

Minerals boundary detection in petrographic thin sections image using ArcGIS software

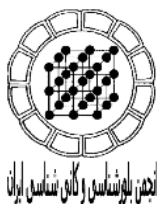
A. Hassanpour, A. Kananian, M. A. Barghi

*School of Geology, Faculty of Sciences, University of Tehran, Iran
Email: Kananian@khayam.ut.ac.ir*

(Received: 23/9/2008, in revised form: 7/12/2008)

Abstract: In this paper, a new method for mineral boundary detection is proposed using a model prepared in ArcGIS ModelBuilder tool. Required data for this method are gray scale images taken from petrographic thin sections. The images are captured in 19 numbers through 90° polarizers and lambda plate rotation with 5° intervals while the microscope table is fixed. Mineral boundaries are detected using the ArcGIS software by comparison of colour intensity amongst the adjacent minerals in sequential images. The presented method is fast and accurate to detect favorite grain boundaries from thin sections, and is able to create a powerful database containing grain shape characteristics. Petrographic study on four rock samples demonstrates that the results of grain boundary detection by the model without operator intervention, are more than 80 percent correlated with manual boundary detection method.

Keywords: *Boundary detection, ArcGIS ModelBuilder, Thin section, Image processing, Petrography.*



مرزبندی کانی‌ها در تصویر مقاطع سنگ‌شناسی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS

عبداله حسن‌پور، علی کنعانیان، محمدعلی برقی

دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران

پست الکترونیکی: Kananian@Khayam.ut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۸۷/۶/۲، نسخه نهایی: ۸۷/۹/۱۷)

چکیده: در این کار پژوهشی، برای مرزبندی کانی‌ها در مقاطع نازک سنگ‌شناسی، روشی جدید بر مبنای طراحی مدل در محیط نرم‌افزاری ArcGIS ModelBuilder ارائه شده است. داده خام مورد نیاز این روش، عکس‌هایی به رنگ خاکستری است که از مقاطع نازک سنگ‌شناختی تهیه می‌شوند. در حالیکه میز چرخان میکروسکوپ ثابت است، تعداد ۱۹ قطعه عکس در هر ۵ درجه با چرخاندن قطب‌بنده و تیغه لاندرا بازه ۹۰ درجه‌ای، تهیه می‌شوند. مرز کانی‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS، از مقایسه شدت روشنایی کانی-های همجوار در عکس‌های متوالی، مشخص می‌شود. روش ارائه شده سریع و دقیق است و قادر است یک پایگاه اطلاعاتی قوی شامل ویژگی‌های شکلی دانه‌ها ایجاد کند. بررسی‌های سنگ‌شناختی پتروگرافی بر روی چهار نمونه سنگی نشان داد که نتایج حاصل از مرزبندی با استفاده از مدل بدون دخالت کاربر، بیش از ۸۰ درصد با نتایج حاصل از مرزبندی دستی همخوانی دارد.

واژه‌های کلیدی: مرزبندی، ArcGIS ModelBuilder، مقطع نازک، پردازش تصویر، سنگ‌شناختی.

۱- مقدمه

هدف اساسی روش‌های تحلیل مقاطع با استفاده از کامپیوتر، شناسایی نوع کانی‌ها به روش خودکار در تصاویر رقمی مقاطع نازک سنگ‌شناسی برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌های آنها است. یکی از مراحل اصلی انجام این کار تعیین حد و مرز دانه‌ها در مقاطع نازک سنگ‌شناسی است.

مقاطع نازک سنگ‌شناسی حاوی اطلاعات ارزشمندی نظیر: شکل، اندازه، نوع کانی، مرز کانی‌ها، درصد اجزای تشکیل دهنده سنگ، سم‌گیری بلورشناختی، آرایش، و پراکندگی اجزای تشکیل دهنده نمونه‌ها در مقیاس میکروسکوپی هستند. چنانچه اطلاعات یاد شده در مقاطع نازک در محیط نرم‌افزاری مورد بررسی قرار گیرند، می‌توان از طریق برقراری ارتباط منطقی بین این ویژگی‌ها، مقاطع را با سرعت و دقت بیشتری شناسایی کرد.

اولین پدیده‌ای که هنگام مشاهده عکس‌های میکروسکوپی نظر بیننده را به خود جلب می‌کند رنگ و میزان روشنایی دانه‌های تشکیل دهنده سنگ است. در حالت کلی رنگ و میزان روشنایی اجزای یک عکس، نتیجه بازتاب و جذب نور به وسیله عناصر تشکیل دهنده عکس است. به همین جهت می‌تواند معرف شکل هندسی و بافت اجزای تشکیل دهنده سنگ در دنیای واقعی باشد. در میکروسکوپ قطبشی، رنگ تداخلی به ضخامت، سم‌گیری بلورشناسی و تفاضل ضرایب شکست در بلورها بستگی دارد. بنابراین تصاویر مقاطع نازک، هم اطلاعات هندسی (شکل دانه‌ها) و هم اطلاعات تحلیلی (دوشکستی) را در بر دارند [۱]. برای به دست آوردن مرز بین کانی‌ها در مقاطع، باید از عکس‌هایی که در نور دوبار قطبیده تهیه می‌شوند، استفاده کرد. زیرا در نور یک بار قطبیده بیشتر کانی‌ها بیرنگ و چنانچه دارای ضریب شکست یکسان باشند، از

می‌گیرد. فرض این روش مرزبندی این است که دانه‌های همجنس با سمتگیری بلورشناختی متفاوت، همواره شدت رنگ متفاوتی دارند و بر اساس تفاوت در شدت رنگشان قابل تفکیک‌اند. ولی عیب این فرض در این است که ممکن است دانه‌هایی علیرغم سمتگیری بلورشناختی متفاوت، شدت رنگ برابری داشته باشند. بنابراین ممکن است دو دانه هم جنس، با سمتگیری بلورشناختی متفاوت نسبت به قطبیده‌ها، در عکس شدت بیشینه، شدت رنگ مشابهی را نشان دهند (شکل ۱). در این حالت چنانچه این دو دانه مجاور یکدیگر باشند، نمی‌توان مرز مشخصی بین آنها مشاهده و رسم کرد. تنها راه حل برای رفع این مشکل استفاده از عکسی به نام Maximum Positioning Image است که موقعیت محور نوری دانه‌ها را در حالت بیشینه شدت رنگ نشان می‌دهد، ولی زمانی که دو دانه مجاور همجنس نباشند (مثلاً کوارتز و فلدسپات که رنگ تداخلی مشابهی دارند)، و از نظر شدت رنگ و موقعیت شدت رنگ برابر باشند، کاستی این روش بیشتر آشکار می‌شود [۶].

چنانکه یاد آور شدیم، در روش‌های پویا و نیمه‌پویا از عکس‌هایی به رنگ خاکستری، ولی در روش ایستا از عکس رنگی استفاده می‌شود. در برخی از بررسی‌ها [۷]، برخلاف روش‌های متداول یاد شده، گرچه عکاسی به روش پویا صورت گرفته است، ولی عکس‌ها در چند موقعیت محدود و به صورت رنگی تهیه شده‌اند. در عکس‌های رنگی به علت بالا بودن تمایز، وضوح مرزها بالاست، ولی در مقاطعی که کانی‌ها دارای خاموشی موجی^۲ و زیردانه‌اند، وضوح بالا سبب ظاهر شدن مرزهای مجازی در دانه‌ها می‌شود. علاوه بر این، در این روش [۷] بازه و تعداد عکس‌ها برای تمایز کامل بین دو دانه مجاور با ویژگی‌های نوری نزدیک به هم کافی نیست. در ضمن، بازه انتخابی در این روش بر مبنای اصول بلورشناسی انتخاب نشده است. با توجه به مشکلی که عکس‌های رنگی ایجاد می‌کنند، عکس‌های خاکستری برای مرزبندی مناسب‌ترند. ولی برای فراهم آوردن تمایز رنگی مناسب در عکس‌هایی با مقیاس خاکستری برای هر دانه، بایستی بازه‌ای مناسب انتخاب شود که از ویژگی‌های بلورشناختی دانه‌ها بیشترین استفاده صورت گیرد. بازه مناسب بازه‌ای است که در آن هر دانه حداقل یک‌بار

یکدیگر تفکیک ناپذیرند. در نور دوبار قطبیده رنگ تداخلی عامل موثری برای جدایی کانیهاست. عکسبرداری از مقاطع میکروسکوپی به منظور مرزبندی دانه‌ها، بیشتر به سه روش ایستا، پویا و نیمه‌پویا انجام می‌گیرد.

در روش ایستا از یک عکس رنگی برای تشخیص مرز دانه‌ها استفاده می‌شود [۲]. مبنای مرزبندی در این روش، جدا کردن دانه‌ها بر اساس تفاوت در رنگ تداخلی آنهاست. از معایب این روش این است که همیشه دو دانه ناهمجنس، رنگ تداخلی متفاوت ندارند و ممکن است با یک رنگ تداخلی دیده شوند (مانند کوارتز و فلدسپات). از طرف دیگر گاهی ممکن است دو کانی ناهمجنس علیرغم تفاوت در رنگ تداخلی، در سمتگیری بلورشناختی خاصی نسبت به قطبیده‌ها، در نور قطبیده به یک رنگ دیده شوند. حالت‌های یاد شده چنانچه در دو دانه مجاور رخ دهد، سبب می‌شود که این دو دانه از یکدیگر قابل تفکیک نباشند. چنانچه مقاطع، حاوی کانی‌های همجنس و یا دوشکستی پایین باشند، کارایی این روش به شدت پایین می‌آید.

