

## **A new method in quantity and 3D network determination of minerals in petrological studies with micromodeling; a case study from garnet at the first skarn zone of Hassan-Abaad, Yazd**

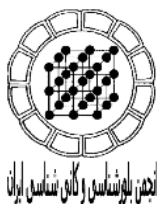
**S. Zandifar, M.V. Valizadeh, V. Tavakoli, M. A. Barghi**

*School of Geology, University College of science, University of Tehran, Tehran, Iran  
Email: szandifar@khayam.ut.ac.ir*

(Received: 26/11/2007, in revised form: 7/4/2008)

**Abstract:** The determination of mineral quantities is one of the primary purposes of petrology and economic geology studies. When producing skarn zonation, it is necessary for the quantities of minerals in each zone to be known. Currently, various methods of determination for mineral quantities in rock bodies have been developed, but a rapid, accurate and economic method for distinguishing 3D mineral distribution has not yet been understood. This study introduces such a method for distinguishing 3D mineral distribution based on image sequence modelling of rocks. In the studied area, -Hassan-Abaad of Taft, central Iran- garnet is one of the most important and most frequent minerals found in skarns and is present in a variety of types and places. For our study, we sampled a very thin layer of rock (300 microns) and prepared a digital photo at every stage of our analysis. Prepared images were analyzed using MATLAB software. Each value of the image with its x, y and z coordinates was stored in a new matrix. Matrices were modelled in RockWorks and filtered based on the mean standard deviation of the modelled data, producing garnet networks. The studied zone had 31.4% garnet, allowing to be considered a garnet- wollastonite zone. This method is also useful for different calculations, such as: determining rock type, field zonation, calculation of the amount of mine and waste material, fluid inclusion studies and distinguishing type and volume of rock porosity.

**Keywords:** *micromodeling, 3D network, garnet, mineral volume quantity, Hassan-Abaad, Yazd.*



## روشی نوین در تعیین مقدار کانیها، و توزیع شبکه سه‌بعدی آنها در بررسیهای سنگ‌شناسی، با استفاده از ریزمدل‌سازی، و بررسی موردی گارنت در اولین زون اسکارن حسن‌آباد یزد

سمیرا زندی‌فر، محمدولی ولی‌زاده، وحید توکلی، محمدعلی برقی

دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران  
پست الکترونیکی: szandifar@khayam.ut.ac.ir

(دریافت مقاله ۱۳۸۶/۸/۵، نسخه نهایی: ۱۳۸۷/۱/۱۹)

**چکیده:** اندازه‌گیری مقدار کانیها و تعیین توزیع فضایی آنها یکی از اولویتهای اصلی بررسیهای زمین‌شناسی اقتصادی و سنگ‌شناسی است. امروزه روشهای متعددی برای تعیین میزان کانیهای موجود در یک سنگ وجود دارد، ولی روشی سریع، ارزان، و دقیقی که شبکه سه‌بعدی کانیهای موجود در یک سنگ را نشان دهد، در دسترس نیست. در این بررسی با استفاده از تهیه تصاویر رقومی پیوسته از یک سنگ، مدل سه‌بعدی کانی (گارنت) موجود در آن ترسیم می‌شود. بدین منظور تصاویر پیوسته از نمونه‌ها با ضخامت ۳۰۰ میکرون تهیه و در نرم‌افزار متلب مورد پردازش قرار گرفت، و مدل‌سازی حجمی نهایی در نرم‌افزار راکورکس انجام پذیرفت. شبکه گارنتها از حذف زمینه سنگ در مدل به‌دست آمده با استفاده از انحراف معیار داده‌ها ساخته شد، و با استفاده از نسبت حجم مدل فیلتر شده به حجم مدل اولیه، مقدار حجمی گارنت سنگ محاسبه شد. با توجه به مقدار ۳۱/۴ درصدی گارنت می‌توان زون مورد مطالعه را زون گارنت-ولاستونیت نامید. این روش را می‌توان در مواردی مانند تعیین تخلخل سنگها، محاسبه عیار ماده معدنی و باطله کانسارها، بررسی آگونهای درگیر، مشخص کردن نام سنگ، منطقه بندی، تعیین آرایش، و جهت‌یافتگی سه‌بعدی کانیها نیز به‌کاربرد.

**واژه‌های کلیدی:** ریزمدل‌سازی، شبکه سه‌بعدی، گارنت، مقدار کانی، حسن‌آباد یزد.

### ۱- مقدمه

یکسان است که تعداد این سلولها به حدتفکیک (resolution) داده‌های موجود بستگی دارد. هرچه فاصله حقیقی داده‌ها کمتر باشد، ابعاد واحد شبکه نیز کوچکتر شده و تعداد سلولها بیشتر می‌شود. برخوردگاه خطوط تشکیل دهنده این شبکه که گره (node) شبکه خوانده می‌شود، با استفاده از داده‌های موجود محاسبه می‌شود (شکل ۱). این مقادیر برای ارزش‌دهی به هر سلول، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ارزشهای مربوط به سلولهای مختلف در سه‌بعد فضایی معمولاً با استفاده از مقیاس رنگی نمایش داده می‌شود. این نمایش سه‌بعدی، تصویری از توزیع پارامتر مورد نظر را در فضا نشان می‌دهد. چنانچه بخشی

امروزه مدل‌های سه‌بعدی ایستا (stochastic) در بررسیهای گوناگون زمین‌شناسی کاربردهای فراوان دارند [۱-۴]. این مدلها در مقیاسهای گوناگون و در موارد مختلف، توزیع فضایی پارامتر مورد مطالعه را نشان می‌دهند. با پیشرفت روشها و الگوریتمهای ریاضی ساخت مدل‌های گوناگون، مدلسازی امروزی به یکی از توانمندترین روشها در بررسیهای توزیع سه‌بعدی شاخصهای مورد مطالعه تبدیل شده است. در اغلب نرم‌افزارها مدل‌سازی برپایه یک شبکه از پیش طراحی شده انجام می‌شود. شبکه مدلسازی سه‌بعدی، مجموعه‌ای از سلولها با ابعاد کاملاً

تفاوت در شیمی ماگما، ترکیب سنگ میزبان، عمق تشکیل، و حالت اکسایش است [۷]. از موارد مهم در بررسی اسکارنها، اندازه گیری مقدار کانیهای اصلی هر بخش برای نامگذاری زون هاست. به همین دلیل روشی که بتواند مقدار دقیق توزیع کانی خاصی را در حجم سنگ نشان دهد، در بررسیهای سنگ شناسی و زمین شناسی اقتصادی بسیار سودمند خواهد بود. امروزه روشهای متعددی برای تعیین میزان کانیهای موجود در یک سنگ وجود دارند که غالباً پرهزینه، وقت گیر، و در مواردی غیر کاربردی هستند [۸، ۹]. در بیشتر موارد گارنت یکی از کانیهای اصلی اسکارن به حساب می آید و در منطقه مورد بررسی نیز فراوانی پرفیروبلاستهای آن در زونهای مختلف دگرگونی به فراوانی مشاهده می شود، و از آنجا که در اولین زون دگرگونی اسکارن حسن آباد، کانی گارنت با دو بعد متفاوت همراه با کانی ولاستونیت (به مقدار تقریباً برابر با گارنت)، دیوپسید و کلسیت مشاهده می شود، نامگذاری اولین زون دگرگونی (یا به عبارتی اولین منطقه کانی زایی با کنتاکت توده نفوذی) نیاز به دقت بیشتری دارد، و محاسبه فراوانی کانیهای موجود در این منطقه لازم به نظر می رسد. با توجه به اینکه گارنت سبز رنگ به خوبی قابل شناسایی است، تعیین مقدار و توزیع شبکه سه بعدی این کانی در سنگ برای نامگذاری زون مورد توجه قرار گرفت.

