



عنوان رساله دکتری

ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی و بهینه‌سازی پارامترهای برش

دانشجو: رضا میکائیل

استاد راهنما:

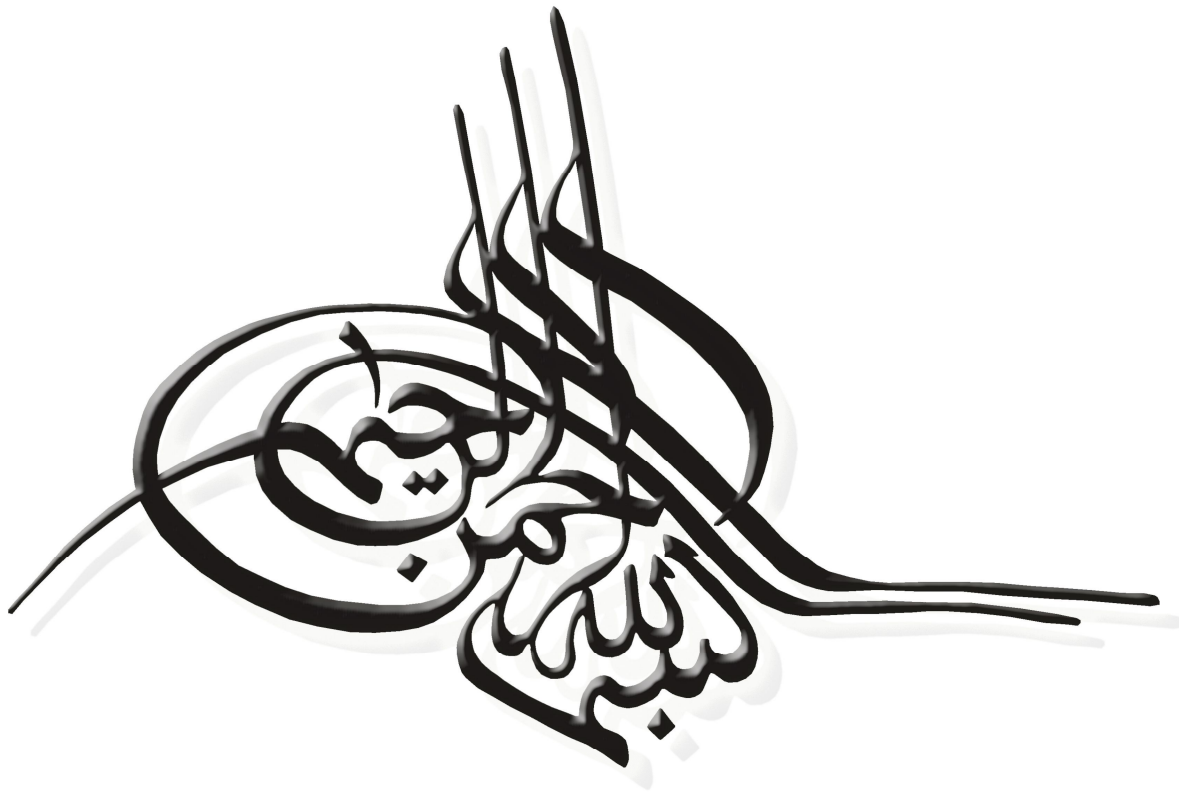
دکتر محمد عطائی

استاد مشاور:

دکتر رضا یوسفی

۱۳۹۰

ماه و سال انتشار: شهریور سال ۱۳۹۰



چکیده:

تخمین قابلیت برش یک سنگ و تعیین عوامل مؤثر بر آن در تخمین هزینه‌ها و طراحی یک کارخانه سنگ‌بری از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. قابلیت برش سنگ به صورت اولیه به مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ و خصوصیات دستگاه برش بستگی دارد. در مرحله نخست از این مطالعه سعی شد تا سیستم طبقه‌بندی جدیدی مبتنی بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ شامل 4 عامل مهم مقاومت فشاری تک محوری، سختی موهس، فاکتور سایندگی شیمیازک و مدول الاستیسیته ارائه شود. درجه اهمیت هر یک از این عوامل با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و دلفی فازی تعیین شد. با استفاده از این سیستم طبقه‌بندی جدید قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی مورد مطالعه (مشمول بر 7 نوع سنگ کربناته و 5 نوع سنگ گرانیتی)، مورد ارزیابی و طبقه‌بندی قرار گرفت. برای بررسی صحت و سقم نتایج حاصل از این طبقه‌بندی، آزمایش‌های برش متنوعی تحت شرایط مختلف عملیاتی با استفاده از یک دستگاه برش در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. در طول انجام این آزمایش‌ها، مقدار شدت جریان مصرفی دستگاه و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داد که در بیشتر موارد سیستم طبقه‌بندی به خوبی توانسته است قابلیت برش سنگ‌های مورد مطالعه را رده‌بندی کند. در مرحله دوم از این مطالعه به بررسی و تحلیل اقتصادی فرایند برش سنگ‌های ساختمانی در برخی از کارخانه‌های سنگ‌بری در شهرک صنعتی محمودآباد اصفهان پرداخته شد. بدین ترتیب توابع مختص هر یک از فاکتورهای هزینه‌ساز در فرایند برش سنگ‌های ساختمانی تعیین شد. در ادامه با استفاده از این توابع، تابع هزینه کل تعیین شد و سپس تحلیل حساسیت برای دو نمونه سنگ تراورتن حاجی آباد و گرانیت قرمز یزد انجام شد. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که دو فاکتور هزینه‌ساز انرژی مصرفی و سایش ابزار الماسی بیشترین تأثیر را در هزینه‌های کلی تولید به ترتیب برای نمونه سنگ‌های تراورتن و گرانیت دارد. با استفاده از این مدل اقتصادی می‌توان به راحتی مقدار هزینه‌های تولید را با توجه به فاکتورهایی نظیر انرژی مصرفی، هزینه کارگری، سایش ابزار الماسی، آب مصرفی و هزینه تعمیر و نگهداری محاسبه کرد. در مرحله سوم از این تحقیق به بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای برش شامل عمق

برش و نرخ پیشروی با کمک الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک پرداخته شد. الگوریتم ژنتیک از جمله الگوریتم‌های بهینه‌ساز می‌باشد که از یک سیر تکاملی طبیعی برای حل مسائل بهینه‌سازی پیروی می‌کند. در نهایت نتایج حاصل از این بخش به صورت نمودارهایی برای انتخاب نقاط بهینه از پارامترهای ماشین‌کاری بر اساس شاخص قابلیت برش سنگ ارائه شده است.

کلمات کلیدی: سنگ‌های ساختمانی، سیستم طبقه‌بندی، تحلیل حساسیت، الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک.

لیست مقالات منتشر شده در راستای رساله

مقالات چاپ و پذیرش شده در مجلات ISI

- 1- Mikaeil R., Yousefi R., Ataei M., Abasian Farani R., 2011. "*Development of a New Classification System for Assessing of Carbonate Rock Sawability*", Archives of Mining Sciences, Vol. 56, No 1, p. 57–68.
- 2- Mikaeil R., Ataei M., Yousefi R., 2011. "*Correlation of production rate of ornamental stone with rock brittleness indexes*". Arabian Journal of Geosciences.
- 3- Mikaeil R., Yousefi R., Ataei M., 2011, "*Sawability Ranking of Carbonate Rock Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process and TOPSIS Approaches*". Scientia Iranica, **Accept.**

مقالات پذیرش شده در مجلات علمی و پژوهشی

- 4- Mikaeil R., Ataei M., Yousefi R., 2011. "*The application of a fuzzy analytical hierarchy process to the prediction of vibration during rock sawing*". Mining Science and Technology (China), **Accept.**
- 5- Mikaeil R., Ataei M., Yousefi R., 2011. "*Predicting the production rate of ornamental rock using statistical models*". Iranian society of Mining Engineering, **Accept.**

پذیرش برای چاپ در کتاب

- 6- Mikaeil R., Ataei M., Yousefi R., "*Evaluating the Power Consumption in Carbonate Rock Sawing Process by Using FDAHP and TOPSIS Techniques*", Efficient Decision Support Systems: Practice and Challenges – From Current to Future / Book 2", ISBN 978-953-307-441-2., **Accept.**

مقالات چاپ شده در کنفرانس‌های بین‌المللی

- 7- Mikaeil R., Hoseinie S. H., Ataei M., (2008), "*Abrasivity and sawability prediction of Khalkhal and Azarshahr Travertine*", 8th International Scientific Conference on Modern Management of Mine Producing and Environmental Protection (SGEM), Albena Complex, Bulgaria.
- 8- Yousefi R., Mikaeil R., Ataei M., 2010. "*Study of Factors Affecting on the Sawability of the Ornamental Stone*". Proceedings of the 8th International Scientific Conference SGEM. Bulgaria.
- 9- M. Ataei, R. Mikaeil, S. H. Hoseinie, R. Yousefi "*Correlation of Cutting Rate with Abrasivity Parameters of Ornamental Stones*", MERSEM-07 International Marble and Natural Stone Congress, Afyonkarahisar, Turkey, 14-15 October 2010.

مقالات در دست داوری

- 10- Reza Mikaeil, Yilmaz Ozelik, Mohammad Ataei and Reza yousefi, "*Ranking the Sawability of Ornamental Stone by Using FDAHP and TOPSIS Techniques*". International Journal of Rock Mechanics and Mining. **Under review.**
- 11- Reza Mikaeil and Mohammad Ataei, "*The Application of Fuzzy Analytical Hierarchy Process Approach for Ranking the Sawability of Carbonate Rock*", International Journal of Rock Mechanics and Mining. **Under review.**
- 12- Reza Mikaeil, Yilmaz Ozelik, Mohammad Ataei and Reza yousefi, "*Correlation of Specific Ampere Draw with Rock Brittleness Indexes in Rock Sawing Process*". Archives of Mining Sciences. **Under review.**
- 13- Mikaeil R., Ataei M., Yousefi R., "*Predicting the sawability of ornamental stone using Fuzzy Analytical Hierarchy Process*", Journal of Engineering Geology. **Under review.**

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

2	1-1- مقدمه
3	2-1- ضرورت انجام طرح
4	3-1- اهداف تحقیق
5	4-1- مراحل انجام تحقیق
5	1-4-1- جمع‌آوری اطلاعات و تهیه جامعه آماری
6	2-4-1- تجزیه و تحلیل داده‌ها
6	5-1- سازماندهی رساله

فصل دوم: فرایند برش سنگ

11	1-2- مقدمه
11	2-2- مکانیزم برش و فرایند تشکیل تراشه
14	3-2- عوامل مؤثر در فرایند برش
15	1-3-2- مشخصات سنگ
15	1-1-3-2- مشخصات فیزیکی سنگ
19	2-1-3-2- مشخصات مکانیکی سنگ‌ها
27	3-1-3-2- مشخصات ساختاری و محیطی سنگ
28	2-3-2- مشخصات برش
28	1-2-3-2- مشخصات عملیاتی برش
32	2-2-3-2- مشخصات طرح برش
39	4-2- معیارهای ارزیابی عملکرد برش
40	1-4-2- نیروهای برش
42	2-4-2- سایش ابزار
44	3-4-2- انرژی ویژه برش

فصل سوم: بررسی سابقه علمی موضوع

فهرست مطالب

48	1-3-1- مروری بر سابقه علمی موضوع
57	2-3- روابط تجربی ارائه شده در زمینه قابلیت برش
57	1-2-3- رابطه بیرله و راترمن
58	2-2-3- سیلان اغلو و گورگیولو
59	3-2-3- روابط ایوب اوغلو و همکاران
60	4-2-3- روابط قهرمان و همکاران
61	5-2-3- روابط گون آیدین و همکاران
61	6-2-3- روابط دلگادو و همکاران
61	7-2-3- روابط بیوک ساگیز و همکاران
62	8-2-3- رابطه ارزوی و همکاران
62	9-2-3- روابط قهرمان و همکاران
62	10-2-3- روابط اوزلیک
63	11-2-3- روابط بیوکساگیز
63	12-2-3- روابط فخر و همکاران
64	13-2-3- روابط آتسی و ارزوی
64	14-2-3- روابط عطایی و همکاران
64	15-2-3- روابط میکائیل و همکاران
65	3-3- طبقه‌بندی‌های ارائه شده در زمینه قابلیت برش
65	1-3-3- سیستم طبقه‌بندی بیرله و راترمن
65	2-3-3- سیستم طبقه‌بندی فازی وی و همکاران
66	3-3-3- سیستم طبقه‌بندی فازی تاتموز و همکاران
67	4-3-3- سیستم طبقه‌بندی قهرمان و همکاران
69	5-3-3- سیستم طبقه‌بندی میکائیل و همکاران
70	4-3- نقد و بررسی مطالعات گذشته

فهرست مطالب

فصل چهارم: ارائه سیستم طبقه بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ های ساختمانی

75	1-4- مقدمه
75	2-4- ارائه یک سیستم طبقه بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ های ساختمانی
76	1-2-4- عوامل مؤثر در قابلیت برش سنگ های ساختمانی
76	2-2-4- تعیین وزن عوامل با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی
77	1-2-2-4- روش تحلیل سلسله مراتبی
79	2-2-2-4- روش تحلیل سلسله مراتبی فازی
82	3-2-2-4- نظر سنجی از متخصصان برش و انجام مراحل تحلیل سلسله مراتبی فازی
87	3-2-4- تعیین وزن عوامل با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی
88	4-2-4- انتخاب پارامترها برای سیستم طبقه بندی
89	1-4-2-4- مقاومت فشاری تک محوری
89	2-4-2-4- فاکتور سایش شیمازک
91	3-4-2-4- سختی موس
91	4-4-2-4- مدول الاستیسیته (یانگ)
92	5-2-4- سیستم طبقه بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ های ساختمانی
94	3-4- مطالعات میدانی و آزمایشگاهی
95	1-3-4- مطالعات میدانی
96	2-3-4- مطالعات آزمایشگاهی
96	1-2-3-4- ساخت دستگاه برش
107	2-2-3-4- مشخصات قطعه کار (سنگ)
109	4-4- طبقه بندی سنگ های ساختمانی با استفاده از سیستم طبقه بندی جدید
110	1-4-4- ارزیابی و بررسی سیستم طبقه بندی جدید در طبقه بندی سنگ های ساختمانی
114	2-4-4- پیش بینی عملکرد برش سنگ های ساختمانی با استفاده از مطالعات آماری
115	1-2-4-4- ارائه مدل های آماری

فهرست مطالب

117	4-2-2-4- اعتبارسنجی مدل‌ها
126	4-5- جمع بندی
	فصل پنجم: تحلیل اقتصادی فرایند برش
132	5-1- مقدمه
132	5-2- فاکتورهای هزینه‌ساز
132	5-2-1- تابع هزینه کارگر
133	5-2-2- تابع هزینه مصرف دیسک
134	5-2-3- تابع هزینه مصرف انرژی
134	5-2-4- تابع هزینه مصرف آب
135	5-2-5- تابع هزینه تعمیر و نگهداری سالانه
136	5-3- تحلیل حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز
139	5-3-1- تحلیل حساسیت تابع هزینه کل نسبت به هزینه‌های تولید
141	5-3-2- تحلیل حساسیت تابع هزینه کل نسبت به نرخ‌های مؤثر در فرایند تولید
144	5-3-3- تحلیل حساسیت تابع هزینه کل برای نمونه سنگ‌های مختلف
144	5-3-3-1- ارائه مدل‌های پیش‌بینی شدت جریان مصرفی و سایش ابزار الماسی
151	5-3-3-2- اعتبارسنجی مدل‌ها
155	5-3-3-3- تعیین مقدار حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز برای نمونه سنگ‌های مختلف
165	5-4- جمع‌بندی
	فصل ششم: بهینه‌سازی فرایند برش
169	6-1- مقدمه
170	6-2- بهینه‌سازی فرایند برش سنگ‌های ساختمانی
171	6-2-1- تعیین توابع هزینه‌ساز با توجه به پارامترهای برش
171	6-2-2- مدلسازی
172	6-2-3- حل مدل بهینه‌سازی

فهرست مطالب

178	3-6- بهینه‌سازی پارامترهای بهینه برش
191	5-6- جمع‌بندی
	فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
194	1-7- نتیجه‌گیری
199	2-7- پیشنهادات
200	مراجع
206	پیوست

فهرست جدول‌ها

16	جدول 2-1- مشخصات فیزیکی مطالعه شده توسط محققین
20	جدول 2-2- پارامترهای مقاومتی مطالعه شده توسط محققین
22	جدول 2-3- شاخص‌های سختی مطالعه شده توسط محققین
24	جدول 2-4- شاخص‌های ساینده‌گی مطالعه شده توسط محققین
26	جدول 2-5- خواص الاستیسیته و پلاستیسیته به همراه تعدادی از شاخص‌های تردی مطالعه شده توسط محققین
29	جدول 2-6- پارامترهای عملیاتی مطالعه شده توسط محققین در زمینه قابلیت برش سنگ
33	جدول 2-7- مطالعات انجام شده در زمینه قابلیت برش سنگ با توجه به مشخصات طرح برش
65	جدول 3-1- کلاس‌های ارائه شده توسط بیرله و راترن با توجه به عملکرد سایش دیسک
66	جدول 3-2- وزن‌های اختصاص داده شده در طبقه بندی فازی وی و همکاران
66	جدول 3-3- طبقه‌بندی ارائه شده توسط وی و همکاران
67	جدول 3-4- مقادیر وزن‌های اختصاص داده شده به هر یک از فاکتورها
67	جدول 3-5- طبقه‌بندی ارائه شده توسط تاتموز و همکاران
68	جدول 3-6- طبقه‌بندی ارائه شده توسط قهرمان و همکاران بر اساس مقادیر شاخص VRI
69	جدول 3-7- طبقه بندی ارائه شده توسط میکائیل و همکاران
72	جدول 3-8- عدم توانایی سیستم‌های طبقه‌بندی موجود در ارزیابی برخی از سنگ‌ها
82	جدول 4-1- نمونه فرم نظر سنجی فرستاده شده برای متخصصین خارجی
83	جدول 4-2- نمونه فرم نظر سنجی فرستاده شده برای متخصصین داخلی
84	جدول 4-3- ماتریس مقایسه زوجی فازی
87	جدول 4-4- وزن اولیه و نهایی هر یک از پارامترها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی
88	جدول 4-5- وزن نهایی هر یک از پارامترها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی
93	جدول 4-6- سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌ها
93	جدول 4-7- پیش‌بینی قابلیت برش سنگ‌ها با توجه به شاخص قابلیت برش
101	جدول 4-8- مشخصات دیسک‌های استفاده شده در آزمایش‌های برش
101	جدول 4-9- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش نمونه سنگ‌های نرم
104	جدول 4-10- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش نمونه سنگ‌های سخت

108	جدول 4-11- مشخصات مکانیکی و فیزیکی سنگ‌های مورد مطالعه
109	جدول 4-12- طبقه‌بندی سنگ‌های ساختمانی متعلق به گروه سخت بر اساس شاخص قابلیت برش
109	جدول 4-13- طبقه‌بندی سنگ‌های ساختمانی متعلق به گروه نرم بر اساس شاخص قابلیت برش
110	جدول 4-14- طبقه‌بندی سنگ‌های سخت مورد مطالعه بر اساس شاخص قابلیت برش (نرخ تولید)
110	جدول 4-15- طبقه‌بندی سنگ‌های مورد مطالعه نرم بر اساس شاخص قابلیت برش (نرخ تولید)
111	جدول 4-16- طبقه‌بندی سنگ‌های سخت مورد مطالعه بر اساس شاخص قابلیت برش (نرخ سایش)
112	جدول 4-17- طبقه‌بندی سنگ‌های سخت مورد مطالعه بر اساس شاخص قابلیت برش (نرخ مصرف انرژی)
112	جدول 4-18- طبقه‌بندی سنگ‌های نرم مورد مطالعه بر اساس شاخص قابلیت برش (نرخ مصرف انرژی)
113	جدول 4-19- طبقه‌بندی سنگ‌های سخت مورد مطالعه بر اساس شاخص قابلیت برش (ارتعاش‌های سیستم)
113	جدول 4-20- طبقه‌بندی سنگ‌های نرم مورد مطالعه بر اساس شاخص قابلیت برش (ارتعاش‌های سیستم)
118	جدول 4-21- نتایج حاصل از بررسی‌های آماری برای مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی شدت جریان مصرفی
123	جدول 4-22- بررسی خطای داده‌های آزمون برای نمونه سنگ‌های سخت
124	جدول 4-23- بررسی خطای داده‌های آزمون برای نمونه سنگ‌های نرم
137	جدول 5-1- اطلاعات و مشخصات ثبت شده از یک کارخانه سنگ‌بری برای انجام تحلیل حساسیت
139	جدول 5-2- مقادیر فاکتورهای هزینه‌ساز برای نمونه سنگ گرانیات یزد
139	جدول 5-3- مقادیر فاکتورهای هزینه‌ساز برای نمونه سنگ تراورتن حاجی آباد
142	جدول 5-4- مقادیر هزینه‌های کل حداقل و حداکثر با توجه به نرخ‌های مؤثر در مدل اقتصادی برای نمونه سنگ سخت
142	جدول 5-5- مقادیر هزینه‌های کل حداقل و حداکثر با توجه به نرخ‌های مؤثر در مدل اقتصادی برای نمونه سنگ نرم
145	جدول 5-6- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای نمونه سنگ‌های نرم
148	جدول 5-7- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای نمونه سنگ‌های سخت
149	جدول 5-8- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی سایش برای نمونه سنگ‌های سخت
151	جدول 5-9- نتایج حاصل از بررسی آزمون‌های آماری برای مدل‌های پیش‌بینی
156	جدول 5-10- نتایج حاصل از تحلیل حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز برای نمونه سنگ‌های سخت
161	جدول 5-11- نتایج حاصل از تحلیل حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز برای نمونه سنگ‌های نرم
176	جدول 6-1- نقاط بهینه پارامترهای برش برای نمونه سنگ‌های سخت مورد مطالعه

فهرست جدول‌ها

178	جدول 6-2- نقاط بهینه پارامترهای برش برای نمونه سنگ‌های نرم مورد مطالعه
184	جدول 6-3- نقاط بهینه برش برای نمونه سنگ‌های سخت
186	جدول 6-4- نقاط بهینه برش برای نمونه سنگ‌های نرم

فهرست شکل‌ها

- 12 شکل 1-2- تعامل نیروهای موجود میان دانه الماسه و سطح خراشیده شده از سنگ
- 13 شکل 2-2- نمایی از تشکیل یک منطقه پلاستیک به همراه ترک‌های شعاعی و جانبی در برش ترد
- 14 شکل 3-2- پارامترهای مؤثر در فرایند برش سنگ
- 18 شکل 4-2- ارتباط میان نرخ برش و درصد کوارتز
- 18 شکل 5-2- رابطه میان نرخ تولید و ضرب دو پارامتر تخلخل و چسبندگی
- 18 شکل 6-2- ارتباط میان نرخ سایش و ضریب بافت
- 18 شکل 7-2- ارتباط میان نرخ سایش و اندازه دانه‌ها
- 20 شکل 8-2- رابطه میان نرخ تولید و مقاومت فشاری
- 20 شکل 9-2- رابطه میان نرخ تولید و چسبندگی
- 21 شکل 10-2- رابطه میان نرخ تولید و مقاومت کششی
- 21 شکل 11-2- رابطه میان نرخ تولید و مقاومت بارنقطه‌ای
- 21 شکل 12-2- رابطه میان نرخ تولید و شاخص مقاومت ضربه‌ای
- 21 شکل 13-2- رابطه میان مقاومت فشاری با مقدار انرژی ویژه برش
- 21 شکل 14-1- رابطه میان نرخ سایش و مقاومت فشاری
- 21 شکل 15-2- رابطه میان نرخ سایش و مقاومت کششی
- 21 شکل 16-2- رابطه میان نرخ تولید و زاویه اصطکاک داخلی
- 23 شکل 17-2- رابطه مابین سختی ویکورز و نرخ برش
- 23 شکل 18-2- رابطه مابین عدد چکش اشمیت و نرخ تولید
- 23 شکل 19-2- رابطه میان نرخ سایش و شاخص ان‌سی‌بی
- 23 شکل 20-2- رابطه میان نرخ سایش و سختی شور
- 25 شکل 21-2- رابطه میان اندیس سایش سوشار و مقدار انرژی ویژه برش
- 25 شکل 22-2- رابطه میان درجه سایش لوس آنجلس و نرخ تولید
- 26 شکل 23-2- رابطه بین اندیس تردی B_3 با نرخ تولید
- 26 شکل 24-2- رابطه بین اندیس تردی B_5 با نرخ تولید
- 27 شکل 25-2- رابطه بین مدول الاستیسیته با نرخ سایش

فهرست شکل‌ها

- شکل 2-26- رابطه بین اندیس تردی B_1 با انرژی ویژه برش 27
- شکل 2-27- رابطه بین اندیس تردی B_2 با انرژی ویژه برش 27
- شکل 2-28- رابطه بین اندیس تردی B_3 با انرژی ویژه برش 27
- شکل 2-29- رابطه میان نیروی برش با عمق برش در نرخ‌های مختلف پیشروی برای نمونه سنگ گرانیت 29
- شکل 2-30- رابطه میان نیروی برش با عمق برش در نرخ‌های مختلف پیشروی برای نمونه سنگ ماربل 29
- شکل 2-31- رابطه میان نرخ پیشروی با نیروی برش در عمق‌های مختلف برش برای نمونه سنگ ماربل 29
- شکل 2-32- رابطه میان نرخ پیشروی با نیروی برش در عمق‌های مختلف برش برای نمونه سنگ گرانیت 29
- شکل 2-33- رابطه میان سرعت محیطی با نیروی مماسی در عمق‌ها و نرخ‌های مختلف برش برای نمونه سنگ ماربل 30
- شکل 2-34- رابطه میان نرخ برش با نیروهای مماسی و نرمال در عمق‌های مختلف برش برای نمونه سنگ ماربل 30
- شکل 2-35- رابطه میان نرخ برش با نیروی نرمال برش برای نمونه سنگ گرانیت 30
- شکل 2-36- رابطه میان انرژی ویژه برش با نرخ پیشروی در عمق‌های مختلف برش برای نمونه سنگ گرانیت 30
- شکل 2-37- رابطه میان انرژی ویژه برش با نرخ پیشروی برای نمونه سنگ‌های مختلف 30
- شکل 2-38- مقدار انرژی ویژه برش را برای دو نوع سنگ با دو تیغه مختلف 30
- شکل 2-39- رابطه میان انرژی ویژه برش با عمق‌های مختلف برش برای نمونه سنگ‌های مختلف 31
- شکل 2-40- رابطه میان انرژی ویژه برش با سرعت برش در نرخ‌های پیشروی مختلف برای نمونه سنگ گرانیت 31
- شکل 2-41- رابطه میان انرژی ویژه برش با نرخ برش در عمق‌های مختلف برش برای نمونه سنگ آندزیت 31
- شکل 2-42- رابطه میان انرژی ویژه برش با سرعت محیطی در عمق‌های مختلف برش 31
- شکل 2-43- رابطه میان انرژی ویژه برش با سرعت حرکت قطعه کار 31
- شکل 2-44- رابطه میان انرژی ویژه برش با عمق برش 31
- شکل 2-45- تغییرات ضخامت تراشه و نرخ برش نسبت به عمق برش 32
- شکل 2-46- تغییرات ضخامت تراشه و نرخ برش نسبت به نرخ پیشروی قطعه کار 32
- شکل 2-47- تغییرات ضخامت تراشه و نرخ برش نسبت به سرعت چرخش دیسک 32
- شکل 2-48- توزیع انرژی ویژه برش برای سنگ‌های مختلف 32
- شکل 2-49- حداکثر عمق برش یک دیسک با توجه به شعاع دیسک و شعاع فلانژ دیسک 34
- شکل 2-50- رابطه میان اندازه دانه الماس و مقاومت ضربه‌ای 36

فهرست شکل‌ها

- 36 شکل 2-51- تغییرات ضخامت تراشه نسبت به اندازه دانه الماس
- 37 شکل 2-52- تغییرات ضخامت تراشه و نرخ برش نسبت به تراکم دانه الماس در اندازه‌های مختلف از دانه الماس
- 37 شکل 2-53- حالت‌های مختلف برش به همراه نیروهای برشی الف) برش رو به بالا ب) برش رو به پایین
- 39 شکل 2-54- مقادیر مختلف نرخ سایش ویژه با توجه به حالت‌های مختلف برش
- 41 شکل 2-55- نیروهای موثر در یک فرآیند برش رو به پایین
- 80 شکل 4-1- اعداد فازی مثلثی
- 81 شکل 4-2- تعامل بین M_1 و M_2
- 90 شکل 4-3- رابطه میزان ساینده‌گری رزینال سنگ با استفاده از سختی موهس
- 92 شکل 4-4- مقادیر وزن نهایی پارامترهای به کار رفته در سیستم طبقه‌بندی جدید
- 94 شکل 4-5- مراحل انجام مطالعات میدانی و آزمایشگاهی
- 96 شکل 4-6- میکرومتر دیجیتالی برای اندازه‌گیری سایش ماکروسکوپی
- 96 شکل 4-7- آمپرسنج مورد استفاده برای ثبت تغییرات شدت جریان مصرفی
- 97 شکل 4-8- نمای کلی دستگاه آزمایش
- 97 شکل 4-9- میز متحرک دستگاه آزمایش
- 97 شکل 4-10- واحد هیدرولیک دستگاه آزمایش
- 98 شکل 4-11- گلوپی دستگاه تست همراه با واشرهای چدنی برای بستن دیسک الماسی
- 99 شکل 4-12- آمپرسنج مورد استفاده برای ثبت تغییرات شدت جریان مصرفی
- 99 شکل 4-13- شتاب‌سنج مورد استفاده برای ثبت ارتعاش‌های سیستم
- 99 شکل 4-14- دیاگرام طراحی شده برای انجام آزمایش‌ها برش
- 100 شکل 4-15- نمونه ای از سیگنال‌های ارتعاشی ثبت شده
- 108 شکل 4-16- فرمت دیجیتالی از مقطع نازک متعلق به نمونه سنگ تراورتن قرمز
- 115 شکل 4-17- مراحل مختلف انجام مطالعات آماری
- شکل 4-18- تغییرات شدت جریان مصرفی نسبت به شاخص قابلیت برش در شرایط ثابت عملیاتی برای سنگ‌های
- 119 گرانیتی و کربناته

فهرست شکل‌ها

- شکل 4-19- تغییرات شدت جریان مصرفی نسبت به عمق‌های مختلف برش برای دو نمونه سنگ گرانیت قرمز یزد و تراورتن آذرشهر 119
- شکل 4-20- تغییرات شدت جریان مصرفی نسبت به نرخ‌های مختلف پیشروی برای دو نمونه سنگ گرانیت قرمز و تراورتن آذرشهر 119
- شکل 4-21- تغییرات سیگنال‌های ارتعاشی نسبت به شاخص قابلیت برش در شرایط ثابت عملیاتی برای سنگ‌های گرانیتی و کربناته 119
- شکل 4-22- تغییرات سیگنال‌های ارتعاشی نسبت به عمق‌های مختلف برش برای دو نمونه سنگ گرانیت قرمز یزد و تراورتن آذرشهر 120
- شکل 4-23- تغییرات سیگنال‌های ارتعاشی نسبت به نرخ‌های مختلف پیشروی برای دو نمونه سنگ گرانیت قرمز و تراورتن آذرشهر 120
- شکل 4-24- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 1 121
- شکل 4-25- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 2 122
- شکل 4-26- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 3 122
- شکل 4-27- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 4 122
- شکل 4-28- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای آزمون مدل 1 125
- شکل 4-29- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای آزمون مدل 2 125
- شکل 4-30- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای آزمون مدل 3 125
- شکل 4-31- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای آزمون مدل 4 126
- شکل 5-1- مقادیر مربوط به توابع هزینه‌ساز برای برش یک متر مربع از بلوک سنگی گرانیت قرمز 138
- شکل 5-2- مقادیر مربوط به توابع هزینه‌ساز برای برش یک متر مربع از بلوک سنگی تراورتن حاجی آباد 138
- شکل 5-3- تحلیل حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز برای برش یک بلوک سنگی سخت 140
- شکل 5-4- تحلیل حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز برای برش یک بلوک سنگی نرم 140
- شکل 5-5- تحلیل حساسیت نرخ‌های تأثیرگذار در فرایند برش یک بلوک سنگی سخت 143
- شکل 5-6- تحلیل حساسیت نرخ‌های تأثیرگذار در فرایند برش یک بلوک سنگی نرم 143
- شکل 5-7- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی برای داده‌های آموزش نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 1 152

فهرست شکل‌ها

- شکل 5-8- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی برای داده‌های آزمون نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 1 153
- شکل 5-9- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی برای داده‌های آموزش نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 2 153
- شکل 5-10- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی برای داده‌های آزمون نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 2 154
- شکل 5-11- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی برای داده‌های آموزش نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 3 154
- شکل 5-12- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی برای داده‌های آزمون نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 3 155
- شکل 5-13- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ سخت با شاخص قابلیت برش 15 157
- شکل 5-14- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ سخت با شاخص قابلیت برش 30 157
- شکل 5-15- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ سخت با شاخص قابلیت برش 50 158
- شکل 5-16- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ سخت با شاخص قابلیت برش 70 158
- شکل 5-17- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ سخت با شاخص قابلیت برش 90 159
- شکل 5-18- روند تغییرات هزینه‌ی کل نسبت به شاخص قابلیت برش در سنگ‌های سخت 159
- شکل 5-19- تغییرات حساسیت فاکتور سایش ابزار الماسی برای نمونه سنگ‌های مورد مطالعه سخت 160
- شکل 5-20- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ نرم با شاخص قابلیت برش 15 162
- شکل 5-21- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ نرم با شاخص قابلیت برش 30 162
- شکل 5-22- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ نرم با شاخص قابلیت برش 50 163
- شکل 5-23- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ نرم با شاخص قابلیت برش 70 163
- شکل 5-24- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ نرم با شاخص قابلیت برش 90 164
- شکل 5-25- روند تغییرات هزینه‌ی کل نسبت به شاخص قابلیت برش در سنگ‌های نرم 164
- شکل 5-26- مقایسه حساسیت دو فاکتور انرژی مصرفی و هزینه کارگری در نمونه سنگ‌های مورد مطالعه نرم 165
- شکل 6-1- فلوچارت طراحی شده برای انجام فرایند بهینه‌سازی 173
- شکل 6-2- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ گرانیت قرمز یزد 173
- شکل 6-3- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ گرانیت چایان 174
- شکل 6-4- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ گرانیت نهبندان 174
- شکل 6-5- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ گرانیت خرمدره 175
- شکل 6-6- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ گرانیت مشهد 176

- 177 شکل 6-7- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ تراورتن قرمز
- 177 شکل 6-8- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ تراورتن حاجی آباد و دره بخاری
- 177 شکل 6-9- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ‌های مرمریت صلصالی، انارک و هرسین
- 181 شکل 6-10- تغییرات هزینه‌ی تولید نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ مرمریت هفتومان
- 190 شکل 6-11- نقاط بهینه‌ی برش در حداکثر نرخ‌های پیشروی مجاز برای نمونه سنگ‌های نرم
- 190 شکل 6-12- نقاط بهینه‌ی برش در حداکثر نرخ‌های پیشروی مجاز برای نمونه سنگ‌های سخت
- 195 شکل 7-1- درصد پارامترهای به کار رفته در مطالعات انجام شده در فرایند برش

نمونه جدول ۱

نرخ تولید	P_h
نرخ پیشروی	F_r
قطر دیسک	S_{diameter}
سرعت چرخش دیسک	N
عمق برش	D_c
مقاومت ضربه‌ای	ISI
چسبندگی	C
عدد چکش اشمیت	SHV
مقاومت سائیدگی لوس آنجلس	LA
سرعت موج P	V_p
مقاومت کششی	σ_t
مقاومت فشاری تک محوری	σ_c
زاویه اصطکاک داخلی	ϕ
مقاومت بار نقطه‌ای	I_s
درصد خاکه (زیر 28 مش) در آزمایش ضربه	q
نرخ ویژه سایش در حالت برش رو به بالا	SWR_U
نرخ ویژه سایش در حالت برش رو به پایین	SWR_D
انرژی ویژه برش در حالت برش رو به بالا	SE_U
انرژی ویژه برش در حالت برش رو به پایین	SE_D
مقاومت سایش سطحی بوهم	$BSAS$
شاخص سختی آن‌سی‌بی	NCB
اندازه دانه‌ها	G_s
ضریب بافت	T_c
مقاومت در برابر ساینده‌گری	AR
مقاومت بار نقطه‌ای	I_s
سختی	H
اندازه و شکل دانه	Sh
چسبندگی	C
مدول الاستیسیته	E

نمونه جدول

تخلخل	n
چگالی	γ
حجم برش	Q_W
نیروی مماسی	F_T
نیروی عمودی	F_N
نیروی برشی	F_C
نیروی قائم	F_V
نیروی افقی	F_H
عرض سگمنت	W_M
درصد کوارتز	Eq
مقاومت در برابر ساینده‌گی	AR
ضریب جذب آب	Wa
سختی شور	$SSHN$
سختی ویکرز	HV
شاخص ساینده‌گی سورشار	CAI
سختی موهس	MH
سختی نوپ	HK
اندازه دانه‌های کلسیت	Cgs
انرژی ویژه برش	SE_{cut}
درصد سیلیس	SC
مقاومت خمشی	BS
شعاع عملکرد دیسک (حداکثر عمق برش)	d_{max}
قطر فلانچ دیسک	D_{flange}
قطر دیسک	D_{saw}
سرعت برش سیم برش	Ss
درصد پلاژیوکلاز	PC
درصد راندمان تولید پلاک‌های سنگی	SE
سرعت موج در بلوک سنگ	V_B
سرعت موج در مغزه گرفته شده از بلوک سنگی	V_L

فهرست نمادها

توان موتور	P_C
تعداد پلاک های سنگی تولید شده سالم	N_{is}
تعداد کل پلاک های سنگی قابل تولید	N_{ts}
شاخص تردی سنگ (نسبت مقاومت فشاری به مقاومت کششی)	B_I
شاخص تردی سنگ (نسبت تفاضل مقاومت فشاری و مقاومت کششی به مجموع دو مقاومت فشاری و کششی)	B_2
شاخص تردی سنگ (مقاومت فشاری ضرب در مقاومت کششی تقسیم بر دو)	B_3
شاخص تردی سنگ (مقاومت فشاری در خاکه زیر 28 مش در آزمایش ضربه)	B_5
سفتی سنگ	T
درصد میزان کوارتز محتوی سنگ	Eqc
اندازه دانه ها	G_s
سختی موس	MH
مدول الاستیسیته	YM
فاکتور ساینده گی شیمازک	$SF-a$
تراورتن قرمز آذرشهر	TGH
تراورتن حاجی آباد	THA
تراورتن دره بخاری	TDA
مرمریت هفتومان	$MHAF$
مرمریت هرسین	MHA
مرمریت صلصالی	MSA
مرمریت انارک	MAN
گرانیت قرمز یزد	GYA
گرانیت مروارید مشهد	GMO
گرانیت خرمدره	GKH
گرانیت چایان	GCH
گرانیت نهبندان	GN
ریشه دوم متوسط مربعات	RMS
سیگنال های ارتعاشی برای سنگ های کربناته	$RMSa_C$
سیگنال های ارتعاشی برای سنگ های گرانیتی	$RMSa_G$
هزینه کارگر	C_L

نمونه جدول ۱

P	دستمزد هر کارگر در ماه
N_L	تعداد کارگر
H_m	تعداد ساعت کاری در ماه
C_d	هزینه مصرف دیسک
W_r	نرخ سایش
P_d	قیمت دیسک
n	تعداد دفعات استفاده از بدنه فولادی دیسک
L	طول مفید سگمنت
P_p	هزینه بدنه فولادی
S_p	هزینه سگمنت مصرفی برای فرآوری مجدد دیسک
G_p	هزینه جوش سگمنت‌ها به بدنه فولادی
C_E	هزینه مصرف انرژی
E_p	قیمت واحد انرژی
E_{co}	نرخ انرژی مصرفی
C_W	هزینه مصرف آب
W_{co}	نرخ مصرف آب
W_p	قیمت واحد لیتر آب
C_M	هزینه تعمیر و نگهداری
d_y	تعداد روزهای کاری در سال
H_d	تعداد ساعت کاری در روز
M_p	هزینه تعمیر و نگهداری سالانه
C_T	تابع هزینه‌ی کل تولید
I_C	شدت جریان مصرفی برای سنگ‌های کربناته
I_G	شدت جریان مصرفی برای سنگ‌های گرانیتی
C_{EC}	هزینه انرژی مصرفی برای گروه سنگ‌های نرم
C_{EG}	هزینه انرژی مصرفی برای گروه سنگ‌های سخت
C_{TC}	هزینه‌ی کل تولید برای گروه سنگ‌های نرم
C_{TG}	هزینه‌ی کل تولید برای گروه سنگ‌های سخت

فصل اول

مقدمه

1-1- مقدمه

امروزه دیسک‌های برش دهنده سنگ در کارخانه‌های تولید سنگ‌های ساختمانی به‌طور قابل توجهی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تخمین قابلیت برش یک سنگ در تخمین هزینه‌ها و طراحی یک کارخانه فرآوری سنگ از اهمیت بالایی برخوردار است. شناخت کامل سنگ‌های ساختمانی و ارزیابی توانایی اجرایی دستگاه‌های برش در کارخانه‌های فرآوری، طراحان و برنامه‌ریزان تولید را به سمت بهبود سرعت فرآوری و افزایش تولید سوق می‌دهد. نیاز به تولید بیشتر، کیفیت عالی و رقابت مؤثر در بازارهای جهانی مستلزم استفاده از تکنولوژی و ابزارهای پیشرفته در بخش استخراج و فرآوری سنگ می‌باشد. به‌کارگیری صحیح این وسایل از یک سو و شناخت و بررسی دقیق عملکرد آن‌ها از سوی دیگر به نحو چشم‌گیری در بالا بردن بازدهی و کیفیت سنگ‌های فرآوری شده کمک می‌کند. از جمله فاکتورهای مهم در عرصه رقابت سنگ‌های ساختمانی، هزینه تمام شده و کیفیت کالا می‌باشد. به‌طور کلی هزینه پرداخت یک پلاک سنگی در صنایع سنگ‌بری بیشتر تحت تأثیر فاکتورهایی نظیر هزینه‌های ابزاری (سایش ابزار) و هزینه‌های مصرف انرژی قرار خواهد داشت و همواره سعی بر این است که نسبت نرخ تولید به دو فاکتور مذکور افزایش یابد. معمولاً نرخ تولید با دو فاکتور سایش ابزار الماسی و مصرف انرژی نسبت مستقیم دارد. با افزایش نرخ تولید آهنگ سایش و مصرف انرژی افزایش می‌یابد. به‌همین منظور دستیابی به یک تعادل ایده‌آل بین نرخ تولید و دو فاکتور هزینه‌ساز سایش ابزار الماسی و مصرف انرژی لازم و ضروری می‌باشد.

از دیرباز تلاش انسان برای دستیابی به مجهولات در عرصه‌های گوناگون علم و فناوری قابل تقدیر و ستایش بوده است. بی‌تردید در عصر حاضر انجام تحقیقات کاربردی و هدفمند، یکی از ارکان پیشرفت علمی و توسعه کشورها می‌باشد. بیش از پنج دهه است که کشورهای صنعتی، به‌صورت کاملاً جدی و برنامه‌ریزی شده فعالیت‌های مربوط به کاهش تلفات ناشی از فقدان دانش فنی و تکنولوژی را در صنعت سنگ‌بری دنبال کرده‌اند که از این رهگذر نه تنها در هزینه‌های مربوط به مصارف انرژی و ابزارهای برش به صرفه‌جویی‌های قابل ملاحظه‌ای دست یافته‌اند، بلکه از توسعه فزاینده روند تخریب محیط زیست نیز به نحو مؤثری جلوگیری کرده‌اند. ارتقاء سطح تکنولوژی ساخت و تولید، افزایش درآمدهای دولت از ناحیه صادرات سنگ و کاهش

مصارف ابزارهای برش دهنده الماسی از دیگر ثمرات اجرای این قبیل سیاست‌ها بوده است. با توجه به منابع عظیم سنگ‌های ساختمانی در کشور و با توجه به نیاز کشور در زمینه تولید و صادرات این محصول (با کمترین هزینه‌های تولیدی)، ارتقاء راندمان دستگاه‌های برش و کاهش واردات ابزارهای الماسی، موضوع تحقیق رساله دکتری با عنوان "ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی و بهینه‌سازی پارامترهای برش" انتخاب گردید تا علاوه بر شناخت بیشتر از سنگ‌های ساختمانی در کشور و بهینه‌سازی الگوی برش، شاهد کاهش مصرف انرژی و واردات تجهیزات و ابزارهای الماسی در کشور باشیم. در این تحقیق سعی شد تا در اولین گام با بررسی منابع مختلف و تحقیقات گذشته و سپس با استفاده از آزمایش‌های دقیق، فرایند برش و پارامترهای مؤثر در آن مورد بررسی قرار گیرد. در مرحله بعد یک سیستم طبقه‌بندی جدید در برگیرنده تمامی مشخصات مهم فیزیکی و مکانیکی برای تعیین اندیس قابلیت برش سنگ ارائه شد. با استفاده از این شاخص جدید می‌توان ارتباط میان مشخصات سنگ و نتایج عملکرد برش را مورد ارزیابی قرار داد. در بخش نهایی از این تحقیق نیز بر اساس داده‌های مربوط به پارامترهای عملیاتی و مشخصات سنگ در تعدادی از واحدهای بزرگ سنگ‌بری در کشور، پارامترهای بهینه عملیاتی برش شامل نرخ پیشروی و عمق برش با توجه به نوع سنگ بر اساس حداقل‌سازی فاکتورهای هزینه‌ساز تعیین و پیشنهاد شد. در این فصل از تحقیق سعی می‌شود تا به بررسی ضرورت و اهداف انجام این تحقیق و همچنین معرفی فصل‌های مختلف آن به‌طور خلاصه پرداخته شود.

1-2- ضرورت انجام طرح

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

1. گستردگی و پراکندگی مطالعات و عدم وجود یک سیستم طبقه‌بندی جامع در برگیرنده تمامی پارامترهای مهم در زمینه قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی.
2. عدم وجود مطالعات کامل و دقیق برای پیش‌بینی میزان عملکرد برش (میزان مصرف انرژی و سایش ابزارهای الماسی) به منظور طراحی و برنامه‌ریزی در کارخانه‌های سنگ‌بری.

3. عدم وجود مطالعات کامل و دقیق برای ارزیابی و بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی برش در

عملکرد و توان اجرایی دستگاه‌های برش در صنایع سنگ‌بری کشور.

4. ارائه یک الگوی مناسب برش به منظور کاهش هزینه‌های تولید (به طور کلی کاهش هزینه‌های

مصرف انرژی و سایش ابزارهای الماسی) و افزایش راندمان تجهیزات برش در صنایع سنگ‌بری

برای نمونه سنگ‌های مختلف.

علی‌رغم ذخایر و تنوع بالای سنگ‌های ساختمانی در کشور و برخورداری از چندین هزار معدن و

کارخانه سنگ‌بری فعال، صنعت سنگ ایران نتوانسته است سهم شایسته‌ای در بازارهای جهانی

به‌دست آورد. با این حال هنوز مطالعات دقیق و گسترده‌ای برای ارتقاء سطح علمی و تکنولوژی

مرتبط با این موضوع در کشور انجام نگرفته است و تنها به بومی کردن و استفاده از تکنولوژی

کشورهای دیگر بسنده شده است. لذا با توجه به توضیحات و موارد ذکر شده، انجام این قبیل مطالعات

برای اولین بار در کشور لازم و ضروری می‌باشد.

3-1- اهداف تحقیق

به‌طور کلی مهم‌ترین اهداف این تحقیق عبارتند از:

1. بررسی تأثیر مشخصات سنگ در قابلیت برش سنگ‌ها و تعیین مهمترین پارامترهای

فیزیکی و مکانیکی سنگ در فرایند برش سنگ‌های ساختمانی.

2. ارائه یک سیستم طبقه‌بندی جدید در برگیرنده تمامی مشخصات مهم فیزیکی و مکانیکی

سنگ، برای بررسی و ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی.

3. بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی شامل نرخ پیشروی و عمق برش در نتایج عملکرد برش

سنگ‌های ساختمانی.

4. ارائه مدل‌های تجربی برای پیش‌بینی و تخمین میزان تولید، مصرف دیسک و مصرف انرژی در

مقیاس صنعتی به منظور طراحی و برنامه‌ریزی دقیق در کارخانه‌های فرآوری سنگ.

5. ارائه راه کارهای مناسب و اصلاح الگوی برش، برای بهبود در سرعت فرآوری و افزایش راندمان تولید دستگاه های برش سنگ.

6. بهینه سازی پارامترهای عملیاتی برش برای دستیابی به یک تعادل ایده آل میان هزینه های تولید (به ویژه دو فاکتور مهم طول عمر ابزار الماسی و نرخ مصرف انرژی) و نرخ برش برای دو گروه از سنگ های نرم و سخت.

1-4-4- مراحل انجام تحقیق

به طور کلی مراحل انجام این تحقیق را می توان به دو بخش الف) جمع آوری اطلاعات و تهیه جامعه آماری ب) تجزیه و تحلیل داده ها، تقسیم بندی کرد. روش انجام هر یک از این بخش ها به طور خلاصه در ذیل آورده شده است.

1-4-4-1- جمع آوری اطلاعات و تهیه جامعه آماری

در این تحقیق سعی گردید با توجه به امکانات موجود (شرایط اقتصادی حاکم بر تحقیق) جامعه آماری کامل و دقیقی از خانواده سنگ های نرم (کربناته) و سخت (گرانیتی) تهیه شود. بدین ترتیب با توجه به تنوع بالای سنگ های نرم و افزایش تقاضای بازار این نوع محصول نسبت به سنگ های گرانیتی، 7 نوع سنگ نرم شامل 4 نوع سنگ مرمریت و 3 نوع سنگ تراورتن و 5 نوع سنگ سخت (درمجموع 12 نوع سنگ ساختمانی) برای انجام مطالعات در نظر گرفته شد.

جامعه آماری تهیه شده در این تحقیق شامل دو بخش آزمایشگاهی و صنعتی می باشد. جامعه آماری تهیه شده در بخش آزمایشگاهی برای تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ و همچنین توسعه و ارزیابی سیستم طبقه بندی جدید برای پیش بینی عملکرد برش در نظر گرفته شد. در کنار مطالعات آزمایشگاهی، مطالعاتی نیز در بخش صنعتی انجام شد که جامعه آماری تهیه شده در این بخش، برای ارزیابی و پیش بینی عملکرد برش و بهینه سازی پارامترهای عملیاتی مورد استفاده قرار گرفت. در تحقیق حاضر، روش نمونه گیری و برداشت داده ها در دو بخش شامل تهیه نمونه ها و پلاک های سنگی برای انجام مطالعات آزمایشگاهی و اندازه گیری عملکرد برش (مقادیر سایش، ارتعاش سیستم و مصرف انرژی) انجام

شد. برای مطالعه و اندازه‌گیری سایش دیسک از اندازه‌گیری ماکروسکوپی بوسیله یک میکرومتر دیجیتالی استفاده شد. در واقع با اندازه‌گیری کاهش ارتفاع سگمنت نسبت به مقدار کارکرد آن می‌توان مقدار نرخ سایش ماکروسکوپی را تعیین کرد. مقدار مصرف انرژی دستگاه برش نیز در طول فرایند برش با توجه به ثبت تغییرات جریان ورودی به دستگاه توسط یک آمپر سنج دقیق، اندازه‌گیری شد. به طور خلاصه جمع‌آوری اطلاعات و تهیه جامعه آماری در این تحقیق در 4 بخش به صورت زیر انجام شد.

1. انجام مطالعات کتابخانه‌ای و جستجوی مقالات علمی برای بررسی سابقه علمی موضوع و

شناسایی مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ‌ها.

2. انجام مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه.

3. راه‌اندازی یک دستگاه برش در مقیاس آزمایشگاهی و تهیه پلاک‌های سنگی برای مطالعه فرایند برش

4. بازدید از واحدهای سنگ‌بری برای جمع‌آوری داده‌های صنعتی.

1-4-2- تجزیه و تحلیل داده‌ها

در طی انجام 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 مختلف این تحقیق شامل موارد زیر می‌باشند:

1. استفاده از دو روش تحلیل سلسله مراتبی فازی¹ و تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی² برای

تعیین وزن و اهمیت پارامترها در سیستم طبقه‌بندی جدید.

2. استفاده از رگرسیون‌های ساده و چند متغیره برای انجام مطالعات آماری و ارائه روابط تجربی

در دو بخش آزمایشگاهی و صنعتی با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS³.

3. استفاده از الگوریتم‌های تکاملی بهینه‌ساز مانند الگوریتم ژنتیک (GA⁴) برای بهبود و

بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی برش.

¹-Fuzzy Analytical Hierarchy Presses

²- Fuzzy Delphi Analytical Hierarchy Presses

³ Statistical Package for Social Science

⁴ Genetic Algorithm

1-5- سازماندهی رساله

به طور کلی مطالب مندرج در این تحقیق در 7 فصل به شرح ذیل سازماندهی و تدوین شد:

فصل 2: فرایند برش سنگ

در این فصل از تحقیق سعی شد تا به بررسی و شناخت فرایند برش سنگ پرداخته شود. به طور خلاصه مواردی که در این فصل به آن اشاره خواهد شد شامل:

- 1- مکانیزم برش و فرایند تشکیل تراشه.
- 2- عوامل مؤثر در فرایند برش سنگ.
- 3- معیارهای ارزیابی عملکرد فرایند برش سنگ.

فصل 3: بررسی سابقه علمی موضوع

در این فصل از تحقیق به بررسی سابقه علمی موضوع، روابط و طبقه‌بندی‌های ارائه شده در زمینه‌ی قابلیت برش سنگ و نقد و بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود. به طور خلاصه موارد اشاره شده در این فصل عبارتند از:

- 1- مروری بر سوابق علمی موضوع.
- 2- روابط تجربی ارائه شده در زمینه قابلیت برش.
- 3- طبقه‌بندی‌های ارائه شده در زمینه قابلیت برش.
- 4- نقد و بررسی بر سابقه علمی موضوع.

فصل 4: ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی

در این فصل از تحقیق پس از شناسایی و تعیین مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ، به بررسی و ارائه شاخص جدیدی برای پیش‌بینی و ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی با استفاده از یک سیستم طبقه‌بندی جدید پرداخته می‌شود. در ادامه مطالعات انجام شده در این فصل، به پیش‌بینی و ارزیابی عملکرد برش سنگ‌های ساختمانی با استفاده از مطالعات آماری (با توجه به پارامترهای عملیاتی برش و شاخص قابلیت برش سنگ) پرداخته می‌شود. بدین ترتیب در این فصل،

ارتباط میان شدت جریان مصرفی دستگاه و نوسانات به وجود آمده در سیستم با مشخصات سنگ و

پارامترهای عملیاتی مورد بررسی قرار می گیرد، به طور خلاصه مطالب مندرج در این فصل شامل:

- 1- تعیین مهمترین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ در زمینه قابلیت برش سنگ های ساختمانی.
- 2- تعیین درجه اهمیت هر یک از پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و دلفی فازی با توجه به نظرات متخصصان.
- 3- ارائه سیستم طبقه بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ های ساختمانی.
- 4- راه اندازی دستگاه برش در مقیاس آزمایشگاهی، تهیه نمونه سنگ های مورد مطالعه برای آزمایشات برش و انجام مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ.
- 5- طبقه بندی سنگ های مورد مطالعه بر اساس شاخص قابلیت برش با استفاده از سیستم طبقه بندی جدید و همچنین ارزیابی سیستم طبقه بندی جدید با توجه به نتایج حاصل از آزمایش های برش.
- 6- ارائه مدل های آماری برای پیش بینی و ارزیابی عملکرد برش و همچنین بررسی ارتباط میان معیارهای عملکرد برش با شاخص قابلیت برش سنگ و پارامترهای عملیاتی برش شامل عمق برش و نرخ پیشروی.

فصل 5: تحلیل اقتصادی فرایند برش

در این فصل از تحقیق سعی می شود تا به بررسی و تحلیل اقتصادی فرایند برش سنگ های ساختمانی در کشور پرداخته شود. برای این منظور پس از تعیین فاکتورهای هزینه ساز در فرایند برش یک بلوک سنگی، تحلیل حساسیت هر یک از این فاکتورها در صنایع سنگبری مورد بررسی قرار گرفت. به طور خلاصه مطالب مندرج در این فصل شامل موارد زیر می باشد:

- 1- تعیین فاکتورهای هزینه ساز در فرایند برش یک بلوک سنگی و بررسی تأثیر هر یک از آنها بر روی هزینه کلی تولید در دو گروه از سنگ های ساختمانی نرم و سخت.
- 2- بررسی تأثیر نوع سنگ بر میزان حساسیت فاکتورهای هزینه ساز در فرایند برش بلوک های سنگی نرم و سخت.

فصل 6: بهینه‌سازی فرایند برش

بهترین شرایط برش زمانی رخ می‌دهد که یک تعادل ایده‌آل بین طول عمر ابزار، نرخ مصرف انرژی و نرخ برش وجود داشته باشد. در واقع راندمان تولید در فرایند برش سنگ‌های ساختمانی با این متغیرهای وابسته مشخص می‌شود. در این فصل از تحقیق سعی شد تا با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی، بهترین شرایط برش (یعنی رسیدن به یک تعادل ایده‌آل بین فاکتورهای هزینه‌ساز به ویژه دو فاکتور مهم طول عمر ابزار الماسی و نرخ مصرف انرژی با نرخ برش) تحقیق شود. به طور خلاصه مطالب مندرج در این فصل شامل موارد زیر می‌باشد:

1- بررسی ارتباط میان هزینه‌های کلی تولید با نرخ تولید و تعیین نقاط بهینه برش برای نمونه سنگ‌های مورد مطالعه.

2- بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی برش شامل دو پارامتر عمق برش و نرخ پیشروی بر اساس کاهش هزینه‌های تولید در دو گروه از سنگ‌های نرم و سخت با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک.

فصل 7: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این فصل از تحقیق به بررسی نتایج حاصل از تحقیق پرداخته شده و پیشنهاداتی نیز در راستای ارتقاء تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

فرایند برش سنگ

2-1- مقدمه

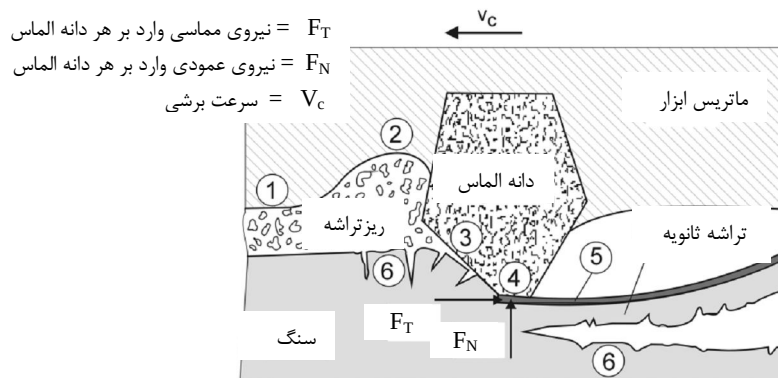
فرایند برش سنگ یک فرایند سایشی می‌باشد. به طوری که می‌توان برش سنگ به کمک سگمنت‌های الماسی را سایش ذرات تشکیل دهنده سنگ بوسیله خراش دانه‌های الماس روی سطح سنگ دانست. برای درک بهتر این فرایند و شرایط حاکم بر دانه الماس در حال برش، شناخت مکانیزم برش و عوامل مؤثر بر آن لازم و ضروری می‌باشد. در این فصل ابتدا به بررسی مکانیزم برش و عوامل مؤثر بر آن پرداخته شده و در ادامه معیارهای ارزیابی عملکرد برش مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

2-2- مکانیزم برش و فرایند تشکیل تراشه

به طور کلی فرایند برش سنگ با استفاده از ابزار برش الماسی را می‌توان در طی دو مرحله به صورت زیر بیان کرد. مرحله نخست از فرایند برش سنگ را می‌توان در نتیجه حرکت سگمنت‌های الماسی بر روی سطح برش⁵ و به دنبال آن تشکیل تراشه⁶ سنگ در نتیجه نفوذ دانه‌های الماس در داخل سنگ دانست. در طی این فرایند، دانه الماس با خراشیدن و شکافتن سطح برش موجب تشکیل تراشه و ایجاد سطح جدید برای دانه الماس بعدی می‌شود. هنگامی که سنگ بوسیله ابزار الماسی تحت برش قرار می‌گیرد اندرکنش مکانیکی میان ابزار و سنگ، نیروهای فرایند را ایجاد می‌کنند که عمدتاً ناشی از فاکتورهایی نظیر تغییر شکل الاستیکی و پلاستیکی در سنگ و اصطکاک میان سگمنت (دانه الماس و ماتریس) با سنگ و تراشه‌های حاصل از برش می‌باشد. شکل 2-1 نمای شماتیکی از یک دانه الماس در حال برش و اندرکنش نیروهای بین میان دانه الماس و سطح خراشیده شده از سنگ را نشان می‌دهد. دو مؤلفه نیروی مماسی و نیروی عمودی، از جمله مهم‌ترین نیروهای مؤثر در مکانیزم برش سنگ می‌باشند (Tonshoff et al., 2002).

⁵-Workpiece

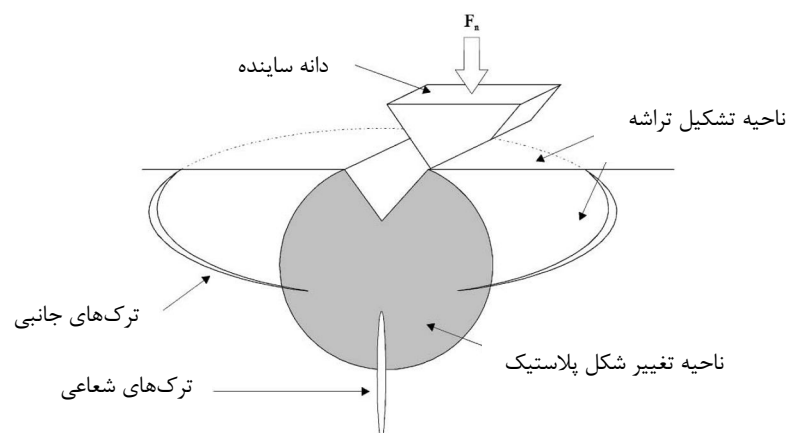
⁶-Chip



- 1- ناحیه اصطکاک بین ریز تراشه ها و ماتریس ابزار 4- ناحیه اصطکاک بین سنگ و دانه الماس
 2- ناحیه سایش یافته توسط ریز تراشه ها و تراشه ها 5- ناحیه تغییر شکل پلاستیک
 3- ناحیه تشکیل تراشه اولیه 6- ناحیه تغییر شکل الاستیک

شکل 2-1- تعامل نیروهای موجود میان دانه الماس و سطح خراشیده شده از سنگ (Tonshoff et al., 2002)

در شروع فرایند، تنش‌های فشاری و کششی ناشی از برخورد دانه الماس با سطح سنگ و نیروهای مماسی به وجود آمده در جلوی دانه الماس، موجب تشکیل تراشه اولیه در ناحیه تحت برش می‌شوند. این مرحله از فرایند برش، تحت عنوان مکانیزم اولیه تشکیل تراشه نامیده می‌شود. زمانی که تراشه اولیه شکل می‌گیرد بخشی از سنگ که در ناحیه تحتانی دانه الماس قرار دارد در اثر تنش فشاری اعمال شده از طرف دانه تغییر شکل پلاستیک می‌دهد. مطابق شکل 2-2 یک ناحیه تغییر شکل پلاستیک برگشت‌ناپذیر در زیر فشاری که از حرکت مماسی دانه الماس، ایجاد شده به وجود می‌آید. به دلیل ماهیت ترد سنگ، تغییر شکل پلاستیک و تنش‌های فشاری، ترک‌هایی به دو صورت شعاعی و جانبی (عرضی) در ناحیه تحت برش ایجاد می‌شوند. منشأ تشکیل این ترک‌ها، تنش‌های کششی در درون ناحیه تغییر شکل پلاستیک است. این گونه ترک‌ها بعد از حذف بار اعمالی به دلیل تمرکز تنش‌های کششی پس‌ماند روی نوک ترک گسترش می‌یابند (Konstanty, 2002).



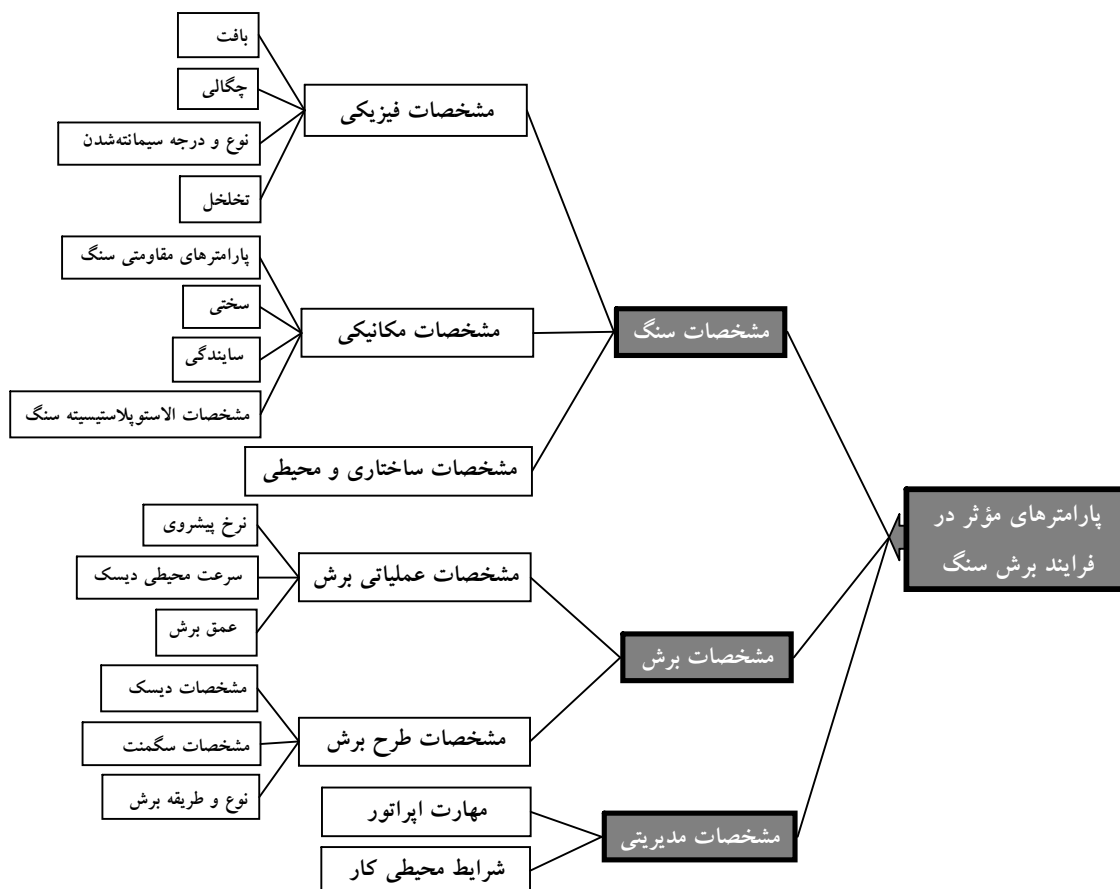
شکل 2-2 - نمایی از تشکیل یک منطقه پلاستیک به همراه ترک‌های شعاعی و جانبی در برش ترد (Bianchi et al., 1998)

همان‌طور که در شکل 2-2 نشان داده شده است ترک‌های جانبی از زیر ناحیه تغییر شکل پلاستیک شروع شده و تا سطح سنگ گسترش می‌یابند. معمولاً این ترک‌ها بعد از برداشت بارهای اعمالی ایجاد می‌شوند. در حقیقت این تغییر ناگهانی تنش موجب یک بازگشت الاستیکی شدید شده که این بازگشت 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 عامل ایجاد تراشه‌های ثانویه می‌شوند. تراشه‌های ایجاد شده در فرایندهای موفق سنگ‌بری عمدتاً از این نوع می‌باشند و برشی که از چنین مشخصه‌ای برخوردار باشد از راندمان و کارایی بیشتری برخوردار خواهد بود. مرحله آخر از فرایند برش، حذف تراشه‌ها و کاهش دمای محیط به کمک جریان سیال سرد می‌باشد. در طی این فرایند تراشه‌های ایجاد شده در مرحله قبل با فشار سیال (در اکثر فرایندها از جریان آب شهری به عنوان سیال روان‌کار استفاده می‌شود) از سطح برش خارج شده و موجب کاهش دمای محیط برش (ناحیه میان سگمنت و سطح برش) می‌شوند. تأثیر روان‌کار هنوز به درستی در شرایط مختلف آشکار نشده است. اما با توجه به بررسی‌های انجام شده مشخص شده است که کاربرد سیال در فرایند، افزایش ریز تراشه‌های اولیه که ناشی از تنش‌های فشاری لبه ابزار برنده می‌باشد را به همراه دارد. با توجه به نتایج بررسی‌های انجام شده می‌توان گفت که کاربرد آب به عنوان روان‌کننده موجب برشی

نرم‌تر و هموارتر با کیفیت سطح بهتر می‌شود. همچنین تمرکز بارهای حرارتی روی نوک دانه‌ها کاهش یافته و تراشه‌های تولید شده به شکل بهتری از محیط برش خارج می‌شوند.

3-2- عوامل مؤثر در فرایند برش

به طور کلی پارامترهای مؤثر در فرایند برش سنگ را می‌توان در سه بخش اصلی شامل الف) مشخصات قطعه کار یا سنگ ب) مشخصات برش و ج) مشخصات مدیریتی از قبیل مهارت اپراتور و شرایط محیطی کار مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. از میان این پارامترها، پارامترهای عملیاتی و مشخصات طرح برش به عنوان پارامترهای قابل کنترل و یا پارامترهای وابسته و پارامترهای مربوط به مشخصات سنگ، به عنوان پارامترهای غیر قابل کنترل یا پارامترهای مستقل در فرایند برش سنگ مطرح می‌باشند. هر کدام از این دسته پارامترها به نحو خاصی در کارآیی و توان تولید فرایند برش تأثیرگذار می‌باشند. شکل 3-2 پارامترهای مؤثر در فرایند برش را نشان می‌دهد. در ادامه به تشریح هر یک با تفصیل بیشتری پرداخته می‌شود.



شکل 3-2- پارامترهای مؤثر در فرایند برش سنگ

2-3-1- مشخصات سنگ

مشخصات سنگ یکی از عوامل مؤثر در فرایند برش به خصوص در فرایند تشکیل تراشه می‌باشد. سنگ به عنوان میزبان عملیات برش، از نقش حیاتی در فرایند برش و تولید دارد. مشخصات سنگ تعیین کننده شرایط، کیفیت و کمیت اندرکنش میان سنگ و ماشین بوده لذا مکانیزم تشکیل تراشه و پیشروی ابزار را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به گستردگی مشخصات سنگ به منظور سهولت در تجزیه و تحلیل و مطالعه این پارامترها، آن‌ها را می‌توان در سه گروه مشخصات فیزیکی، مکانیکی و مشخصات ساختاری تقسیم‌بندی کرد. خواصی نظیر استحکام، تردی، مقاومت در برابر ضربه، اندازه دانه‌ها، بافت سنگ، استحکام و چسبندگی بین دانه‌های سنگ (استحکام سیمان‌شدگی سنگ)، وجود درزه‌ها و خلل و فرج در سنگ (ساختار شکست‌های ریز) می‌توانند نقش مهمی را در فرایند برش ایفا کنند. در این بخش برای بررسی پارامترهای مؤثر در فرایند برش سنگ، هر یک از مشخصات مذکور مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرند.

2-3-1-1- مشخصات فیزیکی سنگ

چگالی، اندازه، شکل دانه، تخلخل، درصد کوارتز، ضریب بافت و نوع و درجه سیمانی شدن از جمله مهمترین مشخصات فیزیکی سنگ‌ها می‌باشند. جدول 1-2 برخی از مشخصات فیزیکی سنگ که توسط محققین در زمینه قابلیت برش سنگ مطالعه شده‌اند را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در برخی از این تحقیقات رابطه ریاضی خاصی بین مشخصات فیزیکی و قابلیت برش سنگ ارائه نشده است و تنها به ذکر با اهمیت بودن این پارامتر در فرایند برش اکتفا شده است. مطابق نتایج ارائه شده در این جدول می‌توان به این نکته اشاره کرد که از میان پارامترهای مطالعه شده توسط محققین، دو پارامتر درصد کوارتز و اندازه و شکل دانه‌ها در اکثر مطالعات مورد بررسی قرار گرفته یا اهمیت آن‌ها مورد تأکید قرار گرفته است.

جدول 1-2- مشخصات فیزیکی سنگ مطالعه شده توسط محققین

مشخصات فیزیکی سنگ						منابع
نوع و درجه سیمانی شدن	ضریب بافت	درصد کوارتز	تخلخل	اندازه و شکل دانه	چگالی	
		•		•		Burgess 1978
		•		•		Wright and Cassapi 1985
		•				Jenning and Wright 1989
		•		•		Clausen et al. 1996
			•		•	Ceylanoglu & Gorgulu, 1997
		•		•		Wei et al. 2003
		•	•	•	•	Ersoy and Atici 2004
•	•	•		•	•	Ozcelik et al. 2004
		•	•	•	•	Ersoy et al. 2005
		•				Delgado et al. 2005
				•		Buyuksagis and Goktan 2005
			•			Kahraman et al. 2006
			•		•	Kahraman et al. 2007
•	•			•		Ozcelik 2007
		•	•	•	•	Buyuksagis 2007
		•				Mikaeil et al. 2008
		•		•		Mikaeil et al. 2011b

الف - چگالی

چگالی یک سنگ نسبت جرم مخصوص سنگ به جرم مخصوص آب یا نسبت وزن مخصوص سنگ به وزن مخصوص آب است. به طور معمول چگالی سنگ‌ها بین $1/9$ تا $3/5$ متغیر است. اما در موارد استثنایی سنگ‌ها به دلیل داشتن کانی‌های سنگین چگالی بیشتری دارند. از آنجائی که چگالی با مقاومت سنگ رابطه مستقیم دارد می‌توان گفت که با عملکرد ابزارهای برش در فرایند برش رابطه عکس دارد. به طور کلی هرچه سنگ متراکم‌تر و چگال‌تر باشد، قابلیت برش آن کمتر خواهد بود.

ب - بافت

یکی از فاکتورهای مهم و اساسی در رفتار مهندسی سنگ‌ها به ویژه در فرایند برش و سایش ابزارهای الماسی، بافت سنگ می‌باشد. لذا این پارامتر در انتخاب درست تجهیزات و ماشین‌آلات برش، تعیین رفتار مکانیکی و پیش‌بینی عملکرد تجهیزات برش باید مورد توجه قرار گیرد. از جمله مشخصات اصلی بافت می‌توان به اندازه، شکل، جهت‌یافتگی، نسبت دانه‌ها و ماتریس سنگ اشاره کرد. از میان مشخصات بافت، شکل دانه‌های سنگ به عنوان بحرانی‌ترین پارامتر مؤثر در قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها مطرح

می‌باشد. در این میان اندازه دانه‌ها نیز از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند چرا که ترک‌های جانبی (عرضی) عمدتاً در مرز دانه‌ها رشد کرده و گسترش می‌یابند و هر چه اندازه دانه‌ها بزرگتر باشد اندازه تراشه‌های ثانویه تشکیل شده نیز بزرگتر می‌شود. دانه‌های گوشه‌دار کشیده و ذرات ریز سنگ باعث کاهش سرعت برش و افزایش قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها می‌شود (Ersoy & Atici, 2004).

یکی از پارامترهای مهم و کمی بافت، ضریب بافت می‌باشد که توسط هاوارد و رولند⁷ در سال 1986 ارائه شده است (Howarth & Rowlands, 1986). با معرفی ضریب بافت و کمی کردن مشخصات بافت سنگ، انقلاب بزرگی در عرصه تکنیک‌های پتروگرافیکی و مهندسی سنگ ایجاد شد. به طوری که بعد از آن اکثر محققین از این پارامتر برای برقراری ارتباط میان مشخصات بافت و مشخصات مهندسی سنگ استفاده کردند. در زمینه قابلیت برش سنگ، آنچه که از نتایج مطالعات محققین مشخص است با افزایش مقدار ضریب بافت، نرخ برش کاهش یافته و نرخ سایش افزایش خواهد یافت.

ج - نوع و درجه سیمانی شدن

مهم‌ترین خصوصیت فیزیکی سنگ‌ها، یعنی نیروی به هم چسبی، حاصل نیروی جاذبه بین مولکول‌های یک جسم یا ماده است. به عبارت دیگر نیروی به هم چسبی یک نیروی درون زاست و در مقابل نیروهای خارجی جدا کننده مولکول‌ها، جسم را مقاوم می‌کند. ماتریس‌های سنگ‌های مختلف عمدتاً با توجه به منشأ ساخت و فرایندهای درگیر در شکل‌گیری و نیز عمر آن‌ها متفاوت می‌باشند. ماتریس سنگ می‌تواند هم‌جنس یا غیر هم‌جنس دانه‌های سنگی باشد. در انواع سنگ‌ها عموماً ماتریس سنگ‌ها شامل گونه‌های سیلیسی، آهکی و رسی می‌باشد (اصانلو، 1386).

