

تعیین مقدار، نوع و توزیع تخلخل در سنگ‌های مخزنی با استفاده از ترکیب آنالیز تصاویر و مدل‌سازی سه‌بعدی

وحید توکلی؛ دانشگاه تهران، دانشکده زمین‌شناسی

دریافت ۹۴/۴/۹

پذیرش ۹۵/۵/۲۰

چکیده

یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در پژوهش‌های زمین‌شناسی مخزن، تعیین نوع و مقدار تخلخل‌های موجود در سنگ است. در این پژوهش با استفاده از تهیه تصاویر رقومی پیوسته ۳۰ نمونه از سازندکنگان، مدل سه‌بعدی تخلخل آن ساخته شده است. لایه‌برداری بسیار نازک (قطر ۲۰۰ میکرون) از نمونه‌های بررسی شده انجام شده و پس از هر مرحله لایه‌برداری از نمونه، تصویر رقومی سطح آن تهیه شد. از آنجا که هدف پژوهش بازسازی شبکه تخلخل‌های سنگ است، سطح سنگ در هر مرحله با خمیر سبزرنگ به‌طور کامل پوشانده شده و سپس خمیر برداشته می‌شود تا تنها تخلخل‌ها رنگی باشند. تصاویر تهیه شده در نرم‌افزار متلب پردازش شده و باند سبزرنگ آن استخراج می‌شود. ارزش‌های اجزاء تصویری این باند به‌همراه مختصات سه‌بعد هر جزء تصویری برای مدل‌سازی سه‌بعدی سنگ استفاده شد. شبکه تخلخل سنگ از حذف بخش‌های اضافی (زمینه سنگ) در مدل به‌دست آمده با استفاده از انحراف معیار داده‌ها به‌دست آمد. با استفاده از نسبت حجم مدل فیلتر شده به حجم مدل اولیه، مقدار تخلخل سنگ نیز قابل محاسبه است. از این مدل‌ها می‌توان علاوه بر به‌دست آوردن نوع، مقدار و توزیع شبکه سه‌بعدی تخلخل، در مواردی مانند تعیین آب‌شباع‌شدگی، آب غیرقابل استحصال، تراوایی و قطر گلوگاه‌ها نیز استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: شبکه تخلخل، مدل‌سازی، آنالیز تصاویر، مخزن، رقومی

مقدمه

تعیین کیفیت مخزنی در مخازن هیدروکربنی یکی از اولویت‌های اصلی پژوهش‌های زمین‌شناسی مخزن است که اغلب بر اساس داده‌های تخلخل و تراوایی به‌دست می‌آید. چنانچه نمونه مغزه از مخزن مورد نظر در دست باشد، از قانون بویل و یا تحلیل تصاویر مقاطع نازک برای اندازه‌گیری تخلخل در سنگ‌ها استفاده می‌شود. روش اول توانایی شناسایی چگونگی توزیع سه‌بعدی تخلخل در سنگ‌ها را ندارد و تنها نشان‌دهنده میزان تخلخل سنگ است، در حالی که نوع تخلخل و نوع ارتباط فضاهای خالی با یکدیگر از شاخص‌های اصلی در تعیین کیفیت مخزنی سازندها است. هرچند مقاطع نازک نشان‌دهنده نوع تخلخل در سنگ‌ها هستند، با توجه به دوبردی بودن، این مقاطع نمی‌توانند نشان‌دهنده توزیع کامل تخلخل در حجم سنگ باشند و در عین حال میزان تخلخل را نیز به‌درستی نشان نمی‌دهند. هم‌چنین این مقاطع تنها نشان‌دهنده بخش بسیار کوچکی از ضخامت سنگ هستند و در بسیاری از موارد تعمیم داده‌های به‌دست آمده از این مقاطع به کل سنگ صحیح نیست. به‌همین منظور از سایر روش‌ها مانند آزمایش‌های تزریق جیوه و یا اسکن مغزه‌ها با استفاده از اشعه ایکس^۱ برای شناخت قطر گلوگاه‌ها و یا بازسازی سه‌بعدی سنگ استفاده