#### موقعیت زمین شناسی

منطقه مورد مطالعه در فاصله ۸۰ کیلومتری جنوب باختری شهرستان یزد و روی نوار ماگماتیسم سنوزوئیک ایران مرکزی مشهور به ارومیه دختر واقع شده است [۱۰]. این منطقه به شدت زمین ساختی بوده و همه واحدهای سنگی آن جابه جا شده اند. این فعالیت به علت قرار گرفتن آن در یک زون گسلی بین گسل اصلی دهشیر- بافت و گسل توران پشت- شمس آباد که یکی از گسلهای فرعی و منشعب از آن است، بیش از مناطق مجاور می باشد. این پیکره گسلی متأثر از آخرین رخداد زمین ساختی آلپ است که پیامد آن فورانهای آتشفشانی است [۱۱]. قدیمی ترین سنگهایی که در این منطقه رخمون دارند به کرتاسه (آهک سازند تفت) وابسته بوده و جوان ترین سنگها را آبرفتها و نیز تراورتنهای دوره حاضر تشکیل می دهند که هنوز از چشمه های تراورتن ساز در حال نهشته شدن هستند (شکل ۲، a).

از مدل برحسب نیاز کاربر حذف شود، درصد حجم باقی مانده به سادگی با استفاده از تقسیم حجم باقی مانده به حجم کل مدل، قابل محاسبه خواهد بود. بدیهی است که توزیع پارامترهای آماری مدل، راهنمای مناسبی برای بررسیهای تکمیلی است. هرچه داده های موجود بیشتر و فاصله آنها نسبت به ابعاد مدل کمتر باشد، مدل ساخته شده دقیقتر خواهد بود. انتخاب روش مناسب برای مدل سازی، درست ترین تصویر از توزیع فضایی پارامتر مورد مطالعه را ایجاد می کند.

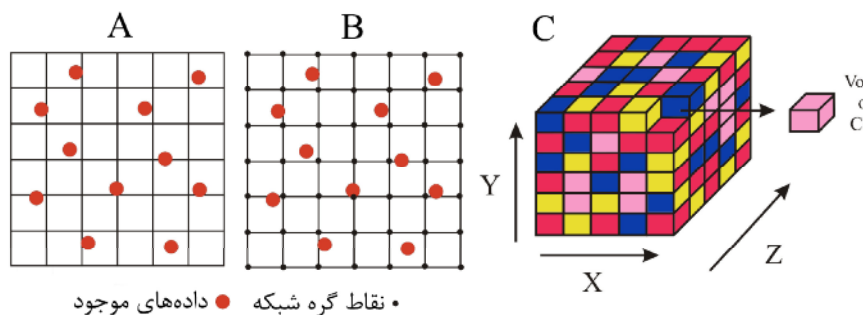
این کار پژوهشی، چگونگی کاربرد روش مدل سازی در ابعاد کوچک و با دقت بسیار بالا را در تعیین مقادیر، و شکل فضایی کانیها در حجم سنگ نشان می دهد. با توجه به روش به کار رفته و استفاده از حجم بالای داده ها برای مدل سازی، نتیجه نهایی حداکثر نزدیکی به توزیع واقعی کانیها را در سنگ خواهد داشت. این روش می تواند علاوه بر تعیین مقدار و توزیع کانیهای موجود در سنگ، در مواردی مانند تعیین تخلخل سنگها، محاسبه عیار ماده معدنی و باطله کانسارها، بررسی آبگوتهای درگیر، تعیین کردن نام سنگ، زون بندی منطقه، و آرایش و جهت یافتگی سه بعدی کانیها نیز به کار رود. با توجه به حجم بسیار بالای داده های ورودی به نرم افزار در این روش، محدودیت سخت افزارهای رایانه ای سبب می شود تا تهیه مدلهایی با ابعاد بزرگتر مشکل شود. بدیهی است که با افزایش کارایی سخت افزارهای رایانه ای در آینده نه چندان دور، این مشکل برطرف خواهد شد.

در اینجا برای معرفی روش، مقدار، و توزیع شبکه فضایی گارنت در اولین زون اسکارن حسن آباد یزد، موردی تعیین می شود.

