

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## تشکر و قدردانی

با سپاس بی‌پایان از جناب آقای دکتر محمد عطایی که در انجام این پایان نامه شاهد کمک‌های بی‌دریغ ایشان بودم.  
همچنین از زحمات جناب آقای دکتر سرشکی تشکر می‌نمایم.  
از زحمات جناب آقای مهندس زیاری، مهندس میکائیل، مهندس خانعلی زاده و دکتر کنشلو نیز کمال تشکر را دارم.



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
گروه استخراج

ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی ایران با توجه به  
خواص فیزیکی و مکانیکی آنها

دانشجو: سعیده رضایی

اساتید راهنما:

جناب آقای دکتر محمد عطایی  
جناب آقای دکتر فرهنگ سرشکی

اساتید مشاور:

مهندس رضا میکائیل  
دکتر مجید انصاری

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیرماه ۱۳۸۹

## چکیده

در این تحقیق، مطالعه روی نه نمونه سنگ ساختمانی کربناته از معادن ایران صورت گرفته است. هدف از مطالعه، تعیین روابط بین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ با قابلیت برش آن‌ها می‌باشد. برای تعیین رابطه بین این پارامترها با قابلیت برش، از طرفی، مشخصاتی نظیر مقاومت فشاری تک-محوره، مقاومت کششی، چگالی، تخلخل، نرخ سایش و سختی اشمیت اندازه‌گیری شده و از طرف دیگر، مشخصات برش دستگاه نیز ثبت شده است. در نهایت و با در دست داشتن این پارامترها، رابطه هر یک از این مشخصات با قابلیت برش سنگ برآورد شده است. برای بررسی درصد عناصر موجود در سنگ و تعیین رابطه‌ی آن‌ها با قابلیت برش به ویژه رابطه‌ی میزان سیلیس موجود در سنگ با قابلیت برش سنگ، نیز آنالیز شیمیایی برای هر نمونه سنگ انجام شده است. برای به دست آوردن این روابط از برازش‌های تک‌متغیره و برای حصول ضریب تعیین بیشتر از برازش چندمتغیره استفاده شده است. برای کاهش تعداد متغیرهای درگیر در برازش چندمتغیره، ارتباط بین پارامترها نیز بررسی شده است. در صورت ارتباط خوب بین این پارامترها می‌توان یک پارامتر را به نمایندگی از دیگری در برازش قرار داد. در اینجا روابط خوبی بین پارامترها مشاهده نشده است و همه‌ی پارامترها به جز پارامترهایی که ضریب تعیین آن‌ها با نرخ برش کمتر از  $0/5$  بوده است در برازش استفاده شده‌اند. بیشترین ضریب تعیین به دست آمده، در برازش پنج‌متغیره بوده است که  $0/91$  می‌باشد. در نهایت با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده و نمودارهای حاصل، قابلیت برش هر یک از سنگ‌های مورد مطالعه قابل تخمین است و از نتایج آن می‌توان در طراحی کارخانه و تعیین نرخ برش بهینه استفاده کرد. همچنین پس از طی این مسیر پیش‌بینی هزینه‌ها و کاهش آن‌ها میسر است.

کلمات کلیدی: خواص فیزیکی، خواص مکانیکی، سنگ ساختمانی، قابلیت برش

## فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه

### ۱ فصل اول ..... ۲

- ۱-۱ مقدمه ..... ۲
- ۲-۱ کلیاتی در مورد سنگ‌های ساختمانی کربناته ..... ۳
- ۱-۲-۱ انواع سنگ‌های ساختمانی کربناته ..... ۳
- ۲-۲-۱ موارد مصرف سنگ‌های تزئینی و نما ..... ۶
- ۳-۱ ضرورت تحقیق ..... ۱۰
- ۴-۱ اهداف تحقیق ..... ۱۱
- ۵-۱ سازمان دهی پایان نامه ..... ۱۱

### ۲ فصل دوم: مکانیزم برش سنگ و پارامترهای مؤثر بر قابلیت برش ..... ۱۴

- ۱-۲ مقدمه ..... ۱۴
- ۲-۲ ماشین‌آلات برش سنگ‌های نرم ..... ۱۶
- ۳-۲ مکانیزم برش سنگ ..... ۱۷
- ۴-۲ پارامترهای مؤثر در فرآیند برش سنگ ..... ۱۹
- ۱-۴-۲ پارامترهای وابسته به خصوصیات سنگ ..... ۲۰
- ۲-۴-۲ پارامترهای وابسته به ماشین ..... ۳۲

### ۳ فصل سوم: مطالعات آزمایشگاهی ..... ۴۲

- ۱-۳ جمع‌آوری نمونه از معدن ..... ۴۳

۴۵.....	آزمایش‌های انجام شده .....	۲-۳
۴۵.....	آزمایش‌های مکانیک سنگی.....	۱-۲-۳
۵۴.....	مطالعات مینرالوژیکی و بافت.....	۲-۲-۳
۵۹.....	آنالیز شیمیایی.....	۳-۲-۳
۶۲.....	نرخ برش.....	۴-۲-۳
۶۴.....	<b>۴ فصل چهارم: تحلیل نتایج.....</b>	
۶۴.....	برازش‌های تک‌متغیره.....	۱-۴
۶۵.....	مقاومت فشاری.....	۴-۱-۱
۶۸.....	مقاومت کششی.....	۲-۱-۴
۷۰.....	چکش اشمیت.....	۳-۱-۴
۷۲.....	لوس آنجلس.....	۴-۱-۴
۷۴.....	چگالی.....	۵-۱-۴
۷۶.....	تخلخل.....	۶-۱-۴
۷۸.....	میزان سیلیس.....	۷-۱-۴
۸۲.....	برازش چندمتغیره.....	۲-۴
۸۲.....	برازش دومتغیره.....	۱-۲-۴
۸۹.....	برازش سه متغیره.....	۲-۲-۴
۹۶.....	برازش چهارمتغیره.....	۳-۲-۴
۱۰۲.....	برازش پنج متغیره.....	۴-۲-۴
۱۰۳.....	جمع‌بندی نتایج.....	۳-۴
۱۰۷.....	<b>۵ فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....</b>	
۱۰۷.....	نتیجه‌گیری.....	۱-۵
۱۱۰.....	پیشنهادات.....	۲-۵



فهرست شکل‌ها

عنوان.....	صفحه
شکل ۱-۲: مراحل برش سنگ.....	۱۸
شکل ۲-۲: نحوه تماس دیسک با سنگ در برش رو به پایین.....	۱۹
شکل ۳-۲: دستگاه مورد استفاده برای مطالعات میکروسکوپی روی مقاطع نازک.....	۳۰
شکل ۴-۲: حداکثر عمق برش یک دیسک با توجه به شعاع دیسک و شعاع فلانژ دیسک.....	۳۵
شکل ۵-۲: نوع حرکت ابزار در انواع برش.....	۳۸
شکل ۱-۳: فلوجارت تحقیق.....	۴۲
شکل ۲-۳: نقشه پراکندگی معادن سنگ ساختمانی ایران.....	۴۳
شکل ۳-۳: مناطق مورد مطالعه در این تحقیق.....	۴۴
شکل ۴-۳: نمونه تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره.....	۴۶
شکل ۵-۳: نمونه تحت آزمایش مقاومت کششی.....	۴۸
شکل ۶-۳: مراحل کار در انجام آزمایش لوس‌آنجلس.....	۵۱
شکل ۷-۳: مشخصات بافتی مرمریت کوه سفید.....	۵۵
شکل ۸-۳: مشخصات بافتی مرمریت هستی‌جان.....	۵۵
شکل ۹-۳: مشخصات بافتی مرمریت صلصالی.....	۵۶
شکل ۱۰-۳: مشخصات بافتی مرمریت سمیرم.....	۵۶
شکل ۱۱-۳: مشخصات بافتی تراورتن عباس‌آباد.....	۵۷
شکل ۱۲-۳: مشخصات بافتی تراورتن خورهه.....	۵۷
شکل ۱۳-۳: مشخصات بافتی تراورتن سیلور تکاب.....	۵۸
شکل ۱۴-۳: مشخصات بافتی تراورتن پرتقالی ماکو.....	۵۸
شکل ۱۵-۳: مشخصات بافتی تراورتن حاجی‌آباد.....	۵۹
شکل ۱-۴: رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوره و نرخ برش.....	۶۶
شکل ۲-۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری تک‌محوره.....	۶۷
شکل ۳-۴: رابطه بین مقاومت فشاری و نرخ برش.....	۶۸



- شکل ۴-۴: رابطه بین مقاومت کششی و نرخ برش ..... ۶۸
- شکل ۵-۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت کششی ..... ۶۹
- شکل ۶-۴: رابطه بین مقاومت کششی و نرخ برش ..... ۷۰
- شکل ۷-۴: رابطه بین سختی چکش اشمیت و نرخ برش ..... ۷۰
- شکل ۸-۴: نمودار حاصل از اطلاعات عدد چکش اشمیت ..... ۷۱
- شکل ۹-۴: رابطه بین عدد چکش اشمیت و نرخ برش ..... ۷۱
- شکل ۱۰-۴: رابطه بین درصد افت لوس آنجلس و نرخ برش ..... ۷۲
- شکل ۱۱-۴: نمودار حاصل از اطلاعات افت لوس آنجلس ..... ۷۳
- شکل ۱۲-۴: رابطه بین عدد درصد افت لوس آنجلس و نرخ برش ..... ۷۳
- شکل ۱۳-۴: رابطه بین چگالی و نرخ برش ..... ۷۴
- شکل ۱۴-۴: نمودار حاصل از اطلاعات چگالی ..... ۷۵
- شکل ۱۵-۴: رابطه بین چگالی و نرخ برش ..... ۷۵
- شکل ۱۶-۴: رابطه بین تخلخل و نرخ برش ..... ۷۶
- شکل ۱۷-۴: رابطه بین تخلخل و نرخ برش پس از حذف نقطه‌ی مربوط به مرمیت سمیرم ..... ۷۷
- شکل ۱۸-۴: نمودار حاصل از اطلاعات تخلخل ..... ۷۷
- شکل ۱۹-۴: رابطه بین تخلخل و نرخ برش ..... ۷۸
- شکل ۲۰-۴: رابطه بین کوارتز محتوی با نرخ برش ..... ۷۹
- شکل ۲۱-۴: نمودار حاصل از اطلاعات میزان سیلیس سنگ ..... ۷۹
- شکل ۲۲-۴: رابطه بین درصد سیلیس محتوی و نرخ برش ..... ۸۰
- شکل ۲۳-۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری و مقاومت کششی ..... ۸۴
- شکل ۲۴-۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری و عدد چکش اشمیت ..... ۸۵
- شکل ۲۵-۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری و افت لوس آنجلس ..... ۸۶
- شکل ۲۶-۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری و تخلخل ..... ۸۸
- شکل ۲۷-۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، مقاومت کششی و عدد چکش اشمیت ..... ۹۰
- شکل ۲۸-۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، عدد چکش اشمیت و افت لوس آنجلس ..... ۹۱
- شکل ۲۹-۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، مقاومت کششی و افت لوس آنجلس ..... ۹۲

- شکل ۳۰-۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، مقاومت کششی و تخلخل ..... ۹۴
- شکل ۳۱-۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، افت لوس آنجلس و تخلخل ..... ۹۵
- شکل ۳۲-۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، مقاومت کششی، افت لوس آنجلس و تخلخل ..... ۹۷
- شکل ۳۳-۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، مقاومت کششی، عدد چکش اشمیت و افت لوس آنجلس ..... ۹۸
- شکل ۳۴-۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، عدد چکش اشمیت و افت لوس آنجلس و تخلخل ..... ۱۰۰
- شکل ۳۵-۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، مقاومت کششی، عدد چکش اشمیت و تخلخل ..... ۱۰۱
- شکل ۳۶-۴: نمودار حاصل از اطلاعات مربوط به برآزش پنج‌متغیره ..... ۱۰۳

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲: دسته‌بندی پارامترهای مؤثر در برش سنگ	۲۰
جدول ۲-۲: تعاریف مختلف شکنندگی	۲۶
جدول ۱-۳: مشخصات معادن مورد مطالعه	۴۴
جدول ۲-۳: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره برای معادن مورد مطالعه	۴۷
جدول ۳-۳: نتایج آزمایش مقاومت کششی برای معادن مورد مطالعه	۴۹
جدول ۴-۳: اعداد قرائت‌شده توسط چکش اشمیت برای معادن مورد مطالعه	۵۰
جدول ۵-۳: نتایج آزمایش سختی چکش اشمیت برای معادن مورد مطالعه	۵۰
جدول ۶-۳: نتایج آزمایش لوس‌آنجلس برای معادن مورد مطالعه	۵۲
جدول ۷-۳: نتایج آزمایش چگالی برای معادن مورد مطالعه	۵۳
جدول ۸-۳: نتایج آزمایش تخلخل برای معادن مورد مطالعه	۵۴
جدول ۹-۳: نوع بافت برای معادن مورد مطالعه	۵۹
جدول ۱۰-۳: نتایج آنالیز شیمیایی مرمریت کوه سفید	۶۰
جدول ۱۱-۳: نتایج آنالیز شیمیایی مرمریت هستی‌جان	۶۰
جدول ۱۲-۳: نتایج آنالیز شیمیایی مرمریت صلصالی	۶۰
جدول ۱۳-۳: نتایج آنالیز شیمیایی مرمریت سمیرم	۶۰
جدول ۱۴-۳: نتایج آنالیز شیمیایی تراورتن عباس‌آباد	۶۰
جدول ۱۵-۳: نتایج آنالیز شیمیایی تراورتن خورهه	۶۱
جدول ۱۶-۳: نتایج آنالیز شیمیایی تراورتن سیلور تکاب	۶۱
جدول ۱۷-۳: نتایج آنالیز شیمیایی تراورتن پرتقالی ماکو	۶۱
جدول ۱۸-۳: نتایج آنالیز شیمیایی تراورتن حاجی‌آباد	۶۱
جدول ۱۹-۳: درصد $SiO_2$ سنگهای مورد مطالعه	۶۱
جدول ۲۰-۳: نرخ برش برای معادن مورد مطالعه	۶۲
جدول ۱-۴: نتایج آزمایش‌ها	۶۵

- جدول ۲-۴: روابط به دست آمده از برازش تک‌متغیره ..... ۸۰
- جدول ۳-۴: ضریب همبستگی بین پارامترهای اندازه گیری شده ..... ۸۲
- جدول ۴-۴: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری و مقاومت کششی ..... ۸۳
- جدول ۵-۴: رابطه‌ی به دست آمده از برازش دومتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری و مقاومت کششی ..... ۸۳
- جدول ۶-۴: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری و چکش اشمیت ..... ۸۴
- جدول ۷-۴: رابطه‌ی به دست آمده از برازش دومتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری و چکش اشمیت ..... ۸۵
- جدول ۸-۴: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری و افت لوس آنجلس ..... ۸۶
- جدول ۹-۴: رابطه‌ی به دست آمده از برازش دومتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری و افت لوس آنجلس ..... ۸۶
- جدول ۱۰-۴: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری و تخلخل ..... ۸۷
- جدول ۱۱-۴: رابطه‌ی به دست آمده از برازش دومتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری و تخلخل ..... ۸۷
- جدول ۱۲-۴: روابط حاصل از برازش دو متغیره با ضریب تعیین کم ..... ۸۸
- جدول ۱۳-۴: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و عدد چکش اشمیت ..... ۸۹
- جدول ۱۴-۴: رابطه‌ی به دست آمده از برازش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و عدد چکش اشمیت ..... ۸۹
- اشمیت ..... ۸۹
- جدول ۱۵-۴: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، عدد چکش اشمیت و افت لوس آنجلس ..... ۹۰
- جدول ۱۶-۴: رابطه‌ی به دست آمده از برازش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، عدد چکش اشمیت و افت لوس آنجلس ..... ۹۰
- جدول ۱۷-۴: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و افت لوس آنجلس ..... ۹۲
- جدول ۱۸-۴: رابطه‌ی به دست آمده از برازش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و افت لوس آنجلس ..... ۹۲
- جدول ۱۹-۴: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و تخلخل ..... ۹۳
- جدول ۲۰-۴: رابطه‌ی به دست آمده از برازش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و تخلخل ..... ۹۳
- جدول ۲۱-۴: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، افت لوس آنجلس و تخلخل ..... ۹۴
- جدول ۲۲-۴: رابطه‌ی به دست آمده از برازش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، افت لوس آنجلس و تخلخل ..... ۹۴
- جدول ۲۳-۴: روابط حاصل از برازش سه‌متغیره با ضریب تعیین کم ..... ۹۵

- جدول ۴-۲۴: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، افت لوس آنجلس و تخلخل.....۹۶
- جدول ۴-۲۵: رابطه‌ی به دست آمده از رگرسیون چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی افت لوس آنجلس و تخلخل.....۹۶
- جدول ۴-۲۶: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، افت لوس آنجلس و چکش اشمیت.....۹۷
- جدول ۴-۲۷: رابطه‌ی به دست آمده از رگرسیون چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و افت لوس آنجلس و عدد چکش اشمیت.....۹۸
- جدول ۴-۲۸: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، چکش اشمیت، افت لوس آنجلس و تخلخل.....۹۹
- جدول ۴-۲۹: رابطه‌ی به دست آمده از برازش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، افت لوس آنجلس، چکش اشمیت و تخلخل.....۹۹
- جدول ۴-۳۰: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، چکش اشمیت و تخلخل.....۱۰۰
- جدول ۴-۳۱: رابطه‌ی به دست آمده از برازش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، چکش اشمیت و تخلخل.....۱۰۱
- جدول ۴-۳۲: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  در برازش پنجمتغیره.....۱۰۲
- جدول ۴-۳۳: رابطه‌ی به دست آمده از رگرسیون پنجمتغیره.....۱۰۲
- جدول ۴-۳۴: روابط حاصل از برازش‌های دومتغیره.....۱۰۴
- جدول ۴-۳۵: روابط حاصل از برازش‌های سه‌متغیره.....۱۰۴
- جدول ۴-۳۶: روابط حاصل از برازش‌های چهارمتغیره.....۱۰۵
- جدول ۴-۳۷: رابطه حاصل از برازش پنج‌متغیره.....۱۰۵

## فصل اول

# مقدمه

## ۱ فصل اول: مقدمه

### ۱-۱ مقدمه

ایران در زمینه صنعت سنگ ساختمانی به عنوان سومین کشور در جهان مطرح است. به گفته کارشناسان یکی از مزیت‌های خدادادی صنعت سنگ در ایران تنوع معادن آن است. در حالی که در دیگر کشورهای تولید کننده سنگ مثل برزیل و هند تنها معدن سنگ گرانیت و در ایتالیا معدن سنگ مرمریت وجود دارد، در ایران انواع معادن سنگ‌های تزئینی با ذخایر سرشار وجود دارد. این سنگ‌ها شامل گرانیت، مرمریت، چینی، کریستال، تراورتن و مرمر بوده که از تنوع رنگی بالایی برخوردار است. با توجه به اهمیت این صنعت و وجود زمینه‌های مناسب برای پیشرفت در این زمینه، انجام مطالعات و بررسی‌هایی در این زمینه ضروری است.

یکی از مسائل مهم در زمینه صنعت سنگ ساختمانی انتخاب مناسب دیسک برش و نرخ برش می‌باشد. با طراحی مناسب کارخانه از بسیاری از هزینه‌های اضافی کاسته می‌شود و پروژه از نظر اقتصادی بهینه می‌شود. لازمی این امر داشتن اطلاعات کافی در زمینه نوع سنگ و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن می‌باشد. با وجود این که این پارامترها غیر قابل تغییر می‌باشند، اما داشتن اطلاعات مناسب در این زمینه منجر به تغییر در پارامترهای ماشین و طراحی مناسب دیسک می‌شود. قابلیت برش سنگ به پارامترهای زیادی بستگی دارد، بنابراین قابلیت برش سنگ را نمی‌توان با روش

مشخص و واحدی اندازه‌گیری کرد. بنابراین برای بررسی این پارامتر به مطالعاتی روی پارامترهای مختلف نیاز است. این پارامترها به طور کلی در سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند. دسته اول پارامترهای وابسته به سنگ می‌باشد که این پارامترها غیر قابل تغییر هستند. دسته دوم پارامترهای وابسته به ماشین می‌باشند که قابل تغییر بوده و با توجه به پارامترهای دسته اول تنظیم می‌شوند. در نهایت دسته سوم پارامترهای محیطی می‌باشند.

## ۱-۲ کلیاتی در مورد سنگ‌های ساختمانی کربناته

### ۱-۲-۱ انواع سنگ‌های ساختمانی کربناته

عمده سنگ‌های ساختمانی و تزئینی را سنگ‌های آهکی تشکیل می‌دهند. این گونه سنگ‌ها به دلیل سختی مناسب، قابلیت ساب و برش، تنوع رنگ، مقاومت خوب، قابلیت استخراج آسان، عدم امکان آلتزه شدن و ذخایر زیاد توانسته‌اند جایگاه خاصی را در سنگ‌های ساختمانی و تزئینی داشته باشند. سنگ آهک از نظر مینرالوژی، از کربنات کلسیم (کلسیت) یا کربنات مضاعف کلسیم، منیزیم (دولومیت) تشکیل شده است و با توجه به ناخالصی‌های جزئی رنگ آنها تغییر می‌کند. در صورت آغشتگی بلورهای کلسیت به اکسیدهای آهن، بسته به شدت آغشتگی، رنگ آنها از کرم تا قهوه‌ای - قرمز تغییر می‌کند. اگر کربنات منیزیم در سنگ کمتر از ۵ درصد باشد به نام سنگ آهک و در صورتی که از ۵ تا ۴۰ درصد باشد به نام سنگ آهک منیزیتی یا سنگ آهک دولومیتی و اگر بیش از ۴۰ درصد باشد به نام دولومیت خوانده می‌شود. سنگ‌های ساختمانی کربناته شامل سنگ‌های با تعریف فوق و همچنین سنگ‌های دگرگون شده آهکی می‌شود که در آنها تبلور مجدد (مثل مرمر) صورت گرفته است. این گروه شامل تراورتن، مرمر، مرمریت، سنگ چینی و کریستال می‌باشد (عطایی، ۱۳۸۷).



**تراورتن:** تراورتن‌ها محصول چشمه‌های آهک ساز قدیمی هستند که به صورت پهنه‌های

نسبتاً وسیعی دیده می‌شوند. از جمله معادن مهم تراورتن، معادن آذرشهر و محلات است که از نظر مرغوبیت بی‌نظیرند. تراورتن سفید در صورتی که رنگ آن به صورت یکنواخت و یک دست سفید باشد و رگچه‌های رنگی و خلل و فرج یکنواخت داشته باشد، از مرغوبیت بیشتری برخوردار است. تراورتن معادن محلات از این‌گونه‌اند. وجود رگچه‌های رنگی ناشی از آلودگی به اکسیدهای آهن در تراورتن باعث زیبایی سنگ می‌شود. تراورتن‌های کرم رنگ که ناشی از وجود رنگدانه‌های پراکنده اکسید آهن در متن سنگ می‌باشد از مرغوبیت کمتری برخوردارند. تراورتن‌های رنگی (بر حسب درصد آلودگی به پیگمنت‌های اکسید آهن به رنگ‌های قرمز، گردویی، لیمویی و غیره دیده می‌شوند) به دلیل نقش و نگارهایی که اختلاف میزان آلودگی اکسید آهن در لایه‌های مختلف تراورتن ایجاد می‌نماید، ظاهر بسیار زیبا و جذابی دارند. در حال حاضر ایران تنها کشور تولیدکننده تراورتن قرمز است. معادن تراورتن رنگی عبارتند از معدن تراورتن گردویی و لیمویی آذرشهر در آذربایجان شرقی، معدن تراورتن قرمز سردارآباد، اردستان و نطنز. تراورتن به دلایل زیر پرمصرف‌ترین سنگ ساختمانی است:

- مقاومت قابل قبول.
- برش‌پذیری و صیقل‌پذیری ایده‌آل.
- شرایط استخراج ایده‌آل به این دلیل که اغلب با لایه‌بندی افقی تا شیب کم در نقاط کم ارتفاع تشکیل می‌گردند و دستیابی آسانی دارند.
- عدم وجود علائم تکتونیکی روی ذخایر موجود تراورتن، زیرا به دلیل جوان بودن (کواترنر) بعد از فازهای کوهزایی مختلف زمین‌شناسی تشکیل یافته‌اند.
- زیبایی ظاهری.
- وجود تخلخل و جذب آب بالا جهت چسبیدن کامل به ملات.

- ارزان بودن به نسبت سایر سنگ‌ها.

**مرمر:** مرمَر که گاه به غلط آن را معادل اونیکس یا ماربل می‌نامند از نظر مینرالوژیکی، کربنات آن از نوع آراگونیت است. مرمرها نظیر تراورتن‌ها محصول عملکرد چشمه‌های آبگرم قدیمی هستند که معمولاً به صورت لایه‌هایی در میان لایه‌های تراورتن دیده می‌شوند. در پروسه کارآیی چشمه‌های آبگرم، اگر افت حرارتی آب چشمه‌ها کند باشد آراگونیت به وجود می‌آید و اگر افت دما به تندی صورت گیرد تراورتن تشکیل می‌گردد. مرمَر به رنگ‌های سفید، شیری، سبز سیر، زرد کهربایی و عسلی تیره و قهوه‌ای حتی سیاه شهرت دارد.

**مرمریت:** از نظر علمی سنگی به نام مرمریت وجود ندارد ولی در اصطلاح معمول معادل ماربل است و حتی گاهی سنگ‌های آهکی خارج از تعریف ماربل را نیز شامل می‌شود. از نظر پتروگرافی مرمریت یا ماربل، سنگ آهکی دگرگون شده‌ای است با وزن مخصوص بیشتر از سنگ آهک که شامل بلورهای کلسیت یا دولومیت یا هر دوی آنهاست که دارای بافت موزائیکی هستند.

از نظر تجاری، مرمریت شامل کلیه سنگ‌های آهکی اعم از دگرگون یا غیردگرگون می‌شود که برای صیقل دادن مناسب بوده و جلای خوبی دارند. مرمریت‌ها را بر حسب مقدار کربنات منیزیم یا کلسیم به نام‌های مرمریت کلسیتی، مرمریت منیزیتی (یا دولومیتی) می‌نامند. این سنگ با توجه به وجود ناخالصی‌ها به رنگ‌های روشن و سفید تا رنگی و نهایتاً تیره وجود دارد.

سختی کلسیت در مقیاس موس ۳ ولی سختی کربنات منیزیم ۳/۵ الی ۴ است، از این‌رو مرمرهای کلسیم و منیزیم‌دار مقاوم‌تر هستند. مرمهرای متشکل از کلسیت خالص مصرف شده در پله‌ها و کف و یا بیرون ساختمان‌ها معمولاً زود خرد می‌شوند. در صورتی که مرمرهای حاوی کربنات منیزیم مقاوم‌تر می‌باشند. به‌خاطر تداخل و قفل‌بندی دانه‌های بلور، مرمَر دارای تخلخل بسیار کمی است که از حدود ۰/۰۰۰۲ الی ۰/۵ درصد حجم سنگ را اشغال می‌کند از این‌رو قادر به آبیگری

زیادی نیست و در مقابل عمل یخزدگی مقاومت بیشتری دارد به طوری که اغلب مرمرها، نوشته‌های زمان باستان را هنوز به روشنی در خود نگهداری نموده‌اند.

### **سنگ چینی و کریستال: سنگ چینی، سنگ آهک دگرگون شده یا مرمر (ماربل) است**

که بافتی تمام بلور دارد و عمدتاً از کلسیت تشکیل شده است. مرمر با تبلور نسبتاً درشت دانه به رنگ سفید یا خاکستری روشن را اصطلاحاً کریستال می‌گویند. مرمرهای حاوی کریستال‌های سفید و براق، اصطلاحاً سنگ چینی نامیده می‌شوند. معادن چینی سنگ حنا (نیریز استان فارس)، نجف‌آباد، معادن کریستال و چینی الیگودرز و معادن چینی و کریستال لای‌بید و گذار سرخ ناحیه موته از معادن معروف ایران هستند. معدن ده بالای یزد از معادن معروف مرمریت ایران است که درجه تبلور، سفیدی و یکنواختی رنگ از عوامل مرغوبیت این سنگ است.

### **۲-۲-۱ موارد مصرف سنگ‌های تزئینی و نما**

از زمان قدیم از سنگ‌ها به خاطر دوام و مقاومت زیاد آن‌ها در احداث ساختمان‌ها و ابنیه مهم استفاده شده است. حتی گاهی سنگ تعیین‌کننده نوع معماری یک منطقه به شمار می‌رفته است. مثلاً تخت جمشید از سنگ آهک، ابنیه تاریخی شهر فلورانس ایتالیا از ماربل کارارا و ابنیه و برج‌های شهر بلونیا در ایتالیا از ماسه‌سنگ ساخته شده‌اند.

امروزه به دلیل پیشرفت فناوری در استخراج و حمل و نقل، استفاده از سنگ ابعاد گسترده‌ای گرفته و از آن در زمینه‌های مختلف ساخت و ساز استفاده می‌شود. مهمترین کاربرد سنگ‌ها به شرح زیر است:

### **پوشش دیوارهای داخلی: اکثر دیوارهای داخلی که با سنگ پوشانده می‌شوند مربوط به**

ساختمان‌های اداری، اماکن عمومی و بهداشتی، فروشگاه‌ها و سالن‌های غذاخوری است. سنگ‌های مورد استفاده برای این کاربرد باید دارای خصوصیات زیر باشند:

۱- قابلیت شست و شو و دوام در برابر شوینده‌ها؛

۲- تخلخل کم؛

۳- جلاپذیری مطلوب؛

۴- رنگ و ظاهر زیبا.

**کف و پلکان:** به کار بردن سنگ برای استفاده در کف و پلکان با توجه به این که در معرض

سایش و احتمالاً ضربه خوردن می‌باشند باید از ویژگی‌هایی به قرار زیر برخوردار باشند:

۱- دارا بودن قابلیت برش در یک جهت، که سنگ‌های دگرگونی و بعضی از سنگ‌های رسوبی

این خصوصیت را دارا می‌باشند؛

۲- دارای مقاومت ضربه‌ای زیاد باشند؛

۳- محکم و سخت باشند؛

۴- دارای مقاومت سایشی نسبتاً زیاد باشند؛

۵- تخلخل کم؛

۶- رنگ و ظاهر زیبا؛

۷- قابل شست و شو و پایدار در برابر اسیدها و بازها و شوینده‌ها.

از بهترین سنگ‌ها برای استفاده در کف و پلکان گنایس و کوارتزیت می‌باشند.

**نما:** بیشترین کاربرد سنگ در ساختمان، در نمای آن است. نمای ساختمان به دلیل قرار

گرفتن در معرض شرایط جوی (باران، یخبندان، آفتاب و آلاینده‌ها)، از اهمیت خاصی برخوردار است.

سنگ نما باید ویژگی‌های خاص داشته باشد تا بتواند در برابر این عوامل دوام بیاورد. بنابراین برای

انتخاب سنگ برای استفاده در نمای ساختمان باید به نکات زیر توجه خاص کرد:

- ۱- نوع آب و هوای منطقه در نظر گرفته شود. سنگی مناسب با شرایط اقلیمی انتخاب گردد. مثلاً در مناطق سرد و مرطوب، سنگ دارای تخلخل بسیار کم باشد، وگرنه ممکن است بر اثر یخبندان سنگ متلاشی شود، یا در مکان‌هایی که امکان وزش طوفان شن وجود دارد، در معرض سایش است.
- ۲- قابلیت صیقل خوردن و برش را داشته باشد؛
- ۳- مقاومت‌های کششی و خمشی نسبتاً خوبی را دارا باشد؛
- ۴- ترکیبات کانی شناسایی آن باید در نظر گرفته شود. چون کانی‌های مضر (کانی‌های آهن) در برابر آب و هوا اکسیده شده و در نتیجه می‌تواند نقطه ضعف بوده و باعث تخریب سنگ شود؛
- ۵- بهتر است برآوردی از عمر مفید ساختمان به عمل آید و سنگ نما متناسب با آن انتخاب گردد؛

۶- در صورت نصب سنگ به روش تر، چسبندگی خوبی با ملات داشته باشد؛

۷- رنگ آن با ثبات باشد؛

۸- در برابر بخارها و گازها و پرتو آفتاب پایدار باشد.

**کف خیابان و پیاده‌رو:** سنگ‌های مورد استفاده در پیاده‌روها باید سخت، بادوام و دارای

مقاومت سایش نسبتاً بالا باشد. سنگ‌ها باید دارای چند کانی<sup>۱</sup> و با دانه‌بندی متوسط باشد.

**بام:** در ایران برای پوشش بام‌ها عموماً از سنگ استفاده نمی‌شود، اما به عنوان پوشش بام در

بعضی مناطق ایران می‌تواند هم از نظر دوام و هم از نظر قیمت کاربری خوبی داشته باشد، مشروط بر

این که سنگ انتخاب شده دارای خصوصیات زیر باشد:

۱- قابلیت تقسیم به لایه‌های نازک و مسطح را داشته باشد؛

۲- باید سنگی سبک و غیر قابل نفوذ باشد؛

---

<sup>1</sup> Polymineral

۳- دارای دوام و مقاومت خمشی خوبی باشد؛

۴- بدون تخلخل و در برابر یخبندان مقاوم باشد.

این ویژگی‌ها معمولاً در سنگ لوح وجود دارد. البته سنگ‌هایی مانند شیست‌های کلریتی و میکا شیست‌ها نیز تا حدودی این ویژگی را دارا می‌باشند.

**دیوار و شالوده:** سنگ‌ها را برای شالوده و دیوارهای حایل معمولاً به صورت منظم و بدون شکل به کار می‌برند. حجم این سنگ‌ها بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۵ متر مکعب است و از قطعات کوچک‌تر برای پرکردن فاصله بین آن‌ها استفاده می‌شود. معمولاً برای این کار، از سنگ‌هایی که در منطقه وجود دارد استفاده می‌شود (برای صرفه‌جویی در هزینه‌ها). به این منظور باید به موارد زیر توجه کرد:

۱- بهتر است سنگ‌هایی نسبتاً سخت با وزن مخصوص و مقاومت فشاری زیاد مصرف گردد؛

۲- سنگ‌هایی که دارای لایه بندی و قابلیت انحلال زیاد هستند، مصرف نشود؛

۳- سنگ‌های متخلخل به کار نرود.

سنگ‌های آهکی دولومیتی و ماسه‌سنگ‌ها از مناسب‌ترین سنگ‌ها به شمار می‌روند.

**موج شکن‌ها و ساختمان‌های بندری:** در به کار بردن سنگ برای موج شکن‌ها و ساختمان‌های بندری به دلیل شرایط خاص (وجود امواج، نمک‌ها، جزر و مد، عوامل شیمیایی محیط) باید به موارد زیر توجه و سنگ‌های مناسب را انتخاب کرد.

