

ارائه یک روش جایگزین در فیزیک سنگ رقومی استاندارد با استفاده از الگوریتم بازسازی ۳-بعدی تصاویر ۲-بعدی

مصدق کریمی^۱، ماسه مان ماه-اسبی^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه زنجان

^۲ محقق ارشد، دانشکده نفت، دانشگاه تگزاس در آستین، ایالات متحده آمریکا.

^۲ محقق ارشد، دانشکده نفت و مهندسی شیمی، دانشگاه کالیفرنیا جنوبی، ایالات متحده آمریکا.

* s.karimpouli@znu.ac.ir

دریافت تیر ۱۳۹۴، پذیرش آذر ۱۳۹۴

چکیده

فیزیک سنگ رقومی روشی نوین است که براساس آن ویژگی های فیزیکی سنگ مانند تراوایی، ضرایب الاستیک و فاکتور سازند به صورت عددی و با استفاده از یک تصویر ۳ بعدی از یک نمونه سنگ محاسبه می شود. این تصاویر توسط میکرو-سی-تی اسکنرهای پیشرفته تهیه می شوند. عدم دسترسی به این دستگاه ها و نیز زمان بر بودن چنین داده های پرهزینه و گرانی، اهمیت توسعه روش های جایگزین را به شدت نشان می دهد. پیشرفت های اخیر در بازسازی ۳ بعدی تصاویر ۲ بعدی مانند الگوریتم بازسازی CCSIM امکان ارائه چنین روش هایی را فراهم آورده است. در این مطالعه، یک روش جایگزین به صورت زیر ارائه می شود: ۱. تهیه تصویر ۲ بعدی با بزرگنمایی بالا، ۲. تقسیم تصویر به زیرتصویرهای مختلف، ۳. بازسازی ۳ بعدی زیرنمونه ها، ۴. تفکیک فازهای کانی و تخلخل از یکدیگر و ۵. محاسبه پارامترهای فیزیکی سنگ. این روش روی داده های استاندارد ماسه سنگ برای پیاده سازی شد. محاسبه نتایج ضرایب الاستیک و تراوایی از یک طرف، از روندهای مرجع سنگ پیروی کرده و از طرف دیگر، تا حدود زیادی مطابق با نتایج مطالعات قبلی هستند. این امر حاکی از دقت و کارایی مناسب روش پیشنهادی است. وجود دو روند متفاوت در محاسبات اولیه تراوایی این نمونه ناشی از وجود دو نوع متفاوت از تخلخل و اندازه گلوگاهی تشخیص داده شد که با تغییر اندازه تصویر و انتخاب زیرتصویرهای معرف تر این مشکل رفع شد.

کلمات کلیدی: فیزیک سنگ رقومی، بازسازی ۳ بعدی، CCSIM، ماسه سنگ برا.