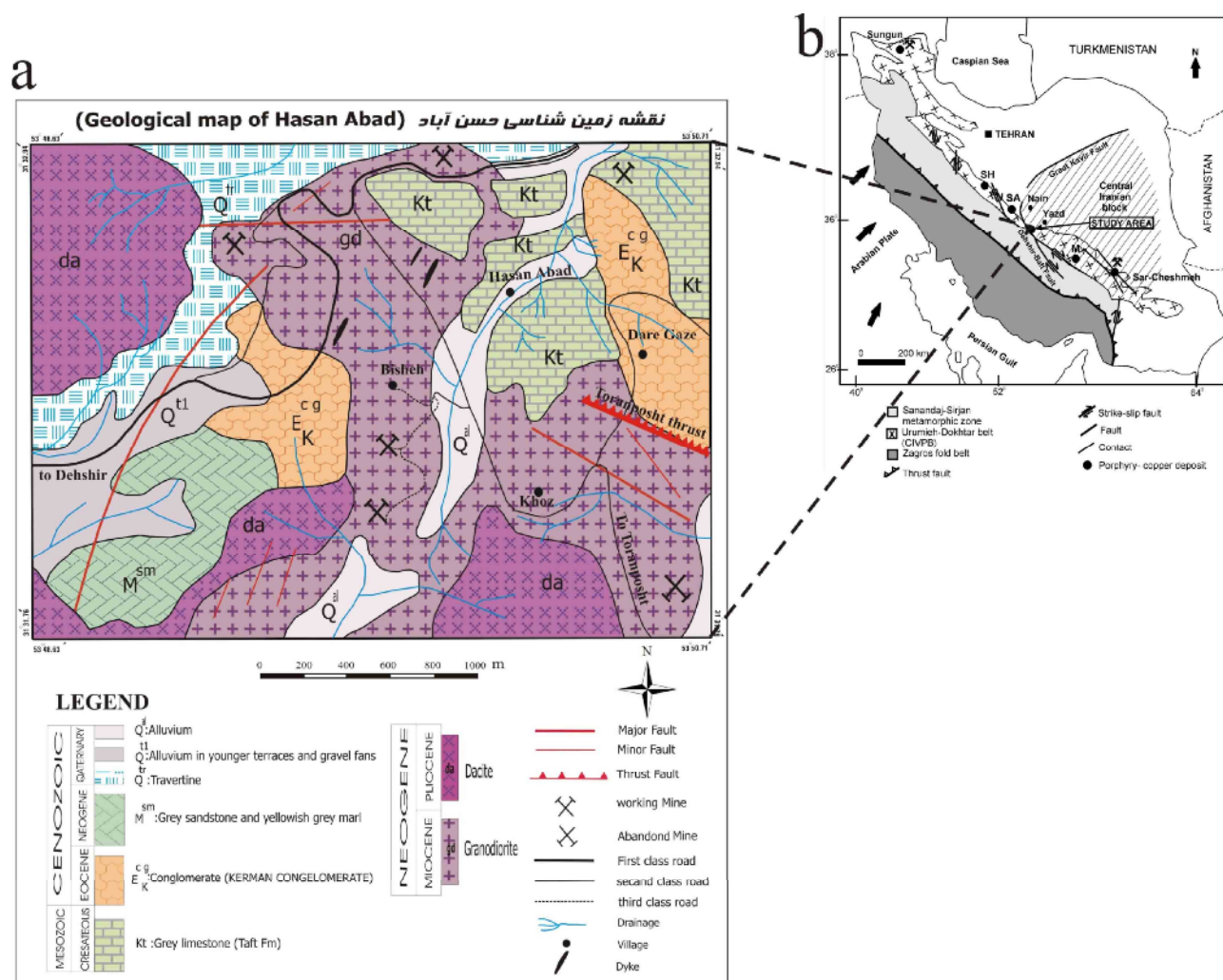
یکی از مهمترین پارامترها در بررسی اسکارنها، زون بندی آنها است. زون بندی از مقیاس میکرومتری تا کیلومتری گسترش دارد و بازتاب دهنده نفوذ آبگون، واکنش سنگ دیواره، تغییرات دما، و اختلاط آبگون است [۵، ۶]. اغلب نهشته های اسکارن بزرگ با فاصله از توده نفوذی و نیز زمان نسبی وابسته به نفوذ، زون بندی می شوند [۷]. در اغلب اسکارنها یک الگوی زون بندی عمومی (زون نزدیک به خاستگاه گارنت، زون دور از خاستگاه پیروکسن، و کانیهای اختصاصی وزوویانیت یا پیروکسنوئید، مانند ولاستونیت و رودونیت) در کنتاکت اسکارن و آهک وجود دارد. تغییر در این الگوی عمومی بازتاب دهنده

رزدانه با رنگ عمومى ارغوانى آغاز مى شود. پايان بخش ته-  
نشست هاى ميوسن در ناحيه مورد بررسى، لايه هاى ماسه سنگ  
و کنگلومرا به رنگ خاکستري تيره است.

دنباله ته نشستى مزوزويک با کنگلومرا (کنگلومراى  
کرمان) و سنگ هاى آتشفشانى ته نشستى ائوسن پوشيده مى شود  
[۱۲]. نهشته هاى ميوسن با ته نشست هاى مارن و ماسه سنگ



شکل ۱: A: برداشت داده هاى پراکنده. B: ساخت نقاط گره شبکه با استفاده از داده هاى برداشت شده. C: شبکه سه بعدى و واحد آن (سلول شبکه).



شکل ۲: نقشه راهنمای موقعیت منطقه مورد بررسى در زون اروميه- دختر و زون هاى زمين ساختى اصلى ايران. M: نهشته هاى مس پرفيرى  
ميدوک. SA: بخش جنوبى نهشته هاى پرفيرى اردستان. SH: نهشته هاى مس پورفيرى شريف آباد [۱۲]. B: نقشه زمين شناسى منطقه مورد  
بررسى در جنوب باخترى شهرستان يزد.

سالم و قابل شناسایی هستند (شکل ۳). نخست همه نمونه‌های مورد نظر در ابعاد چند سانتیمتری برش داده شدند و سطح نمونه مورد مطالعه کاملاً صاف شده و تصویر رقومی [digital] سطح آن تهیه شد. سپس لایه بسیار نازک ۳۰۰ میکرونی از سطح آن برداشت شده و این فرایند دوباره تکرار شد. این ضخامت، با توجه به ابعاد بلورهای مورد مطالعه انتخاب شده است. نظر به اینکه کمترین ضخامت کوچکترین بلور از این رقم بیشتر است، هیچ بلوری در مدل‌سازی در این ابعاد حذف نمی‌شود. باید توجه داشت که تصاویر تهیه شده باید در همه ویژگیهای تصویری شامل مواردی مانند نور، وضوح، شفافیت، حد تفکیک، و اندازه کاملاً یکسان باشند. برداشت لایه‌ها و تهیه تصاویر رقومی تا چند برابر بزرگترین بلور موجود در سنگ ادامه یافت. در شکل ۴ تصاویر مقاطع متوالی دو نمونه سنگ به عنوان مثال آورده شده‌اند. با دقت در ۳۰ مقطع از هر نمونه برداشت شده، و توزیع فضایی بلورها در مدل‌های ساخته شده معلوم شد که بلورهای گارنت در برخی مقاطع کوچکتر و یا حذف شده (به وسیله بلورهای کلسیت جایگزین می‌شوند) و در برخی دیگر رفته‌رفته بزرگتر شده‌اند. در واقع ابعاد گارنت‌ها و چگونگی قرارگیری آنها در فضای سنگی، بسته به وجود درز و شکاف‌ها، متغیر بوده است، و زمین‌ساختی بودن منطقه (چنانکه در موقعیت زمین‌شناسی گفته شد) و نیز اهمیت نقش آگونها را در تولید کانیها تأیید می‌کند. تصاویر تهیه شده در نرم‌افزارهای پردازش عکس، مورد بررسی قرار گرفت تا هرگونه تمایزی در ویژگیهای عکسهای تهیه شده برطرف شود.

