



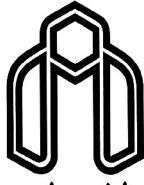
تشکر و قدردانی:

از زحمات بی دریغ اساتید راهنما، جناب آقای دکتر محمد عطایی و جناب آقای دکتر فرهنگ سرشکی نهایت تشکر و سپاس را دارم.

همچنین از جناب آقای مهندس رضا میکائیل، دکتر محمد کنشلو، مهندس نادر زیاری و مهندس خانعلیزاده نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

تقدیم به:

شب‌های خاموش پدرم.....



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج

پایان نامه کارشناسی ارشد

پیش بینی عملکرد سیم برش الماسه با توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ

نرگس قصری

اساتید راهنما:

جناب آقای دکتر محمد عطایی

جناب آقای دکتر فرهاد سرکشی

زمستان ۱۳۸۹

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱ فصل اول: مقدمه	۲
۱ - ۱ مقدمه	۲
۱ - ۲ کلیاتی در مورد سنگ‌های ساختمانی کربناته	۳
۱ - ۳ ضرورت تحقیق	۳
۱ - ۴ اهداف تحقیق	۴
۱ - ۵ سازماندهی پایان نامه	۴
۲ فصل دوم: مکانیزم برش و عوامل مؤثر بر قابلیت برش	۸
۲ - ۱ معرفی دستگاه سیم برش الماسه	۸
۲ - ۲ مکانیزم برش و فرآیند تشکیل تراشه	۱۱
۲ - ۳ نیروهای وارد بر سگمنت	۱۴
۲ - ۳ - ۱ نیروی گریز از مرکز	۱۵
۲ - ۳ - ۲ نیروی نرمال	۱۵
۲ - ۳ - ۳ نیروی وارد بر سیم	۱۶
۲ - ۳ - ۴ اصطکاک بین سنگ و ابزار برش	۱۶
۲ - ۳ - ۵ نیروی برشی (مماسی)	۱۶
۲ - ۴ پارامترهای مؤثر در فرآیند برش	۱۶
۲ - ۴ - ۱ - ۱ مشخصات فیزیکی سنگ	۱۸
۲ - ۴ - ۱ - ۲ مشخصات مکانیکی سنگ‌ها	۲۸
۲ - ۴ - ۱ - ۳ مشخصات ساختاری و محیطی سنگ	۳۴
۲ - ۴ - ۲ مشخصات برش	۳۵
۲ - ۴ - ۲ - ۱ ارتباط بین زاویه بین سیم و افق با نرخ برش	۳۵
۲ - ۴ - ۲ - ۲ ارتباط بین جریان مصرفی و نرخ برش	۳۶
۲ - ۴ - ۲ - ۳ ارتباط بین نرخ برش و بهره‌وری سیم	۳۶
۲ - ۴ - ۲ - ۴ ارتباط بین جریان مصرفی و بهره‌وری سیم	۳۷
۲ - ۴ - ۲ - ۵ تعیین بین بهره‌وری سیم و پارامترهای عملیاتی	۳۸
۲ - ۴ - ۲ - ۶ ارتباط بین نرخ برش و هزینه‌های برش	۳۹
۲ - ۴ - ۲ - ۷ ارتباط بین میزان تولید و فشار برش	۴۰

۴۱.....	۲-۴-۸ ارتباط بین میزان تولید و سرعت برش
۴۳.....	۳ فصل سوم: مطالعات آزمایشگاهی
۴۳.....	۳-۱ مقدمه
۴۴.....	۳-۲ جمع آوری نمونه از معدن
۴۵.....	۳-۳ آزمایش مقاومت فشاری تک محوری
۴۶.....	۳-۴ آزمایش مقاومت کششی
۴۸.....	۳-۵ آزمایش سختی اشمیت
۴۹.....	۳-۶ آزمایش سایش لوس آنجلس
۵۲.....	۳-۷ آزمایش چگالی و تخلخل
۵۴.....	۳-۸ تعیین ضریب بافت
۶۳.....	۳-۸-۱ اطلاعات به دست آمده از مقاطع
۶۹.....	۴ فصل چهارم: تأثیر پارامترهای فیزیکی بر نرخ برش
۶۹.....	۴-۱ مقدمه
۷۱.....	۴-۲ برآزش تک متغیره بین چگالی و تخلخل با نرخ برش
۷۱.....	۴-۲-۱ چگالی
۷۲.....	۴-۲-۲ تخلخل
۷۳.....	۴-۳ برآزش تک متغیره بین مشخصات بافتی با نرخ برش
۷۷.....	۴-۵ برآزش دو متغیره بین مشخصات بافتی و ضریب بافت و نرخ برش
۷۹.....	۴-۵-۱ ضریب بافت و سطح دانه ها
۸۰.....	۴-۵-۲ ضریب بافت و محیط دانه ها
۸۱.....	۴-۵-۳ ضریب بافت و قطر معادل
۸۲.....	۴-۵-۴ ضریب بافت و شاخص یکنواختی
۸۴.....	۴-۶ برآزش سه متغیره بین مشخصات بافتی و ضریب بافت با نرخ برش
۸۴.....	۴-۶-۱ ضریب بافت، سطح و محیط دانه ها
۸۵.....	۴-۶-۲ ضریب بافت، سطح و قطر معادل
۸۷.....	۴-۶-۳ ضریب بافت، سطح و شاخص یکنواختی
۸۸.....	۴-۶-۴ ضریب بافت، محیط و قطر معادل
۸۹.....	۴-۷-۵ ضریب بافت، محیط و شاخص یکنواختی
۹۱.....	۴-۶-۶ ضریب بافت، قطر معادل و شاخص یکنواختی

۴ - ۷	برازش چهار متغیره بین مشخصات بافتی و ضریب بافت با نرخ برش.....	۹۳
۴ - ۷ - ۱	ضریب بافت، سطح، محیط دانه ها و قطر معادل.....	۹۳
۴ - ۷ - ۲	ضریب بافت، سطح، محیط دانه ها و شاخص یکنواختی.....	۹۴
۴ - ۷ - ۳	ضریب بافت ، محیط دانه ها، قطر معادل و شاخص یکنواختی.....	۹۵
۵	فصل پنجم: بررسی تأثیر پارامترهای مکانیکی بر نرخ برش.....	۹۹
۵ - ۱	مقدمه.....	۹۹
۵ - ۲	برازش تک متغیره بین پارامترهای مکانیکی و نرخ برش.....	۱۰۱
۵ - ۳	برازش دو متغیره بین پارامترهای مکانیکی با نرخ برش.....	۱۰۴
۵ - ۳ - ۱	مقاومت فشاری و مقاومت کششی.....	۱۰۴
۵ - ۳ - ۲	مقاومت فشاری و سختی اشمیت.....	۱۰۵
۵ - ۳ - ۳	مقاومت فشاری و سایش لوس آنجلس.....	۱۰۶
۵ - ۳ - ۴	مقاومت کششی و سختی اشمیت.....	۱۰۷
۵ - ۳ - ۵	مقاومت کششی و سایش لوس آنجلس.....	۱۰۹
۵ - ۳ - ۶	سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس.....	۱۱۰
۵ - ۴	برازش سه متغیره بین پارامترهای مکانیکی با نرخ برش.....	۱۱۲
۵ - ۴ - ۱	مقاومت فشاری، مقاومت کششی و سختی اشمیت.....	۱۱۲
۵ - ۴ - ۲	مقاومت فشاری، مقاومت کششی و سایش لوس آنجلس.....	۱۱۳
۵ - ۴ - ۳	مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس.....	۱۱۴
۵ - ۵	برازش چهار متغیره بین پارامترهای مکانیکی با نرخ برش.....	۱۱۶
۵ - ۵ - ۱	مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس.....	۱۱۶
۶	فصل ششم: بررسی توأم پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بر نرخ برش.....	۱۲۰
۶ - ۱	مقدمه.....	۱۲۰
۶ - ۲	بررسی ارتباط بین مشخصات بافتی سنگ و مشخصات مهندسی سنگ.....	۱۲۱
۶ - ۳	برازش چند متغیره بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی.....	۱۲۶
۷	فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات.....	۱۳۱
۷ - ۱	مقدمه.....	۱۳۱
۷ - ۲	بررسی نتایج تأثیر پارامترهای فیزیکی بر نرخ برش.....	۱۳۲
۷ - ۳	بررسی نتایج تأثیر پارامترهای مکانیکی بر نرخ برش.....	۱۳۴
۷ - ۴	بررسی نتایج تأثیر توأم پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بر نرخ برش.....	۱۳۵

۷ - ۷ پیشنهادات.....	۱۳۵
----------------------	-----

- شکل ۱-۱: فلوجارت پایان نامه ۶
- شکل ۱-۲: استخراج بلوک سنگی توسط سیم برش الماسه ۹
- شکل ۲-۲: نمای شماتیکی از اجزاء سیم الماسه ۱۰
- شکل ۲-۳: تعامل نیروهای موجود میان دانه الماسه و سطح خراشیده شده از سنگ ۱۲
- شکل ۲-۴: نمایی از تشکیل یک منطقه پلاستیک به همراه ترک‌های شعاعی و جانبی در برش ترد ۱۳
- شکل ۲-۵: نیروهای وارد بر سگمنت ۱۵
- شکل ۲-۶: عوامل مؤثر بر فرآیند برش ۱۷
- شکل ۲-۷: مفهوم فاکتور زاویه ۲۳
- شکل ۲-۸: شمای کلی یک مقطع نازک برای محاسبه ضریب بافت ۲۵
- شکل ۲-۹: تأثیر زاویه بر نرخ برش ۳۵
- شکل ۲-۱۰: تأثیر توان ماشین بر روی نرخ برش ۳۶
- شکل ۲-۱۱: تأثیر بهره وری سیم بر نرخ برش ۳۷
- شکل ۲-۱۲: تأثیر جریان مصرفی بر بهره وری سیم ۳۸
- شکل ۲-۱۳: عوامل مؤثر بر میزان بهره وری سیم ۳۸
- شکل ۲-۱۴: تأثیر نرخ برش بر هزینه ۳۹
- شکل ۲-۱۵: ارتباط بین فشار ماشین و میزان تولید ۴۰
- شکل ۲-۱۶: ارتباط بین میزان تولید و سرعت برش ۴۱
- شکل ۳-۱: فلوجارت تحقیق ۴۳
- شکل ۳-۲: نمونه سنگ بادباد غربی قبل و بعد از آزمایش مقاومت فشاری ۴۵
- شکل ۳-۳: نمونه سنگ چشمه حاجی قبل و بعد از آزمایش مقاومت فشاری ۴۶
- شکل ۳-۴: نمونه قبل و بعد از تست مقاومت کششی ۴۷
- شکل ۳-۵: نمونه باد باد شرقی در حال اندازه‌گیری جرم خشک ۵۲
- شکل ۳-۶: شمای کلی یک مقطع نازک جهت محاسبه ضریب بافت ۵۴
- شکل ۳-۷: فرمت دیجیتالی مقطع نازک باد باد غربی ۵۶
- شکل ۳-۸: هیستوگرام قطر بزرگ، قطر کوچک، مساحت و محیط دانه های موجود در مقطع نازک باد باد غربی ۵۶
- شکل ۳-۹: فرمت دیجیتالی مقطع نازک باد باد شرقی ۵۷
- شکل ۳-۱۰: هیستوگرام قطر بزرگ، قطر کوچک، مساحت و محیط دانه های موجود در مقطع نازک باد باد شرقی ۵۷
- شکل ۳-۱۱: فرمت دیجیتالی مقطع نازک جوشان رود ۵۸
- شکل ۳-۱۲: هیستوگرام قطر بزرگ، قطر کوچک، مساحت و محیط دانه های موجود درمقطع نازک جوشان رود ۵۸
- شکل ۳-۱۳: فرمت دیجیتالی مقطع نازک چشمه حاجی ۵۹
- شکل ۳-۱۴: هیستوگرام قطر بزرگ، قطر کوچک، مساحت و محیط دانه های موجود در مقطع نازک چشمه حاجی ۵۹
- شکل ۳-۱۵: فرمت دیجیتالی مقطع نازک معدن سنج ۶۰
- شکل ۳-۱۶: هیستوگرام قطر بزرگ، قطر کوچک، مساحت و محیط دانه های موجود در مقطع نازک معدن سنج ۶۰

- شکل ۳-۱۷: فرمت دیجیتالی مقطع نازک اردود غربی..... ۶۱
- شکل ۳-۱۸: هیستوگرام قطر بزرگ، قطر کوچک، مساحت و محیط دانه های موجود در مقطع نازک اردود غربی ... ۶۱
- شکل ۳-۱۹: فرمت دیجیتالی مقطع نازک اردود کارگاه ۴..... ۶۲
- شکل ۳-۲۰: هیستوگرام قطر بزرگ، قطر کوچک، مساحت و محیط دانه های موجود در مقطع نازک اردود کارگاه ۴..... ۶۲
- شکل ۳-۲۱: نمودار ستونی میانگین مساحت دانه‌ها در سنگ‌های مختلف ۶۳
- شکل ۳-۲۲: نمودار ستونی میانگین قطر بزرگ دانه‌ها در سنگ‌های مختلف ۶۴
- شکل ۳-۲۳: نمودار ستونی میانگین محیط دانه‌ها در سنگ‌های مختلف ۶۴
- شکل ۳-۲۴: نمودار ستونی میانگین قطر کوچک دانه‌ها در سنگ‌های مختلف ۶۵
- شکل ۳-۲۵: نمودار ستونی ضریب بافت برای نمونه های مورد مطالعه ۶۷
- شکل ۴-۱: برازش تک متغیره بین چگالی و نرخ برش و نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی و واقعی ۷۲
- شکل ۴-۲: برازش تک متغیره بین تخلخل و نرخ برش و نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی و واقعی ۷۲
- شکل ۴-۳: برازش تک متغیره بین مشخصات بافتی نمونه ها و نرخ برش ۷۴
- شکل ۴-۴: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۱۲) ۸۰
- شکل ۴-۵: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۱۳) ۸۱
- شکل ۴-۶: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۱۴) ۸۲
- شکل ۴-۷: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۱۵) ۸۳
- شکل ۴-۸: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۱۶) ۸۵
- شکل ۴-۹: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۱۷) ۸۷
- شکل ۴-۱۰: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۱۸) ۸۸
- شکل ۴-۱۱: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۱۹) ۸۹
- شکل ۴-۱۲: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۲۰) ۹۰
- شکل ۴-۱۳: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۲۱) ۹۲
- شکل ۴-۱۴: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۲۲) ۹۴
- شکل ۴-۱۵: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۲۳) ۹۵
- شکل ۴-۱۶: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۲۴) ۹۷
- شکل ۵-۱: برازش تک متغیره بین مشخصات مهندسی نمونه ها و نرخ برش ۱۰۱
- شکل ۵-۲: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۵) ۱۰۵
- شکل ۵-۳: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۷) ۱۰۶
- شکل ۵-۴: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۷) ۱۰۷
- شکل ۵-۵: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۸) ۱۰۸
- شکل ۵-۶: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۹) ۱۱۰
- شکل ۵-۷: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۱۰) ۱۱۱
- شکل ۵-۸: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۱۱) ۱۱۳

- شکل ۵- ۹: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۱۲)..... ۱۱۴
- شکل ۵- ۱۰: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۱۳)..... ۱۱۵
- شکل ۵- ۱۱: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۱۴)..... ۱۱۷
- شکل ۶- ۱: ارتباط بین سطح دانه و مشخصات مهندسی نمونه ها..... ۱۲۲
- شکل ۶- ۲: ارتباط بین محیط دانه و مشخصات مهندسی نمونه ها..... ۱۲۲
- شکل ۶- ۳: ارتباط بین قطر معادل و مشخصات مهندسی نمونه ها..... ۱۲۳
- شکل ۶- ۴: ارتباط بین نسبت وضعیت دانه ها و مشخصات مهندسی نمونه ها..... ۱۲۳
- شکل ۶- ۵: ارتباط بین فشردگی و مشخصات مهندسی نمونه ها..... ۱۲۴
- شکل ۶- ۶: ارتباط بین فاکتور شکل و مشخصات مهندسی نمونه ها..... ۱۲۴
- شکل ۶- ۷: ارتباط بین شاخص قفل شدگی و مشخصات مهندسی نمونه ها..... ۱۲۵
- شکل ۶- ۸: ارتباط بین شاخص یکنواختی و مشخصات مهندسی نمونه ها..... ۱۲۵
- شکل ۶- ۹: ارتباط بین ضریب بافت و مشخصات مهندسی نمونه ها..... ۱۲۶
- شکل ۶- ۱۰: نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۶-۳)..... ۱۲۹

جدول ۱-۲: بررسی مشخصات فیزیکی سنگ توسط محققین	۱۸
جدول ۲-۲: روش وزن‌دهی به تفاوت‌های زاویه‌های دانه‌های کشیده	۲۴
جدول ۲-۳: بررسی پارامترهای مقاومتی توسط محققین	۲۹
جدول ۲-۴: بررسی‌های صورت گرفته بر روی شاخص‌های سختی توسط محققین	۳۱
جدول ۲-۵: بررسی انواع ساینده‌گی توسط محققین	۳۲
جدول ۲-۶: بررسی تأثیر خواص الاستیک و پلاستیک توسط محققین	۳۴
جدول ۳-۱: مشخصات معادن مورد مطالعه	۴۴
جدول ۳-۲: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری	۴۶
جدول ۳-۳: نتایج آزمایش مقاومت کششی	۴۸
جدول ۳-۴: نتایج آزمایش سختی اشمیت	۴۹
جدول ۳-۵: تعداد و وزن گوی‌های فولادی دستگاه لوس آنجلس	۵۰
جدول ۳-۶: دانه بندی نمونه‌های انتخابی برای قطعات بزرگتر از ۱۹ میلی‌متر	۵۰
جدول ۳-۷: دانه بندی نمونه‌های انتخابی برای قطعات کوچکتر از ۳۸ میلی‌متر	۵۱
جدول ۳-۸: نتایج تست لوس آنجلس	۵۲
جدول ۳-۹: چگالی و تخلخل نمونه‌های مورد مطالعه	۵۴
جدول ۳-۱۰: میانگین اطلاعات پایه در مورد بافت هر نمونه سنگ	۶۳
جدول ۳-۱۱: مشخصات بافتی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه	۶۵
جدول ۳-۱۲: پارامترهای مربوط به تعیین ضریب بافت	۶۶
جدول ۴-۱: مشخصات فیزیکی نمونه‌های مورد مطالعه	۷۰
جدول ۴-۲: مشخصات سیم برش الماسه	۷۱
جدول ۴-۳: نرخ برش نمونه‌ها توسط سیم برش الماسه در معدن	۷۱
جدول ۴-۴: رابطه به دست آمده از برازش تک متغیره بین چگالی و تخلخل و نرخ برش	۷۳
جدول ۴-۵: روابط حاصل از برازش تک متغیره بین مشخصات بافتی و نرخ برش	۷۷
جدول ۴-۶: ضریب همبستگی بین پارامترهای بافتی	۷۸
جدول ۴-۷: نتایج برازش دو متغیره برای ضریب بافت و سطح دانه‌ها	۷۹
جدول ۴-۸: نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای ضریب بافت و سطح دانه‌ها	۷۹
جدول ۴-۹: نتایج برازش دو متغیره برای ضریب بافت و محیط دانه‌ها	۸۰
جدول ۴-۱۰: نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای ضریب بافت و محیط دانه‌ها	۸۰
جدول ۴-۱۱: نتایج برازش دو متغیره برای ضریب بافت و قطر معادل	۸۱
جدول ۴-۱۲: نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای ضریب بافت و قطر معادل	۸۱
جدول ۴-۱۳: نتایج برازش دو متغیره برای ضریب بافت و شاخص یکنواختی	۸۲
جدول ۴-۱۴: نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای ضریب بافت و شاخص یکنواختی	۸۳
جدول ۴-۱۵: روابط حاصل از برازش دو متغیره بین برخی از مشخصات بافتی و ضریب بافت با نرخ برش	۸۴
جدول ۴-۱۶: نتایج برازش سه متغیره برای ضریب بافت، سطح و محیط دانه‌ها	۸۴

جدول ۴-۱۷: نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای ضریب بافت، سطح و محیط دانه ها	۸۵
جدول ۴-۱۸: نتایج برازش سه متغیره برای ضریب بافت، سطح و قطر معادل	۸۶
جدول ۴-۱۹: نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای ضریب بافت، سطح و قطر معادل	۸۶
جدول ۴-۲۰: نتایج برازش سه متغیره برای ضریب بافت، سطح و شاخص یکنواختی	۸۷
جدول ۴-۲۱: نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای ضریب بافت، سطح و شاخص یکنواختی	۸۷
جدول ۴-۲۲: نتایج برازش سه متغیره برای ضریب بافت، محیط و قطر معادل	۸۸
جدول ۴-۲۳: نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای ضریب بافت، محیط و قطر معادل	۸۹
جدول ۴-۲۴: نتایج برازش سه متغیره برای ضریب بافت، محیط و شاخص یکنواختی	۹۰
جدول ۴-۲۵: نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای ضریب بافت، محیط و شاخص یکنواختی	۹۰
جدول ۴-۲۶: نتایج برازش سه متغیره برای ضریب بافت، قطر معادل و شاخص یکنواختی	۹۱
جدول ۴-۲۷: نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای ضریب بافت، قطر معادل و شاخص یکنواختی	۹۱
جدول ۴-۲۸: روابط حاصل از برازش سه متغیره بین برخی از مشخصات بافتی با نرخ برش	۹۲
جدول ۴-۲۹: نتایج برازش چهار متغیره برای ضریب بافت، سطح، محیط دانه‌ها و قطر معادل	۹۳
جدول ۴-۳۰: نتایج و ضرایب برازش چهار متغیره برای ضریب بافت، سطح، محیط دانه ها و قطر معادل	۹۳
جدول ۴-۳۱: نتایج برازش چهار متغیره برای ضریب بافت، سطح، محیط دانه ها و شاخص یکنواختی	۹۴
جدول ۴-۳۲: نتایج و ضرایب برازش چهار متغیره برای ضریب بافت، سطح، محیط دانه ها و شاخص یکنواختی	۹۵
جدول ۴-۳۳: نتایج برازش چهار متغیره برای ضریب بافت، محیط دانه ها، قطر معادل و شاخص یکنواختی	۹۶
جدول ۴-۳۴: نتایج و ضرایب برازش چهار متغیره برای ضریب بافت، محیط دانه ها، قطر معادل و شاخص یکنواختی	۹۶
جدول ۴-۳۵: روابط حاصل از برازش چهار متغیره بین برخی از مشخصات بافتی و ضریب بافت با نرخ برش	۹۷
جدول ۵-۱: پارامترهای مکانیکی نمونه های مورد مطالعه	۱۰۰
جدول ۵-۲: نتایج حاصل از برازش تک متغیره بین پارامترهای مکانیکی و نرخ برش	۱۰۳
جدول ۵-۳: ضریب همبستگی بین پارامترهای مکانیکی سنگ	۱۰۳
جدول ۵-۴: نتایج برازش دو متغیره برای مقاومت فشاری و مقاومت کششی	۱۰۴
جدول ۵-۵: نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای مقاومت فشاری و مقاومت کششی	۱۰۴
جدول ۵-۶: نتایج برازش دو متغیره برای مقاومت فشاری و سختی اشमित	۱۰۵
جدول ۵-۷: نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای مقاومت فشاری و سختی اشमित	۱۰۵
جدول ۵-۸: نتایج برازش دو متغیره برای مقاومت فشاری و سایش لوس آنجلس	۱۰۶
جدول ۵-۹: نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای مقاومت فشاری و سایش لوس آنجلس	۱۰۷
جدول ۵-۱۰: نتایج برازش دو متغیره برای مقاومت کششی و سختی اشमित	۱۰۸
جدول ۵-۱۱: نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای مقاومت کششی و سختی اشमित	۱۰۸
جدول ۵-۱۲: نتایج برازش دو متغیره برای مقاومت کششی و سایش لوس آنجلس	۱۰۹
جدول ۵-۱۳: نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای مقاومت کششی و سایش لوس آنجلس	۱۰۹
جدول ۵-۱۴: نتایج برازش دو متغیره برای سختی اشमित و سایش لوس آنجلس	۱۱۰

جدول ۵- ۱۵:	نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس.....	۱۱۰
جدول ۵- ۱۶:	نتایج حاصل از برازش دو متغیره بین برخی از پارامترهای مکانیکی و نرخ برش	۱۱۱
جدول ۵- ۱۷:	نتایج برازش سه متغیره برای مقاومت فشاری، کششی و سختی اشمیت.....	۱۱۲
جدول ۵- ۱۸:	نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای مقاومت فشاری، کششی و سختی اشمیت.....	۱۱۲
جدول ۵- ۱۹:	نتایج برازش سه متغیره برای مقاومت فشاری، کششی و سایش لوس آنجلس.....	۱۱۳
جدول ۵- ۲۰:	نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای مقاومت فشاری، کششی و سایش لوس آنجلس	۱۱۳
جدول ۵- ۲۱:	نتایج برازش سه متغیره برای مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس	۱۱۴
جدول ۵- ۲۲:	نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس	۱۱۵
جدول ۵- ۲۳:	نتایج حاصل از برازش سه متغیره بین برخی از پارامترهای مکانیکی و نرخ برش	۱۱۶
جدول ۵- ۲۴:	نتایج برازش چهار متغیره برای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس.....	۱۱۶
جدول ۵- ۲۵:	نتایج و ضرایب برازش چهار متغیره برای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس.....	۱۱۶
جدول ۵- ۲۶:	نتایج حاصل از برازش چهار متغیره بین مقاومت فشاری، کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس با نرخ برش	۱۱۷
جدول ۶- ۱:	ضریب همبستگی بین پارامترهای مکانیکی و فیزیکی.....	۱۲۷
جدول ۶- ۲:	برازش چند متغیره بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی با نرخ برش	۱۲۷
جدول ۶- ۳:	نتایج برازش بین مقاومت کششی، ضریب بافت، سطح و قطر معادل با نرخ برش	۱۲۸
جدول ۶- ۴:	نتایج و ضرایب برازش بین مقاومت کششی، ضریب بافت، سطح و قطر معادل با نرخ برش	۱۲۸

چکیده

در این تحقیق، به منظور پیش‌بینی نرخ برش سیم برش الماسه، یازده نمونه سنگ ساختمانی کربناته از معادن ایران، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هدف از این مطالعه، تعیین روابط بین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ با قابلیت برش آن‌ها می‌باشد. به منظور ارزیابی تأثیر مشخصات بافتی بر روی نرخ برش، ابتدا از هر سنگ مورد مطالعه، یک مقطع نازک میکروسکوپی تهیه، و در مرحله بعد از هر مقطع در زیر میکروسکوپ عکس گرفته شد، سپس عکس‌های مذکور با ورود به نرم افزار اتوکد دیجیتایز شدند، سپس مساحت و محیط دانه‌های موجود در مقاطع تعیین شده است. بعد از این، فرمت دیجیتالی عکس‌ها چاپ شدند و قطر بزرگ و قطر کوچک هر کدام از دانه‌های مشخص شده به صورت دستی تعیین شد و مشخصات دیگر بافتی، طبق روابط ریاضی تعیین شده‌اند. پس از انجام مراحل فوق، پارامترهای دیگر نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی اشمیت، سایش لوس آنجلس، چگالی و تخلخل سنگ‌ها نیز، در آزمایشگاه تعیین شده است. از طرف دیگر، مشخصات سیم برش الماسه و نرخ برش نمونه‌ها نیز در معدن ثبت شده است. در پایان، ارتباط بین پارامترهای ذکر شده و نرخ برش با استفاده از برازش‌های تک متغیره به دست آمده است. همچنین برای حصول ضریب همبستگی بیشتر، از برازش چند متغیره استفاده شده است. برای کاهش تعداد متغیرهای درگیر در برازش چند متغیره، 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. از میان پارامترهای فیزیکی مساحت دانه، قطر معادل و ضریب بافت و از میان پارامترهای مکانیکی مقاومت فشاری، مقاومت کششی و سختی اشمیت ارتباط بسیار خوبی با نرخ برش داشتند و رابطه نهایی برای پیش‌بینی نرخ برش بر حسب این پارامترها می‌باشد.

کلمات کلیدی: مشخصات بافتی، خواص مکانیکی، سنگ ساختمانی، نرخ برش

فصل اول

مقدمه

۱ فصل اول

۱ - ۱ مقدمه

امروزه سیم برش الماسه در معادن سنگ‌های ساختمانی به طور قابل توجهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تخمین قابلیت برش یک سنگ، در پیش‌بینی هزینه‌ها و طراحی یک معدن سنگ ساختمانی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. شناخت کامل سنگ‌های ساختمانی و ارزیابی توانایی اجرایی دستگاه‌های برش در معادن، طراحان و برنامه‌ریزان تولید را به سمت بهبود سرعت برش و افزایش تولید سوق می‌دهد. نیاز به تولید بیشتر و کیفیت بهتر جهت رقابت مؤثر در بازارهای جهانی مستلزم استفاده از تکنولوژی و ابزارهای پیشرفته در بخش استخراج و فرآوری سنگ می‌باشد. به‌کارگیری صحیح این وسایل از یک سو و شناخت و بررسی دقیق عملکرد آن‌ها از سوی دیگر می‌تواند به نحو چشم‌گیری در بالا بردن بازدهی و کیفیت سنگ‌های استخراج شده و فرآوری شده کمک کند. با توجه به منابع عظیم سنگ‌های ساختمانی در کشور و با توجه به نیاز کشور در زمینه تولید و صادرات این محصول با کمترین هزینه‌های تولیدی، ارتقاء راندمان مصرف انرژی و کاهش واردات ابزارهای الماسه، این تحقیق صورت

گرفت، تا بتوان علاوه بر شناخت بیشتر سنگ‌های ساختمانی در کشور، سهم کوچکی را در بهینه‌سازی الگوی برش و کاهش مصرف انرژی و واردات تجهیزات و ابزارهای الماسه داشت.

۱ - ۲ کلیاتی در مورد 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 آلتره 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 و منیزیم (دولومیت) تشکیل شده است، که با توجه به ناخالصی‌های جزئی، رنگ آنها تغییر می‌کند. در صورت آغشتگی‌های بلورهای کلسیت به اکسیدهای آهن، بسته به شدت آغشتگی، رنگ آنها از کرم تا قهوه‌ای قرمز تغییر 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، دولومیت خوانده می‌شود. سنگ‌های ساختمانی کربناته شامل سنگ‌های با تعریف بالا و همچنین سنگ‌های دگرگون شده آهکی می‌باشد که در آن تبلور مجدد (مثل مرمر) صورت گرفته است. این گروه شامل: تراورتن، مرمر، مرمریت، سنگ چینی و کریستال می‌باشد (عطایی، ۱۳۸۷).

۱ - ۳ ضرورت تحقیق

برش سنگ، به عنوان یکی از عملیات مهندسی، در زمینه‌های مختلف فنی و مهندسی به ویژه در مهندسی معدن، کاربردهای وسیع و تعیین کننده‌ای پیدا کرده است. در حال حاضر کیفیت برش به نحوه فزاینده‌ای در صنعت سنگ اهمیت یافته و پیش‌بینی می‌شود که در آینده نیز نقش مهمی را در این زمینه ایفا کند. هم اکنون کشور ما به عنوان یکی از کشورهای غنی در زمینه ذخایر و منابع سنگ‌های ساختمانی در جهان مطرح می‌باشد، با این حال علی‌رغم

وجود چندین هزار معدن و کارخانه سنگبری فعال، صنعت سنگ ایران نتوانسته است سهم شایسته‌ای در بازارهای جهانی به دست آورد. آنچه مسلم است، استعدادها و قابلیت‌های بالقوه و گسترده‌ای برای رونق صادرات سنگ کشورمان وجود دارند، ولی میزان صادرات در مقایسه با حجم ذخایر، تعداد معادن و کارخانه‌های فرآوری فعال مطابقت و تناسب چندانی ندارد. از سوی دیگر با افزایش میزان بازدهی و راندمان ماشین‌آلات برش در این صنعت می‌توان تا حد زیادی به کاهش مصرف انرژی در کشور کمک کرد. با این کار شاخص شدت انرژی که نشان دهنده مصرف انرژی برای تولید مقدار معینی کالا و خدمات است را می‌توان به حد قابل قبول و معقولانه‌ای کاهش داد. افزایش راندمان مصرف انرژی به معنی کاهش میزان مصرف انرژی به ازاء واحد تولید و بهبود بازده ماشین‌آلات، از جمله راه‌کارهای مؤثر برای کاهش قیمت تمام شده کالا در فرآیندهای تولیدی و نخستین گام بهینه‌سازی در بخش صنعت است. لذا این امر باید به عنوان یکی از عوامل مهم در تصمیم‌گیری‌ها، مورد توجه قرار گیرد.

۱ - ۴ اهداف تحقیق

در این تحقیق، بر روی پارامترهای وابسته به سنگ، بررسی و مطالعه صورت گرفته است. 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 سیم برش الماسه، نرخ برش و به طور کلی طراحی معدن را با ضریب اطمینان بالاتری انجام داد. در واقع با انجام این مطالعات می‌توان از صرف هزینه و انرژی اضافی جلوگیری به عمل آورد. همچنین بررسی و یافتن ارتباط بین پارامترهای مینرالوژیکی و بافتی با نرخ برش نیز از اهداف دیگر پایان نامه است.

۱ - ۵ سازمان‌دهی پایان‌نامه

این تحقیق در ۷ 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 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 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 این فصل، ارتباط بین پارامترهای فیزیکی سنگ که در آزمایشگاه به دست آمده، و نرخ برش سنگ، که از معدن به دست آمده، بیان می‌شود. همچنین رابطه‌ای به دست می‌آید که طبق آن، بتوان نرخ برش سنگ را بر طبق برخی از پارامترهای فیزیکی پیش‌بینی نمود.

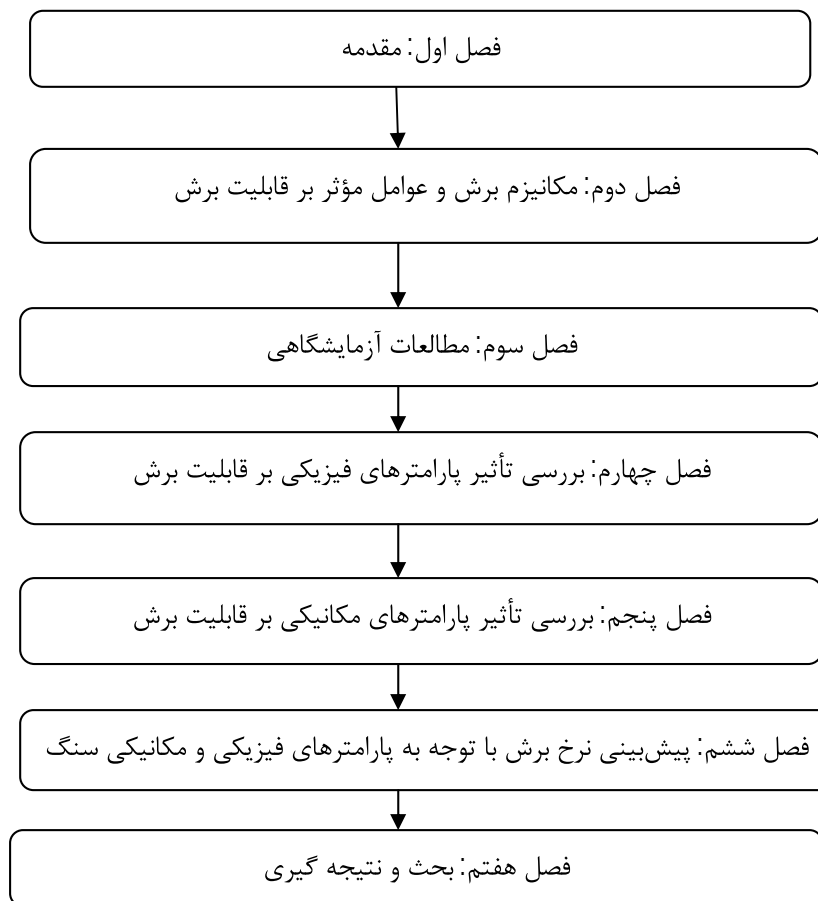
۵- فصل پنجم: در این فصل، ارتباط بین پارامترهای مکانیکی سنگ که در آزمایشگاه به دست آمده، و نرخ برش سنگ که از معدن به دست آمده، بیان می‌شود. همچنین رابطه‌ای به دست می‌آید که طبق آن، بتوان نرخ برش سنگ را بر طبق برخی از پارامترهای مکانیکی پیش‌بینی نمود.

۶- فصل ششم: در این فصل، با توجه به نتایج فصل چهارم و پنجم، برای پیش‌بینی نرخ برش، به بررسی توأم پارامترهای فیزیکی و مکانیکی پرداخته شده است. همچنین رابطه‌ای به دست می‌آید که طبق آن، بتوان نرخ برش سنگ را بر طبق برخی از پارامترهای مکانیکی و فیزیکی پیش‌بینی نمود. اعتبار سنجی مدل نهایی ارائه شده، نیز در این فصل صورت گرفته است.

۷- فصل هفتم: در این فصل، که فصل پایانی است، نتایج حاصل از این تحقیق و پیشنهاداتی که

در این زمینه ارائه شده است، آورده شده است.

فلوچارت پایان نامه در شکل ۱-۱ آورده شده است.



شکل ۱-۱: فلوچارت پایان‌نامه

فصل دوم

مکانیزم برش و پارامترهای مؤثر بر
قابلیت برش

۲ فصل دوم

۲ - ۱ معرفی دستگاه سیم برش الماسه

دستگاه سیم برش الماسه اولین انتخاب، برای استخراج سنگ‌های ساختمانی می‌باشد. این دستگاه، علاوه بر فواید زیست محیطی فراوان، نرخ تولید بالایی دارد و بلوک‌های بزرگتر با هزینه کمتر استخراج می‌شوند. سیم برش الماسه در معادن مرمریت و دیگر معادن سنگ نرم، برای بیش از سه دهه تجربه شده است و اکنون به یک ابزار ضروری در معادن مرمریت تبدیل شده است. در معادن گرانیت، به علت ساینده‌گی بیشتر، برش با سیم الماسه موفقیت‌آمیز نبوده است، اما با پیشرفت تکنولوژی ساخت الماس‌های مصنوعی، برش با سیم الماسه اقتصادی شده است. دستگاه سیم برش الماسه شامل سیم الماسه، به طول ۲۵ تا ۴۵ متر (حداکثر ۱۵۰ متر) به وسیله یک اینچ با قرقه راهنما، در یک جهت معین به طور دایم روی سنگ بریده می‌شود. برای این منظور ابتدا در سنگ دو

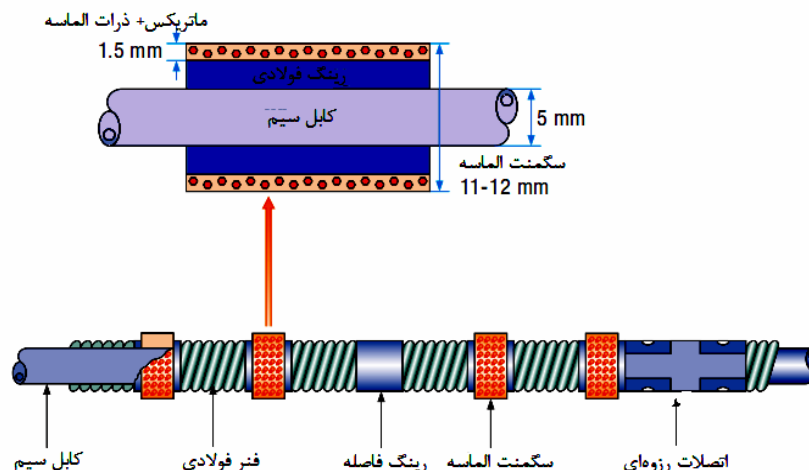
چال عمود برهم که محدوده بلوک را تشکیل می‌دهند حفر شده، و سیم الماسه، از آن عبور داده می‌شود. دستگاه برش در موقع کار بر روی ریل قرار دارد و با استفاده از امکانات الکترونیکی و هیدرولیکی به طور اتوماتیک بر روی ریل جابجا می‌شود و با انجام عمل برش، خود را به عقب می‌کشد. نیروی کشش سیم که حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم است، به صورت ثابت حفظ می‌شود. دستگاه وینچ، معمولاً در فاصله ۵ الی ۸ متری سینه کار قرار می‌گیرد. مکانیزم دستگاه به گونه‌ای است که می‌توان با جابجایی و تغییر جهت محور وینچ، از حالت افقی به عمودی، سنگ را به طور افقی و یا عمودی برید (نبیان و همکاران، ۱۳۷۰). شکل ۱-۲ نمایی از بلوک سنگی در حال استخراج، توسط سیم برش الماسه را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲: استخراج بلوک سنگی توسط سیم برش الماسه (STONEBTB, 2010)

سیم الماسه، حامل سگمنت‌های الماسی به صورت حلقه‌هایی به قطر ۱۰ تا ۱۲ میلی‌متر است که روی سیم کابل فولادی به قطر ۵ میلی‌متر قرار می‌گیرند و در فواصل بین سگمنت‌ها، سیم فنرهای فولادی و اتصالات ایمنی قرار دارد. تعداد سگمنت‌ها در هر متر طول سیم الماسه، حدود ۳۳ عدد

است، که به فواصل ۲۵ تا ۳۲ میلی‌متر از یکدیگر قرار می‌گیرند (نبیان و همکاران، ۱۳۷۰). شکل ۲-۲ نمای شماتیکی از اجزاء سیم الماسه را به همراه سگمنت نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲: نمای شماتیکی از اجزاء سیم الماسه (Ozçelik, 2004)

برای این که بتوان با سیم برش الماسه به راحتی و با ایمنی کار کرد، کنترل دستگاه برش از قبیل نحوه چرخش، میزان کشش، سرعت و ... را در قابی طراحی کرده‌اند که در حدود ۱۰ متری دستگاه قرار دارد و عملیات برش توسط تابلوی کنترل و به طور اتوماتیک انجام می‌شود. روی تابلو دکمه‌ای قرار گرفته است که می‌توان با استفاده از آن، سرعت برش و کشش سیم را در زمان برش تنظیم کرد. با این روش از ایجاد ضربه بر سیم الماسه جلوگیری می‌شود. به منظور خنک کردن سیم الماسه، باید پیوسته آب مورد نیاز تأمین شود. در برش افقی، باید دقت کرد که آب به اندازه کافی وارد شیار شود. در غیر این صورت در اثر برش، پودر سنگ با آب مخلوط می‌شود و سبب تشکیل رسوب می‌شود. از بین بردن این رسوبات، به آب فراوان و پر فشار نیاز خواهد داشت به طوری که در برش‌های افقی مصرف آب حدود ۲۰ درصد بیشتر از برش‌های عمودی است. در استفاده از سیم برش الماسه باید به دو عامل زیر توجه کرد:

الف- بازدهی سیم برش: سطحی از سنگ است که توسط سیم برش در یک ساعت بریده می‌شود.

ب- مصرف ویژه سیم: مقدار متوسط طولی از سیم، که به ازاء هر متر مربع از سنگ مستهلک می‌شود و به کیفیت سنگ، کیفیت سیم و مهارت اپراتور بستگی دارد.

سرعت حرکت سیم برش، به سختی سنگ بستگی دارد و معمولاً در سنگ‌های سخت نظیر گرانیت حدود ۲۰ الی ۳۰ متر در ثانیه و در سنگ‌های چینی و مرمریت ۳۰ الی ۳۶ متر در ثانیه می‌باشد. سرعت برش به کیفیت سنگ بستگی دارد که در معادن مرمریت از ۴ الی ۷ متر مربع در ساعت است. در حالت مطلوب سرعت برش به ۹ متر مربع در ساعت نیز می‌رسد. در اثر اصطکاک، که بین سیم و سنگ‌ها در حالت برش به وجود می‌آید، اجزاء سیم الماسه تحت خوردگی شدید قرار می‌گیرند. در سنگ‌های سخت‌تر این خوردگی بیشتر است. بنابراین پس از هر ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر مربع برش، باید قطعاتی مانند فنرها و اتصالات فاصله کابل فولادی را تعویض کرد. عمر مفید سگمنت‌های الماسه سه برابر عمر مفید سایر قطعات سیم برش شامل فنرها، اتصالات و غیره می‌باشد. عوامل مختلفی ممکن است باعث پاره شدن سیم‌های برش الماسه شود که مهم‌ترین آنها عبارتند از (عطایی، ۱۳۸۷):

۱- مستهلک شدن سیم و داشتن زدگی در سیم که باید مرتباً از آن بازدید به عمل آورد.