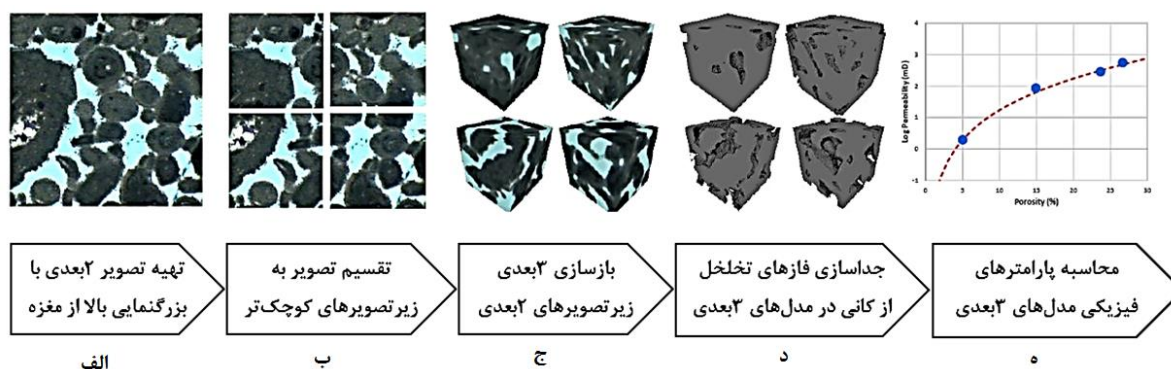
۱. مقدمه

هدف از مطالعات فیزیک سنگی شناسایی و مدل سازی روابط بین پارامترهای قابل اندازه گیری ژئوفیزیکی و ویژگی های برجای سنگ است. در فیزیک سنگ، روابط تئوری و تجربی براساس فرض های تئوریک و اندازه گیری های آزمایشگاهی بدست می آیند. با ظهور تصاویر ۳ بعدی با بزرگنمایی بالا از هندسه پیچیده دانه و تخلخل، فیزیک سنگ رقومی به عنوان روشی مناسب جهت ارزیابی پارامترهای سنگ به سرعت گسترش یافت. اصل اساسی در این روش بر مبنای تهیه تصویر و محاسبه عددی پارامترها است. به این صورت که ابتدا یک تصویر ۳ بعدی از هندسه فضاهای متخلخل و دانه ها تهیه شده و در مرحله بعد فرآیندهای فیزیکی به طور عددی در این تصویر رقومی شبیه سازی می شوند. این فرآیندهای فیزیکی عبارتند از: جریان سیال برای محاسبه تراوایی، شارش جریان الکتریکی برای تعیین مقاومت ویژه و تغییر شکل الاستیک برای محاسبه ضرایب الاستیک و سرعت امواج در سنگ (آندرا و همکاران ۲۰۱۳). مراحل مختلف روش فیزیک سنگ رقومی توسط آندرا و همکاران (۲۰۱۳ الف و ب) و دورکین و همکاران (۲۰۱۱) به صورت زیر معرفی شده است: ۱. تصویر برداری ۳ بعدی رقومی از نمونه های کوچک در مقیاس فضاهای متخلخل. ۲. پردازش تصاویر خام برای تفکیک فازهای متخلخل از ماتریکس و کانی و تهیه یک تصویر قطعه بندی شده، و ۳. شبیه سازی فرآیندهای فیزیکی در تصویر ۳ بعدی. مقایسه نتایج این روش و اندازه گیری های آزمایشگاهی نشان داد که نتایج فیزیک سنگ رقومی معتبر و قابل استفاده در صنعت نفت هستند (لوپز و همکاران ۲۰۱۲، رینگستاد و همکاران ۲۰۱۳، لیویس و هریث ۲۰۱۴). مشکلاتی از جمله عدم دسترسی به تکنولوژی های نوین مانند میکرو-سی-تی-اسکن ها برای تهیه تصاویر ۳ بعدی و نیز زمان بر بودن این داده ها در عین حال هزینه زیادی که برای تهیه آن ها صرف می شود، نیاز به استفاده از روش هایی جایگزین را به خوبی مشخص می کند. یک روش جایگزین برای رفع این مشکلات، بکارگیری مناسب از الگوریتم های بازسازی ۳ بعدی تصاویر ۲ بعدی است. ایده اصلی در چنین روش هایی تخمین آماری ویژگی های سنگ در یک تصویر ۲ بعدی و بازسازی این ویژگی ها با حفظ پارامترهای آماری به صورت ۳ بعدی است. مزیت این روش امکان تولید تعداد زیادی نمونه با ویژگی های ساختاری مشابه سنگ اولیه است. در حالی که چنین تصویرهایی ممکن است پیچیدگی طبیعی نمونه های واقعی را نداشته باشند (آندرا و همکاران ۲۰۱۳ الف). چنین الگوریتم هایی براساس اسکلت سازی مورفولوژیکی (لیانگ و همکاران ۲۰۰۰)، شبیه سازی شاخص سلسله مراتبی (کیم و همکاران ۲۰۰۳) و همچنین ویژگی های بلوری و پارامترهای دیاژنیتیک سنگ (لطیف و همکاران ۲۰۱۰) می باشند. با این وجود، در این مطالعه از روش دقیق بازسازی CCSIM که اخیراً توسط طهماسبی و سهیمی (۲۰۱۲ و ۲۰۱۳) ارائه شده، استفاده شده است. نکته قابل ذکر در این گونه مطالعات آن است که برخلاف کیم و همکاران (۲۰۰۳)، بازسازی تصویر نباید تنها روی یک نمونه انجام شود. دورکین و همکاران (۲۰۱۱) و دورکین و درژی (۲۰۱۲) نشان دادند که بجای مقایسه مستقیم نتایج روش های مختلف، روندی که یک یا چند ویژگی سنگ را به یکدیگر مرتبط می کند باید شناخته شود. آنها اثبات می کنند که مهمترین ویژگی این روندها آن است که مستقل از مقیاس داده ها هستند. به عبارت دیگر روندی که در نمونه های میکروسکوپی است مشابه رفتار سنگ و روند موجود در مقیاس آزمایشگاهی و مغزه است. از مهمترین جنبه های این مطالعه را می توان تلفیق الگوریتم های بازسازی تصویر و روندهای موجود در سنگ دانست. این روندها، با اندازه گیری تعداد زیادی نمونه در آزمایشگاه امکان پذیر است. اما در فیزیک سنگ رقومی استاندارد این روندها با استخراج زیرنمونه های مختلف از نمونه اصلی بدست می آید. بنابراین در روش حاضر نیز باید زیرنمونه های مختلفی بازسازی شده و روندهای مذکور شناخته شوند. این کار با استفاده از تصاویر مختلف واقعی از چند مقطع نازک، یا تصاویر مختلف شبیه سازی شده از یک مقطع نازک و یا تقسیم تصویر یک مقطع نازک به زیرتصویرهای مختلف قابل انجام است. مراحل بعدی این روش مانند