در روش پویا از یک سری عکس‌های پی در پی به رنگ خاکستری که با تغییر یکنواخت زاویه مقطع میکروسکوپی نسبت به راستای قطبیده تهیه شده‌اند، برای مرزبندی دانه‌ها استفاده می‌شود [۳]. در این روش با استفاده از یک فیلتر نرم‌افزاری مانند فیلتر کنی^۱ [۴]، هر یک از عکس‌ها به صورت جداگانه، مرزبندی شده و در پایان با ادغام نتایج، مرزبندی نهایی صورت می‌گیرد. برتری این روش عکاسی آن است که چنانچه دو دانه مجاور در زوایای خاصی از چرخش میز میکروسکوپ به یک رنگ دیده شوند، با تهیه عکس از چند راستای مختلف می‌توان اثر هم‌رنگی در حالت‌های خاص را خنثی کرد. با این وجود، در خاتمه هنوز مرزهای گسسته و یا دانه‌های مرزبندی نشده، دیده می‌شوند [۵].

روش نیمه‌پویا، ترکیبی از دو روش بالا است. در این روش نخست عکس‌های پی در پی از مقاطع، در بازه ۱۸۰ درجه‌ای تهیه می‌شوند [۵، ۶]، ولی در نهایت یک عکس بنام شدت بیشینه از آنها استخراج شده و از روی آن مرز دانه‌ها به دست می‌آید. در این روش، تنها شدت روشنایی دانه‌ها در عکس‌هایی به رنگ خاکستری مبنای مرزبندی دانه‌هاست و عمل مرزبندی فقط روی مقاطع سنگ‌شناختی با یک نوع کانی صورت

1- Canny

2 - Undulose extinction

نرم افزار و با کمترین نقش از سوی کاربر انجام داد، نتایج حاصله سریعتر و دقیق تر قابل تفسیر خواهند بود. یکی از مناسبترین نرم افزارها برای این گونه تحلیل ها، ArcGIS است. این نرم افزار حاوی ابزارهای مناسب برای مرزبندی دانه ها در عکس های میکروسکوپی است. امتیاز این نرم افزار در مدیریت لایه های اطلاعاتی است [۷]. بنابراین در روش هایی که از این نرم افزار استفاده شده است [۲، ۷]، لایه های مختلف اطلاعاتی از قبیل شکل، ترکیب شیمیایی دانه ها، سمگیری بلورشناختی دانه ها، روابط شکلی و نیز آرایش فضایی و پراکندگی دانه ها قابل تلفیق و تحلیل است.

خاموشی کامل و روشنایی بیشینه را نشان دهد، تا مرزبندی دانه ها با کمترین خطا همراه باشد.

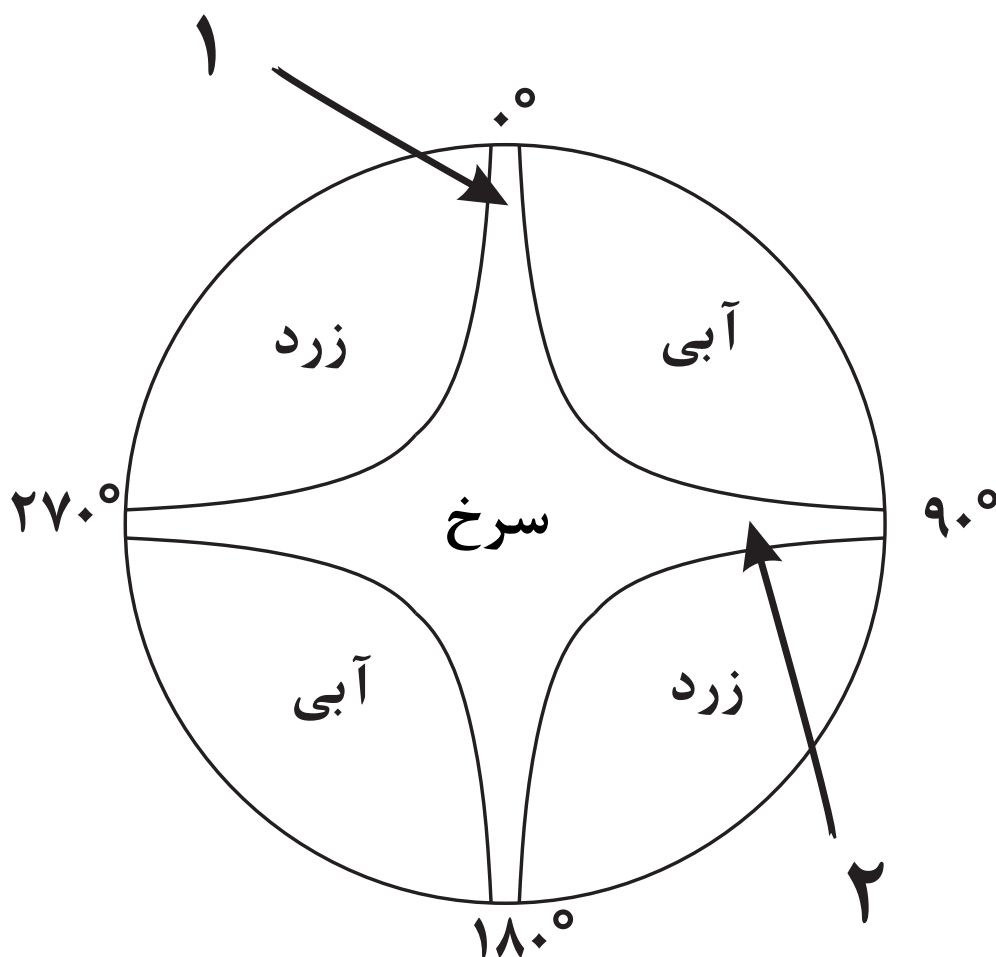
برای مرزبندی عکس های مقاطع نازک سنگ شناختی معمول به سه شیوه عمل شده است:

۱- تشخیص کناره دانه ها [۶ تا ۹]

۲- تشخیص سطح دانه ها [۱۰]

۳- ترکیبی از هر دو روش [۱۱]

علاوه بر روش تهیه عکس و روش مرزبندی، استفاده از برنامه نرم افزاری مناسب نیز اهمیت زیادی دارد. با تلفیق نتایج حاصل از به کارگیری نرم افزارهای متفاوت نیز می توان عمل مرزبندی را انجام داد. اما چنانچه بتوان تمام مراحل مرزبندی را در یک

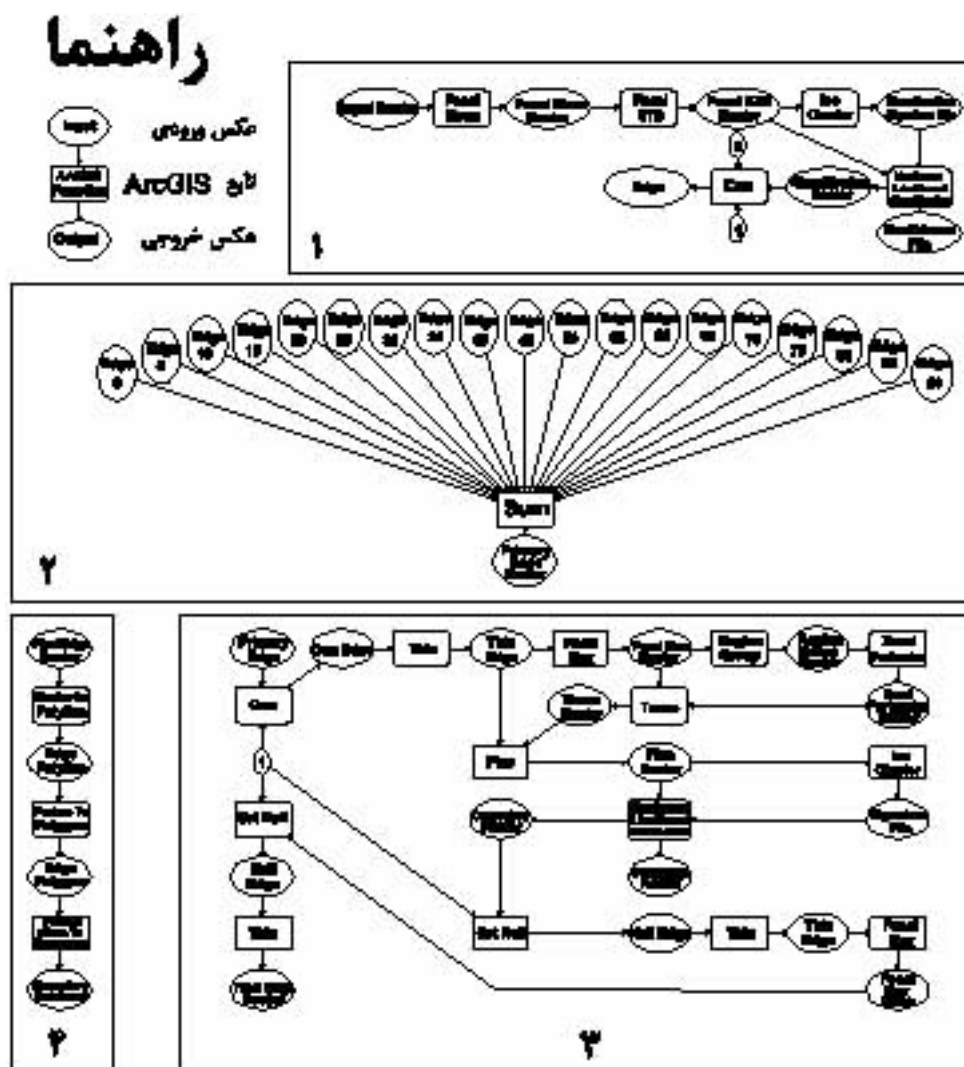


شکل ۱ دانه های ۱ و ۲ با دو سمگیری بلورشناختی متفاوت، در برجسته نگار^۱ از الگوی خاموشی (این برجسته نگار بر اساس رنگ تداخلی حاصل از کانی کوآرتز با محور نوری افقی و راستای ۰ تا ۳۶۰ درجه، در شرایط نور دوبار قطبیده به همراه تیغه لاند، منطقه بندی شده است) به نمایش در آمده اند. در این شکل مشاهده می شود که علیرغم تفاوت در سمگیری بلورشناختی دانه های ۱ و ۲، رنگ تداخلی هر دو دانه سرخ سری اول است.