۲- فشار بیش از حد به سیم یا بالا بردن کشش دستگاه

۳- وجود خاک و سنگ‌ریزه در مسیر برش

۴- برخورد به سطوح بسیار نرم و یا بسیار سخت در سطح برش

۵- انحراف در مسیر سیم برش

۶- زاویه تند در برش

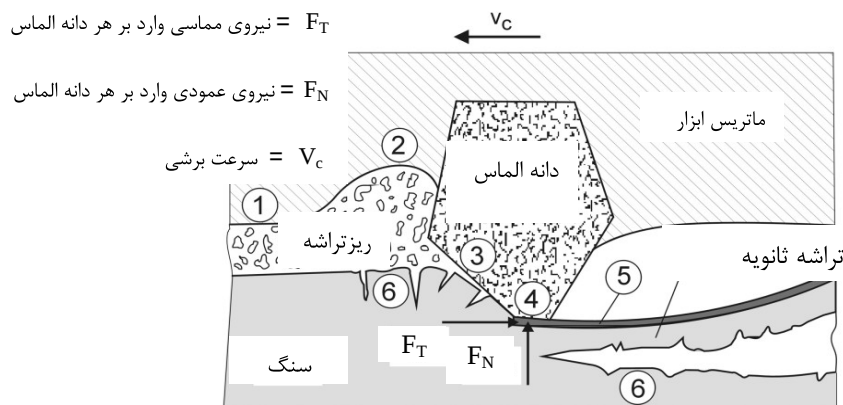
۷- تغییر ناگهانی ولتاژ یا آمپر و یا نقص فنی دستگاه

۲-۲ مکانیزم برش و فرآیند تشکیل تراشه

فرآیند برش سنگ، یک فرآیند سایشی می‌باشد. به طوری که می‌توان برش سنگ به کمک سگمنت‌های الماسه را سایش ذرات تشکیل دهنده سنگ، توسط عبور دانه‌های الماس روی سطح سنگ

دانست. برای درک بهتر این فرآیند و شرایط حاکم بر دانه الماس در حال برش، شناخت مکانیزم برش و پارامترهای مؤثر بر آن لازم و ضروری می‌باشد.

به طور کلی، فرآیند برش سنگ با استفاده از تجهیزات الماسه را می‌توان در طی دو مرحله به طور خلاصه بیان کرد. مرحله نخست را می‌توان در نتیجه حرکت سگمنت‌های الماسه بر روی سطح برش^۱ و به دنبال آن تشکیل تراشه^۲ سنگ در نتیجه نفوذ دانه‌های الماس در داخل سنگ دانست. در طی این فرآیند، دانه الماس با خراشیدن و شکافتن سطح برش، موجب تشکیل تراشه و ایجاد سطح جدید برای دانه الماس بعدی می‌شود. هنگامی که سنگ، توسط ابزار الماسه تحت برش قرار می‌گیرد، تعامل مکانیکی میان ابزار و سنگ، نیروهای فرآیند را ایجاد می‌کنند که عمدتاً ناشی از فاکتورهایی نظیر تغییر شکل الاستیکی و پلاستیکی در سنگ، اصطکاک میان سگمنت (دانه الماس و ماتریکس) با سنگ و تراشه‌های حاصل از برش می‌باشد. شکل ۲-۱ نمای شماتیکی از یک دانه الماس در حال برش و تعامل نیروهای موجود میان دانه الماس و سطح خراشیده شده از سنگ را نشان می‌دهد. دو مولفه نیروی مماسی و نیروی عمودی، از جمله مهم‌ترین نیروهای مؤثر در مکانیزم برش سنگ می‌باشند (Tonshoff et al, 2002).



- ۱ - ناحیه اصطکاک بین ریز تراشه‌ها و ماتریس ابزار
- ۲ - ناحیه سایش یافته توسط ریز تراشه‌ها و تراشه‌ها
- ۳ - ناحیه تشکیل تراشه اولیه
- ۴ - ناحیه اصطکاک بین سنگ و دانه الماس
- ۵ - ناحیه تغییر شکل پلاستیک
- ۶ - ناحیه تغییر شکل الاستیک

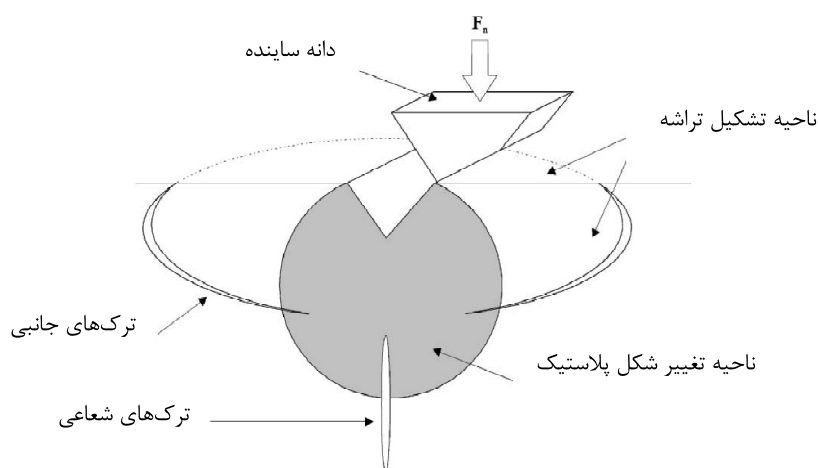
شکل ۲-۳: تعامل نیروهای موجود میان دانه الماسه و سطح خراشیده شده از سنگ (Tonshoff et al, 2002)

¹-Work piece

²-Chip

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 می‌شوند. این مرحله از فرآیند برش، تحت عنوان مکانیزم اولیه تشکیل تراشه نامیده می‌شود. زمانی که تراشه اولیه شکل می‌گیرد بخشی از سنگ که در ناحیه تحتانی دانه الماس قرار دارد در اثر تنش فشاری اعمال شده از طرف دانه، تغییر شکل پلاستیک می‌دهد. مطابق شکل ۲-۴ یک ناحیه تغییر شکل پلاستیک برگشت‌ناپذیر در زیر فشاری که از حرکت مماسی دانه الماس ایجاد شده، به وجود می‌آید. به دلیل ماهیت ترد سنگ، تغییر شکل پلاستیک و تنش‌های فشاری، ترک‌هایی به دو صورت شعاعی و جانبی (عرضی)، در ناحیه تحت برش ایجاد می‌شوند. منشأ تشکیل این ترک‌ها، تنش‌های کششی در درون ناحیه تغییر شکل پلاستیک است. این گونه ترک‌ها بعد از حذف بار اعمالی به دلیل تمرکز تنش‌های کششی پس‌ماند روی نوک ترک گسترش می‌یابند (Konstanty, 2002).

همان‌طور که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است ترک‌های جانبی از زیر ناحیه تغییر شکل پلاستیک شروع شده و تا سطح سنگ گسترش می‌یابند.



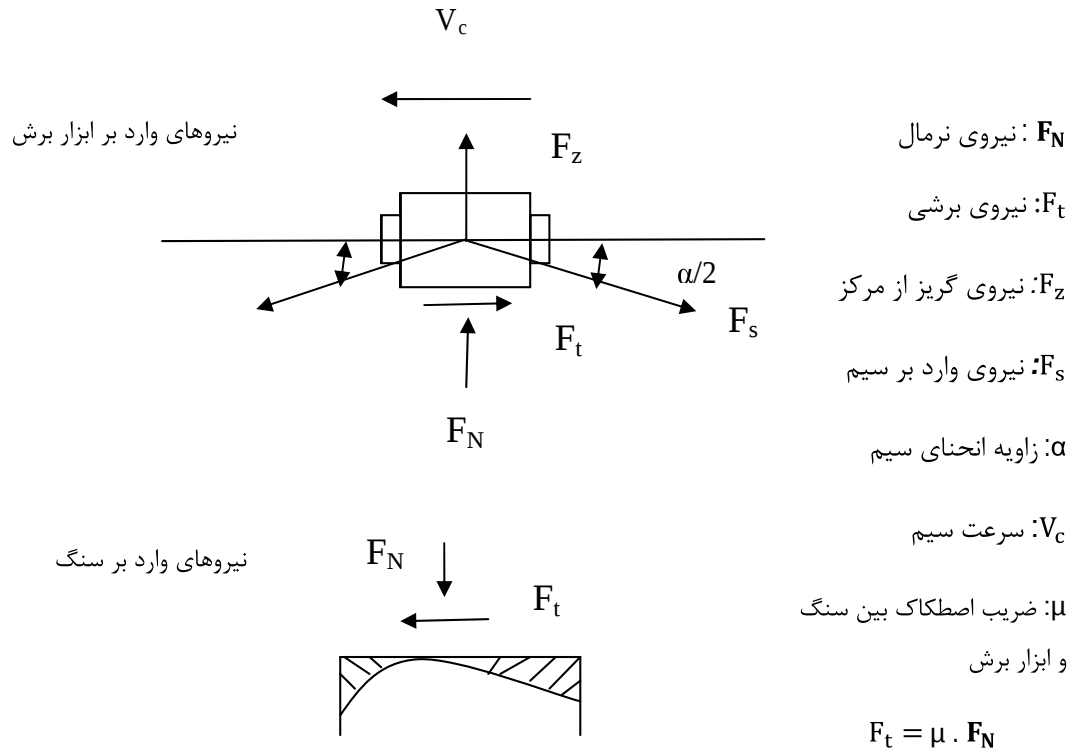
شکل ۲-۴: نمایی از تشکیل یک منطقه پلاستیک به همراه ترک‌های شعاعی و جانبی در برش ترد (Konstanty, 2002)

معمولاً این ترک‌ها بعد از برداشت بارهای اعمالی ایجاد می‌شوند. در حقیقت این تغییر ناگهانی تنش، موجب یک بازگشت الاستیکی شدید شده که این بازگشت منجر به تنش کششی بحرانی و

شکست ترد می‌شود. در این مرحله تراشه ثانویه در زیر دانه الماس تشکیل می‌شود. به عبارت دیگر، ترک‌های جانبی و شکست ترد عامل ایجاد تراشه‌های ثانویه می‌شوند. تراشه‌های ایجاد شده در فرآیندهای موفق سنگ‌بری عمدتاً از این نوع می‌باشند و برشی که از چنین مشخصه‌ای برخوردار باشد از راندمان و کارایی بیشتری برخوردار خواهد بود. مرحله آخر از فرآیند برش، حذف تراشه‌ها و کاهش دمای محیط به کمک جریان سیال سرد می‌باشد. در طی این فرآیند تراشه‌های ایجاد شده در مرحله قبل با فشار سیال (در اکثر فرآیندهای برش از جریان آب شهری به عنوان سیال روان‌کار استفاده می‌شود) از سطح برش خارج شده و موجب کاهش دمای محیط برش (ناحیه میان سگمنت و سطح برش) می‌شوند. تأثیر روان‌کار هنوز به درستی در شرایط مختلف آشکار نشده است. اما با توجه به بررسی‌های انجام شده، مشخص شده است که کاربرد سیال در فرآیند، افزایش ریز تراشه‌های اولیه که ناشی از تنش‌های فشاری لبه ابزار برنده می‌باشد را به همراه دارد. با توجه به نتایج بررسی‌های انجام شده می‌توان گفت که کاربرد آب به عنوان روان‌کار موجب برشی نرم‌تر و هموارتر با کیفیت سطح بهتر می‌شود. تمرکز بارهای حرارتی روی نوک دانه‌ها کاهش یافته و تراشه‌های تولید شده به شکل بهتری از محیط برش خارج می‌شوند.

۲ - ۳ نیروهای وارد بر سگمنت

نیروهای وارد شده به سگمنت در حین برش، در شکل ۲-۵ نشان داده شده است (Tonshoff, 2001):



شکل ۲-۵: نیروهای وارد بر سگمنت (Tonshoff, 2001)

۲-۳-۱ نیروی گریز از مرکز

نیروی گریز از مرکز، در نتیجه سرعت بالای ابزار برش است و باعث کشیده شدن بدنه ابزار روی قطعه کار می‌شود.

۲-۳-۲ نیروی نرمال

تغذیه ابزار برش توسط نیروی نرمال تأمین می‌شود، که باعث می‌شود تا ابزار، فشار وارد شده از طرف سنگ را تحمل کند. نیروی نرمال در فرآیند برش، فاکتور قطعی محسوب می‌شود، زیرا با افزایش بیش از حد این نیرو، اصطکاک بین ابزار و قطعه کار افزایش می‌یابد و دانه‌های الماسه آسیب می‌بینند. همچنین این مسئله، موجب افزایش تنش و در نتیجه، افزایش نیروی وارد بر سیم و افزایش فرسایش سیم می‌شود. قسمتی از نیروی نرمال صرف نیروی گریز از مرکز و قسمتی دیگر صرف نیروی مماسی می‌شود. مقدار نیروی نرمال وارد بر سنگ، بستگی به تعداد سگمنت‌های درگیر بین سنگ و ابزار برش دارد.

۳-۳-۲ نیروی وارد بر سیم

نیروی وارد بر سیم، به توانایی حرکت سیم، تعداد سگمنت و ساختار سگمنت‌ها بستگی دارد. عوامل مهمی که بر نیروی وارد بر سیم تأثیر می‌گذارند عبارتند از:

- ۱- طولی از سیم که با سنگ درگیر است.
- ۲- زاویه درگیری ($\frac{\alpha}{2}$) که در طی فرآیند برش تغییر می‌کند.

۳-۳-۲ اصطکاک بین سنگ و ابزار برش

افزایش اصطکاک بین سنگ و ابزار برش باعث افزایش فرسایش می‌شود.

۳-۳-۲ نیروی برشی (مماسی)

بین مواد انتقال یافته و نیروی برش ارتباطی وجود دارد، با انتقال مواد حاصل از برش سنگ نیروی برش کمتر می‌شود.

۲ - ۴ پارامترهای مؤثر در فرآیند برش

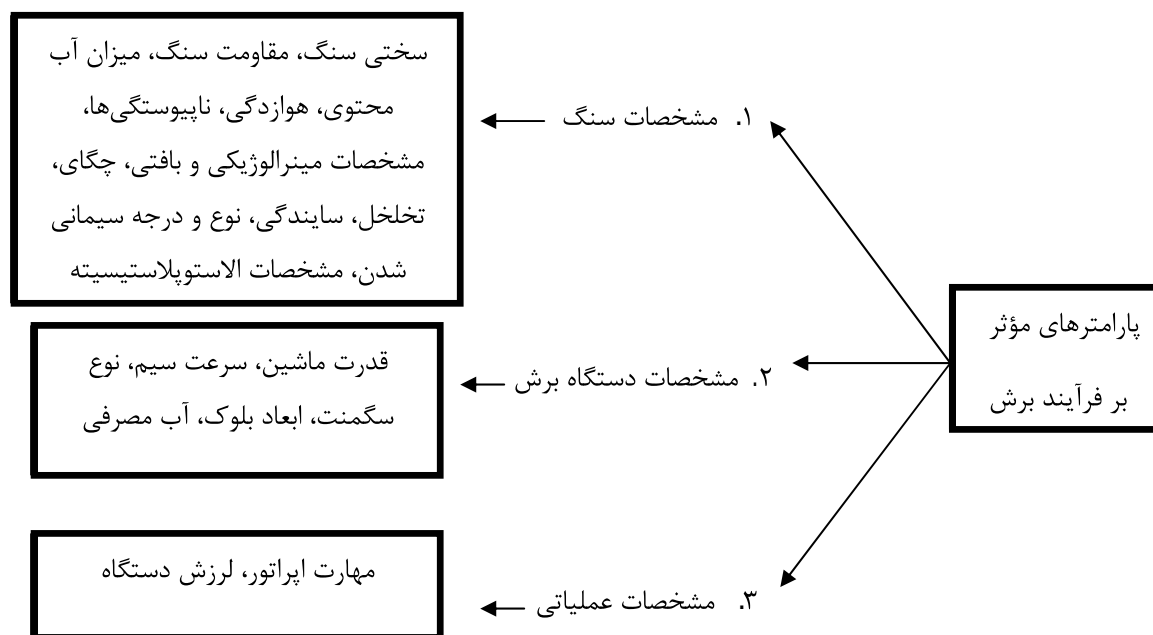
به طور کلی فرآیند برش سنگ را می‌توان در سه بخش اصلی به ترتیب زیر مورد تحلیل قرار داد.

الف) مشخصات سنگ

ب) مشخصات ابزار برش و تجهیزات

ج) مشخصات مدیریتی از قبیل مهارت اپراتور و شرایط محیطی کار مثل لرزش دستگاه

از میان این پارامترها، پارامترهای عملیاتی و مشخصات ابزار برش به عنوان پارامترهای قابل کنترل و یا پارامترهای وابسته و پارامترهای مربوط به مشخصات سنگ، به عنوان پارامترهای غیر قابل کنترل یا پارامترهای مستقل در فرآیند برش سنگ مطرح می‌باشند. هر کدام از این دسته پارامترها به نحو خاصی در کارایی و توان تولید فرآیند برش تأثیرگذار می‌باشند. پارامترهای مؤثر بر عملکرد برش در شکل ۶-۲ آمده است. توضیح تأثیر این پارامترها، به طور مفصل در ادامه‌ی فصل آمده است.



شکل ۲-۶: عوامل مؤثر بر فرآیند برش (Ozçelik, 2004)

۲-۴-۱ مشخصات سنگ

مشخصات سنگ یکی از پارامترهای مؤثر در فرآیند برش به خصوص در فرآیند تشکیل تراشه می‌باشد. سنگ به عنوان میزبان عملیات برش، از نقش حیاتی در فرآیند برش و تولید برخوردار است. مشخصات سنگ تعیین کننده شرایط، کیفیت و کمیت اندرکنش میان سنگ و ماشین بوده، لذا مکانیزم تشکیل تراشه و پیشروی ابزار را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به گستردگی مشخصات سنگ به منظور سهولت در تجزیه و تحلیل و مطالعه این پارامترها، آن‌ها را می‌توان در سه گروه مشخصات فیزیکی، مکانیکی و مشخصات ساختاری تقسیم‌بندی کرد. خواصی نظیر استحکام، تردی، مقاومت در برابر ضربه، اندازه دانه‌ها، بافت سنگ، استحکام و چسبندگی بین دانه‌های سنگ (استحکام سیمان‌شدگی سنگ)، وجود درزه‌ها و خلل و فرج در سنگ (ساختار شکست‌های ریز) می‌توانند نقش مهمی را در فرآیند برش ایفا کنند (عطایی و حسینی، ۱۳۸۷). در این قسمت برای بررسی پارامترهای مؤثر در فرآیند برش سنگ، هر یک از مشخصات مذکور مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرند. در جدول ۲-۱ تحقیقات صورت گرفته بر روی مشخصات فیزیکی سنگ آمده است.

جدول ۲-۱: بررسی مشخصات فیزیکی سنگ توسط محققین

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

۲-۴-۱-۱ مشخصات فیزیکی سنگ

چگالی، اندازه، شکل دانه، تخلخل، درصد کوارتز، ضریب بافت، نوع و درجه سیمانی شدن از جمله مهمترین مشخصات فیزیکی سنگ‌ها می‌باشند. در این قسمت به طور مختصر، این پارامترها معرفی شده‌اند.

الف) چگالی

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

(ب) بافت

یکی از فاکتورهای مهم و اساسی در رفتار مهندسی سنگ‌ها به ویژه در فرآیند برش و سایش ابزارهای الماسه، بافت سنگ می‌باشد. لذا این پارامتر در انتخاب درست تجهیزات و ماشین‌آلات برش، تعیین رفتار مکانیکی و پیش‌بینی عملکرد تجهیزات برش باید مورد توجه قرار گیرد. از جمله مشخصات اصلی بافت، می‌توان به اندازه، شکل، جهت‌یافتگی، نسبت دانه‌ها و ماتریکس سنگ اشاره کرد. از میان مشخصات بافتی، شکل دانه‌های سنگ به عنوان بحرانی‌ترین پارامتر مؤثر در قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها مطرح می‌باشد. اندازه دانه‌ها نیز مهم می‌باشند چرا که ترک‌های جانبی (عرضی) عمدتاً در مرز دانه‌ها رشد کرده و گسترش می‌یابند و هر چه اندازه دانه‌ها بزرگتر باشد، اندازه تراشه‌های ثانویه تشکیل شده نیز بزرگتر می‌شود. دانه‌های گوشه‌دار کشیده و ذرات ریز سنگ باعث کاهش سرعت برش و افزایش قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها می‌شود. تحقیقات انجام شده در مورد سنگ-های آهکی نشان می‌دهد که با افزایش ضریب بافت، نرخ فرسایش افزایش و نرخ برش کاهش می‌یابد (عطایی، حسینی ۱۳۸۷). در بحث بافت سنگ، اندازه، شکل و میزان خمیره (نسبت دانه به خمیره) مورد توجه قرار می‌گیرد. در تقسیم‌بندی رایج در کارهای مهندسی، بافت سنگ‌ها بر اساس دو عامل اندازه و شکل دانه‌ها در چهار گروه تقسیم‌بندی می‌شوند (اصانلو، ۱۳۸۶): الف) دانه‌ای، ب) پورفیری، ج) شیشه‌ای و د) تخریبی مانند ماسه‌سنگ. مشخص‌ترین بافت در این تقسیم‌بندی بافت دانه‌ای است که در سنگ‌های آذرین با توجه به اندازه دانه‌ها انواع آن در چند زیرگروه تقسیم‌بندی می‌شود:

۱ - خیلی درشت با دانه‌های بزرگتر از ۱۰ میلی‌متر

۲ - درشت با دانه‌های ۵ تا ۱۰ میلی‌متر

۳ - متوسط با دانه‌های ۲-۵ میلی‌متر

۴ - ریز دانه با دانه‌های ۰/۲۵ تا ۲ میلی‌متر

۵ - بسیار ریز دانه با دانه‌های کوچک‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر

برای تشخیص و تشریح بافت یک سنگ روش‌های بسیار متنوع و طبقه‌بندی‌های بسیار جامعی وجود دارد که می‌توان در متون کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی آن‌ها را جستجو کرد. با این حال در کارهای مهندسی، تشریح بافت به صورت کیفی نمی‌تواند چندان کارساز باشد. لذا همواره یافتن یک روش برای کمی کردن ویژگی‌های بافت یک سنگ، آرمان محققان مهندسی حفاری و زمین‌شناسی مهندسی بوده است. در این فصل، شاخص‌های کمی ارزیابی بافت سنگ‌ها شرح داده شده است.

۱- مساحت دانه (A_i)

این پارامتر به عنوان ساده‌ترین پارامتر در ارزیابی بافت سنگ‌ها مطرح می‌باشد. مساحت دانه برابر است با مساحت سطح مقطع دیده شده از آن دانه در مقطع نازک سنگ.

۲- محیط دانه (L_p)

این پارامتر نشان دهنده طول مرز دانه در سنگ و یا به عبارت ریاضی، محیط دانه می‌باشد. برای تعیین این پارامتر باید از مقطع نازک سنگ استفاده کرد.

۳- طول قطر بزرگ و کوچک (D_{max}, D_{min})

این پارامترها یکی از پرکاربردترین پارامترهای کمی بافت و دانه‌های سنگ هستند. این دو پارامتر و ترکیب ریاضی آن‌ها از نظر هندسی می‌توانند مشخص‌کننده خصوصیات مختلفی از دانه‌ها و بافت سنگ باشند. در صورتی که در تفسیر مقطع نازک سنگ یا عکس تهیه شده از آن، از مختصات و مش‌بندی استفاده شود از مختصات دو نقطه ابتدا و انتهای قطر بزرگ و کوچک سنگ می‌توان طول آن‌ها را مشخص کرد.

۴- شیب قطرهای اصلی دانه ($MajAS$)

این پارامتر عبارت است از زاویه بین قطر بزرگ‌تر یا قطر کوچک‌تر دانه و خط افق.

۵- قطر معادل (D_{equi})

قطر معادل در حقیقت نشان‌دهنده اندازه دانه‌های سنگ است. این پارامتر با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است (Petruk, 1986).

$$D_{equi} = \sqrt{\frac{4A_i}{\pi}} \quad (۱-۲)$$

که در این رابطه، D_{equi} قطر معادل و A_i مساحت دانه می‌باشد.

۶- فشردگی (C)

این پارامتر به عنوان نشان‌دهنده شکل مقطع دانه‌ها در مطالعه بافت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حالت کلی فشردگی به صورت مفهوم "شکل دانه در حالت گذر و تبدیل از خط بسته به حالت خطی" تعریف می‌شود. برای محاسبه فشردگی از رابطه ریاضی زیر استفاده می‌شود:

$$C = \frac{L_p^2}{A_i} \quad (۲-۲)$$

که در این رابطه، C فشردگی، A_i مساحت دانه و L_p محیط دانه می‌باشد.

۷- فاکتور شکل ^۳(SF)

این پارامتر در مطالعات بافت‌شناسی سنگ‌ها نشان‌دهنده میزان گردی مقطع دانه‌های سنگ می‌باشد. این پارامتر با میزان سطح دانه، رابطه مستقیم و با محیط دانه، رابطه عکس دارد. فاکتور شکل در مقاطع نازک سنگ با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$SF = \frac{4\pi A_i}{L_p^2} \quad (۳-۲)$$

که در این رابطه، SF فاکتور شکل، A_i مساحت دانه و L_p محیط دانه می‌باشد.

³ Shape Factor

۹- نسبت وضعیت دانه (AR^4)

این پارامتر از تقسیم قطر بزرگ دانه بر قطر کوچک آن حاصل می‌شود. با توجه به مشخصات هندسی یک بیضی و با توجه به تعریف این شاخص، چنین می‌توان نتیجه گرفت که این شاخص معیار مناسبی برای ارزیابی بیضوی بودن دانه‌های سنگ می‌باشد. این شاخص به کمک مقطع نازک و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$AR = \frac{D_{\max}}{D_{\min}} \quad (۴-۲)$$

که در این رابطه، AR نسبت وضعیت دانه‌ها، $D_{\max}$ طول قطر بزرگ و $D_{\min}$ طول قطر کوچک دانه می‌باشد.

چنانچه از پارامترهای بالا بر می‌آید، کلیه این پارامترها جزء مشخصات پایه و اساسی برای ارزیابی و تحلیل کمی بافت سنگ‌ها می‌باشند. علاوه بر این، مهم‌ترین کاربرد این پارامترها در تعیین و محاسبه ضرایب بافتی می‌باشد. در ادامه مشهورترین ضرایب ساختی^۵ معرفی شده‌اند (Prikyel, 2006):

۱- ضریب بافت^۶

ضریب بافت، جامع‌ترین و معتبرترین روش کمی کردن بافت یک سنگ است که توسط هوارس و رولند^۷ در سال ۱۹۸۷ ارائه شده است (Ersoy & Waller, 1995). این شاخص با رابطه عمومی زیر قابل محاسبه است:

$$TC = AW \left[\left\{ \frac{N_0}{N_0 + N_1} \times \frac{1}{FF_0} \right\} + \left\{ \frac{N_1}{N_0 + N_1} \times AR_1 \times AF_1 \right\} \right] \quad (۶-۲)$$

که در آن:

TC: ضریب بافت

^۴ Aspect Ratio

^۵ Fabric Coefficients

^۶ Texture Coefficient

^۷ Howarth & Rowland

AW: وزن مساحت (دانسیتته تراکم دانه‌ها)

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

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

FF_0 : میانگین حسابی فاکتور شکل برای دانه‌های N_0

AR_1 : میانگین حسابی نسبت طول بر قطر در دانه‌های N_1

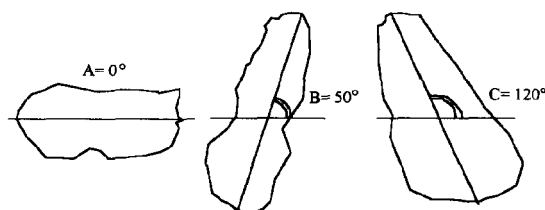
AF_1 : فاکتور زاویه که برای ذره‌های N_1 محاسبه می‌شود.

وزن مساحت (AW) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(7-2) \quad AW = \frac{\text{(مساحت ناحیه مرجع)}}{\text{(مساحت دانه‌های درون مرز ناحیه مرجع)}}$$

فاکتور شکل در رابطه ضریب بافت، معرف انحراف دانه از حالت کروی بودن است. این انحراف به دو صورت به وجود می‌آید: درازشدگی شکل و یا افزایش ناصافی سطح نمونه. فاکتور شکل یا فاکتور کشیدگی دانه از رابطه ۲-۳ قابل محاسبه است.

مفهوم فاکتور زاویه، مطابق شکل ۲-۷، عبارت است از زاویه بین قطر بزرگ دانه و جهت افق. ماکزیمم مقدار این زاویه ۱۸۰ درجه است.



شکل ۲-۷: مفهوم فاکتور زاویه

جهت‌یافتگی زاویه دانه‌ها توسط کمی کردن فاکتور زاویه به دست می‌آید. این فاکتور، برای دانه‌های کشیده و طویل که در آن‌ها نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک بیش از ۲ می‌باشد، محاسبه می‌شود. فاکتور زاویه AF_1 توسط سیستم وزن‌دهی موجود در جدول ۲-۲ طبقه‌بندی می‌شود. این سیستم، تفاوت زاویه‌ای بین همه دانه‌های کشیده را با دقت و به طور مطلق محاسبه می‌کند. تفاوت

زاویه‌ای در نه کلاس مختلف دسته‌بندی می‌شود، برای هر کلاس یک وزن وجود دارد. θ_{DMax} در این جدول، زاویه ای است که قطر بزرگ دانه با افق می‌سازد.

فاکتور زاویه از جمع کلاس‌ها و تقسیم آن‌ها بر کل اعداد زاویه‌ای، به شرح رابطه (۸-۲) محاسبه می‌شود:

$$AF = \sum_{i=1}^n \left[\frac{X_i}{\frac{N(N-1)}{2}} \right] \quad (8-2)$$

که در آن:

AF: فاکتور زاویه

N: تعداد کل دانه‌های کشیده و طویل

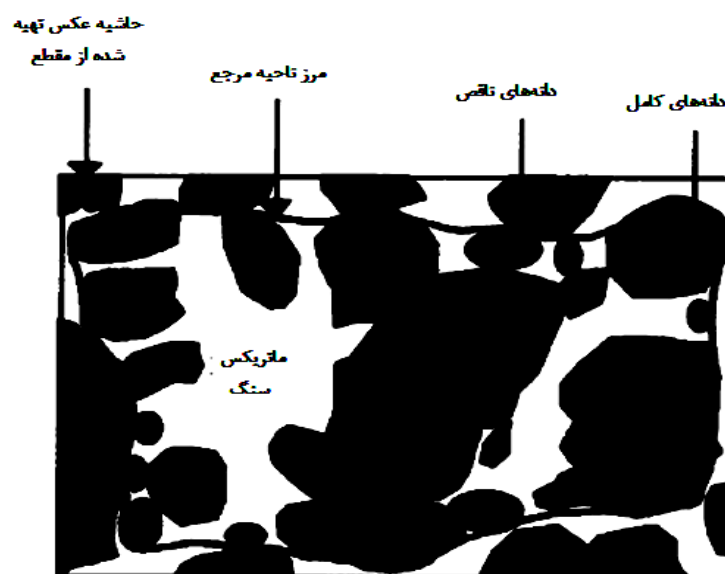
X_i : شماره تفاوت زاویه‌ای در هر کلاس

i: فاکتور وزن‌دهی و شماره کلاس

جدول ۲-۲: روش وزن‌دهی به تفاوت‌های زاویه‌های دانه‌های کشیده (Ersoy & Waller, 1995)

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

برای محاسبه ضریب بافت سنگ، ابتدا از سنگ مورد نظر دو عدد مقطع نازک در جهات عمود بر هم تهیه می‌شود. سپس از مقاطع تهیه شده در زیر میکروسکوپ عکس‌برداری می‌شود. عکس‌های تهیه شده وارد نرم افزار اتوکد^۸ شده و رقومی می‌شوند. پس از رقومی‌شدن عکس‌ها، ابتدا یک محدوده مرجع^۹ یا محدوده دید بر روی مقاطع مشخص می‌شود. این محدوده شامل تمامی دانه‌های کامل قابل مشاهده در عکس بوده و لذا دانه‌های ناقص موجود در حاشیه عکس در نظر گرفته نمی‌شوند (شکل ۲-۸).



شکل ۲-۸: شمای کلی یک مقطع نازک برای محاسبه ضریب بافت (Ersoy & Waller, 1995)

پس از انجام مراحل بالا در نرم‌افزار اتوکد، دور هر یک از دانه‌های موجود در محدوده دید مقطع، خط بسته کشیده می‌شود. سپس در نرم‌افزار محیط، مساحت، قطر بزرگ و قطر کوچک هر دانه محاسبه می‌شود. سپس از نتایج حاصل از محاسبات مذکور پارامترهای موجود در رابطه ضریب بافت (رابطه ۲-۶) تعیین شده و میزان ضریب بافت محاسبه می‌شود.

^۸ . AutoCAD

^۹ . Reference Boundary

۲- شاخص قفل‌شدگی (به هم چسبیدگی)^{۱۰}

این شاخص در سال ۱۹۷۳ برای اولین بار توسط درییر^{۱۱} ارائه شد (Dreyer, 1973). این شاخص به منظور بیان میزان پیچیدگی رابطه دانه-دانه در ساخت و بافت سنگ‌ها پیشنهاد شده است. این پارامتر، میزان مساحت دانه و بخشی از مرز دانه را که با دانه مجاور در تماس است، با هم مقایسه می‌نماید. افزایش شاخص نشان دهنده افزایش پیچیدگی ارتباط دانه‌ها است که این موضوع به نوبه خود نشان‌دهنده مرکب بودن و پیچیدگی شکل دانه‌ها می‌باشد. در مجموع شاخص قفل‌شدگی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$g = \frac{1}{n} \cdot \sum \frac{L_{pi}}{\sqrt{A_i}} \quad (9-2)$$

که در آن g شاخص قفل‌شدگی، n تعداد دانه‌ها، L_{pi} میزانی از محیط دانه که با دانه‌های مجاور هم‌پوشانی دارد و A_i نیز مساحت دانه مورد نظر را نشان می‌دهند.

۳- شاخص یکنواختی اندازه ذرات^{۱۲}

این شاخص نیز برای اولین بار توسط درییر در سال ۱۹۷۳ ارائه شده است (Dreyer, 1973). شاخص یکنواختی نشان‌دهنده توزیع دانه‌بندی ذرات در بافت سنگ می‌باشد. این شاخص با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$t = \frac{A_{avg}}{\sqrt{\sum (A_i - A_{avg})^2}} \quad (10-2)$$

که در آن t شاخص یکنواختی، A_i سطح هر دانه و A_{avg} میانگین سطح دانه‌هاست.

¹⁰ Index of interlocking

¹¹ Dreyer

¹² Index of grain size homogeneity

پارامترها و شاخص‌های کمی مورد استفاده تحلیل بافت سنگ‌ها، به خوبی قابل بررسی و مطالعه بوده و با توجه به عددی بودن آن‌ها به راحتی می‌توان ملاک ارزیابی و مقایسه قرار گیرند. همچنین با توجه به کمی بودن این پارامترها، قابلیت برازش ریاضی و تعیین پارامترهای مهندسی سنگ را به خوبی دارا هستند.

ج- نوع و درجه سیمانی شدن

مهم‌ترین خصوصیت فیزیکی سنگ‌ها، یعنی نیروی به هم‌چسبی، حاصل نیروی جاذبه بین مولکول‌های یک جسم یا ماده است. به عبارت دیگر نیروی به هم‌چسبی، 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 (عطایی، حسینی ۱۳۸۷). 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 و در نتیجه سرعت برش نیز کاهش می‌یابد. در مورد سنگ‌های آهکی که عمدتاً ساختاری لایه لایه دارند و استحکام چسبندگی بین لایه‌ها کمتر از خود لایه می‌باشد، تراشه‌های ثانویه به‌صورت دانه‌های بزرگ در جهت لایه‌ها تشکیل و جدا می‌شوند. بدیهی است که با افزایش کیفیت سیمانی‌شدن و نیز افزایش مقاومت سیمان سنگ، قابلیت برش سنگ کاهش پیدا می‌کند.

د- تخلخل

یکی دیگر از پارامترهای مهم فیزیکی سنگ در زمینه قابلیت برش سنگ، تخلخل سنگ می‌باشد. سنگ‌ها اجسام کاملاً توپری نیستند و عموماً حاوی خلل و فرج به صورت حفره‌های کم و بیش مرتبط و یا حفره‌های مجزاء هستند. وجود این حفره‌ها اهمیت زیادی در خواص مکانیکی و مهندسی سنگ و

نیز تشکیل و گسترش ترک‌های جانبی و شعاعی دارا می‌باشند. در واقع تخلخل و درزه‌ها در ساختار ماده سنگ نقش عیوب و ترک‌های اولیه را بازی می‌کنند. هرچه مقدار این درزه‌ها و تخلخل‌ها بیشتر باشد، تراشه‌های ثانویه راحت‌تر تشکیل می‌شوند. با توجه به مطالب بالا، می‌توان برش مشکل سنگ‌های گرانیتی (که در آن نیروهای برشی بیشتری نیاز می‌باشد) را نسبت به سنگ‌های آهکی و مرمر پیش‌بینی نمود.

۲-۴-۱-۲ مشخصات مکانیکی سنگ‌ها

مشخصات مکانیکی سنگ، شامل پارامترهای مقاومتی، سختی، ساینده‌گی و خواص الاستیک و پلاستیک هستند که در این قسمت، هر یک به طور جداگانه بررسی شده‌اند.

الف- پارامترهای مقاومتی سنگ

مقاومت، میزان پایداری سنگ در مقابل تنش‌های خارجی است. این تنش‌ها ممکن است در حالت سکون (استاتیک) و یا در حالت متحرک (دینامیک) باشند. هنگامی که استحکام یا مقاومت سنگ افزایش می‌یابد، تشکیل تراشه ثانویه مشکل‌تر شده و به دنبال آن نیروهای برشی بیشتری برای تشکیل مقدار مشخصی از تراشه نیاز است. یکی از پارامترهای مقاومتی سنگ، مقاومت فشاری می‌باشد. مقاومت فشاری را می‌توان به عنوان مهم‌ترین و پرکاربردترین ویژگی سنگ‌ها دانست. به دلیل اهمیت و نقش مقاومت در رفتارهای مهندسی سنگ، مقاومت فشاری در اکثر طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ و در کاربردهای گسترده مکانیک سنگ وارد شده و جزء لاینفک قضاوت‌های مهندسی در مورد یک سنگ و یک توده سنگ می‌باشد. یکی دیگر از پارامترهای مهم مقاومتی سنگ، مقاومت کششی سنگ می‌باشد. مقاومت کششی در واقع، ماکزیمم تنش کششی است که یک سنگ می‌تواند تحمل کند. این پارامتر نیز همانند مقاومت فشاری، روندی معکوس با نرخ برش دارد. دو پارامتر مقاومت فشاری و کششی از جمله مهم‌ترین پارامترهایی هستند که در بیشتر مطالعات، در زمینه قابلیت برش سنگ مورد توجه قرار گرفته شده‌اند. علاوه بر این دو پارامتر، پارامترهای مقاومتی دیگری نظیر شاخص مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت

ضربه‌ای، مقاومت خمشی و مقاومت برشی نیز در برخی از مطالعات انجام شده در زمینه قابلیت برش سنگ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همچنین در کنار این پارامترها، پارامترهایی مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی که معرف مقاومت ذاتی سنگ می‌باشند نیز در کنار سایر پارامترها مورد بررسی قرار گرفته شده‌اند. به هر حال آنچه مسلم است با افزایش پارامترهای مقاومتی سنگ، قابلیت برش سنگ کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به خاطر افزایش مقاومت مرزی دانه‌ها و ماتریکس سنگ و به دنبال آن کاهش قدرت تراشه‌برداری دانه الماس دانست. محققین در سراسر دنیا در مورد تأثیر پارامترهای مقاومتی بر قابلیت برش تحقیق کرده‌اند که مهم‌ترین آنها در جدول ۲-۳ درج شده است.

جدول ۲-۳: بررسی پارامترهای مقاومتی توسط محققین

پارامترهای مقاومتی سنگ							منابع
مقاومت ضربه‌ای	مقاومت برشی	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	مقاومت خمشی	شاخص مقاومت بار نقطه‌ای	زاویه اصطکاک داخلی	
		•	•				Wright & Cassapi 1985
		•	•				Jenning & Wright 1989
		•	•	•	•	•	Ceylanoglu & Gorgulu 1997
		•					Wei et al. 2003
		•	•		•		Eyuboglu et al. 2003
•	•	•	•				Ersay & Atici 2004
•		•	•		•	•	Kahraman et al. 2004
•		•	•				Ozcelik et al. 2004
		•	•	•			Ersay et al. 2005
		•	•				Gunydin et al. 2004
		•	•				Ozcelik et al. 2004
		•	•				Buyuksagis & Guktan 2005
•	•	•		•			Ersay et al. 2005
	•		•			•	Kahraman et al. 2006
•		•	•		•		Fener et al. 2007
		•	•				Kahraman et al. 2007
		•	•				Ozcelik 2007
•		•	•		•		Tutmez et al. 2007
		•	•	•			Buyuksagis 2007
		•	•				Atici & Ersay 2009
		•	•				Hanifi copur et al. 2010

جدول ۳-۲ نشان می‌دهد، که در گذشته از پارامترهای مقاومت فشاری و مقاومت کششی بیشتر از پارامترهای مقاومتی دیگر استفاده شده است.

ب- سختی

سختی، عبارت است از مقاومتی که یک کانی یا سنگ در مقابل ابزار خراش‌دهنده (ساینده) از خود نشان می‌دهد تا خراش (سایش) در آن ایجاد نشود. ابزار خراش‌دهنده در تماس با کانی یا سنگ بوده و طی حرکتی (نیرو) موجب ساینده‌گی کانی یا سنگ می‌شوند. همه کانی‌ها و یا سنگ‌ها در مقابل همه اجسام خراش‌دهنده انعطاف‌پذیری ندارند، به عبارت دیگر از نظر خراش‌دهندگی هم اجسام خراش‌دهنده و هم خراش‌پذیرنده طبقه‌بندی شده‌اند. اگر مقاومت سنگ در برابر خراش حاصل از جسم دیگر، مورد نظر باشد، سختی استاتیکی نامیده می‌شود و در حالتی که سختی سنگ در برابر ضربه در نظر گرفته شود سختی دینامیکی نامیده می‌شود. این دو سختی با یکدیگر مساوی نیستند (عطایی، حسینی ۱۳۸۷).

برای ارزیابی سختی سنگ شاخص‌های مختلفی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به عدد چکش اشمیت، سختی موهس^{۱۳}، ویکرز^{۱۴}، شور^{۱۵} و نوپ^{۱۶} اشاره کرد. محققین در سراسر دنیا در مورد تأثیر سختی بر قابلیت برش تحقیق کرده‌اند که مهم‌ترین آنها در جدول ۴-۲ درج شده است.

¹³-Mohs
¹⁴-Vickers
¹⁵-Shore
¹⁶-Knoop

جدول ۲-۴: بررسی‌های صورت گرفته بر روی شاخص‌های سختی توسط محققین

شاخص‌های سختی					منابع
شور	ویکرز	نوپ	موهس	عدد چکش اشمیت	
•			•		Wright & Cassapi 1985
•					Birle & Ratterman
			•		Jenning & Wright 1989
		•		•	Ceylanoglu & Gorgulu 1997
•					Wei et al 2003
•		•			Eyuboglu et al. 2003
•				•	Ersoy & Atici 2004
		•		•	Kahraman et al. 2004
•					Ozcelic et al 2004
			•		Ersoy et al 2005
	•				Delgado et al. 2005
•		•	•	•	Buyuksagis & Guktan 2005
				•	Fener et al. 2007
•				•	Ozcelik 2007
				•	Tutmez et al. 2007
•		•		•	Buyuksagis 2007

جدول ۲-۴ نشان می‌دهد، که در گذشته از پارامترهای عدد اشمیت و شور بیشتر از پارامترهای دیگر برای شاخص سختی استفاده شده است.

ج- ساینده‌گی

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

است. تشخیص خاصیت ساینده‌گی سنگ‌ها بر اساس وجود سیلیس امکان‌پذیر است. سنگ‌هایی مثل دولومیت یا آهک که سیلیس کمتری دارند خاصیت ساینده‌گی کمتری دارند و بالعکس سنگ‌هایی مثل ماسه‌سنگ سیلیسی که سیلیس بیشتری دارند خاصیت ساینده‌گی بیشتری دارند. برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ شاخص‌های کیفی و کمی مختلفی ارائه شده است، که از آن جمله می‌توان به فاکتور ساینده‌گی شیمیازک^{۱۷}، تست لوس آنجلس^{۱۸} و اندیس سایش سورشار^{۱۹} اشاره کرد. تاکنون مطالعات بسیاری پیرامون تأثیر ساینده‌گی بر قابلیت برش سنگ‌ها انجام شده است. به طور کلی با افزایش ساینده‌گی، سرعت برش و قابلیت برش سنگ‌ها کاهش یافته و سایش ابزارهای الماسه افزایش می‌یابد. محققین در سراسر دنیا در مورد تأثیر ساینده‌گی بر قابلیت برش تحقیق کرده‌اند که مهم‌ترین آنها در جدول ۲-۵ درج شده است.