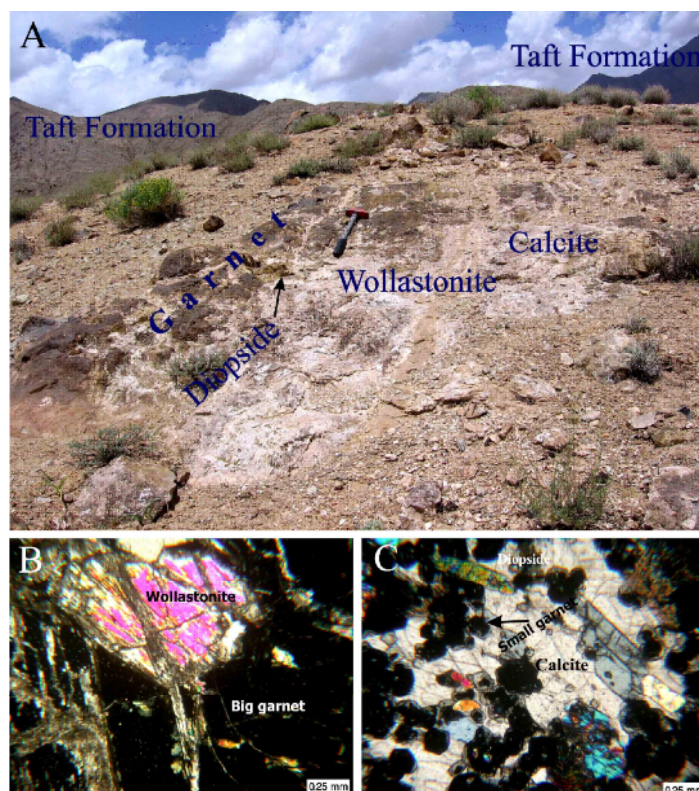
هر عکس در سیستم رقومی نقشه‌بیتی (bitmap) از مجموعه اجزایی تشکیل شده که سلول تصویری (Pixel) نامیده می‌شوند. چنانچه یک عکس در سیستم مختصات دکارتی دوبعدی مکان‌یابی (register) شود، هریک از سلولهای تصویری دارای مختصات منحصر به فردی خواهد بود. با توجه به اینکه تصاویر تهیه شده در بعد سوم نیز در کنار یکدیگر قرار دارند، هر سلول تصویری دارای مختصات  $x, y$  و  $z$  مخصوص به خود است. همچنین هر نقطه در سیستمهای رنگی RGB (سرخ، سبز، آبی) دارای مقادیر مربوط به ارزشهای سه رنگ اصلی است. از آنجا که رنگ کانیهای مورد بررسی در این بررسی سبز است، بیشترین تغییرات رنگی مربوط به نوار سبز (نوار تیره‌تر) عکس خواهد بود. لذا لازم است تا دونوار رنگی دیگر از عکس حذف شوند و ارزش رنگی سبز هر نقطه (g) به عنوان پارامتر مدل در کنار مختصات قرار گیرد.

سنگهای آذرین گسترش وسیعی در منطقه مورد مطالعه دارند. سنگهای بیرونی شامل داسیت و آندزیت، و سنگهای درونی دارای طیف ترکیبی شامل دیوریت، دیوریت کوارتزار و گرانودیوریت است. پلاژیوکلاز کانی عمده این سنگهاست. اسکارن حسن‌آباد در اثر نفوذ توده گرانودیوریتی مربوط به نوار ارومیه- دختر در آهکهای کرتاسه ایجاد شده است. این نوار ماگمایی- متالوژنیک موازی نوار چین خوردگی- برخوردی زاگرس است که در شمال شرقی این زون گسلشی قرار دارد. پلوتونیک، آتشفشان، و کانی زایی وابسته به آن در نتیجه فرورانش در نوار برخوردی زاگرس ایجاد شده است [۱۳] (شکل ۲، b). در هاله دگرگونی ایجاد شده کانیهای ولاستونیت، گارنت، دیوپسید، وزوینیت، اپیدوت، کلینتونیت و افزیت توسط مقاطع میکروسکوپی و بررسیهای دقیقتر ۶۰ نمونه با پراش پرتو ایکس (XRD) شناسایی شده‌اند.

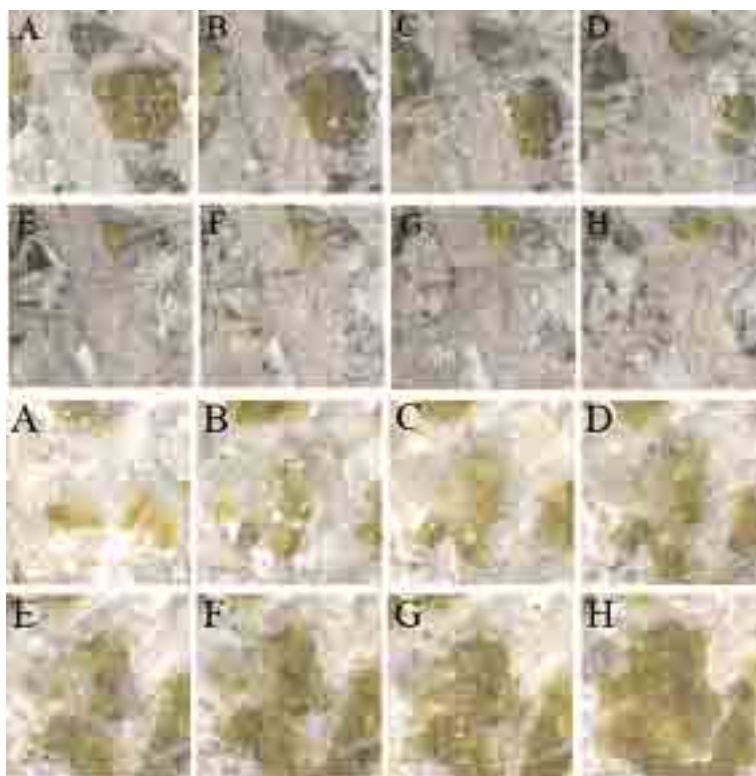
#### روش مطالعه، بحث و بررسی

برای ساخت یک مدل سه‌بعدی نیاز به اطلاعات دقیقی از بخشهای مختلف مدل است تا نرم‌افزارهای تخصصی مدل‌سازی با استفاده از این نقاط معلوم، نقاط نامعلوم را در کل مدل بازسازی کنند. در مقیاسهای کوچک، استفاده از صفحات اطلاعاتی برای ساخت مدل نهایی در بررسیهای گوناگون به کار رفته است [۸، ۱۴]. روشهای تهیه این صفحات به دو نوع ویرانگر و ناویرانگر تقسیم می‌شوند. از روشهای ناویرانگر می‌توان به توموگرافی پرتو X (X-ray tomography)، و روبش فضایی رایانه‌ای (C-T Scanning) اشاره کرد [۸، ۹]. با توجه به هزینه بالای این آنالیزها، عدم دقت کافی دستگاه مورد نظر برای نمونه سنگی، حد تفکیک پایین، و عدم رنگ‌بندی مناسب در اغلب این روشها، در بسیاری از موارد روشهای ویرانگر برتری دارند. در بررسیهای سطح الارضی و در مواردی که دسترسی آسان به حجم بالای نمونه‌ها امکان‌پذیر است، مشکل از بین رفتن نمونه نیز وجود نخواهد داشت. در این بررسیها از روش تهیه مقاطع متوالی از یک سنگ برای مدل‌سازی آن استفاده شده است. از کنتاکت توده نفوذی به سمت دومین زون دگرگونی (حد جدایش زون اول و دوم دگرگونی با حضور یا عدم حضور کانی وزوینیت و افزیت مشخص می‌شود) تعداد ۵۰ نمونه سنگی با فواصل تقریباً یکسان برای تعیین مقدار کانی گارنت و نیز پراکندگی سه‌بعدی این کانی در سنگهای این زون برداشت شدند. این نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که توزیع یکنواختی را در منطقه نشان دهند. همه این نمونه‌ها





شکل ۳ A: نمای کلی از زون مورد مطالعه. B و C: تصاویر کانیهای این زون در مقطع میکروسکوپی.