۲- روش بررسی

در این کار پژوهشی، عکس‌ها به روش پویا تهیه، و مرزبندی بر اساس تشخیص کناره دانه‌ها صورت گرفته است. نخست در ArcGIS کیفیت هر عکس به طور جداگانه افزایش می‌یابد. سپس مرزبندی اولیه صورت می‌گیرد. در مرحله بعد مرزهای ناخواسته و غیرواقعی حذف می‌شوند. در نهایت مرزهای به دست آمده رقمی شد تا در محیط نرم‌افزار ArcGIS قابل بررسی باشد. برای کاهش دخالت کاربر در مراحل یاد شده و عملیات مرزبندی به صورت خودکار، مدلی با استفاده از ArcGIS ModelBuilder طراحی شد (شکل ۲). بیشتر توابع

و فرآیندهایی که در این کار پژوهشی به کار رفته است، هر کدام در نرم‌افزارهای تحلیل عکس، به صورت جداگانه وجود دارند. اما با اجتماع تمام این توابع در محیط نرم‌افزاری ArcGIS، کاربر می‌تواند بدون مراجعه به چندین نرم‌افزار، مرزبندی دانه‌ها را با سرعت بیشتری انجام دهد. ضمناً، انتقال داده‌ها از نرم‌افزاری به نرم‌افزار دیگر (که خود سبب بروز خطای ناشی از روش‌های متفاوت تحلیل در نرم‌افزارهای مختلف می‌شود) نیز انجام نمی‌گیرد. بنابراین، با انجام تمامی مراحل مرزبندی در یک نرم‌افزار، به طور غیر مستقیم بر دقت نتایج نیز افزوده می‌شود.



شکل ۲ مدل ارائه شده در این کار پژوهشی به چهار بخش قابل تقسیم است. ۱: در این بخش از مدل، نخست کیفیت عکس‌ها افزایش می‌یابد و سپس هر عکس، جداگانه مرزبندی می‌شود. ۲: در مرحله بعد با استفاده از تابع Sum مرزهای مربوط به تمامی عکس‌ها با هم تلفیق می‌شوند. ۳: این بخش از مدل، نوفه‌ها را از بین می‌برد. ۴: در این بخش، مرزبندی حاصل از بخش ۳ رقمی شده و اطلاعات شکلی دانه‌ها به صورت خودکار محاسبه می‌شود.

۱-۲- انتخاب نمونه

نمونه‌های طبیعی مورد استفاده در این کار شامل سه مقطع نازک کوارتزیت Qz870114, Qz870120, Qz870121 و یک مقطع نازک میلونیت گرانیته Mt870206 به ضخامت ۲۵ میکرون است (شکل ۷). دانه‌ها در سه مقطع کوارتزیتی به ندرت دارای زیردانه و خاموشی موجی هستند. ولی در مقطع میلونیتی این پدیده‌ها به میزان زیاد مشاهده می‌شود. علاوه بر این موقعیت خاموشی، بیشتر دانه‌های کوارتز در مقطع میلونیتی، نزدیک به هم است که این پدیده بیانگر سمتگیری ترجیحی بلورشناختی در بیشتر دانه‌های کوارتز است. در بیشتر روش‌های مرزبندی، به دلیل فراوانی کوارتز در اغلب سنگ‌های معمولی و کاربرد آن در تحلیل‌های ساختاری و نیز به علت دشوار بودن مرزبندی مقاطع با دانه‌های همجنس (عملکرد مطلوب یک روش در مرزبندی مقاطع دشوار، تایید کننده کارایی بالای آن روش است)، از نمونه‌های کوارتزدار استفاده شده است [۵، ۶، ۷، ۸، ۱۰ و ۱۲]. از برتری‌های انتخاب نمونه‌های کوارتزدار این است که امکان مقایسه نتایج روش ارائه شده در این کار پژوهشی با نتایج حاصل از روش‌های دیگری که از نمونه‌های کوارتزدار استفاده کرده‌اند، فراهم می‌شود.

۲-۲- تهیه عکس

برای تهیه عکس‌های میکروسکوپی، از بازه انتخابی ۹۰ درجه استفاده شد. در این بازه هر دانه حداقل یک‌بار خاموشی کامل و حداکثر روشنایی را نشان می‌دهد و موجب تمایز لازم برای مرزبندی بین عکس‌های پی در پی می‌شود. عکس‌ها به رنگ خاکستری‌اند، بنابراین شدت رنگ نسبی دانه‌ها، معیار مرزبندی آنها در مقاطع نازک سنگ‌شناختی است. ابعاد عکس‌ها ۵۷۶ × ۷۲۰ پیکسل است و با پسوند PNG ذخیره می‌شوند. در این مرحله با چرخاندن قطب‌بندها و تیغه لاند و ثابت نگه داشتن مقطع سنگ‌شناختی [۱، ۳ و ۱۳]، چرخش میز میکروسکوپ قطبشی، شبیه‌سازی شده و در هر ۵ درجه یک عکس گرفته می‌شود. از آنجاییکه در این روش عکسبرداری، تغییرات تدریجی در شدت رنگ دانه‌ها ثبت می‌شود، نتیجه کار از دقت بالایی برخوردار خواهد بود.

در برخی از روش‌های مرزبندی، قطب‌بندها و تیغه لاند ثابت‌اند و میز میکروسکوپ به همراه مقطع می‌چرخد [۱۴ و

۱۵]. ولی در این روش‌ها باید پس از عکسبرداری از مقاطع، عکس‌ها را به اندازه چرخش میز میکروسکوپ در جهت مخالف چرخاند تا پیکسل‌های متناظر در عکس‌های مختلف روی هم قرار گیرند که این خود سبب افزایش در خطا و زمان عکسبرداری می‌شود.

ثابت ماندن مختصات پیکسل‌های متناظر در تمامی عکس‌ها، در مرحله تهیه عکس اهمیت زیادی دارد. زیرا، با ثابت ماندن مختصات پیکسل‌های متناظر، تنها متغیر در عکس‌ها، الگوی رنگ تداخلی برای هر پیکسل خواهد بود که می‌توان براساس آن دانه‌ها را از یکدیگر تفکیک کرد. بدین ترتیب که پیکسل‌های مجاور و با الگوی تداخلی مشابه، مربوط به یک دانه هستند و مناطقی از عکس که تغییرات ناگهانی را در الگوی تداخلی پیکسل‌های مجاور یکدیگر نشان می‌دهند، به عنوان مرز دانه‌ها محسوب می‌شوند.

۲-۳- افزایش کیفیت عکس‌ها

از دیدگاه نظری مقادیر پیکسل‌های داخلی هر دانه باید با هم برابر باشند، ولی در عمل مقادیر پیکسل‌های مربوط به هر دانه یکسان نیستند. وجود نفوذی‌ها، مقاطع با کیفیت پایین، بزرگنمایی بالا، و دگرسانی، عواملی هستند که تغییرات را در مقادیر پیکسل‌های مربوط به یک دانه به وجود می‌آورند. این عوامل با توجه به روش تشخیص مرز دانه‌ها (مراجعه شود به بخش مرزبندی اولیه) سبب ایجاد مرزهای کاذب و عوارض نامطلوب طی فرآیند مرزبندی می‌شوند. برای جلوگیری از ایجاد مرزهای کاذب و عوارض ناخواسته در مراحل بعدی، باید بدون از بین بردن مرز واقعی دانه‌ها مقادیر پیکسل‌های مربوط به هر دانه را به هم نزدیک کرد. برخی از روش‌ها با به کارگیری فیلتر میانگین [۱۶ تا ۱۹]، کیفیت عکس‌ها را به میزان قابل قبولی ارتقا می‌دهند. با اعمال فیلتر نرم‌افزاری میانگین (Neighborhood statistics-Mean) در محیط نرم‌افزار ArcGIS می‌توان بدون از بین بردن مرزهای اصلی دانه‌ها، مقادیر پیکسل‌های مربوط به هر دانه را تا حد امکان به هم نزدیک کرد. این فیلتر، میانگین مقادیر تمام پیکسل‌ها را در گستره‌ای به ابعاد ۵×۵ محاسبه و میانگین را به پیکسل مرکزی این گستره نسبت می‌دهد. این فیلتر با عبور در سرتاسر هر یک از عکس‌ها، تغییرات ناگهانی در ابعاد کوچک را از بین می‌برد و

