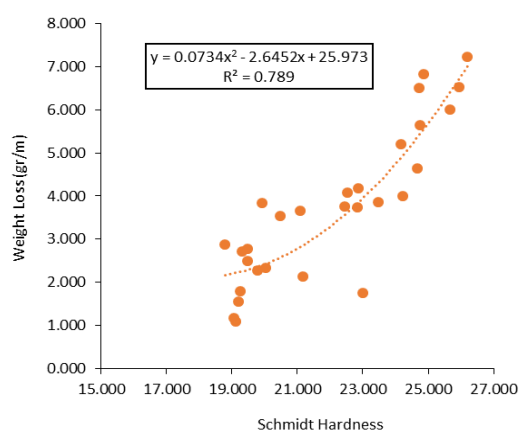
نتایج برازش برای متغیرهای مکانیکی سنگ‌ها نیز در شکل‌های ۶-۱۰ تا ۶-۱۵ نشان داده شده است.



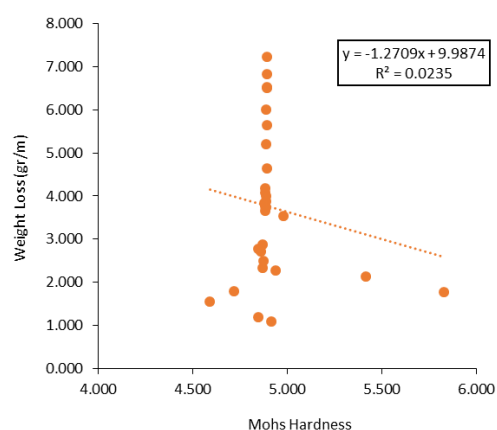
شکل ۶-۱۱- برازش تک متغیره بین
مقاومت کششی و سایش سرمته



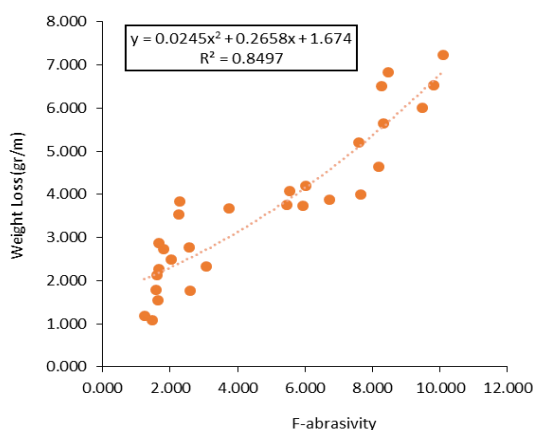
شکل ۶-۱۰- برازش تک متغیره بین
مقاومت فشاری و سایش سرمته



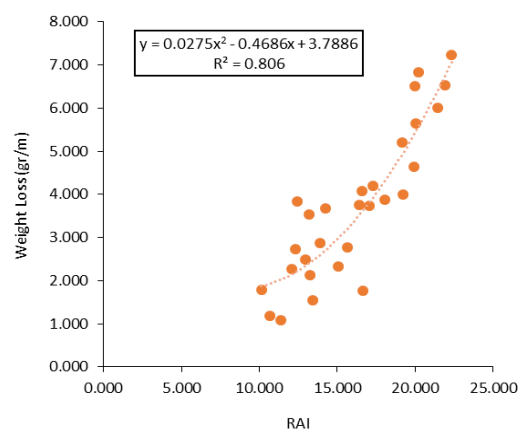
شکل ۶-۱۳- برازش تک متغیره بین
سختی واجهش اشमित و سایش سرمته



شکل ۶-۱۲- برازش تک متغیره بین
سختی موس و سایش سرمته



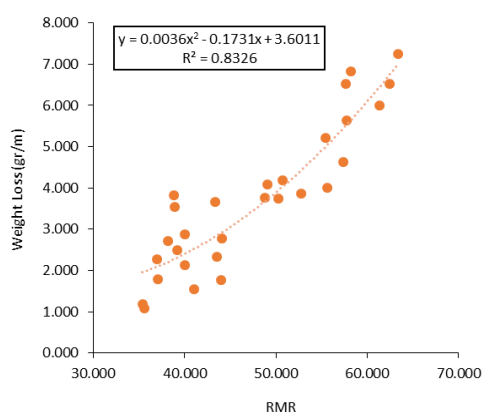
شکل ۶-۱۵- برازش تک متغیره بین
فاکتور ساینده‌گی شیمازک و سایش سرمته



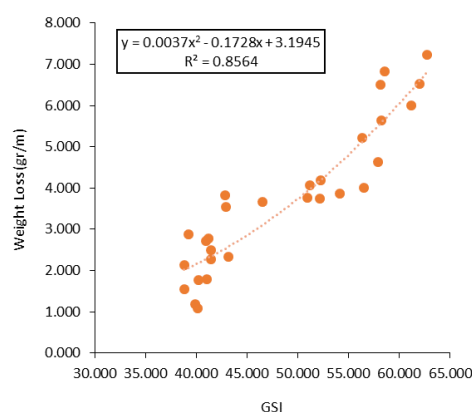
شکل ۶-۱۴- برازش تک متغیره بین
شاخص ساینده‌گی سنگ و سایش سرمته

طبق نتایج برآزش تک متغیره از میان مشخصات مکانیکی سنگ‌ها تمامی پارامترها به غیر از سختی موس رابطه‌ی معناداری را با متغیر وابسته نشان می‌دهند که نشان‌دهنده‌ی همبستگی بالای این پارامترها با نرخ سایش است.

به غیر از مشخصات فیزیکی و مکانیکی، برآزش تک متغیره برای دو مشخصه‌ی توده سنگ نیز انجام شده است که نتایج آن در شکل‌های ۱۶-۶ و ۱۷-۶ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، پارامتر وابسته با شاخص مقاومت زمین‌شناسی و رده‌بندی توده سنگ رابطه‌ی مستقیم و معناداری دارد.

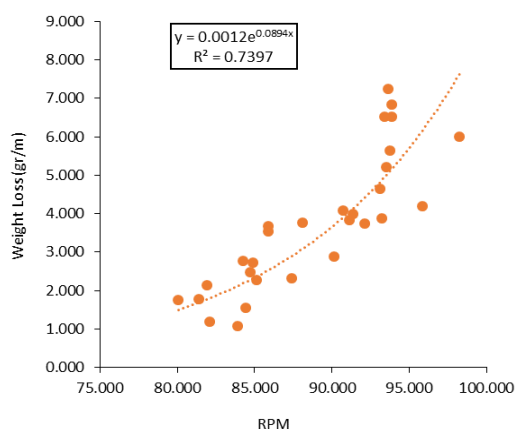


شکل ۱۷-۶- برآزش تک متغیره بین رده‌بندی توده سنگ و سایش سرمته

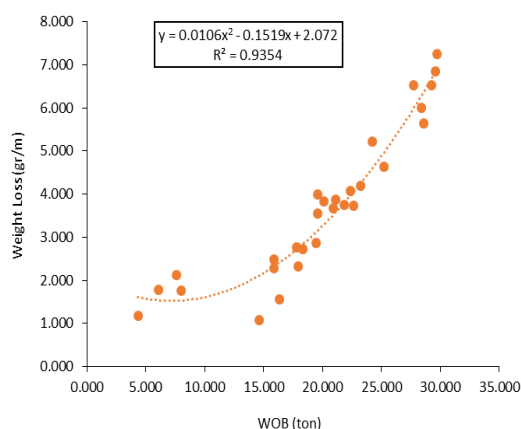


شکل ۱۶-۶- برآزش تک متغیره بین شاخص مقاومت زمین‌شناسی و سایش سرمته

همچنین برای پارامترهای اجرایی و عملیاتی نیز عملیات برآزش تک متغیره نسبت به سایش سرمته‌های حفاری صورت پذیرفته است که نتایج آن در شکل‌های ۱۸-۶ و ۱۹-۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۹-۶- برآزش تک متغیره بین سرعت دوران سرمته و سایش سرمته



شکل ۱۸-۶- برآزش تک متغیره بین بار روی سرمته و سایش سرمته

همان‌طور که از شکل‌های ۱۸-۶ و ۱۹-۶ نمایان است، روند خوب و رابطه‌ی معناداری بین متغیر وابسته و بار روی سرمت و سرعت دوران سرمت‌های حفاری برقرار است.

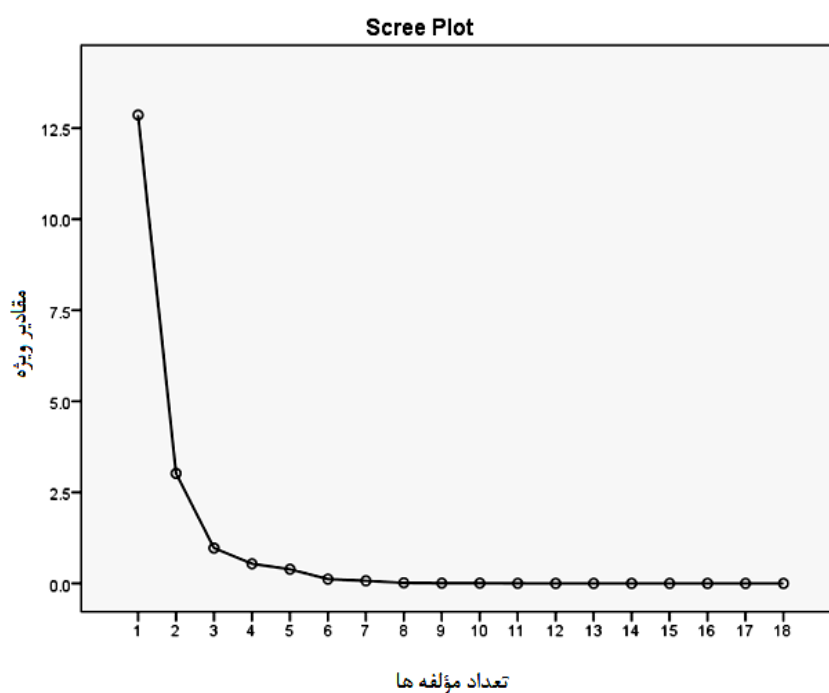
۳-۶- تحلیل مؤلفه‌های اصلی

تحلیل مؤلفه‌های اصلی یک روش کاهش ابعادی است که برای استخراج مؤثرترین پارامترها استفاده می‌شود. این روش به وسیله مجموعه‌ای از فرآیندها، داده‌های اضافی را از یک مجموعه از متغیرهای دارای همبستگی حذف کرده و آن متغیرها را در یک مجموعه کوچکتر بیان می‌کند. بنابراین داده‌ها از یک فضای ابعادی بزرگ به یک فضای ابعادی کوچکتر انتقال می‌یابند. بزرگترین مزیت این انتقال این است که بعد کاهش یافته در عین حال که پارامترهای زاید را حذف می‌کند، تأثیر اکثر پارامترهای مهم را به همراه دارد و راهی را برای درک ساختار داده‌های پیچیده فراهم می‌کند. بنابراین این روش را می‌توان راهی برای کاهش بعد و دسته‌بندی داده‌ها دانست. در این مرحله از تحقیق، داده‌های مربوط به پارامترهای موثر با استفاده از PCA در نرم‌افزار SPSS مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. مشخصات مؤلفه‌های ایجاد شده در این روش در جدول ۶-۱ ارائه شده است. تحلیل مؤلفه‌های اصلی به تعداد متغیرهای مورد بررسی مؤلفه ایجاد می‌کند و مؤلفه‌هایی با مقادیر ویژه بزرگتر از یک را به عنوان مؤلفه‌های اصلی در نظر می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که PCA تعداد مؤلفه‌های سیستم را با استفاده از تعیین ماتریس مقادیر ویژه و روابط ارائه شده در فصل قبل، از ۱۸ مؤلفه به دو مؤلفه کاهش داده است. این دو مؤلفه ۸۸/۲۳٪ از کل واریانس متغیرها را نشان می‌دهند. بنابراین ۱۶ مؤلفه دیگر با توجه به مشارکت کمتر، از محاسبات حذف می‌شوند. یک روش دیگر برای تعیین تعداد مؤلفه‌های اصلی مورد نیاز که بیشترین تغییرات داده‌ها را در بر داشته باشند، استفاده از نمودار اسکری‌پلات است که مقدار ویژه هر مؤلفه را نشان می‌دهد. این نمودار برای ۱۸ مؤلفه‌ی ایجاد شده در شکل ۶-۲۰ نشان داده شده است. هر نقطه در این نمودار شماره مؤلفه و مقدار ویژه مربوط به آن مؤلفه را نشان می‌دهد. نمودار اسکری‌پلات ایجاد شده نشان می‌دهد که از مؤلفه سوم به بعد با مقادیر ویژه کوچکتر از یک، نمودار میل به خطی شدن پیدا می‌کند. بنابراین دو مؤلفه اول به عنوان مؤلفه‌های اصلی

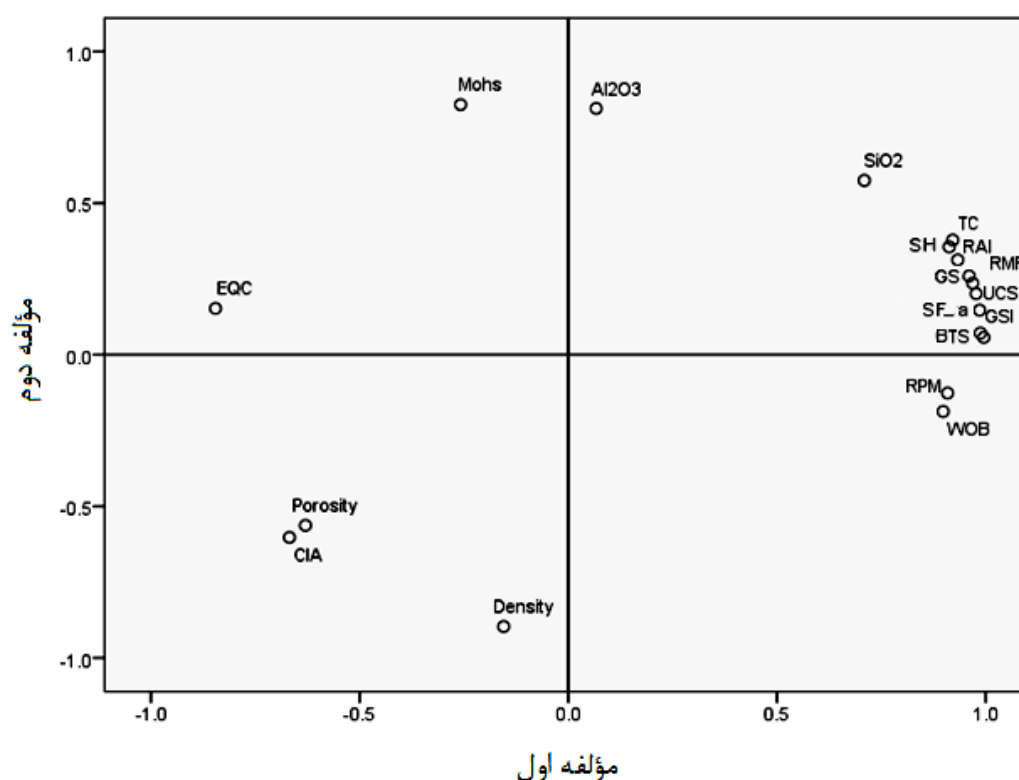
انتخاب می‌شوند. علاوه بر این نمودار، نمای دو بعدی از ارتباط مؤلفه‌های اصلی و متغیرهای مؤثر نیز در شکل ۶-۲۱ نشان داده شده است.

جدول ۶-۱- واریانس داده‌ها با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی

مؤلفه	مقادیر ویژه	واریانس (%)	تجمعی (%)
1	12.861	71.449	71.449
2	3.020	16.776	88.225
3	.970	5.390	93.615
4	.539	2.996	96.611
5	.389	2.159	98.769
6	.119	.659	99.428
7	.072	.401	99.829
8	.016	.091	99.920
9	.007	.038	99.958
10	.006	.034	99.992
11	.001	.007	100.000
12	1.926E-005	.000	100.000
13	9.889E-006	5.494E-005	100.000
14	1.464E-006	8.131E-006	100.000
15	2.215E-007	1.230E-006	100.000
16	8.783E-008	4.880E-007	100.000
17	3.966E-008	2.204E-007	100.000
18	1.045E-008	5.807E-008	100.000

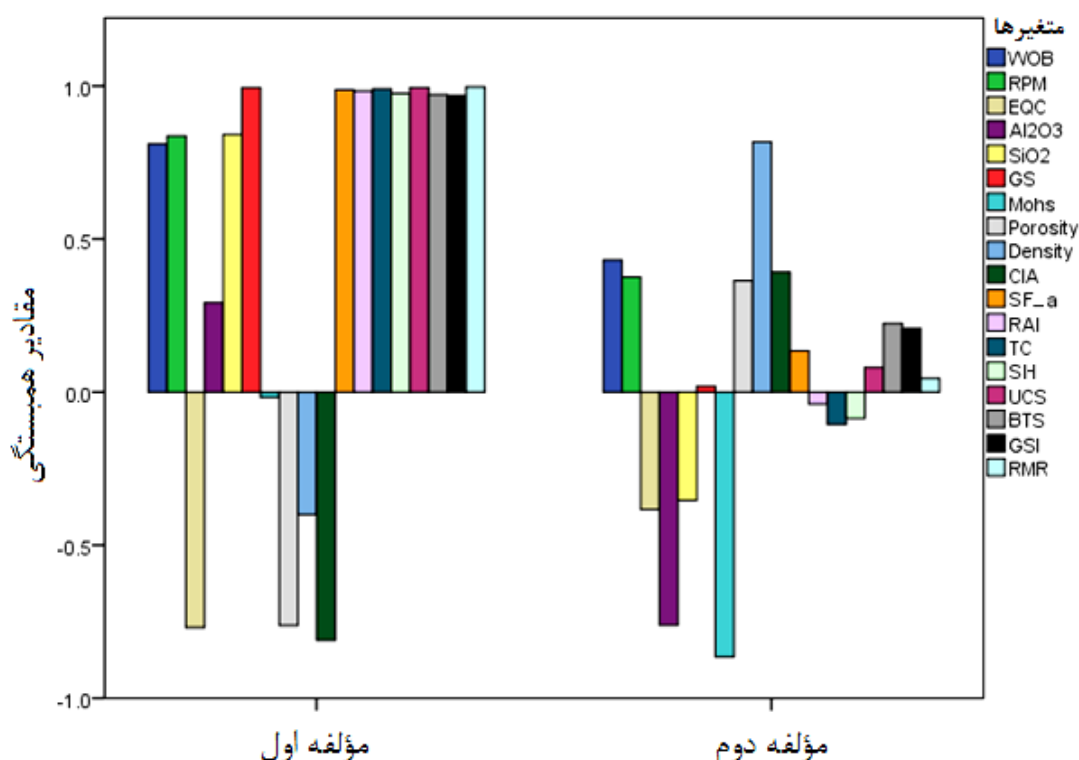


شکل ۶-۲۰- نمودار اسکری پلات برای کلیه مؤلفه‌ها



شکل ۶-۲۱- نمای دو بعدی دو مؤلفه‌ی اصلی و متغیرهای نشان داده شده در هر مؤلفه

این شکل نیز نشان می‌دهد که متغیرهای تخلخل (Porosity)، کوارتز محتوی معادل (EQC)، شاخص دگرسانی شیمیایی (CIA)، محتوای سیلیس (SiO_2)، میانگین اندازه دانه‌ها (GS)، ضریب بافت (TC)، مقاومت فشاری (UCS)، مقاومت کششی (BTS)، سختی واجهش اشمیت (SH)، فاکتور سایندگی شیمازک (SF-a)، شاخص سایندگی سنگ (RAI)، سیستم رده‌بندی توده سنگ (RMR)، شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، بار روی سرمته (WOB) و سرعت دوران سرمته (RPM) با همبستگی بالا در مؤلفه اول و سه متغیر سختی موس (Mohs)، محتوای آلومینا (Al_2O_3) و چگالی (Density) با همبستگی بالا در مؤلفه دوم مشاهده می‌شوند. بنابراین پارامترهای با همبستگی بالا (نسبت واریانس بالا) در مؤلفه‌ی اول به عنوان متغیرهای مؤثر بر نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی انتخاب می‌شوند و پارامترهای باقیمانده که تأثیر ناچیزی بر نرخ سایش دارند (سختی موس، محتوای آلومینا و چگالی)، از محاسبات حذف می‌شوند. شکل ۶-۲۲ نمای دیگری از دو مؤلفه‌ی اصلی انتخاب شده و پارامترهای مؤثر در هر مؤلفه را به صورت واضح‌تر نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲۲- همبستگی بین متغیرها در دو مؤلفه اصلی

۴-۶- تفکیک پایگاه داده به داده‌های آموزش و آزمون

به منظور توسعه‌ی مدل‌های پیش‌بینی‌کننده و تخمین‌گر و اعتبارسنجی آن‌ها نیاز است تا پایگاه داده به دو دسته داده با عنوان داده‌های آموزش و آزمون تقسیم شود. لذا بر اساس نتایج برازش تک متغیره و PCA متغیرهای موثر بر سایش سربسته‌های سه‌مخروطی دورانی شناسایی شده و به صورت تصادفی ۷۵٪ کل داده‌ها به عنوان داده‌های آموزش و ۲۵٪ باقیمانده برای داده‌های آزمون مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به توضیحات بیان شده، ضریب بافت سنگ (TC)، مقاومت فشاری (UCS)، مقاومت کششی (BTS)، سختی و اجهش اشमित (SH)، فاکتور سایندگی شیمازک (SF-a)، اندیس سایندگی سنگ (RAI)، سیستم رده‌بندی توده سنگ (RMR)، شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، بار روی سربسته (WOB) و سرعت دوران سربسته (RPM) به عنوان پارامترهای نهایی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است با توجه به اینکه بافت سنگ بر اساس میانگین اندازه دانه‌ها اندازه‌گیری می‌شود لذا میانگین اندازه دانه‌ها از پارامترهای نهایی حذف شده است.

از این رو، مقادیر پارامترهای نهایی برای ۲۲ سرمته تحت عنوان داده‌های آموزش، برای مدل‌سازی و اطلاعات پارامترهای مربوط به ۷ سرمته‌ی دیگر تحت عنوان داده‌های آزمون، به منظور ارزیابی مدل نهایی مورد استفاده قرار گرفته است. اطلاعات آماری مربوط به داده‌های آموزش و آزمون در جداول ۲-۶ و ۳-۶ به تفصیل نشان داده شده است.

جدول ۲-۶- اطلاعات آماری داده‌های آموزش

وارianس	میانگین	بیشینه	کمینه	پارامتر
49.830	29.750	19.878	4.332	WOB (ton)
21.722	98.250	89.092	81.409	RPM (r/min)
6.169	26.193	21.933	18.784	SH
0.027	0.868	0.577	0.371	TC
97.929	50.998	33.790	21.257	UCS (MPa)
4.264	9.261	5.731	2.870	BTS (MPa)
13.867	22.323	15.867	10.119	RAI
9.635	10.105	4.747	1.235	SF-a (N/mm)
69.724	62.775	48.680	38.793	GSI
85.490	63.364	47.167	35.365	RMR
3.189	3.709	7.241	1.079	BW
خروجی				

WOB: بار روی سرمته، RPM: سرعت دوران سرمته، SH: سختی واجهش اشمیت، TC: ضریب بافت، UCS: مقاومت فشاری تک‌محوری، BTS: مقاومت کششی برزلی، RAI: شاخص ساینده‌گی سنگ، SF-a: فاکتور ساینده‌گی شیمازک، GSI: شاخص مقاومت زمین‌شناسی، RMR: سیستم رده‌بندی توده سنگ، BW: نرخ سایش سرمته

جدول ۳-۶- اطلاعات آماری داده‌های آزمون

وارianس	میانگین	بیشینه	کمینه	پارامتر
39.963	19.912	29.250	8.037	WOB (ton)
31.226	88.310	95.875	80.059	RPM (r/min)
5.018	22.288	25.950	19.469	SH
0.019	0.603	0.850	0.413	TC
66.347	35.055	50.004	25.376	UCS (MPa)
3.395	5.831	9.061	3.591	BTS (MPa)
7.813	16.842	21.940	12.951	RAI
7.549	4.908	9.802	2.035	SF-a (N/mm)
62.071	48.562	62.004	40.240	GSI
57.177	48.467	62.414	39.175	RMR
2.361	3.801	6.526	1.760	BW
خروجی				

۶-۴-۱- تعیین متغیرهای ورودی

در این تحقیق ضریب بافت سنگ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی واجهش اشمیت، فاکتور ساینده‌گی شیمازک، اندیس ساینده‌گی سنگ، سیستم رده‌بندی توده سنگ، شاخص مقاومت زمین‌شناسی، بار روی سرمته و سرعت دوران سرمته به عنوان پارامترهای ورودی (متغیرهای مستقل مدل‌ها) و نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شده است. در ارائه مدل‌ها همواره سعی بر این است که تا حد ممکن مدل ساده (دارای پارامتر ورودی کمتر) و دارای جامعیت باشد. برای این منظور در این تحقیق دو پارامتر عملیاتی به دلیل اینکه قابل کنترل هستند در تمامی مدل‌ها به عنوان متغیر مستقل وجود خواهند داشت اما از میان پارامترهای فیزیکی، مکانیکی باید تعداد متغیرهای مستقل را به گونه‌ای انتخاب کرد که دارای سادگی و عدم همپوشانی باشند. این موضوع از طریق بررسی همبستگی میان هردو متغیر از متغیرهای ذاتی امکان‌پذیر است. از همبستگی بین دو متغیر می‌توان دریافت که دو متغیر کاملاً به هم مرتبط بوده و رفتار یکسانی را در مدل از خود نشان می‌دهند. بنابراین بایستی از کنار هم آوردن آن‌ها در مدل خودداری کرد.

ذکر این نکته حائز اهمیت است که با توجه به اهمیت شرایط توده سنگ مشخصات ساختاری نیز در اکثر مدل‌ها به مانند پارامترهای عملیاتی مورد استفاده قرار گرفته است. پس مدل نهایی ترکیبی از پارامترهای عملیاتی، ساختاری و متغیرهای ذاتی سنگ می‌باشد. لازم به ذکر است به منظور ارائه مدل‌های آماری برای پیش‌بینی نرخ سایش از نرم‌افزار SPSS، استفاده شده است.