می‌شود. هریک از این روش‌ها محدودیت‌های خاص خود را دارد. آزمایش تزریق جیوه با هزینه زیادی انجام می‌شود و باز هم توزیع تخلخل را به صورت سه‌بعدی نشان نمی‌دهد. اسکن مغزه‌ها با استفاده از اشعه ایکس نیز در بهترین حالت ممکن توانایی تفکیکی در حد چند میلی‌متر را دارد که با توجه به اندازه تخلخل در سنگ‌ها که اغلب کوچک‌تر از این مقدار است، این روش نیز نمی‌تواند به‌درستی نشان‌دهنده میزان تخلخل و توزیع سه‌بعدی آن باشد. هزینه زیاد این روش نیز کاربرد آن را دشوار می‌سازد. هرچند از همه این روش‌ها تا کنون برای بازسازی فضاهای خالی موجود در سنگ‌ها استفاده شده است [۷]-[۱]، به‌همین دلیل روشی که بتواند شبکه فضاهای خالی را در سنگ‌ها را با دقت زیاد بازسازی کند، ابزاری سودمند در بررسی‌های مخزنی خواهد بود. برای ارائه چنین روشی لازم است تا تصویری کامل از متن سنگ و یا فضاهای خالی (به‌طور جداگانه) در اختیار داشت. برای ارائه چنین تصویری، لازم است تا همه نقاط موجود در سنگ بر اساس وجود و یا نبود تخلخل رقومی شوند. به‌عبارت دیگر باید بتوان تمام نقاط یک سنگ را به‌صورت دوگانه^۱ به دو گروه «تخلخل» و «متن سنگ» تقسیم‌بندی کرد. از آن‌جا که هر جسم از بینهایت نقطه در فضا تشکیل یافته است، عملاً رقومی کردن تمام نقاط موجود در یک سنگ غیرممکن است. بدیهی است که هر حجم از تعداد نامحدودی صفحه تشکیل یافته است. چنان‌چه بتوان این صفحات را با حد تفکیک قابل قبولی رقومی و سپس با نرم‌افزارهای موجود مدل‌سازی کرد، تصویری سه‌بعدی از سنگ به‌دست می‌آید. چنان‌چه تفکیک تخلخل‌ها از متن سنگ امکان‌پذیر شود، با استفاده از این روش می‌توان مدل سه‌بعدی و توزیع تخلخل‌های موجود در یک سنگ را بازسازی کرد. با استفاده از پردازش‌های ریاضیاتی روی مدل به‌دست آمده، می‌توان سایر پارامترهای سنگ مانند میزان نفت قابل استحصال، قطر گلوگاه‌ها و اندازه تخلخل‌ها را نیز به‌دست آورد [۸]. این پژوهش روشی بر اساس اسکن تصاویر متوالی از سنگ و سپس رقومی‌سازی تصاویر ارائه می‌دهد. در نهایت با مدل‌سازی فضاهای خالی، شبکه سه‌بعدی فضاهای سنگ بازسازی شده و مقدار تخلخل محاسبه می‌شود. محل بررسی شده سازند کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس است. در میدان بررسی شده، این سازند از توالی کربناته- تبخیری تشکیل شده است. انواع مختلف تخلخل‌ها در سازند بررسی شده مشاهده شده است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش ۳۰ نمونه از یک مخزن کربناته در جنوب ایران استفاده شده است. برای اندازه‌گیری تخلخل، نمونه‌های پلاک از سنگ تهیه شده و پس از شستشو با تولوئن و متانول با استفاده از سامانه شستشوی ساکسلت^۲، تخلخل آنان با استفاده از قانون بویل در دستگاه اندازه‌گیری تخلخل تعیین شد. برای انجام آزمایش‌های تزریق جیوه از تخلخل‌سنج جیوه^۳ مدل وینچی^۴ استفاده شد. نمونه‌ها با ابعاد تقریبی ۰/۲ اینچ مربع داخل محفظه قرار گرفته و فشار تا ۶۰۰۰۰ PSI افزایش یافت. در هر مرحله درصد اشباع ثبت شده و به قطر گلوگاه حفرات تبدیل شد. برای تهیه تصاویر، در ابتدا سطح هر نمونه کاملاً صاف شده و سپس تصویر رقومی^۵ از آن تهیه شد. همه تصاویر باید کاملاً یک‌سان باشند تا در زمان تطابق داده‌ها با نرم‌افزار مدل صحیحی از سنگ تهیه شود.

1. Boolean
2. Soxhlet cleaning
3. Mercury pposimeter
4. Vinci
5. Digital

به‌همین دلیل فاصله کانونی، گستره رنگ، حد تفکیک و سایر اختصاصات همه عکس‌ها باید برابر باشد. بدین‌منظور از اسکنر مدل جنیوس^۱ برای اسکن سطح مورد نظر استفاده شد. همه شاخص‌های ذکر شده در این اسکنرها برای سطوح اسکن شده یک‌سان است. از آن‌جا که در این پژوهش تفکیک تخلخل از متن سنگ در تصاویر به‌دست آمده بسیار اهمیت دارد، پیش از تهیه تصویر رقومی، سطح سنگ با خمیر سبزرنگ به‌طور کامل پوشانده شده و سپس خمیر اضافی از سطح سنگ برداشته شد. با این کار تنها فضاهای خالی موجود در سنگ از خمیر رنگی اشباع شد. پس از تهیه تصویر مورد نظر از سطح سنگ، لایه نازک ۲۰۰ میکرونی با دستگاه سایش سنگ صفحه‌هایی از سطح سنگ برداشت شده و فرایند ذکر شده مجدداً بر سطح تازه انجام گرفت. این کار برای هر نمونه حدود ۲۵ بار با توجه به اندازه تخلخل‌ها (تعداد بیش‌تر برای تخلخل‌های بزرگ‌تر) انجام گرفت. با این روش در مجموع حدود ۰/۵ سانتی‌متر (۵۰۰۰ میکرون) از حجم سنگ بررسی می‌شود. تصاویر تهیه شده با استفاده از نرم‌افزارهای معمول پردازش عکس در اندازه‌های یک‌سان برش داده شد (شکل ۱). برای تجزیه‌های داده‌ها و رقومی کردن تصاویر، از نرم‌افزار متلب^۲ استفاده شد. هر عکس رنگی، از باندهای R,G,B ساخته شده که باندها به‌ترتیب نشان‌دهنده رنگ‌های قرمز، سبز و آبی هستند. از آن‌جا که نرم‌افزار متلب بر پایه ماتریس‌ها عمل می‌کند، هر عکس رنگی در این نرم‌افزار به‌صورت ماتریس سه‌بعدی $m \times n \times 3$ تعریف می‌شود که در آن m و n تعداد جزء تصویری^۳ در راستای x, y عکس است و عدد ۳ نشان‌دهنده باندهای قرمز، سبز و آبی هستند (شکل ۲).