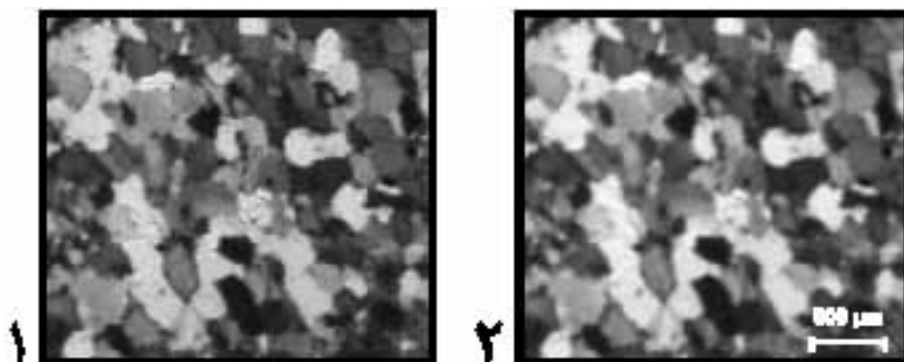
انحراف معیار مقادیر مربوط به گستره مرز دانه‌هاست. با اعمال فیلتر انحراف معیار (Neighborhood statistics - Standard deviation) در محیط نرم‌افزار ArcGIS، گستره مرز دانه‌ها [۲۰] در هر عکس با انحراف معیار بالاتر، از مناطق درونی هر دانه جدا می‌شود. انحراف معیار، پارامتر مهم و معتبر آماریست که با استفاده از آن می‌توان دامنه تغییرات در مقادیر جوامع آماری را محاسبه کرد، و مقادیر ناهنجار (مرز دانه‌ها) را به دقت و به راحتی از مقادیر دیگر زمینه جدا کرد. نتایج به دست آمده با استفاده از فیلتر انحراف معیار، از طریق آنالیز خوشه‌ای (ابزار Iso Cluster در نرم‌افزار ArcGIS) به دو گروه تقسیم می‌شوند، که به عنوان مثال، مقادیر پیکسل‌های مربوط به مرز دانه‌ها برابر با ۱ و سطح درون دانه‌ها برابر صفر است.

در این مرحله روی هر یک از عکس‌ها به صورت مستقل، عمل مرزبندی صورت می‌گیرد و سپس مرزهای به دست آمده از عکس‌های مختلف در هم ادغام شده و به صورت یک عکس واحد به نمایش در می‌آیند (شکل ۴). دانه‌ها در عکس‌های متوالی که طی چرخش ۹۰ درجه‌ای از مقاطع نازک تهیه شده‌اند، در زوایای مختلف با دانه‌های پیرامون خود تمایز رنگی پیدا می‌کنند، بنابراین مرزبندی هر عکس، بخشی از مرز دانه‌ها را نمایان می‌کند. با روی هم قرار گرفتن مرزهای به دست آمده از هر عکس، در نهایت مرز کاملی برای هر دانه مشخص می‌شود. خروجی نهایی این مرحله، مرزبندی ضخیمی است که در اثر روی هم قرار گرفتن مرزها در عکس‌های متوالی ایجاد می‌شود (شکل ۴، تصویر شماره ۲۰). مشکل ضخامت مرزبندی، در مرحله بعدی رفع خواهد شد.

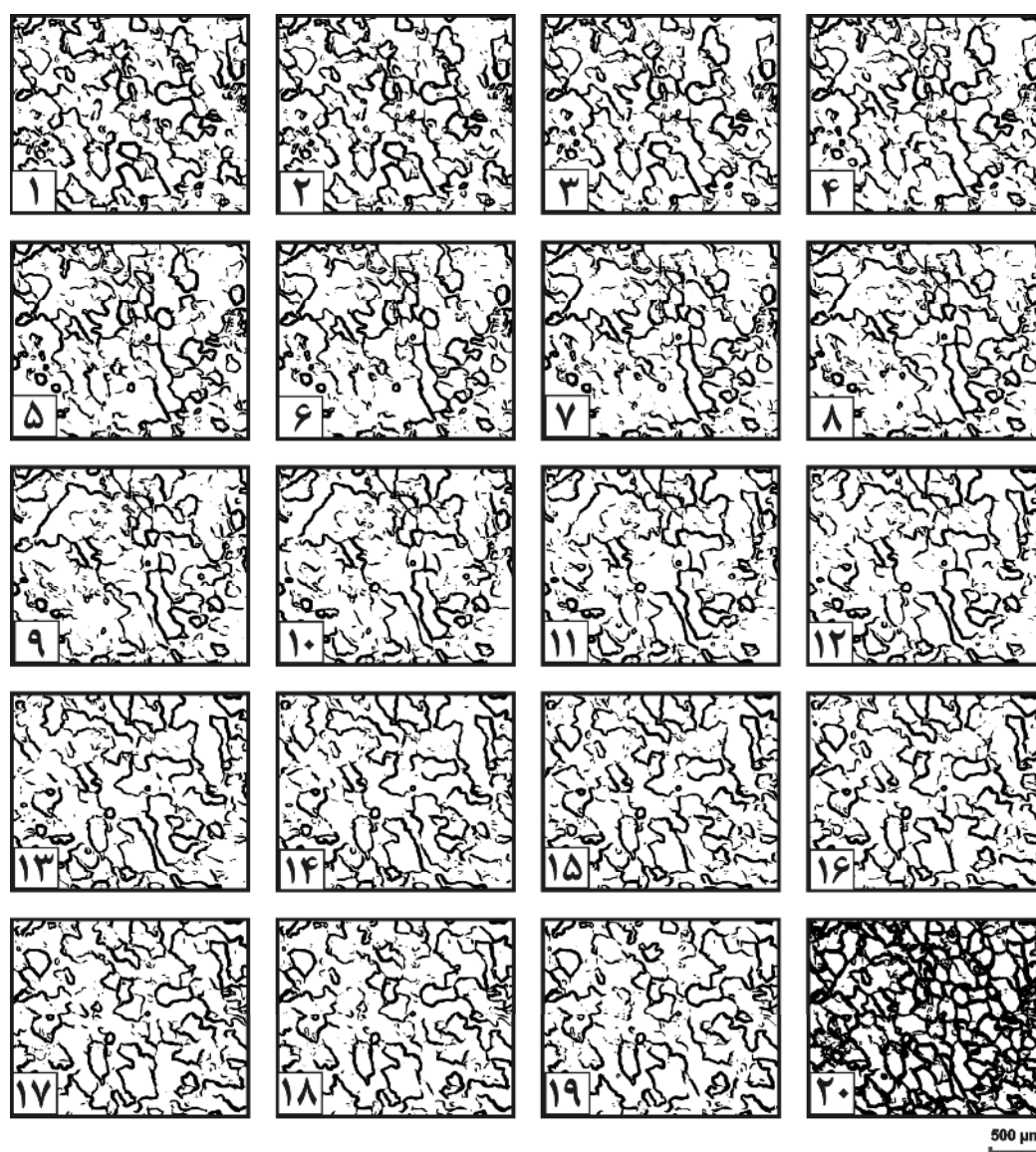
اصطلاحاً کیفیت عکس را در مراحل کاربری بعدی افزایش می‌دهد (منظور از افزایش کیفیت عکس در این کار پژوهشی از بین بردن عوامل ناخواسته در عکس‌هاست). هرچند پس از اعمال این فیلتر نرم‌افزاری مقادیر پیکسل‌های مناطق مربوط به هر دانه بسیار خوب به هم نزدیک می‌شوند ولی به همان نسبت سبب ضعیف‌تر شدن آثار مرز دانه‌ها شده و تا حدی منجر به کاهش وضوح مرز دانه‌ها می‌شود. با این وجود، مرزهای اصلی تا حد قابل قبولی حفظ می‌شوند. این عمل برای تمامی عکس‌ها به طور جداگانه صورت می‌گیرد (شکل ۳). هرچه ابعاد فیلتر بزرگتر باشد، مقادیر پیکسل‌های مربوط به هر دانه به هم نزدیک‌تر خواهند شد و عوارض ناخواسته با ابعاد بزرگتر را نیز در عکس محو می‌کند، ولی در عوض، وضوح مرز واقعی دانه‌ها کمتر می‌شود.

۲-۴- مرزبندی اولیه دانه‌ها

از دیدگاه نظری در گستره هر دانه، مقادیر پیکسل‌های یک دانه نزدیک به هم بوده و در نتیجه میزان نوسان مقادیر پیکسل‌های مجاور در درون یک دانه نیز باید کم باشد. ولی در گستره مرز دانه‌ها، مقادیر پیکسل‌های مجاور با تغییر ناگهانی روبرو می‌شوند. تغییرات ناگهانی در مقادیر پیکسل‌های مجاور همیشه به علت وجود مرز نیست بلکه چنانکه در بخش قبلی یادآور شدیم، مواردی همچون وجود نفوذی، مقاطع با کیفیت پایین، بزرگنمایی بالا، و دگرسانی، سبب این تغییرات می‌شوند. به این ترتیب اهمیت و تاثیر افزایش کیفیت عکس، در این مرحله آشکار می‌شود. با توجه به شدت تغییرات در مقادیر پیکسل‌ها، انحراف معیار مقادیر درون دانه‌ها به طور نسبی پایین‌تر از



شکل ۳ عملکرد مدل ارائه شده در مرحله افزایش کیفیت عکس‌ها با استفاده از فیلتر نرم‌افزاری میانگین. ۱: پیش از اعمال فیلتر میانگین. ۲: پس از اعمال فیلتر میانگین.



