



روش نوین استخراج مدل شبکه حفرات از تصاویر سی تی اسکن سه بعدی

فرزاد برزگر؛ محسن مسیحی^{۱*}؛ محمد آزادی تبار^۲

۱. دانشجو؛ دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

۲. استاد؛ دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

۳. دانشجو؛ دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۳ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۲۴

(DOI): 10.22107/jpg.2019.114613.1054

چکیده

هندسه سنگ مخزن یکی از مهم ترین عوامل تأثیرگذار در آنالیز خواص ایستا و پویا در سنگ مخزن است. از تصاویر سی تی اسکن برای به بصری سازی هندسه داخلی سنگ مخزن استفاده می شود. این تصاویر به صورت مستقیم برای انجام محاسبات مناسب نیستند. مدل های شبکه حفرات برای تبدیل این هندسه به مختصات ریاضی استفاده می شود. استخراج این مدل ها از تصاویر سی تی اسکن با استفاده از روش های آماری - احتمالی مبتنی بر پردازش تصویر مانند روش کره بیشینه محاطی انجام می شود. در این مطالعه روش های جدید برای استخراج مدل شبکه حفرات و نحوه اتصال حفرات ارائه شده است. نحوه اتصالات مبتنی بر آستانه احتمال احاطه گلوگاه مشخص می شود. در این روش پارامترهای استاتیک هندسه سنگ از جمله تخلخل ناحیه ای، شاخص همگنی سنگ از جهت ساختاری، توزیع و میانگین اندازه حفرات و عدد هم آرای می شود. در پایان با استفاده از تصویر مربوط به نمونه مصنوعی سیلیکا، نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج روش کره بیشینه محاطی اصلاح شده، مقایسه شده است. انطباق خوبی میان نتایج مدل حاصل از روش توسعه داده شده با مدل مذکور مشاهده شده است. همچنین مدل شبکه حفرات استخراج شده از نمونه های ماسه سنگی، کربنات و سنگ های مصنوعی به همراه نمودار شاخص همگنی آن ها ارائه شده است.

واژگان کلیدی

تصاویر سی تی اسکن
پردازش تصویر
شبکه حفرات
احاطه گلوگاه
شاخص همگنی

۱. پیش گفتار

برای بازآرایی ساختار سه بعدی سنگ مخزن که ابتدا توسط برایانت و همکاران (S. L. Bryant, Mellor, & Cade, 1993) توسعه داده شد، روش های فرایند محور مبتنی بر شبیه سازی آزمایشگاهی فرآیندهای زمین شناسی بر روی مجموعه از دانه های سنگ بود. ضعف این روش ها عدم امکان شبیه سازی فرآیندهای زمین شناسی پیچیده است (Xiong et al., 2016). به دلیل این که تصاویر سی تی اسکن برای انجام محاسبات بعدی مانند محاسبات خواص جریانی سنگ مناسب نیستند؛ استخراج مدل شبکه حفرات از این تصاویر یک بخش ضروری برای به دست آوردن خواص ایستا و پویای سنگ مخزن است (Al-Kharusi & Blunt, 2007). استخراج این مدل ها از تصاویر سی تی اسکن و یا تصاویر حاصل از بازآرایی

مدل های شبکه حفرات بیان گر هندسه حاکم بر محیط متخلخل در مختصات ساده شده هستند. در یک دهه اخیر استفاده از این مدل ها به منظور محاسبه پارامترهای ایستا و پویای سنگ مخزن کاربرد وسیعی یافته است (Xiong, Baychev, & Jivkov, 2016). این مدل ها امکان آنالیز رفتار سنگ مخزن در مقیاس مغزه را فراهم می کنند (Dong & Blunt, 2009). امروزه استفاده از تصاویر سی تی اسکن سه بعدی امکان تصویربرداری واقعی از ساختار داخلی سنگ با دقت میکرون را فراهم می کند. از آنجایی که تصویربرداری سه بعدی از سنگ پرهزینه است (Dong & Blunt, 2009)، بنابراین بازآرایی ساختار هندسه سه بعدی سنگ با استفاده از تصاویر سی تی اسکن دوبعدی و روش های آماری مورد توجه قرار گرفته است (Al-Kharusi & Blunt, 2007). روش دیگر

سه‌بعدی با استفاده از روش‌های آماری-احتمالی مبتنی بر پردازش تصویر انجام می‌شود.

