

دانشگاه صنعتی شاهرود

گزارش نهایی طرح پژوهشی

بررسی تأثیر بافت بر مشخصات مهندسی سنگ‌ها

مجری طرح:

دکتر محمد عطائی

(دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک)

همکاران طرح:

سید هادی حسینی

(دانشجوی دکتری مهندسی استخراج معدن)

رضا میکائیل

(دانشجوی دکتری مهندسی استخراج معدن)

تابستان ۱۳۸۸

چکیده

در این طرح به منظور ارزیابی تأثیرات بافت بر مشخصات مهندسی و ماکروسکوپی سنگ‌ها تعداد ۱۵ نوع سنگ مورد مطالعه قرار خواهند گرفت. در ابتدا از هر سنگ مورد مطالعه یک مقطع نازک میکروسکوپی تهیه خواهد شد. سپس مقاطع میکروسکوپی مورد تفسیر قرار خواهند گرفت. در تفسیر مقاطع نوع و درصد کانی‌ها و نوع و نام علمی بافت تعیین خواهد شد. در مرحله بعد از هر مقطع پنج عکس دیجیتالی در زیر میکروسکوپ تهیه خواهد شد. سپس عکس‌های مذکور وارد نرم افزار اتوکد (Autocad) شده و دیجیتایز خواهند شد. در این مرحله مساحت، محیط، بزرگترین قطر و کوچکترین قطر تمام دانه‌های موجود در هر عکس تعیین خواهد شد. پس از انجام مراحل فوق طبق روابط ریاضی موجود ضریب بافت (TC) سنگ تعیین خواهد شد. در مرحله بعد مشخصات مهندسی سنگ‌ها همچون مقاومت فشاری، مقاومت کششی، چگالی، مدول الاستیسیته، سختی، فاکتور سایش شیمزک، سرعت موج الاستیک و سختی چکش اشمیت در آزمایشگاه تعیین خواهد شد. در پایان ارتباط بین ضریب بافت و مشخصات مهندسی سنگ‌ها مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

مقدمه

سنگ‌ها یکی از قابل مطالعه‌ترین عناصر طبیعی می‌باشند که تقریباً برای غالب رشته‌های علوم مورد استفاده قرار می‌گیرند. سنگ عبارت از یک جسم طبیعی است که از یک کانی یا مجموعه‌ای از چند کانی تشکیل شده باشد. کانی عبارت از ماده طبیعی آلی یا معدنی است که ترکیب شیمیایی آن بین حدود اختیاری معینی تغییر می‌کند. تجمع کانی‌ها در سنگ تابع شرایط و محیط تشکیل سنگ و مواد اولیه موجود است. ماگما ماده طبیعی سیال و داغی است که ماده سازنده سنگ‌ها به شمار می‌آید و در سیارات، اقمار طبیعی یا دیگر اجرام سماوی با خصوصیات کلی مشابه تولید می‌شود. هنگامی که ماگما بیرون ریخته می‌شود علاوه بر تولید گدازه یا نهشته‌های خرد شده، مقدار زیادی مواد فرّار نیز آزاد می‌شود که در اتمسفر یا هیدروسفر زمین یا در فضای کوچک و بدون هوای سیارات محبوس می‌شود. مشخصات سنگ‌ها را رویدادهای گذشته بر زمین، ترکیب شیمیایی و کانی‌هایی آن‌ها تعیین می‌کنند که نهاده‌ترین بازتاب این سرگذشت به کانی ارتباط پیدا می‌کند و در چگونگی پیوند کانی‌ها با یکدیگر یعنی بافت، چهره می‌نماید. بافت به مفهوم سازش و کنار آمدن ماده با شرایط طبیعی روی داده بر آن، بازگوکننده سرگذشت زمین و پیدایش و تغییرات سنگ هاست. امروزه به طور تقریبی حدود ۳۰۰۰ نوع کانی شناخته شده است که از آن میان تعداد محدودی به طور فراوان در طبیعت وجود دارند. بررسی و مطالعه علم کانی‌شناسی، اکنون از مرز یک علم پایه وابسته به علوم زمین فراتر رفته و کاربرد آن در جهان صنعتی روز به روز گسترده می‌شود. بهره‌گیری از کانی‌های متنوع طبیعی گسترده‌تر از آن است که در این مختصر به بیان آید.

در فصل اول این تحقیق انواع بافت و تعاریف متداول به طور اجمالی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌است. در فصل دوم روش‌های ارزیابی بافت سنگ‌ها شامل پارامترهای اساسی و شاخص‌های بافتی شرح داده و ارائه شده است. در فصل سوم نتایج آزمایش‌های انجام شده به طور تفصیلی ذکر شده است.

فصل اول

انواع بافت و تعاریف متداول

۱- تقسیم‌بندی سنگ‌ها

سنگ‌های کره زمین به سه دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

الف) سنگ‌های آذرین: سنگ‌های آذرین به نوبه خود با توجه به شرایط تشکیل و سرد شدن به انواع مختلف به شرح ذیل تقسیم می‌شوند:

۱) سنگ‌های آتشفشانی که از سرد شدن فوران آتشفشان‌ها در سطح زمین به وجود می‌آیند.

۲) سنگ‌های نفوذی که در عمق زمین به آهستگی سرد می‌شوند.

ب) سنگ‌های رسوبی: سنگ‌های رسوبی سنگ‌هایی هستند که منشأ خارجی دارند و در نتیجه حمل و نقل و ته‌نشین شدن ذرات سنگ‌های قبلی یا رسوب مواد محلول حاصل از آن‌ها در محیط‌های مختلف (هوا، رودخانه، دریاچه، دریا و یخچال) و یا از سیمانی شدن و به هم چسبیدن ذرات سنگ‌های مختلف و برجا (بدون حمل و نقل) تشکیل شده‌اند.

ج) سنگ‌های دگرگونی: سنگ‌های دگرگونی نیز به انواع مختلف به شرح ذیل تقسیم می‌شوند:

۱) سنگ‌های ثانویه‌ای هستند که دگرگون شدن سنگ‌های آذرین یا سنگ‌های رسوبی که قبلاً وجود داشته‌اند، تشکیل می‌شوند. عامل دگرگونی فشار، درجه حرارت، اثر سیال‌ها و جانشینی است.

۲) سنگ‌های آذرآواری و توف‌ها از سنگ‌هایی هستند که از نظر ماده اولیه جزو سنگ‌های آذرین و از نظر طرز و محل تشکیل جزو سنگ‌های رسوبی هستند.

۱-۱- سنگ‌های آذرین

۱-۱-۱- ترکیب کانی شناختی سنگ‌های آذرین

برحسب ظاهر، تجزیه سنگ‌های آذرین عناصر را در پیکر ترکیب شیمیایی با اکسیژن به صورت اکسیدهای FeO , MgO , CaO , Al_2O_3 , SiO_2 و ... نشان می‌دهد. این گونه نگرش به ساختمان سنگ نگاهی مجرد است که ساختمان سنگ را نادیده می‌انگارد. بنابراین اگر اندیشیده شود که این اکسیدها در پیکر کانی‌های کوارتز، فلدسپات، پیروکسن، آمفیبول و ... جای می‌گیرند، در عمل کریستال شیمی را پایه هرگونه داوری گذاشته‌ایم که این خود معلول شرایط حاکم بر کره زمین به طور عام و شرایط مادی و محیطی ماگما به طور خاص است. یک ماگما محیطی است که عناصر به دلیل وجود شرایط فیزیکی و شیمیایی ویژه به صورت اکسید در آن جای دارند، صرف نظر از آن که ماگما خود با مواد درونی‌تر زمین و یا هسته آن از دیدگاه

ترکیب شیمیایی و شرایط فیزیکی تفاوت‌های چشمگیر دارد. بدین‌سان در شرایطی که ماگما آمادگی تبلور و تبدیل شدن از حالت سیال به حالت جامد را پیدا می‌کند، مواد تشکیل دهنده ماگما به گونه‌ای رفتار می‌کنند که ساختمان اتمی عناصر تشکیل دهنده به آن‌ها حکم می‌کند. سرنوشت این عناصر در این شرایط، تشکیل کانی‌های سنگ ساز است. محتوی کلی سنگ در هر جا با برخورداری از شرایط فیزیکی - شیمیایی معلوم، کانی‌های معلوم و معین با آرایش منظم مربوط به همان شرایط را شامل می‌شود. بدین‌سان از آن‌جا که پیدایش هر سنگ، یعنی پیدایش کانی‌های معلوم با آرایش معلوم گویای شرایط تشکیل است، پس با مطالعه بافت و کانی‌شناسی سنگ می‌توان به شرایط حاکم بر آن منطقه و سرگذشت زمین‌شناختی آن محل پی برد. در راستای این الگو، شیشه در زمانی کوتاه سرد شده است، همچنین بلورهای ریز و نهان نیز حاکی از سرعت سرد شدن است. سنگ درشت دانه با آرایش موزائیک نشان از حوصله و شرایط پایدار در پیدایش دما و در نتیجه سرد شدن آهسته دارد. سنگ دربردارنده دوگونه بافت از یک کانی نمایانگر دوگام در روند تکامل خویش است و نهایتاً یک ساخت پدید آمده از کریستال‌های بسیار درشت با اشکال هندسی منظم و سامان یافته، نشان از پایداری شرایطی پدید آمده از سیالی چگال در روند زمانی بس دراز دارد. بدین‌سان سنگ‌شناسی را باید دانشی دانست که با بررسی و پژوهش در ترکیب کریستال شیمی کانی‌ها، رخداد و شرایط گذشته را بازگو می‌کند.

۱-۱-۲ - بافت و ساخت سنگ‌های آذرین

ساختمان سنگ جهت یافتگی، نواربندی، درزه و شکاف. بافت، درجه تبلور، اندازه دانه‌ها و فابریک یا رابطه هندسی میان اجزاء تشکیل دهنده یک سنگ را مشخص می‌کند. مشخصات سنگ‌ها به نمودهای ساختی و بافتی سنگ وابسته است. چرا که لایه لایه بودن، توده‌ای بودن، شکل و نوع و اندازه کانی یا بلورهای تشکیل دهنده سنگ و ارتباط آن‌ها با هم به ساخت و بافت سنگ مربوط است و در استحکام، زیبایی و ظاهر سنگ مؤثر می‌باشد. ویژگی بافت شناختی هر سنگ وابسته به شرایطی است که سنگ در آن ساخته می‌شود. بعضی از سنگ‌های آذرین مثل گرانیت‌ها تمام بلورین هستند که هولوکریستالین نامیده می‌شوند؛ شماری مانند ابسیدین به طور عمده شیشه‌ای هستند. گدازه‌ها و سنگ‌های درونی کم عمق ممکن است شامل شیشه و بلور و یا هر دو باشند. بلورهای بسیار ریز که به شکل مسطح یا منشوری هستند میکروولیت نامیده می‌شوند. اگر میکروولیت‌ها بسیار ریز و بیشتر به شکل‌های شعاعی و میله‌ای و مویی باشند کریستالیت نامیده می‌شوند.

سنگ‌های آذرین از نظر اندازه دانه‌ها متفاوت هستند. گاهی آن‌چنان ریزند که بدون ذره‌بین جدایش دانه‌ها را از یکدیگر نمی‌توان بازشناخت، در حالی که بعضی دیگر دارای دانه‌هایی در مقیاس سانتی‌متر هستند. اگر اجزاء تشکیل دهنده سنگ آن‌چنان ریز باشند که با چشم غیرمسلح قابل تشخیص نباشند آفانیت و بافت آفانتیک نامیده می‌شوند. در مشاهدات میکروسکوپی بعضی از این سنگ‌ها دارای شیشه و بعضی دیگر بلورین هستند. اگر بلورها با میکروسکوپ قابل تشخیص باشند میکروکریستالین و اگر آن‌چنان ریزدانه باشند که تنها با بزرگنمایی‌های بالای میکروسکوپ قابل شناسایی باشند کریپتوکریستالین نامیده می‌شوند. درجه تبلور و اندازه دانه‌های سنگ‌های آذرین به طور عمده به چگونگی سرد شده آن‌ها در دوران انجماد و مقادیری به ترکیب شیمیایی ماگما و غلظت آن بستگی دارد. سنگ‌های هولوکریستالین دانه متوسط و درشت، مخصوص توده‌های درونی (نفوذی) است که در درجه حرارت ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد از ماگما متبلور شده و به آهستگی سرد می‌شوند. در مراحل آخر انجماد، مایع باقیمانده از مواد فرار پر می‌شود. در این شرایط تبلور با هسته‌گذاری آهسته در محیط مایع رخ می‌دهد و در گام‌های پایانی مایع باقیمانده نهایی که در حال جوشش است به سوی شکاف‌ها و درزه‌های موجود در توده‌های بزرگ بلورین کشیده می‌شود. در این حالت کوچ و جابه‌جایی یون‌ها به آسانی انجام می‌پذیرد و بلورها ممکن است بسیار بزرگ شوند و در نتیجه سنگ‌های بسیار دانه درشتی پدیدار شوند که پگماتیت نامیده می‌شوند. بافت‌های بلورین ریزدانه، آفاناتیک و شیشه‌ای در اثر سرد شدن سریع ایجاد می‌شوند. در این حالت هسته‌گذاری بلورها به سرعت اتفاق می‌افتد و رشد بلورها پیوسته کاهش می‌یابد و مجموعه بلورهای ریزدانه ایجاد می‌شوند. اگر سرد شدن آن‌چنان شتاب زده باشد که میزان جوانه‌گذاری به صفر برسد و مایع باقیمانده بسیار غلیظ باشد، محصول نهایی شیشه خواهد بود. این شرایط به طور معمول درباره ماگماهای خروجی و یا توده‌های کوچک درونی که سطحی و کم ژرفا هستند، صدق می‌کند.

الف) بافت دانه‌ای

این بافت ویژه سنگ‌های آذرین درونی (نفوذی) است و به بافت‌های هولوکریستالین معروف می‌باشند که در آن بلورها به آرامی و در عمق زمین تبلور پیدا کرده و به طور معمول با چشم غیرمسلح نیز قابل تشخیص می‌باشند. در بعضی از سنگ‌های آذرین سیلیسی به ویژه گرانیت، پگماتیت‌ها و گرانوفیرها در گام‌های

بازپسین انجماد، ماگما به دلیل تبلور هم‌زمان کوارتز با فلدسپات آلکالن، کوارتز به شکل خطوط میخی در فلدسپات دیده می‌شود. این نوع بافت، بافت گرافیک نامیده می‌شود.

ب) بافت افیتیک

در بعضی از سنگ‌ها به ویژه گابروها، دیابازها و بعضی از بازالت‌ها، دانه‌های پلاژیوکلاز در زمینه‌ای از اوژیت یا پژونیت درشت و نیمه شکل‌دار جای می‌گیرند. در مشاهدات میکروسکوپی مقطع نازک، دانه‌های فلدسپات که غالباً طول متوسط آن‌ها از قطر پیروکسن فراتر نیست در پیروکسن‌ها احاطه و محصور می‌شوند. این نوع بافت افیتیک نامیده می‌شود. اگر درازای پلاژیوکلاز بیشتر از پیروکسن باشد و بخشی از بلور پلاژیوکلاز با پیروکسن محصور شود بافت ساب افیتیک به وجود می‌آید.

پ) بافت پورفیریتیک

این بافت ویژه سنگ‌های آذرین بیرونی است که دربردارنده بلورهای درشت در زمینه‌ای ریزدانه یا شیشه‌ای‌اند. بلورهای درشت فنوکریست یا درشت بلور و بافت موجود پورفیریتیک نامیده می‌شود.

ت) بافت اینترگرانولار

بافت اینترگرانولار در بسیاری از گدازه‌ها و سنگ‌های نیمه عمیق به ویژه بازالت‌ها و دیابازها دیده شده است. در این بافت زوایای میان فلدسپات‌ها با دانه‌های کانی فرومنیزین که در بیشتر موارد الیوین، پیروکسن یا اکسیدهای آهن-تیتان هستند، بی سامان و بدون جهت خاصی پر می‌شوند.

ث) بافت اینترسرتال

اگر فضای میان فلدسپات‌ها با شیشه یا کانی‌های ثانویه بی‌شکل مثل سرپانتین، کلریت، کلسیت و ... پر شود بافت اینترسرتال خواهد بود.

ج) بافت هیالوپلتیک

نوعی بافت اینترسرتال است که ویژه گدازه‌هایی است که فضای میان میکروولیت‌های فلدسپات که در راستاها ناهمسانند به وسیله شیشه پر شده باشد.

چ) بافت فلتی

بافتی است که در آن زمینه هولوکریستالین بعضی از سنگ‌های دربردارنده میکروولیت‌های غالباً فلدسپت به گونه‌ای تنگاتنگ و فشرده درهم پیچیده‌اند.

ح) بافت پیلوتاکسیتی

بافتی است که میکروولیت‌های فلدسپات در نتیجه جریان به طور موازی آرایش شده باشند و میان میکروولیت‌ها، با مواد میکرو-کریپتوکریستالین پر شده باشد. به این بافت تراکیتی نیز گفته می‌شود. بافت‌های دیگری نیز یافت می‌شوند که بر پایه شکستگی‌های موجود، کلاستیک گفته می‌شود.

۱-۲- سنگ‌های دگرگونی

سنگ‌های دگرگونی سنگ‌هایی هستند که از سنگ‌های رسوبی و آذرین قبلی به وجود آمده‌اند و در آن‌ها به علت تغییرات فشار، درجه حرارت یا محیط شیمیایی تغییراتی صورت گرفته است بدون این‌که از حالت جامد خارج شوند. به طور کلی دگرگونی عبارت از واکنش مینرالوژیکی و فابریکی یک سنگ در برابر تغییر شرایط فیزیکی و شیمیایی مؤثر بر روی سنگ است مشروط بر آن‌که شرایط جدید با شرایط تشکیل خود سنگ تفاوت قابل توجهی داشته باشد. در سنگ‌های دگرگونی اغلب جهت یافتگی به شکل‌های زیر مشاهده می‌شود:

- به صورت چین‌بندی که در اغلب موارد باقیمانده ساختار قدیمی سنگ‌های رسوبی تشکیل دهنده است.
 - به صورت شیستوزیته که موجب تورق آسان سنگ می‌شود.
 - به حالت لیتاژ که نتیجه تناوب محدود کانی‌های آهن و منیزیم‌دار با کانی‌های کوارتز-فلدسپاتی است.
- در سنگ‌های دگرگونی با از بین رفتن کانی‌های قبلی یا تبلور مجدد، کانی‌های شاخص دگرگونی به وجود می‌آیند. همچنین قوانین و ترتیب تبلور در سنگ‌های دگرگونی اختصاصی است که خود وسیله‌ای جهت تشخیص آن‌هاست. بافت میکروسکوپی کاتاکلاستیک و کریستابلاستیک و غیره وسیله دیگری برای شناسایی آن‌هاست. تهیه مقاطع زمین‌شناسی کمک مؤثری جهت تشخیص سنگ‌های دگرگونی از سایر سنگ‌هاست.

۱-۲-۱- بافت‌های دگرگونی

الف) پورفیروبلاستیک: بلورهای درشت (پورفیروبلاست) یک یا چند کانی که در زمینه‌ای از دانه‌های ریزتر قرار دارند.

ب) گرانوبلاستیک: بلورهای دگرگون شده تقریباً یک اندازه که در هم قفل شده‌اند.

پ) پوئیکلوبلاستیک: بلور بزرگی از یک کانی به طور مثال گارنت بلورهای دیگری مثل کوارتز و کلسیت را دربرگرفته است.

ت) **لیپدوبلاستیک**: در این بافت کانی‌هایی مثل میکا، کلریت و غیره در جهت معینی به موازات هم آرایش یافته‌اند.

ث) **نمابلاستیک**: نوعی بافت جهت یافته فیبری است که در آن کانی‌هایی مثل گلوکوفان و اکتینولیت و ... در یک جهت و به موازات هم آرایش یافته‌اند.

۱-۳- سنگ‌های رسوبی

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

۱-۳-۱- مشخصات سنگ‌های رسوبی

کلیه سنگ‌های رسوبی لایه‌لایه می‌باشند زیرا تشکیل آن‌ها در اثر ته‌نشین شدن اجسام جامد موجود در آب‌هاست که به مرور و لایه‌لایه ته‌نشین می‌گردند. در بعضی از سنگ‌های رسوبی بعضی از آهک‌ها بقایای فسیلی جانوران و گیاهان دیده می‌شود. جنس سنگ یکنواخت نیست و ممکن است دارای لایه‌های خاک و لای باشد.

۱-۳-۲- تقسیم‌بندی سنگ‌های رسوبی

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

ب) تقسیم‌بندی و نامگذاری میکروسکوپی: این تقسیم‌بندی بر اساس طبقه‌بندی فولک صورت می‌گیرد. چنانچه در این فصل شرح داده شد، از تعاریف انواع بافت‌ها معلوم می‌شود که کلیه طبقه‌بندی‌ها به صورت کیفی بوده و استفاده از این تعابیر و طبقه‌بندی‌ها در کارهای مهندسی غیر ممکن می‌باشد. لذا تاکنون

مهندسان معدن و زمین‌شناسان تلاش‌های بسیار زیادی برای کمی کردن بافت سنگ‌ها و توسعه روش‌های جدید ارزیابی بافت انجام داده‌اند. در فصل آینده شماری از این روش‌ها ارائه و معرفی می‌شوند.

فصل دوم

روش‌های ارزیابی بافت سنگ‌ها

۱ - مقدمه

بافت، نقش اساسی در رفتار مهندسی سنگ‌ها به ویژه از نظر ارتباط سنگ و ماشین (حفاری، برش سنگ ساختمانی، TBM، رودهدر) دارد. در بحث بافت سنگ، اندازه، شکل و میزان خمیره (نسبت دانه به خمیره) مورد توجه قرار می‌گیرد.

در تقسیم‌بندی رایج در کارهای مهندسی، بافت سنگ‌ها بر اساس دو عامل اندازه و شکل دانه‌ها در چهار گروه تقسیم‌بندی می‌شوند (اصانلو، ۱۳۸۶):

۱- دانه‌ای

۲- پورفیری

۳- شیشه‌ای

۴- تخریبی مانند ماسه سنگ.

مشخص‌ترین بافت در این تقسیم‌بندی بافت دانه‌ای است که در سنگ‌های آذرین با توجه به اندازه دانه‌ها انواع آن در چند زیرگروه تقسیم‌بندی می‌شود (اصانلو، ۱۳۸۶):

۱ - خیلی درشت با دانه‌های بزرگتر از ۱۰ میلی‌متر

۲ - درشت با دانه‌های ۵ تا ۱۰ میلی‌متر

۳ - متوسط با دانه‌های ۵-۲ میلی‌متر

۴ - ریزدانه با دانه‌های ۰/۲۵ تا ۲ میلی‌متر

۵ - بسیار ریزدانه با دانه‌های کوچک‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر

برای تشخیص و تشریح بافت یک سنگ روش‌های بسیار متنوع و طبقه‌بندی‌های بسیار جامعی وجود دارد که می‌توان در متون کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی آن‌ها را جستجو کرد و نمونه‌ای از تعاریف و طبقه‌بندی بافت از دیدگاه زمین‌شناسی در فصل قبل آورده شد. با این حال در کارهای مهندسی تشریح بافت به صورت کیفی نمی‌تواند چندان کارساز باشد. لذا همواره یافتن یک روش برای کمی کردن ویژگی‌های بافت یک سنگ آرمان محققان مهندسی حفاری و زمین‌شناسی مهندسی بوده است. در این فصل به تشریح نمونه‌ای از شاخص‌های کمی ارزیابی بافت سنگ‌ها خواهیم پرداخت.

