

طبقه‌بندی سنگ‌های آهکی براساس خصوصیات سنگ‌شناسی و ترکیب شیمیایی با استفاده از روش پردازش تصویر و شناخت الگو فرزانه خرم^۱؛ حسین معماریان^۲؛ بهزاد تخم‌چی^۳؛ امین حسین مرشدی^{۴*}

۱- دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، farzanehkhorrarn@ut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، memarian@ut.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی معدن، تفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، tokhmechi@alumni.ut.ac.ir

۴- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، morshedy@yazd.ac.ir

چکیده

رویکرد پردازش تصویر، یکی از ابزارهای کاربردی در مقوله طبقه‌بندی و تشخیص دیجیتال نوع سنگ‌شناسی است. در این مقاله، تفکیک نمونه‌های سنگ آهک از نظر میزان خلوص کربنات کلسیم، با استفاده از کمی‌سازی ویژگی‌های تصویری نمونه‌ها و الگوریتم آماری بی‌زین، مطالعه شده است. بدین منظور تعداد ۳۰ نمونه سنگ آهک از معدنی در منطقه لاج سمنان برداشت شد. هریک از این نمونه‌ها توسط سنگ‌شکن فکی خرد و بخش‌هایی از نمونه با ابعاد ۷-۲/۵ سانتی‌متر، با استفاده از سرندهی با دهانه ۱ اینچ جدا شده و - بررسی شدند. تعداد ۶۰ تصویر از ۳۰ نمونه در شرایط یکسان تهیه و ویژگی‌های متفاوتی از این تصاویر استخراج شد. به‌منظور کاهش ابعاد ویژگی‌های استخراج شده و انتخاب ویژگی‌های مستقل، ابتدا ضرایب همبستگی اسپیرمن ویژگی‌های گوناگون محاسبه شده و بدین ترتیب تعداد ۱۸ ویژگی مستقل از یکدیگر انتخاب شد. برای افزایش قابلیت تعمیم مدل و با هدف تعیین کوچکترین مجموعه داده‌ها با بالاترین خاصیت پیشگویانه، روش آماری چند متغیره تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر روی ۱۸ ویژگی موردنظر انجام شد، که در نتیجه، ۷ مؤلفه اصلی اول با مدل‌سازی ۹۱٪ تغییرپذیری، برای تشکیل مدل آماری انتخاب شد. نتایج طبقه‌بندی آماری بی‌زین با توجه به دانش پیشین از نوع نمونه‌های موجود در هر تصویر نشان داد که ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر به‌خوبی معرف و تفکیک‌کننده نمونه‌های مختلف می‌باشد. بهترین عملکرد الگوریتم طبقه‌بندی بر اساس نرخ طبقه‌بندی کننده صحیح به ترتیب مربوط به سنگ دولومیت، آهک و آهک دولومیت بود که بیان‌گر دقت حدود ۸۰٪ است. این نتایج، به‌همراه افزایش سرعت عملیات، کاهش هزینه‌ها و عدم نیاز به حضور دایم متخصص، از نقاط قوت استفاده از این روش است.

کلمات کلیدی

پردازش تصویر دیجیتال، طبقه‌بندی سنگ‌شناسی، بی‌زین، سنگ آهک، شناخت الگو

* نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

امروزه، در زمینه کاربرد روش‌های پردازش تصویر در راستای طبقه‌بندی مواد معدنی از نظر سنگ‌شناسی و جداسازی کانه از باطله تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است. اوستریچ و همکاران (۱۹۹۵) در پژوهشی تلاش کرد، تا با استفاده از ویژگی‌های رنگی نمونه‌های معدنی موجود در تصاویر، ترکیب کانی‌های تشکیل دهنده نمونه را مشخص و طبقه‌بندی کند [۷]. پرز و همکاران (۱۹۹۹)، شناسایی ترکیب سنگ‌شناسی نمونه‌های معدنی موجود در تصویر را برپایه استخراج ویژگی‌های رنگی و طبقه‌بندی مورد مطالعه قرار داده‌اند [۸]. در پژوهشی شناسایی و تفکیک انواع مختلف سنگ آهک، برحسب طبقه‌بندی دآن‌هام با استفاده از ویژگی‌های تصویری انجام شده است [۹]. پرز و همکاران (۲۰۱۱)، براساس انتخاب ویژگی‌های رنگی و بافتی تصاویر رقومی، بخش‌بندی، طبقه‌بندی و تفکیک سنگ‌شناسی با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان^۲ (SVM) انجام داده و ترکیب سنگ‌ها در دو حالت مرطوب و خشک را محاسبه کردند [۱۰]. سینگ و همکاران (۲۰۱۱)، تفکیک سنگ‌شناسی لایه‌های مختلف یک معدن سنگ آهن در هند را براساس ویژگی‌های مختلف بافتی و رنگی تصاویری که از فاصله یک متری این نمونه‌ها گرفته شده بود، انجام دادند [۱۱]. در پژوهشی برای تعیین ترکیب شیمیایی سنگ آهک، مدلی بر پایه بینایی ماشینی طراحی شد، که بر اساس ویژگی‌های تصویری خرده سنگ‌ها، در معدن با موفقیت استفاده شد [۱۲]. دونسکوی و همکاران (۲۰۱۵)، از ویژگی‌های بافتی نمونه‌های آهن در زیر میکروسکوپ، برای شناسایی و تشخیص هماتیت، گوتیت و انواع متخلخل آن‌ها از یکدیگر استفاده کردند [۱۳]. در پژوهشی با استفاده از ویژگی‌های بافتی- فضایی تصاویر سنگ، به‌منظور تعیین توالی‌های رسوبی، الگوریتم‌های طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی به‌کار گرفته شده است [۱۴]. از جدیدترین یافته‌های پژوهشی در این زمینه، می‌توان به ارائه روش‌های تعاملی بخش-بندی تصاویر سنگ‌شناسی براساس تلفیق نظر کارشناسان و روش تجزیه و تحلیل خودکار تصاویر و همچنین استفاده از ویژگی‌های استخراجی روش لیزر سه بعدی، به‌منظور طبقه‌بندی سنگ‌شناسی نام برد [۱۵، ۱۶].

