

بررسی ارتباط شاخص‌های بافتی با ویژگی‌های مقاومتی و دوام سنگ‌دانه‌های بالاست آذرین

مهدی ترابی‌کاوه^{۱*}، میرمحمد میری^۲، مهناز خدای^۳ و فریدون حیدری^۴

۱ و ۳- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۴- کارشناس ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

* نویسنده مسئول: m.torabikaveh@yazd.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۲۹

دریافت: ۱۴۰۲/۲/۱۰

چکیده

دوام سایشی و شیمیایی سنگ‌دانه‌های بالاست از ویژگی‌های اساسی محسوب می‌شوند که بر عملکرد سازه‌هایی نظیر ریل راه‌آهن موثر هستند. شاخص‌های سایش لس‌آنجلس و افت وزنی محلول سولفات منیزیم از جمله مهم‌ترین پارامترهای سنگ هستند که به طور معمول در طراحی‌های مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پارامترها تا حد زیادی تحت تاثیر ویژگی‌های بافتی سنگ‌ها می‌باشند. در این پژوهش، هفت نوع سنگ آذرین بیرونی به منظور ارزیابی ارتباط شاخص‌های بافتی با ویژگی‌های کانی‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی، مورد بررسی قرار گرفتند. ویژگی‌های مهندسی شامل وزن واحد حجم، تخلخل، مقاومت بار نقطه‌ای، شاخص سایش لس‌آنجلس و افت وزنی سولفات منیزیم در آزمایشگاه برای نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. همچنین تصاویر مقطع نازک نمونه‌ها در نرم‌افزارهای آنالیز تصویر ImageJ و JMicroVision مورد بررسی قرار گرفتند. شاخص‌های بافتی (ضریب بافتی، شاخص کشیدگی، شاخص مدور بودن، شاخص جامد شدگی و شاخص قطر فرت) براساس آنالیز تصویر انجام شده برای همه نمونه‌ها محاسبه گردیدند. در نهایت، روابط بین این شاخص‌ها و ویژگی‌های کانی‌شناسی و فیزیکی- مکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که کانی‌های غیر هم‌بعد مانند فلدسپار و کانی‌های مافیک (آمفیبول، پیروکسن و بیوتیت) ارتباط نسبتاً معناداری با شاخص کشیدگی دارند. همچنین روابط خطی بسیار قوی بین شاخص سایش لس‌آنجلس ($R^2 = 0.90$) و افت وزنی سولفات منیزیم ($R^2 = 0.88$) با ضریب بافتی مشاهده شد. در نهایت براساس نتایج بدست آمده مشخص گردید که شاخص‌های بافتی نظیر ضریب بافتی می‌توانند در تخمین ویژگی‌های دوام سنگ‌دانه‌ها با قابلیت اطمینان زیادی مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: ویژگی‌های مکانیکی، کانی‌شناسی، شاخص‌های بافتی، سنگ‌دانه بالاست آذرین

۱- پیشگفتار

فضای اشغال شده توسط دانه‌ها در یک منطقه معین، با ویژگی‌های مقاومتی سنگ مرتبط است. این شاخص به عنوان یک مقدار نسبی ارائه می‌شود و به تعیین کمیت شدت تماس دانه‌ها/بلورها کمک می‌کند. پارامتر شاخص دیگر درهم قفل‌شدگی است که اهمیت روابط بین دانه‌های را کمی می‌کند و هر دو عنصر تراکم و تماس ذرات را شامل می‌شود. زورلو و همکاران (۲۰۰۴) وجود یک رابطه خطی بین تراکم بافتی و مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) در ماسه‌سنگ را گزارش کردند. ویژگی‌های کمی ریخت‌شناسی مانند: شکل دانه، شاخص دایروی بودن، شاخص کشیدگی ذره، شاخص جهت‌یافتگی و درجه تراکم دانه‌ها را می‌توان با بررسی دانه‌ها/بلورها و زمینه استخراج کرد. پژوهش‌های زیادی از شاخص‌های مذکور به منظور تخمین ویژگی‌های مقاومتی و دوام سنگ‌ها استفاده شده

یافته‌های تحقیقات انجام شده در زمینه مطالعه رفتار مهندسی سنگ‌ها نشان داده است که ویژگی‌های ریزساختاری، کانی‌شناسی و پتروگرافی، رفتار آن‌ها را تحت تنش‌های وارده کنترل می‌کنند. اثرات خواص بافتی بر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها از دیدگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. روابط هندسی بین کانی‌های سازنده سنگ، بافت سنگ را مشخص می‌کنند. ویژگی‌های هندسی کانی‌ها مانند گردش‌دگی، طولیل‌شدگی، نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک و غیره را می‌توان از طریق مشاهده میکروسکوپی سنگ و مطالعه نمونه‌ها توسط میکروسکوپ (با استفاده از مقاطع نازک) و همچنین از طریق روش‌های مختلف تصویربرداری تحلیلی خودکار و ترکیبی استخراج کرد (شولز و همکاران، ۲۰۲۰). تراکم بافتی با مقدار نسبی

علاوه بر این، تأثیر اندازه بلور بر مقاومت سنگ مهم‌تر از شکل دانه یا محتوای کانی‌شناسی است.

ضریب بافتی (TC) توسط هووارث و رولندز (۱۹۸۶) برای درک تأثیر ویژگی‌های بافتی بر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها پیشنهاد شد. آن‌ها روابط بین خواص مکانیکی و TC را برای سنگ‌های آذرین، مرمرها و ماسه‌سنگ‌ها بررسی و روابط نزدیکی بین خواص مکانیکی سنگ و TC گزارش کردند. در بسیاری از پژوهش‌ها، TC برای پیش‌بینی خواص مهندسی سنگ‌ها استفاده شده است. آلبر و قهرمان (۲۰۰۹) از تحلیل رگرسیونی برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری تک‌محوری یک برش گسلی از TC استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مقاومت فشاری تک‌محوری برش آزمایش شده را می‌توان با استفاده از ضریب بافتی تخمین زد. فریدونی (۲۰۲۲) اهمیت ویژگی‌های کانی‌شناسی و بافتی در ارتباط با خواص مکانیکی سنگ‌ها را مورد مطالعه قرار داد. نتایج پژوهش مذکور نشان داد که اثر ضریب بافتی (TC) بر خواص مکانیکی سنگ‌ها بیشتر از ضریب کانی‌شناسی (MC) است. کولای و بیسر (۲۰۱۷) بر روی روابط بین بافت و پارامترهای مهندسی سنگ‌های بازالتی از طریق رقومی کردن ویژگی‌های بافتی مطالعه کردند. در این تحقیق، تحلیل رگرسیون ساده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی شامل ضریب بافتی و پارامترهای مهندسی شامل وزن واحد حجم خشک، سرعت موج P، سختی واجهشی اشमित، شاخص مقاومت بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌ها انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که استحکام بازالت‌ها با ضریب بافتی آن‌ها رابطه مستقیم دارد. فریدونی و سوسا (۲۰۲۲) پانزده نمونه سنگ آذرین را انتخاب و ویژگی‌های مهندسی آن‌ها نظیر وزن واحد خشک و اشباع، تخلخل، جذب آب، شاخص دوام (SDI)، سختی واجهشی اشमित (SRH)، سرعت موج P اولتراسونیک (UPV) و مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، اندازه‌گیری و ارتباط آن‌ها با TC را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که براساس تحلیل رگرسیون ساده، مقادیر TC رابطه مستقیم با چگالی، SDI، SRH، UPV و UCS و روابط معکوس با تخلخل و جذب آب دارند. خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های پلوتونیک را براساس ضریب بافت ارزیابی کردند. آتسی و کوماکلی (۲۰۱۹) گزارش کردند که همبستگی آماری معنی‌داری

است. ارسوی و آکار (۲۰۱۶) تأثیرات ویژگی‌های پتروگرافی و بافت بر مقاومت گرانیته‌ها را مطالعه کردند و دریافتند که اندازه کانی، تأثیر بیش‌تری نسبت به نوع کانی بر مقاومت سنگ دارد. قبادی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی رابطه خصوصیات فیزیکی و مکانیکی با ویژگی‌های سنگ‌شناسی در سنگ‌های گرانیته‌ی سه منطقه گلیپایگان، الیگودرز و بروجرد پرداختند. بررسی‌ها نشان داد که در سنگ‌های گرانیته‌ی مورد مطالعه اثر نوع بافت بر روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ بیش‌تر از ترکیب کانی‌شناسی است. هم‌چنین یافته‌ها موید این است که بررسی ویژگی‌های سنگ‌شناسی می‌تواند به عنوان یک شاخص اولیه در تخمین ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین قبادی و همکاران (۱۳۹۹) ارتباط هوازدگی، کانی‌شناسی و بافت سنگ‌های پریدوتیتی با خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی پریدوتیت‌های منطقه هرسین کرمانشاه را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در تعیین خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ، اهمیت ویژگی‌های بافتی بیش‌تر از خصوصیات کانی‌شناسی می‌باشد، بدین معنا که خصوصیات دانه‌ها مانند شکل و اندازه، نوع تماس، درجه هوازدگی و شاخص ریزترک‌ها تأثیر مهمی بر روی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌های پریدوتیتی دارد. علیقلی و همکاران (۲۰۱۷) روابط بین شاخص‌های حفاری از جمله شاخص نرخ حفاری (DRI)، شاخص سایش سرتمه (BWI) و شاخص عمر ابزار برش (CLI) از یک سو و از سوی دیگر ویژگی‌های شاخص و داده‌های پتروگرافی سنگ‌های آذرین سخت را ارزیابی کردند. آن‌ها نشان دادند که مدل‌های رگرسیون چندگانه تهیه‌شده با استفاده از ویژگی‌های پتروگرافی، پیش‌بینی بهتری از حفاری‌پذیری را در مقایسه با مدل‌های تهیه‌شده با استفاده از ویژگی‌های شاخص ارائه می‌دهند. هم‌تی و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر کانی‌شناسی و ویژگی‌های بافتی بر مقاومت سنگ‌های آذرین بلورین را با استفاده از روش کمی‌سازی پارامترهای بافتی مبتنی بر پردازش تصویر، بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که مقاومت کششی تحت تأثیر اندازه و محتوای فلدسپات پتاسیم قرار دارد، در حالی که مقاومت فشاری روابط پیچیده‌تری را با پارامترهای بافتی نشان می‌دهد. بطوریکه این ویژگی عمده‌تاً تحت تأثیر هم‌زمان بلورهای پلاژیوکلاز و کوارتز است.