بر اساس توضیحات بیان شده برخی از پارامترها با یکدیگر دارای همبستگی بوده و نمی‌توان از آنها در کنار یکدیگر در ارائه مدل استفاده نمود. به عنوان مثال در تعیین مقدار سیستم رده‌بندی RMR از مقاومت فشاری استفاده شده است و یا یکی از پارامترهای تعیین‌کننده فاکتور شیمازک مقاومت کششی است پس این دو متغیر نمی‌توانند در یک مدل حضور داشته باشند. همچنین شاخص مقاومت زمین‌شناسی و سیستم رده‌بندی توده سنگ برای توضیح شرایط ساختاری سنگ ارائه شده‌اند و رفتاری مشابه را در مدل ارائه می‌دهند و یا شاخص ساینده‌گی سنگ و فاکتور شیمازک هردو شاخصی

برای تعیین ساینده‌گی سنگ‌ها می‌یاشند و در مدل فقط یکی از این دو پارامتر قابل استفاده می‌باشند.

از این رو در این تحقیق ۵۰ مدل به صورت جدول ۶-۴ مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۶-۴- انواع مدل‌های قابل بررسی

مدل	پارامترهای مستقل
(۱)	WOB, UCS, GSI
(۲)	WOB, RAI, GSI
(۳)	WOB, TC, GSI
(۴)	WOB, SF-a, GSI
(۵)	RPM, SF-a, GSI
(۶)	RPM, RAI, GSI
(۷)	WOB, RAI, RMR
(۸)	WOB, SF-a, RMR
(۹)	RPM, RAI, RMR
(۱۰)	RPM, SF-a, RMR
(۱۱)	WOB, UCS, RAI, GSI
(۱۲)	WOB, UCS, SF-a, GSI
(۱۳)	RPM, UCS, RAI, GSI
(۱۴)	RPM, UCS, SF-a, GSI
(۱۵)	WOB, RPM, RAI, RMR
(۱۶)	WOB, RPM, SF-a, RMR
(۱۷)	WOB, RPM, TC, GSI
(۱۸)	WOB, RPM, TC, RMR
(۱۹)	WOB, RPM, SH, RMR
(۲۰)	WOB, RPM, SH, GSI
(۲۱)	WOB, RPM, UCS, GSI
(۲۲)	WOB, RPM, BTS, GSI
(۲۳)	WOB, RPM, BTS, RMR
(۲۴)	WOB, RPM, RAI, GSI
(۲۵)	WOB, RPM, RAI, RMR
(۲۶)	WOB, RPM, SF-a, GSI
(۲۷)	WOB, RPM, TC, SH, GSI
(۲۸)	WOB, RPM, TC, SH, RMR
(۲۹)	WOB, RPM, TC, UCS, GSI
(۳۰)	WOB, RPM, TC, BTS, GSI
(۳۱)	WOB, RPM, TC, BTS, RMR
(۳۲)	WOB, RPM, TC, RAI, GSI
(۳۳)	WOB, RPM, TC, RAI, RMR
(۳۴)	WOB, RPM, TC, SF-a, RMR
(۳۵)	WOB, RPM, TC, SF-a, GSI

ادامه‌ی جدول ۴-۶- انواع مدل‌های قابل بررسی

مدل	پارامترهای مستقل
(۳۶)	WOB, RPM, SH, RAI, GSI
(۳۷)	WOB, RPM, SH, RAI, RMR
(۳۸)	WOB, RPM, SH, SF-a, GSI
(۳۹)	WOB, RPM, SH, SF-a, RMR
(۴۰)	WOB, RPM, UCS, SF-a, GSI
(۴۱)	WOB, RPM, UCS, RAI, GSI
(۴۲)	WOB, RPM, BTS, RAI, GSI
(۴۳)	WOB, RPM, BTS, RAI, RMR
(۴۴)	WOB, RPM, TC, SH, RAI, GSI
(۴۵)	WOB, RPM, TC, SH, RAI, RMR
(۴۶)	WOB, RPM, TC, SH, SF-a, RMR
(۴۷)	WOB, RPM, TC, SH, SF-a, GSI
(۴۸)	WOB, RPM, TC, UCS, SF-a, GSI
(۴۹)	WOB, RPM, TC, BTS, RAI, GSI
(۵۰)	WOB, RPM, TC, BTS, RAI, RMR

۵-۶- رگرسیون چند متغیره‌ی خطی

به منظور تعیین مدل تخمین‌گر با استفاده از روش رگرسیون خطی از نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شده است. بر این اساس تمامی مدل‌های قابل بررسی مورد مطالعه و آزمون قرار گرفته است. بر اساس آزمون‌های مربوط به مدل‌های رگرسیونی نظیر ضرایب منطقی (پیروی معادله از طبیعت ذاتی و علمی موضوع)، عدم هم‌خطی متغیرهای مستقل، نرمال بودن خطاها، فرض استقلال خطاها، معنی‌داری ضرایب متغیرهای مستقل و معنی‌داری کل مدل رگرسیون، از ۵۰ مدل ایجاد شده تنها ۶ مدل رگرسیونی خطی مورد تایید قرار گرفته است. بر اساس آزمون‌های بیان شده در جدول ۵-۶ مدل‌های رگرسیونی چند متغیره خطی تایید شده ارائه شده است.

لازم به ذکر است از جدول ANOVA، جدول ضرایب و آماره دوربین واتسون برای بررسی سطح معنی‌داری روابط، ضرایب متغیرهای مورد بررسی و آماره‌های کنترل هم‌خطی و بررسی استقلال خطاها برای هر مدل رگرسیونی استفاده شده است.

جدول ۶-۵- مدل‌های رگرسیونی چند متغیره خطی

شماره	روابط ارائه شده
1	$BW = -3.850 + 0.109 WOB + 0.013 UCS + 0.103 GSI$
2	$BW = -4.009 + 0.108 WOB + 0.035 RAI + 0.103 GSI$
3	$BW = -3.121 + 0.122 WOB + 2.706 TC + 0.058 GSI$
4	$BW = -2.495 + 0.11 WOB + 0.124 SF-a + 0.071 GSI$
5	$BW = -8.126 + 0.073 RPM + 0.17 SF-a + 0.093 GSI$
6	$BW = -9.955 + 0.072 RPM + 0.089 RAI + 0.12 GSI$

همان‌طور که نتایج رگرسیون چند متغیره‌ی خطی نشان می‌دهد، در تمامی مدل‌های تاییده شده، پارامترهای مستقل رابطه‌ی مستقیمی با نرخ سایش دارند که نشان دهنده‌ی ضرایب منطقی روابط ارائه شده می‌باشد.

۶-۶- رگرسیون چند متغیره‌ی غیرخطی

با این که مدل خطی تقریب خوبی برای نشان دادن ارتباط چند متغیر به حساب می‌آید، اما روابط بین متغیرها به ندرت خطی دقیق است و گاهی ممکن است ارتباط بین چند متغیر از یک الگوی غیرخطی تبعیت کند. به همین دلیل در این تحقیق علاوه بر مدل‌های خطی، مدل‌های مختلف غیرخطی نیز با روش لگاریتم دوگانه مورد استفاده قرار گرفته است. مشابه روابط حاصل از رگرسیون خطی، برای روابط غیرخطی نیز پس از بررسی معنی‌داری کل مدل و معنی‌داری ضرایب متغیرهای مستقل، آزمون دوربین و واتسون برای بررسی استقلال خطاها و نمودار توزیع خطاها برای بررسی نرمال بودن خطاها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مسأله هم‌خطی بین متغیرها نیز با کنترل مقادیر ضریب تورم واریانس و تولرانس بررسی شده است. بر اساس توضیحات بیان شده، از ۵۰ مدل ایجاد شده تنها ۱۵ مدل غیرخطی برای پیش‌بینی مقدار سایش سرمه‌های سه‌مخروطی دورانی در حین حفاری مورد تایید واقع شده که در جدول ۶-۶ قابل مشاهده است.

جدول ۶-۶- مدل‌های رگرسیونی چند متغیره غیرخطی

شماره	روابط ارائه شده
1	$BW = 10^{-2.911} \times WOB^{0.417} \times UCS^{0.153} \times GSI^{1.591}$
2	$BW = 10^{-2.932} \times WOB^{0.409} \times RAI^{0.211} \times GSI^{1.597}$
3	$BW = 10^{-2.102} \times WOB^{0.457} \times TC^{0.328} \times GSI^{1.266}$
4	$BW = 10^{-2.156} \times WOB^{0.406} \times SF - a^{0.15} \times GSI^{1.236}$
5	$BW = 10^{-6.653} \times RPM^{3.452} \times SF - a^{0.374} \times GSI^{0.14}$
6	$BW = 10^{-8.706} \times RPM^{3.526} \times RAI^{0.527} \times GSI^{1.029}$
7	$BW = 10^{-0.754} \times WOB^{0.399} \times SF - a^{0.352} \times RMR^{0.339}$
8	$BW = 10^{-9.892} \times RPM^{4.351} \times RAI^{0.275} \times RMR^{0.965}$
9	$BW = 10^{-6.562} \times RPM^{3.498} \times SF - a^{0.396} \times RMR^{0.025}$
10	$BW = 10^{-3.408} \times WOB^{0.322} \times RPM^{1.445} \times SF - a^{0.298} \times RMR^{0.321}$
11	$BW = 10^{-3.599} \times WOB^{0.406} \times RPM^{1.014} \times TC^{0.362} \times GSI^{1.025}$
12	$BW = 10^{-5.669} \times WOB^{0.405} \times RPM^{1.458} \times SH^{1.376} \times GSI^{0.593}$
13	$BW = 10^{-4.112} \times WOB^{0.375} \times RPM^{0.777} \times UCS^{0.175} \times GSI^{1.416}$
14	$BW = 10^{-4.292} \times WOB^{0.361} \times RPM^{0.875} \times RAI^{0.241} \times GSI^{1.407}$
15	$BW = 10^{-3.411} \times WOB^{0.357} \times RPM^{0.867} \times SF - a^{0.169} \times GSI^{1.008}$

بررسی ضرایب متغیرها در روابط غیرخطی ارائه شده نشان می‌دهد که در کلیه روابط، نرخ سایش با افزایش پارامترهای فیزیکی، مکانیکی، ساختاری و عملیاتی افزایش می‌یابد.

۶-۷- ارزیابی عملکرد مدل‌ها

به منظور ارزیابی عملکرد هریک از مدل‌های انتخاب شده، از دسته داده‌های آزمون استفاده می‌شود. بر این اساس با استفاده از چهار معیار ارزیابی، جذر میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE)، ضریب تعیین^۲ (R^2)، شاخص عملکرد^۳ (VAF) و میانگین درصد خطای مطلق^۴ (MAPE) استفاده شده است. RMSE متوسط خطای نتایج به دست آمده از خروجی مدل را نشان می‌دهد. کاهش این شاخص

^۱ Root Mean Square Error (RMSE)

^۲ Coefficient of Determination

^۳ Variance Account For (VAF)

^۴ Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

موجب افزایش ضریب تعیین رابطه شده و این کارایی بهتر مدل را نشان می‌دهد. علاوه بر این، هر چه شاخص عملکرد (VAF)، بزرگ‌تر و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) کوچک‌تر و نزدیک به

صفر باشد، مدل مناسب‌تر است (Gokceoglu, 2002).

نحوه‌ی محاسبه‌ی معیارهای ارزیابی در روابط زیر ارائه شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t - y)^2} \quad (۱-۶)$$

$$R^2 = 100 \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n (t - \bar{t})(y - \bar{y}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (t - \bar{t})^2 \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2} \right] \quad (۲-۶)$$

$$VAF = 100 \left[1 - \frac{\text{var}(t - y)}{\text{var}(t)} \right] \quad (۳-۶)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{t - y}{t} \right| \times 100 \quad (۴-۶)$$

در این روابط t و y به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده، $\bar{t}$ و $\bar{y}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده و var بیانگر واریانس مقادیر است. در ادامه مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله‌ی هریک از مدل‌های انتخاب شده در داده‌های آزمون به طور مجزا آورده شده است. مقادیر این چهار معیار ارزیابی برای ۶ رابطه‌ی خطی و ۱۵ رابطه‌ی غیرخطی محاسبه شده است. سپس براساس این مقادیر، رتبه هر معیار برای هر مدل تعیین شده و در جداول ۶-۷ و ۶-۸ ارائه شده است.

۶-۸- تعیین بهترین مدل‌ها

به منظور تعیین بهترین مدل‌ها به ازای هر خروجی (در نهایت ۵ مدل) باید به چند جنبه به طور همزمان توجه کرد. در ابتدا باید عملکرد مدل‌ها بر اساس معیارهای ارزیابی چهارگانه معرفی شده مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این، سهولت و زمان محاسبه‌ی مدل‌ها جنبه دیگری است که باید در تعیین بهترین مدل مدنظر قرار گیرد. به این دو جنبه باید قابلیت اطمینان مدل‌ها را که وابسته به روش توسعه‌ی آن‌هاست اضافه نمود. بر این اساس در این قسمت برای هریک از پارامترهای پیش‌بینی شده

اولویت هریک از روش‌ها بر اساس معیارهای ارزیابی چهارگانه مشخص شده است. پس از آن با استفاده از سه استراتژی اولویت‌بندی شامل میانگین رتبه‌ها، روش بردا^۱ و روش کپلند^۲ و در نهایت ادغام^۳ این روش‌ها، اولویت‌بندی مدل‌ها انجام شده است. در مرحله‌ی آخر با در نظر گرفتن دو جنبه‌ی دیگر، بهترین مدل‌ها معرفی شده است.

جدول ۶-۷- مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای روابط ارائه شده

شماره	روابط ارائه شده	RMSE	MAPE	VAF	R ²
1	$BW = -3.850 + 0.109 WOB + 0.013 UCS + 0.103 GSI$	0.171	3.919	98.780	0.988
2	$BW = -4.009 + 0.108 WOB + 0.035 RAI + 0.103 GSI$	0.171	4.442	98.954	0.990
3	$BW = -3.121 + 0.122 WOB + 2.706 TC + 0.058 GSI$	0.168	4.151	98.882	0.989
4	$BW = -2.495 + 0.11 WOB + 0.124 SF-a + 0.071 GSI$	0.170	4.295	98.878	0.989
5	$BW = -8.126 + 0.073 RPM + 0.17 SF-a + 0.093 GSI$	0.391	9.944	94.227	0.945
6	$BW = -9.955 + 0.072 RPM + 0.089 RAI + 0.12 GSI$	0.388	10.913	93.853	0.939
7	$BW = 10^{-2.911} \times WOB^{0.417} \times UCS^{0.153} \times GSI^{1.591}$	0.185	4.151	99.116	0.991
8	$BW = 10^{-2.932} \times WOB^{0.409} \times RAI^{0.211} \times GSI^{1.597}$	0.189	4.490	98.985	0.990
9	$BW = 10^{-2.102} \times WOB^{0.457} \times TC^{0.328} \times GSI^{1.266}$	0.201	5.248	98.737	0.988
10	$BW = 10^{-2.156} \times WOB^{0.406} \times SF - a^{0.15} \times GSI^{1.236}$	0.181	4.630	99.076	0.991
11	$BW = 10^{-6.653} \times RPM^{3.452} \times SF - a^{0.374} \times GSI^{0.14}$	0.561	13.310	86.906	0.879
12	$BW = 10^{-8.706} \times RPM^{3.526} \times RAI^{0.527} \times GSI^{1.029}$	0.522	12.721	88.906	0.903
13	$BW = 10^{-0.754} \times WOB^{0.399} \times SF - a^{0.352} \times RMR^{0.339}$	0.241	6.315	97.731	0.984
14	$BW = 10^{-9.892} \times RPM^{4.351} \times RAI^{0.275} \times RMR^{0.965}$	0.592	13.674	85.474	0.870
15	$BW = 10^{-6.562} \times RPM^{3.498} \times SF - a^{0.396} \times RMR^{0.025}$	0.570	13.480	86.487	0.874
16	$BW = 10^{-3.408} \times WOB^{0.322} \times RPM^{1.445} \times SF - a^{0.298} \times RMR^{0.321}$	0.325	7.545	95.739	0.958
17	$BW = 10^{-3.599} \times WOB^{0.406} \times RPM^{1.014} \times TC^{0.362} \times GSI^{1.025}$	0.268	6.703	97.470	0.975
18	$BW = 10^{-5.669} \times WOB^{0.405} \times RPM^{1.458} \times SH^{1.376} \times GSI^{0.593}$	0.318	8.884	96.090	0.963
19	$BW = 10^{-4.112} \times WOB^{0.375} \times RPM^{0.777} \times UCS^{0.175} \times GSI^{1.416}$	0.244	5.885	98.226	0.983
20	$BW = 10^{-4.292} \times WOB^{0.361} \times RPM^{0.875} \times RAI^{0.241} \times GSI^{1.407}$	0.246	5.687	97.964	0.980
21	$BW = 10^{-3.411} \times WOB^{0.357} \times RPM^{0.867} \times SF - a^{0.169} \times GSI^{1.008}$	0.254	5.910	97.794	0.978

¹ Borda method² Copeland method³ Aggregate method

جدول ۶-۸- رتبه‌بندی هر یک از شاخص‌های ارزیابی برای روابط ارائه شده

شماره	روابط ارائه شده	RMSE	MAPE	VAF	R ²
1	$BW = -3.850 + 0.109 WOB + 0.013 UCS + 0.103 GSI$	3	1	7	7
2	$BW = -4.009 + 0.108 WOB + 0.035 RAI + 0.103 GSI$	4	5	4	4
3	$BW = -3.121 + 0.122 WOB + 2.706 TC + 0.058 GSI$	1	3	5	5
4	$BW = -2.495 + 0.11 WOB + 0.124 SF-a + 0.071 GSI$	2	4	6	6
5	$BW = -8.126 + 0.073 RPM + 0.17 SF-a + 0.093 GSI$	17	16	16	16
6	$BW = -9.955 + 0.072 RPM + 0.089 RAI + 0.12 GSI$	16	17	17	17
7	$BW = 10^{-2.911} \times WOB^{0.417} \times UCS^{0.153} \times GSI^{1.591}$	6	2	1	1
8	$BW = 10^{-2.932} \times WOB^{0.409} \times RAI^{0.211} \times GSI^{1.597}$	7	6	3	3
9	$BW = 10^{-2.102} \times WOB^{0.457} \times TC^{0.328} \times GSI^{1.266}$	8	8	8	8
10	$BW = 10^{-2.156} \times WOB^{0.406} \times SF-a^{0.15} \times GSI^{1.236}$	5	7	2	2
11	$BW = 10^{-6.653} \times RPM^{3.452} \times SF-a^{0.374} \times GSI^{0.14}$	19	19	19	19
12	$BW = 10^{-8.706} \times RPM^{3.526} \times RAI^{0.527} \times GSI^{1.029}$	18	18	18	18
13	$BW = 10^{-0.754} \times WOB^{0.399} \times SF-a^{0.352} \times RMR^{0.339}$	9	12	12	9
14	$BW = 10^{-9.892} \times RPM^{4.351} \times RAI^{0.275} \times RMR^{0.965}$	21	21	21	21
15	$BW = 10^{-6.562} \times RPM^{3.498} \times SF-a^{0.396} \times RMR^{0.025}$	20	20	20	20
16	$BW = 10^{-3.408} \times WOB^{0.322} \times RPM^{1.445} \times SF-a^{0.298} \times RMR^{0.321}$	15	14	15	15
17	$BW = 10^{-3.599} \times WOB^{0.406} \times RPM^{1.014} \times TC^{0.362} \times GSI^{1.025}$	13	13	13	13
18	$BW = 10^{-5.669} \times WOB^{0.405} \times RPM^{1.458} \times SH^{1.376} \times GSI^{0.593}$	14	15	14	14
19	$BW = 10^{-4.112} \times WOB^{0.375} \times RPM^{0.777} \times UCS^{0.175} \times GSI^{1.416}$	10	10	9	10
20	$BW = 10^{-4.292} \times WOB^{0.361} \times RPM^{0.875} \times RAI^{0.241} \times GSI^{1.407}$	11	9	10	11
21	$BW = 10^{-3.411} \times WOB^{0.357} \times RPM^{0.867} \times SF-a^{0.169} \times GSI^{1.008}$	12	11	11	12

۶-۸-۱- استراتژی‌های اولویت‌بندی

از آنجایی که بر اساس هریک از معیارهای ارزیابی چهارگانه برای هر مدل یک رتبه‌بندی متفاوت به دست می‌آید باید برای اجماع در تصمیم‌گیری از روش ادغام برای رتبه‌بندی این مدل‌ها استفاده کرد. لازم به ذکر است، مقادیر روش ادغام با استفاده از میانگین حسابی روش‌های میانگین رتبه‌ها، روش بردا و روش کپلند (اصلاح شده روش بردا) بدست خواهد آمد.

در روش میانگین رتبه‌ها، میانگین حسابی رتبه‌های به دست آمده با استفاده از روش‌های مختلف (که در اینجا معیارهای ارزیابی چهارگانه است) تعیین می‌شود و بر این اساس گزینه‌ها (مدل‌های ارائه شده) اولویت‌بندی می‌شوند. بدیهی است که گزینه‌هایی با میانگین حسابی پایین‌تر در اولویت خواهند بود (رمضان‌نیا، ۱۳۹۲).

در روش بردا برای تصمیم‌گیری، ماتریس مقایسه زوجی بین گزینه‌ها ایجاد می‌شود. در صورتی که بر اساس روش‌های مختلف، تعداد ارجحیت مدلی بر مدل دیگر بیش از تعداد مغلوب شدن آن مدل بر مدل دیگر باشد، در ماتریس مقایسه زوجی عدد ۱ و در غیر این صورت (مساوی یا کمتر بودن تعداد ارجحیت با مغلوب شدن) عدد ۰ گذاشته می‌شود. بنابراین وجود عدد ۱ به منزله آن است که سطر بر ستون ارجحیت دارد و عدد ۰ به منزله ارجحیت ستون بر سطر است. مجموع عناصر هر سطر، تعداد مسلط شدن هر مدل را نشان می‌دهد و بر این اساس مدل‌ها اولویت‌بندی می‌شوند. روش کپلند در حقیقت اصلاح شده روش بردا است. برای این منظور در اولویت‌بندی علاوه بر تعداد مسلط شدن (جمع عناصر هر سطر)، تعداد مغلوب شدن (مجموع عناصر هر ستون) نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس گزینه‌ها بر اساس تفاضل مقادیر مسلط شدن و تعداد مغلوب شدن اولویت‌بندی می‌شوند (عطایی، ۱۳۹۵).

پس از آنکه اولویت‌بندی مدل‌ها توسط سه روش تشریح شده به دست آمد، باید نتایج با یکدیگر ادغام شوند تا یک رتبه و اولویت واحد برای مدل به دست آید که به این تکنیک روش ادغام گفته می‌شود. برای این منظور از رتبه‌های به دست آمده میانگین حسابی گرفته می‌شود (رمضان‌نیا، ۱۳۹۲).

۶-۸-۲- اولویت‌بندی مدل‌ها

با توجه به مطالب عنوان شده در ادامه بر اساس رتبه‌بندی معیارهای چهارگانه به طور مجزا برای هریک از مدل‌ها، از سه روش میانگین رتبه‌ها، روش بردا و روش کپلند استفاده شده است. پس از آن با استفاده از روش ادغام، رتبه‌بندی نهایی مدل‌ها تعیین شده است. در جدول ۶-۹ نتایج رتبه‌بندی مدل‌های تخمین سایش سربسته‌های سه‌مخروطی دورانی ارائه شده است.

