

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته مهندسی معدن، گروه استخراج

پایان نامه کارشناسی ارشد

## ارائه مدلی برای پیش بینی نرخ برش سنگ‌های ساختمانی

دانشجو: سحر وحیدی

اساتید راهنما :

دکتر محمد عطائی

دکتر رضا خالوکاکایی

اساتید مشاور :

مهندس سجاد محمدی

مهندس نادر زیاری

اسفند ۱۳۹۴

## تقدیم اثر

تقدیم به آنان که هر چه آموختم در مکتب عشق آنها آموختم

به پدرم، که راه را به من نشان داد...

به مادرم، که راه رفتن را به من آموخت...

## تقدیر و تشکر

روزی که برای اولین بار در مهر سال ۷۵ قلم به دست گرفتم، سرکار خانم تقوی با صبوری و مهربانی شایسته یک معلم کلاس اول، نخستین جرعه‌های دانستن را به کام تشنه‌ام ریخت و من نیز چون همکلاسی‌هایم جرعه جرعه تشنه‌تر شدم تا امروز...

امروز مفتخرم بر دستان تمام عزیزانی که بعد از آن روز تا به این لحظه، در این گذر پر فراز و نشیب بیست و اندی ساله هر یک به جرعه‌ای کام تشنه‌ام را مهمان کرده‌اند، بوسه زنم. در همین راستا از جناب آقای دکتر عطائی که در تمامی مراحل انجام این پایان‌نامه پیوسته راهنمای من بودند و همچنین جناب آقای دکتر کاکایی، کمال تشکر را دارم. از جناب آقای مهندس سجاد محمدی که بخصوص در کارهای تجزیه و تحلیل آماری و استخراج نتایج این تحلیل کمک‌های مؤثری کردند و جناب آقای مهندس نادر زیاری که در بخش کار آزمایشگاهی نهایت همکاری را ابراز داشتند، صمیمانه سپاسگزارم. در نهایت از خداوند منان می‌خواهم همه‌ی کسانی را که حتی ذره‌ای در انجام این امر مرا یاری نمودند، در سایه‌ی لطف و محبت بی‌کرانش، سلامت، شادکام و موفق بدارد.

## تعهدنامه

- اینجانب سحر وحیدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن-استخراج دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارائه مدلی برای پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های ساختمانی تحت راهنمایی دکتر محمد عطائی متعهد می‌شوم.
- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

### تاریخ و امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

## چکیده

افزایش روز افزون استفاده از دیسک‌های برش‌دهنده و اهمیت پیش‌بینی نرخ برش سنگ در تخمین هزینه‌ها و طراحی کارخانه‌های فرآوری سنگ موجب شد تا تعیین روابط بین خصوصیات سنگ با نرخ برش به عنوان هدف این مطالعه در نظر گرفته شود. به همین منظور ۱۵ نمونه از سنگ‌های تراورتن مورد آزمایش قرار گرفتند و آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، سختی اشمیت، سایش لوس آنجلس، چگالی و تخلخل و همچنین آنالیز شیمیایی برای بررسی درصد عناصر سخت موجود در سنگ و مطالعات بافتی با تهیه مقاطع نازک از نمونه‌ها، برای بررسی تأثیر اندازه دانه‌ها در برش، انجام شدند. از طرف دیگر اطلاعات مربوط به مشخصات برش دستگاه و نرخ برش نمونه‌ها نیز در برخی از کارخانه‌های سنگ‌بری شهر محلات ثبت شدند. در ادامه با توجه به تعداد زیاد پارامترهای مؤثر بر نرخ برش و پیچیدگی روابط بین آن‌ها، از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای کاهش تعداد متغیرهای درگیر استفاده شد. پس از تعیین مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترها و بررسی همبستگی میان آن‌ها، معادلات پیش‌بینی نرخ برش با استفاده از رگرسیون خطی و غیرخطی ارائه شدند. این روابط میان متغیرهای ناهمبسته و با توجه به اهمیت توصیف مشخصات سنگ بر اساس خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن در کنار هم، بر اساس برخی از متغیرهای همبسته ارائه شدند. در نهایت چهار معیار ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطا، شاخص عملکرد و میانگین درصد خطای مطلق برای انتخاب بهترین مدل استفاده شدند. با توجه به مناسب بودن مقادیر این چهار معیار برای دو رابطه، انتخاب رابطه مناسب‌تر بر اساس داده‌های آزمون و بررسی ارتباط مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از این دو رابطه با مقادیر اندازه‌گیری شده انجام شد. در نهایت پس از تعیین مناسب‌ترین رابطه با انجام آنالیز حساسیت، تخلخل به عنوان مؤثرترین متغیر برای پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های تراورتن معرفی شد.

واژه‌های کلیدی: نرخ برش، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، رگرسیون خطی و غیرخطی.

فصل اول: مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ ضرورت تحقیق	۲
۳-۱ اهداف تحقیق	۳
۴-۱ مراحل انجام تحقیق	۳
۵-۱ ساختار پایان نامه	۵

فصل دوم: سنگ‌های ساختمانی کربناته و فرآیند برش

۱-۲ مقدمه	۸
۲-۲ کلیاتی در مورد سنگ‌های ساختمانی	۸
۳-۲ دیسک‌های برش الماسی	۱۰
۴-۲ فرایند برش	۱۴
۵-۲ عوامل مؤثر در فرایند برش سنگ	۱۶
۱-۵-۲ مشخصات سنگ	۱۷
۱-۱-۵-۲ مشخصات فیزیکی سنگ‌ها	۱۷
۲-۱-۵-۲ مشخصات مکانیکی سنگ‌ها	۱۹
۳-۱-۵-۲ مشخصات ساختاری و محیطی سنگ	۲۲
۲-۵-۲ مشخصات دستگاهی	۲۲
۱-۲-۵-۲ مشخصات طرح برش	۲۳

- ۲۶ ..... ۲-۲-۵-۲ مشخصات عملیاتی برش
- ۲۷ ..... ۶-۲ جمع‌بندی

### فصل سوم: سابقه علمی موضوع

- ۳۰ ..... ۱-۳ مقدمه
- ۳۰ ..... ۲-۳ مطالعات انجام شده در زمینه قابلیت برش سنگ
- ۳۴ ..... ۳-۳ روابط ارائه شده برای پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های ساختمانی
- ۳۷ ..... ۴-۳ جمع‌بندی

### فصل چهارم: جمع‌آوری اطلاعات و ایجاد پایگاه داده‌ها

- ۴۰ ..... ۱-۴ مقدمه
- ۴۰ ..... ۲-۴ مطالعات میدانی و آزمایشگاهی
- ۴۲ ..... ۱-۲-۴ مطالعات آزمایشگاهی
- ۴۲ ..... ۴-۲-۱-۱ جمع‌آوری نمونه‌های مورد آزمایش
- ۴۳ ..... ۴-۲-۱-۲ آزمایش تعیین چگالی و تخلخل
- ۴۴ ..... ۴-۲-۱-۳ مطالعات کانی‌شناسی و بافت
- ۴۷ ..... ۴-۲-۱-۴ آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک محوره
- ۴۹ ..... ۴-۲-۱-۵ آزمایش تعیین مقاومت کششی
- ۵۲ ..... ۴-۲-۱-۶ آزمایش تعیین سختی اشمیت
- ۵۳ ..... ۴-۲-۱-۷ آزمایش تعیین سایش لوس آنجلس
- ۵۶ ..... ۴-۲-۱-۸ آنالیز شیمیایی



۵۷	۲-۲-۴ مطالعات میدانی .....
۵۹	۳-۴ جمع‌بندی .....

### فصل پنجم: مدل‌های برازش و روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی

۶۲	۱-۵ مقدمه .....
۶۳	۲-۵ تحلیل رگرسیون .....
۶۴	۱-۲-۵ بررسی نرمال بودن داده‌ها .....
۶۶	۲-۲-۵ بررسی همبستگی متغیرها .....
۶۷	۳-۵ مدل‌های رگرسیون چندگانه .....
۶۷	۱-۳-۵ رگرسیون خطی چندگانه .....
۶۸	۲-۳-۵ رگرسیون غیرخطی چندگانه .....
۶۸	۴-۵ معیارهای ارزیابی یک رابطه رگرسیونی .....
۷۰	۵-۵ تحلیل مؤلفه‌های اصلی .....
۷۴	۶-۵ جمع‌بندی .....

### فصل ششم: ارائه مدل‌های پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های کربناته

۷۶	۱-۶ مقدمه .....
۷۶	۲-۶ تفکیک پایگاه داده به داده‌های آموزش و آزمون .....
۷۹	۳-۶ مدل‌های برازش تک متغیره .....

۴-۶	تحلیل مؤلفه‌های اصلی	۸۱
۵-۶	مدل‌های برازش چند متغیره خطی بر اساس مؤلفه‌های اصلی	۸۵
۱-۵-۶	بررسی نرمال بودن داده‌ها	۸۵
۲-۵-۶	بررسی همبستگی متغیرها	۹۱
۶-۶	مدل‌های برازش چند متغیره غیرخطی بر اساس مؤلفه‌های اصلی	۹۹
۷-۶	تعیین بهترین مدل تخمین نرخ برش	۱۰۶
۸-۶	تحلیل حساسیت	۱۱۰
۹-۶	جمع‌بندی	۱۱۱

#### فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱-۷	مقدمه	۱۱۴
۲-۷	نتیجه‌گیری	۱۱۴
۳-۷	پیشنهادها	۱۱۷

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: مراحل انجام تحقیق ..... ۴
- شکل ۲-۱: ساختار پایان‌نامه ..... ۶
- شکل ۱-۲: کوپ‌های سنگی تهیه شده برای برش با دیسک‌های برش ..... ۱۰
- شکل ۲-۲: آماده‌سازی بلوک سنگی برای برش با دیسک برش‌دهنده ..... ۱۱
- شکل ۳-۲: مراحل تهیه پلاک‌های سنگی ..... ۱۳
- شکل ۴-۲: تعامل نیروهای موجود میان دانه الماس و سطح خراشیده شده از سنگ ..... ۱۵
- شکل ۵-۲: تشکیل ترک‌های جانبی و شعاعی در ناحیه‌ای با تغییر شکل پلاستیک در اثر برش ..... ۱۵
- شکل ۶-۲: عوامل مؤثر در فرایند برش ..... ۱۶
- شکل ۷-۲: حداکثر عمق برش دیسک با توجه به شعاع دیسک و شعاع فلانژ دیسک ..... ۲۴
- شکل ۸-۲: روش‌های مختلف برش و نیروهای برشی مربوطه ..... ۲۶
- شکل ۱-۴: مراحل انجام مطالعات ..... ۴۱
- شکل ۲-۴: نواحی مورد مطالعه ..... ۴۲
- شکل ۳-۴: تصاویر مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌های مورد مطالعه ..... ۴۵
- شکل ۴-۴: نمونه‌های مربوط به آزمایش مقاومت فشاری تک محوره ..... ۴۸
- شکل ۵-۴: نمونه‌های مربوط به آزمایش برزیلی ..... ۵۱
- شکل ۱-۵: توزیع نرمال استاندارد ..... ۶۴
- شکل ۲-۵: چولگی مثبت و منفی ..... ۶۵
- شکل ۳-۵: پراکندگی داده‌ها و تعیین جهات مؤلفه‌های اصلی ..... ۷۲
- شکل ۱-۶: مراحل انجام مطالعات آماری ..... ۷۸

- شکل ۲-۶: برآزش تک متغیره بین نرخ برش و مشخصات مکانیکی نمونه‌ها ..... ۸۰
- شکل ۳-۶: برآزش تک متغیره بین نرخ برش و مشخصات فیزیکی نمونه‌ها ..... ۸۱
- شکل ۴-۶: نمودار اسکری پلات برای کلیه مؤلفه‌ها ..... ۸۳
- شکل ۵-۶: نمای دو بعدی دو مؤلفه اصلی و متغیرهای نشان داده شده در هر مؤلفه ..... ۸۴
- شکل ۶-۶: همبستگی بین متغیرها در دو مؤلفه اصلی ..... ۸۴
- شکل ۷-۶: هیستوگرام داده‌های متغیرهای مورد بررسی ..... ۸۶
- شکل ۸-۶: نمودار QQ برای بررسی نرمال بودن داده‌ها ..... ۸۹
- شکل ۹-۶: نمودار جعبه‌ای برای بررسی نرمال بودن داده‌ها ..... ۹۰
- شکل ۱۰-۶: توزیع فراوانی خطاها برای روابط خطی ارائه شده ..... ۹۷
- شکل ۱۱-۶: نمودار همگنی واریانس‌ها برای روابط خطی ارائه شده ..... ۹۸
- شکل ۱۲-۶: توزیع فراوانی خطاها برای روابط غیرخطی ارائه شده ..... ۱۰۴
- شکل ۱۳-۶: نمودار همگنی واریانس‌ها برای روابط غیرخطی ارائه شده ..... ۱۰۵
- شکل ۱۴-۶: ارتباط مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای داده‌های آموزش ..... ۱۰۸
- شکل ۱۵-۶: ارتباط مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای داده‌های آزمون ..... ۱۰۹
- شکل ۱۶-۶: مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده توسط دو رابطه h و j ..... ۱۰۹

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۳-۱: روابط تجربی ارائه شده به منظور پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های ساختمانی..... ۳۴
- جدول ۴-۱: نتایج آزمایش‌های چگالی و تخلخل ..... ۴۴
- جدول ۴-۲: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوره ..... ۴۹
- جدول ۴-۳: نتایج آزمایش مقاومت کششی ..... ۵۱
- جدول ۴-۴: نتایج آزمایش سختی اشمیت ..... ۵۳
- جدول ۴-۵: تعداد و وزن گوی‌های فولادی دستگاه لوس آنجلس ..... ۵۴
- جدول ۴-۶: دانه‌بندی نمونه‌های انتخابی برای قطعات کوچکتر از ۳۸ میلیمتر ..... ۵۵
- جدول ۴-۷: نتایج آزمایش سایش لوس آنجلس ..... ۵۵
- جدول ۴-۸: نتایج آنالیز شیمیایی بر روی نمونه‌ها ..... ۵۶
- جدول ۴-۹: مقادیر نرخ برش و نرخ پیشروی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌ها ..... ۵۷
- جدول ۴-۱۰: داده‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی ..... ۵۸
- جدول ۶-۱: اطلاعات آماری داده‌های آموزش و آزمون ..... ۷۷
- جدول ۶-۲: واریانس داده‌ها با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی ..... ۸۲
- جدول ۶-۳: مقادیر چولگی و کشیدگی برای متغیرهای مورد بررسی ..... ۸۷
- جدول ۶-۴: نتایج آزمون شاپیرو-ویلک برای متغیرهای مورد بررسی ..... ۸۸
- جدول ۶-۵: ضرایب همبستگی بین متغیرها ..... ۹۱
- جدول ۶-۶: روابط حاصل از انجام رگرسیون خطی چند متغیره ..... ۹۲
- جدول ۶-۷: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه (a) ..... ۹۳
- جدول ۶-۸: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه (a) ..... ۹۳

- جدول ۹-۶: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه (b) ..... ۹۴
- جدول ۱۰-۶: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه (b) ..... ۹۴
- جدول ۱۱-۶: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه (c) ..... ۹۴
- جدول ۱۲-۶: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه (c) ..... ۹۵
- جدول ۱۳-۶: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه (d) ..... ۹۵
- جدول ۱۴-۶: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه (d) ..... ۹۵
- جدول ۱۵-۶: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه (e) ..... ۹۶
- جدول ۱۶-۶: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه (e) ..... ۹۶
- جدول ۱۷-۶: روابط حاصل از انجام رگرسیون غیرخطی چند متغیره ..... ۱۰۰
- جدول ۱۸-۶: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه f ..... ۱۰۰
- جدول ۱۹-۶: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه f ..... ۱۰۱
- جدول ۲۰-۶: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه g ..... ۱۰۱
- جدول ۲۱-۶: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه g ..... ۱۰۱
- جدول ۲۲-۶: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه h ..... ۱۰۲
- جدول ۲۳-۶: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه h ..... ۱۰۲
- جدول ۲۴-۶: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه i ..... ۱۰۲
- جدول ۲۵-۶: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه i ..... ۱۰۳
- جدول ۲۶-۶: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه j ..... ۱۰۳
- جدول ۲۷-۶: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه j ..... ۱۰۳
- جدول ۲۸-۶: مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای روابط ارائه شده ..... ۱۰۷

جدول ۶-۲۹: مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای روابط h و z ..... ۱۱۰

جدول ۶-۳۰: میزان تأثیر پارامترهای ورودی رابطه نهایی ..... ۱۱۱





---

فصل اول

مقدمه و کلیات

---

## ۱-۱ مقدمه

یکی از مسائل مهم در زمینه صنعت سنگ ساختمانی تخمین قابلیت برش سنگ است. با توجه به اینکه امروزه استفاده از دیسک‌های برش‌دهنده سنگ در کارخانه‌های تولید سنگ‌های ساختمانی رو به افزایش است، پیش‌بینی نرخ برش یک سنگ می‌تواند نقش بسزایی در طول عمر دیسک و کیفیت سنگ فرآوری شده داشته باشد. به عبارت دیگر، افزایش میزان تولید و بهبود کیفیت برش در گرو شناخت کامل سنگ‌های ساختمانی و ارزیابی توانایی اجرایی دستگاه‌های برش است. لازمه این امر داشتن اطلاعات کافی در زمینه نوع سنگ و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن می‌باشد. با وجود اینکه این پارامترها غیر قابل تغییر هستند، اما داشتن اطلاعات مناسب در این زمینه، منجر به تغییر در پارامترهای ماشین و طراحی مناسب دیسک می‌شود. 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، نیاز به شناخت بیشتر سنگ‌های ساختمانی در راستای بهینه‌سازی الگوی برش، کاهش مصرف انرژی و واردات تجهیزات و ابزارهای الماسه احساس می‌شود.

## ۱-۲ ضرورت تحقیق

ایران به دلیل وجود ذخایر بالای سنگ‌های ساختمانی در رده برترین کشورهای تولیدکننده سنگ‌های ساختمانی و نما قرار دارد. با اینکه ذخایر غنی سنگ، زمینه مناسبی را برای داشتن جایگاه بالا در بازار جهانی سنگ در دسترس قرار داده است، کشور ما هنوز سهمی در تجارت جهانی سنگ پیدا نکرده است. با توجه به جایگاه بالای ایران در زمینه ذخایر و تنوع سنگ‌های ساختمانی در دنیا، هنوز مطالعات دقیق و گسترده‌ای برای ارتقا سطح علمی و تکنولوژی مرتبط با این موضوع در کشور انجام نگرفته است. از آنجایی که برش سنگ با نرخ برش نامناسب آسیب زیادی را به دیسک برش وارد خواهد کرد، شناخت پارامترهای فیزیکی و

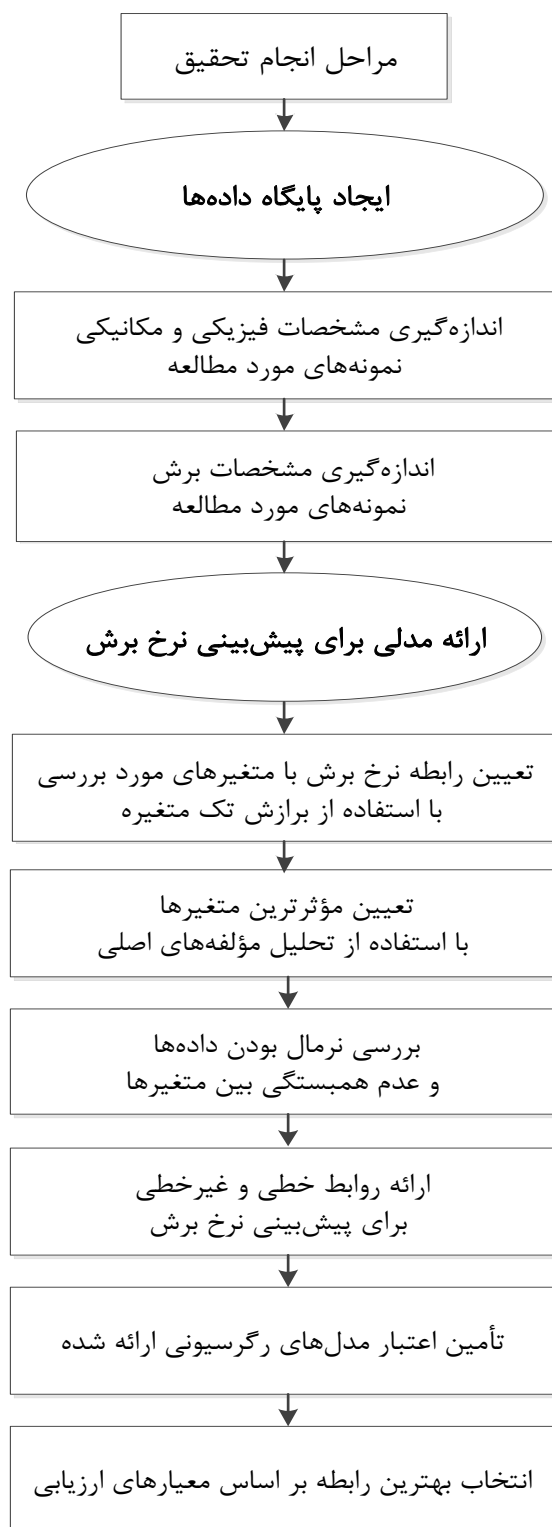
مکانیکی مؤثر، کمک زیادی به افزایش راندمان دستگاه‌های برش خواهد کرد. بنابراین با توجه به افزایش روز افزون کاربرد دیسک‌های برش الماسی و با توجه به اینکه با انتخاب تجهیزات برش متناسب با خصوصیات سنگی می‌توان تا حد زیادی به افزایش میزان بازدهی و راندمان ماشین‌آلات برش کمک کرد، ارائه مدلی برای پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های ساختمانی ضروری است. مدلی که صلاحیت لازم برای پیش‌بینی نرخ برش را بر اساس معیارهای ارزیابی داشته باشد.

### ۳-۱ اهداف تحقیق

هدف اصلی از انجام این مطالعه، پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های تراورتن است. از آنجایی که نرخ برش برای هر سنگ تحت تأثیر مشخصات آن سنگ می‌باشد، در اولین مرحله بایستی عوامل مؤثر بر نرخ برش سنگ تعیین شوند. پس از آن می‌توان مدل‌های مختلفی را بر اساس متغیرهای تعیین شده ایجاد نمود. آنچه اهمیت زیادی دارد، نحوه انتخاب مهم‌ترین پارامترها و اعتبارسنجی مدل‌های ایجاد شده است. بنابراین لازم است برای حصول اطمینان از توانایی مدل تخمینی ارائه شده، مدل توسط مهم‌ترین معیارها مورد ارزیابی قرار گیرد. با انجام این مطالعات می‌توان علاوه بر بهبود کیفیت سنگ فرآوری شده و طول عمر دیسک برش، از صرف هزینه و انرژی اضافی جلوگیری به عمل آورد.

### ۴-۱ مراحل انجام تحقیق

به طور کلی مراحل انجام کار را می‌توان به دو بخش تقسیم‌بندی کرد. بخش اول شامل جمع‌آوری اطلاعات نمونه‌های مورد آزمایش و ایجاد پایگاه داده از جامعه آماری مورد مطالعه و بخش دوم مربوط به کارهای تجزیه و تحلیل آماری و ارائه یک رابطه به منظور پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های ساختمانی است. شکل (۱-۱) این مراحل را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱: مراحل انجام تحقیق

در بخش اول پایگاه داده‌ای متشکل از ۱۵ نمونه سنگ تراورتن برای انجام مطالعات در نظر گرفته شد. در این بخش از تحقیق، اطلاعات برش نمونه‌های مورد مطالعه و همچنین مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها اندازه‌گیری و ثبت شدند. در بخش دوم اطلاعات اندازه‌گیری شده برای ارائه مدلی به منظور پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های کربناته به کار رفتند. به همین منظور پس از تعیین رابطه هر متغیر با نرخ برش، با توجه به تعداد زیاد متغیرهای بررسی، ابتدا روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای تعیین مؤثرترین متغیرها استفاده شده است. پس از آن روابطی با استفاده از رگرسیون خطی و غیرخطی برای پیش‌بینی نرخ برش ارائه شد و معیارهای ارزیابی برای انتخاب بهترین رابطه محاسبه شدند. در نهایت انتخاب بهترین رابطه از میان دو رابطه برتر، با استفاده از داده‌های آزمون انجام شده است.

## ۵-۱ ساختار پایان‌نامه

این تحقیق در ۷ فصل ارائه شده است:

فصل اول: در این فصل ( فصل پیش‌رو)، به طور خلاصه کلیاتی در زمینه موضوع تحقیق، ضرورت بررسی آن و هدف از انجام آن ذکر شده است.

فصل دوم: در این فصل، پس از آشنایی با سنگ‌های ساختمانی کربناته، به معرفی دستگاه برش، بررسی فرآیند برش سنگ و پارامترهای مؤثر بر قابلیت برش آن پرداخته شده است.

فصل سوم: فصل سوم شامل بررسی سابقه علمی موضوع و نتایج و روابط ارائه شده به منظور پیش‌بینی نرخ برش سنگ است.

فصل چهارم: در فصل چهارم از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده و نتایج نرخ برش اندازه‌گیری شده در کارخانه‌های سنگ‌بری، یک پایگاه داده برای مراحل بعد ساخته شده است.

فصل پنجم: در این فصل روش انجام کار به طور کامل شرح داده شده است. در ابتدا مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی و معیارهای انتخاب مدل مناسب بیان شده‌اند. پس از آن

برای آشنایی بیشتر با روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، توضیحاتی راجع به این روش ارائه شده است.

فصل ششم: روابط حاصل از رگرسیون میان متغیرهای انتخاب شده توسط تحلیل مؤلفه‌های اصلی و نرخ برش و همچنین انتخاب بهترین رابطه بر اساس معیارهای ارزیابی، از مطالب ارائه شده در این فصل هستند.

فصل هفتم: نتایج حاصل از تحقیق و همچنین پیشنهادهایی به منظور بهبود کارهای آتی در فصل هفتم، ارائه شده است.

فصل‌بندی ارائه شده برای انجام تحقیق در شکل (۱-۲) آورده شده است.

مقدمه و کلیات	فصل اول
سنگ‌های ساختمانی کربناته و فرآیند برش	فصل دوم
سابقه‌ی علمی موضوع	فصل سوم
جمع‌آوری اطلاعات و ایجاد پایگاه داده‌ها	فصل چهارم
مدل‌های برازش و روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی	فصل پنجم
ارائه مدل‌های پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های کربناته	فصل ششم
نتیجه‌گیری و پیشنهادها	فصل هفتم

شکل ۱-۲: ساختار پایان‌نامه

---

فصل دوم

سنگ‌های ساختمانی کربناته

و فرآیند برش

---

## ۱-۲ مقدمه

امروزه استفاده از دیسک‌های برش در کارخانه‌های تولید سنگ ساختمانی به دلیل انعطاف‌پذیری، سرعت برش بالا، اقتصادی بودن و استفاده آسان، رو به افزایش است. با توجه به اینکه هزینه برش سنگ با قیمت پایین این برش‌دهنده‌ها تا حد وسیعی کنترل می‌شود، تعیین نرخ برش مناسب برای هر نوع سنگ بسیار با اهمیت خواهد بود. داشتن اطلاعات کافی در زمینه نوع سنگ و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن، با امکان ایجاد تغییر در پارامترهای ماشین و طراحی مناسب دیسک، کمک زیادی به بالا بردن بازدهی و کیفیت سنگ‌های فرآوری شده خواهد کرد. به همین منظور، در این فصل پس از بیان مطالبی از سنگ‌های ساختمانی کربناته، به معرفی دیسک‌های برش و بررسی مکانیزم برش پرداخته شده است. علاوه بر این پارامترهای مؤثر در فرآیند برش سنگ برای بررسی دقیق‌تر، دسته‌بندی شده‌اند.

## ۲-۲ کلیاتی در مورد سنگ‌های ساختمانی

ایران کشوری معدن خیز بوده و پتانسیل مناسب آن در بخش معادن سنگ، جایگاه مناسبی را برای رشد اقتصادی کشور فراهم کرده است. بنابراین توجه بیشتر به این بخش و رفع موانع آن، امری ضروری است. مطالعات نشان می‌دهد که ایران از لحاظ برخورداری از معادن سنگ در رتبه دوم و از حیث زیبایی و تنوع در سنگ‌های رنگی در رده نخست جهان قرار دارد. ایران با دارا بودن بیش از ۲ میلیارد تن ذخایر متنوع سنگ‌های تزئینی و نما، در رده ده کشور عمده دارنده ذخایر سنگ قرار گرفته و با تولید انبوه سالانه‌ای که دارد، ۱۰ درصد تولید جهانی را در اختیار دارد (عطائی، ۱۳۸۷).

دسته‌ای از سنگ‌ها، سنگ‌های ساختمانی هستند که با ایجاد تغییر شکل و یا حتی بدون تغییر شکل فیزیکی در یکی از قسمت‌های ساختمان مثل پی، کف، دیواره، نما، سنگ‌فرش جاده و ... به کار می‌روند. قیمت، رنگ، دوام و مشخصات فنی مهم‌ترین عوامل در انتخاب سنگ ساختمانی مناسب هستند.



ویژگی‌های فنی سنگ‌ها معمولاً با آزمایش‌های شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی به دست می‌آیند که به علت تنوع بافت، ساخت و شرایط تشکیل سنگ‌ها بسیار متفاوت می‌باشد (عطایی، ۱۳۸۷).

سنگ‌های تزئینی و نما به عنوان دسته‌ای از سنگ‌های ساختمانی، پس از انتقال به کارخانه در اندازه‌های مختلف بریده می‌شوند و پس از ساب و صیقل خوردن، در قسمت‌هایی از ساختمان که در معرض دید باشند، به کار می‌روند. این نوع سنگ‌ها معمولاً برای پوشش دیوارهای داخلی، پله، کف، نمای ساختمان، کف خیابان و پیاده‌رو و همچنین بام ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرند.

عمده سنگ‌های ساختمانی و تزئینی را سنگ‌های آهکی تشکیل می‌دهند. این گونه سنگ‌ها معمولاً به دلیل سختی قابل قبول، قابلیت ساب و برش، زیبایی و تنوع رنگی، شرایط استخراج آسان و ذخیره کافی قابل استحصال، توانسته‌اند جایگاه خاصی را در سنگ‌های ساختمانی و تزئینی پیدا کنند.

یکی از انواع سنگ‌های ساختمانی تراورتن<sup>۱</sup> است. تراورتن‌ها محصول چشمه‌های آهک‌ساز قدیمی‌اند که دارای منشأ شیمیایی هستند و از ته‌نشین شدن کربنات کلسیم نزدیک چشمه‌ها و غارها به وجود می‌آیند. بافت تراورتن‌ها معمولاً متخلخل است. وجود این حفره‌های سنگی به دلیل خروج گاز به هنگام ته‌نشین شدن و در برخی موارد نتیجه تجزیه گیاهان است. از بین آن‌ها تراورتن‌های سفید که رگه‌های رنگی و تخلخل یکنواختی داشته باشند از کیفیت بیشتری برخوردارند. تراورتن‌های کم‌رنگ حاصل وجود رنگینه‌های پراکنده اکسید آهن در متن سنگ هستند. تراورتن‌های رنگی نیز برحسب درصد رنگینه‌های اکسید آهن به رنگ‌های قرمز، گردویی، لیمویی و غیره دیده می‌شوند. این سنگ‌ها با داشتن نقش‌هایی که ناشی از اختلاف میزان اکسید آهن در لایه‌های مختلف تراورتن هستند، ظاهر بسیار زیبا و جذابی دارند. تراورتن به دلیل داشتن مقاومت قابل قبول، برش‌پذیری و صیقل‌پذیری ایده‌آل، زیبایی ظاهر، وجود تخلخل جهت چسبیدن کامل به ملات و همچنین قیمت مناسب، از جمله پرمصرف‌ترین و ایده‌آل‌ترین

---

<sup>۱</sup> Travertine

سنگ‌های ساختمانی به شمار می‌رود. ذخایر این سنگ در کشور به ۴۵۰ میلیون تن می‌رسد که برخی از آن‌ها مانند تراورتن قرمز آذرشهر، به دلیل کیفیت، رنگ و طرح‌های متنوع، متقاضیان زیادی در بازارهای ایران و جهان دارد (عطائی، ۱۳۸۷). معادن آذرشهر و محلات از جمله معادن مهم تراورتن هستند که از نظر مرغوبیت بی‌نظیرند.

## ۳-۲ دیسک‌های برش الماسی<sup>۱</sup>

بلوک سنگی پس از استخراج از معدن به شکل قواره<sup>۲</sup> و یا به صورت بی‌قواره به کارخانه‌های سنگ‌بری منتقل می‌شود. بی‌قواره بودن کوپ‌ها ممکن است ناشی از عوامل طبیعی، درزه و شکاف‌ها و یا نوع روش استخراج باشد. شکل (۱-۲) بلوک‌های سنگی به شکل قواره و بی‌قواره را نشان می‌دهد. در صورتی که کارخانه تنها از معادنی که کوپ‌های بی‌قواره تولید می‌کند تغذیه شود، اولین ماشین خط تولید، دستگاهی برای قواره کردن سنگ است.



(ب)



(الف)

شکل ۱-۲: کوپ‌های سنگی تهیه شده برای برش با دیسک‌های برش  
(الف) کوپ‌های باقواره (ب) کوپ‌های بی‌قواره

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

<sup>۲</sup> Configuration

برای قواره سنگ می‌توان از دستگاه‌های تک‌لام<sup>۱</sup> که متشکل از تیغه‌ای فولادی است و حدود ۳۵ تا ۳۷ دندانه الماس بر روی آن نصب شده است، استفاده کرد. این دستگاه با برش سنگ از یک یا چند طرف سطوحی صاف با ابعادی منظم و متناسب را بر روی سنگ ایجاد می‌کند. در بعضی از کارخانه‌ها به جای تک‌لام از سایر دستگاه‌های برش مانند سیم برش الماسه<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. ویژگی‌هایی نظیر ابعاد محصول نهایی، جنس سنگ و سختی آن از جمله عواملی هستند که در انتخاب روش و دستگاه مورد نیاز مؤثرند. در نهایت به منظور تهیه سنگ پلاک، بلوک سنگ مشابه شکل (۲-۲) از قسمتی که مسطح‌تر است توسط جرثقیل روی حمّال قرار داده می‌شود و توسط ریل‌های مخصوص به زیر قله‌بر<sup>۳</sup> کشیده می‌شود. پس از آن که سنگ در وضعیت مناسب برش قرار گرفت، توسط دیسک‌های برش یا در اصطلاح معمول قله‌بر، بریده می‌شود.



