



دانشکده مهندسی معدن نفت و ژئوفیزیک

عنوان رساله دکتری

ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی

در فرآیند برش سنگ‌های سخت با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و

سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)

دانشجو: مسعود اخیانی

اساتید راهنما:

دکتر فرهنگ سرشکی

و

دکتر رضا میکائیل

استاد مشاور: دکتر محمد تاجی

رساله دکتری برای اخذ درجه دکتری

شهریور ۱۳۹۶

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

چکیده:

با توجه به وجود ذخایر غنی سنگ‌های ساختمانی در کشور و حداقل بودن میزان صادرات این محصول، که مسلماً می‌تواند ناشی از کیفیت پایین و هزینه تمام شده بالای سنگ‌های تولیدی باشد، استفاده از ابزار پیشرفته، تحقیقات و انجام آزمایش‌های دقیق در زمینه فرآیند برش می‌تواند تا حدی این مشکل را برطرف نماید. در این رابطه ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی و تعیین عوامل مؤثر بر آن در کاهش هزینه‌های تولید و افزایش عمر مفید ابزار برش در طراحی یک کارخانه فرآوری سنگ از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا پیش‌بینی میزان سایش دیسک‌های الماسی و تعیین پارامترهای مؤثر در آن در فرآیند برش سنگ‌های سخت لازم و ضروری می‌باشد. میزان سایش دیسک‌های الماسی به پارامترهایی نظیر مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها و مشخصات عملیاتی دستگاه برش بستگی دارد. در بخش نخست این تحقیق سیستم طبقه‌بندی جدیدی مبتنی بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ شامل چهار مشخصه سختی اشمیت، مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص ساینده‌گی لس آنجلس و مدول الاستیسیته ارائه شد. وزن‌دهی هر یک از این مشخصات با استفاده از روش سیستم‌های مهندسی سنگ کلاسیک و به روش نیمه عددی خبره انجام شد. با توجه به مطلق یا ثابت در نظر گرفته شدن نظرات افراد خبره در روش کلاسیک و هم‌چنین عدم توجه به پراکندگی نظرات، در یک روش پیشنهادی نظرات افراد خبره به صورت یک الگوی صحیح در منطق فازی با وزن‌دهی متناظر با آن مدل شد. پس از انتخاب تابع تعلق فازی گاوسی به عنوان مناسب‌ترین تابع، تابع تعلق فازی بهینه برای ارتباط میان متغیرهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی مورد بررسی قرار گرفت. سطح‌بندی سایش در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی با استفاده از چهار متغیر مذکور با روش‌های بازه‌بندی ثابت، تطبیقی و لگاریتمی با تلفیق الگوریتم ژنتیک صورت گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده، روش تطبیقی لگاریتمی دارای خطای کمتر بوده و لذا به عنوان روش بهینه انتخاب شد. با استفاده از سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی میزان سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی سخت (خروجی) در پنج بازه کیفی خیلی زیاد، زیاد، متوسط،

کم و خیلی کم برای نه نمونه سنگ ساختمانی سخت مورد ارزیابی و طبقه‌بندی قرار گرفت. برای بررسی صحت و سقم نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی با استفاده از الگوریتم فرابتکاری کلونی زنبور عسل یک سیستم طبقه‌بندی براساس نتایج آزمایشگاهی ارائه و نتایج آن با نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی مقایسه شد. هم‌چنین به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از طبقه‌بندی پیشنهادی، آزمایش‌های برش متعددی تحت شرایط عملیاتی مختلف با استفاده از یک دستگاه برش سنگ ساخته شده به این منظور (با قابلیت‌های خاص) انجام شد. در طی انجام این آزمایش‌ها، سایش ماکروسکوپی سگمنت‌های الماسی اندازه‌گیری شد. در نهایت بر اساس مدل پیشنهادی، ۹ نمونه سنگ مورد بررسی در سه کلاس طبقه‌بندی شدند. نمونه‌های ۱ و ۲ در کلاس ۲ با نرخ سایش کم طبقه‌بندی شدند و نشان‌دهنده قابلیت برش‌پذیری زیاد می‌باشند. به‌طور مشابه نمونه‌های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۹ در کلاس ۳ با نرخ سایش متوسط (با یک رنج سایش 0.000005 mm^3 تا 0.000008 mm^3) طبقه‌بندی شده‌اند و دارای قابلیت برش‌پذیری خوب می‌باشند. نمونه ۸ در کلاس ۴ با نرخ سایش زیاد (با سایش 0.0000072 mm^3) قرار گرفته و نشان‌دهنده سایش زیاد و قابلیت برش‌پذیری ضعیف این نمونه می‌باشد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داد که سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی در بیش‌تر موارد توانسته است به خوبی با حداقل خطا مابین میزان سایش پیش‌بینی شده و میزان اندازه‌گیری شده، میزان سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی سخت مورد مطالعه را رده‌بندی کند.

کلمات کلیدی: سنگ‌های ساختمانی سخت، سیستم‌های مهندسی سنگ، سیستم طبقه‌بندی، سایش دیسک‌های الماسی.

من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق

سپاس ایزد منان که به من این فرصت را داد تا به این مرحله از علم رسیده و از هیچ محبتی دریغ نکرد و در تمام مراحل زندگی مرا قوت قلب بود. بی‌شک در این مسیر طولانی دست یاری عزیزان فراوانی همراه من بود که شایسته است تا مراتب سپاس‌گذاری خود را از آنان اعلام دارم. در ابتدا از استاد راهنمای گرامیم جناب آقای دکتر فرهنگ سرشکی بسیار سپاسگذارم چرا که از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و بدون کمک‌های ارزنده علمی و فکری ایشان انجام این تحقیق بسیار مشکل بود. همچنین مراتب سپاس و قدردانی خود را از جناب آقای دکتر رضا میکائیل که سمت استاد راهنمای دوم مرا برعهده داشتند و با صبوری و حوصله مرا در این مسیر یاری نمودند، ابراز می‌دارم. شادکامی و موفقیت روزافزون این عزیزان را از ایزد منان خواستارم. این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران تقدیم می‌نمایم به همسر مهربانم که در تمام طول تحصیل همراه و همگام من بوده است.

لیست مقالات منتشر شده یا پذیرفته شده در راستای رساله

۱- آخانی، م، سرشکی، ف، میکائیل، ر، تاجی، م، (۲۰۱۷). "Combining Fuzzy RES with GA for Predicting Wear Performance of Circular Diamond Saw in the Hard Rocks Cutting Process". Journal of Mining and Environment. **Accept.**

۲- آخانی، م، سرشکی، ف، میکائیل، ر، تاجی، م، (۲۰۱۷). "Evaluation of Cutting Performance of Diamond Saw Machine Using Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm Int". Journal of Mining & Geo-Engineering. **Accept.**

مقالات ارائه شده در کنفرانس‌ها

آخانی، م، سرشکی، ف، میکائیل، ر، تاجی، م، "بررسی و ارائه مدل‌های آماری به منظور پیش‌بینی میزان ساینده‌ی سنگ‌های ساختمانی سخت". ششمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران. بهمن ۹۵، تهران- ایران.

آخانی، م، سرشکی، ف، میکائیل، ر، تاجی، م، "پیش‌بینی عملکرد سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی سخت به کمک سیستم‌های مهندسی سنگ فازی (FRES)", کنفرانس ملی پژوهش‌های نوین در برق، کامپیوتر و مهندسی پزشکی. تیر ۹۶، کازرون- ایران.

مقالات در دست داوری

۱- Akhyani M., Sereshki F., Mikaeil., R., Taji., M, "Study on Multifactorial Fuzzy Classification of Hard Rock Sawability". Journal of Intelligent and Fuzzy Systems. **Under review.**

2- Akhyani M., Sereshki F., Mikaeil., R., Taji., M, "An Investigation of the Effect of Ampere Consumption, Toughness and Brittleness Indexes on Wear Rate of Circular Diamond Saw". Natural Resources & Engineering. **Under review.**

فصل اول: کلیات

- ۲-۱-۱ - مقدمه ۲
- ۱-۲ - ضرورت انجام تحقیق ۳
- ۱-۳ - هدف از انجام تحقیق ۴
- ۱-۴ - مراحل انجام تحقیق ۴
- ۱-۴-۱ - تهیه جامعه آماری ۵
- ۱-۴-۲ - روش انجام تحقیق ۶
- ۱-۵ - تدوین رساله ۶

فصل دوم: فرآیند برش سنگ و عملکرد سایش دیسک‌های الماسی

- ۲-۱ - مقدمه ۱۰
- ۲-۲ - مکانیزم تشکیل تراشه در فرآیند برش سنگ ۱۱
- ۲-۳ - فرآیند سایش دیسک‌های برش‌دهنده الماسی ۱۳
- ۲-۳-۱ - مکانیزم سایش دیسک‌های الماسی دایره‌ای ۱۴
- ۲-۴ - عوامل مؤثر در فرآیند برش و سایش دیسک‌های برش‌دهنده الماسی ۱۷
- ۲-۴-۱ - مشخصات سنگ ۱۸
- ۲-۴-۲ - مشخصات برش ۱۹
- ۲-۴-۳ - معیارهای مناسب برای بررسی عملکرد برش و سایش دیسک‌های الماسی ۲۴
- ۲-۴-۴ - عوامل مؤثر در سایش دیسک‌های برش‌دهنده الماسی ۲۷
- ۲-۵ - جمع‌بندی ۳۱

فصل سوم: بررسی سابقه علمی موضوع

- ۳-۱ - مقدمه ۳۴

فهرست مطالب

۳-۲- مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه عملکرد سایش دیسک‌های الماسی در

- ۳۴ فرآیند برش سنگ
- ۳۴ ۳-۲-۱- تأثیر مشخصات سنگ بر سایش ابزار الماسی
- ۳۸ ۳-۲-۲- تأثیر مشخصات عملیاتی بر سایش ابزار الماسی در فرآیند برش سنگ
- ۴۳ ۳-۲-۳- معیارهای ارزیابی عملکرد دیسک‌های برش‌دهنده الماسی دایره‌ای
- ۴۸ ۳-۳- سیستم‌های طبقه‌بندی موجود در زمینه ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی
- ۴۸ ۳-۳-۱- سیستم طبقه‌بندی بیرله و راترن
- ۴۹ ۳-۳-۲- سیستم طبقه‌بندی فازی وی و همکاران
- ۵۰ ۳-۳-۳- سیستم طبقه‌بندی فازی توتمز و همکاران
- ۵۱ ۳-۳-۴- سیستم طبقه‌بندی قهرمان و همکاران
- ۵۲ ۳-۳-۵- سیستم طبقه‌بندی میکائیل و همکاران
- ۵۳ ۳-۳-۶- سیستم طبقه‌بندی عطائی و همکاران
- ۵۳ ۳-۴- نقد و بررسی تحقیقات گذشته

فصل چهارم: سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) و ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید برای

پیش‌بینی سایش دیسک‌های الماسی

- ۵۸ ۴-۱- مقدمه
- ۵۹ ۴-۲- سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)
- ۵۹ ۴-۲-۱- پیشینه تحقیق سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)
- ۶۱ ۴-۲-۲- ماتریس‌های اندرکنش
- ۶۱ ۴-۲-۳- کدگذاری ماتریس‌های اندرکنش
- ۶۳ ۴-۲-۴- نمودار علت - اثر

فهرست مطالب

۶۶	۴-۳- ارزیابی وزن پارامترهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ کلاسیک (RES)
۶۹	۴-۴- سیستم مهندسی سنگ فازی (FRES) برای وزن‌دهی پارامترهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی
۷۱	۴-۴-۱- روش RES فازی
۷۸	۴-۵- مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها
۷۹	۴-۶- ارائه سیستم طبقه‌بندی برای ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی
۷۹	۴-۶-۱- انتخاب پارامترهای مناسب برای سیستم طبقه‌بندی جدید
۸۲	۴-۶-۲- انتخاب نوع مدل
۸۲	۴-۶-۳- بازه‌بندی
۹۰	۴-۷- جمع‌بندی
۹۴	فصل پنجم: ساخت دستگاه برش سنگ و اعتبارسنجی سیستم طبقه‌بندی جدید
۹۴	۵-۱- مقدمه
۹۵	۵-۲- بررسی نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل
۹۹	۵-۳- صحت‌سنجی سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی با ساخت دستگاه برش سنگ
۱۰۷	۵-۴- تحلیل‌های آماری
۱۰۸	۵-۴-۱- برآزش تک‌متغیره
۱۰۸	۵-۴-۲- برآزش چند متغیره
۱۱۱	۵-۵- پیش‌بینی سایش دیسک‌های الماسی با استفاده از مطالعات آماری
۱۱۲	۵-۵-۱- ارائه مدل‌های آماری
۱۱۳	۵-۵-۲- اعتبارسنجی مدل‌های آماری

فهرست مطالب

۱۱۸	۵-۶- صحت‌سنجی سیستم طبقه‌بندی جدید
۱۱۹	۵-۷- جمع‌بندی
	فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۲۲	۶-۱- نتیجه‌گیری
۱۲۶	۶-۲- پیشنهادات
۱۲۸	مراجع
۱۳۵	پیوست

۱۴	جدول ۱-۲ - عوامل مؤثر بر سایش دیسک های الماسی دایره ای
۳۸	جدول ۱-۳ - خلاصه تحقیقات انجام شده در بخش ۱-۲-۳
۴۳	جدول ۲-۳ - خلاصه تحقیقات انجام شده در بخش ۲-۲-۳
۴۸	جدول ۳-۳ - خلاصه تحقیقات انجام شده در بخش ۳-۲-۳
۴۹	جدول ۴-۳ - طبقه‌بندی ارائه شده در زمینه سایش دیسک توسط بیرله و راترمن
۵۰	جدول ۵-۳ - وزن‌های نهایی متغیرها در طبقه‌بندی فازی وی و همکاران
۵۰	جدول ۶-۳ - طبقه‌بندی ارائه شده توسط وی و همکاران
۵۰	جدول ۷-۳ - وزن‌های اختصاص داده شده به هر یک از پارامترها در طبقه‌بندی
۵۱	جدول ۸-۳ - طبقه‌بندی ارائه شده توسط تاتموز و همکاران
۵۲	جدول ۹-۳ - سیستم طبقه‌بندی قهرمان و همکاران
۵۲	جدول ۱۰-۳ - سیستم طبقه‌بندی ارائه شده توسط میکائیل و همکاران
۶۰	جدول ۱-۴ - خلاصه تحقیقات انجام شده در زمینه سیستم‌های مهندسی سنگ RES
۶۷	جدول ۲-۴ - نمونه ماتریس تکمیل شده توسط یک فرد خبره
۶۸	جدول ۳-۴ - ماتریس برآیند نظرات ۳۰ فرد خبره
۶۹	جدول ۴-۴ - محاسبه مقادیر وزن پارامترهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی با روش RES کلاسیک
۷۵	جدول ۵-۴ - مقادیر میانگین و انحراف معیار متغیرها و تابع تعلق فازی گاوسی (میانگین، انحراف معیار)
۷۶	جدول ۶-۴ - پراکندگی نظرات خبره
۷۷	جدول ۷-۴ - وزن سطری، ستونی و نهایی فازی هر متغیر
۷۸	جدول ۸-۴ - میزان وزن نهایی بدست آمده برای متغیرها در روش RES فازی

فهرست جدول‌ها

- جدول ۴-۹- نتایج آزمایشگاهی پارامترهای منتخب ۷۹
- جدول ۴-۱۰- وزن فازی نهایی هر گروه از متغیرها ۸۲
- جدول ۴-۱۱- طبقه‌بندی به روش بازه‌بندی ثابت برای متغیرهای مؤثر و مقدار سایش دیسک ۸۳
- جدول ۴-۱۲- طبقه‌بندی تطبیقی با بازه ثابت برای متغیرهای مؤثر و مقدار سایش (خروجی) ۸۵
- جدول ۴-۱۳- طبقه‌بندی تطبیقی با الگوریتم ژنتیک ۸۸
- جدول ۴-۱۴- سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی سایش دیسک های الماسی در سنگ‌های ساختمانی سخت ۸۹
- جدول ۴-۱۵- نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگ و سایش پیش‌بینی شده و بازه مربوطه ۹۰
- جدول ۵-۱- نتایج خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مورد مطالعه ۹۶
- جدول ۵-۲- سطح دقت و خاتمه محاسبات در تکرار ۳۰۰ ۹۷
- جدول ۵-۳- بهینه‌سازی و طبقه‌بندی نمونه‌های سنگ مورد مطالعه توسط الگوریتم کلونی زنبور عسل ۹۷
- جدول ۵-۴- مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم کلونی زنبور عسل با سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی ۹۸
- جدول ۵-۵- مشخصات دیسک‌های استفاده شده در آزمایش‌های برش ۱۰۵
- جدول ۵-۶- نتایج حاصل از بررسی‌های آماری برای پیش‌بینی مشخصات فیزیکی و مکانیکی ۱۱۰
- جدول ۵-۷- نتایج حاصل از بررسی‌های آماری برای مدل‌های پیش‌بینی سایش دیسک براساس مشخصات سنگ ۱۱۴
- جدول ۵-۸- نتایج حاصل از بررسی‌های آماری برای مدل‌های پیش‌بینی سایش دیسک براساس پارامترهای عملیاتی ۱۱۵
- جدول ۵-۹- نتایج حاصل از بررسی‌های آماری بر اساس مشخصات سنگ و پارامترهای عملیاتی ۱۱۶
- جدول ۵-۱۰- نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگ، سایش اندازه‌گیری شده و طبقه‌بندی پیشنهادی و بازه مربوطه ۱۱۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۲-۱- تعامل نیروهای موجود میان دانه الماس و سطح سنگ خراشیده شده ۱۲
- شکل ۲-۲- سطح سائیده شده دانه الماس دیسک برش ۱۵
- شکل ۲-۳- کریستال کامل الماس دیسک برش ۱۶
- شکل ۲-۴- پارامترهای مؤثر در فرآیند برش سنگ ۱۸
- شکل ۲-۵- رابطه بین نرخ پیشروی و نیروی برش سنگ مرمر ۲۰
- شکل ۲-۶- رابطه بین نرخ پیشروی و نیروی برش سنگ گرانیت ۲۰
- شکل ۲-۷- تغییرات سایش ابزار بر حسب نرخ پیشروی ۲۱
- شکل ۲-۸- رابطه بین نیروهای نرمال و مماسی و نرخ برداشت ویژه در سرعت محیطی ثابت و هشت عمق برش مختلف در سنگ آهک بژ معدن سوگات ۲۲
- شکل ۲-۹- روش‌های مختلف برش و نیروهای برشی مربوطه ۲۳
- شکل ۲-۱۰- نیروهای مؤثر در فرآیند برش رو به پایین ۲۵
- شکل ۲-۱۱- رابطه بین عمق برش و نیروی برش سنگ مرمر ۲۶
- شکل ۲-۱۲- رابطه بین عمق برش و نیروی برش سنگ گرانیت ۲۶
- شکل ۲-۱۳- تغییرات ضخامت تراشه و نرخ برش نسبت به تراکم دانه الماس با اندازه‌های مختلف ۲۸
- شکل ۲-۱۴- حداکثر عمق برش دیسک برش با توجه به شعاع دیسک و شعاع فلانچ دیسک ۳۰
- شکل ۴-۱- ماتریس اندرکنش یک سیستمی با دو پارامتر A و B ۶۱
- شکل ۴-۲- مقدار کدگذاری با توجه به شیب نمودار پارامترهای P_j و P_i ۶۲
- شکل ۴-۳- نحوه شکل‌گیری محورهای علت - اثر در ماتریس اندرکنش ۶۳
- شکل ۴-۴- نمودار علت - اثر برای ماتریس 4×4 ۶۴
- شکل ۴-۵- مفهوم تسلط و شدت اندرکنش پارامترها ۶۵
- شکل ۴-۶- نمودار علت - اثر مسأله سایش دیسک‌های الماسی ۶۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۴-۷- مراحل تخصیص وزن کلاسیک و فازی به پارامترها و ارائه سیستم طبقه‌بندی ۷۲
- شکل ۴-۸- مقادیر وزن نهایی پارامترهای به کار رفته در سیستم طبقه‌بندی جدید ۸۱
- شکل ۴-۹- همگرایی الگوریتم ژنتیک و مینیمم کردن خطای دسته‌بندی ۸۶
- شکل ۵-۱- حداقل هزینه به ازای هر تکرار توسط الگوریتم ABC ۹۸
- شکل ۵-۲- پلاک‌های تهیه شده از چهارده نوع سنگ ساختمانی سخت ۹۹
- شکل ۵-۳- گلوبی دستگاه برش برای بستن دیسک الماس و انتقال نیرو ۱۰۰
- شکل ۵-۴- موتور اصلی دستگاه برش سنگ ۱۰۱
- شکل ۵-۵- نمودار طراحی شده برای انجام آزمایش های برش ۱۰۲
- شکل ۵-۶- دستگاه برش سنگ ساخته شده در مقیاس آزمایشگاهی ۱۰۲
- شکل ۵-۷- شتاب‌سنج و سنسور ارتعاش برای ثبت ارتعاشات سیستم ۱۰۳
- شکل ۵-۸- نمونه‌ای از سیگنال‌های ارتعاش ثبت شده در کامپیوتر ۱۰۳
- شکل ۵-۹- آمپرسنج دیجیتال برای ثبت تغییرات شدت جریان مصرفی و تابلو برق دستگاه برش سنگ ۱۰۴
- شکل ۵-۱۰- میکرومتر دیجیتال برای اندازه‌گیری سایش دیسک الماسی ۱۰۴
- شکل ۵-۱۱- دورسنج مکانیکی- نوری برای اندازه‌گیری تغییرات سرعت محیطی دیسک برش ۱۰۵
- شکل ۵-۱۲- مراحل مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در این تحقیق ۱۰۶
- شکل ۵-۱۳- مراحل کنترل و اعتبار سنجی آماری رابطه‌ها ۱۰۹
- شکل ۵-۱۴- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی (مدل ۱۰) نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ ۱۱۱
- شکل ۵-۱۵- پراکندگی مقادیر سایش واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده (مدل ۱۲) نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ ۱۱۸

فصل اول

کلیات

در معادن سنگ ساختمانی، موضوع برش سنگ در استخراج معادن، جزء لاینفک تولید سنگ محسوب می‌شود. سایش دیسک‌های برش‌دهنده الماسی در فرآیند برش سنگ به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای فنی و مهندسی در زمینه‌های مختلف علمی به ویژه در مهندسی معدن و صنایع وابسته کاربرد گسترده‌ای دارد. کشور ما به عنوان یکی از غنی‌ترین کشورها در زمینه ذخایر و منابع سنگ ساختمانی در دنیا مطرح می‌باشد (رتبه چهارم جهان)، ولی در مقایسه با میزان منابع و ذخایر موجود، میزان صادرات حداقل ممکن می‌باشد. این امر مسلماً تأثیرپذیر از کیفیت سنگ‌های تولیدی و نیز هزینه تمام شده سنگ‌ها می‌باشد. به طور کلی هزینه تهیه، پرداخت و ساب یک پلاک سنگ در صنایع سنگ‌بری بیشتر تحت تأثیر عواملی مانند هزینه انرژی مصرفی و هزینه‌های ابزاری (سایش دیسک) قرار خواهد داشت. همواره در صنعت سنگ سعی بر این است که نسبت نرخ تولید به این دو فاکتور افزایش داده شود. معمولاً نرخ تولید با دو عامل سایش ابزار الماسی و انرژی مصرفی نسبت مستقیم داشته به طوری که با افزایش نرخ تولید، میزان سایش و انرژی مصرفی نیز افزایش می‌یابد. از طرفی استفاده از ابزارهای پیشرفته و بهره‌گیری از تکنولوژی روز دنیا می‌تواند به نحو چشم‌گیری کیفیت سنگ‌های تولیدی را بالا برده و هزینه دیسک‌های الماسی و میزان مصرف انرژی و در نهایت هزینه‌های تولیدی را کاهش دهد. این امر خود در بهبود شرایط صادرات سنگ‌های ساختمانی کشور تأثیر بسزایی به دنبال خواهد داشت. شناخت کامل خصوصیات مکانیکی و فیزیکی سنگ‌های ساختمانی و بررسی تأثیر آن‌ها در سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش در پیش بینی هزینه‌ها و طراحی یک کارخانه فرآوری سنگ از اهمیت بالایی برخوردار است. در این رابطه تعیین پارامترهای مؤثر در سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی، در برآورد هزینه تولید و کاهش آن و در نهایت طراحی یک کارخانه سنگ‌بری مقرون به صرفه بسیار تأثیرگذار بوده و این صنعت را به سمت بهبود سرعت فرآوری و تولید بیش‌تر و کیفیت بهتر سوق می‌دهد. بنابراین برای دستیابی به یک برنامه‌ریزی تولید دقیق در کارخانه‌های فرآوری سنگ، پیش‌بینی هزینه‌های تولید به

ویژه سایش دیسک‌های الماسی و نیز تعیین پارامترهای مؤثر در آن، بسیار مهم و ضروری است. لذا با توجه به منابع گسترده سنگ‌های ساختمانی در کشورمان و با توجه به نیاز کشور به تولید و صادرات بیشتر این محصول با حداقل هزینه تمام شده ممکن، ارتقا راندمان دستگاه‌های برش و کاهش واردات ابزارهای الماسی، موضوع تحقیق این رساله دکتری انتخاب شد که علاوه بر بررسی و شناخت بیشتر سنگ‌های ساختمانی سخت کشور، به کاهش واردات ابزارهای الماسی، تجهیزات مربوطه و انرژی مصرفی در کشور کمک کند. در این تحقیق سعی شده است تا در اولین قدم با بررسی منابع مختلف و تحقیقات گذشته و سپس با کمک آزمایش‌های دقیق و مؤثر، فرآیند برش و پارامترهای مؤثر در آن مورد بررسی قرار گیرد. در مرحله بعد، یک سیستم طبقه‌بندی جدید که در برگیرنده تمامی مشخصات مهم فیزیکی، مکانیکی و عملیاتی برای تعیین اندیس سایش دیسک‌های الماسی در فرایند برش سنگ‌های ساختمانی سخت ارائه شود. با استفاده از این شاخص جدید می‌توان ارتباط میان مشخصات سنگ و نتایج عملکرد برش سنگ را مورد ارزیابی قرار داد.

۲-۱- ضرورت انجام تحقیق

به‌طور کلی مهم‌ترین دلایل انجام این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

- گستردگی و پراکندگی مطالعات و عدم وجود یک سیستم طبقه‌بندی جامع در برگیرنده تمامی فاکتورهای مؤثر در زمینه سایش دیسک‌های الماسی.
- عدم شناخت کافی از سنگ‌های ساختمانی کشور از دیدگاه میزان سایش ابزار الماسی.
- عدم انجام مطالعات دقیق برای پیش‌بینی میزان مصرف دیسک‌های الماسی در سنگ‌بری‌ها.
- افزایش مصرف دیسک‌های الماسی به دلیل عدم شناخت کافی و دقیق از تجهیزات مورد نیاز.
- عدم وجود مطالعات جامع برای ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی و بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی در بهبود کیفیت و کاهش هزینه‌ها در صنایع سنگ‌بری.
- عدم انتخاب مناسب دیسک‌های الماسی در برخی سنگ‌بری‌ها و عدم وجود راه‌کارهایی برای کاهش میزان سایش دیسک‌های مورد نظر و بالابردن راندمان تجهیزات برش در سنگ‌بری‌ها.

علی‌رغم وجود ذخایر فراوان سنگ‌های ساختمانی در ایران، این کشور هنوز نتوانسته جایگاه مناسبی در بازارهای جهانی بدست آورد. ممکن است دلیل آن عدم مطالعات دقیق و گسترده علمی برای بالا بردن کیفیت سنگ‌های ساختمانی تولیدی و کاهش هزینه‌های تولید که ارتباط مستقیم با بررسی دقیق و جامع سایش در دیسک‌های الماسی دارد، باشد. متأسفانه در کشور، فقط به استفاده از صنایع تجربی و قدیمی و حداکثر استفاده از تکنولوژی کشورهای دیگر بسنده کرده و مطالعات جدید و دقیقی در این زمینه انجام نشده است. لذا با توجه به توضیحات و موارد ذکر شده، انجام این قبیل مطالعات در کشور لازم و ضروری است.

۳-۱- هدف از انجام تحقیق

به‌طور کلی مهم‌ترین اهداف این تحقیق عبارتند از:

- ارائه یک سیستم طبقه‌بندی جدید در برگیرنده تمامی مشخصات مهم فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های ساختمانی سخت برای ارزیابی میزان سایش دیسک‌های الماسی.
- بررسی سابقه علمی موضوع و شناسایی مؤثرترین پارامترهای تأثیرگذار بر سایش دیسک‌های الماسی.
- ساخت یک دستگاه برش با امکانات خاص برای انجام مطالعات برش سنگ‌های ساختمانی و بررسی مقدار سایش دیسک‌های الماسی و پارامترهای مؤثر بر آن.
- مطالعه تأثیر پارامترهای عملیاتی شامل نرخ پیشروی، عمق برش و سرعت محیطی در مقدار سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی.
- بررسی و طبقه‌بندی سنگ‌های مورد مطالعه با توجه به میزان سایش دیسک‌های برش‌دهنده سنگ.
- ارائه مدل‌های تجربی برای بررسی معنی‌داری ارتباط میان مشخصات سنگ، پارامترهای عملیاتی و سایش دیسک‌های الماسی.

۴-۱- مراحل انجام تحقیق

به‌طور کلی مراحل انجام این تحقیق را در بخش‌های زیر تقسیم کرد:

- انجام مطالعات کتابخانه‌ای و جستجوی مقالات علمی معتبر برای بررسی سابقه علمی و تحقیقاتی موضوع و شناسایی مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر میزان سایش دیسک‌های الماسی.

- انجام مطالعات آزمایشگاهی به منظور تعیین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه.

- ساخت و راه‌اندازی یک دستگاه برش در مقیاس آزمایشگاهی و تهیه پلاک‌های سنگ ساختمانی برای مطالعه فرآیند برش و اندازه‌گیری میزان سایش دیسک‌های الماسی.

- جمع‌آوری اطلاعات و تهیه جامعه آماری مناسب و تجزیه و تحلیل داده‌ها و در نهایت ارائه یک سیستم طبقه‌بندی جدید

- اعتبارسنجی سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی توسط محاسبات نرم و یک مدل فیزیکی

۱-۴-۱- تهیه جامعه آماری

در تحقیق حاضر سعی شد با توجه به ملاحظات اقتصادی و امکانات موجود، جامعه آماری دقیق و کاملی از سنگ‌های ساختمانی سخت تهیه شود. بدین ترتیب با توجه به میزان تقاضای بازار، ۹ نوع سنگ ساختمانی سخت از نوع گرانیت برای انجام مطالعات در نظر گرفته شد. جامعه آماری تهیه شده در این بخش برای تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ و همچنین توسعه و ارزیابی سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی میزان سایش دیسک‌های الماسی در نظر گرفته شد. در این تحقیق، روش نمونه‌گیری و تهیه داده در دو بخش تهیه نمونه‌ها و تهیه پلاک‌های سنگی برای انجام مطالعات آزمایشگاهی و اندازه‌گیری میزان سایش دیسک‌های الماسی، انرژی مصرفی و ارتعاش به وجود آمده در سیستم انجام شد. برای مطالعه و اندازه‌گیری میزان سایش دیسک‌های الماسی از یک میکرومتر دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر (اندازه‌گیری ماکروسکوپی) استفاده شد. برای این کار می‌توان با اندازه‌گیری میزان کاهش ارتفاع سگمنت نسبت به مقدار کارکرد، نرخ سایش ماکروسکوپی را تعیین کرد. میزان انرژی مصرفی دستگاه برش در طی فرآیند برش به کمک ثبت تغییرات جریان ورودی به دستگاه توسط یک آمپرسنج دیجیتال دقیق نصب شده بر روی تابلوی دستگاه، اندازه‌گیری شد.

۲-۴-۱- روش انجام تحقیق

در این تحقیق سعی شد تا مطالعات متنوعی با استفاده از روش‌های مناسب بر روی جامعه آماری تهیه شده انجام گیرد. روش‌های استفاده شده در بخش‌های این تحقیق شامل موارد زیر است:

- استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ کلاسیک (RES) و توسعه سیستم فازی آن (FRES) برای تعیین وزن و اهمیت پارامترها، سپس ارائه یک سیستم طبقه‌بندی جدید و اعتبارسنجی آن.

- استفاده از روش فراابتکاری الگوریتم کلونی زنبور عسل برای طبقه‌بندی سنگ‌های مورد مطالعه و مقایسه نتایج آن با سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی برای صحت‌سنجی سیستم مذکور.

- برای صحت‌سنجی سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی با یک مدل فیزیکی، یک دستگاه برش سنگ در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شد و نتایج عملکرد برش با این دستگاه در بررسی صحت و سقم نتایج سیستم پیشنهادی استفاده شد.

- استفاده از رگرسیون‌های ساده و چند متغیره برای انجام مطالعات آماری و بررسی ارتباط معنی‌داری مابین مشخصات سنگ، پارامترهای عملیاتی و سایش دیسک‌های الماسی با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS و اعتبارسنجی روابط ارائه شده به کمک آزمون‌های F و t و جداول مربوطه.

۵-۱- تدوین رساله

به‌طور کلی مطالب مندرج در این تحقیق در ۶ فصل به شرح ذیل تدوین شده است:

فصل ۱: مقدمه و کلیات

فصل ۲: پارامترهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی و فرایند برش سنگ

در این فصل از تحقیق به بررسی فرآیند برش و شناسایی پارامترهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی پرداخته شد. به‌طور خلاصه در این فصل به موارد زیر اشاره خواهد شد:

- مکانیزم برش و نحوه تشکیل تراشه در فرآیند برش.

- عوامل مؤثر بر سایش ابزار الماسی در فرآیند برش.

فصل ۳: بررسی سابقه علمی موضوع

به طور کلی بخش مهمی از هر تحقیق گردآوری و استناد به سوابق و تجربیات علمی محققان دیگر است. بنابراین در این مرحله سوابق علمی مرتبط به صورت پیوسته از گذشته تا کنون مورد مطالعه و مورد استفاده قرار گرفت. در این فصل از تحقیق به بررسی روابط و طبقه‌بندی‌های ارائه شده در زمینه برش و سایش دیسک‌های الماسی و نقد و بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود. خلاصه موارد اشاره شده در این فصل عبارتند از:

- مروری بر سوابق علمی موضوع.

- بررسی روابط و طبقه‌بندی‌های ارائه شده در زمینه برش و سایش دیسک‌های الماسی.

- نقد و بررسی تحقیقات گذشته.

فصل ۴: ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ فازی

(FRES) به منظور ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی

در این فصل از تحقیق سعی شده است تا با استفاده از روش سیستم‌های مهندسی سنگ کلاسیک و فازی شده آن (FRES)، ضمن شناسایی پارامترهای مهم و مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی، به بررسی سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی با ملاحظه شدت جریان مصرفی و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم پرداخته شود. در نهایت پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه یک سیستم طبقه‌بندی جدید بر مبنای پارامترهای مؤثر منتخب (مقاومت فشاری تک‌محوری، سختی اشمیت، ساینده‌گی لس‌آنجلس و مدول الاستیسیته) برای ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی ارائه شد.

فصل ۵: ساخت دستگاه برش سنگ جدید و صحت‌سنجی سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی

در این فصل از تحقیق، در ابتدا صحت و سقم نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی توسط سیستم

^۱-Fuzzy Rock Engineering System

طبقه‌بندی ارائه شده با استفاده از الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل بررسی می‌شود. سپس به منظور صحت‌سنجی نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی با یک مدل فیزیکی پس از تشریح ساخت و راه‌اندازی دستگاه برش سنگ با امکانات خاص تغییر و اندازه‌گیری پارامترهای عملیاتی برش در طی فرآیند برش، نتایج حاصل از عملکرد برش توسط دستگاه مذکور با نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی سنجیده می‌شود. سپس معنی‌داری ارتباط مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ و پارامترهای عملیاتی با سایش دیسک‌های الماسی توسط مدل‌های آماری ارائه شده به کمک نرم‌افزار SPSS بررسی می‌شود.

فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این فصل به بررسی نتایج حاصل از تحقیق در زمینه ارزیابی میزان سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش در سنگ‌های ساختمانی سخت و ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید بر مبنای مشخصات مهم و مؤثر سنگ پرداخته شده و پیشنهاداتی نیز برای بهبود و ارتقاء تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

فرآیند برش سنگ و عملکرد

سایش دیسک‌های الماسی

فرآیند برش سنگ و سایش دیسک‌های الماسی، در زمینه‌های علمی مختلف، به ویژه مهندسی معدن و صنایع وابسته، به عنوان یک پارامتر فنی و مهندسی مهم، به طور ویژه مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. در عصر حاضر، تحقیقات کاربردی از مهم‌ترین عوامل پیشرفت علمی و توسعه کشورهای صنعتی است، که به‌طور جدی و با برنامه‌ریزی فرآیندهای مربوط به جبران ضررهای حاصل از کمبود دانش فنی را، در صنایعی مانند سنگ‌بری پیگیری می‌کند. نتایج حاصل از تحقیقات مذکور، موجب کاهش شدید هزینه‌های فرآوری سنگ، مانند هزینه‌های مصرف انرژی و ابزار برش می‌شود. بالا رفتن سطح تکنولوژی فرآوری سنگ‌های ساختمانی، نه تنها موجب افزایش درآمد حاصله از ناحیه صادرات سنگ می‌شود، کاهش مصرف و هزینه ابزار الماسی را نیز موجب می‌شود. شناخت کامل مکانیک سنگ‌های ساختمانی و تأثیر آن در سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ، در تخمین هزینه‌ها و طراحی یک کارخانه فرآوری سنگ از اهمیت بالایی برخوردار بوده و به شدت در تعیین هزینه‌های تولید مؤثر است.

در حال حاضر، کشور ایران به عنوان یکی از غنی‌ترین کشورها در زمینه ذخایر و منابع سنگ ساختمانی در جهان مطرح است (رتبه چهارم جهانی). البته با داشتن بیش از پنج هزار کارخانه فرآوری سنگ، از لحاظ صادرات سنگ سهم مناسبی در جهان نداشته و با توجه به میزان منابع و ذخایر موجود، میزان صادرات ناچیز است. توجه به این نکته که کیفیت سنگ‌های تولیدی و هزینه تمام شده سنگ‌ها هم بر این مسأله مهم تأثیرگذار است نیز ضروری است. استفاده از ابزار پیشرفته و تکنولوژی روز دنیا، می‌تواند کیفیت سنگ‌های تولیدی را بسیار بالا برده و با استفاده از ماشین‌آلات مناسب‌تر، هزینه دیسک‌های الماسی و میزان مصرف انرژی و بالطبع هزینه‌های تولید را به نحو مقتضی کاهش می‌یابد. بالطبع این کار در بهبود شرایط صادرات سنگ‌های ساختمانی کشور و افزایش درآمد از این بخش تولید، تأثیر بسزایی خواهد داشت.

در این رابطه تعیین پارامترهای مؤثر در سایش دیسک‌های الماسی و فرآیند برش، در برآورد هزینه و

کاهش آن و در نهایت طراحی یک کارخانه سنگ‌بری مقرون به‌صرفه، بسیار تأثیرگذار بوده و این صنعت را به سمت تولید بیشتر و بهبود سرعت فرآوری سوق خواهد داد.

بنابراین از جمله فاکتورهای مهم در عرصه رقابت جهانی و تولید سنگ‌های ساختمانی، هزینه تمام شده و کیفیت کالا می‌باشد، که برای دستیابی به یک برنامه‌ریزی بهینه در فرآیند تولید کارخانه‌های فرآوری سنگ، پیش‌بینی سایش دیسک‌های الماسی و نیز تعیین پارامترهای مؤثر بر آن بسیار مهم و ضروری می‌باشد.

۲-۲- مکانیزم تشکیل تراشه در فرآیند برش سنگ

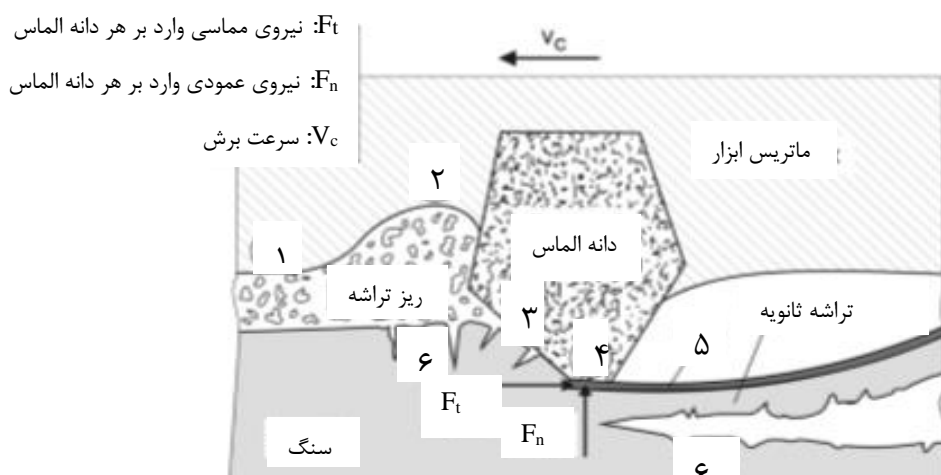
تشکیل تراشه را می‌توان برداشت مواد قطعه‌کار، با استفاده از دانه‌های الماس روی سطح سگمنت دیسک‌های الماسی دایره‌ای تعریف کرد.

به‌طور کلی فرآیند برش سنگ در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول در اثر حرکت سگمنت‌های الماسی بر روی سطح برش^۱ و نفوذ دانه‌های الماس در سنگ، تراشه^۲ تشکیل می‌شود. در این فرآیند دانه الماس با خراشیدن سطح برش موجب تشکیل تراشه و ایجاد یک سطح جدید برای دانه الماس بعدی می‌شود. در برش سنگ با ابزار الماسی، اندرکنش مکانیکی بین ابزار و قطعه‌کار، نیروهای فرآیند برش را تولید می‌کند که عمدتاً ناشی از پارامترهایی مانند تغییر شکل الاستیک و پلاستیک قطعه‌کار و اصطکاک میان سگمنت با سنگ و تراشه‌های حاصل از برش است. شکل ۱-۲ نمایشی شماتیک از یک دانه الماس در حین برش و تعامل نیروهای بین دانه الماس و سطح خراشیده شده قطعه‌کار را نشان می‌دهد. در شروع فرآیند، جلوی دانه الماسی که در حال انجام فرآیند برش است تنش‌های کششی و فشاری حاصل از برخورد دانه الماس با سطح قطعه‌کار و نیروهای مماسی به وجود آمده در جلوی دانه الماس، موجب تشکیل تراشه اولیه در ناحیه برش می‌شوند. این مرحله از فرآیند برش، مکانیزم شکل-گیری تراشه اولیه نامیده می‌شود. این تراشه در داخل شیارهای برش، به جلو یا کناره‌های دانه برنده رانده می‌شود. هم‌زمان با تشکیل تراشه اولیه قسمتی از سنگ که در ناحیه تحتانی دانه الماس قرار

۱-Workpiece

2- Chip

دارد در اثر تنش فشاری اعمالی از دانه الماس تغییر شکل پلاستیک می‌دهد. به دلیل ترد بودن سنگ، تغییر شکل پلاستیک و تنش‌های فشاری، ترک‌هایی به دو صورت شعاعی و جانبی (عرضی) در ناحیه تغییر شکل ایجاد می‌شود که تا سطح سنگ گسترش می‌یابند. این تغییر ناگهانی تنش موجب یک بازگشت الاستیکی شدید شده، و در نهایت منجر به تنش کششی بحرانی و شکست ترد می‌شود. در این مرحله تراشه ثانویه در زیر دانه الماس تشکیل می‌شود. به عبارت دیگر ترک‌های جانبی و شکست ترد باعث ایجاد تراشه‌های ثانویه می‌شوند.



۱- ناحیه اصطکاک ریز تراشه‌ها و ماتریس ابزار

۲- ناحیه سایش توسط ریز تراشه‌ها و تراشه‌ها

۳- ناحیه تشکیل تراشه اولیه

۴- ناحیه اصطکاک سنگ و دانه الماس

۵- ناحیه تغییر شکل پلاستیک

۶- ناحیه تغییر شکل الاستیک

شکل ۱-۲- تعامل نیروهای موجود میان دانه الماس و سطح سنگ خراشیده شده (Tonshoff et al., ۲۰۰۲)

تحقیقات نشان داده که ایجاد این نوع تراشه از راندمان بالاتری برخوردار است. تراشه‌های ایجاد شده در فرآیند برش در سنگ‌بری‌ها عمدتاً از این نوع می‌باشند. مرحله آخر در فرآیند برش، برداشت تراشه‌ها و کاهش دمای محیط توسط جریان سیال خنک‌کننده می‌باشد. در طی این فرآیند تراشه‌های ایجاد شده در مرحله قبل، با فشار سیال مذکور از سطح برش خارج شده و موجب کاهش دمای محل تماس سگمنت و سطح قطعه‌کار یا محیط برش می‌شوند (Ersoy et al., 2005). با توجه به نتایج بدست آمده از تحقیقات مشخص می‌شود که استفاده از آب به عنوان سیال روان‌کننده، موجب برش نرم‌تر و هموارتر، با کیفیت سطح برش بهتر می‌شود. همچنین موجب کاهش تمرکز بارهای حرارتی

نوک دانه‌های الماس شده و تراشه‌های تولید شده سریع‌تر و راحت‌تر از محیط برش خارج می‌شوند.

۲-۳- فرآیند سایش دیسک‌های برش‌دهنده الماسی

برش سنگ در اثر نفوذ سگمنت‌های الماس نصب شده در سطح یک دیسک انجام می‌شود. کریستال‌های الماس که مانند لبه‌های برش‌دهنده عمل می‌کنند، در یک ماتریس ثابت نگه داشته می‌شوند. انتخاب الماس قوی‌تر و مقاوم‌تر در برش سنگ‌های سخت یک قاعده کلی است (konstanty, ۲۰۰۲).

کنترل میزان سایش دیسک‌های الماسی ممکن است با نوع و خواص مواد تشکیل‌دهنده سنگ، شرایط کار و نوع لغزش و ساختمان دیسک الماسی انجام شود. نرخ سایش در برنامه‌های مهندسی سنگ از عوامل اصلی مؤثر بر عمر ابزار و عملکرد قطعات ماشین بوده و مهم می‌باشد. با کنترل میزان سایش دیسک، صرفه‌جویی قابل توجهی در میزان هزینه و کیفیت برش حاصل می‌شود. افزایش سایش دیسک‌های الماسی، نرخ برش را کاهش و انرژی مورد نیاز برای برش را افزایش می‌دهد. همچنین باعث ایجاد شکستگی‌های ریز در دانه‌های الماس دیسک برش می‌شود (Ersoy et al., ۲۰۰۵).

صرفنظر از انتخاب نوع الماس و ماتریس (دیسک) و ویژگی‌های سنگ در حال برش، عوامل دیگری بر عملکرد و عمر تیغه برش مؤثر بوده و بالطبع در میزان سایش دیسک‌های مورد نظر نیز مؤثر می‌باشند. این عوامل عبارتند از:

- روش ساخت سگمنت و عوامل مؤثر بر آن

- خصوصیات قطعه کار

- موقعیت‌های برش

- کارایی خنک‌کننده

- کیفیت اتصال سگمنت و فلز مرکزی

- طراحی فلز مرکزی و سختی آن

- موقعیت و شرایط ماشین برش

- مهارت اپراتور

بدیهی است، تمامی فاکتورهای بالا وابسته به یکدیگر بوده و توجه به آنها ضروری می‌باشد (Konstanty, 2002). نوع و درجه سایش دیسک‌های الماسی به بسیاری عوامل پیچیده و درونی بستگی دارد که در جدول ۱-۲ لیست شده‌اند (Ersoy et al., ۲۰۰۵).

جدول ۱-۲- عوامل مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی دایره ای (Ersoy et al., ۲۰۰۵)

ماشین	حرارت	طراحی دیسک	عوامل مؤثر سنگ				
			عوامل عملیاتی	شرایط محیط	ساختمانی	مکانیکی	بافت
قدرت	شوک حرارتی	مکانیزم برش	نیرو یا بار وارده	دگرگونی	درزه ها	مقاومت	سایز دانه
لرزش	فرسایش حرارتی	روش برش	سرعت برش	آب محتوی	شکستگی ها	سختی	شکل دانه
مهارت اپراتور		خصوصیات الماس	نرخ پیشروی		لایه بندی	ساینده‌گی	نوع کانی
		خصوصیات ماتریس	نرخ برداشت ویژه		نوع بافت	فشار روزنه	نوع ماتریس
		نوع سگمنت	سرعت محیطی		جهت درزه		درجه و نوع اتصال
		چگالی الماس،	عمق برش				ساختمان
		مقطع دیسک	انرژی ویژه برش				اتصال
		هیدرولیک					
		دیسک و ساخت					

۱-۳-۲- مکانیزم سایش دیسک‌های الماسی دایره‌ای

سایش دیسک، تخریب (ماکروسکوپی یا میکروسکوپی) و برداشت مواد سگمنت (سطح برش تیغه برش) توسط شکستگی یا ترک‌های بوجود آمده در سنگ، که موجب کاهش عمر دیسک می‌شود، تعریف می‌شود. دیسک‌های الماسی شامل سه قسمت ماتریس مواد (آلیاژ کبالت، مس، آهن و نیکل) و الماس و هسته فلزی می‌باشند.

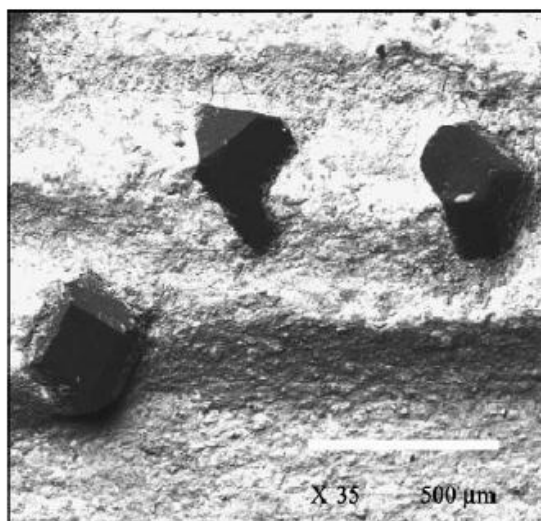
ویژگی‌های سایش ماتریس و الماس در برش سنگ قابل ملاحظه و متفاوت می‌باشد، چون الماس‌ها از

هر ساینده‌ای سخت‌تر بوده و رفتار سایشی متفاوت با ماتریس، از خود نشان می‌دهند. الماس‌ها از ماتریس‌ها شکننده‌تر بوده و در برابر کشش و تنش برشی تولید شده در لبه برش نمی‌توانند به تنهایی به ویژه زمانی که تحت تأثیر بارگذاری شدید قرار می‌گیرند، مقاومت کنند. لذا رفتار سایشی ابزار الماسی بسیار پیچیده بوده و در سطح تماس دیسک و سنگ، ممکن است، خراش، فرسایش، خستگی برش و سایش شدید به‌طور هم‌زمان یا به تنهایی در سایش دیسک‌های الماسی مؤثر باشند. دیسک معمولاً توسط یک مکانیزم میکروسکوپی شامل لایه‌های سطحی رخ می‌دهد که در نهایت در مقیاس ماکروسکوپی به صورت سطح سائیده شده دانه الماس ظاهر می‌شود. شیارها و گودی‌های بسیاری در منطقه تماس ذرات با سنگ تشکیل می‌شود و در نهایت، فرسایش پس از عبور جریان سیال حاوی ذرات جامد و خرده‌های کوچک سنگ، انجام می‌شود (Ersoy et al., ۲۰۰۵). نمونه‌ای از فرسایش در اطراف یک کریستال الماس (تصویر دیجیتال پردازش شده)، در شکل ۲-۲ مشاهده می‌شود. کریستال کامل الماس یک دیسک برش در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲- سطح سائیده شده دانه الماس دیسک برش (Ersoy et al., ۲۰۰۵)

ذرات الماس نسبتاً ترد و شکننده هستند و سختی بالایی نیز دارند، اما در برابر ضربه چندان مقاوم نیستند و اغلب در اثر برخورد پوسته پوسته شده، خرد و ترک می‌خورند. این نوع سایش اغلب در دیسک‌های الماسی دایره‌ای مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۳- کریستال کامل الماس دیسک برش (Ersoy et al., ۲۰۰۵)

در صورتی که الماس بیش از حد شکننده باشد، سریع تر از مواد ماتریس سایش می یابد و بارگذاری بیش تر بر روی دیسک باقی می ماند، در نتیجه دیگر نمی توان توسط ماتریس و الماس (دیسک)، سنگ را برش داد. در مقابل، اگر مواد ماتریس نرم باشند، الماس قبل از اتمام برش های مؤثر، از محل نصب خود خارج شده و منجر به سایش بیش از حد دیسک می شود. بنابراین به منظور برش مؤثر، مواد ماتریس باید به همان اندازه ذرات الماس سائیده شوند.