جدول ۲-۵: بررسی انواع ساینده‌گی توسط محققین

شاخص‌های ساینده‌گی			منابع
شیمیازک	سورشار	لوس آنجلس	
	•		Wright & Cassapi 1985
	•		Wei et al . 2003
		•	Eyuboglu et al. 2003
	•		Ersoy & Atici 2004
		•	Kahraman et al. 2004
•	•		Ersoy et al. 2005
	•		Buyuksagis & Guktan 2005
		•	Fener et al. 2007
		•	Tutmez et al. 2007
	•		Buyuksagis 2007

د- خواص الاستیک و پلاستیک

قابلیت تغییر شکل، نحوه شکست و نوع شکست سنگ‌ها به خاصیت الاستیک و پلاستیک سنگ‌ها بستگی دارد.

¹⁷-Schmiazek abrasivity factor

¹⁸-Los Angeles abrasion test

¹⁹-Cerchar Abrasiveness Index

بر اساس نحوه تغییر شکل سنگ، به عنوان تابعی از تنش‌های تولید شده در اثر بارهای استاتیکی، سنگ‌ها به سه گروه، قابل تفکیک می‌باشند:

الف) الاستیک ترد یا آن‌هایی که از قانون هوک تبعیت می‌کنند.

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

ج) فوق‌العاده پلاستیک یا بسیار متخلخل که در آن‌ها تغییر شکل الاستیک مشخصی وجود ندارد.

اکثر کانی‌های موجود در سنگ، رفتار الاستیک ترد دارند و از قانون هوک تبعیت می‌کنند. خواص الاستیک سنگ توسط مدول الاستیک مشخص می‌شود (Jimeno et al.1995). در برخی سنگ‌ها شکست سنگ، پس از تغییر شکل پلاستیک رخ می‌دهد، این حالت زمانی است که تنش‌ها از حد الاستیک بیشتر شوند. برخی از محققین در مطالعات خود از مدول الاستیک و برخی دیگر نیز از شاخص‌های تردی سنگ برای بررسی و تحلیل فرآیند برش استفاده کرده‌اند. بدیهی است با تغییر مدول الاستیک و شاخص‌های تردی سنگ به دلیل تغییر در مکانیزم تشکیل و رشد ترک‌های جانبی در سنگ و به تبع آن، تشکیل تراشه‌های ثانویه، قابلیت برش سنگ نیز تغییر می‌یابد. مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش مدول الاستیک و شاخص‌های تردی سنگ، مقدار قابلیت برش سنگ کاهش می‌یابد. از مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعات آتوسی^{۲۰} و گونایدین^{۲۱} اشاره کرد. آن‌ها در مطالعاتشان بر روی نمونه‌های مختلفی از سنگ‌های ساختمانی در کشور ترکیه، ارتباط میان شاخص‌های تردی سنگ و قابلیت برش را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با افزایش شاخص‌های تردی سنگ، میزان نرخ تولید کاهش یافته و میزان انرژی ویژه برش سنگ افزایش می‌یابد. محققین در سراسر دنیا در مورد

²⁰-Atici

²¹-Gunaydin

تأثیر خواص الاستیک و پلاستیک بر قابلیت برش تحقیق کرده‌اند که مهم‌ترین آنها در جدول ۶-۲ درج شده است.

جدول ۶-۲: بررسی تأثیر خواص الاستیک و پلاستیک توسط محققین

خواص الاستیک و پلاستیک		منابع
مدول الاستیک	شاخص‌های تردی سنگ	
•		Ceylanoglu & Gorgulu 1997
•		Eyuboglu et al. 2003
•		Ersay & Atici 2004
•		Ersay et al. 2005
	•	Gunaydin et al. 2004
•		Ozcelik et al. 2004
	•	Atici & Ersay 2009

۳-۱-۴-۲ مشخصات ساختاری و محیطی سنگ

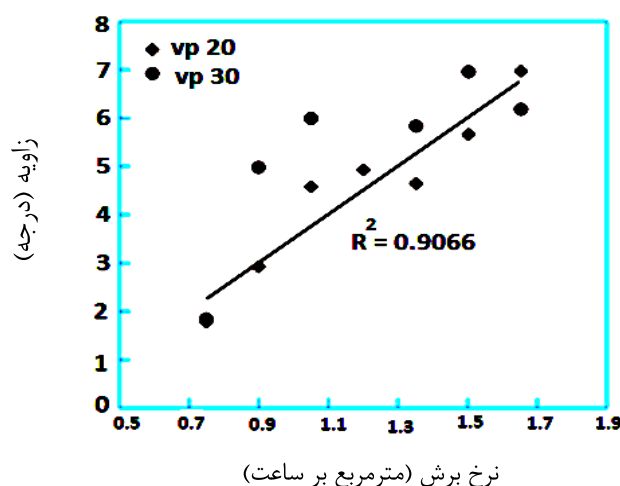
یکی دیگر از مشخصات سنگ، مشخصات ساختاری و محیطی سنگ می‌باشد. از جمله مشخصات ساختاری سنگ می‌توان به درزه، ترک، کلیواژ و جهت‌یافتگی کانی‌ها در سنگ اشاره کرد. هر وضعی در ساختار سنگ، اثر تهاجم عوامل هوازدگی را سرعت می‌بخشد. بنابراین سطوح درزه‌ها، سطوح لایه‌بندی، سطوح گسل یا هر نوع شکاف ناشی از گسل یا چین‌خوردگی (شامل ترک‌های برشی)، همگی شرایط مناسب را برای تأثیر عوامل هوازدگی و یخبندان به وجود می‌آورند. به طور کلی عوامل محیطی شامل هوازدگی و حضور درزه و ترک‌های مویی در سنگ موجب کاهش پارامترهای مقاومتی سنگ شده که در نتیجه آن قابلیت برش سنگ افزایش می‌یابد. با افزایش درزه و ترک‌های مویی در سنگ قابلیت تراشه‌برداری دانه الماس در یک مقدار ثابت، از نیروی برش افزایش یافته که به دنبال آن شاهد افزایش نرخ برش خواهیم بود. یکی دیگر از مشخصات ساختاری سنگ، کلیواژ و جهت‌یافتگی کانی‌ها می‌باشد. به طور کلی، از دیدگاه قابلیت برش سنگ هرچه قدر میزان کانی‌های با سطح کلیواژ مشخص در بلوک سنگی بیشتر باشد، سنگ راحت‌تر برش خواهد خورد (عطایی، حسینی ۱۳۸۷).

۲-۴-۲ مشخصات برش

یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در قابلیت برش سنگ در کنار مشخصات سنگ، مشخصات برش می‌باشد. مشخصات برش جزء پارامترهای قابل کنترل می‌باشند که می‌توانند نقش بسیار مهمی را در افزایش راندمان و بهینه‌سازی فرآیند برش ایفا کنند. با تنظیم و انتخاب صحیح هر کدام از این پارامترها می‌توان به یک الگوی صحیح و مناسب اقتصادی از دیدگاه کاهش مصرف سگمنت، کاهش مصرف انرژی و افزایش نرخ تولید دست پیدا کرد. با افزایش فرسایش سگمنت‌های الماسه، نرخ برش و کارایی سیم کاهش می‌یابد و هزینه‌های تولید افزایش می‌یابد. مهم‌ترین مسأله در سیم برش الماسه تعیین شرایطی است که فرسایش، کمترین مقدار ممکن و کارایی سیم برش الماسه بیشترین مقدار باشد.

۱-۲-۴-۲ ارتباط بین زاویه بین سیم و افق با نرخ برش

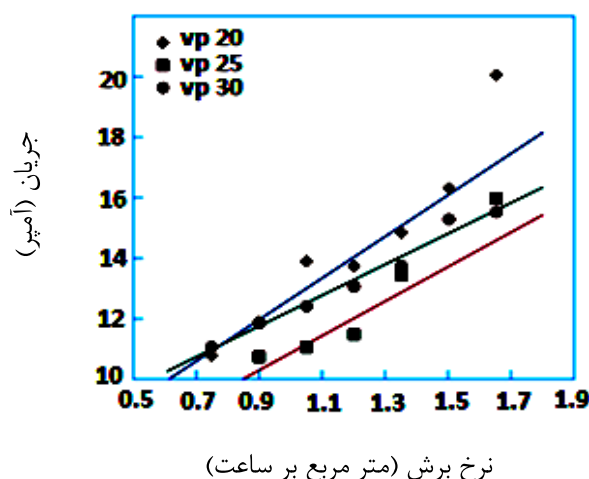
این زاویه، زاویه‌ای است که سیم با محور افق، در حین برش می‌سازد و با افزایش مقاومتی که سیم در حین عملیات برش تحمل می‌کند، افزایش می‌یابد. شکل ۹-۲ ارتباط بین این زاویه و نرخ برش سیم برش الماسه را در سرعت‌های ۲۰ و ۳۰ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. این ارتباط، با توجه به ضریب تعیین بالا، ارتباط نزدیکی می‌باشد. با توجه به شکل ۹-۲، مشاهده می‌شود که افزایش این زاویه، باعث افزایش نرخ برش می‌شود (cai, 2007).



شکل ۹-۲: تأثیر زاویه بر نرخ برش (cai, 2007)

۲-۲-۴-۲ ارتباط بین جریان مصرفی و نرخ برش

شکل ۲-۱۰ ارتباط بین جریان مصرفی و نرخ برش را برای سرعت‌های ۲۰، ۲۵ و ۳۰ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. با افزایش نرخ برش، جریان مصرفی نیز افزایش می‌یابد. در این بررسی مشاهده می‌شود که در یک نرخ برش ثابت، جریان مصرفی برای سرعت‌های پایین‌تر، بیشتر است (cai, 2007).



شکل ۲-۱۰: تأثیر توان ماشین بر روی نرخ برش (cai, 2007)

۳-۲-۴-۳ ارتباط بین نرخ برش و بهره‌وری سیم

بهره‌وری سیم، میزان سطح بریده شده توسط واحد طول سیم می‌باشد، به عبارت دیگر این پارامتر را می‌توان طول عمر سیم تعریف نمود. این پارامتر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R = \frac{A_t}{L} \quad (۲-۱۱)$$

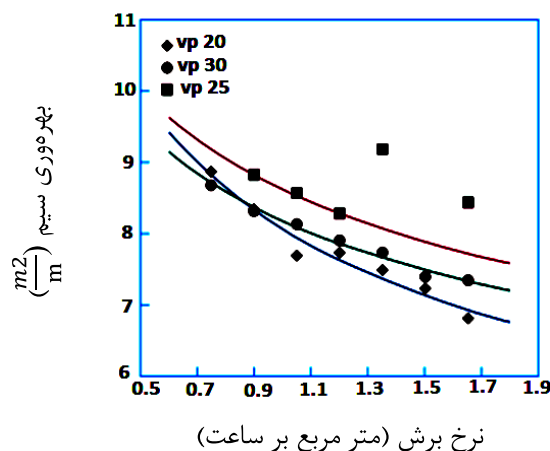
که در آن:

R: بهره‌وری سیم ($\frac{m^2}{m}$)

L: طول سیم (m)

A_t : مقدار سطح برش یافته (m^2)

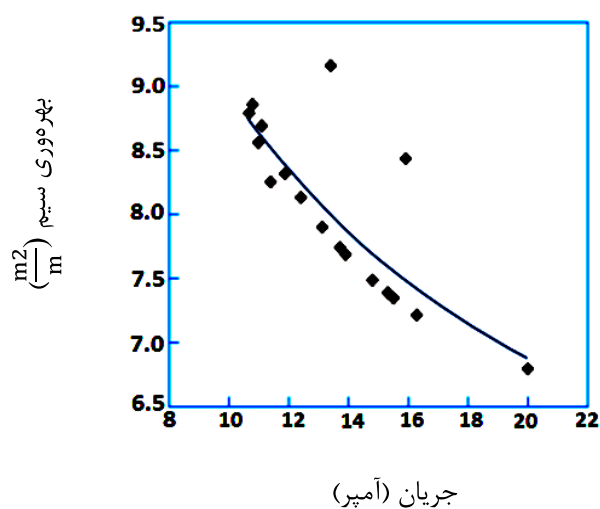
شکل ۱۱-۲ رابطه بین نرخ برش سیم برش الماسه و بهره‌وری سیم را برای سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. با افزایش نرخ برش، مقدار سطح بریده شده به ازاء یک متر سیم کاهش می‌یابد. در این بررسی، مشاهده می‌شود که بهترین بهره‌وری سیم، در سرعت‌های بین ۲۵ تا ۳۰ متر بر ثانیه اتفاق می‌افتد. در نرخ‌های برش کمتر از $\frac{m^2}{h}$ مقدار بهره‌وری سیم یا به عبارتی طول عمر سیم، در سرعت‌های مختلف به هم نزدیکتر است، پس می‌توان اینطور نتیجه گرفت که نرخ برش، تأثیر زیادی در طول عمر سیم دارد و افزایش نرخ برش، طول عمر سیم را کاهش می‌دهد (cai, 2007).



شکل ۱۱-۲: تأثیر بهره‌وری سیم بر نرخ برش (cai, 2007)

۴-۲-۴-۲ ارتباط بین جریان مصرفی و بهره‌وری سیم

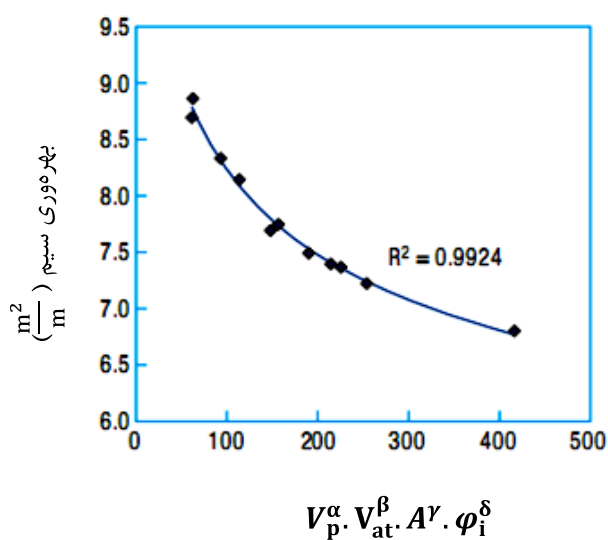
شکل ۱۲-۲ ارتباط بین قابلیت تولید سیم و جریان مصرفی را نشان می‌دهد و همان طور که از شکل مشخص است این دو پارامتر رابطه عکس دارند. با افزایش جریان، افزایش عمل برش به سختی صورت می‌گیرد و این مسأله باعث فرسایش و کاهش طول عمر ابزار می‌شود (cai, 2007).



شکل ۲-۱۲: تأثیر جریان مصرفی بر بهره‌وری سیم (cai, 2007)

۵-۲-۴-۲ تعیین بین بهره‌وری سیم و پارامترهای عملیاتی

شکل ۲-۱۳ رابطه بین بهره‌وری سیم (R_f) را با مقدار N ، که تابعی از سرعت سیم، نرخ برش، جریان مصرفی و زاویه برش در شرایط ثابت است، نشان می‌دهد (cai, 2007):



شکل ۲-۱۳: عوامل مؤثر بر میزان بهره‌وری سیم (cai, 2007)

طبق شکل ۲-۱۳ رابطه زیر ارائه شده است:

$$N = V_p^\alpha \cdot V_{at}^\beta \cdot A^\gamma \cdot \varphi_i^\delta \quad (۲-۱۲)$$

که در این رابطه:

V_{at} : نرخ برش (متر مربع بر ثانیه)

V_p : سرعت سیم (متر بر ثانیه)

A : جریان مصرفی (آمپر)

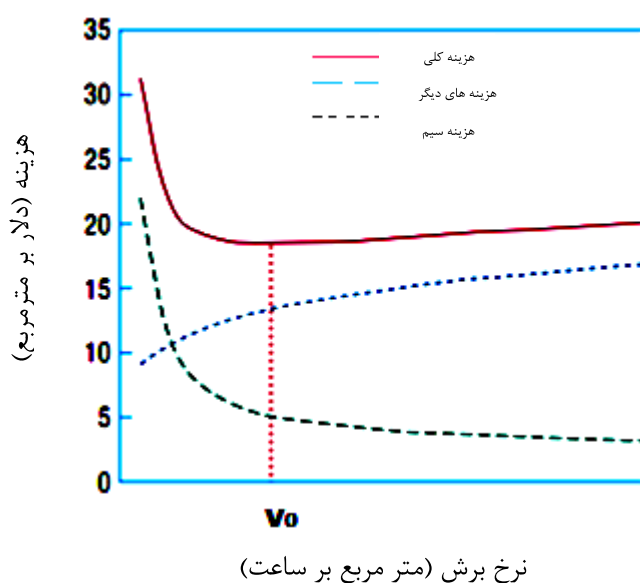
φ_i : زاویه برش (درجه)

$$R_f = 15.46(V_p^{0.2} \cdot V_{at}^{0.5} \cdot A^2 \cdot \varphi_i^{0.2})^{0.14} \quad (2-13)$$

ضریب تعیین برای این رابطه ۰/۹۹ می‌باشد.

۲-۴-۶ ارتباط بین نرخ برش و هزینه‌های برش

قابلیت تولید سیم یا بهره‌وری سیم مهم‌ترین پارامتر اقتصادی در معادن سنگ و یا برش سنگ در کارخانه می‌باشد. با افزایش نرخ برش، مصرف سیم نیز افزایش می‌یابد. شکل ۲-۱۴ رابطه بین نرخ برش و هزینه‌های سیم، هزینه‌های دیگر مثل هزینه (سرمایه‌گذاری، انرژی، آب، نیروی انسانی، نگهداری و هزینه‌های اضافی) و هزینه‌های کلی را نشان می‌دهد (cai, 2007).

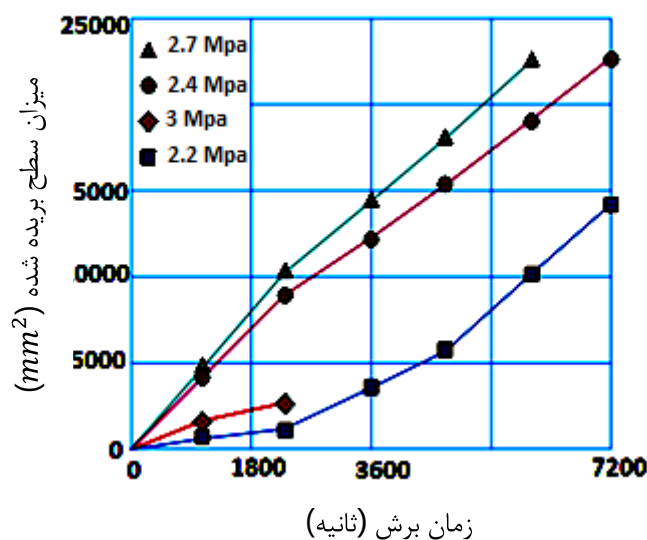


شکل ۲-۱۴: تأثیر نرخ برش بر هزینه (cai, 2007)

مقدار V_0 ، مقدار بهینه‌ای است که برای نرخ برش به‌دست آمده و به ازاء آن هزینه کلی کمترین مقدار است. V_0 در هر صورت به نوع سنگ، کیفیت سیم و قیمت بستگی دارد. از آنجائی که نرخ برش، تأثیر بسزایی در فرسایش دارد، لذا می‌توان با انتخاب دقیق نرخ برش، فرسایش را کاهش داد.

۷-۲-۴-۲ ارتباط بین میزان تولید و فشار برش

فشار برش برای حرکت سیم معمولاً توسط نیروی هیدرولیکی تأمین می‌شود. نیروی مماسی و عمودی که فرآیند برش به آنها بستگی دارد از فشار نشأت می‌گیرند. بنابراین فشار عملیات بر روی میزان تولید تأثیر می‌گذارد. با افزایش فشار برش، میزان تولید نیز افزایش می‌یابد. شکل ۱۵-۲ ارتباط بین این دو پارامتر را نشان می‌دهد (Tonshoff, 2001).

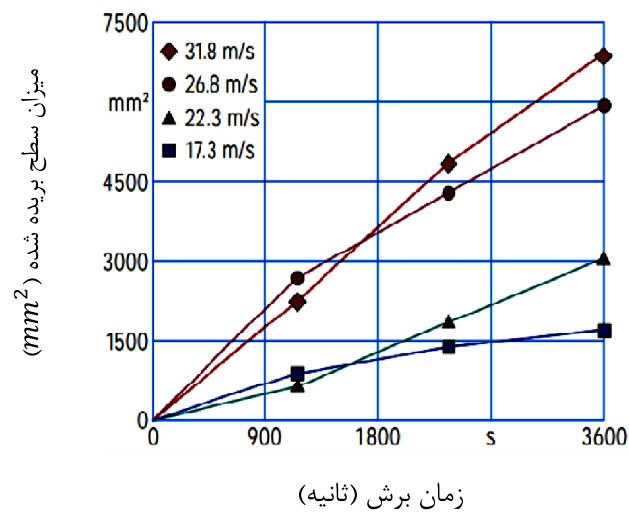


شکل ۱۵-۲: ارتباط بین فشار ماشین و میزان تولید (Tonshoff, 2001)

با افزایش فشار، میزان نیرو نیز افزایش می‌یابد و در همین زمان، تنش‌های وارد بر سیم افزایش می‌یابد که این تنش‌ها ناشی از نیروهای وارد بر سیم می‌باشد. اگر نیروی وارد بر سیم، کمتر و به اندازه لازم باشد، سیم به طور یکنواخت و پیوسته کار می‌کند.

۲-۴-۸ ارتباط بین میزان تولید و سرعت برش

بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که سرعت برش بر روی فرسایش و بهره‌وری سیم تأثیر می‌گذارد ولی این پارامتر بر روی میزان تولید تأثیر بیشتری دارد. با افزایش سرعت برش، میزان تولید افزایش می‌یابد. شکل ۲-۱۶ ارتباط بین این دو پارامتر را نشان می‌دهد (Tonshoff, 2001).



شکل ۲-۱۶: ارتباط بین میزان تولید و سرعت برش (Tonshoff, 2001)

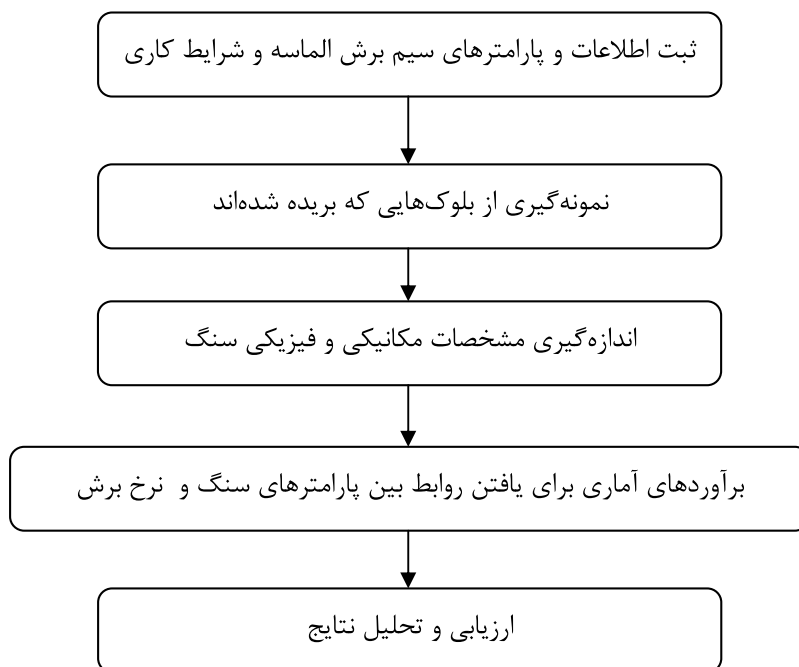
فصل سوم

مطالعات آزمایشگاهی

۳ فصل سوم

۳ - ۱ مقدمه

در این تحقیق، نمونه‌های سنگی از ۱۱ معدن سنگ ساختمانی، جمع‌آوری و برای انجام مطالعات آزمایشگاهی، به آزمایشگاه انتقال یافت. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، مقاومت در برابر سایش، سختی چکش اشمیت، تخلخل و چگالی مطابق با استانداردهای ISRM، در آزمایشگاه بر روی تمامی نمونه‌ها انجام شد. برای بررسی و ارزیابی بافت هر نوع سنگ، یک مقطع نازک از بخش تیپیک سنگ‌های مورد مطالعه، تهیه شد و از هر مقطع سه عکس تهیه شد و وارد نرم افزار اتوکد شدند. در نرم افزار اتوکد دور دانه‌های سنگ، خطوط بسته‌ای به صورت دیجیتالی کشیده شد. سپس محیط و مساحت هر یک از دانه‌ها تعیین شده و ذخیره شدند. سپس فرمت دیجیتالی عکس‌ها چاپ شدند و قطر بزرگ و کوچک هر یک از دانه‌ها مشخص شده، به صورت دستی تعیین شد. در این فصل شرح آزمایش‌های انجام شده، به طور کامل آورده شده است. شکل ۳-۱ مراحل مطالعات آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱: فلوچارت تحقیق

۲-۳ جمع آوری نمونه از معدن

به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی، از یازده معدن سنگ ساختمانی، بلوک سنگی جمع‌آوری شده است. سنگ‌های مورد مطالعه از نوع مرمریت می‌باشند. در انتخاب معادن، سعی شده است که از معادن مختلف استان لرستان نمونه‌برداری انجام شود و هدف این بوده است که شرایط کلی نمونه‌ها، یکسان باشد. در جدول ۱-۳، مشخصات هر یک از نمونه‌های مرمریت، نام معدن و مکان آن‌ها مشاهده می‌شود. پس از برداشت نمونه‌ها از معادن و انتقال آن‌ها به آزمایشگاه، کار آماده‌سازی نمونه‌ها با توجه به نوع آزمایش پیش‌رو آغاز می‌شود. در ادامه، آزمایش‌های انجام‌شده به اختصار آمده است.

جدول ۱-۳: مشخصات معادن مورد مطالعه

نام نمونه	نام معدن	نوع کانه یا کانی‌های اصلی	موقعیت جغرافیایی
مرمریت باد باد غربی	باد باد غربی	کربنات کلسیم (کلسیت)	استان لرستان
مرمریت باد باد شرقی	باد باد شرقی	کربنات کلسیم (کلسیت)	استان لرستان
مرمریت جوشان رود	جوشان رود	کربنات کلسیم (کلسیت)	استان لرستان
مرمریت چشمه حاجی	چشمه حاجی	کربنات کلسیم (کلسیت)	استان لرستان
مرمریت معدن سنج	معدن سنج	کربنات کلسیم (کلسیت)	استان لرستان
مرمریت اردود غربی	اردود غربی	کربنات کلسیم (کلسیت)	استان لرستان
مرمریت اردود کارگاه ۴	اردود	کربنات کلسیم (کلسیت)	استان لرستان
مرمریت نگین تاک	نگین تاک	کربنات کلسیم (کلسیت)	استان لرستان
مرمریت درب گاه شرقی	درب گاه شرقی	کربنات کلسیم (کلسیت)	استان لرستان
مرمریت میرزاوانه	میرزاوانه	کربنات کلسیم (کلسیت)	استان لرستان
مرمریت گوهر سفید کوه	سفید کوه	کربنات کلسیم (کلسیت)	استان لرستان

۳-۳ آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

در این مطالعه، برای هر نمونه سنگی حداقل دو مغزه تهیه شد و طبق استاندارد ISRM برای آزمایش مقاومت فشاری آماده شد. طبق این استاندارد، نسبت ارتفاع به قطر نمونه بین ۲/۵ تا ۳ و حداقل قطر نمونه ۵۴ میلی‌متر (مغزه NX) می‌باشد. همچنین دو انتهای نمونه با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر باید صاف باشد. مقاومت فشاری تک محوری از رابطه زیر به دست می‌آید (فهیمی فر، ۱۳۸۰):

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (۱-۳)$$

که در این رابطه:

σ_c : مقاومت فشاری تک محوری (MPa)

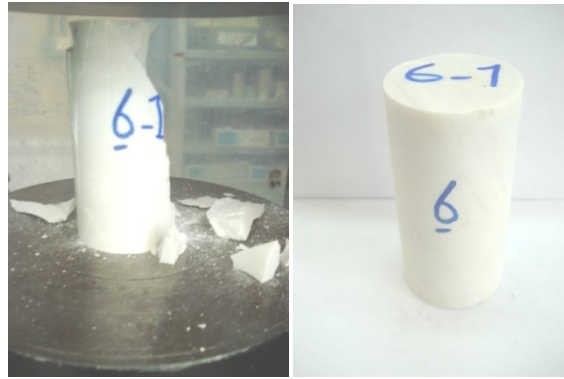
P: نیروی وارد بر سنگ در لحظه گسیختگی (N)

A: سطح مقطع نمونه (mm^2)

شکل ۲-۳ و ۳-۳ مغزه تهیه شده و نحوه شکست، برای نمونه‌های بادباد غربی و چشمه حاجی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است نرخ بارگذاری دستگاه، جهت تست مقاومت فشاری $\frac{KN}{s}$ ۱/۵ می‌باشد.



شکل ۲-۳: نمونه سنگ بادباد غربی قبل و بعد از آزمایش مقاومت فشاری



شکل ۳-۳: نمونه سنگ چشمه حاجی قبل و بعد از آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری به همراه نام نمونه‌ها، در جدول ۲-۳ آورده شده است.

جدول ۲-۳: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

نام نمونه	مقاومت فشاری (MPa)
بادباد غربی	۸۴/۶
باد باد شرقی	۹۸/۹
جوشان رود	۹۵
چشمه حاجی	۶۳/۲۳
معدن سنج	۶۷
اردود غربی	۸۲/۵
اردود ۴	۸۷
نگین تاک	۱۲۴
درب گاه شرقی	۱۳۹/۵
میرزاوانه	۱۳۲/۶
گوهر سفید کوه	۱۸۸/۵

۳-۴ آزمایش 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. به هر حال آنچه مسلم است، با افزایش

پارامترهای مقاومتی سنگ قابلیت برش سنگ کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به خاطر افزایش مقاومت مرزی دانه‌ها و ماتریکس سنگ و به دنبال آن کاهش قدرت تراشه برداری دانه الماس دانست. در این تحقیق برای هر نمونه سنگ، ۲ مغزه مطابق استاندارد ISRM جهت تست مقاومت کششی بریزی تهیه شد. طبق این استاندارد، نسبت طول (ضخامت) به قطر نمونه باید بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ باشد. مقاومت کششی طبق رابطه زیر به دست می‌آید (فهیمی فر، ۱۳۸۰):

$$\sigma_t = \frac{2}{\pi} \times \frac{P}{d.t} \quad (۲-۳)$$

که در این رابطه:

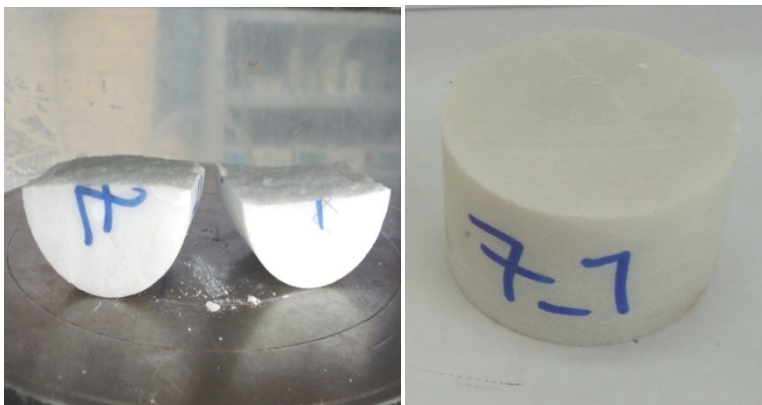
σ_t : مقاومت کششی (MPa)

P : بار وارد بر نمونه در لحظه گسیختگی (N)

d : قطر (mm)

t : طول (ضخامت نمونه) (mm)

شکل ۳-۴ نمونه سنگ مرمریت معدن سنج را قبل و بعد از تست مقاومت کششی نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴: نمونه قبل و بعد از تست مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی به همراه نام نمونه‌ها در جدول ۳-۳ درج شده است.

جدول ۳-۳: نتایج آزمایش مقاومت کششی

نام نمونه	مقاومت کششی (MPa)
بادباد غربی	۳
باد باد شرقی	۶/۶
جوشان رود	۴/۷
چشمه حاجی	۲/۵
معدن سنج	۶/۵
اردود غربی	۶
اردود ۴	۷
نگین تاک	۸/۷
درب گاه شرقی	۱۲/۴
میرزاوانه	۱۱/۶
گوهر سفید کوه	۱۳

۳-۵ آزمایش سختی اشمیت

آزمایش چکش اشمیت، روی بلوک‌هایی به ابعاد $30 \times 40 \times 40$ سانتی‌متر انجام شده است. اندازه-گیری‌ها، روی سطحی از بلوک انجام شده که صاف بوده و فاقد هر گونه ناپیوستگی و هوازدگی می-باشند. این آزمایش طبق استاندارد ISRM انجام شده است. طبق این استاندارد، مقدار سختی به دست آمده، به راستای چکش بستگی دارد و بهتر است چکش در یکی از سه راستای، قائم به سمت بالا، قائم به سمت پائین و افقی قرار گیرد. در هر حالت انحراف چکش نباید از $\pm 5^\circ$ درجه بیشتر باشد. برای تعیین سختی اشمیت با توجه به اینکه احتمال وجود خطا در مقادیر پائین بیشتر است، ابتدا نیمی از داده‌ها که کمترین مقدار را دارند حذف شده و از بقیه داده‌ها میانگین گرفته می‌شود (فهمی فر، ۱۳۸۰). در این تحقیق برای هر نمونه، ۲۰ عدد قرائت شد و ۱۰ عدد کمتر حذف و از بقیه داده‌ها میانگین گرفته شد. سختی اشمیت به دست آمده برای نمونه‌ها به همراه نام نمونه‌ها در جدول ۳-۴ درج شده است.

جدول ۳-۴: نتایج آزمایش سختی اشمیت

نام نمونه	سختی اشمیت
بادباد غربی	۵۳/۶
باد باد شرقی	۵۶/۲
جوشان رود	۵۷/۸
چشمه حاجی	۵۲/۶
معدن سنج	۵۳/۷
اردود غربی	۵۵/۶
اردود ۴	۵۴/۵
نگین تاک	۵۷/۱
درب گاه شرقی	۵۸/۳
میرزاوانه	۵۷/۲
گوهر سفید کوه	۵۸/۶

۳-۶ آزمایش سایش لوس آنجلس

برای ارزیابی ساینده‌ی سنگ، شاخص‌های کیفی و کمی مختلفی، ارائه شده است که از آن جمله می‌توان، به فاکتور ساینده‌ی شیمیازک، تست لوس آنجلس و اندیس سایش سورشار اشاره کرد. در این تحقیق، از تست لوس آنجلس، برای تعیین میزان ساینده‌ی نمونه‌ها استفاده شده است. این تست مقاومت نمونه‌ها را در برابر ضربه و ساینده‌ی نشان می‌دهد. این پارامتر، در تعیین میزان استهلاک ماشین‌های حفاری و تونل زنی و تعیین عمر مفید قطعات، حائز اهمیت است. دستگاه لوس آنجلس، دارای یک استوانه فولادی توخالی است که از اطراف مسدود شده است. قطر داخلی استوانه 5 ± 711 میلی‌متر و طول داخلی آن 5 ± 508 میلی‌متر می‌باشد. این استوانه بر روی پایه‌های محکمی که به فاصله کمی از دو طرف آن قرار گرفته‌اند، سوار می‌گردد. نمونه همراه گوی‌های فولادی ساینده، داخل استوانه ریخته می‌شود که تعداد گوی بستگی به نوع دانه‌بندی نمونه دارد. جدول ۳-۵ تعداد و وزن گوی‌های فولادی را مطابق دانه‌بندی نشان می‌دهد.

جدول ۳-۵: تعداد و وزن گوی‌های فولادی دستگاه لوس آنجلس

دانه بندی نمونه	تعداد گوی	وزن گوی (gr)
۱	۱۲	5000 ± 25
۲	۱۲	5000 ± 25
۳	۱۲	5000 ± 25
A	۱۲	5000 ± 25
B	۱۱	4584 ± 25
C	۸	3330 ± 20
D	۶	2500 ± 15

وزن و دانه‌بندی نمونه مورد آزمایش، برای قطعات بزرگتر از ۱۹ میلی‌متر در جدول ۳-۶ و برای قطعات بزرگتر از ۳۸ میلی‌متر در جدول ۳-۷ آورده شده است. چنانچه نمونه مورد آزمایش قطعات سنگی بزرگ یا مغزه‌های سنگی باشد، ابتدا باید آنها را در سنگ شکن خرد نمود سپس نمونه‌گیری را انجام داد. نمونه پس از انتخاب کاملاً شسته شده و در گرمخانه با حرارتی بین ۱۰۵ تا ۱۱۰ درجه سانتیگراد تا رسیدن به وزنی ثابت خشک می‌شود و جرم نمونه با دقت ۰/۱ گرم اندازه‌گیری می‌گردد.

جدول ۳-۶: دانه بندی نمونه‌های انتخابی برای قطعات بزرگتر از ۱۹ میلی‌متر

وزن قسمت‌های انتخابی از هر الک (gr)			اندازه الک با سوراخ‌های مربعی (mm)	
نوع دانه بندی			مانده روی الک	رد شده از الک
۳	۲	۱		
-	-	2500 ± 50	۶۳	۷۵
-	-	2500 ± 50	۵۳	۶۳
-	5000 ± 50	-	۳۸	۵۳
5000 ± 25	5000 ± 25	-	۲۵/۴	۳۸
5000 ± 25	-	-	۱۹	۲۵/۴
10000 ± 50	10000 ± 75	10000 ± 100	مجموع	

جدول ۳-۷: دانه بندی نمونه‌های انتخابی برای قطعات کوچکتر از ۳۸ میلی‌متر

وزن قسمت‌های انتخابی از هر الک (gr)				اندازه الک با سوراخ‌های مربعی	
نوع دانه بندی				مانده روی الک	رد شده از الک
D	C	B	A		
-	-	-	1250 ± 25	۲۵/۴	۳۸
-	-	-	1250 ± 25	۱۹	۲۵/۴
-	-	2500 ± 10	1250 ± 10	۱۳/۲	۱۹
-	-	2500 ± 10	1250 ± 10	۹/۵	۱۳/۲
-	2500 ± 10	-	-	۵/۶	۹/۵
-	2500 ± 10	-	-	۴/۷	۵/۶
5000 ± 10	-	-	-	۲/۳	۴/۷
5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	مجموع	

نمونه به همراه گوی‌های فولادی، داخل دستگاه لوس آنجلس قرار گرفته و دستگاه با سرعت ۳۰ تا ۳۳ دور در دقیقه حول محور افقی به چرخش در می‌آید. استوانه برای مصالح کوچکتر از ۳۸ میلی - متر ۵۰۰ دور و برای مصالح بزرگتر از ۱۹ میلی‌متر ۱۰۰۰ دور دوران می‌کند. حرکت استوانه باید منظم و با سرعت یکنواخت باشد. پس از پایان دوران، مواد از داخل استوانه خارج شده و با الک ۱/۷ میلی‌متر (نمره ۱۲) جداسازی می‌گردد. قسمت مانده بر روی الک ۱/۷ میلی‌متر شسته شده و در دمای ۱۰۵ تا ۱۱۰ درجه سانتیگراد تا رسیدن به وزنی ثابت، خشک و سپس با دقت یک گرم اندازه‌گیری می‌شود. درصد افت وزنی در اثر سایش از رابطه زیر به دست می‌آید (فهیمی فر، ۱۳۸۰):

$$(3-3) \quad \text{وزن نهایی نمونه} - \text{وزن اولیه نمونه} \div \text{وزن اولیه نمونه} \times 100 = \text{درصد افت وزنی در اثر سایش}$$

در این تحقیق نمونه‌ها، در سنگ شکن فکی خرد شد و دانه‌بندی نمونه‌ها پس از سرند، مطابق دانه‌بندی B بود. جدول ۳-۸ نتایج تست لوس آنجلس را برای نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۳-۸: نتایج تست لوس آنجلس

نام نمونه	سایش لوس آنجلس (%)
بادباد غربی	۳۳
باد باد شرقی	۲۰/۵
جوشان رود	۳۴/۳۱
چشمه حاجی	۲۹/۲۳
معدن سنج	۳۰/۲۸
اردود غربی	۲۵/۰۶
اردود ۴	۳۶/۹
نگین تاک	۲۱/۵
درب گاه شرقی	۲۴/۶
میرزاوانه	۲۱/۴
گوهر سفید کوه	۲۱/۶

۳-۷ آزمایش چگالی و تخلخل

در این تحقیق، سه قطعه از هر نمونه، که وزنی بین ۵۰ تا ۱۰۰ گرم داشت، انتخاب شدند و به مدت ۲۴ ساعت داخل آب نکه داشته شد، سپس جرم اشباع، جرم غوطه ور با ترازوی ارشمیدس و جرم خشک برای هر یک از قطعه‌ها اندازه‌گیری شدند. حجم کل نمونه، حجم منافذ، چگالی و تخلخل برای هر کدام از قطعه‌ها تعیین شد و در نهایت از مقادیر به دست آمده میانگین گرفته شد. شکل ۳-۵ نمونه بادباد شرقی را در حال اندازه‌گیری جرم خشک نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵: نمونه باد باد شرقی در حال اندازه‌گیری جرم خشک

حجم نمونه‌ها، حجم منافذ، چگالی خشک و درصد تخلخل به ترتیب، از روابط زیر محاسبه شدند.

$$V = \frac{M_{sat} - M_{sub}}{\rho_w} \quad (۴-۳)$$

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w} \quad (۵-۳)$$

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (۶-۳)$$

$$n = 100 \cdot \frac{V_v}{V} \quad (۷-۳)$$

که در روابط بالا:

M_{sat} : جرم در حالت اشباع (gr)

M_{sub} : جرم در حالت غوطه ور (gr)

M_s : جرم در حالت خشک (gr)

V_v : حجم منافذ (cm^3)

V : حجم کل (cm^3)

n : تخلخل (%)

ρ_d : چگالی خشک ($\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$)

ρ_w : چگالی آب ($\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$)

در جدول ۳-۹ نتایج به دست آمده، برای پارامترهای فیزیکی نمونه‌ها، از جمله: چگالی و تخلخل

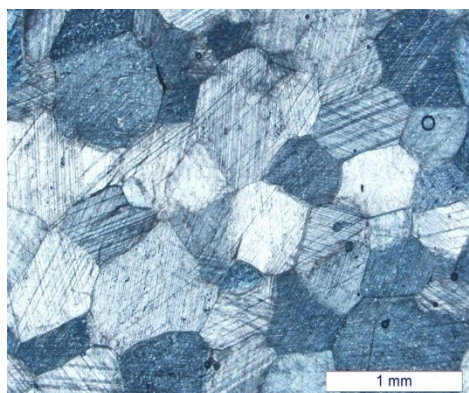
درج شده است.

جدول ۳-۹: چگالی و تخلخل نمونه‌های مورد مطالعه

نام نمونه	چگالی	تخلخل (%)
بادباد غربی	۲/۷۹	۰/۱
باد باد شرقی	۲/۸	۰/۶
جوشان رود	۲/۸۱	۰/۵۱
چشمه حاجی	۲/۸	۰/۴۲
معدن سنج	۲/۸	۰/۳
اردود غربی	۲/۸	۰/۲۶
اردود ۴	۲/۷۸	۰/۳
نگین تاک	۲/۸	۰/۳
درب گاه شرقی	۲/۷۹	۰/۱
میرزاوانه	۲/۸	۰/۱۶
گوهر سفید کوه	۲/۸۲	۰/۱

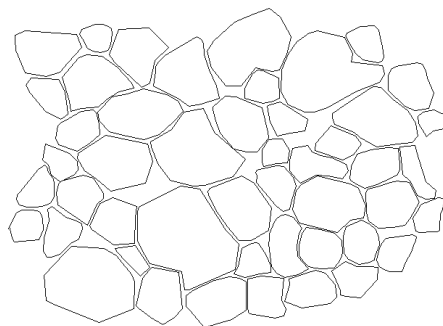
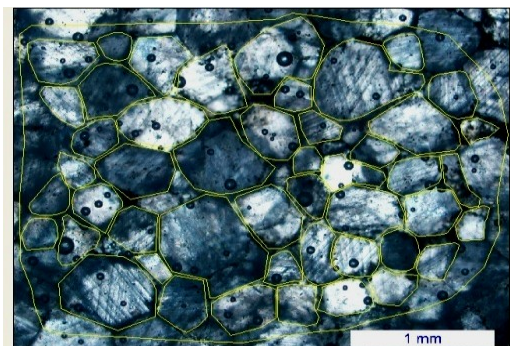
۳-۸ تعیین ضریب بافت

به منظور مطالعه ارتباط میان مشخصات بافتی سنگ‌ها و مشخصات مهندسی و قابلیت برش آنها، ابتدا لازم است تا مشخصات بافتی سنگ‌ها به صورت کمی تعیین شوند. تنها به این وسیله می‌توان، رابطه ریاضی بین این مشخصات را بررسی کرد. شکل ۳-۶ شمای کلی یک مقطع نازک را نشان می‌دهد.