شکل ۴ مقاطع متوالی تهیه شده از دو نمونه مورد مطالعه.

تعداد اجزای تصویری عکس در دو بعد  $x$  و  $y$  دارای داده است. به عبارت دیگر به ازای هر جزء تصویری، مقدار متناظر ارزش نوار رنگ سبز (نوار تیره) وجود دارد، لذا مدل ساخته شده از دقت بسیار بالایی برخوردار است. چنانکه مشاهده می‌شود، این روش روی نمونه‌هایی با ویژگیهای متفاوت آزمایش شده و نتایج، درستی فرایند مدل‌سازی را نشان می‌دهد. چنانکه یادآور شدیم، مدل به‌دست آمده توزیع کامل ارزش نوار رنگ سبز (نوار تیره) را با مقیاس رنگی نشان می‌دهد. برای بررسی درستی مدل‌های ساخته شده، مقاطعی افقی از مدل‌ها انتخاب، و با عکسهای اولیه مقایسه شدند (شکل ۶). چنانکه شکل نشان می‌دهد، توزیع کانی مورد مطالعه در عکس اولیه و مدل ساخته شده بسیار شبیه بوده و فرایند ساخت مدل را تأیید می‌کند.

برای برآورد مقدار کانی مورد مطالعه در حجم سنگ، لازم است تا بخشهای اضافی از مدل حذف شوند. این کار با فیلتر کردن مدل‌های به‌دست آمده امکان‌پذیر است. با توجه به اینکه مدل‌سازی روی نوار سبز (نوار تیره‌تر) انجام گرفته و کانی مورد مطالعه نیز سبز رنگ است، تغییرات ناگهانی در ارزشهای مدل در نقاط مرزی کانی با زمینه سنگ وجود خواهد داشت. از این رو لازم است تا این نقاط عطف که تغییرات عددی مدل در آنها ناگهانی است، به طریقی مشخص شود. بدین منظور از منحنی توزیع بهنجار مدل‌های تهیه شده استفاده شود (شکل ۷). این نقاط عطف روی منحنی توزیع بهنجار با مقادیر «میانگین  $\pm$  انحراف معیار» سازگاری دارند. از این حد در بررسیهای گوناگون برای فیلتر کردن داده‌ها استفاده شد [۱۵ تا ۱۷]. محاسبات آماری دیگر مربوط به چهار مدل شکل ۵ نیز در جدول ۱ به عنوان نمونه ارائه شده است. در این کار نیز مدل‌های به‌دست آمده با استفاده از دو عدد مربوط به میانگین  $\pm$  انحراف معیار فیلتر شدند. با توجه به اینکه همواره مقدار زمینه سنگ از کانی بیشتر است، مقادیر توزیع شده حول میانگین تا انحراف معیار داده‌ها، نشان دهنده مقادیر مربوط به زمینه سنگ است. با کاستن این مقادیر از کل جمعیت مدل، مقادیر کانی در سنگ به‌دست خواهد آمد (شکل ۸). چنانچه حجم کانیهای به‌دست آمده در مدل فیلتر شده به حجم کل مدل تقسیم شود، مقدار نسبی کانیهای موجود در سنگ مشخص می‌شود. درصد این نسبت، میزان کانیهای موجود در سنگ را نشان می‌دهد (فرمول ۱).

$$V = \frac{FMV}{MV} \times 100$$

برای انجام کلیه محاسبات ریاضی و ساخت شبکه مختصات عکس در این کار پژوهشی از نرم‌افزار متلب (MATLAB) استفاده شد. نرم‌افزار متلب یک زبان برنامه نویسی ریاضی است که با دارا بودن توابع کتابخانه‌ای از پیش تعریف شده، امروزه به قویترین زبان برنامه‌نویسی ریاضی علمی تبدیل شده است. برنامه فرایند مورد نظر در این نرم‌افزار نوشته و آماده اجرا شد. نخست هر عکس با نوارهای کامل رنگی به نرم‌افزار وارد شد. کلیه داده‌ها در این نرم‌افزار شکل ماتریسی دارند. در نتیجه هر ماتریس کامل عکس در این نرم‌افزار به صورت  $m \times n \times 3$  شناخته می‌شود که در آن  $m$  و  $n$  طول و عرض عکس برحسب تعداد اجزای تصویری (تعداد پیکسلها) و عدد ۳ نشان‌دهنده نوارهای رنگی سرخ، سبز، و آبی است. نوارهای رنگی سرخ و آبی از ماتریس بالا حذف، و سپس مختصات کلیه اجزای تصویری عکس در ماتریس  $m \times n$  ذخیره شدند. ماتریسهای مربوط به عکسهای متوالی به صورت ستونی مرتب و ارزشهای  $Z$  مربوط به شماره عکس در مقاطع پی در پی و ارزش چهارم مربوط به مقدار عددی رنگ سبز نقطه مورد نظر به آن اضافه شد. ماتریس نهایی با چهار ستون  $X, Y, Z$  و  $g$  در فایل اسکریپت استاندارد ذخیره شد. با توجه به تواناییهای نرم‌افزار راکورکس<sup>۲</sup> و تخصصی بودن این نرم‌افزار، کار مدل‌سازی نهایی با استفاده از این نرم‌افزار انجام گرفت. این نرم‌افزار دارای تواناییهای منحصر به فردی در زمینه مدل‌سازی بوده و در مطالعات دیگر مدل‌سازی نتایج قابل قبولی از آن به دست آمده است [۲]. برای مدل‌سازی روشهای گوناگون ریاضی وجود دارند که در این کار از روش «نقطه همجوار» (closest point) استفاده شد. در این روش هر نقطه مجهول، ارزش مربوط به نزدیکترین نقطه معلوم را خواهد داشت. این روش در مواردی که تغییرات پارامتر مورد نظر در درون مدل ناگهانی است، بهترین روش مدل‌سازی محسوب می‌شود. در این کار پژوهشی با توجه به ماهیت کانیها در زمینه سنگ و مرزهای ناگهانی آنان این روش انتخاب شد. نتایج تجربی نیز این روش مدل‌سازی را تأیید کرده است. مدل نهایی، مدلی کامل از تمامی حجم سنگ بر پایه توزیع ارزش نوار رنگی سبز (نوار تیره) است.