جدول ۶-۹- رتبه بندی مدل های تخمین سایش سرمته های سه مخروطی دورانی بر اساس معیارهای ارزیابی

ادغام	کپلند	بردا	میانگین رتبه ها	روابط ارائه شده	شماره
5.5	7	5	4.5	$BW = -3.850 + 0.109 WOB + 0.013 UCS + 0.103 GSI$	1
4.42	4	5	4.25	$BW = -4.009 + 0.108 WOB + 0.035 RAI + 0.103 GSI$	2
2.5	2	2	3.5	$BW = -3.121 + 0.122 WOB + 2.706 TC + 0.058 GSI$	3
3.83	3	3	4.5	$BW = -2.495 + 0.11 WOB + 0.124 SF-a + 0.071 GSI$	4
16.08	16	16	16.25	$BW = -8.126 + 0.073 RPM + 0.17 SF-a + 0.093 GSI$	5
16.92	17	17	16.75	$BW = -9.955 + 0.072 RPM + 0.089 RAI + 0.12 GSI$	6
1.5	1	1	2.5	$BW = 10^{-2.911} \times WOB^{0.417} \times UCS^{0.153} \times GSI^{1.591}$	7
5.25	6	5	4.75	$BW = 10^{-2.932} \times WOB^{0.409} \times RAI^{0.211} \times GSI^{1.597}$	8
8	8	8	8	$BW = 10^{-2.102} \times WOB^{0.457} \times TC^{0.328} \times GSI^{1.266}$	9
3.33	3	3	4	$BW = 10^{-2.156} \times WOB^{0.406} \times SF - a^{0.15} \times GSI^{1.236}$	10
19	19	19	19	$BW = 10^{-6.653} \times RPM^{3.452} \times SF - a^{0.374} \times GSI^{0.14}$	11
18	18	18	18	$BW = 10^{-8.706} \times RPM^{3.526} \times RAI^{0.527} \times GSI^{1.029}$	12
10.5	10	11	10.5	$BW = 10^{-0.754} \times WOB^{0.399} \times SF - a^{0.352} \times RMR^{0.339}$	13
21	21	21	21	$BW = 10^{-9.892} \times RPM^{4.351} \times RAI^{0.275} \times RMR^{0.965}$	14
20	20	20	20	$BW = 10^{-6.562} \times RPM^{3.498} \times SF - a^{0.396} \times RMR^{0.025}$	15
14.92	15	15	14.75	$BW = 10^{-3.408} \times WOB^{0.322} \times RPM^{1.445} \times SF - a^{0.298} \times RMR^{0.321}$	16
13	13	13	13	$BW = 10^{-3.599} \times WOB^{0.406} \times RPM^{1.014} \times TC^{0.362} \times GSI^{1.025}$	17
14.08	14	14	14.25	$BW = 10^{-5.669} \times WOB^{0.405} \times RPM^{1.458} \times SH^{1.376} \times GSI^{0.593}$	18
9.25	9	9	9.75	$BW = 10^{-4.112} \times WOB^{0.375} \times RPM^{0.777} \times UCS^{0.175} \times GSI^{1.416}$	19
10.08	10	10	10.25	$BW = 10^{-4.292} \times WOB^{0.361} \times RPM^{0.875} \times RAI^{0.241} \times GSI^{1.407}$	20
11.5	12	11	11.5	$BW = 10^{-3.411} \times WOB^{0.357} \times RPM^{0.867} \times SF - a^{0.169} \times GSI^{1.008}$	21

ادغام رتبه بندی ها نشان می دهد که سه مدل خطی و دو مدل غیرخطی پنج مدل نهایی با اولویت بالاتر از دیگر مدل ها می باشند. از این رو مقایسه از لحاظ سهولت و سرعت می تواند تعیین کننده بهترین مدل باشد. به طور واضح یک مدل خطی از یک مدل غیرخطی ساده تر و دارای سرعت محاسباتی بیشتر است ولی با توجه به اینکه در چهار شاخصه ارزیابی مدل ها و رتبه بندی آنها مدل ۷ با پارامترهای بار روی سرمته، مقاومت فشاری تک محوری و شاخص مقاومت زمین شناسی در دو

شاخصه رتبه اول را بدست آورده و همچنین مقاومت فشاری تک محوری (رابطه‌ی ۷) نسبت به ضریب بافت (رابطه‌ی ۳) بیشتر در پروژه‌ها و فعالیت‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد و در اکثر بانک‌های اطلاعاتی داده‌ها در دسترس می‌باشد، از این رو بهترین مدل پیش‌بینی سایش سربسته‌های سه‌مخروطی دورانی مدل رگرسیون غیرخطی است که در آن متغیرهای مستقل شامل بار روی سربسته، مقاومت فشاری تک محوری و شاخص مقاومت زمین‌شناسی است. مدل نهایی به صورت رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است.

$$BW = 10^{-2.911} \times WOB^{0.417} \times UCS^{0.153} \times GSI^{1.591} \quad (5-6)$$

۹-۶- تحلیل حساسیت

آخرین مرحله در مدل‌سازی، تعیین میزان حساسیت هدف مدل‌سازی شده (خروجی) نسبت به پارامترهای ورودی است. با استفاده از آنالیز حساسیت می‌توان روند کلی تأثیر نسبی پارامترهای ورودی مدل را بر خروجی آن تعیین نمود. یکی از روش‌های جدید برای تعیین حساسیت جواب نسبت به پارامترهای ورودی، روش دامنه کسینوسی^۱ (CAM) است. در این روش یک فضای m بعدی به تعداد پارامترهای ورودی در نظر گرفته می‌شود (Jong and Lee, 2004).

$$X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_m\}$$

پس از آن هر عضو از هر پارامتر ورودی X به وسیله یک بردار طول به تابع هدف متصل می‌شود.

$$X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{im}\}$$

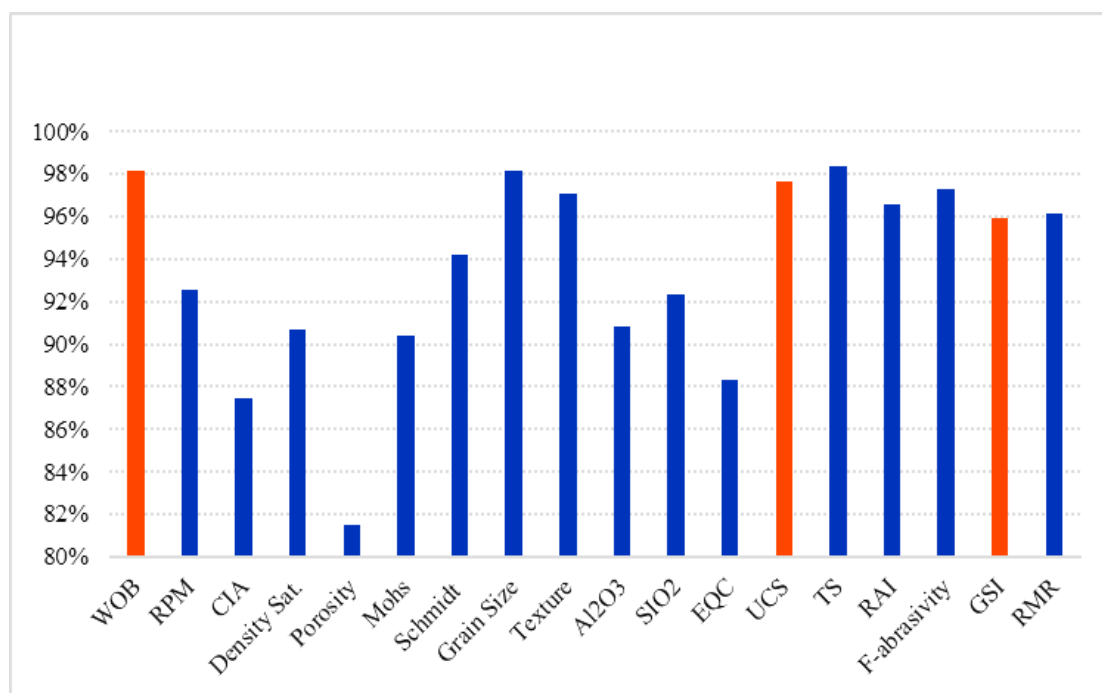
در نهایت میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای ورودی X بر تابع هدف از رابطه‌ی ۶-۶ تعیین می‌شود. هرچه میزان تأثیر پارامتر ورودی بر خروجی مورد نظر بیشتر باشد، R_{ij} به یک نزدیک‌تر خواهد بود. در صورت عدم تأثیر پارامتر ورودی بر خروجی نیز، مقدار R_{ij} صفر است. به طور معمول می‌توان گفت که

^۱ Cosine Amplitude Method

در بررسی R_{ij} ، مقادیر بالای ۰/۹ نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه پارامتر مورد نظر بر خروجی و مقادیر کمتر از ۰/۸ بیان‌گر تأثیر ضعیف آن بر خروجی است (Jong and Lee, 2004).

$$R_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m X_{ik} X_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m X_{ik}^2 \sum_{k=1}^m X_{jk}^2}} \quad (6-6)$$

در شکل ۶-۲۳ تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی بر روی خروجی مورد نظر به نمایش در آمده است. ملاحظه می‌شود که اکثر پارامترها به غیر از شاخص شدت دگرسانی شیمیایی (CIA)، تخلخل و کوارتز محتوی معادل سنگ (EQC) دارای مقادیر بیش از ۰/۹ هستند که بیانگر قرار گرفتن مهم‌ترین پارامترها به عنوان متغیر مستقل یا ورودی مدل‌ها است.



شکل ۶-۲۳- تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی بر روی سایش سرمته‌های حفاری سه‌مخروطی

همچنین با توجه به اینکه متغیرهای مستقل بهترین مدل پیش‌بینی شامل بار روی سرمته، مقاومت فشاری تک محوری و شاخص مقاومت زمین‌شناسی بوده، لذا اهمیت این پارامترها بر روی خروجی مورد نظر (سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی) نیز بررسی شده است.

با توجه به توضیحات فوق، طبق نتایج تحلیل حساسیت بار روی سرمته همواره دارای بیشترین تأثیر در خروجی بهترین مدل بوده است و از این رو مهم‌ترین پارامتر مدل محسوب می‌شود. به همین دلیل باید این پارامتر با دقت بیشتری اندازه‌گیری شود چرا که تغییرات کوچک در مقدار آن به تغییرات اساسی در سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی منجر می‌شود. مقادیر R_{ij} برای پارامترهای ورودی مدل نهایی در جدول ۶-۱۰ ارائه شده است.

جدول ۶-۱۰ میزان تأثیر پارامترهای ورودی رابطه نهایی			
	WOB	UCS	GSI
R_{ij}	0.982	0.977	0.959

۶-۱۰- جمع‌بندی

در این فصل به ارائه مدل‌های مختلف پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی پرداخته شده است. برای این منظور در ابتدا همبستگی متغیرها با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفت تا از بکار بردن همزمان متغیرهای همبسته جلوگیری شود. ابتدا با استفاده از برازش تک متغیره تأثیر هر یک از متغیرهای مورد بررسی بر نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی به‌طور جداگانه با استفاده از برازش تک متغیره تعیین شده است و پارامترهای مؤثر بر نرخ سایش بر اساس روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی استخراج شده است. سپس با استفاده از رگرسیون چند متغیره خطی و رگرسیون چند متغیره غیرخطی، ۲۱ مدل تخمین‌گر برای خروجی ارائه شده است. در نهایت بعد از کنترل و اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده، بهترین مدل بر اساس معیارهای ارزیابی ($MAPE$ ، VAF ، $RMSE$ ، R^2) و استراتژی‌های اولویت‌بندی انتخاب و آنالیز حساسیت به منظور تعیین مقدار تأثیر پارامترهای ورودی بر روی هدف، برای مدل نهایی انجام شده است. لازم به ذکر است بهترین مدل پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی مدل رگرسیون غیرخطی است که در آن متغیرهای مستقل شامل بار روی سرمته، مقاومت فشاری تک محوری و شاخص مقاومت زمین‌شناسی است.

فصل هفتم

پیش بینی سایش سرمایه های سه مخروطی
دورانی با استفاده از یادگیری عمیق

۷-۱- مقدمه

با توجه به توضیحات بیان شده در فصول گذشته، نظارت بر سایش سرمته‌های حفاری برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری در معادن روباز اجتناب‌ناپذیر بوده و تکنیک‌های پایش وضعیت ابزار به صورت مستقیم و غیر مستقیم توسط محققان مختلف برای جلوگیری از تحمیل هزینه‌های مازاد بر پروژه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. اما هر یک از روش‌های بیان شده همواره با معایب بسیاری همراه بوده است. به عنوان مثال، در روش پردازش تصویر، تغییر در روشنایی، فاصله، چرخش تصویر و نوع لنز دوربین بر نتایج نهایی تأثیر بسزایی خواهد داشت و یا میکروسکوپ اسکن الکترونی روبشی علاوه بر بزرگ مقیاسی و قیمت گران، باید در فضایی عاری از تداخل الکتریکی، مغناطیسی و یا لرزش باشند. همچنین، برای کار با میکروسکوپ اسکن الکترونی روبشی و تهیه نمونه، آموزش خاص و ویژه‌ای لازم است. لازم به ذکر است که وضوح محدود، بزرگنمایی کمتر و نمایش سطحی پایین‌تر نمونه از معایب روش میکروسکوپ نوری است. به غیر از مشکلات بیان شده، مشکلات دیگری مانند اندازه‌گیری محدود، زمان‌بر بودن محاسبات، مشکل در موقعیت‌یابی و شناسایی نقاط اندازه‌گیری و پردازش طولانی برای تجزیه و تحلیل سایش سرمته‌های حفاری نیز وجود دارد. به همین دلیل در این فصل به منظور کاهش خطا در تعیین میزان سایش از روش جدیدی برای پیش‌بینی میزان سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی استفاده شده است. برای این منظور، در این فصل از روش یادگیری عمیق^۱ شبکه‌های عصبی کانولوشن (پیچشی یا هم‌گشت)^۲ (CNN یا CNNs یا DCNNs یا ConvNet) و یادگیری انتقالی^۳ (TL) برای پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی استفاده شده است. در ادامه مفاهیم پایه و مراحل مختلف روش پیشنهادی به تفصیل ارائه شده است.

۷-۲- یادگیری عمیق

زمانی که ماشین‌ها توانستند وظایف خود را با کمک هوش انسانی به انجام برسانند هوش مصنوعی^۴ ارزش خود را در این زمینه نمایان کرد. با توجه به پیشرفت تکنولوژی در علوم کامپیوتر نیاز امروز به ماشین‌های

^۱ Deep Learning^۲ Convolutional Neural Networks^۳ Transfer Learning^۴ Artificial Intelligence

یادگیری بیش از هر زمان دیگری است زیرا آنها با استفاده از تجربه و بدون دخالت انسان توانایی یادگیری مهارت‌ها را دارا بوده و درصد خطا را به پایین‌ترین مقدار ممکن می‌رسانند.

الگوریتم‌های یادگیری ماشین در ۳ دسته‌ی یادگیری با نظارت^۱، بدون نظارت^۲ و یادگیری تقویتی^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌منظور خوشه‌بندی^۴، طبقه‌بندی^۵ و پیش‌بینی (بر اساس رگرسیون)، در زمینه‌های نظارت شده و بدون نظارت، مورد استفاده قرار می‌گیرند (Shobha and Rangaswamy, 2018).

یادگیری عمیق یا یادگیری ژرف به عنوان یکی از زیرشاخه‌های یادگیری ماشین^۶ با استفاده از معماری‌های سلسله‌مراتبی و بر مبنای مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها مفاهیم انتزاعی و ویژگی‌های سطح بالا موجود در داده‌ها را با استفاده از یک گراف عمیق که دارای چندین لایه پردازشی متشکل از چندین لایه تبدیلات خطی و غیر خطی مدل‌سازی می‌کند. در واقع یادگیری عمیق کلاسی از تکنیک‌های یادگیری ماشین است که از لایه‌های سلسله‌مراتبی زیادی برای استخراج و تبدیل ویژگی داده‌ها، به منظور تشخیص، طبقه‌بندی و آنالیز الگوها استفاده خواهد کرد. یادگیری عمیق ورودی‌ها را از طریق معماری شبکه عصبی الهام گرفته از مغز انسان تجزیه و تحلیل می‌نماید. شبکه‌های عصبی شامل تعدادی لایه پنهان بوده که از طریق آنها داده‌ها پردازش می‌شوند و امکان یادگیری ماشین را از طریق ارتباطات و وزن‌دهی ورودی‌ها به منظور دستیابی به بهترین نتایج فراهم می‌کنند. الگوریتم‌های یادگیری عمیق در هر مرحله با تکرار الگوریتم، مجموعه داده‌های آموزشی را بهتر آموزش داده و این روند را برای بهبود نتیجه تکرار خواهند کرد. در یادگیری عمیق، ماشین‌ها مشکلات پیچیده‌ای را حل می‌کنند حتی زمانی که با مجموعه‌ای از داده‌های بسیار متنوع، بدون ساختار و ناسازگار روبرو هستند. از آنجایی که الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای یادگیری به حجم زیادی از داده‌ها نیاز دارند، در سال‌های اخیر افزایش و در دسترس بودن حجم زیادی از داده‌ها یکی از دلایل اصلی در نظر گرفتن این موضوع بوده است (Hinton et al., 2006; Bengio, 2009; Saha, 2018).

¹ Supervised Algorithms

² Unsupervised Algorithms

³ Reinforcement Algorithms

⁴ Clustering

⁵ Classification

⁶ Machine Learning

در سال‌های اخیر، یادگیری عمیق در زمینه‌ی بینایی رایانه به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است و به همین دلیل، روش‌های متعددی مرتبط با آن توسعه داده شده است. به طور کلی، این روش‌ها به ۴ دسته شبکه‌های عصبی کانولوشن (پیچشی)، کدگذاری پراکنده (تنک)^۱، خودرمنزنگارها^۲ و ماشین‌های بولترمن محدود شده^۳ (RBMS) تقسیم‌بندی می‌شوند. از میان روش‌های توسعه یافته در یادگیری عمیق، شبکه‌های عصبی کانولوشن تا به امروز موفق‌ترین نوع شبکه برای تجزیه و تحلیل تصاویر در علوم مختلف بوده است که مفاهیم آن در ادامه به طور کامل شرح داده شده است (Guo et al., 2016).

۷-۲-۱- شبکه‌های عصبی کانولوشن (پیچشی)

با پیدایش یادگیری عمیق و کسب نتایج بسیار مناسب در حوزه‌های گوناگون یادگیری ماشین نظیر بینایی کامپیوتر، شبکه‌های عصبی کانولوشن به عنوان یکی از مهمترین الگوریتم‌های فعال در این زمینه مورد استفاده محققان مختلف قرار گرفته است. شبکه‌های عصبی کانولوشن از زمان معرفی تا به امروز دستخوش تغییرات زیادی شده است. این تغییرات سبب شده است تا بصورت گسترده در دامنه‌های مختلفی از هوش مصنوعی نظیر بینایی کامپیوتر، پردازش زبان طبیعی، پوشش معنایی و ... مورد استفاده قرار گیرند.

شبکه‌های عصبی کانولوشن محبوب‌ترین مدل‌های یادگیری عمیق برای آموزش مجموعه داده‌های بصری بوده است و در سال‌های اخیر به عنوان یک کلاس از مدل‌های یادگیری ماشین در تشخیص تصاویر، استخراج ویژگی‌ها، طبقه‌بندی و سایر زمینه‌ها به مورد استفاده قرار گرفته است (Krizhevsky et al., 2012). علی‌رغم برخی از دستاوردهای اولیه در یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی کانولوشن، عصر جدیدی از یادگیری عمیق را با استفاده از پردازش گرافیکی واحد^۴، الگوریتم‌های بهینه‌تر و مجموعه داده‌های بزرگتر ایجاد کرده‌اند (Krizhevsky et al., 2012; Deng and Yu, 2014; Simonyan and Zisserman, 2014; Zeiler and Fergus, 2014).

شبکه‌های عصبی کانولوشن همانند سایر شبکه‌های عصبی از لایه‌های نورونی با وزن و بایاس‌های قابل یادگیری

¹ Sparse Coding

² Autoencoders

³ Restricted Boltzmann Machines

⁴ Graphical Processing Unit (GPU)

(تنظیم) تشکیل شده است. برخلاف شبکه عصبی در شبکه‌های عصبی کانولوشن از پیچیدگی برای مدیریت ریاضیات پشت‌صحنه استفاده می‌شود. حداقل در یک لایه شبکه‌های عصبی کانولوشن به جای ضرب ماتریس از ترکیب استفاده می‌شود. همچنین برخلاف یک شبکه عصبی معمولی، لایه‌های یک شبکه عصبی کانولوشن شامل نورون‌هایی است که در سه بعد عرض، ارتفاع و عمق قرار گرفته‌اند (Yamashita et al., 2018).

شبکه‌های عصبی کانولوشن به گونه‌ای طراحی شده‌اند که علاوه بر عدم تغییر ساختار ورودی به ارتباط بین پیکسل‌های همسایه نیز اهمیت می‌دهد در صورتی که در شبکه‌های عصبی معمولی ساختار داده‌های ورودی تغییر می‌یابد. این عمل سبب صرفه‌جویی در زمان، جلوگیری از بیش‌برازش و کاهش خطای اندازه‌گیری می‌شود. در واقع شبکه‌های عصبی کانولوشن با استفاده از فیلترها روی داده‌های ورودی کار کرده و داده‌هایی را که دارای آرایش شبکه‌ای هستند پردازش می‌کند و سپس ویژگی‌های مهم داده‌های ورودی را استخراج می‌نماید. همچنین در شبکه‌های عصبی کانولوشن فیلترها می‌توانند در صورت آموزش تنظیم شوند به همین دلیل نتایج خروجی در زمان واقعی استخراج خواهند شد (Wu et al., 2017).

در هر شبکه عصبی کانولوشن دو مرحله‌ی تغذیه رو به جلو^۱ (انتشار به جلو) و پس‌انتشار^۲ (انتشار معکوس) برای آموزش شبکه وجود دارد. در مرحله‌ی اول تصویر ورودی به شبکه تغذیه می‌شود و این عمل ضرب نقطه‌ای بین ورودی و پارامترهای هر نورون و اعمال عملیات کانولوشن در هر لایه است. سپس خروجی شبکه، محاسبه شده و به منظور تنظیم پارامترهای شبکه و یا به عبارت دیگر همان آموزش شبکه، از نتیجه خروجی جهت محاسبه‌ی میزان خطای شبکه استفاده می‌شود. برای این منظور، خروجی شبکه با استفاده از یک تابع خطا^۳ با پاسخ صحیح مقایسه می‌شود و این‌گونه میزان خطای شبکه تعیین می‌گردد. در مرحله بعدی بر اساس میزان خطای محاسبه شده مرحله‌ی پس‌انتشار آغاز می‌شود. در این مرحله، گرادیان هر پارامتر محاسبه می‌شود و تمامی پارامترها با توجه به تاثیری که بر خطای ایجاد شده در شبکه دارند تغییر می‌یابند. بعد از بروز شدن پارامترها مرحله بعدی انتشار به جلو آغاز شده و بعد از تکرار تعداد مناسبی از این

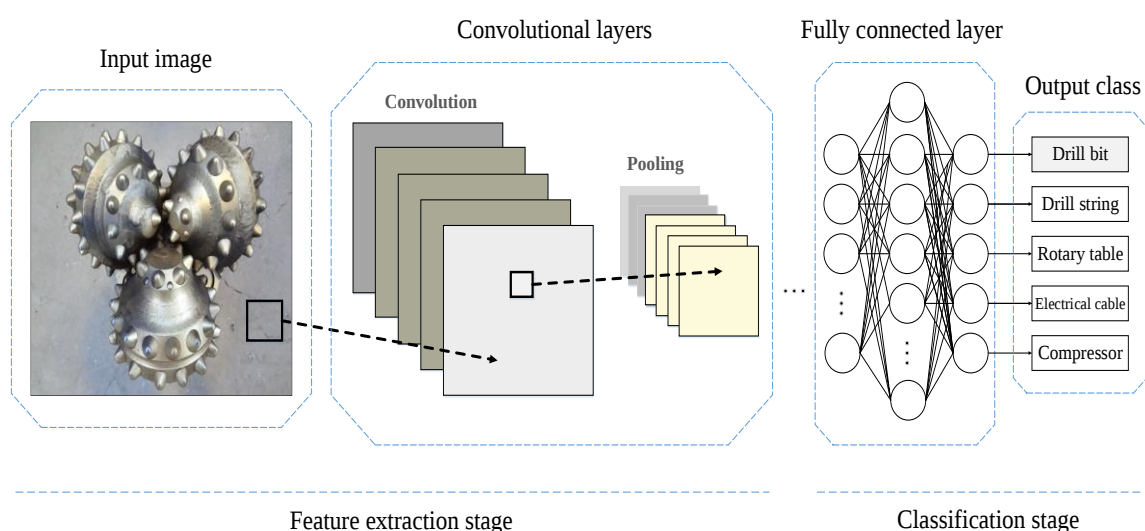
^۱ Feed forward

^۲ BackPropagation

^۳ Loss function

مراحل، آموزش شبکه پایان می‌یابد (Murugan, 2017).

به طور کلی، معماری شبکه‌های عصبی کانولوشن عمیق شامل سه لایه اصلی کانولوشن، لایه‌های جمع‌کننده (ادغام)^۱ و لایه‌های تمام متصل^۲ می‌باشند که هر کدام وظایف مختلفی را انجام می‌دهند. لایه‌های کانولوشن و جمع‌کننده به مازول‌ها گروه‌بندی می‌شوند و لایه‌های تمام متصل این مازول‌ها را دنبال می‌کنند. در واقع استخراج ویژگی‌ها در مراحل کانولوشن و جمع‌کننده انجام می‌گیرد و از طریق لایه‌های تمام متصل طبقه‌بندی تصاویر به اتمام می‌رسد. شکل ۷-۱ یک طرح کلی از معماری شبکه عصبی کانولوشن را برای طبقه‌بندی تصویر سرمته حفاری نشان می‌دهد (LeCun et al., 1998; Krizhevsky et al., 2012).



شکل ۷-۱ طرح معماری شبکه عصبی کانولوشن برای طبقه‌بندی تصویر سرمته حفاری

در هر شبکه عصبی کانولوشن، یک تصویر ورودی به طور مستقیم به شبکه تغذیه می‌شود و چندین مرحله از کانولوشن و لایه‌های جمع‌کننده بر روی داده‌های تصویر انجام می‌شود. در لایه کانولوشن از کرنل‌های^۳ (فیلتر) مختلف برای پیش‌تصویر ورودی و نگاشت‌های ویژگی^۴ میانی استفاده می‌شود و از این طریق نگاشت‌های ویژگی مختلفی را به وجود می‌آورد. لایه جمع‌کننده معمولاً پس از یک لایه کانولوشن به منظور کاهش اندازه نگاشت‌های ویژگی و پارامترهای شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از آخرین لایه‌ی

¹ Pooling

² Fully Connected Layers

³ Kernel

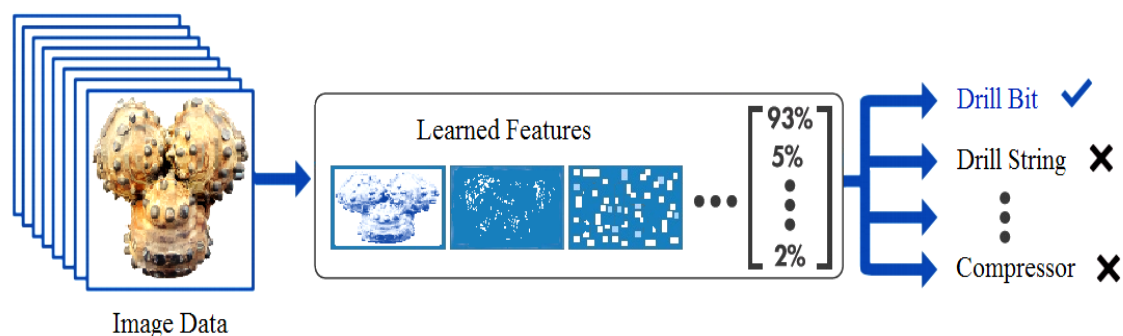
⁴ Feature map

جمع‌کننده، یک یا چند لایه تمام متصل وجود دارد که نگاشت‌های ویژگی دو بعدی را به یک بردار یک بعدی ویژگی تبدیل می‌کنند تا روند نمایش ویژگی^۱ ادامه یابد. ذکر این نکته اهمیت دارد که لایه‌ی تمام متصل اجازه خواهد داد تا نتیجه شبکه به شکل یک بردار ارائه شود. در نهایت، برچسب کلاس خروجی‌ها توسط آخرین لایه تمام متصل تعیین می‌شود. لازم به ذکر است، می‌توان از بردار ویژگی به منظور طبقه‌بندی تصاویر استفاده کرد و یا برای پردازش‌های بعدی بهره برد (Zeiler, 2013; Girshick et al., 2014).