آنچه مسلم است این است که استحکام و چسبندگی بین دانه‌ها هرچه بیشتر باشد تشکیل و رشد ترک‌های جانبی و به دنبال آن ضخامت تراشه تحت نفوذ دانه الماس کاهش یافته و در نتیجه سرعت برش نیز کاهش می‌یابد. در مورد سنگ‌های آهکی که عمدتاً ساختاری لایه لایه دارند و استحکام چسبندگی بین لایه‌ها کمتر از خود لایه می‌باشد، تراشه‌های ثانویه به صورت دانه‌های بزرگ در جهت

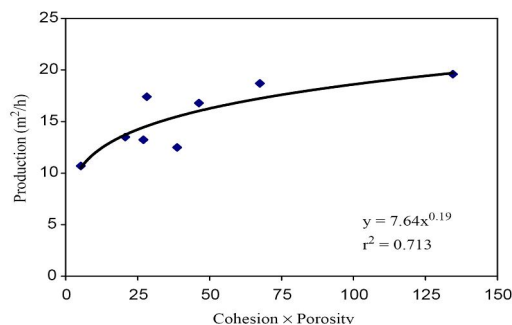
⁷-Howarth & Rowlands

لایه‌ها تشکیل و جدا می‌شوند. بدیهی است که با افزایش کیفیت سیمانی‌شدن و نیز افزایش مقاومت سیمان سنگ، قابلیت برش سنگ کاهش پیدا می‌کند.

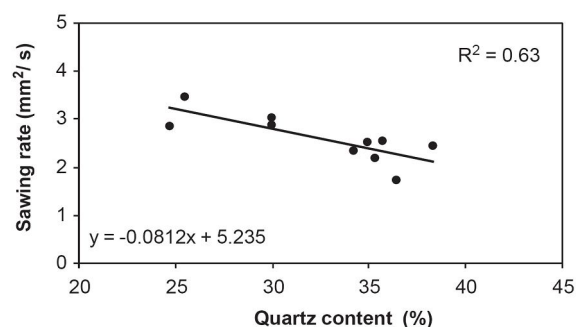
د - تخلخل

یکی دیگر از پارامترهای مهم فیزیکی سنگ در زمینه قابلیت برش سنگ، تخلخل سنگ می‌باشد. سنگ‌ها اجسام کاملاً توپری نیستند و عموماً حاوی خلل و فرج به صورت حفره‌های کم و بیش مرتبط و یا حفره‌های مجزا هستند. وجود این حفره‌ها اهمیت زیادی در خواص مکانیکی و مهندسی سنگ و نیز تشکیل و گسترش ترک‌های جانبی و شعاعی دارا می‌باشند. در واقع تخلخل و درزه‌ها در ساختار ماده سنگ نقش عیوب و ترک‌های اولیه را بازی می‌کنند. هرچه مقدار این درزه‌ها و تخلخل‌ها بیشتر باشد تراشه‌های ثانویه راحت‌تر تشکیل می‌شوند. باتوجه به مطالب فوق می‌توان برش مشکل سنگ‌های گرانیتی (که در آن نیروهای برشی بیشتری نیاز می‌باشد) را نسبت به سنگ‌های آهکی و مرمر پیش‌بینی نمود.

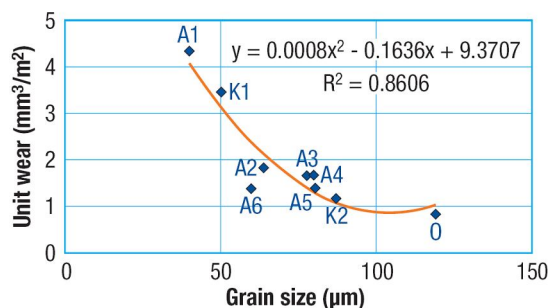
شکل‌های 2-4 تا 2-7 ارتباط میان برخی از پارامترهای فیزیکی سنگ را با نرخ برش و نرخ سایش نشان می‌دهند.



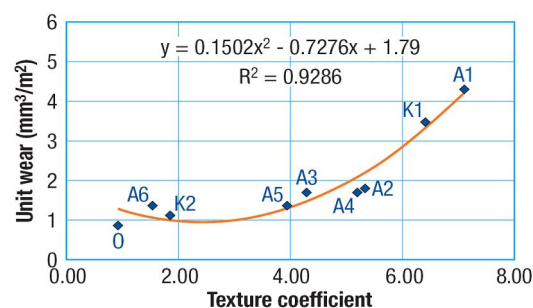
شکل 2-5- رابطه میان نرخ تولید و ضرب دو پارامتر تخلخل و چسبندگی (Kahraman et al. 2006)



2-4- ارتباط میان نرخ برش و درصد کوارتز (Delgado et al. 2005)



2-7- ارتباط میان نرخ سایش و اندازه دانه‌ها (Ozcelik, 2007)



2-6- ارتباط میان نرخ سایش و ضریب بافت (Ozcelik, 2007)

2-3-1-2- مشخصات مکانیکی سنگ‌ها

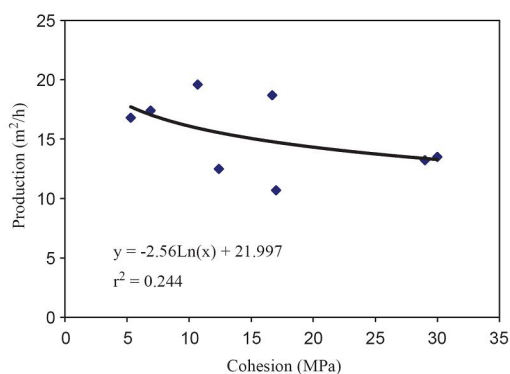
الف - پارامترهای مقاومتی سنگ

مقاومت، میزان پایداری سنگ در مقابل تنش‌های خارجی است. این تنش‌ها ممکن است در حالت سکون (استاتیک) و یا در حالت متحرک (دینامیک) باشند. هنگامی که استحکام یا مقاومت سنگ افزایش می‌یابد تشکیل تراشه ثانویه مشکل‌تر شده و به دنبال آن نیروهای برشی بیشتری برای تشکیل مقدار مشخصی از تراشه نیاز است. یکی از پارامترهای مقاومتی سنگ، مقاومت فشاری می‌باشد. مقاومت فشاری را می‌توان به عنوان مهم‌ترین و پرکاربردترین ویژگی سنگ‌ها دانست. به دلیل اهمیت و نقش مقاومت در رفتارهای مهندسی سنگ، مقاومت فشاری در اکثر طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ و در کاربردهای گسترده مکانیک سنگ وارد شده و جز لاینفک قضاوت‌های مهندسی در مورد یک سنگ و یک توده سنگ می‌باشد. یکی دیگر از پارامترهای مهم مقاومتی سنگ، مقاومت کششی سنگ می‌باشد. مقاومت کششی در واقع ماکزیمم تنش کششی است که یک سنگ می‌تواند تحمل کند. دو پارامتر مقاومت فشاری و کششی از جمله مهم‌ترین پارامترهایی هستند که در بیشتر مطالعات در زمینه قابلیت برش سنگ مورد توجه قرار گرفته‌اند. علاوه بر این دو پارامتر، پارامترهای مقاومتی دیگری نظیر شاخص مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت ضربه‌ای، مقاومت خمشی و مقاومت برشی نیز در برخی از مطالعات انجام شده در زمینه قابلیت برش سنگ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همچنین در کنار این پارامترها، پارامترهایی مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی که معرف مقاومت ذاتی سنگ می‌باشند، نیز در کنار سایر پارامترها مورد بررسی قرار گرفته شده‌اند. به هر حال آنچه مسلم است با افزایش پارامترهای مقاومتی سنگ قابلیت برش سنگ کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به خاطر افزایش مقاومت مرزی دانه‌ها و ماتریس سنگ و به دنبال آن کاهش قدرت تراشه برداری دانه الماس دانست. جدول 2-2 مطالعاتی که در آن‌ها از پارامترهای مقاومتی سنگ برای بررسی و ارزیابی قابلیت برش سنگ استفاده شده یا به اهمیت آن‌ها اشاره شده است را نشان می‌دهد. شکل‌های 2-8 تا 2-16 ارتباط میان برخی از این

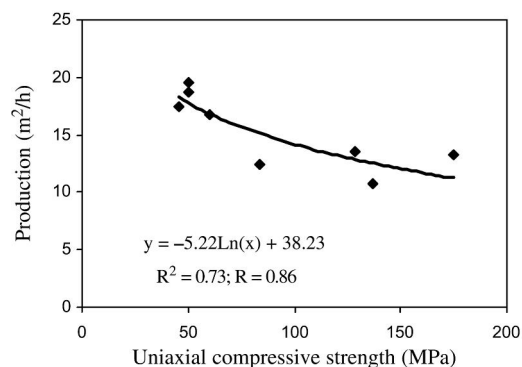
پارامترها را با نرخ برش، نرخ سایش ابزار و انرژی ویژه برش⁸ (انرژی مصرف شده به ازاء واحد حجم برش خورده از سنگ) نشان می‌دهند.

جدول 2-2- پارامترهای مقاومتی مطالعه شده توسط محققین

منابع	پارامترهای مقاومتی سنگ					
	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	شاخص مقاومت بار نقطه‌ای	مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری
Wright and Cassapi 1985						
Jenning and Wright 1989						
Ceylanoglu & Gorgulu, 1997						
Wei et al. 2003						
Eyuboglu et al. 2003						
Ersoy and Atici 2004						
Kahraman et al. 2004						
Gunaydin et al. 2004						
Ozcelik et al. 2004						
Buyuksagis and Goktan 2005						
Ersoy et al. 2005						
Kahraman et al. 2006						
Fener et al. 2007						
Kahraman et al. 2007						
Ozcelik 2007						
Tutmez et al. 2007						
Buyuksagis 2007						
Mikaeil et al. 2008						
Atici and Ersoy 2009						
Ataei et al. 2011						
Mikaeil et al. 2011a						
Mikaeil et al. 2011b						
Mikaeil et al. 2011c						

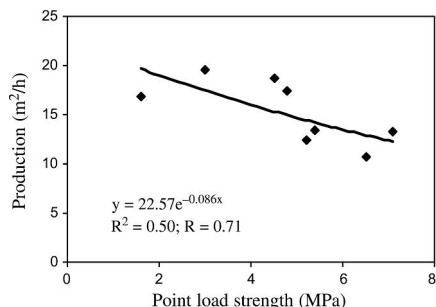


شکل 2-9- رابطه میان نرخ تولید و چسبندگی (Kahraman et al. 2006)

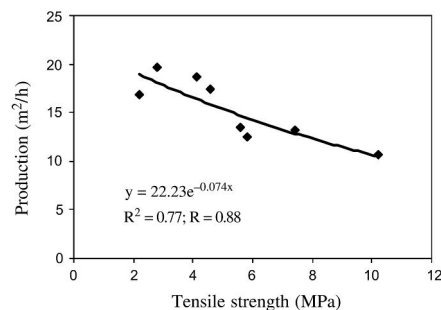


شکل 2-8- رابطه میان نرخ تولید و مقاومت فشاری (Fener et al. 2007)

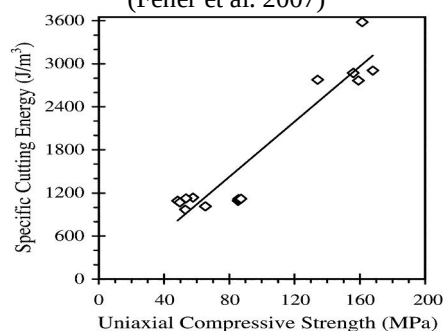
⁸-Specific Cutting Energy



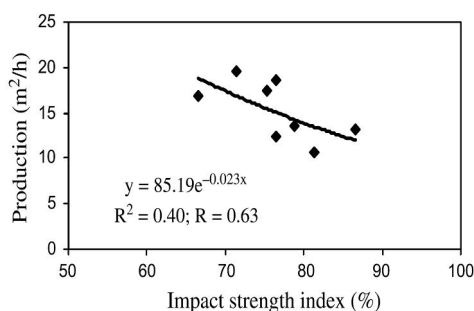
شکل 2-11- رابطه میان نرخ تولید و مقاومت بار نقطه‌ای (Fener et al. 2007)



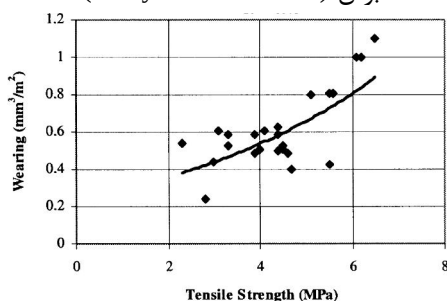
شکل 2-10- رابطه میان نرخ تولید و مقاومت کششی (Fener et al. 2007)



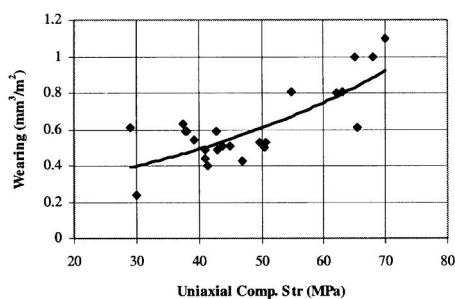
شکل 2-13- رابطه میان مقاومت فشاری با مقدار انرژی ویژه برش (Ersoy and Atici 2004)



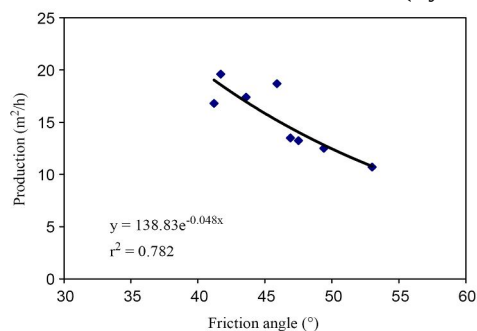
شکل 2-12- رابطه میان نرخ تولید و شاخص مقاومت ضربه‌ای (Fener et al. 2007)



شکل 2-15- رابطه میان نرخ سایش ابزار و مقاومت کششی (Eyuboglu et al. 2003)



شکل 2-14- رابطه میان نرخ سایش ابزار و مقاومت فشاری (Eyuboglu et al. 2003)



شکل 2-16- رابطه میان نرخ تولید و زاویه اصطکاک داخلی (Fener et al. 2007)

ب- سختی

سختی عبارت است از مقاومتی که یک کانی یا سنگ در مقابل ابزار خراش‌دهنده (ساینده) از خود نشان می‌دهد تا خراش (سایش) در آن ایجاد نشود. ابزار خراش‌دهنده در تماس با کانی یا سنگ بوده و طی حرکتی

(نیرو) موجب ساینده‌گی کانی یا سنگ می‌شوند. همه کانی‌ها و یا سنگ‌ها در مقابل همه اجسام خراش‌دهنده انعطاف‌پذیری ندارند، به عبارت دیگر از نظر خراش‌دهندگی هم اجسام خراش‌دهنده و هم خراش‌پذیرنده طبقه‌بندی شده‌اند. اگر مقاومت سنگ در برابر خراش حاصل از جسم دیگر، مورد نظر باشد، سختی استاتیکی نامیده می‌شود و در حالتی که سختی سنگ در برابر ضربه در نظر گرفته شود سختی دینامیکی نامیده می‌شود. این دو سختی با یکدیگر مساوی نیستند (وفائیان، 1371). برای ارزیابی سختی سنگ شاخص‌های مختلفی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به عدد چکش اشمیت⁹، سختی موهس¹⁰، ویکورز¹¹، شور¹²، نوپ¹³ و شاخص سختی ان‌سی‌بی¹⁴ اشاره کرد. در جدول 2-3 برخی از شاخص‌های سختی که توسط تعدادی از محققین در زمینه قابلیت برش سنگ مورد بررسی قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است. شکل‌های 2-17 تا 2-20 ارتباط میان برخی از این شاخص‌ها را با نرخ برش و نرخ سایش نشان می‌دهند. نتایج حاصل از این تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش سختی، سرعت برش و قابلیت برش سنگ‌ها کاهش می‌یابد.

جدول 2-3- شاخص‌های سختی مطالعه شده توسط محققین

شاخص‌های سختی					منابع
شور	ویکورز	ان‌سی‌بی	نوپ	موهس	عدد چکش اشمیت
•		•		•	Wright and Cassapi 1985
•					Birle and Ratterman 1986
		•		•	Jenning and Wright 1989
					Ceylanoglu & Gorgulu, 1997
•					Wei et al. 2003
•		•			Eyuboglu et al. 2003
•					Ersoy and Atici 2004
					Kahraman et al. 2004
•					Ozcelik et al. 2004
				•	Ersoy et al. 2005
	•				Delgado et al. 2005
•		•	•	•	Buyuksagis and Gotan 2005
					Fener et al. 2007
•					Ozcelik 2007
					Tutmez et al. 2007
•					Buyuksagis 2007
					Ataei et al. 2010
					Mikaeil et al. 2011a
				•	Mikaeil et al. 2011b

⁹- Schmidt

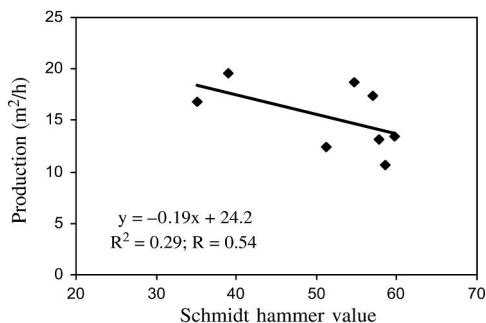
¹⁰-Mohs

¹¹-Vickers

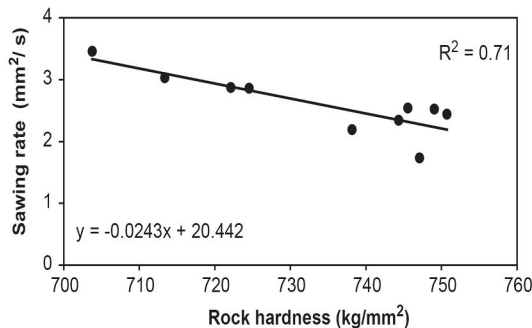
¹²-Shore

¹³-Knoop

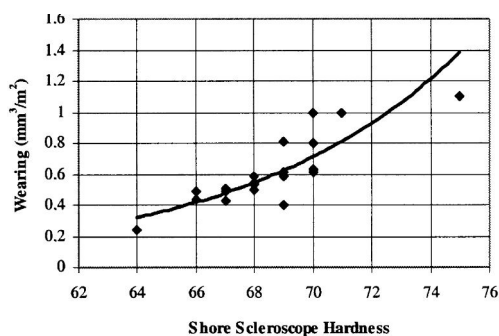
¹⁴-NCB



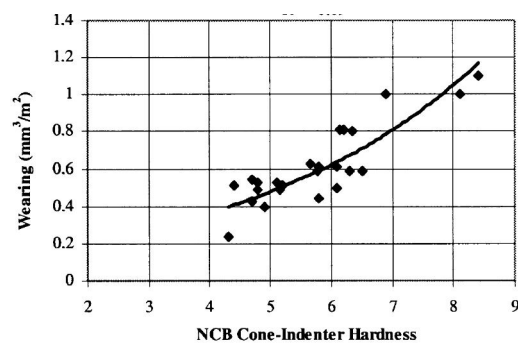
شکل 2-18- رابطه مابین عدد چکش اشمیت و نرخ تولید (Fener et al. 2007)



شکل 2-17- رابطه مابین سختی ویکرز و نرخ برش (Delgado et al. 2005)



شکل 2-20- رابطه میان نرخ سایش ابزار و سختی شور (Eyuboglu et al. 2003)



شکل 2-19- رابطه میان نرخ سایش ابزار و شاخص ان‌سی‌بی (Eyuboglu et al. 2003)

ج - ساینده‌گی

در فرایند برش، ساینده‌گی به خاصیتی از سنگ اطلاق می‌شود که قادر است سگمنت‌هایی از جنس فولاد، کربورتنگستن یا الماس را از بین ببرد. ساینده‌گی یک سنگ به سختی کانی‌ها، شکل و اندازه دانه‌ها، قفل‌شدگی دانه‌ها و ماتریس سنگ بستگی دارد. دانه‌های گوشه‌دار و تیز در مقایسه با دانه‌های گرد سایش بیشتری ایجاد می‌کنند. همچنین تراشه‌های گوشه‌دار و تیز بر روی ابزارهای برش خراش‌های عمیق ایجاد کرده و مانع از خرد شدن سنگ، تحت انرژی منتقل شده از طرف سگمنت می‌شوند. از سوی دیگر خرده‌های ریز و گرد سنگ باعث صیقل دادن سگمنت و کندی دیسک می‌شوند. ساینده‌گی در سنگ‌ها عموماً به سه عامل میزان کوارتز محتوی، اندازه دانه‌ها و مقاومت برشی سنگ‌ها بستگی دارد (Ersoy & Waller, 1995).

در این میان میزان سیلیس یا در حالت کلی کوارتز بسیار مورد تأکید بوده است. تشخیص خاصیت ساینده‌گی سنگ‌ها بر اساس وجود سیلیس امکان‌پذیر است. سنگ‌هایی مثل دولومیت یا آهک که سیلیس کمتری دارند خاصیت ساینده‌گی کمتری دارند و بالعکس سنگ‌هایی مثل ماسه‌سنگ سیلیسی که سیلیس بیشتری

دارند خاصیت ساینده‌گی بیشتری دارند، برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ شاخص‌های کیفی و کمی مختلفی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به فاکتورهای زیر اشاره کرد:

1- فاکتور ساینده‌گی شیمازک¹⁵

2- آزمون ساینده‌گی لوس آنجلس¹⁶

3- اندیس سایش سرشار¹⁷

تاکنون مطالعات بسیاری پیرامون تأثیر ساینده‌گی بر قابلیت برش سنگ‌ها انجام شده است. به طور کلی نتیجه این تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش ساینده‌گی، سرعت برش و قابلیت برش سنگ‌ها کاهش یافته و سایش ابزارهای الماسی افزایش می‌یابد. جدول 2-4 برخی از شاخص‌های ساینده‌گی را که توسط تعدادی از محققین در زمینه قابلیت برش سنگ مورد بررسی قرار گرفته شده‌اند را نشان می‌دهد. شکل‌های 2-21 و 22-2 ارتباط میان شاخص ساینده‌گی سرشار و تست لوس آنجلس را به ترتیب با مقدار انرژی ویژه برش و نرخ تولید نشان می‌دهند.

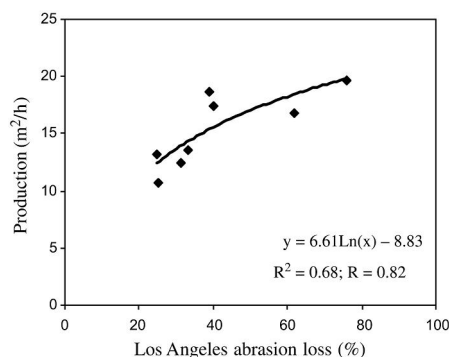
جدول 2-4- شاخص‌های ساینده‌گی مطالعه شده توسط محققین

شاخص‌های ساینده‌گی			منابع
شیمازک	سورشار	لوس آنجلس	
	•		Wright and Cassapi 1985
	•		Wei et al. 2003
		•	Eyuboglu et al. 2003
	•		Ersoy and Atici 2004
		•	Kahraman et al. 2004
•	•		Ersoy et al. 2005
	•		Buyuksagis and Goktan 2005
		•	Fener et al. 2007
		•	Tutmez et al. 2007
	•		Buyuksagis 2007
		•	Ataei et al. 2010
		•	Mikaeil et al. 2011a
•			Mikaeil et al. 2011b

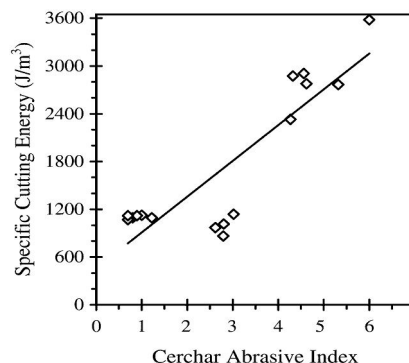
¹⁵-Schmiazek abrasivity factor

¹⁶-Los Angeles abrasion test

¹⁷-Cerchar Abrissivness Index



شکل 22-2- رابطه میان درجه سایش لوس آنجلس و نرخ تولید (Fener et al. 2007)



شکل 21-2- رابطه میان اندیس سایش سوشار و مقدار انرژی ویژه برش (Ersoy and Atici 2004)

د - خواص الاستیک و پلاستیک

قابلیت تغییر شکل، نحوه شکست و نوع شکست سنگ‌ها 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 آن‌هایی که از قانون هوک تبعیت می‌کنند.

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

ج) فوق العاده 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 (Jimeno et al. 1995). در برخی سنگ‌ها شکست سنگ پس از تغییر شکل پلاستیک رخ می‌دهد. این حالت زمانی است که تنش‌ها از حد الاستیک بیشتر شوند.

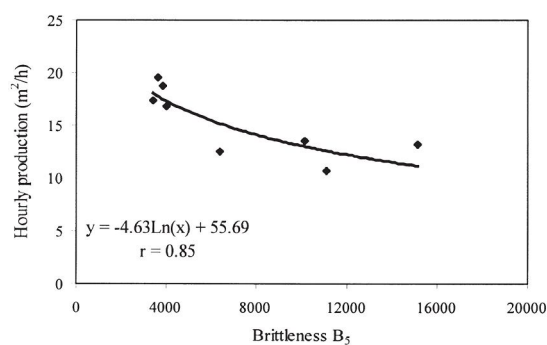
برخی از محققین در مطالعات خود از مدول الاستیک و برخی دیگر نیز از شاخص‌های تردی سنگ برای بررسی و تحلیل فرایند برش استفاده کرده‌اند. بدیهی است با تغییر مدول الاستیک و شاخص‌های تردی سنگ به دلیل تغییر در مکانیزم تشکیل و رشد ترک‌های جانبی در سنگ و به تبع آن تشکیل تراشه‌های ثانویه، قابلیت برش سنگ نیز تغییر می‌یابد. مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش مدول الاستیک و شاخص‌های تردی سنگ، مقدار قابلیت برش سنگ کاهش می‌یابد. از مطالعات انجام شده در این زمینه

می‌توان به مطالعات آتسی¹⁸ و گونایدین¹⁹ اشاره کرد. آن‌ها در مطالعاتشان بر روی نمونه‌های مختلفی از سنگ‌های ساختمانی در کشور ترکیه، ارتباط میان شاخص‌های تردی سنگ و قابلیت برش را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با افزایش شاخص‌های تردی سنگ، میزان نرخ تولید کاهش یافته و میزان انرژی ویژه برش سنگ افزایش می‌یابد. جدول 2-5 محققینی که در مطالعاتشان در زمینه قابلیت برش سنگ، شاخص‌های تردی سنگ و مدول الاستیک را مورد بررسی قرار داده‌اند درج شده است.

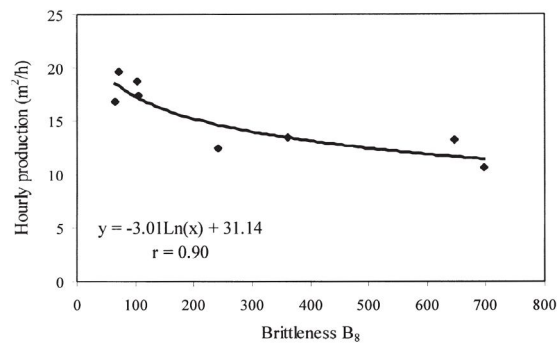
جدول 2-5- خواص الاستیک و پلاستیک به همراه تعدادی از شاخص‌های تردی مطالعه شده توسط محققین

منابع	خواص الاستیک و پلاستیک	
	مدول الاستیک	شاخص‌های تردی سنگ
Ceylanoglu & Gorgulu, 1997	•	
Eyuboglu et al. 2003	•	
Ersoy and Atici 2004	•	
Ersoy et al. 2005	•	
Gunaydin et al. 2004		•
Ozcelik et al. 2004	•	
Atici and Ersoy 2009		•
Mikaeil et al. 2011b	•	
Mikaeil et al. 2011c		•

شکل‌های 2-23 تا 2-28 ارتباط میان برخی از شاخص‌های تردی و مدول الاستیک سنگ با نرخ برش، نرخ سایش ابزار و انرژی ویژه برش را نشان می‌دهند.



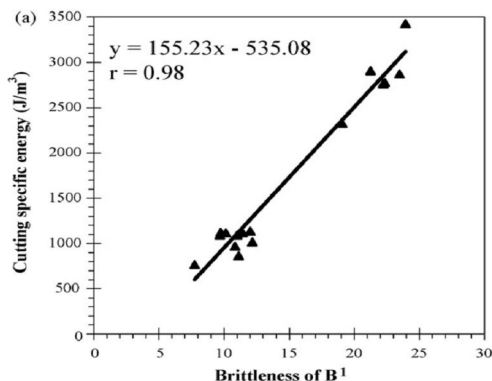
شکل 2-24- رابطه بین اندیس تردی B_5 با نرخ تولید (Gunaydin et al. 2004)



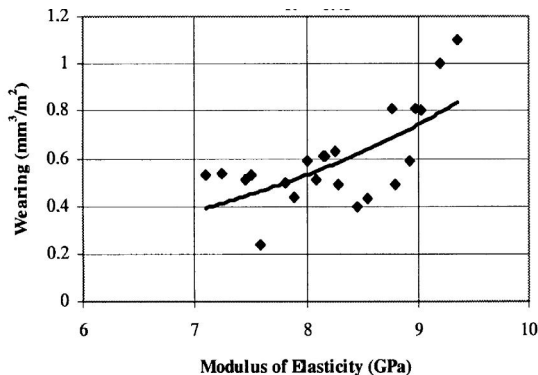
شکل 2-23- رابطه بین اندیس تردی B_8 با نرخ تولید (Gunaydin et al. 2004)

¹⁸-Atici

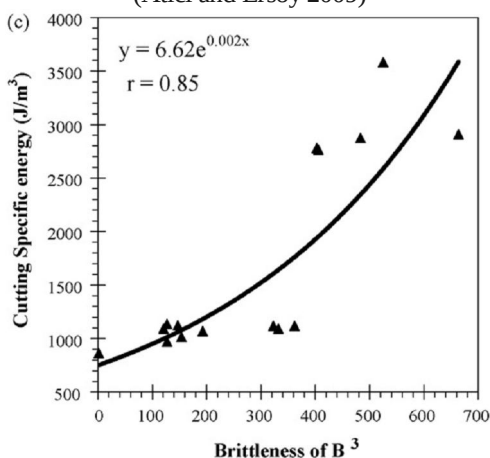
¹⁹-Gunaydin



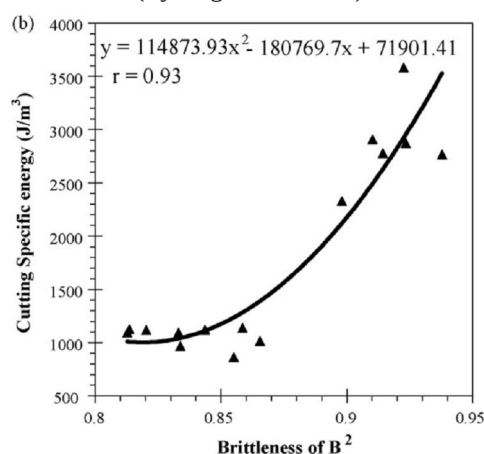
شکل 2-26- رابطه بین اندیس تردی B_1 با انرژی ویژه برش (Atici and Ersoy 2009)



شکل 2-25- رابطه بین مدول الاستیک با نرخ سایش (Eyuboglu et al. 2003)



شکل 2-28- رابطه بین اندیس تردی B_3 با انرژی ویژه برش (Atici and Ersoy 2009)



شکل 2-27- رابطه بین اندیس تردی B_2 با انرژی ویژه برش (Atici and Ersoy 2009)

3-1-3-2- مشخصات ساختاری و محیطی سنگ

از جمله مشخصات ساختاری سنگ می‌توان به درزه، ترک، کلیواژ و جهت‌یافتگی کانی‌ها در سنگ اشاره کرد. هر وضعی در ساختار سنگ اثر تهاجم عوامل هوازدگی را سرعت می‌بخشد. بنابراین سطوح درزه‌ها، سطوح لایه‌بندی، سطوح گسل یا هر نوع شکاف ناشی از گسل یا چین‌خوردگی (شامل ترک‌های برشی) همگی شرایط مناسب را برای تأثیر عوامل هوازدگی و یخ‌بندان به وجود می‌آورند. به طور کلی عوامل محیطی شامل هوازدگی و حضور درزه و ترک‌های مویی در سنگ موجب کاهش پارامترهای مقاومتی سنگ شده که در نتیجه آن قابلیت برش سنگ افزایش می‌یابد. به طوری که می‌توان چنین استنباط کرد که با افزایش درزه و ترک‌های مویی در سنگ قابلیت تراشه‌برداری دانه الماس در یک مقدار ثابت از نیروی برش افزایش یافته که به دنبال آن شاهد افزایش نرخ برش خواهیم بود. یکی دیگر از مشخصات ساختاری سنگ، کلیواژ و جهت‌یافتگی کانی‌ها می‌باشد. به طور کلی از دیدگاه قابلیت برش سنگ هرچه

قدر میزان کانی‌های با سطح کلیواژ مشخص در بلوک سنگی بیشتر باشد سنگ راحت‌تر برش خواهد خورد (Hausberger, 1990, 1989).

2-3-2- مشخصات برش

یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ در کنار مشخصات سنگ، مشخصات برش می‌باشد. مشخصات برش جزء پارامترهای قابل کنترل می‌باشند که می‌توانند نقش بسیار مهمی را در افزایش راندمان و بهینه‌سازی فرایند برش ایفا کنند. با تنظیم و انتخاب صحیح هر کدام از این پارامترها می‌توان به یک الگوی صحیح و مناسب اقتصادی از دیدگاه کاهش مصرف دیسک، کاهش مصرف انرژی و افزایش نرخ تولید دست پیدا کرد. مشخصات برش سنگ را می‌توان در دو بخش شامل عوامل عملیاتی برش و مشخصات طرح برش دسته‌بندی و مورد ارزیابی قرار داد.

2-3-2-1- مشخصات عملیاتی برش

به طور کلی پارامترهای عملیاتی برش شامل نرخ پیشروی²⁰ قطعه کار، سرعت محیطی²¹ و عمق برش²² است. سرعت محیطی به اضافه نیروهای وارده بر دیسک تعیین کننده نرخ پیشروی یا سرعت حرکت قطعه کار می‌باشند. بهترین عملکرد دیسک زمانی است که از یک نرخ پیشروی صحیح و مناسب استفاده شود. استفاده از نرخ‌های پیشروی بالا سبب سایش زودرس سگمنت‌ها و کاهش راندمان برش می‌شود. سرعت محیطی معرف سرعت چرخش دیسک در زمان برش می‌باشد. افزایش سرعت محیطی موجب افزایش سایش، کاهش عملکرد بهینه و از بین رفتن سگمنت (به واسطه بیرون آمدن دانه‌های الماس) در مدت زمان کوتاه‌تر از عمر مفید خود می‌شود. عمق برش معرف میزان نفوذ دیسک در داخل سنگ در طول فرایند برش می‌باشد (Ersoy & Atici, 2004). جدول 2-6 و شکل‌های 2-29 تا 2-48 به ترتیب مطالعات انجام شده در زمینه تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی قابلیت برش سنگ و ارتباط میان برخی از این پارامترها با نرخ برش، نرخ سایش و نیروهای برش را نشان می‌دهند.

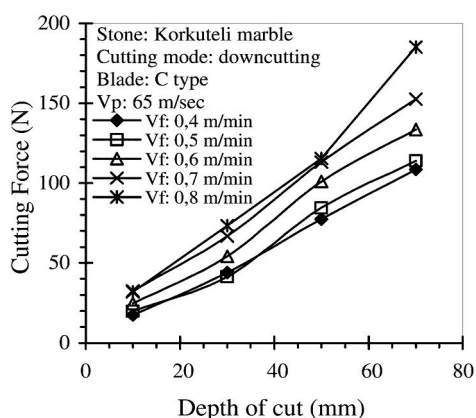
²⁰-Feed rate

²¹-Peripheral speed

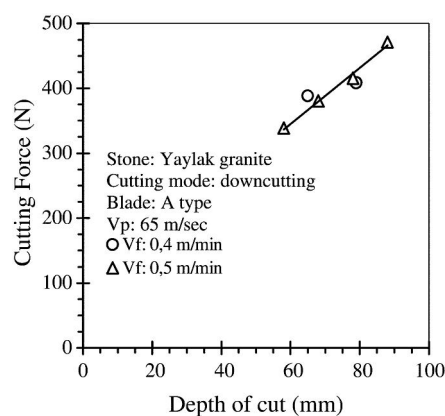
²²-Depth of cut

جدول 6-2- پارامترهای عملیاتی مطالعه شده توسط محققین در زمینه قابلیت برش سنگ

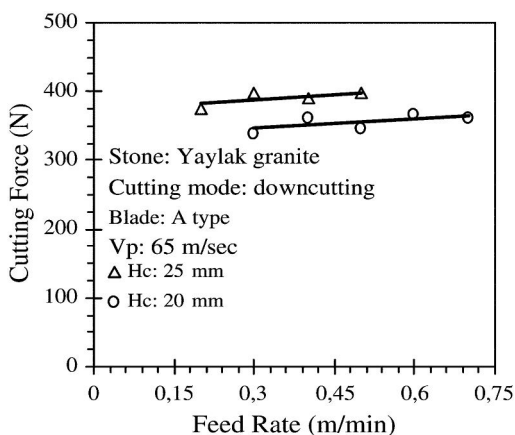
منابع	پارامترهای عملیاتی		
	عمق برش	نرخ پیشروی	سرعت چرخش دیسک
Ertingshausen 1985	•	•	•
Jenning and Wright 1989	•	•	•
Xipeng Xu 1999	•	•	•
Xipeng Xu et al. 2001	•	•	•
Tonshoff et al. 2002	•	•	•
Xipeng Xu et al. 2003	•	•	•
Engels, 2003	•	•	•
Ersoy et al. 2004	•	•	•
Kahraman et al. 2004	•	•	•
Gunaydin et al. 2004	•	•	•
Buyuksagis and Goktan 2005	•	•	•
Buyuksagis 2007	•	•	•
Atici and Ersoy 2009	•	•	•
Mikaeil et al. 2011a	•	•	•
Mikaeil et al. 2011b	•	•	•



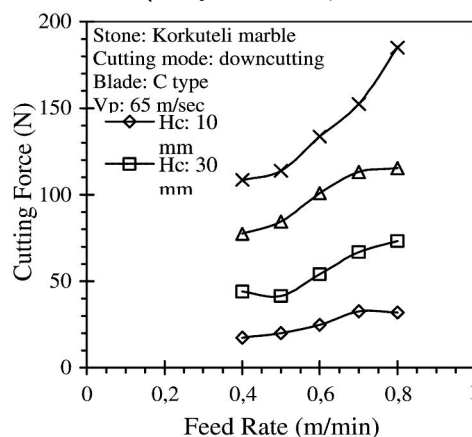
شکل 2-30- رابطه میان نیروی برش با عمق برش در نرخ‌های مختلف پیشروی برای نمونه سنگ ماربل (Ersoy et al. 2004)



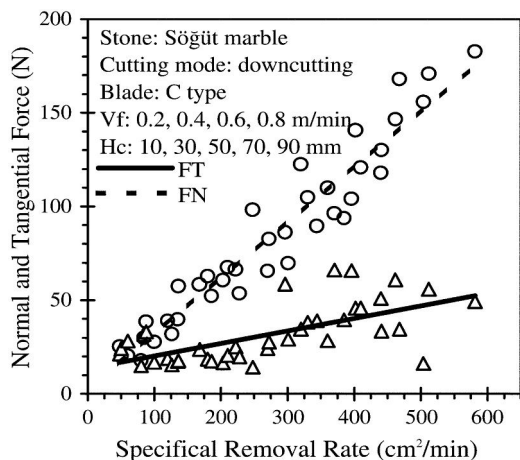
شکل 2-29- رابطه میان نیروی برش با عمق برش در نرخ‌های مختلف پیشروی برای نمونه سنگ گرانیت (Ersoy et al. 2004)



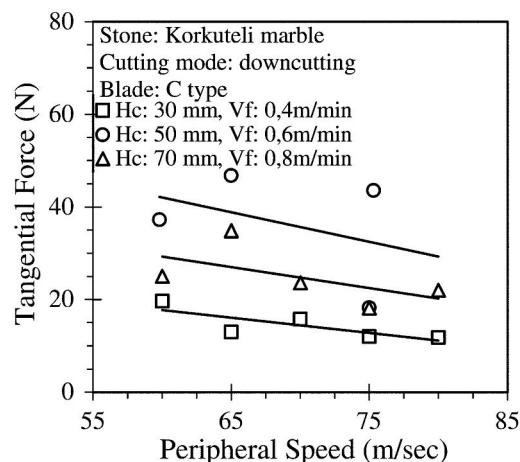
شکل 2-32- رابطه میان نرخ پیشروی با نیروی برش در عمق‌های مختلف برش برای نمونه سنگ گرانیت (Ersoy et al. 2004)



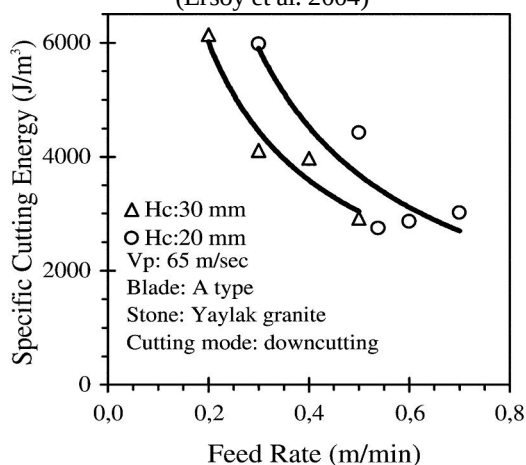
شکل 2-31- رابطه میان نرخ پیشروی با نیروی برش در عمق‌های مختلف برش برای نمونه سنگ ماربل (Ersoy et al. 2004)



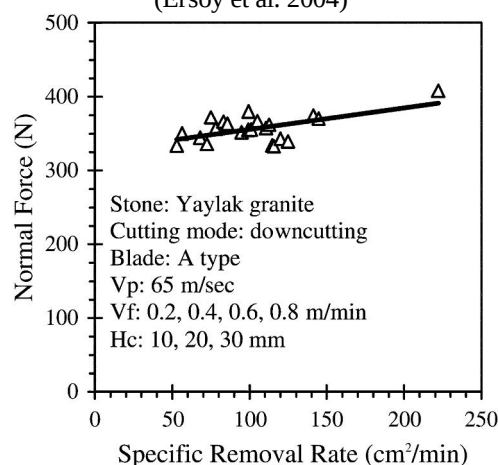
شکل 2-34- رابطه میان نرخ برش با نیروهای مماسی و نرمال در عمق‌های مختلف برش برای نمونه سنگ ماربل (Ersoy et al. 2004)



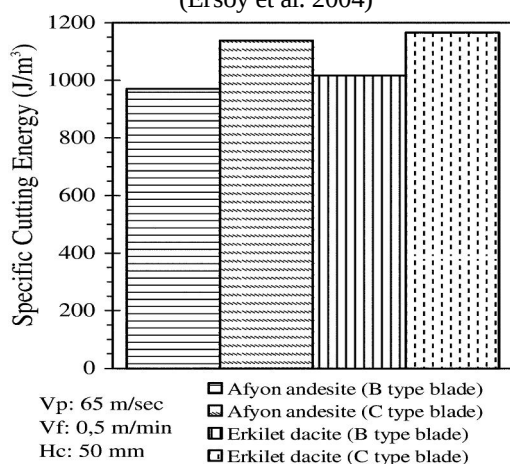
شکل 2-33- رابطه میان سرعت محیطی با نیروی مماسی در عمق‌ها و نرخ‌های مختلف برش برای نمونه سنگ ماربل (Ersoy et al. 2004)



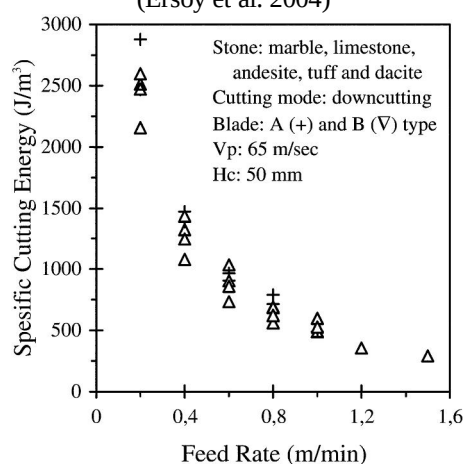
شکل 2-36- رابطه میان انرژی ویژه برش با نرخ پیشروی در عمق‌های مختلف برش برای نمونه سنگ گرانیت (Ersoy et al. 2004)



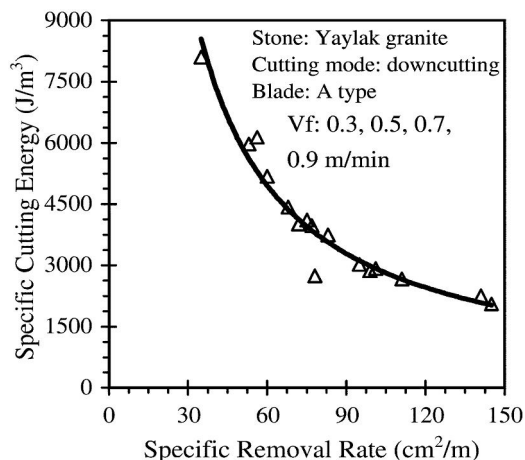
شکل 2-35- رابطه میان نرخ برش با نیروی نرمال برش برای نمونه سنگ گرانیت (Ersoy et al. 2004)



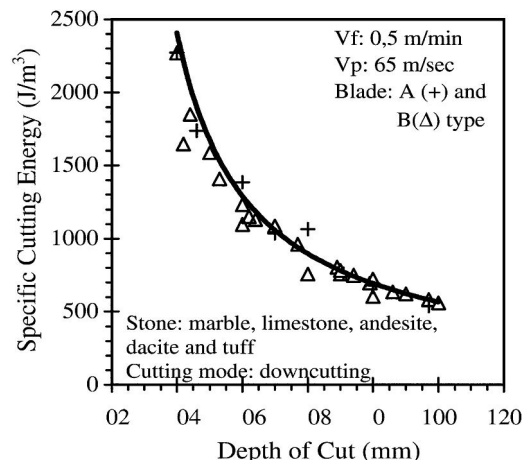
شکل 2-38- مقدار انرژی ویژه برش را برای دو نوع سنگ با دو تیغه مختلف (Ersoy et al. 2004)



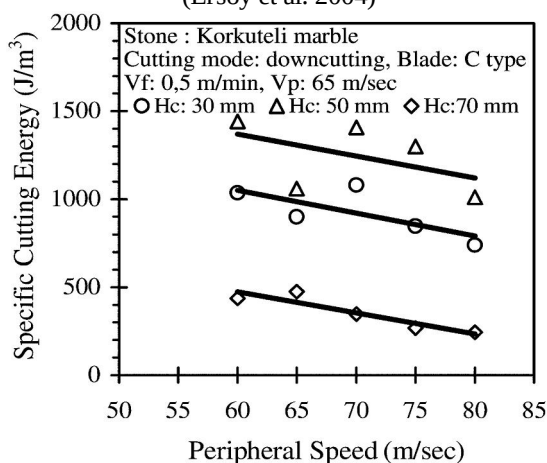
شکل 2-37- رابطه میان انرژی ویژه برش با نرخ پیشروی برای نمونه سنگ‌های مختلف (Ersoy et al. 2004)



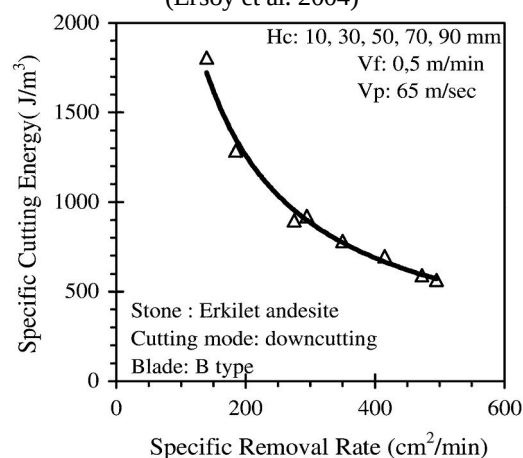
شکل 2-40- رابطه میان انرژی ویژه برش با سرعت برش در نرخ‌های پیشروی مختلف برای نمونه سنگ گرانیت (Ersoy et al. 2004)



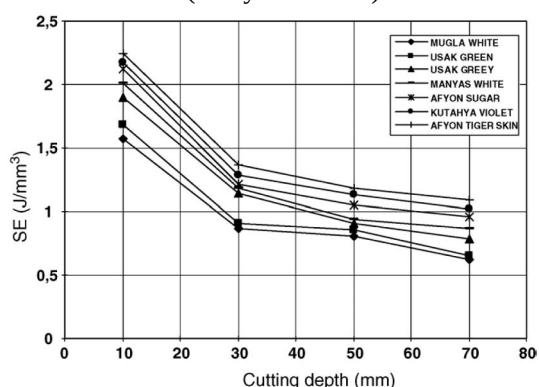
شکل 2-39- رابطه میان انرژی ویژه برش با عمق‌های مختلف برش برای نمونه سنگ‌های مختلف (Ersoy et al. 2004)



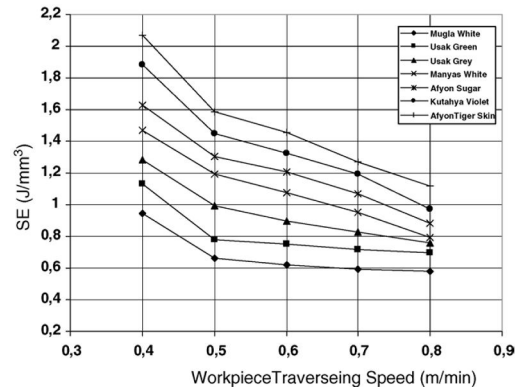
شکل 2-42- رابطه میان انرژی ویژه برش با سرعت محیطی در عمق‌های مختلف برش (Ersoy et al. 2004)



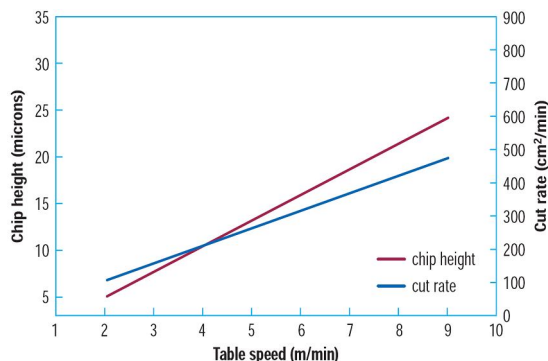
شکل 2-41- رابطه میان انرژی ویژه برش با نرخ برش در عمق‌های مختلف برش برای نمونه سنگ آندزیت (Ersoy et al. 2004)



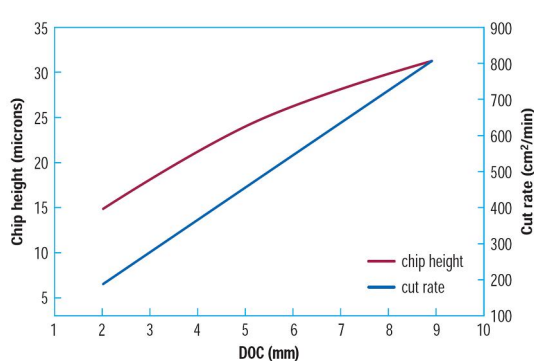
شکل 2-44- رابطه میان انرژی ویژه برش با عمق برش (Buyuksagis and Goktan, 2005)



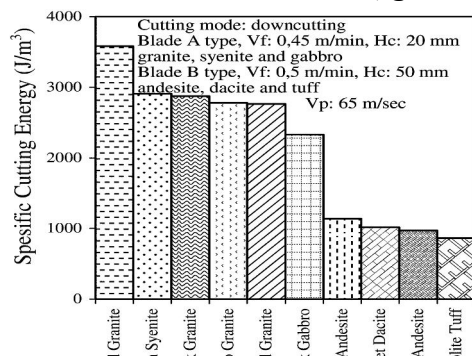
شکل 2-43- رابطه میان انرژی ویژه برش با سرعت حرکت قطعه کار (Buyuksagis and Goktan, 2005)



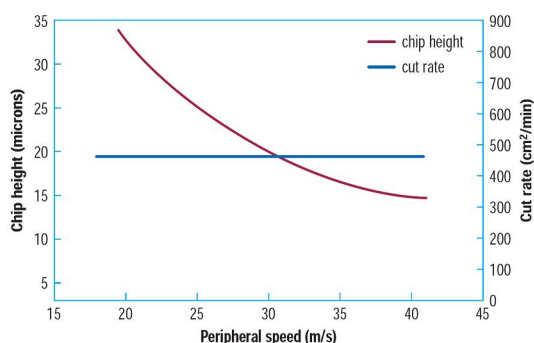
شکل 2-45- تغییرات ضخامت تراشه و نرخ برش نسبت به نرخ پیشروی قطعه کار (Engels, 2003)



شکل 2-46- تغییرات ضخامت تراشه و نرخ برش نسبت به عمق برش (Engels, 2003)



شکل 2-47- توزیع انرژی ویژه برش برای سنگ‌های مختلف (Ersoy et al. 2004)



شکل 2-48- تغییرات ضخامت تراشه و نرخ برش نسبت به سرعت چرخش دیسک (Engels, 2003)

نتایج حاصل از بررسی‌های به‌عمل آمده نشان می‌دهد که در سرعت محیطی ثابت، با افزایش نرخ پیشروی، نیروی برش و توان مصرفی دستگاه افزایش می‌یابد ولی در سرعت محیطی ثابت افزایش نرخ پیشروی موجب کاهش مقدار انرژی ویژه برش می‌شود. البته این مقدار کاهش تا حد مشخصی ادامه داشته و بعد از آن به مقدار ثابت میل می‌کند.

2-2-2-2- مشخصات طرح برش

گروه دیگر از پارامترهای مؤثر در فرایند برش، مشخصات طرح برش می‌باشد. مشخصات طرح برش را می‌توان در سه دسته شامل مشخصات دیسک، مشخصات سگمنت و روش برش مورد بررسی و ارزیابی قرار داد. این مشخصات به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مشخصات قابل کنترل در فرایند برش مطرح بوده و با توجه به نوع سنگ، طراحی و انتخاب می‌شوند. جدول 2-7 مطالعات انجام شده در زمینه قابلیت برش سنگ با توجه به مشخصات طرح برش (مشخصات دیسک، مشخصات سگمنت و روش برش) را نشان می‌دهد.

جدول 7-2- مطالعات انجام شده در زمینه‌ی قابلیت برش سنگ با توجه به مشخصات طرح برش

مشخصات طرح برش			منابع
نوع و طریقه برش	مشخصات سگمنت	مشخصات دیسک	
•			Ertingshausen 1985
•	•	•	Jenning and Wright 1989
	•		Konstanty 1991
	•		Xipeng Xu 1999
•			Konstanty 2002
•	•		Tonshoff et al. 2002
	•		Wang and Clausen 2002
•			Xipeng Xu et al. 2003
	•		Engels, 2003
		•	Kahraman et al. 2004
		•	Gunaydin et al. 2004
•			Buyuksagis, 2007
		•	Mikaeil et al. 2011a

الف - مشخصات دیسک

به طور کلی یک دیسک الماسی شامل یک بدنه دیسکی شکل و سگمنت‌های الماسی در پیرامون آن می‌باشد. بدنه فلزی از فولاد آلیاژی با شاخص‌های متفاوت ساخته می‌شود. نیروهای وارده بر دیسک را می‌توان در دو مؤلفه نیروهای مماسی و عمودی بررسی کرد. نیروهای عمودی موجب نفوذ دانه‌های الماس در سنگ و شکل‌گیری تراشه و نیروهای مماسی موجب برداشت تراشه می‌شوند که در مجموع عملکرد دو نیرو موجب برش سنگ می‌شود. تنش‌های موجود در بدنه دیسک به واسطه این نیروها به صورت تنش‌های فشاری و ممان خمشی ظاهر می‌شوند که در صورت افزایش این نیروها از حد مجاز باعث ایجاد کمانش و انحراف دیسک یا شکست ابزار می‌شوند. یکی از مشخصه‌های مهم ابزارهای برش دیسکی، شعاع عملکرد دیسک می‌باشد. این شعاع معرف حداکثر عمق برش در فرایند برش سنگ می‌باشد. شکل 2-49 حداکثر عمق برش یک دیسک با توجه به قطر دیسک و قطر فلانج²³ دیسک را نشان می‌دهد. شعاع عملکرد دیسک یا به عبارت دیگر حداکثر عمق برش از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d_{\max} = \frac{D_{\text{flange}} - D_{\text{saw}}}{2} \quad (1-2)$$

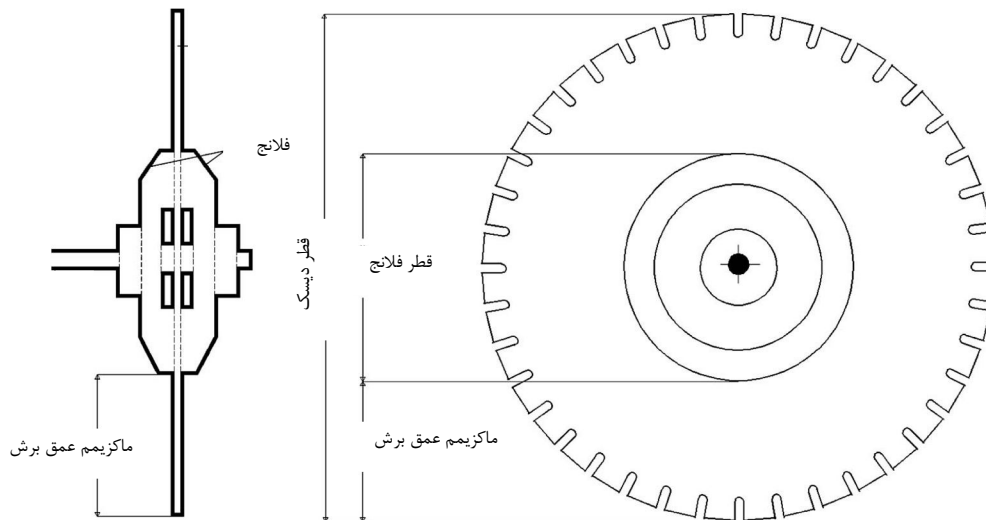
در رابطه بالا داریم:

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

²³-Flange

D_{saw} : قطر دیسک

D_{flange} : قطر فلانژ دیسک



شکل 2-49- حداکثر عمق برش یک دیسک با توجه به شعاع دیسک و شعاع فلانژ دیسک (Karakus, 2006)

همان‌طوری که قبلاً به آن اشاره شد، شعاع عملکرد دیسک یکی از پارامترهای عملیاتی مهم در فرایند برش سنگ می‌باشد. قهرمان و همکارانش (Kahraman et al. 2004) در بررسی‌های خود در زمینه پیش‌بینی نرخ تولید در مقیاس صنعتی، قطر دیسک را به عنوان یکی از پارامترهای ابزاری در پیش‌بینی مقدار نرخ برش در معادلات خود استفاده کردند. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که با افزایش مقدار قطر دیسک، مقدار نرخ تولید کاهش می‌یابد.

ب- مشخصات سگمنت

سگمنت‌های الماسی توسط لحیم جوش یا جوش لیزری به بدنه فلزی دیسک متصل می‌شوند. به طور کلی ساختار سگمنت‌های الماسی را می‌توان در دو بخش اصلی ماتریس فلزی و دانه الماس مورد بررسی قرار داد. در واقع خصوصیات این دو قسمت کارآیی برش سگمنت را مشخص می‌کند.

ب-1- ماتریس فلزی

کریستال‌های الماسی که نقش نقاط برنده را در روی سگمنت بازی می‌کنند درون ماتریس محکمی که وظیفه حفظ و نگهداری این ذرات را بر عهده دارند نگه داشته می‌شوند. مقاومت سایشی ماتریس با

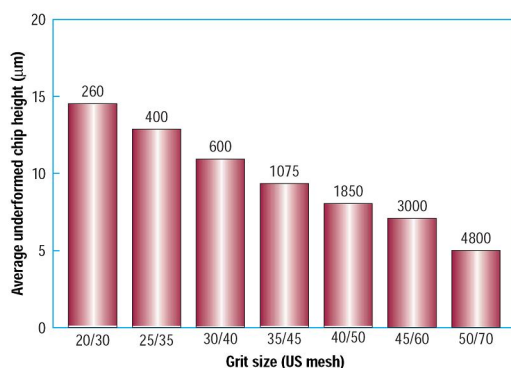
توجه به پارامترهای مؤثر دیگر باید با سرعت سایش دانه‌های الماس هماهنگ باشد. یک برش موفق زمانی رخ می‌دهد که ماتریس و دانه الماس از یک نرخ منظمی از سایش برخوردار باشند بدین ترتیب که نرخ سایش ماتریس به اندازه‌ای باشد که ارتفاع دانه‌های الماس برای برش کافی باشد. در صورتی که ماتریس زودتر از دانه الماس فرسوده شود، دانه الماس زودتر از زمان مورد نظر از سگمنت کننده و از فرایند برش خارج می‌شود. در این حالت از تمام ظرفیت برش الماس استفاده نمی‌شود. در نقطه مقابل اگر ماتریس دیرتر از موعد مورد نظر سائیده شود، فاصله بین لبه برنده الماس و سطح ماتریس رفته رفته کاهش می‌یابد و تراشه به درستی از ناحیه برش خارج نمی‌شود و پیوسته از توانایی برش کاسته می‌شود. انتخاب ماتریس نرم‌تر در برش سنگ‌های سخت گرانیتهی به همین دلیل می‌باشد. چون سرعت سایش دانه‌های الماس در برش این سنگ‌ها بیشتر و سریع‌تر می‌باشد. 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. مشخصه فوق به استحکام و سختی ماتریس وابسته می‌باشد. 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 در مواقع لزوم، زمانی که دانه کند یا شکسته می‌شود و کارایی خود را از دست می‌دهد به راحتی در اثر نیروهای وارده از ماتریس جدا شود (Luo, 1997).

ب-2- دانه الماس

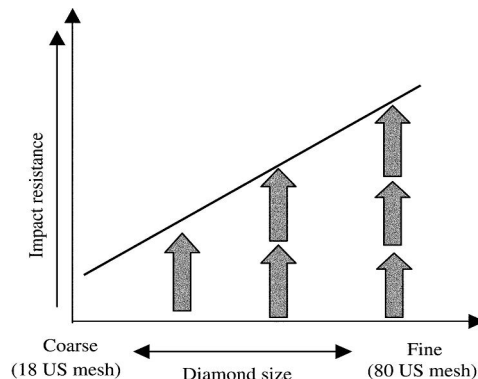
فرایند برش سگمنت‌های الماسی را می‌توان به برش تعداد زیادی از دانه‌های الماس در حال برش شبیه‌سازی کرد. تأثیر دانه‌های الماس در فرایند برش از دو منظر قابل بررسی است: الف) خصوصیات دانه الماس شامل چقرمگی، سختی، شکل و اندازه دانه ب) تراکم یا غلظت دانه‌های الماس. هرچه عمق نفوذ دانه الماس کم باشد، تراشه‌های تشکیل شده عمدتاً از نوع ریز تراشه‌های اولیه می‌باشند. با افزایش عمق نفوذ، عمق و پهنای شیارها زیاد شده و به تبع آن، تغییر شکل پلاستیکی زیادتر می‌شود و از طرفی افزایش تنش‌های اعمال شده به سنگ باعث افزایش ترک‌های عرضی و گسترش آن‌ها تا سطح و تشکیل

تراشه‌های ثانویه می‌شود. انتخاب نوع و اندازه دانه‌های الماس در ابزارهای برش بر پایه میزان سختی و ساینده‌گی سنگ استوار است. بهترین دانه‌های الماس در فرایند برش سنگ، کریستال‌های مکعب هشت وجهی می‌باشند که دارای حداکثر استحکام و مقاومت سایشی می‌باشند. اگر استحکام دانه‌های الماس پایین باشد، به سادگی تحت تنش‌های وارده شکسته می‌شوند که این امر موجب کندی دیسک و پدیده لیزش‌دگی²⁴ در فرایند برش می‌شود (Luo, 1997).

شکل‌های 2-50 و 2-51 به ترتیب ارتباط میان اندازه دانه الماس با ضخامت تراشه و اندازه دانه الماس با مقاومت ضربه‌ای الماس را نشان می‌دهند. مطابق شکل با افزایش اندازه دانه الماس مقدار مقاومت ضربه‌ای آن کاهش یافته و از طرف دیگر مقدار میانگین ضخامت تراشه افزایش می‌یابد.



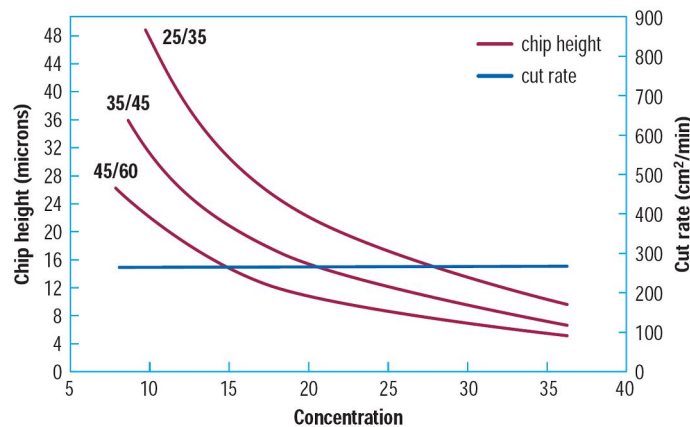
شکل 2-51- تغییرات ضخامت تراشه نسبت به اندازه دانه الماس (Engels, 2003)



شکل 2-50- رابطه میان اندازه دانه الماس و مقاومت ضربه‌ای (Ersoy et al. 2004)

شکل 2-52 تغییرات ضخامت تراشه و نرخ برش نسبت به تراکم دانه الماس با اندازه‌های مختلف را نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش تراکم دانه الماس مقدار ضخامت تراشه کاهش می‌یابد.

²⁴-Glazing

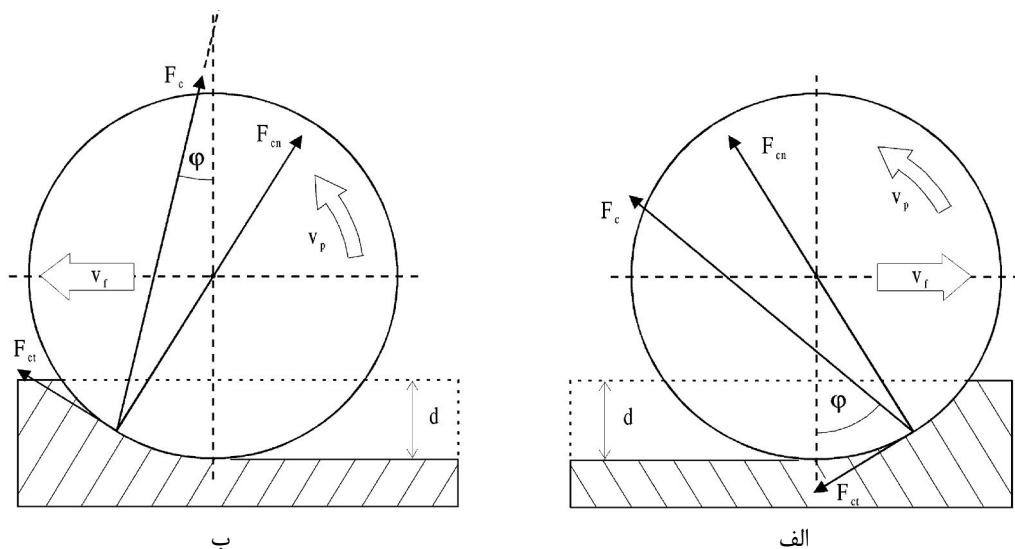


شکل 2-52- تغییرات ضخامت تراشه و نرخ برش نسبت به تراکم دانه الماس با اندازه‌های مختلف دانه الماس (Engels, 2003)

به طور کلی برای سنگ‌های سخت از دانه‌های الماس ریزتر و با تراکم بالاتر به دلیل افزایش مقاومت ضربه‌ای الماس، و برای سنگ‌های نرم‌تر از دانه‌های الماس نسبتاً درشت‌تر و با تراکم کمتر استفاده می‌شود (Ersoy & Atici, 2004).

ج- نوع و طریقه برش

یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ، روش برش می‌باشد. برش سنگ‌های ساختمانی عموماً به دو صورت برش رو به پائین²⁵ و برش رو به بالا²⁶ دسته‌بندی می‌شوند. شکل 2-53 حالت‌های مختلف برش و نیروهای برشی وارده بر دیسک را نشان می‌دهد.



شکل 2-53- روش‌های مختلف برش و نیروهای برشی مربوطه (الف) برش رو به بالا (ب) برش رو به پایین (Konstanty, 2002)

²⁵-Down cutting

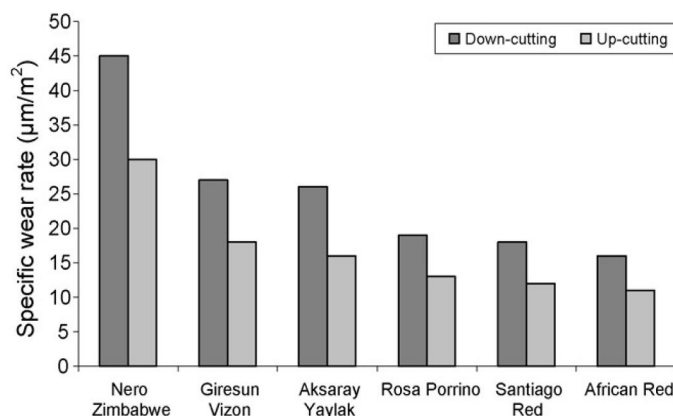
²⁶-Up cutting

مطابق شکل جهت و زوایای نیروهای برشی در دو روش با یکدیگر متفاوت است. این امر می‌تواند نقش مهمی در فرایند برش سنگ ایفا کند. برای مثال گرایش و جهت نیروهای برشی نسبت به چهار چوب ماشین (بستر حامل تیغه) در برش رو به پائین و رو به بالا متفاوت هستند. در هر یک از این دو حالت زمانی که نیروی برشی برآیند به مقدار زیادی از نقطه اثر تکیه‌گاهی منحرف شود، شرایط برشی ناپایدار ظاهر شده و موجب بروز لرزش‌های شدید در سیستم می‌شود. با فرض این‌که بستر تکیه‌گاهی در بالای اسپیندل قرار داشته باشد انحراف نیروی برشی F_c از تکیه‌گاه در روش برش رو به بالا بیشتر و لذا پایداری سیستم در این روش کاهش می‌یابد. همچنین شرایط حمله و نفوذ دانه الماس وقتی که حالت برشی دیسک عوض می‌شود تغییر می‌کند. در روش برش رو به پائین یک دانه الماس در لحظه اول تماس با حداکثر عمق برش به ماده سنگ حمله می‌کند به عبارت دیگر در اولین لحظه برش، دانه الماس بیشترین عمق نفوذ خود را دارد. بعد از آن به موازات حرکت دانه الماس، رفته رفته از عمق برش دانه کاسته شده و در نهایت تماس آن با سنگ قطع می‌شود. در مقابل در برش رو به بالا دانه‌های الماس در ابتدا به سطح کار مماس می‌شوند و به تدریج بر عمق نفوذ آن‌ها افزوده می‌شود و در لحظه خارج شدن از شیار برشی، عمق برش دانه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در فرایند برش رو به پائین، ضربه‌های مکانیکی ناگهانی شدید به دانه الماس وارد می‌شود و بسته به نوع دانه‌ها و ماتریس فلزی باعث شکست یا کنده شدن دانه‌ها می‌شود. بنابراین اگر پیوسته از روش رو به پائین استفاده شود، بهتر است برای بهبود عمر ابزار از دانه‌های الماس با استحکام بالا و با مقاومت بیشتر در برابر ضربه استفاده شود. در برش رو به پائین نرخ سایش در یک سگمنت با سگمنت‌های دیگر متفاوت می‌باشد. در روی یک سگمنت ناحیه‌ای که زودتر وارد منطقه برش می‌شود، سایش بیشتری را متحمل شده و دانه‌های الماس بعدی یا سگمنت بعدی درگیری کمتری با سنگ خواهند داشت. در فرایند برش رو به بالا ضخامت تراشه از صفر شروع شده و به حداکثر خود می‌رسد و در ابتدای تماس، دانه تنها با ماده سنگ مماس می‌باشد که نتیجه آن، سایش اصطکاکی دانه خواهد بود و این امر منجر به تخت و هموار شدن دانه می‌شود (Konstanty, 2002). نتایج بررسی‌های انجام شده در این زمینه نشان داده است که:

- توان مورد نیاز در برش رو به بالا در مقایسه با برش رو به پائین وقتی عمق برش کمتر از 20-25 میلی متر باشد کمتر می باشد. اما زمانی که عمق برش بیشتر می شود توان مورد نیاز در برش رو به پائین کمتر می شود (Ertingshausen, 1985).

- مقدار نرخ سایش و مقادیر انرژی ویژه در برش رو به بالا کمتر از روش رو به پائین می باشد (Buyuksagis, 2007).

با توجه به مطالعات انجام شده می توان گفت که نیروهای برشی معمولاً در روش برش رو به پائین کمتر از روش برش رو به بالا می باشند. دلیل این امر را می توان مربوط به مکانیزم تشکیل تراشه در دو حالت دانست. در روش برش رو به پائین به دلیل وجود نیروهای ضربه ای مکرر و عمق برش زیاد، در ابتدای برش رشد ترک ها و شکست ترد در تراشه ها بیشتر از روش برش رو به بالا می باشد. همین امر موجب تفاوت نیروهای برشی در دو روش می شود. شکل 2-54 مقادیر مختلف نرخ سایش ویژه را در روش های مختلف برش نشان می دهد. مطابق شکل در تمامی نمونه سنگ های مورد مطالعه، مقدار سایش ویژه در روش برش رو به بالا کمتر از روش رو به پائین می باشد.



شکل 2-54- مقادیر مختلف نرخ سایش ویژه با توجه به روش های مختلف برش (Buyuksagis, 2007)

4-2- معیارهای ارزیابی عملکرد برش

برای بهینه سازی فرایند برش اهداف مختلفی وجود دارند. یکی از مهم ترین اهداف، رسیدن به حداکثر مقدار تولید می باشد. البته باید توجه داشت که رسیدن به این هدف مستلزم صرف میزان انرژی بیشتر

و افزایش در مصرف دیسک می‌باشد. به عبارت دیگر با بالا رفتن مقدار نرخ تولید، میزان مصرف انرژی و سایش ابزارهای الماسی نیز افزایش خواهد یافت. دستیابی به بهترین شرایط برش، مستلزم ایجاد یک تعادل ایده‌آل بین طول عمر ابزار، نرخ مصرف انرژی و نرخ برش می‌باشد. به طور کلی عملکرد یک فرایند برش را می‌توان با توجه به معیارهایی نظیر نیروهای برش، سایش ابزار و میزان مصرف انرژی مورد ارزیابی قرار داد.

2-4-1- نیروهای برش

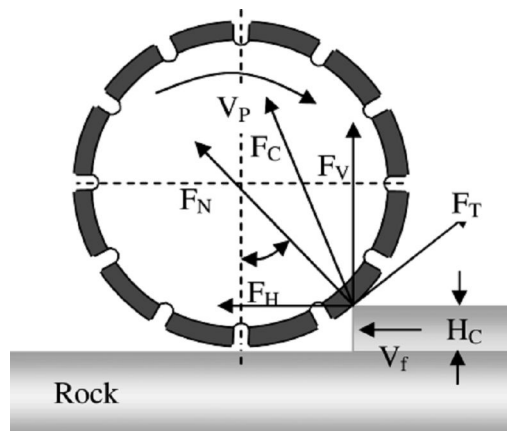
زمانی که سنگ توسط ابزار الماسی برش داده می‌شود، یک تعامل مکانیکی بین ابزار و سنگ، سبب ایجاد نیروهای فرایند برش می‌شود. نیروها در فرایند برش شامل نیروهای افقی، قائم، مماسی، عمودی و نیروی برش می‌باشند. نیروی برشی نیرویی است که در حین عملیات برش به ابزار وارد می‌شود. به تعبیر دیگر نیروی برش نیرویی است که باعث نفوذ ابزار به قطعه کار و سبب برش آن می‌شود. نیروی برشی وارده به ابزار الماسی یا یک دانه الماس را می‌توان به دو مؤلفه نیروی مماسی (F_T) و نیروی عمودی (F_N) تجزیه نمود. 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. از میان نیروهای موجود در فرایند برش، نیروهای افقی و عمودی در فرایند برش با دستگاه دینامومتر اندازه‌گیری می‌شوند و سایر نیروها با استفاده از روابط 2-2 تا 4-2 به صورت تحلیلی قابل محاسبه می‌باشند:

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

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

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

در روابط بالا F_N معرف نیروی عمودی، F_T نیروی مماسی، F_C نیروی برشی، F_V نیروی قائم، F_H نیروی افقی در فرایند برش می‌باشند. شکل 2-55 نیروهای مؤثر در فرایند برش را در حالت برش رو به پایین نشان می‌دهد.