شکل ۵ تعداد چهار مدل از مجموع مدل‌های به‌دست آمده را به عنوان نمونه نشان می‌دهد. شبکه سه‌بعدی ساخته شده به

1- ASCII

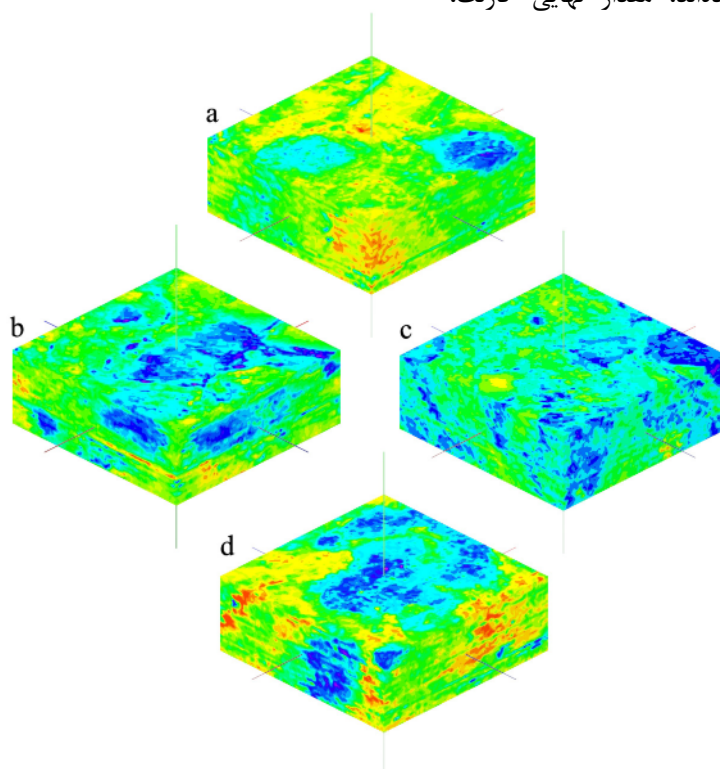
2 - RockWorks

فرمول ۱

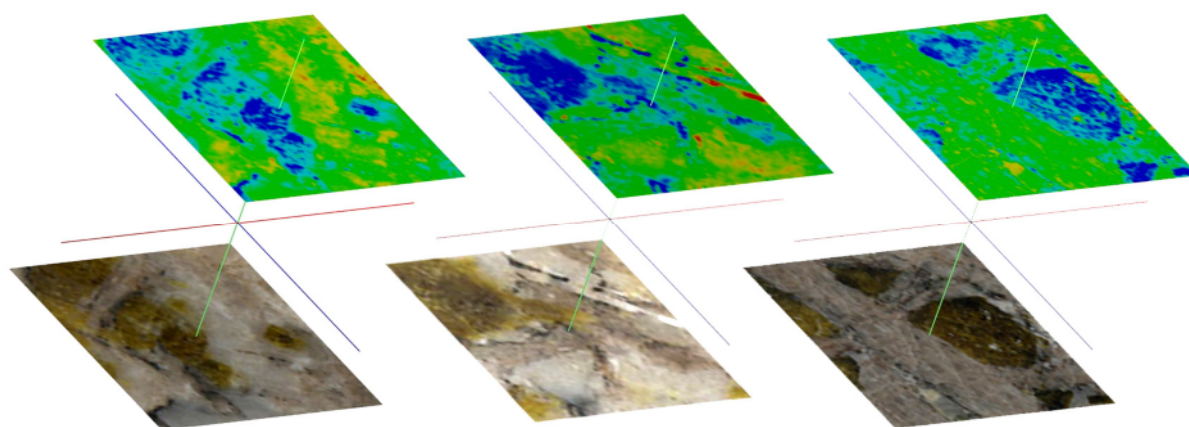
که در آن FMV حجم مدل فیلتر شده (حجم کانیها) و MV حجم کل مدل است.

جدول ۲ مقادیر گارنت به دست آمده از مدل سازی مجموعه نمونه ها را نشان می دهد. از آنجا که نمونه ها از بخشهای مختلف منطقه مورد مطالعه برداشت شده اند، مقدار نهایی گارنت،

میانگین عددی مقادیر مدل های به دست آمده خواهد بود. با توجه به مقدار حجمی میانگین ۳۱/۴ درصدی گارنت می توانیم اولین زون منطقه مورد مطالعه را گارنت-ولاستونیت بنامیم که این گارنتها توزیع فضایی یکنواختی را در متن سنگ نشان نمی دهند.



شکل ۵ چهار نمونه از مدل های کامل ساخته شده از توزیع طیف رنگی نوار سبز (نوار تیره) در نمونه های مورد بررسی (ابعاد نمونه ها در حد چند سانتیمتر است).

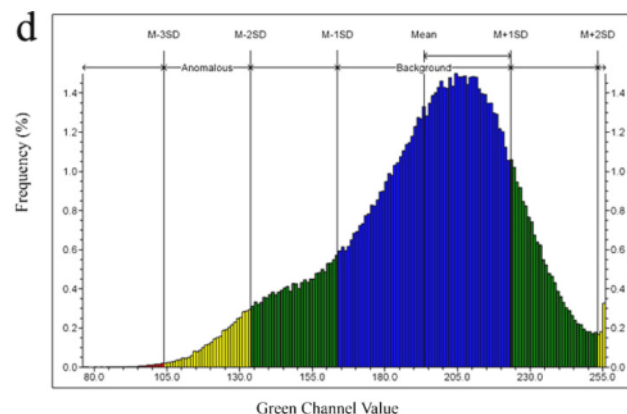
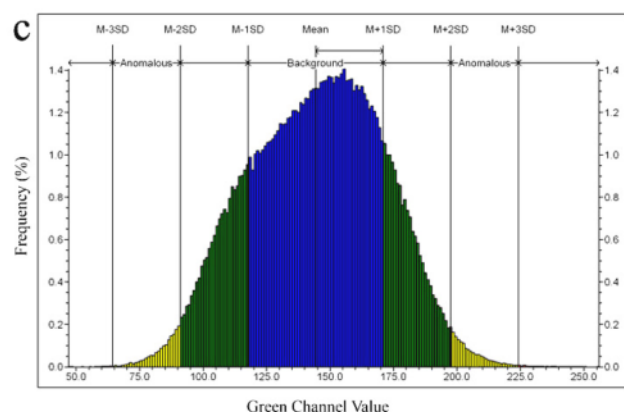
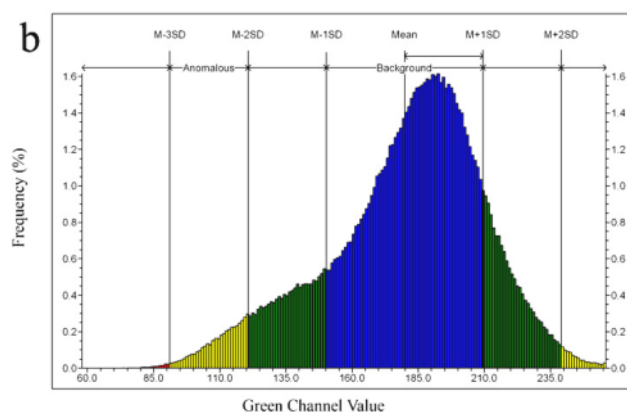
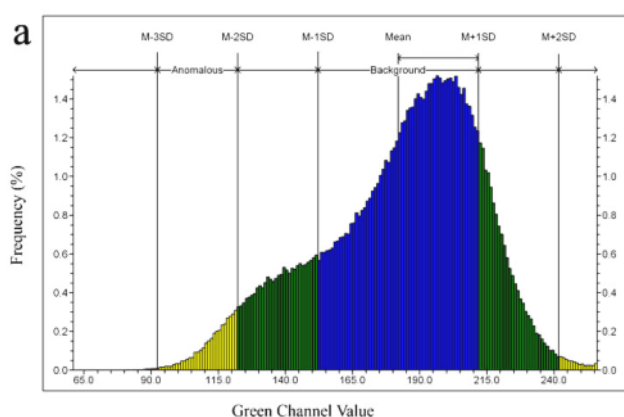