۲- پارامترهای ارزیابی بافت سنگ‌ها

۲-۱- مساحت دانه (A_i)

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

۲-۲- محیط دانه (L_p)

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

۲-۳- طول قطر بزرگ و کوچک (D_{max}, D_{min})

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

۲-۴- شیب قطرهای اصلی دانه (MajAS)

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

۲-۵- قطر معادل (D_{equi})

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

$$D_{min} = \sqrt{\frac{4A_i}{\pi}} \quad (1-2)$$

۲-۶- فشردگی (C)

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

$$C = \frac{L_p^2}{A_i} \quad (2-2)$$

۲-۷- فاکتور شکل (SF)

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

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

۲-۹- نسبت وضعیت دانه (AR^۱)

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

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

۲-۱۰- صافی و همواری مرز دانه (GBS^۲)

این پارامتر نشان دهنده میزان انحراف مرز دانه از حالت همواری و صافی است و از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$GBS = \frac{Lp_{el}}{Lp_{real}} \quad (۵-۲)$$

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

۳- ضرایب ساختی^۳

۳-۱- ضریب بافت^۴

ضریب بافت، جامع‌ترین و معتبرترین روش کمی کردن بافت یک سنگ است که توسط هوارس و رولند^۵ در

¹ Aspect Ratio

² Grain Boundary smoothness

³ Fabric Coefficients

4 . Texture Coefficient

سال ۱۹۸۷ ارائه شده است (Ersoy & Waller, 1995, Howarth & Rowland, 1986, 87a,b). این شاخص

با رابطه عمومی زیر قابل محاسبه است:

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

که در آن:

TC: ضریب بافت

AW: وزن مساحت (دانسیته تراکم دانه‌ها)

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

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

FF_0 : میانگین حسابی فاکتور شکل برای دانه‌های N_0

AR_1 : میانگین حسابی نسبت طول بر قطر در دانه‌های N_1

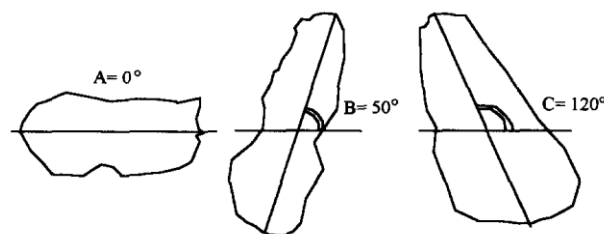
AF_1 : فاکتور زاویه که برای ذره‌های N_1 محاسبه می‌شود.

وزن مساحت (AW) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$AW = \frac{\text{مساحت ناحیه مرجع}}{\text{مساحت دانه‌های درون مرز ناحیه مرجع}} \quad (۷-۲)$$

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

مفهوم فاکتور زاویه مطابق شکل ۲-۴ عبارت است از زاویه بین قطر بزرگ دانه و جهت افق. ماکزیمم مقدار این زاویه ۱۸۰ درجه است.



شکل ۲-۴ - مفهوم فاکتور زاویه

⁵ . Howarth & Rowland

جهت یافتگی زاویه دانه‌ها توسط کمی کردن فاکتور زاویه به دست می‌آید. این فاکتور برای دانه‌های کشیده و طویل که در آن‌ها نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک بیش از ۲ می‌باشد، محاسبه می‌شود. فاکتور زاویه AF1 توسط سیستم وزن‌دهی موجود در جدول ۲-۳ طبقه‌بندی می‌شود. این سیستم تفاوت زاویه‌ای بین همه دانه‌های کشیده را با دقت و به طور مطلق محاسبه می‌کند. تفاوت زاویه‌ای در نه کلاس مختلف دسته‌بندی می‌شود، برای هر کلاس یک وزن وجود دارد.

فاکتور زاویه از جمع کلاس‌ها و تقسیم آن‌ها بر کل اعداد زاویه‌ای به شرح رابطه (۲-۴) محاسبه می‌شود:

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

که در آن:

N: تعداد کل دانه‌های کشیده و طویل

X_i: شماره تفاوت زاویه‌ای در هر کلاس

i: فاکتور وزن‌دهی و شماره کلاس

جدول ۲-۳- روش وزن‌دهی به تفاوت‌های زاویه‌های دانه‌های کشیده (Ersoy & Waller, 1995)

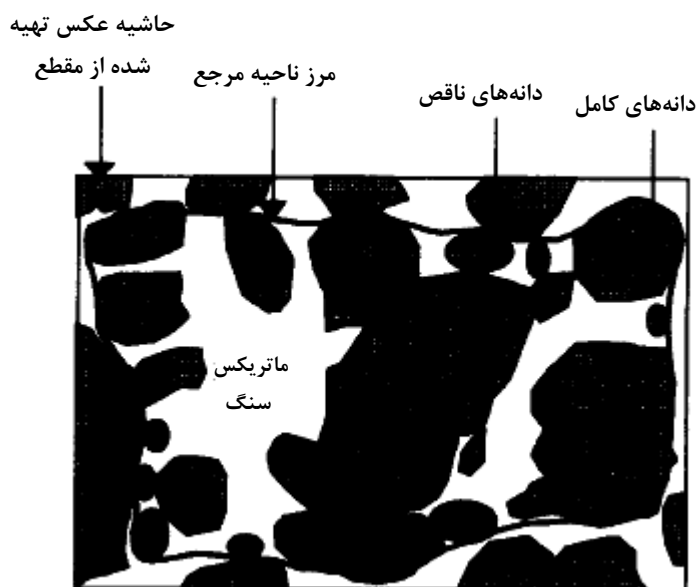
ردیف	دامنه	وزن (i)
۱	$0 < \theta_{DMAX} \leq 10$	۱
۲	$10 < \theta_{DMAX} \leq 20$	۲
۳	$20 < \theta_{DMAX} \leq 30$	۳
۴	$30 < \theta_{DMAX} \leq 40$	۴
۵	$40 < \theta_{DMAX} \leq 50$	۵
۶	$50 < \theta_{DMAX} \leq 60$	۶
۷	$60 < \theta_{DMAX} \leq 70$	۷
۸	$70 < \theta_{DMAX} \leq 80$	۸
۹	$80 < \theta_{DMAX}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

برای محاسبه ضریب بافت سنگ ابتدا از سنگ مورد نظر دو عدد مقطع نازک در جهات عمود بر هم تهیه می‌شود. سپس از مقاطع تهیه شده در زیر میکروسکوپ عکس‌برداری می‌شود. عکس‌های تهیه شده وارد نرم افزار اتوکد^۶ شده و رقومی می‌شوند. پس از رقومی شدن عکس‌ها ابتدا یک محدوده مرجع^۷ یا محدوده دید بر

^۶. AutoCAD

^۷. Reference Boundary

روی مقاطع مشخص می‌شود. این محدوده شامل تمامی دانه‌های کامل قابل مشاهده در عکس بوده و لذا دانه‌های ناقص موجود در حاشیه عکس در نظر شده نمی‌شوند (شکل ۲-۵).



شکل ۲-۵- شمای کلی یک مقطع نازک برای محاسبه ضریب بافت (Ersoy & Waller, 1995)

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

۳-۲- شاخص قفل‌شدگی (به هم چسبیدگی)^۸

این شاخص در سال ۱۹۷۳ برای اولین بار توسط دریر^۹ ارائه شد (Dreyer, 1973). این شاخص به منظور بیان میزان پیچیدگی رابطه دانه-دانه در ساخت و بافت سنگ‌ها پیشنهاد شده است. این پارامتر میزان مساحت دانه و بخشی از مرز دانه را که با دانه مجاور در تماس است را با هم مقایسه می‌نماید. افزایش شاخص نشان دهنده افزایش پیچیدگی ارتباط دانه‌ها است که این موضوع به نوبه خود نشان‌دهنده مرکب بودن و پیچیدگی شکل دانه‌ها می‌باشد. در مجموع شاخص قفل‌شدگی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

^۸ Index of interlocking

^۹ Dreyer

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

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

۳-۳- شاخص یکنواختی اندازه ذرات^{۱۰}

این شاخص نیز برای اولین بار توسط درپیر در سال ۱۹۷۳ ارائه شده است. شاخص یکنواختی نشان دهنده توزیع دانه‌بندی ذرات در بافت سنگ می‌باشد. میزان این شاخص با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است.

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

که در آن A_i سطح هر دانه و A_{avg} مینگین سطح دانه‌هاست.

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

¹⁰ Index of grain size homogeneity

فصل سوم

مطالعات آزمایشگاهی

۱- جمع آوری نمونه از معادن

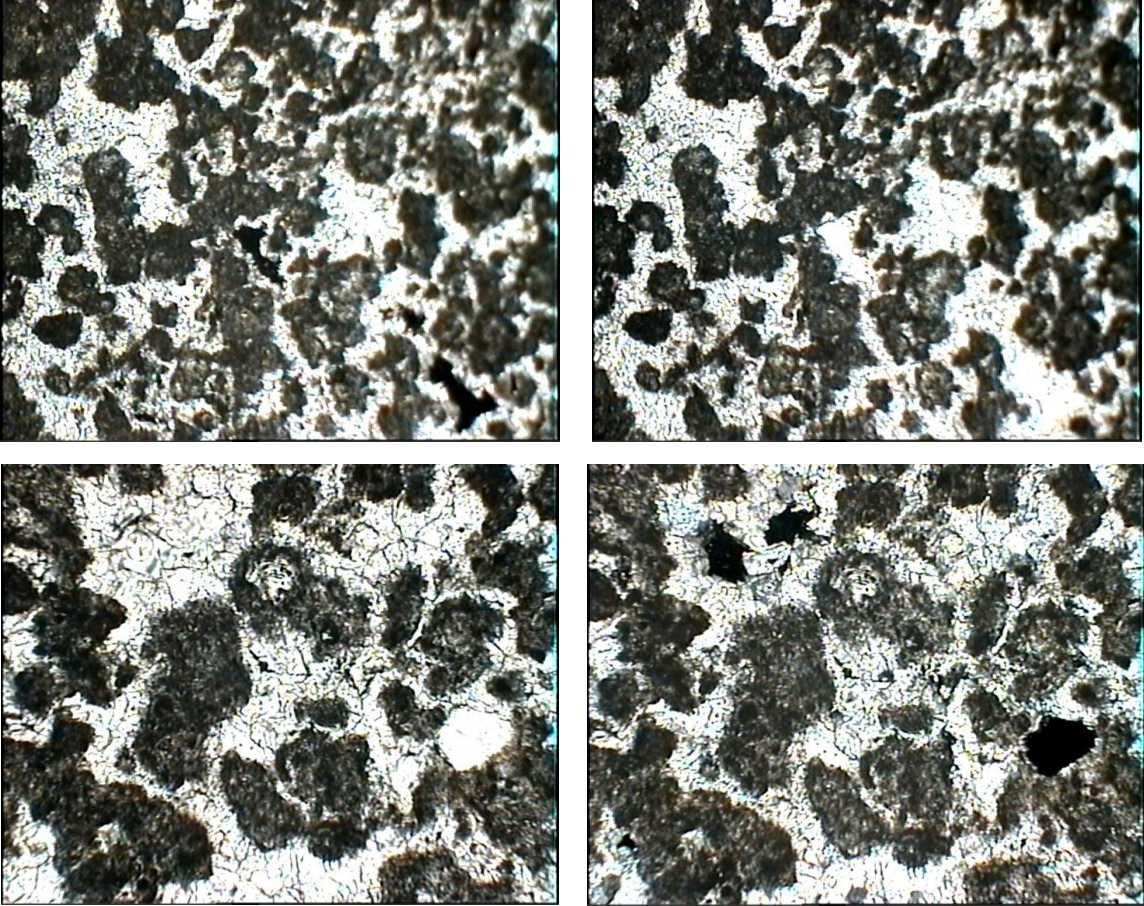
به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگی، در مجموع از سنگ‌های موجود در هشت معدن نمونه‌برداری به عمل آمد. در انتخاب این معادن نوع سنگ از اهمیت بسیار زیادی برخوردار بوده است و هدف این بوده است که از انواع سنگ‌ها در آزمایش‌های انجام شده گنجانده شود. در مجموع از هر معدن پنج نمونه برای انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی انتخاب و به آزمایشگاه منتقل شدند.

۲- آزمایش‌های مکانیک سنگ

با توجه حجم آزمایش‌ها و دقت مورد نیاز، از آزمایشگاه خواسته شد تا کلیه آزمایش‌ها تحت استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ و با دقت بالا انجام گیرند. در مجموع آزمایش‌های زیر بر روی سنگ‌ها انجام شد: الف) آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، ب) آزمایش کشش غیرمستقیم (تست برزیلی) (BTS)، ج) تعیین چگالی خشک (DD)، د) سختی چکش اشمیت (SHN)، پ) مدول یانگ (E) و ت) سرعت موج طولی (V).

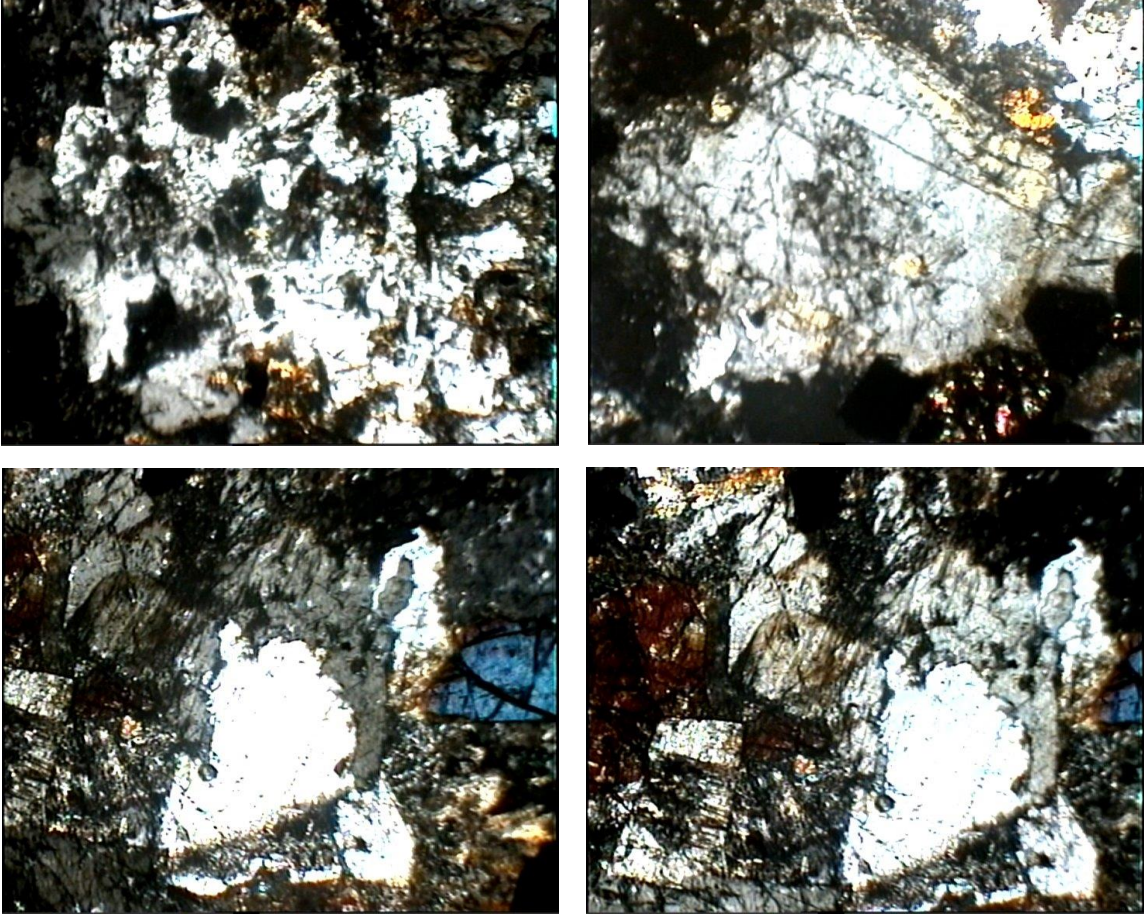
۳- مطالعات کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی

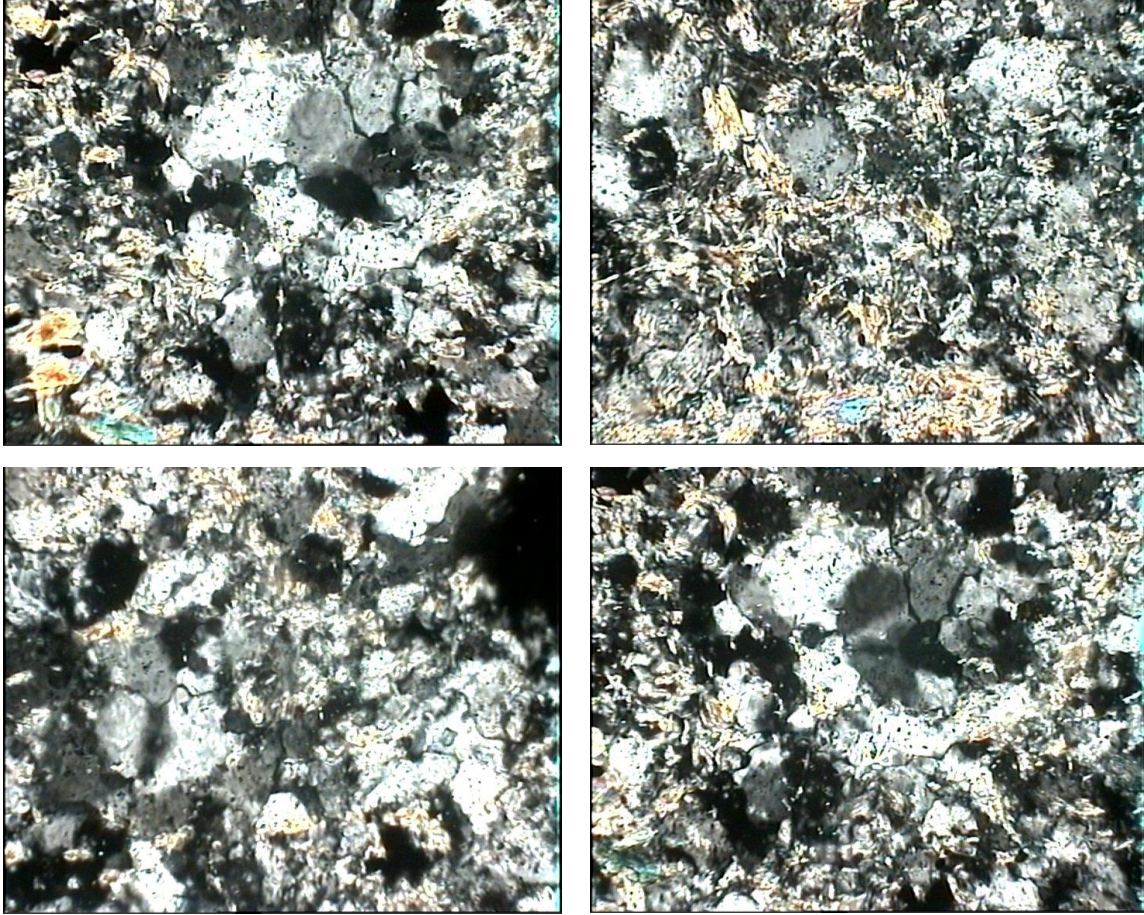
برای بررسی و ارزیابی بافت هر نوع سنگی اطلاع دقیق از مشخصات کانی‌شناسی آن یک امر الزامی و اساسی به شمار می‌رود. در این تحقیق یک مقطع نازک از بخش تیپیک سنگ‌های مورد مطالعه تهیه شده و مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از این مقطع نوع و درصد کانی‌های تشکیل دهنده، نوع بافت تعیین شده است. در تفاسیر مقاطع نازک درصد کانی‌های تشکیل دهنده سنگ و نیز محدوده ابعادی (اندازه) دانه‌ها به دقت مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. پس از تعیین درصد کانی‌های موجود و نیز ابعاد دانه‌ی هر یک از کانی‌ها در هر سنگ، با استفاده از راهنمای کانی‌شناسی، سختی هر یک از کانی‌ها استخراج شد. سپس میزان کوارتز محتوی معادل هر سنگ تعیین شد. با استفاده از نتایج حاصل، میزان شاخص سایش شیمازک سنگ طبق برای هر سنگ محاسبه و معلوم شد. در ادامه مشخصات اصلی سنگ‌های مورد مطالعه آورده شده است.

نام سنگ: تراورتن خلخال				
معدن تراورتن خلخال، ۹۰ کیلومتری جنوب شرقی اردبیل				موقعیت جغرافیایی
بافت	کلسیت، مواد آلی، فضاهاى خالی			کانی‌های موجود
اسپرایت				
مدول الاستیسیته (GPa)	عدد چکش اشمیت	چگالی خشک (g/cm ³)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)
۴۸/۸۳	۵۴/۳	۲/۴۶	۲/۴	۵۰/۵
		سایش شیمازک (N/mm)	کوارتز محتوی (%)	سختی میانگین
		۰/۰۵	۱/۹۳	۲/۶
عکس‌های گرفته شده از مقطع نازک				
				

نام سنگ: تراورتن قرمز				
معدن تراورتن سردارآباد، ۳۷ کیلومتری جنوب شرقی تبریز				موقعیت جغرافیایی
بافت	کلسیت، هماتیت، کانی‌های اپک. فضاهای خالی			
اسپرایت				
مدول الاستیسیته (GPa)	عدد چکش اشمیت	چگالی خشک (g/cm ³)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)
۷۰/۱۹	۵۰/۲	۲/۵۵	۱/۴۵	۵۳
		سایش شیمازک (N/mm)	کوارتز محتوی (%)	سختی میانگین
		۰/۰۶	۳/۸۵	۲/۷
عکس‌های گرفته شده از مقطع نازک				
				