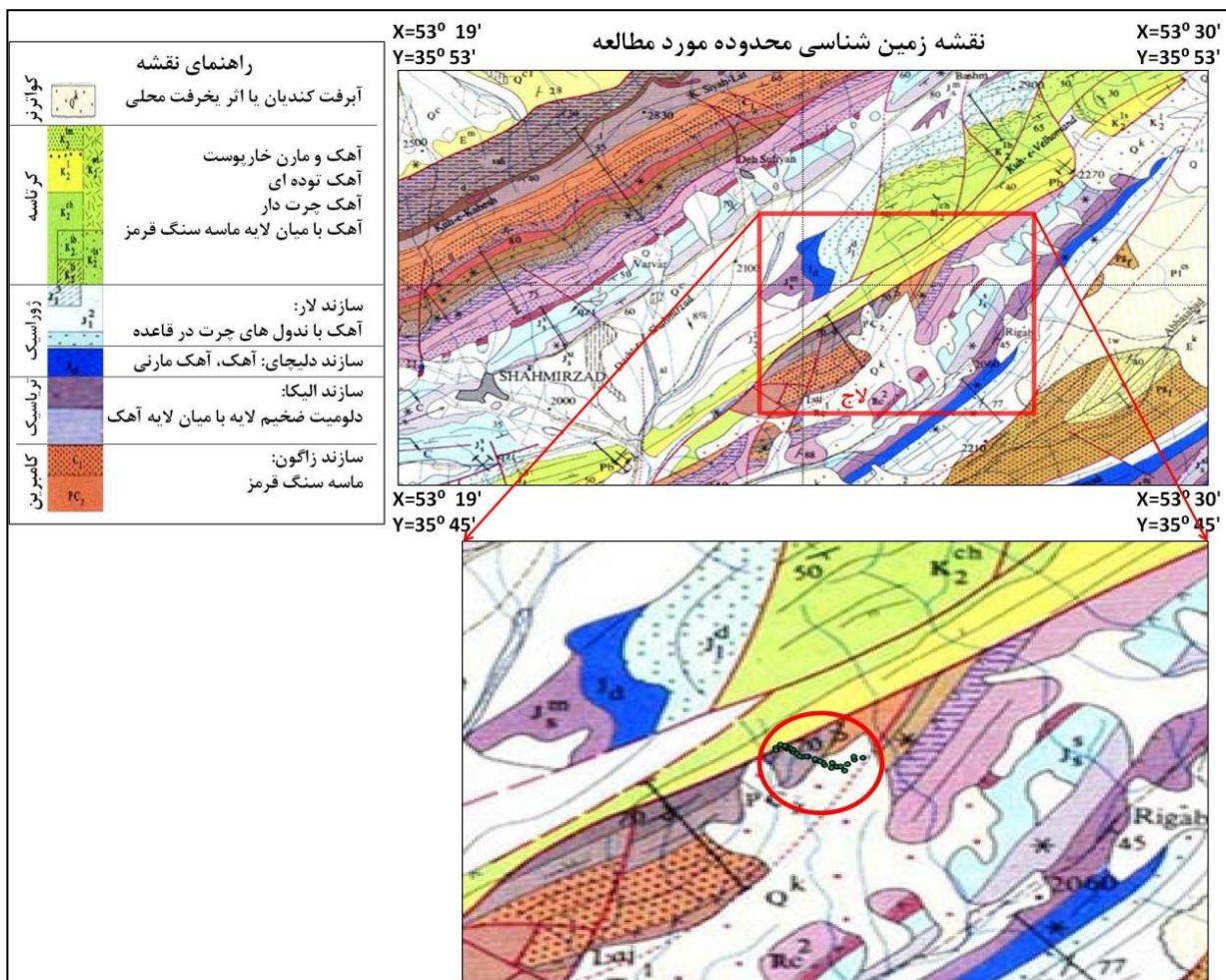
سنگ‌های رسوبی محیط در برگیرنده هیدروکربورها، کانه‌های مختلف، و منابع آب می‌باشند، که تنها واحدهای خاصی از توالی‌های رسوبی ارزش اقتصادی دارند. اکتشاف این سنگ‌ها، مستلزم بررسی و تفکیک رسوبات براساس توصیف ویژگی‌های بافتی، ترکیبات شیمیایی و خصوصیات سنگ‌شناسی آن‌ها است. مطالعه سنگ‌های رسوبی به دو صورت کلی ماکروسکوپی و میکروسکوپی انجام می‌شود. مطالعه ویژگی‌های ماکروسکوپی به ویژگی‌های کلی سنگ‌شناسی اطلاق می‌شود که بدون استفاده از میکروسکوپ در رخنمون توالی‌های رسوبی، نمونه دستی و مغزه حفاری، قابل رویت است [۲۰، ۲۱]. در بررسی‌های میکروسکوپی، مقاطع با تصویر بزرگنمایی شده بررسی می‌شود که هدف این مطالعات، دستیابی به ویژگی‌های ریزمقیاس واحدهای سنگی از جمله ابعاد دانه‌ها، تخلخل، تراوایی و غیره است [۲-۴]. کربنات کلسیم (کلسیت) کانی اصلی تشکیل‌دهنده سنگ آهک است که کمتر به صورت خالص در طبیعت یافت می‌شود. سنگ آهک خالص، بیشتر به صورت سفید تا خاکستری بسیار روشن قرار دیده می‌شود و حضور ناخالصی‌هایی مثل اکسید آهن، اکسید آلومینیوم و اکسید منیزیم آن‌ها را رنگین می‌سازد. درصد ناخالصی‌های ذکر شده در اغلب موارد در سنگ آهک پایین است، اما به علت اینکه معمولاً به صورت یون‌های محلول در ترکیب سنگ حضور دارند، وجود مقدار اندکی از آن‌ها هم می‌تواند موجب تغییر رنگ و بافت لایه آهکی شود. بررسی ترکیب شیمیایی به‌منظور تعیین قابلیت کاربرد سنگ آهک استخراجی و محصولات آن‌ها در صنایع و مصارف گوناگون، اهمیت قابل توجهی دارد. روش‌های تجزیه‌ای متداول به‌منظور تعیین ترکیب شیمیایی هزینه‌بر بوده و عملیات آماده‌سازی نمونه‌ها در این روش‌ها بسیار زمان‌بر است. از سویی، ابعاد متفاوت محصولات خردایش سنگ آهک در صنایع مصرفی مختلف، حایز اهمیت است. بنابراین طراحی روشی هوشمند به‌منظور تعیین ترکیبات شیمیایی سنگ آهک با استفاده از ویژگی‌های تصویری نمونه‌ها بسیار مقرون به صرفه خواهد بود [۵، ۶].

