

## جداسازی خودکار کانی‌های موجود در مقاطع نازک سنگ‌ها با استفاده از الگوریتم‌های پردازش تصویر و خوشه‌بندی

حسین ایزدی<sup>۱</sup>، جواد صدری<sup>۲</sup>، نصرت‌آقا مهران<sup>۳</sup>

### چکیده

جداسازی خودکار کانی‌های موجود در مقاطع نازک با استفاده از روش‌های پردازش تصویر، یکی از موضوعاتی است که در سال‌های اخیر مورد توجه زمین‌شناسان قرار گرفته است. سنگ‌ها اصلی‌ترین منبع اطلاعاتی زمین‌شناسان می‌باشند، و یکی از روش‌های متداول مطالعه سنگ‌ها، تهیه مقاطع نازک از آن‌ها و بررسی این مقاطع با استفاده از میکروسکوپ‌های انکساری قطبی‌کننده نور است. همچنین جداسازی کانی‌های موجود در مقاطع نازک، پیش‌نیاز انجام مطالعات بعدی مانند شناسایی و بررسی اندازه کانی‌ها در مقاطع است. در این مقاله، رویکردی جدید در جداسازی خودکار کانی‌های موجود در مقاطع نازک با استفاده از الگوریتم‌های پردازش تصاویر و خوشه‌بندی مبتنی بر ویژگی‌های رنگی ارائه شده است. به‌منظور جداسازی کانی‌های موجود در مقاطع نازک، از آن‌ها در نورهای معمولی و قطبی تصاویر دیجیتال تهیه شده و با استخراج ویژگی‌های رنگی و به‌کارگیری الگوریتم خوشه‌بندی افزایشی، کانی‌ها جداسازی خواهند شد. در الگوریتم پیشنهادی، ابتدا ویژگی‌های رنگی هر پیکسل در فضاها رنگی RGB و HSI از تصاویر استخراج شده، سپس با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی، پیکسل‌های تصاویر تفکیک شده و در نهایت منجر به جداسازی کانی‌ها خواهد شد. نتایج الگوریتم پیشنهادی در مرحله آزمون بر روی ۸۳ مقطع نازک متشکل از ۱۶ کانی آذرین متداول، نشان دهنده میزان درستی ۸۷/۳۲٪ در جداسازی کانی‌ها می‌باشد. نتایج آزمایشگاهی، نشان‌دهنده جداسازی موفقیت آمیز کانی‌ها به‌ویژه مقاطع دگرسان شده و هوازده می‌باشد. کاربرد اصلی الگوریتم پیشنهادی در زمین‌شناسی سرچاه نفت، آموزش کانی‌شناسی و اکتشافات سطحی سازمان فضایی ایالات متحده آمریکا در سیاره مریخ (NASA Mars Explorations) است که تمامی آن‌ها نیازمند جداسازی آنی کانی‌ها می‌باشند.

### کلید واژه‌ها

جداسازی کانی‌ها، مقاطع نازک، خوشه‌بندی رنگی، پردازش تصاویر دیجیتال، فضاها رنگی RGB و HSI.

دستی، با استفاده از میکروسکوپ‌های انکساری قطبی‌کننده نور<sup>۱</sup> در نورهای معمولی<sup>۲</sup> و قطبی<sup>۳</sup> مورد مطالعه قرار می‌گیرند [۱]. بررسی کانی‌های موجود در مقاطع نازک<sup>۴</sup>، نیازمند تخصص و

### ۱ مقدمه

سنگ‌ها اصلی‌ترین منبع اطلاعاتی در شاخه‌های مرتبط با علوم زمین می‌باشند. تهیه مقاطع نازک از سنگ‌ها، یکی از روش‌های متداول تحلیل و بررسی آن‌ها است که مقاطع نازک به‌صورت

این مقاله در آذرماه ۱۳۹۳ دریافت، در خردادماه ۱۳۹۴ بازنگری و در تیرماه همان سال پذیرفته شد.

۱ گروه مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران. رایانامه: [hossein.izadi@ut.ac.ir](mailto:hossein.izadi@ut.ac.ir)

۲ گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند. رایانامه: [javad.sadri@cs.mcgill.ca](mailto:javad.sadri@cs.mcgill.ca)

۳ گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و مکانیک، دانشگاه بیرجند. رایانامه: [namehran@birjand.ac.ir](mailto:namehran@birjand.ac.ir)

<sup>۱</sup> Polarizer refractive microscope

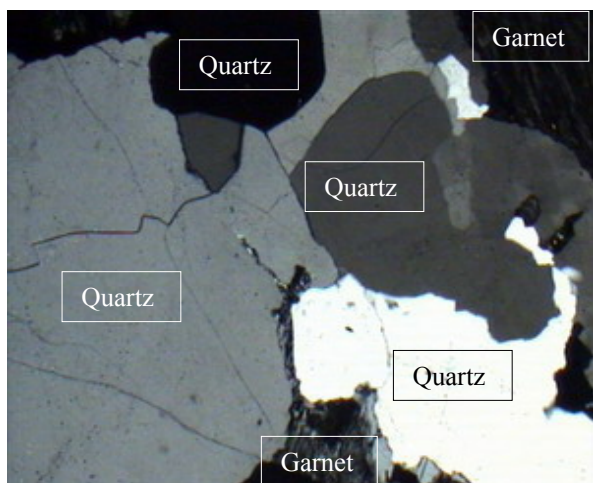
<sup>۲</sup> Plane polarized light

<sup>۳</sup> Cross polarized light

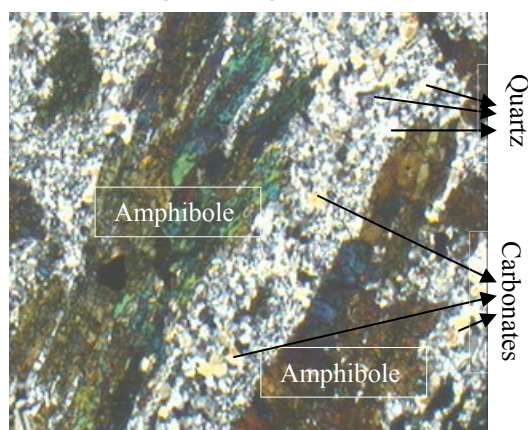
<sup>۴</sup> Thin section

تصویر، کانی‌های موجود در مقاطع را جداسازی می‌کند و در نهایت، مدل نهایی جداسازی کانی‌ها با تنظیم و تصحیح کاربر برنامه تهیه می‌شود.

علی‌رغم انجام مطالعات متعدد، تاکنون روشی کامل و عمومی برای جداسازی خودکار کانی‌ها در مقاطع نازک، از جمله مقاطع نازک هوازده و دگرسان شده (شکل ۲)، ارائه نشده است. در این مقاله، روش خودکار جدیدی برای جداسازی کانی‌ها در مقاطع نازک بر اساس الگوریتم خوشه‌بندی افزایشی [۱۲] مبتنی بر خواص رنگی ارائه گردیده است. بر خلاف الگوریتم پیشنهادی، در اکثر الگوریتم‌های خوشه‌بندی، تعداد خوشه‌ها باید به عنوان ورودی به الگوریتم اعمال گردد [۱۲]. بنابراین، استفاده از این نوع الگوریتم‌ها در جداسازی کانی‌ها ممکن نخواهد بود، زیرا پیش‌بینی تعداد کانی‌های موجود در هر مقطع نازک امکان‌پذیر نمی‌باشد. جداسازی کانی‌های موجود در مقطعی که دچار هوازدگی و دگرسانی شده باشند، مهمترین رویکردی است که الگوریتم پیشنهادی به بررسی آن پرداخته است.



شکل ۱: کانی Quartz در نور قطبی (نمونه‌ای از یک مقطع بدون دگرسانی و هوازدگی)



شکل ۲: کانی Amphibole در نور قطبی (نمونه‌ای از یک مقطع دگرسان شده و هوازده)

تجربه بالایی در کانی‌شناسی می‌باشد؛ بطوری‌که، برای دانشجویان و افراد غیرمتخصص فرآیندی پیچیده و مشکل خواهد بود. همچنین، به دلیل استفاده از یک منبع نور در این میکروسکوپ‌ها، تابش نور به چشم متخصصان موجب خستگی آن‌ها شده و باعث ایجاد خطا در بررسی کانی‌ها خواهد شد. بنابراین، طراحی روشی خودکار به منظور بررسی کانی‌های موجود در مقاطع نازک، کمک شایانی به متخصصان کانی‌شناسی خواهد کرد. بررسی خودکار مقاطع نازک، رویکردی مبتنی بر الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌باشد؛ بطوری‌که، یکی از اهداف اصلی از بررسی تصاویر مقاطع نازک توسط روش‌های خودکار، جداسازی دقیق و صحیح کانی‌های درون آن‌ها می‌باشد [۲-۴]. جداسازی خودکار کانی‌های موجود در مقاطع نازک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و میزان درستی فرآیندهای خودکار بعدی مانند شناسایی کانی‌ها [۵]، اندازه و شکل کانی‌ها [۶] و تشخیص نوع و نام سنگ‌ها [۷]، بستگی زیادی به میزان درستی نتایج جداسازی کانی‌ها دارد.