آزمایش های برش نشان داده است که یک ماتریس نرم بایستی برای برش مواد سخت استفاده شود زیرا سرعت سایش دانه های الماس در برش این سنگ ها بیشتر و سریع تر می باشد. بنابراین سختی ماتریس باید به گونه ای باشد که برای ایجاد لبه های برنده دانه های الماس، به اندازه کافی سائیده شود، تا حرکت لبه برنده و جریان تراشه برداری به سهولت انجام شود. این کار باعث طولانی شدن عمر دیسک و کاهش سایش و افزایش نرخ برش می شود. سایش دیسک ها می تواند به اشکال مختلفی صورت پذیرد که معمول ترین مکانیزم سایش عملیاتی دیسک ها در طی برش سنگ، به شکل سائیدگی (خراش) ظاهر می شود. البته بارگذاری ضربه و فرسودگی شدید نیز به سایش دیسک ها کمک می کنند. مطالعات زیادی برای بررسی کارکرد دیسک های برش در صنعت برش سنگ با توجه به متغیرهایی نظیر اندازه و شکل دانه های الماس، تراکم دانه های الماس و سختی چسب فلزی (باند)

انجام شده است. نتایج تحقیقات نشان داده است که برای سنگ‌های سخت نسبت به سنگ‌های نرم‌تر به اندازه دانه‌های کوچک‌تر نیاز است، کوچک‌تر شدن اندازه دانه‌ها سهم بار وارده بر هر دانه را کاهش می‌دهد که در این صورت فاصله و فضای بیشتری برای براده‌های تولید شده ایجاد می‌شود. در صورت استفاده از ابزار دارای دانه‌های الماس بزرگ برای برش سنگ‌های سخت، نفوذ دانه‌های الماس به داخل سنگ محدودتر می‌شود، در این صورت دانه از باند فلزی زودتر جدا شده و یا دچار سایش شدید می‌شود (Lou & Liao, 1995).

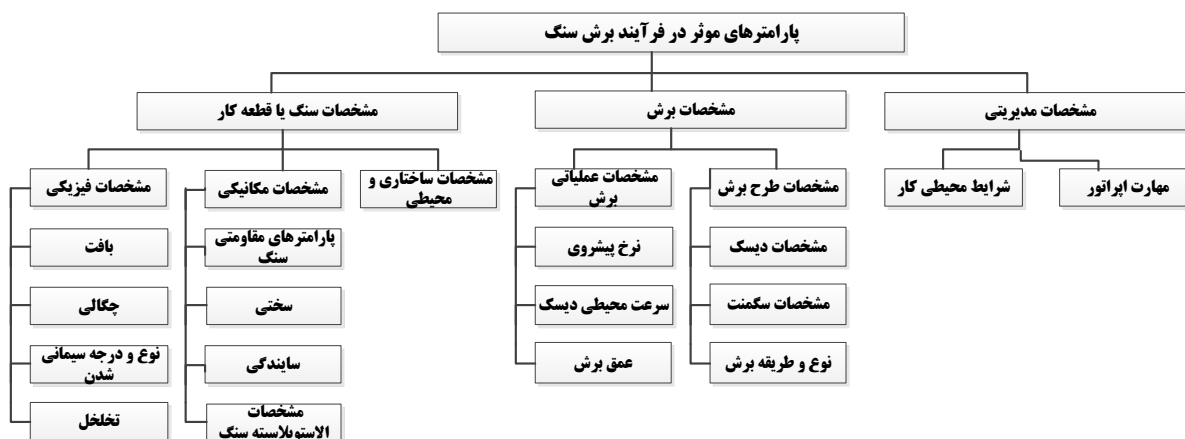
اغلب از سایش ماتریس به عنوان سایش ماکروسکوپی^۱ نام برده می‌شود. معمولاً برای مطالعه سایش ماتریس از مشاهدات میکروسکوپی و اندازه‌گیری ماکروسکوپی استفاده می‌شود. در واقع با اندازه‌گیری کاهش ارتفاع نسبت به مقدار کارکرد ابزار می‌توان سایش ماکروسکوپی آن را تعیین کرد. این اندازه‌گیری توسط ابزار خاص اپتیکی^۲ یا مکانیکی که بدین منظور ساخته شده‌اند، انجام می‌شود.

۴-۲- عوامل مؤثر در فرآیند برش و سایش دیسک‌های برش‌دهنده الماسی

پارامترهای مؤثر در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی را می‌توان به سه بخش اصلی شامل الف) مشخصات سنگ یا قطعه کار ب) مشخصات برش و ج) مشخصات مدیریتی مانند شرایط محیطی کار و مهارت اپراتور تقسیم نمود. هر یک از این پارامترها در کارایی و توان تولید به نحو خاصی تأثیرگذار می‌باشند. در شکل ۴-۲ پارامترهای مؤثر در فرآیند برش نشان داده شده است. در ادامه توضیح کامل هر یک از این پارامترها آورده شده است.

^۱ Macroscopic

^۲ Optic



شکل ۲-۴- پارامترهای مؤثر در فرآیند برش سنگ

۱-۴-۲- مشخصات سنگ

مشخصات سنگ یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در فرآیند برش سنگ می‌باشد که به خصوص در فرآیند تشکیل تراشه تأثیرگذار است. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ، مانند مقاومت و اندازه دانه‌ها بیش‌تر بر برش تأثیرگذار است. دانه‌های الماس مواد را از داخل شیار سنگ مورد نظر برمی‌دارند. عوامل دیگری مانند، نیروهای بین دانه الماس و سنگ، تنش توزیع شده در سنگ، درجه حرارت ابزار در محل تماس با قطعه‌کار، در این فرآیند مؤثر هستند (Turchetta, ۲۰۱۲). مشخصات سنگ یکی از عوامل مؤثر در فرآیند برش و تولید می‌باشد که تعیین کننده شرایط، کیفیت و کمیت اندرکنش میان سنگ و ماشین بوده و مکانیزم تشکیل تراشه و پیشروی ابزار را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. خواص نظیر استحکام، تردی، مقاومت در برابر ضربه، اندازه دانه‌ها، بافت سنگ، وجود درزه‌ها و خلل و فرج در سنگ و چسبندگی بین دانه‌های سنگ نیز می‌توانند در فرآیند برش نقش مهمی را داشته باشند. همچنین برای انتخاب تیغه برش (دیسک)، ماشین برش و شرایط عملیاتی مشخص بودن خواص سنگ ضروری است. همچنین این که آیا یک سنگ خاص می‌تواند توسط یک تیغه دیسک معین بریده شود نیز اهمیت دارد (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴).

با توجه به گستردگی مشخصات سنگ می‌توان آن را به سه دسته مشخصات فیزیکی، مکانیکی و

خواص بافتی (ساختاری) سنگ تقسیم‌بندی کرد. مشخصات فیزیکی سنگ مانند چگالی، اندازه و شکل دانه‌ها، تخلخل، درصد کوارتز، ضریب بافت و نوع و درجه سیمانی شدن، مشخصات مکانیکی سنگ مانند پارامترهای مقاومتی، سختی، ساینده‌گی و خواص الاستیک و پلاستیک و مشخصات ساختاری سنگ مانند درزه، شکاف، ترک، کلیواژ و جهت‌یافتگی کانی‌ها در سنگ می‌باشد. بررسی مشخصات سنگ‌ها، نحوه انجام مطالعات آزمایشگاهی و اندازه‌گیری این پارامترها به تفصیل در پیوست ۱ آورده شده است.

۲-۴-۲- مشخصات برش

مشخصات برش علاوه بر مشخصات سنگ یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در بررسی سایش دیسک‌های الماسی و قابلیت برش سنگ‌ها است. مشخصات برش جزء پارامترهای قابل کنترل بوده و نقش مهمی در راندمان و بهینه‌سازی فرآیند برش می‌تواند ایفا کند. با انتخاب صحیح هر کدام از این پارامترها می‌توان به یک الگوی مناسب اقتصادی از لحاظ کاهش مصرف دیسک، کاهش مصرف انرژی و افزایش نرخ تولید دست یافت. مشخصات برش سنگ را می‌توان در دو بخش پارامترهای عملیاتی و مشخصات طرح برش دسته‌بندی و بررسی نمود.

الف- پارامترهای عملیاتی مؤثر در فرآیند برش سنگ

پارامترهای عملیاتی مؤثر در فرآیند برش سنگ شامل سرعت چرخش دیسک (سرعت محیطی)^۱، عمق برش^۲، نرخ پیشروی^۳، نیروهای برش (افقی، عمودی و محوری)، انرژی ویژه برش (SE_{cut}) می‌باشند. سیال هم به عنوان خنک‌کننده عمل می‌کند که معمولاً از آب شهری به این منظور استفاده می‌شود. نرخ پیشروی یا سرعت حرکت قطعه کار، با توجه به سرعت محیطی و نیروهای وارده بر دیسک تعیین می‌شود. عملکرد مناسب دیسک زمانی است که از یک نرخ پیشروی مناسب استفاده شود. نرخ‌های پیشروی بالا سبب سایش زودرس سگمنت‌ها و کاهش راندمان برش می‌شوند.

۱-Peripheral speed

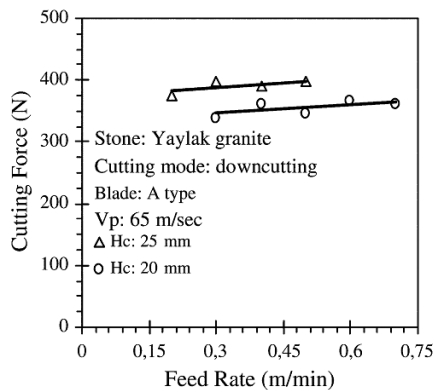
۲-Depth of cut

۳-Feed rate

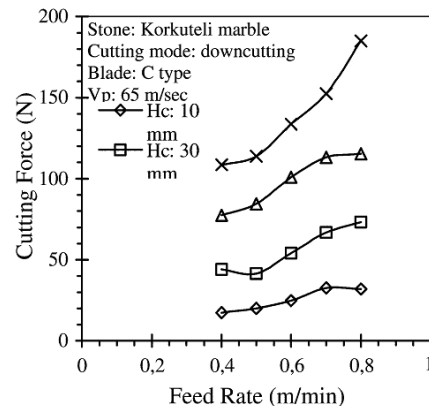
افزایش بیش از حد نرخ پیشروی، موجب افزایش ساییش و کاهش عملکرد بهینه سگمنت‌ها می‌شود. عمق برش، میزان نفوذ دیسک در قطعه کار در حین برش می‌باشد. در آزمایش‌ها معمولاً، عمق برش، سرعت محیطی و نرخ پیشروی، به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شوند، در حالی که سایر متغیرها به عنوان متغیرهای وابسته که به نوع دیسک، نوع سنگ و سرعت محیطی بستگی دارند، در نظر گرفته می‌شوند (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴).

• نرخ پیشروی

نرخ پیشروی، مسافت قطعه کار برش خورده در واحد زمان (cm/min) تعریف می‌شود. توجه به این نکته که عملکرد بهینه دیسک برش، با استفاده از نرخ پیشروی مناسب بدست می‌آید، ضروری است. نرخ پیشروی بیش از حد بالا باعث ساییش زودرس دیسک، در اثر خروج دانه‌های الماس پیش از موعد می‌شود. رابطه نرخ پیشروی با نیروهای برش در شکل‌های ۲-۵ و ۲-۶ در سنگ مرمر و گرانیت در عمق‌های مختلف برش و سرعت محیطی ثابت نشان داده شده است. به‌طور کلی، افزایش در نیروی برش، نرخ پیشروی را افزایش می‌دهد (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴).

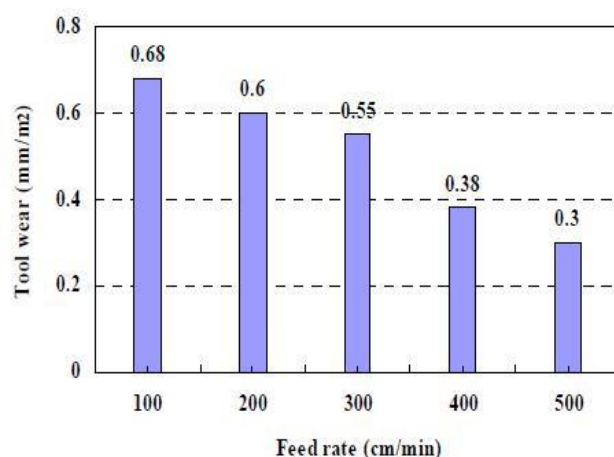


شکل ۲-۶- رابطه بین نرخ پیشروی و نیروی برش سنگ گرانیت (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴)



شکل ۲-۵- رابطه بین نرخ پیشروی و نیروی برش سنگ مرمر (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴)

همان‌طور که در شکل ۲-۷ نشان داده شده است با افزایش نرخ پیشروی مقدار ساییش شعاعی دیسک‌های برش در واحد سطح برش کاهش می‌یابد (یوسفی، ۱۳۸۵).



شکل ۲-۷- تغییرات سایش ابزار بر حسب نرخ پیشروی (یوسفی، ۱۳۸۵)

• سرعت محیطی

نتایج نشان داده که با افزایش سرعت محیطی، نیروها (نرمال و مماسی) کاهش می‌یابند. همچنین با افزایش سرعت محیطی مقدار سنگ برش خورده در واحد زمان برای هر سگمنت کاهش می‌یابد. با این حال، افزایش بیش از حد سرعت محیطی، باعث از بین رفتن سگمنت دیسک در مدت زمان کوتاه‌تر از عمر مفید آن می‌شود و در نهایت کاهش عملکرد بهینه دیسک و افزایش سایش را باعث می‌شود (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴).

• عمق برش

عمق برش میزان نفوذ دیسک در سنگ در طی فرآیند برش می‌باشد. نیروی مورد نیاز برای نرخ پیشروی معین کمتر از نیروی مورد نیاز برای عمق برش معین در سنگ می‌باشد (شکل‌های ۲-۵ و ۲-۶). عمق برش در قطعه‌کار، در مواد با سختی متوسط و نرم مانند مرمیریت، تراورتن و سنگ آهک در یک مرحله برش انجام می‌شود. لیکن در صورت نیاز به عمق برش بیشتر از ۳۰ میلی‌متر در مواد سخت مانند گرانیت‌ها، برش می‌بایست در مراحل بین ۸ تا ۲۰ میلی‌متر انجام شود (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴).

• نرخ برداشت ویژه

نرخ برداشت ویژه یا نرخ برش، سطح برش خورده در واحد زمان تعریف شده و برحسب سانتیمتر مربع

بر دقیقه یا متر مربع بر ساعت بیان می‌شود. نرخ برداشت ویژه می‌تواند از رابطه ۱-۲ محاسبه شود (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴):

$$Q'_w = \frac{L \times H}{t} \quad (۲-۱)$$

که در این رابطه:

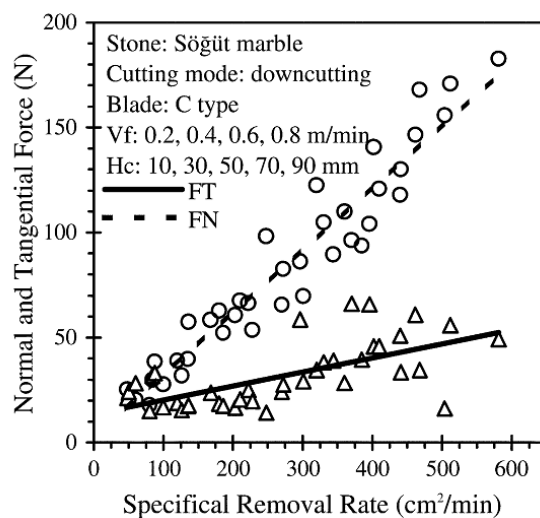
Q'_w : نرخ برداشت ویژه (سانتی‌متر مربع بر دقیقه)

L: طول بلوک سنگ (سانتی‌متر)

H: ضخامت بلوک سنگ (سانتی‌متر)

t: زمان برش (دقیقه)

رابطه بین نیروها (نرمال و مماسی) و نرخ برداشت ویژه در یک سرعت محیطی ثابت و هشت عمق برش مختلف در نرخ پیشروی معین در سنگ آهک بژ معدن سوگات در شکل ۲-۸ نشان داده شده است.



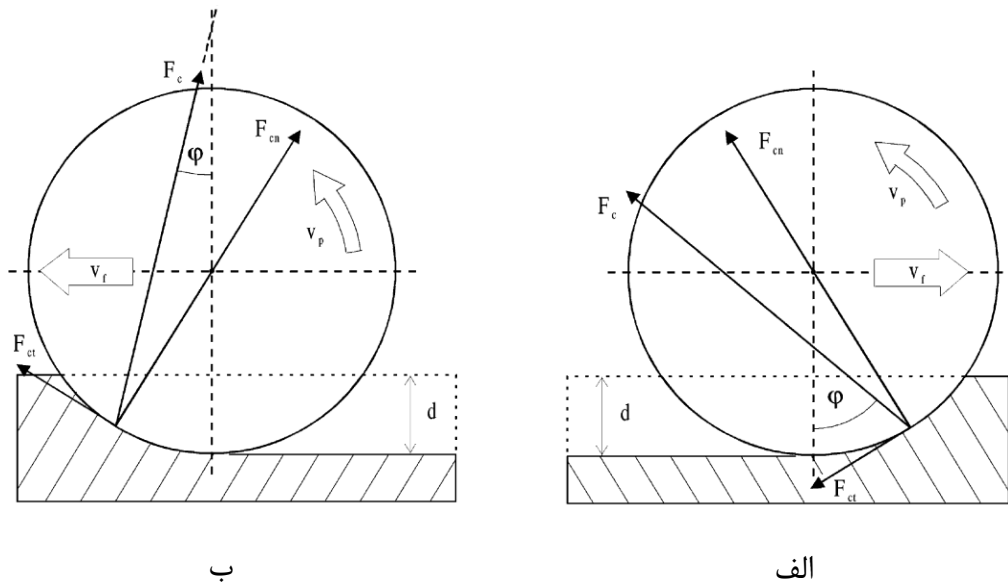
شکل ۲-۸- رابطه بین نیروهای نرمال و مماسی و نرخ برداشت ویژه در سرعت محیطی ثابت و هشت عمق برش مختلف در سنگ آهک بژ معدن سوگات (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴).

همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات نیروی نرمال بیش‌تر از نیروی مماسی است، هم‌چنین یک رابطه خطی بین دو پارامتر مذکور برای یک مقدار بحرانی وجود دارد.

هرگونه افزایش در نیروها، بیش از مقدار مورد نیاز برای تولید نرخ پیشروی ماکزیمم، می‌تواند باعث عدم افزایش میزان خرد شدن سنگ‌ها و در واقع سبب احتمال کاهش نرخ پیشروی شود، زیرا در این حالت نیروهای مورد نیاز برای چرخش تیغه برش، بیش از ظرفیت موتور ماشین برش بوده و سبب به تأخیر انداختن شرایط برش خواهد شد (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴).

ب- نوع و طرح برش

از پارامترهای مؤثر در سایش دیسک‌های الماسی و قابلیت برش سنگ، طرح برش است. برش سنگ‌های ساختمانی به‌طور معمول به دو روش، برش رو به پائین^۱ و برش رو به بالا^۲ انجام می‌شود. شکل ۲-۹ حالت‌های مختلف برش و نیروهای برشی وارده بر یک دیسک برش‌دهنده دایره‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۹- روش‌های مختلف برش و نیروهای برشی مربوطه الف) برش رو به بالا ب) برش رو به پایین (Konstanty, ۲۰۰۲)

مطابق شکل در دو روش مذکور جهت و زوایای نیروهای برشی با یکدیگر متفاوت است که این امر نقش مهمی در فرآیند برش سنگ دارد. همچنین با تغییر روش برش دیسک چگونگی نفوذ دانه الماس تغییر می‌کند. در روش برش رو به پائین یک دانه الماس در لحظه اول تماس با سنگ، با حداکثر عمق برش نفوذ

^۱Down cutting
^۲Up cutting

می‌کند، به عبارت دیگر در ابتدای برش، دانه الماس بیش‌ترین عمق نفوذ خود را دارد. پس از آن با ادامه برش توسط دانه الماس، به مرور از عمق برش دانه الماس کاسته شده و در نهایت تماس آن با سنگ قطع می‌شود. لیکن در برش رو به بالا دانه الماس در ابتدا به سطح کار مماس می‌شود و به تدریج عمق نفوذ آن افزایش می‌یابد و در زمان خارج شدن از منطقه برش، دانه الماس به حداکثر عمق برش خود می‌رسد. در روش برش رو به پائین، ضربه‌های مکانیکی با شدت بالا به دانه الماس وارد می‌شود و بسته به نوع دانه‌ها و ماتریس فلزی شکسته یا کنده شدن دانه‌های الماس ایجاد می‌شود. لذا در صورت استفاده از روش رو به پائین، برای افزایش عمر ابزار بهتر است از دانه‌های الماس با مقاومت بیش‌تر در برابر ضربه استفاده شود. در برش رو به پائین نرخ سایش سگمنت‌ها با یکدیگر متفاوت است. به طوری که در یک سگمنت قسمتی که زودتر وارد منطقه برش می‌شود، سایش بیش‌تری داشته و دانه‌های الماس بعدی سایش کم‌تری خواهند داشت. در مقابل در روش برش رو به بالا در ابتدای تماس، دانه الماس تنها با سنگ مماس می‌شود که حاصل آن، سایش اصطکاکی دانه الماس می‌باشد (Konstanty, 2002).

۳-۴-۲- معیارهای مناسب برای بررسی عملکرد برش و سایش دیسک‌های الماسی

الف) نیروی برش

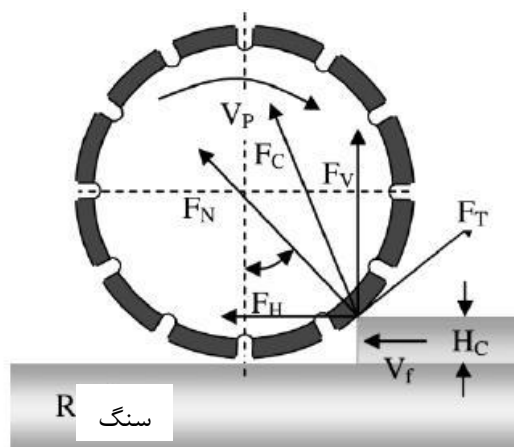
نیروی برش، نیرویی است که باعث نفوذ ابزار برش به قطعه‌کار و انجام برش می‌شود. در حقیقت در زمان برش یک اندرکنش مکانیکی بین ابزار و سنگ، باعث ایجاد نیروهای برش می‌شود که در نهایت موجب برش سنگ می‌شود. نیروها در فرآیند برش شامل نیروهای افقی، قائم، مماسی، عمودی و نیروی برش می‌باشند. نیروی برشی وارده به ابزار الماسی یا یک دانه الماس به دو مؤلفه نیروی مماسی و نیروی عمودی تجزیه می‌شود. نیروی مماسی برابر با نیروی برشی در راستای حرکت نسبی دانه الماس و سنگ بوده و نیروی عمودی، نیروی عمود بر راستای حرکت نسبی دانه الماس و سنگ می‌باشد. در آزمایش‌های مربوطه نیروهای افقی و عمودی توسط دستگاه دینامومتر اندازه‌گیری می‌شوند و سایر نیروها از روابط ۲-۲ تا ۴-۲ به صورت تحلیلی قابل محاسبه می‌باشند (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴).

$$F_N = F_V \cos a + F_H \sin a \quad (2-2)$$

$$F_T = F_V \sin a + F_H \cos a \quad (2-3)$$

$$F_C = \sqrt{F_N^2 + F_T^2} \quad (2-4)$$

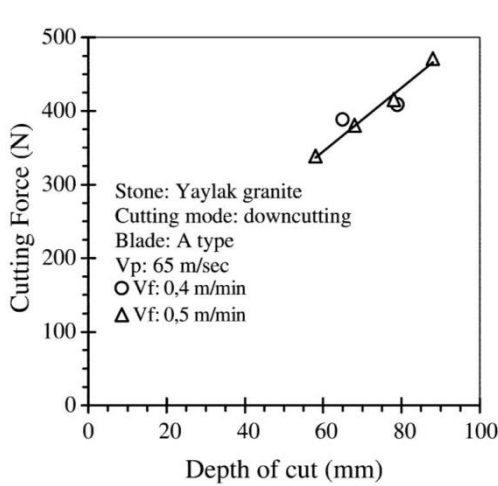
که در روابط بالا، F_N نیروی نرمال محوری، F_T نیروی مماسی، F_C نیروی برشی، F_V نیروی قائم، F_H نیروی افقی، و همگی بر حسب نیوتن می‌باشند. شکل ۱۰-۲ نیروهای مؤثر در فرآیند برش را در حالت برش رو به پایین نشان می‌دهد.



شکل ۱۰-۲ - نیروهای مؤثر در فرآیند برش رو به پایین (Ersoy & Atici., ۲۰۰۴)

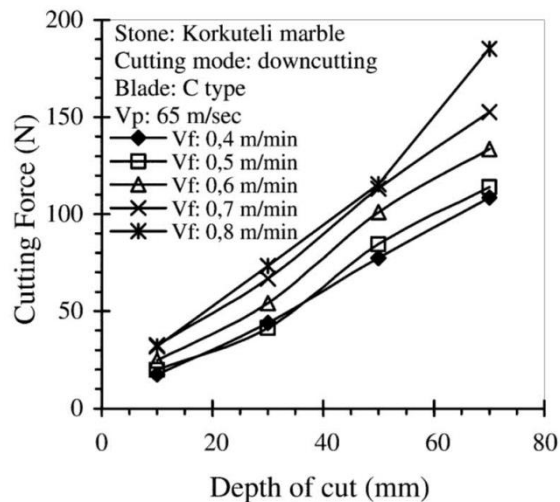
در شکل بالا، V_p سرعت محیطی، V_f سرعت پیشروی و H_c عمق برش می‌باشند. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر این نیروها شامل متغیرهای عمق برش، سرعت پیشروی قطعه‌کار و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها می‌باشد. این متغیرها به‌طور مستقیم روی نیروهای برشی تأثیر دارند. به طوری که با افزایش عمق برش، نیروهای برشی نیز افزایش می‌یابند. خصوصیات مختلف سنگ مانند دانه‌بندی، تخلخل، استحکام و درزه‌ها، موجب تغییر در نیروهای برش می‌شود. به‌طور کلی، هر خصوصیت سنگ، که برش آن را مشکل‌تر می‌کند، نیروهای برش را نیز افزایش می‌دهد. در صورت استفاده از روان‌کار نیروهای برشی کاهش می‌یابند. با فرض ثابت بودن شرایط برش، نسبت نیروهای برش نیز ثابت می‌ماند اما در عمل معمولاً این‌چنین نبوده و شرایط برش دائم تغییر می‌کند. به همین دلیل می‌توان از این معیار برای ارزیابی تغییرات شرایط برش که عمدتاً ناشی از تغییر در سگمنت الماسی می‌باشد،

استفاده کرد. افزایش این نسبت در فرآیند برش نشان‌دهنده کندی ابزار و مشکل‌تر شدن تشکیل تراشه در عملیات برش می‌باشد. از طرف دیگر با کم شدن این نسبت می‌توان نتیجه گرفت که ابزار در این شرایط، عملیات برش را بهتر انجام می‌دهند. در سرعت پیشروی ثابت، نیروهای برش با کاهش عمق برش و افزایش سرعت محیطی، کاهش می‌یابند (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴). شکل‌های ۲-۱۱ و ۲-۱۲ روابط بین نیروی برش و عمق برش را نشان می‌دهند.



شکل ۲-۱۲- رابطه بین عمق برش و نیروی برش

سنگ گرانیت (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴)



شکل ۲-۱۱- رابطه بین عمق برش و نیروی برش

سنگ مرمر (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴)

ب) انرژی ویژه برش

انرژی ویژه برش، مقدار انرژی مورد نیاز برای برداشت واحد حجم سنگ در حین برش تعریف می‌شود که یکی از معیارهای بررسی عملکرد برش می‌باشد.

انرژی ویژه برش با دو پارامتر نیروی برش و میزان سایش رابطه مستقیم دارد. به طوری که با افزایش مقادیر نیروی برش و نرخ سایش، مقدار انرژی ویژه برش نیز افزایش می‌یابد. محاسبه مقدار انرژی ویژه برش، به ویژه برای تخمین قدرت مورد نیاز برای یک عملیات برش خاص مفید است. مقدار پایین‌تر انرژی ویژه برش نشان می‌دهد که دیسک، برش مؤثرتری دارد. مقدار انرژی ویژه برش می‌تواند از رابطه ۲-۵ محاسبه شود (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴):

$$SE_{cut} = \frac{P_C}{Q_W} = \frac{F_T V_P}{H_C W_m V_f} \quad (2-5)$$

که در این رابطه:

SE_{cut} : انرژی ویژه برش (مگاژول بر متر مکعب)

P_C : توان موتور (کیلو وات یا اسب بخار)

Q_W : حجم برش (متر مکعب بر ثانیه)

F_T : نیروی مماسی (نیوتن)

V_P : سرعت محیطی دیسک (متر بر ثانیه)

H_C : عمق برش (متر)

W_m : عرض سگمنت (متر)

V_f : سرعت پیشروی (متر بر ثانیه)

به‌طور کلی پایین بودن مقدار انرژی ویژه برش در فرآیند برش نشان‌دهنده راندمان بالای برش می‌باشد

(Ersoy & Atici, ۲۰۰۴).

۴-۲- عوامل مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی

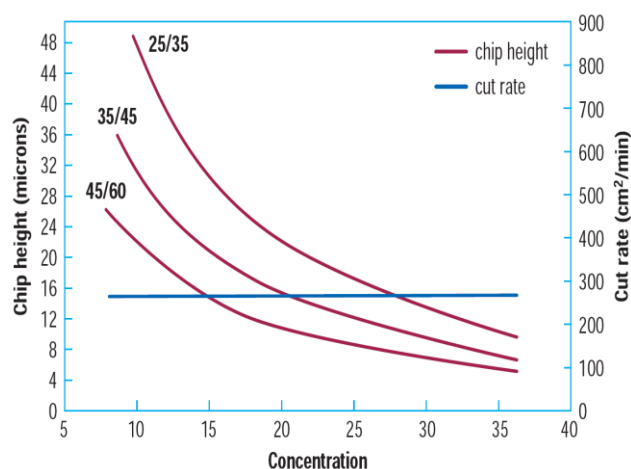
دیسک‌های الماسی دایره‌ای کاربردهای صنعتی گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. این برش‌دهنده‌ها چون سرعت برش بالایی دارند، انعطاف‌پذیر و مقرون به صرفه بوده و به آسانی و با دقت بالا سطح قطعه‌کار را برش می‌دهند، مورد استفاده زیادی دارند (Ersoy et al., 2005). دیسک‌های الماسی دایره‌ای در اثر عوامل متعددی سائیده می‌شوند. عوامل اصلی که در بررسی سایش دیسک‌های الماسی بایستی مورد توجه قرار گیرند شامل نوع دیسک الماسی، پارامترهای عملیاتی برش و مشخصات سنگ تحت برش می‌باشند. بررسی خصوصیات سنگ به تنهایی برای ارزیابی میزان سایش کافی نبوده و بایستی سایر پارامترها نیز مورد بررسی قرار گیرند. سنگ‌های مختلف، میزان سایش متفاوتی را با توجه به ماهیت متقابل بین دیسک و سنگ تولید می‌کنند.

• ساختمان دیسک‌های برش‌دهنده الماسی و سایش آن‌ها

دیسک الماسی از یک بدنه فلزی، دانه‌های ساینده و باند (چسب) تشکیل شده است. بدنه فلزی نیروی چرخشی را از محور ماشین به دانه‌های سگمنت منتقل می‌کند. بدنه دیسک شکل ابزار الماسی را تعیین کرده و تنش‌های حاصل در حین فرآیند برش را جذب می‌کند. کریستال‌های الماس که نقش برنده را در سگمنت دارند، درون ماتریس محکمی که وظیفه حفظ و نگهداری این ذرات را بر عهده دارد، قرار دارند. خصوصیات دانه‌های الماس، با نوع و شکل دانه‌ها، درصد تراکم آن‌ها در چسب و اندازه مش آن‌ها تعیین می‌شود. باند (چسب) یک آلیاژ فلزی (آلیاژ کبالت، مس، آهن و نیکل) است که دانه‌های ساینده را به بدنه ابزار متصل می‌کند (یوسفی، ۱۳۸۵).

به‌طور کلی سه عامل مهم، اندازه و شکل دانه‌های الماس، تراکم الماس در چسب و سختی چسب فلزی تعیین‌کننده کارکرد این نوع ابزار الماسی می‌باشند. بهترین نوع دانه‌های الماس به شکل کریستال‌های مکعبی هشت وجهی منظم می‌باشند که حداکثر استحکام و مقاومت در برابر سایش را از خود نشان می‌دهند. ابزار برشی که در آن‌ها دانه‌های الماس به این شکل بکار رفته است برای برش سنگ‌های با سختی زیاد مناسب می‌باشند.

شکل ۲-۱۳ تغییرات ضخامت تراشه و نرخ برش را نسبت به تراکم دانه‌های الماس با اندازه‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش تراکم دانه‌های الماس مقدار ضخامت تراشه کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۱۳ - تغییرات ضخامت تراشه و نرخ برش نسبت به تراکم دانه الماس با اندازه‌های مختلف (Engels, 2003)

اگر استحکام دانه‌های الماس در چسب کم باشد و یا ماده چسب بیش از اندازه سخت باشد، باعث می‌شود دانه الماس سریع‌تر سایش یافته، که این عمل موجب پدیده لیزش‌دگی ابزار در فرآیند برش می‌شود. در این حالت کارکرد دیسک الماس با مشکل روبرو می‌شود. همچنین اگر ماده چسب بیش از اندازه نرم باشد ماتریس زودتر از دانه الماس فرسوده می‌شود، و دانه الماس قبل از پایان عمر مفید ابزار، از چسب جدا می‌شود که این کار هزینه ابزار را افزایش می‌دهد. در نقطه مقابل، اگر ماتریس دیرتر از موعد مورد نظر سائیده شود، فاصله بین لبه برنده الماس و سطح ماتریس رفته رفته کاهش یافته و تراشه به درستی از ناحیه برش خارج نمی‌شود و از توانایی برش کاسته می‌شود. بنابراین سختی ماده چسب بایستی با سختی دانه الماس به گونه‌ای انتخاب شود که نرخ سایش متناسب با سایش دانه‌های الماس را داشته باشد، تا برش یکنواخت و مؤثر، حاصل شود. انتخاب ماتریس نرم‌تر در برش سنگ‌های سخت‌گرانیته به همین دلیل می‌باشد. چون سرعت سایش دانه‌های الماس در برش این نوع سنگ‌ها بیش‌تر است، بنابراین ماتریس باید به گونه‌ای باشد که برای ایجاد لبه‌های برنده دانه‌های الماس به اندازه کافی سائیده شود تا حرکت لبه برنده و جریان تراشه‌برداری به راحتی انجام شود. ضمناً استحکام چسبندگی بین دانه‌های الماس و ماتریس باید در حد ایده‌آلی باشد تا در اثر ضربه‌های وارده و لرزش دیسک به آسانی از هم جدا نشوند. همچنین زمانی که دانه کنده یا شکسته می‌شود و کارآیی خود را از دست می‌دهد به راحتی در اثر نیروهای وارده از ماتریس جدا شود (Luo, 1997). در نرخ‌های برش بالا، استفاده از دانه‌های الماس متوسط با تراکم بالا در چسب، و در نرخ‌های برش پایین استفاده از دانه‌های الماس کوچک با تراکم کم در چسب، سبب پایداری دانه‌ها در ماتریس و ایجاد شرایط برش مناسب در ابزار الماسی می‌شود (یوسفی، ۱۳۸۵).

نرخ برش و سطح تمام شده مورد نیاز در برش سنگ، تعیین‌کننده اندازه دانه‌های الماس ساینده در فرآیند برش می‌باشند. به عنوان یک قاعده کلی حتی‌الامکان از درشت‌ترین و سخت‌ترین دانه‌های الماس متناسب با سطح تمام شده مناسب در سنگ استفاده می‌شود. برای ابزار سنگ‌بری اندازه

دانه‌های الماس مورد استفاده بین ۲۵ تا ۱۰۰ میکرون می‌باشد. روش‌های اندازه‌گیری سایش ابزار به دو روش انجام می‌شود: روش‌های مستقیم و روش‌های غیرمستقیم. در روش‌های مستقیم میزان سایش ابزار مستقیماً توسط وسایل اندازه‌گیری محاسبه می‌شود. عیب این روش‌ها این است که عملیات ماشین‌کاری باید متوقف شود و زمان بیکاری ماشین‌آلات زیاد می‌شود. در روش‌های غیرمستقیم در حین عملیات ماشین‌کاری، با اندازه‌گیری پارامترهایی که با سایش ابزار ارتباط دارند سایش ابزار تخمین زده می‌شود (یوسفی، ۱۳۸۵). یکی از مشخصه‌های بسیار مهم ابزار برش دیسکی، شعاع عملکرد دیسک می‌باشد. این شعاع معرف حداکثر عمق برش در فرآیند برش سنگ می‌باشد. شکل ۲-۱۴ حداکثر عمق برش یک دیسک برش را با توجه به قطر دیسک و قطر فلانج^۱ دیسک نشان می‌دهد. شعاع عملکرد دیسک یا به عبارت دیگر حداکثر عمق برش از رابطه ۲-۶ محاسبه می‌شود:

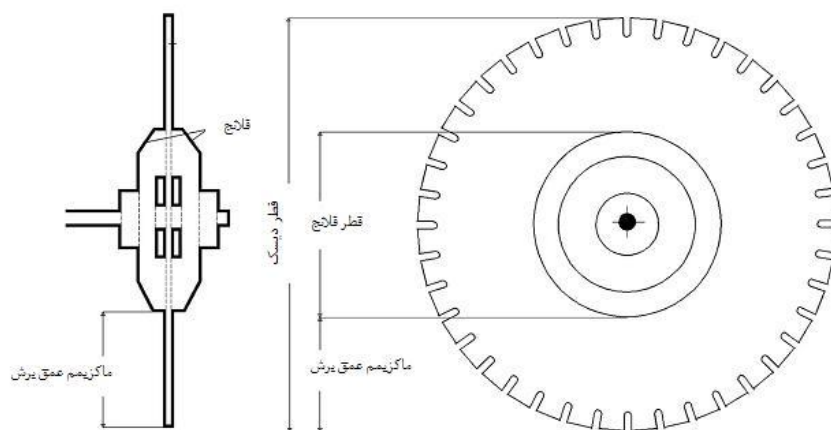
$$d_{max} = \frac{D_{saw} - D_{flange}}{2} \quad (2-6)$$

که در این رابطه:

D_{flange} : قطر فلانج دیسک

D_{saw} : قطر دیسک

d_{max} : شعاع عملکرد دیسک (حداکثر عمق برش)



شکل ۲-۱۴- حداکثر عمق برش دیسک برش با توجه به شعاع دیسک و شعاع فلانج دیسک (Tonshoff et al., ۲۰۰۲)

^۱Flange

شعاع عملکرد دیسک از پارامترهای عملیاتی مهم در فرآیند برش سنگ می‌باشد، نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش قطر دیسک، مقدار نرخ تولید کاهش می‌یابد (Kahraman et al., ۲۰۰۴).

۲-۵- جمع‌بندی

یکی از مهم‌ترین پارامترهای فنی و مهندسی در صنایع سنگ‌بری سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش می‌باشد. پیش‌بینی مقدار سایش دیسک‌های الماسی با رویکرد کاهش هزینه انرژی مصرفی و هزینه ابزار برش می‌تواند با شناخت مکانیک سنگ‌ها و پارامترهای عملیاتی برش و تأثیر آنها بر سایش دیسک‌ها به شدت در تعیین هزینه‌های تولید مؤثر باشد. لذا در این فصل از تحقیق در ابتدا نحوه تشکیل تراشه بیان شد و سپس به معرفی فرآیند سایش دیسک‌های الماسی و پارامترهای مؤثر بر آن پرداخته شد. در نهایت تأثیر تغییر پارامترهای مختلف بر میزان سایش دیسک‌های الماسی با توجه به تحقیقات انجام شده به سه دسته تأثیر مشخصات سنگ، تأثیر پارامترهای عملیاتی و تأثیر معیارهای ارزیابی سایش تقسیم و بررسی شد.

بررسی سابقه علمی موضوع

۳-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه فرآیند برش سنگ و عملکرد سایش ابزار الماسی و سیستم‌های طبقه‌بندی پرداخته شده و نتایج این تحقیقات به‌طور خلاصه و به صورت دسته‌بندی ارائه خواهد شد. سپس در پایان به نقد و بررسی تحقیقات گذشته پرداخته می‌شود.

۳-۲- مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه عملکرد سایش دیسک‌های الماسی در

فرآیند برش سنگ

سایش دیسک‌های برش‌دهنده سنگ در فرآیند برش سنگ یکی از مهم‌ترین پارامترهای فنی و مهندسی در زمینه برش سنگ محسوب می‌شود. با توجه به اهمیت و تأثیر آن در قیمت تمام شده سنگ فرآوری شده تولیدی در کارخانه‌های سنگ‌بری، تحقیقات گسترده‌ای بر روی پارامترهای مؤثر در سایش دیسک‌های الماسی و بهینه‌سازی فرآیند برش سنگ انجام شده است. به منظور بررسی کارهای قبلی انجام گرفته در این زمینه، آن‌ها را به بخش‌های اصلی زیر تقسیم کرده و هر کدام به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد:

- تأثیر مشخصات سنگ بر سایش ابزار الماسی در فرآیند برش سنگ.
- تأثیر پارامترهای عملیاتی بر سایش ابزار الماسی در فرآیند برش سنگ.
- معیارهای ارزیابی عملکرد دیسک‌های برش‌دهنده الماسی.

۳-۲-۱- تأثیر مشخصات سنگ بر سایش ابزار الماسی

مشخصات سنگ یکی از عوامل مهم و مؤثر بر سایش ابزار الماسی می‌باشد. ویژگی‌ها و مشخصات سنگ بسیار متنوع و گسترده بوده که به منظور سهولت در تجزیه و تحلیل و مطالعه آن، می‌توان به سه دسته مشخصات فیزیکی، مکانیکی و ساختاری سنگ تقسیم‌بندی کرد. تحقیقات صورت گرفته در این زمینه در ادامه آورده شده است.

● جنینگ^۱ و رایت^۲ در سال ۱۹۸۹ به مطالعه عوامل مؤثر بر عملکرد دیسک‌های الماسی، قابلیت برش و ارتباط میان طول عمر دیسک الماسی با مشخصات سختی و ساینده‌گی سنگ‌های سخت و نرم پرداختند. نتایج نشان داد که مقدار سایش ارتباط بهتری با سختی در مقایسه با ساینده‌گی سنگ دارد. همچنین افزایش نرخ برش، میزان شدت جریان مصرفی را افزایش می‌دهد.
(Jenning & wright, 1989).

● با توجه به کارهای ایوبوگلو^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۳ که تأثیر مشخصات سنگ بر عملکرد سایش دیسک‌های الماسی دایره‌ای در فرآیند برش سنگ‌های آندوزیتی مطالعه شد. مطالعات بر روی ۲۴ نوع سنگ برای ارزیابی و تعیین تغییرات نرخ سایش انجام شد. نتایج نشان داد که نرخ سایش با افزایش پارامترهای مقاومتی سنگ مانند مدول الاستیسیته و سختی افزایش یافته و با افزایش ضریب جذب آب، کاهش می‌یابد (Eyuboglu et al., ۲۰۰۳).

● قهرمان^۴ و همکارانش در سال ۲۰۰۴ عملکرد دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های کربناته را بررسی کردند. آن‌ها ارتباط میان مشخصات مکانیکی سنگ‌ها مانند مقاومت ضربه‌ای، چسبندگی، مقاومت ساینده‌گی و پارامترهای عملیاتی دستگاه برش شامل نرخ پیشروی، قطر دیسک، سرعت چرخش دیسک و عمق برش را مورد بررسی قرار دادند. مدل تجربی پیشنهادی برای پیش‌بینی نرخ برش نشان داد که با افزایش عوامل مقاومتی سنگ نرخ برش کاهش می‌یابد و با افزایش قطر دیسک برش، نرخ تولید کاهش می‌یابد. همچنین نرخ تولید با پارامترهای عملیاتی دیسک برش ارتباط مستقیم داشته و با افزایش مقادیر پارامترهای عملیاتی، نرخ تولید هم افزایش می‌یابد
(Kahraman et al., ۲۰۰۴).

۱- Jenning

۲- Wright

۳- Eyuboglu

۴- Kahraman

• دلگادو^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۵ به بررسی تأثیر سختی سنگ بر قابلیت برش سنگ در شرایط آزمایشگاهی پرداختند. آن‌ها در این مطالعه سرعت برش و سختی ویکرز را برای ۱۰ نمونه سنگ گرانیت اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که ارتباط نسبتاً خوبی میان سختی ویکرز و سرعت برش وجود داشته و با افزایش سختی سنگ و درصد کوارتز، سرعت برش کاهش می‌یابد (Delgado et al., ۲۰۰۵).

• فنر^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۷ عملکرد دیسک‌های الماسی در برش سنگ‌های کربناته را با توجه به خصوصیات مکانیکی، مانند مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی، ساینده‌گی، سختی چکش اشمیت و مقاومت بار نقطه‌ای مطالعه کردند. آن‌ها با توجه به داده‌های موجود، روابط میان عوامل مذکور و نرخ تولید را با استفاده از رگرسیون‌های ساده و چند متغیره مورد بررسی قرار دادند (Fener et al., 2007).

• تحقیق اوزچلیک^۳ در ۲۰۰۷ مطالعه ارتباط بین مشخصات بافت سنگ از قبیل اندازه دانه‌ها و ضریب بافت با مقادیر نرخ سایش در فرآیند برش سنگ‌های کربناته بود. نتایج بدست آمده نشان داد نرخ سایش با تغییرات ضریب بافت نسبت مستقیم و با اندازه دانه‌ها نسبت عکس دارد. به عبارت دیگر با افزایش ضریب بافت نرخ سایش افزایش و با افزایش اندازه دانه‌ها سایش دیسک کاهش می‌یابد (Ozcelik, ۲۰۰۷).

• آمارال^۴ و همکارانش در سال ۲۰۰۸ بر روی مکانیزم سایش در مواد با ترکیب گرانیت تحقیقاتی را انجام دادند. آن‌ها در ابتدا طرز عمل ابزار الماسی را در برش سنگ‌های گرانیتی بررسی کردند و مشخص کردند که فشردگی هر سنگ در سایش ابزار نقش مؤثری دارد. در نهایت مشخص شد که مکانیزم ترک جانبی در رفتار سایشی گرانیت‌ها در زمان ماشین‌کاری با ابزار الماسی مؤثر است

^۱ Delgado

^۲ Fener

^۳ Ozcelik

^۴ Amaral

(Amaral et al., ۲۰۰۸).

● عطایی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به مطالعه ارتباط میان نرخ تولید سیم برش‌های الماسی با برخی مشخصات سنگ شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی، ساینده‌گی لس‌آنجلس و سختی چکش اشمیت پرداختند. آن‌ها بر روی ۱۴ نمونه سنگ ساختمانی مطالعاتی داشتند. نتایج نشان داد که ارتباط خوبی با ضریب همبستگی بالا بین پارامترهای مذکور و نرخ تولید سیم برش‌های الماسی وجود دارد (Ataei et al., ۲۰۱۲).

● با توجه به تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۱۵ توسط میکائیل و همکارانش که یک رتبه‌بندی برای قابلیت برش با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره (PROMETHEE) انجام دادند. در این تحقیق چهار مشخصه فیزیکی و مکانیکی مهم سنگ شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، ساینده‌گی شیمازک، سختی موس و مدول الاستیسیته به عنوان معیارهای ارزیابی بررسی شد. نتایج نشان داد که روش رتبه‌بندی جدید می‌تواند با سطح اطمینان بالا برای ارزیابی قابلیت برش سنگ تنها با انجام آزمایش‌های مکانیکی مذکور در کارخانه‌های سنگ‌بری بکار برده شود (Mikaeil et al., 2015).

● میکائیل و همکارانش در سال ۲۰۱۶ با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری و منطق فازی به پیش‌بینی قابلیت برش در سنگ‌ها پرداختند. در این تحقیق نتایج خواص فیزیکی و مکانیکی توسط یکی از قوی‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری و روش خوشه‌بندی فازی با کمک نرم‌افزار متلب انجام شد. نتایج نشان داد که در مقایسه این دو روش برای طبقه‌بندی سنگ‌ها براساس خواص فیزیکی و مکانیکی روش الگوریتم فراابتکاری برتری دارد (Mikaeil et al., 2016).

● الماسی و همکارانش در سال ۲۰۱۷ به تحقیق در مورد پیش‌بینی سایش دانه‌های الماس در فرآیند برش با سیم برش الماسی در معادن سنگ ساختمانی پرداختند. آن‌ها در این مطالعه پارامترهای مهم فیزیکی و مکانیکی سنگ شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، فاکتور ساینده‌گی شیمازک، سختی موس و مدول الاستیسیته را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در آزمایشگاه با دستگاه

سیم برش الماسی ساخته شده ۱۱ نوع سنگ مختلف را برش دادند. در جریان فرآیند برش، نرخ سایش دانه‌های الماس بعد از هر برش را اندازه‌گیری کردند. نرخ سایش دانه‌های الماس و خصوصیات سنگ با استفاده از رگرسیون‌های ساده و چند متغیره تجزیه و تحلیل شد و مدل‌های پیش‌بینی توسعه داده شد. نتایج نشان داد که نرخ سایش دانه‌های الماس می‌تواند به‌طور مناسبی با مدل‌های توسعه داده شده، پیش‌بینی شود (Almasi et al., 2017a).

خلاصه تحقیقات گذشته بررسی شده در این بخش در جدول ۱-۳ آمده است.

جدول ۱-۳ - خلاصه تحقیقات انجام شده در بخش ۱-۲-۳

مشخصات بافتی	مشخصات دیسک و طرح برش	مشخصات عملیاتی برش	شاخص ساینده‌گی	الاستوپلاستیسیته	خواص سختی	خواص مقاومتی	محقق
	•	•			•	•	Jenning et al., 1989
			•	•	•		Eyuboglu et al., 2003
	•	•	•		•	•	Kahraman et al., 2004
•		•			•		Delgado et al., 2005
			•		•	•	Fener et al., 2007
•					•	•	Ozcelik, 2007
						•	Amaral et al., 2008
			•		•	•	Ataei et al., 2012a
			•	•	•	•	Mikaeil et al., 2015
			•	•	•	•	Mikaeil et al., 2016
			•	•	•	•	Almasi et al., 2017

۲-۲-۳- تأثیر مشخصات عملیاتی بر سایش ابزار الماسی در فرآیند برش سنگ

مشخصات عملیاتی نیز یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش می‌باشند. این پارامترها نقش مؤثری در افزایش راندمان و بهینه‌سازی فرآیند برش و سایش ابزار الماسی دارند. با تعیین و انتخاب مناسب هر کدام از این عوامل می‌توان یک الگوی منطقی و اقتصادی به منظور کاهش مصرف دیسک، کاهش مصرف انرژی و افزایش نرخ تولید بدست آورد. مشخصات عملیاتی جزء پارامترهای قابل کنترل می‌باشند و شامل نرخ پیشروی قطعه‌کار، سرعت محیطی، عمق برش و مشخصات دیسک برش می‌شوند. در ادامه تحقیقات انجام شده در این زمینه آورده شده است.

- بوتنر^۱ در ۱۹۷۴ به مطالعه فرآیند برش و سایش ابزار الماسی پرداخت. او مشخص کرد که سرعت سایش دانه‌های الماس با تردی و شکنندگی آن‌ها نسبت مستقیم داشته و با افزایش تردی دانه الماس، نرخ سایش نیز در ابزار الماسی افزایش می‌یابد (Buttner, ۱۹۷۴).
- ارتینگشاسن^۲ در سال ۱۹۸۵ به بررسی سایش دیسک‌های برش‌دهنده سنگ در برش سنگ‌های گرانیت در حالات مختلف برش پرداخت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که توان مورد نیاز در حالت برش رو به بالا در مقایسه با برش رو به پایین با عمق برش کمتر از ۲۰ میلی‌متر، کمتر می‌شود. اما زمانی که عمق برش بیشتر می‌شود توان مورد نیاز در حالت برش رو به پایین کمتر می‌شود (Ertingshausen, 1985).
- کنستانتی^۳ در سال ۱۹۹۱ به بررسی عوامل مؤثر بر عملکرد ابزار برش دیسکی پرداخت. او در این مطالعه پارامترهای ابزاری نظیر نوع و کیفیت ساخت سگمنت، مشخصات دانه الماس و انتخاب ترکیب مناسب ماتریس را مورد بررسی قرار داد (Konstanty, ۱۹۹۱).
- لو^۴ و لیاو^۵ در ۱۹۹۵ به مطالعه تأثیر جنس و اندازه دانه الماس در فرآیند برش سنگ گرانیت قرمز هندی، با استفاده از ابزار الماسی پرداختند. آن‌ها در این مطالعه سه نوع دیسک با مشخصات متفاوت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش میزان سختی دانه‌های الماس، نسبت دانه‌های کامل کنده شده به دانه‌های ریز شکسته و کنده شده افزایش یافته و به همین دلیل مقدار نیروهای برش نیز در فرآیند برش افزایش می‌یابند. هم‌چنین وقتی که دانه‌ها سختی کمتری دارند با کاهش اندازه دانه‌های الماس، نیروهای برش افزایش می‌یابند. دلیل این امر را می‌توان در مکانیزم برش و تراشه‌برداری دانه الماس در فرآیند برش ترد در سنگ‌های گرانیتی جستجو کرد. چون براده‌ها در فرآیند برش سنگ‌های گرانیتی به‌طور کلی از رشد ترک‌ها و شکست ترد شکل می‌گیرند.