۷-۱-۲- رویکردهای به کارگیری شبکه‌های عصبی کانولوشن

رویکردهای به کارگیری شبکه‌های عصبی کانولوشن موجود در سناریوهای مختلف شامل، آموزش کامل شبکه عصبی کانولوشن از ابتدا^۲، بازتنظیم^۳ یک مدل شبکه‌ی عصبی کانولوشن از پیش آموزش دیده^۴ و استفاده از شبکه‌ی عصبی کانولوشن از پیش آموزش دیده به عنوان استخراج کننده ویژگی‌های ثابت است (Yin et al., 2017; Marcelino, 2018; Murali et al., 2021):

آموزش کامل شبکه عصبی کانولوشن از ابتدا نیاز به منابع داده زیادی از تصاویر برای داده‌های آموزش دارد (۱۰۰۰ تا میلیون‌ها تصویر). همچنین زمان آموزش برای چند روز تا چند هفته به طول می‌انجامد. با این حال، دقت مدل در آموزش شبکه عصبی کانولوشن از ابتدا زیاد است و می‌تواند برای مجموعه داده‌های کوچک مناسب باشد (شکل ۷-۲).



شکل ۷-۲- آموزش کامل شبکه عصبی کانولوشن از ابتدا برای دسته‌بندی تصویر سرمته حفاری

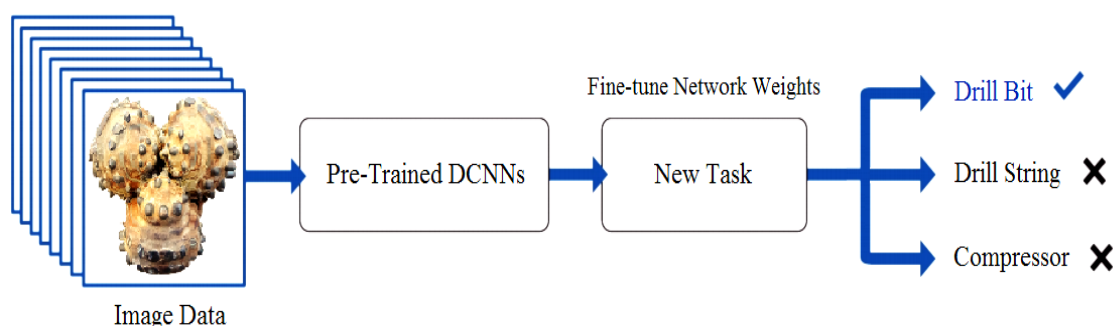
¹ Feature representation

² Scratch

³ Fine tune

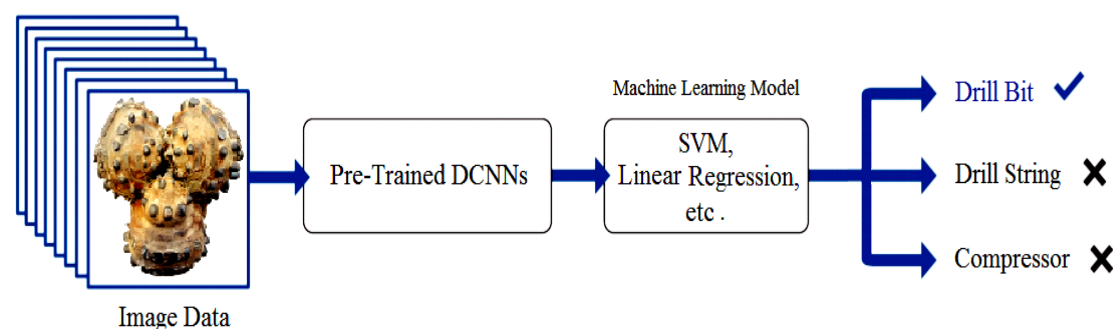
⁴ Pre-trained

بازتنظیم یک مدل شبکه عصبی کانولوشن از پیش آموزش دیده یک گزینه مناسب برای استخراج ویژگی از مدل شبکه عصبی کانولوشن از پیش آموزش دیده است، در صورتی که مجموعه داده جدید (۱۰۰ تا ۱۰۰۰ تصویر) برای آموزش کامل یک شبکه جدید کافی نباشد. لازم به ذکر است که زمان آموزش در این روش ثانیه تا دقیقه است. با این حال، دقت مدل در بازتنظیم یک مدل شبکه عصبی کانولوشن از پیش آموزش دیده خوب است و به مدل (معماری) شبکه عصبی کانولوشن از پیش آموزش دیده بستگی دارد (شکل ۷-۳).



شکل ۷-۳- بازتنظیم یک مدل شبکه عصبی کانولوشن از پیش آموزش دیده برای دسته‌بندی تصویر سرمته حفاری

یک شبکه عصبی کانولوشن از پیش آموزش دیده می‌تواند به عنوان استخراج کننده ویژگی تصاویر مختلف استفاده شود. در این روش ویژگی‌های سطح بالا از هر لایه شبکه عصبی کانولوشن آموزش دیده استخراج می‌شود و در یک کار خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش به منظور طبقه‌بندی، ویژگی‌های استخراج شده با مدل‌های (الگوریتم‌های) یادگیری ماشین ترکیب می‌شوند (شکل ۷-۴).



شکل ۷-۴- ترکیب ویژگی‌های استخراج شده با مدل‌های یادگیری ماشین برای دسته‌بندی تصویر سرمته حفاری

با توجه به توضیحات بیان شده، شبکه کانولوشن برای رسیدن به دقت بالا در پیش‌بینی نیاز به مجموعه داده‌های بزرگ از تصاویر دارد. در بسیاری از حوزه‌ها، چنین داده‌هایی وجود ندارد و یا مجموعه داده‌ها بسیار

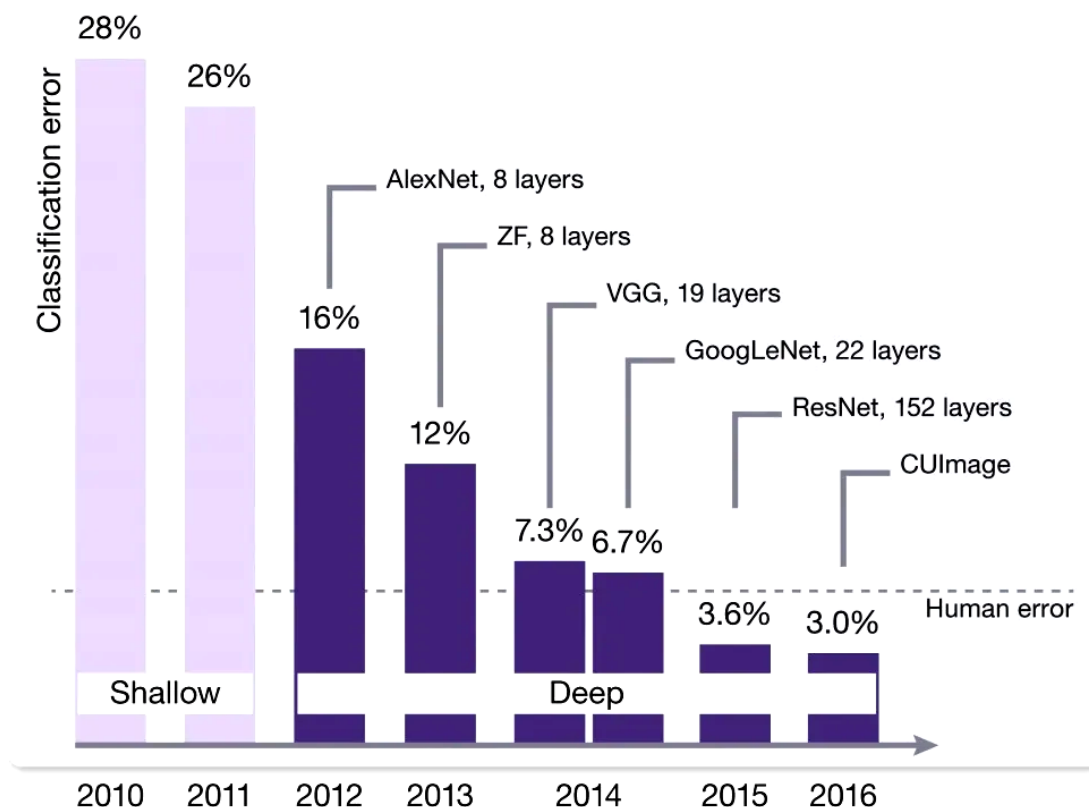
کوچک است. همچنین کسب و جمع‌آوری مجموعه داده‌های بزرگ همواره دشوار و پرهزینه بوده است به همین علت استفاده از وزن‌های شبکه از پیش آموزش دیده برای استخراج ویژگی‌ها نسبت به آموزش کامل شبکه از ابتدا بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در چنین مواردی، روش یادگیری انتقالی برای حل مسائل مختلف نتایج مناسبی را با داده‌های کوچک ارائه داده است (Shin et al., 2016; Wahab et al., 2019).

۷-۲-۱-۲- معماری‌های شبکه‌های عصبی کانولوشن

با پیشرفت‌های اخیر در استفاده از شبکه عصبی کانولوشن در زمینه بینایی رایانه، مدل‌های (معماری) مختلف شبکه عصبی کانولوشن از پیش آموزش دیده شده ایجاد شده است. این معماری‌ها عملکرد بسیار بالایی را در زمینه استخراج ویژگی‌ها از تصاویر نشان داده‌اند. عملکرد شبکه‌های مبتنی بر شبکه عصبی کانولوشن از سال ۲۰۱۲ به بعد با پیشرفت‌های سخت افزاری خصوصاً GPU، معرفی معماری‌های عمیق نوین و تهیه مجموعه داده حجیم (مانند ImageNet) پیشرفت چشم‌گیری داشته است. در این سال الکس کریشفسکی^۱ با استفاده از شبکه عصبی توانست در چالش تشخیص بصری مقیاس بزرگ ImageNet (ILSVRC)^۲ خطای دسته‌بندی را از ۲۶ درصد به ۱۶ درصد کاهش دهد. این کاهش خطای چشم‌گیر در دسته‌بندی تصاویر توجه جامعه محققین مختلف را به خود جلب کرد. این پیشرفت سبب شد تا معماری‌های دیگری در این زمینه معرفی شود تا خطای پیش‌بینی به کمترین میزان خود برسد. برخی از معروف‌ترین معماری‌های شبکه عصبی کانولوشن معرفی شده شامل LeNet، AlexNet، VGGNet، ZFNet، ResNet، GoogLeNet (Inception)، DenseNet، ResNeXt می‌باشند. در شکل ۷-۵ برندگان دسته‌بندی معماری‌های مختلف در چالش تشخیص بصری مقیاس بزرگ ImageNet از سال‌های ۲۰۱۰ تا سال ۲۰۱۶ به نمایش درآمده است (LeCun et al., 1998; Krizhevsky et al., 2012; Simonyan and Zisserman, 2014; Zeiler and Fergus, 2014; He et al., 2015; Szegedy et al., 2015a; Szegedy et al., 2015b; Huang et al., 2017; Xie et al., 2017).

^۱ Alex Krizhevsky

^۲ ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenger



شکل ۷-۵- برندگان معماری‌های شبکه عصبی کانولوشن در چالش تشخیص بصری

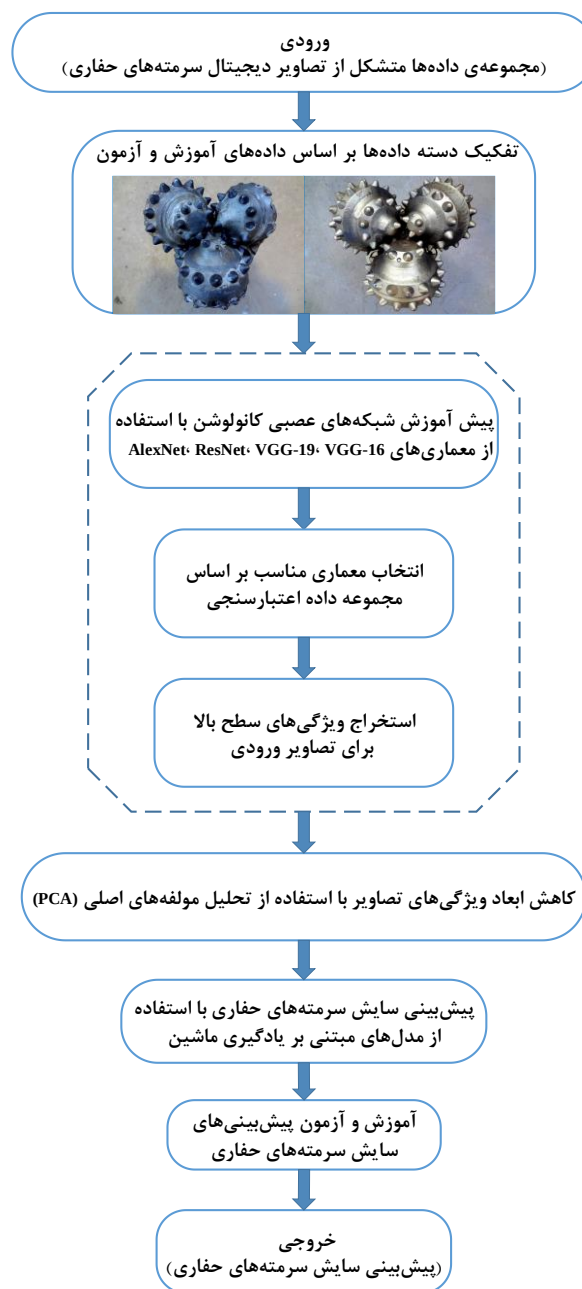
مقیاس بزرگ ImageNet (Verhelst and Moons, 2017)

۷-۳- روش پیشنهادی برای پیش‌بینی میزان سایش سازه‌های سه‌مخروطی دورانی

در این فصل بر اساس مجموعه تصاویر سازه‌های حفاری از معدن مس سرچشمه مراحل مختلف روش پیشنهادی به منظور پیش‌بینی میزان سایش سازه‌های حفاری ارائه می‌شود. همانطور که در شکل ۷-۶ نشان داده شده است روش پیشنهادی شامل چندین مرحله می‌باشد.

از آنجایی که تعداد نمونه‌های موجود از تصاویر سازه‌های حفاری بسیار کم می‌باشد و نمی‌توان از این تعداد تصویر برای آموزش شبکه عصبی عمیق استفاده نمود در همین راستا، در مرحله نخست از یادگیری انتقالی برای استخراج ویژگی‌های سطح بالا در تصاویر سازه‌های حفاری استفاده شده است. در این روش از وزن‌های از پیش آموزش دیده در مجموعه داده حجیم (ImageNet) برای یادگیری عمیق استفاده شده است. لازم به ذکر است که معماری مناسب از شبکه عصبی کانولوشن در دقت و سطوح معنایی ویژگی‌ها بسیار تاثیرگذار است. لذا در این تحقیق چهار معماری AlexNet، ResNet، VGG-16 و VGG-19 به

علت سابقه‌ی مناسب، ساختار خوب و در دسترس بودن رایگان شبکه‌های از پیش آموزش دیده، مورد تحلیل قرار گرفته است و بر اساس مجموعه داده اعتبارسنجی، معماری مناسب با توجه به تصاویر سرمته‌های حفاری انتخاب شده است. سپس در گام بعدی ویژگی‌های چند بعدی استخراج شده مرتبط به لایه آخر کانولوشن به بردار ویژگی تبدیل شده است. در همین راستا با توجه به اهمیت بالای انتخاب لایه مرتبط با نگاشت‌های ویژگی، بعد از ترسیم خروجی لایه‌های مختلف به صورت بصری، لایه‌ی مناسب انتخاب شده است.



شکل ۶-۷- روندنمای روش پیشنهادی به منظور پیش‌بینی سایش سرمته‌های حفاری

لازم به ذکر است به منظور جمع‌آوری ویژگی‌ها از لایه‌های تمام متصل بعد از نگاشت ویژگی انتخابی استفاده می‌شود. در این پژوهش برای نگاشت فضای ویژگی به فضای تصویر از شبکه‌ی معکوس کانولوشن (واهم‌گشت)^۱ استفاده شده است. از آنجایی که تعداد و ابعاد نگاشت‌های ویژگی از شبکه‌ی عصبی کانولوشن بسیار زیاد می‌باشد و این تعداد از ویژگی‌های استخراج شده زمان محاسبات را افزایش خواهد داد، در مرحله‌ی بعد از تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) به منظور کاهش و انتخاب ویژگی‌های موثر در پیش‌بینی استفاده شده است. لازم به ذکر است روش PCA از پراکندگی و توزیع ویژگی‌ها استفاده می‌کند. در گام بعدی از روش پیشنهادی، از مدل‌های (الگوریتم‌های) مبتنی بر یادگیری ماشین بر پایه رگرسیون برای پیش‌بینی میزان سایش سرامته‌های حفاری استفاده شده است. لذا در این مرحله از روش‌های رگرسیون خطی (LR)، رگرسیون درختی^۲ (رگرسیون درخت تصمیم دودویی^۳) (BRDT)، رگرسیون بردار پشتیبان^۴ (SVR)، رگرسیون فرایند گاوسی^۵ (GPR) و رگرسیون جمعی^۶ (ترکیبی) (ER) به منظور پیش‌بینی میزان سایش سرامته‌های حفاری استفاده شده است. لازم به ذکر است تمامی محاسبات و تحلیل‌ها در این پژوهش با استفاده از نرم افزار Matlab بر روی کامپیوتری با ۶ گیگابایت رم و کارت گرافیک GT 525M و با پردازنده Core i5-2410M انجام شده است. در ادامه مراحل روش پیشنهادی به تفصیل بیان شده است.

۷-۳-۱- مطالعات میدانی و مجموعه داده‌ها^۷

به منظور تشکیل مجموعه داده‌ها برای پیش‌بینی سایش سرامته‌های سه‌مخروطی دورانی در معدن مس سرچشمه، سرامته‌های مستهلک پس از جمع‌آوری، شستشو و تمیزکاری به آزمایشگاه تحقیق و توسعه معدن مس سرچشمه انتقال یافته است. سپس از سطح سرامته‌های نو و مستهلک با قرار دادن دوربین در زاویه ۴۵ درجه با تنظیمات ثابت عکس‌برداری شده است. در این پژوهش تعداد عکس‌برداری از سطح سرامته‌های سه‌مخروطی دورانی در معدن مس سرچشمه ۱۰۲ تصویر بوده است. از این تعداد، ۷۴ تصویر برای آموزش و

^۱ Deconvolutional Network

^۲ Regression Tree

^۳ Binary Regression Decision Tree

^۴ Support Vector Regression

^۵ Gaussian Process Regression

^۶ Ensemble Regression

^۷ Datasets

۲۸ تصویر به منظور آزمون مورد تحلیل قرار گرفته است. مقادیر پیش‌بینی شده سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی در روش پیشنهادی بر اساس مقادیر تجربی سایش اندازه‌گیری شده در معدن مس سرچشمه به صورت افت وزنی بوده است. لازم به ذکر است که میزان سایش در سرمته‌های نو صفر در نظر گرفته شده است.

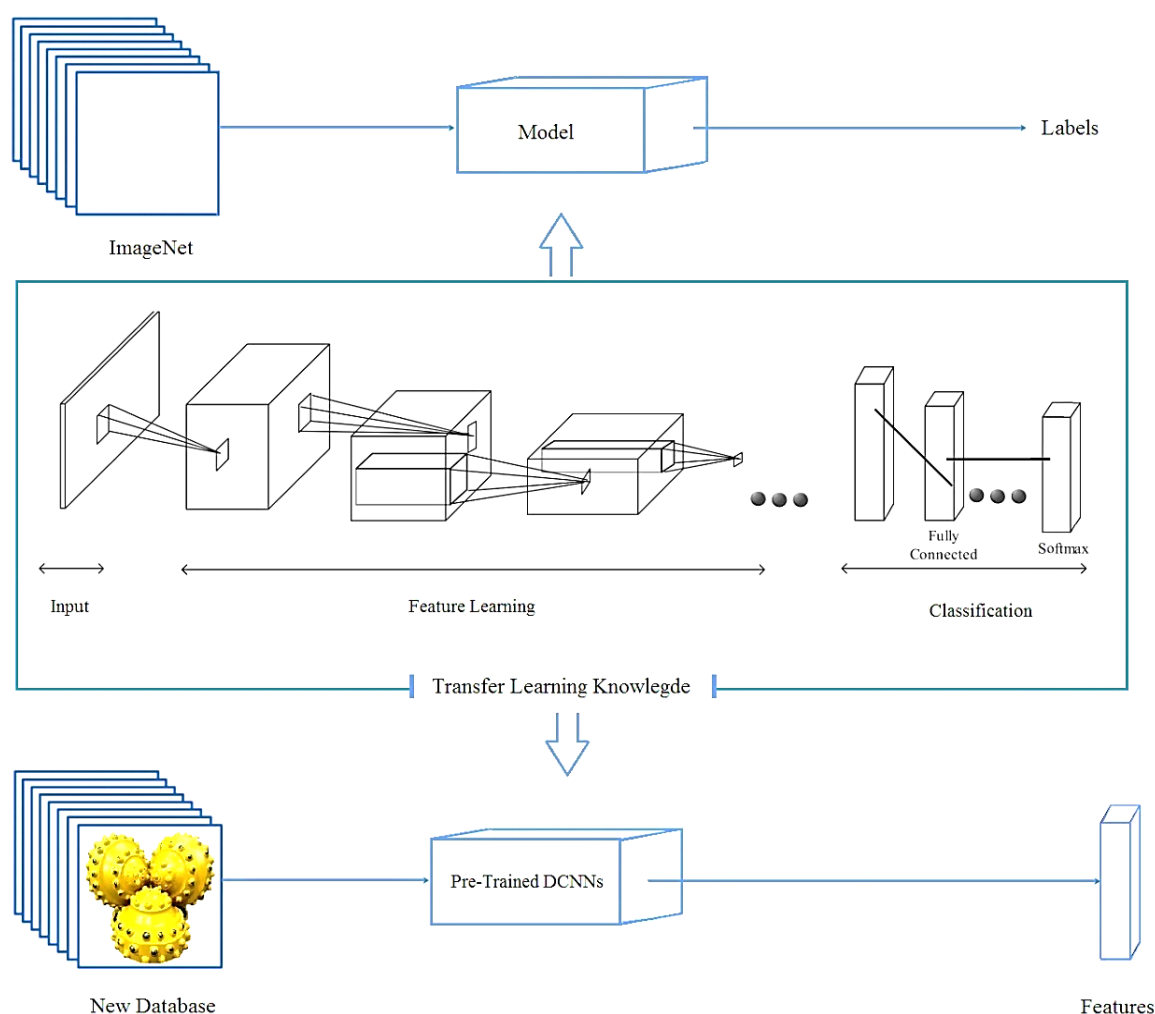
۷-۳-۲- یادگیری انتقالی

برای آموزش یک شبکه عصبی کانولوشن از ابتدا، داده‌های آموزشی زیادی مورد نیاز است و معمولاً داده‌های کافی برای آموزش یک مدل از ابتدا در دسترس نخواهد بود. در این موارد تکنیک یادگیری انتقالی مطرح می‌شود، زیرا با استفاده از آن می‌توان یک مدل یادگیری ماشین را با داده‌های کمتری به وجود آورد (مدل از پیش آموزش دیده است). یادگیری انتقالی، استفاده از دانش یک مدل از پیش آموزش دیده در یک مسئله متفاوت اما مرتبط است. در واقع هدف از یادگیری انتقالی استفاده از دانش به دست آمده در یک مسئله بر اساس داده‌های آموزشی بسیار زیاد برای بهبود تعمیم‌پذیری در مسئله‌ای با داده‌های آموزشی بسیار کوچک و محدود است. یعنی به جای شروع پروسه آموزش از صفر، از الگوهای بدست آمده در مسئله‌ای مشابه استفاده می‌شود. در بسیاری از کاربردهای مهندسی، پزشکی و صنعتی به علت محدودیت مجموعه داده‌ها و تصاویر، استفاده از یادگیری انتقالی مطرح بوده است. در این رساله نیز به دلیل تعداد پایین تصاویر برداشت شده از سرمته‌های حفاری از این روش استفاده شده است (Pan and Yang, 2009; Paul et al., 2016).

در مبحث بینایی کامپیوتر، شبکه‌های عصبی اغلب سعی بر پیدا کردن لبه‌ها در لایه‌های اولیه، شکل‌ها در لایه‌های میانی و برخی ویژگی‌های مربوط به وظیفه‌ی خاص را در لایه‌های آخر دارند. در واقع از ترکیب ویژگی‌های سطح پایین در لایه‌های ابتدایی، ویژگی‌های معنایی سطح بالا با یک نگاه انتزاعی استخراج می‌شود. در یادگیری انتقالی، برخی از لایه‌های میانی و اولیه مدل، حفظ شده و تنها نیاز است که لایه‌های انتهایی دوباره آموزش ببینند تا مدل برای وظیفه جدید مناسب باشد (Gu et al., 2018).