(ب)



(الف)

شکل ۲-۲: آماده‌سازی بلوک سنگی برای برش با دیسک برش‌دهنده

(الف) کشیدن بلوک سنگی به زیر قله‌بر توسط حمّال (ب) قرار دادن سنگ در وضعیت مناسب برش

<sup>۱</sup> Single blade cutter

<sup>۲</sup> Diamond wire saw

<sup>۳</sup> Block cutter

قله‌برها از دو قسمت عمده شامل تیغه‌های دایره‌ای شکل (دیسک) و سگمنت‌های الماسی تشکیل شده‌اند. با استفاده از این دستگاه بلوک سنگ مورد نظر توسط یک یا چند دیسک موازی به صورت هم‌زمان برش می‌خورد و به شکل پلاک درمی‌آید. برش سنگ با قله‌بر به صورت یک مرحله‌ای و یا چند مرحله‌ای انجام می‌گیرد. روش یک مرحله‌ای معمولاً برای سنگ‌های نرم و نیمه سخت مورد استفاده قرار می‌گیرد که برش تنها در یک حرکت و به اندازه عرض پلاک مورد نیاز و البته حداکثر به اندازه عمق برش انجام می‌شود. روش چند مرحله‌ای برای سنگ‌های سخت به کار می‌رود که چندین دیسک عمودی که مراکزشان در یک امتداد است برش سنگ را در چندین مرحله انجام می‌دهند؛ به طوری که در هر مرحله چند سانتی متر در سنگ نفوذ کرده تا به عمق نهایی برسند. تفاوت اصلی روش برش تک مرحله‌ای و چند مرحله‌ای، نحوه حرکت دیسک‌ها پس از انجام هر مرحله برش است. در برش تک مرحله‌ای، برش تنها در حرکت رفت دیسک انجام می‌شود و بعد از برش عمودی، دیسک به عقب برگشته تا برای برش پلاک بعدی آماده شود. این در حالی است که در برش چند مرحله‌ای پس از هر مرحله برش، دیسک‌ها برای برش بعدی ضمن حرکت به عقب حرکت انتقالی عمودی به سمت پایین نیز دارند. همچنین در برش تک مرحله‌ای در صورتی که دستگاه تک دیسک باشد انعطاف پذیری کامل برای تغییر ضخامت سنگ به اندازه دلخواه وجود دارد ولی در برش چند مرحله‌ای ضخامت سنگ‌های برش خورده تنها می‌تواند به اندازه فاصله بین دیسک‌های عمودی باشد و نمی‌توان هیچ گونه تغییری در ضخامت سنگ ایجاد کرد. شکل (۲-۳) نحوه برش سنگ توسط یک تک دیسک به صورت تک مرحله‌ای و مراحل آماده‌سازی پلاک‌های سنگی را نشان می‌دهد. یکی از نکات مهم و قابل توجه، استفاده از آب یا دیگر مواد خنک‌کننده برای خنک نگه داشتن تیغه‌های الماسه است. یکی از دلایلی که باعث فرسودگی و سایش بدنه فولادی در زیر مقطع اتصال سگمنت‌ها با بدنه می‌شود، عدم استفاده از آب کافی و شسته نشدن سریع زائده‌های برش است. این امر همچنین باعث داغ شدن بیش از حد بدنه و در نتیجه ایجاد شکاف و از بین رفتن سگمنت‌ها

می‌شود. بنابراین برای به حداقل رساندن ساییدگی تیغه الماسی باید حجم مناسبی از سیال به کار برده شود. کاربرد آب به عنوان روان کار، برشی نرم تر و هموارتر و کیفیت سطح بهتری را ایجاد می‌کند و باعث می‌شود تراشه‌های تولید شده به شکل بهتری از محیط برش خارج شوند.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

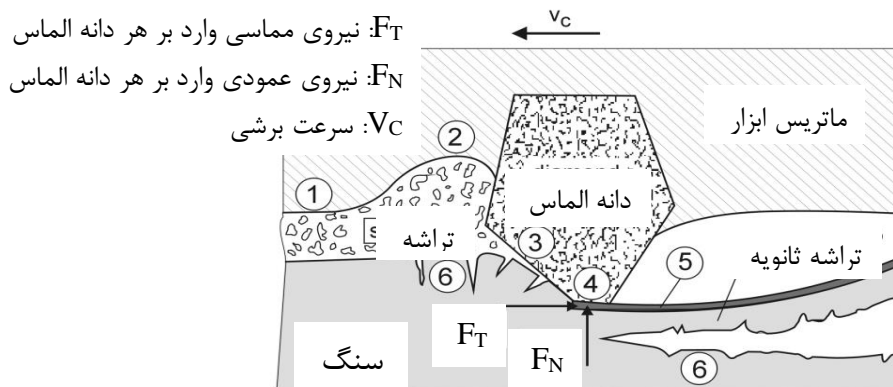
شکل ۲-۳: مراحل تهیه پلاک‌های سنگی

(ب) برش‌های سنگی ایجاد شده پس از چند مرحله برش  
(د) پلاک‌های سنگی آماده شده برای فروش

(الف) برش سنگ برای ایجاد پلاک‌های سنگی  
(ج) انتقال پلاک سنگی بریده شده به مرحله بعد

## ۴-۲ فرایند برش<sup>۱</sup>

به منظور آشنایی با چگونگی برش سنگ توسط برش دهنده‌های دیسکی، لازم است که مکانیزم برش سنگ‌ها مورد بررسی قرار گیرد. پس از آن که ابزار برش در تماس با سنگ قرار گرفت با شروع خرد شدن، ترک‌های جانبی در سنگ شروع به رشد می‌کنند. افزایش اندازه ناحیه شکسته و امتداد ترک‌های جانبی تا سطح آزاد، منجر به برش کامل سنگ خواهد شد. با این که معمولاً اصطلاح برش برای این فرایند به کار می‌رود، این فرآیند یک فرآیند سایشی است. فرآیند برش سنگ نتیجه حرکت سگمنت‌های الماسی بر روی سطح برش<sup>۲</sup> و نفوذ دانه‌های الماس در داخل سنگ است. دانه الماس با خراشیدن و شکافتن سطح برش موجب تشکیل تراشه<sup>۳</sup> و ایجاد سطح جدید برای دانه الماس بعدی می‌شود. بنابراین تشکیل تراشه را می‌توان تخریب سطح برش با استفاده از دیسک برش الماسی دانست. شکل (۴-۲) نمایی از یک دانه الماس در حال برش و تعامل نیروهای موجود بین دانه الماس و سطح خراشیده شده از سنگ را نشان می‌دهد (Mikaeil et al, 2011).



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

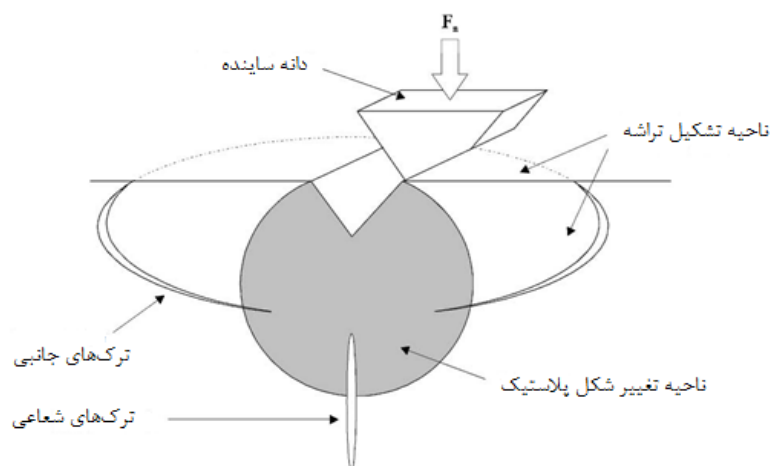
شکل ۴-۲: تعامل نیروهای موجود میان دانه الماس و سطح خراشیده شده از سنگ (Mikaeil et al, 2011)

<sup>۱</sup> Sawing

<sup>۲</sup> Work piece

<sup>۳</sup> Chip

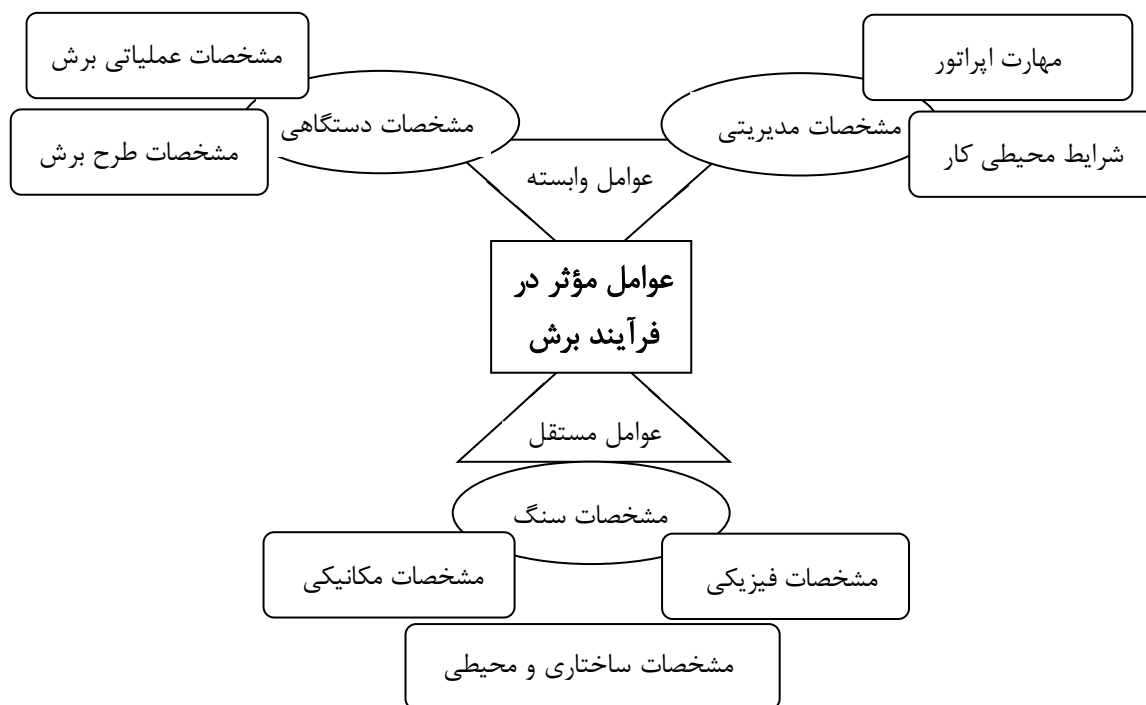
در زمان تشکیل تراشه اولیه تنش فشاری اعمال شده از طرف دانه الماس، موجب تغییر شکل پلاستیک در بخشی از سنگ که در زیر دانه الماس قرار دارد می‌شود. با توجه به ماهیت ترد سنگ، تغییر شکل پلاستیک و تنش‌های فشاری اعمال شده ترک‌هایی را به دو صورت شعاعی و جانبی در ناحیه‌ی تحت برش ایجاد می‌کنند. در حقیقت، تنش‌های کششی در درون ناحیه‌ی تغییر شکل پلاستیک منشأ تشکیل این ترک‌ها هستند. در نهایت پس از حذف بار اعمالی، تمرکز تنش‌های کششی باقیمانده روی نوک ترک‌ها موجب گسترش ترک‌ها می‌شود. شکل (۲-۵) شروع ترک‌های جانبی از زیر ناحیه تغییر شکل پلاستیک و گسترش آن‌ها تا سطح سنگ را نشان می‌دهد. پس از آن تراشه‌های ثانویه در زیر دانه الماس در اثر ترک‌های جانبی و شکست ترد ایجاد می‌شوند. این شکست ترد و تنش کششی بحرانی نتیجه یک بازگشت الاستیکی شدید در اثر تغییر ناگهانی تنش است. عمدتاً تراشه‌های ایجاد شده در یک برش موفق نیز از این نوع هستند. در نهایت حذف تراشه‌ها و کاهش دمای محیط به کمک جریان سیال سرد، در آخرین مرحله از فرآیند برش قرار دارد. فشار سیال تراشه‌های ایجاد شده را از سطح برش خارج کرده و موجب کاهش دمای ناحیه میان سگمنت و سطح برش می‌شود (Konstanty, 2002).



شکل ۲-۵: تشکیل ترک‌های جانبی و شعاعی در ناحیه‌ای با تغییر شکل پلاستیک در اثر برش (Konstanty, 2002).

## ۵-۲ عوامل مؤثر در فرآیند برش سنگ

عوامل مؤثر در فرآیند برش سنگ را می‌توان شامل مشخصات قطعه کار یا سنگ، مشخصات برش و مشخصات مدیریتی دانست. سنگ به عنوان میزبان عملیات برش، فرآیند برش را به شدت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین مشخصات مربوط به سنگ جزء عوامل مستقل یا به بیان ساده‌تر غیر قابل کنترل شناخته می‌شوند. در کنار مشخصات سنگ، مشخصات برش نیز نقش مهمی را در افزایش راندمان و بهینه‌سازی فرآیند برش ایفا می‌کند. با تنظیم و انتخاب صحیح این عوامل می‌توان به یک الگوی صحیح و مناسب اقتصادی دست یافت. بنابراین مشخصات برش به عنوان عوامل وابسته و قابل تغییر مطرح می‌شوند؛ چرا که امکان تغییر آن‌ها بر اساس خصوصیات سنگ وجود دارد. شکل (۶-۲) عوامل مؤثر در فرآیند برش را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد (Mikaeil et al, 2011). در ادامه فصل هر یک از این عوامل تشریح شده‌اند.



شکل ۶-۲: عوامل مؤثر در فرآیند برش



## ۱-۵-۲ مشخصات سنگ

یکی از مهم‌ترین فاکتورها در انتخاب ابزار برش مناسب، شناخت نوع سنگ قابل برش و آشنایی با مشخصات آن می‌باشد. این مشخصات شامل استحکام، تردی، مقاومت در برابر ضربه، اندازه دانه‌ها، بافت سنگ، چسبندگی بین دانه‌های سنگ، درزه‌ها و خلل و فرج موجود در سنگ هستند که نقش مهمی را در فرآیند برش ایفا می‌کنند و از آنجایی که غیر قابل تغییر هستند شناخت آن‌ها قبل از انجام عملیات برش، اهمیت زیادی دارد. با توجه به گستردگی مشخصات سنگ به منظور سهولت در بررسی، می‌توان این عوامل را در سه گروه مشخصات فیزیکی، مشخصات مکانیکی و مشخصات ساختاری بررسی کرد. در این راستا خواص مذکور بایستی با معیارهای استاندارد مطابقت داشته باشند تا بتوان ابزار برش مناسب را بر اساس آن‌ها انتخاب نمود. در بخش‌های بعد به طور مختصر به شرح این مشخصات پرداخته شده است.

## ۱-۱-۵-۲ مشخصات فیزیکی سنگ‌ها

شناخت ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌ها ابتدایی‌ترین بخش مطالعه هر سنگ است. مهم‌ترین این ویژگی‌ها نوع و درجه سیمانی شدن، تخلخل، چگالی و بافت سنگ هستند. نیروی به هم چسبی به‌عنوان مهم‌ترین خصوصیت فیزیکی سنگ‌ها، حاصل نیروی جاذبه بین مولکول‌های یک جسم یا ماده است. در واقع این نیرو یک نیروی درون‌زا و عامل مقاومت ماتریس سنگ در مقابل نیروهای خارجی جدا کننده مولکول‌ها است (اصانلو، ۱۳۸۲). واضح است که هرچه استحکام و چسبندگی بین دانه‌ها بیشتر باشد، امکان تشکیل و رشد ترک‌های جانبی و به دنبال آن ضخامت تراشه حاصل کاهش می‌یابد که این منجر به کاهش سرعت برش خواهد شد. در سنگ‌های آهکی با ساختار لایه لایه، چسبندگی بین لایه‌ها کمتر از خود لایه‌ها است. این امر منجر به تشکیل و جدا شدن تراشه‌های ثانویه به صورت دانه‌های بزرگ در جهت لایه‌ها می‌شود. بنابراین افزایش کیفیت سیمانی شدن، افزایش مقاومت ماتریس سنگ و کاهش نرخ برش سنگ را به دنبال خواهد داشت (میکائیل، ۱۳۹۰).

با توجه به اینکه سنگ‌ها اجسام کاملاً توپری نیستند، تخلخل را می‌توان به صورت خلل و فرج و یا حفره‌های مرتبط و مجزا در آن‌ها دید. این حفره‌ها ممکن است در زمان تشکیل سنگ به وجود آمده باشند (حفره‌های اولیه) و یا نتیجه فرآیندهایی مثل هوازدگی، دگرسانی و یا تبلور مجدد باشند (تخلخل ثانویه). شکل و اندازه این حفره‌ها نیز متفاوت خواهد بود، بنابراین مطالعه آن‌ها اهمیت زیادی در تعیین خواص مهندسی سنگ دارد؛ به طوری که هر چه سنگ متخلخل‌تر باشد مقاومت مکانیکی کمتری خواهد داشت (وفائیان، ۱۳۷۱).

یکی دیگر از خصوصیات فیزیکی، چگالی سنگ‌هاست که می‌توان آن را نسبت جرم مخصوص سنگ به جرم مخصوص آب یا نسبت وزن مخصوص سنگ به وزن مخصوص آب دانست. چگالی تابع منافذ، درزه و شکاف‌ها و سایر فضاها با وجود در سنگ است، به طوری که چگالی یک نمونه مشخص سنگ، با افزایش عمق و در نتیجه افزایش فشار سنگ‌های فوقانی و بسته شدن درزه و ترک‌های موجود در سنگ بیشتر می‌شود. با توجه به اینکه چگالی دانه‌ای اکثر کانی‌ها نزدیک به هم است، اختلاف در چگالی سنگ‌ها بیشتر مربوط به تخلخل آن‌هاست. بنابراین همبستگی زیادی بین چگالی و تخلخل وجود دارد (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰). با توجه به رابطه مستقیم چگالی با مقاومت سنگ، می‌توان گفت که سنگ‌های متراکم‌تر و چگال‌تر، نرخ برش کمتری خواهند داشت (Kahraman and Gunaydin, 2008).

بافت نیز به عنوان یک مشخصه ذاتی، یکی از فاکتورهای مهم در تعیین رفتار مهندسی سنگ است که خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ و عملکرد تجهیزات برش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کیفیت و کمیت بافت سنگ به منشأ تشکیل و فرآیندهای زمین‌شناسی اعمال شده در طول عمر سنگ بستگی دارد. بافت معمولاً شامل دو بخش دانه و خمیره است که مشخصات دانه‌ای نسبت به خمیره تأثیر بیشتری دارد. اندازه دانه‌ها، شکل و جهت‌گیری دانه‌ها، نسبت دانه‌ها و ماتریکس سنگ به عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های بافتی سنگ هستند (میکائیل و همکاران، ۱۳۸۸).

## ۲-۱-۵-۲ مشخصات مکانیکی سنگ‌ها

خواص مکانیکی سنگ، معرف میزان مقاومت آن در مقابل نیرویی است که از خارج به آن وارد می‌شود. به عبارت دیگر، بیشترین مقدار نیروی قابل تحمل برای یک سنگ، بدون آن که سنگ را متحمل تغییر شکل یا شکستگی کند، با توجه به خواص مکانیکی مشخص می‌شود (اصانلو، ۱۳۸۲). مهم‌ترین خصوصیت مکانیکی سنگ‌ها، پارامترهای مقاومتی سنگ است. مقاومت سنگ را می‌توان میزان پایداری سنگ در مقابل تنش‌های خارجی دانست. با افزایش استحکام و مقاومت سنگ، تشکیل تراشه ثانویه مشکل‌تر شده و مشخصاً نیروی برشی بیشتری برای تشکیل مقدار مشخصی از تراشه لازم است. مقاومت ماده سنگ یا سنگ بکر به عنوان یک پارامتر اصلی در اکثر سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ مورد توجه قرار گرفته است. مقاومت فشاری، یکی از پارامترهای مقاومتی سنگ و مهم‌ترین و پرکاربردترین ویژگی سنگ است و جزء جدایی‌ناپذیر قضاوت‌های مهندسی در مورد یک سنگ به شمار می‌رود. عوامل مؤثر بر مقاومت فشاری تک محوره را می‌توان شامل عوامل داخلی و عوامل خارجی دانست. عوامل داخلی بسته به خصوصیات ذاتی سنگ و عوامل خارجی وابسته به روش آزمایش، شرایط محیطی و شخص آزمایش‌کننده است. بنابراین انجام آزمایش تک محوری، مستلزم آماده‌سازی دقیق نمونه است. یکی دیگر از پارامترهای مهم مقاومتی سنگ، مقاومت کششی سنگ است. این مقاومت در واقع حداکثر تنش کششی است که یک سنگ می‌تواند تحمل کند. این دو مقاومت مهم‌ترین پارامترهایی هستند که در بیشتر مطالعات در زمینه قابلیت برش سنگ مورد توجه قرار گرفته‌اند. علاوه بر این دو پارامتر، پارامترهای مقاومتی دیگری چون مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت ضربه‌ای، مقاومت برشی و مقاومت خمشی نیز در برخی از مطالعات مربوط به قابلیت برش سنگ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بدین ترتیب می‌توان گفت که افزایش پارامترهای مقاومتی سنگ با افزایش مقاومت مرزی دانه‌ها و ماتریس سنگ و کاهش قدرت تراشه برداری دانه الماس، نرخ برش سنگ را کاهش می‌دهد (Kahraman et al, 2004).

علاوه بر پارامترهای مقاومتی، سختی<sup>۱</sup> نیز یکی از مفاهیم رایج برای توصیف رفتار سنگ است که تابعی از عوامل ذاتی چون نوع کانی‌ها، ابعاد دانه‌ها، چسبندگی مرزی کانی‌ها، مقاومت و رفتار الاستیک و پلاستیک سنگ می‌باشد. ترکیب این عوامل تعیین‌کننده سختی سنگ است. سختی را می‌توان با مقاومتی که کانی یا سنگ در مقابل ابزار خراش‌دهنده (ساینده) از خود نشان می‌دهد تا خراش (سایش) در آن ایجاد نشود بررسی کرد. ابزار ساینده در تماس با سنگ، طی حرکتی (نیرویی) باعث ساینده‌گی کانی یا سنگ می‌شود. بنابراین مقاومت سنگ در برابر خراش حاصل از جسم دیگر، سختی استاتیکی و مقاومت سنگ در برابر ضربه سختی دینامیکی نامیده می‌شود. لازم به ذکر است که این دو سختی با یکدیگر مساوی نیستند. از طرف دیگر همه کانی‌ها یا سنگ‌ها نیز در مقابل اجسام خراش‌دهنده انعطاف‌پذیر نیستند. بنابراین اجسام خراش‌دهنده و خراش‌پذیر نیز از نظر خراش‌دهندگی طبقه‌بندی می‌شوند (اصانلو، ۱۳۸۲). برای ارزیابی سختی سنگ شاخص‌هایی چون عدد چکش اشمیت<sup>۲</sup>، سختی موهس<sup>۳</sup>، شور<sup>۴</sup>، نوپ<sup>۵</sup> و شاخص سختی ان‌سی‌بی<sup>۶</sup> ارائه شده‌اند. نتایج حاصل از تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش سختی، سرعت برش سنگ‌ها کاهش می‌یابد (Kahraman et al, 2004).

می‌توان گفت که هر جسم جامد زمانی که تحت تأثیر بار یا تنش قرار گیرد، مقداری تغییر در آن به وجود می‌آید. قابلیت تغییر شکل، نحوه شکست و نوع شکست سنگ‌ها به خاصیت الاستیک و پلاستیک آن‌ها بستگی دارد. اگر میزان تنش وارد شده به سنگ کم بوده و سنگ پس از انتقال تنش به حالت اولیه خود برگردد، این خاصیت برگشت‌پذیری سنگ پس از انتقال تنش را الاستیسیته می‌گویند. چنانچه این تنش موجب تغییر شکل دائمی در سنگ شود، پلاستیسیته نامیده می‌شود (اصانلو، ۱۳۸۲).

---

<sup>۱</sup> Hardness

<sup>۲</sup> Schmidt

<sup>۳</sup> Mohs

<sup>۴</sup> Shore

<sup>۵</sup> Knoop

<sup>۶</sup> NCB

خواص الاستیک سنگ توسط مدول الاستیک مشخص می‌شوند. بدیهی است که با تغییر مدول الاستیک و شاخص‌های تردی سنگ، به دلیل تغییر در مکانیزم تشکیل و رشد ترک‌های جانبی در سنگ و به دنبال آن تشکیل تراشه‌های ثانویه، قابلیت برش سنگ نیز تغییر می‌کند. با افزایش مدول الاستیک و شاخص‌های تردی سنگ، قابلیت برش سنگ کاهش می‌یابد (Ataei et al, 2012).

سایش را می‌توان پاسخ سنگ نسبت به عوامل مخرب فیزیکی تعریف کرد که میزان فرسایش سنگ در برابر عوامل فرساینده را نشان می‌دهد. قابلیت سایش سنگ به سختی کانی‌ها، اندازه و شکل دانه‌ها، قفل‌شدگی دانه‌ها و ماتریس سنگ بستگی دارد. به طوری که دانه‌های تیز و گوشه‌دار در مقایسه با دانه‌های گرد سایش بیشتری ایجاد می‌کنند (فهمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰). در فرآیند برش، ساینده‌گی خاصیتی از سنگ است که قدرت از بین بردن سگمنت‌هایی از جنس فولاد، کربور تنگستن یا الماس را دارد. به طوری که تراشه‌های تیز و گوشه‌دار خراش‌های عمیق بر روی ابزار برش ایجاد کرده و مانع از خرد شدن سنگ تحت انرژی منتقل شده از طرف سگمنت می‌شوند و خرده‌های ریز و گرد سنگ موجب صیقل دادن سگمنت و کندی دیسک می‌شوند. میزان کوارتز محتوی، اندازه دانه‌ها و مقاومت برشی سنگ از عوامل مؤثر در ایجاد سایش در سنگ‌ها هستند. در این میان بیشترین تأکید بر روی میزان سیلیس بوده است، به طوری که تشخیص میزان ساینده‌گی سنگ‌ها با توجه به میزان سیلیس امکان‌پذیر است. سنگ‌های آهنی به دلیل میزان سیلیس کمتر، خاصیت ساینده‌گی کمتری دارند. برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ، شاخص‌هایی چون اندیس سایش سرشار<sup>۱</sup>، فاکتور ساینده‌گی شیمازک<sup>۲</sup> و تست لوس آنجلس<sup>۳</sup> به کار می‌روند. مطالعات انجام شده در زمینه بررسی تأثیر سایش بر نرخ برش سنگ نشان می‌دهد که افزایش ساینده‌گی سنگ‌ها با افزایش سایش ابزارهای الماسه، سرعت برش و قابلیت برش سنگ را کاهش می‌دهد (میکائیل، ۱۳۹۰).

---

<sup>۱</sup> Cerchar abrasiveness Index

<sup>۲</sup> Schmiasek abrasivity factor

<sup>۳</sup> Los Angeles abrasion test

## ۲-۵-۳ مشخصات ساختاری و محیطی سنگ

مشخصات ساختاری سنگ تابع عوامل زمین‌شناسی مانند لایه‌بندی، کلیواژ و جهت یافتگی کانی‌ها، درزه و ترک، سطوح گسل و یا هر نوع شکاف ناشی از گسل یا چین خوردگی است که شرایط مناسبی را برای تأثیرگذاری بالای عوامل هوازدگی و یخبندان به وجود می‌آورند. به عبارت دیگر هر وضعی در ساختار سنگ، تأثیر مخرب عوامل هوازدگی را افزایش می‌دهد. بنابراین کلیه عوامل محیطی مانند فرسایش و هوازدگی و وجود ضعف‌های ساختاری اشاره شده در سنگ، با کاهش پارامترهای مقاومتی، نرخ برش سنگ را افزایش می‌دهند. به طوری که می‌توان گفت در یک میزان ثابت از نیروی برش، با افزایش درزه و ترک‌ها در سنگ، قابلیت تراشه‌برداری دانه الماس و به دنبال آن نرخ برش افزایش می‌یابد (Ersoy and Atici, 2004).

## ۲-۵-۲ مشخصات دستگامی

در کنار مشخصات سنگ، مشخصات برش نیز یکی از عوامل مهم در بررسی چگونگی برش سنگ است. مشخصات برش در رده پارامترهای قابل کنترل، نقش بسیار مهمی را در افزایش راندمان و بهینه‌سازی فرآیند برش ایفا می‌کند. چرا که پیش‌بینی عملکرد دستگاه‌های برش، در طراحی و برنامه‌ریزی کارخانه‌های سنگ‌بری نقش بسزایی دارد. بازده فرآیند نیز با توجه به سایش ابزار، انرژی مصرفی و نرخ تولید سنجیده می‌شود. بنابراین افزایش نرخ تولید، کاهش مصرف دیسک و کاهش مصرف انرژی، نیازمند یک الگوی صحیح و مناسب اقتصادی است. مشخصات برش را می‌توان در دو بخش مشخصات عملیاتی برش و مشخصات طرح برش مورد ارزیابی قرار داد.

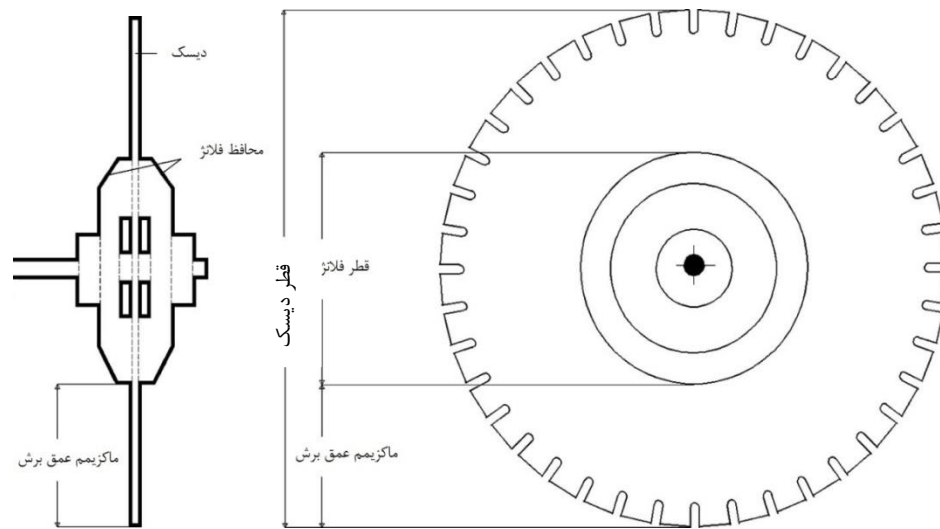
## ۱-۲-۵-۲ مشخصات طرح برش

مشخصات طرح برش به عنوان یکی از مهم‌ترین مشخصات قابل کنترل در فرآیند برش بوده و با توجه به نوع سنگ، طراحی و انتخاب می‌شود. این گروه از عوامل را می‌توان در سه دسته مشخصات دیسک، مشخصات سگمنت و روش برش مورد بررسی و ارزیابی قرار داد.

یک دیسک الماسی شامل یک بدنه دیسکی شکل از جنس فلزی از فولاد آلیاژی و سگمنت‌های الماسی در پیرامون آن می‌باشد. نیروهای وارده به دیسک را می‌توان به دو صورت مؤلفه‌های مماسی و عمودی مورد بررسی قرار داد. نیروهای عمودی موجب نفوذ دانه الماس در سنگ و شکل‌گیری تراشه و نیروهای مماسی باعث برداشتن تراشه می‌شوند. در مجموع عملکرد این دو نیرو موجب برش سنگ می‌شود. تنش‌های موجود در بدنه دیسک به واسطه این نیروها به صورت تنش‌های فشاری و ممان خمشی ظاهر می‌شوند. ایجاد کمانش و انحراف دیسک یا شکست ابزار نتیجه افزایش این نیروها از حد مجاز است. یکی از مشخصه‌های مهم ابزار برش دیسکی شعاع عملکرد دیسک است که معرف حداکثر عمق برش در فرآیند برش سنگ است. رابطه (۱-۲) نحوه محاسبه شعاع عملکرد دیسک را نشان می‌دهد (Karakus, 2006).

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

در این رابطه  $d_{\max}$  شعاع عملکرد دیسک (حداکثر عمق برش)،  $D_{\text{saw}}$  قطر دیسک و  $D_{\text{flange}}$  قطر فلانژ دیسک است. شکل (۱-۲) حداکثر عمق برش یک دیسک را با توجه به قطر دیسک و قطر فلانژ دیسک نشان می‌دهد.



شکل ۲-۷: حداکثر عمق برش دیسک با توجه به شعاع دیسک و شعاع فلانژ دیسک (Karakus, 2006)

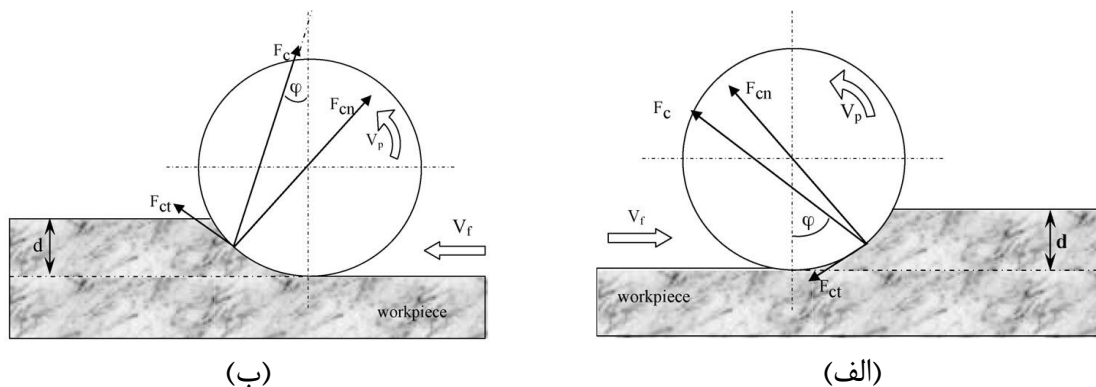
سگمنت‌های الماسی نیز توسط لحیم جوش یا جوش لیزری به بدنه فلزی دیسک متصل شده‌اند. ساختار سگمنت الماسی را می‌توان متشکل از دو بخش ماتریس فلزی و دانه الماس دانست. بنابراین کارایی برش سگمنت به خصوصیات این دو بخش بستگی دارد. دانه‌های الماس به عنوان نقاط برنده بر روی سگمنت قرار گرفته‌اند. این دانه‌ها نیز درون ماتریس محکمی که وظیفه حفظ و نگهداری آن‌ها را بر عهده دارد، نگه داشته می‌شوند. خصوصیات این دانه‌ها مانند اندازه و شکل دانه، سختی و چقرمگی آن و حتی تراکم و غلظت دانه‌های الماس در فرآیند برش مؤثرند. انتخاب نوع و اندازه دانه‌های الماس در ابزارهای برش با توجه به میزان سختی و ساینده‌گی سنگ انجام می‌شود. در صورتی که استحکام دانه‌های الماس پایین باشد، تحت تنش‌های وارده به سادگی شکسته می‌شوند. این امر موجب کندی دیسک و پدیده لیزش‌دگی در فرآیند برش می‌شود. کریستال‌های مکعب هشت وجهی با حداکثر استحکام و مقاومت سایشی، بهترین نوع دانه‌های الماس در فرآیند برش سنگ هستند. یک برش موفق زمانی رخ می‌دهد که ماتریس و دانه الماس نرخ سایش منظمی داشته باشند. در صورتی که ماتریس زودتر از دانه الماس فرسوده شود، دانه الماس زودتر از زمان مورد نظر و بدون آن که از تمام ظرفیت برش آن استفاده شود، از



سگمنت کننده و از فرآیند برش خارج می‌شود. برعکس این حالت، اگر ماتریس دیرتر از زمان مورد نظر ساییده شود، فاصله بین لبه برنده الماس و سطح ماتریس رفته رفته کاهش می‌یابد و تراشه به درستی از ناحیه برش خارج نمی‌شود و پیوسته از توانایی برش کاسته می‌شود. بنابراین استحکام و سختی ماتریس باید به گونه‌ای باشد که برای ایجاد لبه‌های برنده دانه‌های الماس به اندازه کافی ساییده شود تا حرکت لبه برنده و جریان تراشه‌برداری به راحتی انجام شود (میکائیل، ۱۳۹۰).