نوع مختلف سنگ آذرین خروجی به عنوان منابع قرصه بالاست جهت توسعه راه آهن استان یزد مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور با تجزیه و تحلیل بافتی سنگ‌دانه شامل کانی‌شناسی، شکل کانی‌ها و مقدار زمینه، شاخص‌های بافتی تعیین شده و ارتباط آن‌ها با شاخص‌های مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- زمین‌شناسی منطقه و نمونه‌برداری

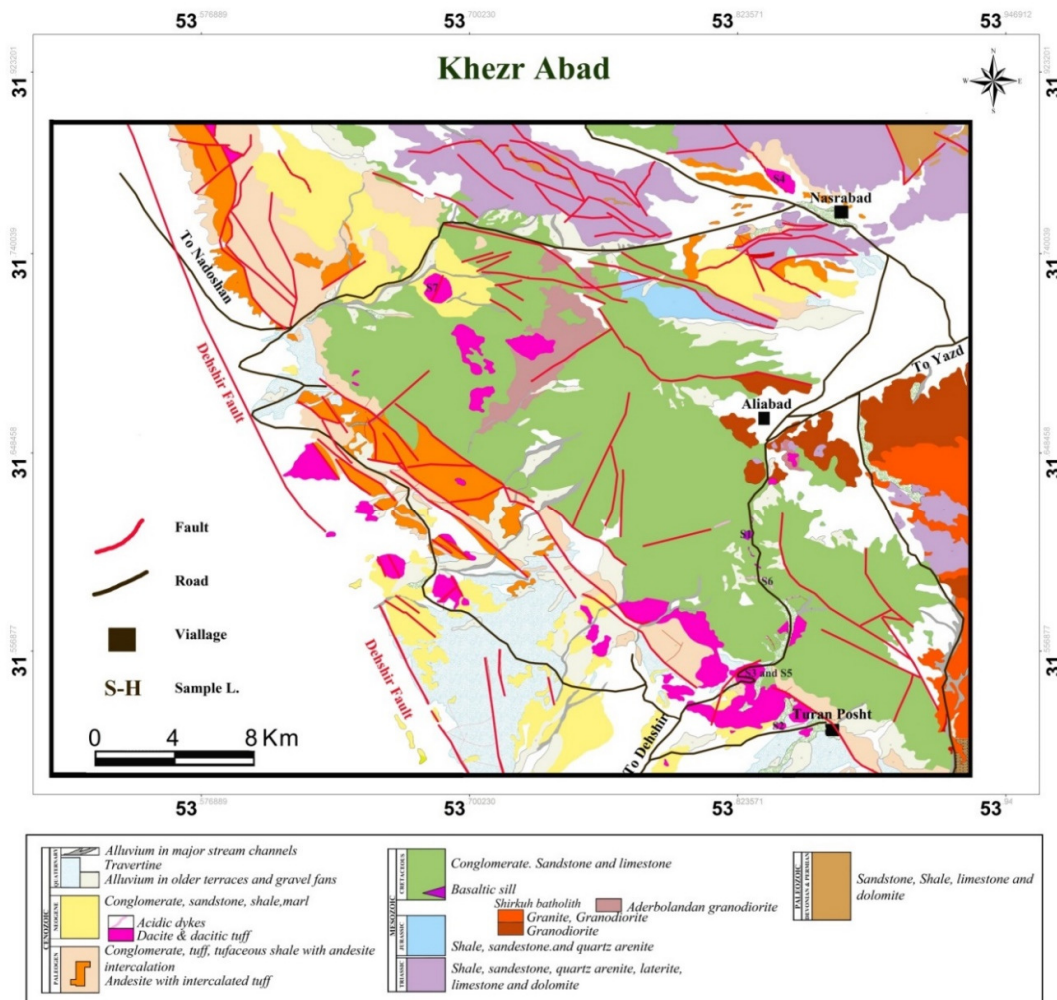
استان یزد در مرکز ایران و در زون زمین‌ساختاری ایران مرکزی قرار دارد. بخش مرکزی این زون که به خرده قاره ایران مرکزی معروف است از باختر به خاور از بلوک‌های یزد، طبس و لوت تشکیل شده است. منطقه نمونه‌برداری در ۷۰ کیلومتری جنوب باختری شهر یزد و در بلوک یزد واقع شده است. این بلوک از شمال به گسل درونه و از باختر به نوار افیولیتی نایب- بافت محدود می‌شود (شکل ۱). تنوع سنگ‌شناسی بلوک یزد گویای پیشینه پیچیده تکتونیکی و ماگمایی این منطقه است. گستردگی و تنوع لیتولوژیکی باعث سهولت دسترسی به انواع سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی برای کاربردهای عمرانی و صنعتی شده است. قدیمی‌ترین تشکیلات زمین‌شناسی پرکامبرین تا رسوبات جوان کواترنری بصورت برونزدهایی از سنگ‌های آذرین درونی، بیرونی، دگرگونی و رسوبی در منطقه به چشم می‌خورند.

تشکیلات پرکامبرین عمدتاً از انواع سنگ‌های دگرگونی و سنگ‌های آذرین تشکیل شده که لایه‌های تبخیری و سنگ‌های آواری نیز در میان آن‌ها دیده می‌شوند. تشکیلات پالئوزوئیک در مقیاس محدودتری اغلب به صورت سنگ‌های آهکی و آواری، کنگلومرا تا ماسه‌سنگ، سنگ‌های دولومیتی، مارن، شیل و کوارتزیت پراکندگی دارند. نهشته‌های تریاس و ژوراسیک محدود و اغلب شامل سنگ‌های آهکی، دلومیت، شیل و ماسه‌سنگ است که توده گرانیتوئیدی شیرکوه به سن بعد از ژوراسیک زیرین در آن‌ها دگرگونی ایجاد کرده است. آهک‌های کرتاسه با گدازه‌های میان لایه و یا نفوذی‌های جوان‌تر از کرتاسه که این سازند را بصورت دایک، سیل و استوک قطع می‌کنند، توده‌های نیمه‌عمیق و گنبدی‌های آتشفشانی نفوژن رخنمون‌های اصلی در منطقه نمونه‌برداری هستند (شکل ۱). بعد از انجام مطالعات کتابخانه‌ای که شامل مطالعه

(در سطح اطمینان ۹۵ درصد) بین TC و مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، سرعت سیر موج (هر دو امواج فشاری برشی برای نمونه‌های خشک و اشباع) وجود دارد. همچنین آن‌ها پیشنهاد کردند که می‌توان از روابط بین TC و خواص مکانیکی سنگ‌ها در طبقه‌بندی سنگ‌ها استفاده کرد. تمام مطالعات فوق نشان می‌دهد که ویژگی‌های پتروگرافی و بافت سنگ بر خواص مهندسی سنگ‌های مختلف تأثیر می‌گذارد. سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در راه‌سازی و بویژه سنگ‌دانه‌های بالاست راه آهن تحت تنش‌های وارده در اثر حمل و نقل دچار سایش شده و در بلند مدت کارایی خود را از دست می‌دهند. کانی‌شناسی، خصوصیات بافتی و شکل سنگ‌دانه بر خواص مکانیکی سنگ‌دانه‌ها تأثیر می‌گذارد. تجزیه و تحلیل پتروگرافی بر روی مقطع نازک می‌تواند داده‌های قابل اعتمادتری از خواص سنگ نسبت به یک آزمایش مکانیکی منفرد به دست دهد. در انتخاب سنگ‌دانه، خواص پتروگرافی همزمان با خواص مکانیکی سنگ‌دانه‌های مختلف بررسی می‌گردد که این می‌تواند به تخمین کیفیت سنگ‌دانه‌ها، تفسیر نتایج آزمایش‌های مکانیکی و ارزیابی اعتبار آن‌ها کمک کند. از این‌رو بررسی ارتباط بین پارامترهای بافتی و خواص مکانیکی سنگ‌دانه‌ها برای پیش‌بینی رفتار آن‌ها مهم است. پیشرفت‌ها در تکنیک‌های آنالیز تصویر سنگ، مانند نرم‌افزارهای ImageJ، فرصتی را برای بررسی بافت سنگ و ترکیب آن با وضوح بسیار زیاد فراتر از آنچه با روش سنتی تجزیه و تحلیل مقاطع نازک قابل دست‌یابی است، فراهم می‌کند. این روش‌ها برخلاف پتروگرافی نوری معمولی که محدود به یک تصویر و تفسیر مشاهده‌ای است، کاملاً خودکار هستند. این امر موجب افزایش دقت اندازه‌گیری پارامترهای بافتی و در نتیجه امکان گسترش روابط دقیق‌تر بین خواص بافتی و ویژگی‌های مقاومتی سنگ می‌گردد. براساس بررسی مطالعات پیشین، هیچ مطالعه جامعی در مورد تأثیر خواص بافت سنگ بر سایش لس آنجلس مصالح سنگی انجام نشده است و توجه بسیار کمی به این موضوع شده است و این انگیزه اصلی انجام مطالعه حاضر است. در این مطالعه ارتباط بین ویژگی‌های بافتی با ویژگی‌های مقاومتی (نظیر سایش لس آنجلس و مقاومت بار نقطه‌ای)، فیزیکی (تخلخل موثر و دانسیته)، دوام (افت وزنی سولفات منیزیم) و ویژگی‌های کانی‌شناسی (درصد مدال کانی‌ها) برای هفت

هر نقطه انتخاب شده تعدادی بلوک سنگی جهت تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی اخذ شد. همچنین به مقدار ۱۵ الی ۲۰ کیلوگرم سنگ‌دانه جهت انجام آزمایش‌های دوام‌پذیری سنگ‌ها تهیه شد و به آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه یزد منتقل گردید. هنگام نمونه‌برداری سعی شد تا نمونه‌های هوازده انتخاب نشوند. مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و پردازش تصاویر در نمودار چارتری نمایش داده شده است (شکل ۲).

نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه، مطالعه مقاله‌ها و گزارش‌های مرتبط با منطقه است، بازدیدهای میدانی لازم انجام شد. با هدف ارزیابی پتانسیل استفاده از سنگ‌های آذرین در بالاست راه‌آهن تنوعی از سنگ‌های آذرین بیرونی شامل گدازه‌ها، سیل‌ها و دایک‌های بازیک تا حد واسط (کرتاسه و جوان‌تر از کرتاسه) و سنگ‌های آتشفشانی اسیدی نئوژن تا پلیوسن انتخاب و نمونه‌برداری شدند (شکل ۲). نمونه‌برداری از ۶ محل که موقعیت جغرافیایی آن‌ها در شکل (۱) مشخص شده است، انجام پذیرفت. از



شکل ۱. موقعیت نمونه‌های برداشته شده بر روی نقشه باز طراحی شده از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ خضر آباد

Fig. 1. The locations of the selected samples on the redesigned map from 1/100000 Khezr Abad geological map

در ارزیابی دوام‌پذیری سنگ‌ها یک ابزار مهم محسوب می‌گردند؛ زیرا مقاومت سنگ در برابر فرسایش، به مقدار زیادی به ویژگی‌های سنگ‌شناسی از جمله کانی‌شناسی و بافت آن بستگی دارد. با توجه به مطالب ذکر

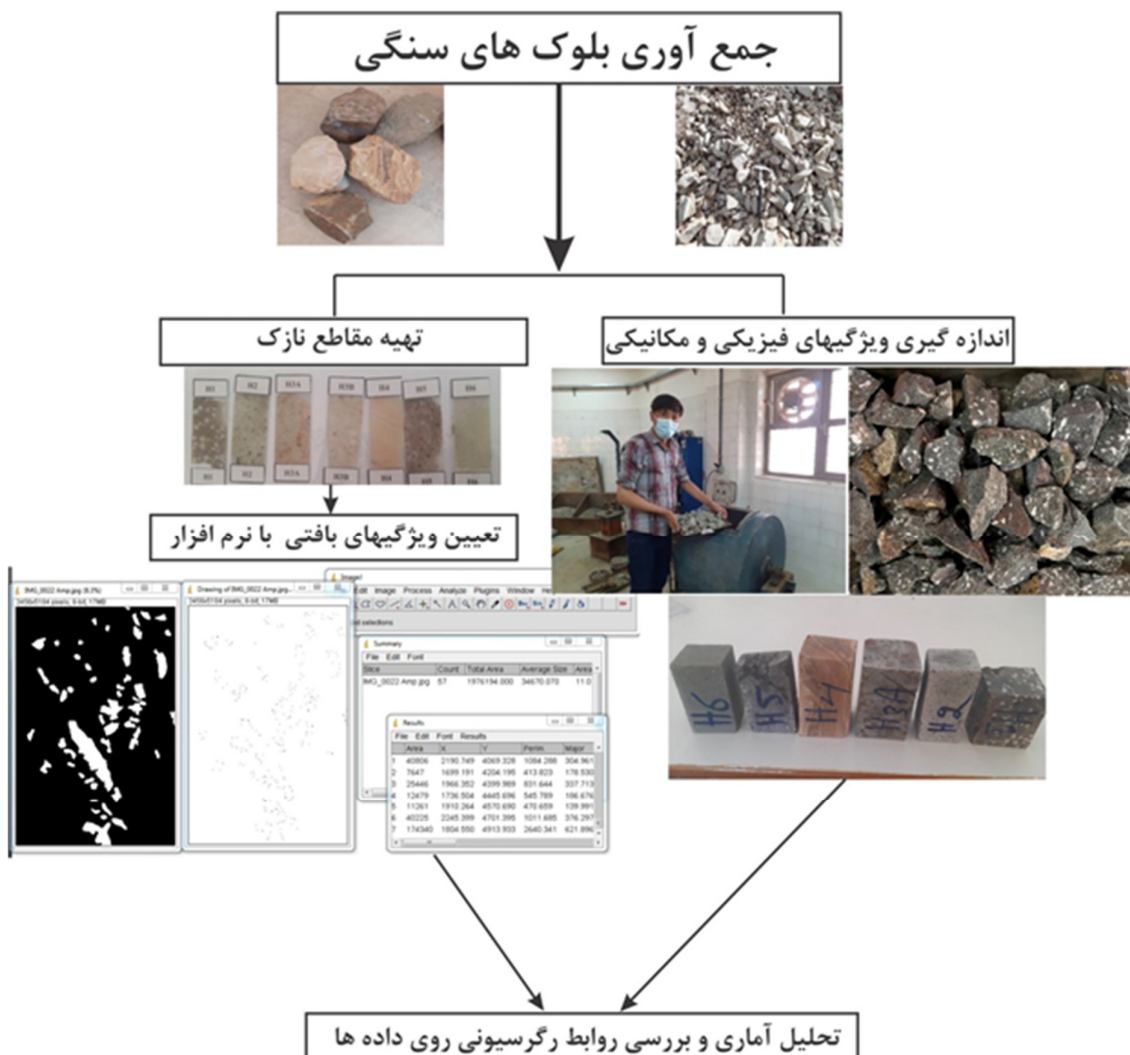
۲-۲- مطالعات سنگ‌شناسی و اندازه‌گیری ویژگی‌های