۱ Buttner

۲ Ertingshausen

۳ Konstanty

۴ Lou

۵ Liao

بنابراین برداشت تراشه در این شرایط مشکل‌تر و نیروهای برشی نیز بیش‌تر می‌شوند (Lou & liao, ۱۹۹۵).

• تانشوف^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۲ به مطالعه فرآیند برش و سایش ابزار الماسی پرداختند. آن‌ها عوامل مؤثر بر سایش ابزار الماسی را به‌طور کامل مورد توجه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که بارهای حرارتی و مکانیکی، مشخصات ابزار، مشخصات قطعه‌کار و عوامل ماشین‌کاری در سایش ابزار الماسی مؤثرند (Tonshoff et al., ۲۰۰۲).

• سان^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۲ یک نوع ماتریس دیسک جدید دایره‌ای را توسعه دادند و خواص مکانیکی ماتریس و فرآیند برش در یک کارخانه سنگ را بررسی کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که دیسک ساخته شده با فرمول جدید در برش سنگ گرانیت بهره‌وری بالا و طول عمر طولانی دارد (Sun et al., 2002).

• کنستانتی در سال ۲۰۰۲ تجزیه و تحلیل برش سنگ با ابزار الماسی را مورد بررسی قرار داد. در نهایت به این نتیجه رسید که علاوه بر انتخاب نوع الماس و ماتریس، عوامل دیگری مانند روش ساخت سگمنت و پارامترهای آن، خصوصیات قطعه‌کار، موقعیت‌های برش، طراحی و ساخت دیسک برش و ورزیدگی اپراتور نیز بر عملکرد و عمر تیغه برش مؤثرند (Konstanty, ۲۰۰۲).

• انگلز^۳ در سال ۲۰۰۳ تأثیر مشخصات عملیاتی و ابزاری را بر نرخ برش و ضخامت تراشه در نمونه‌هایی از سنگ‌های گرانیت بررسی نمود. او به این نتیجه رسید که با افزایش عمق برش، مقدار نرخ برش و ضخامت تراشه افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش نرخ پیشروی میزان نرخ برش و ضخامت تراشه افزایش می‌یابد و نیز مقدار متوسط ضخامت تراشه رابطه مستقیم با اندازه دانه‌های الماس داشته و با افزایش آن افزایش می‌یابد (Engels, ۲۰۰۳).

۱-Tonshoff

۲ Sun

۳-Engles

- ارسوی و آتسی^۱ در سال ۲۰۰۴ به بررسی تأثیر شرایط عملیاتی مختلف بر رفتار دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های مختلف پرداختند. آن‌ها مطالعات خود را روی ۱۶ نمونه سنگ در ۵ گروه با استفاده از ۳ نوع دیسک الماسی دایره‌ای با نرخ‌های مختلف پیشروی (۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ متر بر دقیقه) و عمق‌های مختلف برش (۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ میلی‌متر) و سرعت محیطی ثابت ۰/۵ متر بر ثانیه انجام دادند. آزمایش‌ها به‌طور کلی با روش رو به پائین انجام پذیرفت. نتایج تحقیقات آن‌ها به‌طور خلاصه بصورت زیر می‌باشد:

- با افزایش نرخ پیشروی نیروهای برش افزایش می‌یابد.
 - در یک نرخ پیشروی ثابت با کاهش عمق برش و افزایش سرعت محیطی، نیروهای برش کاهش می‌یابد.
 - یک رابطه خطی بین انرژی ویژه برش و نرخ برداشت ویژه وجود دارد.
 - افزایش عمق برش و سرعت برش مقدار انرژی ویژه برش را کاهش می‌دهد.
 - انرژی ویژه برش با افزایش اندیس سرشار و مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش می‌یابد.
- هم‌چنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از دیسک‌های با اندازه دانه‌های الماس ریزتر و تراکم بیشتر برای سنگ‌های سخت و استفاده از ذرات الماس درشت‌تر و تراکم کم‌تر برای برش سنگ‌های نرم مناسب‌تر است (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴).

- یوسفی در سال ۱۳۸۵ رفتار سایشی یک دیسک الماسی را نسبت به پارامترهای ماشین‌کاری در برش سنگ گرانیت یزد مطالعه نمود. نتایج نشان داد که افزایش نرخ پیشروی موجب کاهش سایش دیسک‌های برش الماسی می‌شود. علت آن کاهش نسبی نیروهای برش و کاهش تأثیر حرارت حاصله بر حسب نوع اتصال‌دهنده در ابزار برش می‌باشد. اما با افزایش سرعت برش، سایش ابزار نیز افزایش می‌یابد زیرا حرارت حاصله و ضربه مکانیکی افزایش می‌یابد (یوسفی، ۱۳۸۵).

^۱ Atici

● با توجه به تحقیق بویوکساگیز^۴ در سال ۲۰۰۷ که به بررسی تأثیر روش‌های برش سنگ بر عملکرد سایش دیسک‌های دایره‌ای در فرآیند برش سنگ‌های گرانیت پرداخت. او دو حالت برش رو به بالا و رو به پایین را بر روی ۶ نوع سنگ گرانیت مختلف آزمایش کرد. نرخ سایش ویژه و مقدار انرژی ویژه برش، به عنوان معیارهای اصلی برای هر حالت برش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج بدست آمده مشخص کرد که مقادیر بالای انرژی مصرفی با مقادیر بالای نرخ سایش ابزار همراه است. هم‌چنین نرخ سایش ویژه و انرژی مصرفی در حالت برش رو به بالا کمتر از حالت برش رو به پایین است (Buyuksagis, ۲۰۰۷).

● با توجه به تحقیق انجام شده در سال ۲۰۱۱ توسط میکائیل و همکارانش که یک مدل جدید ارزیابی و رتبه‌بندی برای بررسی قابلیت برش سنگ‌های کربناته با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) و روش TOPSIS ارائه دادند. در این تحقیق از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی برای تعیین وزن معیارها استفاده شد و سپس با روش TOPSIS رتبه‌بندی انجام شد. آن‌ها انرژی و قدرت مصرفی و پارامترهای عملیاتی برش را اندازه‌گیری کردند (Mikaeil et al., 2011a).

● میکائیل و همکاران در سال ۱۳۹۱ به بررسی ارتباط میان مشخصات سنگ و نرخ برش به کمک تحلیل‌های آماری پرداختند. بدین منظور ۱۷ نوع سنگ ساختمانی مطالعه شد. چهار مشخصه مقاومت فشاری تک‌محوری، سختی موس، فاکتور ساینده‌گی شیمازک و مدول الاستیسیته در آزمایشگاه تعیین شد. سپس به کمک نرم‌افزار SPSS مطالعات آماری انجام پذیرفت و در نهایت یک رابطه آماری برای پیش‌بینی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی با دقت بالا ارائه شد.

● آیدین و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی عملکرد سایش تیغه‌های برش‌دهنده در فرآیند برش سنگ‌های گرانیت پرداختند. آن‌ها مدل‌های پیش‌بینی برای برآورد نرخ سایش ویژه (SWR) ارائه دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که نرخ سایش ویژه با افزایش سرعت محیطی و سرعت پیشروی

^۴ Buyuksagis

افزایش می‌یابد و با افزایش عمق برش و نرخ جریان سیال خنک کننده کاهش می‌یابد (Aydin et al., 2013).

خلاصه تحقیقات گذشته بررسی شده در این بخش در جدول ۲-۳ آمده است.

جدول ۲-۳- خلاصه تحقیقات انجام شده در بخش ۲-۲-۳

مشخصات بافتی	مشخصات دیسک و طرح برش	مشخصات عملیاتی برش	شاخص ساینده‌گی	الاستوپلاستیسیته	خواص سختی	خواص مقاومتی	محقق
	•						Buttner, 1974
	•	•					Ertingshausen, 1985
	•						Konstanty, 1991
	•						Lou & Liao, 1995
	•	•					Tonshoff et al., 2002
	•						Sun et al., 2002
	•						Konstanty, 2002
	•	•					Engels, 2003
•		•	•		•	•	Ersoy & Atici., 2004
		•					یوسفی، ۱۳۸۵
•	•	•	•		•	•	Buyuksagis, 2007
•		•	•	•	•	•	Mikaeil et al., 2011a
		•	•	•	•	•	میکائیل و همکاران، ۱۳۹۱
		•					Aydin et al., 2013

۳-۲-۳- معیارهای ارزیابی عملکرد دیسک‌های برش‌دهنده الماسی دایره‌ای

برای بهینه‌سازی فرآیند برش سنگ و در نهایت دیسک‌های برش‌دهنده الماسی اهداف مختلفی وجود دارد. یکی از مهم‌ترین اهداف، رسیدن به نرخ تولید حداکثر می‌باشد. البته نکته مهم این است که برای رسیدن به این هدف باید انرژی بیش‌تر و افزایش مصرف دیسک انجام شود. به عبارت دیگر با افزایش مقدار نرخ تولید، میزان مصرف انرژی و سایش ابزار الماسی نیز افزایش خواهد یافت. دستیابی به بهترین شرایط، مستلزم ایجاد یک تعادل ایده‌آل بین طول عمر ابزار، نرخ مصرف انرژی و نرخ برش می‌باشد. به‌طورکلی عملکرد یک دیسک برش‌دهنده الماسی را در برش سنگ‌ها با معیارهایی نظیر نیروی برش، سایش ابزار و میزان مصرف انرژی می‌توان مورد ارزیابی قرار داد. در ادامه تحقیقات انجام شده در این زمینه، آورده شده است:

- رایت^۱ و کاساپی^۲ در ۱۹۸۵ به مطالعه پارامترهای مؤثر در زمینه قابلیت برش سنگ پرداختند. در این تحقیق، ارتباط بین خصوصیات فیزیکی و آنالیز پتروگرافی سنگ و نتایج برش بررسی شد. در نهایت نیروی برش را به عنوان مؤثرترین عامل در فرآیند برش معرفی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش نیروی برش، نرخ تولید به ازاء واحد سایش کاهش می‌یابد (Wright & Cassapi, ۱۹۸۵).
- رایت و همکارانش در سال ۱۹۸۶ به بررسی نرخ سایش الماس در فرآیند برش سنگ پرداختند. آن‌ها فرض کردند که ماتریس اطراف دانه سگمنت، سایش می‌یابد، تا ارتفاع کاری دانه الماس (ارتفاع لازم برای برش) ایجاد شود. این ارتفاع یا بیرون‌زدگی دانه الماس تا شکست دانه باقی می‌ماند. ممکن است دانه الماس به دلیل ضعف نگهداری در ماتریس کنده شود یا ممکن است ابتدا ماتریس تا حد معینی که دانه الماس ارتفاع کاری خود را بدست آورد، سایش یافته و دانه الماس پس از دوره کوتاهی با افزایش سایش، کنده شود. همچنین علاوه بر تأثیرپذیری پارامترهای مذکور، دانه الماس ممکن است در اثر نیروی ضربه کنده شود (Wright et al., ۱۹۸۶).
- با توجه به تحقیقات پای^۳ در ۱۹۸۷ که طبقه‌بندی خود را بر اساس عملکرد سایش دیسک و مصرف انرژی ارائه کرد. او در تحقیق خود با اندازه‌گیری مصرف انرژی و سایش دیسک بر روی نمونه‌هایی از سنگ‌های سخت، آن‌ها را در چهار گروه تقسیم بندی کرد. او همچنین در ادامه تحقیقات خود تأثیر مشخصات عملیاتی را بر فرآیند برش مورد بررسی قرار داد. او سرعت حرکت قطعه‌کار یا نرخ پیشروی، عمق برش، سرعت چرخش دیسک و سختی سنگ را به عنوان مؤثرترین عوامل در میزان مصرف انرژی در فرآیند برش بیان کرد (Pai, ۱۹۸۷).
- با توجه به کارهای سیلان اوغلو^۴ و گورگولو^۵ در ۱۹۹۷ که به بررسی ارتباط میان انرژی ویژه برش و نرخ تولید با برخی مشخصات سنگ مانند مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ، مقاومت کششی،

۱ Wright

۲ Cassapi

۳ Pai

۴ Ceylanoglu

۵ Gorgulu

شاخص مقاومت بار نقطه‌ای، سفتی سنگ و سختی چکش اشمیت پرداختند. آن‌ها به بررسی ۵ نوع سنگ در کارخانه‌های سنگ‌بری پرداختند. نتایج حاصل از بررسی‌های آماری رگرسیون‌های ساده و چند متغیره نشان داد که انرژی ویژه برش و میزان نرخ تولید از ارتباط خوبی با مقادیر مشخصات سنگ ذکر شده در بالا برخوردار است (Ceylanoglu & Gorgulu, ۱۹۹۷).

- ارسوی و همکارانش در سال ۲۰۰۵ به مطالعه سایش ابزار الماسی در برش سنگ‌های سخت مختلف و عوامل مؤثر بر آن‌ها پرداختند. آن‌ها ده نوع سنگ را در آزمایشگاه توسط دو نوع دیسک دوار الماسی با نرخ‌های پیشروی مختلف و عمق برش و سرعت محیطی ثابت برش دادند. ارتباط میان مشخصات سنگ، مشخصات کاری، نرخ سایش و انرژی ویژه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ارتباط نسبتاً خوبی میان نرخ سایش و انرژی ویژه برش و همچنین مشخصاتی از سنگ نظیر میزان سیلیس، مقاومت خمشی و سختی چکش اشمیت برقرار است (Ersoy et al., ۲۰۰۵).

- بویوکساگیز و گوکتان^۱ در سال ۲۰۰۵ عملکرد برش بر روی نمونه‌هایی از سنگ‌های مرمر در آزمایشگاه را بررسی کردند. آن‌ها دو پارامتر عمق برش و نرخ پیشروی را به عنوان متغیرهای فرآیند برش، و مقدار انرژی ویژه برش را به عنوان معیار ارزیابی عملکرد برش در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که مقدار انرژی ویژه برش، با پارامترهایی نظیر نرخ پیشروی و عمق برش نسبت عکس داشته و با افزایش آن‌ها کاهش خواهد یافت. همچنین آن‌ها روابطی را برای پیش‌بینی انرژی ویژه برش با استفاده از تحلیل‌های آماری و بر اساس مشخصات سنگ نظیر مقاومت فشاری، سختی موس، شاخص سختی ان سی بی، شاخص ساینده‌گی سرشار و اندازه دانه‌های کلسیت ارائه دادند (Buyuksagis & Goktan, ۲۰۰۵).

- آتیبسی و ارسوی در ۲۰۰۹ به بررسی تأثیر شاخص‌های تردی سنگ بر عملکرد برش نمونه‌های مختلف از سنگ‌های ساختمانی پرداختند. آن‌ها ارتباط میان انرژی ویژه برش و شاخص‌های تردی سنگ را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش مقدار شاخص‌های تردی سنگ

^۱ Goktan

مقدار مصرف انرژی نسبت به واحد حجم بریده شده سنگ افزایش می‌یابد (Atici & Ersoy, ۲۰۰۹).

- آسلانتاس^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۹ بر روی تأثیر نیروهای محوری بر فرآیند برش در سنگ مرمر بررسی کامل انجام دادند. آن‌ها با ملاحظه پارامترهای مختلف عملیاتی برش (سرعت محیطی، نرخ پیشروی و عمق برش) نیروهای محوری را در دیسک برش با دینامومتر اندازه‌گیری کردند. در نهایت نتیجه‌گیری کردند که افزایش نرخ پیشروی و عمق برش به‌طور قابل توجهی انحراف محوری دیسک برش را افزایش می‌دهد (Aslantas et al., 2009).

- ایلماز^۲ در سال ۲۰۱۱ به بررسی تأثیر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ گرانیت بر عملکرد سایش ابزار الماسی پرداختند و یک شاخص جدید ارائه دادند. در این مطالعه آن‌ها خصوصیات میکرو ساختاری ۹ نمونه سنگ مختلف را با میکروسکوپ پلاریزان برای تعیین اجزاء کیفی کانی‌ها، توزیع اندازه دانه‌ها و دیگر ویژگی‌های بافتی بررسی کردند. نرخ سایش ویژه (SWR) به عنوان یک معیار برای بررسی عملکرد سایش تیغه برش در نظر گرفته شد. در نهایت به این نتیجه رسیدند که به استثنای سختی شور، هیچ‌گونه ارتباط معنی‌دار دیگری بین خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ و نرخ سایش ویژه تیغه برش مشاهده نشد. چون مقدار سختی شور نشان‌دهنده سختی کانی‌های موجود در یک سنگ است، به نظر می‌رسد که نرخ سایش تیغه بیش‌تر به سختی کانی‌های سنگ مرتبط است (Yilmaz, ۲۰۱۱).

- میکائیل و همکارانش در سال ۲۰۱۱ به بررسی ارتباط انرژی مصرفی برش با شاخص تردی سنگ در فرآیند برش سنگ با دیسک‌های الماسی پرداختند. آن‌ها روی دوازده نوع سنگ گرانیت و کربناته با تغییر در نرخ‌های پیشروی و عمق برش مختلف تحقیقات خود را انجام دادند. نتایج نشان داد که ارتباط قوی بین انرژی مصرفی برش و شاخص‌های تردی (B_1 و B_2) در سنگ‌های کربناته وجود دارد لیکن این ارتباط در سنگ‌های گرانیت بین انرژی مصرفی و شاخص شکنندگی B_3 بسیار زیاد بود

^۱ Aslantas

^۲ Yilmaz

(Mikaeil et al., 2011b).

• تورچتا^۱ در سال ۲۰۱۲ به بررسی تأثیر شرایط برش بر روی نیروی برش و انرژی برش و ارتباط آن‌ها با سایش ابزار برش پرداخت. در نهایت او یک مدل برش برای برش سنگ‌ها با ابزار الماسی ارائه داد. این مدل، امکان پیش‌بینی اجزاء برش در رابطه با سایش ابزار را بوجود آورد (Turchetta, 2012).

• کاراکورت^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ یک مطالعه برای بهینه‌سازی نیروی برش (Fc) در تیغه‌های الماسی دایره‌ای در برش سنگ انجام داد. در این تحقیق به بررسی تغییرات متغیرهای عملیاتی برش شامل سرعت محیطی، سرعت پیشروی، عمق برش و نرخ جریان سیال خنک کننده و تأثیر آن‌ها بر نیروهای برش را با تجزیه و تحلیل آماری رگرسیون مورد بررسی قرار داد. همچنین نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی به‌طور مؤثری برای پیش‌بینی Fc کاربرد عملی دارد (Karakurt et al., 2014).

• با توجه به تحقیقات میکائیل و همکارانش در سال ۲۰۱۴ که به بررسی و اندازه‌گیری ارتعاش سیستم در فرآیند برش پرداختند. آن‌ها نشان دادند که افزایش ارتعاش سیستم افزایش بسیاری در هزینه‌های تعمیر و نگهداری ماشین برش را به دنبال دارد. همچنین در این تحقیق ارتباط بین شاخص تردی سنگ و مشخصات عملیاتی برش نیز با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که برای ارزیابی سیستم و ویژگی‌های عملیاتی مناسب تنها بررسی خواص مکانیکی سنگ کافی است (Mikaeil et al., 2014).

• آریافر و میکائیل در ۲۰۱۶ یک مدل دقیق برای برآورد انرژی مصرفی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) ارائه دادند. تحقیق آن‌ها بر روی ۷ نمونه سنگ کربناته در شرایط عملیاتی مختلف دستگاه برش سنگ بود. در نهایت آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که می‌توان از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تخمین انرژی مصرفی با توانایی بالا و خطای کم در صنعت، استفاده کرد

^۱-Turchetta

^۲- Karakurt

(Aryafar & Mikaeil, 2016).

● الماسی و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی پیش‌بینی نرخ برش سیم برش الماسی (DWS) بر اساس معیارهای عملکردی اصلی پرداختند. برای این منظور یک سیستم طبقه‌بندی برای رتبه‌بندی قابلیت برش سنگ‌های سخت بر اساس چقرمگی، ساینده‌گی و سختی سنگ توسعه داده شد و یک شاخص قابلیت برش برای سنگ‌های سخت (HDSSI) معرفی شد. سپس با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون ارتباط بین نرخ برش با HDSSI و جریان مصرفی با یک ضریب همبستگی بالا بدست آمد. آن‌ها در این تحقیق مشخصات ۱۱ نوع سنگ سخت را در آزمایشگاه با دستگاه سیم برش ساخته شده مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که نرخ برش سنگ‌های سخت می‌تواند با استفاده از مدل توسعه یافته با موفقیت پیش‌بینی شود (Almasi et al., 2017b).

خلاصه تحقیقات گذشته بررسی شده در این بخش در جدول ۳-۳ آمده است.

جدول ۳-۳- خلاصه تحقیقات انجام شده در بخش ۳-۲-۳

مشخصات بافتی	مشخصات دیسک و طرح برش	مشخصات عملیاتی برش	شاخص ساینده‌گی	الاستوپلاستیسیته	خواص سختی	خواص مقاومتی	محقق
●	●	●	●		●	●	Wright & Cassapi, 1985 Wright et al., 1986 Pai, 1987
●		●	●		●	●	Ceylanoglu & Gorgulu, 1997 Ersoy et al., 2005
●		●	●		●	●	Buyuksagis & Goktan, 2005 Atici & Ersoy, 2009 Aslantas et al., 2009
●		●			●		Yilmaz, 2011 Mikaeil et al., 2011b
●		●					Turchetta, 2012 Karakurt et al., 2014
		●	●		●	●	Mikaeil et al., 2014 Aryafar & Mikaeil, 2016
		●	●		●	●	Almasi et al., 2017b

۳-۳- سیستم‌های طبقه‌بندی موجود در زمینه ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی

سیستم‌های طبقه‌بندی مختلفی در زمینه عملکرد سایش دیسک‌های الماسی و قابلیت برش سنگ‌ها در فرآیند برش ارائه شده است که به بعضی از آن‌ها در زیر اشاره می‌شود:

۳-۳-۱- سیستم طبقه‌بندی بیرله^۱ و راترمن^۲

بیرله و راترمن در ۱۹۸۶ یک سیستم طبقه‌بندی با انجام مطالعات آزمایشگاهی برای پیش‌بینی عملکرد سایش دیسک‌های الماسی در سنگ‌های سخت ارائه دادند (Birle & Ratterman, ۱۹۸۶). آن‌ها در این طبقه‌بندی سنگ‌ها را در چهار کلاس مختلف بر اساس عملکرد سایش دیسک طبقه‌بندی کردند. در طبقه‌بندی ارائه شده با استفاده از رابطه تجربی ۳-۱ که شامل دو پارامتر درصد کوارتز و مقاومت سایشی سنگ است، میزان عملکرد سایش دیسک مورد ارزیابی قرار گرفت و در چهار کلاس مطابق جدول ۳-۴ طبقه‌بندی انجام شد.

$$W = 18 - 0.13E_q - 0.17 AR \quad (3-1)$$

که در این رابطه:

W: عملکرد سایش دیسک (m^2/mm)

Eq: درصد کوارتز (%)

AR: مقاومت در برابر ساینده‌گی (%)

جدول ۳-۴ - طبقه‌بندی ارائه شده در زمینه سایش دیسک توسط بیرله و راترمن (Birle & Ratterman, ۱۹۸۶)

عملکرد سایش دیسک (m^2/mm)	کلاس سنگ
$w > 7$	I
$7 < w < 4$	II
$4 < w < 3$	III
$w < 3$	IV

۳-۳-۲- سیستم طبقه‌بندی فازی وی و همکاران

در سال ۲۰۰۳ وی^۳ و همکاران یک سیستم طبقه‌بندی فازی برای مطالعه و پیش‌بینی سایش

^۱- Birle

^۲-Ratterman

^۴Wei

دیسک‌های الماسی و قابلیت برش سنگ‌های گرانیت ارائه دادند. در این طبقه‌بندی، مقدار سایش دیسک‌های الماسی و نیروی عمودی برش در فرآیند برش سنگ‌ها پیش‌بینی و ارزیابی شد. مشخصات سنگ مانند مقدار کوارتز محتوی، سختی شور، مقاومت فشاری، ساینده‌گی سنگ و اندازه دانه‌های کوارتز به عنوان متغیرهای طبقه‌بندی در نظر گرفته شد که در جدول ۳-۵ آورده شده است.

جدول ۳-۵- وزن‌های نهایی متغیرها در طبقه‌بندی فازی وی و همکاران (Wei et al., 2003)

پارامتر	درصد کوارتز	ساینده‌گی	مقاومت فشاری	سختی شور	اندازه دانه‌های کوارتز
وزن نهایی با توجه به معیار سایش دیسک	۰/۲	۰/۳۱	۰/۱۵	۰/۲۴	۰/۱
وزن نهایی با توجه به نیروی عمودی برش	۰/۲۵	۰/۱	۰/۱۵	۰/۳	۰/۲

در طبقه‌بندی ارائه شده، سنگ‌ها در ۶ کلاس مختلف مطابق جدول ۳-۶ و با استفاده از یک تابع فازی و عملگرهای فازی مورد پیش‌بینی و ارزیابی قرار گرفتند (Wei et al., 2003).

جدول ۳-۶- طبقه‌بندی ارائه شده توسط وی و همکاران (Wei et al., 2003)

کلاس	ساینده‌گی	مقاومت فشاری (MPa)	سختی شور (HS)	اندازه دانه‌های کوارتز (mm)	نیروی برشی عمودی (N)	مقدار سایش دیسک (m^2/mm)	درصد کوارتز (%)
I	۴-۳/۸	۲۲۰-۲۱۰	۹۹-۹۸	۳-۲	۱۰۰۰-۱۱۰۰	۶-۴	۵۰-۴۰
II	۳/۸-۳/۶	۲۱۰-۱۹۰	۹۸-۹۷	۲-۱	۹۰۰-۱۰۰۰	۶-۸	۴۰-۳۰
III	۳/۶-۳/۴	۱۹۰-۱۸۰	۹۷-۹۴	۲-۱/۵	۸۰۰-۹۰۰	۸-۱۰	۳۰-۲۰
IV	۳/۴-۳/۲	۱۸۰-۱۷۰	۹۴-۹۱	۱-۰/۵	۷۰۰-۸۰۰	۱۰-۱۲	۲۰-۱۵
V	۳/۲-۳	۱۷۰-۱۶۰	۹۱-۸۲	۰/۵-۰/۲	۶۰۰-۷۰۰	۱۲-۱۸	۱۵-۱۰
VI	۳-۲/۸	۱۶۰-۱۵۰	۸۲-۸۰	۰/۲-۰	۵۰۰-۶۰۰	۱۸-۳۰	۱۰-۰

۳-۳-۳- سیستم طبقه‌بندی فازی توتمز و همکاران

در سال ۲۰۰۷ توتمز^۱ و همکارانش مطالعاتی برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های کربناته داشتند و یک سیستم طبقه‌بندی جدید ارائه دادند. در این طبقه‌بندی فازی از مشخصات سنگ مانند مقاومت، سختی و ساینده‌گی استفاده شد. متغیرهای انتخابی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، سختی

^۱Tutmez

اشمیت، مقاومت کششی، مقاومت ضربه‌ای، ساینده‌گی، مقاومت بار نقطه‌ای و سرعت موج p بودند. وزن اختصاص داده شده به هر یک از این پارامترها، در جدول ۷-۳ آورده شده است.

جدول ۷-۳ - وزن‌های اختصاص داده شده به هر یک از پارامترها در طبقه‌بندی (Tutmez et al., 2007)

پارامتر	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	چکش اشمیت	بار نقطه‌ای	مقاومت ضربه‌ای	ساینده‌گی لس آنجلس	سرعت موج p
وزن	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۱۸	۰/۱۲

مطابق جدول ۷-۳ بیش‌ترین وزن در این طبقه‌بندی مربوط به مقاومت کششی و کم‌ترین وزن متعلق به سختی چکش اشمیت است. طبقه‌بندی ارائه شده توسط توتمز و همکاران در جدول ۸-۳ آورده شده است. در این طبقه‌بندی، سنگ‌ها در سه کلاس خیلی خوب، خوب و ضعیف طبقه‌بندی و مورد ارزیابی قرار گرفته است (Tutmez et al., 2007).

جدول ۸-۳ - طبقه‌بندی ارائه شده توسط تاتموز و همکاران (Tutmez et al., 2007)

کلاس	مقاومت کششی (MPa)	عدد چکش اشمیت	مقاومت بار نقطه‌ای (MPa)	مقاومت ضربه‌ای (%)	ساینده‌گی لس آنجلس (%)	سرعت موج p (Km/s)	مقاومت فشاری (MPa)
ضعیف	۸-۱۲	۵۰-۶۰	۵-۸	۸۰-۹۰	۲۰-۴۰	۸-۶	۱۲۰-۱۸۰
خوب	۴-۸	۴۰-۵۰	۳-۵	۷۰-۸۰	۴۰-۶۰	۴-۶	۸۰-۱۲۰
عالی	۲-۴	۳۰-۴۰	۱-۳	۶۰-۷۰	۶۰-۸۰	۲-۴	۴۰-۸۰

۳-۳-۴ - سیستم طبقه‌بندی قهرمان و همکاران

قهرمان و همکاران در سال ۲۰۰۷ به بررسی قابلیت برش سنگ‌ها پرداختند. آن‌ها یک سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌ها با توجه به سرعت موج p در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی ارائه دادند. در این سیستم طبقه‌بندی، قابلیت برش سنگ‌ها بر اساس شاخص جدیدی با عنوان نرخ سرعت (VRI) طبقه‌بندی شد. این شاخص از رابطه ۲-۳ قابل محاسبه می‌باشد:

$$VRI = \sqrt{\frac{V_B}{V_L}} \quad (3-2)$$

که در این رابطه:

V_B : سرعت موج در بلوک سنگ و V_L : سرعت موج در مغزه گرفته شده از بلوک سنگ می‌باشد.

^۱Velocity Ratio Index

طبقه‌بندی کیفی قهرمان و همکاران برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌ها بر اساس مقادیر شاخص VRI در جدول ۳-۹ آورده شده است. در این سیستم طبقه‌بندی، بلوک‌های سنگی از نظر کیفیت پلاک‌دهی به پنج کلاس خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف تقسیم‌بندی شدند (Kahraman et al., 2007).

جدول ۳-۹- سیستم طبقه‌بندی قهرمان و همکاران (Kahraman et al., 2007)

مقادیر VRI	کیفیت بلوک از لحاظ قابلیت برش
کوچک‌تر از ۰/۲۵	خیلی ضعیف
۰/۲۵ - ۰/۵	ضعیف
۰/۵ - ۰/۷۵	متوسط
۰/۷۵ - ۰/۹	خوب
بزرگ‌تر از ۰/۹	خیلی خوب

۳-۳-۵- سیستم طبقه‌بندی میکائیل و همکاران

میکائیل و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی و ارزیابی قابلیت برش نمونه‌هایی از سنگ‌های نرم با استفاده از یک سیستم طبقه‌بندی جدید پرداختند. در این تحقیق ۲۵ نمونه سنگ کربناته مورد مطالعه قرار گرفت. در این سیستم طبقه‌بندی، قابلیت برش سنگ‌ها با توجه به خصوصیات مقاومتی، ساینده‌گی و سختی سنگ، در ۵ کلاس خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و خیلی خوب طبقه‌بندی شد. سیستم طبقه‌بندی مذکور در جدول ۳-۱۰ نشان داده شده است:

جدول ۳-۱۰- سیستم طبقه‌بندی ارائه شده توسط میکائیل و همکاران

مقاومت فشاری (مگا پاسگال)	کمتر از ۶۰	۶۰-۸۰	۸۰-۱۲۰	۱۰-۱۶۰	بیشتر از ۱۶۰
امتیاز	۳۷	۲۵/۹	۱۸/۵	۹/۲۵	۳/۷
مقاومت کشی (مگا پاسگال)	کمتر از ۳	۳-۴	۴-۶	۶-۸	بیشتر از ۸
امتیاز	۱۷	۱۱/۹	۸/۵	۴/۲۵	۱/۷
سختی چکش	کمتر از ۳۵	۳۵-۴۰	۴۰-۴۵	۴۵-۵۰	بیشتر از ۵۰
اشمیت	نرم	نسبتاً نرم	نسبتاً سخت	سخت	خیلی سخت

۱/۸	۴/۵	۹	۱۲/۶	۱۸	امتیاز
کمتر از ۳۰	۳۰-۴۰	۴۰-۵۰	۵۰-۶۰	بیشتر از ۶۰	سایندگی لس
ساینده		نسبتاً ساینده		سایندگی کم	آنجلس
۲/۸	۷	۱۴	۱۹/۶	۲۸	امتیاز

در این سیستم طبقه‌بندی، چهار پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی، سختی چکش اشمیت و سایندگی لس آنجلس به ترتیب به نمایندگی از مشخصات مقاومتی، سختی و سایندگی سنگ برای ارزیابی قابلیت برش در نظر گرفته شد. شاخص جدیدی با عنوان "شاخص قابلیت برش سنگ‌های کربناته" (CRS) برای ارزیابی قابلیت برش‌پذیری این گروه از سنگ‌ها به کمک این سیستم طبقه‌بندی معرفی شد. مقدار این شاخص از ۱۰ تا ۱۰۰ تغییر کرده و بیش‌ترین مقدار آن به بلوک سنگی که بهترین قابلیت برش را دارد اختصاص داده شد (Mikaeil et al., 2011c).

۳-۳-۶- سیستم طبقه‌بندی عطایی و همکاران

عطایی و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی قابلیت برش سنگ‌های کربناته با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی پرداختند. آن‌ها در تحقیقشان یک سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی و رتبه‌بندی قابلیت برش در سنگ‌های کربناته ارائه دادند. قابلیت برش سنگ‌های کربناته به پنج دسته: بسیار عالی، خوب، متوسط، ضعیف و بسیار ضعیف طبقه‌بندی شد. در این مطالعه از روش FAHP برای وزن‌دهی معیارها، توسط تصمیم‌گیری خبرگان و رتبه‌بندی قابلیت برش سنگ‌های کربناته در یک سیستم طبقه‌بندی جدید استفاده شد. از بعضی تجزیه و تحلیل‌های پتروگرافی و خصوصیات مکانیکی مانند مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص سایندگی، سختی موس و مدول الاستیسیته برای بدست آوردن طبقه‌بندی قابلیت برش استفاده شد. هم‌چنین تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره برای توسعه مدل جدید برای پیش‌بینی انرژی مصرفی در فرآیند برش سنگ‌های کربناته انجام شد (Ataei et al., 2012b).

۳-۴- نقد و بررسی تحقیقات گذشته

با بررسی تحقیقاتی که تاکنون در زمینه ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی و قابلیت برش سنگ‌ها صورت گرفته، این نکته مشهود است که تعدادی از محققین مانند Kahraman et al., 2004, Fener et al., 2007, Ozcelic, 2007, Mikaeil et al., 2015 و Almasi et al., 2017 به بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها پرداخته‌اند که بیش از نیمی از تحقیقات را شامل می‌شود. این محققین عمدتاً پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوری، عدد چکش اشمیت، اندازه و شکل دانه‌ها و مقاومت کششی را بررسی کرده‌اند. تعدادی از محققین دیگر مانند Lou & liao, 1995, Tonshoff, 2002, Ersoy & Atici, 2004, Mikaeil et al., 2011 و Aydin et al., 2013 به بررسی مشخصات عملیاتی برش پرداخته‌اند. این محققین عمدتاً پارامترهای عمق برش و نرخ پیشروی را مورد بررسی قرار داده‌اند. محققین دیگر مانند Ersoy et al., 2005, Buyuksagis & Goktan, 2005, Mikaeil et al., 2014 و Aryafar et al., 2016 به ارزیابی عملکرد سایش دیسک‌های الماسی پرداخته‌اند. عمدتاً این محققین مشخصات سگمنت و نوع و طرح برش را مطالعه کرده‌اند. بعضی از مطالعات به تحلیل آماری و بررسی ارتباط مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها با قابلیت برش سنگ‌ها پرداخته‌اند مانند Delgado et al., 2005 و Fener et al., 2007 که در این تحقیق‌ها پارامتر سایش دیسک مورد توجه قرار نگرفته است. تعدادی از محققین، سیستم‌های طبقه‌بندی سنگ در زمینه قابلیت برش را ارائه نموده‌اند، مانند Tutmez et al., 2007, Kahraman et al., 2007, Mikaeil et al., 2011 و Ataei et al., 2012. هم‌چنین تعدادی دیگر از محققین مانند Birle & Ratterman, ۱۹۸۶ و Wei et al., 2003 نیز یک سیستم طبقه‌بندی در زمینه ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی ارائه داده‌اند. توجه به این نکته ضروری است که در سیستم‌های طبقه‌بندی بررسی شده تنها طبقه‌بندی Wei et al., 2003 و Tutmez et al., 2007 به صورت فازی انجام شده و سایر طبقه‌بندی‌ها به صورت قطعی (غیر فازی) ارائه شده‌اند. یکی از موارد مهم در ارائه یک سیستم طبقه‌بندی انتخاب مهم‌ترین مشخصات و نحوه امتیازدهی

آن‌ها و رعایت عدم هم‌پوشانی توسط آن‌ها می‌باشد. مسلماً عدم توجه به این نکته دقت و سادگی سیستم طبقه‌بندی را پایین می‌آورد. توجه به این نکته ضروری است که در هیچ‌کدام از تحقیقات مورد بررسی برای تعیین پارامترهای مؤثر و وزن‌دهی آن‌ها از روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) استفاده نشده است که در صورت استفاده از روش مذکور با در نظر گرفتن اندرکنش پارامترها بر هم و بر سیستم نتایج بهتری حاصل می‌شد.

با توجه به موارد ذکر شده، ارائه یک سیستم طبقه‌بندی جدید که به مشخصات مؤثر فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها و پارامترهای عملیاتی برش توجه داشته و نیز رعایت اصول ذکر شده در بالا را نیز در برگیرد، برای ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی لازم و ضروری می‌باشد. با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه روش رویکردهای سیستمی، مشاهده می‌شود که به هر حال قبل از انتخاب مشخصات مهم در یک سیستم طبقه‌بندی، توجه به عدم هم‌پوشانی پارامترها موجب سادگی سیستم طبقه‌بندی و کاهش زمان مورد نیاز و هزینه آزمایش‌ها می‌شود. این نکته نیز باید مورد توجه قرار گیرد که وجود محدودیت‌هایی برای برخی انواع سنگ‌ها، کاربرد این طبقه‌بندی‌ها و رابطه‌ها را محدود می‌کند. در این راستا ارائه یک سیستم طبقه‌بندی جدید که در برگیرنده خصوصیات اکثر سنگ‌های سخت و مشخصات مؤثر آن‌ها باشد و بتواند سایش دیسک‌های الماسی را ارزیابی کند ضروری است. لذا در این تحقیق به منظور انتخاب مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی و وزن‌دهی آن پارامترها از روش سیستم‌های مهندسی سنگ فازی (FRES) استفاده شد.

فصل چهارم

سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) و ارائه سیستم طبقه‌بندی

جدید برای پیش‌بینی سایش دیسک‌های الماسی

۱-۴- مقدمه

نگرش سیستمی با مرور زمان کاربرد فراوانی در تحلیل مسائل مهندسی پیچیده پیدا کرده است. با توجه به این موضوع که روش‌های موجود و مرسوم تجربی، عددی و تحلیلی نمی‌توانند تمامی عوامل مؤثر بر یک مساله خاص را در نظر گرفته و همواره با محدودیت‌های بی‌شماری روبرو هستند، استفاده از تفکر سیستمی که در آن با در نظر گرفتن تمامی جوانب و عوامل مختلف به بررسی مسائلی که تعداد عوامل مؤثر و تأثیرگذار بر سیستم زیاد است، نسبت به سایر روش‌ها، جایگزین مناسبی می‌باشد. این کار به وسیله رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ^۱ (RES) انجام می‌گیرد.

در مجموعه‌های فازی عضویت برخی یا تمام اعضا کاملاً روشن و مشخص نیست و عناصر آن به‌طور نسبی متعلق به آن مجموعه هستند. در روش RES فازی، وزن پارامترها به صورت فازی، اختصاص داده می‌شود. در این حالت بازه مجاز متغیر بر اساس تابع تعلق فازی انتخاب شده به صورت بازه‌بندی-های مشخص به چند رده تقسیم و هر یک از این رده‌ها بر اساس تأثیر آن رده، وزن متناظر با آن اختصاص می‌یابد. عمده تحقیقات پیشین، تنها پارامترهای مؤثر بر قابلیت برش سنگ‌ها و سایش ابزار الماسی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. این در حالی است که سایش دیسک‌های الماسی و قابلیت برش سنگ به پارامترهای زیادی وابسته است که این پارامترها در ارتباط تنگاتنگ با هم است. بنابراین

۱- Rock Engineering System

دستیابی به یک روش جامع که بتوان با استفاده از آن سایش دیسک‌های الماسی را مورد ارزیابی قرار داد، مدنظر است. در مهندسی سنگ به منظور ارزیابی رفتار توده و ماده سنگ، سیستم‌های طبقه‌بندی به عنوان ابزاری کارآمد مطرح می‌باشند. در عصر کنونی در بررسی و تحلیل مسائل پیچیده مهندسی پیشرفت‌های فراوانی صورت گرفته است. بنابراین با توجه به طبیعت پیچیده و پارامترهای مؤثر متعدد در فرآیند برش سنگ‌ها و سایش دیسک‌های الماسی به نظر می‌رسد استفاده از یک سیستم طبقه‌بندی می‌تواند برای رفع پیچیدگی‌های موجود در ارزیابی قابلیت برش سنگ‌ها پیش‌بینی سایش دیسک‌های الماسی راه‌گشا باشد.

هدف از ارائه این فصل، تشریح اصول کلی سیستم‌ها و به‌خصوص رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ است که در ابتدا به اجزای تشکیل دهنده آن شامل ماتریس اندرکنش، نحوه کدگذاری، نمودار علت - اثر و نحوه تفسیر این نمودارها پرداخته می‌شود و سپس به‌عنوان بهبود روش RES جداول تهیه شده با نظر خبرگان، به روش گاوسی، فازی شده و در نهایت وزن هر پارامتر مؤثر بدست آورده می‌شود. در نهایت پس از مقایسه وزن‌های بدست آمده از دو روش RES کلاسیک و فازی، یک سیستم طبقه‌بندی جدید مشتمل بر پارامترهای مؤثر فیزیکی و مکانیکی سنگ با توجه به رعایت اصولی از قبیل عدم وجود محدودیت‌های مرزی، هم‌پوشانی میان پارامترها و سهولت انجام آزمایش‌ها، برای ارزیابی و پیش‌بینی میزان سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی سخت با توجه به وزن‌های بدست آمده با روش RES فازی و نتایج آزمایشگاهی ارائه خواهد شد.

۲-۴ - سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)

در یک سیستم علاوه بر در نظر گرفتن تمامی فاکتورها، نحوه تأثیر متقابل این عوامل بر روی یکدیگر (اندرکنش‌ها) نیز در نظر گرفته می‌شود. برای بررسی تمامی اندرکنش‌ها در یک روش سیستمی، می‌توان آن‌ها را در یک ماتریس قرار داد. این کار به وسیله رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ RES انجام می‌گیرد. عوامل اصلی مؤثر در مساله مورد نظر در امتداد قطر اصلی ماتریس قرار گرفته و اندرکنش‌های هر جفت از عوامل مذکور در سایر درایه‌ها قرار می‌گیرند. پس از آن کدگذاری

اندرکنش‌ها و عملیات جبری سطرها و ستون‌ها انجام شده و کار با خروج نمودارهای مربوطه ادامه می‌یابد.

۱-۲-۴- پیشینه تحقیق سیستم‌های مهندسی سنگ RES

سیستم‌های مهندسی سنگ برای اولین بار توسط هادسون در سال ۱۹۹۲ ارائه شده است و از آن زمان به‌طور گسترده‌ای در حل مسائل پیچیده به کار رفته است. این روش یک سیستم کاملاً مهندسی است که تمام اهداف اصلی و فرعی یک مساله را در نظر گرفته و با اطمینان بالا، توانایی ارزیابی‌ها را داشته و می‌تواند در پروژه‌های مهندسی با اهداف مختلف به کار برده شود. این رویکرد با در نظر گرفتن مساله به صورت یک سیستم واقعی و با استفاده از ویژگی‌ها و تفکر سیستمی، امروزه به عنوان راه حل جدیدی برای مسائل پیچیده مهندسی بکار گرفته می‌شود (Khalokakaie & Naghadehi, ۲۰۱۲). خلاصه تحقیقات انجام شده در این زمینه در جدول ۴-۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱- خلاصه تحقیقات انجام شده در زمینه سیستم‌های مهندسی سنگ RES

نام محقق	کار انجام شده
Rozes et al., 2008	از سیستم‌های مهندسی سنگ برای رتبه‌بندی ناپایداری شیب طبیعی و بدست آوردن ضرایب وزنی و محاسبه شاخص ناپایداری شیب استفاده کرد.
خالوکاکایی و زارع نقدهی، ۱۳۸۸	با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ یک رده‌بندی در شیب‌های سنگی مشرف به جاده خوش بیلاق ایران ارائه داده و مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر ایجاد ناپایداری در شیب‌های سنگی را تعیین کردند.
Naghadehi et al., 2011	یک روش سیستمی احتمالاتی برای تجزیه و تحلیل پارامترهای مهم مؤثر بر پایداری شیب‌های سنگی پرداختند. آن‌ها پارامترهای مؤثر بر پایداری شیب‌های سنگی را مشخص و وزن‌دهی را به کمک روش سیستم‌های مهندسی سنگ انجام دادند.
Naghadehi et al., 2013	یک شاخص جدید برای بررسی پایداری شیب معادن روباز با استفاده از روش سیستم‌های مهندسی سنگ اصلاح شده ارائه دادند. پارامترها توسط سیستم‌های مهندسی سنگ وزن‌دهی شدند که با استفاده از یک الگوریتم شبکه‌های عصبی طبیعی (ANN)

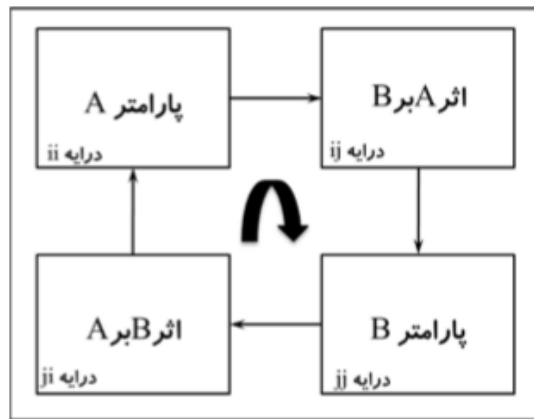
بهبودسازی انجام شد.	
آن‌ها به توسعه یک شاخص رفتاری سنگ (RBI) اطراف فضاهای زیرزمینی با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ RES پرداختند. پارامترهای مؤثر بر رفتار سنگ اطراف فضاهای زیرزمینی (مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص کیفی سنگ RQD، موقعیت صفحه درزه، شرایط تنش‌های اولیه، آب زیرزمینی و موقعیت تونل) مطالعه شد.	Rafiei et al., 2015
در زمینه بهبود سیستم‌های مهندسی سنگ با استفاده از اعداد فازی تحقیق کردند. آن‌ها از یک روش نیمه عددی خبره فازی برای کدگذاری ماتریس RES تهیه شده از پارامترهای مؤثر توده سنگ در معادن با روش استخراج تخریب بزرگ استفاده کردند.	Rafiei et al., 2016

در باره سیستم چندین نظریه و تعاریف زیادی وجود دارد. یکی از محققین به نام برتالانفی^۱ در ۱۹۶۸ یک سیستم را مجموعه‌ای از اجزاء به هم پیوسته و مرتبط دانست که بین آن‌ها یک ارتباط منظم وجود دارد و هر یک از عناصر سیستم بر رفتار یا ویژگی‌های کل سیستم تأثیر داشته و بین عناصر سیستم وابستگی متقابل و تأثیر بر کل سیستم داشته و بستگی به چگونگی رفتار حداقل یک عنصر دیگر از سیستم دارد (Von Bertalanffy, 1968).

۲-۲-۴- ماتریس‌های اندرکنش

در سیستم‌های مهندسی سنگ شناسایی پارامترهای مؤثر با استفاده از ماتریس‌های اندرکنش انجام می‌شود. یک ماتریس اندرکنش در حقیقت یک ماتریس مربعی است که پارامترهای مؤثر و تأثیرگذار بر روی قطر اصلی، و اندرکنش بین پارامترها در درایه‌های غیر قطری قرار می‌گیرد. در شکل ۴-۱ در یک سیستم فرضی با دو پارامتر A و B، پارامتر A در درایه بالا سمت چپ و پارامتر B در درایه پایین سمت راست قرار گرفته‌اند. درایه بالا سمت راست نشان‌دهنده تأثیر A بر روی B و درایه پایین سمت چپ نشان‌دهنده تأثیر B بر روی A می‌باشد (Hudson, 1992).

۱- Bertalanffy



شکل ۴-۱- ماتریس اندرکنش یک سیستم با دو پارامتر A و B (Hudson, 1992)

۳-۲-۴- کدگذاری ماتریس‌های اندرکنش

ماتریس‌های اندرکنش برای نشان دادن مکانیزم تأثیر عوامل مؤثر بر یکدیگر و استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ RES تهیه می‌شوند، لیکن می‌بایست چگونگی عددی‌سازی اهمیت پارامترهای مؤثر مد نظر قرار گیرد. لذا به روشی برای کدگذاری ماتریس اندرکنش توسط چگونگی تأثیر پارامترها بر یکدیگر به صورت عددی نیاز است.

هادسون، ارائه دهنده سیستم‌های مهندسی سنگ RES، پنج روش مختلف برای کدگذاری ماتریس اندرکنش ارائه داده است (Hudson, 1992). این روش‌ها شامل روش دوتایی^۱، نیمه عددی خبره^۳ ESQ، شیب نمودار پارامترها، روش تطبیقی از رویکرد سیستمی مستقیم و روش صریح^۴ می‌باشد.

الف) روش دوتایی: در این روش مکانیزم مابین دو پارامتر به صورت روشن یا خاموش به ترتیب ۰ یا ۱ می‌باشد.

ب) روش نیمه عددی خبره ESQ: این روش معمول‌ترین و پر استفاده‌ترین روش کدگذاری است که در این روش به فعالیت‌های فاقد اندرکنش بر هم مقدار صفر، اندرکنش ضعیف ۱، اندرکنش متوسط ۲، اندرکنش قوی ۳ و اندرکنش شدید و بحرانی ۴ در نظر گرفته می‌شود.

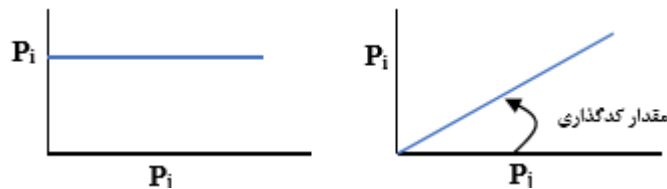
۱_ Quantification

۲_ Binary

۱- Expert Semi - Quantitative

۲_ Explicit

ج) روش شیب نمودار پارامترها: در این روش کدگذاری براساس شیب نمودار پارامترهای P_i و P_j انجام می‌شود که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴- مقدار کدگذاری با توجه به شیب نمودار پارامترهای P_i و P_j

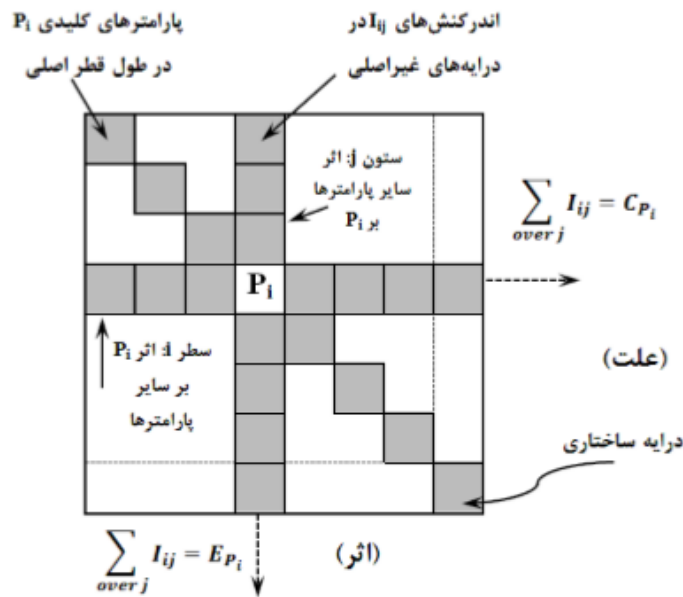
د) روش تطبیقی از رویکرد سیستمی مستقیم: در این روش فرض بر این است که تمام مکانیزم‌ها در درایه‌های ماتریس اندرکنش می‌توانند به صورت یک معادله مشتقات جزئی PDE^1 بیان می‌شود.
 ه) روش صریح: در این روش فرض می‌شود که چنان آگاهی کاملی از کل مکانیزم‌های ماتریس وجود دارد که امکان تحلیل عددی آن‌ها فراهم شود و می‌توان رفتار واقعی اندرکنش‌ها را مورد سنجش قرار داد.