روش فیزیک سنگ استاندارد شامل تفکیک تصویر، محاسبه ویژگی های فیزیکی نمونه ها و تعیین روندهای مربوطه است که در ادامه در مورد هر یک بحث می‌شود.

۲-۱-۲ روش پیشنهادی

مراحل فیزیک سنگ رقومی استاندارد با جزئیات کامل در توسط آندرا و همکاران (۲۰۱۳ الف و ب) ارائه شده است که در بخش قبل نیز به آن اشاره شد. هدف از ارائه این روش در واقع رفع مشکلاتی از جمله عدم دسترسی به دستگاه مناسب، صرف زمان و هزینه زیاد برای تهیه تصاویر ۳ بعدی است. از آنجایی که هدف نهایی در این روش یافتن روندهای مناسب بین پارامترهای فیزیک سنگی است، ایده اصلی این کار تولید زیرنمونه‌های مختلف از یک تصویر ۲ بعدی است. شکل ۱ الگوریتم پیشنهادی این کار را که روش بهبود یافته فیزیک سنگ رقومی استاندارد است، نشان می‌دهد. همان طور که از این شکل برمی‌آید، مرحله اول فیزیک سنگ رقومی استاندارد با سه مرحله (شکل ۱-الف، ب و ج) جایگزین شده است و این در حالی است که مراحل دوم (شکل ۱-د) و سوم (شکل ۱-ه) آنها کاملاً شبیه یکدیگر است.



شکل ۱ الگوریتم پیشنهادی جایگزین شده در این مطالعه.

۲-۱-۲ تهیه تصویر ۲ بعدی

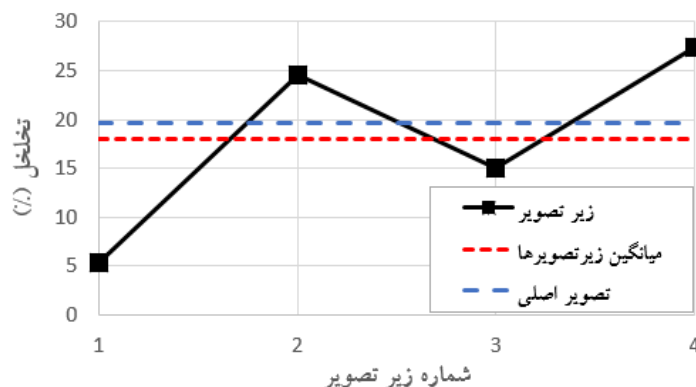
تهیه تصویر اولین مرحله در روش فیزیک سنگ آماری است، اما در روش حاضر به یک تصویر ۲ بعدی با بزرگنمایی بالا (در مقیاس میکرو و نانو) بجای یک تصویر ۳ بعدی نیاز است. یک مقطع نازک معمولی از نمونه سنگ می‌تواند برای این هدف مناسب باشد (شکل ۱-الف). این تصویر به سادگی و با استفاده از میکروسکوپ آزمایشگاهی و یک دوربین با بزرگنمایی بالا قابل تهیه است.