فیزیکی - مکانیکی

مطالعات سنگ‌شناسی، اطلاعاتی لازم در مورد ترکیب کانی‌شناسی و منشأ سنگ را ارائه می‌دهند. این مطالعات

(نامنظم) با استاندارد ISRM (فرانکلین، ۱۹۸۵) استفاده شده است. از هر سنگ ۵ نمونه کلوخه‌ای انتخاب شده و آزمایش بار نقطه‌ای انجام شد. در آخر با میانگین گرفتن از مقادیر بدست آمده، مقدار میانگین گزارش شد. آزمایش سایش لس‌آنجلس (LAA) بر روی نمونه‌ها با روش استاندارد ASTM-C131 (۲۰۰۸) انجام پذیرفت. بطوری-که نمونه‌ها بعد از خشک شدن در آون همراه ۱۲ توپ فولادی کروی در دستگاه سایش لس‌آنجلس ۵۰۰ دور تحت سایش قرار گرفتند. سپس سنگ‌دانه‌ها خشک شدند و میانگین افت جرمی (/) نمونه‌ها به عنوان شاخص سایش لس‌آنجلس (LAV) محاسبه شد.

شده در این پژوهش، مطالعات سنگ‌شناسی مفصلی روی نمونه‌ها صورت پذیرفت تا ارتباط بین دوام سنگ‌ها با کانی‌شناسی و ویژگی‌های بافتی آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. به منظور مطالعه دقیق کانی‌شناسی سنگ‌های مورد مطالعه مجموعاً تعداد ۲۱ مقطع نازک (تعداد سه مقطع برای هر نوع سنگ) تهیه و با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مورد مطالعه قرار گرفتند. برخی از آزمایش‌های فیزیکی رایج از جمله اندازه‌گیری تخلخل مؤثر (n_v) و وزن واحد حجم (γ) روی نمونه‌های اخذ شده انجام پذیرفت. استاندارد ISRM (اولوسای، ۲۰۱۴) برای اندازه‌گیری خواص فیزیکی استفاده شد. در این مطالعه برای آزمایش بار نقطه‌ای از نمونه‌های کلوخه‌ای



شکل ۲. نمودار چارتهی مراحل انجام پژوهش

Fig. 2. Flow chart of research steps

حفره‌ها با کلسیت و کلریت پر شده‌اند که نشان از تاثیر سیالات گرمایی در دگرسانی این سنگ‌ها دارد. لازم به ذکر است که سنگ فاقد رگه است. همچنین تفاوت اندازه درشت بلورها و کانی‌های زمینه سنگ زیاد است. شدت دگرسانی در این نمونه بالاست و سبب جاننشینی الیوین‌ها با کلریت، کلسیت و اپاک و پلاژیوکلازها با کانی‌های رسی و سوسوریت گشته است (شکل ۳پ). به طور کلی، درشت‌بلورها هم دارای کشیدگی شاخص هستند و هم اختلاف اندازه زیادی با کانی‌های زمینه دارند. بررسی کمی بافتی به ترتیب ۷۰ درصد پلاژیوکلازها، ۱۰ درصد الیوین (کانی مافیک) و ۲۰ درصد زمینه را تخمین می‌زند.

آندزیت بازالتی (S2): این سنگ با بافت‌های پورفیری و گلومروپورفیری دارای درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن، هورنبلندهای قهوه‌ای (هورنبلند بازالتی) و پلاژیوکلاز است که در زمینه‌ای متشکل از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز و آمفیبول‌های ریزدانه و شیشه قرار گرفته‌اند (شکل ۳ت). بررسی‌های کمی بافتی نشان می‌دهند که این نمونه از ۴۵ درصد پلاژیوکلاز، ۲۵ درصد کانی تیره (هورنبلند و پیروکسن) و ۳۰ درصد زمینه تشکیل شده است. کانی اپک، کانی فرعی در این سنگ‌هاست. در مواردی سوسوریتی شدن پلاژیوکلاز دیده می‌شود اما کانی‌های تیره سالم هستند. این سنگ از نظر کانی‌شناسی و اندازه دانه ناهمگن و نسبت‌های ابعادی درشت‌بلورها در اینجا تفاوت بیشتری دارند، به عبارت دیگر بلورها کشیده‌تر و ناهم‌بعدتر می‌باشند (از این نظر این نمونه و نمونه بازالت و آندزیت شباهت دارند). حضور دو نسل پلاژیوکلاز (درشت بلور و زمینه) در این سنگ‌ها نشان‌دهنده تبلور چند مرحله‌ای است. بافت گلومروپورفیری نیز که از به هم پیوستن درشت‌بلورها و تراکم بیشتر آن‌ها در بخش‌هایی از سنگ ایجاد می‌شود همچنین در نمونه به چشم می‌خورد. همچنین، این نمونه فاقد رگه و حفره می‌باشد، اگرچه شکستگی در کانی‌ها دیده می‌شود اما در کل سنگ گسترش نیافته است.

آندزیت (S3): این سنگ دارای بافت پورفیری تا هیالوپورفیری است که درشت بلورهای عمدتاً پلاژیوکلاز به همراه هورنبلند در زمینه‌ای شیشه‌ای قرار گرفته‌اند. با توجه به تغییر اندازه درشت بلورها و وجود اندازه‌های مختلف بلور، بافت سری‌ایت (Seriate) را نیز می‌توان برای آن در نظر گرفت (شکل ۳ث). کانی‌های فرعی شامل

آزمایش سلامت سنگ با استفاده از محلول سولفات منیزیم با استفاده از استاندارد ASTM C88 (۲۰۰۵) انجام پذیرفت. نمونه‌های آماده شده داخل محلول ۲۵٪ سولفات منیزیم غرقاب شده و به مدت ۴ الی ۶ ساعت داخل محلول حفظ شدند. سپس نمونه‌ها از داخل محلول خارج شده و به مدت ۱۵ الی ۳۰ دقیقه روی یک پارچه قرار گرفته تا آب آن جذب شود. نمونه‌ها در داخل آون با درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۶ الی ۱۸ ساعت خشک شدند. این مراحل برای ۵ چرخه تکرار شد. بعد از ۵ چرخه آزمایش نمونه‌ها با آب و محلول باریم شسته شدند تا اطمینان حاصل شود که سولفات منیزیم در سطح سنگ باقی نمانده است. در انتهای آزمایش نمونه‌ها طبق استاندارد الک شدند و افت وزنی آن‌ها محاسبه گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مطالعات سنگ‌شناسی

به‌طور کلی نمونه‌ها از نظر پتروگرافی به بازالت، آندزیت بازالتی، آندزیت، داسیت و ریولیت قابل طبقه‌بندی می‌باشند.

بازالت بادامکی (S1): این سنگ دارای بافت پورفیری است و درشت بلورهای الیوین، کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز در زمینه‌ای متشکل از پلاژیوکلازهای ریز و بقایای الیوین، پیروکسن، کلریت و شیشه قرار گرفته‌اند (شکل ۳الف). در این سنگ حفراتی حاصل از خروج گاز دیده می‌شوند که توسط کلسیت و کانی‌های اپاک پر شده و بافت بادامکی ایجاد کرده‌اند (شکل ۳ب). محاسبات بافتی کمی (مودال) نشان می‌دهند که در مجموع پلاژیوکلازها ۳۵ درصد، کانی‌های تیره (الیوین، پیروکسن و کانی‌های اپاک) ۱۵ درصد، حفرات پر شده با کلسیت ۴۰ درصد و زمینه سنگ عمدتاً شامل بلورهای ریز پلاژیوکلاز کلریت و شیشه ۱۰ درصد سنگ را تشکیل داده‌اند. دگرسانی به‌صورت جاننشینی پلاژیوکلاز با سوسوریت، الیوین و کلینوپیروکسن و شیشه زمینه با کلریت و کانی‌های اپاک به چشم می‌خورد اما گستردگی زیادی ندارد.

بازالت (S4): بافت اصلی این سنگ نیز پورفیری است و دارای کانی‌های پلاژیوکلاز، اولیوین و کانی‌های اپاک می‌باشد. درشت بلورهای الیوین و پلاژیوکلاز در زمینه‌ای از پلاژیوکلاز، کانی‌های اپاک و شیشه آتش‌فشانی قرار گرفته‌اند. در این سنگ شکستگی و حفره دیده می‌شود.

۴۸/۶ درصد برای زمینه شیشه‌ای سنگ ارائه می‌دهند. به طور کلی شیشه در این نمونه از سایر نمونه‌ها بیشتر است و ناهم‌بند بودن پلاژیوکلازها کاملاً قابل تشخیص است.

کانی‌های اپاک و کانی‌های رسی بوده و کلریت کانی‌های ثانویه را تشکیل می‌دهند. بررسی‌های کمی بافتی مقادیر ۴۶ درصد را برای پلاژیوکلاز، ۵/۴ درصد برای هورنبلند و



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های مورد مطالعه (الف) پلاژیوکلاز و بقایای اولیوین (ب) بادامک پر شده با کلسیت در بازالت بادامکی، (پ) درشت بلور پلاژیوکلاز و کلریت جانشین شده در کانی مافیک بازالت با بافت پورفیری، (ت) بافت پورفیری و کانی‌های پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن در آندزیت بازالتی، (ث) بافت سری‌ایت در آندزیت، (ج) کوارتز با خوردگی خلیجی در داسیت با بافت پورفیری فلسیتی، (چ) پلاژیوکلاز، سانیدین، کوارتز و آمفیبول در ریولیت با بافت هیالوپورفیری، (ح) پلاژیوکلاز تجزیه شده در زمینه ریزدانه فلدسپار و اکتینولیت در توف ریولیتی. Qtz: کوارتز، Bt: بیوتیت، Pl: پلاژیوکلاز Sa: سانیدین، Cpx: کلینوپیروکسن، Amph: آمفیبول، Act: اکتینولیت، Ol: اولیوین، Cal: کلسیت.