۱- سنگ‌های مورد استفاده باید با دوام، بدون درزه و دارای وزن مخصوص زیاد باشند؛

۲- سنگ‌ها باید دارای مقاومت ضربه‌ای و سایشی مناسبی باشند؛

۳- لایه لایه نباشند؛

۴- در برابر عوامل شیمیایی موجود در محیط مقاومت کنند.

سنگ‌های بازالت، پریدوتیت، سنگ‌های درونی بازیگ، آمفیبولیت‌ها، کوارتزیت‌ها، ماسه سنگ-های سخت دارای ویژگی‌های مذکور در بالا می‌باشند.

**زیر سازی جاده‌ها:** سنگ‌هایی که برای جاده‌سازی استفاده می‌شود باید نسبت به نوع جاده و شرایط

زمین‌شناسی و مرفولوژی منطقه انتخاب شوند. برای انتخاب سنگ باید به موارد زیر توجه کرد:

۱- از دانه‌بندی همگن تشکیل شده باشد؛

۲- حتی‌الامکان بدون تخلخل باشد؛

۳- سخت بوده و وزن مخصوص زیادی داشته باشد؛

۴- از مقاومت فشاری زیادی برخوردار باشد.

**بالاست راه آهن:** سنگ‌های مورد استفاده برای بالاست راه آهن باید دارای خواص زیر باشند:

۱- سخت بوده و وزن مخصوص زیاد داشته باشند؛

۲- مقاومت فشاری و ضربه‌ای زیاد داشته باشند؛

۳- سنگ دارای تخلخل کم بوده و دوام به یخبندان مناسبی داشته باشد.

**موارد ویژه:** گاهی اوقات به خصوص در مناطق صنعتی ممکن است سنگ به خواص ویژه‌ای از

قبیل مقاومت در برابر حرارت، اسیدها یا قلیایی‌ها نیاز داشته باشد. برای این قبیل اهداف، سنگ باید

دارای ویژگی‌هایی به شرح زیر باشد (عطایی، ۱۳۸۷):

۱- مقاوم در برابر حرارت: تالک، توف، آندزیت، بازالت؛

۲- مقاوم در برابر اسیدها: گرانیت، دیوریت، کوارتزیت، ماسه سنگ‌های کوارتزی، آندزیت،

بازالت، دیاباز؛

۳- مقاوم در برابر قلیایی‌ها: سنگ‌های آهکی متراکم، دولومیت‌ها، ماسه‌سنگ‌های کربناتی.

### ۳-۱ ضرورت تحقیق

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

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

دست آورد. با توجه به جایگاه بالای ایران در زمینه ذخایر و تنوع سنگ‌های ساختمانی در دنیا، هنوز مطالعات دقیق و گسترده‌ای برای ارتقاء سطح علمی و تکنولوژی مرتبط با این موضوع در کشور انجام نگرفته است و تنها به بومی کردن و استفاده از تکنولوژی کشورهای دیگر بسنده شده است. لذا با توجه به توضیحات و موارد ذکر شده، انجام این قبیل مطالعات برای اولین بار در کشور لازم و ضروری می‌باشد. از طرف دیگر، انتخاب تجهیزات برش متناسب با خصوصیات مواد سنگی، باعث کاهش هزینه‌های عملیات می‌شود. با توجه به افزایش روز افزون کاربرد دیسک‌های برش الماسی، روشی مناسب برای پیش‌بینی هزینه‌ها و طراحی مناسب آن‌ها ضروری می‌باشد. جمع‌آوری اطلاعات جامع راجع به خصوصیات سنگ‌ها و کاربرد آن در یافتن قابلیت برش سنگ، این امکان را می‌دهد تا با طراحی مناسب کارخانه، هزینه‌ها حداقل شود.

#### ۴-۱ اهداف تحقیق

عمده‌ی بحث در این تحقیق، بررسی و مطالعه روی پارامترهای وابسته به سنگ می‌باشد. در نهایت هدف از این مطالعات، یافتن روابط بین این پارامترها با قابلیت برش سنگ می‌باشد. با تحلیل این نتایج و تعمیم آن به دیگر سنگ‌های ساختمانی مشابه، می‌توان انتخاب دیسک، نرخ برش و به طور کلی طراحی کارخانه را با ضریب اطمینان بالاتری انجام داد. در واقع با انجام این مطالعات می‌توان از صرف هزینه و انرژی اضافی جلوگیری بعمل آورد.

#### ۵-۱ سازمان دهی پایان نامه

این تحقیق در ۵ فصل ارائه شده است.

۱- فصل اول: در این فصل که فصل پیش رو می‌باشد، کلیاتی در زمینه موضوع مشاهده

می‌شود. هدف از انجام این تحقیق و روش انجام آن نیز به طور مختصر ذکر شده است.



۲- فصل دوم: در این فصل به بررسی مکانیزم برش سنگ و پارامترهای مؤثر بر قابلیت برش سنگ پرداخته شده است. پارامترهای مختلف به سه دسته عمده تقسیم شده و تأثیر هر یک از آنها روی قابلیت برش ذکر شده است. همچنین تأثیر هر کدام از آنها روی سایر پارامترها نیز ذکر می‌شود. در این فصل، تأکید روی ذکر تحقیقاتی می‌باشد که توسط دیگر محققین انجام شده است.

۳- فصل سوم: در این فصل به معرفی معادن و مشخصات نمونه‌ها پرداخته شده است. سپس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده شرح داده شده است. همچنین نتایج آزمایش‌ها نیز در این فصل ارائه شده است.

۴- فصل چهارم: در فصل چهارم به تحلیل نتایج ذکر شده در فصل سوم پرداخته شده است و تأثیر پارامترهای مختلف روی قابلیت برش انواع سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر هر یک از پارامترها روی دیگر پارامترها مطالعه شده است.

۵- فصل پنجم: در فصل پایانی نیز نتایج حاصل از این تحقیق و پیشنهاداتی در این زمینه ارائه شده است.

## فصل دوم

# مکانیزم برش سنگ و پارامترهای مؤثر بر قابلیت برش

## ۲ فصل دوم: مکانیزم برش سنگ و پارامترهای مؤثر بر قابلیت برش

### ۲-۱ مقدمه

امروزه، دیسک‌های برش الماسی<sup>۱</sup> به طور گسترده‌ای برای برش سنگ به صورت ورقه ورقه مورد استفاده قرار می‌گیرد. دیسک‌های برش الماسی کاربرد بسیار زیادی در زمینه‌های مختلف صنعتی شامل اره، برش، سایش و قطع زائده‌های بتن و موزائیک دارند. این اره‌ها به دلیل سرعت بریدن بالا، انعطاف‌پذیری و اقتصادی بودن کاربرد وسیعی دارند. همچنین می‌توان آن‌ها را با دقت بالایی در یک سطح برش نصب کرد. بلوک‌های سنگی را می‌توان به راحتی و با حرکات رفت و برگشتی جابجا کرد. همچنین هزینه برش سنگ، با قیمت پایین اره‌ها، تا حد وسیعی کنترل می‌شود. در این زمینه، برای کاهش هزینه‌ها، انتخاب مناسب اره و نرخ برش مناسب برای هر نوع سنگ خاص بسیار با اهمیت است. از طرف دیگر، برای تولیدکننده سنگ، لازم است که برای پیش‌بینی هزینه‌ها و طراحی کارخانه، درجه قابلیت برش سنگ را بداند. قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی به طور خلاصه

---

<sup>۱</sup> Diamond Circular sawing machine

به ویژگی‌های ماشین، نوع و قطر اره، عمق برش، نرخ برش، سایش ابزار و ویژگی‌های سنگ بستگی دارد که در ادامه به شرح آن‌ها پرداخته شده است.

در پروسه‌های با تولید انبوه، هزینه عمده، هزینه‌های مربوط به برنده‌های الماسی می‌باشند. نوع این تیغه‌ها به پارامترهای بسیاری بستگی دارد اما به طور عمده پارامتر مؤثر، قابلیت برش یک سنگ خاص می‌باشد. انتخاب نوع دیسک از لحاظ مقاومت و تاب برداشتن، نوع سگمنت مخصوص سنگ-های متفاوت، نحوه جوش دادن سگمنت به دیسک به طور یکنواخت و در یک ردیف باید بر اساس ضوابط مشخص و استاندارد باشد. بنا بر تجربه در ایران معلوم شده است مصرف نابجا و کاربرد نادرست علاوه بر ضایع کردن مواد، نتیجه مطلوب را نیز در کارآئی این مواد در سنگ بریده به وجود نیاورده است، مخصوصاً در مورد مصرف سگمنت و بشقاب‌های سایشی، طبقه‌بندی و کلاسه‌بندی خاص بین ضرورت مصرف آنها با توجه به نوع سنگ مورد نظر وجود ندارد. در برخی کشورها، یک دسته‌بندی کلی از قابلیت برش سنگ وجود دارد که محدوده کاری را مشخص می‌کند. به طور مثال، در آلمان، سه گروه عمده از سنگ‌های سخت وجود دارد که با فاکتور سایش از هم جدا شده‌اند و سهولت یا سختی برش را مشخص می‌کند. همچنین برای هر گروه، نرخ برش و سرعت تیغه خاصی توصیه می‌شود.

دیسک‌ها از دو قسمت عمده تشکیل شده‌اند، قطعه‌های الماس و هسته فولادی که در مرکز قرار دارد. قطعه الماسی، ماده مرکبی است که از اجزای الماسی به قطر ۱۵۰ تا ۱۰۰۰ میکرون تشکیل شده است و در زمینه فلزی پراکنده شده است. مرکز فولادی از فولادهای متفاوتی ساخته می‌شود که جوش خوردن یا لحیم خوردن قطعه‌های الماسی روی جنس این فولادها تأثیر می‌گذارد.

انتخاب مناسب الماس یکی از مهم‌ترین پارامترها می‌باشد. برای برش سنگ‌های سخت، به اندازه الماس کوچکتری نسبت به مواد نرم نیاز است. به این دلیل که باری که به هر ذره وارد می‌شود در سنگ‌های نرم زیاد نیست. برعکس، اگر الماس‌های درشت‌تری استفاده شود، نفوذ الماس محدود

می‌شود و همچنین با خارج شدن سنگ‌های درشت یا سایش بیش از حد در دانه‌های الماس اتفاق می‌افتد. بنابراین اقتصاد ماشین، به انتخاب مناسب الماس وابستگی بسیار زیادی دارد.

## ۲-۲ ماشین آلات برش سنگ‌های نرم

سنگ پس از استخراج از معادن به صورت بلوک، خواه به شکل قواره یا بی‌قواره به کارخانجات سنگبری حمل می‌شود. اولین ماشینی که برای قواره کردن سنگ بکار می‌رود تک‌لام<sup>۱</sup> نامیده می‌شود که تیغه‌ای است فولادی و حدود ۳۵ تا ۳۷ دندانه الماسه بر آن نصب شده است. با این تیغه بلوک سنگ از یک یا چند طرف بریده می‌شود تا سطوحی صاف با ابعادی منظم و متناسب ایجاد شود. سپس توسط جرثقیل از قسمت یک سطح صاف روی حمال قرار داده می‌شود و از آنجا توسط ریل‌های مخصوص به زیر اره بر کشیده می‌شود. در بعضی از کارخانجات به جای تک‌لام از انواع دستگاه برش با سیم الماسه و هلیکوپتیل استفاده می‌شود. اره‌های الماسه در تعداد مختلف و قدرت برش متفاوت موجود می‌باشند که بعضی دارای چهل و شصت الی هشتاد تیغه هستند (عطایی، ۱۳۸۷).

قدرت برش اره‌ها در سنگ‌های آهکی مختلف به ده تا حدود چهل سانتیمتر عمق در ساعت می‌رسد. فاصله تیغ اره‌های ذکر شده که برای برش ورق سنگ روی ماشین نصب شده‌اند، ۲ سانتیمتر است. برش ورق به ضخامت بیشتر مثلاً سه یا چهار سانتیمتر هم با اره‌ها امکان‌پذیر است که طبیعتاً تعداد کمتری تیغه نصب می‌گردد. با اره‌های مدرن هشتاد تیغه می‌توان از بلوک سنگ به ابعاد حداکثر  $3 \times 2 \times 3/5$  متر استفاده کرد. همچنین بعد از برش به وسیله اره می‌توان از قله‌بر<sup>۲</sup> نیز برای بریدن سنگ استفاده نمود، قله‌برها انواع و ابعاد مختلف دارند که در آن‌ها از تیغه‌های دایره‌ای شکل با دیسک الماسه استفاده می‌شود. قطر دیسک‌ها از ۱۵ سانتیمتر و یا کمتر شروع شده و تا حدود ۳۰۰

<sup>۱</sup> Single Blade Cutter

<sup>۲</sup> block cutter

سانتیمتر می‌رسد. اولاً تعداد ورق تولید شده به وسیله قله‌بر محدود است، حتی با قله‌بر چند دیسک<sup>۱</sup>، ثانیاً ارتفاع قله نیز محدود می‌باشد. یعنی ورق تولید شده حداکثر تا ۱۲۰ سانتیمتر ارتفاع بیشتر نخواهد داشت. از طرفی سرعت برش با دیسک بیشتر است. به هر صورت در یک کارخانه بزرگ، معمولاً از انواع ماشین‌آلات، برای سفارش‌های مختلف استفاده می‌شود. برای اینکه بتوان ورق‌های بزرگ را، که از زیر اره بیرون آمده‌اند به پلاک مورد سفارش تبدیل کرد، از دستگاه‌های مختلف فرز استفاده می‌شود. در کاخانجات بزرگ از فرزهای دروازه‌ای<sup>۲</sup> استفاده می‌شود که معمولاً دیسکی به قطر ۵۰ یا ۶۰ سانتیمتر دارند. روی میز فرز تا حدود ۱۰ ورق را روی هم قرار می‌دهند و پس از تنظیم دستگاه به ابعاد دلخواه می‌برند. در کنار فرزهای دروازه‌ای از قله‌برهای اتوماتیک<sup>۳</sup> که با دیسک‌های کوچک به قطر ۳۰ الی ۴۰ سانتیمتر کار می‌کنند، استفاده می‌شود. برای تبدیل زائده‌ها به پلاک مصرفی از همین دستگاه‌ها یا دستگاه‌های غیراتوماتیک فرز دستی<sup>۴</sup> استفاده می‌شود. بعضی اوقات سنگ‌های نرم مثل تراورتن به علت تراکم زیاد برای دستگاه قله‌بر مشکل ایجاد می‌کنند (عطایی، ۱۳۸۷).

## ۲-۳ مکانیزم برش سنگ

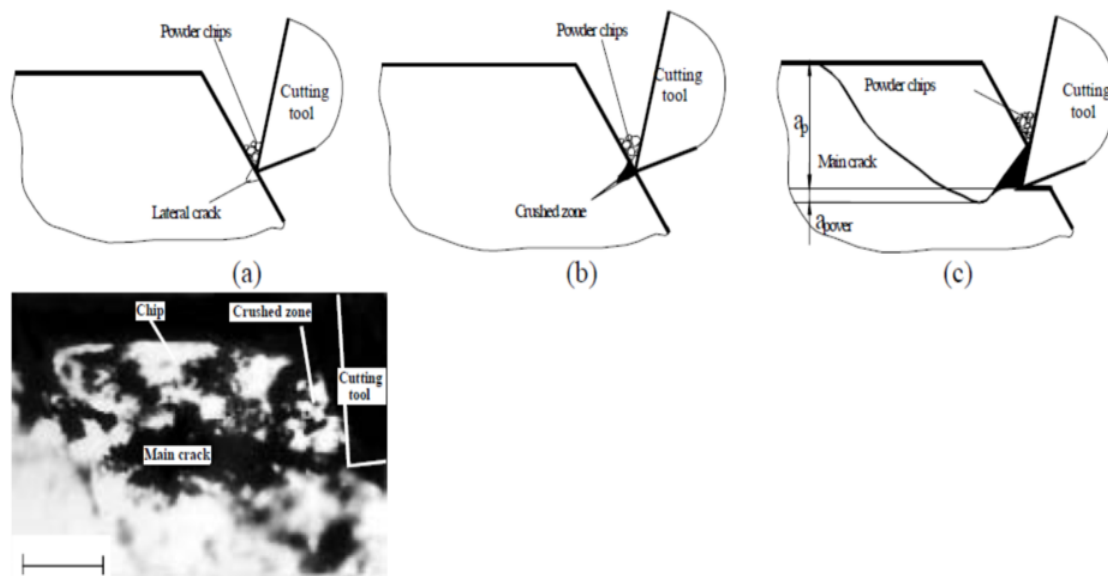
زمانی که ابزار برش با سنگ تماس برقرار می‌کند، سنگ شروع به خرد شدن می‌کند و ترک‌های جانبی شروع به رشد می‌کنند (شکل ۲-۱). در مرحله دوم، سنگ شروع به شکستن می‌کند. در مرحله سوم، اندازه ناحیه شکسته افزایش می‌یابد و ترک ایجاد شده تا سطح آزاد امتداد می‌یابد که منجر به برش کامل سنگ می‌شود (Wei, 2002).

<sup>1</sup> multidisc cutter

<sup>2</sup> bridge cutter

<sup>3</sup> squaring machine

<sup>4</sup> manual squaring machine



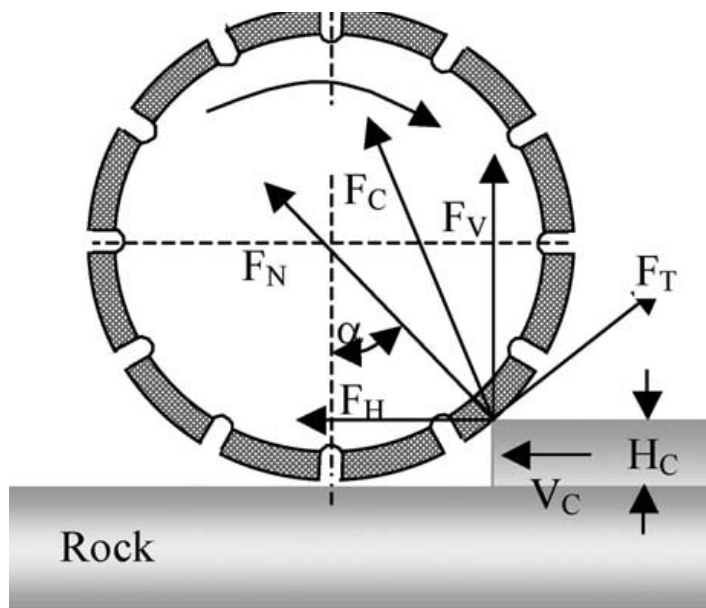
شکل ۱-۲: مراحل برش سنگ (Ersoy, 2003).

در این عملیات هرچند که از واژه برش<sup>۱</sup> استفاده می‌شود، اما در واقع فرآیند، خردشدن<sup>۲</sup> است. تیغه برنده با سرعتی ثابت می‌چرخد. ذرات الماس روی قطعه‌های برنده، مواد را با ایجاد ترک و خراشیدن از بین می‌برند. در طول این عملیات، برش ایجاد می‌شود.

در شکل ۲-۲، نیروهای درگیر در حین فرآیند برش نشان داده شده است (Ersoy, 2003). دو مؤلفه نیروی مماسی و نیروی عمودی، از جمله مهم‌ترین نیروهای مؤثر در مکانیزم برش سنگ می‌باشند. در شروع فرآیند، 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 می‌شود. زمانی که براده 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.

<sup>1</sup> sawing

<sup>2</sup> grinding



$V_p$ : سرعت محیطی  
 $V_c$ : سرعت برش  
 $F_v$ : نیروی عمودی  
 $F_H$ : نیروی افقی  
 $F_N$ : نیروی نرمال  
 $F_C$ : نیروی برشی  
 $\alpha$ : زاویه تاثیر نیروی عمودی

شکل ۲-۲: نحوه تماس دیسک با سنگ در برش رو به پایین (Ersoy, 2003).

## ۴-۲ پارامترهای مؤثر در فرآیند برش سنگ

کاربرد ماشین‌های اره‌کمانه‌ای الماسی در برش سنگ را می‌توان به عنوان سیستم پیچیده‌ای با فاکتورهای تأثیرگذار بسیاری معرفی کرد.

همیشه این مسأله برای تولیدکنندگان برنده‌های الماسی مهم بوده است که یک سری اطلاعات متقابل از قابلیت برش سنگ داشته باشند. قابلیت برش سنگ، با یک روش مشخص قابل شناسایی نمی‌باشد و نمی‌توان با انجام یک آزمایش مشخص این خصوصیت سنگ را شناسایی کرد چون این ویژگی سنگ به پارامترهای بسیار زیادی وابسته است.

پارامترهای مؤثر در راندمان برش را می‌توان مطابق جدول ۲-۱ به سه دسته عمده تقسیم کرد.



جدول ۱-۲: دسته‌بندی پارامترهای مؤثر در برش سنگ (Özçelik, 2007)

شرایط محیطی	پارامترهای تقریباً تغییرپذیر یا تغییرپذیر وابسته به دیسک‌های برش الماسی	پارامترهای غیر قابل تغییر وابسته به خصوصیات سنگ
پرسنل فنی	سرعت برش	ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی
لرزش	تعداد قطعه‌ها	ویژگی‌های شیمیایی
توزیع فشار تیغه‌ها	فاصله بین قطعه‌ها	ویژگی‌های مینرالوژیکی
	ساختار قطعه‌ها	ویژگی‌های سنگ‌شناسی
	مقدار و فشار آب	ویژگی‌های بافتی
	خلوص و PH آب	ویژگی‌های ساختاری
	ابعاد بلوک	ناپیوستگی‌های موجود در سنگ
	ساختار ماشین و نیروی موتور	درجه تغییر یافتگی سنگ
	ابعاد تیغه و ساختار تیغه	

در ادامه این پارامترها شرح داده شده‌اند. در اینجا عمده بحث روی پارامترهای دو دسته اول

می‌باشد.

#### ۱-۴-۲ پارامترهای وابسته به خصوصیات سنگ

مهمترین پارامترهای مؤثر در برش سنگ، پارامترهای غیر قابل تغییر شامل خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ می‌باشند. شناخت دقیقی از خصوصیات سنگ در طراحی تیغه‌های الماسی و ماشین برش ضروری است تا شرایط عملیات مناسبی انتخاب شود.

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، چگالی، تخلخل و سایش می‌باشند. همچنین خصوصیات بافتی سنگ، مهمترین پارامتر در مشخص کردن رفتار مکانیکی و پیش‌بینی عملکرد تجهیزات برش سنگ می‌باشد. در ادامه برخی خصوصیات مهم سنگ‌های ساختمانی شرح داده خواهد شد.

## ۱-۱-۴-۲ خصوصیات مکانیکی سنگ

دسته‌ای از پارامترهای بسیار مهم و تأثیرگذار در قابلیت برش سنگ، خصوصیات مکانیکی سنگ می‌باشد. در این زمینه مطالعات بسیاری صورت گرفته است که نشان دهنده اهمیت مسأله می‌باشد.

## ۱-۱-۱-۴-۲ مقاومت فشاری تک‌محوره

مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) حداکثر تنش فشاری است که سنگ قبل از شکست تحمل می‌کند. مقاومت فشاری را می‌توان به عنوان مهم‌ترین و پرکاربردترین ویژگی سنگ‌ها دانست. به دلیل اهمیت و نقش مقاومت در رفتارهای مهندسی سنگ، مقاومت فشاری در اکثر طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ و در کاربردهای گسترده مکانیک سنگ وارد شده و جزء لاینفک قضاوت‌های مهندسی در مورد یک سنگ و یک توده سنگ می‌باشد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت فشاری سنگ، قابلیت برش سنگ کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به خاطر افزایش مقاومت مرزی دانه‌ها و ماتریکس سنگ و به دنبال آن کاهش قدرت براده برداری دانه الماس دانست. ارزیابی<sup>۱</sup> یکی از افرادی است که در این زمینه تحقیقاتی انجام داده است. وی تحقیقاتی روی پنج گروه از سنگ‌ها انجام داد و به این نتیجه رسیده است که مقاومت فشاری تک‌محوری با انرژی ویژه برش رابطه مستقیم دارد (Ersoy, 2003). فنر<sup>۲</sup> نیز یکی دیگر از افرادی است که با مطالعه روی سنگ‌های ماربل ترکیه به این نتیجه رسیده است که مقاومت فشاری تک‌محوره و نرخ تولید با یکدیگر رابطه معکوس دارند (Fener, 2006).

---

<sup>۱</sup> Ersoy

<sup>۲</sup> Fener

## ۲-۱-۱-۴-۲ مقاومت کششی

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. مقاومت کششی نیز همانند مقاومت فشاری، با قابلیت برش سنگ رابطه معکوس دارد. فنر در سال ۲۰۰۶ به همراه همکارانش طی تحقیقاتی به این نتیجه رسید که مقاومت کششی با نرخ تولید رابطه معکوس دارد (Fener, 2006). همچنین ایوب اقلو<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۲ طی تحقیقاتی روی ۲۴ سنگ اندزیتی، به رابطه مستقیم بین مقاومت کششی و سایش دیسک رسیده است. این امر نشان‌دهنده رابطه معکوس مقاومت کششی و تولید می‌باشد (Eyuboglu, 2002).

## ۳-۱-۱-۴-۲ سختی

سختی عبارت است از مقاومتی که یک کانی یا سنگ در مقابل ابزار خراش‌دهنده (ساینده) از خود نشان می‌دهد. 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 نوع سختی با یکدیگر مساوی نیستند (اصانلو، ۱۳۷۵).

برای ارزیابی سختی سنگ شاخص‌های مختلفی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به عدد چکش اشمیت<sup>۲</sup>، سختی موهس<sup>۳</sup>، ویکورز<sup>۱</sup>، شور<sup>۲</sup>، نوپ<sup>۳</sup> و شاخص سختی ان‌سی‌بی<sup>۴</sup> اشاره کرد.

<sup>1</sup> Eyuboglu

<sup>2</sup> Schmidt

<sup>3</sup> Mohs

فتر و همکارانش مطالعاتی را در این زمینه انجام داده‌اند. آن‌ها عدد چکش اشمیت سنگ‌های ماربل ترکیه را اندازه‌گیری کرده‌اند و در بررسی رابطه آن با نرخ تولید به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش عدد چکش اشمیت، نرخ تولید کاهش می‌یابد (Fener, 2006). همچنین دلگادوا<sup>۵</sup> در سال ۲۰۰۴ مطالعاتی را روی سنگ ساختمانی گرانیته به نام پینک پورینو<sup>۶</sup> انجام داده است که حاصل تحقیقات او نیز نشان می‌دهد که با افزایش سختی سنگ، نرخ برش کاهش می‌یابد (Delgado, 2004).

#### ۲-۴-۱-۱-۴-۲ سایندگی

سایندگی به سختی کانی‌ها بستگی دارد اما شکل دانه‌ها و کلیواژ نیز در کیفیت این خاصیت تأثیر دارند. خرده سنگ‌های گوشه دار و تیز در مقایسه با خرده سنگ‌های گرد بر روی ابزارهای برش خراش‌های عمیق ایجاد می‌کنند و مانع از آن می‌شوند تا انرژی منتقل شده به سطح سگمنت موجب خرد شدن سنگ شود. از سوی دیگر خرده‌های ریز و گرد سنگ نیز باعث صیقل‌دادن سگمنت و کندی دیسک می‌شوند. سایندگی در سنگ‌ها عموماً به سه عامل میزان کوارتز محتوی، اندازه دانه‌ها و مقاومت برشی سنگ‌ها بستگی دارد. در این میان میزان سیلیس یا در حالت کلی کوارتز بسیار مورد تأکید بوده است. تشخیص خاصیت سایندگی سنگ‌ها بر اساس وجود سیلیس امکان‌پذیر است. سنگ‌هایی مثل دولومیت یا آهک که سیلیس کمتری دارند، خاصیت سایندگی کمتری دارند و بالعکس سنگ‌هایی مثل ماسه‌سنگ سیلیسی که سیلیس بیشتری دارند، خاصیت سایندگی بیشتری

---

<sup>1</sup>-Vickers

<sup>2</sup>-Shore

<sup>3</sup>-Knoop

<sup>4</sup>-NCB

<sup>5</sup> Delgado

<sup>6</sup> Pink porrino

دارند. برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ، شاخص‌های کیفی و کمی مختلفی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به فاکتور ساینده‌گی شمیازک<sup>۱</sup>، تست لوس آنجلس<sup>۲</sup> و اندیس سایش سورشار<sup>۳</sup> اشاره کرد. تا کنون مطالعات بسیاری پیرامون تأثیر ساینده‌گی بر قابلیت برش سنگ‌ها انجام شده است. به طور کلی آنچه از این تحقیقات بر می‌آید آن است که با افزایش ساینده‌گی، سرعت برش، سایش ابزارهای الماسه و قابلیت برش سنگ‌ها کاهش می‌یابد. از دیگر مطالعاتی که فنر و همکارانش انجام داده‌اند، مطالعه روی سایش لوس آنجلس سنگ‌های مورد مطالعه‌شان بوده است. در این زمینه، آن‌ها بین افت لوس آنجلس و نرخ تولید رابطه‌ای مستقیم به دست آورده‌اند و نشان داده‌اند که با افزایش افت لوس آنجلس نرخ تولید نیز افزایش می‌یابد (Fener, 2006). همچنین معماریان در سال ۱۳۸۴، به مطالعه روی پنج نوع سنگ ساختمانی ایران پرداخته است و رابطه‌ای مستقیم بین اندیس سایش سورشار و مقاومت فشاری تک‌محوره به دست آورده است. از آن جایی که مقاومت فشاری تک‌محوره رابطه معکوس با قابلیت برش سنگ دارد، لذا رابطه‌ی به دست آمده، نشان‌دهنده رابطه معکوس بین اندیس سایش سورشار و نرخ برش می‌باشد (معماریان، ۱۳۸۴).

#### ۲-۴-۱-۱-۵ شکنندگی<sup>۴</sup>

شکنندگی یکی از مهمترین خصوصیات مکانیکی سنگ می‌باشد. با این حال هیچ تفاهمی بین نویسندگان برای تعریف مشخصی از این مفهوم وجود ندارد. Morley (۱۹۴۴) و Hetenyi (۱۹۶۶) این مفهوم را نبود قابلیت شکل‌پذیری<sup>۵</sup> معرفی می‌کنند. تعریفی دیگر از این مفهوم، این گونه است:

---

<sup>۱</sup>-Schmiazek abrasivity factor

<sup>۲</sup>-Los Angeles abrasion test

<sup>۳</sup>-Cerchar Abrissivness Index

<sup>۴</sup> brittleness

<sup>۵</sup> ductility

زمانی که چسبندگی داخلی سنگ از بین می‌رود، سنگ شکننده تلقی می‌شود. اما به طور کلی شکنندگی بیشتر، موارد زیر را به همراه دارد:

- امتداد یافتگی پایین
- سست شدن شکستگی‌ها
- تشکیل ذرات ریز
- نسبت مقاومت فشاری به کششی بالا
- قابلیت ارتجاع بالا
- زاویه اصطکاک داخلی بالا
- ایجاد ترک و شکاف در تورفتگی‌ها

بنابراین این گونه انتظار می‌رود که با افزایش شکنندگی، قابلیت برش سنگ کاهش می‌یابد. در مطالعاتی که قهرمان و همکارانش در سال ۲۰۰۳ روی نمونه سنگ‌های کربناته انجام داده‌اند، هشت تعریف مختلف از شکنندگی را استفاده کرده‌اند و رابطه هر یک از آن‌ها را با نرخ برش به دست آورده‌اند. فرمول‌های مربوط به هر یک از تعاریف در جدول ۲-۲ آورده شده است (Gunaydin, 2003). قهرمان و همکارانش  $B_3$ ،  $B_5$  و  $B_8$  را محاسبه کردند و رابطه‌ی آن‌ها با نرخ تولید را به دست آوردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش شکنندگی در سنگ، نرخ تولید کاهش می‌یابد. البته این رابطه برای  $B_3$  قابل مشاهده نمی‌باشد و فقط دو پارامتر دیگر رابطه‌ی خوبی نشان داده‌اند (Gunaydin, 2003).

جدول ۲-۲: تعاریف مختلف شکنندگی (Gunaydin, 2003)

پارامترها	رابطه	ردیف
$\varepsilon_r$ : کرنش برگشت پذیر که از روی منحنی تنش-کرنش سنگ به دست می آید. $\varepsilon_t$ : کرنش کل که از روی منحنی تنش-کرنش سنگ به دست می آید.	$B_1 = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_t}$	۱
$W_r$ : انرژی برگشت پذیر که از روی منحنی تنش-کرنش سنگ به دست می آید. $W_t$ : انرژی کل که از روی منحنی تنش-کرنش سنگ به دست می آید.	$B_2 = \frac{W_r}{W_t}$	۲
$\sigma_c$ : مقاومت فشاری تک محوره که از تست مربوطه به دست می آید. $\sigma_t$ : مقاومت کششی که از تست مقاومت کششی به دست می آید.	$B_3 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t}$	۳
$\theta$ : زاویه اصطکاک داخلی که از دایره موهر به دست می آید.	$B_4 = \sin\theta$	۴
$\sigma_c$ : مقاومت فشاری تک محوره که از تست مقاومت فشاری به دست می آید. $q$ : درصد ذرات عبوری از مش شماره ۲۸ که از تست مقاومت ضربه ای به دست می آید.	$B_5 = q\sigma_c$	۵
$H_\mu$ : سختی میکرو که از تست سختی میکرو به دست می آید. $H$ : سختی ماکرو که از تست سختی ماکرو به دست می آید. $K$ : عدد ثابت	$B_6 = \frac{H_\mu - H}{K}$	۶
$W_{rs}$ : انرژی کرنشی برگشت پذیر که در لحظه قبل شکست اندازه گیری می شود. $W_t$ : انرژی کرنشی کل که در لحظه قبل شکست اندازه گیری می شود.	$B_7 = \frac{W_{rs}}{W_t}$	۷
$\sigma_c$ : مقاومت فشاری تک محوره که از تست مربوطه به دست می آید. $\sigma_t$ : مقاومت کششی که از تست مقاومت کششی به دست می آید.	$B_8 = \frac{\sigma_c \sigma_t}{2}$	۸

## ۲-۱-۴-۲ خصوصیات فیزیکی سنگ

### ۱-۲-۱-۴-۲ بافت

مهمترین ویژگی‌های بافتی سنگ شامل اندازه دانه‌ها، شکل دانه‌ها، جهت گیری دانه‌ها، متقارن بودن ذرات و ماده خمیره می‌باشد. در واقع خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ تحت تأثیر همین عوامل می‌باشند. برخی از مهم‌ترین بافت‌های سنگ‌های دگرگونی و سنگ‌های رسوبی در ادامه شرح داده شده است.