روش برش نیز یکی دیگر از عوامل مؤثر در نرخ برش سنگ است. برش سنگ‌های ساختمانی معمولاً به دو صورت برش رو به بالا و برش رو به پایین انجام می‌شود. در هر دو روش جهت و زوایای نیروهای برش، که نقش مهمی در فرآیند برش سنگ دارند، با یکدیگر متفاوت است. در روش برش رو به پایین یک دانه الماس در اولین لحظه تماس بیشترین عمق نفوذ خود را دارد. پس از آن رفته رفته از عمق برش دانه کاسته شده و در نهایت تماس آن با سنگ قطع می‌شود. بنابراین در این نوع از برش، نرخ سایش در یک سگمنت با سگمنت‌های دیگر متفاوت است. در روی یک سگمنت ناحیه‌ای که زودتر وارد منطقه برش می‌شود سایش بیشتری ایجاد می‌شود و دانه‌های الماس بعدی یا سگمنت بعدی درگیری کمتری با سنگ خواهند داشت. این در حالی است که در برش رو به بالا، دانه‌های الماس در ابتدا به سطح کار مماس می‌شوند و به تدریج عمق نفوذ آن‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین عمق برش دانه در لحظه خارج شدن از شیار برشی، بیشترین مقدار خود را دارد. در این روش ضخامت تراشه از صفر شروع شده و سپس به حداکثر خود می‌رسد. در ابتدای تماس، دانه تنها با ماده سنگ مماس است که نتیجه آن سایش اصطکاکی دانه خواهد بود که منجر به تخت شدن دانه می‌شود. در روش برش رو به پایین به دلیل وجود نیروهای ضربه‌ای مکرر و عمق برش زیاد، در ابتدای برش رشد ترک‌ها و شکست ترد در تراشه‌ها بیش از روش برش رو به بالاست. به همین دلیل معمولاً نیروهای برشی در روش برش رو به پایین کمتر از روش برش رو به

بالاست (Buyuksagis, 2007). شکل (۲-۹) حالات مختلف برش و نیروهای برشی وارده بر دیسک را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۸: روش‌های مختلف برش و نیروهای برشی مربوطه (Buyuksagis, 2007)

(الف) برش رو به بالا (ب) برش رو به پایین

## ۲-۲-۵-۲ مشخصات عملیاتی برش

نرخ پیشروی قطعه کار، عمق برش و سرعت محیطی از مهم‌ترین مشخصات عملیاتی برش هستند. سرعت محیطی معرف سرعت چرخش دیسک در زمان برش است. افزایش این سرعت موجب افزایش میزان سایش و از بین رفتن سگمنت‌ها در زمانی کوتاه‌تر از عمر مفید آن‌ها می‌شود. سرعت محیطی همراه با نیروهای وارده به دیسک تعیین‌کننده سرعت حرکت قطعه کار یا نرخ پیشروی هستند. استفاده از نرخ‌های پیشروی بالا نیز سبب سایش زودرس سگمنت‌ها و کاهش راندمان برش می‌شود. بنابراین بهترین عملکرد دیسک زمانی است که از یک نرخ پیشروی مناسب استفاده شود. عمق برش، میزان نفوذ دیسک در داخل سنگ در طول فرآیند برش است. نتایج حاصل از مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در سرعت محیطی ثابت، افزایش نرخ پیشروی و عمق برش موجب افزایش نیروی برش خواهد شد (Ersoy and Atici, 2004).

## ۶-۲ جمع‌بندی

در این فصل پس از بیان توضیحاتی از سنگ‌های ساختمانی کربناته و سنگ تراورتن، به عنوان سنگ مورد مطالعه در این تحقیق، دیسک‌های برش‌دهنده و نحوه برش سنگ توسط آن‌ها تشریح شد. پس از آن مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ شامل نوع و درجه سیمانی شدن، تخلخل، چگالی و بافت، پارامترهای مقاومتی، سختی، سایش و خواص الاستیک و پلاستیک، که تأثیر زیادی بر کیفیت برش دارند معرفی شدند. عامل مهم بعدی که در چگونگی برش سنگ تأثیر زیادی دارد، مشخصات برش است. این مشخصات نیز به عنوان عوامل وابسته و قابل تغییر در دو دسته مشخصات طرح برش و مشخصات عملیاتی برش معرفی شدند.



---

فصل سوم

سابقه علمی موضوع

---

### ۱-۳ مقدمه

در مهندسی سنگ همواره انتخاب پارامترهای مهم و ترکیب این پارامترها در کنار هم، یکی از مهم‌ترین مراحل در انجام یک تحقیق بوده است. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه قابلیت برش سنگ‌ها و بررسی نرخ برش، در مقیاس‌های مختلف صنعتی و آزمایشگاهی انجام گرفته است. در این میان برخی از محققین به بررسی تأثیر مشخصات سنگ در نرخ برش آن پرداخته‌اند و مهم‌ترین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ در فرآیند برش را معرفی کرده‌اند. برخی نیز تأثیر پارامترهای عملیاتی مانند نرخ پیشروی و عمق برش را در نتایج عملکرد برش سنگ‌های ساختمانی مد نظر قرار دادند. برخی از محققان در بررسی‌های خود روابطی را نیز ارائه کرده‌اند که در ادامه به برخی از تحقیقات انجام شده و روابط ارائه شده، اشاره شده است.

### ۲-۳ مطالعات انجام شده در زمینه قابلیت برش سنگ

تاکنون تحقیقات زیادی به منظور پیش‌بینی تأثیر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و به‌خصوص پارامترهای مقاومتی، در قابلیت برش سنگ‌ها صورت گرفته است. علاوه بر این، برخی از محققین تأثیر پارامترهای عملیاتی را در عملکرد برش سنگ‌های ساختمانی بررسی کرده‌اند. در ادامه به برخی از مطالعات انجام شده اشاره شده است.

انگلز<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۳ تأثیر پارامترهای عملیاتی بر نرخ برش و ضخامت تراشه را مورد بررسی قرار داد. وی تحقیقات خود را بر روی نمونه‌هایی از سنگ گرانیت انجام داد و به این نتیجه رسید که نرخ برش و ضخامت تراشه با افزایش عمق و نرخ پیشروی، افزایش و با افزایش سرعت چرخش دیسک کاهش می‌یابد (Engles, 2003).

---

<sup>۱</sup> Engles

در سال ۲۰۰۴ قهرمان<sup>۱</sup> و همکارانش در تعیین ارتباط خواص مکانیکی سنگ با نرخ تولید، ۱۳ نمونه سنگ کربناته را در ترکیه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، عدد چکش اشمیت، شاخص بار نقطه‌ای، مقاومت ضربه‌ای، سایش لوس آنجلس و سرعت موج P<sup>۲</sup> را برای نمونه‌های آزمایش اندازه‌گیری کردند. علاوه بر این، پارامترهای عملیاتی مانند نرخ پیشروی دستگاه برش، قطر دیسک و عمق برش نیز توسط آن‌ها اندازه‌گیری شد. در نهایت با استفاده از تحلیل رگرسیون چندگانه و مدل‌های تخمینی، روابطی را میان نرخ برش و خصوصیات سنگ ارائه کردند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که افزایش پارامترهای مقاومتی سنگ، مقدار سرعت برش یا نرخ برش را کاهش می‌دهد (Kahraman et al, 2004).

دلگادو<sup>۳</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۵ به بررسی تأثیر سختی سنگ بر قابلیت برش آن پرداختند. آزمایش‌ها بر روی ۱۰ نوع سنگ گرانیتی در اسپانیا انجام شد. بررسی‌ها میان مقادیر سختی ویکرز اندازه‌گیری شده در مقیاس آزمایشگاهی و سرعت برش انجام شد. نتایج نشان داد که ارتباط نسبتاً خوب و با ضریب همبستگی بالا میان سختی ویکرز و سرعت برش وجود دارد و با افزایش سختی سنگ و درصد کوارتز سرعت برش کاهش می‌یابد (Delgado et al, 2005).

در سال ۲۰۰۵ بویوکساگیز<sup>۴</sup> و گوکتان<sup>۵</sup> در مطالعه تأثیر عمق برش و نرخ پیشروی بر روی انرژی ویژه برش، نمونه‌هایی از سنگ مرمر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌های آن‌ها رابطه معکوس میان میزان انرژی ویژه برش با دو پارامتر ذکر شده را نشان داد. آن‌ها دریافتند که انرژی ویژه برش با افزایش نرخ پیشروی و عمق برش کاهش خواهد یافت (Buyuksagis and Goktan, 2005).

---

<sup>۱</sup> Kahraman

<sup>۲</sup> P-wave velocity

<sup>۳</sup> Delgado

<sup>۴</sup> Buyuksagis

<sup>۵</sup> Goktan

قهرمان و همکارانش همچنین در سال ۲۰۰۶ قابلیت برش سنگ‌های کربناته را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار داد. وی برای ۸ نمونه سنگ کربناته سه پارامتر چسبندگی، تخلخل و زاویه اصطکاک داخلی را در آزمایشگاه و سرعت برش را در کارخانه فرآوری سنگ در ترکیه اندازه‌گیری کرد. قهرمان با بررسی ارتباط میان پارامترهای ذکر شده و سرعت برش سنگ با استفاده از شبکه‌های عصبی، نشان داد که ارتباط خوبی بین سرعت برش با زاویه اصطکاک داخلی و ضرب دو پارامتر تخلخل و چسبندگی برقرار است (Kahraman et al, 2006).

در سال ۲۰۰۷ بویوکساگیز در بررسی تأثیر حالات مختلف برش سنگ بر عملکرد دیسک برش، تغییرات نرخ سایش و انرژی ویژه برش برای ۶ نوع سنگ گرانیتی را در هر یک از دو حالت برش مورد آزمایش قرار داد. نتایج حاصل نشان داد که در شرایط برش رو به پایین نرخ سایش و انرژی ویژه برش کمتر است. وی علاوه بر این در بررسی ارتباط میان برخی از مشخصات فیزیکی و مکانیکی با دو معیار انرژی ویژه برش و نرخ سایش ویژه، مقاومت خمشی و درصد پلاژیوکلاز را به عنوان مهمترین مشخصات سنگ در پیش‌بینی انرژی ویژه برش و نرخ سایش معرفی کرد (Buyuksagis, 2007).

اوزچلیک<sup>۱</sup> نیز در سال ۲۰۰۷ تأثیر مشخصات بافتی سنگ مانند اندازه دانه‌ها و ضریب بافت را در میزان نرخ سایش سنگ‌های کربناته در فرآیند برش مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که میزان نرخ سایش با افزایش مقدار ضریب بافت افزایش می‌یابد و با افزایش اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد (Ozcelik, 2007).

قهرمان و گونایدین<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۸ عملکرد برش‌دهنده‌های دیسکی را برای ۸ نوع سنگ کربناته مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با انجام آزمایش‌های سختی، چگالی و تخلخل بر روی نمونه‌های مورد آزمایش و با استفاده از رگرسیون خطی ساده و چند متغیره، رابطه‌ی خطی را میان نرخ برش و پارامترهای

---

<sup>۱</sup> Ozcelik

<sup>۲</sup> Gunaydin



ذکر شده ارائه کرده و اضافه کردند که برای سنگ‌هایی با شاخص سختی بالاتر، تخلخل کمتر و مقادیر چگالی بالاتر، نرخ برش کمتر خواهد بود (Kahraman and Gunaydin, 2008).

میکائیل<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۳ با اشاره به اهمیت پیش‌بینی نرخ برش در تخمین هزینه‌ها و طراحی کارخانه‌های سنگ‌بری، سیستم طبقه‌بندی جدیدی را برای ارزیابی نرخ تولید سنگ‌های ساختمانی ارائه دادند. نتایج مطالعات آن‌ها مقاومت فشاری تک محوره، سختی موهس، فاکتور ساینده‌گی شیمازک و مدول الاستیسیته را به عنوان چهار عامل مهم در ارزیابی قابلیت برش سنگ‌های ساختمانی نشان داد (Mikaeil et al, 2013).

دینز توماس<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۵ در تعیین عملکرد دیسک‌های برش، رابطه میان مقادیر سختی اشمیت اندازه‌گیری شده را با خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ و نرخ برش بررسی کرد. او ابتدا ضریب دگرسانی<sup>۳</sup> را به صورت نسبتی از مقادیر سختی تعیین شده تعریف کرد و رابطه این ضریب را با پارامترهای مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، چگالی، تخلخل و سایش سرشار مورد بررسی قرار داد. پس از تعیین رابطه خوب میان این ضریب و پارامترهای مقاومتی و انجام برآزش‌های ساده میان نرخ برش و پارامترهای بررسی، در نهایت با استفاده از برآزش چند متغیره مدلی را برای پیش‌بینی نرخ برش بر اساس ضریب دگرسانی و شاخص سایش سرشار ارائه کرد (Tumac, 2015).

توماس همچنین در سال ۲۰۱۶ به منظور پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های ساختمانی، شبکه عصبی مصنوعی را مورد استفاده قرار داد. برای این منظور ۱۱ نمونه سنگ ساختمانی را مورد بررسی قرار داد. او در تعیین رابطه پیش‌بینی نرخ برش، مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، چگالی، تخلخل و سایش سرشار را به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفت (Tumac, 2016).

---

<sup>۱</sup> Mikaeil

<sup>۲</sup> Deniz Tumac

<sup>۳</sup> Deformation coefficient

### ۳-۳ روابط ارائه شده برای پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های ساختمانی

تاکنون روابط تجربی زیادی به منظور بهبود کیفیت برش سنگ‌های ساختمانی توسط محققین ارائه شده است. روابطی برای پیش‌بینی انرژی ویژه برش، نرخ تولید، عملکرد سایش دیسک و شدت جریان مصرفی دستگاه برش، نمونه‌ای از روابط ارائه شده در زمینه قابلیت برش سنگ هستند. جدول (۳-۱) نمونه‌هایی از روابط ارائه شده در زمینه پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های ساختمانی توسط محققین را نشان می‌دهد. در اکثر این روابط ارتباط میان نرخ برش و پارامترهای اندازه‌گیری شده با استفاده از برازش‌های ساده و چند متغیره تعیین شده است.

جدول ۳-۱: روابط تجربی ارائه شده توسط محققین به منظور پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های ساختمانی

رابطه ارائه شده	سال	نام محقق
$P = \frac{1}{0.00148 + 0.0017\sigma_c}$	۱۹۹۷	جیلان اغلو <sup>۱</sup> و گورگولو <sup>۲</sup>
$P = \frac{1}{-0.205 + 0.005I_c}$		
$P = \exp(4.4 - 0.283\sigma_c)$		
$P = 49.79 - 0.712SHV$		
$P = 0.056SHV + 0.88I_s$		
$P = 2.674\sigma_t - 0.143\sigma_c$		
$P = 0.36E + 0.025SHV$		
$P = -0.19SHV + 4.51I_s - 0.13\sigma_c$		
$P = 0.64SHV + 4.86I_s - 7.94\sigma_t + 0.43T$		

<sup>۱</sup> Ceylanoglu

<sup>۲</sup> Gorgulu

ادامه جدول ۳-۱: روابط تجربی ارائه شده توسط محققین به منظور پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های ساختمانی

رابطه ارائه شده	سال	نام محقق
$P = 0.096 \frac{R^{0.84} * d^{0.8} * ISI^{1.19}}{D^{0.41} * \sigma_t^{0.43}}$ $P = 398.11 \frac{R^{0.96} * d^{0.74}}{D^{0.57} * N^{0.31} * C^{0.07}}$ $P = 275.42 \frac{R^{0.95} * d^{0.76}}{D^{0.53} * N^{0.2} * \phi^{0.15}}$ $P = 302 \frac{R^{0.9} * d^{0.77}}{D^{0.5} * N^{0.29} * \sigma_c^{0.16}}$ $P = 47.86 \frac{R^{0.9} * d^{0.78}}{D^{0.49} * N^{0.1} * \sigma_t^{0.23}}$ $P = 229.09 \frac{R^{0.93} * d^{0.73}}{D^{0.44} * N^{0.18} * SHV^{0.38}}$ $P = 117.49 \frac{R^{0.95} * d^{0.75}}{D^{0.53} * N^{0.18} * I_s^{0.18}}$ $P = 11481.54 \frac{R^{0.94} * d^{0.76}}{D^{0.56} * N^{0.22} * ISI^{1.02}}$ $P = 17.78 \frac{R^{0.92} * d^{0.78} * LA^{0.24}}{D^{0.45} * N^{0.17}}$ $P = 63.1 \frac{R^{0.89} * d^{0.78}}{D^{0.44} * N^{0.15} * V_p^{0.37}}$	۲۰۰۴	قهرمان و همکاران
$P = -0.0812E_q + 5.235$ $P = -0.0243HV + 20.442$	۲۰۰۵	دلگادو و همکاران
$P = 7.46 \times (C \times n)^{0.19}$ $P = 138.83 \times e^{-0.048\phi}$ $P = -2.56 \ln(C) + 21.997$	۲۰۰۶	قهرمان و همکاران
$P = -1.622CAI + 0.347K + 10.692$	۲۰۱۵	توماس

در روابط ارائه شده داریم:

P: نرخ تولید ( $m^2/h$ )

$\sigma_c$ : مقاومت فشاری تک محوره (MPa)

$I_s$ : شاخص بار نقطه‌ای (MPa)

SHV: عدد چکش اشمیت

$\sigma_t$ : مقاومت کششی (MPa)

E: مدول الاستیسیته (GPa)

T: سفتی سنگ ( $kgf.cm/cm^3$ )

R: نرخ پیشروی ( $cm/s$ )

d: عمق برش (cm)

D: قطر دیسک (mm)

ISI: مقاومت ضربه‌ای (%)

N: سرعت چرخش دیسک (rpm)

C: چسبندگی (MPa)

$\varphi$ : زاویه اصطکاک داخلی ( $^\circ$ )

LA: مقاومت سایندگی لوس آنجلس (%)

$V_p$ : سرعت موج p

$E_q$ : درصد کوارتز (%)

HV: سختی ویکرز

n: تخلخل (%)

CAI: شاخص سایش سرشار

K: ضریب دگرسانی

### ۴-۳ جمع‌بندی

در مطالعات ذکر شده، محققان به بررسی تأثیر مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ و همچنین پارامترهای عملیاتی دستگاه برش بر روی نرخ برش سنگ‌ها پرداخته‌اند و پارامترهایی را به عنوان تأثیرگذارترین متغیرها برای سنگ‌های مورد مطالعه خود معرفی کردند. در این میان نیاز به ارائه مدلی برای پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های تراورتن ایران احساس می‌شود. نکته حائز اهمیت در ارائه این مدل، چگونگی انتخاب پارامترهای تأثیرگذار، توجه به عدم همبستگی بین متغیرها و بررسی رابطه برای نبود مشکل هم‌خطی است. بدیهی است که عدم توجه به هر یک از این موارد موجب پایین آمدن دقت، افزایش هزینه آزمایش‌ها و اتلاف وقت خواهد شد. بنابراین ارائه یک مدل که بتوان با کمترین تعداد آزمایش تمامی پارامترهای مهم سنگ را در آن جا داد، لازم و ضروری است.



---

فصل چهارم

جمع‌آوری اطلاعات و

ایجاد پایگاه داده‌ها

---

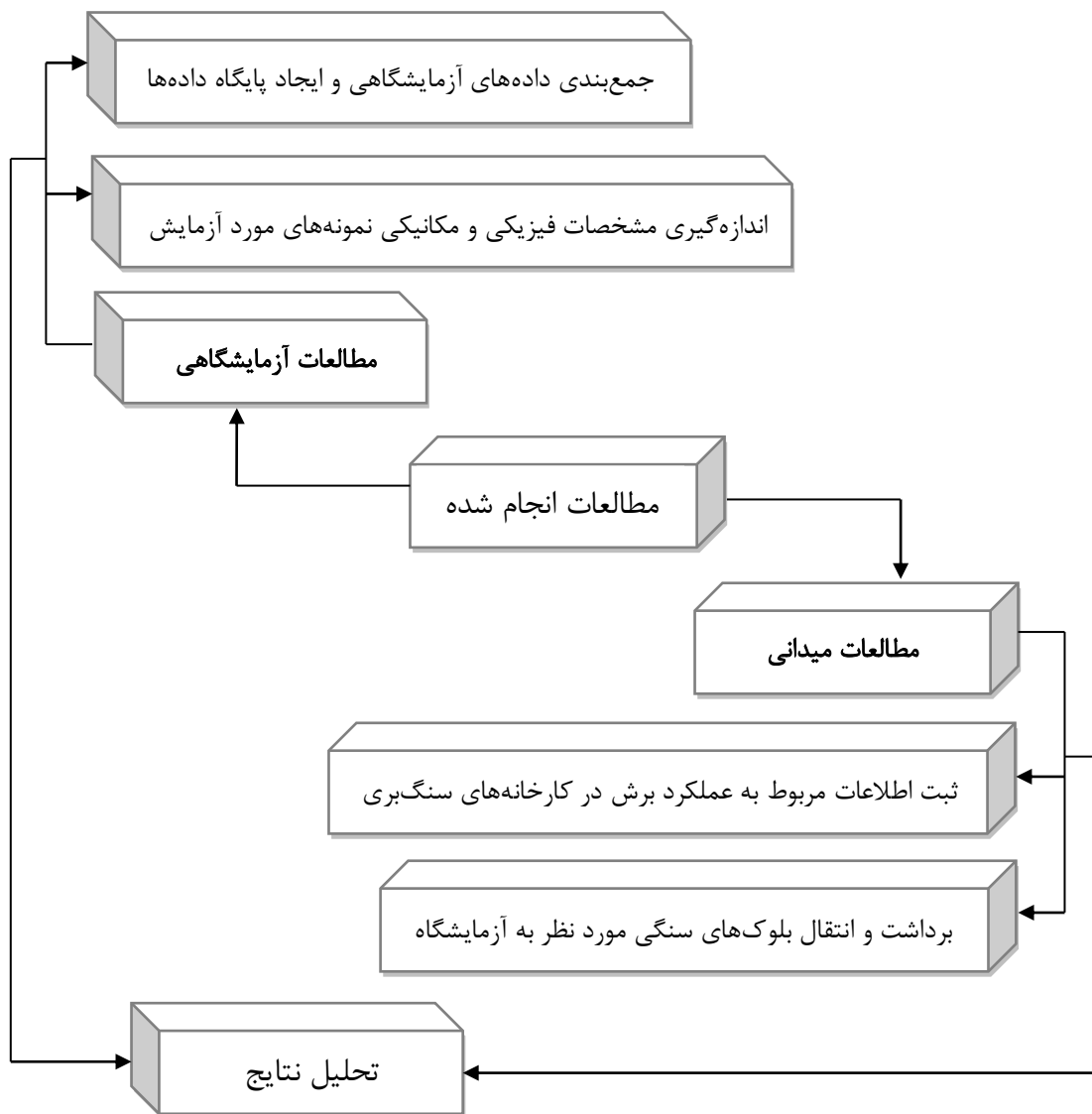
#### ۱-۴ مقدمه

در این تحقیق، به منظور پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های تراورتن، مطالعات آزمایشگاهی بر روی ۱۱ نمونه از این نوع سنگ انجام شد. مطالعات آزمایشگاهی انجام شده شامل آزمایش چگالی و تخلخل، آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، تست برزلی، بررسی بافت، آزمایش تعیین میزان سختی اشمیت، سایش لوس آنجلس و تعیین میزان سیلیس موجود در نمونه‌ها است. در ادامه شرح آزمایش‌های انجام شده و نتایج به دست آمده از هر آزمایش آورده شده است. در نهایت جدولی از اطلاعات اندازه‌گیری شده از نمونه‌های مورد آزمایش برای انجام تحلیل‌های آماری تهیه شده است.

#### ۲-۴ مطالعات میدانی و آزمایشگاهی

به منظور بررسی ارتباط میان مشخصات برش و خصوصیات سنگ، مطالعات آزمایشگاهی و میدانی بر روی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه انجام شد. این نمونه‌ها شامل ۱۱ نوع از سنگ‌های تراورتن بوده که از برخی از کارخانه‌های سنگ‌بری شهر محلات جمع‌آوری شده‌اند. در بخش آزمایشگاهی در ابتدا، کلیه نمونه سنگ‌ها به آزمایشگاه مکانیک سنگ انتقال یافتند و با تهیه نمونه‌های مورد نیاز برای هر آزمایش، هر نمونه برای تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی تحت شرایط استاندارد مورد آزمایش قرار گرفت. پس از آن از هر نمونه یک مقطع نازک برای بررسی بافت سنگ‌ها تهیه شد. علاوه بر این آنالیز شیمیایی برای تعیین درصد عناصر تشکیل‌دهنده هر نمونه توسط دستگاه XRF انجام شد. در بخش بعد مطالعات میدانی برای بررسی عملکرد برش در مقیاس صنعتی در برخی از این کارخانه‌های سنگ‌بری انجام شد. در این بخش از مطالعات نرخ برش و نرخ پیشروی برای کلیه نمونه‌های مورد بررسی اندازه‌گیری شد. شکل (۱-۴) مراحل انجام مطالعات را نشان می‌دهد.



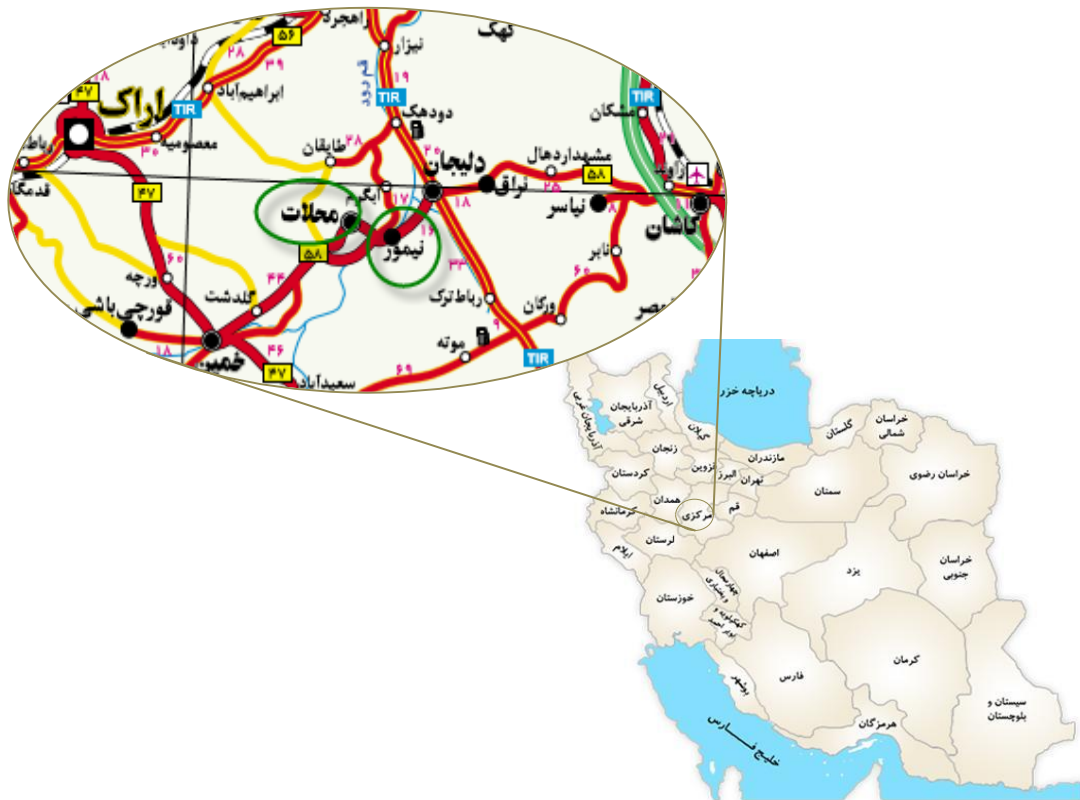


شکل ۴-۱: مراحل انجام مطالعات

#### ۴-۲-۱ مطالعات آزمایشگاهی

#### ۴-۲-۱-۱ جمع‌آوری نمونه‌های مورد آزمایش

به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی ۱۱ نمونه از سنگ‌های ساختمانی در برخی از کارخانه‌های سنگ‌بری استان مرکزی مورد بررسی قرار گرفتند. سنگ‌های مورد مطالعه از نوع تراورتن بوده و از کارخانه‌های سنگ‌بری واقع در شهر محلات و نیم‌پور این استان جمع‌آوری شدند. شکل (۴-۲) این نواحی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این نمونه سنگ‌ها متعلق به برخی از معادن سنگ‌بری در اطراف این دو شهر هستند. پس از برداشت نمونه‌ها و انتقال آن‌ها به آزمایشگاه، مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها با توجه به نوع آزمایش پیش‌رو آغاز می‌شود. در ادامه آزمایش‌های انجام شده و نتایج حاصل از آن‌ها آورده شده است.



شکل ۴-۲: نواحی مورد مطالعه

#### ۲-۱-۲-۴ آزمایش تعیین چگالی (d) و تخلخل (n)

به منظور تعیین چگالی و تخلخل نمونه‌های سنگی با استفاده از روش اشباع و غوطه‌ورسازی، پنج قطعه از هر نمونه سنگ که وزنی معادل ۵۰ تا ۱۰۰ گرم داشت، انتخاب شدند و پس از شستشو و برطرف شدن گرد و غبار سطحی آن‌ها، نمونه‌ها در داخل آب و در خلأ کمتر از ۸۰۰ پاسکال اشباع شدند. پس از طی زمان لازم جهت اشباع نمونه‌ها، جرم اشباع غوطه‌ور نمونه‌ها ( $M_{sub}$ ) با ترازوی دیجیتال و با دقت بالا اندازه‌گیری شد. پس از آن با خروج نمونه از آب و خشک کردن سطح نمونه، بلافاصله پس از خروج و به نحوی که ذره‌ای از سنگ جدا نشود، جرم اشباع با سطح خشک نمونه ( $M_{sat}$ ) اندازه‌گیری شد. پس از خشک شدن نمونه‌ها در گرمخانه، به مدت ۲۴ ساعت و با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد، جرم خشک نمونه ( $M_s$ ) نیز اندازه‌گیری شد. کلیه‌ی مراحل بالا برای همه‌ی نمونه‌ها تکرار شد و در نهایت حجم کل، حجم منافذ، چگالی خشک و تخلخل طبق روابط زیر محاسبه شد (فهیمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰).

$$V = \frac{M_{sat} - M_{sub}}{\rho_w} \quad (۱-۴)$$

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w} \quad (۲-۴)$$

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (۳-۴)$$

$$n = \frac{100V_v}{V} \quad (۴-۴)$$

در این روابط  $V$  حجم کل نمونه ( $\text{cm}^3$ )،  $V_v$  حجم منافذ ( $\text{cm}^3$ )،  $\rho_d$  چگالی خشک ( $\text{gr/cm}^3$ ) و  $n$  تخلخل (%) است. جدول (۱-۴) مقادیر به دست آمده برای دو پارامتر چگالی و تخلخل را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱: نتایج آزمایش‌های چگالی و تخلخل

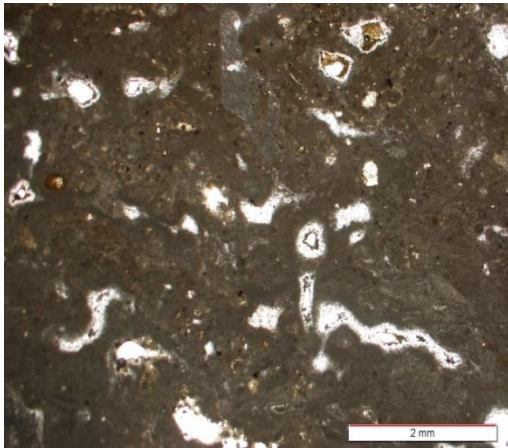
تخلخل (%)	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	نام نمونه
۸/۱۲	۲/۴۳	تراورتن آتشکوه
۱۰/۸۶	۲/۲۵	تراورتن آبگرم
۶/۲۱	۲/۴۶	تراورتن کال زرد
۷/۰۸	۲/۴۶	تراورتن عباس آباد
۷/۳۷	۲/۴۴	تراورتن دلستون
۸/۹	۲/۳۵	تراورتن حاجی آباد
۸/۲۱	۲/۵۵	تراورتن شکلاتی کاشان
۵/۶۲	۲/۵۳	تراورتن هستی جان
۹/۹۹	۲/۲۶	تراورتن نسکافه‌ای
۷/۲۹	۲/۴۴	تراورتن دره بخاری
۷/۷۴	۲/۴۹	تراورتن سفید حاجی آباد

#### ۴-۲-۱-۳ مطالعات کانی‌شناسی و بافت

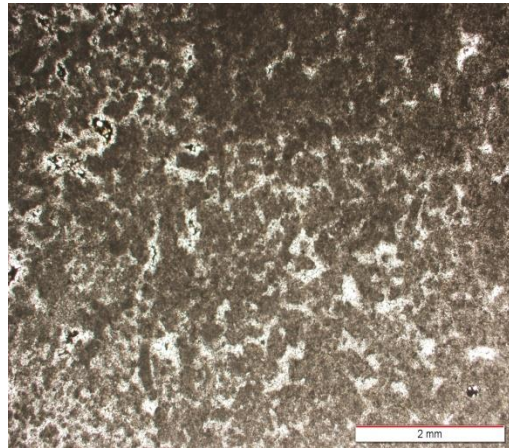
منظور از بافت در سنگ‌ها، اندازه و شکل بلورها، جفت شدگی و جورشدگی آن‌ها و یا به بیان ساده‌تر رابطه فیزیکی آن‌ها با یکدیگر است که خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای بررسی بافت سنگ‌های مورد مطالعه در ابتدا لازم است که با نمونه‌برداری از بلوک مورد نظر، مقاطع نازکی از بخش تیپیک سنگ‌های مورد مطالعه تهیه شود. مطالعه این مقاطع به کمک میکروسکوپ، اطلاعات زیادی از ویژگی‌های مینرالوژیکی سنگ را در اختیار قرار می‌دهد. در واقع با استفاده از این مقطع از سنگ، نوع و درصد کانی‌های تشکیل دهنده مشخص می‌شوند.

بررسی مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌ها نشان داد که بافت اصلی سنگ‌های تراورتن معمولاً میکرایت (ذرات ریز کربنات کلسیم) است. میکرایت‌ها بافت بسیار متراکمی دارند و از اجزای ریز کربنات کلسیم تشکیل شده‌اند، به طوری که ابعاد آن‌ها قابل تشخیص نیست. البته در برخی جاها ممکن است که فضای

خالی بین این ذرات توسط کلسیت‌های درشت‌تر و یا کوارتز پر شده باشد. اما این میزان این‌قدر کم است که می‌توان متن اصلی سنگ را یکدست میکرایت دانست. شکل (۳-۴) تا (۵-۴) عکس‌های تهیه شده از مقاطع نازک نمونه سنگ‌های مورد مطالعه توسط میکروسکوپ را نشان می‌دهد.