شکل ۴ مرزبندی انجام شده به وسیله مدل روی عکس‌های تهیه شده (در بازه ۰ تا ۹۰ درجه و به فاصله هر ۵ درجه) به نمایش درآمده است. مدل ارائه شده در این پژوهش پس از مرزبندی هر عکس به طور جداگانه (۱ تا ۱۹)، آنها را با هم تلفیق کرده و مرزبندی کامل دانه‌ها را به صورت مرزبندی ضخیمی (۲۰) به عنوان خروجی ارائه می‌دهد.

۲-۵- کاهش نوفه (Noise)

در این مرحله نخست ضخامت مرزبندی، با استفاده از ابزار Thin به اندازه یک پیکسل کاهش داده می‌شود تا برای کاهش نوفه‌ها آماده شود. علیرغم افزایش کیفیت عکس در مراحل قبلی و از بین بردن عوامل مشکل‌زا، ممکن است باز هم مرزهایی ناخواسته و غیر واقعی در تصاویر ایجاد شوند که به این مرزهای ناخواسته نوفه می‌گویند. نوفه‌ها در تصویر به صورت مناطق کوچک و ناپیوسته دیده می‌شوند در حالی که مرز دانه‌ها در سراسر مقطع به هم پیوسته است. بنابراین نوفه‌ها

را از روی محیط و یا مساحت کوچکشان در خروجی مرحله مرزبندی اولیه می‌توان شناسایی و حذف کرد. با استفاده از ابزارهایی نظیر Region Group, Zonal Perimeter/Area, Iso Cluster, Maximum Likelihood and Classification (برای توضیح بیشتر در مورد این ابزارها به ضمیمه مراجعه شود) در محیط نرم‌افزار ArcGIS، نخست کل عکس را منطقه‌بندی کرده (ابزار Region Group) و سپس محیط مناطق مختلف محاسبه می‌شود (با استفاده از Zonal Perimeter). در نهایت با استفاده از ابزار Iso Cluster، مناطق بدست آمده را براساس محیطشان به دو گروه اصلی تقسیم

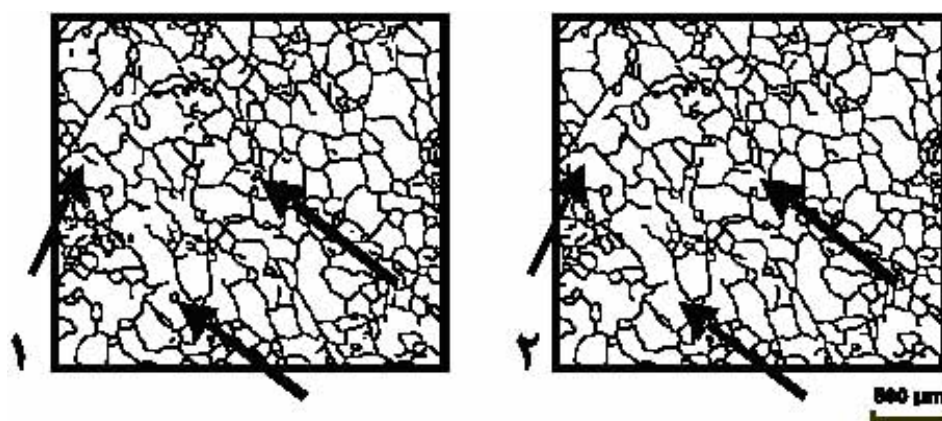
خودکار مرزهای گسسته را که باقیمانده نوفه‌ها از مرحله پیشین‌اند، حذف کرده و فقط گستره‌های بسته را به چندضلعی تبدیل می‌کند (شکل ۶).

پس از تبدیل مرز دانه‌ها به چندضلعی، می‌توان، با ابزارهای ArcGIS ویژگی‌هایی نظیر مساحت، محیط، مرکز جرم دانه‌ها و اطلاعات مکانی دانه‌ها را استخراج کرد. به‌علاوه کاربر می‌تواند، اطلاعات تکمیلی دیگری همانند ریزساختارهای مربوط به هر دانه، نام کانی‌شناختی دانه، ترکیب شیمیایی، و موقعیت محور نوری دانه‌ها را به داده‌های قبلی اضافه کند. بدین ترتیب کاربر می‌تواند در پایان بر اساس پایگاه داده‌های ایجاد شده، انواع محاسبات آماری را انجام دهد و به تجزیه و تحلیل مقاطع نازک سنگ‌شناختی بپردازد. از جمله این تحلیل‌ها می‌توان به تعیین ویژگی پراکندگی مکانی دانه‌ها [۲۱] و محاسبه R_p/Φ [۲۲ و ۲۳] اشاره کرد.

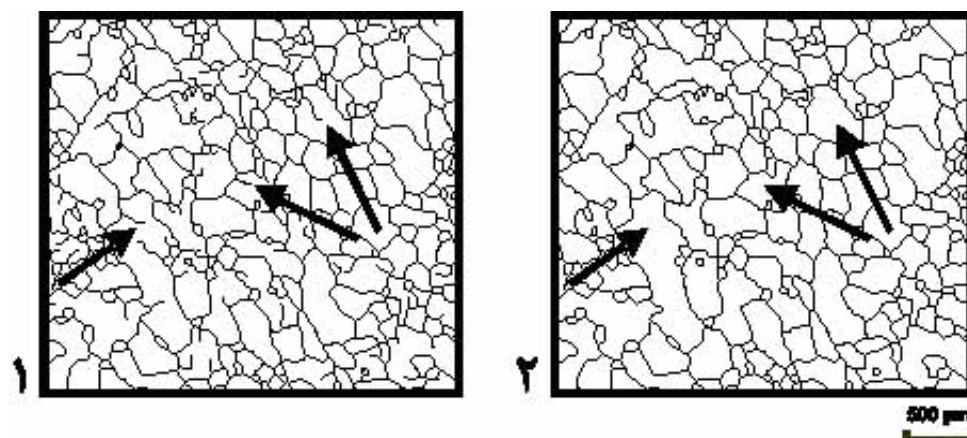
می‌کنیم. در این تقسیم‌بندی مرزهای واقعی (دارای پیوستگی در سرتاسر عکس) با محیط بسیار بزرگتر از نوفه‌ها (مناطق با محیط کوچک و جدا از مناطق دیگر) تمیز پذیر می‌شوند. این احتمال وجود دارد که تعداد اندکی از دانه‌های کوچک نیز ناخواسته در گروه نوفه‌ها قرار گیرند. ولی این احتمال ضعیف بوده و قابل چشم‌پوشی است، زیرا مقایسه مرزبندی نرم‌افزاری و دستی در مقاطع نشان می‌دهد که خطای ناشی از پیدایش پدیده بالا، بسیار ناچیز بوده و عملاً تاثیری بر نتیجه نهایی نخواهد داشت (در بخش ارزیابی مدل بحث خواهد شد). در شکل ۵ عملکرد مدل در مرحله کاهش نوفه نشان داده شده است.

۲-۶- مرزبندی نهایی دانه‌ها

در این مرحله، مرزبندی دانه‌ها به وسیله مدل، رقمی شده و تبدیل به چندضلعی می‌شود. هنگام رقمی کردن، مدل به‌طور



شکل ۵ تصویر ۱ مرزبندی را پیش از مرحله کاهش نوفه، و تصویر ۲ مرزبندی را پس از کاهش نوفه نمایش می‌دهد. در تصویر ۱ نمونه‌هایی از نوفه با پیکان نشان داده شده است که در تصویر ۲ به وسیله مدل از بین رفته است.



شکل ۶ در تصویر ۱ علیرغم مرحله کاهش نوفه هنوز مرزهای گسسته مشاهده می‌شود ولی پس از رقمی کردن مرزبندی و تبدیل آن به چندضلعی (تصویر ۲) باقیمانده نوفه‌ها نیز از بین می‌روند. پیکان‌ها در این تصاویر نمونه‌ای از حذف مرزهای گسسته را نشان می‌دهند.

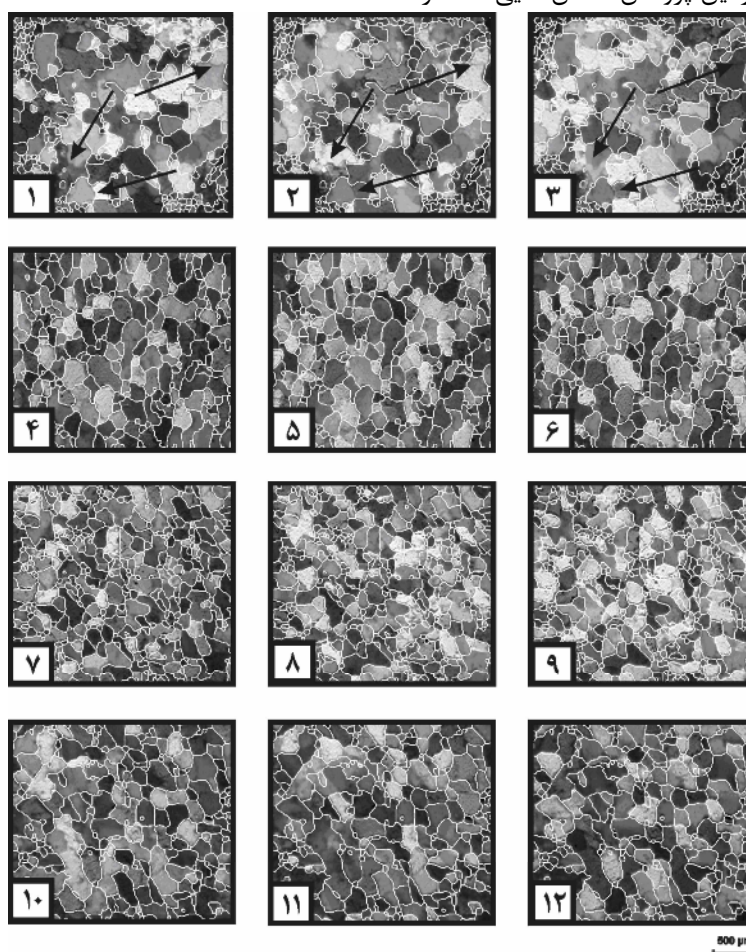
۳- ارزیابی مدل

در این کار پژوهشی، برای برآورد و بررسی روش ارائه شده و عملکرد مدل طراحی شده به سه روش زیر عمل شده است.