۱.۱ استخراج مدل شبکه حفرات

تصاویر سی‌تی‌اسکن دودویی^۱ ثبت شده از فضای متخلخل به‌خوبی ساختار داخلی آن را نمایش می‌دهند. این تصاویر نمی‌توانند به‌راحتی برای شبیه‌سازی در مقیاس حفره‌ای مورد استفاده قرار گیرند و مدل حفرات معادل با تصویر واقعی باید استخراج شود (Dong & Blunt, 2009). در ابتدا روش‌های مختلفی از جمله روش آنالیز محورهای میانی^۲، دیاگرام ورونی و الگوریتم کره بیشینه محاطی برای استخراج مدل شبکه حفرات از تصاویر سی‌تی‌اسکن ارائه شده است (Dong & Blunt, 2009; Xiong et al., 2016). این روش‌ها در ادامه توضیح داده شده است:

- الگوریتم محورهای میانی: این روش تصاویر فضایی از حفرات سنگ را به محورهای میانی منتقل می‌کند که منجر به کاهش تصویر به یک اسکلت توپولوژیک می‌شود. اسکلت توپولوژیک با استفاده از الگوریتم نازک‌سازی (Baldwin, Sederman, Mantle, Alexander, & Gladden, 1996) و یا الگوریتم کوچک کردن فضای حفره‌ای^۳ (Lindquist, Lee, Coker, Jones, & Spanne, 1996) در جهت مرکز کانال حفرات ساخته می‌شود. در روش نازک‌سازی برای جداسازی فضای حفره‌ای از سطوح دانه‌ای، تازمانی که خطوط محوری میانی مشخص شوند از نازک‌سازی استفاده می‌شود. در الگوریتم محورهای میانی حفرات بر روی شاخه‌های محورهای میانی قرار گرفته و با گلوگاه به یکدیگر متصل می‌شوند. اندازه حفره و گلوگاه‌ها از تعداد مراحل فرسایش سطح دانه‌ای به دست می‌آید. به‌طور کلی الگوریتم محورهای میانی در شناسایی اتصالات متقابل در فضای حفره‌ای دقیق عمل می‌کند، اما در شناسایی حفرات دچار مشکل است (Dong & Blunt, 2009; Xiong et al., 2016).

- الگوریتم مبتنی بر دیاگرام ورونی: از آنجایی که در روش‌های بازآرایی که اساس آن‌ها شبیه‌سازی فرآیندهای زمین‌شناسی است، مراکز دانه‌ها مشخص است، استخراج مدل شبکه حفرات از روش دیاگرام ورونی امکان‌پذیر است (Blunt, King, & Scher, 1992; S. Bryant & Blunt, 1992; S. Bryant & Raikes, 1995; S. L. Bryant, King, & Mellor, 1993). در این مدل وکسلهایی که در همسایگی آن‌ها وکسلهایی مربوط به بیش از چهار دانه‌ی مختلف موجود باشد، به عنوان حفره در نظر گرفته می‌شوند و لبه‌های چندضلعی که شامل وکسلهایی است که در همسایگی آن‌ها وکسلهایی مربوط به سه دانه‌ی مختلف وجود دارد، ارتباط بین منافذ را مشخص می‌کنند (Dong & Blunt, 2009).