۴-۲-۴ - نمودار علت - اثر^۲

در نمودار علت - اثر، اثر پارامتر روی سیستم (اثر) و اثر سیستم روی پارامتر (تأثیر) نامیده می‌شود. این نمودار از تأثیر ماتریس اندرکنش بدست آمده و امکان شناسایی پارامترهای مؤثر و شدت اندرکنش هر یک از پارامترها بر سیستم را نشان می‌دهد. پس از کدگذاری ماتریس جمع جبری هر ردیف و هر ستون بدست می‌آید، مجموع مقادیر عددی هر سطر به عنوان (علت) یا اثر P_i روی سیستم است که بر روی محور مختصات با حرف C نشان داده می‌شود و جمع جبری مقادیر هر ستون به عنوان (تأثیر) یا اثر سیستم روی P_i بوده که با حرف E نشان داده می‌شود. بنابراین مقدار C نشان‌دهنده تأثیرات P_i روی سیستم و مقدار E نشان‌دهنده تأثیری است که سیستم روی P_i دارد. چگونگی اثرگذاری یک پارامتر و هم‌چنین تأثیرپذیری آن از سیستم به صورت یک دستگاه مختصات در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. (Hudson, 1992).

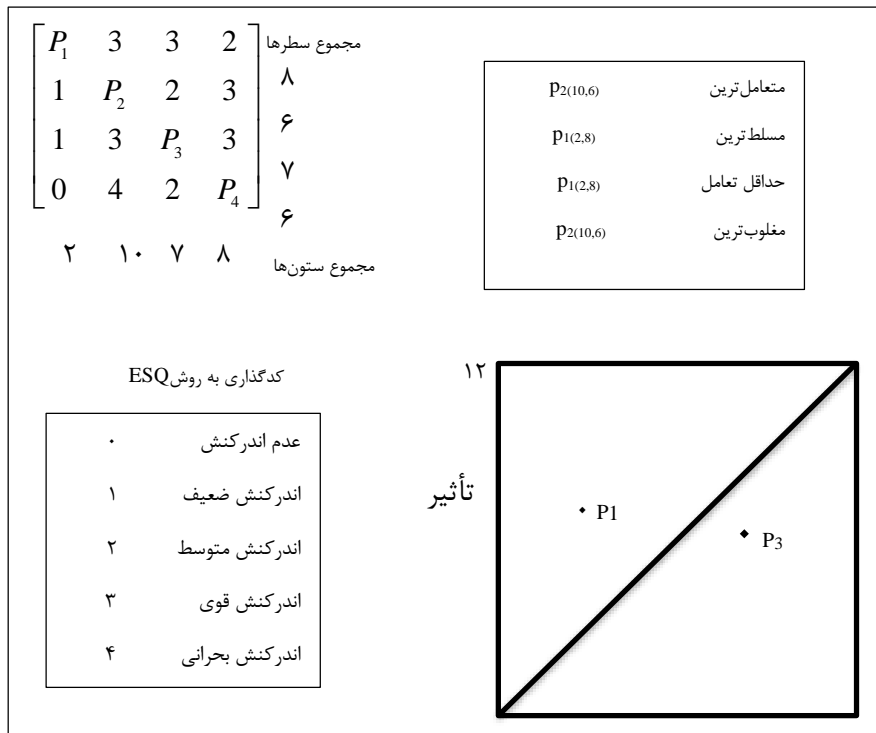
^۲ Partial Differential Equation

^۲ Cause-Effect Plot



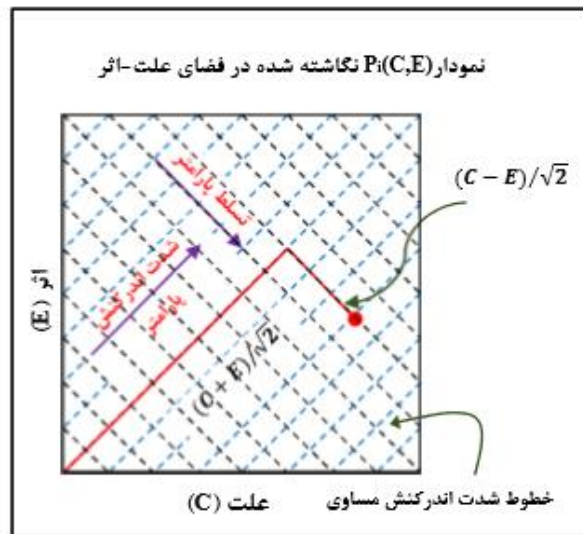
شکل ۴-۳- نحوه شکل گیری محورهای علت - اثر در ماتریس اندركنش (Hudson, 1992)

در ابتدا کدگذاری ماتریس انجام شده و سپس بر روی نمودار علت - اثر، مجموع مقادیر هر سطر و ستون برای هر پارامتر محاسبه و انتقال داده می شود. موقعیت هر نقطه در این نمودار وضعیت و اندركنش آن پارامتر را مشخص می کند. در شکل ۴-۴ نحوه تشکیل نمودار (C,E) به خوبی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که هرچه مقدار حاصل جمع C+E پارامتر مورد نظر بیشتر باشد، شدت اندركنش آن با کل سیستم بیشتر بوده و هرچه مقدار تفاضل C-E پارامتر مورد نظر بیشتر باشد میزان غلبه پارامتر مذکور روی سیستم بیشتر خواهد بود. در ضمن مقدار منفی برای C-E نشان دهنده غلبه سیستم بر پارامتر مورد نظر است (Hudson, 1992).



شکل ۴-۴- نمودار علَّت - اثر برای ماتریس ۴×۴

همان‌طور که در شکل ۴-۴ مشاهده می‌شود متعامل‌ترین پارامتر، P₂ می‌باشد، زیرا دارای بیشترین مقدار C+E است. کمترین فعل و انفعال نیز مربوط به پارامتر P₁ است که دارای کمترین مقادیر C+E می‌باشد. غالب‌ترین پارامتر^۱ P₁ به دلیل دارا بودن بیشترین مقدار C-E می‌باشد. این بدان معنا است که بیشتر از آن که سیستم بر روی P₁ تأثیرگذار باشد، این پارامتر سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مغلوب‌ترین پارامترها نیز P₂ و P₄ با کم‌ترین مقدار C-E می‌باشند. در شکل ۴-۵ موقعیت و خصوصیات غالب‌ترین و تعاملی‌ترین پارامترها به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۴-۵- مفهوم تسلط و شدت اندرکنش پارامترها (Hudson, 1992)

همان‌طور که در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود دو مجموعه خطوط بازایه ۴۵ درجه وجود دارد که نشان‌دهنده مقادیر مساوی از هر یک از خصوصیات شدت اندرکنش و تسلط پارامترها است. با افزایش یکنواخت مقدار شدت اندرکنش، پارامتر از صفر تا حداکثر، مقدار حداکثر تسلط پارامتر متناظر از صفر

۱-Most dominant

تا ۵۰ درصد، شدت اندرکنش افزایش یافته و سپس در مقدار حداکثر شدت اندرکنش به صفر کاهش پیدا می‌کند. مقادیر عددی مربوط به هر کدام از خصوصیات یاد شده عبارتند از $(C + E)/\sqrt{6}$ و $(C - E)/\sqrt{6}$.

پس از تهیه نمودار علت - اثر و تحلیل‌های لازم در نهایت برای بدست آوردن وزن هر پارامتر (مقدار درصد شدت اندرکنش پارامترها) در سیستم و ضرایب وزنی پارامترها از رابطه ۴-۱ استفاده می‌شود (Mazzoccola & Hudson, 1996).

$$a_i = \frac{C_i + E_i}{\sum_{i=1}^n C_i + \sum_{i=1}^n E_i} \quad (4-1)$$

که در این رابطه :

i: تعداد پارامترهای اصلی

α_i : وزن پارامتر i ام

C_i : اثرگذاری پارامتر i ام

E_i : تأثیرپذیری پارامتر i ام

تشکیل ماتریس اندرکنش منجر به تهیه جدولی می‌شود که حاوی مقادیر C و E و C+E و C-E و در نهایت α برای هر پارامتر می‌باشد.

۳-۴- ارزیابی وزن پارامترهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی با استفاده از RES

برای درک بهتر چگونگی اثرات متقابل پارامترهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش، نیاز به یک مطالعه سیستماتیک است تا بتوان میزان اثر یک پارامتر را بر سایر پارامترها و بر سیستم بررسی نمود. به منظور تعیین معیارهای مؤثر بر میزان سایش، یک ماتریس اندرکنش بر اساس مطالعات پیشین شامل کلیه پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها و پارامترهای عملیاتی مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی تهیه شد. برای نظرسنجی، جدول ماتریس تهیه شده برای تعدادی از اساتید برجسته در این زمینه در داخل و خارج از کشور فرستاده شد که نمونه ارسال شده آن در

پیوست ۲ آورده شده است. در این جدول، ۱۳ پارامتر مهم انتخاب شده بر اساس مطالعات پیشین، در امتداد قطر اصلی قرار داده شد. ماتریس اندرکنش برای مسأله پتانسیل سایش دیسک‌های الماسی، به روش نیمه عددی خبره کدگذاری شد. روش کدگذاری نیمه عددی خبره (EQC) معروفترین روش کدگذاری است که دارای پنج کلاس از صفر تا چهار است. در این کلاس‌بندی، به ترتیب صفر برای عدم وجود اندرکنش، ۱ برای اندرکنش ضعیف، ۲ برای اندرکنش متوسط، ۳ برای اندرکنش قوی و ۴ برای اثر بحرانی و شدید در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۴-۲ یک نمونه از ماتریس تکمیل شده توسط یک فرد خبره آورده شده است.

جدول ۴-۲- نمونه ماتریس تکمیل شده توسط یک فرد خبره

	UCS	BTS	N	ρ	W	Sf-a	Ym	EQC	Tc	Gs	IRB	LA	MH
UCS	UCS	۲	۰	۲	۱	۲	۲	۰	۱	۰	۲	۱	۱
BTS	۳	BTS	۰	۱	۲	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱
N	۲	۴	N	۲	۴	۱	۲	۰	۱	۰	۲	۲	۰
ρ	۳	۳	۳	ρ	۳	۲	۳	۰	۱	۱	۲	۲	۱
w	۲	۳	۴	۳	W	۲	۲	۰	۱	۲	۲	۲	۲
Sf-a	۳	۲	۲	۲	۱	Sf-a	۲	۱	۱	۲	۲	۲	۱
Ym	۳	۲	۲	۲	۱	۱	Ym	۰	۲	۱	۲	۲	۱
EQC	۳	۳	۲	۳	۲	۳	۳	EQC	۲	۲	۳	۳	۲
Tc	۳	۲	۱	۲	۱	۲	۲	۱	Tc	۱	۲	۲	۱
Gs	۲	۳	۲	۳	۳	۲	۳	۱	۱	Gs	۳	۳	۲
IRB	۳	۳	۳	۳	۲	۲	۳	۱	۲	۱	IRB	۳	۴
LA	۳	۲	۲	۳	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۳	LA	۳
MH	۳	۳	۲	۳	۲	۳	۳	۲	۲	۲	۳	۳	MH

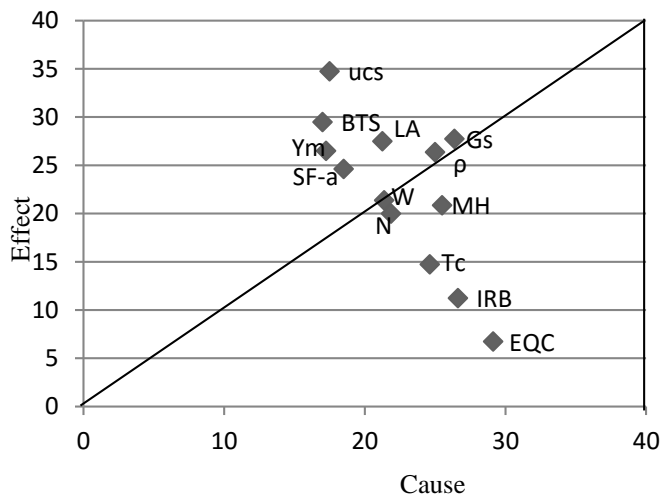
که در این جدول: UCS: مقاومت فشاری تک‌محوری، BTS: مقاومت کششی غیرمستقیم برزیلی، N: تخلخل، ρ : چگالی، W: درصد جذب آب، Sf-a: ساینده‌گی شیمازک، Ym: مدول الاستیسیته، EQC: کوارتز محتوی، Tc: ضریب بافت، Gs: اندازه دانه‌ها، IRB: سختی اشمیت، LA: ساینده‌گی لس‌آنجلس و MH: سختی موس می‌باشد.

پس از جمع‌آوری نظرات ۳۰ فرد خبره (۲۲ نفر از اساتید و صاحب نظران ایرانی و ۸ متخصص در زمینه برش سنگ از کشور ترکیه) برآیند عددی نظرات آنها در جدول ۴-۳ آورده شده است. در این جدول، علّت C از مجموع تمام کدهای سطر و اثر E از مجموع تمام کدهای ستون مربوط به هر

پارامتر قابل محاسبه است. مقادیر علت و اثر هر پارامتر روی محورهای X و Y انتقال داده شده و نمودار علت - اثر را به وجود می‌آورند (شکل ۴-۶). قطر این نمودار نشان‌دهنده مکان هندسی (C=E) بوده و در طول این قطر مجموع C+E افزایش می‌یابد. در نمودار شکل ۴-۶، تفاوت میان اثرات متقابل نشان داده شده است. در این نمودار پارامترهایی که تحت اثر سیستم قرار گرفته‌اند در قسمت بالا و سمت چپ قرار دارند که مقادیر C-E کوچک‌تری دارا هستند و به عبارت دیگر مغلوب سیستم شده‌اند. نقاطی که در قسمت پایین و سمت راست قرار گرفته‌اند پارامترهایی هستند که بر روی سیستم تسلط داشته و به عبارت دیگر بر سیستم غالب هستند، زیرا مقادیر C-E بزرگ‌تری نسبت به نقاط اطراف قطر نمودار دارند. محاسبه میزان اندرکنش با توجه به مقدار C+E می‌تواند موجب شناسایی پارامترهایی که نیاز به کنترل دارند شود. زیرا احتمالاً تغییر در این پارامترها باعث ایجاد تغییرات مهمی در سیستم می‌شود.

جدول ۴-۳- ماتریس برآیند نظرات ۳۰ فرد خبره

	UCS	BTS	N	ρ	W	Sf-a	Ym	EQC	Tc	Gs	IRB	LA	MH	C
UCS	UCS	۲/۲۵	۰/۶۲۵	۲/۵	۱/۳۷۵	۱/۳۷۵	۲/۱۲۵	۰/۵	۰/۸۷۵	۰/۱۲۵	۲/۶۲۵	۲	۱/۱۲۵	۱۷/۵
BTS	۲/۸۷۵	BTS	۰/۵	۱/۶۲۵	۱/۶۲۵	۲/۳۷۵	۱/۷۵	۰/۷۵	۰/۸۷۵	۰/۲۵	۱/۸۷۵	۱/۵	۱	۱۷
N	۳	۳	N	۲/۳۷۵	۳/۶۲۵	۱/۵	۲/۱۲۵	۰	۱/۱۲۵	۰/۲۵	۲/۲۵	۲/۱۲۵	۰/۵	۳۱/۸۷۵
ρ	۳/۱۲۵	۲/۷۵	۳	ρ	۳	۱/۶۲۵	۲/۷۵	۰	۱/۲۵	۱	۲/۵	۲/۳۷۵	۱/۶۲۵	۲۵
w	۲/۵	۲/۷۵	۳	۲/۵	W	۱/۲۵	۲/۲۵	۰	۰/۸۷۵	۱	۱/۸۷۵	۱/۷۵	۱/۶۲۵	۳۱/۳۷۵
Sf-a	۲/۳۷۵	۲	۱/۳۷۵	۱/۳۷۵	۰/۷۵	Sf-a	۱/۵	۰/۶۲۵	۱/۲۵	۱/۳۷۵	۲	۲/۳۷۵	۱/۵	۱۸/۵
Ym	۲/۶۲۵	۲	۱/۳۷۵	۱/۶۲۵	۰/۷۵	۰/۸۷۵	Ym	۰/۱۲۵	۱/۵	۰/۶۲۵	۲	۲/۳۷۵	۱/۳۷۵	۱۷/۲۵
EQC	۳/۵	۲/۶۲۵	۱/۲۵	۲/۵	۱/۷۵	۳/۱۲۵	۲/۸۷۵	EQC	۱/۳۷۵	۱/۱۲۵	۳	۳/۱۲۵	۲/۸۷۵	۲۹/۱۲۵
Tc	۲/۸۷۵	۲/۳۷۵	۱/۸۷۵	۲/۵	۱/۶۲۵	۲/۳۷۵	۲/۱۲۵	۱	Tc	۱/۷۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۱/۶۲۵	۲۴/۶۲۵
Gs	۲/۷۵	۲/۶۲۵	۲/۱۲۵	۲/۳۷۵	۲/۵	۲/۷۵	۲/۵	۰/۶۲۵	۱/۷۵	IRB	۲/۵	۲/۲۵	۱/۸۷۵	۲۶/۶۲۵
IRB	۲/۷۵	۲/۸۷۵	۲	۲/۲۵	۱/۲۵	۲/۲۵	۲/۵	۰/۶۲۵	۱/۵	۱/۵	Gs	۲/۵	۳/۳۷۵	۲۶/۳۷۵
LA	۲/۶۲۵	۱/۷۵	۱/۵	۲/۳۷۵	۱/۵	۲/۳۷۵	۱/۷۵	۱	۱	۰/۸۷۵	۲/۱۲۵	LA	۲/۳۷۵	۲۱/۲۵
MH	۲/۷۵	۲/۵	۱/۳۷۵	۲/۳۷۵	۱/۶۲۵	۲/۷۵	۲/۲۵	۱/۵	۱/۳۷۵	۱/۳۷۵	۲/۷۵	۲/۸۷۵	MH	۲۵/۵
E	۳۴/۷۵	۲۹/۵	۲۰	۲۶/۳۷۵	۲۱/۳۷۵	۲۴/۶۲۵	۲۶/۵	۶/۷۵	۱۴/۷۵	۱۱/۲۵	۲۷/۷۵	۲۷/۵	۲۰/۸۷۵	
Effect														



شکل ۴-۶- نمودار علت - اثر مسأله سایش دیسک‌های الماسی

پس از تهیه جدول برآیند ۳-۴ مقادیر C+E و C-E و در نهایت وزن هر پارامتر ($i\alpha$) نیز از رابطه ۴-۱ محاسبه و در جدول ۴-۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۴- محاسبه مقادیر وزن پارامترهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی با روش RES کلاسیک

پارامتر	UCS	BTS	N	ρ	W	Sf-a	Ym	EQC	Tc	IRB	Gs	LA	MH	مجموع
C+E	۵۲/۲۵	۴۶/۵	۴۱/۸۷۵	۵۱/۳۷۵	۴۲/۷۵	۴۳/۱۲۵	۴۳/۷۵	۳۵/۸۷۵	۳۹/۳۷۵	۳۷/۸۷۵	۵۴/۱۲۵	۴۸/۷۵	۴۶/۳۷۵	۵۸۴
C-E	-۱۷/۲۵	-۱۲/۵	۱/۸۷۵	-۱/۳۷۵	۰	-۶/۱۲۵	-۹/۲۵	۲۷/۳۷۵	۹/۸۷۵	۱۵/۳۷۵	-۱/۳۷۵	-۶/۲۵	۴/۶۲۵	-
$i\alpha$	۸/۹۵	۷/۹۶	۷/۱۷	۸/۸	۷/۳۲	۷/۳۸	۷/۴۹	۶/۱۴	۶/۷۴	۶/۴۹	۹/۲۷	۸/۳۵	۷/۹۴	۱۰۰

با توجه به مقادیر جدول ۴-۴ پارامتر Gs متعامل‌ترین و EQC کم تعامل‌ترین پارامتر می‌باشد. هم‌چنین پارامتر EQC به عنوان غالب‌ترین بر روی سیستم بوده و UCS مغلوب‌ترین پارامتر سیستم شناخته می‌شود. مشکل این است که جدول RES کلاسیک به دلیل پیچیدگی‌های رفتار توده سنگ بعضاً کارایی مناسبی ندارد.

ماتریس اندرکنش یکی از اساس و پایه‌های سیستم‌های مهندسی سنگ است. از طرف دیگر شناخت اندرکنش بین پارامترهای مختلف به فهم کامل تعاملات بین پارامترهای مختلف نیاز دارد و گاهی به این دلیل که رفتار توده سنگ پیچیدگی‌های خاصی دارد، دانستن کامل این ساز و کارها مقدور نیست. تا کنون اکثر کارهای انجام شده در حوزه طبقه‌بندی از نوع کلاسیک بوده است. در این نوع سیستم‌ها

به علت جدا کردن کلاس‌های مختلف سنگ توسط تعدادی محدودیت‌های ثابت، برخی از سنگ‌ها در یک کلاس نادرست طبقه‌بندی می‌شوند که مطلوب نیست. با توجه به اینکه افزایش دقت طبقه‌بندی و نیز افزایش سطح اعتماد آن همواره مد نظر است، لذا در این تحقیق، با فازی کردن داده‌های ماتریس‌های مذکور سعی شده نتایج حاصل از این روش بهبود یابد، دقت بالا رود و پاسخ به شرایط واقعی نزدیک شود.

۴-۴- سیستم مهندسی سنگ فازی (FRES) برای وزن‌دهی پارامترهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی

به طور کلی منطق فازی برگرفته از روش کارکرد مغز انسان است، که با در نظر گرفتن فاکتورهای مختلف و براساس استدلال استنتاجی، جمله‌ها را تعریف و ارزش‌گذاری می‌کند. در واقع، در منطق فازی می‌توان نتایج دقیق را با استفاده از مجموعه‌ای از اطلاعات نادقیق که با الفاظ و مقادیر کلامی تعریف شده‌اند، به دست آورد. در منطق فازی مرز مشخصی وجود ندارد و تعلق عناصر مختلف به مفاهیم و موضوع‌های گوناگون نسبی است. مفهوم و اساس مجموعه‌ها و منطق فازی در سال ۱۹۶۵ به وسیله پروفسور لطفی‌زاده برای تحلیل سیستم‌های پیچیده مطرح شد. لطفی‌زاده پس از معرفی مجموعه فازی، مفاهیم الگوریتم فازی را در سال ۱۹۶۸، تصمیم‌گیری فازی را در سال ۱۹۷۰ و ترتیب فازی را در سال ۱۹۷۱ ارائه نمود و در سال ۱۹۷۳ اساس کار کنترل فازی را ابداع کرد (Lotfi, Z, 1965 ; 1968 ; 1970 ; 1971; 1973).

در مجموعه‌های فازی عضویت برخی یا تمام اعضا کاملاً روشن و مشخص نیست و عناصر آن به‌طور نسبی متعلق به آن مجموعه هستند. یک مجموعه چند ارزشی فازی تعمیم یک مجموعه دو ارزشی کلاسیک می‌باشد که اجازه می‌دهد تا تعلق هر مقداری را در بازه صفر تا یک اختیار کند. در واقع میزان عضویت عناصر مختلف در مجموعه‌های فازی بین صفر و یک متغیر است.

در مجموعه‌های فازی بر خلاف مجموعه‌های قطعی، عناصر به دو دسته عضو و غیر عضو تقسیم نمی‌شوند، بلکه بر اساس آن چه ما تعریف می‌کنیم، میزان عضویت عناصر مختلف در مجموعه‌های

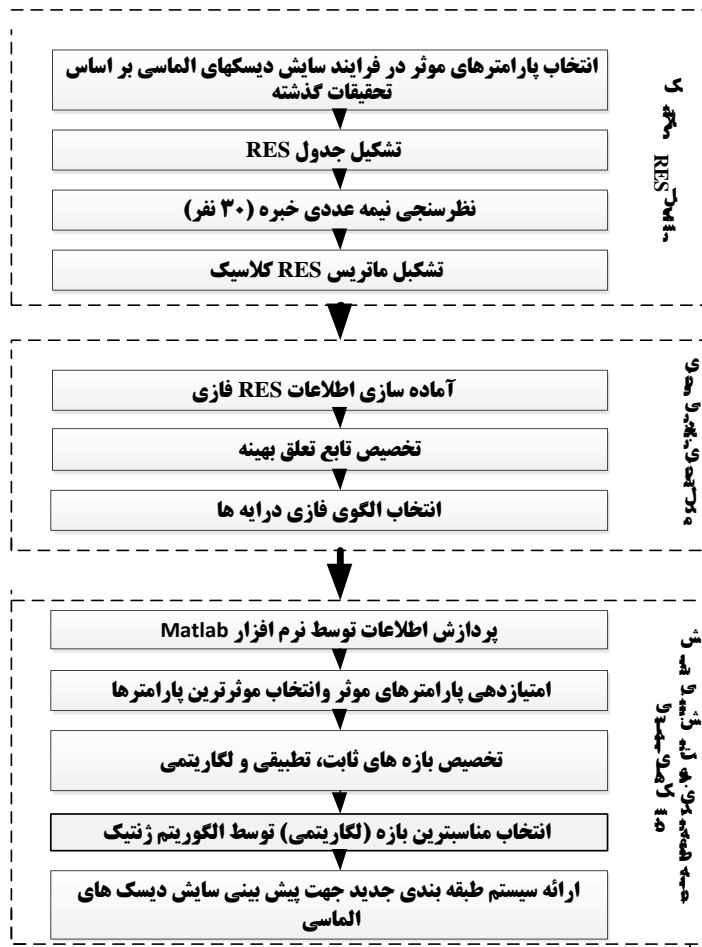
فازی بین صفر و یک متغیر است. در دهه گذشته ابزارهای طبقه‌بندی فازی زیادی در مسائل طبقه‌بندی پایگاه داده استفاده شده است. مدل‌سازی به‌تنهایی هدف نیست و معمولاً پس از طراحی آن، سعی در استفاده از مدل بدست آمده در کاربرد پیش‌بینی پارامتر مورد نظر است. در روش RES کلاسیک استفاده شده در این تحقیق، اولاً نظرات خبره به‌صورت مطلق یا ثابت در نظر گرفته می‌شود، ثانیاً با توجه به این که نمونه‌گیری از یک جامعه هوشمند در حوزه مهندسی صورت می‌گیرد، به پراکندگی نظرات و یا همان واریانس تغییرات نظرات خبره، توجه نمی‌شود. لذا به منظور بهبود روش سیستم‌های مهندسی سنگ، با فازی کردن توابع تعلق مربوطه این مهم انجام خواهد شد.

۱-۴-۴- روش RES فازی

در روش RES فازی، وزن پارامترها بجای استفاده از مقادیر ثابت رابطه ۴-۱، به‌صورت فازی، اختصاص داده می‌شود. در این حالت بازه مجاز متغیر بر اساس تابع تعلق فازی انتخاب شده، به‌صورت بازه‌بندی‌های مشخص به چند رده تقسیم و به هر یک از این رده‌ها بر اساس تأثیر آن رده، وزن متناظر با آن اختصاص می‌یابد. در روش پیشنهادی بر اساس مطالعه سیستم‌های طبیعی و بررسی فرآیند اندرکنش متغیرها، از تابع تعلق گاوسی (نرمال) استفاده شده است که نزدیک‌ترین تابع تعلق از نظر مرزبندی به سیستم‌های طبیعی پیچیده به شمار می‌رود. پارامترهای اصلی تابع تعلق نرمال شامل میانگین و واریانس است که با استفاده از روش‌های عددی و معلوم بودن بازه هر نمونه می‌توان تابع تعلق را مشخص کرده و به آن متغیر تخصیص داد. در تخصیص وزن‌ها با تابع تعلق نرمال فازی، بجای محاسبه به‌صورت یک عدد ثابت در کل بازه، وزن در نقطه میانگین، حداکثر مقدار را دارد و با قرار گرفتن در دو انتهای بازه از مقدار آن کم شده و اثرگذاری متغیر در نقاطی که فاصله آن بیش‌تر از انتظار محسوب می‌شود به همان نسبت کاهش خواهد یافت. در صورت پیروی نکردن الگوی پارامترها یا متغیرهای طبیعی از الگوی تابع تعلق نرمال، آزمون‌های آماری مشخصی وجود دارد که سطح اطمینان برآورد تابع تعلق را دقیقاً مشخص کرده و ناکارآمد بودن این تابع تعلق را در آن پارامتر نشان می‌دهد.

تابع تعلق نرمال (گاوسی) به دلیل نزدیک بودن به فرایندهای طبیعی، قابل قبول در هر دو حالت پیوسته و گسسته و دقت بسیار زیاد، از متداول‌ترین توابع تعلق در مجموعه‌های فازی محسوب می‌شود. بدیهی است که توابع فازی دیگر مانند مثلثی و دوزنقه در سیستم‌های پیچیده معمولاً کارایی کمتری نسبت به تابع گاوسی دارند و این توابع تعلق صرفاً در مواردی که بازه‌های مشخص با اعداد ثابت وجود دارد استفاده می‌شوند لذا در این تحقیق از توابع تعلق گاوسی استفاده شد (Zerafat. A, et al., 2012 ; Jonathan, 2017).

در نهایت در روش پیشنهادی تابع تعلق گاوسی به عنوان تابع مناسب انتخاب شد که با آزمون‌های آماری مختلف دقت و انطباق آن با اطلاعات برداشت شده بررسی شد. پس از اختصاص تابع تعلق به تمامی پارامترهای مؤثر در طبقه‌بندی، ترکیب این پارامترها سیستم نهایی را تشکیل خواهد داد که در این حالت تصمیم‌گیری نهایی با یک سطح آستانه ثابت و معمولاً همانند سیستم‌های کلاسیک انجام خواهد شد. در شکل ۴-۷ مراحل عملیات انجام شده در این فصل از تحقیق آورده شده است.



شکل ۴-۷- مراحل تخصیص وزن کلاسیک و فازی به پارامترها و ارائه سیستم طبقه بندی جدید

الف- مدل سازی تجربی فازی

در این قسمت روش RES فازی استفاده شده در این تحقیق با جزئیات توضیح داده می شود.

ب- گردآوری پایگاه داده و آماده سازی اطلاعات

در ابتدا پرسش نامه جامع از ۳۰ فرد خبره شامل تمامی متغیرهای مهم بر اساس مطالعات پیشین جمع آوری شد. در این پرسش نامه، اثر تمامی متغیرها با هم به صورت ۵ سطحی با توجه به تاثیر آنها بر سایش دیسک بر اساس نظر افراد متخصص این حوزه طراحی شده است. برای آن که بتوان با استفاده از نرم افزار Matlab الگوهای تعریف شده توسط افراد خبره مختلف را به صورت مناسب فراخوانی نمود، کل اطلاعات به صورت یکسان و برای کلیه نظرات موجود در نظرسنجی، وارد نرم افزار

Excel شد (جدول ۴-۲).

ج- تخصیص تابع تعلق

در این مرحله ۳۰ ماتریس 13×13 وجود دارد. با توجه به مشخص بودن تابع چگالی احتمال، لازم است حداقل تعداد نمونه مورد نیاز خبرگان کنترل شود تا حاشیه اطمینان نتایج بدست آمده به اندازه کافی مناسب بوده و بتوان آن‌ها را به عنوان نتایج معنی‌دار ارائه داد. در مورد اندازه نمونه در تابع چگالی احتمال نرمال روابط بسیار زیادی وجود دارد که به عنوان یکی از متداول‌ترین معیارها در این روابط که در نظرسنجی‌ها به آن استناد می‌شود می‌توان به رابطه ۴-۲ اشاره کرد (Nakagawa & Innes, 2007):

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 \sigma_x^2}{\varepsilon^2} \quad (4-2)$$

که در این رابطه:

n: اندازه تعداد نمونه

Z_{α}^2 : مقدار توزیع Z از جدول

σ_x^2 : انحراف معیار (واریانس)

ε : دقت برآورد

بر اساس رابطه ۴-۲، آگاهی از حداقل انحراف معیار جامعه آماری برای بدست آوردن اندازه نمونه ضروری است، اما مشکل اینجاست که معمولاً انحراف معیار جامعه آماری برای تخمین اندازه بهینه نمونه نامعلوم است که این خود جزء مشکلات عملی کار محسوب می‌شود. برای رفع این مشکل روش‌های مختلفی برای برآورد انحراف معیار (σ_x^2) در دسترس هستند که معمول‌ترین آن‌ها شامل:

- ممکن است برآوردهای σ_x^2 از مطالعه‌های مشابه در دسترس باشد.

- اگر شواهدی وجود داشته باشد که جامعه مورد نمونه‌گیری به‌طور تقریبی از توزیع نرمال برخوردار است، می‌توان این حقیقت را به کار برد که R دامنه تغییرات، تقریباً معادل ۴ یا ۶ برابر انحراف معیار

انتخاب می‌شود. دقت شود که محاسبه R مستلزم در دسترس بودن کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین مقدار متغیر در جامعه آماری است. حداقل اندازه نمونه برای آن که توزیعی طبق قضیه حد مرکزی از الگوی نرمال پیروی کند این است که باید ابعاد نمونه از ۲۰ بیش‌تر باشد. در صورتی که ابعاد نمونه بسیار بزرگ باشد الگوی چگالی احتمال بدون توجه به نوع متغیر و الگوی آن به سمت یک الگوی نرمال میل خواهد کرد (Walck, 2007). این موضوع یکی از اصول بسیار مهم برای استناد به استفاده از تابع چگالی احتمال نرمال در الگوی فازی در روش پیشنهادی محسوب می‌شود. برای تعیین اندازه نمونه با توجه به انحراف معیار ماکزیمم موجود در اطلاعات برداشت شده و با در نظر گرفتن یک سطح اطمینان بسیار بالا، تعداد نمونه ۳۰، به عنوان تعداد نمونه مناسب انتخاب شد.

د- الگوی فازی مناسب درایه‌ها

در ماتریس 13×13 گردآوری شده، اگر برای هر متغیر یک الگوی فازی نرمال اختصاص داده شود در مجموع ۱۲ تابع تعلق فازی در هر سطر و در هر ستون (غیر از خود متغیر با خودش) و مجموعاً ۱۴۴ الگوی فازی برای نمایش ارتباط متغیرها بدست خواهد آمد، که این توابع تعلق، می‌تواند الگوی رابطه‌ای این متغیر را با سایر متغیرها با دقت بالا مدل کرده و از نظر صحت، کارایی را افزایش دهد (Tyagi et al., 2017).

در نرم‌افزار Matlab، ۳۰ نظر افراد خبره به عنوان نمونه‌های تصادفی فازی به سیستم داده شد و براساس آن یک تابع چگالی احتمال نرمال به عنوان تابع تعلق تعمیم داده شد. برای بدست آوردن الگوی نرمال از تعداد ۳۰ نمونه مذکور، روش‌های مختلف عددی مانند روش هسته‌ای و B-اسپلاین‌ها استفاده شد (Walck, 2007 ; Jonathan, 2017). در صورتیکه اطلاعات از الگوی نرمال پیروی نکند معیار بیش‌ترین شباهت به عنوان یک آزمون معتبر می‌تواند مورد استناد قرار گیرد که نسبت به سایر آزمون‌ها از قابلیت اطمینان بیش‌تری برخوردار است (Masashi, 2016). در روش پیشنهادی برای اطمینان از پاسخ بدست آمده، با استفاده از آزمون آماری اندرسون - دارلینگ مجدداً صحت الگوی

^{۱۰} Anderson darling

بدست آمده بر روی پرسشنامه‌های افراد خبره، مورد ارزیابی قرار گرفت (Teran, 2007). این آزمون برای تحلیل شباهت یا یکسان بودن نوع تغییر بین دو متغیر تصادفی استفاده می‌شود که خصوصاً در بررسی اعتبار انطباق مدل با اطلاعات، کارایی بسیار گسترده‌ای دارد (Kandethody & Chris, 2015). در این آزمون نتایج بدست آمده در تمامی ۱۴۴ مورد، نشان داد که انطباق صورت گرفته با اطلاعات، از نظر الگو کاملاً هم‌خوانی دارد. مقادیر میانگین و انحراف معیار بدست آمده توسط نرم‌افزار Matlab، به ازای تمامی نمونه‌ها، در جدول ۴-۵ آمده است که توابع تعلق فازی اولیه، کلیه اعداد و درایه‌های ماتریس متغیرها می‌باشد. هرچه عدد گزارش شده از نظر میانگین بالاتر باشد، نشان‌دهنده وابستگی یا تأثیر بیشتر و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، بیانگر تأثیر کم‌تر متغیر در متغیر اصلی محسوب می‌شود. به‌عنوان کم‌ترین اعداد، به اعداد زیر ۱ در جدول ۴-۵، می‌توان اشاره نمود، برای نمونه در ستون ۸ اعداد کوچکتری وجود دارد که بیانگر تأثیر اندک متغیرهای مختلف بر روی متغیر EQC می‌باشد.

جدول ۴-۵- مقادیر میانگین و انحراف معیار متغیرها و تابع تعلق فازی گاوسی (میانگین، انحراف معیار)

UC	0.000	2.250, 0.463	0.750, 0.463	2.500, 0.756	1.375, 0.518	1.375, 0.916	2.000, 0.756	0.500, 0.756	0.750, 0.463	0.125, 0.354	2.500, 0.926	2.000, 0.926	1.250, 1.035
S	2.875, 0.354	0.000	0.500, 0.535	1.750, 0.886	1.625, 0.518	2.375, 1.061	1.875, 0.835	0.750, 1.389	0.875, 0.641	0.250, 0.707	1.875, 1.356	1.375, 0.518	1.000, 1.309
BTS	3.000, 0.535	2.750, 1.035	0.000	2.375, 0.518	3.375, 0.916	1.500, 0.926	2.000, 0.756	0.000, 0.000	1.250, 0.707	0.250, 0.707	2.250, 0.463	2.000, 0.000	0.625, 0.518
N	3.250, 0.707	2.750, 0.707	3.000, 0.000	0.000	2.875, 0.835	1.625, 0.518	2.625, 0.518	0.000, 0.000	1.375, 0.744	1.000, 0.000	2.625, 0.518	2.250, 0.463	1.625, 0.916
P	2.375, 0.744	2.625, 0.518	2.875, 1.246	2.250, 1.035	0.000	1.125, 0.835	2.125, 0.835	0.000, 0.000	0.875, 0.354	0.875, 0.835	1.750, 0.463	1.625, 0.518	1.500, 0.535
w	2.375, 0.744	2.000, 0.535	1.375, 0.916	1.375, 0.916	0.750, 0.463	0.000	1.500, 0.926	0.750, 1.035	1.375, 0.744	1.250, 0.707	2.000, 0.000	2.500, 0.756	1.625, 0.518
Sf-a	2.500, 0.535	2.000, 0.000	1.250, 0.886	1.750, 1.165	0.750, 0.463	0.875, 0.641	0.000	0.125, 0.354	1.500, 0.756	0.500, 0.535	2.000, 0.000	2.375, 0.518	1.375, 0.518
Ym	3.375, 0.518	2.500, 0.535	1.125, 0.835	2.500, 0.756	1.750, 0.463	3.250, 0.707	2.750, 0.463	0.000	1.250, 1.035	0.875, 0.735	2.875, 0.835	3.000, 0.000	2.750, 1.389
EQC	2.750, 0.707	2.250, 0.463	1.875, 0.835	2.500, 0.535	1.750, 0.886	2.500, 0.535	2.125, 0.354	0.875, 0.641	0.000	1.750, 1.035	2.250, 0.463	2.250, 0.463	1.625, 0.916
Tc	2.750, 1.035	2.500, 0.756	2.250, 0.707	2.375, 0.744	2.500, 0.756	2.875, 0.835	2.375, 0.518	0.500, 0.535	1.875, 0.835	0.000	2.500, 0.756	2.250, 0.707	1.875, 0.354
Gs	3.750, 0.463	2.875, 0.354	1.875, 1.246	2.250, 1.035	1.250, 1.035	2.250, 0.463	2.375, 0.518	0.500, 0.535	1.500, 0.926	1.500, 0.926	0.000	2.500, 0.535	3.375, 1.061
IRB	2.625, 0.744	1.750, 0.463	1.625, 1.188	2.375, 1.061	1.500, 0.926	2.500, 0.535	1.750, 0.463	1.000, 0.926	1.125, 0.835	0.875, 0.641	2.000, 0.926	0.000	2.250, 0.707
LA	2.750, 0.463	2.375, 0.744	1.375, 0.916	2.375, 0.916	1.625, 0.518	2.625, 0.518	2.125, 0.835	1.375, 1.302	1.375, 0.916	1.375, 0.916	2.750, 0.707	2.875, 0.354	0.000
MH													

چند مقدار نمونه از پراکندگی نظرات خبره در جدول ۴-۶ نشان داده شده است.

جدول ۴-۶- پراکندگی نظرات خبره

UCS, MH	BTS, Sf-a	BTS, EQC	BTS, IRB	BTS, MH	N, BTS	W, N	W, ρ	Sf-a, EQC
---------	-----------	----------	----------	---------	--------	------	------	-----------

۱/۰۳۵	۱/۰۶۱	۱/۳۸۹	۱/۳۵۶	۱/۳۰۹	۱/۰۳۵	۱/۲۴۶	۱/۰۳۵	۱/۰۳۵
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

در جدول ۴-۶، سطر اول نام دو متغیری که نظر افراد خبره در آن‌ها با یکدیگر هم‌خوانی نداشته و سطر دوم انحراف معیار را نشان می‌دهد که هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده پراکندگی کم‌تر و هر چه بزرگ‌تر باشد نشان‌دهنده پراکندگی بیش‌تر است. به‌عنوان نمونه عدد ۱/۰۳۵ در ستون اول بیان‌گر آن است که تأثیر UCS بر MH در نظر افراد خبره دارای پراکندگی نسبتاً زیادی بوده است.

ه- پردازش اطلاعات

به منظور جمع‌بندی ارزشی از هر متغیر در کنش یا اندرکنش، باید توابع تعلق به صورت مناسب با یکدیگر درهم آمیخته شود تا بتوان یک عدد فازی از میزان اهمیت متغیرها، بدست آورد. برای ترکیب توابع تعلق فازی از یک ایده ریاضی استفاده شد و در حدود ۱۰۰۰۰ نمونه تصادفی با الگوی چگالی احتمال بدست آمده محاسبه شد. با توجه به پیچیدگی این مرحله، از دستور Normrnd در نرم‌افزار Matlab استفاده شد که این دستور یک مولد اعداد تصادفی با الگوی گاوسی با میانگین و انحراف معیار از پیش تعریف شده می‌باشد (Li & Vladik, 2013 ; Stipcevic & cetin, 2014). نمونه‌های تصادفی مجدداً با یکدیگر آمیخته شده و در هر سطر یک الگوی گاوسی بدست آمد، الگوی بدست آمده به نوعی برآیند یا حاصل درهم آمیختگی تمام متغیرها محسوب می‌شود. پس از آن که برای هر درایه ده هزار عدد محاسبه شد، دوازده درایه سطر یا ستون در کنار یکدیگر قرار گرفت که یک بردار ۱۲۰ هزار تایی برای هر سطر یا ستون حاصل شد. با استفاده از این بردار ۱۲۰ هزار تایی مجدد یک الگوی فازی به‌صورت یکتا محاسبه شد (Masashi, 2016).

میانگین و انحراف معیار این الگو در حقیقت خروجی نهایی روش یا همان مقدار فازی نهایی متغیرها محسوب می‌شود. این کار به تفکیک برای هر سطر و ستون تکرار شد. از مزایای دیگر روش پیشنهادی، تأثیر مستقیم میانگین و انحراف معیار تمامی توابع تعلق در جواب نهایی می‌باشد، که تمامی آن‌ها بلا استثناء از نظر ریاضی در پاسخ نهایی تأثیر به‌صورت فازی داشته است. به عنوان نتیجه

نهایی و جمع بندی کلی، در جدول ۷-۴ میزان تأثیر کلیه متغیرها بر میزان سایش دیسک الماسی به تفکیک سطر یا ستون با ملاحظه نظرات خیره و کارهای آماری و فازی، آورده شده است. در نهایت با ترکیب حاصل میانگین سطری و ستونی هر متغیر، طبق رابطه ۳-۴ وزن نهایی فازی هر متغیر بدست آمده است که در جدول ۷-۴ آورده شده است.

$$\alpha = \frac{Z_{row_i} + Z_{Col_i}}{\sum_{i=1}^n Z_{row_i} + \sum_{i=1}^n Z_{Col_i}} \quad (۴-۳)$$

که در این رابطه Z_{row_i} وزن فازی سطری متغیر i ، Z_{Col_i} وزن فازی ستونی متغیر i و N تعداد کل متغیرها می‌باشد. با جمع میانگین سطری و ستونی برای هر متغیر و تقسیم آن بر مجموع مقادیر میانگین سطری و ستونی تمامی متغیرها وزن نهایی فازی هر متغیر بدست می‌آید.

جدول ۷-۴- وزن سطری، ستونی و نهایی فازی هر متغیر

وزن نهایی فازی	ستون		سطر		نام متغیر
	میانگین	واریانس	میانگین	واریانس	
۰/۰۸۹۷	۱/۴۴۸	۱/۰۶۰	۲/۸۶۲	۰/۷۶۹	UCS
۰/۰۸۰۲	۱/۴۲۴	۱/۱۷۶	۲/۳۸۳	۰/۶۸۴	BTS
۰/۰۷۱۵	۱/۷۸۲	۱/۲۳۳	۱/۶۵۹	۱/۱۵۳	N
۰/۰۸۸۸	۲/۰۸۱	۱/۰۹۵	۲/۱۹۹	۰/۹۵۲	ρ
۰/۰۷۱۰	۱/۶۶۴	۱/۰۹۰	۱/۷۵۹	۱/۰۴۹	W
۰/۰۷۶۱	۱/۵۷۳	۰/۹۱۱	۲/۰۷۱	۱/۰۲۵	Sf-a
۰/۰۷۴۲	۱/۴۱۷	۰/۹۴۶	۲/۱۳۵	۰/۷۵۶	Ym
۰/۰۵۹۴	۲/۳۳۲	۱/۱۲۹	۰/۵۳۳	۰/۸۸۶	EQC
۰/۰۶۸۶	۲/۰۳۹	۰/۸۳۸	۱/۲۶	۰/۸۲۲	Tc
۰/۰۶۴۲	۲/۲۱۵	۰/۹۳۹	۰/۸۸۳	۰/۸۹۲	Gs
۰/۰۹۲۱	۲/۱۶۶	۱/۱۹۹	۲/۲۸	۰/۸۰۱	IRB
۰/۰۸۴۰	۱/۷۸۴	۰/۹۹۳	۲/۲۴۹	۰/۷۰۴	LA
۰/۰۷۹۸	۲/۰۸۸	۰/۹۹۳	۱/۷۴۱	۱/۱۳۴	MH

این الگو در حقیقت خروجی نهایی روش پیشنهادی محسوب می‌شود.

از مزایای دیگر این روش، تأثیر مستقیم میانگین و انحراف معیار تمامی توابع تعلق در جواب نهایی می‌باشد، که تمامی آن‌ها بلا استثناء از نظر ریاضی به صورت کامل در پاسخ نهایی تأثیری به صورت فازی داشته‌اند. ماتریس برآیند نهایی به ازاء هر سطر یا ستون در جدول ۷-۴ آورده شده است. انحراف

معیارهای بدست آمده هیچ کدام از ۱/۵ بیشتر نمی باشد. فرایند فازی، به صورت منطقی و ریاضی، متغیرها را با یکدیگر ترکیب کرده و در نهایت برآیند کنش و اندرکنش متغیرها بدست آمده است. به عنوان نتیجه نهایی و جمع بندی کلی، در جدول ۴-۸ وزن نهایی حاصله، برای میزان تأثیر کلیه متغیرها بر میزان سایش دیسک های الماسی با ملاحظه نظر افراد خبره و کارهای آماری و فازی آورده شده است. بیشترین و کمترین وزن به ترتیب مربوط به متغیر IRB و متغیر EQC می باشد.

جدول ۴-۸- میزان وزن نهایی بدست آمده برای متغیرها در روش RES فازی

متغیر	UCS	BTS	N	ρ	W	Sf-a	YM	EQC	Tc	Gs	IRB	LA	MH
وزن نهایی فازی	۸/۹۷	۸/۰۲	۷/۱۵	۸/۸۸	۷/۱۰	۷/۶۱	۷/۴۲	۵/۹۴	۶/۸۶	۶/۴۲	۹/۲۱	۸/۴۰	۷/۹۸

۴-۵- مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ ها

در مهندسی سنگ، همواره انتخاب پارامترهای مهم و ترکیب این پارامترها در کنار یکدیگر، یکی از مهم ترین مراحل یک تحقیق است. آگاهی از خواص سنگ برای انتخاب دیسک، ماشین برش و شرایط عملیاتی ضروری است. همچنین دانستن این که آیا یک سنگ خاص می تواند توسط یک تیغه دیسک معین بریده شود نیز اهمیت دارد (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴). با توجه به گستردگی مشخصات سنگ می توان آن را به سه دسته مشخصات فیزیکی، مکانیکی و خواص بافتی (ساختاری) تقسیم بندی کرد. به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه سنگ های مورد مطالعه و تعیین پارامترهای مورد نظر، از هر نمونه سنگ، بلوک های سنگی با ابعاد مناسب تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. در مجموع از ۹ نمونه سنگ ساختمانی سخت، که تقاضای قابل توجهی در بازار دارند، نمونه برداری به عمل آمد. تمام آزمایش ها تحت استانداردهای انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM) و با دقت مطلوب انجام داده شد. نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی بدست آمده در بررسی مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه سنگ های مورد مطالعه در آزمایشگاه در جدول ۴-۹ آورده شده است.

جدول ۴-۹- مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ های مورد مطالعه

نوع و نام سنگ	UCS (MPa)	BTS (MPa)	IRB	YM (GPa)	SF-a (N/mm)	MH (n)	EQC (%)	Gs (mm)	LA	Tc	ρ (gr/cm ³)	W (%)	N (%)
---------------	-----------	-----------	-----	----------	-------------	--------	---------	---------	----	----	------------------------------	-------	-------

مشکی نطنز	۱۵۷	۱۵/۴۶	۷۱	۳۷	۹/۱	۵/۶	۵۲	۱/۱۳	۲۲/۳	۱/۵۷	۲/۶۸۱	۰/۲۵۹	۰/۶۹۴
نهبندان آستان	۱۳۸	۸/۱۵	۶۹/۵	۲۹	۵/۹۴	۶/۷	۶۴	۱/۱۴	۲۹/۸	۱/۰۱	۲/۵۳۱	۰/۳۰۹	۰/۹۱۳
نهبندان طوسی آستان	۱۴۱	۱۰/۱۵	۷۰/۵	۴۱/۵	۷/۷۴	۶	۶۱	۱/۲۵	۳۱/۲	۱/۳۴	۲/۵۴۲	۰/۳۲۸	۰/۸۷۵
مشکی الموت	۱۷۳	۱۵/۹۸	۷۱/۵	۴۶	۷/۹۹	۵/۷	۳۵	۱/۴۳	۲۱/۲۳	۱/۵۷	۲/۶۹۳	۰/۱۴۲	۰/۴۲
آبی نهبندان	۱۵۵	۱۳/۱	۷۱	۳۹	۱۴/۸۴	۵/۷	۵۵	۲/۰۶	۲۹/۴	۱/۵۹	۲/۵۷	۰/۳۸۷	۰/۸۶۷
گل‌پنبه‌ای سفید نطنز	۱۵۰	۱۱/۲۸	۷۱/۵	۴۳	۱۳/۴	۵/۷	۵۵	۲/۱۶	۳۸/۱	۱/۳۸	۲/۵۶۷	۰/۴۴۵	۰/۹۱۶
مشکی همدان	۱۸۵	۱۷	۷۲	۴۹	۱۰/۸۴	۵/۳	۵۵	۱/۱۶	۱۸/۸	۱/۵۸	۲/۷۱۳	۰/۱۷۳	۰/۳۵۷
سبز جنگلی بیرجند	۲۳۹	۱۸/۸۶	۷۴	۵۲	۹/۶۵	۶/۴	۶۶/۵	۰/۷۷	۱۶/۷	۱/۹۸	۳/۰۰۵	۰/۱۲۸	۰/۳۲۲
سبز یزد	۱۹۹	۱۶/۱۴	۷۱	۴۹/۵	۵/۴۴	۵	۳۷	۰/۹۱	۲۱/۱	۱/۴۷	۲/۸۱۲	۰/۱۳۳	۰/۳۹

که در این جدول UCS: مقاومت فشاری تک‌محوری برحسب مگاپاسکال، BTS: مقاومت کششی غیرمستقیم برزلی برحسب مگاپاسکال، IRB: سختی اشمیت، YM: مدول الاستیسیته برحسب گیگاپاسکال، SF-a: شاخص شیمازک برحسب نیوتن بر میلی-متر، MH: سختی موس، EQC: کوارتز محتوی برحسب درصد، Gs: اندازه دانه‌ها برحسب میلی‌متر، LA: سایندگی لس‌آنجلس، Tc: ضریب بافت، p: چگالی برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، W: رطوبت محتوی برحسب درصد و N: تخلخل برحسب درصد می‌باشد. تمامی نمونه سنگ‌ها با نام تجاری گرانیته در صنعت شناخته می‌شوند.