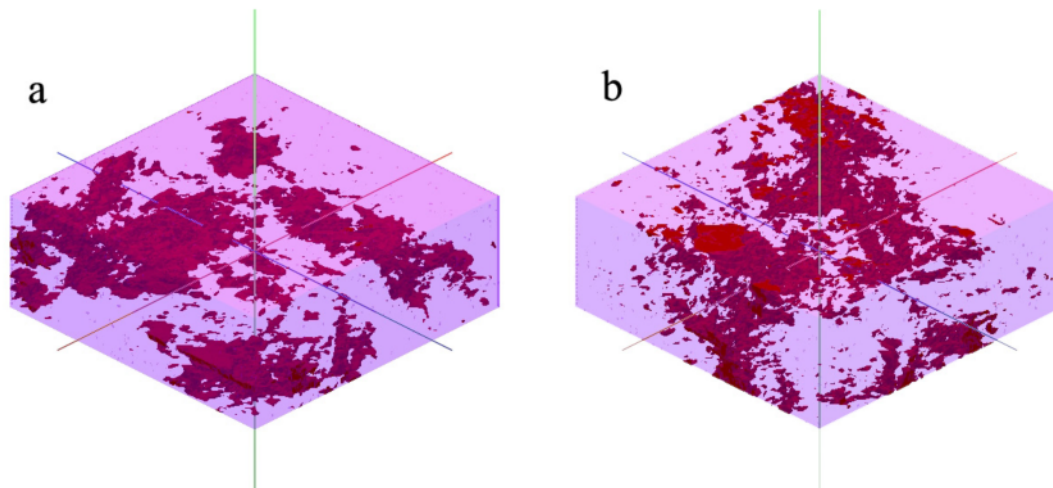
شکل ۶ مقایسه مقاطع افقی سه نمونه از مدل‌های ساخته شده با عکسهای اولیه (مقاطع مدل‌ها در بخش بالا و تصاویر برشهای سنگی در بخش پایین).

جدول ۱ محاسبه پارامترهای آماری چهار نمونه شکل ۵ (جمعیت بر حسب تعداد سلول‌ها و اعداد دیگر بر حسب گستره توزیع نوار رنگ سبز (نوار تیره) در مدل می‌باشد)

| پارامتر آماری                  | محاسبات آماری، نمونه a | محاسبات آماری، نمونه b | محاسبات آماری، نمونه c | محاسبات آماری، نمونه d |
|--------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| جمعیت مدل                      | ۴۱۷۷۲۰                 | ۴۱۷۷۲۰                 | ۴۱۷۷۲۰                 | ۴۱۷۷۲۰                 |
| جمعیت زمینه                    | ۲۷۷۹۶۹                 | ۲۹۱۲۰۲                 | ۲۶۹۹۸۲                 | ۲۸۶۴۶۹                 |
| حداقل                          | ۶۱                     | ۷۵                     | ۴۷                     | ۷۶                     |
| حداکثر                         | ۲۵۶                    | ۲۵۶                    | ۲۵۶                    | ۲۵۶                    |
| گستره                          | ۱۹۴                    | ۱۸۰                    | ۲۰۸                    | ۱۷۹                    |
| میانگین                        | ۱۸۱.۹۶                 | ۲۱۰.۱۸                 | ۱۴۴.۲۶                 | ۱۹۳.۵۲                 |
| انحراف معیار                   | ۲۹.۸۹                  | ۲۰.۴۰                  | ۲۶.۶۴                  | ۲۹.۸۵                  |
| میانه                          | ۱۸۷                    | ۲۱۲                    | ۱۴۵                    | ۱۹۸                    |
| ضریب تغییرات                   | ۰.۱۶۴                  | ۰.۰۹۷                  | ۰.۱۸۴                  | ۰.۱۵۴                  |
| میانگین - انحراف معیار         | ۱۵۲.۰۷                 | ۱۸۹.۷۸                 | ۱۱۷.۶۲                 | ۱۶۳.۶۶                 |
| میانگین - ۲ برابر انحراف معیار | ۱۲۲.۱۷                 | ۱۶۹.۳۸                 | ۹۰.۹۸                  | ۱۳۳.۸۰                 |
| میانگین + انحراف معیار         | ۲۱۱.۸۵                 | ۲۳۰.۵۸                 | ۱۷۰.۹۰                 | ۲۲۳.۳۷                 |
| میانگین + ۲ انحراف معیار       | ۲۴۱.۷۴                 | ۲۵۰.۹۸                 | ۱۹۷.۵۵                 | ۲۵۳.۲۳                 |



شكل ۷ منحنى توزيع بهنجار مربوط به چهار نمونه شكل ۵.



شكل ۸ دو نمونه از مدلهاى فیلتر شده (از مدلهاى a و b شكل ۵) كه نشان دهنده توزيع كانیها در متن سنگ است.

جدول ۲ مقادیر حجمی محاسبه شده گارنت در ۵۰ نمونه.

| شماره نمونه    | مقدار كانی گارنت (%) | شماره نمونه | مقدار كانی گارنت (%) | شماره نمونه | مقدار كانی گارنت (%) | شماره نمونه | مقدار كانی گارنت (%) | شماره نمونه | مقدار كانی گارنت (%) |
|----------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|
| ۱              | ۳۲.۱                 | ۱۱          | ۲۶.۴                 | ۲۱          | ۳۳.۱                 | ۳۱          | ۳۴.۹                 | ۴۱          | ۳۴.۸                 |
| ۲              | ۲۷.۲                 | ۱۲          | ۳۰.۱                 | ۲۲          | ۳۱.۱                 | ۳۲          | ۲۹.۸                 | ۴۲          | ۳۹.۷                 |
| ۳              | ۲۵.۲                 | ۱۳          | ۲۹.۸                 | ۲۳          | ۲۷.۳                 | ۳۳          | ۳۴.۳                 | ۴۳          | ۳۸.۱                 |
| ۴              | ۲۹.۴                 | ۱۴          | ۲۷.۳                 | ۲۴          | ۲۹.۳                 | ۳۴          | ۴۲.۶                 | ۴۴          | ۲۹.۲                 |
| ۵              | ۳۱.۶                 | ۱۵          | ۳۱.۷                 | ۲۵          | ۳۷.۵                 | ۳۵          | ۳۲.۲                 | ۴۵          | ۲۹.۶                 |
| ۶              | ۳۰.۲                 | ۱۶          | ۲۹.۱                 | ۲۶          | ۲۹.۳                 | ۳۶          | ۱۷.۹                 | ۴۶          | ۱۵.۳                 |
| ۷              | ۲۹.۴                 | ۱۷          | ۲۹.۶                 | ۲۷          | ۳۰.۸                 | ۳۷          | ۳۷.۶                 | ۴۷          | ۴۱.۶                 |
| ۸              | ۳۳.۳                 | ۱۸          | ۲۸.۳                 | ۲۸          | ۳۰.۳                 | ۳۸          | ۲۵                   | ۴۸          | ۳۶.۷                 |
| ۹              | ۳۳.۱                 | ۱۹          | ۲۹.۲                 | ۲۹          | ۳۴.۴                 | ۳۹          | ۳۸.۱                 | ۴۹          | ۳۱.۹                 |
| ۱۰             | ۲۸.۵                 | ۲۰          | ۳۰.۱                 | ۳۰          | ۳۹.۲                 | ۴۰          | ۳۳.۴                 | ۵۰          | ۳۴.۵                 |
| میانگین = ۳۱.۴ |                      |             |                      |             |                      |             |                      |             |                      |