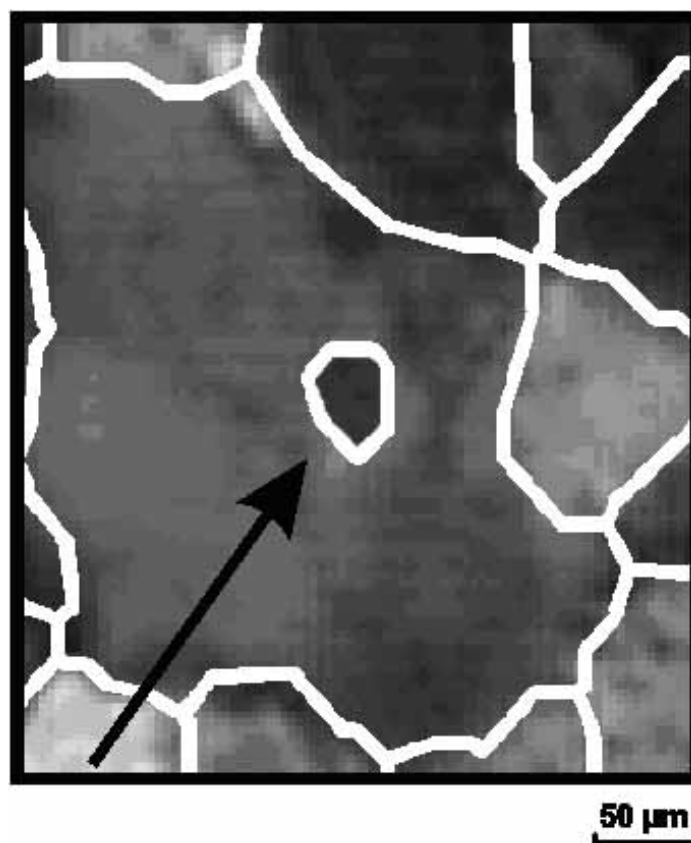
۳-۱- برازش عکس مقاطع و مرزبندی از طریق مدل

یکی از روش‌های ارزیابی مدل طراحی شده، برازش مرز دانه‌ها روی عکس مقطع مربوطه است. با مشاهده برازش مرز دانه‌ها و عکسی از مقطع نمی‌توان با اطمینان در مورد درستی عملکرد مدل طراحی شده، قضاوت کرد. دلیل این امر آن است که هر عکس صرفاً نشان دهنده تصویر مقطع در یک زاویه خاص از چرخش میز میکروسکوپ است و این احتمال وجود دارد که در این زاویه خاص، دو دانه همجوار علی‌رغم تفاوت در جنس و سمتگیری بلورشناختی، به طور کتره‌ای با یک رنگ مشاهده شوند. بنابراین برای رفع این مشکل بایستی مرزبندی مدل را با عکس‌هایی که در زوایای مختلف چرخش میز میکروسکوپ تهیه می‌شوند مقایسه کرد. در این پژوهش، عکس‌هایی که در

سه راستای ۰، ۴۵، و ۹۰ درجه تهیه شده‌اند (عکس‌ها در نور قطبیده و با حضور تیغه لاندای تهیه شده است) با مرزبندی انجام شده به وسیله مدل، برازش و به نمایش در آمده‌اند (شکل ۷). با دقت در شکل‌ها مشاهده می‌شود که عملکرد مدل ارائه شده، در مورد مقاطع نازک کوارتزی قابل قبول بود، ولی در برخی موارد ظاهراً مدل نتوانسته مرز دانه‌ها را به درستی رسم کند (پیکان‌ها در شکل ۷-۱ تا ۳) که علت آن ناچیز بودن تفاوت بین رنگ تداخلی دانه‌های همجوار است. این حالت در دانه‌های همجوار که سمتگیری بلورشناختی آنها مشابه یکدیگرند مشاهده می‌شود. البته در این موارد اغلب مرزهای ترسیم نشده، مرز واقعی نیستند بلکه زیردانه‌اند. وجود زیردانه در عکس شماره Mt860206، سبب اصلی اختلاف عملکرد مدل و عکس یاد شده است. در مواردی نیز مشاهده می‌شود که مدل، مرزهای اضافه و غیر واقعی رسم کرده است. دلیل اصلی آن وجود نفوذی درون دانه است (شکل ۸).



شکل ۷ مرزبندی انجام شده به وسیله مدل. روی عکس مقاطع نازک (عکس‌ها در نور قطبیده و با حضور تیغه لاندای تهیه شده است)، در سه راستای ۰ و ۴۵ و ۹۰ درجه برازش شده است. خطوط سفید، مرز دانه‌ها را نشان می‌دهند. در این شکل طیف سرخ از هر عکس، به نمایش در آمده است (تصاویر ۱ تا ۳ از نمونه Mt870206، ۴ تا ۶ از Qz870114، ۷ تا ۹ از Qz870120 و ۱۰ تا ۱۲ از نمونه Qz870121 تهیه شده است).



شکل ۸ ترسیم مرز غیر واقعی برای یک نفوذی به وسیله مدل، نشان داده شده است.

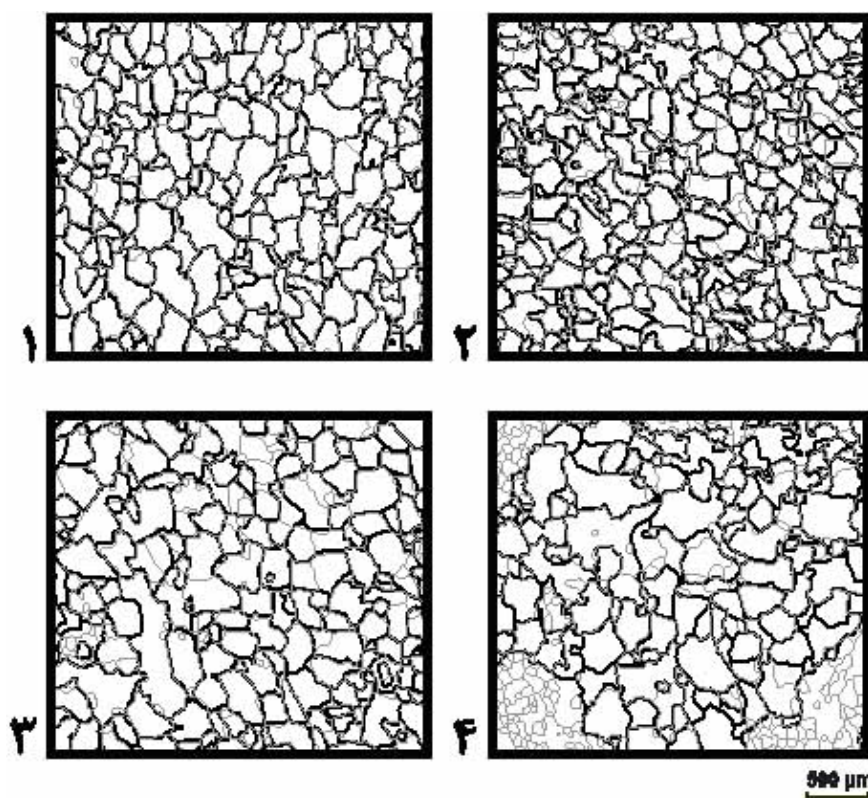
۳-۲- برازش مرزبندی به روش دستی و مدل

یکی دیگر از روش‌های ارزیابی مدل، برازش نتایج حاصل از عملکرد مدل با نتایج مرزبندی دستی است که به عنوان معیاری مناسب برای کنترل عملکرد مدل می‌توان از آن استفاده کرد. این شیوه برازش بین نتایج، در صورتی می‌تواند معیار مناسبی باشد که رقمی کردن مرز دانه‌ها به روش دستی، صحیح انجام شده باشد. از آنجاکه معمولاً در رقمی کردن به روش دستی تنها از یک عکس استفاده می‌شود، نمی‌توان از موارد دخالت خطا که در بالا به آن اشاره شد اجتناب کرد. برای کاهش هرچه بیشتر خطا در رقمی کردن دستی، به طور هم زمان از سه عکس رنگی در راس‌های ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه چرخش میز میکروسکوپ استفاده شده تا روند کلی الگوی رنگ تداخلی هر دانه هنگام رقمی کردن مدنظر قرار گیرد (عکس‌ها در نور دوبار قطبیده و با حضور تیغه لاندائیه تهیه شده است). با مقایسه مرزبندی دستی و خروجی مدل (شکل ۹)، برازش قابل قبولی در مقاطع کوآرتزیتی مشاهده می‌شود، ولی به دلایلی که در بالا گفته شد، برازش در مقطع میلونیتی ضعیف است.