۴-۶-۱-ارائه سیستم طبقه‌بندی برای ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی

برای تدوین و ارائه یک سیستم طبقه‌بندی در مهندسی سنگ، انتخاب پارامترهای کلیدی و ترکیب آن‌ها در کنار هم، یکی از مهم‌ترین اصول طراحی و ایجاد یک سیستم طبقه‌بندی به‌شمار می‌رود (Everitt et al, 2011). یک سیستم طبقه‌بندی سنگ وقتی قابل قبول می‌باشد که علاوه بر ساده بودن (حداقل زمان و هزینه‌های آزمایش)، بتواند با حداقل تعداد پارامتر، تمامی مشخصات مهم فیزیکی و مکانیکی سنگ را پوشش دهد.

۴-۶-۱-۱- انتخاب پارامترهای مناسب برای سیستم طبقه‌بندی جدید

در یک سیستم طبقه‌بندی مناسب باید به حداقل بودن تعداد پارامترها و عدم هم‌پوشانی آن‌ها توجه نمود لذا پس از تحلیل همبستگی بین ۱۳ پارامتر مورد بررسی که به طور مثال ضریب تعیین بین دو پارامتر UCS و ρ برابر ۰/۸۶ بدست آمد، چهار پارامتر سختی اشمیت، مقاومت فشاری تک‌محوری، سایندگی لس‌آنجلس و مدول الاستیسیته به دلیل وزن بیشتر در جدول ۴-۸ و با در نظر گرفتن عدم

هم‌پوشانی پارامترها و حداقل بودن تعداد آن‌ها، به ترتیب به نمایندگی از ۴ مشخصه مهم سنگ شامل خواص سختی، مقاومتی، ساینده‌گی و خواص الاستوپلاستیسیته سنگ، در سیستم طبقه‌بندی جدید پیشنهاد و مورد استفاده قرار گرفت.

الف - سختی اشمیت

سختی تابعی از عوامل ذاتی مانند نوع کانی‌ها، مقاومت و رفتار الاستیک و پلاستیک سنگ و ابعاد دانه‌ها می‌باشد. ترکیب این عوامل، تعیین‌کننده سختی یک سنگ است. وزن نهایی اختصاص داده شده به این پارامتر نیز از مجموع وزن دو پارامتر سختی اشمیت و سختی موهس (برابر ۱۷/۳) حاصل شد.

ب - مقاومت فشاری تک‌محوری

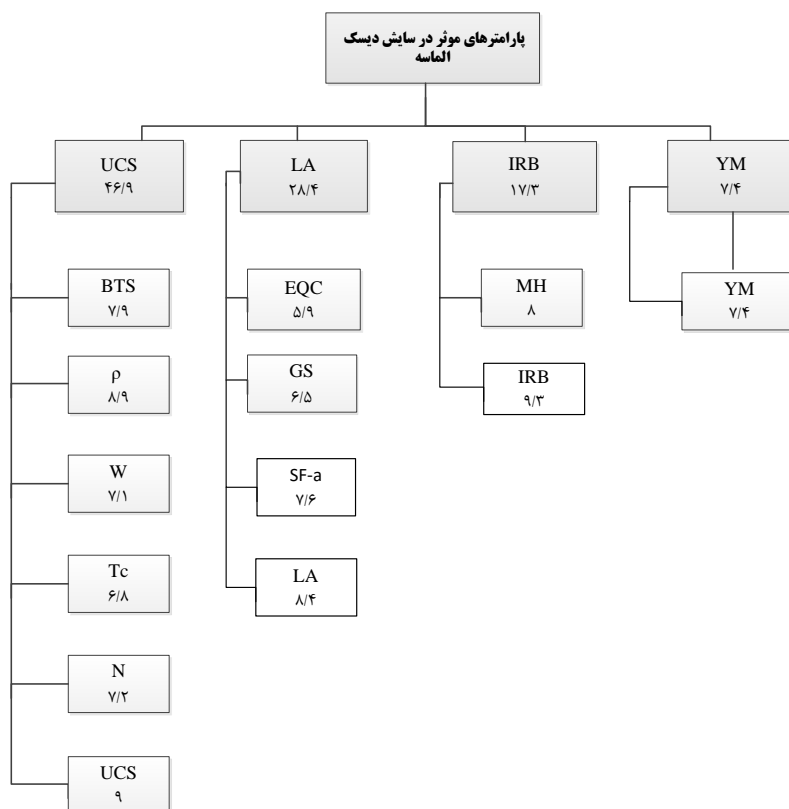
این پارامتر نماینده بسیاری از مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ از قبیل بافت، چگالی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم برزیلی، تخلخل و آب محتوی است که مجموع وزن این پارامترها (برابر ۴۶/۹) به عنوان وزن نهایی پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری در سیستم طبقه‌بندی جدید در نظر گرفته شد.

ج - ساینده‌گی لس آنجلس

قابلیت سایش و قدرت ساینده‌گی سنگ بستگی به نوع و مقدار کانی‌ها، تعداد ریز ترک‌ها، درجه هوازدگی سنگ و نیز چسبندگی بین دانه‌ها دارد. برای بررسی سایش سنگ در آزمایشگاه روش‌های متنوعی توسط محققین مختلف ارائه شده است که برخی کاربرد عمومی پیدا کرده‌اند. آزمایش سایش به روش لس آنجلس امروزه کاربرد وسیعی پیدا کرده است. این روش برای تعیین مقاومت مصالح سنگی در مقابل سایش همراه با ضربه به کار می‌رود. ساینده‌گی لس آنجلس به عنوان شاخص کمی ارزیابی ساینده‌گی سنگ مورد استفاده قرار گرفته است. وزن این پارامتر نیز از مجموع وزن فاکتور ساینده‌گی شیمازک، اندازه دانه‌ها و میزان کوارتز محتوی (برابر با امتیاز ۲۸/۴) محاسبه شد.

د - مدول الاستیسیته (مدول یانگ)

با تمرکز بر نحوه رفتار سنگ در فرایند شکست و تشکیل تراشه در فرایند برش، نحوه رسیدن یک نمونه سنگ به مقاومت فشاری حداکثر بر سایش دیسک‌های الماسی تأثیرگذار است. اگر چه این پارامتر از مشخصات دیگر سنگ نیز تأثیر می‌گیرد، با این حال اثرگذاری آن بیشتر از تأثیرپذیری آن مورد توجه قرار می‌گیرد. مدول الاستیسیته به‌عنوان پارامتر معرف رفتار الاستیسیته سنگ با وزن نهایی (برابر ۷/۴) مورد استفاده قرار گرفت. لذا به این ترتیب وزن هر یک از چهار پارامتر سختی اشمیت، مقاومت فشاری تک‌محوری، ساینده‌گی لس‌آنجلس و مدول الاستیسیته برای ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی تعیین شد. شکل ۴-۸ مقادیر وزن نهایی این پارامترها را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸- مقادیر وزن نهایی پارامترهای به کار رفته در سیستم طبقه‌بندی جدید

۲-۶-۴- انتخاب نوع مدل

با توجه به وزن‌های فازی بدست آمده در جدول ۴-۸ و در ابتدای کار، برای طبقه‌بندی سایش بر

اساس پارامترهای منتخب ساده‌ترین مدل یعنی مدل خطی انتخاب شد. در حالت ۴ متغیره این مدل به صورت رابطه ۳-۴ می باشد.

$$Y_{Model} = \alpha_1 UCS_{group} + \alpha_2 IRB_{group} + \alpha_3 Ym_{group} + \alpha_4 LA_{group} \quad (۴-۳)$$

که در این رابطه Y_{Model} میزان سایش پیش‌بینی شده (خروجی) و $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ به ترتیب وزن‌های فازی گروه‌های UCS، IRB، Ym و LA می‌باشد که از مجموع هر گروه بر اساس شکل ۴-۸ بدست آمده است. چون جمع ۴ مؤلفه باید به طبقه‌بندی متناظر در مدل منجر شود مجموع ضرایب فازی بدست آمده باید نسبت به یکدیگر و جمع کل آنها نرمال‌سازی شود که در نهایت ضرایب قابل استفاده در مدل به صورت جدول ۴-۱۰ خواهد بود.

جدول ۴-۱۰- وزن فازی نهایی هر گروه از متغیرها

ضریب	α_1	α_2	α_3	α_4
وزن فازی نهایی	۰/۴۶۹	۰/۱۷۳	۰/۰۷۴	۰/۲۸۴

تفاوت این رابطه با پیش‌بینی‌های متداول و برازش در حوزه ریاضیات و آمار در این موضوع مهم نهفته است که ضرایب متغیرها در این رابطه باید بر اساس وزن‌های جدول ۴-۱۰ مشخص شود در صورتی که در رگرسیون و ... این اوزان از روش‌های ریاضی بدست می‌آید. تفاوت مهم دیگر این است که در کارهای معمول بازه‌بندی ثابت است اما در این کار انجام شده بازه‌بندی به عنوان درجه آزادی در اختیار طراح قرار داده شده است. به عبارت دیگر اختصاص عدد بازه به متغیرهای ۴ گانه ورودی بر اساس یک بازه‌بندی تطبیقی و غیر یکسان نیز می‌تواند صورت گیرد.

۳-۶-۴- بازه‌بندی

الف- بازه‌بندی ثابت

در طبقه‌بندی، مقدار سایش دیسک الماسی به صورت یک معیار از خیلی کم تا خیلی زیاد مشخص شد. انتخاب مرزها به صورت ۵ سطحی که شامل مقادیر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد می‌شود به عنوان پرکاربردترین روش سطح‌بندی متداول بوده و هنگام اخذ نظر از افراد خبره مورد

استفاده قرار گرفت (Dawes, 2008). مقادیر اختصاص داده شده به هر متغیر رابطه ۳-۴، با سطح‌بندی مشخص شده است، که عددی صحیح از ۱ تا ۵ می‌باشد. در حالت سطح‌بندی با بازه‌های مساوی تغییرات خطی است. در جدول ۴-۱۱ سطح‌بندی به این روش برای چهار متغیر اصلی و مقدار سایش (خروجی) آورده شده است که اعداد به ترتیب کف و سقف بازه‌های مختلف را مشخص می‌کند. در صورتی که بازه‌بندی انتخابی درست طراحی شده باشد باید با جاگذاری بازه‌های بدست آمده و ضرب آن‌ها در مقادیر فازی هر چهار متغیر مذکور، به محدوده بازه‌ای مناسب از سایش (Y_{Model}) دست یافت.

جدول ۴-۱۱- طبقه‌بندی به روش بازه‌بندی ثابت برای متغیرهای مؤثر و مقدار سایش (خروجی)

۲۰۲ - ۲۴۰	۱۶۴ - ۲۰۲	۱۲۶ - ۱۶۴	۸۸ - ۱۲۶	۵۰ - ۸۸	UCS
۷۴ - ۸۰	۶۸ - ۷۴	۶۲ - ۶۸	۵۶ - ۶۲	۵۰ - ۵۶	IRB
۶۰ - ۷۰	۵۰ - ۶۰	۴۰ - ۵۰	۳۰ - ۴۰	۲۰ - ۳۰	YM
۳۹ - ۴۵	۳۳ - ۳۹	۲۷ - ۳۳	۲۱ - ۲۷	۱۵ - ۲۱	LA
۶۹/۸۴ - ۸۶/۴	۵۳/۲۸ - ۶۹/۸۴	۳۶/۷۲ - ۵۳/۲۸	۲۰/۱۶ - ۳۶/۷۲	۳/۶ - ۲۰/۱۶	سایش دیسک (خروجی)
خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	طبقه‌بندی

در این مرحله برای متغیر وابسته Y_{Model} نیز بازه‌بندی یکنواخت در نظر گرفته شد. چون مقادیر سایش اندازه‌گیری شده بسیار اندک بود تمامی مقادیر سایش اندازه‌گیری شده در 10^7 ضرب شد تا اعداد حاصل دارای خطای رند کردن نشود. میزان سایش بین ۴/۵ تا ۷۲ در تست‌های برش اندازه-گیری شده بود. حتی اگر دسته‌بندی‌های انجام شده با یک پله خطا قابل قبول در نظر گرفته شود باز هم از ۹ مورد سایش اندازه‌گیری شده در شش مورد اختلاف عدد حدس زده شده با عدد واقعی بیش از دو طبقه بود که این بیان‌گر یک خطای ۶۶ درصدی در برآورد صحیح اعداد دسته‌ها می‌باشد. پرواضح است که رابطه ۳-۴ و دسته‌بندی ثابت اعمال شده با توجه به میزان خطای بالا، به هیچ عنوان در پیش‌بینی سایش دیسک‌های الماسی کارایی نداشته و این روش قابل قبول نیست.

ب- انتخاب بازه‌ها به صورت تطبیقی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

به دنبال پیشرفت سریع علوم مختلف در قرن ۲۰، توابع غیر خطی غیر تحلیلی در فرآیندهای مختلف مهندسی بوجود آمدند که نیاز به حل عددی آن ها موجب تکامل ساختارهای مختلف حل عددی شد. الگوریتم ژنتیک نیز به عنوان یکی از این ساختارها برای اولین بار در حدود چهار دهه پیش با الهام از ساختارهای طبیعی بوجود آمد. مهمترین نقاط مورد توجه در هر الگوریتم عددی قابلیت تعمیم پذیری، سرعت همگرایی و دقت جواب است که در الگوریتم ژنتیک تمامی این موارد نسبتاً خوب بوده و الگوریتم تقریباً به هر ساختار مهندسی قابل تعمیم است.

با توجه به این پیش زمینه، در این تحقیق برای مشخص کردن بازه‌ها به صورت تطبیقی از روش الگوریتم ژنتیک که از متداول ترین روش های بهینه سازی است استفاده شد. الگوریتم ژنتیک به عنوان الگوریتم بهینه ساز انتخاب و ۴ متغیر ورودی و یک متغیر خروجی مجموعاً ۵ دسته متغیر در اختیار خواهد داشت که باید برای هر دسته متغیر ۴ عدد به عنوان مرز بازه‌ها بدست آورد که اعداد بدست آمده در جدول ۴-۱۲ نشان داده شده است. برای آن که مقدار هر بازه از عدد مشخصی کم تر نشود، در این مرحله به عنوان کف، محدودیت حداقل هر بازه $0/16$ طول کل انتخاب شد. به این ترتیب در بازه ۱۹۰ واحدی UCS حداقل عرض هر طبقه باید تقریباً برابر $30/4$ واحد شود. این محدودیت $0/16$ براساس سعی و خطا و با هدف ماکزیمم کردن درصد درستی انتخاب شد. با انتخاب این عدد هیچ کدام از بازه‌ها کم تر از این عدد نخواهد بود. اما برای سقف بازه هیچ محدودیتی وجود ندارد و تنها شرط آن خواهد بود که بازه‌های بعد از بازه انتخابی نیز باید بتواند حداقل طول مذکور را در اختیار بگیرد تا شرط انتخاب شده به عنوان کران پائین، برای هیچ کدام از متغیرها نقض نشود. الگوریتم ژنتیک پس از اعمال این وضعیت به ۴ بازه مورد نظر اعداد تصادفی ۰ تا ۱ اختصاص می دهد و سپس با استفاده از یک نگاشت هوشمند اعداد بین صفر و یک را به بازه مورد نظر تبدیل می کند. با رند کردن عدد $0/16$ به سمت $0/2$ (بازه با طول مساوی)، رنج نوسان بازه‌ها به صورت تطبیقی کم تر شده و کارایی الگوریتم ژنتیک به سمت بازه بندی با طول ثابت میل می کند. هرچه عدد $0/16$ به صفر

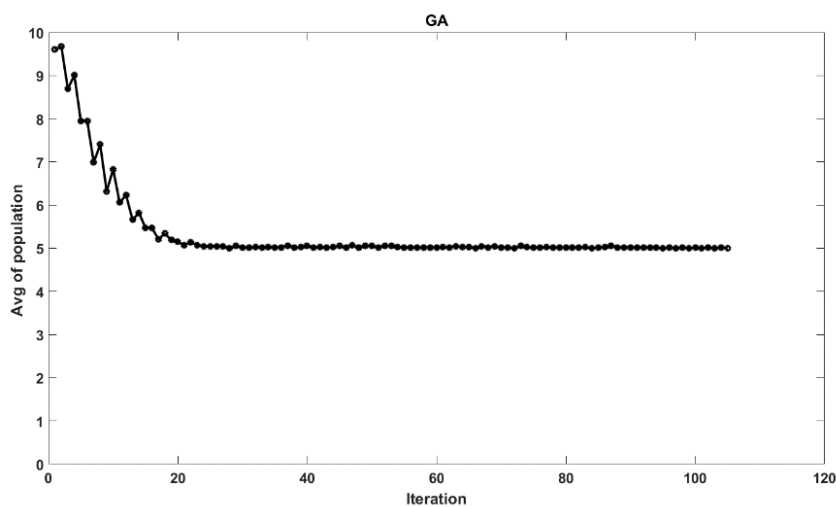
نزدیک‌تر انتخاب شود احتمال حذف یک طبقه بیش‌تر خواهد بود لذا بدین ترتیب عدد ۰/۱۶ انتخاب گردید.

جدول ۴-۱۲- طبقه‌بندی تطبیقی با بازه ثابت برای متغیرهای مؤثر و مقدار سایش (خروجی)

۲۰۹/۲۴۰-۵۸	۱۷۹/۲۰۹-۱۲/۵۸	۱۴۸/۱۷۹-۶۹/۱۲	۱۱۶/۱۴۸-۵۹/۶۹	۱۱۶-۵۰/۵۹	UCS
۷۴/۸۰-۸۲	۶۹/۷۴-۵۶/۸۲	۶۴/۶۹-۴۲/۵۶	۵۹/۶۴-۰۱/۴۲	۵۹-۵۰/۰۱	IRB
۶۱/۷۰-۹۵	۵۳/۶۱-۹۴/۹۵	۴۵/۵۳-۹۱/۹۴	۳۷/۴۵-۳۹/۹۱	۳۷-۲۰/۳۹	YM
۳۹/۴۵-۸۲	۳۴/۳۹-۹۸/۸۲	۲۸/۳۴-۰۹/۹۸	۲۳/۲۸-۰۹/۰۹	۲۳-۱۵/۰۹	LA
۷۲/۰۴-۸۶/۴	۵۷/۶۵-۷۲/۰۴	۴۱/۹۵-۵۷/۶۵	۲۳/۵۱-۴۱/۹۵	۳/۶-۲۳/۵۱	سایش دیسک (خروجی)
خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	طبقه‌بندی

الگوریتم ژنتیک طراحی شده یک الگوریتم ۲۰ متغیره خواهد بود که برای هر یک از دسته‌های ۵ گانه باید بتواند ۴ عدد (برای ۴ متغیر) مشخص را بدست آورد. اعداد اختصاصی توسط الگوریتم ژنتیک اعدادی بین صفر و یک است که با نگاشت توضیح داده شده به اعداد میان بازه‌ای متناظر تبدیل خواهد شد. برای پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک براساس تنظیمات نرم‌افزار Matlab از الگوریتم ژنتیک باینری کمک گرفته شد که با توجه به بازه‌های محدود موجود، دقت هر متغیر با توجه به بازترین بازه یعنی UCS برابر ۸ بیت در نظر گرفته شد. در صورت افزایش این عدد و بالابردن دقت، تأثیر چندانی در جدول بدست آمده مشاهده نشد و صرفاً بار محاسباتی الگوریتم و زمان اجرای آن افزایش یافت. با کم‌تر کردن این بازه دقت انتخاب اعداد به‌صورت مشهودی کاهش یافته و درصد خطا از درصد بدست آمده نامناسب‌تر می‌شود. به دلیل داشتن ۲۰ متغیر و اختصاص ۸ بیت به هر کدام، در نهایت ژن بدست آمده برای هر نمونه یک ژن ۱۶۰ بیتی می‌باشد که برای الگوریتم ژنتیک با پیچیدگی متعارف عدد مناسبی محسوب می‌شود. احتمال جهش که از پارامترهای مهم الگوریتم ژنتیک محسوب می‌شود با توجه به ساختار مسأله برابر ۰/۰۱ در نظر گرفته شد. تعداد نقاط هم‌پوشانی برابر عدد ۹ و الگوریتم هم‌پوشانی، یک الگوریتم هم‌پوشانی چند نقطه‌ای با انتخاب نقاط به‌صورت تصادفی بوده است. تعداد نمونه‌های اولیه یا حجم نمونه در شروع برابر عدد ۵۱۲ در نظر گرفته شد. با کم یا زیاد کردن این متغیر تأثیر خاصی در جواب مشاهده نشد. با چند بار اجرای الگوریتم نیز مشخص شد که با تعداد

۵۱۲، حداقل در حدود ۲۰ نمونه طول می‌کشد تا سیستم هم‌گرا شده و در نهایت به جواب مناسب ختم شود که بیان‌گر تعداد تکرار نمونه حدود ۱۰۲۴۰ می‌باشد. در نهایت بازه‌ها به صورت تطبیقی با رنج گفته شده توسط الگوریتم ژنتیک بدست آمد و دقت جواب در این حالت نسبت به حالت قبل بهبود نسبتاً مناسبی یافت. در شکل ۹-۴ مقدار خطای تابع هزینه به ازاء تکرار در الگوریتم ژنتیک رسم شده است. کاملاً مشخص است الگوریتم طراحی شده توانسته تابع هزینه را با تعداد تکرار نسبتاً کمی حداقل کند.



شکل ۹-۴- همگرایی الگوریتم ژنتیک و مینیمم کردن خطای دسته‌بندی

در این حالت نسبت به حالت خطی با بازه مساوی، بازه اول گسترش نسبتاً زیادی در متغیر UCS داشته و بازه‌های بعدی به همان نسبت دارای طول‌های کم‌تری شده‌اند. در مورد سایر متغیرها جواب تطبیقی با جواب عادی تفاوت دارد اما چندان قابل ملاحظه نیست. در مورد بازه‌بندی برای متغیر خروجی (Y) بازه این وضعیت خود را نشان داد و در حالت تطبیقی نسبت به حالت عادی بازه‌ها در بعضی از بازه‌ها تغییرات مشخصی مشاهده شد. برای نمونه در حالت تطبیقی، شروع بازه اول برای متغیر UCS از ۳/۶ و انتهای بازه اول عدد ۲۳/۵ می‌باشد در حالی که در حالت عادی بازه ثابت بازه اول بازه‌ها از ۳/۶ شروع شده ولی بازه اول طول کم‌تری داشته و انتهای بازه عدد ۲۰ می‌باشد. در حقیقت الگوریتم ژنتیک مقدار بازه‌ها را در سطوح میانی کم‌تر گرفته تا به دلیل بیشتر بودن نمونه‌ها و

تمرکز اعداد در قسمت‌های میانی دقت کار بالاتر رفته و در دو سطح ابتدا و انتهای سطح‌بندی به دلیل آن که تعداد نمونه‌ها نسبتاً کم‌تر بوده، بازه‌ها با طول بیشتر محاسبه شده‌اند. با این حال بازهم مجموعاً ۱۱ واحد خطا وجود دارد که از نظر خطای سطح‌بندی قابل قبول نیست، و اگر کاربر حداقل تغییرات خطای یک واحد را مجاز دانسته باشد نسبت به حالت بازه‌های ثابت تغییرات مشهودی در جواب حاصل نشد و مقدار خطا قابل قبول نیست. با بررسی انجام شده مشخص شد از ۶ مورد خطای رخ داده در حالت قبل یک مورد کاسته شده و درصد درستی در این حالت با فرض مجاز بودن تلرانس ۱ در پاسخ‌دهی برابر ۵۵/۵ درصد خطاست که قابل قبول نمی‌باشد.

با توجه به پاسخ‌های بدست آمده از روش بازه‌بندی ثابت و تطبیقی می‌توان دید بیش‌ترین خطا در نمونه‌های اول و بین طبقات یک و سه خروجی بوده که نشان می‌دهد بازه‌بندی خروجی با وجود تطبیقی بودن هنوز قادر به الگوبرداری صحیح از متغیرهای واقعی نیست.

ج- نگاشت لگاریتمی خروجی و بازه‌بندی تطبیقی با الگوریتم ژنتیک

عمل‌گر لگاریتم با محدود کردن تغییرات در بازه‌های نسبتاً بزرگ و بالا بردن دقت در تغییرات نسبتاً کوچک دقیقاً می‌تواند ایراد عملکرد طبقه‌بندی خروجی را اصلاح کند. نقطه ضعف ذاتی عمل‌گر لگاریتم در عدم قبول اعداد صفر و منفی است که در آزمایش‌های اندازه‌گیری سایش دیسک، سایش صفر یا منفی وجود ندارد. بنابراین محدودیت ذاتی عمل‌گر لگاریتم در این مرحله حذف می‌شود. در روش پیشنهادی پس از ضرب مقادیر خروجی در 10^7 با استفاده از عمل‌گر لگاریتم مقادیر به فضای لگاریتمی برده شد تا سطح‌بندی در فضای لگاریتم صورت گیرد.

پاسخ بدست آمده به ازای تک‌تک نمونه‌ها پس از انتقال به فضای لگاریتم با چهار رقم اعشار دقت در جدول ۴-۱۳ آورده شده است. همین‌طور که از اعداد گردشده می‌توان دید در این حالت بازه بسیار گسترده تغییرات، به‌طور مناسبی با عمل‌گر لگاریتم محدود شده و تفاوت‌ها در بازه‌های پائین‌تر به‌صورت مناسب‌تری خود را نشان می‌دهد. پس از اعمال عمل‌گر لگاریتم به خروجی (Y) مجدداً بازه‌ها به صورت تطبیقی انتخاب و طبقه‌بندی صورت گرفت. با ذکر این نکته که ورودی‌ها فرم

بازه‌بندی خطی خود را حفظ نموده و اعمال نگاشت لگاریتم فقط به متغیر خروجی (سایش) طبقه‌بندی اعمال شد. پس از انجام بازه‌بندی تطبیقی جدید با استفاده از عملگر لگاریتم متغیر سایش محاسبه شد. نتیجه بدست آمده بسیار قابل توجه و جالب بود.

جدول ۴-۱۳- طبقه‌بندی تطبیقی با الگوریتم ژنتیک

۲۰۹/۲۴۰-۶۰	۱۷۹/۲۰۹-۱۴/۶۰	۱۴۸/۱۷۹-۴۸/۱۴	۱۱۷/۱۴۸-۶۲/۴۸	۱۱۷-۵۰/۶۲	UCS
۷۳/۸۰-۲۲	۶۸/۷۳-۰۵/۲۲	۶۰/۶۸-۶۸/۰۵	۵۵/۶۰-۱۰/۶۸	۵۵-۵۰/۱۰	IRB
۷۰-۶۲	۵۳/۶۲-۹۵	۴۵/۵۳-۸۱/۹۵	۳۷/۴۵-۴۵/۸۱	۳۷-۲۰/۴۵	YM
۴۰/۴۵-۲۰	۳۵/۴۰-۰۳/۲۰	۳۰/۳۵-۱۰/۰۳	۲۵/۳۰-۲۹/۱۰	۲۵-۱۵/۲۹	LA
۱/۹۴۹۰-۲/۲۲۸۸	۱/۶۵۵۳-۱/۹۴۹۰	۱/۰۷۹۴-۱/۶۵۵۳	۰/۷۹۷۸-۱/۰۷۹۴	۰/۵۲۲۶-۰/۷۹۷۸	سایش دیسک (خروجی)
خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	طبقه‌بندی

میزان تغییرات در متغیر UCS چندان مشهود نبوده، اما در متغیرهای ۲، ۳ و ۴ به صورت نسبتاً مشخصی تغییرات مشاهده می‌شود. در طبقه‌بندی Y یا خروجی، بازه‌ها تا چهار رقم اعشار گرد شده است، زیرا هنگام کارکردن با عملگر لگاریتم به دلیل وضعیت خاص بازه‌ها ارقام اعشار معنی‌دار بیشتری برای حفظ دقت نیاز خواهد بود.

با این روش، با مقایسه نتایج مدل با نتایج اندازه‌گیری شده، طبقه‌بندی تقریباً بدون خطا صورت گرفته است. با در نظر گرفتن یک واحد اغماض هنگام گزارش نتایج، این روش سطح‌بندی بدون خطا انجام شد. استفاده از روش وزن‌دهی فازی و انتخاب سیستم طبقه‌بندی با انتخاب مرزها به صورت تطبیقی و در نهایت لگاریتمی کردن رابطه ۳-۴، این رابطه به صورت رابطه ۴-۴ بدست آمد:

$$\log_{10}(Y_{Model}) = \alpha_1 UCS_{group} + \alpha_2 IRB_{group} + \alpha_3 Ym_{group} + \alpha_4 LA_{group} \quad (4-4)$$

که تعریف ضرایب و متغیرها مشابه رابطه ۳-۴ می‌باشد.

به عنوان جمع بندی نهایی در رابطه ۴-۴ پیش‌بینی مناسب برای ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی با حداقل متغیر به دست آمده است. در سیستم طبقه‌بندی جدید به منظور امتیازدهی به مقادیر مختلف هر پارامتر، بیش‌ترین امتیاز (خیلی زیاد) به بهترین وضعیت داده شده است. نتیجه نهایی در جدول ۴-۱۴ آورده شده است.

جدول ۴-۱۴- سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی سایش دیسک های الماسی در سنگ‌های ساختمانی سخت

ردیف‌های ارزش					پارامترها
۷۳/۲۲ <	۶۸/۰۵ - ۷۳/۲۲	۶۰/۶۸ - ۶۸/۰۵	۵۵/۱۰ - ۶۰/۶۸	۵۵/۱۰ >	سختی اشمیت
خیلی سخت	سخت	متوسط	کم	خیلی کم	
۱۷/۳	۱۲/۱	۸/۷	۴/۳	۱/۷	امتیاز
۲۰۹/۶۰ <	۱۷۹/۱۴ - ۲۰۹/۶۰	۱۴۸/۴۸ - ۱۷۹/۱۴	۱۱۷/۶۲ - ۱۴۸/۴۸	۱۱۷/۶۲ >	مقاومت فشاری تک-محوری (MPa)
مقاومت خیلی بالا	مقاومت بالا	مقاومت متوسط	مقاومت کم	مقاومت خیلی کم	
۴۶/۹	۳۲/۸	۲۳/۴	۱۱/۷	۴/۷	امتیاز
۶۲ <	۵۳/۹۵ - ۶۲	۴۵/۸۱ - ۵۳/۹۵	۳۷/۴۵ - ۴۵/۸۱	۳۷/۴۵ >	مدول الاستیسیته (GPa)
خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	
۷/۴	۵/۲	۳/۷	۱/۹	۰/۷	امتیاز
۴۰/۲۰ <	۳۵/۴۰ - ۳۰/۲۰	۳۰/۱۰ - ۳۵/۰۳	۲۵/۲۹ - ۳۰/۱۰	۲۵/۲۹ >	سایندگی لس آنجلس
سایندگی خیلی بالا	سایندگی بالا	سایندگی متوسط	سایندگی کم	سایندگی خیلی کم	
۲۸/۴	۱۹/۹	۱۴/۲	۷/۱	۲/۹	امتیاز
۱/۹۴۹۰ - ۲/۲۲۸۸	۱/۶۵۵۳ - ۱/۹۴۹۰	۱/۰۷۹۴ - ۱/۶۵۵۳	۰/۷۹۷۸ - ۱/۰۷۹۴	۰/۵۲۲۶ - ۰/۷۹۷۸	سایش دیسک الماسی (خروجی)
خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	طبقه‌بندی

بر اساس نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگ انجام شده بر روی ۹ نمونه سنگ ساختمانی سخت (جدول ۴-۹) و بر اساس سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی و رابطه نهایی ۴-۴ میزان سایش دیسک الماسی در فرآیند برش بررسی، پیش‌بینی و کلاس‌بندی شد. نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگ، مقدار سایش پیش‌بینی شده و کلاس‌بندی متغیرها در جدول ۴-۱۵ آورده شده است.

جدول ۴-۱۵- نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگ، سایش پیش‌بینی شده و بازه مربوطه

Y _{model}		LA		YM		IRB		UCS		نمونه
کلاس	-	کلاس	-	کلاس	(GPa)	کلاس	-	کلاس	(MPa)	
۲	۲/۴۶	۱	۲۲/۳	۱	۳۷	۴	۷۱	۳	۱۵۷	۱
۲	۲/۱	۲	۲۹/۸	۱	۲۹	۳	۶۹/۵	۲	۱۳۸	۲
۳	۲/۶۳	۳	۳۱/۲	۲	۴۱/۵	۴	۷۰/۵	۲	۱۴۱	۳
۳	۲/۶	۱	۲۱/۲۳	۳	۴۶	۴	۷۱/۵	۳	۱۷۳	۴
۳	۲/۸۱	۲	۲۹/۴	۲	۳۹	۴	۷۱	۳	۱۵۵	۵
۳	۳/۳۸	۴	۳۸/۱	۲	۴۳	۴	۷۱/۵	۳	۱۵۰	۶
۳	۳/۰۷	۱	۱۸/۸	۳	۴۹	۴	۷۲	۴	۱۸۵	۷
۴	۳/۵۴	۱	۱۶/۷	۳	۵۲	۴	۷۴	۵	۲۳۹	۸
۳	۳/۰۷	۱	۲۱/۱	۳	۴۹/۵	۴	۷۱	۴	۱۹۹	۹

با توجه نتایج جدول ۴-۱۵، نه نمونه سنگ سخت مورد مطالعه در سه کلاس قرار می‌گیرند. نمونه‌های ۱ و ۲ در کلاس دوم با سایش کم، نمونه‌های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۹ در کلاس سوم با سایش متوسط و نمونه ۸ در کلاس چهارم با سایش زیاد دیسک الماسی قرار گرفتند.

۴-۷- جمع‌بندی

در این بخش پس از تحقیق، پارامترهای مؤثر در سایش دیسک‌های الماسی در فرایند برش سنگ مشخص و سپس وزن و اهمیت هر کدام از این پارامترها با سیستم مهندسی سنگ (RES) مشخص شد. برای تعیین پارامترهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی پرسشنامه‌ای شامل همه پارامترهای مؤثر از ۳۰ فرد خبره گردآوری و برای کدگذاری آن از روش نیمه عددی خبره استفاده شد. ابتدا سعی شد یک مدل پیش‌بینی با وزن‌های بدست آمده از RES کلاسیک پیشنهاد شود. چون در RES کلاسیک نظرات افراد خبره به صورت مطلق یا ثابت در نظر گرفته می‌شود و به پراکندگی نظرات توجه نمی‌شود به منظور بهبود نتایج، در یک روش پیشنهادی نظرات افراد خبره به صورت یک الگوی صحیح در منطق فازی با وزن‌دهی متناظر با آن مدل شد. پس از انتخاب تابع تعلق فازی گاوسی به عنوان مناسب‌ترین تابع و کنترل تعداد مورد نیاز نظرات خبره برای محاسبه آن، تابع تعلق فازی بهینه بر اساس ماتریس 13×13 با الگوی فازی برای ارتباط متغیرهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی محاسبه شد. مقدار میانگین و انحراف معیار تابع تعلق بدست آمده با سطح اطمینان بالا در

نرم افزار Matlab کنترل و به منظور صحت‌سنجی دقیق‌تر محاسبات از آزمون اندرسن _ دارلینگ استفاده شد. با استفاده از دستور مولد اعداد تصادفی با الگوی گاوسی با میانگین و انحراف معیار مد نظر برای هر درایه ۱۰۰۰۰ عدد تصادفی تولید و در مجموع یک بردار ۱۲۰۰۰۰ تایی با الگوی فازی محاسبه شد. بر اساس نتایج بدست آمده در این مرحله چهار پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری، ساینده‌گی لس‌آنجلس، سختی اشمیت و مدول الاستیسیته به ترتیب با وزن‌های نهایی فازی ۴۶/۹، ۲۸/۴، ۱۷/۳ و ۷/۴ به نمایندگی از چهار مشخصه مهم سنگ شامل خواص سختی، مقاومتی، ساینده‌گی و الاستوپلاستیسیته سنگ، در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت. پس از آن مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه انجام شد تا از نتایج آن در ارائه سیستم طبقه‌بندی استفاده شود. سطح‌بندی سایش با استفاده از چهار متغیر مؤثر با روش‌های بازه-بندی ثابت، تطبیقی و لگاریتمی که دو روش آخر با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شدند، صورت گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده روش تطبیقی لگاریتمی با حداقل خطا به عنوان روش بهینه انتخاب شد. خروجی سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی (سایش دیسک) به ۵ بازه کیفی خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم سطح‌بندی شد. در آخر با انتخاب لگاریتم سایش به عنوان خروجی، یک رابطه با چهار پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری، ساینده‌گی لس‌آنجلس، سختی اشمیت و مدول الاستیسیته برای ارزیابی و پیش‌بینی سایش دیسک‌های الماسی بدست آمد. در نهایت ۹ نمونه سنگ سخت مورد مطالعه در سه کلاس قرار گرفتند. نمونه‌های ۱ و ۲ در کلاس دوم با سایش کم، نمونه‌های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۹ در کلاس سوم با سایش متوسط و نمونه ۸ در کلاس چهارم با سایش زیاد دیسک الماسی قرار گرفتند.

ساخت دستگاه برش سنگ و اعتبارسنجی

سیستم طبقه‌بندی جدید

با توجه به بررسی کارهای انجام شده توسط محققین که در فصل سوم آمده است تاکنون بیش تر تحقیقات انجام شده در زمینه سایش دیسک‌های الماسی و فرآیند برش به بررسی تأثیر مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، تأثیر پارامترهای عملیاتی و تأثیر پارامترهای محیطی به تنهایی و یا به صورت ترکیب نامناسب، بر قابلیت برش سنگ‌ها و یا سایش دیسک‌های الماسی پرداخته‌اند. هم‌چنین سیستم‌های طبقه‌بندی که تاکنون ارائه شده، همان‌طور که در فصل سوم نیز اشاره شد دارای نقاط ضعفی مانند هم‌پوشانی پارامترها، تعداد زیاد متغیرها، عدم سادگی آزمایش‌ها و هزینه و زمان بالای انجام آن‌ها می‌باشند. بنابراین در این تحقیق، به منظور انجام یک تحقیق جامع، به بررسی تأثیر تمامی پارامترهای مهم عملیاتی و مشخصات سنگ مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش به منظور شناسایی و تعیین پارامترهای تأثیرگذار به کمک مطالعات آزمایشگاهی و روش سیستمی RES در فصل چهارم پرداخته شد و در نهایت یک سیستم طبقه‌بندی جدید به دور از نقاط ضعف مذکور، برای ارزیابی و پیش‌بینی میزان سایش دیسک‌های الماسی ارائه شد. در این فصل سعی خواهد شد به منظور بررسی صحت و سقم نتایج حاصل از سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی ارائه شده در فصل چهارم، در مرحله نخست به کمک یکی از روش‌های معمول محاسبات نرم، با استفاده از الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل، پس از ارائه یک سیستم طبقه‌بندی، نتایج حاصل از این طبقه‌بندی با نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی مقایسه شود. هم‌چنین به منظور صحت‌سنجی سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی از یک مدل فیزیکی، با طراحی و ساخت یک دستگاه برش سنگ ساختمانی در مقیاس آزمایشگاهی با قابلیت‌های خاص استفاده می‌شود. پس از بررسی عملکرد برش نه نمونه سنگ ساختمانی سخت با تغییر پارامترهای عملیاتی، میزان سایش دیسک الماسی، شدت جریان مصرفی و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم پس از هر برش اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از بررسی عملکرد برش توسط دستگاه برش مذکور در صحت‌سنجی نتایج حاصل از سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت. در آخر به منظور بررسی معنی‌داری ارتباط میان خصوصیات سنگ و پارامترهای

عملیاتی با سایش دیسک‌های الماسی مطالعات آماری انجام شد. به‌طور خلاصه مطالب مندرج در این فصل به شرح ذیل می‌باشد:

- به منظور بررسی صحت و سقم نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی ارائه شده در فصل چهارم به کمک محاسبات نرم، یک سیستم طبقه‌بندی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل ارائه و نتایج آن با نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی مقایسه شد.
- به منظور صحت‌سنجی نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی از یک مدل فیزیکی، با طراحی و ساخت یک دستگاه برش سنگ ساختمانی در مقیاس آزمایشگاهی با قابلیت‌های خاص استفاده می‌شود. به منظور بررسی عملکرد برش برای نه نمونه سنگ سخت مورد مطالعه با تغییر پارامترهای عملیاتی مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی (عمق برش، سرعت پیشروی و سرعت چرخش دیسک) و میزان سایش دیسک الماسی، شدت جریان مصرفی و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم در فرآیند برش اندازه‌گیری شد. در نهایت نتایج حاصله از بررسی عملکرد برش در صحت‌سنجی سیستم طبقه‌بندی جدید استفاده شد.
- مطالعات آماری برای بررسی ارتباط معنی‌داری مشخصات سنگ و پارامترهای عملیاتی با سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش انجام شد.

۲-۵- بررسی نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل^۱

در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های فراابتکاری در حل سیستم‌های مبهم و پیچیده به دلیل توانایی این روش‌ها در تطبیق مفاهیم بهینه‌سازی با مسایل عدم قطعیت در سیستم‌های مدل‌سازی گسترش چشم‌گیری داشته است. در میان تکنیک‌های فراابتکاری، الگوریتم کلونی زنبور عسل (ABC) یکی از پرکاربردترین روش‌های تکاملی در حوزه محاسبات نرم می‌باشد. این الگوریتم اولین بار توسط کارابوگا^۲ معرفی شد و با الهام از روند زندگی زنبورهای عسل و تلاش آنها در تهیه غذا برای

^۱- Artificial Bee Clony algorithm (ABC)

^۲-Karaboga

بهینه‌سازی مسائل مختلف، سیستم‌های حمل و نقل و مسایل ترافیکی مورد استفاده قرار گرفته است. مهمترین ویژگی این روش نسبت به سایر روشها نوعی جستجوی محلی است که با جستجوی شبه تصادفی منطبق بر ازدحام ترکیب شده و می‌تواند برای بهینه‌سازی ترکیبی یا بهینه‌سازی تابعی به کار رود. توضیحات تکمیلی این روش فراابتکاری در پیوست ۳ آمده است.

در این بخش از تحقیق به منظور بررسی صحت و سقم نتایج حاصل از سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی ارائه شده در فصل چهارم ابتدا با استفاده از روش فراابتکاری الگوریتم کلونی زنبور عسل یک سیستم طبقه‌بندی بر اساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته در آزمایشگاه مکانیک سنگ، بر روی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه (مطابق جدول ۵-۱) ارائه شد. یادآوری می‌شود به منظور بدست آوردن نتایج دقیق‌تر توسط الگوریتم مذکور علاوه بر نتایج ۹ نمونه سنگ سخت مورد مطالعه در این تحقیق از ۵ نمونه داده‌های موجود (نمونه‌های ۱۰ تا ۱۴ در جدول ۵-۱) نیز استفاده شد.

جدول ۵-۱- نتایج خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مورد مطالعه

شماره نمونه	نام سنگ	UCS (Mpa)	MH (n)	Ym (Gpa)	BTS (Mpa)	EQC (%)	Gs (mm)	SF-a (N/mm)
۱	مشکی نطنز	۱۵۷	۵/۶	۳۷	۱۵/۴۶	۵۲	۱/۱۳	۹/۱
۲	نهبندان آستان	۱۳۸	۶/۱	۲۹	۸/۱۵	۶۴	۱/۱۴	۵/۹۵
۳	نهبندان طوسی آستان	۱۴۱	۶	۴۱/۵	۱۰/۱۵	۶۱	۱/۲۵	۷/۷۴
۴	مشکی الموت	۱۷۳	۵/۷	۴۶	۱۵/۹۸	۳۵	۱/۴۳	۷/۹۹
۵	آبی نهبندان	۱۵۵	۵/۷	۳۹	۱۳/۱	۵۵	۲/۰۶	۱۴/۸۴
۶	گل‌پنبه‌ای سفید نطنز	۱۵۰	۵/۷	۴۳	۱۱/۲۸	۵۵	۲/۱۶	۱۳/۴
۷	مشکی همدان	۱۸۵	۵/۳	۴۹	۱۷	۵۵	۱/۱۶	۱۰/۸۴
۸	سبز جنگلی بیرجند	۲۳۹	۶/۴	۵۲	۱۸/۸۶	۶۶/۵	۰/۷۷	۹/۶۵
۹	سبز یزد	۱۹۹	۵	۴۹/۵	۱۶/۱۴	۳۷	۰/۹۱	۵/۴۴
۱۰	نهبندان کرم	۱۴۵	۵/۹۵	۳۶	۹/۲	۶۴/۳	۴/۱	۲۴/۲۵
۱۱	مشکی چایان	۱۷۳	۶/۶	۴۹	۱۵	۶۰/۰۶	۰/۸۷	۷/۶
۱۲	خرمدره	۱۳۳	۵/۶۵	۲۹	۸/۳	۳۲/۲	۳/۹	۱۰/۴۲
۱۳	مروارید مشهد	۱۲۵	۵/۶	۳۱	۷/۴	۳۰/۳	۳/۸	۸/۵
۱۴	قرمز یزد	۱۴۲	۶/۱	۴۴	۸/۵۲	۵۷/۶۵	۲/۹	۱۴/۲۴

در گام اول به منظور مدل‌سازی، ابتدا شبه کد الگوریتم کلونی زنبور عسل و تابع هدف آن نوشته شد.

سپس پارامترهای کنترلی الگوریتم نظیر تعداد تکرارها^۱ برابر با ۳۰۰، اندازه جمعیت^۲ برابر ۵۰ و حداقل خطای خطای قابل پذیرش برابر با $\varepsilon_L = 0.00001$ تعیین می‌شوند. این‌ها پارامترهای کنترلی الگوریتم مذکور برای بهینه‌سازی مناسب می‌باشند که توسط پیشنهادات کارشناسان و تحقیقات گذشته انتخاب می‌شوند (Haghshenas et al., 2017). علاوه بر این نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی ۱۴ نمونه سنگ مورد مطالعه و برای چهار خصوصیت تأثیرگذار سنگ‌ها برای ارزیابی کلاس‌های طبقه‌بندی شده به عنوان داده‌های ورودی به الگوریتم معرفی می‌شوند. سپس در گام بعدی بر اساس تجربه خبرگان، کلاس‌بندی برای طبقه‌بندی‌های ۲، ۳ و ۴ کلاسه توسط نرم افزار تحلیل و بررسی می‌شوند. براساس نتایج بدست آمده مناسب‌ترین طبقه‌بندی برای ۴ کلاسه بدست آمد. نتایج حاصل از طبقه‌بندی ۴ کلاسه در جداول ۲-۵ و ۳-۵ به ترتیب برای حداقل خطای قابل قبول و مقدار بهینه‌سازی هر داده در هر کلاس نشان داده شده است.

جدول ۲-۵- سطح دقت و خاتمه محاسبات در تکرار ۳۰۰

Result	$\varepsilon_L = U^{(n)} - U^{(n-1)}$	$U^{(n)}$	$U^{(n-1)}$	Step (n)
Continue	$0.0541 > 0.00001$	107.1023	107.0482	185
Continue	$0 < 0.00001$	107.0482	107.0482	186
Stop	$0 < 0.00001$	107.0482	107.0482	300

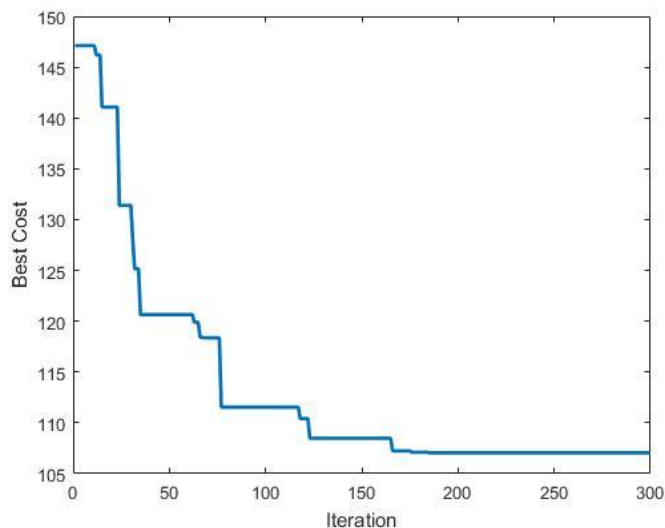
جدول ۳-۵- بهینه‌سازی و طبقه‌بندی نمونه‌های سنگ مورد مطالعه توسط الگوریتم کلونی زنبور عسل

نمونه	بازه‌بندی بهینه	طبقه‌بندی
A ₁	۲۵/۸۷۹	۹/۰۲۹
A ₂	۶/۵۴۸	۱۸/۱۹۱
A ₃	۱۴/۹۴۴	۱۰/۷۰۸
A ₄	۴۳/۹۹	۲۴/۳۶۷
A ₅	۲۵/۳۹۱	۵/۴۲۸
A ₆	۲۲/۷۸۶	۲/۵۹۴
A ₇	۵۶/۲۸۷	۳۶/۲۰۱
A ₈	۱۰۹/۱۱۶	۸۹/۸۹۵
A ₉	۶۹/۷۷۷	۵۰/۵۵۶
A ₁₀	۲۱/۰۴۸	۱۲/۵۹۹
A ₁₁	۴۵/۲۳۳	۲۵/۳۱۵
A ₁₂	۱/۸۸۹	۲۰/۶۷۴
A ₁₃	۷/۴۳	۲۷/۱۳۷
A ₁₄	۱۸/۳۳۵	۸/۷۲۲

۱ Maximum Number of Iterations

۲ Colony size

بر اساس نتایج جدول ۵-۲ الگوریتم در تکرار ۱۸۵ به قابل قبول ترین خطای ممکنه رسیده است و این مقدار تا پایان تکرارها ثابت مانده است. در واقع همگرایی بدست آمده در تکرار ۱۸۵ تا تکرار ۳۰۰ ثابت می ماند که نشان دهنده توانایی این الگوریتم در همگرایی سریع و ثبات است. به علاوه این روند همگرایی در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱- حداقل هزینه به ازای هر تکرار توسط الگوریتم ABC

بر اساس نتایج بدست آمده در جدول ۵-۳، ۱۴ نمونه سنگ مورد مطالعه در ۴ کلاس بندی توسط الگوریتم ABC به صورت ۶ نمونه در کلاس اول (نمونه های ۱، ۳، ۵، ۶، ۱۰ و ۱۴)، ۴ نمونه در کلاس دوم (نمونه های ۴، ۷، ۹ و ۱۱)، ۳ نمونه در کلاس سوم (نمونه های ۲، ۱۲ و ۱۳) و ۱ نمونه در کلاس چهارم (نمونه ۸) بر مبنای چهار پارامتر مهم و مؤثر مقاومت فشاری تک محوری، شاخص ساینده گی شیمازک، سختی موس و مدول الاستیسیته کلاس بندی شده اند. سپس نتایج حاصل از سیستم طبقه بندی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل با نتایج سیستم طبقه بندی پیشنهادی ارائه شده در فصل چهارم مقایسه شد (جدول ۵-۴).

جدول ۵-۴- مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم کلونی زنبور عسل با سیستم طبقه بندی پیشنهادی

نمونه سنگ مورد مطالعه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
نتایج کلاس بندی الگوریتم کلونی زنبور عسل	۱	۳	۱	۲	۱	۱	۲	۴	۲
نتایج کلاس بندی سیستم طبقه بندی پیشنهادی	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۴	۳

با یک واحد اغماض در مقایسه کلاس بندی و با توجه به دسته بندی مشابه برای نمونه های ۱، ۲، ۴، ۶، ۷، ۸ و ۹ در هر دو سیستم طبقه بندی، می توان نتیجه گیری کرد که ارزش کیفی هم پوشانی نتایج دو طبقه بندی خوب است. بنابراین می توان سیستم طبقه بندی پیشنهادی را قادر به ارزیابی میزان سایش دیسک های الماسی در فرآیند برش سنگ های سخت دانست.