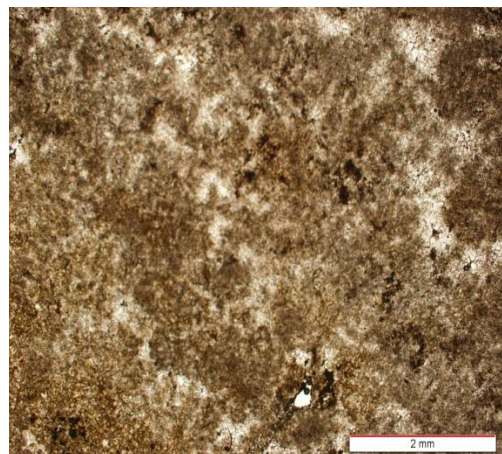
(ب)



(الف)



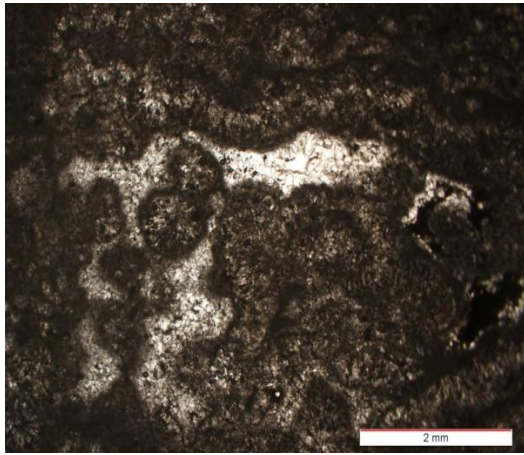
(ت)



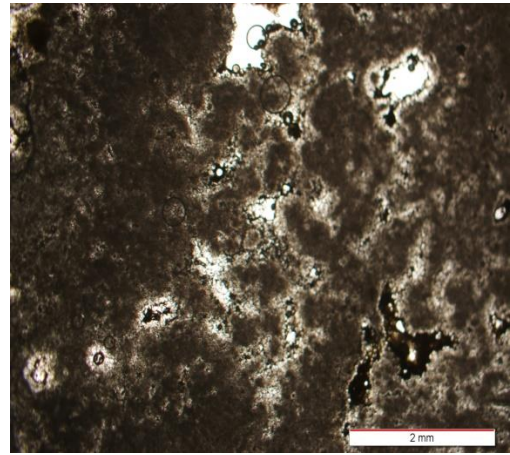
(پ)

شکل ۳-۴: تصاویر مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌های مورد مطالعه

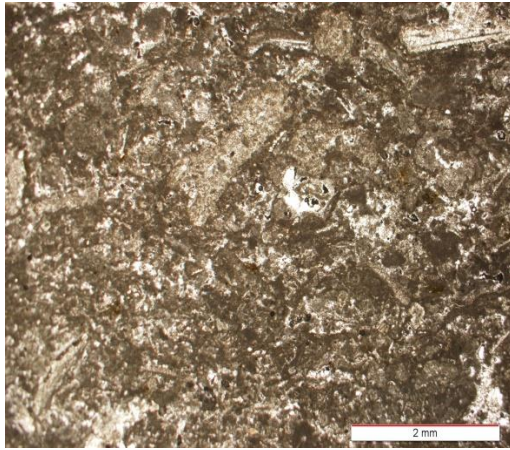




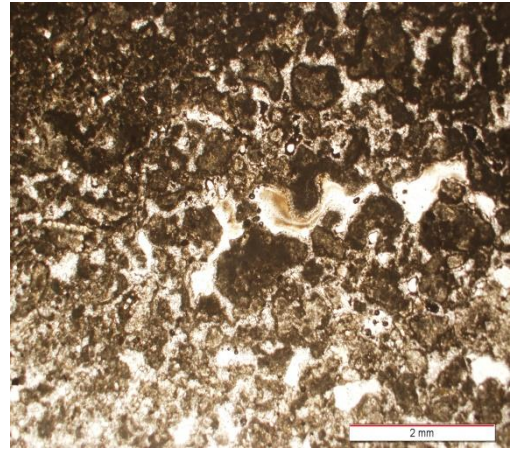
(ج)



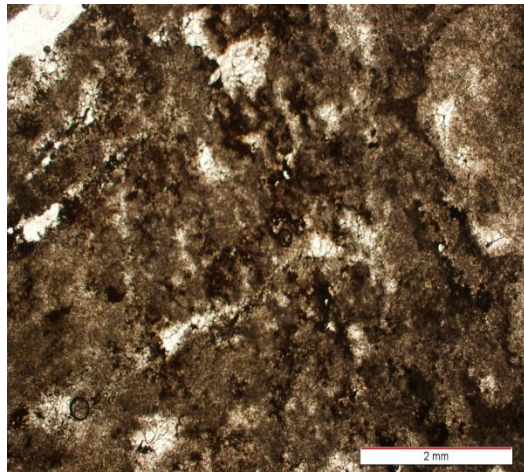
(ث)



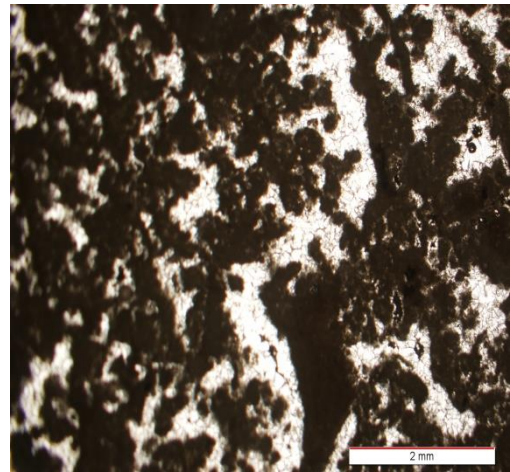
(ح)



(چ)

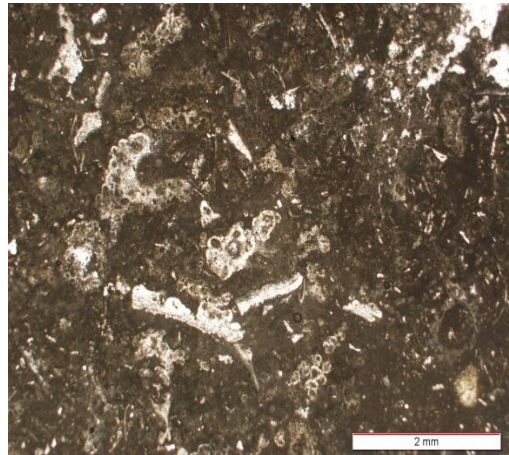


(د)



(خ)

ادامه شکل ۳-۴: تصاویر مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌های مورد مطالعه



(ذ)

ادامه شکل ۴-۳: تصاویر مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌های مورد مطالعه

الف) نمونه آتشکوه، ب) نمونه آبگرم، پ) نمونه کال زرد، ت) نمونه عباس‌آباد، ث) نمونه دلستون، ج) نمونه حاجی‌آباد  
 چ) نمونه شکلاتی کاشان، ح) نمونه هستی‌جان، خ) نمونه نسکافه‌ای (د) نمونه دره بخاری، ذ) نمونه سفید حاجی‌آباد

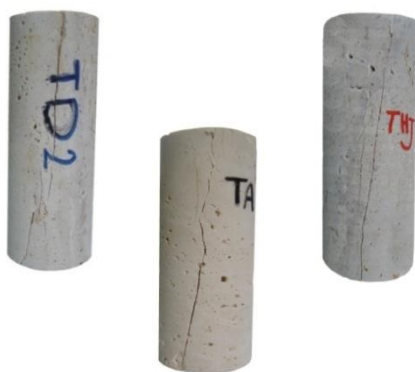
#### ۴-۱-۲-۴ آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک محوره (UCS)

این آزمایش به عنوان آزمایش پایه در اکثر پروژه‌های مهندسی انجام شده و به ندرت اتفاق می‌افتد که در پروژه‌های مقاومت فشاری تک محوره سنگ مورد نیاز نباشد. این آزمایش اساساً به منظور طبقه‌بندی و تعیین مشخصات سنگ بکر مورد استفاده قرار می‌گیرد. انجام این آزمایش طبق استاندارد ISRM، به نمونه‌هایی با نسبت ارتفاع به قطر ۲/۵ تا ۳ و حداقل قطر ۵۴ میلی‌متر (مغزه NX) نیاز دارد. در فرآیند آماده‌سازی این نمونه‌ها، مغزه‌هایی استوانه‌ای شکل از سنگ گرفته شد و به منظور ایجاد بارگذاری یکنواخت در دستگاه مقاومت فشاری تک محوره، سر و ته نمونه‌ها بریده و ساب زده شد. به طوری که دو انتهای نمونه با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر صاف باشد. پس از آن نیز نمونه‌ها به منظور شناسایی کدگذاری شدند. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها توسط دستگاه جک فشاری با نرخ بارگذاری ۱-۵ MPa و در زمانی کمتر از ۵ دقیقه تحت فشار قرار گرفته و شکستند. شکل (۴-۴) نمونه‌های تهیه شده و نحوه شکست برخی از نمونه‌ها بعد از انجام آزمایش را نشان می‌دهد. در نهایت پس از بارگذاری، با تعیین حداکثر بار

وارد بر نمونه‌ها در طول آزمایش و محاسبه سطح مقطع مؤثر هر مغزه، مقاومت فشاری تک محوره برای هر ۱۱ نمونه از رابطه (۴-۵) محاسبه شده است (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰). کلیه این مراحل برای حداقل دو مغزه از هر نمونه انجام شده و میانگین مقادیر محاسبه شده تحت عنوان مقاومت فشاری تک محوره در جدول (۴-۲) آورده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۴: نمونه‌های مربوط به آزمایش مقاومت فشاری تک محوره

(الف) نمونه‌های مورد آزمایش      (ب) نمونه‌ها بعد از شکست



$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

(۵-۴)

در این رابطه F نیروی وارد بر سنگ در لحظه گسیختگی (N) و A سطح مقطع نمونه (mm<sup>2</sup>) است.

جدول ۴-۲: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوره

مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	نام نمونه
۵۰/۷	تراورتن آتشکوه
۳۷/۲۷	تراورتن آبگرم
۳۴/۵۹	تراورتن کال زرد
۵۰/۴۶	تراورتن عباس آباد
۷۱/۸۲	تراورتن دلستون
۴۹/۴۱	تراورتن حاجی آباد
۳۹/۶۹	تراورتن شکلاتی کاشان
۵۱/۱۳	تراورتن هستی جان
۲۸/۴۱	تراورتن نسکافه‌ای
۵۹/۸۳	تراورتن دره بخاری
۶۱/۹۳	تراورتن سفید حاجی آباد

#### ۵-۱-۲-۴ آزمایش تعیین مقاومت کششی ( $\delta_t$ )

مقاومت کششی حداکثر تنش کششی است که یک ماده قادر است تا رسیدن به مرحله گسیختگی تحمل کند. با توجه به این که انجام دقیق آزمایش کشش مستقیم با مشکلاتی همراه است که استفاده از آن را به عنوان یک روش متداول آزمایشگاهی محدود می‌کند، معمولاً برای تعیین آن از روش‌های غیر مستقیم استفاده می‌شود. یکی از این روش‌ها، روش برزیلی است. توجه این آزمایش مبتنی بر این واقعیت تجربی است که با اعمال فشار قطری به نمونه‌های استوانه‌ای سنگ، تنش کششی در امتداد عمود

بر محور بارگذاری گسترش یافته و زمانی که این تنش کششی از مقاومت کششی سنگ بیشتر شود، نمونه دچار گسیختگی می‌شود (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰).

نمونه‌های مورد نیاز برای این آزمایش طبق استاندارد ISRM، مغزه‌هایی با قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت ارتفاع به قطر ۰/۵ هستند که حداکثر ناصافی سطح جانبی آن‌ها نباید از ۰/۰۲۵ میلی‌متر بیشتر باشد. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها بین دو فک بارگذاری قوسی شکل به صورتی که سطوح قوسی کاملاً روی سطح جانبی نمونه بنشینند و هیچ منفذی بین آن‌ها وجود نداشته باشد، قرار می‌گیرند. پس از آن نمونه توسط دستگاه جک فشاری با نرخ بارگذاری ۰/۲ KN/S و در مدت زمان ۱۵ تا ۳۰ ثانیه تحت فشار قرار می‌گیرد. پس از شکستن نمونه و تعیین حداکثر بار وارد بر آن در طول آزمایش، مقاومت کششی نمونه از رابطه (۴-۶) محاسبه می‌گردد (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰).

$$\sigma_t = \frac{2}{\pi} \times \frac{F}{D \times t} \quad (۴-۶)$$

که در آن F بار وارد بر نمونه در لحظه گسیختگی (N)، D قطر نمونه (mm)، t ضخامت (طول) نمونه (mm) و  $\sigma_t$  مقاومت کششی نمونه (MPa) است. شکل (۴-۵) نمونه‌های آماده شده برای آزمایش و نحوه شکست برخی از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. این آزمایش نیز بر روی سه نمونه از هر سنگ انجام شده و با میانگین‌گیری از نتایج به دست آمده، مقاومت کششی سنگ مورد مطالعه به دست آمده است. نتایج این آزمایش در جدول (۴-۳) درج شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۵: نمونه‌های مربوط به آزمایش برزیلی

الف) نمونه‌های مورد آزمایش (ب) نمونه‌ها بعد از شکست

جدول ۴-۳: نتایج آزمایش مقاومت کششی

مقاومت کششی (MPa)	نام نمونه
۵/۹۶	تراورتن آتشکوه
۶/۶۳	تراورتن آبگرم
۳/۴۳	تراورتن کال زرد
۵/۴	تراورتن عباس آباد
۶/۵۱	تراورتن دلستون
۵/۶۵	تراورتن حاجی آباد
۵/۷۴	تراورتن شکلاتی کاشان
۵/۹۴	تراورتن هستی جان
۳/۹۵	تراورتن نسکافه‌ای
۶/۲۷	تراورتن دره بخاری
۶/۶۷	تراورتن سفید حاجی آباد

#### ۴-۲-۱-۶ آزمایش تعیین سختی اشمیت (Hsch)

با وجود این که سختی یکی از مشخصه‌های رفتاری سنگ است، تنها زمانی که سنگ تحت شرایط یکسان و طبق روش‌های آزمایشی خاص مورد بررسی قرار گیرد، امکان کمی کردن آن وجود دارد. بنابراین لازم است با توجه به اهداف مورد نظر نسبت به تعیین روشی برای تعیین سختی، متناسب با طبیعت سنگ و نیاز مهندسی ما، اقدام کرد. آزمایش‌های خراشی، واجهشی یا دینامیکی و اثرگذاری، سه گروه از روش‌هایی هستند که به منظور تعیین سختی سنگ پیشنهاد شده‌اند. با توجه به سادگی و در دسترس بودن وسایل آزمایش چکش اشمیت و همچنین ارتباط بسیار خوب نتایج آن با سایر ویژگی‌های سنگ، این روش از متداول‌ترین روش‌ها برای تعیین سختی سنگ است (فهمی فر و سروش، ۱۳۸۰).

آزمایش چکش اشمیت طبق استاندارد ISRM، بر روی بلوک‌هایی با ابعاد حداقل ۴۰ سانتی متر و بر روی سطحی از بلوک که صاف و فاقد هرگونه ناپیوستگی، درزه و هوازدگی باشد انجام شد. طبق این استاندارد برای تعیین سختی اشمیت لازم است تا برای هر نمونه ۲۰ عدد توسط چکش اشمیت ثبت شود. سپس با توجه به این که احتمال خطا در مقادیر پایین بیشتر است، نیمی از داده‌ها با کمترین مقدار حذف و از بقیه داده‌ها میانگین‌گیری شود. لازم به ذکر است که با توجه به حساسیت میزان سختی به دست آمده به راستای چکش، اندازه‌گیری‌ها با قرار دادن چکش در راستای قائم رو به پایین، بر روی بلوک مورد نظر، انجام شده است. مقادیر مربوط به سختی اشمیت به دست آمده برای نمونه‌ها در جدول (۴-۴) آمده است.

جدول ۴-۴: نتایج آزمایش سختی اشمیت

سختی چکش اشمیت	نام نمونه
۴۹/۶	تراورتن آتشکوه
۵۱/۲	تراورتن آبگرم
۳۹	تراورتن کال زرد
۴۸/۸	تراورتن عباس آباد
۵۶/۸	تراورتن دلستون
۵۲/۲	تراورتن حاجی آباد
۴۸	تراورتن شکلاتی کاشان
۴۹/۸	تراورتن هستی جان
۴۳/۲	تراورتن نسکافه‌ای
۴۷/۸	تراورتن دره بخاری
۴۸/۶	تراورتن سفید حاجی آباد

#### ۴-۲-۱-۷ آزمایش تعیین سایش لوس آنجلس (Wla)

از میان روش‌های متنوعی که برای بررسی سایش سنگ در آزمایشگاه ارائه شده، امروزه آزمایش سایش به روش لوس آنجلس کاربرد وسیعی پیدا کرده است. این روش یکی از آزمایش‌های سایش همراه با ضربه است که در آن علاوه بر فرسایش ناشی از تماس قطعات، ضرباتی نیز به سنگ وارد می‌شود. دستگاه لوس آنجلس دارای یک استوانه فولادی توخالی با قطر داخلی  $711 \pm 5$  میلی‌متر و طول داخلی  $508 \pm 5$  میلی‌متر است. این استوانه بر روی پایه‌های محکمی که به فاصله کمی از دو طرف آن قرار گرفته‌اند و امکان دوران آن را حول محور افقی خود ایجاد می‌کنند، سوار است. برای انجام آزمایش لوس آنجلس، نمونه به همراه گوی‌های فولادی ساینده داخل استوانه ریخته می‌شود. تعداد این گوی‌ها با توجه به نوع دانه‌بندی، طبق جدول (۴-۵) تعیین می‌شود.

برای انجام این آزمایش، پس از خرد کردن نمونه‌ها توسط سنگ‌شکن فکی، نمونه‌ها طبق دانه‌بندی A در جدول (۴-۶) در استاندارد ISRM سرنده شدند. پس از آن نمونه به همراه ۱۲ گوی فولادی به وزن ۵۰۰۰ گرم داخل دستگاه لوس آنجلس قرار گرفته و دستگاه با سرعتی حدود ۳۰ تا ۳۳ دور در دقیقه به چرخش در می‌آید. طبق استاندارد، حرکت استوانه باید منظم و با سرعت یکنواخت بوده و برای مصالح کوچکتر از ۳۸ میلی‌متر ۵۰۰ دور دوران کند. پس از پایان دوران نمونه‌ها از داخل استوانه خارج شده و با سرنده ۱/۷ میلی‌متر (نمره ۱۲) جداسازی می‌شود. بخشی از نمونه که روی سرنده مانده، شسته شده و تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۰۵ تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. پس از آن نمونه با دقت یک گرم وزن شده و درصد افت وزنی طبق رابطه (۴-۷) محاسبه می‌شود. در نهایت نتایج آزمون لوس آنجلس در جدول (۴-۷) آمده است.

$$(۴-۷) \quad \text{وزن نهایی نمونه} - \text{وزن اولیه نمونه} \\ \text{درصد افت وزنی در اثر ساییش} = \frac{\text{وزن اولیه نمونه}}{\text{وزن اولیه نمونه}} \times 100$$

جدول ۴-۵: تعداد و وزن گوی‌های فولادی دستگاه لوس آنجلس (فهمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰)

دانه‌بندی نمونه	تعداد گوی‌ها	وزن گوی (gr)
۱	۱۲	۵۰۰۰ ± ۲۵
۲	۱۲	۵۰۰۰ ± ۲۵
۳	۱۲	۵۰۰۰ ± ۲۵
A	۱۲	۵۰۰۰ ± ۲۵
B	۱۱	۴۵۸۴ ± ۲۵
C	۸	۳۳۳۰ ± ۲۵
D	۶	۲۵۰۰ ± ۲۵

جدول ۴-۶: دانه‌بندی نمونه‌های انتخابی برای قطعات کوچکتر از ۳۸ میلی‌متر (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰)

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

جدول ۴-۷: نتایج آزمایش سایش لوس آنجلس

سایش لوس آنجلس (%)	نام نمونه
۲۹/۵۵	تراورتن آتشکوه
۳۴/۸۸	تراورتن آبگرم
۳۸/۲۴	تراورتن کال زرد
۳۲/۷۵	تراورتن عباس آباد
۳۲/۳۳	تراورتن دلستون
۳۱/۵۷	تراورتن حاجی آباد
۳۱/۰۴	تراورتن شکلاتی کاشان
۲۹/۵۷	تراورتن هستی جان
۴۲/۵۶	تراورتن نسکافه‌ای
۳۰/۳۱	تراورتن دره بخاری
۳۰/۵۸	تراورتن سفید حاجی آباد

#### ۴-۲-۱-۸ آنالیز شیمیایی

به منظور تعیین عناصر تشکیل دهنده نمونه‌ها و بررسی تأثیر کانی‌های سخت بر نرخ برش، آنالیز شیمیایی با استفاده از دستگاه XRF بر روی سنگ‌های مورد مطالعه انجام شد. اطلاعات به‌دست آمده از آنالیز هر یک از نمونه‌ها در جدول (۴-۸) درج شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، میزان CaO موجود در سنگ نسبت به سایر کانی‌های موجود، بیشتر است. با توجه به اهمیت وجود کانی‌های سخت در ساختار سنگ، از میان عناصر تشکیل دهنده تنها میزان سیلیس موجود در سنگ برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۴-۸: نتایج آنالیز شیمیایی بر روی نمونه‌ها

TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	نام نمونه
۰/۰۶	-	-	۰/۰۶	-	۰/۰۶	-	۰/۱۸	۰/۴۴	۹۹/۲	تراورتن آتشکوه
۰/۰۴	۰/۳۲	۰/۰۹	۰/۷۱	۰/۹۲	-	۱/۲۸	۱/۰۱	۰/۸۳	۹۴/۸	تراورتن آبگرم
۰/۱۲	-	-	-	-	۰/۱۴	۰/۸۲	۰/۱۴	۰/۳۸	۹۸/۴	تراورتن کال زرد
۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۹	۲/۱۳	۱/۲۲	-	۱/۴۴	۱/۲۲	۰/۴۳	۹۲/۶	تراورتن عباس آباد
۰/۳۵	-	-	-	۰/۰۶	۰/۱۶	۰/۲	۰/۱۹	۱/۵۲	۹۷/۵۲	تراورتن دلستون
۰/۴۲	۰/۳۲	۰/۰۹۸	۰/۷۱	۰/۴۲	۰/۰۹	۰/۳۷	۰/۷۳	۱/۰۴	۹۵/۸	تراورتن حاجی آباد
۰/۴۹	۰/۵۶	۰/۷۴	-	۰/۲۵	-	۱/۹۸	۱/۲	۱/۰۸	۹۳/۷	تراورتن شکلاتی کاشان
۰/۲۹	۰/۱۹	-	-	۰/۱۴	-	۰/۵۵	۰/۴۲	۱/۱۱	۹۷/۳	تراورتن هستی جان
۰/۵۲	۰/۰۱	۱/۷۲	۱/۰۶	۰/۳۷	-	۱/۹۳	۰/۸۶	۰/۳۳	۹۳/۲	تراورتن نسکافه‌ای
-	۰/۰۵	-	-	-	۰/۰۵	۰/۶۳	۰/۰۸	۰/۱۹	۹۹	تراورتن دره بخاری
۰/۸۵	-	-	-	۰/۰۴	۰/۲	۰/۲۵	۰/۱۴	۱/۰۲	۹۷/۵	تراورتن سفید حاجی آباد



#### ۲-۲-۴ مطالعات میدانی

مطالعات میدانی برای بررسی عملکرد برش در مقیاس صنعتی و همچنین تعیین پارامترهای بهینه دستگاه برش، در برخی از کارخانه‌های سنگبری شهر محلات انجام شد. در این بخش از مطالعات، اطلاعات مربوط به عملکرد برش برای ۱۱ نمونه تراورتن مورد بررسی اندازه‌گیری و ثبت شد. با توجه به یکسان بودن عمق برش، مشخصات دیسک و سگمنت‌ها و سرعت چرخش دیسک برای کلیه نمونه‌های مورد بررسی و همچنین استفاده از روش برش رو به پایین در همه دستگاه‌های برش، نرخ برش (CR) به عنوان تنها متغیر به منظور ارزیابی عملکرد برش، در نظر گرفته شد. جدول (۴-۹) مقادیر نرخ برش و نرخ پیشروی اندازه‌گیری شده را برای ۱۱ نمونه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۹: مقادیر نرخ برش و نرخ پیشروی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌ها

نرخ پیشروی (m/min)	نرخ برش (m <sup>2</sup> /h)	نام نمونه
۱/۴۳	۲۲/۱۴	تراورتن آتشکوه
۱/۲۹	۳۵/۹۱	تراورتن آبگرم
۱/۴۹	۳۶/۶۸	تراورتن کال زرد
۱/۲۷	۳۰/۶	تراورتن عباس آباد
۰/۶۲	۱۵/۲۳	تراورتن دلستون
۱/۰۲	۲۸/۹۹	تراورتن حاجی آباد
۰/۶۸	۲۲/۲۵	تراورتن شکلاتی کاشان
۰/۹۵	۲۴/۵۶	تراورتن هستی جان
۱/۴۴	۴۶/۵۷	تراورتن نسکافه‌ای
۰/۷۱	۱۷/۶۴	تراورتن دره بخاری
۰/۹۲	۲۴/۳۲	تراورتن سفید حاجی آباد

به منظور ارائه مدلی کارآمد، علاوه بر ۱۱ نمونه مورد مطالعه، اطلاعات ۴ نمونه تراورتن دیگر شامل تراورتن تکاب، سفید خورهه، ماکو و پرتقالی حاجی آباد که قبلاً در همین آزمایشگاه و توسط خانم مهندس سعیده رضایی اندازه گیری شده بود نیز مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت پایگاه داده‌ای متشکل از اطلاعات ۱۵ نمونه سنگ تراورتن برای پیش‌بینی نرخ برش به کار گرفته شد (رضایی، ۱۳۸۹). در نهایت جدول (۴-۱۰) کلیه اطلاعات اندازه‌گیری شده به منظور ارائه مدلی برای پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های تراورتن را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۰: داده‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی

نام نمونه	CR (m <sup>2</sup> /h)	UCS (MPa)	$\delta_t$ (MPa)	Hsch	Wla (%)	d (g/cm <sup>3</sup> )	n (%)	SiO <sub>2</sub> (%)
تراورتن آتشکوه	۲۲/۱۴	۵۰/۷	۵/۹۶	۴۹/۶	۲۹/۵۵	۲/۴۳	۸/۱۲	۰/۴۴
تراورتن آبگرم	۳۵/۹۱	۳۷/۲۷	۴/۶۴	۵۱/۲	۳۴/۸۸	۲/۲۵	۱۰/۸۶	۳/۰۳
تراورتن کال زرد	۳۶/۶۸	۳۱/۵۹	۳/۱۷	۳۹	۳۸/۲۴	۲/۴۶	۱۰/۲۲	۰/۳۸
تراورتن عباس‌آباد	۳۰/۶	۵۰/۴۶	۵/۴۱	۴۸/۸	۳۲/۷۵	۲/۴۶	۷/۰۹	۰/۴۳
تراورتن دلستون	۱۵/۲۳	۷۱/۸۲	۶/۵۱	۵۶/۸	۲۹/۳۳	۲/۴۴	۵/۳۷	۰/۵۲
تراورتن حاجی‌آباد	۲۸/۹۹	۳۶/۴۱	۵/۶۵	۵۲/۲	۳۱/۵۷	۲/۳۵	۸/۸۹	۱/۰۴
تراورتن شکلاتی کاشان	۲۲/۲۵	۵۰/۶۹	۵/۷۴	۵۸	۳۱/۰۴	۲/۵۵	۸/۲۱	۲/۰۸
تراورتن هستی جان	۲۴/۵۶	۵۱/۱۳	۵/۰۲	۴۶/۸	۲۹/۵۷	۲/۵۳	۵/۶۲	۱/۱۱
تراورتن نسکافه‌ای	۴۶/۵۷	۲۸/۴۱	۳/۹۵	۴۳/۲	۴۲/۵۶	۲/۲۷	۹/۹۹	۰/۳۳
تراورتن دره بخاری	۱۷/۶۴	۵۹/۸۳	۶/۱۲	۴۷/۸	۳۹/۳۱	۲/۴۴	۷/۲۹	۰/۱۹
تراورتن سفید حاجی‌آباد	۲۴/۳۲	۶۴/۹۳	۶/۶۷	۴۲/۶	۴۰/۵۸	۲/۴۹	۷/۷۴	۱/۰۲
تراورتن تکاب	۱۸/۸	۵۲/۴	۵/۲۶	۵۳/۷	۲۷/۵	۲/۶۵	۶/۵۹	۲/۳۵
تراورتن سفید خورهه	۸/۹	۸۹/۵۱	۶/۷۲	۴۵/۵	۲۵/۹۸	۲/۶۵	۲/۳۵	۲/۱۴
تراورتن ماکو	۱۰	۷۴/۲۳	۷/۵	۴۳/۳	۲۸/۷	۲/۷	۳/۹۴	۱/۰۶
تراورتن پرتقالی حاجی‌آباد	۱۰/۸	۵۶/۷۶	۶/۷۸	۴۵	۲۵/۲۳	۲/۶۱	۵/۱۹	۱/۱۴

## ۳-۴ جمع‌بندی

در این فصل مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها که برش سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهند، انجام شد. علاوه بر این برای اطلاع از مشخصات برش نمونه‌ها، با بازدید از برخی از کارخانه‌های برش‌دهنده نمونه‌های مورد مطالعه، اطلاعات برش این سنگ‌ها اندازه‌گیری شد. پس از بررسی مشخصات برش، با توجه به یکسان بودن شرایط برش برای کلیه نمونه‌ها، نرخ برش به عنوان تنها متغیر مورد بررسی در نظر گرفته شد. در نهایت پایگاه داده‌ها، متشکل از اطلاعات ۱۵ نمونه سنگ تراورتن برای مدل‌سازی رابطه‌ای به منظور پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های تراورتن بر اساس مهم‌ترین مشخصات سنگ، ایجاد شد.



---

فصل پنجم

مدل‌های برآزش و

روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی

---

هدف از تعیین عوامل مؤثر بر نرخ برش سنگ‌های ساختمانی، رسیدن به مدلی است که قادر به پیش‌بینی نرخ برش سنگ با توجه به خصوصیات آن باشد. بنابراین مسأله بعدی پس از تعیین عوامل مؤثر، بررسی درصد تأثیرگذاری این عوامل بر نرخ برش است. یکی از روش‌های مطالعه روابط بین متغیرها و تعیین نحوه وابستگی یک متغیر به متغیرهای دیگر، تحلیل رگرسیون است. الگوی روابط بین متغیرها ممکن است به صورت خطی یا غیرخطی باشد. برای حصول اطمینان از نتایج به دست آمده از مدل‌های رگرسیونی لازم است متغیرهای مستقل مدل ناهمبسته باشند. چرا که مشکل اصلی در رگرسیون، وجود هم‌خطی در یک معادله رگرسیونی است که نشان‌دهنده همبستگی<sup>۱</sup> بالا بین متغیرهای مستقل است. بنابراین پیش از انجام رگرسیون لازم است نرمال بودن داده‌ها و عدم همبستگی بین متغیرها مورد بررسی قرار گیرد. پس از آن برای انتخاب مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترها روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی<sup>۲</sup> (PCA) معرفی شده است. این روش تکنیکی است برای یافتن ترکیبات خطی از متغیرهای اولیه همبسته، در شرایطی که با تعداد زیادی از متغیرها رو به رو هستیم. این روش به‌خصوص در شرایطی که ابعاد داده‌ها و ترکیب ساختار آن‌ها کاملاً مشخص نیست، مفید است. چرا که در تحلیل مؤلفه‌های اصلی، سعی بر آن است که ابعادی از داده‌ها را پیدا کنیم که واریانس کل داده‌ها را توضیح می‌دهد. بنابراین این روش را می‌توان به عنوان یک روش مناسب برای کاهش حجم متغیرها و استخراج پارامترهای مؤثر استفاده کرد. در این فصل پس از بیان روش‌های رگرسیون و انواع آن و همچنین معیارهای ارزیابی یک رابطه رگرسیونی، روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی شرح داده شده است.

---

<sup>۱</sup> Correlation

<sup>۲</sup> Principal Component Analysis

## ۲-۵ تحلیل رگرسیون

تحلیل رگرسیون شامل مجموعه‌ای از تکنیک‌ها است که برای یافتن روابط بین متغیرهای اندازه‌پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساس کار رگرسیون، بررسی و شناخت رفتار بین متغیرها است. در مدل‌های رگرسیونی یک متغیر به عنوان متغیر وابسته<sup>۱</sup> (متغیر پاسخ) در نظر گرفته می‌شود و دیگر متغیرها نقش متغیرهای مستقل<sup>۲</sup> را ایفا می‌کنند. در این مدل‌ها در ساده‌ترین حالت، تغییرات متغیر وابسته با توجه به یک متغیر مستقل پیش‌بینی می‌شود (وایزبرگ، ۱۳۷۴). در حالی که در رگرسیون چندگانه<sup>۳</sup> پیش‌بینی متغیر وابسته با استفاده از ترکیب خطی یا غیرخطی چند متغیر مستقل انجام می‌گیرد. رگرسیون چندگانه در اصل، توسعه یافته همان روش رگرسیون ساده است که بیش از یک متغیر مستقل در آن وجود دارد. در این روش به جای استفاده از یک متغیر مستقل برای توضیح دادن متغیر وابسته، از چند متغیر مستقل برای پیش‌بینی، توضیح و تفسیر متغیر وابسته استفاده می‌شود (والپول، ۱۳۵۷). پس با استفاده از مدل‌های رگرسیون چندگانه می‌توان تغییرات موجود در متغیر وابسته را بهتر و کامل‌تر توضیح داد و مدل دقیق‌تر و جامع‌تری به دست آورد.

به طور کلی تحلیل رگرسیونی در چهار مرحله اساسی انجام می‌گیرد. این مراحل شامل انتخاب متغیر، جمع‌آوری داده‌ها، تشخیص و برازش الگو و اعتبارسنجی<sup>۴</sup> مدل است. مسأله قابل توجه این است که در بسیاری از تحلیل‌های آماری برای حصول اطمینان از نتایج به دست آمده نیاز به انجام انواع آزمون‌های پارامتری احساس می‌شود که در اغلب این آزمون‌ها فرضیات مقدماتی زیادی وجود دارد. یکی از مهم‌ترین و شایع‌ترین فرضیات، فرض نرمال بودن داده‌ها است. با توجه به اینکه قبل از انجام رگرسیون بایستی همبستگی بین متغیرها مورد بررسی قرار گیرد، در ابتدا لازم است که از نرمال بودن داده‌ها

---

<sup>۱</sup> Dependent variable

<sup>۲</sup> Independent variable

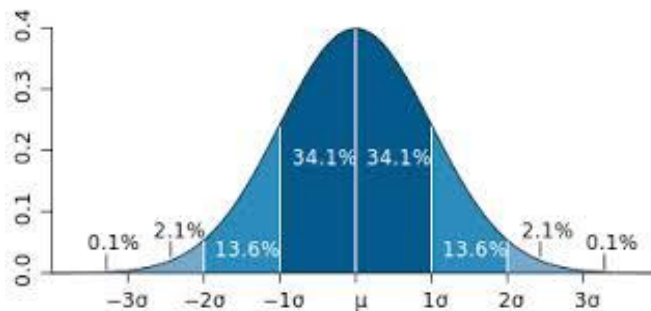
<sup>۳</sup> Multiple regression

<sup>۴</sup> Evaluation

اطمینان کافی حاصل شود. بنابراین قبل از تشخیص و برازش الگو بایستی نرمال بودن داده‌های جمع‌آوری شده و عدم همبستگی بین متغیرهای مورد مطالعه مورد بررسی قرار گیرد.

### ۱-۲-۵ بررسی نرمال بودن داده‌ها

منظور از نرمال بودن توزیع داده‌ها، این است که هیستوگرام فراوانی داده‌ها مانند شکل (۱-۵) تقریباً به صورت منحنی نرمال باشد. برای بررسی وجود توزیع نرمال در متغیرها بایستی مراحل زیر انجام شود.



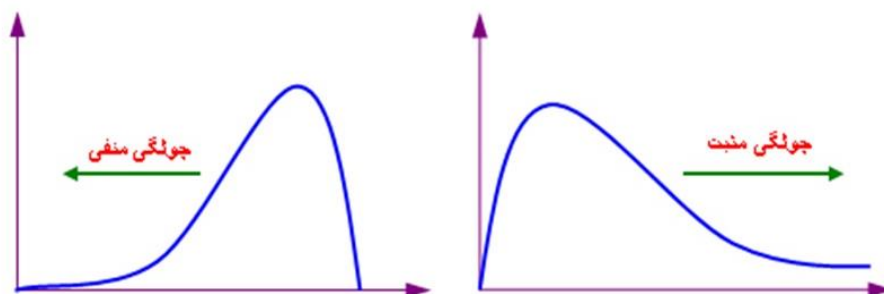
شکل ۱-۵: توزیع نرمال استاندارد (بشلیده، ۱۳۹۱)

الف) بررسی چولگی<sup>۱</sup> و کشیدگی<sup>۲</sup> داده‌ها: ضریب چولگی و ضریب کشیدگی دو شاخص اساسی توزیع داده‌ها هستند. با داشتن این دو شاخص تا حدودی می‌توان به نرمال بودن یا نبودن توزیع داده‌ها پی برد. چولگی معیاری از تقارن یا عدم تقارن تابع توزیع است. در یک توزیع کاملاً متقارن، چولگی صفر است و برای یک توزیع نامتقارن، ضریب چولگی ممکن است منفی و یا مثبت باشد و هرچه مقدار آن فاصله بیشتری از صفر داشته باشد، عدم تقارن شدیدتر است. شکل (۲-۵) حالات چولگی مثبت و منفی را نشان می‌دهد (بشلیده، ۱۳۹۱).

<sup>۱</sup> Skewness

<sup>۲</sup> Kurtosis





شکل ۵-۲: چولگی مثبت و منفی (بشلیده، ۱۳۹۱)

کشیدگی نشان‌دهنده ارتفاع یک توزیع است. به عبارت دیگر کشیدگی معیاری از بلندی منحنی در نقطه ماکزیمم است و میزان کشیدگی برای هر توزیع با کشیدگی توزیع نرمال مقایسه می‌شود. بنابراین کشیدگی مثبت بدین معنی است که قله توزیع مورد نظر از توزیع نرمال بالاتر است و کشیدگی منفی نشان‌دهنده پایین‌تر بودن قله توزیع نسبت به توزیع نرمال است (بشلیده، ۱۳۹۱).

