

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، ژئوفیزیک و نفت

مهندسی معدن

رساله دکتری

مطالعات آزمایشگاهی تأثیر سیال خنک کننده/اروان کار در عملکرد برش دهنده‌های دیسکی در سنگ‌های سخت

نگارنده:

سیدمهدی حسینی

اساتید راهنما:

دکتر محمد عطایی

دکتر رضا کاکایی

استاد مشاور:

دکتر رضا میکائیل

شهریور ۹۸

ب

تقدیم اثر

تقدیم به رنج های بی پایان پدرم

چشم های همیشه بیدار مادرم

و قلب همیشه مهربان خواهرانم

و تقدیم مجدد به مادرم که نشانه لطف الهی در زندگی من
است و مرا در این راه استوار و ثابت قدم نمود و مسیح وار
با صبرش در تمامی این لحظات رفیق راهم بود.

تشکر و قدردانی

پروردگارا سپاس میگویمت که بر من منت نهادی و خلعت تحصیل بر من پوشاندی، چه زیباست ستایش خالق، او که زندگی میکنیم برای وصالش. بر خود وظیفه میدانم تا از تمامی بزرگوارانی که صبورانه در راستای انجام این پژوهش مرا یاری کردند، تشکر و قدردانی نمایم.

چرا که اگر یاری این عزیزان نبود، این تلاش به پایان نمی رسید. از اساتید راهنمای خود جناب آقایان دکتر محمد عطایی و دکتر رضا کاکایی و استاد مشاور دکتر رضا میکاییل

تشکر مینمایم.

همچنین از پدر و مادر عزیزم که برترین آموزگاران خوش بینی و امید من در دوران تحصیل بودند تشکر و قدر دانی مینمایم به پاس محبت و زحمات بی دریغشان.

تعهد نامه

اینجانب سید مهدی حسینی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی معدن دانشکده مهندسی معدن، ژئوفیزیک و نفت دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله دکتری مطالعات آزمایشگاهی تأثیر سیال خنک کننده/روان کار در عملکرد برش دهنده های دیسکی در سنگ های سخت تحت راهنمایی دکتر محمد عطایی و دکتر رضا کاکایی متعهد می شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

فرایند برش سنگ‌های ساختمانی با ابزارهای برش دهنده دیسکی، یک فرایند سایشی می‌باشد. در طی این فرایند، 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 دانه الماس و ماتریس سگمنت با سنگ و تراشه‌های حاصل از فرایند برش می‌باشد. در اکثر فرایندهای سایشی بخش اعظم هدررفت انرژی مربوط به تنش‌های حرارتی می‌باشد، که با افزایش سختی، ساینده‌گی و پارامترهای مقاومتی سنگ این پدیده تشدید می‌شود. یکی از مهم‌ترین راه کارها برای کاهش تنش‌های حرارتی، استفاده از یک سیال خنک‌کننده/روان‌کار مناسب در محیط برش می‌باشد تا هم علاوه بر کاهش دمای محیط، محیط پاک و عاری از تراشه‌های سنگی ایجاد کرد. در این تحقیق سعی شده است تا به بررسی عملکرد ۵ نمونه از سیال خنک‌کننده/روان‌کار شامل آب شهری، پودر آب تراش با نسبت ۳۰ به ۱۰، ۱۵ به ۱۰، آب صابون با نسبت ۱ به ۲۰ و نسبت ۱ به ۴۰ در طی فرایند برش سنگ‌های ساختمانی سخت پرداخته شود. بدین منظور ابتدا ۱۰ نمونه سنگ ساختمانی سخت برای انجام مطالعات انتخاب و سپس نمونه‌های استاندارد شده برای تعیین مشخصات مهم فیزیکی و مکانیکی از قبیل سختی موهس، فاکتور ساینده‌گی شیمازک، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری تک محوره به آزمایشگاه مکانیک سنگ انتقال داده شدند. در ادامه نمونه پلاک‌های تهیه شده از هر نمونه سنگ با استفاده از دستگاه برش سنگ در مقیاس آزمایشگاهی با قابلیت تغییر در مشخصات عملیاتی و استفاده از سیالات خنک‌کننده/روان‌کار مختلف تهیه و نمونه‌ها در شرایط مختلف عملیاتی مورد آزمایش قرار گرفتند. در طی فرایند برش، عملکرد برش با استفاده از حداکثر شدت جریان مصرفی دستگاه برش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان از مطلوبیت استفاده از سیال پودر آب تراش با نسبت ۳۰ به ۱۰ در فرایند برش سنگ‌های سخت داشته است بطوری که در زمان استفاده از این سیال میزان حداکثر شدت جریان مصرفی دستگاه به حداقل مقدار خود نزدیک می‌شود. در گام بعدی با استفاده از مطالعات آماری و روش‌های هوشمند، مدل‌های بهینه‌سازی شده به منظور پیش‌بینی شدت جریان مصرفی طراحی و ارائه شدند. نتایج حاصل از

بررسی‌ها نشان دادند که می‌توان با دقت بالایی با استفاده از مدل‌های آماری و شبکه‌های هوشمند به پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش با توجه به مشخصات سنگ، سیال خنک‌کننده/روان‌کار و پارامترهای عملیاتی پرداخت. در پایان تحلیل اقتصادی کاربرد سیالات مورد مطالعه در مقیاس صنعتی انجام شد. نتایج حاصل از این بخش نشان داد که حداقل در یک دوره‌ی استفاده یک ماهه از سیالات روان‌کار ترکیبی می‌توان به صرفه اقتصادی با توجه به کاهش ۱۵ درصدی انرژی مصرفی دست یافت.

کلمات کلیدی: سنگ‌های ساختمانی سخت، سیال خنک‌کننده/روان‌کار، پودر آب تراش، مطالعات آماری، شبکه‌های هوشمند، الگوریتم‌های فرا ابتکاری.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- 1- Hosseini, S.M. Ataei, M. Khalo Kakaei, R. Mikaeil, R., (2019) **Study of the Effect of the Cooling and Lubricant Fluid on the Cutting Performance of Dimension Stone Through Artificial Intelligence Models**, Engineering Science and Technology, an International Journal. doi.org/10.1016/j.jestch.2019.04.012.
- 2- Hosseini, S.M. Ataei, M. Khalo Kakaei, R. Mikaeil, R., (2019) **Investigating the Role of Coolant and Lubricant Fluids on the Performance of Cutting Disks (Case Study: Hard Rocks).**, The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin. doi.org/10.17794/rgn.2019.2.2.
- 3- Hosseini, S.M. Ataei, M. Khalo Kakaei, R. Mikaeil, R., (2019) **An Experimental Investigation on the Role of Coolant and Lubricant Fluids in the Maximum Electrical Current based upon the Rock Physical and Mechanical Properties.**, Geotechnical and Geological Engineering. doi.org/10.1007/s10706-019-01101-x.
- 4- Hosseini, S.M. Ataei, M. Khalo Kakaei, R. Mikaeil, R., (2018) **Provision of Models for Predicting the Ampere Consumption of Disk Cutting Machines Using Coolant and Lubricant Fluids.**, First National Conference on Recent Advances in Engineering and Modern Sciences.
- 5- Hosseini, S.M. Ataei, M. Khalo Kakaei, R. Mikaeil, R., (2018) **Study of the Effect of Lubricant's Type on the Construction Hard Rocks' Cutting Performance from the Energy Consumption's Perspective.**, Secend National Conference on Civil Engineering, Architecture.

فهرست مطالب

ص	فهرست اشکال.....
ظ	فهرست جداول.....
۱	فصل اول: کلیات.....
۲	۱-۱ مقدمه.....
۳	۲-۱ ضرورت انجام تحقیق.....
۵	۳-۱ اهداف تحقیق.....
۵	۴-۱ سوالات مرتبط با تحقیق.....
۶	۵-۱ فرض‌های تحقیق.....
۷	۶-۱ سازمان دهی رساله.....
۱۱	فصل دوم: سابقه علمی موضوع.....
۱۲	۱-۲ مقدمه.....
۱۲	۲-۲ مطالعات انجام شده.....
۱۵	۱-۲-۲ مطالعات تانشوف و اسپولز (۱۹۸۰).....
۱۵	۲-۲-۲ مطالعات وانگ و همکاران (۱۹۹۵).....
۱۷	۳-۲-۲ مطالعات ژو و لی (۲۰۰۳).....
۱۷	۴-۲-۲ مطالعات یوسفی (۲۰۰۶).....
۱۸	۵-۲-۲ مطالعات گونش ییلماز و گوکتان (۲۰۰۸).....
۱۹	۶-۲-۲ مطالعات تورچتا (۲۰۰۹).....
۲۰	۷-۲-۲ مطالعات بویوک ساقیش (۲۰۰۹).....
۲۰	۸-۲-۲ مطالعات تورچتا (۲۰۱۰).....
۲۱	۹-۲-۲ مطالعات ناگسوارا و همکاران (۲۰۱۰).....
۲۲	۱۰-۲-۲ مطالعات ناگسوارا و همکاران (۲۰۱۲).....
۲۲	۱۱-۲-۲ مطالعات اوجون و همکاران (۲۰۱۲).....
۲۳	۱۲-۲-۲ مطالعات کاراکورت و همکاران (۲۰۱۳).....
۲۴	۱۳-۲-۲ مطالعات صادق‌اسلام و همکاران (۲۰۱۳).....
۲۴	۱۴-۲-۲ مطالعات یورداکول (۲۰۱۵).....
۲۵	۱۵-۲-۲ مطالعات اخیانی و همکاران (۲۰۱۷).....
۲۵	۱۶-۲-۲ مطالعات توماچ و همکاران (۲۰۱۸).....
۲۶	۱۷-۲-۲ مطالعات اخیانی و همکاران (۲۰۱۸).....
۲۷	۱۸-۲-۲ مطالعات میکائیل و همکاران (۲۰۱۸).....

۲۸	 ۳-۲ جمع‌بندی
۲۹	 فصل سوم: مبانی نظری فرآیند برش
۳۰	 ۱-۳ مقدمه
۳۰	 ۲-۳ معرفی دستگاه‌های برش دیسکی
۳۱	 ۳-۳ فرایند برش و فرایند تشکیل تراشه
۳۳	 ۴-۳ عوامل مؤثر در فرآیند برش
۳۳	 ۱-۴-۳ مشخصات سنگ
۳۴	 ۱-۱-۴-۳ مشخصات فیزیکی سنگ
۳۶	 ۲-۱-۴-۳ مشخصات مکانیکی سنگ‌ها
۳۷	 ۳-۱-۴-۳ مشخصات ساختاری و محیطی سنگ
۳۸	 ۴-۱-۴-۳ مطالعات صورت گرفته توسط محققین در زمینه مشخصات سنگ
۳۸	 ۲-۴-۳ مشخصات برش
۴۱	 ۱-۲-۴-۳ مشخصات عملیاتی برش
۴۱	 ۲-۲-۴-۳ مشخصات طرح برش
۴۳	 ۳-۲-۴-۳ مطالعات صورت گرفته توسط محققین در زمینه مشخصات برش
۴۴	 ۳-۴-۳ سیال خنک‌کننده/روان‌کار
۴۶	 ۱-۳-۴-۳ خنک‌کنندگی
۴۶	 ۲-۳-۴-۳ روان‌کنندگی
۴۶	 ۳-۳-۴-۳ شستشو
۴۷	 ۴-۳-۴-۳ رسوب دوغاب
۴۷	 ۴-۴-۳ انواع روان‌کارهای سیال خنک‌کننده/روان‌کار
۴۸	 ۱-۴-۴-۳ روغن‌های معدنی غیر قابل اختلاط
۴۸	 ۲-۴-۴-۳ روغن‌های چرب
۴۹	 ۳-۴-۴-۳ روغن‌های حل‌شونده در آب
۴۹	 ۵-۴-۳ افزودنی‌های سیال خنک‌کننده/روان‌کار
۴۹	 ۱-۵-۴-۳ بهبود دهنده‌های اصطکاک (FM)
۵۰	 ۲-۵-۴-۳ افزودنی‌های ضد سایش (AW)
۵۰	 ۵-۳ تأثیر سیال خنک‌کننده/روان‌کار در فرایند برش
۵۱	 ۶-۳ معیارهای ارزیابی عملکرد برش
۵۱	 ۱-۶-۳ نیروهای برش
۵۴	 ۲-۶-۳ سایش ابزار
۵۷	 ۳-۶-۳ انرژی ویژه برش

۵۸	 ۷-۳ جمع بندی
۵۹	 فصل چهارم: مطالعات آزمایشگاهی
۶۰	 ۱-۴ مقدمه
۶۰	 ۲-۴ مطالعات میدانی
۶۲	 ۳-۴ مطالعات آزمایشگاهی
۶۳	 ۱-۳-۴ آماده سازی نمونه ها
۶۴	 ۲-۳-۴ تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه ها
۶۸	 ۳-۳-۴ مخزن سیال
۶۹	 ۴-۳-۴ ساخت دستگاه برش دهنده دیسکی
۷۴	 ۴-۴ روان کارهای سیال مورد استفاده در فرآیند برش
۷۴	 ۱-۴-۴ سیال ۱: آب شهری شاهرود
۷۵	 ۲-۴-۴ سیال ۲: روغن آب صابون با نسبت ۱ به ۴۰
۷۵	 ۳-۴-۴ سیال ۳: روغن آب صابون با نسبت ۱ به ۲۰
۷۵	 ۴-۴-۴ سیال ۴: پودر آب تراش با نسبت ۳۰ به ۱۰
۷۶	 ۵-۴-۴ سیال ۵: پودر آب تراش با نسبت نسبت ۱۵ به ۱۰
۷۶	 ۵-۴ آزمایش های برش
۷۸	 ۶-۴ جمع بندی
۷۹	 فصل پنجم: تحلیل آماری و مدلسازی
۸۰	 ۱-۵ مقدمه
۸۰	 ۲-۵ بررسی آماری عملکرد دستگاه برش دهنده دیسکی
۹۷	 ۳-۵ جمع بندی
۹۹	 فصل ششم: مدل سازی با استفاده از شبکه های هوشمند و الگوریتم های فراابتکاری
۱۰۰	 ۱-۶ مقدمه
۱۰۱	 ۲-۶ شبکه عصبی مصنوعی
۱۰۳	 ۳-۶ مدل سازی بر اساس نوع سیال خنک کننده/روان کار با توجه به مشخصات سنگ و پارامترهای عملیاتی
۱۰۴	 ۱-۳-۶ مدل سازی با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون
۱۰۸	 ۲-۳-۶ مدل سازی با الگوریتم هیبرید ژنتیک - شبکه عصبی پرسپترون
۱۱۶	 ۳-۳-۶ مدل سازی با استفاده از شبکه های عصبی با توابع پایه شعاعی
۱۲۳	 ۴-۶ مدل سازی بر اساس مشخصات سیال خنک کننده/روان کار با توجه مشخصات سنگ و پارامترهای عملیاتی
۱۲۹	 ۵-۶ جمع بندی

۱۳۱	 فصل هفتم: تحلیل اقتصادی سیالات مورد مطالعه
۱۳۲	 ۱-۷ مقدمه
۱۳۲	 ۲-۷ فاکتورهای هزینه‌ساز مصرف انرژی و سیال خنک‌کننده/روان‌کار
۱۳۲	 ۱-۲-۷ تابع هزینه مصرف انرژی
۱۳۳	 ۲-۲-۷ تابع هزینه مصرف سیال خنک‌کننده/روان‌کار
۱۳۳	 ۳-۷ مقایسه اقتصادی کاربرد سیالات مختلف
۱۳۹	 ۴-۷ جمع بندی
۱۴۱	 فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۴۲	 ۱-۸ نتیجه‌گیری
۱۴۶	 ۲-۸ پیشنهادها
۱۴۷	 پیوست‌ها
۲۰۶	 منابع

فهرست اشکال

۹	شکل ۱-۱ روند نمای مراحل انجام پژوهش.....
۳۱	شکل ۱-۳ الف) دستگاه تک دیسکی مناسب برای برش سنگ‌های کربناته. ب) دستگاه چند دیسکی مناسب برای برش سنگ‌های سخت.....
۳۲	شکل ۲-۳ اندرکنش نیروهای میان دانه الماس و سطح خراشیده شده از سنگ.....
۳۴	شکل ۳-۳ پارامترهای مؤثر در فرایند برش سنگ.....
۴۱	شکل ۴-۳ درصد فراوانی مطالعات صورت گرفته در زمینه مشخصات قطعه کار در فرایند برش... ..
۴۴	شکل ۵-۳ درصد فراوانی مطالعات صورت گرفته در زمینه مشخصات برش در فرایند برش.....
۵۲	شکل ۶-۳ نیروهای مؤثر در یک فرایند برش رو به پایین.....
۵۷	شکل ۷-۳ رابطه بین دو سیال خنک کننده با مدل‌های سایش الماس.....
۶۱	شکل ۱-۴ فلوچارت مراحل انجام مطالعات میدانی و آزمایشگاهی.....
۶۲	شکل ۲-۴ موقعیت مکانی معادن نمونه سنگ‌های مورد مطالعه.....
۶۳	شکل ۳-۴ نمونه سنگ‌های مورد مطالعه در تحقیق.....
۶۵	شکل ۴-۴ الف) دستگاه مغزه گیر و نمونه سنگ اولیه، ب) نمونه سنگ اولیه بعد از مغزه گیری، ج) مغزه‌های اولیه.....
۶۵	شکل ۵-۴ الف) چند نمونه از نمونه‌های استوانه‌ای نهایی آماده شده برای آزمایش مقاومت فشاری تک محوری. ب) نمونه پلاک‌های تهیه شده برای انجام فرایند برش.....
۶۶	شکل ۶-۴ الف) دستگاه اندازه گیری مقاومت فشاری مورد استفاده و ب) یک نمونه سنگ شکسته شده تحت بارگذاری تک محوره.....
۶۷	شکل ۷-۴ مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌های سنگی برای تعیین ضریب بافت.....
۶۹	شکل ۸-۴ مخرن سیال تهیه شده برای فرایند برش.....
۷۰	شکل ۹-۴ گلولی دستگاه برش برای بستن دیسک الماس و انتقال نیرو.....
۷۱	شکل ۱۰-۴ موتور اصلی دستگاه برش سنگ.....
۷۲	شکل ۱۱-۴ دیاگرام طراحی شده برای انجام آزمایش‌های برش.....
۷۳	شکل ۱۲-۴ نمایی از دستگاه برش دهنده دیسکی در مقیاس آزمایشگاهی.....
۷۳	شکل ۱۳-۴ شتاب سنج و سنسور ارتعاش برای ثبت ارتعاشات سیستم.....
۷۳	شکل ۱۴-۴ آمپرسنج دیجیتال نصب شده برای ثبت تغییرات شدت جریان مصرفی و تابلو برق دستگاه برش سنگ.....
۷۷	شکل ۱۵-۴ نمونه پلاک‌های برش خورده تحت شرایط عملیاتی مختلف.....
۸۱	شکل ۱-۵ ارتباط میان شدت جریان مصرفی با تغییرات نرخ پیشروی در عمق برش ۰/۵ سانتی متر
۸۲	شکل ۲-۵ ارتباط میان شدت جریان مصرفی با تغییرات نرخ پیشروی در عمق برش ۰/۷ سانتی متر

۸۲	شکل ۳-۵ ارتباط میان شدت جریان مصرفی با تغییرات نرخ پیشروی در عمق برش ۱ سانتی متر
۸۳	شکل ۴-۵ ارتباط میان شدت جریان مصرفی با تغییرات نرخ پیشروی در عمق برش ۱/۳ سانتی متر
۸۴	شکل ۵-۵ ارتباط میان شدت جریان مصرفی با تغییرات عمق برش در نرخ پیشروی ۴۵ سانتی متر بر دقیقه.....
۸۴	شکل ۶-۵ ارتباط میان شدت جریان مصرفی با تغییرات عمق برش در نرخ پیشروی ۶۰ سانتی متر بر دقیقه.....
۸۵	شکل ۷-۵ ارتباط میان شدت جریان مصرفی با تغییرات عمق برش در نرخ پیشروی ۷۵ سانتی متر بر دقیقه.....
۸۵	شکل ۸-۵ ارتباط میان شدت جریان مصرفی با تغییرات عمق برش در نرخ پیشروی ۹۰ سانتی متر بر دقیقه.....
۹۲	شکل ۹-۵ پراکندگی کل نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۱
۹۳	شکل ۱۰-۵ پراکندگی نقاط آزمون پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۱
۹۳	شکل ۱۱-۵ پراکندگی نقاط آموزش پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۱
۹۳	شکل ۱۲-۵ پراکندگی کل نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۳
۹۴	شکل ۱۳-۵ پراکندگی نقاط آزمون پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۳
۹۴	شکل ۱۴-۵ پراکندگی نقاط آموزش پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۳
۹۴	شکل ۱۵-۵ پراکندگی کل نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۵
۹۵	شکل ۱۶-۵ پراکندگی نقاط آزمون پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۵
۹۵	شکل ۱۷-۵ پراکندگی نقاط آموزش پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۵
۹۵	شکل ۱۸-۵ پراکندگی کل نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۶
۹۶	شکل ۱۹-۵ پراکندگی نقاط آزمون پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۶
۹۶	شکل ۲۰-۵ پراکندگی نقاط آموزش پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۶
۹۶	شکل ۲۱-۵ پراکندگی کل نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۱۰
۹۷	شکل ۲۲-۵ پراکندگی نقاط آزمون پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۱۰
۹۷	شکل ۲۳-۵ پراکندگی نقاط آموزش پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۱۰
۱۰۷	شکل ۱-۶ معماری شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده برای مدل ۹.....
۱۰۷	شکل ۲-۶ نمودار ضریب همبستگی داده های آموزش با شبکه عصبی مصنوعی برای سیال پایه آب
۱۰۷	شکل ۳-۶ نمودار ضریب همبستگی داده‌های آزمون با شبکه عصبی مصنوعی برای سیال پایه آب
۱۰۹	شکل ۴-۶ ساختار اولیه از ژنتیک ترکیبی.....
۱۱۰	شکل ۵-۶ کارایی تعداد نسل در عملکرد شبکه بر اساس $RMSE$
۱۱۲	شکل ۶-۶ نمودار ضریب همبستگی داده‌های آموزش با الگوریتم هیبریدی ژنتیک - شبکه عصبی پرسپترون برای سیال آب.....

۱۱۳	شکل ۶-۷ نمودار ضریب همبستگی داده‌های آزمون با الگوریتم هیبریدی ژنتیک - شبکه عصبی پرسپترون برای سیال آب.....
۱۱۴	شکل ۶-۸ یک مقایسه مابین بیشترین شدت جریان مصرفی اندازه‌گیری شده و شدت جریان پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی پرسپترون برای سیال آب.....
۱۱۵	شکل ۶-۹ مقایسه مابین مقادیر R^2 برای مدل‌های شبیه‌سازی شده بر اساس چهار سیال مورد مطالعه.....
۱۱۵	شکل ۶-۱۰ مقایسه مابین مقادیر $RMSE$ برای مدل‌های شبیه‌سازی شده بر اساس ۴ سیال.....
۱۱۶	شکل ۶-۱۱ مقایسه مابین مقادیر VAF برای مدل‌های شبیه‌سازی شده بر اساس ۴ سیال.....
۱۱۷	شکل ۶-۱۲ معماری پایه روش شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی.....
۱۲۲	شکل ۶-۱۳ همبستگی میان مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار پیش‌بینی شده مدل‌های شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی.....
۱۲۴	شکل ۶-۱۴ راندمان عملکرد شبکه در تکرارهای مختلف برای شبکه با یک لایه میانی پنهان با ۱۰ نرون.....
۱۲۵	شکل ۶-۱۵ نمودار پراکنندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز اول شبکه با یک لایه میانی پنهان با ۱۰ نرون.....
۱۲۷	شکل ۶-۱۶ راندمان عملکرد شبکه در تکرارهای مختلف برای شبکه با سه لایه میانی پنهان با ۱۰ نرون.....
۱۲۸	شکل ۶-۱۷ نمودار پراکنندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز اول شبکه با سه لایه میانی پنهان با ۱۰ نرون.....
۱۲۹	شکل ۶-۱۸ معماری بهینه شبکه عصبی طراحی شده.....
۱۳۶	شکل ۷-۱ مجموع هزینه‌های انرژی و سیال در حالت اول.....
۱۳۶	شکل ۷-۲ مجموع هزینه‌های انرژی و سیال در حالت دوم.....
۱۳۷	شکل ۷-۳ مجموع هزینه‌های انرژی و سیال در حالت سوم.....
۱۳۷	شکل ۷-۴ مجموع هزینه‌های انرژی و سیال در حالت چهارم.....
۱۳۸	شکل ۷-۵ مجموع هزینه‌های انرژی و سیال در حالت پنجم.....
۱۳۸	شکل ۷-۶ مجموع هزینه‌های انرژی و سیال در حالت ششم.....

فهرست جداول

۱۳	جدول ۱-۲ مطالعات انجام شده در حوزه برش سنگ و سیال‌های خنک‌کننده/روان‌کار.....
۳۹	جدول ۱-۳ مشخصات فیزیکی و مکانیکی مطالعه شده توسط محققین در زمینه مشخصات برش سنگ
۴۵	جدول ۲-۳ مشخصات برش مطالعه شده توسط محققین در زمینه مشخصات برش سنگ.....
۴۸	جدول ۳-۳ مشخصات سیال برش مطالعه شده توسط محققین در زمینه فرایند برش سنگ.....
۶۱	جدول ۱-۴ نمونه‌های سنگی تهیه شده به همراه نام تجاری آنها.....
۶۸	جدول ۲-۴ مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگی تهیه شده.....
۷۶	جدول ۳-۴ مشخصات کلی سیالات مورد مطالعه در این تحقیق.....
۷۷	جدول ۴-۴ آزمایش‌های برش در شرایط مختلف عملیاتی با سیالات خنک‌کننده/روان‌کار برای نمونه سنگ A۲ (گرانیت سبز جنگلی بیرجند).....
۸۸	جدول ۱-۵ نتایج حاصل از بررسی‌های رگرسیون چند متغیره خطی برای پیش‌بینی مدل شدت جریان مصرفی.....
۸۹	جدول ۲-۵ نتایج حاصل از بررسی‌های رگرسیون چند متغیره غیر خطی برای پیش‌بینی مدل شدت جریان مصرفی.....
۱۰۳	جدول ۱-۶ روابط شناخته شده جهت تعیین تعداد نرون‌ها در لایه پنهان.....
۱۰۵	جدول ۲-۶ مقادیر شاخص‌های عملکرد هر مدل بر اساس تعداد نرون‌های متفاوت برای سیال پایه آب
۱۰۶	جدول ۳-۶ رتبه بندی مدل شبکه عصبی مصنوعی برای سیال پایه آب.....
۱۱۱	جدول ۴-۶ نتایج شبیه سازی بر اساس شاخص‌های عملکرد با استفاده از الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای سیال آب.....
۱۱۲	جدول ۵-۶ نتایج رتبه بندی مدل‌ها برای الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای سیال آب.....
۱۱۳	جدول ۶-۶ مقایسه بهترین مدل‌های شبیه سازی شده توسط شبکه عصبی پرسپترون و الگوریتم هیبرید ژنتیک - شبکه عصبی پرسپترون برای سیال آب.....
۱۱۴	جدول ۷-۶ مقادیر شاخص‌های عملکرد برای شبکه عصبی پرسپترون در سیالات مختلف.....
۱۱۸	جدول ۸-۶ اثرات پارامترهای کنترل کننده بر عملکرد توابع آماری بر روی کارایی مدل‌های تهیه شده توسط آب صابون به نسبت ۱ به ۲۰.....
۱۱۹	جدول ۹-۶ اثرات پارامترهای کنترل کننده بر عملکرد توابع آماری بر روی کارایی مدل‌های تهیه شده توسط آب صابون به نسبت ۱ به ۴۰.....
۱۱۹	جدول ۱۰-۶ اثرات پارامترهای کنترل کننده بر عملکرد توابع آماری بر روی کارایی مدل‌های تهیه شده توسط پودر آب تراش.....
۱۲۰	جدول ۱۱-۶ رتبه‌بندی مدل‌های به دست آمده در استفاده از آب صابون به نسبت ۱ به ۲۰.....
۱۲۰	جدول ۱۲-۶ رتبه‌بندی مدل‌های به دست آمده در استفاده از آب صابون به نسبت ۱ به ۴۰.....

جدول ۶-۱۳	رتبه‌بندی مدل‌های به دست آمده در استفاده از پودر آب تراش.....	۱۲۱
جدول ۶-۱۴	مقایسه بین نتایج مدل‌های بدست آمده از سه سیال استفاده شده.....	۱۲۲
جدول ۶-۱۵	تحلیل حساسیت شبکه عصبی نسبت به تعداد لایه‌های پنهان.....	۱۲۶
جدول ۶-۱۶	تحلیل حساسیت شبکه عصبی نسبت به تعداد نرون‌های هر لایه.....	۱۲۸
جدول ۷-۱	اطلاعات و مشخصات ثبت شده از کارخانه‌های سنگ‌بری برای انجام تحلیل حساسیت	۱۳۴
جدول ۷-۲	هزینه‌های سیالات مورد استفاده در تحقیق.....	۱۳۵
جدول ۷-۳	مجموع هزینه‌های انرژی و سیال مصرفی.....	۱۳۵

فصل ۱ : کلیات

۱-۱ مقدمه

امروزه ابزارهای برش‌دهنده سنگ در صنعت سنگ‌های ساختمانی در دو بخش معدن و کارخانجات سنگ‌بری به‌طور قابل توجهی مورد استفاده قرار می‌گیرند. شناخت کامل فرایند برش به همراه عملکرد ابزارهای برش می‌تواند به نحو چشم‌گیری در بالا بردن بازدهی و کیفیت محصول فرآوری شده کمک کند. از جمله فاکتورهای مهم در این عرصه، هزینه تمام شده و کیفیت کالا می‌باشد. به طور کلی هزینه پرداخت یک پلاک سنگی در صنایع سنگ‌بری بیشتر تحت تأثیر فاکتورهایی نظیر هزینه‌های ابزاری (سایش ابزار الماسی) و هزینه‌های مصرف انرژی دستگاه‌های برش دهنده سنگ قرار خواهد داشت و همواره در بحث‌های بهینه‌سازی سعی بر این است که نسبت نرخ تولید پلاک‌های سنگی 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 دستگاه‌های برش‌دهنده سنگ افزایش می‌یابد. به همین منظور دستیابی به یک تعادل ایده‌آل بین نرخ تولید و دو فاکتور هزینه‌ساز سایش ابزار الماسی و مصرف انرژی دستگاه‌های برش‌دهنده سنگ لازم و ضروری می‌باشد. عوامل متعددی بر میزان و نحوه عملکرد ابزارهای برش و توان مصرفی دستگاه تأثیر گذار می‌باشند که در این میان مشخصات قطعه‌کار (سنگ)، نوع و شکل ابزار، طرح برش و مشخصات سیال خنک‌کننده/روان‌کار از جمله مهم‌ترین عوامل می‌باشند. استفاده از سیال مناسب به منظور خنک‌کاری و روان‌کاری در فرآیند برش سنگ گریز ناپذیر است. این سیالات با هدف خنک‌کاری ناحیه تماس و جلوگیری از سوختگی سطحی، روان‌کاری و کاهش اصطکاک بین دانه‌های الماس و سطح قطعه‌کار، کاهش انرژی مصرفی، افزایش عمر ابزار، کاهش تغییر شکل حرارتی قطعه‌کار، افزایش صافی سطح و نیز دفع تراشه مورد استفاده قرار می‌گیرند. تاکنون مطالعات، کامل و جامعی در خصوص تأثیر سیال خنک‌کننده/روان‌کار بر عملکرد ابزارهای برش دهنده در فرایند برش صورت نگرفته است. شاید دلیل آن را می‌توان به سهولت عملکرد این فاکتور در فرایند برش در کنار سایر فاکتورها مانند مشخصات

فیزیکی و مکانیکی قطعه کار، مشخصات ابزارهای برش مانند اندازه، تعداد و جنس دانه الماس، ابعاد و جنس باند سگمنت، مشخصات عملیاتی دستگاه برش مانند نرخ پیشروی، عمق برش و سرعت چرخش دیسک و در نهایت نحوه یا نوع برش جستجو کرد. تأثیر سیال خنک کننده/روان کار در فرایند برش به هیچ عنوان قابل چشم پوشی نیست چرا که تنها با یک بار برش خشک می توان به اهمیت و اثرات این فاکتور حساس پی برد.

تاکنون کشورهای صنعتی تولید کننده سنگ های ساختمانی، به صورت کاملاً جدی و برنامه ریزی شده فعالیت های مربوط به کاهش تلفات ناشی از فقدان دانش فنی و فناوری را دنبال کرده اند که از این رهگذر توانسته اند هزینه های مربوط به مصارف انرژی و ابزارهای برش، به صرفه جویی های قابل ملاحظه ای دست یابند. با توجه به افزایش قیمت حامل های انرژی و ابزارهای برش دهنده سنگ و همچنین رقابت در افزایش کیفیت تولید، پیش بینی می شود این تحقیق با عنوان " مطالعات آزمایشگاهی تأثیر سیال خنک کننده/روان کار در عملکرد برش دهنده های دیسکی در سنگ های سخت " بتواند علاوه بر افزایش کیفیت تولید، کاهش چشم گیری را در مصرف انرژی و سایش ابزارهای الماسی ایجاد کند.

بدین ترتیب سعی شد تا علاوه بر شناخت بیشتر سیال های خنک کننده/روان کار به ارزیابی تأثیر هر یک از آنها بر عملکرد ابزار و فرایند برش پرداخته شود. در تحقیق حاضر منظور از سیال خنک کننده آب شهری و منظور از سیال روان کار ترکیب درصدی از روان کارهای معمول (روغن، صابون مایع و ...) با سیال خنک کننده می باشد. در نهایت به ارزیابی تأثیر سیال خنک کننده/روان کار در عملکرد برش با توجه به جنبه های مختلف شامل دستگاه برش (میزان انرژی مصرفی و نرخ برش) و قطعه کار (مشخصات مقاومتی، سختی و ساینده گی) پرداخته می شود.

۲-۱ ضرورت انجام تحقیق

علی رغم برخورداری کشورمان از تعداد زیادی از معادن سنگ ساختمانی و همچنین کارخانه سنگبری

فعال و دارا بودن رتبه‌های برتر در ذخایر سنگ دنیا، علوم پژوهشی متاسفانه نتوانسته است سهم شایسته‌ای را در بهبود عملکرد فرایند در این صنعت به‌دست آورد. به‌طوری که از این دست مطالعات به‌طور گسترده در حوزه‌هایی همچون مهندسی مکانیک انجام پذیرفته شده است. با این حال انتظار می‌رود تا برای ارتقاء سطح علمی و فناوری مرتبط با این موضوع در کشور، فعالیت‌هایی هرچند کوچک اما دقیق در دانشگاه‌ها انجام گرفته شود و تنها به بومی کردن و استفاده از فناوری کشورهای دیگر بسنده نشود. در ایران مطالعات و تحقیقات مختلف در زمینه قابلیت برش و سایش فرایند برش سنگ صورت گرفته است در حالی که در زمینه تأثیر سیال خنک‌کننده/روان‌کار انجام نشده است. لذا با توجه به توضیحات و موارد ذکر شده، انجام این قبیل مطالعات برای اولین بار در کشور لازم و ضروری می‌باشد.

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

- عدم شناخت کامل از تأثیر سیال خنک‌کننده/روان‌کار در فرایند برش سنگ‌های سخت
- ارزیابی تأثیر سیال خنک‌کننده/روان‌کار به عنوان یکی از عوامل مهم در کاهش تنش‌های حرارتی در محیط برش که می‌تواند نقش مهمی در عملکرد بهینه فرایند برش دارا باشد.
- ارزیابی تأثیر سیال خنک‌کننده/روان‌کار به عنوان یکی از عوامل مهم در کاهش نیروهای فرایند به ویژه نیروهای مماسی و نرمال که توجه ویژه به کاهش این نیروها می‌تواند موجب تغییرات چشم‌گیری در افزایش راندمان انرژی به عبارت دیگر کاهش توان مصرفی دستگاه و انرژی مصرفی دستگاه برش شود.
- ارزیابی تأثیر سیال خنک‌کننده/روان‌کار به عنوان یکی از عوامل مهم در کاهش یا حذف کامل تراشه‌ها از محیط برش به عنوان یکی از عوامل مهم در افزایش اصطکاک میان قطعه‌کار و ابزار و در نهایت ایجاد سطحی صاف و تمیز بعد از عبور دانه الماس از محیط برش.

۱-۳ اهداف تحقیق

به‌طور کلی هدف از انجام این تحقیق، بررسی جامع و فراگیر تأثیر سیال خنک‌کننده/روان‌کار در عملکرد برش بر اساس جنبه‌های مختلف شامل دستگاه برش (میزان انرژی مصرفی) و قطعه‌کار (مشخصات مقاومتی، سختی، ساینده‌گی، بافت و ترکیبات کانی شناسی) می‌باشد. در این راستا آزمایش‌های فراوانی انجام شد تا به ارزیابی هر یک از پارامترهای فرآیند، قطعه‌کار و نوع سیال خنک‌کننده/روان‌کار مورد استفاده پرداخته شود.

به‌طور کلی مهم‌ترین اهداف این تحقیق عبارتند از:

- ارزیابی تأثیر انواع سیال خنک‌کننده/روان‌کار بر عملکرد فرایند برش شامل انرژی مصرفی دستگاه برش سنگ
- ارائه مدل‌های آماری به منظور پیش بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش سنگ با توجه به مشخصات سیال، مشخصات سنگ و پارامترهای عملیاتی دستگاه برش سنگ.
- طراحی شبکه‌های عصبی هوشمند برای پیش بینی انرژی مصرفی دستگاه برش سنگ با توجه به مشخصات سنگ، پارامترهای عملیاتی برش و در نهایت مشخصات سیال خنک‌کننده/روان‌کار در فرایند برش.

۱-۴ سوالات مرتبط با تحقیق

به‌طور کلی مهم‌ترین سؤالات اصلی این تحقیق را می‌توان به‌طور خلاصه به صورت ذیل بیان کرد:

- تأثیر سیال خنک‌کننده در کاهش میزان انرژی مصرفی دستگاه برش به چه میزان می‌باشد؟
- تأثیر سیال خنک‌کننده در افزایش عملکرد دستگاه برش سنگ به چه میزان می‌باشد؟
- تأثیر حضور روان‌کار به همراه سیال خنک‌کننده در کاهش میزان انرژی مصرفی دستگاه به چه میزان می‌باشد؟
- حضور روان‌کار به همراه سیال خنک‌کننده چه تأثیری در افزایش عملکرد دستگاه برش سنگ

خواهد داشت؟

- چه ارتباطی میان مقدار روان کار در سیال با میزان کاهش انرژی مصرفی دستگاه برش سنگ حاکم است؟
- میزان سطح تأثیر سیال خنک کننده/روان کار در نمونه سنگ های مختلف سخت با توجه به مهم ترین مشخصات فیزیکی و مکانیکی چقدر است؟

۱-۵ فرض های تحقیق

با توجه به روند آزمایشگاهی پارامترهای مطالعه، فرض های وارد بر این تحقیق را می توان به صورت زیر بیان کرد:

- در طی فرآیند برش شرایط محیطی (درجه حرارت، رطوبت و...) ثابت فرض می شود.
- مشخصات طرح برش شامل جهت چرخش دیسک، نوع و جنس بدنه فولادی دیسک، نوع و جنس سگمنت (ترکیب باند سگمنت، اندازه و درصد دانه های الماس) ثابت فرض می شوند.
- قطعه کار (پلاک سنگی از جنس سخت) به صورت پیوسته بدون درزه و شکاف فرض می شود.
- همچنین مشخصات فیزیکی و مکانیکی در تمامی جهات و نقاط ثابت فرض می شود.
- ارتباط معنی دار میان مشخصات فیزیکی و مکانیکی، سختی و ویسکوزیته سیال خنک کننده/روان کار و پارامترهای عملیاتی دستگاه برش با میزان شدت جریان مصرفی دستگاه برش برقرار می باشد.
- شبکه های عصبی هوشمند قادر به پیش بینی میزان شدت جریان مصرفی دستگاه برش با توجه به مشخصات فیزیکی و مکانیکی، سختی و ویسکوزیته سیال خنک کننده/روان کار و پارامترهای عملیاتی دستگاه برش می باشند.

۱-۶ سازمان دهی رساله

این رساله سعی شده است در اولین گام با بررسی منابع مختلف و تحقیقات گذشته، پارامترهای مؤثر در فرایند برش سنگ مورد مطالعه قرار گیرد. در مرحله بعد به منظور ارزیابی تأثیر سیالات خنک کننده/روان کار بر عملکرد برش، روان کارهای مختلف مورد ارزیابی قرار می گیرد. با استفاده از نتایج بدست آمده می توان ارتباط میان روان کارهای مختلف و نتایج عملکرد برش را مورد ارزیابی قرار داد. به طور کلی ساختار این تحقیق را می توان در هشت فصل شامل فصل اول کلیات، فصل دوم سابقه علمی موضوع، فصل سوم مبانی نظری فرایند برش، فصل چهارم مطالعات آزمایشگاهی، فصل پنجم مطالعات آماری، فصل ششم مدل سازی با استفاده از شبکه های هوشمند و الگوریتم های فرا ابتکاری، فصل هفتم تحلیل اقتصادی سیالات مورد مطالعه و در نهایت فصل هشتم نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات تقسیم بندی کرد. خلاصه ای از محتوی هر یک از این فصل ها به طور خلاصه در ذیل آورده شده است.

فصل اول، کلیات

در این فصل به بررسی موضوع رساله، اهداف عملیاتی تحقیق، ضرورت انجام تحقیق، سوالات و فرض های تحقیق و سازماندهی رساله پرداخته می شود.

فصل دوم، سابقه علمی موضوع

در این فصل از تحقیق سعی می شود تا به بررسی و ارزیابی مقالات مرتبط با موضوع تحقیق در حوزه برش سنگ های ساختمانی و سیالات خنک کننده/روان کار پرداخته شود.

فصل سوم، مبانی نظری فرایند برش

در این فصل به بررسی مبانی نظری فرایند برش سنگ های ساختمانی به همراه معرفی دستگاه های برش سنگ، مشخصات فیزیکی و مکانیکی موثر بر قابلیت برش پذیری سنگ ها، مشخصات ابزاری و مشخصات طرح برش پرداخته می شود.

فصل چهارم، مطالعات آزمایشگاهی

در این فصل از تحقیق سعی می‌شود تا یک جامعه آماری کامل و دقیق از خانواده سنگ‌های سخت ساختمانی و سیالات خنک‌کننده/روان‌کار تهیه شود. جامعه آماری این بخش مستخرج از دو بخش اقدامات صحرایی و مطالعات آزمایشگاهی می‌باشد. در بخش نخست (اقدامات صحرایی) بلوک‌های سنگی مورد نظر در ابعاد مشخص برای انجام مطالعات آزمایشگاهی از معادن مربوطه به آزمایشگاه مکانیک سنگ و کارگاه تهیه مقطع نازک انتقال داده شده‌اند. در ادامه مطالعات آزمایشگاهی و به‌منظور انجام آزمایش‌های برش و ارزیابی سیال خنک‌کننده/روان‌کار بر عملکرد فرایند برش، دستگاه برشی در مقیاس آزمایشگاهی تهیه شد. در این بخش که مهم‌ترین بخش از تحقیق می‌باشد مطالعات به منظور ارزیابی تأثیر پنج سیال خنک‌کننده/روان‌کار در فرایند برش ۱۰ نمونه سنگ سخت ساختمانی انجام شده است.

فصل پنجم، مطالعات آماری

در این فصل سعی می‌شود تا ارتباط میان شدت جریان مصرفی دستگاه برش با مشخصات عملیاتی برش، مشخصات سیال و مشخصات سنگ مورد بررسی قرار گیرد. مطالعات صورت گرفته در این فصل در دو بخش شامل رگرسیون خطی تک متغیره و چند متغیره خطی و غیر خطی انجام می‌شود.

فصل ششم، مدل سازی با استفاده از شبکه‌های هوشمند و الگوریتم‌های فرا ابتکاری

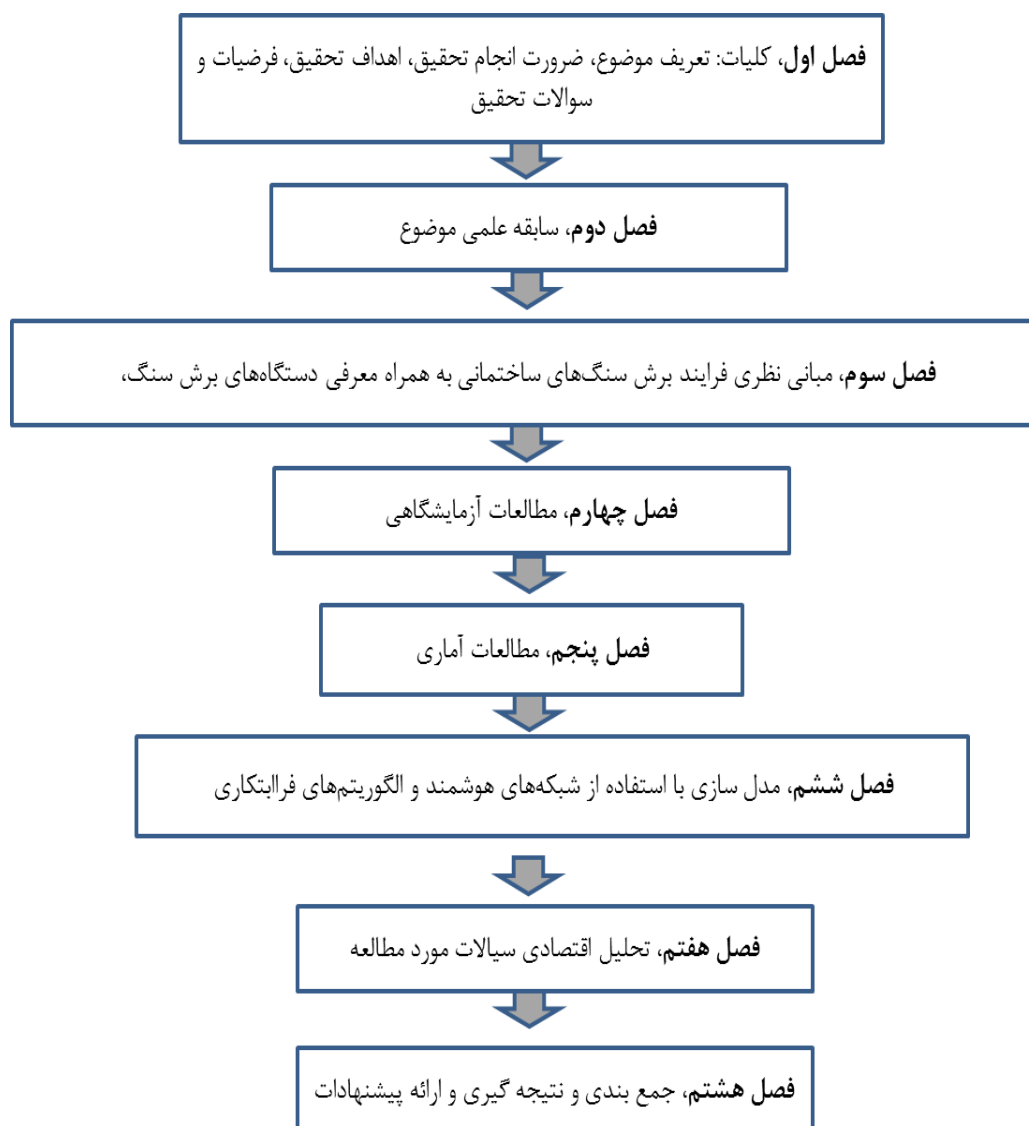
در این فصل از تحقیق، پس از انجام آزمایش‌های مربوطه سعی می‌شود به تحلیل و ارزیابی جامعه آماری به منظور پیش بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش با استفاده از شبکه‌های هوشمند و الگوریتم‌های فراابتکاری پرداخته شود.

فصل هفتم، تحلیل اقتصادی سیالات مورد مطالعه

در این فصل از تحقیق سعی می‌شود تا به ارزیابی و تحلیل اقتصادی سیالات مورد مطالعه در مقیاس صنعتی در شرایط برش سنگ‌های سخت پرداخته شود.

فصل هشتم، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در انتها نیز به بررسی و جمع‌بندی نتایج تحقیق پرداخته شده است. همچنین سعی شده است تا در این فصل پیشنهاداتی برای مطالعات آتی ارائه شود. مراحل ذکر شده انجام تحقیق در روندنمای شکل ۱-۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱-۱ روند نمای مراحل انجام پژوهش

فصل ۲ : سابقه علمی موضوع

۲-۱ مقدمه

فرایند برش سنگ یک فرایند سایشی می‌باشد که در طی انجام این فرایند تراشه سنگ در نتیجه حرکت سگمنت‌های الماسی بر روی سطح سنگ (با نفوذ دانه الماس و خراشیدن و شکافتن سطح برش) شکل می‌گیرد. در طی این فرایند، 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. نکته قابل تأمل در این بخش حضور نامطلوب نیروهای فرایند و تنش‌های حرارتی در کنار تراشه و تأثیرات منفی آن‌ها در عملکرد برش می‌باشد. از این رو تلاش برای کاستن این نیروهای نامطلوب و تسهیل فرآیند برش، به یکی از دغدغه‌های فنی در حوزه برش سنگ ساختمانی تبدیل شده است. محققین نیز در همین راستا سعی داشته‌اند تا با انجام مطالعاتی گره از مشکلات برش و هزینه‌های زیاد این فرآیند باز کنند. از این رو استفاده از انواع سیالات خنک‌کننده/روان‌کار به منظور بررسی تأثیرات آن‌ها در فرآیند برش سنگ و سایر زمینه‌ها به یکی از مباحث کاربردی و گسترده در این حوزه تبدیل شده است. در ادامه به صورت مختصر به گستره فعالیت محقق در این حوزه پرداخته می‌شود.

۲-۲ مطالعات انجام شده

در زمینه تأثیر سیال‌های خنک‌کننده/روان‌کار در فرایند برش سنگ‌های ساختمانی مطالعات زیادی صورت نگرفته است. در حوزه سیالات خنک‌کننده/روان‌کار اکثر مطالعات در زمینه تراش‌کاری، فلزکاری، سنگ‌زنی، سوراخ‌کاری و غیره انجام شده است. این مطالعات به جنبه‌های اقتصادی، محیط‌زیستی و بهره‌وری عملیات پرداخته‌اند. جنبه‌های اقتصادی این مطالعات مربوط به هزینه‌های بالای خنک‌کننده‌ها و روان‌کارهای متداول، تأثیر کم آن‌ها در طول عملیات و بالا رفتن هزینه‌های مربوط به سایش و شکست ابزار برش می‌شود. مطالعات دیگری به بررسی تأثیرات محیط‌زیستی خنک‌کننده‌ها و سیالات روان‌کار و همچنین خطرات بوجود آمده و احتمالی برای اپراتورها پرداخته‌اند.

دسته دیگری نیز به بررسی بهره‌وری عملیات برش در هنگام استفاده از خنک‌کننده‌ها و روان‌کارهای مورد مطالعه پرداخته و کارایی آن‌ها را با خنک‌کننده‌ها و روان‌کارهای متداول سنجیده‌اند. در جدول ۱-۲ مطالعات انجام شده در حوزه برش و زمینه مطالعاتی مرتبط با سیال‌های خنک‌کننده/روان‌کار یا انرژی‌های مصرفی آورده شده است.

جدول ۱-۲ مطالعات انجام شده در حوزه برش سنگ و سیال‌های خنک‌کننده و روان‌کار

محققین	سال	شرایط تحقیق	نتایج
Tonshoff & Schulze [۱]	۱۹۸۰	کاربرد سیال خنک‌کننده/روان‌کار در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی	افزایش عمر ابزار برش، کاهش سایش
Wang et al. [۲]	۱۹۹۵	کاربرد خنک‌کننده‌ها در فرآیند برش سنگ‌های گرانیتی	کاهش سایش، افزایش عمر ابزار برش، کاهش سر و صدای برش، کاهش نیروی مصرفی
Xu & Li [۳]	۲۰۰۳	کاربرد روان‌کننده در فرایند برش برش گرانیت و بررسی تأثیر تراشه در این عملیات با استفاده از تیغه‌های الماسی	افزایش حجم تراشه برداری، تأثیر تراشه‌ها در تغییر مکان خط برش
یوسفی [۴]	۲۰۰۶	بررسی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر سایش ابزار در فرآیند برش سنگ گرانیت	کاهش نیروی برش در سرعت اوج، افزایش سرعت پیشروی، کاهش سایش ابزار، کاهش نیروهای برشی
Yilmaz & Goktan [۵]	۲۰۰۸	بررسی اثرات نرخ برش بر روی نیرو و انرژی مورد نیاز در فرآیند برش دایره ای گرانیت	افزایش نرخ برش، افزایش مصرف انرژی با افزایش تعداد گذرهای اره برش، افزایش سایش ابزار
Turchetta [۶]	۲۰۰۹	بررسی نیروی برش با استفاده از ابزار الماسی در فرآیند برش سنگ	افزایش ضخامت تراشه برداشته شده با افزایش نیروی برشی مماسی
Büyükşagış [۷]	۲۰۰۹	بررسی عملکرد فرآیند برش مرمر با استفاده از ویژگی‌های سگمنت‌های برش الماسی	کاهش مصرف انرژی، کاهش لرزش و صدا، افزایش کیفیت سطح برش، افزایش عمر تیغه برش
Turchetta[۸]	۲۰۱۰	بررسی نیروهای برش در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی با استفاده از دیسک‌های الماسی	وابستگی نیروی برش به شدت و عمق برش و سرعت برش دیسکی الماسی
Nageswara et al [۹]	۲۰۱۰	بررسی مشکلات و راه‌حل‌های فرآیند برش گرانیت	کاهش زمان برش، کاهش انرژی مصرفی، افزایش عمر ابزار برش،
Nageswara et al [۱۰]	۲۰۱۲	کاربرد خنک‌کننده‌های سیال‌گونه در فرآیند برش گرانیت	کاهش زمان عملیات، کاهش مصرف انرژی، افزایش عمر ابزار، کاهش هزینه‌ها

Ucun et al [۱۱]	۲۰۱۳	کاربرد سیالات خنک کننده در فرآیند برش سنگ های ساختمانی	افزایش عملکرد دیسک های برش الماسی
Karakurt et al [۱۲]	۲۰۱۳	بررسی تأثیر متغیرهای عملیاتی بر میزان سایش ویژه تیغه های برش الماسی در فرآیند برش گرانیت	افزایش نرخ سایش ویژه با افزایش سرعت محیطی و سرعت پیمایشی، کاهش نرخ سایش ویژه با افزایش عمق برش و نرخ جریان مایع خنک کننده، روند نزولی و سپس صعودی نرخ سایش ویژه با افزایش نرخ برداشت ویژه،
Sadegheslam et al [۱۳]	۲۰۱۳	بررسی ارتباط میان پارامترهای مقاومتی سنگ و شدت جریان مصرفی در فرایند برش سنگ های ساختمانی	افزایش شدت جریان مصرفی در سنگ های مورد مطالعه با افزایش مشخصات مقاومتی سنگ و پارامترهای ماشین کاری
Yurdakul [۱۴]	۲۰۱۵	بررسی تاثیر پارامترهای برش بر روی توان مصرفی در فرآیند برش گرانیت	افزایش میزان توان مصرفی دستگاه در حالت برش پیشرو با افزایش نرخ پیشروی، افزایش توان مصرفی با افزایش عمق برش در حالت برش پسرو، سودمند بودن روش برش پسرو از لحاظ توان مصرفی
Akhyani et al [۱۵]	۲۰۱۷	بررسی عملکرد ماشین برش الماسی با استفاده از الگوریتم زنبور عسل	ارزیابی صحیح ماشین برش، شدت جریان مصرفی و نرخ سایش دیسک الماسی، با استفاده از الگوریتم سفید عسل
Tumac [۱۶]	۲۰۱۸	ارزیابی قابلیت برش پذیری دیسک های برشی با ابعاد بزرگ بر اساس تنوع سنگ های ساختمانی با توجه به منشأ زمین شناسی	رابطه نسبتاً خوب نرخ تولید پلاک با مقاومت فشاری تک محوره و اندازه متوسط دانه ها، رابطه خوب و نسبتاً خوب نرخ تولید پلاک ها با سختی شور و سختی اشمیت
Akhyani et al [۱۷]	۲۰۱۸	بررسی تاثیر شاخص های زبری و تردی بر روی شدت جریان مصرفی و نرخ سایش ابزار برش دیسکی	پیش بینی نرخ سایش ابزار برش دیسکی الماسی با دقت بالا از شدت جریان مصرفی و شاخص زبری
Mikaeil et al [۱۸]	۲۰۱۸	ارزیابی انرژی مصرفی در فرآیند برش سنگ های ساختمانی	ارتباط مستقیم عمق برش و نرخ پیشروی با مصرف انرژی، افزایش مصرف انرژی با افزایش نرخ پیشروی و عمق برش، ، افزایش هزینه های تعمیر و نگهداری با افزایش فشار روی دستگاه، افزایش احتمال بیرون زدگی الماس با افزایش فشار روی دستگاه

در ادامه به بررسی مطالعات ارائه شده در جدول ۱-۲ پرداخته می شود.

۲-۲-۱ مطالعات تانشوف^۱ و اسچولز^۲ (۱۹۸۰)

در سال ۱۹۸۰ تانشوف و اسچولز آزمایش‌های خود را بروی ۲ نوع سنگ (سنگ گرانیت و گابرو) و ۴ نوع سیال خنک‌کننده: الف- روغن برش با ویسکوزیته پایین با مواد افزودنی فعال فشار بالا، ب- Z_1 : محلول آب‌دار ۲٪ آلی، (مواد آلی به همراه ترکیبات آزاد) ج- Z_2 : یک عامل مرطوب کننده در آب د- آب اصلی شهر هانوفر آلمان انجام دادند. آن‌ها از ۲ دو دیسک WZ_1 و WZ_2 استفاده کردند. در دیسک برش دوم از الماس‌هایی با مش‌بندی $60/50$ $US\ mesh$ استفاده شد که مقاومت آن در برابر شکستگی حدود ۱۰ درصد بیشتر از دیسک برشی نوع اول بود. همچنین الماس‌ها در دیسک دوم به صورت هندسی مرتب شدند. نتایج این آزمایش نشان داد هنگام برش سنگ گابرو با استفاده از آب یا سیال Z_2 می‌توان انتظار داشت که عمر ابزار برشی نوع دوم فقط کمی افزایش یابد، هرچند که الماس‌هایی با کیفیت بهتر در آن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. افزودنی Z_2 در این سیال طول عمر ابزار برشی نوع اول را در حدود ۲۰ درصد افزایش می‌دهد. همچنین در نرخ‌های برش پایین هنگام استفاده از افزودنی Z_2 در مقایسه با سیال آب، طول عمر ابزار برشی نوع دوم به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. با افزودن روغن‌های معدنی مخلوط نشده^۳ یا افزودنی Z_1 به عنوان خنک‌کننده، عمر ابزار برش با کاهش نرخ برش، افزایش می‌یابد. ابزار برش نوع اول در هنگام استفاده از خنک‌کننده Z_1 و ابزار برش نوع دوم در هنگام استفاده از روغن دارای طولانی‌ترین طول عمر هستند. مقایسه ابزار نوع اول و دوم، استفاده از کیفیت بهتر الماس در ابزار برش نشان داد که هنگام استفاده از روغن یا افزودنی Z_1 به‌عنوان خنک‌کننده، سایش ابزار به میزان ۱۰۰ درصد کاهش می‌یابد [۱].

۲-۲-۲ مطالعات وانگ^۴ و همکاران (۱۹۹۵)

در سال ۱۹۹۵ وانگ و همکاران با استفاده از آزمایش‌ها و مشاهدات‌شان، نقش خنک‌کننده‌ها در

¹ Tonshoff

² Schulze

³ Unblended mineral oils

⁴ Wang

فرآیند برش سنگ‌های گرانیتی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق ۵ نوع سگمنت با ترکیبات مختلف، ۳ نوع سنگ گرانیت و ۳ نوع خنک‌کننده مورد مطالعه قرار گرفتند. خنک‌کننده نوع اول تحت عنوان سیال GD به صورت محلول در آب و متشکل از نمک قلیایی اسید چرب، اسید رزینیک (یون منفی عامل فعال سطح)، عوامل غیر فعال کننده سطحی، مواد رسوب دهنده و عامل پراکنده کنندگی می‌باشد. خنک‌کننده دوم تحت عنوان Y_1 متشکل از امولسیون حاوی تعدادی از روغن‌های معدنی، صابون و برخی از عوامل رسوب دهنده است که در بسیاری از دستگاه‌های سنگ شکن استفاده می‌شود. خنک‌کننده نوع سوم نیز آب می‌باشد. نتایج بررسی‌های این محققین نشان داد که استفاده از خنک‌کننده نوع GD در مقایسه با آب، سایش سگمنت‌های مورد استفاده به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. همچنین مشخص شد که نرخ پیشروی در هنگام استفاده از خنک‌کننده نوع GD در مقایسه با آب به صورت کلی بیشتر بوده و در سگمنت نوع اول دارای بیشترین میزان پیشروی در هنگام استفاده از این دو نوع خنک‌کننده می‌باشد که به مرور زمان میزان پیشروی کاهش می‌یابد و در سگمنت نوع پنجم به کمترین میزان خود در میان سگمنت‌ها می‌رسد. همچنین به بررسی میزان پیشروی براساس نوع گرانیت‌ها نیز پرداخته شد و مشخص شد که میزان پیشروی در زمان استفاده از خنک‌کننده نوع GD در مقایسه با آب در حدود دو برابر بیشتر است و میزان پیشروی در گرانیت نوع دوم بیشتر از گرانیت نوع سوم و در گرانیت نوع سوم، بیشتر از گرانیت نوع اول می‌باشد. مقایسه‌ای نیز بین خنک‌کننده نوع GD و Y_1 ، صورت گرفت و مشخص شد که میزان مصرف انرژی در هنگام استفاده از خنک‌کننده نوع GD کمتر از زمانی است که از خنک‌کننده نوع Y_1 استفاده شد. اما در هر دو خنک‌کننده با بیشتر شدن گام برش، میزان مصرف انرژی نیز افزایش می‌یابد. در ادامه به بررسی میزان نوسانات سطح صوت پرداخته شد و مشخص شد که با افزایش گام برش، شیب کاهش نوسانات در خنک‌کننده GD در مقایسه با خنک‌کننده Y_1 بیشتر می‌باشد. میزان سایش ابزار برش نیز در زمان استفاده از خنک‌کننده GD در مقایسه با خنک‌کننده Y_1 کمتر می‌باشد. نتایج کلی حاصل نیز عبارتند از: الف ۱- خنک‌کننده‌ها می‌توانند هم عمر دیسک برش را افزایش دهند و هم سر و صدا و نیروهای

فرایند برش را کاهش دهند. عوامل مختلف برای انتخاب خنک کننده مناسب عبارتند از: روان کنندگی، خنک کنندگی، شست و شو و خروج تراشه های سنگ. ب- مؤثر بودن یا نبودن خنک کننده به ترکیب سگمنت ها، تعداد الماسه ها و مشخصات فیزیکی و مکانیکی قطعه کار (گرانیت های مورد مطالعه) نیز بستگی دارد. ج- سازگاری بین ویژگی های گرانیت و تیغه برش الماسه، پارامترهای برش و خنک کننده باید به منظور بهینه سازی فرایند برش مورد توجه قرار گیرد [۲].

۳-۲-۲ مطالعات ژو و لی^۱ (۲۰۰۳)

ژو و لی در سال ۲۰۰۳ به بررسی تأثیرات تراشه در عملیات برش گرانیت با استفاده از تیغه های الماسی پرداختند. نتایج حاصل از بررسی ها نشان داد که در عملیات برش، تراشه ها باعث تغییر مکان خط برش تحت تأثیر نیروی اعمالی در هر دو حالت برش الف- سگمنت با سطح ثابت و ب- سگمنت با سطح متغیر می شود. علاوه بر طول اتصال هندسی، برآمدگی الماس (میزان بیرون زدگی دانه الماس از ماتریس) فاکتور مهمی است که رفتار تراشه از آن تبعیت می کند. همچنین معلوم شد که تأثیر تراشه تحت تأثیر خاصیت ویسکوزیتی روان کننده است که در این صورت، با افزایش خاصیت ویسکوزیتی روان کننده، امکان برداشت تراشه از محل برش مشکل تر می شود. حجم تراشه های تولید شده در محل تماس سگمنت و گرانیت با افزایش نرخ برداشت قطعه کار، افزایش می یابد، در نتیجه باعث افزایش دشواری برداشت تراشه در ناحیه برش می شود. با پیشروی عملیات برش، ممکن است دشواری برداشت تراشه به علت ساییده شدن الماس (کاهش برآمدگی) به طور مداوم افزایش یابد [۳].

۴-۲-۲ مطالعات یوسفی (۲۰۰۶)

یوسفی در سال ۲۰۰۶ مطالعاتی در زمینه تأثیر پارامترهای ماشین کاری بر سایش ابزار در فرآیند برش سنگ های سخت گرانیت انجام داد. او در این تحقیق به بررسی تأثیر بعضی از پارامترهای ماشین کاری مثل سرعت برش و سرعت پیشروی بر رفتار سایشی یک دیسک برش الماسی در برش سنگ

¹ Xu & Li

گرانیت یزد پرداخت. نتایج نشان داد که [۴]:

- در ابتدا با افزایش سرعت پیشروی، نیروهای برشی افزایش یافته و پس از رسیدن به نقطه اوج خود کاهش می‌یابد. علت آن را می‌توان افزایش ترک‌های عرضی در سنگ گرانیت یزد حاصل از افزایش عمق نفوذ دانه‌های الماس و تشکیل تراشه‌های ثانویه دانست.
- افزایش سرعت پیشروی، باعث کاهش سایش ابزار می‌شود، که علت آن را می‌توان کاهش نسبی نیروهای مکانیکی و همچنین کاهش تأثیر حرارت حاصل بر روی چسب اتصال دهنده دانه‌های الماس در ابزار برشی دانست.
- با افزایش سرعت برش، نیروهای برشی کاهش می‌یابند. زیرا با افزایش سرعت برش، عمق نفوذ دانه به درون ماده سنگ کاهش یافته و از طرفی با افزایش ضربه‌های مکانیکی دانه‌های الماس، رشد ترک‌های جانبی نیز در سنگ بیشتر می‌شود.
- افزایش سرعت برشی، باعث افزایش سایش ابزار می‌شود، زیرا بارهای حرارتی و ضربه‌های مکانیکی در سرعت‌های بالا بیشتر می‌شوند

۲-۲-۵ مطالعات گونش ییلماز و گوکتان^۱ (۲۰۰۸)

- گونش ییلماز و گوکتان در سال ۲۰۰۸ به بررسی اثرات نرخ برش بر روی نیرو و انرژی مورد نیاز در فرآیند برش دایره‌ای گرانیت پرداختند. نتایج آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که [۵]:
- افزایش نرخ برش، کارایی عملیات را از لحاظ انرژی ویژه افزایش می‌دهد، هرچند که این موضوع با میزان انرژی در دسترس ماشین کنترل می‌شود. با این حال، دستیابی به نرخ برش بالاتر، با افزایش سرعت خوردندگی و اعمال یک عمق برش کم از افزایش عمق برش و استفاده از سرعت خوردندگی پایین سودمندتر است. مشخص شد که مورد دوم به انرژی و نیروی بیشتری نیاز دارد.

¹ Gunes Yilmaz & Goktan

- نمودارهای ثبت شده مصرف برق نشان می دهد که با افزایش تعداد گذرهای اره برش، مقدار مصرف انرژی افزایش می یابد که به سایش تدریجی اره منجر می شود. از این رو پیشنهاد شد که در عمل، نظارت بر زمان واقعی عملکرد سایش اره می تواند به راحتی توسط ارزیابی نتایج به دست آمده از مصرف برق انجام شود.
- هرچند که گرانیت دانه درشت (G_1) با مقاومت پایین تر، مشکلات برش پذیری بیشتری نسبت به گرانیت با دانه بندی خوب (G_2) دارد. همچنین نتایج به دست آمده از مطالعات نشان داد که مقاومت نمی تواند پارامتر قابل توجهی در تجزیه و تحلیل قابلیت برش پذیری سنگ های گرانیته باشد. تصور می شود که توزیع نسبتاً بالای اندازه دانه در G_1 همراه با محتوای کوارتز بالا، سبب سایش سریع تر، افزایش نیروی برشی و مصرف انرژی بالاتر می شود.

۲-۶ مطالعات تورچتا^۱ (۲۰۰۹)

در سال ۲۰۰۹ تورچتا مطالعاتی در زمینه نیروی برش با استفاده از ابزار الماسی در فرآیند برش سنگ انجام دادند. بدین منظور آن ها به بررسی نحوه برداشت مواد از سطح برش توسط ابزار الماسی پرداختند. به نوعی این مطالعه، گزارش یک تحلیل سینماتیک بین یک دانه الماس از ابزار برش الماسی و یک قطعه سنگ است. نیروهای برش برای هر دانه با تقسیم نیروی برش کل اندازه گیری شده به تعداد نقاط برش فعال در ناحیه تماس بین ابزار الماسی و سنگ به دست آمد و مشخص شد که به صورت یک تابع توانی بر حسب ضخامت تراشه است. مدل به دست آمده برای ماشین کاری سنگ های ساختمانی توسط ماشین برش و دیسک الماسی معتبر است. اجزای نیروی برش به حداکثر ضخامت تراشه برداشته شده توسط تک الماس و مقادیر فرضی بین ۰/۱ و ۱/۱ نیوتن بستگی دارند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش نیروی برشی مماسی به ازای هر دانه، ضخامت تراشه برداشته شده افزایش می یابد. همچنین مشخص شد که با افزایش نیروی برشی در امتداد عمود بر جهت

¹ Turchetta

پیشروی نیز، ضخامت تراشه برداشته شده افزایش می‌یابد [۶].

۲-۲-۷ مطالعات بویوک ساقیش^۱ (۲۰۰۹)

بویوک ساقیش در سال ۲۰۰۹ مطالعاتی در زمینه بررسی عملکرد فرآیند برش نمونه سنگ مرمر با توجه به ویژگی‌های سگمنت‌های الماسی پرداخت. هدف از این تحقیق تعیین بهترین نوع سگمنت الماسی و ویژگی‌های برجسته آن از میان ۶ نوع سگمنت مورد مطالعه بود که عمدتاً در فرآیند برش مرمرها مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج این تحقیق نشان داد که: با وجود پیچیدگی فرآیند فرآوری سنگ، معیارهای فرآیند برش نظیر: انرژی برش ویژه، نیروی برش، نیروی محوری و نسبت نیروهای به‌دست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی می‌توانند تولیدکنندگان این محصول را در طراحی سگمنت مناسب برای انواع مختلف سنگ‌ها کمک کند. در نهایت نتایج بررسی‌ها نشان داد که درصد قلعه موجود در ماتریس سگمنت، تعداد و اندازه دانه الماس و سختی ماتریس، معیارهای غالبی هستند که بر روی انرژی ویژه برش، نیروی محوری و نیروی برش تأثیرگذار می‌باشند [۷].

۲-۲-۸ مطالعات تورچتا (۲۰۱۰)

در سال ۲۰۱۰ تورچتا به بررسی نیروهای برش در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی با استفاده از دیسک‌های الماسی پرداخت. این کار به معرفی مدل‌های پیش‌بینی نیروی برشی در گستره وسیعی از فرآیند برش سنگ به‌وسیله دیسک‌های الماسی ارائه شده‌اند، می‌پردازد. انجام تحلیل واریانس نشان داد که، نیروی برشی به شدت به عمق برش و سرعت پیشروی بستگی دارد. تأثیر این دو پارامتر به صورت جزئی به‌وسیله ضخامت تراشه معادل یا نرخ برداشت سنگ در نظر گرفته می‌شود. رابطه بین نیروی برش (یا انرژی ویژه برش) و ضخامت تراشه معادل با استفاده از سه نرخ برداشت متفاوت ۲۰۰ میلی‌متر/دقیقه، ۴۰۰ میلی‌متر/دقیقه و ۶۰۰ میلی‌متر/دقیقه، توسط سه تابع توانی مدل شد. همچنین مشخص شد که اجزای نیروی برش به حداکثر ضخامت تراشه برداشت شده با دیسک تک الماسی

¹ Büyüksağış

بستگی دارند. مدل‌های به‌دست آمده موثر، ساده و کلی هستند [۸].

۹-۲-۲ مطالعات ناگسوارا^۱ و همکاران (۲۰۱۰)

در سال ۲۰۱۰ ناگسوارا و همکاران به بررسی مشکلات و راه‌حل‌های موجود در فرآیند برش سنگ‌های سخت گرانیتی پرداختند. مطالعات با در نظر گرفتن و تغییر پارامترهای تأثیرگذاری نظیر خنک‌کننده‌ها، تیغ‌های الماسی ماشین برش، سختی و نرمی ابزار و سنگ، زمان فرآیند برش و انرژی مصرفی انجام شدند. آزمایش‌ها با ۳ نوع سیال خنک‌کننده شامل آب با مدت زمان برش ۲۷ دقیقه، ترکیب آب و روغن با مدت زمان برش ۲۵ دقیقه و ترکیب آب و روغن و نیرما^۲ با مدت زمان برش ۱۹ دقیقه و تغییر سایر پارامترها نظیر سختی و نرمی بلوک سنگ و ابزار برش انجام شدند. همچنین توان صرف شده در فرآیند برش زمانی که خنک‌کننده آب بود حدود ۳/۷ کیلووات ساعت، با استفاده از ترکیب آب و روغن در حدود ۳/۳ کیلووات ساعت و در زمانی که خنک‌کننده ترکیب آب و روغن و نیرما بود ۳ کیلووات ساعت ثبت شد. خلاصه‌ای از نتایج این تحقیق در ادامه آورده شده است [۹]:

- زمان صرف شده برای برش سنگ در هنگام استفاده از سیال خنک‌کننده با ویسکوزیته بالا در مقایسه با سیال خنک‌کننده با ویسکوزیته پایین، کمتر است. از این رو در طی فرآیند برش برای کاهش زمان می‌توان از سیالات خنک‌کننده با ویسکوزیته بالا استفاده کرد.
- انرژی مصرفی در هنگام استفاده از سیال خنک‌کننده با ویسکوزیته بالا کمتر از انرژی صرف شده در هنگام استفاده از سیال خنک‌کننده با ویسکوزیته پایین است. از این رو در طی فرآیند برش برای کاهش مصرف انرژی می‌توان از سیال خنک‌کننده با ویسکوزیته بالا استفاده کرد. همچنین مصرف انرژی در برش سنگ‌های نرم با استفاده از ابزار برشی الماسی نرم کمتر است.
- عمر ابزار برش دهنده با استفاده از سیال خنک‌کننده با ویسکوزیته بالا، افزایش می‌یابد. همچنین عمر ابزار در فرآیند برش مواد نرم با ابزار برشی دارای الماس سخت بیشتر بوده و زمان

¹ Nageswara

² Nirma

مورد نیاز برای برش سنگ نیز در هنگام استفاده از ابزار برشی الماسی نرم بسیار کمتر است.

۲-۲-۱۰ مطالعات ناگسوارا و همکاران (۲۰۱۲)

ناگسوارا و همکاران ۲۰۱۲ مطالعاتی در زمینه انتخاب خنک‌کننده‌های سیال‌گونه در فرآیند برش سنگ‌های سخت گرانیتهی انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از خنک‌کننده‌ها برای برش سنگ‌های سخت می‌تواند مزایای مختلفی از قبیل افزایش طول عمر ابزار، بالا رفتن کیفیت سطح برش خورده و دقت بهتر در ابعاد به‌دست آمده را به همراه داشته باشد. همین نتایج باعث رسیدن به سرعت و عمق برش بیشتر در طی فرایند برش می‌شود. انتخاب بهترین سیال خنک‌کننده به طور عمده به ۳ عامل در فرآیند ماشین‌کاری شامل مشخصات ماشین‌کاری، قطعه‌کار و جنس ابزار برش بستگی دارد. ترکیبی از این سه عامل تأثیر گذار، اطلاعات اولیه را برای انتخاب بهترین خنک‌کننده فراهم می‌کند. همچنین بازیابی سیال خنک‌کننده استفاده شده می‌تواند مزایایی همانند: کاهش هزینه‌های برش، کاهش هزینه‌های مصرف خنک‌کننده و همچنین کاهش میزان آلودگی محیطی را به همراه داشته باشد. آزمایش‌ها با استفاده از ۳ نوع مایع خنک‌کننده آب، ترکیب آب و روغن و ترکیب آب و نیرما و تغییر پارامترهای دیگری نظیر سختی/نرمی سنگ و جنس سخت/نرم ابزار برش انجام شد [۱۰].

۲-۲-۱۱ مطالعات اوجون^۱ و همکاران (۲۰۱۲)

اوجون و همکاران در سال ۲۰۱۲ مطالعاتی را در زمینه تأثیر سیال خنک‌کننده در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی با استفاده از برش دهنده‌های دیسکی انجام دادند. آن‌ها در طی تحقیقشان از ۴ سیال خنک‌کننده شامل: آب، Ace-Cool، روغن بور^۲ و آب صابون برای برش دو نوع سنگ و از روش برش رو به پایین^۳ استفاده شد. در طی فرایند برش، توان مصرفی دستگاه برش، نیروهای فرایند، انرژی

¹ Uzun

² Boron Oil

³ Down Cutting

ویژه و سایش دیسک مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که سیال‌های خنک‌کننده مورد مطالعه به عنوان جایگزینی مناسب بجای آب، عملکرد برش دیسک الماسی را افزایش می‌دهند. همچنین بالاترین عملکرد زمانی حاصل می‌شود که از مخلوط آب و نفت بور به عنوان سیال خنک‌کننده/روان‌کار استفاده شود [۱۱].

۲-۲-۱۲ مطالعات کاراکورت^۱ و همکاران (۲۰۱۳)

در سال ۲۰۱۳ کاراکورت و همکاران به بررسی تأثیر متغیرهای عملیاتی بر میزان سایش ویژه تیغه‌های برش الماسی در فرآیند برش گرانیت پرداختند. هدف از این تحقیق بررسی عملکرد سایش تیغه‌های برش دهنده سنگ‌های سخت گرانیته بود. در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد با افزایش سرعت محیطی و نرخ پیشروی، مقدار نرخ سایش ویژه^۲ (SWR) بر حسب میکرومتر بر متر مربع به‌عنوان معیاری برای عملکرد برش) افزایش پیدا می‌کند. همچنین مشخص شد که این شاخص با افزایش عمق برش و نرخ جریان سیال خنک‌کننده (به‌ویژه برای سطوح پایین‌تر نرخ جریان مایع خنک‌کننده) کاهش می‌یابد. مقدار بحرانی سرعت محیطی به لحاظ تعیین نرخ سایش ویژه برای سایر سنگ‌های مورد آزمایش مقدار ۳۵ متر بر ثانیه تعیین شد. با توجه به نتایج مشخص شد که در طی آزمایش مقدار SWR در ابتدا کاهش یافته و سپس با افزایش نرخ برداشت ویژه (مقدار سنگ برداشت شده در واحد زمان یا مساحت برش در واحد زمان است) افزایش می‌یابد. مقادیر بحرانی نرخ جریان به لحاظ تعیین نرخ سایش ویژه برای سایر سنگ‌های مورد آزمایش، تعیین شدند. در مقادیر پایین نرخ جریان سیال خنک‌کننده (کمتر از ۱۵۰ میلی لیتر بر ثانیه)، تراشه‌های تولید شده ممکن است به‌صورت کامل از سطح برش حذف نشوند و این عامل باعث اعمال نیروی برش بیشتری می‌شود که افزایش نرخ سایش ویژه را به همراه دارد [۱۲].

¹ Karakurt

² Specific Wear Rate

۲-۲-۱۳ مطالعات صادق اسلام و همکاران (۲۰۱۳)

در سال ۲۰۱۳ صادق اسلام و همکاران به بررسی ارتباط میان پارامترهای مقاومتی سنگ و شدت جریان مصرفی در فرایند برش سنگ‌های ساختمانی پرداختند. ارزیابی نتایج حاصل از برازش‌های چند متغیره نشان داد که با افزایش مشخصات مقاومتی سنگ (افزایش مقاومت مرزی دانه‌ها و ماتریس سنگ و به دنبال آن کاهش قدرت تراشه برداری دانه الماس) میزان شدت جریان مصرفی دستگاه افزایش می‌یابد. در نهایت جهت بررسی و کنترل معنی‌داری روابط از تست‌های آماری t و F ، استفاده شد. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که میزان شدت جریان مصرفی دستگاه‌های برش، می‌تواند با یک سطح اطمینان مناسب و ضریب همبستگی بالا، با توجه به مشخصات مقاومتی نمونه سنگ مورد ارزیابی قرار گیرد [۱۳].