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مذکور در ۲۵ کیلومتری شمال سمنان، در جنوب شرقی شهمیرزاد و شرق دربند، در منطقه‌ای معروف به لاج قرار دارد که دارای طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۲۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی است. ارتفاع این محدوده از سطح دریا ۲۰۵۰ متر می‌باشد و دربرگه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ استان سمنان واقع شده است [۱۸]. در شکل ۱، محدوده مورد مطالعه در نقشه زمین شناسی سمنان به همراه موقعیت نمونه‌های برداشته شده نشان داده شده است. بر این اساس، قسمت عمده نمونه‌های برداشته شده از آهک-های سازند الیکا و بخش کوچکی از آن از مربوط به آهک-های دوره کرتاسه و بخشی مربوط به آبرفت کندیان^۳ می‌باشد. در محدوده مذکور ضخامت لایه‌های آهک بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر متغیر است، که شیب آن‌ها به سمت جنوب و امتداد آن‌ها شرقی- غربی است. دو نوع آهک در محدوده دیده می‌شود، که یکی به صورت آهک توده‌ای و دیگری با ساخت لایه بندی است. آهک لایه‌بندی دارای شیبی کمتر از ۳۵ درجه به سمت شمال شیب است؛ درمحدوده مورد مطالعه، پنج باند آهکی و دولومیتی قابل مشاهده است [۱۸].

مطالعات محدودی در کشور، در زمینه تعیین درصد آهن در نمونه‌های هماتیت، با توجه به ویژگی‌های تصویری نمونه‌های پودر شده هماتیت پرداخته شده است. نتایج نشان داد، که از روی ویژگی‌های تصویری نمونه‌ها می‌توان با دقت قابل قبولی به درصد آهن در نمونه‌های هماتیت دسترسی پیدا کرد [۱۷]. در موارد بیان شده دیده می‌شود، که نتایج تحلیل تصاویر بحث شده با واقعیت‌های زمین شناسی سازگاری بالایی دارد. این هم خوانی می‌تواند به علت کمی سازی ویژگی‌های تصویری معرف باشد که به کنترل عدم قطعیت‌ها و حذف خطاهای انسانی کمک می‌کند. انجام تحقیقات گسترده‌تر در خصوص ارتقاء عملکرد مراحل مختلف این رویکرد در کاربردهای گوناگون باعث می‌شود، تا ضعف‌هایی از جمله دقت پایین و عدم عملی بودن این روش در برخی شرایط تا حد امکان کاهش یابد. این امر به گسترش این رویکرد به عنوان یک حسگر بینا در زمینه کنترل کیفیت برخط در مراحل مختلف معدن کاری کمک خواهد کرد.

در این مقاله، به منظور مطالعه نمونه‌های سنگ آهک تهیه شده براساس ترکیب شیمیایی آن‌ها، امکان طبقه‌بندی نمونه‌ها بر مبنای میزان خلوص کربنات کلسیم و با توجه به ویژگی‌های تصویری انجام گرفته است. بدین منظور از قطعات خرد شده نمونه‌ها عکس برداری و بخش بندی اجزای مختلف تصویر انجام می‌شود. طبقه‌بندی نمونه‌ها در یکی از سه گروه سنگ آهک، آهک دولومیتی و دولومیت براساس ویژگی‌های مختلف استخراجی از اجزای تصاویر شامل ویژگی‌های بافتی، رنگی و ریخت-شناسی به عنوان ورودی طبقه‌بندی کننده و با استفاده از الگوریتم آماری بیزین صورت می‌پذیرد. با توجه به نکات ذکر شده تغییرات ترکیب شیمیایی در نمونه‌ها بر روی ویژگی‌های ظاهری آن‌ها تاثیر گذار بوده و همین امر طبقه‌بندی نمونه‌ها براساس ویژگی‌های ظاهری آن‌ها را ممکن می‌سازد.



شکل ۱: نمایش منطقه مورد مطالعه به همراه موقعیت نقاط نمونه برداری در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ استان سمنان.

پذیری منطقه مورد مطالعه از لحاظ ترکیب سنگ شناسی باشد. مشخصات کلی نمونه های برداشته شده روی نمونه دستی در جدول ۱ به تفصیل بیان شده است.

در نهایت، تعداد ۳۰ نمونه لب پری از قسمت های مختلف این محدوده به صورت تصادفی از یک باند آهکی و یک باند دولومیتی با استفاده از چکش برداشته شد. تلاش شده تا نمونه های برداشت شده تا حد امکان بیان گر تغییر-

جدول ۱: توصیف سنگ شناسی و دامنه تغییر درصد ترکیبات شیمیایی تشکیل دهنده گروه های مختلف

گروه سوم (دولومیت)	گروه دوم (سنگ آهک دولومیتی)	گروه اول (آهک)	توصیف سنگ شناسی	درصد ترکیب شیمیایی
ذرات درشت بلور (0.75 میلی متر) متخلخل ترد و شکننده خاکستری تیره حاوی لکه های قرمز، نارنجی، قهوه ای تیره	ذرات ریز بلور ($0.12-0.175$ میلی متر) کمی متخلخل ترد و شکننده شیری و خاکستری تیره رنگ، حاوی لکه های قهوه ای و خاکستری	ذرات ریز بلور متراکم تخلخل پایین ترد و شکننده شیری رنگ، صورتی و خاکستری روشن، حاوی رگه ها و بلورهای نمایان کلسیت و رگه های نمایان تیره رنگ		
۴۲/۸-۵۷	۵۷/۷-۶۲/۴	۸۰-۹۸	CaCO ₃	
۰/۱۹-۰/۴۵	۰/۱۶-۰/۲۷	۰/۰۵-۰/۲۸	Fe ₂ O ₃	
۰/۱۳-۱/۲۵	۰/۲۳-۰/۱۹	۰/۰۶-۰/۹۶	Al ₂ O ₃	
۴۱/۱۶-۵۴	۳۶/۱۲-۴۰/۳۲	۰/۸۴-۱۷/۲۲	MgCO ₃	

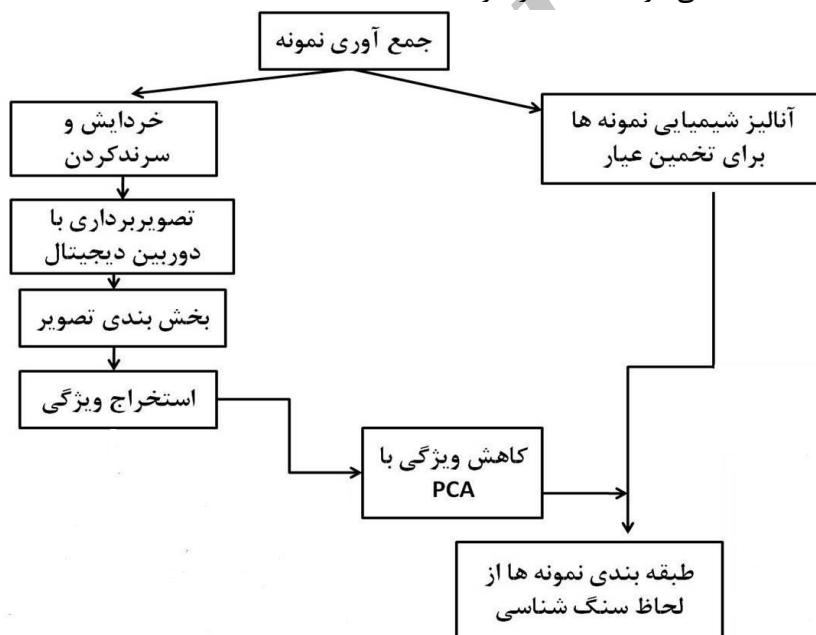
با دهانه ۱ اینچ جدا شده و تعداد دو تصویر از آن‌ها در حالت‌های مختلف گرفته شد. بدین ترتیب تعداد ۶۰ تصویر موجود است، که درصد ترکیبات شیمیایی آن‌ها در دسترس ماست.