Fig. 3. Microscopic images (XPL) of the studied samples a) plagioclase and remnant of olivine b) amygdale filled with calcite in amygdaloidal basalt c) plagioclase phenocryst and mafic mineral replaced by chlorite in basalt with porphyry texture d) plagioclase and clinopyroxene in basalt with porphyry texture e) Seriate texture in andesite c) Quartz with felsitic porphyry texture c) Plagioclase, sanidine, quartz and amphibole in rhyolite with hyaloporphyry texture. h) Altered plagioclase in the groundmass of fine grain feldspar and actinolite in rhyolitic tuff. Qtz: quartz, Bt: biotite, Pl: plagioclase, Sa: sanidine, Cpx: clinopyroxene, Amph: amphibole, Act: actinolite, Ol: olivine, Cal: calcite.

توسط مواد ریزدانه و شیشه پر شده است. به طور کلی شدت دگرسانی نسبتاً بالا بوده و بسیاری از فلدسپارها را تحت‌تاثیر قرار داده است. اکتینولیت، دیگر کانی ثانویه در این نمونه‌هاست که احتمالاً از دگرسانی پیروکسن‌ها بر جای مانده است. بررسی‌های کمی بافتی مقادیر ۲۶/۳ درصد را برای کانی‌های روشن (فلدسپار و کوارتز)، ۱۹/۹ درصد را برای کانی‌های مافیک (بیوتیت و اکتینولیت) و ۵۳/۸ درصد را برای زمینه سنگ نشان می‌دهند (شکل ۳ج).

۳-۲- شاخص‌های بافتی نمونه‌های مورد مطالعه

آنالیز تصاویر مقاطع نازک با برنامه‌های کامپیوتری به یک روش مطالعاتی بافتی رایج در زمین‌شناسی تبدیل شده است. این برنامه‌ها امکان اندازه‌گیری سریع و تجزیه و تحلیل کمی خواص مقاطع نازک را فراهم می‌کند. خواص پتروگرافی نمونه‌های مورد مطالعه با استفاده از تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک مورد بررسی قرار گرفتند. از هر نمونه عکس‌هایی با بزرگنمایی ۴X تهیه گردید. این تصاویر با نرم‌افزارهای ImageJ و JMicroVision مورد بررسی قرار گرفتند. برای مطالعات پتروگرافی، اندازه دانه ۱۸۰ میکرومتر به عنوان آستانه پایین برای تفکیک زمینه از بلورها انتخاب شد. کانی‌های زیر این اندازه به عنوان زمینه در نظر گرفته شدند. خواص بافتی (به عنوان مثال، محیط و مساحت هر کانی) با ردیابی هر جزء بر روی تصاویر با وضوح بالا و اندازه‌گیری طول محور بلند، به نام قطر فرت (یعنی طولانی‌ترین فاصله بین هر دو نقطه در امتداد مرز انتخاب) اندازه‌گیری شد. پس از آن، مساحت کل کانی‌های اصلی با توجه به سطح کل قابل مشاهده نرمالایز شد. ناحیه نرمال شده هر کانی اصلی تشکیل دهنده تحت عنوان "درصد کانی" گزارش گردید. در طی آنالیز بافتی مقطع نازک، علاوه بر ویژگی‌های اساسی شامل محیط و مساحت کانی‌ها و قطر فرت^۱، پارامترهای دیگری نظیر شاخص جامدشدگی^۲ و شاخص مدور بودن^۳ با استفاده از نرم‌افزار ImageJ اندازه‌گیری شدند (شکل ۴). جامد شدگی چگالی یک جسم را اندازه‌گیری می‌کند. این شاخص را می‌توان به عنوان نسبت مساحت یک جسم به مساحت بدنه محدب جسم به دست آورد (شکل ۴). شاخص دایره‌ای (نسبت مساحت به محیط) را می‌توان به عنوان نسبت مساحت یک

داسیت (S5): این سنگ دارای بافت پورفیری تا پورفیری فلسیتی بوده و دارای کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز، سانیدین، آمفیبول و بیوتیت می‌باشد. درشت‌بلورهای کوارتز دارای خوردگی خلیجی هستند و زمینه سنگ ناهمگن بوده و از کوارتز و فلدسپارهای ریز دانه و شیشه آتشفشانی تشکیل شده، جایی که کوارتز در آن بیشترین سهم را دارد (شکل ۳ج). کانی اپک، تنها کانی فرعی در نمونه‌ها است که به صورت پراکنده در برخی نقاط دیده می‌شود. بررسی‌های کمی بافتی نشان می‌دهند که فلدسپارها (سانیدین و پلاژیوکلاز) در مجموع ۴۵ درصد حجمی، بقایای کانی‌های تجزیه شده بیوتیت و آمفیبول ۱۰ درصد، کوارتز بصورت درشت بلور ۵ درصد و زمینه شیشه و کوارتز و فلدسپارهای ریزدانه ۴۰٪ درصد حجمی سنگ را به خود اختصاص می‌دهند. درشت بلورهای فلدسپار در این سنگ به نسبت آندزیت‌ها و آندزی بازالت‌ها (نمونه‌های S2 و S3) هم‌بعدتر هستند.

ریولیت (S7): این نمونه دارای بافت پورفیری و هیالوپورفیری با اختلاف اندازه بسیار در بین درشت‌بلورها و زمینه است. درشت‌بلورها شامل سانیدین، کوارتز، پلاژیوکلاز و بیوتیت می‌باشند (شکل ۳ج). کانی‌های زمینه به سختی قابل شناسایی‌اند هرچند می‌توان بلورهای کوچک کوارتز و فلدسپار را تشخیص داد که خود در بستری از شیشه آتشفشانی اسیدی قرار گرفته‌اند. کوارتز و گاهی فلدسپارها دارای خوردگی خلیجی هستند. فلدسپارها شکستگی دارند و در برخی موارد کمی تجزیه شده‌اند. دیگر ویژگی این نمونه، زاویه دار بودن دانه‌های آن است که نشان‌دهنده شکل‌گیری آن در نتیجه فوران‌های انفجاری است. آثار دگرسانی تا حدی دیده می‌شوند اما گسترش زیادی ندارند. بررسی‌های کمی بافتی مقادیر ۱۸ درصد را برای فلدسپارها، ۸ درصد را برای بیوتیت (کانی مافیک)، ۳ درصد درشت بلور کوارتز و ۷۱ درصد را برای زمینه ریزدانه و شیشه‌ای برآورد می‌کنند.

توف ریولیتی (S6): در این نمونه بلورهای پلاژیوکلاز در زمینه‌ای متشکل از پلاژیوکلاز، سانیدین، کوارتز، بیوتیت و اکتینولیت قرار گرفته و بافت پورفیری را در ایجاد نموده‌اند. این نمونه نسبت به دیگر نمونه‌ها ریزدانه‌تر بوده و تفاوت اندازه بین دانه‌ها نامحسوس است. فضای بین این کانی‌ها

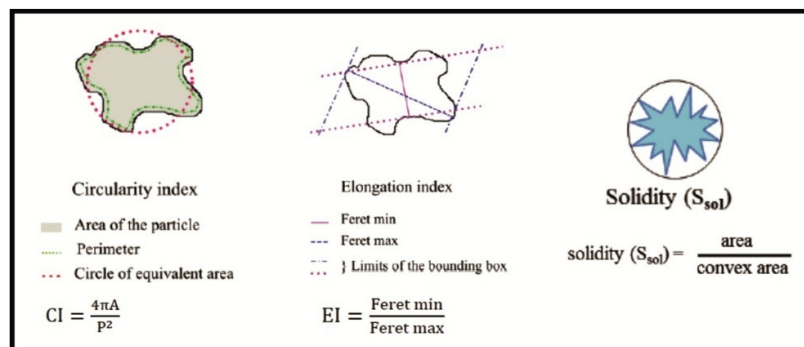
³ Circularity

¹ Feret's diameter

² Solidity

کمند^۴ انتخاب گشته و به صورت یک لایه از سایر بخش‌های تصویر جدا شد. سپس، هر لایه به طور جداگانه انتخاب شده و رنگ آن در شرایط آستانه‌ای^۵ قرار گرفت تا به طور کامل سیاه شود. پس از آن، لایه مربوط به هر کانی به صورت یک فایل مجزا با فرمت JPEG ذخیره شد تا قابلیت بررسی در نرم‌افزار ImageJ را داشته باشند. در شکل‌های ۵ و ۶ تصاویر مقاطع نازک قبل و بعد از پردازش تصویر هر نمونه ارائه شده است.

جسم به مساحت دایره ای با محیط محدب یکسان به دست آورد. شاخص کشیدگی نیز عبارت است از نسبت قطر کوچک جسم به قطر بزرگ آن (شکل ۴). به منظور محاسبه پارامترهای بافتی، ابتدا تصاویر مقاطع نازک در نرم‌افزار فتوشاپ پردازش شدند. بطوریکه در ابتدا، تصویر مناسب از مقطع نازک نمونه انتخاب شده و در نرم‌افزار وارد شد. محدوده هر یک از کانی‌ها یا گروهی از کانی‌ها (مانند فلدسپارها) با دقت و در بزرگنمایی‌های بالا توسط ابزار



شکل ۴. فاکتورهای شکل کانی‌ها

Fig. 4. Shape factors of minerals

جدول ۱. مقادیر درصد مدال کانی‌ها، ویژگی‌های فیزیکی - مکانیکی و شاخص‌های بافتی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های مورد مطالعه

Table 1. Values of mineral modal percentages, physical-mechanical characteristics and textural indices measured for the studied samples

شماره نمونه	مساحت نرمالایز شده (اجزاء اصلی (درصد کانی‌ها)			نتایج آزمایش‌های فیزیکی - مکانیکی					شاخص‌های بافتی			
	فلدسپار	کانی‌های مافیک	زمینه (Gm.)	γd (g/cm ³)	n_e (%)	I_{s50} (MPa)	LAA (%)	MgSO ₄ loss (%)	کشیدگی	مدور بودن	جامد شدگی	قطر فرت (mm)
S1	۳۴/۷	۵/۳۰	۶۰/۱۰	۲/۷۱	۲/۶۳	۵/۴۷	۱۲/۶	۰/۹۷	۰/۶۱	۰/۴۹	۰/۸۰	۰/۵۷
S2	۴۶/۰	۱۱/۰	۴۳/۰	۲/۶۲	۲/۰۵	۷/۸۱	۱۰/۸	۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۶۹	۰/۹۰	۰/۵۴
S3	۴۶/۰	۵/۴۰	۴۸/۶	۲/۵۳	۲/۳۳	۷/۴۳	۸/۴۰	۰/۵۹	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۸۶	۰/۷۲
S4	۷/۱۰	۱۲/۱	۸۰/۸	۲/۴۵	۲/۳۵	۶/۲۸	۹/۴۰	۰/۵۶	۰/۵۰	۰/۶۳	۰/۸۴	۰/۸۸
S5	۵۵/۱	۱/۹۰	۴۳/۰	۲/۲۵	۵/۵۹	۵/۸۳	۸/۲۰	۰/۶۱	۰/۶۲	۰/۵۹	۰/۸۸	۱/۴۲
S6	۲۶/۳	۱۹/۹	۵۳/۸	۲/۳۹	۲/۱۶	۴/۴۴	۱۷/۵	۱/۵۸	۰/۵۷	۰/۵۶	۰/۸۹	۱/۱۱
S7	۱۳/۹	۴/۶۰	۸۱/۵	۲/۳۱	۴/۸۹	۶/۵۱	۱۳/۲	۱/۲۶	۰/۶۰	۰/۶۲	۰/۹۱	۰/۵۱

۱. مساحت کل کانی‌های اصلی با توجه به کل مساحت قابل مشاهده در تصاویر نرمال شدند. ناحیه نرمال شده هر کانی اصلی تحت عنوان درصد کانی در نظر گرفته شد. نمونه ای از تصاویر پردازش شده از نمونه‌های مورد مطالعه در شکل (۷) نمایش داده شده است. در طول تجزیه و