سنگ‌های با دانه‌بندی مساوی که اغلب در سنگ‌هایی دیده می‌شود که از یک کانی تشکیل شده است (مانند کوارتزیت و مرمر) به آن‌هایی گفته می‌شود که همه دانه‌های آن هم‌اندازه می‌باشد، اگرچه در این سنگ‌ها هم ترجیحی دانه‌ها وجود دارد ولی در مقیاس میکروسکوپی قابل دیدن نیست. در این دسته از سنگ‌ها فابریک‌های زیر مهم‌تر است (سرابی ۱۳۷۳):

**فابریک موزائیکی:** به فابریک سنگی گفته می‌شود که در آن دانه‌بندی سنگ مساوی بوده و دانه‌ها هم‌بعد است. مرز دانه‌های مختلف، خط مستقیم یا خط‌های کم‌انحنای است.

**فابریک مضرسی:** به فابریک سنگی با دانه‌بندی مساوی گفته می‌شود که در آن دانه‌ها هم‌بعد و معمولاً عدسی‌شکل است. مرز دانه‌های مجاور هم خیلی غیر منظم است و بلورهای مختلف در داخل هم فرو رفته است.

**فابریک میلونیتی:** بافت سنگ خیلی ریزدانه‌ای می‌باشد که محصول خرد شدن مکانیکی سنگ‌هاست، بدون این که تبلور دوباره‌ای در کانی‌های اولیه صورت گیرد. این مواد خردشده معمولاً به وسیله نوعی سیمان به هم متصل شده است.

در سنگ‌های با دانه‌بندی نامساوی معمولاً دو اندازه مشخص و متفاوت در دانه‌های سنگ دیده می‌شود. در این دسته از سنگ‌ها فابریک‌های زیر حائز اهمیت است:



**کریستالوبلاستیک:** نام فابریکی است که در نتیجه تبلور مجدد در سنگ‌های دگرگونی به وجود می‌آید.

**پرفیروبللاستیک:** در مورد سنگ‌های دگرگونی است که دارای فابریک کریستالوبلاستیک با دانه‌هایی است که دارای دو یا چند اندازه مشخص و متفاوت می‌باشد که بلورهای درشت آن به نام پرفیرو بلاست خوانده می‌شود.

**پوایکیلوبلاستیک یا فابریک غربالی:** در مورد بافت سنگی به کار می‌رود که دارای فابریک پرفیروبللاستیک بوده و در داخل هر یک از پرفیروبللاست‌ها تعداد بسیاری بلورهای ریز وجود دارد.

**فابریک متقاطع یا دکاسیت:** که به آن فابریک هورنفلسی نیز گفته می‌شود، در مورد فابریک سنگ‌های تشکیل شده از دو یا چند کانی به کار می‌رود که دانه‌های آن دارای توجیه ترجیحی نیست.

**فابریک کاتاکلاستیک یا اتوکلاستیک:** به نوعی فابریک گفته می‌شود که در سنگ‌های حاصل از خرد شدن مکانیکی سنگ‌ها ظاهر می‌شود. در این حالت تبلور دوباره صورت نگرفته است.

**بافت ملاتی:** به بافتی گفته می‌شود که در آن دانه‌های درشت کانی‌ها در زمینه‌ای از مواد خرد شده از همان کانی‌ها قرار گرفته باشد.

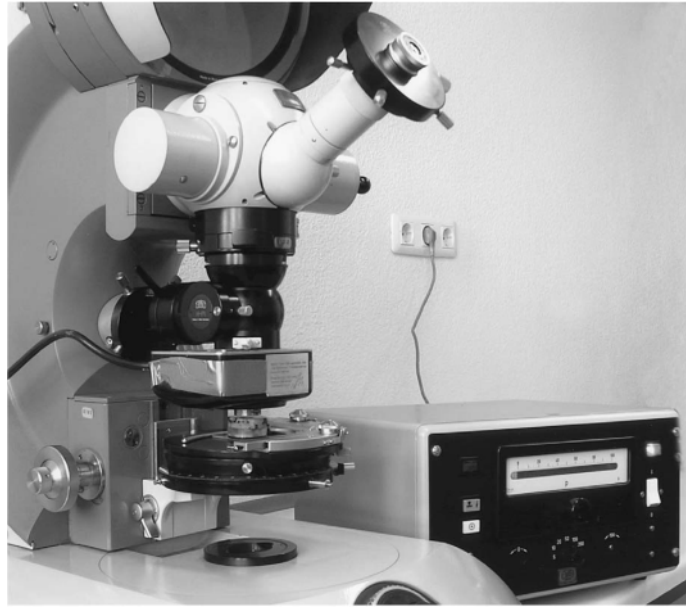
منشأ اصلی سنگ‌های رسوبی مواد ریز جامد معلق در رودخانه‌ها است. این رودخانه‌ها در ضمن حرکت موجب به هم غلتیدن سنگ‌ها شده و سبب خرد شدن آن‌ها می‌شوند. همچنین تکه‌های ریز سنگ‌ها که در اثر سایر عوامل طبیعی مانند یخبندان و غیره از تکه سنگ‌ها جدا شده‌اند به وسیله رودخانه جابه‌جا شده و به محل‌هایی با عمق بیشتر برده می‌شوند. این دانه‌های ریز در اثر نیروی ثقل زمین و همچنین در اثر فعل و انفعالات شیمیایی در این مکان‌ها ته‌نشین شده و تحت فشار قرار می‌گیرند. این فشار ممکن است در اثر لایه‌های فوقانی ته‌نشین‌های جدید باشد و یا فشارهای دیگر و بالاخره بعد از سالیان دراز این لایه‌ها یکپارچه شده و تولید سنگ‌های رسوبی می‌نمایند. کلیه سنگ‌های رسوبی لایه‌لایه می‌باشند زیرا تشکیل آن‌ها در اثر ته‌نشین شدن اجسام جامد موجود در آب‌هاست که به مرور و لایه‌لایه ته‌نشین می‌گردند. در بعضی از سنگ‌های رسوبی بقایای فسیلی

جانوارن و گیاهان دیده می‌شود. جنس سنگ یکنواخت نیست و ممکن است دارای لایه‌های خاک و لای باشد (سرابی، ۱۳۷۳).

اگر دانه‌های سنگ در حد میکرون باشد (۱ تا ۲ میکرون) به آن خاک یا خاک رس می‌گویند. اگر درشتی آن تا صدم میلی‌متر باشد به آن لای می‌گویند. اگر قطر دانه‌ها تا حدود دهم میلی‌متر و حتی یک میلی‌متر باشد به آن ماسه گفته می‌شود (سرابی، ۱۳۷۳).

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای بافتی سنگ بر روی قابلیت برش سنگ باید نمونه سنگی که از معدن استخراج شود، در کارخانه با ابزار برش الماسی بریده شود و به ورقه‌هایی تقسیم شود. نمونه برداری از این ورقه‌ها انجام شده و تیغه‌های نازک از این نمونه‌ها آماده می‌شود. پس از آماده کردن این تیغه‌ها، مطالعاتی روی تیغه‌ها برای پیدا کردن ویژگی‌های مینرالوژیکی سنگ انجام می‌شود. نوع و درصد کانی‌های محتوی در این مرحله مشخص می‌شود. همچنین اندازه و شکل دانه‌ها نیز معین می‌شود. شکل ۲-۳ نمونه‌ای از میکروسکوپی که در تفسیر مقاطع استفاده می‌شود، نشان می‌دهد. در نهایت روابط بین بافت و قابلیت برش سنگ با ارزیابی نتایج مشخص می‌شود.

معماریان در سال ۱۳۸۴ مطالعاتی را در زمینه تأثیر ضریب بافت روی مقاومت فشاری تک-محوره سنگ‌های کربناته انجام داده است و به این نتیجه رسیده است که با افزایش ضریب بافت، مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد. این مسأله نشان دهنده این است که افزایش ضریب بافت سنگ، قابلیت برش آن را کاهش می‌دهد (معماریان، ۱۳۸۴).



شکل ۲-۳: دستگاه مورد استفاده برای مطالعات میکروسکوپی روی مقاطع نازک

#### ۲-۲-۱-۴-۲ نوع و درجه سیمانی شدن

مهم‌ترین خصوصیت فیزیکی سنگ‌ها، یعنی نیروی به هم چسبی، حاصل نیروی جاذبه بین مولکول‌های یک جسم یا ماده است. به عبارت دیگر نیروی به هم چسبی یک نیروی درون زاست و در مقابل نیروهای خارجی جدا کننده مولکول‌ها، جسم را مقاوم می‌کند. ماتریکس‌های سنگ‌های مختلف عمدتاً با توجه به منشأ ساخت و فرآیندهای درگیر در شکل‌گیری و نیز عمر آن‌ها متفاوت می‌باشند. ماتریکس سنگ می‌تواند هم‌جنس یا غیر هم‌جنس دانه‌های سنگی باشد. در انواع سنگ‌ها عموماً ماتریکس سنگ‌ها شامل گونه‌های سیلیسی، آهکی و رسی می‌باشد. از آن جایی که درجه سیمانی شدن یک پارامتر کیفی است، ارتباط ریاضی خاص یا کمیت شناخته شده‌ای برای نشان دادن رابطه بین سیمانی شدن و سرعت برش پیشنهاد نشده است. آنچه مسلم است این است که استحکام و چسبندگی بین دانه‌ها هرچه بیشتر باشد، تشکیل و رشد ترک‌های جانبی و به دنبال آن ضخامت تراشه تحت نفوذ دانه الماسه کاهش یافته که در نتیجه آن سرعت برش کاهش می‌یابد. در مورد سنگ‌های آهکی که عمدتاً ساختاری لایه لایه دارند و استحکام چسبندگی بین لایه‌ها کمتر از خود لایه می‌باشد، براده‌های ثانویه به صورت دانه‌های بزرگ در جهت لایه‌ها تشکیل و جدا می‌شوند. بدیهی

است که با افزایش کیفیت سیمانی شدن و نیز افزایش مقاومت سیمان سنگ، قابلیت برش سنگ کاهش پیدا می کند (Ozcelik, 2007).

### ۲-۴-۱-۲-۳ چگالی

چگالی یک سنگ نسبت جرم مخصوص سنگ به جرم مخصوص آب یا نسبت وزن مخصوص سنگ به وزن مخصوص آب است. به طور معمول چگالی سنگ‌ها بین  $1/9$  تا  $3/5$  متغیر است. اما در موارد استثنایی سنگ‌ها به دلیل داشتن کانی‌های سنگین چگالی بیشتری دارند. از آنجائی که چگالی با مقاومت سنگ رابطه مستقیم دارد می‌توان گفت که با عملکرد ابزارهای برش در فرآیند برش رابطه عکس دارد. به طور کلی هرچه سنگ متراکم‌تر و چگال‌تر باشد، قابلیت برش کمتر خواهد بود (Ersoya, 2004).

### ۲-۴-۱-۴-۲ تخلخل

تخلخل عبارت است از تمام خلل و فرج‌های موجود در رسوب یا سنگ که به دو صورت کل یا مؤثر بیان می‌شود. تخلخل کل<sup>۱</sup> شامل تمام منافذ موجود در رسوب یا سنگ است که از نسبت حجم حفره‌های موجود در سنگ به حجم کل سنگ به دست می‌آید و آن را به درصد بیان می‌کنند. تخلخل مؤثر یا مفید<sup>۲</sup> شامل حفره‌های متصل به هم است که قادر است مایعات را از خود عبور دهد. این تخلخل از نسبت حجم حفره‌های متصل به هم به حجم کل سنگ به دست می‌آید. لازم به ذکر است که در سنگ حفره‌هایی وجود دارد که قادر نیستند مایعات را از خود عبور دهند. این حفره‌ها به نام تخلخل غیر مفید نامیده می‌شود و از تفاضل تخلخل مفید از تخلخل کل به دست می‌آید.

---

<sup>1</sup> Total Porosity

<sup>2</sup> Effective Porosity

بنابراین تخلخل عددی بین صفر تا یک است. همچنین با ضرب کردن این میزان در ۱۰۰ می‌توان آن را به صورت درصد نیز بیان کرد.

بعضی سنگ‌ها همچون ماسه‌سنگ و سنگ خارا به علت چینش مناسب ریزدانه‌ها تخلخل پایینی دارند. به این نوع سنگ‌ها به اصطلاح سنگ‌های به هم فشرده گویند. سنگ‌هایی مانند سنگ آهک نیز معمولاً دارای تخلخل بالا می‌باشند.

مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش تخلخل، قابلیت برش سنگ افزایش می‌یابد. قهرمان و همکارانش (۲۰۰۶)، با انجام آزمایش‌هایی به این نتیجه رسیدند که تخلخل و نرخ تولید رابطه مستقیم با یکدیگر دارند (Kahramana, 2006).

#### ۲-۴-۲ پارامترهای وابسته به ماشین

در بسیاری از موارد، فرآیند برش، عملکرد بهینه‌ای ندارد و نتایج نا رضایت‌بخشی نشان می‌دهد. در این موارد، طراحی‌های ماشین، ابزار و کل پروسه باید مدنظر قرار گیرد.

یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ در کنار مشخصات سنگ، مشخصات برش می‌باشد. مشخصات برش جزء پارامترهای قابل کنترل بوده که می‌تواند نقش بسیار مهمی را در افزایش راندمان عملکرد فرآیند برش ایفا کند. با تنظیم و انتخاب صحیح هر کدام از این پارامترها می‌توان به یک الگوی صحیح و مناسب اقتصادی از دیدگاه کاهش مصرف دیسک و انرژی و افزایش نرخ تولید دست پیدا کرد. به طور کلی سه عامل مهم یعنی اندازه و شکل دانه‌های الماس، تراکم الماس در زمینه و سختی زمینه فلزی تعیین کننده کارکرد این نوع ابزارها می‌باشند. اما برای یک ابزار مشخص عوامل دیگری مثل نوع برش، سرعت برش، عمق برش، سرعت پیشروی، دقت ماشین، خصوصیات سنگ تحت برش، مهارت اپراتور و... نیز تعیین کننده هستند. انتخاب بهینه این عوامل برای رسیدن به حداکثر بازده فرآیند مؤثر می‌باشند. بازده فرآیند نیز با توجه به سایش ابزار، انرژی

مصرفی و نرخ تولید سنجیده می‌شود. در این راستا شناخت تأثیر هر یک از این عوامل بر سایش ابزار، انرژی مصرفی و نرخ تولید در فرآیند برش سنگ لازم می‌باشد.

عملکرد برش و طول عمر دیسک‌های برش تحت تأثیر فاکتورهای زیر می‌باشد:

- الماس و خصوصیات زمینه (نوع الماس، تمرکز الماس، اندازه سنگ‌ریزه)؛
- مشخصات دیسک و روش ساخت سگمنت؛
- شرایط برش (سرعت محیطی، نرخ پیشروی، عمق برش)؛
- نوع برش (رو به بالا، رو به پایین).

#### ۲-۴-۱ الماس و خصوصیات زمینه

فرآیند برش سگمنت‌های الماسه را می‌توان به برش تعداد زیادی از دانه‌های الماس در حال برش شبیه‌سازی کرد. تأثیر دانه‌های الماس در فرآیند برش از دو منظر خصوصیات دانه الماس شامل چقرمگی، سختی، شکل و اندازه دانه و تراکم یا غلظت دانه‌های الماس قابل بررسی می‌باشد. هرچه عمق نفوذ دانه الماس کم باشد، براده‌های تشکیل شده عمدتاً از نوع ریز براده‌های اولیه می‌باشند. با افزایش عمق نفوذ، عمق و پهنای شیارها زیاد شده و به تبع آن، تغییر شکل پلاستیکی زیادتر می‌شود و از طرفی افزایش تنش‌های اعمال شده به سنگ باعث افزایش ترک‌های عرضی و گسترش آن‌ها تا سطح و تشکیل براده‌های ثانویه می‌شود. انتخاب نوع و اندازه دانه‌های الماسه در ابزارهای برش بر پایه میزان سختی و ساینده‌گی سنگ استوار است. بهترین دانه‌های الماس در فرآیند برش سنگ، کریستال‌های مکعب هشت وجهی می‌باشند که دارای حداکثر استحکام و مقاومت سایشی می‌باشند.

اگر استحکام دانه‌های الماس پایین باشد، به سادگی تحت تنش‌های وارده شکسته می‌شود که این امر موجب کندی دیسک و پدیده لیزشدگی<sup>۱</sup> در فرآیند برش می‌شود.

استفاده از دیسک‌های با الماس‌های دانه‌ریز تر و با تراکم بالا ممکن است منجر به افزایش طول عمر دیسک‌ها شود. با کاهش اندازه دانه‌های الماس، مقاومت ذرات افزایش می‌یابد. ارزوی در سال ۲۰۰۴، به بررسی رابطه‌ی بین اندازه دانه‌های الماس و مقاومت ضربه‌ای آن‌ها پرداخته و به این نتیجه رسیده است که با ریزش دانه‌ها، مقاومت آن‌ها افزایش می‌یابد و این امر منجر به افزایش طول عمر آن‌ها می‌شود (Ersoy,2003).

در مورد خصوصیات زمینه، زمینه فلزی، از ذرات پودری بسیار ریز ۵/۰ تا ۲ میکرونی تشکیل شده است. معمولاً این مواد، شامل کبالت، برنز، تنگستن کارباید، نیکل و قلع می‌باشند. عموماً، کارخانه‌های سازنده برای تولید ماده نهایی که شامل توزیع یکنواختی از اجزای تشکیل دهنده باشد، از لیزاننده استفاده می‌کنند که الماس را به خوبی با مواد زمینه ترکیب می‌کند.

به طور کلی برای سنگ‌های سخت از دانه‌های الماس ریزتر به دلیل افزایش مقاومت ضربه‌ای الماس با تراکم بالاتر و برای سنگ‌های نرم‌تر به نسبت از دانه‌های الماس درشت‌تر و با تراکم کمتر استفاده می‌شود (Ersoy,2003).

## ۲-۲-۴-۲ مشخصات دیسک و روش ساخت سگمنت

**مشخصات دیسک:** دیسک‌های برش دهنده الماسه شامل یک بدنه دیسکی شکل و سگمنت‌های الماسه در پیرامون آن می‌باشند. 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

---

<sup>1</sup>-Glazing

برداشت تراشه می‌شوند که در مجموع عملکرد دو نیرو موجب برش سنگ می‌شود. تنش‌های موجود در بدنه دیسک به واسطه این نیروها به صورت تنش‌های فشاری و ممان خمشی ظاهر می‌شوند که در صورت افزایش این نیروها از حد مجاز باعث ایجاد کمانش و انحراف دیسک یا شکست ابزار می‌شوند. یکی از مشخصه‌های مهم ابزارهای برش دهنده دیسکی، شعاع عملکرد دیسک می‌باشد. این شعاع معرف حداکثر عمق برش در فرآیند برش سنگ می‌باشد. شکل ۲-۴ حداکثر عمق برش یک دیسک با توجه به شعاع دیسک و شعاع فلانژ دیسک را نشان می‌دهد. شعاع عملکرد دیسک از رابطه ۲-۱ محاسبه می‌شود:

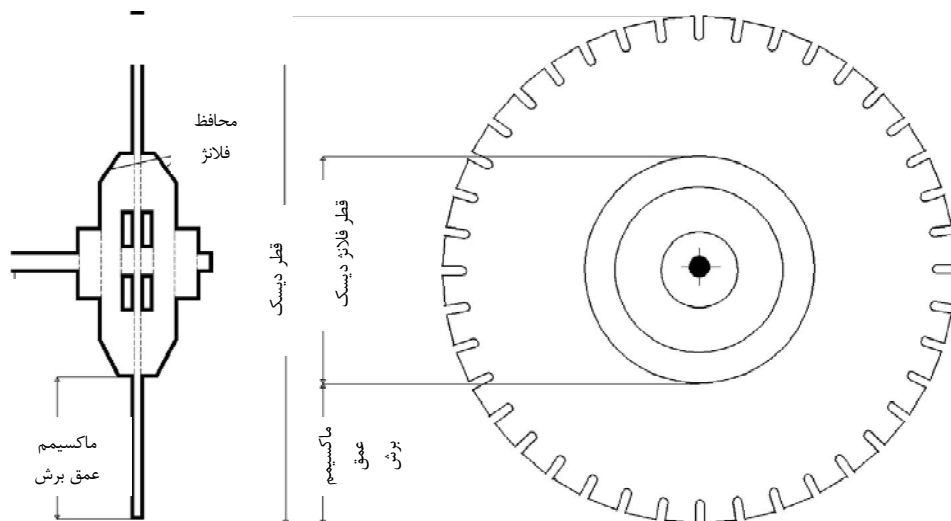
$$d_{\max} = \frac{D_{\text{saw}} - D_{\text{flange}}}{2} \quad \text{رابطه ۲-۱}$$

در این رابطه:

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

$D_{\text{saw}}$ : قطر دیسک

$D_{\text{flange}}$ : قطر فلانژ دیسک



شکل ۲-۴: حداکثر عمق برش یک دیسک با توجه به شعاع دیسک و شعاع فلانژ دیسک (Karakus, 2006).



همانطور که ذکر شد شعاع عملکرد دیسک یکی از پارامترهای عملیاتی مهم در فرآیند برش سنگ می‌باشد. قهرمان و همکارانش در بررسی‌های خود در زمینه پیش‌بینی نرخ تولید در مقیاس صنعتی، قطر دیسک را به عنوان یکی از پارامترهای ابزاری در پیش‌بینی مقدار نرخ برش در معادلات خود استفاده کردند. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که با افزایش مقدار قطر دیسک مقدار نرخ تولید کاهش می‌یابد.

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

### ۲-۴-۲-۳ شرایط برش

به طور کلی پارامترهای عملیاتی برش شامل نرخ پیشروی<sup>۱</sup> قطعه کار، سرعت محیطی<sup>۲</sup> و عمق برش<sup>۳</sup> می‌باشند. سرعت محیطی به اضافه نیروهای وارده بر دیسک تعیین کننده نرخ پیشروی یا سرعت حرکت قطعه کار می‌باشند. بهترین عملکرد دیسک زمانی است که از یک نرخ پیشروی صحیح و مناسب استفاده شود. استفاده از نرخ‌های پیشروی بالا سبب سایش زودرس سگمنت‌ها و پایین آمدن راندمان برش می‌شود. سرعت محیطی معرف سرعت چرخش دیسک در زمان برش می‌باشد. افزایش سرعت محیطی موجب افزایش سایش، کاهش عملکرد بهینه و از بین رفتن سگمنت (به واسطه بیرون آمدن دانه‌های الماسه) در مدت زمان کوتاه‌تر از عمر مفید خود می‌شود. عمق برش معرف میزان نفوذ دیسک در داخل سنگ در طول فرآیند برش می‌باشد (Ersoy,2003).

---

<sup>1</sup> Feed rate

<sup>2</sup> Peripheral speed

<sup>3</sup> Depth of cut

## ۲-۴-۲-۳-۱ سرعت محیطی

انگلز در سال ۲۰۰۳ به مطالعه روی مشخصات ماشین پرداخت. یکی از نتایجی که به دست آورده است نشان‌دهنده رابطه معکوس بین سرعت محیطی و ضخامت تراشه می‌باشد. همچنین از نتایج این مطالعات این گونه استنباط می‌شود که رابطه‌ی مشخصی بین سرعت محیطی و نرخ برش وجود ندارد (Engels, 2003). همچنین ارزوی در مطالعاتش در سال ۲۰۰۴ روی سنگ‌های ماربل، به این نتیجه رسیده است که با افزایش سرعت محیطی، انرژی ویژه برش کاهش می‌یابد (Engels, 2003). با افزایش سرعت محیطی، مقدار نیروهای برش و میزان سنگ برش خورده در واحد زمان به ازاء هر سگمنت کاهش می‌یابد (Ersoy, 2003).

## ۲-۴-۲-۳-۲ نرخ پیشروی

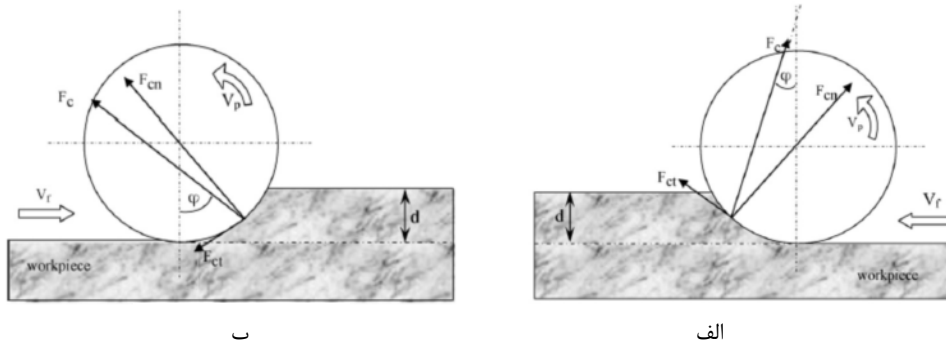
انگلز در سال ۲۰۰۳ بین نرخ پیشروی و ضخامت تراشه و همچنین بین نرخ پیشروی و نرخ برش روابط مستقیمی به دست آورده است (Engels, 2003). همچنین نتایج حاصل از بررسی‌های به عمل آمده نشان داده است که در سرعت محیطی ثابت، با افزایش نرخ پیشروی، نیروی برش و توان مصرفی دستگاه افزایش یافته ولی در کل این افزایش نرخ پیشروی موجب کاهش مقدار انرژی ویژه برش می‌شود. البته این مقدار کاهش تا حد مشخصی ادامه داشته و بعد از آن به مقدار ثابت میل می‌کند (Ersoy, 2003).

## ۲-۴-۲-۳-۳ عمق برش

نتایج مطالعات ارزوی و همکارانش نشان می‌دهد که با افزایش عمق برش، میزان انرژی ویژه کاهش می‌یابد (Ersoy, 2003). همچنین ارزوی با مطالعه روی سنگ‌های گرانیتی به این نتیجه رسیده است که با افزایش عمق برش، میزان انرژی برش افزایش می‌یابد (Ersoy, 2004).

### ۴-۲-۴-۲ نوع برش

یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ حالت برش می‌باشد. حالت‌های مختلف برش را می‌توان به دو حالت برش رو به پائین<sup>۱</sup> و حالت برش رو به بالا<sup>۲</sup> دسته‌بندی کرد. شکل ۵-۲ حالت‌های مختلف برش را به همراه نیروهای برشی وارده بر دیسک را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵-۲ جهت و زوایای نیروهای برشی در دو حالت با یکدیگر متفاوت بوده که این امر می‌تواند در فرآیند برش نقش مهمی ایفا کند. برای مثال گرایش و جهت نیروهای برشی نسبت به چهار چوب ماشین (بستر حامل تیغه) در برش رو به پائین و رو به بالا متفاوت هستند.



شکل ۵-۲: نوع حرکت ابزار در انواع برش، الف: برش رو به بالا، ب: برش رو به پایین (Buyuksagis, 2007)

در هر یک از این دو حالت زمانی که نیروی برشی برآیند به مقدار زیادی از نقطه اثر تکیه‌گاهی منحرف شود، شرایط برشی ناپایدار ظاهر شده که موجب بروز لرزش‌های شدید در سیستم می‌شود. با فرض این که بستر تکیه‌گاهی در بالای اسپیندل قرار داشته باشد، انحراف نیروی برشی  $F_c$  از تکیه‌گاه در حالت برش رو به بالا بیشتر می‌باشد و لذا پایداری سیستم در این حالت کاهش می‌یابد. ثانیاً شرایط حمله و نفوذ دانه الماس وقتی که حالت برشی دیسک عوض می‌شود، تغییر می‌کند. در حالت برش رو به پائین یک دانه الماس در لحظه اول تماس با حداکثر عمق برش به ماده سنگ حمله

<sup>1</sup> Down cutting

<sup>2</sup> Up cutting

می‌کند به عبارت دیگر در اولین لحظه برش دانه الماس بیشترین عمق نفوذ خود را دارد. بعد از آن به موازات حرکت دانه الماس، رفته رفته از عمق برش دانه کاسته شده و در نهایت تماس آن با سنگ قطع می‌شود. در مقابل در برش رو به بالا دانه‌های الماس در ابتدا به سطح کار مماس می‌شوند و به تدریج بر عمق نفوذ آن‌ها افزوده می‌شود و در لحظه خارج شدن از شیار برشی، عمق برش دانه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در فرآیند برش رو به پائین، ضربه‌های مکانیکی ناگهانی شدید به دانه الماس وارد می‌شود و بسته به نوع دانه‌ها و باند فلزی باعث شکست یا کنده شدن دانه‌ها می‌شود. بنابراین اگر پیوسته از روش رو به پائین استفاده شود برای بهبود عمر ابزار بهتر است 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 فرآیند برش رو به بالا ضخامت براده 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 منجر به تخت و هموار شدن آن‌ها می‌شود.

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که:

۱. توان مورد نیاز در حالت برش رو به بالا در مقایسه با برش رو به پائین وقتی عمق برش کمتر از ۲۰-۲۵ میلی‌متر باشد کمتر می‌باشد. اما زمانی که عمق برش بیشتر می‌شود توان مورد نیاز در حالت برش رو به پائین کمتر می‌شود (Karakus, 2006).

۲. مقدار نرخ سایش و مقادیر انرژی ویژه در حالت برش رو به بالا کمتر از روش رو به پائین می‌باشد (Buyuksagis, 2007).

همچنین با توجه به مطالعات انجام شده می‌توان گفت که نیروهای برشی معمولاً در حالت برش رو به پائین کمتر از حالت برش رو به بالا می‌باشند. دلیل این امر را می‌توان مربوط به مکانیزم

تشکیل براده در دو حالت دانست. در حالت برش رو به پائین به دلیل وجود نیروهای ضربه‌ای مکرر و عمق برش زیاد در ابتدای برش رشد ترک‌ها و شکست ترد در براده‌ها بیشتر از حالت برش رو به بالا می‌باشد. همین امر موجب تفاوت نیروهای برشی در دو حالت می‌شود.

---

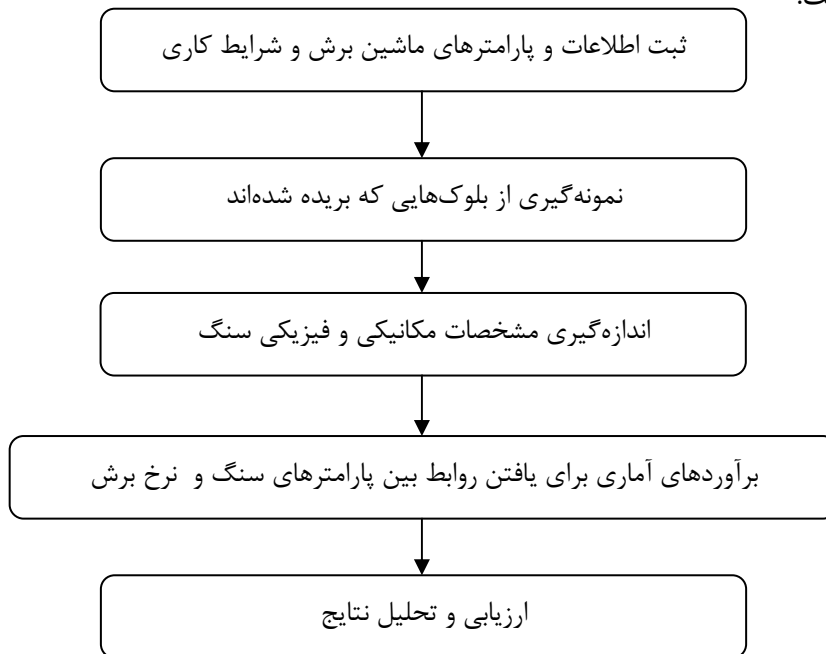
---

## فصل سوم

# مطالعات آزمایشگاهی

### ۳ فصل سوم: مطالعات آزمایشگاهی

در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها بر روی قابلیت برش، مراحل کار مطابق شکل ۱-۳ انجام شده است. مطالعات روی دستگاه‌های برش و اندازه‌گیری نرخ برش و سرعت برش در کارخانه‌های مربوط به هر یک از معادن انجام شده است. آزمایش‌های مکانیک سنگی در آزمایشگاه مکانیک سنگ انجام و نتایج آن‌ها محاسبه شده است. مطالعات مینرالوژیکی و بافتی نیز با تهیه مقطع نازک و مطالعه روی آن‌ها صورت گرفته است. در نهایت تفسیر نتایج به دست آمده انجام شده است.

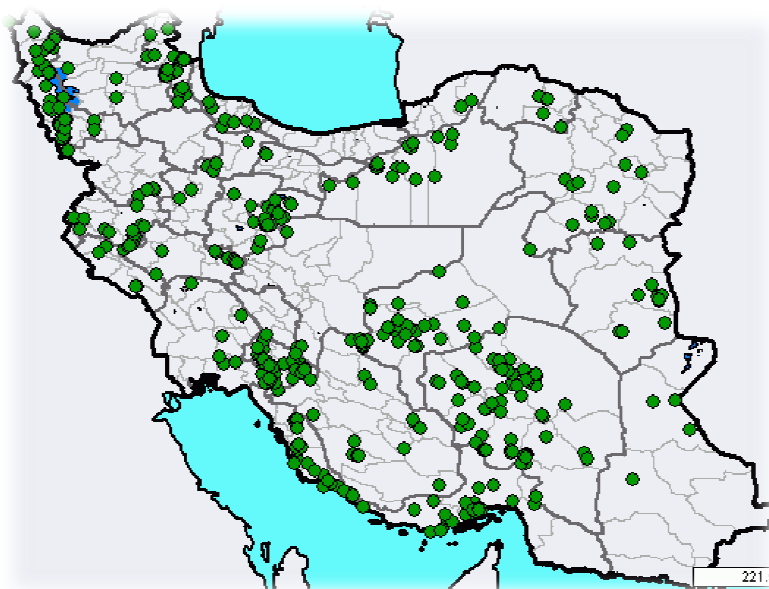


شکل ۱-۳: فلوچارت تحقیق

### ۱-۳ جمع آوری نمونه از معدن

به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی، از نه معدن، نه بلوک سنگی جمع آوری شده است. سنگ‌های مورد مطالعه از نوع مرمر و تراورتن می‌باشند. در انتخاب معادن، سعی شده است که از مناطق مختلف ایران نمونه‌برداری انجام شود و هدف این بوده است که سنگ‌های ساختمانی مناطق مختلف ایران با مشخصات متفاوت مورد بررسی قرار گیرد. در شکل ۲-۳، پراکندگی معادن سنگ ساختمانی در ایران و در شکل ۳-۳، نواحی مورد مطالعه نشان داده شده‌اند. در جدول ۱-۳، مشخصات هر یک از نمونه‌ها، معادن و مکان آن‌ها مشاهده می‌شود.

پس از برداشت نمونه‌ها از معادن و انتقال آن‌ها به آزمایشگاه، کار آماده‌سازی نمونه‌ها با توجه به نوع آزمایش پیش رو آغاز می‌شود. در ادامه آزمایش‌های انجام‌شده به اختصار آمده است.