۳- آماده سازی نمونه‌ها

نمونه‌های برداشته شده دارای جرم حدودی ۵ کیلوگرم و ابعاد اولیه ۲۵-۲۰ سانتی‌متر است. نمونه‌ها در ابتدا به دو قسمت مساوی تقسیم شدند، یک بخش از نمونه به‌منظور تجزیه شیمیایی به آزمایشگاه فرستاده شد و تحت شرایط استاندارد به روش شیمی تر درصد ترکیبات شیمیایی $CaCO_3$ ، $MgCO_3$ ، Fe_2O_3 ، Al_2O_3 اندازه گرفته شد. همچنین مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان از نظر سنگ‌شناسی مطالعه و بررسی شدند؛ بخش دیگر از هر نمونه به‌منظور تصویربرداری آماده سازی شد. برای این منظور هر نمونه با استفاده از سنگ‌شکن فکّی خرد شد (بخش‌های هوازده نمونه‌ها تراشیده و حذف شدند). پس از خردایش، بخش‌هایی از نمونه با ابعاد ۷-۲/۵ سانتی‌متر با استفاده از سرندها

۴- روش مطالعه

در این بخش، مراحل مختلف اجرای این الگوریتم از آماده سازی نمونه‌ها تا طبقه‌بندی سنگ‌ها بیان شده است. این مراحل شامل استخراج ویژگی‌های مورد نیاز از خرده‌های تشخیص داده شده این نمونه‌ها، آماده سازی داده‌ها، کاهش ابعاد داده‌ها و در نهایت تشخیص الگوهای نهان در داده‌های مورد بررسی از طریق طبقه‌بندی نمونه‌ها از لحاظ سنگ‌شناسی و تخمین ترکیبات شیمیایی آن‌ها است (شکل ۲).



شکل ۲: فلوچارت مراحل الگوریتم طبقه‌بندی سنگ براساس مشخصه‌های تصویری

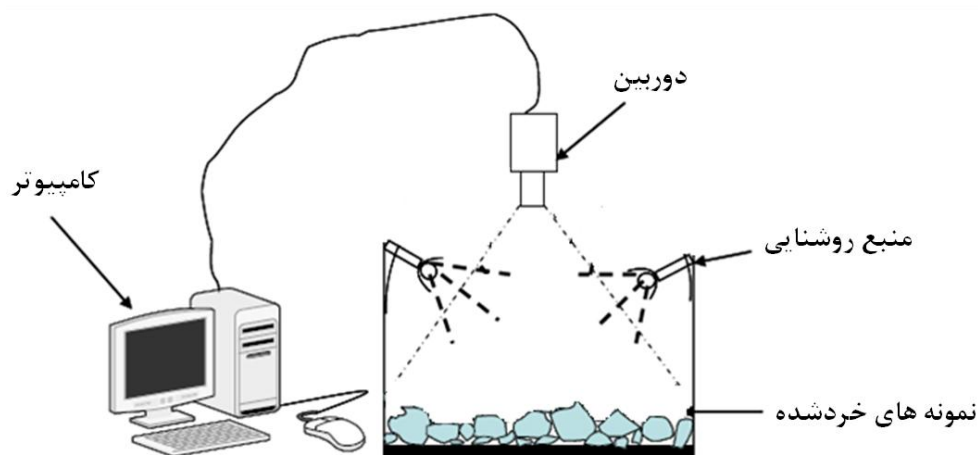
نتایج مهم است، در تمامی تصاویر دوربین در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از نمونه‌ها قرار داشت، همچنین دو لامپ مهتابی با قدرت ۹ وات، با نور سفیدرنگ در فاصله ۲۵ سانتی‌متر از نمونه‌ها به‌عنوان منبع نور استفاده شدند [۱۹]. به‌منظور ممانعت از تابش نورهای اضافی در

۴-۱- ثبت تصاویر

در این پژوهش، به‌منظور ثبت تصاویر از دوربین پاناسونیک مدل DMC-LC 50 استفاده شد. به‌دلیل اینکه ثابت بودن سیستم و شرایط نورپردازی و تصویربرداری در

آن‌ها ۰/۱۵ میلی‌متر بر هر پیکسل در جهات افقی و عمودی است. در شکل ۳، نحوه تصویربرداری استاندارد از خرده‌های سنگ نمایش داده شده است.

هنگام تصویربرداری، نمونه‌ها از ۴ طرف توسط صفحات چوبی با ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر، که دو به دو در فاصله ۴۰ سانتی‌متر به موازات یکدیگر قرار داشتند، احاطه شدند. پس از انتقال تصاویر به کامپیوتر، اندازه تصاویر 11544×2080 پیکسل بوده و قابلیت تفکیک مکانی



شکل ۳: طرح کلی شرایط ثبت تصاویر

تصویر خاکستری به‌همراه نوسازی تصویر حاصل تحت خصوصیات تصویر خاکستری، برای از بین بردن لکه‌های اضافی در تصویر استفاده شد. در نهایت عملگر بخش‌بندی، عملگر پردازشی آب‌فشان برای به پایان رساندن عملیات بخش‌بندی استفاده شد [۵]. در شکل ۴، نمونه تصویر گرفته و نحوه بخش‌بندی نمونه‌های سنگی خرد شده نمایش داده شده است.

۴-۲- بخش‌بندی تصاویر

هدف کلی بخش‌بندی تصاویر، تقسیم تصویر به بخش‌هایی است، که هر بخش نماینده یک خرده سنگ در تصویر باشد. کارایی این بخش وابسته به استخراج ویژگی‌های مطلوب از نواحی مناسب نماینده هر خرده سنگ می‌باشد. برای بهبود نتایج حاصل از بخش‌بندی از یک فیلتر میان‌های با پنجره 8×8 برای حذف جزئیات ناخواسته تصویر استفاده شد. اجرای عملگر پیش‌پردازشی سایش



شکل ۴: نمایش تصویر اولیه و بخش‌بندی شده نمونه خرد شده سنگ

پیکسل‌های تصویر در فرم طیف خاکستری از جمله، مؤلفه‌های رنگی قرمز، آبی، سبز، نوع رنگ، اشباع و شدت روشنایی محاسبه شد که در جدول ۲ نمایش داده شده است.