شکل 2-55- نیروهای مؤثر در یک فرآیند برش رو به پایین (Ersoy & Atici, 2004)

مؤلفه‌های نیروی مماسی و عمودی در ابزار برشی موجب ایجاد تنش‌های فشاری، کششی و برشی می‌شوند. نسبت این دو نیرو به شرایط عملیاتی برش بستگی داشته که در صورت ثابت ماندن تمام شرایط این نسبت نیز تقریباً ثابت باقی می‌ماند. مهمترین عوامل مؤثر بر این نیروها، متغیرهایی مانند عمق برش، نرخ پیشروی قطعه کار و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ می‌باشند. این متغیرها به طور مستقیم روی نیروهای برشی تأثیر می‌گذارند. به طوری که با افزایش عمق نفوذ، نیروهای برشی نیز افزایش می‌یابند. در صورت رشد ترک‌های جانبی و تشکیل تراشه‌های ثانویه، نیروهای برشی نسبت به سطح مقطع کاهش می‌یابند. در صورت استفاده از روان کار نیروهای برشی کاهش می‌یابند. بسته به خصوصیات سنگ نظیر استحکام، دانه‌بندی، خلل و فرج و درزه‌ها و ... نیروهای برشی نیز تغییر می‌کنند. در کل هر خصوصیتی از سنگ که تراشه‌برداری را مشکل‌تر کند، نیروهای برشی را نیز افزایش می‌دهد. در بعضی موارد از نسبت نیروی عمودی به نیروی مماسی برای شناخت بهتر فرایند استفاده می‌شود. با فرض این که شرایط برش ثابت بماند، این نسبت نیز ثابت می‌ماند. اما در عمل چنین نیست و شرایط برش مرتب تغییر می‌کند. به همین دلیل می‌توان از این معیار برای ارزیابی تغییر شرایط برش که عمدتاً ناشی از تغییرات موجود در سگمنت الماسی می‌باشد، استفاده کرد. افزایش این نسبت در فرایند برش نشان‌دهنده کندی ابزار و مشکل‌تر شدن تشکیل تراشه و عملیات برش می‌باشد. از طرف دیگر با کم شدن این نسبت می‌توان نتیجه گرفت که ابزار در این شرایط،

عملیات برش را بهتر انجام می‌دهد. نتایج بررسی‌های انجام شده در این زمینه را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- در فرایند برش با افزایش مقدار نیروهای برش مقدار نرخ تولید به ازاء واحد سایش سگمنت کاهش می‌یابد (Wright & Cassapi, 1985).
- در فرایند برش با نرخ پیشروی ثابت، با افزایش عمق برش مقدار نیروهای افقی و قائم افزایش می‌یابند. این در حالی است که در نرخ‌های پیشروی کمتر شدت تغییرات نیروی افقی بیشتر می‌باشد (Xipeng Xu et al., 2001).
- در نرخ‌های ثابت پیشروی، نیروهای برش با کاهش عمق برش و افزایش سرعت محیطی، کاهش می‌یابند (Ersoy & Atici, 2004).

2-4-2- سایش ابزار

سایش ابزارهای الماسی از جمله مهمترین متغیرهای ارزیابی عملکرد برش سنگ می‌باشد. بارهای حرارتی به دلیل وجود فاکتورهایی نظیر اصطکاک بین الماس و سنگ، اصطکاک میان ماتریس و سنگ و تراشه‌های سنگ در تلفیق با بارهای مکانیکی حاصل از نیروهای برش موجب سایش ابزارهای الماسی می‌شوند. در بحث سایش ابزارهای الماسی عمدتاً سایش سگمنت مورد بررسی قرار می‌گیرد. به طور کلی می‌توان سایش سگمنت را به دو بخش سایش الماس و سایش ماتریس تقسیم کرد. سایش در دانه‌های الماس در اثر خاصیت سایشی ماده سنگ همراه با بارهای مکانیکی و حرارتی فرایند ایجاد می‌شود. همه عواملی که به نوعی روی بارهای مکانیکی و حرارتی فرایند مؤثر باشند، بر سایش دانه‌های الماس نیز اثرگذار خواهند بود.

رایت و والپر²⁷ در سال 1986 به بررسی نرخ سایش الماس در فرایند برش سنگ پرداختند. آن‌ها فرض کردند که ماتریس در اطراف دانه 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

²⁷-Wright & Walper

الماس به دلیل ضعف نگهداری در ماتریس کنده شود. یا ممکن است ابتدا ماتریس تا حد معینی که دانه الماس ارتفاع کاری خود را به دست آورد سایش یابد و دانه الماس پس از دوره کوتاهی با افزایش سایش، کنده شود. همچنین علاوه بر تأثیرپذیری از پارامترهای مذکور، دانه‌های الماس ممکن است در اثر نیروهای ضربه‌ای نیز کنده شوند (Wright & Walper, 1986).

خصوصیات خود دانه‌های الماس و ماتریس فلزی نیز در نوع سایش و سرعت سایش مؤثر می‌باشند. در صورتی که دانه الماس سختی بالا و استحکام کمتری داشته باشد در برابر ضربه‌های مکانیکی ضعیف بوده اما در برابر بارهای حرارتی و سختی سنگ مقاوم‌تر می‌باشد. در شرایطی که ضربات مکانیکی زیاد باشند، این دانه‌ها به راحتی می‌شکنند و درصد دانه‌های بزرگ شکسته شده افزایش می‌یابد. زمانی که بارهای حرارتی و سایش مکانیکی بر فرایند غالب شوند، این دانه‌ها به دلیل سختی بالاتر بهتر عمل می‌کنند و دیرتر سایش می‌یابند. به عکس اگر دانه‌های الماس استحکام بیشتری داشته باشند، در شرایط ضربه‌ای مقاومت بهتری از خود نشان می‌دهند. اما در شرایطی که بارهای حرارتی و اصطکاک و سختی ماده سنگ بیشتر باشند، کارآیی کمتری داشته و زودتر سائیده می‌شوند. از این رو انتخاب دانه‌های ساینده از نظر سختی و استحکام با توجه به شرایط حاکم بر فرایند باید به گونه‌ای صورت گیرد تا سایش ابزار حداقل شود. استحکام چسبندگی بین ماتریس و دانه الماس نیز در سایش الماس‌ها مؤثر می‌باشد. بدین ترتیب که اگر استحکام چسبندگی بین دانه‌های الماس و ماتریس کم باشد، قبل از این که ظرفیت برشی دانه‌های الماس تکمیل شود از ماتریس جدا می‌شوند که نتیجه آن کنده شدن دانه و ایجاد حفره‌های عمیق در سگمنت می‌باشد. در بحث سایش ماتریس این نکته قابل توجه است که در طی فرایند برش، تراشه‌هایی که از سنگ جدا می‌شوند و در فاصله بین ابزار و سنگ در مایع خنک کننده معلق می‌مانند، نقش یک ماده ساینده را بازی کرده و باعث سایش ماتریس سگمنت می‌شوند. سایش ناشی از تراشه‌های سنگ عمدتاً به نوع سنگ بستگی دارد. در فرایند برش سنگ‌های رسوبی، عمدتاً شکست در جهت مرز لایه‌هایی که استحکام بین آن‌ها کمتر می‌باشد، صورت می‌گیرد. در نتیجه این امر تراشه‌های سنگی نسبتاً بزرگی به وجود می‌آیند. در این حالت اثر سایشی

روی دانه‌های الماس ناچیز بوده اما اثر سایشی شدیدی روی ماتریس ایجاد می‌شود. بنابراین بسته به نوع سنگ، مشخصات دانه‌های الماس، ساختار و جنس ماتریس و پارامترهای عملیاتی بایستی به درستی انتخاب شوند. حالت ایده‌آل ماتریس زمانی است که سرعت سایش ماتریس با سرعت سایش دانه‌های الماس موزون و هماهنگ باشد. در غیر این صورت ممکن است یکی از دو حالت نامطلوب زیر رخ دهد (Luo, 1997):

- ماتریس زودتر از دانه‌های الماس سائیده شود، که در این صورت از ظرفیت برشی الماس به طور کامل استفاده نمی‌شود و دانه الماس زودتر از موعد کنده و از ماتریس خارج می‌شود.
- ماتریس دیرتر از دانه‌های الماس سایش می‌یابد، که در این صورت فضای بین لبه‌های برنده و سطح ماتریس کاهش می‌یابد و تراشه به راحتی خارج نمی‌شود و ابزار رفته رفته توانایی برش خود را از دست می‌دهد.

اغلب از سایش ماتریس به سایش ماکروسکوپی²⁸ نام برده می‌شود. معمولاً جهت 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 ابزارهای خاص اپتیکی²⁹ یا مکانیکی که بدین منظور ساخته شده‌اند، انجام می‌شود.

2-4-3- انرژی ویژه برش

یکی دیگر از معیارهای بررسی و ارزیابی عملکرد برش، انرژی ویژه برش می‌باشد. این پارامتر با دو پارامتر نیروی برش و مقدار سایش رابطه مستقیم دارد. به طوری که با افزایش مقادیر نیروهای برشی و نرخ سایش، مقدار انرژی ویژه برش افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان در عدم کارایی صحیح و مناسب سگمنت‌های الماسی در فرایند برش جستجو کرد. انرژی ویژه برش معرف مقدار انرژی مورد نیاز برای برداشت یا برش واحد حجم سنگ می‌باشد. انرژی ویژه برش به عنوان یکی از معیارهای مهم

²⁸-Macroscopic

²⁹-Optic

برای ارزیابی راندمان برش و انتخاب نوع و طرح برش در بسیاری از تحقیقات به کار گرفته شده است. مقدار انرژی ویژه برش از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد (Ersoy & Atici, 2004):

$$SE_{cut} = \frac{P_C}{Q_W} = \frac{F_T N}{d W_M V_f} \quad (5-2)$$

در رابطه 5-2 داریم:

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

P_C : توان موتور (مگا وات یا اسب بخار)

Q_W : حجم برش (متر مکعب بر ثانیه)

F_T : نیروی مماسی برش (نیوتن)

N : سرعت محیطی دیسک (متر بر ثانیه)

d : عمق برش (متر)

W_M : عرض سگمنت (متر)

V_f : نرخ پیشروی (متر بر ثانیه)

نتایج بررسی‌های انجام شده در این زمینه نشان داده است که:

- با افزایش مقدار نرخ برش، میزان انرژی ویژه برش تا حد معینی کاهش یافته و در ادامه به یک مقدار ثابت میل می‌کند (Xipeng Xu et al., 2001).
- سرعت محیطی دیسک به نسبت سایر پارامترهای عملیاتی تأثیر چندانی در مقدار انرژی ویژه نداشته و افزایش این پارامتر موجب کاهش نامحسوسی در مقدار انرژی ویژه می‌شود (Ersoy & Atici, 2004).
- با افزایش پارامترهای مقاومتی و ساینده‌گی سنگ، مقدار انرژی ویژه برش افزایش می‌یابد (Ersoy & Atici, 2004).
- با افزایش شاخص‌های تردی و شکنندگی سنگ مقدار انرژی ویژه برش افزایش می‌یابد (Atici & Ersoy, 2008).

- با افزایش نرخ سایش، میزان انرژی ویژه برش افزایش می‌یابد (Buyuksagis, 2007).
به طور کلی پایین بودن مقدار انرژی ویژه برش در فرایند برش نشان دهنده راندمان بالای برش می‌باشد.

qN5 Ķdžə

Á Ě Œ Õ Ó Ė Ł ı Ɔ Ƀ

ŮŇĭ Ñ̄

3-1- مروری بر سابقه علمی موضوع

اولین بار نورلینگ³⁰ در سال 1971 به بررسی تأثیر خصوصیات مکانیکی و اجزاء تشکیل دهنده سنگ بر روی نتایج برش سنگ‌های ساختمانی در کشور سوئد پرداخت. او در تحقیقات خود خصوصیات پتروگرافی سنگ را به عنوان یکی از عوامل دخیل در قابلیت برش سنگ مورد ارزیابی و بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که اندازه دانه‌های کوارتز نسبت به مقدار کوارتز از اهمیت بیشتری در قابلیت برش سنگ برخوردار می‌باشد (Norling, 1971).

باتنر³¹ در سال 1974 در مطالعات خود در زمینه فرایند برش و سایش ابزارهای الماسی دریافت که سرعت سایش دانه‌ها با تردی و شکنندگی آن‌ها نسبت مستقیم داشته و با افزایش تردی دانه الماس، سرعت سایش آن نیز افزایش می‌یابد (Buttner, 1974).

تانسوف³² و وارنک³³ در سال 1982 به بررسی پارامترهای ابزاری و نحوه انتخاب صحیح آن‌ها در فرایند برش سنگ پرداختند. نتایج بررسی‌های آنان نشان داد که بهترین شرایط برش از نظر اقتصادی زمانی است که از دانه‌های الماس با اندازه دانه‌های متوسط با تراکم یا غلظت بالا در نرخ‌های برش زیاد و برای نرخ‌های برش پایین از دانه‌هایی با اندازه کوچکتر و غلظت کمتر استفاده شود (Tonshoff and Warnecke, 1982).

ارتینگشاسن³⁴ در سال 1985 به بررسی و مطالعه سایش دیسک در برش سنگ گرانیات در حالت‌های مختلف برش پرداخت. نتایج حاصل از بررسی‌های او نشان داد که توان مورد نیاز در حالت برش رو به بالا در مقایسه با برش رو به پائین وقتی عمق برش کمتر از 20-25 میلی‌متر باشد، کمتر می‌باشد. اما زمانی که عمق برش بیشتر می‌شود، توان مورد نیاز در حالت برش رو به پائین کمتر می‌شود. در برش‌های عمیق، سایش شعاعی غیر یکنواخت در حالت برش رو به پائین ممکن است باعث تحریک ارتعاشات شدید در دیسک، قطعه کار و ماشین برش شود و ممکن است رفته رفته باعث انحراف مسیر برش دیسک شده و در نهایت شیار پهن‌تری به وجود آید (Ertingshausen, 1985).

30-Norling

31-Buttner

32-Tonshoff

33-Warnecke

34-Ertingshausen

در سال 1985 رایت³⁵ و کاساپی³⁶ به بررسی فاکتورهای مؤثر در زمینه قابلیت برش سنگ پرداختند. آن‌ها در تحقیقشان سعی داشتند تا رابطه‌ای میان خصوصیات فیزیکی و آنالیز پتروگرافیکی سنگ و نتایج برش برقرار سازند. در نهایت پس از بررسی‌های فراوان نیروی برش را به عنوان مهم‌ترین عامل در فرایند برش ارائه دادند. نتایج حاصل از بررسی‌هایشان نشان داد که با افزایش نیروی برش، نرخ تولید به ازاء واحد سایش کاهش می‌یابد (Wright and Cassapi, 1985).

پای³⁷ در سال 1987 طبقه‌بندی خود را بر اساس عملکرد سایش دیسک و مصرف انرژی ارائه کرد. او در تحقیقات خود با اندازه‌گیری مصرف انرژی و سایش دیسک بر روی نمونه‌هایی از سنگ‌های سخت، آن‌ها را در چهار گروه تقسیم‌بندی کرد. او همچنین در ادامه تحقیقات خود تأثیر پارامترهای عملیاتی را بر روی فرایند برش مورد بررسی قرار داد. او در تحقیقات خود سرعت حرکت قطعه کار (نرخ پیشروی)، عمق برش، سرعت چرخش دیسک و سختی سنگ را به عنوان مهمترین پارامتر در میزان مصرف انرژی در فرایند برش بیان کرد (Pai, 1987).

هاسبرگر³⁸ در سال 1989 و 1990 به بررسی علت رفتارهای مختلف سنگ در نتیجه استفاده از ابزارهای الماسی پرداخت. نتایج حاصل از تحقیقات وی نشان داد که هرچه میزان کانی‌های با سطح کلیواژ مشخص در بلوک سنگی بیشتر باشد، سنگ راحت‌تر برش خواهد خورد (Hausberger, 1989, 1990).

جنینگ³⁹ و رایت در سال 1989 پس از بررسی عوامل مؤثر در عملکرد دیسک‌های الماسی، قابلیت برش (نرخ برش به ازاء واحد سایش) و ارتباط میان عمر مفید دیسک با پارامترهای ساینده‌گی و سختی را در نمونه‌های مختلفی از سنگ‌های سخت و نرم مورد مطالعه قرار داد. نتایج حاصل از بررسی‌هایشان نشان داد که مقدار سایش از ارتباط بهتری با ساینده‌گی سنگ در مقایسه با سختی برخوردار می‌باشد. در ادامه تحقیقات، آن‌ها دریافتند که با افزایش نرخ برش میزان مصرف انرژی افزایش می‌یابد و این در حالی است که

35-Wright

36-Cassapi

37-Pai

38-Hausberger

39-Jening

شیب تغییرات مصرف انرژی نسبت به افزایش عمق برش بیشتر از شیب تغییرات مصرف انرژی نسبت به افزایش نرخ پیشروی می‌باشد. همچنین در مقایسه انجام شده برای انواع مختلف سنگ، بیشترین میزان مصرف انرژی به ترتیب متعلق به سنگ‌های گرانیتی، ماربل و ماسه سنگی بود (Jening and Wright, 1989).

کنستانتی⁴⁰ در سال 1991 به بررسی فاکتورهای مؤثر در عملکرد ابزارهای برش دیسکی پرداخت. او در مطالعاتش پارامترهای ابزاری نظیر نوع و کیفیت ساخت سگمنت، مشخصات دانه الماس (شامل اندازه، نوع و تراکم) و انتخاب ترکیب مناسب ماتریس سگمنت را مورد بررسی قرار داد (Konstanty, 1991).
لو⁴¹ و لیاو⁴² در سال 1995 به بررسی تأثیر جنس و اندازه دانه الماس در فرایند برش سنگ گرانیت قرمز هندی پرداختند. آن‌ها در مطالعاتشان سه نوع دیسک با مشخصات ابزاری متفاوت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از بررسی‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش مقدار سختی دانه‌های الماس، نسبت دانه‌های کامل کنده شده به دانه‌های ریز شکسته و کنده شده افزایش یافته و به تبع آن مقدار نیروهای برش در فرایند افزایش می‌یابند. همچنین در شرایطی که دانه‌ها از سختی مشابه‌ای برخوردار باشند، با کاهش اندازه دانه‌های الماس، نیروهای برش افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان در مکانیزم برش و تراشه برداری دانه الماس در فرایند برش ترد در سنگ‌های گرانیتی جستجو کرد. چرا که براده‌ها در فرایند برش سنگ‌های گرانیتی عموماً از رشد ترک‌ها و شکست ترد شکل می‌گیرند و ناحیه ترک خورده نیز متأثر از میزان برجستگی دانه‌ها می‌باشد که این ناحیه برای دانه‌های ریز کمتر می‌باشد. بنابراین برداشت تراشه در این شرایط مشکل‌تر و نیروهای برشی نیز بیشتر می‌شوند (Luo and Liao, 1995).

در سال 1996 کلاژن⁴³ و همکارانش به بررسی ویژگی‌های انتشار امواج صوتی در فرایند برش یک سنگ گرانیتی پرداختند. آن‌ها در تحقیقاتشان انتشار صوت را به عنوان یک پارامتر مهم در طبقه‌بندی برش

⁴⁰-Konstanty

⁴¹-Luo

⁴²-Liao

⁴³-Clausen

سنگ‌ها ارائه دادند. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که عواملی همچون مشخصات و تناوب کانی‌ها، اندازه دانه‌ها و درجه قفل‌شدگی آن‌ها در فرآیند برش نقش به سزائی خواهند داشت (Clausen, 1996).

در سال 1997 جیلان اغلو⁴⁴ و گورگیولو⁴⁵ ارتباط میان انرژی ویژه برش و نرخ تولید را با برخی از مشخصات سنگ شامل مقاومت فشاری تک محوری سنگ، مقاومت کششی، شاخص مقاومت بار نقطه‌ای، سفتی سنگ و سختی چکش اشمیت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در مطالعاتشان به بررسی پنج نوع سنگ در چهار کارخانه سنگ‌بری پرداختند. نتایج حاصل از بررسی‌های آماری (برازش‌های ساده و چند متغیره) نشان داد که انرژی ویژه برش و میزان نرخ تولید از ارتباط خوبی با مقادیر مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، مقاومت بار نقطه‌ای، سفتی سنگ و سختی چکش اشمیت برخوردار می‌باشند (Ceylanoglu and Gorgulu, 1997).

سون⁴⁶ و همکاران در سال 2002 به بررسی تأثیر پارامترهای مقاومتی و سختی سگمنت در عملکرد فرایند برش سنگ پرداختند. آن‌ها در بررسی‌های خود تأثیر افزایش ماده کاربید سیلیسم⁴⁷ را در افزایش مقاومت خمشی و سختی ماتریس سگمنت مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از بررسی‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش مقدار مشخصی از کاربید سیلیسم در ماتریس سگمنت، موجب افزایش مقاومت خمشی و سختی آن و در نهایت منجر به افزایش عملکرد برش (افزایش مقدار حجم برداشته شده از سنگ در واحد زمان به ازاء مقدار وزن کاسته شده از سگمنت) خواهد شد (Sun et al., 2002).

ایوب اوغلو⁴⁸ و همکاران در سال 2003 به بررسی تأثیر پارامترهای سنگ بر روی عملکرد سایش دیسک‌های دایره‌ای در فرایند برش سنگ‌های آندزیتی پرداختند. آن‌ها مطالعاتشان را بر روی 24 نوع سنگ آندزیتی برای ارزیابی و تعیین تغییرات نرخ سایش انجام دادند. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که نرخ سایش با افزایش پارامترهای مقاومتی سنگ، سختی و مدول الاستیسیته کاهش یافته و با افزایش ضریب جذب آب کاهش می‌یابد (Eyuboglu et al., 2003).

44-Ceylanoglu

45-Gorgulu

46-Sun

47-Silicon Carbide

48-Eyuboglu

انگلز⁴⁹ در سال 2003 به بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی و مشخصات ابزاری بر روی نرخ برش و ضخامت تراشه در نمونه‌هایی از سنگ‌های گرانیتی پرداخت. نتایج به دست آمده از این تحقیق را به طور خلاصه می‌توان به صورت زیر بیان کرد (Engles, 2003):

- با افزایش عمق برش مقدار نرخ برش و ضخامت تراشه افزایش می‌یابند.
- با افزایش سرعت چرخش دیسک و تراکم دانه‌الماس مقدار نرخ برش ثابت و مقدار ضخامت تراشه کاهش می‌یابد.
- با افزایش نرخ پیشروی مقدار نرخ برش و ضخامت تراشه افزایش می‌یابند.
- مقدار متوسط ضخامت تراشه رابطه مستقیم با اندازه دانه‌الماس داشته و با افزایش آن افزایش می‌یابد.

ارسوی⁵⁰ و آتیسی⁵¹ در سال 2004 به بررسی رفتار دیسک‌های برش دهنده سنگ در فرایند برش سنگ‌های مختلف تحت شرایط مختلف عملیاتی پرداختند. مطالعات بر روی 16 نوع سنگ مختلف از جنس گرانیت، گابرو، آندزیت، بازالت، توف و مرمر با سه نوع دیسک در شرایط عملیاتی مختلف با عمق‌های مختلف برش (90 و 70، 50، 30، 10 میلی‌متر) و نرخ‌های مختلف پیشروی (1 و 6/8، 0/0، 0/4، 0/2 متر بر دقیقه) با سرعت محیطی ثابت (65 متر بر ثانیه) با دستگاه برش در شرایط برش رو به پایین انجام پذیرفت. نتایج حاصل از بررسی‌های ارزیابی و آتیسی را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر بیان کرد (Ersoy and Atici, 2004):

- نیروهای برش در یک نرخ ثابت پیشروی با کاهش عمق برش و افزایش سرعت محیطی، کاهش می‌یابد.
- با افزایش نرخ پیشروی، نیروی برش افزایش یافته و با افزایش سرعت محیطی، نیروهای برش کاهش می‌یابد.

⁴⁹-Engles

⁵⁰-Ersoy

⁵¹-Atici

- با افزایش عمق و سرعت برش، مقدار انرژی ویژه برش کاهش می‌یابد.
 - با افزایش شاخص سایش سورشار و مقاومت فشاری تک محوری، مقدار انرژی ویژه برش افزایش می‌یابد.
- همچنین آن‌ها در مطالعاتشان برای انتخاب نوع و اندازه دانه‌های الماس برای سنگ‌های مختلف پیشنهاد کردند که از دیسک‌هایی با اندازه دانه‌های الماس ریزتر و با تراکم بالاتر برای برش سنگ‌های سخت و از دیسک‌هایی با اندازه دانه‌های بزرگتر و با تراکم کمتر برای برش سنگ‌های نرم استفاده شود. در سال 2004 قهرمان⁵² و همکارانش به بررسی عملکرد دیسک‌های برش دهنده سنگ در فرایند برش سنگ‌های کربناته پرداختند. بررسی‌ها بر روی 13 نمونه سنگ کربناته در کشور ترکیه انجام شد. آن‌ها در تحقیقاتشان به بررسی ارتباط میان خواص مکانیکی سنگ (از قبیل مقاومت ضربه‌ای، چسبندگی، مقاومت ساینده‌گی، سرعت موج p، مقاومت کششی، مقاومت فشاری تک محوری، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت بار نقطه‌ای) و پارامترهای عملیاتی دستگاه برش (از قبیل نرخ پیشروی دستگاه برش، قطر دیسک، سرعت چرخش دیسک، عمق برش) با نرخ تولید پرداختند. در نهایت آن‌ها مدل‌های تجربی خود را برای پیش‌بینی نرخ برش ارائه کردند. نتایج بررسی‌های انجام شده توسط قهرمان و همکارانش را به طور خلاصه می‌توان به صورت زیر بیان کرد (Kahraman et al., 2004):
- با افزایش پارامترهای مقاومتی سنگ مقدار سرعت برش یا نرخ برش کاهش می‌یابد.
 - مقدار نرخ تولید با قطر دیسک نسبت عکس داشته و با افزایش مقدار قطر دیسک، مقدار نرخ تولید کاهش می‌یابد.
 - مقدار نرخ تولید با پارامترهای عملیاتی (نرخ پیشروی، عمق برش و سرعت چرخش دیسک) نسبت مستقیم داشته و با افزایش مقادیر پارامترهای عملیاتی، مقدار نرخ تولید افزایش می‌یابد.

گونایدین⁵³ و همکارانش در سال 2004 ارتباط میان شاخص‌های شکنندگی سنگ و میزان سرعت برش سنگ‌های کربناته را در کشور ترکیه مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داد که ارتباط خوبی میان دو اندیس شکنندگی B_5 (حاصل ضرب مقاومت فشاری تک محوری و درصد خاکه زیر 28 مش در آزمایش ضربه) و B_3 (حاصل ضرب مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی سنگ تقسیم بر دو) با سرعت برش وجود داشته و با افزایش مقدار شاخص‌های تردی مقدار سرعت برش کاهش خواهد یافت (Gunaydin et al., 2004).

آیهان⁵⁴ در سال 2005 به بررسی و انجام تحلیل حساسیت بر روی مدل‌های اقتصادی در فرایند برش سنگ‌های کربناته در کشور ترکیه پرداخت. نتایج بررسی‌های وی نشان داد که پارامتر مصرف انرژی به عنوان حساس‌ترین پارامتر اقتصادی در میان سایر پارامترها، نظیر هزینه مصرف دیسک، آب، کارگر و ... مطرح می‌باشد که تقریباً 30 تا 50 درصد از هزینه کل فرایند را شامل می‌شود (Ayhan, 2005).

ارسوی و همکاران در سال 2005 به بررسی سایش ابزارهای الماسی در فرایند برش نمونه‌هایی از سنگ‌های ساختمانی پرداختند. آن‌ها در بررسی‌های خود ارتباط میان پارامترهای سنگ، نرخ سایش و انرژی ویژه برش را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که ارتباط خوبی میان نرخ سایش و انرژی ویژه برش و همچنین پارامترهای از سنگ نظیر حجم سیلیس، مقاومت خمشی و سختی چکش اشمیت برقرار می‌باشد (Ersoy et al., 2005).

دلگادو⁵⁵ و همکارانش در سال 2005 به بررسی تأثیر سختی سنگ بر روی قابلیت برش سنگ در شرایط آزمایشگاهی پرداختند. آزمایش‌ها بر روی 10 نمونه سنگ گرانیته در کشور اسپانیا انجام شد. آن‌ها در بررسی‌های خود مقدار سختی ویکرز⁵⁶ را برای هر یک از نمونه‌ها در مقیاس آزمایشگاهی اندازه‌گیری کرده و در ادامه به بررسی ارتباط میان این پارامتر و سرعت برش پرداختند. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داد که ارتباط نسبتاً خوبی (با ضریب همبستگی 0/71) میان سختی ویکرز و

⁵³-Gunaydin

⁵⁴-Ayhan

⁵⁵-Delgado

⁵⁶-Vickers hardness

سرعت برش وجود داشته و با افزایش سختی سنگ و درصد کوارتز مقدار سرعت برش کاهش خواهد یافت (Delgado et al., 2005).

بویوکساگیز⁵⁷ و گوکتان⁵⁸ در سال 2005 به بررسی و مطالعه عملکرد برش نمونه سنگ‌هایی از جنس مرمر در مقیاس آزمایشگاهی پرداختند. آن‌ها در بررسی‌های خود دو پارامتر عمق برش و نرخ پیشروی را به عنوان متغیرهای فرایند برش و مقدار انرژی ویژه برش را به عنوان معیار ارزیابی عملکرد برش در نظر گرفتند. نتایج حاصل از بررسی‌های آن‌ها 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 در ادامه تحقیقاتشان آن‌ها روابطی را برای پیش‌بینی انرژی ویژه برش با استفاده از تحلیل‌های آماری و بر اساس پارامترهای سنگ نظیر مقاومت فشاری، سختی موهس، شاخص سختی ان‌سی‌بی و نوپ، شاخص ساینده‌گی سورشار و اندازه دانه‌های کلسیت ارائه دادند (Buyuksagis and Goktan, 2005).

در سال 2006 قهرمان و همکارانش به بررسی و پیش‌بینی قابلیت برش سنگ‌های کربناته با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. آن‌ها در تحقیقاتشان 8 نمونه سنگ کربناته در کشور ترکیه را مورد بررسی قرار دادند. سه پارامتر چسبندگی، تخلخل و زاویه اصطکاک داخلی برای هر نمونه سنگ در آزمایشگاه و میزان سرعت برش هر نمونه در کارخانه فرآوری سنگ اندازه‌گیری شد. در ادامه با استفاده از شبکه عصبی به بررسی و پیش‌بینی قابلیت برش با توجه به پارامترهای مذکور پرداختند. آن‌ها در ادامه بررسی‌های خود ارتباط میان پارامترهای چسبندگی، تخلخل، زاویه اصطکاک داخلی و سرعت برش سنگ را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که ارتباط نسبتاً خوبی میان سرعت برش با پارامتر زاویه اصطکاک داخلی و ضرب دو پارامتر تخلخل و چسبندگی برقرار می‌باشد (Kahraman et al., 2006).

بویوکساگیز در سال 2007 به بررسی تأثیر حالت‌های مختلف برش سنگ بر روی عملکرد برش دیسک‌های دایره‌ای در فرایند برش سنگ‌های گرانیتی پرداخت. مطالعات بر روی 6 نوع سنگ گرانیتی

⁵⁷-Buyuksagis

⁵⁸-Goktan

برای ارزیابی و تعیین تغییرات نرخ سایش و مقدار انرژی ویژه، در هر یک از حالت‌های برش انجام شد. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که نرخ سایش و مقدار انرژی ویژه در حالت برش رو به پایین کمتر از حالت برش رو به بالا است. بویوکسایز در ادامه تحقیقاتش به بررسی ارتباط میان مشخصات سنگ (از قبیل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، سختی اشمیت، سختی شور، اندیس سایش سوشار، دانسیته، تخلخل، میانگین اندازه دانه، درصد کوارتز، اورتوکلاز و پلاژیوکلاز) با دو معیار نرخ سایش ویژه و انرژی ویژه در حالت‌های مختلف برش با استفاده از تحلیل‌های آماری پرداخت. نتایج حاصل از مطالعات آماری نشان داد که مقاومت خمشی و درصد پلاژیوکلاز از مهمترین مشخصات سنگ در پیش‌بینی میزان نرخ سایش و انرژی ویژه برش می‌باشند (Buyuksagis, 2007).

فنر⁵⁹ و همکاران در سال 2007 به بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش دهنده‌های دیسکی در فرایند برش سنگ‌های کربناته پرداختند. آن‌ها در مطالعاتشان ارتباط میان مشخصات سنگ (از قبیل مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، سرعت موج p، ساینده‌گی، سختی اشمیت، مقاومت بار نقطه‌ای و مقاومت ضربه‌ای) و نرخ برش را با استفاده از برازش‌های ساده و چند متغیره مورد بررسی قرار دادند. (Fener et al., 2007).

اوزچلیک⁶⁰ در سال 2007 به بررسی ارتباط میان مشخصات بافتی سنگ (از قبیل اندازه دانه‌ها و ضریب بافت) با مقادیر نرخ سایش در فرایند برش سنگ‌های کربناته پرداخت. نتایج بررسی‌های وی نشان داد که با افزایش مقدار ضریب بافت مقدار نرخ سایش افزایش یافته و با افزایش اندازه دانه‌ها مقدار نرخ سایش کاهش می‌یابد (Ozcelik, 2007).

آیسی و ارسوی در سال 2009 به بررسی تأثیر شاخص‌های تردی سنگ بر عملکرد برش نمونه‌های مختلفی از سنگ‌های ساختمانی پرداختند. آن‌ها در بررسی‌های خود ارتباط میان انرژی ویژه برش و شاخص‌های تردی سنگ را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از بررسی‌های آن‌ها نشان داد که با

⁵⁹-Fener

⁶⁰-Ozcelik

افزایش مقدار شاخص‌های تردی سنگ مقدار مصرف انرژی به ازای واحد حجم بریده شده از سنگ افزایش می‌یابد (Atici and Ersoy, 2009).

عطایی و همکاران در سال 2011 ارتباط میان نرخ تولید سیم برش‌های الماسی را با برخی از پارامترهای سنگ شامل مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، ساینده‌گی لوس آنجلس و سختی چکش اشمیت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مطالعاتشان را بر روی 14 نمونه سنگ کربناته در 14 معدن سنگ ساختمانی انجام دادند. نتایج حاصل از این مطالعات نشان داد که ارتباط خوبی با ضریب همبستگی بالای 0/9 میان پارامترهای مذکور و نرخ تولید سیم برش‌های الماسی برقرار می‌باشد (Ataei et al, 2011).

میکائیل و همکاران در سال 2011 به بررسی ارتباط میان شاخص‌های تردی سنگ و نرخ تولید دیسک‌های الماسی پرداختند. نتایج بررسی‌ها بر روی 17 نمونه سنگ ساختمانی (10 نمونه سنگ گرانیتی و 7 نمونه سنگ کربناته) نشان داد که ارتباط بسیار خوبی با ضریب همبستگی بالای 0/95 میان شاخص تردی B_3 و نرخ تولید برقرار می‌باشد (Mikaeil et al, 2011c).

3-2- روابط تجربی ارائه شده در زمینه قابلیت برش سنگ

تاکنون روابط تجربی زیادی توسط محققین در زمینه پیش‌بینی و تعیین قابلیت برش سنگ ارائه شده است که در بیشتر این روابط از برازش‌های ساده و چند متغیره برای بررسی ارتباط میان پارامترهای مؤثر و قابلیت برش سنگ استفاده شده است.

3-2-1- رابطه بیرله و راترمن (Birle and Ratterman, 1990)

$$w = 18 - 0.13Eq - 0.17AR \quad (1-3)$$

در رابطه بالا داریم:

w : عملکرد سایش دیسک (m^2/mm)

Eq : درصد کوارتز (%)

AR : مقاومت در برابر ساینده‌گی (%)

2-2-3- روابط جیلان اغلو و گورگولو (Ceylanoglu & Gorgulu, 1997)

$$P = \frac{1}{0.00148 + 0.0017\sigma_c} \quad R^2 = 0.79 \quad (2-3)$$

$$SE_{cut} = -4.85 + 0.18\sigma_c \quad R^2 = 0.90 \quad (3-3)$$

$$P = \frac{1}{-0.205 + 0.005I_s} \quad R^2 = 0.38 \quad (4-3)$$

$$SE_{cut} = -27.166 + 5.44I_s \quad R^2 = 0.46 \quad (5-3)$$

$$P = \exp(4.4 - 0.283\sigma_t) \quad R^2 = 0.83 \quad (6-3)$$

$$SE_{cut} = \exp(-1 + 0.37\sigma_t) \quad R^2 = 0.87 \quad (7-3)$$

$$P = 49.79 - .712SHV \quad R^2 = 0.87 \quad (8-3)$$

$$SE_{cut} = \frac{1}{1.022 - 0.015SHV} \quad R^2 = 0.88 \quad (9-3)$$

$$P = 0.056SHV + 0.88I_s \quad R^2 = 0.53 \quad (10-3)$$

$$SE_{cut} = -0.113SHV + 2.57I_s \quad R^2 = 0.52 \quad (11-3)$$

$$P = 2.674\sigma_t - 0.143\sigma_c \quad R^2 = 0.6 \quad (12-3)$$

$$SE_{cut} = -0.795\sigma_t + 0.2\sigma_c \quad R^2 = 0.93 \quad (13-3)$$

$$P = 0.36E + 0.025SHV \quad R^2 = 0.83 \quad (14-3)$$

$$SE_{cut} = -0.244E + 0.24SHV \quad R^2 = 0.99 \quad (15-3)$$

$$P = -0.19SHV + 4.51I_s - 0.13\sigma_c \quad R^2 = 0.72 \quad (16-3)$$

$$SE_{cut} = 0.28SHV - 3.32I_s + 0.21\sigma_c \quad R^2 = 0.95 \quad (17-3)$$

$$P = 0.64SHV + 4.86I_s - 7.94\sigma_t + 0.43T \quad R^2 = 0.98 \quad (18-3)$$

$$SE_{cut} = -0.39SHV - 2.3I_s + 5.36\sigma_t + 0.64T \quad R^2 = 0.99 \quad (19-3)$$

در روابط بالا داریم:

P : نرخ تولید (m^2/h)

SE_{cut} : انرژی ویژه برش (J/mm^3)

σ_t : مقاومت کششی (MPa)

σ_c : مقاومت فشاری تک محوری (MPa)

E : مدول کشسان (GPa)

I_s : مقاومت بار نقطه‌ای (MPa)

T : سفتی سنگ ($Kgf.cm/cm^3$)

3-2-3- روابط ایوب اوغلو و همکاران (Eyuboglu et al., 2003)

$$w = 0.2129 e^{0.0209\sigma_c} \quad R^2 = 0.56 \quad (20-3)$$

$$w = 0.2396 e^{0.202\sigma_t} \quad R^2 = 0.46 \quad (21-3)$$

$$w = 0.0366 e^{0.3343E} \quad R^2 = 0.43 \quad (22-3)$$

$$w = 0.1286 e^{0.2626NCB} \quad R^2 = 0.69 \quad (23-3)$$

$$w = 1.5209 e^{-0.9832Wa} \quad R^2 = 0.67 \quad (24-3)$$

$$w = 0.00006 e^{-0.1331SSHN} \quad R^2 = 0.7 \quad (25-3)$$

$$w = -5.4123 + 0.0024\sigma_c - 0.0206\sigma_t + 0.0095I_s + 0.0993SSHN - 0.1621NCB + 0.0591Bsa - 0.0007LA \quad (26-3)$$

در روابط بالا داریم:

w : عملکرد سایش دیسک (mm^3/m^2)

NCB : شاخص سختی آن‌سی‌بی

Wa : ضریب جذب آب (%)

$SSHN$: سختی شور

LA : مقاومت سائیدگی لوس آنجلس (%)

$BSAS$: مقاومت سایش سطحی بوهم ($cm^3/50cm^2$)

3-2-4- روابط قهرمان و همکاران (Kahraman et al. 2004)

$$P = 0.01 \frac{V_f^{0.73} d^{1.03} ISI^{2.27}}{D^{0.8} \sigma_t^{0.6}} \quad R^2 = 0.93 \quad (27-3)$$

$$P = 31.84 \frac{V_f^{0.69} d^{1.07} N^{0.01}}{D^{0.70} c^{0.04}} \quad R^2 = 0.84 \quad (28-3)$$

$$P = 23.44 \frac{V_f^{0.73} d^{0.99} N^{0.11}}{D^{0.42} \phi^{0.61}} \quad R^2 = 0.88 \quad (29-3)$$

$$P = 11.19 \frac{V_f^{0.64} d^{1.04} N^{0.08}}{D^{0.52} \sigma_c^{0.17}} \quad R^2 = 0.88 \quad (30-3)$$

$$P = 2.63 \frac{V_f^{0.64} d^{1.06} N^{0.28}}{D^{0.59} \sigma_t^{0.27}} \quad R^2 = 0.91 \quad (31-3)$$

$$P = 12.47 \frac{V_f^{0.71} d^{0.93} N^{0.19}}{D^{0.41} SHV^{0.54}} \quad R^2 = 0.89 \quad (32-3)$$

$$P = 7.18 \frac{V_f^{0.68} d^{1.06} N^{0.18}}{D^{0.64} I_s^{0.17}} \quad R^2 = 0.87 \quad (33-3)$$

$$P = 588.8 \frac{V_f^{0.67} d^{1.09} N^{0.15}}{D^{0.71} ISI^{0.93}} \quad R^2 = 0.86 \quad (34-3)$$

$$P = 0.21 \frac{V_f^{0.69} d^{0.99} LA^{0.34} N^{0.23}}{D^{0.38}} \quad R^2 = 0.91 \quad (35-3)$$

$$P = 0.47 \frac{V_f^{0.64} d^{0.95} N^{0.28}}{D^{0.23} V_p^{0.55}} \quad R^2 = 0.90 \quad (36-3)$$

در روابط بالا داریم:

V_f : نرخ پیشروی دستگاه برش (cm/s)

D : قطر دیسک (mm)

N : سرعت چرخش دیسک (rpm)

d : عمق برش (cm)

ISI : مقاومت ضربه‌ای (%)

C : چسبندگی (MPa)

SHV : عدد چکش اشمیت

V_p : سرعت موج p (Km/s)

ϕ : زاویه اصطکاک داخلی ($^\circ$)

3-2-5- روابط گونایدین و همکاران (Gunaydin et al. 2004)

$$P = -4.63 \ln B_5 + 55.69 \quad B_5 = q \sigma_c \quad R^2 = 0.72 \quad (37-3)$$

$$P = -3.01 \ln B_8 + 31.14 \quad B_3 = \frac{\sigma_c \sigma_t}{2} \quad R^2 = 0.81 \quad (38-3)$$

در روابط بالا داریم:

B_5 و B_3 : شاخص‌های تردی سنگ

q : درصد خاکه (زیر 28 مش) در آزمایش ضربه

3-2-6- روابط دلگادو و همکاران (Delgado et al., 2005)

$$P = -0.0812Eq + 5.235 \quad R^2 = 0.63 \quad (39-3)$$

$$P = -0.0243HV + 20.442 \quad R^2 = 0.71 \quad (40-3)$$

در روابط بالا داریم:

HV : سختی ویکرز

3-2-7- روابط بیوکساگیز و گوکتان (Buyuksagis & Goktan, 2005)

$$SE_{cut} = -1.309 + 0.73CAI + 0.42MH - 0.012HK + 0.267NCB - 0.028Cgs \quad R^2 = 0.975 \quad (41-3)$$

$$SE_{cut} = -1.000195 + 0.588CAI + 0.439MH - 0.0127UCS \quad R^2 = 0.887 \quad (42-3)$$

در روابط بالا داریم:

CAI : شاخص ساینده‌گی سرشار

MH : سختی موهس

HK : سختی نوپ

Cgs : اندازه دانه‌های کلسیت (mm)

SE_{cut} : انرژی ویژه برش (J/mm^3)

8-2-3- رابطه ارسوی و همکاران (Ersoy et al., 2005)

$$w = 0.000003SE_{cut} + 0.000039SC + 0.00012BS - 0.0001SHV \quad R^2 = 0.99 \quad (43-3)$$

در رابطه بالا داریم:

w : نرخ سایش ($\frac{gr}{m^3} \times 10^{-3}$)

SC : مقدار سیلیس (%)

BS : مقاومت خمشی (MPa)

9-2-3- روابط قهرمان و همکاران (Kharaman et al. 2006)

$$P = 7.46 \times (C \times n)^{0.19} \quad R^2 = 0.713 \quad (44-3)$$

$$P = 138.83 \times e^{-0.048\phi} \quad R^2 = 0.78 \quad (45-3)$$

$$P = -2.56 \ln(C) + 21.997 \quad R^2 = 0.244 \quad (46-3)$$

در روابط بالا داریم:

n : تخلخل (%)

10-2-3- روابط اوزچلیک (Ozelick, 2007)

$$w = 0.0008 Gs^2 - 0.1636 Gs + 9.3707 \quad R^2 = 0.86 \quad (47-3)$$

$$w = 0.1502Tc^2 - 0.7276Tc + 1.79 \quad R^2 = 0.93 \quad (48-3)$$

در روابط بالا داریم:

w : عملکرد سایش دیسک ($\frac{mm^3}{m^2}$)

Gs : اندازه دانه‌ها (μm)

Tc : ضریب بافت

3-2-11- روابط بیوکساگیز (Buyuksagis, 2007)

$$SWR_U = 3.483 - 0.234P_c + 0.592Bs \quad (49-3)$$

$$SWR_D = 9.214 - 0.469P_c + 0.565Bs \quad (50-3)$$

$$SE_U = 2.474 + 0.023Bs \quad (51-3)$$

$$SE_D = 2.614 + 0.043P_c + 0.011Bs \quad (52-3)$$

در روابط بالا داریم:

SWR_U : نرخ ویژه سایش در حالت برش رو به بالا $(\mu m/m^2)$

SWR_D : نرخ ویژه سایش در حالت برش رو به پایین $(\mu m/m^2)$

SE_U : انرژی ویژه برش در حالت برش رو به بالا (Nm/mm^3)

SE_D : انرژی ویژه برش در حالت برش رو به پایین (Nm/mm^3)

PC : درصد پلاژیوکلاز (%)

3-2-12- روابط فنر و همکاران (Fener et al, 2007)

$$P = -38.8 - 0.02\sigma_c - 0.02\sigma_t + 0.7SHV - 4.9I_s + 1.2ISI - 0.08LA - 8.1V_p \quad R^2 = 1 \quad (53-3)$$

$$P = 28.21 + 0.69SHV - 8.92V_p \quad R^2 = 0.81 \quad (54-3)$$

$$P = 23.67 + 0.72SHV - 1.03I_s - 7.72V_p \quad R^2 = 0.86 \quad (55-3)$$

$$P = 32.59 + 0.67SHV - 0.09ISI - 8.5V_p \quad R^2 = 0.81 \quad (56-3)$$

$$P = -5.22 \ln \sigma_c + 38.23 \quad R^2 = 0.73 \quad (57-3)$$

$$P = 22.23e^{-0.074\sigma_t} \quad R^2 = 0.77 \quad (58-3)$$

$$P = -0.19SHV + 24.2 \quad R^2 = 0.29 \quad (59-3)$$

$$P = 22.57e^{-0.086I_s} \quad R^2 = 0.5 \quad (60-3)$$

$$P = 85.19e^{-0.023ISI} \quad R^2 = 0.4 \quad (61-3)$$

$$P = 6.61 \ln LA - 8.83 \quad R^2 = 0.68 \quad (62-3)$$

$$P = -2.51V_p + 28.49 \quad R^2 = 0.52 \quad (63-3)$$

3-2-13- روابط آتیسوی و ارسوی (Atici and Ersoy 2009)

$$SE_{cut} = 155.23(B_1) - 535.08 \quad B_1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad R^2 = 0.96 \quad (64-3)$$

$$SE_{cut} = 114873.93(B_2) - 180769.7(B_2) + 71901.41 \quad B_2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad R^2 = 0.87 \quad (65-3)$$

$$SE_{cut} = 6.62e^{0.002(B_3)} \quad B_3 = \frac{\sigma_c \times \sigma_t}{2} \quad R^2 = 0.72 \quad (66-3)$$

در روابط بالا داریم:

B_1, B_2 و B_3 : شاخص‌های تردی سنگ

3-2-14- روابط عطایی و همکاران (Ataei et al. 2011)

$$P_h = 19.208e^{-0.0113UCS} \quad (67-3)$$

$$P_h = 17.122e^{-0.1382BTS} \quad (68-3)$$

$$P_h = -57.875 \ln(SH) + 239.45 \quad (69-3)$$

$$P_h = 0.3653LA^{0.8497} \quad (70-3)$$

$$P_h = \sqrt{\frac{10^{17.431} \times LA^{0.418}}{UCS^{0.503} \times BTS^{0.642} \times SH^{8.596}}} \quad (71-3)$$

3-2-15- روابط میکائیل و همکاران

$$GP_h = 3.7102 \times \ln(B_1) - 4.3321 \quad B_1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad R^2 = 0.63 \quad (72-3)$$

$$CP_h = 1.1562 \times B_1 - 3.5122 \quad R^2 = 0.7 \quad (73-3)$$

$$GP_h = 0.03 \times \exp(6.0031 \times B_2) \quad B_2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_t + \sigma_c} \quad R^2 = 0.68 \quad (74-3)$$

$$CP_h = 72.333 \times \ln(B_2) + 22.439 \quad R^2 = 0.7 \quad (75-3)$$

$$GP_h = 7.0304 \times \exp(-0.0003 \times B_3) \quad B_3 = \frac{\sigma_c \times \sigma_t}{2} \quad R^2 = 0.98 \quad (76-3)$$

$$CP_h = -0.017 \times (B_3) + 12.91 \quad R^2 = 0.89 \quad (77-3)$$

$$P_h = 76.747 \times B_3^{-0.3998} \quad R^2 = 0.96 \quad (78-3)$$

3-3- سیستم‌های طبقه‌بندی موجود در زمینه ارزیابی قابلیت برش

سیستم‌های طبقه‌بندی که تا کنون در زمینه قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی نرم و سخت ارائه شده‌اند عبارتند از:

3-3-1- سیستم طبقه‌بندی بیرله و راترمن

بیرله⁶¹ و راترمن⁶² در سال 1986 طبقه‌بندی خود را بر پایه مطالعات آزمایشگاهی برای پیش‌بینی عملکرد سایش دیسک در سنگ‌های سخت ارائه دادند (Birle and Ratterman 1990). آن‌ها در طبقه‌بندی خود سنگ‌ها را در چهار کلاس مختلف بر اساس عملکرد سایش دیسک طبقه‌بندی کردند. در طبقه‌بندی ارائه شده توسط بیرله و راترمن سنگ‌ها با استفاده از یک رابطه تجربی (رابطه 3-1 شامل دو پارامتر درصد کوآرتز و مقاومت سایشی سنگ) و بر اساس میزان عملکرد سایش دیسک مورد ارزیابی قرار گرفته و در چهار کلاس مطابق جدول 3-1 طبقه‌بندی می‌شدند.

(Birle and Ratterman 1990) $G \text{ sat } I \text{ as } Y \text{ GÜGÜGNKJ } \text{ 703PGÜNiS } \text{ Ndxll } \text{ GÜHk2 } \text{ Êg } \text{ H Hg } \text{ p } \Sigma$

کلاس سنگ	میزان عملکرد سایش دیسک (m^2/mm)
I	$\bar{W} >$
II	$\bar{W} < \bar{H}$
III	$\bar{H} < \bar{W}$
IV	$\bar{H} <$

3-3-2- سیستم طبقه‌بندی فازی وی و همکاران (Wei et al. 2003)

وی⁶³ و همکارانش در سال 2003 طبقه‌بندی فازی خود را به منظور بررسی و پیش‌بینی قابلیت برش سنگ‌های گرانیتی ارائه دادند. با استفاده از این طبقه‌بندی، دو معیار سایش دیسک و نیروی عمودی برش برای سنگ‌ها قابل پیش‌بینی و ارزیابی بود. در این طبقه‌بندی پارامترهایی نظیر سختی، شور،

61-Birle

62-Ratterman

63-Wei

مقدار کوارتز موجود در سنگ (به درصد)، ساینده‌گی سنگ، مقاومت فشاری و اندازه دانه‌های کوارتز به عنوان متغیرهای طبقه‌بندی در نظر گرفته شدند. وزن‌های اختصاص داده شده به هر یک از این پارامترها با توجه به دو معیار سایش دیسک و نیروی عمودی برش، در جدول 2-3 آورده شده است.

جدول 2-3- وزن‌های اختصاص داده شده در طبقه‌بندی فازی وی و همکاران (Wei et al. 2003)

فاکتور	درصد کوارتز	ساینده‌گی	مقاومت فشاری	سختی شور	اندازه دانه‌های کوارتز
وزن اختصاص داده شده با توجه به سایش دیسک	0/2	0/31	0/15	0/24	0/1
وزن اختصاص داده شده با توجه به نیروی بهینه دستگاه برش سنگ	0/25	0/1	0/15	0/3	0/2

مطابق جدول 2-3 ساینده‌گی و سختی سنگ به ترتیب بیشترین وزن را در بین پارامترهای سنگ در زمینه سایش دیسک و نیروی بهینه عمودی دستگاه برش دهنده سنگ دارا می‌باشند. در طبقه‌بندی ارائه شده توسط وی و همکاران سنگ‌ها در 6 کلاس مختلف مطابق جدول 3-3 و با استفاده از یک تابع فازی و عملگرهای فازی مورد پیش‌بینی و ارزیابی قرار می‌گیرند.

جدول 3-3- طبقه‌بندی ارائه شده توسط وی و همکاران (Wei et al. 2003)

کلاس	درصد کوارتز (%)	ساینده‌گی	مقاومت فشاری (MPa)	سختی شور (HS)	اندازه دانه‌های کوارتز (mm)	نیروی برشی قائم (N)	I_{avg} (mm)
I	50-40	4-3/8	220-210	99-98	3-2	1000-1100	4-6
II	40-30	3/8-3/6	210-190	98-97	2-1	900-1000	6-8
III	30-20	3/6-3/4	190-180	97-94	2-1/5	800-900	8-10
IV	20-15	3/4-3/2	180-170	94-91	1-0/5	700-800	10-12
V	15-10	3/2-3	170-160	91-82	0/5-0/2	600-700	12-18
VI	10-0	3-2/8	160-150	82-80	0/2-0	500-600	18-30

3-3-3- سیستم طبقه‌بندی فازی توتمز و همکاران (Tutmez et al. 2007)

تاتموز⁶⁴ و همکارانش در سال 2007 سیستم طبقه‌بندی خود را برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های کربناته ارائه دادند. آن‌ها در طبقه‌بندی فازی خود از برخی مشخصات مقاومتی، سختی و ساینده‌گی سنگ برای تعیین قابلیت برش سنگ استفاده کردند. متغیرهای به کار گرفته شده در این

64-Tutmez

طبقه‌بندی شامل مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، سختی اشمیت، مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت ضربه‌ای، ساینده‌گی، سرعت موج p بودند. ضریب اهمیت اختصاص داده شده به هر یک از این پارامترها، در جدول 3-4 آورده شده است.

جدول 3-4- مقادیر وزن‌های اختصاص داده شده به هر یک از پارامترها (Tutmez et al. 2007)

فاکتور	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	چکش اشمیت	بار نقطه‌ای	مقاومت ضربه‌ای	ساینده‌گی لوس آنجلس	سرعت موج p
وزن	0/21	0/24	0/06	0/11	0/08	0/18	0/12

مطابق جدول 3-4 بیشترین وزن در این طبقه‌بندی متعلق به مقاومت کششی و کمترین وزن متعلق به سختی چکش اشمیت می‌باشد. طبقه‌بندی ارائه شده توسط تاتموز و همکاران در جدول 3-5 آورده شده است. با استفاده از این طبقه‌بندی، سنگ‌ها در سه کلاس خیلی خوب، خوب و ضعیف مورد ارزیابی قرار می‌گرفتند.

جدول 3-5- طبقه‌بندی ارائه شده توسط تاتموز و همکاران (Tutmez et al. 2007)

کلاس	سرعت موج P (Km/s)	ساینده‌گی لوس آنجلس (%)	مقاومت ضربه‌ای (%)	مقاومت بار نقطه‌ای (MPa)	عدد چکش اشمیت	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)
بسیار خوب	6-8	20-40	80-90	5-8	50-60	8-12	120-180
خوب	4-6	40-60	70-80	3-5	40-50	4-8	80-120
ضعیف	2-4	60-80	60-70	1-3	30-40	2-4	40-80

3-3-4- سیستم طبقه‌بندی قهرمان و همکاران (Kahraman et al, 2007)

قهرمان و همکارانش در سال 2007 به بررسی قابلیت پلاک‌دهی بلوک‌های سنگی پرداختند. آن‌ها در تحقیقاتشان، سیستم طبقه‌بندی جدیدی را برای ارزیابی قابلیت پلاک‌دهی بلوک‌های سنگی با توجه به سرعت موج p، در فرایند برش سنگ‌های ساختمانی الماسی ارائه دادند. در این سیستم طبقه‌بندی، قابلیت پلاک‌دهی بلوک‌های سنگی بر اساس شاخص جدیدی با عنوان نسبت سرعت⁶⁵ (VRI) طبقه‌بندی می‌شدند. این شاخص از رابطه 3-79 قابل محاسبه می‌باشد:

$$VRI = \sqrt{\frac{V_B}{V_L}} \quad (79-3)$$

⁶⁵-Velocity Ratio Index

در رابطه بالا داریم:

V_B : سرعت موج در بلوک سنگ

V_L : سرعت موج در مغزه گرفته شده از بلوک سنگی

طبقه‌بندی کیفی که قهرمان و همکاران برای ارزیابی قابلیت پلاک‌دهی بلوک‌های سنگی بر اساس مقادیر شاخص VRI ارائه کردند، در جدول 3-6 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 می‌شوند.

جدول 3-6- طبقه‌بندی ارائه شده توسط قهرمان و همکاران بر اساس مقادیر شاخص VRI (Kahraman et al, 2007)

مقادیر VRI	کیفیت بلوک از نظر قابلیت تولید
کوچکتر از 0/25	خیلی ضعیف
0/25-0/5	ضعیف
0/5-0/75	متوسط
0/75-0/9	خوب
بزرگتر از 0/9	خیلی خوب

آن‌ها در ادامه مطالعاتشان به بررسی ارتباط میان شاخص VRI و درصد راندمان تولید پلاک‌های سنگی⁶⁶ پرداختند. در طی انجام این تحقیق در مجموع 22 بلوک سنگ مورد آزمایش قرار گرفت. در نهایت ارتباط میان پارامترهای مذکور توسط برازش ساده مورد بررسی قرار گرفت. رابطه 3-80 ارتباط میان پارامترهای مذکور را نشان می‌دهد.

$$SE = 26.96Ln(VRI) + 97.4 \quad (80-3)$$

در رابطه 3-80، SE معرف درصد راندمان تولید پلاک‌های سنگی بوده که از رابطه 3-81 قابل محاسبه می‌باشد:

$$SE = \frac{N_{is}}{N_{ts}} \times 100 \quad (81-3)$$

در رابطه بالا داریم:

⁶⁶-Slab Efficiency

N_{is} : تعداد پلاک‌های سالم تولید شده از بلوک سنگی

N_{ts} : تعداد کل پلاک‌های سنگی قابل تولید

3-3-5- سیستم طبقه‌بندی میکائیل و همکاران

میکائیل و همکاران در سال 2011 به بررسی و ارزیابی قابلیت برش نمونه‌هایی از بلوک‌های سنگی نرم با استفاده از یک سیستم طبقه‌بندی جدید پرداختند. آن‌ها در تحقیق‌شان 25 نمونه سنگ کربناته را مورد مطالعه قرار دادند. در سیستم طبقه‌بندی ارائه شده، قابلیت برش‌پذیری بلوک‌های سنگی با توجه به خصوصیات مقاومتی، ساینده‌گی و سختی سنگ، در 5 کلاس خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و خیلی خوب مورد بررسی قرار می‌گرفتند. سیستم طبقه‌بندی مذکور در جدول 3-7 نشان داده شده است.

جدول 3-7- سیستم طبقه‌بندی ارائه شده توسط میکائیل و همکاران

مقاومت فشاری (مگا پاسکال)	کمتر از 60	80-60	120-80	160-120	بیشتر از 160
مقاومت خیلی کم	مقاومت کم	مقاومت متوسط	مقاومت بالا	مقاومت خیلی بالا	
امتیاز	37	25/9	18/5	9/25	3/7
مقاومت کششی (مگا پاسکال)	کمتر از 3	4-3	6-4	8-6	بیشتر از 8
مقاومت خیلی کم	مقاومت کم	مقاومت متوسط	مقاومت بالا	مقاومت خیلی بالا	
امتیاز	17	11/9	8/5	4/25	1/7
سختی چکش اشمیت	کمتر از 35	40-35	45-40	50-45	بیشتر از 50
نرم	نسبتاً نرم	نسبتاً سخت	سخت	خیلی سخت	
امتیاز	18	12/6	9	4/5	1/8
ساینده‌گی لوس آنجلس	بیشتر از 60	60-50	40-50	30-40	کمتر از 30
ساینده‌گی کم	نسبتاً ساینده	ساینده			
امتیاز	28	19/6	14	7	2/8

در این سیستم طبقه‌بندی، 4 آزمایش شناخته شده شامل: مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، سختی چکش اشمیت و ساینده‌گی لوس آنجلس به ترتیب به نمایندگی از مشخصات مقاومتی، سختی و ساینده‌گی سنگ برای ارزیابی قابلیت برش در نظر گرفته شدند. بدین ترتیب شاخص جدیدی به نام "شاخص قابلیت برش سنگ‌های کربناته" ⁶⁷ CRS برای ارزیابی قابلیت برش‌پذیری این گروه از سنگ‌ها با

⁶⁷ Carbonate Rock Sawability

کمک این سیستم طبقه‌بندی معرفی شد. لازم به ذکر است مقدار این شاخص از 10 تا 100 تغییر کرده و بیشترین مقدار آن به بلوک سنگی اختصاص داده می‌شود که بهترین قابلیت برش را دارا باشد.

آن‌ها در ادامه تحقیقات‌شان مدل آماری جدیدی را برای پیش‌بینی نرخ تولید بر اساس مشخصات فنی دستگاه و شاخص قابلیت برش سنگ ارائه دادند. رابطه 3-82 مدل آماری مذکور را نشان می‌دهد.

$$P_h = \frac{S_{diameter}^{0.632} \times S_{speed}^{0.502} \times CRS_i^{0.204}}{10^{2.827}} \quad (82-3)$$

در رابطه بالا P_h ، $S_{diameter}$ ، S_{speed} و CRS_i به ترتیب معرف نرخ تولید بر حسب متر مربع بر ساعت، قطر دیسک الماسی بر حسب میلی‌متر، سرعت چرخش دیسک بر حسب دور بر دقیقه و شاخص قابلیت برش می‌باشند.

3-4- نقد و بررسی مطالعات گذشته

تا کنون مطالعات نسبتاً خوبی در مقیاس‌های مختلف صنعتی و آزمایشگاهی در زمینه قابلیت برش سنگ‌ها انجام گرفته است. در این میان برخی از محققین به بررسی خصوصیات سنگ و برخی هم به بررسی مشخصات طرح برش و برخی دیگر نیز به بررسی پارامترهای عملیاتی برش پرداخته‌اند. از میان این عوامل، مشخصات سنگ از جمله مهمترین پارامترهایی بوده است که در بیش از نیمی از مطالعات مورد بررسی قرار گرفته شده است. مطالعات انجام شده در زمینه قابلیت برش سنگ‌ها را می‌توان در دو بخش ارائه سیستم‌های طبقه‌بندی سنگ‌ها و روابط تجربی برای ارزیابی عملکرد برش، تقسیم‌بندی کرد. متأسفانه در مطالعاتی که تاکنون در این دو بخش انجام شده است تمامی پارامترهای مؤثر در زمینه قابلیت برش سنگ به خوبی پوشش داده نشده‌اند. برای مثال در بیشتر روابط تجربی تنها از تعداد محدودی پارامتر برای ارزیابی عملکرد برش سنگ استفاده شده است. در بخش طبقه‌بندی سنگ‌ها از نظر قابلیت برش، مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی و طبقه‌بندی تنها برای تعداد محدودی از سنگ‌ها انجام شده است. برای مثال بیرله و راترن با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی تعدادی از سنگ‌ها، آن‌ها را با توجه به عملکرد سایش دیسک امتیازدهی کرده و

در 4 دسته تقسیم‌بندی کردند. یا در مطالعات دیگری که در همین راستا توسط پای انجام شد سنگ‌های مورد مطالعه بر مبنای میزان عملکرد سایش دیسک و توان مصرفی دستگاه برش مورد ارزیابی و طبقه‌بندی قرار گرفته شدند. به هر حال این قبیل مطالعات و طبقه‌بندی‌ها تنها در شرایط خاص آزمایشگاهی و تنها برای نمونه سنگ‌های مورد مطالعه قابل ارزیابی می‌باشند. از سوی دیگر در همین راستا وجود محدودیت‌های مرزی در مقادیر پارامترهای مورد استفاده در سیستم‌های طبقه‌بندی، باعث شده است که برخی از سنگ‌ها در این طبقه‌بندی‌ها جایی نداشته باشند. به عبارت دیگر سیستم‌های طبقه‌بندی قادر به ارزیابی و طبقه‌بندی این قبیل سنگ‌ها نمی‌باشند. برای رفع این مشکل به یک سیستم طبقه‌بندی جامع و کامل نیاز است تا با توجه به مشخصات سنگ بتوان قابلیت برش تمامی سنگ‌ها را مورد ارزیابی و پیش‌بینی قرار داد. به طور کلی مهم‌ترین انتقادهای وارد در این تحقیقات را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

الف - عدم دقت کافی در انتخاب ضرایب موجود در معادلات ارائه شده توسط برخی از محققین

یکی از مهمترین مواردی را که در بحث تحلیل و ارزیابی معادلات آماری می‌بایست به آن توجه کرد وجود ضرایب دقیق یا به عبارت دیگر پیروی معادله از طبیعت ذاتی و علمی موضوع می‌باشد. متأسفانه در برخی از روابط ارائه شده در زمینه قابلیت برش سنگ این مسئله مورد توجه قرار نگرفته است. برای مثال در رابطه 3-42 مقدار انرژی ویژه برش با افزایش مقدار مقاومت فشاری تک محوری کاهش می‌یابد. یا در رابطه 3-43 مقدار سایش ویژه با افزایش مقدار سختی چکش اشمیت کاهش می‌یابد. یا در رابطه 3-53 نرخ تولید با افزایش مقدار مقاومت ضربه‌ای و سختی چکش اشمیت افزایش یافته و با کاهش مقاومت ساینده‌گی لوس آنجلس کاهش می‌یابد. به هر حال آنچه مسلم است با افزایش پارامترهای مقاومتی سنگ و افزایش سختی و ساینده‌گی قابلیت برش سنگ کاهش می‌یابد که متأسفانه در معادلات فوق عکس این مطلب نشان داده شده است. این نکته حائز اهمیت است که در بحث تحلیل معادلات آماری یکی از مهمترین معیارهای ارزیابی صحت و سقم

معادله، علاوه بر آزمون‌های F و t ، بررسی ضرایب برازش می‌باشد که باید در مطالعات آماری به آن توجه داشت.

ب) وجود محدودیت‌های مرزی در سیستم‌های طبقه‌بندی موجود

از جمله مطالعات انجام شده در زمینه ارائه سیستم‌های طبقه‌بندی برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی می‌توان به سیستم‌های طبقه‌بندی ارائه شده توسط وی و همکاران در سال 2003 برای سنگ‌های گرانیتی و تاتموز و همکاران در سال 2007 برای سنگ‌های کربناته اشاره کرد. نکته حائز اهمیت در این سیستم‌های طبقه‌بندی، وجود محدودیت‌های مرزی در مشخصات سنگ می‌باشد. این محدودیت‌ها در مرز مقادیر پارامترهای موجود در سیستم طبقه‌بندی موجب شده است تا برخی از سنگ‌ها نتوانند جایگاهی در این طبقه‌بندی‌ها داشته باشند. برای مثال قابلیت برش یک نوع سنگ مرمر با مقاومت فشاری تک محوری کمتر از 40 مگا پاسکال را نمی‌توان با سیستم طبقه‌بندی تاتموز و همکاران مورد ارزیابی قرار داد. یا در سیستم طبقه‌بندی که وی و همکاران برای سنگ‌های گرانیتی ارائه کردند، سنگی با مشخصات سختی شور کمتر از 80 و یا مقاومت فشاری بالاتر از 220 مگاپاسکال را نمی‌توان در این سیستم مورد ارزیابی قرار داد. جدول 8-3 نمونه سنگ‌هایی را که نمی‌توان با سیستم‌های طبقه‌بندی موجود مورد ارزیابی و طبقه‌بندی قرار داد را نشان می‌دهد.

جدول 8-3- عدم توانایی سیستم‌های طبقه‌بندی موجود در ارزیابی برخی از سنگ‌ها			
عدم توانایی سیستم طبقه‌بندی وی و همکاران			
نام سنگ	سختی شور (HS)	مقاومت فشاری (MPa)	مراجع
Aksaray yaylak granite	69/4	155/9	(Ersoy et al., 2005)
Nero zimbabwe	68/6	292	(Buyuksagis, 2007)
عدم توانایی سیستم طبقه‌بندی تاتموز و همکاران			
سنگ	مقاومت فشاری (MPa)	مراجع	
Manyas withe	39/2	(Buyuksagis & Goktan, 2005)	

ج) وجود هم پوشانی میان برخی از پارامترهای مورد استفاده در طبقه‌بندی‌ها

از جمله موارد مهم و حائز اهمیت که بایستی در ارائه یک سیستم طبقه‌بندی به آن توجه کرد، انتخاب مهم‌ترین پارامترها و نحوه امتیازدهی آن‌ها در سیستم طبقه‌بندی و عدم هم‌پوشانی میان پارامترها می‌باشد. عدم توجه به هر یک از این موارد موجب پائین آمدن دقت و سادگی سیستم طبقه‌بندی و پیچیدگی آن می‌شود. یکی از این موارد مهم که در سیستم طبقه‌بندی تانموز و همکاران مورد توجه قرار گرفته نشده است، هم‌پوشانی میان پارامترها در سیستم طبقه‌بندی می‌باشد. برای مثال شاخص مقاومت بار نقطه‌ای که به خودی خود معرف دو پارامتر مقاومت فشاری و کششی سنگ است، در کنار دو پارامتر مقاومت فشاری و کششی سنگ به عنوان یکی از پارامترهای مهم در سیستم طبقه‌بندی قرار داده شده است. به هر حال آنچه مسلم است قبل از انتخاب پارامترهای مهم در یک سیستم طبقه‌بندی، بررسی هم‌پوشانی پارامترها برای سادگی سیستم طبقه‌بندی و کاهش زمان و هزینه آزمایش‌ها، لازم و ضروری می‌باشد. هنر در طراحی یک سیستم طبقه‌بندی در آن است که بتوان با کمترین تعداد آزمایش، تمامی پارامترهای مهم سنگ را در یک سیستم طبقه‌بندی جای داد. با توجه به موارد ذکر شده، ارائه یک سیستم طبقه‌بندی جدید مشتمل بر تمامی مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ با توجه به رعایت اصولی از قبیل عدم وجود محدودیت‌های مرزی و هم‌پوشانی میان پارامترها، برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی لازم و ضروری می‌باشد.

ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی

4-1- مقدمه

پیش‌بینی قابلیت برش سنگ و ارزیابی عملکرد دستگاه‌های برش در تخمین هزینه‌ها و طراحی یک کارخانه سنگ‌بری از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. شناخت کامل سنگ‌ها و ارزیابی توان اجرایی دستگاه‌های برش، طراحان و برنامه‌ریزان تولید را به سمت بهبود سرعت فرآوری و افزایش تولید سوق می‌دهد. بنابراین برای دستیابی به یک طراحی و برنامه‌ریزی دقیق در کارخانه‌های فرآوری، پیش‌بینی قابلیت برش سنگ و تعیین پارامترهای مؤثر در ماشین‌کاری امری مهم و ضروری می‌باشد. تا کنون مدل‌ها و طبقه‌بندی‌های مختلفی در زمینه قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی توسط محققین ارائه شده است. اما به دلیل عدم وجود مطالعات کامل و وجود یک‌سری محدودیت‌ها و نواقص در برخی از این مطالعات، امکان طراحی و برنامه‌ریزی دقیق برای یک کارخانه فرآوری سنگ غیر ممکن یا مشکل می‌باشد. همواره سعی بر این است تا سیستم طبقه‌بندی ارائه شود که به خوبی تمامی عوامل مؤثر در فرایند برش (فاکتورهای نظیر نرخ تولید، میزان مصرف انرژی و سایش ابزارهای الماسی که تأثیر به‌سزایی در قیمت تمام شده کالا دارا می‌باشند) را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در این فصل تلاش می‌شود تا یک سیستم طبقه‌بندی جدید مشتمل بر تمامی مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ با توجه به رعایت اصولی از قبیل عدم وجود محدودیت‌های مرزی و هم‌پوشانی میان پارامترها، برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی ارائه شود. پس از ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید، صحت و سقم نتایج آن با استفاده از آزمایش‌های دقیق مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای دستیابی به این هدف، پس از انجام مطالعات میدانی و آزمایشگاهی، کارایی سیستم طبقه‌بندی جدید با کمک معیارهایی از قبیل نرخ تولید، مصرف انرژی، سایش دیسک و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت.

4-2- ارائه یک سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی

یکی از موارد مهم و ضروری برای دستیابی به یک طراحی و برنامه‌ریزی دقیق در کارخانه‌های سنگ‌بری، پیش‌بینی و ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی می‌باشد. با استفاده از یک طراحی دقیق می‌توان به جایگاه مناسبی هم از دیدگاه اقتصادی و هم از نظر کیفیتی دست پیدا کرد. در این بخش از تحقیق تلاش

شده است تا با توجه به پارامترهای مهم و مؤثر در فرایند برش، یک سیستم طبقه‌بندی جامع برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی ارائه شود.

4-2-1- پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی

تا کنون مطالعات متنوعی در زمینه ارتباط میان پارامترهای مهم سنگ (اهم از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی) و قابلیت برش‌پذیری سنگ‌ها انجام شده است که در بیشتر این مطالعات اندرکنش بین پارامترهای سنگ و قابلیت برش توسط سیستم‌های طبقه‌بندی و معادلات آماری مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. در این بخش از تحقیق با توجه به شناخت حاصل از فرایند برش از طریق مرور کلیه منابع معتبر و نیز شناسایی بسیاری از پارامترهای مؤثر، تلاش شده است تا یک سیستم طبقه‌بندی جامع برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌ها ارائه شود. همان‌طور که در فصل دوم به آن اشاره شد، فرایند برش سنگ یک فرایند سایشی می‌باشد به طوری که می‌توان برش سنگ به کمک سگمنت‌های الماسی را سایش ذرات تشکیل دهنده سنگ توسط عبور دانه‌های الماس روی سطح سنگ دانست. برای درک بهتر این فرایند و شرایط حاکم بر دانه الماس در حال برش، شناخت مکانیزم برش و بررسی عوامل مؤثر بر آن لازم و ضروری می‌باشد. با توجه به بررسی‌های به عمل آمده، در طی این تحقیق، کلیه پارامترهای مهم مربوط به سنگ که در قابلیت برش سنگ مؤثرند به تعداد دوازده پارامتر به شرح ذیل تشخیص داده شدند: (1) بافت سنگ، (2) اندازه و شکل دانه‌های سنگ، (3) درصد کوارتز، (4) نوع ماتریس و کیفیت سیمانته شدن، (5) سختی، (6) ساینده‌گی، (7) هوازدگی، (8) چگالی، (9) سختی چکش اشمیت، (10) مقاومت فشاری تک‌محوری، (11) مقاومت کششی، (12) مدول الاستیسیته.