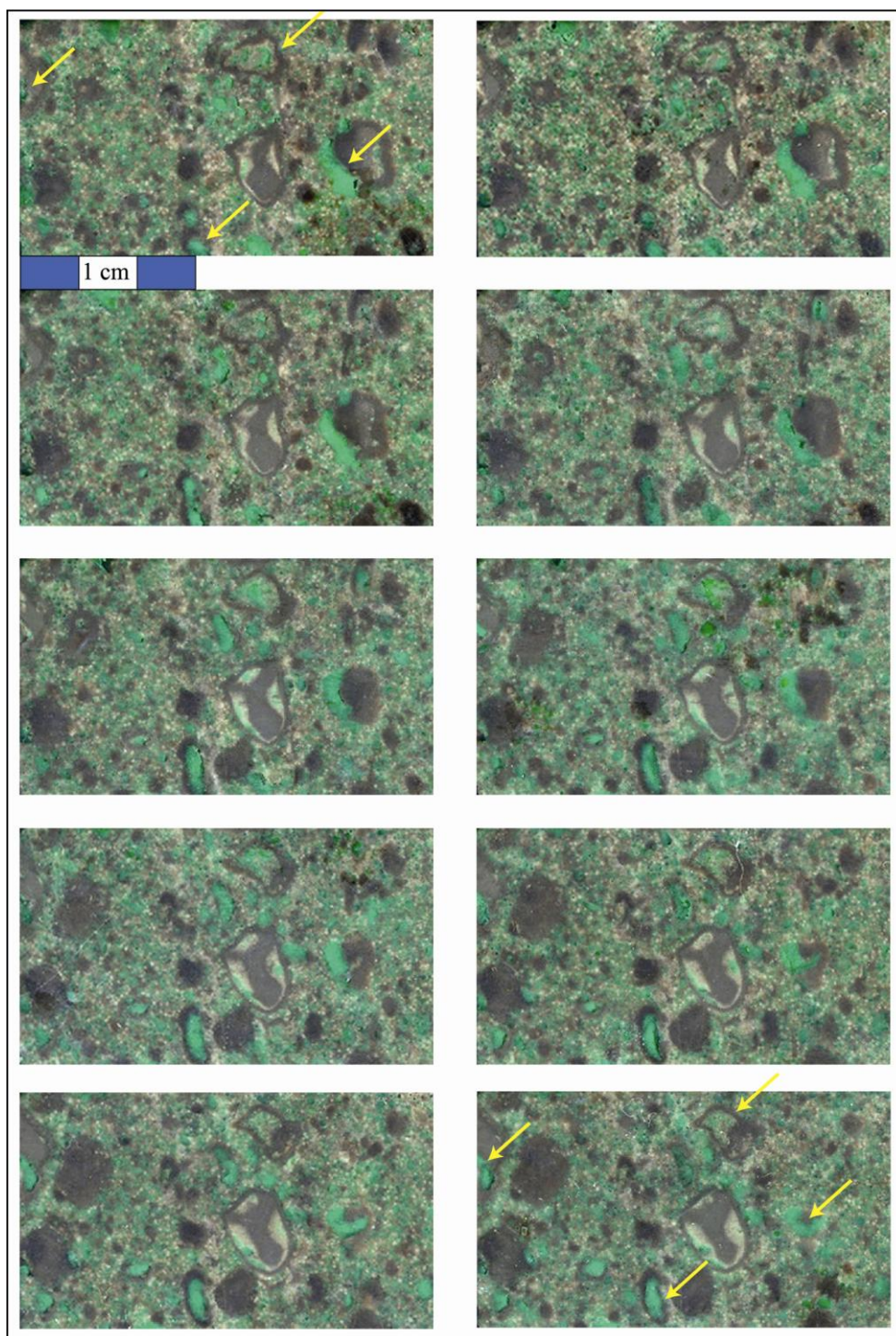
با توجه به رنگ به‌کار رفته برای پرکردن تخلخل‌ها، باند سبز نشان‌دهنده توزیع تخلخل خواهد بود از این رو، دوباند دیگر از ماتریس تصاویر حذف شدند. در ادامه ماتریس مختصات اجزای تصویری عکس برای استفاده در نرم‌افزار راکورکس^۴ به‌صورت ستونی مرتب شد. ارزش‌های متناظر مربوط به باند رنگ سبز عکس نیز در کنار هر مختصات قرار گرفت. فایل نهایی با فرمت اسکی^۵ از نرم‌افزار استخراج شد تا برای مدل‌سازی در نرم‌افزار راکورکس استفاده شود.

نتایج

شکل ۳ کدهای شبیه‌سازی شده^۶ برنامه نوشته شده را در نرم‌افزار متلب نشان می‌دهد. در این برنامه در ابتدا عکس‌ها به‌صورت ماتریس به نرم‌افزار وارد می‌شود. سه صفحه موجود در این ماتریس به‌ترتیب توزیع مقادیر رنگ قرمز، سبز و آبی را نشان می‌دهد. سپس توزیع رنگ‌های قرمز و آبی از سنگ حذف می‌شود. با استفاده از ابعاد ماتریس، مختصات همه نقاط موجود در صفحه مقادیر رنگ سبز ساخته شده و سپس داده‌های همه عکس‌ها به یک ماتریس تبدیل می‌شود.

مقادیر میانگین به‌اضافه و منهای انحراف از معیار از ماتریس استخراج شده و ماتریس نهایی از جمع سه ماتریس تولید شده در سه بعد تولید می‌شود. فایل خروجی این برنامه به نرم‌افزار راکورکس (نسخه ۱۵) وارد شده و مدل‌سازی نمونه‌های بررسی شده در این نرم‌افزار انجام شد. این نرم‌افزار در موارد مشابه و مقیاس‌های گوناگون به‌کار رفته و نتایج

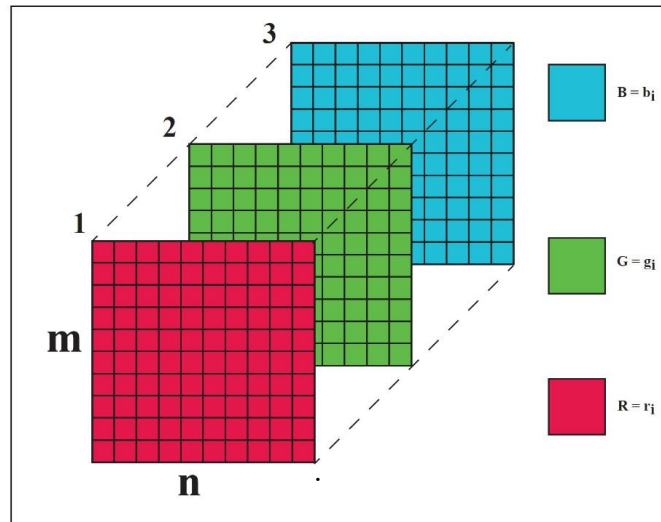
1. Genius ColorPage HR6X Slim Scanner
2. MATLAB
3. Pixel
4. RockWorks
5. ASCII
6. pseudocode