۲-۲ تهیه تصویرهای کوچکتر

برای پیدا کردن روند بین پارامترهای فیزیک سنگی سنگ، به چندین نمونه یا زیرنمونه نیاز است. شیوه‌های متفاوتی برای بازسازی ۳ بعدی زیرنمونه‌های مختلف از روی تصاویر ۲ بعدی وجود دارد. اول آن که می‌توان چندین مقطع نازک تهیه نمود و در نتیجه تصاویر ۲ بعدی مختلفی تولید نمود. مزیت این کار آن است که سناریوهای بیشتری از ساختار نمونه واقعی سنگ در نظر گرفته می‌شود. روش دیگر شبیه‌سازی یک تصویر ۲ بعدی و تولید تصاویر مختلف ۲ بعدی است. در واقع یک محدودیت در اندازه تصویر ورودی به الگوریتم بازسازی وجود دارد که این تصویر باید حداکثر 128×128 پیکسل داشته باشد. بنابراین در دو شیوه قبل ممکن است نیاز به بریدن یا تغییر اندازه باشد. تغییر اندازه یک تصویر بزرگ به یک تصویر کوچک به معنای از دست دادن ریزساختارها و میکروتخلخل‌ها است که باعث تولید نتایج نامناسب می‌گردد. بنابراین روش سوم که در این مطالعه نیز از آن استفاده شده است، به صورت تقسیم تصویر ۲ بعدی به زیرتصاویری با اندازه 128×128 پیکسل در محیط متلب پیشنهاد می‌شود (مانند دورکین و همکاران ۲۰۱۱). این زیرتصاویر هم به صورت منظم و هم نامنظم

می‌توانند انتخاب شوند.

با وجود آن که انتظار نمی‌رود زیرتصویرها شباهت کاملی با تصویر داشته باشند، اما ممکن است زیرتصویرهایی تولید شوند که برای مثال به دلیل واقع شدن در گوشه‌ها یا لبه‌های تصویر و یا واقع شدن درون یک دانه یا تخلخل بزرگ، اختلاف فاحشی با تصویر اولیه داشته باشند. بنابراین پس از تولید زیرتصویرها، باید آن‌هایی را که نماینده مناسبی از محیط ناهمگن سنگ هستند، انتخاب نمود. در این صورت انتظار می‌رود که ویژگی‌های سنگ حول یک مقدار میانگین نوسان کنند دورکین و همکاران (۲۰۱۱). برای مثال، همان گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، مقدار تخلخل تصویر مقطع نازک در شکل ۱-الف، ۱۹/۷٪ است به طوری که مقدار تخلخل زیرتصویرها (شکل ۱-ب) از ۵/۳ تا ۲۷/۴٪ متغیر است. میانگین این مقادیر ۱۸/۱٪ است که بسیار به مقدار تخلخل تصویر مقطع نازک نزدیک است.



شکل ۲ مقادیر تخلخل میانگین زیرتصویرها، مقدار تخلخل تصویر اصلی و مقادیر تخلخل زیرتصویرها (شکل ۱-ب و ۱-الف).