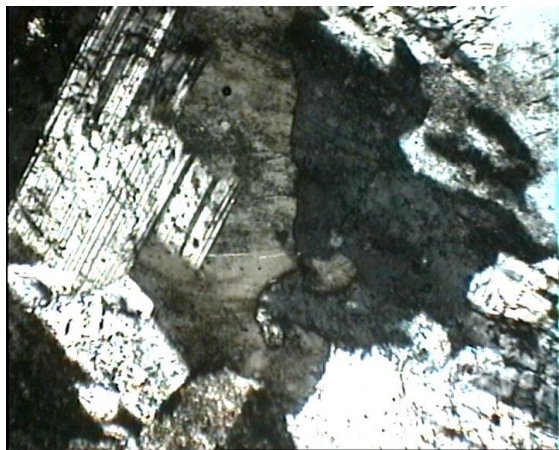
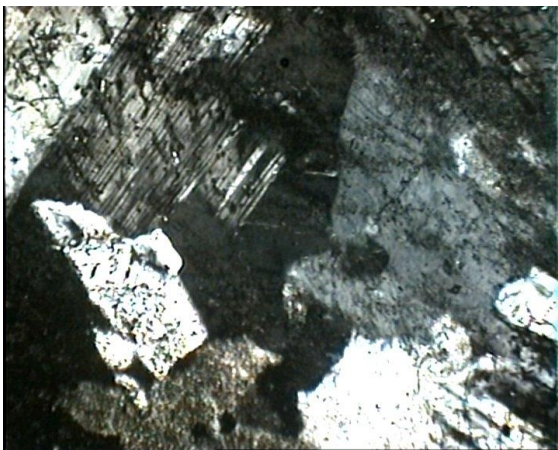
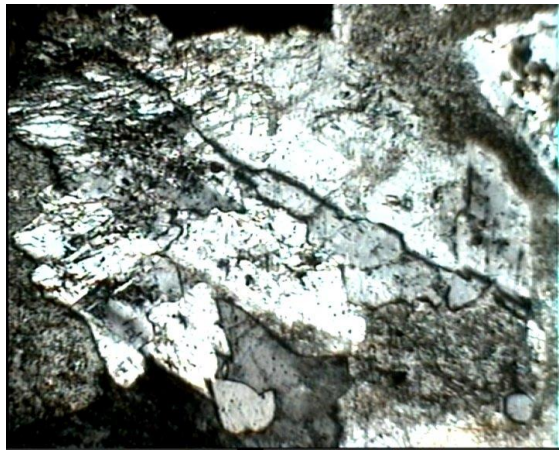
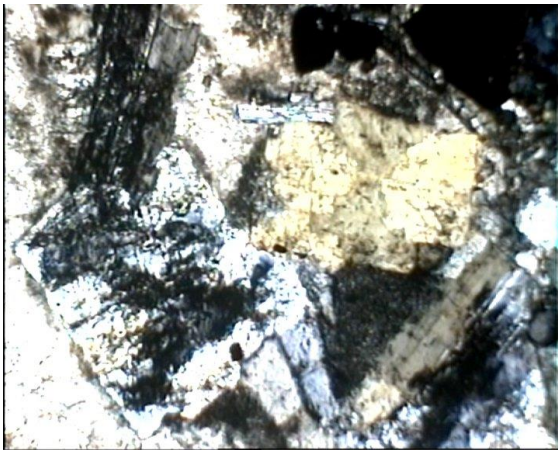
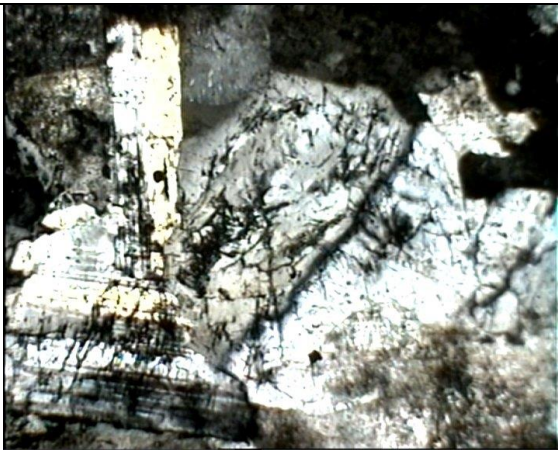
نام سنگ: سیلیس				
موقعیت جغرافیایی		معدن خواجه مرجان، ۱۵ کیلومتری شمال غربی تبریز		
کانی‌های موجود		کوارتز، آندزین، میکروکلین، موسکوویت، آپاتیت، زیرکن، قطعات سنگ شکسته، کانی‌های اپک		
بافت	گرانولار (دانه‌ای)	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	چگالی خشک
مدول الاستیسیته		(MPa)	(MPa)	(g/cm ³)
۴۳/۲۸	۵۴	۱۱۲	۴/۱۸	۲/۵۸
سختی میانگین		سایش شیمازک	کوارتز محتوی (%)	عدد چکش اشمیت
		(N/mm)		
		۶/۳۵	۷۲/۴۵	۷/۴۲
عکس‌های گرفته شده از مقطع نازک				
				

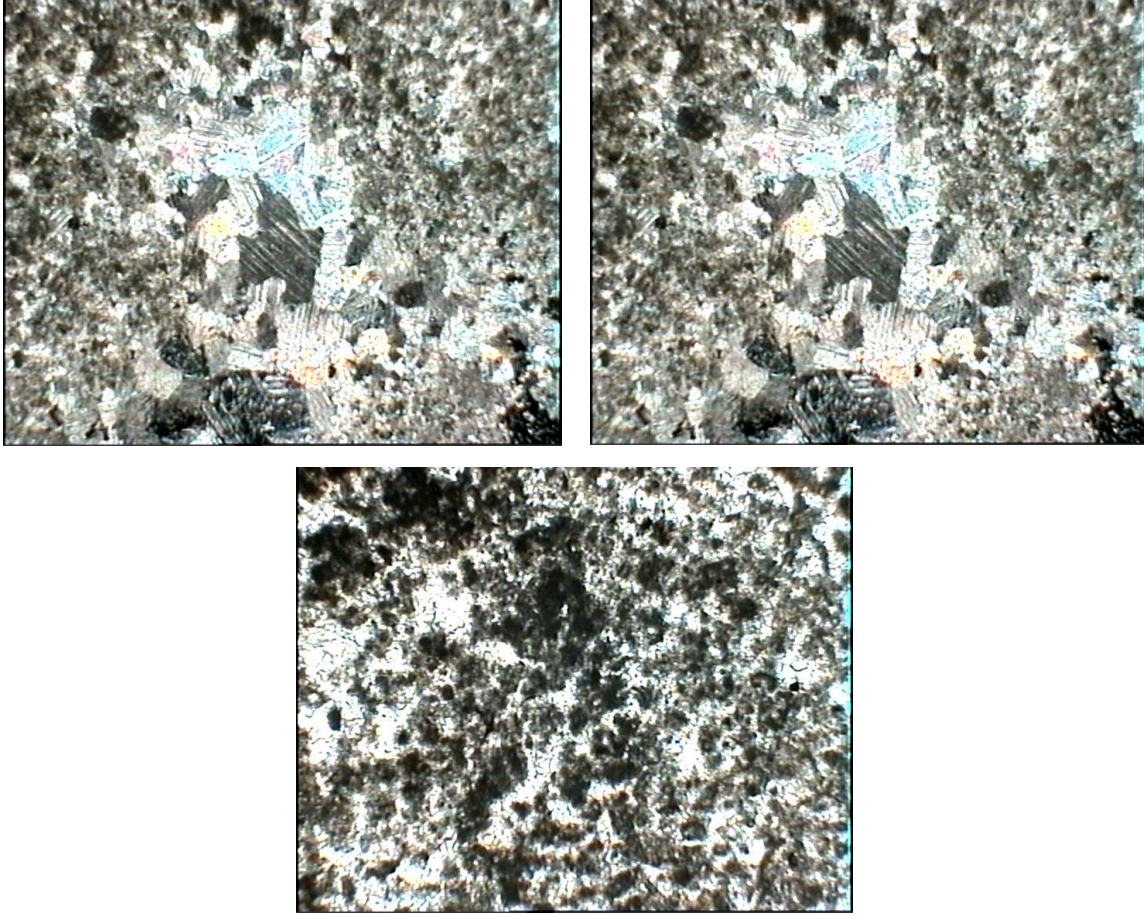
نام سنگ: نفلین سینیت				
معدن نفلین سینیت رزگانه سراب، ۸۵ کیلومتری شرق تبریز				موقعیت جغرافیایی
بافت	آلکالی فلدسپات، پلاژیوکلاز، نفلین، اوژیت، الیون، آپاتیت، کانی‌های اپک			کانی‌های موجود
گرانولار (دانه‌ای)				
مدول الاستیسیته (GPa)	عدد چکش اشمیت	چگالی خشک (g/cm ³)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)
۵۱/۵۹	۵۷/۲	۲/۴۹	۴/۴۶	۷۶
		سایش شیمازک (N/mm)	کوارتز محتوی (%)	سختی میانگین
		۶/۳۲	۳۷/۵۹	۵/۸۵
عکس‌های گرفته شده از مقطع نازک				
				

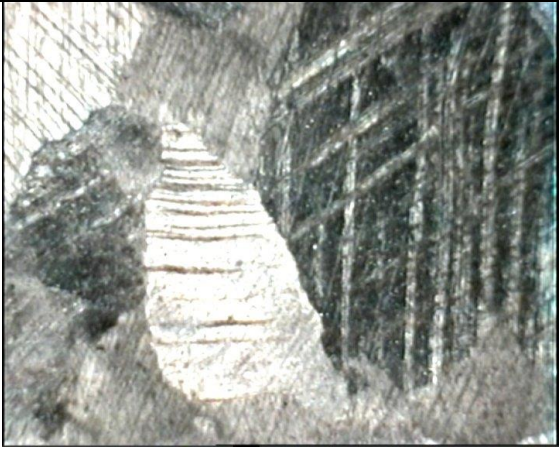
نام سنگ: مونزونیت				
معدن مس سونگون، ۱۲۰ کیلومتری شمال شرق تبریز				موقعیت جغرافیایی
بافت		کوارتز، سرسیت، زیرکن، موسکوویت، کانی‌های اپک		کانی‌های موجود
گرانوبلاستیک				
مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	چگالی خشک (g/cm ³)	عدد چکش اشمیت	مدول الاستیسیته (GPa)
۵۷	۴/۲۱	۲/۵۸	۵۰/۹	۵۱/۲۳
سختی میانگین		سایش شیمازک (N/mm)	کوارتز محتوی (%)	
۴/۷۵		۱/۱۳	۵۲/۸۱	
عکس‌های گرفته شده از مقطع نازک				
				

نام سنگ: گرانیت				
موقعیت جغرافیایی				
معدن اوچ مازی مراغه، ۹۳ کیلومتری جنوب شرقی تبریز				
کانی‌های موجود		فلدسپات، آندزیت، بیوتیت، آمفیبول، پیروکسن، کلریت، کانی‌های اپک		
بافت				
گرانولار (دانه‌ای)				
مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	چگالی خشک (g/cm ³)	عدد چکش اشمیت	مدول الاستیسیته (GPa)
۸۷/۵	۵/۳۶	۲/۶۵	۱/۵۸	۶۰/۸۴
سختی میانگین	کوارتز محتوی (%)	سایش شیمازک (N/mm)		
۵/۴۲	۳۲/۵	۱۱/۴۴		

عکس‌های گرفته شده از مقطع نازک



نام سنگ: سنگ آهک				
موقعیت جغرافیایی				معدن آهک سیمان صوفیان، کارگاه ۷۵، ۳۱ کیلومتری شمال غرب تبریز
کانی‌های موجود		کلسیت، هماتیت، کانی‌های اپک		
بافت	اسپرایت			
مدول الاستیسیته (GPa)				
۴۴/۱	۵۴/۱	چگالی خشک (g/cm ³) ۲/۵۹	مقاومت کششی (MPa) ۲/۲۳	مقاومت فشاری (MPa) ۵۱
		سایش شیمازک (N/mm)	کوارتز محتوی (%)	سختی میانگین
		۰/۱۴	۴/۲	۳/۱۵
عکس‌های گرفته شده از مقطع نازک				
				

نام سنگ: سنگ آهک				
موقعیت جغرافیایی		معدن آهک سیمان صوفیان، کارگاه ۱۷، ۳۱ کیلومتری شمال غرب تبریز		
کانی‌های موجود		کلسیت، مواد آلی، هماتیت، قطعات سنگ خرد شده		
بافت اسپرایت				
مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	چگالی خشک (g/cm ³)	عدد چکش اشمیت	مدول الاستیسیته (GPa)
۴۰	۵/۴۵	۲/۷۹	۵۲/۳	۵۸/۸۲
سختی میانگین		سایش شیمازک (N/mm)	کوارتز محتوی (%)	
۳/۰۵		۰/۲۵	۳/۴	
عکس‌های گرفته شده از مقطع نازک				
				

در این فصل مشخصات مکانیکی و فیزیکی تعدادی از سنگ‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند. طبق شکل‌های ارائه شده در این فصل از مقاطع نازک تهیه شده برای آنالیز بافت سنگ‌ها استفاده خواهد شد. در فصل آینده مراحل مختلف آنالیز بافت و نتایج تعیین پارامترها و شاخص‌های بافتی ارائه خواهد شد. سپس تحلیل‌های رگرسیونی بر روی ارتباط مشخصات فیزیکی و مکانیکی با پارامترهای بافتی انجام خواهد شد.

فصل چهارم

مطالعات انجام شده بر روی مقاطع

۱- مقدمه

به منظور مطالعه ارتباط میان مشخصات بافتی سنگ‌ها و مشخصات مهندسی آنها ابتدا لازم است تا مشخصات بافتی سنگ‌ها به صورت کمی تعیین شوند. تنها به این وسیله می‌توان رابطه ریاضی بین این مشخصات را بررسی کرد.

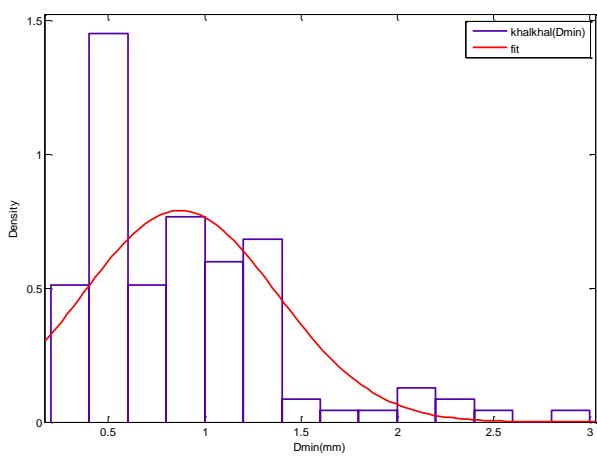
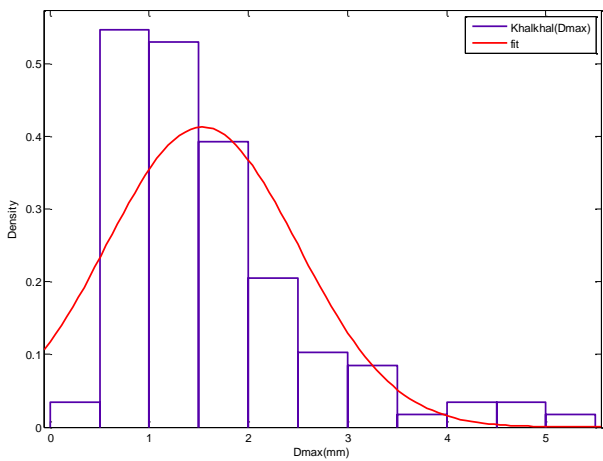
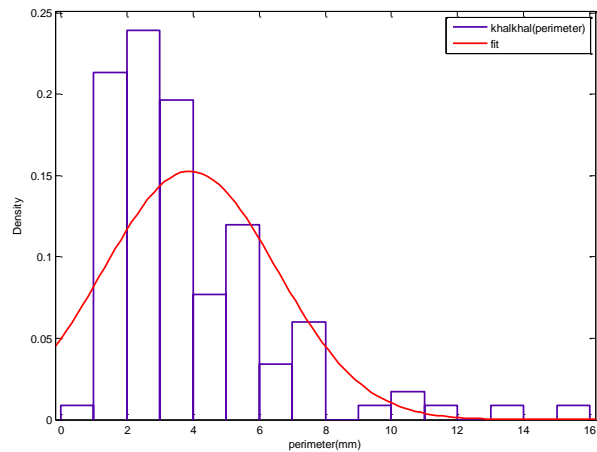
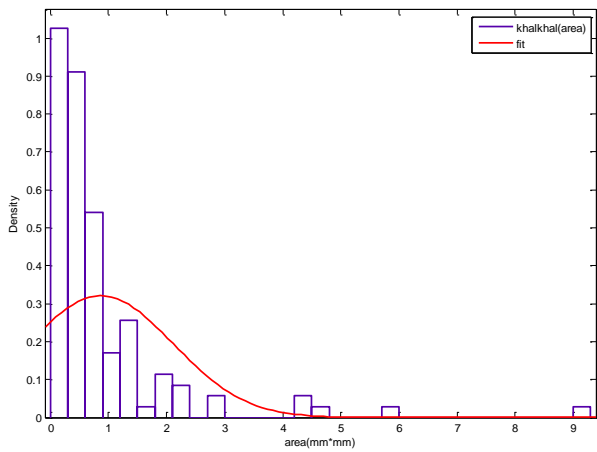
در این فصل تعدادی از شاخص‌های بافتی معرفی شده در فصل سوم با استفاده از محاسبات ریاضی انجام شده بر روی مقاطع تعیین شده است. برای تعیین مشخصات بافتی سنگ‌های مورد نظر، یکی از عکس‌های تهیه شده از مقاطع هر سنگ به عنوان مقطع معرف آن سنگ انتخاب شد. در مرحله بعد هر یک از این عکس‌ها وارد نرم‌افزار اتوکد گردیدند. در نرم‌افزار اتوکد دور دانه‌های سنگ خطوط بسته‌ای به صورت دیجیتالی کشیده شدند. سپس با استفاده از دستوره‌های موجو در نرم‌افزار محیط و مساحت هر یک از دانه‌ها تعیین شده و ذخیره شدند. بعد از این کار، فرمت دیجیتالی عکس‌های چاپ شده و قطر بزرگ و قطر کوچک هر کدام از دانه‌های مشخص شده به صورت دستی تعیین شد.

پس از تعیین مساحت، محیط، قطر بزرگ و قطر کوچک هر دانه سایر پارامترها طبق روابط ارائه شده در فصل سوم محاسبه گردیدند نتایج کلیه محاسبات و مشخصات بافتی تمامی سنگ‌های مورد مطالعه در جدول (۱۰۰۰) ارائه شده است. در ادامه فصل، نتایج آنالیز ابعادی بافت سنگ‌ها مورد مطالعه ارائه شده است.

۲- تراورتن خلخال

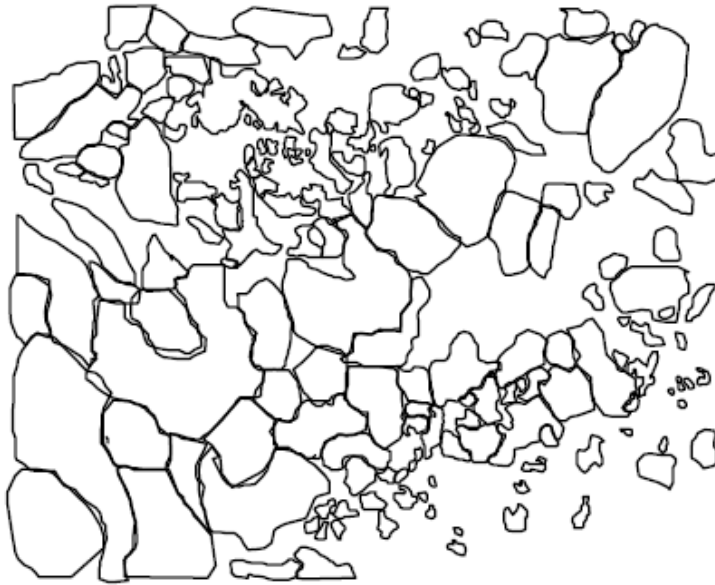


شکل ۴-۱- فرمت دیجیتالی مقطع نازک تراورتن خلخال

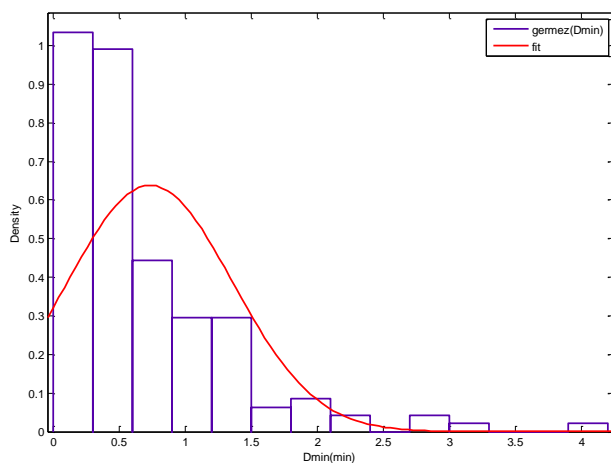
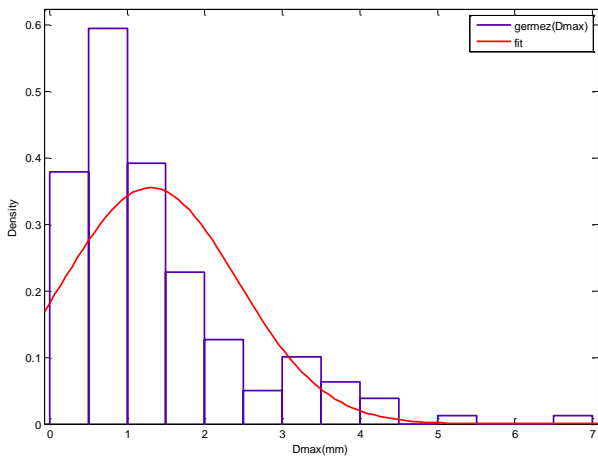
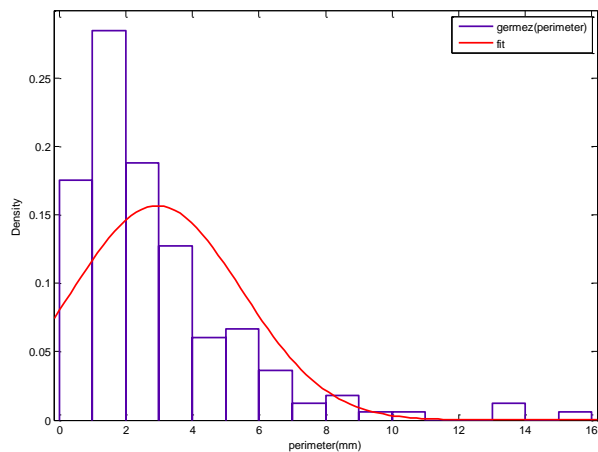
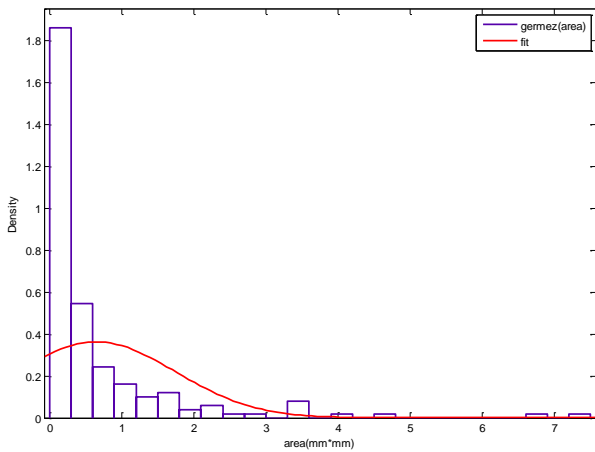


شکل ۴-۲- هیستوگرام مساحت، محیط، قطر بزرگ و قطر کوچک دانه‌های موجود در مقطع نازک تراورتن خلخال