شکل ۱. چند تصویر از مجموعه تصاویر رقومی برداشت شده از یکی از نمونه‌ها. تغییرات در عکس‌های اول و آخر با علامت پیکان نشان داده شده است

قابل قبولی از آن به دست آمده است [۹]. فایل‌های به دست آمده ۴ ستون داده دارد که به ترتیب نشان‌دهنده مختصات طول، عرض، عمق مدل و مقدار ارزش رنگ سبز در آن نقطه است $[X, Y, Z, g]$. اجزای تصویری موجود در هر تصویر از گوشه بالای سمت چپ عکس به ترتیب شماره مرتب می‌شوند. بدین صورت که اولین جزء تصویری در بالا و

سمت چپ دارای مختصات $[1,1,1]$ است. به سمت راست به مقادیر x ، به سمت پایین به مقادیر y و به سمت داخل سنگ به مقادیر z افزوده می‌شود. برای مثال جزء تصویری دهم از سمت راست و پانزدهم از بالا در عکس پنجم دارای مختصات $[5, 15, 10]$ است. با توجه به موارد گفته شده این نقطه دارای مقدار مشخصی از رنگ سبز است که مختصات چهارم آن را تشکیل می‌دهد و در نتیجه با داشتن مختصات سه‌بعدی $[x,y,z]$ و مقدار شاخص موردنظر در نقطه بررسی شده (g) می‌توان توزیع سه‌بعدی این مقدار را مدل‌سازی کرد.



شکل ۲. نمایش یک تصویر در نرم‌افزار متلب به صورت ماتریس $m \times n \times 3$ است که m و n نشان‌دهنده ابعاد عکس بر حسب پیکسل و ۳ نشان‌دهنده باندهای رنگی عکس (قرمز، سبز، آبی) است. هر نقطه در هر باند دارای عدد میزان آن رنگ در آن نقطه است

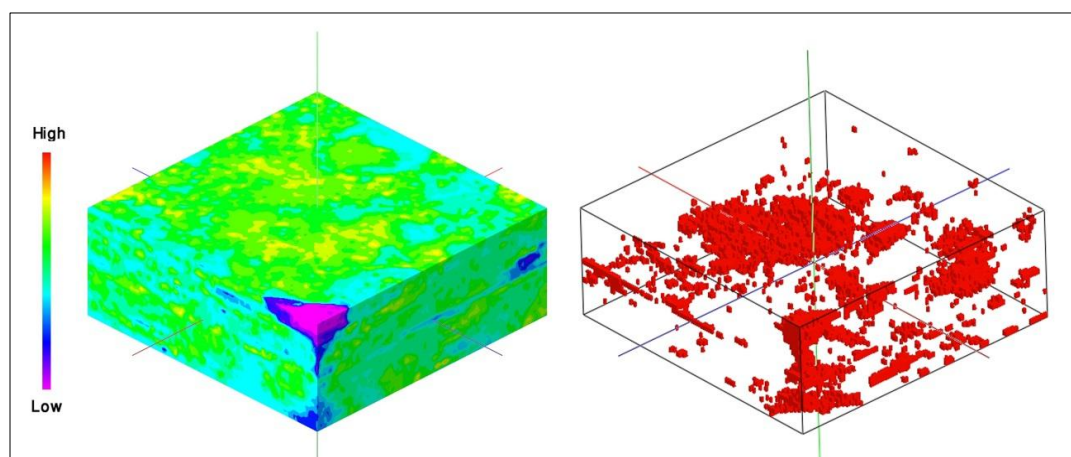
```

ImageNum=i;
% Reading images
For A=1:ImageNum;
  A=imread('A.jpg');
% Extracting green channel
  AP = A (:,2);
% Size determination
  [SXAP, SYAP] = size (AP);
% Coordination matrix
  [X Y Z] = meshgrid (1: SXAP, 1: SYAP, 1: ImageNum);
  XR=X (:,1);
  YR=Y (:,1);
  ZR=Z (:,1);
% Converting all vector parts to one vector
  All= all (1, AP);
% Calculating mean + 1Standard deviation and mean - 1Standard deviation
  m= mean (All);
  s= std (All);
  SDH= m+s;
  SDL= m-s;
% Deleting out of range data
  Inrange = SDL<All>SDH;
% Building final matrix
  XRF=cat (1,XR);
  YRF=cat (1,YR);
  ZRF=cat (1,ZR);
  Final=cat (2,XRF,YRF,ZRF,All);

```

شکل ۳. کدهای شبیه‌سازی شده برنامه در نرم‌افزار متلب (برای توضیح به متن مراجعه شود)

مقدار ارزش هر رنگ در این سامانه رنگی قرمز، سبز و آبی بین صفر تا ۲۵۵ در تغییر است که صفر نشان‌دهنده وجود نداشتن آن رنگ و ۲۵۵ نشان‌دهنده حداکثر مقدار رنگ موردنظر است. پس از ورود نقاط به نرم‌افزار برای ساخت یک مدل پیوسته، نرم‌افزار فاصله بین نقاط را با استفاده از داده‌های معلوم بازسازی می‌کند. فاصله بین نقاط شبکه مدل^۱، مدل ۲/۵ برابر داده‌های موجود در نظر گرفته شد که در محاسبات زمین‌آماری توصیه می‌شود. برای مدل‌سازی در این پژوهش با توجه به این نکته که تغییرات متغیر مورد نظر در بسیاری از موارد ناگهانی است، برای بازسازی فضای بین نقاط از روش «نزدیکترین نقطه»^۲ برای مدل‌سازی استفاده شد. در این روش هر نقطه از مدل که فاقد داده است معادل نزدیک‌ترین نقطه دارای داده مقداردهی می‌شود. با توجه به این نکته که تخلخل سنگ می‌تواند در نقاطی به‌طور ناگهانی تغییر یابد (حالت منطقی یا صفر و یک دارد) این روش بهترین روش در این نوع از مدل‌سازی است. با توجه به این که این مدل از تمام داده‌های اجزای تصویری سنگ تهیه می‌شود، در ابتدا مدلی کامل از تمام حجم سنگ بر اساس توزیع باند سبز به دست می‌آید (شکل ۴). با استفاده از مدل به دست آمده می‌توان در هر جهت دل‌خواه تغییرات تخلخل را بررسی کرد. برای بررسی صحت مدل به دست آمده، مقاطع افقی از چند بخش از مدل تهیه شده و با تصاویر اولیه مقایسه گردید (شکل ۵).