۳-۵- صحت سنجی سیستم طبقه بندی پیشنهادی با ساخت دستگاه برش سنگ

در این بخش از تحقیق به منظور ارزیابی و صحت سنجی سیستم طبقه بندی پیشنهادی در فصل چهارم با مدل فیزیکی، بررسی ارتباط میان پارامترهای عملیاتی برش و مشخصات سنگ با میزان سایش دیسک های الماسی و همچنین مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه سنگ های مورد مطالعه، یک دستگاه برش سنگ ساختمانی در مقیاس آزمایشگاهی با مشخصات و ابعاد خاص طراحی و ساخته شد. پس از ساخت دستگاه مذکور، در مرحله بعد، از هر نمونه سنگ مورد مطالعه، پلاک های مورد نیاز با ابعاد ۴۰×۴۰ سانتی متر، تهیه و برای انجام مطالعات برش به آزمایشگاه انتقال داده شد (شکل ۵-۲). پلاک های مذکور تحت شرایط عملیاتی مختلف توسط دستگاه برش مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته و برش داده شد.



شکل ۵-۲- پلاک های تهیه شده از چهارده نوع سنگ ساختمانی سخت

مکانیزم کار این دستگاه بر اساس اصول و قواعد برش دایروی بوده و با توجه به اهداف و نیازهای

آزمایش طراحی شده است. قسمت‌های مختلف دستگاه به گونه‌ای طراحی و ساخته شده است که امکان تغییر پارامترهای ماشین‌کاری با تغییرات جزئی در ماشین در طی فرآیند برش میسر باشد. اجزاء اصلی این دستگاه آزمایش شامل چهار بخش:

الف) شاسی و اسکلت دستگاه، متشکل از دو ریل راهنما برای حرکت میز متحرک دستگاه

ب) قسمت فوقانی شاسی (محل قرارگیری محور اصلی ماشین) و موتور دستگاه

ج) قسمت تحتانی شاسی (برای جمع‌آوری گل، آب و براده‌های حاصل از برش)

د) تابلوی برق دستگاه (محل نصب فیوزها، اینورترها و آمپرسنج دیجیتال)

میز پیشروی دستگاه دارای یک سطح تخت و تراز می‌باشد که پلاک‌های تهیه شده از نمونه سنگ‌ها برای عملیات برش روی آن قرار داده شده و ثابت می‌شوند. میز دستگاه توسط یک مکانیزم موتور الکتریکی روی ریل دستگاه حرکت رفت و برگشت انجام می‌دهد. استفاده از سیستم الکتریکی و یک اینورتر امکان کنترل و تنظیم سرعت یکنواخت حرکت میز که همان نرخ پیشروی می‌باشد را فراهم می‌آورد. در دستگاه مورد نظر انتقال نیرو به محور اصلی توسط پولی و تسمه لاستیکی انجام می‌شود. دیسک برش در بین دو واشر چدنی توسط مکانیزم پیچ و مهره نصب و محکم می‌شود. بخش گلویی که وظیفه انتقال نیرو از پولی به دیسک را بر عهده دارد بر روی بستری فولادی روی شاسی دستگاه ثابت شده است. شکل ۳-۵ گلویی دستگاه برش ساخته شده را نشان می‌دهد. موتور اصلی دستگاه از نوع اسپیندل با توان ۴ کیلووات (۵/۵ اسب بخار) بوده که در بالای شاسی دستگاه نصب شده است و وظیفه تامین نیروی چرخشی مورد نیاز برای چرخش دیسک را به عهده دارد (شکل ۳-۵).



شکل ۳-۵- گلویی دستگاه برش برای بستن دیسک الماس و انتقال نیرو

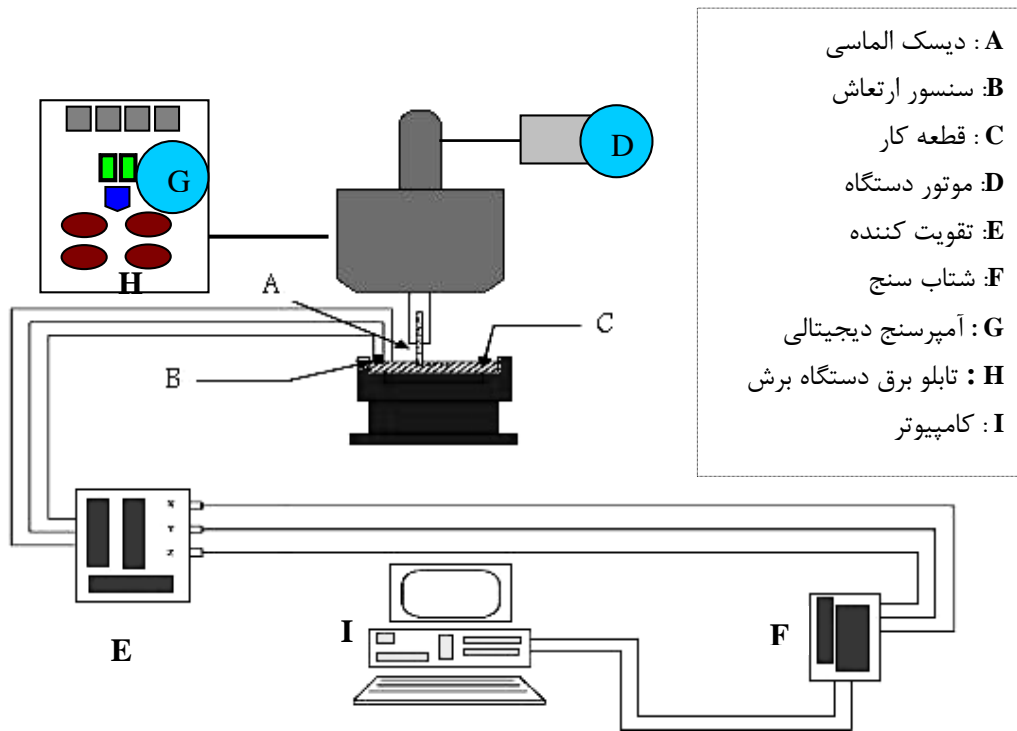


شکل ۵-۴- موتور اصلی دستگاه برش سنگ

پیشروی عمودی (تغییر عمق برش) توسط یک مکانیزم که پایه و اساس آن پیچ و مهره می‌باشد انجام می‌شود. این مکانیزم قابلیت تنظیم و تغییر عمق برش با دقت $0/1$ میلی‌متر را فراهم می‌سازد. برای تغییر عمق برش کافی است چرخ تعبیه شده کنار موتور دستگاه در جهت مورد نظر چرخانده شود تا عمق برش به اندازه مورد نیاز تغییر کند.

برای تغییر سرعت موتورهای الکتریکی محرک میز (پیشروی افقی) و چرخش دیسک از دو واحد اینورتر در ساخت دستگاه استفاده شد. این سیستم امکان کنترل سرعت‌های پیشروی و چرخش دیسک مختلف را فراهم می‌نماید. مدار الکتریکی دستگاه به گونه‌ای طراحی شده است که کنترل سرعت پیشروی ماشین (رفت و برگشت) را در حالت تمام‌خودکار امکان‌پذیر می‌کند. مقدار سرعت پیشروی کرنومتر با توجه به مسافت برش سنجیده می‌شود. نمودار طراحی شده برای انجام مطالعات برش به همراه تجهیزات جانبی استفاده شده، در شکل ۵-۵ نشان داده شده است.

دستگاه برش سنگ ساخته شده به منظور مطالعه و بررسی تأثیر تغییر پارامترهای عملیاتی بر سایش دیسک‌های الماسی در شکل ۵-۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۵- نمودار طراحی شده برای انجام آزمایش های برش



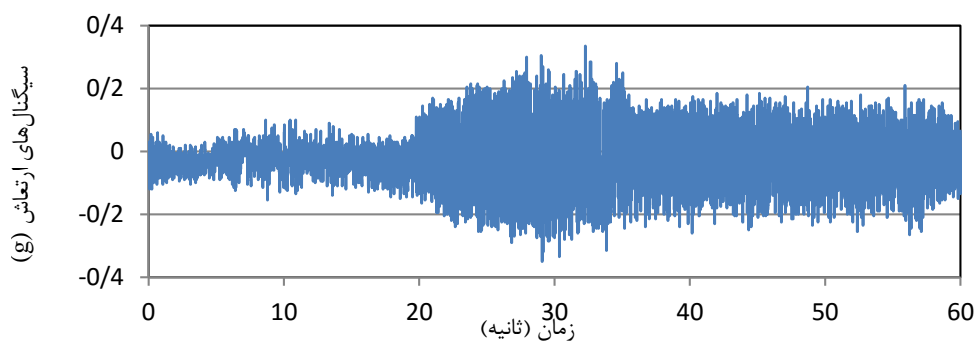
شکل ۵-۶- دستگاه برش سنگ ساخته شده در مقیاس آزمایشگاهی

به منظور بررسی ارتعاشات دستگاه برش سنگ و ثبت ارتعاش های به وجود آمده در سیستم، بر روی قطعه کار در حال برش، یک سنسور ارتعاش نصب می شود. سپس سیگنال های خروجی از سنسور شتاب سنج برای تبدیل به سیگنال های قابل پردازش به دستگاه شتاب سنج منتقل و در پایان برای

پردازش نهایی توسط نرم‌افزارهای مربوطه به کامپیوتر انتقال داده شد. در شکل ۷-۵ شتابسنج و سنسور ارتعاش استفاده شده در این تحقیق و در شکل ۸-۵ نمونه‌ای از سیگنال‌های ارتعاش ثبت شده در کامپیوتر نشان داده شده است.



شکل ۷-۵- شتابسنج و سنسور ارتعاش برای ثبت ارتعاشات سیستم



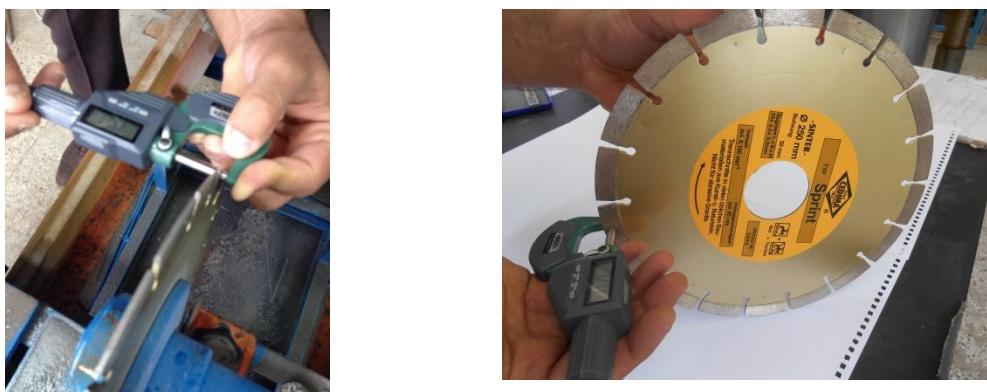
شکل ۸-۵- نمونه‌ای از سیگنال‌های ارتعاش ثبت شده در کامپیوتر

برای اندازه‌گیری شدت جریان مصرفی در حین فرآیند برش نیز یک آمپرسنج دیجیتال تهیه و بر روی تابلو برق دستگاه نصب شد. در هر مرحله برش سنگ میزان انرژی مصرفی و توان مصرفی دستگاه از روی آمپرسنج مذکور ثبت شد. در شکل ۹-۵ آمپرسنج دیجیتال نصب شده و تابلو برق دستگاه برش مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۹- آمپرسنج دیجیتال برای ثبت تغییرات شدت جریان مصرفی و تابلو برق دستگاه برش سنگ

در طی برداشت داده‌های برش، اطلاعات مربوط به تغییرات سایش دیسک الماسی توسط یک میکرومتر دیجیتال اندازه‌گیری و ثبت شد. این میکرومتر دیجیتال سایش ماکروسکوپی دیسک را با دقت 0.001 میلی‌متر می‌تواند اندازه‌گیری کند. در شکل ۵-۱۰ میکرومتر دیجیتال مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰- میکرومتر دیجیتال برای اندازه‌گیری سایش دیسک الماسی

ضمناً به منظور اندازه‌گیری سرعت چرخش دیسک یا سرعت محیطی در طی فرآیند برش از یک دستگاه دورسنج مکانیکی - نوری استفاده شد که با دقت بالایی می‌تواند تغییرات سرعت محیطی دیسک را اندازه‌گیری کند. در شکل ۵-۱۱ دستگاه دورسنج استفاده شده در این مرحله نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۱- دورسنگ مکانیکی- نوری برای اندازه‌گیری تغییرات سرعت محیطی دیسک برش

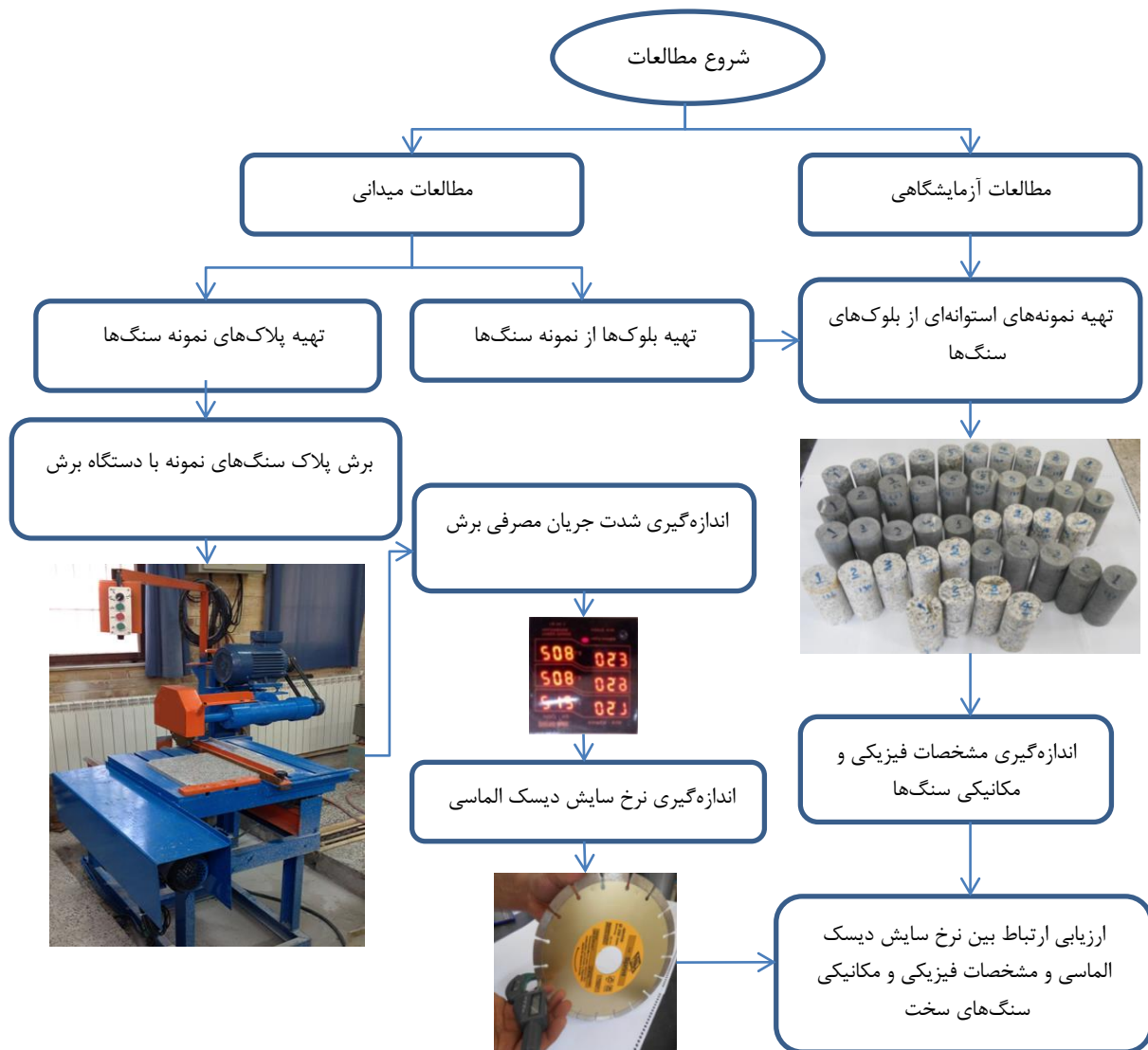
در تمامی آزمایش‌ها، برش در حالت موافق، یعنی حرکت قطعه کار هم راستا با چرخش دیسک انجام شده و از آب به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده شده است. در آزمایش‌های برش از دیسک فلزی سخت‌بر (با سگمنت‌های الماسی) به قطر ۲۵ cm و ضخامت ۵ mm استفاده شد. در دیسک استفاده شده سگمنت‌های الماسی با ابعاد $3.5 \times 6 \times 2/5$ mm و به تعداد ۱۸ عدد در پیرامون بدنه فولادی لحیم شده بودند. دانه‌های الماس مصنوعی به شکل کریستال‌های مکعب هشت وجهی با مش $50/60$ و درصد وزنی ۳۰ تا ۴۰ برای این نوع دیسک سخت بر در باند فلزی توزیع شده‌اند.

مشخصات دیسک استفاده شده در آزمایش‌های برش در جدول ۵-۵ آورده شده است.

جدول ۵-۵- مشخصات دیسک‌های استفاده شده در آزمایش‌های برش		
نوع دیسک	درصد وزنی الماس به کار رفته در باند	اندازه مش کریستال‌های الماس
گرانیت بر	۳۰ درصد تا ۴۰ درصد	$50/60$

بدین ترتیب پس از انجام مطالعات و بررسی‌های لازم توسط دستگاه برش آزمایش برش تحت شرایط مختلف ماشین‌کاری بر روی نمونه سنگ‌های سخت مورد مطالعه، انجام شد.

در شکل ۵-۱۲ فلوجارت تمامی مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق به منظور نشان دادن بهتر مراحل تحقیق آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نهایت ارتباط بین نرخ سایش دیسک‌های الماسی و مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها ارزیابی خواهد شد و در نهایت سیستم طبقه‌بندی ارائه شده در فصل چهارم اعتبارسنجی خواهد شد.



شکل ۵-۱۲- فلوجارت مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در این تحقیق

پارامترهای عملیاتی مؤثر بر سایش دیسک‌های برش شامل، سرعت چرخش (سرعت محیطی)، عمق برش، نرخ پیشروی است. آب هم به عنوان خنک‌کننده عمل می‌کند که معمولاً از آب شهری به این منظور استفاده می‌شود. سرعت پیشروی یا سرعت حرکت قطعه کار، توسط سرعت محیطی به اضافه نیروهای وارده بر دیسک تعیین می‌شود. بهترین عملکرد دیسک زمانی است که از یک نرخ پیشروی مناسب و درست استفاده شود. نرخ‌های پیشروی بالا سبب سایش زودرس سگمنت‌ها و کاهش راندمان برش می‌شوند. سرعت محیطی معرف سرعت چرخش دیسک در زمان برش است. افزایش آن موجب افزایش سایش و کاهش عملکرد بهینه سگمنت (به دلیل جدا شدن دانه الماس زودتر از موعد)

می‌شود. عمق برش نشان‌دهنده میزان نفوذ دیسک در داخل پلاک سنگ در طی فرآیند برش می‌باشد. در آزمایش‌ها معمولاً، عمق برش، سرعت محیطی و نرخ پیشروی، به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شوند، در حالی که سایر متغیرها به عنوان متغیرهای وابسته که به نوع دیسک، نوع سنگ و سرعت محیطی بستگی دارند، در نظر گرفته می‌شوند (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴).

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی مذکور بر سایش دیسک‌های الماسی، پس از شماره‌گذاری سگمنت‌های دیسک تهیه شده (به منظور مشخص کردن یک سگمنت برای اندازه‌گیری سایش) در طی فرآیند برش با تغییر هر کدام از این سه پارامتر به تنهایی، دو پارامتر دیگر ثابت در نظر گرفته شد. پارامتر نرخ پیشروی و سرعت محیطی در ۵ حالت و عمق برش در ۳ حالت تغییر داده شد و در نهایت برای هر نمونه سنگ مورد مطالعه ۷۵ حالت مختلف برش در نظر گرفته شد.

به‌طور کلی مطالعات انجام شده در این بخش را می‌توان در دو بخش عمده به صورت زیر بیان کرد:

- تهیه، برداشت و انتقال بلوک‌های سنگی مورد نظر به آزمایشگاه برای تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی، در این مرحله، بلوک‌های سنگی معرف در ابعاد مشخص از بلوک‌های سنگی بزرگ جدا شده و برای انجام آزمایش‌های مربوطه به آزمایشگاه انتقال داده خواهند شد.

- برداشت و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به عملکرد برش برای نمونه سنگ‌های مورد مطالعه، این کار با دستگاه برش سنگ ساخته شده انجام و سایش دیسک الماسی پس از هر پیشروی مشخص در هر حالت اندازه‌گیری شد. اطلاعات ثبت شده در این بخش شامل اطلاعات مربوط به پارامترهای عملیاتی (عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت محیطی دیسک)، شدت جریان مصرفی، ارتعاش به وجود آمده در سیستم و سایش ابزار الماسی برای نمونه سنگ‌های مورد مطالعه می‌باشد.

۴-۵- تحلیل‌های آماری

به منظور بررسی ارتباط بین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها و بین سایش دیسک‌های الماسی و مشخصات مذکور و نیز پارامترهای عملیاتی، تحلیل‌های آماری بر روی نتایج آزمایشگاهی انجام شد. تحلیل‌های آماری در دو بخش برازش تک متغیره و برازش چند متغیره خطی و غیرخطی توسط

نرم افزار SPSS انجام شد.

۱-۴-۵- برآزش تک متغیره

در این بخش از تحقیق ارتباط میان مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ توسط آنالیز برآزش تک متغیره انجام شد. در مجموع داده های آزمایشگاهی مربوط به نه نوع سنگ ساختمانی سخت با توابع خطی بررسی شد که پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری، ساینده گی لس آنجلس و مدول الاستیسیته دارای سطح ارتباط معنی داری قابل قبول حاصل شد. البته سایر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ دارای ارتباط خطی و غیرخطی معنی داری نبوده است. روابط ۱-۵ تا ۷-۵ رابطه خطی بدست آمده مابین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ را نشان می دهد که با توجه به R^2 بدست آمده قابل قبول نیستند.

$$LA = 53.953 - 0.167UCS \quad R^2 = 0.601 \quad (5-1)$$

$$LA = 49.146 - 1.694BTS \quad R^2 = 0.730 \quad (5-2)$$

$$UCS = 262.045 - 3.593LA \quad R^2 = 0.6 \quad (5-3)$$

$$UCS = 7.920BTS + 59.788 \quad R^2 = 0.743 \quad (5-4)$$

$$Ym = 0.181UCS + 11.934 \quad R^2 = 0.667 \quad (5-5)$$

$$Ym = 1.633BTS + 20.006 \quad R^2 = 0.641 \quad (5-6)$$

$$Ym = 35.429\rho - 52.037 \quad R^2 = 0.571 \quad (5-7)$$

در رابطه های ارائه شده LA معرف ساینده گی لس آنجلس بر حسب درصد، UCS مقاومت فشاری تک محوری بر حسب مگاپاسکال، BTS مقاومت کششی غیرمستقیم برزلی بر حسب مگاپاسکال، Ym مدول الاستیسیته بر حسب گیگاپاسکال و ρ چگالی می باشد.

۲-۴-۵- برآزش چند متغیره

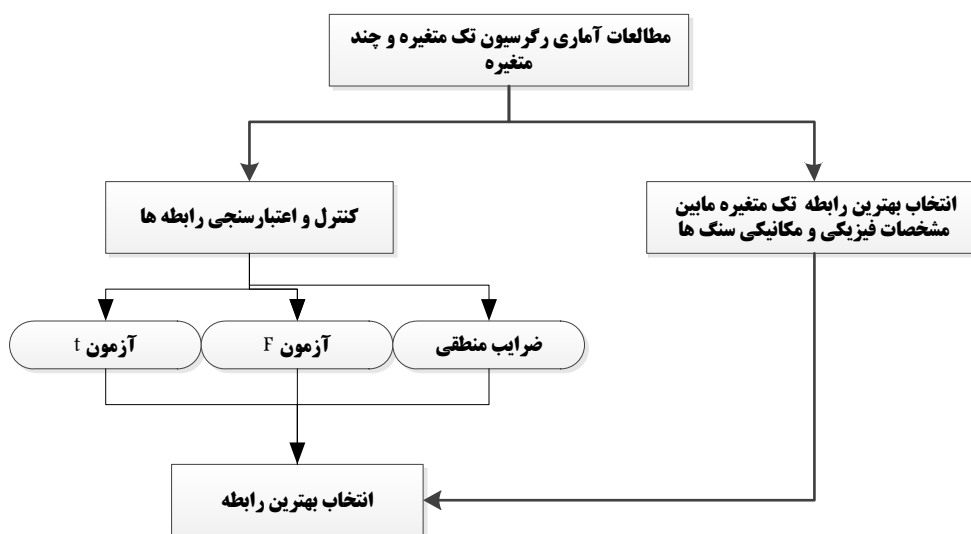
به منظور بررسی ارتباط دقیق تر میان مشخصات سنگ، برآزش دو، سه و چهار متغیره انجام شد. رابطه های ۸-۵ تا ۱۰-۵ از مطالعات آماری حاصل شده است.

$$LA = 21.384 + 0.029UCS - 0.839BTS + 42.327W \quad R^2 = 0.925 \quad (8-5)$$

$$LA = 24.328 - 0.66BTS + 40.53W \quad R^2 = 0.921 \quad (9-5)$$

$$Ym = 44.110 + 0.17UCS - 5.231MH \quad R^2 = 0.806 \quad (10-5)$$

در رابطه‌های بررسی شده پارامترهای سایندهی لس آنجلس و مدول الاستیسیته به عنوان پارامتر وابسته و مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ به عنوان پارامترهای مستقل، دارای سطح معنی‌داری مناسب بدست آمد و به منظور بررسی و کنترل رابطه‌های بدست آمده از آزمون‌های آماری F و t استفاده شد. فلوجارت ارائه شده در شکل ۵-۱۳ مراحل انجام کنترل و اعتبارسنجی رابطه‌های مابین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ را به ترتیب نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است برای کنترل معنی‌داری رابطه از آزمون F و برای کنترل معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل، از آزمون t استفاده شده است. مقادیر هر یک از پارامترهای بالا به‌طور جداگانه برای هر رابطه با استفاده از نرم‌افزار SPSS تعیین شد. نتایج حاصل از بررسی‌های آماری در جدول ۵-۵ نشان داده شده است. نکته مهم که در ارائه رابطه‌های آماری باید به آن توجه شود وجود ضرایب منطقی یا به عبارت دیگر پیروی رابطه از طبیعت ذاتی فرآیند است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سایندهی لس آنجلس و مدول الاستیسیته با افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش می‌یابد.

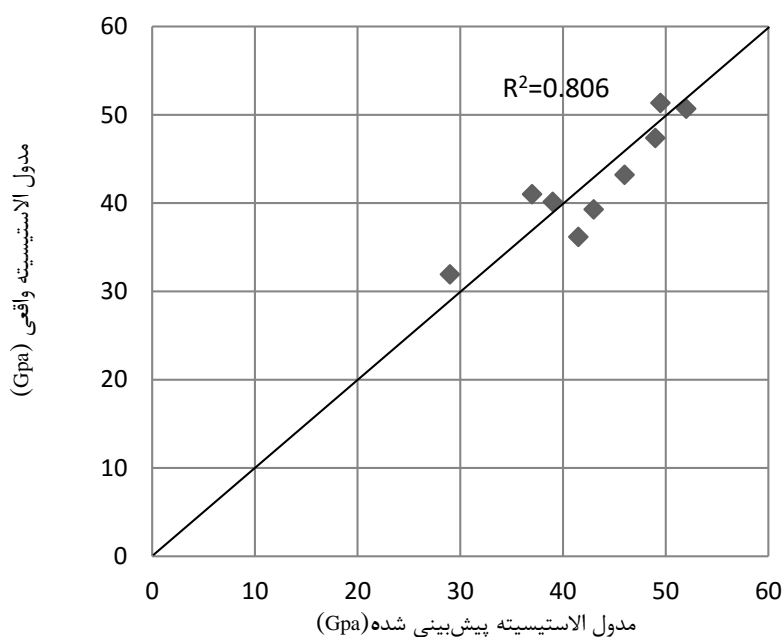


شکل ۵-۱۳ - مراحل کنترل و اعتبارسنجی آماری رابطه‌ها

بطور مثال در بحث صحت‌سنجی رابطه‌های چند متغیره به تفصیل، ارتباط سایندهی لس‌آنجلس و مدول الاستیسیته با متغیرهای مستقل (MH و W، BTS، UCS) در جدول ۵-۶ آورده شده است. با توجه به توضیحات بالا از میان رابطه‌های ۸ تا ۱۰ تنها رابطه ۱۰ می‌تواند یک رابطه قابل قبول برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته باشد زیرا در این رابطه مقدار معیار تصمیم F و t کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد و ضریب تبیین مطلوب آن ۰/۸۰۶ و هم‌چنین تعداد متغیر کم پیش‌بینی کننده رابطه (MH و UCS) مشخص‌کننده مطلوب‌ترین رابطه بین روابط ۵-۸ تا ۵-۱۰ است. یکی دیگر از روش‌های ارزیابی رابطه‌های آماری پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ است. شکل ۵-۱۴ پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده را نسبت به مقادیر واقعی مدول الاستیسیته برای رابطه پیش‌بینی ۵-۱۰ نشان می‌دهد. هرچه تراکم این نقاط نسبت به خط نیم‌ساز بیشتر باشند رابطه دقت بهتری دارد. با توجه به توضیحات ارائه شده می‌توان چنین استنباط کرد که رابطه ۵-۱۰ بر اساس اهمیت پارامترها با دیدگاه منطقی نسبت به رابطه ۵-۹ که آن هم از نظر ریاضی قابل قبول است، دقت نسبتاً خوبی در تخمین و پیش‌بینی مقدار مدول الاستیسیته دارد.

جدول ۵-۶- نتایج حاصل از بررسی‌های آماری برای پیش‌بینی مشخصات فیزیکی و مکانیکی

رابطه	ضرایب	خطای استاندارد	F	Sig	F جدول	T	Sig	t جدول	R ²
عدد ثابت	۲۱/۳۸۴	۹/۵۵۳				۲/۲۳۸		۰/۰۷۵	
(۵-۸) UCS	۰/۰۲۹	۰/۰۵۵	۲۰/۶۸۲	۰/۰۰۳	۳/۴۶	۰/۵۲۹		۰/۶۲۰	
BTS	-۰/۸۳۹	۰/۵۰۶				-۱/۶۵۸		۱/۹۴۳	۰/۹۲۵
W	۴۲/۳۲۷	۱۱/۸۸۱				۳/۸۹۳		۰/۰۱۶	
عدد ثابت	۲۴/۳۲۸	۷/۲۸۴				۳/۳۴۰		۰/۱۶	
(۵-۹) BTS	-۰/۶۶۰	۰/۳۵۴	۳۵/۰۹۶	۰/۰	۳/۵۹	-۱/۸۶۸		۱/۴۱۵	۰/۹۲۱
W	۴۰/۳۵۳	۱۰/۵۸۰				۳/۸۱۴		۰/۰۰۹	
عدد ثابت	۴۴/۱۱۰	۱۶/۹۷۹				۲/۵۹۸		۰/۰۴۱	
(۵-۱۰) UCS	۰/۱۷۰	۰/۰۴۰	۱۲/۴۶۱	۰/۰۰۷	۳/۵۹	۴/۲۲۴		۱/۸۹۵	۰/۸۰۶
MH	-۵/۲۳۱	۲/۵۲۰				-۲/۰۷۶		۰/۰۴۳	



شکل ۵-۱۴- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی (مدل ۱۰) نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱

۵-۵- پیش‌بینی سایش دیسک‌های الماسی با استفاده از مطالعات آماری

در شناخت و بررسی هر چه بیشتر فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی پیش‌بینی و ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی می‌تواند یک گام مهم و اساسی در ارزیابی توان اجرایی دستگاه‌های برش سنگ باشد. در این بخش تحقیق، برای دستیابی به این مهم به بررسی ارتباط مشخصات فیزیکی و مکانیکی

سنگ و سایش دیسک‌های الماسی به کمک تحلیل‌های آماری پرداخته شد.

به منظور ارائه مدل‌های آماری برای ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی در ابتدا آزمایش‌های برش بر روی نمونه سنگ‌های مورد نظر با استفاده از یک دستگاه برش در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. در حین فرآیند برش پس از انجام هر برش سایش دیسک الماسی اندازه‌گیری شد. پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی و تهیه یک جامعه آماری مناسب، مطالعات آماری به کمک نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ بر روی این جامعه آماری انجام شد. در نهایت صحت‌سنجی هر یک از مدل‌ها توسط آزمون‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. ضمناً در طی انجام مطالعات آماری، پارامترهای عملیاتی دستگاه برش (عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت چرخش دیسک) و مشخصات سنگ به عنوان متغیرهای مستقل و پارامتر سایش دیسک الماسی به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند.

۱-۵-۵- ارائه مدل های آماری

در این قسمت ارتباط میان سایش دیسک های الماسی با پارامترهای عملیاتی با استفاده از برازش چند متغیره، توسط نرم افزار آماری SPSS مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد و مدل های آماری مناسب برای پیش بینی سایش دیسک های الماسی با توجه به پارامترهای عملیاتی ماشین برش ارائه خواهد شد. همانطور که قبلا نیز به آن اشاره شد پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی در کل حدود ۶۷۵ تست برای نمونه سنگ های سخت تحت شرایط مختلف ماشین کاری ثبت شد. داده های جمع آوری شده پس از جمع بندی در نرم افزار Excel، به عنوان ورودی به نرم افزار SPSS داده شد. در بررسی های انجام شده توسط این نرم افزار، سایش دیسک الماسی به عنوان متغیر وابسته و پارامترهای عملیاتی ماشین به عنوان پارامترهای مستقل برای سنگ های سخت مورد مطالعه در نظر گرفته شد. پس انجام مراحل محاسباتی در نرم افزار SPSS، مدل های آماری برای پیش بینی سایش دیسک های الماسی برای سنگ های ساختمانی سخت در روابط ۱۱ تا ۱۳ با توجه به مشخصات سنگ ها، در روابط ۵-۱۴ و ۵-۱۵ با توجه به پارامترهای عملیاتی و در روابط ۵-۱۶ تا ۵-۱۸ با ملاحظه همزمان پارامترهای عملیاتی و مشخصات سنگ ها ارائه شده است:

$$Wr = 9.9 \times 10^{-8} UCS + 3.149 \times 10^{-7} SF_a + 7.567 \times 10^{-6} N - 2.244 \times 10^{-5} \quad R^2 = 0.873 \quad (5-11)$$

$$Wr = 5.19 \times 10^{-8} UCS + 4.775 \times 10^{-7} SF_a + 1.985 \times 10^{-6} MH - 2.258 \times 10^{-5} \quad R^2 = 0.906 \quad (5-12)$$

$$Wr = 4.728 \times 10^{-8} UCS + 4.377 \times 10^{-7} SF_a - 9.888 \times 10^{-6} \quad R^2 = 0.714 \quad (5-13)$$

$$W_r = \frac{D_c^{1.838}}{10^{6.185} \times F_r^{0.301}} \quad R^2 = 0.661 \quad (5-14)$$

$$W_r = \frac{D_c^{0.943} \times I^{3.520}}{10^{10.694} \times F_r^{1.020}} \quad R^2 = 0.690 \quad (5-15)$$

$$Wr = \frac{IRB^{78.704}}{10^{123.627} \times I^{23.215}} \quad R^2 = 0.776 \quad (5-16)$$

$$Wr = \frac{UCS^{6.598} \times SF - a^{2.086} \times 10^{3.948}}{I^{21.885}} \quad R^2=0.886 \quad (5-17)$$

$$Wr = \frac{UCS^{3.059} \times SF - a^{1.895}}{10^{14.439}} \quad R^2=0.729 \quad (18)$$

در رابطه‌های بالا D_c عمق برش بر حسب سانتی‌متر، F_r سرعت پیشروی بر حسب سانتی‌متر بر دقیقه، I شدت جریان مصرفی بر حسب آمپر، IRB سختی اشمیت، UCS مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب مگاپاسکال و $SF-a$ شاخص ساینده‌گی شیمازک می‌باشند. این نکته حائز اهمیت است که بایستی بتوان با استفاده از رابطه‌های مذکور به نتایج پیش‌بینی نسبتاً خوبی از میزان سایش دیسک‌های الماسی با توجه به مشخصات عملیاتی برش دست پیدا کرد.

۲-۵-۵- اعتبارسنجی مدل‌های آماری

به منظور بررسی صحت‌سنجی هر کدام از رابطه‌ها ابتدا از آزمون‌های آماری استفاده شد و سپس روند منطقی و معنی‌داری هر یک از متغیرهای رابطه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌های آماری در جداول ۷-۵ تا ۹-۵ نشان داده شده است. مطابق جدول ۷-۵ برای کنترل معنی‌داری رابطه‌ها از آزمون F و برای کنترل معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل، از آزمون t استفاده شد. با توجه به اینکه مقدار F به دست آمده از جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۹ درصد (سطح معناداری $\alpha=0.01$) مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج مندرج در جدول ۷-۵، مقدار F رابطه‌های ۵-۱۱ و ۱۲-۵ بزرگ‌تر از مقدار F جدول توزیع (برابر با $10/925$ در هر دو رابطه) می‌باشد که در هر دو رابطه ۵-۱۱ و ۱۲-۵ مقدار معنی‌داری یا خطا در رد فرضیه صفر sig کمتر از سطح معناداری یا احتمال خطا می‌باشد. لذا می‌توان فرضیه صفر را که بیان‌کننده عدم وجود رابطه خطی میان سایش دیسک الماسی و متغیرهای مستقل است رد کرده و نتیجه‌گیری کرد که حداقل یکی از ضرایب رگرسیون صفر نمی‌باشد. اما در مورد رابطه ۵-۱۳ که F رابطه از F جدول کوچک‌تر است نمی‌توان فرضیه صفر را رد کرد و معنی‌داری کلی رابطه ۵-۱۳ تایید نمی‌شود. پس از کنترل معنی‌داری کلی رابطه‌ها با آزمون F ، معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل در رابطه‌های معنی‌دار با آزمون t کنترل

می‌شود. معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل رابطه‌های معنی‌دار ۵-۱۱ و ۵-۱۲ با آزمون t با سطح اعتماد ۹۵ درصد انجام شد. از آن‌جا که مقدار t های به دست آمده از متغیرهای مستقل در رابطه‌های ۵-۱۱ و ۵-۱۲، بزرگ‌تر از مقدار t حاصل از جدول توزیع (برابر با ۱/۹۴۳) بوده و هم‌چنین کمتر بودن مقادیر معنی‌داری یا خطا در رد فرضیه صفر برای هر یک از متغیرهای مستقل مسئله ($\text{sig} \leq 0/05$) از مقدار سطح معنی‌داری ($\alpha = 0/05$)، می‌توان فرضیه صفر ضرایب متغیرهای مستقل را برای رابطه‌های ۵-۱۱ و ۵-۱۲ در جدول ۷-۵ رد کرد و این دو رابطه قابل قبول هستند.

جدول ۷-۵- نتایج حاصل از بررسی‌های آماری برای مدل‌های پیش‌بینی سایش دیسک بر اساس مشخصات سنگ

رابطه	ضرایب	خطای استاندارد	F	Sig	F جدول	t	Sig	t جدول	R ²
عدد ثابت	$-2/244 \times 10^{-5}$	۰/۰				-۴/۰۳۱	۰/۰۱۰		
UCS (۵-۱۱)	$9/9 \times 10^{-10}$	۰/۰	۱۱/۴۰۶	۰/۰۱۱	۱۰/۹۲۵	۴/۱۷۶	۰/۰۰۹	۱/۹۴۳	۰/۸۷۳
SF-a	$3/149 \times 10^{-7}$	۰/۰				۲/۴۸۰	۰/۰۵۶		
N	$7/567 \times 10^{-6}$	۰/۰				۲/۴۹۰	۰/۰۵۵		
عدد ثابت	$-2/258 \times 10^{-5}$	۰/۰				-۵/۰۴۰	۰/۰۰۴		
UCS (۵-۱۲)	$5/19 \times 10^{-10}$	۰/۰	۱۵/۹۷۲	۰/۰۰۵	۱۰/۹۲۵	۵/۲۱۶	۰/۰۰۳	۱/۹۴۳	۰/۹۰۶
SF-a	$4/775 \times 10^{-7}$	۰/۰				۴/۶۷۲	۰/۰۰۵		
MH	$1/988 \times 10^{-6}$	۰/۰				۳/۱۸۰	۰/۰۲۶		
عدد ثابت	$-9/888 \times 10^{-6}$	۰/۰				-۳/۰۶۲	۰/۰۲۲		
UCS (۵-۱۳)	$4/728 \times 10^{-10}$	۰/۰	۷/۵۰۴	۰/۰۲۳	۱۲/۲۴۶	۳/۰۲۶	۰/۰۲۳	۱/۸۹۵	۰/۷۱۴
SF-a	$4/377 \times 10^{-7}$	۰/۰				۲/۶۹۸	۰/۰۳۶		

هم‌چنین مطابق جدول ۵-۸ به منظور معنی‌داری کلی رابطه‌های ۵-۱۴ و ۵-۱۵ مقدار F به دست آمده از جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۹ درصد (سطح معناداری $\alpha = 0/01$) مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج مندرج در جدول ۷-۵، مقدار F هر یک از رابطه‌های ۵-۱۴ و ۵-۱۵ بزرگ‌تر از مقدار F جدول توزیع (برابر با ۱۲/۲۴۶ در رابطه ۵-۱۴ و ۱۰/۹۲۵ در رابطه ۵-۱۵) می‌باشد که در هر دو مدل مقدار معنی‌داری در رد فرضیه صفر کمتر از سطح معنی‌داری می‌باشد لذا می‌توان فرضیه صفر را که بیان‌کننده عدم وجود رابطه خطی میان سایش دیسک الماسی و متغیرهای مستقل است را رد کرده و نتیجه‌گیری کرد که حداقل یکی از ضرایب رگرسیون صفر نمی‌باشد. پس از کنترل معنی‌داری کلی رابطه با آزمون F، معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل با آزمون t کنترل می‌شود. معنی‌داری

هر یک از متغیرهای مستقل با آزمون t با سطح اعتماد ۹۵ درصد انجام شد. از آنجا که مقدار t های به دست آمده از متغیرهای مستقل در رابطه ۵-۱۵، بزرگتر از مقدار t حاصل از جدول توزیع (برابر با ۱/۹۴۳) بوده و همچنین کمتر بودن مقادیر معنی داری در رد فرضیه صفر از مقدار سطح معنی داری ($\alpha = 0/05$)، می توان فرضیه صفر بودن ضرایب متغیرهای مستقل را برای رابطه ۵-۱۵ در جدول ۸-۵ نیز رد کرد.

جدول ۸-۵- نتایج حاصل از بررسی های آماری برای مدل های پیش بینی سایش دیسک بر اساس پارامترهای عملیاتی

رابطه	ضرایب	خطای استاندارد	F	Sig	F جدول	t	sig	t جدول	R ²
عدد ثابت	-۶/۱۸۵	۰/۰۵۱				-۱۲۲/۳۰۹	۰/۰		
(۵-۱۴) F _r	-۰/۳۰۱	۰/۲۹۱	۲۷/۸۷۲	۰/۰	۱۲/۲۴۶	-۱/۰۳۴	۰/۳۰۵	۱/۸۹۵	۰/۶۶۱
D _c	۱/۸۳۸	۰/۲۵۰				۷/۳۴۷	۰/۰		
عدد ثابت	-۱۰/۶۹۴	۱/۹۲۹				-۵/۵۴۴	۰/۰		
(۵-۱۵) D _c	۰/۹۴۳	۰/۴۵۳	۲۱/۵۵۷	۰/۰	۱۰/۹۲۵	۲/۰۸۲	۰/۰۴۱	۱/۹۴۳	۰/۶۹۰
F _r	-۱/۰۲۰	۰/۴۱۸				-۲/۴۴۲	۰/۰۱۷		
I	۳/۵۲۰	۱/۵۰۵				۲/۳۳۸	۰/۰۲۲		

مطابق جدول ۵-۹ برای کنترل معنی داری رابطه های ۵-۱۶ تا ۵-۱۸ از آزمون F و برای کنترل معنی داری هر یک از متغیرهای مستقل، از آزمون t استفاده شد. مقدار F به دست آمده از جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۷/۵ درصد (سطح معناداری $\alpha = 0/025$) مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج جدول ۵-۹، مقدار F هر یک از رابطه ها بزرگتر از مقدار F جدول توزیع (برابر با ۸/۰۷۲۷ در رابطه ۵-۱۶، ۷/۲۵۹۹ در رابطه ۵-۱۷ و ۸/۰۷۲۷ در رابطه ۵-۱۸) می باشد که در هر سه رابطه مقدار معنی داری کمتر از سطح معنی داری می باشد و فرضیه صفر یا عدم وجود رابطه خطی میان سایش دیسک الماسی و متغیرهای مستقل است رد شده و می توان نتیجه گیری کرد که حداقل یکی از ضرایب رگرسیون صفر نمی باشد. پس از کنترل معنی داری کلی رابطه های ۵-۱۶ تا ۵-۱۸ با آزمون F ، معنی داری هر یک از متغیرهای مستقل با آزمون t کنترل می شود. معنی داری هر یک از متغیرهای مستقل با آزمون t با سطح اعتماد ۹۵ درصد انجام شد. از آنجا که مقدار t های به دست آمده از متغیرهای مستقل در رابطه های ۵-۱۶ و ۵-۱۸، بزرگتر از مقدار t حاصل از جدول توزیع (برابر با ۱/۸۹۵ در هر دو رابطه) بوده و می توان فرضیه صفر بودن ضرایب متغیرهای مستقل را برای رابطه های

۱۶ و ۱۸ در جدول ۵-۸ رد کرد ولی رابطه ۵-۱۷ چون مقدار t های بدست آمده از متغیرهای مستقل از مقدار t جدول توزیع (۱/۹۴۳) کوچکتر است این رابطه قابل قبول نمی باشد.

جدول ۵-۹- نتایج حاصل از بررسی های آماری بر اساس مشخصات سنگ و پارامترهای عملیاتی

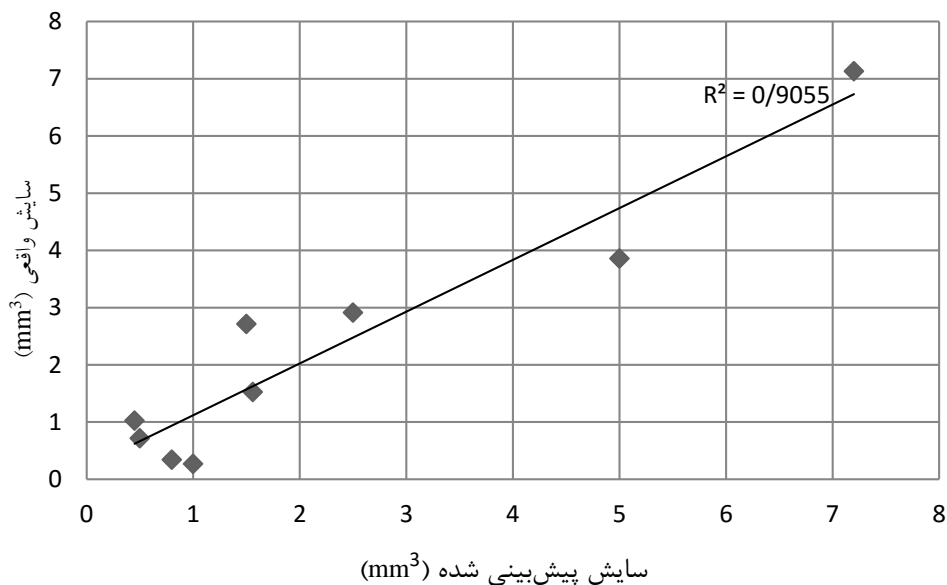
رابطه	ضرایب	خطای استاندارد	F	Sig	F جدول	t	Sig	t جدول	R ²
عدد ثابت	-۱۲۳/۶۲۷	۲۵/۹۸۰				-۴/۷۵۹	۰/۰۰۳		
IRB (۵-۱۶)	۷۸/۷۰۴	۱۸/۴۶۲	۱۰/۳۹۱	۰/۰۱۱	۸/۰۷۲۷	۴/۲۶۳	۰/۰۰۵	۱/۸۹۵	۰/۷۷۶
I	-۲۳/۲۱۵	۹/۳۲۵				-۲/۴۹۰	۰/۰۴۷		
عدد ثابت	۳/۹۴۸	۷/۲۷۴				۰/۵۴۳	۰/۶۱۱		
UCS (۵-۱۷)	۶/۵۹۸	۱/۵۷۸	۱۲/۹۲۲	۰/۰۰۹	۷/۲۵۹۹	۴/۱۸۱	۰/۰۰۹	۱/۹۴۳	۰/۸۸۶
SF-a	۲/۰۸۶	۰/۴۳۷				۴/۷۷۱	۰/۰۰۵		
I	-۲۱/۸۸۵	۸/۳۶۵				-۲/۶۱۶	۰/۰۴۷		
عدد ثابت	-۱۴/۴۳۹	۲/۶۳۵				-۵/۴۷۹	۰/۰۰۲		
UCS (۵-۱۸)	۳/۰۵۹	۱/۱۴۲	۸/۰۸۴	۰/۰۲۰	۸/۰۷۲۷	۲/۶۷۹	۰/۰۳۷	۱/۸۹۵	۰/۷۲۹
SF-a	۱/۸۹۵	۰/۶۰۶				۳/۱۲۹	۰/۰۲۰		

از موارد مهم در بررسی رابطه های آماری که باید به آن توجه شود، وجود ضرایب منطقی در رابطه های آماری می باشد. وجود ضرایب منطقی در یک رابطه، یعنی رابطه از طبیعت ذاتی فرآیند پیروی می کند. به عبارت دیگر یک مدل آماری زمانی دارای اعتبار است که بتواند تحت هر شرایطی، مقادیری درست از فرآیند را پیش بینی کند. در این تحقیق، روند منطقی و طبیعی هر یک از مدل های معنی دار (۵-۱۱، ۵-۱۲، ۵-۱۵، ۵-۱۶ و ۵-۱۸) با توجه به طبیعت ذاتی فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. چگونگی روند این تغییرات نسبت به تغییر هر یک از متغیرهای رابطه ها (عمق برش، سرعت پیشروی، شدت جریان مصرفی و مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگها) برای رابطه های سایش دیسک های الماسی مورد بررسی قرار گرفت.

مسلماً با افزایش پارامترهای عملیاتی مانند عمق برش و مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ مانند سختی اشمیت، شاخص ساینده گی شیمازک و مقاومت فشاری تک محوری میزان سایش دیسک های الماسی نیز افزایش می یابد. که دلیل این امر را می توان در مکانیزم و چگونگی تشکیل براده جستجو کرد. چون با افزایش مشخصات مقاومتی مانند مقاومت فشاری تک محوری، سختی مانند

سختی اشمیت و سایندگی مانند شاخص شیمازک ضخامت براده یا تراشه تشکیل شده سنگ کاهش می‌یابد. با افزایش مشخصات مذکور، عمق نفوذ دانه‌های الماس کاهش می‌یابد و این خود باعث افزایش سایش سگمنت‌های الماس می‌شود. هم‌چنین با افزایش عمق برش و مشخصات مذکور سنگ میزان شدت جریان مصرفی دستگاه نیز افزایش و متناسب با آن میزان سایش دیسک الماسی افزایش می‌یابد. با توجه به توضیحات ارائه شده می‌توان ادعا کرد که رابطه‌های ارائه شده دارای ضرایب منطقی می‌باشند. به عبارت دیگر ضرایب توانی موجود در هر یک از رابطه‌ها مطابقت خوبی با طبیعت ذاتی فرآیند برش دارد. لیکن بین دو رابطه ۵-۱۱ و ۵-۱۲ که بر اساس مشخصات سنگ بدست آمده رابطه ۱۲ به دلیل ضریب تبیین بالاتر (۰/۹۰۶) و پارامترهای شناخته شده مناسب‌تر بوده و انتخاب می‌شود. هم‌چنین بین دو رابطه ۵-۱۶ و ۵-۱۸ رابطه ۵-۱۶ به دلیل ضریب تعیین بالاتر (۰/۷۷۶) و سهولت اندازه‌گیری پارامترهای مربوطه مناسب‌تر بوده و انتخاب می‌شود.

یکی دیگر از روش‌های ارزیابی رابطه‌های آماری پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ می‌باشد. شکل ۵-۱۵ پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده نسبت به واقعی را برای رابطه پیش‌بینی ۵-۱۲ نشان می‌دهد، هرچه تراکم این نقاط نسبت به خط نیم‌ساز بیشتر باشند رابطه از دقت بهتری برخوردار می‌باشد. با توجه به این که تاکنون رابطه‌های آماری مناسبی برای پیش‌بینی سایش در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی سخت مشاهده نشده است و هم‌چنین با توجه به اختلاف پائین میان مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی سایش دیسک‌های الماسی، دقت رابطه‌های ۵-۱۲، ۵-۱۵ و ۵-۱۶ از جداول ۵-۷ تا ۵-۹ را می‌توان قابل قبول ارزیابی نمود.