در سال‌های اخیر تعدادی از محققان، الگوریتم‌های متنوعی را با استفاده از ویژگی‌های رنگی به منظور جداسازی کانی‌های موجود در مقاطع نازک توسعه داده‌اند [۸]. اکثر این روش‌ها بر اساس شناسایی لبه و تغییرات رنگی طراحی شده‌اند، اما این روش‌ها تنها در بررسی و جداسازی کانی‌های موجود در مقاطع بدون دگرسانی و هوازدگی کاربرد دارند [۹] (شکل ۱). در روش پیشنهادی توسط [۶]، الگوریتمی بر اساس روش‌های پردازش تصویر، هموارسازی گوسی، محاسبات تغییرات رنگ، مقدار آستانه و استفاده از روش‌های اسکلت‌بندی تصویر طراحی گردید. در مطالعه‌ای دیگر، با استفاده از روش<sup>۳</sup> (LGB)، الگوریتمی برای شناسایی مرز کانی‌ها طراحی شد [۸]. الگوریتمی بر اساس خواص رنگی کانی‌ها توسط [۱۰] به منظور یافتن مرزهای کانی‌ها در مقاطع نازک طراحی گردید که از الگوریتم رشد ناحیه<sup>۴</sup> به عنوان ابزار اصلی فرآیند شناسایی مرزها استفاده شده است. همچنین، استفاده از انتقال سیستم‌های رنگی و به‌کارگیری فضاهای رنگی RGB، CIELab، YUV و YIQ، روشی است که توسط [۱۱] پیشنهاد داده شده است. این روش، مدل نهایی جداسازی را با استفاده از الگوریتم جداسازی آب‌پخشان<sup>۵</sup> ارائه می‌دهد. در تحقیقی دیگر، برنامه کامپیوتری به نام TSecSoft توسط [۷] طراحی شد. این برنامه، با استفاده از حداقل رنگ تداخلی و اجرای الگوریتم‌های پردازش

<sup>۱</sup> Features

<sup>۲</sup> Color gradient

<sup>۳</sup> Lazy Grain Boundary

<sup>۴</sup> Region Growing

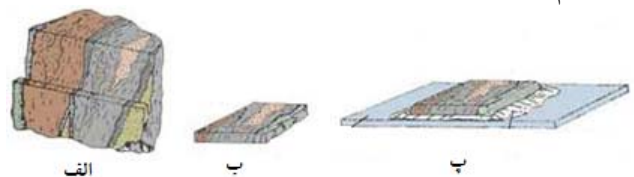
<sup>۵</sup> Watershed

## ۲ اطلاعات کانی‌شناسی

کانی‌ها در نورهای معمولی و قطبی دارای خواص رنگی متفاوتی می‌باشند. به منظور بررسی خواص، ویژگی‌ها و کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌های معدنی، از آن‌ها مقاطع نازک تهیه می‌گردد. این مقاطع توسط میکروسکوپ‌های انکساری قطبی کننده نور مطالعه می‌شوند؛ به طوری که، خواص، ویژگی‌ها و کانی‌های درون سنگ قابل شناسایی خواهد بود. در ادامه این بخش، مفاهیم مربوط به مقاطع نازک، میکروسکوپ انکساری قطبی کننده نور و خواص نوری کانی‌ها ارائه خواهند شد.

### ۲-۱- مقاطع نازک

طی عملیات صحرایی و نمونه‌برداری سنگی از مناطق مختلف و انجام فرآیندهای تخصصی، مقاطع نازک از سنگ‌ها به دست می‌آیند. بدین صورت که قطعه سنگ نمونه‌برداری شده به آزمایشگاه سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی انتقال یافته (شکل ۳-الف) و تکه‌ای از آن که هدف مطالعه می‌باشد، از نمونه جدا می‌شود (شکل ۳-ب). سپس، تکه‌ی جدا شده طی عملیات‌های تخصصی، به ضخامت حدود ۳۰ میکرون رسانده می‌شود (شکل ۳-پ) و از آن به منظور مطالعه کانی‌ها استفاده خواهد شد. به طور کلی، هر مقطع نازک می‌تواند شامل یک یا چند کانی شاخص باشد و بنابراین، وجود تنها یک کانی شاخص در یک مقطع امری نادر است. کانی شاخص در مقاطع نازک به کانی‌هایی اطلاق می‌گردد که فراوانی نسبی بالایی در مقطع داشته باشند. با توجه به شکل ۱، کانی‌های Quartz و Garnet کانی‌های شاخص این مقطع می‌باشند و همچنین با توجه به شکل ۲، کانی‌های Amphibole، Quartz و Carbonates به عنوان کانی‌های شاخص شناخته می‌شوند. اگر چندین کانی شاخص در یک مقطع موجود باشند، می‌توان آن مقطع را به نام کانی شاخصی که بیشترین فراوانی را در آن مقطع دارد، نام‌گذاری کرد.

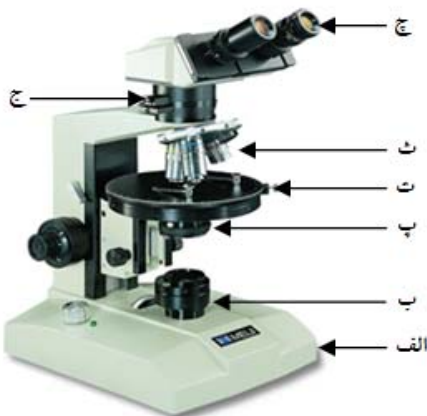


شکل ۳: مراحل تهیه مقطع نازک از سنگ. الف: قطعه نمونه‌برداری شده از سنگ معدن، ب: قسمتی از سنگ که هدف مطالعه است، پ: مقطع نازک به دست آمده.

### ۲-۲- میکروسکوپ‌های انکساری قطبی کننده نور

میکروسکوپ‌های انکساری قطبی کننده نور، با تبدیل نور معمولی به نور قطبی و به کارگیری هر دو نور ذکر شده، ابزار مهمی در

مطالعه مقاطع نازک می‌باشد. در این میکروسکوپ‌ها، منبع تولید نور سفید (شکل ۴-ب) بر روی پایه‌ای (شکل ۴-الف) تعبیه شده است. منشور نیکلی ثابت<sup>۱</sup> که در این نوع میکروسکوپ‌ها به منظور بررسی کانی‌ها در نور قطبی تعبیه شده است، در شکل ۴-پ نشان داده شده است که همواره در مسیر نور قرار دارد. صفحه گردان<sup>۲</sup> (شکل ۴-ت) مکانی است که مقطع نازک بر روی آن قرار می‌گیرد و توسط عدسی‌های شیئی (شکل ۴-ث) مورد بررسی قرار می‌گیرد. منشور نیکلی متحرک<sup>۳</sup> (شکل ۴-ج) که یکی از اجزای مهم این نوع میکروسکوپ‌ها است، در بالای عدسی‌های شیئی تعبیه شده است و قابلیت ورود یا خروج به مسیر نور را دارد، به گونه‌ای که اگر در مسیر نور باشد، نور را قطبی کرده و اگر در مسیر نور نباشند، نور معمولی خواهد بود. منشور نیکلی ثابت با کمک منشور نیکلی متحرک، قادر خواهند بود نور معمولی را به نور قطبی تبدیل نمایند. عدسی‌های چشمی (شکل ۴-چ) که در بالاترین موقعیت میکروسکوپ تعبیه شده‌اند، به منظور دیدن کانی‌های مقطع نازک توسط متخصصان مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۴: میکروسکوپ انکساری قطبی کننده نور. الف: پایه، ب: منبع تولید نور، پ: منشور نیکلی ثابت، ت: صفحه گردان، ث: عدسی‌های شیئی، ج: منشور نیکلی متحرک، چ: عدسی‌های چشمی

### ۲-۳- خواص نوری کانی‌ها

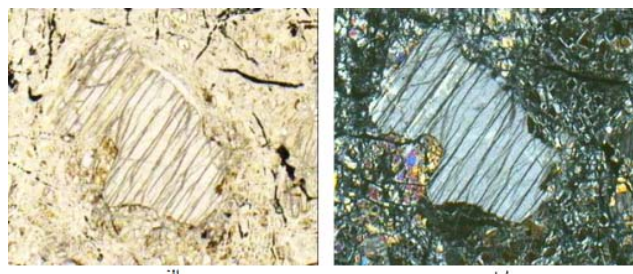
به طور کلی، مقصود از خواص نوری کانی‌ها، خواص نوری آن‌ها در مقاطع نازک است. کانی‌ها دارای خواص نوری مختلف و خاصی می‌باشند. اکثر کانی‌های موجود در مقاطع نازک در نور معمولی بیرنگ هستند (شکل ۵-الف). به همین منظور، منشورهای نیکلی ثابت و متحرک در میکروسکوپ‌های انکساری قطبی کننده نور تعبیه شده‌اند که نور را قطبی کرده و بدین ترتیب، می‌توان کانی‌ها را در نور قطبی و در رنگ‌های تداخلی مشاهده

<sup>۱</sup> Polarizer

<sup>۲</sup> Stage

<sup>۳</sup> Analyzer

نمود (شکل ۵-ب). رنگ‌های تداخلی، به رنگ‌های دیده شده بر روی مقطع نازک تحت نور قطبی گفته می‌شود که بسته به جهت برش مقطع نازک، نوع و خواص ذاتی کانی‌ها، متفاوت می‌باشد. بنابراین، به منظور شناسایی و طبقه‌بندی کانی‌ها در مقاطع نازک، علاوه بر بررسی آن‌ها تحت نور معمولی و رنگ معمولی، آن‌ها را تحت نور قطبی و رنگ‌های تداخلی نیز مورد بررسی قرار می‌دهند.



شکل ۵: نمونه‌ای از یک مقطع نازک. الف: تحت نور معمولی، ب: تحت نور قطبی.