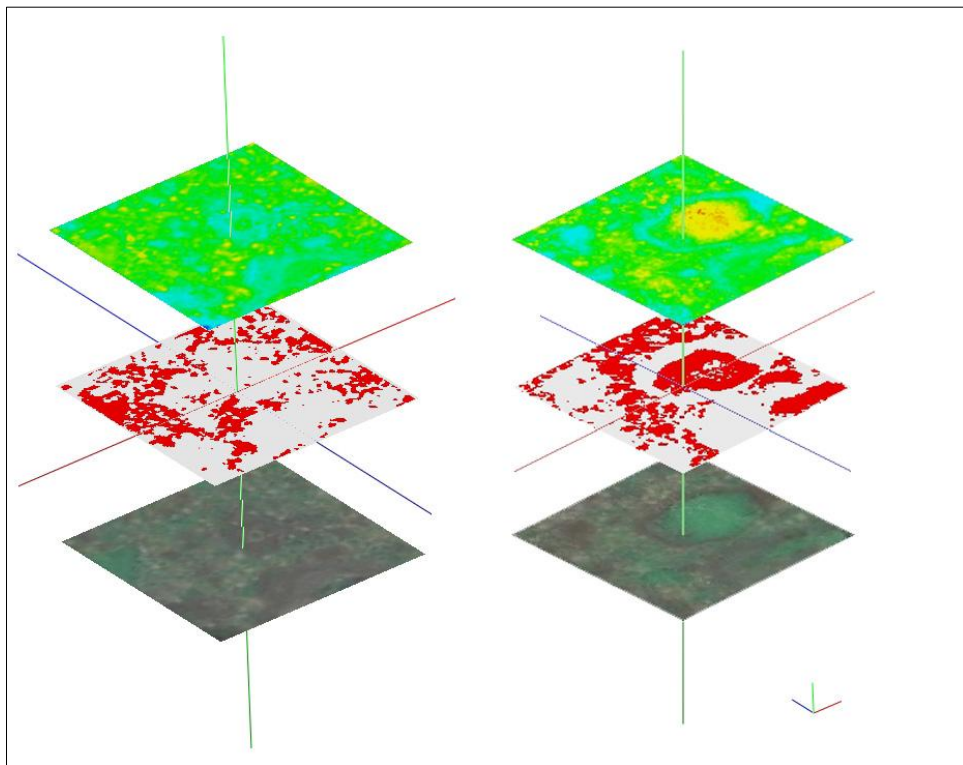
شکل ۴. سمت چپ: توزیع ارزش باند رنگ سبز در یکی از نمونه‌های بررسی شده. رنگ‌های به کار رفته در این مدل با رنگ سبز نمونه اصلی هم‌خوانی نداشته و تنها توزیع ارزش رنگ سبز را از رنگ‌های سرد به گرم نشان می‌دهد. سمت راست: توزیع تخلخل نمونه به صورت دوگانه^۳. ابعاد نمونه ۱ سانتی‌متر است.

بحث

تعیین دقیق توزیع شبکه سه‌بعدی تخلخل در سنگ‌ها از مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده کیفیت مخزنی در سنگ‌ها است زیرا منجر به شناخت دقیق رفتار سنگ در زمان تولید می‌شود. تعیین شبکه سه‌بعدی تخلخل، مدلی واقعی از تخلخل‌های مرتبط و غیرمرتبط (تخلخل‌های مفید و غیرمفید) را در اختیار قرار می‌دهد. برای تعیین شبکه سه‌بعدی تخلخل در سنگ‌ها روش‌های گوناگونی ارائه شده است [۱۰]، [۱۱]، اما روشی سریع، دقیق و کم‌هزینه که منجر به تعیین دقیق مقدار و شبکه سه‌بعدی تخلخل‌ها شود در دسترس نیست. این پژوهش با استفاده از ریزمدل‌سازی تخلخل

1. Node spacing
2. Closest point

3. Boolean

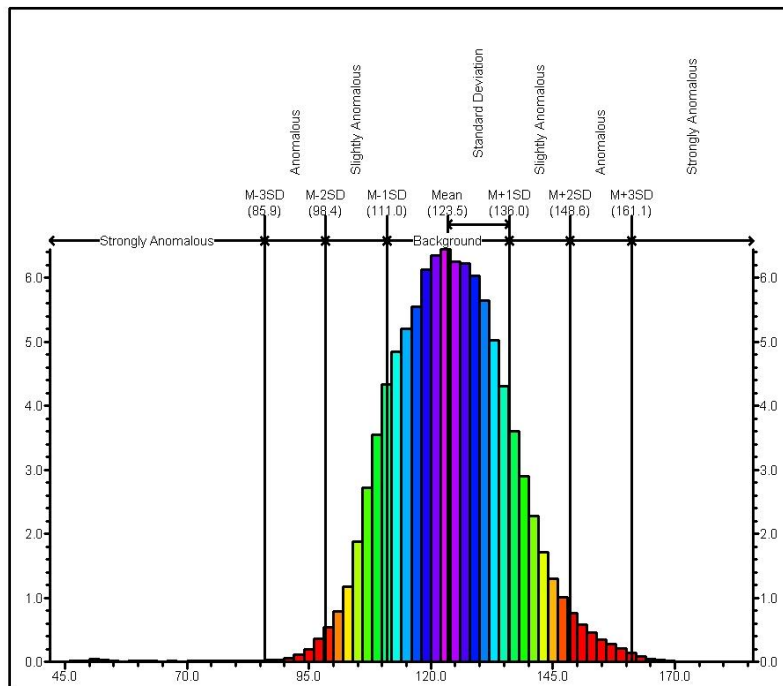


شکل ۵. مقایسه دو مقطع از مدل به‌دست آمده با تصاویر اصلی. مرز دانه‌ها، رنگ‌های تدریجی متن سنگ و تخلخل‌های رنگ‌شده در مدل به خوبی مشخص هستند. تصویر میانی داده‌های دوگانه مقاطع را نشان می‌دهد.