۳- تراورتن قرمز

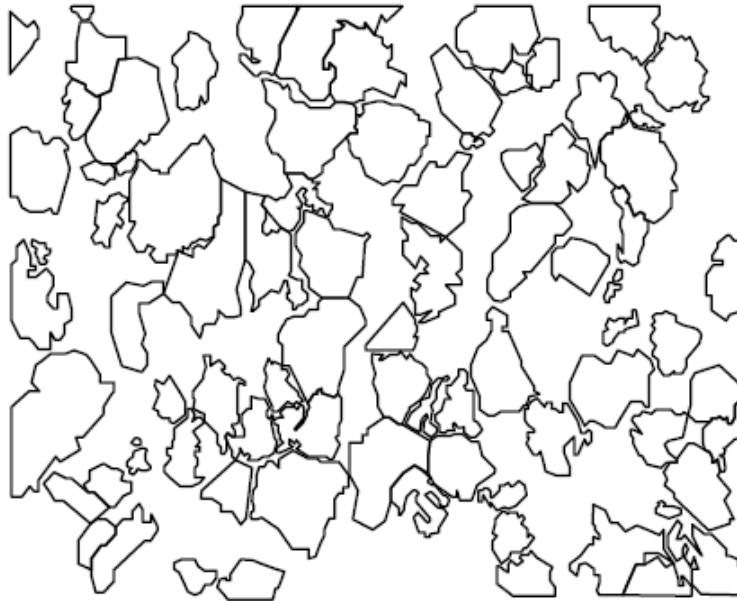


شکل ۴-۳- فرمت دیجیتالی مقطع نازک تراورتن قرمز

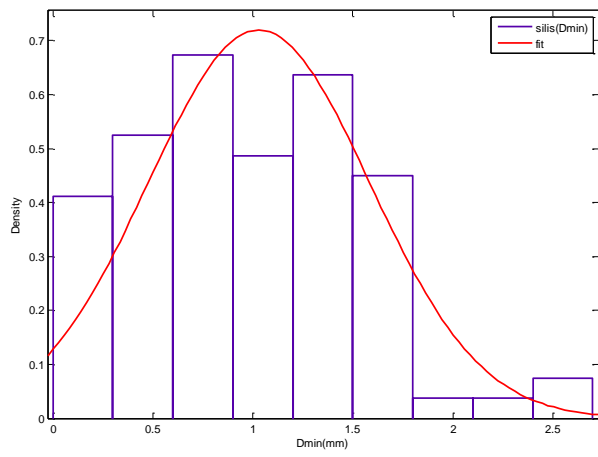
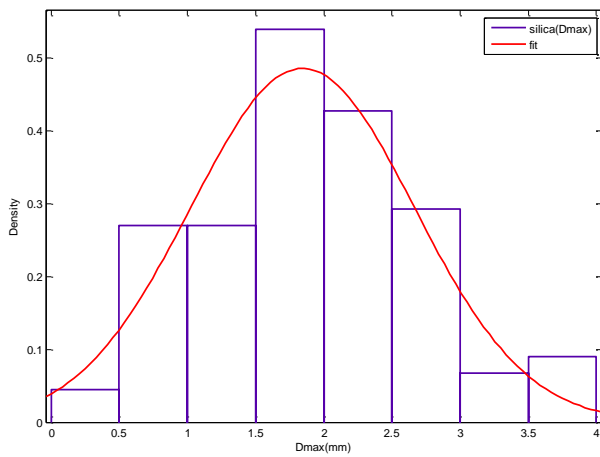
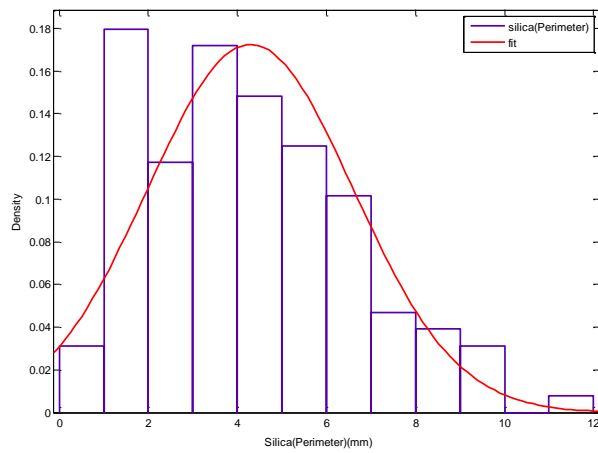
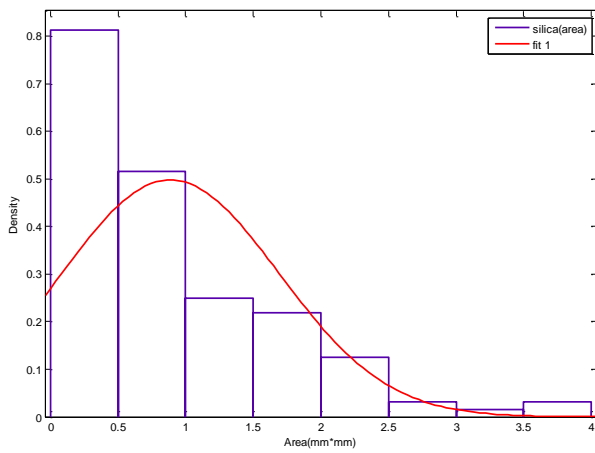


شکل ۴-۴- هیستوگرام مساحت، محیط، قطر بزرگ و قطر کوچک دانه‌های موجود در مقطع نازک تراورتن قرمز

۴- سیلیس

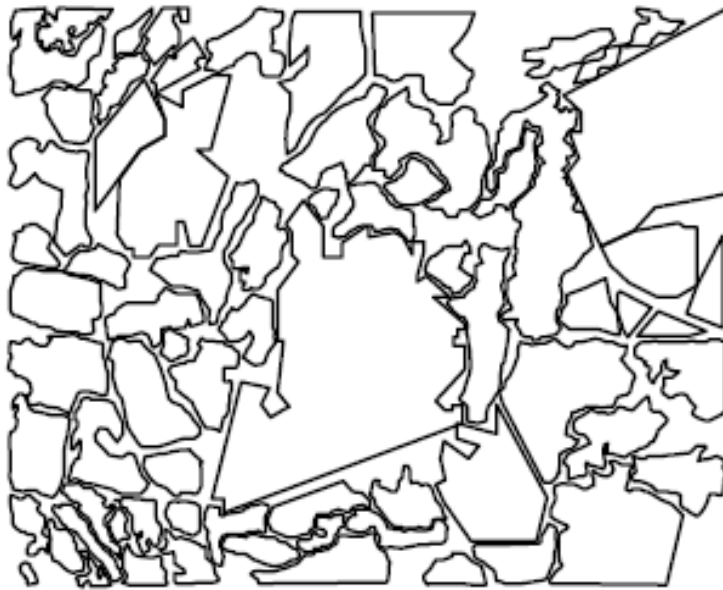


شکل ۴-۵- فرمت دیجیتالی مقطع نازک سیلیس

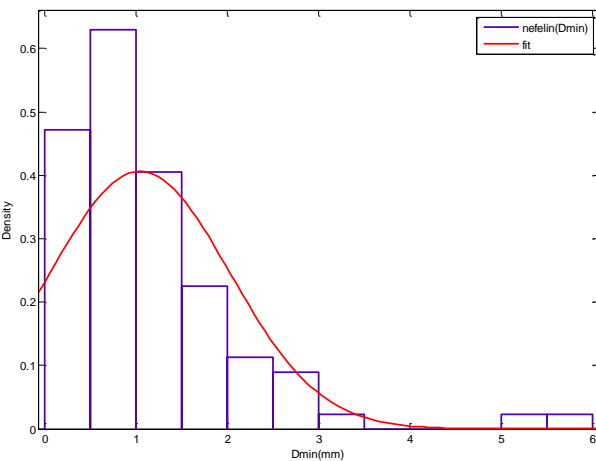
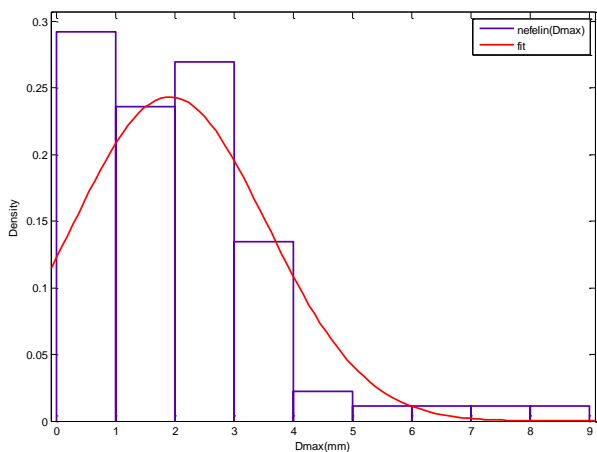
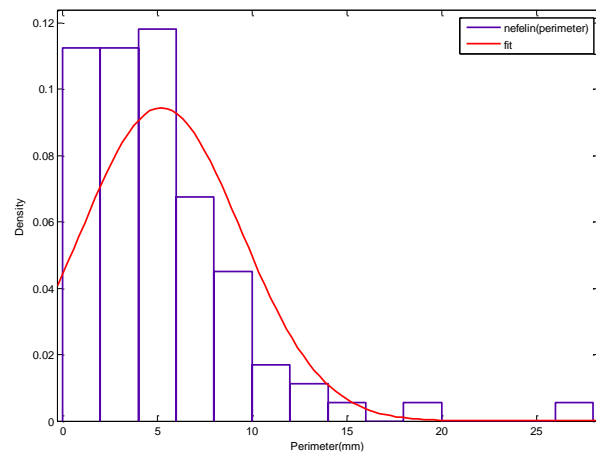
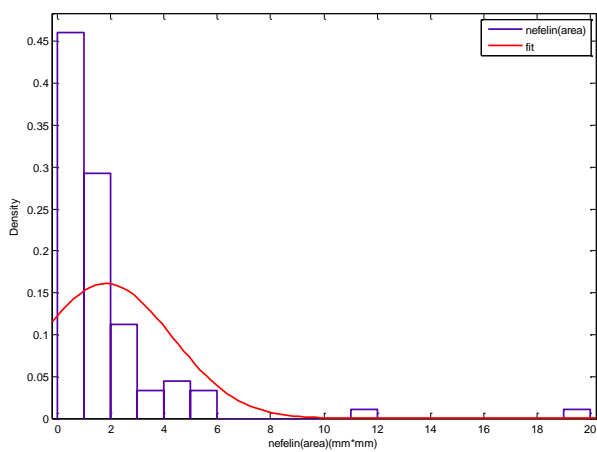


شکل ۴-۶- هیستوگرام مساحت، محیط، قطر بزرگ و قطر کوچک دانه‌های موجود در مقطع نازک سیلیس

۵- نفلین

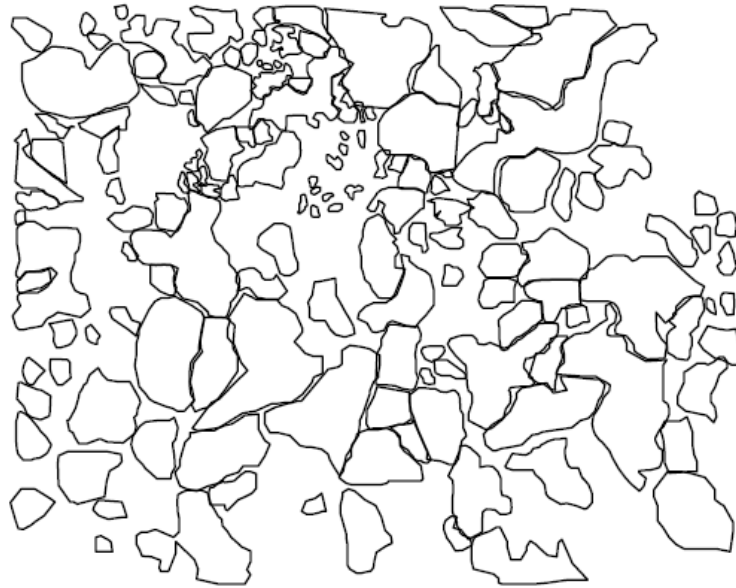


شکل ۴-۷- فرمت دیجیتالی مقطع نازک نفلین

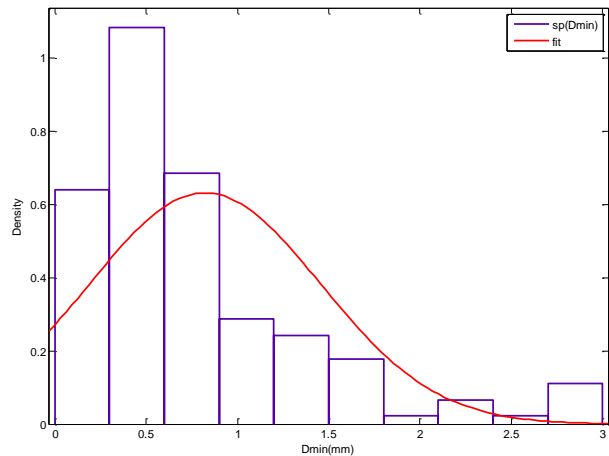
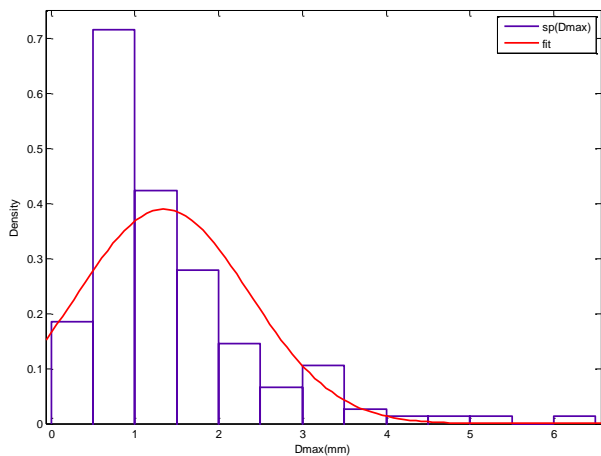
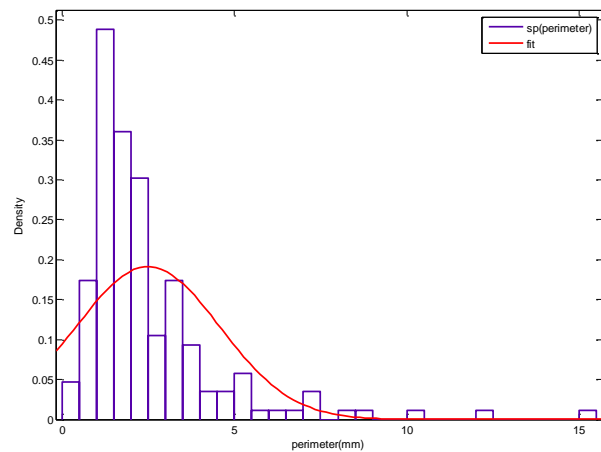
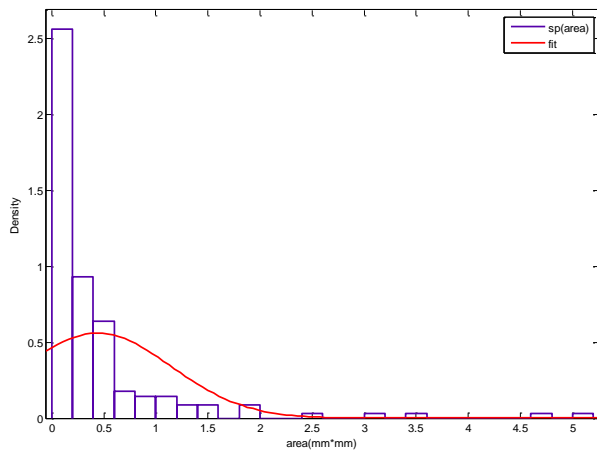


شکل ۴-۸- هیستوگرام مساحت، محیط، قطر بزرگ و قطر کوچک دانه‌های موجود در مقطع نازک نفلین

۶- مونزونیت



شکل ۴-۹- فرمت دیجیتالی مقطع نازک مونزونیت

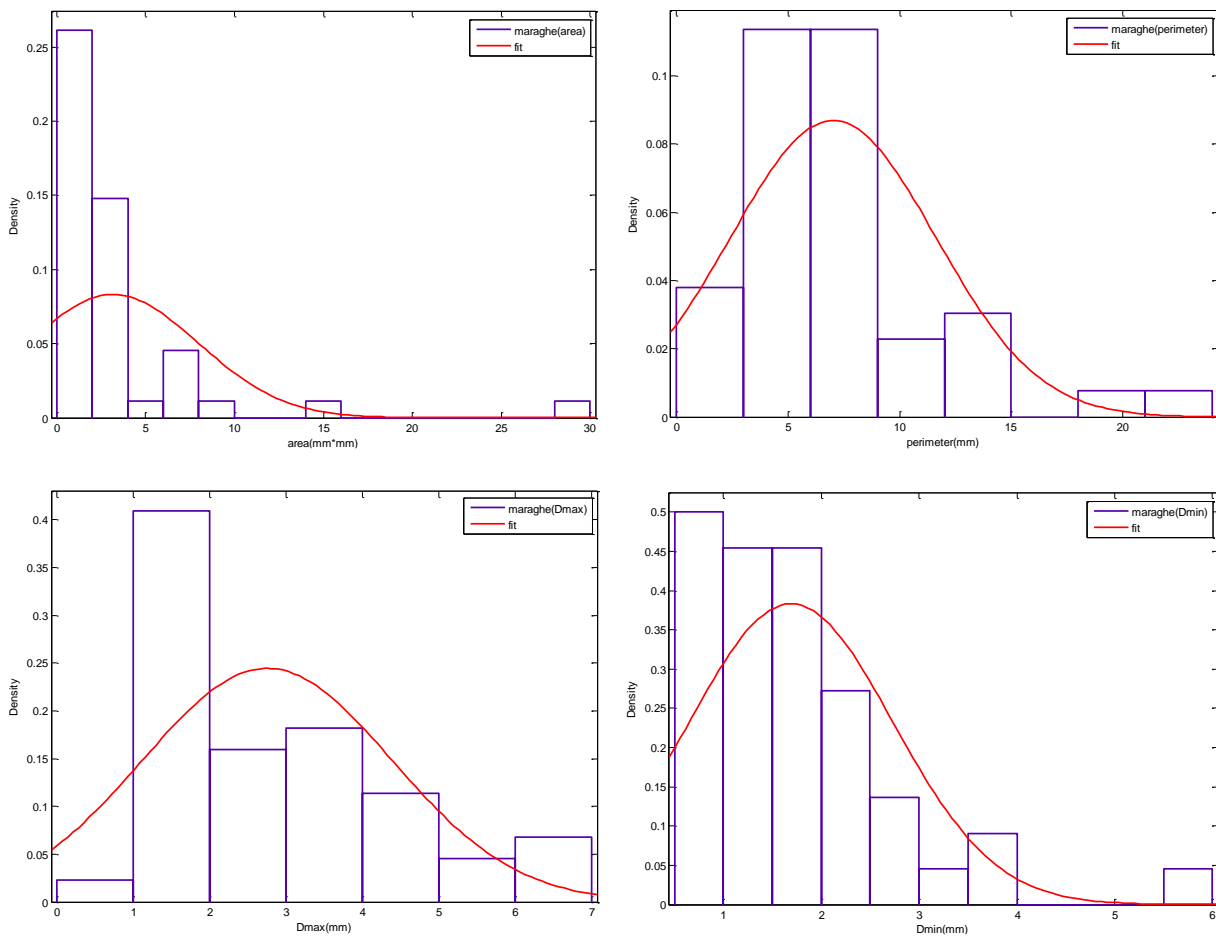


شکل ۴-۱۰- هیستوگرام مساحت، محیط، قطر بزرگ و قطر کوچک دانه‌های موجود در مقطع نازک مونزونیت

۷- گرانیت مراغه

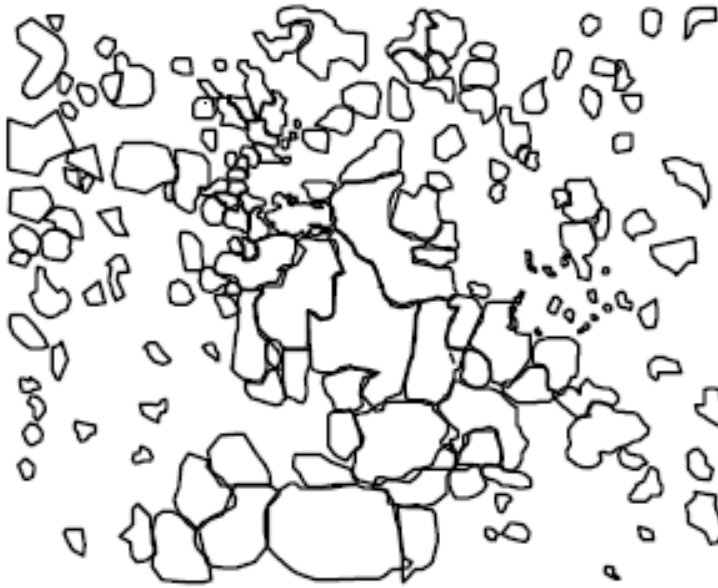


شکل ۴-۱۱- فرمت دیجیتالی مقطع نازک گرانیت مراغه

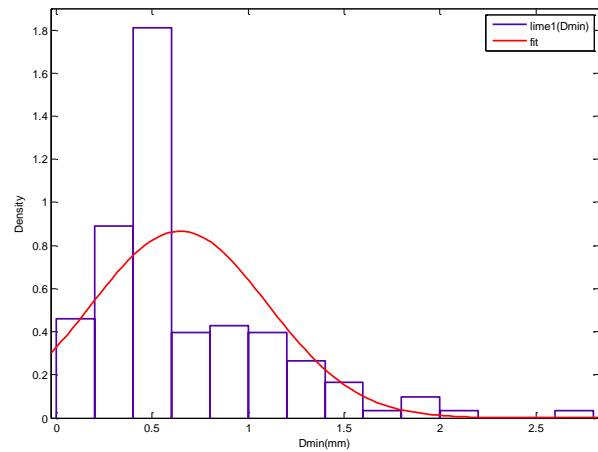
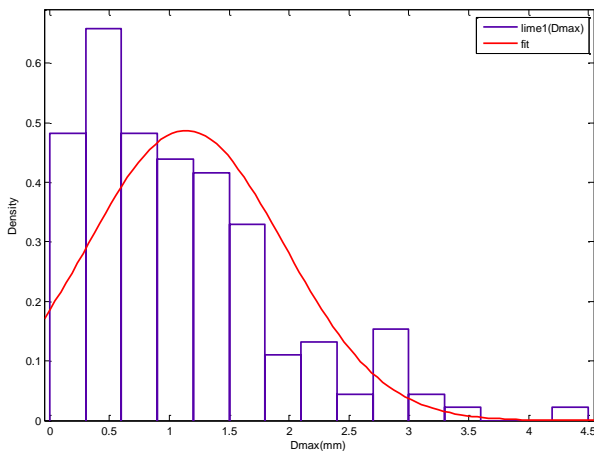
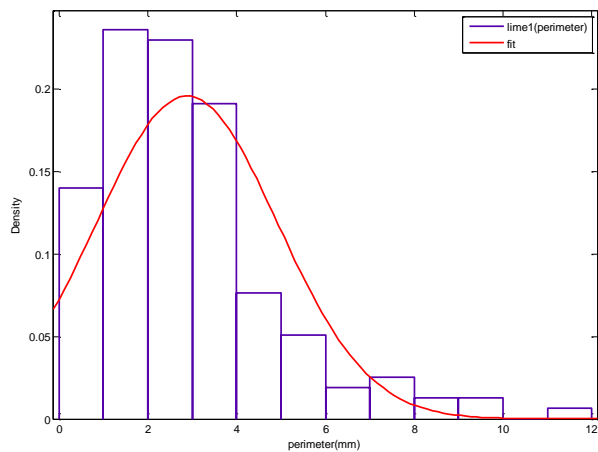
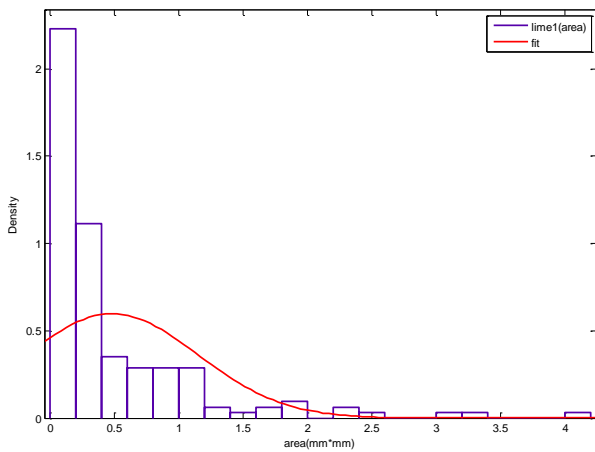


شکل ۴-۱۲- هیستوگرام مساحت، محیط، قطر بزرگ و قطر کوچک دانه‌های موجود در مقطع نازک گرانیت مراغه