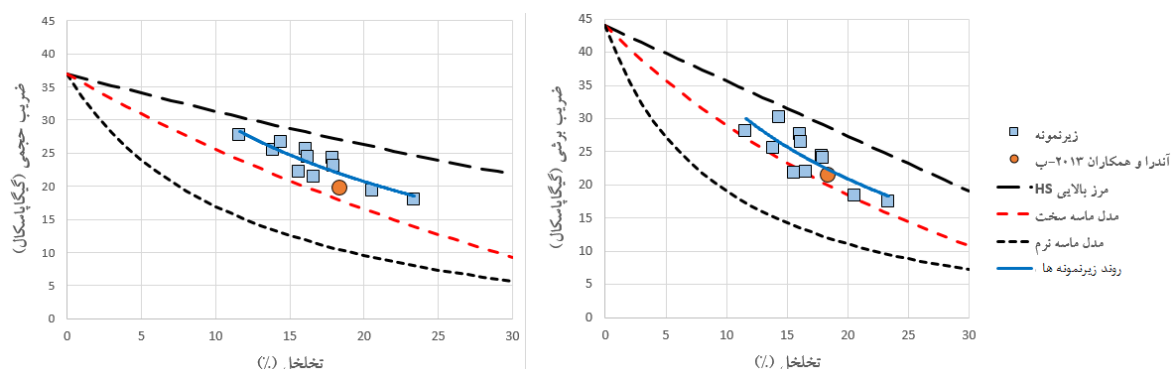
۲-۳-۱۰-۳ مازی ۱۰۰۳: تصاویرهای ۲-۰۲

پس از انتخاب زیرتصویرهای مناسب، الگوریتم بازسازی تصویر CCSIM جهت تولید زیرنمونه‌های ۳ بعدی از زیرتصویرهای ۲ بعدی در محیط برنامه‌نویسی C++ مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱-ج) (طهماسبی و سهمی ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳). اساس این الگوریتم اما به شیوه‌ای کاملاً متفاوت است. در ابتدا تصویر ۲ بعدی اصلی به عنوان اولین لایه در پایین‌ترین بخش تصویر ۳ بعدی در نظر گرفته می‌شود. سپس، چهار تصویر ۲ بعدی دیگر یعنی وجه‌های جلو، عقب، چپ و راست مدل ۳ بعدی با استفاده از الگوریتم CCSIM شرطی تولید می‌شود. این وجه‌ها پیوستگی خارجی مدل ۳ بعدی را حفظ می‌کنند. در مرحله بعد، مکان‌های مناسب داده‌های شرطی لایه دوم بر اساس انتروپی شانون تعیین می‌شود. این ایده باعث می‌شود که تولید الگوها و پیوستگی‌های عمودی بین لایه‌ها به طور مناسبی حاصل شود. لازم به ذکر است که برای حفظ پیوستگی لایه‌ها با وجه‌های خارجی، این وجه‌ها نیز به عنوان داده‌های شرطی برای لبه‌های جدید در نظر گرفته می‌شوند. در نهایت لایه جدید با استفاده از این داده‌های شرطی تولید می‌شوند. این رویه تا تولید بالاترین لایه در مدل ۳ بعدی ادامه می‌یابد. اطلاعات تکمیلی بیشتر توسط طهماسبی و سهمی (۲۰۱۲ و ۲۰۱۳) ارائه شده است. آن‌ها از این الگوریتم برای نمونه استاندارد ماسه‌سنگ برای استفاده کردند که نتایج قابل قبولی در پیش‌بینی تخلخل و تراوایی ارائه نمود.

۲-۴-۱۰-۴ مطالعه ۱۰۰۴: تخلخل و کانی

در این مرحله فازهای مختلف باید از هم تفکیک داده شوند و به هر وکسل (پیکسل ۳ بعدی) تصویر برجسته‌ی مطابق فاز مربوطه تعلق گیرد. این کار به طور معمول توسط نرم‌افزارهای پیشرفته و براساس مراحل از پردازش تصویر شامل فیلتر فضایی، حذف نوفه، رویه‌های مورفولوژیکی، مقادیر حد آستانه و تحلیل خوشه‌بندی انجام می‌گیرد. با این وجود در مطالعه حاضر از روش ساده رسم هسته‌گرام تصویر و انتخاب دستی حد آستانه (مدونا و همکاران ۲۰۱۲) برای قطعه‌بندی فاز

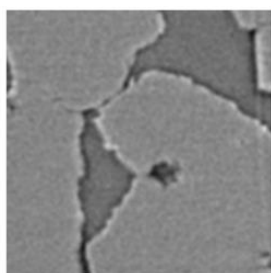
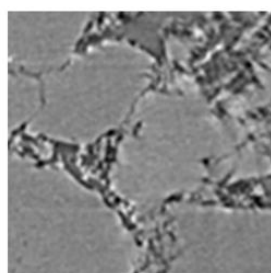
نقطه محاسبه شده توسط آندرا و همکاران (۲۰۱۳-ب) و یا از نزدیکی آن می‌گذرد که نشان از دقت و صحت مناسب این نتایج و اعتبار روش پیشنهادی در تولید نتایج شبیه‌سازی شده قابل اعتماد دارد.



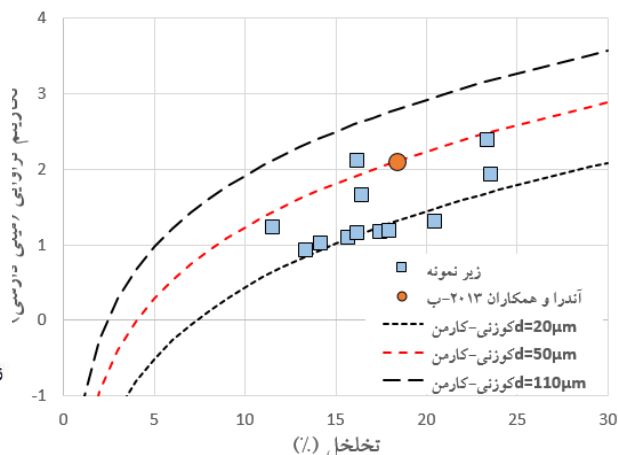
شکل ۴. مقایسه نتایج محاسبه شده از زیر نمونه‌های $128 \times 128 \times 128$ (ب) و (ب) ارائه شده توسط آندرا و همکاران (۲۰۱۳-ب)؛ اندازه $1024 \times 1024 \times 1024$ (ب) و (ب) از زیر نمونه‌های $128 \times 128 \times 128$ (ب) و (ب) و داده‌های مرجع شامل مرز $128 \times 128 \times 128$ (ب) و (ب) یافته پایینی (مدل ماسه نرم-سخت) و کواته هاشین-کواته (خط چین متوسط) نشان داده شده‌اند.