در واقع یادگیری انتقالی، از تجربیات گذشته برای حل مشکلات جدید الهام گرفته است و نگاشت اطلاعات از مدل آموزش دیده در کاربرد قبلی را به مدل جدید تعمیم خواهد داد. این اطلاعات از جهات مختلف به داده‌ها

و خود مسئله بستگی دارد. مزیت اصلی یادگیری انتقالی، کاهش زمان یادگیری است. همچنین با استفاده از شبکه کانولوشن، نیاز به داده‌های حجیم کاهش خواهد یافت (Pan and Yang, 2009; Paul et al., 2016). از آنجایی که مجموعه داده تصاویر سرمته‌های حفاری معدن مس سرچشمه بسیار کم بوده و جمع‌آوری این نوع از تصاویر کار بسیار دشواری است در این پژوهش از یک مجموعه داده جامع که تمامی خصیصه‌های موجود در تصاویر را شامل می‌شود (ImageNet) استفاده شده است. با توجه به توضیحات بیان شده در این پژوهش، چهار معماری AlexNet، ResNet، VGG-16 و VGG-19 به منظور پیش‌آموزش شبکه عصبی کانولوشن مورد استفاده قرار گرفته است که در ادامه جزئیات این روش‌ها شرح داده شده است. شکل ۷-۷ روش پیشنهادی برای استفاده از یادگیری انتقالی در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۷- مراحل یادگیری انتقالی در روش پیشنهادی

۷-۳-۲-۱- معماری شبکه عصبی عمیق AlexNet

معماری AlexNet در چالش ILSVRC در سال ۲۰۱۲، مجموعه داده حجیم ImageNet (طبقه‌بندی شده در ۱۰۰۰ گروه) را با خطای ۱۶/۴ درصد طبقه‌بندی کرد و برای اولین بار خطای طبقه‌بندی را به میزان چشم‌گیری کاهش داد. این معماری شامل ۵ لایه کانولوشنی ادغام شده با لایه‌های حداکثر تجمع و ۳ لایه تمام متصل است. این معماری تصاویر ورودی را با ابعاد $224 \times 224 \times 3$ دریافت کرده و با انجام عملیات کانولوشن و جمع کردن نتایج را به لایه‌های تمام متصل ارسال می‌کند و تصویر ورودی را پردازش می‌نماید. این شبکه بر روی مجموعه داده ImageNet آموزش دیده و برای کاهش زمان آموزش در آن از تابع فعال‌ساز^۱ (ReLU) استفاده شده است. همچنین برای جلوگیری از بیش‌برازش نمونه‌های آموزشی، تکنیک حذف تصادفی یا برون‌اندازی^۲ در این شبکه پیاده‌سازی شده است (Krizhevsky et al., 2012).

۷-۳-۲-۲- معماری شبکه عصبی عمیق VGGNet

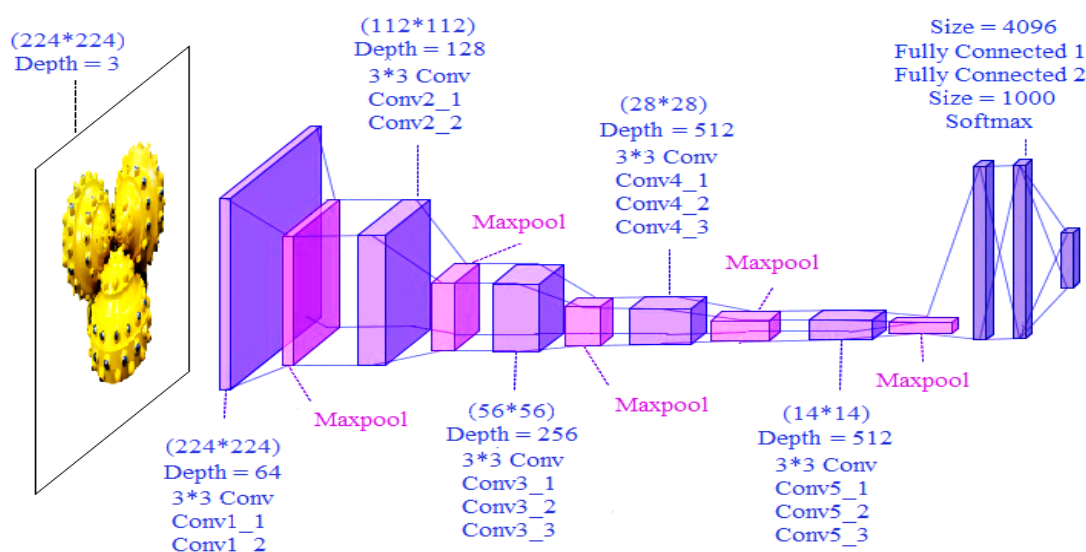
سیمونیان و زیسرمن^۳ در چالش ILSVRC در سال ۲۰۱۴ با این دیدگاه که معماری عمیق‌تر باعث افزایش دقت در محاسبات می‌شود معماری VGG را ارائه دادند و با خطای ۷/۳ درصد در طبقه‌بندی در جایگاه دوم این رقابت‌ها قرار گرفتند. این شبکه بیشتر بخاطر شکل هرمی ماندنش شناخته می‌شود که در آن لایه‌هایی که به تصویر نزدیکتر هستند، پهن‌تر و لایه‌های دورتر، عمیق‌تر هستند. با توجه به کاربرد متنوع این معماری بعضی از محققان شبکه پیش‌آموزش دیده‌ی VGG را برای کاربرد خود بازتنظیم می‌کنند و یا تغییراتی در معماری این شبکه محبوب ایجاد می‌نمایند و از ابتدا آن را آموزش می‌دهند (Loukadakis et al., 2018).

شبکه‌ی VGG شامل لایه‌های کانولوشنی (محاسباتی) است که از طریق لایه‌های جمع‌کننده، لایه‌ها را کوچکتر می‌کنند. در ابتدا شبکه‌ی VGG با ۱۶ لایه با عنوان VGG-16 ارائه شد و سپس با تغییراتی جزئی در شبکه‌ی VGG-16 شبکه VGG-19 با ۱۹ لایه مطرح گردید. شبکه‌ی VGG-16 همان‌طور که در شکل ۷-۸ نشان داده شده است، شامل ۱۶ لایه کانولوشنی (پارامتری) است. شبکه‌ی VGG-16، شامل دو لایه کانولوشنی با

^۱ Activation Function^۲ Dropout^۳ Simonyan and Zisserman

۶۴ فیلتر با ابعاد 3×3 است که پشت هم قرار گرفته‌اند. سپس، یک لایه حداکثر تجمع با ابعاد 2×2 با پرش^۱ به اندازه ۲ قرار گرفته است که علاوه بر نمونه‌برداری، بعد ویژگی‌ها را به نصف کاهش می‌دهد. در ادامه، دو لایه کانولوشنی با ۱۲۸ فیلتر، سه لایه کانولوشنی با ۲۵۶ فیلتر و سه لایه کانولوشنی با ۵۱۲ فیلتر با ابعاد 3×3 با یک لایه حداکثر تجمع ادامه فرایند این معماری را تشکیل می‌دهند. در انتها، ویژگی‌ها استخراج شده به یک بردار ویژگی تبدیل شده و در اختیار لایه‌های تمام متصل (نورونی) قرار می‌گیرند. در این معماری دو لایه تمام متصل با ۴۰۹۶ ویژگی پشت هم قرار گرفته‌اند. در نهایت، یک لایه تمام متصل به ابعاد ۱۰۰۰ متناظر با تعداد کلاس‌های کاربرد شبکه در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه پایگاه داده ImageNet شامل ۱۰۰۰ کلاس می‌باشد، لایه‌ی خروجی در شبکه‌ی VGG-16 نیز شامل ۱۰۰۰ نورون است. لازم به ذکر است که در تمامی لایه‌های کانولوشنی و نورونی از تابع فعال‌ساز (ReLU) استفاده شده است. در معماری شبکه VGG، به ازای هر تصویر، ۹۳ مگابایت حافظه اشغال می‌شود. همچنین این شبکه ۱۳۸ میلیون پارامتر قابل یادگیری دارد (Simonyan and Zisserman, 2014; Rezende et al., 2018).

لازم به ذکر است که شبکه‌ی VGG-19 سه لایه کانولوشن اضافه نسبت به شبکه‌ی VGG-16 با ساختار مشابه دارد که نشان‌دهنده عمق بیشتر این معماری است.



شکل ۷-۸- معماری شبکه عصبی عمیق VGG-16

¹ Max pooling

² Stride

۷-۳-۲-۳- معماری شبکه عصبی عمیق ResNet

معماری ResNet با نام مخفف شبکه باقیمانده^۱ در سال ۲۰۱۵ توسط مایکروسافت در چالش ILSVRC ارائه شد و توانست خطای طبقه‌بندی را به میزان ۳/۶ درصد کاهش دهد. این معماری از قدرت انسان در تشخیص اشیاء فراتر رفت و با دقت به مراتب بالاتر از انسان اشیاء را تشخیص داد. این معماری از ۱۵۲ لایه تشکیل شده است که یک رکورد در سه بخش تشخیص اشیاء، طبقه‌بندی و مکان‌یابی^۲ با استفاده از یک مدل است. در این شبکه ارتباطاتی بین لایه‌ها خارج از ساختار کانولوشنی در نظر گرفته شده است تا ورودی‌های لایه قبلی بدون واسطه به لایه بعدی انتقال یابد و در مرحله پس انتشار یا اصلاح شبکه، خطای هر لایه را به لایه قبلی منتقل شود تا شبکه معماری عمیق‌تر شده و سرعت آموزش افزایش یابد. به این ارتباطات اتصالات پرش^۳ و به ساختار حاصل از آن بلوک باقی‌مانده^۴ می‌گویند. ایده اصلی یک بلوک باقی‌مانده این است که ورودی توسط یک لایه کانولوشن، لایه ReLU و یک لایه کانولوشن پردازش شده و تابع $F(x)$ را تولید کند و نتیجه آن را با ورودی لایه قبل جمع نماید (He et al., 2015).

۷-۳-۲-۴- انتخاب معماری مناسب شبکه عصبی عمیق

انتخاب بهترین معماری شبکه عصبی عمیق می‌تواند در عملکرد روش پیشنهادی بسیار تاثیرگذار باشد. به همین دلیل در این پژوهش، معماری‌های AlexNet، VGG-16، VGG-19 و ResNet برای انتخاب معماری مناسب در مجموعه اعتبارسنجی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است لایه‌های مربوط به شبکه کانولوشن در این بخش ثابت فرض شده (آموزشی وجود ندارد) و فقط در لایه‌های تمام متصل آموزش صورت گرفته است. لازم به ذکر است در لایه انتهایی تمامی معماری‌ها یک خروجی برای پیش‌بینی میزان سایش در تصاویر سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی در نظر گرفته شده است. جدول ۷-۱ خروجی بدست آمده از مجموعه آموزش و اعتبارسنجی را برای معماری مختلف نشان می‌دهد. لازم به ذکر است مراحل آموزش

^۱ Residual Network

^۲ Localization

^۳ Skip connections

^۴ Residual block

برای لایه‌های تمام متصل برای این مجموعه آموزش ۱۰۰ در نظر گرفته شده است و دیگر پارامترهای معماری بر اساس پارامتر معماری استاندارد تنظیم شده است.

جدول ۷-۱- مقایسه معماری‌های مختلف شبکه عصبی عمیق در مجموعه اعتبارسنجی

معماری	VGG-16	VGG-19	AlexNet	ResNet
R^2	0.68	0.59	0.45	0.56

طبق جدول فوق معماری VGG-16 بهترین عملکرد را در مجموعه اعتبارسنجی به خود اختصاص داده است. به همین دلیل مراحل بعدی روش پیشنهادی بر اساس این معماری انجام شده است. با این حال نتایج اولیه عملکرد معماری در پیش‌بینی میزان سایش سرمته‌های سه‌مخروطی با ضریب تعیین ۰/۶۸ نمی‌تواند عملکرد مناسبی برای این نوع از تصاویر باشد، لذا با استفاده از روش پیشنهادی این عملکرد بسیار بهبود یافته است.

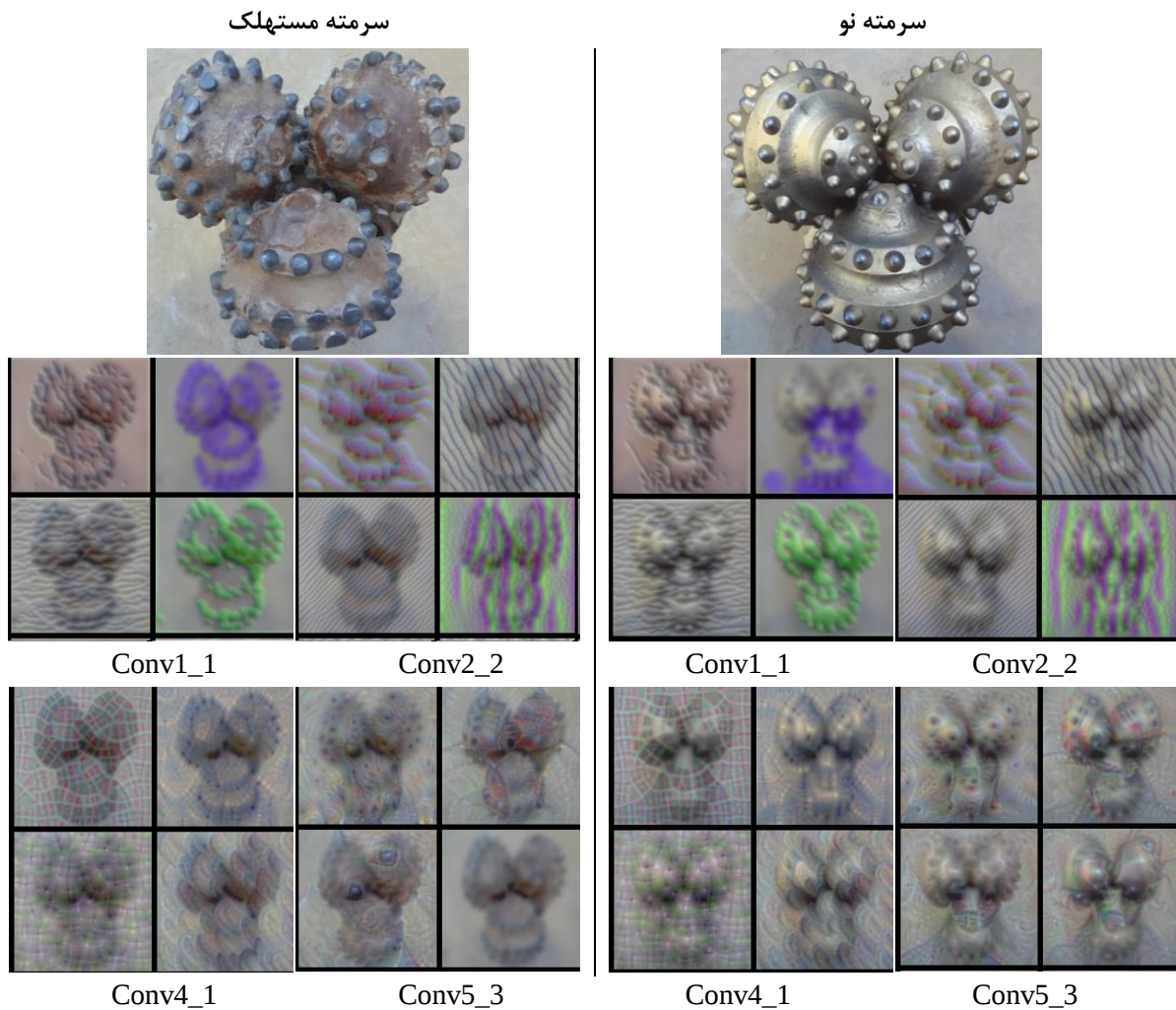
۷-۳-۲-۵- نمایش ویژگی‌های استخراجی

ویژگی‌های استخراجی خروجی لایه‌های کانولوشن در فضای ویژگی بوده و نمی‌توان از این فضا برای نمایش استفاده نمود. در همین راستا در این پژوهش، یک شبکه معکوس کانولوشن برای نمایش بصری ویژگی‌های استخراجی معرفی شده است. این شبکه، فضای ویژگی را به فضای تصویر نگاشت می‌کند که این عمل برای تحلیل بصری ویژگی‌های استخراج شده در سطوح مختلف بسیار تاثیرگذار می‌باشد. در این مرحله برای انتخاب بهترین لایه از لایه‌های موجود، این نگاشت‌های ویژگی مربوط به معماری VGG-16 ترسیم شده که در شکل ۷-۹ نشان داده شده است. در این شکل برای درک بیشتر نمایش ویژگی‌های استخراجی چند کرنل (فیلتر) در چندین لایه کانولوشنی به نمایش درآمده است.

۷-۳-۳- کاهش ابعاد ویژگی‌های استخراج شده

بعد از استخراج ویژگی‌ها از شبکه‌های کانولوشن، تعداد ویژگی‌های استخراج شده از حد معمول بیشتر است. لایه‌های کانولوشن به دلیل استفاده از هسته‌های متفاوت معمولاً دارای ابعاد بسیار بالایی می‌باشند. در همین راستا در این پژوهش بعد از نگاشت ماتریس ویژگی به بردار ویژگی، ویژگی‌های موثر با توجه به پراکندگی و توزیع ویژگی‌ها کاهش یافته است. برای این منظور از روش تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی برای انتخاب

بهترین ویژگی‌ها استفاده شده است. در واقع در این روش یک نگاشت جدید برای ویژگی‌ها بر اساس واریانس داده‌ها معرفی شده است و مؤلفه‌هایی از مجموعه داده با بیشترین تأثیر در واریانس داده در مکانیزم نگاشت ویژگی حفظ می‌شوند (Turk and Pentland, 1991; Roweis and Saul, 2000; Qiu et al., 2012).



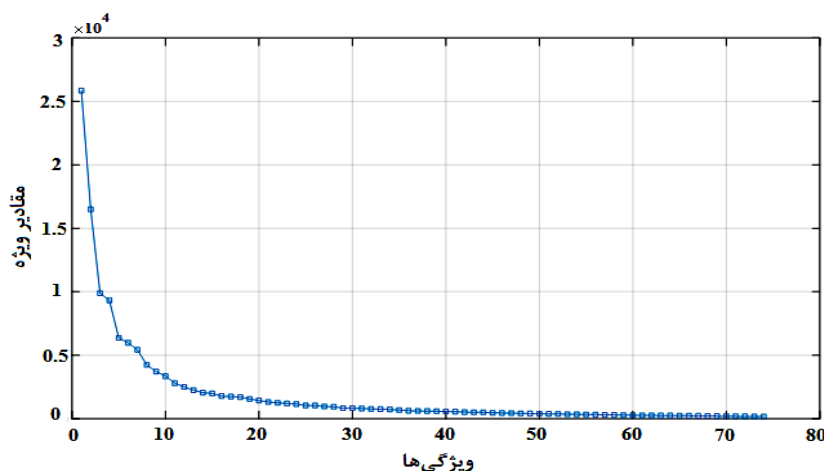
شکل ۷-۹- نمایش کرنل‌های (فیلترها) لایه‌های کانولوشن در شبکه VGG-16

در این پژوهش برای محاسبه تعداد ویژگی‌های موثر از رابطه‌ی زیر استفاده شده است.

$$\frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{\sum_{j=1}^f \lambda_j} \geq 0.98 \quad (1-7)$$

در این رابطه k تعداد ویژگی انتخاب شده، f تعداد کل ویژگی‌ها و λ مقادیر بردار ویژه می‌باشد.

بر اساس رابطه (۷-۱) و نمودار مقادیر ویژه نشان داده شده در شکل ۷-۱۰، از ۴۰۹۶ ویژگی استخراج شده توسط لایه تمام متصل تنها ۳۵ ویژگی دارای ارزش بوده و از این تعداد ویژگی برای مرحله بعدی استفاده شده است. در واقع نمونه‌های استخراجی با این تعداد ویژگی به فضای PCA نگاشت می‌شوند.



شکل ۷-۱۰- میزان مقادیر ویژه محاسبه شده توسط PCA بر اساس مجموعه‌ی آموزش

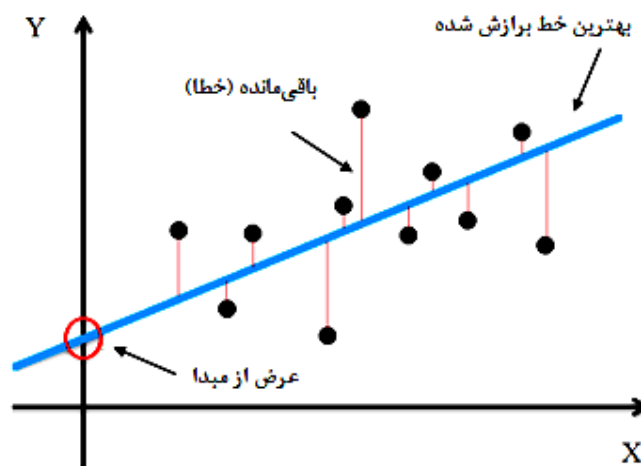
۷-۳-۴- پیش‌بینی میزان سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی

هدف از یادگیری ماشین، پیش‌بینی یا خوشه‌بندی است. پیش‌بینی فرایندی است که در آن، با استفاده از مجموعه‌ای از متغیرهای ورودی، مقدار یک متغیر خروجی برآورد می‌شود. پیش‌بینی در یادگیری تحت نظارت به دو دسته کلی رگرسیون و طبقه‌بندی (دسته‌بندی) تقسیم می‌شوند. در مسائل رگرسیون، متغیر قابل پیش‌بینی یک مقدار واقعی است، اما در مسائل طبقه‌بندی، از متغیرها برای پیش‌بینی یک یا برخی از دسته‌های از پیش تعریف شده استفاده می‌شود. هدف از رگرسیون پیش‌بینی متغیر مستقل بر اساس متغیر وابسته است (Brownlee, 2017; Jernelv et al., 2020; Sarker, 2021).

الگوریتم‌های پیش‌بینی مبتنی بر رگرسیون در یادگیری ماشین در دسته‌های مختلفی قرار می‌گیرند که در این پژوهش از روش‌های رگرسیون خطی، رگرسیون درختی، رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)، رگرسیون فرایند گاوسی (GPR) و رگرسیون جمعی (ترکیبی) به منظور پیش‌بینی میزان سایش سرمت‌های حفاری استفاده شده است. لازم به ذکر است در این پژوهش از مدل‌های یادگیری ماشین استاندارد به صورت پیش فرض استفاده شده است. در ادامه مبانی و مفاهیم این روش‌ها تشریح شده است.

۷-۳-۴-۱- رگرسیون خطی

رگرسیون خطی شکل استاندارد یک مدل خطی است. فرایند پیش‌بینی در رگرسیون خطی سعی می‌کند ضرایب مدل را به گونه‌ای انتخاب کند که با داده‌های موجود همخوانی داشته باشد، یعنی پیش‌بینی‌ها به مقادیر رؤیت شده در داده‌ها نزدیک باشند و یکی از مهم‌ترین مسائل در رگرسیون خطی، به حداقل رساندن اختلاف بین این دو است. یکی از متداول‌ترین روش‌های تخمین مدل رگرسیون خطی، روش کمترین مربعات معمولی^۱ (OLS) است که در آن مجموع مربع تفاضل پیش‌بینی‌ها و داده‌های وابسته کمینه می‌شود. این روش مستلزم پیدا کردن وارونه ضرب خارجی ماتریس تمام داده‌های مستقل با ماتریس ترانزاده آن است که سعی می‌کند بهترین خط رگرسیونی برای داده‌ها را برازش نماید (Hutcheson and Sofroniou, 1999). در روش OLS، مجموع توان دوم باقیمانده‌ی^۲ داده‌ها (RSS) (خطاها) باید نسبت به خط رگرسیون (بهترین خط رگرسیون) حداقل باشد. لازم به ذکر است که اختلاف بین مقادیر واقعی^۳ و مقادیر برازش شده^۴ یا مقادیر پیش‌بینی شده^۵ توسط مدل (با پارامترهای مشخص)، باقیمانده را تعیین می‌کند. نمودار پراکندگی رابطه خطی بین دو متغیر مستقل و وابسته در شکل ۷-۱۱ نشان داده شده است (Bruce et al., 2020).



شکل ۷-۱۱- نمودار پراکندگی از نقاط داده، باقی‌مانده‌ها (خطاها) و بهترین خط رگرسیون (Hutcheson, 2011)

¹ Ordinary Least Squares

² Residual Sum of Squares

³ Measured Value

⁴ Fitted Value

⁵ Predicted Value

لازم به ذکر است در مدل‌های رگرسیون خطی در یادگیری ماشین، از تنظیم کردن (منظم سازی)^۱ برای پیش‌گیری از بیش‌برازش استفاده می‌شود. تنظیم کردن، بیش‌برازش را از طریق افزودن جریمه^۲ به تابع زیان^۳ کاهش می‌دهد (Bowles, 2015).

۷-۳-۴-۲- رگرسیون درختی (رگرسیون درخت تصمیم دودویی)

درخت تصمیم یک ابزار پیش‌بینی است که نمایش نموداری از نتایج ممکن را با استفاده از مشاهدات ارائه می‌دهد. درخت تصمیم می‌تواند با الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین طراحی شود. یکی از محبوب‌ترین و ساده‌ترین الگوریتم‌های درخت‌های تصمیم، طبقه‌بندی و درخت رگرسیون^۴ (CART) است. این الگوریتم بر اساس درخت‌های دودویی (باینری) بنا شده است و می‌تواند در پیش‌بینی پیامدهای کمی (رگرسیون درختی) یا طبقه‌بندی شده (طبقه‌بندی درختی) مورد استفاده قرار گیرد. روش CART از طریق مجموعه‌ای از شرط‌های منطقی، پیامد مورد مطالعه را پیش‌بینی یا طبقه‌بندی می‌نماید. در این روش پیش‌بینی‌ها به صفات موردبررسی به وسیله برگ‌ها و شاخه‌ها متصل می‌شوند. در واقع یک مجموعه از گره‌های تصمیم با شاخه‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند و از ریشه گره گسترش یافته و تا برگ و گره‌های نهایی ادامه می‌یابند. لازم به ذکر است که برای هر گره تنها دو شاخه وجود دارد. درخت تصمیم، برای هر تصمیم یک کاوش کامل از تمام متغیرهای موجود و انشعاب مقادیر فراهم و با خرد کردن‌های بهینه، انتخاب می‌شود. برای جلوگیری از بیش‌برازش، می‌توان درختان کوچکتر با برگ‌های بزرگتر را امتحان کرد و سپس درختان بزرگتر را در نظر گرفت (Breiman et al., 1984; Kim et al., 2019; Toolbox, 2019).