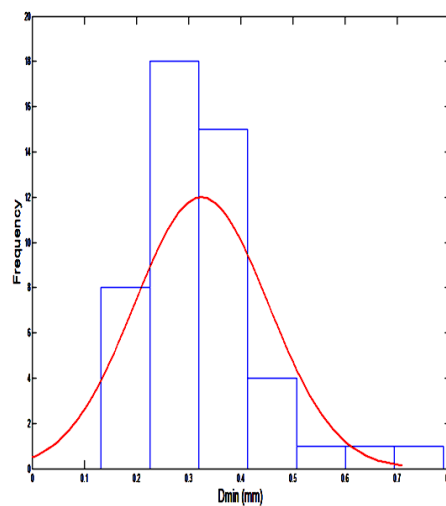
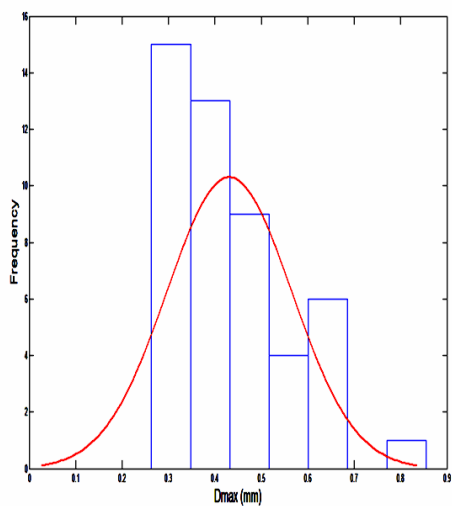
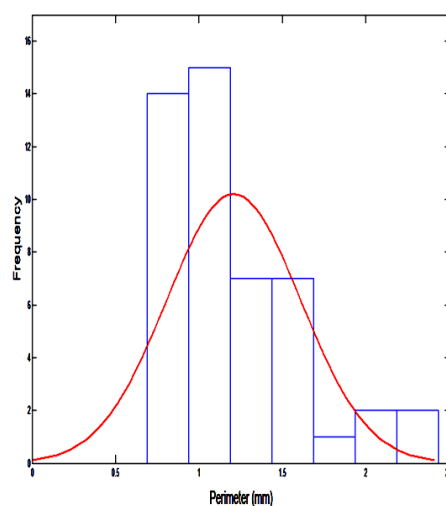
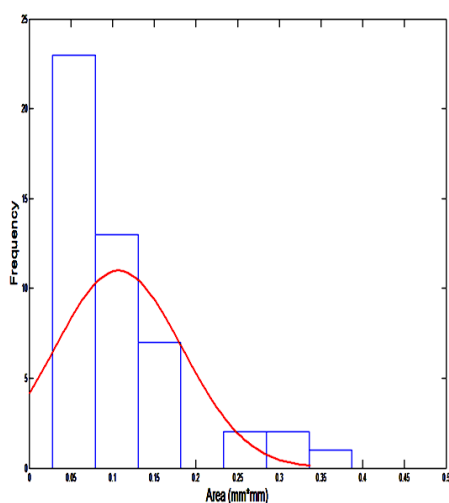


شکل ۳-۶: شمای کلی یک مقطع نازک جهت محاسبه ضریب بافت

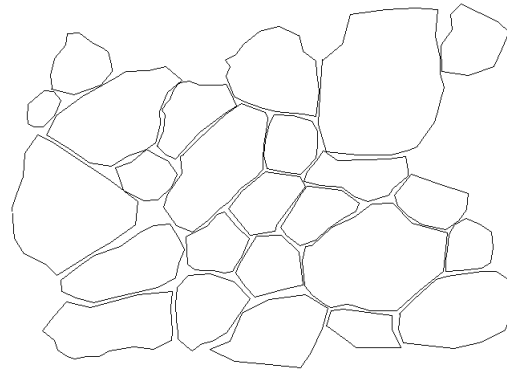
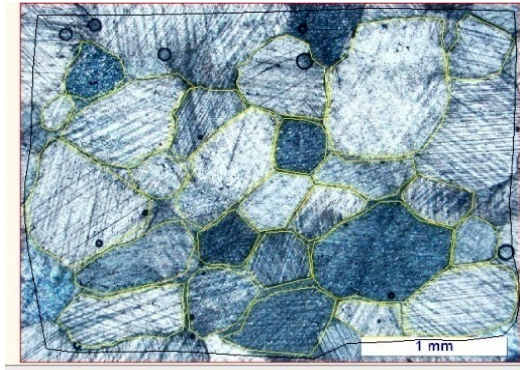
در نرم افزار اتوکد، دور هر یک از دانه های موجود در محدوده دید مقطع، خط بسته کشیده می شود. سپس در نرم افزار، محیط، مساحت، قطر بزرگ و قطر کوچک هر دانه محاسبه می شود. سپس از نتایج حاصل از محاسبات مذکور در فصل دوم، پارامترهای موجود در رابطه ضریب بافت تعیین شده و میزان ضریب بافت محاسبه می شود. لازم به ذکر است که روابط مربوط به تعیین ضریب بافت به طور کامل در فصل دوم شرح داده شده است. در شکل های ۳-۷ تا ۳-۲۰، فرمت دیجیتالی مقطع نازک، و همچنین هیستوگرام مساحت، محیط، قطر بزرگ و قطر کوچک نمونه های مورد مطالعه، آورده شده است.



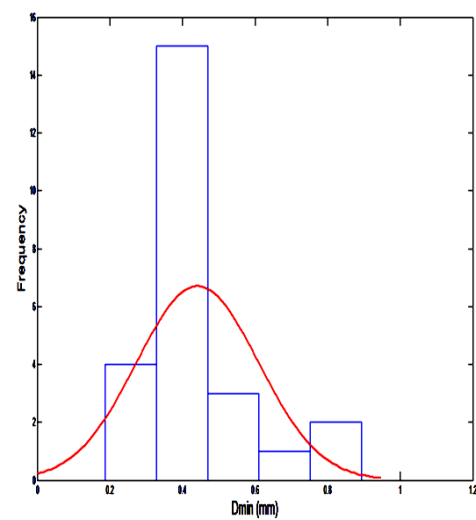
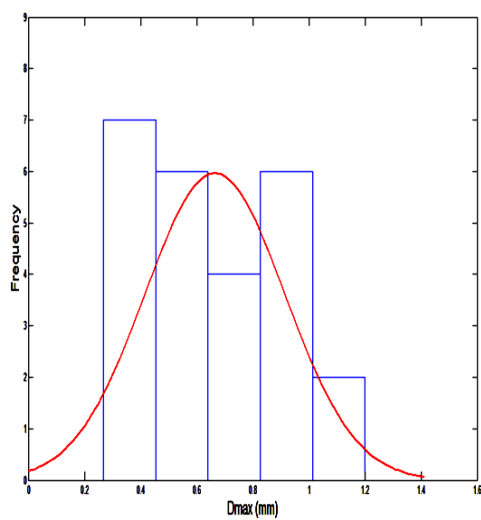
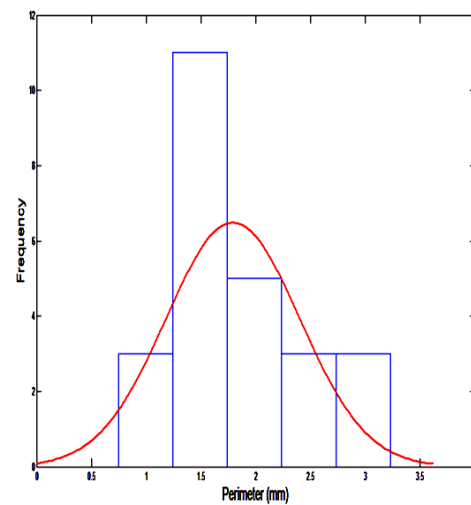
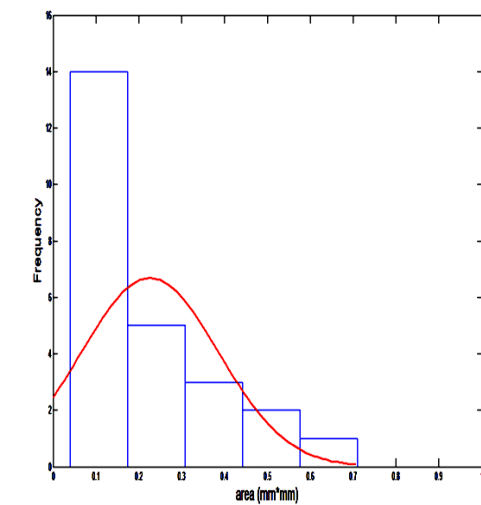
شکل ۳-۷: فرمت دیجیتالی مقطع نازک باد باد غربی



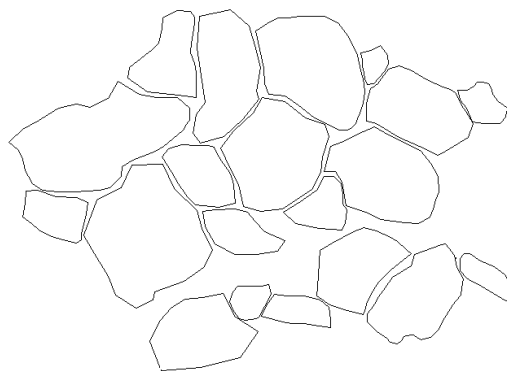
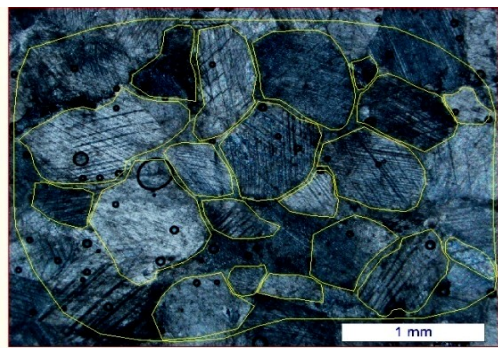
شکل ۳-۸: هیستوگرام قطر بزرگ، قطر کوچک، مساحت و محیط دانه‌های موجود در مقطع نازک باد باد غربی



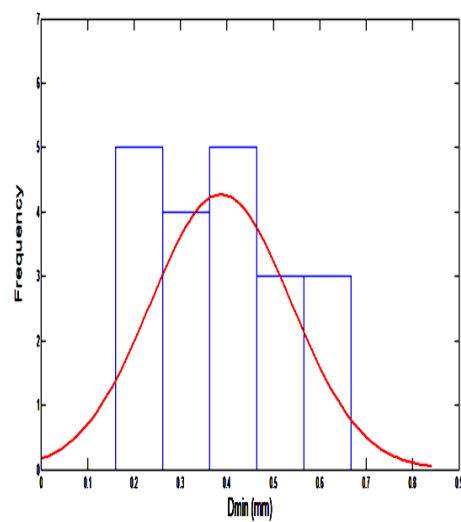
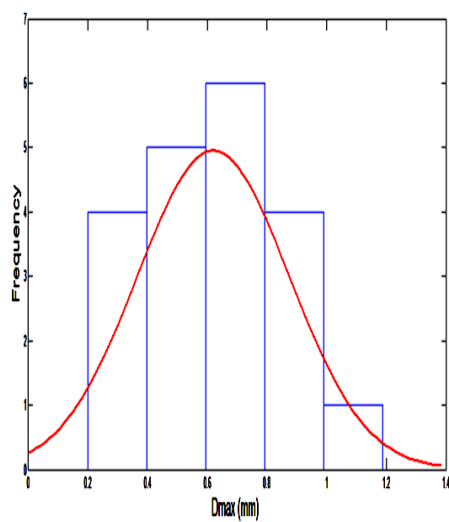
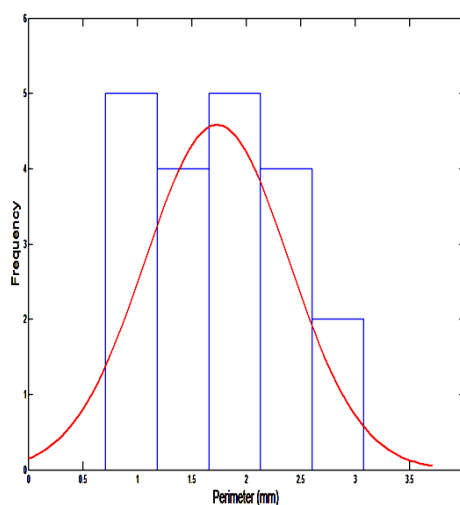
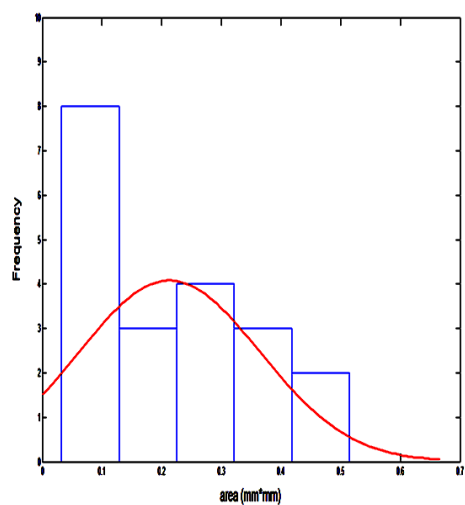
شکل ۳-۹: فرمت دیجیتالی مقطع نازک باد باد شرقی



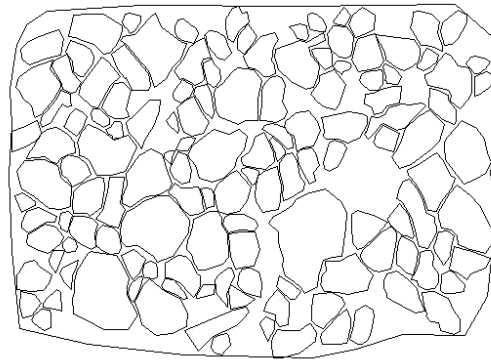
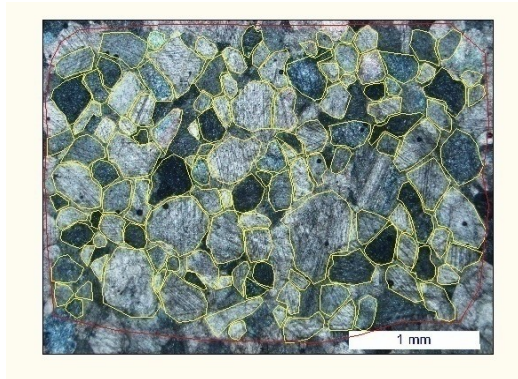
شکل ۳-۱۰: هیستوگرام قطر بزرگ، قطر کوچک، مساحت و محیط دانه‌های موجود در مقطع نازک باد باد شرقی



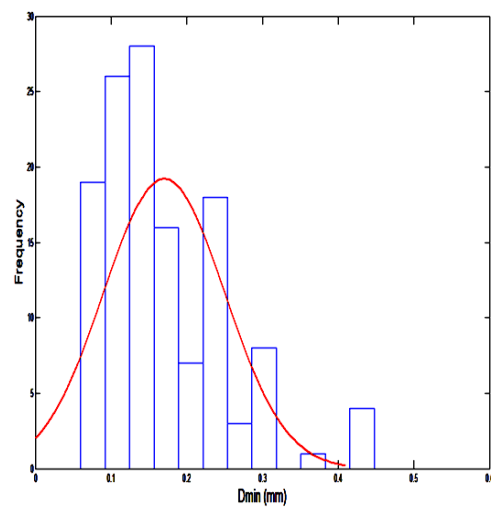
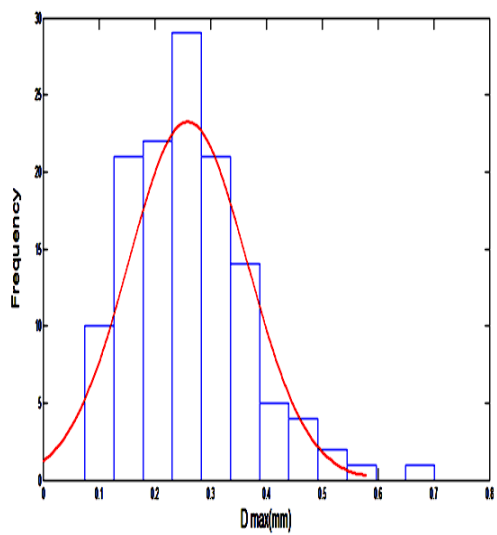
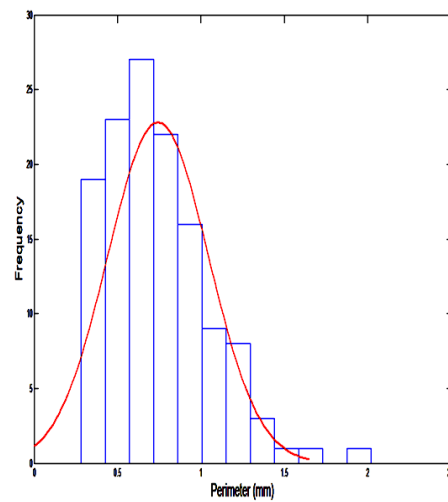
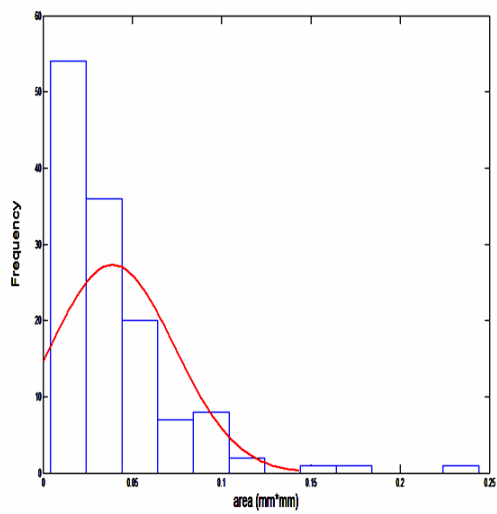
شکل ۳-۱۱: فرمت دیجیتالی مقطع نازک جوشان رود



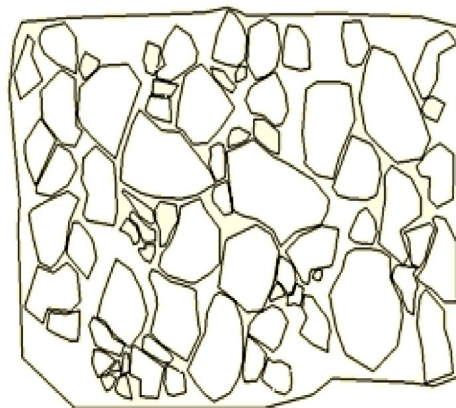
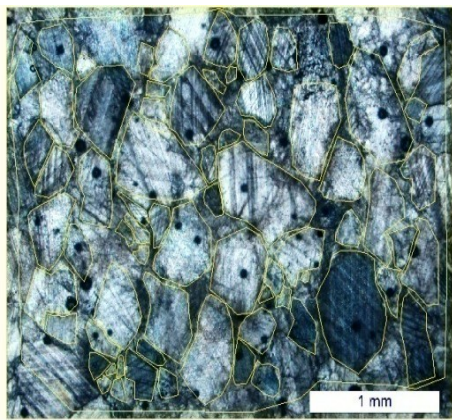
شکل ۳-۱۲: هیستوگرام قطر بزرگ، قطر کوچک، مساحت و محیط دانه‌های موجود در مقطع نازک جوشان رود



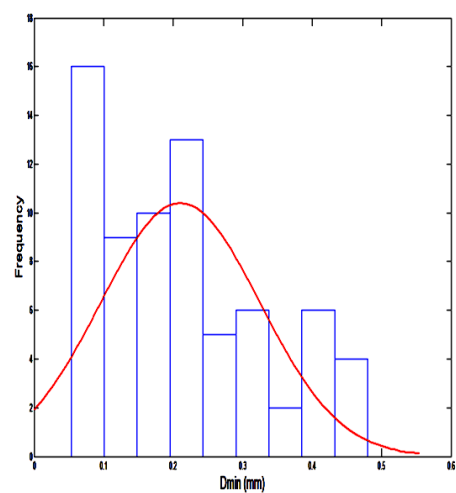
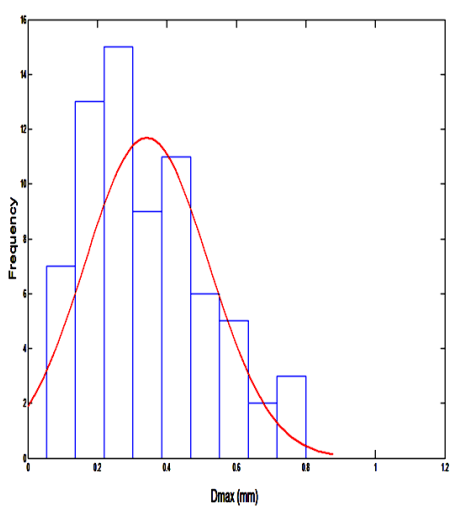
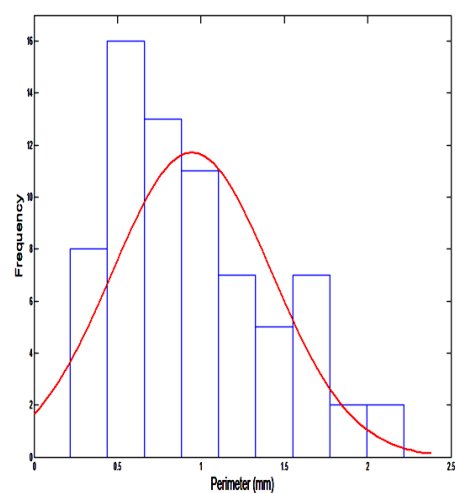
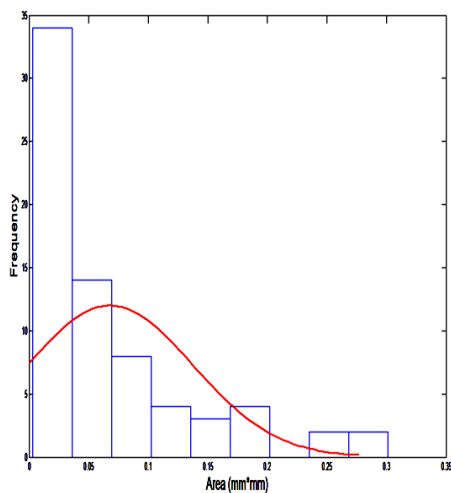
شکل ۳-۱۳: فرمت دیجیتالی مقطع نازک چشمه حاجی



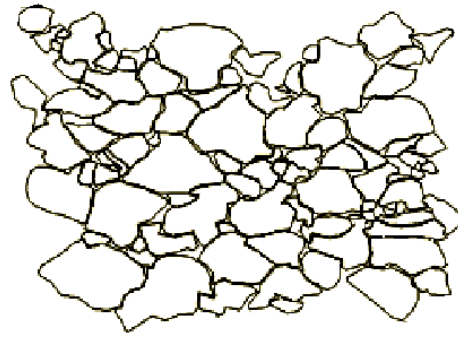
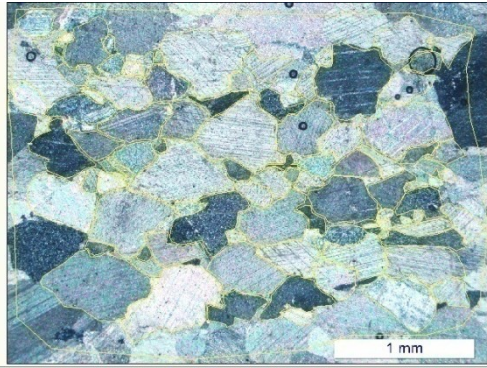
شکل ۳-۱۴: هیستوگرام قطر بزرگ، قطر کوچک، مساحت و محیط دانه‌های موجود در مقطع نازک چشمه حاجی



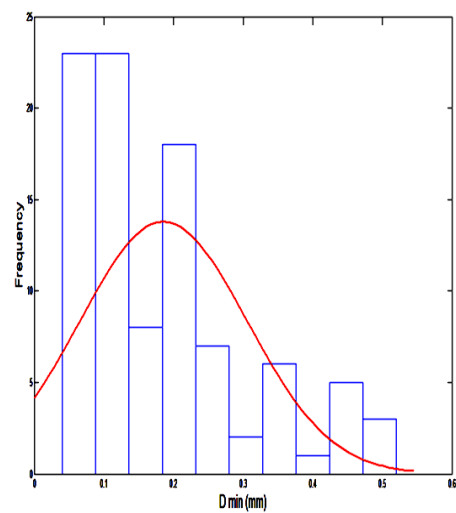
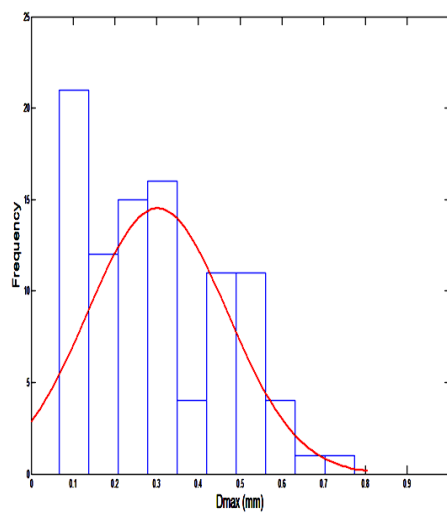
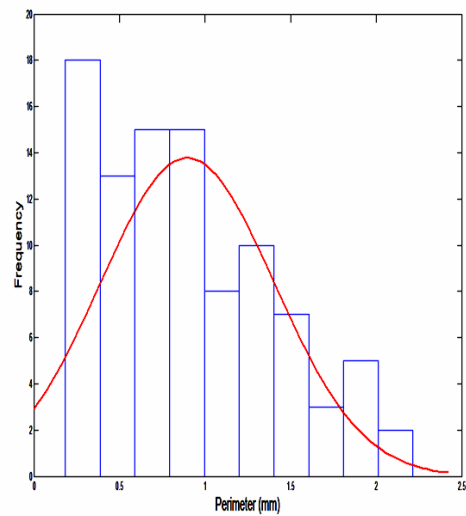
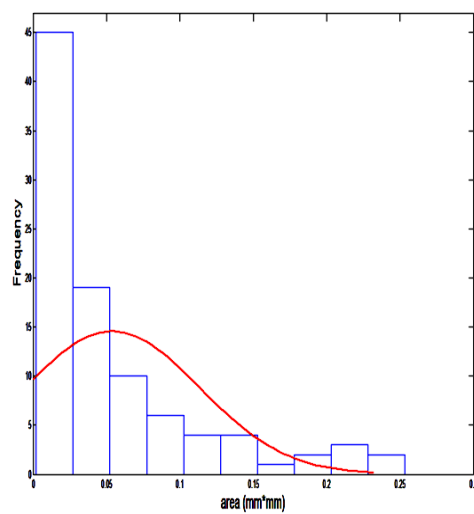
شکل ۳-۱۵: فرمت دیجیتالی مقطع نازک معدن سنج



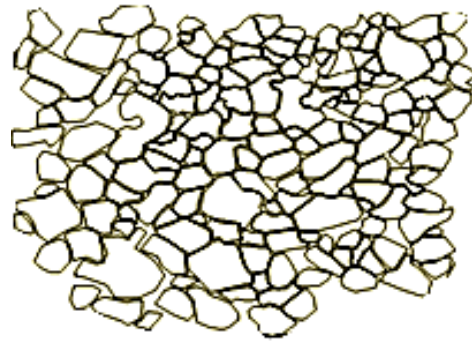
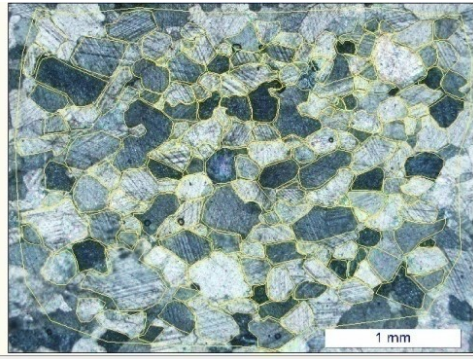
شکل ۳-۱۶: هیستوگرام قطر بزرگ، قطر کوچک، مساحت و محیط دانه‌های موجود در مقطع نازک معدن سنج



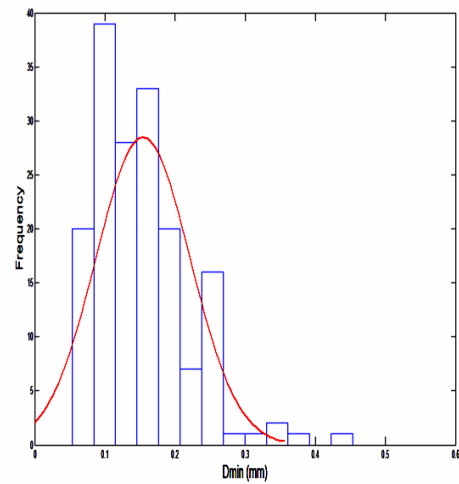
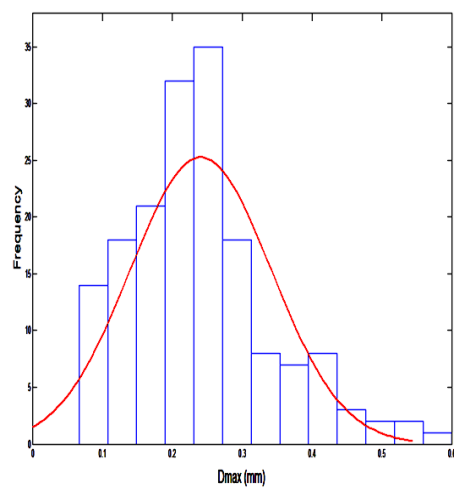
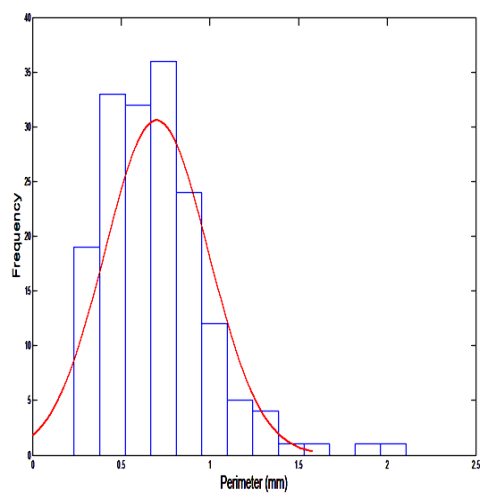
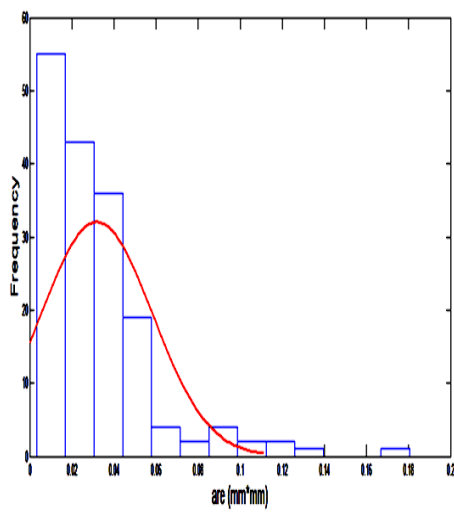
شکل ۳-۱۷: فرمت دیجیتالی مقطع نازک اردود غربی



شکل ۳-۱۸: هیستوگرام قطر بزرگ، قطر کوچک، مساحت و محیط دانه‌های موجود در مقطع نازک اردود غربی



شکل ۳-۱۹: فرمت دیجیتالی مقطع نازک اردود کارگاه ۴



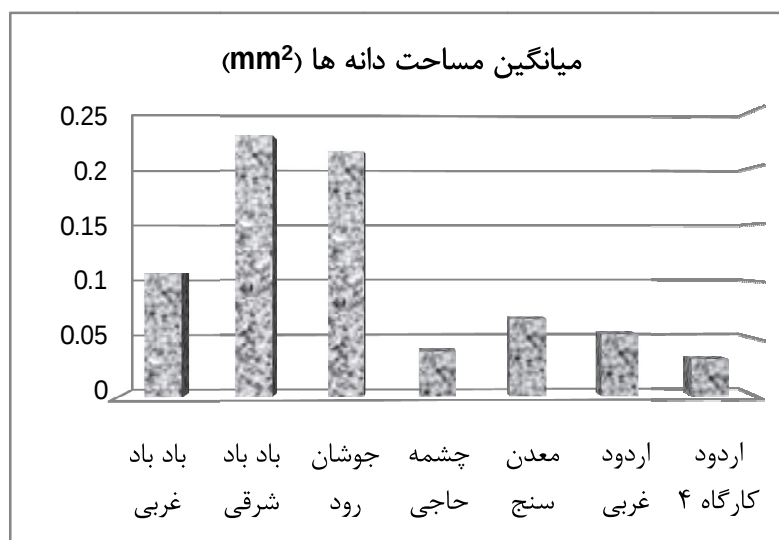
شکل ۳-۲۰: هیستوگرام قطر بزرگ، قطر کوچک، مساحت و محیط دانه‌های موجود در مقطع نازک اردود کارگاه ۴

۳-۸-۱ اطلاعات به دست آمده از مقاطع

چنانچه ذکر شد و در شکل‌های ۳-۷ تا ۳-۲۰ مشاهده می‌شود، در تمامی نمونه‌های سنگی، مساحت، محیط، قطر بزرگ و قطر کوچک دانه‌ها به عنوان اطلاعات پایه در مورد شرایط بافت سنگ‌ها از مقاطع استخراج شده‌اند. با توجه به محاسبات آماری انجام شده، میانگین این پارامترها در هر سنگ به شرح جدول ۳-۱۰ و شکل‌های ۳-۲۱ تا ۳-۲۴ می‌باشد. لازم به ذکر است، قطر و محیط بر حسب میلی‌متر و مساحت بر حسب میلی‌متر مربع می‌باشند.

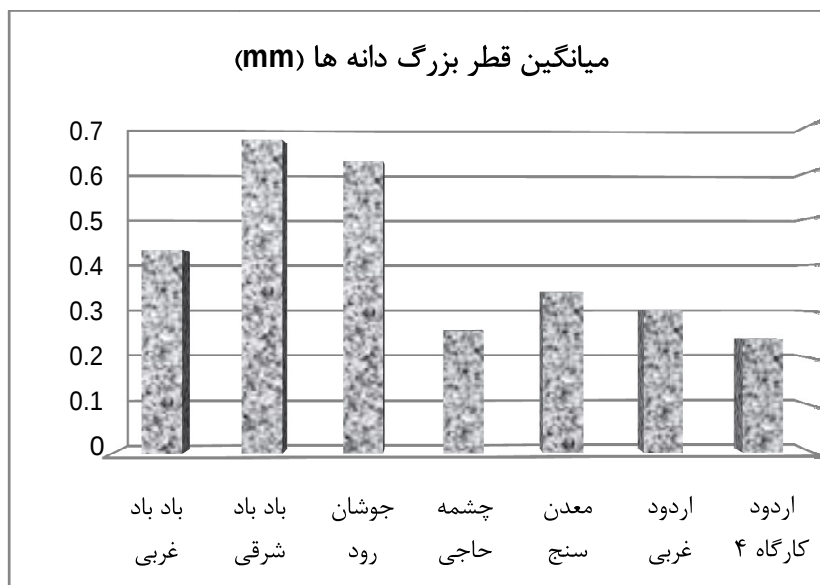
جدول ۳-۱۰: میانگین اطلاعات پایه در مورد بافت هر نمونه سنگ

نام سنگ	مساحت دانه‌ها (mm^2)	محیط دانه‌ها (mm)	قطر بزرگ (mm)	قطر کوچک (mm)
باد باد غربی	۰/۱۰۷	۱/۲۰۸	۰/۴۳۱	۰/۳۲۵
باد باد شرقی	۰/۲۲۶	۱/۷۹۲	۰/۶۶۴	۰/۴۴۱
جوشان رود	۰/۲۱۳	۱/۷۳۳	۰/۶۲	۰/۳۸۷
چشمه حاجی	۰/۰۳۸	۰/۷۴۲	۰/۲۵۹	۰/۱۷
معدن سنج	۰/۰۶۷	۰/۹۴۶	۰/۳۴۲	۰/۲۱
اردود غربی	۰/۰۵۳	۰/۸۹۶	۰/۳۰۲	۰/۱۸۵
اردود کارگاه ۴	۰/۰۳۱	۰/۶۹۹	۰/۲۴	۰/۱۵۴

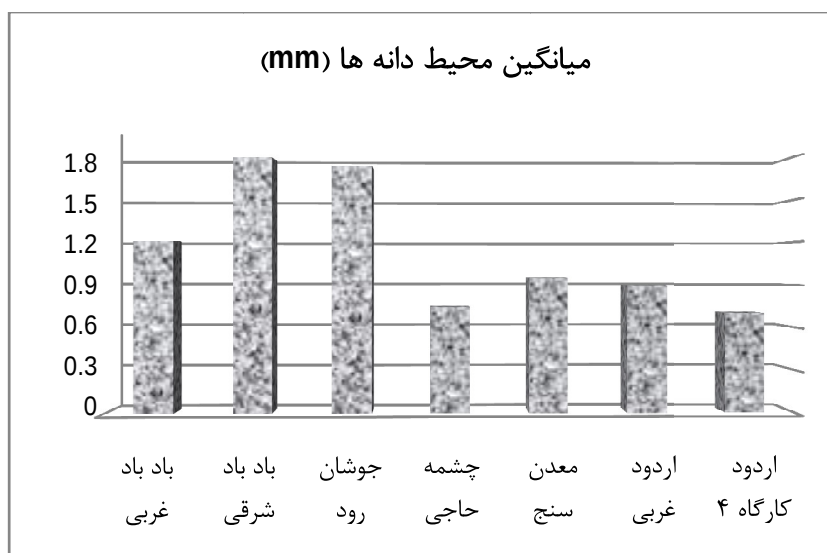


شکل ۳-۲۱: نمودار ستونی میانگین مساحت دانه‌ها در سنگ‌های مختلف

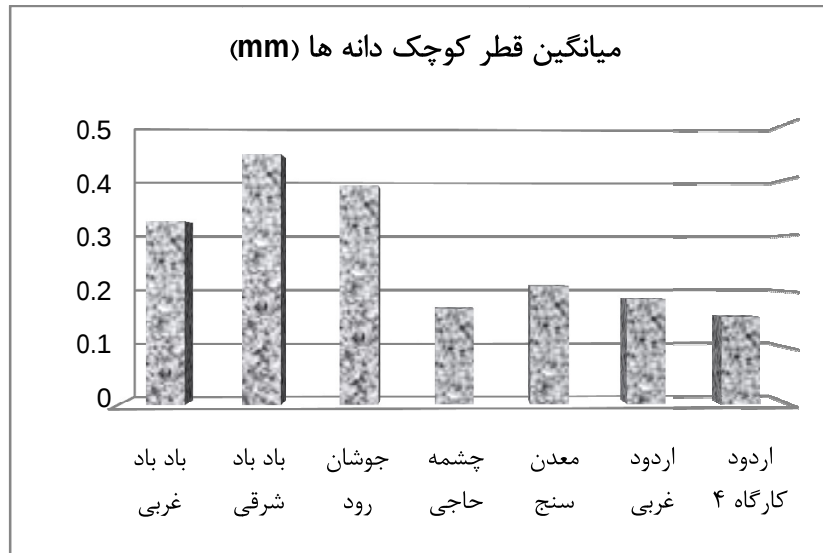
چنانچه از این شکل بر می آید، مرمیت باد باد شرقی دارای درشت ترین دانه ها و مرمیت اردود کارگاه ۴ دارای ریزترین دانه ها، در بین سنگ های مورد مطالعه بوده اند.



شکل ۳-۲۲: نمودار ستونی میانگین قطر بزرگ دانه ها در سنگ های مختلف



شکل ۳-۲۳: نمودار ستونی میانگین محیط دانه ها در سنگ های مختلف



شکل ۳-۲۴: نمودار ستونی میانگین قطر کوچک دانه‌ها در سنگ‌های مختلف

با توجه به اطلاعات پایه، که به طور مستقیم از مقاطع استخراج شدند، اطلاعات تکمیلی و شاخص‌های ریاضی دیگر نیز، با توجه به روابط ریاضی ارائه شده در فصل دوم محاسبه شدند. جدول ۳-۱۱ مشخصات بافتی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۱۱: مشخصات بافتی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه

نام نمونه	AR	D_{equi}	C	SF	t	g
باد باد غربی	۱/۴۰۶	۰/۳۵	۱۵/۲۳	۰/۸۳۵	۰/۲۰۳	۳/۸۹۷
باد باد شرقی	۱/۵۶۷	۰/۵۰۸	۱۵/۷۸	۰/۸۰۷	۰/۲۸۸	۳/۹۶۶
جوشان رود	۱/۶۹۲	۰/۴۸۶	۱۶/۲۹۴	۰/۷۷۹	۰/۳۲۳	۴/۰۳۲
چشمه حاجی	۱/۶۱	۰/۲۰۶	۱۶/۶۵۱	۰/۷۶۹	۰/۰۹۸	۳/۹۷۶
معدن سنج	۱/۶۹۸	۰/۲۶	۱۷/۱۵۱۹	۰/۷۴۷	۰/۱۱۶	۴/۱۳
اردود غربی	۱/۷۵۹	۰/۲۲۶	۲۰/۴۷۱	۰/۶۵۴	۰/۰۹۳	۴/۴۸۴
اردو کارگاه ۴	۱/۶۱۴	۰/۱۸۷	۱۷/۶۳۱	۰/۷۳	۰/۰۹۲	۴/۱۸۶

با توجه به جدول ۳-۱۱ مشاهده می‌شود، که مرمیت اردود غربی بیشترین نسبت وضعیت دانه، فشردگی و شاخص قفل شدگی دانه، مرمیت باد باد شرقی بیشترین قطر معادل، مرمیت باد باد غربی بیشترین فاکتور شکل و مرمیت جوشان رود بیشترین شاخص یکنواختی را در بین سنگ‌ها داشته‌اند.

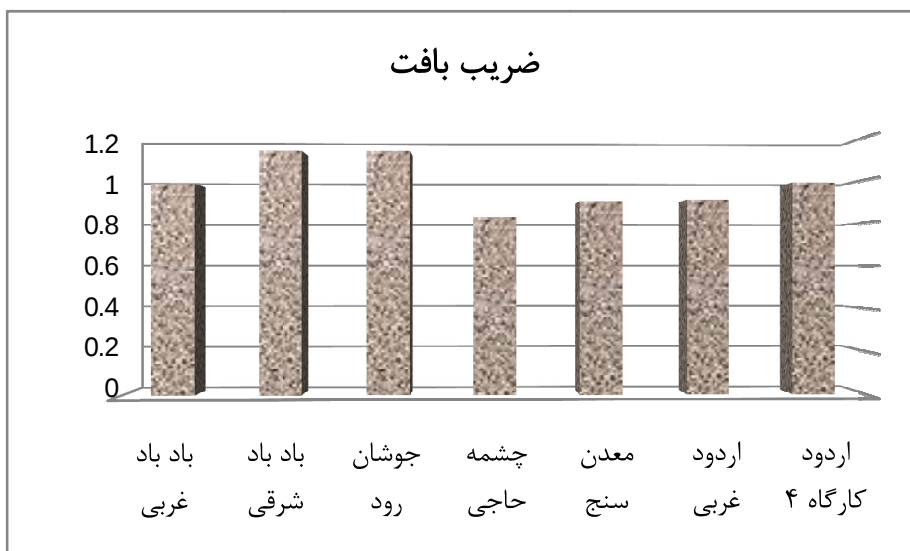
از این موضوع می‌توان به یک نتیجه جالب دست یافت و آن اینکه، هر یک از سنگ‌ها در یک پارامتر شاخص‌ترند و هیچ سنگی از نظر تمامی شاخص‌ها سرآمد نیست. این موضوع تحلیل رفتار سنگ، تحت شرایط مختلف را بسیار متغیر می‌سازد. این امر به صورت پایه، منشأ بسیاری از پیچیدگی‌های مطالعات مکانیک سنگی است. به این صورتی که، بسته به شرایط، هر سنگ می‌تواند رفتار مختلف تابع بافت، از خود نشان دهد.

در مرحله بعد، پارامترهای موجود در رابطه ضریب بافت که در فصل دوم آمده است، محاسبه شد و نتایج در جدول ۳-۱۲ درج شده است.