شکل ۲-۳: نقشه پراکندگی معادن سنگ ساختمانی ایران





شکل ۳-۳: مناطق مورد مطالعه در این تحقیق

جدول ۳-۱: مشخصات معادن مورد مطالعه

موقعیت جغرافیایی	نوع کانه یا کانی‌های اصلی	نوع معدن	نام معدن	کد نمونه
استان قم، بخش ایزدشهر	کربنات کلسیم	مرمریت	کوه سفید	مرمریت کوه سفید
استان مرکزی، شهرستان بندزرک، بخش جاسک	کربنات کلسیم	مرمریت	هستی-جان	مرمریت هستی جان
استان اصفهان، بخش بیابانک	کربنات کلسیم	مرمریت	صلصالی	مرمریت صلصالی
استان اصفهان، شهرستان بایک، شهر بالاچام، بخش بیابانک	کربنات کلسیم	مرمریت	آبشار سمیرم	مرمریت سمیرم
استان مرکزی، شهرستان کریان، بخش فاریاب	کربنات کلسیم	تراورتن سفید	عباس آباد	تراورتن عباس آباد
استان اصفهان، شهر کاشان	کربنات کلسیم	تراورتن	خوره کاشان	تراورتن خوره کاشان
استان آذربایجان غربی، شهرستان تکاب	کربنات کلسیم	تراورتن	تکاب	تراورتن سیلور تکاب
استان آذربایجان غربی، شهرستان ماکو	کربنات کلسیم	تراورتن پرتقالی	ماکو	تراورتن پرتقالی ماکو
استان مرکزی، شهرستان کریان، بخش فاریاب	کربنات کلسیم	تراورتن سفید	حاجی آباد	تراورتن حاجی آباد

### ۲-۳ آزمایش‌های انجام شده

خصوصیات مکانیکی و فیزیکی سنگ، جزء دسته پارامترهای بسیار مهم و تأثیرگذار در قابلیت برش سنگ می‌باشند. برای بررسی تأثیر این پارامترها روی قابلیت برش سنگ، آزمایش‌های مختلفی صورت گرفته است.

### ۱-۲-۳ آزمایش‌های مکانیک سنگی

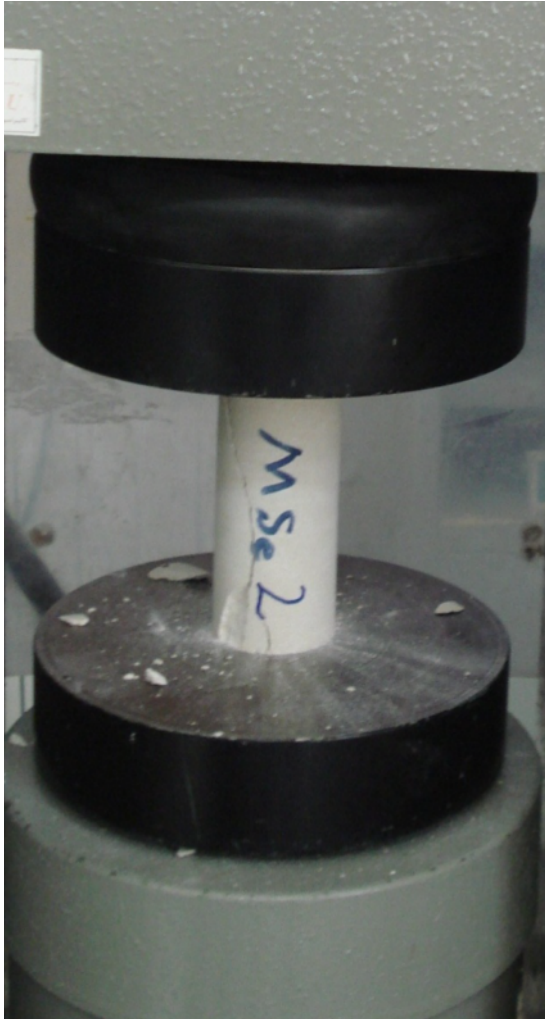
آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS): آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره طبق استاندارد ISRM، روی نمونه‌هایی با قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۲/۵ تا ۳ انجام شده است. در فرآیند آماده‌سازی این نمونه‌ها، ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای از سنگ گرفته شده و سپس برای دستیابی به سطحی صاف از نمونه‌ها، سر و ته نمونه‌ها بریده و ساب زده شده است. با این کار فرآیند بارگذاری در دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوره به طور یکنواخت انجام می‌شود. این آزمایش‌ها با نرخ بارگذاری ۰/۵ تا ۱ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شده است.

شکل ۳-۴، یکی از نمونه‌های مورد مطالعه را قبل و بعد از شکست در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره نشان می‌دهد. در نهایت و پس از قرائت عدد مربوط به آزمایش، مقاومت فشاری تک‌محوره با استفاده از رابطه زیر به دست آمده است.

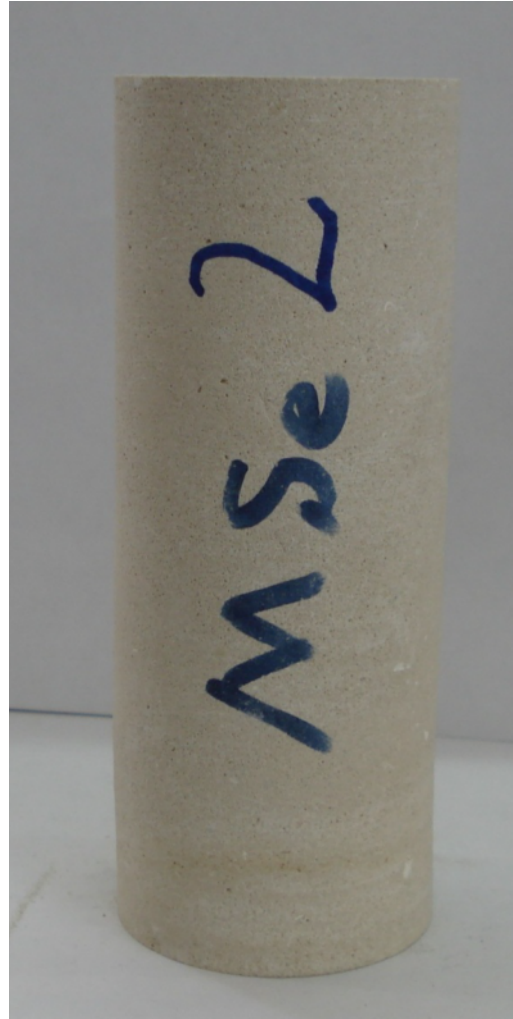
$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad \text{رابطه ۳-۱}$$

که در آن  $F$  نیرویی است که در لحظه شکست سنگ به آن وارد می‌شود و  $A$  مساحت سطح مقطع سنگ نمونه‌های استوانه‌ای می‌باشد.

برای هر نوع سنگ آزمایش روی دو نمونه انجام شده و در نهایت میانگین مقادیر به عنوان مقاومت فشاری سنگ استفاده شده است. در جدول ۲-۳ نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره برای معادن مورد مطالعه درج شده است.



ب- نمونه پس از آزمایش



الف- نمونه قبل از آزمایش

شکل ۳-۴: نمونه مرمریت سمیرم تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره

جدول ۳-۲: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره برای معادن مورد مطالعه

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره						
UCS (MPa)	مقاومت (MPa)	نیرو (KN)	طول / قطر	طول (mm)	قطر (mm)	نام نمونه
۱۰۹/۱۶	۱۰۶/۹۸	۲۴۵	۲/۵۷	۱۳۸/۸۴	۵۴	۱ مرمیت کوه-
	۱۱۱/۳۴	۲۵۵	۲/۵۱	۱۳۵/۷۵	۵۴	۲ سفید
۱۰۱/۵۲	۹۶/۰۶	۲۲۰	۲/۵۲	۱۳۶/۲۵	۵۴	۱ مرمیت
	۱۰۶/۹۸	۲۴۵	۲/۵۳	۱۳۶/۸۴	۵۴	۲ هستی‌جان
۵۷/۸۵	۶۱/۱۳	۱۴۰	۲/۵۲	۱۳۶/۲	۵۴	۱ مرمیت
	۵۴/۵۸	۱۲۵	۲/۵۴	۱۳۷/۴	۵۴	۲ صلصالی
۵۳/۴۹	۴۸/۰۳	۱۱۰	۲/۶۳	۱۴۱/۷۹	۵۴	۱ مرمیت
	۵۸/۹۵	۱۳۵	۲/۵۷	۱۳۸/۸۷	۵۴	۲ سمیرم
۱۶/۳۷	۱۵/۲۸	۳۵	۲/۵۷	۱۳۸/۹۵	۵۴	۱ تراورتن
	۱۷/۴۷	۴۰	۲/۶۲	۱۴۱/۵	۵۴	۲ عباس‌آباد
۸۹/۵۱	۹۸/۲۴	۲۲۵	۲/۵۹	۱۳۹/۹۷	۵۴	۱ تراورتن
	۸۰/۷۸	۱۸۵	۲/۵۹	۱۳۹/۶۸	۵۴	۲ خورهه
۵۲/۴۰	۴۸/۰۳	۱۱۰	۲/۵	۱۳۴/۸۴	۵۴	۱ تراورتن
	۵۶/۷۶	۱۳۰	۲/۵۶	۱۳۸/۰۷	۵۴	۲ سیلور تکاب
۷۴/۲۳	۶۵/۵	۱۵۰	۲/۵۸	۱۳۹/۴	۵۴	۱ تراورتن
	۸۲/۹۶	۱۹۰	۲/۵۷	۱۳۸/۷	۵۴	۲ پرتقالی ماکو
۵۶/۷۶	۴۸/۰۳	۱۱۰	۲/۶۳	۱۴۲/۲۴	۵۴	۱ تراورتن
	۶۵/۵	۱۵۰	۲/۵۶	۱۳۸/۴	۵۴	۲ حاجی‌آباد

آزمایش مقاومت کششی برزیلی (BTS): آزمایش مقاومت کششی روی نمونه‌هایی به قطر

۵۴ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۰/۵ تا ۰/۷۵ طبق استاندارد ASTM D ۳۹۶۷ انجام شده است. در

شکل ۳-۵ یکی از نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش نشان داده شده است.

بارگذاری در این آزمایش به طور مداوم و با نرخ ۰/۷ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شده است. پس از قرائت

عدد، مقاومت کششی از رابطه زیر به دست آمده است:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DL}$$

رابطه ۳-۲

که در آن نیروی  $F$  است که در لحظه شکست سنگ به آن وارد می‌شود؛  $D$  قطر نمونه و  $L$  طول نمونه می‌باشد.



ب- نمونه پس از آزمایش

الف- نمونه قبل از آزمایش

شکل ۳-۵: نمونه تحت آزمایش مقاومت کششی

این آزمایش نیز روی دست کم دو نمونه انجام شده و میانگین آن‌ها به عنوان مقاومت کششی نمونه محاسبه شده است. در جدول ۳-۳ نتایج آزمایش مقاومت کششی برای معادن مورد مطالعه درج شده است.

جدول ۳-۳: نتایج آزمایش مقاومت کششی برای معادن مورد مطالعه

تست برزیلی							
BTS (MPa)	مقاومت (MPa)	نیرو (KN)	طول قطر	طول (mm)	قطر (mm)	نام نمونه	
۶/۵۸	۵/۰۷	۱۵	۰/۶۵	۳۴/۹	۵۴	۱	مرمریت کوه-
	۸/۱	۲۵	۰/۶۷	۳۶/۳۸	۵۴	۲	سفید
۴/۵۸	۲/۷۳	۸	۰/۶۴	۳۴/۵	۵۴	۱	مرمریت
	۶/۴۲	۲۰	۰/۶۸	۳۶/۷	۵۳/۹	۲	هستی جان
۵/۳۸	۵/۶۱	۱۸	۰/۷	۳۷/۸۶	۵۳/۹	۱	مرمریت
	۵/۱۵	۱۵	۰/۶۴	۳۴/۴۳	۵۴	۲	صلصالی
۵/۴۷	۶/۳۹	۱۵	۰/۵۱	۲۷/۷۱	۵۴	۱	مرمریت
	۴/۵۴	۱۵	۰/۷۲	۳۸/۹۱	۵۴	۲	سمیرم
۵/۱۱	۴/۷۴	۱۵	۰/۶۹	۳۷/۳	۵۴/۰۵	۱	تراورتن
	۵/۴۹	۱۵	۰/۶	۲۳/۳	۵۳/۹	۲	عباس آباد
۵/۱۱	۳/۵	۱۰	۰/۶۲	۳۳/۷	۵۴	۱	تراورتن
	۶/۷۲	۲۰	۰/۶۵	۳۵/۰۴	۵۶/۰۶	۲	خوره
۴/۲	۳/۱۴	۱۰	۰/۶۹	۳۷/۵	۵۴	۱	تراورتن
	۵/۲۶	۱۷	۰/۷۱	۳۸/۱	۵۴	۲	سیلور تکاب
۳/۹۳	۴/۷۱	۱۵	۰/۶۹	۳۷/۵۵	۵۴/۰۵	۱	تراورتن
	۳/۱۵	۱۰	۰/۶۹	۳۷/۴	۵۴/۰۵	۲	پرتقالی ماکو
۷/۰۸	۷/۳۸	۲۵	۰/۷۴	۳۹/۸۵	۵۴/۰۹	۱	تراورتن
	۶/۷۸	۲۲	۰/۷۱	۳۸/۲۵	۵۴	۲	حاجی آباد

آزمایش سختی چکش اشمیت: آزمایش چکش اشمیت روی بلوک‌هایی به ابعاد ۴۰ در ۴۰ در ۳۰ سانتی‌متر انجام شده است. اندازه‌گیری‌ها روی سطحی از بلوک انجام شده که صاف بوده و فاقد هرگونه ناپیوستگی و هوازدگی می‌باشند. این آزمایش طبق استاندارد ISRM انجام شده است. طبق این استاندارد، ۲۰ عدد توسط چکش اشمیت خوانده می‌شود و در نهایت میانگین ده عدد بزرگتر به عنوان عدد چکش اشمیت محاسبه می‌شود. در جدول‌های ۳-۴ و ۳-۵ نتایج آزمایش سختی چکش اشمیت برای معادن مورد مطالعه درج شده است.

جدول ۳-۴: اعداد قرائت شده توسط چکش اشمیت برای معادن مورد مطالعه

آزمایش سختی چکش اشمیت								
تراورتن کوه- سفید	مرمریت هستی- جان	مرمریت صلصالی	مرمریت سمیرم	تراورتن عباس- آباد	تراورتن خوره	تراورتن سیلور تکاب	تراورتن پرتقالی ماکو	تراورتن حاجی- آباد
۲۰	۲۹	۴۸	۲۰	۲۸	۴۲	۴۴	۲۰	۲۲
۲۴	۳۴	۴۸	۲۰	۴۰	۵۰	۴۴	۲۲	۲۲
۲۴	۳۶	۴۸	۲۲	۴۲	۵۰	۴۸	۲۹	۲۶
۲۴	۳۸	۵۲	۲۲	۴۲	۵۰	۴۸	۳۰	۲۸
۲۶	۴۰	۵۲	۲۴	۴۴	۵۲	۴۹	۳۰	۳۲
۲۸	۴۲	۵۴	۲۴	۴۴	۵۴	۴۹	۳۰	۳۴
۲۸	۴۲	۵۴	۲۴	۴۴	۵۴	۴۹	۳۱	۳۸
۳۲	۴۳	۵۴	۲۵	۴۴	۵۵	۵۰	۳۲	۳۸
۳۴	۴۴	۵۶	۲۶	۴۶	۵۶	۵۰	۳۶	۳۸
۴۲	۴۴	۵۶	۲۶	۴۶	۵۶	۵۰	۳۶	۴۰
۴۴	۴۸	۵۶	۲۶	۴۸	۵۶	۵۰	۳۸	۴۲
۴۴	۵۰	۵۷	۲۶	۴۸	۵۶	۵۰	۴۰	۴۲
۴۸	۵۴	۵۸	۲۶	۴۸	۵۶	۵۱	۴۰	۴۲
۵۰	۵۴	۵۸	۲۸	۴۸	۵۷	۵۲	۴۰	۴۴
۵۰	۵۴	۵۸	۲۸	۴۸	۵۸	۵۴	۴۴	۴۴
۵۴	۶۰	۵۸	۲۸	۴۸	۵۸	۵۴	۴۵	۴۴
۵۴	۶۰	۵۸	۲۸	۴۸	۵۸	۵۴	۴۶	۴۶
۵۴	۶۲	۵۸	۳۰	۵۰	۵۸	۵۶	۴۶	۴۶
۵۸	۶۲	۶۰	۳۰	۵۲	۵۸	۵۸	۴۶	۵۰
۵۸	۶۴	۶۰	۳۰	۵۲	۶۰	۵۸	۴۸	۵۰

جدول ۳-۵: نتایج آزمایش سختی چکش اشمیت برای معادن مورد مطالعه

آزمایش سختی چکش اشمیت								
تراورتن کوه- سفید	مرمریت هستی- جان	مرمریت صلصالی	مرمریت سمیرم	تراورتن عباس- آباد	تراورتن خوره	تراورتن سیلور تکاب	تراورتن پرتقالی ماکو	تراورتن حاجی- آباد
۵۱/۴	۵۷/۲	۵۸/۱	۲۸	۴۹	۵۷/۵	۵۳/۷	۴۳/۳	۴۵

**آزمایش لوس آنجلس:** برای انجام آزمایش، به ۵۰۰۰ گرم از هر یک از نمونه‌ها نیاز است. با توجه به این که دانه‌بندی انتخابی، نوع B استاندارد ISRM می‌باشد، نمونه‌ی مناسب با توجه به الک-های مربوطه آماده می‌شود و نمونه مورد نظر به همراه ۱۱ عدد گوی فلزی در دستگاه قرار می‌گیرد تا ۵۰۰ دور بچرخد. برای این کار سرعت دستگاه روی ۱۷ دور بر دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه تنظیم می‌شود. سپس نمونه‌ها به طور کامل از دستگاه تخلیه و با الک شماره ۱۲ الک می‌شوند. مواد مانده روی الک شماره ۱۲ با آب شسته شده و در کوره قرار می‌گیرد تا به طور کامل خشک شود. سپس نمونه وزن می‌شود. مواد مانده روی الک، در واقع نشان‌دهنده موادی است که پس از سایش مواد در دستگاه باقی مانده‌اند. در نهایت عدد مربوط به افت لوس آنجلس از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{رابطه ۳-۳} \quad 100 (\%) \times \frac{\text{وزن نهایی نمونه} - \text{وزن اولیه نمونه}}{\text{وزن اولیه نمونه}} = \text{افت لوس آنجلس}$$

در شکل ۳-۶ مراحل کار در این آزمایش مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۶: مراحل کار در انجام آزمایش لوس آنجلس



در جدول ۳-۶ نتایج آزمایش لوس آنجلس برای معادن مورد مطالعه درج شده است.

جدول ۳-۶: نتایج آزمایش لوس آنجلس برای معادن مورد مطالعه

تست سایش لوس آنجلس			
نام نمونه	وزن خشک نمونه قبل از آزمایش (gr)	وزن خشک نمونه بعد از آزمایش (gr)	درصد افت وزنی در اثر سایش
مرمریت کوه سفید	۵۰۰۴/۳	۳۶۸۰	۲۶/۴۶
مرمریت هستی جان	۵۰۰۴/۶	۳۶۱۷	۲۷/۷۳
مرمریت صلصالی	۵۰۰۴/۸	۳۷۴۵	۲۵/۱۷
مرمریت سمیرم	۵۰۰۳/۷	۳۰۹۶	۳۸/۱۳
تراورتن عباس آباد	۵۰۰۵/۸	۳۴۵۸	۳۰/۹۲
تراورتن خورهه	۵۰۰۰	۳۷۰۱	۲۵/۹۸
تراورتن سیلور تکاب	۵۰۱۵/۵	۳۵۸۷	۲۸/۴۸
تراورتن پرتقالی ماکو	۵۰۰۷/۲۴	۳۵۷۰	۲۸/۷
تراورتن حاجی آباد	۵۰۰۵/۹	۳۷۳۸	۲۵/۳۳

آزمایش تعیین چگالی خشک: برای تعیین این پارامتر نمونه‌هایی به وزن ۵۰ تا ۱۰۰ گرم

آماده شده است. این وزن به عنوان وزن خشک نمونه می‌باشد. سپس نمونه‌ها به مدت ۸ تا ۱۰ ساعت در آب قرار داده شده است تا به طور کامل اشباع شود. سطح نمونه‌ها پس از بیرون کشیدن از آب بلافاصله با دستمال خشک شده و وزن آن‌ها اندازه‌گیری شده است. این وزن به عنوان وزن اشباع در نظر گرفته می‌شود. وزن نمونه‌ها در حالت اشباع، در آب نیز اندازه گرفته شده است.

در نهایت با استفاده از این سه عدد و روابط زیر چگالی خشک نمونه محاسبه شده است:

$$\rho_{\text{خشک}} = \frac{M_s}{V_T} \quad \text{رابطه ۳-۴}$$

$$V_T = M_{\text{sat}} - M_{\text{sub}} \quad \text{رابطه ۳-۵}$$

که در این روابط  $M_s$  وزن خشک نمونه؛  $M_{\text{sat}}$  وزن اشباع نمونه؛  $M_{\text{sub}}$  وزن نمونه در آب و  $V_T$

حجم کل نمونه می‌باشد.

در جدول ۷-۳ نتایج آزمایش چگالی برای معادن مورد مطالعه درج شده است.

جدول ۷-۳: نتایج آزمایش چگالی برای معادن مورد مطالعه

تست چگالی						
میانگین چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	وزن نمونه در آب (gr)	وزن اشباع (gr)	وزن خشک (gr)	نام نمونه	
۲/۷۸	۲/۷۹	۳۵/۸	۵۶	۵۵/۸۲	۱	مرمریت کوه- سفید
	۲/۷۸	۴۲/۳۴	۶۶/۴۳	۶۶/۱۷	۲	
۲/۷۹	۲/۷۶	۵۳/۸۷	۸۴/۸۱	۸۸/۴۴	۱	مرمریت هستی جان
	۲/۸۲	۳۴/۶۳	۵۳/۷۸	۵۳/۶۱	۲	
۲/۷۷	۲/۷۵	۵۶/۱	۸۸/۴۲	۸۸/۱	۱	مرمریت صلصالی
	۲/۷۸	۳۶/۲۶	۵۶/۸۷	۵۶/۶۳	۲	
۲/۷۶	۲/۷۶	۴۰/۹۳	۷۰/۳۹	۶۴/۱۸	۱	مرمریت سمیرم
	۲/۷۵	۳۵/۷۶	۶۱/۵۵	۵۶/۱۶	۲	
۲/۶۳	۲/۶۸	۵۱/۷۲	۸۴/۴۶	۸۲/۵۵	۱	تراورتن عباس آباد
	۲/۵۹	۵۹/۳۷	۹۸/۳	۹۶/۶۶	۲	
۲/۶۵	۲/۶۱	۶۲/۰۲	۱۰۱/۴۳	۱۰۰/۵۱	۱	تراورتن خورهه
	۲/۶۹	۳۶/۱۵	۵۸/۰۹	۵۷/۶	۲	
۲/۶۵	۲/۶۷	۳۷/۱۶	۶۰/۵۹	۵۹/۳۸	۱	تراورتن سیلور تکاب
	۲/۶۸	۳۳/۲	۵۴/۱	۵۲/۹۶	۲	
	۲/۵۹	۵۲/۳۵	۸۸/۱۳	۸۵/۳۱	۳	
۲/۷	۲/۷۱	۵۳/۰۳	۸۵/۵	۸۴/۰۹	۱	تراورتن یرتقالی ماکو
	۲/۶۹	۵۴/۶۵	۸۸/۰۷	۸۷	۲	
۲/۶۱	۲/۶	۵۶/۹۲	۹۴/۹۱	۹۲/۵۸	۱	تراورتن حاجی آباد
	۲/۶۳	۴۲/۶۵	۶۹/۹	۶۸/۷۵	۲	
	۲/۶۱	۴۱/۳۷	۶۸/۲۵	۶۷/۰۶	۳	

تست تخلخل: با استفاده از روابط زیر این پارامتر محاسبه می‌شود:

$$v = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_{water}} \quad \text{رابطه ۶-۳}$$

$$n = \frac{v}{V_T} \quad \text{رابطه ۷-۳}$$

که در این روابط  $v$  حجم خلل و فرج سنگ می‌باشد.

در جدول ۳-۸ نتایج آزمایش تخلخل برای معادن مورد مطالعه درج شده است.

جدول ۳-۸: نتایج آزمایش تخلخل برای معادن مورد مطالعه

تست تخلخل					
نام نمونه	وزن خشک (gr)	وزن اشباع (gr)	وزن نمونه در آب (gr)	تخلخل (%)	میانگین تخلخل (%)
مرمریت کوه- سفید	۱	۵۵/۸۲	۵۶	۳۵/۸	۰/۹۲
	۲	۶۶/۱۷	۶۶/۴۳	۴۲/۳۴	۱/۰۷
مرمریت هستی جان	۱	۸۸/۴۴	۸۴/۸۱	۵۳/۸۷	۱/۱۹
	۲	۵۳/۶۱	۵۳/۷۸	۳۴/۶۳	۰/۹۲
مرمریت صلصالی	۱	۸۸/۱	۸۸/۴۲	۵۶/۱	۰/۹۹
	۲	۵۶/۶۳	۵۶/۸۷	۳۶/۲۶	۱/۱۶
مرمریت سمیرم	۱	۶۴/۱۸	۷۰/۳۹	۴۰/۹۳	۲۶/۷۲
	۲	۵۶/۱۶	۶۱/۵۵	۳۵/۷۶	۲۶/۴۲
تراورتن عباس آباد	۱	۸۲/۵۵	۸۴/۴۶	۵۱/۷۲	۶/۱۹
	۲	۹۶/۶۶	۹۸/۳	۵۹/۳۷	۴/۳۹
تراورتن خورهه	۱	۱۰۰/۵۱	۱۰۱/۴۳	۶۲/۰۲	۲/۴
	۲	۵۷/۶	۵۸/۰۹	۳۶/۱۵	۲/۲۹
تراورتن سیلور تکاب	۱	۵۹/۳۸	۶۰/۵۹	۳۷/۱۶	۵/۴۵
	۲	۵۲/۹۶	۵۴/۱	۳۳/۲	۵/۷۵
	۳	۸۵/۳۱	۸۸/۱۳	۵۲/۳۵	۸/۵۶
تراورتن پرتقالی ماکو	۱	۸۴/۰۹	۸۵/۵	۵۳/۰۳	۴/۵۵
	۲	۸۷	۸۸/۰۷	۵۴/۶۵	۳/۳۲
تراورتن حاجی آباد	۱	۹۲/۵۸	۹۴/۹۱	۵۶/۹۲	۶/۵۲
	۲	۶۸/۷۵	۶۹/۹	۴۲/۶۵	۴/۴۲
	۳	۶۷/۰۶	۶۸/۲۵	۴۱/۳۷	۴/۶۲

### ۳-۲-۲ مطالعات مینرالوژیکی و بافت

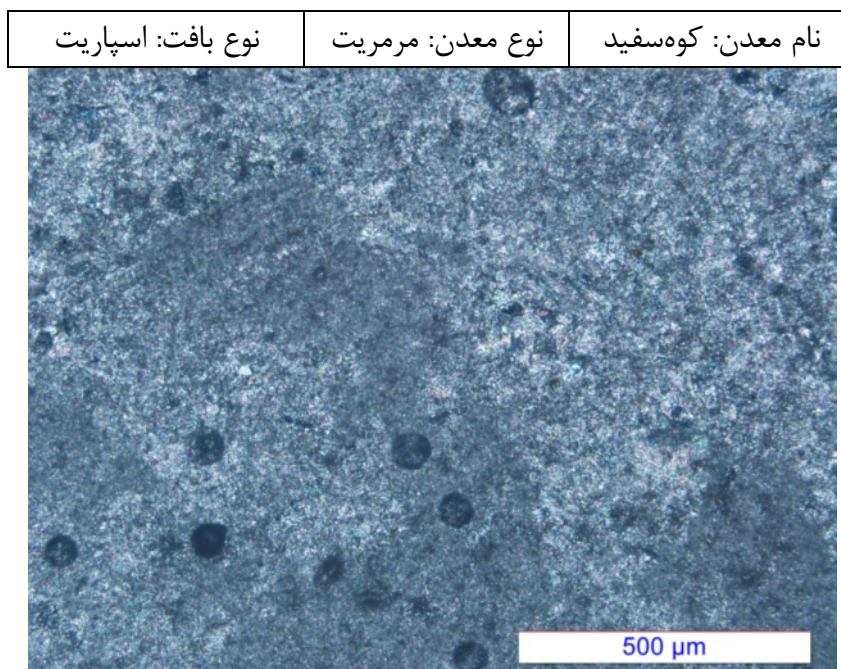
بافت یکی از مشخصه‌های مهم در سنگ می‌باشد که تأثیر مستقیم در پارامترهای مکانیک

سنگی سنگ دارد. منظور از بافت، شکل و اندازه بلور و رابطه فیزیکی آنها با یکدیگر است که توسط

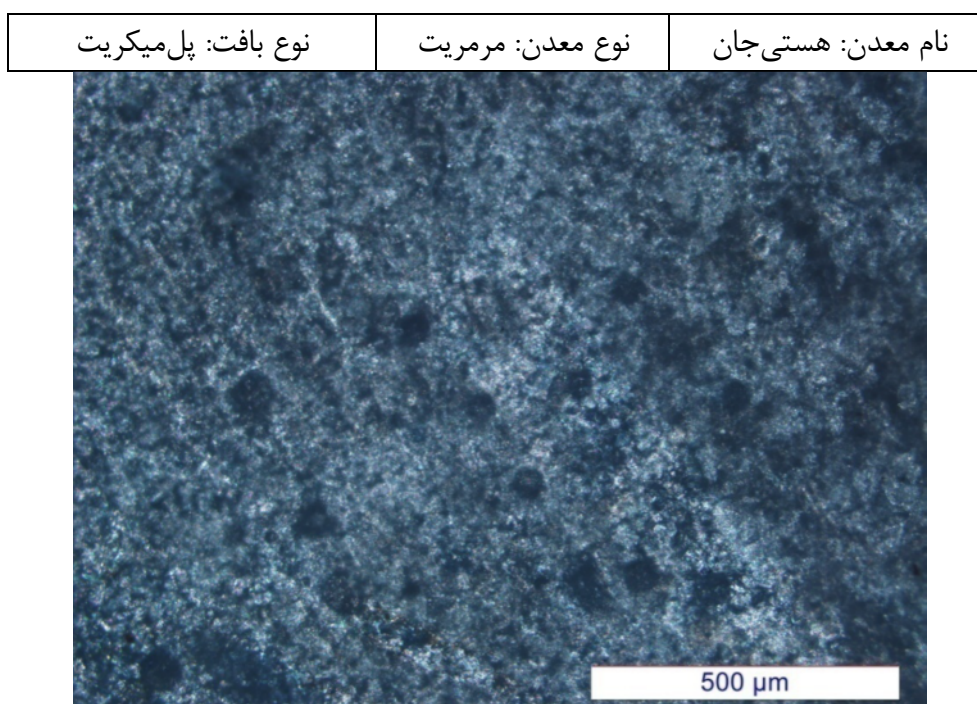
میکروسکوپ مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای بررسی بافت سنگ‌های مورد مطالعه، ابتدا از بلوک‌ها

نمونه‌برداری شده است، سپس از این نمونه‌ها مقاطع نازک تهیه شده است. این مقاطع با میکروسکوپ

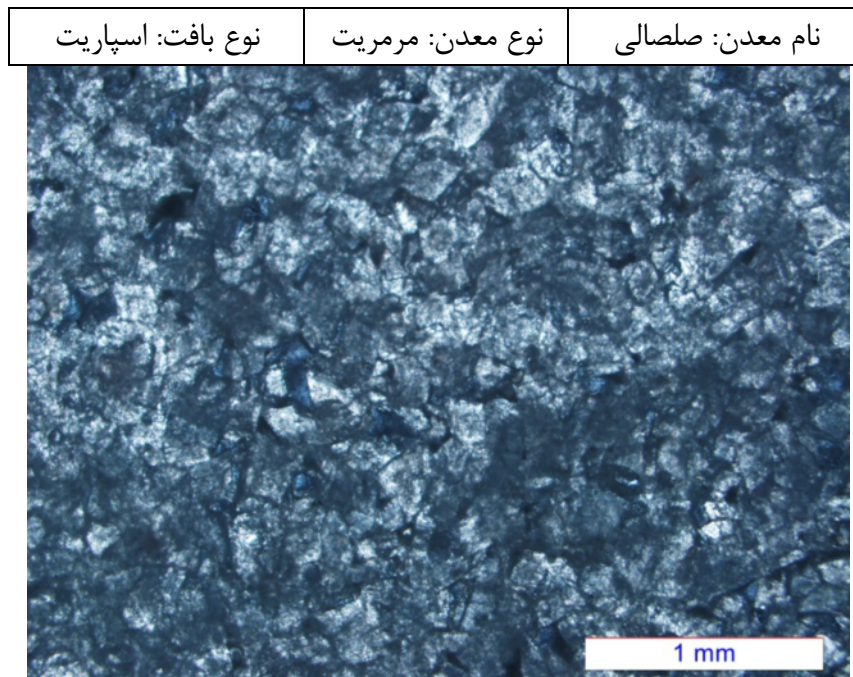
مورد مطالعه قرار گرفته است. مشخصات بافتی و عکس مربوط به هر یک از معادن مورد بررسی در شکل ۷-۳ تا شکل ۱۵-۳ نمایش داده شده است.