معمولاً برای بررسی نرمال بودن داده‌ها با استفاده از چولگی و کشیدگی توزیع داده‌ها از خطای استاندارد ضریب چولگی و ضریب کشیدگی استفاده می‌شود. در حالت کلی چنانچه میزان این خطای استاندارد خارج از بازه (۲، -۲) باشد، داده‌ها از توزیع نرمال برخوردار نبوده و می‌بایست قبل از هر آزمون مشروط به فرض نرمال بودن داده‌ها، داده‌ها را به توزیع نرمال نزدیک کرد (مومنی و قیومی، ۱۳۹۱).

ب) آزمون شاپیرو ویلک<sup>۱</sup> و آزمون کلموگروف-اسمیرنوف<sup>۲</sup>: علاوه بر چولگی و کشیدگی، آزمون‌های دیگری نیز در نرم‌افزار SPSS<sup>۳</sup> وجود دارد که به کمک آن‌ها می‌توان نرمال بودن داده‌ها را بررسی کرد. آزمون شاپیرو-ویلک و کلموگروف-اسمیرنوف دو نمونه از این آزمون‌ها هستند که تقریباً می‌توان آن‌ها را مشابه هم دانست؛ چرا که تنها در عمل تفاوت اندکی با هم دارند. در شرایطی که حجم نمونه‌ها کم است، نتایج هر دو آزمون یکسان است ولی در شرایطی حجم نمونه‌ها بیشتر از ۲۰۰۰ است، آزمون

<sup>۱</sup> Shapiro-Wilk

<sup>۲</sup> Kolmogorov-Smirnov

<sup>۳</sup> Statistical Package for the Social Sciences

کلموگروف- اسمیرنوف مناسب‌تر از شاپیرو- ویلک است. معمولاً چنانچه سطح معنی‌داری در این آزمون بیش از ۵ درصد باشد، می‌توان داده‌ها را با اطمینان بالایی نرمال فرض کرد (مومنی و قیومی، ۱۳۹۱).

ج) نمودارهای جعبه‌ای و QQ: نمودار جعبه‌ای که معمولاً برای توزیع نرمال در مرکز نمودار قرار می‌گیرد، امکان دیدن داده‌های پرت را فراهم می‌کند. بنابراین می‌تواند انحراف یک توزیع را از توزیع نرمال به خوبی تشریح کند. در نمودار QQ نیز داده‌های یک توزیع نرمال معمولاً روی یک خط قرار می‌گیرند و به صورت مارپیچ و S وار نخواهند بود. هرچه نقاطی که نماینده داده‌ها هستند، به این خط نزدیک‌تر باشند، توزیع داده‌ها به توزیع نرمال نزدیک‌تر است (مومنی و قیومی، ۱۳۹۱).

#### ۵-۲-۲ بررسی همبستگی متغیرها

تحلیل همبستگی شاخصی آماری است که نوع و شدت رابطه‌ی بین دو متغیر را توصیف می‌کند. یکی از معیارهای مورد استفاده در تعیین همبستگی دو متغیر، ضریب همبستگی است. این ضریب در مورد توزیع‌های دو یا چند متغیره به کار می‌رود و در واقع رابطه بین دو متغیر (مستقیم یا معکوس) را بدون در نظر گرفتن مقیاس‌های آن‌ها نشان می‌دهد. مقدار این ضریب بین ۱ تا -۱ است و در صورت نبود رابطه میان دو متغیر، مقدار آن صفر خواهد شد. از همبستگی بین دو متغیر می‌توان دریافت که دو متغیر کاملاً به هم مرتبطند و در اصل می‌توان فرض کرد که این دو متغیر رفتار یکسانی را در مدل از خود نشان می‌دهند. بنابراین بایستی از کنار هم آوردن آن‌ها در مدل خودداری کرد (مومنی و قیومی، ۱۳۹۱).

## ۳-۵ مدل‌های رگرسیون چندگانه

### ۱-۳-۵ رگرسیون خطی چندگانه

رگرسیون خطی، ممکن است ساده یا چندگانه باشد. یک مدل حاصل از رگرسیون چند متغیره خطی در نهایت شکلی مانند رابطه (۱-۵) خواهد داشت. این معادله معمولاً با استفاده از روش حداقل مربعات، بر متغیرهای مستقل برازش داده می‌شود (وایزبرگ، ۱۳۷۴).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (1-5)$$

در این معادله  $Y$  متغیر وابسته،  $X_1, X_2, \dots, X_n$  متغیرهای مستقل،  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  ضرایب متغیرهای مستقل،  $\beta_0$  مقدار ثابت معادله و  $\varepsilon$  مجموع خطاهای تصادفی است. برای معادله برازش شده به صورت رابطه (۱-۵)، مجموع مربعات خطاهای مشاهده شده<sup>۱</sup> (SEE) برای مقادیر  $Y$  به دست آمده از این مدل، از رابطه (۲-۵) محاسبه می‌شود. در این رابطه  $\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \dots + \hat{\beta}_n X_n + \varepsilon$  مدل برازش داده شده و مقادیر  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_n$  تخمین‌های پارامتری مدل هستند (وایزبرگ، ۱۳۷۴). به علت پیچیدگی محاسبات، برای محاسبه هر یک از این پارامترها بایستی از برنامه‌های کامپیوتری استفاده کرد. در اینجا از نرم‌افزار SPSS که یکی از چهار نرم افزار پیشرفته موجود در زمینه آمار است، استفاده می‌شود.

$$SEE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n \left[ y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_{1i} + \hat{\beta}_2 X_{2i} + \dots + \hat{\beta}_n X_{ni} + \varepsilon) \right]^2 \quad (2-5)$$

رگرسیون چندمتغیره خطی دارای فرضیات زیر است (مومنی و قیومی، ۱۳۹۱):

الف) خطاهای تصادفی ( $\varepsilon$ ) مورد انتظار برای هر مقدار ثبت شده از متغیر وابسته  $y$  دارای مقدار صفر و واریانس ثابت است. ( $V(e_i) = \sigma_\varepsilon^2$  و  $E(\varepsilon) = 0$ ). نتیجه این شرط این است که توزیع خطاها باید دارای توزیع نرمال باشد.

<sup>۱</sup> Sum of Squares for Error

ب) بین خطاهای مدل همبستگی وجود نداشته باشد و این یعنی  $cov(e_i, e_j) = 0$ .

ج) بین متغیرهای مستقل همبستگی وجود نداشته باشد.

### ۲-۳-۵ رگرسیون غیرخطی چندگانه

اساس رگرسیون غیرخطی بر مبنای درک رگرسیون خطی است. این نوع از رگرسیون، روشی برای یافتن مدلی غیرخطی از رابطه بین متغیر وابسته و مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل را بدون محدودیت خطی بودن ارائه می‌کند. رگرسیون غیرخطی مدل‌های مختلفی دارد که می‌توان به مدل‌های درجه ۲، درجه ۳ و ... و همچنین چند جمله‌ای‌های نمایی و توانی اشاره کرد. یکی از این مدل‌های غیرخطی، مدل لگاریتمی دوگانه است. این معادله در حالت کلی به صورت رابطه (۳-۵) خواهد بود (Tiryaki, 2008).

$$Y = aX_1^{b_1} X_2^{b_2} X_3^{b_3} \dots X_n^{b_n} \quad (3-5)$$

در این رابطه  $Y$  مقدار پیش‌بینی شده برای متغیر وابسته،  $a$  عرض از مبدأ،  $X_1, X_2, \dots, X_n$  متغیرهای مستقل و  $b_1, b_2, \dots, b_n$  ضرایب رگرسیونی هستند. با لگاریتم گرفتن از طرفین معادله، معادله به صورت ارائه شده در رابطه (۴-۵) به شکل خطی تبدیل می‌شود و این رابطه را می‌توان همانند رابطه (۵-۵) به شکل یک تابع رگرسیون خطی نوشت (Tiryaki, 2008).

$$\log Y = \log a + b_1 \log X_1 + \dots + b_n \log X_n \quad (4-5)$$

$$Y' = a' + b'_1 X_1 + b'_2 X_2 + \dots + b'_n X_n \quad (5-5)$$

### ۴-۵ معیارهای ارزیابی یک رابطه رگرسیونی

پس از تعیین یک رابطه رگرسیونی، برای تعیین اعتبار رابطه به دست آمده لازم است در ابتدا معنی‌داری کل مدل رگرسیون آزموده شود. برای این منظور می‌توان از جدول ANOVA استفاده کرد. در صورتی که سطح معنی‌داری (sig.) محاسبه شده در این جدول کمتر از ۵ درصد باشد، مدل رگرسیونی

معنی‌دار خواهد بود. پس از آن بایستی تک تک ضرایب متغیرهای مستقل به کمک جدول ضرایب و مقادیر t ارائه شده برای هر متغیر، از لحاظ معنی‌داری بررسی شوند. در مرحله بعد لازم است که سه شرط زیر برای هر رابطه مورد بررسی قرار گیرد (مومنی و قیومی، ۱۳۹۱):

الف) بررسی استقلال خطاها: یکی از فرضیاتی که باید در روابط رگرسیونی مد نظر قرار گیرد، فرض استقلال خطاها از یکدیگر است. خطاها به صورت اختلاف مقدار واقعی از مقدار اندازه‌گیری شده تعریف می‌شوند. در نرم‌افزار SPSS، برای بررسی استقلال خطاها از یکدیگر از آزمون دوربین-واتسون<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. چنانچه مقدار این آماره در بازه‌ی (۲/۵-۱/۵) قرار گیرد، می‌توان استقلال خطاها را پذیرفت. در صورتی که فرضیه استقلال خطاها رد شود و خطاها با یکدیگر همبستگی داشته باشند، امکان استفاده از مدل رگرسیون ارائه شده وجود ندارد.

ب) بررسی نرمال بودن خطاها: علاوه بر استقلال خطاها، خطاها باید دارای توزیع نرمال با میانگین صفر باشند. بدین منظور باید پس از محاسبه مقادیر استاندارد خطاها، نمودار توزیع داده‌ها و نمودار نرمال آن‌ها رسم شود و مقایسه بین این دو نمودار صورت گیرد. بدیهی است که در صورت عدم برقراری این شرط نیز نمی‌توان مدل رگرسیونی را مورد استفاده قرار داد.

ج) بررسی هم‌خطی: هم‌خطی در یک معادله رگرسیونی بدین معنا است که بین متغیرهای مستقل همبستگی بالایی وجود دارد. در این حالت ممکن است حتی با وجود بالا بودن  $R^2$ ، مدل دارای اعتبار بالایی نباشد. وجود مسأله هم‌خطی بین متغیرها را نیز می‌توان با کنترل مقادیر ضریب تورم واریانس<sup>۲</sup> (VIF) و تولرانس<sup>۳</sup> مورد بررسی قرار داد. هر چه میزان تولرانس کم باشد اطلاعات مربوط به متغیرها کم بوده و مشکلاتی در استفاده از رگرسیون ایجاد خواهد شد. ضریب تورم واریانس معکوس تولرانس است و

---

<sup>۱</sup> Durbin-Watson

<sup>۲</sup> Variance Inflation Factor

<sup>۳</sup> Tolerance

هر چه افزایش یابد، واریانس ضرایب رگرسیون افزایش یافته و رگرسیون را نامناسب می‌سازد. می‌توان گفت در شرایطی که VIF بیشتر از ۱۰ و تولرانس کمتر از ۰/۱ باشد، وجود هم‌خطی بین متغیرهای مستقل محتمل است و مقدار VIF بیشتر از ۳۰ نشان‌دهنده جدی بودن این مشکل است.

## ۵-۵ تحلیل مؤلفه‌های اصلی

تحلیل مؤلفه‌های اصلی از روش‌های آماری چند متغیره و مبتنی بر مقادیر ویژه است که در آن با استفاده از مقادیر ویژه<sup>۱</sup> و بردارهای ویژه<sup>۲</sup> جهت‌هایی با حداکثر تغییرپذیری شناسایی می‌شود. سپس با تعریف مؤلفه‌های جدیدی که ترکیب خطی از متغیرهای اولیه هستند، ابعاد متغیرهای اولیه کاهش یافته و نقش هر یک از این متغیرها در تغییرپذیری مشخص می‌شود. سال‌هاست که محققان این روش را در علوم مختلف استفاده نموده‌اند. این روش ابتدا در سال ۱۹۰۱ توسط پیرسون<sup>۳</sup> معرفی شد و پس از آن هتلینگ<sup>۴</sup> در سال ۱۹۳۳ روش‌های محاسباتی آن را پیشنهاد نمود و آن را گسترش داد (فرشادفر، ۱۳۸۴). افزایش تعداد متغیرها با افزایش تعداد ضرایب همبستگی، روابط بین متغیرها را بسیار گسترش خواهد داد. از آنجایی که تحلیل داده‌های چندگانه نقش اساسی در تحلیل اطلاعات دارد، نیاز به تکنیک‌هایی در راستای کاهش ابعاد داده‌ها احساس می‌شود.

هدف از تحلیل مؤلفه‌های اصلی این است که واریانس موجود در داده‌ها توسط مؤلفه‌هایی ارائه شود که مستقل از هم بوده و هیچ همبستگی بین آن‌ها وجود ندارد. اولین مؤلفه تا آنجا که ممکن است علت بیشترین واریانس موجود در داده‌ها خواهد بود. بیشترین واریانس ممکن پس از مؤلفه اول توسط مؤلفه دوم ارائه می‌شود. تا جایی که در یک مجموعه مطالعاتی با  $n$  متغیر، اولین مؤلفه تا  $n$  امین مؤلفه، کل

---

<sup>۱</sup> Eigenvalues

<sup>۲</sup> Eigenvectors

<sup>۳</sup> Pearson

<sup>۴</sup> Hotelling

واریانس مربوط به داده‌ها را نشان می‌دهند. بنابراین PCA تنها به وسیله‌ی مجموعه‌ای از فرآیندها، داده‌های اضافی از یک مجموعه از متغیرهای دارای همبستگی را حذف می‌کند و آن متغیرها را در یک مجموعه کوچک‌تر بیان می‌کند. مهم‌ترین ویژگی بعد کاهش یافته این است که با اینکه پارامترهای زاید را حذف می‌کند، تأثیر اکثر پارامترهای مهم را به همراه دارد.

در حالت تئوری، اگر یک مجموعه  $p$  متغیری  $X_1, X_2, \dots, X_p$  داشته باشیم، PCA متغیرهای اصلی را با استفاده از ماتریس همبستگی متغیرها، به  $p$  متغیر  $PC_1, PC_2, \dots, PC_p$  که فاقد همبستگی با یکدیگر هستند، تبدیل می‌کند. این متغیرهای فاقد همبستگی، مؤلفه‌های اصلی مجموعه داده‌ها هستند که به صورت رابطه (۶-۵) معرفی می‌شوند (Suzuki et al, 1994).

$$PC_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1p}X_p$$

$$PC_2 = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2p}X_p$$

$$PC_p = a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2 + \dots + a_{pp}X_p \quad (۶-۵)$$

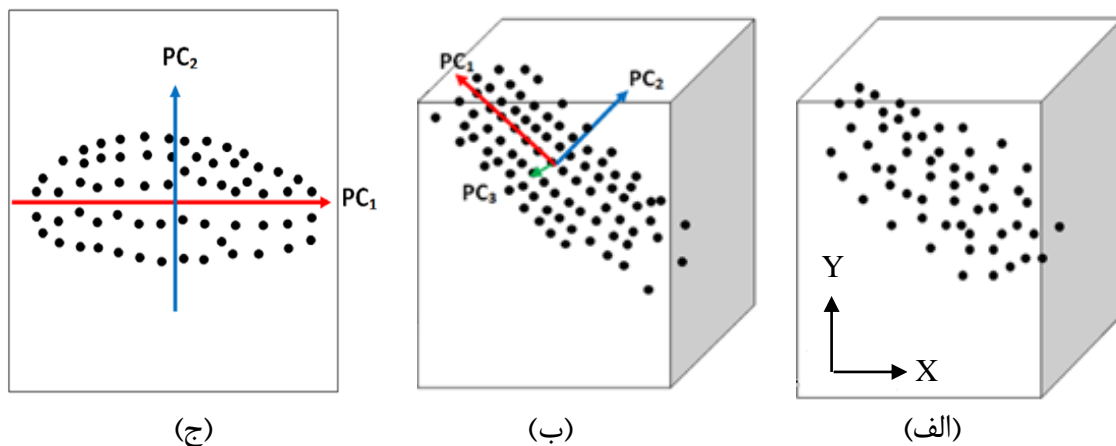
در این معادلات  $a_{ij}$  ها مقدار کواریانس بین دو متغیر هستند. بنابراین با تعریف  $p$  مؤلفه مستقل جدید، می‌توان کل واریانس موجود در داده‌ها را توجیه کرد، به‌طوری‌که رابطه (۷-۵) همواره برای مؤلفه‌های ایجاد شده برقرار است. البته هنگام تجزیه متغیرها به مؤلفه‌های جدید، همواره امید بر آن است که واریانس تعدادی از مؤلفه‌ها آنقدر کم باشد که صرف نظر کردن از آن مشکلی ایجاد نکند. در این حالت، تغییرات در مجموعه داده‌ها با تعداد کمتری از متغیرهای PC و البته با برخورداری از واریانس‌های قابل توجیه، توضیح داده می‌شود.

$$Var(PC_1) \geq Var(PC_2) \geq \dots \geq Var(PC_p) \quad (۷-۵)$$

در شکل (۵-۳-الف) مجموعه‌ای از داده‌ها که در فضای مختصات پراکنده شده‌اند، نشان داده شده است. این پراکندگی در جهت دو محور  $X$  و  $Y$  قرار ندارد. بنابراین جهتی که واریانس بیشتری از داده‌ها را

در بر می‌گیرد، به عنوان جهت اصلی در نظر گرفته می‌شود. جهات اصلی که داده‌ها در آن تغییر می‌کنند با محور  $PC_1$  به عنوان مؤلفه اصلی اول و محور  $PC_2$  به عنوان مؤلفه اصلی دوم و عمود بر محور اول، نشان داده شده است (۵-۳-ب). پس از آن با انتقال محورها به راستای  $PC_1$  و  $PC_2$ ، ضمن آن که محورها در راستای بیشترین واریانس داده‌ها قرار می‌گیرند، داده‌ها مجدداً همبستگی پیدا می‌کنند (۵-۳-ج). با توجه به این که دوران<sup>۱</sup> به نحوی صورت می‌گیرد که محورها با زاویه ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر قرار می‌گیرند، کواریانس بین مؤلفه‌ها صفر خواهد بود (Engel, 2007).

در این مختصات جدید، واریانس در جهت محور  $PC_1$  بزرگتر از محور  $PC_2$  است. با توجه به اینکه PCA متغیرهای جدید را به صورت ترکیبی از متغیرهای اصلی محاسبه می‌کند، هرچقدر همبستگی متغیرهای اولیه بیشتر باشد، واریانس مؤلفه اصلی اول بیشتر است. بنابراین مؤلفه‌های اصلی با تشکیل ماتریس کواریانس داده‌های اولیه و تعیین مقادیر ویژه و بردارهای ویژه آن ماتریس، تعیین می‌شوند.



شکل ۵-۳: پراکندگی داده‌ها و تعیین جهات مؤلفه‌های اصلی (Engel, 2007)  
 الف) پراکندگی داده‌ها نسبت به محورهای مختصات (ب) جهت مؤلفه‌های اصلی  
 ج) جهت مؤلفه‌های اصلی پس از چرخش

<sup>۱</sup> Rotation



اگر  $\Sigma$  ماتریس کواریانس،  $I$  ماتریس یکه،  $\lambda$  مقدار ویژه و  $A$  بردارهای ویژه متناظر با مقادیر ویژه باشند، مؤلفه‌های اصلی با تعیین مقادیر ویژه و بردارهای ویژه با استفاده از روابط (۵-۹) و (۵-۱۰) برای ماتریس  $\Sigma$  ارائه شده در رابطه (۵-۸) به دست می‌آیند (فرشادفر، ۱۳۸۴).

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \text{COV}(x_1, x_1) & \text{COV}(x_1, x_2) & \dots & \text{COV}(x_1, x_p) \\ \text{COV}(x_2, x_1) & \text{COV}(x_2, x_2) & \dots & \text{COV}(x_2, x_p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{COV}(x_p, x_1) & \text{COV}(x_p, x_2) & \dots & \text{COV}(x_p, x_p) \end{bmatrix} \quad (۵-۸)$$

$$|\Sigma - \lambda I| = 0 \quad (۵-۹)$$

$$\Sigma A = \lambda A \quad (۵-۱۰)$$

انتخاب چند مؤلفه اصلی اول که بیشترین مقدار واریانس را دارند و به عنوان مؤلفه‌های اصلی شناخته می‌شوند، از اساسی‌ترین اقدامات در تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی است؛ چراکه با انتخاب چند مؤلفه اصلی اول، سایر مؤلفه‌ها از محاسبات حذف می‌شوند. به منظور تعیین تعداد مؤلفه‌های اصلی مورد نیاز که بیشترین تغییرات داده‌ها را در بر داشته‌اند، می‌توان از نموداری تحت عنوان اسکری پلات<sup>۱</sup>، که در آن مقادیر ویژه در مقابل شماره مؤلفه‌ها رسم می‌شوند، استفاده کرد. در این نمودار مرز بین مؤلفه‌های اصلی و غیر اصلی، محلی است که شیب نمودار کم شده و نمودار میل به خطی شدن پیدا می‌کند و این نقطه محلی است که مقادیر ویژه در مقابل تغییر شماره مؤلفه تغییر چندانی ننماید.

غیر از نمودار اسکری پلات می‌توان از نمودار سه بعدی، برای نشان دادن توزیع فضایی متغیرهای تعیین شده در هر مؤلفه اصلی نیز استفاده کرد. این نمودار در حقیقت اهمیت هر متغیر را در هر مؤلفه اصلی نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> Scree-plot

## ۵-۶ جمع‌بندی

در این فصل تحلیل رگرسیون برای بررسی رابطه بین نرخ برش با متغیرهای مورد مطالعه انتخاب شد. به همین منظور پس از بیان توضیحاتی از رگرسیون چند متغیره خطی و غیر خطی، با توجه به تعداد زیاد متغیرها روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای کاهش حجم متغیرها و انتخاب مؤثرترین آن‌ها معرفی شد. مرحله بعد از تعیین یک رابطه رگرسیونی، بررسی معنی‌داری کل مدل رگرسیون و ضرایب متغیرهای مستقل و سه شرط استقلال خطاها، نرمال بودن خطاها و نبود هم‌خطی در معادله رگرسیونی ارائه شده است. با توجه به مشکل‌ساز بودن مسأله هم‌خطی در روابط رگرسیونی، ابتدا بایستی از مستقل بودن متغیرها و عدم همبستگی بین آن‌ها اطمینان حاصل کرد. بنابراین ضریب چولگی و کشیدگی، آزمون شاپیرو-ویلک و کلموگروف-اسمیرنوف، نمودار جعبه‌ای و QQ برای بررسی نرمال بودن داده‌ها پیش از بررسی همبستگی بین متغیرها معرفی شدند.

---

فصل ششم

ارائه مدل‌های پیش‌بینی

نرخ برش سنگ‌های کربناته

---

هدف از مطالعه نمونه‌هایی از سنگ‌های کربناته و بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها، ارائه مدلی است که قادر به پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های کربناته با توجه به مشخصات آن‌ها باشد. برای این منظور داده‌ها در دو بخش داده‌های آموزش و آزمون مورد استفاده قرار گرفتند. در ابتدا لازم است که تأثیر هر یک از متغیرهای مورد بررسی بر نرخ برش به‌طور جداگانه مشخص شود. پس از آن پارامترهای مؤثر بر نرخ برش، بر اساس روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی استخراج شدند و پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها و عدم همبستگی بین متغیرها، معادلات پیش‌بینی نرخ برش توسط رگرسیون چند متغیره خطی و غیرخطی ارائه شدند. در نهایت بعد از کنترل و اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده، بهترین مدل بر اساس معیارهای ارزیابی مطرح شده انتخاب و آنالیز حساسیت به منظور تعیین مقدار تأثیر پارامترهای ورودی بر روی هدف، برای مدل نهایی انجام شد.

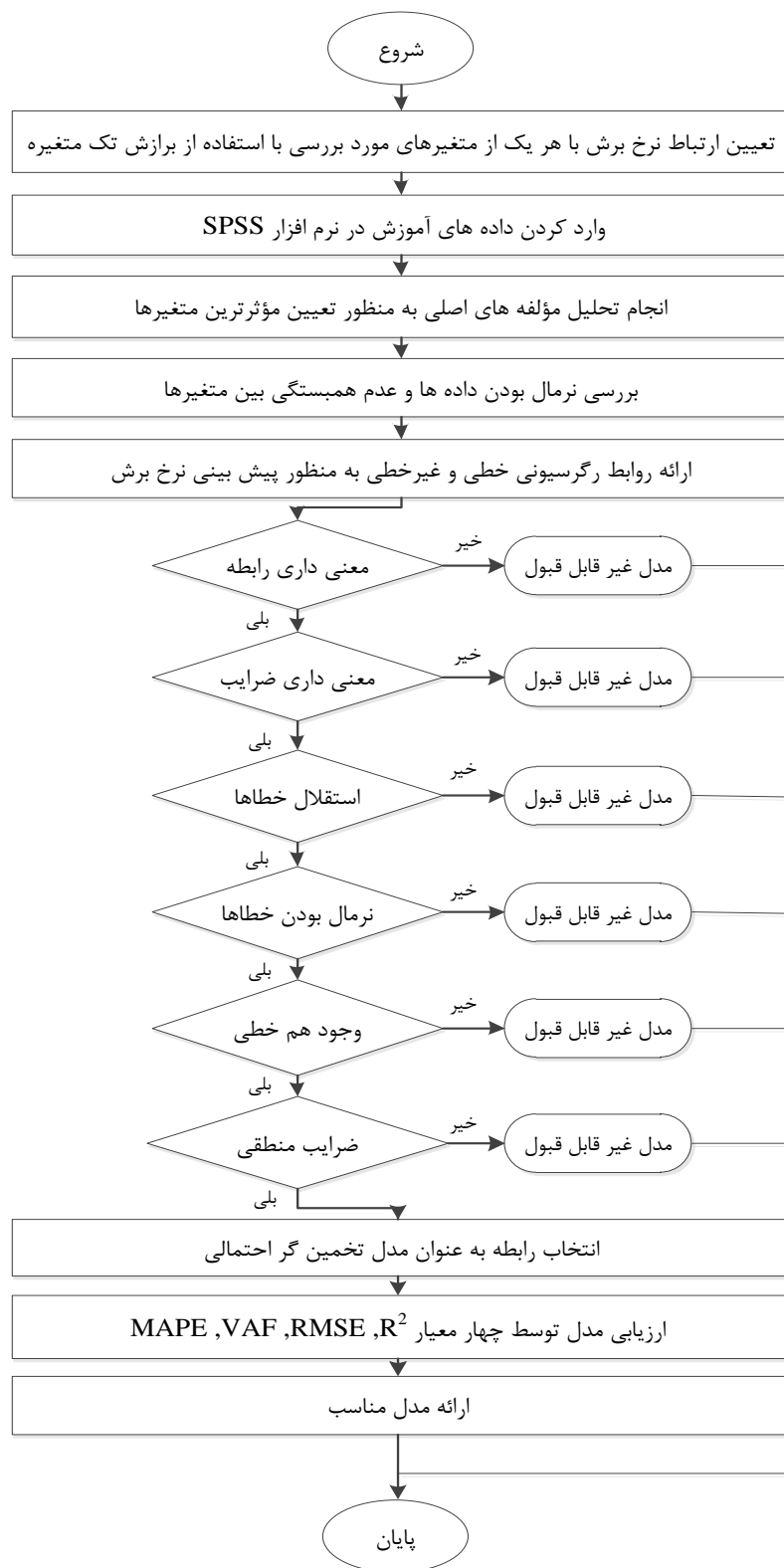
## ۲-۶ تفکیک پایگاه داده به داده‌های آموزش و آزمون

در این تحقیق به منظور تعیین مدل‌های پیش‌بینی کننده و تخمین‌گر، داده‌های مربوط به مشخصات فیزیکی و مکانیکی ۱۵ نمونه سنگ تراورتن و همچنین اطلاعات مربوط به برش آن‌ها به دو دسته داده‌های آموزش مدل و داده‌های آزمون مدل تقسیم‌بندی می‌شوند. طبق این تقسیم‌بندی، ۷۵ درصد از داده‌های پایگاه اطلاعات ساخته شده به صورت تصادفی برای آموزش و ۲۵ درصد باقیمانده برای آزمون استفاده شدند. از این رو، اطلاعات ۱۱ نمونه از این سنگ‌ها تحت عنوان داده‌های آموزش، برای مدل‌سازی و اطلاعات مربوط به ۴ نمونه دیگر تحت عنوان داده‌های آزمون، به منظور ارزیابی مدل نهایی ارائه شده استفاده شدند. اطلاعات آماری مربوط به داده‌های آموزش و آزمون در جداول (۱-۶) آورده شده است. در این مدل‌سازی پارامترهای مکانیکی مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، سختی اشمیت و سایش لوس آنجلس همراه با پارامترهای فیزیکی چگالی، تخلخل و میزان سیلیس به عنوان ورودی و نرخ برش به

عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شده است. پس از آن به منظور ارائه مدل‌های آماری برای پیش‌بینی نرخ برش، با وارد کردن داده‌ها در نرم‌افزار SPSS، تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای انتخاب مهم‌ترین پارامترها انجام و بررسی نرمال بودن داده‌ها و عدم همبستگی بین متغیرها بررسی شد. پس از ارائه روابط رگرسیونی و کنترل و اعتبارسنجی کلیه روابط ارائه شده بهترین مدل بر اساس معیارهای ارزیابی انتخاب شده است. شکل (۶-۱) مراحل انجام مطالعات آماری را نشان می‌دهد.

جدول ۶-۱: اطلاعات آماری داده‌های آموزش و آزمون

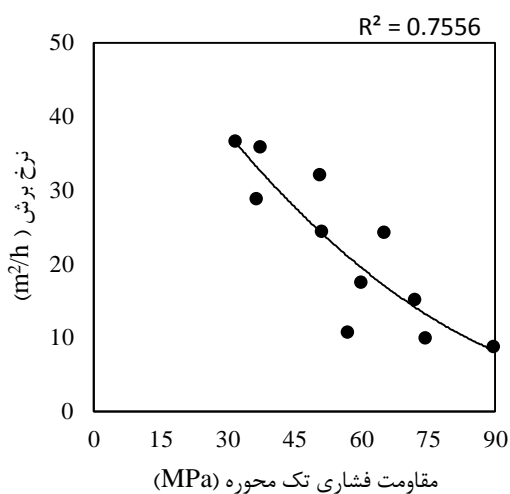
پارامتر	کمینه	بیشینه	میانگین	واریانس	داده‌های آموزش		
					ورودی	خروجی	
مقاومت فشاری تک محوره	۲۸/۴۱	۸۹/۵۱	۵۵/۲۵	۲۹۱/۱۹	ورودی		
مقاومت کششی	۳/۱۷	۶/۷۸	۵/۶۳	۱/۴۱			
سختی اشمیت	۳۹	۵۸	۴۸	۳۶/۲۴			
سایش لوس آنجلس	۲۵/۲۳	۴۲/۵۶	۳۲/۶۳	۳۹/۵۶			
چگالی	۲/۲۶۵	۲/۶۵	۲/۵۱	۰/۰۱			
تخلخل	۲/۳۴۹	۱۰/۲۱۷	۶/۹۷	۵/۲۳			
میزان سیلیس	۰/۱۹۵	۲/۳۴۵	۱/۰۷	۰/۶۳			
نرخ برش	۸/۹	۴۶/۵۶۶	۱۴/۶۷	۱۳۳/۰۱	خروجی	داده‌های آزمون	
مقاومت فشاری تک محوره	۳۶/۴۱	۷۴/۲۳	۴۹/۵۹	۳۱۱/۱۳	ورودی		
مقاومت کششی	۴/۶۴	۷/۵	۵/۷۹	۱/۴۷			
سختی اشمیت	۴۳/۳	۵۲/۲	۴۸/۸۸	۱۵/۸۵			
سایش لوس آنجلس	۲۸/۷	۳۴/۸۸	۳۱/۹۸	۶/۶۴			
چگالی	۲/۲۵	۲/۷	۲/۴۴	۰/۰۳۷			
تخلخل	۳/۹۴	۱۰/۸۶	۸/۴۵	۹/۶۹			
میزان سیلیس	۰/۴۳	۳/۰۳۴	۱/۳۹	۱/۲۸			
نرخ برش	۱۰	۳۵/۹۱	۲۶/۳۸	۱۲۷/۹۳	خروجی		



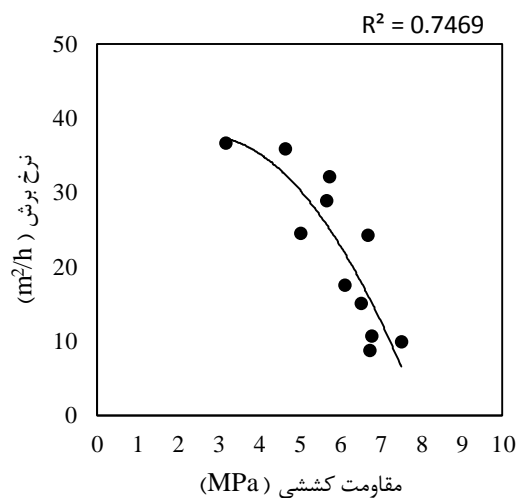
شکل ۶-۱: مراحل انجام مطالعات آماری

### ۳-۶ مدل‌های برازش تک متغیره

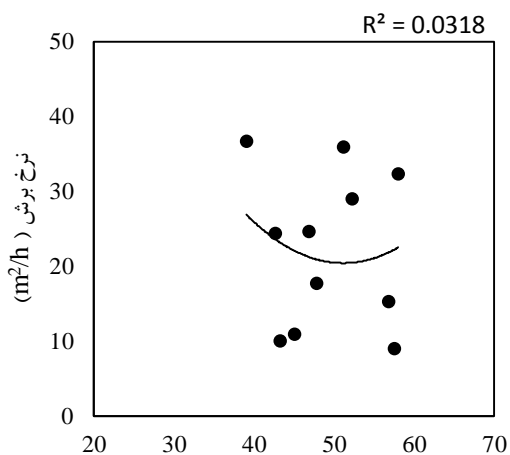
برای تعیین رابطه پارامترهای مورد بررسی با نرخ برش، در ابتدا می‌بایست تأثیر هر کدام از آن‌ها بر نرخ برش، به‌طور جداگانه مشخص شود. به همین منظور در این بخش، برازش‌های تک متغیره برای تعیین ارتباط تک تک متغیرها با نرخ برش انجام شده است. شکل (۲-۶) و (۳-۶) نتایج این برازش‌ها را برای هر دو دسته متغیرهای فیزیکی و مکانیکی نشان می‌دهد. در هر مورد بهترین منحنی با بالاترین ضریب تعیین ( $R^2$ ) بر داده‌ها برازش شده است. همان‌طور که دیده می‌شود تمامی متغیرها ارتباط خوبی با نرخ برش ندارند. نتایج نشان می‌دهد که ارتباط نرخ برش با مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی و چگالی روندی کاهشی دارد. به طوری که با افزایش این سه پارامتر نرخ برش کاهش می‌یابد. در حالی که با افزایش میزان تخلخل و سایش لوس آنجلس در سنگ‌ها، میزان نرخ برش نیز افزایش می‌یابد. نتایج برازش بین دو پارامتر سختی اشمیت و میزان سیلیس با نرخ برش نیز روند مشخصی را ارائه نمی‌کند که نشان از همبستگی کمتر این دو پارامتر با نرخ برش دارد. شاید بتوان عدم ارتباط نرخ برش با سختی اشمیت را تخلخل بالای نمونه‌های مورد آزمایش دانست؛ چرا که سختی اشمیت در مورد سنگ‌های خیلی نرم یا خیلی سخت دارای محدودیت بوده و نتایج قابل اطمینانی نمی‌دهد. از آنجایی که تأثیر میزان سیلیس در سنگ‌های گرانیتی محسوس‌تر است، نبود رابطه مشخص میان نرخ برش و میزان سیلیس را نیز می‌توان کربناته بودن سنگ‌های مورد مطالعه و کمتر بودن میزان سیلیس آن‌ها دانست.