### ۳ ایجاد پایگاه داده‌ای از تصاویر مقاطع نازک

به دلیل عدم وجود و در دسترس بودن پایگاه داده‌ای مطلوب و تخصصی در مورد تصاویر مقاطع نازک در سطح کشور و حتی در

جدول ۱. کانی‌های مورد استفاده در این مقاله و تعداد هریک از آن‌ها

| تعداد نمونه‌ها | نام کانی  | ردیف # | تعداد نمونه‌ها | نام کانی    | ردیف # |
|----------------|-----------|--------|----------------|-------------|--------|
| ۵              | Zircon    | ۹      | ۷              | Muscovite   | ۱      |
| ۵              | Amphibole | ۱۰     | ۷              | Nepheline   | ۲      |
| ۴              | Apatite   | ۱۱     | ۷              | Nosean      | ۳      |
| ۶              | Biotite   | ۱۲     | ۸              | Olivine     | ۴      |
| ۴              | Enstatite | ۱۳     | ۸              | Orthoclase  | ۵      |
| ۲              | Melilite  | ۱۴     | ۶              | Plagioclase | ۶      |
| ۸              | Epidote   | ۱۵     | ۱۱             | Quartz      | ۷      |
| ۲              | Alanite   | ۱۶     | ۵              | Sanidine    | ۸      |

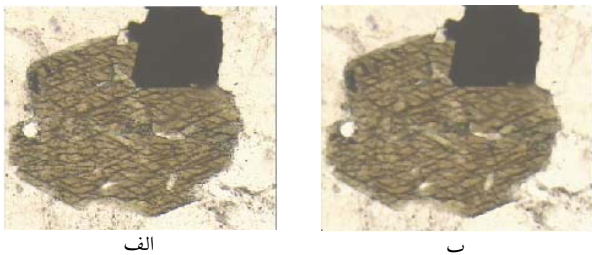
### ۴ الگوریتم جداسازی خودکار کانی‌ها

در الگوریتم پیشنهادی، جداسازی خودکار کانی‌ها مبتنی بر خواص رنگی با استفاده از روش‌های پردازش تصاویر دیجیتال و خوشه‌بندی افزایشی، که ایده‌ای مشابه روش<sup>۱</sup> (ART) [۱۲] است، انجام خواهد گرفت. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی به‌منظور جداسازی خودکار کانی‌های موجود در مقاطع نازک در (شکل ۶) نشان داده شده است که در زیربخش‌های بعدی، جزئیات آن تشریح خواهد شد.

نرمال شده خواهد بود. پس از تبدیل تصویر RGB به HSI، مؤلفه‌های تصویر HSI نیز مشابه تصویر RGB و با استفاده از رابطه (۱) نرمال‌سازی خواهند شد.

#### ۴-۱-۲ اعمال فیلتر میانگین

فیلتر میانگین یک فیلتر مکانی خطی است که کاربردهای فراوانی در پردازش و تحلیل تصاویر دارد. این فیلتر تصویر را هموار می‌کند که این امر موجب پردازش و تحلیل راحت‌تر تصویر می‌شود [۱۴]. بنابراین، در این مقاله از یک فیلتر میانگین ساده و یکنواخت با ماسک  $3 \times 3$ ، که مقادیر درایه‌های ماسک برابر ۱ بوده است، به منظور هموار کردن تصاویر استفاده شده است. تأثیر فیلتر میانگین در (شکل ۷) نشان داده شده است.



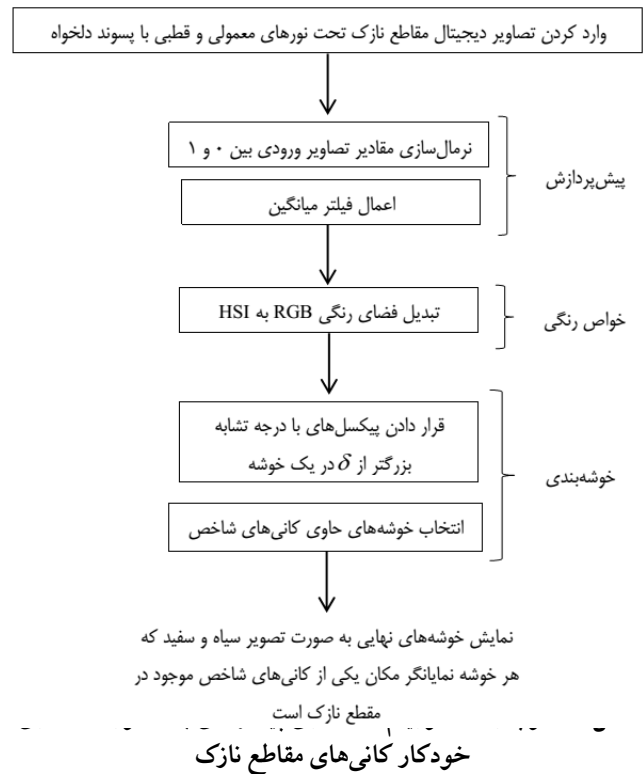
شکل ۷: اعمال فیلتر میانگین بر روی تصویر. الف: قبل از اعمال فیلتر، ب: بعد از اعمال فیلتر

#### ۴-۲- خواص رنگی

خواص رنگی در کانی‌شناسی، یکی از مهمترین و اساسی‌ترین پارامترها در بررسی کانی‌های موجود در مقاطع نازک می‌باشد [۱۵]. متخصصان کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی، در حالت دستی، در فضای رنگی RGB مقاطع نازک را مورد بررسی قرار می‌دهند؛ اما، فضای رنگی RGB به شدت نور و تغییرات آن حساس می‌باشد [۱۶]. بنابراین از فضای رنگی دیگری به نام فضای رنگی HSI نیز استفاده شده است، که حساسیت کمتری به تغییرات شدت نور منبع در بررسی کانی‌ها دارد.

#### ۴-۴- خوشه بندی

خوشه‌بندی یکی از مسائل مهم در علوم کامپیوتر است [۱۷] و هدف آن شناسایی گروه‌های دارای الگوهای مشابه و شناسایی ساختار معنی‌دار و کاربردی در پایگاه داده‌ای است [۱۲]. در این مقاله، برای هر پیکسل، یک بردار  $12 \times 1$  شامل ویژگی‌های RGB و HSI در دو نور معمولی و قطبی استخراج می‌شود و از این ویژگی‌ها به صورت‌های ترکیب‌های مختلف برای جداسازی استفاده خواهد شد. مبنای جداسازی کانی‌ها، انجام خوشه‌بندی مبتنی بر خواص رنگی است. بنابراین، در ابتدا، پیکسل‌های با درجه تشابه بزرگتر از  $\delta$  در یک خوشه قرار می‌گیرند، و پس از آن، خوشه‌های حاوی کانی‌های شاخص شناسایی خواهند شد و به عنوان کانی‌های جداسازی شده در قالب تصاویر سیاه و سفید ارائه خواهند گردید. همچنین، میزان شباهت بر اساس رابطه (۲)



#### ۴-۱-۱ پیش‌پردازش

عملیات پیش‌پردازش به منظور آماده کردن ورودی و سازگار ساختن آن با الگوریتم انجام می‌شود [۵]. در مبحث آماده کردن تصویر ورودی، انجام عملیات پیش‌پردازش باعث خواهد شد که الگوریتم نسبت به حالتی که عملیات پیش‌پردازش انجام نشده است، دارای نتایج بهتری باشد. در زیربخش‌های بعدی، عملیات‌هایی که در قسمت پیش‌پردازش انجام شده است، توضیح داده خواهند شد.

#### ۴-۱-۱-۱ نرمال‌سازی مقادیر تصاویر ورودی بین ۰ و ۱

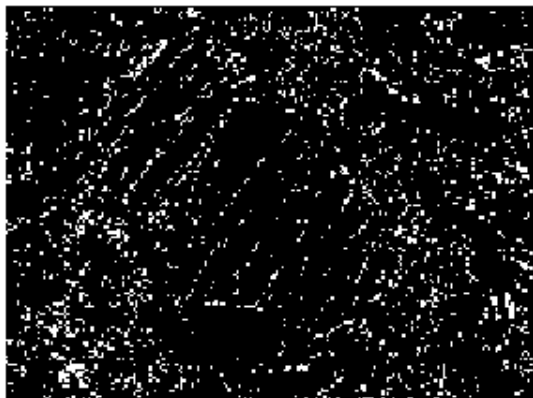
نرمال‌سازی بین ۰ و ۱ یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین عملیات پیش‌پردازش در تمامی شاخه‌های روش‌های یادگیری ماشین می‌باشد. نرمال‌سازی باعث خواهد شد که ارزش تمامی ورودی‌ها یکسان شود و بنابراین، الگوریتم به ورودی خاصی حساسیت بیشتر یا کمتری پیدا نخواهد کرد [۱۳]. در این مقاله، از رابطه (۱) به منظور نرمال‌سازی ویژگی‌ها انتخاب گردیده است که  $V_{min}$ ،  $V_{input}$ ،  $V_{max}$  و  $eps$  به ترتیب نماینده: مقدار ورودی از هر ویژگی، مقدار کمینه در هر ویژگی، مقدار بیشینه در هر ویژگی و مقدار مثبت کوچک به منظور جلوگیری از صفر شدن مقدار نرمال شده می‌باشند.

$$X = \frac{V_{input} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} + eps \quad (1)$$

عملیات نرمال‌سازی بر روی هر یک از مؤلفه‌های قرمز، سبز و آبی تصویر رنگی وارد شده به مرحله نرمال‌سازی، به‌طور جداگانه، اعمال شده و پس از آن، سه مؤلفه نرمال شده قرمز، سبز و آبی با یکدیگر ترکیب شده و بنابراین تصویر خروجی، یک تصویر رنگی

#### ۴-۴-۲ انتخاب خوشه‌های حاوی کانی‌های شاخص

پس از انجام عملیات خوشه‌بندی، تعداد زیادی خوشه به دست خواهد آمد، اما با توجه به ملاحظات زمین‌شناسی، تنها برخی از آن‌ها حاوی اطلاعات مهم راجع به کانی‌های شاخص می‌باشند. به عنوان مثال، اگر کانی نشان داده شده در (شکل ۵) به الگوریتم پیشنهادی وارد شود، یکی از خوشه‌هایی که تولید خواهد شد، در (شکل ۸) نشان داده شده است. با توجه به (شکل ۵)، این خوشه حاوی اطلاعات مهمی راجع به کانی‌های شاخص نمی‌باشد و لازم است که حذف گردد و در نتیجه‌ی جداسازی نهایی اثرگذار نباشد. بنابراین، تمامی خوشه‌های گزارش شده تحت یک فیلتر میانگین با ماسک  $3 \times 3$ ، و آستانه‌گذاری مجدد و تبدیل دوباره آن‌ها به تصاویر سیاه و سفید، بازنویسی می‌شوند. بنابراین، تصاویر تصادفی که پیکسل‌های سفید آن موقعیت‌های مکانی تصادفی دارند، مانند (شکل ۸)، یا به طور کامل سیاه می‌شوند، و یا تعداد پیکسل‌های آن کمتر از ۷۵ پیکسل ( $0.1$ ) درصد کل پیکسل‌ها که این آستانه از طریق آزمایش به دست آمده است) خواهد شد. تصاویری که یکی از این دو حالت را داشته باشند، تصاویر بدون اطلاعات مهم هستند و بنابراین حذف خواهند شد و نقشی در نتیجه نهایی نخواهند داشت.