جدول ۳-۱۲: پارامترهای مربوط به تعیین ضریب بافت

نام نمونه	AW	$\frac{N_0}{N_0 + N_1}$	$\frac{N_1}{N_0 + N_1}$	$\frac{1}{FF_0}$	AR ₁	AF ₁	TC
باد باد غربی	۰/۸۰	۰/۹۵	۰/۰۴	۱/۱۸	۳/۱۳	۰/۶	۰/۹۷
باد باد شرقی	۰/۸۸	۰/۷۶	۰/۲۴	۱/۱۸	۲/۳۰	۰/۶۷	۱/۱۲
جوشان رود	۰/۷۶	۰/۷۵	۰/۲۵	۱/۲۴	۲/۴۷	۰/۸۸	۱/۱۲
چشمه حاجی	۰/۶۱	۰/۸۶	۰/۱۳	۱/۲۷	۲/۳۴	۰/۷۸	۰/۸۲
معدن سنج	۰/۶۱	۰/۸۴	۰/۱۵	۱/۳۲	۲/۵۵	۰/۸۹	۰/۸۹
اردود غربی	۰/۶۰	۰/۷۷	۰/۲۲	۱/۱۱	۲/۶۲	۰/۶۵	۰/۹
اردو کارگاه ۴	۰/۷۰	۰/۸۸	۰/۱۱	۱/۳۵	۲/۳۸	۰/۷۷	۰/۹۸

شکل ۳-۲۵ نمودار ستونی ضریب بافت را در سنگ‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد، همان طور که ملاحظه می‌شود، نمونه سنگ مرمریت جوشان رود و باد باد شرقی بیشترین و نمونه مرمریت چشمه حاجی، کمترین ضریب بافت را از میان نمونه‌ها دارند.



شکل ۳- ۲۵: نمودار ستونی ضریب بافت برای نمونه‌های مورد مطالعه

در این فصل، مشخصات فیزیکی نمونه‌ها شامل چگالی، تخلخل، مشخصات بافتی نمونه‌ها و پارامترهای مکانیکی آن‌ها تعیین شد. در فصل چهارم و پنجم تأثیر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بر روی نرخ برش بررسی شده است.

فصل چهارم

بررسی تأثیر پارامترهای فیزیکی

بر نرخ برش

۴ فصل چهارم

۴ - ۱ مقدمه

در این فصل، تأثیر پارامترهای فیزیکی و بافتی نمونه‌ها بر عملکرد سیم برش الماسه، با استفاده از تحلیل برازش ساده و چند متغیره مورد بررسی قرار گرفته است. روابط میان مقادیر نرخ برش و مشخصات فیزیکی سنگ از قبیل، چگالی و تخلخل و همچنین مشخصات بافتی از قبیل سطح، محیط، قطر معادل، فاکتور شکل، وضعیت دانه‌ها، فشردگی، شاخص قفل‌شدگی، شاخص یکنواختی و ضریب بافت با استفاده از توابع لگاریتم طبیعی، نمایی، توانی و درجه دوم مورد بررسی قرار گرفت و سپس بهترین تابع با بیشترین ضریب تعیین میان داده‌ها، در نظر گرفته شد. جدول ۴-۱ مشخصات فیزیکی نمونه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۴-۲ مشخصات سیم برش الماسه، از قبیل مدل ماشین، نوع سگمنت، تعداد سگمنت در هر متر و... را نشان می‌دهد، و نرخ برش نمونه‌ها توسط سیم برش الماسه، در جدول ۴-۳ درج شده است.

جدول ۴-۱: مشخصات فیزیکی نمونه‌های مورد مطالعه

نام نمونه	چگالی	تخلخل (%)	مساحت دانه‌ها (mm ²)	مساحت دانه‌ها (mm)	وضعیت دانه‌ها	قطر معادل
بادباد غربی	۲/۷۹	۰/۱	۰/۱۰۷	۱/۲۰۸	۱/۴۰۶	۰/۳۵
باد باد شرقی	۲/۸	۰/۶	۰/۲۲۶	۱/۷۹۲	۱/۵۶۷	۰/۵۰۸
جوشان رود	۲/۸۱	۰/۵۱	۰/۲۱۳	۱/۷۳۳	۱/۶۹۲	۰/۴۸۶
چشمه حاجی	۲/۸	۰/۴۲	۰/۰۳۸	۰/۷۴۲	۱/۶۱	۰/۲۰۶
معدن سنج	۲/۸	۰/۳	۰/۰۶۷	۰/۹۴۶	۱/۶۹۸	۰/۲۶
اردود غربی	۲/۸	۰/۲۶	۰/۰۵۳	۰/۸۹۶	۱/۷۵۹	۰/۲۲۶
اردود ۴	۲/۷۸	۰/۳	۰/۰۳۱	۰/۶۹۹	۱/۶۱۴	۰/۱۸۷
نگین تاک	۲/۸	۰/۳	—	—	—	—
درب گاه شرقی	۲/۷۹	۰/۱	—	—	—	—
میرزاوانه	۲/۸	۰/۱۶	—	—	—	—
گوهر سفید کوه	۲/۸۲	۰/۱	—	—	—	—

ادامه جدول ۴-۱: مشخصات فیزیکی نمونه‌های مورد مطالعه

نام نمونه	فشردگی	فاکتور شکل	شاخص یکنواختی	شاخص قفل شدگی	ضریب بافت
بادباد غربی	۱۵/۲۳	۰/۸۳۵	۰/۲۰۳	۳/۸۹۷	۰/۹۷
باد باد شرقی	۱۵/۷۸	۰/۸۰۷	۰/۲۸۸	۳/۹۶۶	۱/۱۲
جوشان رود	۱۶/۲۹۴	۰/۷۷۹	۰/۳۲۳	۴/۰۳۲	۱/۱۲
چشمه حاجی	۱۶/۶۵۱	۰/۷۶۹	۰/۰۹۸	۳/۹۷۶	۰/۸۲
معدن سنج	۱۷/۱۵۱۹	۰/۷۴۷	۰/۱۱۶	۴/۱۳	۰/۸۹
اردود غربی	۲۰/۴۷۱	۰/۶۵۴	۰/۰۹۳	۴/۴۸۴	۰/۹
اردود ۴	۱۷/۶۳۱	۰/۷۳	۰/۰۹۲	۴/۱۸۶	۰/۹۸
نگین تاک	—	—	—	—	—
درب گاه شرقی	—	—	—	—	—
میرزاوانه	—	—	—	—	—
گوهر سفید کوه	—	—	—	—	—

جدول ۴-۲: مشخصات سیم برش الماسه

مدل ماشین	دنانتون
توان موتور (کیلو وات)	۴۵
طول سیم (متر)	۶۵ - ۸۰
سرعت خطی سیم (متر بر ثانیه)	۳۰ - ۳۵
قطر چرخش (سانتی متر)	۶۰
نوع سگمنت	نرم بر
تعداد سگمنت در هر متر	۳۲

جدول ۴-۳: نرخ برش نمونه‌ها توسط سیم برش الماسه در معدن

نام معدن	نرخ برش (متر مربع بر ساعت)
باد باد غربی	۱۰
باد باد شرقی	۶
جوشان رود	۶/۲
چشمه حاجی	۱۰
معدن سنج	۱۰/۶
اردود غربی	۹/۷
اردود کارگاه ۴	۹/۳
نگین تاک	۵/۵۱
درب گاه شرقی	۳/۴۹
میرزاوانه	۳/۶۶
گوهر سفید کوه	۲/۱۹

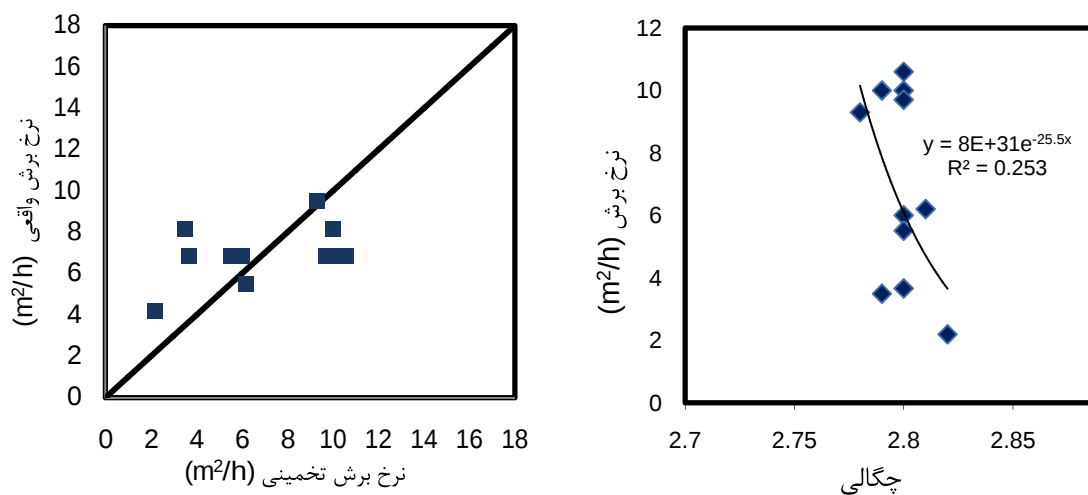
۴-۲ برازش تک متغیره بین چگالی و تخلخل با نرخ برش

در این بخش، ارتباط بین چگالی و تخلخل با نرخ برش، با برازش تک متغیره بررسی شده است.

۴-۲-۱ چگالی

شکل ۴-۱ برازش تک متغیره، بین چگالی و نرخ برش را نشان می‌دهد. بهترین تابع با ضریب تعیین بالا، در این رابطه تابع نمایی است، که ضریب تعیین ۰/۲۵۳ دارد. همان طور که از شکل پیداست، این ارتباط روندی کاهشی دارد، اما با توجه به مقدار ضریب تعیین، مشخص است که تأثیر

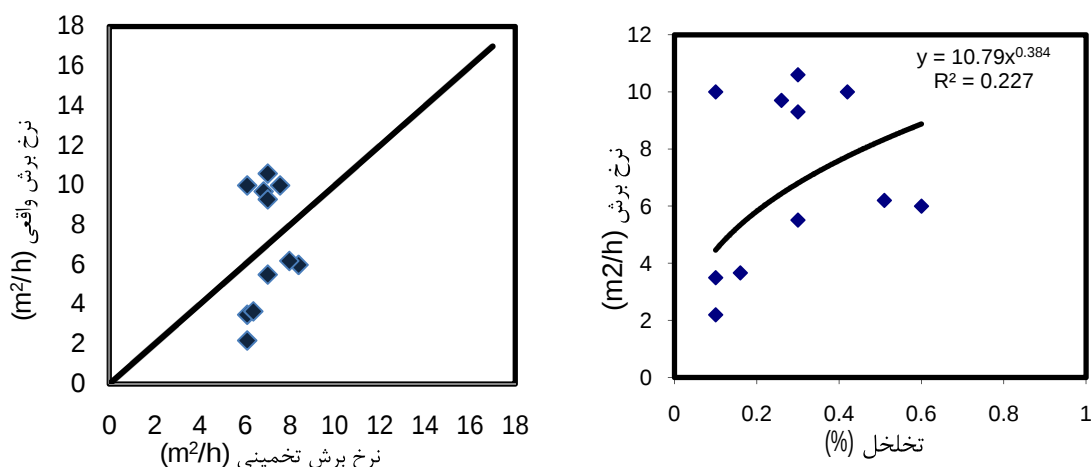
چگالی بر روی نرخ برش اهمیت چندانی ندارد. همچنین نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی حاصل از این برازش و نرخ برش واقعی در این قسمت آورده شده است.



شکل ۴ - ۱: برازش تک متغیره بین چگالی و نرخ برش و نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی و واقعی

۲-۲-۴ تخلخل

شکل ۲-۴ برازش تک متغیره، بین تخلخل و نرخ برش را نشان می‌دهد. بهترین تابع با ضریب تعیین بالا، در این رابطه تابع توانی است، که ضریب تعیین 0.227 دارد. همان طور که از شکل پیداست، این ارتباط روندی کاهشی دارد، اما با توجه به مقدار ضریب تعیین، مشخص است که تأثیر چگالی بر روی نرخ برش اهمیت چندانی ندارد. همچنین نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی حاصل از این برازش و نرخ برش واقعی در این قسمت آورده شده است.



شکل ۴ - ۲: برازش تک متغیره بین تخلخل و نرخ برش و نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی و واقعی

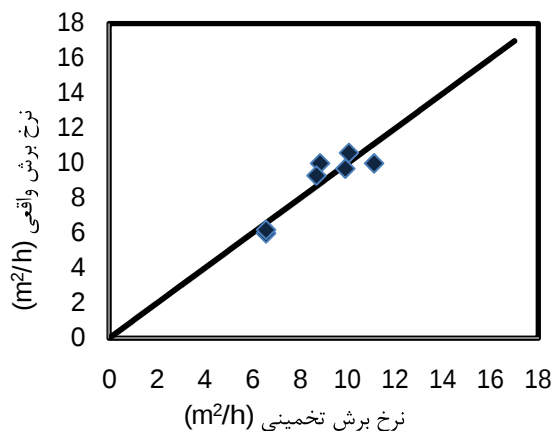
جدول ۴-۴، اطلاعات به دست آمده از برازش تک متغیره، بین چگالی و تخلخل با نرخ برش را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، Pr نرخ برش بر حسب متر مربع بر ساعت می‌باشد.

جدول ۴-۴: روابط به دست آمده از برازش تک متغیره بین چگالی و تخلخل و نرخ برش

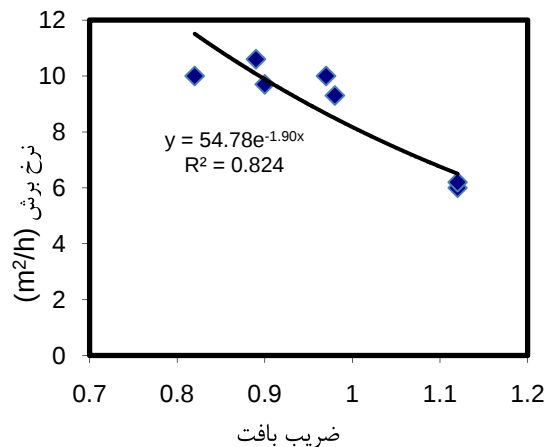
ضریب تعیین	ضریب همبستگی	مدل	
۰/۲۵۳	۰/۵	$Pr = 8E + 31e^{-25.5 d}$	رابطه (۱-۴)
۰/۲۲۷	۰/۴۶	$Pr = 10.79 n^{0.384}$	رابطه (۲-۴)

۴-۳ برازش تک متغیره بین مشخصات بافتی با نرخ برش

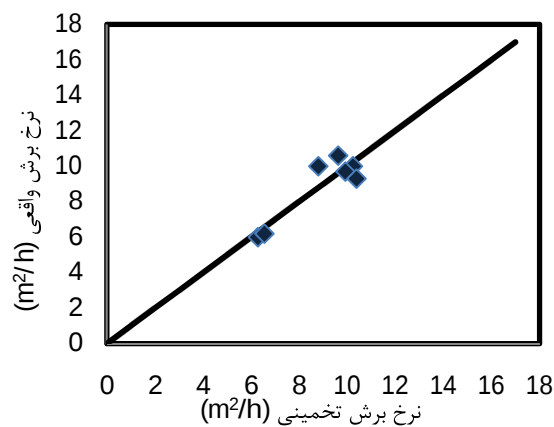
شکل ۴-۳ برازش تک متغیره بین مشخصات بافتی با نرخ برش را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، ضریب بافت، سطح دانه‌ها، محیط دانه‌ها، قطر معادل و شاخص یکنواختی ارتباط خوبی با نرخ برش دارند.



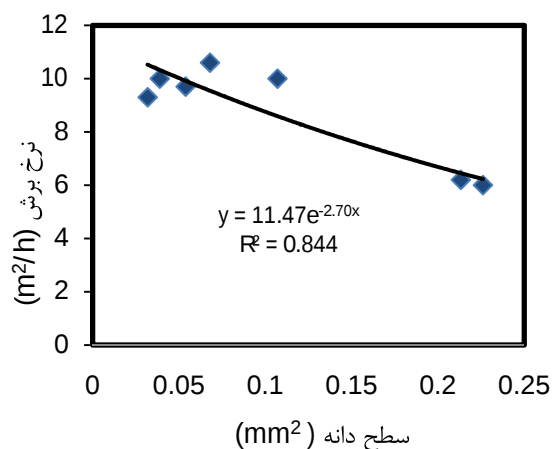
ب: نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی و واقعی



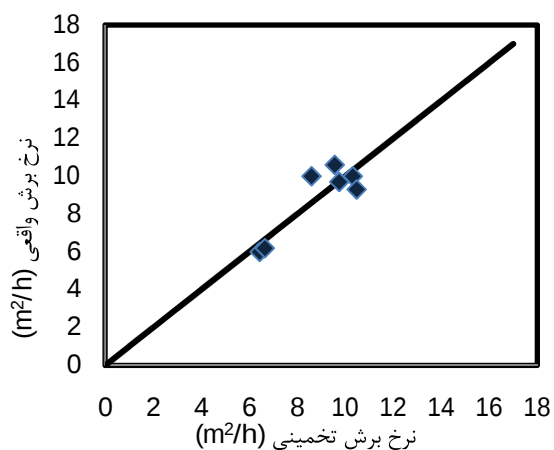
الف: برازش تک متغیره بین ضریب بافت و نرخ برش



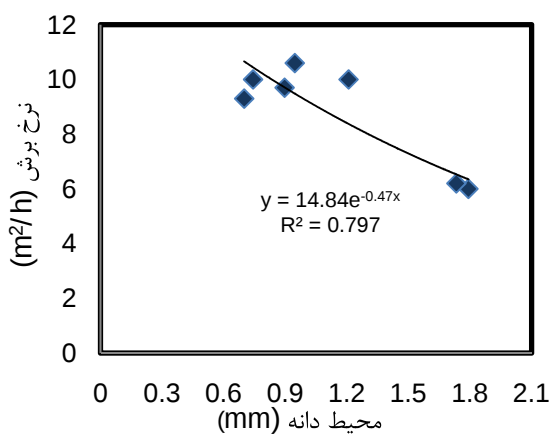
ت: نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی و واقعی



پ: برازش تک متغیره بین سطح دانه‌ها و نرخ برش

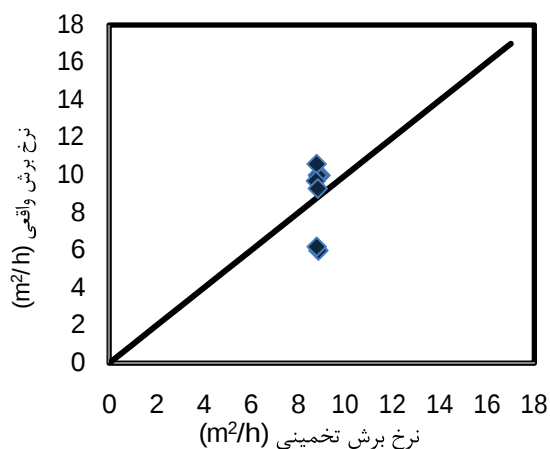


ج: نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی و واقعی

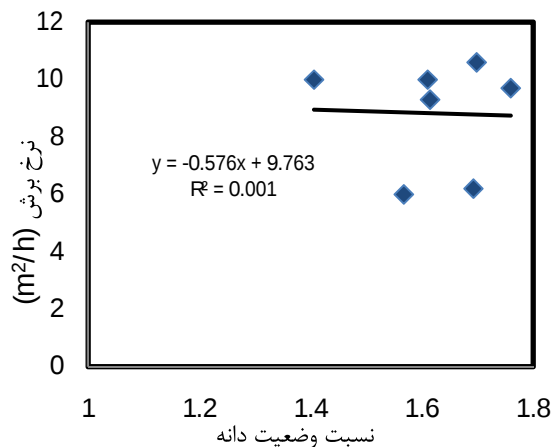


ث: برازش تک متغیره بین محیط دانه‌ها و نرخ برش

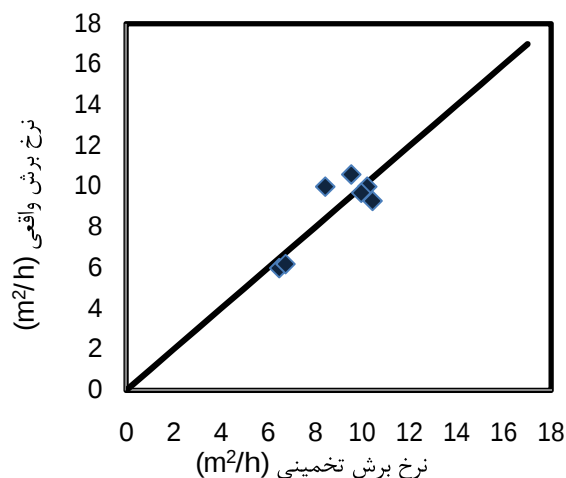
شکل ۴-۳: برازش تک متغیره بین مشخصات بافتی نمونه‌ها و نرخ برش



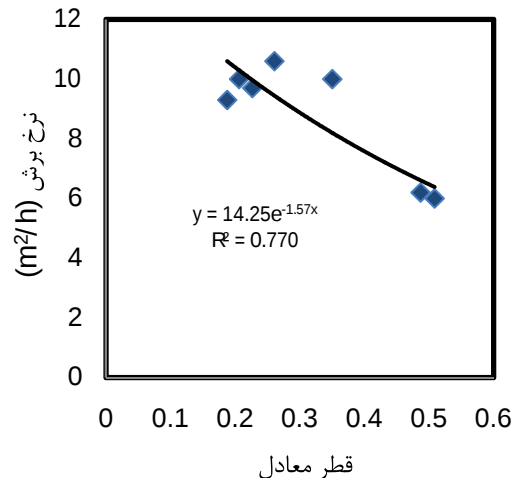
ح: نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی و واقعی



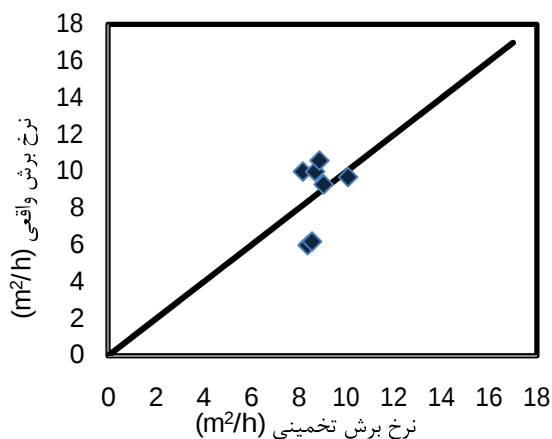
چ: برازش تک متغیره بین وضعیت دانه‌ها و نرخ برش



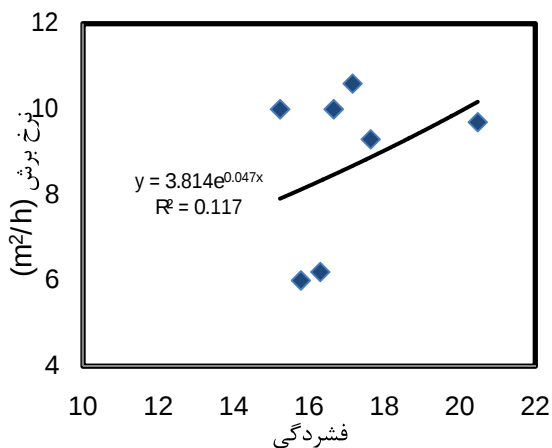
د: نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی و واقعی



خ: برازش تک متغیره بین قطر معادل و نرخ برش

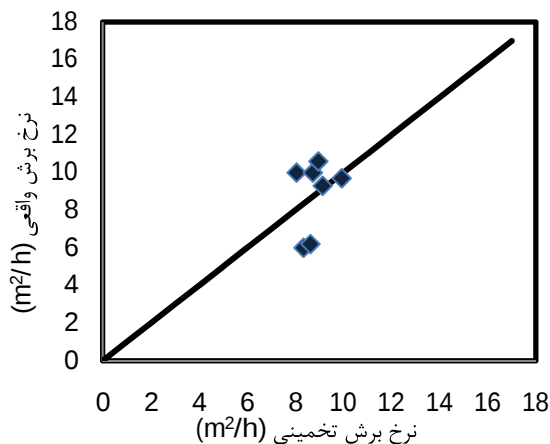


ر: نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی و واقعی

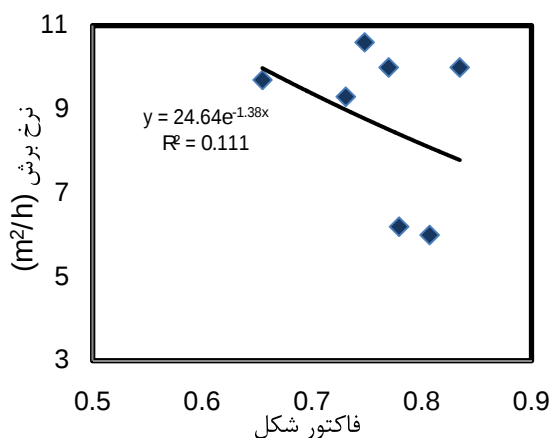


ذ: برازش تک متغیره بین فشردگی و نرخ برش

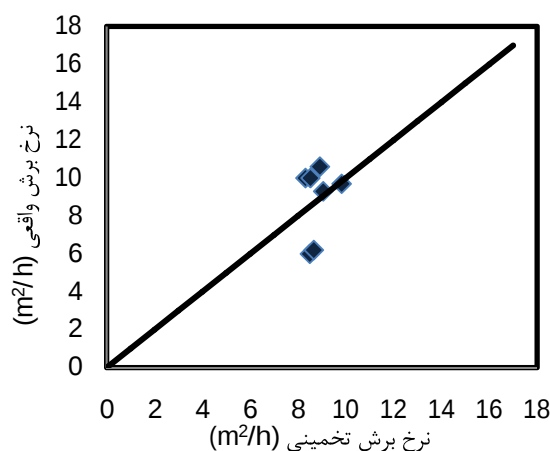
ادامه شکل ۳-۴ برازش تک متغیره بین مشخصات بافتی نمونه‌ها و نرخ برش



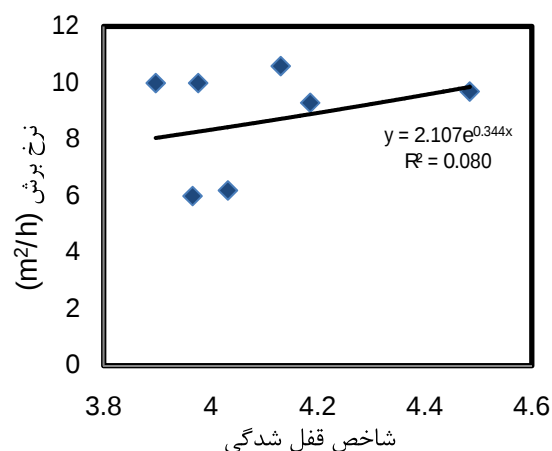
س: نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی و واقعی



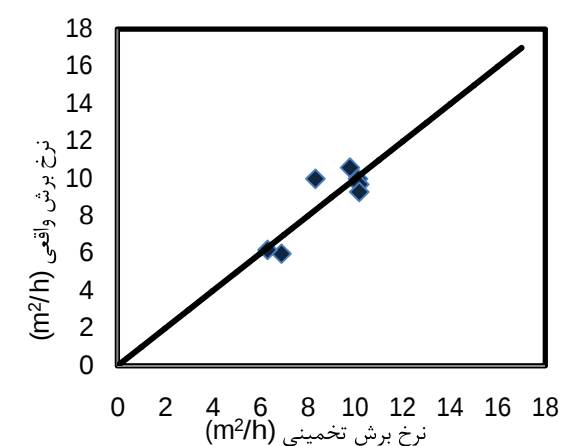
ز: برازش تک متغیره بین فاکتور شکل و نرخ برش



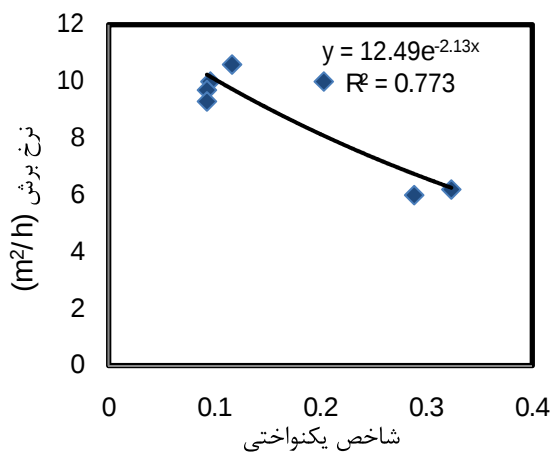
ص: نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی و واقعی



ش: برازش تک متغیره بین شاخص قفل شدگی و نرخ برش



ط: نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی و واقعی



ض: برازش تک متغیره بین شاخص یکنواختی و نرخ برش

ادامه شکل ۳-۴ برازش تک متغیره بین مشخصات بافتی نمونه‌ها و نرخ برش

جدول ۴-۵ اطلاعات به دست آمده از برازش تک متغیره بین مشخصات بافتی را با نرخ برش

نشان می‌دهد.

جدول ۴-۵: روابط حاصل از برازش تک متغیره بین مشخصات بافتی و نرخ برش

ضریب تعیین	ضریب همبستگی	مدل	
۰/۸۲	۰/۹	$Pr = 54.7e^{-1.9 TC}$	رابطه (۳۰۴)
۰/۸۴	۰/۹۱	$Pr = 11.47e^{-2.7A}$	رابطه (۴۰۴)
۰/۷۹	۰/۸۸	$Pr = 14.84e^{-0.48Lp}$	رابطه (۵۰۴)
۰/۰۰۱	۰/۰۳	$Pr = -0.57AR + 9.76$	رابطه (۶۰۴)
۰/۷۷	۰/۸۷	$Pr = 14.25e^{-1.57Dequi}$	رابطه (۷۰۴)
۰/۱۱	۰/۳۳	$Pr = 3.81e^{0.047C}$	رابطه (۸۰۴)
۰/۱۱	۰/۳۳	$Pr = 3.81e^{-0.047SF}$	رابطه (۹۰۴)
۰/۰۸	۰/۲۸	$Pr = 24.64e^{1.38 g}$	رابطه (۱۰۰۴)
۰/۷۷	۰/۸۷	$Pr = 12.49e^{-2.13t}$	رابطه (۱۱۰۴)

همان طور که ملاحظه شد، تمام پارامترهای فیزیکی ارتباط خوبی با نرخ برش ندارند. از میان مشخصات فیزیکی مورد مطالعه، سطح دانه، محیط دانه، قطر معادل، ضریب بافت و شاخص یکنواختی ضریب همبستگی خوبی با نرخ برش داشتند. برای بهبود و بالا بردن ضریب همبستگی، ارتباط بین این پارامترها و نرخ برش، با برازش چند متغیره نیز بررسی شد.

۴ - ۵ برازش دو متغیره بین مشخصات بافتی و ضریب بافت و نرخ برش

برای بهبود و بالا بردن ضریب تعیین روابط به دست آمده از برازش ساده، برازش چند متغیره برای پارامترهایی که ضریب تعیین نسبتاً خوبی را در برازش ساده داشتند، انجام شد. در بخش پارامترهای فیزیکی، مشاهده شد که چگالی و تخلخل، ضریب همبستگی قابل توجهی با نرخ برش

نداشتند، لذا برای این دو پارامتر برآزش دو متغیره انجام نشد. همان طور که در جدول ۵-۴ مشاهده شد، تمام روابط به دست آمده از پارامترهای بافتی، ضریب همبستگی مناسبی ندارند. در نتیجه برآزش تک متغیره، به درستی ارتباط بین قابلیت برش و پارامترهای مختلف را نشان نمی‌دهد و باید از برآزش‌های چند متغیره استفاده کرد. در برآزش چند متغیره، معمولاً از پارامترهایی استفاده می‌شود، که ضریب همبستگی آنها با نرخ برش در برآزش تک متغیره، بیشتر از ۰/۵ باشد. با توجه به جدول ۵-۴ ضریب بافت، سطح، محیط، قطر معادل دانه‌ها و شاخص یکنواختی ضریب همبستگی مناسبی داشتند. جدول ۶-۴ ضریب همبستگی بین پارامترهای بافتی را نشان می‌دهد. از آنجائی که تعداد پارامترها در برآزش چند متغیره زیاد می‌باشد و کاربرد روابط به‌دست آمده از این برآزش‌ها مشکل می‌باشد، لذا تعداد متغیرها باید کاهش یابد. در صورت یافتن رابطه خوبی بین دو متغیر، یعنی در صورتی که ضریب همبستگی آنها بیشتر از ۰/۹ باشد، یکی از متغیرها قابل حذف می‌باشد.

جدول ۶-۴: ضریب همبستگی بین پارامترهای بافتی

<i>Pr</i>	<i>t</i>	<i>g</i>	<i>SF</i>	<i>C</i>	<i>Dequi</i>	<i>AR</i>	<i>Perimeter</i>	<i>Area</i>	<i>TC</i>	
									۱	<i>TC</i>
								۱	۰/۸۹	<i>Area</i>
							۱	۰/۹۹	۰/۸۸	<i>Perimeter</i>
						۱	۰/۱۵	-۰/۱۴	۰/۱۵	<i>AR</i>
					۱	-۰/۲۱	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۸۷	<i>Dequi</i>
				۱	-۰/۵۶	۰/۷۴	-۰/۵	-۰/۵۲	-۰/۴۱	<i>C</i>
			۱	-۰/۹۸	۰/۵۹	-۰/۸۱	۰/۵۳	۰/۵۳	۰/۴۱	<i>SF</i>
		۱	-۰/۹۷	۰/۹۸	-۰/۴۹	۰/۷۴	-۰/۴۲	-۰/۴۴	-۰/۳	<i>g</i>
	۱	-۰/۵۳	-۰/۶۱	۰/۶	۰/۹۸	-۰/۲۳	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۸۹	<i>t</i>
۱	-۰/۸۶	۰/۲۶	۰/۳۱	۰/۳۲	-۰/۸۶	-۰/۰۳	-۰/۸۸	-۰/۹۱	-۰/۹۱	<i>Pr</i>

با توجه به جدول ۴-۶ و ضریب همبستگی بین مشخصات فیزیکی و نرخ برش، ارتباط بین ضریب بافت، سطح دانه، محیط دانه، قطر معادل دانه‌ها و شاخص یکنواختی با نرخ برش، با برآزش چند متغیره نیز بررسی شد.

۴-۵-۱ ضریب بافت و سطح دانه‌ها

نتایج برآزش دو متغیره، بین ضریب بافت و سطح دانه‌ها برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۴-۷ و ۴-۸ درج شده است.

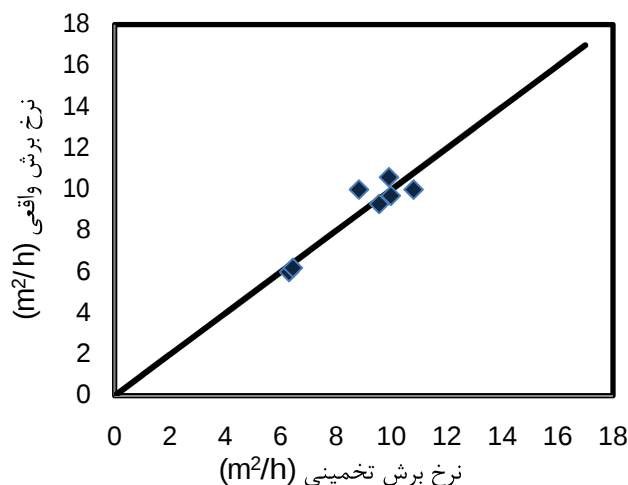
جدول ۴-۷: نتایج برآزش دو متغیره برای ضریب بافت و سطح دانه‌ها

مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۴-۱۲) $Pr = -10.81 A - 8.24 TC + 17.97$	۰/۹۳	۰/۸۷	۰/۸	۰/۸۳

جدول ۴-۸: نتایج و ضرایب برآزش دو متغیره برای ضریب بافت و سطح دانه‌ها

مدل	ضرایب برآزش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۴-۱۲)	عدد ثابت	۱۷/۹۷	۱۳/۶۱	۶/۹۴	۳/۲۴	۰/۰۳۱
	A	-۱۰/۸۱			-۱/۱۷	۰/۳
	TC	-۸/۲۴			-۱/۲۵	۰/۲۷

در این برآزش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل (یعنی ۱۳/۶۱)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۶/۹۴)، لذا حداقل یکی از ضرایب برآزش صفر نمی‌باشد. شکل ۴-۴ نمودار صحت سنجی رابطه بین سطح دانه‌ها و ضریب بافت با نرخ برش را نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد.



شکل ۴-۴: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۱۲-۴)

۴-۵-۲ ضریب بافت و محیط دانه‌ها

نتایج برازش دو متغیره، بین ضریب بافت و محیط دانه‌ها برای پیش بینی نرخ برش، در جدول

۴-۹ و ۴-۱۰ درج شده است.

جدول ۴-۹: نتایج برازش دو متغیره برای ضریب بافت و محیط دانه‌ها

مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۱۳-۴) $Pr = -1.46 Lp - 10 TC + 20.23$	۰/۹۲	۰/۸۵	۰/۷۸	۰/۸۸

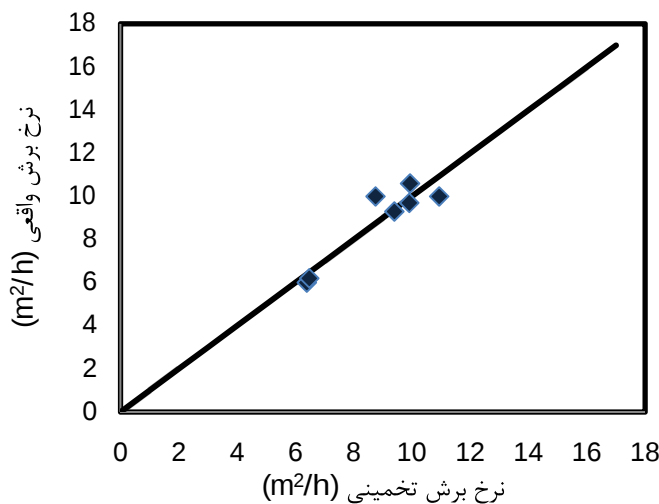
جدول ۴-۱۰: نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای ضریب بافت و محیط دانه‌ها

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۱۳-۴)	عدد ثابت	۲۰/۲۳	۱۱/۷۷	۶/۹۴	۴/۱۳	۰/۰۱۴
	Lp	-۱/۴۶			-۰/۸۶	۰/۴۳
	TC	-۱۰			-۱/۴۹	۰/۲

در این برازش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۱۱/۷۷)، از مقدار F

جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۶/۹۴)، لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۴-۵ نمودار صحت سنجی رابطه بین محیط دانه‌ها و ضریب بافت با نرخ برش را نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد.



شکل ۴-۵: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۱۳)

۴-۵-۳ ضریب بافت و قطر معادل

نتایج برازش دو متغیره، بین ضریب بافت و قطر معادل برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۴-۴ و ۱۱ و ۱۲-۴ درج شده است.

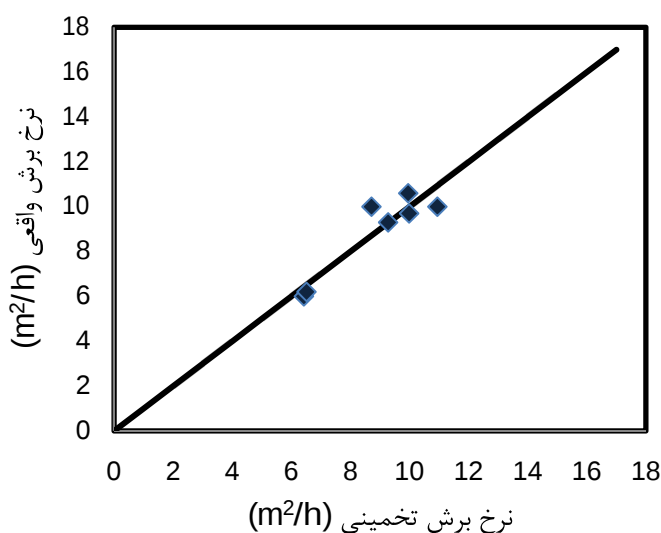
جدول ۴-۱۱: نتایج برازش دو متغیره برای ضریب بافت و قطر معادل

مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۴-۱۴) $Pr = -4.13 De_{qui} - 10.9 TC + 20.73$	۰/۹۱	۰/۸۴	۰/۷۷	۰/۹۱

جدول ۴-۱۲: نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای ضریب بافت و قطر معادل

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۴-۱۴)	عدد ثابت	۲۰/۷۳	۱۱/۰۹	۶/۹۴	۴/۱۴	۰/۰۱۴
	Dequi	-۴/۱۳			-۰/۷۱	۰/۵۱
	TC	-۱۰/۹			-۱/۶۲	۰/۱۷

در این برازش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی $1/0.9$)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی $6/94$)، لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد. شکل ۶-۴ نمودار صحت سنجی رابطه بین قطر معادل و ضریب بافت با نرخ برش را نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد



شکل ۶-۴: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۱۴-۴)

۴-۵-۴ ضریب بافت و شاخص یکنواختی

نتایج برازش دو متغیره، بین ضریب بافت و شاخص یکنواختی برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۱۳-۴ و ۱۴-۴ درج شده است.

جدول ۱۳-۴: نتایج برازش دو متغیره برای ضریب بافت و شاخص یکنواختی

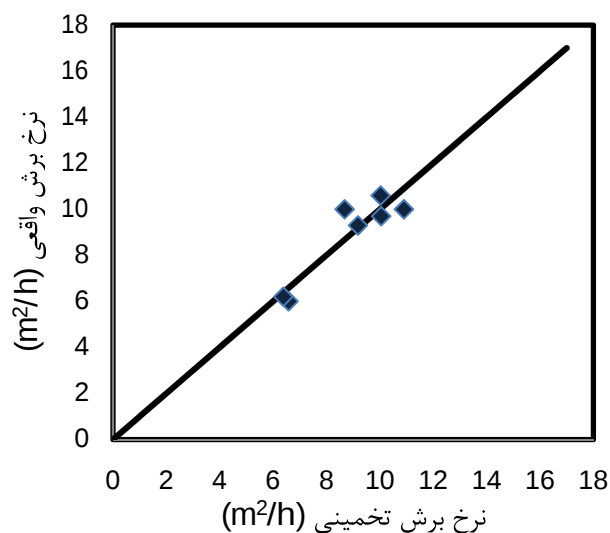
خطای معیار تخمین	R^2 تصحیح شده	R^2	R	مدل	
۰/۹۲	۰/۷۶	۰/۸۴	۰/۹۱	$Pr = -5.5 t - 10.87 TC + 20.34$	رابطه (۱۵-۴)

جدول ۴-۱۴: نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای ضریب بافت و شاخص یکنواختی

مقدار P	t	F انتخاب شده از جدول	F	خطای معیار	ضرایب برازش	مدل	رابطه (۴-۱۵)
۰/۰۲۴	۳/۵۱	۶/۹۴	۱۰/۸۵	۵/۷۸	۲۰/۳۴	عدد ثابت	
۰/۵۴	-۰/۶۵			۸/۳۸	-۵/۵	t	
۰/۲	-۱/۵			۷/۲۴	-۱۰/۸۷	TC	

در این برازش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی $۱۰/۸۵$)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی $۶/۹۴$)، لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۴-۷ نمودار صحت سنجی رابطه بین شاخص یکنواختی و ضریب بافت با نرخ برش را نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد.



شکل ۴-۷: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۱۵)

جدول ۴-۱۵ اطلاعات مربوط به برازش دو متغیره بین برخی از مشخصات بافتی و ضریب بافت را با نرخ برش نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۵: روابط حاصل از برازش دو متغیره بین برخی از مشخصات بافتی و ضریب بافت با نرخ برش

ضریب تعیین	ضریب همبستگی	مدل	
۰/۸۷	۰/۹۳	$Pr = -10.81 A - 8.24 TC + 17.97$	رابطه (۱۲-۴)
۰/۸۵	۰/۹۲	$Pr = -1.46 Lp - 10 TC + 20.23$	رابطه (۱۳-۴)
۰/۸۴	۰/۹۱	$Pr = -4.13 Dequi - 10.9 TC + 20.73$	رابطه (۱۴-۴)
۰/۸۴	۰/۹۱	$Pr = -5.5 t - 10.87 TC + 20.34$	رابطه (۱۵-۴)

با توجه به جدول ۴-۱۵، بیشترین ضریب همبستگی مربوط به مدل (۴-۱۲) شامل، سطح دانه و ضریب بافت می‌باشد. مقدار این ضریب همبستگی ۰/۹۳ می‌باشد، که افزایش چندانی نسبت به بالاترین ضریب همبستگی در برازش تک متغیره (یعنی ۰/۹۱)، نداشته است، لذا برای رسیدن به ضریب همبستگی بیشتر، ارتباط پارامترها و نرخ برش با برازش سه متغیره نیز بررسی شد.