## برداشت

محاسبه مقدار و تعیین شبکه سه بعدی کانیهها در بررسیهای زمین شناسی اقتصادی و سنگ شناسی ضروری است. در اینجا با توجه به گستردگی کم اسکارن، پیچیدگیهای کانیهشناسی موجود، طبیعت نامنظم منطقه و پوشیدگی بخش زیادی از آن با تراورتهای دوره حاضر، رفتار این سنگها پیچیده تر نیز

می شود. با توجه به اینکه روش ساده تر، ارزان تر و سریع ترى كه بتوان همزمان مقدار و توزیع شبکههای کانیه سنگ را به دست آورد در دسترس نیست، لذا روش مورد بحث در این مقاله بر پایه تحلیل ریاضی و مدل سازی سه بعدی تصاویر پیوسته از سنگ مورد مطالعه قرار گرفت. مقایسه نتایج به دست آمده با منابع اصلی (مانند تصاویر اولیه) قابلیت بالای روش را در تعیین

[4] Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Carvalho E.R., Hitzman N.W., Johnson C.A., Filho C.R.S., Torresi I., "Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sosego iron oxide- copper – gold deposit, Carajas Mineral province, Brazil: paragenesis and stable isotope constraints", *Miner deposita* 26 (2006) 121-148.

[5] Nakano T., "The zoned skarn developed in diorite porphyry in the Shinyama area, Kamaishi mine, Japan", *Mining Geology* 28 (1978) 99-109.

[6] Ochiai K., "A reaction model relating skarn zones and ore formation at the Nippo copper ore deposit, Kamaishi mine, northern Japan", *Economic Geology* 82 (1978) 1001-1018.

[7] Meinert L.D., "Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration", *Canadian Institute of Mining Metallurgy petroleum* 6 (1998) 185-208.

[8] Al-Kharusi A.S., Blunt M.J., "Network extraction from sandstone and carbonate pore space images", *Journal of Petroleum Science and Engineering* 56 (2007) 219-231.

[9] Gryze S. D., Jassogne L., Six J., Bossuyt H., Wevers M., Mercks, R., "Pore structure changes during deposiotion of fresh residue: X-ray tomography analysis", *Geoderma* 134 (2006) 82-96.

[10] Jankovic S., "Metallogeny of the Alpine granitoids in the Tethyan-Eurasian metallogenic belt," in *Proceedings of the 27th International Geological Congress Moscow August 4-14 12: Utrecht Netherlands, VNU Science Press* (1984) 247-273.

[۱۱] دهقان منشادی ب.، "مطالعه پترولوژی و ژئوشیمی ماگماتیسم و دگرگونی منطقه دره زرشک - توران پشت، جنوب غربی یزد"، رساله کارشناسی ارشد دانشگاه تهران ۱۳۷۹.

[12] Zarasvandi A., Liaghat S., "Geology of the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad Porphyry Copper Deposits, Central Iran", *International Geology Review* 47 (2005) 620-646.

[13] Berberian M., King G. C. P., "Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran", *Canadian Journal of Earth Sciences* 18 (1981) 210-265.

[14] Vogel H.J., Roth K., "Quantitative morphology and network representation of soil

مقدار و توزیع شبکه سه بعدی کانی (گارنت) نشان می‌دهد. مقدار حجمی گارنت موجود در این منطقه (به عبارتی اولین زون دگرگونی از سمت کنتاکت) ۳۱/۴ درصد است که نسبت به کانیهای زمینه (ولاستونیت، دیوپسید، کلسیت) نسبت بالایی است. بنابراین، این زون را می‌توان زون گارنت- ولاستونیت نامید. با بررسی توزیع سبهدی گارنت طبق مدل‌های به دست آمده، زمین ساختی بودن منطقه و اهمیت نقش آبگونها در تشکیل این کانی تأیید می‌شود و نیز می‌توان به اطلاعات مفیدی از محیط تشکیل گارنت در زمان تولید و نیز رخدادهایی که پس از آن ممکن است آن را تحت تأثیر قرار داده باشند، پی برد. از آنجا که در این مقاله در معرفی این روش کوشش بسیاری شده است، شرح همه نتایج بدست آمده ممکن نبود، و در نتیجه اطلاعات دقیق‌تر و جزئی‌تر درباره محیط تشکیل و سرگذشت این کانی و کانیهای دیگر منطقه در بررسیهای بعدی به تفصیل بیان خواهد شد.

این روش به ویژه در بررسیهای کیفی معدن، می‌تواند کاربردهای زیادی داشته باشد، و با نمونه برداریهای متناوب از یک کانی معدنی در مکان‌های مختلف یک کانسار به طوری که کل منطقه را پوشش دهد، می‌توان در حداقل زمان و با کمترین هزینه عیار ماده معدنی را تعیین کرد. همچنین در مواردی از قبیل بررسی آبگونها درگیر و محاسبه نوع، مقدار تخلخل در مخازن نفتی، و بررسی زمین ساختی منطقه نیز کاربرد دارد.

## مراجع

[1] Hilpert M., Miller C.T., "Pore-morphology-based simulation of drainage in totally wetting porous media", *Advances in Water Resources* 24 (2001) 243-255.

[2] Wylie A. S., Wood J. R., "Well-log tomography and 3-D imaging of core and log-curve amplitudes in a Niagaran reef, Belle River Mills field, St. Clair County, Michigan, United States", *AAPG Bulletin* 89 (4) (2005) 409-433.

[3] Hersum T.G., Marsh B.D., "Igneous microstructures from Kinetic models of crystallization", *Journal of volcanology and geothermal research* 154 (2006) 34-47.

T.J., "Modeling and assimilation of root zone soil moisture using remote sensing observations in Walnut Gulch Watershed during SMEX04", Remote Sensing of Environment (2007) in press

*pore Structure*", Advances in Water Resources 24 (2001) 233-242.

[15] Zhou G., "A comparison of fractal dimension estimators based on multiple surface generation algorithms", Computer and Geosciences 31 (2007) 1260-1269.

[16] Cooper G. R.J., Cowan D.R., "Filtering using variable order vertical derivatives", Computers & Geosciences 30 (2004) 455-459.

[17] Das N.N., Mohanty B.P., Cosh M.H., Jackson