4-2-2- تعیین وزن پارامترها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

انتخاب پارامترهای مؤثر در فرایند برش سنگ‌های ساختمانی و تعیین وزن هر یک آن‌ها از جمله مهم‌ترین و اساسی‌ترین مسائل موجود در ارائه یک سیستم طبقه‌بندی جامع می‌باشد. با توجه به طبیعت ذاتی سنگ و تأثیرپذیری هر کدام از پارامترها از یکدیگر، ارزیابی نهایی برای رسیدن به یک وزن مشخص و دقیق برای هر یک از پارامترها کمی دشوار است. از جمله روش‌های مناسب برای وزن‌دهی به

پارامترهای مؤثر در یک فرایند در مهندسی سنگ، روش‌های تحلیل سلسله مراتبی فازی و دلفی فازی می‌باشند. در این روش‌ها، از نظرات و تجربیات متخصصان برای دستیابی به یک وزن مشخص استفاده می‌شود. بدین ترتیب دایره تجربیات افراد پشتمانه روش خواهد بود. تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است. اگرچه این روش در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته شده ولی هنوز این روش قادر نیست به خوبی تفکر بشر را بیان کند (Kahreman et al, 2004). این روش، برای بیان دقیق نظر تصمیم‌گیرنده‌ها در گزینه‌های مقایسه‌ای دارای نقص است (Wang and Chen, 2007). همچنین این روش به دلیل مقیاس نامتوازن⁶⁸ در قضاوت‌ها و عدم قطعیت و دقت کم مقایسه‌های زوجی مورد انتقاد قرار دارد. تصمیم‌گیرندگان اغلب در قضاوت‌های‌شان ارائه یک بازه را نسبت به یک عدد ثابت ترجیح می‌دهند زیرا آن‌ها به علت طبیعت فازی مقایسه‌های زوجی قادر نیستند به صراحت نظرشان را در مورد برتری‌ها اعلام کنند (Deng, 1999).

روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) می‌تواند یکی از راه‌حل‌های مناسب برای غلبه و رفع همه این نواقص و مشکلات باشد (Kahreman et al, 2003). در حال حاضر این روش به عنوان یک روش شناخته شده و مؤثر در دنیا مطرح شده است و تاکنون کاربردهای گسترده‌ای از این روش در مجلات معتبر علمی به چاپ رسیده است (Ataei, (2005), Basligil, (2005), Ayag and Ozdemir, (2006), Haq and Kannan (2006), Mikaeil et al. (2008), Mikaeil et al. (2009), Zare Naghadehi et al. (2009)). در این فصل مراحل مختلف انجام شده برای تعیین وزن پارامترهای مؤثر در فرایند برش، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی آورده شده است.

4-2-2-1- روش تحلیل سلسله مراتبی

روش تحلیل سلسله مراتبی یکی از تکنیک‌های قدرتمند تصمیم‌گیری چند معیاره می‌باشد که در سال 1980 توسط محققى به نام توماس ساعتى⁶⁹ استاد دانشگاه پیتسبورگ ارائه شد و علی‌رغم

⁶⁸ Unbalanced scale

⁶⁹ Saaty

برخی انتقادهای از سوی محافل علمی مورد استقبال قرار گرفت. این روش که منعکس‌کننده رفتار طبیعی و تفکر انسانی است، تصمیم‌گیرندگان را قادر می‌سازد که تعامل بین فاکتورهای مختلف را در موقعیت‌های پیچیده و غیرساختاری، ارائه دهند. این تکنیک، تصمیم‌گیری را از طریق سازماندهی احساسات، ادراکات، برآوردها، قضاوت‌ها تسهیل کرده و نیروهای اثرگذار بر تصمیم را شناسایی می‌کند. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یکی از جامع‌ترین فرآیندهای طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است، زیرا با این روش امکان فرموله کردن مسأله به صورت سلسله مراتبی فراهم می‌شود و همچنین امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمی و کیفی را در مسأله دارد. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی با تجزیه مسائل مشکل و پیچیده، آن‌ها را به شکلی ساده تبدیل کرده و به حل آن‌ها می‌پردازد. در واقع تحلیل سلسله مراتبی روشی برای کمک به تصمیم‌گیران است تا اهداف و راه‌کارهای خود را در یک محیط پیچیده بدون ساختار و غیر شفاف، اولویت‌بندی و طبقه‌بندی کنند. در این روش، مسأله تصمیم‌گیری به سطوح مختلف هدف، معیارها و زیر معیارها و گزینه‌ها تقسیم می‌شود تا تصمیم‌گیرنده بتواند به راحتی در کوچک‌ترین تصمیم‌گیری دقت کند. برای ساختن مدل تصمیم‌گیری، در بالاترین سطح هدف و در سطح یا سطوح میانی معیارها و در سطح پایین گزینه‌های ممکن گذاشته می‌شود.

مهم‌ترین قابلیت روش تحلیل سلسله مراتبی در توانایی تبدیل ساختار سلسله مراتبی یک مسأله پیچیده چند شاخصه به ساختار بسط داده شده برای درک بهتر تصمیم‌گیرنده از مسأله تصمیم‌گیری می‌باشد. این روش برای مشخص کردن اهمیت نسبی معیارها یا گزینه‌ها بر مقایسه زوجی (دوتایی) عناصر تصمیم‌گیری با در نظر گرفتن معیارها یا گزینه‌ها استوار است. مبنای روش تحلیل سلسله مراتبی تقسیم مسأله تصمیم‌گیری به بخش‌های کوچک‌تر است که تصمیم‌گیرندگان را به سوی مقایسه‌های زوجی بین معیارهای مؤثر در مسأله تصمیم‌گیری هدایت می‌کند، تا میزان اهمیت و تأثیر هر کدام از معیارها توسط کارشناسان در سلسله مراتب بیان شود. در این روش بر اساس قضاوت‌های ذهنی، به اهمیت هر معیار نسبت به سایر معیارها، مقادیر عددی اختصاص داده می‌شود. در نهایت، معیارهایی که دارای بیشترین

اهمیت باشند، مشخص می‌شوند. به عبارت دیگر، ترتیب اولویت معیارها تعیین می‌شود. امتیاز کلی هر گزینه‌ی ممکن، از ضرب امتیاز نسبی هر مسیر در گزینه مورد تصمیم‌گیری به دست می‌آید و سپس این امتیاز به هر گزینه تصمیم‌گیری اضافه می‌شود.

2-2-2-4- روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

در این تحقیق از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی ارائه شده توسط چنگ⁷⁰، برای تعیین وزن پارامترهای مؤثر در سیستم طبقه‌بندی استفاده شده است. اگر $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ مجموعه اشیاء و $G = \{g_1, g_2, g_3, \dots, g_n\}$ مجموعه اهداف باشد، بر اساس روش تحلیل گسترش چنگ، هر شی گسترش پیدا می‌کند برای هر هدف انجام شده، بنابراین m تحلیل گسترش یافته برای هر شی می‌تواند طبق رابطه زیر به دست بیاید (Chang, 1996):

$$M_{gi}^1, M_{gi}^2, \dots, M_{gi}^m, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1-4)$$

مراحل مختلف محاسباتی این روش به ترتیب شامل موارد زیر می‌باشد:

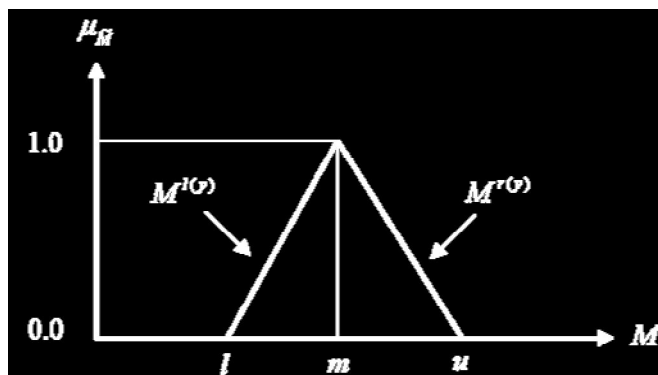
الف) تعیین ماتریس مقایسه زوجی توسط تصمیم‌گیرنده‌ها

ب) تشکیل ماتریس مقایسه زوجی فازی به ترتیب زیر خواهد بود:

$$(\tilde{A}) = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{12} & 1 & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

اگر مجموعه تصمیم‌گیرنده دارای چندین شخص تصمیم‌گیرنده باشد، درایه‌های ماتریس مقایسه زوجی که در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به کار می‌رود، به صورت یک عدد فازی مثلثی نوشته می‌شود که مؤلفه‌ی اول آن حداقل مقدار نظرسنجی‌ها، مؤلفه‌ی دوم آن میانگین مقدار نظرسنجی‌ها و مؤلفه‌ی سوم آن حداکثر مقدار نظرسنجی‌ها می‌باشد. شکل 4-1 یک عدد فازی مثلثی را نشان می‌دهد.

⁷⁰ Chang



شکل 4-1- اعداد فازی مثلثی

ج) محاسبه پارامتر S_i برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسه زوجی، S_i که خود یک عدد فازی مثلثی است از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad (2-4)$$

در رابطه بالا i بیانگر شماره سطر و j معرف شماره ستون می‌باشد. پارامتر M_{gi}^j در این رابطه معرف اعداد فازی مثلثی متعلق به ماتریس مقایسه زوجی هستند. برای به‌دست آوردن $\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ ، عمل جمع فازی $M_{gi}^j (j = 1, 2, \dots, m)$ به صورت زیر انجام شده است.

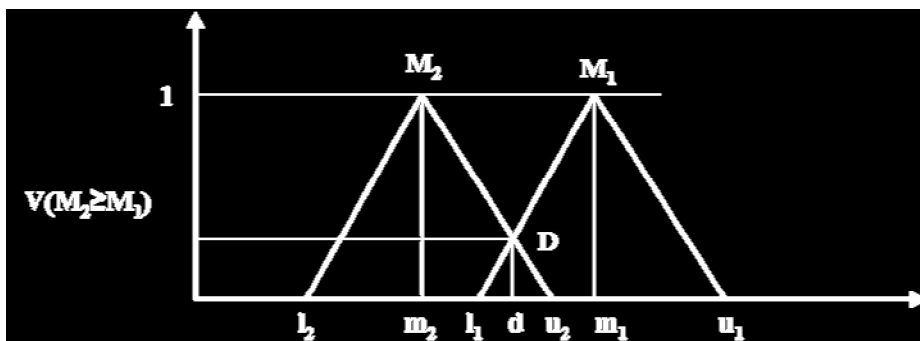
$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \left(\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right) \quad (3-4)$$

و سپس مقدار معکوس رابطه بالا به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (4-4)$$

در روابط بالا l_i ، m_i و u_i به ترتیب مؤلفه‌های اول تا سوم اعداد فازی هستند.

د) مقایسه اعداد فازی و تعیین مقادیر $V(M_2 > M_1)$ به‌طور کلی اگر $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ و $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ دو عدد فازی مثلثی باشند، مطابق شکل (2-4) درجه بزرگی M_1 نسبت به M_2 به صورت زیر تعریف می‌شود:



شکل 2-4- تعامل بین M_2 و M_1 (Chang, 1996)

$$V(M_2 \geq M_1) = \begin{cases} 1 & \text{if } m_2 \geq m_1 \\ 0 & \text{if } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5-4)$$

از طرف دیگر میزان بزرگی یک عدد فازی مثلثی از عدد فازی مثلثی دیگر از رابطه زیر به دست می آید:

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \text{ and } (M \geq M_2) \text{ and } \dots \text{ and } (M \geq M_k)] \\ = \min V(M \geq M_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (6-4)$$

ه) محاسبه وزن هر یک از پارامترها، وزن هر یک از پارامترها از رابطه زیر قابل محاسبه می باشد.

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k) \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad k \neq i \quad (7-4)$$

بدین ترتیب بردار وزن قبل از نرمالایز شدن، به صورت زیر خواهد بود:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n)) \quad (8-4)$$

و) محاسبه بردار وزن نهایی، برای محاسبه بردار وزن نهایی باید بردار وزن محاسبه شده در مرحله قبل

را نرمالیز کرد، بدین ترتیب بردار وزن نهایی را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n)) \quad (9-4)$$

4-2-2-3- نظرسنجی از متخصصان و انجام مراحل تحلیل سلسله مراتبی فازی

در این بخش از تحقیق مراحل انجام شده برای تعیین وزن هر یک از پارامترهای مؤثر در فرایند برش سنگ نشان داده شده است. گامهای محاسباتی برای تعیین وزن پارامترها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی عبارتند از:

گام یک: تکمیل فرم نظرسنجی توسط تصمیم گیرنده‌ها

فرمهای نظرسنجی مشتمل بر کلیه پارامترهای مؤثر بر قابلیت برش، برای 12 تن از متخصصین در داخل و خارج از کشور ارسال شد. فرمهای تکمیل شده پس از بررسی، برای ورود به روش تحلیل سلسله مراتبی فازی مورد استفاده قرار گرفتند. جدولهای 1-4 و 2-4 نمونه‌هایی از فرمهای نظرسنجی فرستاده شده برای متخصصین را نشان می‌دهد.

جدول 1-4- نمونه فرم نظر سنجی فرستاده شده برای متخصصین خارجی

Mechanical and Physical properties	Importance of each parameter				
	Very Weak Importance	Weak Importance	Moderate Importance	Strong Importance	Very Strong Importance
Texture					
Grain Size & Shape					
Matrix Type & Cementation					
Quartz Content (%)					
Hardness					
Abrasiveness					
Weathering					
Density					
Schmit Hammer Rebound					
Uniaxial Compressive Strength (UCS)					
Tensile Strength					
Young's Modules					

[illegible]

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}
c_1	1	3	5	1	1	1	5	5	3	1/3	1	3
c_2	1/3	1	3	1/3	1/3	1/3	3	3	1	1/5	1/3	1
c_3	1/5	1/3	1	1/5	1/5	1/5	1	1	1/3	1/9	1/5	1/3
c_4	1	3	5	1	1	1	5	5	3	1/3	1	3
c_5	1	3	5	1	1	1	5	5	3	1/3	1	3
c_6	1	3	5	1	1	1	5	5	3	1/3	1	3
c_7	1/5	1/3	1	1/5	1/5	1/5	1	1	1/3	1/9	1/5	1/3
c_8	1/5	1/3	1	1/5	1/5	1/5	1	1	1/3	1/9	1/5	1/3
c_9	1/3	1	3	1/3	1/3	1/3	3	3	1	1/5	1/3	1
c_{10}	3	7	9	3	3	3	9	9	5	1	3	5
c_{11}	1	3	5	1	1	1	5	5	3	1/3	1	3
c_{12}	1/3	1	3	1/3	1/3	1/3	3	3	1	1/5	1/3	1

گام دوم: تشکیل ماتریس مقایسه زوجی فازي $(\tilde{A})$. در این بخش ماتریس مقایسه زوجی فازي با توجه

به اعداد فازي تشکیل شد. ماتریس مقایسه زوجی فازي در جدول 3-4 نشان داده شده است:

جدول 3-4- ماتریس مقایسه زوجی فازي

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
C ₁	(1, 1, 1)	(0.7, 1, 1.4)	(0.7, 1.4, 2.3)	(0.6, 0.8, 1)	(0.6, 0.7, 1)	(0.6, 0.8, 1)
C ₂	(0.7, 1, 1.4)	(1, 1, 1)	(0.7, 1.3, 1.7)	(0.7, 0.7, 0.8)	(0.6, 0.7, 1)	(0.7, 0.8, 1)
C ₃	(0.4, 0.9, 1.4)	(0.6, 0.9, 1.4)	(1, 1, 1)	(0.4, 0.6, 1)	(0.3, 0.6, 0.8)	(0.4, 0.7, 1)
C ₄	(1, 1.4, 1.8)	(1.3, 1.4, 1.4)	(1, 1.8, 2.3)	(1, 1, 1)	(0.8, 1, 1.3)	(1, 1.1, 1.3)
C ₅	(1, 1.5, 1.8)	(1, 1.5, 1.8)	(1.3, 1.9, 3)	(0.8, 1.1, 1.3)	(1, 1, 1)	(0.8, 1.1, 1.3)
C ₆	(1, 1.3, 1.8)	(1, 1.3, 1.4)	(1, 1.7, 2.3)	(0.8, 0.9, 1)	(0.8, 0.9, 1.3)	(1, 1, 1)
C ₇	(0.4, 0.8, 1.4)	(0.6, 0.7, 1)	(0.4, 0.9, 1)	(0.4, 0.5, 0.8)	(0.3, 0.5, 0.8)	(0.4, 0.6, 1)
C ₈	(0.4, 0.8, 1)	(0.6, 0.7, 1)	(0.7, 0.9, 1)	(0.4, 0.5, 0.7)	(0.3, 0.5, 0.7)	(0.4, 0.6, 0.7)
C ₉	(0.4, 0.9, 1.4)	(0.4, 0.9, 1.4)	(0.6, 1.1, 1.7)	(0.3, 0.6, 0.8)	(0.3, 0.6, 0.8)	(0.3, 0.7, 1)
C ₁₀	(1.3, 1.5, 1.8)	(1, 1.5, 1.8)	(1, 2, 3)	(0.8, 1.1, 1.3)	(0.8, 1.1, 1.3)	(1, 1.2, 1.3)
C ₁₁	(1, 1.2, 1.4)	(0.7, 1.2, 1.4)	(0.7, 1.6, 2.3)	(0.6, 0.9, 1)	(0.6, 0.8, 1)	(0.7, 0.9, 1)
C ₁₂	(0.7, 1.1, 1.4)	(0.7, 1.1, 1.4)	(1, 1.4, 2.3)	(0.6, 0.8, 1)	(0.7, 0.8, 0.8)	(0.6, 0.9, 1)

ادامه جدول 3-4- ماتریس مقایسه زوجی فازي

	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
C ₁	(0.7, 1.6, 2.3)	(1, 1.5, 2.3)	(0.7, 1.4, 2.3)	(0.6, 0.7, 0.8)	(0.7, 0.9, 1)	(0.7, 1, 1.4)
C ₂	(1, 1.5, 1.7)	(1, 1.4, 1.7)	(0.7, 1.3, 2.3)	(0.6, 0.7, 1)	(0.7, 0.9, 1.4)	(0.7, 1, 1.4)
C ₃	(1, 1.3, 2.3)	(1, 1.2, 1.4)	(0.6, 1.1, 1.7)	(0.3, 0.6, 1)	(0.4, 0.8, 1.4)	(0.4, 0.8, 1)
C ₄	(1.3, 2, 2.3)	(1.4, 1.9, 2.3)	(1, 1.8, 3)	(0.8, 0.9, 1.3)	(1, 1.2, 1.8)	(1, 1.3, 1.8)
C ₅	(1.3, 2.2, 3)	(1.4, 2.1, 3)	(1.3, 1.9, 3)	(0.8, 1, 1.3)	(1, 1.3, 1.8)	(1.3, 1.3, 1.4)
C ₆	(1, 2, 2.3)	(1.4, 1.9, 2.3)	(1, 1.7, 3)	(0.8, 0.9, 1)	(1, 1.1, 1.4)	(0.4, 0.7, 1)
C ₇	(1, 1, 1)	(0.6, 1, 1.4)	(0.4, 0.9, 1.7)	(0.3, 0.5, 1)	(0.4, 0.7, 1.4)	(0.4, 0.7, 1)
C ₈	(0.7, 1.1, 1.7)	(1, 1, 1)	(0.6, 0.9, 1.7)	(0.3, 0.5, 0.7)	(0.4, 0.7, 1)	(0.4, 0.7, 1)
C ₉	(0.6, 1.3, 2.3)	(0.6, 1.2, 1.7)	(1, 1, 1)	(0.3, 0.6, 1)	(0.4, 0.8, 1.4)	(0.4, 0.8, 1)
C ₁₀	(1, 2.4, 3)	(1.4, 2.2, 3)	(1, 2, 3)	(1, 1, 1)	(1.3, 1.3, 1.4)	(1, 1.4, 1.8)
C ₁₁	(0.7, 1.8, 2.3)	(1, 1.7, 2.3)	(0.7, 1.6, 2.3)	(0.7, 0.8, 0.8)	(1, 1, 1)	(0.7, 1.1, 1.4)
C ₁₂	(1, 1.7, 2.3)	(1, 1.6, 2.3)	(1, 1.4, 2.3)	(0.6, 0.7, 1)	(0.7, 1, 1.4)	(1, 1, 1)

گام سوم: محاسبه مقادیر S_i برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسه زوجی فازي. در این بخش مقادیر

پارامتر S_i برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسه زوجی فازي محاسبه و مقدار آن در زیر آورده شده

است:

$$S_{C_1} = (8.51, 12.8, 17.9) \otimes (1/216, 1/160, 1/111) = (0.039, 0.08, 0.162)$$

$$S_{C_2} = (9.11, 12.4, 15.4) \otimes (1/216, 1/160, 1/111) = (0.042, 0.077, 0.148)$$

$$S_{C_3} = (7.01, 10.4, 15.4) \otimes (1/216, 1/160, 1/111) = (0.032, 0.065, 0.139)$$

$$S_{C_4} = (12.5, 16.7, 21.7) \otimes (1/216, 1/160, 1/111) = (0.058, 0.104, 0.196)$$

$$S_{C_5} = (12.9, 17.7, 23.7) \otimes (1/216, 1/160, 1/111) = (0.06, 0.11, 0.214)$$

$$S_{C_6} = (11.2, 15.4, 19.9) \otimes (1/216, 1/160, 1/111) = (0.052, 0.096, 0.18)$$

$$S_{C_7} = (5.87, 8.79, 13.4) \otimes (1/216, 1/160, 1/111) = (0.027, 0.055, 0.121)$$

$$\begin{aligned}
S_{C_8} &= (6.44, 8.87, 12.2) \otimes (1/216, 1/160, 1/111) = (0.03, 0.055, 0.11) \\
S_{C_9} &= (5.85, 10.5, 15.4) \otimes (1/216, 1/160, 1/111) = (0.027, 0.066, 0.14) \\
S_{C_{10}} &= (12.5, 18.8, 23.7) \otimes (1/216, 1/160, 1/111) = (0.058, 0.117, 0.214) \\
S_{C_{11}} &= (9.11, 14.4, 18.3) \otimes (1/216, 1/160, 1/111) = (0.042, 0.09, 0.166) \\
S_{C_{12}} &= (9.52, 13.3, 18.3) \otimes (1/216, 1/160, 1/111) = (0.044, 0.083, 0.166)
\end{aligned}$$

گام چهارم: محاسبه مقادیر $V(M_2 > M_1)$. مقادیر محاسبه شده برای هر درایه در زیر آورده شده است:

$$\begin{aligned}
V(S_{C_1} \geq S_{C_2}) &= 1, \quad V(S_{C_1} \geq S_{C_3}) = 1, \quad V(S_{C_1} \geq S_{C_4}) = 0.81, \quad V(S_{C_1} \geq S_{C_5}) = 0.77, \\
V(S_{C_1} \geq S_{C_6}) &= 0.869, \quad V(S_{C_1} \geq S_{C_7}) = 1, \quad V(S_{C_1} \geq S_{C_8}) = 1, \quad V(S_{C_1} \geq S_{C_9}) = 1, \\
V(S_{C_1} \geq S_{C_{10}}) &= 0.736, \quad V(S_{C_1} \geq S_{C_{11}}) = 0.921, \quad V(S_{C_1} \geq S_{C_{12}}) = 0.971; \\
V(S_{C_2} \geq S_{C_1}) &= 0.978, \quad V(S_{C_2} \geq S_{C_3}) = 1, \quad V(S_{C_2} \geq S_{C_4}) = 0.768, \quad V(S_{C_2} \geq S_{C_5}) = 0.73, \\
V(S_{C_2} \geq S_{C_6}) &= 0.83, \quad V(S_{C_2} \geq S_{C_7}) = 1, \quad V(S_{C_2} \geq S_{C_8}) = 1, \quad V(S_{C_2} \geq S_{C_9}) = 1, \quad V(S_{C_2} \geq S_{C_{10}}) = 0.693, \\
V(S_{C_2} \geq S_{C_{11}}) &= 0.89, \quad V(S_{C_2} \geq S_{C_{12}}) = 0.95; \\
V(S_{C_3} \geq S_{C_1}) &= 0.87, \quad V(S_{C_3} \geq S_{C_2}) = 0.89, \quad V(S_{C_3} \geq S_{C_4}) = 0.672, \quad V(S_{C_3} \geq S_{C_5}) = 0.636, \\
V(S_{C_3} \geq S_{C_6}) &= 0.74, \quad V(S_{C_3} \geq S_{C_7}) = 1, \quad V(S_{C_3} \geq S_{C_8}) = 1, \quad V(S_{C_3} \geq S_{C_9}) = 1, \\
V(S_{C_3} \geq S_{C_{10}}) &= 0.608, \quad V(S_{C_3} \geq S_{C_{11}}) = 0.79, \quad V(S_{C_3} \geq S_{C_{12}}) = 0.84; \\
V(S_{C_4} \geq S_{C_1}) &= 1, \quad V(S_{C_4} \geq S_{C_2}) = 1, \quad V(S_{C_4} \geq S_{C_3}) = 1, \quad V(S_{C_4} \geq S_{C_5}) = 0.96, \quad V(S_{C_4} \geq S_{C_6}) = 1, \\
V(S_{C_4} \geq S_{C_7}) &= 1, \quad V(S_{C_4} \geq S_{C_8}) = 1, \quad V(S_{C_4} \geq S_{C_9}) = 1, \quad V(S_{C_4} \geq S_{C_{10}}) = 0.92, \quad V(S_{C_4} \geq S_{C_{11}}) = 1, \\
V(S_{C_4} \geq S_{C_{12}}) &= 1; \\
V(S_{C_5} \geq S_{C_1}) &= 1, \quad V(S_{C_5} \geq S_{C_2}) = 1, \quad V(S_{C_5} \geq S_{C_3}) = 1, \quad V(S_{C_5} \geq S_{C_4}) = 1, \quad V(S_{C_5} \geq S_{C_6}) = 1, \\
V(S_{C_5} \geq S_{C_7}) &= 1, \quad V(S_{C_5} \geq S_{C_8}) = 1, \quad V(S_{C_5} \geq S_{C_9}) = 1, \quad V(S_{C_5} \geq S_{C_{10}}) = 0.96, \quad V(S_{C_5} \geq S_{C_{11}}) = 1, \\
V(S_{C_5} \geq S_{C_{12}}) &= 1; \\
V(S_{C_6} \geq S_{C_1}) &= 1, \quad V(S_{C_6} \geq S_{C_2}) = 1, \quad V(S_{C_6} \geq S_{C_3}) = 1, \quad V(S_{C_6} \geq S_{C_4}) = 0.94, \\
V(S_{C_6} \geq S_{C_5}) &= 0.89, \quad V(S_{C_6} \geq S_{C_7}) = 1, \quad V(S_{C_6} \geq S_{C_8}) = 1, \quad V(S_{C_6} \geq S_{C_9}) = 0.88, \\
V(S_{C_6} \geq S_{C_{10}}) &= 0.86, \quad V(S_{C_6} \geq S_{C_{11}}) = 1, \quad V(S_{C_6} \geq S_{C_{12}}) = 1; \\
V(S_{C_7} \geq S_{C_1}) &= 0.77, \quad V(S_{C_7} \geq S_{C_2}) = 0.78, \quad V(S_{C_7} \geq S_{C_3}) = 0.89, \quad V(S_{C_7} \geq S_{C_4}) = 0.56, \\
V(S_{C_7} \geq S_{C_5}) &= 0.53, \quad V(S_{C_7} \geq S_{C_6}) = 0.63, \quad V(S_{C_7} \geq S_{C_8}) = 1, \quad V(S_{C_7} \geq S_{C_9}) = 0.9, \\
V(S_{C_7} \geq S_{C_{10}}) &= 0.51, \quad V(S_{C_7} \geq S_{C_{11}}) = 0.69, \quad V(S_{C_7} \geq S_{C_{12}}) = 0.73; \\
V(S_{C_8} \geq S_{C_1}) &= 0.75, \quad V(S_{C_8} \geq S_{C_2}) = 0.76, \quad V(S_{C_8} \geq S_{C_3}) = 0.9, \quad V(S_{C_8} \geq S_{C_4}) = 0.52, \\
V(S_{C_8} \geq S_{C_5}) &= 0.48, \quad V(S_{C_8} \geq S_{C_6}) = 0.59, \quad V(S_{C_8} \geq S_{C_7}) = 1, \quad V(S_{C_8} \geq S_{C_9}) = 0.89, \\
V(S_{C_8} \geq S_{C_{10}}) &= 0.46, \quad V(S_{C_8} \geq S_{C_{11}}) = 0.66, \quad V(S_{C_8} \geq S_{C_{12}}) = 0.703;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V(S_{c_9} \geq S_{c_1}) &= 0.87, \quad V(S_{c_9} \geq S_{c_2}) = 0.89, \quad V(S_{c_9} \geq S_{c_3}) = 1, \quad V(S_{c_9} \geq S_{c_4}) = 0.68, \\
V(S_{c_9} \geq S_{c_5}) &= 0.64, \quad V(S_{c_9} \geq S_{c_6}) = 0.74, \quad V(S_{c_9} \geq S_{c_7}) = 1, \quad V(S_{c_9} \geq S_{c_8}) = 1, \\
V(S_{c_9} \geq S_{c_{10}}) &= 0.612, \quad V(S_{c_9} \geq S_{c_{11}}) = 0.79, \quad V(S_{c_9} \geq S_{c_{12}}) = 0.84; \\
V(S_{c_{10}} \geq S_{c_1}) &= 1, \quad V(S_{c_{10}} \geq S_{c_2}) = 1, \quad V(S_{c_{10}} \geq S_{c_3}) = 1, \quad V(S_{c_{10}} \geq S_{c_4}) = 1, \quad V(S_{c_{10}} \geq S_{c_5}) = 1, \\
V(S_{c_{10}} \geq S_{c_6}) &= 1, \quad V(S_{c_{10}} \geq S_{c_7}) = 1, \quad V(S_{c_{10}} \geq S_{c_8}) = 1, \quad V(S_{c_{10}} \geq S_{c_9}) = 1, \quad V(S_{c_{10}} \geq S_{c_{11}}) = 1, \\
V(S_{c_{10}} \geq S_{c_{12}}) &= 1; \\
V(S_{c_{11}} \geq S_{c_1}) &= 1, \quad V(S_{c_{11}} \geq S_{c_2}) = 1, \quad V(S_{c_{11}} \geq S_{c_3}) = 1, \quad V(S_{c_{11}} \geq S_{c_4}) = 0.88, \\
V(S_{c_{11}} \geq S_{c_5}) &= 0.84, \quad V(S_{c_{11}} \geq S_{c_6}) = 0.95, \quad V(S_{c_{11}} \geq S_{c_7}) = 1, \quad V(S_{c_{11}} \geq S_{c_8}) = 1, \\
V(S_{c_{11}} \geq S_{c_9}) &= 1, \quad V(S_{c_{11}} \geq S_{c_{10}}) = 0.799, \quad V(S_{c_{11}} \geq S_{c_{12}}) = 1; \\
V(S_{c_{12}} \geq S_{c_1}) &= 1, \quad V(S_{c_{12}} \geq S_{c_2}) = 1, \quad V(S_{c_{12}} \geq S_{c_3}) = 1, \quad V(S_{c_{12}} \geq S_{c_4}) = 0.836, \\
V(S_{c_{12}} \geq S_{c_5}) &= 0.797, \quad V(S_{c_{12}} \geq S_{c_6}) = 0.9, \quad V(S_{c_{12}} \geq S_{c_7}) = 1, \quad V(S_{c_{12}} \geq S_{c_8}) = 1, \\
V(S_{c_{12}} \geq S_{c_9}) &= 1, \quad V(S_{c_{12}} \geq S_{c_{10}}) = 0.761, \quad V(S_{c_{12}} \geq S_{c_{11}}) = 0.95;
\end{aligned}$$

گام پنجم: محاسبه وزن اولیه هر یک از پارامترها با استفاده از رابطه 4-7.

$$\begin{aligned}
d'(C_1) &= \min(1, 1, 0.81, 0.77, 0.87, 1, 1, 1, 0.736, 0.92, 0.97) = 0.736 \\
d'(C_2) &= \min(0.98, 1, 0.78, 0.73, 0.83, 1, 1, 1, 0.693, 0.89, 0.95) = 0.693 \\
d'(C_3) &= \min(0.87, 0.89, 0.67, 0.64, 0.74, 1, 1, 1, 0.608, 0.79, 0.89) = 0.608 \\
d'(C_4) &= \min(1, 1, 1, 0.96, 1, 1, 1, 1, 0.92, 1, 1) = 0.92 \\
d'(C_5) &= \min(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0.96, 1, 1) = 0.96 \\
d'(C_6) &= \min(1, 1, 1, 0.94, 0.89, 1, 1, 0.88, 0.86, 1, 1) = 0.86 \\
d'(C_7) &= \min(0.77, 0.78, 0.89, 0.56, 0.53, 0.63, 1, 0.9, 0.51, 0.69, 0.73) = 0.51 \\
d'(C_8) &= \min(0.75, 0.76, 0.9, 0.52, 0.48, 0.59, 1, 0.89, 0.46, 0.66, 0.7) = 0.46 \\
d'(C_9) &= \min(0.87, 0.89, 1, 0.68, 0.64, 0.74, 1, 1, 0.612, 0.79, 0.84) = 0.612 \\
d'(C_{10}) &= \min(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1) = 1 \\
d'(C_{11}) &= \min(1, 1, 1, 0.88, 0.84, 0.95, 1, 1, 1, 0.799, 1) = 0.799 \\
d'(C_{12}) &= \min(1, 1, 1, 0.84, 0.8, 0.9, 1, 1, 1, 0.761, 0.95) = 0.761
\end{aligned}$$

گام ششم: محاسبه بردار وزن نهایی با استفاده از رابطه 4-9. بدین ترتیب وزن نهایی هر یک از پارامترها با

استفاده از رابطه 4-9 محاسبه شد. مقادیر وزن هر یک از پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ‌های

ساختمانی در جدول 4-4 آورده شده است. چنانچه از این جدول مشخص است مقاومت فشاری تک محوری

دارای بیشترین وزن و چگالی کمترین وزن را در میان پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ به خود اختصاص دادند.

جدول 4-4- وزن اولیه و نهایی هر یک از پارامترها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ	وزن اولیه	وزن نهایی
C ₁ بافت	0/7362	0/0827
C ₂ اندازه و شکل دانه ها	0/6928	0/0778
C ₃ نوع ماتریس و سیمان سنگ	0/6087	0/0684
C ₄ درصد کوارتز	0/9157	0/1028
C ₅ سختی	0/9586	0/1077
C ₆ ساینده‌گی	0/855	0/096
C ₇ هوازدگی	0/505	0/0567
C ₈ چگالی	0/4587	0/0515
C ₉ سختی چکش اشمیت	0/6124	0/0688
C ₁₀ مقاومت فشاری تک محوری	1	0/1123
C ₁₁ مقاومت کششی	0/7993	0/0898
C ₁₂ مدول الاستیسیته	0/7613	0/0855

3-2-4- تعیین وزن پارامترها با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی

یکی دیگر از روش‌های متداول در ارزش‌دهی معیارهای یک مسأله با توجه به نظرات خبرگان، روش دلفی فازی می‌باشد. در روش دلفی فازی، نظرات افراد خبره (که در قالب نظرات کیفی می‌باشد)، به صورت اعداد قطعی بیان می‌شوند. بدین ترتیب می‌توان از نظرات افراد خبره برای پیش‌بینی و ارزیابی معیارها استفاده کرد. در این تحقیق وزن هر یک از پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی نیز انجام شد. بدین ترتیب وزن هر یک از پارامترها با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی دلفی محاسبه شد (توضیح کامل این روش به همراه مراحل محاسباتی انجام شده برای تعیین وزن هر یک از پارامترها در پیوست شماره 1 آورده شده است). مقادیر وزن نهایی متعلق به هر یک از پارامترها در جدول 4-5 درج شده است. با بررسی و مقایسه نتایج جدول‌های 4-4 و 4-5 مشخص می‌شود که، وزن‌های به دست آمده از دو روش تقریباً یکسان می‌باشند.

جدول 4-5- وزن نهایی هر یک از پارامترها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی

پارامتر	وزن نهایی
C ₁	بافت 0/0793
C ₂	اندازه و شکل دانه‌ها 0/0796
C ₃	نوع ماتریس و سیمان سنگ 0/0655
C ₄	درصد کوارتز 0/1076
C ₅	سختی 0/1125
C ₆	سایندگی 0/0958
C ₇	هوازدهی 0/0568
C ₈	چگالی 0/0569
C ₉	سختی چکش اشمیت 0/0619
C ₁₀	مقاومت فشاری تک محوری 0/1136
C ₁₁	مقاومت کششی 0/0857
C ₁₂	مدول الاستیسیته 0/0847

4-2-4- انتخاب پارامترها برای سیستم طبقه‌بندی

در مهندسی سنگ به ویژه در تدوین و ارائه یک سیستم طبقه‌بندی، همواره انتخاب پارامترهای مهم و ترکیب آن‌ها در کنار هم، یکی از مهم‌ترین اصول طراحی یک سیستم طبقه‌بندی به‌شمار می‌رود. چنانچه مشاهده می‌شود تمامی پارامترهای بررسی شده، می‌توانند تمامی مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ را به خوبی پوشش دهند. از طرفی برخی از این پارامترها مثل هوازدهی و نوع ماتریکس و سیمان سنگ دارای شاخص کمی و آزمایشگاهی نیستند. همچنین تعدادی از پارامترهای مورد اشاره با یکدیگر هم‌پوشانی داشته و برخی از پارامترها را در بر می‌گیرند. حال این سؤال مطرح می‌شود که آیا بررسی و اندازه‌گیری تمامی پارامترهای فوق برای ارزیابی قابلیت برش یک نمونه سنگ الزامی می‌باشد. پر واضح است که اندازه‌گیری تک تک پارامترهای فوق علاوه بر صرف هزینه‌های زیاد به مدت زمان بیشتری نیز نیاز دارد که از حوصله یک کاربر برای ارزیابی قابلیت برش سنگ خارج است. لذا قرار گیری تمامی پارامترهای فوق در سیستم طبقه‌بندی جدید دور از دسترس بوده و منطقی نمی‌باشد. به عبارت دیگر یک سیستم طبقه‌بندی زمانی قابل قبول می‌باشد که علاوه بر سادگی (کاهش زمان و هزینه آزمایش‌ها)، بتواند با حداقل تعداد پارامتر، تمامی مشخصات مهم فیزیکی و مکانیکی سنگ را پوشش دهد. با توجه به

مطالب فوق، 4 پارامتر شناخته شده شامل: مقاومت فشاری تک محوری، فاکتور سایش شیمازک، سختی موس و مدول الاستیسیته به ترتیب به نمایندگی از 4 مشخصه مهم سنگ شامل خواص مقاومتی، ساینده‌گی، سختی و خواص الاستوپلاستیسیته سنگ، در سیستم طبقه‌بندی جدید پیشنهاد و مورد استفاده قرار گرفته شدند.

4-2-4-1- مقاومت فشاری تک محوری

این پارامتر به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مهندسی سنگ در اکثر مطالعات مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. این پارامتر می‌تواند نماینده بسیاری از مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ از قبیل مقاومت، بافت، چگالی، میزان هوازدگی و نیز کیفیت و نوع ماتریکس سنگ باشد. از طرفی این آزمایش، یک آزمایش بسیار شناخته شده و قابل دسترس می‌باشد که از این نظر می‌توان پارامترهای بدون کمیت مثل هوازدگی را با آن مورد مطالعه قرار داد. لذا با توجه به همه تفاسیر، مجموع وزن پنج پارامتر فوق (برابر با امتیاز 0/37) به عنوان وزن نهایی پارامتر مقاومت فشاری تک محوری در سیستم طبقه‌بندی جدید در نظر گرفته شده است.

4-2-4-2- فاکتور ساینده‌گی شیمازک

ساینده‌گی یکی از مهم‌ترین پارامترهای سنگ از نظر قابلیت برش می‌باشد. این پارامتر سرعت برش و نیز استهلاک تجهیزات برش را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها پیشنهاد شده است. در این میان شاخص ساینده‌گی شیمازک به دلیل در نظر گرفتن مقاومت کششی، اندازه دانه‌ها و نیز میزان کوارتز محتوی نسبت به سایر روش‌ها برتری داشته و به دلیل توجه به ترکیب میکروسکوپی سنگ از قابلیت بالایی در ارزیابی و پیش‌بینی ساینده‌گی سنگ‌ها برخوردار می‌باشد. این شاخص در سال 1970 توسط شیمازک و ناتز⁷¹ ارائه شده است. رابطه کلی این شاخص به صورت زیر می‌باشد (Ersoy & Waller, 1995a):

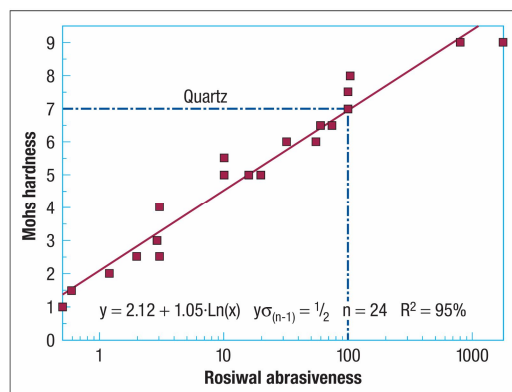
71. Schimazek & Natz

$$SFa = \frac{(Eqc \times Gs \times BTS)}{100} \quad (10-4)$$

در رابطه بالا Eqc معرف درصد میزان کوارتز محتوی سنگ، Gs، اندازه دانه‌ها بر حسب میلی‌متر و BTS معرف مقاومت کششی غیرمستقیم (آزمون برزیلی) بر حسب مگا پاسکال می‌باشد. اندازه دانه‌ها با استفاده از تهیه مقاطع نازک از بخش تیپیک و میانگین‌گیری وزنی اندازه دانه‌ها به دست می‌آید. مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم نیز از طریق آزمایش در آزمایشگاه مکانیک سنگ محاسبه می‌شود. در رابطه بالا پارامتر کوارتز محتوی یکی از مؤثرترین پارامترهای مربوط به ساینده‌گی سنگ‌ها می‌باشد. این شاخص را می‌توان از رابطه 4-11 تعیین کرد. به طوری که هر کانی با توجه به سختی مقیاس موس چه درصدی از ساینده‌گی ناشی از کوارتز را ایجاد می‌کند می‌توان کوارتز محتوی نمونه سنگی مورد مطالعه را به دست آورد.

$$Eqc = \sum_{i=1}^n A_i \cdot R_i \quad (11-4)$$

در رابطه بالا A معرف درصد کانی‌ها، R ساینده‌گی رزیوال⁷² و n تعداد کانی‌ها می‌باشد. میزان ساینده‌گی رزیوال سنگ با استفاده از سختی موس و طبق رابطه نشان داده شده در شکل 4-3 قابل محاسبه است. چنانچه از این شکل بر می‌آید، میزان Eqc برای کانی کوارتز 100% بوده و با کاهش میزان کوارتز و یا سختی دیگر کانی‌های سنگ میزان ساینده‌گی سنگ به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد.



(Thuro, 1997) 2 N4Eqc 3 4Eqc 5 6Eqc 7 8Eqc 9 10Eqc 11 12Eqc 13 14Eqc 15 16Eqc 17 18Eqc 19 20Eqc 21 22Eqc 23 24Eqc 25 26Eqc 27 28Eqc 29 30Eqc 31 32Eqc 33 34Eqc 35 36Eqc 37 38Eqc 39 40Eqc 41 42Eqc 43 44Eqc 45 46Eqc 47 48Eqc 49 50Eqc 51 52Eqc 53 54Eqc 55 56Eqc 57 58Eqc 59 60Eqc 61 62Eqc 63 64Eqc 65 66Eqc 67 68Eqc 69 70Eqc 71 72Eqc 73 74Eqc 75 76Eqc 77 78Eqc 79 80Eqc 81 82Eqc 83 84Eqc 85 86Eqc 87 88Eqc 89 90Eqc 91 92Eqc 93 94Eqc 95 96Eqc 97 98Eqc 99 100Eqc

72. Rosiwal

با توجه به مطالب ذکر شده، فاکتور ساینده‌گی شیمازک به عنوان شاخص کمی ارزیابی ساینده‌گی سنگ مورد استفاده قرار گرفته است. وزن این پارامتر نیز از مجموع وزن مقاومت کششی، ساینده‌گی و میزان کوارتز محتوی و اندازه دانه‌ها (برابر با امتیاز 0/36) محاسبه گردید.

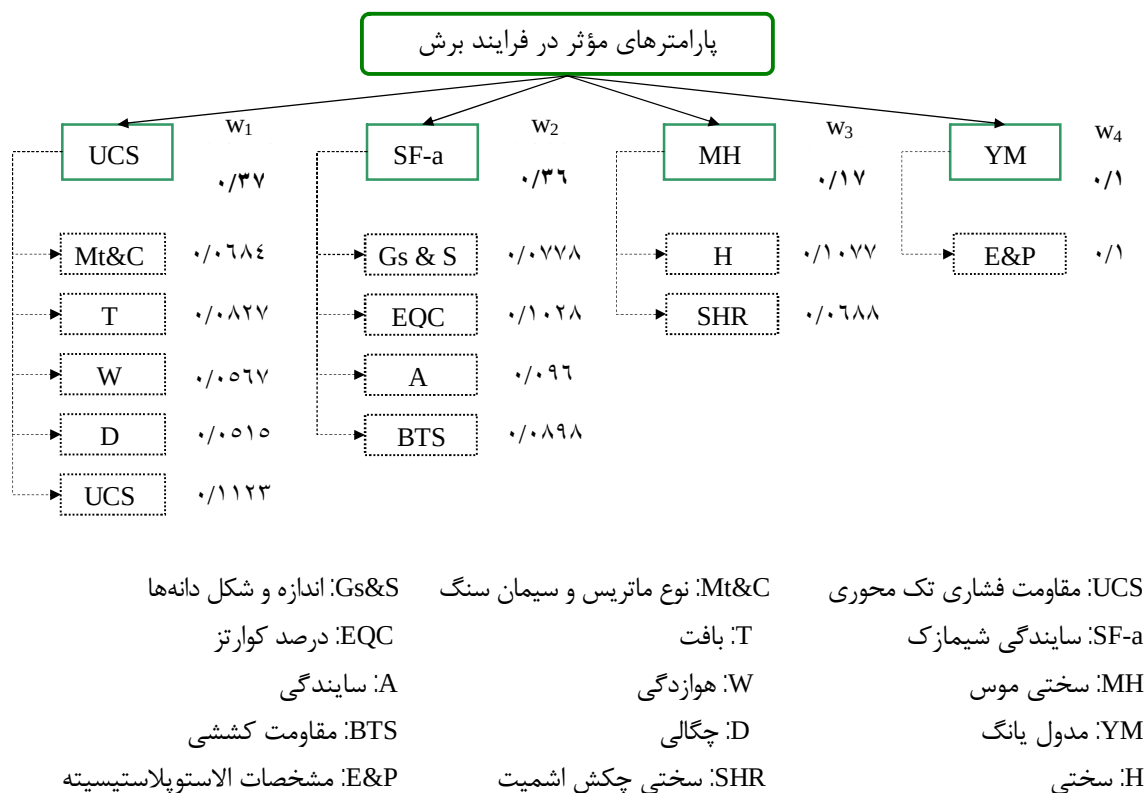
3-4-2-4- سختی موس

سختی یکی از مهم‌ترین پارامترهای هر کانی به شمار می‌رود که تأثیر بسیار زیادی بر سختی کل سنگ و در نهایت قابلیت برش آن دارد. از آنجائی که سختی واقعی و علمی یک سنگ از مطالعه مقطع نازک و بررسی ترکیب کانی‌شناسی سنگ حاصل می‌شود لذا در این تحقیق مقیاس سختی موس برای ارزیابی سختی مورد استفاده قرار گرفته است. از عمده دلایل استفاده از سختی موس را می‌توان به شهرت و آشنایی خوب کاربران و دقت بالای آن (به دلیل استفاده از مقطع نازک) عنوان کرد. وزن نهایی اختصاص داده شده به این پارامتر نیز از مجموع وزن دو پارامتر سختی و سختی چکش اشمیت (برابر با امتیاز 0/17) حاصل گردید.

4-4-2-4- مدول الاستیسیته (مدول یانگ)

با توجه به رفتار سنگ‌ها در فرایند شکست و تشکیل تراشه در فرایند برش، نحوه رسیدن یک سنگ به مقاومت فشاری حداکثر آن بر قابلیت برش سنگ تأثیرگذار است. الاستیسیته را می‌توان یک پارامتر مستقل دانست که رفتار خاصی در سنگ ایجاد می‌کند. اگرچه این پارامتر از سایر مشخصات سنگ اثر می‌پذیرد با این حال اثرگذاری آن بیشتر از تأثیرپذیری آن مورد توجه قرار می‌گیرد. لذا در این تحقیق مدول الاستیسیته (مدول یانگ) به عنوان معرف رفتار الاستیسیته سنگ مورد استفاده قرار گرفته شده است. وزن این پارامتر نیز به عنوان وزن نهایی در سیستم طبقه‌بندی (برابر با امتیاز 0/1) مورد استفاده قرار گرفت.

بدین ترتیب وزن هر یک از چهار پارامتر مقاومت فشاری تک محوری، ساینده‌گی شیمازک، سختی موس و مدول یانگ برای ارزیابی قابلیت برش سنگ تعیین گردید. شکل 4-4 مقادیر وزن نهایی این پارامترها را نشان می‌دهد.



شکل 4-4- مقادیر وزن نهایی پارامترهای به کار رفته در سیستم طبقه بندی جدید

5-2-4- سیستم طبقه بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ های ساختمانی

در سیستم طبقه بندی جدید به منظور امتیازدهی به مقادیر مختلف هر پارامتر، بیشترین امتیاز به بهترین وضعیت (خیلی خوب) داده شده است. برای امتیاز حالت های خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف به ترتیب 70%، 50%، 25% و 10% امتیاز ماکزیمم، اختصاص یافته است. بدین ترتیب سعی شد تا سیستم طبقه بندی پیشنهادی غیر خطی شود. چراکه یک سیستم غیر خطی بهتر می تواند به طبقه بندی توده سنگ های ضعیف پردازد (Hoek & Brown, 1994). با توجه به توضیحات ارائه شده، سیستم طبقه بندی جدید برای ارزیابی و پیش بینی قابلیت برش هر دو گروه از سنگ های ساختمانی سخت (گرانیتی) و نرم (کربناته) پیشنهاد شد. جدول 4-6 این سیستم طبقه بندی جدید را به همراه ردیف های ارزش متعلق به هر پارامتر را نشان می دهد.

جدول 4-6- سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی

ردیف‌های ارزش						پارامترها	
1	مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)	نرم	25>	25-55	55-85	85-115	115<
		سخت	50>	50-90	90-140	140-200	200<
		مقاومت خیلی کم	مقاومت کم	مقاومت متوسط	مقاومت بالا	مقاومت خیلی بالا	
	امتیاز	37		25/9	18/5	9/25	3/7
2	فاکتور سایش شیمازک (N/mm)	نرم	0/05>	0/05-0/1	0/1-0/15	0/15-0/2	0/2<
		سخت	2/5>	2/5-5	5-7/5	7/5-10	10<
		سایندگی خیلی کم	سایندگی کم	سایندگی متوسط	سایندگی بالا	سایندگی خیلی بالا	
	امتیاز	36		25/2	18	9	3/6
3	سختی موس (n)	نرم	2>	2-2/5	2/5-3	3-3/5	>3/5
		سخت	3>	3-4/5	4/5-6	6-7	>7
		خیلی نرم تا نرم	نسبتاً نرم	نسبتاً سخت	سخت	خیلی سخت	
	امتیاز	17		11/9	8/5	4/25	1/7
4	مدول الاستیسیته (GPa)	نرم	10>	10-30	30-50	50-70	70<
		سخت	15>	15-40	40-65	65-90	90<
		خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	
	امتیاز	10		7	5	2/5	1

در سیستم طبقه‌بندی جدید میزان قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی توسط یک اندیس کمی جدید با نام شاخص قابلیت برش سنگ⁷³ (RSi) مورد بررسی قرار می‌گیرد. شاخص به دست آمده از این سیستم طبقه‌بندی می‌تواند به عنوان یک شاخص مهم و کاربردی برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از این شاخص جدید، در مجموع به سنگ‌ها امتیازی از 10 تا 100 اختصاص داده شده و قابلیت برش سنگ‌ها در دو گروه سخت و نرم به صورت کیفی در پنج کلاس خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف طبقه‌بندی می‌شوند (جدول 4-7).

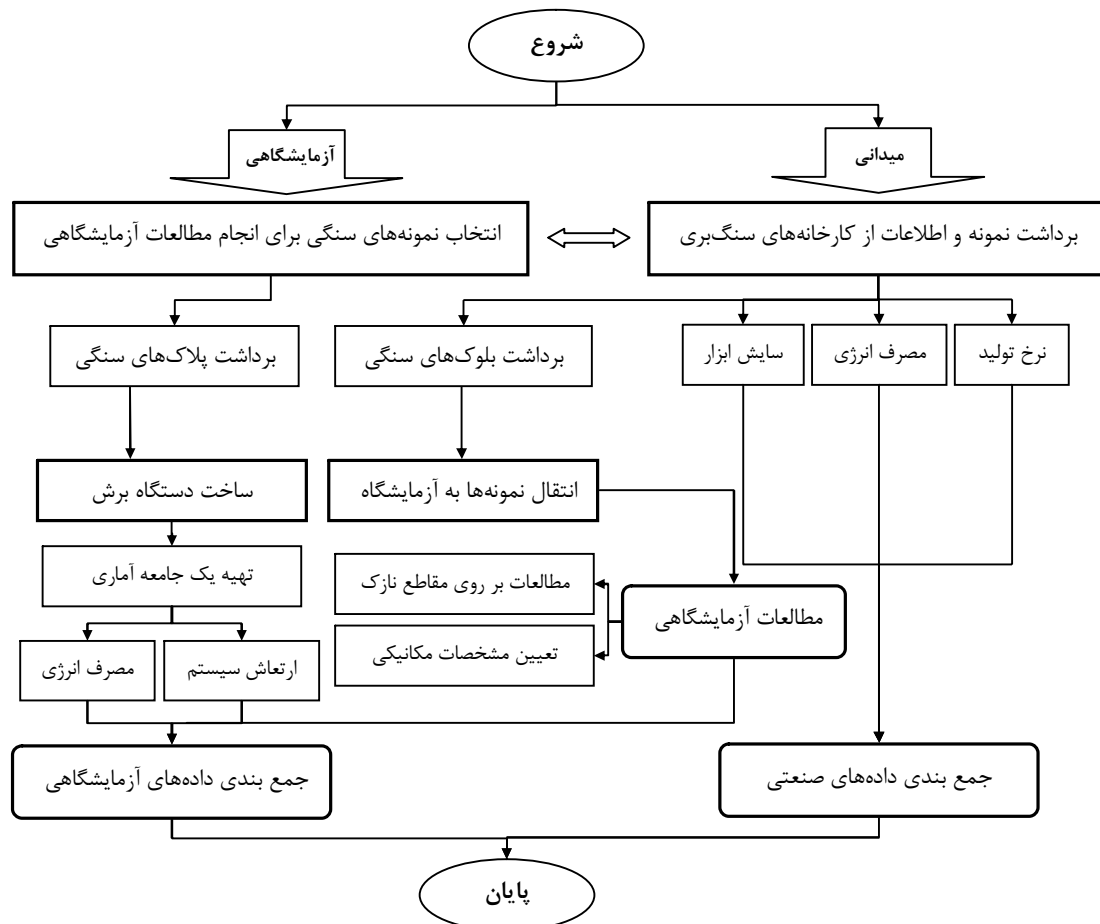
جدول 4-7- پیش‌بینی کیفی قابلیت برش سنگ‌ها با توجه به شاخص قابلیت برش

شاخص قابلیت برش سنگ	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100
برش سنگ	کم	متوسط-کم	متوسط	متوسط - بالا	بالا
قابلیت برش سنگ	خیلی ضعیف	ضعیف	متوسط	خوب	خیلی خوب

⁷³ Rock Sawability index

3-4- مطالعات میدانی و آزمایشگاهی

در این بخش از تحقیق به منظور بررسی و ارزیابی سیستم طبقه‌بندی جدید و همچنین بررسی ارتباط میان پارامترهای عملیاتی برش و مشخصات سنگ، مطالعات میدانی و آزمایشگاهی بر روی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه انجام شد. شکل 4-5 فلوچارتی از مراحل انجام مطالعات میدانی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل 4-5- مراحل انجام مطالعات میدانی و آزمایشگاهی

همان‌طوری که در این فلوچارت نشان داده شده است، مطالعات میدانی و آزمایشگاهی در سه بخش مجزا انجام شده است. در گام نخست، در مطالعات انجام شده در بخش آزمایشگاهی، نمونه سنگ‌های مورد مطالعه برای بررسی و آنالیز فیزیکی و مکانیکی به آزمایشگاه مکانیک سنگ و آزمایشگاه تهیه مقطع نازک انتقال یافته و نمونه‌های سنگی مورد نظر تحت شرایط استاندارد مورد آزمایش قرار گرفتند. در بخش بعد، از هر نمونه سنگ پلاک‌های مورد نیاز تهیه و سپس برای انجام مطالعات برش به آزمایشگاه انتقال داده شدند. در

این بخش پلاک‌ها تحت شرایط مختلف عملیاتی (عمق‌های مختلف برش و نرخ‌های مختلف پیشروی) توسط یک دستگاه برش (تهیه شده در مقیاس آزمایشگاهی) مورد بررسی و آزمایش قرار گرفتند. در بخش سوم، مطالعات میدانی برای بررسی عملکرد برش در مقیاس صنعتی و همچنین بررسی و تعیین پارامترهای بهینه دستگاه برش، در برخی از کارخانه‌های سنگ‌بری در داخل کشور انجام شد.

4-3-1- مطالعات میدانی

به منظور بررسی و عملکرد فرایند برش در مقیاس صنعتی و همچنین برداشت نمونه سنگ‌های مورد مطالعه برای انجام مطالعات آزمایشگاهی، مطالعات میدانی در برخی از کارخانه‌های سنگ‌بری در شهرک صنعتی شمس آباد تهران و محمود آباد اصفهان انجام شد. به‌طور کلی مطالعات میدانی انجام شده در این تحقیق را می‌توان در دو بخش عمده به صورت زیر بیان کرد:

- 1- برداشت و انتقال بلوک‌های سنگی مورد نظر به آزمایشگاه برای تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی. در این بخش از مطالعات میدانی، بلوک‌های سنگی در ابعاد مشخص از بلوک‌های سنگی بزرگ جدا شده و برای انجام آزمایش‌های مربوطه به آزمایشگاه انتقال داده شدند.
- 2- برداشت و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به عملکرد برش برای دو گروه از نمونه سنگ‌های سخت و نرم. در این بخش از مطالعات میدانی، اطلاعات مربوط به عملکرد برش سنگ‌های ساختمانی مورد مطالعه در برخی از کارخانه‌های سنگ‌بری در کشور اندازه‌گیری و ثبت شد. اطلاعات ثبت شده در این بخش شامل اطلاعات مربوط به پارامترهای عملیاتی (عمق برش و نرخ پیشروی) و معیارهای ارزیابی عملکرد برش (نرخ برش، میزان مصرف انرژی دستگاه و سایش ابزار الماسی برای نمونه سنگ‌های سخت) می‌باشد. در طی برداشت داده‌های صنعتی، اطلاعات مربوط به تغییرات سایش ابزار و مصرف انرژی دستگاه در شرایط مختلف عملیاتی به ترتیب توسط میکرومتر و آمپرسنج دیجیتالی (شکل‌های 4-6 و 4-7) اندازه‌گیری و ثبت شد.



شکل 4-6- میکرومتر دیجیتالی برای اندازه‌گیری سایش ماکروسکوپی



شکل 4-7- آمپرسنج مورد استفاده برای ثبت تغییرات شدت جریان مصرفی

4-3-2- مطالعات آزمایشگاهی

به طور کلی مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این تحقیق را می‌توان به دو بخش زیر تقسیم‌بندی کرد:

الف) تعیین مشخصات قطعه کار

ب) راه‌اندازی دستگاه برش و انجام آزمایش‌های مربوطه برای درک بهتر فرایند برش و ارزیابی سیستم طبقه‌بندی جدید در پیش‌بینی معیارهای عملکرد برش. از جمله مهمترین اهداف این بخش از تحقیق، بررسی و ارزیابی عملکرد سیستم طبقه‌بندی جدید و همچنین بررسی ارتباط میان معیارهای ارزیابی عملکرد برش سنگ و پارامترهای عملیاتی و شاخص قابلیت برش سنگ می‌باشد.

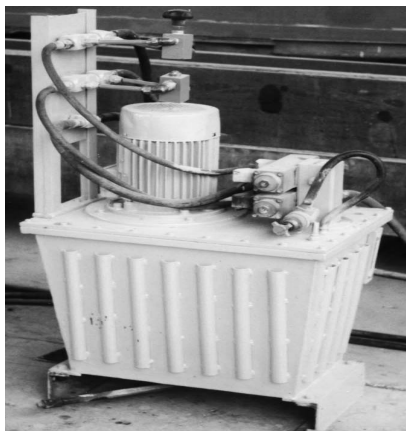
4-3-2-1- ساخت دستگاه برش

به‌منظور انجام آزمایش‌های برش در مقیاس آزمایشگاهی، دستگاه برشی در مقیاس آزمایشگاهی تهیه شد. مکانیزم این دستگاه بر اساس اصول و قواعد برش دایروی بوده و با توجه به اهداف و نیازهای آزمایش طراحی شده است. شکل 4-8 نمای کلی از دستگاه مورد نظر را نشان می‌دهد.

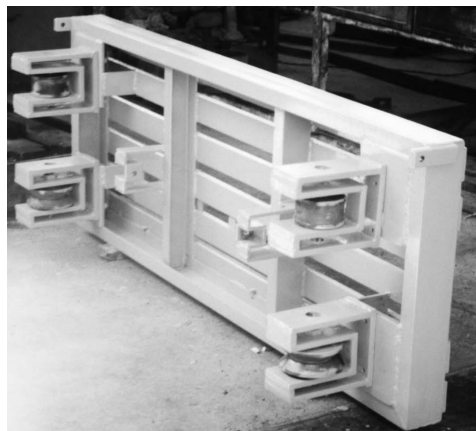


شکل 4-8- نمای کلی دستگاه آزمایش

قسمت‌های مختلف دستگاه به گونه‌ای طراحی شد که امکان تغییر پارامترهای ماشین‌کاری با تغییرات جزئی در ماشین میسر باشد. اجزاء اصلی این دستگاه آزمایش شامل سه بخش الف) بستر دستگاه، متشکل از دو ریل راهنما برای میز متحرک ماشین، ب) قسمت فوقانی شاسی (محل قرارگیری محور اصلی ماشین) و ج) قسمت تحتانی شاسی (برای جمع‌آوری گل، آب و براده‌های حاصل از برش) می‌باشد. میز متحرک دستگاه دارای سطحی تخت می‌باشد که قطعات سنگ برای عملیات برش روی این صفحه ثابت می‌شوند. میز دستگاه توسط یک مکانیزم چرخ و زنجیر به وسیله یک موتور هیدرولیکی روی ریل دستگاه حرکت می‌کند. استفاده از سیستم هیدرولیک امکان کنترل و تنظیم سرعت حرکت میز که همان نرخ پیشروی می‌باشد را فراهم می‌آورد. شکل‌های 4-9 و 4-10 به ترتیب میز متحرک دستگاه و واحد هیدرولیکی را نشان می‌دهند.



شکل 4-10- واحد هیدرولیک دستگاه آزمایش



شکل 4-9- میز متحرک دستگاه آزمایش

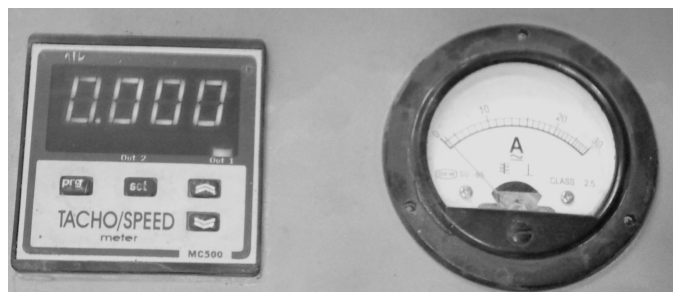
در دستگاه مورد نظر انتقال نیرو به محور اصلی توسط پولی و تسمه لاستیکی انجام می‌شود. دیسک برشی در بین دو واشر چدنی توسط مکانیزم پیچ و مهره نصب و محکم می‌شود. کل گلوئی بر روی بستری فولادی که روی بستر اصلی یاتاقان بندی شده است ثابت می‌شود. یاتاقان بندی بستر گلوئی به گونه‌ای می‌باشد که امکان یک حرکت چرخشی بسیار محدود تقریباً 8° را به آن می‌دهد. شکل 4-11 گلوئی دستگاه تست را نشان می‌دهد. موتور اصلی اسپیندل با توان 7/5 کیلو وات در بالای بستر نصب می‌شود. پیشروی عمودی توسط یک مکانیزم ترکیبی با یک موتور هیدرولیکی انجام می‌شود. این مکانیزم که پایه و اساس آن پیچ و مهره می‌باشد قابلیت تنظیم عمق برش با دقت 0/1 میلی‌متر را فراهم می‌آورد. برای راه‌اندازی موتورهای محرک میز (پیشروی افقی) و بستر گلوئی (پیشروی عمودی) از یک واحد هیدرولیکی استفاده شده است. این سیستم امکان کنترل سرعت‌های پیشروی را فراهم می‌نماید. مدار الکتریکی دستگاه به گونه‌ای است که کنترل حرکات پیشروی ماشین را در سه حالت دستی و نیمه خودکار و تمام خودکار امکان‌پذیر می‌نماید. مقدار سرعت پیشروی توسط یک شمارش‌گر الکترونیکی سنجیده می‌شود.



شکل 4-11- گلوئی دستگاه تست همراه با واشرهای چدنی برای بستن دیسک الماسی

در طی انجام آزمایش، معیارهای ارزیابی عملکرد برش شامل میزان شدت جریان مصرفی دستگاه و ارتعاش‌های به‌وجود آمده در سیستم به‌ترتیب توسط یک آمپرسنج و یک شتاب‌سنج دقیق با کمک تجهیزات جانبی در شرایط مختلف ماشین‌کاری شامل نرخ‌های مختلف پیشروی و عمق‌های مختلف برش، ثبت و اندازه‌گیری شد. شکل‌های 4-12 و 4-13 به‌ترتیب تجهیزات مورد استفاده برای اندازه‌گیری و ثبت داده‌های شدت جریان مصرفی دستگاه و ارتعاش‌های به‌وجود آمده در سیستم را

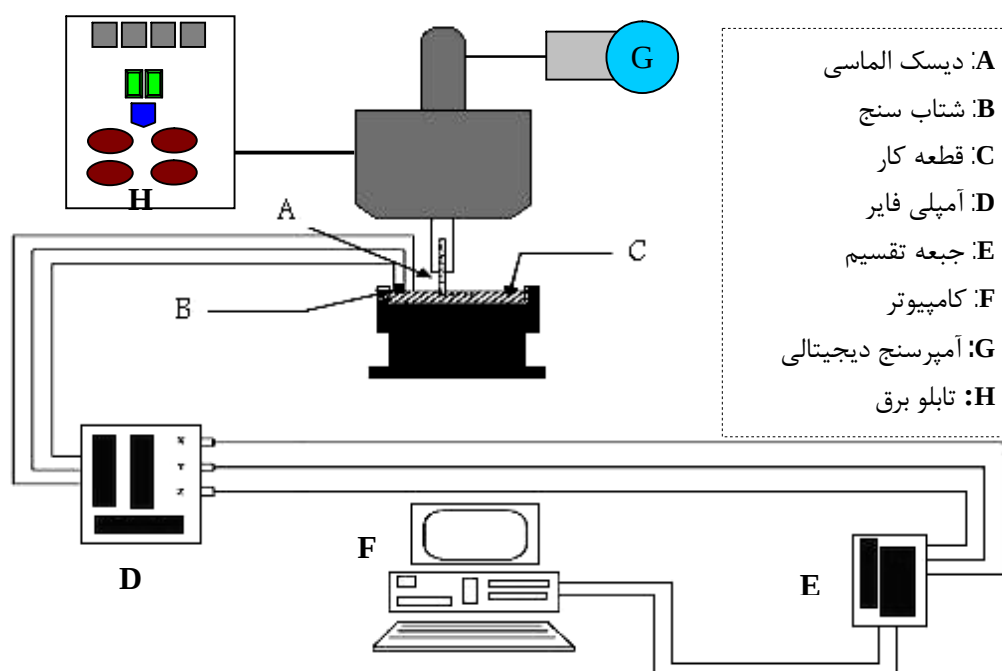
نشان می‌دهند. همچنین دیاگرام طراحی شده برای انجام مطالعات آزمایشگاهی به همراه تجهیزات جانبی استفاده شده در طول آزمایش، در شکل 4-14 نشان داده شده است.



شکل 4-12- آمپرسنج مورد استفاده برای ثبت تغییرات شدت جریان مصرفی

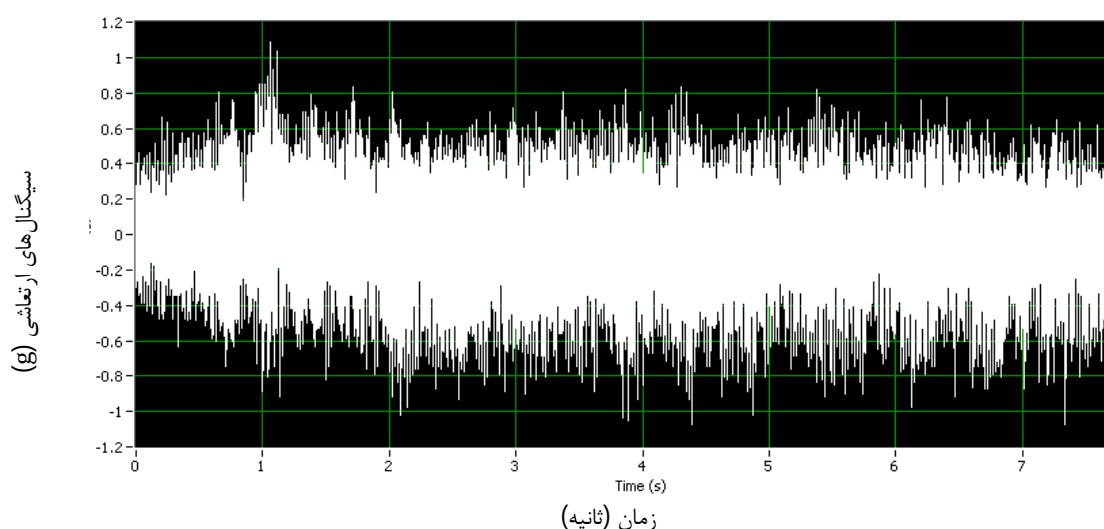


شکل 4-13- شتاب‌سنج مورد استفاده برای ثبت ارتعاش‌های سیستم



شکل 4-14- دیاگرام طراحی شده برای انجام آزمایش‌های برش

در طی انجام آزمایش‌های برش، برای ثبت ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم، ابتدا سیگنال‌های خروجی از شتابسنج توسط آمپلی‌فایر تقویت شده و سپس برای تبدیل به سیگنال‌های قابل پردازش به جعبه تقسیم و در پایان برای پردازش نهایی به کامپیوتر انتقال داده می‌شد. پردازش داده‌ها با کمک یک برنامه کامپیوتری تهیه شده در محیط Labview صورت پذیرفت. شکل 4-15 نمونه‌ای از سیگنال‌های ارتعاشی ثبت شده را نشان می‌دهد.



شکل 4-15- نمونه‌ای از سیگنال‌های ارتعاشی ثبت شده

با توجه به ماهیت سیگنال‌های ارتعاشی و جلوگیری از صفر شدن مقادیر میانگین، در این تحقیق از مقادیر RMS ارتعاش‌های سیستم در تحلیل‌های آماری استفاده شد. واژه RMS مخفف عبارت « Root Mean Square ریشه دوم متوسط مربعات» است. از نظر ریاضی این عبارت از رابطه 4-12 قابل محاسبه می‌باشد:

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^T x(t)^2 dt}{T}} \quad (12-4)$$

در رابطه 4-12 پارامتر X معرف مقدار RMS تابع x در بازه زمانی T می‌باشد که برابر با ریشه دوم میانگین مربعات مقادیر لحظه‌ای می‌باشد. این مقادیر بیشتر در تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی، ولتاژ و در شرایطی که مقادیر مثبت و منفی داده‌ها در یک سیگنال احتمال صفر شدن میانگین مقادیر را بالا می‌برند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تمامی آزمایش‌ها، برش در حالت موافق (حرکت قطعه کار هم

راستا با چرخش دیسک) و از آب به عنوان سیال خنک کننده استفاده شد. در آزمایش‌های برش از دو دیسک فلزی (سخت بر و نرم بر) به قطر 41 cm و ضخامت 2/7 mm استفاده شده است. سگمنت‌های الماسی با ابعاد 40×10×3 mm و به تعداد 28 عدد در پیرامون بدنه فولادی لحیم شده‌اند. دانه‌های الماس مصنوعی به شکل کریستال‌های مکعب هشت وجهی با مش 40/50 برای دیسک سخت بر و مش 30/40 برای دیسک نرم بر و درصد وزنی 25 تا 30 و 30 تا 40 به ترتیب برای دو دیسک نرم بر و سخت بر در باند فلزی توزیع شدند. مشخصات دیسک‌های استفاده شده در آزمایش‌های برش در جدول 4-8 آورده شده است.

جدول 4-8- مشخصات دیسک‌های استفاده شده در آزمایش‌های برش		
نوع دیسک	درصد وزنی الماس به کار رفته در باند	اندازه مش کریستال‌های الماس
سخت بر	30 درصد تا 40 درصد	40/50
نرم بر	25 درصد تا 30 درصد	30/40

بدین ترتیب پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی در مجموع در حدود 223 نمونه آزمایش برش تحت شرایط مختلف ماشین‌کاری بر روی سنگ‌های مورد مطالعه انجام شد که از این میان 112 نمونه آزمایش متعلق به سنگ‌های نرم و 111 نمونه آزمایش برای نمونه سنگ‌های سخت بود. نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی برش برای دو گروه از سنگ‌های مورد مطالعه به همراه مشخصات عملیاتی، شاخص قابلیت برش و عملکرد برش در جدول‌های 4-9 و 4-10 آورده شده است.