شکل ۸: یکی از نتایج گزارش شده توسط الگوریتم پیشنهادی در جداسازی کانی نشان داده شده در (شکل ۵). این تصویر حاوی اطلاعات مهمی راجع به کانی‌های شاخص و مرز آن‌ها نمی‌باشد و بنابراین، با استفاده از فیلتر میانگین و آستانه‌گذاری مجدد، حذف خواهد شد.

#### ۵- نتایج آزمایشگاهی

جداسازی خودکار کانی‌ها با روش پیشنهادی، نتایج موفق‌تری را در جداسازی کانی‌ها بخصوص کانی‌های موجود در مقاطع هوازده و دگرسان شده نشان می‌دهد. از آنجا که روش پیشنهادی، یک روش خوشه‌بندی بدون ناظر است، بایستی مقدار بهینه پارامترهای آن، و همچنین حالت بهینه نوع ورودی‌ها، با طراحی چندین آزمایش بر روی نمونه‌های آموزشی تعیین شوند. در ابتدا، چندین آزمایش به منظور تعیین مقدار بهینه  $\delta$  انجام گردید. بدین منظور، تعداد دوازده مقطع نازک که دارای بافت و هوازدگی متفاوت بوده، و نمونه‌های مناسبی به منظور نشان دادن جامعه کل می‌باشند، به عنوان نمونه-

سنجیده می‌شود، که متغیر  $d$ ، فاصله اقلیدسی بین پیکسل‌های ورودی و مرکز هر خوشه است.

$$S = \frac{1}{1+d^2} \quad (2)$$

در زیربخش‌های بعدی، فرایند تشکیل خوشه‌ها و شناسایی کانی‌های شاخص تشریح خواهند شد.

۴-۴-۱ قرار دادن پیکسل با درجه تشابه بزرگتر از  $\delta$  در یک خوشه در الگوریتم پیشنهادی، ایده‌ی پایه‌ی الگوریتم ART برای خوشه‌بندی استفاده شده است. پارامتر  $\delta$  (حداقل میزان شباهت) تنها مؤلفه‌ای است که لازم است قبل از اجرای الگوریتم تعیین شود که مقدار آن بین صفر و ۱ متغیر است. مراحل اجرای الگوریتم خوشه‌بندی استفاده شده در این مقاله به شرح زیر است [۱۲]:

۱. تعیین حداقل میزان شباهت ( $\delta$ )
۲. مجموعه نمایندگان خوشه‌ها  $(\emptyset)$
۳. خواندن الگوی بعدی
۴. یافتن شبیه‌ترین نماینده از بین نماینده خوشه‌ها برای الگوی ورودی با میزان شباهت بزرگتر از  $\delta$ :  
اگر وجود داشت: الگوی ورودی به خوشه مربوط به شبیه‌ترین نماینده وارد می‌شود و نماینده خوشه بدین صورت به‌روز می‌شود که میانگین تمام الگوهای خوشه گرفته می‌شود و هر الگو که به میانگین نزدیک‌تر باشد، به عنوان نماینده جدید آن خوشه در نظر گرفته خواهد شد.  
اگر وجود نداشت: یک خوشه جدید ساخته می‌شود و الگوی ورودی به عنوان نماینده آن، به مجموعه‌ی نمایندگان خوشه‌ها ورود پیدا می‌کند.
۵. برو به مرحله ۳، و توقف به شرط تمام شده الگوهای ورودی.

این الگوریتم سریع‌تر از k-means می‌تواند اجرا شود، بدین دلیل که به منظور یافتن نماینده هر خوشه، هر الگو تنها یک مرتبه وارد فرآیند الگوریتم می‌شود. همچنین، این ویژگی باعث می‌شود الگوریتم به منظور خوشه‌بندی پویا و خوشه‌بندی داده‌های جدید مناسب باشد [۱۲]. خوشه‌بندی پویا برای داده‌های جدید بدین صورت در این الگوریتم وجود دارد که اگر الگوی (پیکسل) جدیدی به الگوریتم وارد شود، یعنی یک الگو جدید به پایگاه داده-ای اضافه شود، الگوریتم نیازی به بررسی الگوهای قبلی ندارد و تنها الگوی جدید پردازش شده و به یکی از خوشه‌های قبلی الحاق می‌گردد.

های آموزشی انتخاب گردید (جدول ۲). نتایج حاصل از جداسازی کانی‌ها به ازای مقادیر مختلف  $\delta$  در (جدول ۲) نشان داده شده است. با توجه به نتایج نشان داده شده در (جدول ۲)، به منظور انجام جداسازی دیگر مقاطع که در بخش ۲ به آن‌ها اشاره گردید، مقدار  $\delta$  برابر با ۰/۹ قرار داده شد. سپس، میزان درستی برای بردارهای متفاوت ورودی برای دوازده نمونه آموزشی ذکر شده در (جدول ۲) محاسبه گردید. با توجه به پایگاه داده‌ای و فضاهای رنگی موجود، سه حالت برای ورودی‌ها در نظر گرفته شد. اولین حالت شامل یک بردار  $1 \times 6$  متشکل از ویژگی‌های

Red، Green و Blue (فضای رنگی RGB) در نورهای معمولی و قطبی؛ حالت دوم شامل یک بردار  $1 \times 6$  متشکل از ویژگی‌های Hue، Saturation و Intensity (فضای رنگی HSI) در نورهای معمولی و قطبی و حالت سوم شامل یک بردار  $1 \times 12$  متشکل از ویژگی‌های Red، Green و Blue (فضای رنگی RGB)، Hue، Saturation و Intensity (فضای رنگی HSI) در نورهای معمولی و قطبی. نتیجه حاصل از این آزمایش‌ها نیز در (جدول ۳) نشان داده شده است.

جدول ۲. تعیین مقدار بهینه پارامتر  $\delta$ 

| نام کانی    | میزان درستی برای $\delta=0/80$ | میزان درستی برای $\delta=0/85$ | میزان درستی برای $\delta=0/90$ | نام کانی | میزان درستی برای $\delta=0/80$ | میزان درستی برای $\delta=0/85$ | میزان درستی برای $\delta=0/90$ |
|-------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Muscovite   | ۰/۶۲                           | ۰/۷۷                           | ۰/۸۵                           | Quartz   | ۰/۷۰                           | ۰/۸۱                           | ۰/۹۲                           |
| Nepheline   | ۰/۶۰                           | ۰/۸۰                           | ۰/۹۰                           | Sanidine | ۰/۷۳                           | ۰/۸۰                           | ۰/۹۰                           |
| Nosean      | ۰/۷۱                           | ۰/۸۶                           | ۰/۹۲                           | Zircon   | ۰/۶۵                           | ۰/۷۸                           | ۰/۸۵                           |
| Olivine     | ۰/۶۸                           | ۰/۷۹                           | ۰/۸۷                           | Apatite  | ۰/۶۸                           | ۰/۸۰                           | ۰/۸۶                           |
| Plagioclase | ۰/۶۵                           | ۰/۷۴                           | ۰/۸۵                           | Biotite  | ۰/۷۲                           | ۰/۸۲                           | ۰/۹۰                           |
| Kyanite     | ۰/۷۵                           | ۰/۸۲                           | ۰/۹۱                           | Garnet   | ۰/۶۸                           | ۰/۷۸                           | ۰/۸۸                           |