۳-۴- استخراج ویژگی‌ها

پس از مرحله بخش‌بندی و مجزا کردن خرده‌های سنگ از یکدیگر در یک تصویر، در مجموع ۳۹۲ نمونه (خرده سنگ) در کلیه تصاویر تشخیص داده شد، سپس ویژگی‌های متفاوت هر خرده سنگ در تصاویر مورد مطالعه استخراج شدند. ویژگی‌های رنگی و مقادیر مربوط به

جدول ۲: تعداد ویژگی‌های استخراج شده از خرده سنگ‌های مورد بررسی

ویژگی‌های رنگی	ویژگی‌های بافتی هم‌رخداد	ویژگی‌های ریخت شناسی
میانگین (۷)	تباين (۴)	طول محور بیشینه (۱)
نما (۷)	همبستگی (۴)	طول محور کمینه (۱)
واریانس (۷)	انرژی (۴)	نسبت طول محور بیشینه به کمینه (۱)
چولگی (۷)	همگنی (۴)	خروج از مرکز (۱)



شکل ۵: تفاوت طیف‌های رنگی نمونه‌های سنگی برداشت شده دولومیتی تا آهکی

۴-۴- کاهش ابعاد مجموعه داده

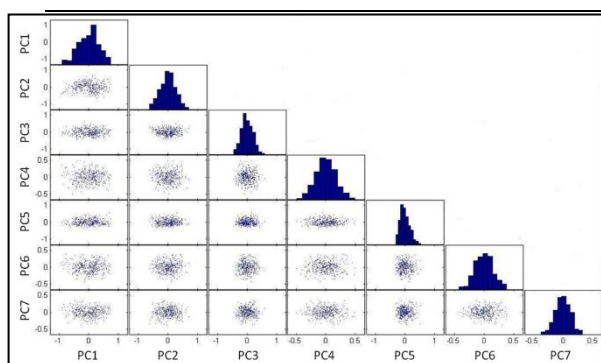
تعداد ۷۶ ویژگی در طول فرآیند استخراج ویژگی از ۳۹۲ نمونه (جزء) تشخیص داده شده در تصاویر استخراج شد. به‌منظور درک نحوه تغییرات ویژگی‌ها نسبت به یکدیگر، ضریب همبستگی اسپیرمن برای دسته داده‌ها محاسبه شد. طبق استانداردهای موجود تغییرات ثبت شده ویژگی‌هایی که دارای ضریب همبستگی ۱-۰/۷۵ هستند، به یکدیگر وابسته بوده و بررسی همه آن‌ها اطلاعاتی بیشتر از بررسی یکی از ویژگی‌ها در برنخواهد داشت. بدین ترتیب به‌منظور حذف ویژگی‌های نامناسب که پردازش را پیچیده کرده و کارایی یادگیری مدل را کاهش می‌دهند، پس از بررسی ضرایب همبستگی، ویژگی‌هایی که قدر مطلق ضرایب همبستگی آن‌ها با یکدیگر بیشتر از ۰/۶ باشد، در یک گروه قرار گرفت. سپس یکی از آن‌ها

نقش ویژگی‌های رنگی به‌عنوان معرف برای تفکیک سنگ‌شناسی‌های گوناگون و تخمین مقدار ترکیبات شیمیایی با توجه به برداشت نمونه‌ها از لایه‌های مختلف با رنگ‌های متفاوت و خلوص متفاوت کربنات کلسیم، به کار گرفته شد که در شکل ۵، این تفاوت‌های تصویری قابل مشاهده است. ویژگی‌های بافتی و ریخت‌شناسی سنگ آهک نیز با توجه به تغییرات شرایط بستر رسوبی و هوازدگی تغییر می‌کند [۲۰]. به‌طور مثال برای معدن سنگ آهک مورد مطالعه مشاهده، که نمونه‌های هوازده پس از خردایش تا حدودی شکل گرد به خود می‌گیرند، در صورتی که سنگ‌های آهک متراکم پس از خردایش از لبه‌های تیزی برخوردار شدند. از این رو، در صورتی که ویژگی‌های ریخت شناسی از تصاویر استخراج شده و در مدل سازی به‌کار گرفته شوند، ارتباط مشخصی را با ویژگی‌های نوع نمونه سنگ مورد بررسی از جمله درصد ترکیبات از خود نشان می‌دهند. تمام این جزئیات از قابلیت‌های ویژه روش‌های پردازش و ویژگی‌های تصویری نشأت گرفته شده است [۲۱، ۲۲].

کردن ویژگی‌ها از طریق تشکیل ترکیب خطی آن‌ها پرداخته شد. انتخاب پارامترهای مناسب در بین پارامترهای دیگر، یکی از مسائل حساس و مورد بحث است. براساس تحلیل عوامل اصلی، ۷ عامل اصلی اول بیش از ۹۰٪ از تغییرپذیری داده‌ها را توجیه می‌کنند که به همین دلیل برای طبقه‌بندی انتخاب شدند (جدول ۳).

جدول ۳: واریانس، درصد واریانس و واریانس تجمعی عوامل اصلی

عوامل اصلی	عامل اول	عامل دوم	عامل سوم	عامل چهارم	عامل پنجم	عامل ششم	عامل هفتم
واریانس داده‌ها	۰/۱۱۲۳	۰/۰۶۱۴	۰/۰۳۳۴	۰/۰۲۶۷	۰/۰۲۴۸	۰/۰۲۱۹	۰/۰۱۶
درصد واریانس	۳۴/۳۳۱	۱۸/۷۸	۱۰/۲۲	۸/۱۵	۷/۵۸	۶/۷۱	۴/۸۹
واریانس تجمعی	۳۴/۳۳۱	۵۳/۱۱۱	۶۳/۳۳۱	۷۱/۴۸۱	۷۹/۰۶۱	۸۵/۷۷۱	۹۰/۶۶۱



شکل ۶: بررسی رابطه بین هفت عامل اصلی استخراج شده

تفکیک گروه‌های سه گانه آهک، آهک-دولومیتی و دولومیت براساس عوامل استخراجی روش تحلیل مؤلفه اصلی بررسی شد. به‌کارگیری هر یک از عوامل به‌صورت مجزا نمی‌تواند مرز جدایش قابل قبولی را بین سه طبقه سنگ ترسیم نمایند. با استفاده از تعداد دو عامل، جدایش قابل قبولی بین سنگ آهک‌های گروه اول و دولومیت‌های مربوط به گروه سوم به‌وجود آمده است، اما سنگ‌های آهک دولومیتی گروه دوم دارای هم پوشانی با نمونه‌های دو گروه دیگر است. همچنین مشاهده می‌شود، که پراکندگی داده‌ها در محور مربوط به عامل دوم کمتر از عامل اول است، که مرتبط با خروجی‌های تحلیل عوامل اصلی است. با افزایش تعداد ابعاد عوامل در حالت سه بعدی، جدایش بین نمونه‌های آهک دولومیتی از دو گروه دیگر بسیار قانع‌کننده‌تر از حالت نمودار دوبعدی است (شکل ۷). از این رو، به‌منظور جدایش بهتر تمام گروه‌ها افزایش تعداد عوامل توجیه‌پذیر است که در بخش‌های بعدی تحلیل حساسیت برای تعیین تعداد عوامل بهینه بررسی شده است.