جدول 4-9- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش نمونه سنگ‌های نرم					
شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش سیستم (RMS)	شدت جریان مصرفی (A)
1	35	200	59/4	0/17	10
2	22	200	59/4	0/14	8
3	15	200	59/4	0/13	7
4	35	300	59/4	0/24	13/5
5	15	300	59/4	0/17	8
6	22	300	59/4	0/2	10
7	35	400	59/4	0/26	16
8	22	400	59/4	0/23	11

ادامه جدول 4-9- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش نمونه سنگ‌های نرم

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش سیستم (RMS)	شدت جریان مصرفی (A)
9	15	400	59/4	0/21	9
10	35	100	59/4	0/13	8
11	30	100	59/4	0/12	7/5
12	22	100	59/4	0/11	6/5
13	15	100	59/4	0/1	6/5
14	30	200	52	0/17	11
15	22	200	52	0/17	9
16	15	200	52	0/15	7
17	30	300	52	0/23	13
18	15	300	52	0/19	8
19	22	300	52	0/22	10/5
20	30	400	52	0/26	15
21	15	400	52	0/22	10
22	22	400	52	0/25	12
23	36	100	52	0/13	8
24	22	100	52	0/11	6/5
25	15	100	52	0/1	6/2
26	30	100	52	0/12	7/5
27	30	200	52	0/17	10
28	15	200	52	0/15	6/5
29	22	200	52	0/17	8/5
30	30	400	52	0/27	15
31	15	400	52	0/22	10
32	22	400	52	0/25	12
33	33	300	52	0/25	13/5
34	22	300	52	0/21	10/5
35	15	300	52	0/19	8
36	30	300	52	0/24	13
37	33	100	52	0/13	8
38	15	100	52	0/1	6/3
39	22	100	52	0/11	6/5
40	30	100	52	0/13	7/5
41	30	200	45/75	0/23	11
42	15	200	45/75	0/17	7
43	22	200	45/75	0/2	9
44	35	100	45/75	0/15	8/5
45	15	100	45/75	0/11	6/3
46	22	100	45/75	0/12	6/7
47	30	100	45/75	0/14	8

ادامه جدول 4-9- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش نمونه سنگ‌های نرم

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش سیستم (RMS)	شدت جریان مصرفی (A)	
MHA	35	300	45/75	0/28	15	48
MHA	15	300	45/75	0/23	8/5	49
MHA	22	300	45/75	0/25	11	50
MHA	30	300	45/75	0/27	14	51
MHA	30	400	45/75	0/34	15/5	52
MHA	22	400	45/75	0/3	13	53
MHA	15	400	45/75	0/28	10	54
MHAF*	30	200	34/2	0/25	13	55
MHAF	15	200	34/2	0/21	8	56
MHAF	22	200	34/2	0/23	10/5	57
MHAF	30	300	34/2	0/28	16	58
MHAF	15	300	34/2	0/24	11	59
MHAF	22	300	34/2	0/25	13	60
MHAF	33	100	34/2	0/16	10	61
MHAF	15	100	34/2	0/13	6/3	62
MHAF	22	100	34/2	0/14	7/5	63
MHAF	30	100	34/2	0/16	9	64
MHAF	33	400	34/2	0/4	19	65
MHAF	15	400	34/2	0/3	11	66
MHAF	22	400	34/2	0/33	14	67
MHAF	30	400	34/2	0/37	17	68
MSA*	15	200	45/75	0/24	8	69
MSA	22	200	45/75	0/27	9	70
MSA	30	200	45/75	0/28	11	71
MSA	15	300	45/75	0/28	8/5	72
MSA	22	300	45/75	0/31	11	73
MSA	30	300	45/75	0/32	14	74
MSA	15	400	45/75	0/3	10/5	75
MSA	22	400	45/75	0/33	13	76
MSA	30	400	45/75	0/36	16	77
MSA	35	100	45/75	0/17	9	78
MSA	30	100	45/75	0/15	8	79
MSA	15	100	45/75	0/13	6/3	80
MSA	22	100	45/75	0/14	7	81
MAN*	30	200	45/75	0/21	11	82
MAN	22	200	45/75	0/19	9	83
MAN	15	200	45/75	0/17	7	84
MAN	30	300	45/75	0/27	14	85
MAN	15	300	45/75	0/23	9	86

ادامه جدول 4-9- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش نمونه سنگ‌های نرم

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش سیستم (RMS)	شدت جریان مصرفی (A)
MAN	22	300	45/75	0/26	11
MAN	30	400	45/75	0/33	16
MAN	15	400	45/75	0/27	11
MAN	22	400	45/75	0/31	13
MAN	15	100	45/75	0/12	6/5
MAN	30	100	45/75	0/15	8
MAN	22	100	45/75	0/14	7
MAN	35	100	45/75	0/16	9
TGH	30	200	59/4	0/14	8/9
MAN	35	400	45/75	0/36	19/5
MAN	35	300	45/75	0/3	18
MAN	35	200	45/75	0/24	12/2
MSA	32	400	45/75	0/38	18
MSA	32	300	45/75	0/35	15/5
MSA	32	200	45/75	0/3	14
MHAF	33	300	34/2	0/29	19/5
MHA	35	400	45/75	0/38	23
MHAF	33	200	34/2	0/27	14
MHA	35	200	45/75	0/29	13
TDA	33	400	52	0/28	16/5
TGH	30	300	59/4	0/23	12
TDA	33	200	52	0/18	11
THA	36	400	52	0/27	20
THA	36	300	52	0/24	22
THA	36	200	52	0/18	12
TGH	30	400	59/4	0/23	12/5

*TGH: تراورتن قرمز آدرشهر، THA: تراورتن حاجی آباد، TDA: تراورتن دره بخاری، MHAF: مرمریت هفتومان، MHA: مرمریت هرسین، MSA: مرمریت صلصالی، MAN: مرمریت انارک

جدول 4-10- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش نمونه سنگ‌های سخت

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش سیستم (RMS)	شدت جریان مصرفی (A)
N*	34	200	28/35	0/33	13/5
N	24	200	28/35	0/26	11
N	30	200	28/35	0/27	12/5
N	18	300	28/35	0/28	9/5
N	24	300	28/35	0/3	13
N	30	300	28/35	0/31	15
N	36	350	28/35	0/36	23/5

ادامه جدول 4-10- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش نمونه سنگ‌های سخت

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش سیستم (RMS)	شدت جریان مصرفی (A)
8	18	350	28/35	0/33	10/5
9	35	375	28/35	0/35	28
10	17/5	375	28/35	0/3	10/5
11	24	400	28/35	0/36	15
12	30	400	28/35	0/37	18
13	34	400	28/35	0/38	20
14	18	425	28/35	0/35	11/5
15	18	450	28/35	0/42	15
16	24	100	28/35	0/18	7/5
17	30	100	28/35	0/19	8
18	36	100	28/35	0/16	8/5
19	18	100	28/35	0/21	7/5
20	30	200	27/5	0/31	12/5
21	35	200	27/5	0/28	14
22	24	200	27/5	0/26	11
23	15	300	27/5	0/26	9
24	24	300	27/5	0/3	13
25	35	300	27/5	0/33	17
26	15	350	27/5	0/26	10
27	30	350	27/5	0/35	18
28	30	375	27/5	0/21	17
29	16	375	27/5	0/28	12/5
30	35	400	27/5	0/38	20
31	30	400	27/5	0/36	18
32	24	400	27/5	0/35	17
33	17/5	425	27/5	0/35	16
34	24	100	27/5	0/17	8
35	17/5	100	27/5	0/27	7/5
36	30	100	27/5	0/18	9
37	35	100	27/5	0/2	10
38	32/5	100	27/5	0/23	9
39	17/5	450	27/5	0/39	16
40	24	200	37/6	0/21	9
41	30	200	37/6	0/23	11
42	30	300	37/6	0/28	13
43	24	300	37/6	0/26	11/5
44	17	300	37/6	0/27	9
45	17	350	37/6	0/25	9/5
46	35	350	37/6	0/36	16/5

ادامه جدول 4-10- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش نمونه سنگ‌های سخت

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش سیستم (RMS)	شدت جریان مصرفی (A)
47	18	375	37/6	0/33	10
48	34	375	37/6	0/19	18
49	30	400	37/6	0/31	15
50	35	400	37/6	0/33	17
51	17/5	400	37/6	0/25	11
52	24	400	37/6	0/3	13
53	17/5	425	37/6	0/36	11/5
54	17/5	450	37/6	0/4	14/5
55	24	100	37/6	0/16	7
56	30	100	37/6	0/17	7/5
57	34	100	37/6	0/22	8
58	16/5	100	37/6	0/16	7
59	16/5	100	43	0/1	7
60	24	100	43	0/13	6/5
61	30	100	43	0/14	7
62	16/5	450	43	0/32	11
63	16/5	425	43	0/25	10
64	16/5	400	43	0/21	9/5
65	24	400	43	0/25	12
66	30	400	43	0/28	14
67	35	400	43	0/3	16
68	33	375	43	0/33	17/5
69	16/5	375	43	0/2	8/5
70	35	350	43	0/33	15/5
71	17/5	350	43	0/24	8/5
72	30	200	22/1	0/2	10
73	24	200	22/1	0/2	9
74	24	300	22/1	0/24	11
75	30	300	22/1	0/25	12
76	18	300	22/1	0/24	8/5
77	35	200	22/1	0/31	15
78	30	200	22/1	0/3	14
79	24	200	22/1	0/29	12
80	17	300	22/1	0/3	11
81	24	300	22/1	0/34	15
82	30	300	22/1	0/37	17
83	17	350	22/1	0/4	11/5
84	35	350	22/1	0/35	28
85	17	375	22/1	0/38	12/5

ادامه جدول 4-10- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش نمونه سنگ‌های سخت

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش سیستم (RMS)	شدت جریان مصرفی (A)	
86	35	375	22/1	0/34	19	YA
87	30	400	22/1	0/43	20	YA
88	35	400	22/1	0/45	23	YA
89	24	400	22/1	0/4	18	YA
90	17/5	425	22/1	0/43	14/5	YA
91	17/5	450	22/1	0/49	18	YA
92	30	100	22/1	0/22	9	YA
93	24	100	22/1	0/2	8/5	YA
94	17/5	100	22/1	0/17	7/5	YA
95	35	100	22/1	0/16	9	YA
96	35	300	22/1	0/34	23	YA
97	17	200	28/35	0/24	9	N
98	36	300	28/35	0/32	16	N
99	18	400	28/35	0/35	12	N
100	15	200	27/5	0/33	9	CH
101	30	300	27/5	0/3	14	CH
102	17/5	400	27/5	0/46	17	CH
103	17	200	37/6	0/16	8	KH
104	35	200	37/6	0/28	12/5	KH
105	35	300	37/6	0/26	13/5	KH
106	33	100	43	0/15	7/5	MO
107	17/5	200	43	0/24	8	MO
108	35	200	43	0/24	11	MO
109	34	300	43	0/26	13/5	MO
110	17	200	22/1	0/31	9	YA
111	17/5	400	22/1	0/45	14/5	YA

*YA: گرانیت قرمز یزد، MO: گرانیت مروارید مشهد، KH: گرانیت خرمدره، CH: گرانیت چایان، N: گرانیت نهبندان

4-2-3-2- مشخصات قطعه کار (سنگ)

نمونه سنگ‌های مطالعه شده در این تحقیق شامل دو گروه از سنگ‌های ساختمانی متشکل از 7 نوع سنگ ساختمانی نرم و 5 نوع سنگ ساختمانی سخت بودند. برای انجام مطالعات آزمایشگاهی و تعیین پارامترهای مورد نظر، در مجموع از هر نمونه سنگ، بلوک‌های سنگی تهیه و سپس به آزمایشگاه منتقل شدند. کلیه آزمایش‌ها تحت استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1981) و با دقت بالا انجام شده است. برای بررسی و اطلاع دقیق از مشخصات کانی‌شناسی یک مقطع نازک از بخش تیپیک سنگ‌های مورد مطالعه تهیه شد و مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه‌ای از مقطع نازک تهیه شده برای

مطالعه، در شکل 4-16 نشان داده شده است. با استفاده از این مقطع نوع و درصد کانی‌های تشکیل دهنده، میزان کوارتز محتوی معادل هر سنگ برای تعیین مشخصات ساینده‌گی و سختی محاسبه شدند. نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی شامل مشخصات مکانیکی و فیزیکی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه در آزمایشگاه در جدول 4-11 آورده شده است.



شکل 4-16- فرمت دیجیتالی از مقطع نازک متعلق به نمونه سنگ گرانیت چایان

جدول 4-11- مشخصات مکانیکی و فیزیکی سنگ‌های مورد مطالعه

نام معدن	نوع و نام سنگ	EQC (%)	BTS (MPa)	GS (mm)	MH (n)	YM (GPa)	UCS (MPa)	SF-a (N/mm)
قلعه خرگوشی	گرانیت قرمز	57/65	8/52	2/9	6/1	43/6	142	14/24
چایان	گرانیت مشکی	60/06	15	0/87	6/6	48/6	173	7/6
نه‌بندان	گرانیت سفید	64/3	9/2	4/1	5/95	35/5	145	24/25
خوش طینت	گرانیت شکلاتی خرمدره	32/2	8/3	3/9	5/65	28/9	133	10/42
گرانیت خاتم	گرانیت مروارید	30/3	7/4	3/8	5/6	31/2	125	8/5
ذوالفقار علی (ع)	مرمریت کرم هرسین	3/6	6/8	0/55	3/5	32/5	71/5	0/135
گل سنگ	مرمریت صورتی انارک	3/4	7/1	0/45	3/2	33/6	74/5	0/109
آذرشهر	تراورتن قرمز	2/8	4/3	1/01	2/9	20/7	53	0/122
حاجی آباد	تراورتن حاجی آباد	2/6	5/6	0/85	2/9	21	61/5	0/124
دره بخاری	تراورتن دره بخاری	2/7	5/4	0/87	2/95	23/5	63	0/127
صلصالی	مرمریت صلصالی	3/2	6/3	0/52	3/1	31/6	73	0/105
هفتومان	مرمریت صورتی هفتومان	4	7/2	0/6	3/6	35/5	74/5	0/173

EQC: کوارتز محتوی، BTS: مقاومت کششی، GS: اندازه دانه‌ها، MH: سختی موس، YM: مدول الاستیسیته، UCS: مقاومت فشاری تک محوری،

SF-a: فاکتور ساینده‌گی شیمارک

4-4- طبقه‌بندی سنگ‌های ساختمانی با استفاده از سیستم طبقه‌بندی جدید

در این بخش از تحقیق به بررسی و طبقه‌بندی سنگ‌های ساختمانی با استفاده از سیستم طبقه‌بندی جدید پرداخته می‌شود. برای این منظور پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی و تعیین شاخص قابلیت برش هر یک از نمونه سنگ‌های مورد مطالعه، طبقه‌بندی آن‌ها در دو گروه از سنگ‌های سخت و نرم با استفاده از سیستم طبقه‌بندی جدید انجام شد. نتایج حاصل از این طبقه‌بندی به ترتیب در جدول‌های 12-4 و 13-4 برای دو گروه از سنگ‌های مورد مطالعه سخت و نرم آورده شده است.

جدول 12-4- طبقه‌بندی سنگ‌های ساختمانی متعلق به گروه سخت بر اساس شاخص قابلیت برش

سنگ‌های مورد مطالعه	شاخص قابلیت برش (RSi)
1 گرانیت قرمز یزد	22/1
2 گرانیت مشکی چایان	27/5
3 گرانیت سفید نهبندان	28/35
4 گرانیت شکلاتی خرمده	37/6
5 گرانیت مروارید مشهد	43

جدول 13-4- طبقه‌بندی سنگ‌های ساختمانی متعلق به گروه نرم بر اساس شاخص قابلیت برش

سنگ‌های مورد مطالعه	شاخص قابلیت برش (RSi)
1 مرمریت صورتی هفتومان	34/2
2 مرمریت صورتی انارک	45/75
3 مرمریت کرم هرسین	45/75
4 مرمریت صلصالی	45/75
5 تراورتن دره بخاری	52
6 تراورتن حاجی آباد	52
7 تراورتن قرمز	59/4

نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داد که در گروه سنگ‌های سخت، نمونه سنگ گرانیت قرمز یزد و در گروه سنگ‌های نرم، نمونه سنگ مرمریت هفتومان، کمترین مقدار شاخص قابلیت برش را در میان سنگ‌های مورد مطالعه دارا می‌باشند. در نقطه مقابل دو نمونه سنگ گرانیت مشهد و تراورتن قرمز آذرشهر به ترتیب بیشترین مقدار شاخص قابلیت برش را در نمونه سنگ‌های سخت و نرم دارا بودند. به عبارت دیگر

این دو نمونه سنگ از دیدگاه قابلیت برش دارای برش پذیری بهتری نسبت به سایر سنگ‌های مورد مطالعه می‌باشند.

4-4-1- ارزیابی و بررسی سیستم طبقه‌بندی جدید در طبقه‌بندی سنگ‌های ساختمانی

در این بخش از تحقیق به بررسی و ارزیابی سیستم طبقه‌بندی پرداخته می‌شود. برای این منظور سیستم طبقه‌بندی توسط معیارهایی از قبیل نرخ تولید، مصرف انرژی، ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم و سایش ابزار مورد ارزیابی و تحقیق قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها در جدول‌های 4-14 تا 4-20 آورده شده است. لازم به ذکر است که قسمت‌های هاشور خورده در برخی از خانه‌های این جداول به معنی این است که سیستم طبقه‌بندی به درستی قابلیت برش سنگ‌های مورد مطالعه را پیش‌بینی کرده است. به عبارت دیگر طبقه‌بندی سنگ‌ها در خانه‌های هاشور خورده به درستی انجام شده است.

جدول 4-14- طبقه‌بندی سنگ‌های سخت مورد مطالعه بر اساس شاخص قابلیت برش (نرخ تولید)

گزینه‌ها	شاخص قابلیت برش (RSi)	نرخ تولید (m ² /h)
1 گرانیت قرمز یزد	22/1	5/5
2 گرانیت مشکی چایان	27/5	5
3 گرانیت سفید نهبندان	28/35	5
4 گرانیت شکلاتی خرمده	37/6	6
5 گرانیت مروارید مشهد	43	6/5

جدول 4-15- طبقه‌بندی سنگ‌های نرم مورد مطالعه بر اساس شاخص قابلیت برش (نرخ تولید)

گزینه‌ها	شاخص قابلیت برش (RSi)	نرخ تولید (m ² /h)
1 مرمریت صورتی هفتومان	34/2	8
2 مرمریت صورتی انارک	45/75	9
3 مرمریت کرم هرسین	45/75	8/5
4 مرمریت صصلالی	45/75	9
5 تراورتن دره بخاری	52	10
6 تراورتن حاجی آباد	52	10
7 تراورتن قرمز	59/4	11

بررسی‌ها نشان می‌دهد که طبقه‌بندی انجام شده در هر دو گروه از سنگ‌های مورد مطالعه تنها در یک مورد (نمونه سنگ گرانیت قرمز یزد و مرمریت هرسین به ترتیب از گروه سنگ‌های سخت و نرم) با مقادیر محاسبه شده نرخ تولید مطابقت ندارد. لازم به ذکر است که سه نمونه سنگ مرمریت صورتی انارک، کرم هرسین و صلصالی دارای مقادیر یکسان شاخص قابلیت برش می‌باشند که با جابجایی دو نمونه سنگ مرمریت هرسین و صورتی انارک، ترتیب طبقه‌بندی ارائه شده برای نمونه سنگ‌های نرم با مقدار نرخ تولید، مطابقت خوبی پیدا خواهد کرد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان ادعا کرد که سیستم طبقه‌بندی جدید با دقت خوبی (بیش از 80 درصد از موارد) به درستی قابلیت برش سنگ‌های مورد مطالعه را پیش‌بینی کرده است.

همان‌طوری که در این تحقیق به آن اشاره شد، معیارهای مختلفی برای ارزیابی و بررسی سیستم طبقه‌بندی جدید موجود می‌باشد. یکی دیگر از معیارهای عملکرد برش، نرخ سایش ابزارهای الماسی می‌باشد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها برای نمونه سنگ‌های سخت در جدول 4-16 آورده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که شاخص قابلیت برش سنگ تنها به جز یک مورد (نمونه سنگ گرانیت نه‌بندان)، به‌خوبی توانسته است سنگ‌های مورد مطالعه را از دیدگاه سایش ابزار الماسی مورد طبقه‌بندی قرار دهد.

جدول 4-16- طبقه‌بندی سنگ‌های سخت مورد مطالعه بر اساس شاخص قابلیت برش (نرخ سایش)

گزینه‌ها	شاخص قابلیت برش (RSi)	نرخ سایش (mm/h)
1 گرانیت قرمز یزد	22/1	0/655
2 گرانیت مشکی چایان	27/5	0/495
3 گرانیت سفید نه‌بندان	28/35	0/58
4 گرانیت شکلاتی خرمد	37/6	0/336
5 گرانیت مروارید مشهد	43	0/268

یکی دیگر از معیارهای به‌کار گرفته شده برای بررسی و ارزیابی عملکرد سیستم طبقه‌بندی، میزان مصرف انرژی یا به عبارت دیگر شدت جریان برق مصرفی دستگاه برش می‌باشد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها برای دو گروه از سنگ‌های مورد مطالعه در جدول‌های 4-17 و 4-18 آورده شده است. با بررسی نتایج حاصل از طبقه‌بندی نمونه

سنگ‌های سخت می‌توان ادعا کرد که سیستم طبقه‌بندی با دقت بالایی توانسته است قابلیت برش سنگ‌های مورد مطالعه را از دیدگاه مصرف انرژی مورد ارزیابی قرار دهد. همان‌طوری که در جدول 4-17 نشان داده شده است، سیستم طبقه‌بندی در تمامی حالت‌ها به جز حالت C (شرایط عملیاتی نرخ پیشروی 300 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 30 میلی‌متر) به‌خوبی سنگ‌های مورد مطالعه را از نظر نرخ مصرف انرژی مورد طبقه‌بندی قرار داده است. به عبارت دیگر سیستم طبقه‌بندی در بیش از 97 درصد موارد به‌خوبی توانسته قابلیت برش سنگ‌های سخت مورد مطالعه را پیش‌بینی کند. این در حالی است که دقت تخمین این معیار برای نمونه سنگ‌های نرم کمتر از نمونه سنگ‌های سخت می‌باشد.

جدول 4-17- طبقه‌بندی سنگ‌های سخت مورد مطالعه بر اساس شاخص قابلیت برش (نرخ مصرف انرژی)

گزینه‌ها	شاخص قابلیت برش (RSi)	نرخ مصرف انرژی (I)							
		A	B	C	D	E	F	G	H
1	گرانیت قرمز یزد	20	18	17	15	14	12	9	8/5
2	گرانیت مشکی چایان	18	17	14	13	12/5	11	9	8
3	گرانیت سفید نهبندان	18	15	15	13	12/5	11	8	7/6
4	گرانیت شکلاتی خرمد	15	13	13	11/5	11	9	7/5	7
5	گرانیت مروارید مشهد	14	12	12	11	10	9	7	6/5

A نرخ پیشروی 400 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 30 میلی‌متر، B نرخ پیشروی 400 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 24 میلی‌متر، C نرخ پیشروی 300 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 30 میلی‌متر، D نرخ پیشروی 300 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 24 میلی‌متر، E نرخ پیشروی 200 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 30 میلی‌متر، F نرخ پیشروی 200 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 24 میلی‌متر، G نرخ پیشروی 100 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 30 میلی‌متر، H نرخ پیشروی 100 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 24 میلی‌متر

جدول 14-18- طبقه‌بندی سنگ‌های نرم مورد مطالعه بر اساس شاخص قابلیت برش (نرخ مصرف انرژی)

گزینه‌ها	شاخص قابلیت برش (RSi)	نرخ مصرف انرژی (I)							
		I	J	K	L	M	N	O	P
1	مرمریت صورتی هفتومان	14	11	13	11	10/5	8	7/5	6/3
2	مرمریت صورتی انارک	13	11	11	9	9	7	7	6/5
3	مرمریت کرم هرسین	13	10	11	8/5	9	7	6/7	6/3
4	مرمریت صلاصالی	13	10/5	11	8/5	9	8	7	6/3
5	تراورتن دره بخاری	12	10	10/5	8	8/5	6/5	6/5	6/3
6	تراورتن حاجی آباد	12	10	10/5	8	9	7	6/5	6/2
7	تراورتن قرمز	11	9	10	8	8	7	6/5	6/2

I نرخ پیشروی 400 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 22 میلی‌متر، J نرخ پیشروی 400 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 15 میلی‌متر، K نرخ پیشروی 300 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 22 میلی‌متر، L نرخ پیشروی 300 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 15 میلی‌متر، M نرخ پیشروی 200 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 22 میلی‌متر، N نرخ پیشروی 200 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 15 میلی‌متر، O نرخ پیشروی 100 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 22 میلی‌متر، P نرخ پیشروی 100 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 15 میلی‌متر

یکی دیگر از معیارهای به کار گرفته شده برای ارزیابی سیستم طبقه‌بندی، ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده در این بخش در جدول‌های 4-19 و 4-20 آورده شده است.

جدول 4-19- طبقه‌بندی سنگ‌های سخت مورد مطالعه بر اساس شاخص قابلیت برش (ارتعاش‌های سیستم)

گزینه‌ها	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش‌های سیستم (RMSa)							
		A	B	C	D	E	F	G	H
1	گرانیت قرمز یزد	0/43	0/4	0/37	0/34	0/3	0/29	0/22	0/2
2	گرانیت مشکی چایان	0/36	0/35	0/3	0/3	0/31	0/26	0/18	0/17
3	گرانیت سفید نهبندان	0/37	0/36	0/31	0/3	0/27	0/26	0/19	0/18
4	گرانیت شکلاتی خرمد	0/31	0/3	0/28	0/26	0/23	0/21	0/17	0/16
5	گرانیت مروارید مشهد	0/28	0/25	0/25	0/24	0/2	0/2	0/14	0/13

A نرخ پیشروی 400 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 30 میلی‌متر، B نرخ پیشروی 400 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 24 میلی‌متر، C نرخ پیشروی 300 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 30 میلی‌متر، D نرخ پیشروی 300 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 24 میلی‌متر، E نرخ پیشروی 200 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 30 میلی‌متر، F نرخ پیشروی 200 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 24 میلی‌متر، G نرخ پیشروی 100 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 30 میلی‌متر، H نرخ پیشروی 100 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 24 میلی‌متر

جدول 4-20- طبقه‌بندی سنگ‌های نرم مورد مطالعه بر اساس شاخص قابلیت برش (ارتعاش‌های سیستم)

گزینه‌ها	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش‌های سیستم (RMSa)							
		I	J	K	L	M	N	O	P
1	مرمریت صورتی هفتومان	0/33	0/3	0/25	0/24	0/23	0/21	0/14	0/13
2	مرمریت صورتی انارک	0/31	0/27	0/26	0/23	0/19	0/17	0/14	0/12
3	مرمریت کرم هرسین	0/3	0/28	0/25	0/23	0/2	0/17	0/12	0/11
4	مرمریت صلصالی	0/33	0/3	0/31	0/28	0/27	0/24	0/14	0/13
5	تراورتن دره بخاری	0/25	0/22	0/21	0/19	0/17	0/15	0/11	0/1
6	تراورتن حاجی آباد	0/25	0/22	0/22	0/19	0/17	0/15	0/11	0/1
7	تراورتن قرمز	0/23	0/21	0/2	0/17	0/14	0/13	0/11	0/1

I نرخ پیشروی 400 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 22 میلی‌متر، J نرخ پیشروی 400 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 15 میلی‌متر، K نرخ پیشروی 300 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 22 میلی‌متر، L نرخ پیشروی 300 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 15 میلی‌متر، M نرخ پیشروی 200 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 22 میلی‌متر، N نرخ پیشروی 200 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 15 میلی‌متر، O نرخ پیشروی 100 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 22 میلی‌متر، P نرخ پیشروی 100 سانتی‌متر بر دقیقه و عمق برش 15 میلی‌متر

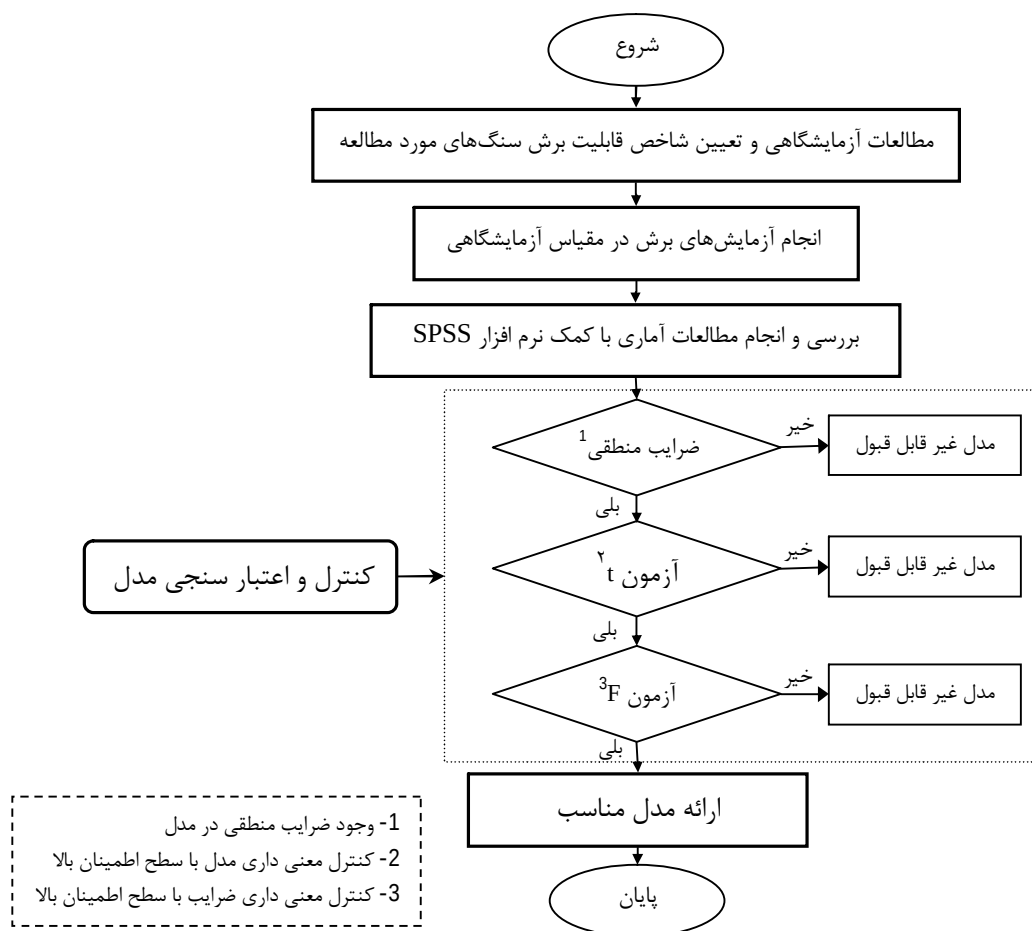
نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که سیستم طبقه‌بندی در 85 درصد موارد برای نمونه سنگ‌های سخت و 80 درصد برای نمونه سنگ‌های نرم به‌خوبی میزان قابلیت برش سنگ‌ها را از نظر ارتعاش‌های سیستمی طبقه‌بندی کرده است. در حالت خوشبینانه و با در نظر گرفتن مقادیر یکسان شاخص قابلیت برش برای سه نمونه سنگ مرمریتی می‌توان ادعا کرد که سیستم طبقه‌بندی با دقت نسبتاً خوبی میزان ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم را برای هر دو گروه از سنگ‌های ساختمانی سخت و نرم پیش‌بینی کرده است.

در مجموع با توجه به بررسی‌های به عمل آمده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که سیستم طبقه‌بندی جدید در اکثر موارد به خوبی توانسته است میزان عملکرد برش سنگ‌های ساختمانی مورد مطالعه را مورد ارزیابی و پیش‌بینی قرار دهد.

4-4-2- پیش‌بینی عملکرد برش سنگ‌های ساختمانی با استفاده از مطالعات آماری

پیش‌بینی و ارزیابی عملکرد برش سنگ‌های ساختمانی می‌تواند یکی از گام‌های مهم و اساسی در شناخت هرچه بیشتر فرایند و همچنین ارزیابی توانایی اجرایی دستگاه‌های برش باشد. برای دستیابی به این هدف سعی شد تا در این بخش از تحقیق به بررسی ارتباط میان مشخصات سنگ و عملکرد برش با کمک تحلیل‌های آماری پرداخته شود. همان‌طوری که پیشتر به آن اشاره شد شاخص قابلیت برش سنگ می‌تواند نماینده‌ی خوبی از مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ در فرایند برش سنگ‌های ساختمانی باشد. از جمله کاربردهای مهم این شاخص در کنار پارامترهای ماشین، می‌توان به پیش‌بینی معیارهای ارزیابی عملکرد برش سنگ شامل، شدت جریان مصرفی دستگاه برش و ارتعاش‌های به‌وجود آمده در سیستم اشاره کرد. در این بخش از تحقیق تلاش می‌شود تا به این مهم، با استفاده از تحلیل‌های آماری دست پیدا کرد.

به منظور ارائه مدل‌های آماری برای پیش‌بینی و ارزیابی عملکرد برش مراحل مختلفی مطابق با فلوچارت شکل 4-17 انجام شد. همان‌طوری که در این شکل نشان داده شده است در مرحله نخست پس از انجام آزمایش‌های مربوطه و تعیین پارامترهای مورد نظر، مقدار شاخص قابلیت برش برای هر یک از نمونه سنگ‌های مورد مطالعه توسط سیستم طبقه‌بندی تعیین گردید. در مرحله بعد آزمایش‌های برش بر روی نمونه سنگ‌های مورد نظر با استفاده از یک دستگاه برش در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی و تهیه یک جامعه آماری مناسب، مطالعات آماری با کمک نرم افزار SPSS بر روی این جامعه آماری انجام شد. در انتها نیز صحت و سقم هر یک از مدل‌ها توسط آزمون‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. در طول انجام مطالعات آماری، پارامترهای ماشین‌کاری (عمق برش و نرخ پیشروی) و شاخص قابلیت برش سنگ به عنوان متغیرهای مستقل و پارامترهای شدت جریان مصرفی دستگاه و ارتعاش به وجود آمده در سیستم به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شدند.



شکل 4-17- مراحل مختلف انجام مطالعات آماری

4-4-2-1- ارائه مدل‌های آماری

در این بخش از تحقیق، ارتباط میان شدت جریان مصرفی دستگاه برش و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم با شاخص قابلیت برش و پارامترهای ماشین‌کاری با استفاده از برازش چند متغیره، توسط نرم افزار آماری SPSS مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. بدین ترتیب پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی، مدل‌های آماری مناسب برای پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم با توجه به پارامترهای ماشین‌کاری و شاخص قابلیت برش ارائه شد. همانطوری که پیشتر به آن اشاره شد پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی در کل در حدود 223 (112 و 111 نمونه تست به ترتیب برای دو گروه از سنگ‌های مطالعه شده نرم و سخت) نمونه آزمایش تحت شرایط مختلف ماشین‌کاری ثبت شد. که از این تعداد آزمایش، بخشی برای ساخت و طراحی مدل (داده‌های آموزش) و بخشی دیگر برای آزمون مدل

(داده‌های آزمون) مورد استفاده قرار گرفت (نمونه آزمایش‌های در نظر گرفته شده برای آموزش و آزمون مدل به تفکیک در پیوست شماره 2 آورده شده است). داده‌های آموزش پس از جمع‌بندی در نرم افزار Excel، در دو بخش (داده‌های مربوط به شدت جریان مصرفی دستگاه و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم) به عنوان ورودی به نرم افزار SPSS داده شد. در بررسی‌های انجام شده توسط این نرم افزار، ریشه‌ی دوم متوسط مربعات سیگنال‌های ارتعاشی و شدت جریان مصرفی دستگاه برش به عنوان متغیر وابسته و پارامترهای ماشین‌کاری و شاخص قابلیت برش به عنوان پارامترهای مستقل برای هر دو گروه از سنگ‌های مورد مطالعه در نظر گرفته شد.

بدین ترتیب پس از انجام مراحل محاسباتی در نرم افزار، مدل‌های آماری برای پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش و سیگنال‌های ارتعاشی برای هر دو گروه از سنگ‌های گرانیته و کربناته به صورت زیر ارائه گردید:

$$I_G = \frac{D_c^{0.66} \times F_r^{0.494}}{10^{0.297} \times RSi^{0.488}} \quad \text{مدل (1)}$$

$$I_C = \frac{D_c^{0.541} \times F_r^{0.432}}{10^{0.077} \times RSi^{0.402}} \quad \text{مدل (2)}$$

$$RMSa_C = \frac{D_c^{0.287} \times F_r^{0.585}}{10^{1.296} \times RSi^{0.692}} \quad \text{مدل (3)}$$

$$RMSa_G = \frac{D_c^{0.15} \times F_r^{0.448}}{10^{1.013} \times RSi^{0.563}} \quad \text{مدل (4)}$$

در مدل‌های بالا I_G و I_C به ترتیب معرف شدت جریان مصرفی برای سنگ‌های کربناته و گرانیته بر حسب آمپر، $RMSa_C$ و $RMSa_G$ به ترتیب معرف سیگنال‌های ارتعاشی برای سنگ‌های کربناته و گرانیته بر حسب گرانش زمین، D_c عمق برش بر حسب میلی‌متر، F_r نرخ پیشروی بر حسب سانتی‌متر بر دقیقه و RSi نیز معرف شاخص قابلیت برش می‌باشند. با استفاده از مدل‌های مذکور می‌توان به

دیدگاه نسبتاً خوبی از میزان مصرف انرژی دستگاه‌های برش و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم با توجه به پارامترهای ماشین‌کاری و شاخص قابلیت برش سنگ دست پیدا کرد.

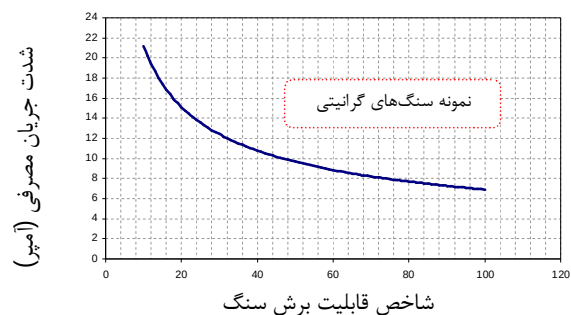
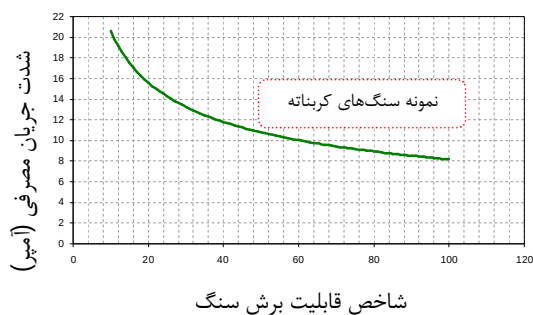
4-2-4-2- اعتبارسنجی مدل‌ها

در این بخش از تحقیق به کنترل و اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده پرداخته می‌شود. به منظور بررسی صحت و سقم هر یک از مدل‌ها ابتدا از آزمون‌های آماری استفاده گردید و سپس روند منطقی و طبیعی هر یک از متغیرهای مدل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از بررسی‌های آماری در جدول 4-21 نشان داده شده است. همانطور که در این جدول نشان داده شده است، برای کنترل معنی‌داری مدل‌ها از آزمون F و برای کنترل معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل، از آزمون t استفاده شده است. با توجه به این که مقدار F به دست آمده از جدول توزیع با سطح اعتماد 99 درصد بزرگتر از مقدار F به دست آمده از مدل می‌باشد، می‌توان فرضیه صفر را که بیان می‌کند رابطه خطی بین متغیرهای وابسته (شدت جریان مصرفی و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم) و متغیرهای مستقل (عمق برش، نرخ پیشروی و شاخص قابلیت برش سنگ) وجود ندارد را رد کرده و نتیجه‌گیری کرد که حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد. پس از کنترل معنی‌داری کلی مدل با آزمون F ، معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل با آزمون t کنترل می‌شود. با استفاده از این آزمون می‌توان فرضیه صفر بودن هر یک از ضرایب متغیرهای مستقل را آزمایش کرد. از آنجا که مقدار t حاصل از جدول توزیع مربوطه با سطح اعتماد 90 درصد بزرگتر از مقدار t های به دست آمده از متغیرهای مستقل می‌باشد، می‌توان فرضیه صفر بودن ضرایب متغیرهای مستقل را رد کرد.

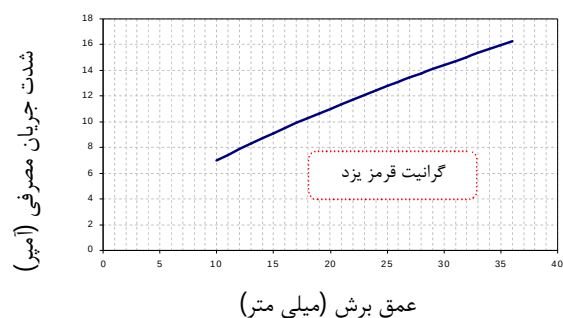
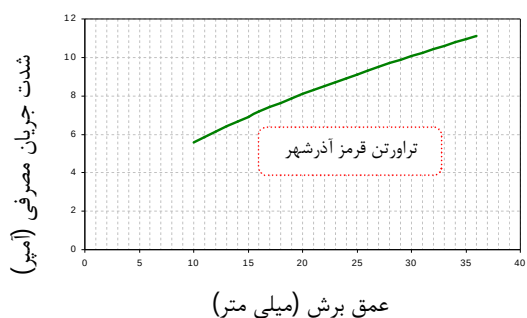
جدول 4-21- نتایج حاصل از بررسی‌های آماری برای مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی شدت جریان مصرفی

مدل	ضرایب توانی	خطای معیار	F	F جدول	t	t جدول	R
مدل (1)	عدد ثابت	-0/297	0/11		-2/67		
	D_c	0/66	0/04	261/8	16/21	1/65	0/95
	F_r	0/494	0/022		22/5		
	RS_i	-0/488	0/048		-10/1		
مدل (2)	عدد ثابت	-0/077	0/076		-2/016		
	D_c	0/541	0/02	696/42	27/154	1/65	0/98
	F_r	0/432	0/011		37/786		
	RS_i	-0/402	0/038		-10/527		
مدل (3)	عدد ثابت	-1/296	0/127		-10/165		
	D_c	0/287	0/034	362/11	8/556	1/65	0/96
	F_r	0/585	0/019		30/471		
	RS_i	-0/692	0/064		-10/775		
مدل (4)	عدد ثابت	-1/013	0/144		-7/056		
	D_c	0/15	0/052	108/97	2/874	1/65	0/89
	F_r	0/448	0/029		15/705		
	RS_i	-0/563	0/062		-9/013		

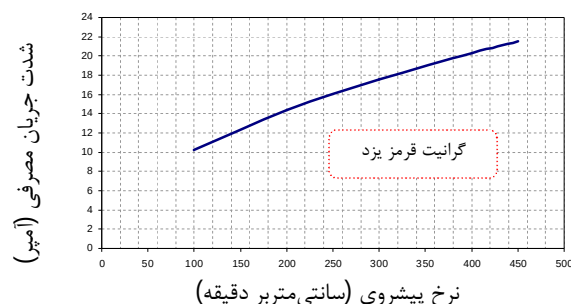
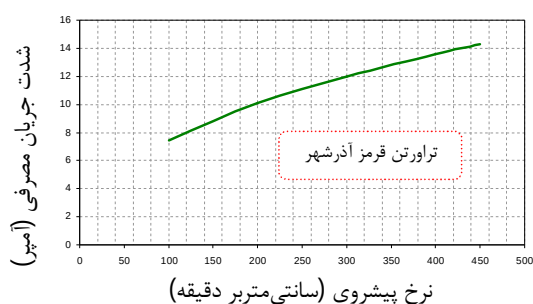
یکی از موارد مهمی را که در بررسی مدل‌های آماری می‌بایست به آن توجه داشت، وجود ضرایب منطقی در مدل می‌باشد. ضرایب منطقی در یک مدل به معنی پیروی مدل از طبیعت ذاتی فرایند می‌باشد. به عبارت دیگر یک مدل آماری زمانی دارای اعتبار علمی می‌باشد که بتواند تحت هر شرایطی، مقادیر درستی از فرایند را پیش‌بینی کند. در تحقیق حاضر، روند طبیعی و منطقی هر یک از مدل‌ها با توجه به طبیعت ذاتی فرایند مورد بررسی قرار گرفت. چگونگی روند این تغییرات نسبت به تغییر هر یک از متغیرهای مدل (شاخص قابلیت برش، عمق برش و نرخ پیشروی) برای مدل‌های شدت جریان مصرفی دستگاه و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم به ترتیب در شکل‌های 4-18 تا 4-23 نشان داده شده است.



شکل 4-18- تغییرات شدت جریان مصرفی نسبت به شاخص قابلیت برش در شرایط ثابت عملیاتی برای سنگ‌های گرانیتی و کربناته



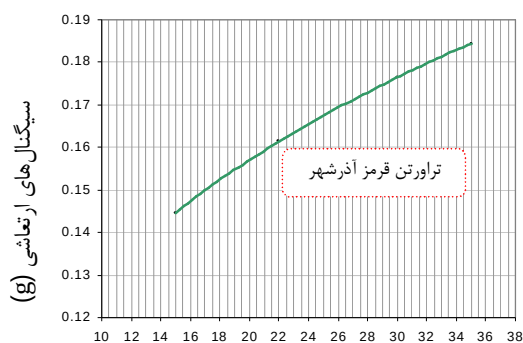
شکل 4-19- تغییرات شدت جریان مصرفی نسبت به عمق‌های مختلف برش برای دو نمونه سنگ گرانیت قرمز یزد و تراورتن آذرشهر



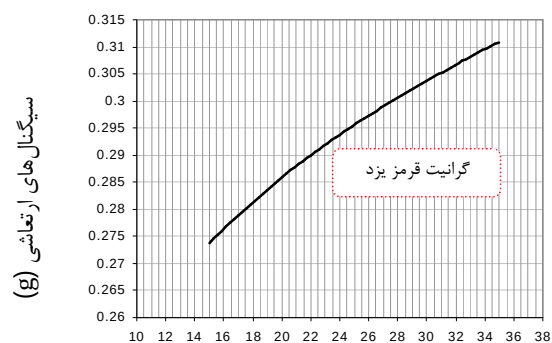
شکل 4-20- تغییرات شدت جریان مصرفی نسبت به نرخ‌های مختلف پیشروی برای دو نمونه سنگ گرانیت قرمز و تراورتن آذرشهر



شکل 4-21- تغییرات سیگنال‌های ارتعاشی نسبت به شاخص قابلیت برش در شرایط ثابت عملیاتی برای سنگ‌های گرانیتی و کربناته

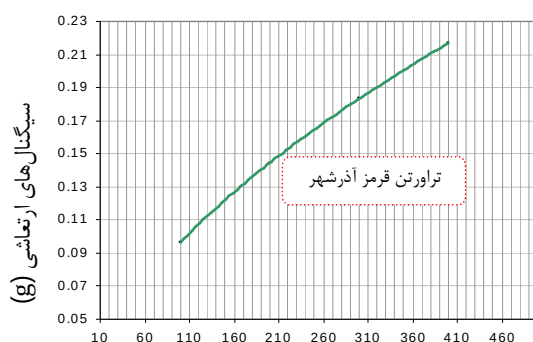


عمق برش (میلی متر)

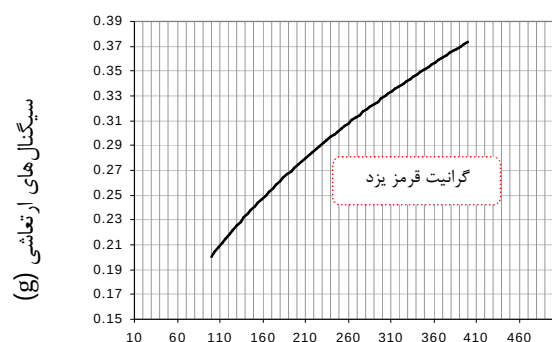


عمق برش (میلی متر)

شکل 4-22- تغییرات سیگنال‌های ارتعاشی نسبت به عمق‌های مختلف برش برای دو نمونه سنگ گرانیت قرمز یزد و تراورتن آذرشهر



نرخ پیشروی (سانتی‌متر بر دقیقه)



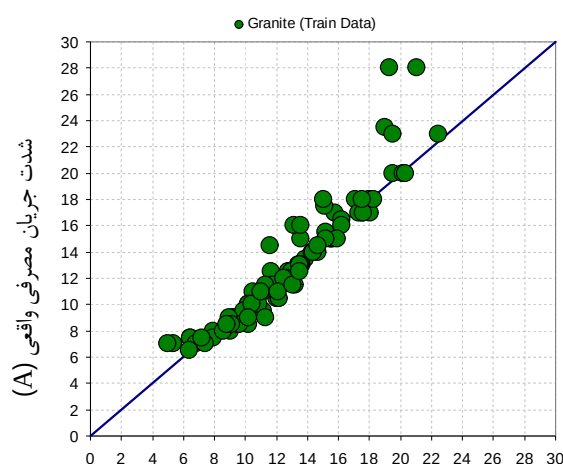
نرخ پیشروی (سانتی‌متر بر دقیقه)

شکل 4-23- تغییرات سیگنال‌های ارتعاشی نسبت به نرخ‌های مختلف پیشروی برای دو نمونه سنگ گرانیت قرمز و تراورتن آذرشهر

آنچه مسلم است با افزایش قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی، میزان برش‌پذیری آن‌ها افزایش یافته و در نتیجه میزان انرژی مصرفی دستگاه و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم کاهش پیدا خواهد کرد. دلیل این امر را می‌توان در مکانیزم و چگونگی تشکیل براده جستجو کرد. به طوری که ضخامت براده یا تراشه سنگ با کاهش مشخصات مقاومتی، سختی و سایندگی سنگ افزایش می‌یابد. با کاهش مشخصات مذکور، عمق نفوذ دانه الماسی افزایش یافته که به دنبال آن شاهد افزایش و رشد ترک‌های جانبی و شعاعی در سنگ خواهیم بود. تشکیل و گسترش این ترک‌ها در سنگ باعث ایجاد براده‌های ثانویه می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش قابلیت برش سنگ، درصد براده‌های ثانویه افزایش می‌یابد تا جایی که حتی حجم عمده‌ای از براده‌های ایجاد شده از نوع براده‌های ثانویه می‌باشند. در کل در اثر گسترش ترک‌های جانبی و تشکیل براده‌های ثانویه عمل برداری راحت‌تر انجام می‌شود و نیروهای

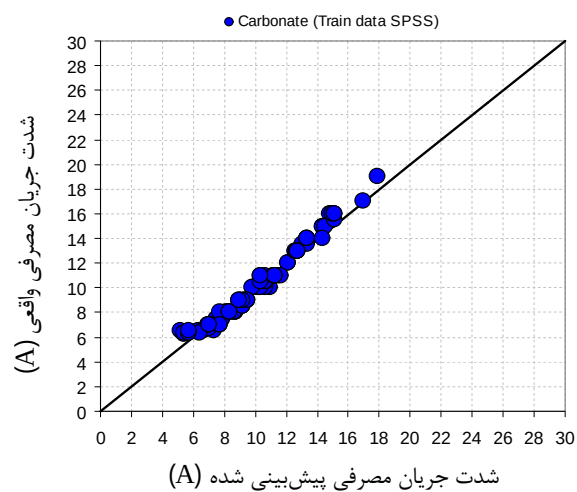
برشی کاهش می‌یابند. به دلیل کاهش این نیروها می‌توان انتظار داشت که میزان شدت جریان مصرفی دستگاه و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم نیز کاهش یابند. همچنین با افزایش عمق برش و نرخ پیشروی، نیروهای فرایند افزایش یافته و با افزایش این نیروها میزان انرژی مصرفی دستگاه و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم نیز افزایش پیدا خواهند کرد. با توجه به توضیحات ارائه شده و نتایج مشاهده شده در شکل‌های 4-18 تا 4-23، می‌توان ادعا کرد که مدل‌های ارائه شده دارای ضرایب منطقی می‌باشند. به عبارت دیگر ضرایب توانی موجود در هر یک از مدل‌ها مطابقت خوبی با طبیعت ذاتی فرایند دارند.

یکی دیگر از روش‌های ارزیابی مدل‌های آماری پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی داده‌های آموزش نسبت به خط نیمساز 1:1 می‌باشد. شکل‌های 4-24 تا 4-27 پراکندگی این نقاط را نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل‌های شدت جریان مصرفی دستگاه و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم نشان می‌دهند. هرچه تراکم این نقاط نسبت به خط نیمساز بیشتر باشند میزان خطای تخمین کمتر بوده و مدل از دقت بهتری برخوردار می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان استنباط کرد که مدل‌ها از دقت خوبی در تخمین و پیش‌بینی مقدار شدت جریان مصرفی و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم برخوردار می‌باشند.

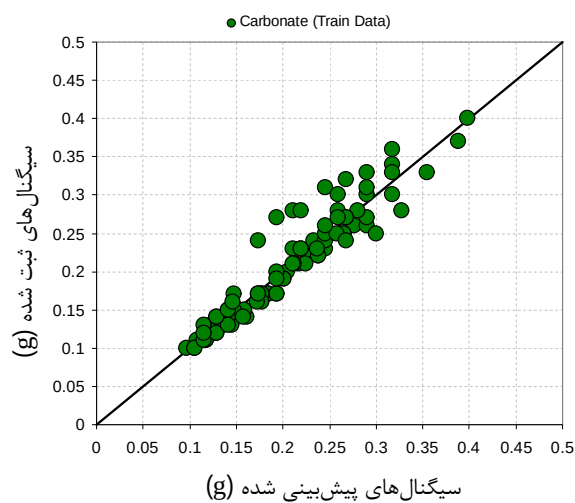


شدت جریان مصرفی پیش‌بینی شده (A)

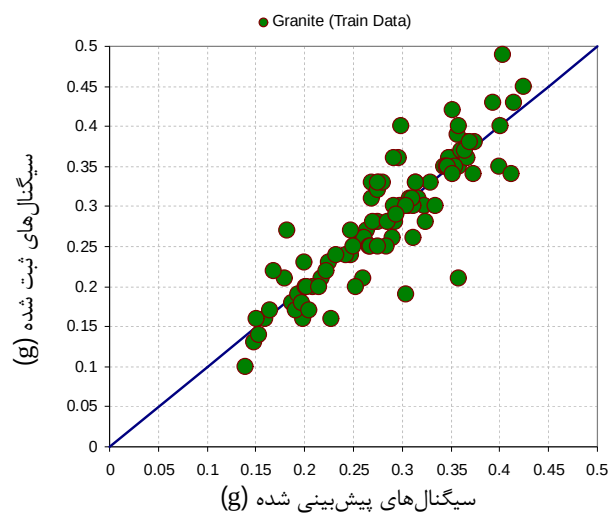
شکل 4-24- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 1



شکل 4-25- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 2



شکل 4-26- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 3



شکل 4-27- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 4

همانطوری که قبلاً به آن اشاره شد، بخشی از داده‌های آزمایشگاهی برای آموزش مدل و بخشی دیگر نیز برای آزمون مدل‌های پیش‌بینی در نظر گرفته شد. در این بخش به بررسی نتایج حاصل از مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی داده‌های آزمون پرداخته می‌شود. مقادیر نقاط پیش‌بینی شده شدت جریان مصرفی دستگاه و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم به همراه خطای نسبی تخمین، به ترتیب برای نمونه سنگ‌های سخت و نرم در جدول‌های 4-22 و 4-23 درج شده است. نتایج مندرج در این جداول نشان می‌دهد که، مدل‌ها از خطای تخمین پایینی در پیش‌بینی میزان ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم و شدت جریان مصرفی دستگاه برخوردار می‌باشند. به طوری که مقادیر متوسط خطای نسبی تخمین هر یک از مدل‌های 1، 2، 3 و 4 به ترتیب برابر با 7/59، 10/65، 13/23 و 12/16 درصد برآورد گردید که با وجود خطاهایی نظیر خطاهای کاربردی، شخصی و خطای محیطی، به نظر می‌رسد این مقدار نسبی خطا برای مدل‌های پیش‌بینی قابل قبول باشد.

جدول 4-22- بررسی خطای داده‌های آزمون برای نمونه سنگ‌های سخت

شماره تست	مقادیر واقعی ارتعاش سیستم (RMS)	مقادیر پیش‌بینی ارتعاش سیستم (RMS)	خطای تخمین (%)	شدت جریان مصرفی واقعی (A)	مقادیر پیش‌بینی شدت جریان (A)	خطای تخمین (%)
1	N*	0/24	0/24	1/03	9	8/8
2	N	0/32	0/33	1/69	16	17/6
3	N	0/35	0/33	4/69	12	12/8
4	CH*	0/33	0/24	26/65	9	8/2
5	CH	0/3	0/32	7/36	14	15/8
6	CH	0/46	0/34	26/54	17	12/8
7	KH*	0/16	0/21	29/26	8	7/6
8	KH	0/28	0/23	17/68	12/5	12/3
9	KH	0/26	0/27	6/31	13/5	15
10	MO*	0/15	0/16	3/52	7/5	7/9
11	MO	0/24	0/19	19/75	8	7/3
12	MO	0/24	0/21	10/95	11	11/5
13	MO	0/26	0/26	1/86	13/5	13/8
14	YA*	0/31	0/28	10/01	9	9/9
15	YA	0/45	0/38	15/07	14/5	14/2

YA*: گرانیت قرمز یزد، MO: گرانیت مروارید مشهد، KH: گرانیت خرمدره، CH: گرانیت چایان، N: گرانیت نهبندان

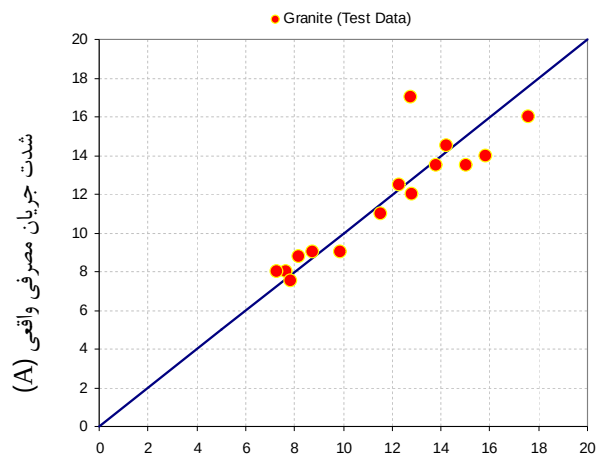
جدول 4-23- بررسی خطای داده‌های آزمون برای نمونه سنگ‌های نرم

شماره تست	مقادیر واقعی ارتعاش سیستم (RMS)	مقادیر پیش‌بینی ارتعاش سیستم (RMS)	خطای تخمین (%)	شدت جریان مصرفی واقعی (A)	مقادیر پیش‌بینی شدت جریان (A)	خطای تخمین (%)
1	TGH*	0/14	0/17	26/02	8/9	10
2	MAN*	0/36	0/33	8/32	19/5	16/3
3	MAN	0/3	0/27	7/03	18	14/4
4	MAN	0/24	0/22	8/32	12/2	12/1
5	MSA*	0/38	0/32	15	18	15/6
6	MSA	0/35	0/27	22/01	15/5	13/8
7	MSA	0/3	0/21	28/23	14	11/6
8	MHAF*	0/29	0/34	16/14	19/5	15/8
9	MHA*	0/38	0/33	12/79	23	16/4
10	MHAF	0/27	0/27	1/6	14	13/2
11	MHA	0/29	0/22	23/82	13	12/2
12	TDA*	0/28	0/30	6/51	16/5	15/1
13	TGH	0/23	0/22	2/76	12	0
14	TDA	0/18	0/2	10/45	11	11/2
15	THA*	0/27	0/31	13/25	20	15/8
16	THA	0/24	0/26	7/67	22	14
17	THA	0/18	0/20	13/24	12	11/7
18	TGH	0/23	0/26	15/07	12/5	13/6

*TGH: تراورتن قرمز آذرشهر، THA: تراورتن حاجی آباد، TDA: تراورتن دره بخاری، MHAF: مرمریت هفتومان، MHA:

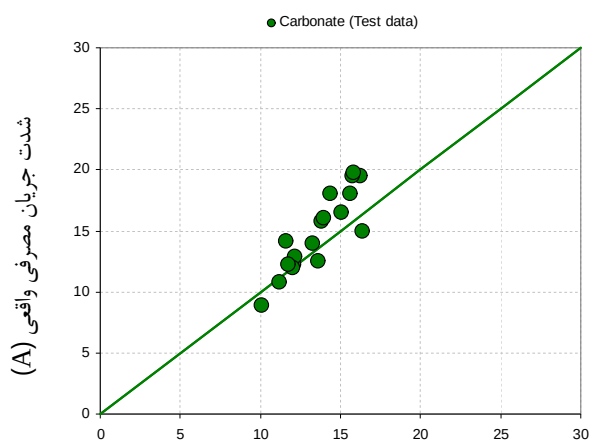
مرمریت هرسین، MSA: مرمریت صلصالی، MAN: مرمریت انارک

پس از بررسی خطای نسبی تخمین داده‌های آزمون، به بررسی پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی این دسته از داده‌ها نسبت به خط نیمساز 1:1 پرداخته شد. نمودار شکل‌های 4-28 تا 4-31 پراکندگی نقاط واقعی و پیش‌بینی شده را برای مدل‌های شدت جریان مصرفی دستگاه و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم نشان می‌دهند. با توجه به تمرکز خوب این نقاط بر روی خط نیمساز 1:1 و همچنین مقادیر پایین متوسط خطای تخمین، می‌توان ادعا کرد که مدل‌ها از دقت قابل قبولی در تخمین میزان ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم و شدت جریان مصرفی دستگاه برخوردار می‌باشند.



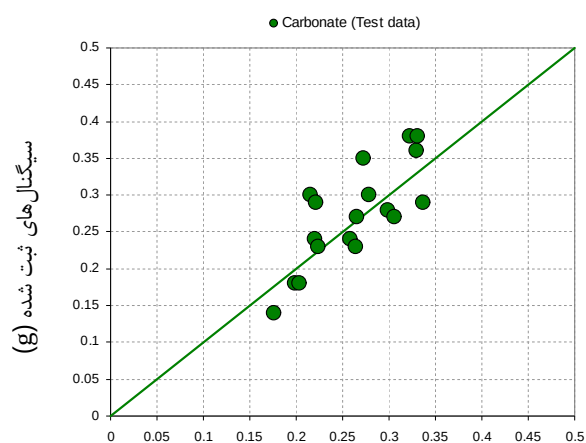
شدت جریان مصرفی پیش‌بینی شده (A)

شکل 4-28- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای آزمون مدل 1



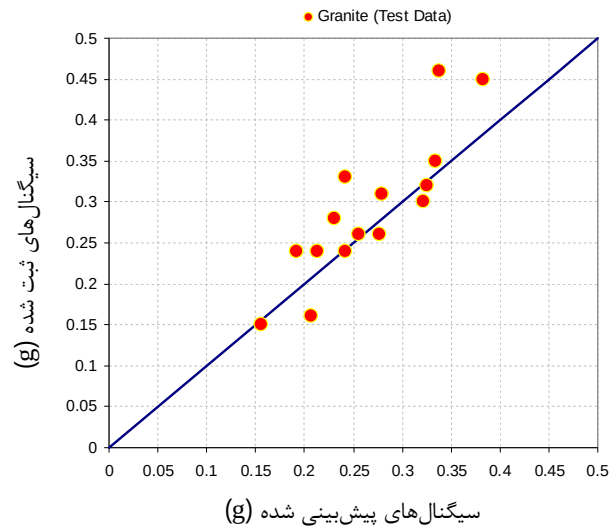
شدت جریان مصرفی پیش‌بینی شده (A)

شکل 4-29- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای آزمون مدل 2



سیگنال‌های پیش‌بینی شده (g)

شکل 4-30- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای آزمون مدل 3



شکل 4-31- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای آزمون مدل 4

5-4- جمع بندی

در بخش نخست از این فصل سعی شد تا کلیه پارامترهای مهم و مؤثر در قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرند. از میان پارامترهای بررسی شده 12 پارامتر (از قبیل چگالی، بافت، نوع ماتریکس و درجه سیمانته شدن، تخلخل، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، سختی، ساینده‌گی و مدول الاستیسیته) به‌عنوان مهم‌ترین و مؤثرترین پارامترها در قابلیت برش سنگ شناخته شدند. در ادامه ضریب اهمیت هر یک از این پارامترها با توجه به نظرسنجی از خبرگان و استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی و دلفی فازی تعیین شدند. در طی انجام این بخش از تحقیق، از میان پارامترهای مؤثر، چهار پارامتر سختی موس، فاکتور ساینده‌گی شیمازک، مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته به ترتیب به نمایندگی از 4 مشخصه مهم سنگ شامل سختی، ساینده‌گی، خواص مقاومتی و الاستوپلاستیسیته سنگ انتخاب شدند. در بخش دوم از این فصل، یک سیستم طبقه‌بندی جدید، بر اساس پارامترهای مذکور، برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی ارائه شد. در ادامه قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی مورد مطالعه با کمک سیستم طبقه‌بندی مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت مدل‌های آماری برای پیش‌بینی عملکرد برش سنگ در مقیاس آزمایشگاهی با توجه به پارامترهای

عملیاتی برش و شاخص قابلیت برش ارائه شد، به طور کلی نتایج حاصل از بررسی‌های به عمل آمده از این فصل را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- بررسی تأثیر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ بر روی قابلیت برش سنگ‌ها و انتخاب مهم‌ترین و مؤثرترین پارامترها از میان پارامترهای موجود با توجه به رعایت اصولی از قبیل:

1- عدم هم‌پوشانی پارامترها با یکدیگر

2- پوشش تمامی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها

3- سعی در به حداقل رساندن پارامترها

4- سهولت در دسترسی و انجام آزمایش‌های مربوطه

- تعیین ضریب اهمیت هر یک از پارامترها با توجه به نظر متخصصین با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی و دلفی فازی برای ارائه یک سیستم طبقه‌بندی جدید به منظور تعیین قابلیت برش سنگ‌ها.

با استفاده از این سیستم طبقه‌بندی جدید می‌توان سنگ‌های ساختمانی را از نظر قابلیت برش به پنج کلاس خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف طبقه‌بندی کرد.

- طبقه‌بندی سنگ‌های مورد مطالعه از نظر قابلیت برش با استفاده از سیستم طبقه‌بندی جدید.

پس از تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه، شاخص قابلیت برش هر نمونه سنگ توسط سیستم طبقه‌بندی جدید تعیین شد. پس از تعیین مقادیر شاخص قابلیت برش، نمونه‌های سنگی بر اساس شاخص قابلیت برش در دو گروه (سنگ‌های نرم و سخت)، طبقه‌بندی شدند. بررسی‌ها نشان داد که دو نمونه سنگ گرانیت قرمز یزد و مرمریت هفتومان دارای کمترین مقدار قابلیت برش و در نقطه مقابل دو نمونه سنگ گرانیت مشهد و تراورتن قرمز آذرشهر دارای بیشترین مقدار قابلیت برش در گروه از سنگ‌های سخت و نرم بودند.

- بررسی و ارزیابی عملکرد سیستم طبقه‌بندی جدید.

در این بخش سعی شد تا به بررسی و ارزیابی عملکرد سیستم طبقه‌بندی جدید پرداخته شود. در گام نخست عملکرد برش سنگ‌های مورد مطالعه در دو بخش صنعتی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه نتایج حاصل از این بخش برای ارزیابی سیستم طبقه‌بندی جدید مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از طبقه‌بندی انجام شده در دو گروه از سنگ‌های سخت و نرم با معیارهایی نظیر نرخ برش، نرخ مصرف انرژی، نرخ سایش و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که سیستم طبقه‌بندی جدید در بیشتر موارد به خوبی توانسته است نمونه سنگ‌های مورد مطالعه را از دیدگاه قابلیت برش مورد ارزیابی و طبقه‌بندی قرار دهد.

• ارائه مدل‌های تجربی برای پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه‌های برش و ارتعاش‌های به

وجود آمده در سیستم با توجه به شاخص قابلیت برش و پارامترهای ماشین‌کاری.

یکی از فاکتورهای مهمی (در کنار انرژی مصرفی دستگاه‌های برش) که می‌تواند علاوه بر کیفیت پلاک تولیدی بر قیمت تمام شده کالا نیز تأثیرگذار باشد، ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم حین عملیات برش می‌باشد. بدیهی است که هر گونه ارتعاش در سیستم می‌تواند مستقیماً در هزینه‌های ابزار، تعمیر و نگهداری و مصرف انرژی تأثیرگذار باشد. لذا مطالعه و بررسی سیگنال‌های ارتعاشی و کنترل آن، در یک فرایند ماشین‌کاری به منظور کاهش هزینه‌های تولید، لازم و ضروری می‌باشد. ارتعاش‌های به وجود آمده در یک سیستم می‌تواند در اثر تغییرات سیکلی نیروهای دینامیکی متأثر از تغییر شرایط ماشین‌کاری یا تغییر در مشخصات مقاومتی قطعه کار باشد. در این فصل از تحقیق تلاش شد تا علاوه بر بررسی و ارزیابی فرایند برش مدل‌هایی برای پیش‌بینی میزان ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم و شدت جریان مصرفی دستگاه‌های برش ارائه شود. نتایج حاصل از بررسی‌های آزمایشگاهی به‌عنوان ورودی نرم افزار آماری SPSS در نظر گرفته شدند و در نهایت مدل‌های پیش‌بینی شدت جریان مصرفی و ارتعاش با توجه به پارامترهای ماشین‌کاری و شاخص قابلیت برش ارائه شدند. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان به دیدگاه نسبتاً خوبی از میزان مصرف انرژی دستگاه‌های برش و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم دست پیدا کرد.

- بررسی صحت و سقم مدل‌های آماری.

برای بررسی صحت و سقم مدل‌های آماری از آزمون‌های F و t استفاده شد. برای کنترل معنی‌داری مدل-ها از آزمون F و برای کنترل معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل، از آزمون t استفاده شد. با توجه به این که مقدار F به دست آمده از جدول توزیع با سطح اعتماد بالای 99 درصد بزرگتر از مقدار F به دست آمده از مدل می‌باشد لذا می‌توان فرضیه صفر را که بیان می‌کند رابطه خطی بین متغیر وابسته (سیگنال-های ارتعاشی و شدت جریان مصرفی دستگاه برش) و متغیرهای مستقل (عمق برش، نرخ پیشروی و شاخص قابلیت برش سنگ) وجود ندارد را رد کرده و نتیجه‌گیری کرد که حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد. پس از کنترل معنی‌داری کلی مدل، معنی‌داری هر یک از متغیرهای مستقل با آزمون t کنترل شد. با استفاده از این آزمون می‌توان فرضیه صفر بودن هر یک از ضرایب متغیرهای مستقل را آزمایش کرد. از آنجا که مقدار t حاصل از جدول توزیع مربوطه با سطح اعتماد 90 درصد بزرگتر از مقدار t های به دست آمده از متغیرهای مستقل می‌باشد لذا می‌توان فرضیه صفر بودن ضرایب متغیرهای مستقل را رد کرد. همچنین دقت تخمین هر یک از مدل‌ها با توجه به پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 مورد بررسی قرار گرفت. بدیهی است هرچه تراکم نقاط نسبت به خط نیمساز بیشتر باشند میزان خطای تخمین کمتر بوده و مدل از دقت بهتری برخوردار می‌باشد. با توجه به تراکم خوب نقاط نسبت به خط نیمساز می‌توان چنین استنباط کرد که مدل‌ها از دقت خوبی در تخمین و پیش‌بینی مقدار شدت جریان مصرفی و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم برخوردار می‌باشند.

- بررسی روند تغییرات ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم و شدت جریان مصرفی دستگاه برش

نسبت به پارامترهای عمق برش، نرخ پیشروی و شاخص قابلیت برش سنگ.

یکی از موارد مهمی را که در بررسی مدل‌های آماری می‌بایست به آن توجه داشت، وجود ضرایب منطقی در مدل می‌باشد. ضرایب منطقی در یک مدل به معنی پیروی مدل از طبیعت ذاتی فرایند می‌باشد. بدیهی است در شرایط ثابت عملیاتی با افزایش قابلیت برش سنگ مقدار انرژی مصرفی و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم کاهش یابد. در این حالت به دلیل کاهش بارهای مکانیکی و حرارتی

وارد بر دانه‌های الماسی، انتظار می‌رود تا میزان ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم و انرژی مصرفی دستگاه کاهش یابد. همچنین با افزایش عمق برش و نرخ پیشروی، نیروهای فرایند افزایش یافته و با افزایش این نیروها میزان ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم و انرژی مصرفی دستگاه نیز افزایش پیدا خواهند کرد. لذا انتظار خواهیم داشت که در مدل‌های ارائه شده روند تغییر ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم و انرژی مصرفی دستگاه، مطابق با طبیعت ذاتی فرایند با افزایش قابلیت برش کاهش و با افزایش پارامترهای عملیاتی افزایش پیدا کند. نتایج حاصل از بررسی‌های به عمل آمده در این بخش نشان داد که در تمامی مدل‌ها، متغیرها از ضرایب منطقی قابل قبولی برخوردار می‌باشند.

تحلیل اقتصادی فرایند برش

5-1- مقدمه

همان‌طوری که در فصل نخست از این تحقیق به‌آن اشاره شد، یکی از مهم‌ترین اهداف این تحقیق، دستیابی به پارامترهای بهینه برش می‌باشد. تا مشخص شود در چه شرایطی از ماشین‌کاری (برای یک نمونه سنگ مشخص)، بیشترین صرفه‌ی اقتصادی به دست خواهد آمد. به عبارت دیگر در چه نقطه‌ای از شرایط ماشین‌کاری میزان هزینه‌های تولید به کمترین مقدار خود به ازای واحد سطح بریده شده از سنگ، نزدیک می‌شود. با این توضیح لازم دیده شد تا قبل از شروع تحلیل‌های بهینه‌سازی، به بررسی و تحلیل اقتصادی فرایند برش پرداخته شود. بدین ترتیب سعی شد تا در مرحله نخست از بررسی و تحلیل اقتصادی فرایند برش، فاکتورهای هزینه‌ساز در دو گروه از سنگ‌های ساختمانی نرم و سخت شناسایی شده و سپس به تحلیل حساسیت این فاکتورها در فرایند برش پرداخته شود. تحلیل حساسیت را می‌توان در تعیین میزان تأثیرپذیری اقتصادی طرح‌های صنعتی نسبت به متغیرهای آن استفاده کرد. ساده‌ترین شکل تحلیل حساسیت مطالعه اثر تغییرات یک متغیر بی‌ثبات بر شاخص‌های اقتصادی می‌باشد. به عبارت دیگر تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که در صورت تغییر در مقدار متغیر، تابع هدف (جواب مسأله) به چه میزان تغییر می‌کند. بدین ترتیب می‌توان متغیرهای حساس را از متغیرهای غیر حساس مشخص نمود.

5-2- فاکتورهای هزینه‌ساز

در یک واحد تولید سنگ‌های ساختمانی همانند دیگر واحدهای تولیدی، تولید با هزینه‌هایی مواجه می‌باشد. به طور کلی هزینه‌های موجود برای برش یک بلوک سنگی را می‌توان به پنج تابع هزینه‌ی کارگری، مصرف دیسک‌های الماسی، انرژی مصرفی دستگاه‌های برش، مصرف آب و هزینه‌های تعمیر و نگهداری تقسیم‌بندی کرد. مدل‌های ریاضی مربوط به هر یک از توابع مذکور را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد:

5-2-1- تابع هزینه کارگر

با استفاده از این تابع می‌توان هزینه‌های مربوط به نیروی کارگری را به ازای برش یک متر مربع از بلوک سنگی محاسبه کرد. مقدار هزینه‌های کارگری با استفاده از رابطه 5-1 قابل محاسبه می‌باشد.

$$C_L = \frac{P \times N_L}{H_m \times P_h} \quad (\text{رابطه 1-5})$$

در رابطه بالا داریم:

$$C_L: \text{هزینه کارگر } (T/m^2)$$

$$P: \text{دستمزد هر کارگر در ماه } (T/month)$$

$$N_L: \text{تعداد کارگر}$$

$$H_m: \text{تعداد ساعت کاری در ماه}$$

$$P_h: \text{نرخ تولید } (m^2/h)$$

$$P_h = K \times D_c \times F_r \quad (\text{رابطه 2-5})$$

$$K: \text{ضریب تبدیل برابر با 0/036}$$

$$D_c: \text{عمق برش } (mm)$$

$$F_r: \text{نرخ پیشروی } (cm/s)$$

2-2-5- تابع هزینه مصرف دیسک

رابطه 3-5 هزینه دیسک مصرفی را با توجه به نرخ سایش، قیمت واحد دیسک و عمر دیسک (طول سگمنت قابل مصرف) تعیین می‌کند. با استفاده از این تابع، هزینه دیسک مصرفی به ازای برش یک متر مربع از بلوک سنگی قابل محاسبه می‌باشد.

$$C_d = \frac{W_r \times P_d}{L \times n \times P_h} \quad (\text{رابطه 3-5})$$

در رابطه بالا داریم:

$$C_d: \text{هزینه مصرف دیسک } (T/m^2)$$

$$W_r: \text{نرخ سایش } (mm/h)$$

$$P_d: \text{قیمت دیسک } (T)$$

$$n: \text{تعداد دفعات استفاده از بدنه فولادی دیسک}$$

L : طول مفید سگمنت (mm)

لازم به ذکر است که در کارخانه‌های سنگ‌بری بعد از مصرف کامل سگمنت‌ها، بدنه فولادی دیسک برای استفاده مجدد به کارگاه جوش سگمنت فرستاده می‌شود. بدین ترتیب برای دفعات متوالی می‌توان سگمنت‌های الماسی را به بدنه جوش داد و بدنه دیسک را برای استفاده مجدد آماده کرد. به‌طور متوسط تعداد دفعات استفاده از یک بدنه فولادی 4 تا 6 بار می‌باشد. با توجه به توضیحات ارائه شده، قیمت واحد دیسک الماسی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_d = P_p + (n \times (S_p + G_p)) \quad (\text{رابطه 4-5})$$

P_p : هزینه بدنه فولادی (T)

S_p : هزینه سگمنت مصرفی برای فرآوری مجدد دیسک (T)

G_p : هزینه جوش سگمنت‌ها به بدنه فولادی (T)

3-2-5- تابع هزینه مصرف انرژی

هزینه انرژی مصرفی را می‌توان از رابطه 5-5 با توجه به نرخ مصرف انرژی و قیمت واحد انرژی تعیین کرد. با استفاده از این تابع هزینه مصرف انرژی به ازای واحد سطح برش خورده از بلوک سنگی قابل محاسبه می‌باشد.

$$C_E = \frac{E_{co} \times E_p}{P_h} \quad (\text{رابطه 5-5})$$

در رابطه بالا داریم:

C_E : هزینه مصرف انرژی (T/m^2)

E_p : قیمت واحد انرژی (T/Kwh)

E_{co} : نرخ انرژی مصرفی (Kwh/h)

4-2-5- تابع هزینه مصرف آب

رابطه 6-5 میزان هزینه آب مصرفی را به ازای واحد سطح برش خورده از یک بلوک سنگی نشان می‌دهد.

$$C_w = \frac{W_{co} \times W_p}{P_h} \quad (\text{رابطه 6-5})$$

در رابطه بالا داریم:

$$C_W: \text{هزینه مصرف آب } (T/m^2)$$

$$W_{co}: \text{نرخ مصرف آب } (lit/h)$$

$$W_p: \text{قیمت واحد لیتر آب } (T/lit)$$

5-2-5- تابع هزینه تعمیر و نگهداری سالانه

رابطه 7-5 هزینه‌ی مربوط به تعمیر و نگهداری به ازای واحد سطح برش خورده از بلوک سنگی را نشان می‌دهد:

$$C_M = \frac{M_p}{P_h \times d_y \times H_d} \quad (\text{رابطه 7-5})$$

در رابطه بالا داریم:

$$C_M: \text{هزینه تعمیر و نگهداری } (T/m^2)$$

$$d_y: \text{تعداد روزهای کاری در سال}$$

$$H_d: \text{تعداد ساعت کاری در روز}$$

$$M_p: \text{هزینه تعمیر و نگهداری سالانه } (T/year)$$

رابطه 8-5، تابع هزینه‌ی کل تولید را به ازای واحد سطح بریده شده از یک بلوک سنگی نشان می‌دهد. مطابق این رابطه تابع هزینه‌ی کل برابر با مجموع توابع هزینه‌ساز شامل هزینه‌ی مصرف دیسک، انرژی، نیروی کارگری، تعمیر و نگهداری و هزینه‌ی مصرف آب می‌باشد.

$$C_T = C_L + C_d + C_E + C_W + C_M \quad (\text{رابطه 8-5})$$

در رابطه بالا پارامتر C_T معرف تابع هزینه‌ی کل تولید بر حسب تومان بر متر مربع می‌باشد. با جاگذاری مقادیر مربوط به هر یک از توابع هزینه‌ساز در تابع هزینه کل، رابطه 8-5 را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد. بدین ترتیب هزینه کل تولید برای واحد سطح برش خورده از یک بلوک سنگی از رابطه 9-5 قابل محاسبه می‌باشد.

$$C_T = \frac{W_r \times P_d}{L \times n \times P_h} + \frac{E_{co} \times E_p}{P_h} + \frac{P \times N_L}{H_m \times P_h} + \frac{M_p}{P_h \times d_y \times H_d} + \frac{W_{co} \times W_p}{P_h} \quad (\text{رابطه 9-5})$$

5-3- تحلیل حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز

یکی از روش‌های مناسب برای تحلیل اقتصادی یک فرایند، تحلیل حساسیت یک تابع نسبت به فاکتورهای تأثیرگذار در آن می‌باشد. به عبارت دیگر تحلیل حساسیت روشی برای سنجش میزان تأثیرپذیری یک تابع نسبت به تغییر متغیرهای آن تابع است. با استفاده از این روش می‌توان متغیرهای حساس یک تابع را پیدا کرد. بدین ترتیب مقادیر مختلف برای متغیرهای تابع که ممکن است در طی انجام فرایند دچار تغییر شوند، تحلیل می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان اتفاقات آینده را برای تابع مورد نظر پیش‌بینی کرد. این روش امروزه در بسیاری از علوم از قبیل امور مالی، حسابداری، کنترل پروژه، مهندسی صنایع و غیره کاربرد فراوانی پیدا کرده است.