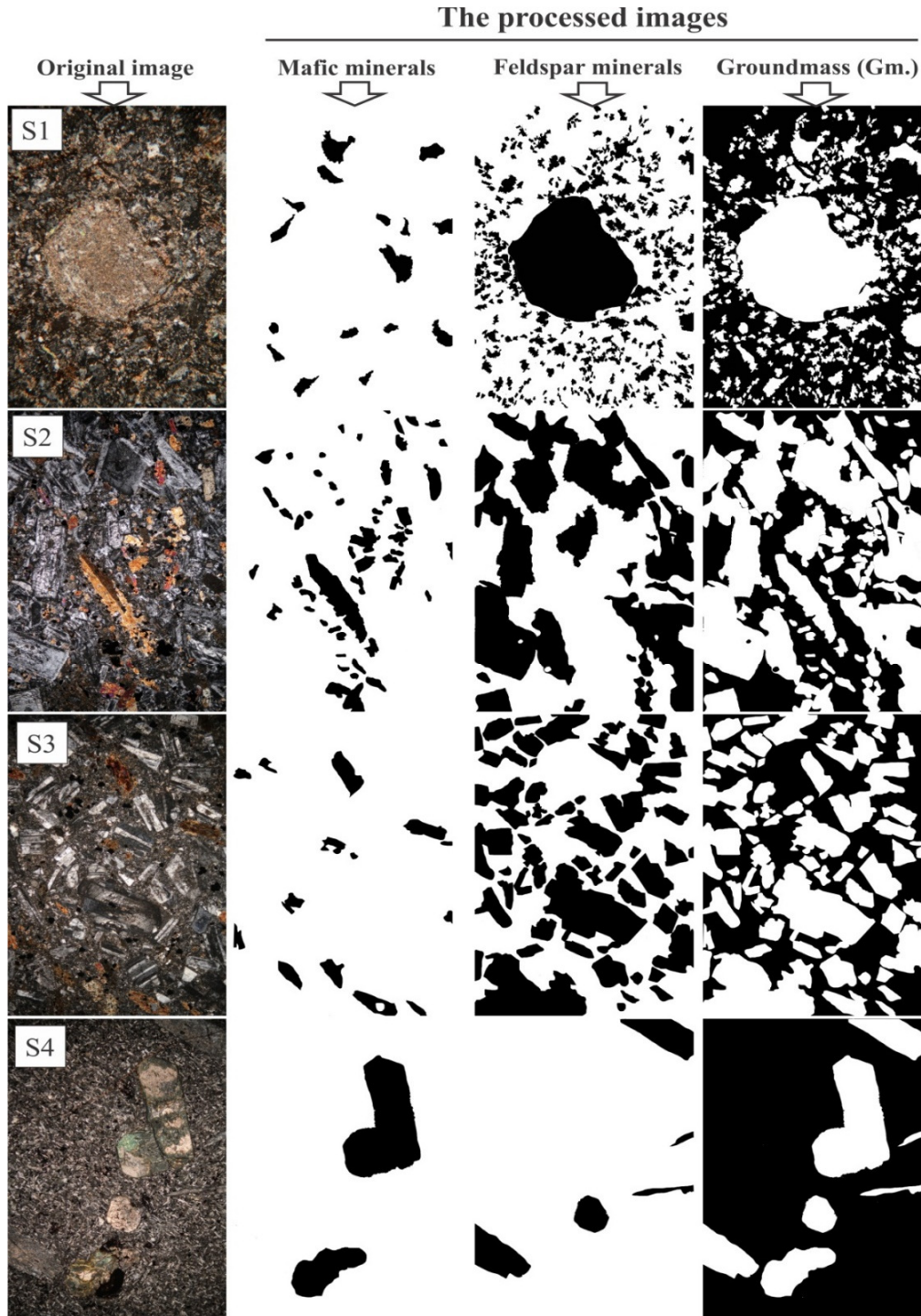
در مرحله پردازش تصاویر ابتدا تصویر اولیه بوسیله نرم‌افزار ImageJ به حالت Binary درآمد و سپس Threshold شدند. پس از آن با استفاده از گزینه Particle analysis مقادیر مساحت، محیط، قطر فرت و پارامترهای بافتی نظیر کشیدگی، مدور بودن و جامدشدگی محاسبه شدند (جدول

⁵ Threshold

⁴ Lasso tool

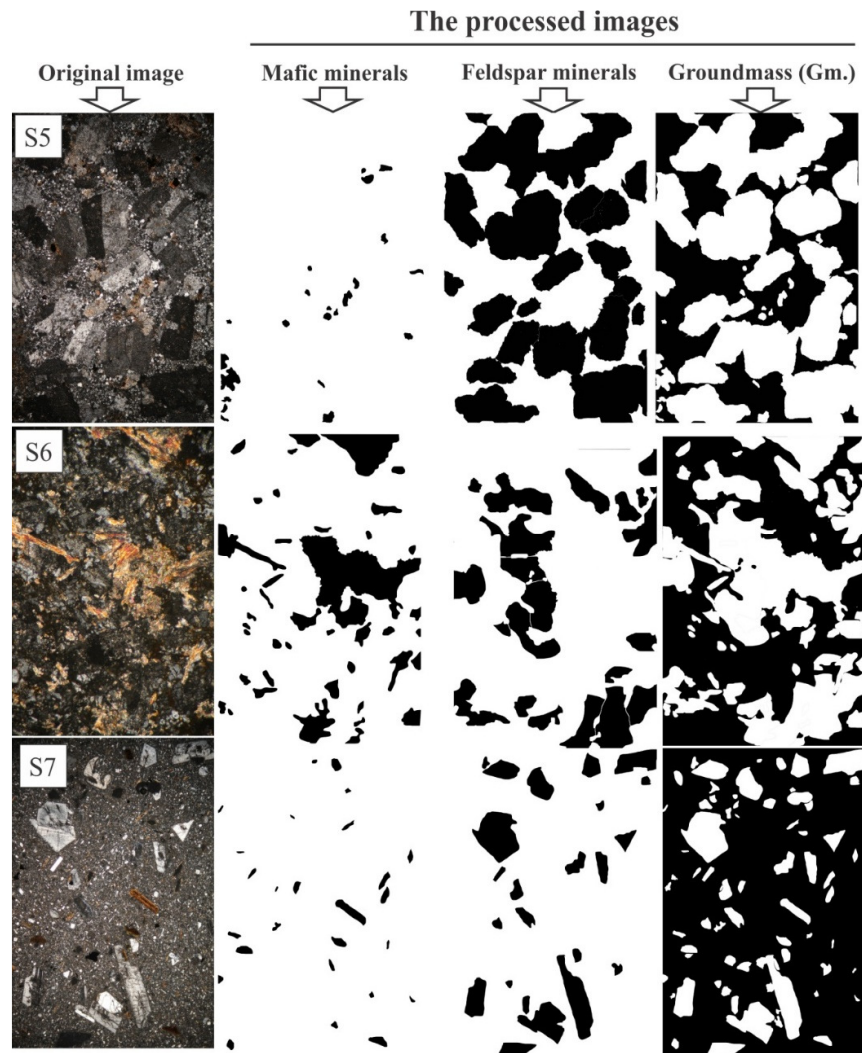
سنگ است. نتایج اندازه‌گیری شاخص بافتی شامل قطر فرت، شاخص جامدشدگی، شاخص کشیدگی و شاخص مدور بودن در جدول (۱) ارائه شده است.

تحلیل کمی تصاویر مقاطع نازک، اکثر پارامترها براساس سطح دانه، محیط، حداکثر و حداقل طول تعریف می‌شوند. با این حال، هر پارامتر نشان‌دهنده یک ویژگی خاص مربوط به شرایط مکانیکی، هندسی یا ساختاری بافت

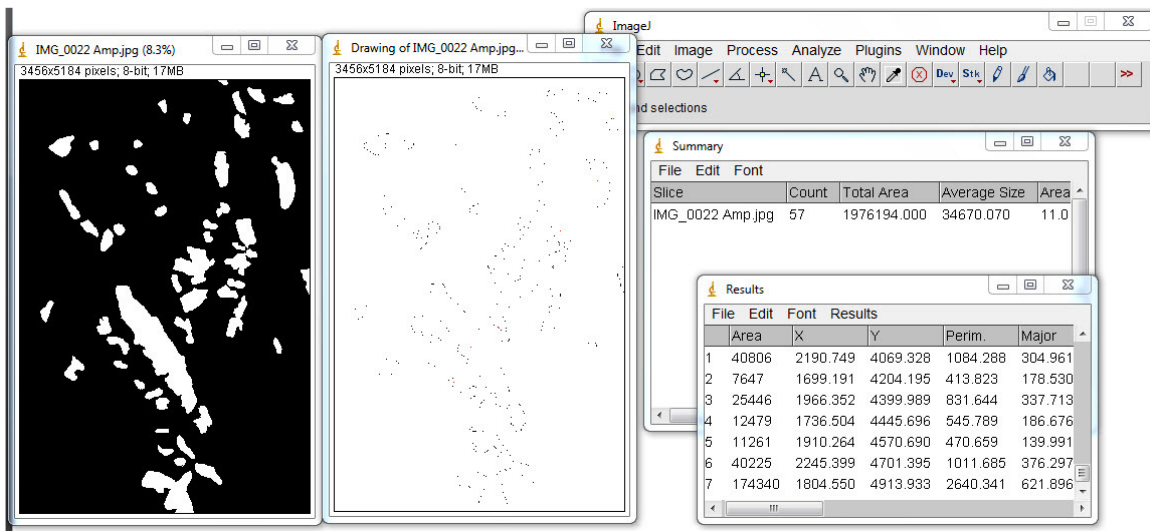


شکل ۵. مراحل پردازش تصاویر با نرم‌افزار فتوشاپ جهت اندازه‌گیری پارامترهای بافتی (نمونه‌های S1 تا S5)

Fig. 5. Image processing steps with Photoshop software to measure textural parameters (samples S1 to S5)



شکل ۶. مراحل پردازش تصاویر با نرم‌افزار فتوشاپ جهت اندازه‌گیری پارامترهای بافتی (نمونه‌های S5 تا S7)
Fig. 6. Image processing steps with Photoshop software to measure textural parameters (samples S5 to S7)



شکل ۷. نمونه‌ای از تصاویر مقاطع نازک پردازش شده در نرم‌افزار ImageJ
Fig. 7. An example of thin section images processed in ImageJ software

مقادیر TC محاسبه شده از معادله (۱) برای نمونه‌های سنگ مورد مطالعه در جدول (۲) ارائه شده است. براساس نتایج، مقادیر TC از ۰/۸۵ تا ۰/۹۴ متغیر هستند. نمونه‌های S6 و S5 به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار TC را دارند. براساس نمودار هیستوگرام، TC دارای مقدار متوسط ۰/۹ است. همچنین مقادیر انحراف استاندارد (Std. Dev.) بسیار کم (۰/۰۳) است، که پراکندگی نزدیک مقادیر TC را نشان می‌دهد (شکل ۹). پارامترهای AW، AR1 و TC دارای روابط مستقیم هستند و بنابراین، مقدار TC با افزایش AW و AR1 افزایش می‌یابد. این در جایی است که ارتباط FF0 و TC معکوس است.