شکل ۵-۱۵- پراکندگی مقادیر سایش واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده (۵-۱۲) نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ هم‌چنین با مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده سایش دیسک و سایش واقعی اندازه‌گیری شده خطای نسبی تخمین نیز برای هر کدام از مدل‌های ۵-۱۲، ۵-۱۵ و ۵-۱۶ محاسبه شد، مدل‌های منتخب از خطای تخمین پایینی در پیش‌بینی میزان سایش دیسک‌های الماسی برخوردار می‌باشند. به طوری که مقادیر خطای نسبی تخمین هر یک از مدل‌های ۵-۱۲، ۵-۱۵ و ۵-۱۶ به ترتیب برابر ۱۲/۰۷، ۲/۶۱ و ۵/۴ درصد بدست آمد که با وجود خطاهای شخصی، محیطی و کاربردی به نظر می‌رسد این مقادیر نسبی خطا برای مدل‌های پیش‌بینی سایش دیسک ارائه شده، قابل قبول باشد.

۵-۶- صحت‌سنجی سیستم طبقه‌بندی جدید

برای بررسی صحت سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی (جدول ۴-۱۴)، آزمایش‌های مکانیک سنگ بر روی ۹ نمونه سنگ ساختمانی سخت انجام شد، هم‌چنین نرخ سایش دیسک الماسی در فرآیند برش بررسی و اندازه‌گیری شد. نتایج کلاس‌بندی و مقدار سایش اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در جدول ۵-۹ آورده شده است. هم‌چنین نتایج بازه‌بندی و خروجی طبقه‌بندی پیشنهادی در جدول ۵-۱۰ گنجانده شده است. ضریب همبستگی R^2 بین نتایج طبقه‌بندی و نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده ۰/۸۳ بدست آمد که قابل قبول می‌باشد.

جدول ۵-۱۰- نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگ، سایش اندازه‌گیری شده و طبقه‌بندی پیشنهادی و بازه مربوطه

Y _{model}	Log(۱۰ ^۶ Wr)		۱۰ ^۶ Wr		Wr		LA		YM		IRB		UCS		نمونه
	کلاس	-	کلاس	-	۱۰ ^۶ mm ^۳	(mm ^۳)	کلاس	-	کلاس	(GPa)	کلاس	-	کلاس	(MPa)	
۲	۲/۴۶	۱	۰/۶۵۳	۴/۵	۰/۰۰۰۰۰۰۴۵	۱	۲۲/۳	۱	۳۷	۴	۷۱	۳	۱۵۷	۱	
۲	۲/۱	۱	۰/۶۹۹	۵	۰/۰۰۰۰۰۰۵	۲	۲۹/۸	۱	۲۹	۳	۶۹/۵	۲	۱۳۸	۲	
۳	۲/۶۳	۲	۰/۹۰۳	۸	۰/۰۰۰۰۰۰۸	۳	۳۱/۲	۲	۴۱/۵	۴	۷۰/۵	۲	۱۴۱	۳	
۳	۲/۶	۳	۱/۱۹۳	۱۵/۶	۰/۰۰۰۰۰۰۱۵۶	۱	۲۱/۲۳	۳	۴۶	۴	۷۱/۵	۳	۱۷۳	۴	
۳	۲/۸۱	۴	۱/۶۹۹	۵۰	۰/۰۰۰۰۰۰۵	۲	۲۹/۴	۲	۳۹	۴	۷۱	۳	۱۵۵	۵	
۳	۳/۳۸	۳	۱/۳۹۸	۲۵	۰/۰۰۰۰۰۰۲۵	۴	۳۸/۱	۲	۴۳	۴	۷۱/۵	۳	۱۵۰	۶	
۳	۳/۰۷	۳	۱/۱۷۶	۱۵	۰/۰۰۰۰۰۰۱۵	۱	۱۸/۸	۳	۴۹	۴	۷۲	۴	۱۸۵	۷	
۴	۳/۵۴	۴	۱/۸۵۷	۷۲	۰/۰۰۰۰۰۰۷۲	۱	۱۶/۷	۳	۵۲	۴	۷۴	۵	۲۳۹	۸	
۳	۳/۰۷	۲	۱	۱۰	۰/۰۰۰۰۰۰۱	۱	۲۱/۱	۳	۴۹/۵	۴	۷۱	۴	۱۹۹	۹	

برای تایید صحت مدل و کارایی روش پیشنهادی، از بین ۹ نمونه نتایج آزمایش موجود یک سطر حذف و مدل مجدداً برای نمونه‌های باقی‌مانده محاسبه شد و نتایج حاصل از نظر بازه‌بندی به سطر حذف شده اعمال گردید. این کار مجموعاً نه بار برای نمونه‌ها تکرار و در تمامی دفعات نتایج بازه‌بندی نسبتاً یکسان و مناسب بدست آمد که نشان‌گر اعتبار و قابلیت اطمینان روش پیشنهادی می‌باشد. در نهایت بر اساس مدل پیشنهادی، ۹ نمونه سنگ مورد بررسی در سه کلاس طبقه‌بندی شدند. نمونه‌های ۱ و ۲ در کلاس ۲ با نرخ سایش کم طبقه‌بندی شدند و نشان‌دهنده برش‌پذیری زیاد می‌باشد. به‌طور مشابه نمونه‌های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۹ در کلاس ۳ با نرخ سایش متوسط (با یک رنج سایش mm^3 ۰/۰۰۰۰۰۰۵ تا ۰/۰۰۰۰۰۰۸) طبقه‌بندی شده‌اند و دارای قابلیت برش‌پذیری خوب می‌باشند. نمونه ۸ در کلاس ۴ با نرخ سایش زیاد (با سایش mm^3 ۰/۰۰۰۰۰۰۷۲) قرار گرفته و نشان‌دهنده قابلیت برش‌پذیری ضعیف این نمونه می‌باشد. با توجه به نتایج، می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی جدید قادر به ارزیابی و طبقه‌بندی میزان سایش دیسک‌های الماسی در فرایند برش سنگ‌های ساختمانی سخت می‌باشد.

۵-۷- جمع‌بندی

در بخش نخست از این فصل به منظور بررسی صحت و سقم سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی ارائه شده در فصل چهارم با استفاده از محاسبات نرم، یک سیستم طبقه‌بندی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری کلونی

زنبور عسل ارائه و نتایج آن با نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی مقایسه شد. سپس به منظور صحت‌سنجی سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی با یک مدل فیزیکی، دستگاه برش سنگی با امکانات تغییر و اندازه‌گیری پارامترهای عملیاتی برش ساخته شد. نحوه عملکرد برش بر روی نه نمونه سنگ سخت بررسی و مقدار سایش دیسک توسط میکرومتر دیجیتالی اندازه‌گیری شد. سپس ضمن بررسی معنی‌داری ارتباط مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها و پارامترهای عملیاتی برش با سایش دیسک‌های الماسی به منظور استفاده از مشخصات مذکور در بحث صحت‌سنجی سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی، برای پیش‌بینی سایش دیسک‌های الماسی روابطی ارائه شد. نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی به عنوان ورودی نرم‌افزار آماری SPSS در نظر گرفته شدند و در نهایت مدل‌های پیش‌بینی سایش دیسک‌های الماسی ارائه شدند. سپس برای بررسی صحت‌سنجی مدل‌های آماری از آزمون‌های F و t استفاده شد. برای کنترل معنی‌داری مدل‌ها از آزمون F و برای کنترل معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل از آزمون t و جداول مربوطه استفاده شد. هم‌چنین به منظور صحت‌سنجی سیستم طبقه‌بندی جدید، از بین ۹ نمونه نتایج آزمایش موجود یک سطر حذف و مدل مجدداً برای نمونه‌های باقی‌مانده بررسی شد و نتایج حاصل از نظر بازه‌بندی به سطر حذف شده اعمال شد. این کار مجموعاً نه بار برای همه نمونه‌ها تکرار و در تمامی دفعات نتایج بازه‌بندی نسبتاً یکسان و مناسب بدست آمد که نشان‌گر اعتبار و قابلیت اطمینان روش مذکور می‌باشد. با توجه به نتایج جدول ۵-۱۰، ۹ نمونه سنگ مورد بررسی در سه کلاس طبقه‌بندی شدند. نمونه‌های ۱ و ۲ در کلاس ۲ با نرخ سایش کم طبقه‌بندی شدند و نشان‌دهنده برش‌پذیری زیاد می‌باشد. به‌طور مشابه نمونه‌های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۹ در کلاس ۳ با نرخ سایش متوسط طبقه‌بندی شده‌اند و دارای قابلیت برش‌پذیری خوب می‌باشند. نمونه ۸ در کلاس ۴ با نرخ سایش زیاد قرار گرفته و نشان‌دهنده قابلیت برش‌پذیری ضعیف این نمونه می‌باشد. در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی جدید قادر به ارزیابی و طبقه‌بندی سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی سخت می‌باشد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۶- نتیجه‌گیری

با توجه به به داشتن ذخایر فراوان سنگ ساختمانی در کشور و توجه به حداقل بودن میزان صادرات این محصول که بالطبع ناشی از کیفیت پایین و هزینه تمام شده بالای سنگ‌های تولیدی می‌باشد، استفاده از ابزار پیشرفته و تکنولوژی روز دنیا، تحقیقات و انجام آزمایش‌های دقیق در زمینه فرآیند برش می‌تواند تا حدی باعث حل این معضل در صنعت فرآوری سنگ شود. در این رابطه ارزیابی و پیش‌بینی سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی و تعیین عوامل مؤثر بر آن، در کاهش هزینه‌های تولید و افزایش عمر مفید ابزار برش در طراحی یک کارخانه فرآوری سنگ از اهمیت بالایی برخوردار است. میزان سایش دیسک‌های الماسی به مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها و پارامترهای عملیاتی برش نظیر عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت چرخش دیسک بستگی دارد، لذا تعیین پارامترهای مؤثر در سایش دیسک‌های الماسی و پیش‌بینی آن، در برآورد هزینه‌های تولید و کاهش آن‌ها، می‌تواند باعث هدایت صنعت سنگ به سمت بهبود سرعت تولید، کیفیت بالاتر و هزینه تمام شده کم‌تر شود. با توجه به توضیحات داده شده، مشخص می‌شود که ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی و تعیین پارامترهای مؤثر در آن تأثیر به‌سزایی در بهبود فرآوری سنگ داشته و مطالعاتی از این دست لازم و ضروری می‌باشد.

در این تحقیق سعی شد پس از بررسی منابع مختلف و تحقیقات گذشته و نیز با استفاده از نکات پیشنهادی تحقیقات انجام شده در این زمینه و انجام آزمایش‌های دقیق، فرآیند برش، سایش دیسک‌های الماسی و پارامترهای مؤثر بر آن بررسی شده و سپس یک سیستم طبقه‌بندی جدید در برگیرنده تمامی مشخصات فیزیکی و مکانیکی مهم سنگ، برای ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی سخت ارائه شود. برای وزن‌دهی و تعیین پارامترهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی، از روش سیستم‌های مهندسی سنگ کلاسیک، روش نیمه عددی خبره EQC استفاده شد. چون در روش RES کلاسیک نظرات افراد خبره به صورت مطلق یا ثابت در نظر گرفته می‌شود و نیز به پراکندگی نظرات توجه نمی‌شود به منظور بهبود نتایج، نظرات افراد خبره به صورت

یک الگوی فازی با وزن‌دهی متناظر با آن به کمک نرم‌افزار Matlab مدل شد. پس از انتخاب تابع تعلق فازی گاوسی به عنوان مناسب‌ترین تابع، تابع تعلق فازی بهینه برای ارتباط متغیرهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی محاسبه شد. سطح‌بندی سایش در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی با استفاده از مقدار وزن فازی شده چهار متغیر مؤثر منتخب شامل سختی اشمیت، مقاومت فشاری تک‌محوری، ساینده‌گی لس‌آنجلس و مدول الاستیسیته، با روش‌های بازه‌بندی ثابت، تطبیقی و لگاریتمی که دو روش آخر با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شدند، صورت گرفت. براساس نتایج بدست آمده، روش تطبیقی لگاریتمی با میزان خطای کمتر به عنوان روش بهینه انتخاب شد. در مرحله بعد به منظور تایید نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی با استفاده از محاسبات نرم، به کمک الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل یک سیستم طبقه‌بندی برای سنگ‌های سخت مورد مطالعه، ارائه شد که نتایج بدست آمده از طبقه‌بندی حاصل از الگوریتم ABC، با نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی مقایسه و نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی را مورد تایید قرار داد. همچنین به منظور بررسی صحت‌سنجی سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی با استفاده از مدل فیزیکی، یک دستگاه برش سنگ جدید با امکانات خاص در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شد و به کمک نتایج بدست آمده از بررسی عملکرد برش سنگ‌های سخت مورد مطالعه توسط دستگاه مذکور و اندازه‌گیری سایش دیسک الماسی پس از هر برش، صحت‌سنجی سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی انجام پذیرفت. در مرحله بعد معنی‌داری ارتباط مشخصات فیزیکی و مکانیکی و پارامترهای عملیاتی برش (سرعت پیشروی و عمق برش) با سایش دیسک‌های الماسی، مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با توجه بررسی‌های انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی جدید قادر به ارزیابی و طبقه‌بندی سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی سخت می‌باشد.

نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به‌طور خلاصه به‌صورت زیر بیان کرد:

- با بررسی سابقه علمی موضوع و با توجه به این نکته که در ارائه یک سیستم طبقه‌بندی انتخاب مهم‌ترین مشخصات و نحوه امتیازدهی آن‌ها و رعایت عدم هم‌پوشانی متغیرها اهمیت

بالایی دارد و عدم توجه به این نکته دقت و سادگی سیستم طبقه‌بندی را پایین می‌آورد. هم‌چنین تعداد کم متغیرها در یک سیستم طبقه‌بندی موجب می‌شود تا در زمان و هزینه آزمایش‌ها صرفه‌جویی شود، لذا در این تحقیق سعی شد، در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی علاوه بر عدم هم‌پوشانی پارامترهای مؤثر، پوشش تمامی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مهم سنگ، حداقل کردن پارامترها و سهولت اندازه‌گیری پارامترهای مربوطه نیز در نظر گرفته شود.

- مطالعات آزمایشگاهی به منظور تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مورد مطالعه و تعیین پارامترهای مؤثر بر سایش دیسک الماسی انجام شد و سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی با ۴ مشخصه مهم سنگ منتخب شامل سختی اشمیت، مقاومت فشاری تک‌محوری، ساینده‌گی لس‌آنجلس و مدول الاستیسیته به نمایندگی از ۴ مشخصه سختی، مقاومتی، ساینده‌گی و خواص الاستوپلاستیسیته سنگ ارائه شد. وزن‌دهی پارامترها با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ فازی (FRES) انجام شد. به طوری که پس از انجام محاسبات مربوطه، پارامترهای سختی اشمیت، مقاومت فشاری تک‌محوری، ساینده‌گی لس‌آنجلس و مدول الاستیسیته به ترتیب با وزن‌های نهایی فازی ۴۶/۹، ۲۸/۴، ۱۷/۳ و ۷/۴ در سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفتند.

- هم‌چنین به منظور بررسی صحت و سقم نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی با استفاده از محاسبات نرم، به کمک الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل یک سیستم طبقه‌بندی براساس نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی ارائه شد. با توجه به نتایج حاصل از این الگوریتم فراابتکاری سنگ‌های مورد مطالعه به ۴ کلاس به صورت، ۶ نمونه در کلاس اول (نمونه‌های ۱، ۳، ۵، ۶، ۱۰ و ۱۴)، ۴ نمونه در کلاس دوم (نمونه‌های ۴، ۷، ۹ و ۱۱)، ۳ نمونه در کلاس سوم (نمونه‌های ۲، ۱۲ و ۱۳) و ۱ نمونه در کلاس چهارم (نمونه ۸) بر مبنای چهار پارامتر مهم و مؤثر مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص ساینده‌گی شیمازک، سختی موس و

مدول الاستیسیته کلاس بندی شدند. نتایج بدست آمده، نتایج سیستم طبقه بندی پیشنهادی را به خوبی تایید نمود.

- برای صحت سنجی نتایج سیستم طبقه بندی پیشنهادی با استفاده از یک مدل فیزیکی، یک دستگاه برش سنگ جدید در مقیاس آزمایشگاهی با امکان تغییر، اندازه گیری پارامترهای عملیاتی (عمق برش، سرعت پیشروی و سرعت محیطی)، شدت جریان مصرفی و ارتعاش های به وجود آمده در سیستم ساخته شد. مطالعات عملکرد برش بر روی ۹ نمونه سنگ ساختمانی سخت مورد مطالعه، با تغییر پارامترهای عملیاتی و اندازه گیری سایش دیسک الماسی، شدت جریان مصرفی و ارتعاش به وجود آمده در سیستم پس از هر برش انجام شد. در نهایت نتایج عملکرد برش توسط دستگاه برش مذکور برای بررسی، ارزیابی و صحت سنجی نتایج سیستم طبقه بندی جدید مورد استفاده قرار گرفت.

- در نهایت بر اساس مدل پیشنهادی، ۹ نمونه سنگ مورد بررسی در سه کلاس طبقه بندی شدند. نمونه های ۱ و ۲ در کلاس ۲ با نرخ سایش کم طبقه بندی شدند و نشان دهنده برش پذیری زیاد می باشد. به طور مشابه نمونه های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۹ در کلاس ۳ با نرخ سایش متوسط (با یک رنج سایش 0.000005 mm^3 تا 0.000008 mm^3) طبقه بندی شده اند و دارای قابلیت برش پذیری خوب می باشند. نمونه ۸ در کلاس ۴ با نرخ سایش زیاد (با سایش 0.000072 mm^3) قرار گرفته و نشان دهنده قابلیت برش پذیری ضعیف این نمونه می باشد.

- به منظور بررسی معنی داری ارتباط مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ ها و پارامترهای عملیاتی برش با سایش دیسک های الماسی، تحلیل های آماری انجام و روابطی ارائه شد. نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی به عنوان ورودی نرم افزار آماری SPSS در نظر گرفته شدند. سپس برای بررسی صحت سنجی مدل های آماری از آزمون های F و t استفاده شد. برای کنترل معنی داری مدل ها از آزمون F و برای کنترل معنی داری هر یک از متغیرهای مستقل از آزمون t و جداول مربوطه استفاده شد. مدل های ۵-۱۲، ۵-۱۵ و ۵-۱۶ ضمن تایید معنی داری روابط و متغیرهای

مستقل آن‌ها با توجه به ضریب تعیین نسبتاً خوب به ترتیب ۰/۷۷۶، ۰/۹۰۶ و ۰/۶۹۰ برای پیش‌بینی میزان سایش بر اساس مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مورد مطالعه و پارامترهای عملیاتی از میان روابط ارائه شده انتخاب شدند.

در نهایت با مقایسه نتایج حاصله از الگوریتم فرابتکاری کلونی زنبور عسل با نتایج سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی و هم‌چنین صحت‌سنجی سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی بر اساس نتایج حاصله از بررسی عملکرد برش توسط دستگاه برش سنگ ساخته شده می‌توان نتیجه گرفت که سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی جدید به خوبی قادر به ارزیابی و طبقه‌بندی میزان سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی سخت می‌باشد.

۲-۶- پیشنهادات

در زمینه تحقیق انجام شده پیشنهاداتی مطرح می‌باشد که می‌توان از آن‌ها در تحقیقات آتی استفاده کرد. از جمله مهم‌ترین این پیشنهادات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ساخت دستگاه برش تمام اتوماتیک با نصب یک موتور الکتریکی برای تغییر عمق برش به منظور افزایش دقت در تغییر عمق برش، علاوه بر تجهیزات نصب شده در دستگاه ساخته شده در این تحقیق، به منظور بالا بردن دقت در تحقیقات آتی در زمینه برش می‌تواند مؤثر باشد.
- به دلیل اهمیت بالای ارزیابی و پیش‌بینی سایش دیسک‌های دایره‌ای می‌توان در تحقیقات آتی سایش دیسک را در فرآیند برش سنگ‌های نرم نیز بررسی نمود. هم‌چنین در این مورد به منظور بالا بردن دقت اندازه‌گیری سایش این نوع دیسک که به دلیل ماهیت نوع سنگ نرم بسیار ناچیز می‌باشد، پیشنهاد می‌شود از پردازش تصویر برای اندازه‌گیری میزان سایش ایجاد شده در دیسک برش استفاده شود. بدین ترتیب مسلماً خطای اندازه‌گیری این پارامتر در مطالعات و آزمایش‌های برش به شدت کاهش می‌یابد.

- مطالعه بر روی تغییر سیال خنک‌کننده و تأثیر آن بر میزان سایش دیسک‌های برش می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. احتمالاً تغییر در سیال خنک‌کننده که در حال حاضر بطور معمول از آب استفاده می‌شود، در کاهش میزان سایش دیسک برش و نهایتاً کاهش هزینه‌های تولید و بهبود سطح برش مؤثر است. هم‌چنین با توجه به کاهش منابع آب می‌توان روی بهینه‌سازی مصرف سیال خنک‌کننده و برگشت آب مصرفی نیز تحقیق نمود.

مراجع

- اصانلو، م. (۱۳۸۶)، "روش‌های حفاری"، چاپ سوم، مرکز نشر صدرا.
- اسدزاده، گ.، معماریان، ح. (۱۳۸۵)، "بررسی ارتباط بین میزان سایش و بافت سنگ در نمونه‌هایی از سنگ‌های ساختمانی ایران"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۰، شماره ۱، ۹۳-۱۰۳.
- خالوکاکی، ر.، زرارع نقدهی، م. (۱۳۸۸)، "تحلیل و رده‌بندی پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی مشرف به جاده گردنه خوش بیلاق با استفاده از رویکرد سیستمی"، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد دوم، شماره ۱ و ۲، ص: ۱۹-۲۳.
- میکائیل، ر.، عطایی، م. و یوسفی، ر. (۱۳۹۱)، "ارائه رابطه‌های آماری برای پیش‌بینی قابلیت برش دیسکی سنگ‌های ساختمانی"، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن. دوره هفتم، شماره چهاردهم.
- وفائیان، م. (۱۳۷۱)، "مکانیک سنگ"، انتشارات دانشگاه یزد.
- یوسفی، ر. (۱۳۸۵)، "تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر سایش ابزار در فرآیند برش سنگ گرانیت یزد"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۰، شماره ۶.
- Almasi, S. N., Bagherpour, R., Mikaeil, R., and Ozcelik, Y., (2017a), "Analysis of bead wear in diamond wire sawing considering the rock properties and production rate". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*: 1-15.
- Almasi, S. N., Bagherpour, R., Mikaeil, R., Ozcelik, Y., and Kalhori, H., (2017b), Predicting the Building Stone Cutting Rate Based on Rock Properties and Device Pullback Amperage in Quarries Using M5P Model Tree". *Geotechnical and Geological Engineering*: 1-16.
- Amaral, P. M., Fernandes, J. C., and Rosa, L. G., (2009), "Wear mechanisms in materials with granitic textures, applicability of a lateral crack system model". *Wear*, 266(7): 753-764.
- Aryafar, A., and Mikaeil, R., (2016), "Estimation of the ampere consumption of dimension stone sawing machine using of artificial neural networks. *Int. Journal of Mining & Geo-Engineering*. 50(1): 121-130.
- Aslantas, K., Özbek, O., Uçun, İ., and Büyüksağ, İ. S., (2009), "Investigation of the effect of axial cutting force on circular diamond sawblade used in marble cutting process". *Materials and Manufacturing Processes*. 24(12): 1423-1430.

Ataei, M., Mikaeil, R., Sereshki, F., and Ghaysari, N., (2012a), "Predicting the production rate of diamond wire saw using statistical analysis". *Arabian Journal of Geosciences*, 5(6): 1289-1295.

Ataei, M., Mikaeil, R., Hoseinie, S. H., and Hosseini, S. M., (2012b), "Fuzzy analytical hierarchy process approach for ranking the sawability of carbonate rock". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 50: 83-93.

Atici, U., and Ersoy, A., (2009), "Correlation of specific energy of cutting saws and drilling bits with rock brittleness and destruction energy". *Journal of Materials Processing Technology*. 209(5): 2602-2612.

Aydin, G., Karakurt, I., and Aydiner, K., (2013), "Wear performance of saw blades in processing of granitic rocks and development of models for wear estimation". *Rock mechanics and rock engineering*. 46(6): 1559-1575.

Birle, J. D., and Ratterman, E., (1986), "An approximate ranking of the sawability of hard building stones based on laboratory tests". *Dimensional Stone Magazine*. 3: 3-29.

Buttner, A., (1974), "Diamond tools and stone". *Industrial Diamond Review*. 34: 89-93.

Buyuksagis, I. S., and Goktan, R. M., (2005), "Investigation of marble machining performance using an instrumented block-cutter". *Journal of Materials Processing Technology*. 169(2): 258-262.

Buyuksagis, I. S., (2007), "Effect of cutting mode on the sawability of granites using segmented circular diamond sawblade". *Journal of Materials Processing Technology*. 183(2): 399-406.

Ceylanoglu, A., and Gorgulu, K., (1997), "The performance measurement results of stone cutting machines and their relations with some material properties". In *Proc. of the sixth international symposium on mine planning and equipment selection*, Rotterdam, Balkema: 393-398.

Dawes, J., (2008), "Do Data Characteristics Change According to the number of scale points used? An experiment using 5-point, 7-point and 10-point scales". *International Journal of Market Research*. 50 (1): 61-77.

Delgado, N. S., Rodríguez-Rey, A., del Río, L. S., Sarriá, I. D., Calleja, L., and de Argandona, V. R., (2005), "The influence of rock microhardness on the sawability of Pink Porrino granite (Spain)". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 42(1): 161-166.

Engels, A., (2003), "The role of particles per carat in diamond tool behaviour". IDR. Industrial diamond review. (2): 39-45.

Ersoy, A., & Waller, M. D., (1995), "Textural characterisation of rocks". engineering geology. 39(3-4): 123-136.

Ersoy, A., and Atıcı, U., (2004), "Performance characteristics of circular diamond saws in cutting different types of rocks." Diamond and Related Materials. 13.1: 22-37.

Ersoy, A., Buyuksagic, S., and Atici, U., (2005), "Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard abrasive rocks". Wear. 258(9): 1422-1436.

Ertingshausen, W., (1985), "Wear processes in sauring hard stone. IDR". Industrial diamond review. 45(510): 254-258.

Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M. and Stahl, D., (2011), Miscellaneous Clustering Methods, in Cluster Analysis, 5th Edition, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.

Eyuboglu, A. S., Ozcelik, Y., Kulaksiz, S. and Engin, I. C., (2003), "Statistical and microscopic investigation of disc segment wear related to sawing Ankara andesites. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(3): 405-414.

Fener, M., Kahraman, S., and Ozder, M. O., (2007), "Performance prediction of circular diamond saws from mechanical rock properties in cutting carbonate rocks". Rock Mechanics and Rock Engineering. 40(5): 505-517.

Haghshenas, S. S., Haghshenas, S. S., Mikaeil, R., Moghadam, P. S., and Haghshenas, A. S., (2017), "A New Model for Evaluating the Geological Risk Based on Geomechanical Properties-Case Study: The Second Part of Emamzade Hashem Tunnel". 22(1), 309-320. Available at ejge.com.

Hudson, J., (1992), "Rock engineering systems". *Theory and practice*.

ISRM. ISRM suggested methods. In: Brown ET, editor. Rock characterization testing and monitoring. Oxford: Pergamon; 1981.

Jennings, M. and Wright, D., (1989), "Guidelines for sawing stone." Industrial Diamond Review. 49.2: 70-5.

Jimeno, E. Lopez, C. and Ayala, C., (1995), Drilling and blasting of rocks. CRC Press.

Jonathan, P., (2017), "Chapter 7 - Theoretical probability distributions, In Introduction to Business Analytics using Simulation", Academic Press. Boston: 151-195.

Kahraman, S., Fener, M., and Gunaydin, O., (2004), "Predicting the sawability of carbonate rocks using multiple curvilinear regression analysis". International journal of rock mechanics and mining sciences. 41(7): 1123-1131.

Kahraman, S., Ulker, U., and Delibalta, M. S., (2007), "A quality classification of building stones from P-wave velocity and its application to stone cutting with gang saws". *Journal-South African Institute of Mining and Metallurgy*. 107(7): 427.

Kandethody, M. R. and Chris, P. T., (2015), "Chapter 7 - Goodness-of-Fit Tests Applications, In *Mathematical Statistics with Applications in R (Second Edition)*, Academic Press, Boston: 371-408.

Karaboga, D., Gorkemli, B., Ozturk, C. and Karaboga, N., (2014), "A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications". *Artificial Intelligence Review*. 42(1): 21-57.

Karakurt, I., Aydin, G. and Aydiner, K., (2014), "An investigation on the kerf width in abrasive waterjet cutting of granitic rocks. *Arabian Journal of Geosciences*". 7(7); 2923-2932.

Konstanty, J., (1991), "The materials science of stone sawing". *IDR. Industrial diamond review*. 51(542): 27-31.

Konstanty, J., (2002), "Theoretical analysis of stone sawing with diamonds". *Journal of materials processing technology*. 123(1): 146-154.

KhaloKakaie, R., and Naghadehi, M. Z., (2012), "Ranking the rock slope instability potential using the Interaction Matrix (IM) technique; a case study in Iran." *Arabian Journal of Geosciences*. 5.2: 263-273.

Li, S., Yukio, O. and Vladik, K., (2013) , "Limit theorems and applications of set-valued and fuzzy set-valued random variables". Vol. 43. Springer Science & Business Media.

Lloyd, S., (1982), "Least squares quantization in PCM". *IEEE transactions on information theory*. 28(2): 129-137.

Lotfi. Z, A., (1965), "Fuzzy sets, *journal of Information and contro*"l. Page 19-34.

Lotfi. Z, A., (1968), "Fuzzy algorithms, *journal of Information and contro*"l. Vol 12, page 94-102.

Lotfi. Z, A., (1970), "Decision Making in Fuzzy Environment, *journal of Management science*". Vol 17 Page 141-164.

Lotfi. Z, A., (1971), "Theory of Fuzzy Sets and its Application, *Proceedings*". Page 408.

Lotfi. Z, A., (1973), "Outline of a new approach to the analysis of complex system and decision".

Luo, S. Y., and Liao, Y. S., (1995), "Study of the behaviour of diamond saw-blades in stone processing." *Journal of materials processing technology*. 51.1-4: 296-308.

Luo, S. Y., (1997), "Investigation of the worn surfaces of diamond sawblades in sawing granite. *Journal of materials processing technology*. 70(1-3): 1-8.

Masashi, S., (2016), " Chapter 12 - Maximum Likelihood Estimation, In *Introduction to Statistical Machine Learning*", Morgan Kaufmann, Boston: 123-138.

Mazzoccola, D. F., and J. A. Hudson., (1996), "A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability." *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 29.1: 37-56.

Mikaeil, R., Yousefi, R. and Ataei, M., (2011a), "Sawability ranking of carbonate rock using fuzzy analytical hierarchy process and TOPSIS approaches". *Scientia Iranica*. 18(5): 1106-1115.

Mikaeil, R., Ozcelik, Y., Ataei, M. and Yousefi, R., (2011b), Correlation of specific ampere draw with rock brittleness indexes in rock sawing process. *Archives of Mining Sciences*. 56(4): 777-788.

Mikaeil, R., Yousefi, R., Ataei, M. and Farani, R. A., (2011c), "Development of a new classification system for assessing of carbonate rock sawability". *Archives of Mining Sciences*. 56(1): 59-70.

Mikaeil, R., Ataei, M., Ghadernejad, S. and Sadegheslam, G., (2014), "Predicting the relationship between system vibration with rock brittleness indexes in rock sawing process". *Archives of Mining Sciences*. 59(1): 139-153.

Mikaeil, R., Abdollahi Kamran, M., Sadegheslam, G. and Ataei, M., (2015), "Ranking sawability of dimension stone using PROMETHEE method". *Journal of Mining and Environment*. 6(2): 263-271.

Mikaeil, R., Haghshenas, S. S., Haghshenas, S. S. and Ataei, M., (2016), "Performance prediction of circular saw machine using imperialist competitive algorithm and fuzzy clustering technique". *Neural Computing and Applications*: 1-10.

Naghadehi, M. Z., Jimenez, R., KhaloKakaie, R. and Jalali, S. M. E., (2011), "A probabilistic systems methodology to analyze the importance of factors affecting the stability of rock slopes". *Engineering Geology*. 118, no. 3: 82-92.

Naghadehi, M. Z., Jimenez, R., KhaloKakaie, R. and Jalali, S. M. E., (2013), "A new open-pit mine slope instability index defined using the improved rock engineering systems approach." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 61:

1-14.

Nakagawa, S., and Innes C. C., (2007), "Effect size, confidence interval and statistical significance: a practical guide for biologists." *Biological Reviews* 82.4: 591-605.

Özçelik, Y., (2007), "The effect of marble textural characteristics on the sawing efficiency of diamond segmented frame saws". *IDR. Industrial diamond review*, (2).

Pai, D. M., (1987), "A fundamental study of the diamond sawing of rock" (Doctoral dissertation, Arizona State University).

Rafiee, R., Ataei, M. and KhalooKakaie, R., (2015), "A new cavability index in block caving mines using fuzzy rock engineering system." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 77: 68-76.

Rafiee, R., Ataei, M., KhaloKakaie, R., Jalali, S. M. E., and Sereshki, F., (2016), "A fuzzy rock engineering system to assess rock mass cavability in block caving mines." *Neural Computing and Applications*. 27, no. 7: 2083-2094.

Rozos, D., Pyrgiotis, L., Skias, S., and Tsagaratos, P., (2008). An implementation of rock engineering system for ranking the instability potential of natural slopes in Greek territory. An application in Karditsa County. *Landslides*, 5(3): 261-270.

Stipčević, M., and Çetin, K. K., (2014), "True random number generators." *Open Problems in Mathematics and Computational Science*. Springer International Publishing,. 275-315.

Sun, L., Pan, J., and Lin, C., (2002), "A new approach to improve the performance of diamond sawblades". *Materials Letters*. 57(4): 1010-1014.)

Terán, P., (2007), "Probabilistic foundations for measurement modelling with fuzzy random variables." *Fuzzy Sets and Systems*. 158, no. 9: 973-986.

Thuro, K., (1997), "Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunnelling". *Geologische Rundschau*. 86(2): 426-438.

Tönshoff, H. K., Hillmann-Apmann, H. and Asche, J., (2002), "Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications". *Diamond and Related Materials*. 11(3): 736-741.

Turchetta, S., (2012), "Cutting force and diamond tool wear in stone machining". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 61(5): 441-448.

Tutmez, B., Kahraman, S. and Gunaydin, O., (2007), "Multifactorial fuzzy approach to the sawability classification of building stones". *Construction and Building Materials*. 21(8): 1672-1679.

Tyagi, S., Agrawal, S., Yang, K. and Ying, H., (2017), "An extended Fuzzy-AHP approach to rank the influences of socialization-externalization-combination-internalization modes on the development phase", *Applied Soft Computing*, Volume 52: ۵۰۵-۵۱۸.

Von Bertalanffy, L., (1968), "Organismic psychology and systems theory". Worcester: Clark University Press,.

Walck, C., (2007), "Handbook on statistical distributions for experimentalists". 153 p.

Wei, X., Wang, C. Y. and Zhou, Z. H., (2003), "Study on the fuzzy ranking of granite sawability". *Journal of Materials Processing Technology*, 139(1), 277-280.

Wright, D. N. and Cassapi, V. B., (1985), "Factors influencing stone sawability". *Industrial Diamond Review*. 45(2): 84-87.

Wright, D. N., Wapler, H. and Tönshoff, H. K., (1986), "Investigations and prediction of diamond wear when sawing". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 35(1): 239-244.

Yılmaz, N. G., (2011), "Abrasivity assessment of granitic building stones in relation to diamond tool wear rate using mineralogy-based rock hardness indexes". *Rock mechanics and rock engineering*. 44(6): 725 p.

Zerafat. A, M., Tajaddini, A., Mustafa, A., Jalal Kamali, M., (2012), " Ranking alternatives in a preferential voting system using fuzzy concepts and data envelopment analysis", *Computers & Industrial Engineering*. Volume 63, Issue 4, December: 784-۷۹۰.

پیوست ۱

۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها و مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین آن‌ها

در مهندسی سنگ، همواره انتخاب پارامترهای مهم و ترکیب این پارامترها در کنار یکدیگر، یکی از مهم‌ترین مراحل یک تحقیق است. آگاهی از خواص سنگ برای انتخاب دیسک، ماشین برش و شرایط عملیاتی ضروری است. همچنین دانستن این که آیا یک سنگ خاص می‌تواند توسط یک تیغه دیسک معین بریده شود نیز اهمیت دارد (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴). با توجه به گستردگی مشخصات سنگ می‌توان آن را به سه دسته مشخصات فیزیکی، مکانیکی و خواص بافتی (ساختاری) تقسیم‌بندی کرد. به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگ مورد مطالعه و تعیین پارامترهای مورد نظر، از هر نمونه سنگ بلوک‌های سنگی با ابعاد مناسب تهیه و به آزمایشگاه منتقل شدند. در مجموع از ۹ نمونه سنگ ساختمانی سخت، که تقاضای قابل توجهی در بازار دارند، نمونه‌برداری به عمل آمد. تمام آزمایش‌ها تحت استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) و با دقت مطلوب انجام داده شد.

۱-۱- مشخصات فیزیکی سنگ

شناخت ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌ها از ابتدایی‌ترین بخش مطالعه سنگ‌ها است، زیرا خواص فیزیکی تقریباً با تمام بخش‌های دیگر به نحوی در ارتباط است. مشخصات سنگ مانند چگالی، اندازه و شکل دانه‌ها، تخلخل، درصد کوارتز، ضریب بافت و نوع و درجه سیمانی شدن مهم‌ترین مشخصات فیزیکی سنگ‌ها می‌باشند. با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی می‌توان نحوه رفتار سنگ و توده‌های سنگ را ارزیابی نمود.

الف) چگالی

چگالی یک سنگ عبارت است از نسبت بین جرم مخصوص سنگ (ρ_S) به جرم مخصوص آب (ρ_W) یا نسبت بین وزن مخصوص سنگ (γ_S) به وزن مخصوص آب (γ_W)، چون چگالی واحد ندارد، کاربرد آن ساده بوده و استفاده از آن در محاسبات بیش‌تر است. چگالی سنگ در رابطه ۱ آمده است.

$$S_G = \frac{\rho_S}{\rho_W} = \frac{\gamma_S}{\gamma_W} \quad (1)$$

که در این رابطه S_G چگالی و فاقد واحد است (اصانلو، ۱۳۸۶). چگالی سنگ به ترکیب و ساختمان شیمیایی آن بستگی دارد. معمولاً سنگ‌های با کانی‌های سنگین چگالی بیشتری دارند. چگالی سنگ با مقاومت سنگ و سرعت نفوذپذیری رابطه مستقیم دارد. هر چه سنگ متراکم‌تر باشد، سرعت نفوذپذیری کمتر خواهد بود و بالعکس. به‌طور کلی هر چه سنگ متراکم‌تر و چگال‌تر باشد، قابلیت برش‌پذیری آن کمتر خواهد بود.

ب) بافت

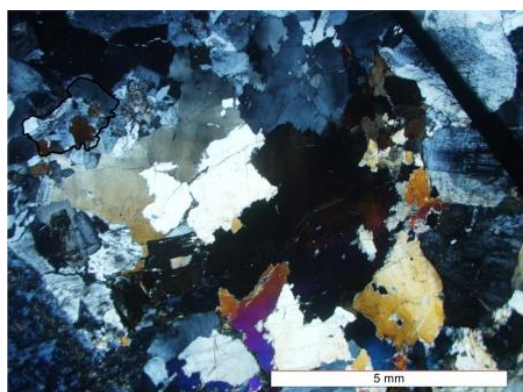
بافت سنگ گویای ساختمان درونی سنگ است. ممکن است تحت تأثیر اشکال و اندازه‌های مختلف ذرات و کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ، در سنگ‌های مختلف به شکل‌های گوناگون مشاهده شود (اصانلو، ۱۳۸۶). بافت یکی از فاکتورهای مهم و اساسی در رفتار مهندسی سنگ، به ویژه در فرآیند برش و سایش ابزار الماسی است. این عامل در انتخاب درست ماشین‌آلات برش و دیسک، تعیین رفتار مکانیکی و پیش‌بینی عملکرد تجهیزات برش می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. از میان مشخصات بافت، شکل دانه‌های سنگ مهم‌ترین پارامتر مؤثر در قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها می‌باشد. از جمله مشخصات دیگر بافت می‌توان به اندازه، شکل، جهت یافتگی، نسبت دانه‌ها و ماتریس سنگ اشاره کرد. البته در این میان اندازه دانه‌ها نیز اهمیت زیادی دارد، زیرا ترک‌های جانبی (عرضی) عمدتاً در مرز دانه‌ها رشد کرده و گسترش می‌یابند و هرچه اندازه دانه‌ها بزرگ‌تر باشد، اندازه تراشه‌های ثانویه تشکیل شده نیز بزرگ‌تر می‌شود. دانه‌های گوشه‌دار و ذرات ریز سنگ‌ها سبب کاهش نرخ برش و افزایش قابلیت سایش (ساینده‌گی) سنگ‌ها می‌شوند (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴).

• ضریب بافت

درصدهای متفاوتی از کانی‌های مختلف، اجزای اصلی سنگ را تشکیل می‌دهند. سنگ یک ماده ناهمگن و به ندرت همگن می‌باشد. خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ، با کانی‌های تشکیل‌دهنده و خصوصیات بافتی آن (اندازه دانه‌ها، شکل دانه‌ها، جهت یافتگی دانه‌ها و غیره) بستگی زیادی دارد.

– نمونه‌های بررسی شده

به منظور بررسی رابطه بافت سنگ و سایش ابزار برش، ۹ نمونه سنگ ساختمانی سخت مورد مطالعه، مورد بررسی قرار گرفت. پیش نیاز ایجاد رابطه بین ضریب بافت و سایش سنگ، شناسایی کانی‌ها و بافت نمونه‌ها است. به همین منظور، جهت مطالعه کانی‌شناسی میکروسکوپی نمونه‌ها، مقاطع نازک آنها مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ای از مقطع نازک تهیه شده، در شکل ۱ نشان داده شده است. با استفاده از این مقاطع نوع و درصد کانی‌های تشکیل‌دهنده، میزان کوارتز محتوی معادل هر سنگ برای تعیین مشخصات ساینده‌گی و سختی محاسبه شدند.

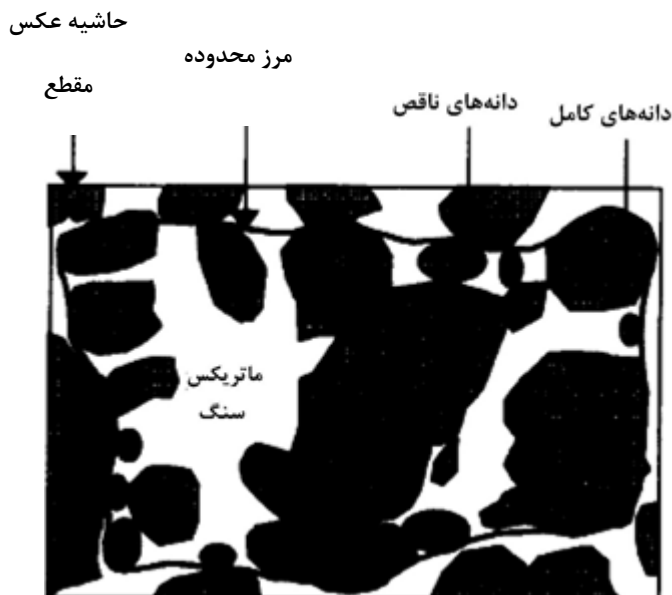


شکل ۱- فرمت دیجیتال از مقطع نازک نمونه سنگ مشکی الموت

– اندازه گیری و محاسبه ضریب بافت سنگ‌ها

به منظور محاسبه ضریب بافت سنگ، به عنوان پارامتری کمی در شناخت بافت سنگ‌های مختلف، پس از تهیه مقاطع نازک، با استفاده از یک میکروسکوپ پلاریزان با نور عبوری، از هر یک از مقاطع نازک عکس گرفته شد، این عکس‌ها سپس توسط یک اسکنر با قدرت بزرگ‌نمایی بالا، اسکن شدند. سایر مطالعات مربوط به محاسبه ضریب بافت خارج از میکروسکوپ و به‌طور دستی و یا توسط کامپیوتر صورت گرفت. به منظور اندازه‌گیری پارامترهای هندسی دانه‌های موجود در سنگ نیز از نرم‌افزار اتوکد استفاده شد. در مرحله بعد، هر یک از عکس‌ها به صورت رقومی در آمدند. جهت رقومی کردن عکس‌ها ابتدا یک محدوده مرجع یا محدوده دید بر روی مقاطع مشخص شد. محدوده مرجع محدوده‌ای است که در آن تنها دانه‌های کامل قرار می‌گیرند و دانه‌های ناقص که قسمتی از آنها از عکس بیرون است را شامل نمی‌شود، شکل ۱ یک محدوده مرجع نمونه را نشان می‌دهد. در لایه‌ای

دیگر مرز دانه‌ها بر روی تصویر اصلی رسم گردید و سپس دانه‌ها شماره‌گذاری شد. لازم به ذکر است که تعداد دانه‌ها به صورتی انتخاب گردید که بتوان آنها را به عنوان یک نمونه معرف از کل دانه‌های مقطع نازک تلقی کرد. برای هر یک از دانه‌ها پارامترهایی چون محیط دانه، مساحت دانه، قطر بزرگ، قطر کوچک و مساحت محدوده مرجع، اندازه‌گیری و محاسبه گردید. برای محاسبه قطر بزرگ و قطر کوچک دانه، فاصله دو خط موازی مماس بر هر دانه در چندین جهت مختلف اندازه‌گیری شد (شکل ۲)، و در نهایت بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین این فواصل به عنوان قطر بزرگ و قطر کوچک، در نظر گرفته شدند. سپس از نتایج حاصل از محاسبات مذکور پارامترهای موجود در رابطه ضریب بافت (رابطه ۲)، تعیین شده و میزان ضریب بافت محاسبه می‌شود.



شکل ۲- شمای کلی یک مقطع نازک برای محاسبه ضریب بافت (Ersoy & Waller, 1995)

پس از اندازه‌گیری مشخصات بلورها، ضریب بافت از رابطه زیر محاسبه شد:

$$TC = AW \times \left[\left(\frac{N_0}{N_0 + N_1} \times \frac{1}{FF_0} \right) + \left(\frac{N_0}{N_0 + N_1} \times AR_1 \times AF_1 \right) \right] \quad (2)$$

که در این رابطه:

TC: ضریب بافت

AW: وزن مساحت (وزن مربوط به چگالی دانه‌ها)

N_0 : تعداد دانه‌های با نسبت طول به عرض کمتر از ۲

N_1 : تعداد دانه‌های با نسبت طول به عرض بیشتر از ۲

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 برای تمام دانه‌های N_1 (کیفیت جهت یافتگی دانه‌ها را تعیین می‌کند)

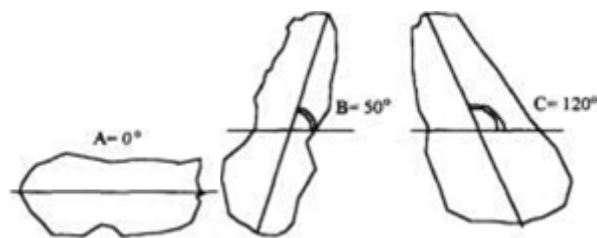
وزن مساحت (AW) به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$AW = \frac{\text{مساحت دانه های درون مرز محدوده مرجع}}{\text{مساحت محدوده مرجع}} \quad (3)$$

فاکتور شکل در رابطه ضریب بافت معرف انحراف دانه از حالت کروی بودن است، این انحراف به دو صورت به وجود می‌آید: درازشدگی شکل یا افزایش ناصافی سطح نمونه. فاکتور شکل یا کشیدگی دانه از رابطه ۴ قابل محاسبه است:

$$AF = \frac{\text{مربع (محیط)}}{\text{مساحت}} = \text{فاکتور شکل} \quad (4)$$

مفهوم فاکتور زاویه مطابق شکل ۳ عبارت است از زاویه بین قطر بزرگ دانه و جهت افق. ماکزیمم مقدار این زاویه ۱۸۰ درجه است. جهت یافتگی زاویه دانه‌ها توسط کمی کردن فاکتور زاویه به دست می‌آید. این فاکتور فقط برای دانه‌های کشیده و طویل، که در آن‌ها نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک، بیش از ۲ است، محاسبه می‌شود.



شکل ۳- مفهوم فاکتور زاویه

فاکتور زاویه AF_1 توسط سیستم وزن دهی موجود در جدول ۱ طبقه‌بندی شده است. این سیستم تفاوت زاویه بین همه دانه‌های کشیده را با دقت و به‌طور مطلق محاسبه می‌کند. تفاوت زاویه‌ای در ۹

کلاس مختلف، یک وزن وجود دارد. فاکتور زاویه از جمع کلاس‌ها و تقسیم آنها بر کل اعداد زاویه‌ای به شرح رابطه ۵ محاسبه می‌شود (اسدزاده و معماریان، ۱۳۸۵):

$$AF_1 = \frac{1}{\sigma} \sum_{i=1}^n \left[\frac{X_i}{N(N-1)} \right]^i \quad (5)$$

که در این رابطه:

N : تعداد کل دانه‌های دارای کشیدگی ($N_1=N$)

X_i : تعداد اختلافات زاویه‌ای در هر کلاس

i : فاکتور وزن‌دهی و شماره کلاس

جدول ۱- روش وزن‌دهی به تفاوت‌های زاویه‌ای دانه‌های کشیده (Ersoy & waller, 1995)

ردیف	دامنه	وزن (i)
۱	$0 < \theta_{D_{MAX}} \leq 10$	۱
۲	$10 < \theta_{D_{MAX}} \leq 20$	۲
۳	$20 < \theta_{D_{MAX}} \leq 30$	۳
۴	$30 < \theta_{D_{MAX}} \leq 40$	۴
۵	$40 < \theta_{D_{MAX}} \leq 50$	۵
۶	$50 < \theta_{D_{MAX}} \leq 60$	۶
۷	$60 < \theta_{D_{MAX}} \leq 70$	۷
۸	$70 < \theta_{D_{MAX}} \leq 80$	۸
۹	$80 < \theta_{D_{MAX}} \leq 90$	۹

در جدول ۲ مقادیر محاسبه شده ضریب بافت (Tc) برای نه نمونه سنگ مورد مطالعه آمده است.

جدول ۲- مقادیر ضریب بافت نه نمونه سنگ مورد مطالعه

شماره	نوع و نام سنگ	Tc
۱	مشکی نطنز	۱/۵۷

۱/۰۱	نهبدان آستان	۲
۱/۳۴	نهبدان طوسی آستان	۳
۱/۵۷	مشکی الموت	۴
۱/۵۹	آبی نهبدان	۵
۱/۳۸	گل پنبه ای سفید نطنز	۶
۱/۵۸	مشکی همدان	۷
۱/۹۸	سبز جنگلی بیرجند	۸
۱/۴۷	گرانیت سبز یزد	۹

ج) تخلخل

سنگ‌ها حاوی مقداری خلل و فرج به صورت حفره‌های تقریباً مرتبط و یا حفره‌های مجزا و شکاف‌هایی هستند. وجود این حفره‌ها اهمیت زیادی در خواص مکانیکی سنگ‌ها دارد. به‌طور کلی هر چه تخلخل سنگ بیشتر باشد مقاومت مکانیکی آن کمتر است. به همین دلیل یکی دیگر از پارامترهای فیزیکی مهم در زمینه قابلیت برش سنگ‌ها و سایش ابزار، تخلخل سنگ می‌باشد. تخلخل یک سنگ به شکل و اندازه دانه‌های تشکیل‌دهنده آن، تنوع دانه‌ها، سیمانه شدن آن‌ها و نوع و تجمع کانی‌ها بستگی دارد. هرچه مقدار این درزه‌ها و تخلخل بیشتر باشد تراشه‌های ثانویه راحت‌تر تشکیل شده و سایش ابزار کمتر خواهد بود.

د) نیروهای به هم چسبی (نوع و درجه سیمانی شدن)

یکی از ویژگی فیزیکی سنگ‌ها، یعنی نیروی به هم چسبی، حاصل نیروی جاذبه بین مولکول‌های یک جسم یا ماده است. استحکام و چسبندگی بین دانه‌ها هرچه بیشتر باشد تشکیل و رشد ترک‌های جانبی کاهش یافته و نیز ضخامت تراشه تحت نفوذ دانه الماس نیز کاهش یافته و باعث کاهش نرخ برش می‌شود. بدیهی است با افزایش کیفیت سیمانه‌شدن و نیز افزایش مقاومت سنگ، قابلیت برش سنگ کاهش و سایش ابزار الماسی افزایش می‌یابد (اصانلو، ۱۳۸۶).