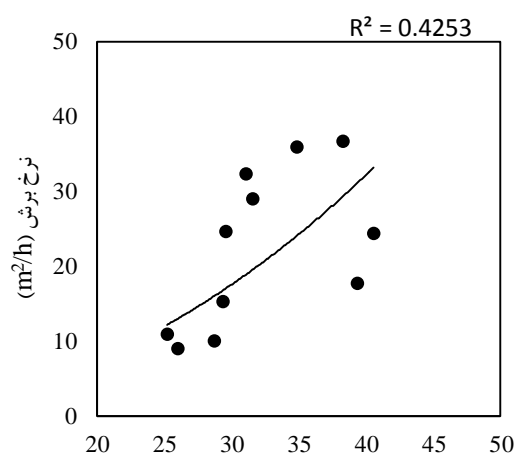
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

سختی اشمیت

سایش لوس آنجلس (%)

شکل ۶-۲: برازش تک متغیره بین نرخ برش و مشخصات مکانیکی نمونه‌ها

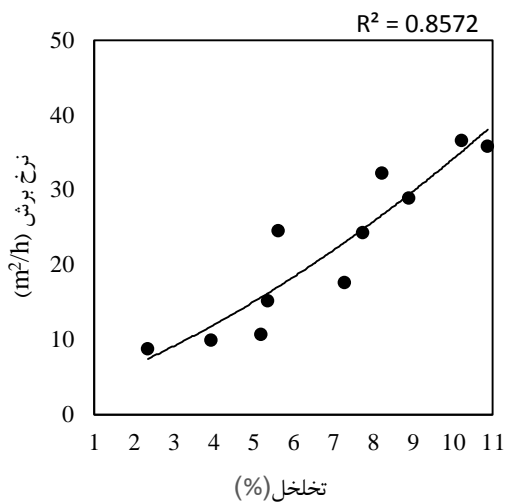
الف) برازش تک متغیره بین مقاومت کششی و نرخ برش

ب) برازش تک متغیره بین مقاومت فشاری تک محوره و نرخ برش

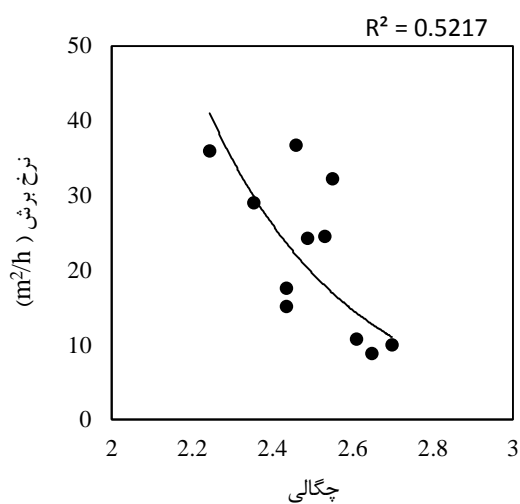
ج) برازش تک متغیره بین سایش لوس آنجلس و نرخ برش

د) برازش تک متغیره بین سختی اشمیت و نرخ برش

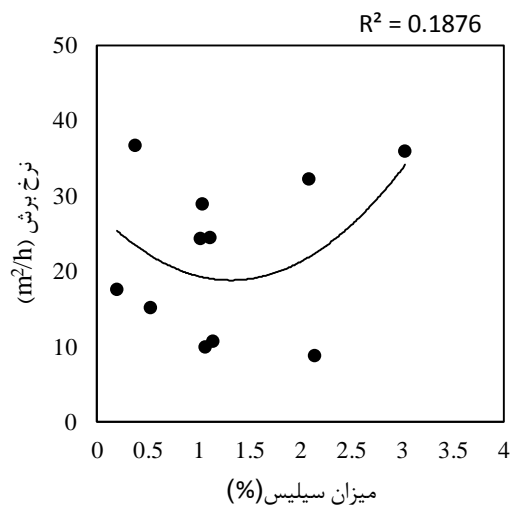




(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۶-۳: برازش تک متغیره بین نرخ برش و مشخصات فیزیکی نمونه‌ها

(الف) برازش تک متغیره بین چگالی و نرخ برش (ب) برازش تک متغیره بین تخلخل و نرخ برش

(ج) برازش تک متغیره بین میزان سیلیس و نرخ برش

## ۴-۶ تحلیل مؤلفه‌های اصلی

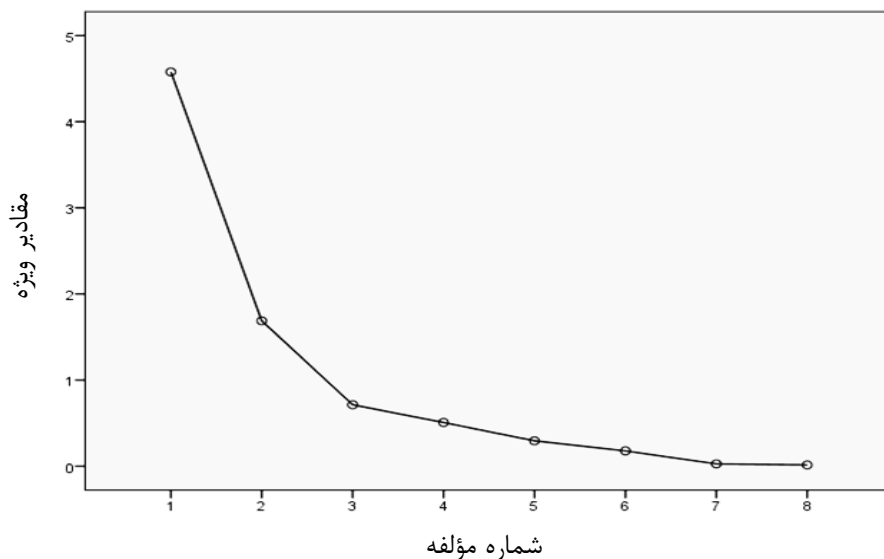
تحلیل مؤلفه‌های اصلی یک روش کاهش ابعادی است که برای استخراج مؤثرترین پارامترها استفاده می‌شود. این روش به وسیله مجموعه‌ای از فرآیندها، داده‌های اضافی را از یک مجموعه از متغیرهای دارای

همبستگی حذف کرده و آن متغیرها را در یک مجموعه کوچکتر بیان می‌کند. بنابراین داده‌ها از یک فضای ابعادی بزرگ به یک فضای ابعادی کوچکتر انتقال می‌یابند. بزرگترین مزیت این انتقال این است که بعد کاهش یافته در عین حال که پارامترهای زاید را حذف می‌کند، تأثیر اکثر پارامترهای مهم را به همراه دارد و راهی را برای درک ساختار داده‌های پیچیده فراهم می‌کند. بنابراین این روش را می‌توان راهی برای کاهش بعد و دسته‌بندی داده‌ها دانست. در این مرحله از تحقیق، PCA بر روی داده‌های مربوط به ۱۱ نمونه از سنگ‌های تراورتن در نرم‌افزار SPSS انجام شد. مشخصات مؤلفه‌های ایجاد شده در این روش در جدول (۶-۲) آورده شده است. تحلیل مؤلفه‌های اصلی به تعداد متغیرهای مورد بررسی مؤلفه ایجاد می‌کند و مؤلفه‌هایی با مقادیر ویژه بزرگتر از یک را به عنوان مؤلفه‌های اصلی در نظر می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که PCA تعداد مؤلفه‌های سیستم را با استفاده از تعیین ماتریس مقادیر ویژه و روابط ارائه شده در فصل قبل، از ۸ مؤلفه به دو مؤلفه کاهش داد. این دو مؤلفه ۷۸/۳۲۵٪ از کل واریانس متغیرها را نشان می‌دهند. بنابراین ۶ مؤلفه دیگر با توجه به مشارکت کمتر، از محاسبات حذف می‌شوند.

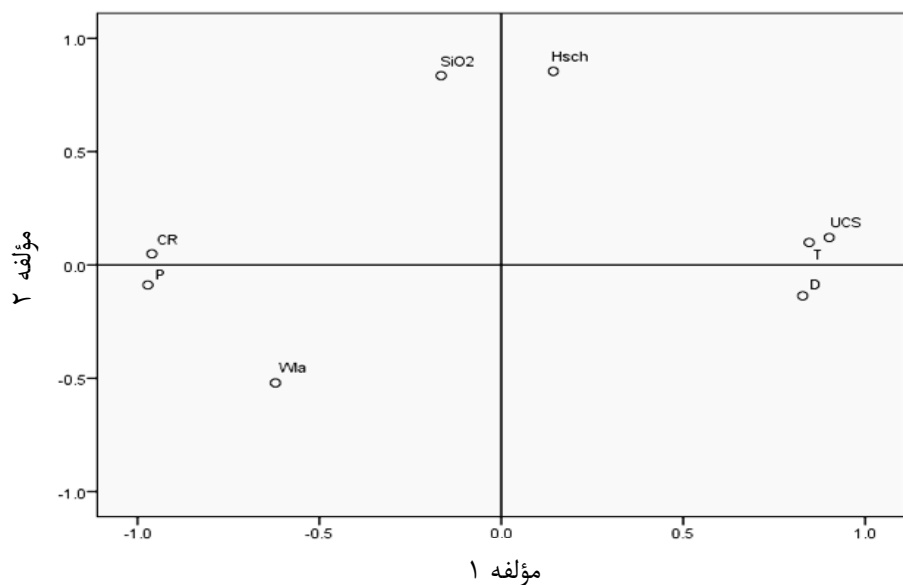
جدول ۶-۲: واریانس داده‌ها با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی

مؤلفه	مقادیر ویژه	واریانس(٪)	تجمعی(٪)
۱	۴/۵۷۸	۵۷/۲۲۹	۵۷/۲۲۹
۲	۱/۶۸۸	۲۱/۰۹۶	۷۸/۳۲۵
۳	۰/۷۱۳	۸/۹۱۹	۸۷/۲۴۴
۴	۰/۵۰۷	۶/۳۴۲	۹۳/۵۸۶
۵	۰/۲۹۴	۳/۶۷۹	۹۷/۲۶۵
۶	۰/۱۷۸	۲/۲۲۱	۹۹/۴۸۶
۷	۰/۰۲۷	۰/۳۳۷	۹۹/۸۲۲
۸	۰/۰۱۴	۰/۱۷۸	۱۰۰/۰۰۰

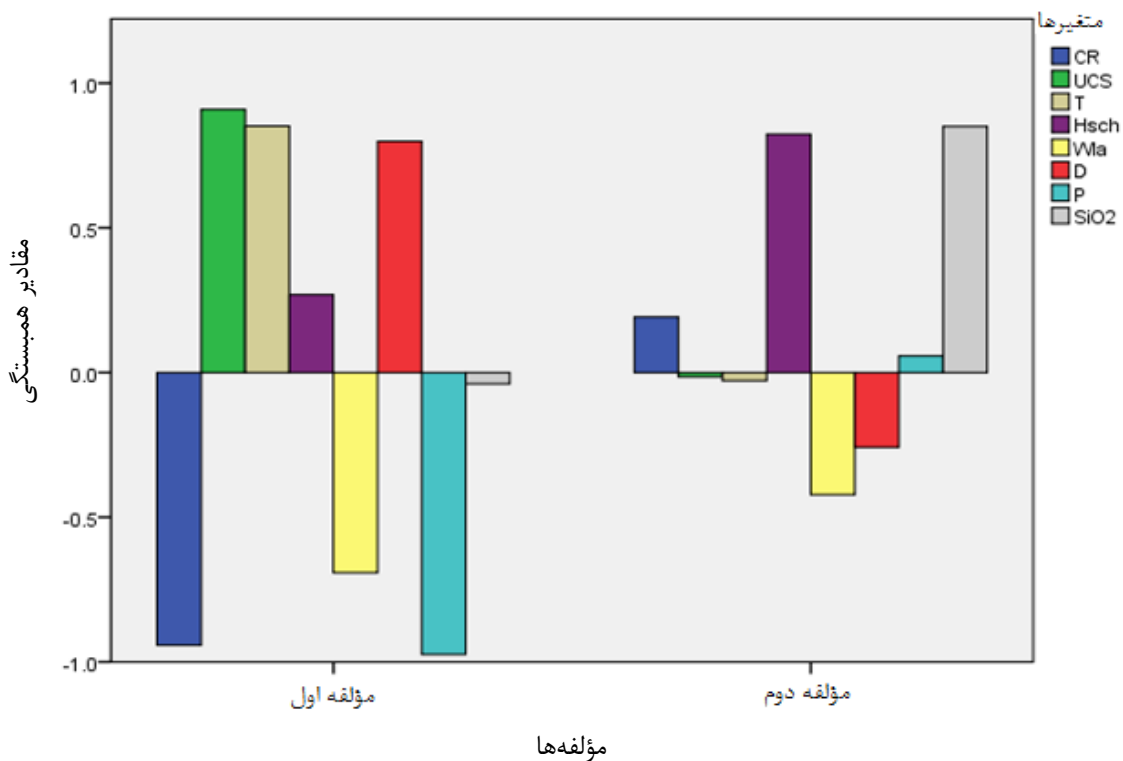
یک راه دیگر برای تعیین تعداد مؤلفه‌های اصلی مورد نیاز که بیشترین تغییرات داده‌ها را در بر داشته باشند، استفاده از نمودار اسکری پلات است که مقدار ویژه هر مؤلفه را نشان می‌دهد. این نمودار برای ۸ مؤلفه ایجاد شده در شکل (۴-۶) نشان داده شده است. هر نقطه در این نمودار شماره مؤلفه و مقدار ویژه مربوط به آن مؤلفه را نشان می‌دهد. نمودار اسکری پلات ایجاد شده نشان می‌دهد که از مؤلفه سوم به بعد با مقادیر ویژه کوچکتر از یک، نمودار میل به خطی شدن پیدا می‌کند. بنابراین دو مؤلفه اول به عنوان مؤلفه‌های اصلی انتخاب می‌شوند. علاوه بر این نمودار، نمای دو بعدی از ارتباط مؤلفه‌های اصلی و متغیرهای مؤثر نیز در شکل (۵-۶) نشان داده شده است. این شکل نیز نشان می‌دهد که متغیرهای CR،  $P$ ،  $T$ ،  $UCS$  و  $D$  با همبستگی بالا در مؤلفه اول و دو متغیر  $Hsch$  و  $SiO_2$  با همبستگی بالا در مؤلفه دوم مشاهده می‌شوند. بنابراین پارامترهای مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، سایش لوس آنجلس، چگالی و تخلخل از مؤلفه اول به عنوان متغیرهای مؤثر بر نرخ برش انتخاب می‌شوند و پارامترهای باقیمانده که تأثیر ناچیزی بر نرخ برش دارند، حذف می‌شوند. شکل (۶-۶) نمای دیگری از دو مؤلفه اصلی انتخاب شده و پارامترهای مؤثر در هر مؤلفه را به صورت واضح‌تر نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶: نمودار اسکری پلات برای کلیه مؤلفه‌ها



شکل ۵-۶: نمای دو بعدی دو مؤلفه اصلی و متغیرهای نشان داده شده در هر مؤلفه



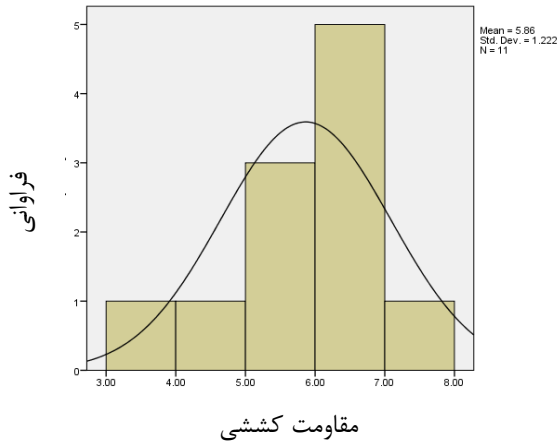
شکل ۶-۶: همبستگی بین متغیرها در دو مؤلفه اصلی  
 CR: نرخ برش، UCS: مقاومت فشاری تک‌محوره، T: مقاومت کششی، Hsch: سختی اشمیت،  
 Wla: سایش لوس‌آنجلس، D: چگالی، P: تخلخل، SiO<sub>2</sub>: میزان سیلیس

## ۵-۶ مدل‌های برازش چند متغیره خطی بر اساس مؤلفه‌های اصلی

به منظور انجام رگرسیون، اطلاعات مربوط به ۱۱ نمونه انتخابی به عنوان داده‌های آموزش برای مدل‌سازی استفاده شدند. برای پیش‌بینی نرخ برش با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندگانه از روش ورود توأم، که در آن کلیه متغیرهای مستقل به صورت همزمان وارد تحلیل می‌شوند، در نرم‌افزار SPSS استفاده شده است. برای رسیدن به این رابطه، نرخ برش به عنوان متغیر وابسته و مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی، سایش لوس آنجلس، چگالی و تخلخل به عنوان متغیرهای مستقل، در مدل وارد شدند. اولین مرحله پس از تعیین هر رابطه رگرسیونی بررسی معنی‌داری کل مدل رگرسیون و معنی‌داری تک تک ضرایب متغیرهای مستقل است. از آنجایی که مشکل اصلی در مدل‌های رگرسیونی، مسأله وجود هم‌خطی بین متغیرهای مستقل است، قبل از انجام رگرسیون بایستی همبستگی بین متغیرها بررسی شود. در این تحقیق با توجه به اینکه همه‌ی متغیرها دارای مقیاس نسبی و پیوسته هستند، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده است. برای بررسی همبستگی دو متغیر با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون در ابتدا لازم است که نرمال بودن داده‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

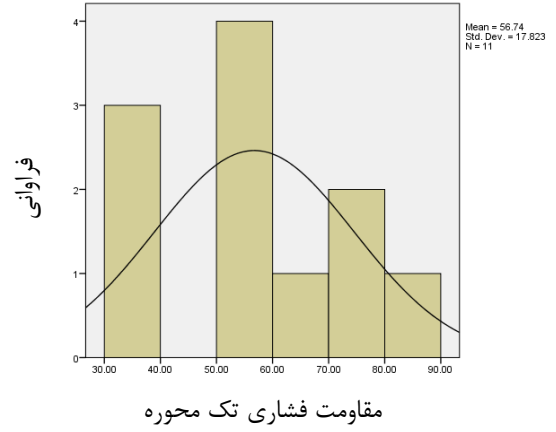
## ۱-۵-۶ بررسی نرمال بودن داده‌ها

به منظور بررسی نرمال بودن داده‌ها ابتدا هیستوگرام داده‌های مربوط به متغیرهای مورد مطالعه رسم شده است. شکل (۶-۷) این هیستوگرام را برای پنج متغیر مورد بررسی نشان می‌دهد. پس از آن نرمال بودن داده‌ها با استفاده از چهار روش بررسی چولگی و کشیدگی، آزمون شاپیرو-ویلک، نمودار جعبه‌ای و نمودار QQ مورد بررسی قرار گرفته است.



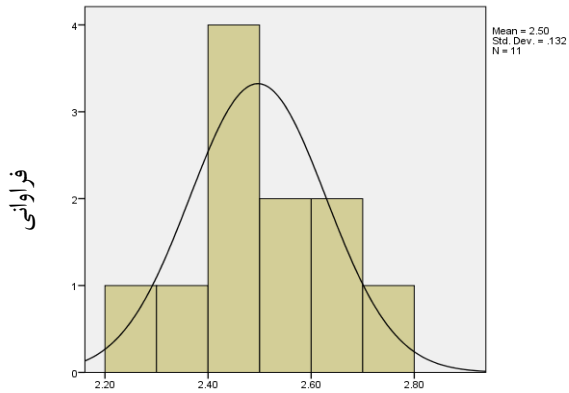
مقاومت کششی

(ب)



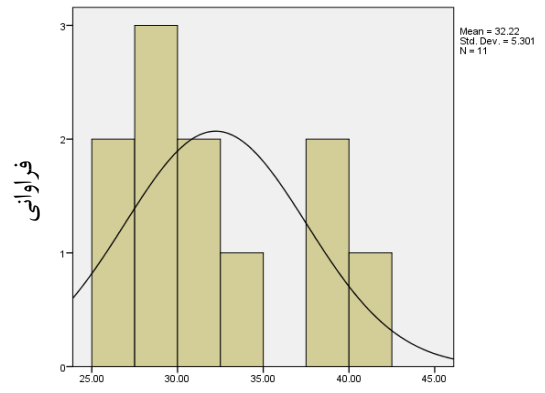
مقاومت فشاری تک محوره

(الف)



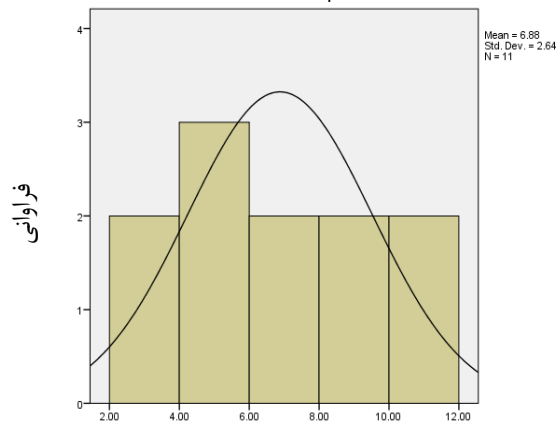
چگالی

(د)



سایش لوس آنجلس

(ج)



تخلخل

(ه)

شکل ۶-۷: هیستوگرام داده‌های متغیرهای مورد بررسی

الف) مقاومت فشاری تک محوره    ب) مقاومت کششی    ج) سایش لوس آنجلس    د) چگالی    ه) تخلخل

الف) بررسی چولگی و کشیدگی داده‌ها: همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، چولگی معیاری از تقارن یا عدم تقارن تابع توزیع و کشیدگی نشان‌دهنده ارتفاع یک توزیع است.

در حالت کلی چنانچه خطای استاندارد ضریب چولگی و کشیدگی داده‌ها خارج از بازه (۲، -۲) باشد، داده‌ها از توزیع نرمال برخوردار نبوده و می‌بایست قبل از هر آزمون مشروط به فرض نرمال بودن داده‌ها، داده‌ها را به توزیع نرمال نزدیک کرد. نتایج بررسی چولگی و کشیدگی داده‌ها در جدول (۳-۶) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های مربوط به هر پنج متغیر مورد بررسی دارای توزیع نرمال هستند.

جدول ۳-۶: مقادیر چولگی و کشیدگی برای متغیرهای مورد بررسی

متغیر	میزان چولگی	میزان کشیدگی
UCS	۰/۲۶۹	-۰/۴۹۷
$\delta_t$	-۱/۰۳۶	۱/۱۳۹
Wla	۰/۴۱۴	-۱/۱۵۶
D	-۰/۳	-۰/۰۰۸
N	-۰/۱۱۳	-۰/۷۳۷

ب) آزمون شاپیرو ویلک<sup>۱</sup>: در این تحقیق با توجه به حجم کم نمونه‌ها از میان دو روش آزمون شاپیرو- ویلک و آزمون کلموگروف- اسمیرنوف، آزمون شاپیرو- ویلک مورد استفاده قرار گرفت. معمولاً چنانچه شاخص معنی‌داری ارائه شده در این آزمون بیش از ۵ درصد باشد، می‌توان داده‌ها را با اطمینان بالایی نرمال فرض کرد. نتایج این آزمون برای پنج متغیر بررسی در جدول (۴-۶) آورده شده است. نتایج این آزمون نیز نرمال بودن داده‌ها را برای هر پنج متغیر مورد بررسی نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> Shapiro-Wilk

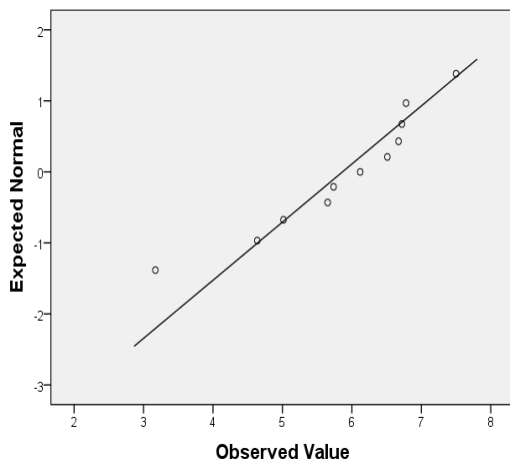
جدول ۴-۶: نتایج آزمون شاپیرو-ویلک برای متغیرهای مورد بررسی

متغیر	میزان شاخص شاپیرو-ویلک
UCS	۰/۸۵۷
$\delta_t$	۰/۳۸۵
Wla	۰/۳۵۰
D	۰/۹۷۶
N	۰/۹۳۴

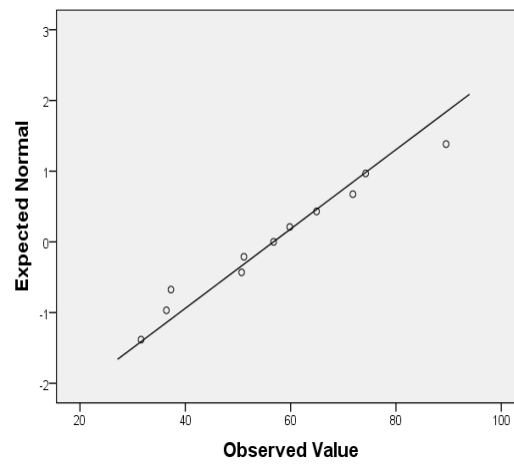
ج) نمودارهای جعبه‌ای و QQ: همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، نمودار جعبه‌ای معمولاً برای توزیع نرمال در مرکز نمودار قرار می‌گیرد و داده‌های یک توزیع نرمال در نمودار QQ نیز بر روی یک خط قرار می‌گیرند. نتایج مربوط به این دو نمودار برای داده‌های مربوط به هر متغیر، در شکل (۶-۸) و (۶-۹) آورده شده است.

نتایج حاصل از نمودارهای جعبه‌ای و QQ و همچنین نتایج آزمون شاپیرو-ویلک و بررسی چولگی و کشیدگی برای داده‌های هر متغیر نشان داد که داده‌ها از توزیع نرمال برخوردارند. بنابراین می‌توان از ضریب همبستگی پیرسون برای بررسی همبستگی متغیرها استفاده کرد.

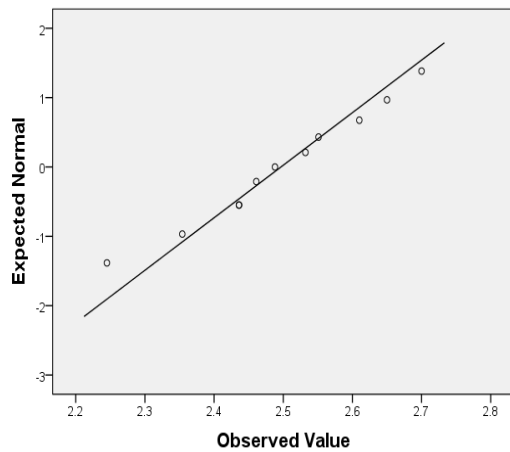




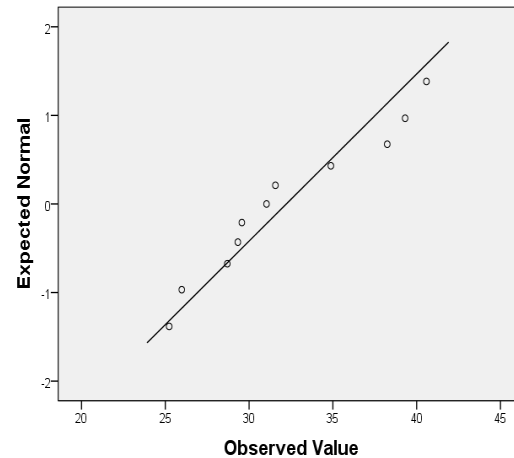
(ب)



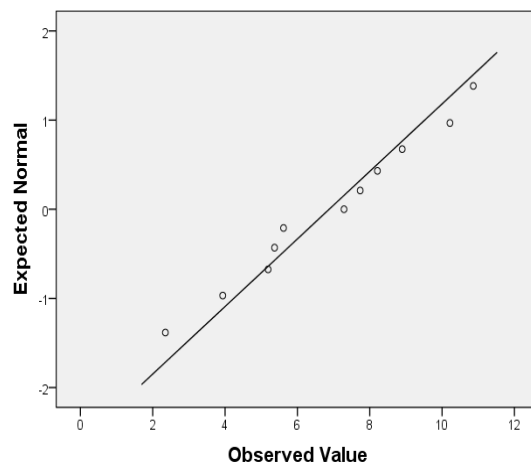
(الف)



(د)



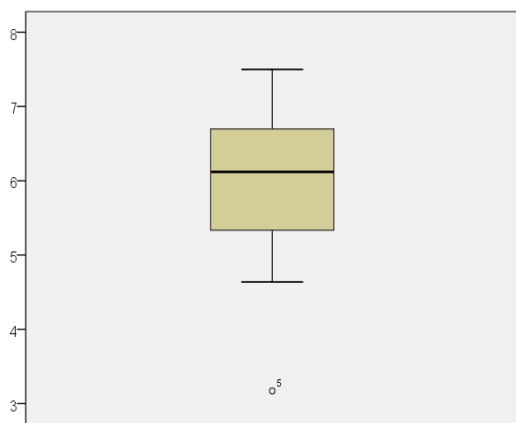
(ج)



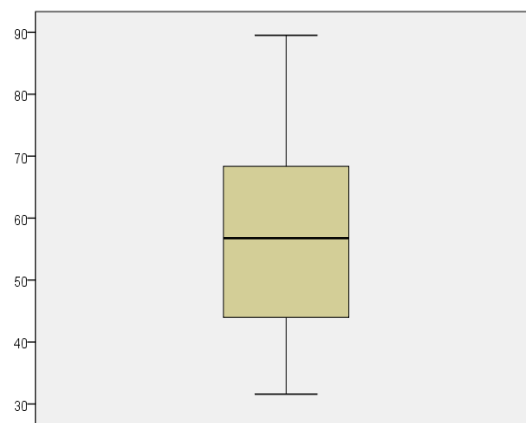
(ه)

شکل ۶-۸: نمودار QQ برای بررسی نرمال بودن داده‌ها

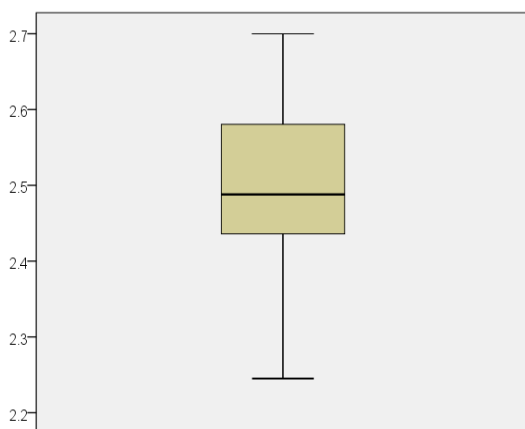
الف) مقاومت فشاری تک محوره (ب) مقاومت کششی (ج) سایش لوس آنجلس (د) چگالی (ه) تخلخل



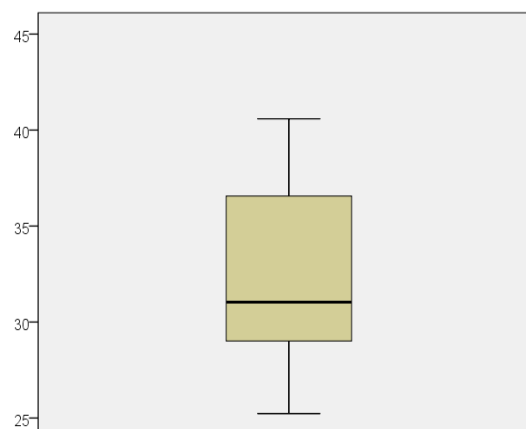
T  
(ب)



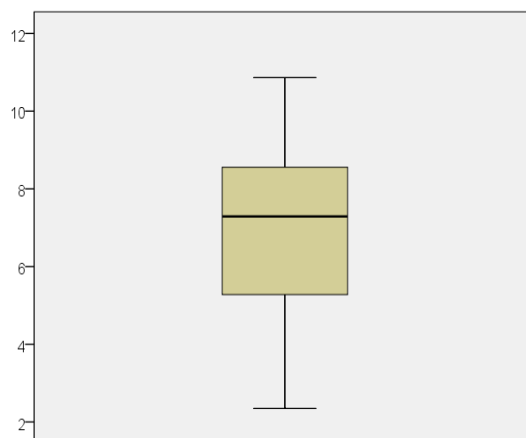
UCS  
(الف)



D  
(د)



Wla  
(ج)



P  
(ه)

شکل ۶-۹: نمودار جعبه‌ای برای بررسی نرمال بودن داده‌ها

(الف) مقاومت فشاری تک محوره (ب) مقاومت کششی (ج) سایش لوس آنجلس (د) چگالی (ه) تخلخل

## ۲-۵-۶ بررسی همبستگی متغیرها

با توجه به اینکه همبستگی دو متغیر به کار رفته در یک مدل باعث ایجاد مشکل هم‌خطی و عدم اعتبار رابطه ارائه شده می‌شود، بررسی عدم همبستگی بین متغیرها اهمیت بسزایی دارد. به منظور بررسی همبستگی در این تحقیق از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده است. در صورتی که سطح معنی‌داری بین دو متغیر مقداری کمتر از ۰/۰۵ داشته باشد، میان دو متغیر همبستگی وجود دارد. پس از حصول اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، بررسی همبستگی بین هر دو متغیر مورد مطالعه انجام شد. نتایج بررسی همبستگی نشان داد که دو پارامتر مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی با مقدار ضریب همبستگی ۰/۰۳ به هم وابسته‌اند. بنابراین از ورود این دو پارامتر در کنار هم در روابط ارائه شده خودداری شده است. ضریب همبستگی ۰/۲۱۰ و ۰/۱۸۹ به ترتیب بین متغیر سایش لوس آنجلس با دو متغیر مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی، نشان داد که سایش لوس آنجلس مستقل از هر دو پارامتر است. همچنین دو متغیر چگالی و تخلخل با ضریب همبستگی ۰/۰۳ به یکدیگر وابسته‌اند و نباید در یک رابطه در کنار یکدیگر قرار گیرند. این نتایج همبستگی بین تخلخل با متغیرهای مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی و سایش لوس آنجلس و همچنین همبستگی مقاومت فشاری تک محوره با چگالی را نشان داد. جدول (۵-۶) ضرایب همبستگی پیرسون بین هر پنج متغیر را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۶: ضرایب همبستگی بین متغیرها

n	d	Wla	$\delta_t$	UCS	
۰/۰	۰/۰۲۶	۰/۲۱۰	۰/۰۰۳	۱	UCS
۰/۰۰۹	۰/۰۷۳	۰/۱۸۹	۱	۰/۰۰۳	T
۰/۰۲	۰/۰۹	۱	۰/۱۸۹	۰/۲۱۰	Wla
۰/۰۰۳	۱	۰/۰۹	۰/۰۷۳	۰/۰۲۶	D
۱	۰/۰۰۳	۰/۰۲	۰/۰۰۹	۰/۰	P

از آن جایی که پارامترهای سنگ مستقل از هم نیستند، امکان وجود همبستگی بین هر جفت متغیر مورد بررسی وجود دارد. بنابراین قبل از ارائه مدل‌های رگرسیونی، لازم است که همبستگی بین هر دو متغیر موجود بررسی شود. وجود همبستگی بین متغیرهای مورد استفاده در مدل در صورتی که به مدل رگرسیون آسیبی وارد نکند، مشکلی ایجاد نخواهد کرد. بنابراین با توجه به اینکه پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بایستی در کنار هم در یک رابطه وارد شوند، پس از انجام رگرسیون خطی برای پیش‌بینی نرخ برش بر اساس متغیرهای ناهمبسته، مدل‌هایی نیز با حضور پارامترهای دارای همبستگی پیشنهاد شد. در این روابط بررسی ایجاد مشکل به دلیل وجود همبستگی بین متغیرها، به بررسی وجود هم‌خطی در روابط ارائه شده موقوف شده است.