۷-۳-۴-۳- رگرسیون بردار پشتیبان

رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) یکی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین است که برای پیش‌بینی و رگرسیون غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد و بر تئوری آموزش آماری استوار است. این روش بر اساس کمینه‌سازی

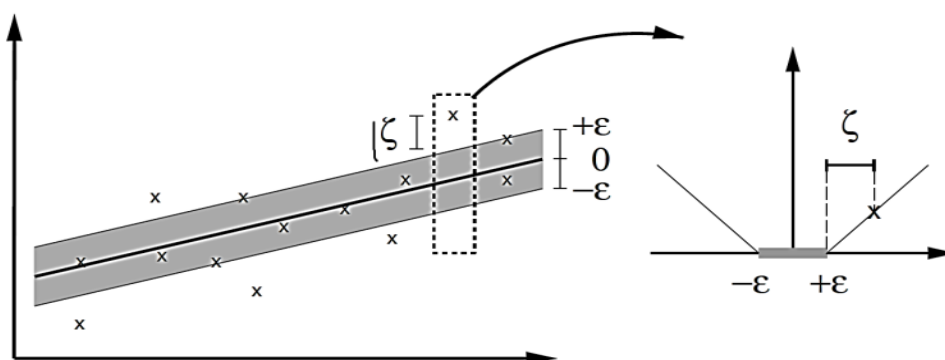
^۱ Regularization

^۲ Penalty

^۳ Loss Function

^۴ Classification and Regression Tree

ریسک ساختاری^۱ بین داده‌های ورودی و مقدار پارامتر وابسته، ارتباط برقرار می‌کند. کمینه‌سازی ریسک ساختاری، نسبت به روش متداول کمینه‌سازی ریسک تجربی مورد استفاده در الگوریتم‌هایی مانند شبکه‌های عصبی و روش‌های کلاسیک آماری، دارای برتری است و برخلاف روش‌هایی همانند شبکه‌های عصبی، به جواب‌های موضوعی همگرا نمی‌شود. SVR روشی برای تخمین یک تابع است که بر اساس داده‌های آموزشی از یک شیء ورودی به یک عدد واقعی نگاشت می‌شود. در مسائل رگرسیون، بردارهای ورودی به یک فضای چندبعدی، نگاشت می‌شوند؛ سپس یک ابرصفحه ساخته شده که بردارهای ورودی را با بیشترین فاصله ممکن، از یکدیگر جدا می‌کند. برای رفع مشکل انجام عملیات در فضایی با ابعاد زیاد، از تابع کرنل استفاده می‌شود. در این صورت عملیات می‌تواند با همان سرعت فضای داده‌های ورودی انجام شود. در واقع با استفاده از تابع کرنل، مشکل چند بعدی و غیرخطی بودن نگاشت، مرتفع می‌شود و پیچیدگی و خطای مدل پیش‌بینی به حداقل می‌رسد (Cortes and Vapnik, 1995; Yu and Kim, 2012; Deka, 2014). بنابراین هدف در SVR پیدا کردن تابع $f(x)$ برای محاسبه y_i بر اساس بردار ورودی است به طوری که از مقدار واقعی t_i حداقل اختلاف را دارا باشد. این اختلاف (ε) توسط تابع زیان معرفی می‌شود. در SVR تابع زیان “ ε -insensitive” مطابق شکل ۷-۱۲ بیان می‌شود (Vapnik, 2013).



شکل ۷-۱۲ - تابع زیان “ ε -insensitive” (Smola and Schölkopf, 2004)

طبق شکل ۷-۱۲ بر اساس تابع زیان تنها نمونه‌هایی که خارج از مرز سایه زده شده قرار می‌گیرند دارای متغیر شناور^۲ غیر صفر خواهند بود. بنابراین اگر مقدار خروجی پیش‌بینی شده در این حاشیه

^۱ Structural Risk Minimization

^۲ Slack variable

$$L_\varepsilon(\xi) = \begin{cases} 0 & \text{if } |\xi| \leq \varepsilon \\ |\xi| - \varepsilon & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7-1)$$

فرایند گاوسی روشی مناسب به منظور تعریف توزیع‌های مقدم برای مدل‌های انعطاف‌پذیر رگرسیون و طبقه‌بندی است که در آن رگرسیون یا توابع احتمال طبقه به اشکال ساده پارامتری محدود نشده باشند. یکی از مزیت‌های فرایند گاوسی تنوع بسیار توابع کواریانس آن است که به ایجاد توابعی با درجات مختلف همواری یا انواع مختلف ساختارهای پیوستی منجر می‌شود و این امکان را فراهم می‌آورد تا از میان آنها گزینش مناسبی صورت گیرد. مدل‌های رگرسیون فرایند گاوسی (GPR) مدل‌های احتمالاتی مبتنی بر کرنل نامتقارن می‌باشند که می‌توانند بین توابعی با تعداد یک یا چندین متغیر ورودی توزیع مناسبی را مشخص کنند. در این روش می‌توان از محاسبات ماتریس برای استنتاج بهره برد. هنگامی که چنین تابعی میانگین پاسخ را در یک مدل رگرسیونی با خطاهای گاوسی تعریف می‌کند. این مسئله برای مجموعه داده‌هایی با بیش از هزار نمونه امکان‌پذیر است. فرایندهای گاوسی به علت دارا بودن خصوصیات نرمال از اهمیت بالایی در مدل‌سازی آماری برخوردارند (Neal, 1997).

۱۸۴

$$y = f(x) + N(0, \sigma_f^2) \quad (3-7)$$

که در آن $N(0, \sigma_f^2)$ به عنوان نویز تابع توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس σ_f^2 است. به منظور ساده‌سازی، روش جدید آمیختن نویز در $k(x, x')$ در رابطه‌ی ۴-۷ به نمایش در آمده است. لازم به ذکر است که رگرسیون فرایند گاوسی $f(x)$ را جست‌وجو می‌کند.

$$k(x, x') = \sigma_f^2 \exp\left[\frac{-(x - x')^2}{2\tau^2}\right] + \sigma_n^2 \delta(x, x') \quad (4-7)$$

که در آن $\delta(x, x')$ تابع دلتای کرونکر است. مقادیر پیش‌بینی شده مشاهده‌ها طبق رابطه ۳-۷ یکسان هستند، اما واریانس‌ها به علت فرایند نویز مشاهده‌ای تفاوت دارند. برای آماده‌سازی رگرسیون فرایند گاوسی تابع کواریانس، رابطه ۴-۷ در میان همه ترکیبات ممکن این نقاط محاسبه می‌شود و یافته‌ها در روابط ماتریسی زیر بیان می‌شود.

$$k = \begin{pmatrix} k(x_1, x_1) & \dots & k(x_1, x_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k(x_n, x_1) & \dots & k(x_n, x_n) \end{pmatrix} \quad (5-7)$$

$$k_* = (k(x_*, x_1) \quad k(x_*, x_2) \quad \dots \quad k(x_*, x_n)) \quad k_{**} = k(x_*, x_*) \quad (6-7)$$

۷-۳-۴-۵- رگرسیون جمعی (ترکیبی)

مدل‌های یادگیری ماشین جمعی یا ترکیبی یکی از روش‌های یادگیری ماشین است که تکمیل‌کننده مدل‌های یادگیری ماشینی انفرادی هستند. از مدل‌های یادگیری ماشین جمعی به منظور طبقه‌بندی و پیش‌بینی (رگرسیون) استفاده می‌شود. در این تحقیق از درخت رگرسیون جمعی با استفاده از ترکیب وزنی درختان چندگانه به منظور پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی استفاده شده است. لازم به ذکر است، ترکیب چندین درخت رگرسیون عملکرد پیش‌بینی را افزایش می‌دهد.

در این روش، مدل‌های یادگیری ضعیف^۱ یا مدل‌های پایه برای حل یک مسئله آموزش می‌بینند و

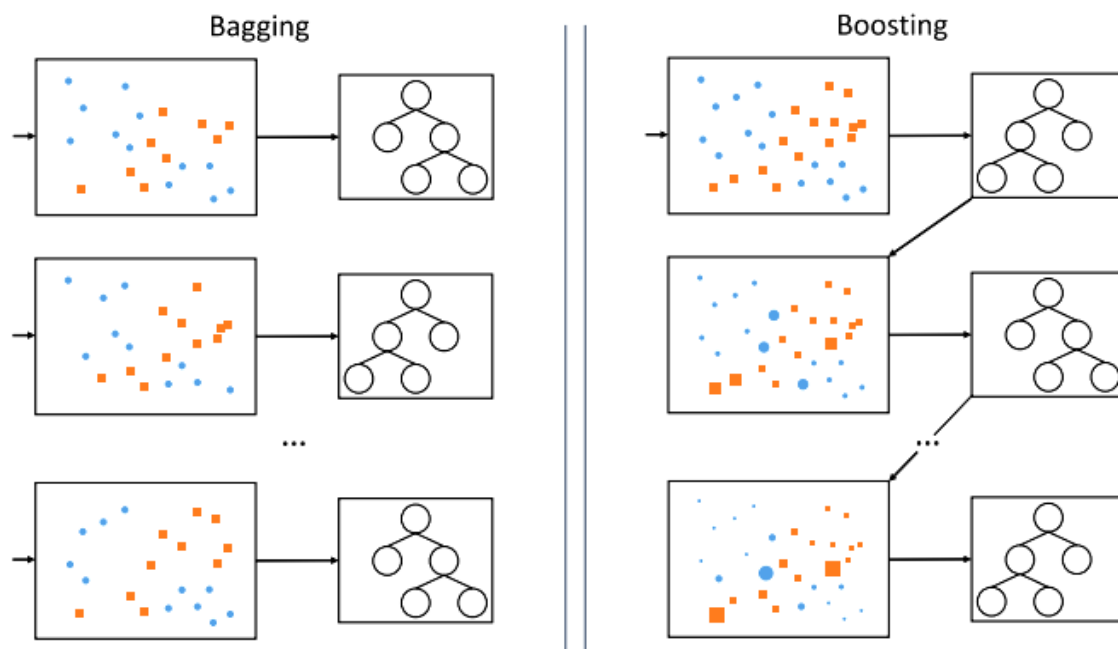
^۱ Weak learner

برای رسیدن به نتایج بهتر با هم ترکیب می‌شوند. هنگامی که مدل‌های ضعیف به صورت صحیح با یکدیگر ترکیب می‌شوند مدل‌های دقیق‌تر و پایدارتری به وجود خواهد آمد. در مدل‌های یادگیری ماشین، انتخاب الگوریتم‌ها به متغیرهای زیادی مانند مقدار داده‌ها، ابعاد داده‌ها و فرضیه توزیع آنها در کسب نتایج مناسب وابسته است. در روش‌های جمعی، مدل‌های پایه به عنوان اجزای سازنده با یکدیگر ترکیب می‌شوند و مدل‌های پیچیده‌تری را به وجود می‌آورند. در بیشتر مواقع این مدل‌ها به تنهایی به علت بایاس یا واریانس بالا عملکرد مناسب و مطلوبی نخواهند داشت. لازم به ذکر است که مدل‌های پایه می‌بایست به صورت منطقی و منسجم^۱ با یکدیگر ترکیب شوند. این بدان معنی است که در صورت انتخاب یک مدل پایه با بایاس کم و واریانس بالا، باید از یک روش ترکیبی که تمایل به کاهش واریانس دارد استفاده شود و در صورت انتخاب یک مدل پایه با بایاس بالا و واریانس کم باید از روشی که تمایل به کاهش بایاس دارد استفاده شود (Breiman, 1996; Hastie and Tibshirani, 2009).

به منظور ترکیب مدل‌های پایه در روش یادگیری ماشین جمعی از سه روش دسته‌بندی^۲، تقویتی^۳ و انباشته‌سازی^۴ استفاده می‌شود. در روش جمعی دسته‌بندی از مدل‌های پایه همگون استفاده می‌شود. در روش جمعی مدل‌های پایه به صورت موازی و مستقل از یکدیگر آموزش می‌بینند و با فرایند میانگین‌گیری قطعی^۵ با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در روش جمعی تقویتی نیز همانند روش جمعی دسته‌بندی از مدل‌های پایه همگون استفاده می‌شود که با یک روش تطبیقی^۶ و به صورت دنباله‌ای آموزش می‌بینند (یک مدل پایه به مدل قبلی خود وابسته است) و با یک استراتژی قطعی ترکیب می‌شوند. اما در روش جمعی انباشته‌سازی از مدل‌های پایه ناهمگون استفاده می‌شود که به صورت موازی آموزش می‌بینند و با آموزش یک متامدل^۷ بر روی خروجی‌های پیش‌بینی شده مدل‌های پایه، ترکیب می‌شوند. بنابراین می‌توان گفت، روش‌های جمعی دسته‌بندی بیشتر بر ایجاد مدلی ترکیبی با

¹ Coherent² Bagging³ Boosting⁴ Stacking⁵ Deterministic averaging process⁶ Adaptive⁷ Meta-Model

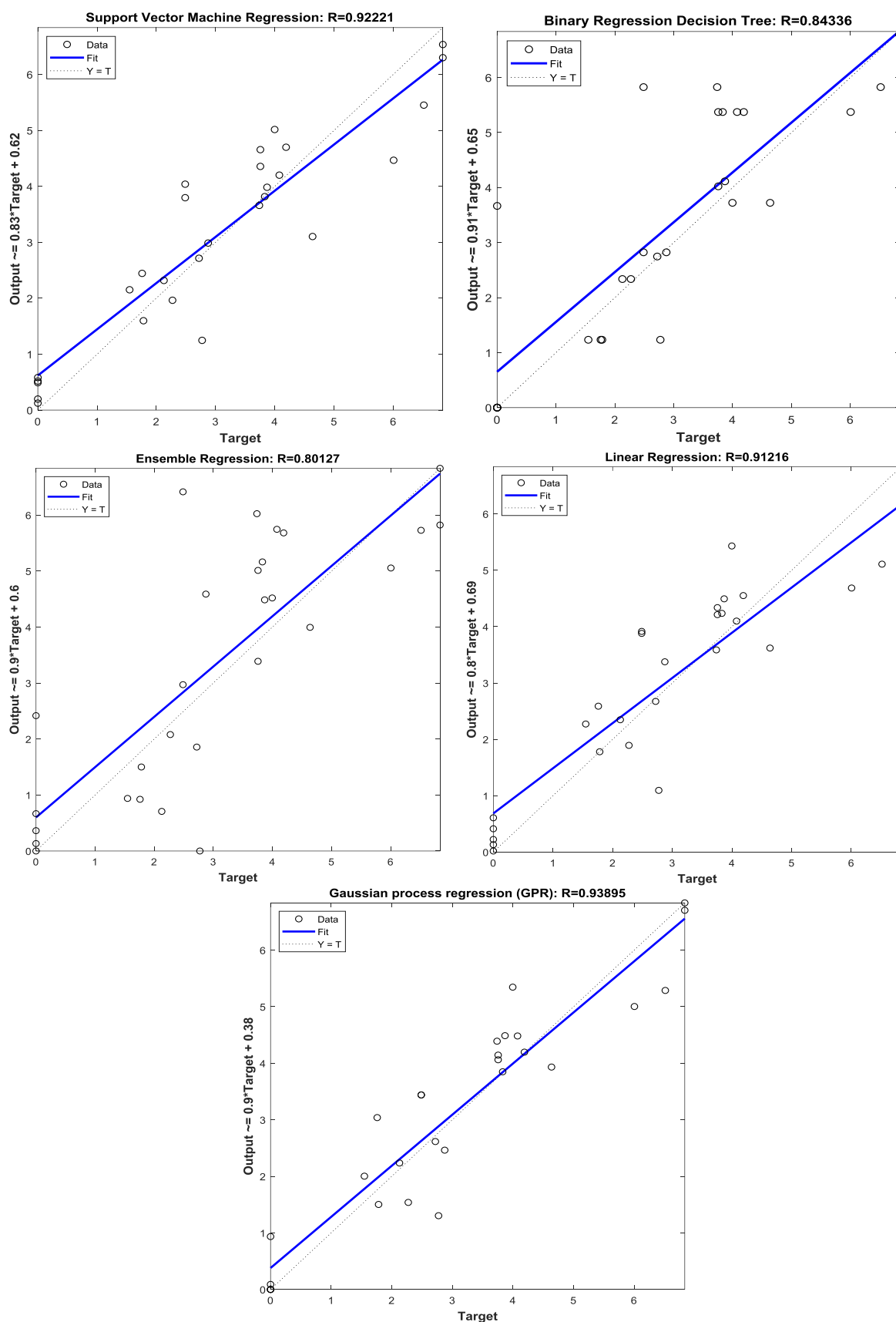
واریانس کمتر نسبت به مدل‌های پایه خود، تمرکز دارد در حالی که روش‌های تقویتی و انباشته‌سازی سعی در ایجاد مدلی قوی‌تر با بایاس کمتر نسبت به مدل‌های پایه خود است (ممکن است واریانس نیز کاهش یابد) (Mohamed et al., 2017; Kim et al., 2019). در شکل ۷-۱۳ تفاوت دو روش دسته‌بندی (Bagging)، تقویتی (Boosting) در رگرسیون جمعی به نمایش در آمده است.



شکل ۷-۱۳- تفاوت دو روش bagging و boosting در رگرسیون جمعی (González et al., 2020)

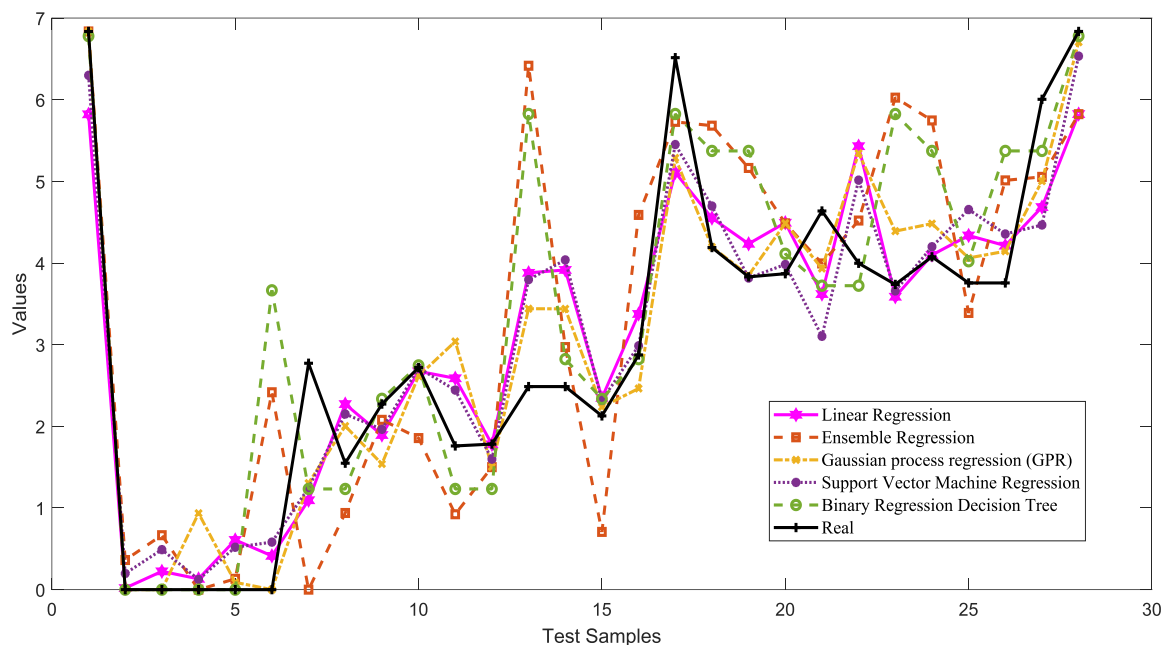
۷-۳-۵- تحلیل نتایج بر اساس روش پیشنهادی

در این بخش، پیش‌بینی نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی در معدن مس سرچشمه بر اساس روش پیشنهادی صورت گرفته است. لازم به ذکر است در سال‌های اخیر روش خاصی برای پیش‌بینی نرخ سایش در این نوع از تصاویر ارائه نشده است. در همین راستا، روش پیشنهادی بر روی کامپیوتری با ۶ گیگابایت رم و کارت گرافیک GT 525M و پردازنده Core i5-2410M پیاده‌سازی شده است. با توجه به تعداد تصاویر، نرخ سایش با استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر رگرسیون در یادگیری ماشین پیش‌بینی شده است. در شکل ۷-۱۴ نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف در پیش‌بینی میزان سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی در معدن مس سرچشمه بر اساس مجموعه داده تصاویر نشان داده شده است.



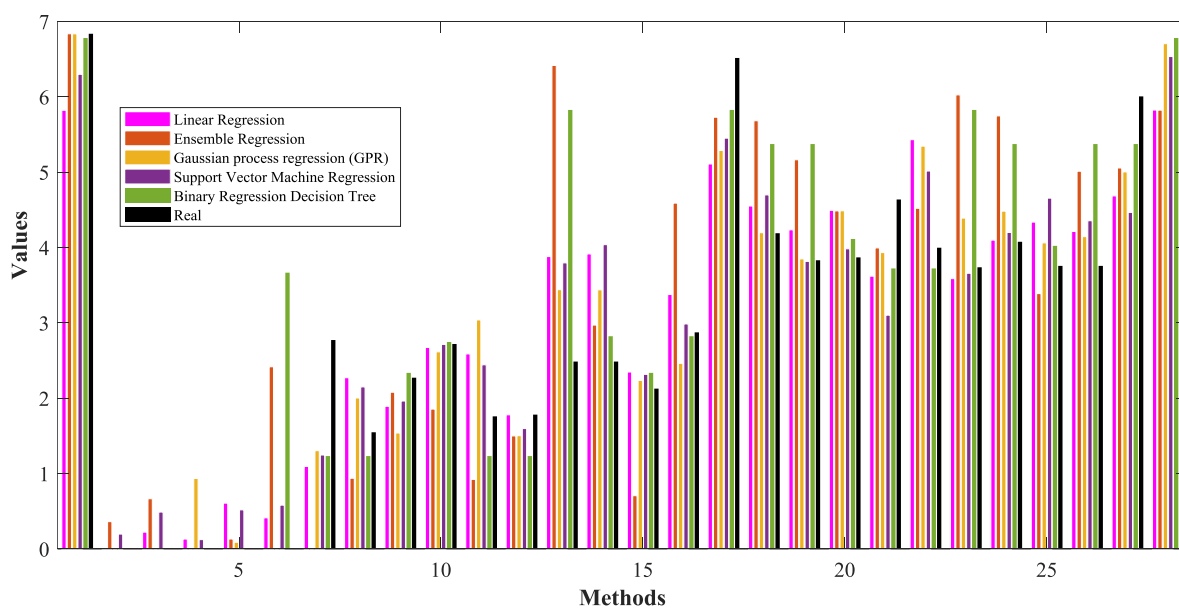
شکل ۷-۱۴- پیش بینی میزان سایش سرمت‌های سه مخروطی دورانی با استفاده از مدل‌های مختلف روش پیشنهادی

در شکل ۷-۱۵ میزان کارایی مدل های مختلف پیش بینی سایش سرمته های سه مخروطی دورانی بر اساس روش پیشنهادی به صورت بصری به نمایش درآمده است.



شکل ۷-۱۵- میزان کارایی مدل های مختلف روش پیشنهادی در پیش بینی سایش سرمته های سه مخروطی دورانی

همچنین شکل ۷-۱۶ پیش بینی سایش سرمته های سه مخروطی دورانی از طریق روش پیشنهادی را نسبت به مجموعه ی واقعی به صورت نمودار میله ای نشان می دهد.



شکل ۷-۱۶- نمودار میله ای پیش بینی سایش سرمته های سه مخروطی دورانی از طریق روش پیشنهادی

۷-۳-۵-۱- ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی

عملکرد هریک از مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی همانند مدل‌های آماری ارائه شده در فصل پیشین برای دسته داده‌های آزمون بر اساس چهار معیار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2)، شاخص عملکرد (VAF) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) مورد ارزیابی قرار گرفته است. پس از تعیین مقادیر چهار معیار ارزیابی برای مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر یادگیری ماشین، رتبه هر معیار برای هر مدل تعیین شده است و در جداول ۷-۲ و ۷-۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است با توجه به اینکه مقادیر واقعی سایش در سرمته‌های نو صفر در نظر گرفته شده است، میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) مقادیر پیش‌بینی شده سرمته‌های نو در مدل‌های ارائه شده تعریف نشده خواهد شد که به منظور حل این مشکل، این معیار بدون در نظر گرفتن مقادیر واقعی سایش در سرمته‌های نو در نظر گرفته شده است و در جداول ۷-۲ و ۷-۳ با علامت اختصاری $MAPE^*$ به نمایش در آمده است.

جدول ۷-۲- مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای مدل‌های ارائه شده

شماره	مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی	RMSE	$MAPE^*$	VAF	R^2
1	رگرسیون خطی (LR)	0.828	14.775	83.092	0.832
2	رگرسیون جمعی (ER)	1.389	24.212	53.970	0.642
3	رگرسیون فرایند گاوسی (GPR)	0.696	13.926	88.107	0.882
4	رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)	0.781	15.362	84.975	0.850
5	رگرسیون درخت تصمیم دودویی (BRDT)	1.227	19.991	65.805	0.711

جدول ۷-۳- رتبه‌بندی هر یک از شاخص‌های ارزیابی برای مدل‌های ارائه شده

شماره	مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی	RMSE	$MAPE^*$	VAF	R^2
1	رگرسیون خطی (LR)	3	2	3	3
2	رگرسیون جمعی (ER)	5	5	5	5
3	رگرسیون فرایند گاوسی (GPR)	1	1	1	1
4	رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)	2	3	2	2
5	رگرسیون درخت تصمیم دودویی (BRDT)	4	4	4	4

۷-۳-۵-۲- اولویت‌بندی مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی

در این مرحله پس از تعیین رتبه هر معیار در هر مدل بر اساس رتبه‌بندی معیارهای چهارگانه، اولویت‌بندی مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی از طریق روش‌های میانگین رتبه‌ها، روش بردا و روش کپلند مشخص شده است. در انتها با استفاده از روش ادغام، رتبه‌بندی نهایی هر یک از مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی تعیین شده است. در جدول ۷-۴ نتایج رتبه‌بندی مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی ارائه شده است.

جدول ۷-۴- رتبه‌بندی مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی بر اساس معیارهای ارزیابی

ادغام	کپلند	بردا	میانگین رتبه‌ها	مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی	شماره
2.92	3	3	2.75	رگرسیون خطی (LR)	1
5	5	5	5	رگرسیون جمعی (ER)	2
1	1	1	1	رگرسیون فرایند گاوسی (GPR)	3
2.08	2	2	2.25	رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)	4
4	4	4	4	رگرسیون درخت تصمیم دودویی (BRDT)	5

ادغام رتبه‌بندی‌ها نشان می‌دهد که رگرسیون فرایند گاوسی (GPR) در تمام روش‌های اولویت‌بندی دارای اولویت بالاتری نسبت به دیگر مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی است. لذا بر اساس نتایج بدست آمده از رتبه‌بندی مدل‌های پیش‌بینی، رگرسیون فرایند گاوسی (GPR) به عنوان بهترین مدل پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی در این پژوهش انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است می‌توان از این مدل توسعه یافته به منظور پیش‌بینی سایش سرمته‌های حفاری در معادن مختلف بهره برد.