۲-۲-۱۴ مطالعات یورداکول^۱ (۲۰۱۵)

در سال ۲۰۱۵ یورداکول به بررسی تاثیر پارامترهای برش بر روی توان مصرفی دستگاه برش پرداخت. بر اساس شرایط برش در نظر گرفته شده، یک گرانیات از نوع نیمه سخت برای انجام عملیات برش در نظر گرفته شد. هدف از این تحقیق بررسی تاثیر حالت برش، عمق برش و نرخ پیشروی بر روی توان مصرفی دستگاه برش بود. بدین منظور از دو ردیف دیسک برشی برای ارزیابی دوازده حالت مختلف برش استفاده گردید. این آزمایش‌ها با برش‌هایی به اندازه ۱۲۰۰ میلی‌متر، نرخ‌های پیشروی برابر با ۱۰، ۱۵ و ۱۷ متر بر دقیقه و عمق‌های برشی برابر با ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر با سرعت محیطی ثابت ۳۵ متر بر ثانیه انجام شد. اثرات حالت برش، عمق برش و نرخ پیشروی بر عملکرد برش (انرژی مصرفی به عنوان یکی از مهمترین شاخص‌های عملکرد برش) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که در عمق‌های برش ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر در حالت برش پیشرو، با افزایش نرخ پیشروی، میزان توان مصرفی دستگاه افزایش می‌یابد. تغییرات توان مصرفی با تغییرات عمق برش با ثابت

¹ Yurdakul

نگه داشتن نرخ‌های پیشروی نیز ثبت شد و نتایج نشان داد که توان مصرفی نیز با افزایش عمق برش در حالت برش پسرو، افزایش می‌یابد. در نهایت بعد از انجام آزمایش‌ها به صورت پسرو و پیشرو مشخص شد که روش برش پسرو از لحاظ توان مصرفی سودمندتر است [۱۴].

۲-۲-۱۵ مطالعات اخیانی و همکاران (۲۰۱۷)

در سال ۲۰۱۷ اخیانی و همکاران به بررسی عملکرد ماشین برش الماسی با استفاده از الگوریتم زنبور عسل پرداختند. هدف آن‌ها از این مطالعه استفاده از الگوریتم زنبور عسل برای پیش‌بینی عملکرد دیسک برش دایره‌ای در سنگ‌های سخت بود. بدین منظور، چهارده نوع سنگ سخت در آزمایشگاه با استفاده از یک دستگاه برش در شرایط عملیاتی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. چهار ویژگی مهم مکانیکی و فیزیکی سنگ‌ها از قبیل مقاومت فشاری تک‌محوره، شاخص سختی شیمازک، سختی موهس و مدول یانگ در آزمایشگاه تعیین شدند. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که الگوریتم کلونی زنبور عسل می‌تواند با توجه به ویژگی‌های مکانیکی سنگ، با قابلیت بالایی به ارزیابی عملکرد برش دهنده‌های دیسکی بپردازد [۱۵].

۲-۲-۱۶ مطالعات توماچ^۱ و همکاران (۲۰۱۸)

در سال ۲۰۱۸ توماچ و همکاران به ارزیابی قابلیت برش‌پذیری برش دهنده‌های دیسکی بر اساس تنوع سنگ‌های ساختمانی با توجه به منشأ زمین‌شناسی آن‌ها پرداختند. در این تحقیق مشخص شد که برآورد و ارزیابی مناسب عملکرد دیسک‌های برش دهنده سنگ یکی از مهمترین عوامل بهبود بهره‌وری فرآیند برش و کاهش هزینه‌های کارخانه‌های فرآوری سنگ است. از جمله پارامترهای طراحی در بهبود عملکرد و انتخاب برش دهنده‌های دیسکی عبارتند از: قطر دیسک، قدرت دستگاه، سرعت محیطی، عمق برش و مصرف ابزار و ویژگی‌های دستگاه برش. خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های ساختمانی و شرایط زمین‌شناسی می‌باشند. علاوه بر این، تجربه اپراتور یکی دیگر از

¹ Tumac

پارامترهای عملیاتی مهم در برآورد عملکرد این دیسک‌ها به حساب می‌آید. در این تحقیق شانزده سنگ ساختمانی دگرگونی و نه سنگ مختلف رسوبی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. در ادامه ارتباط میان عملکرد دیسک‌های برشی با مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ با استفاده از آنالیز رگرسیون ساده، چندگانه و غیر خطی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که: در سنگ‌های ساختمانی دگرگونی، نرخ تولید پلاک، رابطه نسبتاً خوبی با مقاومت فشاری تک‌محوره و اندازه متوسط دانه‌ها به ترتیب با ضرایب تعیین $0/64$ و $0/61$ دارد. در سنگ‌های ساختمانی نوع رسوبی نیز نرخ تولید پلاک‌ها با سختی شور و سختی اشمیت به ترتیب یک رابطه خوب و نسبتاً خوبی به ترتیب با ضرایب تعیین $0/58$ و $0/59$ دارند. در تمام نمونه‌ها (داده‌های ترکیبی)، می‌توان نتیجه گرفت که نرخ تولید پلاک را می‌توان به وسیله مقاومت فشاری تک‌محوره و سختی شور (ضریب تعیین به ترتیب $0/69$ و $0/67$) برآورد کرد. سیزده مدل براساس رگرسیون چند متغیره و غیر خطی پیشنهاد شد. در میان این مدل‌ها، سه مدل خطی و سه غیر خطی به عنوان بهترین مدل‌ها برای برآورد نرخ تولید پلاک در فرایند برش سنگ‌های دگرگونی و رسوبی انتخاب شدند [۱۶].

۲-۲-۱۷ مطالعات اخپانی و همکاران (۲۰۱۸)

در سال ۲۰۱۸ اخپانی و همکاران مطالعاتی را در زمینه تاثیر شاخص‌های تردی بر روی شدت جریان مصرفی و نرخ سایش ابزارهای برش دهنده دیسکی انجام دادند. بدین منظور ارتباط میان چهار شاخص تردی تحت عناوین B_1 , B_2 , B_3 , B_4 و شدت جریان مصرفی و نرخ سایش ابزار با استفاده از تحلیل رگرسیون ساده و چندگانه مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت، اعتبارسنجی مدل‌های توسعه یافته با آزمون‌های آماری F و t ، ضریب همبستگی و نمودارهای مقادیر پیش‌بینی شده در مقایسه با مقادیر واقعی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و بهترین مدل انتخاب شد. نتایج نشان داد که نرخ سایش ابزارهای برش دهنده دیسکی الماسی می‌تواند با دقت بالایی با توجه به شدت جریان مصرفی و شاخص تردی پیش‌بینی شود [۱۷].

۲-۱۸ مطالعات میکائیل و همکاران (۲۰۱۸)

در سال ۲۰۱۸ میکائیل و همکاران مطالعاتی را در زمینه انرژی مصرفی در فرآیند برش سنگ‌های ساختمانی انجام دادند. آن‌ها آزمایش‌های خود را بر روی هفت سنگ کربناته تحت شرایط عملیاتی مختلف نظیر عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت محیطی انجام دادند و مدل‌های آماری را با استفاده از نرم افزار SPSS برای پیش بینی انرژی مصرفی ارائه گردید. نتایج حاصل از بررسی‌های آن‌ها نشان داد که [۱۸]:

عمق برش و نرخ پیشروی ارتباط مستقیمی با مصرف انرژی دارند و دلیل آن را می‌توان در فرایند برش و سهولت تشکیل تراشه جستجو کرد. با توجه به نمودارهای مصرف انرژی در مقایسه با نرخ پیشروی و عمق برش، شیب نمودار با افزایش مقادیر این پارامترها رو به بالا افزایش می‌یابد. مصرف انرژی حداکثر در نرخ پیشروی ۴۰۰ و عمق برش ۳۵ میلی‌متر به حداکثر میزان خود می‌رسد. با استفاده از بیش از ۱۲۰ نمونه آزمایش شده در شرایط مختلف عملیاتی، یک مدل آماری برای پیش بینی انرژی مصرفی ارائه شد. نتایج آزمون‌های آماری (F و t) نشان از صحت و سقم ضرایب متغیرها داشته و پراکندگی مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده انرژی مصرفی، دقت بالای مدل را نشان می‌دهد. با توجه به مطالعات انجام شده در یک مقیاس آزمایشگاهی، با افزایش عمق برش و نرخ پیشروی، انرژی مصرفی در واحد سطح برش (انرژی مصرفی ویژه) نزدیک به مقدار بهینه آن است. نکته مهم اینجاست که با افزایش این دو پارامتر، فشار بر روی دستگاه افزایش می‌یابد، واضح است که با افزایش فشار بر روی دستگاه، علاوه بر افزایش هزینه تعمیر و نگهداری دستگاه، ارتعاش روی دیسک نیز افزایش یافته و ضایعات در جهت برش گسترده‌تر شده و پرتاب سنگ افزایش خواهد یافت. علاوه بر این، در چنین وضعیتی احتمال بیرون‌زدگی الماس از ماتریس به علت افزایش نیروی برش، افزایش می‌یابد. بنابراین، لازم است همه عوامل موثر با هم به منظور دستیابی به یک شرایط برش ایده‌آل مورد بررسی قرار گیرند. برای تعیین بهترین شرایط برش، همچنین مدل ارائه شده در این مطالعه می‌تواند به همراه سایر مدل‌ها (مدل‌های پیش‌بینی سایش و ارتعاش) برای کمک به دستیابی به شرایط

برداشت ایده آل کمک کند.

۲-۳ جمع بندی

بررسی مطالعات فوق نشان داد که اکثر مطالعات انجام شده در حوزه سیال خنک کننده/روان کار مرتبط با شاخه های رشته مکانیک بوده و با فرآیند تراشکاری، سوراخ کاری، سنگ زنی، صاب و سیقل و برش فلزات مرتبط می باشد و کمتر تحقیقی در ارتباط با فرایند برش سنگ انجام شده است. در رشته معدن و در حوزه برش سنگ های ساختمانی در کشور ایران علی رغم وجود پتانسیل های بالایی که در صنعت سنگ وجود دارد، مطالعه ای جامع در زمینه بررسی تأثیر سیال های خنک کننده/روان کار در فرآیند برش سنگ ساختمانی و انرژی مصرفی دستگاه لازم و مورد نیاز می باشد. اکثر مطالعات انجام شده در حوزه برش سنگ تنها با در نظر گرفتن پارامترهای عملیاتی و نمونه های سنگی کم به ارزیابی انرژی مصرفی دستگاه برش پرداخته اند و هیچ کدام از این مطالعات تغییرات نرخ تولید و شدت جریان مصرفی را با در نظر گرفتن تأثیر سیال های خنک کننده/روان کار، به صورت همزمان مورد مطالعه قرار نداده اند. از این رو در ادامه بعد از بررسی مبانی فرآیند برش سعی شد تا با تهیه نمونه های سنگی مختلف، عملیات برش در مقیاس آزمایشگاهی به بررسی تأثیر پنج سیال خنک کننده/روان کار تحت شرایط مختلف عملیاتی شامل عمق های مختلف برش و نرخ های مختلف پیشروی، بر روی تغییرات عملکرد برش به ویژه شدت جریان مصرفی دستگاه برش پرداخته شود.

فصل ۳: مبانی نظری فرآیند برش

۳-۱ مقدمه

فرآیند برش سنگ ساختمانی یک فرایند سایشی می‌باشد به‌طوری که می‌توان برش سنگ به کمک سگمنت‌های الماسی را سایش ذرات تشکیل دهنده سنگ توسط 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 به بررسی فرایند برش و عوامل مؤثر بر آن پرداخته شده است.

۳-۲ معرفی دستگاه‌های برش دیسکی

دستگاه‌های برش دیسکی سنگ ساختمانی (قله‌برها) در کارخانه‌های فرآوری را می‌توان به‌صورت کلی به دو دسته دستگاه‌های برش سنگ‌های سخت و برش سنگ‌های نرم تقسیم بندی کرد. با توجه به ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های سخت‌بر و سنگ‌های نرم‌بر، نوع دیسک‌های مورد استفاده برای برش این سنگ‌ها متفاوت می‌باشد. قطر دیسک‌های مورد استفاده از ۰/۲ متر و یا کمتر شروع شده و تا حدود ۳ متر نیز می‌رسد. فرآیند برش توسط این دستگاه به وسیله یک یا چند دیسک (به صورت همزمان) صورت می‌پذیرد. برش سنگ بسته به نوع سنگ می‌تواند در یک یا چند مرحله انجام گیرد که معمولاً برای سنگ‌های کربناته و نیمه سخت به صورت تک‌مرحله‌ای و برای سنگ‌های سخت به صورت چند مرحله‌ای تنظیم می‌شود. در فرایند برش با استفاده از این دستگاه می‌بایست به منظور خنک نگه داشتن تیغه‌ها و شستن ضایعات از مواد خنک‌کننده/روان‌کار استفاده کرد. عدم استفاده از مواد خنک‌کننده/روان‌کار مناسب باعث داغ شدن تیغه‌ها، فرسودگی بدنه تیغه، ایجاد شکاف بین بدنه تیغه و سگمنت به سبب همین داغ شدگی می‌شود. در شکل ۳-۱ الف و ۳-۱ ب به ترتیب ۲ قله‌بر مناسب برای برش سنگ‌های کربناته و سنگ‌های سخت نشان داده شده است [۱۹].



ب



الف

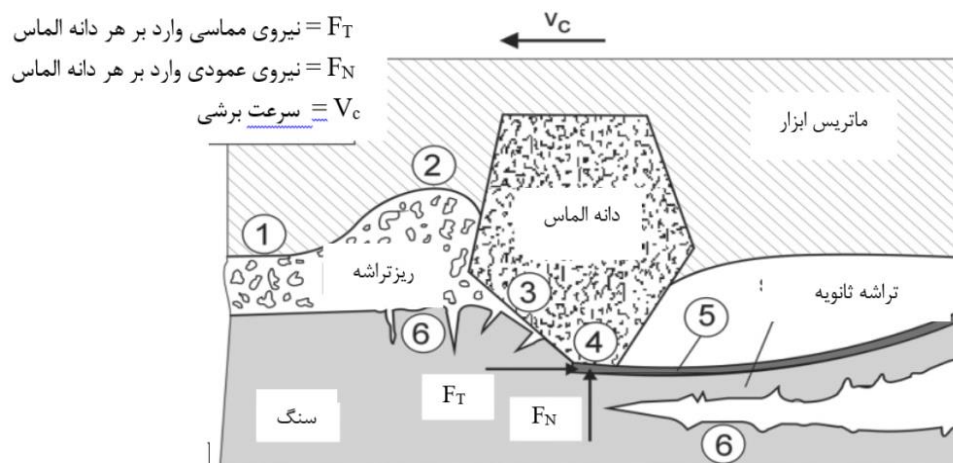
شکل ۱-۳ الف) دستگاه تک دیسکی مناسب برای برش سنگ‌های کربناته. ب) دستگاه چند دیسکی مناسب برای برش سنگ‌های سخت [۱۹]

۳-۳ فرایند برش و فرایند تشکیل تراشه

به‌طور 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 برش^۱ و به دنبال آن تشکیل تراشه^۲ 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 توسط 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 ۲-۳ 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 [۲۰].

¹ Workpiece

² Chip



۱- ناحیه اصطکاک بین ریز تراشه ها و ماتریس ابزار ۴- ناحیه اصطکاک بین سنگ و دانه الماس

۲- ناحیه ساییش یافته توسط ریز تراشه ها و تراشه ها ۵- ناحیه تغییر شکل پلاستیک

۳- ناحیه تشکیل تراشه اولیه ۶- ناحیه تغییر شکل الاستیک

شکل ۳-۲ اندرکنش نیروهای میان دانه الماس و سطح خراشیده شده از سنگ [۲۰].

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 یک ناحیه تغییر شکل پلاستیک برگشت‌ناپذیر در زیر شیاری که از حرکت مماسی دانه الماس، ایجاد شده به وجود می‌آید [۲۱].

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 [۲۱].

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، به عامل ایجاد تراشه‌های ثانویه تبدیل

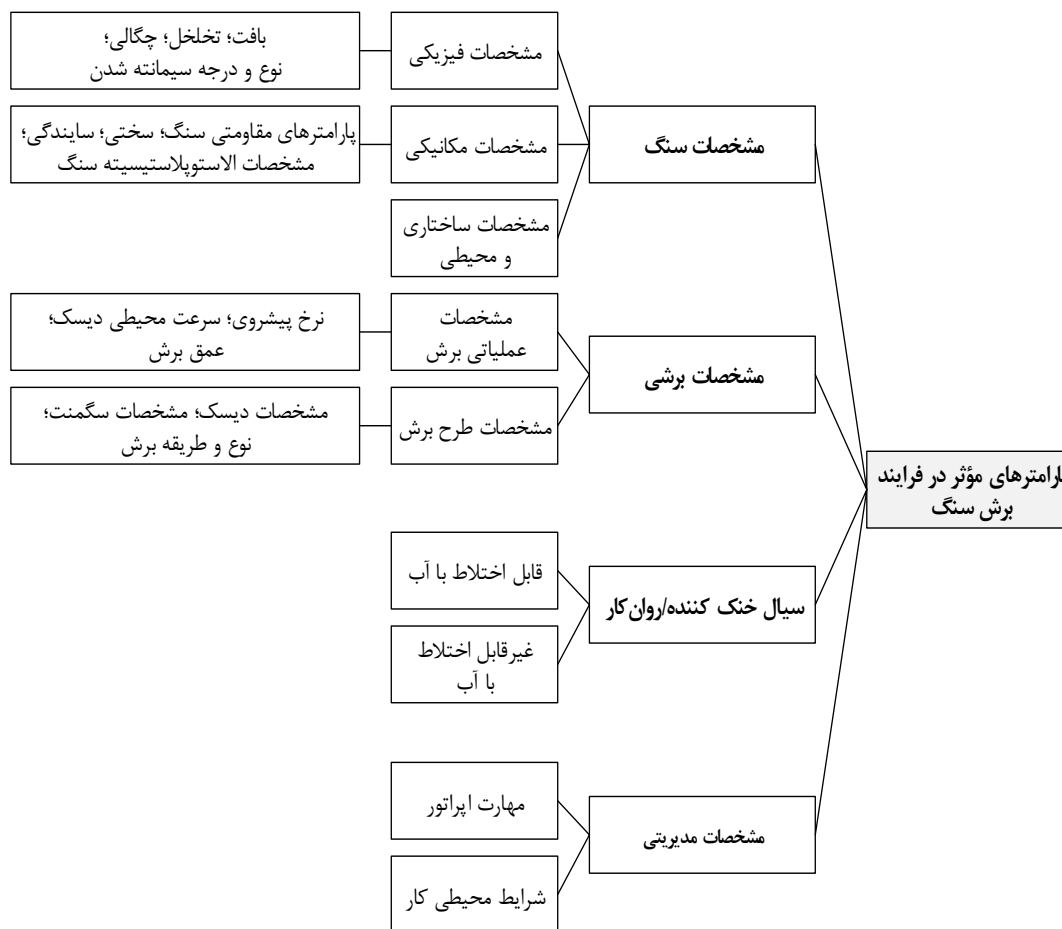
می‌شوند. تراشه‌های ایجاد شده در فرایندهای موفق سنگ‌بری عمدتاً از این نوع می‌باشند و برشی که از چنین مشخصه‌ای برخوردار باشد از راندمان و کارایی بیشتری برخوردار خواهد بود. حذف تراشه‌ها و کاهش دمای محیط به کمک جریان سیال خنک‌کننده، مرحله آخر از فرایند برش می‌باشد. در طی این فرآیند تراشه‌های ایجاد شده در مرحله قبل با فشار سیال از سطح برش خارج شده و موجب کاهش دمای محیط برش (ناحیه میان سگمنت و سطح برش) می‌شوند [۲۱].

۳-۴ عوامل مؤثر در فرآیند برش

به‌طور کلی پارامترهای مؤثر در فرایند برش سنگ را می‌توان در چهار بخش اصلی شامل الف) مشخصات قطعه‌کار یا سنگ ب) مشخصات برش ج) سیال خنک‌کننده/روان‌کار و د) مشخصات مدیریتی از قبیل مهارت اپراتور و شرایط محیطی کار مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. از میان این پارامترها، پارامترهای عملیاتی، مشخصات طرح برش و سیال خنک‌کننده 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 کارایی و توان تولید فرایند برش تأثیرگذار می‌باشند. شکل ۳-۳ پارامترهای مؤثر در فرایند برش را نشان می‌دهد.

۳-۴-۱ مشخصات سنگ

از عوامل مؤثر در فرایند برش به خصوص در فرایند تشکیل تراشه می‌توان به مشخصات سنگ اشاره کرد. سنگ به عنوان میزبان عملیات برش، از نقش حیاتی در فرایند برش و تولید برخوردار است. مشخصات سنگ تعیین‌کننده شرایط، کیفیت و کمیت اندرکنش میان سنگ و ماشین بوده لذا فرایند 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 [۲۲].



شکل ۳-۳ پارامترهای مؤثر در فرایند برش سنگ

۳-۴-۱-۱ مشخصات فیزیکی سنگ

چگالی، اندازه، شکل دانه، تخلخل، درصد کوارتز، ضریب بافت و نوع و درجه سیمانتی شدن از جمله مهم‌ترین مشخصات فیزیکی سنگ‌ها می‌باشند. 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 [۲۲].

الف: چگالی

چگالی یک سنگ نسبت جرم مخصوص سنگ به جرم مخصوص آب یا نسبت وزن مخصوص سنگ به وزن مخصوص آب است. از آنجایی که چگالی با مقاومت سنگ رابطه مستقیم دارد می‌توان نتیجه گرفت که با عملکرد ابزارهای برش در فرایند برش رابطه عکس دارد. به‌طور کلی می‌توان گفت هرچه

سنگ متراکم‌تر و چگال‌تر باشد، قابلیت برش آن کمتر خواهد بود [۲۲].

ب: بافت

بافت سنگ یکی از فاکتورهای مهم و اساسی در رفتار مهندسی سنگ‌ها به ویژه در فرایند برش و سایش ابزارهای الماسی 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 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 ساینده‌گری 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 ساینده‌گری سنگ‌ها می‌شود [۲۲].

ضریب بافت یکی از پارامترهای مهم و کمی بافت می‌باشد که توسط هاوارد و رولند^۱ در سال ۱۹۸۶ ارائه شده است. با معرفی ضریب بافت و کمی کردن مشخصات بافت سنگ، تحولی در عرصه تکنیک‌های پتروگرافیکی و مهندسی سنگ ایجاد شد به‌طوری 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 [۲۳].

ج: نوع و درجه سیمانی شدن

نیروی به هم چسبی که از آن به‌عنوان مهم‌ترین خصوصیت فیزیکی سنگ‌ها نام برده می‌شود، حاصل نیروی جاذبه بین مولکول‌های یک جسم یا ماده است. به عبارت دیگر نیروی به هم چسبی یک نیروی درون‌زا بوده و در مقابل نیروهای خارجی جدا کننده مولکول‌ها، جسم را مقاوم می‌کند. ماتریس‌های

¹ Howarth & Rowlands

سنگ‌های مختلف عمدتاً با توجه به منشأ ساخت و فرایندهای درگیر در شکل‌گیری و نیز میزان عمر 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 [۲۴].

با بیشتر شدن استحکام و چسبندگی بین دانه‌ها، 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.

د: تخلخل

یکی دیگر از پارامترهای مهم فیزیکی سنگ در زمینه قابلیت برش سنگ، تخلخل 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 دارند. در واقع تخلخل و ترک در ساختار ماده سنگ نقش ترک‌های اولیه را بازی می‌کنند، از این رو هرچه مقدار این ترک‌ها و تخلخل‌ها بیشتر باشد تراشه‌های ثانویه راحت‌تر تشکیل می‌شوند.

۳-۴-۱-۲ 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. با افزایش استحکام یا مقاومت سنگ، تشکیل تراشه ثانویه مشکل‌تر می‌شود و باعث می‌شود برای تشکیل مقدار مشخصی از تراشه به نیروهای برشی بیشتری نیاز باشد. یکی از پارامترهای مقاومتی سنگ، مقاومت فشاری می‌باشد که به عنوان مهم‌ترین و پرکاربردترین ویژگی سنگ‌ها در نظر گرفته می‌شود. 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. 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 [۲۲].

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 [۲۵].

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 صیقل‌دادن سگمنت و کندی دیسک می‌شوند. ساینده‌گی در سنگ‌ها عموماً به سه عامل میزان کوارتز محتوی، اندازه دانه‌ها و مقاومت برشی سنگ‌ها بستگی دارد [۲۲].

۳-۴-۱-۳ مشخصات ساختاری و محیطی سنگ

از جمله مشخصات ساختاری سنگ می‌توان به درزه، ترک، کلیواژ و جهت‌یافتگی کانی‌ها در سنگ

اشاره کرد. 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. 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 نرخ برش افزایش خواهد یافت. یکی دیگر از مشخصات ساختاری سنگ، کلیواژ و جهت‌یافتگی کانی‌ها می‌باشد. از دیدگاه قابلیت برش سنگ هرچه قدر میزان کانی‌های با سطح کلیواژ مشخص در بلوک سنگی بیشتر باشد سنگ راحت‌تر برش خواهد خورد [۲۲].

۳-۴-۱ مطالعات صورت گرفته توسط محققین در زمینه مشخصات سنگ

مطالعات صورت گرفته توسط محققین در زمینه مشخصات قطعه‌کار (سنگ) که در مجلات معتبر به چاپ رسیده در جدول ۳-۱ آورده شده است.

نمودار شکل ۳-۴ درصد فراوانی مطالعات صورت گرفته توسط محققین برای هر یک از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ در فرایند برش را نشان می‌دهد. همان طوری که در این نمودار مشخص می‌باشد پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، مقاومت کششی برزیلی (BTS)، کوارتز محتوی (QC)، سختی (H) و ساینده‌گی (A) به ترتیب در بیش از ۵۰ درصد از مطالعات مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در این میان پارامتر مقاومت فشاری تک محوری با ۸۳ درصد بیشترین مقدار را در میان پارامترهای مطالعه شده دیگر به خود اختصاص داده است.

۳-۴-۲ مشخصات برش

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 دسته‌بندی مورد ارزیابی قرار داد.

جدول ۳-۱ مشخصات فیزیکی و مکانیکی مطالعه شده توسط محققین در زمینه مشخصات سنگ

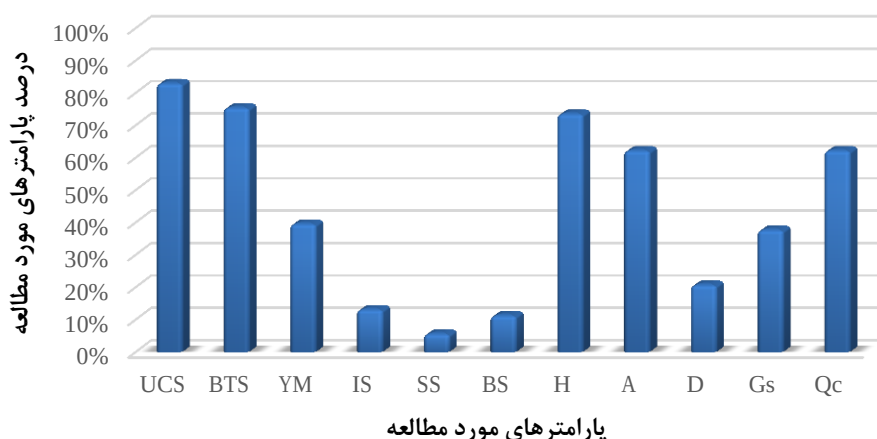
مشخصات فیزیکی و مکانیکی											نوع تیغه		سال	محققین
UCS	BTS	YM	IS	SS	BS	H	A	D	Gs	Qc	دیسک برشی	سیم برش		
									•	•	•		۱۹۷۸	Burgess [۲۶]
•	•					•	•			•	•		۱۹۸۵	Wright and Cassapi [۲۷]
						•					•		۱۹۸۶	Birle and Ratterman [۲۸]
•	•					•				•	•		۱۹۸۹	Jenning and Wright [۲۹]
									•	•	•		۱۹۹۶	Clausen et al [۳۰]
•						•	•			•	•		۲۰۰۳	Wei et al [۳۱]
•	•	•				•					•		۲۰۰۳	Eyuboglu et al [۳۲]
											•		۲۰۰۳	Zhang & Lu [۳۳]
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		۲۰۰۴	Ersoy and Atici [۳۴]
•	•		•			•	•				•		۲۰۰۴	Kahraman et al [۳۵]
•	•		•								•		۲۰۰۴	Gunaydin et al [۳۶]
•	•	•				•		•		•		•	۲۰۰۴	Ozcelik et al [۳۷]
•	•					•	•			•	•		۲۰۰۵	Buyuksagis and Goktan [۳۸]
•	•	•	•	•	•		•	•		•	•		۲۰۰۵	Ersoy et al. [۳۹]
						•				•	•		۲۰۰۵	Delgado et al [۴۰]
				•						•	•		۲۰۰۶	Kahraman et al [۴۱]
•	•		•			•	•				•		۲۰۰۷	Fener et al [۴۲]
•	•							•		•	•		۲۰۰۷	Kahraman et al [۴۳]
•	•					•				•		•	۲۰۰۷	Ozcelik [۴۴]
•	•		•			•	•				•		۲۰۰۷	Tutmez et al [۴۵]
•	•				•	•	•	•		•	•		۲۰۰۷	Buyuksagis [۴۶]
•										•		•	۲۰۰۸	Mikaeil et al [۴۷]
						•		•			•		۲۰۰۸	Kahraman and Gunaydin [۴۸]
•	•	•				•	•		•	•	•		۲۰۱۱	Mikaeil et al [۴۹]
•	•					•	•				•		۲۰۱۱	Mikaeil et al [۵۰]
•	•										•		۲۰۱۱	Mikaeil et al [۵۱]
•	•	•				•	•		•	•	•		۲۰۱۱	Mikaeil et al [۵۲]
•	•	•				•	•		•	•	•		۲۰۱۱	Mikaeil et al [۵۳]
•	•					•	•		•	•		•	۲۰۱۲	Ataei et al. [۵۴]
•	•					•	•				•		۲۰۱۲	Ataei et al [۵۵]

ادامه جدول ۳-۱

•	•				•	•	•	•		•		۲۰۱۲	Yurdakul and Akdas [۵۶]
									•		•	۲۰۱۲	Ghaysari et al [۵۷]
•	•	•				•	•		•	•	•	۲۰۱۳	Mikaeil et al [۵۸]
•	•										•	۲۰۱۳	Mikaeil et al [۵۹]
•		•					•			•	•	۲۰۱۳	Sadegheslam et al. [۱۳]
•	•										•	۲۰۱۴	Mikaeil et al [۶۰]
						•	•				•	۲۰۱۵	Tumac [۶۱]
•	•	•				•	•		•	•	•	۲۰۱۶	Mikaeil et al [۶۲]
•	•	•				•	•		•	•	•	۲۰۱۶	Mikaeil et al. [۶۳]
•	•	•				•	•		•	•	•	۲۰۱۶	Aryafar and Mikaeil [۶۴]
•	•						•	•			•	۲۰۱۶	Tumac [۶۵]
•	•	•				•	•		•	•	•	۲۰۱۷	Almasi et al [۶۶]
•	•	•				•	•		•	•	•	۲۰۱۷	Almasi et al [۶۷]
•	•	•				•	•		•	•	•	۲۰۱۷	Almasi et al [۶۸]
•	•	•				•	•		•	•	•	۲۰۱۷	Kamran et al [۶۹]
•	•	•				•	•		•	•	•	۲۰۱۷	Akhyani et al [۱۵]
•	•	•				•	•		•	•	•	۲۰۱۷	Akhyani et al [۷۰]
•	•	•				•	•		•	•	•	۲۰۱۷	Mikaeil et al [۷۱]
•	•		•		•	•	•	•			•	۲۰۱۸	Yilmazkaya et al [۷۲]
•	•					•	•	•			•	۲۰۱۸	Tumac and Shaterpour-Mamaghani [۱۶]
•					•	•		•		•	•	۲۰۱۸	Zhang et al [۷۳]
•	•	•				•					•	۲۰۱۸	Akhyani et al [۱۷]

مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، مقاومت کششی (BTS)، مدول الاستیسیته (E)، مقاومت ضربه‌ای (IS)، مقاومت برشی

(SS)، مقاومت خمشی (BS)، سختی (H)، ساینده‌گی (A)، چگالی (D)، اندازه دانه‌ها (Gs)، و کوارتز محتوی (Qc)



شکل ۳-۴ درصد فراوانی مطالعات صورت گرفته در زمینه مشخصات قطعه کار در فرایند برش

۳-۴-۲-۱ مشخصات عملیاتی برش

به طور کلی پارامترهای عملیاتی برش شامل نرخ پیشروی^۱ قطعه کار، سرعت محیطی^۲ و عمق برش است. سرعت محیطی به اضافه نیروهای وارده بر دیسک تعیین کننده نرخ پیشروی یا سرعت حرکت قطعه کار می باشند. بهترین عملکرد دیسک زمانی است که از یک نرخ پیشروی صحیح و مناسب استفاده شود. استفاده از نرخهای پیشروی بالا سبب سایش زودرس سگمنت ها و کاهش راندمان برش می شود. سرعت محیطی معرف سرعت چرخش دیسک در زمان برش می باشد. افزایش سرعت محیطی موجب افزایش سایش، کاهش عملکرد بهینه و از بین رفتن سگمنت (به واسطه بیرون آمدن دانه های الماس) در مدت زمان کوتاه تر از عمر مفید خود می شود. عمق برش معرف میزان نفوذ دیسک در داخل سنگ در طول فرایند برش می باشد [۳۴].

۳-۴-۲-۲ مشخصات طرح برش

گروه دیگر از پارامترهای مؤثر در فرایند برش، مشخصات طرح برش می باشد. مشخصات طرح برش را می توان در سه دسته شامل مشخصات دیسک، مشخصات سگمنت و روش برش مورد بررسی و ارزیابی قرار داد. این مشخصات به عنوان یکی از مهم ترین مشخصات قابل کنترل در فرایند برش مطرح بوده و

¹ Feed Rate

² Peripheral Speed

با توجه به نوع سنگ، طراحی و انتخاب می‌شوند [۲۲].

الف: مشخصات دیسک

به‌طور 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 کماتش 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.

ب: مشخصات سگمنت

سگمنت‌های الماسی توسط لحیم جوش یا جوش لیزری به بدنه فلزی دیسک متصل می‌شوند که ساختار سگمنت‌های الماسی را می‌توان در دو بخش ماتریس فلزی و دانه الماس مورد بررسی قرار داد.

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 پائین و برش رو به بالا^۱ دسته‌بندی می‌شوند

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

¹ Up Cutting

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 [۲۱]. 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 ۲۵-۲۰ میلی‌متر باشد کمتر می‌باشد. اما زمانی که عمق برش بیشتر می‌شود توان مورد نیاز در برش رو به پائین کمتر می‌شود [۷۴].

- مقدار نرخ سایش و مقادیر انرژی ویژه در برش رو به بالا کمتر از روش رو به پائین می‌باشد [۴۶].
- با توجه به مطالعات انجام شده می‌توان گفت که نیروهای برشی معمولاً در روش برش رو به پائین کمتر از روش برش رو به بالا می‌باشند. دلیل این امر را می‌توان مربوط به مکانیزم تشکیل تراشه در دو حالت دانست. در روش برش رو به پائین به دلیل وجود نیروهای ضربه‌ای مکرر و عمق برش زیاد، در ابتدای برش رشد ترک‌ها و شکست ترد در تراشه‌ها بیشتر از روش برش رو به بالا می‌باشد. همین امر موجب تفاوت نیروهای برشی در دو روش می‌شود.

۳-۲-۴-۳ مطالعات صورت گرفته توسط محققین در زمینه مشخصات برش

مطالعات صورت گرفته توسط محققین در زمینه مشخصات برش (ماشین، ابزار برش و نوع و طریقه

برش) که در مجلات معتبر به چاپ رسیده در جدول ۳-۲ آورده شده است.

نمودار شکل ۳-۵ درصد فراوانی مطالعات صورت گرفته توسط محققین برای هر یک از پارامترهای مشخصات برش در فرایند برش را نشان می‌دهد. همان طوری که در این نمودار مشخص می‌باشد پارامترهای نرخ پیشروی قطعه کار (F_r) و عمق برش (D_c) در بیش از ۵۰ درصد از مطالعات مورد بررسی قرار گرفته‌اند که نرخ پیشروی قطعه کار (F_r) با ۸۱ درصد و عمق برش (D_c) با ۷۲ درصد بیشترین مقدار را در میان پارامترهای مطالعه شده دیگر به خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۳-۵ درصد فراوانی مطالعات صورت گرفته در زمینه مشخصات برش در فرایند برش

۳-۴-۳ سیال خنک‌کننده/روان‌کار

در فرایند برش سنگ حضور نامطلوب نیروهای فرایند و تنش‌های حرارتی از تأثیرات منفی در عملکرد برش می‌باشد که بخش اعظم انرژی هدررفته مربوط به تنش‌های حرارتی ناشی از اصطکاک میان سگمنت و قطعه کار می‌باشد، که با افزایش سختی، ساینده‌گی و پارامترهای مقاومتی سنگ این موضوع تشدید می‌شود. به منظور افزایش توان تراشه برداری دانه الماس می‌بایست در کنار کاهش نیروهای فرایند، تنش‌های حرارتی تولید شده را به حداقل ممکن رساند تا هم به ارتقاء و کیفیت سطح برش خورده کمک کرد و هم عمر ابزار را بهبود بخشید. این امر زمانی محقق می‌شود که بتوان عوامل نامطلوب مذکور (نیروهای فرایند، تنش‌های حرارتی و حضور تراشه) را در محیط فرایند به حداقل رساند. یکی از مهم‌ترین راه کار برای دستیابی به این هدف استفاده از یک سیال

خنک کننده/روان کار مناسب در محیط برش می باشد [۲].

جدول ۲-۳ مشخصات برش مطالعه شده توسط محققین در زمینه مشخصات برش سنگ

مشخصات عملیاتی			طرح برش			محققین
P_s	F_r	D_c	M	S	B	
		•	•			Ertingshausen (۱۹۸۵) [۷۴]
•	•	•	•	•	•	Jenning and Wright (۱۹۸۹) [۲۹]
				•		Konstanty (۱۹۹۱) [۷۵]
				•		Clausen and Wang (۱۹۹۶) [۳۰]
	•	•		•		Xu (۱۹۹۹) [۷۶]
•	•	•				Xu et al (۲۰۰۱) [۷۷]
			•			Konstanty (۲۰۰۲) [۲۱]
•	•	•	•	•		Tonshoff et al (۲۰۰۲) [۲۰]
•	•	•	•			Xipeng Xu et al (۲۰۰۳) [۳]
•	•	•		•		Engels, (۲۰۰۳) [۷۸]
•	•	•			•	Kahraman et al. (۲۰۰۴) [۳۵]
•	•				•	Gunaydin et al. (۲۰۰۴) [۳۶]
•	•	•				Ersoy et al. (۲۰۰۵) [۳۹]
	•	•				Buyuksagis and Goktan (۲۰۰۵) [۳۸]
	•	•	•			Buyuksagis, (۲۰۰۷) [۴۶]
	•	•				Polini and Turchetta, (۲۰۰۷) [۷۹]
	•	•				Atici and Ersoy (۲۰۰۹) [۸۰]
	•	•				Mikaeil et al. (۲۰۱۱) [۴۹]
	•	•				Mikaeil et al. (۲۰۱۱) [۵۰]
	•	•				Mikaeil et al. (۲۰۱۱) [۵۲]
•	•	•				Ataei et al.(۲۰۱۲) [۵۴]
	•	•				Mikaeil et al. (۲۰۱۴) [۶۰]
•	•	•				Yurdakul (۲۰۱۵) [۱۴]
	•		•	•	•	Sun et al. (۲۰۱۶) [۸۱]
•						Akarslan et al. (۲۰۱۷) [۸۲]
•	•	•				Akhyani et al. (۲۰۱۷) [۱۵]
•	•	•	•			Atici and Ersoy (۲۰۱۷) [۸۳]
•	•	•				Akhyani et al.(۲۰۱۸) [۱۷]
•	•					Zhang et al. (۲۰۱۸) [۷۳]
•						Yilmazkaya et al. (۲۰۱۸) [۷۲]
	•		•		•	Tumac and Shaterpour-Mamaghani (۲۰۱۸) [۱۶]
•	•	•				Mikaeil et al. (۲۰۱۸) [۱۸]

مشخصات دیسک (B)، مشخصات سگمنت (S)، نوع و طریقه برش (M)، عمق برش (D_c)، نرخ پیشروی قطعه کار (F_r) و سرعت

محیطی (P_s)

۳-۴-۱-۳ خنک‌کنندگی

به‌طور معمول، آب عامل اصلی خنک‌کنندگی در فرایند برش و بعنوان یک سیال خنک‌کننده ایفای نقش می‌کند و از آنجا که الماس آب‌گریز است، به منظور بهبود انتقال حرارت در سطح الماس از مایع خنک‌کننده، می‌توان از یون منفی عوامل فعال سطحی استفاده کرد. از طرفی یون‌های منیزیم و کلسیم موجود در آب با یون منفی عوامل فعال سطحی واکنش نشان می‌دهند که منجر به افزایش نیروی جاذبه بین تراشه‌ها و خنک‌کننده و کاهش سریع تأثیر مایع خنک‌کننده می‌شود. میزان کشش سطحی خنک‌کننده نیز در فرایند برش مؤثر است زیرا هنگامی که مایع خنک‌کننده دارای یک کشش سطحی کم باشد میزان هدایت حرارتی، نفوذ به پهنه برش به شکل لایه‌های روان‌کننده و سرعت بخشیدن به توسعه ترک خوردگی افزایش می‌یابد که این مهم باعث کاهش درجه حرارت و نیروهای برشی می‌شود بنابراین انتخاب عوامل فعال سطحی و چگالی آن‌ها در سیال خنک‌کننده مهم است [۸۴].

۳-۴-۲-۳ روان‌کنندگی

روان‌کاری خاصیتی از سیال است که قابلیت آن را در کاهش سایش و اصطکاک سطوح در حال تماس را نشان می‌دهد و هر چه خاصیت روان‌کاری سیال بیشتر شود ضریب اصطکاکی کمتر می‌شود. هنگام استفاده از عوامل فعال سطحی مختلف در آزمایش مشخص شده است که یون منفی عوامل فعال سطحی سیال خنک‌کننده/روان‌کار در کاهش اصطکاک بین الماس و کوارتز مؤثر می‌باشد. لایه‌هایی روان‌کننده به شکل نوار بین الماس و کوارتز که جذب شده‌اند، مشاهده شده است این لایه‌های روان‌کننده، اصطکاک بین دانه‌های الماس و قطعه کار را کاهش داده و در نتیجه نیروهای فرایند برش (نیروهای نرمال و مماسی) کاهش می‌یابد [۸۴].

۳-۴-۳ شستشو

عمل شستشو در برش سنگ، تراشه‌ها و گرد و خاک را از سطح سگمنت تمیز می‌کند زیرا تجمع آن‌ها

در سطح سگمنت باعث افزایش درجه حرارت برش و سایش الماس به صورت سریع می‌شوند. روغن‌های معدنی موجود در برخی از خنک‌کننده‌ها نه تنها منجر به جذب گرد و خاک روی سطح تخته سنگ و سگمنت می‌شود، بلکه باعث آلودگی محیط زیست نیز می‌شود [۸۴].

۴-۳-۴ رسوب دوغاب

مواد معدنی اصلی در گرانیته، مانند کوارتز و فلدسپار دارای بار الکتریکی منفی بوده، بنابراین گرد و خاک یکدیگر را دفع کرده و به آرامی ته نشین می‌شوند. هنگامی که چگالی دوغاب بالا است سایش سگمنت افزایش می‌یابد و می‌بایست سیال خنک‌کننده تعویض شود. لازم به ذکر است که به منظور ارزیابی بهتر و دقیق‌تر تأثیر سیال خنک‌کننده/روان‌کار در فرایند برش سعی شده است در فصل بعد مطالب جامع‌تر و کامل‌تری بیان شود [۸۴].

۴-۴-۴ انواع روان‌کارهای سیال خنک‌کننده/روان‌کار

یکی از موارد مورد توجه در عملیات ماشین‌کاری بحث خنک‌کاری و روان‌کاری در حین پرداخت سنگ می‌باشد. از آنجا که اصطکاک حاصله از سایش و تماس قطعه و ابزارآلات و دستگاه باعث ایجاد حرارت در منطقه برش و در نتیجه سایش زودتر سگمنت و در پی آن عدم حصول نتیجه مطلوب است. برای رفع این مشکل از سیالات روان‌کار هنگام برش سنگ استفاده می‌گردد. این سیالات ممکن است پایه آبی یا پایه روغنی و یا پلیمری و... داشته باشند. سیالات یا روان‌سازهای خنک‌کننده در فرایند برش نقش حیاتی ایفاء می‌کنند کارکرد اصلی این سیالات عبارت است از: خنک‌کنندگی (باعث کاهش حرارت در منطقه برش)، روان‌کنندگی (باعث کاهش اصطکاک بین ابزار آلات و سنگ) و تخلیه تراشه‌ها (باعث تخلیه سریع تراشه‌ها از محل برش و حمل آن به چاله‌ی لجن). انواع روان‌کارهایی که در فرایند برش سنگ می‌توان استفاده نمود به دو دسته قابل اختلاط و غیر قابل اختلاط با آب تقسیم می‌شوند. در جدول ۳-۳ دسته بندی ارائه شده توسط تانوشوف-اسکولز نشان داده شده است [۱].

جدول ۳-۳ مشخصات سیال برش مطالعه شده توسط محققین در زمینه فرایند برش سنگ [۱]

نوع روان کننده	خنک کننده
روغن های معدنی غیر قابل اختلاط، روغن های معدنی چرب، روغن های معدنی قابل اختلاط	خنک کننده های غیر قابل اختلاط با آب
با درجه امولسیون پائین، با درجه امولسیون بالا	خنک کننده های امولسیونی
محلول های نمکی، خنک کننده های محلول با ذرات آلی	خنک کننده محلول در آب
	خنک کننده های قابل اختلاط با آب

در ادامه برخی از انواع روغن های مورد استفاده در سیال خنک کننده/روان کار تشریح می شود.

۳-۴-۱ روغن های معدنی غیر قابل اختلاط

روغن های غیر حل شونده معدنی، ترکیبات هیدروکربن های مایع مشتق شده از نفت خام هستند. این روغن ها با روش های مختلف تقطیر و پالایش نفت خام بدست می آیند. ساختار روغن های غیر حل بسیار پیچیده است. در ساختار این روغن ها علاوه بر هیدروکربن های مایع، ناخالصی هایی از ترکیبات سولفور، اکسیژن و نیتروژن نیز وجود دارد. در ساختار روغن های غیر حل شونده معدنی ترکیبات هیدروکربنی زیر وجود دارد [۸۵].

- هیدروکربن های پارافینی یا ایزوپارافینی
- هیدروکربن های سیکلوپارافینی
- هیدروکربن های غیر اشباع شده با ساختار سیکلوآروماتیک

بهترین روغن های معدنی نوع پارافینی است. این نوع روغن ها از نقطه نظر شیمیایی و حرارتی نسبتاً پایدار بوده و شاخص ویسکوزیته بالایی دارند.

۳-۴-۲ روغن های چرب

روغن های چرب طبیعی شامل روغن های گیاهی، حیوانی و روغن ماهی است. ۹۵٪ ساختار این روغن ها از استرها (تری گلیسیریدهای)، اسیدهای چرب و ۵٪ باقی مانده از اسیدهای چرب آزاد تشکیل شده است. روغن های چرب طبیعی تحت بارهای کم، خاصیت روان کاری بالایی دارند. علاوه بر آن

روغن‌های چرب طبیعی از نظر زیست محیطی بی‌خطر بوده و تجزیه پذیر هستند. روغن‌های چرب طبیعی را می‌توان با روغن‌های معدنی ترکیب کرد و به عنوان افزودنی برای بهبود خاصیت ضد اصطکاک روغن‌ها و افزایش خاصیت روان‌کاری آن‌ها به کار برد [۸۵].

۳-۴-۱ روغن‌های حل‌شونده در آب

روغن‌های حل‌شونده در آب (امولسیون‌ها) متداول‌ترین سیالات خنک‌کاری محسوب می‌شوند. امولسیون از حل کردن روغن‌های حل‌شونده معدنی در آب و معمولاً با نسبت ۱/۲۰ بدست می‌آید. امولسیون‌ها کاربرد عمومی داشته و خواص خنک‌کاری آن‌ها بیشتر از روان‌کاری می‌باشد. یکی از معایب روغن‌های حل‌شونده ضعیف بودن پایداری امولسیون است، بدین معنا که روغن‌های حل‌شده در آب تمایل به جدا شدن دارند [۸۵].

۳-۴-۵ افزودنی‌های سیال خنک‌کننده/روان‌کار

افزودنی‌ها نقش مهمی در خواص روغن‌ها دارند. بیشتر افزودنی‌های صنعتی ساختار شیمیایی آلی دارند و با روغن‌های طبیعی (روغن‌های معدنی یا روغن‌های چرب) واکنش می‌دهند. هر افزودنی پس از ترکیب با سیال پایه خواص جدید و کاربرد خاصی به آن می‌دهد. در مواردی افزودنی‌ها خواص لازم و مورد نیاز سیال را افزایش می‌دهند و در مواردی دیگر از تأثیر خواص نامطلوب سیال که ممکن است عملکرد برش را کاهش دهد، جلوگیری می‌کنند. با استفاده از افزودنی‌های الف: بهبود دهنده‌های اصطکاک^۱ (*FM*) ب: افزودنی‌های ضد سایش^۲ (*AW*) خاصیت روان‌کاری سیال افزایش می‌یابد [۸۵]:

۳-۴-۵-۱ بهبود دهنده‌های اصطکاک (*FM*)

بهبود دهنده اصطکاک افزودنی فعالی است با قابلیت ترکندگی بالا، که در روغن پایه حل شده و به محض تماس با سطح ابزار برش جذب آن می‌شود. بهبود دهنده‌های اصطکاک معمولاً از زنجیره‌های

¹ Friction modifier

² Antiwear additives

هیدروکربنی بلند و باریک تشکیل شده‌اند. یک طرف زنجیره دارای ملکول قطبی بوده و مکانیزم جذب از طریق سر قطبی زنجیره‌های هیدروکربنی صورت می‌پذیرد و فیلم‌هایی با خاصیت روان‌کاری جامد روی سطح کار ایجاد می‌کند [۸۵].

۳-۴-۵-۲ افزودنی‌های ضد سایش (AW)

افزودنی‌های ضد سایش مواد فعال تریبوشیمیایی هستند. واکنش‌های تریبوشیمیایی در ناحیه تماس سنگ/قطعه کار رخ می‌دهد. افزودنی‌های ضد سایش لایه‌ای حاصل از واکنش شیمیایی بر روی سطح قطعه کار در حین فرآیند برش تشکیل می‌دهند، به‌طوری که محصولات واکنش به آسانی تغییر شکل داده و برداشته می‌شوند و سایش سنگ کاهش می‌یابد. از این رو افزودنی‌های ضد سایش نیروهای عمودی برش را کاهش داده و فرایند برش را آسان‌تر می‌کنند [۸۵].

۳-۵ تأثیر سیال خنک‌کننده/روان‌کار در فرایند برش

همان‌طوری که در فرایند تشکیل تراشه به آن اشاره شد، پس از تشکیل تراشه ثانویه (ترک‌های جانبی و شکست ترد عامل ایجاد تراشه‌های ثانویه می‌باشند که تراشه‌های ایجاد شده در فرایندهای موفق سنگ‌بری عمدتاً از این نوع می‌باشند)، فرایند برش وارد مرحله‌ی جدید خود می‌شود. در این مرحله، حذف تراشه‌ها و کاهش دما به کمک جریان سیال خنک‌کننده از جمله مهم‌ترین عوامل در افزایش راندمان برش می‌باشد. در طی این فرایند تراشه‌های باقی مانده از مرحله قبل با فشار سیال از محیط خارج شده و دمای محیط برش کاهش می‌یابد. با توجه به بررسی‌های انجام شده مشخص شده است که کاربرد سیال خنک‌کننده/روان‌کار در فرآیند برش، افزایش ریز تراشه‌های اولیه را که ناشی از تنش‌های فشاری لبه ابزار برنده برش است را به همراه دارد. آنچه مسلم است کاربرد سیال خنک‌کننده/روان‌کار موجب برشی نرم‌تر، هموارتر با کیفیت سطح برش بهتر و افزایش بهره‌وری با توجه به موارد زیر می‌شود [۲، ۲۲]:

- کاهش نیروهای فرایند و به دنبال آن کاهش مصرف انرژی و سایش ابزار

- کاهش تمرکز تنش‌های حرارتی و توزیع بهتر آن در محیط (سطح برش) و نوک دانه الماس و به دنبال آن افزایش کیفیت سطح برش و کاهش تغییرات پلاستیک در ابزار و در نتیجه افزایش طول عمر ابزار
 - خروج بهتر و سریع‌تر تراشه‌های تولید شده از محیط و به دنبال آن حذف اصطکاک میان سگمنت و تراشه و هدر رفت انرژی و افزایش طول عمر ابزار
 - محافظت از قطعه‌کار و ماشین در برابر خوردگی
- در فصل بعد به معرفی کامل روان‌کارهای سیال خنک‌کننده/روان‌کار مورد استفاده در فرآیند برش در این تحقیق پرداخته می‌شود.

۳-۶ معیارهای ارزیابی عملکرد برش

برای بهینه‌سازی فرایند برش اهداف مختلفی وجود دارند. یکی از مهم‌ترین اهداف، رسیدن به حداکثر مقدار تولید می‌باشد. 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. به‌طور کلی عملکرد یک فرایند برش را می‌توان با توجه به معیارهایی نظیر نیروهای برش، سایش ابزار و میزان مصرف انرژی مورد ارزیابی قرار داد [۲۲].

۳-۶-۱ 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 قطعه‌کار و سبب برش آن می‌شود. نیروی

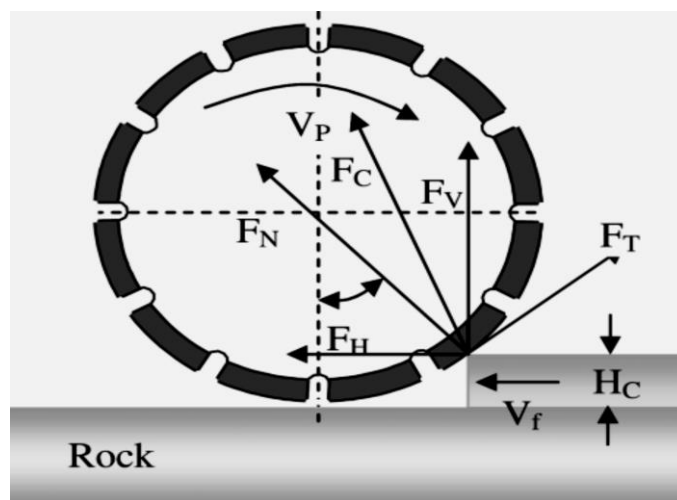
برشی وارده به ابزار الماسی یا یک دانه الماس را می‌توان به دو مؤلفه نیروی مماسی (F_T) و نیروی عمودی (F_N) تجزیه کرد. نیروی مماسی برابر با نیروی برشی در راستای حرکت نسبی دانه الماس و سنگ بوده و نیروی عمودی، نیروی عمود بر راستای حرکت نسبی دانه الماس و سنگ می‌باشد. از میان نیروهای موجود در فرایند برش، نیروهای افقی و عمودی در فرایند برش با دستگاه دینامومتر اندازه‌گیری می‌شوند و سایر نیروها با استفاده از روابط ۱-۳ تا ۳-۳ به صورت تحلیلی قابل محاسبه می‌باشند [۳۴]:

$$F_N = F_V \cos \alpha + F_H \sin \alpha \quad (۱-۳)$$

$$F_T = F_V \sin \alpha + F_H \cos \alpha \quad (۲-۳)$$

$$F_C = \sqrt{(F_N^2 + F_T^2)} \quad (۳-۳)$$

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 ۳-۶ نیروهای مؤثر در فرایند برش را در حالت برش رو به پایین نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶ نیروهای مؤثر در یک فرایند برش رو به پایین [۳۴]

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 قطعه‌کار و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ می‌باشند. این متغیرها به‌طور مستقیم روی نیروهای برشی تأثیر می‌گذارند به‌طوری‌که 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 روان‌کار 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 این‌که 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 کرد [۲۲]:

- در فرایند برش با افزایش مقدار نیروهای برش مقدار نرخ تولید به ازاء واحد سایش سگمنت کاهش می‌یابد.
- 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.
- در نرخ‌های ثابت پیشروی، نیروهای برش با کاهش عمق برش و افزایش سرعت محیطی، کاهش می‌یابند.

۳-۶-۲ 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. به‌طور 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 [۲۲].

رایت و والپر^۱ در سال ۱۹۸۶ 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 الماس به دلیل ضعف نگهداری در ماتریس کنده شود یا ممکن است ابتدا ماتریس تا حد معینی که دانه الماس ارتفاع کاری خود را به‌دست 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 [۸۶].

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 به‌راحتی 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

¹ Wright & Walper

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 [۸۷]:

- ماتریس زودتر از دانه‌های الماس سائیده شود، که در این صورت از ظرفیت برشی الماس به‌طور 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 ماکروسکوپی^۱ نام برده می‌شود. معمولاً برای مطالعه سایش ماتریس از مشاهدات میکروسکوپی و اندازه‌گیری ماکروسکوپی استفاده می‌شود. در واقع با اندازه‌گیری کاهش ارتفاع نسبت به مقدار کارکرد ابزار می‌توان سایش ماکروسکوپی آن را تعیین کرد. این اندازه‌گیری توسط ابزارهای خاص اپتیکی^۲ یا مکانیکی که بدین منظور ساخته شده‌اند، انجام می‌شود. حالت‌های مختلف از سایش الماس توسط بسیاری از محققان مطالعه شده است که شش حالت از آن‌ها بر اساس مشاهدات مداوم یک سگمنت توسط وانگ^۳ و همکاران به شرح زیر تعریف شده و در شکل ۳-۷ نشان داده شده است [۲].

Protrusion: ارتفاع بالا آمدگی دانه الماس برای برش سنگ کافی نیست.

Drop-out: خروج دانه الماس از سطح سگمنت

Partial drop-out: بعضی از دانه‌های الماسی به وسیله نیروی برشی و گرمای برشی به هم فشرده می‌شوند. در حالت عادی این ذرات دارای لبه‌های برنده‌ای هستند.

Flatting: دانه الماس به وسیله ذرات ساینده سخت گرانیات مسطح می‌شوند که سبب افزایش نیروی برشی و دما می‌شود (اصطلاحاً گردش‌دگی).

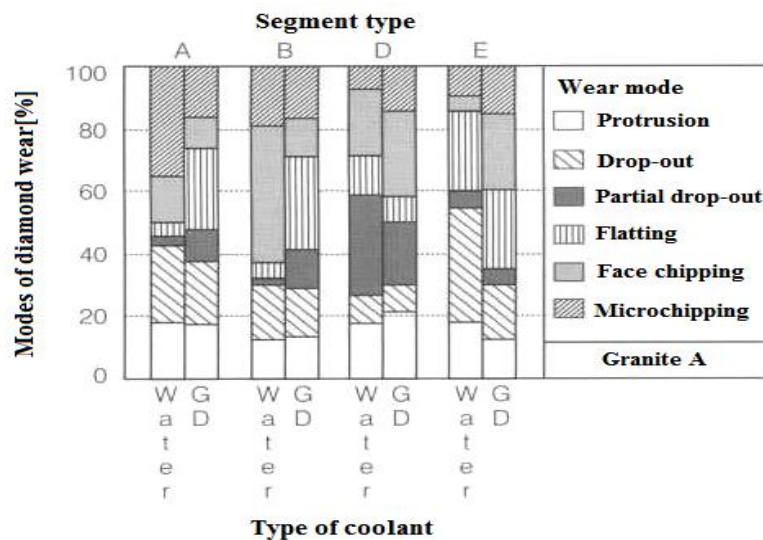
Face chipping: دانه‌های الماس به شدت شکسته شده و دارای سطح زبر می‌باشند. اگر شکستگی سطح، قابل چشم‌پوشی باشد لبه‌های برنده جدید می‌تواند شکل بگیرد.

Micro chipping: این ذرات بیشترین اثر سایش کناره‌ها را دارند و همچنین دارای شکلی مناسب هستند.

¹ Macroscopic

² Optic

³ Ucan



شکل ۳-۷ رابطه بین دو سیال خنک کننده با مدل های سایش الماس [۲].

۳-۶-۳ انرژی ویژه برش

یکی دیگر از معیارهای بررسی و ارزیابی عملکرد برش، انرژی ویژه برش می باشد. این پارامتر با دو پارامتر نیروی برش و مقدار سایش رابطه مستقیم دارد. با افزایش مقادیر نیروهای برشی و نرخ سایش، مقدار انرژی ویژه برش افزایش می یابد. علت این امر را می توان در عدم کارایی صحیح و مناسب سگمنت های الماسی در فرایند برش جستجو کرد. انرژی ویژه برش معرف مقدار انرژی مورد نیاز برای برداشت یا برش واحد حجم سنگ می باشد. انرژی ویژه برش به عنوان یکی از معیارهای مهم 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 ۳-۴ قابل محاسبه می باشد [۳۴]:

$$SE_{cut} = \frac{P_C}{Q_W} = \frac{F_T N}{dW_M V_f} \quad (3-4)$$

در آن:

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 زمینه انرژی ویژه برش نشان داده است که [۲۲]:

- با افزایش مقدار نرخ برش، میزان انرژی ویژه برش تا حد معینی کاهش یافته و در ادامه به یک مقدار ثابت میل می‌کند.

- 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.

- با افزایش پارامترهای مقاومتی و ساینده‌گی سنگ، مقدار انرژی ویژه برش افزایش می‌یابد.

- با افزایش شاخص‌های تردی و شکنندگی سنگ مقدار انرژی ویژه برش افزایش می‌یابد.

- با افزایش نرخ سایش، میزان انرژی ویژه برش افزایش می‌یابد.

به‌طور کلی پایین بودن مقدار انرژی ویژه برش در فرایند برش نشان دهنده راندمان بالای برش می‌باشد.

۳-۷ جمع بندی

در این فصل پس از بررسی فرایند برش و فرایند تشکیل تراشه به عوامل مؤثر در فرایند برش پرداخته شد. این عوامل در چهار بخش اصلی شامل مشخصات قطعه‌کار، مشخصات برش و سیال خنک‌کننده/روان‌کار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نهایتاً معیارهای ارزیابی عملکرد برش نظیر نیروهای فرایند (نرمال و مماسی)، سایش ابزار و میزان مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفت. در فصل بعد به انجام مطالعات آزمایشگاهی و تهیه جامعه آماری مشتمل بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه، سیالات روان‌کار استفاده شده در تحقیق به همراه مشخصات عملیاتی دستگاه برش پرداخته خواهد شد.

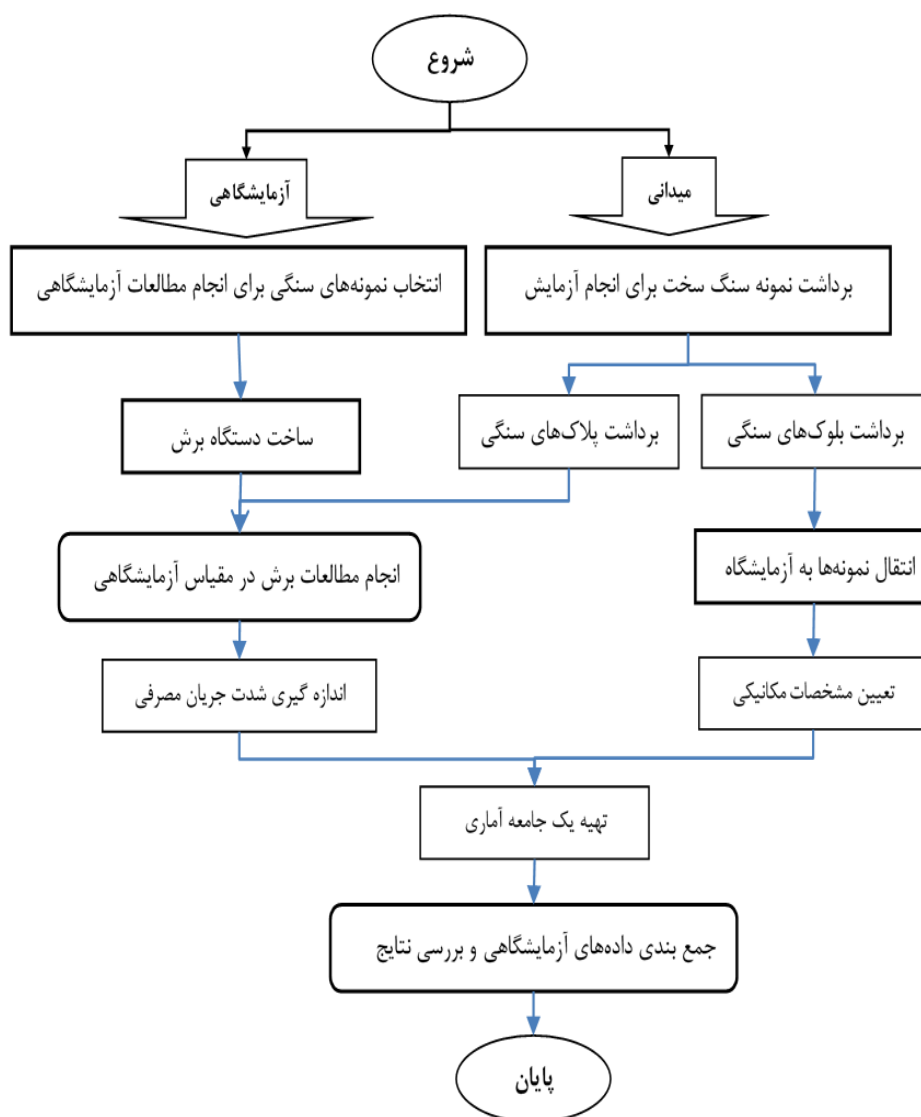
فصل ۴ : مطالعات آزمایشگاهی

۴-۱ مقدمه

انجام مطالعات آزمایشگاهی و میدانی در یک راستا باعث افزایش اعتبار کار انجام شده از نظر اعتبار درونی و بیرونی می‌شود. مطالعات میدانی که در یک شرایط طبیعی و با کمترین میزان دخالت عناصر مصنوعی انجام می‌گیرد، اعتبار بیرونی بیشتری دارد اما از طرفی طرح‌های میدانی معمولاً دارای هزینه‌های بیشتری هستند و به دلیل نبود کنترل بر روی متغیرهای موثر اعتبار درونی کمتری دارند. اما مطالعات آزمایشگاهی در یک شرایط کنترل شده صورت می‌پذیرد و این امر باعث حذف پارامترهای مزاحم می‌شود. از طرفی می‌توان با انجام تغییرات متعدد، تأثیر تغییر متغیرها بر روی مساله را مورد بررسی دقیق قرار داد. در این تحقیق نیز مطالعات در دو بخش میدانی و آزمایشگاهی به منظور بررسی عملکرد فرآیند برش با کمک مطالعات آماری انجام گرفت. در مطالعه میدانی به نحوه انتخاب و تهیه نمونه‌های سنگی مورد مطالعه پرداخته شده، سپس با انتقال به آزمایشگاه و آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمایش‌های برش بر روی آن‌ها صورت می‌پذیرد. مطالعات آزمایشگاهی نیز شامل ساخت مخزن سیال و ساخت دستگاه برش‌دهنده دیسکی در مقیاس آزمایشگاهی با قابلیت ثبت و اندازه‌گیری میزان شدت جریان مصرفی و انتخاب روان‌کار مناسب با مشخصات معین می‌باشد. در شکل ۴-۱ مراحل این تحقیق به صورت فلوچارت آورده شده است.

۴-۲ مطالعات میدانی

انتخاب نمونه‌ها در صنعت سنگ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نمونه انتخاب شده معرف کوپ سنگی، بلوک‌های بریده شده و در مقیاس بزرگتر ذخیره یک معدن است، از این رو انجام مطالعات آزمایشگاهی و دستیابی به نتایج صحیح به نحوه انتخاب و آماده‌سازی نمونه‌ی انتخاب شده بستگی دارد. در تحقیق حاضر، ابتدا مطالعاتی در حوزه برش سنگ و سیالات خنک‌کننده و همچنین بازار سنگ ایران انجام شد و در مرحله بعد با مراجعه به معادن، نمونه‌های مورد نظر تهیه شدند. در جدول ۴-۱ نمونه‌سنگ‌های تهیه شده به همراه نام تجاری آنها آورده شده است.

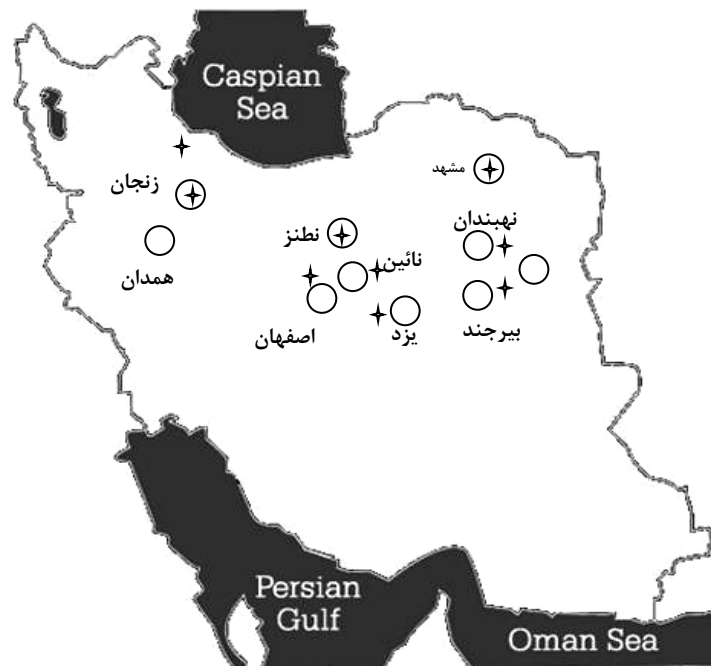


شکل ۴-۱ فلوچارت مراحل انجام مطالعات میدانی و آزمایشگاهی

جدول ۴-۱ نمونه‌های سنگی تهیه شده به همراه نام تجاری آنها

ردیف	نام سنگ	نام تجاری سنگ
A۱	گرانیت	گرانیت خرم‌دره
A۲	سپینیت	گرانیت سبز جنگلی بیرجند
A۳	دیاباز	گرانیت سبز شاداب نائین
A۴	گرانیت	گرانیت سبز کاهویی بیرجند
A۵	گرانیت	گرانیت سفید نطنز
A۶	گرانیت	گرانیت سفید نهبندان
A۷	توف	گرانیت قرمز اصفهان
A۸	بازالت	گرانیت قرمز یزد
A۹	گرانیت	گرانیت مروارید مشهد
A۱۰	دیوریت	گرانیت مشکی چایان

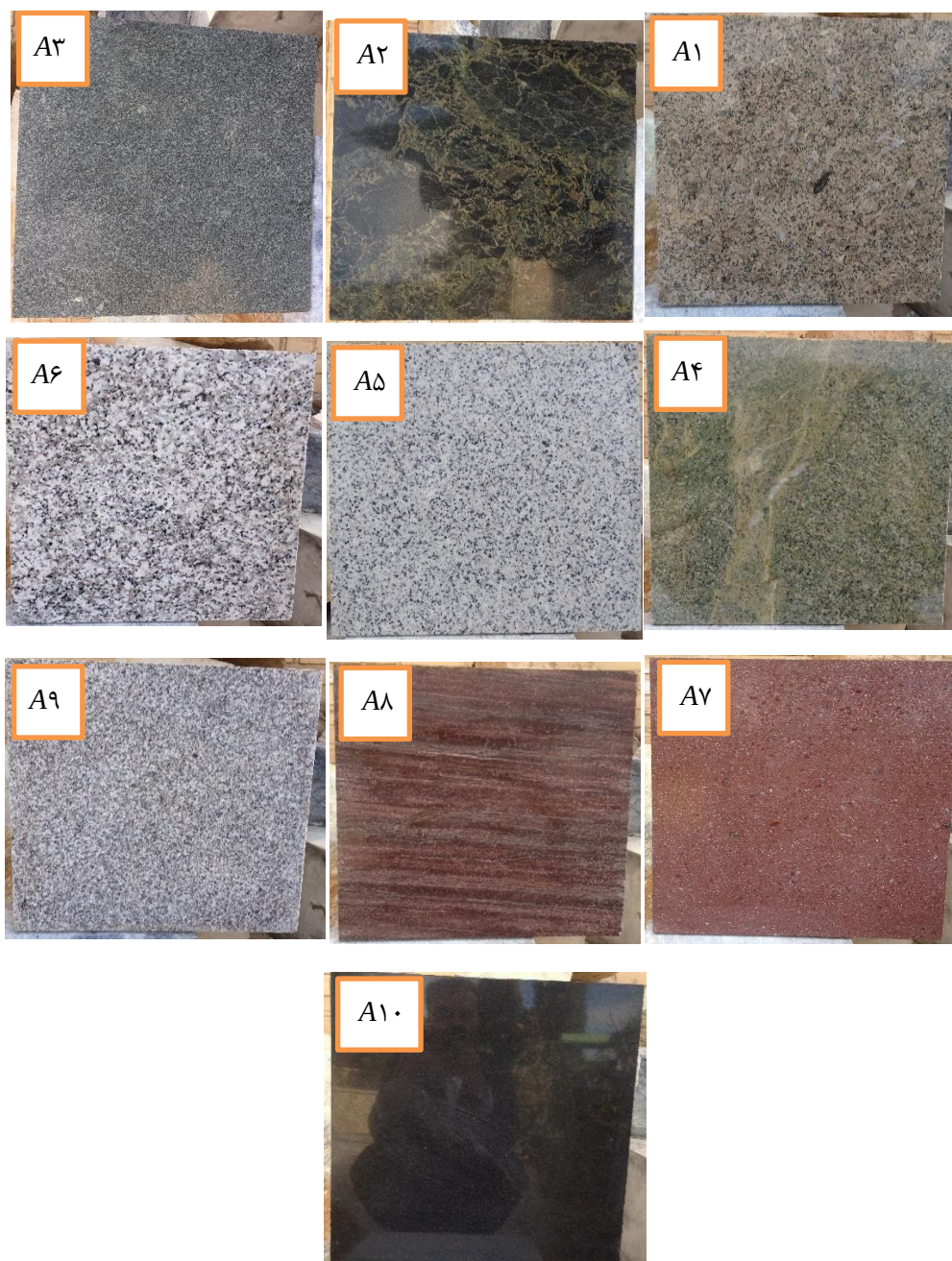
موقعیت مکانی معادن نمونه سنگ‌های تهیه شده در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۴-۳ نیز نمونه‌هایی از سنگ‌های مورد مطالعه که به صورت پلاک در آمده اند قابل مشاهده است.



شکل ۴-۲ موقعیت مکانی معادن نمونه سنگ‌های مورد مطالعه

۴-۳ مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی این تحقیق شامل تهیه نمونه‌های سنگی و انتقال به آزمایشگاه مکانیک سنگ به منظور تهیه نمونه‌های مناسب برای برش توسط دستگاه برش‌دهنده دیسکی با استفاده از سیالات خنک‌کننده و برداشت و ارزیابی نتایج می‌شود. بدین منظور در ادامه نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها توضیح داده می‌شود و سپس به مخزن سیال تهیه شده پرداخته و نحوه ساخت دستگاه برش‌دهنده دیسکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این دستگاه به صورت اختصاصی (مشخصات و ابعاد) در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است.



شکل ۳-۴ نمونه سنگ‌های مورد مطالعه (۱) گرانیت خرم دره (۲) گرانیت سبز جنگلی بیرجند (۳) گرانیت سبز شاداب نائین (۴) گرانیت سبز کاهویی بیرجند (۵) گرانیت سفید نطنز (۶) گرانیت سفید نهبندان (۷) گرانیت قرمز اصفهان (۸) گرانیت قرمز یزد (۹) گرانیت مروارید مشهد (۱۰) گرانیت مشکی چایان

۱-۳-۴ آماده‌سازی نمونه‌ها

در مرحله نخست از مطالعات آزمایشگاهی، نمونه‌های سنگی در ابعاد مشخص برای انجام مطالعات و تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی به آزمایشگاه مکانیک سنگ انتقال داده شدند. سپس نمونه‌های استوانه‌ای با استفاده از یک مغزه‌گیر الماسی از نمونه‌های تهیه شده گرفته شده و به وسیله یک دیسک

برش الماسی سطح آنها صیقل داده شد تا با توجه به استاندارد *ISRM* (استاندارد *NX* با نسبت قطر به طول ۱:۲/۵) برای تعیین مشخصات مکانیکی مورد استفاده قرار گیرند. همچنین نمونه‌هایی به صورت پلاک با ابعاد ۴۰×۴۰ سانتی متر و با ضخامت ۱/۵ تا ۲ سانتی متر از نمونه سنگ‌های مورد مطالعه تهیه و برای انجام آزمایش‌های برش به وسیله دستگاه برش دهنده دیسکی در مقیاس آزمایشگاهی به آزمایشگاه منتقل شدند. در شکل ۴-۴ الف) دستگاه مغزه‌گیر، ب) دستگاه مغزه‌گیر و نمونه سنگ اولیه بعد از مغزه‌گیری و ج) مغزه‌های اولیه گرفته شده نشان داده شده‌اند. همچنین در شکل ۴-۵ الف) چند نمونه از نمونه‌های استوانه‌ای نهایی آماده شده برای آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و ب) نمونه پلاک‌های تهیه شده برای فرآیند برش نشان داده شده است.

۴-۳-۲ تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها

نمونه‌های استوانه‌ای بعد از آماده سازی به منظور تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی مورد آزمایش قرار گرفتند. این نمونه‌ها به منظور تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره با نرخ بارگذاری ۱ مگاپاسکال بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفتند و میانگین مقاومت فشاری تک‌محوره برای نمونه‌های تهیه شده از هر سنگ به عنوان مقاومت فشاری نمونه مورد نظر در نظر گرفته شد. در شکل ۴-۶ الف) دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری مورد استفاده و ب) یک نمونه سنگ شکسته شده تحت بارگذاری تک محوره نشان داده شده است.



ب



الف



ج

شکل ۴-۴ الف) دستگاه مغزه گیر و نمونه سنگ اولیه، ب) نمونه سنگ اولیه بعد از مغزه گیری، ج) مغزه های اولیه

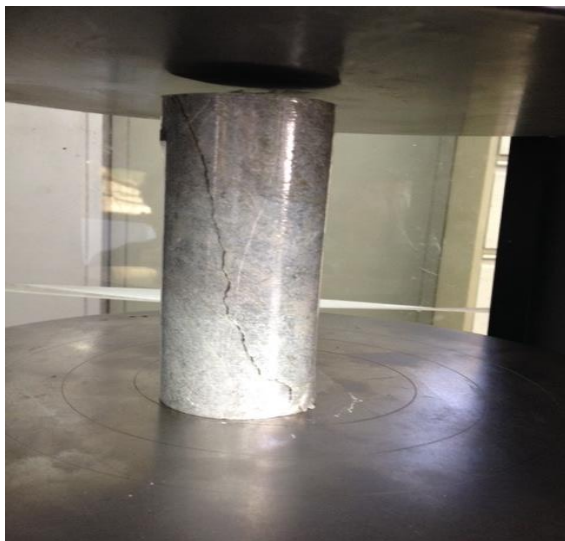


ب



الف

شکل ۵-۴ الف) چند نمونه از نمونه های استوانه ای نهایی آماده شده برای آزمایش مقاومت فشاری تک محوری.
ب) نمونه پلاک های تهیه شده برای انجام فرآیند برش



ب



الف

شکل ۴-۶ الف) دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری مورد استفاده و ب) یک نمونه سنگ شکسته شده تحت بارگذاری تک محوره

شاخص سایش شیمازک برای نمونه‌های سنگی با استفاده از ۴-۱ محاسبه شد [۵۴]:

$$SFa = \frac{EQC \times Gs \times BTS}{100} \quad (۱-۴)$$

در آن:

SFa : شاخص سایش شیمازک بر حسب (N/mm)

EQC : درصد کوارتز معادل

Gs : میانگین اندازه دانه‌ها بر حسب (mm)

BTS : مقاومت کشش برزیلی غیر مستقیم

سختی هر کدام از نمونه‌های سنگی نیز بر اساس سختی کانی‌های موجود در سنگ و براساس رابطه

۴-۲ محاسبه می‌شود [۴۷].

$$Mean\ Hardness = \sum_{i=1}^n M_i \times H_i \quad (۲-۴)$$

در آن:

M_i : درصد کانی موجود در سنگ

H_i : سختی موهس کانی موجود در سنگ

n : تعداد کانی‌های موجود در سنگ

ضریب بافت نمونه‌های سنگی نیز با استفاده از رابطه ۳-۴ محاسبه شد. چهار عامل کرویت دانه‌ها، کشیدگی دانه‌ها، جهت‌داری دانه‌ها و میزان نسبت دانه به ماتریکس بر روی ضریب بافت یک سنگ تأثیر گذار هستند. همچنین عکس نمونه مقاطع نازک تهیه شده برای تعیین ضریب بافت در شکل ۷-۴ نشان داده شده است [۵۷].

$$TC = AW \left[\left(\frac{N_0}{N_0 + N_1} \times \frac{1}{FF_0} \right) + \left(\frac{N_1}{N_0 + N_1} \times AR_1 \times AF_1 \right) \right] \quad (3-4)$$

در آن:

TC : ضریب بافت

AW : نسبت دانه به ماتریکس

N_0 : تعداد دانه‌هایی که نسبت طول به قطر آنها کوچکتر از ۲ است

N_1 : تعداد دانه‌هایی که نسبت طول به قطر آنها بزرگتر از ۲ است

FF_0 : میانگین حسابی فاکتور شکل

AR_1 : میانگین حسابی نسبت طول به قطر دانه‌ها

AF_1 : فاکتور زاویه برای کمی کردن جهت‌داری دانه‌ها



شکل ۷-۴ مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌های سنگی برای تعیین ضریب بافت

همچنین در نهایت، از مدول یانگ مماسی که عبارتست از شیب خط مماس بر منحنی تنش-کرنش محوری در نقطه‌ای دارای ۵۰ درصد مقاومت نهایی نمونه سنگ، در این تحقیق استفاده شد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۴-۲ ارائه شده است.