- الگوریتم کره‌ی بیشینه‌ی محاطی: این روش در ابتدا توسط سیلین و همکاران (Silin & Patzek, 2006) ارائه شد. اساس این روش به این صورت است که در هر ناحیه بزرگ‌ترین کره‌ی محاطی به عنوان حفره پوششی آن ناحیه در نظر گرفته می‌شود. کره‌های بزرگ به عنوان حفره و کره‌های کوچک در همسایگی کره‌ها بزرگ به عنوان گلوگاه در نظر گرفته می‌شوند. الکاروسی^۴ و بلانت^۵ (Al-Kharusi & Blunt, 2007) این مدل را توسعه دادند و علاوه بر تعریف سلین که محدود به ارباب (کره‌های بزرگ) و برده (کره‌های کوچک) بود، از تعریف دیگری به نام خوشه استفاده نمودند که بیانگر مجموعه از کره‌های کوچک واسطه است که کره‌های بزرگ هم‌سایز مجاور را به یکدیگر متصل می‌کند. مدل کره بیشینه محاطی به‌خوبی ساختار حفرات را تشخیص می‌دهد؛ اما به علت هم‌پوشانی حفرات کوچک و وجود راه‌های مختلف برای ایجاد اتصال میان حفرات در تشخیص گلوگاه‌ها دچار مشکل می‌شود (Xiong et al., 2016). دانگ و بلانت (Dong & Blunt, 2009) یک روش اصلاح شده از الگوریتم کره‌ی بیشینه‌ی محاطی مبتنی بر روش الکاروسی و بلانت را توسعه دادند. این روش با ارائه یک الگوریتم جدید خوشه‌بندی، بزرگ‌ترین حفرات را بر اساس رتبه و اندازه خود به یک درخت خانوادگی مرتبط می‌کند. روش آن‌ها در

¹ Binary

² Medial axis analysis

³ Pore space burning algorithm

⁴ Al-kharusi

⁵ Blunt

گلوگاه با تجزیه و تحلیل منحنی محورهای میانی مربوط به صفحه‌های محوری به نقاط گوشه‌ای تقسیم می‌شوند. پارامترهای تقریب‌زننده‌ی زاویه گوشه-گوشه، حجم و هدایت‌پذیری، در سطوح مختلف از گسسته‌سازی استخراج می‌شوند. این سطوح گسسته‌سازی متناظر با ضخامت لایه مرطوب و فشار مویینگی محلی در طول فرآیند شبیه‌سازی جریان چندفازی است. آن‌ها برای اعتبار سنجی مدل خود در ابتدا آن را برای گسسته‌سازی یک ساختار حفره‌ای زاویه‌دار مصنوعی استفاده کردند. مدل آن‌ها زوایای گوشه را به‌درستی بازتولید نمود. در پایان الگوریتم خود را برای یک تصویر سی-تی‌اسکن مربوط به یک سنگ اعمال نمودند و تطابق مناسبی میان خواص ماکروسکوپی، نفوذپذیری و فاکتور سازندگی مشاهده کردند.

در این مطالعه روش جدیدی برای استخراج مدل شبکه حفرات ارائه شده است. در روند استخراج این روش به علت حذف پله‌ای و شکستن ماتریس‌ها، زمان اجرای برنامه نسبت به حالت پیوسته و تک‌ماتریسی کاهش می‌یابد. نحوه‌ی اتصالات مبتنی بر آستانه‌ی احاطه گلوگاه مشخص می‌شود. تعریف آستانه احاطه گلوگاه ارائه شده در این مدل از ایجاد گلوگاه‌های غیرواقعی جلوگیری می‌کند. این قابلیت در مقیاس خیلی کوچک بسیار دارای اهمیت است و از اتصال حفرات غیر متصل و شبه مماس جلوگیری می‌کند. در این روش تعریف جدیدی برای گلوگاه ارائه می‌شود که موجب نزدیک شدن مدل به تصویر واقعی سنگ می‌شود، اگرچه این مفهوم جدید تناقضی با مفاهیم گذشته برای گلوگاه ندارد اما امکان به وجود آوردن گلوگاه‌های چندضلعی (منحنی در مقیاس‌ها بزرگ) را نیز فراهم می‌کند. در این روش پارامترهای استاتیک هندسی سنگ، از جمله تخلخل ناحیه‌ای، شاخص همگنی سنگ از جهت ساختاری، توزیع اندازه حفرات و گلوگاه‌ها، میانگین عدد هم‌آرایی و تابع توزیع اندازه‌ی حفرات محاسبه می‌شود.