۷-۴- جمع‌بندی

در این فصل به منظور پیش‌بینی میزان سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی معدن مس سرچشمه از روش یادگیری عمیق شبکه‌های عصبی کانولوشن استفاده شده است. از آنجایی که تعداد نمونه‌های موجود از تصاویر سرمته‌های حفاری بسیار کم می‌باشد و نمی‌توان از این تعداد تصویر برای آموزش شبکه عصبی

عمیق استفاده نمود در همین راستا، در مرحله‌ی نخست از یادگیری انتقالی برای استخراج ویژگی‌های سطح بالا در تصاویر سرمه‌های حفاری استفاده شده است. لازم به ذکر است که معماری مناسب از شبکه عصبی کانولوشن در دقت و سطوح معنایی ویژگی‌ها بسیار تاثیرگذار است؛ لذا معماری VGG با ۱۶ لایه با توجه به بهترین عملکرد در مجموعه اعتبارسنجی و آزمون به عنوان معماری مناسب انتخاب شده است. سپس ویژگی‌های چند بعدی استخراج شده مرتبط به لایه آخر کانولوشن به بردار ویژگی تبدیل شده است. از آنجایی که تعداد و ابعاد نگاشت‌های ویژگی از شبکه‌ی عصبی کانولوشن بسیار زیاد می‌باشد و این تعداد از ویژگی‌های استخراج شده زمان محاسبات را افزایش خواهد داد، در مرحله‌ی بعد از تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) به منظور کاهش و انتخاب ویژگی‌های موثر در پیش‌بینی استفاده شده است. در گام بعدی از روش پیشنهادی، از مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین برای پیش‌بینی میزان سایش سرمه‌های حفاری استفاده شده است. بر اساس نتایج پژوهش، روش GPR عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی برای پیش‌بینی سایش سرمه‌های سه‌مخروطی دورانی داشته است.

فصل ہشتم

نتیجہ گیری و مشہادہ

۸-۱- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی از روش‌های آماری و یادگیری عمیق استفاده شده است. به همین علت مراحل اجرای تحقیق در دو بخش و سه فاز مجزا انجام شده است.

بخش اول: در بخش اول ابتدا عوامل موثر بر سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی در معدن مس سرچشمه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی از طریق افت وزنی، افت ابعادی و افت حجمی محاسبه شده و با تعیین پارامترهای موثر بر اساس نتایج برازش تک متغیره و تحلیل مؤلفه‌ای اصلی (PCA)، ارتباط بین این عوامل و سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی از طریق روش آماری تعیین شده است. در ادامه به منظور پیش‌بینی نرخ سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی در حین حفاری مدل‌های آماری خطی و غیرخطی توسعه داده شده است. در این تحقیق، عملکرد مدل‌های آماری ارائه شده بر اساس معیارهای ارزیابی چهارگانه، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2)، شاخص عملکرد (VAF) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) مورد بررسی قرار گرفته است و اولویت هریک از روش‌ها بر اساس معیارهای ارزیابی چهارگانه تعیین شده است. سپس با استفاده از سه استراتژی اولویت‌بندی میانگین رتبه‌ها، روش بردا و روش کپلند و در نهایت ادغام این روش‌ها، اولویت‌بندی مدل‌ها انجام شده است. به طور کلی نتایج حاصل از ارائه مدل تجربی با استفاده از روش آماری را می‌توان به صورت زیر عنوان کرد:

- بر اساس نتایج برازش تک متغیره از بین مشخصات فیزیکی سنگ‌ها، تنها میانگین اندازه دانه‌ها و ضریب بافت و از میان مشخصات مکانیکی سنگ‌ها تمامی پارامترها به غیر از سختی موس رابطه‌ی معناداری را با متغیر وابسته (سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی) نشان می‌دهند که نشان‌دهنده‌ی همبستگی بالای این پارامترها با نرخ سایش است. همچنین بر اساس این نتایج، پارامتر وابسته با شاخص مقاومت زمین‌شناسی، سیستم رده‌بندی توده سنگ، بار روی سرمته و سرعت دوران رابطه‌ی مستقیم و معناداری دارد. در مابقی متغیرها یا روند مشخصی مشاهده نشده است و یا دامنه‌ی تغییرات مقادیر پارامترها بسیار کوچک بوده است که این پارامترها را به یک

مشخصه تبدیل خواهد کرد و نمی‌توان از آن به عنوان متغیر یاد کرد. لازم به ذکر است که در این تحلیل آماری از نتایج افت وزنی به عنوان مقادیر سایش سرشته‌های سه‌مخروطی دورانی استفاده شده است زیرا در سایر روش‌های اندازه‌گیری شده نظیر افت حجمی و افت ابعادی روند مناسبی بین متغیر وابسته و مستقل در برآزش‌های تک متغیره دیده نشده است.

- به منظور کاهش تعداد متغیرهای تحقیق با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، تعداد مؤلفه‌های سیستم با استفاده از تعیین ماتریس مقادیر ویژه و روابط ارائه شده، از ۱۸ مؤلفه به دو مؤلفه کاهش یافته است. این دو مؤلفه ۸۸/۲۳٪ از کل واریانس متغیرها را نشان می‌دهند. بنابراین پارامترهای با همبستگی بالا (نسبت واریانس بالا) در مؤلفه‌ی اول (تخلخل، کوارتز محتوی معادل، شاخص دگرسانی شیمیایی، محتوای سیلیس، میانگین اندازه دانه‌ها، ضریب بافت، مقاومت فشاری، مقاومت کششی برزیلی، سختی واجهش اشمیت، فاکتور ساینده‌ی شیمازک، شاخص ساینده‌ی سنگ، سیستم رده‌بندی توده سنگ، شاخص مقاومت زمین‌شناسی، بار روی سرشته و سرعت دوران سرشته) به عنوان متغیرهای مؤثر بر نرخ سایش سرشته‌های سه‌مخروطی دورانی انتخاب شده و پارامترهای باقیمانده که تأثیر ناچیزی بر نرخ سایش دارند (سختی موس، محتوای آلومینا و چگالی)، از محاسبات حذف شده است.

- به منظور توسعه‌ی مدل‌های پیش‌بینی‌کننده و تخمین‌گر و اعتبارسنجی آن‌ها پایگاه داده به دو دسته داده با عنوان داده‌های آموزش و آزمون تقسیم شده است. لذا بر اساس نتایج برآزش تک متغیره و PCA متغیرهای مؤثر بر سایش سرشته‌های سه‌مخروطی دورانی شناسایی شده و به صورت تصادفی ۷۵٪ کل داده‌ها به عنوان داده‌های آموزش و ۲۵٪ دیگر برای داده‌های آزمون مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به توضیحات بیان شده، ضریب بافت سنگ (TC)، مقاومت فشاری (UCS)، مقاومت کششی برزیلی (BTS)، سختی واجهش اشمیت (SH)، فاکتور ساینده‌ی شیمازک (SF-a)، اندیس ساینده‌ی سنگ (RAI)، سیستم رده‌بندی توده سنگ (RMR)، شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، بار روی سرشته (WOB) و سرعت دوران سرشته (RPM) به عنوان

پارامترهای نهایی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است با توجه به اینکه بافت سنگ بر اساس میانگین اندازه دانه‌ها اندازه‌گیری می‌شود لذا میانگین اندازه دانه‌ها از پارامترهای نهایی حذف شده است.

- در ارائه مدل‌ها همواره سعی بر این است که تا حد ممکن مدل ساده (دارای پارامتر ورودی کمتر) و دارای جامعیت باشد. برای این منظور در این تحقیق دو پارامتر عملیاتی به دلیل اینکه قابل کنترل هستند در تمامی مدل‌ها به عنوان متغیر مستقل وجود خواهند داشت اما از میان پارامترهای فیزیکی، مکانیکی باید تعداد متغیرهای مستقل را به گونه‌ای انتخاب کرد که دارای سادگی و عدم همپوشانی باشند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که با توجه به اهمیت شرایط توده سنگ مشخصات ساختاری نیز در اکثر مدل‌ها به مانند پارامترهای عملیاتی مورد استفاده قرار گرفته است. پس مدل نهایی ترکیبی از پارامترهای عملیاتی، ساختاری و متغیرهای ذاتی سنگ بوده است. بر اساس توضیحات بیان شده برخی از پارامترها با یکدیگر دارای همبستگی بوده و نمی‌توان از آنها در کنار یکدیگر در ارائه مدل استفاده نمود از این رو در این تحقیق ۵۰ مدل خطی و ۵۰ مدل غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس معنی‌داری کل مدل و معنی‌داری ضرایب متغیرهای مستقل، آزمون دوربین واتسون برای بررسی استقلال خطاها و نمودار توزیع خطاها برای بررسی نرمال بودن خطاها برای روابط خطی و غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مسأله هم‌خطی بین متغیرها نیز با کنترل مقادیر ضریب تورم واریانس و تولرانس بررسی شده است. بر اساس توضیحات بیان شده، برای پیش‌بینی مقدار سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی در حین حفاری از ۱۰۰ مدل خطی و غیرخطی ارائه شده تنها ۲۱ مدل که شامل ۶ مدل خطی و ۱۵ مدل غیرخطی است مورد تایید واقع شده است.
- به منظور ارزیابی عملکرد هریک از مدل‌های توسعه یافته، از دسته داده‌های آزمون استفاده شده است. بر این اساس عملکرد مدل‌های توسعه یافته بر اساس معیارهای ارزیابی چهارگانه، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2)، شاخص عملکرد (VAF) و میانگین درصد

خطای مطلق (MAPE) مورد بررسی قرار گرفته و اولویت‌بندی هریک از مدل‌ها بر اساس سه استراتژی اولویت‌بندی شامل میانگین رتبه‌ها، روش بردا و روش کپلند و ادغام این روش‌ها انجام شده است. ادغام رتبه‌بندی‌ها نشان می‌دهد که بهترین مدل آماری پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی مدل رگرسیون غیرخطی است که در آن متغیرهای مستقل شامل، بار روی سرمته (WOB)، مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) است. مدل آماری نهایی پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی به صورت رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است.

$$BW = 10^{-2.911} \times WOB^{0.417} \times UCS^{0.153} \times GSI^{1.591} \quad (۸-۱)$$

- در این تحقیق به منظور تعیین مقدار تأثیر پارامترهای ورودی بر روی هدف از آنالیز حساسیت، برای مدل‌ها استفاده شده است. با توجه به اینکه متغیرهای مستقل بهترین مدل پیش‌بینی شامل بار روی سرمته، مقاومت فشاری تک محوری و شاخص مقاومت زمین‌شناسی بوده، لذا اهمیت این پارامترها بر روی خروجی مورد نظر (سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی) نیز بررسی شده است. با توجه به توضیحات فوق، طبق نتایج تحلیل حساسیت، بار روی سرمته (WOB)، همواره دارای بیشترین تأثیر در خروجی بهترین مدل بوده است و از این رو مهم‌ترین پارامتر مدل محسوب می‌شود. به همین دلیل باید این پارامتر با دقت بیشتری اندازه‌گیری شود چرا که تغییرات کوچک در مقدار آن به تغییرات اساسی در سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی منجر می‌شود.

بخش دوم: در بخش دوم تحقیق به علت پیشرفت‌های اخیر استفاده از یادگیری عمیق در زمینه بینایی رایانه و عملکرد مناسب این روش‌ها از یادگیری عمیق برای پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی استفاده شده است. در این راستا بر اساس روش پیشنهادی، از یک مجموعه داده تصاویر عکس‌برداری شده از معدن مس سرچشمه برای پیش‌بینی میزان سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب روش پیشنهادی در پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی

دورانی می‌باشد. نتایج حاصل از ارائه مدل پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی با استفاده از یادگیری عمیق را می‌توان به صورت زیر عنوان کرد:

- با توجه به تعداد پایین تصاویر عکس‌برداری شده از سرمته‌های حفاری و عدم وجود تعادل در توزیع تصاویر در پیش‌بینی این نوع از کاربردها، استفاده از روش‌های سنتی یادگیری ماشین برای استخراج ویژگی نمی‌تواند عملکرد مناسبی را از خود نشان دهد. در سال‌های اخیر یکی از روش‌های موثر برای استخراج ویژگی‌ها در مجموعه داده‌های پیچیده و کوچک، روش یادگیری انتقالی بر اساس یادگیری عمیق بوده است. در این پژوهش از یادگیری انتقالی بر اساس ویژگی‌های استخراج شده از آموزش بر روی مجموعه داده بزرگ ImageNet استفاده شده است. همانطور که در نتایج این پژوهش نشان داده شده است، ویژگی‌های استخراج شده در تصاویر سرمته‌های حفاری توسط انتقال یادگیری از نظر بصری بسیار مناسب می‌باشد و می‌توان از این روش در این نوع از تصاویر به دلیل تعداد پایین تصاویر استفاده شود.
- در این کاربرد، استفاده از یادگیری عمیق برای استخراج ویژگی چندین مزیت دارد که از جمله آن می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:
 - مستقل بودن نسبت به اندازه ورودی: در واقع با توجه به ماهیت یادگیری عمیق، اندازه تصاویر ورودی نمی‌تواند در استخراج ویژگی در لایه‌های بالاتر تاثیر چندانی داشته باشد.
 - چرخش و تغییر زاویه تصویر برداری: با توجه به این نکته که تصاویر در محیط ایزوله دریافت نمی‌شود و از طرفی دستگاه‌ها دارای شرایط متفاوت بوده‌اند یادگیری عمیق در استخراج این نوع از ویژگی‌ها عملکرد مناسبی داشته است.
 - تغییرات شرایط محیطی و روشنایی: ترکیب لایه‌های مختلف از شبکه‌های عمیق تاثیر تغییرات محیطی و روشنایی تا حد امکان کاهش می‌یابد در همین راستا ویژگی‌های استخراج شده تا حد امکان در این شرایط محیطی مناسب ارزیابی شده‌اند.
- انتخاب معماری مناسب در یادگیری انتقالی با توجه به کاربرد آن، بسیار مهم و حیاتی می‌باشد.

در همین راستا معماری شبکه VGG با ۱۶ لایه، عملکرد مناسبی را در این پژوهش در مجموعه اعتبارسنجی و آزمون داشته است.

- همواره ویژگی‌های استخراج شده، دارای ابعاد و تعداد نگاشت‌های ویژگی بالا بوده است. همچنین استخراج ویژگی‌های موثر و رابطه‌ی بین آنها به دلیل پیچیدگی این نوع از ویژگی‌ها به سادگی امکان پذیر نمی‌باشد. در همین راستا در این پژوهش از روش کاهش ویژگی PCA برای استخراج و ارزش‌دهی به ویژگی‌ها استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده‌ی این نکته می‌باشد که استفاده از روش‌های کاهش ویژگی سبب افزایش دقت پیش‌بینی و کاهش زمان اجرا می‌شود.
- انتخاب تعداد ویژگی در روش‌های کاهش ویژگی می‌تواند در دقت عملکرد این نوع از کاربردها بسیار موثر باشد. در همین راستا بعد از تحلیل مقادیر ویژه استخراج شده توسط PCA و ارزیابی روش در مجموعه اعتبارسنجی تعداد ۳۵ ویژگی بعد از نگاشت ویژگی برای پیش‌بینی مجموعه آزمون مورد استفاده قرار گرفته است که این تعداد نشان دهنده عملکرد روش پیشنهادی می‌باشد.
- الگوریتم‌های یادگیری ماشین به منظور خوشه‌بندی، طبقه‌بندی و پیش‌بینی (بر اساس رگرسیون)، در زمینه‌های نظارت شده و بدون نظارت، مورد استفاده قرار می‌گیرند. لذا در این تحقیق از مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین بر پایه رگرسیون شامل روش‌های رگرسیون خطی (LR)، رگرسیون درختی (رگرسیون درخت تصمیم دودویی) (BRDT)، رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)، رگرسیون فرایند گاوسی (GPR) و رگرسیون جمعی (ER) برای پیش‌بینی میزان سایش سرمت‌های حفاری استفاده شده است. سپس عملکرد هریک از مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمت‌های سه‌مخروطی دورانی همانند مدل‌های آماری برای دسته داده‌های آزمون بر اساس چهار معیار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2)، شاخص عملکرد (VAF) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) مورد ارزیابی قرار گرفته است. پس از تعیین مقادیر چهار معیار ارزیابی برای مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر یادگیری ماشین، رتبه هر معیار برای هر مدل تعیین شده است. در این مرحله پس از تعیین رتبه هر معیار در هر مدل بر اساس رتبه‌بندی معیارهای چهارگانه، اولویت‌بندی

مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی از طریق روش‌های میانگین رتبه‌ها، روش بردا و روش کپ‌لند مشخص شده است. در انتها با استفاده از روش ادغام، رتبه‌بندی نهایی هر یک از مدل‌های پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی تعیین شده است.

- بر اساس نتایج بدست آمده از رتبه‌بندی مدل‌های پیش‌بینی، رگرسیون فرایند گوسی (GPR) به عنوان بهترین مدل پیش‌بینی سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی انتخاب شده است.
- لازم به ذکر است می‌توان از این مدل جدید توسعه‌یافته به منظور پیش‌بینی سایش سرمته‌های حفاری در معادن مختلف بهره برد.

۸-۲- پیشنهادها

با توجه به نتایج و تجارب این پژوهش، توسعه‌ی پایگاه داده، تنظیم دستگاه حفاری، انتخاب سرمته‌ی مناسب و ارتقای دانش فنی را می‌توان به عنوان حوزه‌های پیشنهادی برای بهبود و توسعه‌ی ارزیابی عملکرد سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی ارائه کرد:

- **توسعه‌ی پایگاه داده:** در این تحقیق از ۱۰ نمونه سنگ و ۲۹ سرمته از معدن مس سرچشمه برای توسعه‌ی مدل‌ها استفاده شده است. به طور واضح افزایش تعداد مطالعه‌ی موردی با شرایط محیطی متفاوت (بررسی حفاری دورانی دیگر معادن) در ایجاد پایگاه داده می‌تواند موجب افزایش جامعیت مدل‌ها شود.
- **تنظیم دستگاه حفاری:** یکی از مواردی مهمی که تاثیر مستقیمی بر سایش سرمته‌های حفاری دارد تنظیمات پیش‌فرض دستگاه حفاری می‌باشد. در این تحقیق پارامترهای عملیاتی نظیر بار روی سرمته به عنوان کلیدی‌ترین پارامتر موثر بر سایش سرمته‌های سه‌مخروطی دورانی معرفی شده است لذا میزان تغییرات این پارامتر تاثیر مستقیمی بر سایش سرمته‌ها خواهد داشت. با توجه به اینکه اپراتورهای دستگاه حفاری بیشتر از بیشینه مقدار پیش‌فرض دستگاه برای حفاری چال‌های انفجاری استفاده می‌کنند لذا با کاهش مقادیر پیش‌فرض پارامترهای عملیاتی دستگاه حفاری با استفاده از تنظیمات سیستم‌های برقی آنها، میزان

مصرف سرمته به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت که موجب بهینه‌سازی مصرف سرمته، سودآوری و کاهش هزینه‌های حفاری خواهد شد.

- **انتخاب سرمته‌ی مناسب:** انتخاب سرمته مناسب با توجه به جنس سنگ از دیگر مواردی

است که کمتر مورد توجه خریداران این بخش مهم حفاری بوده است. طبق بررسی میدانی انجام شده از سرمته‌های مورد استفاده در معدن مس سرچشمه، تنها چند مدل مناسب این سازند زمین‌شناسی می‌باشند و دیگر سرمته‌ها با انتخابی نادرست هزینه‌های حفاری را افزایش داده‌اند. به عنوان مثال سرمته‌های ۸/۵ اینچی شرکت ولگابارماش برای سازند نرم طراحی شده است در صورتی که در معدن مس سرچشمه برای سازند متوسط تا سخت مورد استفاده قرار گرفته است.

- **ارتقای دانش فنی:** یکی دیگر از مواردی که می‌تواند به کاهش مصرف سرمته‌ها و افزایش

راندمان و کاهش هزینه‌های حفاری منجر شود ارتقای دانش فنی اپراتور دستگاه حفاری است. لازم به ذکر است هر سرمته با توجه به سنگی که در آن حفاری می‌کند و شرایط عملیاتی که در آن قرار دارد با نوع خاصی از سایش یا خرابی سرمته مواجه می‌شود. افزایش دانش فنی اپراتور کمک خواهد کرد که با توجه به نوع خرابی به وجود آمده از تکرار آن در موارد مشابه جلوگیری کند.

منابع و مراجع

- اصانلو م، (۱۳۸۶) "روش‌های حفاری"، چاپ سوم، مرکز نشر صدا، ص ۴۹۴.
- رمضان‌نیا طلوتی ر، (۱۳۹۲) "ارزیابی ریسک زمین‌شناسی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در تونل‌سازی مکانیزه (مطالعه موردی تونل انتقال آب نوسود)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- عطایی م، (۱۳۹۵) "تصمیم‌گیری چند معیاره"، چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
- فرشادفر ع، (۱۳۸۴) "اصول و روش‌های آماری چند متغیره"، چاپ دوم، انتشارات طاق بستان، ۷۳۴ صفحه.
- فهیمی فر ا و سروش ح، (۱۳۸۰) "آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها"، جلد اول، چاپ اول، انتشارات شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، ۷۱۹ صفحه.
- مومنی م و قیومی ع. ف، (۱۳۹۱) "تحلیل‌های آماری با استفاده از SPSS"، چاپ هفتم، ویرایش چهارم، انتشارات گنج شایگان، ۲۹۶ صفحه.
- والپول ر، (۱۳۷۵) "مقدمه‌ای بر احتمالات و آمار کاربردی"، ترجمه میربهادر قلی آریانژاد و محمد ذهبیون، چاپ نهم، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
- وایزبرگ س، (۱۳۷۴) "رگرسیون خطی کاربردی"، ترجمه حسینعلی نیرومند، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
- Abbas, R. K. (2018). A review on the wear of oil drill bits (conventional and the state of the art approaches for wear reduction and quantification). *Engineering Failure Analysis*, 90, 554-584.
- Adebayo, B. (2011). Effect of textural characteristics of rock on bit wear. *AU Journal of Technology*, 14(4).
- Adebayo, B. (2019). Evaluation of the performance of Atlas Copco SDR4 Rotary drill in Sagamu limestone formation, Nigeria. *FUTA Journal of Engineering and Engineering Technology*, 13(1), 12-19.
- Adebayo, B., & Adetula, B. (2013). Evaluation of physical and mechanical properties of rock for drilling condition classification. *World Journal of Engineering*, 10(4), 359-366.
- Adebayo, B., & Akande, J. M. (2015). Analysis of Button Bit Wear and Performance of Down-The-Hole Hammer Drill. *Ghana Mining Journal*, 15(2), 36-41.
- Adebayo, B., & Akeju, V. O. (2012a). Evaluation of Tri-cone Bit Performance on Limestone Formation. In *Advanced Materials Research* (Vol. 367, pp. 555-560). Trans Tech Publications.
- Adebayo, B., & Akeju, V. O. (2012b). Correlation of Limestone Properties with Bit Performance Variables for LIMROCKWARE2010 Development. *Journal of Mining World Express*, 1(2), 34-38.
- Adebayo, B., & Bello, W. A. (2012). Property Analysis for Correlation of Specific Energy with Penetration Rate and Bit Wear Rate. In *Advanced Materials Research* (Vol. 367, pp. 547-553). Trans Tech Publications.

- Adebayo, B., & Okewale, I. A. (2007). Analysis of the potential of some Nigerian rocks to wear drill bit. *Aust J Technol*, 11, 1-5.
- Adebayo, B., Opafunso, Z. O., & Akande, J. M. (2010). Drillability and strength characteristics of selected rocks in Nigeria. *AU JT*, 14(1), 56-60.
- Angseryd, J., From, A., Wallin, J., Jacobson, S., & Norgren, S. (2013). On a wear test for rock drill inserts. *Wear*, 301(1), 109-115.
- Arefi, B., Settari, A., & Angman, P. (2005). Analysis and simulation of erosion in drilling tools. *Wear*, 259(1), 263-270.
- Babatunde, A. (2015). Development of rock bitwear models for selected rocks in Nigeria using dominant rock properties. *World Journal of Engineering*, 12(4), 331-340.
- Bailey, S. G., & Perrott, C. M. (1974). Wear processes exhibited by WC-Co rotary cutters in mining. *Wear*, 29(1), 117-128.
- Bell, F. G. (Ed.). (2013). *Engineering in rock masses*. Elsevier.
- Bengio, Y. (2009). Learning deep architectures for AI. *Foundations and trends in Machine Learning*, 2(1), 1-127.
- Beste, U., Coronel, E., & Jacobson, S. (2006). Wear induced material modifications of cemented carbide rock drill buttons. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 24(1), 168-176.
- Beste, U., Hartzell, T., Engqvist, H., & Axén, N. (2001). Surface damage on cemented carbide rock-drill buttons. *Wear*, 249(3), 324-329.
- Beste, U., & Jacobson, S. (2008). A new view of the deterioration and wear of WC/Co cemented carbide rock drill buttons. *Wear*, 264(11), 1129-1141.
- Beste, U., Jacobson, S., & Hogmark, S. (2008). Rock penetration into cemented carbide drill buttons during rock drilling. *Wear*, 264(11), 1142-1151.
- Blombery, R. I., Perrot, C. M., & Robinson, P. M. (1974). Abrasive wear of tungsten carbide-cobalt composites. I. Wear mechanisms. *Materials Science and Engineering*, 13(2), 93-100.
- Boomeri, M., Nakashima, K., & Lentz, D. R. (2010). The Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Kerman, Iran: a mineralogical analysis of the igneous rocks and alteration zones including halogen element systematics related to Cu mineralization processes. *Ore Geology Reviews*, 38(4), 367-381.
- Bowles, M. (2015). *Machine Learning in Python: Essential Techniques for Predictive Analysis*.
- Breiman, L. (1996). Bagging predictors. *Machine learning*, 24(2), 123-140.
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., & Stone, C. (1984). Classification and regression trees. *Belmont: Wadsworth*.
- Brownlee, J. (2017). Master machine learning algorithms, Retrieved from.
- Bruce, P., Bruce, A., & Gedeck, P. (2020). *Practical statistics for data scientists: 50+ essential concepts using R and Python*. O'Reilly Media.
- Capik, M., & Batmunkh, B. (2021). Measurement, Prediction, and Modeling of Bit Wear During Drilling Operations. *Journal of Mining and Environment*, 12(1), 15-30.