به‌صورت نماینده آن گروه به عنوان ویژگی معرف در نظر گرفته شد، از این رو، تعداد ۱۸ ویژگی مستقل از بین ۷۶ ویژگی استخراج شده انتخاب شد [۲۳]. با هدف اینکه کوچک‌ترین مجموعه داده‌ها با بالاترین خاصیت پیشگویانه را در دسترس داشته باشیم، با اعمال روش تحلیل مؤلفه-های اصلی^۴ (PCA) بر روی این ۱۸ ویژگی به خلاصه

در شکل ۶، رابطه بین هفت عامل اصلی مورد بررسی قرار گرفته که بیان‌گر مستقل بودن عامل نسبت به هم بوده و به‌صورت ماتریسی رابطه و توزیع عوامل اصلی نمایش داده شده است. ویژگی‌هایی که در هر مؤلفه، بیشترین بار فاکتوری را دارند به شرح زیر می‌باشند:

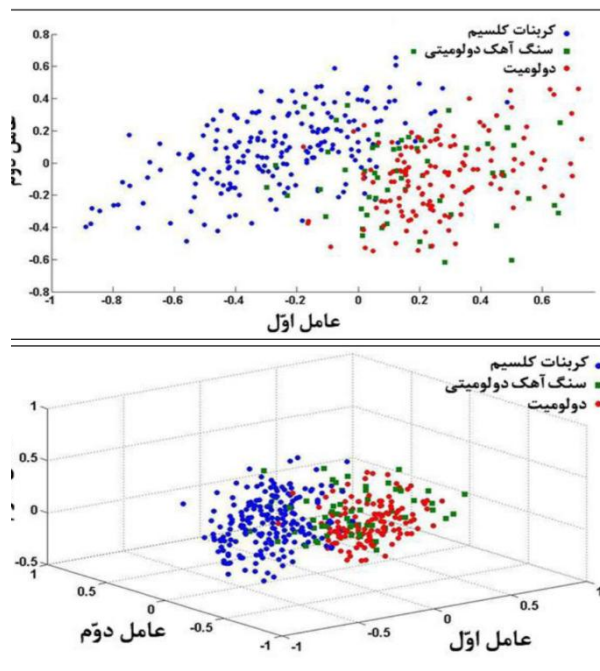
- عامل اول: دامنه مؤلفه آبی، نمای مؤلفه اشباع، تباین و دامنه میان چارکی اشباع؛
- عامل دوم: انحراف مطلق از میانگین شدت روشنایی، همبستگی، چولگی مؤلفه اشباع، خروج از مرکز؛
- عامل سوم: همبستگی، چولگی و کشیدگی مؤلفه نوع رنگ، انرژی، چولگی مؤلفه قرمز؛
- عامل چهارم: چولگی مؤلفه اشباع، همبستگی، خروج از مرکز، انرژی؛
- عامل پنجم: همبستگی، انحراف مطلق از میانگین شدت روشنایی، چولگی مؤلفه اشباع، میانگین مؤلفه قرمز؛
- عامل ششم: همبستگی، نمای مؤلفه نوع رنگ، نمای مؤلفه قرمز، دامنه میان چارکی اشباع؛
- عامل هفتم: دامنه میان چارکی و چولگی مؤلفه اشباع، انرژی، چولگی مؤلفه نوع رنگ؛

است. یعنی با توجه به تعداد رخداد هر طبقه در داده‌های آموزشی، مدل احتمالات اولیه هر گروه تعیین می‌شود. از تعداد کل ۳۹۲ خرده سنگ مورد بررسی که توسط فرآیند بخش‌بندی از کل تصاویر تشخیص داده شده است، بردار ویژگی ۷۰٪ نمونه‌ها معادل با ۲۷۴ نمونه به‌عنوان داده‌های آموزش و ۳۰٪ نمونه‌ها معادل با تعداد ۱۱۸ نمونه به‌عنوان داده‌های آزمون انتخاب شدند. بر این اساس چندین بار کل داده‌ها به‌صورت تصادفی به دو دسته داده‌های آموزشی و آزمون تقسیم شدند و صحت طبقه‌بندی مدل‌های احتمالات شرطی بیزین تشکیل شده بر اساس هر کدام از دسته داده‌ها با یکدیگر مقایسه شدند. در نهایت مدلی که کمترین خطا و بیشترین صحت طبقه‌بندی را به‌دست دهد، به‌منظور طبقه‌بندی، محاسبه و مقایسه نتایج انتخاب شد. لازم به ذکر است که داده‌های آموزش و آزمون به نسبت از داده‌های هریک از کلاس‌های موجود انتخاب شدند. در جدول ۴، تعداد نمونه‌هایی که در میان ۲۷۴ نمونه آموزشی به هر گروه تعلق دارند و میزان احتمالات اولیه تجربی هریک از سه گروه نامبرده را نشان می‌دهد.