۸- سنگ آهک

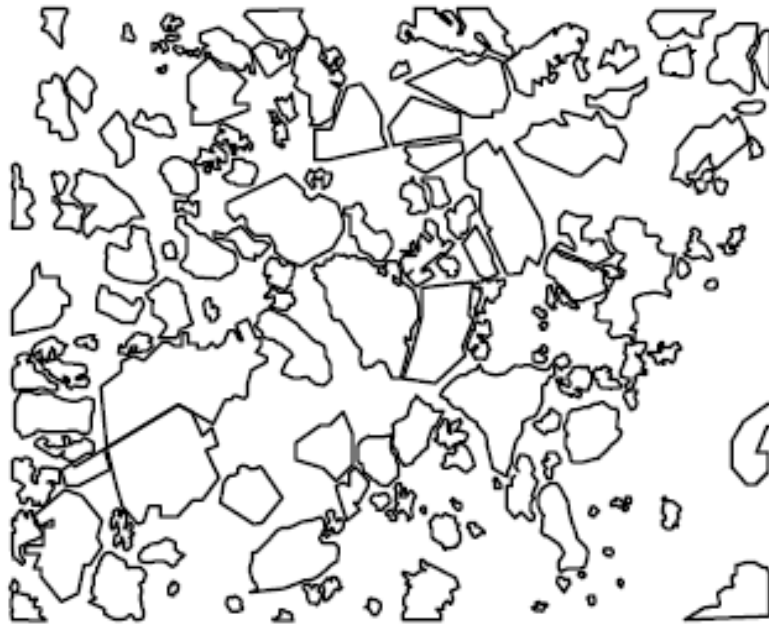


شکل ۴-۱۳- فرمت دیجیتالی مقطع نازک سنگ آهک

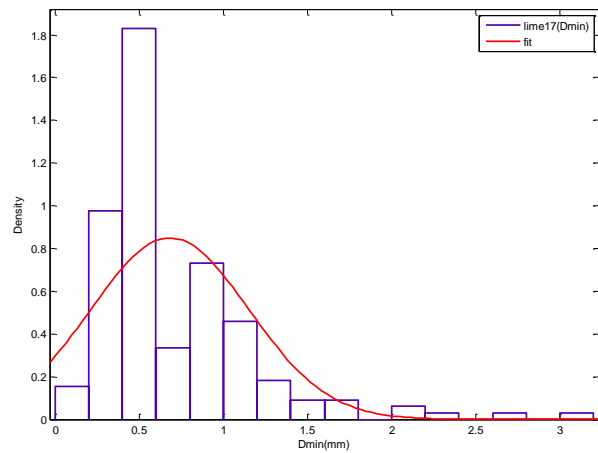
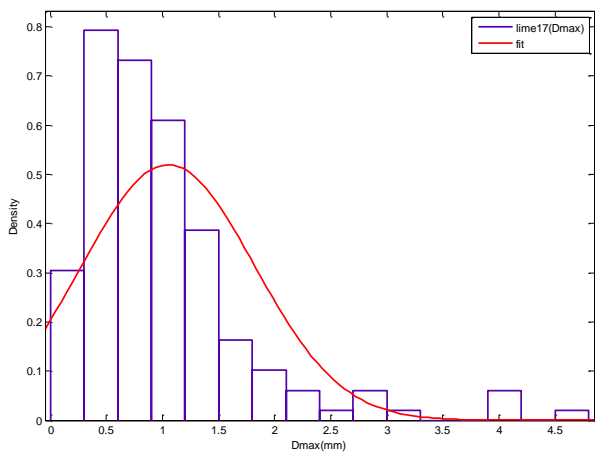
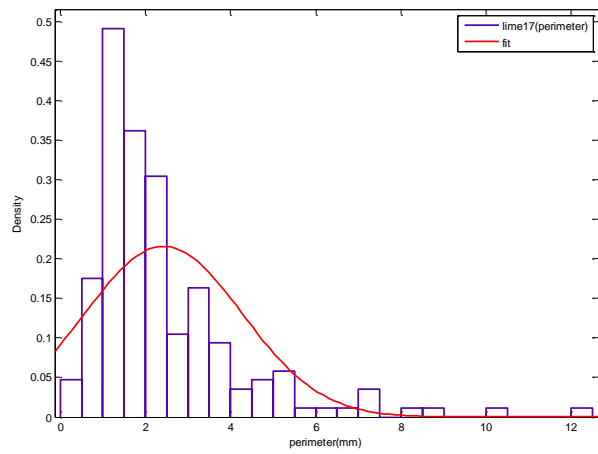
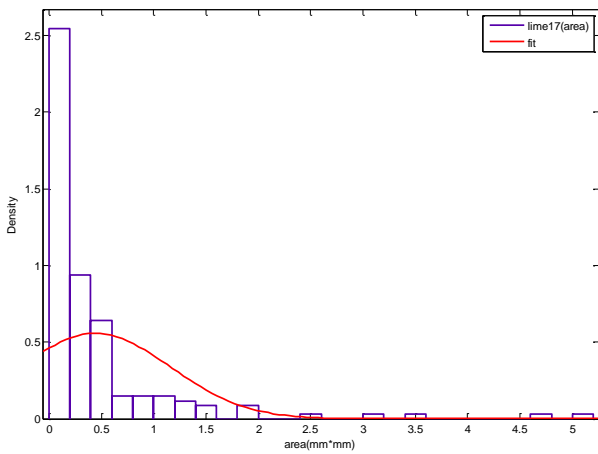


شکل ۴-۱۴- هیستوگرام مساحت، محیط، قطر بزرگ و قطر کوچک دانه‌های موجود در مقطع نازک سنگ آهک

۹- سنگ آهک



شکل ۴-۱۵- فرمت دیجیتالی مقطع نازک سنگ آهک



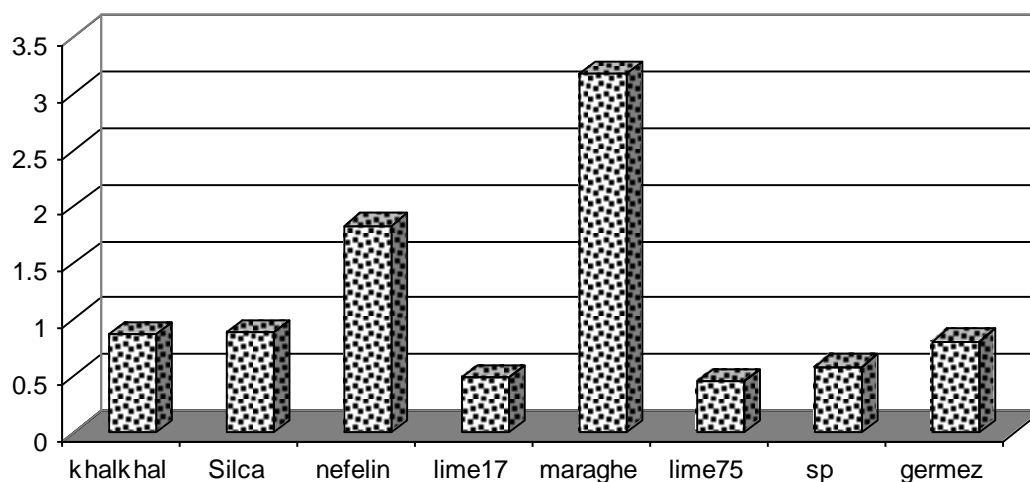
شکل ۴-۱۶- هیستوگرام مساحت، محیط، قطر بزرگ و قطر کوچک دانه‌های موجود در مقطع نازک سنگ آهک

۱۰- اطلاعات بدست آمده از مقاطع

چنانچه ذکر شد و در شکل‌های ۱-۴ تا ۱۶-۴ دیدیم در تمامی نمونه‌های سنگی مساحت، محیط، قطر بزرگ و قطر کوچک دانه‌ها به عنوان اطلاعات پایه در مورد شرایط بافت سنگ‌ها از مقاطع استخراج گردیده‌اند. با توجه به محاسبات آماری انجام شده میانگین این پارامترها در هر سنگ به شرح جدول ۱-۴ و شکل‌های ۴-۱۷ تا ۴-۲۰ می‌باشد.

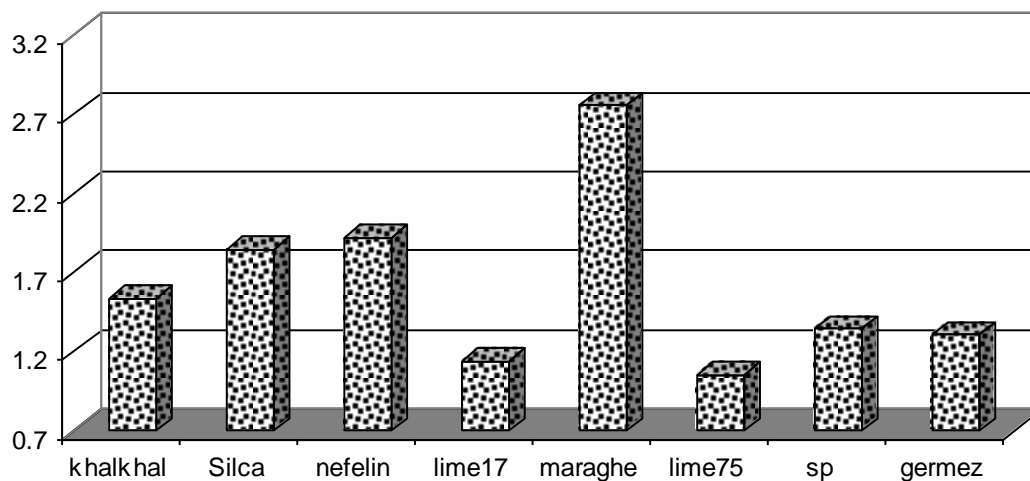
جدول ۱-۴- میانگین اطلاعات پایه در مورد بافت هر نمونه سنگ

نام سنگ	مساحت دانه‌ها	محیط دانه‌ها	قطر بزرگ	قطر کوچک
تراورتن خلخال	0.869	3.922	1.534	0.872
سیلیس	0.888	4.294	1.844	1.03
نفلین سینیت	1.829	5.217	1.919	1.046
سنگ آهک شیری	0.484	2.883	1.138	0.644
گرانیت	3.175	7.031	2.755	1.691
سنگ آهک سیاه	0.442	2.426	1.051	0.682
مونزونیت	0.577	2.493	1.343	0.823
تراورتن قرمز	0.802	2.966	1.302	0.735



شکل ۴-۱۷- نمودار ستونی میانگین مساحت دانه‌ها در سنگ‌های مختلف

چنانچه از این شکل بر می‌آید گرانیت مراغه دارای درشت‌ترین دانه‌ها و سنگ آهک سیاه (۷۵) دارای ریزترین دانه‌ها در بین سنگ‌های مورد مطالعه بوده‌اند.



شکل ۴-۱۸- نمودار ستونی میانگین قطر بزرگ دانه‌ها در سنگ‌های مختلف

با توجه به اطلاعات پایه که به طور مستقیم از مقاطع استخراج گردیدند، اصلاحات تکمیلی و شاخص‌های ریاضی دیگر نیز با توجه به روابط ریاضی ارائه شده در فصل دوم محاسبه گردیدند. جدول ۴-۲ مشخصات بافتی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۲- مشخصات بافتی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه

نام سنگ	Dequi	C	SF	AR	g	t
تراورتن خلخال	1.052	17.707	0.709	1.76	4.798	0.065
سیلیس	1.063	20.77	0.605	1.791	5.017	0.098
نفلین سینیت	1.526	14.883	0.844	1.835	5.18	0.081
سنگ آهک شیری	0.785	17.185	0.731	1.767	4.96	0.098
گرانیت	2.011	15.574	0.806	1.629	4.585	0.101
سنگ آهک سیاه	0.751	13.307	0.944	1.54	4.278	0.047
مونزونیت	0.857	10.767	1.167	1.632	4.482	0.047
تراورتن قرمز	1.011	10.975	1.144	1.771	4.535	0.046

با توجه در جدول فوق مشاهده می‌شود که گرانیت بیشترین قطر معادل، سیلیس بیشترین فشردگی دانه، مونزونیت بیشترین فاکتور شکل دانه، نفلین سینیت بیشترین نسبت وضعیت دانه و قفل‌شدگی دانه‌ها و گرانیت بیشترین شاخص یکنواختی را در بین سنگ‌ها داشته‌اند. از این موضوع می‌توان به یک نتیجه جالب دست یافت و آن اینکه هر یک از سنگ‌ها در یک پارامتر شاخص‌ترند و هیچ سنگی از نظر تمامی شاخص‌ها

سرآمد نیست. این موضوع تحلیل رفتار سنگ تحت شرایط مختلف را بسیار متغییر می‌سازد. این امر به صورت پایه، منشا بسیار از پیچیدگی‌های مطالعات مکانیک‌سنگی است. به این صورت که، بسته به شرایط هر سنگ می‌تواند رفتار مختلف تابع بافت از خود نشان دهد.

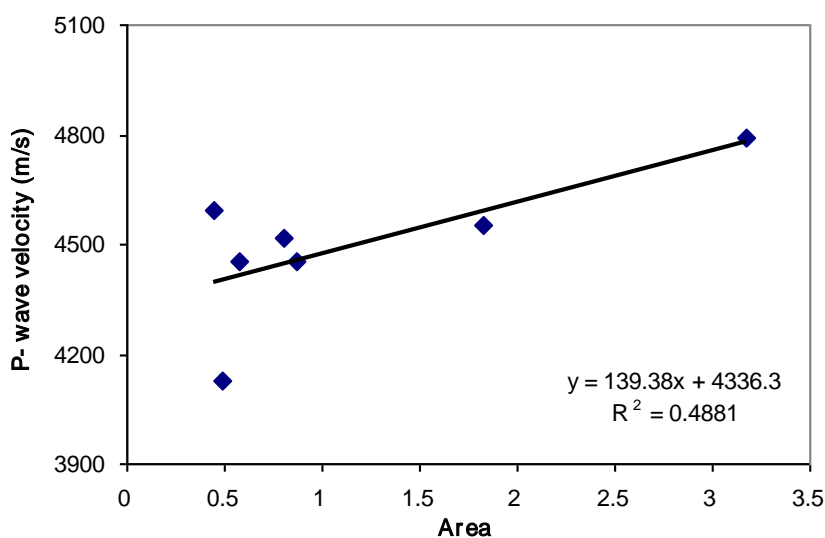
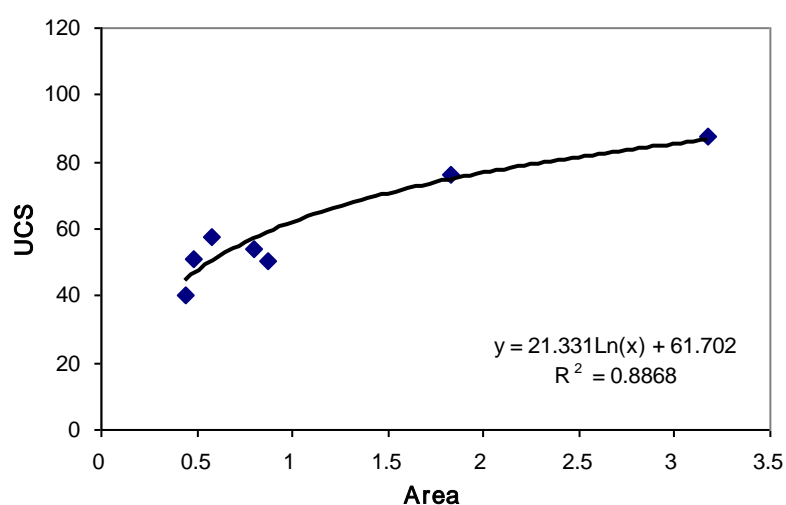
در فصل آینده بیش‌تر به این موضوع پرداخته خواهد شد.

مطالعات و آنالیزهای رگرسیونی

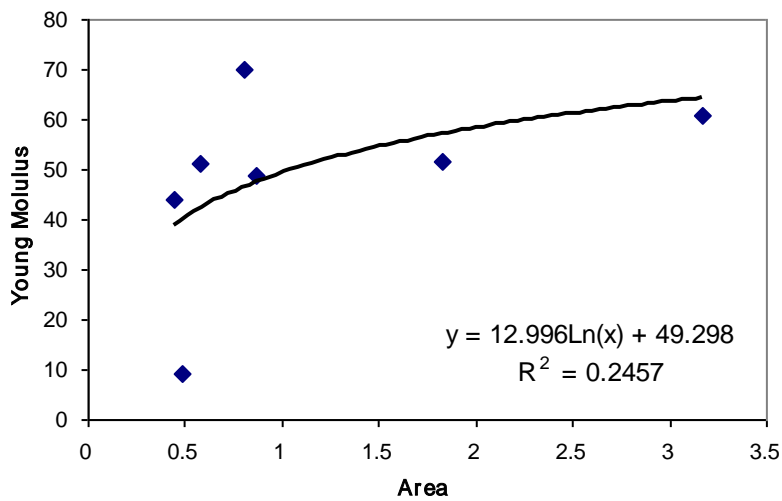
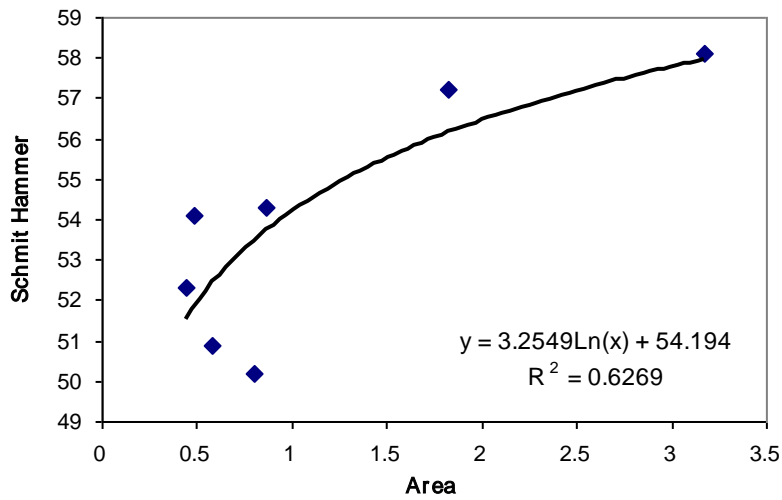
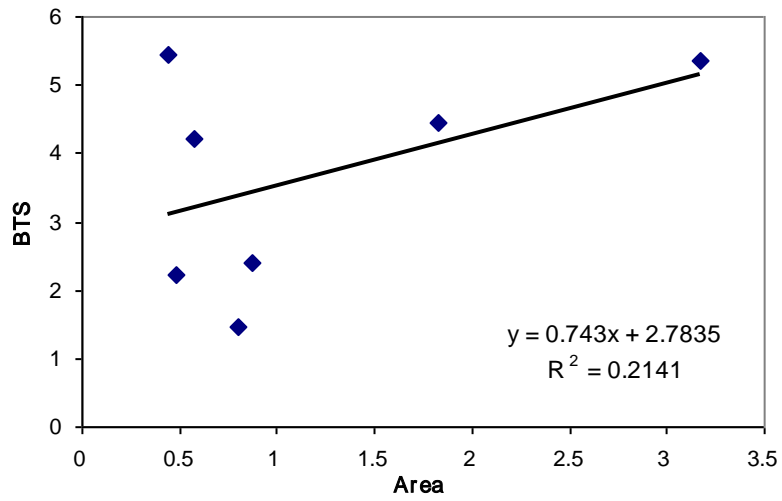
۱- مقدمه

با توجه به مطالعات آزمایشگاهی بر روی مشخصات مکانیک سنگی و نیز مصالعات میکروسکوپی بر روی مقاطع، به راحتی می‌توان تأثیر مشخصات بافتی را بر روی مشخصات مهندسی سنگ‌ها را مطالعه نمود. برای این منظور، در این فصل نطالعات رگرسیونی بین کلیه پارامترهای مهندسی سنگ و مشخصات بافتی انجام شده است. در ادامه نتایج این تحلیل‌ها به طور کامل ارائه شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

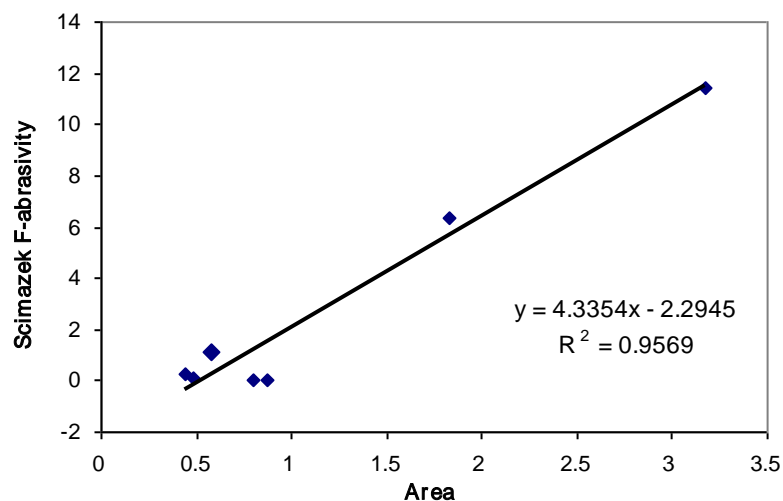
۲- ارتباط سطح دانه با مشخصات مهندسی سنگ‌ها



شکل ۵-۱- ارتباط میانگین سطح دانه با مقاومت فشاری و سرعت موج در سنگ



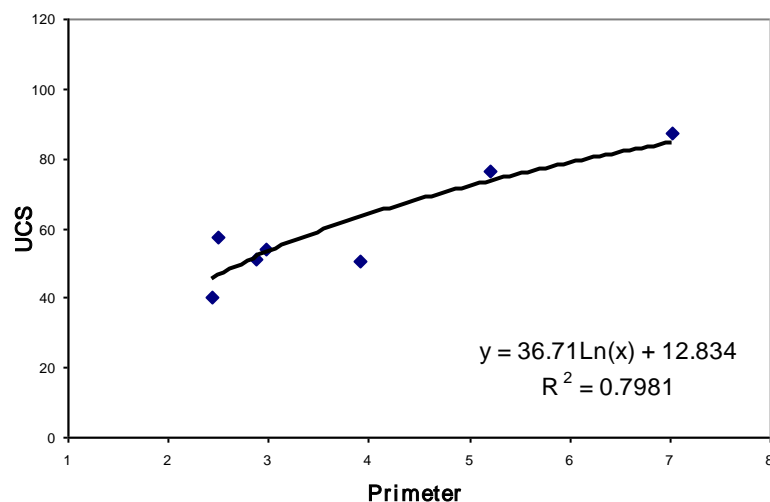
شکل ۵-۲- ارتباط میانگین سطح دانه با مقاومت کششی برزیلی، و سختی اشمیت و مدول الاستیسیته



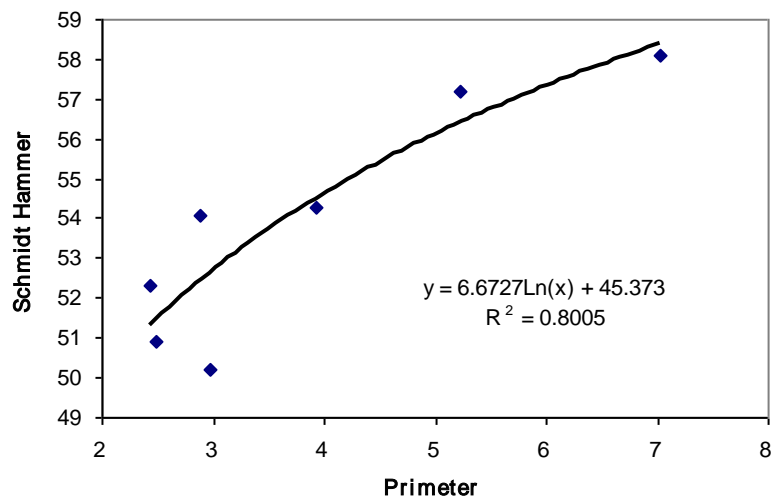
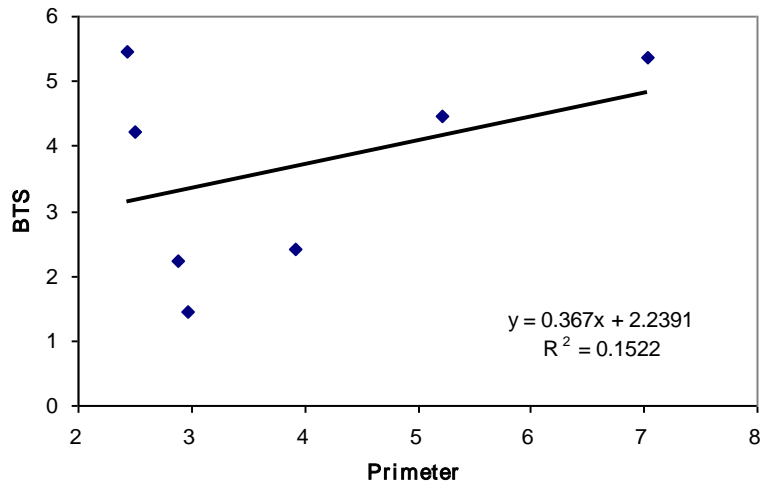
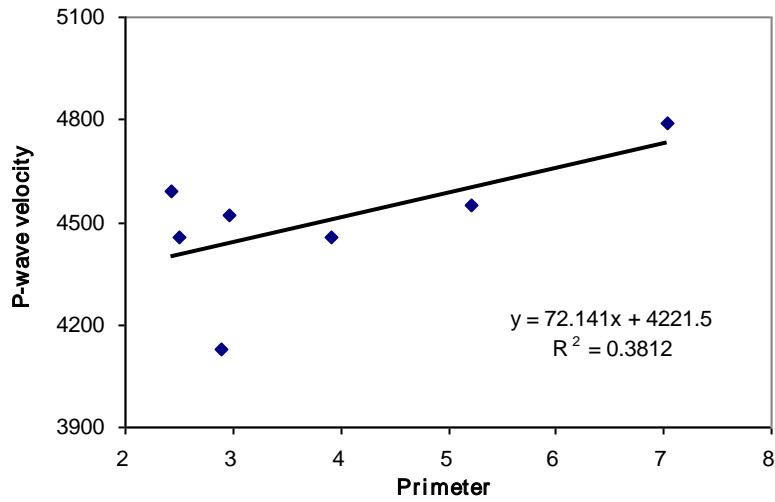
شکل ۵-۳- ارتباط میانگین سطح دانه با شاخص ساینده‌گی شیمازک

چنانچه از شکل‌های فوق بر می‌آید میزان مساحت میانگین دانه‌های سنگ رابطه بسیار خوبی با مقاومت فشاری و ساینده‌گی سنگ‌ها دارد. لذا می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که مساحت دانه‌های سنگ مقاومت فشاری تک‌محوری و ساینده‌گی سنگ‌ها را بیشتر از سایر مشخصات سنگ تحت تأثیر قرار می‌دهد.