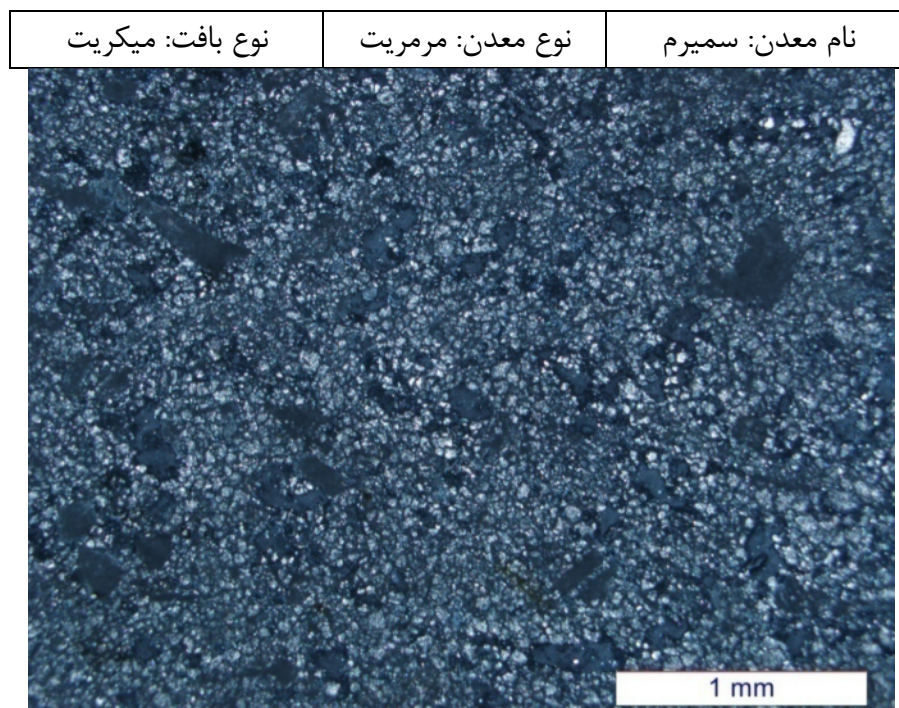
شکل ۷-۳: مشخصات بافتی مرمریت کوه سفید



شکل ۸-۳: مشخصات بافتی مرمریت هستی جان



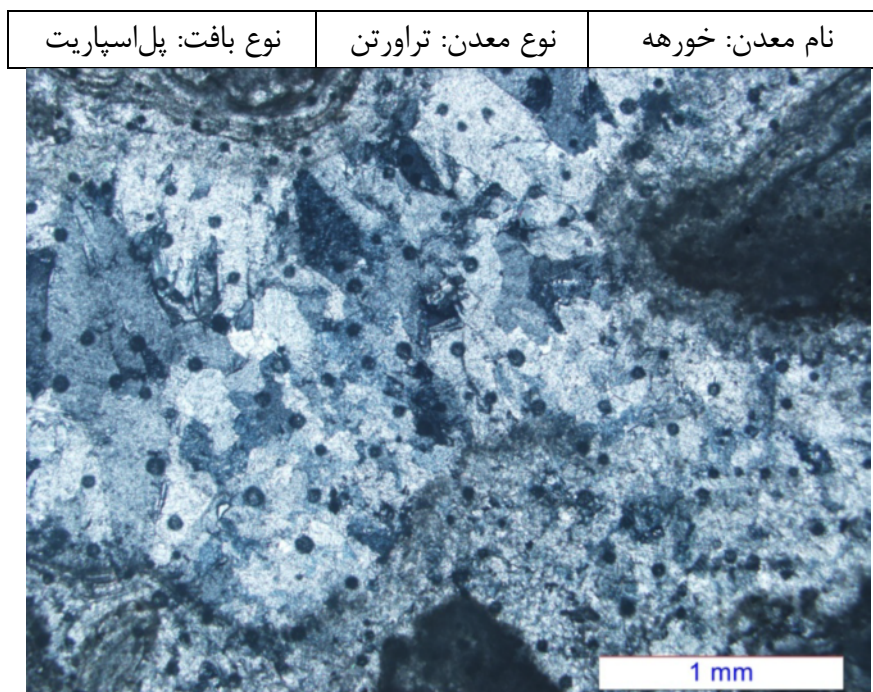
شکل ۳-۹: مشخصات بافتی مرمیت صلصالی



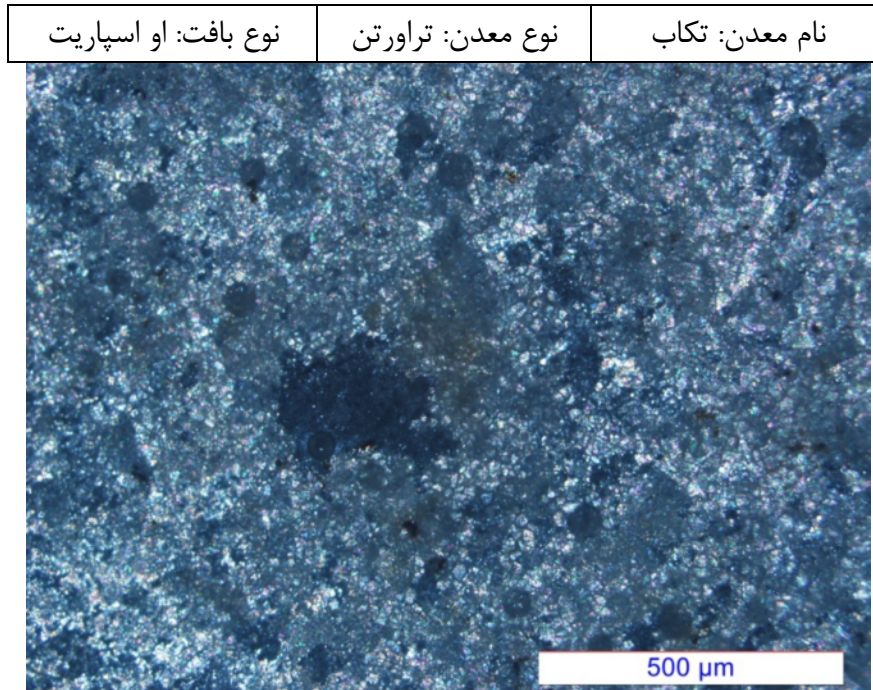
شکل ۳-۱۰: مشخصات بافتی مرمیت سمیرم



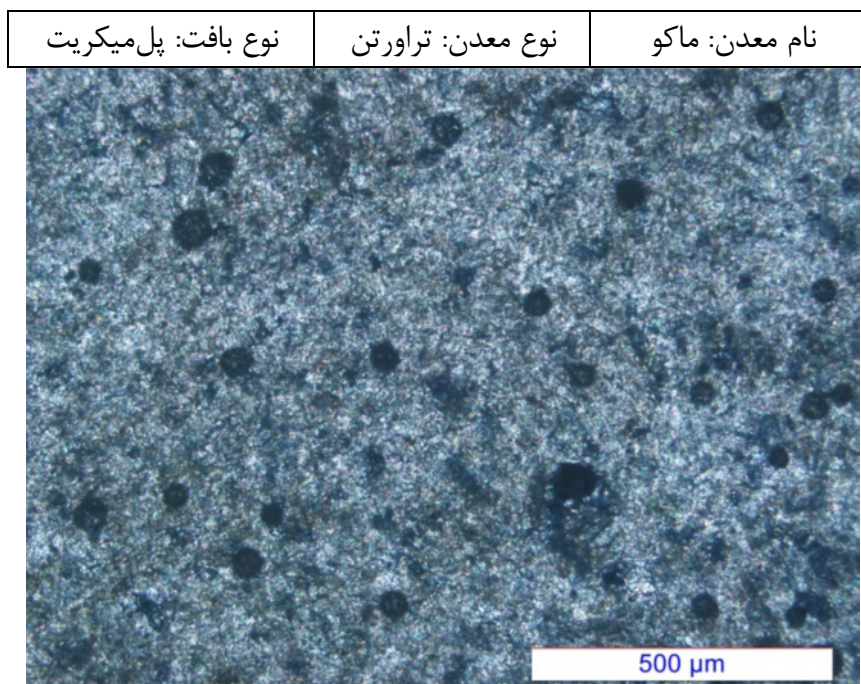
شکل ۳-۱۱: مشخصات بافتی تراورتن عباس آباد



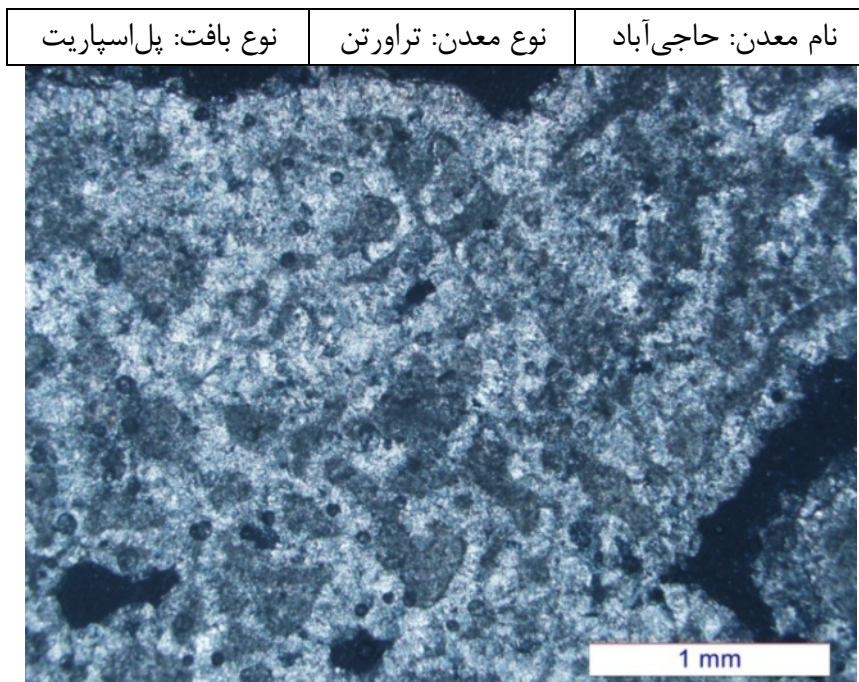
شکل ۳-۱۲: مشخصات بافتی تراورتن خورهه



شکل ۳-۱۳: مشخصات بافتی تراورتن سیلور تکاب



شکل ۳-۱۴: مشخصات بافتی تراورتن پرتقالی ماکو



شکل ۳-۱۵: مشخصات بافتی تراورتن حاجی آباد

در جدول ۳-۹، نوع بافت برای معادن مورد مطالعه به طور کلی درج شده است.

جدول ۳-۹: نوع بافت برای معادن مورد مطالعه

کد نمونه	نام معدن	نوع معدن	نوع بافت
MG	کوه سفید	مرمریت	اسپاریت
MHJ	هستی جان	مرمریت	پل میکریت
Msa	صلصالی	مرمریت	اسپاریت
Mse	آبشار سمیرم	مرمریت	میکریت
TAA	عباس آباد	تراورتن سفید	پل اسپاریت
TKH	خوره	تراورتن	پل اسپاریت
TST	تکاب	تراورتن	او اسپاریت
TPM	ماکو	تراورتن پرتقالی	پل میکریت
THA	حاجی آباد	تراورتن سفید	پل اسپاریت

### ۳-۲-۳ آنالیز شیمیایی

برای بررسی عناصر موجود در سنگ و تعیین رابطه‌ی بین کوارتز محتوی و نرخ برش سنگ،

آنالیز شیمیایی انجام شده است. برای این کار از دستگاه XRF استفاده شده است. همانطور که انتظار



می‌رفت، میزان CaO موجود در سنگ‌ها، نسبت به بقیه عناصر موجود، بیشتر می‌باشد. در جدول ۱۰-۳ تا جدول ۱۹-۳ اطلاعات به دست آمده از این آنالیزها درج شده‌است.

جدول ۱۰-۳: نتایج آنالیز شیمیایی مرمیت کوه سفید

نام نمونه	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O
مرمیت کوه سفید	۹۵/۵۷۳	۱/۵۶۴	۰/۵۸۸	۰/۰۲۲	۰/۰۱۹	۰/۲۴۹	۰/۰۲۵	۰/۳۳۶	۱/۵۶۵	۰/۰۶۱

جدول ۱۱-۳: نتایج آنالیز شیمیایی مرمیت هستی جان

نام نمونه	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O
مرمیت هستی جان	۹۴/۲۹۷	۱/۹۸۲	۰/۸۸۶	۰/۰۹۷	۰/۰۵۲	۰/۱۸۴	۰/۰۶۹	۰/۹۳۸	۱/۴۴۷	۰/۰۴۷

جدول ۱۲-۳: نتایج آنالیز شیمیایی مرمیت صلصالی

نام نمونه	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O
مرمیت صلصالی	۹۴/۸۳	۱/۸۳۸	۰/۴۰	۰/۰۰۵	۰/۰۴۲	۰/۲۷	۰/۰۱۰	۰/۹۱	۱/۴۲	۰/۲۲

جدول ۱۳-۳: نتایج آنالیز شیمیایی مرمیت سمیرم

نام نمونه	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O
مرمیت سمیرم	۹۵/۸۳۱	۱/۸۳۸	۰/۴۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۴۲	۰/۲۶۸	۰/۰۱	۰/۹۱۱	۰/۴۷۳	۰/۲۲

جدول ۱۴-۳: نتایج آنالیز شیمیایی تراورتن عباس آباد

نام نمونه	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	CuO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
تراورتن عباس آباد	۹۶/۹۶۲	۱/۴۴۸	۰/۱۹	۰/۰۱۹	۰/۰۱۳	۰/۰۸۸	۰/۰۱۴	۰/۵۷۹	۰/۳۱	۰/۱۷

جدول ۳-۱۵: نتایج آنالیز شیمیایی تراورتن خورهه

نام نمونه	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O
تراورتن خورهه	۹۴/۷۶۳	۲/۱۴۳	۰/۳۷	۰/۰۱۲	۰/۰۴۲	۰/۱۱۵	۰/۰۲۱	۰/۷۲۶	۱/۷۱	۰/۰۹۸

جدول ۳-۱۶: نتایج آنالیز شیمیایی تراورتن سیلور تکاب

نام نمونه	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O
تراورتن سیلور تکاب	۹۱/۵۹۷	۲/۳۴۵	۱/۴۳۶	۱/۲۲۳	۰/۰۳۸	۰/۲۱۶	۰/۰۳۳	۰/۹۳	۲/۱۳	۰/۰۵۵

جدول ۳-۱۷: نتایج آنالیز شیمیایی تراورتن پرتقالی ماکو

نام نمونه	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O
تراورتن پرتقالی ماکو	۹۵/۷۷۳	۱/۰۶۴	۱/۰۸۸	۰/۰۲۲	۰/۰۱۹	۰/۰۴۹	۰/۰۲۵	۰/۰۳۳	۱/۵۶۵	۰/۰۶۱

جدول ۳-۱۸: نتایج آنالیز شیمیایی تراورتن حاجی آباد

نام نمونه	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O
تراورتن حاجی آباد	۹۵/۷۶۳	۱/۱۴۳	۰/۳۶۹	۰/۰۱۲	۰/۰۴۲	۰/۱۱۵	۰/۰۲	۰/۷۲۶	۰/۷۱۱	۰/۰۹۸

جدول ۳-۱۹: درصد SiO<sub>2</sub> سنگ‌های مورد مطالعه

نام نمونه	مرمریت کوه سفید	مرمریت هستی-جان	مرمریت صلصالی	مرمریت سمیرم	تراورتن عباس-آباد	تراورتن خورهه	تراورتن سیلور تکاب	تراورتن پرتقالی ماکو	تراورتن حاجی-آباد
SiO <sub>2</sub> (%)	۱/۵۶۴	۱/۹۸۲	۱/۸۳۸	۱/۸۳۸	۱/۴۴۸	۲/۱۴۳	۲/۳۴۵	۱/۰۶۴	۱/۱۴۳

### ۳-۲-۴ نرخ برش

نرخ برش، نشان دهنده مساحت بریده شده توسط دستگاه در یک ساعت می باشد و بر حسب مترمربع در ساعت بیان می شود. با در دست داشتن اطلاعات برش دستگاه و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ، می توان نقش هر یک از پارامترها را در قابلیت برش سنگ ها به دست آورد. نرخ برش سنگ های مورد مطالعه، توسط دستگاهی با قطر دیسک ۱۲۰ میلیمتر، سرعت دیسک ۴۵۰ دور در دقیقه، شدت جریان ۱۲۰ آمپر، ولتاژ ۳۸۰ ولت و سگمنت نرم بر اندازه گیری شده است که نتایج آن در جدول ۳-۲۰ درج شده است.

جدول ۳-۲۰: نرخ برش برای معادن مورد مطالعه

کد نمونه	نام معدن	نوع معدن	نرخ برش (متر مربع در ساعت)
MG	کوه سفید	مرمریت	۷/۵
MHJ	هستی جان	مرمریت	۸/۵
Msa	صلصالی	مرمریت	۱۰
Mse	آبشار سمیرم	مرمریت	۱۱/۸
TAA	عباس آباد	تراورتن سفید	۱۰/۶
TKH	خوره	تراورتن سفید	۸/۹
TST	تکاب	تراورتن	۹/۸
TPM	ماکو	تراورتن	۱۰
THA	حاجی آباد	تراورتن پرتقالی	۱۰/۸

## فصل چهارم

# تحلیل نتایج

## ۴ فصل چهارم: تحلیل نتایج

به منظور بررسی تأثیر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها روی قابلیت برش، آزمایش‌های مختلفی که در فصل قبل مورد مطالعه قرار گرفت انجام شده است. به طور خلاصه نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۴-۱ درج شده است. بدین منظور از برازش‌های تک‌متغیره و چندمتغیره استفاده شده است.

### ۴-۱ برازش‌های تک‌متغیره

با بررسی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی به دست آمده از آزمایش‌ها و اطلاعات نرخ برش، می‌توان رابطه بین هر یک از پارامترها با نرخ برش را به دست آورد. مدل‌های مختلف خطی، لگاریتمی، نمایی و توانی امتحان شده‌اند و مدل با بیشترین ضریب تعیین به عنوان بهترین رابطه انتخاب شده - است. در ادامه به تحلیل این روابط پرداخته شده است.

جدول ۴-۱: نتایج آزمایش‌ها

نرخ برش (m <sup>2</sup> /h)	SiO <sub>2</sub> (%)	تخلخل (%)	چگالی خشک (gr/cm <sup>3</sup> )	افت لوس آنجلس (%)	سختی چکش اشمیت	مقاومت کششی (Mpa)	مقاومت فشاری (Mpa)	کد نمونه
۷/۵	۱/۵۶۴	۰/۹۹۸	۲/۷۸	۲۶/۴۶	۵۱/۴	۸/۱	۱۰۹/۱۶	مرمریت کوه سفید
۸/۵	۱/۹۸۲	۱/۰۵۵	۲/۷۹	۲۷/۷۳	۵۷/۲	۶/۴۲	۱۰۱/۵۲	مرمریت هستی جان
۱۰	۱/۸۳۸	۱/۰۷۲	۲/۷۷	۲۵/۱۷	۵۸/۱	۵/۱۵	۵۷/۸۵	مرمریت صلصالی
۱۱/۸	۱/۸۳۸	۲۶/۵۷۲	۲/۷۶	۳۸/۱۳	۲۸	۴/۵۴	۵۳/۴۹	مرمریت سمیرم
۱۰/۶	۱/۴۴۸	۵/۲۸۸	۲/۶۳	۳۰/۹۲	۴۹	۵/۴۹	۱۶/۳۷	تراورتن عباس آباد
۸/۹	۲/۱۴۳	۲/۳۴۹	۲/۶۵	۲۵/۹۸	۵۷/۵	۶/۷۲	۸۹/۵۱	تراورتن خوره
۹/۸	۲/۳۴۵	۶/۵۸۵	۲/۶۵	۲۷/۵	۵۳/۷	۵/۲۶	۵۲/۴۰	تراورتن سیلور تکاب
۱۰	۱/۰۶۴	۳/۹۳۵	۲/۷	۲۸/۷	۴۳/۳	۳/۱۵	۷۴/۲۳	تراورتن پرتقالی ماکو
۱۰/۸	۱/۱۴۳	۵/۱۸۹	۲/۶۱	۲۵/۳۳	۴۵	۶/۷۸	۵۶/۷۶	تراورتن حاجی آباد

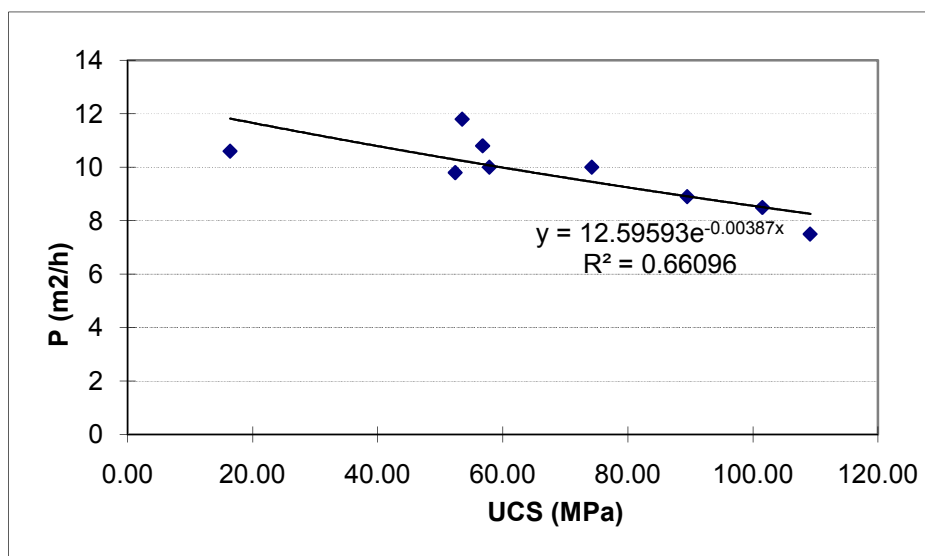
#### ۱-۱-۴ مقاومت فشاری

شکل ۴-۱، رابطه‌ی بین مقاومت فشاری و نرخ برش را نشان می‌دهد. رابطه‌ی نسبتاً خوبی بین این دو پارامتر مشاهده می‌شود. مدلی که بیشترین ضریب تعیین را برای این رابطه تأمین می‌کند، مدل نمایی می‌باشد. مشاهده می‌شود با افزایش مقاومت فشاری تک‌محوره، نرخ برش کاهش می‌یابد.

معادله‌ی این نمودار به صورت زیر می‌باشد:

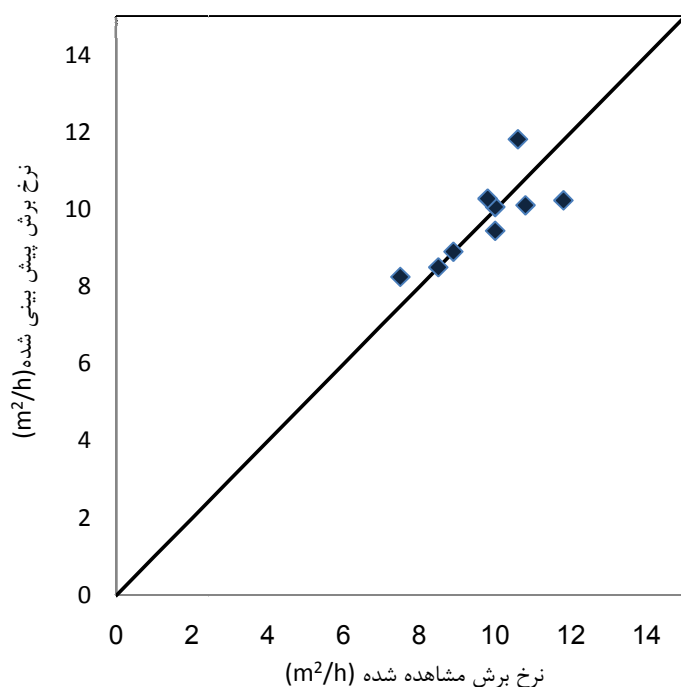
$$P = 12.59e^{-0.00387\sigma_c} \quad R^2 = 0.661 \quad \text{رابطه ۴-۱}$$

که در این رابطه،  $P$  نرخ تولید بر حسب  $m^2/h$  و  $\sigma_c$  مقاومت فشاری تک‌محوره بر حسب  $MPa$  می‌باشد.



شکل ۴-۱: رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوره و نرخ برش

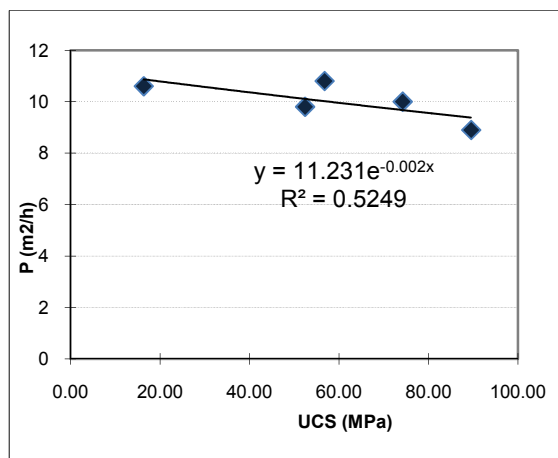
برای بررسی صحت رابطه‌ی به دست آمده از برازش، از نمودارهایی استفاده شده است که محور افقی آن پارامتر مشاهده شده و محور عمودی آن پارامتری می‌باشد که با استفاده از رابطه‌ی حاصل از برازش به دست آمده است. چگونگی پراکندگی نقاط در اطراف نیمساز ربع اول و سوم، میزان صحت این روابط را نشان می‌دهد. بدیهی است که هرچه این نقاط نزدیک‌تر به نیمساز باشند، صحت رابطه‌ی به دست آمده بیشتر می‌باشد. شکل ۴-۲، نمودار صحت‌سنجی رابطه‌ی مقاومت فشاری با نرخ برش را نشان می‌دهد.



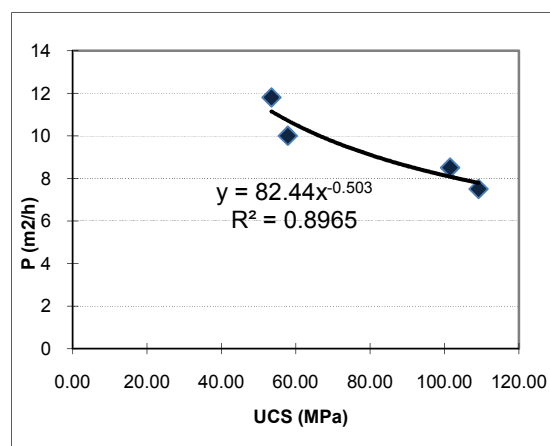
شکل ۴-۲: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری تک‌محوره

به دلیل اینکه، در این تحقیق، آزمایش‌ها روی دو نوع سنگ یعنی تراورتن و مرمریت انجام شده‌است، لذا برای درک دقیق‌تر چگونگی رفتار این دو جامعه آماری، بهتر است روابط پارامترهای فیزیکی و مکانیکی با نرخ برش برای هر یک از این دو جامعه به طور جداگانه نیز بررسی شود. شکل ۳-۴ رابطه‌ی مقاومت فشاری و نرخ برش برای مرمریت‌ها و تراورتن‌ها را جداگانه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ضریب تعیین برای مرمریت بزرگ‌تر از ضریب تعیین همین رابطه برای دو نوع سنگ شده است. در نمودار تراورتن بر خلاف مرمریت‌ها ضریب تعیین کمتر شده‌است. این امر نشان‌دهنده این است که نرخ برش مرمریت‌ها وابستگی بیشتری به مقاومت فشاری دارد و این امر ممکن است به دلیل توده‌ای بودن مرمریت باشد.





ب



الف

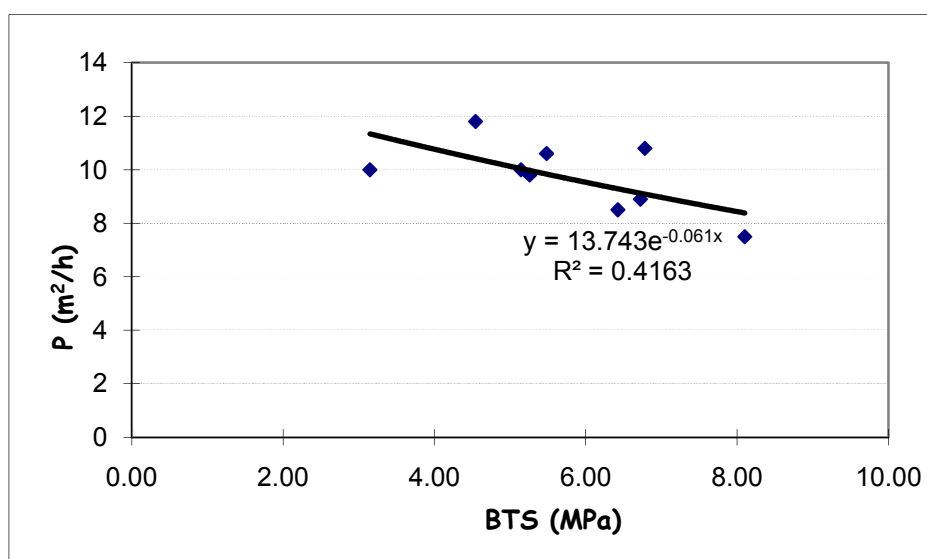
شکل ۳-۴: رابطه بین مقاومت فشاری و نرخ برش، الف: مرمیت، ب: تراورتن

#### ۲-۱-۴ مقاومت کششی

رابطه بین مقاومت کششی و نرخ تولید در شکل ۴-۴ مشاهده می‌شود. مدلی که بیشترین ضریب تعیین را تأمین می‌کند، در این رابطه نیز مدل نمایی می‌باشد. همانطور که انتظار می‌رفت، رابطه‌ی معکوس بین این دو پارامتر مشاهده می‌شود. رابطه‌ی این معادله به صورت زیر می‌باشد:

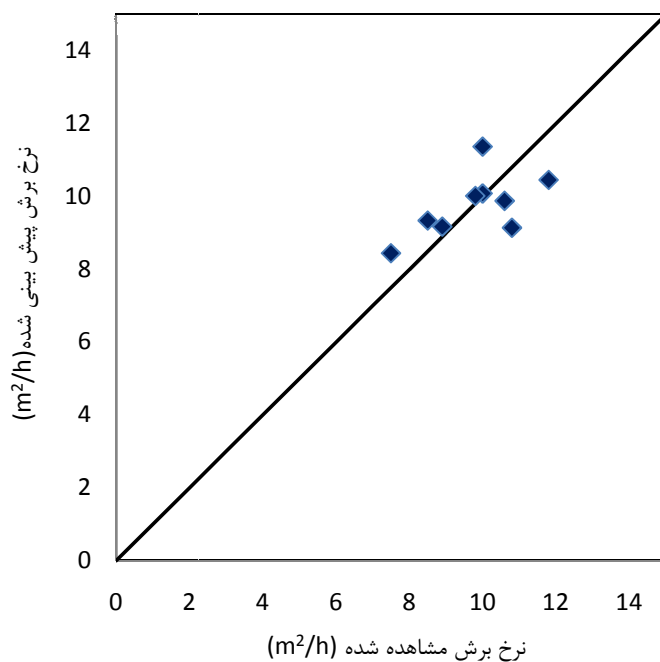
$$P = 13.74e^{-0.06\sigma_t} \quad R^2 = 0.416 \quad \text{رابطه ۲-۴}$$

که در آن  $\sigma_t$  مقاومت کششی بر حسب MPa می‌باشد.



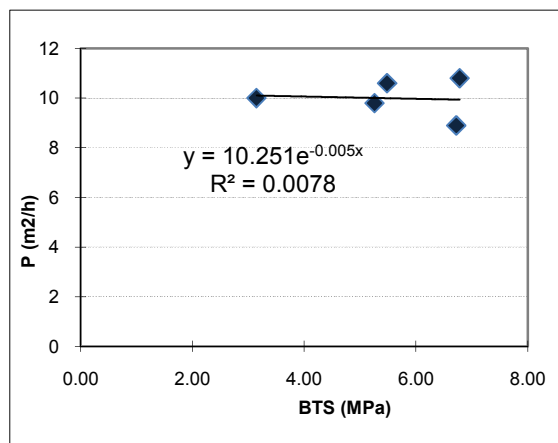
شکل ۴-۴: رابطه بین مقاومت کششی و نرخ برش

شکل ۴-۵ نمودار صحت‌سنجی مربوط به رابطه مقاومت کششی و نرخ برش را نشان می‌دهد. به دلیل ضریب تعیین کم این رابطه، نقاط در اطراف نیمساز پراکنده شده‌اند و این امر نشان می‌دهد که این رابطه از اعتبار خوبی برخوردار نیست.

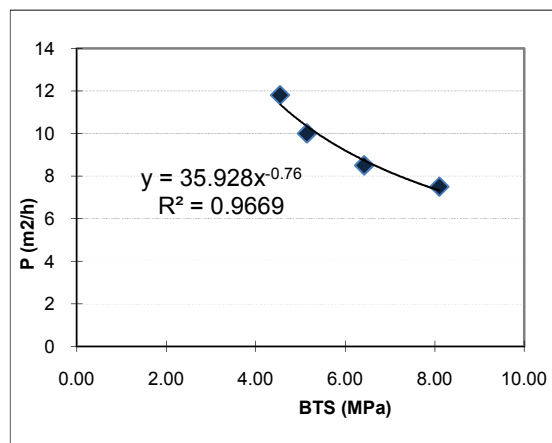


شکل ۴-۵: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت کششی

برای این پارامتر نیز نتایج مرمیت و تراورتن جداگانه بررسی شده است. در شکل ۴-۶، این رابطه به صورت جداگانه برای مرمیت و تراورتن نشان داده شده است. در مورد مقاومت کششی نیز مشاهده می‌شود که وابستگی نرخ برش مرمیت به مقاومت فشاری بسیار بیشتر از تراورتن می‌باشد. ضریب تعیین برای این رابطه برای مرمیت ۰/۹۶۶ شده است که رابطه‌ی بسیار خوبی را نشان می‌دهد و می‌توان از این رابطه در تخمین قابلیت برش استفاده نمود. در حالیکه در تراورتن با افزایش مقاومت کششی، تغییری در نرخ برش مشاهده نمی‌شود.