۴-۶ برازش سه متغیره بین مشخصات بافتی و ضریب بافت با نرخ برش

برای دستیابی به ضریب همبستگی بیشتر، بین ضریب بافت و پارامترهای مذکور در قسمت قبل، برازش سه متغیره انجام شد.

۴-۶-۱ ضریب بافت، سطح و محیط دانه‌ها

نتایج برازش سه متغیره، بین ضریب بافت، سطح و محیط دانه‌ها برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۴-۱۶ و ۴-۱۷ درج شده است.

جدول ۴-۱۶: نتایج برازش سه متغیره برای ضریب بافت، سطح و محیط دانه‌ها

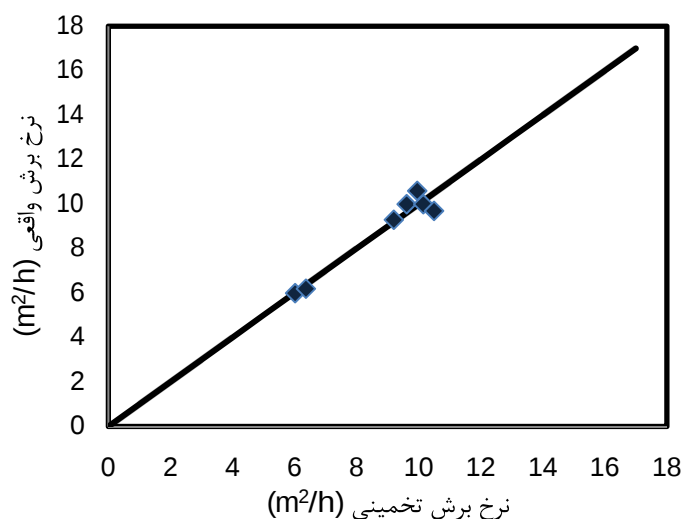
خطای معیار تخمین	R^2 تصحیح شده	R^2	R	مدل	
۰/۶۴	۰/۸۸	۰/۹۴	۰/۹۷	$Pr = -94.32 A - 6.1 TC + 14.63 Lp + 7.94$	رابطه (۱۶-۴)

جدول ۴-۱۷: نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای ضریب بافت، سطح و محیط دانه‌ها

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۴-۱۶)	عدد ثابت	۷/۹۴	۱۶/۲۴	۹/۲۸	۱/۱۶	۰/۳۲
	A	-۹۴/۳۲			-۲/۱۲	۰/۱۲
	Lp	۱۴/۶۳			۱/۹	۰/۱۵
	TC	-۶/۱			-۱/۱۷	۰/۳۲

در این برازش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۱۶/۲۴)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۹/۲۸)، لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۴-۸ نمودار صحت سنجی رابطه بین ضریب بافت، سطح و محیط دانه‌ها با نرخ برش را نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد.



شکل ۴-۸: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۱۶)

۴-۶-۲ ضریب بافت، سطح و قطر معادل

نتایج برازش سه متغیره، بین ضریب بافت، سطح و قطر معادل برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۴-۱۸ و ۴-۱۹ درج شده است.

جدول ۴-۱۸: نتایج برازش سه متغیره برای ضریب بافت، سطح و قطر معادل

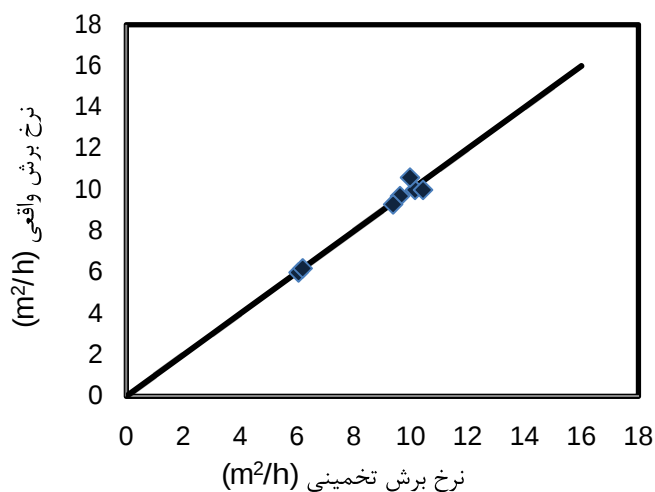
مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۱۷-۴) $Pr = -87.44 A - 5.24 TC + 44.83 Dequi + 8.89$	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۴	۰/۴۵

جدول ۴-۱۹: نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای ضریب بافت، سطح و قطر معادل

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۱۷-۴)	عدد ثابت	۸/۸۹	۳۴/۲۵	۹/۲۸	۲/۱۶	۰/۱۱
	A	-۸۷/۴۴			-۳/۶۲	۰/۰۳
	TC	-۵/۲۴			-۱/۴۲	۰/۲۵
	Dequi	۴۴/۸۳			۳/۲۴	۰/۰۴

در این برازش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۳۴/۲۵)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۹/۲۸)، لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۴-۹ نمودار صحت سنجی رابطه بین ضریب بافت، سطح و قطر معادل با نرخ برش را نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد.



شکل ۴-۹: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۱۷-۴)

۴-۶-۳ ضریب بافت، سطح و شاخص یکنواختی

نتایج برازش سه متغیره، بین ضریب بافت، سطح و شاخص یکنواختی برای پیش بینی نرخ برش،

در جدول ۴-۲۰ و ۴-۲۱ درج شده است.

جدول ۴-۲۰: نتایج برازش سه متغیره برای ضریب بافت، سطح و شاخص یکنواختی

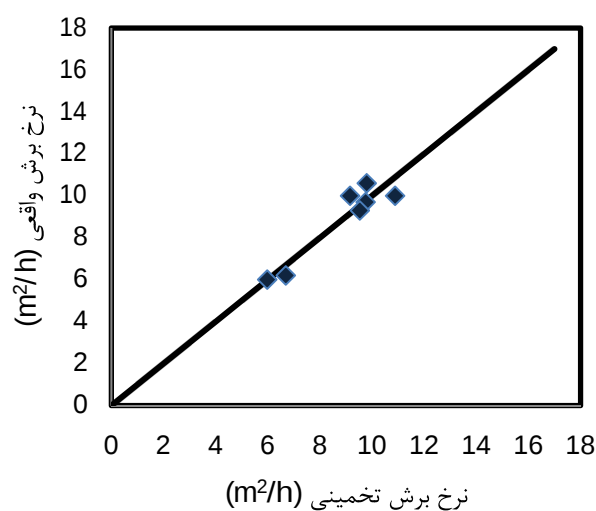
مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۱۸-۴) $Pr = -23.47 A - 9.25 TC + 11.76 t + 18.25$	۰/۹۴	۰/۸۸	۰/۷۷	۰/۹

جدول ۴-۲۱: نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای ضریب بافت، سطح و شاخص یکنواختی

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۱۸-۴)	عدد ثابت	۱۸/۲۵	۷/۹۱	۹/۲۸	۳/۰۴	۰/۰۵
	A	-۲۳/۴۷			-۱/۰۷	۰/۳۶
	TC	-۹/۲۵			-۱/۲۷	۰/۲۹
	t	۱۱/۷۶			۰/۶۵	۰/۵۶

در این برازش، با توجه به کوچکتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۷/۹۱)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۹/۲۸)، لذا این مدل با این سطح اعتماد، معتبر نیست.

شکل ۴-۱۰ نمودار نرخ برش تخمینی به دست آمده، از مدل ۴-۱۸ را برحسب نرخ برش واقعی نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۰: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۱۸)

۴-۶-۴ ضریب بافت، محیط و قطر معادل

نتایج برازش سه متغیره، بین ضریب بافت، محیط و قطر معادل برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۴-۲۲ و ۴-۲۳ درج شده است.

جدول ۴-۲۲: نتایج برازش سه متغیره برای ضریب بافت، محیط و قطر معادل

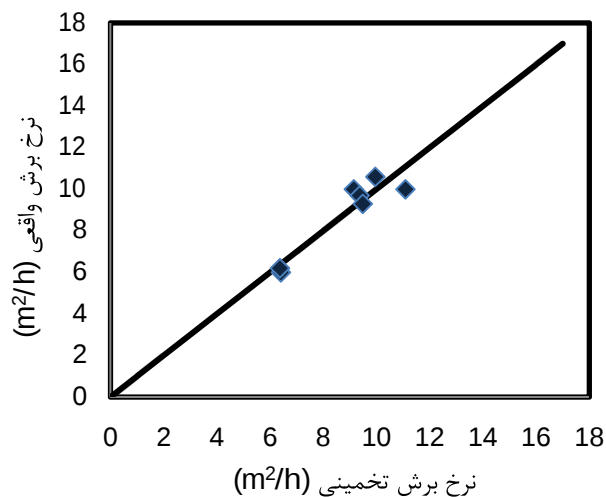
مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۴-۱۹) $Pr = -10.2L p - 9.41 TC + 29.24 Dequi + 20.36$	۰/۹۳	۰/۸۷	۰/۷۵	۰/۹۴

جدول ۴-۲۳: نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای ضریب بافت، محیط و قطر معادل

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۱۹-۴)	عدد ثابت	۲۰/۳۶	۷/۱۶	۹/۲۸	۳/۹۲	۰/۰۳
	Lp	-۱۰/۲			-۰/۸۵	۰/۴۵
	TC	-۹/۴۱			-۱/۳۱	۰/۲۷
	Dequi	۲۹/۲۴			۰/۷۴	۰/۵۱

در این برازش، با توجه به کوچکتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی $۷/۱۶$)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی $۹/۲۸$)، لذا این مدل با سطح اعتماد ۹۵ درصد معتبر نیست.

شکل ۴-۱۱ نمودار نمودار نرخ برش تخمینی به دست آمده، از مدل ۴-۱۹ را برحسب نرخ برش واقعی نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۱: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۱۹-۴)

۴-۷-۵ ضریب بافت، محیط و شاخص یکنواختی

نتایج برازش سه متغیره، بین ضریب بافت، محیط و شاخص یکنواختی برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۴-۲۴ و ۴-۲۵ درج شده است.

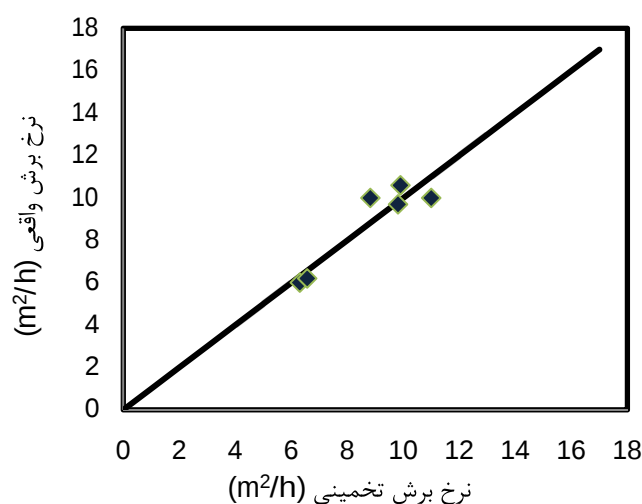
جدول ۴-۲۴: نتایج برازش سه متغیره برای ضریب بافت، محیط و شاخص یکنواختی

مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۲۰-۴) $Pr = -2.19 Lp - 10.46 TC + 3.88 t + 20.83$	۰/۹۱	۰/۸۴	۰/۷۱	۱/۰۲

جدول ۴-۲۵: نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای ضریب بافت، محیط و شاخص یکنواختی

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۲۰-۴)	عدد ثابت	۲۰/۸۳	۵/۹۶	۹/۲۸	۳/۲۱	۰/۰۴
	Lp	-۲/۱۹			-۰/۵	۰/۶۴
	TC	-۱۰/۴۶			-۱/۲۹	۰/۲۸
	t	۳/۸۸			۰/۱۸	۰/۸۶

در این برازش، با توجه به کوچکتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۵/۹۶)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۹/۲۸)، لذا این مدل با سطح اعتماد ۹۵ درصد معتبر نیست. شکل ۴-۱۲ نمودار نمودار نرخ برش تخمینی به دست آمده، از مدل ۴-۲۰ را برحسب نرخ برش واقعی نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۲: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۲۰-۴)

۴-۶-۶ ضریب بافت، قطر معادل و شاخص یکنواختی

نتایج برازش سه متغیره، بین ضریب بافت، قطر معادل و شاخص یکنواختی برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۴-۲۶ و ۴-۲۷ درج شده است.

جدول ۴-۲۶: نتایج برازش سه متغیره برای ضریب بافت، قطر معادل و شاخص یکنواختی

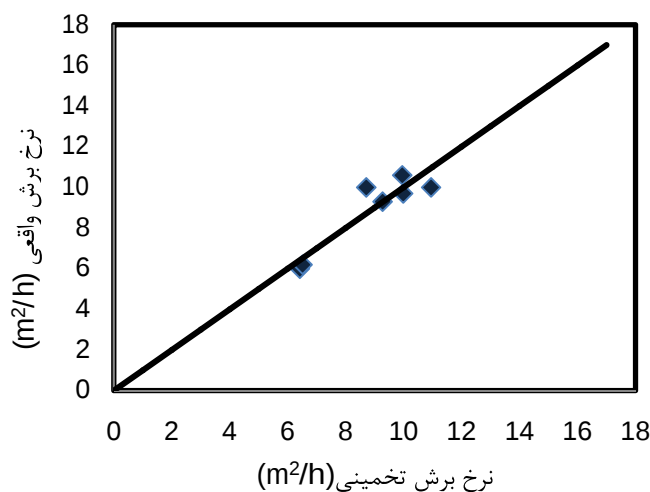
مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۴-۲۱) $Pr = -4.19 Dequi - 10.91 TC + 0.1 t + 20.47$	۰/۹۱	۰/۸۴	۰/۶۹	۱/۰۵

جدول ۴-۲۷: نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای ضریب بافت، قطر معادل و شاخص یکنواختی

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۴-۲۱)	عدد ثابت	۲۰/۴۷	۵/۵۴	۹/۲۸	۳/۰۳	۰/۰۶
	Dequi	-۴/۱۹			-۰/۲۳	۰/۸۲
	TC	-۱۰/۹۱			-۱/۳۱	۰/۲۷
	t	۰/۱			۰/۰۰۴	۰/۹۹

در این برازش، با توجه به کوچکتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۵/۵۴)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۹/۲۸)، لذا این مدل با این سطح اعتماد معتبر نیست.

شکل ۴-۱۳ نمودار نمودار نرخ برش تخمینی به دست آمده، از مدل ۴-۲۱ را برحسب نرخ برش واقعی نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۳: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۲۱)

جدول ۴-۲۸ اطلاعات مربوط به برازش سه متغیره بین برخی از مشخصات بافتی را با نرخ برش نشان می‌دهد. برازش سه متغیره بین این پارامترها و نرخ برش نشان داد که مدل‌های (۴-۱۸) تا (۴-۲۱) با سطح اعتماد ۹۵ درصد معتبر نیستند، اما مدل‌های (۴-۱۶) و (۴-۱۷) ضریب همبستگی مناسبی با نرخ برش داشتند. برای بالا بردن ضریب همبستگی، ارتباط پارامترها و نرخ برش، با برازش چهار متغیره نیز بررسی شد.

جدول ۴-۲۸: روابط حاصل از برازش سه متغیره بین برخی از مشخصات بافتی با نرخ برش

مدل		ضریب همبستگی	ضریب تعیین
رابطه (۴-۱۶)	$Pr = -94.32 A - 6.1 TC + 14.63 Lp + 7.94$	۰/۹۷	۰/۹۴
رابطه (۴-۱۷)	$Pr = -87.44 A - 5.24 TC + 44.83 Dequi + 8.89$	۰/۹۸	۰/۹۷
رابطه (۴-۱۸)	$Pr = -23.47 A - 9.25 TC + 11.76 t + 18.25$	۰/۹۴	۰/۸۸
رابطه (۴-۱۹)	$Pr = -10.2 Lp - 9.41 TC + 29.24 Dequi + 20.36$	۰/۹۳	۰/۸۷
رابطه (۴-۲۰)	$Pr = -2.19 Lp - 10.46 TC + 3.88 t + 20.83$	۰/۹۱	۰/۸۴
رابطه (۴-۲۱)	$Pr = -4.19 Dequi - 10.19 TC + 0.1 t + 20.47$	۰/۹۱	۰/۸۴

۴-۷ برازش چهار متغیره بین مشخصات بافتی و ضریب بافت با نرخ برش

برای دستیابی به ضریب همبستگی بیشتر، بین ضریب بافت و پارامترهای مذکور در قسمت قبل، برازش چهار متغیره انجام شد.

۴-۷-۱ ضریب بافت، سطح، محیط دانه‌ها و قطر معادل

نتایج برازش چهار متغیره، بین ضریب بافت، سطح، محیط دانه‌ها و قطر معادل برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۴-۲۹ و ۴-۳۰ درج شده است.

جدول ۴-۲۹: نتایج برازش چهار متغیره برای ضریب بافت، سطح، محیط دانه‌ها و قطر معادل

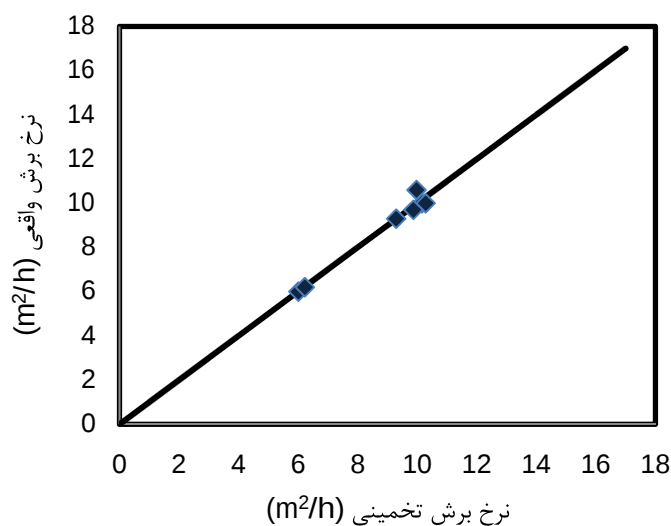
مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۴-۲۲) $Pr = 36.01 Dequi - 5.1 TC + 4.99 Lp - 100.84 A + 7.26$	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۲	۰/۵۱

جدول ۴-۳۰: نتایج و ضرایب برازش چهار متغیره برای ضریب بافت، سطح، محیط دانه‌ها و قطر معادل

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۴-۲۲)	عدد ثابت	۷/۲۶	۲۰/۲۷	۱۹/۲۵	۱/۳۵	۰/۳
	A	-۱۰۰/۸۴			-۲/۸۶	۰/۱
	TC	-۵/۱			-۱/۲۲	۰/۳۴
	Lp	۴/۹۹			۰/۵۹	۰/۶۱
	Dequi	۳۶/۰۱			۱/۶۷	۰/۲۳

در این برازش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۲۰/۲۷)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۱۹/۲۵)، لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۴-۱۴ نمودار صحت سنجی رابطه بین ضریب بافت، سطح، محیط دانه‌ها و قطر معادل با نرخ برش را نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد.



شکل ۴-۱۴: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۲۲)

۴-۷-۲ ضریب بافت، سطح، محیط دانه‌ها و شاخص یکنواختی

نتایج برازش چهار متغیره، بین ضریب بافت، سطح، محیط دانه‌ها و شاخص یکنواختی برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۴-۳۱ و ۴-۳۲ درج شده است.

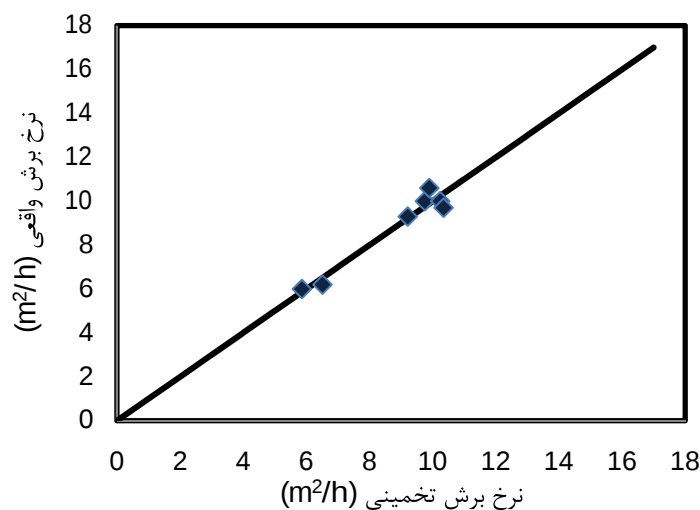
جدول ۴-۳۱: نتایج برازش چهار متغیره برای ضریب بافت، سطح، محیط دانه‌ها و شاخص یکنواختی

خطای معیار تخمین	R^2 تصحیح شده	R^2	R	مدل	رابطه
۰/۷۶	۰/۸۴	۰/۹۴	۰/۹۷	$Pr = 6.47 t - 6.79 TC + 13.75 Lp - 96.28 A + 8.7$	(۴-۲۳)

جدول ۴-۳۲: نتایج و ضرایب برازش چهار متغیره برای ضریب بافت، سطح، محیط دانه‌ها و شاخص یکنواختی

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۴-۲۳)	عدد ثابت	۸/۷	۸/۸۶	۱۹/۲۵	۱/۰۶	۰/۳۹
	A	-۹۶/۲۸			-۱/۸۳	۰/۲
	TC	-۶/۷۹			-۱/۰۶	۰/۳۹
	Lp	۱۳/۷۵			۱/۴۸	۰/۲۷
	t	۶/۴۷			۰/۴۱	۰/۷۱

در این برازش، با توجه به کوچکتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۸/۸۶)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۱۹/۲۵)، لذا این مدل با این سطح اعتماد معتبر نیست. شکل ۴-۱۵ نمودار نمودار نرخ برش تخمینی به دست آمده، از مدل ۴-۲۳ را برحسب نرخ برش واقعی نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۵: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۲۳)

۴-۷-۳ ضریب بافت، محیط دانه‌ها، قطر معادل و شاخص یکنواختی

نتایج برازش چهار متغیره، بین ضریب بافت، محیط دانه‌ها، قطر معادل و شاخص یکنواختی برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۴-۳۳ و ۴-۳۴ درج شده است.

جدول ۴-۳۳: نتایج برازش چهار متغیره برای ضریب بافت، محیط دانه‌ها، قطر معادل و شاخص یکنواختی

مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۴-۲۴) $Pr = -7.43 t - 8.34 TC - 11.54 L p + 38.37 Dequi + 19.24$	۰/۹۳	۰/۸۸	۰/۶۴	۱/۱۳

جدول ۴-۳۴: نتایج و ضرایب برازش چهار متغیره برای ضریب بافت، محیط دانه‌ها، قطر معادل و شاخص یکنواختی

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۴-۲۴)	عدد ثابت	۱۹/۲۴	۳/۷۱	۱۹/۲۵	۲/۵۱	۰/۱۲
	Lp	-۱۱/۵۴			-۰/۷۵	۰/۵۲
	TC	-۸/۳۴			-۰/۸۷	۰/۴۷
	t	-۷/۴۳			-۰/۲۵	۰/۸۲
	Dequi	۳۸/۳۷			۰/۶۴	۰/۵۸

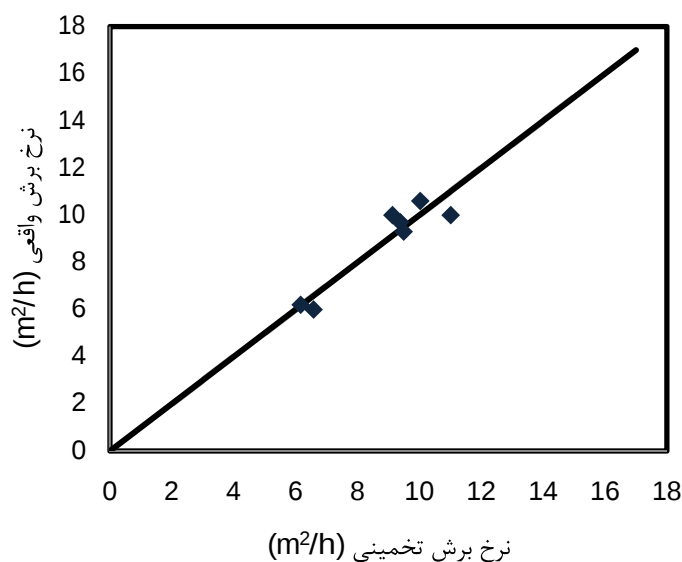
در این برازش، با توجه به کوچکتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۳/۷۱)، از مقدار

F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۱۹/۲۵)، لذا این مدل با این سطح اعتماد معتبر

نیست.

شکل ۴-۱۶ نمودار نمودار نرخ برش تخمینی به دست آمده، از مدل ۴-۲۴ را برحسب نرخ برش واقعی

نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۶: نمودار مقایسه نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۴-۲۴)

جدول ۴-۳۵ اطلاعات مربوط به برازش چهار متغیره بین برخی از مشخصات بافتی و ضریب بافت را با نرخ برش نشان می‌دهد. برازش چهار متغیره نشان داد، که مدل‌های (۴-۲۳) و (۴-۲۴) با سطح اعتماد ۹۵ درصد معتبر نیستند، همچنین با توجه به این جدول، مشاهده می‌شود که با وجود افزایش تعداد متغیرها، افزایش قابل توجهی در ضریب همبستگی وجود ندارد.

جدول ۴-۳۵: روابط حاصل از برازش چهار متغیره بین برخی از مشخصات بافتی و ضریب بافت با نرخ برش

مدل		ضریب همبستگی	ضریب تعیین
رابطه (۴-۲۲)	$Pr = 36.01 Dequi - 5.1 TC + 4.99 Lp - 100.48 A + 7.26$	۰/۹۸	۰/۹۷
رابطه (۴-۲۳)	$Pr = 6.47 t - 6.79 TC + 13.75 Lp - 96.28 A + 7.26$	۰/۹۷	۰/۹۴
رابطه (۴-۲۴)	$Pr = -7.43 t - 8.34 TC - 11.54 Lp + 38.37 Dequi + 19.24$	۰/۹۳	۰/۸۸

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته جهت بررسی تأثیر مشخصات بافتی بر روی نرخ برش، مدل ۱۷-۴ با ضریب همبستگی ۰/۹۸ شامل سطح دانه، قطر معادل و ضریب بافت بهترین مدل برای پیش‌بینی نرخ برش بر حسب پارامترهای بافتی می‌باشد. این مدل، دارای بیشترین ضریب همبستگی با تعداد متغیر کمتر می‌باشد.

فصل پنجم

بررسی تأثیر پارامترها مکانیکی سنگ

بر نرخ برش

۵ فصل پنجم

۵ - ۱ مقدمه

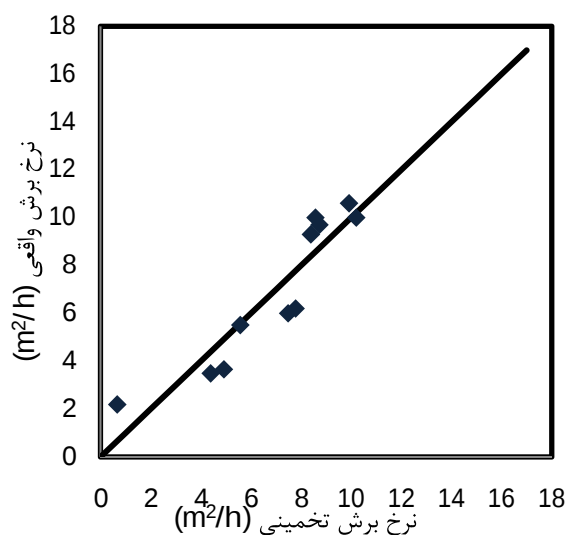
در این فصل، تأثیر پارامترهای مکانیکی نمونه‌ها بر عملکرد سیم برش الماسه، با استفاده از آنالیز برازش ساده و چند متغیره مورد بررسی قرار گرفته شده است. روابط میان مقادیر نرخ برش و مشخصات مقاومتی سنگ از قبیل مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی و همچنین مشخصات سختی و سایش سنگ با استفاده از توابع لگاریتم طبیعی، نمایی، توانی و درجه دوم مورد بررسی قرار گرفت و سپس بهترین تابع با بیشترین ضریب تعیین میان داده‌ها، در نظر گرفته شد. در ادامه برای بهبود و بالا بردن ضریب تعیین روابط به دست آمده از برازش ساده، برازش چند متغیره نیز برای پارامترهایی که ضریب تعیین نسبتاً خوبی را در برازش ساده داشتند، انجام شد. جدول ۵-۱ مشخصات مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۵- ۱: پارامترهای مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه

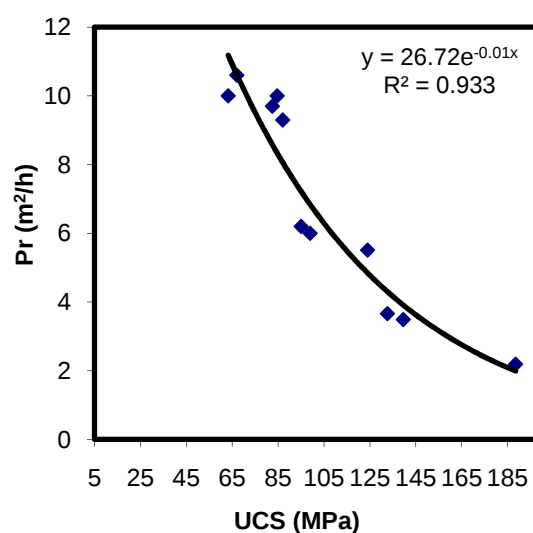
نام نمونه	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	سختی اشمیت	سایش لوس آنجلس (%)
بادباد غربی	۸۴/۶	۳	۵۳/۶	۳۳
باد باد شرقی	۹۸/۹	۶/۶	۵۶/۲	۲۰/۵
جوشان رود	۹۵	۴/۷	۵۷/۸	۳۴/۳۱
چشمه حاجی	۶۳/۲۳	۲/۵	۵۲/۶	۲۹/۲۳
معدن سنج	۶۷	۶/۵	۵۳/۷	۳۰/۲۸
اردود غربی	۸۲/۵	۶	۵۵/۶	۲۵/۰۶
اردود ۴	۸۷	۷	۵۴/۵	۳۶/۹
نگین تاک	۱۲۴	۸/۷	۵۷/۱	۲۱/۵
درب گاه شرقی	۱۳۹/۵	۱۲/۴	۵۸/۳	۲۴/۶
میرزاوانه	۱۳۲/۶	۱۱/۶	۵۷/۲	۲۱/۴
گوهر سفید کوه	۱۸۸/۵	۱۳	۵۸/۶	۲۱/۶

۵-۲ برآزش تک متغیره بین پارامترهای مکانیکی و نرخ برش

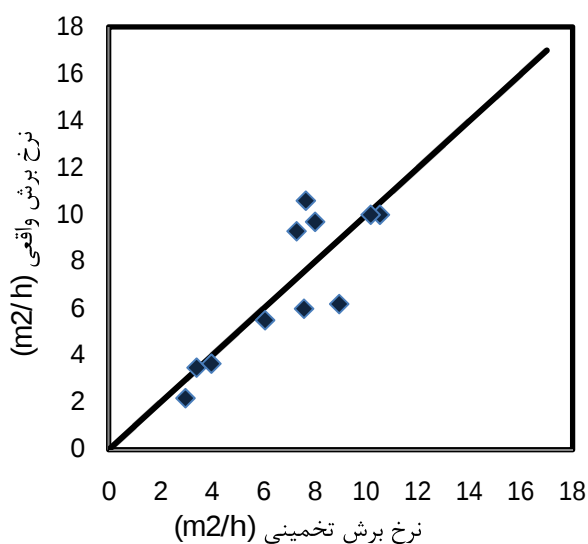
بین پارامترهای مکانیکی نمونه‌ها که در آزمایشگاه به دست آمده است و نرخ برش، برآزش تک متغیره انجام شده است و نتایج این برآزش‌ها در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.



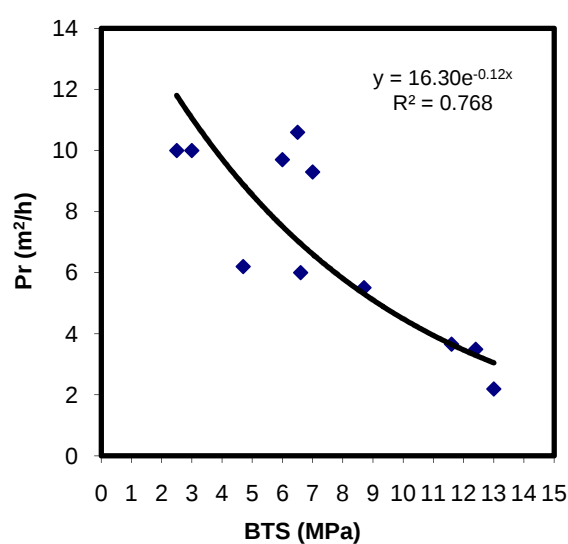
ب: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی



الف: برآزش تک متغیره بین مقاومت فشاری و نرخ برش

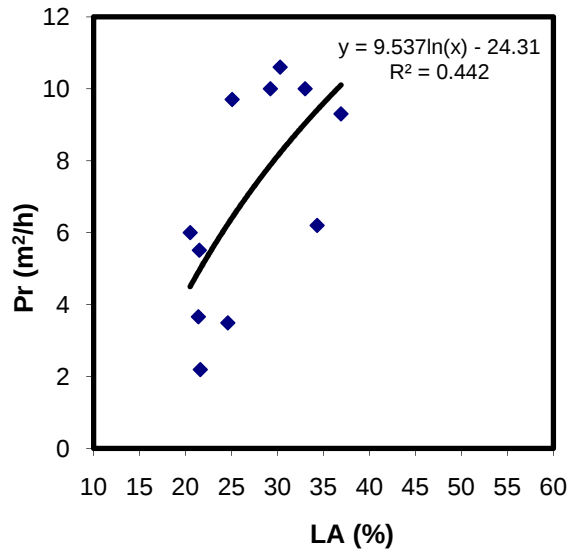
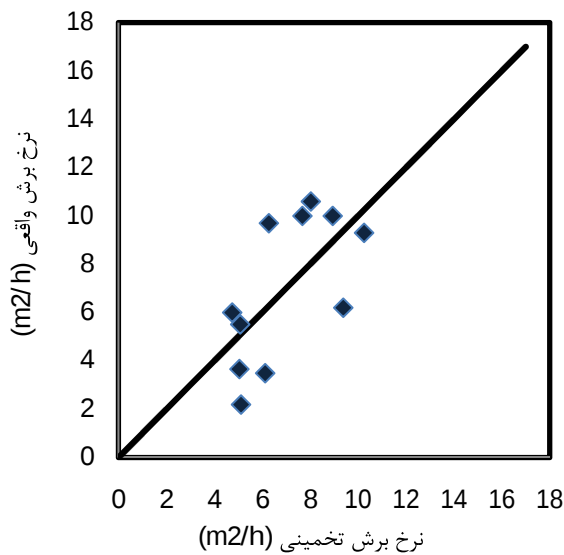


ت: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی

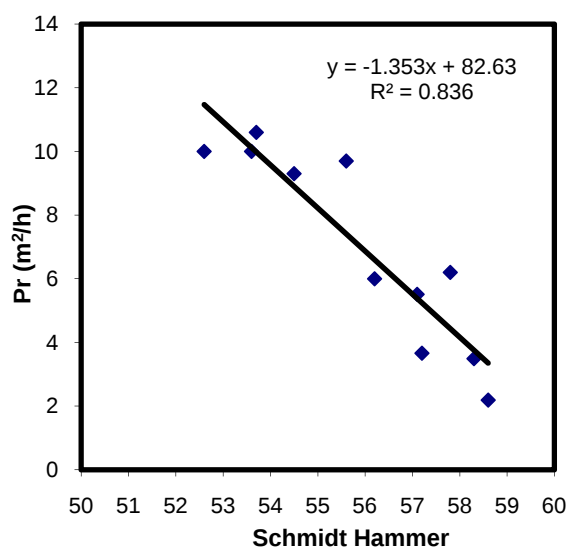
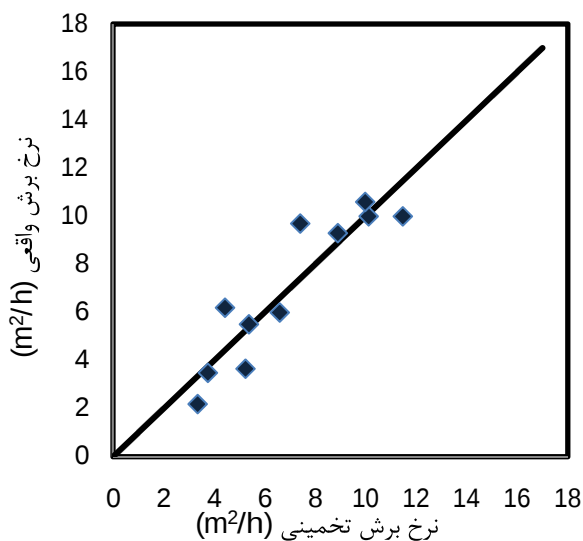


پ: برآزش تک متغیره بین مقاومت کششی و نرخ برش

شکل ۵-۱: برآزش تک متغیره بین مشخصات مهندسی نمونه‌ها و نرخ برش



ث: برازش تک متغیره بین سایش لوس آنجلس و نرخ برش ج: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی



چ: برازش تک متغیره بین سختی اشمیت و نرخ برش ج: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی

ادامه شکل ۵-۱ برازش تک متغیره بین مشخصات مهندسی نمونه‌ها و نرخ برش

جدول ۵-۲ اطلاعات حاصل از برازش تک متغیره، بین پارامترهای مکانیکی و نرخ برش را نشان

می‌دهد.

جدول ۵-۲: نتایج حاصل از برازش تک متغیره بین پارامترهای مکانیکی و نرخ برش

ضریب تعیین	ضریب همبستگی	مدل	
۰/۹۳	۰/۹۶	$Pr = 26.72 e^{-0.01\sigma_c}$	رابطه (۱-۵)
۰/۷۶	۰/۸۷	$Pr = 16.3 e^{-0.12\sigma_t}$	رابطه (۲-۵)
۰/۴۴	۰/۶۶	$Pr = 9.53 \ln(LA) - 24.32$	رابطه (۳-۵)
۰/۸۳	۰/۹۱	$Pr = -1.353 R_n + 82.63$	رابطه (۴-۵)

با توجه به جدول ۵-۲، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سایش لوس آنجلس و سختی اشمیت، ضریب همبستگی مناسبی با نرخ برش دارند. در این میان، همبستگی سایش لوس آنجلس نسبت به دیگر پارامترهای مقاومتی، با نرخ برش کمتر است، دلیل این امر را می‌توان ساینده‌گی کم سنگ‌های کربناته دانست. برای یافتن پارامترهای برازش چند متغیره، ضریب همبستگی بین پارامترهای مکانیکی نیز بررسی شد. نتایج حاصل از این بررسی در جدول ۵-۳ درج شده است.

جدول ۵-۳: ضریب همبستگی بین پارامترهای مکانیکی سنگ

مقاومت فشاری	مقاومت کششی	سایش لوس آنجلس	سختی اشمیت	نرخ برش (m ² /h)
مقاومت فشاری	۱			
مقاومت کششی	۰/۸۸	۱		
سایش لوس آنجلس	-۰/۵۹	-۰/۶	۱	
سختی اشمیت	۰/۸۳	۰/۷۷	-۰/۵۲	۱
نرخ برش (m ² /h)	-۰/۹۲	-۰/۸۴	۰/۶۴	-۰/۹۱

با توجه به جدول ۵-۳، بین هیچ یک از پارامترهای مکانیکی، ضریب همبستگی بیشتر از ۰/۹ وجود ندارد، لذا باید برازش چند متغیره، بین تمامی پارامترهای مکانیکی و نرخ برش صورت گیرد.

۵-۳ برآزش دو متغیره بین پارامترهای مکانیکی با نرخ برش

همان طور که در فصل قبل ذکر شد، برای بهبود و یافتن رابطه‌ای با ضریب همبستگی بیشتر، بین پارامترها برآزش چند متغیره انجام شد.

۵-۳-۱ مقاومت فشاری و مقاومت کششی

نتایج برآزش دو متغیره، بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۵-۴ و ۵-۵ درج شده است.

جدول ۵-۴: نتایج برآزش دو متغیره برای مقاومت فشاری و مقاومت کششی

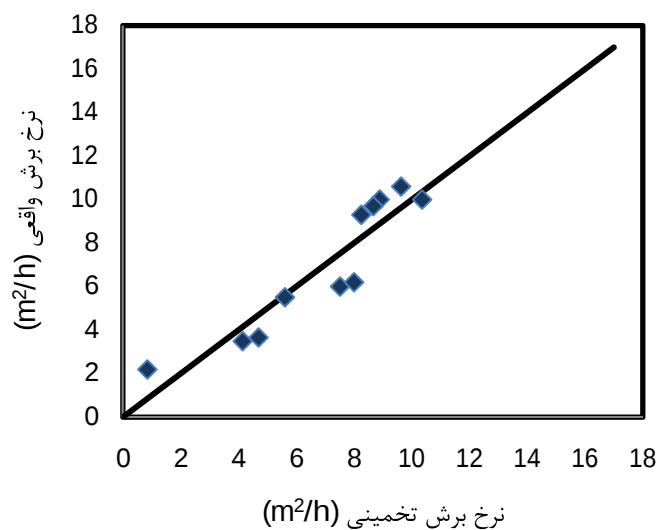
مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۵-۵) $Pr = -0.06 \sigma_c - 0.12 \sigma_t + 14.82$	۰/۹۲	۰/۸۵	۰/۸۲	۱/۲۹

جدول ۵-۵: نتایج و ضرایب برآزش دو متغیره برای مقاومت فشاری و مقاومت کششی

مدل	ضرایب برآزش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۵-۵)	عدد ثابت	۱۴/۸۲	۲۴/۲۱	۴/۴۶	۱۱/۶۱	۲/۷۵
	σ_c	-۰/۰۶			-۲/۸۶	۰/۰۲
	σ_t	-۰/۱۲			-۰/۵	۰/۶۲

در این برآزش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۲۴/۲۱)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۴/۴۶)، لذا حداقل یکی از ضرایب برآزش صفر نمی‌باشد.

شکل ۵-۲ نمودار صحت سنجی رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی با نرخ برش را نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد.



شکل ۵-۲ نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۵)

۵-۳-۲ مقاومت فشاری و سختی اشمیت

نتایج برازش دو متغیره، بین مقاومت فشاری و سختی اشمیت برای پیش بینی نرخ برش، در

جدول ۵-۶ و ۵-۷ درج شده است.

جدول ۵-۶: نتایج برازش دو متغیره برای مقاومت فشاری و سختی اشمیت

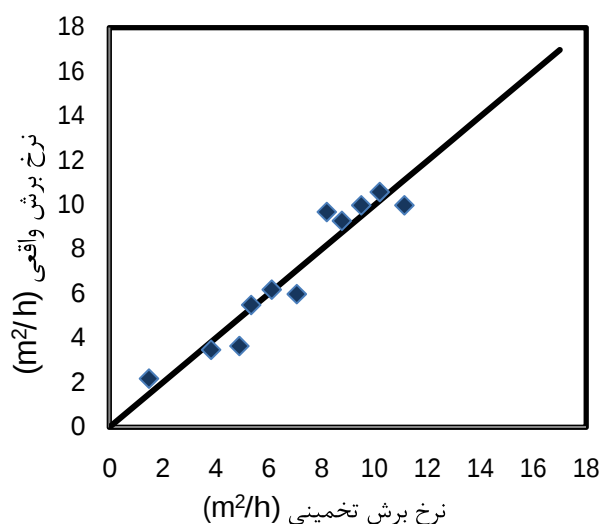
مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۶-۵) $Pr = -0.04 \sigma_c - 0.69 R_n + 50.54$	۰/۹۵	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۹۷

جدول ۵-۷: نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای مقاومت فشاری و سختی اشمیت

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۶-۵)	عدد ثابت	۵۰/۵۴	۴۵/۸۸	۴/۴۶	۳/۶۴	۰/۰۰۶
	σ_c	-۰/۰۴			-۲/۸۸	۰/۰۲
	R_n	-۰/۶۹			-۲/۵۶	۰/۰۳

در این برازش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی $45/88$)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی $4/46$)، لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۳-۵ نمودار صحت سنجی رابطه بین مقاومت فشاری و سختی اشمیت با نرخ برش را نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد.



شکل ۳-۵: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۶)

۳-۳-۵ مقاومت فشاری و سایش لوس آنجلس

نتایج برازش دو متغیره، بین مقاومت فشاری و سایش لوس آنجلس برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۵-۸ و ۵-۹ درج شده است.