تشخیص حفرات بزرگ کارآمد است و برای حفرات با اندازه‌های کم‌تر از رزولوشن تصویر نیز بر اساس روش‌های تصادفی مقادیری گزارش می‌شود. روش آن‌ها تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد. علاوه بر روش‌های ذکر شده اخیراً نیز مطالعات دیگری پیرامون این مبحث صورت گرفته که در ادامه توضیح داده شده‌اند. ربانی و همکاران (Rabbani, Jamshidi, & Salehi, 2014) با استفاده از الگوریتم تقسیم‌بندی مبتنی بر کربندی^۱ و تابع فاصله بلوک شهری روشی ساده برای استخراج و شناسایی حفرات و گلوگاه‌ها در دو و سه بُعد ارائه دادند. آن‌ها توزیع عدد هم‌آرایی^۲ به‌دست‌آمده از روش خود برای نمونه‌های ماسه‌سنگ و کربناته را با نتایج حاصل از مدل کره‌ی بیشینه محاطی مقایسه نمودند و تطابق مناسبی مشاهده نمودند. گوستیک^۳ (Gostick, 2017) یک روش سریع استخراج مدل شبکه حفرات با استفاده از الگوریتم کربندی مبتنی بر نشانگر ارائه نمود. او الگوریتم خود را برای چندین ماده متخلخل استاندارد از جمله ماسه‌سنگ و الیاف فیبری اعمال کرد و در همه موارد به‌خصوص در مورد ماسه‌سنگ‌ها تطابق مناسبی میان پاسخ‌ها و مقادیر معلوم مشاهده نمود.

شبکه‌ی استخراج‌شده از تصویر یک محیط فیبری با استفاده از این الگوریتم به‌درستی تانسور نفوذپذیری غیرایزوتروپیک را پیش‌بینی کرد که این نشان‌دهنده توانایی اساسی الگوریتم برای شناسایی ویژگی‌های کلیدی ساختاری بود. الگوریتم ارائه شده بسیار سریع بوده و دارای زمان پردازش حدود ۲۰۰ ثانیه است. قاسمی‌نژاد و همکاران (Raeini, Bijeljic, & Blunt, 2017) روشی ارائه نمودند که ساده‌سازی‌های هندسی رایج در روش‌های استخراج مدل شبکه حفرات را کاهش می‌دهد. در روش آن‌ها شبکه تولید شده در واقع حاصل از گسسته‌سازی سطوح ایجاد شده از انتقال تصویر سه‌بعدی به محورهای میانی است. در این گسسته‌سازی فضاهای خالی به حفرات مجزا دسته‌بندی می‌شوند و هر حفره به زیرمجموعه‌هایی تقسیم می‌شود که به آن‌ها اتصالات نیمه-گلوگاه^۴ گفته می‌شود. اتصالات نیمه-

¹ watershed segmentation

² Coordination Number

³ Gostick JT¹

⁴ half-throat connections

می‌شود. این روش به نوعی روشی برای بخش‌بندی تصویر بر اساس یافتن آستانه بهینه است. منظور از آستانه بهینه در اینجا، یافتن مقداری است که حداکثر یکنواختی را در تابع شدت، در هر دو کلاس ایجاد کند و واریانس تابع توزیع شدت مابین دو کلاس را کمینه سازد. با اعمال روش آتسو بر تصاویر سی‌تی‌اسکن تابع معرف سطح مطابق معادله (۱) حاصل می‌شود.

$$Z(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in \text{pore} \\ 0 & \text{if } x \in \text{solid} \end{cases} \quad (1)$$

این تابع معرف در واقع مشخصه ریاضی ساده شده برای فضای داخلی سنگ به حساب می‌آید. استفاده از این تابع معرف به عنوان فضای داخلی سنگ امکان انجام پردازش در فضای ماتریسی را فراهم می‌نماید.

۲.۱ استخراج حفره‌ها

الگوریتم شناسایی حفرات یکی از مهم‌ترین بخش‌های استخراج مدل شبکه حفرات است. حفرات می‌بایست به گونه‌ای شناسایی شوند که اولویت با حفرات بزرگ‌تر باشد و از طرفی حفرات استخراج شده کم‌ترین هم‌پوشانی مختصاتی را داشته باشند. در این مطالعه شناسایی حفرات با استفاده از یک تابع احتمال، معادله (۲)، و بر حسب تخلخل ناحیه‌ای مورد آنالیز انجام می‌شود. مطابق شکل ۱ قالب بررسی‌کننده یک کره با مختصات مرکز متغیر و شعاع ثابت است. معادله‌ی (۲) بیانگر نسبت و کسل‌های مربوط حفرات، $Z(i, j, k)$ به کل پیکسل‌های قالب بررسی‌کننده است. زمانی که این کسر از آستانه در نظر گرفته شده بیشتر باشد؛ تابع شمارشگر حفره‌ها، مختصات کره موردنظر را ذخیره می‌کند. $\Lambda(x_c, y_c, z_c, R) = 1$ ، و این ناحیه از مراحل بعدی آنالیز حذف می‌شود.