مطالعات آزمایشگاهی تطابق خوبی با مدل ماسه سخت (خط نقطه چین) نشان می‌دهند (آندرا و همکاران ۲۰۱۳-ب) که هر دوی آن‌ها نسبت به روش معمول پتروفیزیک رقومی و نتایج این مطالعه مقدار کمتری دارند. این امر به دو دلیل بزرگنمایی تصویر و نیز تفاوت در فشار محیط می‌باشد. بزرگنمایی تصویر کم تصویر باعث می‌شود تا ریزتخلخل و ریزترک‌هایی به مقدار قابل توجهی از سختی سنگ می‌کاهند در تصاویر موجود در نظر گرفته نشوند. در نتیجه مقادیر بیشتری برای ضرایب الاستیک بدست می‌آید که به معنای نمونه‌ای سخت‌تر از حالت واقعی است. همچنین برای رفع مشکل فشار محیط باید یا نتایج آزمایشگاهی در فشارهای بالاتر انجام پذیرند (درژی و همکاران ۲۰۱۱) و یا در مدل‌های رقومی فاز سومی به نام فصل مشترک دانه به دانه با مدولی بین فاز تخلخل (حداقل فشار) و کانی (حداکثر فشار) در نظر گرفته شود (مدونا و همکاران ۲۰۱۲).

نتایج تراوایی محاسبه شده براساس این روش در شکل ۵ نمایش داده شده است. این نتایج نیز برای پیدا کردن روند مناسب در مقابل تخلخل رسم شده‌اند. در این مورد روندهای مرجع با رابطه تراوایی کوزنی-کارمن و برای اندازه دانه‌های متفاوت محاسبه و نشان داده شدند. نتیجه محاسبه شده توسط آندرا و همکاران (۲۰۱۳-ب) برای همین نمونه ولی با اندازه $1024 \times 1024 \times 1024$ نیز برای مقایسه بهتر روی شکل آمده است. همان گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، نتایج زیر نمونه‌ها روی دو روند متفاوت از یکدیگر قرار گرفتند: یکی با اندازه دانه ۲۰ میکرومتر و دیگری با اندازه دانه ۵۰ میکرومتر که روند دوم از نقطه محاسبه شده توسط آندرا و همکاران (۲۰۱۳-ب) می‌گذرد. برای بررسی بیشتر، زیرتصویرهای مربوط به هر یک از این روندها کنترل شدند. علت وجود دو روند در نتایج، وجود دو نوع تخلخل مختلف در این تصاویر تشخیص داده شد. شکل ۶ زیرتصویرهایی از هر یک از این روندها را نشان می‌دهد. اگرچه این زیرتصویرها تخلخل مشابهی دارند (۱۶-۱۸٪)، اما دارای شکل تخلخل و اندازه گلوگاهی متفاوت از هم هستند. زیرتصویر شماره ۴۰ حاوی تخلخل شبه شکستگی با اندازه گلوگاهی نازک است در حالی که زیرتصویر ۳۳ دارای تخلخل شبه حفره‌ای با اندازه گلوگاهی باز است. به همین علت، تراوایی محاسبه شده برای زیرتصویر ۴۰ کمتر از زیرتصویر ۳۳ است.