جدول ۴-۲ مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگی تهیه شده

نوع سنگ	نام تجاری سنگ	UCS (MPa)	Mh	YM (GPa)	TC	SF-a (N/mm)
گرانیت	گرانیت خرم‌دره	۱۳۳	۵/۶۵	۲۸/۹	۳/۶۶	۱۰/۴۲
سینیت	گرانیت سبز جنگلی بیرجند	۲۳۹	۶/۴	۵۲	۳/۵۱	۲۸/۳
دیاباز	گرانیت سبز شاداب نائین	۲۷۹	۶/۱	۵۶	۳/۶۲	۸/۳۵۲
گرانیت	گرانیت سبز کاهویی بیرجند	۱۱۰	۶/۳	۳۷	۳/۵۹	۴/۲۸۴
گرانیت	گرانیت سفید نطنز	۱۵۰	۵/۷	۴۳	۴/۹۵	۴۶/۶۳
گرانیت	گرانیت سفید نهبندان	۱۴۵	۵/۹۵	۳۵/۵	۵/۱۹	۲۴/۲۵
توف	گرانیت قرمز اصفهان	۱۸۲	۶	۴۶/۵	۵/۴۰	۱/۸۷۲
بازالت	گرانیت قرمز یزد	۱۴۲	۶/۱	۴۳/۶	۳/۰۹	۱۴/۲۴
گرانیت	گرانیت مروارید مشهد	۱۲۵	۵/۶	۳۱/۲	۶/۶۰	۸/۵
دیوریت	گرانیت مشکی چایان	۱۷۳	۶/۶	۶/۴۸	۸/۹۴	۶/۷

مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، سختی موهس (Mh)، مدول یانگ (YM)، ضریب بافت (TC) شاخص سایش شیمزاک (SF-a)

۴-۳-۳ مخزن سیال

به منظور تأمین سیال مورد نیاز در فرآیند برش یک مخزن از جنس پلی اتیلن به حجم ۴۰۰ لیتر تهیه شد. این مخزن در کنار دستگاه برش و کاملاً هم‌سطح با آن قرار داده شد. در طی فرآیند برش سنگ، سیال مورد مطالعه با یک لوله از مخزن به دستگاه و دیسک برشی منتقل شده و عمل خنک‌کنندگی و راون‌کاری را تسهیل می‌کند. در شکل ۴-۸ نمایی از این مخزن در کنار دستگاه برش نشان داده شده است.



شکل ۴-۸ مخزن سیال تهیه شده برای فرآیند برش

۴-۳-۴ ساخت دستگاه برش دهنده دیسکی

در این بخش از تحقیق به منظور بررسی تأثیر سیال روان کار بر روی فرآیند برش نمونه سنگ مورد مطالعه، شدت جریان مصرفی دستگاه و میزان مصرف انرژی، دستگاه برش سنگ ساختمانی در مقیاس آزمایشگاهی به منظور پیشبرد اهداف تحقیق اصلاح و به روز رسانی شد. پس از اصلاح دستگاه، پلاک‌های آماده شده از نمونه سنگ مورد مطالعه تحت شرایط عملیاتی مختلف توسط دستگاه برش مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته و برش داده می‌شوند. مکانیزم عملکرد دستگاه برش دهنده ساخته شده در مقیاس آزمایشگاهی از قوانین برش دایروی یا دیسکی پیروی می‌کند و با توجه به نیازمندی‌های تحقیق طراحی و ساخته شده است. بخش‌های مختلف دستگاه به گونه‌ای طراحی و ساخته شده است که امکان تغییر در پارامترهای ماشین‌کاری با تغییرات جزئی در ماشین در طی فرآیند برش میسر می‌شود. اجزاء اصلی دستگاه برش دهنده شامل سه بخش زیر است:

(الف) بستر دستگاه، متشکل از دو ریل راهنما برای حرکت میز متحرک دستگاه

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

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

دستگاه دارای یک میز پیشروی با سطح تخت و تراز می‌باشد که نمونه‌های سنگی (پلاک‌های تهیه

شده) برای عملیات برش با قرار گرفتن روی این صفحه ثابت می‌شوند. میز دستگاه متحرک بوده و توسط یک موتور الکتریکی و مکانیزم چرخ و زنجیر روی ریل دستگاه به صورت رفت و برگشتی حرکت می‌کند. نرخ پیشروی دستگاه با استفاده از سیستم الکتریکی و نصب یک اینورتر^۱ بر روی تابلوی برق دستگاه که امکان کنترل و تنظیم سرعت یکنواخت حرکت میز را فراهم می‌آورد، قابل کنترل است. انتقال نیرو به محور اصلی در دستگاه مورد نظر توسط یک قرقره و تسمه لاستیکی انجام می‌شود. دیسک برشی دستگاه توسط یک مکانیزم پیچ و مهره در بین دو واشر چدنی نصب شده و محکم می‌شود. وظیفه انتقال نیرو از قرقره به دیسک برشی و همچنین بستن دیسک برشی بر عهده بخش گلویی دستگاه است که بر روی بستری فولادی روی شاسی دستگاه ثابت شده است. در شکل ۴-۹ گلویی دستگاه برش ساخته شده نشان داده شده است.



شکل ۴-۹ گلویی دستگاه برش برای بستن دیسک الماس و انتقال نیرو

یاتاقان بندی بستر گلویی به گونه‌ای می‌باشد که امکان یک حرکت چرخشی بسیار محدود تقریباً ۸ درجه را به آن می‌دهد. موتور اصلی دستگاه که از نوع اسپیندل با توان ۷/۵ کیلووات (۱۰ اسب بخار) بوده و در بالای بستر دستگاه نصب شده است و وظیفه تأمین نیروی چرخشی مورد نیاز را به عهده دارد (شکل ۴-۱۰).

یک مکانیزم بر پایه و اساس پیچ و مهره وظیفه پیشروی عمودی (تغییر عمق برش) در دستگاه را برعهده دارد که دقت آن در قابلیت تنظیم و تغییر عمق برش ۰/۱ میلی‌متر می‌باشد. به منظور ایجاد تغییرات در عمق برش، یک چرخ در کنار موتور تعبیه شده است که با چرخاندن آن در جهت مورد نظر می‌توان عمق برش را به اندازه مورد نیاز تغییر داد.

¹ Inventor

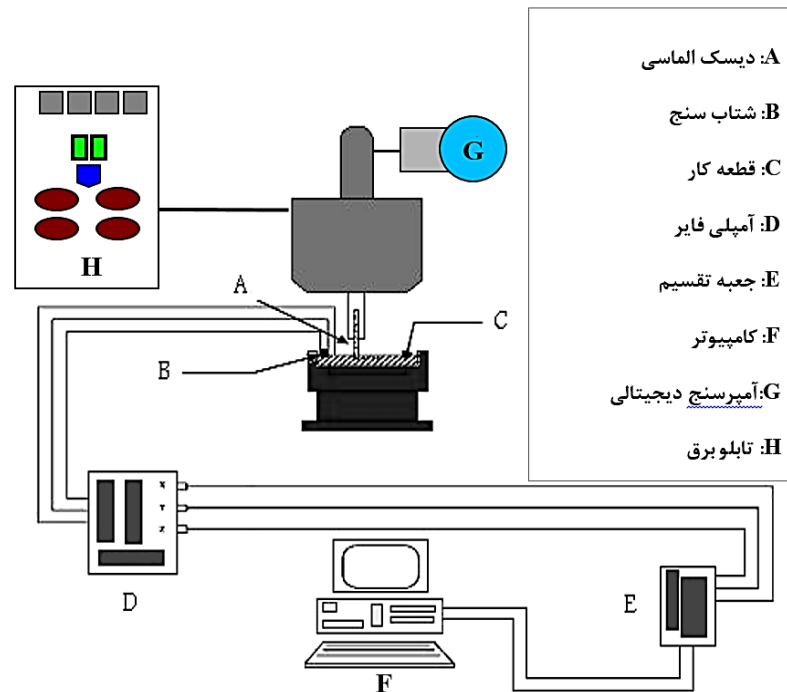


شکل ۴-۱۰ موتور اصلی دستگاه برش سنگ

تغییرات سرعت موتورهای الکتریکی محرک میز (پیشروی افقی) و چرخش دیسک توسط دو واحد اینورتر تعبیه شده در دستگاه صورت می‌پذیرد. این سیستم امکان کنترل سرعت‌های پیشروی و چرخش‌های مختلف دیسک 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. یکی از توانایی‌ها دستگاه، قابلیت کنترل سرعت پیشروی ماشین (رفت و برگشت) در حالت تمام خودکار است. این امکان توسط مدار الکتریکی دستگاه فراهم می‌شود. یک کرنومتر وظیفه اندازه‌گیری سرعت پیشروی دستگاه را بر عهده دارد. این سرعت با توجه به مسافت برش سنجیده می‌شود. دیاگرام طراحی شده برای مطالعات آزمایشگاهی به همراه تجهیزات جانبی استفاده شده در دستگاه، در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است. دستگاه برش دیسکی ساخته شده به منظور مطالعه و بررسی تأثیر سیال خنک‌کننده/روان‌کار بر روی فرآیند برش در شکل ۴-۱۲ قابل مشاهده است.

ارتعاشات دستگاه برش سنگ و ارتعاش‌های به وجود آمده در سیستم، بر روی قطعه کار در حال برش، توسط یک سنسور ارتعاش که بر روی دستگاه نصب می‌گردد ثبت می‌شود. سپس سیگنال‌های خروجی از سنسور شتاب‌سنج برای تبدیل به سیگنال‌های قابل پردازش به دستگاه شتاب‌سنج منتقل

شده و در مرحله آخر به کامپیوتر منتقل شدند تا با استفاده از نرم‌افزارهای پردازش نهایی بر روی آنها انجام شود. در شکل ۴-۱۳ شتاب‌سنج و سنسور ارتعاش استفاده شده نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۱ دیاگرام طراحی شده برای انجام آزمایش های برش

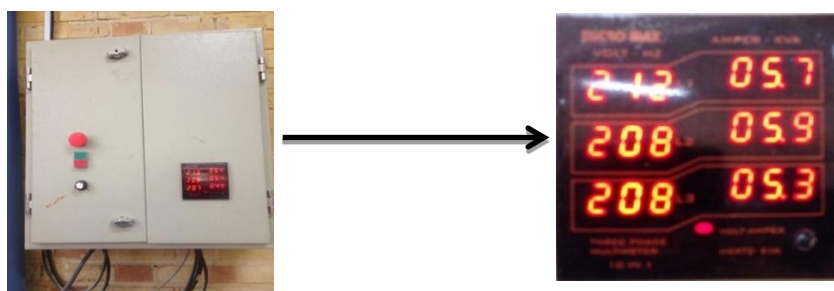
میزان شدت جریان مصرفی در حین فرآیند برش نیز توسط یک آمپرسنج دیجیتال که بر روی تابلو برق دستگاه نصب شد اندازه‌گیری می‌شود. در هر مرحله برش سنگ میزان انرژی مصرفی و توان مصرفی دستگاه از روی آمپرسنج مذکور ثبت خواهد شد. در شکل ۴-۱۴ آمپرسنج دیجیتال نصب شده و تابلو برق دستگاه برش قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱۲ نمایی از دستگاه برش دهنده دیسکی در مقیاس آزمایشگاهی



شکل ۴-۱۳ شتاب سنچ و سنسور ارتعاش برای ثبت ارتعاشات سیستم



شکل ۴-۱۴ آمپرسنچ دیجیتال نصب شده برای ثبت تغییرات شدت جریان مصرفی و تابلو برق دستگاه برش سنگ

۴-۴ روان کارهای سیال مورد استفاده در فرآیند برش

در بخش‌های گذشته به این موضوع اشاره شد که فرآیند برش سنگ یک فرآیند سایشی بوده و با توجه به اندرکنش مکانیکی بین ابزار برشی و سنگ، نیروهایی ایجاد می‌شوند که با خصوصیات الاستیسیته و پلاستیسیته سنگ، اصطکاک بین ابزار (سگمنت‌ها) و سنگ و تراشه‌های تولید شده در طی فرآیند ارتباط دارند. حضور نامطلوب نیروهای فرآیند و تنش‌های حرارتی بوجود آمده به همراه تولید تراشه و تأثیرات نامطلوب آن از نکات مهم و منفی در فرآیند برش هستند.

در اکثر فرایندهای سایشی بخش اعظم هدررفت انرژی مربوط به تنش‌های حرارتی ناشی از اصطکاک میان سگمنت و قطعه کار می‌باشد، که با افزایش سختی، ساینده‌گی و پارامترهای مقاومتی سنگ این موضوع تشدید می‌شود. به منظور افزایش توان تراشه برداری دانه الماس می‌بایست در کنار کاهش نیروهای فرایند، تنش‌های حرارتی تولید شده را به حداقل ممکن رساند تا هم به ارتقاء و کیفیت سطح برش خورده کمک کرد و هم عمر ابزار را بهبود بخشید. این امر زمانی محقق می‌شود که بتوان عوامل نامطلوب مذکور (نیروهای فرایند، تنش‌های حرارتی و حضور تراشه) را در محیط فرایند به حداقل رساند. یکی از مهم‌ترین راه کار برای دست یابی به این هدف استفاده از یک سیال خنک‌کننده/روان کار مناسب در محیط برش می‌باشد تا هم علاوه بر کاهش دمای محیط برش، محیط پاک و عاری از تراشه های سنگی ایجاد کرد.

در این تحقیق به منظور انجام عملیات برش بر روی پلاک‌های تهیه شده از ۱۰ نمونه سنگ، از پنج سیال استفاده شد که عبارتند از:

۴-۴-۱ سیال ۱؛ آب شهری شاهرود

نخستین سیال پیشنهادی برای مطالعه فرایند برش آب شهری شاهرود می‌باشد. آب شهری یا آب چاه معمول‌ترین و پرکاربردترین سیال خنک‌کننده در فرایند برش سنگ می‌باشد. در تحقیق حاضر در گام نخست پس از بررسی عملکرد برش با سیال آب شهری شاهرود تأثیر سایر سیالات مورد مطالعه

پیشنهادی در مقایسه با سیال آب شهری شاهرود در عملکرد برش مورد ارزیابی و پژوهش قرار می‌گیرد.

۴-۴-۲ سیال ۲: روغن آب صابون با نسبت ۱ به ۴۰

دومین سیال مورد مطالعه در این تحقیق، روغن آب صابون با نسبت ۱ به ۴۰ (یک لیتر روغن آب صابون و ۴۰ لیتر آب شهری) می‌باشد. نسل جدید روغن‌های حل شونده در آب که به‌طور عامیانه به آن روغن آب صابون گفته می‌شود در بسیاری از عملیات برش از جمله سنگ زنی جهت روان‌کنندگی و خنک‌کنندگی بکار برده می‌شود. از مزایای آن می‌توان به پایداری امولسیون و عدم دو فاز شدن به دلیل فناوری نانو، عمر مفید، عدم گندیدگی و فساد، ترکیب سریع با آب و تشکیل امولسیون بدون نیاز به هم زدن و اتلاف زمان و صرف انرژی و روان‌کنندگی مطلوب اشاره کرد.

۴-۴-۳ سیال ۳: روغن آب صابون با نسبت ۱ به ۲۰

سومین سیال مورد مطالعه در این تحقیق ترکیب روغن آب صابون با نسبت ۱ به ۲۰ می‌باشد. این سیال با غلظت ترکیبی متفاوت با سیال نوع دوم می‌باشد.

۴-۴-۴ سیال ۴: پودر آب تراش با نسبت ۳۰ به ۱۰

چهارمین سیال مورد مطالعه در این تحقیق، سیال پودر آب تراش^۱ با نسبت ۳۰ به ۱۰ (۳۰ گرم پودر آب تراش با ۱۰ لیتر آب) می‌باشد. پودر آب تراش به عنوان یک سیال خنک‌کننده/روان‌کار دارای خاصیت روان‌کنندگی و خنک‌کنندگی مطلوب برای عملیات برش حاوی چندین نوع مواد ضد خوردگی برای محافظت از تجهیزات با تکنولوژی بالا و مقاومت بالا در مقابل پدیده تشکیل کف و رسوب‌های ناخواسته و قابلیت فیلتراسیون و حل‌شوندگی در آب سخت با هر درجه سختی می‌باشد. این سیال سازگار با محیط زیست می‌باشد.

¹ Boron Nitride Powder

۴-۵ سیال ۵: پودر آب تراش با نسبت نسبت ۱۵ به ۱۰

آخرین سیال مورد مطالعه در این تحقیق، پودر با آب تراش با نسبت ۱۵ به ۱۰ می‌باشد. برای تهیه این سیال ۱۵ گرم از پودر آب تراش با ۱۰ لیتر آب شهری ترکیب شد. مشخصات کلی پنج سیال مورد مطالعه در جدول ۳-۴ قابل مشاهده است.

جدول ۳-۴ مشخصات کلی سیالات مورد مطالعه در این تحقیق			
ردیف	سیال	سختی (PH)	ویسکوزیته (mPa.s)
۱	آب	۷/۶۸	۱/۰۶۹
۲	آب صابون ۱ با نسبت ۴۰/۱	۷/۸۷	۰/۹۸۵۱
۳	آب صابون ۲ با نسبت ۲۰/۱	۸/۲۳	۰/۹۷۵۴
۴	پودر آب تراش با نسبت ۳۰/۱۰	۷/۹۶	۱/۸۳۹
۵	پودر آب تراش با نسبت ۱۵/۱۰	۸/۱	۱/۱۵۸

۴-۵ آزمایش‌های برش

مطالعات تحت شرایط مختلف عملیاتی با پنج نوع سیال روان کار شامل آب شهری شهرستان شاهرود، آب صابون با نسبت ۱ به ۴۰، ۱ به ۲۰، پودر آب تراش با نسبت‌های ۳۰ به ۱۰ و ۱۵ به ۱۰ انجام شد. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه برش در شرایط متفاوت عملیاتی شامل عمق‌های برش (D_c) متفاوت ۰/۵، ۰/۷، ۱ و ۱/۳ سانتی‌متر و نرخ‌های پیشروی (Fr) مختلف پیشروی ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ سانتی‌متر بر دقیقه با سرعت چرخش ثابت ۳۴۰۰ دور بر دقیقه دیسک انجام شد. برای هر سیال ۱۶۰ آزمایش و در مجموع تعداد ۸۰۰ آزمایش برای ۵ سیال انجام گرفت. در تمام موارد بیشترین شدت جریان مصرفی دستگاه در طول فرایند برش توسط یک آمپرسنج دقیق (با توجه به ثبت تغییرات جریان ورودی به دستگاه) اندازه‌گیری و ثبت شد. در ادامه به بررسی تأثیر سیال‌های مورد استفاده در میزان تغییرات شدت جریان مصرفی پرداخته خواهد شد. در شکل ۴-۱۵ نمونه پلاک‌های سنگی بریده شده تحت شرایط عملیاتی مختلف قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱۵ نمونه پلاک‌های برش خورده تحت شرایط عملیاتی مختلف

تغییرات حداکثر شدت جریان مصرفی دستگاه برش در طی فرایند برش نمونه سنگ A2 (سبز جنگلی بیرجند) با توجه به پارامترهای عملیاتی و سیالات مورد مطالعه در جدول ۴-۴ آورده شده است. لازم به ذکر است که نتایج آزمایش‌های برش سنگ برای تمام نمونه سنگ‌های مورد مطالعه در این تحقیق در پیوست الف آورده شده است.

جدول ۴-۴ آزمایش‌های برش در شرایط مختلف عملیاتی با سیالات خنک‌کننده/روان‌کار برای نمونه سنگ A2

(گرانیت سبز جنگلی بیرجند)

ردیف	مشخصات عملیاتی برش			آب شهری	آب صابون ۱ به ۴۰	آب صابون ۱ به ۲۰	آب تراش ۱۰/۳۰	آب تراش ۱۰/۱۵
	Dc (cm)	Fr (cm/min)	Ps (rpm)	حداکثر شدت جریان مصرفی دستگاه (آمپر)				
۱	۰/۵	۹۰	۳۴۰۰	۸/۳	۶/۱	۶/۷	۵/۱	۷/۳
۲	۰/۷	۹۰		۱۰/۲	۷/۴	۷/۳	۵/۶	۶/۷
۳	۱	۹۰		۱۱/۲	۸/۳	۸/۵	۵/۹	۷/۵
۴	۱/۳	۹۰		۱۳/۸	۹/۶	۹/۵	۶/۴	۸/۸
۵	۰/۵	۷۵		۷/۶	۶	۶/۲	۵	۶/۷
۶	۰/۷	۷۵		۹/۱	۶/۹	۷/۱	۵/۵	۶/۱
۷	۱	۷۵		۱۰/۲	۷/۸	۷/۷	۵/۶	۶/۵
۸	۱/۳	۷۵		۱۲/۶	۸/۶	۸/۸	۶/۲	۸/۷
۹	۰/۵	۶۰		۶/۵	۵/۹	۵/۸	۵	۵/۳
۱۰	۰/۷	۶۰		۷/۴	۶/۴	۶/۳	۵/۳	۵/۹
۱۱	۱	۶۰		۷/۸	۷/۲	۶/۸	۵/۶	۶/۱
۱۲	۱/۳	۶۰		۸/۷	۷/۹	۷/۶	۶/۱	۸/۷
۱۳	۰/۵	۴۵		۵/۷	۵/۶	۵/۳	۵	۵/۲
۱۴	۰/۷	۴۵		۶/۵	۶/۲	۶	۵/۲	۵/۸
۱۵	۱	۴۵		۷/۱	۷	۶/۱	۵/۲	۷
۱۶	۱/۳	۴۵		۷/۶	۷/۴	۶/۸	۵/۵	۷/۹

Dc : عمق برش، Fr : نرخ پیشروی، Ps : سرعت چرخش دیسک

۴-۶ جمع‌بندی

در این فصل به مطالعات میدانی و آزمایشگاهی تحقیق پرداخته شد. در مطالعات میدانی با مراجعه به معادن، ۱۰ نمونه سنگ سخت تهیه شد. این نمونه‌ها به منظور تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی به آزمایشگاه مکانیک سنگ منتقل شدند. در آزمایشگاه مکانیک سنگ با تهیه نمونه‌های مشخص بر اساس استاندارد *ISRM* (استاندارد *NX*) جهت تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره، ضریب بافت، مدول یانگ و شاخص سایش شیمازک به عنوان مهمترین مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه سنگ‌ها تعیین شدند. در مرحله بعد به منظور انجام فرآیند برش، دستگاه برش در مقیاس آزمایشگاهی مطابق با استانداردهای برش دایروی ساخته شد. پلاک‌هایی با ابعاد ۴۰ در ۴۰ سانتی‌متر از نمونه سنگ‌های مورد مطالعه تهیه و به آزمایشگاه برش برای انجام عملیات برش انتقال داده شد. عملیات برش تحت شرایط عملیاتی مختلف (۴ نرخ پیشروی و ۴ عمق برش متفاوت) و با استفاده از پنج سیال خنک‌کننده/روان‌کار (آب شهری، آب صابون با نسبت ۱ به ۴۰، آب صابون با نسبت ۱ به ۲۰، پودر آب تراش ۳۰ به ۱۰ و پودر آب تراش ۱۵ به ۱۰) بر روی نمونه پلاک‌های تهیه شده به منظور بررسی میزان مصرف انرژی دستگاه برش انجام شد.

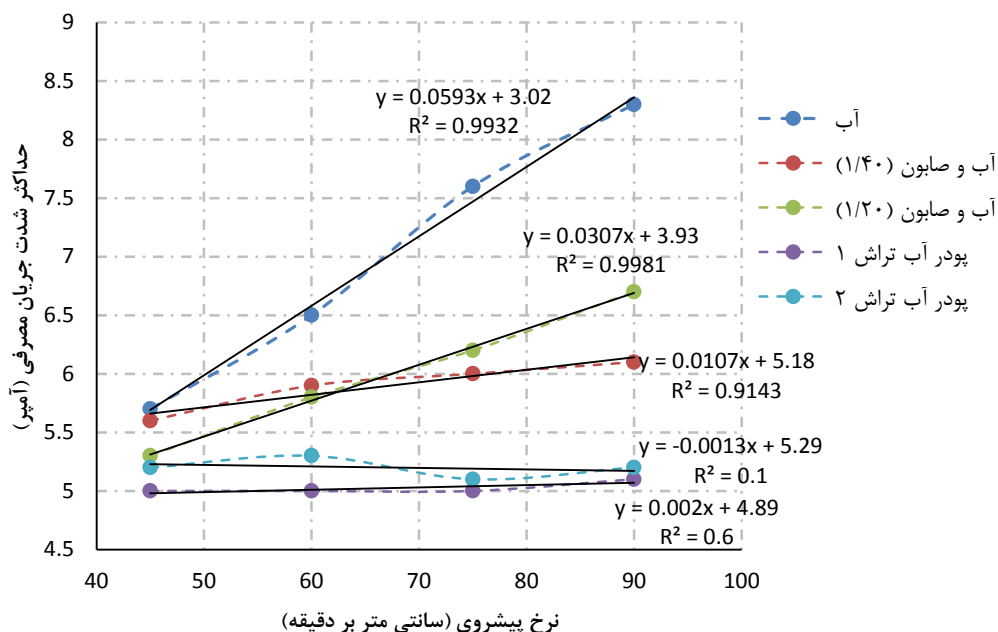
فصل ۵ : تحلیل آماری و مدل سازی

۵-۱ مقدمه

در این فصل سعی خواهد شد تا به بررسی و ارزیابی تاثیر سختی (PH) و ویسکوزیته سیال خنک‌کننده/روان‌کار به همراه مشخصات سنگ و پارامترهای عملیاتی شامل عمق برش و نرخ پیشروی بر میزان مصرف حداکثر انرژی دستگاه‌های برش دهنده دیسکی در طی فرایند برش سنگ‌های سخت با استفاده از مدل‌های آماری پرداخته شود. همان‌طور که در فصل قبل به آن اشاره شد طی فرایند برش سنگ در مجموع از میان آزمایش‌های انجام شده تعداد ۸۰ آزمایش (تعداد ۱۶ آزمایش برای هر سیال خنک‌کننده/روان‌کار) برای هر نمونه سنگ ساختمانی سخت به ثبت رسید.

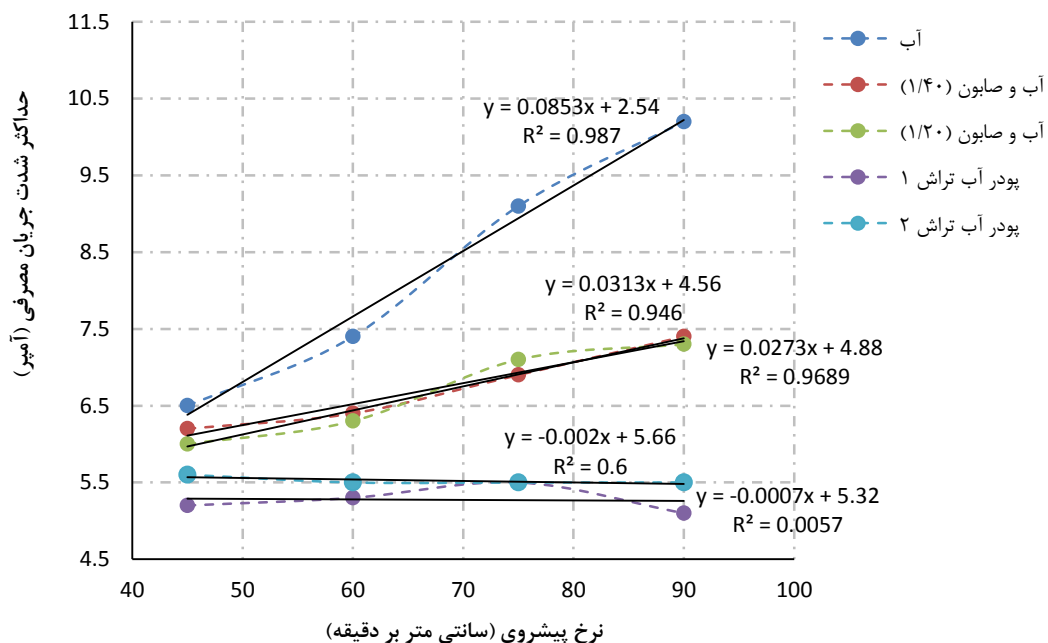
۵-۲ بررسی آماری عملکرد دستگاه برش دهنده دیسکی

به منظور بررسی ارتباط میان پارامترهای عملیاتی (نرخ پیشروی و عمق برش)، مشخصات سیال خنک‌کننده/روان‌کار (سختی و ویسکوزیته) و شدت جریان مصرفی، مطالعات آماری با کمک نرم افزار $SPSS$ و $Excel$ در دو بخش رگرسیون تک متغیره و چند متغیره خطی و غیر خطی انجام شد. نمودارهای ۵-۱ تا ۵-۸ ارتباط میان حداکثر شدت جریان مصرفی دستگاه برش با تغییرات مشخصات عملیاتی برش در شرایط استفاده از پنج سیال مورد مطالعه برای نمونه سنگ گرانیت سبز جنگلی بیرجند را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است نمودارهای مربوط به سایر نمونه سنگ‌های ساختمانی مورد مطالعه در این تحقیق در پیوست ب آورده شده است.

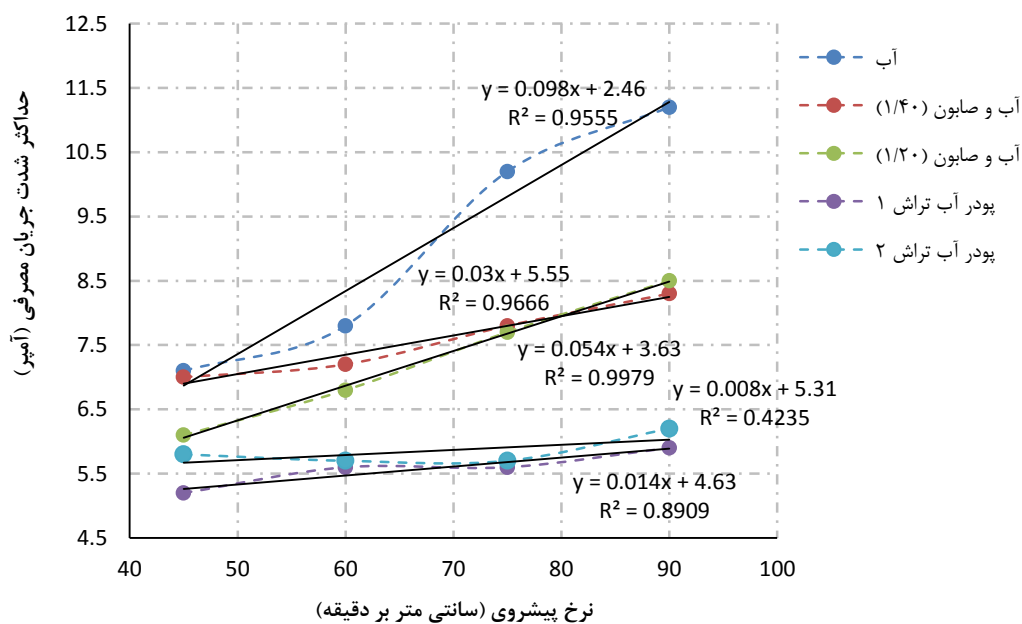


شکل ۵-۱ ارتباط میان حداکثر شدت جریان مصرفی با تغییرات نرخ پیشروی در عمق برش ۰/۵ سانتی متر

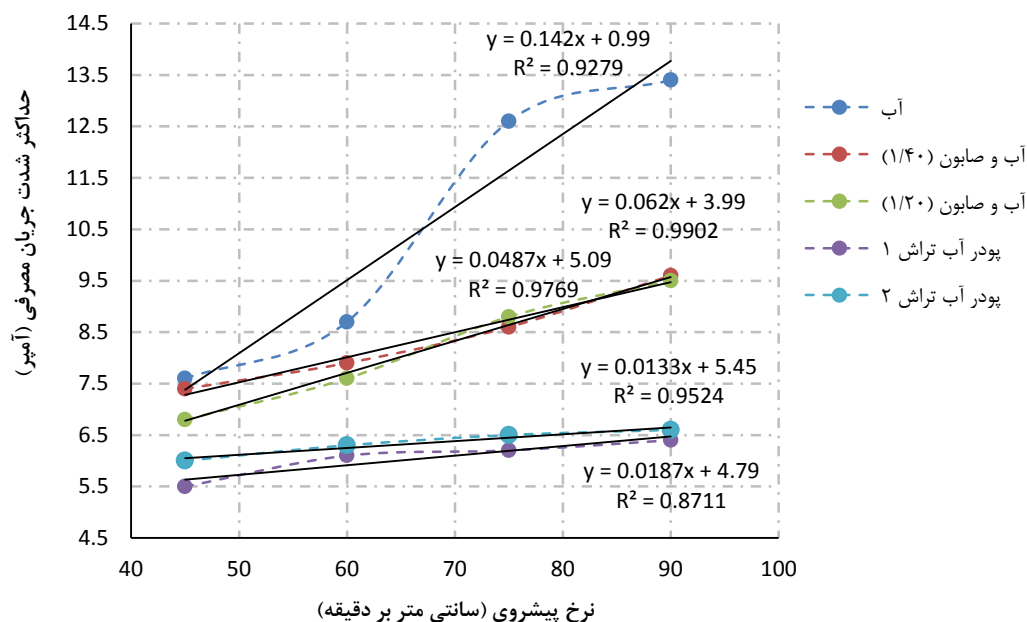
همان طوری که در شکل ۵-۱ مشاهده می شود، شیب تغییرات شدت جریان مصرفی دستگاه برش در عمق برش ۰/۵ سانتی متر، با افزایش نرخ پیشروی از ۴۵ به ۹۰ سانتی متر بر دقیقه برای نمونه سیال آب شهری برابر با ۰/۰۶ می باشد. به عبارت دیگر تغییر میزان شدت جریان مصرفی دستگاه از مقدار ۵/۷ آمپر به مقدار ۸/۳ آمپر به مقدار ۴۶ درصد افزایش پیدا کرده است که این مقدار در مقابل تغییرات شدت جریان سیال پودر آب تراش بسیار بالا می باشد. به طوری که تنها در شرایط استفاده از پودر آب تراش میزان شدت جریان مصرفی دستگاه در شرایط مشابه به مقدار ۰/۲ آمپر (از مقدار ۵ آمپر به ۵/۲ آمپر) افزایش پیدا کرده است که میزان تغییرات تنها ۴ درصد مشاهده شده است. این تغییرات نشان دهنده عملکرد خوب سیال روان کار در کاهش میزان شدت جریان مصرفی دستگاه در نرخ های بالای تولید می باشد. با مشاهده نمودارهای شکل های ۵-۲ تا ۵-۴ نیز می توان به نسبت این روند را مشاهده کرد.



شکل ۵-۲ ارتباط میان حداکثر شدت جریان مصرفی با تغییرات نرخ پیشروی در عمق برش ۰/۷ سانتی متر



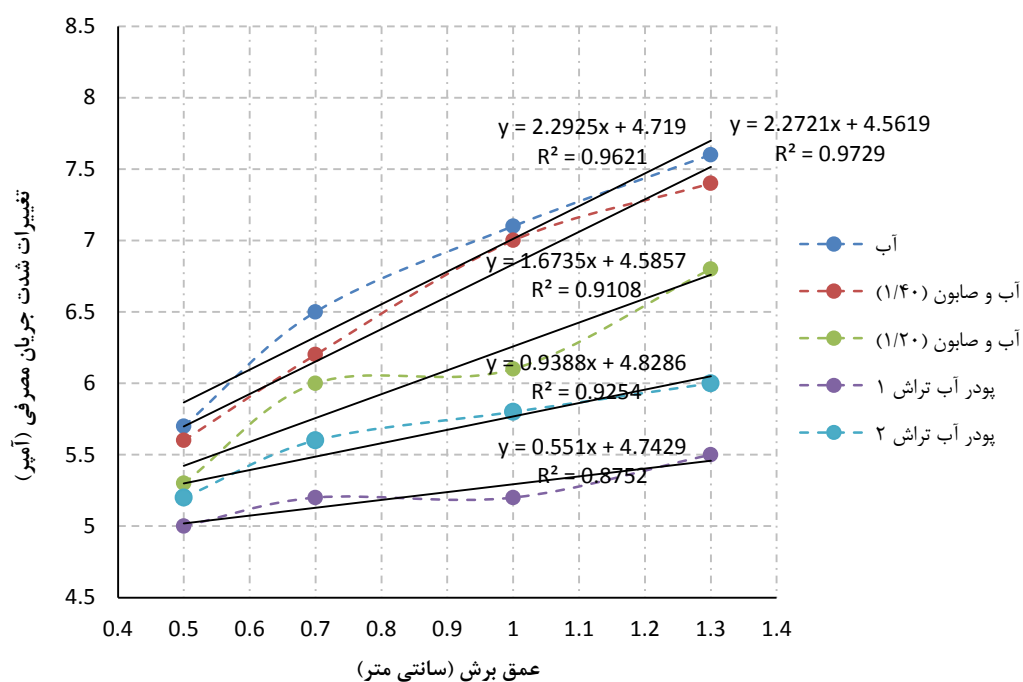
شکل ۵-۳ ارتباط میان حداکثر شدت جریان مصرفی با تغییرات نرخ پیشروی در عمق برش ۱ سانتی متر



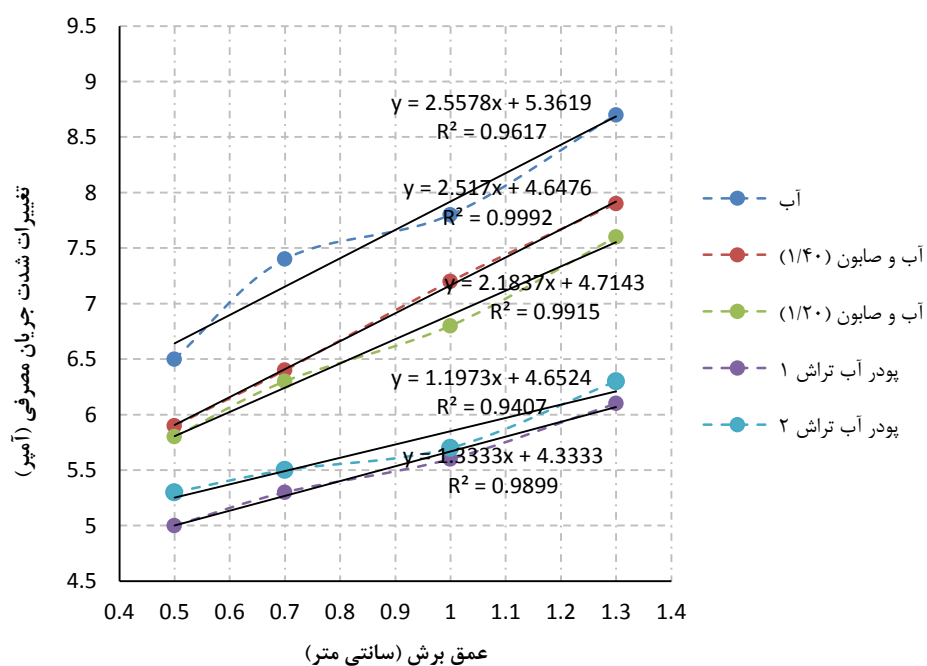
شکل ۴-۵ ارتباط میان حداکثر شدت جریان مصرفی با تغییرات نرخ پیشروی در عمق برش ۱/۳ سانتی متر

مطابق با نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های ۵-۵ تا ۵-۸، می‌توان روند افزایش شدت جریان مصرفی دستگاه برش با افزایش عمق برش در شرایط ثابت از نرخ پیشروی در سیالات مورد مطالعه را مشاهده کرد. همان‌طوری که در بخش قبل به آن اشاره شد شیب تغییرات شدت جریان مصرفی برای سیالات ترکیبی رفته‌رفته روند کاهشی را نسبت به سیال پایه آب شهری دنبال کرده به‌طوری که در سیال پودر آب تراش کمترین میزان تغییرات شدت جریان مصرفی دستگاه برش نسبت تغییرات عمق برش مشاهده می‌شود.

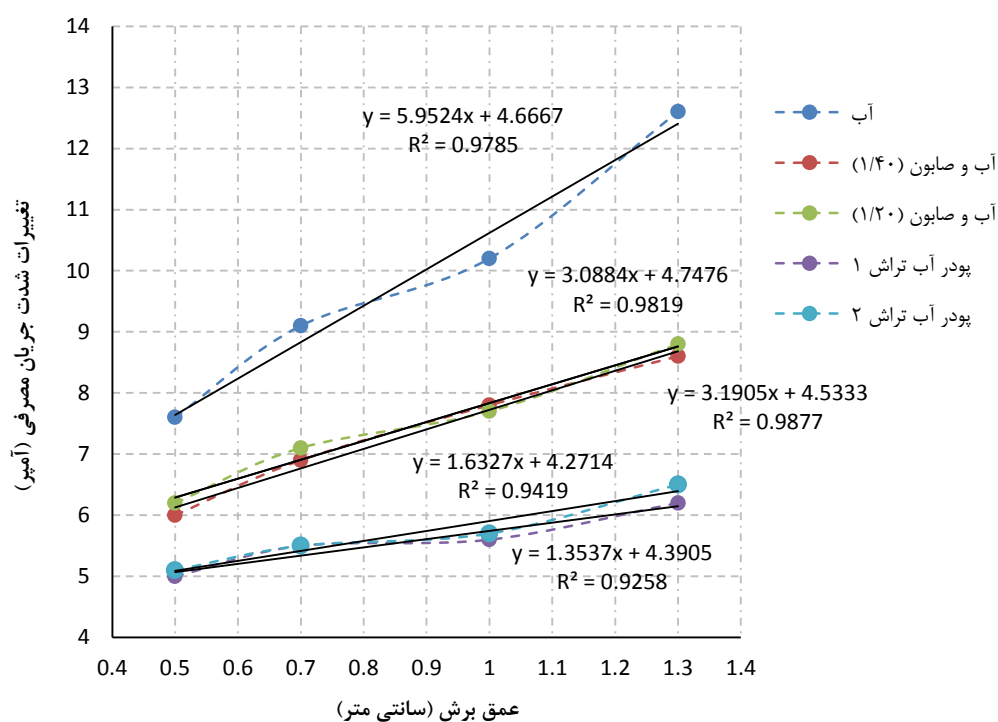
بررسی‌ها نشان می‌دهد در شرایط استفاده از سیال آب شهری، میزان شدت جریان مصرفی دستگاه در نرخ پیشروی ثابت ۴۵ سانتی متر بر دقیقه، با تغییر عمق برش از ۰/۵ سانتی متر به ۱/۳ سانتی متر از مقدار ۵/۷ آمپر به مقدار ۷/۶ آمپر (به مقدار ۳۳ درصد) افزایش پیدا کرده است. این در حالی است که با تغییر سیال (پودر آب تراش ۲) در شرایط مشابه، مقدار شدت جریان مصرفی دستگاه از ۵ آمپر به ۵/۵ آمپر (۱۰ درصد) افزایش پیدا کرده است. این روند تغییرات کاهشی در سایر نمودارها مشهود می‌باشد.



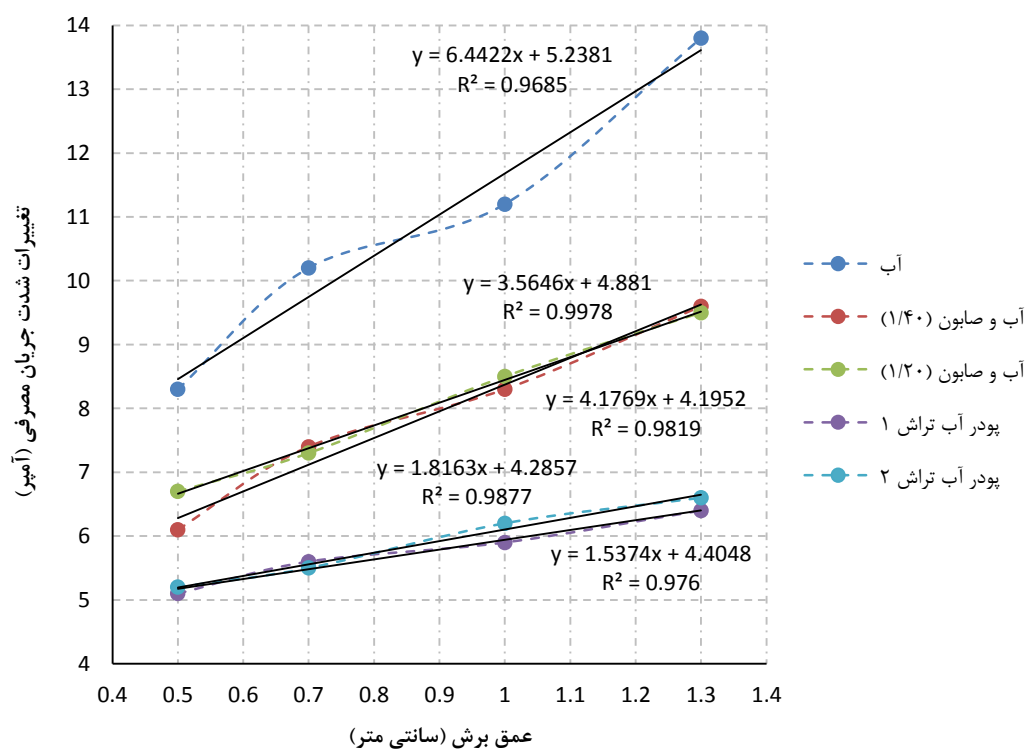
شکل ۵-۵ ارتباط میان حداکثر شدت جریان مصرفی با تغییرات عمق برش در نرخ پیشروی ۴۵ سانتی‌متر بر دقیقه



شکل ۵-۶ ارتباط میان حداکثر شدت جریان مصرفی با تغییرات عمق برش در نرخ پیشروی ۶۰ سانتی‌متر بر دقیقه



شکل ۵-۷ ارتباط میان حداکثر شدت جریان مصرفی با تغییرات عمق برش در نرخ پیشروی ۷۵ سانتی متر بر دقیقه



شکل ۵-۸ ارتباط میان حداکثر شدت جریان مصرفی با تغییرات عمق برش در نرخ پیشروی ۹۰ سانتی متر بر دقیقه

نتایج حاصل از بررسی‌های به عمل آمده از شکل‌های ۵-۱ تا ۵-۸ نشان می‌دهد که در سرعت چرخشی ثابت از دیسک (۳۴۰۰ دور در دقیقه) با افزایش مقدار عمق برش و نرخ پیشروی شدت جریان مصرفی افزایش می‌یابد. شیب تغییرات جریان مصرفی با افزایش نرخ پیشروی و عمق برش افزایش یافته به‌طوری که نسبت این تغییرات در نرخ‌های پیشروی و عمق برش بالا به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

دلیل افزایش مقدار شدت جریان مصرفی دستگاه برش با افزایش مقدار نرخ برش و نرخ پیشروی را می‌توان به علت افزایش نیروهای فرایند شامل نیروهای نرمال و برشی و افزایش تنش‌های حرارتی در لحظه برخورد دانه الماس با سطح سنگ در حین فرایند برش دانست. با افزایش سرعت پیشروی و عمق برش، توان تراشه برداری یا ضخامت براده برداشته شده توسط دانه الماس افزایش می‌یابد. این افزایش علاوه بر افزایش نیروها و تنش‌های فرایند، موجب تشکیل و رشد ترک‌های جانبی و شعاعی در زیر سطح تماس دانه الماس با سنگ می‌شود. تشکیل و گسترش این ترک‌ها در سنگ باعث ایجاد براده‌های ثانویه شده به عبارت دیگر با افزایش عمق نفوذ دانه الماس درصد براده‌های ثانویه افزایش یافته تا جایی که حتی حجم عمده‌ای از براده‌های ایجاد شده از نوع براده‌های ثانویه می‌شوند. در مجموع میزان حداکثر شدت جریان مصرفی دستگاه در حجم ثابتی از تراشه برداشت شده (نرخ برش) کاهش می‌یابد. در اینجا نکته قابل تامل، افزایش میزان استهلاک دیسک و لرزش دستگاه و در نهایت افزایش هزینه‌های ابزاری و تعمیرات و نگهداری می‌باشد. راه حل پیشنهادی برای رفع این مشکل، کاهش نیروهای فرایند و تنش‌های حرارتی در محیط برش می‌باشد که مهمترین وظیفه یک سیال خنک‌کننده/روان‌کار می‌باشد. یک سیال خنک‌کننده/روان‌کار مناسب می‌تواند با کاهش ضریب اصطکاک محیط و خروج به موقع تراشه‌های برداشت شده سهم بسزایی در کاهش نیروهای فرایند و تنش‌های حرارتی داشته باشد. مطابق نمودارهای ۵-۱ تا ۵-۸ با تغییر سیال خنک‌کننده (آب شهری) به سیال خنک‌کننده/روان‌کار، میزان شدت جریان مصرفی دستگاه برش کاهش می‌یابد. به‌طوری که در نرخ‌های برش بالا (بیشترین مقدار عمق برش و نرخ پیشروی) مقدار حداکثر شدت جریان مصرفی

دستگاه برش به‌طور میانگین به میزان ۱۴ درصد کاهش می‌یابد. بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد که در بیشتر موارد استفاده از سیال پودر آب تراش با نسبت ۳۰ به ۱۰ بهترین عملکرد را در میان سایر روان‌کننده دارا می‌باشد.

نتایج حاصل از بررسی سایر نمونه سنگ‌های مورد مطالعه در این تحقیق نیز نشان از افزایش مقدار حداکثر شدت جریان مصرفی دستگاه برش با افزایش پارامترهای عملیاتی برش شامل نرخ پیشروی و عمق برش می‌باشد. همچنین مطابق نتایج به دست آمده از مقایسه سیالات مورد مطالعه، می‌توان به مطلوبیت شرایط استفاده از روان‌کارهای آب صابون و پودر آب تراش در طی فرایند برش اشاره کرد. به‌طوری که در شرایط استفاده از این سیالات می‌توان به‌طور میانگین ۱۵ درصد کاهش را در میزان شدت جریان مصرفی دستگاه برش مشاهده کرد.

در ادامه به منظور بررسی ارتباط میان شدت جریان مصرفی حداکثر دستگاه برش با مشخصات سنگ، سیال خنک‌کننده/روان‌کار و پارامترهای عملیاتی، مطالعات آماری با استفاده از رگرسیون چند متغیره خطی و غیر خطی انجام شد. در این بخش داده‌های آزمایشگاهی مربوط به ۷ نمونه سنگ در مجموع با تعداد ۵۶۰ نمونه تست برای طراحی و ساخت مدل و داده‌های ۳ نمونه سنگ باقی مانده مشتمل بر ۲۴۰ نمونه تست به منظور ارزیابی و آزمون مدل‌ها در نرم افزار SPSS مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج حاصل از بررسی‌های رگرسیون چند متغیره خطی و غیر خطی به ترتیب در جداول ۱-۵ و ۲-۵ نشان داده شدند. رابطه‌های ۱-۵ تا ۵-۵ و ۶-۵ تا ۱۰-۵ به ترتیب مدل‌های خطی و غیر خطی چند متغیره برای پیش بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش سنگ را نشان می‌دهند.

جدول ۵-۱ نتایج حاصل از بررسی‌های رگرسیون چند متغیره خطی برای پیش بینی مدل شدت جریان مصرفی

مدل	ضرایب مدل	ضرایب	خطای معیار	F	F جدول	T	t جدول	R
مدل ۱	عدد ثابت	۱۹/۲۸۸	۱/۴			۱۳/۷۸		
	D_c	۲/۶۰۱	۰/۱۰۸			۲۴/۰۹		
	F_r	۰/۰۲۷	۰/۰۰۲	۲۲۹/۳۳	۳/۷۸	۱۳/۹۱	۲/۵۸	۰/۷۸۹
	PH	-۲/۰۳۲	۰/۱۷۳			۱۱/۷۲		
	Vis	-۰/۲۸۸	۰/۱۰۱			۲/۸۵		
مدل ۲	عدد ثابت	۱۴/۰۶۹	۱/۵۸۳			۸/۸۹		
	D_c	۲/۶۰۱	۰/۱۰۳			۲۵/۲۲		
	F_r	۰/۰۲۷	۰/۰۰۲			۱۴/۵۶		
	PH	-۲/۰۳۲	۰/۱۳۵			-۱۲/۲۸		
	Vis	-۰/۲۸۸	۰/۰۷۹	۱۳۲/۸۱	۲/۸۰۲	-۲/۹۸	۲/۵۸	۰/۸۱۱
	UCS	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱			۰/۳۳		
	Mh	۰/۸۵۶	۰/۱۵۷			۵/۴۵		
	$SF-a$	-۰/۰۰۱	۰/۰۰۲			-۰/۵۰۲		
مدل ۳	YM	۰/۰۰۴	۰/۰۰۹			۰/۴۲		
	عدد ثابت	۱۸/۹۹۷	۱/۳۹۵			۱۳/۶۲		
	D_c	۲/۶۰۱	۰/۱۰۷			۲۴/۲۴۵		
	F_r	۰/۰۲۷	۰/۰۰۲	۱۸۷/۴۵	۳/۳۱۹	۱۴/۰۰۲	۲/۵۸	۰/۷۹۳
	PH	-۲/۰۳۲	۰/۱۷۲			-۱۱/۸		
	Vis	-۰/۲۸۸	۰/۱۰۱			-۲/۸۷		
مدل ۴	UCS	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱			۲/۸۷		
	عدد ثابت	۱۳/۹۲۳	۱/۵۳۶			۹/۰۶		
	D_c	۲/۶۰۱	۰/۱۰۳			۲۵/۲۶		
	F_r	۰/۰۲۷	۰/۰۰۲			۱۴/۵۹		
	PH	-۲/۰۳۲	۰/۱۶۵	۱۷۷/۶۳	۳/۰۱۷	-۱۲/۲۹	۲/۵۸	۰/۸۱۱
	Vis	-۰/۲۸۸	۰/۰۹۷			-۲/۹۹		
	Mh	۰/۸۹۴	۰/۱۲۴			۷/۱۹		
مدل ۵	$SF-a$	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲			-۰/۳۸		
	عدد ثابت	۱۳/۸۳۴	۱/۵۲			۹/۱۲		
	D_c	۲/۶۰۱	۰/۱۰۳			۲۵/۲۸		
	F_r	۰/۰۲۷	۰/۰۰۲	۲۱۳/۵	۳/۳۱۹	۱۴/۶	۲/۵۸	۰/۸۱۱
	PH	-۲/۰۳۲	۰/۱۶۵			-۱۲/۳۱		
	Vis	-۰/۲۸۸	۰/۰۹۶			-۲/۹۹		
	Mh	۰/۹۰۷	۰/۱۲			۷/۵۶		

جدول ۵-۲ نتایج حاصل از بررسی‌های رگرسیون چند متغیره غیر خطی برای پیش بینی مدل شدت جریان مصرفی

مدل	ضرایب مدل	ضرایب	خطای معیار	F	F جدول	T	t جدول	R
مدل ۶	عدد ثابت	۲/۳۶۸	۰/۱۶۲	۲۷۳/۶۱	۳/۷۸	۱۴/۶۶	۲/۵۸	۰/۸۱۵
	D_c	۰/۳۰۹	۰/۰۱۲			۲۶/۶۵		
	F_r	۰/۲۴۳	۰/۰۱۶			۱۵/۰۴		
	PH	-۲/۱۶۳	۰/۱۷۶			-۱۲/۲۸		
	Vis	-۰/۰۵۸	۰/۰۱۸			-۳/۲۳		
مدل ۷	عدد ثابت	۱/۸۶۵	۰/۱۷۴	۱۵۶/۳	۲/۸۰۲	۱۴/۷۸	۲/۵۸	۰/۸۳۳
	D_c	۰/۳۰۹	۰/۰۱۱			۳۲/۶۵		
	F_r	۰/۲۴۳	۰/۰۱۵			۱۸/۲۶		
	PH	-۲/۱۶۳	۰/۱۶۹			-۱۴/۱۶		
	Vis	-۰/۰۵۸	۰/۰۱۷			-۲/۹۹		
	UCS	-۰/۰۲۲	۰/۰۲۶			-۱/۲۳		
	Mh	۰/۶۴۱	۰/۱۱۷			۰/۲۴۷		
	$SF-a$	۰/۰۰۰	۰/۰۰۴			-۰/۵۲۲		
مدل ۸	YM	۰/۰۳۳	۰/۰۴۱	۲۲۱/۱	۳/۳۱۹	۱/۶۹	۲/۵۸	۰/۸۱۶
	عدد ثابت	۲/۳۰۵	۰/۱۶۴			۱۴/۰۶		
	D_c	۰/۳۰۹	۰/۰۱۲			۲۶/۷۳		
	F_r	۰/۲۴۳	۰/۰۱۶			۱۵/۰۸		
	PH	-۲/۱۶۳	۰/۱۷۶			-۱۲/۳۱		
	Vis	-۰/۰۵۸	۰/۰۱۸			-۳/۲۴		
مدل ۹	UCS	۰/۰۲۸	۰/۰۱۴	۲۰۸/۸	۳/۰۱۷	۲/۰۷	۲/۵۸	۰/۸۳۳
	عدد ثابت	۱/۸۴۳	۰/۱۷۲			۱۰/۷۵		
	D_c	۰/۳۰۹	۰/۰۱۱			۲۷/۸۸		
	F_r	۰/۲۴۳	۰/۰۱۵			۱۵/۷۳		
	PH	-۲/۱۶۳	۰/۱۶۸			-۱۲/۸۴		
	Vis	-۰/۰۵۸	۰/۰۱۷			-۳/۳۸		
	Mh	۰/۶۷۵	۰/۰۹۵			۷/۱۴		
مدل ۱۰	$SF-a$	-۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۲۵۰/۹	۳/۳۱۹	-۰/۳۲۸	۲/۵۸	۰/۸۳۳
	عدد ثابت	۱/۸۳۷	۰/۱۷			۱۰/۸		
	D_c	۰/۳۰۹	۰/۰۱۱			۲۷/۹		
	F_r	۰/۲۴۳	۰/۰۱۵			۱۵/۷۵		
	PH	-۲/۱۶۳	۰/۱۶۸			-۱۲/۸۵		
	Vis	-۰/۰۵۸	۰/۰۱۷			-۳/۳۹		
	Mh	۰/۶۸۲	۰/۰۹۲			۷/۳۸		

روابط زیر ارتباط میان شدت جریان مصرفی حداکثر دستگاه برش با مشخصات سنگ، سیال خنک‌کننده/روان‌کار و پارامترهای عملیاتی برش را در شرایط مختلف از کاربرد انواع مختلف سیال روان‌کار را برای مدل‌های ۱ تا ۱۰ نشان می‌دهد.

$$I_{Max} = 2.601D_c + 0.027F_r - 2.032PH - 0.288Vis + 19.28 \quad (۱-۵)$$

$$I_{Max} = 2.601D_c + 0.027F_r - 2.032PH - 0.288Vis + 0.856Mh - 0.001SF - a + 0.004YM + 14.069 \quad (۲-۵)$$

$$I_{Max} = 2.601D_c + 0.027F_r - 2.032PH - 0.288Vis + 0.002UCS + 18.997 \quad (۳-۵)$$

$$I_{Max} = 2.601D_c + 0.027F_r - 2.032PH - 0.288Vis + 0.894Mh + 13.923 \quad (۴-۵)$$

$$I_{Max} = 2.601D_c + 0.027F_r - 2.032PH - 0.288Vis + 0.907Mh + 13.834 \quad (۵-۵)$$

$$I_{Max} = 233.35 \times \frac{D_c^{0.309} \times F_r^{0.243}}{PH^{2.163} \times Vis^{0.058}} \quad (۶-۵)$$

$$I_{Max} = 73.28 \times \frac{D_c^{0.309} \times F_r^{0.243} \times Mh^{0.641} \times YM^{0.033}}{PH^{2.163} \times Vis^{0.058} \times UCS^{0.022}} \quad (۷-۵)$$

$$I_{Max} = 201.84 \times \frac{D_c^{0.309} \times F_r^{0.243} \times UCS^{0.028}}{PH^{2.163} \times Vis^{0.058}} \quad (۸-۵)$$

$$I_{Max} = 69.66 \times \frac{D_c^{0.309} \times F_r^{0.243} \times Mh^{0.675}}{PH^{2.163} \times Vis^{0.058} \times SF - a^{0.001}} \quad (۹-۵)$$

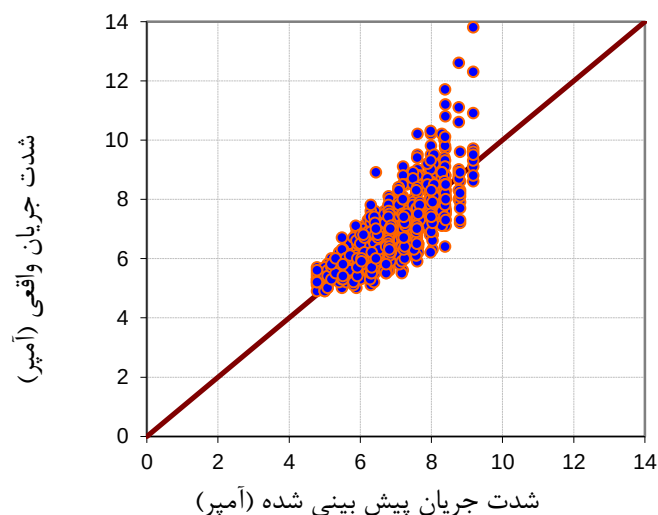
$$I_{Max} = 68.71 \times \frac{D_c^{0.309} \times F_r^{0.243} \times Mh^{0.682}}{PH^{2.163} \times Vis^{0.058}} \quad (۱۰-۵)$$

در مدل‌های ارائه شده I_{Max} معرف شدت جریان مصرفی حداکثر بر حسب آمپر، UCS مقاومت فشاری تک محوری بر حسب مگا پاسکال، MY مدول الاستیسیته بر حسب گیگا پاسکال، SF فاکتور ساینده شیمیازک بر حسب نیوتن بر میلی‌متر و Mh عدد سختی موهس، Dc عمق برش بر حسب

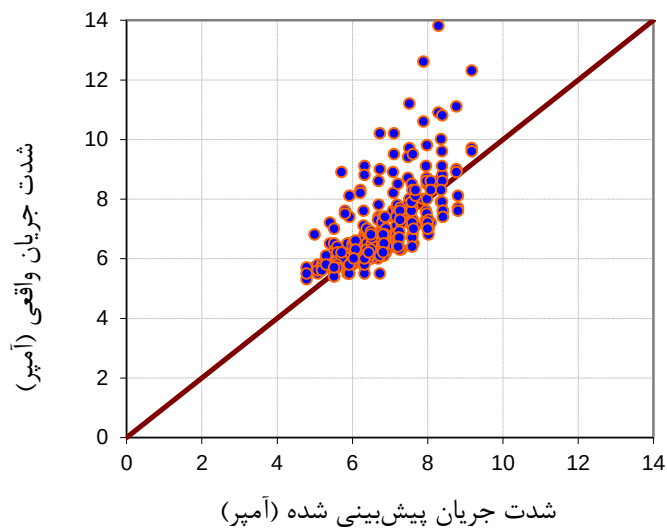
سانتی متر، Fr نرخ پیشروی بر حسب سانتی متر بر دقیقه، PH سختی سیال خنک کننده/روان کار و Vis ویسکوزیته سیال می باشند. در تمامی مدل ها شدت جریان مصرفی حداکثری دستگاه برش دهنده به عنوان پارامتر وابسته و مشخصات سنگ، سیال و پارامترهای عملیاتی دستگاه به عنوان پارامترهای مستقل در نظر گرفته شدند. به منظور بررسی و کنترل معنی داری مدل از آزمون F و برای کنترل معنی داری هر یک از متغیرهای مستقل، از آزمون t استفاده شده است. نتایج حاصل از آزمون های F و t در جداول ۵-۱ و ۵-۲ نشان داده شده است. با توجه به این که مقدار F به دست آمده از جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۹ درصد بزرگتر از مقدار F به دست آمده از تمامی مدل ها می باشد لذا می توان فرضیه صفر را که بیان می کند رابطه خطی بین متغیر وابسته (حداکثر شدت جریان مصرفی دستگاه برش) و متغیرهای مستقل (مشخصات سنگ، سیال و دستگاه) وجود ندارد را رد کرده و نتیجه گیری کرد که حداقل یکی از ضرایب رگرسیون صفر نمی باشد. پس از کنترل معنی داری کلی مدل با آزمون F ، معنی داری هر یک از متغیرهای مستقل با آزمون t کنترل می شود. با استفاده از این آزمون می توان فرضیه صفر بودن هر یک از ضرایب متغیرهای مستقل را آزمایش کرد. از آنجا که تنها در برخی از مدل ها مقدار t حاصل از جدول توزیع مربوطه با سطح اعتماد ۹۹ درصد بزرگتر از مقدار t های به دست آمده از متغیرهای مستقل می باشد لذا می توان فرضیه صفر بودن ضرایب متغیرهای مستقل را رد کرد. بدین ترتیب برخی از مدل ها از جمله مدل های ۵-۲، ۵-۴، ۵-۷، ۵-۸ و ۵-۹ از میان مدل های موجود حذف می شوند. از جمله نکات مهمی که می بایست در تحلیل های آماری به ویژه در ارائه مدل های آماری به آن توجه داشت وجود ضرایب منطقی یا به عبارت دیگر پیروی مدل از طبیعت ذاتی فرایند می باشد. به طوری که همواره شاهد افزایش شدت جریان مصرفی دستگاه در شرایط ثابت عملیاتی با افزایش مشخصات مقاومتی، سختی و ساینده گی سنگ می باشیم. یا در شرایط ثابت استفاده از سیال برای یک قطعه کار ثابت شاهد افزایش شدت جریان مصرفی دستگاه با افزایش پارامترهای عملیاتی می باشیم. لذا مدلی که خلاف این موضوع را ثابت کند از نظر علمی غیر قابل قبول می باشد. با توجه به توضیحات بالا از میان مدل های ارائه شده

مدل‌های ۲-۵، ۴-۵، ۷-۵ و ۹-۵ از ضرایب منطقی برخوردار نمی‌باشند، چرا که در این مدل‌ها با افزایش ساینده سنگ مقدار شدت جریان مصرفی دستگاه برش افزایش می‌یابد. در نهایت پس از بررسی‌های به عمل آمده مدل‌های ۱، ۳، ۵، ۶ و ۱۰ به ترتیب با ضرایب همبستگی ۰/۷۸۹، ۰/۷۹۳، ۰/۸۱۱، ۰/۸۱۵ و ۰/۸۳۳ به عنوان مدل‌های پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش با توجه به مشخصات سیال، قطعه کار و پارامترهای عملیاتی انتخاب شدند.

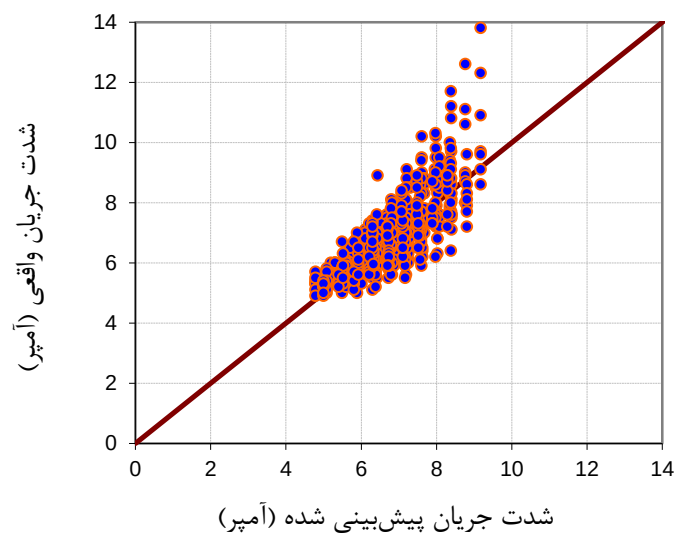
یکی دیگر از روش‌های ارزیابی مدل‌های آماری پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ می‌باشد. هرچه تراکم این نقاط نسبت به خط نیم‌ساز بیشتر باشند مدل از دقت بیشتری برخوردار بوده به عبارت دیگر خطای تخمین مدل پایین می‌باشد. شکل ۹-۵ تا ۲۳-۵ پراکندگی تمامی نقاط، نقاط مورد آزمون و آموزش پیش‌بینی شده شدت جریان مصرفی دستگاه برش را به ترتیب برای مدل‌های ۱-۵، ۳-۵، ۵-۵، ۶-۵ و ۱۰-۵ نسبت به مقادیر واقعی شدت جریان مصرفی دستگاه برش نشان می‌دهد. با توجه به توضیحات ارائه شده می‌توان چنین استنباط کرد که مدل‌ها از دقت مطلوبی در تخمین و پیش‌بینی مقدار شدت جریان مصرفی برخوردار می‌باشند.



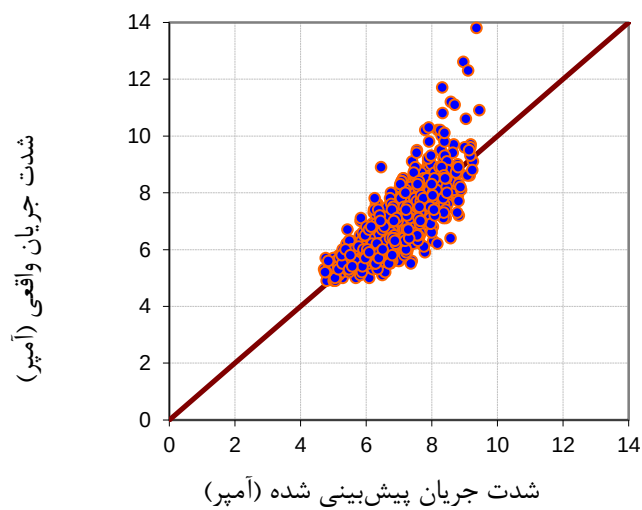
شکل ۹-۵ پراکندگی کل نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۱



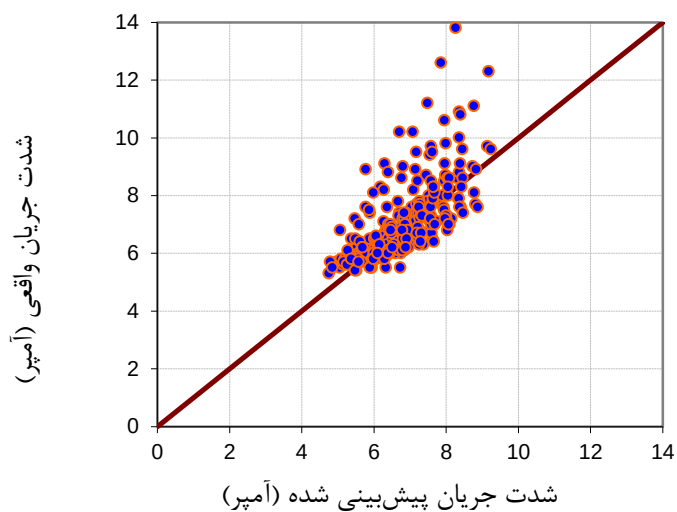
شکل ۵-۱۰ پراکندگی نقاط آزمون پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۱



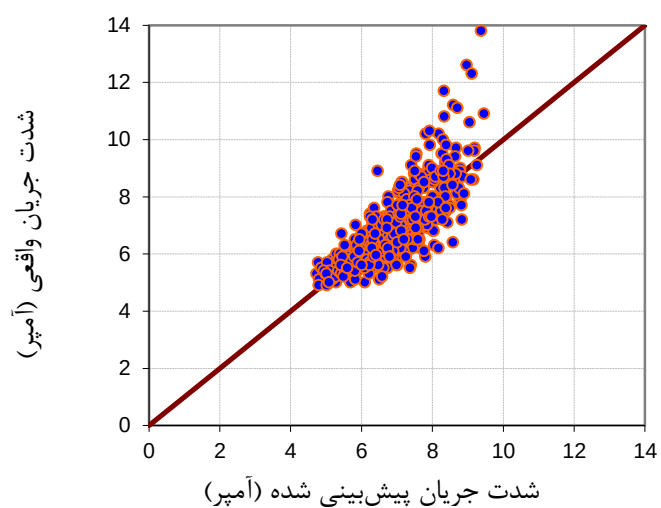
شکل ۵-۱۱ پراکندگی نقاط آموزش پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۱



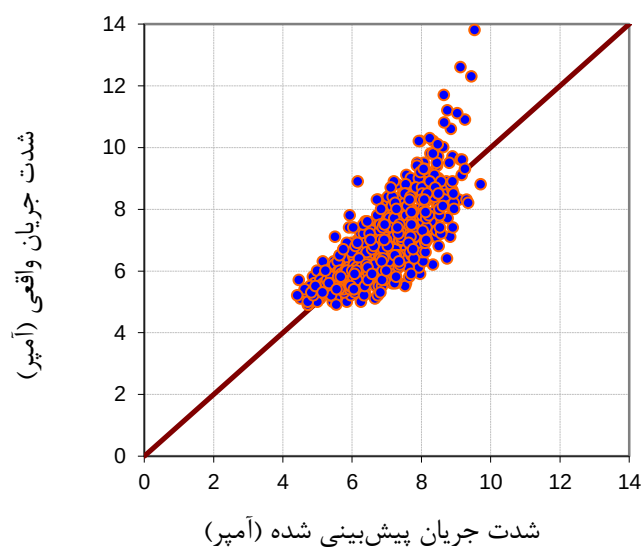
شکل ۵-۱۲ پراکندگی کل نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۳



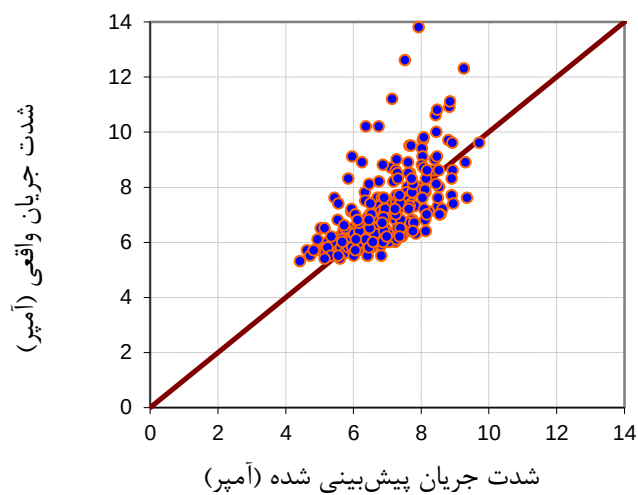
شکل ۵-۱۳ پراکندگی نقاط آزمون پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۳



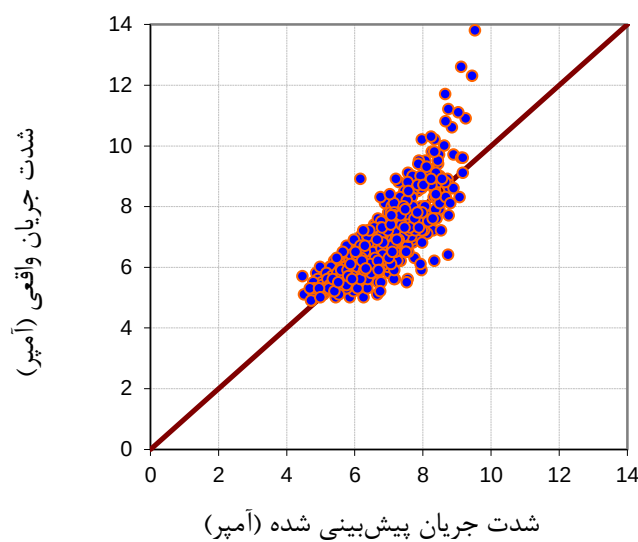
شکل ۵-۱۴ پراکندگی نقاط آموزش پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۳



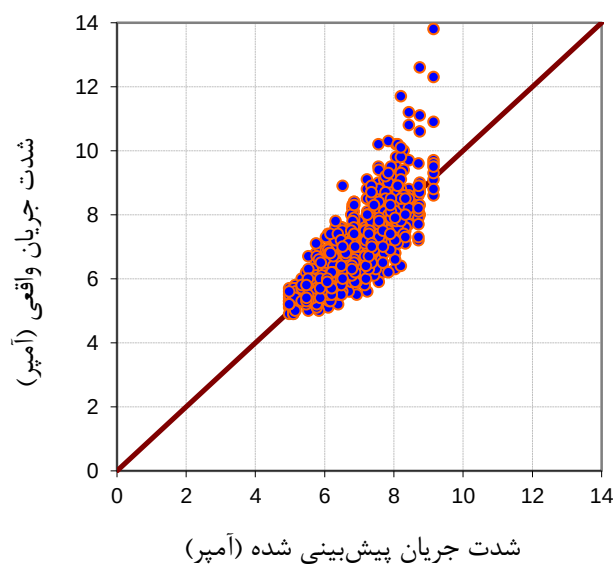
شکل ۵-۱۵ پراکندگی کل نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۵



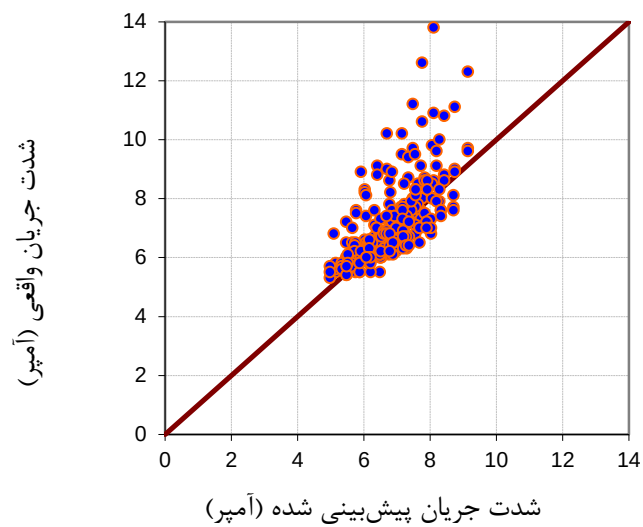
شکل ۵-۱۶ پراکندگی نقاط آزمون پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۵



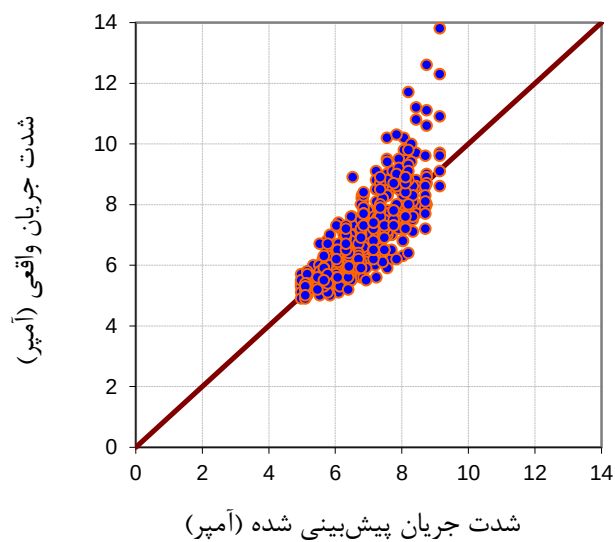
شکل ۵-۱۷ پراکندگی نقاط آموزش پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۵



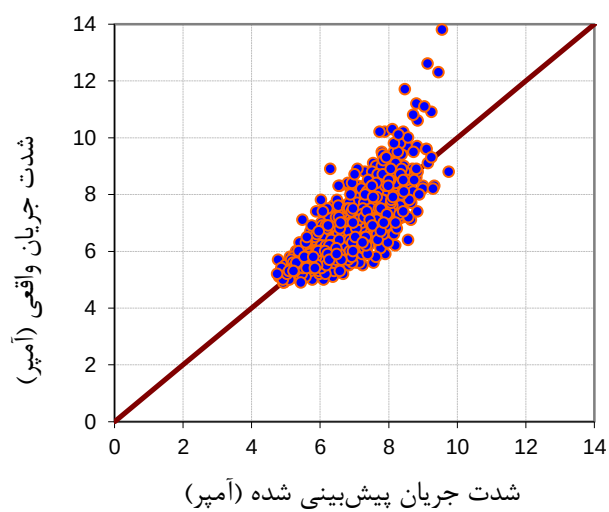
شکل ۵-۱۸ پراکندگی کل نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۶



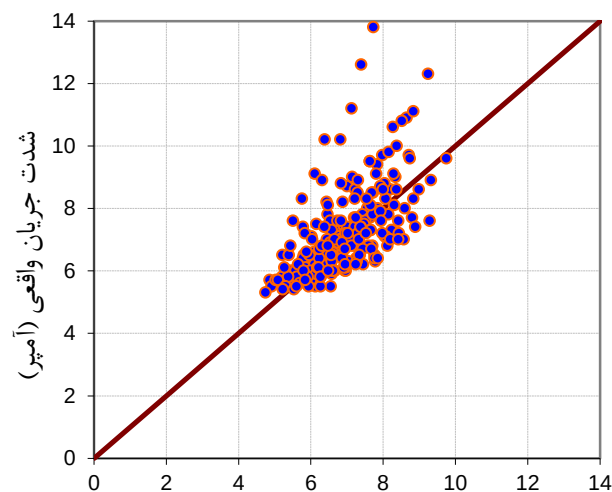
شکل ۵-۱۹ پراکندگی نقاط آزمون پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۶



شکل ۵-۲۰ پراکندگی نقاط آموزش پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۶

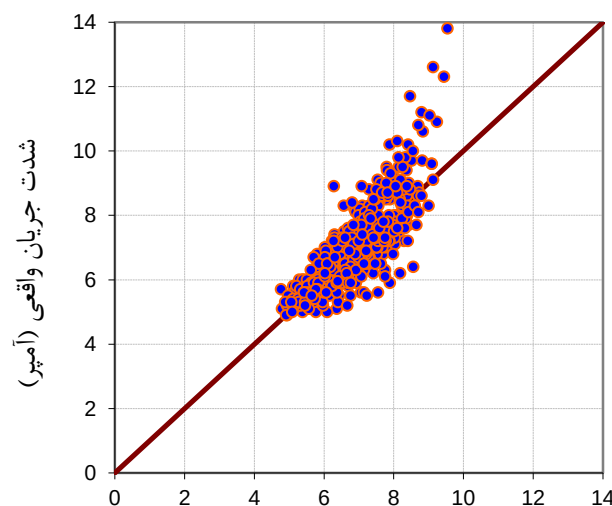


شکل ۵-۲۱ پراکندگی کل نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۱۰



شدت جریان پیش‌بینی شده (آمپر)

شکل ۵-۲۲ پراکندگی نقاط آزمون پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۱۰



شدت جریان پیش‌بینی شده (آمپر)

شکل ۵-۲۳ پراکندگی نقاط آموزش پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز ۱:۱ برای مدل ۱۰

۵-۳ جمع بندی

در این فصل از تحقیق سعی شد با انجام آزمایش‌های دقیق و مطالعات آماری ارتباط میان شدت جریان مصرفی دستگاه برش سنگ با مشخصات سیال خنک‌کننده/روان‌کار (شامل سختی و ویسکوزیته)، مشخصات سنگ (سختی موس، ساینده‌گی شیمازک، مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته) و مشخصات عملیاتی (عمق برش و نرخ پیشروی) مورد بررسی قرار گیرد. پس از جمع آوری داده‌های آزمایشگاهی، مطالعات آماری در سه بخش رگرسیون خطی تک متغیره، رگرسیون چند

متغیره خطی و غیر خطی انجام شد. نتایج حاصل از برازش‌های ساده تک متغیره خطی نشان داد که با افزایش مشخصات عملیاتی شامل عمق برش و نرخ پیشروی مقدار شدت جریان مصرفی دستگاه برش افزایش پیدا می‌کند. به طوری که شیب این تغییرات در شرایط استفاده از سیالات مختلف متفاوت می‌باشد. در حالت کلی می‌توان به عملکرد مناسب سیال خنک‌کننده/روان‌کار پودر آب تراش با نسبت ۳۰ به ۱۰ (۳۰ گرم در ۱۰ لیتر آب) اشاره کرد که در بیشتر موارد استفاده از این سیال به عنوان سیال خنک‌کننده/روان‌کار، میزان شدت جریان مصرفی دستگاه به‌طور چشمگیری کاهش پیدا کرده است. در طی انجام این تحقیق ۱۰ مدل آماری چند متغیره خطی و غیر خطی برای پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش با استفاده از نرم افزار SPSS ارائه شد. تست‌های آماری t و F برای کنترل و معنی داری مدل و ضرایب و همچنین ضرایب منطقی مدل برای بررسی صحت و سقم مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. پس از انجام بررسی‌ها ۵ مدل به عنوان مدل‌های نهایی برای پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش انتخاب شدند. نتایج تست‌های آماری برای ۵ مدل انتخابی با سطح اطمینان ۹۹ درصد و ضریب همبستگی در حدود ۰/۸ نشان دادند که می‌توان با دقت خوبی میزان شدت جریان مصرفی دستگاه برش را در شرایط مختلف استفاده از سیالات مختلف مورد ارزیابی قرار داد. در این میان مدل‌های ۶ و ۱۰ را می‌توان با توجه به ضرایب همبستگی بیشتر نسبت به سایر مدل‌ها، به عنوان مدل‌های برتر جهت پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه با توجه به پارامترهای عملیاتی شامل عمق برش و نرخ پیشروی، مشخصات سیال شامل سختی و ویسکوزیته و سختی سنگ معرفی کرد. نکته قابل تامل در تمامی مدل‌ها، ضرایب منطقی پارامترهای عملیاتی، سختی و ویسکوزیته سیال می‌باشند. به طوری که در تمامی مدل‌ها میزان شدت جریان مصرفی دستگاه برش سنگ دارای ارتباط مستقیم با میزان عمق برش و نرخ پیشروی می‌باشند. در نقطه مقابل تغییرات شدت جریان مصرفی دستگاه برش دارای ارتباط عکس با سختی و ویسکوزیته سیال می‌باشد به طوری که با افزایش میزان روان‌کاری سیال یا به عبارت دیگر افزایش سختی و ویسکوزیته سیال میزان شدت جریان مصرفی دستگاه برش سنگ کاهش می‌یابد.