جدول ۴: میزان احتمالات اولیه تجربی برای هریک از گروه‌ها

کلاس	معرف	تعداد	احتمال اولیه
اول	کربنات کلسیم	۱۰۸	٪۳۹
دوم	سنگ آهک دولومیتی	۷۵	٪۲۷
سوم	دولومیت	۹۱	٪۳۳

ماتریس درهم ریختگی^۵، نمایشگر نحوه اختصاص کسری از تمام داده‌های یک کلاس واقعی در کلاس دیگر (یا همان کلاس) توسط طبقه‌بندی کننده می‌باشد، برای ارزیابی قابلیت طبقه‌بندی استفاده می‌شود. نرخ طبقه‌بندی صحیح^۶ (CCR) مقداری کمی از صحت طبقه‌بندی کننده بوده و توسط ماتریس درهم ریختگی به‌صورت تقسیم درایه‌های قابل قبول ماتریس بر تعداد کل دسته‌ها محاسبه می‌شود و مقدار متوسط خطای ارائه شده در جداول برابر با (1-CCR) برحسب درصد است [۲۴]. در جدول ۵ مشاهده می‌شود که مقدار CCR برای گروه دوم (سنگ آهک-دولومیتی) کمتر از دو گروه دیگر است؛ این مساله می‌تواند به دلیل کمتر بودن احتمال اولیه تجربی برای این گروه نسبت به گروه‌های اول و سوم باشد. در



شکل ۷: نمودارهای پراکندگی دوبعدی و سه بعدی عامل اول، عامل دوم و عامل سوم براساس سه گروه سنگی

۵- بحث و بررسی

هدف اصلی طبقه‌بندی، اختصاص یک مشاهده (نمونه) بر پایه مقادیر ویژگی‌های گوناگون به یک کلاس مشخص است. طبقه‌بندی بیزین روشی تا حدی متفاوت برای این مسئله دارد، در این رویکرد، توزیع احتمالاتی وابسته به هر طبقه و ویژگی‌ها تخمین زده می‌شود، بنابراین یادگیری در این طبقه‌بندی عبارت از تخمین زدن این توزیع احتمالات وابسته است. پس از اینکه چنین تخمینی ساخته شد، مقادیر را مرتب کرده و طبقه‌ای که با احتمال بیشتری دربرگیرنده موضوع مورد مطالعه باشد، مشخص می‌شود. الگوریتم مورد استفاده به‌منظور طبقه‌بندی مدل احتمالاتی بیزین، به نوع تابع توزیع پارامترها وابسته نبوده است و بدین ترتیب از روش‌های غیر پارامتری برای تخمین تابع توزیع احتمالات شرطی استفاده می‌شود. نکته قابل ذکر، بحث احتمالات اولیه و دقت این احتمالات در فرآیند طبقه‌بندی که از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است [۲۴، ۲۵].

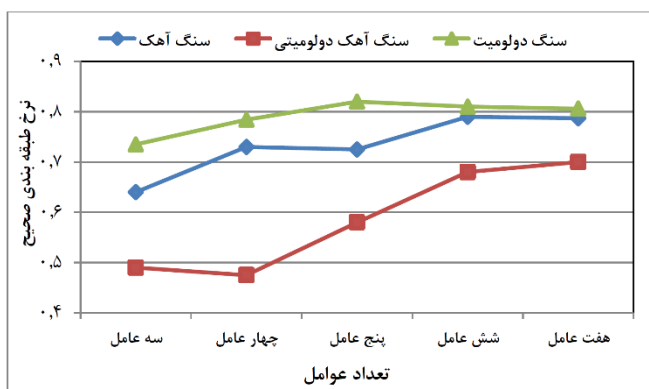
به علت عدم اطلاع از میزان احتمالات اولیه مربوط به حضور یا رخداد هریک از سه کلاس مورد نظر، این مسئله کاملاً رایج است که از احتمالات اولیه تجربی استفاده شده

سرعت عملیات، کاهش هزینه‌ها و عدم نیاز به حضور متخصص در صورت استفاده از این روش مطلوب است.

مجموع نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، که ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر به خوبی معرف و تفکیک‌کننده لیتولوژی‌های مختلف است. این نتایج با توجه به افزایش

جدول ۵: ماتریس درهم ریختگی برای داده‌های آموزشی و خطای طبقه‌بندی بیز برحسب درصد

خطای میانگین (%)	خطا (%)	تصمیم					
		دولومیت	سنگ آهک دولومیتی	کربنات کلسیم			
۲۱٪	۲۱	۹	۱۳	۷۸	کربنات کلسیم	آموزشی	
	۲۵	۱۴	۷۵	۱۱			سنگ آهک دولومیتی
	۱۷	۸۳	۱۶	۱			دولومیت
۲۳/۳۳٪	۲۱	۹	۱۲	۷۹	کربنات کلسیم	داده	
	۳۰	۱۰	۷۰	۲۰			سنگ آهک دولومیتی
	۱۹	۸۱	۱۷	۲			دولومیت



شکل ۸: بررسی احتمال موفقیت دسته‌بندی داده‌ها با افزایش

تعداد عوامل ورودی

به منظور تحلیل حساسیت خروجی طبقه‌بندی، تاثیر افزایش تعداد عوامل خروجی PCA (بین سه تا هفت عامل) بر نرخ صحت طبقه‌بندی بررسی شد. در این بررسی، افزایش تعداد عوامل بر طبقه‌بندی صحیح سنگ-های آهکی و دولومیتی اثر قابل توجهی نداشته است که می‌تواند متأثر از بالا بودن احتمال اولیه در طبقه‌بندی بیزین این دو گروه سنگ است، در مقابل افزایش تعداد ویژگی‌ها به شش عامل، باعث افزایش نرخ طبقه‌بندی تا ۰/۷ می‌شود. در مورد هر سه گروه سنگی، با افزایش تعداد عوامل ورودی به تعداد هفت عامل، مقدار CCR به یک مقدار ثابتی میل می‌کند (شکل ۸).

در راستای اعتبارسنجی فرآیند یادگیری بیزین، داده‌ها به نسبت آموزش ۷۰٪ و آزمون ۳۰٪ تقسیم شد و با توجه به روند رایج، داده‌های آموزش نسبت به داده‌های آزمون دارای نرخ طبقه‌بندی صحیح بالاتری است. در شکل ۹، احتمال طبقه‌بندی صحیح داده‌های آموزش و آزمون برای سه گروه سنگی نمایش داده شده است که احتمال بالای طبقه‌بندی داده‌های آموزش، بیان‌گر قابلیت بالای تعمیم‌پذیری این الگوریتم است.