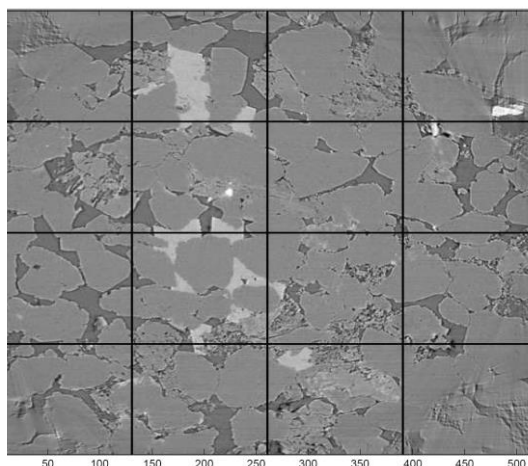
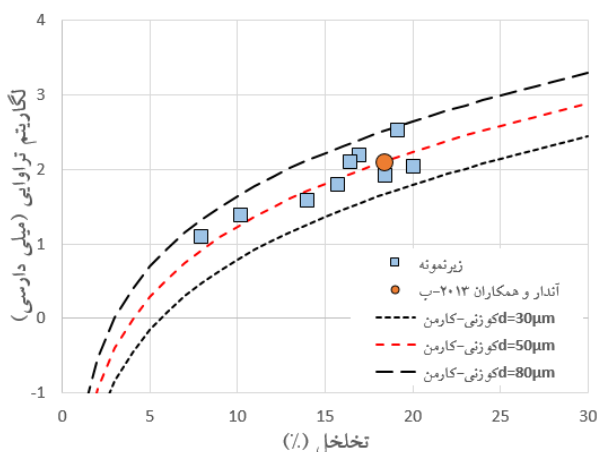


زیرتصویر شماره ۲۳ (اندازه دانه - ۵۰ میکرومتر) زیرتصویر شماره ۴۰ (اندازه دانه - ۲۰ میکرومتر)



شکل ۵. تراوایی محاسبه شده از زیرنمونه‌های $128 \times 128 \times 128$ (چهارگوش) و نتیجه ارائه شده توسط آندرا و همکاران (۲۰۱۳-ب) با اندازه $1024 \times 1024 \times 1024$ (دوایر). روندهای مرجع براساس رابطه کوزنی-کارمن و اندازه دانه‌های ۱۱۰ (خط چین بلند)، ۲۰ (خط چین کوتاه) و ۵۰ میکرومتر (خط چین متوسط).

از آنجایی که ریزتخلخل‌ها تاثیر کمتری روی تراوایی دارند، برای بدست آوردن روند تراوایی ماسه‌سنگ برآ اندازه تصویر ۲بعدی اولیه با ضریب ۰/۵ کوچک شده و سپس به $(\epsilon^2=16)$ زیرتصویر با اندازه 128×128 تقسیم شد (شکل ۷). این امر موجب بزرگ‌تر شدن اندازه پیکسل‌ها و تولید زیرتصویرهایی با الگوی پراکندگی تخلخل معرف‌تر شد. شکل ۸ نشان دهنده مقادیر تراوایی محاسبه شده در این مرحله است. همان طور که در این شکل دیده می‌شود، تراوایی زیرنمونه‌ها در امتداد روندی مناسب با اندازه دانه ۵۰ میکرومتر قرار گرفته‌اند که از نقطه محاسبه شده توسط آندرا و همکاران (۲۰۱۳-ب) نیز می‌گذرد.



شکل ۸. مانند شکل (۵) اما برای تصویر تغییر اندازه داده شده. روندهای مرجع براساس رابطه کوزنی-کارمن و اندازه دانه‌های ۸۰ (خط چین بلند)، ۳۰ (خط چین کوتاه) و ۵۰ میکرومتر (خط چین متوسط).

شکل ۷. تصویر ۲بعدی تغییر اندازه داده شده با ضریب ۰/۵ و تقسیم شده به $(\epsilon^2=16)$ زیرتصویر با اندازه 128×128 .

۴. نتیجه گیری

فیزیک سنگ رقومی، روش مناسبی در پیش بینی و تخمین پارامترهای فیزیک سنگی به شمار می رود که با گسترش تکنولوژی های تصویربرداری با بزرگنمایی بالا پیشرفت های شگرفی داشته است. با این وجود، عدم دسترسی به تکنولوژی های نوین مانند میکرو سی-تی-اسکن ها و نیز زمان بر و هزینه بر بودن تهیه چنین اطلاعاتی، مشکلاتی را در استفاده از این روش ها به همراه داشته است. به عنوان یک روش جایگزین برای رفع این مشکلات، در این مطالعه از بازسازی ۳ بعدی تصاویر ۲ بعدی استفاده شده است. در این روش، یک تصویر ۲ بعدی با بزرگنمایی بالا (که تهیه آن بسیار ساده است) به زیرتصویرهای کوچکتر تقسیم شده و در مرحله بعد با الگوریتم CCSIM زیرنمونه های ۳ بعدی از روی آن ها بازسازی می شوند. سپس، فازهای تخلخل و کانی از هم تفکیک شده و در نهایت پارامترهای فیزیک سنگی زیرنمونه ها به صورت عددی محاسبه می شوند. در واقع ایده اصلی در ارائه نتایج، یافتن روندهای موجود در پارامترهای فیزیک سنگی به جای یک مقدار مشخص برای آن نمونه است. این روش روی داده های استاندارد ماسه سنگ برا پیاده سازی شد. نتایج نشان می دهد که روند حاصل از زیرنمونه ها مطابق با روندهای مرجع بوده و این روندها خود مقداری نزدیک به مقادیر واقعی نمونه دارند. این امر حاکی از دقت و کارایی مناسب روش پیشنهادی است. البته وجود دو روند متفاوت در محاسبات اولیه تراوایی این نمونه ناشی از وجود دو نوع متفاوت از تخلخل و اندازه گلوگاهی تشخیص داده شد که با تغییر اندازه تصویر و انتخاب زیرتصویرهای معرف تر این مشکل رفع شد.