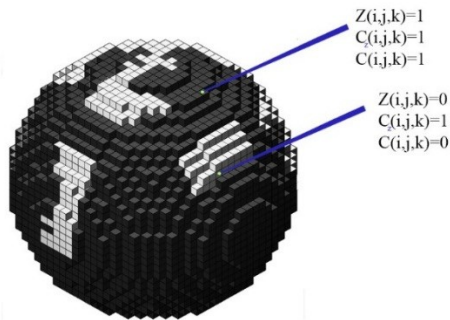
شاخص همگنی ارائه شده در این مطالعه امکان آنالیز و مقایسه‌ی شماتیک مدل شبکه حفرات استخراج شده، با ساختار واقعی سنگ را فراهم می‌نماید. در پایان با استفاده از تصویر مربوط به نمونه‌ی مصنوعی سیلیکا، نتایج حاصل از مدل با نتایج حاصل از روش اصلاح شده‌ی کره‌ی بیشینه محاطی^۱ که توسط دانگ و بلانت ارائه شده، مقایسه شده است. است. انطباق خوبی میان نتایج روش توسعه داده شده با مدل مذکور مشاهده شد. همچنین مدل شبکه حفرات استخراج شده از نمونه‌های ماسه‌سنگی، کربناته و سنگ‌های مصنوعی به همراه نمودار شاخص همگنی آن‌ها ارائه شده است.

۲. روش و الگوریتم‌ها

۲.۱ پیش‌پردازش تصاویر

از آنجا که فضای سنگ متشکل از دو بخش متفاوت (حفره و دانه) است، بنابراین می‌توان تصاویر حاصل از سنگ را به صورت دودویی شده تبدیل نمود. معمولاً پیکسل‌های سطوح متعلق به حفرات با پیکسل‌های سطوح متعلق به دانه‌ها از لحاظ رنگ، متفاوت هستند. آستانه‌گیری ابزار مناسبی جهت جداسازی حفرات از دانه‌ها است. روش‌های مختلفی برای بخش‌بندی تصاویر با استفاده از دودویی کردن ارائه شده است. روش مبتنی بر آنالیز خوشه‌بندی بر مبنای واریانس آتسو (Otsu, 1979)، روش مبتنی بر آنترپی جانسن و همکاران (Johannsen & Bille, 1982) و کاپر و همکاران (Kapur, Sahoo, & Wong, 1985)، روش مبتنی واریانس تصاویر نیبلاک (Gatos, Pratikakis, & Perantonis, 2006)، روش مبتنی بر تضاد تصاویر برنسن (Thepade, Das, & Ghosh, 2014) و روش کیتلر (Kittler & Illingworth, 1986) که خطای اندازه‌گیری در محاسبه‌ی آستانه‌ی بهینه را در نظر می‌گیرد، مهم‌ترین روش‌های دودویی‌سازی تصاویر به حساب می‌آیند. روش آستانه‌گیری آتسو رایج‌ترین روش مورد استفاده برای دودویی‌سازی تصاویر است که در این مقاله مورد استفاده واقع شده است. آستانه‌گذاری آتسو، در زیر گروه روش‌های آستانه‌گذاری مبتنی بر خوشه‌بندی، دسته‌بندی

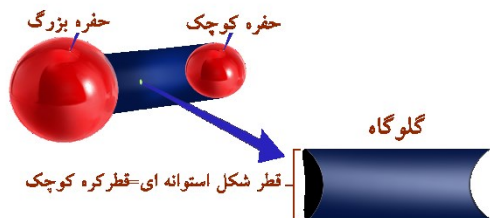
¹ Modified Maximal Ball (MMB)



شکل ۱. شماتیک ناحیه بررسی و محاسبه پارامترهای قابل استفاده در تابع احتمال.