۳-۳- نتایج اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که نمونه‌های S1 و S5 به ترتیب دارای بیشترین ($2/71 \text{ g/cm}^3$) و کمترین ($2/25 \text{ g/cm}^3$) وزن واحد حجم می‌باشند. درصد تخلخل در نمونه‌های مورد مطالعه ۲/۰۵-۵/۵۹ درصد متغیر است. نمونه S5 دارای بیشترین درصد تخلخل (۵/۵۹٪) بوده و نمونه S2 دارای کمترین درصد تخلخل (۲/۰۴۹٪) است. با استفاده از طبقه‌بندی آنون (۱۹۷۹) سنگ‌های مورد مطالعه به‌صورت کیفی براساس درصد تخلخل و وزن واحد حجم طبقه‌بندی شدند. براساس این تقسیم‌بندی نمونه S5 در رده دارای تخلخل متوسط و نمونه‌های دیگر در رده دارای تخلخل پائین قرار می‌گیرند. نتایج آزمایش بار نقطه‌ای در جدول (۱) ارائه شده است. با توجه به نتایج این آزمایش می‌توان گفت که مقدار بار نقطه‌ای در نمونه‌های مورد مطالعه از ۴/۶۳MPa الی ۷/۸۱MPa تغییر می‌کند. نمونه S2 دارای بیشترین مقدار مقاومت بار نقطه‌ای (۷/۸۱MPa) و نمونه S5 دارای کمترین مقدار (۴/۶۳MPa) است.

نتایج آزمایش شاخص سایش لس آنجلس نمونه‌های مورد مطالعه که در جدول (۱) ارائه شده است، نشان می‌دهد که مقدار سایش لس آنجلس در نمونه‌های مورد مطالعه از ۸/۲ درصد الی ۱۷/۵ درصد متغیر است، نمونه‌های S5 (داسیت) و نمونه S4 (تراکی‌اندزیت) به ترتیب دارای بیشترین (۱۷/۵ درصد) و کمترین (۸/۲ درصد) افت لس آنجلس می‌باشند. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که داسیت‌ها کمترین مقاومت را در برابر عوامل فرساینده دارند، در

بافت سنگ‌ها تحت عنوان "درجه بلوری شدن، اندازه دانه یا دانه‌بندی، و بافت یا روابط هندسی بین اجزای تشکیل دهنده یک سنگ" تعریف شده است (ویلیامز و همکاران، ۱۹۵۴). ضریب بافتی (TC) پیشنهاد شده توسط هووارث و رولندز (۱۹۸۶) فاکتور بسیار خوبی برای کمی‌سازی بافت سنگ است. TC از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

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

در این رابطه، TC ضریب بافتی، AW وزن تراکم دانه‌ها، N_0 تعداد دانه‌هایی که نسبت طول به عرض آن‌ها کمتر از ۲ است، N_1 تعداد دانه‌هایی که نسبت طول به عرض آن‌ها بیشتر از ۲ است، FF_0 میانگین حسابی فاکتور شکل تمام دانه‌های N_1 ، AR_1 میانگین حسابی نسبت طول به عرض دانه‌های N_1 و AF_1 ضریب زاویه که جهت‌گیری دانه‌ها را تعیین می‌کند، می‌باشد.

AR، AW و FF با معادلات زیر محاسبه می‌شوند.

$$AW = \frac{\text{مساحت دانه‌ها درون مرز ناحیه مرجع}}{\text{مساحت ناحیه مرجع}}$$

$$AR = \frac{L}{W}$$

$$FF = \frac{4\pi A}{P^2}$$

در این معادلات، L طول، W عرض، P محیط و A مساحت است. ضریب زاویه نیز (AF) از طریق معادلات زیر محاسبه می‌شود.

$$AF = \sum_{i=1}^9 \left(\frac{\chi_i}{\frac{N(N-1)}{2}} \right) \times i$$

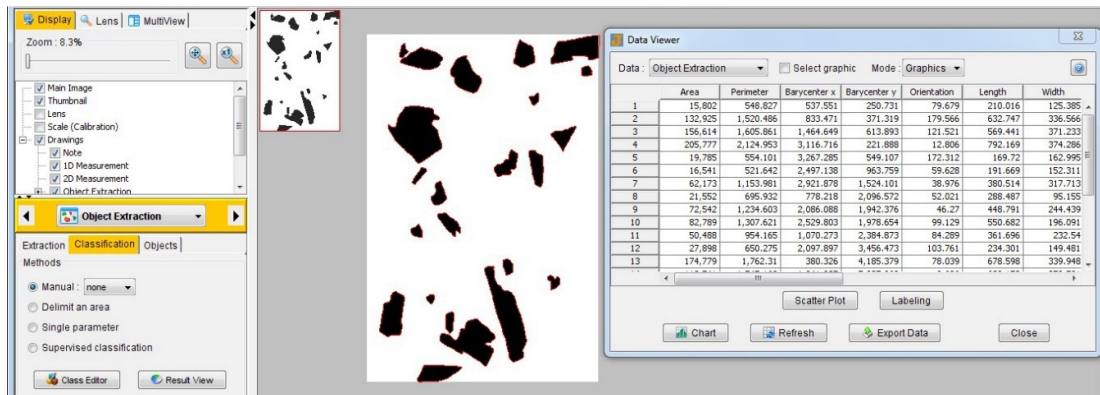
$$AF_1 = \frac{AF}{5}$$

در این روابط N: تعداد کل دانه‌های کشیده، χ_i : شماره تفاوت زاویه‌ای در هر کلاس و i: فاکتور وزن‌دهی و شماره کلاس، می‌باشند.

محاسبه ضریب بافتی با استفاده از آنالیز تصاویر با فرمت TIFF در نرم‌افزار JMicroVision انجام پذیرفت. این یک نرم‌افزار با ارزش برای تعیین اندازه، شکل، جهت و ویژگی‌های بافتی سنگ‌های مختلف است. محیط این نرم‌افزار برای محاسبه TC در شکل (۸) ارائه شده است. پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه TC مانند AW، AR، FF و AF تعیین شده و در جدول خلاصه شده‌اند.

درصد برای نمونه‌های مورد مطالعه تغییر می‌کند. نمونه S2 که یک سنگ تراکی آندزیت بازالتی است دارای کمترین افت وزنی (۵۸۹/۰ درصد) می‌باشد و نمونه S5 نیز که یک سنگ داسیتی است دارای بیش‌ترین افت وزنی (۵۷۹/۱ درصد) می‌باشد. بطور کلی نمونه‌های بازیک و حدواسط در برابر محلول سولفات منیزیم دوام بالاتری نسبت به نمونه‌های اسیدی داشته‌اند.

حالی که آندزیت‌ها مقاومت خوبی در برابر فرسایش نشان می‌دهند. براساس نتایج بدست آمده از هفت نمونه مورد مطالعه بهترین سنگ‌دانه برای استفاده در بالاست آندزیت و تراکی آندزیت بوده و داسیت‌ها نسبت به آندزیت‌ها ضعیف‌تر هستند. نتایج آزمایش سولفات منیزیم در جدول (۱) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار افت وزنی در محلول سولفات منیزیم از ۵۸۹/۰ درصد الی ۵۷۹/۱

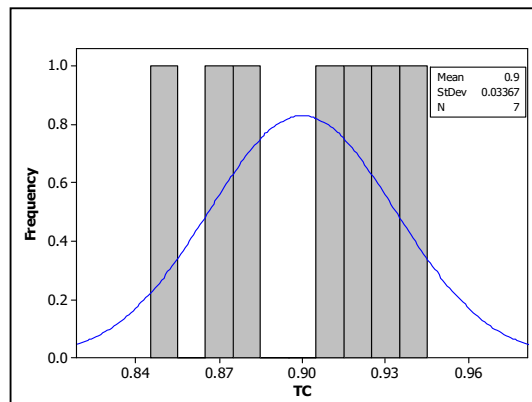


شکل ۸. نمایی از پردازش تصاویر مقاطع نازک در نرم‌افزار JmicroVision
 Fig. 8. A view of thin section image processing in JmicroVision software

جدول ۲. محاسبه پارامترها و مقادیر ضریب بافتی نمونه‌های مورد مطالعه

Table 2. Calculation of parameters and texture coefficient values of the studied samples

شماره نمونه	AW	N0	N1	FF0	ARI	AF1	ضریب بافتی (TC)
S1	۱	۷۳	۱۳	۱/۳۲	۳/۱۵	۰/۵	۰/۸۸
S2	۱	۳۲	۲۰	۱/۴۹	۲/۶۵	۰/۵	۰/۹۲
S3	۱	۴۶	۲۵	۱/۴۸	۲/۸۰	۰/۵	۰/۹۳
S4	۱	۲	۳	۱/۴۹	۲/۱۵	۰/۵	۰/۹۱
S5	۱	۱۰	۲	۱/۱۰	۲/۲۳	۰/۵	۰/۹۴
S6	۱	۱۶	۶	۱/۵۸	۲/۸۵	۰/۵	۰/۸۵
S7	۱	۱۶	۷	۱/۴۱	۲/۷۵	۰/۵	۰/۸۷

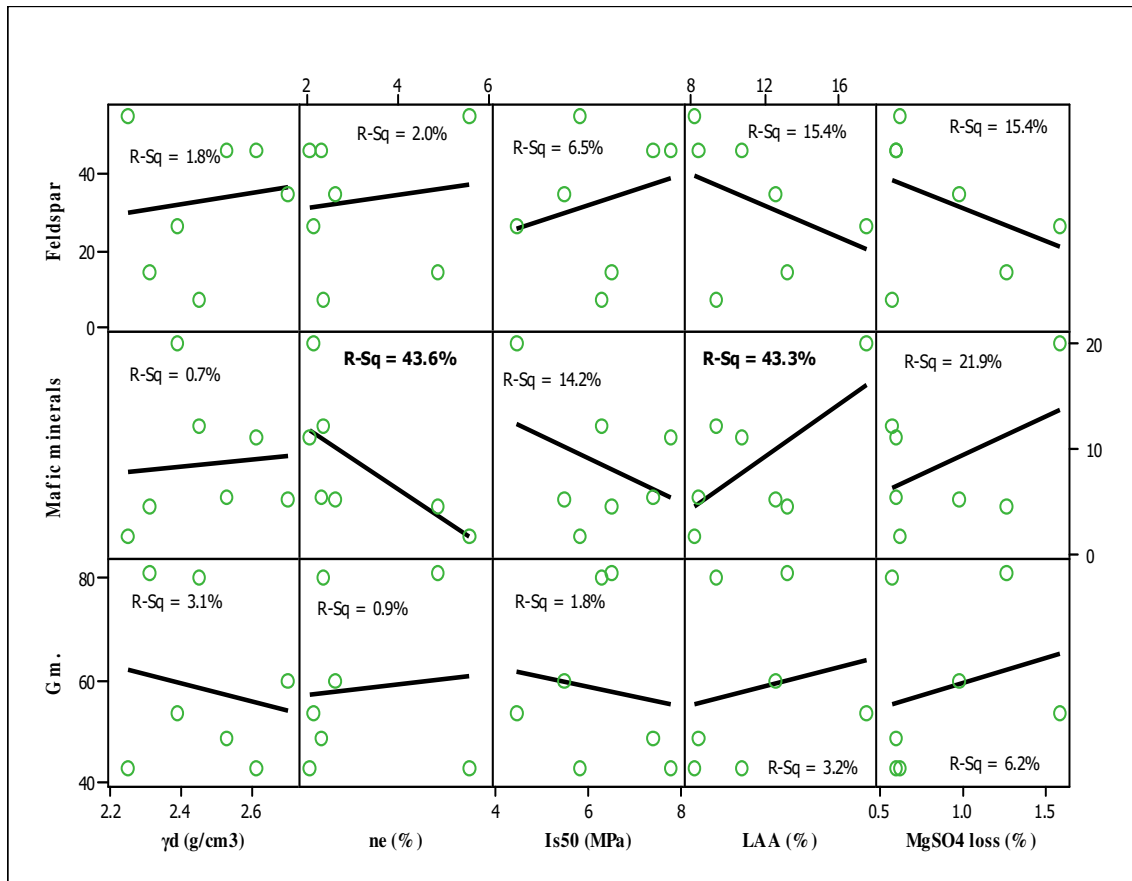


شکل ۹. نمودار هیستوگرام برای مقادیر ضریب بافتی نمونه‌های مورد مطالعه
 Fig. 9. Histogram diagram for the texture coefficient values of the studied samples

مورد مطالعه نیز از تحلیل رگرسیونی استفاده شد. برای این منظور، همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکی-مکانیکی و ترکیب کانی‌شناسی با پنج ویژگی بافتی ذکر شده بررسی شد (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). برای بررسی همبستگی‌ها از تابع خطی استفاده شد و بهترین معادلات بر اساس مقادیر بالاترین ضریب تعیین (R^2) انتخاب شدند. براساس روابط به دست آمده، دو شاخص بافتی کشیدگی و ضریب بافتی (TC) ارتباط تقریباً معناداری با درصد کانی‌های فلدسپار و کانی‌های مافیک نشان می‌دهند (شکل ۱۲). این در جایی است که زمینه سنگ (Gm.) فاقد ارتباط با شاخص‌های مذکور است. با توجه به عدم هم‌بعد بودن کانی‌های فلدسپار و مافیک (آمفیبول، پیروکسن و بیوتیت)، ارتباط معنی‌دار آن‌ها با شاخص کشیدگی قابل توجیه است. این در حالی است که سایر شاخص‌های بافتی هیچگونه ارتباط معناداری با درصد کانی‌های سنگ‌های مورد مطالعه نشان نمی‌دهند (شکل ۱۲).