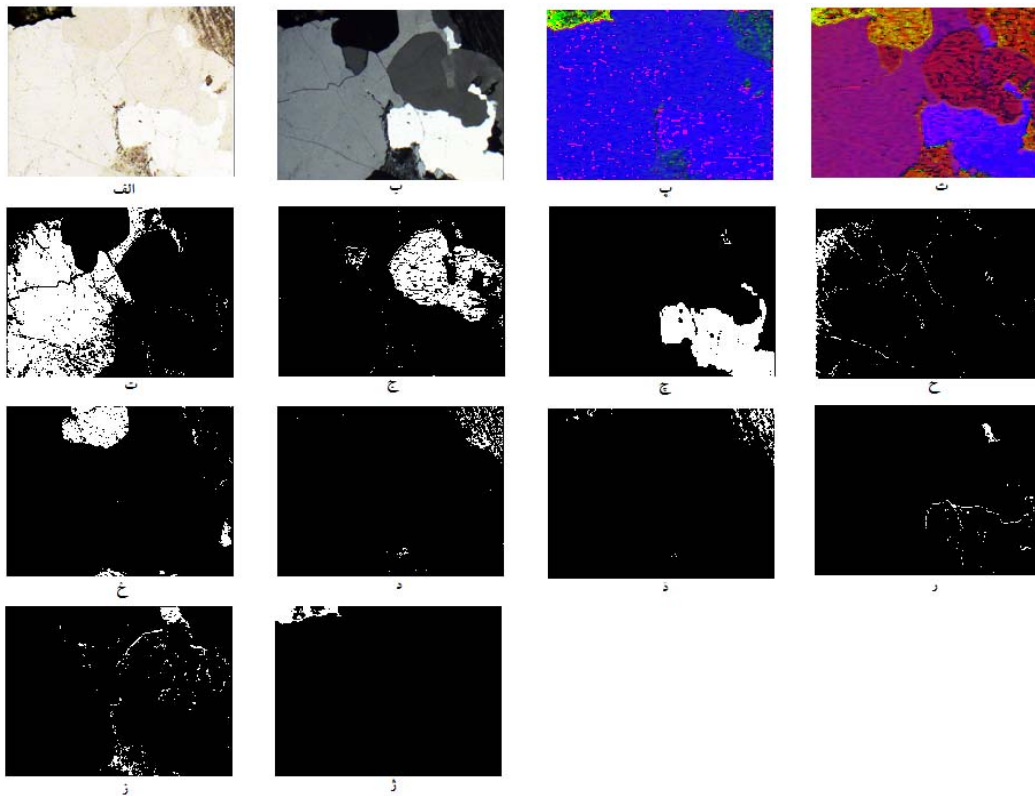
کانی شاخص، کانی Quartz است که به دلیل ۱- عدم وجود هوازدگی، ۲- عدم وجود دگرسانی و ۳- تغییرات رنگ بسیار محدود سطح کانی، روش‌های قبلی جداسازی موجود در تاریخچه تحقیق نیز قادر به جداسازی کانی‌های درون این مقطع می‌باشند. هر کدام از تصاویر سیاه و سفید موجود در شکل‌های زیر، نشان دهنده یک خوشه در مقطع نازک می‌باشد که بر مبنای ویژگی‌های رنگی، از دیگر کانی‌های دیگر (تصویرهای سیاه و سفید دیگر موجود در هر عکس) جداسازی شده است. به‌طور کلی، هرچقدر تأثیر سه عامل ذکر شده بیشتر شود، روش‌های قبلی در جداسازی خودکار کانی‌های آن مقاطع نتایج ضعیف‌تری ارائه خواهند کرد. مقاطعی که در (شکل ۱۰) و (شکل ۱۱) نشان داده شده است، به- ترتیب دارای Alanite و Melilite می‌باشند، و نمونه‌هایی از مقاطعی است که سه عامل ذکر شده در آن‌ها نمود بیشتری پیدا کرده است. در (شکل ۱۲)، نمونه‌ای از کانی Amphibole دیده می‌شود که به شدت دچار هوازدگی و دگرسانی گردیده، و شبیه به یک تصویر با مقادیر تصادفی شده است. تمامی روش‌های قبلی اشاره شده در پیشینه تحقیق، در جداسازی چنین مقاطعی، عملکرد مؤثری نخواهند داشت.

جدول ۳. بررسی میزان درستی حالت‌های مختلف بردار ورودی

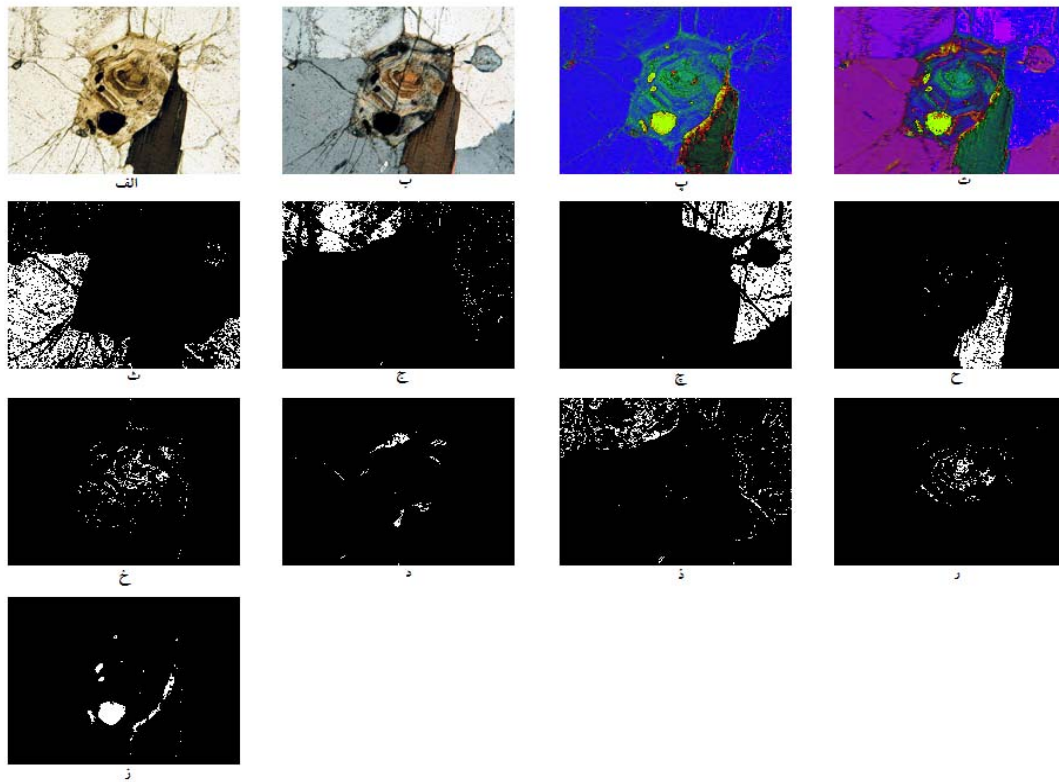
| میزان درستی برای جداسازی مقاطع (%) | بردارهای ورودی مختلف                                      |
|------------------------------------|---|
| ۸۳/۶۱                              | بردار ورودی $1 \times 6$ فضای رنگی RGB                    |
| ۸۴/۴۷                              | بردار ورودی $1 \times 6$ فضای رنگی HSI                    |
| ۸۸/۴۲                              | بردار ورودی $1 \times 12$ ترکیب هر دو فضای رنگی RGB و HSI |

بنابراین، با توجه به نتایج نشان داده شده در (جدول ۳)، بردار ورودی  $1 \times 12$  به منظور انجام عملیات جداسازی بر روی دیگر مقاطع موجود در پایگاه داده‌ای انتخاب گردید. همچنین به منظور کمی‌سازی میزان درستی جداسازی توسط الگوریتم پیشنهادی، محدوده هر کانی در مقطع نازک توسط کاربر متخصص تعیین شده، و مجموع تعداد پیکسل‌هایی که در خوشه‌های (تصاویر سیاه و سفید) گزارش شده مربوط به هر کانی می‌باشند، به تعداد پیکسل‌های همان کانی در مقطع تقسیم می‌شود.

نتایج الگوریتم پیشنهادی به منظور جداسازی کانی‌های موجود در چهار مقطع نازک به عنوان نمونه، که دارای میزان هوازدگی متفاوت می‌باشند، در (شکل ۹)، (شکل ۱۰)، (شکل ۱۱) و (شکل ۱۲) نشان داده شده است. در (شکل ۹)، فراوانترین

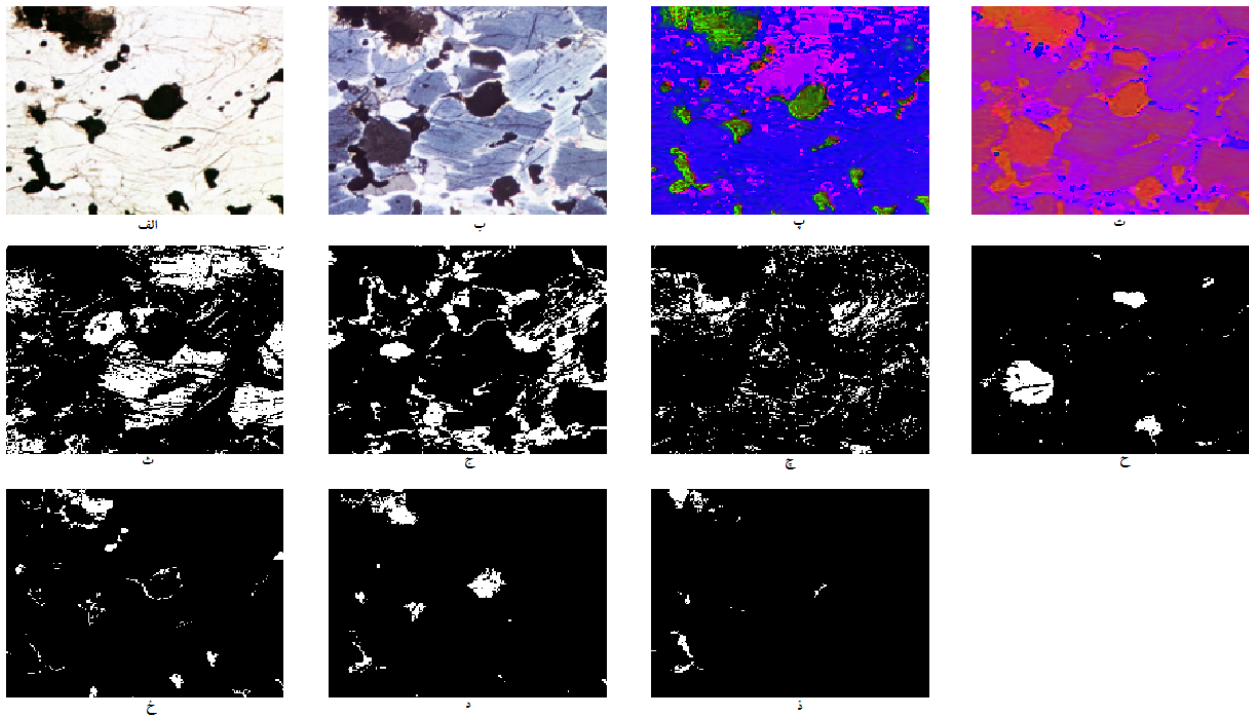


شکل ۹: نتیجه جداسازی مقطع کانی Quartz با استفاده از روش پیشنهادی. الف: تصویر مقطع در فضای RGB و نور معمولی، ب: تصویر مقطع در فضای RGB و نور قطبی، پ: تصویر مقطع در فضای HSI و نور معمولی، ت: تصویر مقطع در فضای HSI و نور قطبی. ث الی ز: تصاویر سیاه و سفید که هر کدام نشان دهنده یک خوشه بر مبنای تغییرات رنگ آن در مقطع هستند.