در حال حاضر صنعت برش سنگ از جمله مهم‌ترین صنایع معدنی کشور می‌باشد که توجه ویژه به این بخش می‌تواند کمک شایانی به اقتصاد کشور در زمینه صادرات این محصول و رقابت سالم با کشورهای دیگر داشته باشد. از جمله عوامل مهم در رقابت بازارهای جهانی، قیمت تمام شده و کیفیت سنگ‌های فرآوری شده می‌باشد. صرفه اقتصادی تحت شرایطی که در کیفیت کالا نقصانی ایجاد نشود، یکی از موارد مهم و ضروری در این بخش از صنعت می‌باشد. از این رو انجام مطالعاتی مرتبط با این موضوع در بخش‌های صنعتی لازم و ضروری می‌باشد. از جمله مطالعات اقتصادی که تاکنون در زمینه برش سنگ انجام شده است، می‌توان به مطالعات آیهان در سال 2005 اشاره کرد (Ayhan, 2005). او در مطالعاتش به بررسی و تحلیل حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز در فرایند تولید پلاک‌های سنگی نرم در کشور ترکیه پرداخت. نتایج حاصل از بررسی‌های وی نشان داد که در میان فاکتورهای هزینه‌ساز، هزینه‌ی مصرف انرژی بیشترین تأثیر را در قیمت تمام شده یک پلاک سنگی دارا می‌باشد.

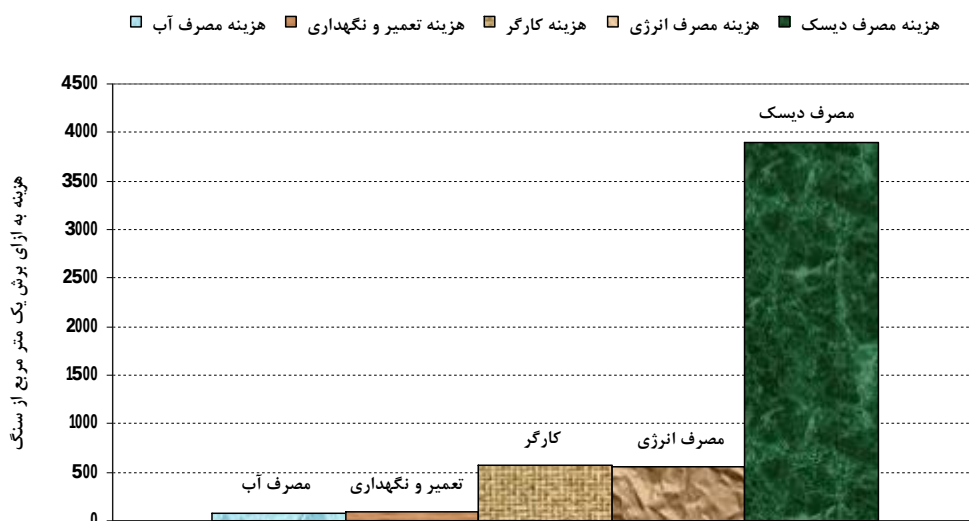
در این بخش از تحقیق نیز سعی می‌شود تا به بررسی و تحلیل حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز در صنایع سنگ‌بری در کشور ایران پرداخته شود. بدین ترتیب برای تعیین حساس‌ترین پارامتر در فرایند برش بلوک‌های سنگی از دیدگاه اقتصادی، تحلیل حساسیت برای دو کارخانه سنگ‌بری در شهرک صنعتی محمود آباد اصفهان و بر روی دو نوع سنگ تراورتن حاجی آباد و گرانیت قرمز یزد انجام شد.

بدین منظور ابتدا اطلاعات اقتصادی مورد نیاز در نمونه فرمی که از قبل تهیه شده بود ثبت شد. اطلاعات و مشخصات ثبت شده برای دو گروه از سنگ‌های ساختمانی مورد مطالعه در جدول 1-5 نشان داده شده است. مطابق با اطلاعات درج شده در جدول 1-5، در کارخانه‌های مورد مطالعه از دیسک‌های سخت‌بر برای برش سنگ‌های گرانیتی و از دیسک‌های نرم‌بر برای برش سنگ‌های نرم استفاده می‌شد. ساعات کاری در هر شیفت کاری به طور متوسط برابر با 11 ساعت در روز و 286 ساعات در ماه برآورد شد. میزان حداکثر جریان مصرفی دیسک برابر با 130 آمپر و مقدار ولتاژ مصرفی دستگاه برابر با 400 ولت در نظر گرفته شد. با توجه به ساعات کاری در نظر گرفته شده در این تحلیل (ساعات میان باری)، مقدار بهای هر کیلو وات ساعت 39 تومان در نظر گرفته شد.

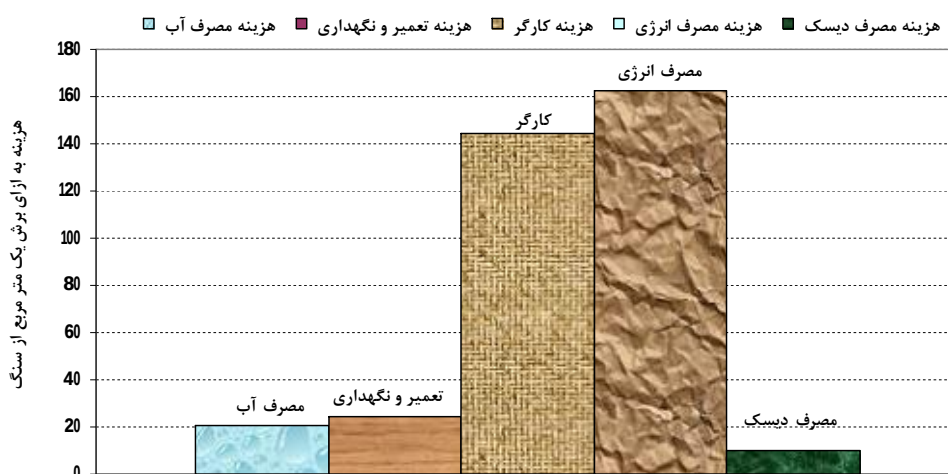
جدول 1-5- اطلاعات و مشخصات ثبت شده از کارخانه‌های سنگ‌بری برای انجام تحلیل حساسیت

نوع سنگ	کربناته - تراورتن حاجی آباد	گرانیتی - گرانیت یزد
W_{co} : نرخ مصرف آب (lit/h)	600	600
W_p : قیمت واحد لیتر آب	0/4 تومان	0/4 تومان
P : دستمزد هر کارگر در ماه	500 هزار تومان	500 هزار تومان
N_L : تعداد کارگر	1 نفر	1 نفر
H_m : تعداد ساعت کاری در ماه	286	286
D_c : عمق برش (mm)	6	1/5
F_r : نرخ پیشروی (cm/s)	56	56
P_h : نرخ تولید (m^2/h)	12/1	3/024
W_r : نرخ سایش (mm/h)	0/0035	0/655
n : تعداد دفعات استفاده از بدنه دیسک فولادی	4	6
S_p : هزینه‌ی سگمنت برای فرآوری مجدد دیسک (T)	140000 تومان	130000 تومان
G_p : هزینه‌ی جوش سگمنت‌ها به بدنه فولادی (T)	15000 تومان	15000 تومان
P_d : قیمت دیسک (T)	205 هزار تومان	180 هزار تومان
L : طول مفید سگمنت (mm)	6	10
E_{co} : نرخ انرژی مصرفی (Kwh/h)	50/4	43/6
E_p : قیمت واحد انرژی (T/Kwh)	39	39
M_p : هزینه تعمیر و نگهداری سالانه	1000000 تومان	1000000 تومان
d_y : تعداد روزهای کاری در سال	312	312
H_d : تعداد ساعت کاری در روز	11	11

پس از تکمیل اطلاعات اقتصادی، مقادیر مربوط به هر یک از توابع هزینه‌ساز شامل مصرف آب، انرژی، دیسک، هزینه نیروی کارگری و تعمیر و نگهداری به ازای هر متر مربع از سنگ محاسبه و در نهایت مقدار هزینه‌ی کل تولید برای برش یک متر مربع از بلوک‌های سنگی مورد مطالعه محاسبه شد. شکل‌های 1-5 و 2-5 هزینه‌های موجود برای برش یک متر مربع از بلوک‌های سنگی مورد مطالعه را نشان می‌دهند.



شکل 1-5- مقادیر مربوط به توابع هزینه‌ساز برای برش یک متر مربع از بلوک سنگی گرانیت قرمز



شکل 2-5- مقادیر مربوط به توابع هزینه‌ساز برای برش یک متر مربع از بلوک سنگی تراورتن حاجی آباد

همان‌طوری که مشاهده می‌شود از میان فاکتورهای هزینه‌ساز دو فاکتور انرژی و سایش ابزار الماسی به‌ترتیب بیشترین هزینه را در فرایند برش دو نمونه سنگ تراورتن حاجی آباد و گرانیت قرمز یزد به خود اختصاص داده‌اند که با توجه به هزینه‌ی بالای دیسک (سایندگی بالای سنگ‌های سخت) و افزایش قیمت

انرژی در کشور، انتخاب این دو فاکتور به عنوان دو فاکتور هزینه‌ساز مؤثر در فرایند برش قابل پیش‌بینی بوده است. توجه به این نکته ضروری است که مقادیر هر یک از این فاکتورها تنها تحت شرایط اقتصادی ثابت تعیین شده است. سؤالی که در اینجا مطرح می‌شود این است که تغییر و تحول اقتصادی (به عبارت دیگر تغییر در قیمت حامل‌های انرژی، ابزارهای الماسی، نیروهای کارگری و ...) چه تأثیری بر ساختار اقتصادی فرایند یا به عبارت دیگر چه تأثیری بر میزان هزینه‌های کلی تولید دارا می‌باشند. برای پاسخ به این سؤال لازم است تا تغییرات تابع هزینه کل نسبت به تغییر متغیرهای مسأله مورد بررسی قرار گیرد. به بیان دیگر نیاز است تا حساسیت تابع هزینه کل نسبت به فاکتورهای هزینه‌ساز تعیین شود.

5-3-1- تحلیل حساسیت تابع هزینه کل نسبت به هزینه‌های تولید

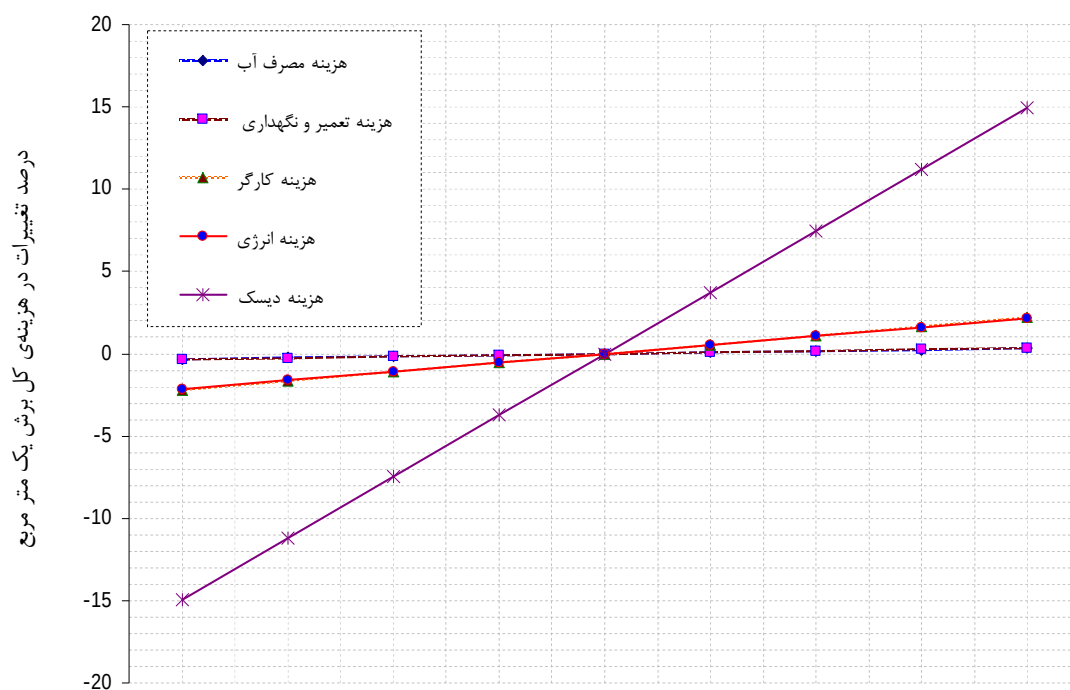
برای انجام تحلیل حساسیت ابتدا دامنه تغییرات هر یک از متغیرهای تأثیرگذار تعیین (دامنه تغییر هر یک از متغیرها از 20- درصد تا 20 درصد در نظر گرفته شد) و سپس هزینه کل بر اساس مقادیر ورودی جدید محاسبه شد. نتایج حاصل از بررسی‌های به‌عمل آمده از تحلیل حساسیت به‌ترتیب در جدول‌های 5-2 و 5-3 و همچنین نمودارهای 5-3 و 5-4 آورده شده است.

جدول 5-2- مقادیر فاکتورهای هزینه‌ساز برای نمونه سنگ گرانیت قرمز یزد

فاکتورهای هزینه‌ساز	حداقل مقدار	هزینه‌ی کل	حداکثر مقدار	هزینه‌ی کل
هزینه‌ها بر حسب تومان				
هزینه‌ی هر لیتر آب	0/33	5201	0/494	5234
هزینه‌ی تعمیر و نگهداری سالانه	800000	5198	1200000	5237
هزینه‌ی کارگر (حقوق ماهیانه)	400000	5102	600000	5333
هزینه‌ی دیسک مصرفی	144000	4438	216000	5997
هزینه‌ی هر کیلووات ساعت انرژی	31/2	5105	46/8	5330

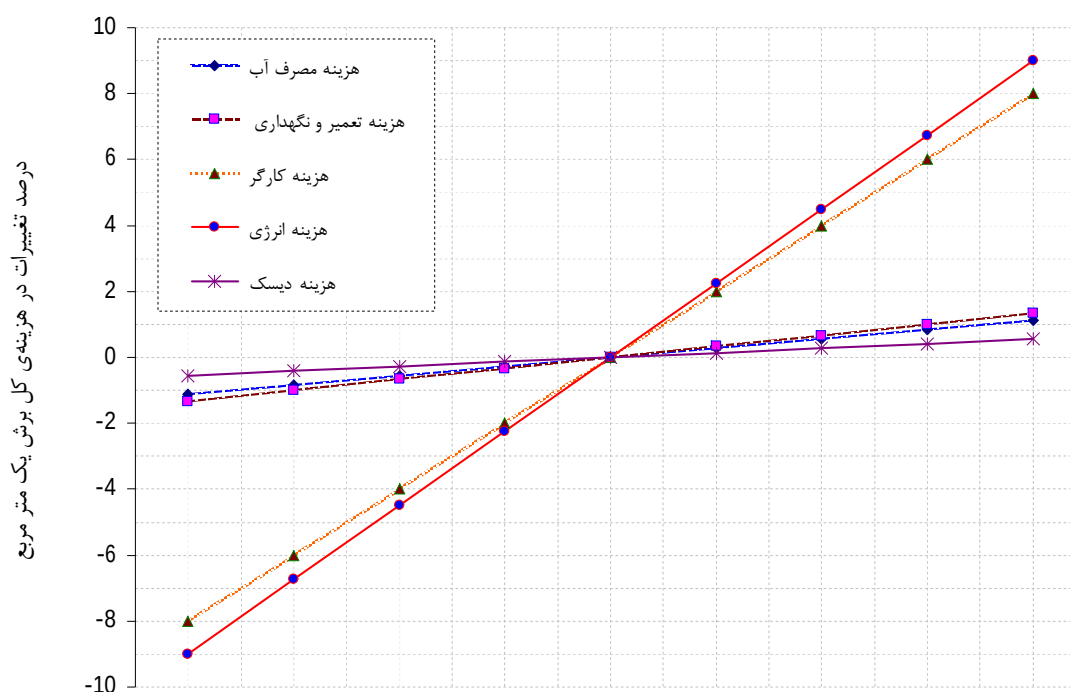
جدول 5-3- مقادیر فاکتورهای هزینه‌ساز برای نمونه سنگ تراورتن حاجی آباد

فاکتورهای هزینه‌ساز	حداقل مقدار	هزینه‌ی کل	حداکثر مقدار	هزینه‌ی کل
هزینه‌ها بر حسب تومان				
هزینه‌ی هر لیتر آب	0/33	357	0/494	366
هزینه‌ی تعمیر و نگهداری سالانه	800000	357	1200000	366
هزینه‌ی کارگر (حقوق ماهیانه)	400000	333	600000	390
هزینه‌ی دیسک مصرفی	164000	360	246000	363
هزینه‌ی هر کیلووات ساعت انرژی	31/2	329	46/8	394



درصد تغییرات فاکتورهای هزینه‌ساز از مقدار اولیه

شکل 5-3- تحلیل حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز برای یک بلوک سنگی سخت



درصد تغییرات فاکتورهای هزینه‌ساز از مقدار اولیه

شکل 5-4- تحلیل حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز برای یک بلوک سنگی نرم

همان‌طوری که در نمودار شکل 3-5 نشان داده شده است، در فرایند برش سنگ‌های ساختمانی سخت، شیب تغییرات تابع هزینه کل نسبت به فاکتور هزینه‌ی سایش ابزار الماسی بیش از سایر فاکتورها می‌باشد. به عبارت دیگر میزان حساسیت تابع هزینه کل نسبت به تغییرات این فاکتور بیشتر از سایر فاکتورها می‌باشد. به‌طوری که هزینه‌های مربوط به این فاکتور بیش از 80 درصد هزینه‌های کل تولید را شامل می‌شود. به طور مشابه در بررسی‌های انجام شده از تحلیل حساسیت برای نمونه سنگ تراورتن حاجی آباد مشخص گردید که تابع هزینه کل از حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات فاکتور انرژی مصرفی در مقایسه با سایر فاکتورها برخوردار می‌باشد (شکل 4-5). با توجه به افزایش بهای انرژی در کشور و افزایش آن در سال‌های بعد انتظار می‌رود که این فاکتور هم‌چنان به‌عنوان تأثیرگذارترین فاکتور در هزینه‌های تولید سنگ‌های ساختمانی در کشور باشد. با توجه به افزایش قیمت حامل‌های انرژی در سال‌های آتی در کشور، ارائه راه‌کارهایی برای کاهش مصرف انرژی در این بخش از صنعت (برای کاهش هزینه‌های تولید و در کل کاهش مصرف انرژی در کشور)، امری لازم و ضروری می‌باشد. از جمله راه‌کارهای مفید در این راستا می‌توان به ارائه یک الگوی مناسب برش با توجه به کاهش هزینه‌ی انرژی و افزایش تولید اشاره کرد. با ارائه چنین الگویی علاوه بر افزایش راندمان تولید و کاهش هزینه‌های آن می‌توان به کاهش سرانه‌ی مصرف انرژی در کل کشور نیز کمک کرد. همچنین به عنوان یک راه حل ساده می‌توان به انتقال شیفت کاری از ساعات میان باری به ساعات کم باری (براساس اعلام وزارت نیرو ساعات کم باری از 11 شب تا 6 صبح، ساعات میان باری از 6 صبح تا 6 عصر و ساعات اوج بار در زمستان از 6 عصر تا 11 شب است)، برای کاهش هزینه‌های انرژی اشاره کرد. بدین ترتیب اگر مدیران کارخانه‌های سنگ‌بری بخش اعظم فعالیت‌های خود را به ساعات کم باری انتقال دهند، منفعت قابل توجهی در پرداخت قیمت انرژی برق خواهند برد.

5-3-2- تحلیل حساسیت تابع هزینه کل نسبت به نرخ‌های مؤثر در فرایند برش

از جمله مسائل مهم در تحلیل اقتصادی یک فرایند، شناسایی عوامل تأثیرگذار در آن فرایند می‌باشد. در بخش نخست از تحلیل اقتصادی فرایند برش، سعی شد تا به بررسی تأثیر فاکتورهای هزینه‌ساز بر

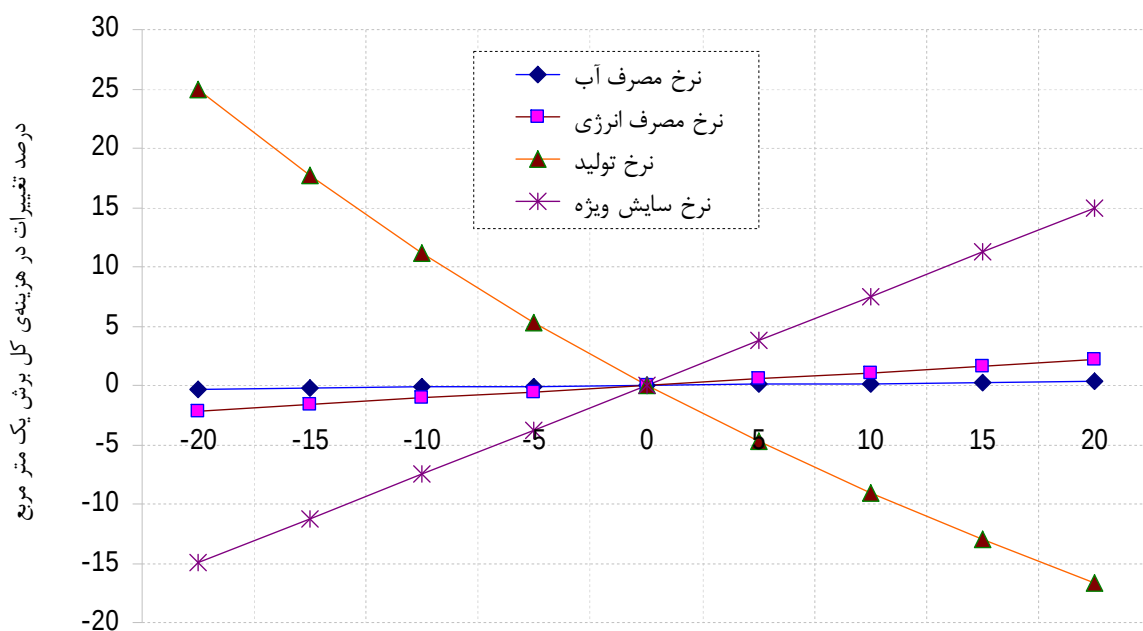
هزینه‌ی کل تولید به ازای واحد سطح بریده شده از یک بلوک سنگی نرم و سخت پرداخته شود. با توجه به بررسی‌های به عمل آمده مشخص شد که هزینه‌ی انرژی و سایش ابزار الماسی از جمله فاکتورهای مهم و تأثیرگذار در قیمت تمام شده محصول می‌باشند. نکته قابل توجه در این بخش این است که، عوامل مهم دیگری علاوه بر فاکتورهای مذکور در فرایند تولید تأثیرگذار می‌باشند که بررسی هر یک از آن‌ها می‌تواند در بررسی و تحلیل اقتصادی این فرایند مفید واقع گردد. عواملی که تنها از دیدگاه عملیاتی قابل بررسی بوده و تحت تأثیر عوامل اقتصادی بازار و قیمت حامل‌های انرژی قرار ندارند. از جمله مهم‌ترین این عوامل می‌توان به نرخ تولید، نرخ سایش دیسک و نرخ مصرف انرژی اشاره کرد. به طوری که کوچک‌ترین تغییر در این پارامترها می‌تواند منجر به تغییرات کلی در هزینه‌های تولید شود. بدین ترتیب با تغییر در پارامترهای عملیاتی می‌توان هزینه‌های تولید را به‌نحو قابل توجهی تغییر داد. لذا با توجه به توضیحات ارائه شده بررسی هر یک از فاکتورهای مذکور در هزینه‌های برش یک بلوک سنگی لازم و ضروری می‌باشد. برای این منظور در این بخش از تحقیق سعی شد تا به بررسی و تحلیل حساسیت این فاکتورها شامل نرخ تولید، نرخ سایش، نرخ مصرف آب و نرخ مصرف انرژی بر قیمت تمام شده برش یک متر مربع از بلوک سنگی پرداخته شود. نتایج حاصل از این بررسی‌ها در جدول‌های 4-5 و 5-5 و شکل‌های 5-5 و 6-5 آورده شده است.

جدول 4-5- مقادیر هزینه‌های کل حداقل و حداکثر با توجه به نرخ‌های مؤثر در مدل اقتصادی برای نمونه سنگ سخت

نرخ‌های مؤثر در مدل اقتصادی	حداقل مقدار	هزینه‌ی کل	حداکثر مقدار	هزینه‌ی کل
نرخ مصرف آب (لیتر در ساعت)	480	5201	720	5234
نرخ سایش (میلی‌متر بر ساعت)	0/52	4438	0/79	5997
نرخ مصرف انرژی (کیلووات ساعت بر ساعت)	34/88	5105	52/32	5330
نرخ تولید (متر مربع بر ساعت)	2/42	6522	3/63	4348

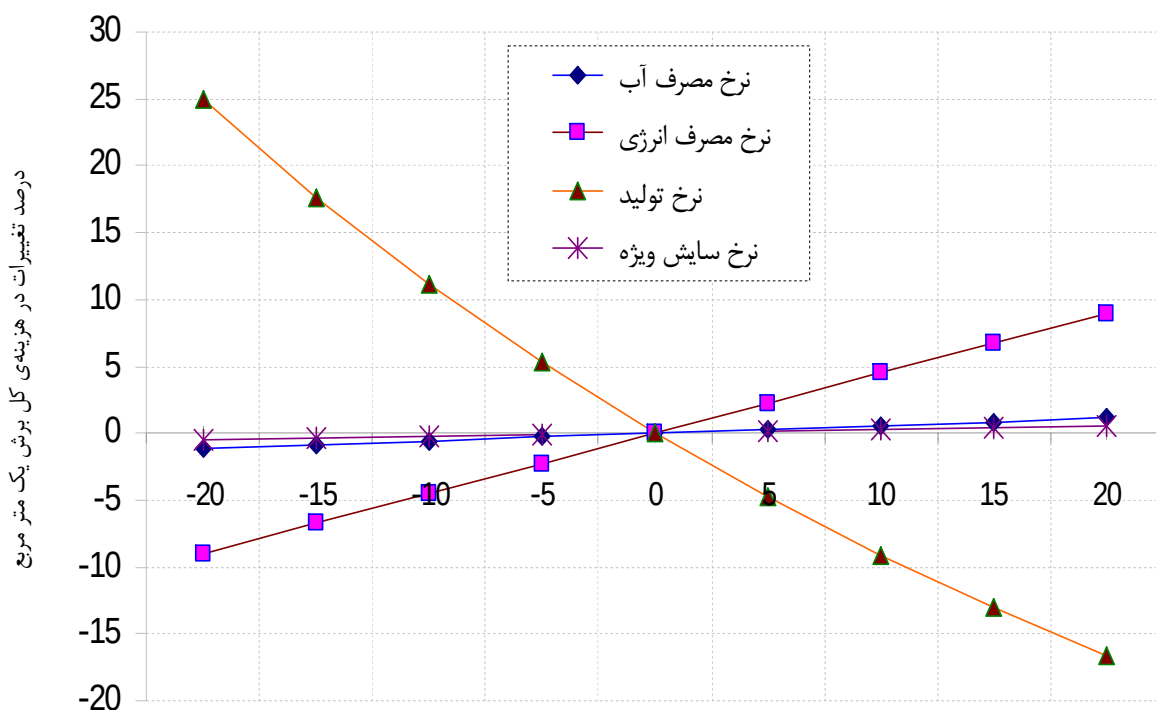
جدول 5-5- مقادیر هزینه‌های کل حداقل و حداکثر با توجه به نرخ‌های مؤثر در مدل اقتصادی برای نمونه سنگ نرم

نرخ‌های مؤثر در مدل اقتصادی	حداقل مقدار	هزینه‌ی کل	حداکثر مقدار	هزینه‌ی کل
نرخ مصرف آب (لیتر در ساعت)	480	357	720	366
نرخ سایش (میلی‌متر بر ساعت)	0/0028	360	0/0042	363
نرخ مصرف انرژی (کیلووات ساعت بر ساعت)	40/32	329	60/48	394
نرخ تولید (متر مربع بر ساعت)	9/68	452	14/52	301



درصد تغییرات نرخ‌های تأثیرگذار از مقدار اولیه

شکل 5-5- تحلیل حساسیت نرخ‌های تأثیرگذار در فرایند برش یک بلوک سنگی سخت



درصد تغییرات نرخ‌های تأثیرگذار از مقدار اولیه

شکل 5-6- تحلیل حساسیت نرخ‌های تأثیرگذار در فرایند برش یک بلوک سنگی نرم

نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که نرخ تولید بیشترین تأثیر را در میان فاکتورهای مورد بررسی دارد. می‌باشد که پس از این فاکتور، دو فاکتور نرخ سایش و نرخ مصرف انرژی به ترتیب در نمونه سنگ‌های

سخت و نرم از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند. به عبارت دیگر هزینه‌های کلی برش در نمونه سنگ‌های سخت و نرم پس از فاکتور نرخ تولید، بیشتر تحت تأثیر فاکتورهای نظیر نرخ سایش و نرخ مصرف انرژی می‌باشند. پر واضح است که هرچه توان تولید در یک فرایند افزایش یابد به همراه آن هزینه‌های تولید نیز کمتر خواهد شد. اما این نکته را نباید فراموش کرد که افزایش بیش از اندازه نرخ تولید تحت شرایط یکسان محیطی (تحت شرایطی که دستگاه و اپراتور یکسان در نظر گرفته شوند) منجر به افزایش بیش از اندازه هزینه‌ها در بخش‌هایی مانند هزینه‌ی مصرف دیسک (سایش زودرس دیسک‌های برش)، افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری (افزایش ارتعاش‌ها در سیستم)، هزینه‌ی مصرف انرژی و در نهایت کاهش کیفیت کالا (افزایش شیارهای ناهمگون در سطح سنگ) می‌شود. لذا برای رسیدن به یک شرایط اقتصادی مطلوب می‌بایست به یک تعادل ایده‌آل میان نرخ تولید و هزینه‌های موجود دست پیدا کرد. بدین ترتیب می‌توان تحت یک شرایط عملیاتی مطلوب به یک نرخ تولید بهینه دست پیدا کرد.

5-3-3- تحلیل حساسیت تابع هزینه کل برای نمونه سنگ‌های مختلف

آنچه مسلم است در یک فرایند تولید میزان حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز در نمونه سنگ‌های مختلف با توجه به تفاوت میزان قابلیت برش‌پذیری هر یک از آن‌ها متفاوت می‌باشد. سؤالی که در اینجا مطرح می‌شود این است که میزان تأثیرپذیری شاخص‌های اقتصادی نسبت به تغییر قابلیت برش‌پذیری سنگ‌ها به چه میزان می‌باشد. برای درک بهتر این موضوع و دستیابی به تأثیر شاخص قابلیت برش سنگ بر میزان حساسیت هزینه‌های کلی تولید، نیاز است تا ارتباط میان هزینه‌های تولید با قابلیت برش‌پذیری سنگ‌ها مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور سعی شد تا مدل‌های پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه‌های برش و سایش ابزارهای الماسی با توجه به شاخص قابلیت برش‌پذیری سنگ ارائه شود.

5-3-3-1- ارائه مدل‌های پیش‌بینی شدت جریان مصرفی و سایش ابزار الماسی

در این بخش از تحقیق تلاش شد تا مدل‌های پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش و سایش ابزارهای الماسی در مقیاس صنعتی با کمک مطالعات آماری ارائه شود. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان

ارتباط میان انرژی مصرفی دستگاه برش و سایش ابزار الماسی را با پارامترهای ماشین کاری و مشخصات سنگ مورد بررسی و تحقیق قرار داد. برای این منظور ابتدا مطالعات میدانی به منظور برداشت داده‌های صنعتی شامل انرژی مصرفی دستگاه برش و سایش ابزار الماسی در نرخ‌های مختلف پیشروی و عمق برش انجام شد. سپس نتایج حاصل از برداشت داده‌های آماری پس از جمع‌بندی به‌عنوان ورودی نرم افزار آماری SPSS در نظر گرفته شد. در مجموع از میان داده‌های جمع‌آوری شده بخشی برای تهیه و ساخت مدل (داده‌های آموزش) و بخشی دیگر برای ارزیابی مدل (داده‌های آزمون) در نظر گرفته شد. جدول‌های 5-6 تا 5-8 آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی شدت جریان مصرفی و سایش ابزار الماسی را برای دو گروه از سنگ‌های مورد مطالعه نشان می‌دهند. بدین ترتیب از 115 داده‌ی جمع‌آوری شده از نمونه سنگ‌های کربناته، 100 نمونه برای آموزش و ساخت مدل و 15 نمونه برای آزمون مدل مورد استفاده قرار گرفت. به همین ترتیب از مجموع 93 داده جمع‌آوری شده در بخش سنگ‌های سخت، تعداد 62 نمونه برای شدت جریان مصرفی و 31 نمونه برای سایش ابزار الماسی برداشت شد که از این میان تعداد 28 و 55 نمونه برای آموزش و تعیین مدل آماری سایش و شدت جریان مصرفی دستگاه برش و مابقی نمونه‌ها برای آزمون مدل‌های مربوطه مورد استفاده قرار گرفت.

جدول 5-6- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای نمونه سنگ‌های نرم

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	شدت جریان مصرفی (A)
1	0/5	25	45/75	82
2	1	25	45/75	91
3	2	25	45/75	104
4	2/5	25	45/75	109
5	3	25	45/75	116
6	3/5	25	45/75	124
7	0/5	35	45/75	85
8	1	35	45/75	93
9	1/5	35	45/75	98
10	2/5	35	45/75	113
11	3	35	45/75	121
12	0/5	45	45/75	87
13	1	45	45/75	94
14	1/5	45	45/75	99
15	2	45	45/75	111

ادامه جدول 5-6- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای نمونه سنگ‌های نرم

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	شدت جریان مصرفی (A)
16	2/5	45	45/75	116
17	0/5	25	59/4	69
18	1	25	59/4	75
19	2	25	59/4	83
20	2/5	25	59/4	89
21	3/5	25	59/4	99
22	4	25	59/4	104
23	4/5	25	59/4	109
24	5	25	59/4	117
25	0/5	35	59/4	70
26	1	35	59/4	75
27	2/5	35	59/4	91
28	3	35	59/4	96
29	3/5	35	59/4	100
30	4	35	59/4	106
31	4/5	35	59/4	110
32	5	35	59/4	118
33	0/5	45	59/4	70
34	1	45	59/4	76
35	2	45	59/4	81
36	2/5	45	59/4	93
37	3	45	59/4	98
38	3/5	45	59/4	101
39	4	45	59/4	107
40	4/5	45	59/4	113
41	0/5	25	52	71
42	1	25	52	77
43	2	25	52	85
44	2/5	25	52	91
45	3	25	52	98
46	3/5	25	52	106
47	4/5	25	52	113
48	5	25	52	119
49	0/5	35	52	73
50	1	35	52	78
51	2	35	52	85
52	2/5	35	52	92
53	3	35	52	98
54	3/5	35	52	103
55	4	35	52	109
56	5	35	52	121
57	0/5	45	52	74

ادامه جدول 5-6- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای نمونه سنگ‌های نرم

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	شدت جریان مصرفی (A)
58	1	45	52	80
59	2	45	52	86
60	2/5	45	52	92
61	3	45	52	101
62	4	45	52	108
63	4/5	45	52	116
64	5	45	52	124
65	0/5	25	45/75	76
66	1	25	45/75	84
67	1/5	25	45/75	91
68	2/5	25	45/75	104
69	3	25	45/75	110
70	3/5	25	45/75	116
71	0/5	35	45/75	78
72	1	35	45/75	87
73	2	35	45/75	101
74	2/5	35	45/75	108
75	3	35	45/75	113
76	3/5	35	45/75	119
77	0/5	45	45/75	79
78	1	45	45/75	86
79	1/5	45	45/75	94
80	2	45	45/75	103
81	2/5	45	45/75	110
82	3	45	45/75	116
83	1	25	45/75	82
84	1/5	25	45/75	90
85	2	25	45/75	97
86	2/5	25	45/75	102
87	3	25	45/75	108
88	3/5	25	45/75	114
89	0/5	35	45/75	76
90	1	35	45/75	83
91	1/5	35	45/75	92
92	2/5	35	45/75	104
93	3	35	45/75	110
94	3/5	35	45/75	117
95	0/5	45	45/75	77
96	1	45	45/75	85
97	1/5	45	45/75	94
98	2	45	45/75	101
99	2/5	45	45/75	108

ادامه جدول 5-6- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای نمونه سنگ‌های نرم

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	شدت جریان مصرفی (A)
100	3	45	45/75	115
101	1/5	30	45/75	98
102	2	35	45/75	106
103	3	40	45/75	123
104	3	30	59/4	84
105	2	35	59/4	77
106	5	40	59/4	108
107	4	30	52	100
108	4/5	35	52	107
109	3/5	40	52	97
110	2	30	45/75	99
111	1/5	35	45/75	93
112	3/5	40	45/75	123
113	0/5	30	45/75	74
114	2	35	45/75	99
115	3/5	40	45/75	120

جدول 5-7- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای نمونه سنگ‌های سخت

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	شدت جریان مصرفی واقعی (A)
1	1	37	28/35	83
2	1/5	37	28/35	100
3	2	37	28/35	118
4	0/5	45	28/35	67
5	1	45	28/35	84
6	1/5	45	28/35	100
7	2	45	28/35	118
8	0/5	56	28/35	67
9	1	56	28/35	84
10	1/5	56	28/35	104
11	2	56	28/35	121
12	0/5	37	43	58
13	1	37	43	72
14	1/5	37	43	89
15	2	37	43	104
16	0/5	45	43	59
17	1	45	43	72
18	1/5	45	43	91
19	2	45	43	106
20	0/5	56	43	61
21	1/5	56	43	94
22	2	56	43	110

ادامه جدول 5-7- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای نمونه سنگ‌های سخت

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	شدت جریان مصرفی واقعی (A)
23	0/5	37	27/5	65
24	1	37	27/5	84
25	1/5	37	27/5	101
26	2	37	27/5	118
27	0/5	45	27/5	67
28	1	45	27/5	86
29	2	45	27/5	115
30	0/5	56	27/5	69
31	1	56	27/5	88
32	1/5	56	27/5	106
33	2	56	27/5	123
34	0/5	37	22/1	66
35	1	37	22/1	86
36	1/5	37	22/1	104
37	0/5	45	22/1	68
38	1	45	22/1	93
39	1/5	45	22/1	106
40	2	45	22/1	124
41	0/5	56	22/1	69
42	1	56	22/1	92
43	1/5	56	22/1	109
44	2	56	22/1	130
45	0/5	37	37/6	61
46	1	37	37/6	78
47	1/5	37	37/6	92
48	2	37	37/6	106
49	1	45	37/6	77
50	1/5	45	37/6	94
51	2	45	37/6	108
52	0/5	56	37/6	64
53	1	56	37/6	78
54	1/5	56	37/6	96
55	2	56	37/6	111
56	0/5	37	28/35	65
57	1	56	43	76
58	3	56	43	121
59	1/5	45	27/5	103
60	2	37	22/1	124
61	0/5	45	37/6	62
62	3	56	37/6	126

جدول 5-8- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی سایش برای نمونه سنگ‌های سخت

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	مقدار سایش (mm)	نرخ سایش (mm/h)
1	0/5	37	28/35	0/157	0/093
2	0/5	45	28/35	0/168	0/120
3	1	45	28/35	0/189	0/271
4	1/5	45	28/35	0/208	0/447
5	0/5	56	28/35	0/18	0/160
6	1	56	28/35	0/201	0/358
7	1/5	56	28/35	0/217	0/580
8	2	37	43	0/121	0/242
9	2	45	43	0/124	0/301
10	1	56	43	0/103	0/156
11	1/5	56	43	0/118	0/268
12	2	56	43	0/132	0/399
13	0/5	37	27/5	0/154	0/087
14	0/5	45	27/5	0/163	0/112
15	0/5	56	27/5	0/172	0/147
16	1	56	27/5	0/181	0/309
17	1/5	56	27/5	0/193	0/495
18	0/5	37	22/1	0/168	0/104
19	0/5	45	22/1	0/183	0/138
20	0/5	56	22/1	0/198	0/186
21	1	56	22/1	0/214	0/401
22	1/5	56	22/1	0/233	0/655
23	2	37	37/6	0/129	0/280
24	2	45	37/6	0/138	0/365
25	0/5	56	37/6	0/111	0/091
26	1	56	37/6	0/123	0/202
27	1/5	56	37/6	0/136	0/336
28	2	56	37/6	0/145	0/477
29	2	56	28/35	0/21	0/729
30	3	45	43	0/142	0/535
31	1/5	37	37/6	0/115	0/191

در نهایت پس از انجام مطالعات آماری، مدل‌های آماری برای پیش‌بینی سایش ابزارهای الماسی و شدت

جریان مصرفی دستگاه‌های برش به‌صورت زیر پیشنهاد شدند.

$$I_C = 10^{2.813} \times \frac{D_c^{0.211} \times F_r^{0.043}}{RSI^{0.562}} \quad \text{مدل (1)}$$

$$I_G = 10^{2.098} \times \frac{D_c^{0.418} \times F_r^{0.118}}{RSi^{0.247}} \quad \text{مدل (2)}$$

$$W_r = \frac{D_c^{1.166} \times F_r^{1.173}}{10^{0.564} \times RSi^{1.372}} \quad \text{مدل (3)}$$

در مدل‌های بالا I_G و I_C به ترتیب معرف شدت جریان مصرفی برای سنگ‌های کربناته و گرانیتی بر حسب آمپر، W_r نرخ سایش بر حسب میلی‌متر بر ساعت، D_c عمق برش بر حسب میلی‌متر، F_r نرخ پیشروی بر حسب سانتی‌متر بر ثانیه، RSi شاخص قابلیت برش می‌باشند.

5-3-3-2- اعتبارسنجی مدل‌ها

در این بخش از تحقیق به کنترل و اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده پرداخته می‌شود. به منظور بررسی صحت و سقم هر یک از مدل‌ها ابتدا از آزمون‌های آماری استفاده گردید و سپس پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز ربع اول مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از بررسی‌های آماری در جدول 5-9 نشان داده شده است.

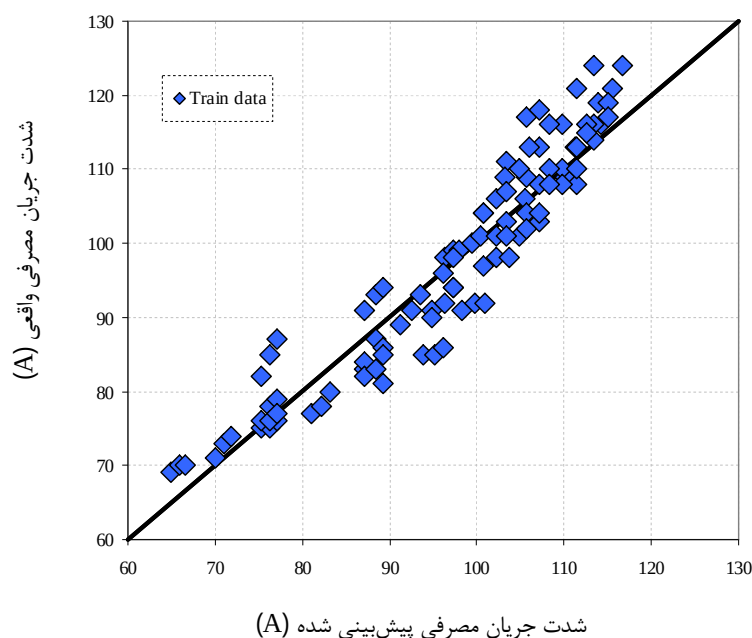
جدول 5-9- نتایج حاصل از بررسی آزمون‌های آماری برای مدل‌های پیش‌بینی

مدل	ضرایب توانی	خطای معیار	F	F جدول	t	t جدول	R
مدل (1)	عدد ثابت	2/813	0/086	290/55	4/8	32/59	0/91
	D_c	0/211	0/007			29/02	
	F_r	0/043	0/021			2/086	
	RS_i	-0/562	0/48			-11/73	
مدل (2)	عدد ثابت	2/098	0/046	110/76	5/1	45/64	0/98
	D_c	0/418	0/007			56/02	
	F_r	0/118	0/023			5/24	
	RS_i	-0/247	0/016			-15/22	
مدل (3)	عدد ثابت	-0/564	0/226	411/55	5/1	-2/49	0/98
	D_c	1/166	0/037			31/47	
	F_r	1/173	0/105			11/2	
	RS_i	-1/372	0/09			-15/29	

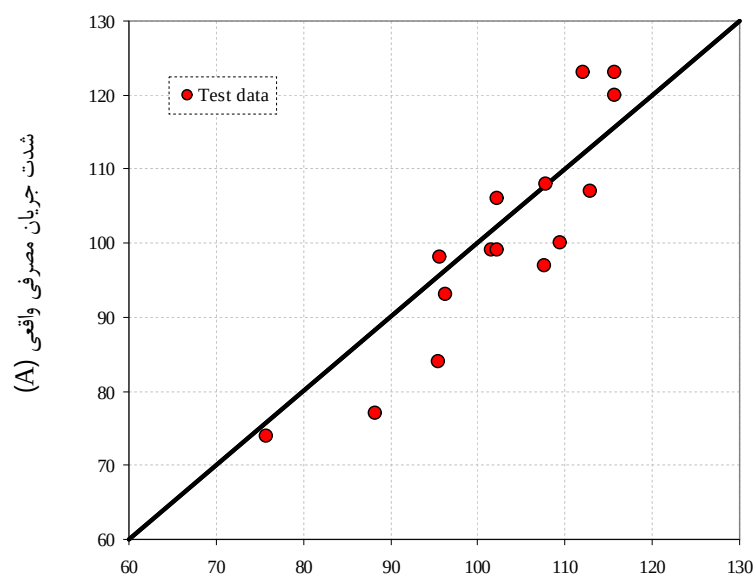
همان‌طوری که در جدول 5-9 مشاهده می‌شود در تمامی مدل‌ها، مقدار t و F های به دست آمده از مدل بزرگتر از مقدار به دست آمده از جدول می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان گفت که نتایج آزمون معنی‌داری

کلی مدل (آزمون F) و متغیرهای مستقل آن (آزمون t) برای هر یک از مدل‌ها مطلوب می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان در تمامی مدل‌ها فرضیه‌ی صفر را که بیان می‌کند رابطه خطی بین متغیرهای وابسته (شدت جریان مصرفی و سایش ابزار الماسی) و متغیرهای مستقل (عمق برش، نرخ پیشروی و شاخص قابلیت برش سنگ) وجود ندارد را رد کرد. همچنین می‌توان فرضیه‌ی صفر بودن هر یک از ضرایب متغیرهای مستقل را رد کرده و نتیجه‌گیری کرد که حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

یکی دیگر از معیارهای ارزیابی مدل‌های آماری، پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیمساز 1:1 برای دو گروه از داده‌های آزمون و آموزش می‌باشد. شکل‌های 5-7 تا 5-12 پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی را نسبت به خط نیمساز 1:1 برای دو گروه از سنگ‌های مورد مطالعه نشان می‌دهند. با توجه به مقادیر خطای نسبی و تمرکز خوب این نقاط نسبت به خط نیمساز، می‌توان گفت که مدل‌ها از دقت خوبی در تخمین و پیش‌بینی مقادیر شدت جریان مصرفی دستگاه و سایش ابزار الماسی برخوردار می‌باشند. لازم به ذکر است که تمامی داده‌های مورد استفاده برای آموزش و آزمون مدل‌ها به تفکیک به همراه مقادیر خطای نسبی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی در پیوست شماره 3 آورده شده است.

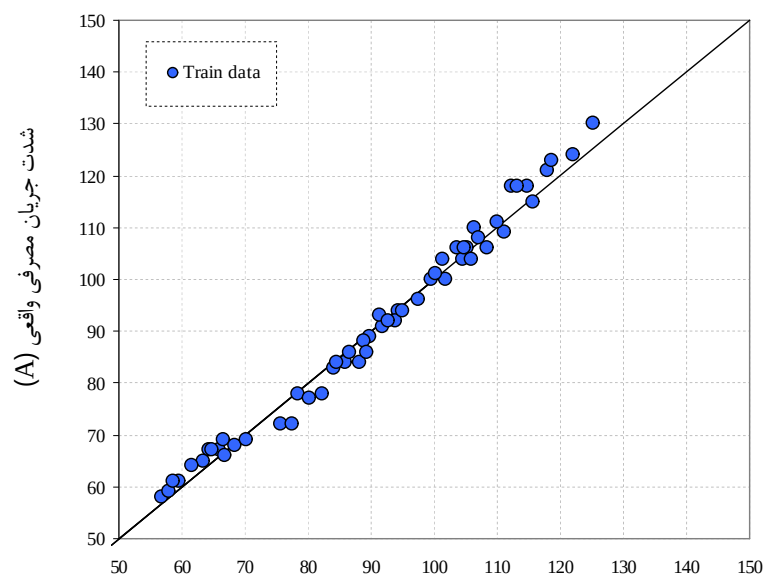


شکل 5-7- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی برای داده‌های آموزش نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 1



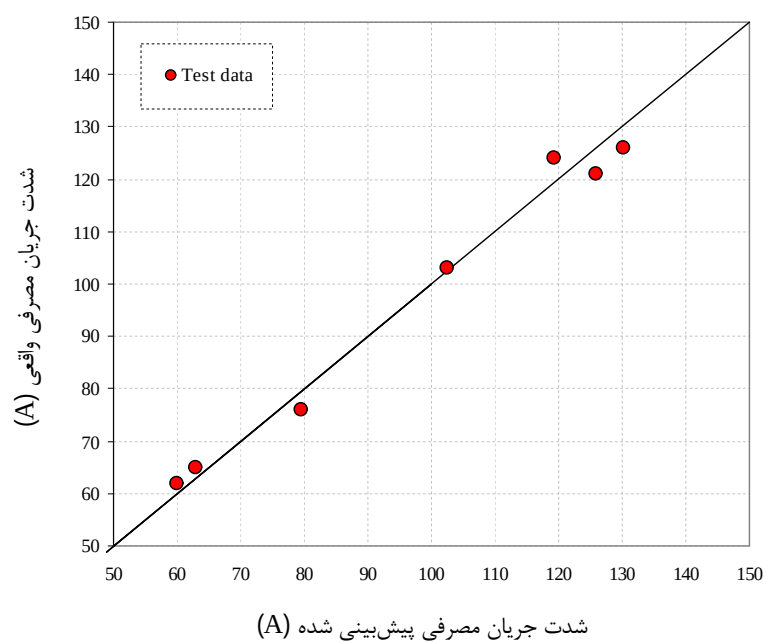
شدت جریان مصرفی پیش‌بینی شده (A)

شکل 5-8- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی برای داده‌های آزمون نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 1

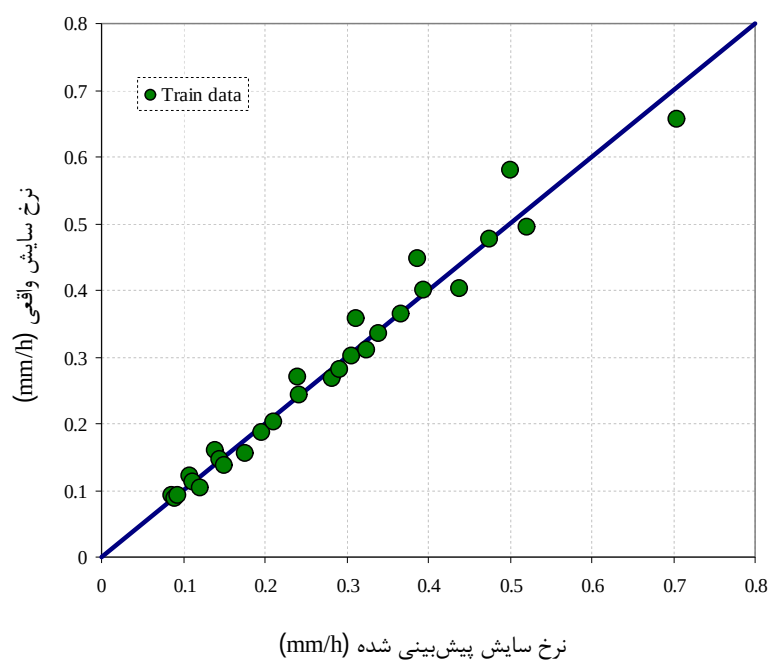


شدت جریان مصرفی پیش‌بینی شده (A)

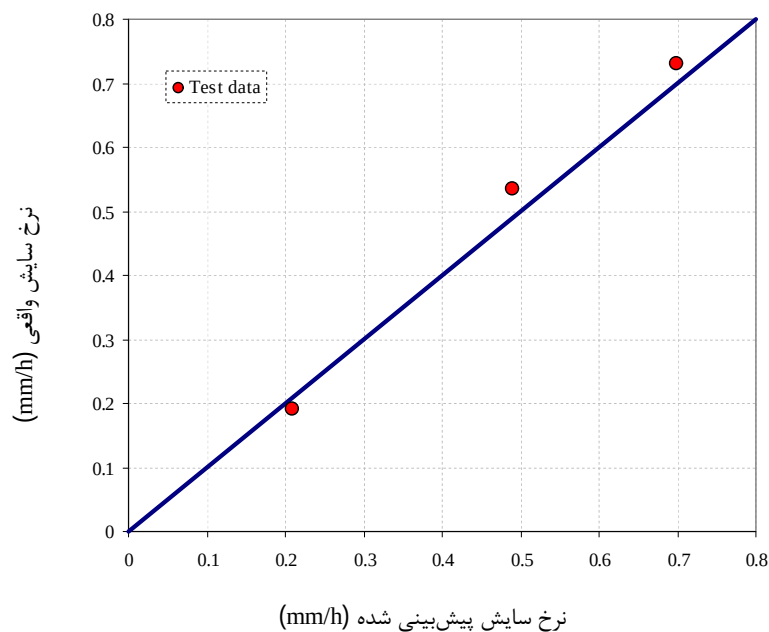
شکل 5-9- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی برای داده‌های آموزش نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 2



شکل 5-10- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی برای داده‌های آزمون نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 2



شکل 5-11- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی برای داده‌های آموزش نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 3



شکل 5-12- پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی برای داده‌های آزمون نسبت به خط نیمساز 1:1 برای مدل 3

5-3-3-3- تعیین مقدار حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز برای نمونه سنگ‌های مختلف

در این بخش از تحقیق سعی می‌شود تا به بررسی و تحلیل حساسیت تابع هزینه کل نسبت به فاکتورهای هزینه‌ساز در نمونه سنگ‌های مختلف پرداخته شود. بدین ترتیب پس از تعیین مدل‌های پیش‌بینی شدت جریان مصرفی و سایش ابزار الماسی، رابطه‌های 5-5 و 6-5 به صورت روابط زیر بازنویسی می‌شوند.

$$C_{EC} = \frac{10^{2.813} \times D_c^{0.211} \times F_r^{0.043} \times V \times E_p}{RS_i^{0.562} \times D_c \times F_r \times K} \quad (\text{رابطه 5-10})$$

$$C_{EG} = \frac{10^{2.098} \times D_c^{0.418} \times F_r^{0.118} \times V \times E_p}{RS_i^{0.247} \times D_c \times F_r \times K} \quad (\text{رابطه 5-11})$$

$$C_d = \frac{D_c^{1.166} \times F_r^{1.173} \times (P_p + (n \times (S_p + G_p)))}{10^{0.564} \times RS_i^{1.372} \times L \times n \times D_c \times F_r \times K} \quad (\text{رابطه 5-12})$$

در روابط بالا پارامترهای C_{EC} و C_{EG} به ترتیب معرف هزینه انرژی مصرفی برای دو گروه از سنگ‌های نرم و سخت بر حسب تومان بر متر مربع و C_d نشانگر هزینه دیسک مصرفی بر حسب تومان بر مترمربع و V معرف ولتاژ مصرفی دستگاه برش می‌باشند. بدین ترتیب با جاگذاری روابط بالا در رابطه 5-9، تابع هزینه کل را می‌توان برای دو گروه از سنگ‌های نرم و سخت به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$C_{TC} = \frac{W_r \times (P_p + (n \times (S_p + G_p)))}{L \times n \times D_c \times F_r \times K} + \frac{10^{2.813} \times D_c^{0.211} \times F_r^{0.043} \times V \times E_p}{RSi^{0.562} \times D_c \times F_r \times K} \quad \text{(رابطه 13-5)}$$

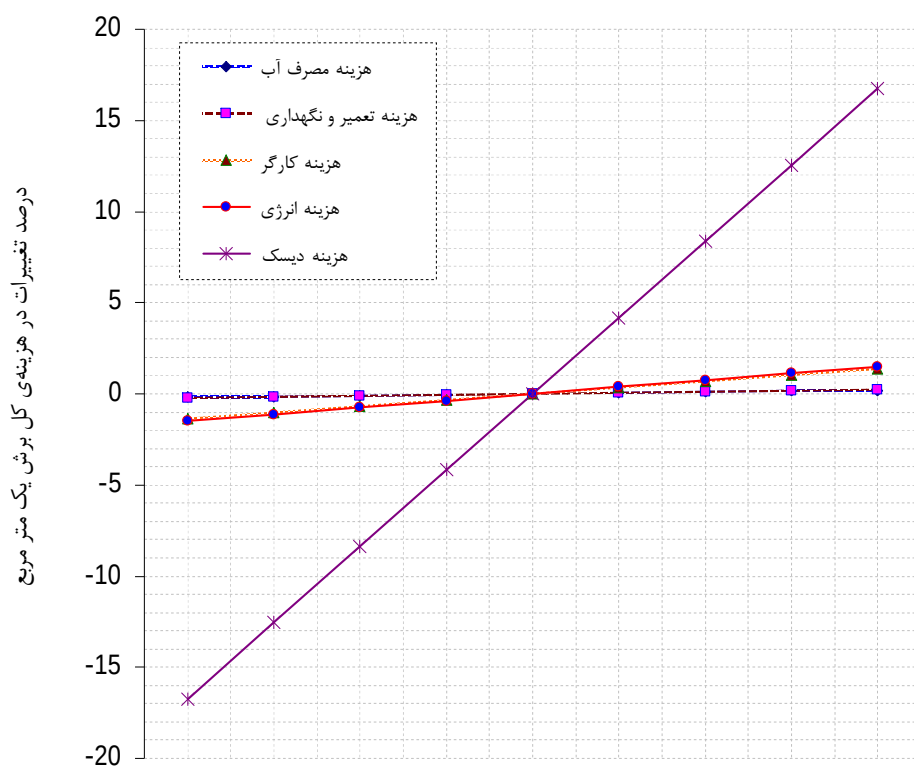
$$+ \frac{P \times N_L}{H_m \times D_c \times F_r \times K} + \frac{M_p}{D_c \times F_r \times K \times d_y \times H_d} + \frac{W_{co} \times W_p}{D_c \times F_r \times K}$$

$$C_{TG} = \frac{D_c^{1.166} \times F_r^{1.173} \times (P_p + (n \times (S_p + G_p)))}{10^{0.564} \times RSi^{1.372} \times L \times n \times D_c \times F_r \times K} + \frac{10^{2.098} \times D_c^{0.418} \times F_r^{0.118} \times V \times E_p}{RSi^{0.247} \times D_c \times F_r \times K} \quad \text{(رابطه 14-5)}$$

$$+ \frac{P \times N_w}{H_m \times D_c \times F_r \times K} + \frac{M_p}{D_c \times F_r \times K \times d_y \times H_d} + \frac{W_{co} \times W_p}{D_c \times F_r \times K}$$

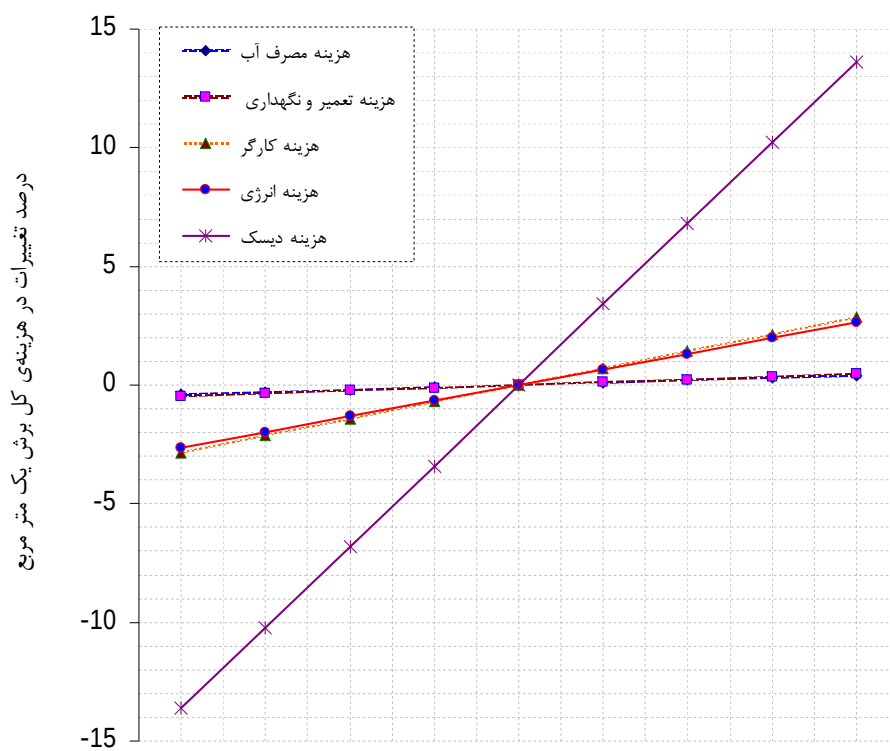
در روابط بالا C_{TC} و C_{TG} به ترتیب معرف هزینه‌ی کل تولید برای دو گروه از نمونه سنگ‌های نرم و سخت بر حسب تومان بر متر مربع می‌باشد. با استفاده از روابط بالا می‌توان میزان تغییرات حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز را نسبت به شاخص قابلیت برش سنگ محاسبه کرد. برای این منظور مطالعات برای نمونه سنگ‌های مختلف سخت (نمونه سنگ‌هایی با شاخص قابلیت برش متفاوت از 15 تا 90) تحت شرایط عملیاتی ثابت (عمق برش 1/5 میلی‌متر و سرعت پیشروی 56 سانتی‌متر بر ثانیه) انجام شد. جدول 5-10 به همراه نمودارهای 5-13 تا 5-17 تحلیل حساسیت تابع هدف (تابع هزینه‌ی کل) نسبت به فاکتورهای هزینه‌ساز را برای نمونه سنگ‌های مختلف سخت نشان می‌دهند.

جدول 5-10- نتایج حاصل از تحلیل حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز برای نمونه سنگ‌های سخت					
مشخصات کیفی سنگ	خیلی خوب	خوب	متوسط	ضعیف	خیلی ضعیف
شاخص قابلیت برش سنگ	90	70	50	30	15
هزینه‌ی کل تولید (تومان)	1772	2049	2591	4042	8516
تغییرات فاکتور آب (%)	0/923	0/798	0/631	0/404	0/192
تغییرات فاکتور تعمیرات (%)	1/088	0/941	0/744	0/477	0/226
تغییرات فاکتور کارگر (%)	6/527	5/644	4/462	2/86	1/358
تغییرات فاکتور انرژی (%)	4/575	4/21	3/616	2/63	1/482
تغییرات فاکتور سایش (%)	6/888	8/408	10/55	13/63	16/74



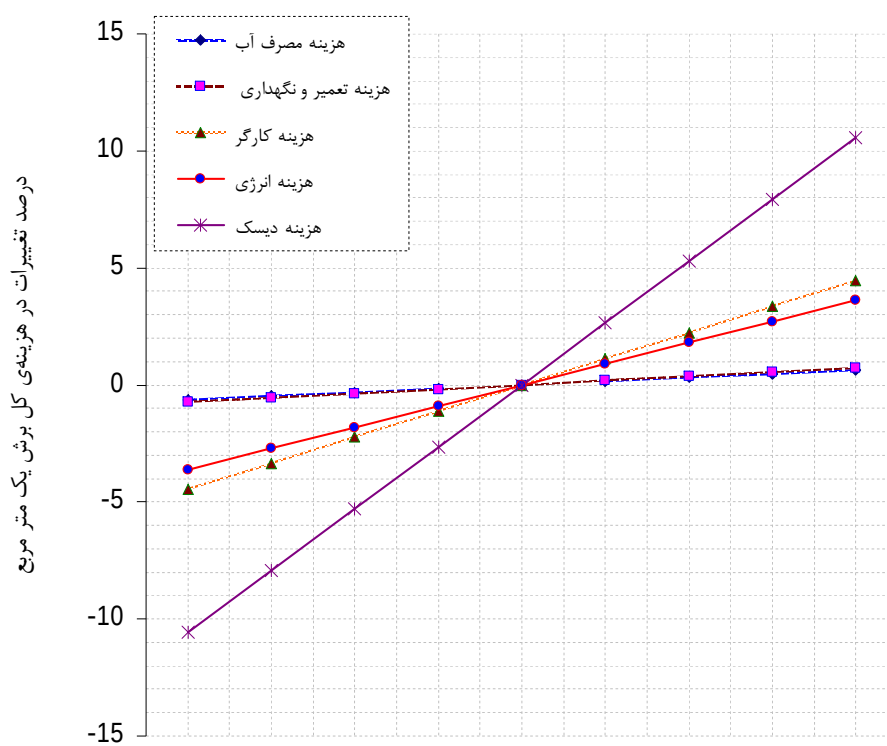
درصد تغییرات فاکتورهای هزینه‌ساز از مقدار اولیه

شکل 5-13- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ سخت با شاخص قابلیت برش 15



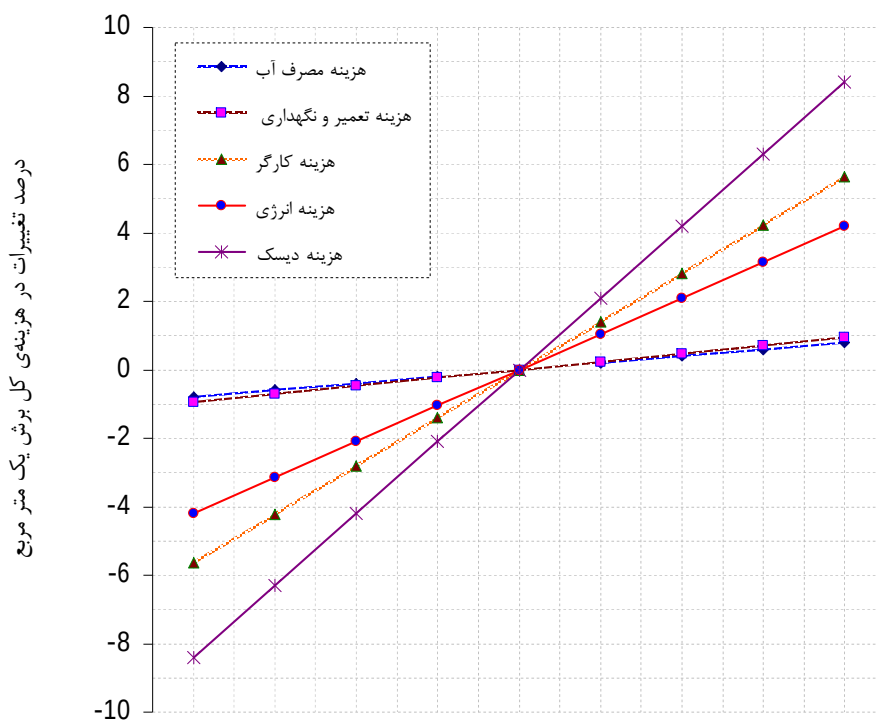
درصد تغییرات فاکتورهای هزینه‌ساز از مقدار اولیه

شکل 5-14- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ سخت با شاخص قابلیت برش 30



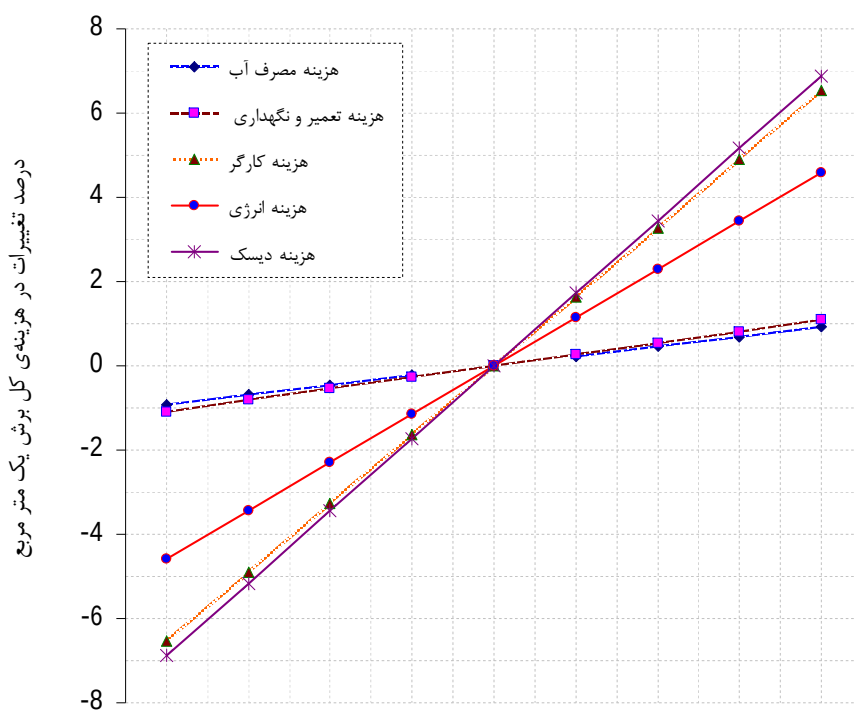
درصد تغییرات فاکتورهای هزینه‌ساز از مقدار اولیه

شکل 5-15- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ سخت با شاخص قابلیت برش 50



درصد تغییرات فاکتورهای هزینه‌ساز از مقدار اولیه

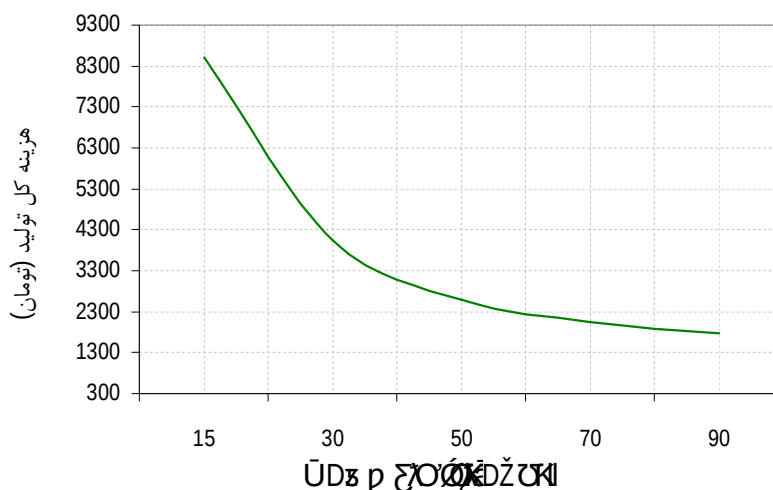
شکل 5-16- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ سخت با شاخص قابلیت برش 70



درصد تغییرات فاکتورهای هزینه ساز از مقدار اولیه

شکل 5-17- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ سخت با شاخص قابلیت برش 90

نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش مقدار شاخص قابلیت برش، مقدار هزینه‌ی کل کاهش پیدا خواهد کرد. دلیل این امر را می‌توان در کاهش هزینه‌های تولید در واحد سطح بریده شده از سنگ شامل هزینه‌های انرژی و سایش ابزار الماسی جستجو کرد. شکل 5-18 روند تغییرات هزینه‌ی کل را نسبت به شاخص قابلیت برش سنگ برای نمونه سنگ‌های سخت نشان می‌دهد.

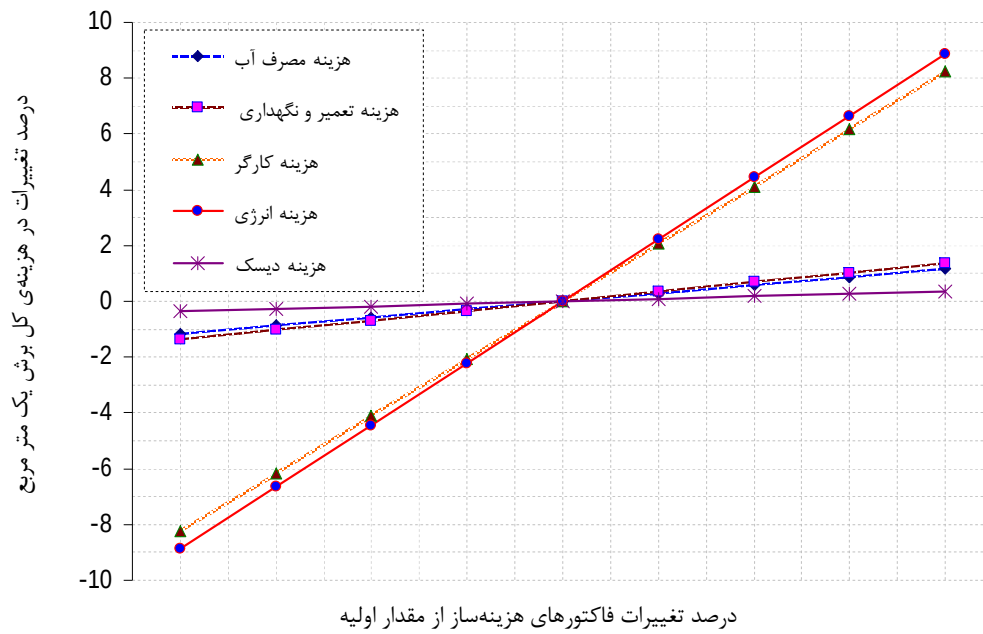


شکل 5-18- روند تغییرات هزینه‌ی کل نسبت به شاخص قابلیت برش در سنگ‌های سخت

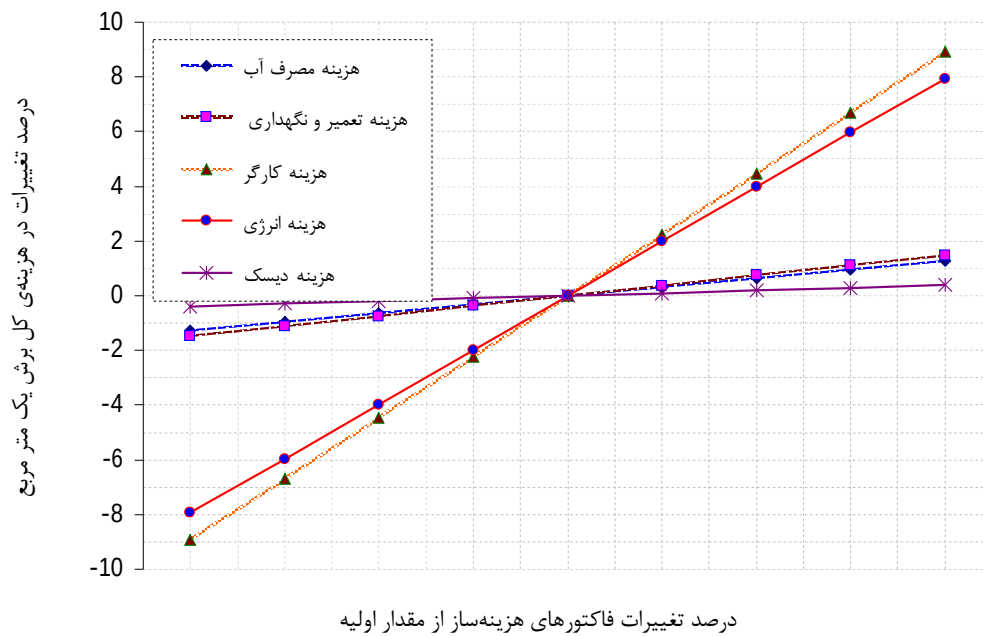
یکی دیگر از نکات قابل توجه در این بخش از تحقیق، تغییر میزان حساسیت تابع هزینه‌ی کل نسبت به دو فاکتور انرژی و هزینه‌ی کارگری با توجه به تغییر شاخص قابلیت برش سنگ‌های مورد مطالعه می‌باشد. به‌طوری که برای نمونه سنگ‌هایی با شاخص قابلیت برش کمتر از 22، مقدار حساسیت تابع هزینه‌ی کل نسبت به فاکتور انرژی بیشتر از فاکتور هزینه‌ی کارگری بوده ولی در نمونه سنگ‌هایی با قابلیت برش بالاتر از 22، مقدار حساسیت فاکتور هزینه‌ی کارگری بیشتر می‌باشد. این در حالی است که مقدار حساسیت تابع هزینه کل برای نمونه سنگی با شاخص قابلیت برش 22 نسبت به دو فاکتور مذکور تقریباً برابر می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان مرتبط با تغییر هزینه‌های انرژی برای نمونه سنگ‌های مختلف با توجه تغییر قابلیت برش دانست. چرا که در یک نرخ تولید ثابت (شرایط ثابت عملیاتی)، با افزایش شاخص قابلیت برش، هزینه‌های مصرف انرژی دستگاه برش نسبت به هزینه‌های کارگری از کاهش بیشتری برخوردار می‌باشد. نکته قابل توجه در این بخش باقی ماندن فاکتور مصرف دیسک الماسی به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر در فرایند برش می‌باشد. به طوری که حساسیت این فاکتور در تمامی حالات بیشتر از سایر فاکتورها می‌باشد.