۲-۱- مشخصات مکانیکی سنگ‌ها

الف) پارامترهای مقاومتی سنگ

مقاومت را می‌توان میزان پایداری سنگ در مقابل تنش‌های خارجی دانست که این تنش‌ها ممکن است در حالت سکون (استاتیکی) یا متحرک (دینامیکی) روی سنگ تأثیر بگذارند. تنش ممکن است از نوع فشاری، کششی، خمشی یا برشی باشد. به‌طور طبیعی، سنگ در مقابل تنش‌های فشاری مقاومت بیش‌تری نشان می‌دهد. میزان مقاومت برشی هر سنگ حدود ده درصد مقاومت فشاری همان سنگ است. عوامل مؤثر در مقدار مقاومت فشاری سنگ‌ها عبارتند از: نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ و شرایط استقرار آن‌ها، درجه هوازدگی یا آلتراسیون سنگ‌ها، نیروهای بین مولکولی ذرات تشکیل‌دهنده آن‌ها، وجود عواملی مانند درزه و شکاف در سنگ‌ها، خواص الاستیکی و پلاستیکی سنگ‌ها و جهت و میزان نیروهای وارده به سنگ‌ها (اصانلو، ۱۳۸۶). یکی از عوامل مقاومتی سنگ، مقاومت فشاری می‌باشد که می‌توان آن را مهم‌ترین و پرکاربردترین ویژگی سنگ دانست که در اکثر طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ مورد استفاده قرار گرفته است. یکی دیگر از عوامل مقاومتی سنگ‌ها، مقاومت کششی سنگ است که در واقع ماکزیمم تنش کششی است که یک سنگ می‌تواند تحمل کند. به‌طور کلی، دو عامل مقاومت کششی و فشاری از جمله مهم‌ترین عواملی هستند که در اکثر مطالعات قابلیت برش سنگ و سایش ابزار مورد توجه قرار گرفته‌اند. علاوه بر آن‌ها پارامترهای دیگری مانند مقاومت ضربه‌ای، آزمایش بار نقطه‌ای، مقاومت خمشی و مقاومت برشی نیز در این زمینه بررسی شده‌اند. آنچه مسلم است هر چه عوامل مقاومتی سنگ افزایش یابد قابلیت برش سنگ‌ها کاهش یافته و سایش ابزار نیز افزایش می‌یابد که دلیل این امر را می‌توان به علت افزایش مقاومت مرزی دانه‌ها و ماتریس سنگ و در نهایت کاهش قدرت تراشه برداری دانه الماس دانست.

• مقاومت فشاری تک‌محوری

پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مهندسی سنگ در اکثر مطالعات مهندسی استفاده شده است. این پارامتر می‌تواند نماینده بسیاری از مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ از قبیل مقاومت، چگالی، میزان هوازدگی و نیز کیفیت و نوع ماتریس سنگ باشد. از

طرفی آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری یک آزمایش بسیار شناخته شده و قابل دسترس است که با وجود ظاهری ساده، انجام دقیق آن بسیار مشکل است. معمولاً کمتر اتفاق می‌افتد که در پروژه‌های مقاومت فشاری تک‌محوری مورد نیاز نباشد. مقاومت ماده سنگ به عنوان یک پارامتر اصلی در اکثر سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ مورد توجه قرار گرفته است. مقاومت فشاری تک‌محوری نامحسوس بالاترین مقدار تنشی است که یک نمونه استوانه‌ای سنگ می‌تواند تحت بار تک‌محوره تحمل نماید. این مقاومت با UCS^1 یا σ_c نشان داده می‌شود. به منظور بررسی و اندازه‌گیری این پارامتر ابتدا از هر نوع سنگ سخت انتخاب شده، ۵ نمونه استاندارد تهیه و توسط دستگاه موجود در آزمایشگاه مکانیک سنگ تحت بارگذاری قرار داده شد. در شکل ۴ پنج مغزه تهیه شده و نحوه بارگذاری انجام شده توسط دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی سنگ گرانیت آبی نهبندان آورده شده است. این پارامتر در حقیقت می‌تواند به عنوان نماینده بسیاری از مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ مانند مقاومت، چگالی، بافت، میزان هوازدگی و نیز کیفیت و نوع ماتریس سنگ باشد. همچنین آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری یک آزمایش بسیار شناخته شده و قابل دسترس است که با وجود ظاهری ساده، انجام دقیق آن بسیار مشکل است.



ب



الف

شکل ۴- الف: مغزه‌های تهیه شده و ب: آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در سنگ گرانیت آبی نهبندان

● مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی)

¹ Uniaxial Compressive Strength

پارامتر مقاومتی دیگر که اکثر محققین آن را بررسی کرده‌اند پارامتر مقاومت کششی غیر مستقیم (برزیلی)^۱ است. این آزمایش برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای سنگ بکر به‌طور غیرمستقیم بکار می‌رود. این آزمایش مبتنی بر این واقعیت تجربی است که با اعمال فشار قطری به نمونه‌های استوانه‌ای سنگ، تنش کششی در امتداد عمود بر محور بارگذاری گسترش یافته و زمانی که این تنش کششی از مقاومت کششی سنگ بیشتر شود، نمونه دچار گسیختگی می‌شود. در آزمایشگاه نمونه‌هایی با قطر حدود ۵۴ میلی‌متر و ارتفاع نمونه‌ها تقریباً برابر شعاع آن‌ها در نظر گرفته شد. تعداد ده نمونه برای هر نوع سنگ تهیه و آماده شد. سپس نمونه‌ها به گونه‌ای داخل فک‌های بارگذاری قرار گرفت که بار به‌صورت قطری به آن وارد شده و سطوح قوسی شکل طوری روی سطوح جانبی نمونه قرار گرفت که هیچ منفذی بین آنها وجود نداشته باشد. بار به‌طور پیوسته و یکنواخت به نمونه‌ها وارد شد. این کار بر روی ۹ نوع سنگ سخت بر اساس استاندارد بین‌المللی ISRM توسط فک‌های بارگذاری قوسی شکل انجام گرفت. در شکل ۵ نحوه بارگذاری و نمونه شکسته شده در آزمایش برزیلی در سنگ گرانیت سبز جنگلی بیرجند مشاهده می‌شود.



ب



الف

شکل ۵- الف: نحوه بارگذاری و شکست مغزه توسط آزمایش برزیلی ب: مغزه شکسته شده توسط آزمایش برزیلی در سنگ گرانیت سبز جنگلی بیرجند

^۱- Berezilian Test

ب) سختی^۱

در اکثر پروژه‌های مهندسی مرتبط با سنگ‌ها، برای طبقه‌بندی و شناسایی سنگ‌ها و پیش‌بینی عکس‌العمل سنگ‌ها در برابر ابزار الماسی، شاخص‌های تجربی خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها سختی است. سختی تابعی از عوامل ذاتی مانند نوع کانی‌ها، مقاومت و رفتار الاستیک و پلاستیک سنگ و ابعاد دانه‌ها می‌باشد. ترکیب این عوامل، تعیین‌کننده سختی یک سنگ است. سختی عبارت است از مقاومتی که کانی یا سنگ در برابر خراش‌دهنده، از خود نشان می‌دهد تا سایش در آن ایجاد نشود. ابزار ساینده در تماس با کانی‌ها یا سنگ بوده و در اثر اعمال نیرو موجب ساییدگی کانی یا سنگ می‌شوند. از نظر خراش‌دهندگی، هم اجسام خراش‌دهنده و هم اجسام خراش‌پذیر، طبقه‌بندی شده‌اند، یعنی همه کانی‌ها یا سنگ‌ها در مقابل همه اجسام خراش‌دهنده یکسان عمل نمی‌کنند. هر چه درجه سختی و ساینده‌گی سنگ‌ها بیشتر باشد، عمر ابزار برش کوتاه‌تر و سرعت نفوذپذیری نیز کمتر می‌شود. عوامل مؤثر در افزایش یا کاهش میزان سختی سنگ شامل:

- کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ: هر چه کانی‌های سنگ سخت‌تر باشند، خراش و ساییدگی در سنگ‌ها دشوارتر ایجاد می‌شود.
- نیروی به هم چسبی: هر چه نیروی به هم چسبی کانی‌های سنگ زیادتر باشد، ابزار ساینده به انرژی بیشتری برای ایجاد خراش و سایش نیاز دارند.
- شکل دانه‌ها: دانه‌های گوشه‌دار (تیز) خاصیت ساینده‌گی بیشتری دارند و این‌گونه دانه‌ها عمر ابزار را کاهش خواهند داد.
- اندازه دانه‌ها: به‌طور معمول دانه‌های درشت تأثیر فرسایشی بیشتری روی ابزار خواهند گذاشت.
- درجه هم‌وزنی سنگ‌ها: به‌طور معمول، سنگ‌هایی که از یک کانی تشکیل شده‌اند درجه سختی کمتری دارند.

^۱ Hardness

- مقدار آب در سنگ: هر چه آب در سنگ بیش تر باشد، درجه سختی و ساینده‌گی آن کمتر است (اصانلو، ۱۳۸۶).

برای ارزیابی سختی سنگ شاخص‌های مختلفی ارائه شده است از جمله می توان به عدد چکش اشمیت، سختی موس، تست ویکرز و تست شور اشاره کرد. در معیار موس سختی کانی‌ها به صورت اعداد صحیح از ۱ تا ۱۰ در نظر گرفته شده است و در این معیار، هر کانی با عدد سختی بالاتر می‌تواند کانی با عدد سختی پائین تر را خط بیندازد. معیار تست ویکرز (نفوذ هرم الماسی در نمونه) نیز می‌تواند برای ارزیابی شاخص سختی استفاده شود. توجه به این نکته ضروری استفاده از این روش برای تعیین سختی سنگ‌های سخت نمی‌توان استفاده کرد زیرا در این نوع سنگ به دلیل سرخوردن هرم الماسی روی سطح سنگ محدودیت استفاده وجود دارد. تعیین سختی دینامیکی سنگ‌ها را می‌توان توسط تست شور تعیین نمود. در این تست، چکشی با نوک الماسی از ارتفاع معینی رها می‌شود، بر مبنای میزان برگشت چکش به حالت اولیه سختی سنگ تعیین می‌شود. به‌طور کلی با افزایش سختی، نرخ برش و قابلیت برش سنگ‌ها کاهش یافته و سایش ابزار برش افزایش می‌یابد (وفائیان، ۱۳۷۱).

در این تحقیق با توجه به امکانات موجود و مشخصات سنگ‌های مورد مطالعه دو نوع سختی چکش اشمیت و سختی موس اندازه‌گیری شد.

در روش چکش اشمیت، پلانژر^۱ یا میله چکش روی قسمت مسطح نمونه قرار گرفته و با اعمال فشار چکش به سنگ به داخل بدنه چکش فرو می‌رود که این عمل باعث فشرده شدن فنر داخل چکش می‌شود. ضامن فنر چکش در میزان انرژی تراکمی معینی آزاد شده و به وزنه‌ای که روی پلانژر قرار دارد ضربه می‌زند. ارتفاع واجهشی وزنه از روی خط‌کش خوانده شده و به عنوان مقیاسی برای تعیین سختی استفاده می‌شود. چکش اشمیت باید روی مغزه‌های NX (۵۴ میلیمتر) یا بزرگتر و یا نمونه‌های بلوکی شکل مورد استفاده قرار گیرد. حداقل ۲۰ آزمایش مجزا باید روی هر نمونه سنگ انجام گیرد

^۱ Plunger

(ISRM, 1981). نمونه‌ای از انجام تست سختی اشمیت در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۶- نمونه‌ای از تست سختی اشمیت

ج) ساینده‌گی^۱

ساینده‌گی به پاسخ سنگ‌ها نسبت به عوامل مخرب فیزیکی گفته می‌شود که در واقع مقدار فرسایش سنگ در برابر عوامل فرساینده را نشان می‌دهد. ساینده‌گی، مقیاسی برای سنجش کیفیت مصالح سنگی و نیز معیاری برای پیش‌بینی عکس‌العمل سنگ در برابر عملیات حفاری یا سنگ‌بری می‌باشد. قدرت ساینده‌گی سنگ عبارتست از مقدار تأثیر فرسایشی سنگ روی سایر موادی که با آن در تماس هستند. در فرآیند برش، ساینده‌گی به خاصیتی از سنگ اطلاق می‌شود که قادر است سگمنت‌های ابزار از جنس فولاد، کربور تنگستن یا الماس را از بین ببرد. ساینده‌گی یک سنگ تأثیر قابل توجهی روی هزینه و عمر تیغه دیسک دارد، که کنترل آن باعث می‌شود که ابزار برش تیزی‌شان را از طریق سایش از دست ندهند. بنابراین در ارزیابی آزمایش‌های برش، بررسی پتانسیل ساینده‌گی سنگ‌ها یک گام ضروری در پیش‌بینی سایش و عملکرد تیغه‌های دیسک برش می‌باشد (Ersoy & Atici, ۲۰۰۴).

در این رابطه میزان سیلیس بالا باعث افزایش سایش دیسک می‌شود. میزان سیلیس بر عملکرد سایش دیسک‌ها بسیار مؤثر بوده و تشخیص خاصیت ساینده‌گی سنگ‌ها بر اساس میزان وجود سیلیس، در حالت کلی کوارتز، امکان‌پذیر است. سنگ‌هایی مثل دولومیت یا آهک که سیلیس کمتری دارند

^۱-Abrasive

خاصیت سایندگی کمتری دارند، بالعکس سنگ‌هایی مثل ماسه‌سنگ سیلیسی که سیلیس بیش‌تری دارند، خاصیت سایندگی بیش‌تری دارند (Lou & Liao, 1994). این معیار در تعیین میزان فرسایش ماشین‌های حفاری و سنگ‌بری و تعیین عمر مفید قطعات، دارای اهمیت زیادی می‌باشد. در تولید سنگ‌های ساختمانی نیز، یکی از عوامل اصلی تعیین قیمت تمام شده اسلب سنگ، سایندگی آن است. برآورد قدرت سایندگی سنگ‌های سخت‌گرانی‌تی در برش سنگ بسیار مهم است. ترکیب کانی‌شناسی و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ بر خصوصیات سایندگی و مقاومت آنها تأثیرگذار است. در نهایت با افزایش سایندگی، نرخ برش و قابلیت برش سنگ‌ها کاهش یافته و سایش ابزار الماسی افزایش می‌یابد.

برای بررسی سایش سنگ در آزمایشگاه روش‌های متنوعی توسط محققین مختلف ارائه شده است که برخی کاربرد عمومی پیدا کرده‌اند. از مهم‌ترین آنها می‌توان به فاکتور سایندگی شیمازک^۱، آزمون سایندگی لس‌آنجلس^۲ و اندیس سایش سرشار^۳ اشاره کرد. در این تحقیق در آزمایش تعیین سایندگی لس‌آنجلس و فاکتور سایندگی شیمازک مورد بررسی قرار گرفت.

آزمایش سایندگی به روش لس‌آنجلس امروزه کاربرد وسیعی پیدا کرده است. این روش برای تعیین مقاومت مصالح سنگی در مقابل سایش همراه با ضربه به کار می‌رود. در این روش مقدار افت وزنی سنگ بر اثر ضربه و سایش در دستگاه لس‌آنجلس (شکل ۷-الف) پس از تعداد مشخصی دوران به دست می‌آید. دانه‌بندی نمونه‌های انتخابی برای قطعات کوچکتر از ۳۸ میلیمتر طبق استاندارد ISRM (جدول ۳) توسط سنگ شکن شکسته و دسته‌بندی شد (شکل ۷-ب). طبق استاندارد مذکور استوانه برای مصالح کوچکتر از ۳۸ میلیمتر ۵۰۰ دور بطور منظم و با سرعت یکنواخت دوران می‌کند. پس از پایان دوران، مواد از داخل استوانه خارج شده و با الک ۱/۷ میلیمتر (نمره ۱۲) جداسازی انجام شد. قسمت مانده روی الک ۱/۷ میلیمتر شسته شده و در دمای ۱۰۵ تا ۱۱۰ درجه

^۱-Schimazek abrasivity factor

^۲-Los Angeles abrasion test

^۳-Cerchar Abrissvness Index

سانتیگراد کاملاً خشک و سپس با ترازوی دیجیتال با دقت یک گرم وزن شد. در طول این عملیات نباید هیچ قسمتی از نمونه از دست برود و تمام نمونه تا انتهای آزمایش حفظ شود. سپس از رابطه ۶، درصد افت وزنی در اثر سایش محاسبه شد:

$$(۶) \quad \text{درصد افت وزنی در اثر سایش} = \frac{\text{وزن نهایی نمونه} - \text{وزن اولیه نمونه}}{\text{وزن اولیه نمونه}} \times 100$$



ب



الف

شکل ۷- الف: دستگاه آزمایش لس آنجلس و ب: نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش لس آنجلس

جدول ۳- دانه‌بندی نمونه‌های انتخابی برای قطعات کوچکتر از ۳۸ میلیمتر

وزن قسمت های انتخابی از هر الک (gr)	اندازه الک با سوراخ های مربعی (mm)	
نوع دانه بندی	مانده روی الک	رد شده از الک
۲۵±۱۲۵۰	۲۵/۴	۳۸
۲۵±۱۲۵۰	۲۹	۲۵/۴
۱۰±۱۲۵۰	۱۳/۲	۱۹
۱۰±۱۲۵۰	۹/۵	۱۳/۲
۱۰±۵۰۰۰	مجموع	

شاخص ساینده‌گی شیمازک با در نظر گرفتن اندازه دانه‌ها، مقاومت کششی و میزان کوارتز محتوی و نیز توجه به ترکیب کانی‌شناسی از قابلیت بالایی در ارزیابی ساینده‌گی سنگ‌ها برخوردار است. شاخص مذکور از رابطه ۷ قابل محاسبه است (Ersoy & Waller, 1995):

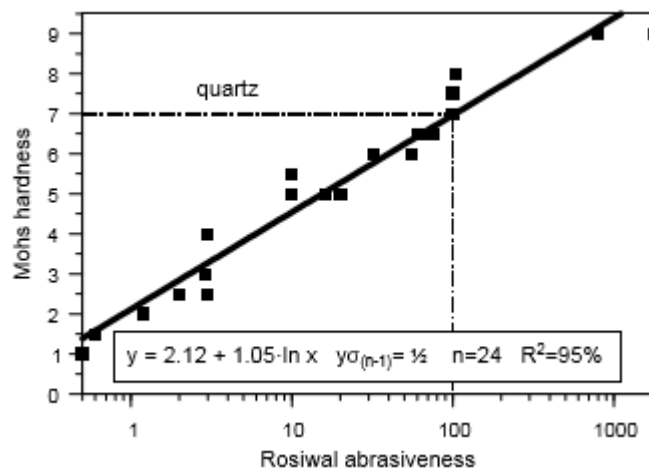
$$SF_a = \frac{Eqc \times G_s \times BTS}{100} \quad (۷)$$

که در این رابطه Eqc، درصد کوارتز محتوی سنگ، پارامتر G_s ، اندازه دانه‌ها بر حسب میلی‌متر و

BTS، مقاومت کششی غیر مستقیم (برزیلی) بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. پارامتر کوارتز محتوی در رابطه ۷ یکی از پارامترهای مؤثر مرتبط با ساینده‌گی سنگ‌ها می‌باشد که از رابطه ۸ قابل محاسبه می‌باشد:

$$Eqc = \sum_{i=1}^n A_i \cdot R_i \quad (8)$$

که در این رابطه R ساینده‌گی رزیوال^۱، A درصد کانی‌ها و n تعداد کانی‌ها می‌باشد. ساینده‌گی رزیوال سنگ را به کمک سختی موس و رابطه نشان داده شده در شکل ۸ می‌توان بدست آورد. با توجه به شکل با کاهش درصد کوارتز و یا دیگر کانی‌های موجود در سنگ ساینده‌گی سنگ به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد و همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان Eqc برای کانی کوارتز ۱۰۰٪ می‌باشد.



شکل ۸- رابطه ساینده‌گی رزیوال با سختی موس (Thuro, 1997)

د) خواص الاستیک و پلاستیک

نحوه و نوع شکست سنگ‌ها و قابلیت تغییر شکل آن‌ها به خاصیت الاستیک و پلاستیک سنگ‌ها بستگی دارد. بر اساس نحوه تغییر شکل سنگ به عنوان تابعی از تنش‌های تولید شده در اثر بارهای استاتیکی، سه گروه سنگ قابل تفکیک است (Jimeno et al., 1995):
الف) الاستیک ترد یا سنگ‌هایی که از قانون هوک تبعیت می‌کنند.

^۱- Rosiwal

ب) پلاستیک ترد که قبل از شکستن تغییر شکل پلاستیک دارند.

ج) فوق‌العاده پلاستیک یا بسیار متخلخل که در آن‌ها تغییر شکل الاستیک مشخصی وجود ندارد. اکثر کانی‌های موجود در سنگ رفتار الاستیک ترد دارند و از قانون هوک تبعیت می‌کنند. خواص الاستیک سنگ توسط مدول الاستیک مشخص می‌شود. برخی از محققین در مطالعات خود از مدول الاستیسیته (مدول یانگ) و برخی دیگر نیز از شاخص‌های تردی سنگ برای بررسی و تحلیل فرایند برش استفاده کرده‌اند. بدیهی است با تغییر مدول الاستیسیته و شاخص‌های تردی سنگ به دلیل تغییر در مکانیزم تشکیل و رشد ترک‌های جانبی در سنگ و به تبع آن تشکیل تراشه‌های ثانویه، قابلیت برش سنگ نیز تغییر می‌یابد. مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش مدول الاستیسیته و شاخص‌های تردی سنگ، مقدار قابلیت برش سنگ کاهش و میزان سایش ابزار الماسی افزایش می‌یابد. با بررسی دقیق نحوه رفتار سنگ در فرآیند تشکیل تراشه و شکست سنگ در فرآیند برش، و بررسی این نکته که نحوه رسیدن یک نمونه سنگ به مقاومت فشاری حداکثر بر سایش دیسک‌های الماسه تأثیرگذار است. الاستیسیته را می‌توان یک پارامتر مهم که رفتار خاصی در سنگ بوجود می‌آورد دانست. اگرچه این پارامتر از مشخصات دیگر سنگ نیز تأثیر می‌پذیرد، با این حال اثرگذاری آن بیشتر از تأثیرپذیری آن مورد توجه قرار می‌گیرد. مدول الاستیسیته به‌عنوان پارامتر معرف رفتار الاستیسیته سنگ مورد بررسی قرار گرفت.

پیوست ۲

آماده‌سازی اطلاعات و جامعه آماری نمونه‌ها

در ابتدا پرسش‌نامه‌ای جامع شامل تمامی متغیرهای مهم بر اساس مطالعات پیشین جمع‌آوری شد. در این پرسش‌نامه، اثر تمامی متغیرها با هم به صورت ۵ سطحی با توجه به تاثیر آنها بر سایش دیسک بر اساس نظر افراد متخصص این حوزه طراحی شده است. با توجه به مشخص بودن تابع چگالی احتمال، ضروری است حداقل تعداد نمونه مورد نیاز کنترل شود تا حاشیه اطمینان نتایج بدست آمده به اندازه کافی مناسب بوده و بتوان آن‌ها را به عنوان نتایج معنی‌دار ارائه داد.

حداقل اندازه نمونه برای آن که توزیعی طبق قضیه حد مرکزی از الگوی نرمال پیروی کند این است که باید ابعاد نمونه از ۲۰ بیش‌تر باشد. این موضوع یکی از اصول بسیار مهم برای استناد به استفاده از تابع چگالی احتمال نرمال در الگوی فازی در روش پیشنهادی محسوب می‌شود. در مورد اندازه نمونه در تابع چگالی احتمال نرمال بر اساس رابطه ۴-۲، با توجه به انحراف معیار ماکزیمم موجود در اطلاعات برداشت شده و با در نظر گرفتن یک سطح اطمینان بسیار بالا، تعداد نمونه ۳۰، به عنوان تعداد نمونه مناسب انتخاب شد.

پس از تعیین تعداد نمونه مورد نیاز طبق رابطه ۴-۲، که در این تحقیق منظور از نمونه مورد نیاز همان پرسش‌نامه و جداول RES تهیه شده می‌باشد، این پرسش‌نامه‌ها برای ۳۰ فرد خبره در زمینه برش ارسال شد. در مورد ترکیب ۳۰ فرد خبره پس از بررسی و شناسایی متخصصین و صاحب نظران در زمینه فرآیند برش و سایش دیسک تصمیم‌گیری شد که پرسش‌نامه تهیه شده برای ۲۲ نفر خبره در این زمینه در ایران و ۸ نفر متخصص از کشور ترکیه ارسال شود.

نمونه پرسش‌نامه و معرفی پارامترهای منتخب در جدول RES که برای متخصصین ایرانی و غیر ایرانی ارسال شده است در ذیل آمده است. قابل ذکر است از زمان ارسال این پرسش‌نامه‌ها تا زمان دریافت پاسخ آن پس از چندین بار پیگیری مدت ۶ ماه زمان صرف شده است.

به نام خدا

استاد گرامی جناب آقای دکتر

با سلام و احترام

با توجه به موضوع تز اینجانب تحت عنوان "ارائه سیستم طبقه بندی جدید برای ارزیابی سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)" و نیاز به تحقیق به کمک روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) و لزوم کسب نظر خبرگان امر در زمینه ارتباط و اندرکنش پارامترهای مؤثر در سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش سنگ، به پیوست ماتریس تهیه شده (شکل ۱) و جدول معرفی پارامترهای مؤثر (جدول ۱) و جدول مفهوم کدها در روش RES (جدول ۲) خدمتتان ارسال می‌گردد.

خواهشمند است با توجه به موارد ذکر شده و در نظر گرفتن " اندرکنش پارامترهای مذکور بر روی سایش دیسک‌های دایره‌ای الماسی در فرآیند برش سنگ " در صورت امکان شکل ۱ را تکمیل فرمائید.

با تقدیم احترام

مسعود اخیانی

دانشجوی دکتری معدن

دانشگاه صنعتی شاهرود

	UCS	BTS	N	ρ	W	Sf-a	Ym	EQC	TC	Gs	IRB	LA	MH
UCS	UCS												
BTS		BTS											
N			N										
P				ρ									
W					W								
Sf-a						Sf-a							
Ym							Ym						
EQC								EQC					
Tc									TC				
Gs										Gs			
IRB											IRB		
LA												LA	
MH													MH

شکل ۱- ماتریس اندرکنش پارامترهای مؤثر بر سایش دیسک‌های الماسی در فرآیند برش

جدول ۱- معرفی پارامترهای شکل ۱

توضیح	پارامترها
مقاومت فشاری تک محوری	UCS
مقاوت کششی غیرمستقیم (برزیلی)	BTS
تخلخل	N
چگالی	ρ
درصد جذب آب	W
شاخص ساینده‌گی شیمازک	Sf- a
مدول الاستیسیته	Ym
کوارتز محتوی	EQC
ضریب بافت	TC
اندازه دانه‌ها	Gs
سختی چکش اشمیت	IRB
ساینده‌گی لس آنجلس	LA
سختی موس	MH

جدول ۲- مفهوم کدهای موردنیاز در روش RES برای تکمیل شکل ۱

ارتباط جفتی پارامترها	امتیاز عددی
فاقد اندرکنش	صفر
اندرکنش ضعیف	۱
اندرکنش متوسط	۲
اندرکنش قوی	۳
اندرکنش شدید و بحرانی	۴

در ادامه نامه و پرسش نامه ارسال شده برای متخصصین غیر ایرانی آورده شده است.

۱- Introduction

Circular diamond saw (cds) is one of the major sawing machines in dimension stone processing plants. Predicting the performance of circular diamond saw is very important to estimate the cost and the planning of the stone processing plants. Performance of cds depends on some important factors such as machine and tool characteristics, physical and mechanical characteristics of rock and tool wear rate. It is necessary not only to consider individual factors, but also how these all interact together. As a means of linking the rock mechanics principles to the rock engineering applications, it is appropriate to consider how such interactions can be characterized. For rock mechanics modelling and rock engineering design for a specific project, we need to be able to identify the relevant physical variables and the linking mechanisms, and then consider their combined operation.

۲- Rock Engineering Systems Approach

Facing problems with high complexity, such that, the routine methods are incapable of solving them easily, necessitates an appeal to take advantages of rock engineering system approach (Jiao, 1995).

A systematic method for thinking about all the interactions is to list them in a matrix. This is the basic device used by the rock engineering systems (RES) approach. The principal factors considered relevant to the problem are listed along the leading diagonal of a square matrix (top left to bottom right) and the interactions between pairs of principal factors form the off-diagonal terms. Then off-diagonal terms are assigned values which describe the degree of influence of one parameter on the other parameter. The assignment of these values is called Coding the interaction matrix and the results are determined by carrying out calculations on the columns and rows of the matrix.

The figure 1-1 shows that, the parameters A and B are located in the top left and low right respectively. The top right location indicates the dominance of A on B, whereas the low left is vice versa (Hudson 1992).

A 4 x 4 interaction matrix is shown in Figure 1-2. Here the leading diagonal terms are Rock Structure, Rock Stress, Water Flow and Construction. In each of the off-diagonal terms, one example of the potential interactions is shown. The information in these off-diagonal boxes is illustrative rather than comprehensive at this stage. With N leading diagonal terms the matrix will have N(N-1) off-diagonal mechanisms (Hudson and Harrison, 1997).

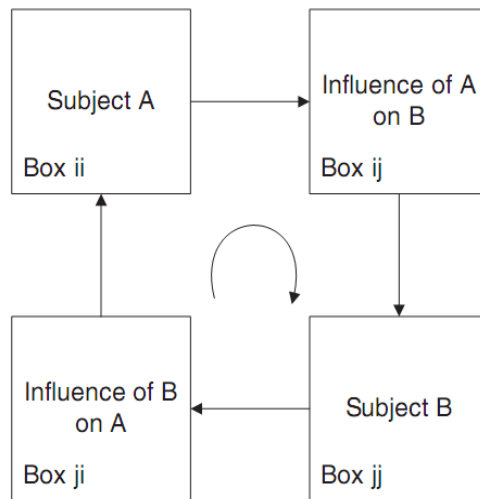


Figure 1- 1: The principle of the interaction matrix (Hudson, 1992)

Rock Mechanics - Rock Engineering 4x4 Interaction matrix			
Rock Structure F_{ij}	Fractures affect the values and orientations of the stresses	The fracture network governs the secondary permeability	Fractures can influence the size and orientation of excavations
Stresses can open or close fractures, and also create them	Rock Stress σ_{ij}	In general, the higher the normal stress, the lower the permeability	High rock stresses can cause construction failures
Continual water flow in fractures affects their properties	Normal stresses reduced by water pressure	Water Flow K_{ij}	Grouting and drainage may be required during construction
Blasting can damage old fractures and create new fractures	In the vicinity of excavations the principal stresses are altered	An excavation will always become a sink for the water flow	Const-ruction C_{ij}
The top left 3x3 matrix represents rock mechanics. When the extra leading diagonal term C_{ij} is added, the resulting 4x4 matrix represents rock engineering.			

Figure 1- 2: 4x4 interaction matrix for mechanical parameters (Hudson and Harrison, 1997)

٣- Coding the Interaction Matrix

The coding process is for the propose of quantitation of interaction of parameters on each other and making up the related matrix. There are five main methods of characterizing the significance of the off-diagonal boxes in the interaction matrix.

Dear:

I paste just the coding method that we use in this research

a) Expert semi-quantitative (ESQ):

The ESQ coding is helpful when the mechanisms cannot be quantified but an estimate of their significance can be made. The ESQ coding method has been used to establish parameter interactive intensity and dominance from the binary interaction matrix. There are five level of coding as shown in table 1-1. In this method, coding is done by a technician or an expert or a group of technicians.

Table 1- 1: Concept of codes in ESQ

Code value	Concept
0	no interaction
1	weak interaction
2	medium interaction
3	strong interaction
4	“critical” interaction

b) Matrixes intended:

Matrixes made of important parameters intended are shown in Fig. 1-3.

Please according to the above description, in the matrixes intended applied opinion and submit it for me.

Best regards.

	UCS	BTS	N	ρ	W	Sf-a	Ym	EQC	TC	Gs	IRB	LA	MH
UCS	UCS												
BTS		BTS											
N			N										
ρ				ρ									
w					W								
Sf-a						Sf-a							
Ym							Ym						
EQC								EQC					
Tc									TC				
Gs										Gs			
IRB											IRB		
LA												LA	
MH													MH

Figure 1-3:Matrix important parameters according dependent parameter Wr

c) Introduction parameters:

The parameters intended this research in table 1-2. Introduction.

Table 1-2: Introduction important parameters

Parameters	Introduction Parameters
UCS	Uniaxial Compressive Strength
BTS	Indirect Tensile Strength (Brazilian Test)
N	Porosity
ρ	Density
W	Water Content
Sf – a	Abrasiveness Index Schimazek
Ym	Modules of Elasticity
EQC	Quartz Content
TC	Texture Coefficient
Gs	Grain Size
MH	Mohs Hardness
LA	Abrasive Los Angeles
IRB	Schmidt hammer Hardness
Wr	Wear rate of Circular Diamond Saw in the Process of Cutting Stone

پیوست ۳

۱- روش فراابتکاری الگوریتم کلونی زنبور عسل

در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های فراابتکاری در حل سیستم‌های مبهم و پیچیده به دلیل توانایی این روش‌ها در تطبیق مفاهیم بهینه‌سازی با مسایل عدم قطعیت در سیستم‌های مدل‌سازی گسترش چشم‌گیری داشته است. در میان تکنیک‌های فراابتکاری، الگوریتم کلونی زنبور عسل (ABC) یکی از پرکاربردترین روش‌های تکاملی در حوزه محاسبات نرم می‌باشد. این الگوریتم اولین بار توسط کارابوگا^۱ معرفی شد و با الهام از روند زندگی زنبورهای عسل و تلاش آنها در تهیه غذا، برای بهینه‌سازی مسایل مختلف در صنعت، سیستم‌های حمل و نقل و مسایل ترافیکی مورد استفاده قرار گرفت. همان‌گونه که ذکر شد عملکرد الگوریتم کلونی زنبور عسل از روند زندگی زنبورهای عسل الهام گرفته شده است. کلونی زنبور عسل به صورت کلی از سه بخش منابع غذایی، زنبورهای کارگر و زنبورهای غیرکارگر تشکیل شده است. هم‌چنین خود زنبورهای غیرکارگر به دو بخش زنبورهای تماشاگر و پیشاهنگ تقسیم می‌شوند. زنبورهای عسل در رفتار و ساختار زندگی از یک سیستم ارتباطی پیچیده استفاده می‌کنند. ارتباط بین زنبورها توسط زبان رقص انجام می‌گیرد. زبان رقص شامل مجموعه‌ای از حرکات پشت سرهم است که توسط زنبورها انجام می‌گیرد. این رقص که واگل دنس^۲ نام دارد، حاوی اطلاعاتی در مورد کیفیت منبع، مکان و موقعیت آن می‌باشد. در ابتدا مجموعه‌ای از منابع غذایی به طور تصادفی انتخاب می‌شوند. زنبورهای کارگر به سمت منابع می‌روند و میزان شهد آنها را محاسبه می‌کنند. سپس این زنبورها به کندو بازگشته و اطلاعات خود را با زنبورهای تماشاگر به اشتراک می‌گذارند. در مرحله‌ی دوم بعد از تبادل اطلاعات، هر زنبور کارگر به سمت منبعی می‌رود که قبلاً دیده است و ممکن است براساس اطلاعاتی که در حافظه دارد یک منبع جدید در همسایگی منبع قبلی انتخاب کند. هم‌چنین پیشاهنگان محیط پیرامون را برای یافتن منابع غذایی جدید کاوش می‌کنند. در صورتی که منبع غذایی تمام شود یا زنبورها آنجا را ترک کنند و به

^۱-Karaboga

^۲- Waggle dance

منبع جدید بروند ابتدا شایستگی منبع (راه حل) جدید را بر اساس اطلاعات ذخیره شده از منابع (راه حل‌های) قبلی مورد بررسی قرار می‌دهند. اگر این شایستگی از مراحل قبلی بیشتر باشد این منبع (راه حل) جدید در حافظه زنبور باقی می‌ماند، در غیر این صورت در محاسبات شایستگی در منابع غذایی جدید دیگر ملاک سنجش آخرین و مناسب‌ترین منبع باقی می‌ماند. این روند تا پایان برآورده شدن نیازها (رسیدن به بهینه ترین راه حل) ادامه خواهد داشت. این مراحل توسط رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$V_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij} (x_{ij} - x_{kj}) \quad (1)$$

$$k \in \{1, 2, 3, \dots, BN\}, \quad i \neq k$$

$$j \in \{1, 2, 3, \dots, D\}$$

که در رابطه ۱، V_{ij} موقعیت جدید زنبور اولیه می‌باشد، هم‌چنین x_{ij} و x_{kj} موقعیت‌های زنبور اولیه و زنبورهای دیگر (زنبور همسایه) می‌باشد که هرچه مقدار $(x_{ij} - x_{kj})$ کم‌تر باشد انحراف از موقعیت x_{ij} کم‌تر می‌شود. مقدار k و j به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و BN تعداد زنبور کارگر است که تعداد آن با SN که منبع غذایی است، برابر است. هم‌چنین متغیر k با متغیر i متفاوت است. ϕ_{ij} به صورت یک عدد تصادفی بین بازه $[-1, 1]$ است و این متغیر تولید منابع غذایی را در اطراف x_{ij} کنترل می‌کند. در حقیقت در رابطه ۱ سعی می‌شود موقعیت اولیه بدست آمده در حرکت‌های بعدی خود با توجه به مقدار شاخص ϕ_{ij} در جهت یا خلاف آن حرکت کند. تفاوت این الگوریتم با الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر نظیر PSO در این است که با توجه به انتخاب اعداد تصادفی از شاخص ϕ_{ij} سعی می‌شود تا حدود زیادی ایجاد تنوع در آن داده شود و از قرار گرفتن زنبورها در نقاط بهینه جلوگیری شود (Karaboga et al, 2014).

همان‌گونه که ذکر شده بعد از پایان عملیات جستجو، تماشاگرها اطلاعات بدست آمده از زنبورهای کارگر را ارزیابی و بررسی می‌کنند و سپس با توجه به آنالیز اطلاعات بدست آمده در مورد منابع

غذایی با یک احتمال مناسب یکی از منابع غذایی را انتخاب می‌کنند. رابطه ۲ این احتمال را محاسبه می‌کند.

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n} \quad (2)$$

که در رابطه ۲، P_i بیان‌گر یک احتمال مناسب برای منبع غذایی است. SN تعداد منابع غذایی (تعداد راه حل‌های موجود) است. Fit_i تابع برازندگی و شایستگی منابع غذایی است که متناظر با I_{th} زنبور است. در ادامه اگر یک منبع غذایی پایان یابد و یا کیفیت آن مناسب نباشد زنبورهای کارگر آن‌ها را رها کرده و به یک پیشاهنگ تبدیل می‌شوند. یعنی اگر در مدل شایستگی نقطه‌ای بعد از چند تکرار بهبود پیدا نکند باید آن نقطه بهینه محلی را ترک کرد و یک نقطه تصادفی جدید انتخاب کرد.

انتخاب یک روش و رویکرد مناسب برای حل سیستم‌های پیچیده بستگی به شرایط و میزان پیچیدگی سیستم دارد. انتخاب نادرست در انتخاب سیستم مدل‌سازی نه تنها سبب حل صحیح مسئله نمی‌شود بلکه می‌تواند سبب پیچیدگی بیش‌تر شود و رویکرد معکوس در حل مسئله ایجاد کند. با توجه به توضیحات داده شده، در این پژوهش با توجه به سیستم مورد مطالعه که عدم قطعیت از یکسو در ماهیت خصوصیات سنگ‌ها و از سوی دیگر در نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده وجود دارد، استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل برای بررسی و ارزیابی نتایج مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱-۱- مدل سازی

به منظور بررسی و ارزیابی نتایج آزمایشگاهی بدست آمده در این تحقیق از یکی از مهم‌ترین کاربردهای الگوریتم کلونی زنبور عسل یعنی بهینه‌سازی در کلاس‌بندی داده‌ها استفاده شده است. در این روند از $loyd's Algorithm (k-means)$ مطابق رابطه ۳ به عنوان تابع هدف در الگوریتم مذکور به منظور طبقه‌بندی داده‌ها مورد استفاده و برازش قرار می‌گیرد (Lloyd, 1982).

$$Obj.Function = \sum_{i=1}^n \min_{1 \leq j \leq k} d(x_i, m_j) \quad (1)$$

که m_i مرکز خوشه و k تعداد خوشه‌ها می‌باشد. X_i مجموعه داده‌ها بوده و مقدار i برابر است با $i=[1,2,3,\dots,n]$. هم‌چنین d فاصله اقلیدسی مرکز خوشه تا هر عضو می‌باشد.

در گام اول به منظور مدل‌سازی، ابتدا شبه کد الگوریتم و تابع هدف آن نوشته می‌شود. سپس پارامترهای کنترلی الگوریتم نظیر تعداد تکرارها^۱ برابر با ۳۰۰، اندازه جمعیت^۲ برابر ۵۰ و حداقل خطای قابل پذیرش برابر با $\varepsilon_L = 0.00001$ تعیین می‌شوند. این‌ها پارامترهای کنترلی الگوریتم مذکور برای بهینه‌سازی مناسب می‌باشند که توسط پیشنهادات کارشناسان و تحقیقات گذشته انتخاب می‌شوند (Haghshenas et al., 2017). علاوه بر این نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی ۱۴ نمونه سنگ مورد مطالعه و برای ۴ خصوصیت تأثیرگذار سنگ‌ها برای ارزیابی کلاس‌های طبقه‌بندی شده به عنوان داده‌های ورودی به الگوریتم معرفی می‌شوند. سپس در گام بعدی بر اساس تجربه خبرگان، کلاس‌بندی برای طبقه‌بندی‌های ۲، ۳ و ۴ کلاسه توسط نرم افزار تحلیل و بررسی می‌شوند. براساس نتایج بدست آمده مناسب‌ترین طبقه‌بندی برای ۴ کلاسه بدست می‌آید. نتایج حاصل از طبقه‌بندی ۴ کلاسه در جداول ۱ و ۲ به ترتیب برای حداقل خطای قابل قبول و مقدار بهینه‌سازی هر داده در هر کلاس نشان داده شده است.

جدول ۱- سطح دقت و خاتمه محاسبات در تکرار ۳۰۰

Result	$\varepsilon_L = U^{(n)} - U^{(n-1)}$	$U^{(n)}$	$U^{(n-1)}$	Step (n)
Continue	$0.0541 > 0.00001$	107.1023	107.0482	185
Continue	$0 < 0.00001$	107.0482	107.0482	186
Stop	$0 < 0.00001$	107.0482	107.0482	300

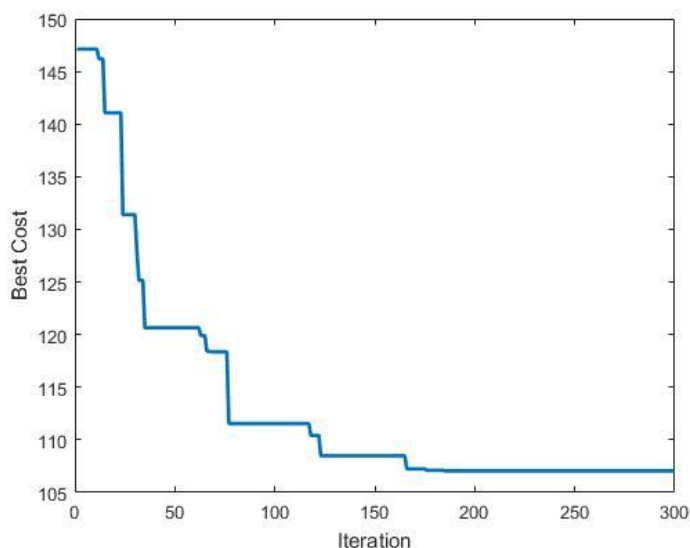
^۱ Maximum Number of Iterations

^۲ Colony Size

جدول ۲- بهینه‌سازی و طبقه‌بندی نمونه‌های سنگ مورد مطالعه توسط الگوریتم کلونی زنبور عسل

نمونه	بازه‌بندی بهینه	طبقه‌بندی
A ₁	۸۲/۷۵۷	کلاس I
A ₂	۱۰۳/۰۱۵	
A ₃	۹۷/۹۵۲	
A ₄	۶۵/۶۵۹	
A ₅	۸۴/۵۳۹	
A ₆	۸۸/۹۸۴	
A ₇	۵۳/۵۲۴	کلاس II
A ₈	۱/۸۳۴	
A ₉	۳۹/۵۷	
A ₁₀	۹۶/۰۶۹	
A ₁₁	۶۵/۴۶۹	کلاس III
A ₁₂	۱۰۷/۸۸۳	
A ₁₃	۱۱۵/۳۱۱	
A ₁₄	۹۶/۸۹۶	کلاس IV

بر اساس نتایج جدول ۱ الگوریتم در تکرار ۱۸۵ به قابل قبول‌ترین خطای ممکنه رسیده است و این مقدار تا پایان تکرارها ثابت مانده است. در واقع همگرایی بدست آمده در تکرار ۱۸۵ تا تکرار ۳۰۰ ثابت می‌ماند که نشان‌دهنده توانایی این الگوریتم در همگرایی سریع و ثبات است. به‌علاوه این روند همگرایی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- حداقل هزینه به ازای هر تکرار توسط الگوریتم ABC

بر اساس نتایج بدست آمده در جدول ۲، ۱۴ نمونه سنگ مورد مطالعه در ۴ کلاس‌بندی توسط الگوریتم ABC به صورت ۶ نمونه در کلاس اول (نمونه‌های ۱، ۳، ۵، ۶، ۱۰ و ۱۴)، ۴ نمونه در کلاس

دوم (نمونه‌های ۴، ۷، ۹ و ۱۱)، ۳ نمونه در کلاس سوم (نمونه‌های ۲، ۱۲ و ۱۳) و ۱ نمونه در کلاس چهارم (نمونه ۸) بر مبنای چهار پارامتر مهم و مؤثر مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص ساینده‌گی شیمازک، سختی موس و مدول الاستیسیته کلاس‌بندی شده‌اند.

در پایان به منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده، نتایج الگوریتم ABC با پارامترهای عملکرد برش (شدت جریان مصرفی و سایش دیسک الماسی) نیز مقایسه شده است که نتایج آن در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- نتایج الگوریتم ABC و پارامترهای عملکرد برش

طبقه‌بندی	پارامترهای عملکرد برش		نمونه سنگ
	Wr (mm ³)	I (A)	
کلاس I	۰/۰۰۰۰۰۰۴۵	۱۵/۵	A ₁
	۰/۰۰۰۰۰۰۰۸	۱۵/۴	A ₃
	۰/۰۰۰۰۰۰۲۵	۱۵/۶	A ₆
	۰/۰۰۰۰۰۰۰۳	۱۵/۷	A ₁₀
	۰/۰۰۰۰۰۰۱۶	۱۵/۶	A ₁₄
کلاس II	۰/۰۰۰۰۰۰۱۵۶	۱۶/۱	A ₄
	۰/۰۰۰۰۰۰۰۵	۱۵/۷	A ₅
	۰/۰۰۰۰۰۰۱۵	۱۶/۲	A ₇
	۰/۰۰۰۰۰۰۰۱	۱۶/۶	A ₉
	۰/۰۰۰۰۰۰۲۲	۱۵/۸	A ₁₁
کلاس III	۰/۰۰۰۰۰۰۰۵	۱۵/۲	A ₂
	۰/۰۰۰۰۰۰۰۶	۱۵/۴	A ₁₂
	۰/۰۰۰۰۰۰۰۴	۱۵/۵	A ₁₃
کلاس IV	۰/۰۰۰۰۰۰۷۲	۱۷	A ₈

با توجه به جدول ۳ سنگ‌های مورد مطالعه به ۴ کلاس طبقه‌بندی شده‌اند. نمونه‌های ۱، ۳، ۶، ۱۰ و ۱۴ در کلاس اول طبقه‌بندی شده‌اند. تمام این نمونه‌ها به جز نمونه ۳ دارای مقدار متوسط شدت جریان مصرفی از ۱۵/۵ تا ۱۵/۷ آمپر می‌باشند. اگر چه میزان سایش برای نمونه‌های ۱ و ۳ با این کلاس مطابقت ندارد. به همین ترتیب نمونه‌های ۴، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ در کلاس دوم با متوسط میزان سایش (۰/۰۰۰۰۰۰۱ تا ۰/۰۰۰۰۰۰۳ میلی‌متر مکعب) و شدت جریان مصرفی (۱۵/۷ تا ۱۶/۶ آمپر) طبقه‌بندی شده‌اند. نمونه‌های ۲، ۱۲ و ۱۳ در کلاس سوم که دارای عملکرد خوب برش با میزان کم سایش و شدت جریان مصرفی است طبقه‌بندی شده‌اند. نمونه ۸ با مقدار بالای سایش و شدت جریان مصرفی در کلاس چهارم طبقه‌بندی شده است. این نمونه، عملکرد برش بسیار ضعیفی دارد. بر اساس

نتایج، دقت طبقه‌بندی در روش پیشنهادی حدود ۹۲/۹ درصد (تنها یک خطا در ۱۴ نمونه) بدست آمد و می‌توان نتیجه‌گیری کرد که الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل توانایی ارزیابی و طبقه‌بندی عملکرد برش در فرآیند برش سنگ‌های سخت را دارد.

Abstract

Despite the fact that Iran is rich in construction rock resources, exports are minimum in this area as a result of the low quality and the high cost of the produced rocks. This problem can be solved to a great extent by employing advanced tools, research, and accurate experiments regarding the cutting process.

In this regard, the evaluation of the abrasion of diamond disks in the rock-cutting process and specifying the cost-reducing and life-extending factors for the cutting tools is of utmost importance when designing a rock processing plant. Therefore, estimating the abrasion of diamond disks and specifying the parameters that are effective in the process of cutting hard rocks is necessary. The abrasion of diamond disks depends on the physical and mechanical properties of the rocks and the operational specifications of the cutting device. In the first part of the study, a new system of classification was proposed based on the physical and mechanical properties of the rock, including four characteristics (Schmidt hardness, uniaxial compressive strength, the Los Angeles abrasion index, and the elasticity modulus). These characteristics were weighted using classical rock engineering systems and by the Expert Semi-Quantitative (ESQ) method. Considering that the experts' opinions are considered absolute and fixed and that the distribution of the opinions is not taken into account in the classical method, the proposed method models the experts' opinions as a correct scheme using fuzzy logic and the corresponding weight allocation. After selecting the fuzzy Gaussian membership function as the most fitting function, the optimum fuzzy membership function was investigated in order to relate the parameters that are effective on the abrasion of diamond disks. In the proposed system, abrasion is categorized using the four aforementioned variables by dividing them into fixed, comparative, and logarithmic intervals in combination with the genetic algorithm. Based on the results, the logarithmic comparative method is associated with a smaller error, thus selected as the optimal method. Using the proposed classification system, the abrasion of the diamond disks in the process of cutting hard construction rocks (output) was evaluated and classified into five qualitative intervals (very high, high, medium, low, and very low) for nine sample hard construction rocks. In order to validate the results of the proposed classification system another classification system was developed using the metaheuristic artificial bee colony algorithm based on experimental results and its output was compared with that of the proposed system. Moreover, in order to validate

the results of the proposed classification system, multiple cutting tests were conducted under various operational conditions using a customized disk cutter with special capabilities for this reason. During the set of experiments, the macroscopic abrasion of the diamond segments was measured. Ultimately, based on the proposed model, the nine studied rock specimens were categorized into three classes. Specimens 1 and 2 were categorized into class 2 with a small abrasion rate that shows a high cuttability. Similarly, the specimens 3, 4, 5, 6, 7, and 9 were categorized into class 3 with a medium abrasion rate (0.000005 to 0.000008 mm³) and favorable cuttability. Specimen 8 was categorized into class 4 with high abrasion rate (0.0000072 mm³) that shows the high abrasion and low cuttability of this specimen. The results suggest that, in most cases, the proposed classification system has been able to rank the abrasion of diamond saws in the process of cutting hard construction rocks with minimum difference between the estimated and measured abrasion.

Keywords: Hard Rocks, Rock Engineering Systems, Classification System, Wear diamond saws.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining Engineering and Geophysics

Ph.D thesis title

**Proposing a new Classification System for Evaluating the
wear of diamond saws for Cutting Hard Rocks Using
Experimental Results and Rock Engineering Systems
(RES)**

Student: Masoud Akhyani

Supervisors:

Dr. Farhang Sereshky

and

Dr. Reza Mikaeil

Advisor: Dr. Mohammad Taji

Ph.D. thesis for doctoral degree

Shahrivar 1396