ب



الف

شکل ۴-۶: رابطه بین مقاومت کششی و نرخ برش، الف: مرمیت، ب: تراورتن

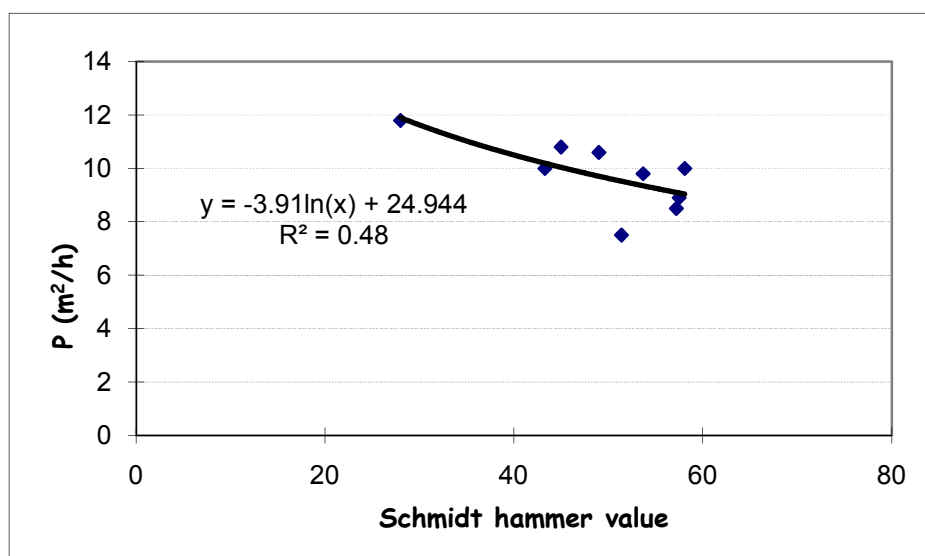
### ۳-۱-۴ چکش اشمیت

در شکل ۴-۷، رابطه‌ی بین عدد چکش اشمیت و نرخ برش مشاهده می‌شود. در این رابطه، مدل لگاریتمی بیشترین ضریب تعیین را تأمین می‌کند. مشاهده می‌شود که با افزایش سختی، نرخ برش کاهش می‌یابد. رابطه‌ی این معادله به صورت زیر می‌باشد:

$$P = -3.91 \ln(R_n) + 24.944 \quad R^2 = 0.48$$

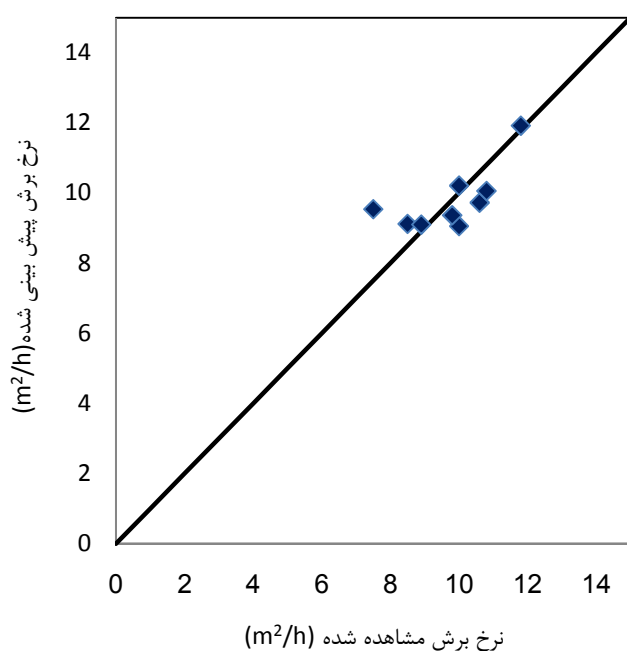
رابطه ۴-۳

که در آن،  $R_n$  عدد سختی چکش اشمیت می‌باشد.

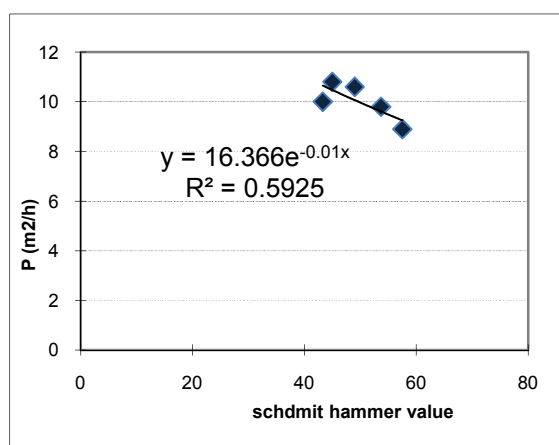


شکل ۴-۷: رابطه بین سختی چکش اشمیت و نرخ برش

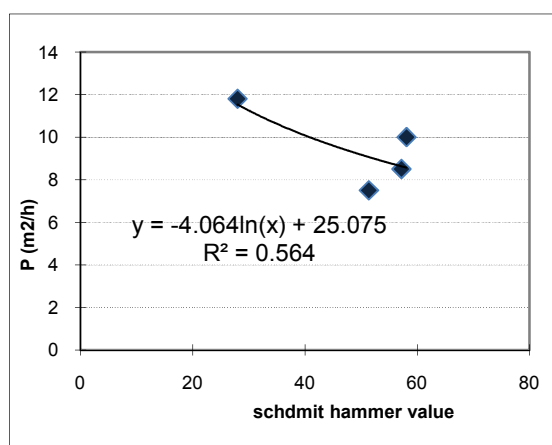
در شکل ۴-۸، نمودار صحت‌سنجی رابطه‌ی عدد چکش اشمیت و نرخ برش قابل مشاهده می‌باشد. به علت کم بودن ضریب تعیین، نقاط، نزدیک نیمساز نیستند و در اطراف آن پراکنده شده‌اند. در شکل ۴-۹ نیز این رابطه به طور جداگانه برای مرمریت و تراورتن بررسی شده است. برای این رابطه ضریب تعیین برای هر دو نوع سنگ تقریباً برابر می‌باشد و اختلاف قابل ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود. اما رابطه‌ی نرخ برش این دو نوع سنگ با عدد چکش اشمیت، در صورت بررسی به طور جداگانه رابطه‌ی بهتری می‌باشد.



شکل ۴-۸: نمودار حاصل از اطلاعات عدد چکش اشمیت



ب



الف

شکل ۴-۹: رابطه بین عدد چکش اشمیت و نرخ برش، الف: مرمریت، ب: تراورتن

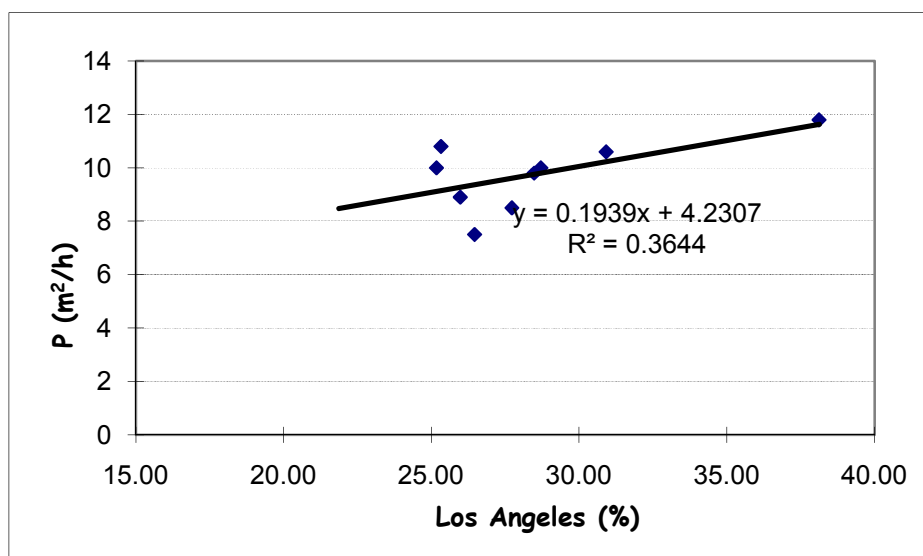
### ۴-۱-۴ لوس آنجلس

شکل ۴-۱۰، رابطه‌ی بین درصد افت لوس آنجلس و نرخ برش را نشان می‌دهد. مدل خطی بهترین ضریب تعیین را تأمین می‌کند. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد افت لوس آنجلس، نرخ برش افزایش می‌یابد. رابطه‌ی این معادله در ادامه مشاهده می‌شود:

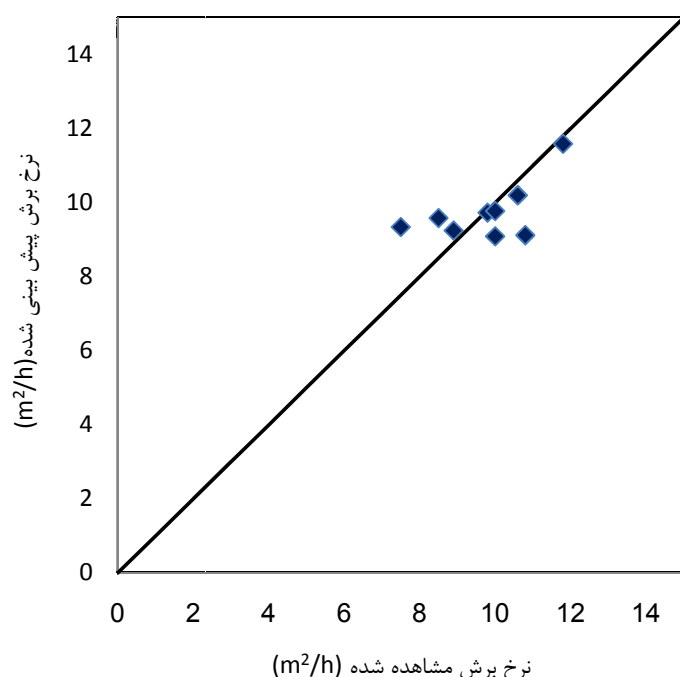
$$P = 0.193LA + 4.230 \quad R^2 = 0.364 \quad \text{رابطه ۴-۴}$$

که در آن  $LA$ ، افت لوس آنجلس بر حسب درصد می‌باشد.

شکل ۴-۱۱، نمودار صحت‌سنجی رابطه‌ی بین درصد افت لوس آنجلس و نرخ برش را نشان می‌دهد. به دلیل ضریب تعیین بسیار پایین این رابطه، فاصله نقاط از نیمساز به نسبت زیاد می‌باشد.

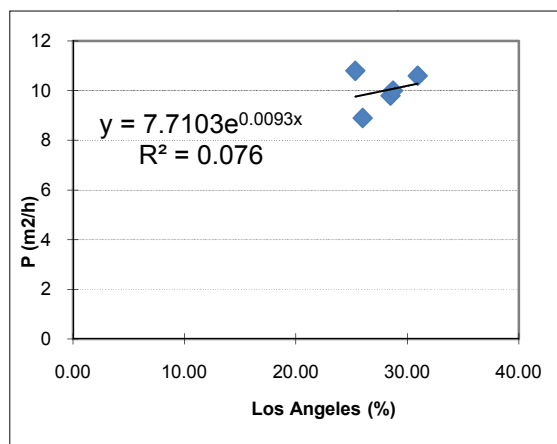


شکل ۴-۱۰: رابطه بین درصد افت لوس آنجلس و نرخ برش

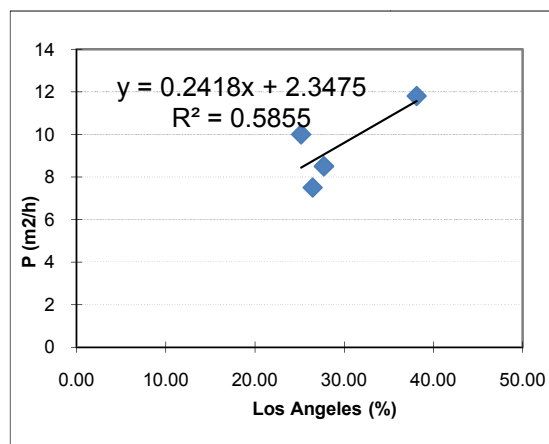


شکل ۴-۱۱: نمودار حاصل از اطلاعات افت لوس آنجلس

در شکل ۴-۱۲، رابطه بین افت لوس آنجلس و نرخ برش به صورت جداگانه برای مرمریت و تراورتن بررسی شده است. در مورد این پارامتر نیز مرمریت ضریب تعیین بیشتری دارد در حالیکه برای تراورتن وابستگی خاصی بین افت لوس آنجلس و نرخ برش مشاهده نمی‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که تخمین قابلیت برش با استفاده از افت لوس آنجلس برای مرمریت با ضریب اطمینان بیشتری قابل انجام می‌باشد.



ب



الف

شکل ۴-۱۲: رابطه بین عدد درصد افت لوس آنجلس و نرخ برش، الف: مرمریت، ب: تراورتن

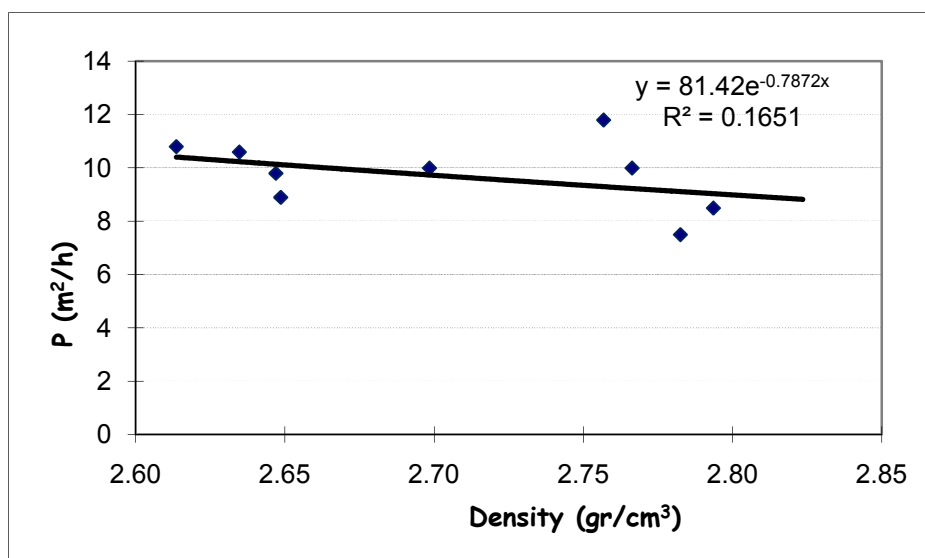
### ۵-۱-۴ چگالی

رابطه بین چگالی و نرخ برش در شکل ۴-۱۳ قابل مشاهده می‌باشد. ضریب تعیین در این رابطه بسیار پایین می‌باشد و تخمین قابلیت برش امکان‌پذیر نمی‌باشد. رابطه‌ی این نمودار به صورت زیر می‌باشد:

$$P = 81.42e^{-0.7872 d} \quad R^2 = 0.1651$$

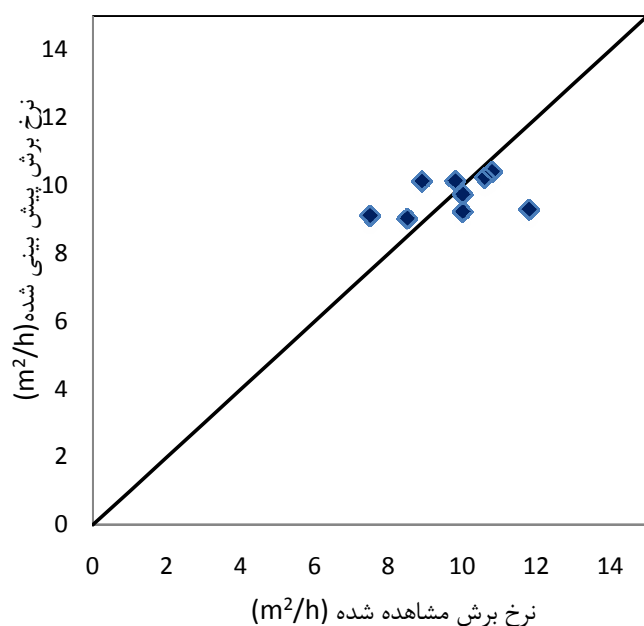
رابطه ۴-۵

که در آن  $d$ ، چگالی بر حسب  $\text{gr/cm}^3$  می‌باشد.



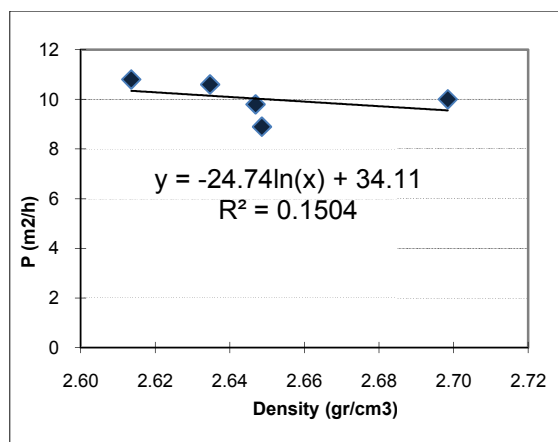
شکل ۴-۱۳: رابطه بین چگالی و نرخ برش

شکل ۴-۱۴، نمودار صحت‌سنجی رابطه‌ی بین چگالی و نرخ برش را نشان می‌دهد. پراکندگی بسیار زیاد می‌باشد و این امر نشان می‌دهد که مدل به دست آمده اعتباری ندارد.

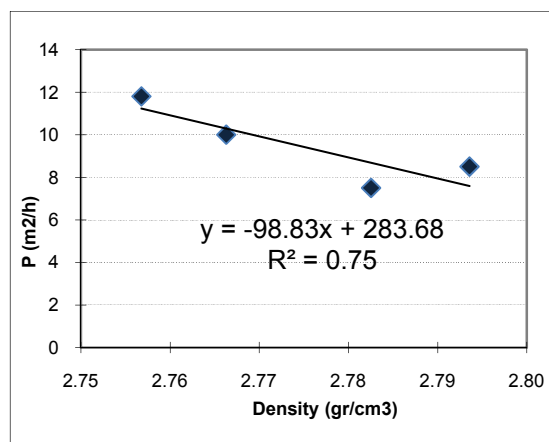


شکل ۴-۱۴: نمودار حاصل از اطلاعات چگالی

در مورد چگالی نیز روابط مربوطه برای تراورتن و مرمیت به صورت جداگانه بررسی شده‌اند. شکل ۴-۱۵، این روابط را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در صورت بررسی جداگانه مرمیت‌ها، وابستگی نرخ برش آن‌ها به چگالی بسیار بیشتر از حالتی است که هر دو جامعه آماری با هم بررسی می‌شوند. این امر نشان می‌دهد که تراورتن‌ها روند خوبی ندارند، همانطور که در شکل ۴-۱۵ نیز مشاهده می‌شود که ضریب تعیین رابطه مربوط به تراورتن‌ها بسیار کم می‌باشد و با افزایش چگالی، نرخ برش تراورتن‌ها تغییر خاصی نکرده است.



ب



الف

شکل ۴-۱۵: رابطه بین چگالی و نرخ برش، الف: مرمیت، ب: تراورتن



## ۶-۱-۴ تخلخل

همچنین در شکل ۴-۱۶، رابطه‌ی بین تخلخل و نرخ برش مشاهده می‌شود. در این رابطه مشاهده می‌شود که با افزایش تخلخل، نرخ برش نیز افزایش می‌یابد. مدل لگاریتمی بیشترین ضریب تعیین را دارا می‌باشد. اما همانطور که از نمودار این معادله پیداست، همه‌ی نقاط این نمودار در سمت چپ می‌باشند به جز یک نقطه که مربوط به مرمیت سمیرم می‌باشد. این مرمیت تخلخل ۲۶/۵۷٪ دارد که در مقایسه با بقیه تخلخل‌ها بسیار بزرگ‌تر می‌باشد. لذا این نقطه از اعتبار مدل می‌کاهد. چون در صورت حذف آن ضریب تعیین و معادله‌ی نمودار بسیار تغییر خواهد کرد. در نتیجه طبق علم آمار نمی‌توان به این پارامتر اطمینان کرد و در تخمین قابلیت برش از آن استفاده نمود مگر اینکه نقطه‌ی مربوط به مرمیت سمیرم حذف شود.

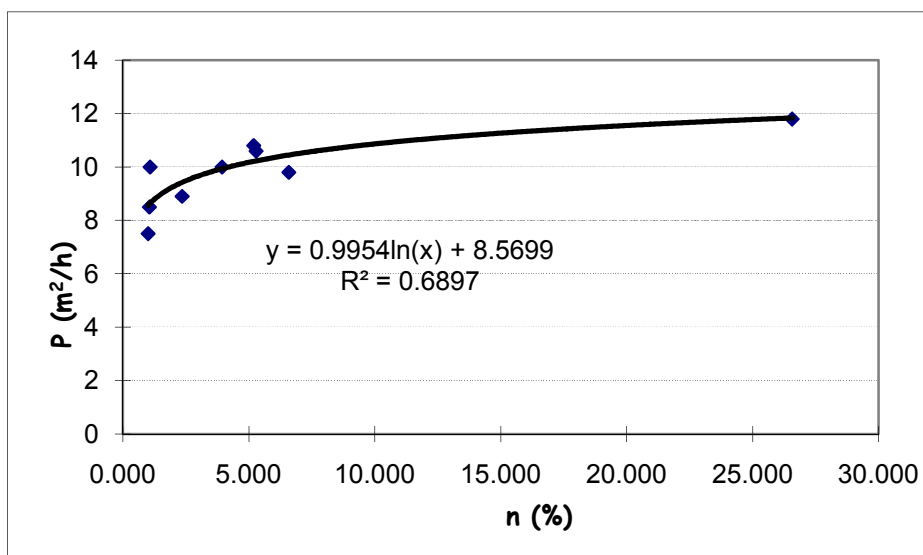
رابطه‌ی این معادله قبل از حذف مرمیت سمیرم به صورت زیر می‌باشد:

$$P = 0.995 \ln(n) + 8.569$$

$$R^2 = 0.689$$

رابطه ۴-۶

که در این رابطه،  $n$ ، تخلخل بر حسب درصد است.



شکل ۴-۱۶: رابطه بین تخلخل و نرخ برش

شکل ۴-۱۷، نمودار بین تخلخل و نرخ برش را پس از حذف مرمیت سمیرم نشان می‌دهد.

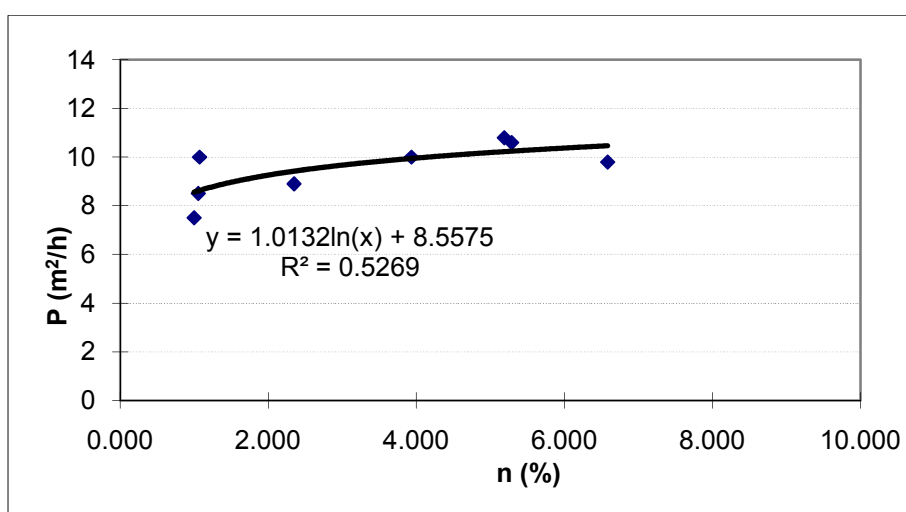
رابطه‌ی این معادله، به صورت زیر می‌باشد:

$$P = 1.013 \ln(n) + 8.557 \quad R^2 = 0.526 \quad \text{رابطه ۴-۷}$$

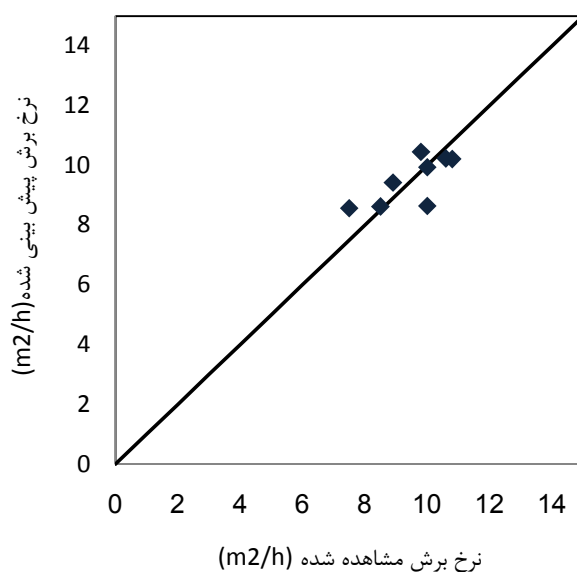
همانطور که مشاهده می‌شود، پس از حذف نقطه مربوط به مرمیت سمیرم، ضریب تعیین

کاهش یافته است. شکل ۴-۱۸، نمودار صحت‌سنجی رابطه تخلخل پس از حذف مرمیت سمیرم می-

باشد.

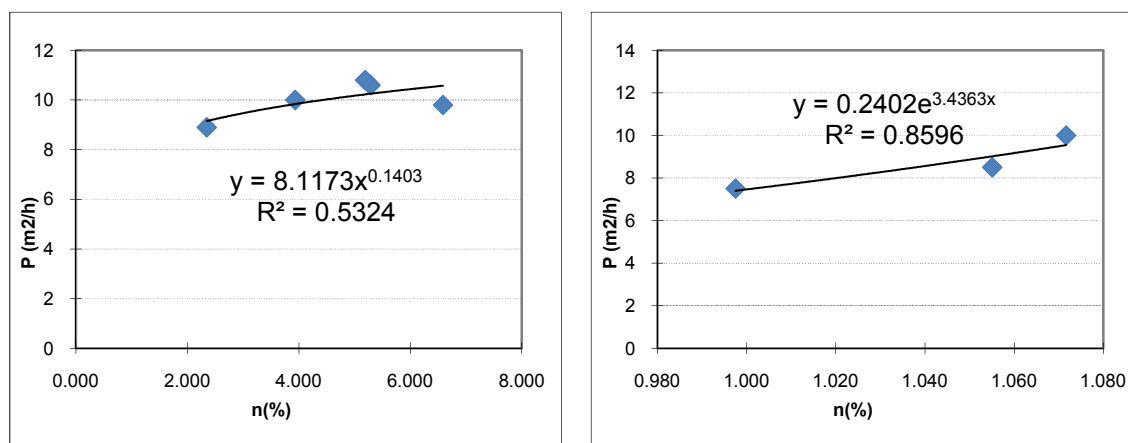


شکل ۴-۱۷: رابطه‌ی بین تخلخل و نرخ برش پس از حذف نقطه‌ی مربوط به مرمیت سمیرم



شکل ۴-۱۸: نمودار حاصل از اطلاعات تخلخل

همچنین در مورد پارامتر تخلخل نیز دو نوع سنگ به طور جداگانه بررسی شده‌اند که نتایج آن را می‌توان در شکل ۴-۱۹ مشاهده کرد. البته این بررسی پس از حذف داده مربوط به مرمیت سمیرم انجام شده است. در این رابطه نیز ضریب تعیین مربوط به مرمیت بیشتر از تراورتن می‌باشد و این مقدار بسیار بزرگتر از ضریب تعیین رابطه‌ای است که هر دو نوع سنگ در نظر گرفته شده‌اند.



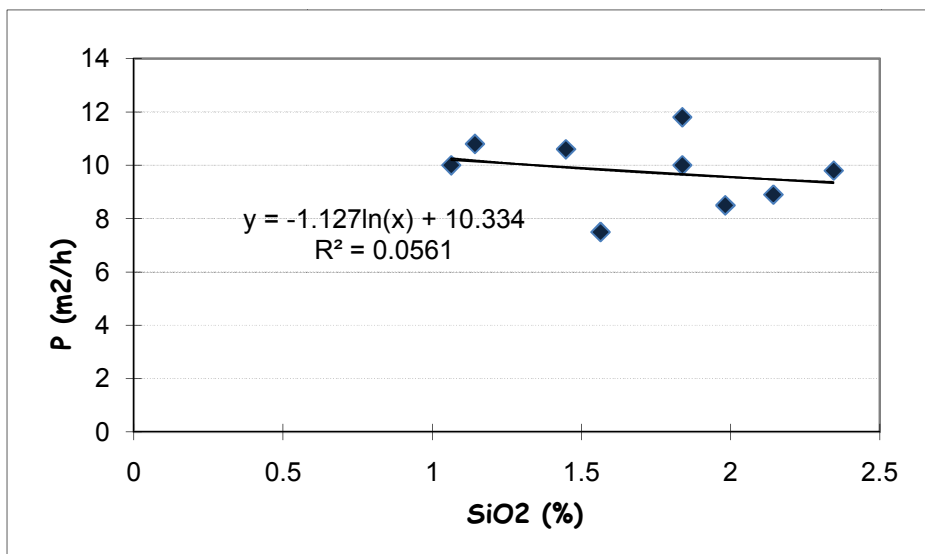
الف  
ب  
شکل ۴-۱۹: رابطه بین تخلخل و نرخ برش، الف: مرمیت، ب: تراورتن

#### ۷-۱-۴ میزان سیلیس

شکل ۴-۲۰، رابطه‌ی بین میزان سیلیس موجود در سنگ و نرخ برش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد سیلیس، نرخ برش کاهش می‌یابد اما رابطه‌ی خوبی بین این دو پارامتر مشاهده نمی‌شود، دلیل این امر کربناته‌بودن این سنگ‌ها می‌باشد. نرخ برش سنگ‌های ساختمانی کربناته به اندازه سنگ‌های گرانیتی تحت تاثیر میزان سیلیس آن‌ها نمی‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، رابطه‌ی لگاریتمی بیشترین ضریب تعیین را برای این معادله تأمین می‌کند. رابطه‌ی این معادله به صورت زیر می‌باشد:

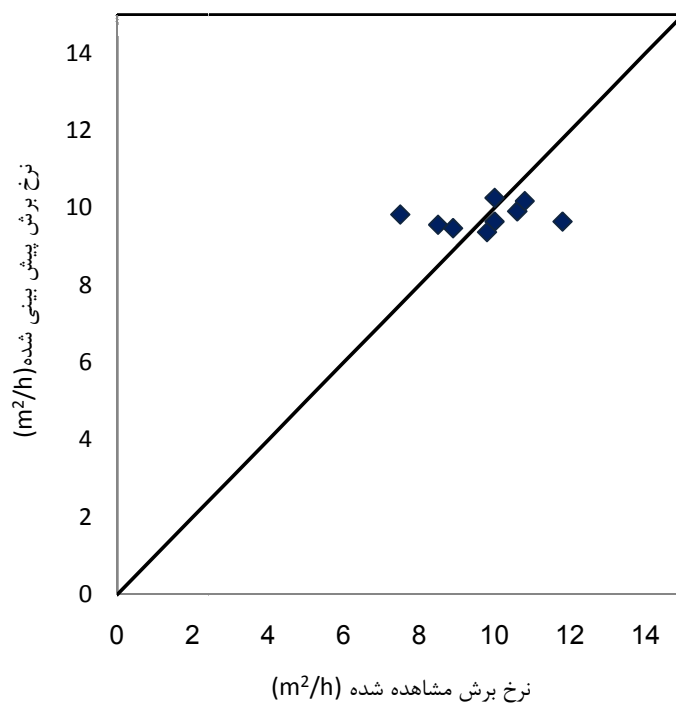
$$P = -1.12 \ln(S) + 10.33 \quad R^2 = 0.056 \quad \text{رابطه ۴-۸}$$

که در این رابطه، S درصد سیلیس موجود در نمونه می‌باشد.



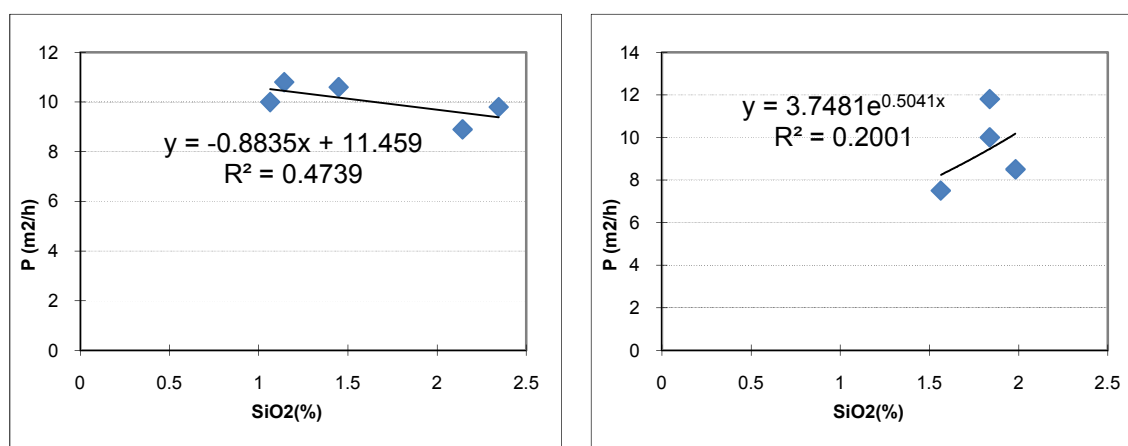
شکل ۴-۲۰: رابطه بین کوارتز محتوی با نرخ برش

شکل ۴-۲۱، نمودار صحت‌سنجی مربوط به رابطه‌ی بین میزان سیلیس موجود در سنگ و نرخ برش را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نقاط نمودار در اطراف نیمساز پراکنده شده‌اند و نزدیک به نیمساز نیستند، دلیل این امر ضریب تعیین پایین این رابطه می‌باشد.



شکل ۴-۲۱: نمودار حاصل از اطلاعات میزان سیلیس سنگ

شکل ۴-۲۲، رابطه‌ی سیلیس با نرخ برش را در دو جامعه آماری به طور جداگانه بررسی کرده است. مشاهده می‌شود که روند این پارامتر در دو نمونه کاملاً برعکس می‌باشد. این امر به دلیل این می‌باشد که سیلیس اندازه گیری شده سیلیس‌های درگیر می‌باشند و تاثیر آن‌ها در نرخ برش تاثیر واقعی که از سیلیس‌های آزاد داریم نمی‌باشد. همچنین همانطور که قبلاً ذکر شد، نرخ برش سنگ‌های کربناته کمتر تحت تاثیر این پارامتر می‌باشد. تنها نمونه‌ای که سیلیس آزاد آن انتظار می‌رود که زیاد باشد، مرمیت کوه سفید می‌باشد که دلیل آن نسبت سیلیس به اکسید آلومینیوم زیاد آن یعنی ۴/۶۶ می‌باشد، لذا وجود سیلیس آزاد محتمل تر است. بقیه سنگ‌ها سیلیس آزاد بسیار کمی دارند.



ب

الف

شکل ۴-۲۲: رابطه بین درصد سیلیس محتوی و نرخ برش، الف: مرمیت، ب: تراورتن

در جدول ۴-۲، روابط حاصل از برازش‌های تک‌متغیره به طور کلی مشاهده می‌شود.

جدول ۴-۲: روابط به دست آمده از برازش تک‌متغیره

رابطه	ضریب همبستگی	متغیر
$P = 12.59e^{-0.00387\sigma_c}$	$R^2 = 0.661$	مقاومت فشاری
$P = 13.74e^{-0.06\sigma_t}$	$R^2 = 0.416$	مقاومت کششی
$P = -3.91 \ln(R_n) + 24.944$	$R^2 = 0.48$	عدد چکش اشمیت
$P = 0.193LA + 4.230$	$R^2 = 0.364$	افت لوس آنجلس
$P = 81.42e^{-0.7872d}$	$R^2 = 0.1651$	چگالی
$P = 0.995 \ln(n) + 8.569$	$R^2 = 0.689$	تخلخل
$P = -1.12 \ln(S) + 10.33$	$R^2 = 0.056$	درصد SiO <sub>2</sub>

همان گونه که ملاحظه می‌شود، تمام روابط ضریب تعیین مناسبی ندارند. در نتیجه برآزش تک‌متغیره به درستی ارتباط بین قابلیت برش و پارامترهای مختلف را نشان نمی‌دهد و باید از برآزش-های چندمتغیره استفاده کرد. در برآزش چندمتغیره معمولاً از پارامترهایی استفاده می‌شود که ضریب همبستگی آن‌ها با پارامتر نرخ برش بیشتر از  $0/5$  باشد. در جدول ۳-۴، ضریب همبستگی بین پارامترها قابل مشاهده می‌باشد. طبق این جدول، پارامترهای چگالی و میزان  $SiO_2$  از برآزش حذف می‌شوند. در مورد پارامتر تخلخل نیز، همانطور که پیش‌تر نیز ذکر شد، این پارامتر از اعتبار خوبی برخوردار نمی‌باشد. لذا داده‌ی مربوط به مرمیت سمیرم حذف شده است چون در صورت وجود آن داده، ضریب تعیین بیشتر می‌شود در صورتیکه این افزایش در ضریب تعیین به دلیل داده‌ای می‌باشد که مقدار آن اختلاف زیادی با بقیه‌ی داده‌ها دارد. لذا حذف آن هرچند که باعث کاهش ضریب تعیین می‌شود اما اعتبار علمی آن را افزایش می‌دهد. در نهایت پارامترهای مورد استفاده در برآزش چندمتغیره عبارتند از مقاومت فشاری، مقاومت کششی، عدد چکش اشمیت، تخلخل و درصد افت لوس آنجلس.