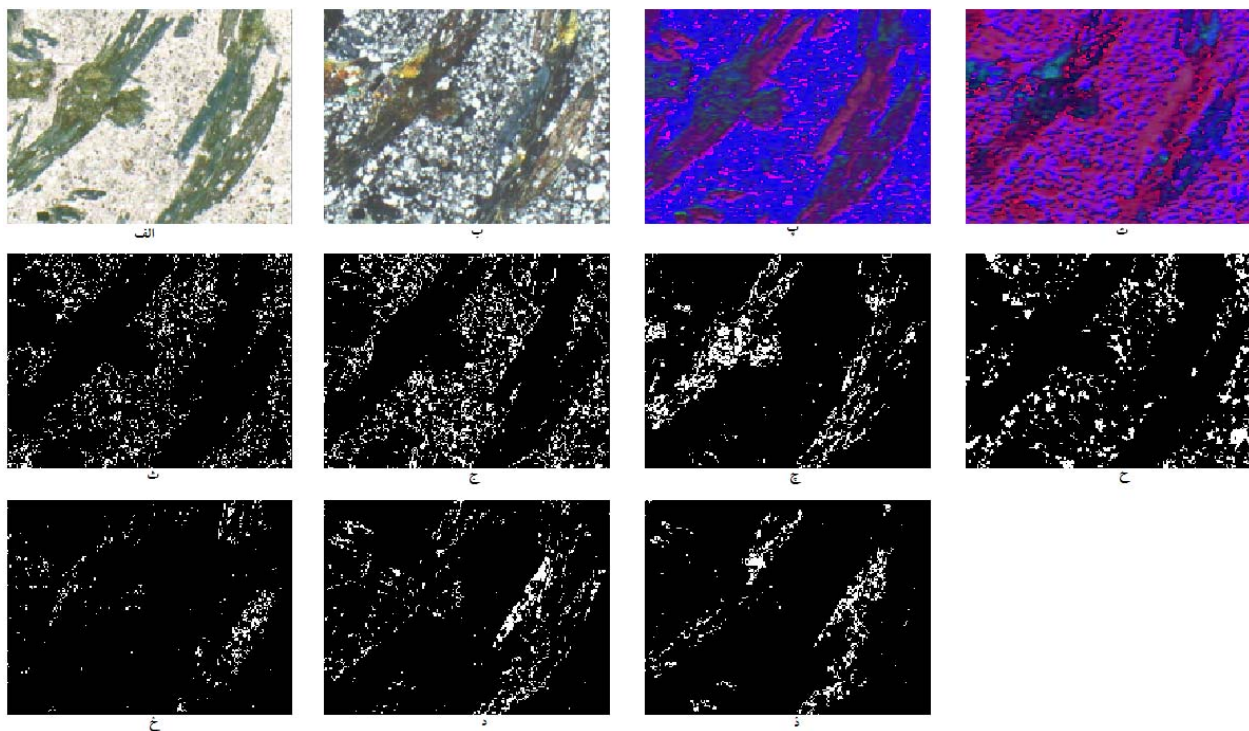


شکل ۱۰: نتیجه جداسازی کانی Alanite با استفاده از روش پیشنهادی. الف: تصویر مقطع در فضای RGB و نور معمولی، ب: تصویر مقطع در فضای RGB و نور قطبی، پ: تصویر مقطع در فضای HSI و نور معمولی، ت: تصویر مقطع در فضای HSI و نور قطبی. ث الی ز: تصاویر سیاه و سفید که هر کدام نشان دهنده یک خوشه بر مبنای تغییرات رنگ آن در مقطع هستند.





شکل ۱۱: نتیجه جداسازی کانی Melilite با استفاده از روش پیشنهادی. الف: تصویر مقطع در فضای RGB و نور معمولی، ب: تصویر مقطع در فضای RGB و نور قطبی، پ: تصویر مقطع در فضای HSI و نور معمولی، ت: تصویر مقطع در فضای HSI و نور قطبی. ث الی ذ: تصاویر سیاه و سفید که هر کدام نشان دهنده بر مبنای تغییرات رنگ آن در مقطع هستند.



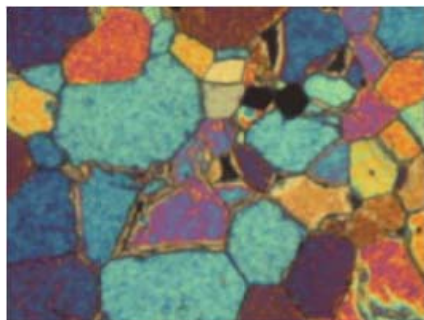
شکل ۱۲: نتیجه جداسازی کانی Amphibole با استفاده از روش پیشنهادی. الف: تصویر مقطع در فضای RGB و نور معمولی، ب: تصویر مقطع در فضای RGB و نور قطبی، پ: تصویر مقطع در فضای HSI و نور معمولی، ت: تصویر مقطع در فضای HSI و نور قطبی. ث الی ذ: تصاویر سیاه و سفید که هر کدام نشان دهنده یک خوشه بر مبنای تغییرات رنگ آن در مقطع هستند.

هوازده مانند نمونه نشان داده شده در شکل ۱۲ خواهد بود. در راستای مقایسه روش پیشنهادی با الگوریتم‌های قبلی، یک نمونه از الگوریتم‌های قبلی [۱۰] با نتایج الگوریتم پیشنهادی مقایسه خواهد شد. مقطع مورد استفاده در [۱۰]، در (شکل ۱۳-الف) نشان داده شده است. تصویر مقطع مورد استفاده به منظور مقایسه

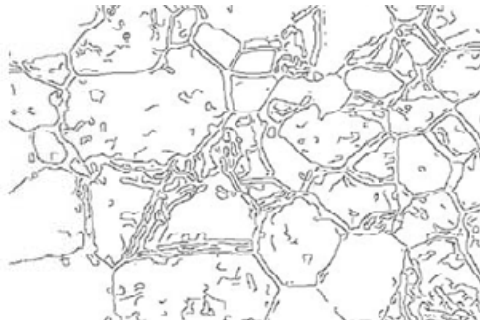
الگوریتم پیشنهادی، به دلیل استفاده از روش یادگیری افزایشی، قادر است تصاویری مانند (شکل ۱۲) را به گونه‌ای مورد تحلیل قرار می‌دهد که نتایج بسیار بهتری نسبت به روش‌های قبلی حاصل شود. زیرا الگوریتم پیشنهادی بر اساس تغییرات رنگی مرز کانی‌ها عمل نکرده و بنابراین، قادر به جداسازی صحیح‌تر کانی‌های

مقطع مصنوعی بوده که دارای تغییرات رنگی واضحی در مرزها می‌باشد و بنابراین، عملیات جداسازی فرآیند پیچیده و مشکلی نخواهد بود. نتیجه جداسازی توسط الگوریتم پیشنهادی [۱۰] در (شکل ۱۳-ب) نشان داده شده است. نتایج جداسازی مقطع نشان داده شده در (شکل ۱۳-الف) توسط الگوریتم پیشنهادی، در (شکل ۱۴) نشان داده شده است. با توجه به (شکل ۱۴)، الگوریتم پیشنهادی نتایج قابل قبولی را در جداسازی کانی‌ها نشان می‌دهد.

نتایج، از مقاله منتشر شده [۱۰] اقتباس شده و به دلیل مصنوعی بودن مقطع نازک، تنها تصاویر در نور پولاریزه یا نور معمولی در مقالات مشاهده می‌شود. بنابراین، الگوریتم پیشنهادی تنها با استفاده از ۶ ویژگی، جداسازی را انجام خواهد داد و نتایج به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی با نتایج آن مقالات مقایسه خواهد شد. لازم به ذکر است که اکثر مطالعات قبلی با استفاده از مقاطع مصنوعی، الگوریتم‌های جداسازی را توسعه داده‌اند. مقطعی مانند مقطع نشان داده شده در (شکل ۱۳-الف)، یک