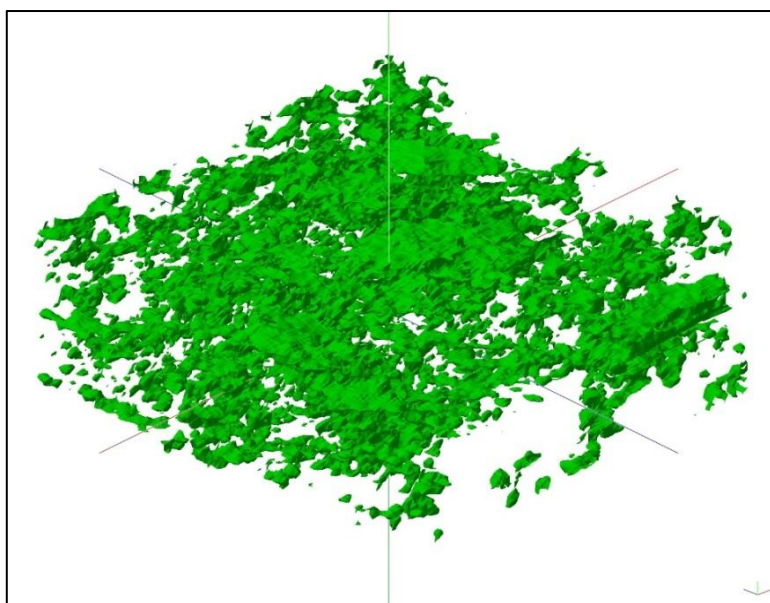
سنگ به تعیین این موارد می‌پردازد. با توجه به این‌که مدل نهایی به‌دست آمده طیف گسترده‌ای از ارزش‌های رنگ سبز دارد، نیاز است تا حد تخلخل در این مدل مشخص شود. به‌عبارت دیگر باید مشخص شود که تخلخل‌ها دارای چه گستره‌ای از ارزش رنگ سبز در مدل ساخته شده هستند. بدیهی است با توجه به این‌که رنگ سبز برای پرکردن فضاهای خالی استفاده شده است، توزیع نرمالی از ارزش رنگ سبز در مدل‌ها وجود خواهد داشت. بدین ترتیب که حداکثر فراوانی رنگ سبز در مرکز توزیع نرمال و با بیش‌ترین فراوانی مشخص می‌شود. شکل ۶ توزیع رنگ سبز را در یکی از مدل‌های ساخته شده نشان می‌دهد. با توجه به این‌که به غیر از تخلخل‌ها رنگ سبز دیگری در نمونه وجود ندارد، در این نمودار مقادیر رنگ سبز در توزیع فراوانی به‌سرعت افت خواهد کرد. با توجه به توزیع نرمال داده‌ها، میانگین در وسط نمودار و منطبق با بیش‌ترین فراوانی است. انحراف از این مقدار میانگین نشان‌دهنده دور شدن از تخلخل‌ها است و در نتیجه گستره مقادیر میانگین \pm انحراف معیار نشان‌دهنده تخلخل سنگ است. این مقادیر هم در محاسبه مقدار تخلخل و هم در فیلتر کردن مدل تخلخل‌ها استفاده می‌شود.

برای به‌دست آوردن شبکه تخلخل سنگ، مدل کلی باید بر اساس آستانه تغییر رنگ سبز فیلتر شود. به‌عبارت دیگر تنها داده‌های مربوط به تخلخل داخل مدل باقی‌مانده و سایر داده‌ها حذف شود. بر این اساس در هر مدل، داده‌های مابین میانگین و انحراف از معیار از مدل حذف شد. نتیجه باقی‌مانده توزیع تخلخل در سنگ را نشان می‌دهد (شکل ۷). با توجه به مدل به‌دست آمده، بررسی توزیع تخلخل در همه جهت‌های دل‌خواه امکان‌پذیر است. تهیه مدل‌هایی با مقادیر بالاتر فیلترشدگی نیز امکان‌پذیر است. این مدل‌ها امکان بررسی‌های جنبی مانند بررسی شبکه تخلخل نمونه

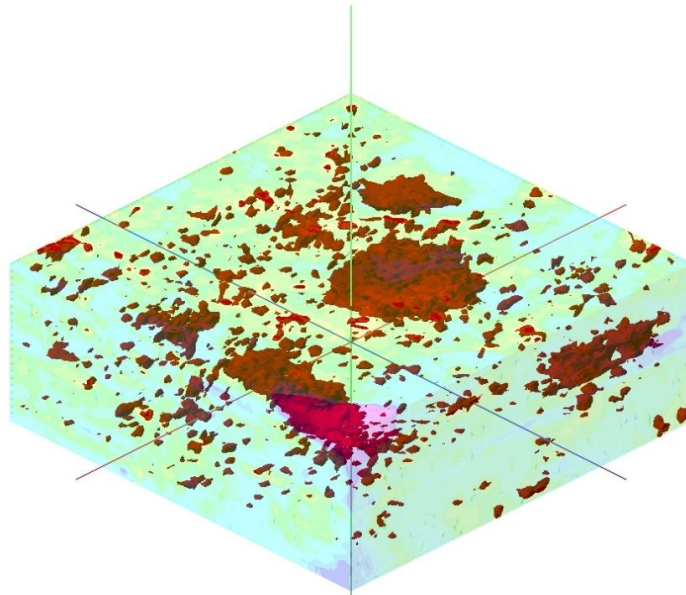
بدون ریزتخلخل‌ها^۱، مشاهده رفتار سیال در جهت‌های مختلف سنگ و شکل تخلخل‌های غالب را امکان‌پذیر می‌سازد. شکل ۸ فیلترینگ مدل با استفاده از «میانگین + دو برابر انحراف معیار» را نشان می‌دهد. چنان‌که مشخص است، در این شکل تنها تخلخل‌های اصلی در متن سنگ قابل مشاهده هستند و ریزتخلخل‌ها از مدل حذف شده‌اند.