۳-۴- بررسی ارتباط ویژگی‌های کانی‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی با شاخص‌های بافتی

ارتباط بین ویژگی‌های کانی‌شناسی و فیزیکی-مکانیکی توسط نرم‌افزار Minitab مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۰). نتایج نشان داد که از بین کانی‌های سنگ تنها کانی‌های مافیک ارتباط نسبتاً معناداری با شاخص لس‌آنجلس ($R^2 = 0.43$) و تخلخل موثر ($R^2 = 0.436$) نشان می‌دهند. از آنجایی که کانی‌های مافیک در شرایط سطحی ناپایدار هستند احتمال هوازدگی آن‌ها بیشتر بوده و می‌توانند موجب افزایش تخلخل گردند. ارتباط معنادار بین درصد کانی‌های مافیک و افت لس‌آنجلس نیز تاییدی بر این موضوع می‌باشد. بطوریکه این کانی‌ها معمولاً نسبت به سایر کانی‌های سنگ سست‌تر بوده و در حین سایش و یا در معرض محلول خورنده به راحتی از سنگ جدا می‌شوند (شکل ۱۱). برای بررسی ارتباط ویژگی‌های بافتی با ویژگی‌های کانی‌شناسی و فیزیکی-مکانیکی سنگ‌های



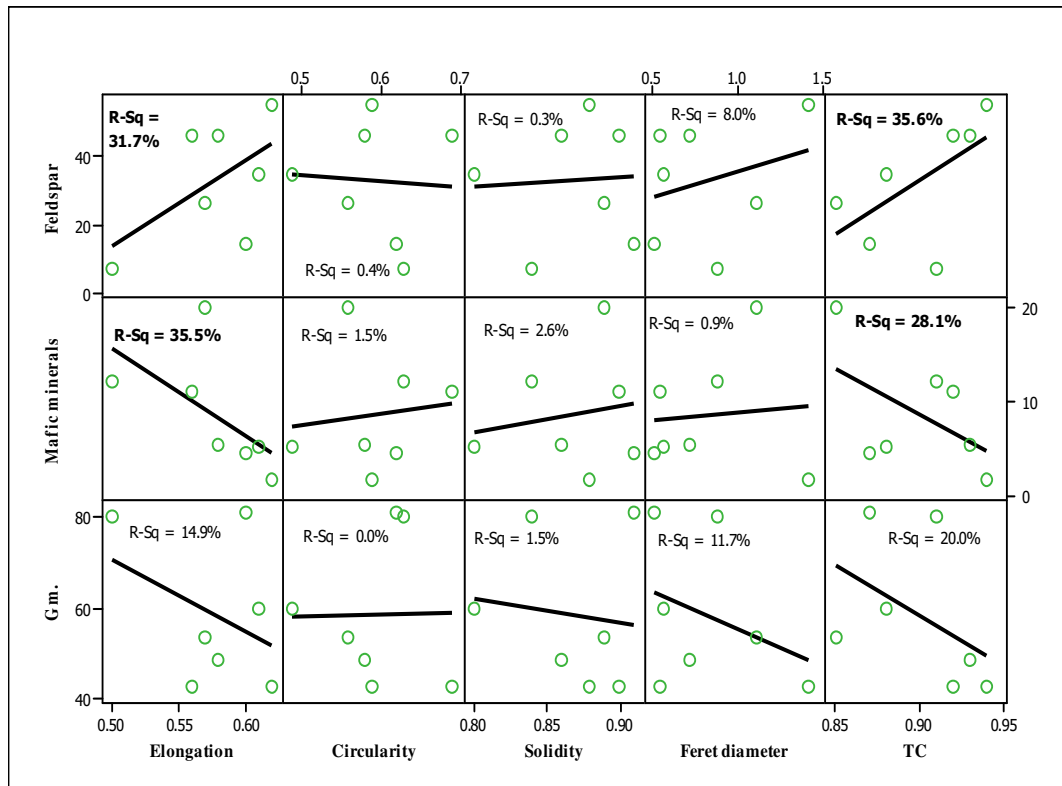
شکل ۱۰. ارتباط بین ویژگی‌های کانی‌شناسی و فیزیکی-مکانیکی

Fig. 10. Relationship between mineralogical and physical-mechanical characteristics



شکل ۱۱. نمونه شستشو داده شده S7 بعد از آزمایش لس آنجلس که در آن حفرات سطحی نمایانگر جدا شدن کانی‌های سست مانند کانی‌های مافیک هستند.

Fig. 11. The washed sample S7 after the Los Angeles test, where the surface holes represent the separation of weak minerals such as mafic minerals



شکل ۱۲. ارتباط بین شاخص‌های بافتی و ترکیب کانی‌شناسی

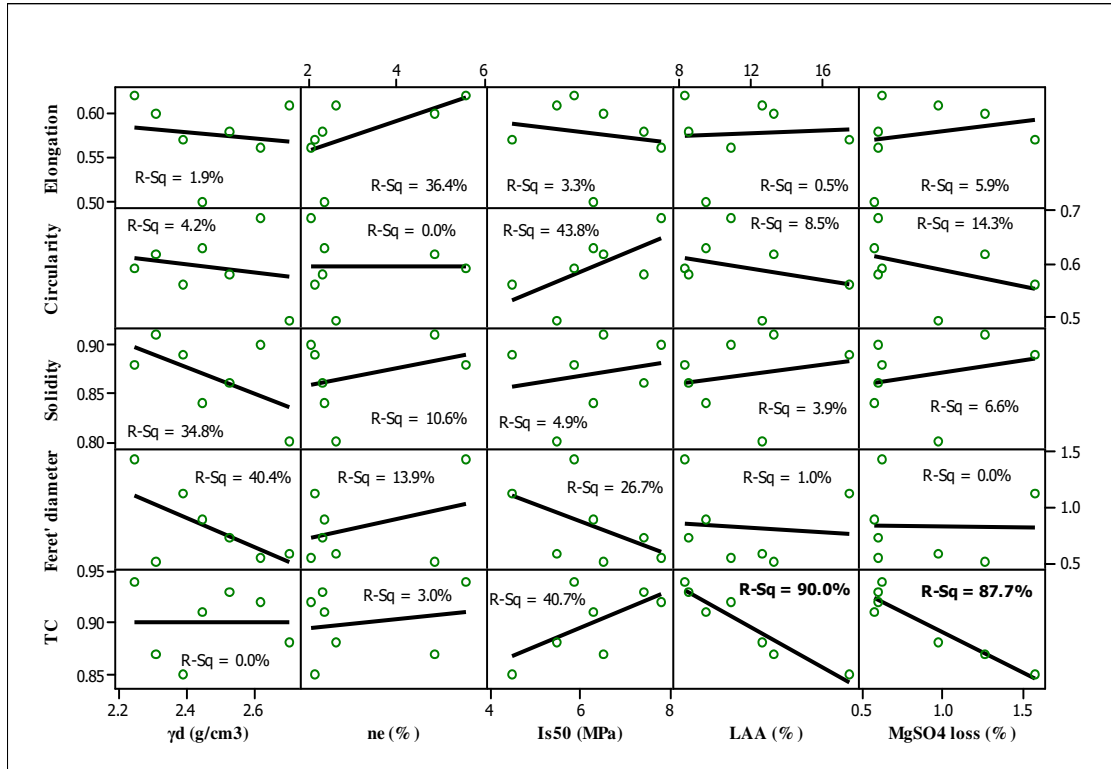
Fig. 12. Relationship between textural indices and mineralogical composition

نیز رابطه معنی‌داری دارد ($R^2 = 0/41$). به نظر می‌رسد تنوع در کانی‌شناسی و اعمال بار به صورت متمرکز در آزمایش بار نقطه‌ای موجب تنوع در مقادیر شاخص بار نقطه‌ای حتی برای یک نوع سنگ می‌گردد. لذا می‌توان گفت که استفاده از شاخص‌های بافتی برای تخمین

همان‌طور که از شکل (۱۳) پیداست، از بین شاخص‌های بافتی تنها ضریب بافتی (TC) رابطه خطی معنی‌دار قوی با ویژگی‌های دوام مانند شاخص افت لس آنجلس ($R^2 = 0/90$) و افت وزنی سولفات منیزیم ($R^2 = 0/88$)، نشان می‌دهد. همچنین این شاخص با مقاومت بار نقطه‌ای

تخمین ویژگی‌های دوام مورد استفاده قرار گیرند. ذکر این نکته لازم است که سایر شاخص‌های بافتی اندازه‌گیری شده در این مطالعه ارتباط معنادار قابل توجهی با ویژگی‌های مقاومتی نشان ندادند (شکل ۱۳).

ویژگی‌های مقاومتی بایستی با احتیاط صورت گیرد. این در حالیست که در مورد شاخص‌های بیان کننده دوام سنگ مانند LAA و افت وزنی سولفات منیزیم، پارامترهای بافتی نظیر TC می‌توانند به عنوان شاخصی مطمئن جهت



شکل ۱۳. ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی - مکانیکی و شاخص‌های بافتی

Fig. 13. Relationship between physical-mechanical characteristics and textural indices

وزنی کمتری می‌باشند و در مقابل عوامل مخرب آسیب بیش‌تری به نمونه‌های داسیتی وارد کرده‌اند. در این میان، نمونه تراکی‌آندزیت بازالتی S2، دارای کمترین افت وزنی (۵۹٪ درصد) در محلول سولفات منیزیم بوده و نمونه داسیتی S5، بیشترین افت وزنی (۵۸٪ درصد) را دارد. - در بین کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌های مورد مطالعه، کانی‌های مافیک ارتباط نسبتاً معناداری با شاخص لس‌آنجلس ($R^2 = ۰/۴۳$) و تخلخل موثر ($R^2 = ۰/۴۴$) نشان دادند. این کانی‌ها معمولاً متأثر از شرایط سطحی هوازده شده و در معرض سایش به راحتی از سنگ جدا می‌شوند. بنابراین درصد چنین کانی‌هایی می‌تواند در تعیین مقاومت سایشی سنگ‌ها نقش مهمی داشته باشد. کانی‌های فلدسپار و مافیک (آمفیبول، پیروکسن و بیوتیت) با توجه به غیر هم‌بعد بودن، ارتباط نسبتاً معنی‌داری با

۴- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش را می‌توان به شرح ذیل خلاصه کرد:

- نتایج آزمایش لس‌آنجلس نمونه‌های مورد مطالعه نشان داد که؛ نمونه‌های آندزیتی نسبت به نمونه‌های داسیتی دارای مقدار سایش لس‌آنجلس کمتری می‌باشند. برای مثال نمونه S4 که یک سنگ تراکی‌آندزیت است کمترین مقدار سایش لس‌آنجلس (۸/۲ درصد) را دارد در حالی که نمونه S5 که یک سنگ داسیتی می‌باشد دارای بیش‌ترین مقدار سایش لس‌آنجلس در بین نمونه‌های مورد مطالعه (۱۷/۵ درصد) است. در کل می‌توان گفت که نمونه‌های آندزیتی نسبت به نمونه‌های داسیتی در مقابل سایش دارای دوام بیش‌تری می‌باشند.