به طور مشابه این مطالعات نیز برای نمونه سنگ‌های نرم تحت شرایط عملیاتی ثابت (عمق برش 5 میلی‌متر و نرخ پیشروی 60 سانتی‌متر بر ثانیه) انجام شد. جدول 5-11 به همراه نمودارهای 5-20 تا 5-24 نتایج حاصل از تحلیل حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز را برای نمونه سنگ‌هایی با قابلیت برش 15 تا 90 نشان می‌دهند.

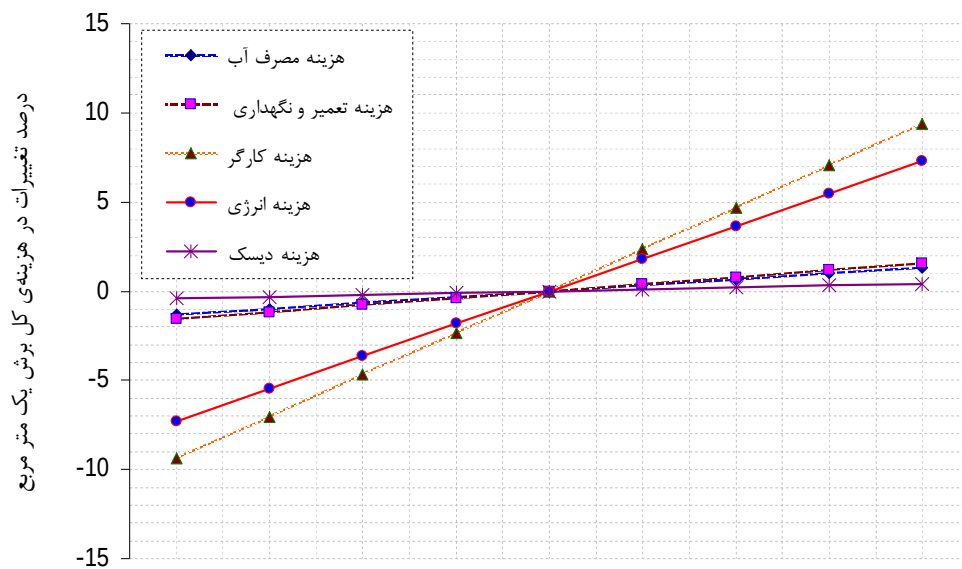
جدول 5-11- نتایج حاصل از تحلیل حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز برای نمونه سنگ‌های نرم					
مشخصات کیفی سنگ	خیلی خوب	خوب	متوسط	ضعیف	خیلی ضعیف
شاخص قابلیت برش سنگ	90	70	50	30	15
هزینه‌ی کل تولید (تومان)	354	373	404	463	576
تغییرات فاکتور آب (%)	1/32	1/25	1/15	1/01	0/81
تغییرات فاکتور تعمیرات (%)	1/55	1/47	1/36	1/19	0/95
تغییرات فاکتور کارگر (%)	9/29	8/82	8/15	7/11	5/72
تغییرات فاکتور انرژی (%)	7/2	7/86	8/78	10/21	12/12
تغییرات فاکتور سایش (%)	0/64	0/60	0/56	0/49	0/39



شکل 5-22- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ نرم با شاخص قابلیت برش 50



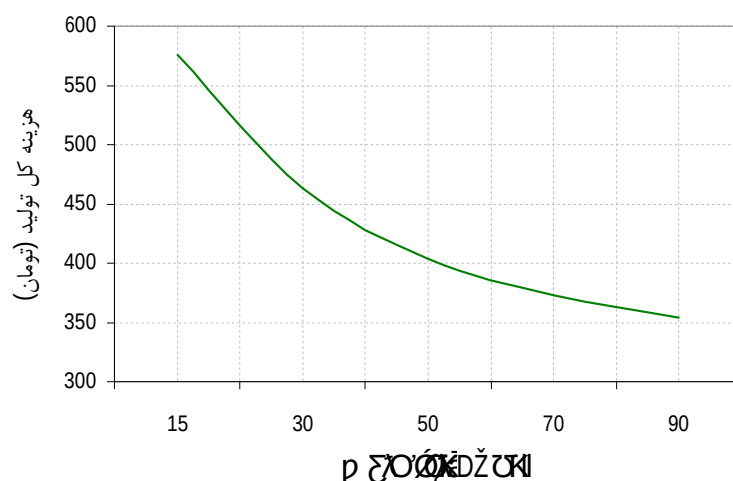
شکل 5-23- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ نرم با شاخص قابلیت برش 70



درصد تغییرات فاکتورهای هزینه‌ساز از مقدار اولیه

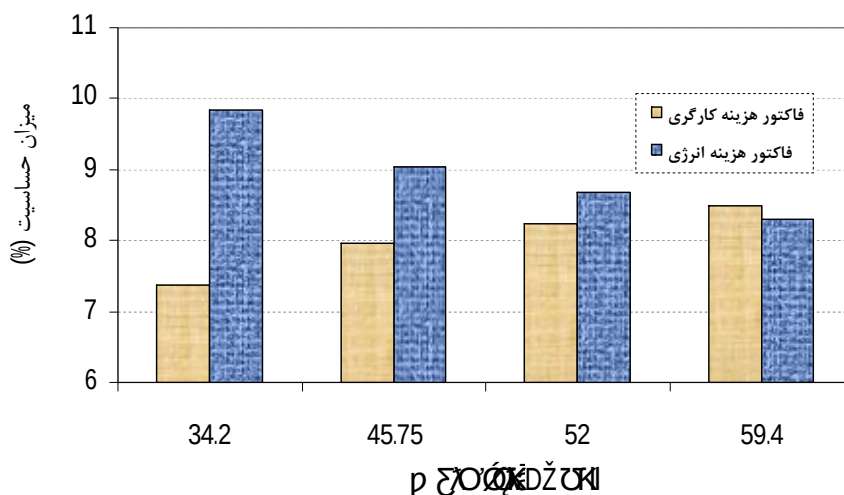
شکل 5-24- تحلیل حساسیت برای یک نمونه سنگ نرم با شاخص قابلیت برش 90

نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش مقدار شاخص قابلیت برش، میزان هزینه‌های کلی تولید به ازای واحد سطح بریده شده از بلوک سنگی کاهش می‌یابد. به طوری که هزینه‌های تولید برای نمونه سنگی با شاخص قابلیت 15 (576 تومان)، تقریباً 39 درصد بیشتر از هزینه نمونه سنگی با شاخص قابلیت 90 (354 تومان) می‌باشد. شکل 5-25 روند تغییرات هزینه‌ی کل را نسبت به شاخص قابلیت برش در سنگ‌های نرم می‌دهد.



شکل 5-25 - روند تغییرات هزینه‌ی کل نسبت به شاخص قابلیت برش در سنگ‌های نرم

نکته قابل توجه در این بخش تغییر حساسیت تابع هزینه کل نسبت به دو فاکتور هزینه انرژی و کارگری می‌باشد. نتایج نشان داده است که با افزایش شاخص قابلیت برش سنگ حساسیت تابع هزینه کل نسبت به فاکتور انرژی در مقایسه با فاکتور هزینه کارگری کاهش می‌یابد. به طوری که میزان حساسیت تابع هزینه کل نسبت به این دو فاکتور در نقطه شاخص قابلیت برش 56 یکسان بوده و در نمونه سنگ‌هایی با شاخص قابلیت بیشتر از 56 مقدار حساسیت تابع هزینه کل نسبت به فاکتور هزینه کارگری بیشتر از هزینه انرژی می‌باشد. به طور مشابه این مطلب را می‌توان در نمونه سنگ‌های مطالعه شده نیز مشاهده کرد. نمودار شکل 5-26 مقایسه دو فاکتور انرژی مصرفی و هزینه کارگری را در نمونه سنگ‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان می‌دهد که در تمامی نمونه سنگ‌های مطالعه شده به جز نمونه سنگ تراورتن قرمز آذرشهر، حساسیت تابع هزینه کل نسبت به فاکتور انرژی بیشتر از سایر فاکتورها می‌باشد.



شکل 5-26- مقایسه حساسیت دو فاکتور انرژی مصرفی و هزینه کارگری در نمونه سنگ‌های مورد مطالعه نرم

4-5- جمع بندی

امروزه یکی از معیارهای مهم در رقابت بازارهای جهانی، قیمت تمام شده کالا در شرایط کیفی یکسان می‌باشد. لذا با توجه به هزینه‌های بالای برش یک بلوک سنگی، انجام مطالعات دقیق اقتصادی از جمله حساسیت‌سنجی و تجزیه و تحلیل ریسک‌پذیری این قبیل پروژه‌های اقتصادی لازم و ضروری است.

تحلیل حساسیت از جمله روش‌های موجود برای تعیین حساسیت مدل اقتصادی نسبت به فاکتورهای هزینه‌ساز می‌باشد. به‌طوری که در این روش تابع هدف (مدل اقتصادی) نسبت به تغییر متغیرهای اقتصادی مورد سنجش قرار می‌گیرد. تعیین تأثیرپذیری تابع هدف در شرایط مختلف در طول عمر یک پروژه می‌تواند کمک شایانی به مدیران برای جهت‌گیری مناسب اقتصادی، در طول عمر طرح داشته باشد. در این فصل از تحقیق سعی شد تا به بررسی و تحلیل اقتصادی فرایند برش بلوک‌های سنگی سخت و نرم پرداخته شود. به‌طور کلی نتایج حاصل از این فصل را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

1- در بخش نخست از این فصل پس از تعیین فاکتورهای هزینه‌ساز در فرایند برش، به بررسی و محاسبه هزینه‌های موجود در فرایند برش دو بلوک سنگی تراورتن حاجی آباد و گرانیق قرمز یزد پرداخته شد. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که در شرایط فعلی هزینه‌ی مصرف انرژی و سایش ابزار الماسی بیشترین مقدار هزینه‌های تولید را به ترتیب در فرایند برش دو بلوک سنگی نرم و سخت دارا می‌باشند. لذا بررسی این فاکتورها به‌عنوان هزینه‌سازترین فاکتورها در گروه سنگ‌های سخت و نرم لازم و ضروری می‌باشد.

2- در بخش دوم از این فصل به بررسی تأثیر نرخ‌های مؤثر در فرایند برش سنگ شامل نرخ مصرف انرژی، سایش ابزار الماسی، تولید، مصرف آب بر هزینه‌های کلی تولید پرداخته شد. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که نرخ تولید بیشترین تأثیر را در هزینه‌های کلی تولید در میان فاکتورهای مورد بررسی دارا می‌باشد. همچنین در ادامه بررسی‌ها مشخص گردید که هزینه‌های کلی برش در نمونه سنگ‌های سخت و نرم پس از فاکتور نرخ تولید، بیشتر تحت تأثیر فاکتورهای نظیر نرخ سایش و نرخ مصرف انرژی می‌باشند.

3- در بخش انتهایی از این فصل سعی شد تا به بررسی و تحلیل حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز برای نمونه سنگ‌های مختلف (تحت شرایط مختلف از شاخص قابلیت برش سنگ) نرم و سخت پرداخته شود. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده در این بخش نشان داد که با افزایش شاخص قابلیت برش سنگ مقدار هزینه‌های کلی تولید به ازای واحد سطح بریده شده از سنگ کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه در این فصل تغییر حساسیت تابع هزینه‌ی کل نسبت به فاکتورهای هزینه‌ساز انرژی و هزینه‌ی

کارگری در شرایط مختلف از نوع سنگ می‌باشد. به‌طوری که با تغییر شاخص قابلیت برش سنگ از شاخص 22 برای نمونه سنگ‌های سخت و شاخص 56 برای نمونه سنگ‌های نرم تحت شرایط عملیاتی ثابت (عمق برش 1/5 میلی‌متر و نرخ پیشروی 56 سانتی‌متر بر ثانیه برای نمونه سنگ‌های سخت و عمق برش 5 میلی‌متر و نرخ پیشروی 60 سانتی‌متر بر ثانیه)، مقدار حساسیت تابع هزینه‌ی کل نسبت به دو فاکتور انرژی و هزینه‌ی کارگری جابه‌جا می‌شود. به‌عبارت دیگر با افزایش مقدار شاخص قابلیت برش سنگ از این نقاط مرزی، مقدار حساسیت تابع هزینه کل نسبت به فاکتور هزینه کارگری بیشتر از هزینه انرژی مصرفی می‌شود. دلیل این امر را می‌توان به‌خاطر کاهش هزینه‌های انرژی مصرفی با توجه به افزایش قابلیت برش‌پذیری سنگ عنوان کرد.

بهینه‌سازی فرایند برش

6-1- مقدمه

هم اکنون کشور ما به عنوان یکی از کشورهای غنی در زمینه ذخایر و منابع سنگ‌های ساختمانی در جهان مطرح می‌باشد. با این حال علی‌رغم وجود چندین هزار معدن و کارخانه‌های سنگ‌بری فعال، صنعت سنگ ایران نتوانسته است سهم شایسته‌ای در بازارهای جهانی به دست آورد. به هر حال آنچه مسلم است، استعدادها و قابلیت‌های بالقوه و گسترده‌ای برای رونق صادرات سنگ کشورمان وجود دارند، ولی میزان صادرات این محصول در مقایسه با حجم ذخایر، تعداد معادن و کارخانه‌های فرآوری فعال، مطابقت و تناسب چندانی وجود ندارد. نیاز به تولید بیشتر، کیفیت عالی و رقابت مؤثر در بازارهای جهانی مستلزم استفاده از تکنولوژی و ابزارهای پیشرفته در بخش استخراج و فرآوری سنگ می‌باشد. به کارگیری صحیح و بررسی دقیق عملکرد این تجهیزات می‌تواند به‌طور فزاینده‌ای بازدهی و کیفیت سنگ‌های فرآوری شده را بالا برد. از سوی دیگر با افزایش میزان بازدهی و راندمان ماشین‌آلات برش می‌توان تا حد زیادی به کاهش مصرف انرژی و ابزارهای الماسی که در حال حاضر به عنوان دو مسأله مهم و اساسی در کشور مطرح می‌باشد، کمک کرد. با این کار شاخص شدت انرژی مصرفی و سایش را که نشان دهنده‌ی مصرف انرژی و دیسک برای تولید سطح معینی از سنگ است را می‌توان به حد قابل قبول و معقولانه‌ای کاهش داد. افزایش راندمان مصرف انرژی و دیسک به معنی کاهش میزان مصرف انرژی و دیسک به ازاء واحد تولید و بهبود بازده ماشین‌آلات، از جمله راه کارهای مؤثر برای کاهش قیمت تمام شده کالا در فرایندهای تولیدی و نخستین گام بهینه‌سازی در بخش صنعت می‌باشد. لذا این امر باید به عنوان یکی از عوامل مهم در تصمیم‌گیری‌ها، مورد توجه قرار گیرد. از طرف دیگر مهم‌ترین عامل که همان قیمت تمام شده سنگ می‌باشد را نباید فراموش کرد. آنچه مسلم است فاکتورهایی نظیر نرخ تولید، میزان مصرف انرژی و سایش ابزارهای الماسی تأثیر به‌سزایی در قیمت تمام شده کالا دارا می‌باشند که همواره سعی می‌شود تا نسبت نرخ تولید به دو فاکتور هزینه‌های ابزاری و مصرف انرژی افزایش یابد. همان‌طوری که در فصل قبل به آن اشاره شد هزینه‌ی حامل‌های انرژی (با توجه به افزایش قیمت انرژی در کشور) و ابزارهای برش دیسکی و نیروی کارگری از جمله فاکتورهای مؤثر در قیمت

تمام شده پلاک‌های تولیدی می‌باشند. بدون شک بهبود عملکرد مناسب دستگاه‌های برش با هدف استفاده بهینه از منابع انرژی و کاهش هزینه‌های تولید از جمله سر فصل‌های مهم در این بخش از تحقیق محسوب می‌شود. در این فصل از تحقیق سعی شد تا با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش و سایش ابزار الماسی، به بررسی و تعیین شرایط مطلوب برش در دو گروه از سنگ‌های سخت و نرم پرداخته شود. برای رسیدن به بهترین شرایط برش می‌بایست به یک تعادل ایده‌آل میان فاکتورهای هزینه‌ساز شامل هزینه‌ی ابزار، هزینه‌ی انرژی، هزینه‌ی کارگری، مصرف آب، تعمیر و نگهداری با نرخ برش دست پیدا کرد. در واقع راندمان فرایند برش توسط این متغیرهای وابسته مشخص می‌شود.

6-2- بهینه‌سازی فرایند برش سنگ‌های ساختمانی

در این بخش از تحقیق سعی شده است تا به بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی برش با توجه به نوع سنگ (شاخص قابلیت برش سنگ) از دیدگاه اقتصادی (کمینه کردن هزینه‌های کلی تولید) پرداخته شود. برای دستیابی به این مهم، تعیین یک تابع هدف (تابع اقتصادی) و بررسی عوامل تأثیرگذار بر آن در فرایند برش سنگ ضروری است. بدین ترتیب در مرحله نخست از تحلیل بهینه‌سازی، بررسی و شناسایی رفتار فرایند برش تحت شرایط مختلف عملیاتی لازم و ضروری می‌باشد تا علاوه بر بررسی و شناخت دقیق رفتار فرایند، مدل‌های مناسبی برای شبیه‌سازی فرایند در مقیاس صنعتی ارائه شود. با استفاده از چنین مدل‌هایی می‌توان رفتار فرایند را در شرایط مختلف عملیاتی با دقت مناسبی پیش‌بینی کرد. همان‌طوری که در فصل قبل به آن اشاره شد هزینه‌های تولید در یک واحد سنگ‌بری را می‌توان به هزینه‌هایی از قبیل هزینه‌ی مصرف آب، انرژی، سایش ابزار الماسی، کارگری و تعمیر و نگهداری تقسیم‌بندی کرد. پس از بررسی‌های مختلف، دو فاکتور سایش ابزار الماسی و انرژی مصرفی به ترتیب به عنوان حساس‌ترین فاکتور در فرایند برش بلوک‌های سنگی سخت و نرم شناسایی شدند. همچنین مشخص گردید که تغییراتی هرچند کوچک در مقدار نرخ تولید (مستخرج از ضرب دو پارامتر عمق برش و نرخ پیشروی) می‌تواند تأثیر بالایی در هزینه‌ی کل فرایند داشته باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سه عامل نرخ سایش ابزار الماسی (در نمونه

سنگ‌های سخت)، مصرف انرژی و نرخ تولید از جمله مهم‌ترین فاکتورهایی می‌باشند که در فرایند برش می‌بایست به آن‌ها توجه کرد. به عبارت دیگر بررسی و ارتباط میان این سه فاکتور با نوع سنگ تحت شرایط مختلف عملیاتی برای انجام فرایند بهینه‌سازی برش لازم و ضروری می‌باشد. در این فصل به منظور بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی فرایند برش مراحل مختلف محاسباتی انجام شد. مراحل انجام این پروسه همانند سایر مسائل بهینه‌سازی شامل بخش‌های زیر می‌باشد:

الف) تعیین فاکتورهای هزینه‌ساز و ارائه توابع مورد نظر با توجه به پارامترهای مهمی نظیر عمق برش، نرخ پیشروی و شاخص قابلیت برش سنگ

ب) مدلسازی (تابع هدف و محدودیت‌های مسأله)

ج) حل مدل بهینه‌سازی

6-2-1- تعیین توابع هزینه‌ساز با توجه به پارامترهای برش

در فصل قبل فاکتورهای هزینه‌ساز در فرایند برش بلوک‌های سنگی نرم و سخت تعیین و توابع مربوط به هر یک از آن‌ها نیز ارائه شد. به دلیل ارائه توابع مذکور در فصل قبل، از ارائه مجدد این توابع در این فصل خودداری شده است.

6-2-2- مدلسازی

یکی از موارد مهم در یک فرایند بهینه‌سازی، ارائه تابع معیار یا همان تابع هدف می‌باشد. در مسأله‌ی مورد نظر تابع هدف همان تابع هزینه‌ی کل برای برش یک متر مربع از بلوک سنگی می‌باشد که در نهایت می‌بایست با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌ساز به کمترین مقدار خود با توجه به محدودیت‌های مسأله نزدیک شود. رابطه‌های 1-6 و 2-6 به ترتیب توابع هدف را برای دو گروه از سنگ‌های نرم و سخت (تابع هزینه‌ی کل برش به ازای یک متر مربع از پلاک سنگی) نشان می‌دهند.

$$C_{TC} = \frac{W_r \times (P_p + (n \times (S_p + G_p)))}{L \times n \times D_c \times F_r \times K} + \frac{10^{2.813} \times D_c^{0.211} \times F_r^{0.043} \times V \times E_p}{RSI^{0.562} \times D_c \times F_r \times K} \quad (\text{رابطه 1-6})$$

$$+ \frac{P \times N_L}{H_m \times D_c \times F_r \times K} + \frac{M_p}{D_c \times F_r \times K \times d_y \times H_d} + \frac{W_{co} \times W_p}{D_c \times F_r \times K}$$

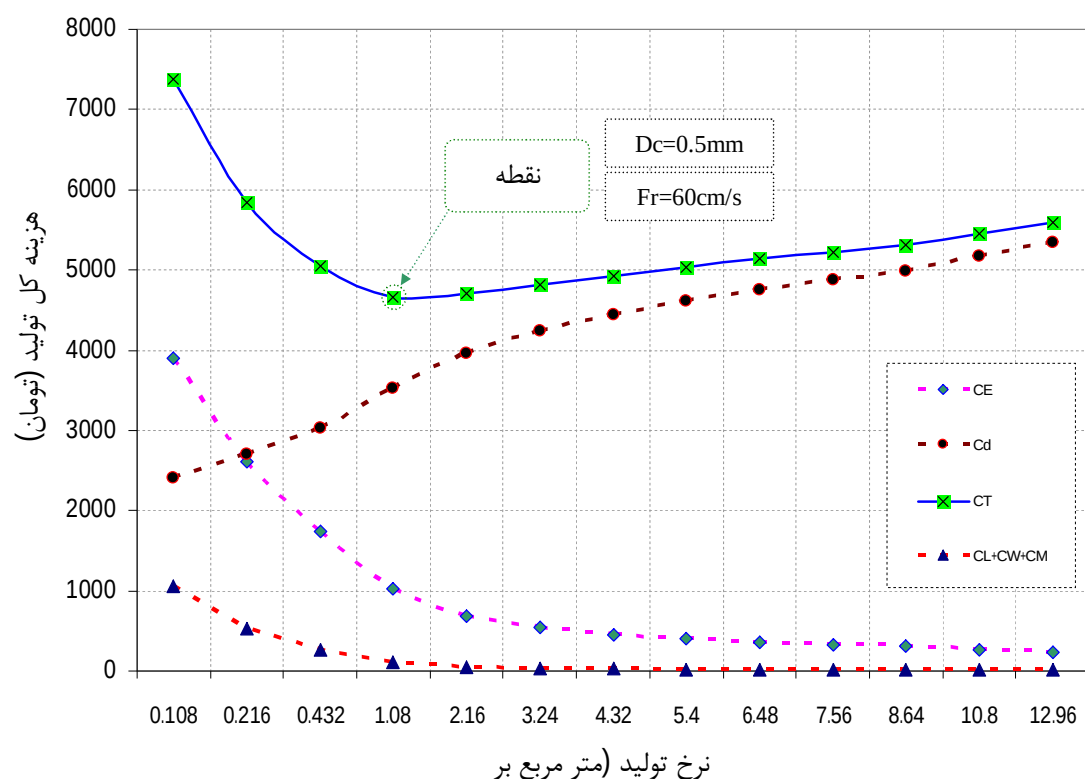
$$C_{TG} = \frac{D_c^{1.166} \times F_r^{1.173} \times (P_p + (n \times (S_p + G_p)))}{10^{0.564} \times RSi^{1.372} \times L \times n \times D_c \times F_r \times K} + \frac{10^{2.098} \times D_c^{0.418} \times F_r^{0.118} \times V \times E_p}{RSi^{0.247} \times D_c \times F_r \times K} \quad (\text{رابطه 2-6})$$

$$+ \frac{P \times N_w}{H_m \times D_c \times F_r \times K} + \frac{M_p}{D_c \times F_r \times K \times d_y \times H_d} + \frac{W_{co} \times W_p}{D_c \times F_r \times K}$$

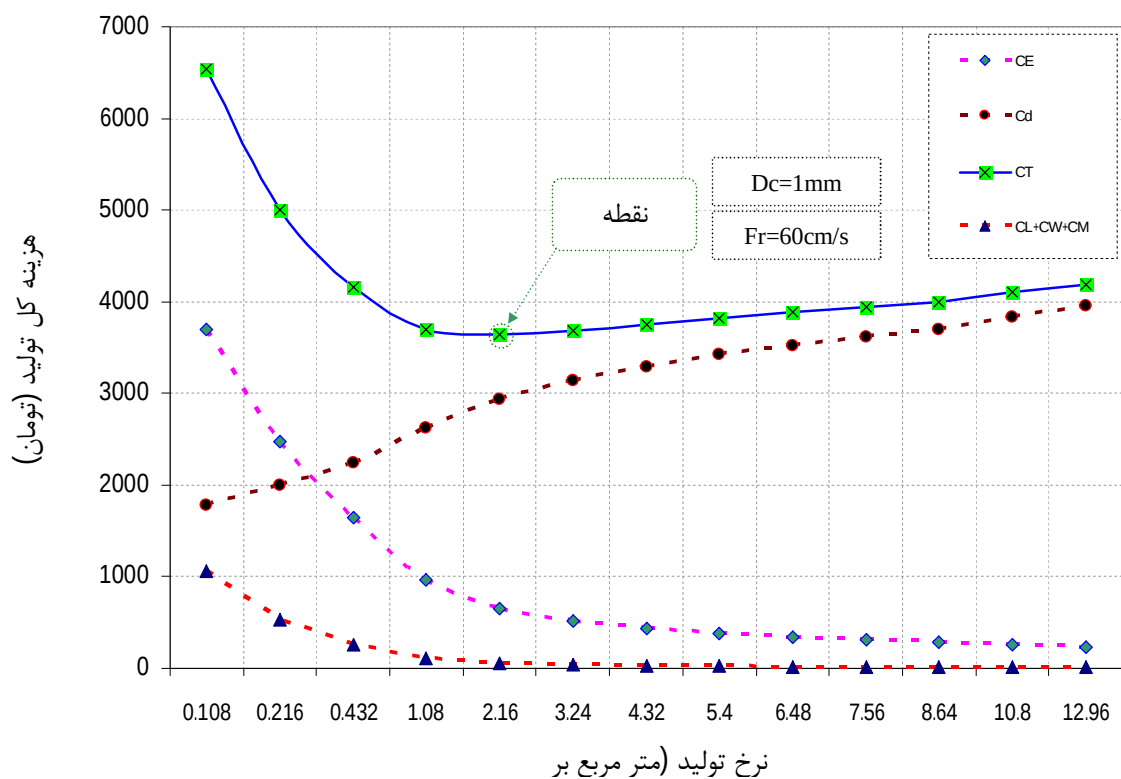
یکی دیگر از موارد مهم و ضروری که می‌بایست در مسائل بهینه‌سازی به آن توجه کرد، تعیین محدودیت‌های مسأله می‌باشد. از جمله محدودیت‌های مهم در مسأله‌ی حاضر، محدودیت شدت جریان مصرفی دستگاه برش می‌باشد. به‌طوری که افزایش مقدار شدت جریان مصرفی دستگاه از 130 آمپر به بالا موجب افزایش بیش از اندازه لرزش دستگاه شده که به دنبال آن هزینه‌های تعمیر و نگهداری افزایش یافته و در نهایت منجر به کاهش کیفیت پلاک‌های سنگی می‌شود.

3-2-6- حل مدل بهینه‌سازی

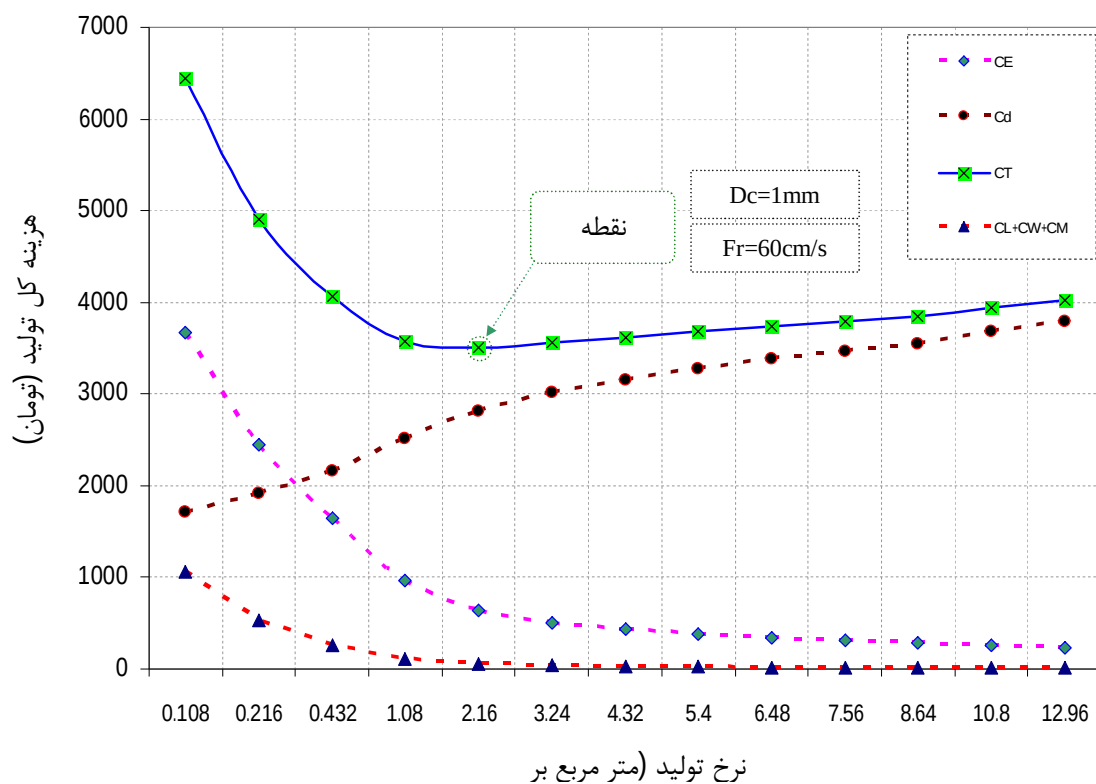
برای درک بهتر این موضوع و قبل از انجام فرایند بهینه‌سازی با کمک الگوریتم‌های بهینه‌ساز، ابتدا سعی شد تا در فضای دو بعدی به بررسی نقاط بهینه برش پرداخته شود. بدین منظور ارتباط میان نرخ تولید (حاصل ضرب دو پارامتر عمق برش و نرخ پیشروی) و تابع هزینه‌ی کل تولید در فرایند برش نمونه سنگ‌های مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب مقادیر هر یک از توابع هزینه‌ساز برای نمونه سنگ‌های مورد مطالعه محاسبه و روند تغییرات هزینه‌ی کل به ازای مقادیر مختلف از نرخ تولید تعیین شد. نمودار شکل‌های 1-6 تا 5-6 تغییرات تابع C_{TG} نسبت به فاکتورهای هزینه‌ساز انرژی مصرفی، سایش ابزار الماسی (دو فاکتور مهم در هزینه‌های کلی تولید نمونه سنگ‌های سخت) و مجموع سایر هزینه‌های تولید (شامل هزینه کارگری، تعمیر و نگهداری و هزینه آب مصرفی) را برای 5 نمونه سنگ سخت مورد مطالعه نشان می‌دهد.



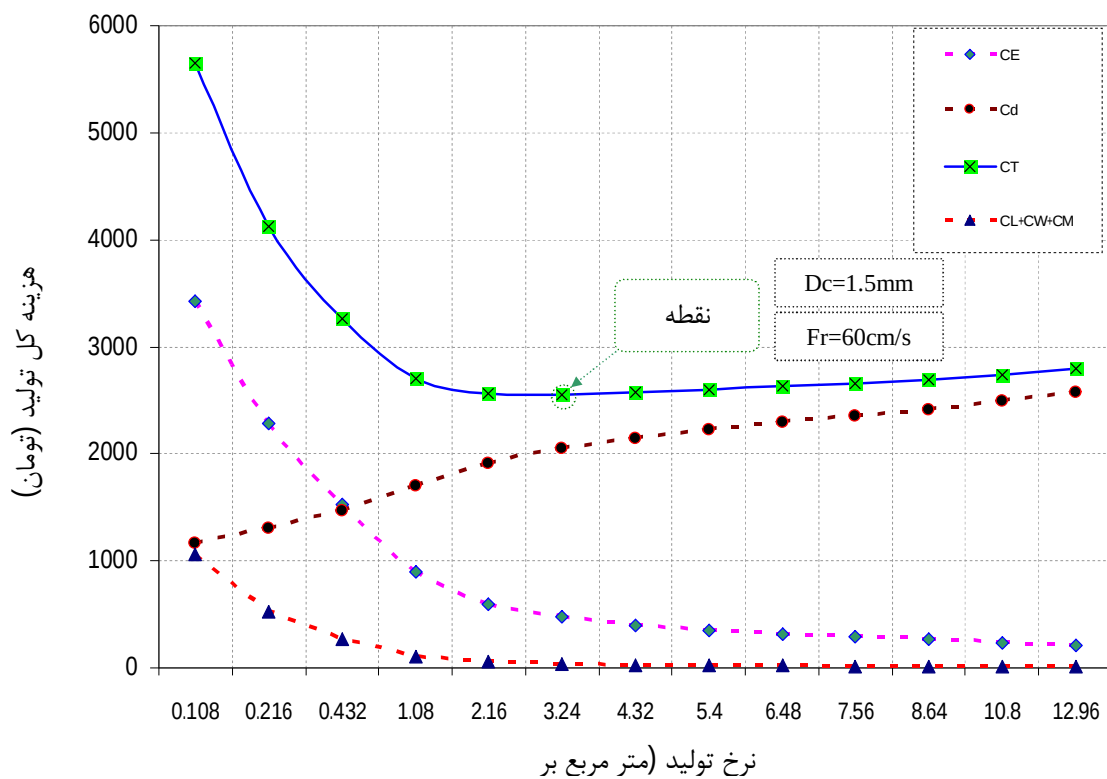
شکل 6-1- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ گرانیت قرمز یزد



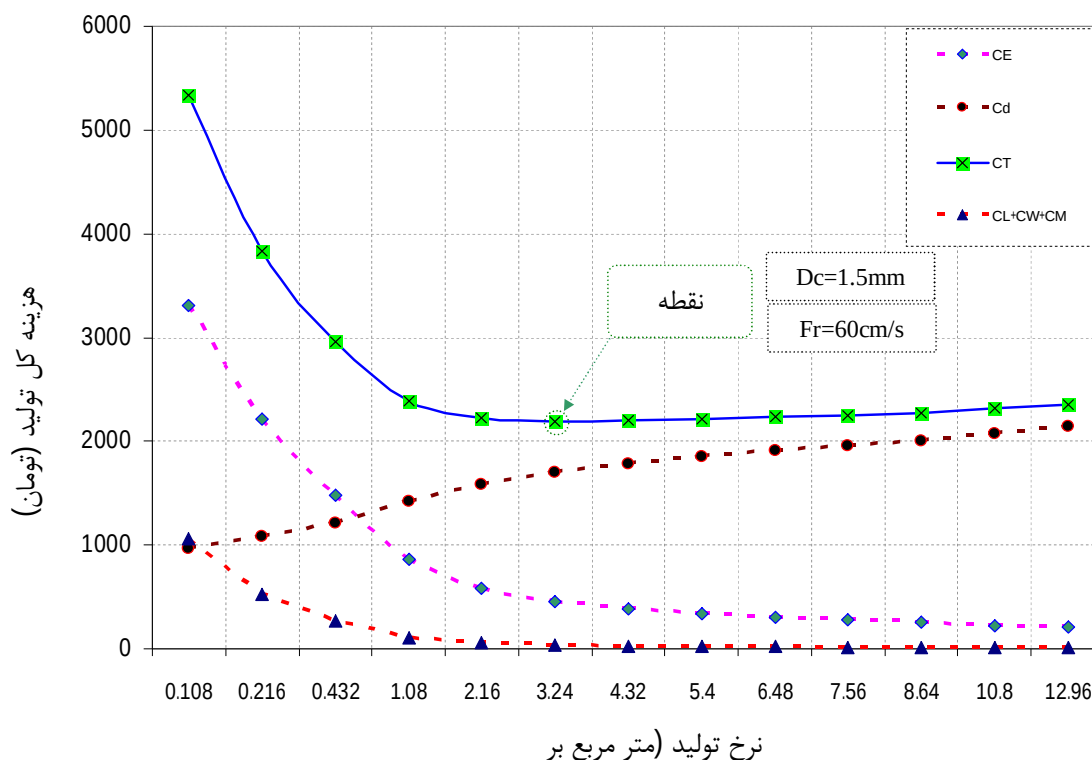
شکل 6-2- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ گرانیت چایان



شکل 3-6- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ گرانیت نهپندان



شکل 4-6- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ گرانیت خرمدره



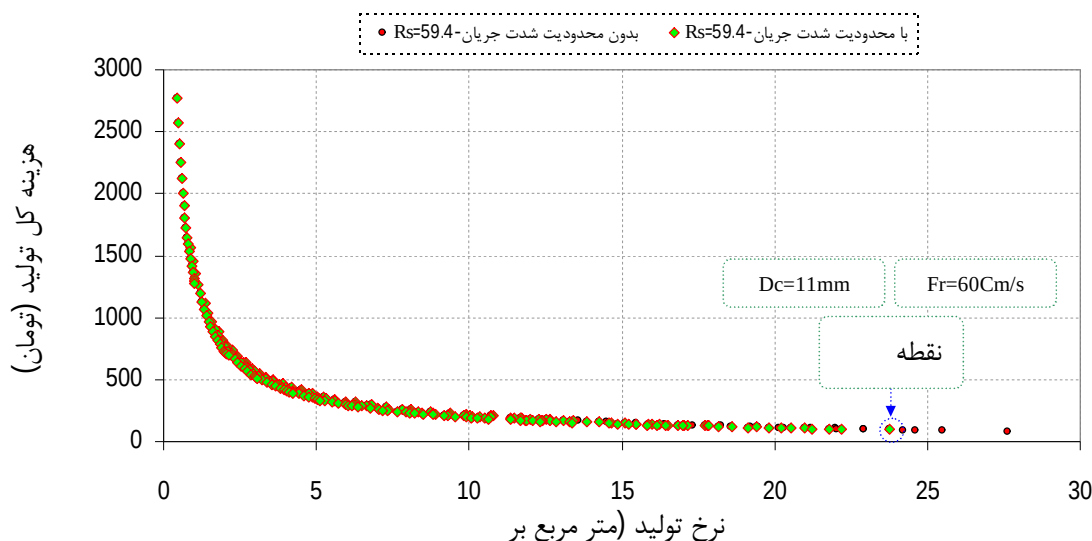
شکل 5-6- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ گرانیت مشهد

همان طوری که در شکل‌های بالا نشان داده شده است، منحنی تغییرات تابع هزینه‌ی کل در ابتدا دارای شیب نسبتاً تندی بوده که با عبور از نقطه مینیمم به شیب تقریباً ملایمی نزدیک می‌شود. دلیل این امر را می‌توان در ارتباط نزدیک میان مقدار نرخ تولید و هزینه‌های کلی تولید جستجو کرد. به طوری که با افزایش میزان نرخ تولید (افزایش پارامترهای عملیاتی)، مقادیر مربوط به هزینه‌های کارگری، مصرف آب و انرژی بر خلاف هزینه‌ی مصرف دیسک کاهش می‌یابد. این روند تغییرات تا قبل از نقطه بهینه ادامه داشته تا جایی که مقدار هزینه‌های مصرف دیسک و انرژی در یک نقطه به یکدیگر نزدیک شده و پس از عبور از نقطه تلاقی‌شان، تابع هدف به مقدار بهینه خود نزدیک می‌شود. برای مثال در نمونه سنگ گرانیت خرمدره (نمونه سنگی با شاخص قابلیت برش 37/6)، مقدار هزینه‌های دو فاکتور انرژی و مصرف دیسک در نقطه‌ای با مشخصات نرخ تولید 0/432 متر مربع بر ساعت با هم تلاقی پیدا کرده و سپس با افزایش نرخ تولید یعنی در نقطه 3/42 متر مربع بر ساعت (عمق برش 1/5 و نرخ پیشروی 60 سانتی‌متر بر ثانیه) مقدار تابع هزینه کل به کمترین مقدار خود (2553 تومان) می‌رسد. به عبارت دیگر این نقطه را می‌توان به عنوان نقطه بهینه برش برای نمونه سنگ گرانیت خرمدره معرفی کرد. به همین ترتیب برای نمونه سنگ گرانیت قرمز یزد

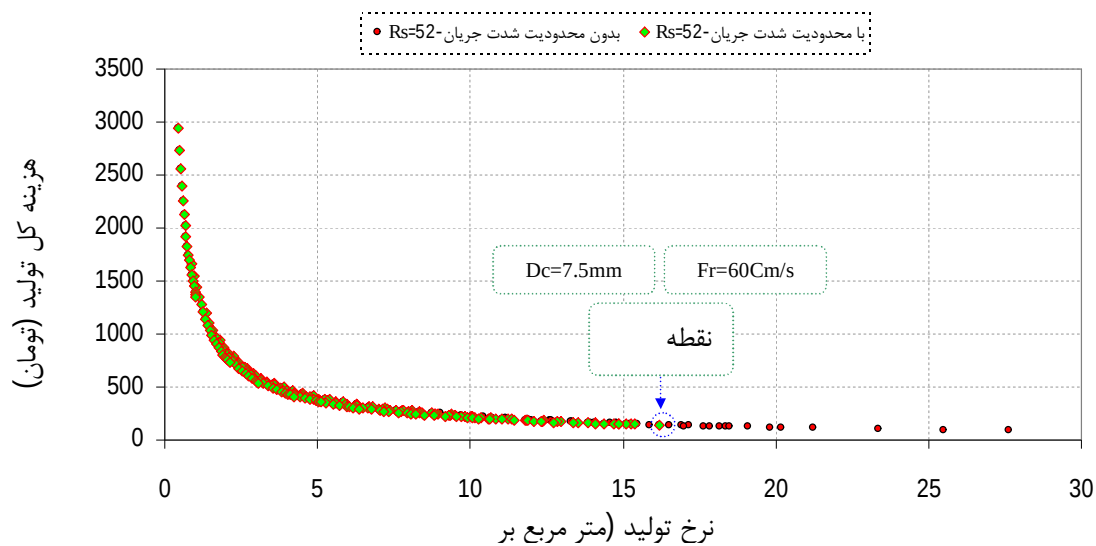
(همانطوری که در شکل 6-1 مشاهده می‌شود)، تابع C_{TG} در نقطه‌ای با نرخ برش 1/08 متر مربع بر ساعت به مقدار بهینه‌ی خود (مینیمم مقدار تابع هزینه کل) نزدیک شده است. بدین ترتیب دومین نقطه‌ی فضایی بهینه مورد نظر با مختصات عمق برش 0/5 میلی‌متر و نرخ پیشروی 60 سانتی‌متر بر ثانیه برای نمونه سنگ گرانیت قرمز با شاخص قابلیت برش 22/1 نیز تعیین گردید. مشخصات نقاط بهینه و مقادیر تابع هدف متعلق به هر یک از نمونه سنگ‌های مورد مطالعه در جدول 6-1 آورده شده است.

جدول 6-1- نقاط بهینه پارامترهای برش برای نمونه سنگ‌های سخت مورد مطالعه					
نام سنگ	قرمز یزد	چایان	نه‌بندان	خرمدره	مروارید مشهد
شاخص قابلیت برش سنگ	22/1	27/5	28/35	37/6	43
عمق بهینه برش (mm)	0/5	1	1	1/5	1/5
نرخ بهینه پیشروی (cm/s)	60	60	60	60	60
سایش ویژه (mm/h)	0/212	0/3524	0/338	0/368	0/306
هزینه‌ی دیسک مصرفی (T/m^2)	3533	2936	2816	2044	1701
شدت جریان مصرفی (A)	71	90	89	98	95
هزینه‌ی انرژی مصرفی (T/m^2)	1022	647	642	473	458
سایر هزینه‌ها (T/m^2)	106	53	53	35	35
هزینه‌ی کل تولید (T/m^2)	4661	3637	3516	2553	2193

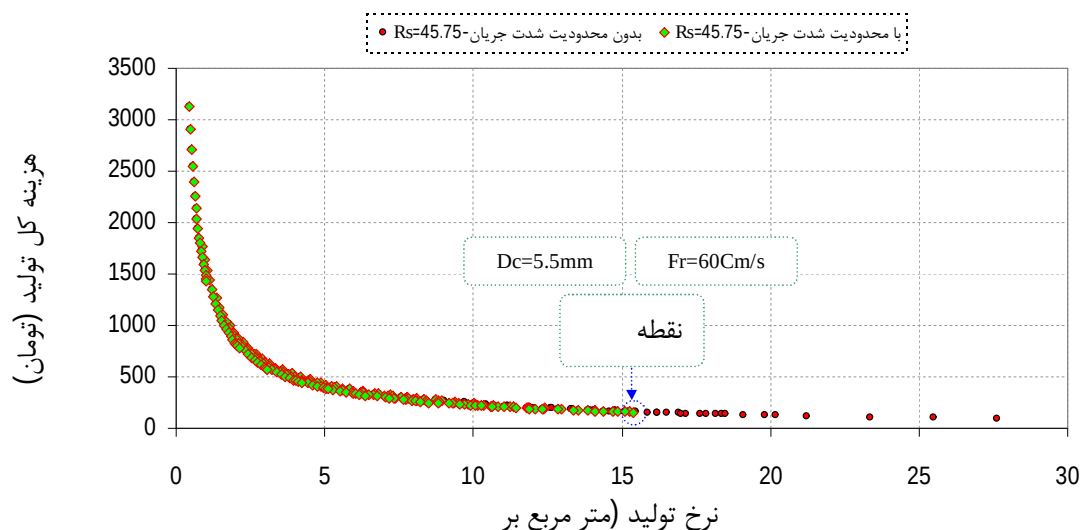
به طور مشابه تغییرات هزینه کلی تولید نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ‌های مورد مطالعه نرم نیز رسم شد و نقاط بهینه برش (حداقل مقدار تابع هدف) با توجه به محدودیت شدت جریان مصرفی دستگاه برش تعیین شد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها در شکل‌های 6-6 تا 6-9 و جدول 6-2 آورده شده است.



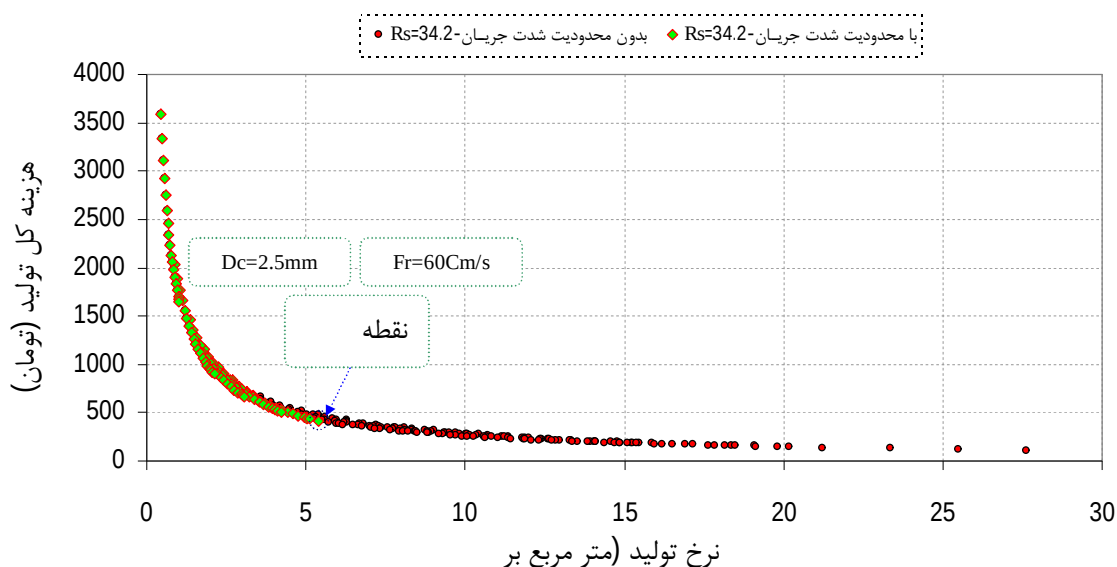
شکل 6-6- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ تراورتن قرمز



شکل 6-7- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ تراورتن حاجی آباد و دره بخاری



شکل 6-8- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ‌های مرمریت صلاصالی، انارک و هرسین



شکل 6-9- تغییرات هزینه‌ی تولید نسبت به تغییرات نرخ تولید برای نمونه سنگ مرمریت هفتومان

جدول 6-2- نقاط بهینه پارامترهای برش برای نمونه سنگ‌های نرم مورد مطالعه

نام سنگ	هفتومان	صلصالی، انارک و هرسین	حاجی آباد و دره بخاری	قرمز آذرشهر
شاخص قابلیت برش سنگ	34/2	45/75	52	59/4
عمق بهینه برش (mm)	2/5	5/5	7/5	11
نرخ بهینه پیشروی (cm/s)	60	60	60	60
شدت جریان مصرفی (A)	129	130	129	130
هزینه‌ی انرژی مصرفی (T/m^2)	373	170	124	85
سایر هزینه‌ها (T/m^2)	44	20	14	10
هزینه‌ی کل تولید (T/m^2)	417	190	138	95

6-3- بهینه‌سازی پارامترهای برش

همان‌طوری که در بخش‌های قبل به آن اشاره شد هدف از انجام این فصل از تحقیق، دستیابی به یک تعادل ایده‌آل میان نرخ تولید و فاکتورهای هزینه‌ساز در فرایند برش سنگ‌های ساختمانی می‌باشد. با توجه به غیر خطی بودن مدل، استفاده از روش‌های خطی برای دستیابی به نقطه بهینه امکان‌پذیر نمی‌باشد. تلاش برای دستیابی به نقطه بهینه با دقت بالا و زمان کمتر موجب یافتن روش‌های ابتکاری⁷⁴ در حل این قبیل از معادلات شد. یکی از این روش‌های ابتکاری، الگوریتم ژنتیک⁷⁵ (GA) می‌باشد که از موجودات زنده برای توسعه آن در حل مسائل بهینه‌سازی الهام گرفته شد. الگوریتم ژنتیک مهمترین روش از تکنیک‌های محاسبات تکاملی⁷⁶ است که از اصل وراثت⁷⁷ و تکامل در طبیعت پیروی می‌کند. این الگوریتم اولین بار در سال 1962 در دانشگاه میشیگان توسط جان هلند⁷⁸ ارائه گردید که از آن زمان تا کنون مسیر طولانی را طی کرده است و گذشت زمان و کاربرد وسیع آن در مسائل گوناگون، آن را به روش مطمئنی تبدیل کرده است. الگوریتم ژنتیک برای مسائل غیرخطی با متغیرهای زیاد، بسیار مناسب بوده و می‌تواند در مسائل بهینه‌سازی نقطه بهینه‌ی کلی را پیدا کند. اجزای الگوریتم ژنتیک شباهت زیادی به ژنتیک معمولی دارد و به طور

⁷⁴ Heuristic Methods

⁷⁵ Genetic Algorithm

⁷⁶ Evolutionary Computation

⁷⁷ Heredity

⁷⁸ John Holland

کلی از اجزایی شامل، کروموزم^{۷۹}، ژن^{۸۰}، جمعیت ژنتیکی^{۸۱}، تابع برازندگی^{۸۲} و عملگرهای ژنتیکی^{۸۳} تشکیل می‌شود. در الگوریتم ژنتیک، کروموزم‌ها از رشته‌هایی از ژن‌ها که با ترتیب معینی در کنار هم چیده شده‌اند، تشکیل می‌شوند. جمعیتی از این کروموزم‌ها در کنار یکدیگر جمعیت ژنتیکی را می‌سازند. کروموزم‌های مختلف در این جامعه، راه‌حل‌های مختلفی برای حل یک مسئله خاص هستند که با یکدیگر برای باقی ماندن در جامعه مورد نظر رقابت می‌کنند. شانس هر یک از کروموزم‌ها برای ادامه حیات و تولید مثل بر اساس توانایی آن‌ها در حل مسئله مورد نظر می‌باشد. برای تعیین این توانایی‌ها تابعی تحت عنوان تابع برازندگی در الگوریتم ژنتیک تعریف شده است که وظیفه آن تعیین مطلوبیت هر کروموزم می‌باشد. در واقع برازندگی تنها دیدی است که الگوریتم ژنتیک نسبت به مسئله مورد نظر خواهد داشت و غیر از آن الگوریتم ژنتیک هیچ تصویری از ماهیت مسئله و چگونگی فضای پاسخ ندارد. یکی از فرایندهای مهم در الگوریتم ژنتیک، فرایند انتخاب طبیعی^{۸۴} می‌باشد. فرایند انتخاب طبیعی موجب می‌شود تا کروموزم‌هایی که ساختار بهتری دارند برای تولید مثل و تشکیل نسل^{۸۵} جدید انتخاب شوند. برای تولید نسل‌های جدید در الگوریتم ژنتیک از عملگرهای مختلفی با نام عملگرهای ژنتیکی شامل عملگرهای تولید مجدد^{۸۶}، تبادل ژنی^{۸۷} و جهش^{۸۸} استفاده می‌شود. الگوریتم ژنتیک، جزء آن دسته از الگوریتم‌های ریاضی می‌باشد که به‌طور موازی بر روی یک جمعیت از ویژگی‌ها (کروموزوم‌ها) به جستجو می‌پردازد. این کروموزوم‌ها راه‌حل‌های بالقوه مسئله می‌باشند. الگوریتم‌های ژنتیکی همواره به دنبال بهترین راه‌حل‌های مسئله با استفاده مجدد از بهترین‌ها با استفاده از این عملگرها می‌باشند. عملگرهای ژنتیکی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

⁷⁹ Chromosome

⁸⁰ Gene

⁸¹ Genetic Population

⁸² Fitness Function

⁸³ Genetic Operators

⁸⁴ Natural Selection

⁸⁵ Generation

⁸⁶ Reproduction

⁸⁷ Crossover

⁸⁸ Mutation

1- تولید مجدد: تولید مثل مجدد در واقع انتقال برخی از اعضای یک نسل به نسل بعدی بدون هر گونه تغییر می‌باشد. به عبارت دیگر به منظور انتقال خصوصیات برتر از یک نسل به نسل بعدی، کروموزم‌هایی که سازگاری بهتری نسبت به سایرین دارند، مستقیماً به نسل بعد منتقل می‌شوند تا در نسل جدید رقابت بین بهترین‌های نسل قبل و اعضای نسل جدید صورت گیرد و بدین وسیله حرکت همواره به سوی رسیدن به اعضایی با سازگاری بالاتر است.

2- تبادُل ژنی: این عملگر مهمترین عملگر الگوریتم ژنتیک می‌باشد که به آن عملگر ترکیبی نیز گفته می‌شود. این عملگر قسمت‌هایی از اطلاعات را که از اعضای مختلف جامعه به دست می‌آورد، با یکدیگر ترکیب می‌کند. به عبارت دیگر این امتزاج زمانی صورت می‌گیرد که والدین بخش‌هایی از کروموزم مربوط به خود را تعویض نمایند. هدف از انجام این کار افزایش امکان تولید عضوی با مشخصات برتر و سازگاری بیشتر است. بنابراین توسط این عملگر، اعضای جدید با ترکیب قسمت‌هایی از دو عضو ایجاد می‌شوند.

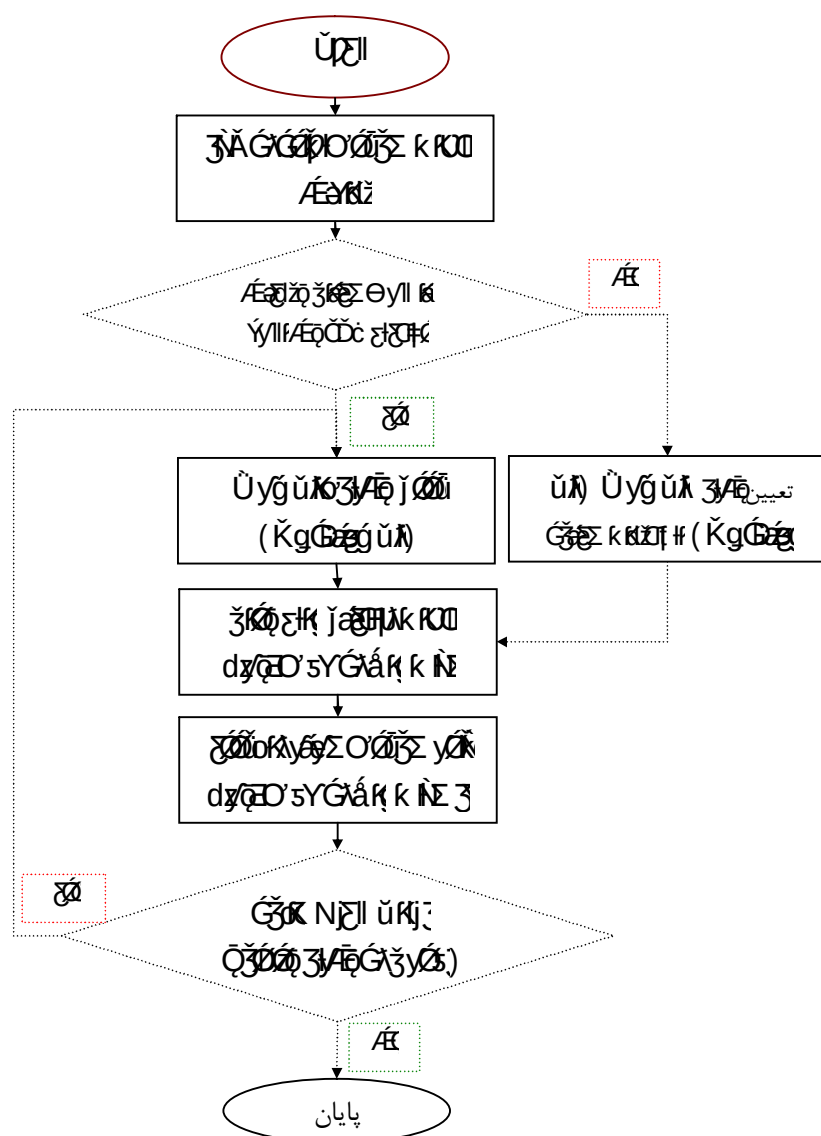
3- جهش: این عملگر در الگوریتم ژنتیک به معنی تغییر تصادفی در یکی از ژن‌ها می‌باشد. در عمل جهش کروموزم‌های جدیدی ساخته می‌شوند که در آن‌ها ترکیب‌های جدید از ژن‌ها وجود دارد که قبلاً در جامعه کروموزم‌ها وجود نداشته است. بنابراین عملگر جهش در حقیقت تأمین کننده نیاز الگوریتم ژنتیک به گوناگونی و تنوع کروموزم‌های جامعه است.

این عملگرها پتانسیل لازم را برای راه‌حل‌های جدید ایجاد می‌نمایند که در تکرار بعدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در نهایت پس از چندین بار تکرار جمعیت به نقطه بهینه کلی همگرا می‌شود. از این رو الگوریتم ژنتیک یک روش جستجوی تکرار شونده⁸⁹ است. پس از هر تکرار، کیفیت جامعه نسبت به نسل قبلی بهبود خواهد یافت، بدین ترتیب الگوریتم ژنتیک در نهایت به جواب بهینه نزدیک می‌شود.

در این بخش از تحقیق از یک الگوریتم ژنتیک با مقادیر حقیقی برنامه‌ریزی شده در محیط نرم افزار MATLAB برای شناسایی پارامترهای بهینه مدل تابع هدف که همان هزینه‌ی کل تولید واحد سطح بریده شده از سنگ می‌باشد، استفاده شد. مقادیر پارامترهای مدل در هر گام متغیرهایی هستند که باید

⁸⁹ Iterative search method

توسط الگوریتم ژنتیک بهینه شوند. در شروع فرایند، برنامه تهیه شده جمعیت اولیه‌ای شامل 100 جواب به فرم رشته‌هایی از متغیرها (کروموزوم‌ها) تولید می‌نماید. این جواب‌ها، رشته‌هایی با اعداد تصادفی در ناحیه جستجو می‌باشند که محدودیت‌ها در اندازه پارامترها را نیز شامل می‌شوند. در نتیجه مقدار تابع هدف برای کروموزوم‌های مختلف ارزیابی می‌شود و برای انتخاب بعدی به کار می‌رود. در برنامه تهیه شده الگوریتم مورد نظر به صورتی تنظیم گردید که بعد از 100 تکرار (تعداد نسل برابر با 100) متوقف شود. محدودیت‌های مسأله، با وارد کردن جریمه روی تابع هدف در برنامه کنترل وارد گردید. شکل 10-6 فلوچارت طراحی شده برای انجام فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد.



شکل 10-6- فلوچارت طراحی شده برای انجام فرایند بهینه‌سازی

همانطوری که در این شکل مشاهده می‌شود در شروع فرایند بهینه‌سازی، تعدادی کروموزم که هر یک بیانگر یک نقطه از فضای جواب می‌باشند به طور تصادفی تولید می‌شوند. در مرحله بعد برازندگی هر یک از کروموزم‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. قبل از تعیین مقدار برازندگی کروموزم‌ها، شرط یا محدودیت مسأله مورد نظر که همان شدت جریان مصرفی دستگاه برش می‌باشد برای کروموزم‌های منتخب (نقاط کاندید شده از پارامترهای برش شامل نرخ پیشروی و عمق برش) مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین ترتیب کروموزم‌هایی که شرط لازم را دارا نباشند با احتساب جریمه در تابع هدف مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. پس از محاسبه مقادیر برازندگی هر یک از کروموزم‌ها، بهترین مقدار برازندگی و کروموزم مربوط به آن حفظ می‌شود. از روی کروموزم‌های تولید شده باید کروموزم‌های نسل بعدی تعیین شوند. برای این منظور احتمال بقای هر یک از کروموزم‌ها محاسبه می‌شود و سپس با تولید اعداد تصادفی میزان حضور هر یک از کروموزم‌ها در نسل آینده تعیین می‌شود. بدین ترتیب جمعیت والدین برای تولید نسل بعد تشکیل می‌شود.

در مسأله مورد نظر از روش انتخاب چرخ رولت⁹⁰ برای انتخاب جمعیت والدین برای تولید مثل استفاده گردید. در این روش شانس هر یک از کروموزم‌ها برای انتخاب، به طور مستقیم متناسب با مقدار برازش آن‌ها می‌باشد. برای تولید مثل و تولد فرزندان (تولید نسل جدید)، کروموزم‌های منتخب دو به دو با یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند. سپس کروموزم‌ها از یک نقطه از وسط شکسته شده و قطعات نظیر دو کروموزم با یکدیگر جابجا می‌شوند بدین ترتیب کروموزم فرزندان شکل می‌گیرد. در این بخش احتمال تبادل ژنی⁹¹ برابر با 0/65 در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر با این احتمال عملگر تبادل ژنی وقتی جفت کروموزم‌ها برای تکثیر انتخاب می‌شوند، عمل خواهد کرد. یعنی انتظار خواهیم داشت که 65 درصد از کروموزم‌ها به طور متوسط تحت عملیات تبادل ژنی قرار گیرند.

⁹⁰ Roulette wheel method

⁹¹ Crossover Probability

پس از مرحله تبادل ژنی نوبت به مرحله جهش می‌رسد که در آن بر اساس احتمال یک درصد، ژن‌های برخی از کروموزم‌ها به طور تصادفی تغییر می‌یابند. در مسأله مورد نظر احتمال جهش⁹² ژنی در یک کروموزم یک درصد در نظر گرفته شد. این مقدار درصد اعضای نسل جدید را که به وسیله جهش ایجاد می‌شوند را مشخص می‌کند. افزایش این مقدار در الگوریتم ژنتیک باعث می‌شود که فرزندان (جواب‌های جدید مسأله) شباهت خودشان را نسبت به والدین از دست داده و موجب تنوع کروموزم‌های جامعه می‌شود. پس از انجام تمامی مراحل فوق دوباره احتمال بقای هر کروموزم محاسبه شده و بقیه مراحل به همین صورت تکرار می‌شود. این عمل به تعداد 100 بار صورت گرفته و بعد از این مقدار تکرار بهترین برازندگی و کروموزم مربوط به آن (نقاط بهینه برش برای نمونه سنگی با شاخص قابلیت برش مشخص) تحت عنوان جواب مسأله معرفی می‌شود.

با توجه به این که مسأله مورد نظر (فرایند برش بلوک‌های سنگی) یک مسأله‌ی سه بعدی می‌باشد، می‌بایست نقطه‌ی بهینه از تابع هدف در فضای سه بعدی شامل محورهای مختصاتی X (عمق برش)، Y (نرخ پیشروی) و Z (شاخص قابلیت برش سنگ) تعیین شود. برای این منظور نیاز است تا نقطه‌ی بهینه برش برای هر نمونه سنگ به طور جداگانه توسط الگوریتم ژنتیک تعیین شود. تا بدین ترتیب مقدار تابع هدف به مینیمم مقدار خود در مختصات فضایی مذکور نزدیک شود. برای دستیابی به این هدف الگوریتم ژنتیک با توجه به شاخص‌های مختلف برش برای دو گروه از سنگ‌های مورد مطالعه سخت و نرم مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین ترتیب نقاط بهینه برش برای نمونه سنگ‌های مختلف (با شاخص قابلیت برش متفاوت) تعیین شد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها در جدول‌های 3-6 و 4-6 برای محدودیت حداکثر نرخ پیشروی 80، 70، 60، 50 و 40 سانتی‌متر بر ثانیه برای دو گروه از سنگ‌های مورد مطالعه سخت و نرم نشان داده شده است.

⁹² Mutation Probability

جدول 3-6- مقادیر بهینه عمق برش به ازای نرخ‌های مختلف پیشروی در نمونه سنگ‌های سخت

شاخص قابلیت برش سنگ RSi	نرخ پیشروی (cm/s)				
	80	70	60	50	40
10	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5
11	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5
12	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5
13	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5
14	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5
15	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5
16	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5
17	0/5	0/5	0/5	0/5	1
18	0/5	0/5	0/5	0/5	1
19	0/5	0/5	0/5	0/5	1
20	0/5	0/5	0/5	0/5	1
21	0/5	0/5	0/5	1	1
22	0/5	0/5	0/5	1	1
23	0/5	0/5	0/5	1	1
24	0/5	0/5	0/5	1	1
25	0/5	0/5	1	1	1/5
26	0/5	0/5	1	1	1/5
27	0/5	0/5	1	1	1/5
28	0/5	0/5	1	1	1/5
29	0/5	1	1	1	1/5
30	0/5	1	1	1	1/5
31	0/5	1	1	1/5	1/5
32	0/5	1	1	1/5	2
33	1	1	1	1/5	2
34	1	1	1	1/5	2
35	1	1	1	1/5	2
36	1	1	1/5	1/5	2
37	1	1	1/5	1/5	2/5
38	1	1	1/5	1/5	2/5
39	1	1	1/5	2	2/5
40	1	1	1/5	2	2/5
41	1	1	1/5	2	2/5
42	1	1/5	1/5	2	2/5
43	1	1/5	1/5	2	3
44	1	1/5	1/5	2	3

ادامه جدول 3-6- مقادیر بهینه عمق برش به ازای نرخ‌های مختلف پیشروی در نمونه سنگ‌های سخت

شاخص قابلیت برش سنگ RSi	نرخ پیشروی (cm/s)				
	80	70	60	50	40
1	1/5	1/5	2	3	45
1	1/5	2	2/5	3	46
1	1/5	2	2/5	3	47
1/5	1/5	2	2/5	3/5	48
1/5	1/5	2	2/5	3/5	49
1/5	1/5	2	2/5	3/5	50
1/5	1/5	2	2/5	3/5	51
1/5	1/5	2	2/5	3/5	52
1/5	2	2	3	4	53
1/5	2	2	3	4	54
1/5	2	2/5	3	4	55
1/5	2	2/5	3	4	56
1/5	2	2/5	3	4	57
1/5	2	2/5	3	4	58
1/5	2	2/5	3/5	4	59
2	2	2/5	3/5	4	60
2	2	2/5	3/5	4	61
2	2	2/5	3/5	4	62
2	2/5	3	3/5	4	63
2	2/5	3	3/5	4/5	64
2	2/5	3	4	4/5	65
2	2/5	3	4	4/5	66
2	2/5	3	4	4/5	67
2	2/5	3	4	4/5	68
2	2/5	3	4	4/5	69
2	2/5	3/5	4	4/5	70
2	2/5	3/5	4/5	4/5	71
2/5	2/5	3/5	4/5	4/5	72
2/5	3	3/5	4/5	4/5	73
2/5	3	3/5	4/5	4/5	74
2/5	3	3/5	4/5	5	75
2/5	3	3/5	4/5	5	76
2/5	3	3/5	4/5	5	77
2/5	3	4	4/5	5	78
2/5	3	4	4/5	5	79

ادامه جدول 3-6- مقادیر بهینه عمق برش به ازای نرخ‌های مختلف پیشروی در نمونه سنگ‌های سخت

نرخ پیشروی (cm/s)					شاخص قابلیت
80	70	60	50	40	برش سنگ RSi
2/5	3	4	4/5	5	80
2/5	3/5	4	4/5	5	81
3	3/5	4	4/5	5	82
3	3/5	4	4/5	5	83
3	3/5	4/5	5	5	84
3	3/5	4/5	5	5	85
3	3/5	4/5	5	5	86
3	3/5	4/5	5	5	87
3	3/5	4/5	5	5/5	88
3	3/5	4/5	5	5/5	89
3	4	4/5	5	5/5	90
3	4	4/5	5	5/5	91
3/5	4	4/5	5	5/5	92
3/5	4	5	5	5/5	93
3/5	4	5	5	5/5	94
3/5	4	5	5	5/5	95
3/5	4	5	5	5/5	96
3/5	4	5	5	5/5	97
3/5	4/5	5	5	5/5	98
3/5	4/5	5	5	5/5	99
3/5	4/5	5	5	5/5	100

جدول 4-6- مقادیر بهینه عمق برش به ازای نرخ‌های مختلف پیشروی در نمونه سنگ‌های نرم

نرخ پیشروی (cm/s)					شاخص قابلیت
80	70	60	50	40	برش سنگ RSi
0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	10
0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	11
0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	12
0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	13
0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	14
0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	15
0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	16
0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	17
0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	18
0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	19

ادامه جدول 4-6- مقادیر بهینه عمق برش به ازای نرخ‌های مختلف پیشروی در نمونه سنگ‌های نرم

نرخ پیشروی (cm/s)					شاخص قابلیت
80	70	60	50	40	برش سنگ RSi
0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	20
0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	21
0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	22
0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	23
0/5	0/5	1	1	1	24
1	1	1	1	1	25
1	1	1	1	1	26
1	1	1	1	1	27
1	1	1/5	1/5	1/5	28
1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	29
1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	30
1/5	1/5	1/5	2	2	31
2	2	2	2	2	32
2	2	2	2	2/5	33
2	2	2/5	2/5	2/5	34
2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	35
2/5	2/5	2/5	3	3	36
2/5	3	3	3	3	37
3	3	3	3/5	3/5	38
3	3/5	3/5	3/5	3/5	39
3/5	3/5	3/5	4	4	40
3/5	4	4	4	4/5	41
4	4	4	4/5	4/5	42
4	4/5	4/5	4/5	5	43
4/5	4/5	5	5	5	44
5	5	5	5/5	5/5	45
5	5	5/5	5/5	6	46
5/5	5/5	6	6	6/5	47
5/5	6	6	6/5	6/5	48
6	6	6/5	6/5	7	49
6/5	6/5	7	7	7/5	50
7	7	7	7/5	8	51
7	7/5	7/5	8	8/5	52
7/5	8	8	8/5	8/5	53
8	8	8/5	9	9	54

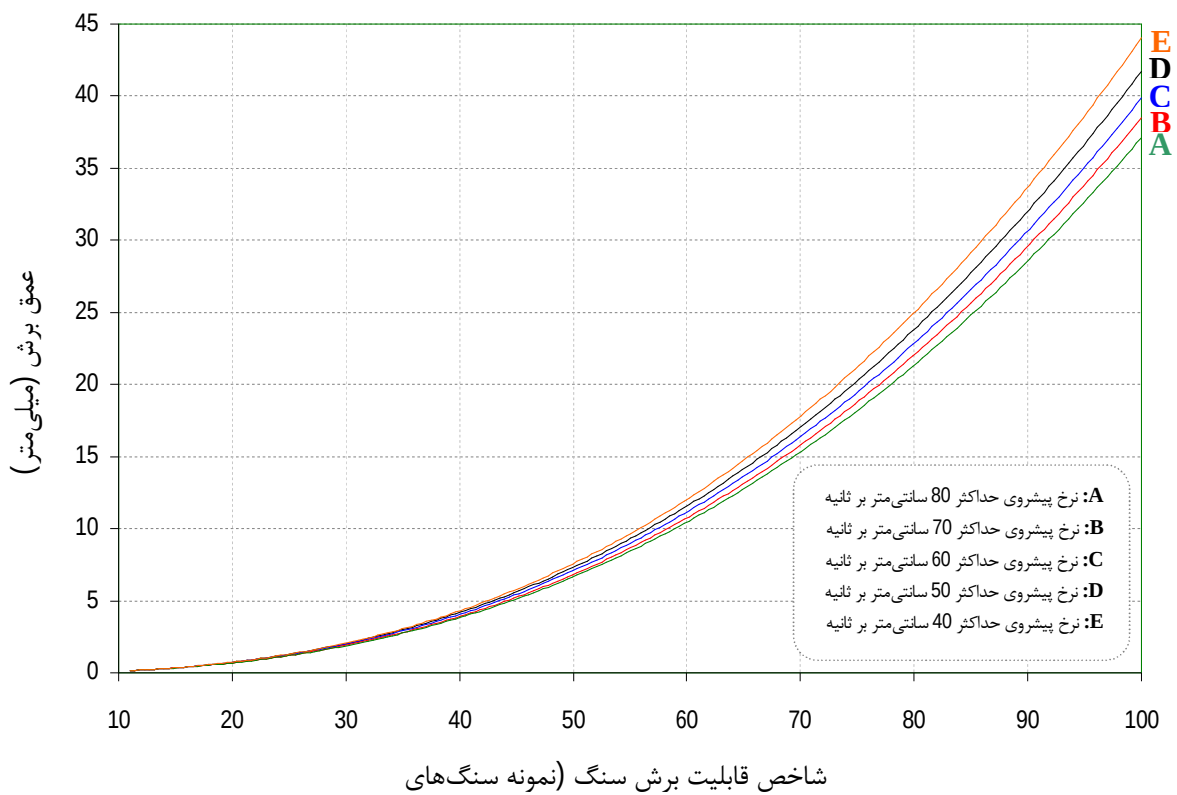
ادامه جدول 6-4- مقادیر بهینه عمق برش به ازای نرخ‌های مختلف پیشروی در نمونه سنگ‌های نرم

نرخ پیشروی (cm/s)					شاخص قابلیت
80	70	60	50	40	برش سنگ RSi
8/5	8/5	9	9	9/5	55
9	9	9/5	9/5	10	56
9	9/5	10	10	10/5	57
9/5	10	10/5	10/5	11	58
10	10/5	10/5	11	11/5	59
10/5	11	11	11/5	12	60
11	11/5	12	12	13	61
11/5	12	12/5	13	13/5	62
21	12/5	31	13/5	14	63
12/5	13	13/5	14	14/5	64
13	13/5	14	14/5	15	65
13/5	14	14/5	15	16	66
14/5	14/5	15	16	16/5	67
15	15/5	16	16/5	17	68
15/5	16	16/5	17	18	69
16	16/5	17	17/5	18/5	70
16/5	17	18	18/5	19/5	71
17/5	18	18/5	19	20	72
18	18/5	19	20	21	73
18/5	19	20	20/5	21/5	74
19/5	20	20/5	21/5	22/5	75
20	20/5	21/5	22	23	76
21	21/5	22	23	24	77
21/5	22	23	24	25	78
22/5	23	23/5	24/5	25/5	79
23	23/5	24/5	25/5	26/5	80
24	24/5	25/5	26/5	27/5	81
24/5	25/5	26	27	28/5	82
25/5	26	27	28	29/5	83
26/5	27	28	29	30/5	84
27	28	29	30	31/5	85
28	29	29/5	31	32/5	86
29	29/5	30/5	32	33/5	87
30	30/5	31/5	33	34/5	88
30/5	31/5	32/5	34	35/5	89

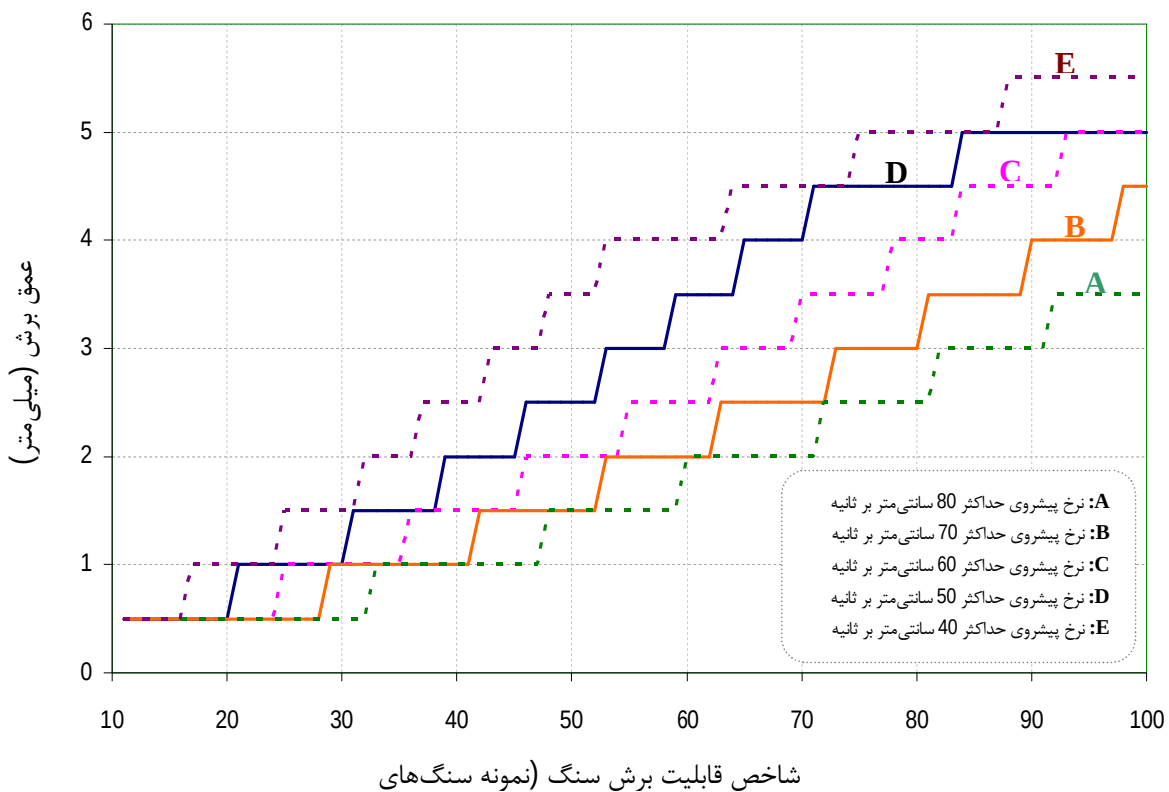
ادامه جدول 6-4- مقادیر بهینه عمق برش به ازای نرخ‌های مختلف پیشروی در نمونه سنگ‌های نرم

نرخ پیشروی (cm/s)					شاخص قابلیت
80	70	60	50	40	برش سنگ RSi
31/5	32/5	33/5	35	36/5	90
32/5	33/5	34/5	36	37/5	91
33/5	34/5	35/5	37	38/5	92
34/5	35/5	36/5	38	40	93
35/5	36/5	38	39	41	94
36/5	38	39	40/5	42	95
37/5	39	40	41/5	43/5	96
38/5	40	41	42/5	44/5	97
40	41	42	44	46	98
41	42	43/5	45	47	99
42	43	44/5	46/5	48/5	100

همچنین شکل‌های 6-11 و 6-12 نمودارهای مربوط به نقاط بهینه عمق برش را برای محدودیت‌های حداکثر نرخ پیشروی 40، 50، 60، 70، 80 و 40 سانتی‌متر بر ثانیه برای دو گروه از سنگ‌های مورد مطالعه سخت و نرم با توجه به شاخص قابلیت برش سنگ نشان می‌دهند. بدین ترتیب با استفاده از این نمودارها می‌توان در نرخ‌های مختلف پیشروی با توجه به محدودیت دستگاه نقاط بهینه‌ی برش را به ازای مقادیر مختلف از شاخص قابلیت برش سنگ تعیین کرد.