شکل ۶. توزیع داده‌ها در یکی از مدل‌های ساخته شده به همراه پارامترهای آماری. با توجه به این که بیشترین فراوانی در باند سبز مربوط به تخلخل‌ها است، عبارت «Background» در شکل به معنی بیشترین حضور تخلخل‌ها است



شکل ۷. توزیع شبکه تخلخل در یکی از نمونه‌های بررسی شده



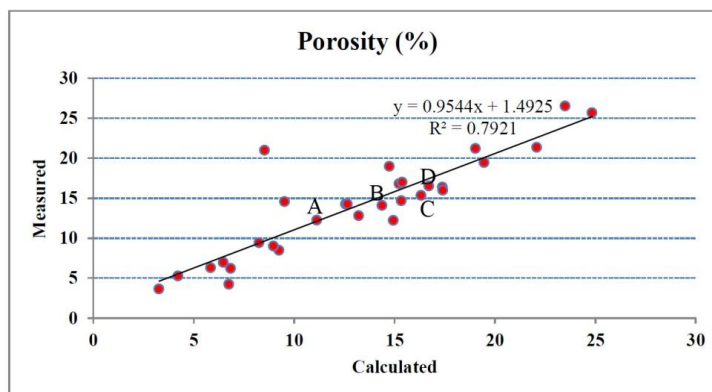
شکل ۸. فیلتر کردن مدل اصلی با استفاده از عدد مربوط به «میانگین + دو برابر انحراف معیار». تنها تخلخل‌های اصلی سنگ حضور دارند و ریز تخلخل‌ها از مدل حذف شده‌اند.

هر مدل از مجموعه عناصر کوچک‌تری ساخته شده است که یک سلول^۱ و یا یک «جزء مدلی»^۲ نامیده می‌شود. حجم هر مدل نیز بر اساس تعداد این اجزا در مدل محاسبه می‌شود. بنابراین چنانچه حجم مدل تخلخل از حجم مدل کلی سنگ کسر شود، مقدار تخلخل سنگ به دست می‌آید و در نتیجه میزان تخلخل سنگ از این رابطه قابل محاسبه است:

$$\phi = (Rv * 100) / Av$$

ϕ : مقدار تخلخل Rv : اجزا مدلی باقی‌مانده Av : اجزا مدلی کل

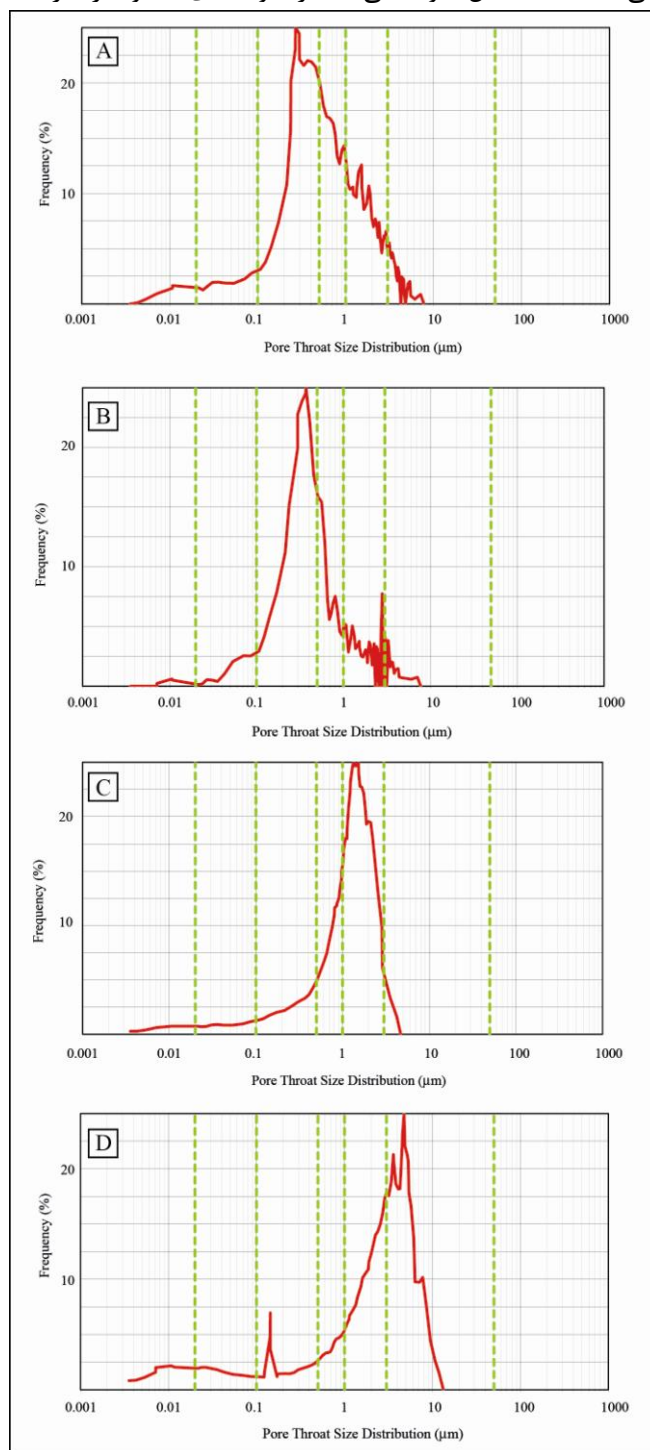
مقایسه مقادیر تخلخل به دست آمده با تخلخل‌های حاصل از آزمایش‌های معمول مغزه^۳ نشان می‌دهد که اعداد به دست آمده می‌تواند با انحراف قابل قبول از مقادیر آزمایشگاهی به‌عنوان تخلخل سنگ استفاده شود. نمودار تطابق داده‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹. مقایسه داده‌های به دست آمده در این روش با داده‌های حاصل از بررسی‌های معمول مغزه تطابق قابل قبولی را بین داده‌ها نشان می‌دهد. محل نمونه‌های شکل ۱۰ به صورت A, B, C, D مشخص شده است