تقدردانی

از آقایان دکتر آصف و مهندس مداحی بخاطر داوری مقاله سپاسگزاری می گردد.

- ANDRÄ, H., COMBARET, N., DVORKIN, J., GLATT, E., HAN, J., KABEL, M., and Et al., 2013a, Digital rock physics benchmarks-Part I: Imaging and segmentation: *Computers and Geosciences*, **50**, 25–32.
- ANDRÄ, H., COMBARET, N., DVORKIN, J., GLATT, E., HAN, J., KABEL, M., and Et al, 2013b, Digital rock physics benchmarks-part II: Computing effective properties: *Computers and Geosciences*, **50**, 33–43.
- DERZHI, N., SISK, C., and KALAM, Z., 2011, Application of digital rock physics for geophysical rock properties: *Twelfth International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, 1472-1475
- DVORKIN, J., DERZHI, N., DIAZ, E., and FANG, Q., 2011, Relevance of computational rock physics: *Geophysics*, **76**, E141–E153.
- DVORKIN, J., and DERZHI, N., 2012, Rules of upscaling for rock physics transforms: Composites of randomly and independently drawn elements: *Geophysics*, **77**, WA129–WA139.
- GARBOCZI, E.J., and DAY, A., 1995, Algorithm for computing the effective linear elastic properties of heterogeneous materials: Three dimensional results for composites with equal phase poisson ratios: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **43**, 1349–1362.
- KEEHM, Y., MUKERJI, T., and NUR, A., 2003, Permeability prediction from thin sections: 3D reconstruction and lattice-Boltzmann flow simulation: *Geophysical Research Letters*, **31**, L04606.
- LATIET, F.D.E., BISWAL, B., FAUZI, U., and HILFER, R., 2010, Continuum reconstruction of the pore scale microstructure for Fontainebleau sandstone: *Physica A*, **389**, 1607-1618.
- LIANG, Z., IOANNIDIS, M.A., and CHATZIS, I., 2000, Permeability and electrical conductivity of porousmedia from 3D stochastic replicas of the microstructure: *Chemical Engineering Science*, **55** (22), 5247–5262.
- LIUBIS, L.A., and HARITH, Z.Z.T., 2014, Pore Type Classification on Carbonate Reservoir in Offshore Sarawak using Rock Physics Model and Rock Digital Images, IOP Conf. Series: *Earth and Environmental Science*, **19**, 012003.
- LOPEZ, O., MOCK, A., ØREN, P.E., LONG, H., KALAM, A., and Et al., 2012, Validation of fundamental carbonate reservoir core properties using digital rock physics: *International Symposium of the Society of Core Analysts*, SCA2012-19.
- MADONNA, C., ALMQVIST, B.S.G., and SAENGER, E.H., 2012, Digital rock physics: numerical prediction of pressure-dependent ultrasonic velocities using μ CT imaging: *Geophysical Journal International*, **189** (3), 1475–1482.
- RINGSTAD, C., WESTPHAL, E., MOCK, A., and AL-HAMMADI, M., 2013, Elastic Properties of Carbonate Reservoir Rocks Using Digital Rock Physics, *75th EAGE Conference & Exhibition*.
- TAHMASEBI, P., and SAHIMI, M., 2012, Reconstruction of three-dimensional porous media using a single thin section: *Physical Review E*, **85**, 066709.
- TAHMASEBI, P., and SAHIMI, M., 2013, Cross-correlation function for accurate reconstruction of heterogeneous media: *Physical Review Letters*, **110**, 078002.