جدول ۵-۸: نتایج برازش دو متغیره برای مقاومت فشاری و سایش لوس آنجلس

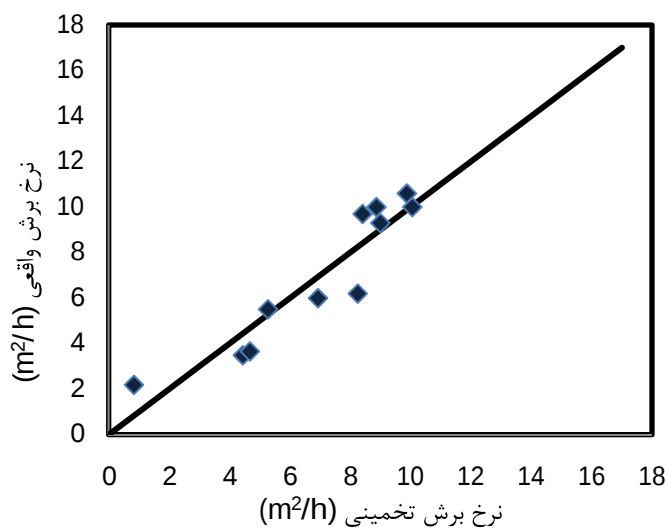
مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۵-۷) $Pr = -0.06 \sigma_c + 0.07 LA + 12.2$	۰/۹۳	۰/۸۶	۰/۸۳	۱/۲۴

جدول ۵-۹: نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای مقاومت فشاری و سایش لوس آنجلس

مقدار P	t	F انتخاب شده از جدول	F	خطای معیار	ضرایب برازش	مدل	
۰/۰۰۶	۳/۶۸	۴/۴۶	۲۶/۱۵	۳/۳۱	۱۲/۲	عدد ثابت	رابطه (۷-۵)
۰/۰۰۰۷	-۵/۲۲			۰/۰۱	-۰/۰۶	σ_c	
۰/۳۹	۰/۹			۰/۰۸	۰/۰۷	LA	

در این برازش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۲۶/۱۵)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۴/۴۶)، لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۴-۵ نمودار صحت سنجی رابطه بین مقاومت فشاری و سایش لوس آنجلس با نرخ برش را نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد.



شکل ۴-۵: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۷-۵)

۴-۳-۵ مقاومت کششی و سختی اشمیت

نتایج برازش دو متغیره، بین مقاومت کششی و سختی اشمیت برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۵-۱۰ و ۵-۱۱ درج شده است.

جدول ۵-۱۰: نتایج برازش دو متغیره برای مقاومت کششی و سختی اشمیت

مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۸-۵) $Pr = -0.28 \sigma_t - 0.96 R_n + 63.04$	۰/۹۴	۰/۸۸	۰/۸۵	۱/۱۷

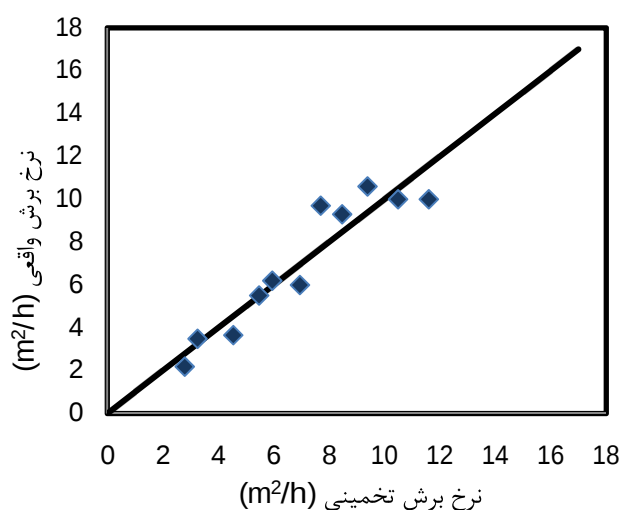
جدول ۵-۱۱: نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای مقاومت کششی و سختی اشمیت

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۸-۵)	عدد ثابت	۶۳/۰۴	۲۹/۸۱	۴/۴۶	۴/۱۸	۰/۰۰۳
	σ_t	-۰/۲۸			-۱/۷۵	۰/۱۱
	R_n	-۰/۹۶			-۳/۳۷	۰/۰۰۹

در این برازش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۲۹/۸۱)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۴/۴۶)، لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۵-۵ نمودار صحت سنجی رابطه بین مقاومت کششی و سختی اشمیت با نرخ برش را نشان

می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد.



شکل ۵-۵: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۸-۵)

۵-۳-۵ مقاومت کششی و سایش لوس آنجلس

نتایج برآزش دو متغیره، بین مقاومت کششی و سایش لوس آنجلس برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۱۲-۵ و ۱۳-۵ درج شده است.

جدول ۱۲-۵: نتایج برآزش دو متغیره برای مقاومت کششی و سایش لوس آنجلس

مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۵-۹) $Pr = -0.61 \sigma_t + 0.1LA + 8.61$	۰/۸۶	۰/۷۳	۰/۶۷	۱/۷۴

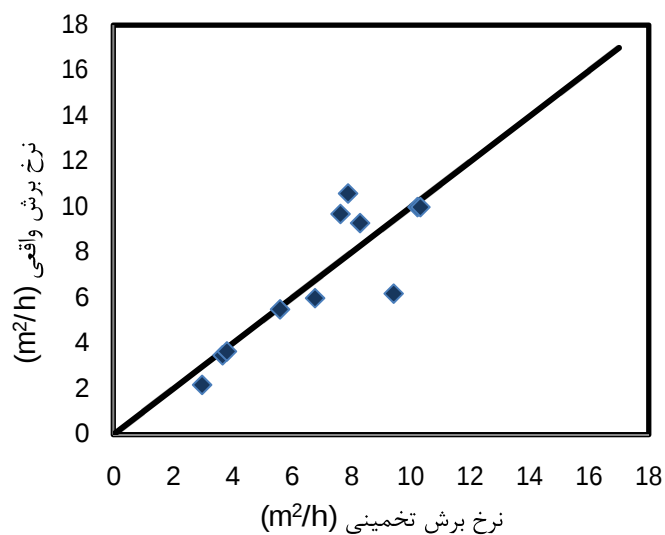
جدول ۱۳-۵: نتایج و ضرایب برآزش دو متغیره برای مقاومت کششی و سایش لوس آنجلس

مدل	ضرایب برآزش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۵-۹)	عدد ثابت	۸/۶۱	۱۱/۳۶	۴/۴۶	۲/۰۱	۰/۰۷
	σ_t	-۰/۶۱			-۳/۱۶	۰/۰۱
	LA	۰/۱			۰/۹	۰/۳۹

در این برآزش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۱۱/۳۶)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۴/۴۶)، لذا حداقل یکی از ضرایب برآزش صفر نمی‌باشد.

شکل ۵-۶ نمودار صحت سنجی رابطه بین مقاومت کششی و سایش لوس آنجلس با نرخ برش را

نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد.



شکل ۵-۶: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۹)

۵-۳-۶ سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس

نتایج برازش دو متغیره، بین سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس برای پیش بینی نرخ برش، در

جدول ۵-۱۴ و ۵-۱۵ درج شده است.

جدول ۵-۱۴: نتایج برازش دو متغیره برای سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس

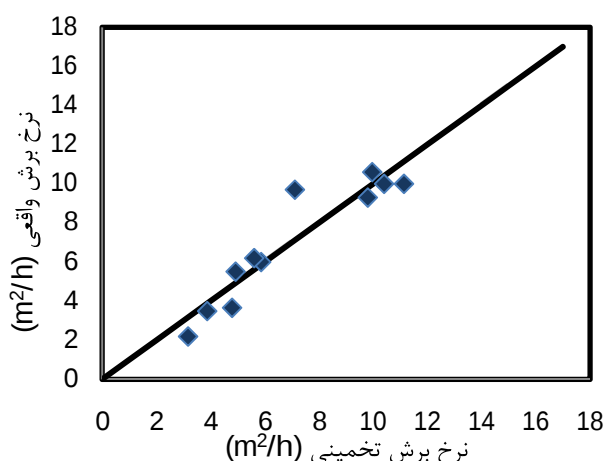
مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۵-۱۰) $Pr = -1.17 R_n + 0.11 LA + 69.63$	۰/۹۳	۰/۸۷	۰/۸۴	۱/۲۲

جدول ۵-۱۵: نتایج و ضرایب برازش دو متغیره برای سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۵-۱۰)	عدد ثابت	۶۹/۶۳	۲۷/۵۴	۴/۴۶	۵/۱۷	۰/۰۰۰۸
	LA	۰/۱۱			۱/۵۲	۰/۱۶
	R_n	-۱/۱۷			-۵/۳	۰/۰۰۰۶

در این برازش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۲۷/۵۴)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۴/۴۶)، لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۵-۷ نمودار صحت سنجی رابطه بین سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس با نرخ برش را نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد.



شکل ۵-۷: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۱۰)

جدول ۵-۱۶ اطلاعات حاصل از برازش دو متغیره، بین پارامترهای مکانیکی و نرخ برش را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول با توجه به افزایش متغیرها، افزایشی در ضریب همبستگی به وجود نیامد. برای رسیدن به ضریب همبستگی بیشتر، برازش سه متغیره نیز بین پارامترها انجام شد.

جدول ۵-۱۶: نتایج حاصل از برازش دو متغیره بین برخی از پارامترهای مکانیکی و نرخ برش

مدل		ضریب همبستگی	ضریب تعیین
رابطه (۵-۵)	$Pr = -0.06 \sigma_c - 0.12 \sigma_t + 14.82$	۰/۹۲	۰/۸۵
رابطه (۶-۵)	$Pr = -0.04 \sigma_c - 0.69 R_n + 50.54$	۰/۹۵	۰/۹۱
رابطه (۷-۵)	$Pr = -0.06 \sigma_c + 0.07 LA + 12.2$	۰/۹۳	۰/۸۶
رابطه (۸-۵)	$Pr = -0.28 \sigma_t - 0.96 R_n + 63.04$	۰/۹۴	۰/۸۸
رابطه (۹-۵)	$Pr = -0.61 \sigma_t + 0.1 LA + 8.61$	۰/۸۶	۰/۷۳
رابطه (۱۰-۵)	$Pr = -1.17 R_n + 0.11 LA + 69.63$	۰/۹۳	۰/۸۷

۵-۴ برازش سه متغیره بین پارامترهای مکانیکی با نرخ برش

برای بهبود و یافتن رابطه‌ای با ضریب همبستگی بیشتر، بین پارامترهای مکانیکی برازش سه متغیره انجام شد.

۵-۴-۱ مقاومت فشاری، مقاومت کششی و سختی اشمیت

نتایج برازش سه متغیره، بین مقاومت فشاری، مقاومت کششی و سختی اشمیت برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۵-۱۷ و ۵-۱۸ درج شده است.

جدول ۵-۱۷: نتایج برازش سه متغیره برای مقاومت فشاری، کششی و سختی اشمیت

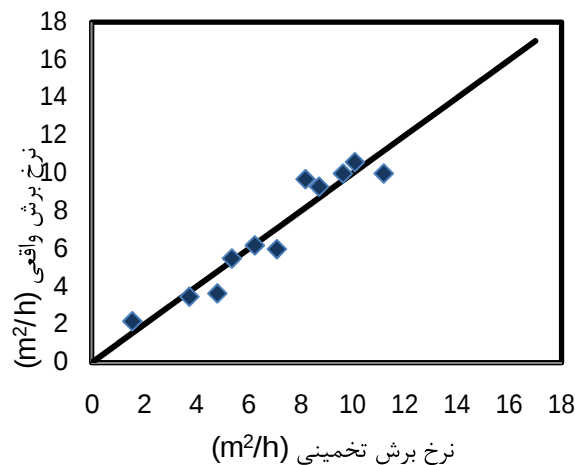
مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۱۱-۵) $Pr = -0.05 \sigma_t - 0.03 \sigma_c - 0.68 R_n + 49.86$	۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۸۸	۱/۰۳

جدول ۵-۱۸: نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای مقاومت فشاری، کششی و سختی اشمیت

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۱۱-۵)	عدد ثابت	۴۹/۸۶	۲۷/۰۵	۴/۳۵	۳/۳۲	۰/۰۱
	σ_c	-۰/۰۳			-۱/۸۵	۰/۱
	σ_t	-۰/۰۵			-۰/۲۶	۰/۷۹
	R_n	-۰/۶۸			-۲/۳۴	۰/۰۵

در این برازش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۲۷/۰۵)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۴/۳۵)، لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۵-۸ نمودار صحت سنجی رابطه بین مقاومت فشاری، مقاومت کششی و سختی اشمیت را با نرخ برش نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد.



شکل ۵-۸: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۱۱)

۲-۴-۵ مقاومت فشاری، مقاومت کششی و سایش لوس آنجلس

نتایج برازش سه متغیره، بین مقاومت فشاری، مقاومت کششی و سایش لوس آنجلس برای پیش

بینی نرخ برش، در جدول ۵-۱۹ و ۵-۲۰ درج شده است.

جدول ۵-۱۹: نتایج برازش سه متغیره برای مقاومت فشاری، کششی و سایش لوس آنجلس

مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۵-۱۲) $Pr = -0.07\sigma_t - 0.06\sigma_c + 0.06LA + 12.31$	۰/۹۳	۰/۸۶	۰/۸۱	۱/۳۲

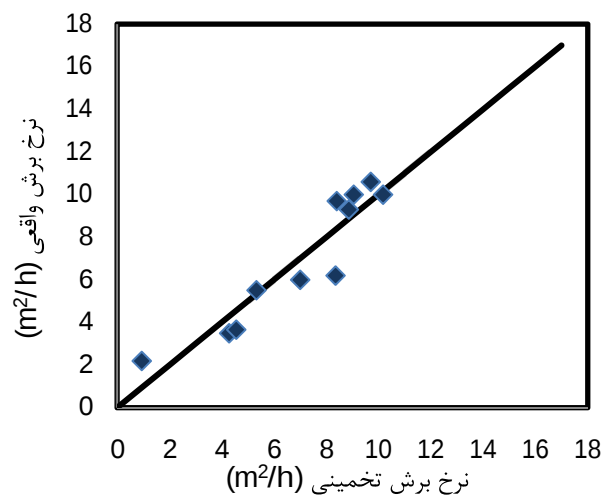
جدول ۵-۲۰: نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای مقاومت فشاری، کششی و سایش لوس آنجلس

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۵-۱۲)	عدد ثابت	۱۲/۳۱	۱۵/۴۹	۴/۳۵	۳/۴۷	۰/۰۱
	σ_c	-۰/۰۶			-۲/۶۳	۰/۰۳
	σ_t	-۰/۰۷			-۰/۳	۰/۷۶
	LA	۰/۰۶			۰/۷۶	۰/۴۶

در این برازش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۲۷/۰۵)، از مقدار F

جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۴/۳۵)، لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۹-۵ نمودار صحت سنجی رابطه بین مقاومت فشاری، مقاومت کششی و سایش لوس آنجلس را با نرخ برش نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد.



شکل ۹-۵: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۱۲-۵)

۳-۴-۵ مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس

نتایج برازش سه متغیره، بین مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۲۱-۵ و ۲۲-۵ درج شده است.

جدول ۲۱-۵: نتایج برازش سه متغیره برای مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس

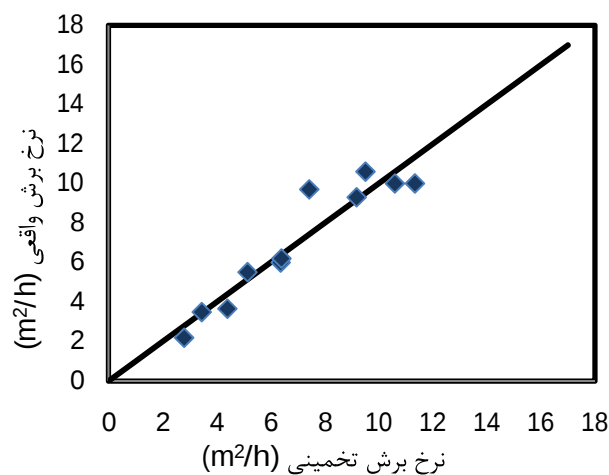
خطای معیار تخمین	R^2 تصحیح شده	R^2	R	مدل	رابطه (۱۳-۵)
۱/۱۷	۰/۸۵	۰/۸۹	۰/۹۴	$Pr = -0.93R_n - 0.22 \sigma_c - 0.08LA + 58.7$	

جدول ۵-۲۲: نتایج و ضرایب برازش سه متغیره برای مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۵-۱۳)	عدد ثابت	۵۸/۷	۲۰/۱۷	۴/۳۵	۳/۷۴	۰/۰۰۷
	σ_c	-۰/۲۲			-۱/۲۴	۰/۲۵
	LA	-۰/۰۸			۰/۹۹	۰/۳۵
	R_n	-۰/۹۳			-۳/۲۵	۰/۰۱

در این برازش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۲۰/۱۷)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۴/۳۵)، لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد.

شکل ۵-۱۰ نمودار صحت سنجی رابطه بین مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس را با نرخ برش نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد.



شکل ۵-۱۰: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۱۳)

جدول ۵-۲۳ اطلاعات حاصل از برازش سه متغیره، بین برخی از پارامترهای مکانیکی و نرخ برش را نشان می‌دهد. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود، با توجه به افزایش متغیرها، افزایش قابل توجهی در ضریب همبستگی حاصل نشد.

جدول ۵-۲۳: نتایج حاصل از برازش سه متغیره بین برخی از پارامترهای مکانیکی و نرخ برش

مدل		ضریب همبستگی	ضریب تعیین
رابطه (۱۱-۵)	$Pr = -0.05 \sigma_t - 0.03 \sigma_c - 0.68 R_n + 49.86$	۰/۹۶	۰/۹۲
رابطه (۱۲-۵)	$Pr = -0.07 \sigma_t - 0.06 \sigma_c + 0.06 LA + 12.31$	۰/۹۳	۰/۸۶
رابطه (۱۳-۵)	$Pr = -0.93 R_n - 0.22 \sigma_c - 0.08 LA + 58.7$	۰/۹۴	۰/۸۹

۵-۵ برازش چهار متغیره بین پارامترهای مکانیکی با نرخ برش

برای دستیابی به ضریب همبستگی بیشتر، بین مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس برازش چهار متغیره انجام شد.

۵-۵-۱ مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس

نتایج برازش چهار متغیره، بین مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس برای پیش بینی نرخ برش، در جدول ۵-۲۴ و ۵-۲۵ درج شده است.

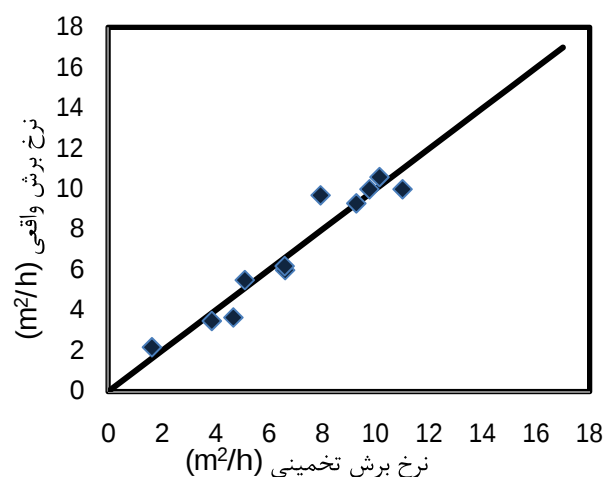
جدول ۵-۲۴: نتایج برازش چهار متغیره برای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس

مدل		R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۱۴-۵)	$Pr = -0.67 R_n - 0.03 \sigma_c + 0.06 LA - 0.01 \sigma_t + 47.14$	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۸۸	۱/۰۴

جدول ۵-۲۵: نتایج و ضرایب برازش چهار متغیره برای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس

مدل		ضرایب برازش	خطای معیار	F	F انتخاب شده از جدول	t	مقدار P
رابطه (۱۴-۵)	عدد ثابت	۴۷/۱۴	۱۵/۴۶	۱۹/۹۷	۴/۵۳	۳/۰۴	۰/۰۲
	σ_c	-۰/۰۳	۰/۰۲			-۱/۷	۰/۱۳
	σ_t	-۰/۰۱	۰/۱۹			-۰/۰۵	۰/۹۵
	LA	۰/۰۶	۰/۰۷			۰/۹	۰/۴
	R_n	-۰/۶۷	۰/۲۹			-۲/۲۸	۰/۰۶

در این برازش، با توجه به بزرگتر بودن مقدار F به دست آمده از مدل، (یعنی ۱۹/۹۷)، از مقدار F جدول توزیع با سطح اعتماد ۹۵ درصد (یعنی ۴/۵۳)، لذا حداقل یکی از ضرایب برازش صفر نمی‌باشد. شکل ۵-۱۱ نمودار صحت سنجی رابطه بین مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس را با نرخ برش نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد.



شکل ۵-۱۱: نمودار مقایسه بین نرخ برش واقعی و تخمینی رابطه (۵-۱۴)

جدول ۵-۲۶ اطلاعات حاصل از برازش چهار متغیره، بین برخی از مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس با نرخ برش را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۲۶: نتایج حاصل از برازش چهار متغیره بین مقاومت فشاری، کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس با نرخ برش

ضریب تعیین	ضریب همبستگی	مدل	
		$Pr = -0.67R_n - 0.03 \sigma_c + 0.06LA - 0.01 \sigma_t + 47.14$	رابطه (۵-۱۴)
۰/۹۳	۰/۹۶		

با بررسی‌های صورت گرفته در این فصل، مشاهده شد که مقاومت فشاری بیشترین تأثیر را بر نرخ برش دارد و برآزش حاصل از این پارامتر مکانیکی و نرخ برش، بالاترین ضریب همبستگی (یعنی ۰/۹۶) و کمترین تعداد متغیر را دارد.

فصل ششم

پیش‌بینی نرخ برش با توجه به
پارامترهای مکانیکی و فیزیکی سنگ

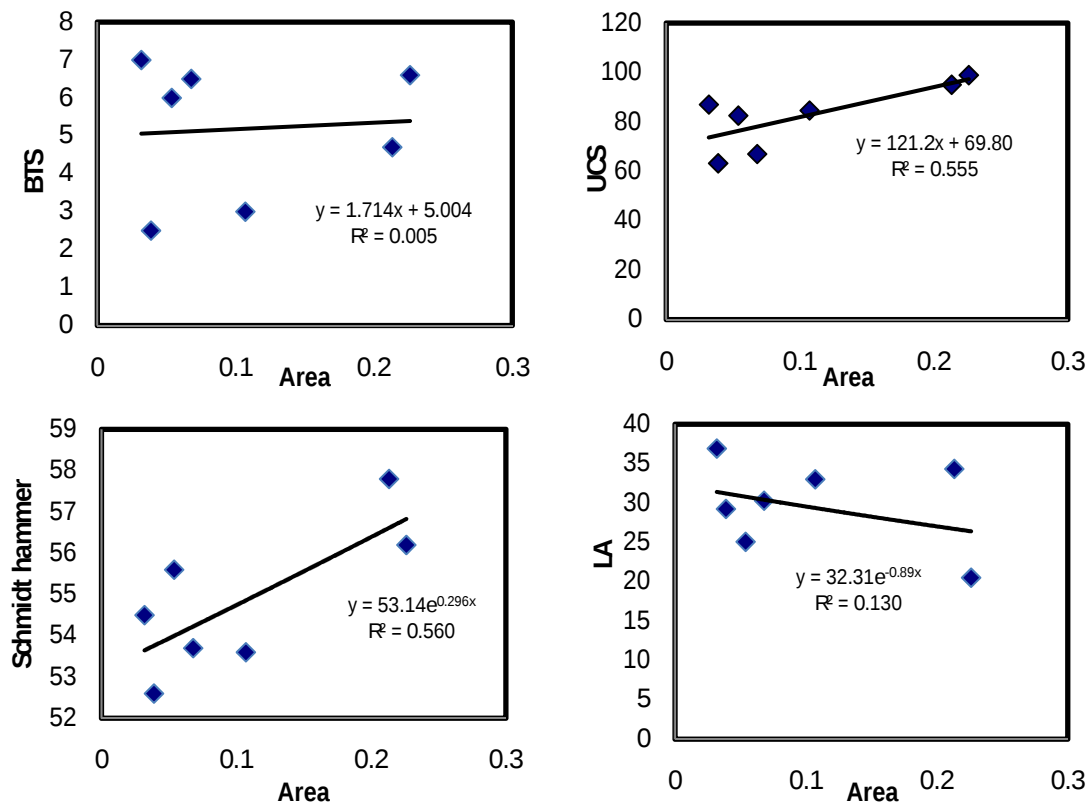
۶ فصل ششم

۶ - ۱ مقدمه

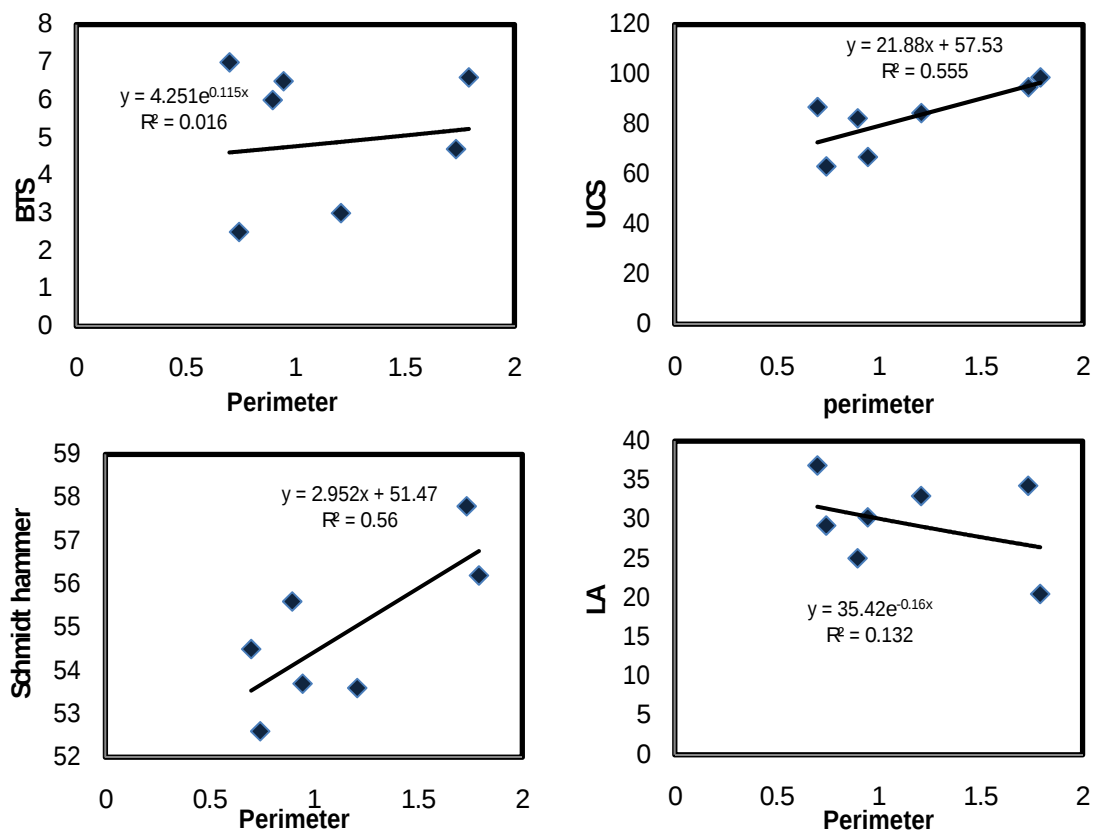
در فصل چهارم و پنجم، تأثیر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بر روی نرخ برش به طور جداگانه بررسی شدند و مشاهده شد، از بین مشخصات فیزیکی (بافتی) سطح دانه‌ها، ضریب بافت و قطر معادل و از بین مشخصات مکانیکی سنگ، مقاومت فشاری، سختی اشمیت و مقاومت کششی تأثیر بیشتری بر نرخ برش سنگ دارند. در این فصل، تأثیر توأم این پارامترها بر روی نرخ برش، با برازش چند متغیره بررسی شده است. مدل بهینه، برای پیش‌بینی نرخ برش، مدلی خواهد بود که ضریب همبستگی بالاتر و تعداد متغیر کمتر را داشته باشد. در این فصل، همچنین ارتباط بین مشخصات بافتی نمونه‌ها و مشخصات مکانیکی نیز بررسی شده است.

۶-۲ بررسی ارتباط بین مشخصات بافتی سنگ و مشخصات مهندسی سنگ

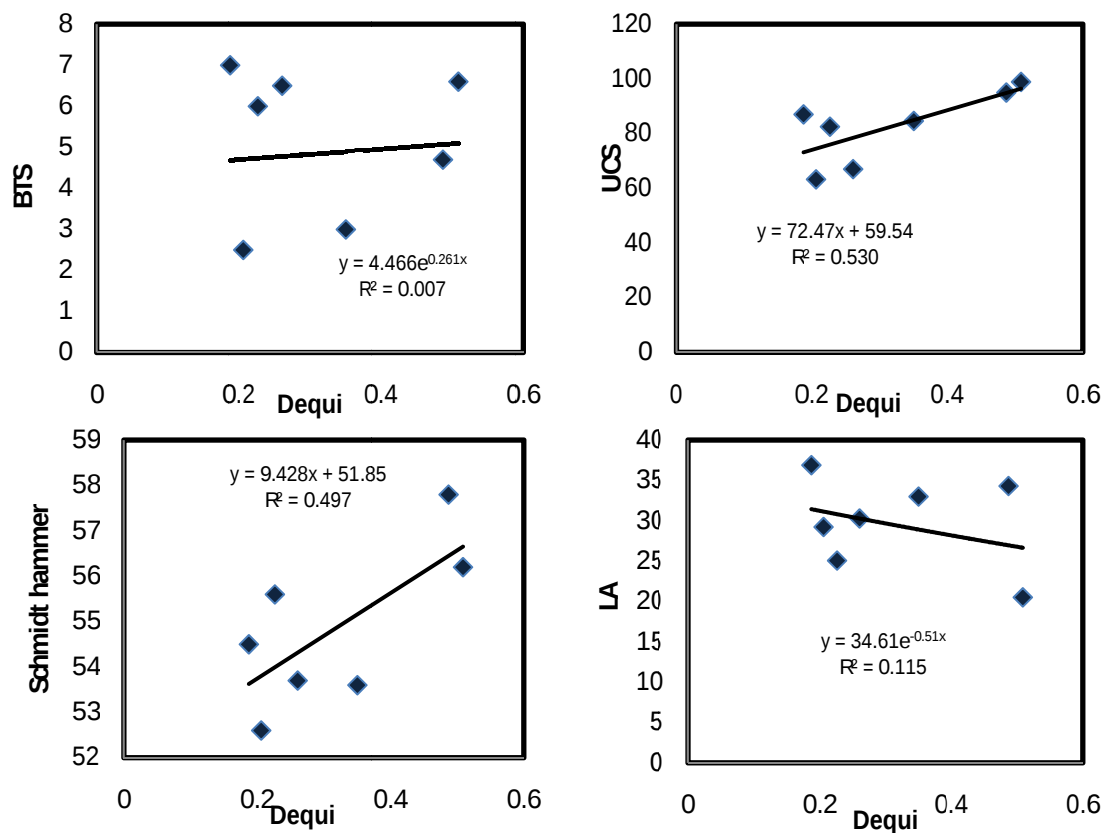
با توجه به مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین مشخصات مکانیکی سنگ (مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس) و نیز مطالعات میکروسکوپی بر روی مقاطع، به راحتی می‌توان تأثیر مشخصات بافتی را بر روی مشخصات مهندسی سنگ‌ها مطالعه کرد. برای این منظور، در این بخش، مطالعات برازشی بین کلیه پارامترهای مهندسی سنگ و مشخصات بافتی انجام شده است. در شکل‌های ۶-۱ تا ۶-۹ ارتباط بین مشخصات بافتی و مشخصات مهندسی سنگ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بین مقاومت فشاری و سختی اشمیت با سطح دانه‌ها، محیط دانه‌ها و قطر معادل ارتباط خوبی وجود دارد. این ارتباط نشان می‌دهد، که با افزایش اندازه دانه‌ها این پارامترها افزایش می‌یابد. این امر بدین دلیل است که با افزایش اندازه دانه‌ها مقاومت دانه در برابر گسیختگی و انتشار ترک در سنگ افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث افزایش مقاومت فشاری سنگ و سختی اشمیت می‌شود. همچنین یکنواختی اندازه دانه‌ها و ضریب بافت تأثیر منطقی بر مقاومت فشاری و سختی اشمیت داشته و ارتباط ریاضی نسبتاً خوبی بین این پارامترها و مقاومت فشاری و سختی اشمیت برقرار است. علت این موضوع را می‌توان چنین تشریح کرد که، در صورت یکنواختی اندازه دانه‌ها و افزایش ضریب بافت، شبکه و ساختار سنگ یک حالت ایزوتروپ یافته و نقاط ضعف شبکه سنگ کمتر می‌شود و در نتیجه گسیختگی این ساختار مشکل‌تر گشته و مقاومت فشاری و سختی اشمیت افزایش می‌یابد. فشردگی، فاکتور شکل، شاخص قفل شدگی و نسبت وضعیت دانه‌ها عملاً ارتباط ریاضی خوبی (از دیدگاه ضریب همبستگی) با مشخصات مهندسی وجود ندارند، لذا برای بررسی بیشتر، نیاز به انجام مطالعات گسترده‌تر و افزایش تعداد نمونه می‌باشد.



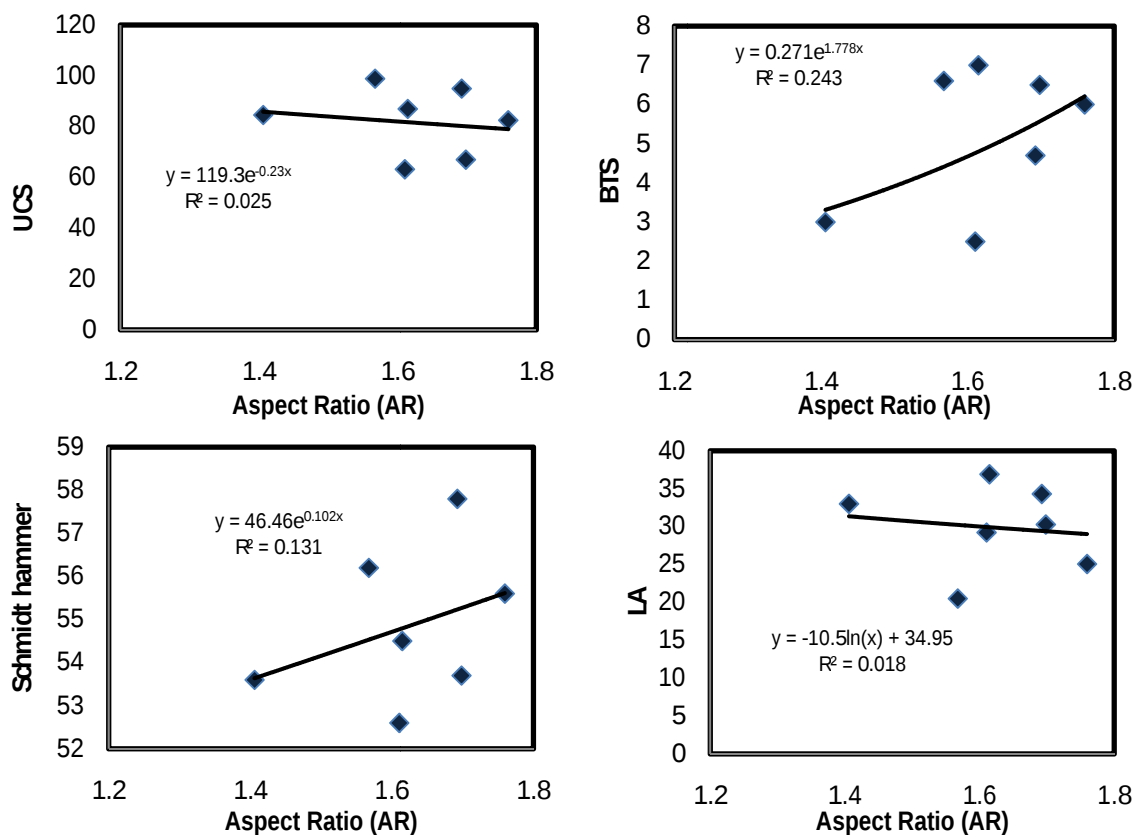
شکل ۶-۱: ارتباط بین سطح دانه و مشخصات مهندسی نمونه‌ها



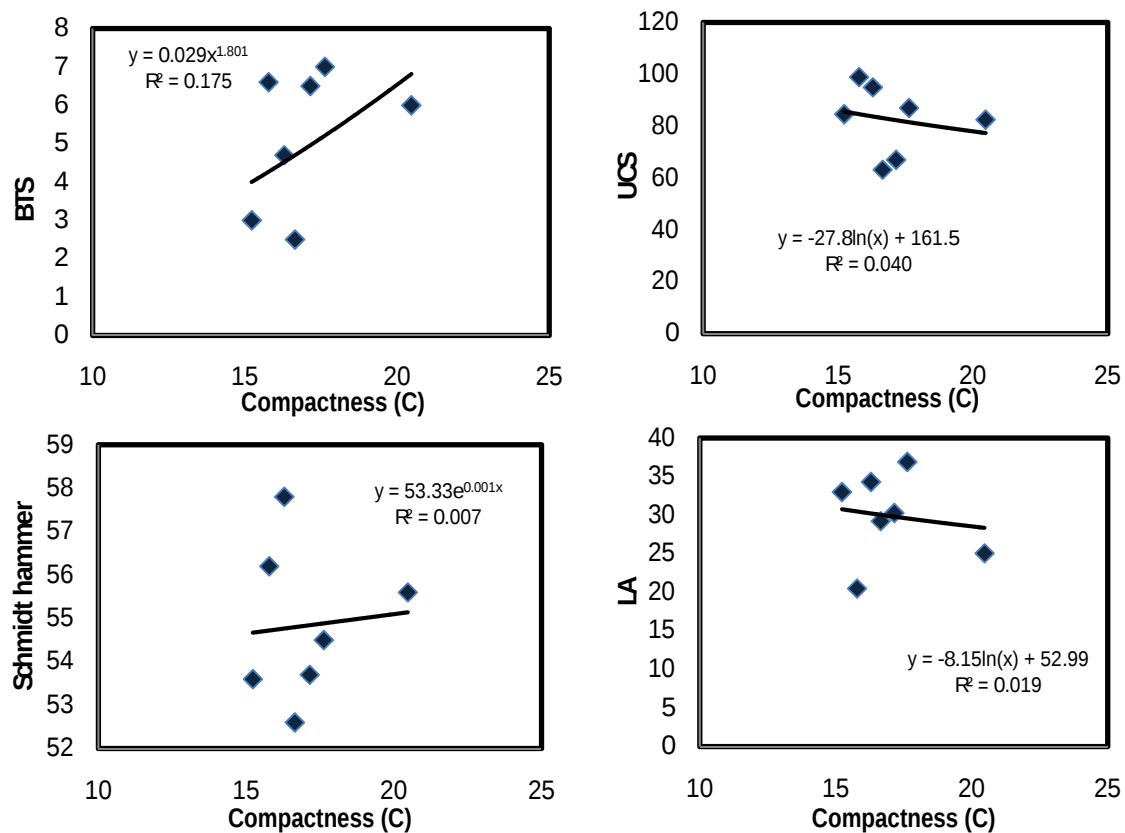
شکل ۶-۲: ارتباط بین محیط دانه و مشخصات مهندسی نمونه‌ها



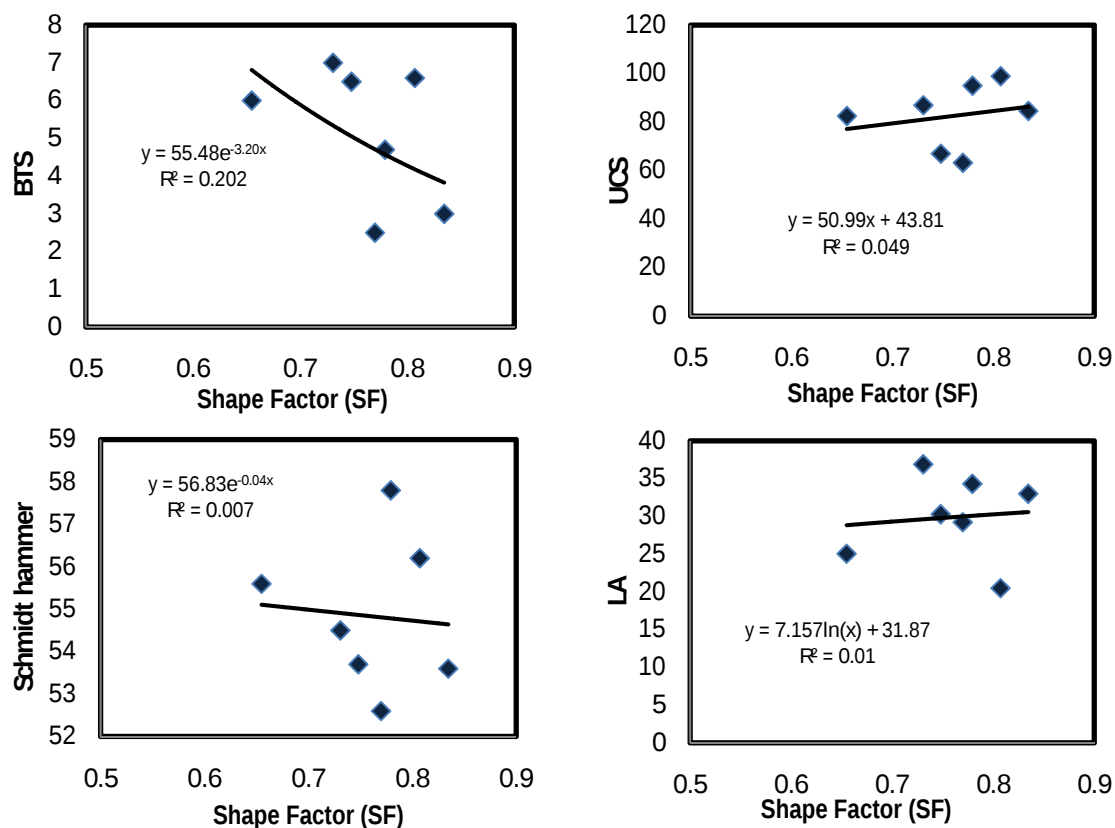
شکل ۶-۳: ارتباط بین قطر معادل و مشخصات مهندسی نمونه‌ها



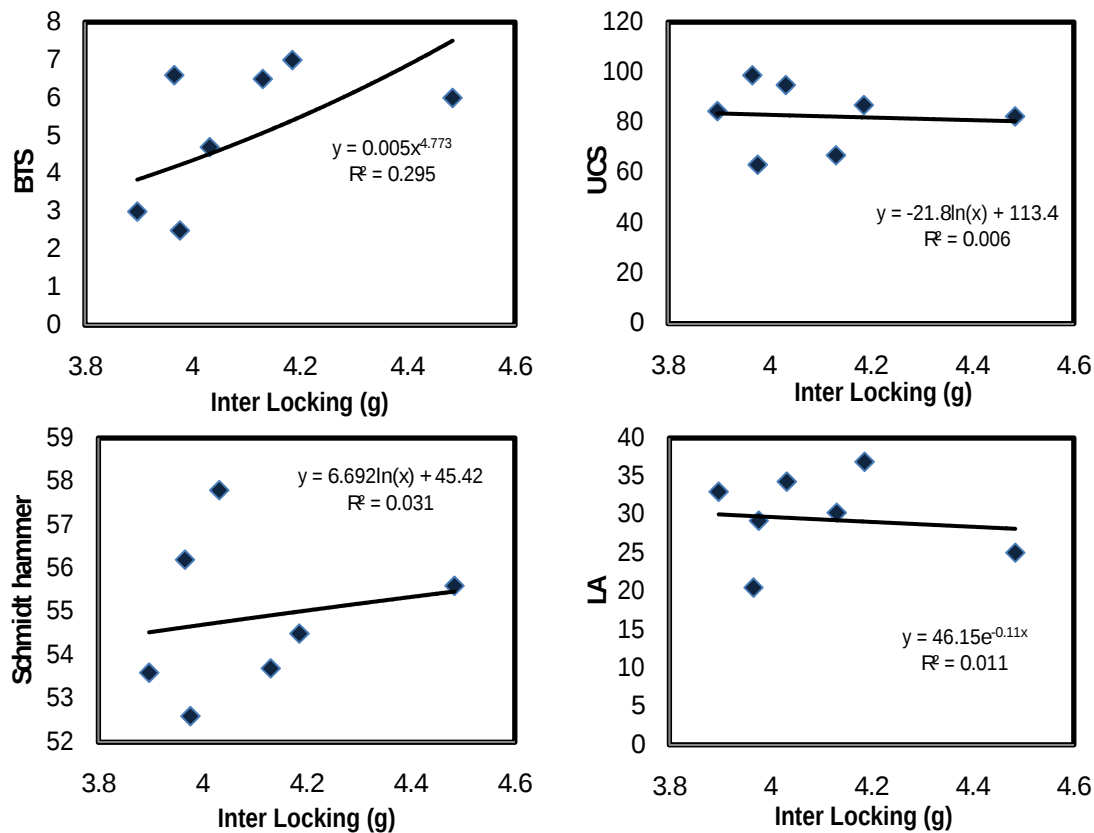
شکل ۶-۴: ارتباط بین نسبت وضعیت دانه‌ها و مشخصات مهندسی نمونه‌ها