1. Cell
2. Voxel
3. RCAL

آزمایش‌های تزریق جیوه از رابطه بین فشار تزریق یک سیال و درصد اشباع آن، توزیع اندازه گلوگاه حفره‌ها را بازسازی می‌کند. در این پژوهش برای اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده، نمودارهای مربوط به تزریق جیوه چهار نمونه آورده شده است (شکل ۱۰). شکل ۹ محل داده‌ها را بر نمودار تخلخل-تراوایی نشان می‌دهد. چنان‌که در شکل دیده می‌شود، تخلخل و تراوایی نمونه‌ها هم‌زمان با افزایش قطر گلوگاه تخلخل‌ها افزایش می‌یابد. این داده‌ها نشان می‌دهد که روش به‌کار رفته توانایی محاسبه تخلخل نمونه‌هایی با قطر گلوگاه‌های متفاوت را دارد.



شکل ۱۰. چهار نمونه از داده‌های تزریق جیوه. محل نمونه‌ها روی شکل ۹ مشخص است

نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی روشی برای برآورد مقدار، نوع و چگونگی توزیع تخلخل بر اساس تحلیل ریاضیاتی و مدل‌سازی سه‌بعدی تصاویر پیوسته از سنگ می‌پردازد. مقایسه مدل به‌دست آمده با تصاویر اولیه توانایی روش را در تعیین مقدار و گسترش شبکه سه‌بعدی تخلخل نشان می‌دهد. فیلتر کردن مدل بر اساس شاخص‌های آماری استاندارد، مواردی مانند شکل و گسترش تخلخل‌های اصلی را نیز آشکار می‌سازد. با استفاده از مدل فیلتر شده و محاسبه درصد حجم اجزای مدلی باقی‌مانده نسبت به کل مدل می‌توان مقادیر تخلخل در سنگ‌ها را نیز به‌دست آورد. مقایسه نتایج حاصل از این روش با داده‌های به‌دست آمده از آنالیز معمول مغزه نشان داد که این روش می‌تواند مقادیر تخلخل موجود در سنگ‌ها را با دقت قابل قبولی محاسبه کند. برتری این روش به سایر روش‌های موجود، دقت زیاد آن به سبب فاصله کم بین صفحات رقومی‌شده، هزینه بسیار کم، سادگی و سرعت روش و عدم نیاز آن به دستگاه‌هایی با فناوری خاص و پیچیده است.

با توجه به این که مدل به‌دست آمده بیان عددی توزیع شکل و مقدار تخلخل در سنگ است، از این روش می‌توان علاوه بر تعیین مقدار و توزیع شبکه سه‌بعدی تخلخل در موارد دیگری مانند محاسبه میزان آب‌اشباع‌شدگی، آب قابل استحصال و غیرقابل استحصال، تعیین شکل تخلخل‌های اصلی سنگ، جدایش ریز تخلخل‌ها و تعیین مقدار آن‌ها، پیوستگی و یا عدم پیوستگی تخلخل‌های موجود در سنگ، محاسبه مقدار تراوایی و قطر گلوگاه‌ها نیز استفاده کرد.

منابع

1. Akin S., Kovscek A.R., "Computed tomography in petroleum engineering research", In: F. Mees, R. Swennen, M. Van Geet, P. Jacobs (Eds.), Application of X-ray Computed Tomography in the Geosciences, Special Publication-Geological Society of London, 215 (2003) 23-38.
2. Johns R.A., Steude J.D., Castanier L.M., Roberts P.V., "Non destructive measurements of fracture aperture in crystalline rock cores using X-ray computed tomography", Journal of Geophysical Research, 98 (1993) 1889-1900.
3. Kamath J., Xu B., Lee S.H., Yortsos Y.C., "Use of pore network models to interpret laboratory experiments on vugular rocks", Journal of Petroleum Science and Engineering, 20 (1998) 109-115.
4. Ketcham R.A., Carlson W.D., "Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to geosciences", Computer and Geoscience, 27 (2001) 381-400.
5. Peters E.J., Afzal N., "Characterization of heterogeneities in permeable media with computed tomography imaging", Journal of Petroleum Science and Engineering, 7 (1992) 283-296.

6. Van Geet M., Swennen R., Wevers M., "Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerized tomography", *Sedimentary Geology*, 132 (2000) 25-36.
7. Beckers E., Plougonven E., Roisin C., Hapca S., Léonard A., Degré A., "X-ray microtomography: A porosity-based thresholding method to improve soil pore network characterization?", *Geoderma*, 219 (2014) 145-154.
8. Lopez O., Mock A., Oren P.E., Long H., "Validation of fundamental carbonate reservoir core properties using digital rock physics", *International Symposium of the Society of Core Analysts*, UK (2012) 1-12.
9. 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 (2005) 409-433.
10. 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.
11. Gryze S.D., Jassogne L., Six J., Bossuyt H., Wevers M., Mercks R., "Pore structure changes during deposition of fresh residue: X-ray tomography analysis", *Geoderma*, 134 (2006) 82-96.