فصل ۶: مدل سازی با استفاده از شبکه های هوشمند و الگوریتم های فراابتکاری

در فرایند برش، عوامل متعددی بر میزان و نحوه عملکرد ابزارهای برش دهنده و توان مصرفی دستگاه تأثیر گذار می‌باشند. سیال‌های خنک‌کننده و روان‌کار یکی از عوامل مؤثر در فرایند برش می‌باشد که تعیین انتخاب صحیح نوع آن‌ها می‌تواند سبب کاهش مصرف انرژی، بهبود فرایند برش، کیفیت سنگ و افزایش طول عمر ابزار برش شود. با توجه به نتایج حاصله از مطالعات آماری و افزایش دقت مدل‌های پیش‌بینی، در این فصل سعی می‌شود تا از سایر ابزارهای پیش‌بینی برای مدل‌سازی شدت جریان مصرفی دستگاه برش و ارزیابی سیال روان‌کار استفاده شود. هدف از این فصل ارائه یک مدل عصبی مصنوعی پیش‌بینی دقیق و کاربردی جهت بررسی تأثیر سیال خنک‌کننده/روان‌کار بر عملکرد برش با نگرشی ویژه به شدت جریان مصرفی به عنوان یکی از مهمترین فاکتورهای تأثیر گذار بر عملکرد دیسک‌های برش می‌باشد. بدین منظور انجام مطالعات در دو بخش مجزا صورت گرفت که بخش اول شامل طراحی شبکه‌های هوشمند عصبی جهت پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش برای نوع سیال خنک‌کننده/روان‌کار با توجه به فاکتورهای مشخصات سنگ (مقاومت فشاری تک محوره سنگ، فاکتور ساینده‌گی شیمازک، مدول الاستیسیته و سختی موهس) و مشخصات عملیاتی دستگاه برش (عمق برش و نرخ پیشروی) مورد مطالعه در این تحقیق و در بخش دوم طراحی یک شبکه هوشمند عصبی جهت پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش برای مشخصات سیال (سختی و ویسکوزیته) با توجه به تمام فاکتورهای مورد مطالعه در این تحقیق، مشخصات سنگ (مقاومت فشاری تک محوره سنگ، فاکتور ساینده‌گی شیمازک، مدول الاستیسیته و سختی موهس) و مشخصات عملیاتی دستگاه برش (عمق برش و نرخ پیشروی) انجام شد. در این مطالعه ۱۰ نمونه سنگ ساختمانی سخت مورد مطالعه تحت شرایط استفاده از سیالات خنک‌کننده/روان‌کار مورد آزمایش قرار گرفت. در ادامه براساس سه روش پیش‌بینی هوشمند شامل الگوریتم شبکه‌های عصبی پرسپترون^۱،

¹The networks (ANN) perceptron

شبکه‌های هیبریدی ژنتیک - شبکه عصبی پرسپترون^۱ و شبکه‌های عصبی با توابع پایه شعاعی^۲، شبیه‌سازی‌های مورد نظر صورت گرفته و مدل‌های بهینه در پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش در دو بخش توضیح داده شده ارائه گردید.

۲-۶ شبکه عصبی مصنوعی^۳

هوش مصنوعی که از فلسفه هوش بشری نشأت می‌گیرد بدون تردید یکی از مهم‌ترین تکنیک‌های محاسبات در دنیای صنعتی بشمار می‌رود. اگرچه واژه هوش مصنوعی اولین بار در سال ۱۹۵۰ به کار برده شد اما نسبت به سایر علوم در چندین دهه به سرعت رشد چشم‌گیری در حل مسایل صنعتی، عملی و تئوری داشت [۷۱]. یکی از پایه‌های اصلی هوش مصنوعی شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد. طیف گسترده‌ای از محققین بر روی شبکه‌های عصبی مصنوعی تحقیقات متعددی انجام داده‌اند. کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان یکی از کاربردی‌ترین روش‌های محاسبات نرم در سال‌های اخیر در حوزه‌های مهندسی معدن و ژئوتکنیک بسیار پرکاربرد ظاهر شده است [۱۱، ۶۲، ۷۱، ۸۸]. در حوزه هوش محاسباتی تعداد زیادی روش‌های کارآمد، هوشمند و بهینه‌سازی برای حل مسایل پیچیده و دینامیکی نظیر الگوریتم‌های ابتکاری و فرا ابتکاری، منطق فازی، شبکه‌های عصبی مصنوعی وجود دارد که بیشک یکی از مهمترین مولفه‌های هوش محاسباتی شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشند. شبکه‌های عصبی مصنوعی دارای کاربردهای متعددی در حل مسایل پیچیده و عدم قطعیت می‌باشند. در یک مطالعه بر روی عملیات آتشباری ارمغانی و همکاران با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری^۴ به آموزش شبکه‌های عصبی به پیش‌بینی فشار هوای بیش از حد در اثر انفجار پرداختند. بررسی‌ها بر روی ۷۰ عملیات انفجار صورت گرفت و نتایج نشان دهنده کارایی الگوریتم هیبریدی رقابت استعماری به منظور پیش‌بینی فشار بیش از حد نسبت به سایر روش‌های استعماری بود [۸۹]. محمدی و

¹The hybrid genetic algorithm and neural networks (ANN) perceptron

²Radial Basis Function (RBF) Neural Networks

³Multi-Layer Perceptron (MLP) Neural Network

⁴Imperialist competitive algorithm (ICA)

همکاران با استفاده از شبکه‌های عصبی چند لایه پرسپترون یک مدل عصبی به منظور پیش‌بینی نرخ تولید دستگاه برش اره زنجیری ارائه نمودند. آن‌ها با انجام ۳۰ تست آزمایشگاهی بر روی نمونه سنگ‌های استخراج شده از ۵ معدن سنگ ساختمانی در ایران پارامتر اندازه‌گیری شده شامل شاخص سایش لس آنجلس، مقاومت فشاری تک محوری، شاخص چکش اشمیت و درصد کوارتز محتوی را به عنوان داده‌های ورودی مدل و نرخ تولید را به عنوان خروجی مدل در نظر گرفتند. بر اساس نتایج پایانی مدل ارائه شده کارایی بالایی در پیش‌بینی نرخ تولید ماشین از خود نشان داد [۹۰]. یکی از شبکه‌های عصبی مصنوعی که به واسطه کاربرد راحت و جواب‌های دقیق، بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است شبکه‌های عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه می‌باشند. در واقع این شبکه‌ها که شبکه‌های چند لایه پیشرو^۱ می‌باشند به دلیل استفاده جهت آموزش شبکه عصبی از الگوریتم پسرو^۲ استفاده می‌کنند که به این دلیل به الگوریتم‌های چندلایه پرسپترون^۳ (MLP) شناخته می‌شوند. شبکه‌های MLP از سه لایه اصلی شامل لایه ورودی جهت ورودی‌های شبکه که یک لایه می‌باشد، لایه پنهان (این لایه می‌تواند از یک یا چندین لایه تشکیل شده باشد) و یک لایه خروجی که محل معرفی خروجی شبکه می‌باشد. تعداد نرون‌های لایه‌های ورودی و خروجی بر اساس شرایط مسئله و به ترتیب بر اساس تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها تعیین می‌شوند. در مورد لایه‌های پنهان روابط متعددی جهت تعیین تعداد نرون‌های این لایه معرفی شده است. در جدول ۶-۱ تعدادی از روابط شناخته شده جهت تعیین تعداد نرون‌ها در لایه پنهان معرفی شده است.

همچنین لازم به ذکر است که در بخش‌های بعدی به منظور تحلیل داده‌ها، ابتدا مدل‌سازی و سپس ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی بر اساس نتایج سیال پایه (آب) تعیین شده و سپس همین روند برای مدل‌سازی و سپس ساختار بهینه الگوریتم هیبریدی ژنتیک-شبکه عصبی پرسپترون تعیین می‌شود. در پایان مدل طراحی شده بهینه برای سه سیال خنک‌کننده/روان‌کار دیگر مورد استفاده و

¹ Multi-layer feedforward neural network

² Back-propagation

³ Multi Layer Perceptron

نتایج مورد ارزیابی قرار می گیرد.

جدول ۶-۱ روابط شناخته شده جهت تعیین تعداد نرون ها در لایه پنهان

روابط	محققین
$\leq 2 \times N_i + 1$	هچت و نلسون ^۱ [۹۱]
$2N_i$	کاسترا و بوید ^۲ [۹۲]
$(N_i + N_0) / 2$	کانلوپولس و ویکلیسون ^۳ [۹۳]
$\frac{2 + N_0 \times N_i + 0.5N_0 \times (N_0^2 + N_i) - 3}{N_i + N_0}$	ریپلی ^۴ [۹۴]
$2N_i / 3$	پائولا ^۵ [۹۵]
$\sqrt{N_i + N_0}$	ونگ ^۶ [۹۶]
	مسترز ^۷ [۹۷]

N_i : تعداد نرون های ورودی، N_0 : تعداد نرون های خروجی

۳-۶ مدل سازی بر اساس نوع سیال خنک کننده/روان کار با توجه به مشخصات

سنگ و پارامترهای عملیاتی

همان طوری در بخش های قبل به آن اشاره گردید مطالعات در دو بخش مجزا ابتدا بر اساس نوع سیال خنک کننده/روان کار مورد مطالعه و سپس بر اساس مشخصات سیال خنک کننده/روان کار با توجه به فاکتورهای مشخصات سنگ و مشخصات عملیاتی دستگاه برش مورد مطالعه انجام می شود. در بخش نخست مدل های بهینه تنها با توجه به مشخصات سنگ و مشخصات عملیاتی دستگاه برش برای انواع سیالات مورد مطالعه ارائه خواهد شد. در ادامه مدل های عصبی پیش بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش برای انواع مختلف سیالات آورده شده است.

¹ Hecht-Nielsen

² Kaastra and Boyd

³ Kannellopoulas and Wilkinson

⁴ Ripley

⁵ Paola

⁶ Wang

⁷ Masters

۶-۳-۱ مدل سازی با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون

به منظور ایجاد یک شبکه عصبی پرسپترون مناسب برای این شبیه سازی جهت تخمین دقیق از شدت جریان مصرفی دستگاه برش پس از تهیه و تنظیم داده های ورودی و خروجی باید الگوریتم آموزش شبکه عصبی پرسپترون و تعداد نرون های لایه پنهان تعیین شود. در گام اول به دلیل توانایی بالای الگوریتم یادگیری لونبرگ-مارکوارت^۱ از این الگوریتم بر اساس پیشنهاد هاگان و منهاج^۲ در این شبیه سازی استفاده می شود و همچنین در لایه پنهان و لایه خروجی به ترتیب از توابع تانسینگ^۳ و پورلین^۴ به عنوان توابع انتقال استفاده می شود. در مرحله بعدی بر اساس روابط تجربی جدول ۶-۱، تعداد نرون ورودی $N_i=6$ و تعداد نرون خروجی $N_o=1$ ، تعداد نرون های لایه پنهان می تواند در رنج ۲ تا ۱۱ قرار گیرد. سپس از ۱۶۰ تست که بر روی ۱۰ نمونه سنگ ساختمانی گرانیات انجام شد برای انجام مدل سازی استفاده می شود. بر اساس تحقیق ها و پیشنهاد محققین حوزه محاسبات نرم، از میان ۱۶۰ داده آزمایشگاهی، تعداد ۷۵ درصد داده ها (۱۲۰ داده) به عنوان داده آموزش و ۲۵ درصد داده ها (۴۰ داده) به عنوان داده های آزمون در نظر گرفته می شود [۹۸]. داده های ورودی شامل ۴ مشخصه مهم فیزیکی و مکانیکی سنگ (مقاومت فشاری تک محوره سنگ، فاکتور ساینده گی شیمازک، مدول الاستیسیته و سختی موهس) و ۲ مشخصه عملیاتی مهم (نرخ پیشروی قطعه کار و عمق برش) بوده که با شدت جریان مصرفی به عنوان نرون خروجی مورد ارزیابی قرار می گیرند. در این شبیه سازی ها به منظور تعیین کارایی و اثر بخشی الگوریتم از شاخص هایی شامل شاخص (VAF)، ریشه میانگین مربعات خطا^۵ (RMSE) و ضریب همبستگی (R^2) مطابق روابط ۶-۱ تا ۶-۳ استفاده می شود.

¹ Levenberg-Marquardt (LM) learning algorithm

² Hagan and Menhaj

³ tansig

⁴ purelin

⁵ Root Mean Square

$$VAF = \left[1 - \frac{\text{var}(x_i - y_i)}{\text{var}(x_i)} \right] \quad ۱-۶$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad ۲-۶$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - x_{mean})^2] - [\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2]}{[\sum_{i=1}^n (x_i - x_{mean})^2]} \quad ۳-۶$$

که در روابط بالا n نشان دهنده تعداد مجموعه داده‌ها می‌باشد. مقادیر x_i و y_i به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده می‌باشند. این نکته قابل توجه است که برای به‌دست آوردن شاخص عملکرد مناسب باید مقدار VAF به ۱۰۰ درصد، مقادیر $RMSE$ و R^2 به ترتیب به ۰ و ۱ نزدیک باشند. از این‌رو برای ایجاد یک مدل دقیق و مناسب بر اساس تعداد نرون‌های لایه پنهان، ۱۱ مدل شبیه سازی شده و بر اساس شاخص‌های عملکرد شبکه‌های عصبی میزان کارایی هر مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این مدل‌سازی در جدول ۶-۲ نشان داده شده است.

جدول ۶-۲ مقادیر شاخص‌های عملکرد هر مدل بر اساس تعداد نرون‌های متفاوت برای سیال پایه آب

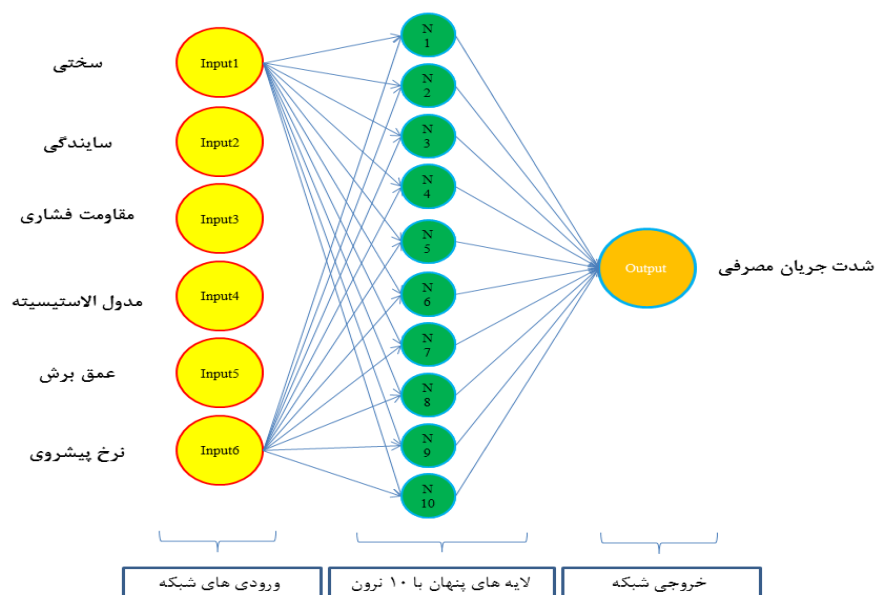
شماره مدل	تعداد نرون‌های لایه پنهان	نتایج شبکه برای R^2		نتایج شبکه برای $RMSE$		نتایج شبکه برای VAF	
		آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون
۱	۲	۰/۹۷	۰/۸۷	۰/۱	۰/۱۲	۹۰/۷۱	۸۳/۵۲
۲	۳	۰/۸۵	۰/۷۹	۰/۱۳	۰/۱۵	۸۲/۱۱	۷۲/۱۹
۳	۴	۰/۹۶	۰/۹۱	۰/۰۶	۰/۱	۹۶/۴۵	۹۱/۲۸
۴	۵	۰/۹۷	۰/۸۴	۰/۰۵	۰/۱۵	۹۷/۳۹	۸۴/۹۱
۵	۶	۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۰۶	۰/۰۹	۹۶/۴۸	۹۲/۲۷
۶	۷	۰/۹۸	۰/۸۰	۰/۰۴	۰/۱۵	۹۸/۷۶	۷۹/۸۳
۷	۸	۰/۹۹۱	۰/۷۳	۰/۰۳	۰/۱۹	۹۹	۶۶/۷
۸	۹	۰/۹۹۳	۰/۸۸	۰/۰۳	۰/۳۵	۹۹/۳۵	۷۴/۷۹
۹	۱۰	۰/۹۹۷	۰/۹۳	۰/۰۱	۰/۰۹	۹۹/۷۵	۹۲/۷۷
۱۰	۱۱	۰/۹۹۲	۰/۷۳	۰/۰۲	۰/۱۹	۹۹/۶۳	۸۳/۵
۱۱	۱۲	۰/۹۸	۰/۷۳	۰/۰۲	۰/۱۹	۹۸/۸۷	۶۹/۷۸

در گام آخر برای تعیین مناسب‌ترین مدل بر اساس یک سیستم رتبه‌بندی ساده با توجه به شاخص‌های مذکور شامل R^2 ، $RMSE$ و VAF ، ۱۱ مدل شبیه سازی شده رتبه‌بندی شدند. مطابق

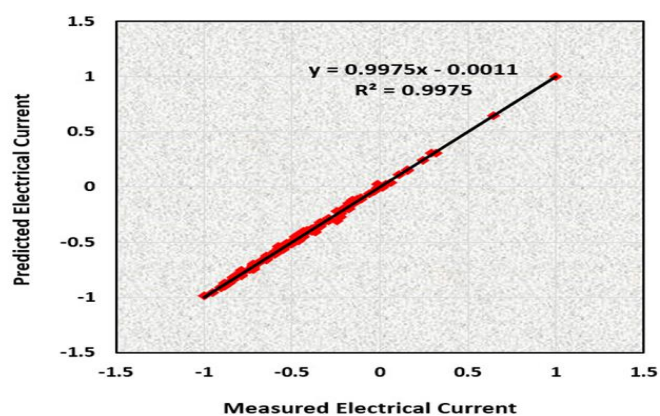
نتایج به دست آمده از جدول ۳-۶، مدل شماره ۹ دارای بالاترین رتبه در میان مدل‌های شبیه‌سازی شده جهت پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای دستگاه برش در نظر گرفته شد. مطابق نتایج مندرج در جدول ۲-۶ شاخص‌های عملکرد این مدل به ترتیب برای مقادیر آموزشی VAF و $RMSE$ و R^2 برابر است با ۹۹/۷۵، ۰/۰۱ و ۰/۹۹۷، همچنین مقادیر آزمون VAF و $RMSE$ و R^2 به ترتیب برابر با ۹۲/۷۷، ۰/۰۹ و ۰/۹۳ می‌باشند.

جدول ۳-۶ رتبه بندی مدل شبکه عصبی مصنوعی برای سیال پایه آب								
شماره مدل	تعداد نرون‌های لایه پنهان	نتایج شبکه برای R^2		نتایج شبکه برای $RMSE$		نتایج شبکه برای VAF		رتبه‌بندی کلی
		آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	
۱	۲	۶	۷	۵	۹	۲	۷	۳۶
۲	۳	۴	۴	۴	۸	۱	۳	۲۴
۳	۴	۵	۹	۶	۱۰	۳	۹	۴۲
۴	۵	۶	۶	۷	۸	۵	۸	۴۰
۵	۶	۵	۱۰	۶	۱۱	۴	۱۰	۴۶
۶	۷	۷	۵	۸	۸	۶	۵	۳۹
۷	۸	۸	۳	۹	۷	۸	۱	۳۶
۸	۹	۱۰	۸	۹	۶	۹	۴	۴۶
۹	۱۰	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۶۶
۱۰	۱۱	۹	۳	۱۰	۷	۱۰	۶	۴۵
۱۱	۱۲	۷	۳	۱۰	۷	۷	۲	۳۶

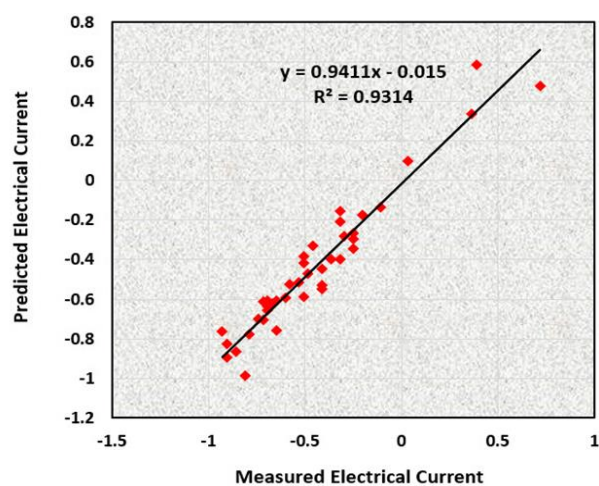
در جدول ۳-۶ برای رتبه بندی ابتدا تعداد مدل‌ها را مبنا قرار داده و سپس از بالاترین امتیاز شروع کرده و تا پایین ترین امتیاز به مدل‌ها اختصاص می‌دهیم. به عنوان مثال در جدول بالا ۱۱ مدل وجود دارد بنابراین امتیازها از ۱۱ شروع می‌شود و به بالاترین مقادیر در هر یک از شاخص‌های عملکرد اختصاص می‌دهیم. بنابراین مدل شماره ۹ یک مدل بهینه به منظور پیش‌بینی بیشترین شدت جریان مصرفی برای خنک‌کننده آب به صورت $6 \times 10 \times 1$ می‌باشد که شامل ۶ نرون ورودی، ۱۰ نرون در لایه پنهان و ۱ نرون در لایه خروجی می‌باشد. اشکال ۱-۶، ۲-۶ و ۳-۶ به ترتیب معماری شبکه و مقدار ضریب همبستگی را برای مدل شماره ۹ به ترتیب برای داده‌های آموزش و آزمون نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱ معماری شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده برای مدل ۹



شکل ۶-۲ نمودار ضریب همبستگی داده های آموزش با شبکه عصبی مصنوعی برای سیال پایه آب



شکل ۶-۳ نمودار ضریب همبستگی داده های آزمون با شبکه عصبی مصنوعی برای سیال پایه آب

۶-۳-۲ مدل سازی با الگوریتم هیبرید ژنتیک - شبکه عصبی پرسپترون^۱

سیستم‌های تکاملی به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخه‌های هوش مصنوعی بر اساس نظریه داروینیسیم عمل کرده و در حل مسایل از طریق استراتژی ایجاد رقابت برای دستیابی به بهترین جواب عمل می‌کنند. ازجمله روش‌های تکاملی می‌توان به الگوریتم تکاملی تفاضلی^۲، الگوریتم رقابت استعماری^۳ و روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۴ اشاره کرد. این دسته از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی دارای کاربردهای متعددی در زمینه‌های مهندس عمران، معدن و مکانیک سنگ هستند [۹۹-۱۰۰]. در این بین الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی می‌باشد که اولین بار توسط جان هالند^۵ در سال ۱۹۷۵ در دانشگاه میشیگان ارائه شد [۱۰۱]. روند اجرای پروسه الگوریتم ژنتیک نظیر اغلب الگوریتم‌های فرا ابتکاری با ایجاد جمعیت اولیه آغاز می‌شود. تمامی اعضای جمعیت توسط یک تابع برازش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس نتیجه اولیه توسط دو اپراتور الگوریتم ژنتیک یعنی تکامل و تقاطع برای تولید نسل بعد از جواب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این چرخه تا تعیین مناسب‌ترین نسل از جواب‌ها ادامه پیدا می‌کند. در واقع می‌توان گفت که فضای جستجو در جهت تکامل پیدا می‌کند که مسئله به بهترین جواب دست یابد. این نکته قابل ذکر است که به دلیل جایگزینی تصادفی استفاده از جواب‌های تولید شده جدید با جواب‌های قدیمی (نسل فرزند ایجاد شده جدید با نسل والد)، الگوریتم ژنتیک شانس بیشتری در عبور از مینیمم محلی در فضای جستجوی جواب را دارد. این الگوریتم به دلیل حل دقیق و صریح مسایل پیچیده در طیف گسترده ای از علوم مختلف کاربرد دارد [۱۰۲]. استفاده از این الگوریتم فراابتکاری در حوزه ارزیابی شاخص‌های مهندسی سنگ مطالعات نسبتاً وسیعی صورت گرفته است. در بیشتر این مطالعات با استفاده از سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری در کنار الگوریتم ژنتیک نظیر الگوریتم تکامل تفاضلی و شبکه‌های هوشمند

¹ Hybrid ANN-Genetic Algorithm

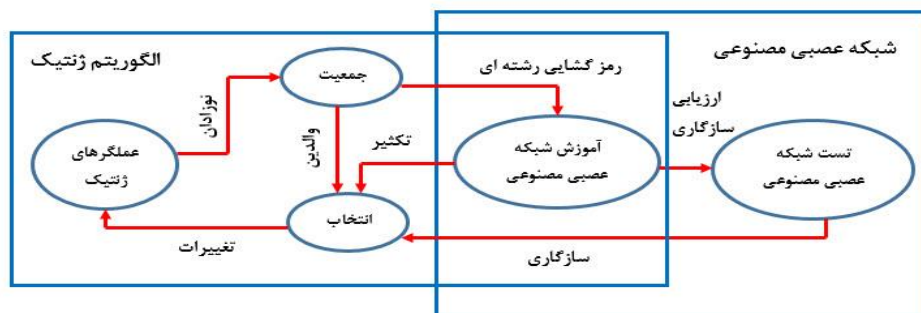
² Differential Evolution algorithm

³ Imperialist competitive algorithm

⁴ Particle swarm optimization

⁵ John Holland

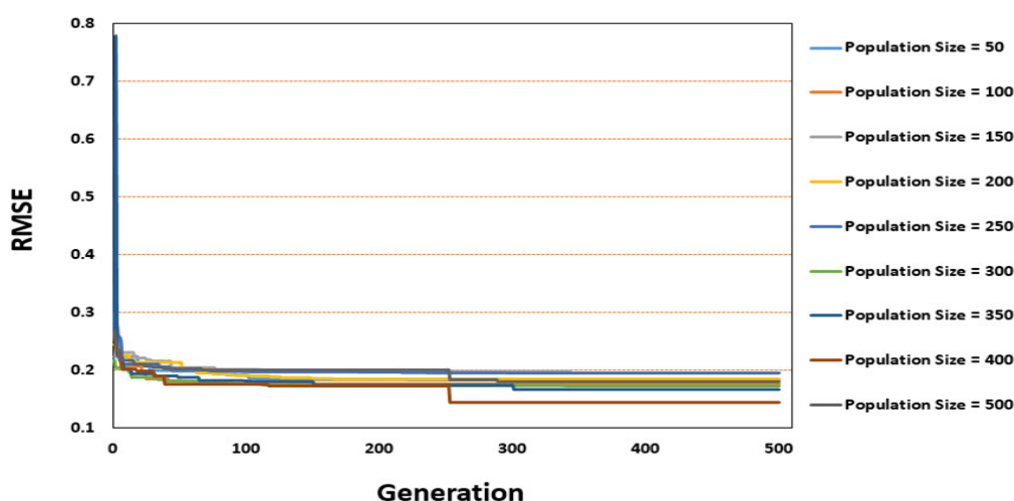
به کلاس‌بندی داده و ارزیابی داده‌های حاصل از نتایجی مانند لرزش‌های ماشین‌های برش دهنده سنگ، پیش‌بینی عملکرد سیم برش الماسه و همچنین بررسی لرزه‌ای تونل‌های کم عمق دایروی پرداخته شده است [۱۰۲-۱۰۳]. آموزش شبکه‌های عصبی یکی از مهم‌ترین کاربردهای الگوریتم ژنتیک می‌باشد. توانایی این الگوریتم در جستجو در فضای مسئله و فرار از نقاط بهینه محلی کمینه شرایطی را فراهم نموده است که با آموزش شبکه عصبی مصنوعی توسط این الگوریتم، سبب افزایش توانایی و کارایی شبکه عصبی مصنوعی می‌شود. از این‌رو در این مطالعه از الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای ارائه یک مدل بهینه به منظور پیش‌بینی شدت جریان مصرفی استفاده می‌شود. شکل ۴-۶ ساختار اولیه از الگوریتم ژنتیک ترکیبی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶ ساختار اولیه از ژنتیک ترکیبی [۱۰۴]

همان‌گونه که ذکر شد، الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان یکی از کاربردی‌ترین تکنیک‌های بهینه‌سازی بشمار می‌روند. از این‌رو در این بخش برای تعیین یک مدل دقیق و کارآمد جهت پیش‌بینی بیشترین شدت جریان مصرفی شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از الگوریتم ژنتیک آموزش داده می‌شود و به عنوان یک الگوریتم ترکیبی کاربردی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای کنترلی الگوریتم برای ایجاد مدل بهینه نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند، زیرا سبب همگرایی الگوریتم و کاهش خطا می‌شوند. برخی از این پارامترهای کنترلی بر اساس پیشنهاد کارشناسان خبره و مطالعات گذشته‌گان به صورت مستقیم قابل استفاده می‌باشند. از این‌رو در این

شبیه‌سازی ۳ پارامتر شامل بازترکیبی^۱ در ۱۵ درصد، در صد تکامل^۲ و درصد تقاطع^۳ نیز به ترتیب در ۳۵ درصد و ۵۰ درصد به دست آمدند. اما برخی از این پارامترهای کنترلی به صورت مستقیم و صریح قابل دسترسی نمی‌باشند و در یک گستره داده مورد ارزیابی و انتخاب قرار می‌گیرند که حداکثر تعداد نسل^۴ (G_{Max}) و اندازه جمعیت^۵ دو تا از مهم‌ترین پارامترهای کنترلی این دسته می‌باشند. در گام اول برای تعیین حداکثر تعداد نسل براساس عملگرهای آماری شامل $RMSE$ مقدار حداکثر تعداد نسل بهینه را با پیشنهاد خبرگان و متخصصین با حداکثر تعداد نسل برابر ۵۰۰ و یک گستره از اندازه جمعیت برابر با ۵۰ الی ۵۰۰ در نظر گرفته و آنالیزهای مورد نظر انجام داده می‌شود. درواقع با انجام یک آنالیز حساسیت میزان حساسیت و کارایی حداکثر تعداد نسل بر روی مدل‌های ساخته شده توسط الگوریتم ژنتیک ترکیبی مشخص می‌شود. نتایج بدست آمده در شکل ۵-۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که تحلیل‌ها صورت گرفته در نرم افزار متلب می‌باشد و برای رسم نمودارها از نرم افزار اکسل استفاده شده است. همچنین تابع برازش در این مرحله مجذور مربعات خطا است.



شکل ۵-۶ کارایی تعداد نسل در عملکرد شبکه بر اساس $RMSE$

¹ Recombination

² Mutation

³ Cross-over

⁴ Maximum number of generation

⁵ Population size

بر اساس شکل ۵-۶، نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مقدار و روند $RMSE$ برای حداکثر تعداد نسل بیشتر از ۳۵۰ ثابت شده و تغییر نمی‌یابد. بنابراین مقدار بهینه برای حداکثر تعداد نسل برابر ۳۵۰، تعیین می‌شود. در گام بعدی با توجه به سایر پارامترهای کنترلی، برای تعیین اندازه جمعیت بهینه، مدل‌های گوناگونی در یک رنج ۵۰ تا ۵۰۰ برای اندازه جمعیت شبیه‌سازی می‌شود. برای ۱۶۰ داده آزمایشگاهی بر اساس پیشنهاد لونی^۱، ۷۵ درصد داده‌ها برای داده‌های آموزش و مابقی داده‌ها برای داده‌های آزمون در نظر گرفته می‌شود. از اینرو ۹ مدل در نرم افزار متلب^۲ ساخته شده و نتایج بررسی شده بر اساس شاخص‌های عملکرد الگوریتم مطابق روابط ۱-۶ تا ۳-۶ در جدول ۴-۶ نشان داده شده است.

جدول ۴-۶ نتایج شبیه سازی بر اساس شاخص های عملکرد با استفاده از الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای سیال آب

شماره مدل	حداکثر تعداد نسل	اندازه جمعیت	نتایج شبکه برای R^2		نتایج شبکه برای $RMSE$		نتایج شبکه برای VAF	
			آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون
۱	۳۵۰	۵۰	۰/۴۷	۰/۳۹	۰/۲۶	۰/۲۵	۴۴/۰۱	۳۷/۸۵
۲	۳۵۰	۱۰۰	۰/۵۰	۰/۳۸	۰/۲۵	۰/۲۴	۴۸/۸۹	۳۶/۱۸
۳	۳۵۰	۱۵۰	۰/۵۴	۰/۶۳	۰/۲۲	۰/۲۲	۵۱/۸۸	۶۱/۳۵
۴	۳۵۰	۲۰۰	۰/۶۲	۰/۶۳	۰/۲۱	۰/۱۸	۳۰/۷۶	۴۴/۳۹
۵	۳۵۰	۲۵۰	۰/۶۷	۰/۶۱	۰/۱۹	۰/۲۱	۴۸/۶۱	۴۱/۲۲
۶	۳۵۰	۳۰۰	۰/۶۷	۰/۶۰	۰/۱۹	۰/۲۱	۴۹/۵۲	۴۰/۵۶
۷	۳۵۰	۳۵۰	۰/۶۱	۰/۷۰	۰/۲	۰/۱۶	۵۸/۶	۶۹/۶۲
۸	۳۵۰	۴۰۰	۰/۵۷	۰/۶۲	۰/۲	۰/۲۱	۵۵/۳۲	۴۳/۲
۹	۳۵۰	۵۰۰	۰/۵۶	۰/۶۴	۰/۲۳	۰/۲	۵۴/۴	۴۵/۳

سپس مدل‌های ساخته شده با استفاده از یک روش رتبه‌بندی ساده ارائه شده توسط زورلو^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۸، رتبه‌بندی می‌شود و نتایج حاصل از این رتبه‌بندی در جدول ۵-۶ نشان داده شده است.

¹ Looney

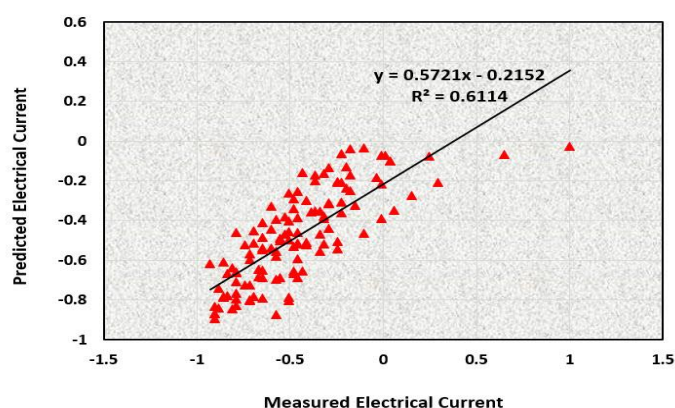
² MATLAB

³ Zorlu

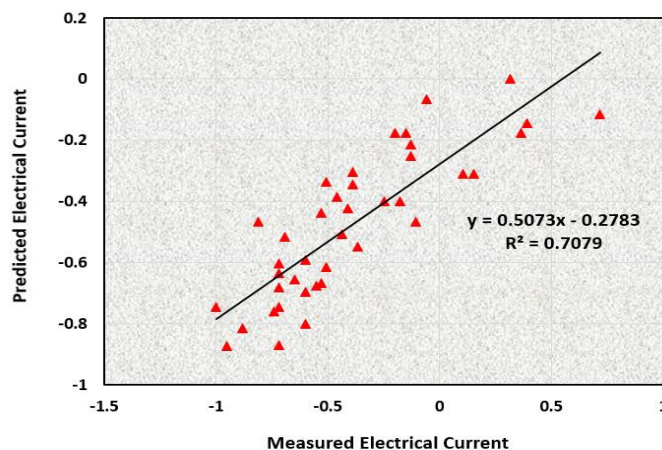
جدول ۵-۶ نتایج رتبه بندی مدل ها برای الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای سیال آب

شماره مدل	اندازه جمعیت	نتایج شبکه برای R^2		نتایج شبکه برای $RMSE$		نتایج شبکه برای VAF		رتبه بندی
		آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	
۱	۵۰	۲	۳	۳	۳	۲	۲	۱۵
۲	۱۰۰	۳	۲	۴	۴	۴	۱	۱۸
۳	۱۵۰	۴	۷	۶	۵	۶	۸	۳۶
۴	۲۰۰	۸	۷	۷	۸	۱	۶	۳۷
۵	۲۵۰	۹	۵	۹	۶	۳	۴	۳۶
۶	۳۰۰	۹	۴	۹	۶	۵	۳	۳۶
۷	۳۵۰	۷	۹	۸	۹	۹	۹	۵۱
۸	۴۰۰	۶	۶	۸	۶	۸	۵	۳۹
۹	۵۰۰	۵	۸	۵	۷	۷	۷	۳۹

بر اساس نتایج حاصل از این رتبه بندی مدل شماره ۷ با کسب امتیاز ۵۱ از میان ۹ مدل شبیه سازی شده دارای بالاترین رتبه به منظور پیش بینی بیشترین شدت جریان مصرفی برای خنک کننده آب می باشد. همچنین شاخص های عملکرد الگوریتم برای داده های آموزش این مدل به ترتیب شامل $R^2=0/61$ ، $RMSE=0/12$ و $VAF=58/6$ و شاخص های عملکرد الگوریتم برای داده های آزمون این مدل به ترتیب شامل $R^2=0/70$ ، $RMSE=0/16$ و $VAF=69/62$ می باشد، که مقدار بسیار مناسبی می باشند. اشکال ۶-۶ و ۶-۷ مقدار ضریب همبستگی را برای مدل شماره ۷ به ترتیب برای داده های آموزش و آزمون نشان می دهد.



شکل ۶-۶ نمودار ضریب همبستگی داده های آموزش با الگوریتم هیبریدی ژنتیک - شبکه عصبی پرسپترون برای سیال آب



شکل ۶-۷ نمودار ضریب همبستگی داده‌های آزمون با الگوریتم هیبریدی ژنتیک - شبکه عصبی پرسپترون برای سیال آب

بر اساس نتایج به دست آمده از جداول ۳-۶ و ۵-۶، مدل های شماره ۹ و ۷ به ترتیب بهترین و کارآمدترین مدل ها برای شبکه عصبی پرسپترون و الگوریتم هیبرید ژنتیک-شبکه عصبی پرسپترون هستند. جدول ۶-۶ مقایسه‌ای براساس شاخص‌های عملکرد مابین بهترین مدل‌های شبیه‌سازی شده توسط دو روش هوشمند را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است مدل برتر شبیه سازی شده توسط الگوریتم شبکه عصبی پرسپترون دارای توانایی و کارامدی چشمگیری نسبت به مدل برتر الگوریتم هیبرید ژنتیک - شبکه عصبی پرسپترون می‌باشد.

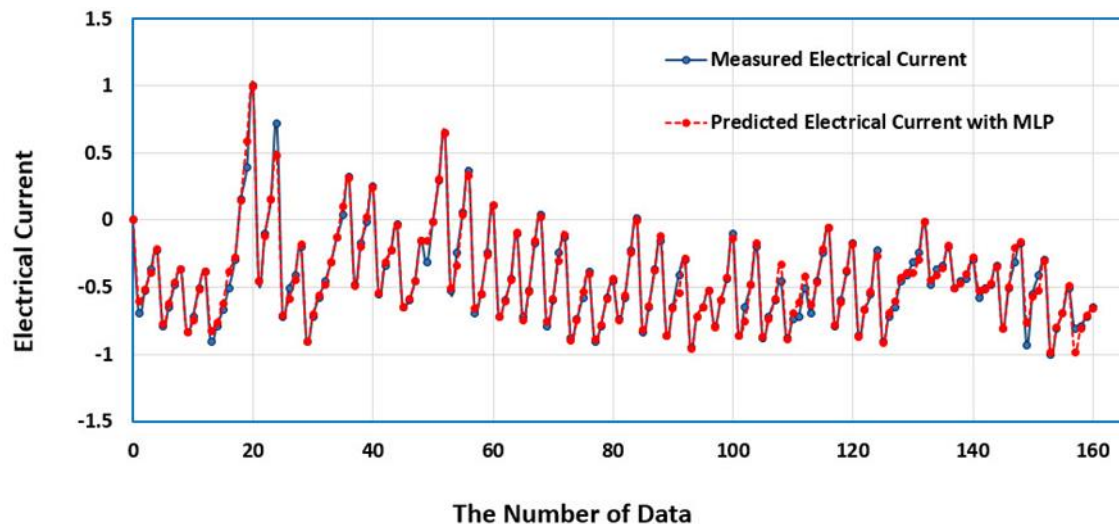
جدول ۶-۶ مقایسه بهترین مدل های شبیه سازی شده توسط شبکه عصبی پرسپترون و الگوریتم هیبرید

ژنتیک-شبکه عصبی پرسپترون برای سیال آب

مدل‌ها	نتایج شبکه برای R^2		نتایج شبکه برای $RMSE$		نتایج شبکه برای VAF	
	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش
شماره ۹ شبکه عصبی پرسپترون	۰/۹۳	۰/۹۹۷	۰/۰۹	۰/۰۱	۹۲/۷۷	۹۹/۷۵
شماره ۷ الگوریتم هیبرید ژنتیک-شبکه عصبی پرسپترون	۰/۷	۰/۶۱	۰/۱۶	۰/۲	۶۹/۶۲	۵۸/۶

شکل ۶-۸ یک مقایسه مابین بیشترین شدت جریان مصرفی دستگاه و بیشترین شدت جریان مصرفی پیش‌بینی شده را بر اساس مدل شماره ۹ توسط شبکه عصبی مصنوعی برای تمام ۱۶۰ داده مورد

بررسی برای سیال آب را نشان می‌دهد. همانگونه که از این نتایج مشخص هست بر اساس تطابق داده‌ها، شبکه عصبی پرسپترون با دقت بالایی توانسته بیشترین شدت جریان مصرفی را پیش‌بینی کند.



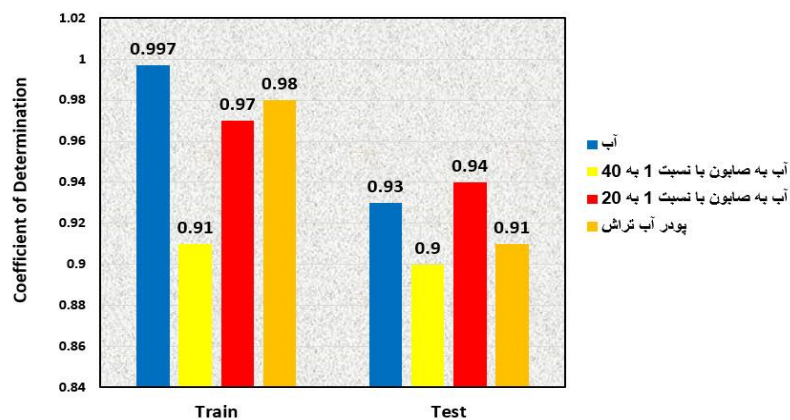
شکل ۶-۸ یک مقایسه مابین بیشترین شدت جریان مصرفی اندازه‌گیری شده و شدت جریان پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی پرسپترون برای سیال آب

در تحلیل نهایی مدل ارائه شده توسط شبکه عصبی پرسپترون که بر اساس خنک‌کننده آب تهیه شده است را برای داده‌هایی که از آزمایشات انجام گرفته شده بر روی همان نمونه سنگ‌ها توسط دو نوع آب صابون به نسبت ۱ به ۲۰ و ۱ به ۴۰ به‌دست آمده و پودر آب تراش ۳۰ به ۱ در نظر گرفته و سه مدل دیگر شبیه سازی شد. نتایج بدست آمده از این شبیه سازی‌ها در جدول ۶-۷ نشان داده شده است.

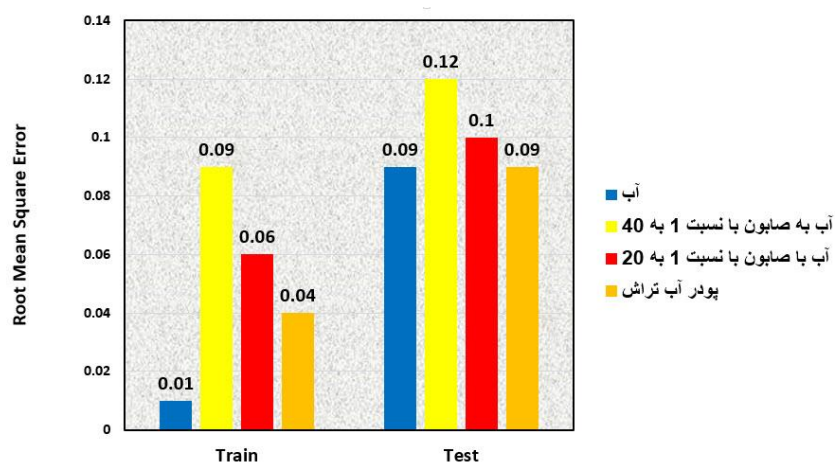
جدول ۶-۷ مقادیر شاخص‌های عملکرد برای شبکه عصبی پرسپترون در سیالات مختلف

سیال‌ها	نتایج شبکه برای R^2		نتایج شبکه برای $RMSE$		نتایج شبکه برای VAF	
	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش
آب صابون به نسبت ۱ به ۴۰	۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۱	۰/۱۲	۹۰/۴۵	۹۰/۴۸
آب صابون به نسبت ۱ به ۲۰	۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۱	۰/۰۶	۹۳/۹۸	۹۶/۵۹
پودر آب تراش ۳۰ به ۱۰	۰/۹۱	۰/۹۸	۰/۰۹۹	۰/۰۴۸	۹۱/۱۷	۹۸/۲۹

بر اساس نتایج بدست آمده از جدول ۶-۷ به وضوح روشن است که مدل شبیه‌سازی شده توسط چندلایه^۱ دارای کارایی چشمگیری به منظور پیش‌بینی بیشترین شدت جریان مصرفی برای سایر سیالات روان‌کار شامل آب صابون به نسبت ۱ به ۲۰ و ۱ به ۴۰ می‌باشد. شکل‌های ۶-۹ تا ۶-۱۱ مقایسه بین نتایج به‌دست آمده از شاخص‌های الگوریتم به منظور پیش‌بینی بیشترین شدت جریان مصرفی دستگاه برش بر اساس سه سیال به ترتیب برای R^2 ، $RMSE$ و VAF نشان می‌دهد. براساس نتایج به‌دست آمده تمامی مقادیر شاخص‌های عملکرد الگوریتم برای هر سه مدل دارای مقدار بسیار مناسبی می‌باشند که بیانگر عملکرد قوی، کارآمدی و اثر بخشی مدل ارائه شده می‌باشد.

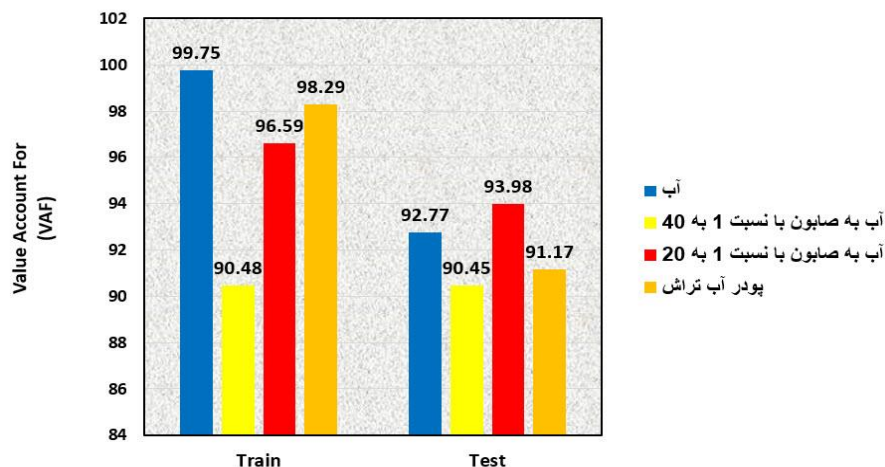


شکل ۶-۹ مقایسه مابین مقادیر R^2 برای مدل‌های شبیه‌سازی شده بر اساس چهار سیال مورد مطالعه



شکل ۶-۱۰ مقایسه مابین مقادیر $RMSE$ برای مدل‌های شبیه‌سازی شده بر اساس چهار سیال

¹ Multi-layer perceptron



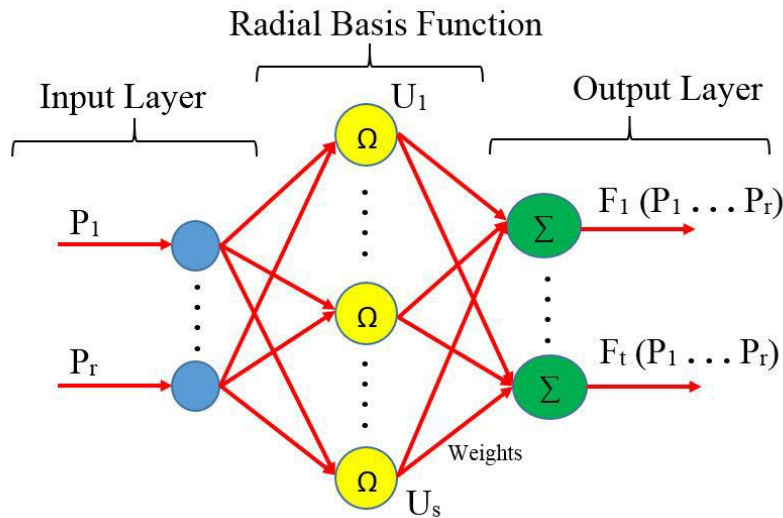
شکل ۶-۱۱ مقایسه مابین مقادیر VAF برای مدل های شبیه سازی شده بر اساس چهار سیال

۳-۳-۶ مدل سازی با استفاده از شبکه های عصبی با توابع پایه شعاعی

شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی یکی از پرکاربردترین انواع شبکه عصبی می باشد که سرعت بالا در همگرایی نسبت به شبکه های چند لایه و تحقیقات کاربردی فراوان در زمینه های متعدد فنی - مهندسی از جمله مزایای این شبکه می باشد. RBF از نوع شبکه های پیشخور^۱ می باشد و ایجاد مناسب ترین نگاشت بین بردارهای ورودی و خروجی از پرکاربردترین هدف های این شبکه می باشد. به لحاظ ساختار لایه ها، شبیه شبکه عصبی پرسپترون می باشد و از ۳ لایه تشکیل شده است که به ترتیب عبارتند از لایه ورودی، لایه پنهان و لایه خروجی. وظیفه ایجاد نگاشت مابین داده های ورودی و خروجی بر عهد لایه پنهان می باشد. لایه ورودی و خروجی به ترتیب فقط ورود داده ها و خروج داده ها را دارند که در پایان داده های خروجی، به صورت خطی می باشد. همچنین از مهم ترین تفاوت های RBF و شبکه عصبی پرسپترون می توان به تعداد لایه ها اشاره کرد که تعداد لایه ها در شبکه عصبی پرسپترون می تواند سه و یا بیشتر باشد ولی در RBF تعداد لایه ها سه تا می باشد. همچنین آرگومان توابع در RBF فاصله اقلیدسی است در حالی که در شبکه عصبی پرسپترون این آرگومان حاصل ضرب داخلی بردار ورودی لایه در وزن ها است. یکی از دلایل محبوبیت و توانمندی این شبکه این است که با داشتن تعداد نرون های کافی در لایه مخفی، قادر به تقریب سازی هر تابع پیوسته و با هر درجه دقت می باشند. شکل

¹ Feed forward

۱۲-۶ معماری پایه این شبکه را نشان می‌دهد [۸۹].



شکل ۱۲-۶ معماری پایه روش شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی [۸۹]

با توجه به توانایی بالا و مطلوب روش شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی در رویارویی با مسایل پیچیده، در این مطالعه از این روش برای بررسی تاثیر انواع سیال‌های خنک‌کننده و روان‌کار بر روی نحوه عملکرد دستگاه و شدت جریان مصرفی دستگاه و همچنین ارائه مدل‌های پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش استفاده می‌شود. برای اطمینان از نحوه عملکرد الگوریتم در این مطالعه از سه شاخص عملکرد شامل ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و شاخص VAF روابط ۱-۶ تا ۳-۶ استفاده می‌شود.

همان‌گونه که ذکر شد، در تحلیل‌های بخش قبلی، سیال آب به عنوان سیال پایه در نظر گرفته شد و پس از ساخت شبکه بهینه قابل قبول، این شبکه برای سایر سیالات مورد آزمایش و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی قرار گرفت. از اینرو، با تغییر رویکرد تحلیلی به منظور جلوگیری از یک روند تحلیلی تکراری و ایجاد رویکرد تحلیلی متفاوت در این بخش، برای هر یک از سیالات به صورت جداگانه مدل شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی ساخته می‌شود. به منظور مدل‌سازی ابتدا پارامترهای کنترلی روش شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی مشخص می‌شود. این پارامترهای کنترلی نقش بسزایی در سرعت همگرایی و بهبود عملکرد الگوریتم دارند. دو پارامتر کنترلی مهم در شبکه‌های عصبی با توابع پایه

شعاعی عبارتند از تعداد نرون‌های لایه پنهان و پخش کننده^۱ که وظیفه ارتباط و تعیین عملکرد توابع در لایه پنهان بر عهد نرون‌های لایه پنهان می‌باشد و پخش کننده به عنوان کنترل کننده پراکندگی در توابع عمل می‌کند. برای تعیین دقیق این پارامترهای کنترلی نیاز به انجام سعی و خطا می‌باشد، از این رو با نظر کارشناسان و متخصصین در زمینه محاسبات نرم و با توجه به داده‌های ورودی، تعداد نرون‌های لایه‌های پنهان ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ و مقادیر آن‌ها به ترتیب ۰/۵، ۱ و ۱/۵ در نظر گرفته شد. داده‌های ورودی و خروجی بر اساس تحقیقات لونی به صورت ۷۵ درصد برای داده‌های آموزش و مابقی برای داده‌های آزمون مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌سازی‌ها برای نتایج بدست آمده آزمایشگاهی بر اساس سه سیال مورد نظر انجام می‌گیرد و به ترتیب ۹ مدل برای هر سیال و مجموعاً ۲۷ مدل شبیه سازی می‌شود. جداول ۶-۸ تا ۶-۱۰ به ترتیب شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای آب صابون به نسبت ۱ به ۲۰ و ۱ به ۴۰ و پودر آب تراش ۳۰ به ۱۰ را نشان می‌دهند.

جدول ۶-۸ اثرات پارامترهای کنترل کننده بر عملکرد توابع آماری بر روی کارایی مدل‌های تهیه شده توسط آب صابون به نسبت ۱ به ۲۰

شماره مدل	اندازه لایه	پخش کننده	تعداد نرون‌ها	نتایج شبکه برای R^2		نتایج شبکه برای $RMSE$		نتایج شبکه برای VAF	
				آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون
۱	۳	۰/۵	۹۰	۰/۹۷	۰/۵۷	۰/۱۴	۰/۶۲	۹۷/۱۲	۲۸/۹۲
۲	۳	۰/۵	۱۰۰	۰/۹۸	۰/۴۶	۰/۰۹	۰/۶۶	۹۸/۹۳	۳۶/۳۷
۳	۳	۰/۵	۱۱۰	۰/۹۹	۰/۲۸	۰/۰۲	۱/۵۷	۹۹/۸۸	۲۷/۴۹
۴	۳	۱	۹۰	۰/۹۸	۰/۴۷	۰/۰۹	۰/۷۵	۹۸/۷۸	۳۰/۸۶
۵	۳	۱	۱۰۰	۰/۹۹	۰/۳۱	۰/۰۵	۰/۹۳	۹۹/۶۵	۲۵/۵۹
۶	۳	۱	۱۱۰	۰/۹۹	۰/۲۲	۰/۰۲	۰/۸۸	۹۹/۹۲	۱۸/۳۷
۷	۳	۱/۵	۹۰	۰/۹۳	۰/۵۴	۰/۲۱	۰/۶۷	۹۳/۴۱	۳۷/۹۳
۸	۳	۱/۵	۱۰۰	۰/۹۹	۰/۸۲	۰/۰۱	۰/۴۴	۹۹/۹۵	۸۱/۹۹
۹	۳	۱/۵	۱۱۰	۰/۹۹	۰/۷۹	۰/۰۲	۰/۴۷	۹۹/۸۸	۷۹/۴۱

¹ Spread

جدول ۹-۶ اثرات پارامترهای کنترل کننده بر عملکرد توابع آماری بر روی کارایی مدل‌های تهیه شده توسط آب صابون به نسبت ۱ به ۴۰

شماره مدل	اندازه لایه	پخش کننده	تعداد نرون‌ها	نتایج شبکه برای R^2		نتایج شبکه برای $RMSE$		نتایج شبکه برای VAF	
				آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون
۱	۳	۰/۵	۹۰	۰/۹۵	۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۸۶	۹۵/۶۴	۱۵/۳۴
۲	۳	۰/۵	۱۰۰	۰/۹۷	۰/۲۴	۰/۱۴	۰/۸۲	۹۷/۱۹	۱۷/۸۹
۳	۳	۰/۵	۱۱۰	۰/۹۹	۰/۵۰	۰/۰۴	۰/۷۲	۹۹/۶۵	۴۷/۹۱
۴	۳	۱	۹۰	۰/۹۳	۰/۲۰	۰/۲۲	۱/۰۸	۹۲/۸۵	۱۴/۲۳
۵	۳	۱	۱۰۰	۰/۹۹	۰/۲۵	۰/۰۶	۰/۹۲	۹۹/۴۲	۲۰/۷۶
۶	۳	۱	۱۱۰	۰/۹۹	۰/۲۹	۰/۰۵	۰/۹۹	۹۹/۶۱	۱۸/۴۴
۷	۳	۱/۵	۹۰	۰/۹۸	۰/۴۶	۰/۰۹	۰/۷۲	۹۸/۶۶	۲۳/۳۳
۸	۳	۱/۵	۱۰۰	۰/۹۹	۰/۸۱	۰/۰۳	۰/۴۶	۹۹/۸۵	۸۱/۰۱
۹	۳	۱/۵	۱۱۰	۰/۹۹	۰/۶۹	۰/۰۳	۰/۴۸	۹۹/۷۳	۶۳/۳۷

جدول ۱۰-۶ اثرات پارامترهای کنترل کننده بر عملکرد توابع آماری بر روی کارایی مدل‌های تهیه شده توسط پودر آب تراش ۳۰ به ۱۰

شماره مدل	اندازه لایه	پخش کننده	تعداد نرون‌ها	نتایج شبکه برای R^2		نتایج شبکه برای $RMSE$		نتایج شبکه برای VAF	
				آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون
۱	۳	۰/۵	۹۰	۰/۹۶	۰/۴۷	۰/۲۵	۰/۸۷	۹۵/۸۵	۳۵/۰۵
۲	۳	۰/۵	۱۰۰	۰/۹۹	۰/۶۲	۰/۱۱	۰/۷۳	۹۹/۱۷	۵۱/۰۷
۳	۳	۰/۵	۱۱۰	۰/۹۹	۰/۲۳	۰/۰۳	۱/۶۶	۹۹/۹۳	۲۱/۸۷
۴	۳	۱	۹۰	۰/۹۸	۰/۵۱	۰/۱۵	۰/۹۶	۹۸/۵۵	۴۸/۸۴
۵	۳	۱	۱۰۰	۰/۹۹	۰/۵۹	۰/۰۴	۰/۹۹	۹۹/۸۷	۵۹/۸۱
۶	۳	۱	۱۱۰	۰/۹۹	۰/۸۱	۰/۰۴	۰/۵۸	۹۹/۸۵	۷۵/۲۸
۷	۳	۱/۵	۹۰	۰/۹۹	۰/۶۳	۰/۰۶	۰/۷۹	۹۹/۷۳	۵۵/۰۲
۸	۳	۱/۵	۱۰۰	۰/۹۹	۰/۸۲	۰/۰۳	۰/۵۴	۹۹/۹۵	۸۱/۹۵
۹	۳	۱/۵	۱۱۰	۰/۹۹	۰/۷۴	۰/۰۳	۰/۶۳	۹۹/۹۱	۶۶/۴۹

پس از انجام مدل‌سازی‌ها بر اساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمده تحت ۳ نوع سیال متفاوت، مدل‌های شبیه‌سازی شده براساس روش رتبه‌بندی ساده رتبه‌بندی می‌شوند تا بهترین مدل شبیه‌سازی شده برای هر یک از سیالات مورد نظر تعیین شود. نتایج بدست آمده مطابق جداول ۱۱-۶ تا ۱۳-۶ می‌باشد.

جدول ۶-۱۱ رتبه‌بندی مدل‌های به دست آمده در استفاده از آب صابون به نسبت ۱ به ۲۰

رتبه‌بندی کلی	نتایج شبکه برای VAF		نتایج شبکه برای $RMSE$		نتایج شبکه برای R^2		تعداد نرون‌ها	پخش کننده	اندازه لایه	شماره مدل
	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش				
۳۳	۴	۳	۷	۵	۷	۷	۹۰	۰/۵	۳	۱
۳۶	۶	۵	۶	۶	۵	۸	۱۰۰	۰/۵	۳	۲
۳۱	۳	۷	۱	۸	۳	۹	۱۱۰	۰/۵	۳	۳
۳۳	۵	۴	۴	۶	۶	۸	۹۰	۱	۳	۴
۳۰	۲	۶	۲	۷	۴	۹	۱۰۰	۱	۳	۵
۳۱	۱	۸	۳	۸	۲	۹	۱۱۰	۱	۳	۶
۳۰	۷	۲	۵	۴	۶	۶	۹۰	۱/۵	۳	۷
۵۴	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۱۰۰	۱/۵	۳	۸
۴۸	۸	۷	۸	۸	۸	۹	۱۱۰	۱/۵	۳	۹

جدول ۶-۱۲ رتبه‌بندی مدل‌های به دست آمده در استفاده از آب صابون به نسبت ۱ به ۴۰

رتبه‌بندی کلی	نتایج شبکه برای VAF		نتایج شبکه برای $RMSE$		نتایج شبکه برای R^2		تعداد نرون‌ها	پخش کننده	اندازه لایه	شماره مدل
	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون				
۲۰	۲	۲	۵	۳	۲	۶	۹۰	۰/۵	۳	۱
۲۶	۳	۳	۶	۴	۳	۷	۱۰۰	۰/۵	۳	۲
۴۵	۷	۷	۷	۸	۷	۹	۱۱۰	۰/۵	۳	۳
۱۲	۱	۱	۲	۲	۱	۵	۹۰	۱	۳	۴
۳۳	۵	۵	۴	۶	۴	۹	۱۰۰	۱	۳	۵
۳۴	۴	۶	۳	۷	۵	۹	۱۱۰	۱	۳	۶
۳۶	۶	۴	۷	۵	۶	۸	۹۰	۱/۵	۳	۷
۵۴	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۱۰۰	۱/۵	۳	۸
۵۰	۸	۸	۸	۹	۸	۹	۱۱۰	۱/۵	۳	۹

جدول ۶-۱۳ رتبه‌بندی مدل‌های به دست آمده در استفاده از پودر آب تراش ۳۰ به ۱۰

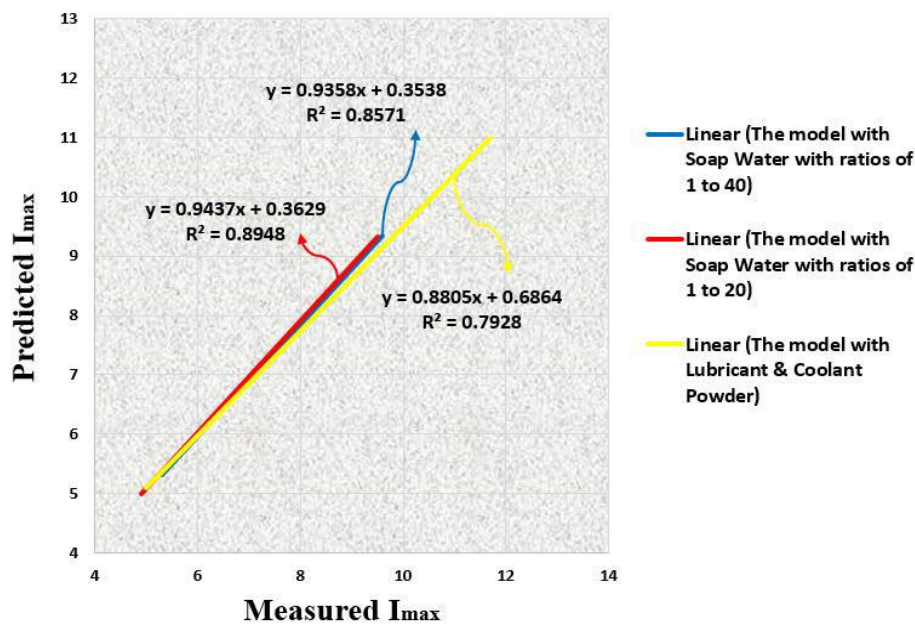
رتبه‌بندی کلی	نتایج شبکه برای VAF		نتایج شبکه برای $RMSE$		نتایج شبکه برای R^2		تعداد نرون‌ها	پخش کننده	اندازه لایه	شماره مدل
	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون				
۲۰	۱	۲	۴	۴	۷	۲	۹۰	۰/۵	۳	۱
۳۳	۳	۴	۶	۶	۹	۵	۱۰۰	۰/۵	۳	۲
۲۹	۸	۱	۱	۹	۹	۱	۱۱۰	۰/۵	۳	۳
۲۴	۲	۳	۳	۵	۸	۳	۹۰	۱	۳	۴
۳۵	۶	۶	۲	۸	۹	۴	۱۰۰	۱	۳	۵
۴۶	۵	۸	۸	۸	۹	۸	۱۱۰	۱	۳	۶
۳۶	۴	۵	۵	۷	۹	۶	۹۰	۱/۵	۳	۷
۵۴	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۱۰۰	۱/۵	۳	۸
۴۶	۷	۷	۷	۹	۹	۷	۱۱۰	۱/۵	۳	۹

مطابق جداول ۶-۱۱ تا ۶-۱۳، بر اساس نتایج بدست آمده از مدل‌های شبیه‌سازی شده، مدل شماره ۸ با رتبه ۵۴ دارای بهترین شبیه‌سازی از بیشترین شدت جریان مصرفی بر اساس نتایج دستگاه برش با سیال آب صابون به نسبت ۱ به ۴۰ می‌باشد. همچنین مدل شماره ۸ به ترتیب با کسب رتبه‌های ۵۴ دارای بهترین عملکرد پیش‌بینی و شبیه‌سازی برای بیشترین شدت جریان مصرفی بر اساس نتایج دستگاه برش با سیال آب صابون به نسبت ۱ به ۲۰ و پودر آب تراش می‌باشند.

نکته قابل ملاحظه بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل‌های صورت گرفته و شبیه‌سازی‌های انجام گرفته مشخص می‌شود که بهینه و مطلوب‌ترین مدل‌ها برای پیش‌بینی بیشترین شدت جریان مصرفی دستگاه برش پخش‌کننده برابر با ۱/۵ و تعداد نرون‌های شبکه پنهان برابر ۱۰۰ برای نتایج بدست آمده تحت هر سه سیال مورد استفاده در آزمایش‌ها است. همچنین به‌طور کلی می‌توان ذکر کرد که اکثر مدل‌ها با تعداد نرون‌های ۹۰ دارای کمترین عملکرد می‌باشند. درگام نهایی با تعیین یک ساختار یکسان شبکه عصبی مصنوعی با توابع پایه شعاعی برای هر سه سیال، یکبار دیگر به صورت تصادفی داده‌ها برای هر سیال بصورت جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده برای هر یک از مدل‌ها برای هر سیال مطابق جدول ۶-۱۴ و شکل ۶-۱۳ می‌باشد.

جدول ۱۴-۶ مقایسه بین نتایج مدل‌های بدست آمده از سه سیال استفاده شده

سیال‌ها	نتایج شبکه برای R^2	نتایج شبکه برای $RMSE$	نتایج شبکه برای VAF
آب صابون به نسبت ۱ به ۲۰	۰/۸۹۵	۰/۲۸۵	۸۹/۱۶
آب صابون به نسبت ۱ به ۴۰	۰/۸۵۷	۰/۳۴۵	۸۵/۳۱
پودر آب تراش ۳۰ به ۱۰	۰/۷۹۳	۰/۵۷۲	۷۷/۸۲



شکل ۱۳-۶ همبستگی میان مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار پیش‌بینی شده مدل‌های شبکه عصبی با توابع پایه شعاعی

با توجه به نتایج جدول ۱۴-۶ کاملاً واضح است که ساختار مدل شبکه عصبی مصنوعی با توابع پایه شعاعی برای تحلیل داده‌های بدست آمده آزمایشگاهی براساس سه سیال متفاوت بسیار مناسب و مطلوب می‌باشد و شاخص‌های عملکرد شبکه عصبی در هر سه مدل دارای مقادیر قابل قبول و مناسب می‌باشد. بر اساس شکل ۱۳-۶ نکته قابل ذکر این است که مدل ارائه شده نشان دهنده بیشترین کاهش شدت جریان مصرفی برای دستگاه برش تحت پودر آب تراش ۳۰ به ۱۰ نسبت به دو سیال دیگر می‌باشد. همچنین به ترتیب آب صابون به نسبت ۱ به ۴۰ و ۱ به ۲۰ دارای حداکثر تأثیر در کاهش شدت جریان مصرفی دستگاه می‌باشند.

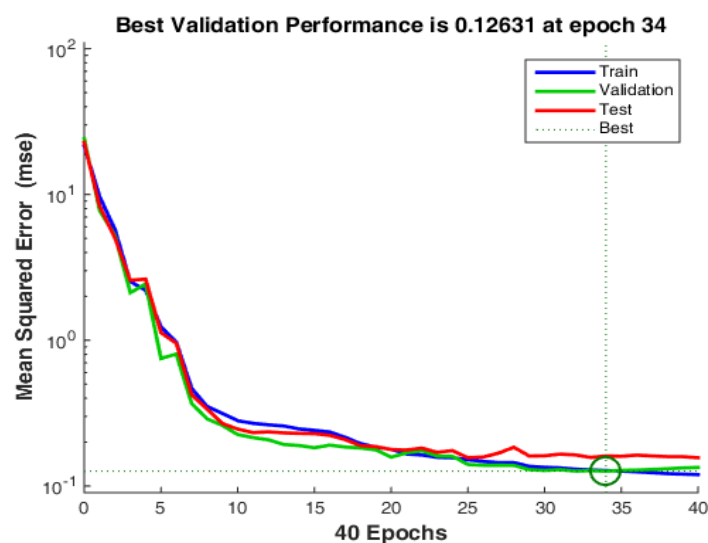
۴-۶ مدل‌سازی بر اساس مشخصات سیال خنک‌کننده/روان‌کار با توجه

مشخصات سنگ و پارامترهای عملیاتی

در این بخش از تحقیق، با استفاده از قابلیت‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی تلاشی در جهت ایجاد ابزاری قوی برای پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش با توجه به مشخصات سنگ (شامل مقاومت فشاری تک محوری، سختی موهس، فاکتور ساینده‌گی شیمازک و مدول الاستیسیته)، مشخصات سیال خنک‌کننده/روان‌کار (شامل پنج سیال آب شهری، پودر آب صابون با نسبت ۱ به ۲۰ و ۱ به ۴۰، پودر آب تراش با نسبت ۳۰ به ۱۰ و ۱۵ به ۱۰) و پارامترهای عملیاتی (شامل ۴ عمق برش و نرخ پیشروی) انجام خواهد شد. از آنجایی که پارامترهای طراحی شبکه عصبی دربرگیرنده المان‌های زیادی اعم از نوع شبکه، نوع تابع آموزش، تابع انتقال، تعداد لایه‌های پنهان میانی، الگوریتم تعیین وزن‌ها و تعداد نورون‌های هر لایه را در بر می‌گیرد، طراحی و توسعه شبکه عصبی مصنوعی بهینه نیاز به توجه دقیق‌تری به تاثیر انتخاب این پارامترها دارد. در چنین مواردی با لحاظ کردن مقادیر و توابع مختلف در طراحی شبکه با استفاده از روش آزمون و خطا به سمت شبکه بهینه حرکت می‌شود. در این راستا جهت دسترسی به شبکه عصبی مصنوعی با قدرت پیش‌بینی قابل قبول در حالت کلی نیاز به پیاده‌سازی آزمون سعی و خطا در ارتباط با انتخاب پارامترهای طراحی شبکه می‌باشد. در بین پارامترهای طراحی، تعداد لایه‌های پنهان میانی شبکه و تعداد نورون‌های هر لایه از تاثیرگذارترین پارامترها بر روی عملکرد شبکه و دقت آن محسوب می‌شود. لذا با توجه به اهمیت این بخش از طراحی، اقدام به طراحی شبکه‌های عصبی مصنوعی متعدد با لحاظ نمودن تعداد متفاوتی از لایه‌های پنهان میانی از یک سو و از سوی دیگر تعداد نورون‌های مختلف شده است. بعد از طراحی شبکه‌های عصبی جهت ارزیابی عملکرد و میزان دقت شبکه عصبی در پیش‌بینی متغیر هدف، نیاز به استفاده از معیارهایی می‌باشد. از مهمترین معیارهای ارزیابی شبکه عصبی مصنوعی می‌توان به نمودار راندمان شبکه اشاره کرد که تابعی از مجموع خطاهای روی داده در فرایند پیش‌بینی متغیر هدف

می‌باشد. شاخص بعدی در ارتباط با ارزیابی عملکرد شبکه عصبی مصنوعی، ملاحظه میزان همبستگی مقادیر پیش بینی شده و مقادیر واقعی می‌باشد. در این مطالعه جهت تشخیص شبکه بهینه عصبی پیش‌بینی کننده مقدار حداکثر شدت جریان مصرفی از شاخص‌های مذکور بهره گرفته شده است. در طی انجام این تحقیق ۸۰۰ نمونه تست شامل ۸ متغیر مستقل (مقاومت فشاری تک محوری، سختی موهس، فاکتور ساینده‌گی شیمازک و مدول الاستیسیته، سختی سیال، ویسکوزیته سیال، عمق برش و نرخ پیشروی) و یک متغیر وابسته (حداکثر شدت جریان مصرفی دستگاه) به ترتیب به عنوان ورودی‌ها و خروجی شبکه انتخاب شدند. تعداد داده‌های آموزش و آزمون نیز به ترتیب ۷۰ و ۳۰ درصد کل داده‌ها در نظر گرفته شدند. در طی فرایند جستجوی شبکه عصبی مصنوعی بهینه شبکه‌های متعددی از نوع شبکه عصبی پیش خور^۱ طراحی شده‌اند.