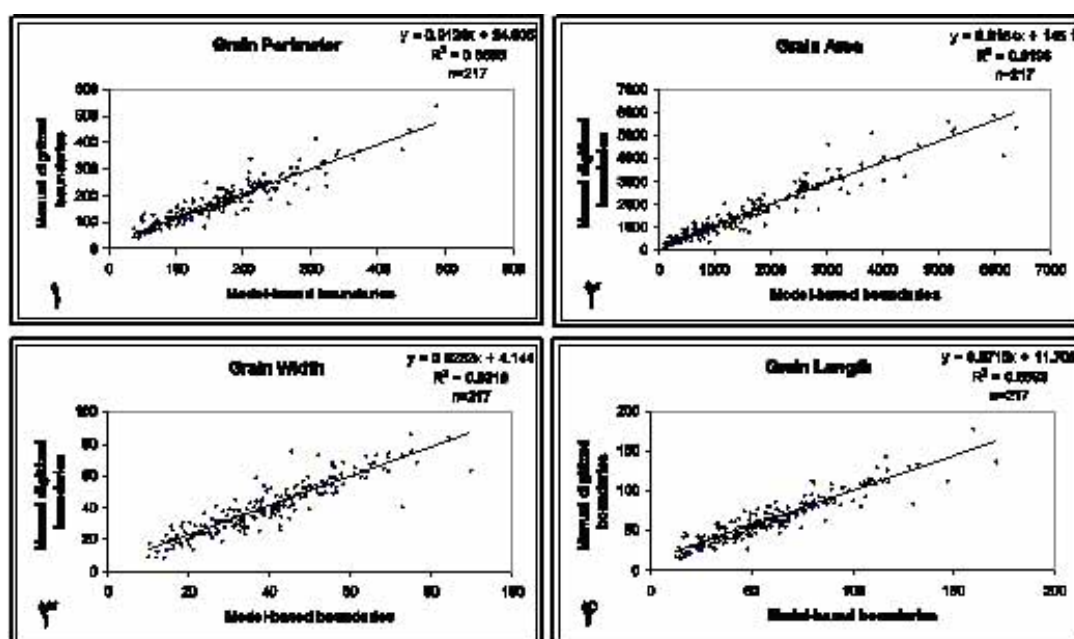
۳-۳- ارزیابی کمی عملکرد مدل

با افزودن ویژگی‌های شکلی دانه‌ها (محیط، مساحت، طول و عرض) در محیط نرم‌افزار ArcGIS، می‌توان از این ویژگی‌ها در ارزیابی کمی عملکرد مدل استفاده کرد. در این بخش عملکرد مدل با مرزبندی دستی روی مقطع Qz870114 مقایسه شده است.

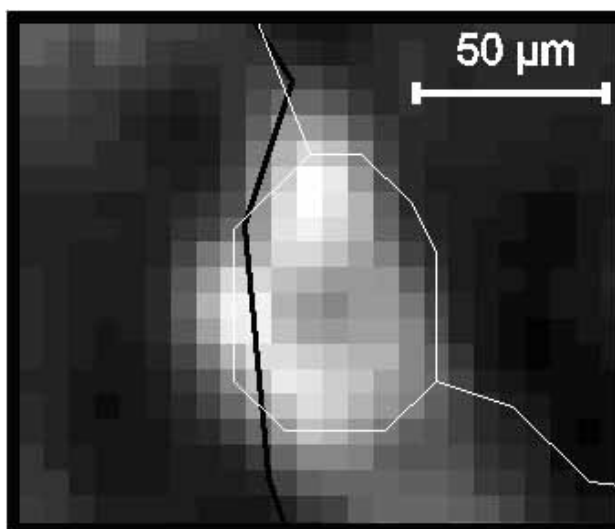
چنانکه در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود از مقایسه ویژگی‌های شکلی به دست آمده از مدل و مرزبندی دستی، دانه‌هایی که موقعیت مکانی یکسانی در هر دو روش دارند، همبستگی بالایی ($R^2 > 0.8$) را در تمامی ویژگی‌های شکلی نشان می‌دهند. از موارد دخالت خطا در این روش ارزیابی، می‌توان به رقمی نکردن دانه‌های بسیار کوچک در روش دستی و مرزبندی آن‌ها با استفاده از مدل اشاره کرد (شکل ۱۱). البته لازم به یادآوری است که خطای ایجاد شده، ناشی از عدم دقت کافی در روش مرزبندی دستی است که اجتناب ناپذیر است، و در ارتباط با کاستی مدل ارائه شده در این کار پژوهشی نیست. این مسئله موجب می‌شود گاهی دانه‌های رقمی شده به روش دستی بزرگتر از دانه‌های حاصل از مدل دیده شوند.



شکل ۹ در این شکل، مرزبندی به وسیله مدل و روش دستی، برای مقایسه بر هم برآزیده شده‌اند. تصاویر ۱، ۲ و ۳ به ترتیب نمونه‌های Qz870114، Qz870120 و Qz870121 از جنس کوارتزیت و تصویر ۴ نمونه Mt870206 از جنس میلونیت (در این تصویر به روش دستی، فقط دانه‌های کوارتز مرزبندی شده‌اند ولی مدل دانه‌های غیر کوارتز را نیز رقی کرده است) را نشان می‌دهند. خطوط خاکستری، مرزبندی به وسیله مدل و خطوط سیاه رنگ، مرزبندی به شیوه دستی را نشان می‌دهند.



شکل ۱۰ در این نمودارها عملکرد مدل و مرزبندی به شیوه دستی (با رعایت موقعیت مکانی دانه‌ها) به صورت کمی و با استفاده از ویژگی‌های شکلی دانه‌ها از قبیل: ۱- محیط ۲- مساحت ۳- عرض ۴- طول، در مرزبندی ۲۱۷ دانه، مقایسه شده است. مقیاس ویژگی‌های محاسبه شده در این شکل واحد است.



شکل ۱۱ تفاوت مرزبندی‌ها به دو شیوه دستی و براساس مدل. با دقت در این شکل، مشاهده می‌شود که دانه کوچکی که به وسیله مدل مرزبندی شده، در روش دستی به علت کوچک بودن آن مرزبندی نشده است و بدین ترتیب موجب تفاوت مرزبندی بین دو روش دستی و مدل ارائه شده در این پژوهش شده است. خطوط سفید، مرزبندی به وسیله مدل و خطوط سیاه رنگ، مرزبندی به شیوه دستی را نشان می‌دهند.

۴- برداشت

روش ارائه شده در این کار پژوهشی قادر است مرز دانه‌ها را پس از تهیه عکس‌های مقاطع نازک بدون دخالت کاربر با دقت بالا همراه با سایر اطلاعات شکلی آنها رسم کند. از برتری‌های مهم این روش، ایجاد یک پایگاه اطلاعاتی شامل ویژگی‌های شکلی و موقعیت مکانی دانه‌هاست که می‌توان از آن، برای تحلیل‌های شکلی و مکانی استفاده کرد. تمامی مراحل مرزبندی در محیط نرم‌افزار ArcGIS انجام می‌پذیرد. روش ارائه شده در این پژوهش وابسته به مقادیر کمی مربوط به پیکسل‌های عکس‌ها نیست بلکه براساس اختلاف نسبی مقادیر پیکسل‌ها، فرایند مرزبندی را انجام می‌دهد. همچنین می‌توان فرآیندهای زمین‌شناسی کنترل‌کننده ویژگی‌های شکلی و مکانی دانه‌ها را مدلسازی کرد. با توجه به دقت بالا و صرف زمان کم در اجرا، و قابلیت انعطاف در میزان بندی مدل ارائه شده، می‌توان در بررسی‌های ناحیه‌ای و گسترده مکانی که به بررسی و تحلیل تعداد زیادی مقاطع نیاز دارند، از این روش استفاده کرد.

به طور کلی مدل ارائه شده برای مرزبندی مقاطع نازک سنگ‌شناختی در این پژوهش، نسبت به مدل‌های رایج از برتری‌های زیر برخوردار است:

الف: در همه مراحل اجرای مرزبندی پس از تهیه عکس، کاربر دخالتی ندارد. این امر سبب کاهش زمان انجام مرزبندی و افزایش دقت می‌شود.

ب: با استفاده از مدل ارائه شده، کاربر می‌تواند همه مراحل را به دقت بررسی کند. چنانچه در پایان نتیجه مطلوب حاصل نشود، کاربر قادر است اقدام به تغییر و بهینه‌سازی در میزان بندی مدل کند.

ج: مدل طراحی شده در ArcGIS تنها مرز دانه‌ها را رسم نمی‌کند، بلکه آنها را رقمی نیز می‌کند و ویژگی‌های شکلی و مکانی آنها را محاسبه کرده و همه این اطلاعات را به صورت خودکار در یک منبع اطلاعاتی ذخیره می‌کنند.

د: GIS ابزار قدرتمندی برای تحلیل‌های مکانی و مدلسازی است. به‌عنوان مثال، تحلیل کرنش [۲۴]، تحلیل‌های آماری نظیر کریجینگ^۲ [۲۵] و مدلسازی حالات تنش و کرنش در ArcGIS به راحتی انجام می‌گیرد.

و: نرم‌افزار ArcGIS به آسانی در دسترس قرار دارد و به راحتی قابل تغییر و تنظیم برای دریافت نتایج بهتر است.