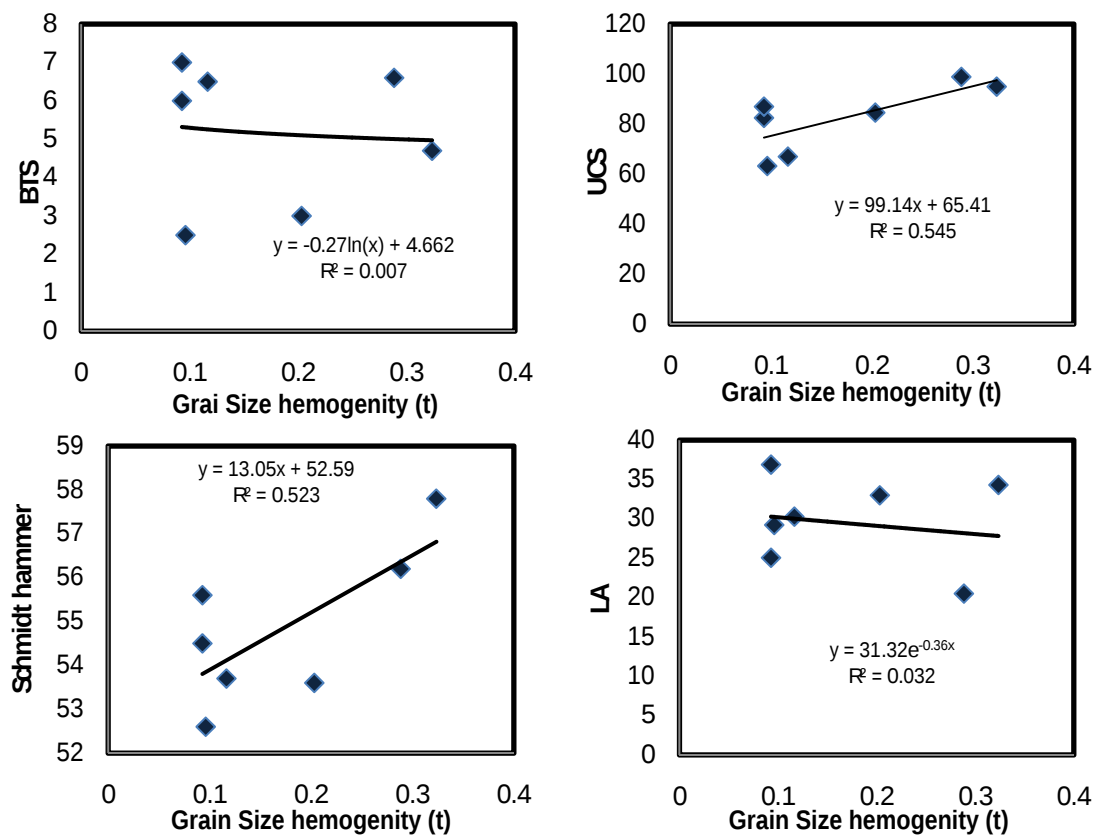
شکل ۵-۶: ارتباط بین فشردگی و مشخصات مهندسی نمونه‌ها



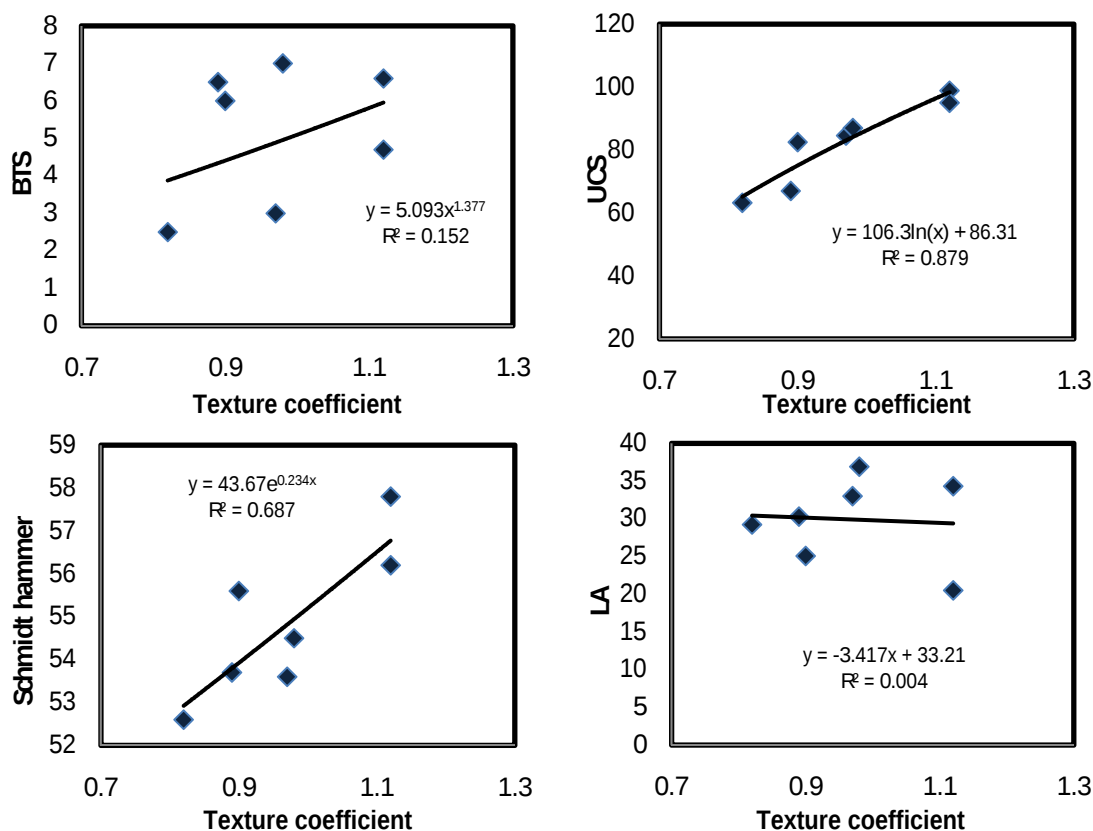
شکل ۶-۶: ارتباط بین فاکتور شکل و مشخصات مهندسی نمونه‌ها



شکل ۶-۷: ارتباط بین شاخص قفل شدگی و مشخصات مهندسی نمونه‌ها



شکل ۶-۸: ارتباط بین شاخص یکنواختی و مشخصات مهندسی نمونه‌ها



شکل ۶-۹: ارتباط بین ضریب بافت و مشخصات مهندسی نمونه‌ها

با توجه به بررسی ارتباط بین مشخصات بافتی و پارامترهای مکانیکی سنگ، مشاهده شد که ارتباط خوبی بین ضریب بافت با مقاومت فشاری و سختی اشمیت وجود دارد. با افزایش ضریب بافت، مقاومت فشاری و سختی اشمیت افزایش می‌یابد، این روند افزایشی، منطقی است زیرا با افزایش ضریب بافت، ساختار شبکه حالت ایزوتروپ پیدا می‌کند و گسترش ترک و گسیختگی دشوارتر می‌شود و در نتیجه مقاومت سنگ نیز افزایش می‌یابد.

۳-۶ برآزش چند متغیره بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی

همان طور که در ابتدای فصل گفته شد، از میان پارامترهای فیزیکی، سطح دانه‌ها، قطر معادل و ضریب بافت و از میان پارامترهای مکانیکی سنگ مقاومت فشاری تک محوری، سختی اشمیت و مقاومت کششی ارتباط بیشتری با نرخ برش سنگ داشتند. روابط به دست آمده از برآزش چند متغیره

بین این پارامترها و نرخ برش و همچنین همبستگی بین پارامترها نیز در این بخش ارائه شده است.

جدول ۶-۱ همبستگی بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی را نشان می‌دهد.

جدول ۶-۱: ضریب همبستگی بین پارامترهای مکانیکی و فیزیکی

	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	سختی اشمیت	ضریب بافت	سطح دانه	قطر معادل	نرخ برش
مقاومت فشاری	۱						
مقاومت کششی	۰/۳۵	۱					
سختی اشمیت	۰/۸۱	۰/۳۹	۱				
ضریب بافت	۰/۹۳	۰/۳۱	۰/۸۲	۱			
سطح دانه	۰/۷۴	۰/۰۷	۰/۷۵	۰/۸۹	۱		
قطر معادل	۰/۷۲	۰/۰۲	۰/۷	۰/۸۷	۰/۹۹	۱	
نرخ برش	-۰/۸۲	-۰/۲۱	-۰/۸۴	-۰/۹	-۰/۹	-۰/۸۶	۱

برای پیش‌بینی نرخ برش با توجه به مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ، ارتباط این پارامترها و

نرخ برش با برازش چند متغیره بررسی شده است. نتایج این بررسی در جدول ۶-۲ آورده شده است.

لازم به ذکر است، برازش بین این پارامترها در تمام حالات بررسی شد و روابطی در جدول ۶-۲ ارائه

شده است، که ضریب همبستگی بالاتری دارند.

جدول ۶-۲: برازش چند متغیره بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی با نرخ برش

مدل		ضریب همبستگی	ضریب تعیین	ضریب تعیین تصحیح شده
رابطه (۱-۶)	$Pr = -90.27A - 0.02 \sigma_c - 1.03TC + 45.4 D_{equi} + 7.21$	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۲
رابطه (۲-۶)	$Pr = -91.47A - 0.03 \sigma_c + 45.74 D_{equi} + 6.66$	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۵
رابطه (۳-۶)	$Pr = -102.234A + 0.2\sigma_t + 56.17 D_{equi} - 8.44 TC + 8.88$	۰/۹۹۶	۰/۹۹۲	۰/۹۷
رابطه (۴-۶)	$Pr = -96.35A + 49.94D_{equi} + 0.11 R_n - 6.28 TC + 2.89$	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۲

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲-۶، رابطه ۳-۶ بیشترین ضریب همبستگی را دارد. این رابطه بین ضریب بافت، سطح دانه‌ها، قطر معادل و مقاومت کششی می‌باشد. از این جدول، می‌توان چنین استنباط نمود، که به دلیل همبستگی قابل توجه بین ضریب بافت با مقاومت فشاری و سختی اشمیت، مدل‌های به دست آمده برای این روابط، ضریب همبستگی یکسانی دارند. این مدل به عنوان مدل نهایی، جهت پیش‌بینی نرخ برش با توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی ارائه شده است. نتایج حاصل از این برازش در جدول ۳-۶ و ۴-۶ درج شده است.

جدول ۳-۶: نتایج برازش بین مقاومت کششی، ضریب بافت، سطح و قطر معادل با نرخ برش

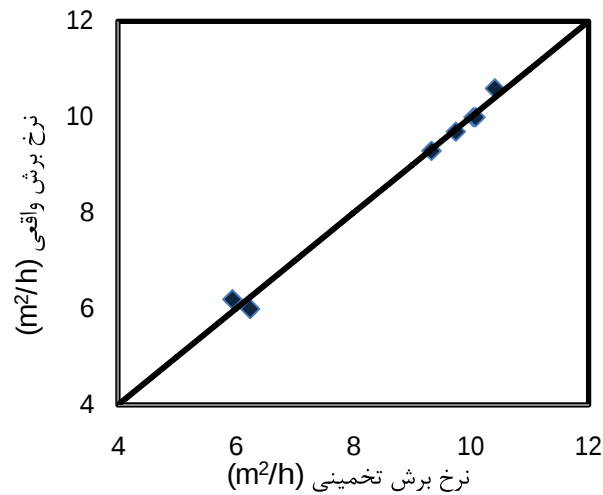
مدل	R	R^2	R^2 تصحیح شده	خطای معیار تخمین
رابطه (۳-۶) $Pr = -102.23 + 0.2\sigma_t + 56.17 D_{equi} - 8.44 TC + 8.88$	۰/۹۹۶	۰/۹۹۲	۰/۹۷	۰/۲۹

جدول ۴-۶: نتایج و ضرایب برازش بین مقاومت کششی، ضریب بافت، سطح و قطر معادل با نرخ برش

مدل	ضرایب برازش	خطای معیار	F مشاهده شده	مقدار P برازش مدل	t	مقدار P
رابطه (۳-۶)	عدد ثابت	۸/۸۸	۶۲/۲۸	۰/۱۵۸	۳/۳۳	۰/۰۸
	σ_t	۰/۲			۲/۲۶	۰/۱۵
	A	-۱۰۲/۲۳			۶/۰۳ -	۰/۰۲
	D_{equi}	۵۶/۱۷		۱۹/۲۵	۵/۴۷	۰/۰۳
	TC	- ۸/۴۴			۳/۰۴ -	۰/۰۹

برای کنترل اعتبار کلی مدل، یا به عبارت دیگر برای کنترل معنی‌داری آن، از آزمون F استفاده شده است. نتایج آزمون F نشان دهنده برازش مدل بر مشاهدات می‌باشد. به عبارت دیگر، مدل خطی ارائه شده، بیان‌کننده وجود رابطه خطی بین سرعت برش و متغیرهای مستقل می‌باشد.

شکل ۶-۱۰ نمودار صحت سنجی رابطه بین مقاومت کششی، ضریب بافت، سطح و قطر معادل را با نرخ برش نشان می‌دهد. فاصله نقاط از خط نیم‌ساز (۱:۱) بیانگر خطای سرعت برش تخمینی می‌باشد. با توجه به این شکل می‌توان استنباط نمود که مدل نهایی ارائه شده، نرخ برش را به خوبی پیش‌بینی نموده است.



شکل ۶-۱۰: نمودار مقایسه بین نرخ برش تخمینی و واقعی رابطه (۶-۳)

فصل هفتم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۷ فصل هفتم

۷ - ۱ مقدمه

در این تحقیق، رابطه بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی با نرخ برش به طور جداگانه بررسی شد. بدیهی است، رابطه‌ای منطقی و قابل قبول است که پارامترهای مستقل، از یک خانواده باشند. در فصل‌های چهارم و پنجم، رابطه‌ی بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ با نرخ برش، با استفاده از برازش تک متغیره، دو متغیره، سه متغیره و چهار متغیره بررسی شد. همچنین در فصل ششم به بررسی توأم پارامترهای فیزیکی و مکانیکی پرداخته شد، و روابط گوناگونی بر حسب پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و فیزیکی - مکانیکی برای پیش بینی نرخ برش به دست آمد. در این فصل به بررسی و بحث در مورد روابط به دست آمده می‌پردازیم.

۷ - ۲ بررسی نتایج تأثیر پارامترهای فیزیکی بر نرخ برش

۱. از جمله مشخصات فیزیکی مورد بررسی، چگالی نمونه‌ها بود، که این پارامتر رابطه‌ی خوبی با نرخ برش نشان نداد. ضریب همبستگی این رابطه $0/5$ به دست آمد. با افزایش چگالی، نرخ برش افزایش می‌یابد که این روند منطقی است، اما به دلیل قابل توجه نبودن ضریب همبستگی بین چگالی و نرخ برش، این پارامتر در برازش چند متغیره مورد استفاده قرار نگرفته است.
۲. یکی دیگر از پارامترهای فیزیکی، تخلخل نمونه‌ها است. با افزایش تخلخل، نرخ برش افزایش می‌یابد. ضریب همبستگی این رابطه $0/46$ به دست آمد، که قابل توجه نیست، لذا این پارامتر، در برازش چند متغیره مورد استفاده قرار نگرفته است.
۳. مهم‌ترین پارامتر فیزیکی و یکی از مشخصه‌های بافتی سنگ، ضریب بافت است که در این تحقیق برای ۷ نمونه، از ۱۱ نمونه مورد بررسی، محاسبه شد. با افزایش ضریب بافت، نرخ برش کاهش می‌یابد. ضریب همبستگی این رابطه، $0/9$ به دست آمد. به دلیل قابل توجه بودن ضریب همبستگی این پارامتر با نرخ برش، این پارامتر در برازش چند متغیره مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به ضریب همبستگی بین مشخصات بافتی، برازش چند متغیره فقط بین ضریب بافت با سطح، محیط دانه‌ها، قطر معادل و شاخص یکنواختی انجام شد. در برازش دو متغیره بین ضریب بافت و این مشخصات بافتی، بیشترین ضریب همبستگی مربوط به برازش بین ضریب بافت و سطح دانه‌ها بود که $0/93$ به دست آمد. در برازش سه متغیره، بیشترین ضریب همبستگی مربوط به برازش بین ضریب بافت، سطح دانه‌ها و قطر معادل بود که $0/98$ به دست آمد. در برازش چهار متغیره، نیز بیشترین ضریب همبستگی مربوط به برازش بین ضریب بافت، سطح، محیط دانه‌ها و قطر معادل بود که ضریب همبستگی آن $0/98$ به دست آمد.

۴. سطح دانه‌ها یکی از مشخصات بافتی است، که در این تحقیق بررسی شد. ارتباط این پارامتر و نرخ برش دارای روندی معکوس بود، یعنی با افزایش سطح دانه‌ها، نرخ برش کاهش می‌یابد. این روند، بر اساس رابطه شیمیاژک، که با افزایش سطح دانه‌ها افزایش ساینده‌گی را داریم، قابل توجیه است. ضریب همبستگی این رابطه $0/91$ به دست آمد، که بیشترین ضریب همبستگی بین پارامترهای فیزیکی می‌باشد.
۵. محیط دانه‌ها یکی دیگر از مشخصات بافتی است، که در این تحقیق بررسی شد. ارتباط این پارامتر و نرخ برش دارای روندی معکوس بود، یعنی با افزایش محیط دانه‌ها، نرخ برش کاهش می‌یابد. ضریب همبستگی این رابطه $0/88$ به دست آمد.
۶. نسبت وضعیت دانه‌ها یکی از مشخصات بافتی است، که در این تحقیق بررسی شد. اما ارتباط قابل توجهی بین این پارامتر و نرخ برش مشاهده نشد.
۷. قطر معادل یکی از مشخصات بافتی است، که در این تحقیق بررسی شد. ارتباط این پارامتر و نرخ برش دارای روندی معکوس بود، یعنی با افزایش قطر معادل، نرخ برش کاهش می‌یابد. ضریب همبستگی این رابطه $0/87$ به دست آمد.
۸. فشردگی یکی از مشخصات بافتی است، که در این تحقیق بررسی شد. ارتباط این پارامتر و نرخ برش دارای روندی مستقیم بود، اما این ارتباط، به دلیل ضریب همبستگی کم (مقدار $0/33$) قابل توجه نبود.
۹. فاکتور شکل یکی از مشخصات بافتی است، که در این تحقیق بررسی شد. ارتباط این پارامتر و نرخ برش دارای روندی مستقیم بود، اما این ارتباط، به دلیل ضریب همبستگی کم (مقدار $0/33$) قابل توجه نبود.
۱۰. شاخص قفل شدگی یکی دیگر از مشخصات بافتی است، که در این تحقیق بررسی شد. اما ارتباط قابل توجهی بین این پارامتر و نرخ برش مشاهده نشد.

۱۱. شاخص یکنواختی آخرین پارامتر بافتی است، که در این تحقیق بررسی شد. ارتباط این پارامتر و نرخ برش دارای روندی معکوس بود، یعنی با افزایش شاخص یکنواختی، نرخ برش کاهش می‌یابد. ضریب همبستگی این رابطه $0/87$ به دست آمد.

۷ - ۳ بررسی نتایج تأثیر پارامترهای مکانیکی بر نرخ برش

۱. مقاومت فشاری تک محوری یکی از مشخصات مهندسی سنگ است، که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. ارتباط بین این پارامتر و نرخ برش روندی معکوس داشت، که منطقی است و ضریب همبستگی این رابطه $0/96$ به دست آمد، که بیشترین ضریب همبستگی بین پارامترهای مکانیکی می‌باشد. برازش چند متغیره، با توجه به ضریب همبستگی بین پارامترهای مکانیکی، برای تمام این پارامترها انجام شد. در برازش دو متغیره بیشترین ضریب همبستگی مربوط به برازش بین مقاومت فشاری و سختی اشمیت با نرخ برش بود، که ضریب همبستگی $0/95$ داشت. در برازش سه متغیره بیشترین ضریب همبستگی مربوط به مقاومت فشاری، کششی و سختی اشمیت با ضریب همبستگی $0/96$ بود. و برازش چهار متغیره که بین پارامترهای مقاومت فشاری، کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس انجام شد، ضریب همبستگی $0/96$ به دست آمد.
۲. مقاومت کششی یکی دیگر از مشخصات مهندسی سنگ است، که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. ارتباط بین این پارامتر و نرخ برش روندی معکوس داشت که منطقی است و ضریب همبستگی این رابطه $0/87$ به دست آمد.
۳. سختی اشمیت یکی مشخصات سختی سنگ است، که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. ارتباط بین این پارامتر و نرخ برش روندی معکوس داشت که منطقی است و ضریب همبستگی این رابطه $0/91$ به دست آمد.

۴. سایش لوس آنجلس یکی مشخصات ساینده سنگ است، که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. ارتباط بین این پارامتر و نرخ برش روندی مستقیم داشت که منطقی است و ضریب همبستگی این رابطه ۰/۶۶ به دست آمد.

۴ - ۷ بررسی نتایج تأثیر توأم پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بر نرخ برش

با توجه به نتایج به دست آمده در فصل چهارم و پنجم، از بین پارامترهای فیزیکی سطح دانه، ضریب بافت و قطر معادل، و از بین پارامترهای مکانیکی مقاومت فشاری، مقاومت کششی و سختی اشمیت برای پیش بینی نرخ برش و ارائه رابطه نهایی انتخاب شدند. بالاترین ضریب همبستگی بین روابط ارائه شده، مربوط به برازش چهار متغیره بین مقاومت کششی، سطح دانه‌ها، ضریب بافت و قطر معادل می‌باشد که ضریب همبستگی این رابطه، ۰/۹۹۶ می‌باشد. این رابطه، جهت پیش بینی نرخ برش می‌باشد که شامل پارامترهای فیزیکی و پارامترهای مکانیکی است. اعتبار این رابطه، علاوه بر مقدار ضریب همبستگی و نمودار نرخ برش تخمینی بر حسب نرخ برش واقعی، با آزمون F نیز صحت سنجی شده است.

به طور کلی، تمام روابط حاصل از برازش‌ها صحت‌سنجی شده‌اند و از این بین، برخی روابط، با سطح اعتماد ۹۵ درصد معتبر نبودند.

۵ - ۷ پیشنهادات

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

۱. بهتر است تعداد نمونه‌های مورد مطالعه افزایش یابد تا بررسی‌های آماری روی جامعه آماری کامل‌تری انجام شود.

۲. در این مطالعه، بررسی تأثیر میزان کوارتز و سیلیس موجود در سنگ‌های کربناته صورت نگرفت، لذا پیشنهاد می‌شود که برای بررسی تأثیر میزان کوارتز موجود در سنگ‌های کربناته بر نرخ برش، از روش‌هایی مانند اسیدشویی، مطالعات میکروسکوپی استفاده شود.
۳. در این مطالعه، تأثیر مشخصات توده سنگ مانند ناپیوستگی‌ها، درزه‌ها، گسل و ... بر عملکرد سیم برش الماسه بررسی نشده است. سنگ‌های مورد مطالعه، ماده سنگ در نظر گرفته شده- اند لذا برای بررسی دقیق‌تر پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی، تأثیر مشخصات توده سنگ نیز در نظر گرفته شود.
۴. پارامترهای مدیریتی، مانند مهارت اپراتور و لرزش دستگاه در این بررسی برای نمونه‌های مختلف، ثابت در نظر گرفته شدند. بهتر است برای بررسی کامل‌تر تأثیر این پارامترها نیز مورد مطالعه قرار گیرد.
۵. در این مطالعه، نوع سنگ‌های مورد بررسی از نوع مرمریت بوده‌اند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی، انواع مختلف سنگ‌های ساختمانی مورد مطالعه قرار بگیرند تا رابطه ارائه شده جامع‌تر باشد.

منابع و مراجع

- اصانلو م، (۱۳۷۵) "روشهای حفاری" مرکز نشر صدرا.
- سایت اینترنتی <http://www.STONEBTB.com>، (۲۰۱۰).
- عطایی م، (۱۳۸۷) "استخراج سنگهای ساختمانی" چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
- عطایی م، حسینی ه، (۱۳۸۷) "بررسی تأثیر بافت بر مشخصات مهندسی سنگ"، گزارش طرح پژوهشی، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- فهیمی فر ا، سروش ح، (۱۳۸۰) "آزمایشهای مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها" جلد اول، انتشارات شرکت سهامی آزمایشگاههای فنی و مکانیک خاک.
- نبیان ا، فرهادیان م، برادران م و حمیدی انارکی غ، (۱۳۷۰) "سنگهای تزئینی و نما" چاپ اول، وزارت معادن و فلزات، معاونت اکتشافی.

Cai O. Careddu N. Mereu M. Mulas I. (2007), "the influence of operating parameters on the total productivity of diamond wire in cutting granite" **J. of industrial diamond review**, pp 25.

Dreyer W. (1973), "The Science of Rock Mechanics". Part I. The Strength Properties of Rocks, 2nd ed. Series on Rock and Soil Mechanics, vol. 1 (1971/73), No. 2. Trans Tech Publications, Clausthal. 500 pp.

Ersoy A. & Waller M. D. (1995), "Textural characterization of rocks" **J. of Engineering Geology**, June, Vol. 39, Issues 3-4, 123-136.

Howarth D.F. and Rowlands J.C. (1986), "Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties" **J. of Geotech Testing**, 9:169-179.

Howarth D.F. and Rowlands J.C. (1987), "Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties" **J. of Rock Mech. Rock Eng.**, 20:57-85.

Howarth D.F. and Rowlands J.C. (1987b), "The effect of rock texture on drillability and mechanical rock properties". **Proceedings of 6th Congress of the International**

Society of Rock Mechanics, Montréal (Canada), August 30–September 3, 1987, vol. 1, pp. 655–658.

Jimeno C. L. Jimeno E.L. & Carcedo F.J.A. (1995), "Drilling and blasting of rocks" A.A Balkema, Pub Rotterdam.

Konstanty J. (1991), "The Materials Science of Stone Sawing" **J. of Industrial Diamond Review**.

Ozcelic Y. Polat, E. Bayram, F. Ay, A.M. (2004) "investigation of the effects of textural properties on marble cutting with diamond wire" **Int. J. Rock Mech. Min. Sci**, Vol. 41, No.3.

Petruk W. (1986), Image analysis: "an overview of developments". CANMET Report 86-4E, 5 pp.

Přikryl P. (2006), "Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients": Limitations and possible source of misinterpretations. *Engineering Geology* 87 (2006) 149–162.

Tonshoff H.k. Friemuth T. Hillman-Apmann H. (2001), "Diamond wire sawing of steel components" **J. of industrial diamond review**, pp 203.

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

پیوست

درجه آزادی

جدول مقادیر F در سطح احتمال ۵ درصد

مخرج کسر

F

درجه آزادی صورت کسر

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۱	۱۶۱	۲۰۰	۲۱۶	۲۲۵	۲۳۰	۲۳۴	۲۳۷	۲۳۹
۲	۱۸/۵۱	۱۹/۰۰	۱۹/۱۶	۱۹/۲۵	۱۹/۳۰	۱۹/۳۳	۱۹/۳۵	۱۹/۳۷
۳	۱۰/۱۳	۹/۵۵	۹/۲۸	۹/۱۲	۹/۰۱	۸/۹	۸/۸۹	۸/۸۵
۴	۷/۷۱	۶/۹۴	۶/۵۹	۶/۳۹	۶/۲۶	۶/۱۶	۶/۰۹	۶/۰۴
۵	۶/۶۱	۵/۷۹	۵/۴۱	۵/۱۹	۵/۰۵	۴/۹۵	۴/۸۸	۴/۸۲
۶	۵/۹۹	۵/۱۴	۴/۷۶	۴/۵۳	۴/۳۹	۴/۲۸	۴/۲۱	۴/۱۵
۷	۵/۵۹	۴/۷۴	۴/۳۵	۴/۱۲	۳/۹۷	۳/۸۷	۳/۷۹	۳/۷۳
۸	۵/۳۲	۴/۴۶	۴/۰۷	۳/۸۴	۳/۶۹	۳/۵۸	۳/۵۰	۳/۴۴
۹	۵/۱۲	۴/۲۶	۳/۸۶	۳/۶۳	۳/۴۸	۳/۳۷	۳/۲۹	۳/۲۳
۱۰	۴/۹۶	۴/۱۰	۳/۷۱	۳/۴۸	۳/۳۳	۳/۲۲	۳/۱۴	۳/۰۷
۱۱	۴/۸۴	۳/۹۸	۳/۵۹	۳/۳۶	۳/۲۰	۳/۰۹	۳/۰۱	۲/۹۵
۱۲	۴/۷۵	۳/۸۹	۳/۴۹	۳/۲۶	۳/۱۱	۳/۰۰	۲/۹۱	۲/۸۵
۱۳	۴/۶۷	۳/۸۱	۳/۴۱	۳/۱۸	۳/۰۳	۲/۹۲	۲/۸۳	۲/۷۷
۱۴	۴/۶	۳/۷۴	۳/۳۴	۳/۱۱	۲/۹۶	۲/۸۵	۲/۷۶	۲/۷۰
۱۵	۴/۵۴	۳/۶۸	۳/۲۹	۳/۰۶	۲/۹۰	۲/۷۹	۲/۷۱	۲/۶۴
۱۶	۴/۴۹	۳/۶۳	۳/۲۴	۳/۰۱	۲/۸۵	۲/۷۴	۲/۶۶	۲/۵۹
۱۷	۴/۴۵	۳/۵۹	۳/۲۰	۲/۹۶	۲/۸۱	۲/۷۰	۲/۶۱	۲/۵۵
۱۸	۴/۴۱	۳/۵۵	۳/۱۶	۲/۹۳	۲/۷۷	۲/۶۶	۲/۵۸	۲/۵۱
۱۹	۴/۳۸	۳/۵۲	۳/۱۳	۲/۹۰	۲/۷۴	۲/۶۳	۲/۵۴	۲/۴۸
۲۰	۴/۳۵	۳/۴۹	۳/۱۰	۲/۸۷	۲/۷۱	۲/۶۰	۲/۵۱	۲/۴۵
۲۲	۴/۳۰	۳/۴۴	۳/۰۵	۲/۸۲	۲/۶۶	۲/۵۵	۲/۴۶	۲/۴
۲۴	۴/۲۶	۳/۴۰	۳/۰۱	۲/۷۸	۲/۶۲	۲/۵۱	۲/۴۲	۲/۳۶
۲۶	۴/۲۳	۳/۳۷	۲/۹۸	۲/۷۴	۲/۵۹	۲/۴۷	۲/۳۹	۲/۳۲
۲۸	۴/۲۰	۳/۳۴	۲/۹۵	۲/۷۱	۲/۵۶	۲/۴۵	۲/۳۶	۲/۲۹
۳۰	۴/۱۷	۳/۳۲	۲/۹۲	۲/۶۹	۲/۵۳	۲/۴۲	۲/۳۳	۲/۲۷
۴۰	۴/۰۸	۳/۲۳	۲/۸۴	۲/۶۱	۲/۴۵	۲/۳۴	۲/۲۵	۲/۱۸
۶۰	۴/۰۰	۳/۱۵	۲/۷۶	۲/۵۳	۲/۳۷	۲/۲۵	۲/۱۷	۲/۱۰
۱۲۰	۳/۹۲	۳/۰۷	۲/۶۸	۲/۴۵	۲/۲۹	۲/۱۷	۲/۰۹	۲/۰۲
∞	۳/۸۴	۳/۰۰	۲/۶۰	۲/۳۷	۲/۲۱	۲/۱۰	۲/۰۱	۱/۹۴

ادامه جدول مقادیر F در سطح احتمال ۵ درصد

درجه آزادی

مخرج کسر F

درجه آزادی صورت کسر F

	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۴	۱۶	۲۰	۲۵
۱	۲۴۱	۲۴۲	۲۴۳	۲۴۴	۲۴۵	۲۴۶	۲۴۸	۲۴۹
۲	۱۹/۳۸	۱۹/۴۰	۱۹/۴۰	۱۹/۴۱	۱۹/۴۱	۱۹/۴۳	۱۹/۴۵	۱۹/۴۵
۳	۸/۸۱	۸/۷۹	۸/۷۶	۸/۷۴	۸/۷۱	۸/۶۹	۸/۶۶	۸/۶۴
۴	۶/۰۰	۵/۹۶	۵/۹۳	۵/۹۱	۵/۸۷	۵/۸۴	۵/۸۰	۵/۷۷
۵	۴/۷۷	۴/۷۴	۴/۷۰	۴/۶۸	۴/۶۴	۴/۶۰	۴/۵۶	۴/۵۴
۶	۴/۱۰	۴/۰۶	۴/۰۲	۴/۰۰	۳/۹۶	۳/۹۲	۳/۸۷	۳/۸۴
۷	۳/۶۸	۳/۶۴	۳/۶۰	۳/۵۷	۳/۵۲	۳/۴۹	۳/۴۴	۳/۴۰
۸	۳/۳۹	۳/۳۵	۳/۳۱	۳/۲۸	۳/۲۳	۳/۲۰	۳/۱۵	۳/۱۱
۹	۳/۱۸	۳/۱۴	۳/۱۰	۳/۰۷	۳/۰۲	۲/۹۸	۲/۹۴	۲/۹۰
۱۰	۳/۰۲	۲/۹۸	۲/۹۴	۲/۹۱	۲/۸۶	۲/۸۲	۲/۷۷	۲/۷۴
۱۱	۲/۹۰	۲/۸۵	۲/۸۲	۲/۷۹	۲/۷۴	۲/۷۰	۲/۶۵	۲/۶۱
۱۲	۲/۸۰	۲/۷۵	۲/۷۲	۲/۶۹	۲/۶۴	۲/۶۰	۲/۵۴	۲/۵۱
۱۳	۲/۷۱	۲/۶۷	۲/۶۳	۲/۶۰	۲/۵۵	۲/۵۱	۲/۴۶	۲/۴۲
۱۴	۲/۶۵	۲/۶۰	۲/۵۶	۲/۵۳	۲/۴۸	۲/۴۴	۲/۳۹	۲/۳۵
۱۵	۲/۵۹	۲/۵۴	۲/۵۱	۲/۴۸	۲/۴۳	۲/۳۹	۲/۳۳	۲/۲۹
۱۶	۲/۵۴	۲/۴۹	۲/۴۵	۲/۴۲	۲/۳۷	۲/۳۳	۲/۲۸	۲/۲۳
۱۷	۲/۴۹	۲/۴۵	۲/۴۱	۲/۳۸	۲/۳۳	۲/۲۹	۲/۲۳	۲/۱۹
۱۸	۲/۴۶	۲/۴۱	۲/۳۷	۲/۳۴	۲/۲۹	۲/۲۵	۲/۱۹	۲/۱۵
۱۹	۲/۴۲	۲/۳۸	۲/۳۴	۲/۳۱	۲/۲۶	۲/۲۱	۲/۱۶	۲/۱۰
۲۰	۲/۳۹	۲/۳۵	۲/۳۱	۲/۲۸	۲/۲۳	۲/۱۸	۲/۱۲	۲/۰۸
۲۲	۲/۳۴	۲/۳۰	۲/۲۶	۲/۲۳	۲/۱۸	۲/۱۳	۲/۰۷	۲/۰۲
۲۴	۲/۳۰	۲/۲۵	۲/۲۲	۲/۱۸	۲/۱۳	۲/۰۹	۲/۰۳	۱/۹۸
۲۶	۲/۲۷	۲/۲۲	۲/۱۸	۲/۱۵	۲/۱۰	۲/۰۵	۱/۹۹	۱/۹۴
۲۸	۲/۲۴	۲/۱۹	۲/۱۵	۲/۱۲	۲/۰۶	۲/۰۲	۱/۹۶	۱/۹۰
۳۰	۲/۲۱	۲/۱۶	۲/۱۲	۲/۰۹	۲/۰۴	۱/۹۹	۱/۹۳	۱/۸۸
۴۰	۲/۱۲	۲/۰۸	۲/۰۴	۲/۰۰	۱/۹۵	۱/۹۰	۱/۸۴	۱/۷۸
۶۰	۲/۰۴	۱/۹۹	۱/۹۵	۱/۹۲	۱/۸۶	۱/۸۱	۱/۷۵	۱/۶۹
۱۲۰	۱/۹۶	۱/۹۱	۱/۸۶	۱/۸۳	۱/۷۷	۱/۷۲	۱/۶۶	۱/۶۰
∞	۱/۸۸	۱/۸۳	۱/۷۹	۱/۷۵	۱/۶۹	۱/۶۴	۱/۵۷	۱/۵۱

جدول t استیودنت

درجه

آزادی

سطوح معنی دار آزمون دو طرفه

	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۱
۱	۱/۰۰۰	۱/۳۷۶	۱/۹۶۳	۳/۰۷۸	۶/۳۱۴	۱۲/۷۰۶	۳۱/۸۲۱	۶۳/۶۵۷	۶۳۶/۶۱۹
۲	۰/۸۱۶	۱/۰۶۱	۱/۳۸۶	۱/۸۸۶	۲/۹۲۰	۴/۳۰۳	۶/۹۶۵	۹/۹۲۵	۳۱/۵۹۸
۳	۰/۷۶۵	۰/۹۷۸	۱/۲۵۰	۱/۶۳۸	۲/۳۵۳	۳/۱۸۲	۴/۵۴۱	۵/۸۴۱	۱۲/۹۴۱
۴	۰/۷۴۱	۰/۹۴۱	۱/۱۹۰	۱/۵۳۳	۲/۱۳۲	۲/۷۷۶	۳/۷۴۷	۴/۶۰۴	۸/۶۱۰
۵	۰/۷۲۷	۰/۹۲۰	۱/۱۵۶	۱/۴۷۶	۲/۱۰۵	۲/۵۷۱	۳/۳۶۵	۴/۰۳۲	۶/۸۵۹
۶	۰/۷۱۸	۰/۹۰۶	۱/۱۳۴	۱/۴۴۰	۱/۹۴۳	۲/۴۴۷	۳/۱۴۳	۳/۷۰۷	۵/۹۵۹
۷	۰/۷۱۱	۰/۸۹۶	۱/۱۱۹	۱/۴۱۵	۱/۸۹۵	۲/۳۶۵	۲/۹۹۸	۳/۴۹۹	۵/۴۰۵
۸	۰/۷۰۶	۰/۸۸۹	۱/۱۰۸	۱/۳۹۷	۱/۸۶۰	۲/۳۰۶	۲/۸۹۶	۳/۳۵۵	۵/۰۴۱
۹	۰/۷۰۳	۰/۸۸۳	۱/۱۰۰	۱/۳۸۳	۱/۸۳۳	۲/۲۶۲	۲/۸۲۱	۳/۲۵۰	۴/۷۸۱
۱۰	۰/۷۰۰	۰/۸۷۹	۱/۰۹۳	۱/۳۷۲	۱/۸۱۲	۲/۲۲۸	۲/۷۶۴	۳/۱۶۹	۴/۵۸۷
۱۱	۰/۶۹۷	۰/۸۷۶	۱/۰۸۸	۱/۳۶۳	۱/۷۹۶	۲/۲۰۱	۲/۷۱۸	۳/۱۰۶	۴/۴۳۷
۱۲	۰/۶۹۵	۰/۸۷۳	۱/۰۸۳	۱/۳۵۶	۱/۷۸۲	۲/۱۷۹	۲/۶۸۱	۳/۰۵۵	۴/۳۱۸
۱۳	۰/۶۹۴	۰/۸۷۰	۱/۰۷۹	۱/۳۵۰	۱/۷۷۱	۲/۱۶۰	۲/۶۵۰	۳/۰۱۲	۴/۲۲۱
۱۴	۰/۶۹۲	۰/۸۶۸	۱/۰۷۶	۱/۳۴۵	۱/۷۶۱	۲/۱۴۵	۲/۶۲۴	۲/۹۷۷	۴/۱۴۰
۱۵	۰/۶۹۱	۰/۸۶۶	۱/۰۷۴	۱/۳۴۱	۱/۷۵۳	۲/۱۳۱	۲/۶۰۲	۲/۹۴۷	۴/۰۷۳
۱۶	۰/۶۹۰	۰/۸۶۵	۱/۰۷۱	۱/۳۳۷	۱/۷۴۶	۲/۱۲۰	۲/۵۸۳	۲/۹۲۱	۴/۰۱۵
۱۷	۰/۶۸۹	۰/۸۶۳	۱/۰۶۹	۱/۳۳۰	۱/۷۴۰	۲/۱۱۰	۲/۵۶۷	۲/۸۹۸	۳/۹۶۵
۱۸	۰/۶۸۸	۰/۸۶۲	۱/۰۶۷	۱/۳۳۰	۱/۷۳۴	۲/۱۰۱	۲/۵۵۲	۲/۸۷۸	۳/۹۲۲
۱۹	۰/۶۸۸	۰/۸۶۱	۱/۰۶۶	۱/۳۲۸	۱/۷۲۹	۲/۰۹۳	۲/۵۳۹	۲/۸۶۱	۳/۸۸۳
۲۰	۰/۶۸۷	۰/۸۶۰	۱/۰۶۴	۱/۳۲۵	۱/۷۲۵	۲/۰۸۶	۲/۵۲۸	۲/۸۴۵	۳/۸۵۰
۲۱	۰/۶۸۶	۰/۸۵۹	۱/۰۶۳	۱/۳۲۳	۱/۷۲۱	۲/۰۸۰	۲/۵۱۸	۲/۸۳۱	۳/۸۱۹
۲۲	۰/۶۸۶	۰/۸۵۸	۱/۰۶۱	۱/۳۲۱	۱/۷۱۷	۲/۰۷۴	۲/۵۰۸	۲/۸۱۹	۳/۷۹۲
۲۳	۰/۶۸۵	۰/۸۵۸	۱/۰۶۰	۱/۳۱۹	۱/۷۱۴	۲/۰۶۹	۲/۵۰۰	۲/۸۰۷	۳/۷۶۷
۲۴	۰/۶۸۵	۰/۸۵۷	۱/۰۵۹	۱/۳۱۸	۱/۷۱۱	۲/۰۶۴	۲/۴۹۲	۲/۷۹۷	۳/۷۴۵
۲۵	۰/۶۸۴	۰/۸۵۶	۱/۰۵۸	۱/۳۱۶	۱/۷۰۸	۲/۰۶۰	۲/۴۸۵	۲/۷۸۷	۳/۷۲۵
۲۶	۰/۶۸۴	۰/۸۵۶	۱/۰۵۸	۱/۳۱۵	۱/۷۰۶	۲/۰۵۶	۲/۴۷۹	۲/۷۷۹	۳/۷۰۷
۲۷	۰/۶۸۴	۰/۸۵۵	۱/۰۵۷	۱/۳۱۴	۱/۷۰۳	۲/۰۵۲	۲/۴۷۳	۲/۷۷۱	۳/۶۹۰
۲۸	۰/۶۸۳	۰/۸۵۵	۱/۰۵۶	۱/۳۱۳	۱/۷۰۱	۲/۰۴۸	۲/۴۶۷	۲/۷۶۳	۳/۶۷۴
۲۹	۰/۶۸۳	۰/۸۵۴	۱/۰۵۵	۱/۳۱۱	۱/۶۹۹	۲/۰۴۵	۲/۴۶۲	۲/۷۵۶	۳/۶۵۹
۳۰	۰/۶۸۳	۰/۸۵۴	۱/۰۵۵	۱/۳۱۰	۱/۶۹۷	۲/۰۴۲	۲/۴۵۷	۲/۷۵۰	۳/۶۴۶
۴۰	۰/۶۸۱	۰/۸۵۱	۱/۰۵۰	۱/۳۰۳	۱/۶۸۴	۲/۰۲۱	۲/۴۲۳	۲/۷۰۴	۳/۵۵۱
۶۰	۰/۶۷۹	۰/۸۴۸	۱/۰۴۶	۱/۲۹۶	۱/۶۷۱	۲/۰۰۰	۲/۳۹۰	۲/۶۶۰	۳/۶۴۰
۱۲۰	۰/۶۷۷	۰/۸۴۵	۱/۰۴۱	۱/۲۸۹	۱/۶۵۸	۱/۹۸۰	۲/۳۵۸	۲/۶۱۷	۳/۳۷۳
∞	۰/۶۷۴	۰/۸۴۲	۱/۰۳۶	۱/۲۸۲	۱/۶۴۵	۱/۹۶۰	۲/۳۲۶	۲/۵۷۶	۳/۲۹۱
	۰/۲۵	۰/۲	۰/۱۵	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۲۵	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۵

درجه

سطوح معنی دار آزمون یک طرفه

آزادی