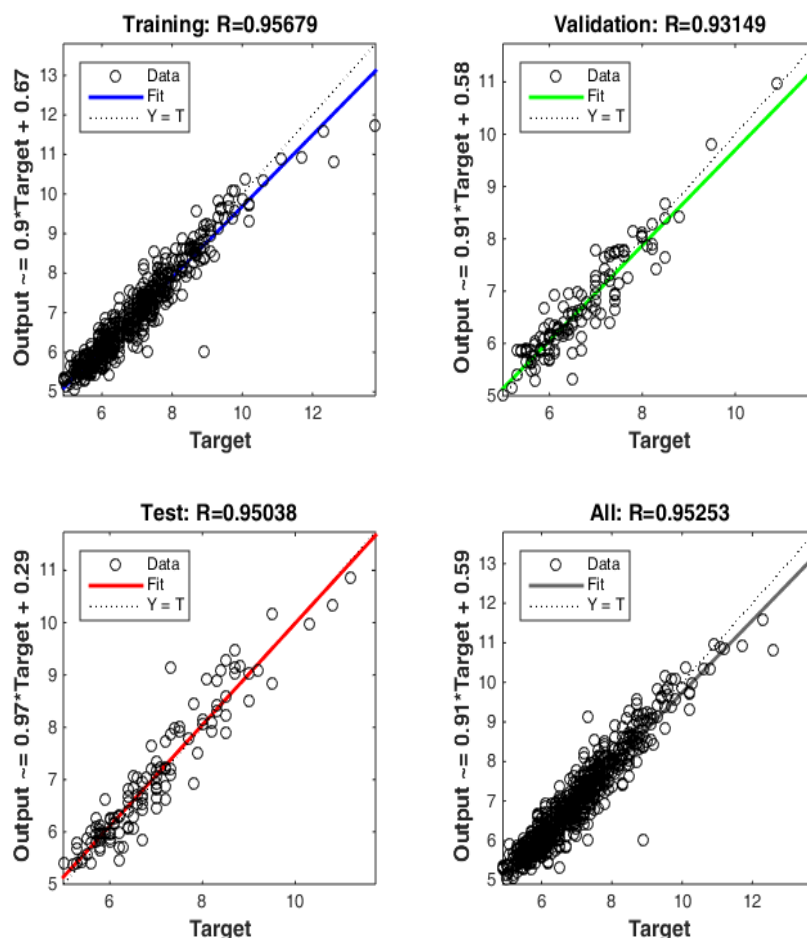
همان‌طوری که در بخش‌های قبل ذکر شد، یکی از پارامترهای مهم در کنترل کارایی شبکه عصبی مصنوعی، نمودار کارایی شبکه می‌باشد که نشان دهنده برآیند خطاهای رخ داده در مراحل مختلف تکرار شبکه می‌باشد. شکل ۶-۱۴ راندمان عملکرد شبکه در تکرارهای مختلف برای شبکه با یک لایه میانی پنهان با ۱۰ نرون را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۴ راندمان عملکرد شبکه در تکرارهای مختلف برای شبکه با یک لایه میانی پنهان با ۱۰ نرون

^۱ Feed forward

یکی دیگر از روش‌های ارزیابی عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی، پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی بر روی نیم‌ساز ربع اول می‌باشد. هرچه پراکندگی نقاط نسبت به خط نیم‌ساز کمتر باشد شبکه از دقت بیشتری در پیش‌بینی نتایج مسئله برخوردار می‌باشد. شکل ۶-۱۵ نمودار پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی را نسبت به خط نیم‌ساز اول نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۵ نمودار پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز اول شبکه با یک لایه میانی پنهان با ۱۰ نرون

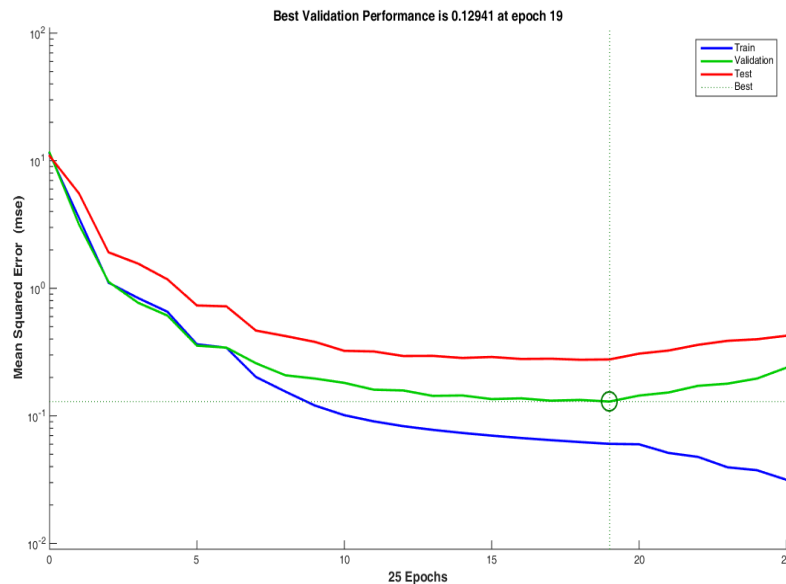
یکی از مهمترین پارامترهای معماری شبکه عصبی مصنوعی تعداد لایه‌های پنهان شبکه می‌باشد که تاثیر بسیار زیادی بر عملکرد آن دارد. لذا هیچ فرایند طراحی شبکه بهینه‌ای بدون آنالیز حساسیت آن نسبت به انتخاب لایه‌های پنهان قابلیت اطمینان بالایی نخواهد داشت. لذا در مواجهه با فضاهای داده‌ای مختلف و سازگاری شبکه با این فضاها می‌بایست عملکرد شبکه تحت شرایط مختلفی تعداد

لایه‌های پنهان مورد مطالعه قرار گیرد. این فرایند در این مرحله از تحقیق جهت جلوگیری اطلاله مطلب بر روی شبکه‌هایی با تعداد لایه‌هایی میانی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ انجام پذیرفت. لازم به ذکر است که با پارامترهای طراحی ثابت از هر نوع شبکه ۱۰ بار ایجاد شده و میانگین مقادیر خروجی هر شبکه برای ۱۰ بار تکرار لحاظ شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های مختلف شبکه‌های عصبی به طور خلاصه در جدول ۶-۱۵ آمده است.

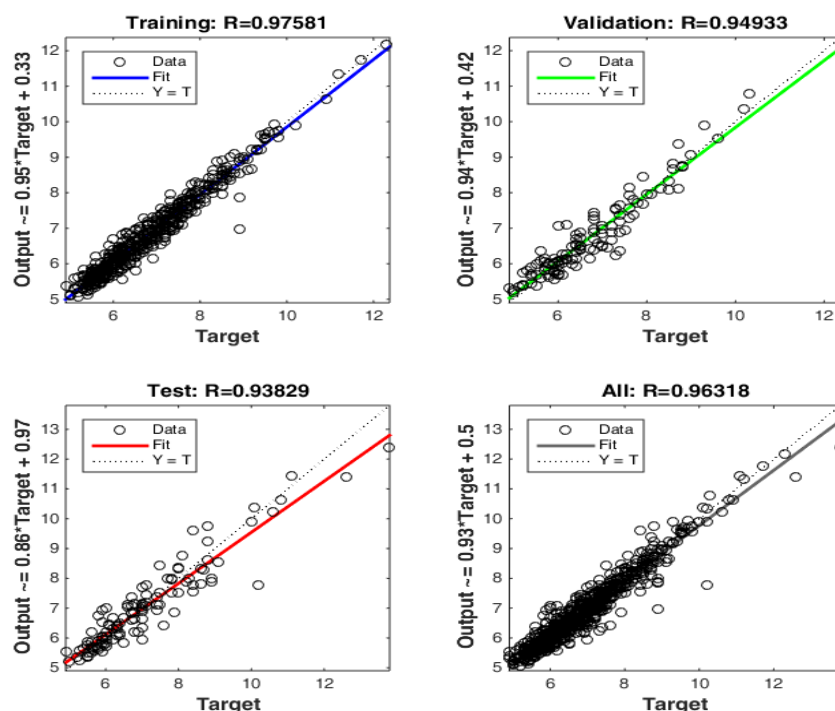
جدول ۶-۱۵ تحلیل حساسیت شبکه عصبی نسبت به تعداد لایه‌های پنهان				
ردیف	تعداد لایه	تعداد نرون	ضریب همبستگی	شاخص کارایی شبکه
۱	۱	۱۰	۰/۹۵	۰/۱۲۶
۲	۲	۱۰	۰/۹۶	۰/۱۸۲
۳	۳	۱۰	۰/۹۶۳	۰/۱۲۹
۴	۴	۱۰	۰/۹۳	۰/۳۵۸
۵	۵	۱۰	۰/۷۸	۰/۶۲۳

با توجه به جدول ۶-۱۵ با تغییر تعداد لایه‌های میانی شبکه‌ها مقدار خروجی‌های شبکه تحت تاثیر قرار می‌گیرد که این مورد انطباق بالایی با واقعیت موجود در این حوزه دارد. روند تغییرات پارامترهای ارزیابی برای شبکه‌های ایجاد شده با لایه‌های مختلف نشان از عدم پایداری مقادیر و ارائه روندی ثابت در مواجهه با تغییر تعداد لایه‌های پنهان میانی شبکه نشان می‌دهد. با مراجعه به مقادیر پارامترهای ارزیابی ارائه شده در جدول ۶-۱۵، نشان از بهبود نتایج به دست آمده با افزایش تعداد لایه‌های پنهان می‌باشد. ولی نکته کلیدی و مهم حاصل از این تحلیل این مطلب است که با ادامه روند افزایش تعداد لایه‌ها خبری از بهبود با ثبات نتایج نخواهد بود و با گذر از یک تعداد لایه پنهان میانی بهینه نتایج بدست آمده دقت و صحت مطلوب خود را از دست می‌دهد. لذا می‌توان به این نتیجه رسید که انتخاب تعداد لایه‌های پنهان میانی تاثیر مستقیمی بر نتیجه عملکرد شبکه داشته و از سوی دیگر با افزایش تعداد لایه‌ها روند بهبود عملکرد شبکه پایدار نبوده و می‌بایست به دنبال یافتن بهینه تعداد لایه‌های پنهان میانی شبکه بود. در مواجهه با فضای داده‌ای حاکم بر این مطالعه و با ارجاع به نتایج ارائه شده در جدول ۶-۱۵ بهینه تعداد لایه‌های میانی برابر با سه می‌باشد. شکل‌های ۶-۱۶ تا ۶-۱۷ به ترتیب

راندمان عملکرد شبکه در تکرارهای مختلف و نمودار پراکندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز اول را برای شبکه عصبی مصنوعی با سه لایه میانی پنهان با ۱۰ نرون را نشان می‌دهند.



شکل ۶-۱۶ راندمان عملکرد شبکه در تکرارهای مختلف برای شبکه با سه لایه میانی پنهان با ۱۰ نرون بعد از تعیین لایه‌های بهینه میانی برای شبکه عصبی، تعیین تعداد نرون‌های مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است. زیرا بعد از تعداد لایه‌های میانی از مهمترین عوامل موثر بر عملکرد شبکه تعداد نرون‌ها می‌باشد. جهت تحلیل حساسیت کارکرد شبکه نسبت به انتخاب تعداد نرون‌های هر لایه، تعداد نرون‌های ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نرون برای تعداد بهینه لایه‌ای ۳ انتخاب و عملکرد شبکه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. جدول ۶-۱۶ نتایج حاصل از این ارزیابی را نشان می‌دهد. در نهایت تعداد نرون‌های ۱۰ برای ۳ لایه میانی پنهان به عنوان معماری بهینه شبکه پیشنهاد می‌شود.

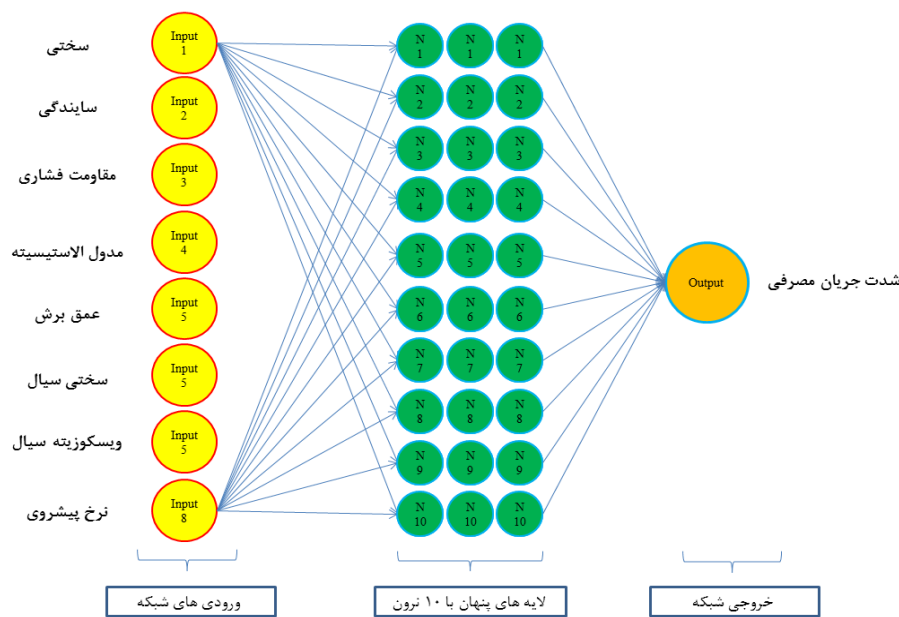


شکل ۶-۱۷ نمودار پراکنندگی نقاط پیش‌بینی شده و واقعی نسبت به خط نیم‌ساز اول شبکه با سه لایه میانی پنهان با ۱۰ نرون

جدول ۶-۱۶ تحلیل حساسیت شبکه عصبی نسبت به تعداد نرون‌های هر لایه

ردیف	تعداد لایه	تعداد نرون	ضریب همبستگی	شاخص کارایی شبکه
۱	۳	۸	۰/۹۶۵	۰/۲۶۶
۲	۳	۹	۰/۹۲۹	۰/۲۳۹
۳	۳	۱۰	۰/۹۶۳	۰/۱۲۹
۴	۳	۱۱	۰/۸۳	۰/۹۴۴
۵	۳	۱۲	۰/۷۹	۱/۱۲۹

با توجه به مقادیر مندرج در جدول ۶-۱۶ بهینه مقدار شاخص کارایی شبکه با تعداد ۱۰ نرون، ۰/۱۲۹ و مقدار ضریب همبستگی برای شبکه مذکور برابر با مقدار ۰/۹۶۳ می‌باشد. در نهایت با توجه به مقادیر مناسب شاخص کارایی شبکه و ضریب همبستگی می‌توان از بین شبکه‌های آموزش داده شده با تعداد نرون‌های ۸ تا ۱۲، طراحی و معماری بهینه مدل شبکه عصبی را به منظور پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش با توجه به تمامی فاکتورهای طراحی (مشخصات سیال، مشخصات سنگ و مشخصات عملیاتی) با سه لایه پنهان و تعداد ۱۰ نرون انتخاب کرد. شکل ۶-۱۸ معماری بهینه شبکه عصبی طراحی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۸ معماری بهینه شبکه عصبی طراحی شده

۵-۶ جمع‌بندی

عدم شناخت کامل از فرایند برش می‌تواند سبب کاهش راندمان و بهروری در صنعت سنگ‌های ساختمانی در دو بخش معدن و کارخانه‌های سنگ‌بری باشد. ارزیابی بیشترین شدت جریان مصرفی به عنوان یکی از مهمترین فاکتورهای فرایند برش می‌تواند سبب کاهش هزینه تمام شده و افزایش کیفیت محصول فراوری شده شود. از سوی دیگر سیال‌های خنک‌کننده/روان‌کار یکی از مهمترین عوامل تأثیر گذار بر روی میزان و نحوه عملکرد ابزارهای برش و توان مصرفی دستگاه تأثیر گذار می‌باشد. با توجه به اهمیت موضوع در این مطالعه هدف ارائه یک مدل بهینه به منظور پیش‌بینی بیشترین شدت جریان مصرفی برای پنج نوع سیال خنک‌کننده و روان‌کار می‌باشد از این‌رو در این مطالعه با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون و الگوریتم ترکیبی ژنتیک - شبکه عصبی پرسپترون به عنوان روش‌های هوشمند، یک مدل بهینه برای پیش‌بینی بیشترین شدت جریان مصرفی شبیه سازی شده است. با انجام آزمایش‌هایی بر روی ۱۰ نوع سنگ، در مجموع ۱۶۰ آزمون آزمایشگاهی برای هر یک از سیالات شامل آب صابون به نسبت ۱ به ۲۰ و ۱ به ۴۰ و پودر آب تراش انجام شد، و چهار

پارامترتاثیر گذار فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها شامل مقاومت فشاری تک محوری، سختی موهس، شاخص سایش شیمازک و مدول یانگ و ۲ پارامتر عملیاتی شامل نرخ نفوذ و نرخ پیشروی به عنوان داده‌های ورودی و بیشترین شدت جریان مصرفی به عنوان داده خروجی داده‌ها در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته مشخص می‌شود که برای تحلیل و ارزیابی آزمایش‌ها و سیستم فرآیند برش، الگوریتم یادگیری لوببرگ-مارکوارت^۱ کارایی و اثر بخشی چشم‌گیری نسبت به الگوریتم ژنتیک در آموزش شبکه عصبی از خود نشان داد. مدل شبیه‌سازی شده توسط شبکه عصبی پرسپترون تحت سیال آب به صورت $6 \times 10 \times 1$ تعریف شده که شامل ۶ نرون ورودی، ۱۰ نرون در لایه پنهان و ۱ نرون در لایه خروجی می‌باشد که دارای توانایی بسیار قابل قبولی در پیش‌بینی شدت جریان مصرفی برای سنگ‌های سخت تحت سیالات دیگر شامل آب صابون به نسبت ۱ به ۲۰ و ۱ به ۴۰ و پودر آب تراش می‌باشد.

در ادامه یک شبکه عصبی پیشخور با ۸ ورودی شامل مشخصات سیال خنک‌کننده/روان‌کار (شامل سختی و ویسکوزیته)، مشخصات سنگ (سختی موس، ساینده شیمازک، مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته) و مشخصات عملیاتی (نرخ پیشروی و عمق برش) و یک خروجی شامل شدت جریان مصرفی دستگاه برش طراحی شد. در طی انجام این بخش، چندین شبکه با تعداد ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ لایه پنهان با تعداد ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نرون ساخته شد و نتایج آن‌ها با توجه به عملکرد شبکه و همبستگی میان نتایج واقعی و پیش‌بینی شده با یکدیگر مقایسه شد. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که یک شبکه عصبی مصنوعی پیشخور با ۳ لایه پنهان و ۱۰ نرون مناسب‌ترین شبکه برای پیش‌بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش با ضریب همبستگی ۰/۹۶ می‌باشد. بدین ترتیب این شبکه می‌تواند با دقت بالایی با توجه به مشخصات سیال خنک‌کننده/روان‌کار، مشخصات سنگ و مشخصات عملیاتی برش میزان شدت جریان مصرفی حداکثری دستگاه برش را مورد ارزیابی و پیش‌بینی قرار دهد.

¹ Levenberg–Marquardt (LM) learning algorithm

فصل ۷ : تحلیل اقتصادی سیالات مورد مطالعه

۷-۱ مقدمه

یکی از مهم‌ترین اهداف این تحقیق، ارزیابی سیال خنک‌کننده/روان‌کار در فرایند برش سنگ‌های سخت می‌باشد تا مشخص شود تحت چه شرایطی از مناسب‌ترین سیال با بیشترین صرفه‌ی اقتصادی استفاده کرد. بدین ترتیب سعی شد تا در مرحله نخست به بررسی تاثیر سیال بر یکی از فاکتورهای هزینه‌ساز در فرایند برش پرداخته شود. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که در شرایط تغییر سیال آب شهری میزان مصرف انرژی به طور میانگین در حدود ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. بررسی اقتصادی این مسئله که آیا تغییر سیال به عبارت دیگر افزایش هزینه سیال خنک‌کننده/روان‌کار، می‌تواند با کاهش هزینه‌های مصرف انرژی برابری کرده و یا از آن کمتر شود. در ادامه به بررسی این موضوع و پاسخ به سوال مطرح شده پرداخته می‌شود.

۷-۲ فاکتورهای هزینه‌ساز مصرف انرژی و سیال خنک‌کننده/روان‌کار

در یک واحد تولید سنگ‌های ساختمانی همانند دیگر واحدهای تولیدی، تولید با هزینه‌هایی مواجه می‌باشد. مدل‌های ریاضی مربوط به هزینه مصرف انرژی و سیال خنک‌کننده/روان‌کار را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد:

۷-۲-۱ تابع هزینه مصرف انرژی

هزینه‌ی انرژی مصرفی را می‌توان از رابطه ۷-۱ با توجه به نرخ مصرف انرژی و قیمت واحد انرژی تعیین کرد. با استفاده از این تابع هزینه‌ی مصرف انرژی به ازای واحد سطح برش خورده از بلوک سنگی قابل محاسبه می‌باشد.

$$C_E = \frac{E_{co} \times E_P}{P_h} \quad (۷-۱)$$

در آن:

C_E : هزینه مصرف انرژی (T/m^2)

E_p : قیمت واحد انرژی (T/Kwh)

E_{co} : نرخ انرژی مصرفی (Kwh/h)

P_h : نرخ تولید (m^2/h)

۲-۲-۷ تابع هزینه مصرف سیال خنک کننده/روان کار

رابطه ۲-۷ میزان هزینه‌ی سیال مصرفی را به ازای واحد سطح برش خورده از یک بلوک سنگی نشان می‌دهد.

$$C_w = \frac{W_{co} \times W_p}{P_h} \quad (2-7)$$

در آن :

C_w : هزینه مصرف سیال (T/m^2)

W_{co} : نرخ مصرف سیال (lit/h)

W_p : قیمت واحد لیتر سیال (T/lit)

۳-۷ مقایسه اقتصادی کاربرد سیالات مختلف

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^۱ در سال ۲۰۰۵ اشاره کرد

[۱۰۵]. 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 سعی می‌شود تا به بررسی و تحلیل اقتصادی دو فاکتور هزینه‌ساز در صنعت سنگ‌بری در کشور ایران پرداخته شود. بدین ترتیب برای تحلیل در مقیاس صنعتی، تحلیل اقتصادی برای یک کارخانه سنگ‌بری در شهرک صنعتی محمود آباد اصفهان بر روی نمونه سنگ گرانیت قرمز یزد انجام شد. بدین منظور ابتدا اطلاعات اقتصادی مورد نیاز در نمونه فرم تهیه شده ثبت شد. اطلاعات و مشخصات ثبت شده در جدول ۷-۱ نشان داده شده است. مطابق با اطلاعات درج شده در جدول ۷-۱، در کارخانه‌ی مورد مطالعه از دیسک‌های سخت‌بر برای برش سنگ‌های گرانیتی استفاده می‌شود. ساعات کاری به‌طور متوسط برابر با ۱۰ ساعت در روز و ۲۸۰ ساعات در ماه برآورد شد. میزان حداکثر جریان مصرفی دستگاه برش دهنده دیسکی برابر با ۱۳۰ آمپر و مقدار ولتاژ مصرفی آن برابر با ۴۰۰ ولت می‌باشد. مقدار بهای هر کیلو وات ساعت و هر لیتر آب شهری با توجه به تعرفه سال ۱۳۹۷ برای مراکز صنعتی برابر ۳۹۰ تومان در نظر گرفته شد.

جدول ۷-۱ اطلاعات و مشخصات ثبت شده از کارخانه‌های سنگ‌بری برای انجام تحلیل حساسیت

نوع سنگ	گرانیتی - گرانیت یزد
W_{co} : نرخ مصرف آب (lit/h)	۶۰۰
W_p : قیمت واحد لیتر آب	۷/۲ تومان
C_p : قیمت هر گرم پودر آب تراش	۱۸۹ تومان
C_s : قیمت هر لیتر روغن آب صابون	۸۰۰ تومان
H_m : تعداد ساعت کاری در ماه	۲۸۰
D_c : عمق برش (mm)	۱/۵
F_r : نرخ پیشروی (cm/s)	۵۶
P_h : نرخ تولید (m^2/h)	۳/۰۲۴
E_{co} : نرخ انرژی مصرفی (Kwh/h)	۴۳/۶
E_p : قیمت واحد انرژی (T/Kwh)	۳۹۰
d_y : تعداد روزهای کاری در سال	۳۱۲
H_d : تعداد ساعت کاری در روز	۱۰

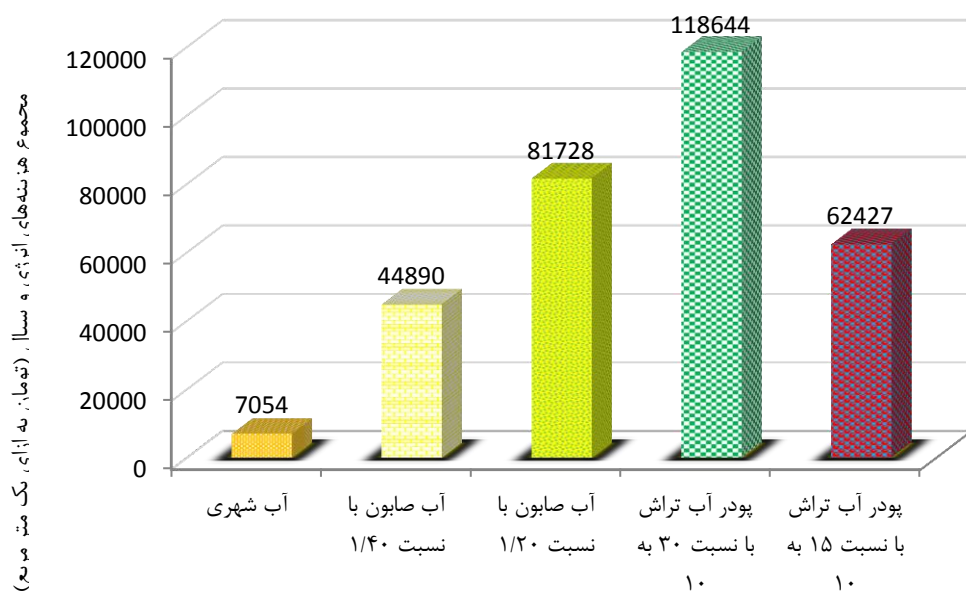
جدول ۷-۲ هزینه‌های سیالات مورد استفاده در تحقیق

سیال	هزینه هر لیتر سیال (تومان)	
آب شهری	۷/۲	
آب صابون با نسبت ۱ به ۴۰	$C_{F2} = \frac{(C_S \times 1 + W_P \times 40)}{41}$	۲۰۲/۱۶
آب صابون با نسبت ۱ به ۲۰	$C_{F3} = \frac{(C_S \times 1 + W_P \times 20)}{21}$	۳۸۷/۸۲
آب تراش با نسبت ۳۰ به ۱۰	$C_{F4} = \frac{(C_P \times 30 + W_P \times 10)}{10}$	۵۷۳/۸۸
آب تراش با نسبت ۱۵ به ۱۰	$C_{F5} = \frac{(C_P \times 15 + W_P \times 10)}{10}$	۲۹۰/۵۴

پس از تکمیل اطلاعات اقتصادی، مطابق با جدول ۷-۲ مقادیر مربوط به هر یک از توابع هزینه‌ساز شامل مصرف آب و مصرف انرژی در شرایط مختلف استفاده از ۵ سیال مورد استفاده در این تحقیق به ازای هر متر مربع از سنگ محاسبه شد. لازم به ذکر است که میانگین کاهش مصرف انرژی در شرایط استفاده از سیالات در حدود ۱۵ درصد در نظر گرفته که با این میزان کاهش، مجموع مقادیر هزینه‌های سیال و انرژی به ازای هر متر مربع در ۶ حالت از دوره مصرف سیال‌ها به صورت یک ساعته، چهار ساعته، ده ساعته، ماهانه، دو ماهه و سه ماهه در جدول ۷-۳ درج شده است. نمودارهای شکل‌های ۷-۱ تا ۷-۶ به ترتیب مجموع هزینه‌های انرژی و سیال خنک‌کننده/روان‌کار را برای دوره‌های مختلف مصرف نشان می‌دهد.

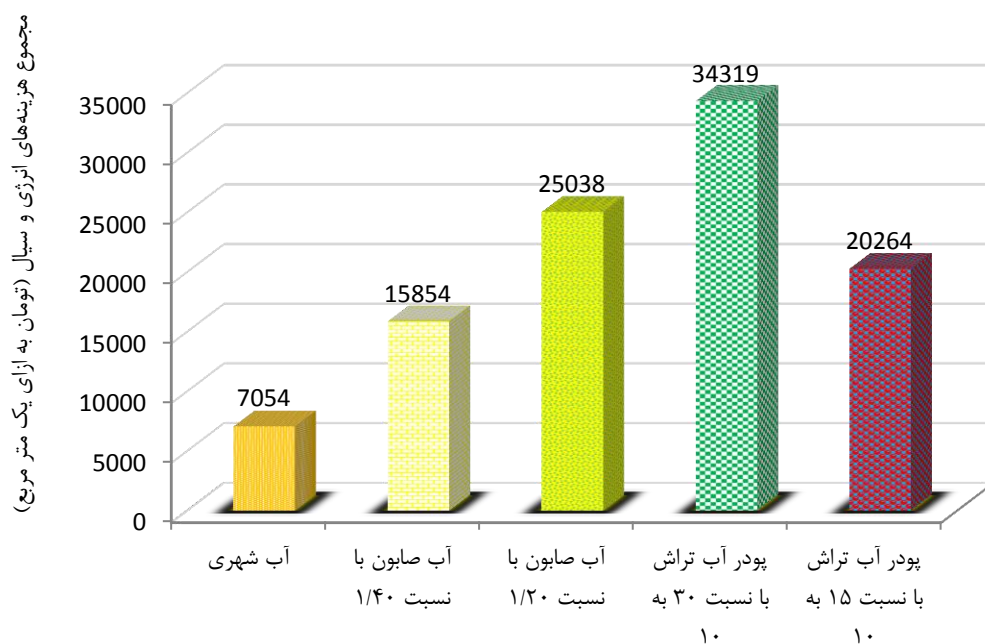
جدول ۷-۳ مجموع هزینه‌های انرژی و سیال مصرفی

حالت‌های کاربرد سیال خنک‌کننده و روان‌کار						سیال‌های مورد مطالعه
۱	۲	۳	۴	۵	۶	
مجموع هزینه‌ها (تومان به ازای هر متر مربع سنگ)						
۷۰۵۴	۷۰۵۴	۷۰۵۴	۷۰۵۴	۷۰۵۴	۷۰۵۴	سیال ۱ (آب شهری)
۴۴۸۹۰	۱۵۸۵۴	۱۰۰۴۷	۶۳۱۳	۶۲۴۴	۶۲۲۱	سیال ۲ (آب صابون ۱ به ۴۰)
۸۱۷۲۸	۲۵۰۳۸	۱۳۷۰۱	۶۴۱۲	۶۲۷۷	۶۲۳۲	سیال ۳ (آب صابون ۱ به ۲۰)
۱۱۸۶۴۴	۳۴۳۱۹	۱۷۴۵۴	۶۶۱۲	۶۴۱۱	۶۳۴۴	سیال ۴ (پودر آب تراش ۳۰ به ۱۰)
۶۲۴۲۷	۲۰۲۶۴	۱۱۸۳۲	۶۴۱۱	۶۳۱۱	۶۲۷۷	سیال ۵ (پودر آب تراش ۱۵ به ۱۰)



سیالات مورد مطالعه در تحقیق

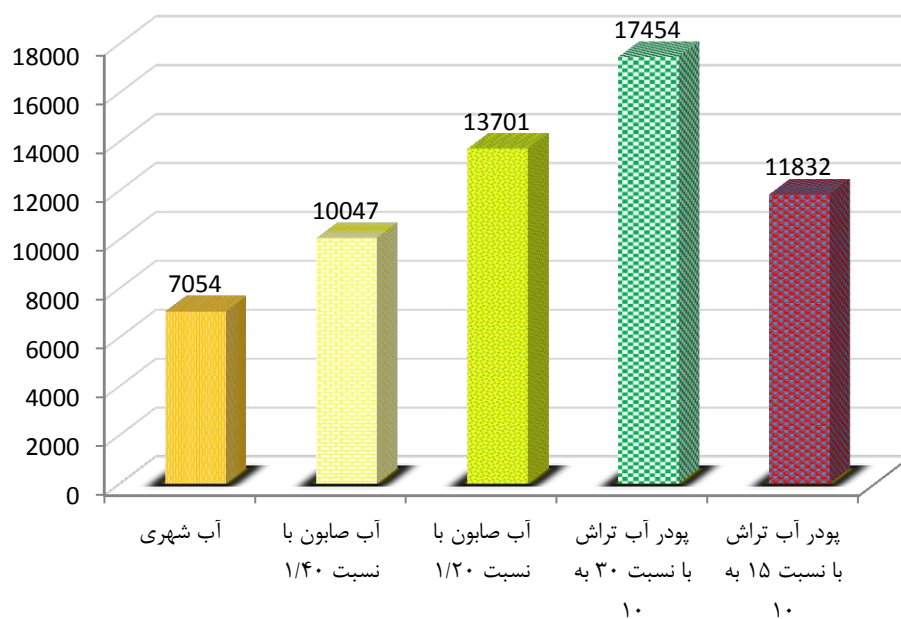
شکل ۱-۷ مجموع هزینه‌های انرژی و سیال در حالت اول



سیالات مورد مطالعه در تحقیق

شکل ۲-۷ مجموع هزینه‌های انرژی و سیال در حالت دوم

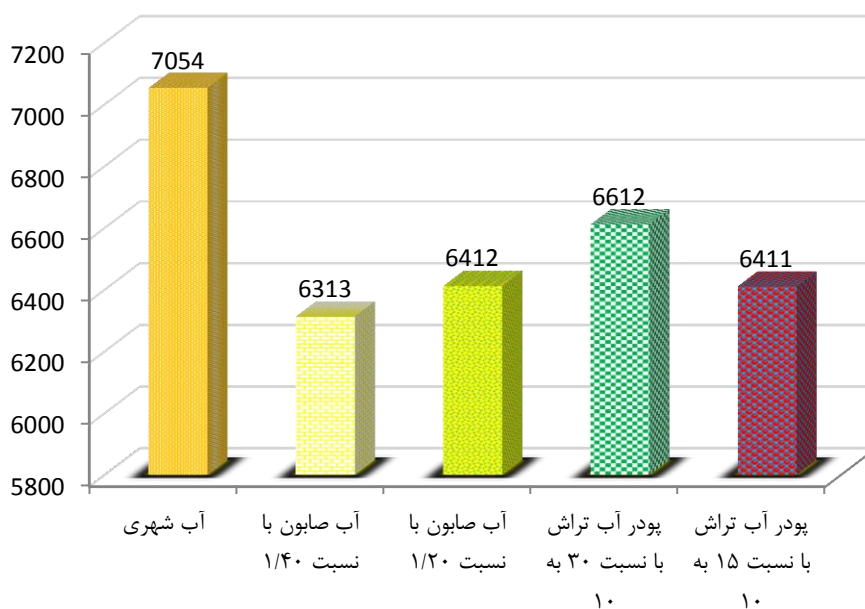
مجموع هزینه‌های انرژی و سیال (تومان به ازای یک متر مربع)



سیالات مورد مطالعه در تحقیق

شکل ۳-۷ مجموع هزینه‌های انرژی و سیال در حالت سوم

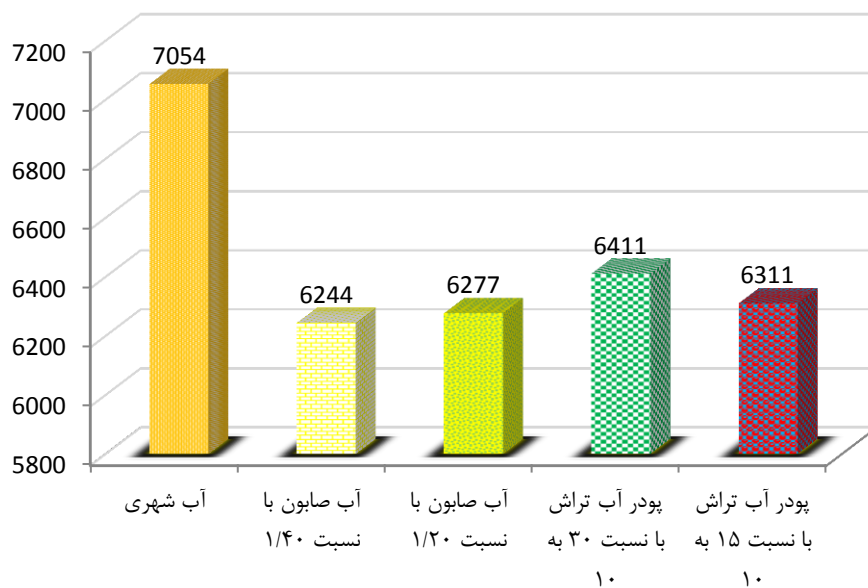
مجموع هزینه‌های انرژی و سیال (تومان به ازای یک متر مربع)



سیالات مورد مطالعه در تحقیق

شکل ۴-۷ مجموع هزینه‌های انرژی و سیال در حالت چهارم

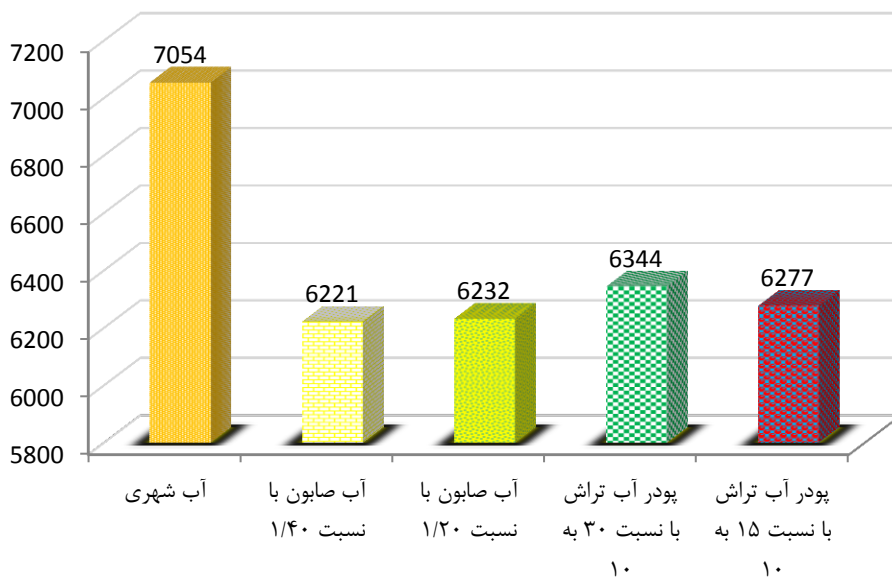
مجموع هزینه‌های انرژی و سیال (تومان به ازای یک متر مربع)



سیالات مورد مطالعه در تحقیق

شکل ۵-۷ مجموع هزینه‌های انرژی و سیال در حالت پنجم

مجموع هزینه‌های انرژی و سیال (تومان به ازای یک متر مربع)



سیالات مورد مطالعه در تحقیق

شکل ۶-۷ مجموع هزینه‌های انرژی و سیال در حالت ششم

بررسی نمودارها نشان می‌دهد که در دوره‌های استفاده شده در حالت‌های ۴، ۵ و ۶ مجموع هزینه‌های انرژی و سیال‌های ترکیبی از نمونه سیال پایه استفاده در فرایند برش کمتر می‌باشد. این بدین معنی می‌باشد که با جایگزین کردن سیالات ترکیبی (چهار سیال خنک‌کننده/روان‌کار) به جای سیال آب، کاهش هزینه‌های انرژی نسبت به افزایش هزینه‌های سیال بیشتر بوده و در مجموع هزینه برش هر متر مربع از پلاک سنگی کاهش می‌یابد. بدین ترتیب در صورت استفاده از یک مخزن ۶۰۰ لیتری از سیال ترکیبی در یک دوره یک ماهه یا بیشتر می‌توان به صرفه اقتصادی حداقل ۸۰۰ تومانی در هر متر مربع بریده شده از سنگ دست پیدا کرد.

۷-۴ جمع‌بندی

در این فصل سعی شد تا عملکرد اقتصادی سیالات ترکیبی مطالعه شده در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین منظور مقایسه‌ای از مجموع هزینه‌های انرژی و سیالات مورد مطالعه در یک واحد سنگ‌بری انجام شد. در طی انجام تحلیل اقتصادی میانگین کاهش مصرف شدت جریان مصرفی دستگاه برش سنگ، معادل میانگین کاهش این شاخص در مقیاس آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که مجموع هزینه‌های انرژی و سیال خنک‌کننده/روان‌کار برای چهار سیال آب صابون با نسبت ۱ به ۴۰ و ۱ به ۲۰ و پودر آب تراش با نسبت ۳۰ به ۱۰ و ۱۵ به ۱۰ برای دوره‌های یک ماهه و بعد از آن دارای صرفه اقتصادی بهتری نسبت به سیال پایه (آب شهری) می‌باشد. این بدین معنی است که با استفاده از این چهار سیال به عنوان خنک‌کننده/روان‌کار مقدار کاهش در قیمت انرژی ایجاد شده بیشتر از قیمت تمام شده سیال مورد استفاده در یک دوره ماهانه و بیشتر از آن می‌باشد.

فصل ۸ : نتیجه گیری و پیشنهادات

۸-۱ نتیجه‌گیری

عدم کارایی و مدیریت فنی مصرف انرژی در برخی از فرآیندهای صنعتی و اثرات نامطلوب زیست محیطی ناشی از آن، ضرورت بهینه‌سازی مصرف انرژی و انجام پروژه‌های بسیاری در این خصوص را آشکار می‌سازد. دستیابی به این هدف مستلزم بررسی دقیق صنایع می‌باشد تا بتوان ضمن یافتن راهکارهایی جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی، هزینه‌های تولید کالا را نیز کاهش داد. صنعت برش سنگ نیز در کشور با بیش از شصت هزار سنگبری فعال مستثنی از این امر نمی‌باشد. 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. برای دستیابی به چنین اهدافی شناخت دقیق تجهیزات برش به همراه فرآیند برش و پارامترهای مؤثر در آن امری لازم و ضروری می‌باشد.

در طی فرایند برش، 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. نکته قابل تأمل در این بخش حضور نامطلوب نیروهای فرایند و تنش‌های حرارتی در کنار تراشه و تأثیرات منفی آن‌ها در عملکرد برش می‌باشد. در اکثر فرایندهای سایشی بخش اعظم هدررفت انرژی مربوط به تنش‌های حرارتی ناشی از اصطکاک میان سگمنت و قطعه کار می‌باشد، که با افزایش سختی، ساینده‌گی و پارامترهای مقاومتی سنگ این موضوع تشدید می‌شود. به منظور افزایش توان تراشه برداری دانه الماس می‌بایست در کنار کاهش نیروهای فرایند، تنش‌های حرارتی تولید شده را به حداقل ممکن رساند تا هم به ارتقاء و کیفیت سطح برش خورده کمک کرد و هم عمر ابزار را بهبود بخشید. این امر زمانی محقق می‌شود که بتوان عوامل نامطلوب مذکور (نیروهای فرایند، تنش‌های حرارتی و حضور تراشه) را در محیط فرایند به حداقل رساند. یکی از مهم‌ترین راهکار برای دست‌یابی به این هدف استفاده از یک سیال خنک‌کننده/روان‌کار مناسب در محیط برش می‌باشد تا هم علاوه بر کاهش دمای

محیط برش، محیط پاک و عاری از تراشه های سنگی ایجاد کرد.

در بخش نخست از تحقیق حاضر، مطالعات میدانی و آزمایشگاهی به منظور بررسی عملکرد فرایند برش با استفاده از دستگاه برش دهنده دیسکی در مقیاس آزمایشگاهی با قابلیت ثبت و اندازه گیری میزان شدت جریان مصرفی صورت پذیرفت. آزمایشات تحت شرایط مختلف عملیاتی شامل عمق های برش ۰/۵، ۰/۷، ۱ و ۱/۳ سانتی متر و نرخ های مختلف پیشروی ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ سانتی متر بر دقیقه با سرعت چرخش ثابت ۳۴۰۰ دور بر دقیقه دیسک با ۵ نوع سیال روان کار شامل آب، آب صابون با نسبت ۱ به ۴۰، ۱ به ۲۰ و پودر آب تراش با نسبت های ۳۰ به ۱۰ و ۱۵ به ۱۰ انجام شد. در مجموع تعداد ۸۰۰ آزمایش به عنوان جامعه آماری برای انجام مطالعات آماری و طراحی شبکه های هوشمند مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج حاصل از این بررسی ها در بخش مطالعات آماری نشان داد که:

- نتایج حاصل از برازش های ساده تک متغیره خطی نشان داد که با افزایش مشخصات عملیاتی شامل عمق برش و نرخ پیشروی مقدار شدت جریان مصرفی دستگاه برش افزایش پیدا می کند. به طوری که شیب این تغییرات در شرایط استفاده از سیالات مختلف متفاوت می باشد. در حالت کلی می توان به عملکرد مناسب سیال خنک کننده/روان کار پودر آب تراش با نسبت ۳۰ به ۱۰ اشاره کرد که در بیشتر موارد استفاده از این سیال به عنوان سیال خنک کننده/روان کار، میزان شدت جریان مصرفی دستگاه به طور چشمگیری کاهش پیدا کرده است. در مجموع میانگین کاهش شدت جریان مصرفی دستگاه برش سنگ، در شرایط استفاده از سیالات روان کار به میزان ۱۵ درصد ثبت شد.
- در ادامه مطالعات آماری، ۱۰ مدل آماری چند متغیره خطی و غیر خطی برای پیش بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش با استفاده از نرم افزار SPSS ارائه شد. تست های آماری t و F برای کنترل و معنی داری مدل و ضرایب و همچنین ضرایب منطقی مدل برای بررسی صحت و سقم مدل ها مورد استفاده قرار گرفتند. پس از انجام بررسی ها ۵ مدل به عنوان مدل های نهایی برای پیش بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش انتخاب شدند. نتایج تست های آماری برای ۵ مدل انتخابی با سطح

اطمینان ۹۹ درصد و ضریب همبستگی در حدود ۰/۸ نشان دادند که می‌توان با دقت خوبی میزان شدت جریان مصرفی دستگاه برش را در شرایط متفاوت با استفاده از سیالات مختلف مورد ارزیابی قرار داد. در این میان مدل‌های ۶ و ۱۰ را می‌توان با توجه به ضرایب همبستگی بیشتر نسبت به سایر مدل‌ها، به عنوان مدل‌های برتر جهت پیش بینی شدت جریان مصرفی دستگاه با توجه به پارامترهای عملیاتی شامل عمق برش و نرخ پیشروی، مشخصات سیال شامل سختی و ویسکوزیته و سختی سنگ معرفی کرد. نکته قابل تامل در تمامی مدل‌ها، ضرایب منطقی پارامترهای عملیاتی، سختی و ویسکوزیته سیال می‌باشند. به طوری که در تمامی مدل‌ها میزان شدت جریان مصرفی دستگاه برش سنگ دارای ارتباط مستقیم با میزان عمق برش و نرخ پیشروی می‌باشند. در نقطه مقابل تغییرات شدت جریان مصرفی دستگاه برش دارای ارتباط عکس با سختی و ویسکوزیته سیال می‌باشد به طوری که با افزایش میزان روان کاری سیال یا به عبارت دیگر افزایش سختی و ویسکوزیته سیال میزان شدت جریان مصرفی دستگاه برش سنگ کاهش می‌یابد.

نتایج بررسی‌های انجام شده در بخش طراحی و مدل سازی شبکه‌های هوشمند نشان داد که:

- مقایسه شاخص‌های عملکرد مدل‌های ساخته شده توسط الگوریتم‌های مورد استفاده بیانگر کارآمدی و قابلیت بالای شبکه عصبی پرسپترون چند لایه برای پیش‌بینی بیشترین شدت جریان مصرفی دستگاه برش نسبت به الگوریتم هیبریدی ژنتیک - شبکه عصبی پرسپترون می‌باشد. در واقع با انجام یک مقایسه مشخص می‌شود که نه تنها مدل برتر در شبیه سازی‌های صورت گرفته توسط شبکه عصبی پرسپترون دارای شاخص‌های عملکرد بسیار کارآمدتر و برتری است، بلکه سایر مدل‌های شبیه سازی شده نیز توسط این الگوریتم دارای برتری کاملی نسبت به مدل‌های شبیه سازی شده توسط الگوریتم هیبریدی ژنتیک - شبکه عصبی پرسپترون است.

- در شبیه سازی‌های انجام شده، مشخص شد که الگوریتم یادگیری لونیگ و مارکواردت دارای قابلیت و کارایی چشم‌گیرتری نسبت به الگوریتم ژنتیک در آموزش شبکه عصبی مصنوعی بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با وجود عدم قطعیت و پیچیدگی سیستم، مقدار این عدم قطعیت و

پیچیدگی سیستم به اندازه‌ای بوده است که الگوریتم یادگیری لونیبرگ و مارکواردت بتواند این سیستم را تحلیل بکند. در واقع به دلیل توانایی بسیار بالای الگوریتم ژنتیک این الگوریتم در آموزش شبکه عصبی مصنوعی دچار بیش‌برازش می‌شود. این نکته قابل ذکر است که آزمایش‌ها بر روی نمونه سنگ‌های سخت به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها و همچنین بررسی عملکرد دستگاه برش براساس پیش‌بینی بیشترین شدت جریان مصرفی دستگاه برش به عنوان یک مجموعه و سیستم دارای عدم قطعیت و پیچیده به حساب می‌آید، اما مقدار این عدم قطعیت و پیچیدگی به صورت واضح مشخص نمی‌باشد.

- ادامه بررسی شبکه‌های هوشمند، یک شبکه عصبی پیشخور با ۸ ورودی شامل تمامی مشخصات اندازه گیری شده در این تحقیق شامل، مشخصات سیال خنک‌کننده/روان‌کار (شامل سختی و ویسکوزیته)، مشخصات سنگ (سختی موس، ساینده‌گی شیمازک، مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیسیته) و مشخصات عملیاتی (نرخ پیشروی و عمق برش) و یک خروجی شامل شدت جریان مصرفی دستگاه برش طراحی شد. این شبکه با ۳ لایه پنهان و ۱۰ نرون مناسبترین شبکه برای پیش بینی شدت جریان مصرفی دستگاه برش با ضریب همبستگی ۰/۹۶ از میان شبکه‌های مختلف انتخاب شد. شبکه طراحی شده با دقت بالایی می‌تواند با توجه به مشخصات سیال خنک‌کننده/روان‌کار، مشخصات سنگ و مشخصات عملیاتی برش میزان شدت جریان مصرفی حداکثری دستگاه برش را مورد ارزیابی و پیش بینی قرار دهد.

در نهایت مطالعات اقتصادی جهت ارزیابی سیالات مورد مطالعه انجام شد نتایج حاصل از این بخش نشان داد که:

- با بررسی مجموع مقادیر هزینه‌های سیال و انرژی به ازای هر متر مربع در ۶ حالت از دوره مصرف سیال‌ها (دوره‌های تعویض یک ساعته، چهار ساعته، ده ساعته، ماهانه، دو ماهه و سه ماهه سیال)، مشخص شد که استفاده از چهار سیال خنک‌کننده/روان‌کار برای دوره‌های یک ماهه و بعد از آن دارای صرفه اقتصادی بهتری نسبت به سیال پایه آب شهری می‌باشد. این بدین معنی است که در

زمان استفاده از این چهار سیال به عنوان خنک کننده/روان کار مقدار کاهش در هزینه‌های انرژی بیشتر از قیمت تمام شده سیال روان کار مورد استفاده می‌باشد.

۸-۲ پیشنهادها

به‌طور کلی موارد زیر جهت انجام مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود:

- ارزیابی و مقایسه سیالات خنک کننده/روان کار مورد مطالعه در این تحقیق از دیدگاه زیست محیطی
 - ارزیابی عملکرد سیالات مورد مطالعه از دیدگاه فرایندهای شیمی-فیزیکی (تعامل کانی‌های تشکیل دهنده سنگ با سیال خنک کننده/روان کار) در طول فرایند برش
 - ارزیابی تأثیر سیال خنک کننده/روان کار به عنوان یکی از عوامل مهم در کاهش نیروهای فرایند به ویژه نیروهای مماسی و نرمال که توجه ویژه به کاهش این نیروها می‌تواند موجب تغییرات چشم‌گیری در کاهش سایش ابزار الماسی به عبارت دیگر افزایش قدرت تراشه‌برداری دانه الماس، جلوگیری از لهیدگی، گردش‌دگی، خروج زودرس دانه از باند، شکست زودرس دانه و تغییر شکل‌های پلاستیک ابزار شود.
- در نهایت آنچه مسلم است این است که سیال بهینه از دیدگاه قابلیت برش می‌بایست با توجه به تمامی فاکتورهای هزینه‌ساز تعیین شود به طوری که یک مدل هزینه مشتمل بر تمامی هزینه‌های برش شامل هزینه‌های سیال، هزینه‌های کارگری، هزینه‌های تعمیرات و نگهداری، هزینه‌های سایش دیسک و هزینه انرژی مصرفی تهیه شده و سپس مطلوب‌ترین سیال با توجه به کمترین هزینه‌ها انتخاب شود.

پیوست

پیوست الف - نتایج آزمایش گاهی به دست آمده

پیوست الف- جدول نتایج آزمایشگاهی برای نمونه های تحت آزمایش در هنگام استفاده از

سیال های خنک کننده/روان کار

پیوست ب- نمودارهای به دست آمده از فرآیند برش

پیوست ب-۱- نمودارهای تغییرات شدت جریان بر حسب تغییرات عمق برش

پیوست ب-۲- نمودارهای تغییرات شدت جریان بر حسب تغییرات نرخ پیشروی

پیوست الف - نمونه ای نتایج آزمایش گاهی به دست آمده

جدول پیوست الف- جدول نتایج آزمایشگاهی برای نمونه های تحت آزمایش

نمونه ها	SF-a(N/mm)	YM	MH	UCS	Vis (mPa.s)	PH	Dc (cm)	Fr (cm/min)	Imax
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.069	7.68	0.5	90	6.6
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.069	7.68	0.7	90	7.3
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.069	7.68	1	90	8
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.069	7.68	1.3	90	8.6
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.069	7.68	0.5	75	6.2
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.069	7.68	0.7	75	6.8
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.069	7.68	1	75	7.5
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.069	7.68	1.3	75	8
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.069	7.68	0.5	60	6
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.069	7.68	0.7	60	6.5
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.069	7.68	1	60	7.4
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.069	7.68	1.3	60	7.8
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.069	7.68	0.5	45	5.7
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.069	7.68	0.7	45	6.2
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.069	7.68	1	45	6.7
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.069	7.68	1.3	45	7.4
A2	28.3	52	6.4	239	1.069	7.68	0.5	90	8.3
A2	28.3	52	6.4	239	1.069	7.68	0.7	90	10.2
A2	28.3	52	6.4	239	1.069	7.68	1	90	11.2
A2	28.3	52	6.4	239	1.069	7.68	1.3	90	13.8
A2	28.3	52	6.4	239	1.069	7.68	0.5	75	7.6

A2	28.3	52	6.4	239	1.069	7.68	0.7	75	9.1
A2	28.3	52	6.4	239	1.069	7.68	1	75	10.2
A2	28.3	52	6.4	239	1.069	7.68	1.3	75	12.6
A2	28.3	52	6.4	239	1.069	7.68	0.5	60	6.5
A2	28.3	52	6.4	239	1.069	7.68	0.7	60	7.4
A2	28.3	52	6.4	239	1.069	7.68	1	60	7.8
A2	28.3	52	6.4	239	1.069	7.68	1.3	60	8.7
A2	28.3	52	6.4	239	1.069	7.68	0.5	45	5.7
A2	28.3	52	6.4	239	1.069	7.68	0.7	45	6.5
A2	28.3	52	6.4	239	1.069	7.68	1	45	7.1
A2	28.3	52	6.4	239	1.069	7.68	1.3	45	7.6
A3	8.352	56	6.1	279	1.069	7.68	0.5	90	8.2
A3	8.352	56	6.1	279	1.069	7.68	0.7	90	9
A3	8.352	56	6.1	279	1.069	7.68	1	90	9.7
A3	8.352	56	6.1	279	1.069	7.68	1.3	90	10.9
A3	8.352	56	6.1	279	1.069	7.68	0.5	75	7.5
A3	8.352	56	6.1	279	1.069	7.68	0.7	75	8.8
A3	8.352	56	6.1	279	1.069	7.68	1	75	9.5
A3	8.352	56	6.1	279	1.069	7.68	1.3	75	10.6
A3	8.352	56	6.1	279	1.069	7.68	0.5	60	7.2
A3	8.352	56	6.1	279	1.069	7.68	0.7	60	8.1
A3	8.352	56	6.1	279	1.069	7.68	1	60	8.6
A3	8.352	56	6.1	279	1.069	7.68	1.3	60	9.4
A3	8.352	56	6.1	279	1.069	7.68	0.5	45	6.8
A3	8.352	56	6.1	279	1.069	7.68	0.7	45	7
A3	8.352	56	6.1	279	1.069	7.68	1	45	7.6
A3	8.352	56	6.1	279	1.069	7.68	1.3	45	8.9
A4	4.284	37	6.3	110	1.069	7.68	0.5	90	8.2
A4	4.284	37	6.3	110	1.069	7.68	0.7	90	9.5
A4	4.284	37	6.3	110	1.069	7.68	1	90	10.8
A4	4.284	37	6.3	110	1.069	7.68	1.3	90	12.3
A4	4.284	37	6.3	110	1.069	7.68	0.5	75	7.3
A4	4.284	37	6.3	110	1.069	7.68	0.7	75	8.5
A4	4.284	37	6.3	110	1.069	7.68	1	75	9.8
A4	4.284	37	6.3	110	1.069	7.68	1.3	75	11.1
A4	4.284	37	6.3	110	1.069	7.68	0.5	60	6.6
A4	4.284	37	6.3	110	1.069	7.68	0.7	60	7.2
A4	4.284	37	6.3	110	1.069	7.68	1	60	8.5
A4	4.284	37	6.3	110	1.069	7.68	1.3	60	10
A4	4.284	37	6.3	110	1.069	7.68	0.5	45	6.5
A4	4.284	37	6.3	110	1.069	7.68	0.7	45	7
A4	4.284	37	6.3	110	1.069	7.68	1	45	7.7
A4	4.284	37	6.3	110	1.069	7.68	1.3	45	9.1
A5	46.63	43	5.7	150	1.069	7.68	0.5	90	6.5

A5	46.63	43	5.7	150	1.069	7.68	0.7	90	7.3
A5	46.63	43	5.7	150	1.069	7.68	1	90	8.8
A5	46.63	43	5.7	150	1.069	7.68	1.3	90	9.7
A5	46.63	43	5.7	150	1.069	7.68	0.5	75	6.2
A5	46.63	43	5.7	150	1.069	7.68	0.7	75	7
A5	46.63	43	5.7	150	1.069	7.68	1	75	8.5
A5	46.63	43	5.7	150	1.069	7.68	1.3	75	9
A5	46.63	43	5.7	150	1.069	7.68	0.5	60	5.8
A5	46.63	43	5.7	150	1.069	7.68	0.7	60	6.4
A5	46.63	43	5.7	150	1.069	7.68	1	60	7.1
A5	46.63	43	5.7	150	1.069	7.68	1.3	60	7.9
A5	46.63	43	5.7	150	1.069	7.68	0.5	45	5.7
A5	46.63	43	5.7	150	1.069	7.68	0.7	45	6.2
A5	46.63	43	5.7	150	1.069	7.68	1	45	7.1
A5	46.63	43	5.7	150	1.069	7.68	1.3	45	7.6
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.069	7.68	0.5	90	6.4
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.069	7.68	0.7	90	7.1
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.069	7.68	1	90	8.6
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.069	7.68	1.3	90	9.6
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.069	7.68	0.5	75	6
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.069	7.68	0.7	75	6.8
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.069	7.68	1	75	8
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.069	7.68	1.3	75	8.9
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.069	7.68	0.5	60	5.9
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.069	7.68	0.7	60	6.8
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.069	7.68	1	60	7.8
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.069	7.68	1.3	60	8.3
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.069	7.68	0.5	45	5.5
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.069	7.68	0.7	45	6.5
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.069	7.68	1	45	6.8
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.069	7.68	1.3	45	7.3
A7	1.872	46.5	6	182	1.069	7.68	0.5	90	6.2
A7	1.872	46.5	6	182	1.069	7.68	0.7	90	7
A7	1.872	46.5	6	182	1.069	7.68	1	90	7.7
A7	1.872	46.5	6	182	1.069	7.68	1.3	90	9.1
A7	1.872	46.5	6	182	1.069	7.68	0.5	75	5.9
A7	1.872	46.5	6	182	1.069	7.68	0.7	75	6.8
A7	1.872	46.5	6	182	1.069	7.68	1	75	7.5
A7	1.872	46.5	6	182	1.069	7.68	1.3	75	8.7
A7	1.872	46.5	6	182	1.069	7.68	0.5	60	5.8
A7	1.872	46.5	6	182	1.069	7.68	0.7	60	6.5
A7	1.872	46.5	6	182	1.069	7.68	1	60	7
A7	1.872	46.5	6	182	1.069	7.68	1.3	60	7.6
A7	1.872	46.5	6	182	1.069	7.68	0.5	45	5.8

A7	1.872	46.5	6	182	1.069	7.68	0.7	45	6.4
A7	1.872	46.5	6	182	1.069	7.68	1	45	6.5
A7	1.872	46.5	6	182	1.069	7.68	1.3	45	7.4
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.069	7.68	0.5	90	6.6
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.069	7.68	0.7	90	7.6
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.069	7.68	1	90	8.5
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.069	7.68	1.3	90	9.3
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.069	7.68	0.5	75	6.2
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.069	7.68	0.7	75	7
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.069	7.68	1	75	7.9
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.069	7.68	1.3	75	8.8
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.069	7.68	0.5	60	5.9
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.069	7.68	0.7	60	6.7
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.069	7.68	1	60	7.2
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.069	7.68	1.3	60	8.6
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.069	7.68	0.5	45	5.7
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.069	7.68	0.7	45	6.5
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.069	7.68	1	45	6.8
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.069	7.68	1.3	45	7.6
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.069	7.68	0.5	90	7.8
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.069	7.68	0.7	90	8.2
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.069	7.68	1	90	8.5
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.069	7.68	1.3	90	9.5
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.069	7.68	0.5	75	7.5
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.069	7.68	0.7	75	8
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.069	7.68	1	75	8.1
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.069	7.68	1.3	75	8.7
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.069	7.68	0.5	60	7.4
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.069	7.68	0.7	60	7.6
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.069	7.68	1	60	7.7
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.069	7.68	1.3	60	8.3
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.069	7.68	0.5	45	7.1
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.069	7.68	0.7	45	7.4
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.069	7.68	1	45	7.5
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.069	7.68	1.3	45	8.1
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.069	7.68	0.5	90	6.1
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.069	7.68	0.7	90	7.4
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.069	7.68	1	90	8.2
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.069	7.68	1.3	90	8.8
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.069	7.68	0.5	75	5.6
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.069	7.68	0.7	75	7.2
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.069	7.68	1	75	7.8
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.069	7.68	1.3	75	8.3
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.069	7.68	0.5	60	5.3

A10	7.6	48.6	6.6	173	1.069	7.68	0.7	60	6.1
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.069	7.68	1	60	6.6
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.069	7.68	1.3	60	7.4
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.069	7.68	0.5	45	6.1
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.069	7.68	0.7	45	6.2
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.069	7.68	1	45	6.5
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.069	7.68	1.3	45	6.8
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9851	7.87	0.5	90	5.9
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9851	7.87	0.7	90	6.1
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9851	7.87	1	90	6.8
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9851	7.87	1.3	90	7.9
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9851	7.87	0.5	75	5.8
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9851	7.87	0.7	75	6
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9851	7.87	1	75	6.4
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9851	7.87	1.3	75	7.5
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9851	7.87	0.5	60	5.6
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9851	7.87	0.7	60	6.1
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9851	7.87	1	60	6.9
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9851	7.87	1.3	60	7.2
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9851	7.87	0.5	45	5.5
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9851	7.87	0.7	45	6
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9851	7.87	1	45	6.3
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9851	7.87	1.3	45	6.6
A2	28.3	52	6.4	239	0.9851	7.87	0.5	90	6.1
A2	28.3	52	6.4	239	0.9851	7.87	0.7	90	7.4
A2	28.3	52	6.4	239	0.9851	7.87	1	90	8.3
A2	28.3	52	6.4	239	0.9851	7.87	1.3	90	9.6
A2	28.3	52	6.4	239	0.9851	7.87	0.5	75	6
A2	28.3	52	6.4	239	0.9851	7.87	0.7	75	6.9
A2	28.3	52	6.4	239	0.9851	7.87	1	75	7.8
A2	28.3	52	6.4	239	0.9851	7.87	1.3	75	8.6
A2	28.3	52	6.4	239	0.9851	7.87	0.5	60	5.9
A2	28.3	52	6.4	239	0.9851	7.87	0.7	60	6.4
A2	28.3	52	6.4	239	0.9851	7.87	1	60	7.2
A2	28.3	52	6.4	239	0.9851	7.87	1.3	60	7.9
A2	28.3	52	6.4	239	0.9851	7.87	0.5	45	5.6
A2	28.3	52	6.4	239	0.9851	7.87	0.7	45	6.2
A2	28.3	52	6.4	239	0.9851	7.87	1	45	7
A2	28.3	52	6.4	239	0.9851	7.87	1.3	45	7.4
A3	8.352	56	6.1	279	0.9851	7.87	0.5	90	5.9
A3	8.352	56	6.1	279	0.9851	7.87	0.7	90	6.5
A3	8.352	56	6.1	279	0.9851	7.87	1	90	7.4
A3	8.352	56	6.1	279	0.9851	7.87	1.3	90	8.6
A3	8.352	56	6.1	279	0.9851	7.87	0.5	75	5.9

A3	8.352	56	6.1	279	0.9851	7.87	0.7	75	6.2
A3	8.352	56	6.1	279	0.9851	7.87	1	75	7
A3	8.352	56	6.1	279	0.9851	7.87	1.3	75	8.1
A3	8.352	56	6.1	279	0.9851	7.87	0.5	60	5.8
A3	8.352	56	6.1	279	0.9851	7.87	0.7	60	6
A3	8.352	56	6.1	279	0.9851	7.87	1	60	6.9
A3	8.352	56	6.1	279	0.9851	7.87	1.3	60	7.7
A3	8.352	56	6.1	279	0.9851	7.87	0.5	45	5.7
A3	8.352	56	6.1	279	0.9851	7.87	0.7	45	6
A3	8.352	56	6.1	279	0.9851	7.87	1	45	6.4
A3	8.352	56	6.1	279	0.9851	7.87	1.3	45	6.9
A4	4.284	37	6.3	110	0.9851	7.87	0.5	90	5.8
A4	4.284	37	6.3	110	0.9851	7.87	0.7	90	6.7
A4	4.284	37	6.3	110	0.9851	7.87	1	90	7.2
A4	4.284	37	6.3	110	0.9851	7.87	1.3	90	8.3
A4	4.284	37	6.3	110	0.9851	7.87	0.5	75	5.8
A4	4.284	37	6.3	110	0.9851	7.87	0.7	75	6.5
A4	4.284	37	6.3	110	0.9851	7.87	1	75	7
A4	4.284	37	6.3	110	0.9851	7.87	1.3	75	8.3
A4	4.284	37	6.3	110	0.9851	7.87	0.5	60	5.7
A4	4.284	37	6.3	110	0.9851	7.87	0.7	60	6.2
A4	4.284	37	6.3	110	0.9851	7.87	1	60	6.8
A4	4.284	37	6.3	110	0.9851	7.87	1.3	60	7.6
A4	4.284	37	6.3	110	0.9851	7.87	0.5	45	5.3
A4	4.284	37	6.3	110	0.9851	7.87	0.7	45	6.1
A4	4.284	37	6.3	110	0.9851	7.87	1	45	6.6
A4	4.284	37	6.3	110	0.9851	7.87	1.3	45	7.4
A5	46.63	43	5.7	150	0.9851	7.87	0.5	90	5.8
A5	46.63	43	5.7	150	0.9851	7.87	0.7	90	6
A5	46.63	43	5.7	150	0.9851	7.87	1	90	6.3
A5	46.63	43	5.7	150	0.9851	7.87	1.3	90	7.2
A5	46.63	43	5.7	150	0.9851	7.87	0.5	75	5.7
A5	46.63	43	5.7	150	0.9851	7.87	0.7	75	6
A5	46.63	43	5.7	150	0.9851	7.87	1	75	6.2
A5	46.63	43	5.7	150	0.9851	7.87	1.3	75	7.1
A5	46.63	43	5.7	150	0.9851	7.87	0.5	60	5.6
A5	46.63	43	5.7	150	0.9851	7.87	0.7	60	8.9
A5	46.63	43	5.7	150	0.9851	7.87	1	60	6.3
A5	46.63	43	5.7	150	0.9851	7.87	1.3	60	7.3
A5	46.63	43	5.7	150	0.9851	7.87	0.5	45	5.5
A5	46.63	43	5.7	150	0.9851	7.87	0.7	45	5.8
A5	46.63	43	5.7	150	0.9851	7.87	1	45	6.3
A5	46.63	43	5.7	150	0.9851	7.87	1.3	45	6.8
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9851	7.87	0.5	90	5.5

A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9851	7.87	0.7	90	6.3
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9851	7.87	1	90	6.8
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9851	7.87	1.3	90	7.7
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9851	7.87	0.5	75	5.5
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9851	7.87	0.7	75	6.1
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9851	7.87	1	75	6.5
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9851	7.87	1.3	75	7.6
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9851	7.87	0.5	60	5.5
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9851	7.87	0.7	60	6
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9851	7.87	1	60	6.5
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9851	7.87	1.3	60	7.2
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9851	7.87	0.5	45	5.4
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9851	7.87	0.7	45	5.9
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9851	7.87	1	45	6.4
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9851	7.87	1.3	45	6.7
A7	1.872	46.5	6	182	0.9851	7.87	0.5	90	6.1
A7	1.872	46.5	6	182	0.9851	7.87	0.7	90	6.9
A7	1.872	46.5	6	182	0.9851	7.87	1	90	7.3
A7	1.872	46.5	6	182	0.9851	7.87	1.3	90	8.1
A7	1.872	46.5	6	182	0.9851	7.87	0.5	75	5.8
A7	1.872	46.5	6	182	0.9851	7.87	0.7	75	6.5
A7	1.872	46.5	6	182	0.9851	7.87	1	75	7
A7	1.872	46.5	6	182	0.9851	7.87	1.3	75	7.6
A7	1.872	46.5	6	182	0.9851	7.87	0.5	60	5.5
A7	1.872	46.5	6	182	0.9851	7.87	0.7	60	6.1
A7	1.872	46.5	6	182	0.9851	7.87	1	60	6.7
A7	1.872	46.5	6	182	0.9851	7.87	1.3	60	7.2
A7	1.872	46.5	6	182	0.9851	7.87	0.5	45	5.4
A7	1.872	46.5	6	182	0.9851	7.87	0.7	45	6
A7	1.872	46.5	6	182	0.9851	7.87	1	45	6.8
A7	1.872	46.5	6	182	0.9851	7.87	1.3	45	7.2
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9851	7.87	0.5	90	6.4
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9851	7.87	0.7	90	7.2
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9851	7.87	1	90	7.9
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9851	7.87	1.3	90	8.9
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9851	7.87	0.5	75	6.2
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9851	7.87	0.7	75	7
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9851	7.87	1	75	7.5
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9851	7.87	1.3	75	8.5
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9851	7.87	0.5	60	6
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9851	7.87	0.7	60	7
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9851	7.87	1	60	7.4
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9851	7.87	1.3	60	8.3
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9851	7.87	0.5	45	5.8

A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9851	7.87	0.7	45	6
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9851	7.87	1	45	6.4
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9851	7.87	1.3	45	7.1
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9851	7.87	0.5	90	5.5
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9851	7.87	0.7	90	6
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9851	7.87	1	90	6.6
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9851	7.87	1.3	90	7.3
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9851	7.87	0.5	75	5.5
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9851	7.87	0.7	75	5.9
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9851	7.87	1	75	6.5
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9851	7.87	1.3	75	7.3
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9851	7.87	0.5	60	5.4
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9851	7.87	0.7	60	5.9
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9851	7.87	1	60	6.3
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9851	7.87	1.3	60	6.9
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9851	7.87	0.5	45	5.3
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9851	7.87	0.7	45	5.8
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9851	7.87	1	45	6.1
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9851	7.87	1.3	45	6.5
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9851	7.87	0.5	90	5.8
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9851	7.87	0.7	90	6.4
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9851	7.87	1	90	7.2
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9851	7.87	1.3	90	8.2
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9851	7.87	0.5	75	5.7
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9851	7.87	0.7	75	6.2
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9851	7.87	1	75	7
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9851	7.87	1.3	75	8
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9851	7.87	0.5	60	5.7
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9851	7.87	0.7	60	6
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9851	7.87	1	60	6.7
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9851	7.87	1.3	60	7.4
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9851	7.87	0.5	45	5.4
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9851	7.87	0.7	45	5.9
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9851	7.87	1	45	6.3
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9851	7.87	1.3	45	7
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9754	8.23	0.5	90	6.1
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9754	8.23	0.7	90	6.7
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9754	8.23	1	90	7
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9754	8.23	1.3	90	7.6
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9754	8.23	0.5	75	6
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9754	8.23	0.7	75	6.5
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9754	8.23	1	75	7
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9754	8.23	1.3	75	7.4
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9754	8.23	0.5	60	5.8

A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9754	8.23	0.7	60	6.2
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9754	8.23	1	60	6.4
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9754	8.23	1.3	60	7
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9754	8.23	0.5	45	5.7
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9754	8.23	0.7	45	6
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9754	8.23	1	45	6.2
A1	10.42	28.9	5.65	133	0.9754	8.23	1.3	45	6.4
A2	28.3	52	6.4	239	0.9754	8.23	0.5	90	6.7
A2	28.3	52	6.4	239	0.9754	8.23	0.7	90	7.3
A2	28.3	52	6.4	239	0.9754	8.23	1	90	8.5
A2	28.3	52	6.4	239	0.9754	8.23	1.3	90	9.5
A2	28.3	52	6.4	239	0.9754	8.23	0.5	75	6.2
A2	28.3	52	6.4	239	0.9754	8.23	0.7	75	7.1
A2	28.3	52	6.4	239	0.9754	8.23	1	75	7.7
A2	28.3	52	6.4	239	0.9754	8.23	1.3	75	8.8
A2	28.3	52	6.4	239	0.9754	8.23	0.5	60	5.8
A2	28.3	52	6.4	239	0.9754	8.23	0.7	60	6.3
A2	28.3	52	6.4	239	0.9754	8.23	1	60	6.8
A2	28.3	52	6.4	239	0.9754	8.23	1.3	60	7.6
A2	28.3	52	6.4	239	0.9754	8.23	0.5	45	5.3
A2	28.3	52	6.4	239	0.9754	8.23	0.7	45	6
A2	28.3	52	6.4	239	0.9754	8.23	1	45	6.1
A2	28.3	52	6.4	239	0.9754	8.23	1.3	45	6.8
A3	8.352	56	6.1	279	0.9754	8.23	0.5	90	6.4
A3	8.352	56	6.1	279	0.9754	8.23	0.7	90	7
A3	8.352	56	6.1	279	0.9754	8.23	1	90	7.9
A3	8.352	56	6.1	279	0.9754	8.23	1.3	90	9.2
A3	8.352	56	6.1	279	0.9754	8.23	0.5	75	6.1
A3	8.352	56	6.1	279	0.9754	8.23	0.7	75	7
A3	8.352	56	6.1	279	0.9754	8.23	1	75	7.8
A3	8.352	56	6.1	279	0.9754	8.23	1.3	75	8.6
A3	8.352	56	6.1	279	0.9754	8.23	0.5	60	6
A3	8.352	56	6.1	279	0.9754	8.23	0.7	60	6.5
A3	8.352	56	6.1	279	0.9754	8.23	1	60	7
A3	8.352	56	6.1	279	0.9754	8.23	1.3	60	7.6
A3	8.352	56	6.1	279	0.9754	8.23	0.5	45	5.4
A3	8.352	56	6.1	279	0.9754	8.23	0.7	45	6
A3	8.352	56	6.1	279	0.9754	8.23	1	45	6.1
A3	8.352	56	6.1	279	0.9754	8.23	1.3	45	6.4
A4	4.284	37	6.3	110	0.9754	8.23	0.5	90	5.8
A4	4.284	37	6.3	110	0.9754	8.23	0.7	90	6.4
A4	4.284	37	6.3	110	0.9754	8.23	1	90	7
A4	4.284	37	6.3	110	0.9754	8.23	1.3	90	8.5
A4	4.284	37	6.3	110	0.9754	8.23	0.5	75	5.7

A4	4.284	37	6.3	110	0.9754	8.23	0.7	75	6.2
A4	4.284	37	6.3	110	0.9754	8.23	1	75	6.8
A4	4.284	37	6.3	110	0.9754	8.23	1.3	75	7.8
A4	4.284	37	6.3	110	0.9754	8.23	0.5	60	5.6
A4	4.284	37	6.3	110	0.9754	8.23	0.7	60	6
A4	4.284	37	6.3	110	0.9754	8.23	1	60	6.4
A4	4.284	37	6.3	110	0.9754	8.23	1.3	60	7
A4	4.284	37	6.3	110	0.9754	8.23	0.5	45	5.3
A4	4.284	37	6.3	110	0.9754	8.23	0.7	45	5.6
A4	4.284	37	6.3	110	0.9754	8.23	1	45	6
A4	4.284	37	6.3	110	0.9754	8.23	1.3	45	6.3
A5	46.63	43	5.7	150	0.9754	8.23	0.5	90	5.8
A5	46.63	43	5.7	150	0.9754	8.23	0.7	90	6.3
A5	46.63	43	5.7	150	0.9754	8.23	1	90	6.9
A5	46.63	43	5.7	150	0.9754	8.23	1.3	90	7.5
A5	46.63	43	5.7	150	0.9754	8.23	0.5	75	5.7
A5	46.63	43	5.7	150	0.9754	8.23	0.7	75	6.2
A5	46.63	43	5.7	150	0.9754	8.23	1	75	6.9
A5	46.63	43	5.7	150	0.9754	8.23	1.3	75	7.4
A5	46.63	43	5.7	150	0.9754	8.23	0.5	60	5.6
A5	46.63	43	5.7	150	0.9754	8.23	0.7	60	6
A5	46.63	43	5.7	150	0.9754	8.23	1	60	6.4
A5	46.63	43	5.7	150	0.9754	8.23	1.3	60	6.8
A5	46.63	43	5.7	150	0.9754	8.23	0.5	45	5.1
A5	46.63	43	5.7	150	0.9754	8.23	0.7	45	5.5
A5	46.63	43	5.7	150	0.9754	8.23	1	45	5.6
A5	46.63	43	5.7	150	0.9754	8.23	1.3	45	5.9
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9754	8.23	0.5	90	5.8
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9754	8.23	0.7	90	6.3
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9754	8.23	1	90	6.9
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9754	8.23	1.3	90	7.2
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9754	8.23	0.5	75	5.6
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9754	8.23	0.7	75	6.1
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9754	8.23	1	75	6.7
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9754	8.23	1.3	75	7
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9754	8.23	0.5	60	5.4
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9754	8.23	0.7	60	6
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9754	8.23	1	60	6.5
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9754	8.23	1.3	60	6.8
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9754	8.23	0.5	45	4.9
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9754	8.23	0.7	45	5.5
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9754	8.23	1	45	5.7
A6	24.25	35.5	5.95	145	0.9754	8.23	1.3	45	6.1
A7	1.872	46.5	6	182	0.9754	8.23	0.5	90	6.3