ه: این روش می‌تواند عمل مرزبندی را در مقاطع نازک سنگ‌های حاوی کانی‌های متنوع نیز انجام دهد (برای تک‌محوری و

یک تابع همسایگی^۵ می‌باشد که با عبور از سرتاسر عکس، بیشینه مقادیر پیکسل‌ها را در محدوده تعریف شده (در این مثال ۵×۵) محاسبه نموده و آنرا به پیکسل مرکزی آن محدوده نسبت می‌دهد.

Focal STD

یک تابع همسایگی است که انحراف معیار پیکسل‌ها در محدوده تعریف شده (در این مثال ۵×۵) برای هر عکس را محاسبه می‌کند و به پیکسل مرکزی آن محدوده نسبت می‌دهد.

Iso Cluster

این تابع با به‌کارگیری روش دسته‌بندی داده‌ها در گروه‌هایی با خصوصیات نزدیک به هم، داده‌ها (در این مثال مرز و غیر مرز) را تقسیم‌بندی می‌کند و نتیجه را به صورت فایل متنی ارائه می‌دهد.

Maximum likelihood classification

با این تابع و خروجی تابع Iso Cluster می‌توان پیکسل‌های عکس را به مرز و غیر مرز تقسیم کرد.

Neighborhood

به شکل گستره‌ای که در آن توابع همسایگی عمل می‌کنند گفته می‌شود که شامل: چهارگوش، دایره، گوه و حلقوی است. در این مثال از شکل چهارگوش با ابعاد ۵×۵ استفاده شده است.

Plus

تابعی است که خروجی آن عکسی است که مجموع مقادیر پیکسل‌های متناظر در دو عکس ورودی است.

Raster to polyline

این تابع عناصر خطی در عکس را رقمی و تبدیل به چندخطی می‌کند.

Region Group

این تابع تمامی سطح عکس را جستجو می‌کند و مناطق پیوسته (دارای مقادیر مساوی و در ارتباط باهم) را می‌یابد. سپس به هر کدام از این مناطق عدد مشخصه‌ای نسبت می‌دهد.

Set null

دومحوری)، زیرا معیار مرزبندی با این مدل، اختلاف نسبی بین شدت رنگ دانه‌ها در عکس‌های مقاطع نازک سنگ‌شناختی است و بر خلاف روش‌های پویا و نیمه‌پویا به مقادیر واقعی پیکسل‌ها نیاز ندارد.

با تمام مزایای یاد شده، با این روش نمی‌توان به نتیجه‌ای با دقت صددرصد دست یافت. ولی با دخالت کاربر و میزان بندی مناسب می‌توان با صرف وقت بیشتر، به نتایج مطلوب‌تری رسید.

قدردانی

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی مصوب دانشگاه تهران به شماره ۶۱۰۵۰۲۶/ک۶۰۹ زیر عنوان " کمی نمودن مطالعات پتروگرافی کانی کوارتز با استفاده از روش تلفیق داده‌های میکروسکوپ پلاریزان و کامپیوتر " انجام شده است که بدینوسیله از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه تهران قدردانی می‌شود.

ضمیمه

توابع مورد استفاده در طراحی مدل برای مرزبندی مقاطع نازک سنگ‌شناختی در محیط نرم‌افزار ArcGIS (برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد توابع، به راهنمای نرم‌افزار ArcGIS و یا به سایت ESRI (www.esri.com) مراجعه شود):

Con

این تابع در مدل طراحی شده با اجرای فرایند If/Else روی هر یک از عکس‌های ورودی که شامل عکس‌های دوتایی^۴ هستند، مقادیر ۰ را به سطح داخلی دانه‌ها و ۱ را به مرز دانه‌ها نسبت می‌دهد.

Feature class to polygon

این تابع مرز دانه‌ها را از حالت خط به چند ضلعی تبدیل می‌کند.

Feature to Coverage

این تابع از اشکال چندضلعی، یک پایگاه داده حاوی اطلاعات شکلی (مساحت و محیط) می‌سازد.

Focal Max

stage", Computers & Geosciences 33 (2007) 1176-1188.

[7] Li Y., Onasch C.M., Guo Y., "GIS-based detection of grain boundaries", Journal of Structural Geology 30 (2008) 431-443.

[8] Heilbronner R., "Automatic grain boundary detection and grain size analysis using polarization micrographs or orientation images", Journal of Structural Geology 22 (2000) 969-981.

[9] Bartozzi M., Boyle A.P., Prior D.J., "Automated grain boundary detection and classification in orientation contrast images", Journal of Structural Geology 22 (2000) 1569-1579.

[10] Choudhury K.R., Meere P.A., Mulchrone K.F., "Automated grain boundary detection by CASRG", Journal of Structural Geology 28 (2006) 363-375.

[15] Obara B., "An image processing algorithm for the reversed transformation of rotated microscope images", Computers & Geosciences 33 (2007) 853-859.

[11] Zhou Y., Starkey J., Mansinha L., "Segmentation of petrographic images by integrating edge detection and region growing", Computers & Geosciences 30 (2004) 817-831.

[12] Obara B., "A new algorithm using image colour system transformation for rock grain segmentation", Mineralogy and Petrology 91 (2007) 271-285.

[13] Fueten F., Goodchild J.S., "Quartz c-axis orientation determination using the rotating polarizer microscope", Journal of Structural Geology 23 (2001) 895-902.

[14] Stockhert B., Duyster J., "Discontinuous grain growth in recrystallised vein quartz-implications for grain boundary structure, grain boundary mobility, crystallographic preferred orientation, and stress history", Journal of Structural Geology 21 (1999) 1477-1490.

[16] Ozanian T.R., Phillips R., "Enhancement of fluoroscopic images with varying contrast", Computer Methods and Programs in Biomedicine 65 (2001) 1-16.

[17] Salem N.M., Nandi A.K., "Novel and adaptive contribution of the red channel in preprocessing of colour fundus images", Journal of the Franklin Institute 344(3-4) (2007) 243-256.

[18] Chen T.J., Chuang K.S., Chen S., Lu J.C., Shiao Y.H., "A Novel Image Smoothing Filter

تابعی است که مقدار NoData را در صورتیکه تابع شرطی تعریف شده در آن پیکسل‌ها صحیح باشد (مشخص کننده پیکسل‌هایی که مرز نمی‌باشند)، به آنها نسبت می‌دهد. در صورتیکه تابع شرطی مورد نظر صحیح نباشد، مقدار پیکسل‌های عکس ورودی دیگر را به صورت خروجی عکس ارائه می‌دهد.

Sum

یکی از مجموعه توابع Cell statistics است که مجموع مقادیر پیکسل‌های متناظر در هر یک از عکس‌های ورودی را محاسبه می‌کند و نتیجه را به صورت یک عکس ارائه می‌کند.

Thin

این تابع ضخامت عناصر خطی در عکس را به میزان یک پیکسل تقلیل می‌دهد.

Times

این تابع مقادیر پیکسل‌های متناظر دو عکس ورودی را با یکدیگر ضرب و به صورت یک عکس ارائه می‌دهد.

Zonal Perimeter

این تابع، محیط مربوط به پیکسل‌های مرتبط با هم در یک منطقه از عکس را محاسبه می‌کند.

مراجع

[1] Heilbronner R.P., Pauli C., "Integrated spatial and orientation analysis of quartz c-axes by computer aided microscopy", Journal of Structural Geology 15 (1993) 369-382.

[2] Barraud J., "The use of watershed segmentation and GIS software for textural analysis of thin sections", Journal of Volcanology and Geothermal Research 154 (2006) 17-33.

[3] Starkey J., Samantaray A.K., "Edge detection in petrographic images", Journal of Microscopy 172(3) (1993) 263-266.

[4] Canny J., "A computational approach to edge detection", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 8(6) (1986) 679-698.

[5] Goodchild J.S., Fueten F., "Edge detection in petrographic images using the rotating polarizer stage", Computers & Geosciences 24 (1998) 745-751.

[6] Fueten F., Mason J., "An artificial neural net assisted approach to editing edges in petrographic images collected with the rotating polarizer

- [22] Ramsay J.G., "Folding and Fracturing of Rocks", McGraw-Hill, New York (1967).
- [23] Lisle R.J., "Geological Strain Analysis. A Manual for the R/Φ Technique", Pergamon Press (1985).
- [24] Fernandez F.J., Menendez-Duarte R., Aller J., Bastida F., "Application of geographical information systems to shape fabric analysis. In: Bruhn, D., Burlini, L. (Eds.), High-Strain Zones: Structure and Physical Properties", Geological Society of London Special Publication 245 (2005) 409-420.
- [25] Guo Y., Onasch C.M., "Analysis of grain-scale deformation using a thin section GIS", Geological Society of America Abstracts with Programs 33 (2001) 324.
- Using Membership Function", Journal of Digital Imaging 20(4) (2007) 381-392.
- [19] Wang S.R., Sun Y.N., Chang F.M., "Artifact removal and texture-based rendering for visualization of 3D fetal ultrasound images", Medical And Biological Engineering Computing, Online published, Springer, DOI 10.1007/s11517-007-0286-7 (2007).
- [20] Obara B., "Identification of transcrystalline microcracks observed in microscope images of a dolomite structure using image analysis methods based on linear structuring element processing", Computers & Geosciences 33 (2007) 151-158.
- [21] Fry N., "Random point distributions and strain measurement in rocks", Tectonophysics 60 (1979) 806-807.