از آنجائیکه تعداد پارامترها در برآزش چندمتغیره زیاد می‌باشد و کاربرد روابط به دست‌آمده از این برآزش‌ها مشکل می‌باشد، لذا تعداد متغیرها باید کاهش یابد. در صورت یافتن رابطه‌ی خوبی بین دو متغیر، یعنی در صورتیکه ضریب همبستگی بین آن‌ها بیشتر از  $0/9$  باشد، یکی از متغیرها قابل حذف می‌باشد. لذا در اینجا به بررسی رابطه‌ی پارامترها پرداخته می‌شود. ضریب همبستگی بین متغیرها در جدول ۳-۴ درج شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی بین هیچ یک از پارامترها در حدی نیست که بتوان یکی از آن‌ها را حذف نمود. لذا برآزش‌ها با همه‌ی پارامترهایی که پیش‌تر ذکر شد، انجام شده است.

جدول ۴-۳: ضریب همبستگی بین پارامترهای اندازه گیری شده

نرخ برش (m <sup>2</sup> /h)	SiO <sub>2</sub> (%)	تخلخل (%)	چگالی خشک (gr/cm <sup>3</sup> )	افت لوس آنجلس (%)	سختی چکش اشمیت	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	
							۱	مقاومت فشاری
						۱	۰/۴۷	مقاومت کششی
					۱	۰/۴۳	۰/۳۲	سختی چکش اشمیت
				۱	-۰/۸۳	-۰/۴۵	-۰/۳۷	افت لوس آنجلس (%)
			۱	۰/۱۸	۰/۰۰۱	۰/۰۴	۰/۵۵	چگالی خشک
		۱	-۰/۸۵	۰/۴	-۰/۵۴	-۰/۳۶	-۰/۷۲	تخلخل (%)
	۱	-۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۰۱	۰/۳۹	۰/۱۷	۰/۱۵	SiO <sub>2</sub> (%)
۱	-۰/۲۳	۰/۷۰	-۰/۳۶	۰/۶۰	-۰/۶۹	-۰/۶۲	-۰/۸	نرخ برش (m <sup>2</sup> /h)

عدم وجود رابطه‌ی مناسب بین پارامترهایی که بررسی کرده‌ایم ممکن است به علت وجود خطا در آزمایش باشد، چون انتظار می‌رفت که بین پارامترهایی مثل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و عدد چکش اشمیت روابط خوبی به دست آید اما در اینجا رابطه‌ی خوبی مشاهده نمی‌شود.

#### ۲-۴ برآزش چندمتغیره

برای بهبود و بالا بردن ضریب همبستگی رابطه‌های به دست آمده از برآزش ساده، برآزش چند متغیره انجام شده است. برای انجام این کار از نرم افزار Excel استفاده شده است. برآزش با دو متغیر، سه، چهار و پنج متغیر انجام شده است.

#### ۱-۲-۴ برآزش دومتغیره

##### ۱-۱-۲-۴ مقاومت فشاری و مقاومت کششی

برآزش دومتغیره با دو متغیر مقاومت فشاری و مقاومت کششی انجام شده است. نتایج این برآزش در

جدول ۴-۴ و جدول ۵-۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۴: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری و مقاومت کششی

مقدار $P$	$t$	$F$ انتخاب شده از جدول	$F$	خطای معیار	ضرایب برازش	مدل
۰/۰۰۰۰۲	۱۱/۶	۰/۰۲۲	۷/۶۶	۱/۱۵۴	۱۳/۳۹	عدد ثابت
۰/۰۴	-۲/۶۶			۰/۰۱۱	-۰/۰۲۹	
۰/۲۴	-۱/۲۹			۰/۲۲	-۰/۲۸۴	

جدول ۵-۴: رابطه‌ی به دست آمده از برازش دومتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری و مقاومت کششی

خطای معیار تخمین	$R^2$ تصحیح شده	$R^2$	$R$	مدل
۰/۷۹۶	۰/۶۲۴	۰/۷۱۸	۰/۸۴۸	$P = 13/39 - 0/029\sigma_c - 0/284\sigma_t$

برای کنترل اعتبار کلی مدل یا به عبارت دیگر برای کنترل معنی‌داری آن از آزمون  $F$  استفاده

شده است. نتایج آزمون  $F$  در

جدول ۴-۴ نشان داده شده است. از آنجا که مقدار  $F$  از جدول توزیع آن با سطح اعتماد ۹۵

درصد برابر با ۰/۰۲۲ و مقدار  $F$  به دست آمده از مدل مطابق

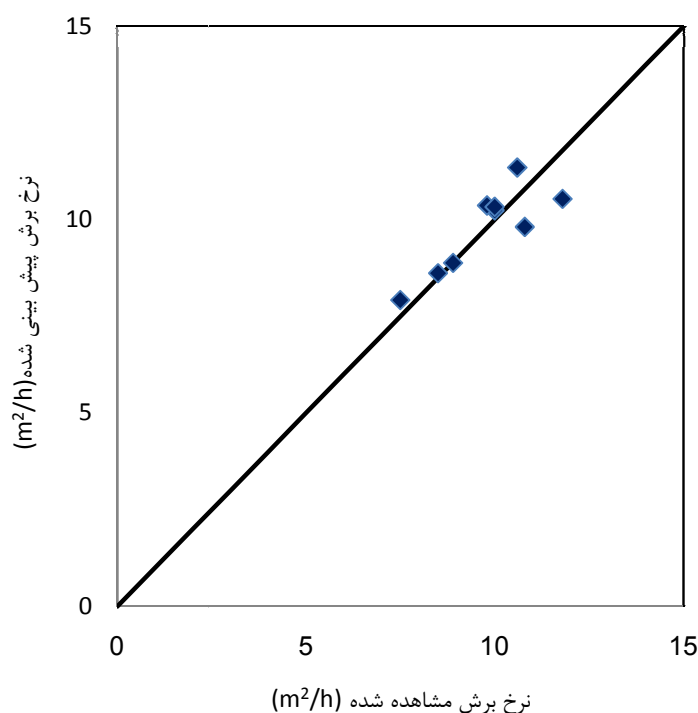
جدول ۴-۴ برابر با ۷/۶۶ بزرگتر از مقدار به دست آمده از جدول توزیع می‌باشد لذا می‌توان

فرضیه صفر را که بیان می‌کند رابطه خطی بین سرعت برش و متغیرهای مستقل وجود ندارد را رد

کرده و نتیجه‌گیری کرد که حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد. شکل ۴-۲۳، نمودار صحت-

سنجی مربوط به رابطه‌ی بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی با نرخ برش را نشان می‌دهد.





شکل ۴-۲۳: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری و مقاومت کششی

#### ۴-۲-۱-۲ مقاومت فشاری و چکش اشمیت

همچنین برآزش دومتغیره با دو متغیر مقاومت فشاری و چکش اشمیت، نیز انجام شده است. نتایج این برآزش در جدول ۴-۶ و جدول ۴-۷ نشان داده شده است. با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $F$  به دست آمده از مدل یعنی  $۱۷/۳۵۲$  از مقدار  $F$  جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد یعنی  $۰/۰۰۳۲$  لذا حداقل یکی از ضرایب برآزش صفر نمی‌باشد.

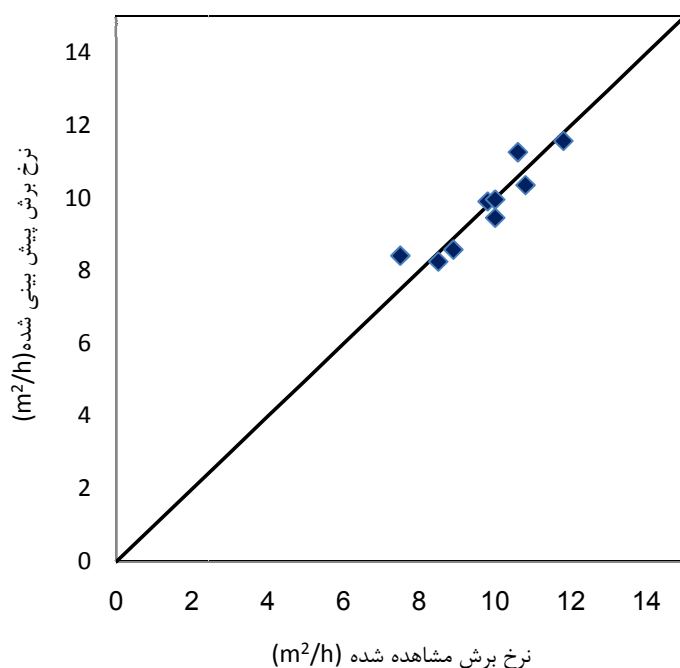
جدول ۴-۶: ضرایب برآزش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری و چکش اشمیت

مقدار $P$	$t$	$F$ انتخاب شده از جدول	$F$	خطای معیار	ضرایب برآزش	مدل
$۰/۰۰۰۰۰۸$	$۱۳/۹۷۱$	$۰/۰۰۳۲$	$۱۷/۳۵۲$	$۱/۰۷۲$	$۱۴/۹۷۷$	عدد ثابت
$۰/۰۰۷۴$	$-۳/۹۰۴$			$۰/۰۰۷$	$-۰/۰۲۹$	
$۰/۰۲۲$	$-۲/۹۴۴$			$۰/۰۲۲$	$-۰/۰۶۶$	$R_n$

جدول ۴-۷: رابطه‌ی به دست آمده از برازش دومتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری و چکش اشمیت

خطای معیار تخمین	$R^2$ تصحیح شده	$R^2$	$R$	مدل
۰/۵۷۶	۰/۸۰۳	۰/۸۵۳	۰/۹۲۳	$P = 14/977 - 0/029\sigma_c - 0/066R_n$

شکل ۴-۲۴، نمودار صحت‌سنجی مربوط به رابطه‌ی بین مقاومت فشاری و عدد چکش اشمیت با نرخ برش را نشان می‌دهد. با توجه به ضریب همبستگی ۰/۹۲۳ مشاهده می‌شود که نقاط بسیار نزدیک به نیمساز می‌باشد و این مطلب نشان‌دهنده صحت رابطه می‌باشد.



شکل ۴-۲۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری و عدد چکش اشمیت

### ۳-۱-۲-۴ مقاومت فشاری و افت لوس آنجلس

برازش دو متغیره با متغیرهای مقاومت فشاری و افت لوس آنجلس نیز انجام شده است. نتایج آن در جدول ۴-۱۳ و جدول ۴-۱۴ نشان داده شده است.

با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $F$  به دست آمده از مدل یعنی ۹/۲۸ از مقدار  $F$  جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد یعنی ۰/۰۱۴۶ لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

جدول ۴-۸: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری و افت لوس آنجلس

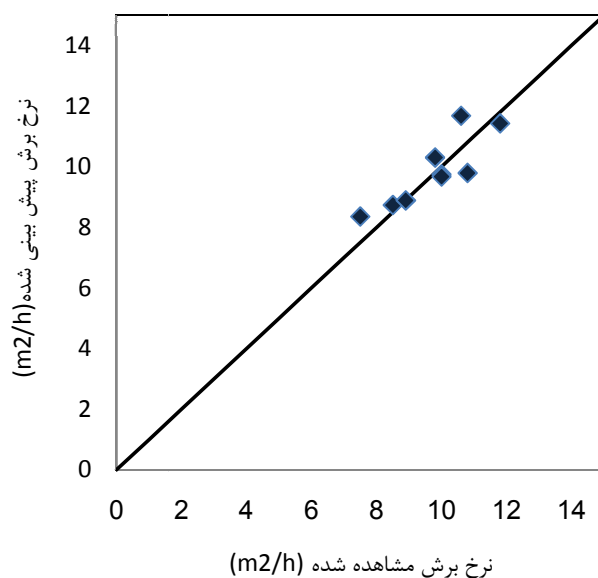
مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	$F$	$F$ انتخاب شده از جدول	$t$	مقدار $P$
عدد ثابت	۸/۴۶	۲/۳۲	۹/۲۸	۰/۰۱۴۶	۳/۶۴	۰/۰۱۱
	-۰/۰۳	۰/۰۰۹			-۳/۰۲	۰/۰۲۳
$LA$	۰/۱۲	۰/۰۷			۱/۶۹	۰/۱۴

جدول ۴-۹: رابطه‌ی به دست آمده از برازش دومتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری و افت لوس آنجلس

مدل	$R$	$R^2$	$R^2$ تصحیح شده	خطای معیار تخمین
$P = ۸/۴۶ - ۰/۰۳\sigma_c + ۰/۱۲LA$	۰/۸۷	۰/۷۵۶	۰/۶۷۴	۰/۷۴

شکل ۴-۲۴، نمودار صحت‌سنجی مربوط به رابطه‌ی بین مقاومت فشاری و افت لوس آنجلس با

نرخ برش را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۵: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری و افت لوس آنجلس

### ۴-۱-۲-۴ مقاومت فشاری و تخلخل

برازش دو متغیره با متغیره‌های مقاومت فشاری و تخلخل نیز انجام شده است. نتایج آن در

جدول ۴-۱۰ و جدول ۴-۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۰: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیره‌های مقاومت فشاری و تخلخل

مقدار $P$	$t$	$F$ انتخاب شده از جدول	$F$	خطای معیار	ضرایب برازش	مدل
۰/۰۰۰۳	۸/۹۷	۰/۰۲۷	۸/۱۱	۱/۲۵	۱۱/۲۱	عدد ثابت
۰/۰۵۹	-۲/۴۳			۰/۰۱	-۰/۰۲۸	
۰/۶۴	۰/۵			۰/۱۵۶	۰/۰۷۸	$n$

جدول ۴-۱۱: رابطه‌ی به دست آمده از برازش دومتغیره با متغیره‌های مقاومت فشاری و تخلخل

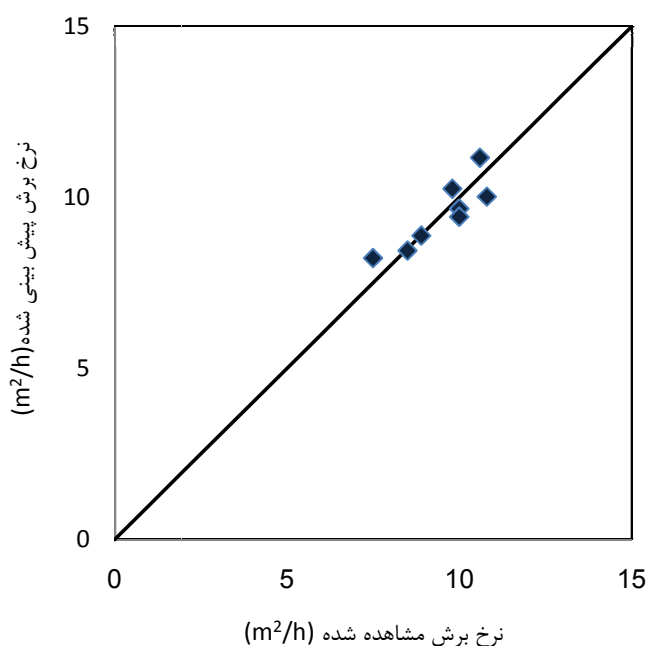
خطای معیار تخمین	$R^2$ تصحیح شده	$R^2$	$R$	مدل
۰/۶۴	۰/۶۷	۰/۷۶	۰/۸۷	$P = 11/21 - 0/028\sigma_c + 0/078n$

با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $F$  به دست آمده از مدل یعنی ۸/۱۱ از مقدار  $F$  جدول توزیع

با سطح اعتماد ۹۵ درصد یعنی ۰/۰۲۷ لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۴-۲۶، نمودار صحت‌سنجی مربوط به رابطه بین مقاومت فشاری و تخلخل با نرخ برش

را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۶: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری و تخلخل

روابط دیگری نیز با استفاده از برآزش دومتغیره می‌توان به دست آورد، اما از آنجائیکه ضرایب همبستگی باقی روابط کم می‌باشد، بنابراین از شرح آن‌ها در اینجا خودداری می‌شود، این روابط در جدول ۴-۱۲ درج شده است.

جدول ۴-۱۲: روابط حاصل از رگرسیون دو متغیره با ضریب تعیین کم

رابطه	ضریب تعیین	متغیرها
$P = 15.28 - 0.36\sigma_c - 0.07R_n$	$R^2 = 0.61$	مقاومت کششی و چکش اشمیت
$P = 8.15 - 0.38\sigma_t + 0.136LA$	$R^2 = 0.52$	مقاومت کششی و افت لوس آنجلس
$P = 10.23 - 0.28\sigma_t + 0.28n$	$R^2 = 0.603$	مقاومت کششی و تخلخل
$P = 0.17 + 0.32R_n + 0.77LA$	$R^2 = 0.49$	چکش اشمیت و افت لوس آنجلس
$P = 9.57 + 0.022R_n + 0.32n$	$R^2 = 0.49$	چکش اشمیت و تخلخل
$P = 8.93 - 0.02LA + 0.36n$	$R^2 = 0.49$	افت لوس آنجلس و تخلخل

### ۲-۲-۴ برآزش سه متغیره

برای دستیابی به ضریب همبستگی بیشتر، برآزش چندمتغیره با سه متغیر نیز انجام شده است.

### ۱-۲-۲-۴ مقاومت فشاری، مقاومت کششی و چکش اشمیت

نتایج برآزش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت کششی، مقاومت فشاری و عدد چکش اشمیت در جدول ۱۳-۴ و جدول ۱۴-۴ درج شده است.

جدول ۱۳-۴: ضرایب برآزش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و عدد چکش اشمیت

مدل	ضرایب برآزش	خطای معیار	$F$	$F$ انتخاب شده از جدول	$t$	مقدار $P$
عدد ثابت	۱۵/۲۹۰	۱/۱۶۲	۱۱/۲۱۹	۰/۰۱۲	۱۳/۱۵۸	۰/۰۰۰۰۵
	-۰/۰۲۶	۰/۲۴			-۳/۱۷۹	۰/۰۲۴
	-۰/۱۴۴	۰/۰۰۸			-۰/۸۳۶	۰/۴۴
$R_n$	-۰/۰۵۹	۰/۱۷۳			-۲/۴۲۹	۰/۰۶

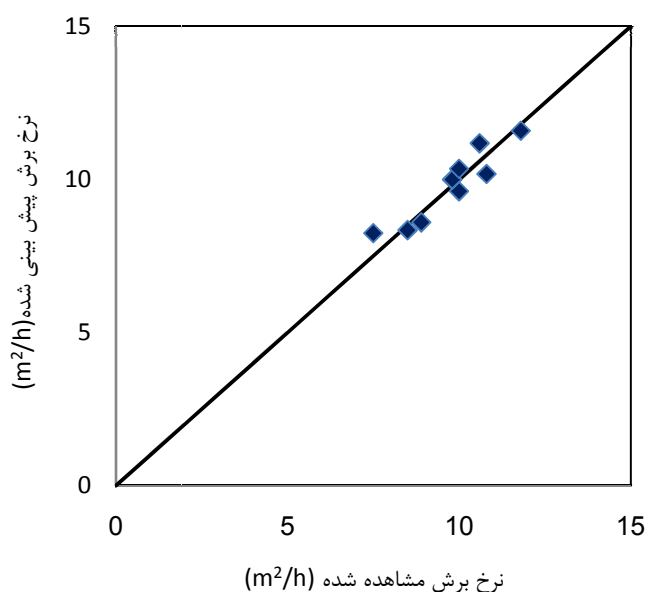
جدول ۱۴-۴: رابطه‌ی به دست آمده از برآزش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و عدد چکش اشمیت

مدل	$R$	$R^2$	$R^2$ تصحیح شده	خطای معیار تخمین
$P = ۱۵/۲۹۰ - ۰/۰۲۶ \sigma_c - ۰/۱۴۴ \sigma_t - ۰/۰۵۹ R_n$	۰/۹۳۳	۰/۸۷۱	۰/۷۹۳	۰/۵۹۰۹

با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $F$  به دست آمده از مدل یعنی ۱۱/۲۱۹ از مقدار  $F$  جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد یعنی ۰/۰۱۲ لذا حداقل یکی از ضرایب برآزش صفر نمی‌باشد.

شکل ۲۷-۴، نمودار صحت‌سنجی رابطه‌ی بین مقاومت فشاری، مقاومت کششی و عدد چکش

اشمیت با نرخ برش را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۷: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، مقاومت کششی و عدد چکش اشمیت

#### ۲-۲-۲-۴ مقاومت فشاری، چکش اشمیت و لوس آنجلس

نتایج برآزش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری و عدد چکش اشمیت و افت لوس-

آنجلس در جدول ۴-۱۵ و جدول ۴-۱۶ درج شده است.

جدول ۴-۱۵: ضرایب برآزش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، عدد چکش اشمیت و افت لوس آنجلس

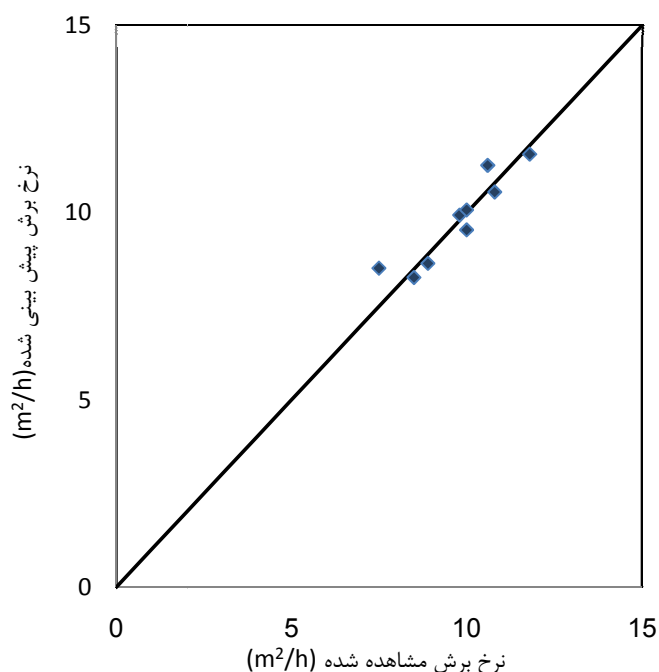
مقدار $P$	$t$	$F$ انتخاب شده از جدول	$F$	خطای معیار	ضرایب برآزش	مدل
۰/۰۱۷	۳/۴۹	۰/۱۵۴	۹/۸۳	۴/۶۶	۱۶/۲۸	عدد ثابت
۰/۰۱۶	-۳/۶			۰/۰۰۸۳	-۰/۰۲۹	
۰/۱۲۳	-۱/۸۵			۰/۰۴	-۰/۰۷۵	$R_n$
۰/۷۸۵	-۰/۲۹			۰/۰۹۸	-۰/۰۲۸	$LA$

جدول ۴-۱۶: رابطه‌ی به دست آمده از برآزش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، عدد چکش اشمیت و افت لوس آنجلس

خطای معیار تخمین	$R^2$ تصحیح شده	$R^2$	$R$	مدل
۰/۶۲۶	۰/۷۶۸	۰/۸۵۵	۰/۹۲۵	$P = ۱۶/۲۸ - ۰/۰۲۹ \sigma_c - ۰/۰۷۵ R_n - ۰/۰۲۸ LA$

با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $F$  به دست آمده از مدل یعنی  $9/83$  از مقدار  $F$  جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد یعنی  $0/154$  لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۴-۲۸، نمودار صحت‌سنجی رابطه‌ی بین مقاومت فشاری، عدد چکش اشمیت و افت لوس آنجلس با نرخ برش را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود به دلیل ضریب تعیین بزرگ این رابطه، نقاط نزدیک به نیمساز هستند.



شکل ۴-۲۸: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، عدد چکش اشمیت و افت لوس آنجلس

#### ۳-۲-۲-۴ مقاومت فشاری، مقاومت کششی و لوس آنجلس

نتایج برازش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری و عدد چکش اشمیت و افت لوس آنجلس در جدول ۴-۱۷ و جدول ۴-۱۸ درج شده‌است.



جدول ۴-۱۷: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و افت لوس- آنجلس

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	$F$	$F$ انتخاب شده از جدول	$t$	مقدار $P$
عدد ثابت	۹/۹۴	۲/۹۹	۶/۰۶۹	۰/۰۴	۳/۳۱۶	۰/۰۲۱
	-۰/۰۲۶	۰/۰۱۱			-۲/۴۵	۰/۰۵۷
	-۰/۱۸۴	۰/۲۲۵			-۰/۸۱۸	۰/۴۵
LA	۰/۰۹۴	۰/۰۷۶			۱/۲۴	۰/۲۷

جدول ۴-۱۸: رابطه‌ی به دست آمده از برازش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و افت لوس آنجلس

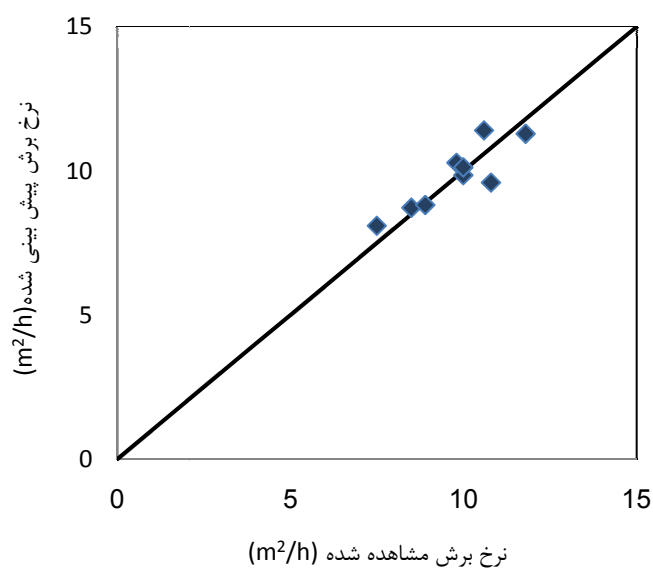
مدل	$R$	$R^2$	$R^2$ تصحیح شده	خطای معیار تخمین
$P = 9/94 - 0/026 \sigma_c - 0/184 \sigma_t + 0/094 LA$	۰/۸۸۵	۰/۷۸۴	۰/۶۵۵	۰/۷۶۳

با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $F$  به دست آمده از مدل یعنی ۶/۰۶۹ از مقدار  $F$  جدول

توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد یعنی ۰/۰۴ لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۴-۲۹، نمودار صحت‌سنجی رابطه‌ی بین مقاومت فشاری، مقاومت کششی و افت لوس-

آنجلس با نرخ برش را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۹: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، مقاومت کششی و افت لوس آنجلس

#### ۴-۲-۲-۴ مقاومت فشاری، مقاومت کششی و تخلخل

نتایج برآزش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و تخلخل در جدول ۱۹-۴ و جدول ۲۰-۴ درج شده است. ذکر این نکته ضروری است که برای این برآزش و برآزش‌های دیگری که تخلخل در آن آورده شده است، اطلاعات مرمیت سمیرم از داده‌های ورودی حذف شده است. دلیل این امر پیش‌تر ذکر شده است.

جدول ۱۹-۴: ضرایب برآزش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و تخلخل

مدل	ضرایب برآزش	خطای معیار	$F$	$F$ انتخاب شده از جدول	$t$	مقدار $P$	
عدد ثابت	۱۲/۰۵۵	۱/۵۵	۵/۵۷	۰/۰۴۶۵	۷/۷۶	۰/۰۰۱	
	-۰/۰۲۵	۰/۰۱۲				-۲/۰۵	۰/۱۱
	-۰/۱۷۵	۰/۱۸۷				-۰/۹۴	۰/۴
$n$	۰/۰۶۷	۰/۱۵۸				۰/۴۲	۰/۶۹

جدول ۲۰-۴: رابطه‌ی به دست آمده از برآزش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و تخلخل

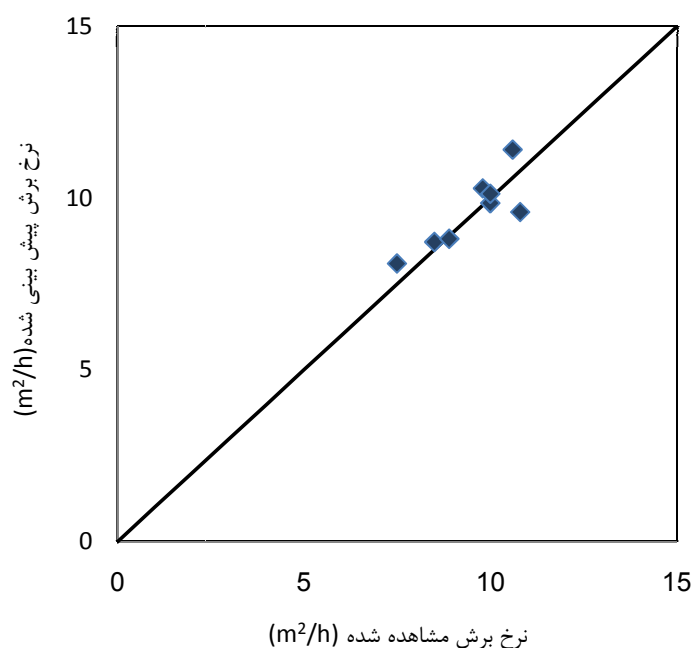
مدل	$R$	$R^2$	$R^2$ تصحیح شده	خطای معیار تخمین
$P = 12/055 - 0/025 \sigma_c - 0/175 \sigma_t + 0/067 n$	۰/۸۹۸	۰/۸۰۷	۰/۶۶۲	۰/۶۵۴

با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $F$  به دست آمده از مدل یعنی ۵/۵۷ از مقدار  $F$  جدول توزیع

با سطح اعتماد ۹۵ درصد یعنی ۰/۰۴۶۵ لذا حداقل یکی از ضرایب برآزش صفر نمی‌باشد.

شکل ۴-۳۰، نمودار صحت‌سنجی رابطه‌ی بین مقاومت فشاری، مقاومت کششی و تخلخل با

نرخ برش را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳۰: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، مقاومت کششی و تخلخل

#### ۴-۲-۲-۵ مقاومت فشاری، افت لوس آنجلس و تخلخل

نتایج برازش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، افت لوس آنجلس و تخلخل در جدول

۴-۲۱ و جدول ۴-۲۲ درج شده است.

جدول ۴-۲۱: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، افت لوس آنجلس و تخلخل

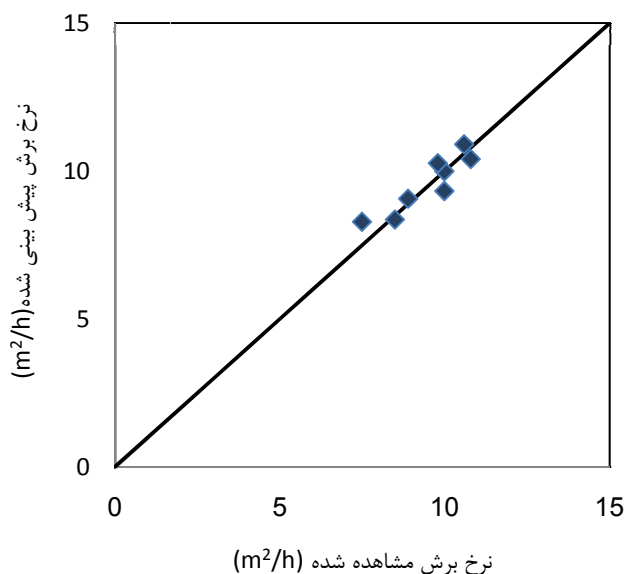
مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	$F$	$F$ انتخاب شده از جدول	$t$	مقدار $P$
عدد ثابت	۱۴/۸۹	۴/۳۶	۵/۴۳	۰/۰۶۸	۳/۴۲	۰/۰۲۷
	-۰/۰۳	۰/۰۱۲			-۲/۵۳	۰/۰۶۴
$LA$	-۰/۱۲۹	۰/۰۱۴			-۰/۱۸۵	۰/۴۳
$n$	۰/۰۹۶	۰/۱۶			۰/۵۹۹	۰/۵۸

جدول ۴-۲۲: رابطه‌ی به دست آمده از برازش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، افت لوس آنجلس و تخلخل

مدل	$R$	$R^2$	$R^2$ تصحیح شده	خطای معیار تخمین
$P = 14/89 - 0/03 \sigma_c - 0/129 LA + 0/096 n$	۰/۸۹۶	۰/۸۰۲	۰/۶۵۵	۰/۶۶

با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $F$  به دست آمده از مدل یعنی  $5/43$  از مقدار  $F$  جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد یعنی  $0/068$  لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۴-۳۱، نمودار صحت‌سنجی رابطه‌ی بین مقاومت فشاری، افت لوس‌آنجلس و تخلخل با نرخ برش را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳۱: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، افت لوس‌آنجلس و تخلخل

برازش‌های سه‌متغیره دیگری نیز انجام شده‌است، اما به دلیل ضریب تعیین پایین این روابط از شرح آن‌ها خودداری شده است. این روابط در جدول ۴-۲۳ درج شده است.

جدول ۴-۲۳: روابط حاصل از برازش سه‌متغیره با ضریب تعیین کم

رابطه	ضریب تعیین	متغیرها
$P = 13.66 - 0.029\sigma_c - 0.04R_n + 0.0083n$	$R^2 = 0.795$	مقاومت فشاری، چکش اشمیت، تخلخل
$P = 13.02 - 0.336\sigma_t - 0.116LA + 0.314n$	$R^2 = 0.63$	مقاومت کششی، افت لوس‌آنجلس، تخلخل
$P = 15.133 - 0.36\sigma_t + 0.0032LA - 0.07R_n$	$R^2 = 0.61$	مقاومت کششی، چکش اشمیت، افت لوس‌آنجلس
$P = 10.69 - 0.27\sigma_t - 0.0087LA + 0.27n$	$R^2 = 0.6$	مقاومت کششی، چکش اشمیت، تخلخل
$P = 10.46 - 0.031LA - 0.023R_n + 0.329n$	$R^2 = 0.49$	چکش اشمیت، افت لوس‌آنجلس، تخلخل

۳-۲-۴ برآزش چهارمتغیره

۱-۳-۲-۴ مقاومت فشاری، مقاومت کششی، افت لوس آنجلس و تخلخل

نتایج برآزش چهارمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، افت لوس آنجلس و تخلخل در جدول ۴-۲۴ و جدول ۴-۲۵ درج شده است. این رابطه، بیشترین ضریب تعیین را در بین باقی برآزش‌های چهار متغیره دارا می‌باشد.