A7	1.872	46.5	6	182	0.9754	8.23	0.7	90	7
A7	1.872	46.5	6	182	0.9754	8.23	1	90	7.6
A7	1.872	46.5	6	182	0.9754	8.23	1.3	90	8.7
A7	1.872	46.5	6	182	0.9754	8.23	0.5	75	6
A7	1.872	46.5	6	182	0.9754	8.23	0.7	75	6.8
A7	1.872	46.5	6	182	0.9754	8.23	1	75	7.2
A7	1.872	46.5	6	182	0.9754	8.23	1.3	75	8.3
A7	1.872	46.5	6	182	0.9754	8.23	0.5	60	5.5
A7	1.872	46.5	6	182	0.9754	8.23	0.7	60	6
A7	1.872	46.5	6	182	0.9754	8.23	1	60	6.4
A7	1.872	46.5	6	182	0.9754	8.23	1.3	60	7
A7	1.872	46.5	6	182	0.9754	8.23	0.5	45	5.5
A7	1.872	46.5	6	182	0.9754	8.23	0.7	45	6
A7	1.872	46.5	6	182	0.9754	8.23	1	45	6.3
A7	1.872	46.5	6	182	0.9754	8.23	1.3	45	6.8
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9754	8.23	0.5	90	6
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9754	8.23	0.7	90	6.8
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9754	8.23	1	90	7.3
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9754	8.23	1.3	90	8.5
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9754	8.23	0.5	75	5.9
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9754	8.23	0.7	75	6.4
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9754	8.23	1	75	7
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9754	8.23	1.3	75	7.9
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9754	8.23	0.5	60	5.7
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9754	8.23	0.7	60	6
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9754	8.23	1	60	6.7
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9754	8.23	1.3	60	7.5
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9754	8.23	0.5	45	5.2
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9754	8.23	0.7	45	5.8
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9754	8.23	1	45	6
A8	14.24	43.6	6.1	142	0.9754	8.23	1.3	45	6.4
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9754	8.23	0.5	90	6.5
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9754	8.23	0.7	90	6.9
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9754	8.23	1	90	7.5
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9754	8.23	1.3	90	7.9
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9754	8.23	0.5	75	6
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9754	8.23	0.7	75	6.7
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9754	8.23	1	75	7
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9754	8.23	1.3	75	7.3
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9754	8.23	0.5	60	5.3
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9754	8.23	0.7	60	5.6
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9754	8.23	1	60	6.1
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9754	8.23	1.3	60	6.7
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9754	8.23	0.5	45	5.2

A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9754	8.23	0.7	45	5.5
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9754	8.23	1	45	5.8
A9	8.5	31.2	5.6	125	0.9754	8.23	1.3	45	6.2
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9754	8.23	0.5	90	6
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9754	8.23	0.7	90	6.3
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9754	8.23	1	90	7.2
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9754	8.23	1.3	90	8.1
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9754	8.23	0.5	75	6
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9754	8.23	0.7	75	6.2
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9754	8.23	1	75	7
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9754	8.23	1.3	75	7.8
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9754	8.23	0.5	60	5.8
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9754	8.23	0.7	60	6.1
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9754	8.23	1	60	6.8
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9754	8.23	1.3	60	7.1
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9754	8.23	0.5	45	5.6
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9754	8.23	0.7	45	6
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9754	8.23	1	45	6.8
A10	7.6	48.6	6.6	173	0.9754	8.23	1.3	45	7.1
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.839	7.96	0.5	90	5.5
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.839	7.96	0.7	90	6
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.839	7.96	1	90	7.1
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.839	7.96	1.3	90	8
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.839	7.96	0.5	75	5.4
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.839	7.96	0.7	75	5.9
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.839	7.96	1	75	7
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.839	7.96	1.3	75	7.6
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.839	7.96	0.5	60	5.4
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.839	7.96	0.7	60	5.8
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.839	7.96	1	60	6.5
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.839	7.96	1.3	60	7.2
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.839	7.96	0.5	45	5.2
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.839	7.96	0.7	45	5.7
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.839	7.96	1	45	5.7
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.839	7.96	1.3	45	6.1
A2	28.3	52	6.4	239	1.839	7.96	0.5	90	5.1
A2	28.3	52	6.4	239	1.839	7.96	0.7	90	5.6
A2	28.3	52	6.4	239	1.839	7.96	1	90	5.9
A2	28.3	52	6.4	239	1.839	7.96	1.3	90	6.4
A2	28.3	52	6.4	239	1.839	7.96	0.5	75	5
A2	28.3	52	6.4	239	1.839	7.96	0.7	75	5.5
A2	28.3	52	6.4	239	1.839	7.96	1	75	5.6
A2	28.3	52	6.4	239	1.839	7.96	1.3	75	6.2
A2	28.3	52	6.4	239	1.839	7.96	0.5	60	5

A2	28.3	52	6.4	239	1.839	7.96	0.7	60	5.3
A2	28.3	52	6.4	239	1.839	7.96	1	60	5.6
A2	28.3	52	6.4	239	1.839	7.96	1.3	60	6.1
A2	28.3	52	6.4	239	1.839	7.96	0.5	45	5
A2	28.3	52	6.4	239	1.839	7.96	0.7	45	5.2
A2	28.3	52	6.4	239	1.839	7.96	1	45	5.2
A2	28.3	52	6.4	239	1.839	7.96	1.3	45	5.5
A3	8.352	56	6.1	279	1.839	7.96	0.5	90	6.4
A3	8.352	56	6.1	279	1.839	7.96	0.7	90	7
A3	8.352	56	6.1	279	1.839	7.96	1	90	7.7
A3	8.352	56	6.1	279	1.839	7.96	1.3	90	8.8
A3	8.352	56	6.1	279	1.839	7.96	0.5	75	6
A3	8.352	56	6.1	279	1.839	7.96	0.7	75	6.7
A3	8.352	56	6.1	279	1.839	7.96	1	75	7
A3	8.352	56	6.1	279	1.839	7.96	1.3	75	7.5
A3	8.352	56	6.1	279	1.839	7.96	0.5	60	5.6
A3	8.352	56	6.1	279	1.839	7.96	0.7	60	6
A3	8.352	56	6.1	279	1.839	7.96	1	60	6.5
A3	8.352	56	6.1	279	1.839	7.96	1.3	60	7
A3	8.352	56	6.1	279	1.839	7.96	0.5	45	5.8
A3	8.352	56	6.1	279	1.839	7.96	0.7	45	6
A3	8.352	56	6.1	279	1.839	7.96	1	45	6.1
A3	8.352	56	6.1	279	1.839	7.96	1.3	45	6.2
A4	4.284	37	6.3	110	1.839	7.96	0.5	90	7.4
A4	4.284	37	6.3	110	1.839	7.96	0.7	90	8
A4	4.284	37	6.3	110	1.839	7.96	1	90	9.4
A4	4.284	37	6.3	110	1.839	7.96	1.3	90	11.7
A4	4.284	37	6.3	110	1.839	7.96	0.5	75	7
A4	4.284	37	6.3	110	1.839	7.96	0.7	75	7.6
A4	4.284	37	6.3	110	1.839	7.96	1	75	8.5
A4	4.284	37	6.3	110	1.839	7.96	1.3	75	10.3
A4	4.284	37	6.3	110	1.839	7.96	0.5	60	6.7
A4	4.284	37	6.3	110	1.839	7.96	0.7	60	6
A4	4.284	37	6.3	110	1.839	7.96	1	60	7.8
A4	4.284	37	6.3	110	1.839	7.96	1.3	60	8.6
A4	4.284	37	6.3	110	1.839	7.96	0.5	45	5.7
A4	4.284	37	6.3	110	1.839	7.96	0.7	45	6
A4	4.284	37	6.3	110	1.839	7.96	1	45	6.5
A4	4.284	37	6.3	110	1.839	7.96	1.3	45	7
A5	46.63	43	5.7	150	1.839	7.96	0.5	90	6.1
A5	46.63	43	5.7	150	1.839	7.96	0.7	90	7
A5	46.63	43	5.7	150	1.839	7.96	1	90	8.3
A5	46.63	43	5.7	150	1.839	7.96	1.3	90	9.3
A5	46.63	43	5.7	150	1.839	7.96	0.5	75	5.9

A5	46.63	43	5.7	150	1.839	7.96	0.7	75	6.3
A5	46.63	43	5.7	150	1.839	7.96	1	75	7.5
A5	46.63	43	5.7	150	1.839	7.96	1.3	75	8
A5	46.63	43	5.7	150	1.839	7.96	0.5	60	5.4
A5	46.63	43	5.7	150	1.839	7.96	0.7	60	6
A5	46.63	43	5.7	150	1.839	7.96	1	60	6.5
A5	46.63	43	5.7	150	1.839	7.96	1.3	60	6.9
A5	46.63	43	5.7	150	1.839	7.96	0.5	45	5.3
A5	46.63	43	5.7	150	1.839	7.96	0.7	45	5.7
A5	46.63	43	5.7	150	1.839	7.96	1	45	5.7
A5	46.63	43	5.7	150	1.839	7.96	1.3	45	6.1
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.839	7.96	0.5	90	6.7
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.839	7.96	0.7	90	7.5
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.839	7.96	1	90	8.8
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.839	7.96	1.3	90	9.8
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.839	7.96	0.5	75	6
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.839	7.96	0.7	75	7
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.839	7.96	1	75	8.1
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.839	7.96	1.3	75	9
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.839	7.96	0.5	60	5.5
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.839	7.96	0.7	60	6.3
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.839	7.96	1	60	7.3
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.839	7.96	1.3	60	8.2
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.839	7.96	0.5	45	5.4
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.839	7.96	0.7	45	5.9
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.839	7.96	1	45	6.1
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.839	7.96	1.3	45	6.7
A7	1.872	46.5	6	182	1.839	7.96	0.5	90	6.1
A7	1.872	46.5	6	182	1.839	7.96	0.7	90	7
A7	1.872	46.5	6	182	1.839	7.96	1	90	7.7
A7	1.872	46.5	6	182	1.839	7.96	1.3	90	9.1
A7	1.872	46.5	6	182	1.839	7.96	0.5	75	6
A7	1.872	46.5	6	182	1.839	7.96	0.7	75	6.8
A7	1.872	46.5	6	182	1.839	7.96	1	75	7.3
A7	1.872	46.5	6	182	1.839	7.96	1.3	75	8.6
A7	1.872	46.5	6	182	1.839	7.96	0.5	60	5.8
A7	1.872	46.5	6	182	1.839	7.96	0.7	60	6
A7	1.872	46.5	6	182	1.839	7.96	1	60	6.6
A7	1.872	46.5	6	182	1.839	7.96	1.3	60	7.3
A7	1.872	46.5	6	182	1.839	7.96	0.5	45	5.1
A7	1.872	46.5	6	182	1.839	7.96	0.7	45	5.5
A7	1.872	46.5	6	182	1.839	7.96	1	45	5.6
A7	1.872	46.5	6	182	1.839	7.96	1.3	45	5.9
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.839	7.96	0.5	90	6.9

A8	14.24	43.6	6.1	142	1.839	7.96	0.7	90	7.5
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.839	7.96	1	90	8.4
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.839	7.96	1.3	90	10.1
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.839	7.96	0.5	75	6.6
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.839	7.96	0.7	75	7.2
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.839	7.96	1	75	8
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.839	7.96	1.3	75	9.3
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.839	7.96	0.5	60	6.3
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.839	7.96	0.7	60	6.8
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.839	7.96	1	60	7.4
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.839	7.96	1.3	60	8.3
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.839	7.96	0.5	45	5.6
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.839	7.96	0.7	45	6
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.839	7.96	1	45	6.2
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.839	7.96	1.3	45	6.7
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.839	7.96	0.5	90	5.5
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.839	7.96	0.7	90	6.3
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.839	7.96	1	90	7.1
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.839	7.96	1.3	90	7.8
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.839	7.96	0.5	75	5.5
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.839	7.96	0.7	75	6.2
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.839	7.96	1	75	7
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.839	7.96	1.3	75	7.5
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.839	7.96	0.5	60	5.3
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.839	7.96	0.7	60	6
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.839	7.96	1	60	6.6
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.839	7.96	1.3	60	7.1
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.839	7.96	0.5	45	5
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.839	7.96	0.7	45	5.6
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.839	7.96	1	45	5.9
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.839	7.96	1.3	45	6.4
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.839	7.96	0.5	90	6.1
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.839	7.96	0.7	90	7
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.839	7.96	1	90	7.7
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.839	7.96	1.3	90	8.5
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.839	7.96	0.5	75	6
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.839	7.96	0.7	75	6.8
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.839	7.96	1	75	7.5
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.839	7.96	1.3	75	8
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.839	7.96	0.5	60	5.8
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.839	7.96	0.7	60	6
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.839	7.96	1	60	6.5
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.839	7.96	1.3	60	6.9
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.839	7.96	0.5	45	5.4

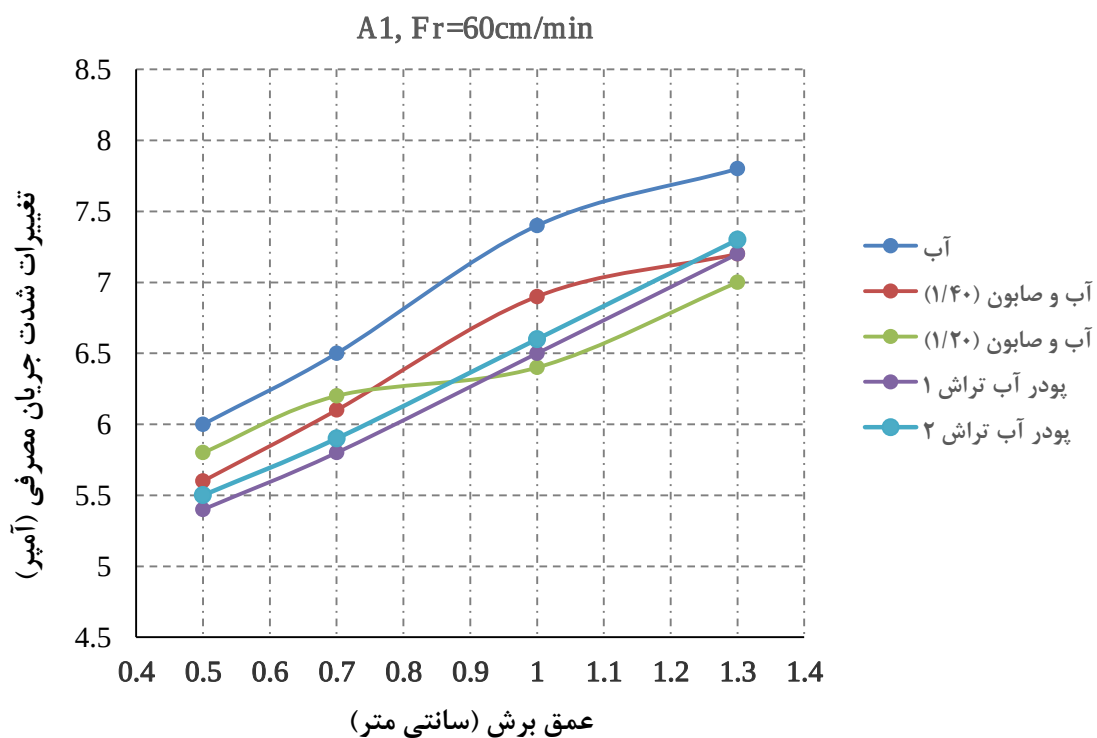
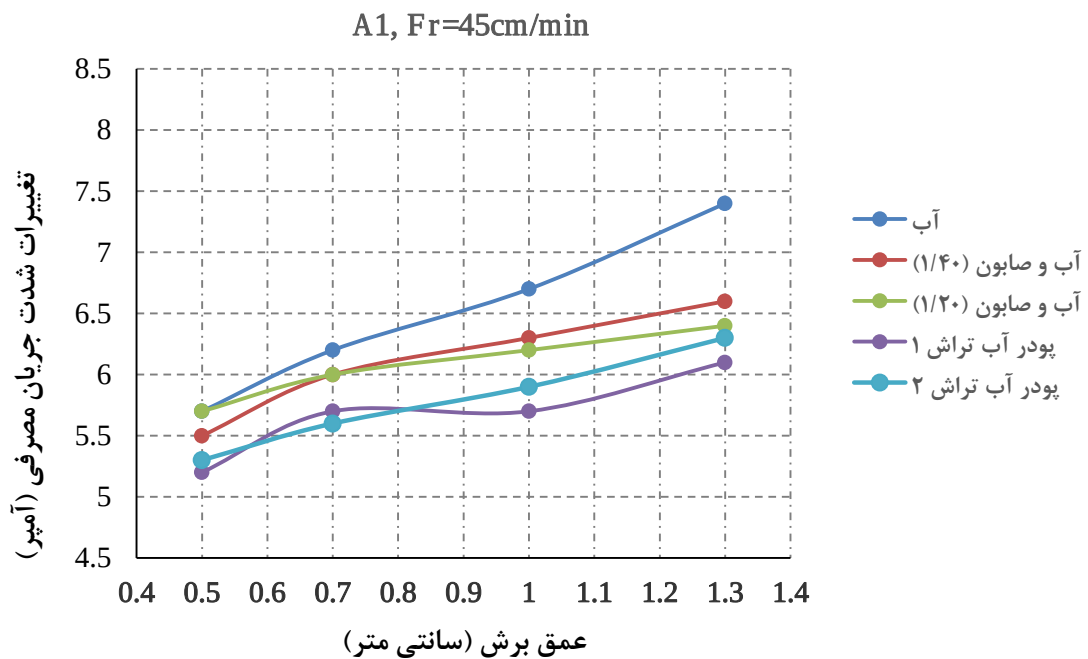
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.839	7.96	0.7	45	5.7
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.839	7.96	1	45	5.7
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.839	7.96	1.3	45	5.9
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.158	8.1	0.5	90	6.4
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.158	8.1	0.7	90	5.9
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.158	8.1	1	90	6.5
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.158	8.1	1.3	90	7.2
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.158	8.1	0.5	75	5.6
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.158	8.1	0.7	75	5.9
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.158	8.1	1	75	6.2
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.158	8.1	1.3	75	7.4
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.158	8.1	0.5	60	5.3
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.158	8.1	0.7	60	5.7
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.158	8.1	1	60	5.9
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.158	8.1	1.3	60	7.8
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.158	8.1	0.5	45	5.3
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.158	8.1	0.7	45	5.6
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.158	8.1	1	45	6.9
A1	10.42	28.9	5.65	133	1.158	8.1	1.3	45	8.3
A2	28.3	52	6.4	239	1.158	8.1	0.5	90	7.3
A2	28.3	52	6.4	239	1.158	8.1	0.7	90	6.7
A2	28.3	52	6.4	239	1.158	8.1	1	90	7.5
A2	28.3	52	6.4	239	1.158	8.1	1.3	90	8.8
A2	28.3	52	6.4	239	1.158	8.1	0.5	75	6.7
A2	28.3	52	6.4	239	1.158	8.1	0.7	75	6.1
A2	28.3	52	6.4	239	1.158	8.1	1	75	6.5
A2	28.3	52	6.4	239	1.158	8.1	1.3	75	8.7
A2	28.3	52	6.4	239	1.158	8.1	0.5	60	5.3
A2	28.3	52	6.4	239	1.158	8.1	0.7	60	5.9
A2	28.3	52	6.4	239	1.158	8.1	1	60	6.1
A2	28.3	52	6.4	239	1.158	8.1	1.3	60	8.7
A2	28.3	52	6.4	239	1.158	8.1	0.5	45	5.2
A2	28.3	52	6.4	239	1.158	8.1	0.7	45	5.8
A2	28.3	52	6.4	239	1.158	8.1	1	45	7
A2	28.3	52	6.4	239	1.158	8.1	1.3	45	7.9
A3	8.352	56	6.1	279	1.158	8.1	0.5	90	6.5
A3	8.352	56	6.1	279	1.158	8.1	0.7	90	6.4
A3	8.352	56	6.1	279	1.158	8.1	1	90	7.2
A3	8.352	56	6.1	279	1.158	8.1	1.3	90	8.4
A3	8.352	56	6.1	279	1.158	8.1	0.5	75	5.5
A3	8.352	56	6.1	279	1.158	8.1	0.7	75	6.1
A3	8.352	56	6.1	279	1.158	8.1	1	75	7.2
A3	8.352	56	6.1	279	1.158	8.1	1.3	75	7.8
A3	8.352	56	6.1	279	1.158	8.1	0.5	60	5.4

A3	8.352	56	6.1	279	1.158	8.1	0.7	60	6
A3	8.352	56	6.1	279	1.158	8.1	1	60	7.1
A3	8.352	56	6.1	279	1.158	8.1	1.3	60	8.5
A3	8.352	56	6.1	279	1.158	8.1	0.5	45	5.2
A3	8.352	56	6.1	279	1.158	8.1	0.7	45	5.9
A3	8.352	56	6.1	279	1.158	8.1	1	45	7
A3	8.352	56	6.1	279	1.158	8.1	1.3	45	7.7
A4	4.284	37	6.3	110	1.158	8.1	0.5	90	5.8
A4	4.284	37	6.3	110	1.158	8.1	0.7	90	6.3
A4	4.284	37	6.3	110	1.158	8.1	1	90	7.2
A4	4.284	37	6.3	110	1.158	8.1	1.3	90	8.9
A4	4.284	37	6.3	110	1.158	8.1	0.5	75	5.3
A4	4.284	37	6.3	110	1.158	8.1	0.7	75	6.3
A4	4.284	37	6.3	110	1.158	8.1	1	75	7.4
A4	4.284	37	6.3	110	1.158	8.1	1.3	75	7.5
A4	4.284	37	6.3	110	1.158	8.1	0.5	60	5.4
A4	4.284	37	6.3	110	1.158	8.1	0.7	60	6.3
A4	4.284	37	6.3	110	1.158	8.1	1	60	7.2
A4	4.284	37	6.3	110	1.158	8.1	1.3	60	7.6
A4	4.284	37	6.3	110	1.158	8.1	0.5	45	5.4
A4	4.284	37	6.3	110	1.158	8.1	0.7	45	5.9
A4	4.284	37	6.3	110	1.158	8.1	1	45	7.3
A4	4.284	37	6.3	110	1.158	8.1	1.3	45	7.7
A5	46.63	43	5.7	150	1.158	8.1	0.5	90	5.7
A5	46.63	43	5.7	150	1.158	8.1	0.7	90	6.1
A5	46.63	43	5.7	150	1.158	8.1	1	90	6.9
A5	46.63	43	5.7	150	1.158	8.1	1.3	90	8.7
A5	46.63	43	5.7	150	1.158	8.1	0.5	75	5.1
A5	46.63	43	5.7	150	1.158	8.1	0.7	75	6.4
A5	46.63	43	5.7	150	1.158	8.1	1	75	6.8
A5	46.63	43	5.7	150	1.158	8.1	1.3	75	7.3
A5	46.63	43	5.7	150	1.158	8.1	0.5	60	5.3
A5	46.63	43	5.7	150	1.158	8.1	0.7	60	6.5
A5	46.63	43	5.7	150	1.158	8.1	1	60	7.2
A5	46.63	43	5.7	150	1.158	8.1	1.3	60	8.9
A5	46.63	43	5.7	150	1.158	8.1	0.5	45	4.9
A5	46.63	43	5.7	150	1.158	8.1	0.7	45	5.3
A5	46.63	43	5.7	150	1.158	8.1	1	45	6.5
A5	46.63	43	5.7	150	1.158	8.1	1.3	45	7.3
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.158	8.1	0.5	90	5.6
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.158	8.1	0.7	90	6.2
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.158	8.1	1	90	7.3
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.158	8.1	1.3	90	8.9
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.158	8.1	0.5	75	5.4

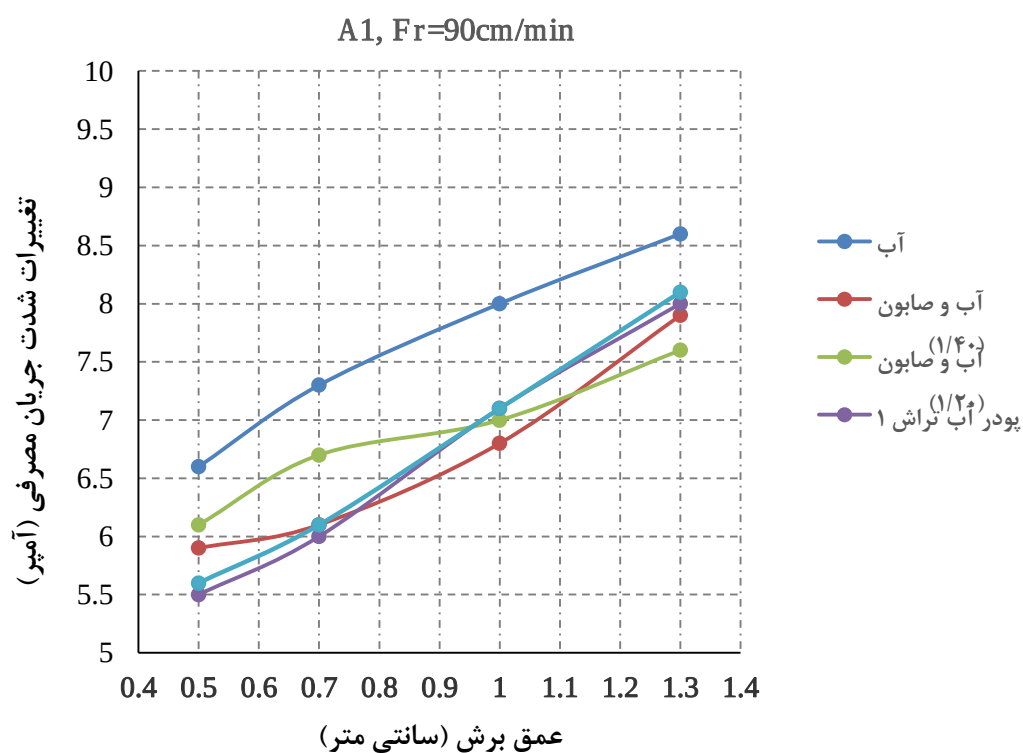
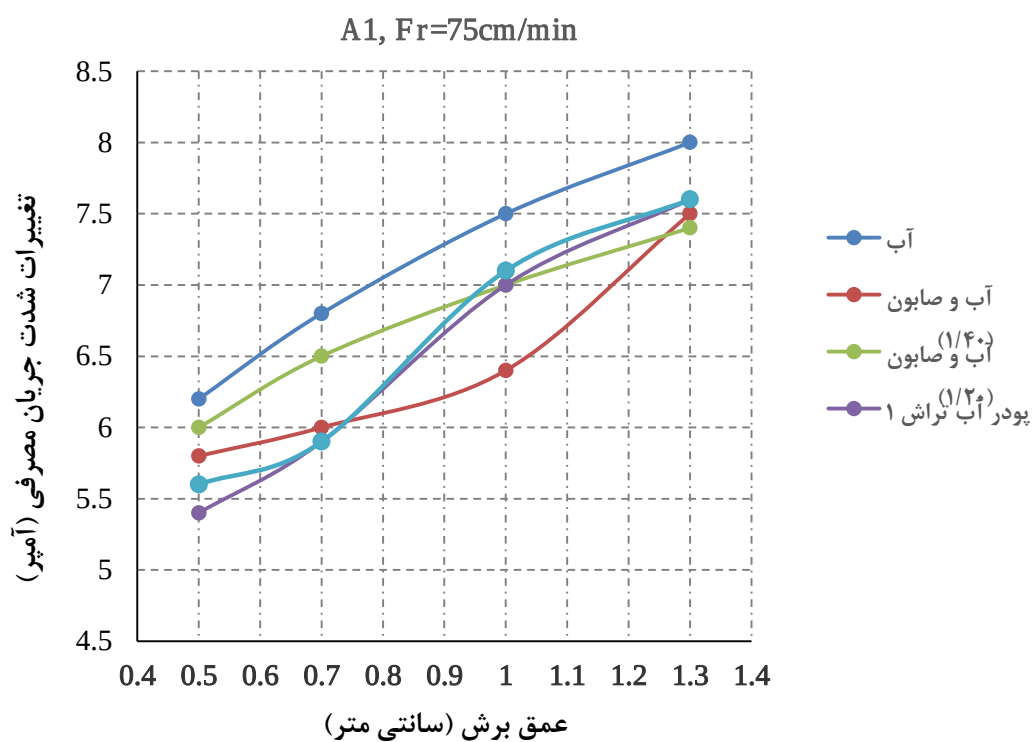
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.158	8.1	0.7	75	5.9
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.158	8.1	1	75	7.4
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.158	8.1	1.3	75	7.8
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.158	8.1	0.5	60	5.6
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.158	8.1	0.7	60	6.1
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.158	8.1	1	60	6.9
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.158	8.1	1.3	60	8
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.158	8.1	0.5	45	5.3
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.158	8.1	0.7	45	6.3
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.158	8.1	1	45	7.2
A6	24.25	35.5	5.95	145	1.158	8.1	1.3	45	8.4
A7	1.872	46.5	6	182	1.158	8.1	0.5	90	6.2
A7	1.872	46.5	6	182	1.158	8.1	0.7	90	5.9
A7	1.872	46.5	6	182	1.158	8.1	1	90	6.5
A7	1.872	46.5	6	182	1.158	8.1	1.3	90	7.6
A7	1.872	46.5	6	182	1.158	8.1	0.5	75	5.7
A7	1.872	46.5	6	182	1.158	8.1	0.7	75	5.95
A7	1.872	46.5	6	182	1.158	8.1	1	75	6.5
A7	1.872	46.5	6	182	1.158	8.1	1.3	75	7.3
A7	1.872	46.5	6	182	1.158	8.1	0.5	60	5.2
A7	1.872	46.5	6	182	1.158	8.1	0.7	60	5.6
A7	1.872	46.5	6	182	1.158	8.1	1	60	5.9
A7	1.872	46.5	6	182	1.158	8.1	1.3	60	7.9
A7	1.872	46.5	6	182	1.158	8.1	0.5	45	5
A7	1.872	46.5	6	182	1.158	8.1	0.7	45	5.5
A7	1.872	46.5	6	182	1.158	8.1	1	45	6.7
A7	1.872	46.5	6	182	1.158	8.1	1.3	45	7.7
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.158	8.1	0.5	90	5.9
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.158	8.1	0.7	90	6.5
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.158	8.1	1	90	7.1
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.158	8.1	1.3	90	8.4
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.158	8.1	0.5	75	5.5
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.158	8.1	0.7	75	6.3
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.158	8.1	1	75	7.1
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.158	8.1	1.3	75	9.2
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.158	8.1	0.5	60	6.2
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.158	8.1	0.7	60	6.1
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.158	8.1	1	60	6.5
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.158	8.1	1.3	60	7.8
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.158	8.1	0.5	45	5.7
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.158	8.1	0.7	45	6
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.158	8.1	1	45	7.6
A8	14.24	43.6	6.1	142	1.158	8.1	1.3	45	8.4
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.158	8.1	0.5	90	6.9

A9	8.5	31.2	5.6	125	1.158	8.1	0.7	90	6.5
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.158	8.1	1	90	7.4
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.158	8.1	1.3	90	10.2
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.158	8.1	0.5	75	5.7
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.158	8.1	0.7	75	5.9
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.158	8.1	1	75	6.9
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.158	8.1	1.3	75	8.5
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.158	8.1	0.5	60	5.5
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.158	8.1	0.7	60	5.7
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.158	8.1	1	60	7.2
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.158	8.1	1.3	60	8.7
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.158	8.1	0.5	45	5.4
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.158	8.1	0.7	45	6.3
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.158	8.1	1	45	7.8
A9	8.5	31.2	5.6	125	1.158	8.1	1.3	45	8.3
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.158	8.1	0.5	90	6.5
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.158	8.1	0.7	90	5.6
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.158	8.1	1	90	6.3
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.158	8.1	1.3	90	7.1
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.158	8.1	0.5	75	5.2
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.158	8.1	0.7	75	5.5
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.158	8.1	1	75	5.8
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.158	8.1	1.3	75	7.1
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.158	8.1	0.5	60	5.4
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.158	8.1	0.7	60	5.7
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.158	8.1	1	60	5.9
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.158	8.1	1.3	60	6.6
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.158	8.1	0.5	45	4.9
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.158	8.1	0.7	45	5.4
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.158	8.1	1	45	5.9
A10	7.6	48.6	6.6	173	1.158	8.1	1.3	45	6.4

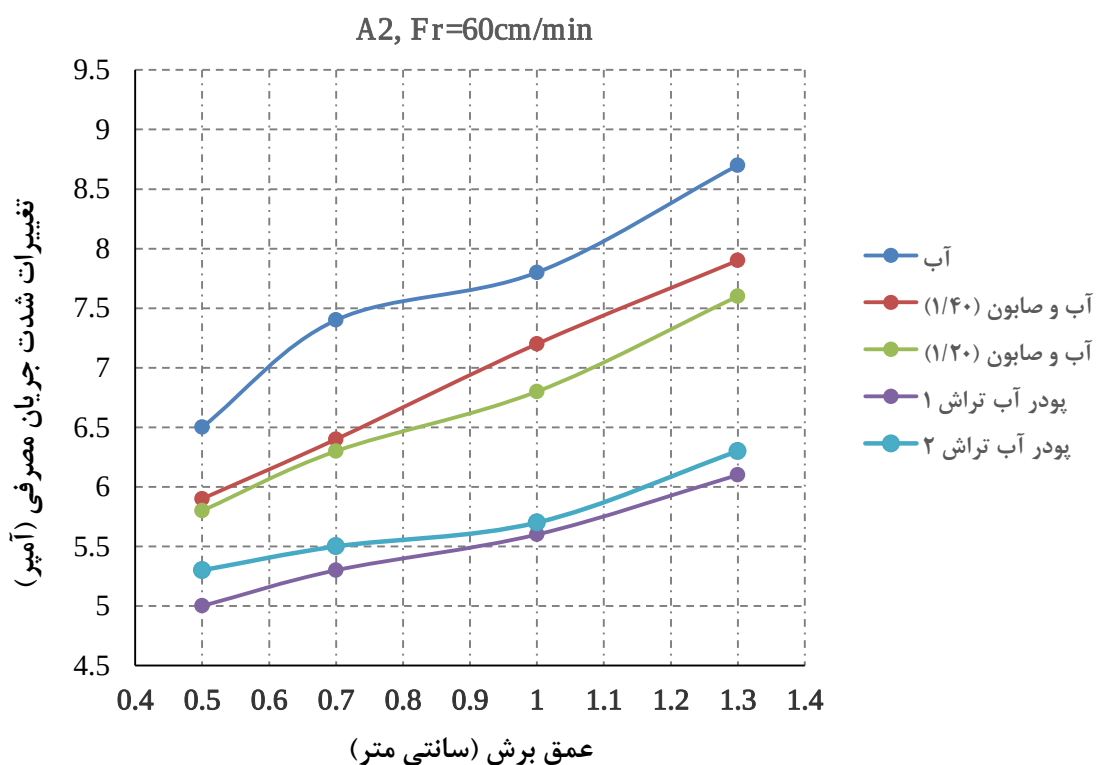
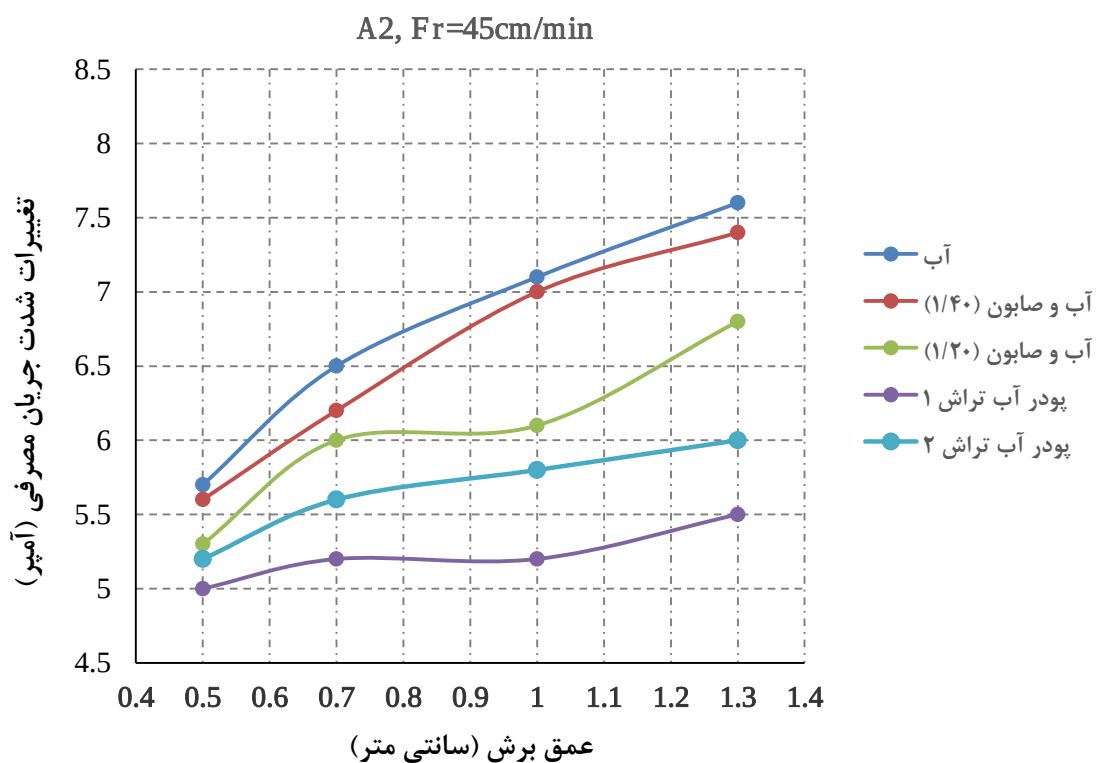
پیوست ب- نمودارهای به دست آمده از فرآیند برش



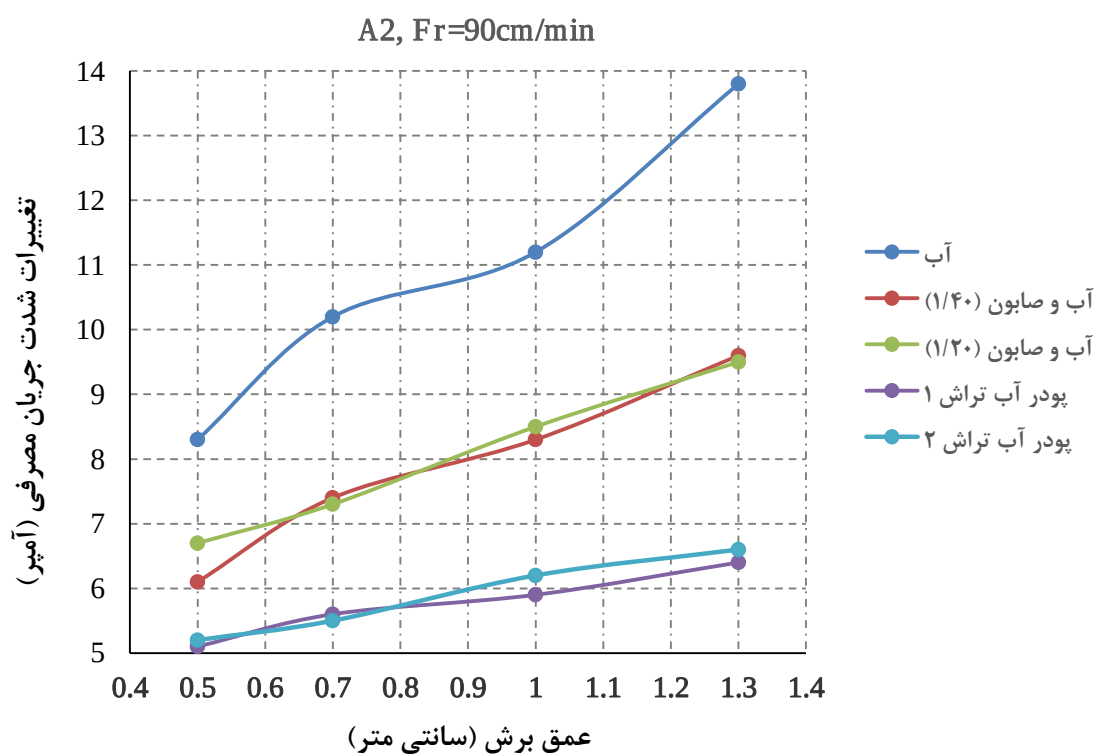
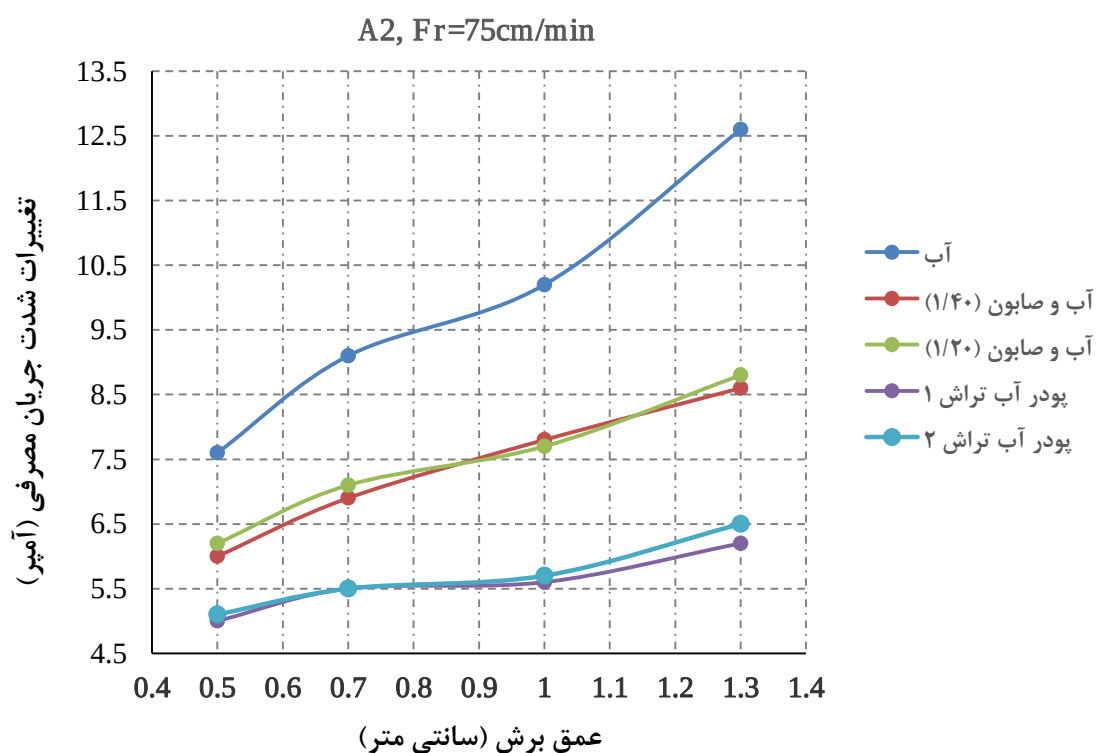
شکل پیوست ب ۱-۱ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیت خرم دره



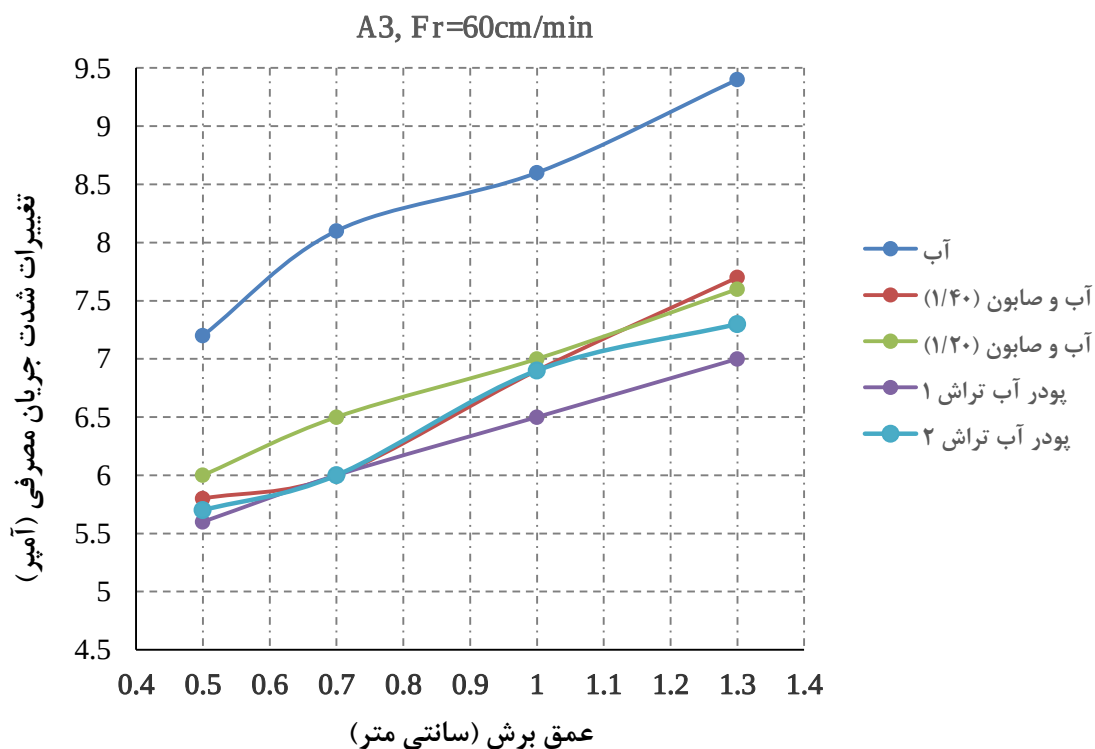
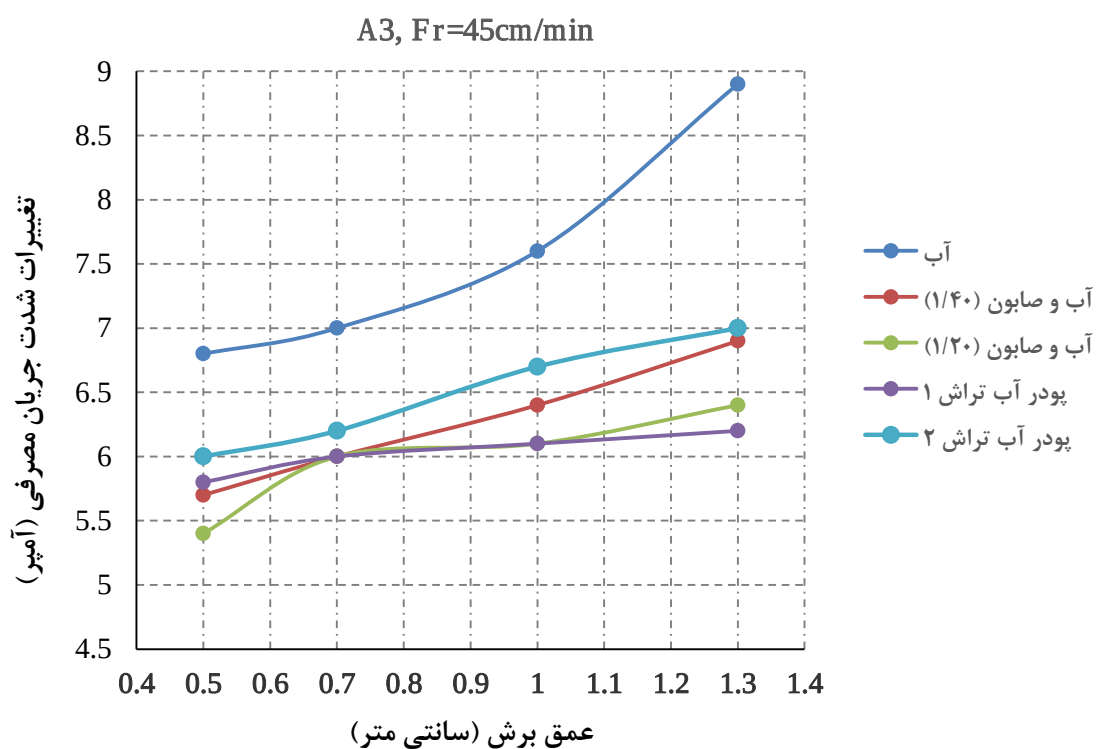
شکل پیوست ب ۱-۲ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیته خرم دره



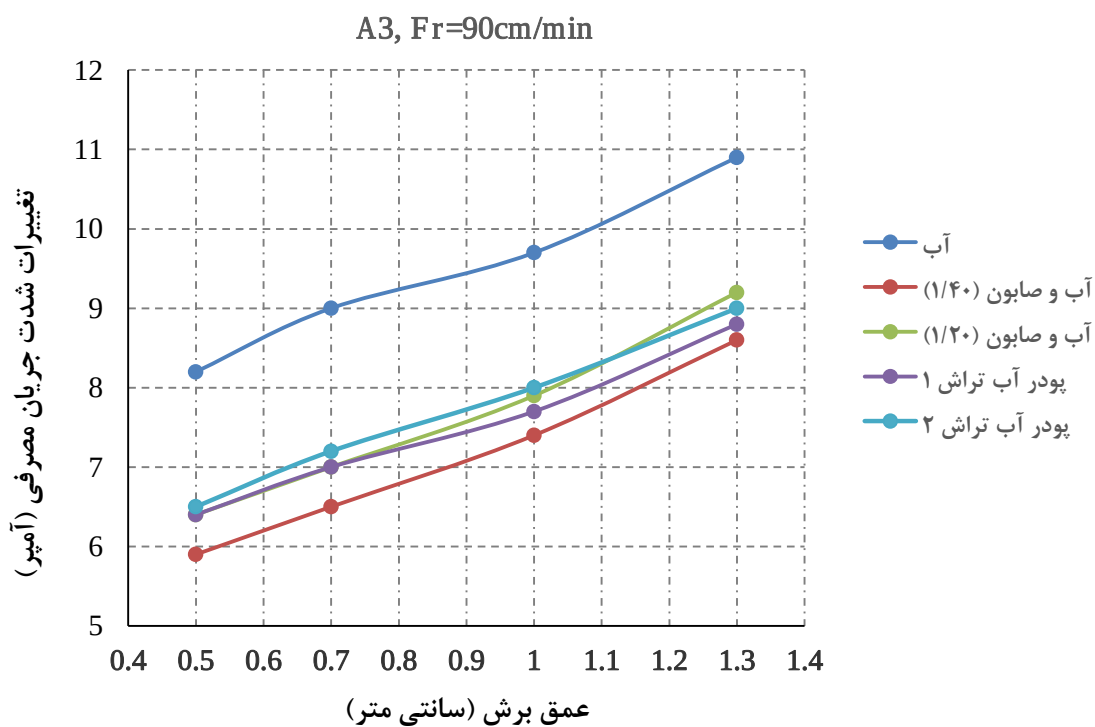
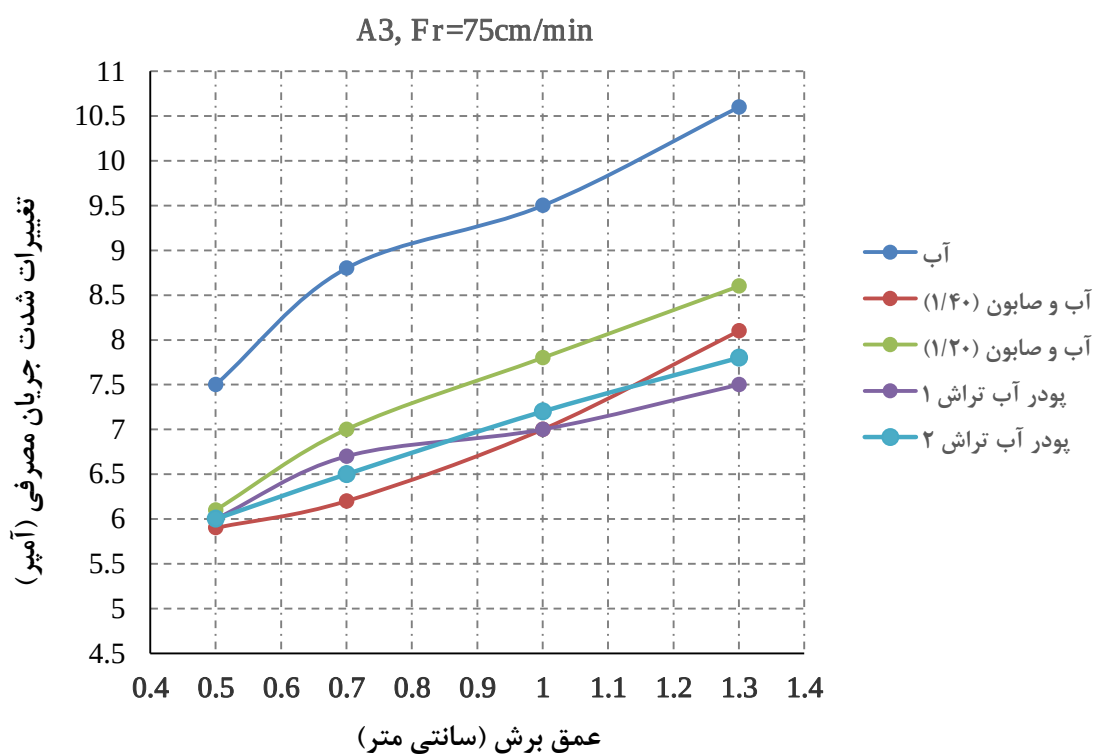
شکل پیوست ب ۱-۳ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیت سبز جنگلی بیرجند



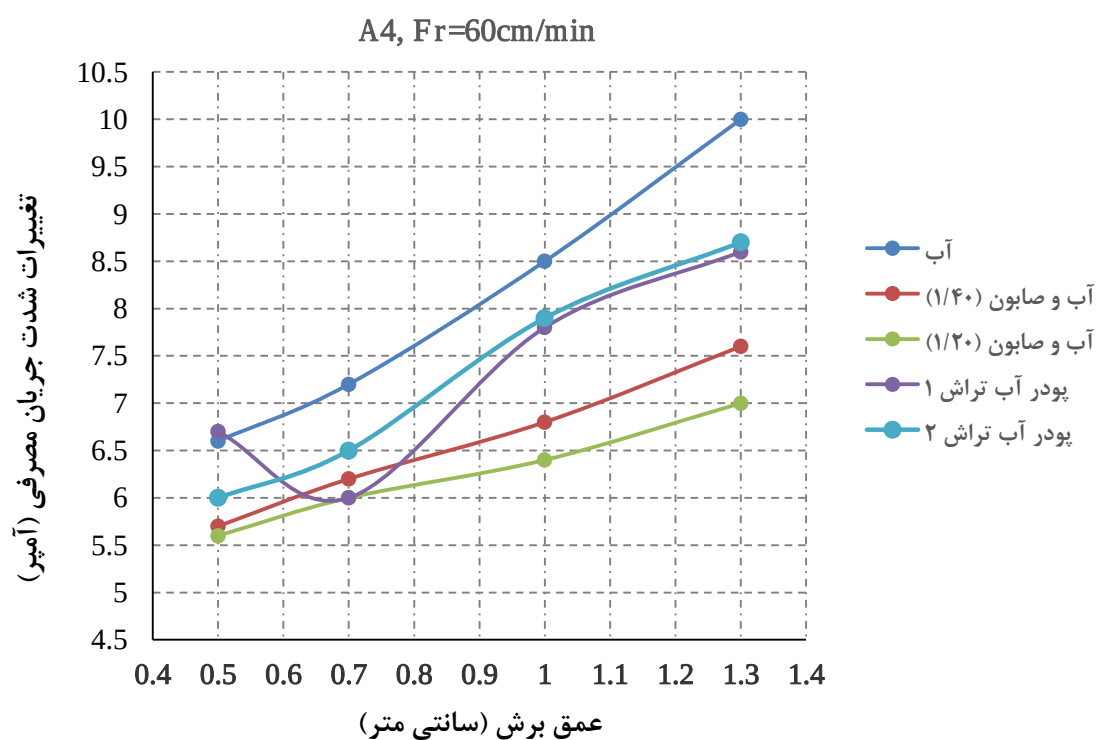
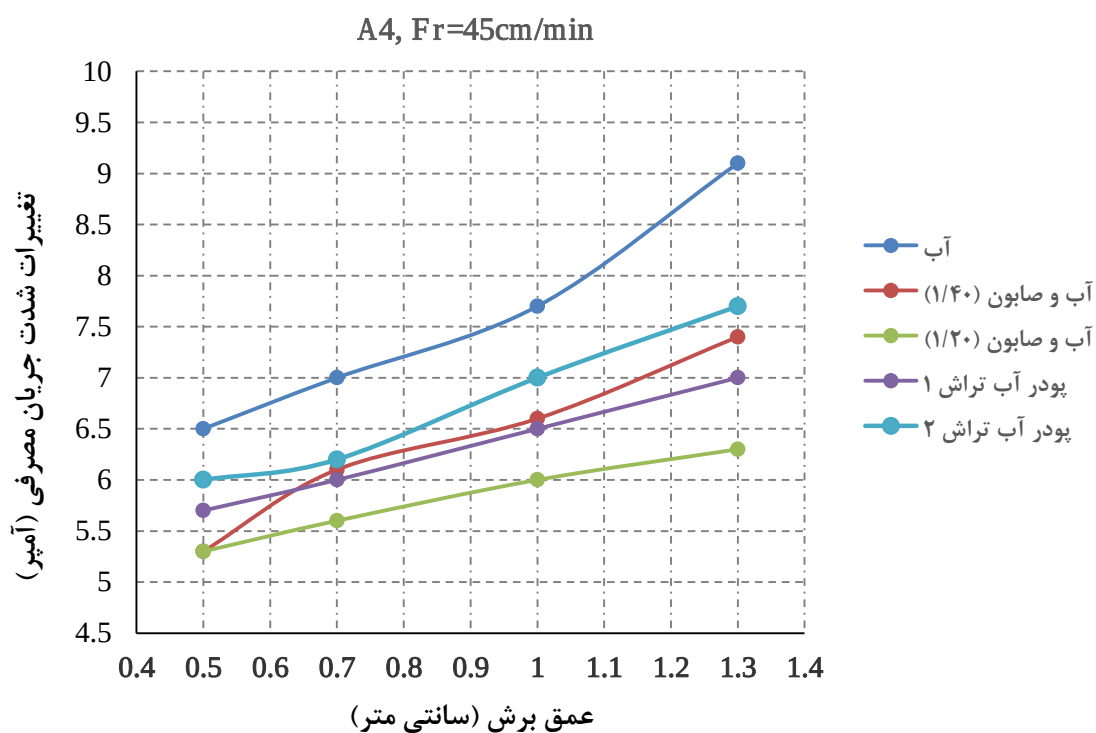
شکل پیوست ب ۱-۴ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیات سبز جنگلی بیرجند



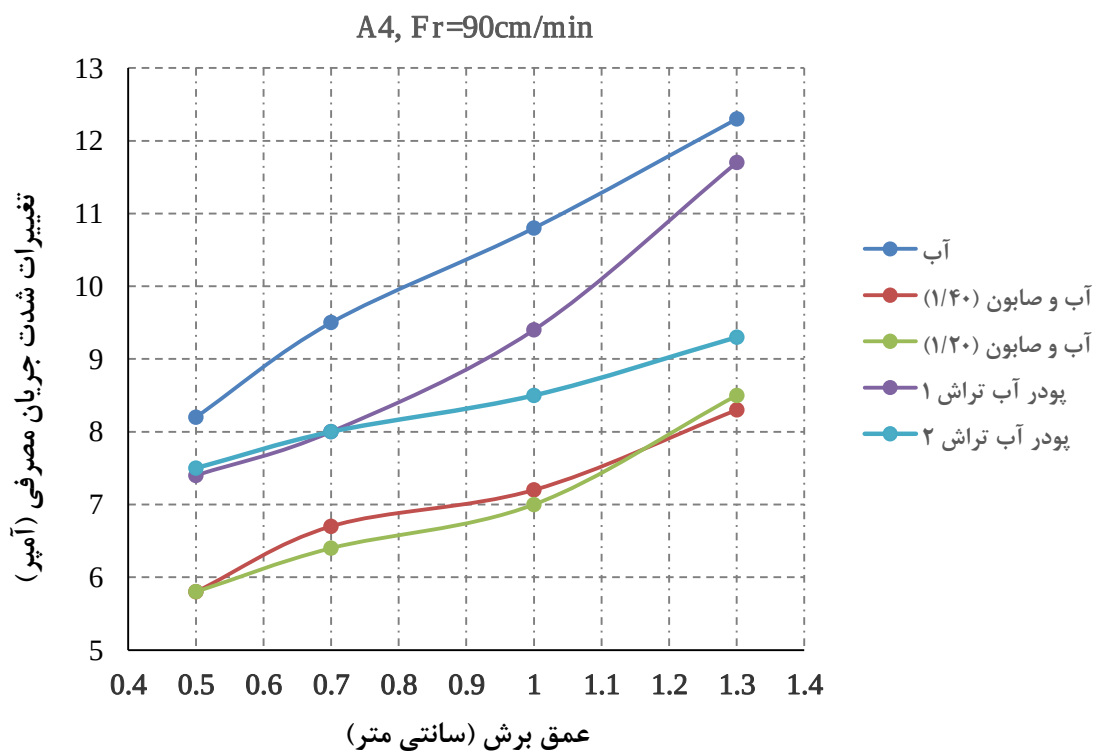
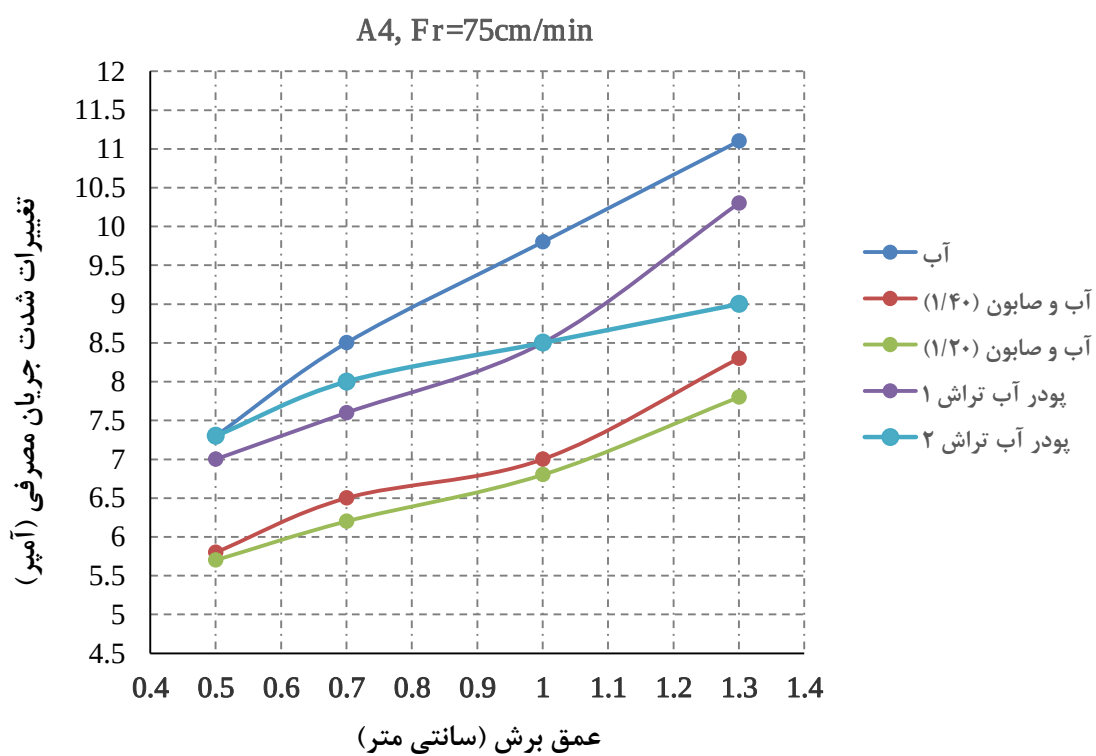
شکل پیوست ب ۱-۵ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیات سبز شاداب نایین



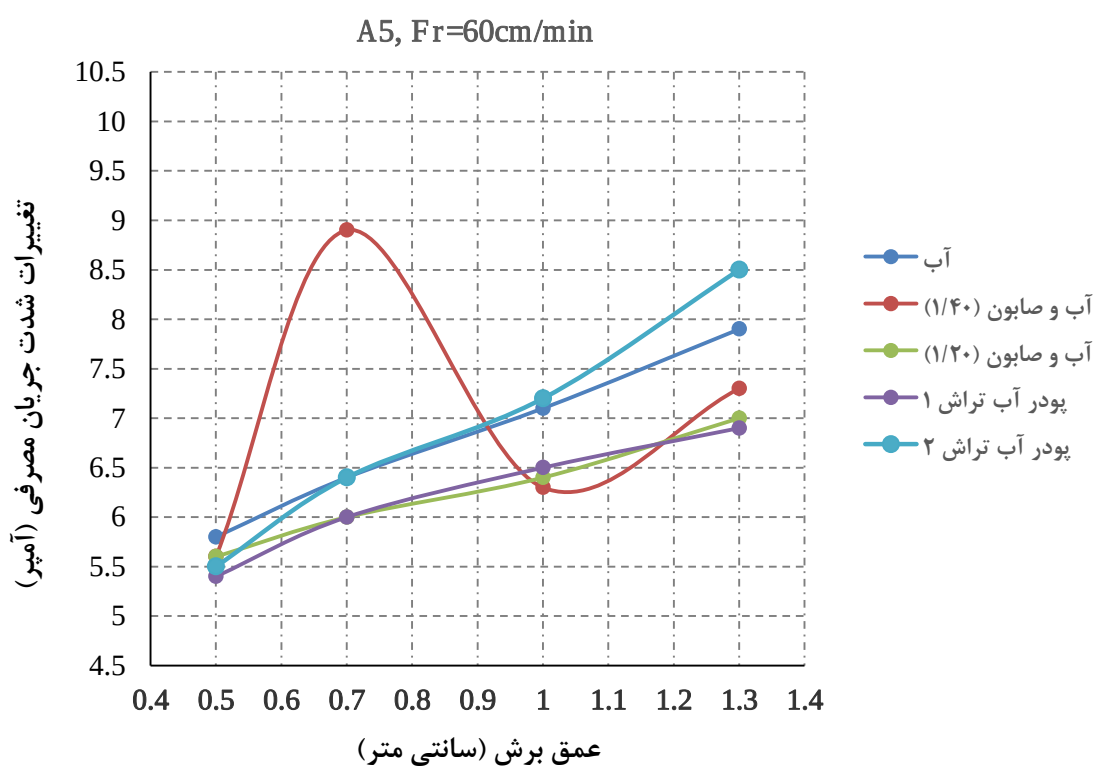
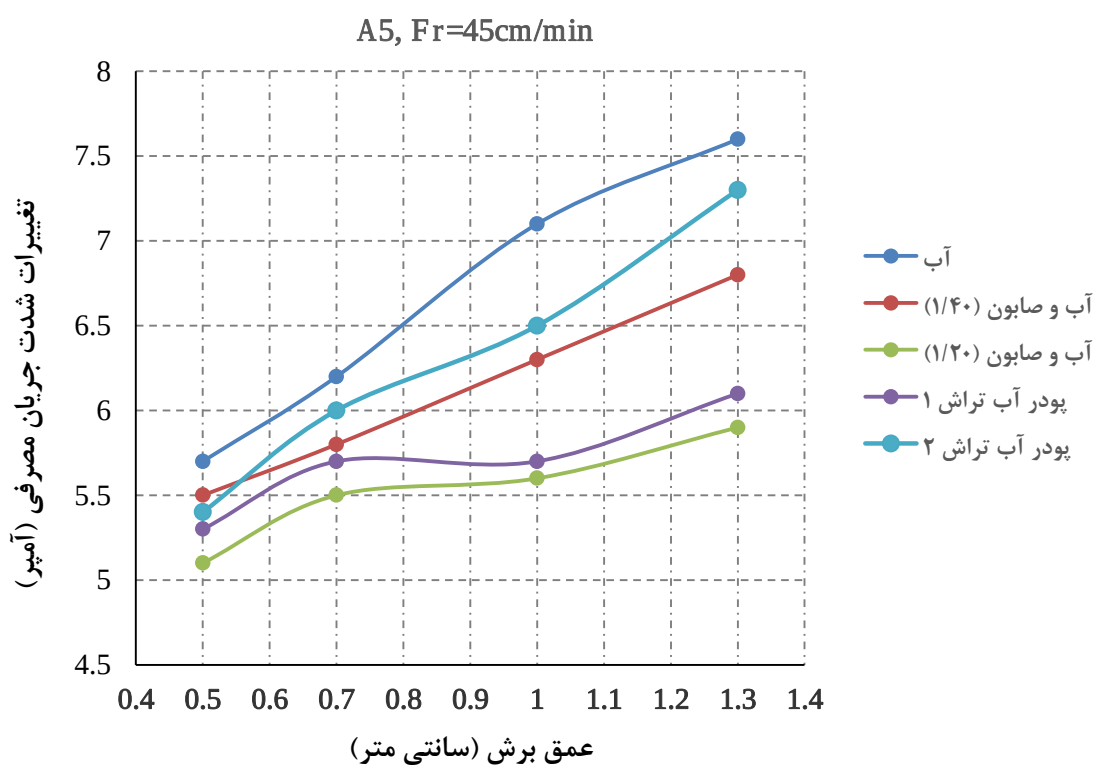
شکل پیوست ب ۱-۶ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیات سبز شاداب نائین



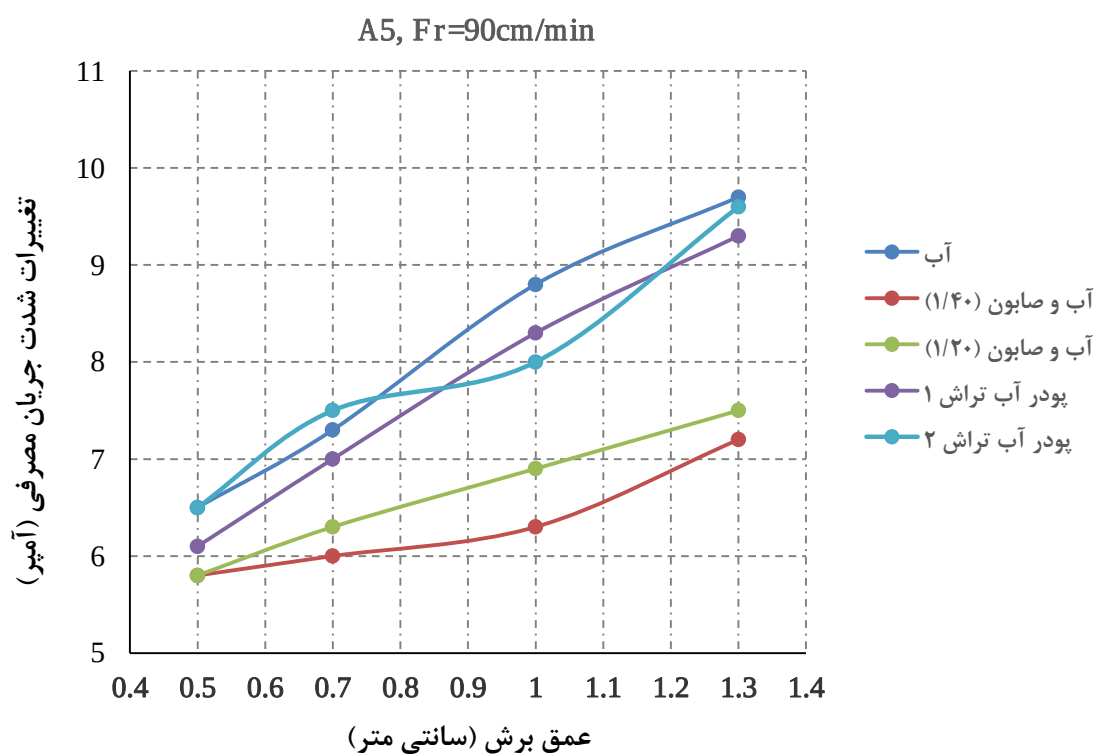
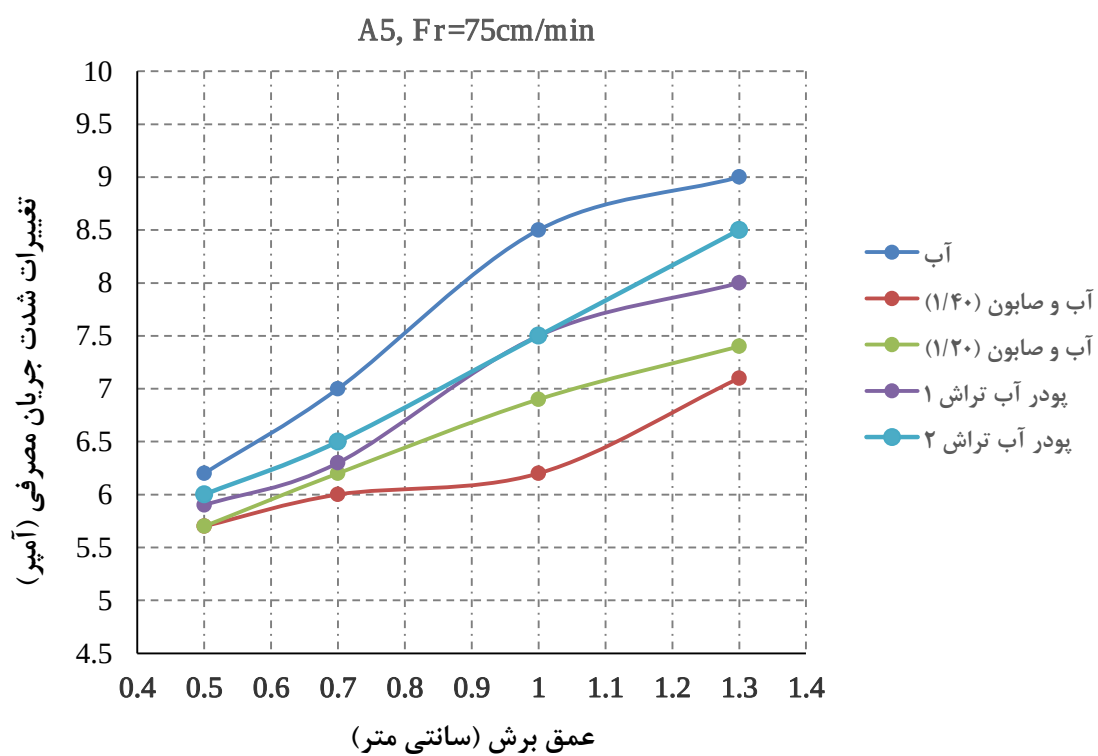
شکل پیوست ب ۷-۱ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانتیت سبز کاهویی بیرجند



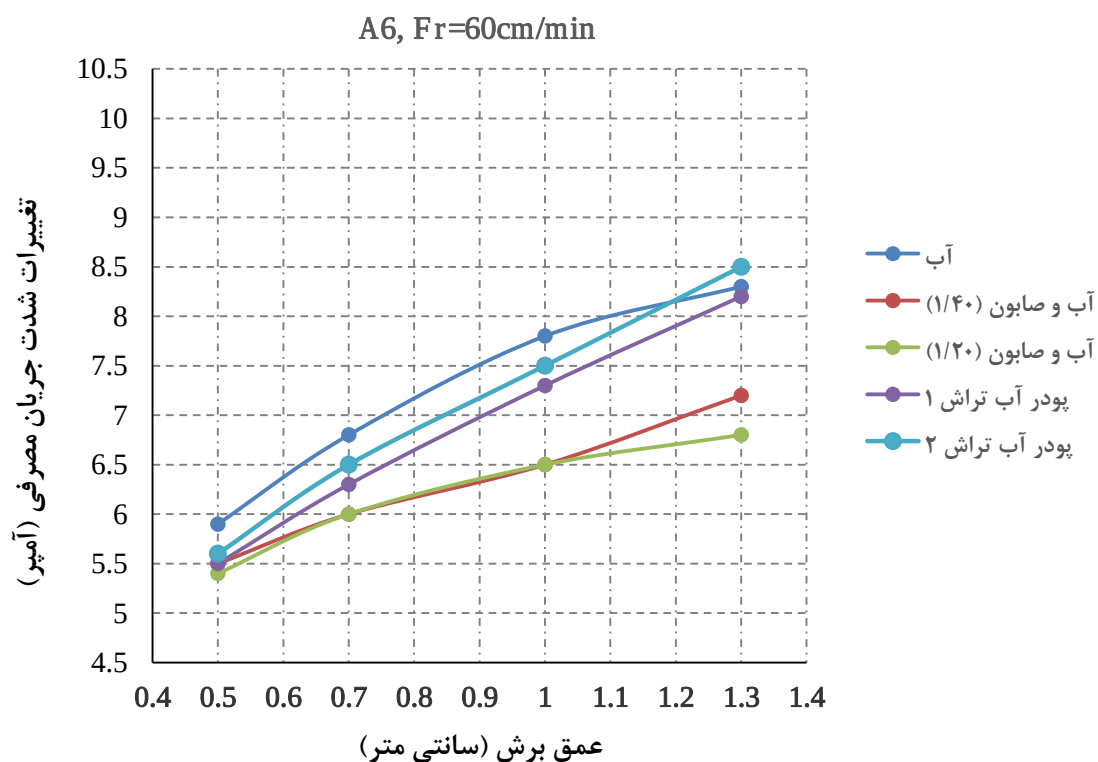
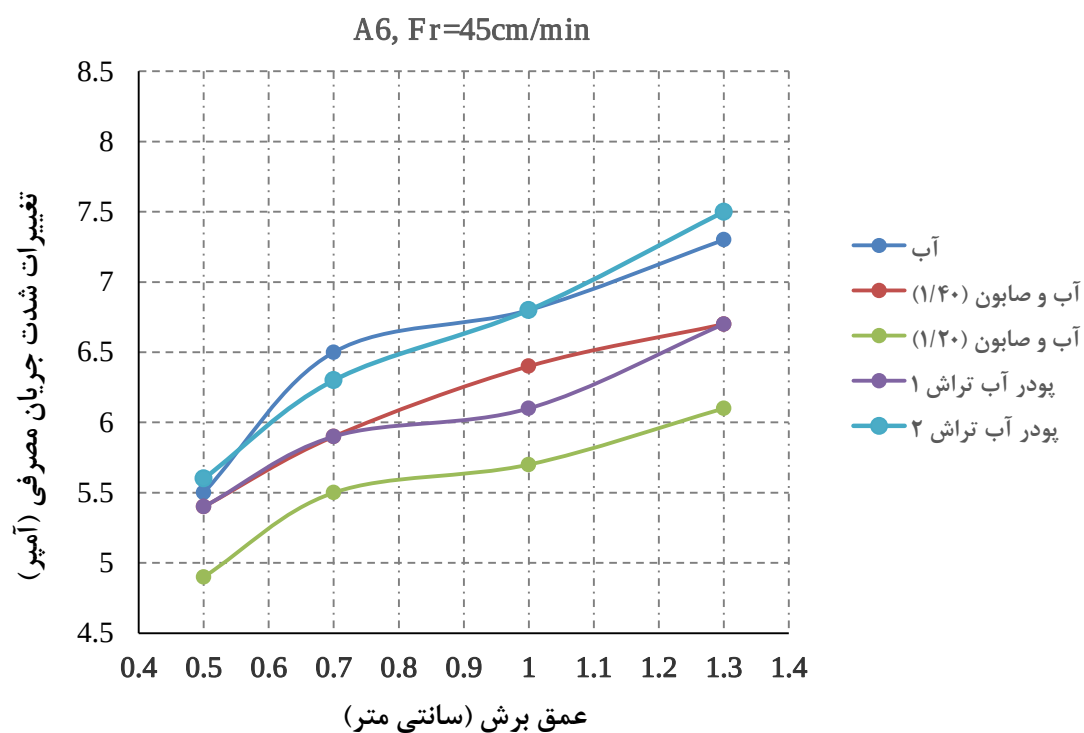
شکل پیوست ب ۸-۱ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیات سبز کاهویی بیرجند