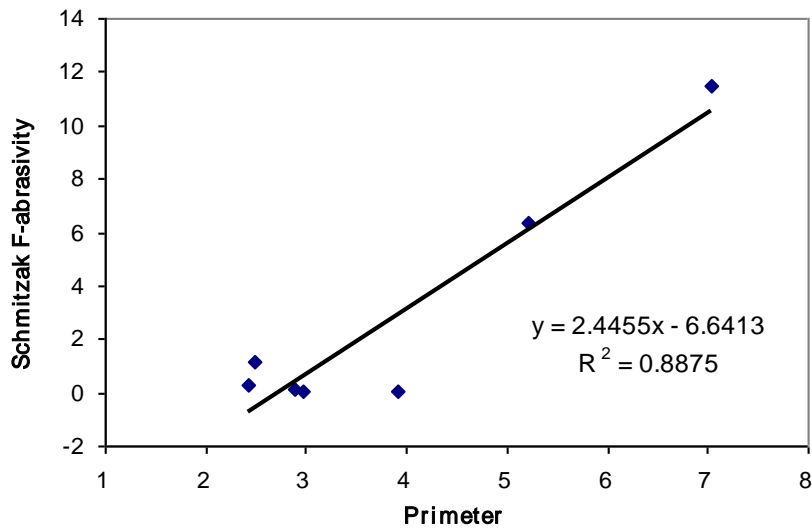
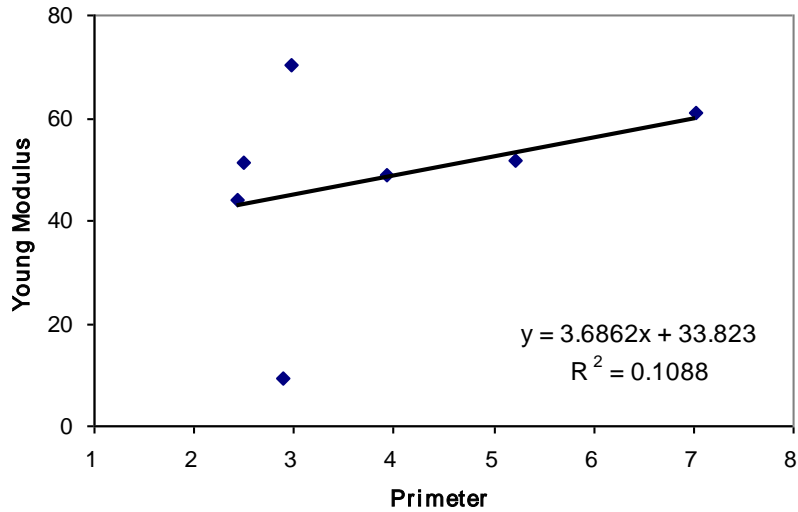
۳- ارتباط محیط دانه با مشخصات مهندسی سنگ‌ها



شکل ۵-۴- ارتباط میانگین محیط دانه‌ها با مقاومت فشاری سنگ



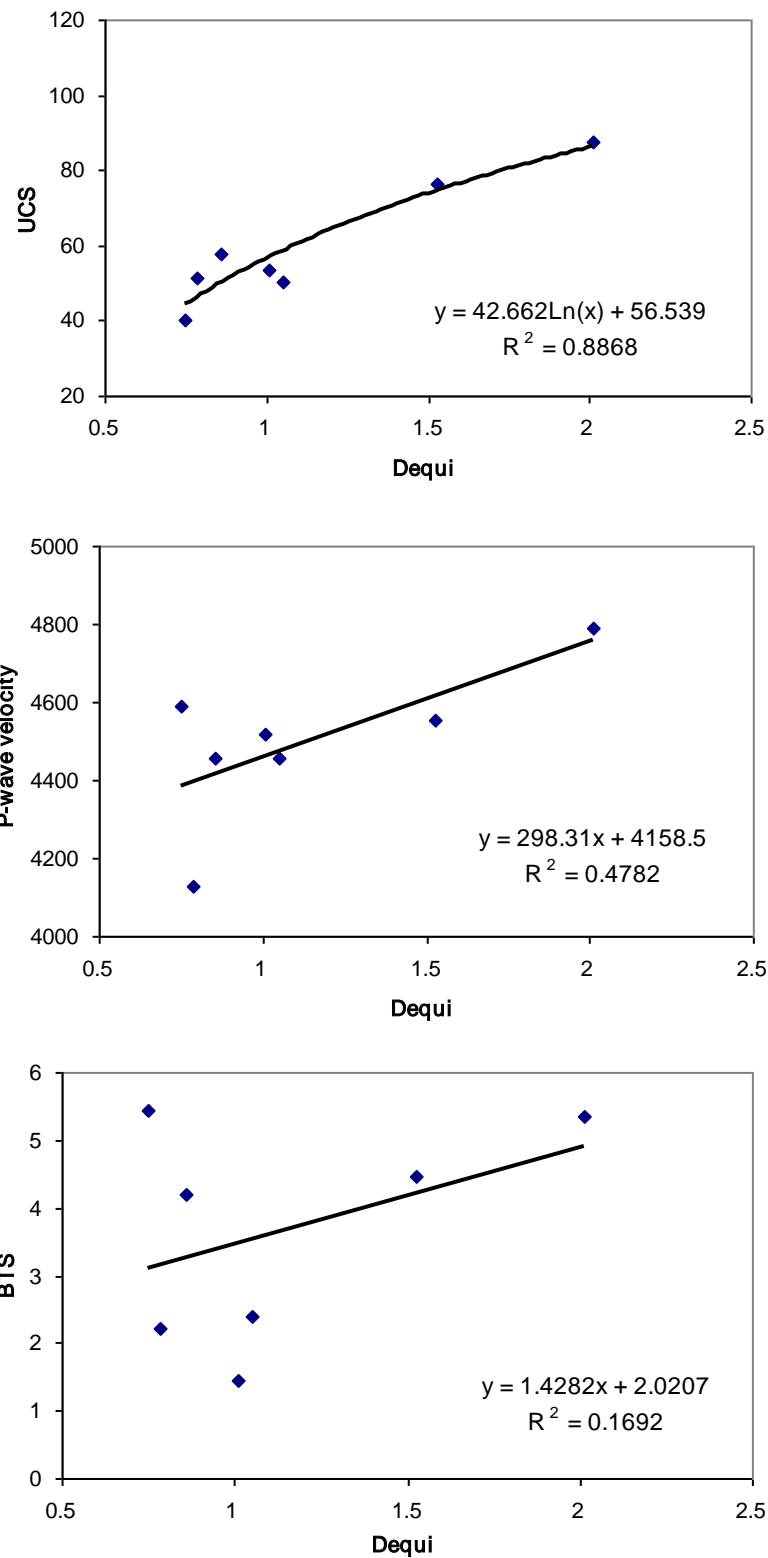
شکل ۵-۵- ارتباط میانگین محیط دانه با سرعت موج در سنگ ، مقاومت کششی برزیلی و سختی اشمیت



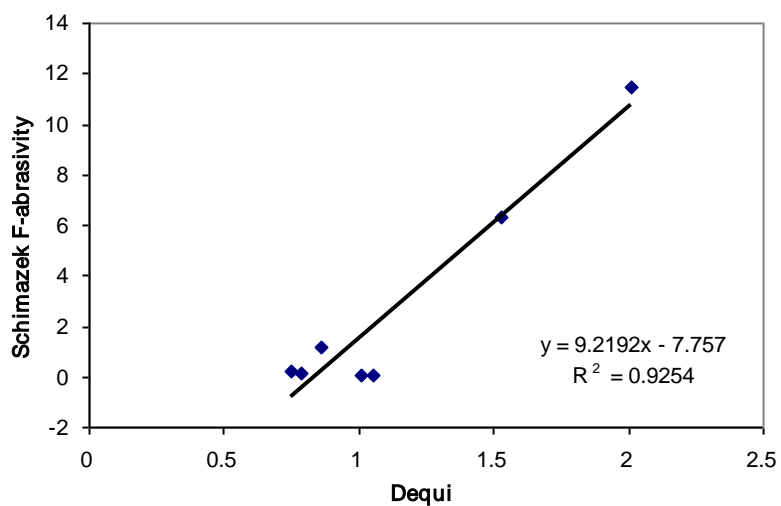
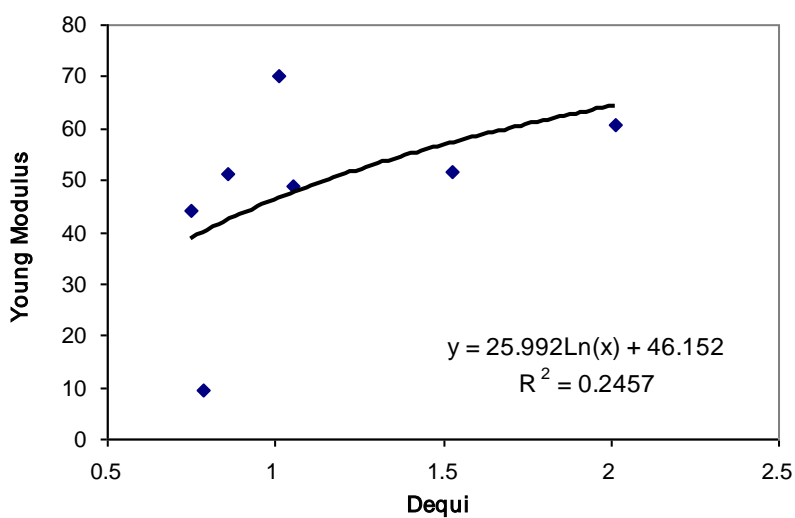
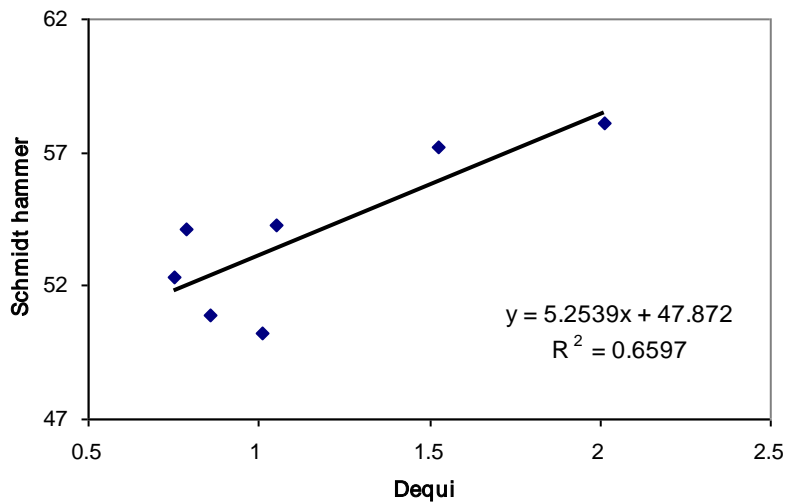
شکل ۵-۶- ارتباط میانگین سطح دانه با مدول الاستیسیته شاخص ساینده‌گی شیمازک

چنانچه معادلات بالا نشان می‌دهند، میزان محیط میانگین دانه‌های سنگ رابطه خوبی با مقاومت فشاری، سختی چکش اشمیت و ساینده‌گی سنگ‌ها دارد. لذا می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد این پارامترها نسبت به سایر پارامترها حساسیت بیشتری به محیط دانه‌های سنگ دارند.

۴- ارتباط قطر معادل با مشخصات مهندسی سنگ‌ها



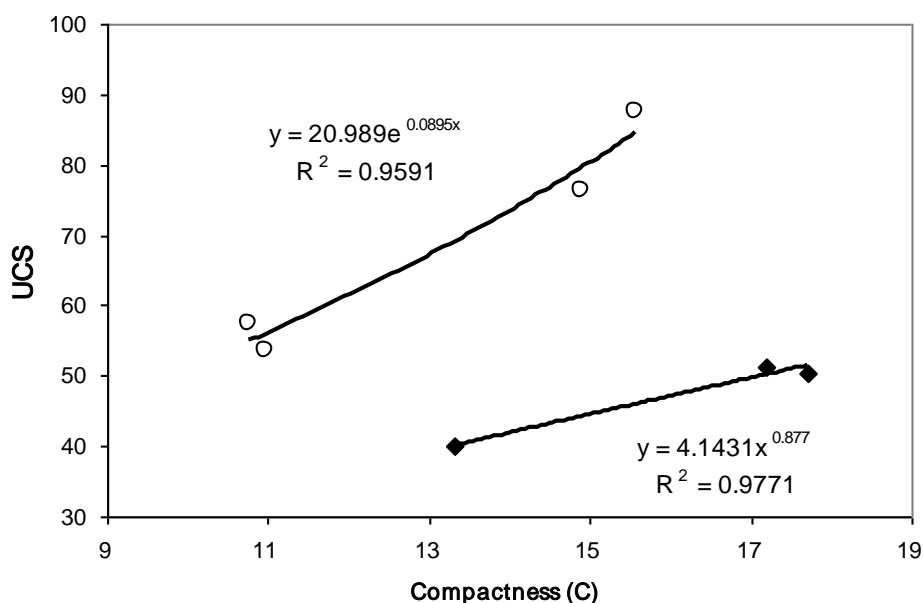
شکل ۵-۷- ارتباط میانگین قطر معادل با مقاومت فشاری، سرعت موج در سنگ و مقاومت کششی برزیلی



شکل ۵-۸- ارتباط میانگین قطر معادل با سختی اشمیت، مدول الاستیسیته و شاخص ساینده‌گی

با توجه در روابط فوق معلوم می‌شود که قطر معادل دانه‌های سنگ رابطه خوبی با مقاومت فشاری، سختی چکش اشمیت و ساینده‌گی سنگ‌ها دارد. اما این پارامتر با سایر مشخصات مهندسی سنگ رابطه ریاضی قوی

۵- ارتباط فشردگی دانه‌ها با مشخصات مهندسی سنگ‌ها



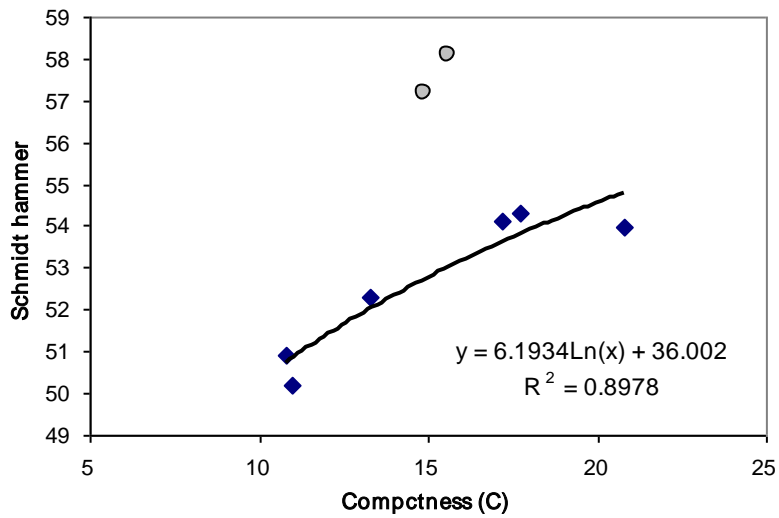
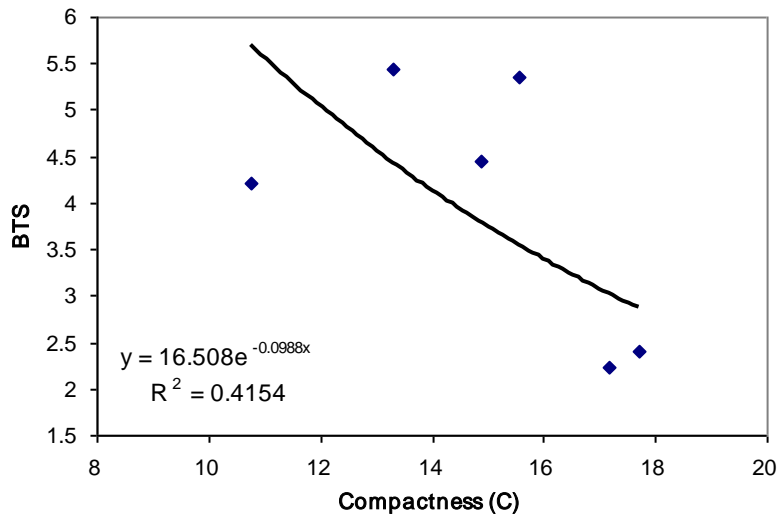
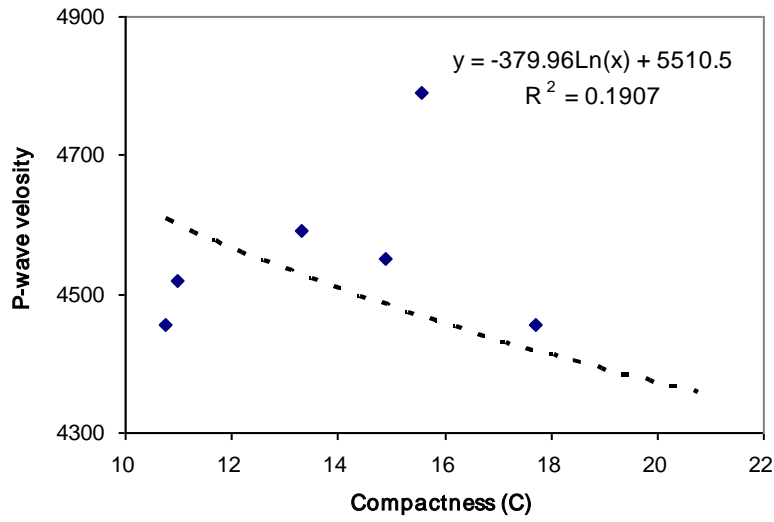
شکل ۵-۹- ارتباط فشردگی دانه‌ها با مقاومت فشاری سنگ

چنانچه در این شکل نشان داده شده است با انجام تحلیل‌های رگرسیونی بر روی داده‌های موجود معلوم گردید که یک دو دستگی آشکار در داده‌ها وجود دارد. با بررسی اولیه معلوم گردید که سنگ‌های تراورتن خلخال، سنگ آهک شیری و سنگ آهک سیاه که جزو گروه سنگ‌های کربناته هستند دارای یک رابطه بسیار قوی می‌باشند. همچنین در سایر سنگ‌های مورد مطالعه نیز یک رابطه ریاضی مجزا ولی قوی بین فشردگی دانه‌ها و مقاومت فشاری سنگ برقرار است.

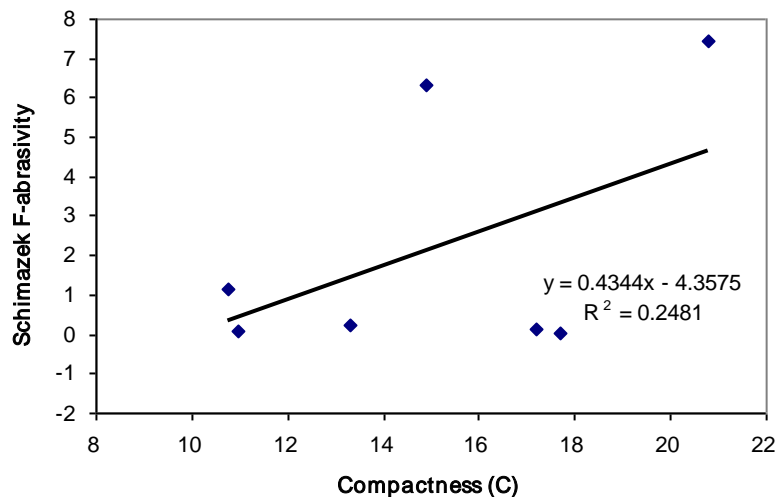
این نتایج نشان می‌دهد که شدت وابستگی مقاومت فشاری سنگ‌ها به فشردگی دانه‌ها از یک سنگ به سنگ دیگر متغیر است. البته سطح این وابستگی در تمامی سنگ‌ها بالاست و فقط رابطه ریاضی بین این دو پارامتر تفاوت دارد.

چنانچه از رابطه ریاضی بین فشردگی و سختی چکش اشمیت بر می‌آید، دو سنگ گرانیت مراغه و نفلین سینیت با توجه به شرایط خاص دانه‌بندی و ابعاد بزرگ‌تر دانه‌ها نسبت به سایر سنگ‌ها در رابطه ریاضی فوق شرکت ندارند. برای توجیه این مطلب چنین می‌توان فرض نمود که در سنگ‌های دانه درشت‌تر رابطه ریاضی دیگری بین فشردگی و سختی چکش اشمیت برقرار باشد و اثبات این موضوع به تحقیقات بیشتر بر روی

تعداد سنگ بیشتری نیاز دارد.