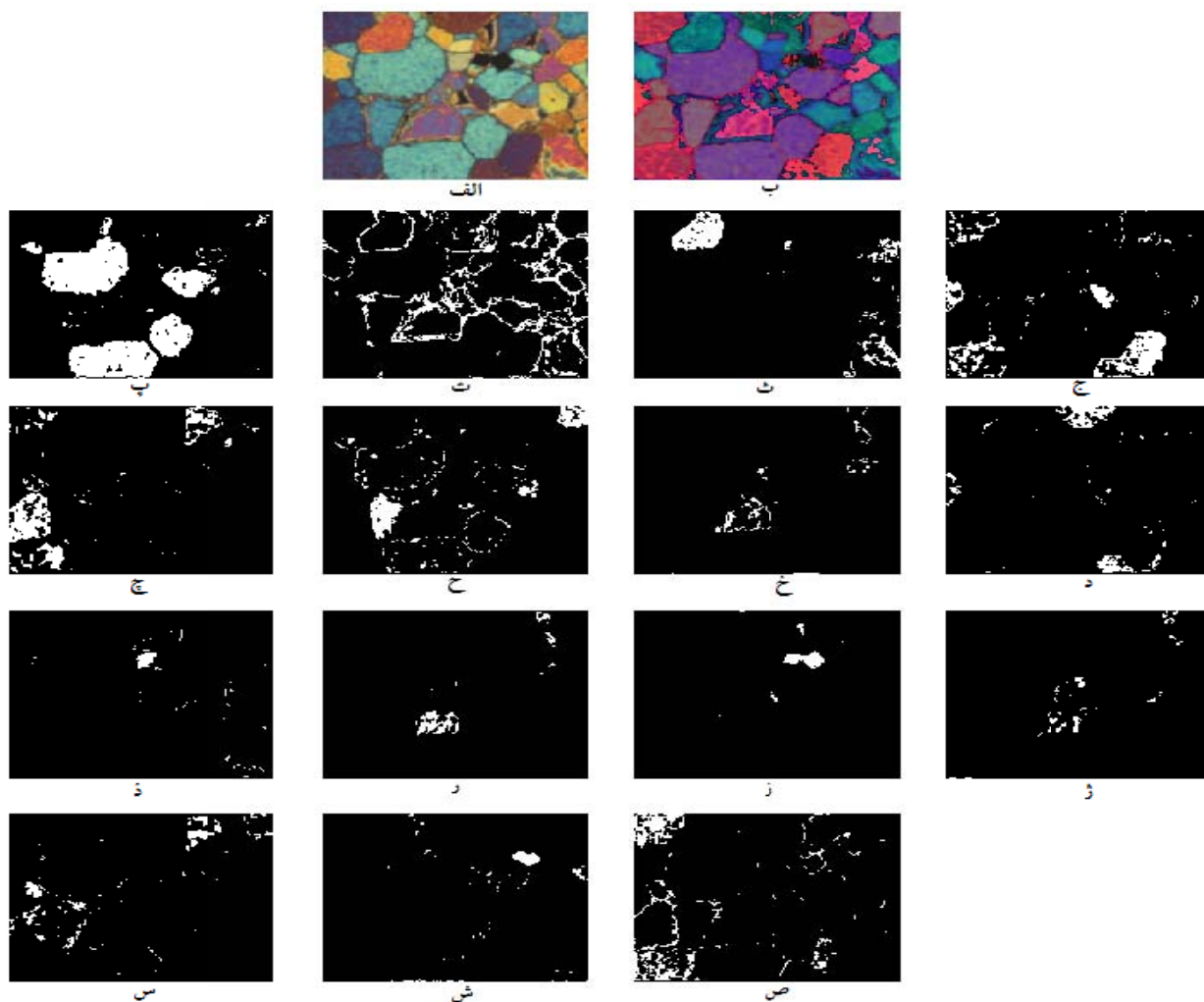


الف



ب

شکل ۱۳: مقطع مورد استفاده در مرجع [۱۰]. الف: این مقطع، یک مقطع مصنوعی است که به منظور بررسی میزان درستی الگوریتم پیشنهادی توسط [۱۰] به منظور جداسازی کانی‌های درون آن استفاده شده است. ب: نتیجه انجام عملیات جداسازی که با تعیین مرزها مشخص گردیده است.

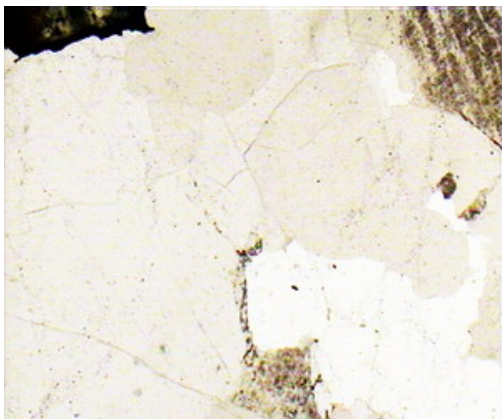


شکل ۱۴: مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی با نتایج [۱۰]. الف: تصویر مورد استفاده در [۱۰] در فضای رنگی RGB، ب: تصویر مورد استفاده در [۱۰] در فضای رنگی HSI، پ الی ص: نتایج حاصل از جداسازی توسط الگوریتم پیشنهادی.

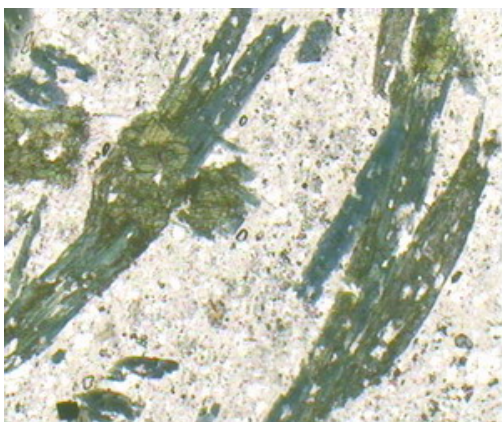
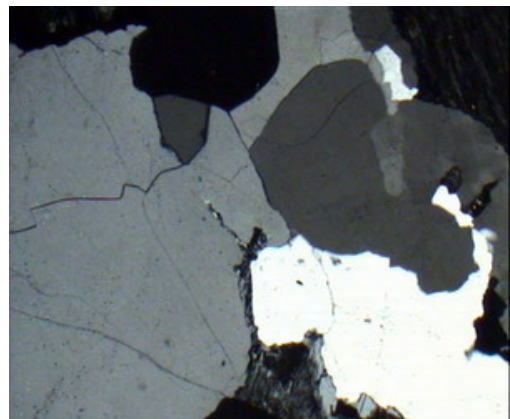
جداسازی کانی‌های مقاطع نازک استفاده گردید، که نیازی به تعیین تعداد خوشه‌ها قبل از شروع اجرای برنامه ندارد، زیرا تعداد کانی‌های موجود در مقاطع قابل پیش‌بینی نمی‌باشد. استفاده موزی از روش‌های خوشه‌بندی و پردازش تصاویر دیجیتال، رویکرد اصلی این مقاله به‌منظور جداسازی خودکار کانی‌های مقاطع نازک می‌باشد که تلفیق این ابزارها، با توجه به وجود هوازده‌گی، دگرسانی و تغییرات رنگی بعضی مقاطع صورت گرفته است. نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، نشان‌دهنده درستی بالای الگوریتم پیشنهادی در جداسازی خودکار کانی‌ها در مقاطع نازک، به‌خصوص مقاطع نازک هوازده و دگرسان شده، می‌باشد. در این مقاله، برخلاف اکثر مطالعات قبلی ذکر شده در پیشینه تحقیق که تنها از ۱ مقطع نازک مصنوعی استفاده کرده‌اند، از تعداد ۹۵ مقطع نازک واقعی متشکل از ۱۶ کانی متداول و قابل دسترس، به‌منظور بررسی میزان درستی الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است.

## ۷ پیوست

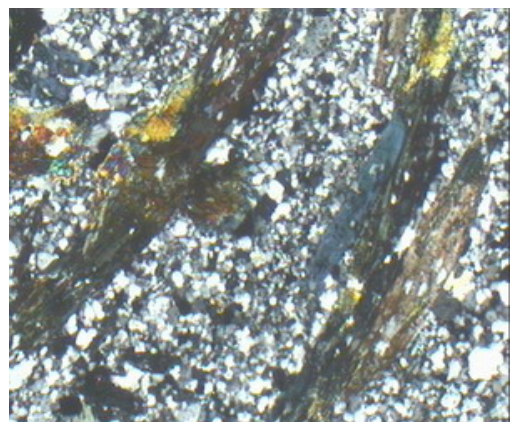
تصاویر شش مقطع نازک استفاده شده در این مقاله. تصاویر سمت چپ در نور معمولی و تصاویر سمت راست در نور قطبی تهیه شده‌اند.



Quartz



Amphibole



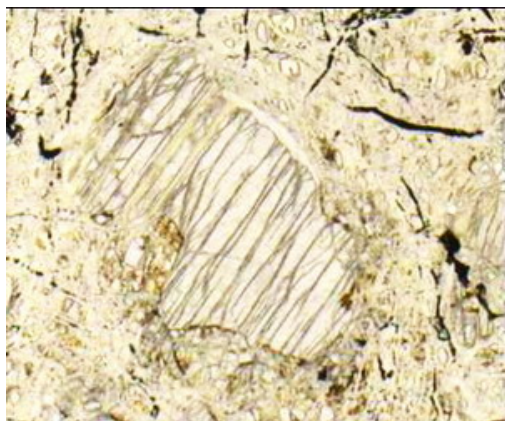
به منظور اندازه‌گیری میزان درستی کلی الگوریتم پیشنهادی، فرآیند جداسازی بر روی مقاطع ذکر شده در (جدول ۱) به‌جز مقاطع استفاده شده در مرحله آموزش (جدول ۲) انجام شده و میزان درستی کلی الگوریتم در (جدول ۴) گزارش داده شده است. با توجه به (جدول ۴)، میزان درستی کل الگوریتم پیشنهادی ۸۷/۳۲٪ می‌باشد.