شکل 6-11- نقاط بهینه‌ی برش در حداکثر نرخ‌های پیشروی مجاز برای نمونه سنگ‌های نرم



شکل 6-12- نقاط بهینه‌ی برش در حداکثر نرخ‌های پیشروی مجاز برای نمونه سنگ‌های سخت

6-5- جمع بندی

همان‌طوری که پیشتر به آن اشاره شد مهم‌ترین هدف از انجام این بخش از تحقیق دستیابی به شرایط مطلوب برش از دیدگاه اقتصادی بوده که پس از تحلیل اقتصادی فرایند برش در فصل 6، در این فصل از تحقیق مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت. یکی از مهم‌ترین اصول در انجام یک پروسه‌ی بهینه‌سازی، شناسایی دقیق فرایند و ارائه یک تابع هدف با توجه به متغیرهای تأثیرگذار در فرایند می‌باشد. در یک فرایند برش همانند سایر فعالیت‌های صنعتی، هزینه‌های تولید متأثر از متغیرهای زیادی نظیر حامل‌های انرژی، مواد مصرفی، نیروهای کارگری و ... می‌باشد که همواره سعی شده است تا تعادل ایده‌آلی میان این هزینه‌ها و میزان نرخ تولید برقرار شود. برای دستیابی به این مهم نیاز است تا از یک منظر کلی که همان دیدگاه اقتصادی می‌باشد، به مسأله نگاه شود. بدین ترتیب می‌توان با در نظر گرفتن تابع هزینه کل به عنوان تابع هدف، در بهترین شرایط تولید، هزینه‌های تولید را به حداقل مقدار ممکن کاهش داد. در مرحله نخست از فرایند بهینه‌سازی، تابع هدف مورد نظر به صورت هزینه‌ی کلی تولید مشتمل بر تمامی هزینه‌های موجود برای تولید یک مترمربع از پلاک سنگی تعریف شد. پس از بازدیدهای فراوان از کارخانه‌های بزرگ فرآوری سنگ در کشور، مشخص شد که 5 فاکتور انرژی، نیروی کارگری، تعمیر و نگهداری، مصرف آب و مصرف دیسک از جمله فاکتورهای مهم و تأثیرگذار در قیمت تمام شده یک پلاک سنگی می‌باشند. بدین ترتیب اجزای تابع هدف یا همان تابع هزینه کل مشخص گردید. پس از جمع‌آوری داده‌های صنعتی، تابع هزینه مربوط به هر یک از فاکتورها با استفاده از مطالعات آماری تعیین شد و پس از تعیین توابع هزینه‌ساز، تابع هزینه‌ی کل که مجموع تمامی توابع هزینه‌ساز می‌باشد مشخص شد. در نهایت مقدار بهینه پارامترهای برش شامل عمق و نرخ پیشروی بر اساس حداقل‌سازی تابع هزینه‌ی کل با توجه به نوع سنگ و محدودیت‌های دستگاه برش، با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک مشخص گردید. بدین ترتیب پس از تعیین نقاط بهینه برش برای نمونه سنگ‌های مورد مطالعه، نقاط بهینه در یک فضای سه بعدی مشتمل بر سه محور عمق برش، نرخ پیشروی و شاخص قابلیت برش سنگ، برای دو گروه از سنگ‌های نرم و سخت

تعیین گردید، بررسی‌ها نشان داد که در شرایط مختلف از محدودیت‌های دستگاه مقدار نقاط بهینه
برش نیز تغییر خواهد کرد. برای این منظور سعی شد تا گراف‌هایی برای تعیین نقاط بهینه در شرایط
مختلف از محدودیت‌های دستگاه ارائه شود تا با استفاده از این گراف‌ها بتوان تحت شرایط مختلف از
مشخصات دستگاه به بهترین شرایط عملیاتی برش برای نمونه سنگ مورد نظر نزدیک شد.

نتیجه گیری و پیشنهادهات

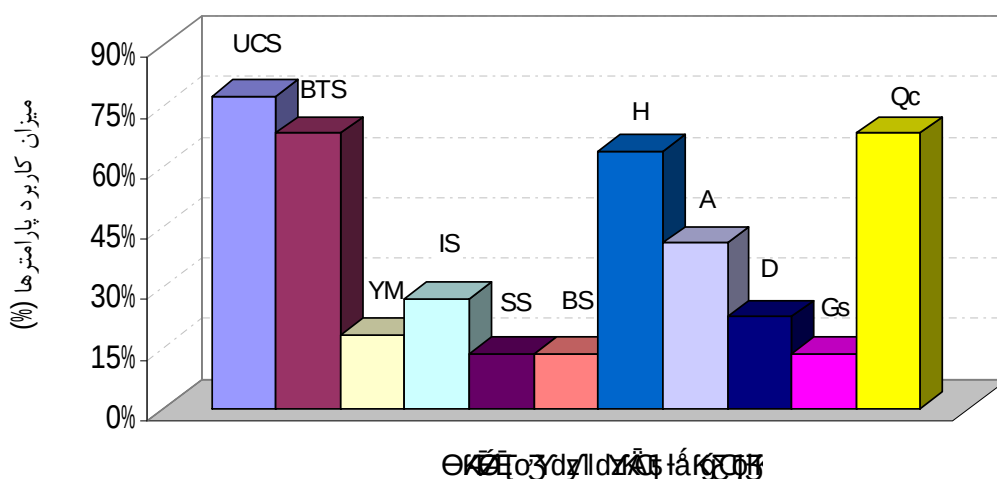
7-1- نتیجه گیری

تخمین قابلیت برش یک سنگ و تعیین پارامترهای مؤثر بر آن در تخمین هزینه‌ها و طراحی یک کارخانه سنگ‌بری از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. شناخت کامل سنگ‌های ساختمانی و ارزیابی توانایی اجرایی دستگاه‌های برش می‌تواند طراحان و برنامه‌ریزان تولید را به سمت بهبود سرعت فرآوری و افزایش تولید سوق دهد. بنابراین برای دستیابی به یک طراحی و برنامه‌ریزی دقیق در کارخانه‌های فرآوری، پیش‌بینی قابلیت برش سنگ و تعیین پارامترهای مؤثر در ماشین‌کاری امری مهم و ضروری می‌باشد. از سوی دیگر توجه به این نکته ضروری است که با وجود بیش از 5500 کارخانه‌ی فعال فرآوری سنگ در کشور، نمی‌توان به راحتی از مقوله‌ی مصرف انرژی و سایش ابزارهای الماسی و همچنین بهینه‌سازی و افزایش راندمان دستگاه‌های برش چشم‌پوشی کرد. پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش و سایش ابزارهای الماسی و همچنین بررسی ارتباط میان این معیارها با پارامترهای ماشین‌کاری و نوع سنگ، می‌تواند یکی از گام‌های مهم و اساسی برای دستیابی به شرایط بهینه از دیدگاه مصرف انرژی و سایش ابزارهای الماسی در صنعت برش سنگ باشد. لذا دستیابی به یک روش برتر هم‌راستا با افزایش راندمان دستگاه‌های برش، کاهش مصرف انرژی و ابزارهای الماسی و رسیدن به کیفیتی عالی لازم و ضروری می‌باشد. بدین ترتیب نیاز است تا به یک تعادل بهینه میان نرخ برش و هزینه‌های موجود برای برش واحد سطح بریده شده از بلوک سنگی به خصوص با توجه به دو فاکتور مصرف انرژی دستگاه برش و سایش ابزار الماسی دست پیدا کرد. برای دستیابی به این هدف سعی شد تا در مرحله نخست پس از بررسی منابع مختلف و تحقیقات گذشته و همچنین استفاده از آزمایش‌های دقیق و نکات پیشنهادی تحقیقات موجود، محدودیت‌ها و نواقص موجود در این زمینه به حداقل رسانده شده و یک سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی در دو گروه از سنگ‌های نرم و سخت ارائه شود. با استفاده از این سیستم طبقه‌بندی می‌توان سنگ‌های ساختمانی را در 5 کلاس خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف از نظر قابلیت برش مورد ارزیابی قرار داد. در مرحله بعد سعی شد تا مدل‌های مناسبی برای پیش‌بینی میزان مصرف انرژی و سایش ابزارهای الماسی با توجه به مشخصات سنگ (شاخص قابلیت

برش) و پارامترهای عملیاتی (نرخ پیشروی و عمق برش) ارائه شود. با استفاده از این مدل‌ها، تابع هزینه‌ی کل، مشتمل بر 5 فاکتور هزینه‌ساز مصرف انرژی، دیسک، آب، نیروی کارگری و تعمیر و نگهداری برای انجام پروسه‌ی بهینه‌سازی نوشته شد و سپس متغیرهای مستقل شامل نرخ پیشروی و عمق برش با توجه به محدودیت‌های مسئله و با کمک الگوریتم ژنتیک بهینه گردید.

به طور کلی نتایج حاصل از فصل‌های این تحقیق را می‌توان به‌طور خلاصه به‌صورت زیر عنوان کرد:

1- در بخش نخست از این تحقیق سعی شد تا علاوه بر بررسی مکانیزم برش و فرایند تشکیل تراشه، پارامترهای مؤثر در فرایند برش به‌همراه معیارهای ارزیابی عملکرد این فرایند مورد بررسی و پژوهش قرار گیرد. بررسی‌های آماری بر روی پارامترهای مؤثر در فرایند برش سنگ که تاکنون توسط محققین در مجلات معتبر علمی به چاپ رسیده‌اند، نشان داد که از میان پارامترهای بررسی شده مربوط به مشخصات قطعه کار (سنگ)، پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، درصد کوارتز، سختی و ساینده‌گی به‌ترتیب در بیشتر از 65، 60، 60، 58 و 35 درصد مطالعات مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل 7-1 درصد پارامترهای به‌کار رفته در مطالعات انجام شده در فرایند برش را نشان می‌دهد. به‌عبارت دیگر می‌توان گفت که پارامترهای فوق از نظر محققین از اهمیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها در فرایند برش برخوردار بوده‌اند.



شکل 7-1 درصد پارامترهای به کار رفته در مطالعات انجام شده در فرایند برش

2- بررسی سابقه علمی موضوع نشان می‌دهد 3 انتقاد کلی بر مطالعاتی که تاکنون محققین انجام شده‌اند، وارد است که عبارتند از:

الف) عدم وجود ضرایب دقیق در برخی از معادلات ارائه شده برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی.

ب) وجود هم‌پوشانی میان پارامترهای مورد استفاده در برخی از طبقه‌بندی‌ها و معادلات ارائه شده در زمینه قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی.

ج) وجود محدودیت‌های مرزی در برخی از سیستم‌های طبقه‌بندی موجود در زمینه قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی.

با توجه به ضعف‌های مذکور تصمیم گرفته شد تا یک سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی ارائه شود.

3- از جمله نتایج به دست آمده در این تحقیق می‌توان به ارائه یک سیستم طبقه‌بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی اشاره کرد. در طی انجام این تحقیق سعی شد تا سیستم طبقه‌بندی جدیدی ارائه شود که علاوه بر رعایت اصولی از قبیل عدم هم‌پوشانی پارامترها با یکدیگر، پوشش تمامی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، سعی در به حداقل رساندن پارامترها و در نهایت سهولت در دسترسی و انجام آزمایش‌های مربوطه، به خوبی بتواند قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی را مورد ارزیابی قرار دهد. در سیستم طبقه‌بندی جدید 4 مشخصه‌ی مهم از سنگ شامل مقاومت فشاری تک محوری، سختی موهس، فاکتور ساینده‌ی شیمازک و مدول الاستیسیته به نمایندگی از 4 خانواده از پارامترهای مقاومتی، سختی، ساینده‌ی و خواص الاستوپلاستیسیته سنگ انتخاب شدند. آنچه مسلم است درجه اهمیت هر یک از این پارامترها از دیدگاه قابلیت برش با یکدیگر متفاوت بوده که می‌بایست با توجه به درجه اهمیت‌شان امتیازدهی شوند. از جمله نکات مهم این بخش می‌توان به تعیین درجه اهمیت پارامترهای سیستم طبقه‌بندی با توجه به نظرات خبرگان با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و دلفی فازی اشاره کرد. به طوری که پس از انجام محاسبات مربوطه پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری، فاکتور ساینده‌ی شیمازک، سختی موهس و مدول الاستیسیته به ترتیب امتیازهای 0/36، 0/37، 0/17 و 0/1 را در سیستم طبقه‌بندی جدید به خود اختصاص دادند. این سیستم در مجموع به سنگ‌ها امتیازی از 10 تا 100 اختصاص داده و قابلیت برش سنگ‌ها را در دو گروه سخت و نرم به پنج کلاس

خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف طبقه‌بندی می‌کند. پس از ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید صحت و سقم نتایج به دست آمده مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور پس از انجام مطالعات آزمایشگاه، به انجام مطالعات برش در مقیاس آزمایشگاهی پرداخته شد. برای انجام این بخش از تحقیق نمونه دستگاه برش در مقیاس آزمایشگاهی تهیه شد و مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه انجام شد. در نهایت نتایج عملکرد برش برای بررسی و ارزیابی سیستم طبقه‌بندی جدید مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی و ارزیابی سیستم طبقه‌بندی جدید نشان داد که سیستم طبقه‌بندی جدید از قابلیت خوبی در ارزیابی معیارهای برش شامل نرخ برش، نرخ مصرف انرژی، نرخ سایش و ارتعاش‌های سیستم برخوردار می‌باشد.

4- یکی دیگر از نتایج به دست آمده از این تحقیق، بررسی و تحلیل اقتصادی فرایند برش سنگ‌های ساختمانی در بخش صنعتی می‌باشد. در حقیقت نتایج این بخش از تحقیق مقدمه‌ای برای شروع فرایند بهینه‌سازی پارامترهای برش می‌باشد. در این بخش علاوه بر آنالیز اقتصادی دو نمونه سنگ تراورتن حاجی آباد و گرانیت قرمز یزد، به بررسی تأثیر نوع سنگ نیز بر میزان حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز پرداخته شد. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده در این بخش نشان داد که 5 فاکتور مهم هزینه‌ساز شامل هزینه‌ی کارگری، مصرف انرژی، آب، دیسک و تعمیر و نگهداری، هزینه‌های کلی برش یک بلوک سنگی را تشکیل می‌دهند. که از این میان هزینه‌ی انرژی و سایش ابزار الماسی به‌ترتیب به عنوان مهم‌ترین و حساس‌ترین فاکتور برای دو نمونه سنگ مورد مطالعه یعنی تراورتن حاجی آباد و گرانیت قرمز یزد شناسایی شدند. یکی از نتایج مهم این بخش، ارائه توابع هزینه‌ساز برای تحلیل اقتصادی یک فرایند برش می‌باشد که با کمک این مدل‌های اقتصادی مقدار هر یک از فاکتورهای هزینه‌ساز قابل محاسبه می‌باشد. همچنین نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت فاکتورهای هزینه‌ساز در فرایند برش نمونه سنگ‌های سخت و نرم می‌تواند دیدگاه مناسبی از میزان تغییرات در هزینه‌های تولید در شرایط مختلف اقتصادی به مدیران این بخش‌های صنعتی ارائه دهد تا بتوانند در شرایط دشوار اقتصادی تصمیم‌های مناسبی برای افزایش راندمان تولید دستگاه‌های برش اتخاذ نمایند. یکی دیگر از نتایج مهم این بخش بررسی میزان

تغییرات فاکتورهای هزینه‌ساز با توجه به تغییر در میزان قابلیت برش‌پذیری سنگ اشاره کرد. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده نشان داد که حساسیت تابع هزینه کل نسبت دو فاکتور هزینه‌ی انرژی و هزینه‌ی نیروی کارگری با افزایش مقدار قابلیت برش سنگ تغییر می‌یابد. به طوری که با افزایش قابلیت برش‌پذیری سنگ مقدار هزینه‌های انرژی کاهش یافته تا جایی که مقدار تغییرات هزینه کل نسبت به تغییر این فاکتور در مقایسه با فاکتور هزینه‌ی کارگری کاهش می‌یابد.

5- یکی دیگر از بخش‌های این تحقیق، بهینه‌سازی پارامترهای برش در فرایند برش سنگ سنگ‌های ساختمانی می‌باشد. امروزه در بیشتر کارخانه‌های برش سنگ به دلیل عدم کارایی و مدیریت فنی دستگاه‌های برش شاهد مصرف بی‌رویه منابع طبیعی به خصوص انرژی می‌باشیم که نتیجه‌ای جز افزایش اثرات نامطلوب زیست محیطی و کاهش راندمان تولید نخواهد داشت. لذا بهینه‌سازی مصرف انرژی و ایجاد یک بستر مناسب برای افزایش کارایی تجهیزات برش و بهبود راندمان تولید لازم و ضروری می‌باشد. دستیابی به این هدف مستلزم بررسی دقیق این فرایند و ارائه راه‌کارهایی برای بهینه‌سازی فرایند و کاهش هزینه‌های تولید کالا می‌باشد. در بخش پایانی از این تحقیق سعی شد تا به بهترین شرایط برش از دیدگاه اقتصادی دست پیدا کرد. بی‌تردید بهترین شرایط برش زمانی رخ می‌دهد که یک تعادل ایده‌آل میان نرخ تولید و هزینه‌های آن برقرار شود. بدین ترتیب پس از تعیین تابع هدف (تابع هزینه‌ی کل تولید)، به بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای برش (دو پارامتر عمق برش و نرخ پیشروی) با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک پرداخته شد. بدین ترتیب نقاط بهینه برش با توجه به شاخص قابلیت برش در یک فضای سه بعدی شامل سه محور مختصاتی که هر کدام معرف پارامترهای عمق برش، نرخ پیشروی و شاخص قابلیت برش سنگ بودند برای دو گروه از سنگ‌های نرم و سخت ارائه شد. با بررسی نقاط بهینه نمونه سنگ‌های مطالعه شده مشخص گردید که مقدار بهینه نرخ پیشروی برابر با مقدار حداکثر نرخ پیشروی دستگاه برش می‌باشد. به طوری که با نادیده گرفتن محدودیت دستگاه‌های برش مقدار نرخ پیشروی همواره در نقاط بهینه به بیشترین مقدار خود میل می‌کند. برای این منظور گراف‌هایی نیز با توجه به محدودیت‌های مختلف دستگاه

برش از دیدگاه حداکثر میزان نرخ پیشروی دستگاه‌های برش ارائه شد که با استفاده از این گراف‌ها می‌توان نقاط بهینه‌ی برش را با توجه به محدودیت‌های مختلف دستگاه تعیین کرد.

7-2- پیشنهادات

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

1- استفاده از امواج صوتی به‌عنوان یک معیار مناسب برای ارزیابی عملکرد برش سنگ. بدین منظور پیشنهاد می‌شود تا این معیار در کنار سایر معیارهای ارزیابی عملکرد برش سنگ مورد استفاده قرار گرفته و ارتباط میان امواج صوتی حاصل از فرایند برش سنگ با پارامترهای عملیاتی برش سنگ و شاخص قابلیت برش سنگ مورد ارزیابی و پژوهش قرار گیرد.

2- استفاده از امواج اولتراسونیک برای برش سنگ به عبارت دیگر پیشنهاد ساخت یک دستگاه برش با استفاده از تکنولوژی امواج اولتراسونیک. برش سنگ با استفاده از امواج اولتراسونیک می‌تواند راه‌حل خوب و مناسبی برای کاهش سایش ابزار، مصرف انرژی و ضخامت شیار برش (به عبارت دیگر کاهش پرت سنگ) باشد.

3- استفاده از تجهیزات پیشرفته هسته‌ای برای اندازه‌گیری و ثبت دقیق نرخ سایش در طی انجام فرایند برش. برای اندازه‌گیری دقیق سایش ابزار الماسی و افزایش دقت پیشنهاد می‌شود تا برداشت لحظه‌ای سایش ابزار الماسی توسط یک دستگاه مجهز به ثبت امواج رادیواکتیو انجام شود. برای انجام این کار پیشنهاد می‌شود تا از علوم پیشرفته‌ی هسته‌ای استفاده شود. به‌طوری که می‌توان در مرحله نخست سگمنت‌های الماسی را با تشعشعات رادیواکتیو آغشته کرد و سپس با استفاده از یک دستگاه آشکارساز رادیواکتیو، مقدار سایش سگمنت‌های الماسی را در هر لحظه از فرایند برش مورد اندازه‌گیری قرار داد. بدین ترتیب خطای اندازه‌گیری این پارامتر نیز در مطالعات و آزمایشات برش به شدت کاهش می‌یابد.

مراجع

- اصلانو، م، (1386)، "روشهای حفاری"، چاپ سوم، مرکز نشر صدرا، ص 494.
- وفائیان، م، (1371)، "مکانیک سنگ"، انتشارات دانشگاه یزد.
- Ataei, M. (2005) "Multi-criteria selection for alumina-cement plant location in East-Azerbaijan province of Iran". The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 105(7), pp. 507–514.
- Ataei M., Mikaeel R., Sereshki F., Ghaysari N. (2011) "Predicting the production rate of diamond wire saw using statistical analysis". Arabian Journal of Geosciences.
- Atici U, 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, 2602–2612.
- Ayag, Z., Ozdemir, R. G. (2005) "A fuzzy AHP approach to evaluating machine tool alternatives". Journal of Intelligent Manufacturing, 17, pp. 179–190 (2006).
- Ayhan M, "Cost model and sensitivity analysis of cutting and processing stage at a marble plant". Industrial Diamond Review, 3 49-54.
- Basligil, H. (2005)"The fuzzy analytic hierarchy process for software selection problems". Journal of Engineering and Natural Sciences, 2, pp. 24–33.
- Bianchi E.C, Silva E.J, Silva C. E, Souza G. F, C.A. Fortulan, O.C. Fernandes, Valarelli I. D, Aguiar P.R, (1998) "The behaviour of resinbond diamond wheels in the grinding of advanced ceramics". Industrial Diamond Review, 4.
- Birle J.D, Ratterman E, (1974) "An approximate ranking of the sawability of hard building stones based on laboratory tests". Dimensional Stone Magazine, 1986, pp 3-29.
- Buttner A, "Diamond tools and stone". Industrial Diamond Review. 34 , pp 89-93.
- Burgess RB, (1978) "Circular sawing granite with diamond saw blades". In: Proceedings of the Fifth Industrial Diamond Seminar, pp. 3–10.
- Buyuksagis I.S, Goktan R.M, (2005) "Investigation of marble machining performance using an instrumented block-cutter". Journal of Materials Processing Technology, 169, pp 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, pp 399–406.
- Ceylanoglu A, Gorgulu K, (1997) "The performance measurement results of stone cutting machines and their relations with some material properties". *Proceedings of the Sixth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*. Rotterdam, Balkema, pp 393–8.
- Chang, D. Y. (1996) "Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP". *European Journal of Operational Research*, 95, pp. 649–655.
- Clausen R, Wang CY, Meding M, (1996) "Characteristics of acoustic emission during single diamond scratching of granite". *Industrial Diamond Review*, 3, pp 96–9.
- Delgado N.S, Rodriguez R, Rio A, Sarria I.D, Calleja L, Argandona V.G.R, (2005) "The influence of microhardness on the sawability of Pink Porrino granite (Spain) ". *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 42: 161–6.
- Deng, H. (1999) "Multicriteria analysis with fuzzy pair-wise comparison". *International Journal of Approximate Reasoning*, 21, pp. 215–231.
- Engels A, (2003) "The role of Particles Per Carat in diamond tool behavior", *Industrial Diamond Review* 2 39-45.
- Ersoy A, & Waller M.D, (1995) "Textural characterization of rocks". *Journal of Engineering Geology*, Vol. 39, Issues 3-4, 123-136.
- Ersoy A, Atici U. (2004) "Performance characteristics of circular diamond saws in cutting different types of rocks". *Diamond and Related Materials*, 13, pp. 22–37.
- Ersoy A., Buyuksagis S., Atici U. (2005) "Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard and abrasive rocks", *Wear* 258, pp. 1422–1436.
- Ertingshausen, W. (1985) "Wear processes in sawing hard stone", *Industrial Diamond Review*. 5, pp.254–258.
- Eyuboglu A.S, Ozcelik Y, Kulaksiz S, Engin I.C, (2003) "Statistical and microscopic investigation of disc segment wear related to sawing Ankara andesites", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40 405–414.
- Fener M, Kahraman S, & Ozder M.O, (2007) "Performance Prediction of Circular Diamond Saws from Mechanical Rock Properties in Cutting Carbonate Rocks", *Rock Mech. Rock Engng.* 40 (5), 505–517

- Gunaydin O., Kahraman S., Fener M. "Sawability prediction of carbonate rocks from brittleness indexes". The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 104, pp. 239-244 (2004).
- Haq, A. N., Kannan, G. (2006) "Fuzzy analytical hierarchy process for evaluating and selecting a vendor in a supply chain model". International Journal of Advanced Manufacturing, 29, pp. 826–835.
- Hausberger P. (1989) "Causes of the different behaviour of rocks when machined with diamond tools". Industrial Diamond Review, 3, pp. 1-25.
- Hausberger P. (1990) "Stone Machinability". Industrial Diamond Review, 3, pp 1–25.
- Hoek E, Brown ET. (1994) "Practical estimation of rock mass strength". Int. J. Rock Mech Min Sci;34(8):1165–86
- Howarth D.F, Rowlands J.C, (1986) "Development of an Index to Quantify Rock Texture for Qualitative Assessment of Intact Rock Properties". Geotechnical Testing Journal, Vol. 9, pp 169-179.
- International Society for Rock Mechanics. (1981) "Rock characterisation, testing and monitoring: ISRM suggested methods". Oxford: Pergamon.
- Jimeno C. L, Jimeno E.L & Carcedo F.J.A, (1995) "Drilling and blasting of rocks". A.A Balkema, Pub Rotterdam.
- Jennings M., Wright D. (1989) "Guidelines for sawing stone", Industrial Diamond Review, 49, pp. 70–75.
- Kahraman, C., Cebeci, U., Ulukan, Z. (2003) "Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP". Logistics Information Management, 16 (6), pp. 382–394.
- Kahraman, C., Cebeci, U., Ruan, D. (2004) "Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey". International Journal of Production Economics, 87, pp. 171–184.
- Kahraman S, Fener M, Gunaydin O, (2004) "Predicting the sawability of carbonate rocks using multiple curvilinear regression analysis". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41; pp 1123–1131.
- Kahraman S, Altun H, Tezekici B.S, Fener M. (2006) "Sawability prediction of carbonate rocks from shear strength parameters using artificial neural networks". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43(1), pp 157–164.

- Kahraman S, Ulker U, Delibalta S, (2007) "A quality classification of building stones from P-wave velocity and its application to stone cutting with gang saws". The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 107, pp 427–430.
- Karakus A, Discussion of the paper by Kahraman S, Fener M, Gunaydin O, (2006) "Predicting the sawability of carbonate rocks using multiple curvilinear regression analysis". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43, pp 1306–1307.
- Konstanty J, (1991) "The Materials Science of Stone Sawing", Industrial Diamond Review. 1, pp 27–31
- Konstanty J, (2002) "Theoretical analysis of stone sawing with diamonds", Journal of materials processing technology, 123, pp 146-154.
- Luo S.Y., Liao Y.S, (1995) "Study of the behavior of diamond sawblade in stone processing". Journal of Materials Processing Technology. 51 296-308.
- Luo S.Y, (1997) "Investigation of the worn surfaces of diamond sawblade in sawing granite". Journal of Material Processing Technology. 70 1-8.
- Mikaeil R, Ataei M, Hoseinie S.H. (2008) "Predicting the production rate of diamond wire saws in carbonate rocks cutting", Industrial Diamond Review, (IDR). 3, pp. 28-34.
- Mikaeil, .R, Zare Naghadehi, .M, Sereshki, .F. (2009) "Multifactorial Fuzzy Approach to the Penetrability Classification of TBM in Hard Rock Conditions". Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 24, pp. 500–505.
- Mikaeil, .R, Zare Naghadehi, .M, Ataei, .M, KhaloKakaie, R. (2009) "A Decision Support System Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) and TOPSIS Approaches for Selection of the Optimum Underground Mining Method". Archives of Mining Sciences, Vol. 54, No 2, pp. 341–368.
- Mikaeil R., Yousefi R., Ataei M., Abasian Farani R., (2011a) "Development of a New Classification System for Assessing of Carbonate Rock Sawability", Archives of Mining Sciences, Vol. 56, No 1, p. 57–68.
- Mikaeil R., Ataei M., Yousefi R., (2011b) "The application of a fuzzy analytical hierarchy process to the prediction of vibration during rock sawing". Mining Science and Technology.

- Mikaeil R., Ataei M., Yousefi R., (2011c) "Correlation of production rate of ornamental stone with rock brittleness indexes". *Arabian Journal of Geosciences*.
- Norling R.G; (1971) "Mechanical properties and the composition of some Swedish natural stone types and their effect on cutting results". In: Presentation at the Conference on Diamond in the Construction and Stone Industry, in German.
- ? zçelik, Y., Polat, E., Bayram, F. and Ay, A. M. (2004) "Investigation of the effects of textural properties on marble cutting with diamond wire", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(3), pp 1-7.
- ? zçelik Y, (2007) "The effect of marble textural characteristics on the sawing efficiency of diamond segmented frame saws". *Industrial Diamond Review*, 2, pp 65-70.
- Pai D.M, (1987) "A fundamental study of the diamond sawing of rock". Ph.D. Dissertation, Arizona State University.
- Saaty, T. L. (1980) "The analytic hierarchy process". New York: McGraw- Hill.
- Sun L.a, Pan J.b, Lin C, (2002) "A new approach to improve the performance of diamond sawblades", *Materials Letters*, 57, pp 1010–1014.
- Tonshoff H.K, Warnecke G, (1982) "Research on stone sawing". P. Daniel (Ed), *Advance in Ultrahard Mareials Application Technology*, Vol 1, Harnbeam, England, pp 36-49.
- Tonshoff H.K, Hillmann-Apmann H, Asche J, (2002) "Diamond tools in stone and civil engineering industry": cutting principles, wear and applications, *Diamond and Related Materials* 11, 736–741.
- Thuro, K, (1997) "Drillability prediction- geological influences in hard rack drill and blast tunneling". *Geol Runsch*, 86: 426-438.
- Tutmez B., Kahraman S., Gunaydin O. (2007) "Multifactorial fuzzy approach to the sawability classification of building stones". *Construction and Building Materials*, 21, pp. 1672–1679.
- Unver B. (1996) "A statistical method for practical assessment of sawability of rocks". In: M. Barla, ed. *Eurock '96*. Rotterdam: Balkema, pp. 59-65.
- Vaya and Vikram. (1983) "Mineralogical parameters in granite sawing", technical paper, University of Jodhpur, pp. 7-79.

- Wang, T. C., Chen, Y. H. (2007) "Applying consistent fuzzy preference relations to partnership selection". *Omega, the International Journal of Management Science*, 35, pp. 384–388.
- Wei X, Wang C.Y, Zhou Z.H. (2003) "Study on the fuzzy ranking of granite sawability". *Journal of Materials Processing Technology*, 139, pp. 277–80.
- Wright D.N, Cassapi V.B, (1985) "Factors influencing stone sawability", *Industrial Diamond Review* 2, pp 84-87.
- Wright D.N, Walper H, (1986) "Investigation and prediction of diamond wear when sawing" , *annals CIRP* 35 (1) 239-244.
- Xu X, (1999) "Friction studies on the process in circular sawing of granites", *Tribology Letters* 7 221–227.
- Xu X, Li Y, Malkin S, (2001) "Forces and energy in circular sawing and grinding of granite". *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 123 13–22.
- Xu X, Li Y, Yu Y, (2003)"Force ratio in the circular sawing of granites with a diamond segmented blade", *Journal of Materials Processing Technology*, 139 281–285.
- Zare Naghadehi, .M, Mikaeil .R, Ataei, M. (2009) "The Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) Approach to Selection of Optimum Underground Mining Method for Jajarm Bauxite Mine, Iran". *Expert Systems with Applications*, 36, pp. 8218–8226.

پیوست 1

پ-1- تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی (FDAHP)⁹³

در روش دلفی، پیش‌بینی‌های ارائه شده توسط افراد خبره در قالب اعداد قطعی بیان می‌گردند، در حالی که استفاده از اعداد قطعی برای پیش‌بینی‌های بلند مدت، آن را از دنیای واقعی دور می‌سازد. از طرفی افراد خبره از شایستگی‌های و توانایی‌های ذهنی خود برای پیش‌بینی استفاده می‌نمایند و این نشان می‌دهد که عدم قاطعیت حاکم بر این شرایط از نوع امکانی است نه احتمالی. امکانی بودن عدم قاطعیت، با مجموعه‌های فازی سازگاری دارد و بنابراین بهتر آن است که با استفاده از مجموعه‌های فازی (با بکارگیری اعداد فازی) به پیش‌بینی بلند مدت و تصمیم‌گیری در دنیای واقعی بپردازیم. بدین ترتیب اطلاعات لازم را در قالب زبان طبیعی از خبرگان اخذ نموده و مورد تحلیل قرار می‌دهیم. این روش تحلیل، روش دلفی فازی نامیده می‌شود.

مراحل اجرای روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی به شرح زیر است:

الف) نظر سنجی از متخصصان

در این مرحله ابتدا از متخصصان مختلف در مورد پارامترهای مؤثر بر یک پدیده یا تصمیم به صورت کیفی یا در صورت امکان کمی نظرسنجی به عمل می‌آید. نمونه فرم‌های فرستاده شده برای خبرگان در فصل 4 از این تحقیق آورده شده است.

ب) محاسبه اعداد فازی

برای محاسبه اعداد فازی (a_{ij}) نظرات حاصل از نظرسنجی از متخصصان به طور مستقیم مد نظر قرار می‌گیرد. اعداد فازی در این تحقیق بر اساس تابع عضویت مثلثی محاسبه شد. شکل پ-1 محاسبه اعداد فازی با روش مثلثی را نشان می‌دهد. مطابق شکل پ-1، در روش فازی دلفی یک عدد فازی به صورت رابطه‌های پ-1 تا پ-4 قابل محاسبه می‌باشند (Liu & Chen, 2007).

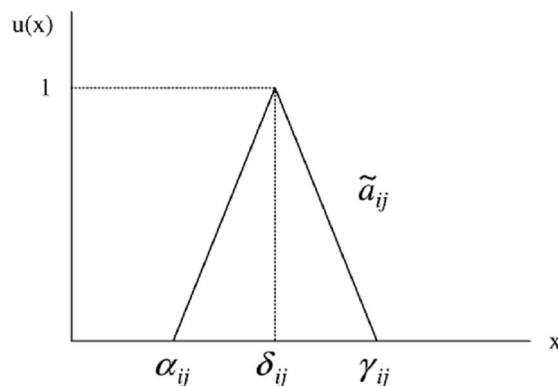
$$a_{ij} = (\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}) \quad \text{پ-1}$$

$$\alpha_{ij} = \min(\beta_{ijk}) \quad k = 1, \dots, n \quad \text{پ-2}$$

$$\delta_{ij} = \left(\prod_{k=1}^n \beta_{ijk} \right)^{1/n}, \quad k = 1, \dots, n \quad \text{پ-3}$$

$$\gamma_{ij} = \max(\beta_{ijk}) \quad k = 1, \dots, n \quad \text{پ-4}$$

⁹³ . Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process



شکل پ-1- تابع عضویت مثلثی در روش فازی دلفی (Liu & Chen, 2007)

در روابط بالا γ_{ij} و α_{ij} به ترتیب معرف حد بالا و حد پائین نظرات داوران می‌باشند. پارامتر β_{ijk} نیز معرف اهمیت نسبی پارامتر i نسبت به پارامتر j از دیدگاه متخصص k ام است.

(ج) تشکیل ماتریس مقایسه زوجی فازی

در این مرحله با استفاده از اعداد فازی که از مرحله قبل به دست آمده ماتریس مقایسه زوجی فازی بین پارامترها مختلف با کمک رابطه پ-5 تشکیل می‌شود (Liu & Chen, 2007).

$$\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}] \tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ij} \approx 1, \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{پ-5})$$

یا به صورت:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & (\alpha_{12}, \delta_{12}, \gamma_{12}) & (\alpha_{13}, \delta_{13}, \gamma_{13}) \\ (\frac{1}{\gamma_{12}}, \frac{1}{\delta_{12}}, \frac{1}{\alpha_{12}}) & (1,1,1) & (\alpha_{23}, \delta_{23}, \gamma_{23}) \\ (\frac{1}{\gamma_{13}}, \frac{1}{\delta_{13}}, \frac{1}{\alpha_{13}}) & (\frac{1}{\gamma_{23}}, \frac{1}{\delta_{23}}, \frac{1}{\alpha_{23}}) & (1,1,1) \end{bmatrix}$$

ماتریس مقایسه زوجی فازی در ذیل آورده شده است.

جدول پ-1- ماتریس مقایسه زوجی نهایی فازی

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
C ₁	(1, 1, 1)	(0.7, 1, 1.4)	(0.7, 1.4, 2.3)	(0.6, 0.8, 1)	(0.6, 0.7, 1)	(0.6, 0.8, 1)
C ₂	(0.7, 1, 1.4)	(1, 1, 1)	(0.7, 1.3, 1.7)	(0.7, 0.7, 0.8)	(0.6, 0.7, 1)	(0.7, 0.8, 1)
C ₃	(0.4, 0.9, 1.4)	(0.6, 0.9, 1.4)	(1, 1, 1)	(0.4, 0.6, 1)	(0.3, 0.6, 0.8)	(0.4, 0.7, 1)
C ₄	(1, 1.4, 1.8)	(1.3, 1.4, 1.4)	(1, 1.8, 2.3)	(1, 1, 1)	(0.8, 1, 1.3)	(1, 1.1, 1.3)
C ₅	(1, 1.5, 1.8)	(1, 1.5, 1.8)	(1.3, 1.9, 3)	(0.8, 1.1, 1.3)	(1, 1, 1)	(0.8, 1.1, 1.3)
C ₆	(1, 1.3, 1.8)	(1, 1.3, 1.4)	(1, 1.7, 2.3)	(0.8, 0.9, 1)	(0.8, 0.9, 1.3)	(1, 1, 1)
C ₇	(0.4, 0.8, 1.4)	(0.6, 0.7, 1)	(0.4, 0.9, 1)	(0.4, 0.5, 0.8)	(0.3, 0.5, 0.8)	(0.4, 0.6, 1)
C ₈	(0.4, 0.8, 1)	(0.6, 0.7, 1)	(0.7, 0.9, 1)	(0.4, 0.5, 0.7)	(0.3, 0.5, 0.7)	(0.4, 0.6, 0.7)
C ₉	(0.4, 0.9, 1.4)	(0.4, 0.9, 1.4)	(0.6, 1.1, 1.7)	(0.3, 0.6, 0.8)	(0.3, 0.6, 0.8)	(0.3, 0.7, 1)
C ₁₀	(1.3, 1.5, 1.8)	(1, 1.5, 1.8)	(1, 2, 3)	(0.8, 1.1, 1.3)	(0.8, 1.1, 1.3)	(1, 1.2, 1.3)
C ₁₁	(1, 1.2, 1.4)	(0.7, 1.2, 1.4)	(0.7, 1.6, 2.3)	(0.6, 0.9, 1)	(0.6, 0.8, 1)	(0.7, 0.9, 1)
C ₁₂	(0.7, 1.1, 1.4)	(0.7, 1.1, 1.4)	(1, 1.4, 2.3)	(0.6, 0.8, 1)	(0.7, 0.8, 0.8)	(0.6, 0.9, 1)

ادامه جدول پ-1- ماتریس مقایسه زوجی نهایی فازی

	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
C ₁	(0.7, 1.6, 2.3)	(1, 1.5, 2.3)	(0.7, 1.4, 2.3)	(0.6, 0.7, 0.8)	(0.7, 0.9, 1)	(0.7, 1, 1.4)
C ₂	(1, 1.5, 1.7)	(1, 1.4, 1.7)	(0.7, 1.3, 2.3)	(0.6, 0.7, 1)	(0.7, 0.9, 1.4)	(0.7, 1, 1.4)
C ₃	(1, 1.3, 2.3)	(1, 1.2, 1.4)	(0.6, 1.1, 1.7)	(0.3, 0.6, 1)	(0.4, 0.8, 1.4)	(0.4, 0.8, 1)
C ₄	(1.3, 2, 2.3)	(1.4, 1.9, 2.3)	(1, 1.8, 3)	(0.8, 0.9, 1.3)	(1, 1.2, 1.8)	(1, 1.3, 1.8)
C ₅	(1.3, 2.2, 3)	(1.4, 2.1, 3)	(1.3, 1.9, 3)	(0.8, 1, 1.3)	(1, 1.3, 1.8)	(1.3, 1.3, 1.4)
C ₆	(1, 2, 2.3)	(1.4, 1.9, 2.3)	(1, 1.7, 3)	(0.8, 0.9, 1)	(1, 1.1, 1.4)	(0.4, 0.7, 1)
C ₇	(1, 1, 1)	(0.6, 1, 1.4)	(0.4, 0.9, 1.7)	(0.3, 0.5, 1)	(0.4, 0.7, 1.4)	(0.4, 0.7, 1)
C ₈	(0.7, 1.1, 1.7)	(1, 1, 1)	(0.6, 0.9, 1.7)	(0.3, 0.5, 0.7)	(0.4, 0.7, 1)	(0.4, 0.7, 1)
C ₉	(0.6, 1.3, 2.3)	(0.6, 1.2, 1.7)	(1, 1, 1)	(0.3, 0.6, 1)	(0.4, 0.8, 1.4)	(0.4, 0.8, 1)
C ₁₀	(1, 2.4, 3)	(1.4, 2.2, 3)	(1, 2, 3)	(1, 1, 1)	(1.3, 1.3, 1.4)	(1, 1.4, 1.8)
C ₁₁	(0.7, 1.8, 2.3)	(1, 1.7, 2.3)	(0.7, 1.6, 2.3)	(0.7, 0.8, 0.8)	(1, 1, 1)	(0.7, 1.1, 1.4)
C ₁₂	(1, 1.7, 2.3)	(1, 1.6, 2.3)	(1, 1.4, 2.3)	(0.6, 0.7, 1)	(0.7, 1, 1.4)	(1, 1, 1)

(د) محاسبه وزن فازی هر یک از پارامترها

در این مرحله وزن فازی متعلق به هر پارامتر را می‌توان با استفاده از رابطه‌های پ-6 و پ-7 تعیین کرد (Liu & Chen, 2007)

$$\tilde{Z}_i = [\tilde{a}_{ij} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in}]^{/n} \quad (\text{پ-6})$$

$$\tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1} \quad (\text{پ-7})$$

در رابطه بالا $\otimes$ علامت ضرب اعداد فازی و $\oplus$ علامت جمع اعداد فازی می‌باشد. در نهایت پارامتر $\tilde{W}_i$ که یک بردار سطری است، معرف وزن فازی پارامتر $\tilde{A}$ می‌باشد.

$$\tilde{Z}_1 = [\tilde{a}_{11} \otimes \tilde{a}_{12} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{112}]^{/12} = [0.6948, 0.968, 1.3738]$$

$$\tilde{Z}_2 = [\tilde{a}_{21} \otimes \tilde{a}_{22} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{212}]^{/12} = [0.7451, 0.968, 1.2989]$$

$$\tilde{Z}_3 = [\tilde{a}_{31} \otimes \tilde{a}_{32} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{312}]^{/12} = [0.5373, 0.7861, 1.2268]$$

$$\tilde{Z}_4 = [\tilde{a}_{41} \otimes \tilde{a}_{42} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{412}]^{/12} = [1.0284, 1.3098, 1.7181]$$

$$\tilde{Z}_5 = [\tilde{a}_{51} \otimes \tilde{a}_{52} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{512}]^{/12} = [1.0502, 1.3773, 1.8295]$$

$$\tilde{Z}_6 = [\tilde{a}_{61} \otimes \tilde{a}_{62} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{612}]^{/12} = [0.9, 1.1823, 1.5363]$$

$$\tilde{Z}_7 = [\tilde{a}_{71} \otimes \tilde{a}_{72} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{712}]^{/12} = [0.4665, 0.6661, 1.0885]$$

$$\tilde{Z}_8 = [\tilde{a}_{81} \otimes \tilde{a}_{82} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{812}]^{/12} = [0.508, 0.6897, 0.9733]$$

$$\tilde{Z}_9 = [\tilde{a}_{91} \otimes \tilde{a}_{92} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{912}]^{/12} = [0.4601, 0.7858, 1.2189]$$

$$\tilde{Z}_{10} = [\tilde{a}_{101} \otimes \tilde{a}_{102} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{1012}]^{/12} = [1.0284, 1.4483, 1.8295]$$

$$\tilde{Z}_{11} = [\tilde{a}_{111} \otimes \tilde{a}_{112} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{1112}]^{/12} = [0.7451, 1.1074, 1.4128]$$

$$\tilde{Z}_{12} = [\tilde{a}_{121} \otimes \tilde{a}_{122} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{1212}]^{/12} = [0.7717, 1.0353, 1.4128]$$

$$\sum \tilde{Z}_i = [8.9356, 12.327, 16.919]$$

$$\tilde{W}_1 = \tilde{Z}_1 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.0411, 0.0785, 0.1537]$$

$$\begin{aligned}
\tilde{W}_2 &= \tilde{Z}_2 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.044, 0.0785, 0.1454] \\
\tilde{W}_3 &= \tilde{Z}_3 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.0318, 0.064, 0.1373] \\
\tilde{W}_4 &= \tilde{Z}_4 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.0608, 0.1063, 0.1923] \\
\tilde{W}_5 &= \tilde{Z}_5 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.0621, 0.1117, 0.2047] \\
\tilde{W}_6 &= \tilde{Z}_6 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.0532, 0.0959, 0.1719] \\
\tilde{W}_7 &= \tilde{Z}_7 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.0276, 0.054, 0.1218] \\
\tilde{W}_8 &= \tilde{Z}_8 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.03, 0.056, 0.1089] \\
\tilde{W}_9 &= \tilde{Z}_9 \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.0272, 0.0637, 0.1364] \\
\tilde{W}_{10} &= \tilde{Z}_{10} \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.0608, 0.1175, 0.2047] \\
\tilde{W}_{11} &= \tilde{Z}_{11} \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.044, 0.0898, 0.1581] \\
\tilde{W}_{12} &= \tilde{Z}_{12} \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \tilde{Z}_2 \oplus \tilde{Z}_3)^{-1} = [0.0456, 0.084, 0.1581]
\end{aligned}$$

ه) غیر فازی کردن وزن پارامترها

پس از یافتن وزن های فازی مربوط به هر یک از پارامترها، تمامی اعداد با استفاده از رابطه پ-8 به صورت غیر فازی تبدیل می شوند (Liu & Chen, 2007).

$$\tilde{W}_i = (\prod_{j=1}^3 \omega_j)^{1/3} \quad (\text{پ-8})$$

$$W_1 = (\prod_{j=1}^3 \omega_j)^{1/3} = 0.07928,$$

$$W_2 = 0.0796,$$

$$W_3 = 0.0655,$$

$$W_4 = 0.1076,$$

$$W_5 = 0.1125,$$

$$W_6 = 0.0958,$$

$$W_7 = 0.05675,$$

$$W_8 = 0.0569,$$

$$W_9 = 0.0619,$$

$$W_{10} = 0.1136,$$

$$W_{11} = 0.0857,$$

$$W_{12} = 0.0847.$$

بدین ترتیب وزن هر یک از پارامترها با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی دلفی محاسبه شد و مقادیر متعلق به هر یک از آنها در جدول پ-2 درج شده است.

جدول پ-2- وزن نهایی هر یک از پارامترها با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی دلفی

وزن نهایی	پارامتر
0/0793	C ₁ بافت
0/0796	C ₂ اندازه و شکل دانه ها
0/0655	C ₃ نوع ماتریس و سیمان سنگ
0/1076	C ₄ درصد کوارتز
0/1125	C ₅ سختی
0/0958	C ₆ ساینده
0/0568	C ₇ هوازدگی
0/0569	C ₈ چگالی
0/0619	C ₉ سختی چکش اشمیت
0/1136	C ₁₀ مقاومت فشاری تک محوری
0/0857	C ₁₁ مقاومت کششی
0/0847	C ₁₂ مدول الاستیسیته

پیوست 2

پ-2- مجموع داده‌های آزمایشگاهی حاصل از مطالعات برش در مقیاس آزمایشگاهی

جدول پ-1- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش (داده‌های آموزش برای نمونه سنگ‌های نرم)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش سیستم (RMS)	شدت جریان مصرفی (A)
1	TGH*	35	200	59/4	0/17
2	TGH	22	200	59/4	0/14
3	TGH	15	200	59/4	0/13
4	TGH	35	300	59/4	0/24
5	TGH	15	300	59/4	0/17
6	TGH	22	300	59/4	0/2
7	TGH	35	400	59/4	0/26
8	TGH	22	400	59/4	0/23
9	TGH	15	400	59/4	0/21
10	TGH	35	100	59/4	0/13
11	TGH	30	100	59/4	0/12
12	TGH	22	100	59/4	0/11
13	TGH	15	100	59/4	0/1
14	THA*	30	200	52	0/17
15	THA	22	200	52	0/17
16	THA	15	200	52	0/15
17	THA	30	300	52	0/23
18	THA	15	300	52	0/19
19	THA	22	300	52	0/22
20	THA	30	400	52	0/26
21	THA	15	400	52	0/22
22	THA	22	400	52	0/25
23	THA	36	100	52	0/13
24	THA	22	100	52	0/11
25	THA	15	100	52	0/1
26	HAI	30	100	52	0/12
27	TDA*	30	200	52	0/17
28	TDA	15	200	52	0/15
29	TDA	22	200	52	0/17
30	TDA	30	400	52	0/27
31	TDA	15	400	52	0/22
32	TDA	22	400	52	0/25
33	TDA	33	300	52	0/25
34	TDA	22	300	52	0/21
35	TDA	15	300	52	0/19
36	TDA	30	300	52	0/24
37	TDA	33	100	52	0/13
38	TDA	15	100	52	0/1
39	TDA	22	100	52	0/11
40	TDA	30	100	52	0/13

ادامه جدول پ-1- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش (داده‌های آموزش برای نمونه سنگ‌های نرم)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش سیستم (RMS)	شدت جریان مصرفی (A)	
MHA*	30	200	45/75	0/23	11	41
MHA	15	200	45/75	0/17	7	42
MHA	22	200	45/75	0/2	9	43
MHA	35	100	45/75	0/15	8/5	44
MHA	15	100	45/75	0/11	6/3	45
MHA	22	100	45/75	0/12	6/7	46
MHA	30	100	45/75	0/14	8	47
MHA	35	300	45/75	0/28	15	48
MHA	15	300	45/75	0/23	8/5	49
MHA	22	300	45/75	0/25	11	50
MHA	30	300	45/75	0/27	14	51
MHA	30	400	45/75	0/34	15/5	52
MHA	22	400	45/75	0/3	13	53
MHA	15	400	45/75	0/28	10	54
MHAF*	30	200	34/2	0/25	13	55
MHAF	15	200	34/2	0/21	8	56
MHAF	22	200	34/2	0/23	10/5	57
MHAF	30	300	34/2	0/28	16	58
MHAF	15	300	34/2	0/24	11	59
MHAF	22	300	34/2	0/25	13	60
MHAF	33	100	34/2	0/16	10	61
MHAF	15	100	34/2	0/13	6/3	62
MHAF	22	100	34/2	0/14	7/5	63
MHAF	30	100	34/2	0/16	9	64
MHAF	33	400	34/2	0/4	19	65
MHAF	15	400	34/2	0/3	11	66
MHAF	22	400	34/2	0/33	14	67
MHAF	30	400	34/2	0/37	17	68
MSA*	15	200	45/75	0/24	8	69
MSA	22	200	45/75	0/27	9	70
MSA	30	200	45/75	0/28	11	71
MSA	15	300	45/75	0/28	8/5	72
MSA	22	300	45/75	0/31	11	73
MSA	30	300	45/75	0/32	14	74
MSA	15	400	45/75	0/3	10/5	75
MSA	22	400	45/75	0/33	13	76
MSA	30	400	45/75	0/36	16	77
MSA	35	100	45/75	0/17	9	78
MSA	30	100	45/75	0/15	8	79
MSA	15	100	45/75	0/13	6/3	80
MSA	22	100	45/75	0/14	7	81
MAN*	30	200	45/75	0/21	11	82

ادامه جدول پ-1- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش (داده‌های آموزش برای نمونه سنگ‌های نرم)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش سیستم (RMS)	شدت جریان مصرفی (A)
83	MAN	22	200	45/75	0/19
84	MAN	15	200	45/75	0/17
85	MAN	30	300	45/75	0/27
86	MAN	15	300	45/75	0/23
87	MAN	22	300	45/75	0/26
88	MAN	30	400	45/75	0/33
89	MAN	15	400	45/75	0/27
90	MAN	22	400	45/75	0/31
91	MAN	15	100	45/75	0/12
92	MAN	30	100	45/75	0/15
93	MAN	22	100	45/75	0/14
94	MAN	35	100	45/75	0/16

*TGH: تراورتن قرمز آذرشهر، THA: تراورتن حاجی آباد، TDA: تراورتن دره بخاری، MHAF: مرمیت هفتومان، MHA:

مرمیت هرسین، MSA: مرمیت صلصالی، MAN: مرمیت انارک

جدول پ-2- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش (داده‌های تست برای نمونه سنگ‌های نرم)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش سیستم (RMS)	شدت جریان مصرفی (A)
1	TGH*	30	200	59/4	0/14
2	MAN*	35	400	45/75	0/36
3	MAN	35	300	45/75	0/3
4	MAN	35	200	45/75	0/24
5	MSA*	32	400	45/75	0/38
6	MSA	32	300	45/75	0/35
7	MSA	32	200	45/75	0/3
8	MHAF*	33	300	34/2	0/29
9	MHA*	35	400	45/75	0/38
10	MHAF	33	200	34/2	0/27
11	MHA	35	200	45/75	0/29
12	TDA*	33	400	52	0/28
13	TGH	30	300	59/4	0/23
14	TDA	33	200	52	0/18
15	THA*	36	400	52	0/27
16	THA	36	300	52	0/24
17	THA	36	200	52	0/18
18	TGH	30	400	59/4	0/23

*TGH: تراورتن قرمز آذرشهر، THA: تراورتن حاجی آباد، TDA: تراورتن دره بخاری، MHAF: مرمیت هفتومان، MHA:

مرمیت هرسین، MSA: مرمیت صلصالی، MAN: مرمیت انارک

جدول پ-3- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش (داده‌های آموزش برای نمونه سنگ‌های سخت)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش سیستم (RMS)	شدت جریان مصرفی (A)
1	N*	200	28/35	0/33	13/5
2	N	200	28/35	0/26	11
3	N	200	28/35	0/27	12/5
4	N	300	28/35	0/28	9/5
5	N	300	28/35	0/3	13
6	N	300	28/35	0/31	15
7	N	350	28/35	0/36	23/5
8	N	350	28/35	0/33	10/5
9	N	375	28/35	0/35	28
10	N	375	28/35	0/3	10/5
11	N	400	28/35	0/36	15
12	N	400	28/35	0/37	18
13	N	400	28/35	0/38	20
14	N	425	28/35	0/35	11/5
15	N	450	28/35	0/42	15
16	N	100	28/35	0/18	7/5
17	N	100	28/35	0/19	8
18	N	100	28/35	0/16	8/5
19	N	100	28/35	0/21	7/5
20	CH*	200	27/5	0/31	12/5
21	CH	200	27/5	0/28	14
22	CH	200	27/5	0/26	11
23	CH	300	27/5	0/26	9
24	CH	300	27/5	0/3	13
25	CH	300	27/5	0/33	17
26	CH	350	27/5	0/26	10
27	CH	350	27/5	0/35	18
28	CH	375	27/5	0/21	17
29	CH	375	27/5	0/28	12/5
30	CH	400	27/5	0/38	20
31	CH	400	27/5	0/36	18
32	CH	400	27/5	0/35	17
33	CH	425	27/5	0/35	16
34	CH	100	27/5	0/17	8
35	CH	100	27/5	0/27	7/5
36	CH	100	27/5	0/18	9
37	CH	100	27/5	0/2	10
38	CH	100	27/5	0/23	9
39	CH	450	27/5	0/39	16
40	KH*	200	37/6	0/21	9
41	KH	200	37/6	0/23	11
42	KH	300	37/6	0/28	13

ادامه جدول پ 3-آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش (داده‌های آموزش برای نمونه سنگ‌های سخت)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش سیستم (RMS)	شدت جریان مصرفی (A)
43	KH	24	300	37/6	0/26
44	KH	17	300	37/6	0/27
45	KH	17	350	37/6	0/25
46	KH	35	350	37/6	0/36
47	KH	18	375	37/6	0/33
48	KH	34	375	37/6	0/19
49	KH	30	400	37/6	0/31
50	KH	35	400	37/6	0/33
51	KH	17/5	400	37/6	0/25
52	KH	24	400	37/6	0/3
53	KH	17/5	425	37/6	0/36
54	KH	17/5	450	37/6	0/4
55	KH	24	100	37/6	0/16
56	KH	30	100	37/6	0/17
57	KH	34	100	37/6	0/22
58	KH	16/5	100	37/6	0/16
59	MO*	16/5	100	43	0/1
60	MO	24	100	43	0/13
61	MO	30	100	43	0/14
62	MO	16/5	450	43	0/32
63	MO	16/5	425	43	0/25
64	MO	16/5	400	43	0/21
65	MO	24	400	43	0/25
66	MO	30	400	43	0/28
67	MO	35	400	43	0/3
68	MO	33	375	43	0/33
69	MO	16/5	375	43	0/2
70	MO	35	350	43	0/33
71	MO	17/5	350	43	0/24
72	MO	30	200	22/1	0/2
73	MO	24	200	22/1	0/2
74	MO	24	300	22/1	0/24
75	MO	30	300	22/1	0/25
76	MO	18	300	22/1	0/24
77	YA*	35	200	22/1	0/31
78	YA	30	200	22/1	0/3
79	YA	24	200	22/1	0/29
80	YA	17	300	22/1	0/3
81	YA	24	300	22/1	0/34
82	YA	30	300	22/1	0/37
83	YA	17	350	22/1	0/4
84	YA	35	350	22/1	0/35

ادامه جدول پ-3-آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش (داده‌های آموزش برای نمونه سنگ‌های سخت)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش سیستم (RMS)	شدت جریان مصرفی (A)
85	YA	17	375	22/1	0/38
86	YA	35	375	22/1	0/34
87	YA	30	400	22/1	0/43
88	YA	35	400	22/1	0/45
89	YA	24	400	22/1	0/4
90	YA	17/5	425	22/1	0/43
91	YA	17/5	450	22/1	0/49
92	YA	30	100	22/1	0/22
93	YA	24	100	22/1	0/2
94	YA	17/5	100	22/1	0/17
95	YA	35	100	22/1	0/16
96	YA	35	300	22/1	0/34

*YA: گرانیت قرمز یزد، MO: گرانیت مروارید مشهد، KH: گرانیت خرمدره، CH: گرانیت چایان، N: گرانیت نهبندان

جدول پ-4-آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی عملکرد برش (داده‌های تست برای نمونه سنگ‌های سخت)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	ارتعاش سیستم (RMS)	شدت جریان مصرفی (A)
1	N*	17	200	28/35	0/24
2	N	36	300	28/35	0/32
3	N	18	400	28/35	0/35
4	CH*	15	200	27/5	0/33
5	CH	30	300	27/5	0/3
6	CH	17/5	400	27/5	0/46
7	KH*	17	200	37/6	0/16
8	KH	35	200	37/6	0/28
9	KH	35	300	37/6	0/26
10	MO*	33	100	43	0/15
11	MO	17/5	200	43	0/24
12	MO	35	200	43	0/24
13	MO	34	300	43	0/26
14	YA*	17	200	22/1	0/31
15	YA	17/5	400	22/1	0/45

*YA: گرانیت قرمز یزد، MO: گرانیت مروارید مشهد، KH: گرانیت خرمدره، CH: گرانیت چایان، N: گرانیت نهبندان

پیوست 3

پ-3- مجموع داده‌های حاصل از مطالعات برش در مقیاس صنعتی

جدول پ-1- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای نمونه سنگ‌های نرم (داده‌های آموزش)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	شدت جریان مصرفی (آمپر)
1	0/5	25	45/75	82
2	1	25	45/75	91
3	2	25	45/75	104
4	2/5	25	45/75	109
5	3	25	45/75	116
6	3/5	25	45/75	124
7	0/5	35	45/75	85
8	1	35	45/75	93
9	1/5	35	45/75	98
10	2/5	35	45/75	113
11	3	35	45/75	121
12	0/5	45	45/75	87
13	1	45	45/75	94
14	1/5	45	45/75	99
15	2	45	45/75	111
16	2/5	45	45/75	116
17	0/5	25	59/4	69
18	1	25	59/4	75
19	2	25	59/4	83
20	2/5	25	59/4	89
21	3/5	25	59/4	99
22	4	25	59/4	104
23	4/5	25	59/4	109
24	5	25	59/4	117
25	0/5	35	59/4	70
26	1	35	59/4	75
27	2/5	35	59/4	91
28	3	35	59/4	96
29	3/5	35	59/4	100
30	4	35	59/4	106
31	4/5	35	59/4	110
32	5	35	59/4	118
33	0/5	45	59/4	70
34	1	45	59/4	76
35	2	45	59/4	81
36	2/5	45	59/4	93
37	3	45	59/4	98
38	3/5	45	59/4	101
39	4	45	59/4	107
40	4/5	45	59/4	113

ادامه جدول پ-1- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای نمونه سنگ‌های نرم
(داده‌های آموزش)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	شدت جریان مصرفی (آمپر)
41	0/5	25	52	71
42	1	25	52	77
43	2	25	52	85
44	2/5	25	52	91
45	3	25	52	98
46	3/5	25	52	106
47	4/5	25	52	113
48	5	25	52	119
49	0/5	35	52	73
50	1	35	52	78
51	2	35	52	85
52	2/5	35	52	92
53	3	35	52	98
54	3/5	35	52	103
55	4	35	52	109
56	5	35	52	121
57	0/5	45	52	74
58	1	45	52	80
59	2	45	52	86
60	2/5	45	52	92
61	3	45	52	101
62	4	45	52	108
63	4/5	45	52	116
64	5	45	52	124
65	0/5	25	45/75	76
66	1	25	45/75	84
67	1/5	25	45/75	91
68	2/5	25	45/75	104
69	3	25	45/75	110
70	3/5	25	45/75	116
71	0/5	35	45/75	78
72	1	35	45/75	87
73	2	35	45/75	101
74	2/5	35	45/75	108
75	3	35	45/75	113
76	3/5	35	45/75	119
77	0/5	45	45/75	79
78	1	45	45/75	86
79	1/5	45	45/75	94
80	2	45	45/75	103
81	2/5	45	45/75	110

ادامه جدول پ-1- آزمایش‌های انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای نمونه سنگ‌های نرم
(داده‌های آموزش)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	شدت جریان مصرفی (آمپر)
82	3	45	45/75	116
83	1	25	45/75	82
84	1/5	25	45/75	90
85	2	25	45/75	97
86	2/5	25	45/75	102
87	3	25	45/75	108
88	3/5	25	45/75	114
89	0/5	35	45/75	76
90	1	35	45/75	83
91	1/5	35	45/75	92
92	2/5	35	45/75	104
93	3	35	45/75	110
94	3/5	35	45/75	117
95	0/5	45	45/75	77
96	1	45	45/75	85
97	1/5	45	45/75	94
98	2	45	45/75	101
99	2/5	45	45/75	108
100	3	45	45/75	115

جدول پ-2- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای نمونه سنگ‌های سخت (داده‌های آموزش)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	شدت جریان مصرفی واقعی (آمپر)
1	1	37	28/35	83
2	1/5	37	28/35	100
3	2	37	28/35	118
4	0/5	45	28/35	67
5	1	45	28/35	84
6	1/5	45	28/35	100
7	2	45	28/35	118
8	0/5	56	28/35	67
9	1	56	28/35	84
10	1/5	56	28/35	104
11	2	56	28/35	121
12	0/5	37	43	58
13	1	37	43	72
14	1/5	37	43	89
15	2	37	43	104
16	0/5	45	43	59
17	1	45	43	72
18	1/5	45	43	91

ادامه جدول پ-2- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای نمونه سنگ‌های سخت
(داده‌های آموزش)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	شدت جریان مصرفی واقعی (آمپر)
19	2	45	43	106
20	0/5	56	43	61
21	1/5	56	43	94
22	2	56	43	110
23	0/5	37	27/5	65
24	1	37	27/5	84
25	1/5	37	27/5	101
26	2	37	27/5	118
27	0/5	45	27/5	67
28	1	45	27/5	86
29	2	45	27/5	115
30	0/5	56	27/5	69
31	1	56	27/5	88
32	1/5	56	27/5	106
33	2	56	27/5	123
34	0/5	37	22/1	66
35	1	37	22/1	86
36	1/5	37	22/1	104
37	0/5	45	22/1	68
38	1	45	22/1	93
39	1/5	45	22/1	106
40	2	45	22/1	124
41	0/5	56	22/1	69
42	1	56	22/1	92
43	1/5	56	22/1	109
44	2	56	22/1	130
45	0/5	37	37/6	61
46	1	37	37/6	78
47	1/5	37	37/6	92
48	2	37	37/6	106
49	1	45	37/6	77
50	1/5	45	37/6	94
51	2	45	37/6	108
52	0/5	56	37/6	64
53	1	56	37/6	78
54	1/5	56	37/6	96
55	2	56	37/6	111

جدول پ-3- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی سایش برای نمونه سنگ‌های سخت (داده‌های آموزش)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	مقدار سایش (mm)	نرخ سایش (mm/h)
1	0/5	37	28/35	0/157	0/093
2	0/5	45	28/35	0/168	0/120
3	1	45	28/35	0/189	0/271
4	1/5	45	28/35	0/208	0/447
5	0/5	56	28/35	0/18	0/160
6	1	56	28/35	0/201	0/358
7	1/5	56	28/35	0/217	0/580
8	2	37	43	0/121	0/242
9	2	45	43	0/124	0/301
10	1	56	43	0/103	0/156
11	1/5	56	43	0/118	0/268
12	2	56	43	0/132	0/399
13	0/5	37	27/5	0/154	0/087
14	0/5	45	27/5	0/163	0/112
15	0/5	56	27/5	0/172	0/147
16	1	56	27/5	0/181	0/309
17	1/5	56	27/5	0/193	0/495
18	0/5	37	22/1	0/168	0/104
19	0/5	45	22/1	0/183	0/138
20	0/5	56	22/1	0/198	0/186
21	1	56	22/1	0/214	0/401
22	1/5	56	22/1	0/233	0/655
23	2	37	37/6	0/129	0/280
24	2	45	37/6	0/138	0/365
25	0/5	56	37/6	0/111	0/091
26	1	56	37/6	0/123	0/202
27	1/5	56	37/6	0/136	0/336
28	2	56	37/6	0/145	0/477

جدول پ-4- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای نمونه سنگ‌های نرم (داده‌های تست)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	شدت جریان مصرفی واقعی (آمپر)	شدت جریان مصرفی پیش‌بینی (آمپر)	خطای نسبی (%)
1	1/5	30	45/75	98	95/6	2/4
2	2	35	45/75	106	102/3	3/5
3	3	40	45/75	123	112/1	8/9
4	3	30	59/4	84	95/6	13/8
5	2	35	59/4	77	88/3	14/7
6	5	40	59/4	108	107/8	0/2
7	4	30	52	100	109/4	9/4
8	4/5	35	52	107	112/9	5/6
9	3/5	40	52	97	107/7	11/1
10	2	30	45/75	99	101/6	2/6
11	1/5	35	45/75	93	96/3	3/5
12	3/5	40	45/75	123	115/8	5/9
13	0/5	30	45/75	74	75/8	2/5
14	2	35	45/75	99	102/3	3/3
15	3/5	40	45/75	120	115/8	3/5

جدول پ-5- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای نمونه سنگ‌های سخت (داده‌های تست)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	شدت جریان مصرفی واقعی (آمپر)	شدت جریان مصرفی پیش‌بینی (آمپر)	خطای نسبی (%)
1	0/5	37	28/35	65	62/8	3/3
2	1	56	43	76	79/6	4/7
3	3	56	43	121	125/9	4/1
4	1/5	45	27/5	103	102/6	0/4
5	2	37	22/1	124	119/3	3/7
6	0/5	45	37/6	62	60	3/2
7	3	56	37/6	126	130/2	3/3

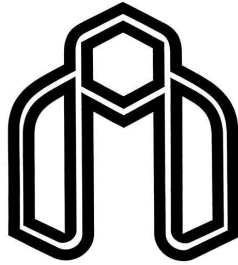
جدول پ-6- آزمایشات انجام شده برای بررسی و پیش‌بینی سایش برای نمونه سنگ‌های سخت (داده‌های تست)

شماره تست	عمق برش (mm)	نرخ پیشروی (cm/s)	شاخص قابلیت برش (RSi)	مقدار سایش (mm)	نرخ سایش واقعی (mm/h)	نرخ سایش پیش‌بینی (mm/h)	خطای نسبی (%)
1	2	56	28/35	0/21	0/729	0/699	4/1
2	3	45	43	0/142	0/535	0/49	8/4
3	1/5	37	37/6	0/115	0/191	0/209	9/4

Abstract:

The prediction of rock sawability and determination of effective parameters are very important in the cost estimation and the best planning of the plants. Rock sawability depends on the machine characteristics and rock mechanical properties. In this study, first a new classification system was developed with the respect to rock mechanical properties such as uniaxial compressive strength, abrasivity index, mean Moh's hardness, and Young's modulus. The importance degree of mentioned parameters in the new classification system was determined by Fuzzy and Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process methods. Using this classification system, the rock sawability index (RSi) of a variety groups of studied dimensional rocks (7 types of carbonate rock and 5 types of granite rock) was evaluated and classified into five categories. To verify the result of applied classification for ranking the rock sawability, studied rocks were sawn using a fully instrumented laboratory cutting rig at different feed rate and depth of cut at constant peripheral speed. During the sawing trials, the ampere and system vibration were monitored and calculated as performance characteristics of the saws. The results of sawing trials showed that the sawability ranking of studied rocks is correct. It was concluded that the sawability of dimensional rocks can reliably be ranked using the developed classification system. In the second step, the economic analysis was carried out on sawing process in the some factories located in Mahmod Abad Esfahan. The main factors that affect the dimensional rock sawing costs were calculated using the developed equations. Then, functions used in calculating sawing costs were developed using these equations. In additionally, a total cost model was generated for every dimensional rock product. Cost analyses of two different dimensional rock groups were made by using this model. Also sensitivity analyses of all cost parameters were created. A major conclusion to be drawn from this step was that the energy cost and wearing cost have the biggest effect on the carbonate and granite product cost model. The developed cost model from this study can be used for all carbonate and granite types, and can generate a cost analysis of wide dimensional rock production easily. In the third step of this study, the sawing parameters such as depth of cut and feed rate were optimized using genetic algorithm. A genetic algorithm (GA) is a search heuristic that mimics the process of natural evolution. This heuristic is routinely used to generate useful solutions to optimization and search problems. In this study, the optimum machining parameters were determined for studied rocks using genetic algorithm. Finally, tow graphs were presented based on rock sawability for selecting the optimum points of machining parameters (depth of cut and feed rate).

Keywords: Ornamental stone; Classification system; Sensitivity analysis; Genetic algorithm



Shahrood University of Tecnology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

Development of New Classification System for Assessing the Dimensional Stones Sawability and Optimization of Sawing Parameters

Reza Mikaeil

Supervisor:
Dr. Mohammad Ataei

Consultant:
Dr. Reza Yousefi

Date: September 2011