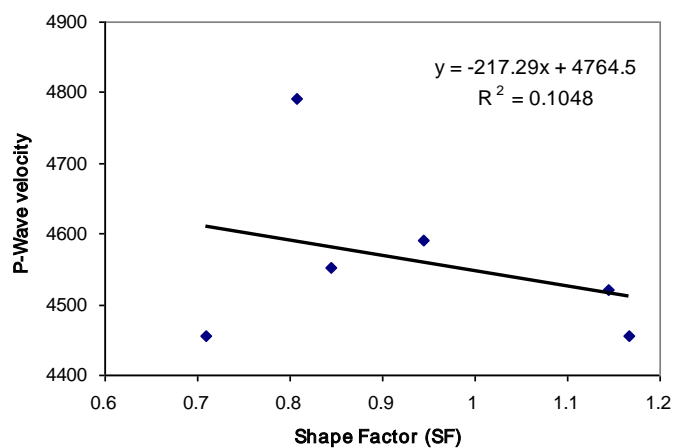
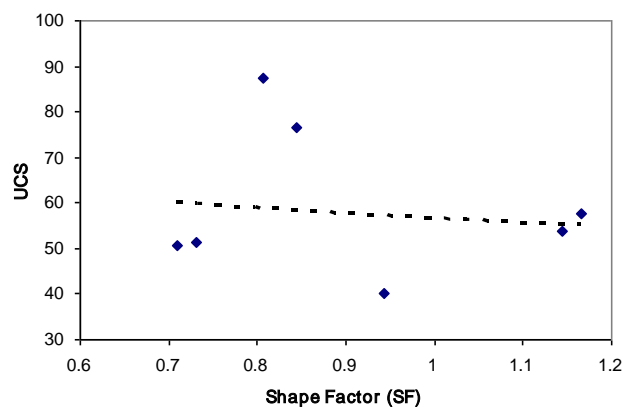
شکل ۵-۱۰- ارتباط فشردگی دانه‌ها با سرعت موج در سنگ، مقاومت کششی برزیلی و چکش اشمیت



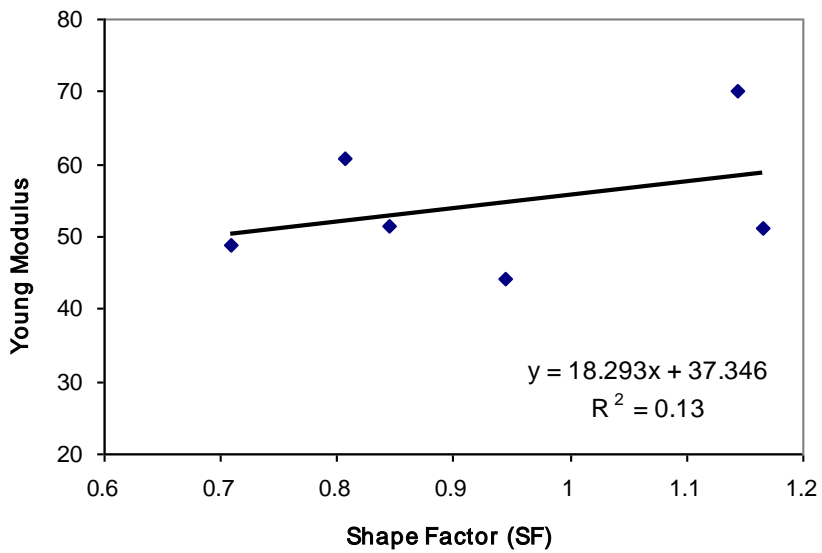
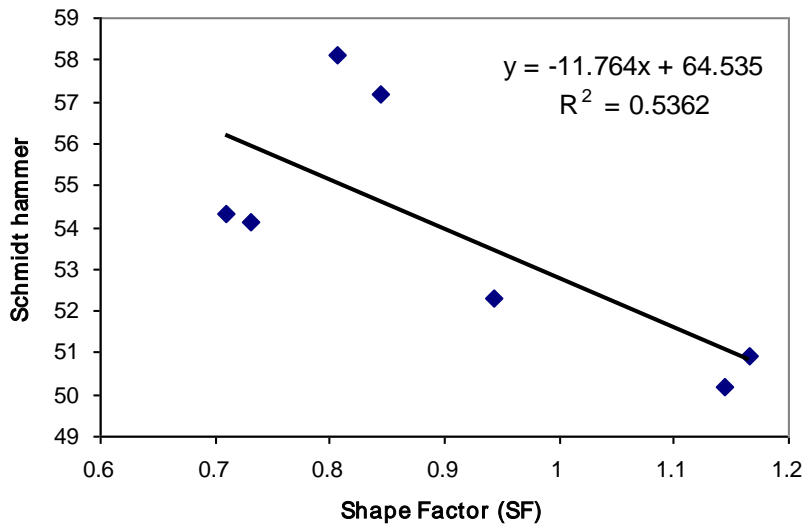
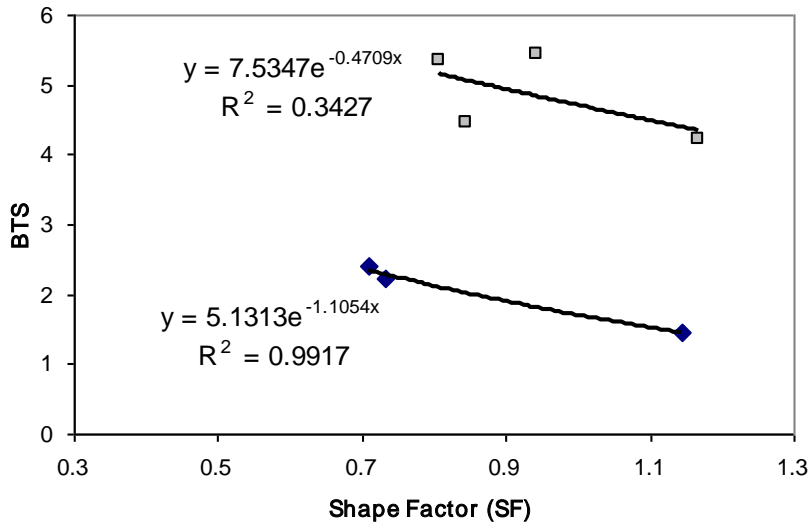
شکل ۵-۱۱- ارتباط فشردگی دانه‌ها با شاخص ساینده‌گری شیمازک

چنانچه اشکال بالا نشان می‌دهند، میزان فشردگی دانه‌های سنگ رابطه خوبی با مقاومت فشاری، سختی چکش اشمیت دارد. اما با سایر پارامترهای مهندسی رابطه مناسبی ندارد.

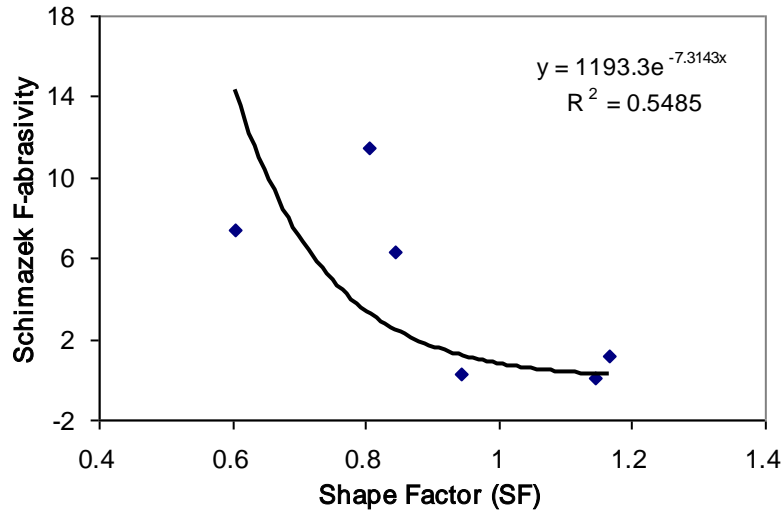
۶- ارتباط فاکتور شکل دانه‌ها با مشخصات مهندسی سنگ‌ها



شکل ۵-۱۲- ارتباط فاکتور شکل دانه‌ها با مقاومت فشاری و سرعت موج در سنگ



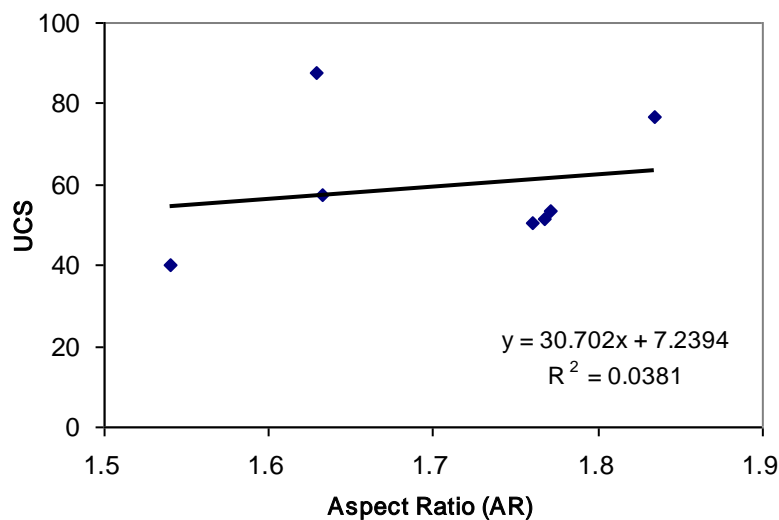
شکل ۵-۱۳- ارتباط فاکتور شکل دانه‌ها با مقاومت کششی برزیلی، سختی چکش اشمیت و مدول الاستیسیته



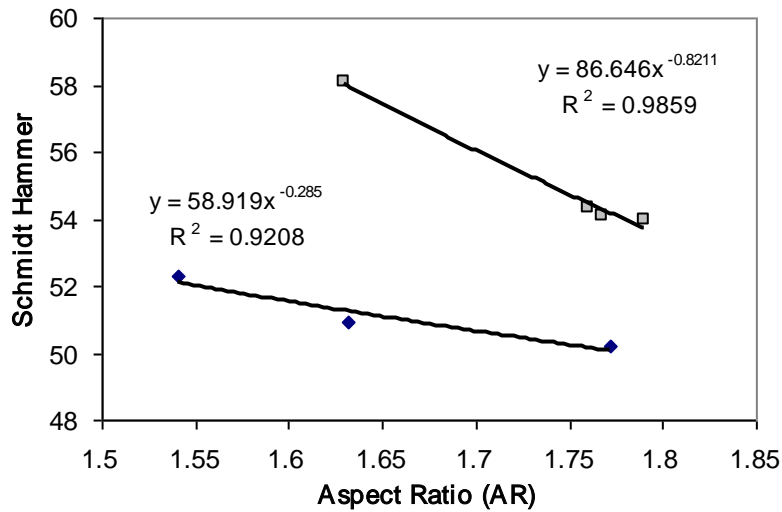
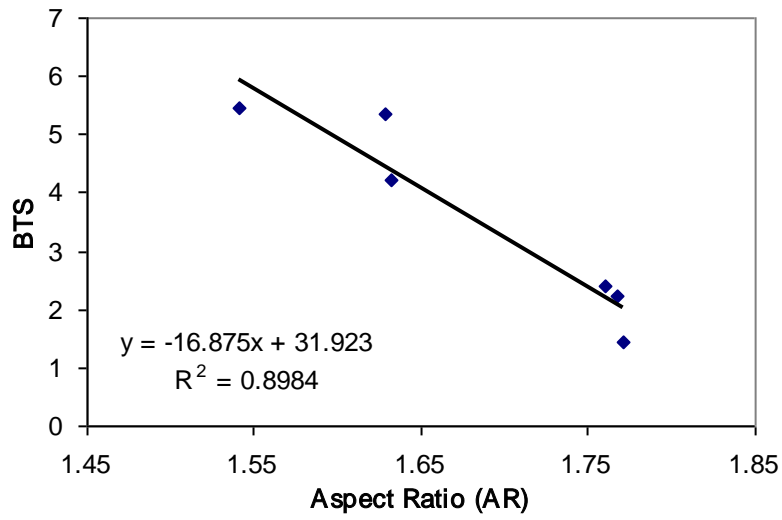
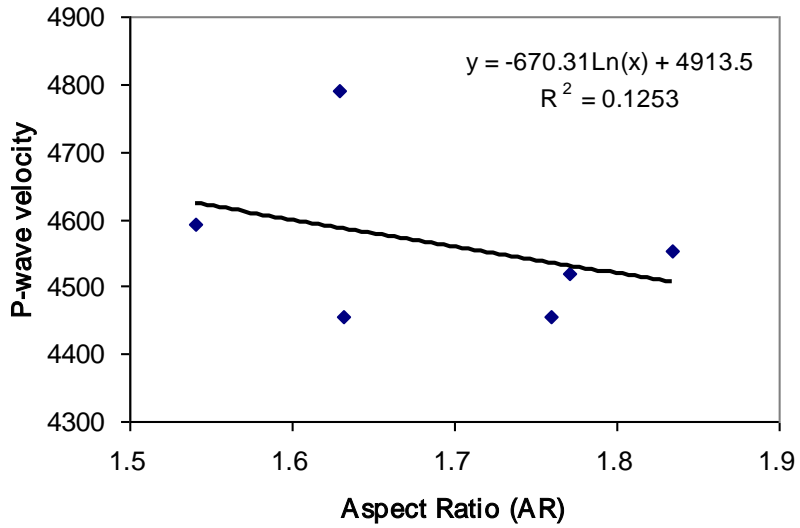
شکل ۵-۱۴- ارتباط فاکتور شکل دانه‌ها با شاخص ساینده‌گی شیمازک

چنانچه از روابط ریاضی فوق نشان می‌دهند تنها دو پارامتر مقاومت کششی برزیلی و شاخص ساینده‌گی شیمازک رابطه نسبتاً قوی با فاکتور شکل دانه‌ها دارند و سایر پارامتر از این مشخصه دانه‌ها زیاد تأثیر نمی‌پذیرند. در مورد مقایسه کششی هم شایان ذکر است که با مطالعات به عمل آمده مشخص گردید که سه سنگ تراورتن خلخال، تراورتن قرمز و سنگ آهک شیری شرایط ماتریس بسیار مشابهی دارند. لذا می‌توان چنین برداشت نمود که در سنگ‌های با شرایط ماتریس یکسان مقاومت کششی سنگ به شدت به میزان گردی دانه‌ها حساس و وابسته است.

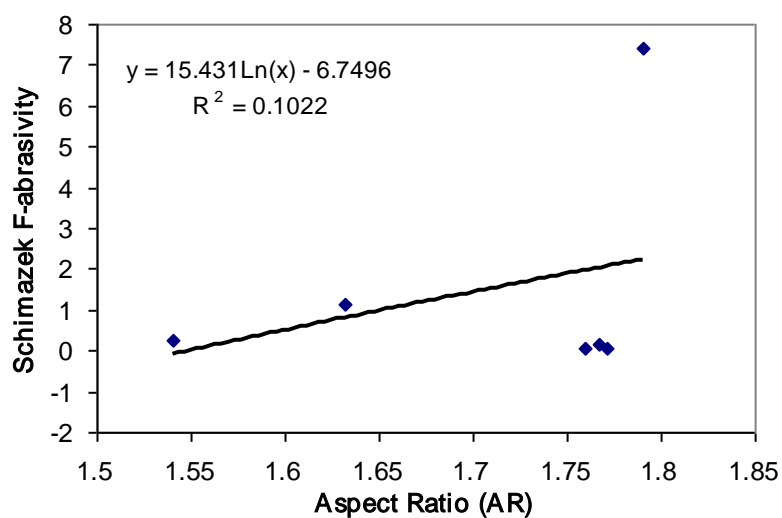
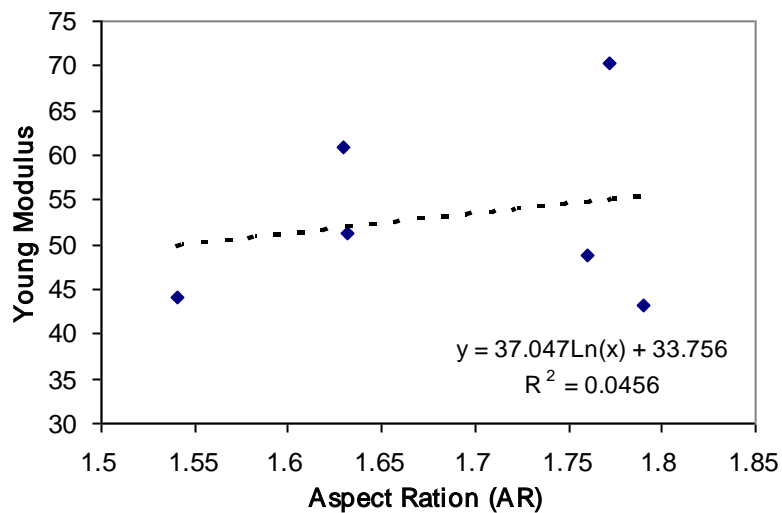
۷- ارتباط نسبت وضعیت دانه‌ها با مشخصات مهندسی سنگ‌ها



شکل ۵-۱۵- ارتباط نسبت وضعیت دانه‌ها با مقاومت فشاری تک محوری



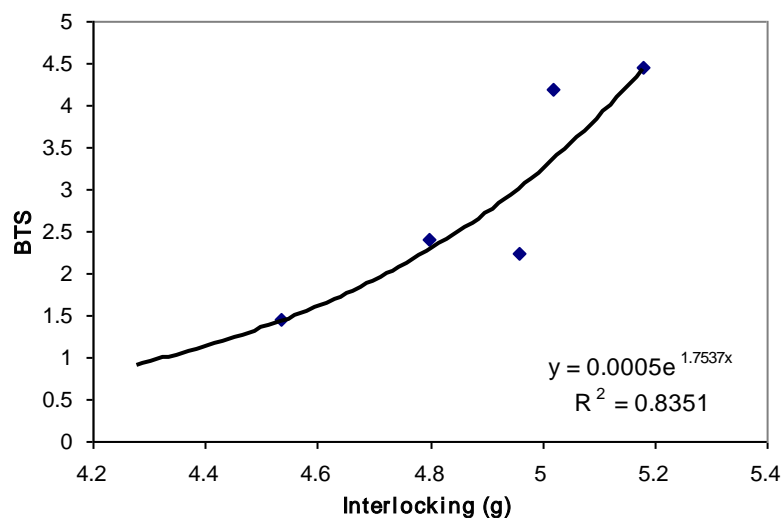
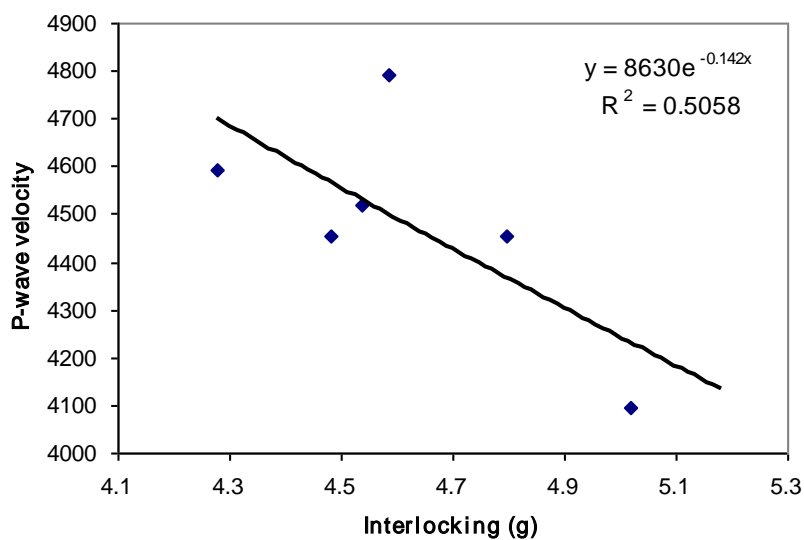
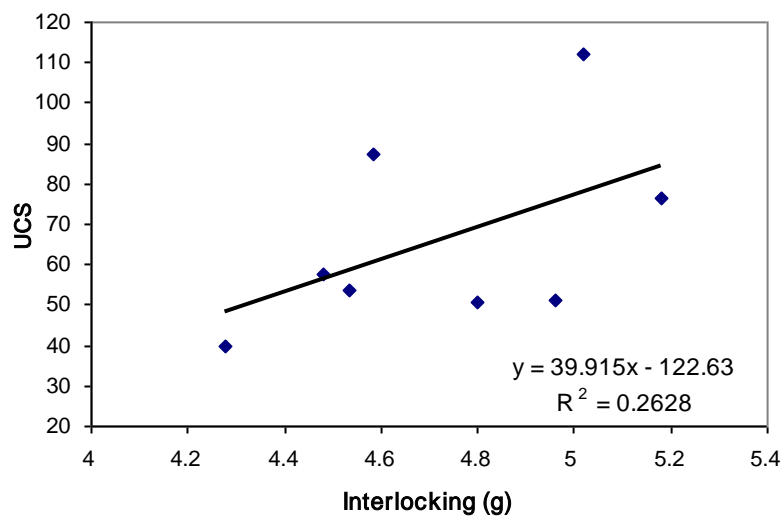
شکل ۵-۱۶- ارتباط نسبت وضعیت دانه‌ها با سرعت موج، مقاومت کششی برزیلی و سختی چکش اشمیت



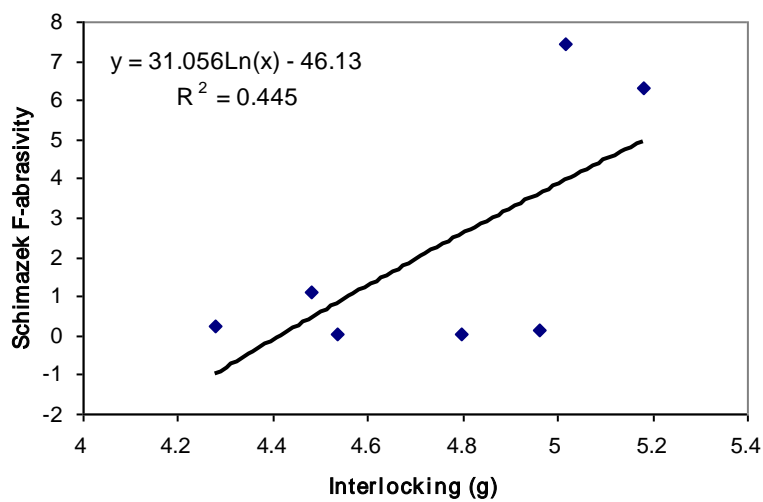
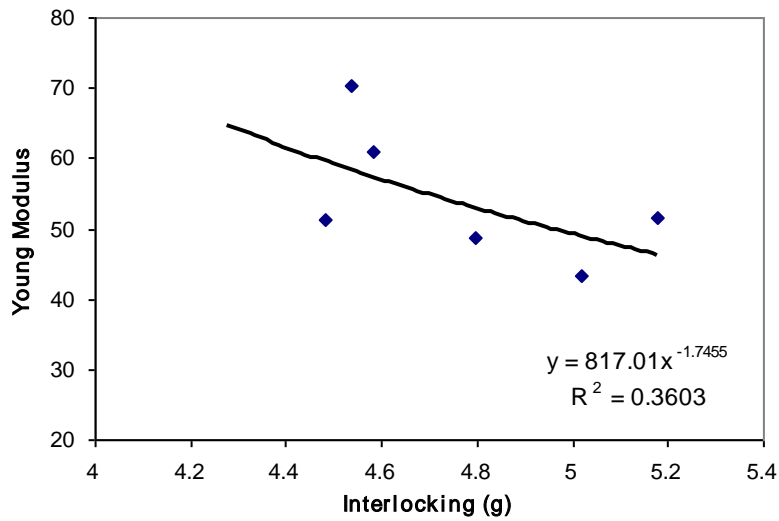
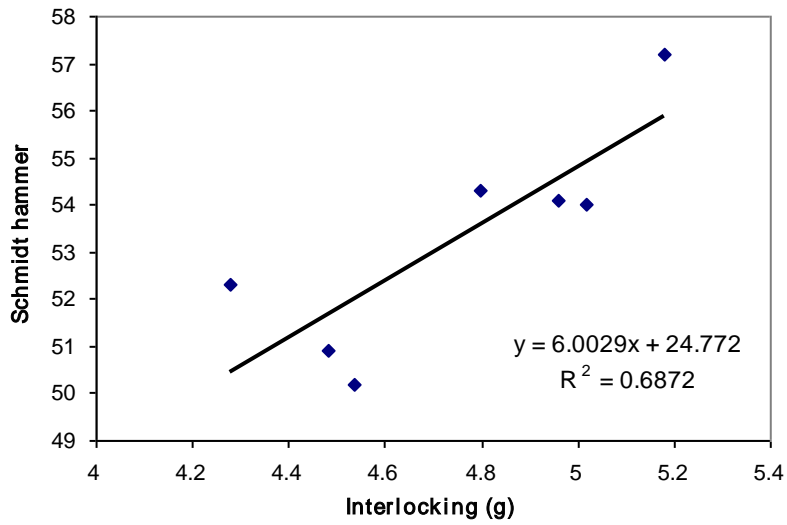
شکل ۵-۱۷- ارتباط نسبت وضعیت دانه‌ها با مدول الاستیسیته و شاخص سایندگی شیمازک

با توجه به روابط ریاضی به دست آمده در این بخش، به خوبی معلوم می‌شود که نسبت وضعیت دانه با دو پارامتر مقاومت کششی برزیلی و سختی چکش اشمیت رابطه قوی داشته ولی با سایر مشخصات مهندسی سنگ روابط به شدت ضعیفی دارد.