- Capik, M., & Yilmaz, A. O. (2021). Development models for the drill bit lifetime prediction and bit wear types. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 139, 104633.
- Carpinteri, A., Dimastrogiovanni, L., & Pugno, N. (2005). Fractal coupled theory of drilling and wear. *International journal of fracture*, 131(2), 131-142.
- Cooper, G. A. (2002). Proposal for the real-time measurement of drill bit tooth wear. *Transactions - Geothermal Resources Council*, 189-192.
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine learning*, 20(3), 273-297.
- Deka, P. C. (2014). Support vector machine applications in the field of hydrology: a review. *Applied Soft Computing*, 19, 372-386.
- Deng, L., & Yu, D. (2014). Deep learning: methods and applications. *Foundations and Trends® in Signal Processing*, 7(3-4), 197-387.
- Dogruoz, C., Bolukbasi, N., Rostami, J., & Acar, C. (2016). An Experimental Study of Cutting Performances of Worn Picks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(1), 213-224.
- Dudek, R., & Władzielczyk, K. (2018). Wear Testing of Buttons in Bits for Blasthole Drilling. *Tribologia*.
- Ebden, M. (2015). Gaussian processes: A quick introduction. *arXiv preprint arXiv:1505.02965*.
- Engelbrecht, A. P. (2007). *Computational intelligence: an introduction*. John Wiley & Sons.
- Ersoy, A., & Waller, M. D. (1995a). Textural characterisation of rocks. *Engineering Geology*, 39(3-4), 123-136.
- Ersoy, A., & Waller, M. D. (1995b). Wear characteristics of PDC pin and hybrid core bits in rock drilling. *Wear*, 188(1), 150-165.
- Ersoy, A., & Waller, M. D. (1997). Drilling detritus and the operating parameters of thermally stable PDC core bits. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(7), 1109-1123.
- Fink, J. B., Hoenig, S. A., & Griffith, J. L. (1986). Electrochemical aspects of WC-Co drill bit wear. *Wear*, 108(1), 97-101.
- Gee, M. G., Gant, A., & Roebuck, B. (2007). Wear mechanisms in abrasion and erosion of WC/Co and related hardmetals. *Wear*, 263(1), 137-148.
- Ghosh, R., Schunnesson, H., & Kumar, U. (2016). Evaluation of operating life length of rotary tricone bits using Measurement While Drilling data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 83, 41-48.
- Girshick, R., Donahue, J., Darrell, T., & Malik, J. (2014). Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 580-587).
- Gokceoglu, C. (2002). A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara agglomerates from their petrographic composition. *Engineering Geology*, 66(1), 39-51.
- Gokhale, B. V. (2010). *Rotary drilling and blasting in large surface mines*. CRC Press.

- González, S., García, S., Del Ser, J., Rokach, L., & Herrera, F. (2020). A practical tutorial on bagging and boosting based ensembles for machine learning: Algorithms, software tools, performance study, practical perspectives and opportunities. *Information Fusion*, 64, 205-237.
- Grady, D. (1999). Impact failure and fragmentation properties of tungsten carbide. *International journal of impact engineering*, 23(1), 307-317.
- Güney, A., Altındag, R., Yavuz, H., & Saraç, S. (2005). Evaluation of the relationships between Schmidt hardness rebound number and other (engineering) properties of rocks. In *Proceedings of the 19th International Mining Congress and Fair of Turkey (IMCET 2005)*, Izmir, Turkey.
- Gu, J., Wang, Z., Kuen, J., Ma, L., Shahroudy, A., Shuai, B., Liu, T., Wang, X., Wang, G., Cai, J. and Chen, T. (2018). Recent advances in convolutional neural networks. *Pattern Recognition*, 77, 354-377.
- Guo, Y., Liu, Y., Oerlemans, A., Lao, S., Wu, S., & Lew, M. S. (2016). Deep learning for visual understanding: A review. *Neurocomputing*, 187, 27-48
- Gupta, A., Chattopadhyaya, S., & Hloch, S. (2013). Critical investigation of wear behaviour of WC drill bit buttons. *Rock mechanics and rock engineering*, 46(1), 169-177.
- Hastie, T., & Tibshirani, R. (2009). & Friedman, J. (2008). The Elements of Statistical Learning; Data Mining, Inference and Prediction.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2015). Delving deep into rectifiers: Surpassing human-level performance on imagenet classification. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision* (pp. 1026-1034).
- Heinrichs, J., Olsson, M., & Jacobson, S. (2017). Initial deformation and wear of cemented carbides in rock drilling as examined by a sliding wear test. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 64, 7-13.
- Hinton, G. E., Osindero, S., & Teh, Y. W. (2006). A fast learning algorithm for deep belief nets. *Neural computation*, 18(7), 1527-1554.
- Hoseinie, S. H., Aghababaei, H., & Pourrahimian, Y. (2008). Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index (RDi). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(1), 1-10.
- Hoseinie, S. H., Ataei, M., & Osanloo, M. (2009). A new classification system for evaluating rock penetrability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(8), 1329-1340.
- Howarth, D. F., & Rowlands, J. C. (1987). Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 20(1), 57-85.
- Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L., & Weinberger, K. Q. (2017). Densely connected convolutional networks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 4700-4708).
- Huang, S. L., & Wang, Z. W. (1997). The mechanics of diamond core drilling of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3), 134-e1.

- Hussian, S., Mohammad, N., Ur Rehman, Z., Khan, N. M., Shahzada, K., Ali, S., ... & Sherin, S. (2020). Review of the geological strength index (GSI) as an empirical classification and rock mass property estimation tool: origination, modifications, applications, and limitations. *Advances in Civil Engineering*, 2020.
- Hustrulid, W. A., Kuchta, M., & Martin, R. K. (2013). *Open Pit Mine Planning and Design, Two Volume Set & CD-ROM Pack*. CRC Press.
- Hutcheson, G. D. (2011). Ordinary least-squares regression. *L. Moutinho and GD Hutcheson, The SAGE dictionary of quantitative management research*, 224-228.
- Hutcheson, G. D., & Sofroniou, N. (1999). *The multivariate social scientist: Introductory statistics using generalized linear models*. Sage.
- Hutchings, I. M., & Shipway, P. (1992). *Tribology: friction and wear of engineering materials*.
- Ivanicová, L., Lazarová, E., KruFáková, M., Labaš, M., Feriancikova, K., & Behunová, D. (2018, May). Indirect prediction of drill bit wear in andesite drilling. In *2018 19th International Carpathian Control Conference (ICCC)* (pp. 79-84). IEEE.
- Jacobson, F. (2018). Wear and degradation of Co, Fe and Ni-based cemented carbides against sandstone and granite.
- Jimeno, E. L., Jimino, C. L., & Carcedo, A. (1995). *Drilling and blasting of rocks*. CRC Press.
- Jernelv, I. L., Hjelme, D. R., Matsuura, Y., & Aksnes, A. (2020). Convolutional neural networks for classification and regression analysis of one-dimensional spectral data. *arXiv preprint arXiv:2005.07530*.
- Jong, Y. H., & Lee, C. I. (2004). Influence of geological conditions on the powder factor for tunnel blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 533-538.
- Karasawa, H., Ohno, T., Miyazaki, K., & Eko, A. (2016). Experimental results on the effect of Bit wear on torque response. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 84, 1-9.
- Katiyar, P. K., Singh, P. K., Singh, R., & lava Kumar, A. (2016). Modes of failure of cemented tungsten carbide tool bits (WC/Co): A study of wear parts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 54, 27-38.
- Kim, D., Jeon, J., & Kim, D. (2019). Predictive Modeling of Pavement Damage Using Machine Learning and Big Data Processing. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 19(1), 95-107.
- Konyashin, I., & Ries, B. (2014a). Wear damage of cemented carbides with different combinations of WC mean grain size and Co content. Part I: ASTM wear tests. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 46, 12-19.
- Konyashin, I., & Ries, B. (2014b). Wear damage of cemented carbides with different combinations of WC mean grain size and Co content. Part II: Laboratory performance tests on rock cutting and drilling. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 45, 230-237.
- Kopeliovich, D. (2015). Mechanisms of wear. *SubsTech: Substances & Technologies*, 12.
- Larsen-Basse, J. (1973). Wear of hard-metals in rock drilling: a survey of the literature. *Powder*

Metallurgy.

- Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In *Advances in neural information processing systems* (pp. 1097-1105).
- Larsen-Basse, J. (1973). Wear of hard-metals in rock drilling: a survey of the literature. *Powder Metallurgy*, 16(31), 1-32.
- Larsen-Basse, J. (1983). Effect of composition, microstructure, and service conditions on the wear of cemented carbides. *JOM*, 35(11), 35-42.
- Larsen-Basse, J., & Koyanagi, E. T. (1979). Abrasion of WC-Co alloys by quartz. *Journal of Lubrication Technology*, 101(2), 208-211.
- LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., & Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278-2324.
- Loukadakis, M., Cano, J. and O'Boyle, M. (2018) Accelerating Deep Neural Networks on Low Power Heterogeneous Architectures. *Eleventh International Workshop on Programmability and Architectures for Heterogeneous Multicores (MULTIPROG-2018)*, Manchester, UK, 24 Jan 2018.
- Lowell, J.D. and Guilbert, J.M., 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4), pp.373-408.
- Majeed, Y., Bakar, M. A., & Butt, I. A. (2020). Abrasivity evaluation for wear prediction of button drill bits using geotechnical rock properties. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(2), 767-787.
- Marcelino, P. (2018). Transfer learning from pre-trained models. *Towards Data Science*.
- Mazen, A. Z., Rahmanian, N., Mujtaba, I. M., & Hassanpour, A. (2019). Estimation of Dulling Rate and Bit Tooth Wear Using Drilling Parameters and Rock Abrasiveness. *Journal of Petroleum Technology*, 9(3), 1-21.
- McGehee, D. Y., Dahlem, J. S., Gieck, J. C., Kost, B., Lafuze, D., Reinsvold, C. H., & Steinke, S. C. (1992). The IADC Roller Bit Classification System. In *SPE/IADC Drilling Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- Miller, D., & Ball, A. (1990). An instrumented laboratory machine for the evolution of drill bit performance. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 90(10), 283-288.
- Miller, D., & Ball, A. (1991). The wear of diamonds in impregnated diamond bit drilling. *Wear*, 141(2), 311-320.
- Mohamed, H., Salah, M., Nadaoka, K., & Zahran, M. (2017). Assessment of proposed approaches for bathymetry calculations using multispectral satellite images in shallow coastal/lake areas: a comparison of five models. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(2), 42.
- Montgomery, R. S. (1968). The mechanism of percussive wear of tungsten carbide composites. *Wear*, 12(5), 309-329.

- Montgomery, R. S. (1969). Percussive wear properties of cemented carbides. *Trans Soc Min Eng AIME*, 244(2), 153-157.
- Moseley, S. G., Bohn, K. P., & Goedickemeier, M. (2009). Core drilling in reinforced concrete using polycrystalline diamond (PCD) cutters: Wear and fracture mechanisms. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27(2), 394-402.
- Murali, S., Deepu, R., & Shivamurthy, R. C. (2021). ResNet-50 vs VGG-19 vs Training from Scratch: A comparative analysis of the segmentation and classification of Pneumonia from chest x-ray images. *Global Transitions Proceedings*.
- Murugan, P. (2017). Feed forward and backward run in deep convolution neural network. *arXiv preprint arXiv:1711.03278*.
- Naganawa, S. (2012). Feasibility study on roller-cone bit wear detection from axial bit vibration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 82, 140-150.
- Nahak, S., Dewangan, S., & Chattopadhyaya, S. (2015). Discussion on Wear Phenomena in Cemented Carbide. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11, 284-293.
- Neal, R. M. (1997). Monte Carlo implementation of Gaussian process models for Bayesian regression and classification. *arXiv preprint physics/9701026*.
- Nesbitt, H., & Young, G. M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *nature*, 299(5885), 715-717.
- Nouari, M., List, G., Girot, F., & Gehin, D. (2005). Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(12), 1436-1442.
- Olovsjö, S., Johanson, R., Falsafi, F., Bexell, U., & Olsson, M. (2013). Surface failure and wear of cemented carbide rock drill buttons—the importance of sample preparation and optimized microscopy settings. *Wear*, 302(1), 1546-1554.
- Pan, S. J., & Yang, Q. (2009). A survey on transfer learning. *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*, 22(10), 1345-1359.
- Paul, R., Hawkins, S. H., Balagurunathan, Y., Schabath, M., Gillies, R. J., Hall, L. O., & Goldgof, D. B. (2016). Deep feature transfer learning in combination with traditional features predicts survival among patients with lung adenocarcinoma. *Tomography*, 2(4), 388-395.
- Perrott, C. M. (1979). Tool materials for drilling and mining. *Annual Review of Materials Science*, 9(1), 23-50.
- Piri, M., Hashemolhosseini, H., Mikaeil, R., Ataei, M., & Baghbanan, A. (2020). Investigation of wear resistance of drill bits with WC, Diamond-DLC, and TiAlSi coatings with respect to mechanical properties of rock. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 87, 105113.
- Plinninger, R. J., Spaun, G., & Thuro, K. (2002a). Predicting tool wear in drill and blast. *Tunnels & Tunneling International Magazine*, 1-5.
- Plinninger, R. J., Spaun, G., & Thuro, K. (2002b). Prediction and Classification of tool wear in

- drill and blast tunnelling. In *Engineering Geology for Developing Countries—Proceedings of the 9th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment, Durban* (pp. 16-20).
- Plinninger, R. J. (2008). Abrasiveness assessment for hard rock drilling. *Geomechanics and Tunnelling*, 1(1), 38-46.
- Praharaj, S. (2009). *Processing and Characterization of Fly Ash - Quartz Coatings* (Doctoral dissertation, National Institute of Technology, Rourkela).
- Qiu, J., Wang, H., Lu, J., Zhang, B., & Du, K. L. (2012). Neural network implementations for PCA and its extensions. *International Scholarly Research Notices*, 2012.
- Rafezi, H., Hassani, F., & Yapici, G. G. (2020). Practicality of Tricone Bit Wear Condition Assessment. *Experimental Results*, 1, e35, 1–6.
- Rashidi, B., Hareland, G., & Nygaard, R. (2008). Real-time drill bit wear prediction by combining rock energy and drilling strength concepts. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- Rashidi, B., Hareland, G., Tahmeen, M., Anisimov, M., & Abdorazakov, S. (2010a). Real-Time Bit Wear Optimization Using the Intelligent Drilling Advisory System (Russian). In *SPE Russian Oil and Gas Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Rashidi, B., Hareland, G., & Wu, A. (2010b). New approach in real-time bit wear prediction. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- Rehman, H., Ali, W., Naji, A. M., Kim, J. J., Abdullah, R. A., & Yoo, H. K. (2018). Review of rock-mass rating and tunneling quality index systems for tunnel design: Development, refinement, application and limitation. *Applied Sciences*, 8(8), 1250.
- Reitz, R. W., & de Freitas Filho, P. J. (2018). Real-Time Simulation Method Using Monte Carlo and Clustering Algorithms: A Case Study Covering Drill Bit Wear. *J. Comput. Sci.*, 14(2), 273-285.
- Rezende, E., Ruppert, G., Carvalho, T., Theophilo, A., Ramos, F., & de Geus, P. (2018). Malicious software classification using VGG16 deep neural network's bottleneck features. In *Information Technology-New Generations* (pp. 51-59). Springer, Cham.
- Roweis, S. T., & Saul, L. K. (2000). Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding. *science*, 290(5500), 2323-2326.
- Saai, A., Bjørge, R., Dahl, F., Antonov, M., Kane, A., Diop, J. B., & Ojala, N. (2020). Adaptation of Laboratory tests for the assessment of wear resistance of drill-bit inserts for rotary-percussive drilling of hard rocks. *Wear*, 456, 203366.
- Saeidi, O., Elyasi, A., & Torabi1b, S. R. (2015). Wear Assessment of the WC/CO cemented carbide tricone drillbits in an open pit mine.
- Saeidi, O., Rostami, J., Ataei, M., & Torabi, S. R. (2014). Use of digital image processing techniques for evaluating wear of cemented carbide bits in rotary drilling. *Automation in Construction*, 44, 140-151.
- Saha, S. (2018). A comprehensive guide to convolutional neural networks—the ELI5 way.

- Sahoo, S. K., & Choudhary, B. S. (2017). Effect of uniaxial compressive strength of rock on penetration rate and bit wear rate of drill. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 65(8), 454-460.
- Sarker, I. H. (2021). Machine learning: Algorithms, real-world applications and research directions. *SN Computer Science*, 2(3), 1-21.
- Shahrabi, M. (2015). Drilling bits Abrasion Analysis Using DIP Techniques. *Int. J. Modern App. Physics*, 5(1), 37-41.
- Shankar, V. K., Kunar, B. M., Murthy, C. S., & Ramesh, M. R. (2020). Measurement of bit-rock interface temperature and wear rate of the tungsten carbide drill bit during rotary drilling. *Friction*, 8(6), 1073-1082.
- Shin, H. C., Roth, H. R., Gao, M., Lu, L., Xu, Z., Nogues, I., ... & Summers, R. M. (2016). Deep convolutional neural networks for computer-aided detection: CNN architectures, dataset characteristics and transfer learning. *IEEE transactions on medical imaging*, 35(5), 1285-1298.
- Shobha, G., & Rangaswamy, S. (2018). Machine learning. In *Handbook of statistics* (Vol. 38, pp. 197-228). Elsevier.
- Simonyan, K., & Zisserman, A. (2014). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv preprint arXiv:1409.1556*.
- Smola, A. J., & Schölkopf, B. (2004). A tutorial on support vector regression. *Statistics and computing*, 14(3), 199-222.
- Šporin, J. (2020). Characterisation of the Wear of the Roller Cone Drill Bit Caused by Improperly Chosen Drilling Regime. *RMZ-M&G*, 67, 01-12.
- Šporin, J., Balaško, T., Mrvar, P., Janc, B., & Vukelić, Ž. (2020). Change of the Properties of Steel Material of the Roller Cone Bit Due to the Influence of the Drilling Operational Parameters and Rock Properties. *Energies*, 13(22), 5949.
- Stachowiak, G., & Batchelor, A. W. (2013). *Engineering tribology*. Butterworth-Heinemann.
- Stupina, A. A., Shigin, A. O., Shigina, A. A., Karaseva, M. V., & Korpacheva, L. N. (2014). Control and management by resource of rolling cutter bits in drilling rock massif. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 1(21), 84-90.
- Suana, M., & Peters, T. (1982). The Cerchar abrasivity index and its relation to rock mineralogy and petrography. *Rock mechanics*, 15(1), 1-8.
- Suzuki T. Ohtaguchi K. and Koide K. (1994). Correlation between flash points and chemical structures of organic compounds, using principal component analysis. *Int. j. of. Chemical Engineering*, 34(3), 393-402.
- Swick, K. J., Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (1992). Mechanism of wear of rotary-percussive drilling bits and the effect of rock type on wear. *Tribology international*, 25(1), 83-88.
- Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., ... & Rabinovich, A. (2015a). Going deeper with convolutions. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 1-9).
- Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J., & Wojna, Z. (2015b). *Rethinking the Inception architecture for computer vision*. arXiv 1512.00567.

- Teti, R., Jemielniak, K., O'Donnell, G., & Dornfeld, D. (2010). Advanced monitoring of machining operations. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 59(2), 717-739.
- Thuro, K. (1997). Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunnelling. *Geologische Rundschau*, 86(2), 426-438.
- Tiryaki, B. (2008). Application of artificial neural networks for predicting the cuttability of rocks by drag tools. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(3), 273-280.
- Tkalich, D., Kane, A., Saai, A., Yastrebov, V.A., Hokka, M., Kuokkala, V.T., Bengtsson, M., From, A., Oelgardt, C. and Li, C.C. (2017). Wear of cemented tungsten carbide percussive drill-bit inserts: Laboratory and field study. *Wear*, 386, 106-117.
- Toolbox, G. O. (2019). User's Guide (R2019a), The MathWorks. Inc, Natick, Massachusetts, United States.
- Torres, Y., Tarrago, J. M., Coureaux, D., Tarrés, E., Roebuck, B., Chan, P., ... & Mingard, K. P. (2014). Fracture and fatigue of rock bit cemented carbides: Mechanics and mechanisms of crack growth resistance under monotonic and cyclic loading. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 45, 179-188.
- Turk, M. A., & Pentland, A. P. (1991). Face recognition using eigenfaces. In *Proceedings. 1991 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 586-587). IEEE Computer Society.
- Tze-Pin, L., Hood, M., Cooper, G. A., & Xiaohong, L. (1992). Wear and failure mechanisms of polycrystalline diamond compact bits. *Wear*, 156(1), 133-150.
- Vapnik, V. (2013). The nature of statistical learning theory. *Springer science & business media*.
- Verhelst, M., & Moons, B. (2017). Embedded deep neural network processing: Algorithmic and processor techniques bring deep learning to iot and edge devices. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 9(4), 55-65.
- Wahab, N., Khan, A., & Lee, Y. S. (2019). Transfer learning based deep CNN for segmentation and detection of mitoses in breast cancer histopathological images. *Microscopy*.
- Wang, Z., Huang, W., & Ma, Y. (2014). Micro-scale abrasive wear behavior of medical implant material Ti-25Nb-3Mo-3Zr-2Sn alloy on various friction pairs. *Materials Science and Engineering: C*, 42, 211-218.
- Wang, C., & Li, S. (2018). Evaluation of Rock Abrasiveness Based on PDC Compact Wear Model. *Recent Patents on Engineering*, 12(2), 153-163.
- Williams, C. K., & Rasmussen, C. E. (2006). *Gaussian processes for machine learning* (Vol. 2, No. 3, p. 4). Cambridge, MA: MIT press.
- Wu, A., Hareland, G., & Rashidi, B. (2010). The effect of different rock types and roller cone insert types and wear on ROP (rate of penetration). In *44th US Rock Mechanics Symposium and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association.
- Wu, B., Liu, Z., Yuan, Z., Sun, G., & Wu, C. (2017). Reducing overfitting in deep convolutional neural networks using redundancy regularizer. In *International Conference on Artificial Neural Networks* (pp. 49-55). Springer, Cham.

- Xie, S., Girshick, R., Dollár, P., Tu, Z., & He, K. (2017). Aggregated residual transformations for deep neural networks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 1492-1500).
- Xuefeng, T., & Shifeng, T. (1994). The wear mechanisms of impregnated diamond bits. *Wear*, 177(1), 81-91.
- Yahiaoui, M., Paris, J. Y., Denape, J., & Dourfaye, A. (2015). Wear mechanisms of WC–Co drill bit inserts against alumina counterface under dry friction: Part 1—WC–Co inserts with homogenous binder phase content. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 48, 245-256.
- Yamashita, R., Nishio, M., Do, R. K. G., & Togashi, K. (2018). Convolutional neural networks: an overview and application in radiology. *Insights into imaging*, 9(4), 611-629.
- Yin, X., Chen, W., Wu, X., & Yue, H. (2017). Fine-tuning and visualization of convolutional neural networks. In *2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* (pp. 1310-1315). IEEE.
- Yu, H., & Kim, S. (2012). SVM Tutorial-Classification, Regression and Ranking. *Handbook of Natural computing*, 1, 479-506.
- Zeiler, M. D. (2013). *Hierarchical convolutional deep learning in computer vision* (Doctoral dissertation, New York University).
- Zeiler, M. D., & Fergus, R. (2014). Visualizing and understanding convolutional networks. In *European conference on computer vision* (pp. 818-833). Springer, Cham.

Abstract

Bits are one of the most important parts of drilling, due to the type of application and high costs. Wear of these tools are an important parameter for estimating the efficiency of drilling equipment in mining projects. Examining the parameters affecting the tricone rotary bits wear can prevent wasting time and additional costs of the drilling process. Therefore, in this study, statistical methods and deep learning have been used to predict the tricone rotary bits wear. In the first part, the tricone rotary bits wear has been calculated through weight loss, dimensional loss, and volumetric loss, and by determining the effective parameters based on the results of univariate analysis and Principal Component Analysis (PCA), the relationship between these factors and the tricone rotary bits wear has been determined through statistical methods. In this study, only 21 models, including 6 linear models and 15 nonlinear models, have been approved to predict the rate of tricone rotary bits wear while drilling. Also, due to recent advances in the use of deep learning in the field of computer vision and the proper performance of these methods, in the second part of the research, deep learning has been used to predict the tricone rotary bits wear. Due to the low number of images taken from drilling bits and the imbalance in the distribution of images of transfer learning based on the extracted features, training on the large ImageNet dataset has been used. Then the 16-layer VGG architecture is selected as the appropriate architecture according to the proper performance in the validation and test set. Then, due to the dimensions and high number of mappings of the extracted features, according to PCA, 35 features were used to predict the test set. Finally, to predict the wear rate of tricone rotary bits from regression-based machine learning models were used. It should be noted that the performance of the models has been examined based on four evaluation criteria. Then, using the three strategies of prioritizing the mean ranks, Borda and Copeland's method, finally using the arithmetic mean, the prioritization of the models has been done by aggregating the ranking of the above methods. The rank aggregation method shows that the best model for predicting the tricone rotary bits wear is the nonlinear regression model in which the independent variables include Weight On Bit (WOB), Uniaxial Compressive Strength (UCS) and Geological Strength Index (GSI). Also, based on the performance of the results obtained from the machine learning prediction models ranking, Gaussian Process Regression (GPR) has been selected as the best model for predicting the tricone rotary bits wear.

Keywords: Drilling, Tricone rotary bits, Wear, Statistical methods, Deep learning



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D. Thesis in Mining Engineering

**Providing a new empirical model to predict the
tricone rotary bits wear of open pit mines**

Prepared By:

Seyed Rasol Ramezannia

Supervisor:

Prof. Mohammad Ataei

Prof. Reza Kakaie

Advisor:

Dr. Seyed Hadi Hoseinie

Industrial Advisor:

Abdol Majid Salehi Nasab

September 2021