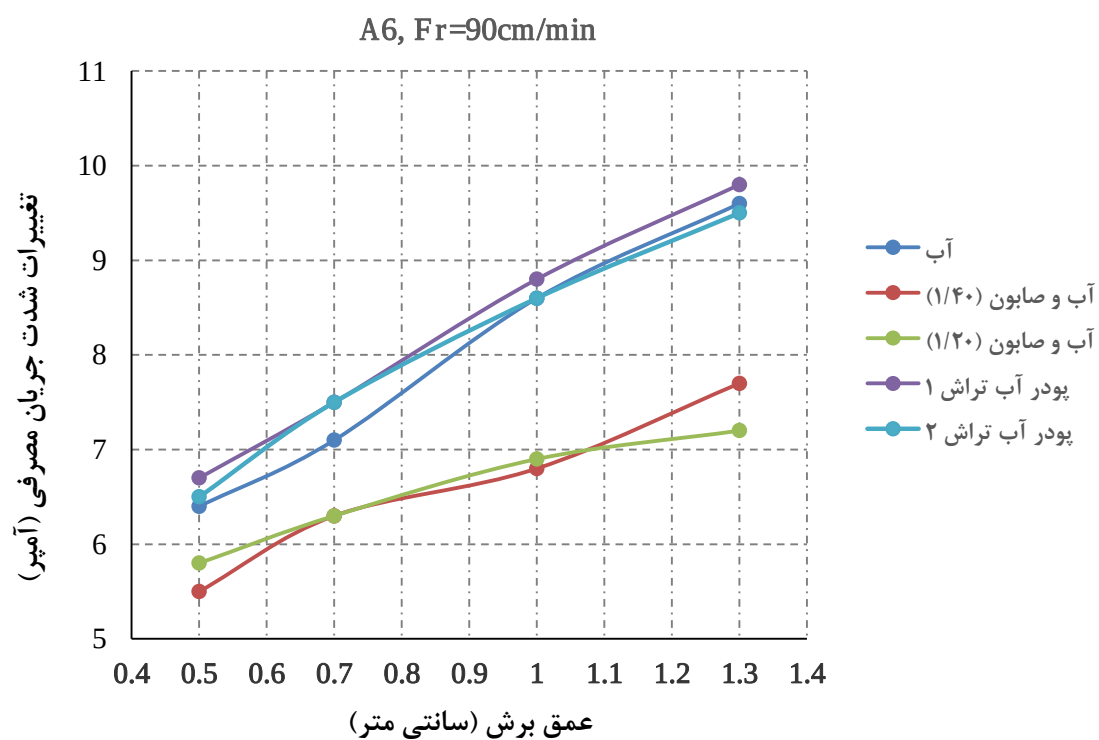
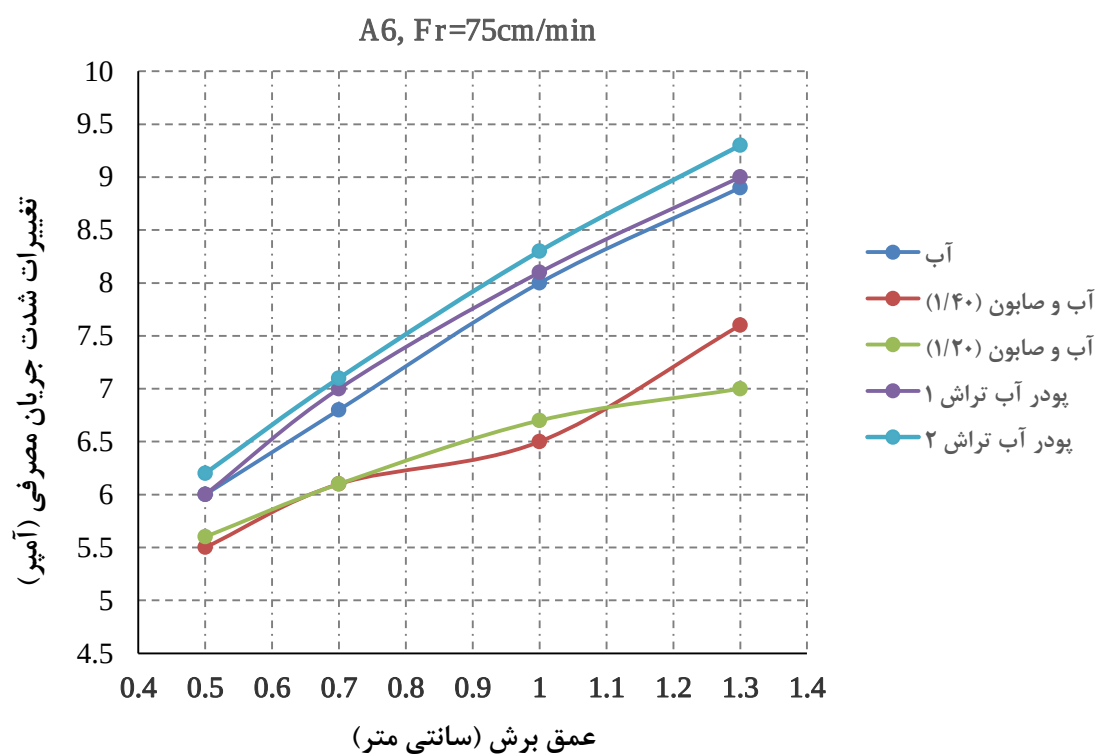
شکل پیوست ب ۹-۱ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیات سفید نطنز



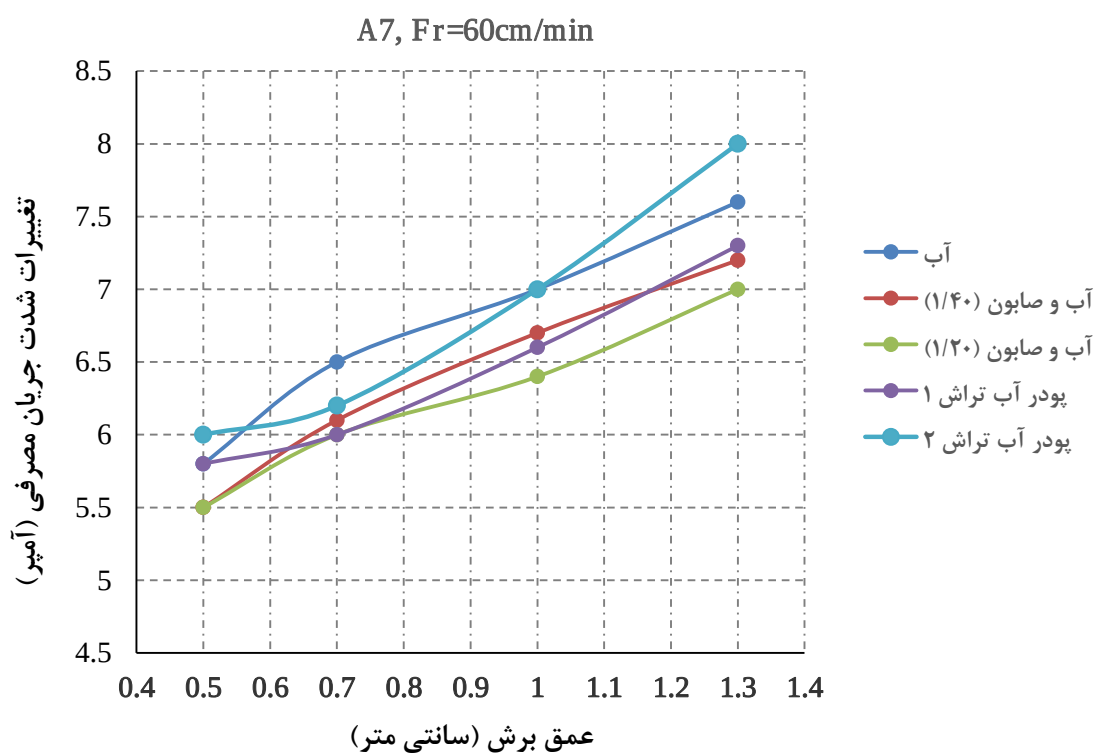
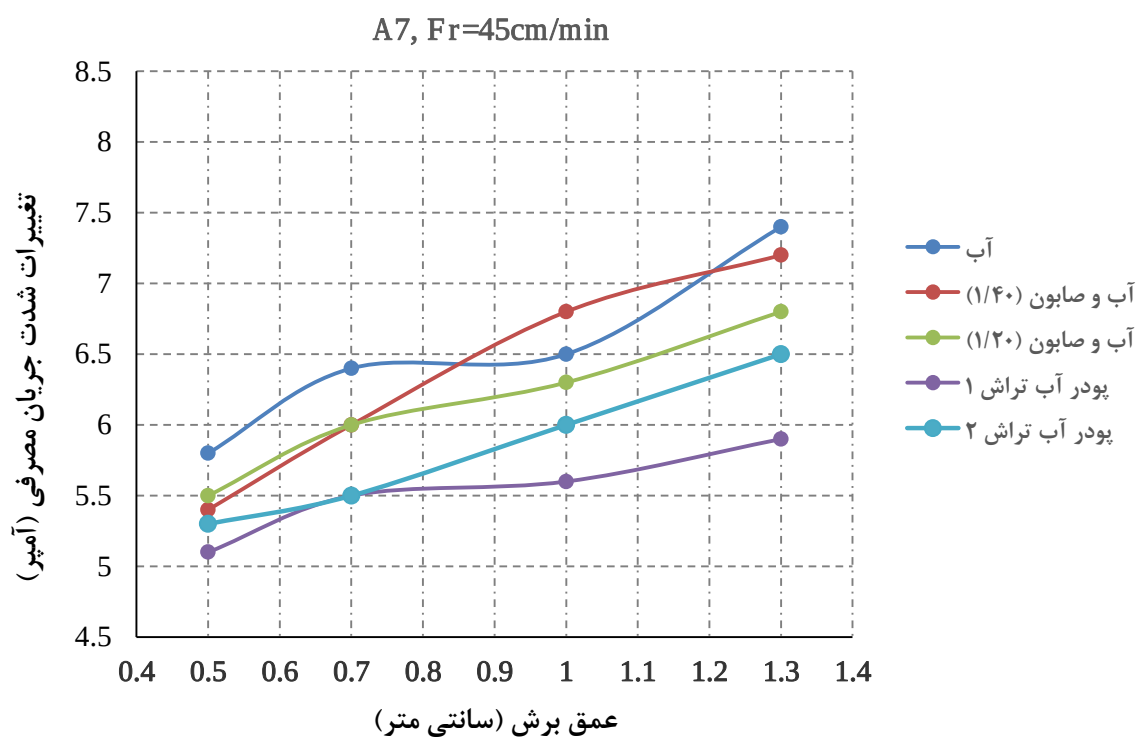
شکل پیوست ب ۱-۱۰ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیت سفید نطنز



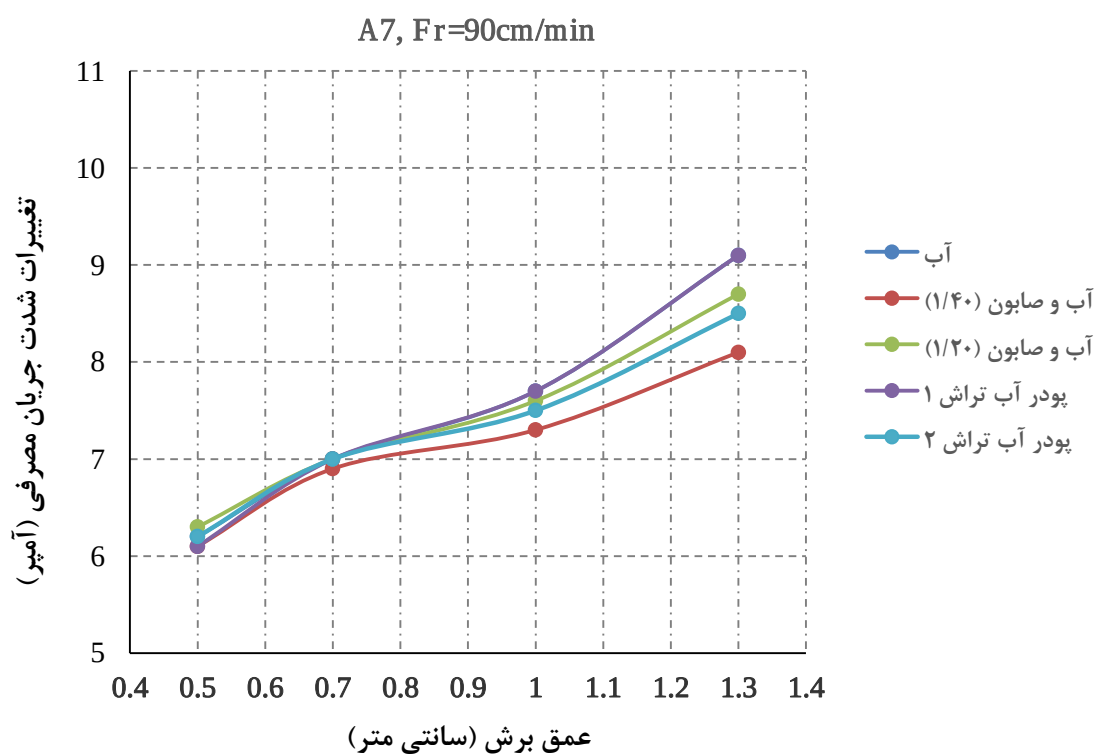
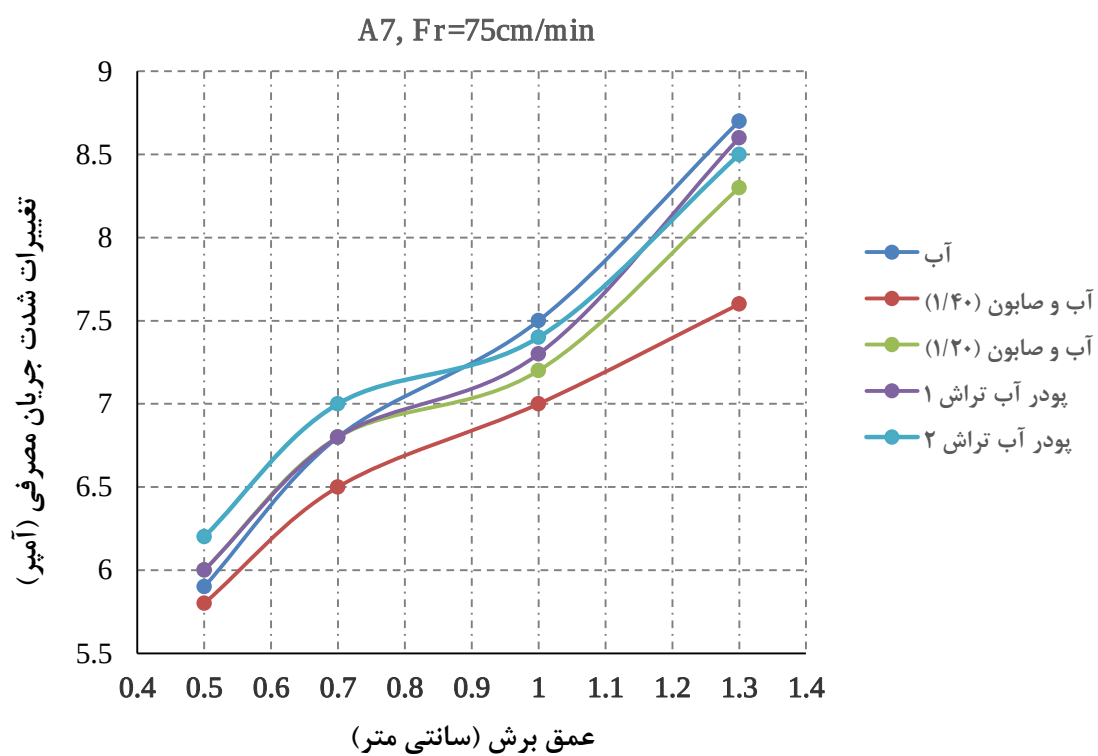
شکل پیوست ب ۱-۱۱ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیات سفید نه‌بندان



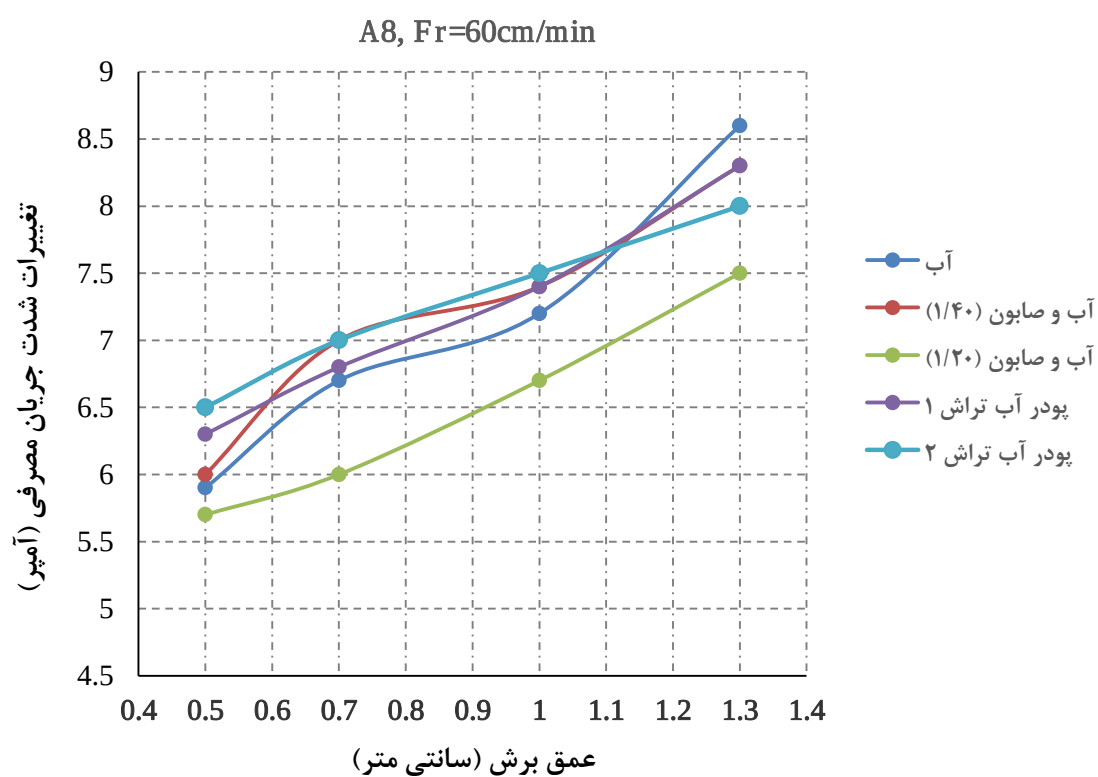
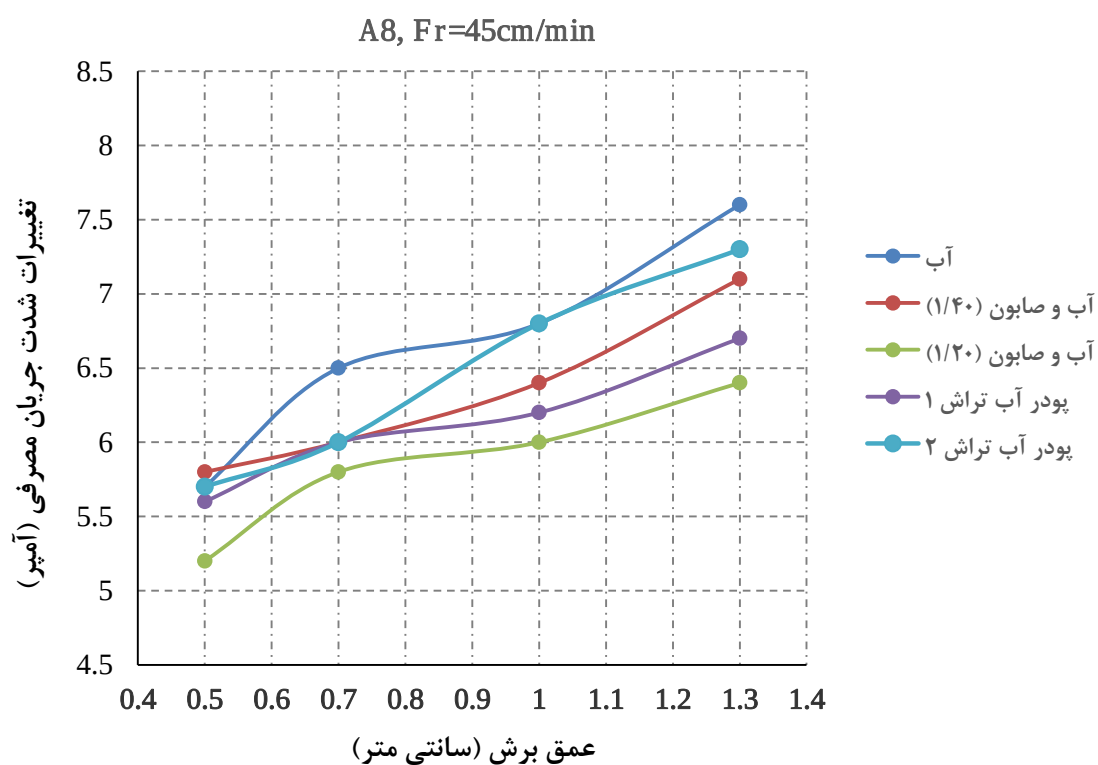
شکل پیوست ب ۱-۱۲ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیات سفید نهبدان



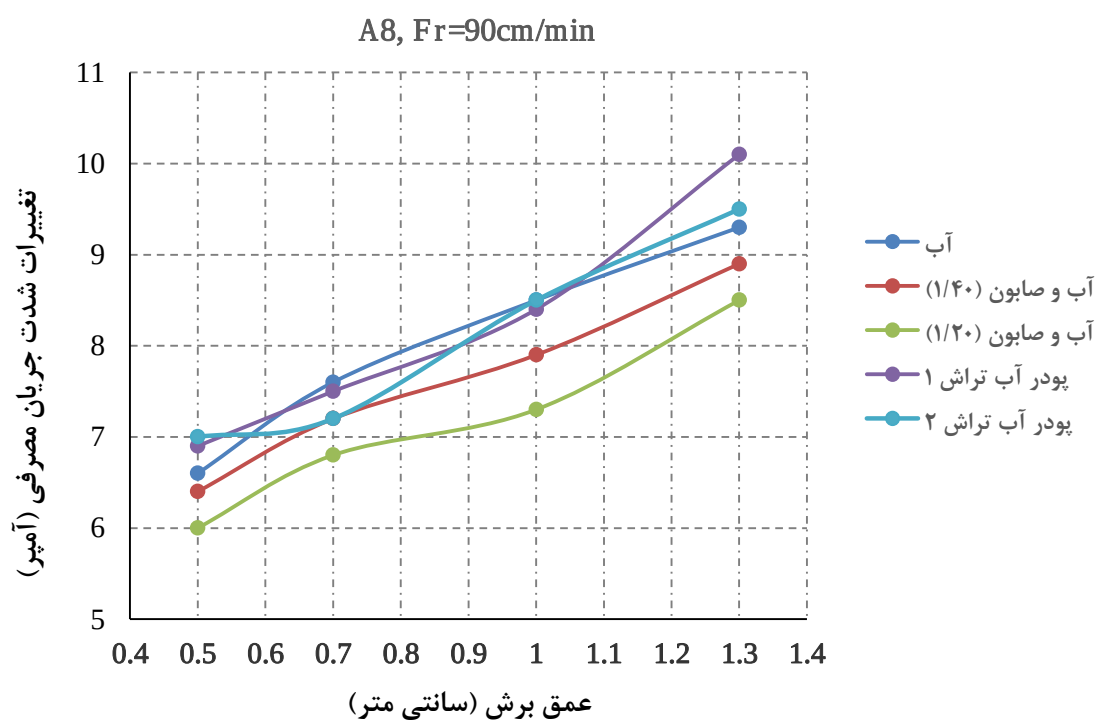
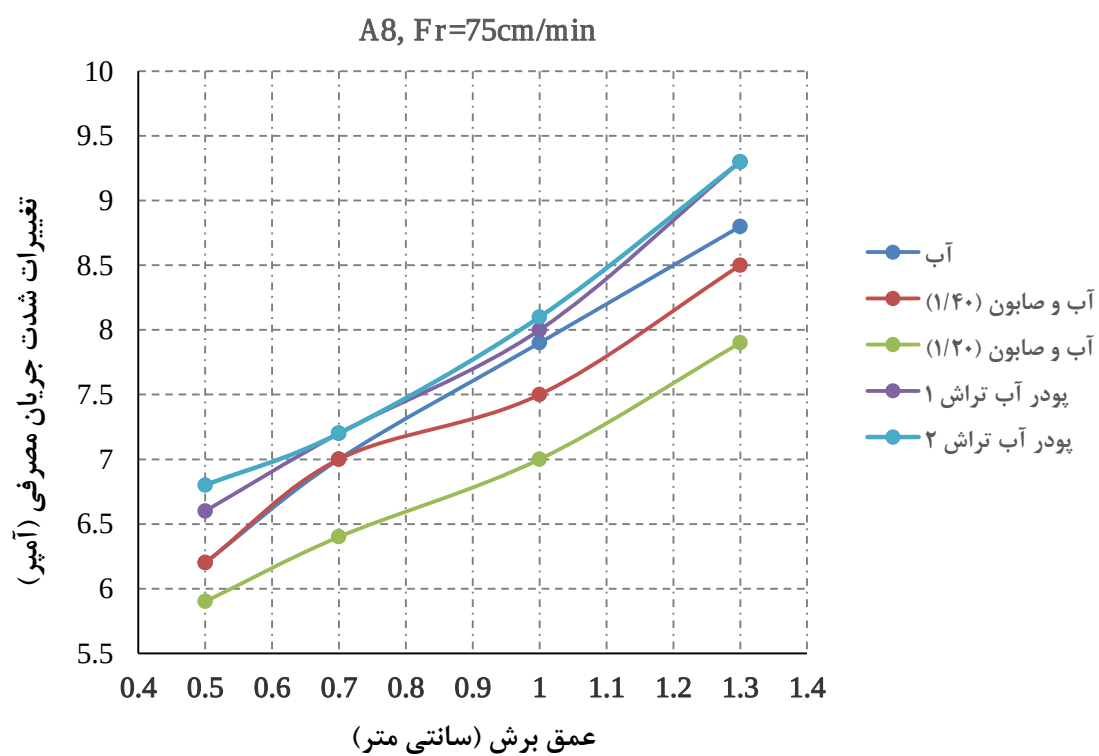
شکل پیوست ب ۱-۱۳ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیت قرمز اصفهان



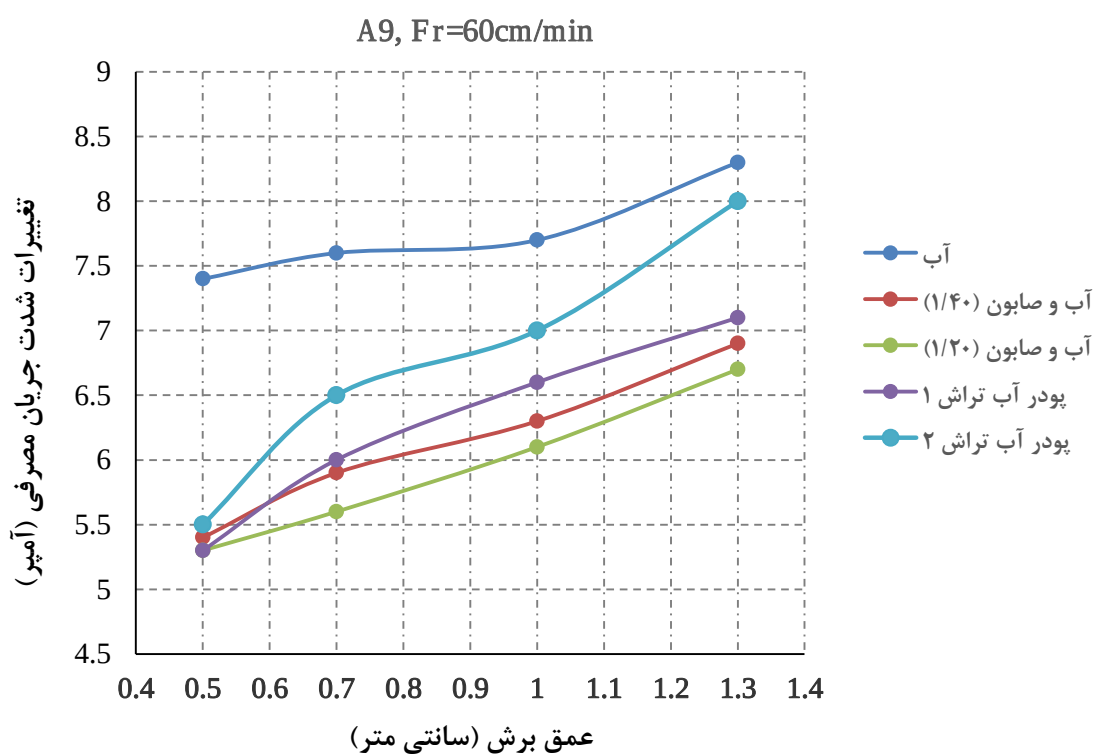
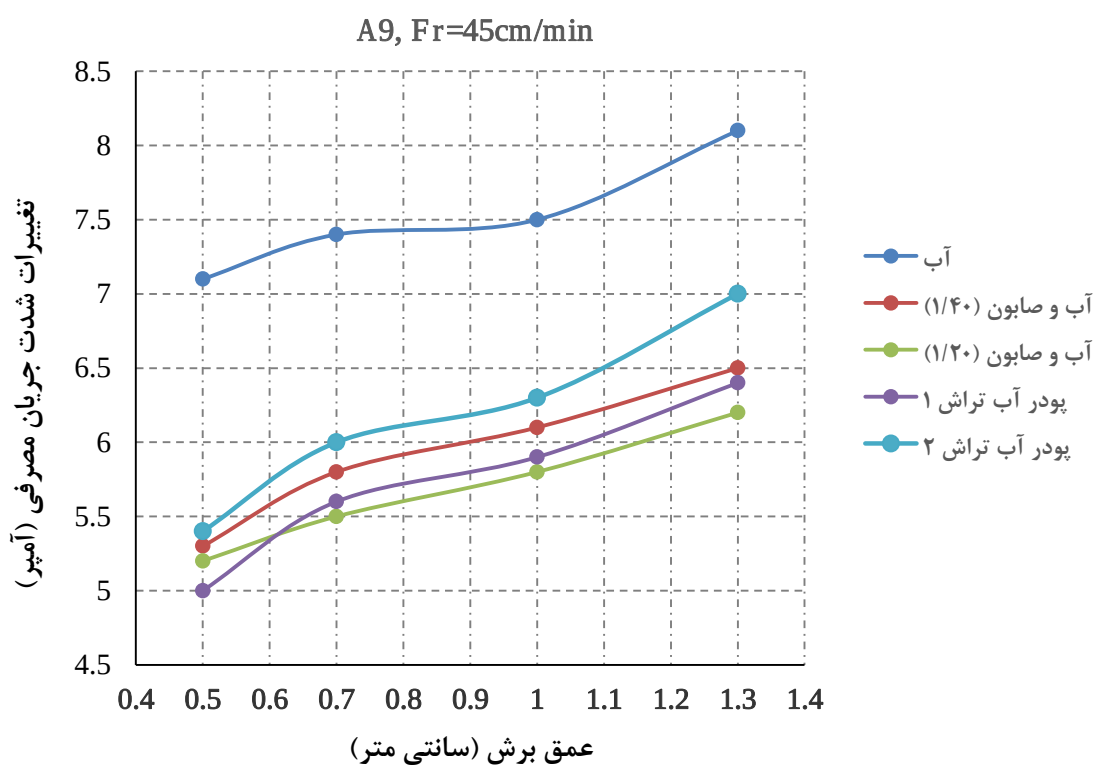
شکل پیوست ب ۱-۱۴ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیته قرمز اصفهان



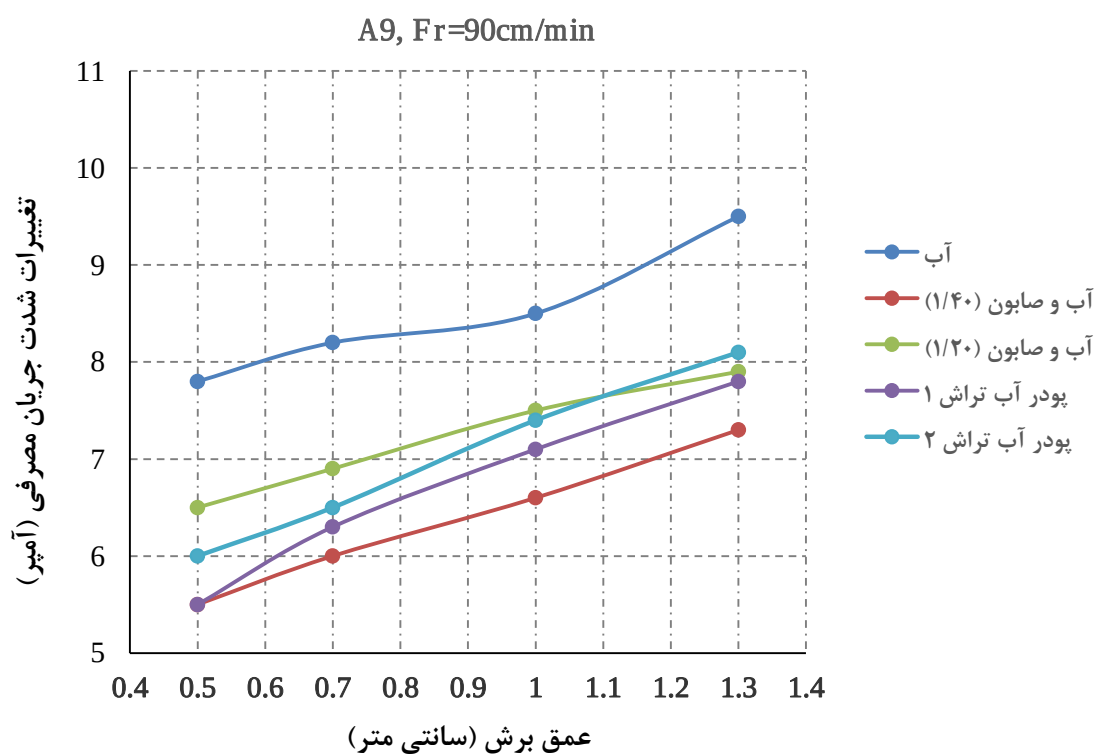
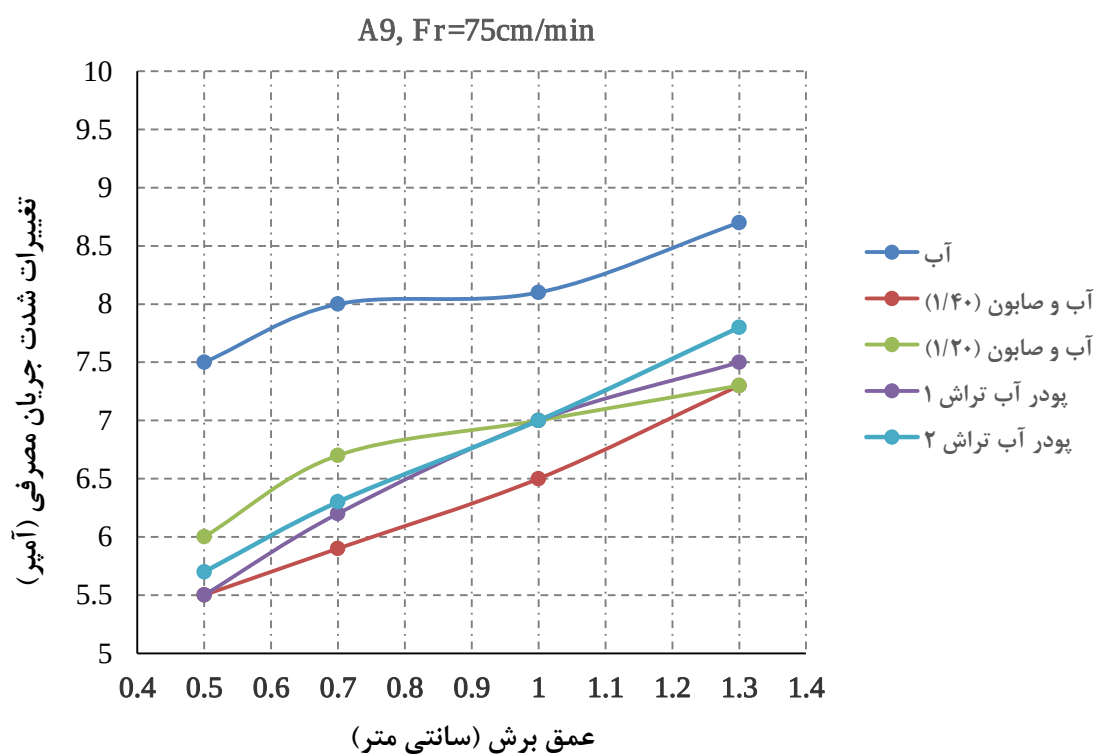
شکل پیوست ب ۱-۱۶ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیته قرمز یزد



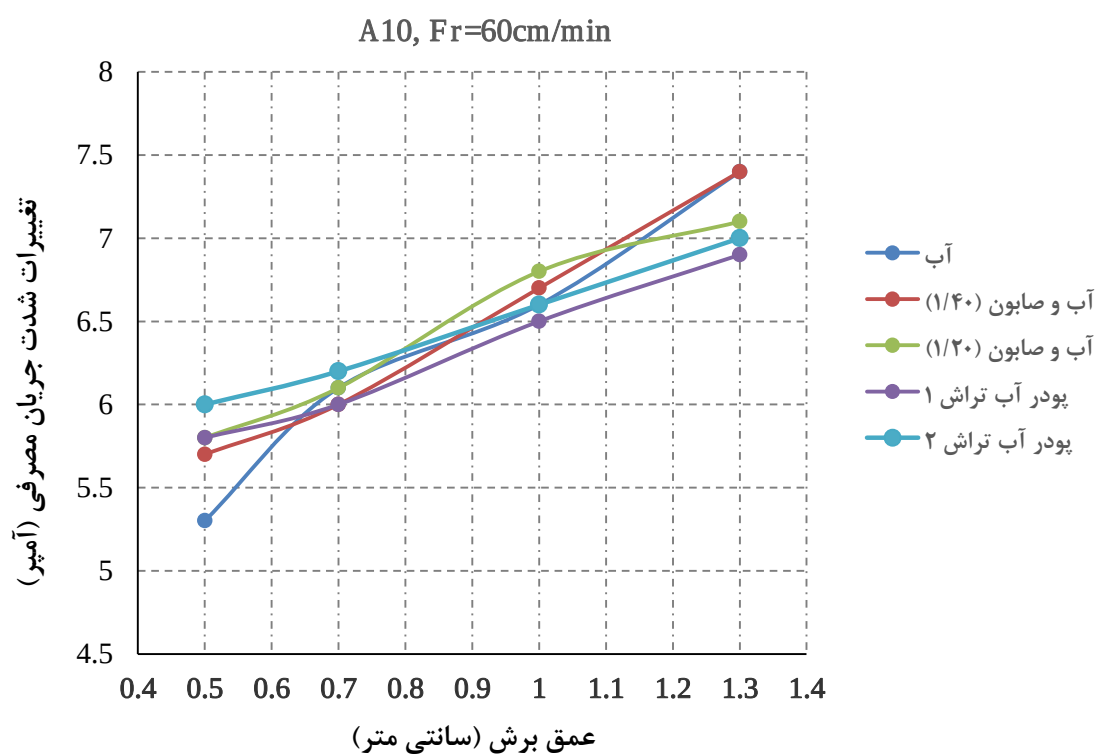
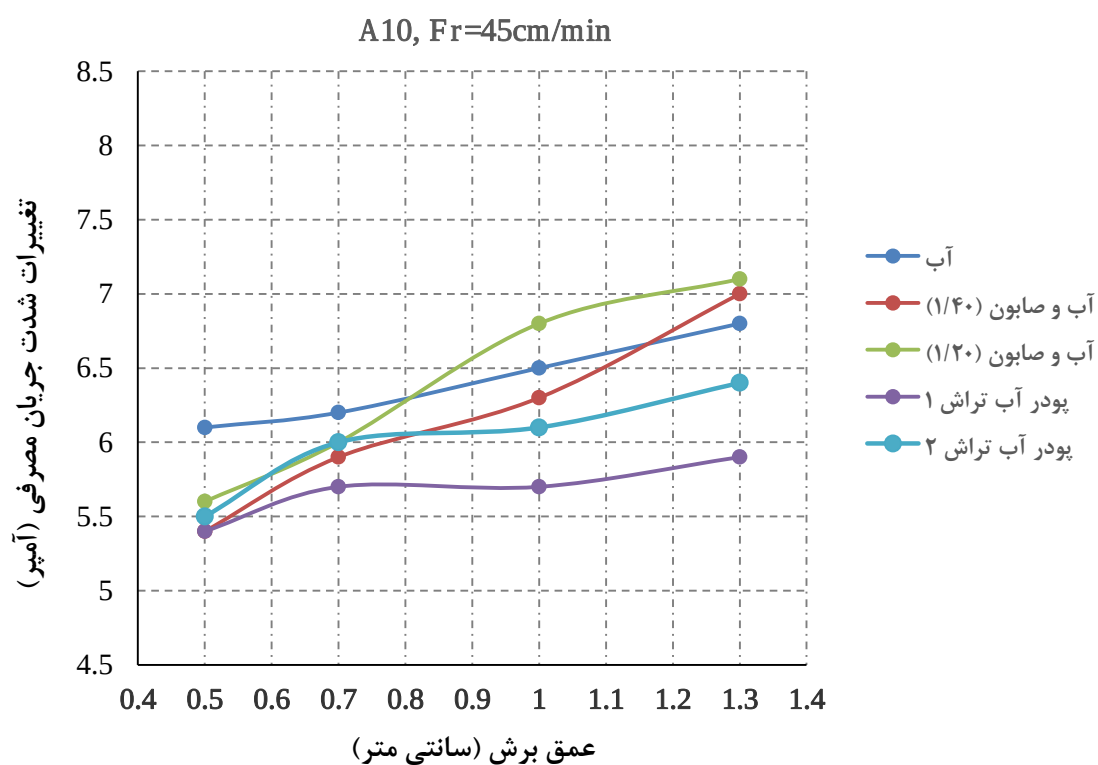
شکل پیوست ب ۱-۱۶ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانتیت قرمز یزد



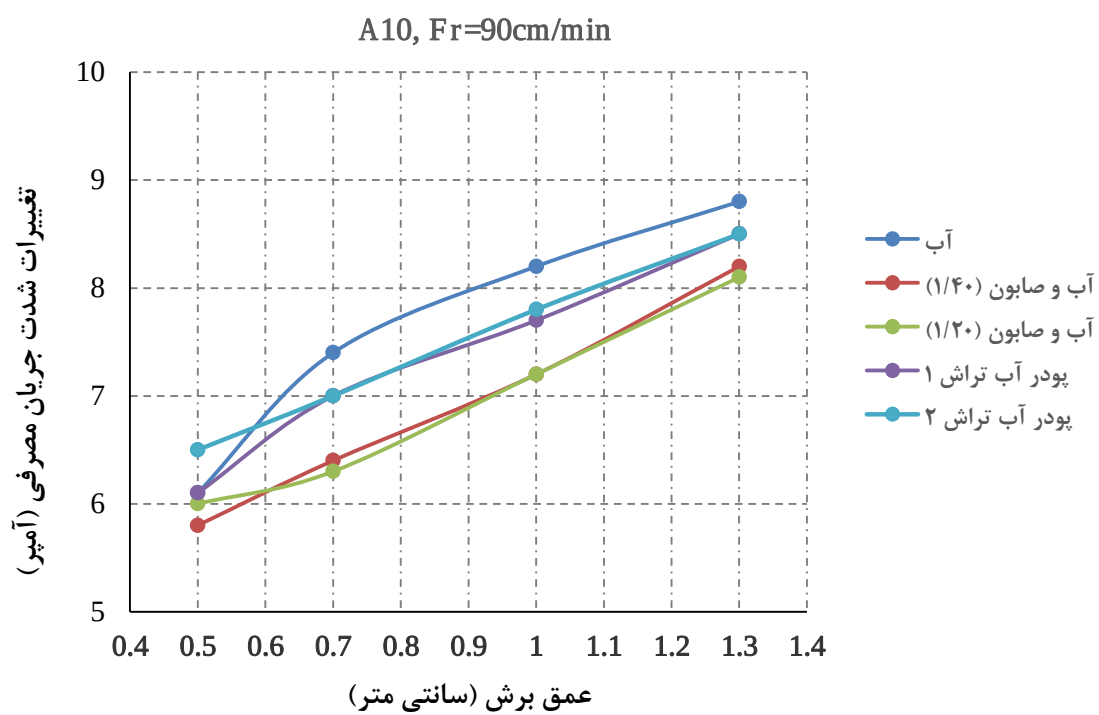
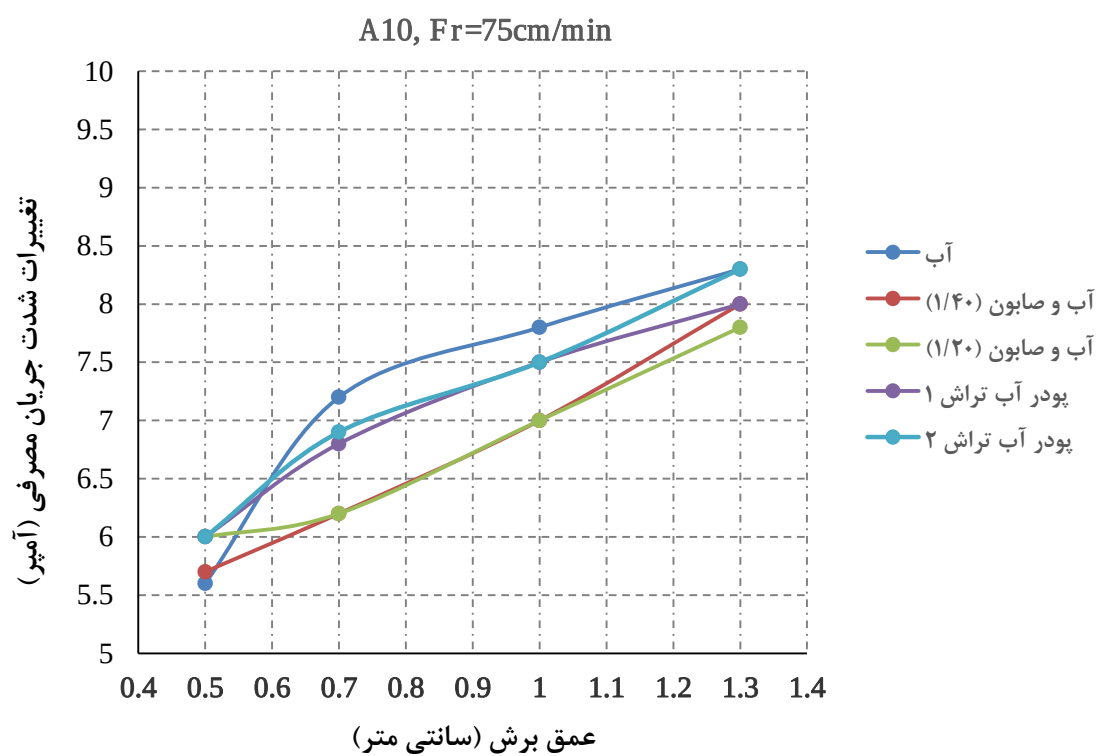
شکل پیوست ب ۱-۱۷ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیات مر.وارید مشهد



شکل پیوست ب ۱-۱۸ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیته مر.وارید مشهد

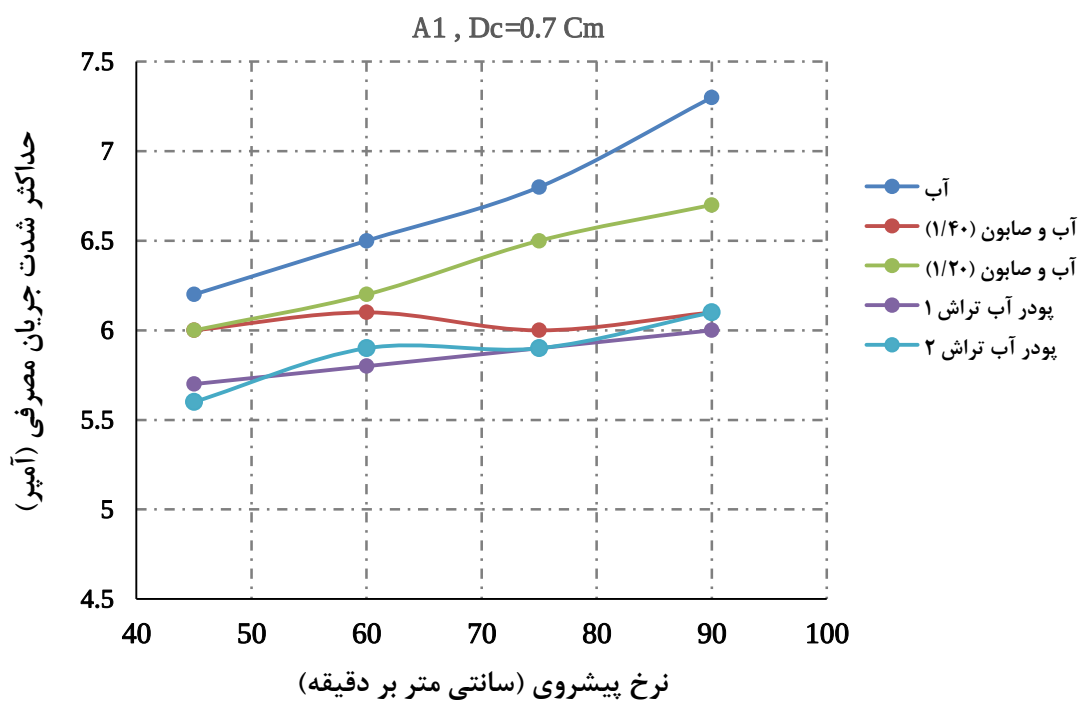
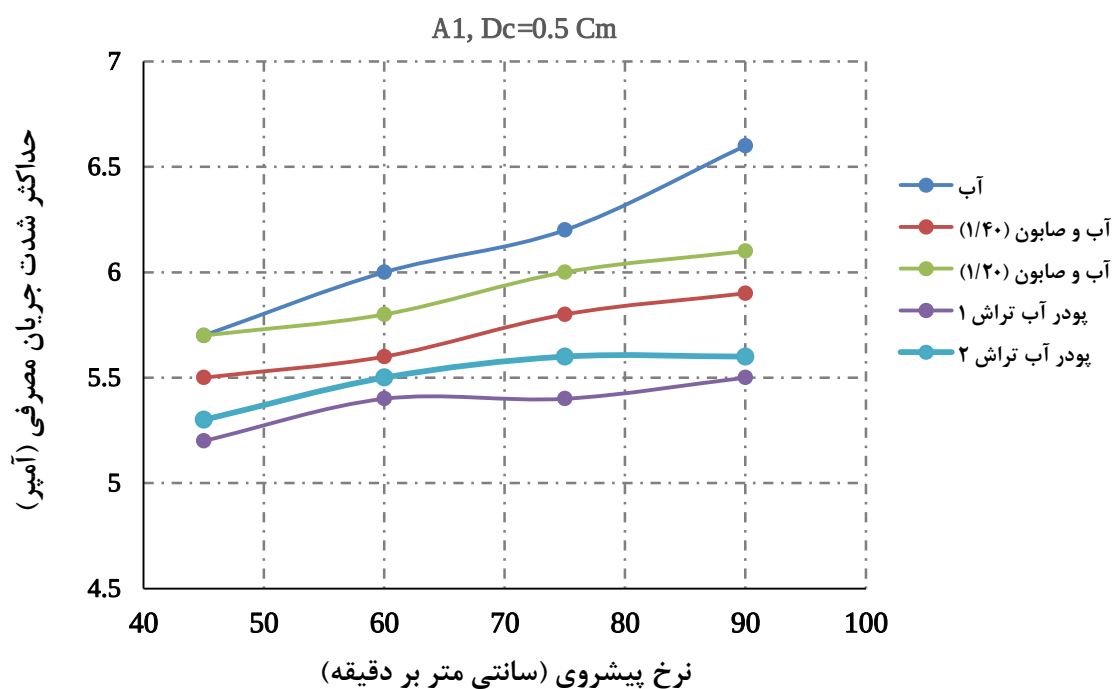


شکل پیوست ب ۱-۱۹ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیته مشکی چایان

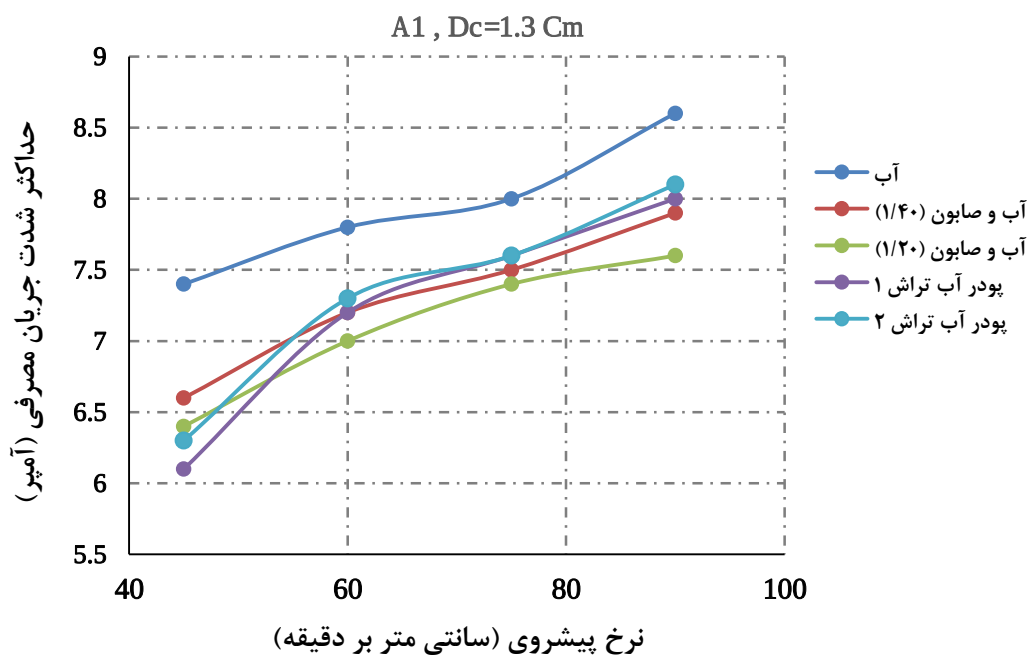
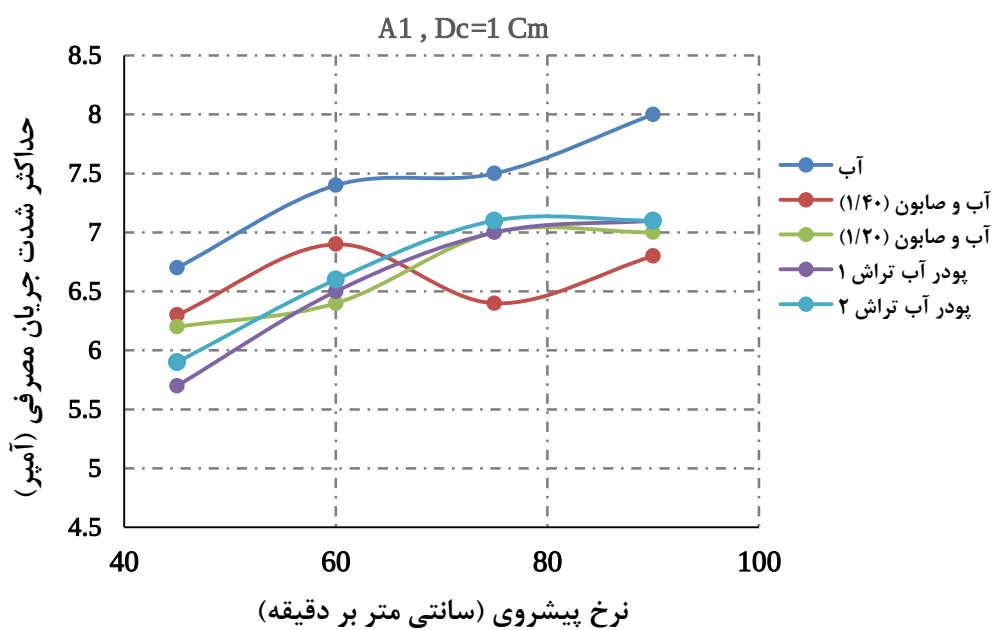


شکل پیوست ب ۱-۲۰ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات عمق برش برای گرانیات مشکی

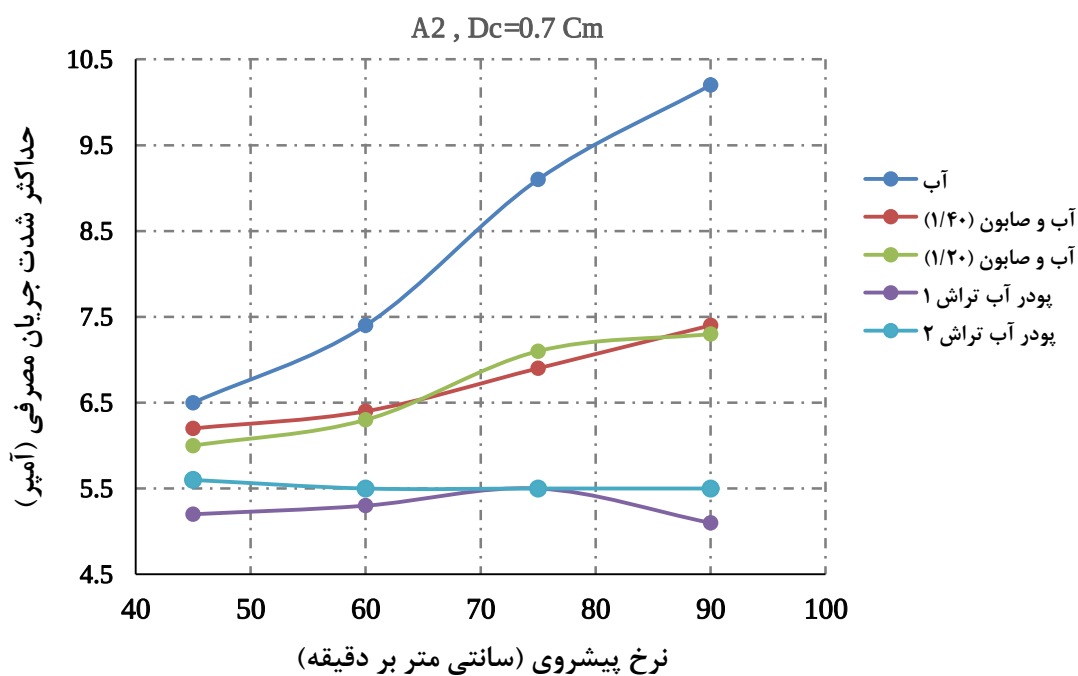
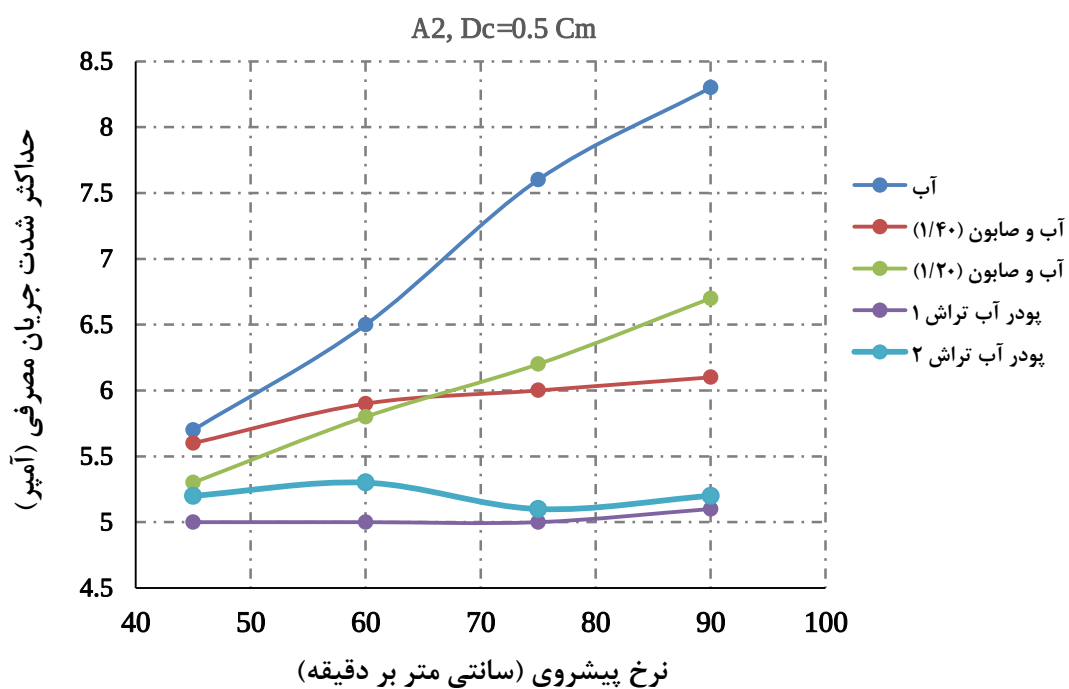
چایان



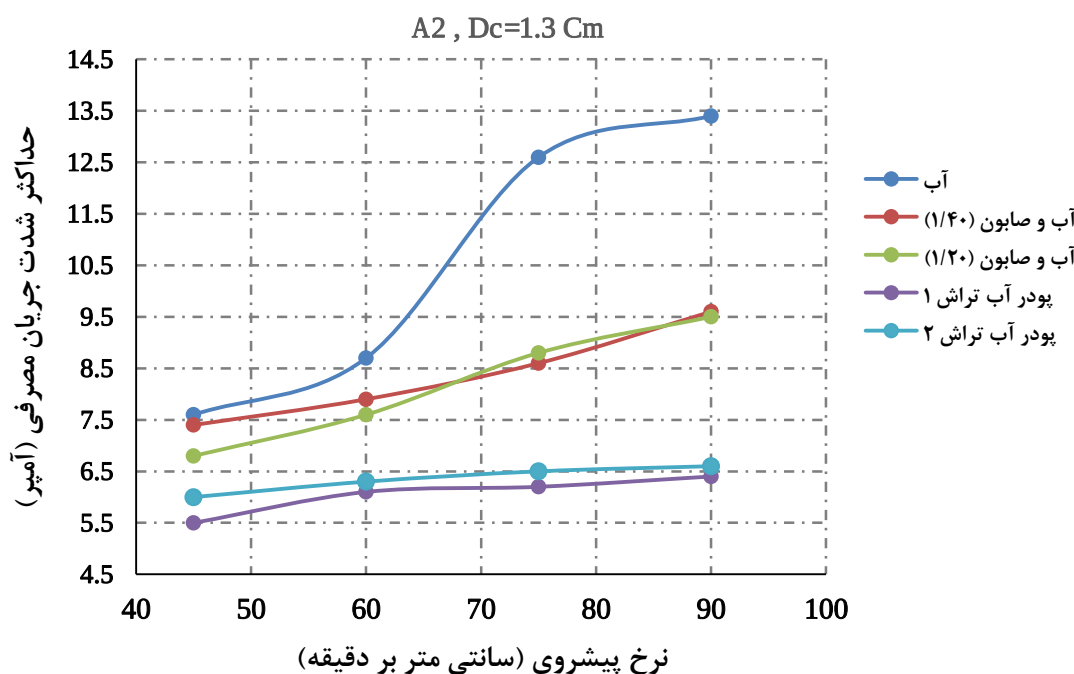
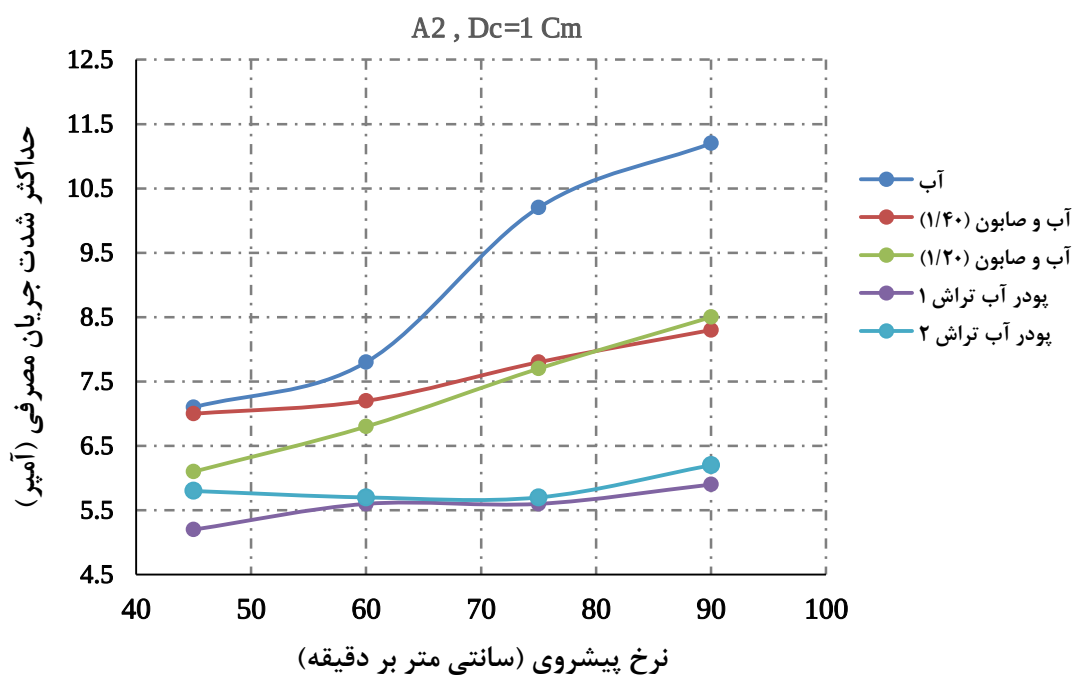
شکل پیوست ب ۱-۲ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانیات خرم دره



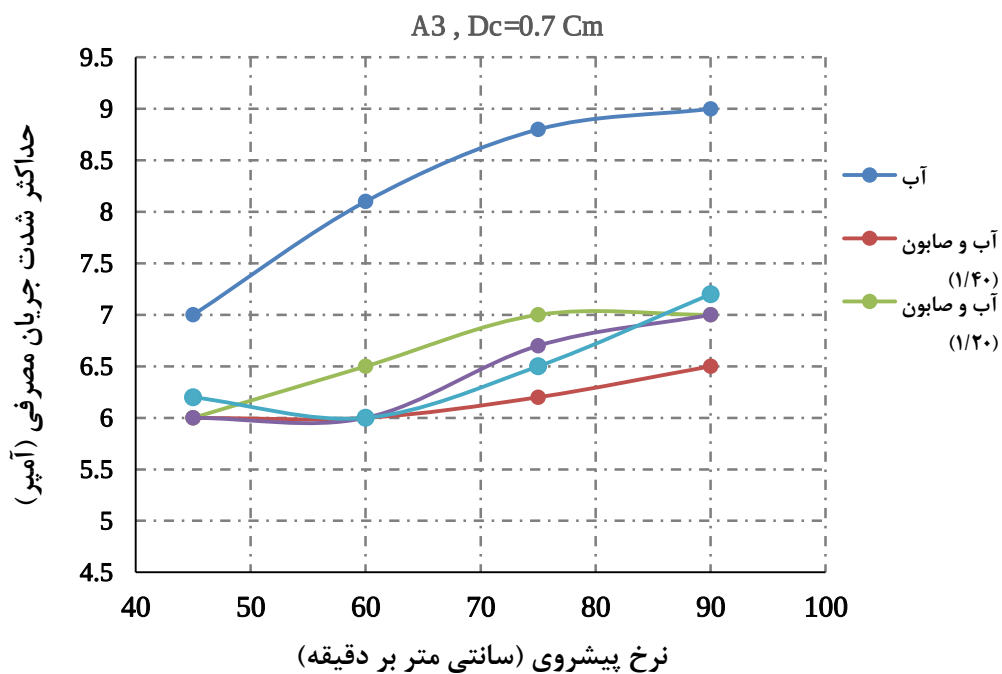
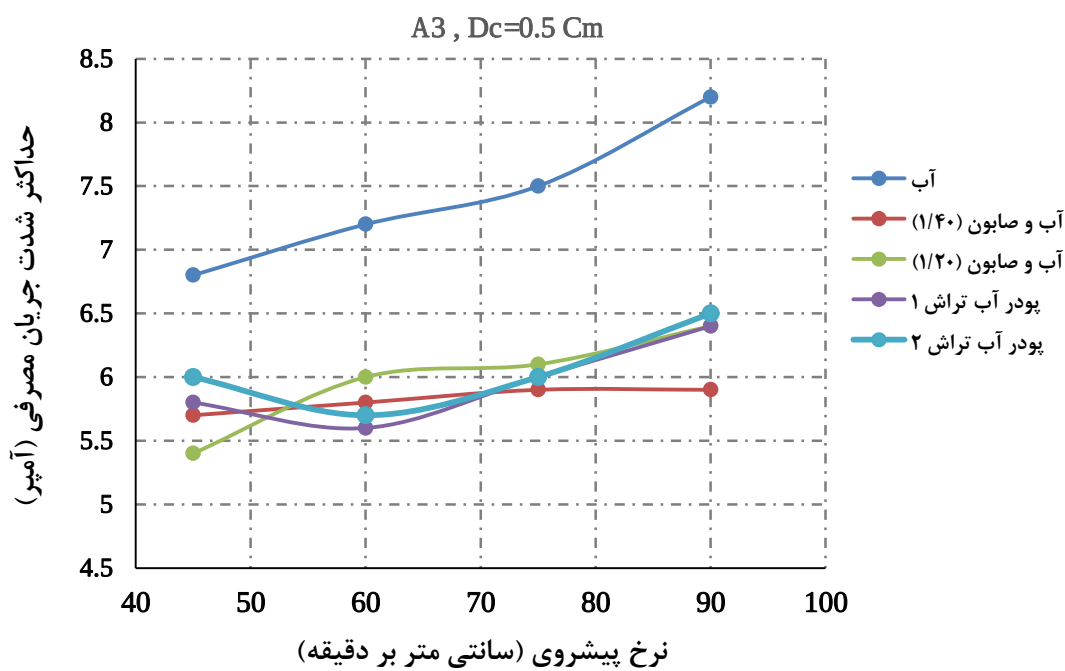
شکل پیوست ب ۲-۲ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانیته خرم دره



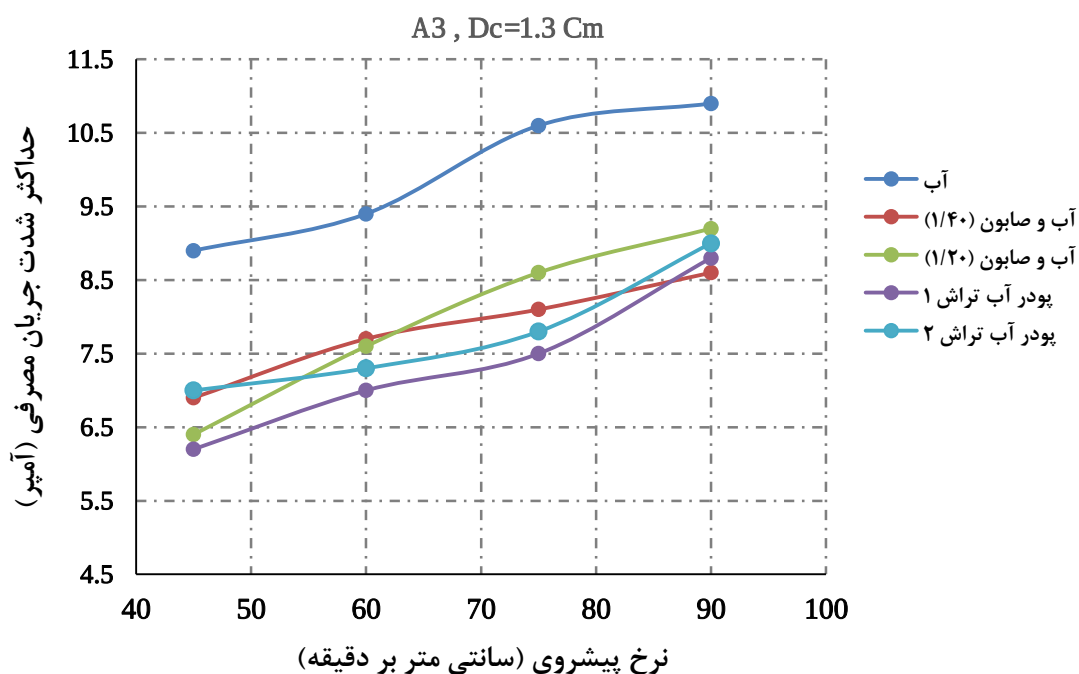
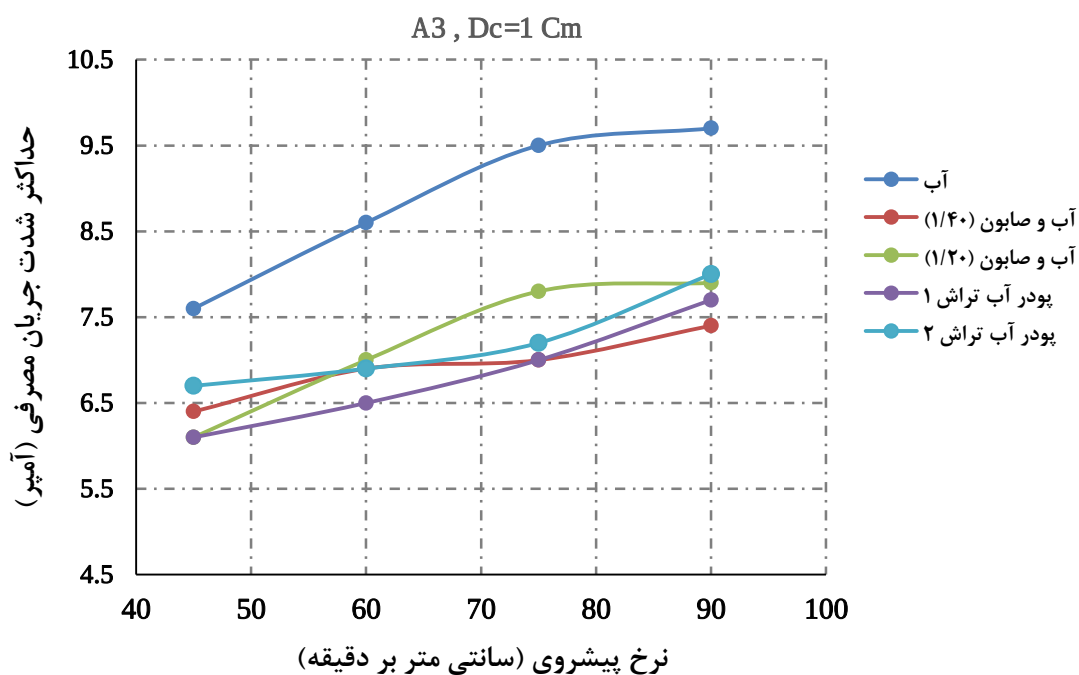
شکل پیوست ب ۲-۳ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانت سبز جنگلی بیرجند



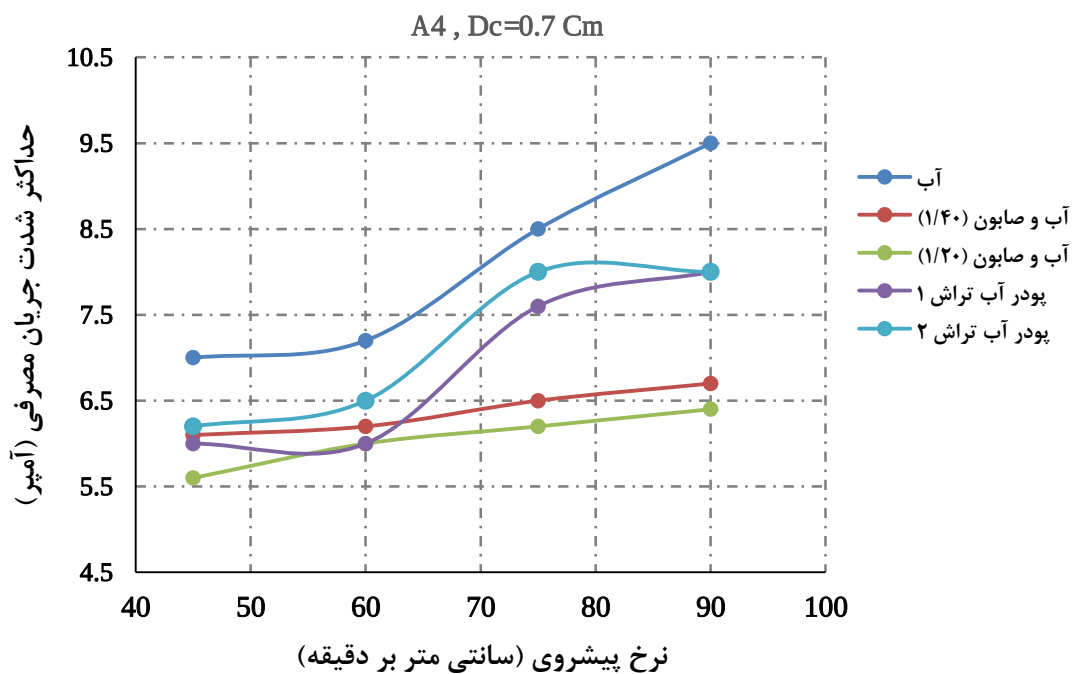
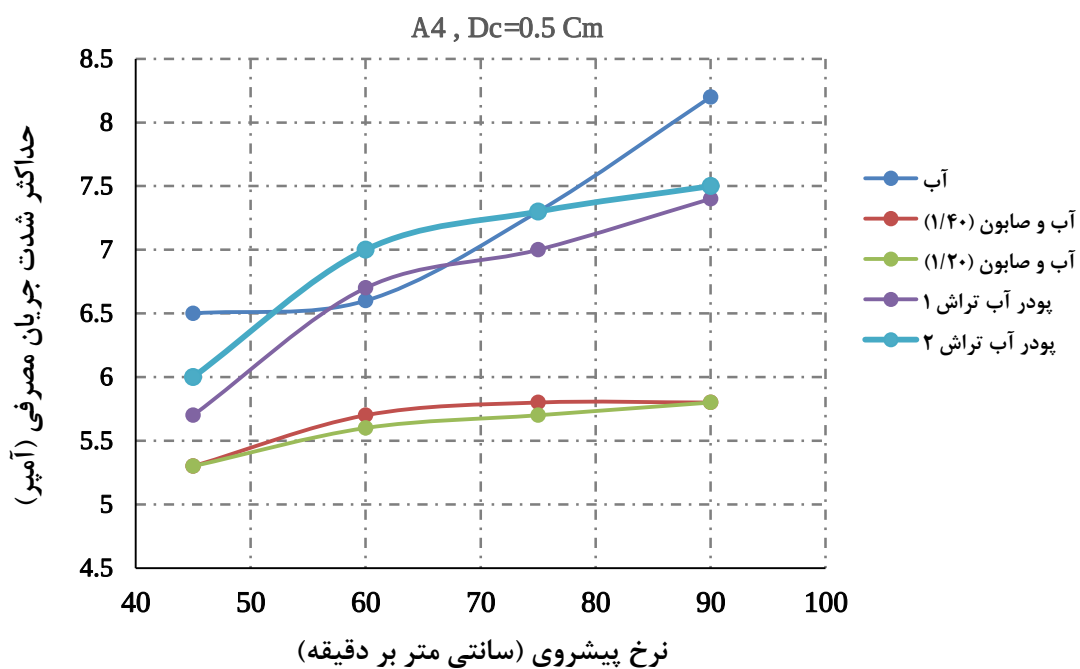
شکل پیوست ب ۲-۴ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانتیت سبز جنگلی بیرجند