۸- ارتباط شاخص قفل‌شدگی با مشخصات مهندسی سنگ‌ها



شکل ۵-۱۸- ارتباط شاخص قفل‌شدگی دانه‌ها با مقاومت فشاری، سرعت موج و مقاومت کششی برزیلی

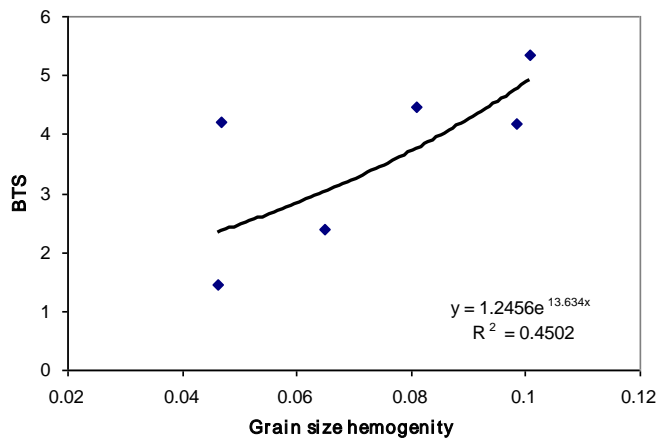
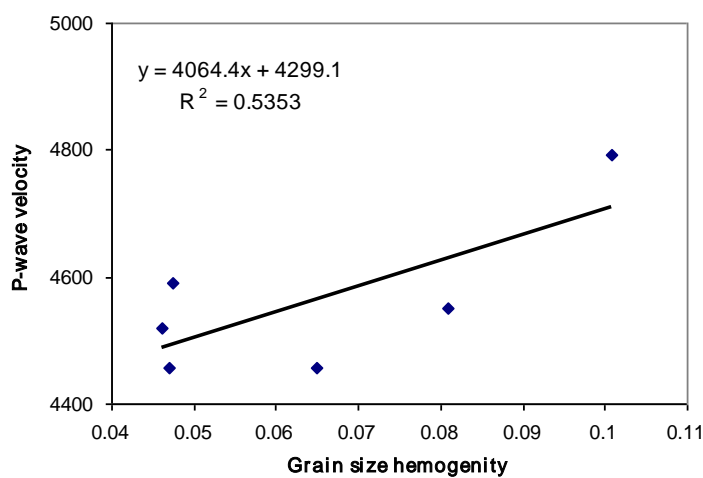
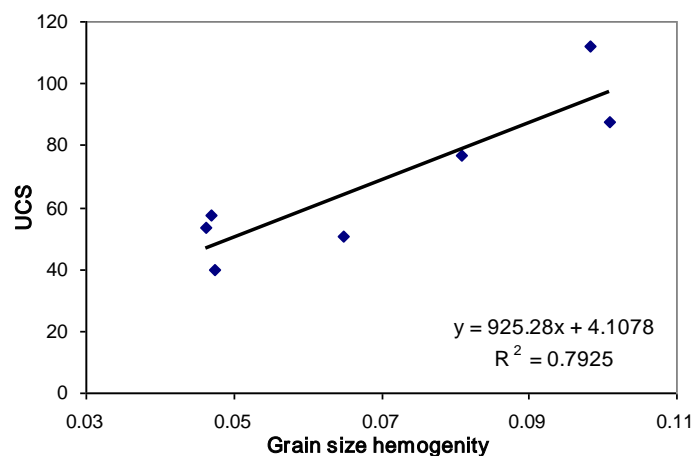


شکل ۵-۱۹- ارتباط شاخص قفل‌شدگی دانه‌ها با سختی چکش‌اشمیت، مدول الاستیسیته و شاخص سایش

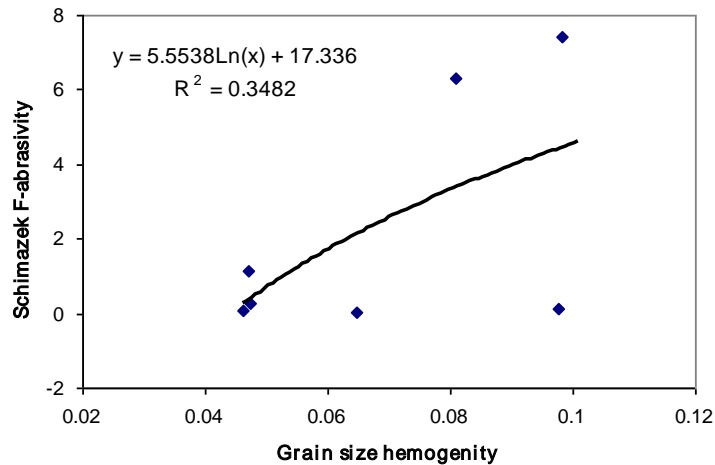
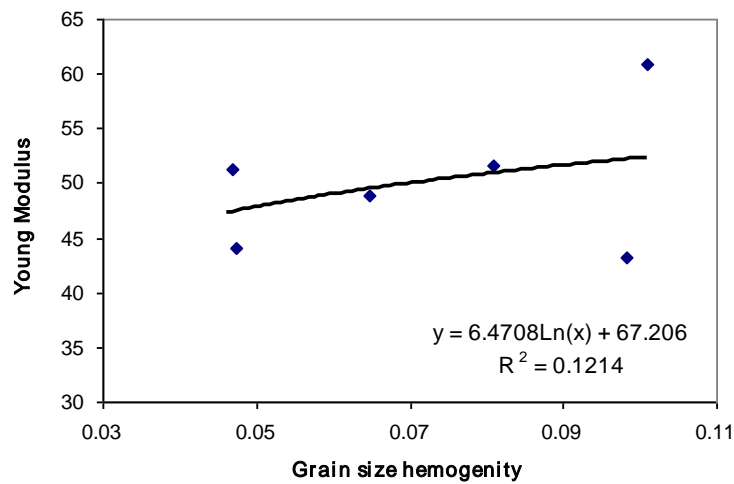
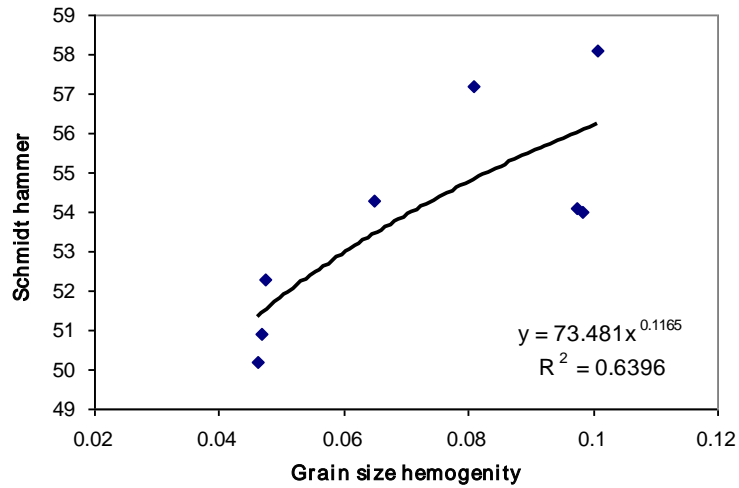
شیمازک

با توجه به نتایج به دست آمده از محاسبات این بخش به وضوح معلوم است که مقاومت کششی برزیلی و سختی چکش اشمیت رابطه ریاضی و وابستگی نسبتاً مشهودی با شاخص قفل‌شدگی دانه‌های سنگ دارند اما در سایر پارامترها چنین ارتباطی قابل تشخیص نیست.

۹- ارتباط شاخص یکنواختی با مشخصات مهندسی سنگ‌ها



شکل ۵-۲- ارتباط شاخص یکنواختی دانه‌ها با مقاومت فشاری، سرعت موج و مقاومت کششی برزیلی



شکل ۵-۲۱- ارتباط شاخص قفل‌شدگی دانه‌ها با سختی چکش اشمیت، مدول الاستیسیته و شاخص سایش

شیمازک

چنانچه از شکل‌های فوق بر می‌آید، میزان یکنواختی دانه‌های سنگی رابطه ریاضی نسبتاً قابل قبولی بین مقاومت فشاری و سختی چکش اشمیت برقرار است. اما متأسفانه بین این شاخص و سایر مشخصات مهندسی سنگ ارتباط قوی مشاهده نمی‌شود.

فصل ششم

ارتباط بافت با قابلیت ماشین کاری سنگ‌ها

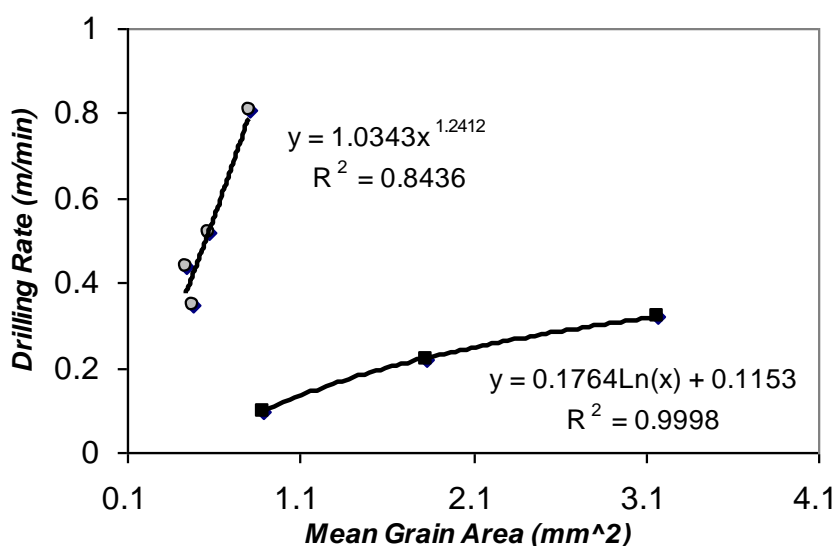
۱- مقدمه

با توجه به نتایج ارائه شده در فصل قبل، چنین می‌توان نتیجه گرفت که کلیه پارامترهای مهندسی سنگ بویژه پارامترهای مقاومتی آن، با بافت سنگ رابطه منطقی دارند. روابط ریاضی ارائه شده گرچه در بسیاری از موارد ضعیف بوده و از همگرایی مناسبی برخوردار نبودند با این حال روند کلی تغییرات مشخصات سنگ نسبت به تغییرات بافت سنگ را تا حد مناسبی نشان می‌دادند.

یکی دیگر از خانواده مهم مشخصات سنگ‌ها قابلیت ماشین‌کاری و یا رفتار سنگ در مقابل ماشین است. از جمله این مشخصات می‌توان به قابلیت حفاری^{۱۱}، قابلیت برش^{۱۲} و قابلیت کنده شدن توسط TBM^{۱۳} اشاره نمود. سرعت پیشروی این سیستم‌ها در سنگ و نیز میزان سایش و مصرف ابزار آلات برش ارتباط تنگاتنگی دارند.

در این فصل ارتباط خصوصیات بافت سنگ با قابلیت حفاری (سرعت حفاری ضربه‌ای دورانی) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بی‌شک این مبحث به طور جدی‌تری تأثیر مشخصات بافت بر رفتار مهندسی سنگ را مورد بررسی قرار خواهد داد.

۲- ارتباط مشخصات بافتی بر سرعت حفاری

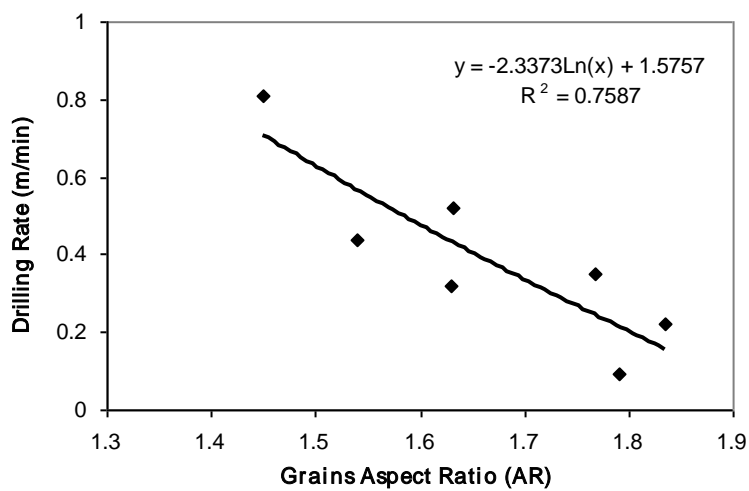
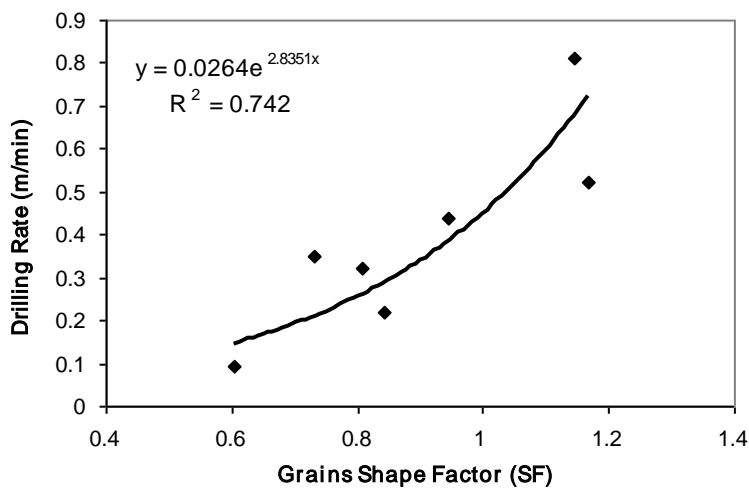
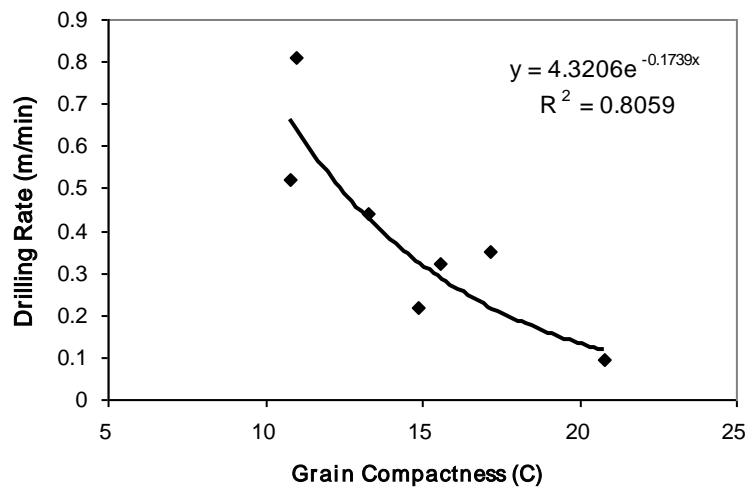


شکل ۶-۱- ارتباط میانگین مساحت دانه‌های سنگ با سرعت حفاری

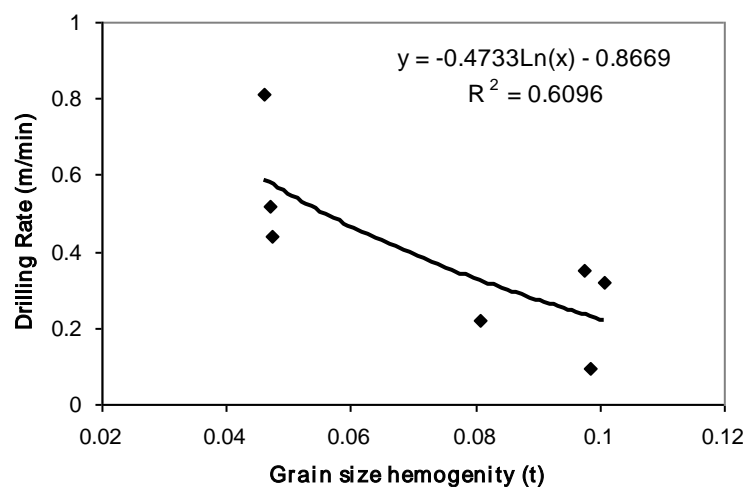
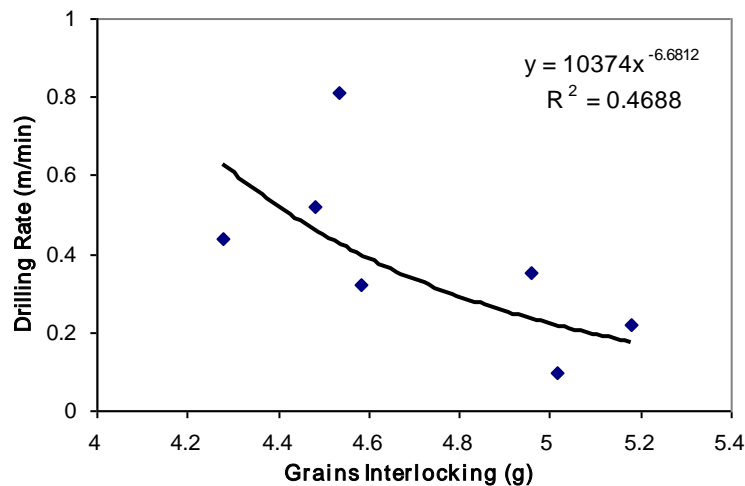
¹¹ . Drillability

¹² . Cuttability

¹³ . Borability



شکل ۶-۲- ارتباط فشردگی، فاکتور شکل و نسبت وضعیت دانه‌های سنگ با سرعت حفاری



شکل ۶-۳- ارتباط قفل‌شدگی و یکنواختی دانه‌های سنگ با سرعت حفاری

با توجه در شکل ۶-۱ می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که شدت تغییرات سرعت حفاری نسبت به مساحت دانه‌ها در سنگ‌های نرم و سخت متفاوت است. با افزایش مساحت دانه سرعت حفاری افزایش می‌یابد. شدت تغییرات سرعت حفاری نسبت به تغییرات مساحت در سنگ‌های نرم بیشتر از سنگ‌های سخت می‌باشد. با توجه در سایر روابط ریاضی ارائه شده چنین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که پس از مساحت دانه‌ها، پارامتر فشرده‌گی از رابطه قوی‌تری با سرعت حفاری برخوردار است. سایر منحنی‌های ارائه شده در این مبحث کاملاً بر شرایط فنی حفاری منطبق بوده و روند کیفی موجود در واقعیت به خوبی در روابط ریاضی نیز نمود دارد.

فصل هفتم

نتیجه گیری

چنانچه در فصل‌های مختلف این تحقیق بر آن تأکید شد، بافت سنگ یکی از مهمترین مشخصات سنگ است که به صورت ذاتی در سایر مشخصات مهندسی سنگ تأثیر می‌گذارد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شدت و ضعف این تأثیر مشخصات بافتی بر روی مشخصات مهندسی سنگ در هر مشخص بافت نسبت به دیگر مشخصات تفاوت فاحشی دارد. بدین معنی که تأثیر بافت سنگ بر روی هر مشخصه مهندسی سنگ ناشی از یک مشخصه بافتی خاص بوده و تمامی مشخصات بافتی بر روی یک پارامتر تأثیر ندارد. در مجموع میزان همگرایی (R^2) روابط ریاضی ارائه شده در این تحقیق را می‌توان به تفکیک مشخصات بافت و مشخصات مهندسی به صورت جدول زیر خلاصه نمود.

جدول ۷-۱- میزان همبستگی مشخصات بافتی با مشخصات مهندسی سنگ

Schimizek Abrasivity	E	Schmidt	BTS	P-wave velocity	UCS	
۰/۹۵	۰/۲۴	۰/۶۲	۰/۱۲	۰/۴۸	۰/۸۸	سطح دانه
۰/۸۸	۰/۱	۰/۸	۰/۱۵	۰/۳۸	۰/۷۹	محیط دانه
۰/۹۲	۰/۲۴	۰/۶۵	۰/۱۷	۰/۴۷	۰/۸۸	قطر معادل
۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۸۹	۰/۴۱	۰/۱۹	۰/۹۷	فشردگی
۰/۵۴	۰/۱۳	۰/۵۳	۰/۹۹	۰/۱	فاکتور
۰/۱	۰/۰۴	۰/۹۸	۰/۸۹	۰/۱۲	۰/۰۳	وضعیت
۰/۴۴	۰/۳۶	۰/۶۸	۰/۸۳	۰/۵	۰/۲۶	قفل شدگی
۰/۳۴	۰/۱۲	۰/۶۳	۰/۴۵	۰/۵۳	۰/۷۹	یکنواختی

چنانچه در این جدول ملاحظه می‌شود، اکثر مشخصات بافتی سنگ با مقاومت فشاری و کششی سنگ ارتباط ریاضی قابل قبولی دارند. همچنین سایندهای سنگ با سطح دانه، محیط دانه و قطر معادل رابطه قوی داشته ولی از سایر پارامترهای بافت تأثیر کمتری می‌گیرد.

تنها پارامتر مهندسی سنگ که تقریباً از تمامی مشخصات بافتی تأثیر می‌پذیرد سختی چکش اشمیت می‌باشد که به عنوان یک آزمایش غیرمستقیم کاربردهای فراوانی دارد. نتیجه حاصل نشام می‌دهد که گرچه چکش اشمیت یک آزمایش سطحی است با این حال می‌تواند واقعیات درونی سنگ بویژه بافت را به خوبی نشان دهد.

منابع و مراجع

اصانلو، مرتضی، ۱۳۷۵، روشهای حفاری، مرکز نشر صدرا.

- Ersoy, A. & Waller, M. D. 1995, Textural characterization of rocks. *J. of Engineering Geology*, June, Vol. 39, Issues 3-4, 123-136.
- Howarth, D.F. and Rowlands, J.C., 1986. Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties. *Geotech. Testing J.*, 9: 169-179.
- Howarth, D.F. and Rowlands, J.C., 1987. Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. *Rock Mech. Rock Eng.*, 20:57-85.
- Howarth, D.F., Rowlands, J.C., 1987b. The effect of rock texture on drillability and mechanical rock properties. *Proceedings of 6th Congress of the International Society of Rock Mechanics*, Montréal (Canada), August 30–September 3, 1987, vol. 1, pp. 655–658.
- Dreyer, W., 1973. *The Science of Rock Mechanics. Part I. The Strength Properties of Rocks*, 2nd ed. Series on Rock and Soil Mechanics, vol. 1 (1971/73), No. 2. Trans Tech Publications, Clausthal. 500 pp.
- Petruk, W., 1986. Image analysis: an overview of developments. *CANMET Report 86-4E*, 5 pp.
- Přikryl, P., 2006. Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients: Limitations and possible source of misinterpretations. *Engineering Geology* 87 (2006) 149–162.