روابط حاصل از انجام رگرسیون خطی چند متغیره و ضریب تعیین مربوط به هر رابطه در جدول (۶-۶) ارائه شده است. در کلیه روابط نرخ برش به عنوان متغیر وابسته و پنج مشخصه مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، سایش لوس آنجلس، چگالی و تخلخل به عنوان پارامترهای مستقل در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۶-۶: روابط حاصل از انجام رگرسیون خطی چند متغیره

شماره رابطه	رابطه	$R^2$
(a)	$CR = 31/0.49 - 0/44 UCS + 0/504 Wla$	0/796
(b)	$CR = 91/762 + 0/325 Wla - 5/337 \delta_t - 19/481 d$	0/79
(c)	$CR = 23/772 - 0/149 Wla + 2/875 n - 2/808 \delta_t$	0/907
(d)	$CR = 51/92 - 0/408 UCS - 8/26 d + 0/439 Wla$	0/802
(e)	$CR = 7/84 - 0/072 UCS - 0/154 Wla + 3/413 n$	0/861

مسأله بعدی پس از تعیین روابط رگرسیونی، تأمین اعتبار روابط ارائه شده است. از این رو بایستی، معنی‌داری کل مدل رگرسیون، معنی‌داری تک تک ضرایب متغیرهای مستقل، فرض استقلال خطاها، نرمال بودن خطاها و عدم هم‌خطی متغیرهای مستقل مورد بررسی قرار گیرد. به همین منظور جدول ANOVA برای بررسی سطح معنی‌داری به دست آمده برای هر رابطه و جدول ضرایب که نشان‌دهنده ضرایب متغیرهای مورد بررسی و آماره‌های کنترل هم‌خطی برای هر مدل رگرسیون است، به صورت جداول (۶-۷) تا (۶-۱۶) آورده شده است. آماره دوربین-واتسون نیز برای بررسی استقلال خطاها در این جداول ارائه شده است.

جدول ۶-۷: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه (a)

آماره هم‌خطی		t values	ضرایب استاندارد شده	ضرایب غیراستاندارد شده	متغیرهای مستقل	
VIF	تولرانس		Beta	B		
		۲/۱۳۹		۱۴/۵۱۳	۳۱/۰۴۹	ثابت
۱/۲۰۲	۰/۸۳۲	-۴/۳۱۸	-۰/۷۵۶	۰/۱۰۲	-۰/۴۴	UCS
۱/۲۰۲	۰/۸۳۲	۱/۴۷۰	۰/۲۵۷	۰/۳۴۳	۰/۵۰۴	Wla

جدول ۶-۸: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه (a)

خلاصه مدل					
تعداد	دوربین واتسون	خطای استاندارد تخمین	R <sup>2</sup> تعدیل شده	R <sup>2</sup>	R
۱۱	۱/۶۸۸	۵/۲۴۴	۰/۷۴۵	۰/۷۹۶	۰/۸۹۲
تحلیل واریانس (ANOVA)					
سطح معنی‌داری	میزان F	میانگین مجذورات	درجه آزادی	مجموع مجذورات	منبع تغییرات
۰/۰۰۲	۱۵/۶۳۳	۴۲۹/۹۱۲	۲	۸۵۹/۸۲۳	رگرسیون
		۲۷/۵	۸	۲۱۹/۹۹۷	باقیمانده
			۱۰	۱۰۷۹/۸۲۰	کل

جدول ۹-۶: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه (b)

آماره هم‌خطی		t values		ضرایب استاندارد شده	ضرایب غیراستاندارد شده	متغیرهای مستقل
VIF	تولرانس			Beta	B	
		۱/۸۷۶			۴۸/۹۲۲	ثابت
۱/۷۲۵	۰/۵۸۰	-۱/۰۸۷	-۰/۲۴۸		۱۷/۹۱۷	D
۱/۴۴۹	۰/۶۹۰	۰/۷۹۵	۰/۱۶۶		۰/۴۰۹	Wla
۱/۵۰۹	۰/۶۶۳	-۲/۹۴۸	-۰/۶۲۸		۱/۸۱۱	T

جدول ۱۰-۶: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه (b)

خلاصه مدل					
تعداد	دوربین واتسون	خطای استاندارد تخمین	R <sup>2</sup> تعدیل شده	R <sup>2</sup>	R
۱۱	۲/۰۴۲	۵/۶۹۵	۰/۷	۰/۷۹	۰/۸۸۹
تحلیل واریانس (ANOVA)					
سطح معنی‌داری	میزان F	میانگین مجذورات	درجه آزادی	مجموع مجذورات	منبع تغییرات
۰/۰۰۹	۸/۷۶۵	۲۸۴/۲۶۵	۳	۸۵۲/۷۹۵	رگرسیون
		۳۲/۴۳۲	۷	۲۲۷/۰۲۵	باقیمانده
			۱۰	۱۰۷۹/۸۲	کل

جدول ۱۱-۶: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه (c)

آماره هم‌خطی		t values		ضرایب استاندارد شده	ضرایب غیراستاندارد شده	متغیرهای مستقل
VIF	تولرانس			Beta	B	
		۱/۷۶۸			۱۳/۴۴۸	ثابت
۲/۲۶	۰/۴۴۲	-۱/۹۰۷	-۰/۳۳		۱/۴۷۳	T
۱/۹۴۱	۰/۵۱۵	-۰/۴۷۲	-۰/۰۶۷		۰/۳۱۵	Wla
۳/۴۸۹	۰/۲۸۷	۳/۳۹۵	۷۳۰		۲/۸۷۵	P

جدول ۶-۱۲: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه (c)

خلاصه مدل					
R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> تعدیل شده	خطای استاندارد تخمین	دوربین واتسون	تعداد
۰/۹۵۲	۰/۹۰۷	۰/۸۶۷	۳/۷۸۵	۱/۷۳۸	۱۱
تحلیل واریانس (ANOVA)					
منبع تغییرات	مجموع مجزورات	درجه آزادی	میانگین مجزورات	میزان F	سطح معنی‌داری
رگرسیون	۹۷۹/۵۳۵	۳	۳۲۶/۵۱۲	۲۲/۷۹۱	۰/۰۰۱
باقیمانده	۱۰۰/۲۸۵	۷	۱۴/۳۲۶		
کل	۱۰۷۹/۸۲	۱۰			

جدول ۶-۱۳: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه (d)

متغیرهای مستقل	ضرایب غیراستاندارد شده	ضرایب استاندارد شده	t values	آماره هم‌خطی	
	B	Beta		VIF	تولرانس
ثابت	۵۱/۹۲۰	۵۰/۷۷۷	۱/۰۲۳		
UCS	-۰/۴۰۸	۰/۱۳۲	-۳/۱۰۲	۱/۷۹۵	۰/۵۵۷
D	-۸/۲۶۰	۱۹/۱۶۱	-۰/۴۳۱	۲/۰۹۰	۰/۴۷۸
Wla	۰/۴۳۹	۰/۳۹۲	۱/۱۲۰	۱/۴۱۱	۰/۷۰۹

جدول ۶-۱۴: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه (d)

خلاصه مدل					
R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> تعدیل شده	خطای استاندارد تخمین	دوربین واتسون	تعداد
۰/۸۹۵	۰/۸۰۲	۰/۷۱۶	۵/۵۳۳	۱/۸۲۷	۱۱
تحلیل واریانس (ANOVA)					
منبع تغییرات	مجموع مجزورات	درجه آزادی	میانگین مجزورات	میزان F	سطح معنی‌داری
رگرسیون	۸۶۵/۵۱۳	۳	۲۸۸/۵۰۴	۹/۴۲۴	۰/۰۰۷
باقیمانده	۲۱۴/۳۰۷	۷	۳۰/۶۱۵		
کل	۱۰۷۹/۸۲	۱۰			

جدول ۶-۱۵: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه (e)

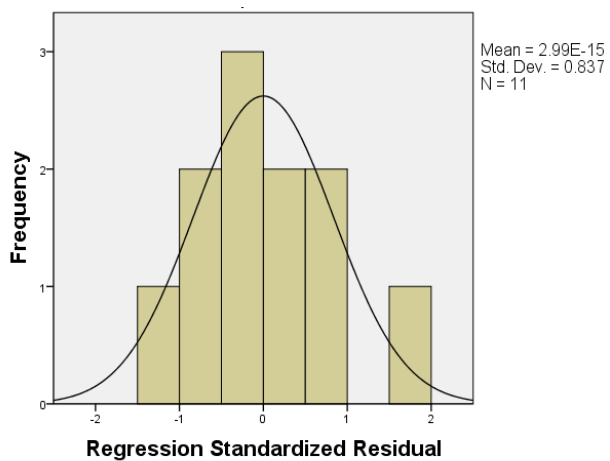
آماره هم‌خطی		t values		ضرایب استاندارد شده	ضرایب غیراستاندارد شده	متغیرهای مستقل	
VIF	تولرانس			Beta	خطای استاندارد	B	
		۰/۴۳۲			۱۸/۱۵۹	۷/۸۴	ثابت
۲/۹۴۴	۰/۳۴	-۰/۳۲۵		۰/۰۷۹	۰/۴۷۴	-۰/۱۵۴	W1a
۱۱/۶۲۵	۰/۰۸۶	۱/۸۰۴		۰/۱۸۶۷	۱/۸۹۲	۳/۴۱۳	P
۷/۳۹۲	۰/۱۳۵	-۰/۳۲۰		-۰/۱۲۳	۰/۲۲۳	-۰/۰۷۲	UCS

جدول ۶-۱۶: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه (e)

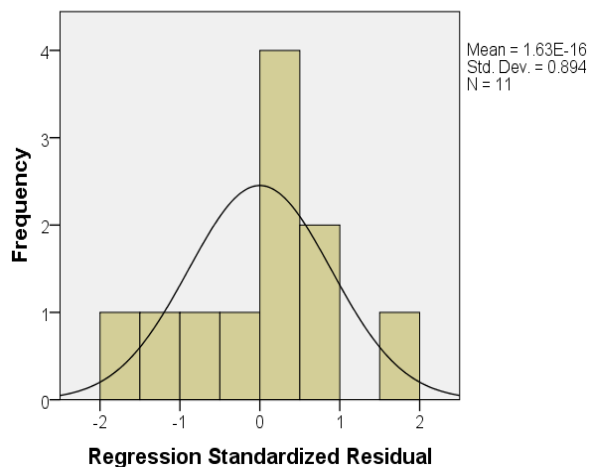
خلاصه مدل						
	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> تعدیل شده	خطای استاندارد تخمین	دوربین واتسون	تعداد
	۰/۹۲۸	۰/۸۶۱	۰/۸۰۱	۴/۶۳۲	۱/۸۶۴	۱۱
تحلیل واریانس (ANOVA)						
منبع تغییرات	مجموع مجذورات	درجه آزادی	میانگین مجذورات	میزان F	سطح معنی داری	
رگرسیون	۹۲۹/۶۶۴	۳	۳۰۹/۸۸۸	۱۴/۴۴۶	۰/۰۰۲	
باقیمانده	۱۵۰/۱۵۶	۷	۲۱/۴۵۱			
کل	۱۰۷۹/۸۲	۱۰				

برای بررسی نرمال بودن خطاها نیز نمودار توزیع خطاها مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نمودار توزیع فراوانی و توزیع نرمال و مقادیر میانگین بسیار کوچک (نزدیک به صفر) و انحراف معیار نزدیک به یک برای هر رابطه، نشان می‌دهد که توزیع خطاها تقریباً نرمال است. علاوه بر این بررسی نمودار همگنی واریانس‌ها که یک نمودار پراکنش از مانده‌های استاندارد شده در مقابل مقادیر برازشی استاندارد شده است نیز حالت مطلوبی را برای هر رابطه نشان داد؛ چرا که در هر رابطه مانده‌ها به شکل تصادفی در یک نوار افقی پیرامون یک مقدار مانده صفر پراکنده شده‌اند. بنابراین می‌توان با اطمینان هر پنج رابطه را برای تخمین به کار برد. نمودار مربوط به توزیع فراوانی خطاها در شکل (۶-۱۰) و نمودار مربوط به همگنی واریانس‌ها در شکل (۶-۱۱) برای هر رابطه آورده شده است.

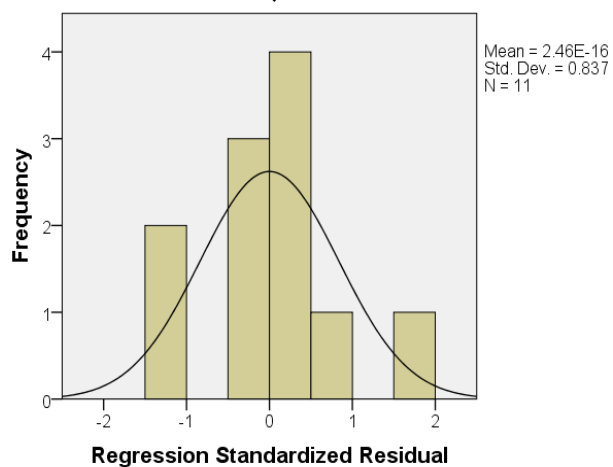




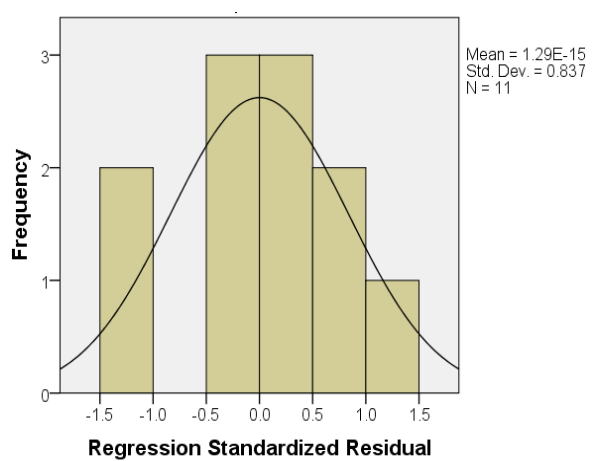
(ب)



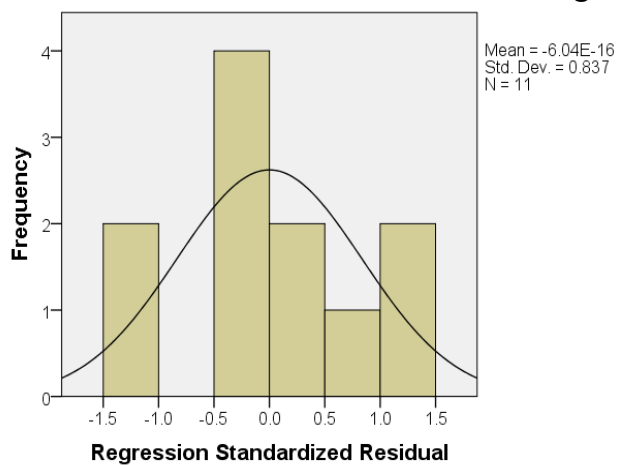
(الف)



(د)



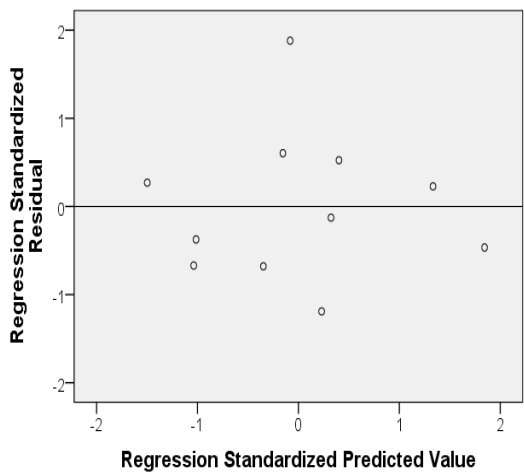
(ج)



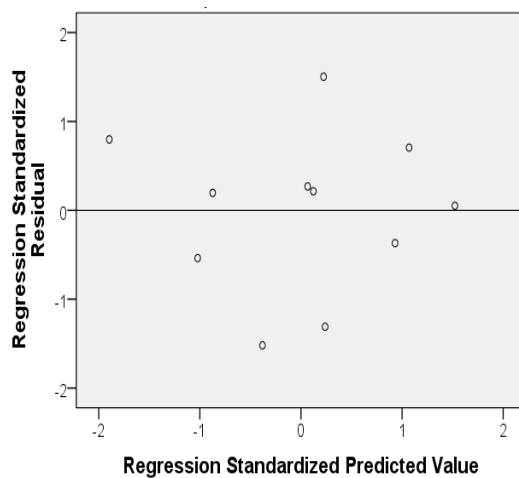
(ه)

شکل ۶-۱۰: توزیع فراوانی خطاها برای روابط خطی ارائه شده

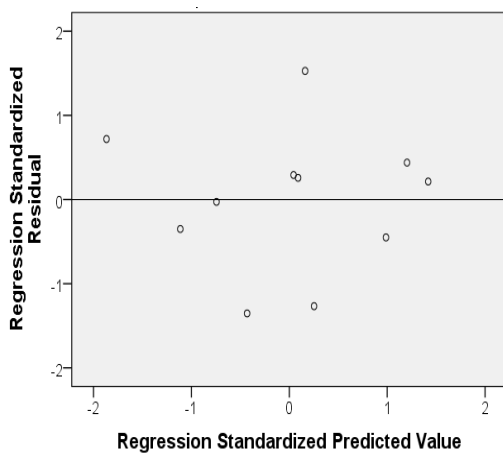
الف) رابطه a    ب) رابطه b    ج) رابطه c    د) رابطه d    ه) رابطه e



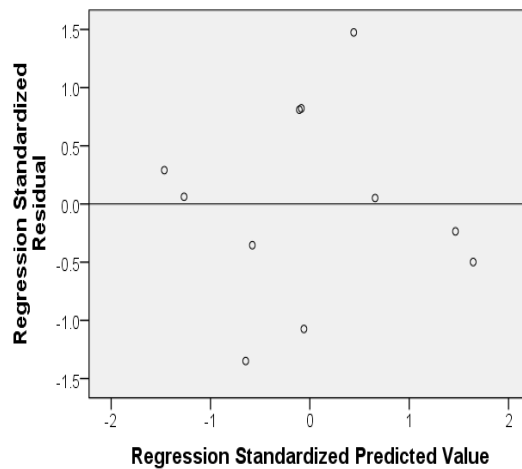
(ب)



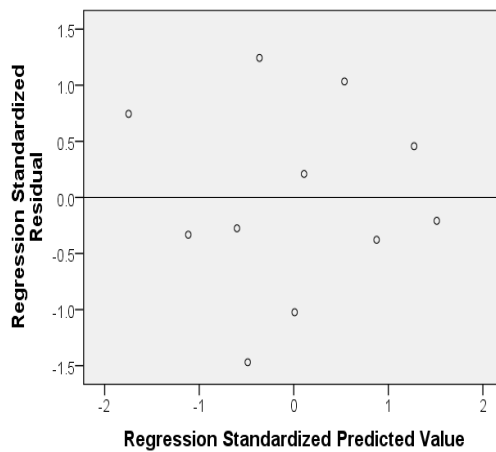
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۶-۱۱: نمودار همگنی واریانس‌ها برای روابط خطی ارائه شده

الف) رابطه a    ب) رابطه b    ج) رابطه c    د) رابطه d    ه) رابطه e

یکی از مهم‌ترین مواردی که در بحث تحلیل و ارزیابی معادلات آماری باید مورد توجه قرار گیرد، وجود ضرایب منطقی و به عبارت دیگر پیروی معادله از طبیعت ذاتی و علمی موضوع است. بنابراین این مسأله باید در روابط ارائه شده برای پیش‌بینی نرخ برش مورد توجه قرار گیرد. همان‌طور که نتایج برآزش‌های تک متغیره نشان می‌دهد، افزایش پارامترهای مقاومتی و چگالی سنگ، نرخ برش را کاهش می‌دهد. در حالی که با افزایش سایش لوس آنجلس و میزان تخلخل در سنگ‌ها نرخ برش افزایش می‌یابد. بنابراین رابطه‌ای که خلاف این موضوع را ثابت کند، از نظر علمی غیر قابل قبول است. یک رابطه باید علاوه بر پوشش پارامترهای مهم، ضرایب منطقی داشته باشد تا به درستی روند طبیعی یک فرآیند را مدل‌سازی کند. بررسی روابط ارائه شده نشان می‌دهد که در روابط c و e، نرخ برش با افزایش سایش لوس آنجلس کاهش می‌یابد. پس این دو رابطه به دلیل عدم وجود ضرایب منطقی نمی‌توانند برای پیش‌بینی نرخ برش مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین تنها روابط a، b و d قابل قبول خواهند بود.

## ۶-۶ مدل‌های برآزش چند متغیره غیرخطی بر اساس مؤلفه‌های اصلی

با این که مدل خطی تقریب خوبی برای نشان دادن ارتباط چند متغیره به حساب می‌آید، اما روابط بین متغیرها به ندرت خطی دقیق است و گاهی ممکن است ارتباط بین چند متغیره از یک الگوی غیرخطی تبعیت کند. به همین دلیل علاوه بر مدل‌های خطی، مدل‌های مختلف غیرخطی نیز با روش لگاریتم دوگانه ایجاد شدند. این روابط با توجه به داده‌های مربوط به ۱۱ نمونه سنگ تراورتن مورد مطالعه، که نرمال بودن و عدم همبستگی آن‌ها قبلاً بررسی شده است، ایجاد شدند. جدول (۶-۱۷) روابط ارائه شده و ضریب تعیین مربوط به هر رابطه را نشان می‌دهد. مشابه روابط حاصل از رگرسیون خطی، برای روابط غیرخطی نیز پس از بررسی معنی‌داری کل مدل و معنی‌داری ضرایب متغیرهای مستقل، آزمون دوربین واتسون برای بررسی استقلال خطاها و نمودار توزیع خطاها برای بررسی نرمال بودن خطاها مورد بررسی قرار گرفت. مسأله هم‌خطی بین متغیرها نیز با کنترل مقادیر ضریب تورم واریانس و تولرانس

بررسی شد. ضرایب متغیرهای بررسی و آماره‌های کنترل هم‌خطی و همچنین مقادیر آماره دوربین واتسون برای مدل‌های رگرسیون غیرخطی ارائه شده نیز در جداول (۶-۱۸) تا (۶-۲۷) آورده شده است. مقادیر ضریب تورم واریانس و تولرانس نشان می‌دهد که در روابط غیرخطی نیز، مشکل هم‌خطی بین متغیرهای بررسی وجود ندارد.

جدول ۶-۱۷: روابط حاصل از انجام رگرسیون غیرخطی چند متغیره

R <sup>2</sup>	رابطه	شماره رابطه
۰/۸۱	$CR = \frac{10^{1.465} \times Wla^{1.16}}{UCS^{1.02}}$	(f)
۰/۷۶	$CR = \frac{10^{2.228} \times Wla^{0.804}}{\delta_i^{1.008} \times d^{3.463}}$	(g)
۰/۸۷۱	$CR = \frac{10^{1.062} \times Wla^{0.043} \times n^{0.822}}{\delta_i^{0.643}}$	(h)
۰/۸۱۹	$CR = \frac{10^{2.01} \times Wla^{1.016}}{UCS^{0.099} \times d^{1.317}}$	(i)
۰/۸۴۴	$CR = \frac{10^{1.11} \times Wla^{0.455} \times n^{0.59}}{UCS^{0.559}}$	(j)

جدول ۶-۱۸: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه f

متغیرهای مستقل	ضرایب غیراستاندارد شده	ضرایب استاندارد شده	t values	آماره هم‌خطی
B	خطای استاندارد	Beta		VIF
ثابت	۱/۴۶۵	۱/۱۱۶	۱/۳۱۲	
UCS	-۱/۱۰۲	۰/۲۷۳	-۴/۰۲۸	۰/۸۱۷
Wla	۱/۱۶۰	۰/۵۵۱	۲/۱۰۶	۰/۸۱۷

جدول ۶-۱۹: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه f

خلاصه مدل					
R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> تعدیل شده	خطای استاندارد تخمین	دوربین واتسون	تعداد
۰/۹	۰/۸۱	۰/۷۶۳	۰/۱۱۱	۱/۷۸۳	۱۱
تحلیل واریانس (ANOVA)					
منبع تغییرات	مجموع مجزورات	درجه آزادی	میانگین مجزورات	میزان F	سطح معنی‌داری
رگرسیون	۰/۴۲۲	۲	۰/۲۱۱	۱۷/۰۷۶	۰/۰۰۱
باقیمانده	۰/۰۹۹	۸	۰/۰۱۲		
کل	۰/۵۲۱	۱۰			

جدول ۶-۲۰: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه g

متغیرهای مستقل		ضرایب غیراستاندارد شده	ضرایب استاندارد شده	t values	آماره هم‌خطی
		B	خطای استاندارد	Beta	VIF
ثابت	۲/۲۲۸	۱/۷۵۷	۱/۲۶۹		
W1a	۰/۸۰۴	۰/۷۴۳	۱/۰۸۳	۰/۶۵۱	۱/۵۳۷
T	-۱/۰۰۸	۰/۴۷۷	-۲/۱۱۵	۰/۷۱۶	۱/۳۹۷
D	-۳/۴۶۳	۲/۳۱۲	-۱/۴۹۸	۰/۶۲۳	۱/۶۰۴

جدول ۶-۲۱: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه g

خلاصه مدل					
R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> تعدیل شده	خطای استاندارد تخمین	دوربین واتسون	تعداد
۰/۸۷۲	۰/۷۶	۰/۶۵۶	۰/۱۳۴	۱/۴۸۶	۱۱
تحلیل واریانس (ANOVA)					
منبع تغییرات	مجموع مجزورات	درجه آزادی	میانگین مجزورات	میزان F	سطح معنی‌داری
رگرسیون	۰/۳۹۶	۳	۰/۱۳۲	۷/۳۷۰	۰/۰۱۴
باقیمانده	۰/۱۲۵	۷	۰/۰۱۸		
کل	۰/۵۲۱	۱۰			

جدول ۶-۲۲: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه h

آماره هم‌خطی		t values	ضرایب استاندارد شده		متغیرهای مستقل
VIF	تولرانس		Beta	خطای استاندارد شده	
		۱/۱۶۲		۰/۹۱۳	ثابت
۲/۰۳۴	۰/۴۹۲	۰/۰۶۹	۰/۰۱۳	۰/۶۲۷	Wla
۱/۶۵۰	۰/۶۰۶	-۱/۶۹۳	-۰/۲۹۶	۰/۳۸۰	T
۲/۶۷۳	۰/۳۷۴	۳/۱۹۱	۰/۷۰۹	۰/۲۵۸	P

جدول ۶-۲۳: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه h

خلاصه مدل					
R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> تعدیل شده	خطای استاندارد تخمین	دوربین واتسون	تعداد
۰/۹۳۳	۰/۸۷۱	۰/۸۱۵	۰/۰۹۸	۱/۴۱۷	۱۱
تحلیل واریانس (ANOVA)					
منبع تغییرات	مجموع مجذورات	درجه آزادی	میانگین مجذورات	میزان F	سطح معنی‌داری
رگرسیون	۰/۴۵۴	۳	۰/۱۵۱	۱۵/۷۰۱	۰/۰۰۲
باقیمانده	۰/۰۶۷	۷	۰/۰۱		
کل	۰/۵۲۱	۱۰			

جدول ۶-۲۴: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه i

آماره هم‌خطی		t values	ضرایب استاندارد شده		متغیرهای مستقل
VIF	تولرانس		Beta	خطای استاندارد شده	
		۱/۳۳۵		۱/۵۰۶	ثابت
۱/۷۸۹	۰/۵۵۹	-۲/۸۶۷	-۰/۶۱۷	۰/۳۴۵	UCS
۱/۴۵۵	۰/۶۸۷	۱/۶۲۰	۰/۳۱۴	۰/۶۲۷	Wla
۲/۱۰۶	۰/۴۷۵	-۰/۵۷۳	-۰/۱۳۴	۲/۳۰۰	D

جدول ۶-۲۵: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه i

خلاصه مدل					
R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> تعدیل شده	خطای استاندارد تخمین	دوربین واتسون	تعداد
۰/۹۰۵	۰/۸۱۹	۰/۷۴۱	۰/۱۱۶	۱/۷۷۳	۱۱
تحلیل واریانس (ANOVA)					
منبع تغییرات	مجموع مجزورات	درجه آزادی	میانگین مجزورات	میزان F	سطح معنی داری
رگرسیون	۰/۴۲۷	۳	۰/۱۴۲	۱۰/۵۳۷	۰/۰۰۵
باقیمانده	۰/۰۹۴	۷	۰/۰۱۳		
کل	۰/۵۲۱	۱۰			

جدول ۶-۲۶: ضرایب رگرسیون و هم‌خطی متغیرها برای رابطه j

متغیرهای مستقل	ضرایب غیراستاندارد شده	ضرایب استاندارد شده	t values	آماره هم‌خطی
	B	Beta		VIF
ثابت	۱/۱۱۰		۰/۹۹۱	
UCS	-۰/۵۵۹	-۰/۳۴۸	-۱/۰۸۵	۰/۲۱۷
P	۰/۵۹۰	۰/۵۰۹	۱/۲۲۹	۰/۱۳۰
Wla	۰/۴۵۵	۰/۱۴۱	۰/۵۸۱	۰/۳۸۰

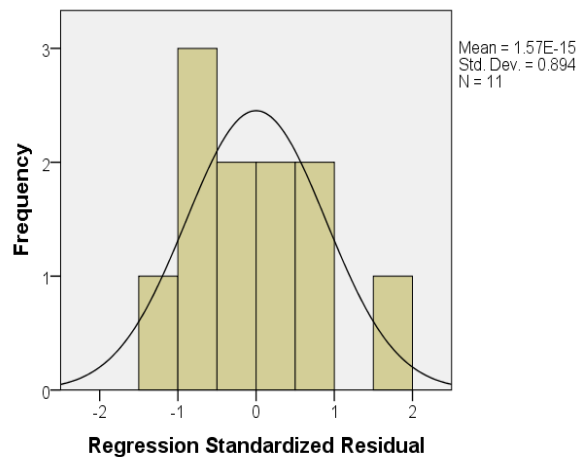
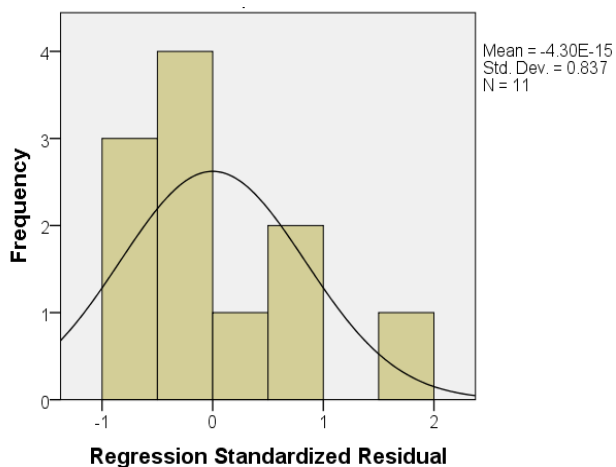
جدول ۶-۲۷: مشخصه‌های آماری رگرسیون و تحلیل واریانس برای رابطه j

خلاصه مدل					
R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> تعدیل شده	خطای استاندارد تخمین	دوربین واتسون	تعداد
۰/۹۱۹	۰/۸۴۴	۰/۷۷۷	۰/۱۰۸	۱/۵۷۱	۱۱
تحلیل واریانس (ANOVA)					
منبع تغییرات	مجموع مجزورات	درجه آزادی	میانگین مجزورات	میزان F	سطح معنی داری
رگرسیون	۰/۴۴	۳	۰/۱۴۷	۱۲/۶۱۴	۰/۰۰۳
باقیمانده	۰/۰۸۱	۷	۰/۰۱۲		
کل	۰/۵۲۱	۱۰			

مقایسه نمودار توزیع فراوانی خطاها و توزیع نرمال ارائه شده در شکل (۶-۱۲) برای هر رابطه

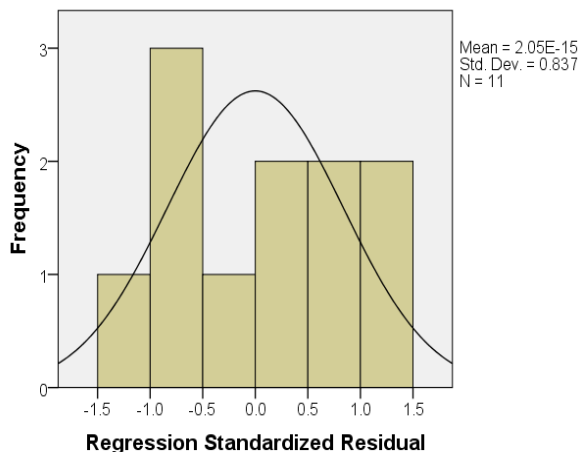
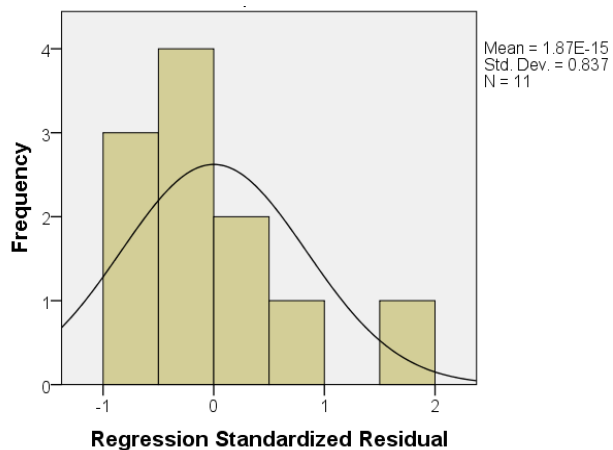
غیرخطی نشان داد که توزیع خطاها تقریباً نرمال است. نمودار همگنی واریانس‌ها برای بررسی پراکندگی

تصادفی مانده‌ها نیز برای هر رابطه در شکل (۶-۱۳) آورده شده است.