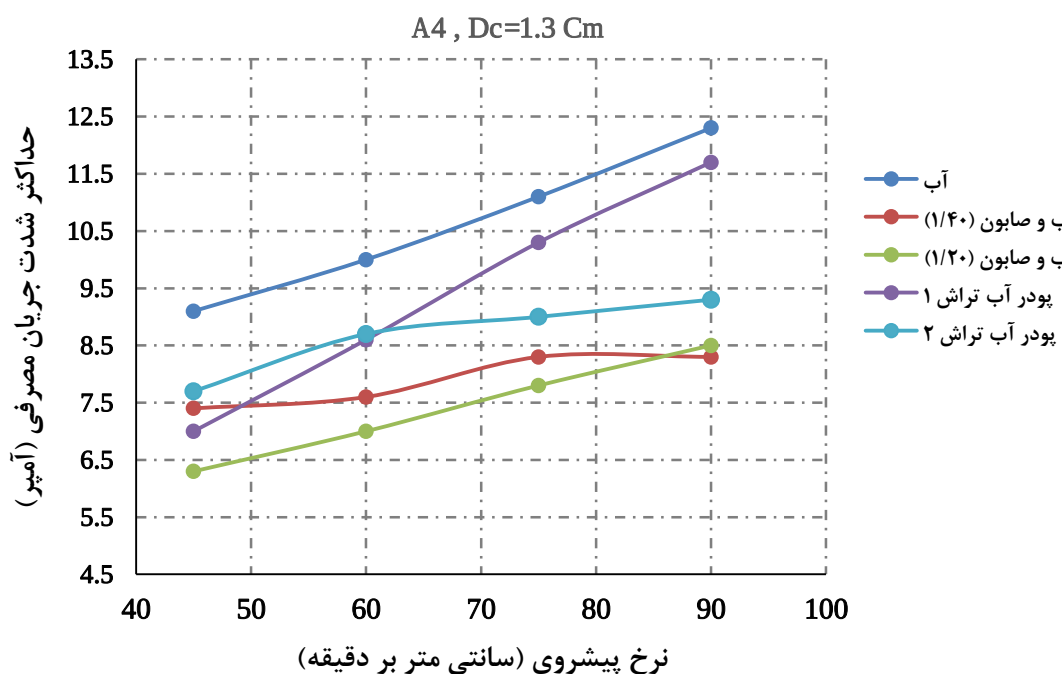
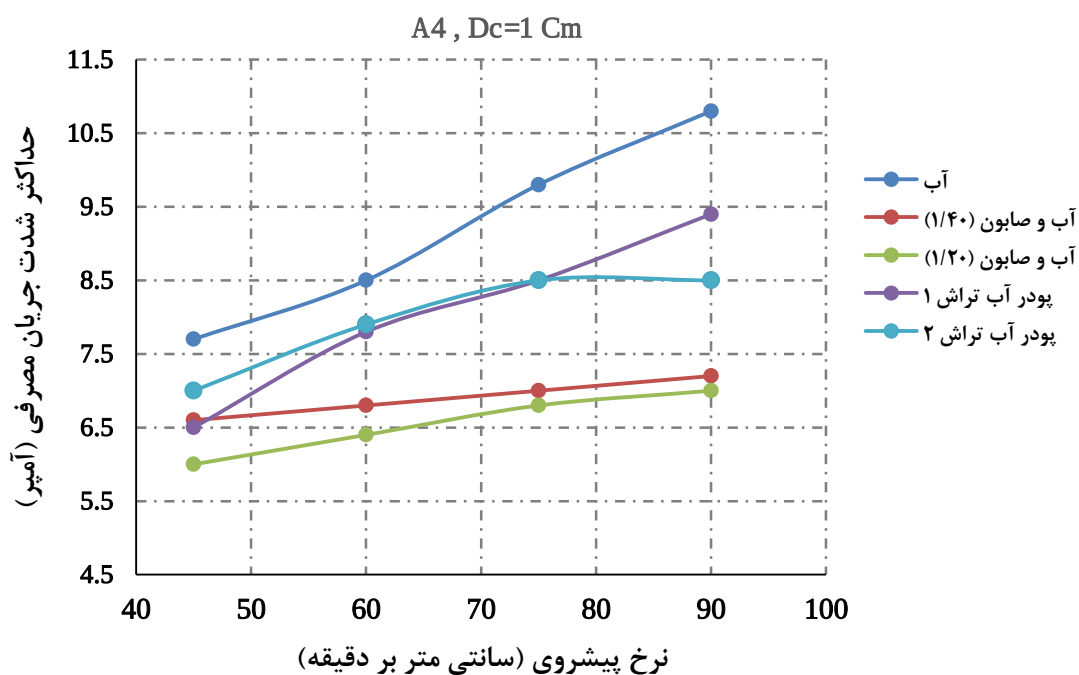
شکل پیوست ب ۲-۵ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانیات سبز شاداب نائین



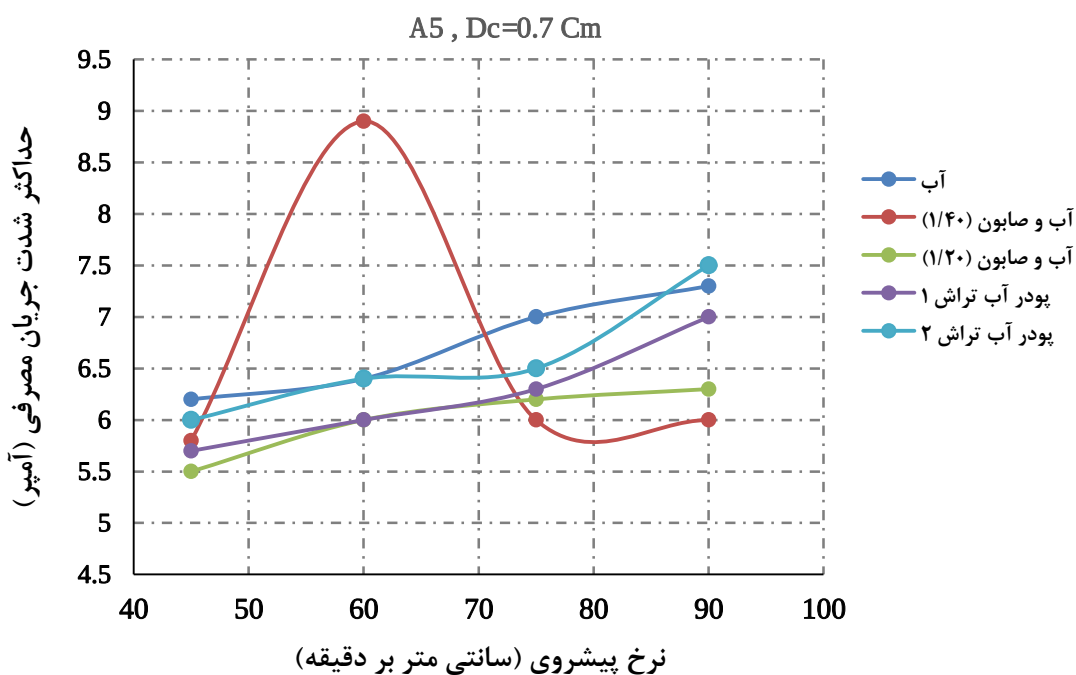
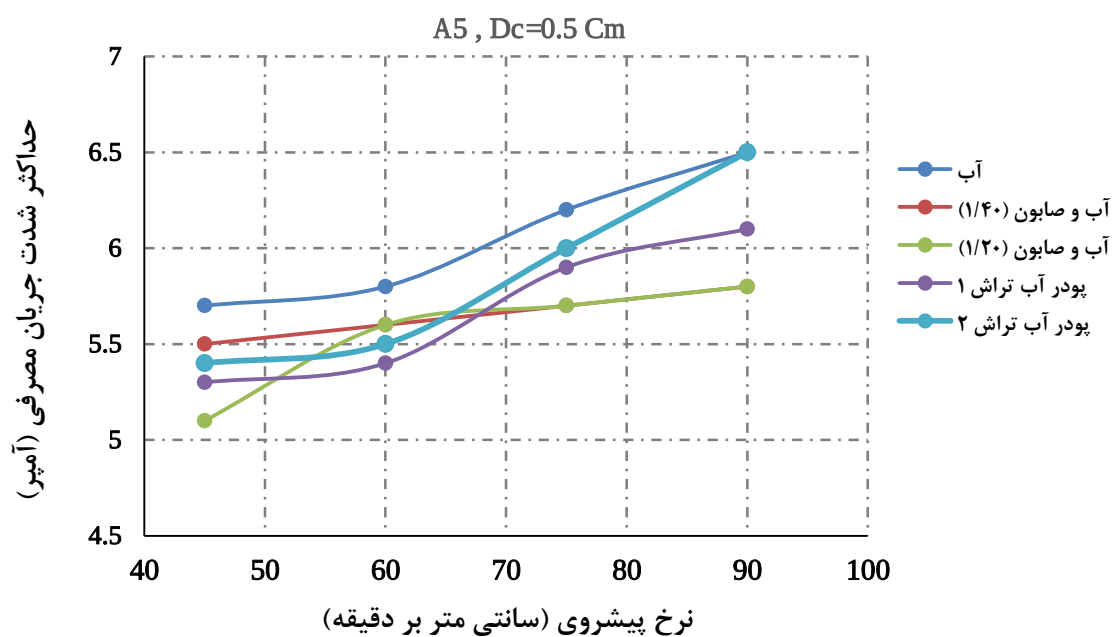
شکل پیوست ب ۲-۶ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانت سبز شاداب نائین



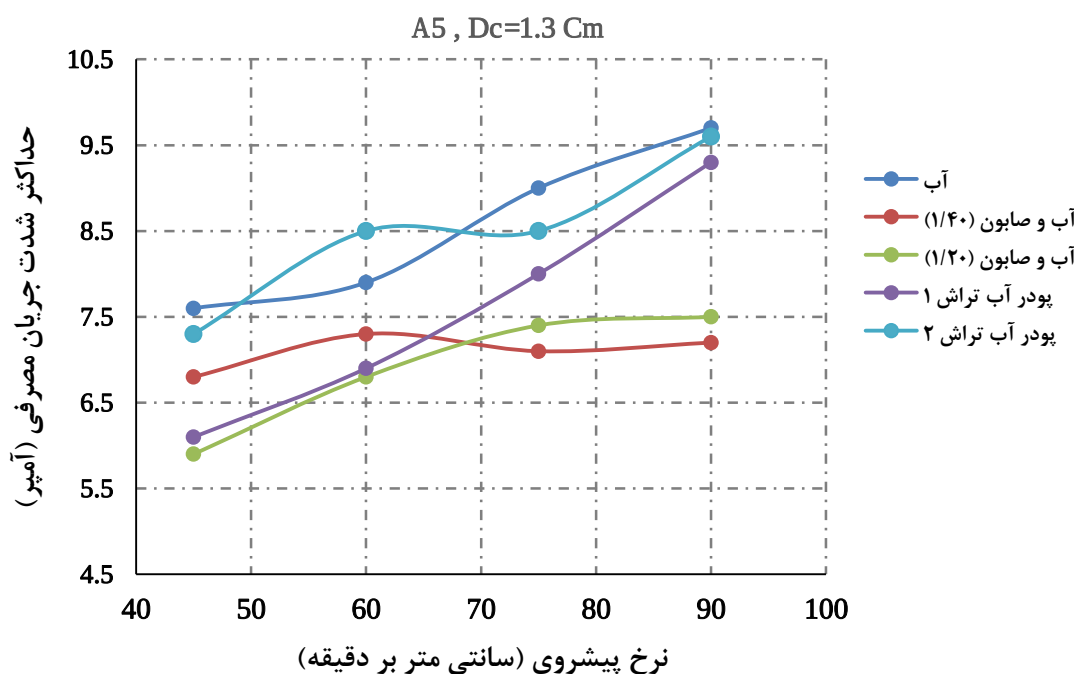
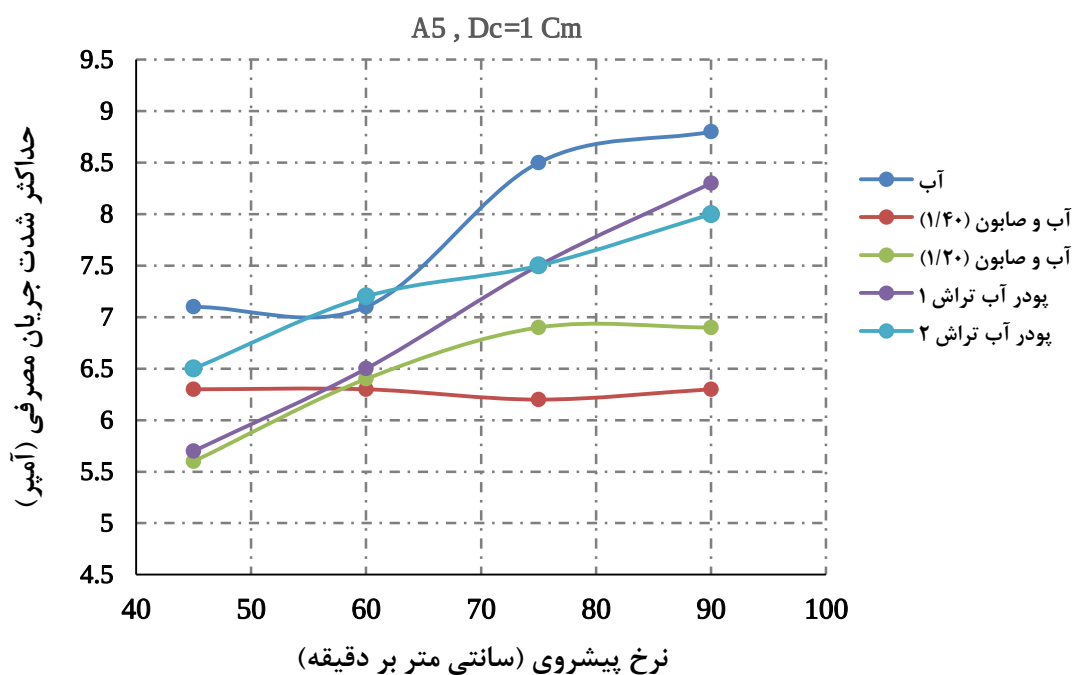
شکل پیوست ب ۲-۷ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانیات سبز کاهویی بیرجند



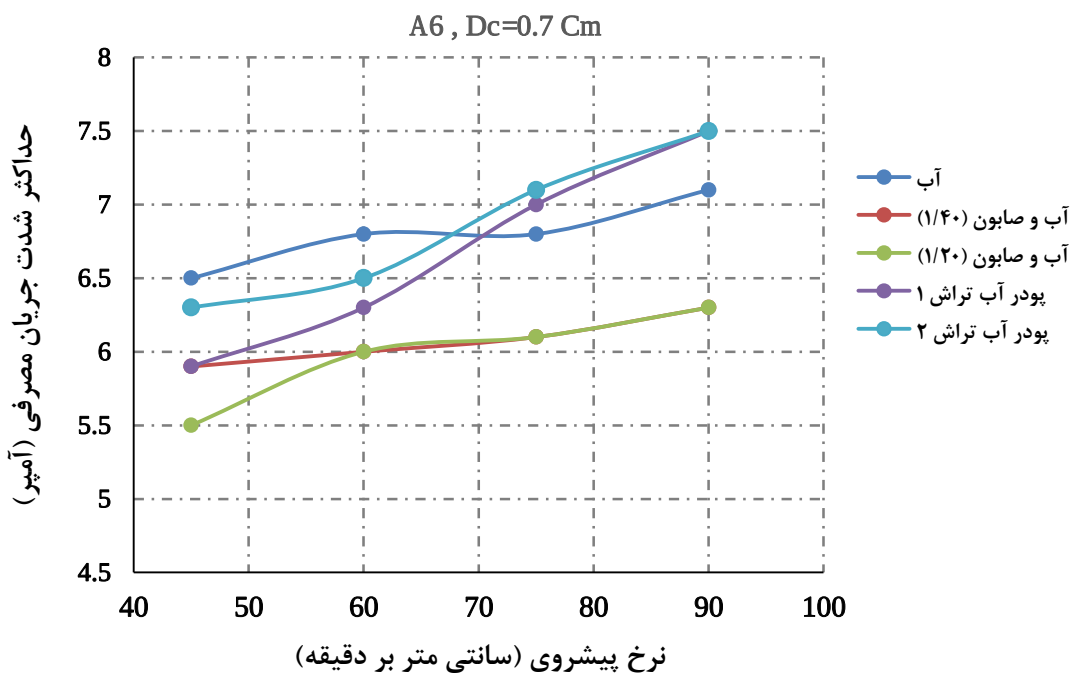
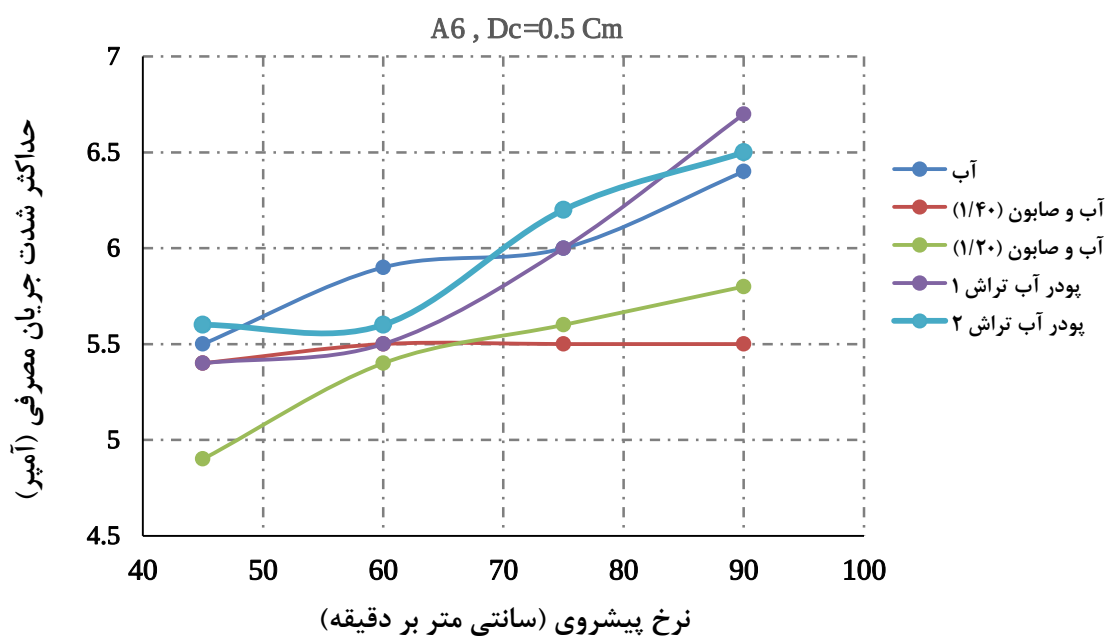
شکل پیوست ب ۲-۸ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانت سبز کاهویی بیرجند



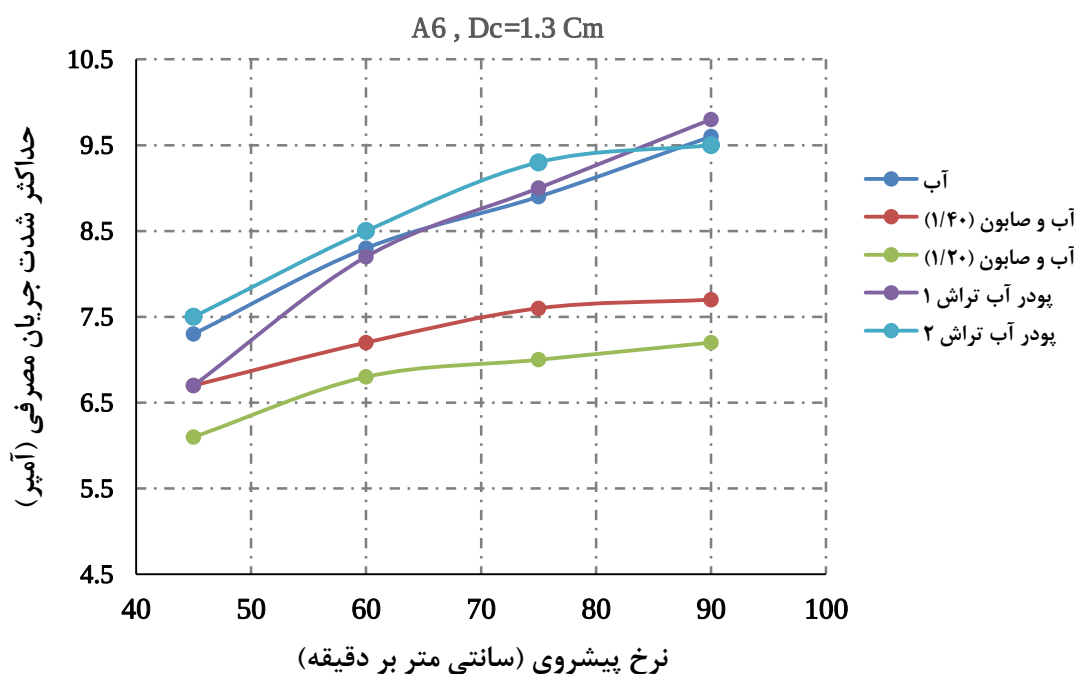
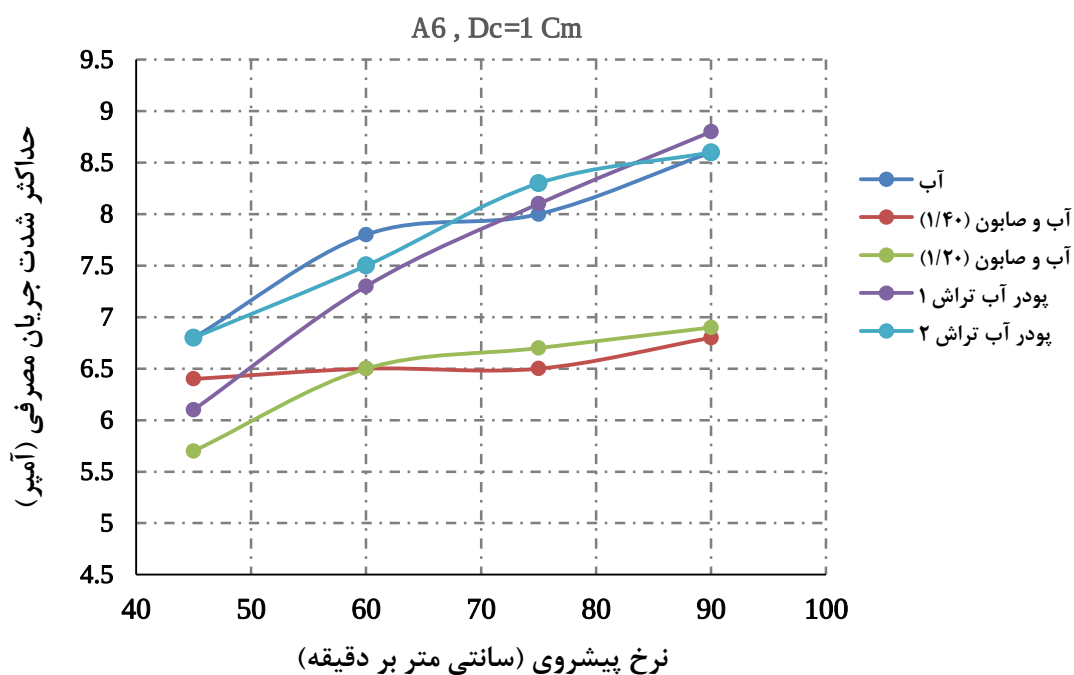
شکل پیوست ب ۲-۹ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانیات سفید نطنز



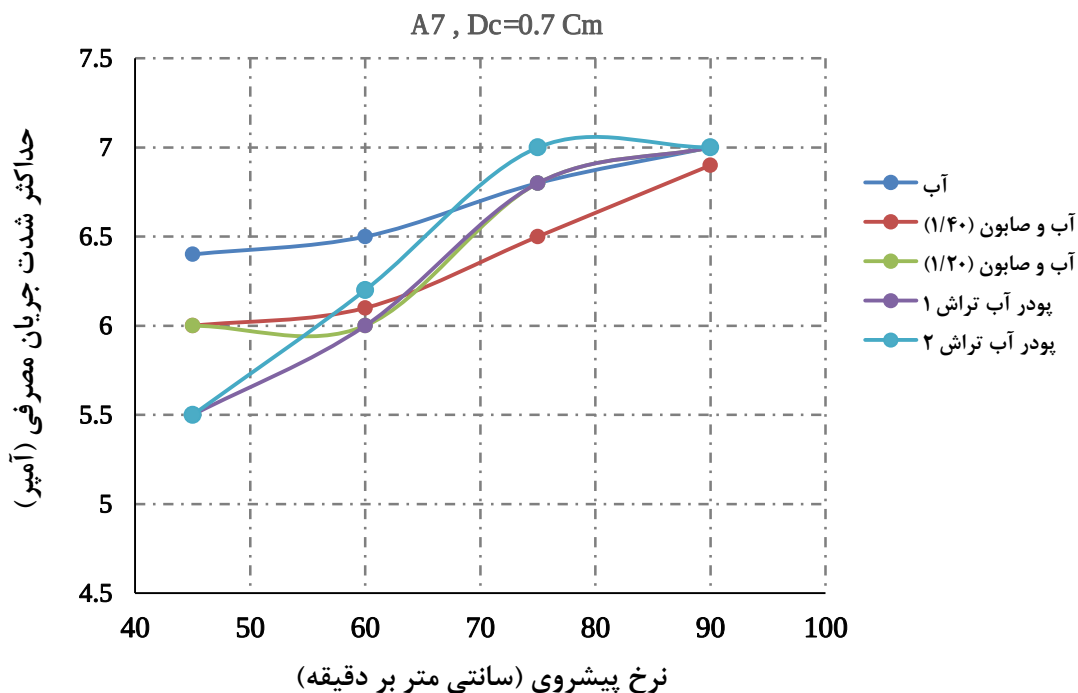
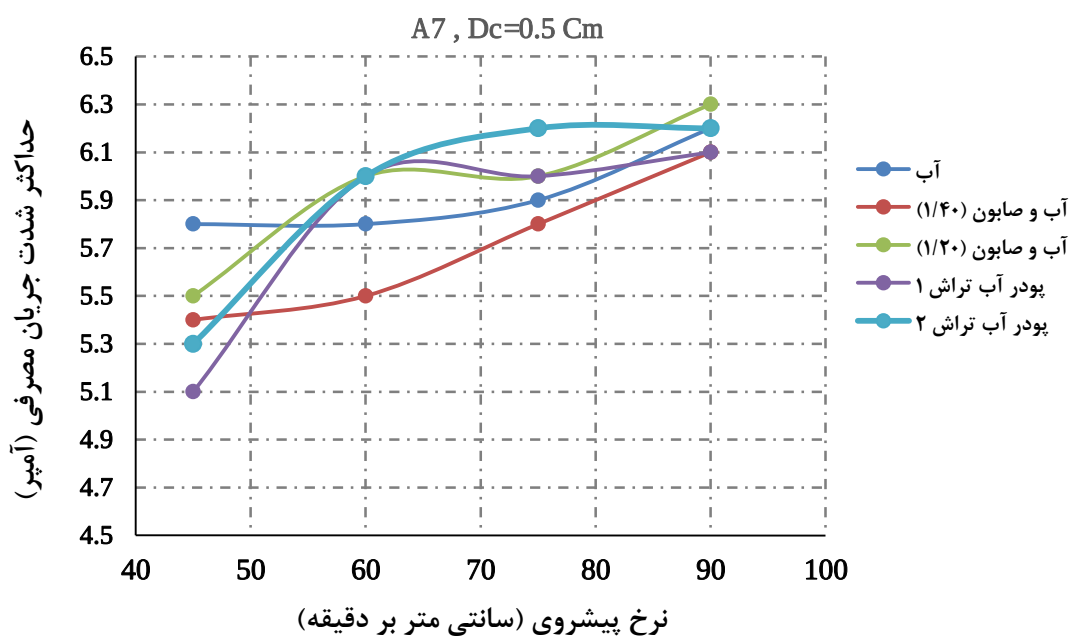
شکل پیوست ب ۱۰-۲ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانیات سفید نطنز



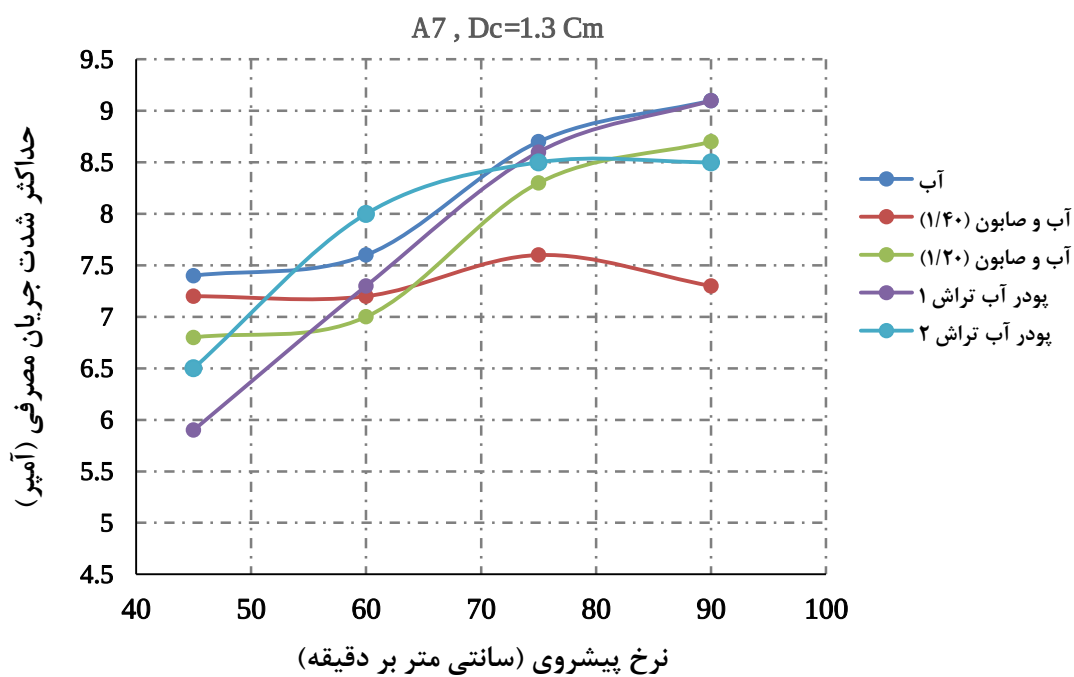
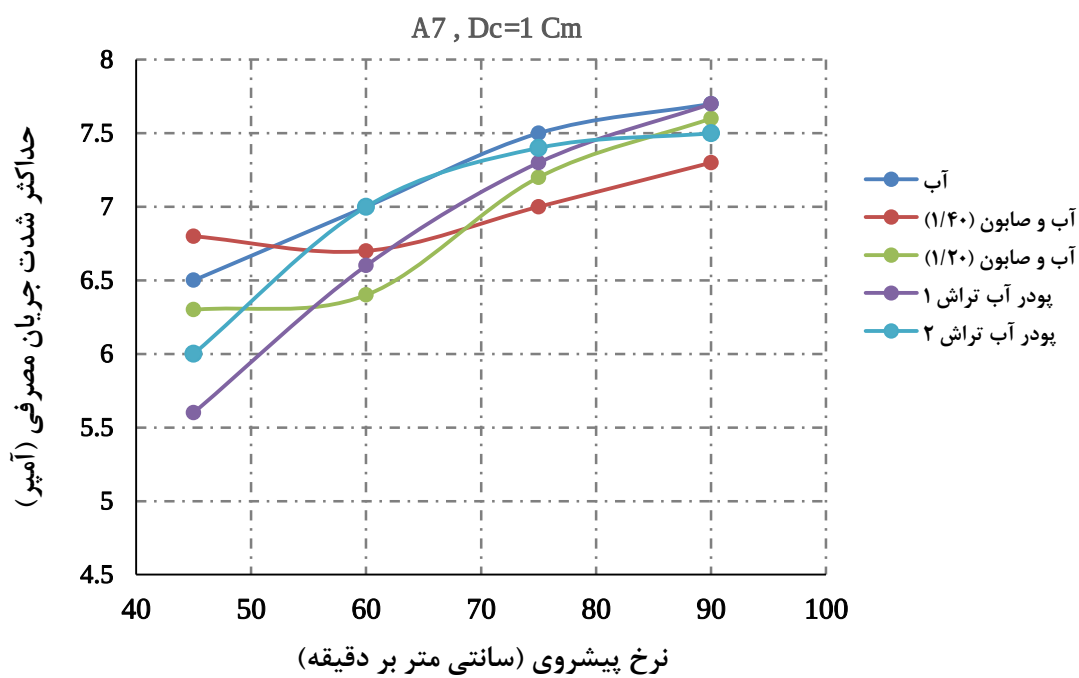
شکل پیوست ب ۲-۱۱ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانیت سفید نهبندان



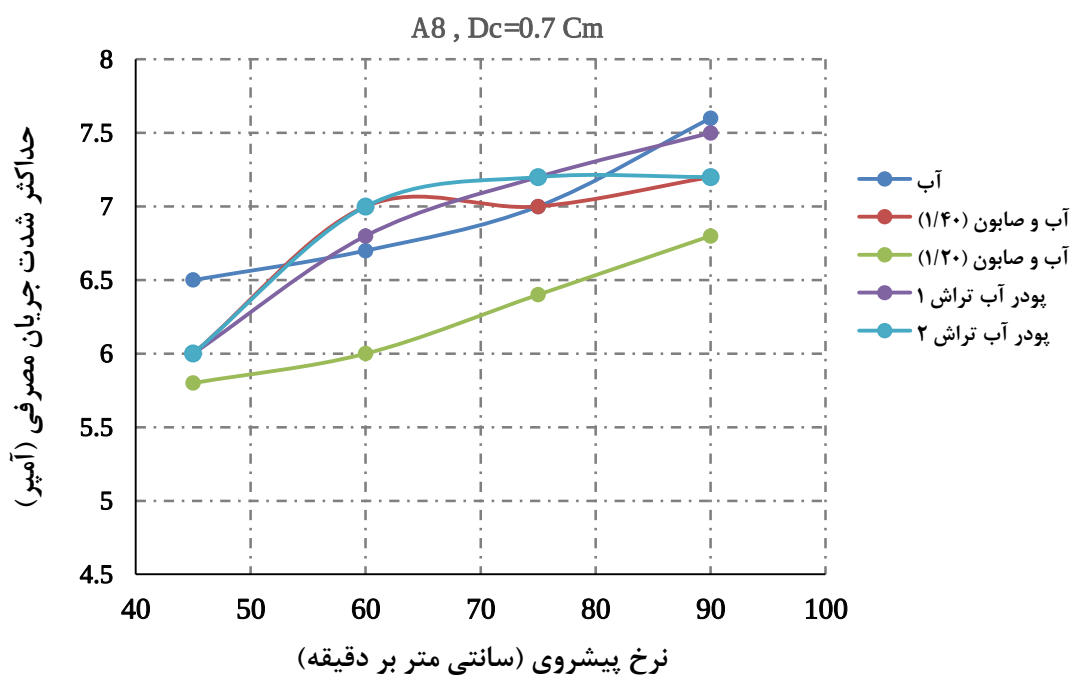
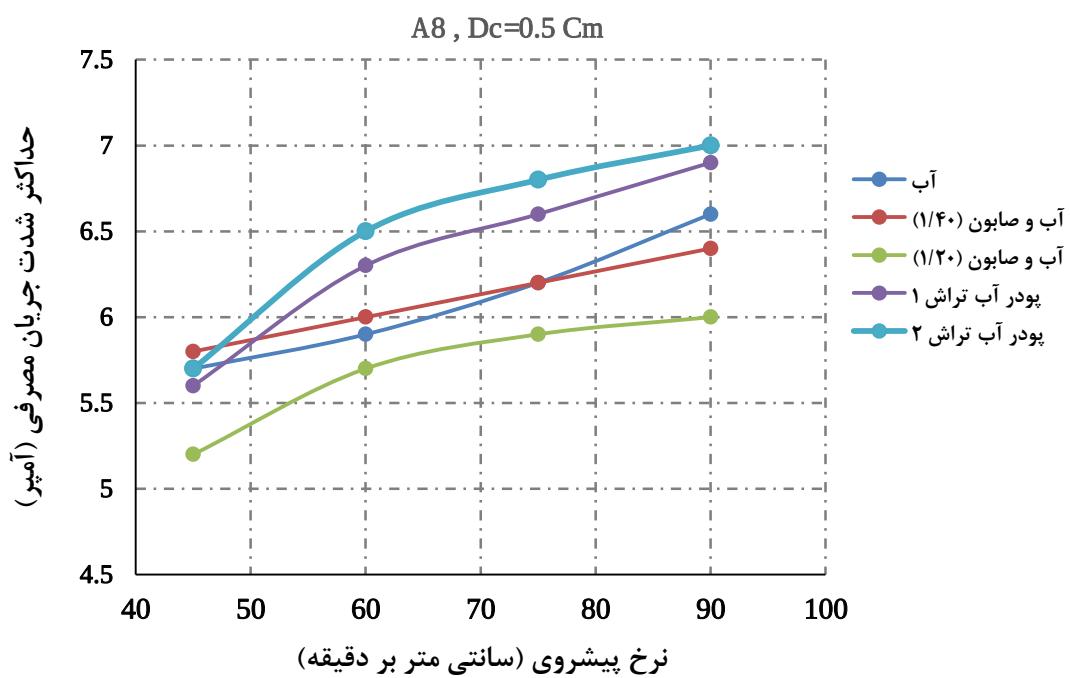
شکل پیوست ب ۲-۱۲ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانیات سفید نهبدان



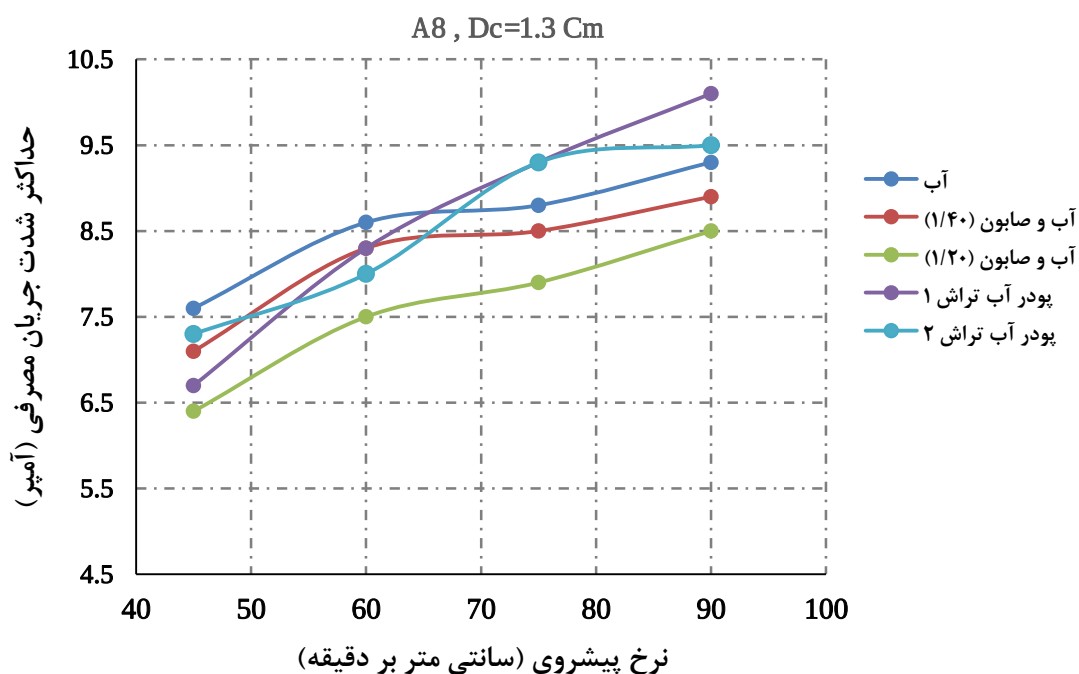
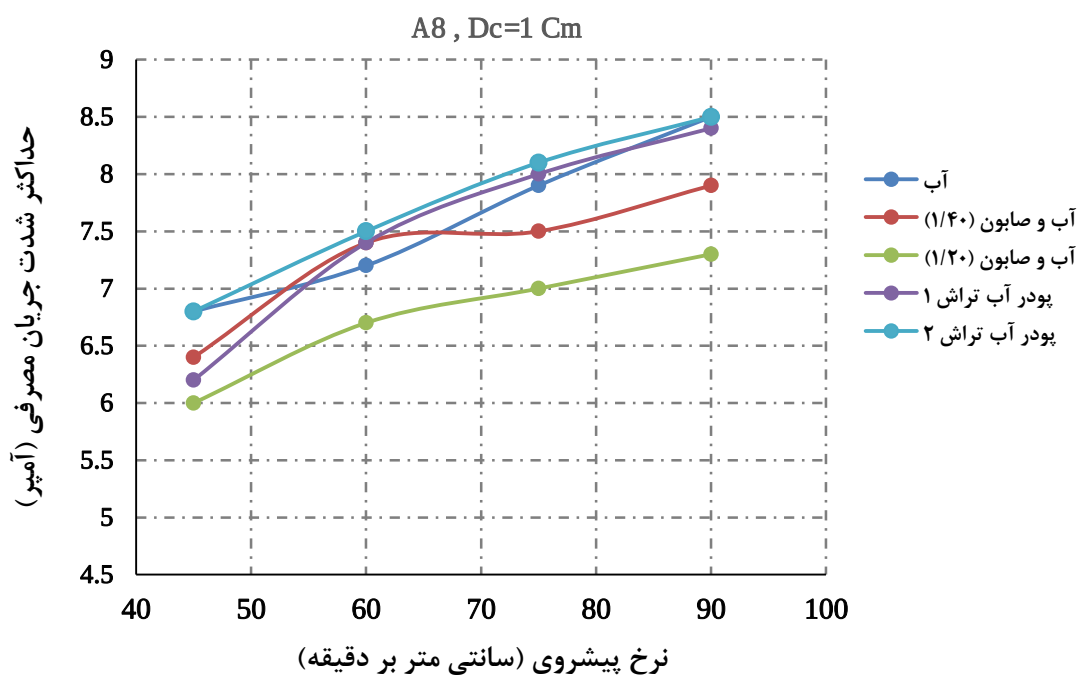
شکل پیوست ب ۲-۱۳ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانیته قرمز اصفهان



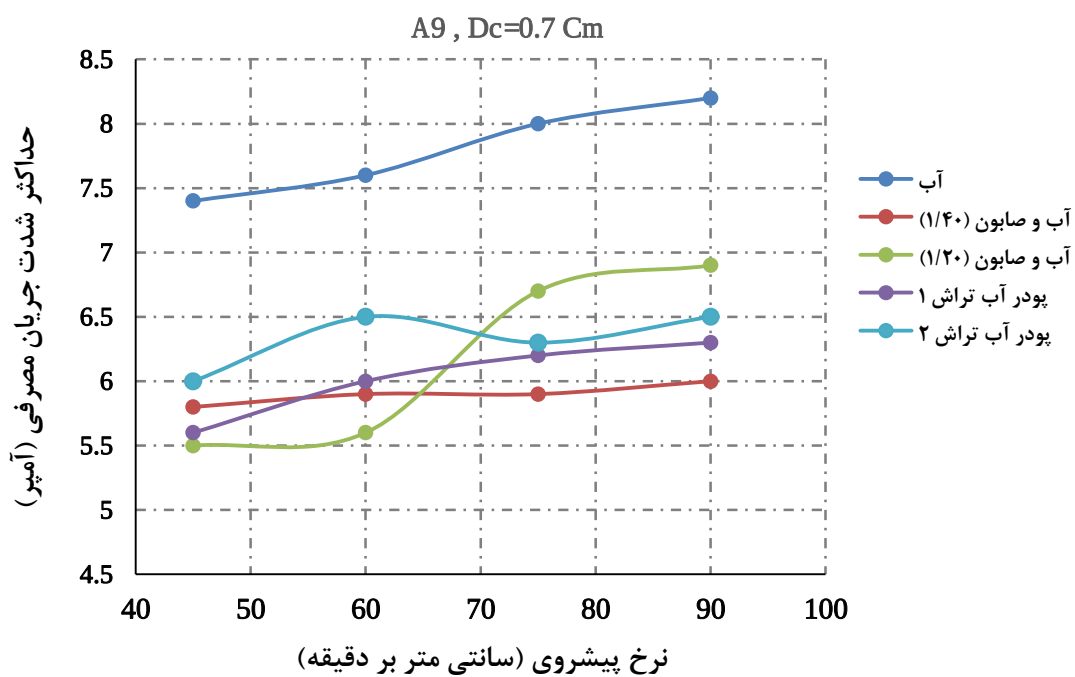
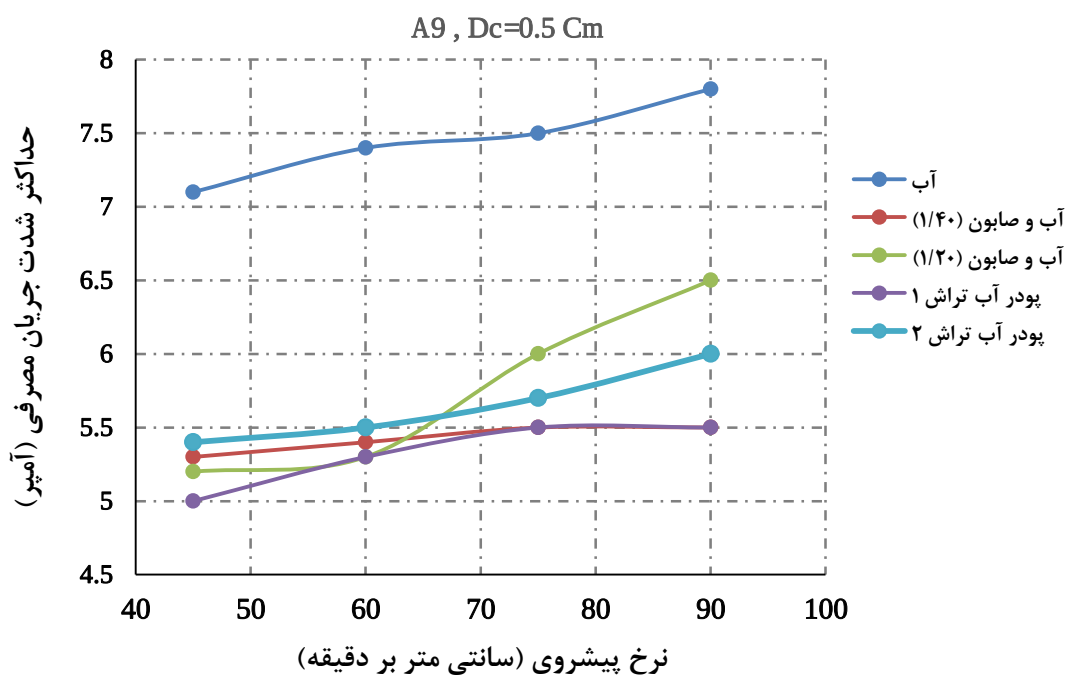
شکل پیوست ب ۲-۱۴ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانیته قرمز اصفهان



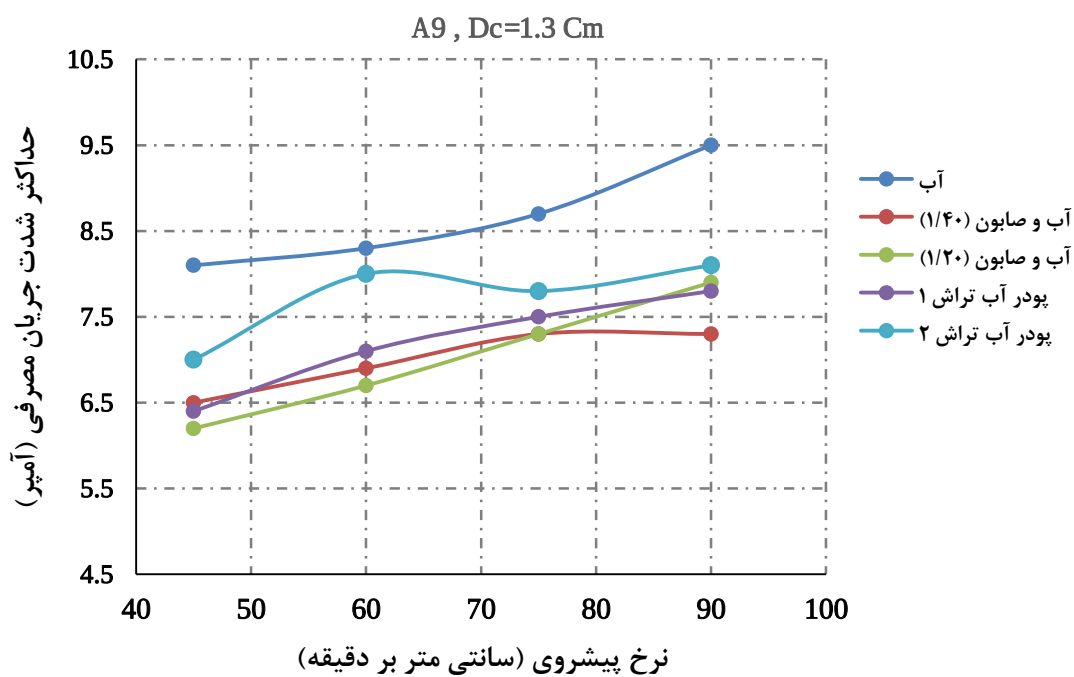
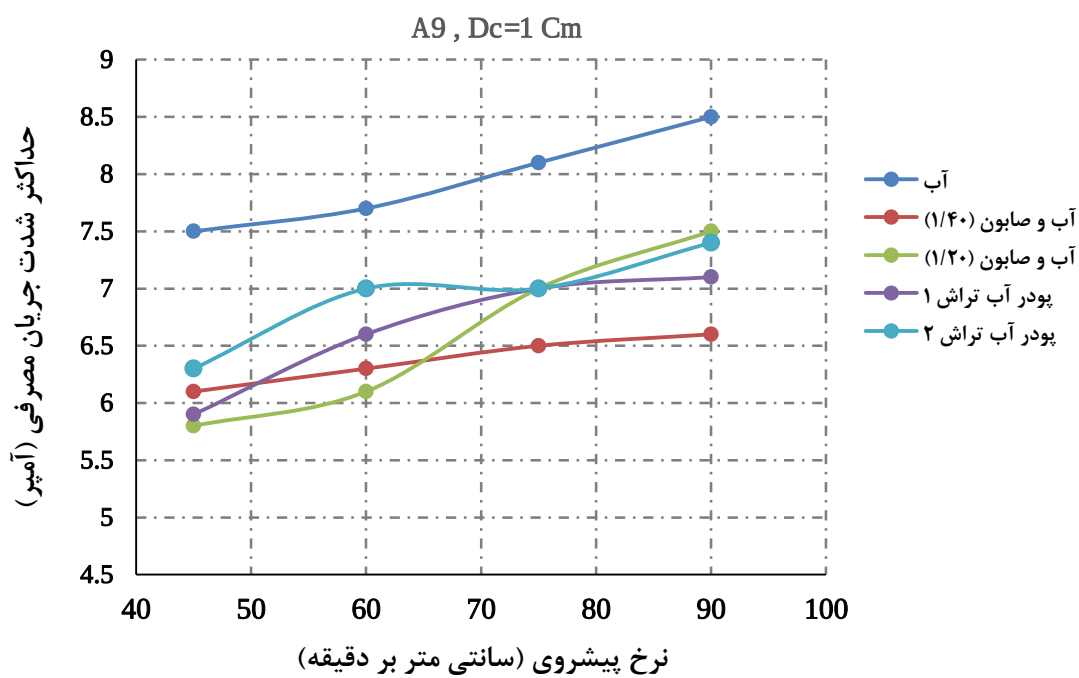
شکل پیوست ب ۲-۱۵ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانیته قرمز یزد



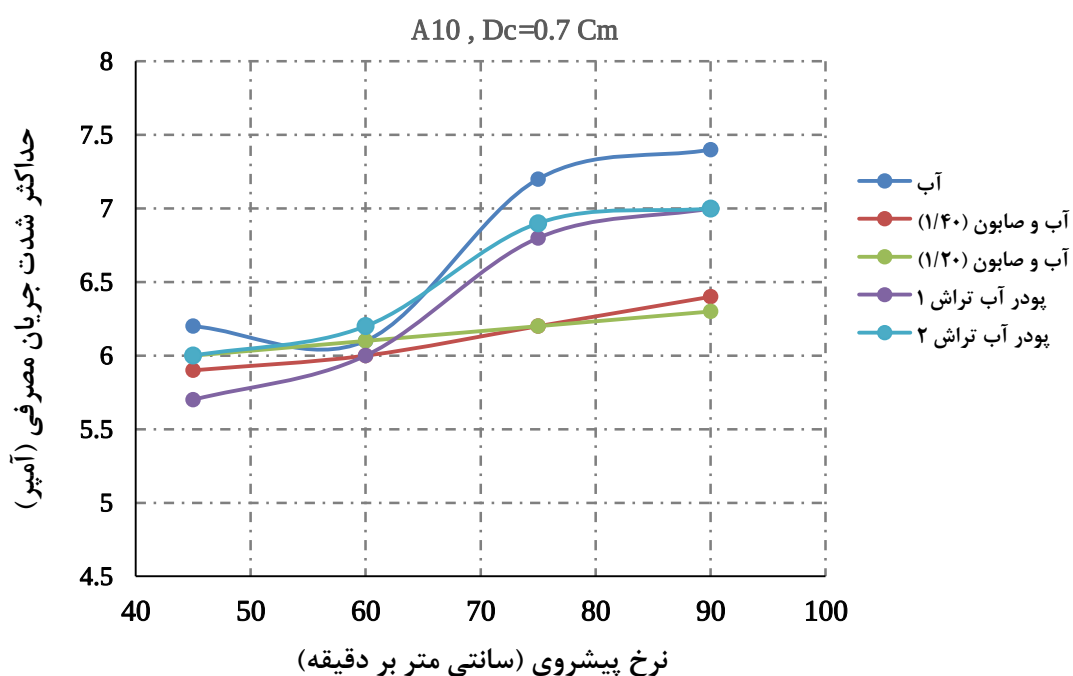
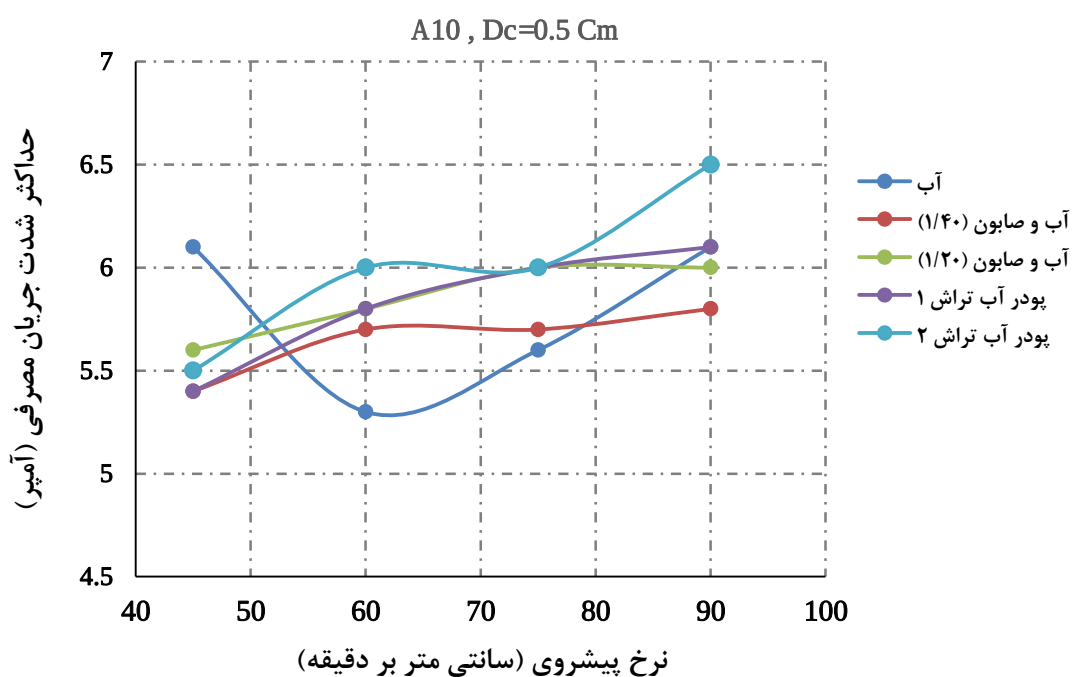
شکل پیوست ب ۲-۱۶ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانیته قرمز یزد



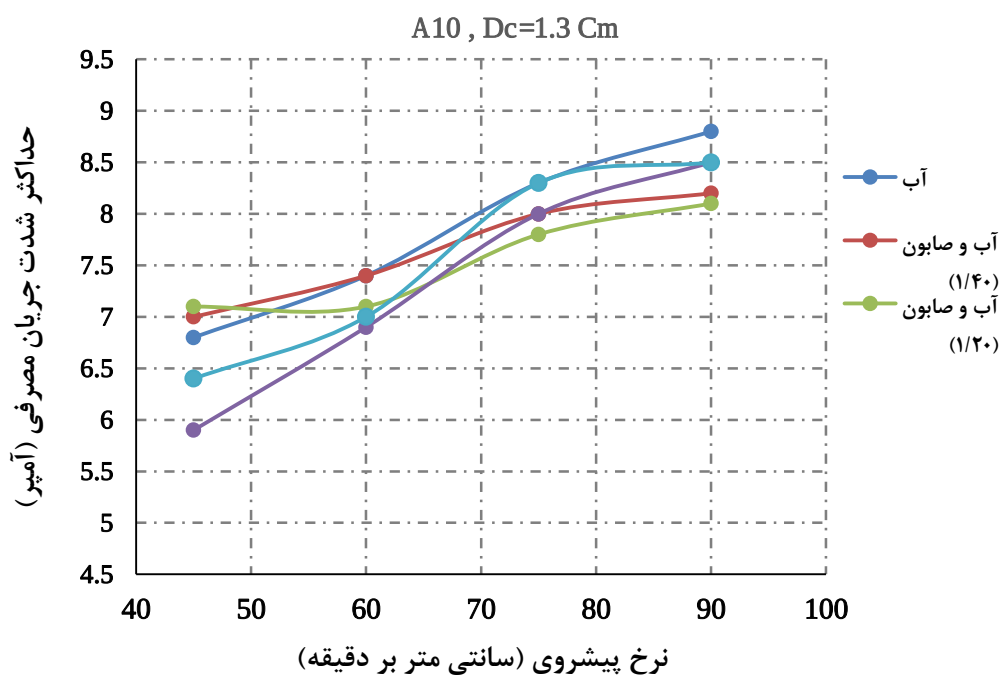
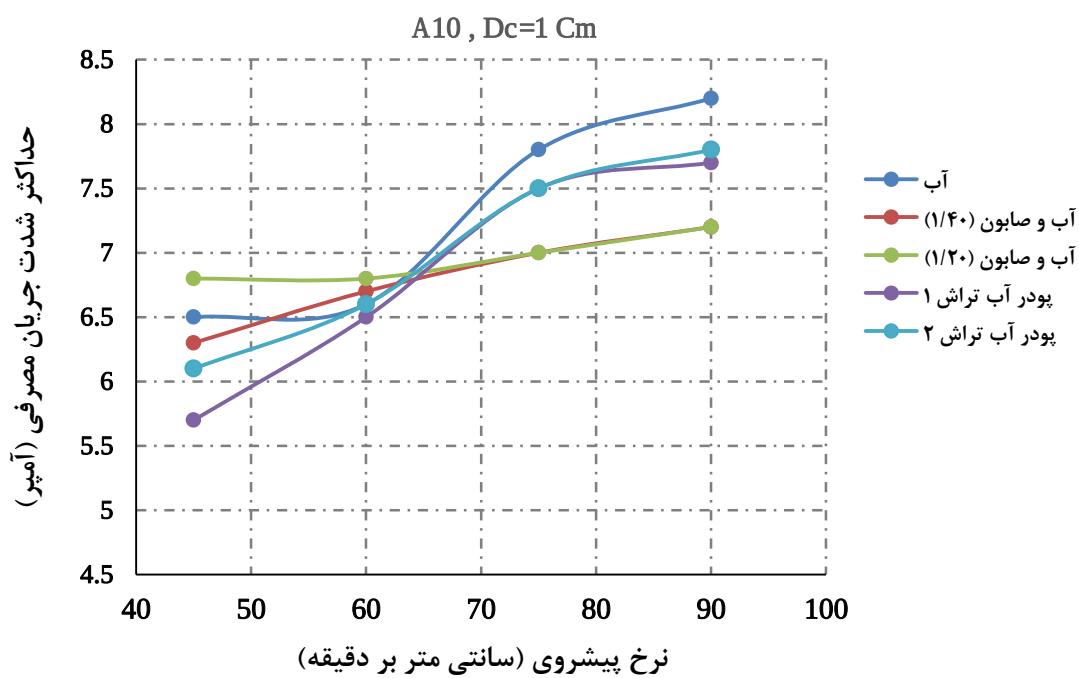
شکل پیوست ب ۲-۱۷ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانیات مروارید مشهد



شکل پیوست ب ۲-۱۸ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانیات مروارید مشهد



شکل پیوست ب ۲-۱۹ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانیات مشکی چایان



شکل پیوست ب ۲-۲۰ نمودارهای تغییرات شدت جریان مصرفی ماشین بر حسب تغییرات نرخ پیشروی برای گرانیات مشکی چایان

1. Tonshoff, H. Schulze, R., (1980) *The effect of the coolant in the sawing of hard stone. Industrial Diamond Review, (JUL): p. 252-257.*
2. Wang, C., Wei, X., Tang, Z.L., Pan, Z.C., (1995) *The role of coolant in granite sawing. Industrial Diamond Review, 55(567): p. 156-60.*
3. Xu ,X., Y. Li, Yu, Y., (2003) *Force ratio in the circular sawing of granites with a diamond segmented blade. Journal of Materials Processing Technology, 139(1-3): p. 281-285.*
۴. یوسفی, (۱۳۸۵) ر., تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر سایش ابزار در فرآیند برش. نشریه دانشکده فنی, دوره ۴۰: ص ۹۱۴-۹۰۷
5. Yilmaz, G. Göktan, R.M., (2008) *Effect of sawing rate on force and energy requirements in the circular sawing of granites. Eskisehir Osmangazi Univ J Eng Arch Fac, 11(2): p. 5974.*
6. Turchetta, S., (2009) *Cutting force on a diamond grit in stone machining. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 44(9-10): p. 854-861.*
7. Buyuksagis, I.S., (2009) *The effects of circular sawblade diamond segment characteristics on marble processing performance. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 224(8): p. 1559-1565.*
8. Turchetta, S., (2010) *Cutting Force in Stone Machining by Diamond Disk. Advances in Materials Science and Engineering, 2010: p. 1-6.*
9. Nageswara Raol, B. Nelson, J.E.B, Ravi B., (2010) *Problems and solutions for Saw in Granite Mineral Processing. IJCCIS, 2: p. 142-145.*
10. Nageswara Rao B., Nelson, J., Balunaik, B., Raj, P., (2012) *Selection of Viscous Coolants in Granite Machining. IOSR-JMCE, 4(5): p. 11-14.*
11. Uzun, İ., (2013) *Effect of cooling liquids on cutting process using diamond segmented disc of natural stones. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 227(10): p. 2315-2327.*

12. Karakurt, I., Aydin, G., Aydiner, K., (2013) *Effect of operating variables on specific wear rate of diamond sawblades in sawing of granites. Engineering Science & Technology, an International Journal, JESTECH 16 (1), p. 11-16.*
13. Sadegheslam, G., Mikaeil, R. Rooki, R., (2013) *Predicting the production rate of diamond wire saws using multiple nonlinear regression analysis. Geosystem engineering, 16(4): p. 275-285.*
14. Yurdakul, M., (2015) *Effect of cutting parameters on consumed power in industrial granite cutting processes performed with the multi-disc block cutter. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 76: p. 104-111.*
15. Akhyani, M., Sereshki F., Mikaeil, R., Taji, M., (2017) *Evaluation of Cutting Performance of Diamond Saw Machine Using Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm. Int. Journal of Mining & Geo-Engineering, 51(2): p. 185-190.*
16. Tumac, D. Shaterpour-Mamaghani A., (2018) *Estimating the sawability of large diameter circular saws based on classification of natural stone types according to the geological origin. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 101 : p. 18-32.*
17. Akhyani, M., Sereshki F., Mikaeil R., (2018) *An Investigation of the Effect of Toughness and Brittleness Indexes on Ampere Consumption and Wear Rate of a Circular Diamond Saw. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 33(4): p. 85-92.*
18. Mikaeil, R., Sohrabian B., Ataei M., (2018) *The Study of Energy Consumption in the Dimension Stone Cutting Process. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 33(4): p. 65-71.*
۱۹. میکائیل, ر. عطایی, م. جعفر شیرزاد, پ. جعفرنژاد قراحسنلو, ا. جلیلی کشتیان, ی., (۲۰۱۸) توسعه مدل اقتصادی جدید به منظور ارزیابی هزینه‌ها در فرآیند برش سنگ‌های کربناته. نشریه علمی-پژوهشی مکانیک سنگ ایران, شماره ۱, دوره ۳, ص ۴۶-۳۹
20. Tönshoff, H., Hillmann-Apmann H., Asche, J., (2002) *Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications. Diamond and Related Materials. 11(3): p. 736-741.*
21. Konstanty, J., (2002) *Theoretical analysis of stone sawing with diamonds. Journal of materials processing technology, 123(1): p. 146-154.*
۲۲. میکائیل, ر., (۱۳۹۰) *ارائه یک سیستم طبقه بندی جدید برای ارزیابی قابلیت برش سنگ های ساختمانی و بهینه سازی پارامترهای برش, دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی شاهرود, دانشگاه صنعتی شاهرود.*
23. 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, 9(4): p. 169-179.*

۲۴. اصانلو، م. (۱۳۸۶) "روشهای حفاری"، چاپ ۳، مرکز نشر صدا، ص ۴۹۴.

۲۵. وفائیان، م.، (۱۳۷۱) "مکانیک سنگ"، دانشگاه یزد، انتشارات دانشگاه یزد، ص ۲۳۱.

26. Burgess, R. Birle J. (1978) Circular sawing granite with diamond saw blades. in *Proceedings of the fifth industrial diamond seminar*.

27. Wright, D. Cassapi V., (1985) Factors influencing stone sawability. *Industrial Diamond Review*, 45(2): p. 84-7.

28. Birle, J.D. Ratterman E., (1986) An approximate ranking of the sawability of hard building stones based on laboratory tests. *Dimensional Stone Magazine*, 3(1): p. 3-29.

29. Jennings, M. and D. Wright, (1989) Guidelines for sawing stone. *Industrial Diamond Review*, 49(2): p. 70-5.

30. Clausen, R., Wang C., Meding M., (1996) Characteristics of acoustic emission during single diamond scratching of granite. *Industrial Diamond Review*, 56(570): p. 96-9.

31. Wei, X., Wang C., Zhou Z., (2003) Study on the fuzzy ranking of granite sawability. *Journal of materials processing technology*, 139(1-3): p. 277-280.

32. Eyuboglu, A., 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 and Mining Sciences*, 40(3): p. 405-414.

33. Zhang, S. Lu F., (2003) A new method of grading the sawability of natural rock materials. in *Key Engineering Materials*. 250: p. 293-296.

34. Ersoy, A. Atici, U., (2004) Performance characteristics of circular diamond saws in cutting different types of rocks. *Diamond and Related Materials*, 13(1): p. 22-37.

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

36. Gunaydin, O., Kahraman S., Fener M., (2004) Sawability prediction of carbonate rocks from brittleness indexes. *J. South Afr. Inst. Min. Metall*, 104(1): p. 239-244.

37. Ozcelik, Y., Polat, E. Bayram, F. 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: p. 228-234.

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

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

40. Delgado, N.S., Rey, A. R., Rio, L. Sarria, I. Calleja, L. Ruiz, G., (205) *The influence of rock microhardness on the sawability of Pink Porrino granite (Spain)*. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 1(42): p. 161-166.
41. Kahraman, S. Altun, H. Fener, M. (2006) *Sawability prediction of carbonate rocks from shear strength parameters using artificial neural networks*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1(43): p. 157-164.
42. Fener, M., Kahraman S., Ozder M., (2007) *Performance prediction of circular diamond saws from mechanical rock properties in cutting carbonate rocks*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 40(5): p. 505-517.
43. Kahraman, S., Ulker U., Delibalta M., (2007) *A quality classification of building stones from P-wave velocity and its application to stone cutting with gang saws*. *Journal south african institute of mining and metallurgy*, 107 (7): p. 427.
44. Özçelik, Y., (2007) *The effect of marble textural characteristics on the sawing efficiency of diamond segmented frame saws*. *IDR. Industrial diamond review*, 67(2): p. 65-70.
45. Tutmez, B., Kahraman S., Gunaydin O., (2007) *Multifactorial fuzzy approach to the sawability classification of building stones*. *Construction and Building Materials*, 21(8): p. 1672-1679.
46. Buyuksagis, I., (2007) *Effect of cutting mode on the sawability of granites using segmented circular diamond sawblade*. *Journal of Materials Processing Technology*, 183(2-3): p. 399-406.
47. Mikael, R., Ataei M., Hoseinie H., (2008) *Predicting the production rate of diamond wire saws in carbonate rock cutting*. *IDR. Industrial Diamond Review*, 68(3): p. 28-34.
48. Kahraman, S. Gunaydin O., (2008) *Indentation hardness test to estimate the sawability of carbonate rocks*. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(4): p. 507-511.
49. Mikaeil, R., Ataei M., Yousefi R., (2011) *Application of a fuzzy analytical hierarchy process to the prediction of vibration during rock sawing*. *Mining Science and Technology (China)*, 21(5): p. 611-619.
50. Mikaeil, R., Ataei M., Yousefi R., (2011) *Evaluating the Power Consumption in Carbonate Rock Sawing Process by Using FDAHP and TOPSIS Techniques*, in *Efficient Decision Support Systems-Practice and Challenges in Multidisciplinary Domains*. *InTech*, DOI: 10.5772/16332. p. 413-436
51. Mikaeil, R., Yousefi R., Ataei M., (2011) *Sawability ranking of carbonate rock using fuzzy analytical hierarchy process and TOPSIS approaches*. *Scientia Iranica*, 18(5): p. 1106-1115.

52. 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*, 56(1): p. 59–70.
53. Mikaeil, R., Ozcelik Y., Ataei M., Yousefi R., (2011) Correlation of specific ampere draw with rock brittleness indexes in rock sawing process. *Archives of Mining Sciences*, 56(4): p. 777–788.
54. Ataei, M., Mikaeil R., Hoseinie S. H., Hosseini S. M. (2012) Fuzzy analytical hierarchy process approach for ranking the sawability of carbonate rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 50: p. 83-93.
55. Ataei, M., Mikaeil R., Sereshki F., Ghaysari N. (2012) Predicting the production rate of diamond wire saw using statistical analysis. *ARAB J GEOSCI.*, 5(6): p. 1289-1295.
56. Yurdakul, M. and H. Akdas, (2012) Prediction of specific cutting energy for large diameter circular saws during natural stone cutting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 53: p. 38-44.
57. Ghaysari, N., Ataei M., Sereshki F., Mikaeil R., (2012) Prediction of performance of diamond wire saw with respect to texture characteristics of rock/*Prognozowanie Wydajności Pracy Strunowej Piły Diamentowej W Odniesieniu do Charakterystyki Tekstury Skał*. *Archives of Mining Sciences*, 57(4): p. 887-900.
58. Mikaeil, R., M. Ataei, and R. Yousefi, (2013) Correlation of production rate of ornamental stone with rock brittleness indexes. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(1): p. 115-121.
59. Mikaeil, R., Ozcelik Y., Ataei M., Yousefi R., (2013) Ranking the sawability of ornamental stone using Fuzzy Delphi and multi-criteria decision-making techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 58: p. 118-126.
60. Mikaeil, R., Ataei M., Ghadernejad S., Sadegheslam G., (2014) Predicting the relationship between system vibration with rock brittleness indexes in rock sawing process. *Archives of Mining Sciences*, 59(1): p. 139-153.
61. Tumac, D., (2015) Predicting the performance of large diameter circular saws based on Schmidt hammer and other properties for some Turkish carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 75: p. 159-168.
62. Mikaeil, R., Ozcelik Y., Ataei M., Shafiee Haghshenas S., (2016) Application of harmony search algorithm to evaluate the performance of diamond wire Saw. *J Min Environ*.
63. Mikaeil, R., Shafiee Haghshenas S., Shafiee Haghshenas S., Ataei M., (2016) Performance prediction of circular saw machine using imperialist competitive algorithm and fuzzy clustering technique. *Neural Computing and Applications*, p. 1-10.

64. Aryafar, A. and R. Mikaeil, (2016) Estimation of the ampere consumption of dimension stone sawing machine using of artificial neural networks. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 50(1): p. 121-130.
65. Tumac, D., (2016) Artificial neural network application to predict the sawability performance of large diameter circular saws. *Measurement*, 80: p. 12-20.
66. Almasi, S.N., Bagherpour, R. Mikaeil, R. Ozcelik, Y., (2017) Analysis of bead wear in diamond wire sawing considering the rock properties and production rate. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(4): p. 1593-1607.
67. Almasi, S.N., Bagherpour, R. Mikaeil, R. Ozcelik, Y., (2017) Developing a new rock classification based on the abrasiveness, hardness, and toughness of rocks and PA for the prediction of hard dimension stone sawability in quarrying. *Geosystem Engineering*, 20(6): p. 295-310.
68. Almasi, S.N., Bagherpour, R. Mikaeil, R. Ozcelik, Y. Kalhori, H., (2017) Predicting the building stone cutting rate based on rock properties and device pullback amperage in quarries using M5P model tree. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(4): p. 1311-1326.
69. Kamran, M.A., Khoshsirrat, M. Mikaeil, R. Nikkhoo, F., (2017) Ranking the sawability of ornamental and building stones using different MCDM methods. *Journal of Engineering Research*, 5 (3). p. 126-149.
70. Akhyani, M., Mikaeil, R. Sereshki, F. Taji, M., (2017) Combining fuzzy RES with GA for predicting wear performance of circular diamond saw in hard rock cutting process. *Journal of Mining and Environment*. 10 (3), p. 559-574.
71. Mikaeil, R., Haghshenas, S. S. Ozcelik, Y. Haghshenas, S. S, (2017) Development of intelligent systems to predict diamond wire saw performance. *Soft Computing in Civil Engineering*, 1(2): p. 52-69.
72. Yilmazkaya, E., Dagdelenler, G. Ozcelik, Y. Sonmez, H. (2018) Prediction of mono-wire cutting machine performance parameters using artificial neural network and regression models. *Engineering Geology*, 239: p. 96-108.
73. Zhang, H., Zhang J., Dong, P. Sun, Q. (2018) Investigation of the sawing performance of a new type of diamond frame saw machine. *Diamond and Related Materials*, 84: p. 11-19.
74. Ertingshausen, W., (1985) Wear processes in sauring hard stone. *IDR. Industrial diamond review*, 45(510): p. 254-258.
75. Konstanty, J., (1991) The materials science of stone sawing. *IDR. Industrial diamond review*, 51(542): p. 27-31.
76. Xu, X., (1999) Friction studies on the process in circular sawing of granites. *Tribology Letters*, 7(4): p. 221-227.

77. Xu, X., Y. Li, and S. Malkin, (2001) Forces and energy in circular sawing and grinding of granite. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 123(1): p. 13-22.
78. Engels, A., (2003) The role of Particles Per Carat in diamond tool behaviour. *Industrial diamond review*, (2): p. 39-42.
79. Polini, W. Turchetta S., (2007) Monitoring of diamond disk wear in stone cutting by means of force or acceleration sensors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35(5-6): p. 454-467.
80. Atici, U. Ersoy A., (2009) Correlation of specific energy of cutting saws and drilling bits with rock brittleness and destruction energy. *J MATER PROCESS TECH.*, 209(5): p. 2602-2612.
81. Sun, Q., Zhang J., Wang Z., Zhang H., Fang J., (2016) Segment wear characteristics of diamond frame saw when cutting different granite types. *Diamond and Related Materials*, 68: p. 143-151.
82. Akarslan, E., Hocaoglu F.O., Uzun, I., (2017) Classification of disc damage status by discovering knowledge from experimental data in marble cutting process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(13): p. 2407-2416.
83. Atici, U. Ersoy, A., (2017) Applied Genetic Programming for Predicting Specific Cutting Energy for Cutting Natural Stones. *Applied Artificial Intelligence*, 31(5-6): p. 439-452.
84. Ru and Fan, (1988) *Drilling coolant*, in Zhongnan University of Technology Press. 8: Changsha, China.
۸۵. حداد، م. ج. ، (۱۳۸۹) فرآیند سنگ‌زنی با روان‌کاری کمینه و بررسی خصوصیات سطحی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس.
86. Wright, D., Wapler H., Tönshoff, H. (1986) Investigations and prediction of diamond wear when sawing. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 35(1): p. 239-244.
87. Luo, S., (1997) Investigation of the worn surfaces of diamond sawblades in sawing granite. *Journal of materials processing technology*, 70(1-3): p. 1-8.
88. Tumac, D., (2014) Predicting the performance of chain saw machines based on Shore scleroscope hardness. *Rock mechanics and rock engineering*, 47(2): p. 703-715.
89. Armaghani, D.J., M. Hasanipanah, and E.T. Mohamad, (2016) A combination of the ICA-ANN model to predict air-overpressure resulting from blasting. *Engineering with Computers*, 32(1): p. 155-171.
90. Mohammadi, J., Ataei, M. Kakaei, R. K. Mikaeil, R. Haghshenas. S. S., (2018) Prediction of the production rate of chain saw machine using the multilayer perceptron (MLP) neural network. *Civil Engineering Journal*, 4(7): p. 1575-1583.

91. Hecht-Nielsen, R. Kolmogorov's,. (1987) Mapping neural network existence theorem. in *Proceedings of the international conference on Neural Networks*. IEEE Press New York.
92. Kaastra, I. and M. Boyd, (1996) Designing a neural network for forecasting financial and economic time series. *Neurocomputing*, 10(3): p. 215-236.
93. Kanellopoulos, I. Wilkinson, G.G. (1997) Strategies and best practice for neural network image classification. *International Journal of Remote Sensing*, 18(4): p. 711-725.
94. Ripley, B.D., (1993) Statistical aspects of neural networks. *Networks and chaos—statistical and probabilistic aspects*, 50: p. 40-123.
95. Paola, J., (1994) Neural network classification of multispectral imagery. MSc thesis, The University of Arizona, USA.
96. Wang, C., (1994) A theory of generalization in learning machines with neural network applications.
97. Masters, T. Schwartz, M. (1994) Practical neural network recipes in C. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(5): p. 853-853.
98. Looney, C.G., (1996) Advances in feedforward neural networks: demystifying knowledge acquiring black boxes. *IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering*,(2): p. 211-226
99. Mikaeil, R., Shaffiee Haghshenas S., Shirvand Y., Valizadeh Hasanluy M., V. Roshanaei, (2016) Risk assessment of geological hazards in a tunneling project using harmony search algorithm (case study: Ardabil-Mianeh railway tunnel). *Civil Engineering Journal*, 2(10): p. 546-554.
100. Aryafar, A., Mikaeil R., Doulati Ardejani F., Shaffiee Haghshenas S., Jafarpour A., (2019) Application of non-linear regression and soft computing techniques for modeling process of pollutant adsorption from industrial wastewaters. *Journal of Mining and Environment*, 10(2): p. 327-337.
101. Holland, J., (1975) *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis*. Holland, JH.
102. Mohamad, E.T., Shirani Faradonbeh R., Jahed Armaghani D., Monjezi M., Zaimi Abd Majid M., (2017) An optimized ANN model based on genetic algorithm for predicting ripping production. *Neural Computing and Applications*, 28(1): p. 393-406.
103. Khandelwal, M., Marto, A., Fatemi, S. A., Ghorogi, M., Jahed Armaghani, D., Singh, T. N., Tabrizi, O., (2018) Implementing an ANN model optimized by genetic algorithm for estimating cohesion of limestone samples. *Engineering with Computers*, 34(2): p. 307-317.

104. Saemi, M., M. Ahmadi, and A.Y. Varjani., (2007) *Design of neural networks using genetic algorithm for the permeability estimation of the reservoir. Journal of Petroleum Science and Engineering*, 59(1-2): p. 97-105.

105. Ayhan M, "Cost model and sensitivity analysis of cutting and processing stage at a marble plant". *Industrial Diamond Review*, 3 49-54.

Abstract

Dimensional stone cutting with circular diamond saw is an abrasive process. During this process, the mechanical interaction between the tool and the rock generates the process forces, mainly due to factors such as the elastic and plastic deformation of the rock and the friction between the diamond grain and the segmented matrix of the stone and chip matrix. In most abrasive processes the major loss of energy is due to thermal stress, which is exacerbated by the increase in hardness, abrasion and rock resistance parameters. One of the most important ways to reduce thermal stress is to use a suitable cooling fluid/lubricant in the cutting process to create a clean environment and free of chip in addition to reducing the temperature. In this study, it was tried to investigate the performance of 5 samples of cooling/lubricating fluid including water, lubricant powder with 30:10,15:10, soap water with 1:20 and 1:40 ratio during the process of cutting hard dimension stones. For this purpose, 10 samples of hard dimension stone were selected for the study and then standardized samples were transferred to rock mechanics laboratory for determining of important physical and mechanical properties such as Mohs hardness, Schimazek's F-abrasiveness factors, Young modulus and uniaxial compressive strength. Following, Slabs prepared from each rock sample were cut using a laboratory scale stone cutting machine with the ability to vary the operating parameters and the use of different cooling/lubricating fluids. During the cutting process, the cutting performance was evaluated using the maximum electrical current consumed by the cutting machine. The results showed that the use of lubricant powder was desirable in the process of hard rock cutting. So the maximum amount of electrical current consumed by the machine approached its minimum value when using this fluid. In the next step, optimized models were designed and presented by using statistical studies and intelligent methods to predict the consumption current electrical. The results showed that using the statistical models and neural network can be very accurately to predict the electrical current based on rock characteristics, coolant and lubricant characteristics and operating parameters. At the end of this study, the economic analysis of the studied fluids was carried out on the industrial scale. The results of this section showed that at least one month of use of combined lubricant fluids can achieve economical savings by reducing energy consumption about 15%.

Keywords: *Hard dimensional stones, Coolant/Lubricant Fluid, Powder lubricant, Statistical Studies, Intelligent Neural Networks, Meta-heuristic Algorithms.*



*Shahrood University of
Technology*

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics

Ph.D. Thesis in Mining Engineering.

Laboratory Studies of the Effect of Coolant/lubricant Fluid on the Performance of Disk Cutters in Hard Rock

By Seyed Mehdi Hosseini

Supervisor:

Dr. Mohammad Ataei

Dr. Reza Kakaei

Advisor:

Dr. Reza Mikaeil

October, 2019