- نتایج آزمایش مخرب سولفات منیزیم نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که نمونه‌های آندزیتی دارای افت

- mechanical properties of rocks. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(7): 637.
- Fereidooni, D., and Sousa, L (2022) Predicting the Engineering Properties of Rocks from Textural Characteristics Using Some Soft Computing Approaches. *Material*, 15: 7922. doi:10.3390/ma15227922.
- Franklin, J. A (1985) Suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 22(2): 51-60. doi: 10.1016/0148-9062(85)92327-7.
- Ghobadi, M. H, Amiri, M., Aliani, F (2011) The study of engineering geological properties of peridotites in Harsin, Kermanshah province (A case study). *Journal of Engineering Geology*, 14(1): 105-132. doi: 10.22084/nfag.2019.19208.1375 (in Persian).
- Ghobadi, M. H., Ahmadi, L., Miri, M. M., Jafari, S. R (2019) The relationship between petrology and physical and mechanical properties of Granitoid rocks. *New Findings In Applied Geology*, 12(24): 54-64. doi: 10.22084/nfag.2018.14348.1268 (in Persian).
- Hemmati, A., Ghafoori, M., Moomivand, H., & Lashkaripour, G. R (2020) The effect of mineralogy and textural characteristics on the strength of crystalline igneous rocks using image-based textural quantification. *Engineering Geology*, 266: 105467.
- Howarth, D. F., and Rowlands, J. C (1986) Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties. *Geotechnical Testing Journal*, 9: 169-179. doi: 10.1520/gtj10627j.
- Kolay, E., and Baser, T (2017) The effect of the textural characteristics on the engineering properties of the basalts from Yozgat region, Turkey. *Journal of the Geological Society of India*, 90: 102-110.
- Schulz, B., Sandmann, D., Gilbricht, S (2020) SEM-Based Automated Mineralogy and Its Application in Geo- and Material Sciences. *Minerals*, 10: 1004. doi:10.3390/min10111004. 10.3390/min10111004.
- Ulusay, R (2014) *The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014*, Springer, 201 p.
- Williams, H., Turner, F. J., Gilber, C. M (1954) *Petrography: An Introduction to the Study of Rocks in Thin Section*. W.H. Freeman Company: San Francisco, CA, USA, 406 p.
- Zorlu, K., Ulusay, R. T., Ocakoglu, F., Gokceoglu, C. A., Sonmez, H (2004) Predicting intact rock properties of selected sandstones using petrographic thin-section data. *International Journal of Rock Mechanics Mineral Science*, 41: 93-98. doi:10.1016/j.ijrmms. 2004.03.025.
- شاخص کشیدگی نشان دادند. همچنین ارتباط بین درصد این کانی‌ها با TC نیز قابل ذکر می‌باشد.
- ضریب بافتی (TC) رابطه خطی معنی‌دار قوی با ویژگی‌های دوام مانند شاخص سایش لس‌آنجلس ($R^2 = 0/90$) و افت وزنی سولفات منیزیم ($R^2 = 0/88$)، نشان داد. همچنین این شاخص رابطه معنی‌داری با مقاومت بار نقطه‌ای ($R^2 = 0/41$) دارد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که شاخص‌های بافتی نظیر TC که انواع پارامترهای بافتی مانند شکل، اندازه و آرایش ذرات را همزمان در نظر می‌گیرند، می‌توانند در تخمین ویژگی‌های دوام سنگ‌دانه‌ها با قابلیت اطمینان زیادی مورد استفاده قرار گیرند.

References

- Alber, M., Kahraman, S (2009) Predicting the uniaxial compressive strength and elastic modulus of a fault breccia from texture coefficient. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42: 117-127. doi:10.1007/s00603-008-0167-x.
- Aligholi, S., Lashkaripour, G. R., Ghafoori, M., Azali, S. T (2017) Evaluating the relationships between NTNU/SINTEF drillability indices with index properties and petrographic data of hard igneous rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50: 2929-2953.
- Anon, O (1979) Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1: rock and soil materials. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 19(1): 364-437. doi: https://doi.org/10.1007/BF02600503.
- ASTM (2005) Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. ASTM C88-05. ASTM International West Conshohocken, 4 p.
- ASTM (2008) C131/C131M: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. *Annual Book of American Society for Testing materials ASTM Standards*, West Conshohocken, 5 p.
- Atici, U., Comakli, R (2019) Evaluation of the physico-mechanical properties of plutonic rocks based on texture coefficient. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 119(1): 63-69.
- Ersoy, H., and Acar, S (2016) Influences of petrographic and textural properties on the strength of very strong granitic rocks. *Environmental Earth Sciences*, 75: 1461-1476. doi: 10.1007/s12665-016-6277-y.
- Fereidooni, D (2022) Importance of the mineralogical and textural characteristics in the

Investigating the relationship between textural indices with the strength and durability properties of igneous ballast aggregates

M. Torabi-Kaveh^{1*}, M. M. Miri², M. Khodami³ and F. Haidary⁴

1, 3- Assist. Prof., Dept. of Geology, Yazd University, Yazd, Iran

2- Assist. Prof., Dept. of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

4- M. Sc. of Engineering Geology, Yazd University, Yazd, Iran

*m.torabikaveh@yazd.ac.ir

Received: 2023.5.30 Accepted: 2023.7.20

Abstract

Abrasion and chemical durability of ballast aggregates are considered to be essential characteristics that affect the performance of structures such as railway. Los Angeles abrasion index and weight loss in magnesium sulfate solution are among the most important parameters of rocks that are usually used in engineering designs. These parameters are largely influenced by the texture characteristics of rocks. In this research, seven types of extrusive igneous rocks were investigated in order to evaluate the correlation of textural indices with mineralogical, physical and mechanical characteristics. Engineering characteristics including density, porosity, point load strength, Los Angeles abrasion index and weight loss of magnesium sulfate were measured in the laboratory for the samples. Also, the thin section photographs of the samples were analyzed in ImageJ and JMicroVision image analyzer softwares. Textural indices (texture coefficient, elongation index, circularity index, solidity index and ferret diameter index) were calculated based on the image analysis for all the samples. Finally, the relationships between these indices with mineralogical and physical-mechanical characteristics of the rocks were evaluated. The results showed that non-dimensional minerals such as feldspar and mafic minerals (amphibole, pyroxene and biotite) have a relatively significant relationship with elongation index. Also, very strong linear relationships were observed between Los Angeles abrasion index ($R^2 = 0.90$) and weight loss of magnesium sulfate ($R^2 = 0.877$) with texture coefficient. Finally, based on the results, it is inferred that textural indices such as texture coefficient can be used in estimating the durability characteristics of aggregates with high reliability.

Keywords: Mechanical characteristics, Mineralogy, Textural indices, Igneous rock ballast

Introduction

Previous studies on rock engineering behavior have shown that microstructural, crystal sizes and mineralogical characteristics of rocks control their behavior under applied stresses. The effects of textural properties on the physical and mechanical properties of rocks have been investigated from different aspects. The geometric relationships between minerals define texture of a rock that It can be extracted through study of rock thin sections together with various automated and combined analytical image processing methods (Scholz et al., 2020). Many researches have used textural indicators to estimate the strength and durability characteristics of rocks (e. g. Zorlu et al. 2004; Alber and Kahraman 2009; Ersoy and Acar 2016; Aligholi et al. 2017; Ghobadi et al. 2011; Kolay and Baser 2017; Ghobadi et al. 2019; Fereidooni and Sousa 2022). In this

study, the relationship between textural characteristics with resistance characteristics (such as Los Angeles abrasion index, weight loss of magnesium sulfate and point load strength), physical (effective porosity and density) and mineralogical characteristics (modal percentage of minerals) are investigated for 7 different types of extrusive igneous rocks used in railway ballast. The textural indices of the aggregate samples were determined using the mineralogical and textural features (including the mineral shapes and the groundmass volume percent). Also their relationship with the above mentioned parameters were evaluated.

Materials & Methods

With the aim of evaluating the potential of using igneous rocks in railway ballast, a variety of extrusive igneous rocks including lavas, sills

and basic to intermediate dikes (Cretaceous and younger than Cretaceous) and acidic volcanic rocks from Neogene to Pliocene were selected and sampled from 6 locations. A number of the rock blocks were extracted from each location to prepare laboratory samples. Also, 15 to 20 kg of the rocks was prepared to carry out durability tests in the engineering geology laboratory of Yazd University. Detailed petrographic properties of the samples were determined to investigate the relationship between the durability of the rocks and their mineralogy and textural characteristics. Some common physical tests, including effective porosity (n_e) and unit weight (γ) measurements were performed with ISRM standard method on the samples. For point load testing, irregular block samples were tested by ISRM standard method (Franklin, 1985). The Los Angeles abrasion (LAA) test was performed on the samples using the ASTM-C131 (2008) standard method. The rock soundness test was also done using magnesium sulfate solution with ASTM C88 (2005) standard.

Discussion of Results

The relationship between mineralogical and physical-mechanical characteristics was investigated by the Minitab software. The results showed that among the rock minerals, only mafic minerals have relatively significant relationship with Los Angeles abrasion index ($R^2 = 0.433$) and effective porosity ($R^2 = 0.436$). Since mafic minerals are unstable in surface conditions, they are more likely to be weathered and can increase porosity. The significant relationship between the percentage of mafic minerals and the loss of Los Angeles index confirms this issue. Because of that these minerals are usually weaker than the other rock minerals, they easily separated from the rock during abrasion and/or exposure to corrosive solution. Based on the results, two textural indices of elongation and textural coefficient (TC) show an almost significant relationship with the percentage of feldspar and mafic minerals. On the other hand, the groundmass (Gm.) has no correlation with the mentioned indicators. Due to the non-equidimensional shape of the feldspars and mafic minerals (amphibole, pyroxene and biotite), their significant relationship with elongation index can be justified. Among the textural indices, only the texture coefficient (TC) has a strong significant linear relationship with durability

characteristics such as Los Angeles abrasion index ($R^2 = 0.90$) and weight loss of magnesium sulfate ($R^2 = 0.877$). Although this index has a significant relationship with point load strength index ($R^2 = 0.407$). It seems that variation in mineralogy and concentrated load application in point load test, causes variation in point load index values even for the same type of rock. Therefore, it can be concluded that the use of textural indices to estimate the strength characteristics should be done with caution. However, in the case of rock durability indices such as LAA and weight loss of magnesium sulfate, textural parameters such as TC can be used as reliable indicators to estimate durability characteristics.

Conclusions

The most important findings of this research are summarized as follows:

- The results of the Los Angeles and the magnesium sulfate tests on the studied samples show that the andesite samples have lower abrasion and weight loss values than the dacite samples.
- Among the minerals forming the studied rocks, the mafic minerals show relatively significant relationship with Los Angeles index ($R^2 = 0.433$) and effective porosity ($R^2 = 0.436$). These minerals are usually affected by weathering in surface conditions and separate easily from the rock under abrasion. Therefore, the amount of such minerals can play an important role in determining the abrasion resistance of rocks. The feldspar and mafic minerals (amphibole, pyroxene and biotite) represent a relatively significant relationship with elongation index.
- Texture coefficient (TC) has a strong significant linear relationship with durability characteristics such as Los Angeles abrasion index ($R^2 = 0.90$) and magnesium sulfate weight loss ($R^2 = 0.877$). Also, it shows a significant relationship with point load strength index ($R^2 = 0.407$). According to the obtained results, textural indices such as TC (including the shape, size and arrangement of particles), can estimate the durability properties of aggregates with high reliability.