جدول ۴. میزان درستی کلی الگوریتم پیشنهادی به منظور جداسازی کانی‌های موجود در مقاطع نازک موجود در پایگاه داده‌ای

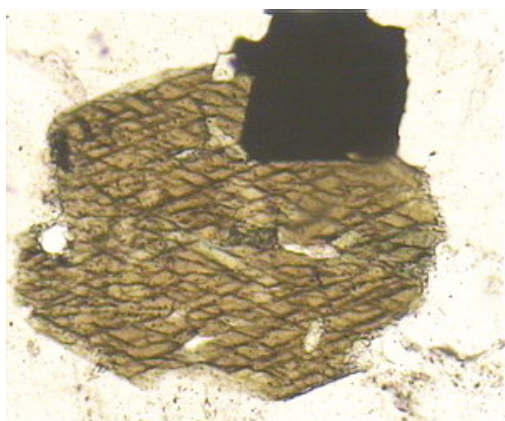
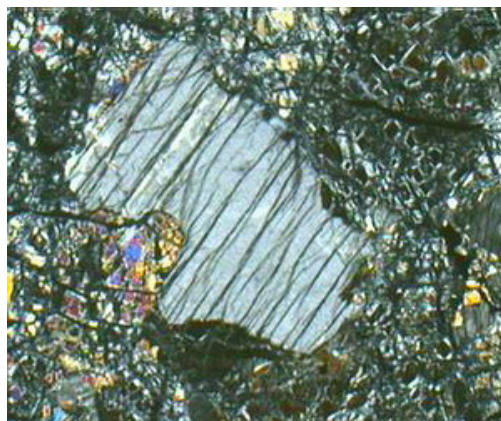
| مقاطع هوازده | مقاطع بدون هوازده‌گی | تعداد مقاطع         |
|--------------|----------------------|---------------------|
| ۳۰           | ۵۳                   | میزان درستی کلی (%) |
| ۸۳/۲۶        | ۹۳/۳۸                |                     |

## ۶ نتیجه‌گیری

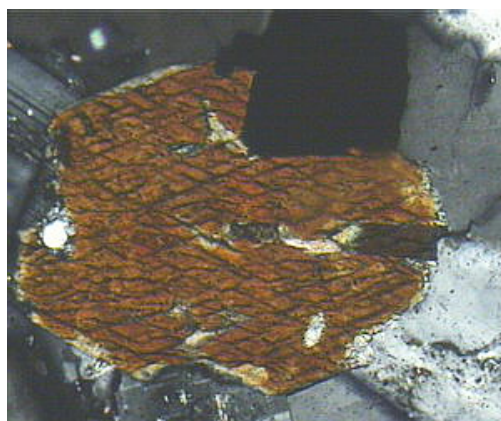
جداسازی کانی‌های موجود در مقاطع نازک فرایندی دشوار است که استفاده از روش‌های خودکار و تلفیق آن با محدودیت‌ها و شرایط خاص کانی‌شناسی، نوآوری‌ای است که در مقاله حاضر ارائه گردیده است. در این مقاله، از نوعی الگوریتم خوشه‌بندی به‌منظور



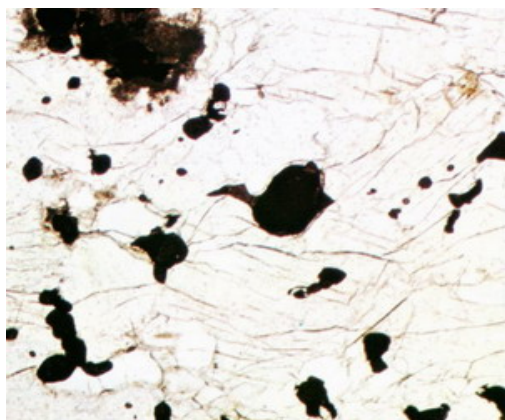
Bronzite



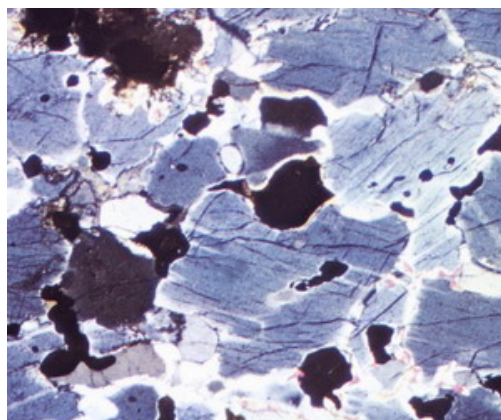
Amphibole



Alanite



Melilite



## مراجع:



**حسین ایزدی** مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی معدن گرایش اکتشاف در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه بیرجند دریافت نمودند. هم‌اکنون ایشان دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد در رشته مهندسی نفت گرایش اکتشاف در دانشکده فنی دانشگاه تهران می‌باشند. ایشان تاکنون موفق به انتشار ۳ مقاله ISI، ۲ مقاله علمی پژوهشی و ۱۰ مقاله در کنفرانس‌های داخلی و خارجی از تحقیقات دوره کارشناسی خود شده است. علاقه‌مندی‌های علمی ایشان شامل فیزیک سنگ رقومی، بازسازی سه‌بعدی مواد ناهمگن تصادفی، آمار  $n$  نقطه‌ای، برنامه‌نویسی هوشمند، سیستم‌های خبره و پردازش تصویر می‌باشد.



**جواد صدری** در سال ۱۳۸۶ مدرک دکتری خود را در زمینه یادگیری ماشین و بازشناسی الگو از دانشگاه کونکوردیا کانادا دریافت نمود. ایشان همچنین مدت یک سال را در مرکز بازشناسی الگو و یادگیری ماشین دانشگاه کونکوردیا و دو سال در مرکز بیوانفورماتیک دانشگاه مک‌گیل به عنوان دوره پسا-دکتری خود گذرانده‌اند. ایشان

مقالات متعددی را در مجلات و کنفرانس‌های بین‌المللی در زمینه‌های بیوانفورماتیک، بازشناسی الگو و خواندن متون دست‌نویس به چاپ رسانده‌اند. مقاله ایشان در نهمین دوره IWFHR (International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition) در سال ۲۰۰۴ در توکیو ژاپن به عنوان مقاله برتر انتخاب شد. همچنین ایشان یکی از نویسندگان کتاب "Character Recognition Systems, a Guide for Students & Practitioners" هستند که توسط انتشارات John Wiley & Sons در سال ۲۰۰۷ منتشر شد. ایشان دبیر اولین کنفرانس بازشناسی الگو و آنالیز تصویر (PRIA 2013) در دانشگاه بیرجند بوده‌اند و همچنین داور مقالات را در چندین مجله بین‌المللی در زمینه‌های بیوانفورماتیک، بازشناسی الگو و خواندن متون دست‌نویس نظیر Pattern Recognition, Pattern Recognition Letters, Int. J. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Int. J. Document Analysis and Recognition, Pattern Analysis and Applications and Signal Processing J در حال حاضر ایشان تحقیقات خود را در مرکز بیوانفورماتیک دانشگاه مک‌گیل کانادا ادامه می‌دهند و زمینه تحقیقاتی ایشان کاربردهای بازشناسی الگو و یادگیری ماشین در بیوانفورماتیک، خواندن متون دست‌نویس، آنالیز متون دست‌نویس، جداسازی و بازشناسی اسناد تاریخی، پردازش تصویر و الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد.



**نصرت آقا مهران** مدرک کارشناسی خود را در رشته کانی‌شناسی در سال ۱۳۶۷ از دانشگاه برلین آلمان دریافت نمودند. ایشان همچنین در سال ۱۳۷۰ مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته کانی‌شناسی گرایش کانی‌های صنعتی از دانشگاه برلین آلمان دریافت کردند. ایشان عضو هیئت علمی دانشگاه بیرجند بوده‌اند و در مهر ماه

سال ۱۳۹۳ دارفانی را وداع گفتند. روحشان شاد و یادشان گرامی باد.

- [1] Fueten. F, (1997), "A computer controlled rotating polarizer stage for the petrographic microscope". Computers & Geosciences 23, 203-208.
- [2] Fabbri. A. G, (1984) "Image Processing of Geological Data". Van Nostrand Reinhold, New York, 224 pp.
- [3] Allard. B, and Benn. K, (1989), "Shape preferred orientation analysis using digitized images on a microcomputer". Computers & Geosciences 15(3), 441-448.
- [4] Simigian. S, and Starkey. J, (1989), "IMAGE: modi@ed for use on a microcomputer based system". Computers & Geosciences 15(3), 237-254. Detection and Region Growing", Computers and Geosciences 30, 817-831.
- [5] Izadi. H, Sadri. J, Mehran. N.A, (2013), "Intelligent Mineral Identification Using Clustering and Artificial Neural Networks Techniques", Published in the Proceedings of The First Iranian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis (PRIA 2013), Birjand, Iran.
- [6] Goodchild. J. Scott and Fueten. F, (1998), "Edge Detection in Petrographic Images Using The Rotation Polarizer Stage". Computers & Geosciences 24(8), 745-751.
- [7] Yesiloglu-Gultekin. N, Keceli. A.S, Sezar. E.A, Can. A.B, Gokceoglu.C, Bayhan. H, (2012), "A Computer Program (TSecSoft) to Determine Mineral Percentages Using Photographs Obtained from Thin Sections". Computers & Geosciences 46, 310-316.
- [8] Heilbronner. R, (2000), "Automatic Grain Boundary Detection and Grain Size Analysis Using Polarization Micrographs or Orientation Images". Journal of Structural Geology 22, 969-981.
- [9] Arnould. X, Coster. M, Chermant. J.L, Chermant. L, Chartier. T, Elmoataz. A, (2001), "Segmentation and grain size of ceramics". Image Analysis and Stereology 20, 131-135.
- [10] Zhou, Y., Starkey, J., Mansinha, L. (2004A), Identification of Mineral Grains in a Petrographic Thin Section Using Phi- and Max-Images, Mathematical Geology 36(7), 781-801.
- [11] Obara. B, (2007), "A New Algorithm Using Image Color System Transformation for Rock Grain Segmentation". Mineralogy and Petrology 91, 271-285.
- [12] Sadri. J, Ching. Y.S, Bui. T.D, (2006), "A New Clustering Method for Improving Plasticity and Stability in Handwritten Character Recognition Systems", 18<sup>th</sup> International Conference on Pattern Recognition.
- [13] Rashedi. E, Nezamabadi-pour. H and Saryazdi. S, (2009), "GSA: A Gravitational Search Algorithm", Information Science, Vol. 179, pp. 2232-2248.
- [14] Gonzalez. R.C, Woods. R.E, and Eddins. S.L, (2003), "Digital Image Processing Using MATLAB", Pearson Prentice Hall.
- [15] Marschallinger. R, (1997), "Automatic Mineral Classification in The Macroscopic Scale", Computers&Geosciences, Vol. 23, pp. 119-126.
- [16] Thompson. S, Fueten. F and Bochus. D, (2001), "Mineral Identification Using Artificial Neural Networks and the Rotation Polarizer Stage", Computer & Geoscience, Nol. 27, pp. 1081-1089.
- [17] Prudent. Y and Ennaji. A, (2005), "A New Learning Algorithm for Incremental Self-Organizing Maps", Proc. of European Symposium on Artificial Neural Network (ESANN) 2005, Belgium, April.