شکل ۹: نمودار احتمال موفقیت دسته‌بندی براساس داده‌های

آموزش و آزمون

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، یک مدل احتمالاتی بی‌زین برپایه ویژگی‌های حاصل از آنالیز تصویر برای طبقه‌بندی سنگی ارائه شده است. در راستای بررسی امکان برقراری ارتباطی بین ویژگی‌های تصویری سنگ آهک در مقیاس ماکروسکوپی با ترکیب شیمیایی و سنگ‌شناسی آن‌ها انجام شده است. بدین ترتیب، خودکار بودن روش‌های مورد استفاده در درجه دوم اهمیت قرار گرفته است. به‌منظور اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی، تصاویر پردازش شده مربوط به نمونه‌های خرد شده آهکی (پس از حذف بخش‌های هوازده شده با تراشیدن دستی نمونه‌ها) از بخش‌های مختلف معدنی در شمال سمنان مطالعه شد و براساس ترکیب شیمیایی و سنگ‌شناسی طبقه‌بندی شدند. سپس تصاویر مربوط به هر نمونه بخش‌بندی و نواحی مرتبط به هر خرده سنگ مجزا جدا شد که تعداد ۷۶ ویژگی مربوط به هر ناحیه استخراج شد. تحلیل مؤلفه اصلی برای کاهش ابعاد فضای ویژگی مورد استفاده قرار گرفت و هفت عامل اول در حدود ۹۱٪ واریانس کل داده‌ها را توجیه می‌کنند، از این رو برای تشکیل مدل احتمالاتی بی‌زین از آن‌ها استفاده شد. قابلیت کارائی مدل پیشنهادی با استفاده از داده‌های آزمون بررسی شد و نتایج مربوط به صحت طبقه‌بندی نشان داد که این مدل به خوبی قادر به تفکیک و جداسازی نمونه‌های مربوط به گروه‌های مختلف از یکدیگر با دقت در حدود ۸۰٪ است. مدل پیشنهادی به دلیل این‌که برپایه داده‌های آموزش مربوط به این منطقه تشکیل شده است، به‌منظور طبقه‌بندی برخط از این نوع سنگ مشابه قابل کاربرد است. بدیهی است که با اطمینان یافتن از کارایی ویژگی‌های تصویری در این مورد، بررسی پردازش‌هایی از جمله استفاده از حدود آستانه سطوح روشنایی تصویر، به‌منظور دستیابی به اهدافی از این قبیل، هدف پژوهش‌های بعدی خواهد بود.

منابع

- [1] Dorador, J., & Rodríguez-Tovar, F.J. 2016. "High resolution digital image treatment to color analysis on cores from IODP Expedition 339: Approaching lithologic features and bioturbational influence". *Marine Geology* 377, 127-135.
- [2] Bjarlykke, K. 2010. "Petroleum geoscience: From sedimentary environments to rock physics", Springer, London, 508 pp.
- [3] Jouini, M.S., Vega, S., & Al-Ratrout, A. 2015. "Numerical estimation of carbonate rock properties using multiscale images". *Geophysical Prospecting* 63(2), 405-421.
- [4] Saxena, N., Mavko, G., Hofmann, R., & Srisutthiyakorn, N. 2017. "Estimating permeability from thin sections without reconstruction: Digital rock study of 3D properties from 2D images". *Computers & Geosciences* 102, 79-99.
- [5] Khorram, F., Memarian, H., Tokhmechi, B., & Soltanian-zadeh, H. 2011. "Limestone chemical components estimation using image processing and pattern recognition techniques". *Journal of Mining and Environment* 2(2), 126-135.
- [6] Patel, A.K., & Chatterjee, S. 2016. "Computer vision-based limestone rock-type classification using probabilistic neural network". *Geoscience Frontiers* 7(1), 53-60.
- [7] Oestreich, J.M., Tolley, W.K., & Rice, D.A. 1995. "The development of a color sensor system to measure mineral compositions", *Minerals Engineering* 8(1), 31-39.
- [8] Perez, C., Casali, A., Gonzalez, G., Vallebuona, G., & Vargas, R. 1999. "Lithological composition sensor based on digital image feature extraction, genetic selection of features and neural classification". In *Information Intelligence and Systems, IEEE, Bethesda*, 236-241.
- [9] Marmo, R., Amodio, S., Tagliaferri, R., Ferreri, V., & Longo, G. 2005. "Textural identification of carbonate rocks by image processing and neural network: Methodology proposal and examples", *Computers & Geosciences* 31(5), 649-659.
- [10] Perez, C.A., Estévez, P.A., Vera, P.A., Castillo, L.E., Aravena, C.M., Schulz, D.A., & Medina, L.E. 2011. "Ore grade estimation by feature selection and voting using boundary detection in digital image analysis". *International Journal of Mineral Processing* 101(1), 28-36.
- [11] Singh, V., Singh, T. N., & Singh, V. 2011. "Image processing applications for customized mining and ore classification". *Arabian Journal of Geosciences* 4(7-8), 1163-1171.
- [12] Chatterjee, S., 2013. "Vision-based rock-type classification of limestone using multi-class support vector machine". *Applied intelligence* 39(1), 14-27.
- [13] Donskoi, E., Poliakov, A., Manuel, J.R., Peterson, M., & Hapugoda, S. 2015. "Novel developments in optical image analysis for iron ore, sinter and coke characterization". *Applied Earth Science* 124(4), 227-244.
- [14] Cracknell, M.J., & Reading, A.M. 2015. "Spatial-Contextual Supervised Classifiers Explored: A Challenging Example of Lithostratigraphy Classification". *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth*

- [21] Gonzales, R. C., & Woods, R.E. 2010. "Digital Image Processing", Pearson Education, 976 pp.
- [22] Thompson, C. M., & Shure, L. 1995. "Image processing toolbox [for use with Matlab]".
- [23] Chen, S., Grunsky, E.C., Hattori, K., and Liu, Y., 2015. "Principal Component Analysis of Geochemical Data from the REE-rich Maw Zone, Athabasca Basin, Canada". Geological Survey of Canada, Open File 7689, 24p.
- [24] Duda, R.O., Hart, P.E., & Stork, D.G. 2012. "Pattern classification", John Wiley & Sons, 654 pp.
- [25] Vapnik, V. 2013. "The nature of statistical learning theory", Springer, London, 314 pp.
- Observations and Remote Sensing 8(3), 1371-1384.
- [15] Galdames, F.J., Perez, C.A., Estévez, P.A., & Adams, M. 2017. "Classification of rock lithology by laser range 3D and color images". International Journal of Mineral Processing 160: 47-57.
- [16] Vasuki, Y., Holden, E.J., Kovesi, P., & Micklethwaite, S. 2017. "An interactive image segmentation method for lithological boundary detection: A rapid mapping tool for geologists". Computers & Geosciences 100, 27-40.
- [۱۷] ذاکری خطیر، م؛ شاه حسینی، ا؛ شفایی، س.ض؛ رحیمی، م. ۱۳۸۷، "تعیین عیار ماده معدنی با استفاده از شبکه عصبی و تکنیک پردازش تصویر"، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۳، شماره ۶: ۷۳-۶۷.
- [۱۸] شرکت زمین نگار پاسارگاد. ۱۳۸۸. "گزارش زمین شناسی معدن آهک نوین سمنان"، ۴۸ صفحه.
- [19] Chatterjee, S., 2006 "Geostatistical and image based quality control models for Indian mineral industry". Unpublished Ph.D. Thesis dissertation, IIT Kharagour, India, 272 pp.
- [20] Flügel, E. 2012. "Microfacies analysis of limestones". Springer, London.

¹ Segmentation

² Support-vector machine

³ Kendyan

⁴ Principal component analysis

⁵ Confusion matrix

⁶ Correct classification rate