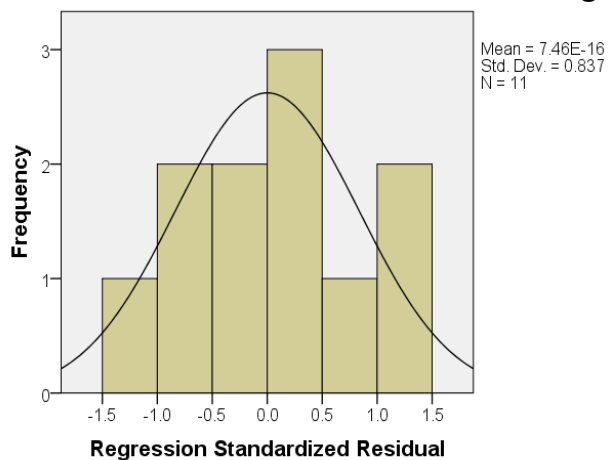
(ب)

(الف)



(د)

(ج)

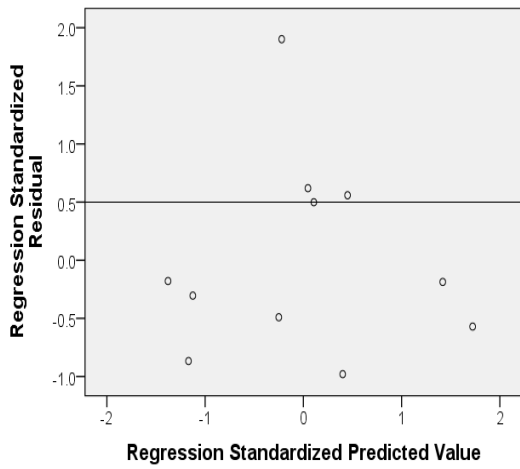


(ه)

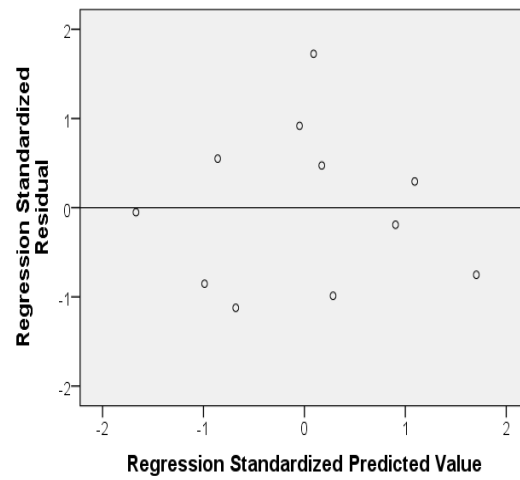
شکل ۶-۱۲: توزیع فراوانی خطاها برای روابط غیر خطی ارائه شده

الف رابطه f    ب رابطه g    ج رابطه h    د رابطه i    ه رابطه j

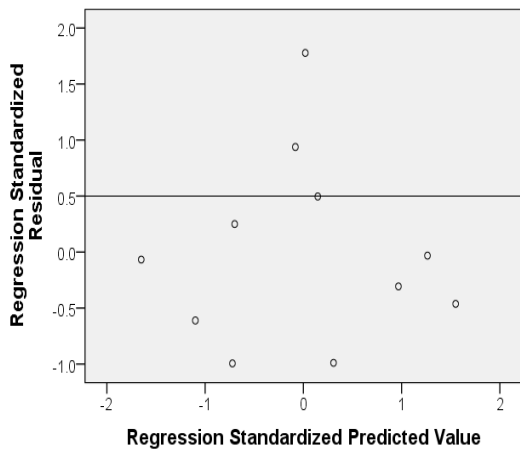




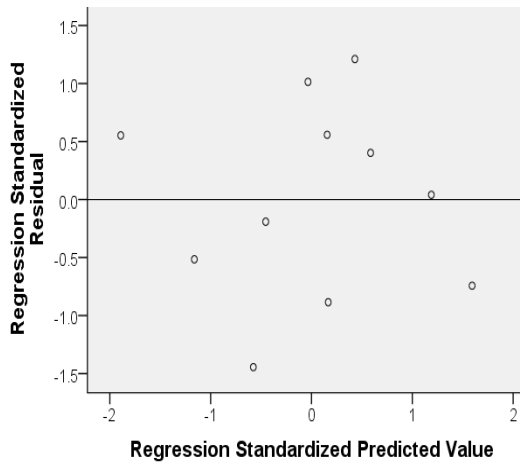
(ب)



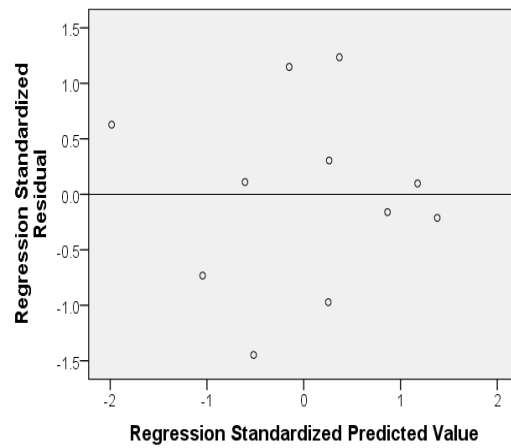
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۶-۱۳: نمودار همگنی واریانس‌ها برای روابط غیرخطی ارائه شده

الف) رابطه f      ب) رابطه g      ج) رابطه h      د) رابطه i      ه) رابطه j

بررسی ضرایب متغیرها در روابط غیرخطی ارائه شده نشان می‌دهد که در کلیه روابط، نرخ برش با افزایش پارامترهای مقاومتی و چگالی کاهش یافته و با افزایش سایش لوس آنجلس و تخلخل سنگ‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین هر پنج رابطه قابل قبول خواهند بود.

#### ۷-۶ تعیین بهترین مدل تخمین نرخ برش

برای تعیین مناسب‌ترین رابطه از میان روابط ارائه شده از ضریب تعیین  $R^2$ ، جذر میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE)، شاخص عملکرد<sup>۲</sup> (VAF) و میانگین درصد خطای مطلق<sup>۳</sup> (MAPE) استفاده شده است. RMSE متوسط خطای نتایج به دست آمده از خروجی مدل را نشان می‌دهد. کاهش این شاخص موجب افزایش ضریب تعیین رابطه شده و این کارایی بهتر مدل را نشان می‌دهد. علاوه بر این، هر چه شاخص عملکرد (VAF)، بزرگتر و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) کوچکتر و نزدیک به صفر باشد، مدل مناسب‌تر است. نحوه محاسبه این شاخص‌ها در روابط (۳-۶) تا (۶-۶) ارائه شده است (Gokceoglu, 2002). مقادیر این چهار معیار نیز برای هر پنج رابطه خطی و هر پنج رابطه غیرخطی به دست آمده، در جدول (۲۸-۶) آورده شده است.

$$R^2 = 100 \left[ \frac{\left( \sum_{i=1}^N (y_{meas} - \bar{y}_{meas})(y_{pred} - \bar{y}_{pred}) \right)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_{meas} - \bar{y}_{meas})^2 \sum_{i=1}^N (y_{pred} - \bar{y}_{pred})^2}} \right] \quad (۳-۶)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{meas} - y_{pred})^2} \quad (۴-۶)$$

$$VAF = 100 \left[ 1 - \frac{\text{var}(y_{meas} - y_{pred})}{\text{var}(y_{meas})} \right] \quad (۵-۶)$$

<sup>۱</sup> Root Mean Square Error

<sup>۲</sup> Variance Account For

<sup>۳</sup> Mean Absolute Percentage Error

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_{meas} - y_{pred}}{y_{meas}} \right| \times 100 \quad (6-6)$$

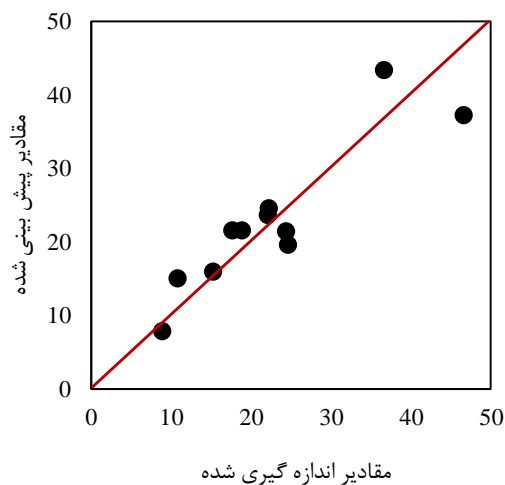
در این روابط  $y_{meas}$  و  $y_{pred}$  به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده و  $\bar{y}_{meas}$  و  $\bar{y}_{pred}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده هستند. var نیز در این روابط به معنی واریانس مقادیر است.

جدول ۶-۲۸: مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای روابط ارائه شده

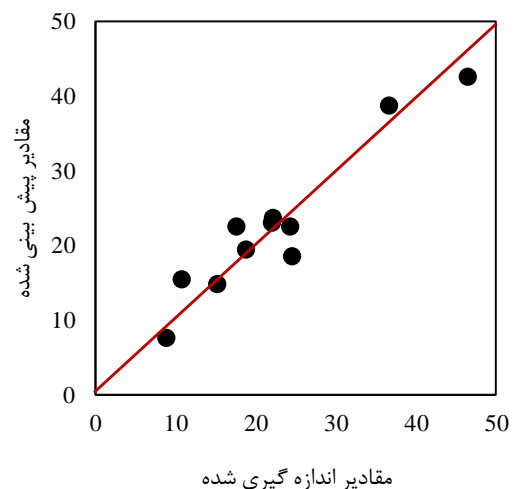
شماره	رابطه	R <sup>2</sup>	RMSE	VAF	MAPE
A	$CR = 31.049 - 0.44UCS + 0.504Wla$	۷۹/۶	۸/۴۷۷	۳۲/۱۳۲	۳۶/۱۲۱
B	$CR = 91.762 - 5.337\delta_t + 0.325Wla - 19.481d$	۷۹	۴/۵۴۶	۷۸/۹۷۵	۱۹/۱۹۸
D	$CR = 51.92 - 0.408UCS + 0.439Wla - 8.26d$	۸۰/۲	۴/۴۱۴	۸۰/۱۵۳	۲۱/۰۲۵
F	$CR = \frac{10^{1.465} \times Wla^{1.16}}{UCS^{1.02}}$	۸۱	۵/۰۹۱	۷۳/۶۹۵	۱۸/۴۰۸
G	$CR = \frac{10^{2.228} \times Wla^{0.804}}{\delta_t^{1.008} \times d^{3.463}}$	۷۶	۵/۷۴۹	۶۶/۴۸۹	۱۹/۵۳۴
H	$CR = \frac{10^{1.062} \times Wla^{0.043} \times n^{0.822}}{\delta_t^{0.643}}$	۸۷/۱	۴/۰۴۷	۸۳/۳۷۲	۱۵/۷۷۱
I	$CR = \frac{10^{2.01} \times Wla^{1.016}}{UCS^{0.099} \times d^{1.317}}$	۸۱/۹	۴/۸۶۸	۷۵/۹۵۴	۱۶/۵۴۳
j	$CR = \frac{10^{1.11} \times Wla^{0.455} \times n^{0.59}}{UCS^{0.559}}$	۸۴/۴	۳/۹۲۷	۸۴/۴۵۳	۱۶/۱۷۶

مقایسه شاخص‌های ارزیابی ارائه شده برای هر رابطه نشان می‌دهد که بیشترین میزان R<sup>2</sup> و کمترین میزان MAPE متعلق به رابطه h و بیشترین میزان VAF و کمترین میزان RMSE متعلق به رابطه z است. بنابراین انتخاب مناسب‌ترین رابطه از میان این دو رابطه با استفاده از داده‌های آزمون و مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده توسط دو رابطه، با مقدار اندازه‌گیری شده انجام می‌گیرد. شکل (۶-۱۴) ارتباط بین

مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای دو رابطه  $h$  و  $z$  و وضعیت آن‌ها نسبت به خط نیمساز را برای داده‌های آموزش و شکل (۶-۱۵) این ارتباط را برای داده‌های آزمون نشان می‌دهد. به منظور بررسی بهتر، مقادیر اندازه‌گیری شده برای هر چهار داده آزمون و مقادیر محاسبه شده توسط هر دو رابطه و همچنین ارتباط بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای دو رابطه  $h$  و  $z$  در شکل (۶-۱۶) نشان داده شده است. پس از آن مقادیر  $R^2$ ،  $RMSE$ ،  $MAPE$  و  $VAF$  برای دو رابطه باقیمانده و بر اساس مقادیر پیش‌بینی شده برای داده‌های آزمون محاسبه شد که مقادیر آن‌ها در جدول (۶-۲۹) آورده شده است. این مقادیر نشان می‌دهد که بیشترین میزان ضریب تعیین و شاخص عملکرد و همچنین کمترین میزان جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق، متعلق به رابطه  $h$  بوده و این رابطه مقادیر واقعی‌تری را تخمین می‌زند. بنابراین رابطه نهایی برای پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های تراورتن به صورت رابطه (۶-۷) ارائه شده است که در آن  $CR$  نرخ برش ( $m^2/h$ )،  $Wla$  سایش لوس آنجلس ( $\%$ )،  $n$  تخلخل و  $\delta_t$  و  $\delta_c$  مقاومت کششی (MPa) است.



(ب)

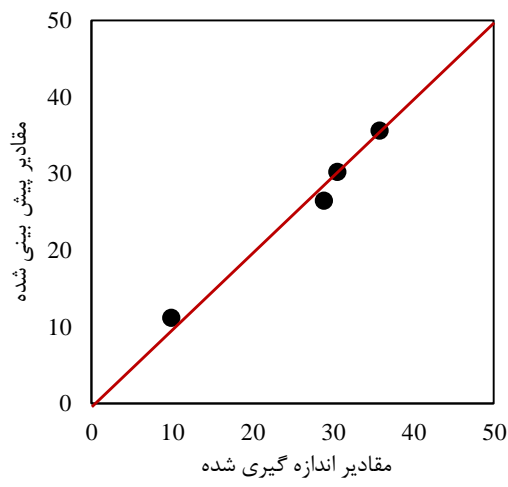


(الف)

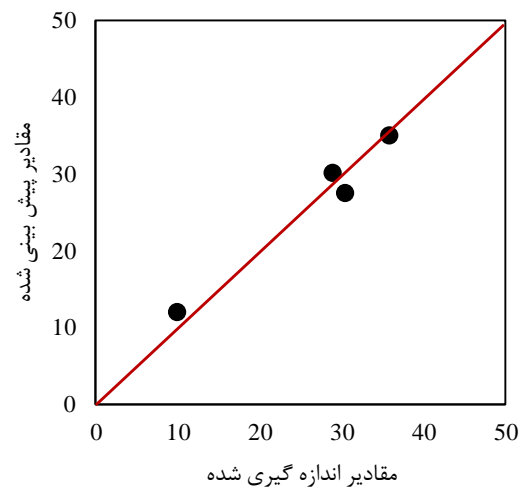
شکل ۶-۱۴: ارتباط مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای داده‌های آموزش

(ب) رابطه  $z$

(الف) رابطه  $h$



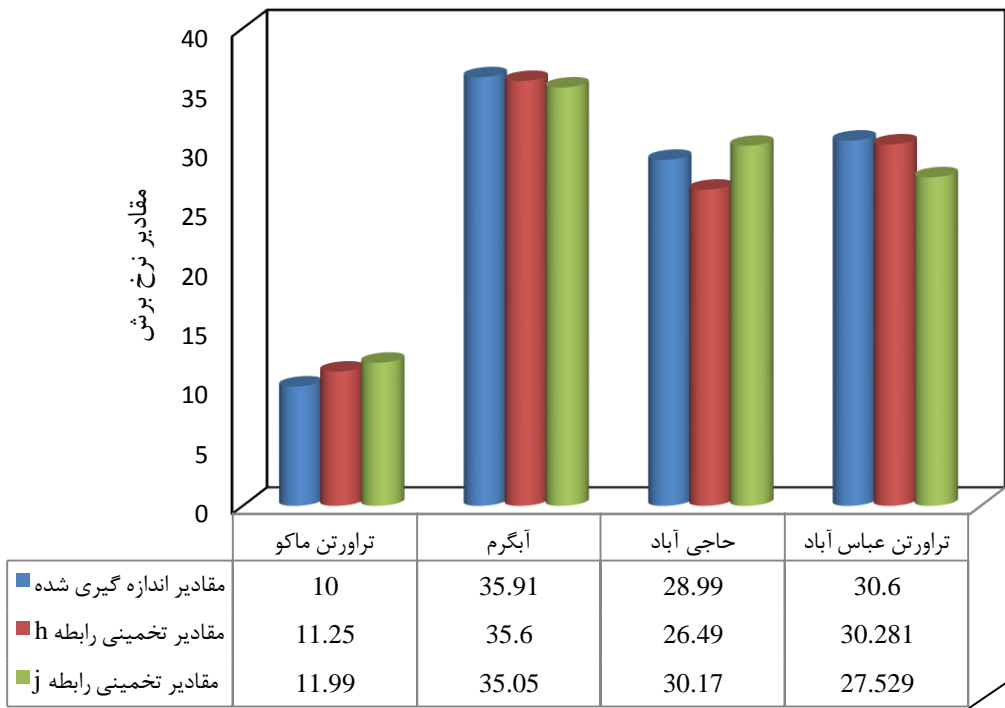
(ب)



(الف)

شکل ۶-۱۵: ارتباط مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای داده‌های آزمون

(الف) رابطه h (ب) رابطه z



شکل ۶-۱۶: مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده توسط دو رابطه h و z

جدول ۶-۲۹: مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای روابط h و j

MAPE	VAF	RMSE	R <sup>2</sup>	رابطه	شماره
۵/۷۵	۹۸/۱۵	۱/۴۱	۹۸/۶	$CR = \frac{10^{1.062} \times Wla^{0.043} \times P^{0.822}}{T^{0.643}}$	(h)
۹/۰۹	۹۵/۹۹	۱/۹۷	۹۷	$CR = \frac{10^{1.11} \times Wla^{0.455} \times P^{0.59}}{UCS^{0.559}}$	(j)

$$CR = \frac{10^{1.062} * Wla^{0.043} * n^{0.822}}{\delta_t^{0.643}} \quad (7-6)$$

### ۸-۶ تحلیل حساسیت<sup>۱</sup>

آخرین مرحله در مدل‌سازی، تعیین میزان حساسیت هدف مدل‌سازی شده (خروجی) نسبت به پارامترهای ورودی است. با استفاده از آنالیز حساسیت می‌توان روند کلی تأثیر نسبی پارامترهای ورودی مدل را بر خروجی آن تعیین نمود.

یکی از روش‌های جدید برای تعیین حساسیت جواب نسبت به پارامترهای ورودی، روش دامنه کسینوسی<sup>۲</sup> (CAM) است. در این روش یک فضای m بعدی به تعداد پارامترهای ورودی در نظر گرفته می‌شود (Jong and Lee, 2004).

$$X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_m\} \quad (7-6)$$

پس از آن هر عضو از هر پارامتر ورودی X به وسیله یک بردار طول به تابع هدف متصل می‌شود.

$$X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{im}\} \quad (8-6)$$

در نهایت میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای ورودی X بر تابع هدف از رابطه (۶-۹) تعیین می‌شود. هرچه میزان تأثیر پارامتر ورودی بر خروجی مورد نظر بیشتر باشد، R<sub>ij</sub> به یک نزدیک‌تر خواهد بود. در

<sup>۱</sup> Sensitivity analysis

<sup>۲</sup> Cosine Amplitude Method

صورت عدم تأثیر پارامتر ورودی بر خروجی نیز، مقدار  $R_{ij}$  صفر است. به طور معمول می‌توان گفت که در بررسی  $R_{ij}$ ، مقادیر بالای ۰/۹ نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه پارامتر مورد نظر بر خروجی و مقادیر کمتر از ۰/۸ بیان‌گر تأثیر ضعیف آن بر خروجی است (Jong and Lee, 2004).

$$R_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m X_{ik} X_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m X_{ik}^2 \sum_{k=1}^m X_{jk}^2}} \quad (9-6)$$

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر در رابطه ارائه شده برای نرخ برش، تحلیل حساسیت به روش کسینوسی برای مدل نهایی انجام شد. نتایج حاصل برای سه پارامتر مقاومت کششی، افت سایش لوس آنجلس و تخلخل در جدول (۳۰-۶) آمده است.

جدول ۳۰-۶: میزان تأثیر پارامترهای ورودی رابطه نهایی

P	Wla	T	متغیر
۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۸۳	$R_{ij}$

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که سه متغیر تخلخل، سایش لوس آنجلس و مقاومت کششی، به ترتیب بیشترین تأثیر را بر نرخ برش سنگ‌های ساختمانی تراورتن دارند.

## ۹-۶ جمع‌بندی

در این تحقیق هفت پارامتر مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، سختی اشمیت، سایش لوس آنجلس، چگالی، تخلخل و میزان سیلیس به عنوان متغیرهای مورد بررسی برای پیش‌بینی نرخ برش در نظر گرفته شدند. در این فصل برای تعیین رابطه هر متغیر با نرخ برش ابتدا برازش تک متغیره میان نرخ برش با تک تک متغیرها انجام شد. در مرحله بعد با تقسیم داده‌ها به داده‌های آموزش و آزمون،

مهم‌ترین متغیرها بر اساس داده‌های آموزش و با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخاب شدند. پس از آن با استفاده از رگرسیون چند متغیره خطی و غیر خطی ده رابطه برای تخمین نرخ برش بر اساس متغیرهای ناهمبسته و برخی از متغیرهای همبسته ارائه شد. برای اطمینان از نتایج رگرسیون به دست آمده برای هر مدل، معنی‌داری کل مدل رگرسیون، معنی‌داری ضرایب متغیرهای مستقل، استقلال خطاها، نرمال بودن خطاها، عدم وجود هم‌خطی و منطقی بودن ضرایب به دست آمده بررسی شد. برای انتخاب مناسب‌ترین رابطه چهار معیار  $R^2$ ، RMSE، VAF، MAPE برای هشت رابطه باقیمانده محاسبه شدند. در نهایت با توجه به مناسب بودن مقادیر معیارهای ارزیابی ارائه شده برای دو رابطه، انتخاب مناسب‌ترین رابطه با استفاده از داده‌های آزمون انجام شد. در آخر نیز برای بررسی حساسیت نرخ برش نسبت به پارامترهای ارائه شده در رابطه نهایی، تحلیل حساسیت کسینوسی انجام شد.



---

فصل هفتم

## نتیجه گیری و پیشنهادها

---

## ۱-۷ مقدمه

پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های ساختمانی نیاز به شناخت بیشتر سنگ‌ها و بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها دارد. به همین منظور در این تحقیق ابتدا اطلاعات مربوط به مشخصات فیزیکی و مکانیکی ۱۵ نمونه از سنگ‌های ساختمانی تراورتن، اندازه‌گیری و ثبت شد. با توجه به یکسان بودن شرایط برش برای نمونه‌ها، نرخ برش به عنوان تنها متغیر برای بررسی در نظر گرفته شد. در فصل قبل پس از تعیین مهم‌ترین پارامترها و تعیین رابطه هر پارامتر با نرخ برش به کمک برازش‌های تک متغیره، روابطی میان نرخ برش و مهم‌ترین مشخصات سنگ ارائه شد. از میان روابط ارائه شده بهترین رابطه برای پیش‌بینی نرخ برش به کمک معیارهای ارزیابی و پس از آن استفاده از داده‌های آزمون، انتخاب شد. نتایج حاصل از کار و همچنین پیشنهاداتی در جهت بهبود کار در بخش‌های بعد ارائه شده است.

## ۲-۷ نتیجه‌گیری

پیش‌بینی نرخ برش دیسک‌های برش‌دهنده سنگ، کمک زیادی به افزایش راندمان آن‌ها خواهد کرد. نرخ برش برای هر سنگ بر اساس خصوصیات سنگ و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن تعیین می‌شود. بنابراین در ابتدا لازم است که مؤثرترین پارامترها در فرآیند برش سنگ تعیین شوند. به همین دلیل آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، سختی اشمیت، سایش لوس آنجلس، چگالی و تخلخل بر روی ۱۵ نمونه از سنگ‌های ساختمانی تراورتن انجام شد. از طرف دیگر آنالیز شیمیایی برای تعیین درصد عناصر سخت به ویژه سیلیس موجود در نمونه‌ها انجام شد. مشخصات برش شامل مشخصات عملیاتی برش و مشخصات طرح برش نیز برای هر نمونه ثبت شد. با توجه به یکسان بودن عمق برش، مشخصات دیسک و سگمنت‌ها و سرعت چرخش دیسک برای کلیه نمونه‌های مورد بررسی و همچنین استفاده از روش برش رو به پایین در همه دستگاه‌های برش، نرخ برش به عنوان تنها متغیر به منظور ارزیابی عملکرد برش، در نظر گرفته شد. کلیه داده‌های اندازه‌گیری شده برای هر نمونه برای ارائه مدلی به

منظور پیش‌بینی نرخ برش سنگ‌های ساختمانی کربناته مورد استفاده قرار گرفت. به طور کلی نتایج حاصل از انجام این تحقیق را می‌توان به صورت زیر عنوان کرد:

- نتایج برآزش‌های انجام شده میان نرخ برش و پارامترهای مقاومتی سنگ نشان داد که افزایش میزان مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی، موجب کاهش نرخ برش خواهد شد. علاوه بر این، ضریب تعیین  $0/746$  برای رابطه میان نرخ برش با مقاومت کششی و  $0/755$  برای رابطه این پارامتر با مقاومت فشاری تک محوره نشان داد که رابطه خوبی میان نرخ برش و این دو پارامتر وجود دارد. کاهش میزان نرخ برش با افزایش چگالی نیز، رابطه معکوس با ضریب تعیین  $0/521$  را میان این دو پارامتر نشان داد. سایش لوس آنجلس با ضریب تعیین  $0/425$  و تخلخل با ضریب تعیین  $0/857$ ، رابطه مستقیمی با نرخ برش دارند. تخلخل با بالاترین ضریب تعیین در برآزش‌های تک متغیره انجام شده به عنوان مؤثرترین پارامتر در بررسی نرخ برش سنگ‌های ساختمانی تراورتن شناخته شد. بررسی ارتباط سختی اشمیت و میزان سیلیس موجود در سنگ با نرخ برش، نشان داد که رابطه خوبی میان نرخ برش و این دو پارامتر برقرار نیست. با توجه به اینکه تأثیر میزان سیلیس در سنگ‌های گرانیتی محسوس‌تر است، علت این امر را می‌توان کربناته بودن سنگ‌های مورد مطالعه و کمتر بودن میزان سیلیس آن‌ها دانست.
- به منظور کاهش تعداد متغیرهای بررسی با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، از میان ۸ مؤلفه به دست آمده اولین مؤلفه که  $57/229$  درصد از واریانس داده‌ها را تشریح می‌کند در نظر گرفته شد و مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، سایش لوس آنجلس، چگالی و تخلخل، که در این مؤلفه همبستگی بالایی با نرخ برش داشتند، به عنوان مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترها انتخاب شدند.

- بررسی همبستگی میان پنج متغیر انتخاب شده نشان داد که مقاومت فشاری تک محوره با ضریب همبستگی  $0/003$  با مقاومت کششی،  $0/009$  با چگالی و  $0/026$  با تخلخل همبسته است. علاوه بر آن تخلخل نیز با ضریب همبستگی  $0/003$  با چگالی و  $0/009$  با مقاومت کششی همبسته است و برای جلوگیری از مشکل هم خطی بین متغیرها، نباید متغیرهای همبسته همزمان در روابط رگرسیونی وارد شوند. از آنجایی که ارائه یک رابطه نیاز به حضور پارامترهای فیزیکی و مکانیکی در کنار یکدیگر دارد، مدل‌هایی نیز با حضور پارامترهای همبسته ارائه شد و مشکل همبستگی بین آن‌ها به بررسی مسأله هم خطی روابط ارائه شده موقوف شد.
- در مرحله تأمین اعتبار مدل‌های رگرسیونی ارائه شده، آزمون دوربین واتسون در بررسی استقلال خطاها، نمودار توزیع فراوانی خطاها و میانگین نزدیک به صفر و انحراف معیار نزدیک به یک برای هر رابطه و همچنین ضریب تورم واریانس و تولرانس در بررسی هم خطی روابط نشان داد که کلیه روابط می‌توانند برای پیش‌بینی نرخ برش مناسب باشند.
- برای تعیین مناسب‌ترین رابطه از میان روابط ارائه شده از ضریب تعیین  $R^2$ ، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص عملکرد (VAF) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) استفاده شده است. بیشترین میزان  $R^2$  و کمترین میزان MAPE به ترتیب با مقادیر  $87/1$  و  $15/771$  متعلق به رابطه  $h$  و بیشترین میزان VAF و کمترین میزان RMSE به ترتیب با مقادیر  $84/453$  و  $3/927$  متعلق به رابطه  $z$  هستند. بنابراین دو رابطه  $h$  و  $z$  به عنوان بهترین روابط برای تخمین نرخ برش سنگ‌های کربناته هستند.
- بررسی دو رابطه انتخاب شده با استفاده از داده‌های آزمون و رسم نمودار مقادیر پیش‌بینی شده بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده برای هر دو رابطه نشان داد که رابطه غیرخطی میان

سه متغیر مقاومت کششی، سایش لوس آنجلس و تخلخل تخمین بهتری را انجام می‌دهد. بنابراین به عنوان رابطه نهایی برای پیش‌بینی نرخ برش انتخاب شد.

- در تحلیل حساسیت صورت گرفته با استفاده از روش دامنه کسینوسی مشخص شد از میان سه متغیر مقاومت کششی، سایش لوس آنجلس و تخلخل، نرخ برش دارای حساسیت بیشتری نسبت به پارامتر تخلخل (با مقدار تأثیر ۰/۹۸) است.

### ۳-۷ پیشنهادها

پس از انجام این تحقیق پیشنهاداتی مطرح می‌شود که برای کسب نتایج بهتر در تحقیقات مشابه، به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود:

- در این تحقیق نرخ برش به عنوان تنها متغیر مورد بررسی در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه تغییرات این پارامتر بر روی میزان مصرف انرژی دستگاه برش بی‌تأثیر نخواهد بود، توصیه می‌شود در مطالعات بعدی تغییرات این پارامتر نیز برای نرخ برش‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد.
- افزایش نرخ برش باعث می‌شود که دیسک برای برش مقدار مشخصی از سنگ مدت زمان کمتری را با سنگ درگیر باشد و این سایش دیسک برش را افزایش خواهد داد. با توجه به اینکه ارائه راه کارهایی به منظور کاهش سایش دیسک و افزایش طول عمر آن نقش بسزایی در کاهش هزینه‌ها خواهد داشت، بررسی ارتباط این دو پارامتر نیز اهمیت زیادی خواهد داشت.

## منابع

- اصائلو م، (۱۳۸۲) "روشهای حفاری" چاپ دوم، مرکز نشر صدا، ۴۶۸ صفحه.
- بشلیده ک، (۱۳۹۱) "روشهای پژوهش و تحلیل آماری" انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۳۲۴ صفحه.
- چترجی س، (۱۳۸۴) "تحلیل رگرسیون با مثال" ترجمه حسینعلی نیرومند، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۳۸۳ صفحه.
- رضایی س، (۱۳۸۹) پایان نامه کارشناسی ارشد: "ارزیابی قابلیت برش سنگهای ساختمانی ایران با توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی آن" دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- عطائی م، (۱۳۸۷) "استخراج سنگهای ساختمانی" چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، ۲۸۶ صفحه.
- فرشادفر ع، (۱۳۸۴) "اصول و روشهای آماری چند متغیره" چاپ دوم، انتشارات طاق بستان، ۷۳۴ صفحه.
- فهیمی فر ا و سروش ح، (۱۳۸۰) "آزمایشهای مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها" جلد اول، چاپ اول، انتشارات شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، ۷۱۹ صفحه.
- مومنی م و قیومی ع. ف، (۱۳۹۱) "تحلیلهای آماری با استفاده از SPSS" چاپ هفتم، ویرایش چهارم، انتشارات گنج شایگان، ۲۹۶ صفحه.
- میکائیل ر، عطائی م و حسینی س. ه، (۱۳۸۸) "تأثیر مشخصات بافتی بر مقاومت فشاری تک محوره سنگها" ششمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۷۰۱-۷۱۲.
- میکائیل ر، (۱۳۹۰)، رساله دکتری: "ارائه سیستم طبقه بندی جدید برای ارزیابی سنگهای ساختمانی و بهینه سازی پارامترهای برش"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

والپول ر، (۱۳۵۷) "مقدمه‌ای بر احتمالات و آمار کاربردی" ترجمه میربهادر قلی آریانژاد و محمد ذهبیون، چاپ نهم، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ۴۳۷ صفحه.

وایزبرگ س، (۱۳۷۴) "رگرسیون خطی کاربردی" ترجمه حسینعلی نیرومند، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۴۱۹ صفحه.

وفائیان م، (۱۳۷۱) "مکانیک سنگ" چاپ اول، انتشارات دانشگاه یزد، ۲۳۱ صفحه.

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

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

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

Ceylanoglu A. and Gorgulu K. (1997) "The performance measurement results of stone cutting machines and their relations with some material properties" *Proceeding of the sixth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*. pp 393-398.

Delgado N. S. Rodriguez-Rey A. Rio L. M. Sarria I. D. Calleja L and Argandona R. D. (2005) "The influence of rock microhardness on the sawability of Pink Porrino granite (Spain)" *Int. J. of. Rock Mechanics & Mining Sciences*, 42, pp 161-166.

Engels A. (2003) "The role of Particles Per Carat in diamond tool behavior" *Industrial diamond review*, pp 23-45.

Engel B. A. (2007) "Computational intelligence: an introduction" 2<sup>nd</sup> ed.

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

Gokceoglu C. (2002) "A Fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara agglomerates from their petrographic composition" *Engineering Geology*, 66, pp 39-51.

Jong Y. H. and Lee C. I. (2004) "Influence of geological conditions on the powder factor for tunnel blasting" *Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 41, No. 3, pp 135-147.

Kahraman S. Fener M. and Gunaydin O. (2004) "Predicting the sawability of carbonate rocks using multiple curvilinear regression analysis" *Int. J. of Rock Mechanics & Mining Science*, 41, pp 1123-1131.

Kahraman S. Altun H. Tezekici B. S. and Fener M. (2006) "Sawability prediction of carbonate rocks from shear strength parameters using artificial neural networks" *Int. J. of Rock Mechanics & Mining Science*, 43, pp 157-164.

Kahraman S. and Gunaydin O. (2008) "Indentation hardness test to estimate the sawability of carbonate rocks" *Bull Eng Geol Environ*, 67, pp 507-511.

Karakus A. (2006) Discussion of the paper by S. Kahraman, M. Fenar, O. Gunaydin "Predicting the sawability of carbonate rocks using multiple curvilinear regression analysis" *Int. J. of Rock Mechanics & Mining Science*, 43, pp 1306-1307.

Konstanty J. (2002) "Theoretical analysis of stone sawing with diamonds" *J. of Materials Processing Technology*, 123, pp 146-154.

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

Mikaeil R. Ozcelik Y. Yousefi R. Ataei M. and Hosseini S.M. (2013) "Ranking the sawability of ornamental stone using Fuzzy Delphi and multi-criteria decision-making techniques" *Int. J. of Rock Mechanics & Mining Science*, 58, pp 118-126.

Ozcelik Y. (2007) "The effect of marble textural characteristics on the sawing efficiency of diamond segmented frame saws" *Industrial Diamond Review*, 2, pp 65-70.

Suzuki T. Ohtaguchi K. and Koide K. (1994) "Correlation between flash points and chemical structures of organic compounds, using principal component analysis" *Int. j. of Chemical Engineering*, 34(3), 393-402.

Tiryaki B. (2008) "Application of artificial neural networks for predicting the cuttability of rocks by drag tools" *J. of Tunnelling and Underground Space Technology*, 23, pp 273-280.

Tumac D. (2015) "Predicting the performance of large diameter circular saws based on Schmidt hammer and other properties for some Turkish carbonate rocks" *Int. J. of Rock Mechanics & Mining Science*, 75, pp 159-168.



Tumac D. (2016) “Artificial neural network application to predict the sawability performance of large diameter circularsaws” *Measurement*, 80, pp 12-20.

## **Abstract**

Determination of the relationship between rock properties and cutting rate is the aim of research due to the heavy using of circular diamond saws and the importance of predicting the cutting rate for the cost estimation and the best planning of the plants. For this purpose, 15 samples of travertine were tested and uniaxial compressive strength, tensile strength, Schmidt hammer value, Los Angeles abrasion, density, porosity were determined. Moreover, chemical analysis for check the percent of hard elements and texture studies for check the effect of grain size were performed. Also, cutting rate of samples was measured in some stone plants of Mahalat, too. After that principal component analysis was used for reducing the number of variables and predictive equations of cutting rate were presented by using linear and nonlinear regression. This equations were created between uncorrelated variables and some of the correlated variables because it is better than stone described based on both physical and mechanical properties. After that the coefficient determination, root mean square error, variance account for and mean absolute percentage error used for select the better model. Since the values of these four criteria were suitable for two equations, better model selected by using test data and compare the measured values with the predicted values by this two equations. Finally, after select the best model by using the sensitivity analysis, porosity selected as the most effective of variables for prediction the cutting rate of travertine stones.

**Keywords:** Cutting rate, Principal Component Analysis, Linear and nonlinear regression.



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mining- Petroleum and Geophysics**

**Presentation of a model for prediction the cutting rate  
of ornamental stones**

**By. Sahar Vahidi**

**Supervisors:**

**Prf. Mohammad Ataei**

**Prf. Reza Khalu-kakaei**

**Consultant:**

**Eng. Nader Ziary**

**Eng. Sajad Mohammadi**

**Date: March 2016**