جدول ۴-۲۴: ضرایب برآزش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، افت لوس آنجلس و تخلخل

مدل	ضرایب برآزش	خطای معیار	$F$	$F$ انتخاب شده از جدول	$t$	مقدار $P$
عدد ثابت	۱۷/۸۰۴	۴/۴۲	۵/۵۷	۰/۰۹۵	۴/۰۳۱	۰/۰۲۷
	-۰/۰۲۸	۰/۰۱۱			-۲/۵	۰/۰۸۷
$\sigma_t$	-۰/۲۵	۰/۱۷۷			-۱/۴۰۹	۰/۲۵۴
$LA$	-۰/۱۹	۰/۱۳۸			-۱/۳۷	۰/۲۶۳
$n$	۰/۰۸۹	۰/۱۴۴			۰/۶۱۴	۰/۵۸

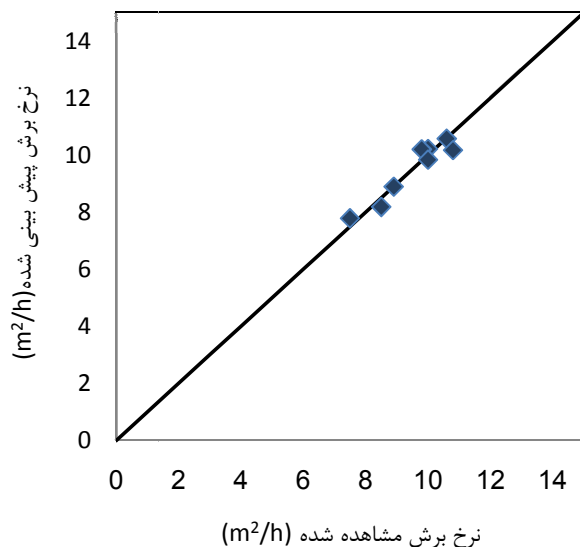
جدول ۴-۲۵: رابطه‌ی به دست آمده از برآزش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی افت لوس آنجلس و تخلخل

مدل	$R$	$R^2$	$R^2$ تصحیح شده	خطای معیار تخمین
$P = 17/804 - 0/028\sigma_c - 0/25\sigma_t - 0/19LA + 0/089n$	۰/۹۴	۰/۸۸	۰/۷۲	۰/۵۹

در این برآزش نیز با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $F$  به دست آمده از مدل یعنی ۵/۵۷ از مقدار  $F$  جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد یعنی ۰/۰۹۵ لذا حداقل یکی از ضرایب برآزش صفر نمی‌باشد.

شکل ۴-۳۲، نمودار صحت‌سنجی رابطه‌ی بین مقاومت فشاری، مقاومت کششی و افت لوس آنجلس و تخلخل با نرخ برش را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی بالای این رابطه باعث شده است که

نقاط بسیار نزدیک به نیمساز باشند و این امر نشان می‌دهد که این رابطه ضریب اطمینان بالایی دارد.



شکل ۴-۳۲: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، مقاومت کششی، افت لوس آنجلس و تخلخل

۲-۳-۲-۴ مقاومت فشاری، مقاومت کششی، افت لوس آنجلس و عدد چکش اشمیت  
 نتایج برازش چهارمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، افت لوس آنجلس و  
 عدد چکش اشمیت در جدول ۴-۲۶ و جدول ۴-۲۷ درج شده است.

جدول ۴-۲۶: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، افت لوس-  
 آنجلس و چکش اشمیت

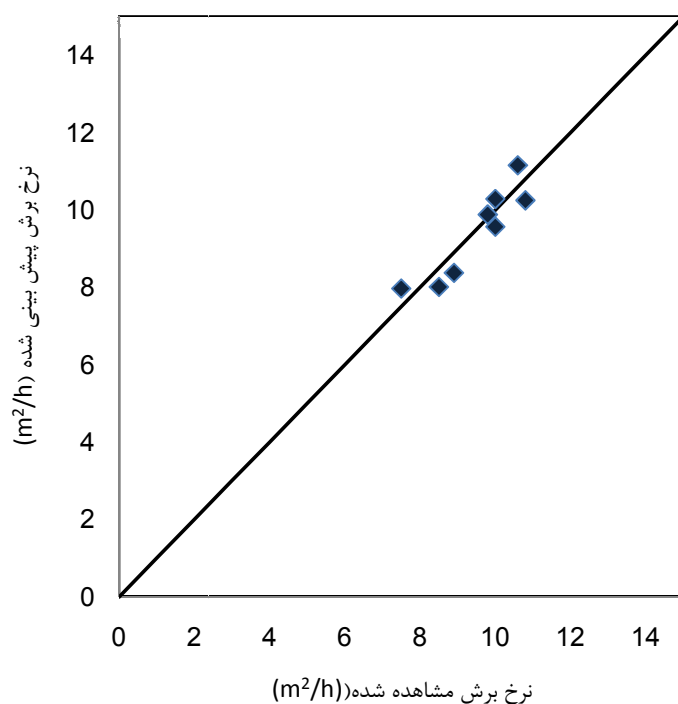
مقدار $P$	$t$	$F$ انتخاب شده از جدول	$F$	خطای معیار	ضرایب برازش	مدل
۰/۰۲۵	۳/۴۸	۰/۰۴۲	۷/۰۶	۴/۹۶	۱۷/۲۵۱	عدد ثابت
۰/۰۴۳	-۲/۹۳			۰/۰۰۹۲	-۰/۰۲۷	
۰/۰۴۶	-۰/۸۲			۰/۱۹۱	-۰/۱۵۷	$\sigma_t$
۰/۱۶۱	-۱/۷۲			۰/۰۴۲	-۰/۰۷	$Rn$
۰/۷۰۳	۰/۴۱			۰/۱۰۳	۰/۰۴۲	$LA$

جدول ۴-۲۷: رابطه‌ی به دست آمده از برازش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و افت لوس آنجلس و عدد چکش اشمیت

مدل	$R$	$R^2$	$R^2$ تصحیح شده	خطای معیار تخمین
$P = 17/251 - 0/027\sigma_c - 0/157\sigma_t + 0/042LA - 0/07R_n$	۰/۹۳۶	۰/۸۷۶	۰/۷۵	۰/۶۴

با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $F$  به دست آمده از مدل یعنی ۷/۰۶ از مقدار  $F$  جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد یعنی ۰/۰۴۲ لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۴-۳۳، نمودار صحت‌سنجی رابطه‌ی بین مقاومت فشاری، مقاومت کششی و افت لوس - آنجلس و چکش اشمیت با نرخ برش را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳۳: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، مقاومت کششی، عدد چکش اشمیت و افت لوس - آنجلس

### ۳-۳-۲-۴ مقاومت فشاری، چکش اشمیت، افت لوس آنجلس و تخلخل

نتایج برآزش چهارمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، افت لوس آنجلس و

تخلخل در جدول ۴-۲۸ و جدول ۴-۲۹ درج شده است.

جدول ۴-۲۸: ضرایب برآزش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، چکش اشمیت، افت لوس- آنجلس و تخلخل

مدل	ضرایب برآزش	خطای معیار	$F$	$F$ انتخاب شده از جدول	$t$	مقدار $P_r$
عدد ثابت	۱۸/۷۶۸	۵/۹۶	۴/۲۳	۰/۱۳۳	۳/۱۵	۰/۰۵۱
	-۰/۰۳۴	۰/۰۱۳			-۲/۶۵	۰/۰۷۷
$R_n$	-۰/۰۵۱	۰/۰۵۳			-۰/۹۶	۰/۴۱
$LA$	-۰/۱۵۷	۰/۱۵۱			-۱/۰۴	۰/۳۷
$n$	۰/۰۱۲	۰/۱۸۵			۰/۰۶۵	۰/۹۵

جدول ۴-۲۹: رابطه‌ی به دست آمده از برآزش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، افت لوس آنجلس، چکش اشمیت و تخلخل

مدل	$R$	$R^2$	$R^2$ تصحیح شده	خطای معیار تخمین
$P = 18.768 - 0.034\sigma_c - 0.51R_n - 0.157LA + 0.12n$	۰/۹۲	۰/۸۵	۰/۶۵	۰/۶۷

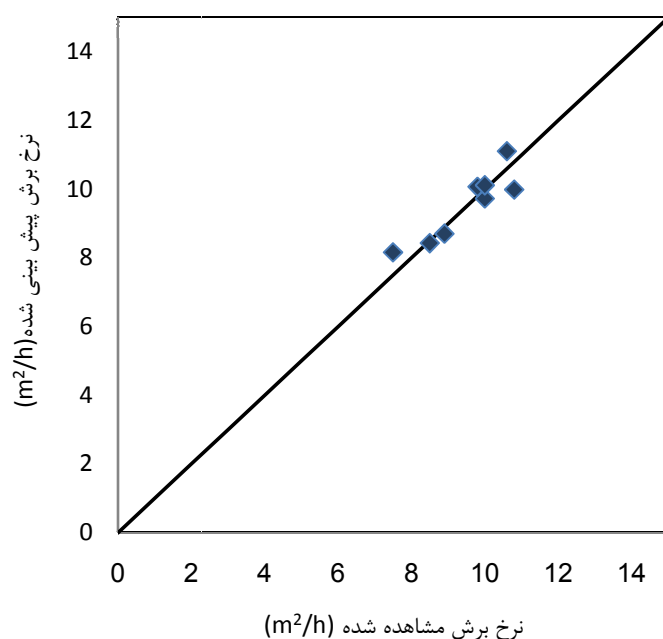
با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $F$  به دست آمده از مدل یعنی ۴/۲۳ از مقدار  $F$  جدول توزیع

با سطح اعتماد ۹۵ درصد یعنی ۰/۱۳۳ لذا حداقل یکی از ضرایب برآزش صفر نمی‌باشد.

شکل ۴-۳۴، نمودار صحت‌سنجی رابطه‌ی بین مقاومت فشاری، عدد چکش اشمیت، افت

لوس آنجلس و تخلخل با نرخ برش را نشان می‌دهد.





شکل ۴-۳۴: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، عدد چکش اشمیت و افت لوس آنجلس و تخلخل

۴-۳-۲-۴ مقاومت فشاری، مقاومت کششی، چکش اشمیت و تخلخل  
 نتایج برازش چهارمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، چکش اشمیت و  
 تخلخل در جدول ۴-۳۰ و جدول ۴-۳۱ درج شده است.

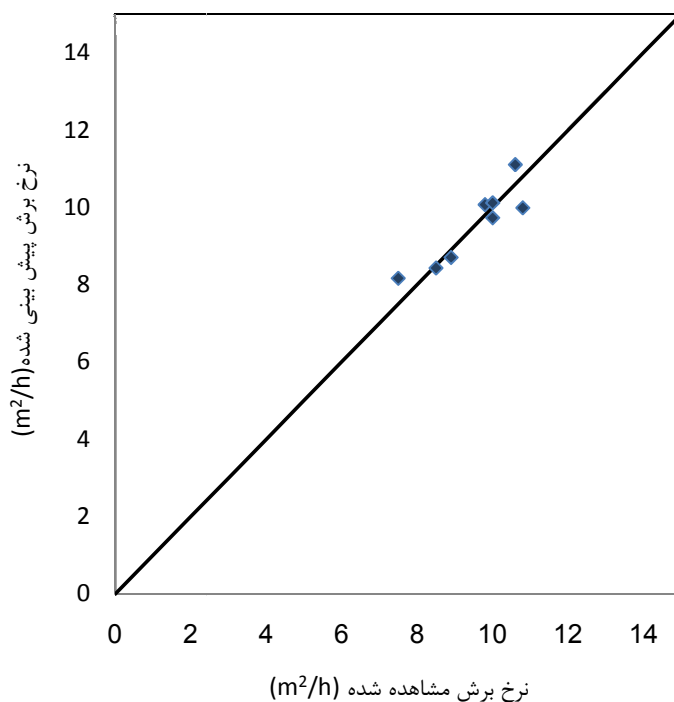
جدول ۴-۳۰: ضرایب برازش و نتایج آزمون  $F$  با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، چکش اشمیت  
 و تخلخل

مقدار $P$	$t$	$F$ انتخاب شده از جدول	$F$	خطای معیار	ضرایب برازش	مدل
۰/۰۳۳	۳/۷۶	۰/۱۶۴	۳/۵۲۵	۳/۶۸	۱۳/۸۵	عدد ثابت
۰/۱۵	-۱/۹۴			۰/۰۱۴	-۰/۰۲۶	$\sigma_c$
۰/۵۳	-۰/۷۱			۰/۲۱	-۰/۱۵	$\sigma_t$
۰/۶۲	-۰/۵۵			۰/۰۵۸	-۰/۰۳۲	$R_n$
۰/۹۵	-۰/۰۷۱			۰/۱۹۹	۰/۰۱۴	$n$

جدول ۴-۳۱: رابطه‌ی به دست آمده از برازش چندمتغیره با متغیرهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، چکش اشمیت و تخلخل

خطای معیار تخمین	$R^2$ تصحیح شده	$R^2$	$R$	مدل
۰/۷۲	۰/۵۹	۰/۸۲۴	۰/۹۱	$P = ۱۳/۸۵ - ۰/۰۲۶\sigma_c - ۰/۱۵\sigma_t + ۰/۰۳۲Rn + ۰/۰۱۴n$

با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $F$  به دست آمده از مدل یعنی  $۳/۵۲۵$  از مقدار  $F$  جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد یعنی  $۰/۱۶۴$  لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد. شکل ۴-۳۵، نمودار صحت‌سنجی رابطه‌ی بین مقاومت فشاری، مقاومت کششی، عدد چکش اشمیت و تخلخل با نرخ برش را نشان می‌دهد. ضریب تعیین بالای این رابطه باعث شده است که نقاط به نیمی‌ساز نزدیک باشند.



شکل ۴-۳۵: نمودار حاصل از اطلاعات مقاومت فشاری، مقاومت کششی، عدد چکش اشمیت و تخلخل

همچنین رابطه‌ی بین مقاومت کششی، چکش اشمیت، افت لوس آنجلس و تخلخل با نرخ برش نیز بررسی شده است. رابطه‌ی این معادله به صورت زیر می‌باشد:

$$P = 14.34 - 0.33\sigma_t - 0.012R_n + 0.299n - 0.12LA \quad R^2 = 0.64 \quad \text{رابطه ۹-۴}$$

همانطور که مشاهده می‌شود، ضریب تعیین این رابطه کم می‌باشد و قابل اطمینان نمی‌باشد.

#### ۴-۲-۴ برآزش پنج‌متغیره

برآزش پنج‌متغیره با پارامترهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، افت لوس آنجلس، عدد چکش اشمیت و تخلخل انجام شده است. این برآزش بهترین ضریب تعیین را تامین کرده است و کاربرد آن برای تخمین قابلیت برش سنگ اطمینان بیشتری را حاصل می‌کند. با استفاده از این رابطه و با در دست داشتن پنج پارامتری که در رابطه می‌باشند می‌توان قابلیت برش سنگ را تخمین زد. نتایج این برآزش در جدول ۴-۳۲ و جدول ۴-۳۳ درج شده است.

جدول ۴-۳۲: ضرایب برآزش و نتایج آزمون F در برآزش پنج‌متغیره

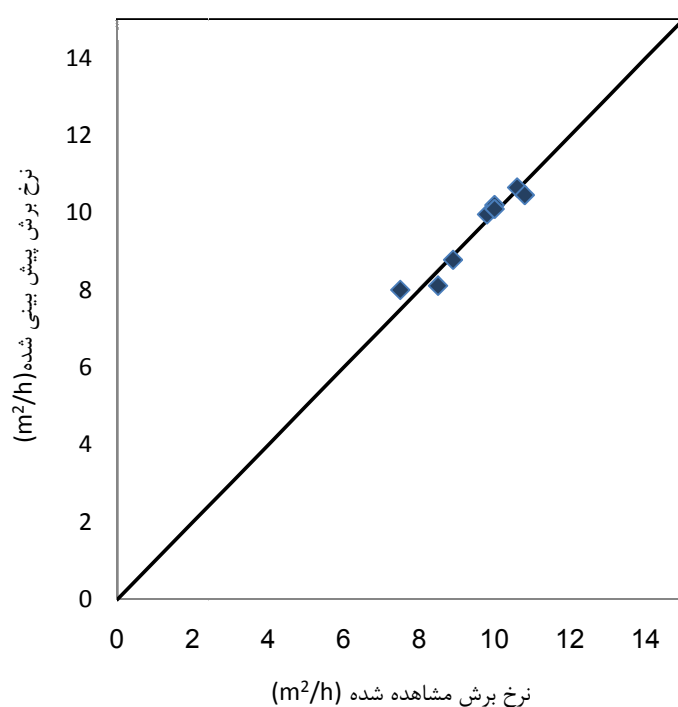
مقدار P	t	F انتخاب شده از جدول	F	خطای معیار	ضرایب برآزش	مدل
۰/۰۷۲	۳/۵۳	۰/۲۱	۴/۰۷	۵/۸۴	۲۰/۶۱	عدد ثابت
۰/۱۳۲	-۲/۴۸			۰/۰۱۲	-۰/۰۳۰	
۰/۳۶۳	-۱/۱۷			۰/۱۹۲	-۰/۲۲۴	$\sigma_t$
۰/۵۰۴	-۰/۸۱			۰/۰۵۱	-۰/۰۴۱	$R_n$
۰/۳	-۱/۳۹			۰/۱۴۸	-۰/۲۰۵	LA
۰/۹۱۳	۰/۱۲۴			۰/۱۷۴	۰/۰۲۲	n

جدول ۴-۳۳: رابطه‌ی به دست آمده از رگرسیون پنج‌متغیره

خطای معیار تخمین	$R^2$ تصحیح شده	$R^2$	R	مدل
۰/۶۳	۰/۶۸	۰/۹۱	۰/۹۵	$P = 20.61 - 0.3\sigma_c - 0.224\sigma_t - 0.41R_n - 0.205LA + 0.22n$

در مورد بررسی این برازش نیز، با توجه به بزرگتر بودن مقدار  $F$  به دست آمده از مدل یعنی  $4/07$  از مقدار  $F$  جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد یعنی  $0/21$  لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۴-۳۶، نمودار صحت‌سنجی رابطه‌ی مربوط به برازش پنج‌متغیره را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با ضریب تعیین بزرگی که این رابطه دارد، نقاط بسیار نزدیک به نیمساز هستند و این امر صحت رابطه را تأیید می‌کند.



شکل ۴-۳۶: نمودار حاصل از اطلاعات مربوط به برازش پنج‌متغیره

### ۳-۴ جمع‌بندی نتایج

در جدول ۴-۳۴، روابط حاصل از برازش دومتغیره درج شده است. این روابط، روابطی می‌باشد که ضریب تعیین نسبتاً خوبی داشته‌اند.

جدول ۴-۳۵، نیز روابط حاصل از برازش سه‌متغیره را نشان می‌دهد که ضریب تعیین قابل قبولی داشته‌اند. در جدول ۴-۳۶ نیز روابط حاصل از برازش چهارمتغیره که ضریب تعیین قابل قبولی داشته‌اند، درج شده است. همچنین رابطه‌ی حاصل از برازش پنج‌متغیره در جدول ۴-۳۷ درج شده است.

جدول ۴-۳۴: روابط حاصل از برازش‌های دو متغیره

رابطه	ضریب تعیین	متغیرها
$P = 13/39 - 0/29 \sigma_c - 0/284 \sigma_t$	۰/۷۱۸	مقاومت فشاری و مقاومت کششی
$P = 14/977 - 0/29 \sigma_c - 0/66 R_n$	۰/۸۵۳	مقاومت فشاری و عدد چکش اشمیت
$P = 8/46 - 0/3 \sigma_c + 0/12 LA$	۰/۷۵۶	مقاومت فشاری و افت لوس آنجلس
$P = 11/21 - 0/28 \sigma_c + 0/78 n$	۰/۷۶	مقاومت فشاری و تخلخل

جدول ۴-۳۵: روابط حاصل از برازش‌های سه‌متغیره

رابطه	ضریب تعیین	متغیرها
$P = 15/290 - 0/26 \sigma_c - 0/144 \sigma_t - 0/59 R_n$	۰/۸۷۱	مقاومت فشاری، مقاومت کششی و عدد چکش اشمیت
$P = 16/28 - 0/29 \sigma_c - 0/75 R_n - 0/28 LA$	۰/۸۵۵	مقاومت فشاری، عدد چکش اشمیت و لوس آنجلس
$P = 9/94 - 0/26 \sigma_c - 0/184 \sigma_t + 0/94 LA$	۰/۷۸۴	مقاومت فشاری، مقاومت کششی و لوس آنجلس
$P = 12/055 - 0/25 \sigma_c - 0/175 \sigma_t + 0/67 n$	۰/۸۰۷	مقاومت فشاری، مقاومت کششی و تخلخل
$P = 14/89 - 0/3 \sigma_c - 0/129 LA + 0/96 n$	۰/۸۰۲	مقاومت فشاری، لوس آنجلس و تخلخل

جدول ۴-۳۶: روابط حاصل از برازش‌های چهارمتغیره

رابطه	ضریب تعیین	متغیرها
$P = 17/804 - 0.28\sigma_c - 0.25\sigma_t - 0.19LA + 0.89n$	0/88	مقاومت فشاری، مقاومت کششی، افت لوس آنجلس و تخلخل
$P = 17/251 - 0.27\sigma_c - 0.157\sigma_t + 0.42LA + 0.7R_n$	0/876	مقاومت فشاری، مقاومت کششی، عدد چکش اشمیت و لوس آنجلس
$P = 18/768 - 0.34\sigma_c - 0.51R_n - 0.157LA + 0.12n$	0/85	مقاومت فشاری، چکش اشمیت، تخلخل و لوس آنجلس
$P = 13/85 - 0.26\sigma_c - 0.15\sigma_t + 0.32R_n + 0.14n$	0/824	مقاومت فشاری، مقاومت کششی، چکش اشمیت و تخلخل

جدول ۴-۳۷: رابطه حاصل از برازش پنج‌متغیره

رابطه	ضریب تعیین	متغیرها
$P = 20/61 - 0.3\sigma_c - 0.224\sigma_t - 0.41R_n - 0.205LA + 0.22n$	0/91	مقاومت فشاری، مقاومت کششی، افت لوس آنجلس، چکش اشمیت و تخلخل

با بررسی روابط حاصل از برازش‌های چندمتغیره، مشاهده می‌شود که بیشترین ضریب تعیین برای رابطه‌ی حاصل از برازش پنج‌متغیره می‌باشد. لذا بهترین رابطه که برای تخمین قابلیت برش توصیه می‌شود، رابطه‌ی حاصل از برازش پنج‌متغیره می‌باشد.

## فصل پنجم

# نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۵ فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

### ۱-۵ نتیجه‌گیری

در این تحقیق مطالعاتی با هدف یافتن رابطه بین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ با نرخ برش آن‌ها انجام شده است. در این راستا نه نمونه سنگ از معادن سنگ ساختمانی مختلف ایران جمع‌آوری شده است و در آزمایشگاه عملیات آماده‌سازی برای انجام آزمایشات مختلف انجام شده است. آزمایش‌های مکانیک سنگی و آزمایش XRF و بررسی‌های مینرالوژیکی و بافت روی نمونه‌ها انجام شده است. پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و نرخ برش‌های ثبت شده برای یافتن روابط مناسب جهت تخمین نرخ برش سنگ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برازش تک‌متغیره برای بررسی روابط بین پارامترها با نرخ برش استفاده شده است، به دلیل اینکه جامعه آماری دارای دو نوع متفاوت از سنگ می‌باشد، برازش‌ها برای هر نوع از سنگ نیز انجام شده است که این امر نشان داده است که مرمزیت‌ها از روند بهتری نسبت به تراورتن‌ها برخوردار هستند. این امر به دلیل توده‌ای بودن مرمزیت می‌باشد که این توده‌ای بودن تبعیت از روند خاص را به دنبال دارد. می‌توان این نتیجه را گرفت که وجود جامعه آماری تراورتن در کنار مرمزیت باعث کاهش ضریب تعیین رابطه‌ی نهایی شده است. در کل نتایج زیر حاصل گردیده است:



۱. مقاومت فشاری تک‌محوره رابطه معکوس با قابلیت برش سنگ دارد. رابطه‌ی نسبتاً خوبی بین این دو پارامتر مشاهده شده است. با افزایش مقاومت فشاری، نرخ برش کاهش می‌یابد. بیشتریت ضریب تعیین در برازش تک متغیره مربوط به این پارامتر بوده است.
۲. مقاومت کششی رابطه معکوس با قابلیت برش سنگ دارد. هرچند که ضریب تعیین نسبتاً پایین می‌باشد اما با افزایش مقاومت کششی، نرخ برش کاهش می‌یابد.
۳. رابطه‌ی معکوس بین عدد چکش اشمیت و نرخ برش به دست آمده است. در مورد این پارامتر نیز ضریب تعیین پایین می‌باشد اما با افزایش عدد چکش اشمیت نرخ برش سنگ کاهش می‌یابد.
۴. درصد افت لوس آنجلس رابطه مستقیم با نرخ برش سنگ دارد. در مورد این رابطه نیز با وجود ضریب تعیین پایین، با افزایش درصد افت لوس آنجلس، قابلیت برش سنگ افزایش می‌یابد.
۵. چگالی نیز رابطه‌ی معکوس با نرخ برش دارد. با افزایش چگالی قابلیت برش سنگ کاهش می‌یابد. اما ضریب تعیین این پارامتر کم می‌باشد.
۶. تخلخل رابطه‌ی مستقیم با نرخ برش دارد. با افزایش تخلخل قابلیت برش سنگ نیز افزایش می‌یابد. در این رابطه، ضریب تعیین نسبتاً خوبی مشاهده می‌شود. در مورد این پارامتر، احتمال داده می‌شود که وجود یک داده که اختلاف زیادی با بقیه داده‌ها دارد، موجب افزایش ضریب تعیین شده باشد، لذا بررسی‌های انجام شده پس از حذف این داده می‌باشد.
۷. رابطه‌ی خوبی بین پارامتر میزان سیلیس موجود و نرخ برش به دست نیامده است. دلیل این امر کربناته بودن سنگ‌های مورد مطالعه می‌باشد. در سنگ‌های ساختمانی گرانیته تاثیر سیلیس بر قابلیت برش بسیار محسوس‌تر می‌باشد در حالیکه در این تحقیق به دلیل نوع کربناته سنگ‌ها رابطه‌ی خوبی بین این دو پارامتر مشاهده نمی‌شود.

روابط حاصل از برآزش‌ها نیز آورده شده‌است. می‌توان از روابطی که دارای ضریب تعیین بالاتر هستند، در تخمین قابلیت برش سنگ استفاده کرد. از آن‌جا که ضریب تعیین در این روابط قابل قبول نمی‌باشند، لذا از برآزش‌های چندمتغیره نیز در این تحقیق استفاده شده است، متغیر چگالی و میزان سیلیس که ضریب تعیین کمتر از  $0/5$  دارند در برآزش‌های چندمتغیره استفاده نشده‌اند. لذا برآزش با ۵ متغیر انجام شده است. همچنین برای کاهش تعداد این متغیرها، رابطه‌ی بین هر یک از پارامترها نیز بررسی شده‌است، زیرا وجود دو متغیر که ضریب همبستگی بالایی با هم دارند موجب می‌شود که رابطه‌ی نهایی غیرواقعی شود. در این تحقیق برخلاف انتظار، رابطه‌ی قابل قبولی بین پارامترها پیدا نشده است. نتایج برآزش چندمتغیره به صورت زیر می‌باشد:

۱. در برآزش دومتغیره، رابطه‌ی بین هر دو پارامتر با نرخ برش بررسی شده است. ضریب تعیین در روابطی که از این برآزش به دست آمده قابل قبول نمی‌باشد. بیشترین ضریب تعیین برای رابطه‌ی بین مقاومت فشاری و چکش اشمیت با نرخ برش می‌باشد که  $0/803$  به دست آمده است.

۲. در برآزش سه‌متغیره رابطه بین هر سه پارامتر با نرخ برش بررسی شده است که بیشترین ضریب تعیین در این روابط مربوط به رابطه بین مقاومت فشاری، مقاومت کششی و عدد چکش اشمیت با نرخ برش می‌باشد که  $0/871$  است.

۳. در برآزش چهارمتغیره، بیشترین ضریب تعیین مربوط به رابطه بین مقاومت فشاری، مقاومت کششی، افت لوس آنجلس و تخلخل با نرخ برش می‌باشد که  $0/88$  است. ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد پارامترها ضریب تعیین افزایش یافته است.

۴. ضریب تعیین برآزش پنج متغیره  $0/91$  شده است که میزان قابل قبولی است. بیشترین ضریب تعیین مربوط به همین رابطه می‌باشد، لذا با در دست داشتن پارامترهای مربوط، می‌توان نرخ برش را با استفاده از رابطه به دست آمده از برآزش پنج‌متغیره با سطح اطمینان خوبی تخمین زد.

به‌طور کلی روابط حاصل از همه‌ی برآزش‌ها صحت سنجی شده‌اند و این صحت سنجی‌ها نشان داده است که روابط به دست‌آمده از صحت خوبی برای نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق برخوردار است. با حذف تراورتن‌ها ضریب همبستگی پارامترهای مرمیت‌ها با یکدیگر و با نرخ برش افزایش محسوسی دارد. در نتیجه انجام برآزش‌های چندمتغیره با این داده‌ها نتایج بهتری را می‌دهد و می‌توان روابط قابل قبول‌تری را برای مرمیت‌ها به دست آورد اما به دلیل کم‌بودن جامعه آماری با ۴ مرمیت نمی‌توان از برآزش چندمتغیره استفاده نمود.

## ۲-۵ پیشنهادات

برای کسب نتایج بهتر در تحقیقات مشابه پیشنهادات زیر توصیه می‌شود:

۱. در این تحقیق سنگ‌های مورد مطالعه از دو نوع مرمیت و تراورتن بوده‌اند که این مسئله در تعیین روابط بین پارامترها با نرخ برش، مشکل ایجاد می‌کند. در واقع تلفیق این دو نوع سنگ، نتایج را از نتایج واقعی که برای هر نوع سنگ به تنهایی انتظار داریم، دور می‌کند، لذا پیشنهاد می‌شود که جامعه‌ی آماری مورد مطالعه، یک نوع سنگ خاص باشد.
۲. بهتر است تعداد نمونه‌های مورد بررسی بیشتر باشد تا بررسی‌های آماری روی جامعه آماری کامل‌تری انجام شود.
۳. در برآزش‌های چندمتغیره بهتر است نوع سنگ‌ها را جداگانه بررسی کرد و پارامترهایی که ضریب همبستگی بالایی با هم دارند را در این برآزش‌ها حذف نمود.
۴. میزان سیلیس در این تحقیق با استفاده از آزمایش XRF انجام شده است که ممکن است این سیلیس، سیلیس موجود در کانی‌های رسی باشد و میزان واقعی کوارتز را ندهد، لذا پیشنهاد می‌شود که برای به دست آوردن میزان کوارتز در سنگ‌های کربناته از روش‌های دیگری مثل اسیدشویی و یا استفاده از مطالعات میکروسکوپی استفاده شود. همچنین برای بررسی بهتر این پارامتر با نرخ برش، بهتر است از پارامترهایی استفاده کرد که دارای

رابطه‌ای باشند که میزان سیلیس با باقی پارامترها در آن رابطه گنجانده شود و سپس رابطه‌ی آن پارامتر با نرخ برش بررسی شود.

۵. دانه‌بندی سنگ، محیط دانه‌ها، مساحت آن‌ها و باقی پارامترهای مربوط به بافت سنگ نیز بهتر است بررسی شود. در این راستا بررسی تاثیر ضریب بافت روی نرخ برش سنگ مطالعات جامع‌تری را در پی دارد.

۶. می‌توان تأثیر پارامترهای به دست آمده در این تحقیق را روی سایش دیسک برش نیز بررسی نمود. با بررسی سایش دیسک، سایش دیسک با توجه به پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ تخمین زده می‌شود و با انتخاب مناسب دیسک از سایش دیسک کاسته می‌شود.

## فهرست منابع

Buyuksagis, I.S. (2006) "Effect of cutting mode on the sawability of granites using segmented circular diamond sawblade" *Journal of Materials Processing Technology* 183 .

Delgado, A. and Rodriguez-Rey A. (2004) "The influence of rock microhardness on the sawability of Pink Porrino granite (Spain)" *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 42.

Engels, A. (2003) "the role of Particles Per Carat in diamond tool behaviour" *Industrial diamond review*.

Ersoy, A. and Atici, U. (2003) "Performance characteristics of circular diamond saws in cutting different types of rocks" *Diamond and Related Materials* 13 , 35.

Ersoya, A. and Buyuksagic, S. and Atici, U. (2004) "Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard abrasive rocks" *wear* 258.

Eyuboglu, A.S. and Ozcelik, Y. (2002) "Statistical and microscopic investigation of disc segment wear related to sawing Ankara andesites" *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40 .

Fener, M. and Kahraman, S. and Ozder, M.O. (2006) "Performance Prediction of Circular Diamond Saws from Mechanical Rock Properties in Cutting Carbonate Rocks" *rock mechanics and rock engineering* .

Gunaydin, O. and Kahraman, S. and Fener, M. (2003) "Sawability prediction of carbonate rocks from brittleness indexes" *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*.

Kahramana, S. and Altun, H. and tezekici, B.S. and Fener, M. (2006) "Sawability prediction of carbonate rocks from shear strength parameters using artificial neural networks". *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 43 (2006) .

Kahraman, S. and Fener, M. and Gunaydin, O. (2006) "Predicting the sawability of carbonate rocks using multiple curvilinear regression analysis" *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 41.

---

Özçelik, Y. (2007) "The effect of marble textural characteristics on the sawing efficiency of diamondsegmented frame saws" *industrial diamond review* .

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

معماریان ح. و علمی اسدزاده گ. (۱۳۸۴) "بررسی ارتباط بین میزان سایش و بافت سنگ در نمونه هایی از سنگهای ساختمانی ایران" نشریه دانشکده فنی .

اصانلو م. (۱۳۷۵) "روشهای حفاری" مرکز نشر صدرا.

عطایی م، (۱۳۸۷) " استخراج سنگهای ساختمانی" چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

سرابی ف، (۱۳۷۳) "سنگهای دگرگونی" چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران.

میکائیل ر، (۱۳۸۷) "پیشنهاد رساله دکتری".