۲.۳ تشخیص گلوگاهها

بعد از مشخص نمودن حفرات، مرحله بعدی بررسی برقراری ارتباط میان حفرات است. در این مطالعه گلوگاه نقطه اتصال دو حفره در نظر گرفته می شود که قطر آن حداکثر برابر با قطر حفره کوچکتر است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است؛ گلوگاه به صورت یک استوانه با دو مقطع کره ای در نظر گرفته می شود که این مقاطع حاصل از تقاطع دو کره با یک استوانه است.



شکل ۲. شماتیک تعریف مدنظر برای گلوگاه در مدل سازی.

در این مدل تعریف گلوگاه صرفاً به محل کوچک اتصال میان حفرات منحصر می شود و اتصال میان دو کره ای هم اندازه مجاور در واقع به معنای طولی تر شدن گلوگاه است. همانطور که در شکل ۳ مشخص است، این تعریف علاوه بر هم پوشانی با تعاریف سابق، مدل شبکه حفرات را از نظر ساختاری به شکل واقعی نزدیک تر می کند و همچنین امکان به وجود آوردن گلوگاه های شبه منحنی را نیز فراهم می کند.

$$\Lambda(x_c, y_c, z_c, R) = \begin{cases} 1 & \text{if } \Omega \geq T \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$\Omega = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c C_z(i, j, k)}{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c C(i, j, k)} \quad (2)$$

a ، b و c نشان دهنده تعداد وکسل در جهت های مختلف مختصات است، Ω نسبت فضای حفره ای به کل ناحیه کروی است. روابط (۳) و (۴) به ترتیب نشان دهنده ی تابع شمارنده کل وکسل ها درون ناحیه کروی، C ، و تابع شمارنده وکسل های مربوط به حفرات درون ناحیه ی کروی، C_z ، است.

$$C(i, j, k) = \begin{cases} 1 & \text{if } (i-x_c)^2 + (j-y_c)^2 + (k-z_c)^2 - R^2 \leq 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

$$C_z(i, j, k) = \begin{cases} 1 & \text{if } z(i, j, k) = 1 \ \& \ (i-x_c)^2 + (j-y_c)^2 + (k-z_c)^2 - R^2 \leq 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

الگوریتم آنالیز تصویر به گونه ای است که با شروع از بزرگترین قالب (کره) که متناسب با ابعاد تصویر محاسبه می شود، تمام تصویر پالایه می شود و سپس اندازه قالب بررسی کننده کاهش می یابد و مجدد تصویر پالایه می شود. مختصاتی از تصویر دودویی شده که معادله (۲) برای آن ها صادق است ذخیره سازی شده و از مرحله ی بعدی آنالیز حذف می شوند. این آنالیز تا رسیدن به مرحله ی عدم یافت حفره ادامه پیدا می کند. خروجی آنالیز، مکان هندسی حفرات و شعاع هر حفره است. به علت حذف حفرات شناسایی شده در هر مرحله، هم پوشانی کره های استخراج شده به حداقل می رسد؛ اما بنا بر آستانه ی انتخابی، ممکن است تعداد معدودی هم پوشانی میان کره ها مشاهده شود. در صورت وجود هم پوشانی احتمالی میان کره ها، با کاهش شعاع حفرات متصل به هم آن ها به صورت مماس تبدیل می شوند.

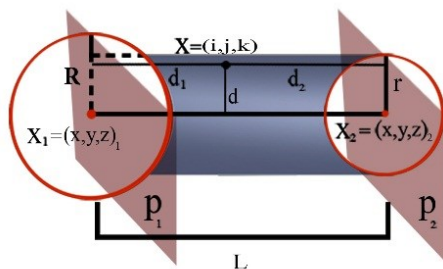
ناحیه گلوگاه، β_p ، و تابع شمارشگر پیکسل‌های مربوط به حفره‌ها در محدوده‌ی گلوگاه، α_p ، است.

$$\beta_p = \begin{cases} 1 & \text{if } L - (R+r) < \min\{D\} \ \& \\ & \omega_n > 0 \ \& \ \lambda_1 \leq 0 \ \& \ \lambda_2 \leq 1 \quad n=1,2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

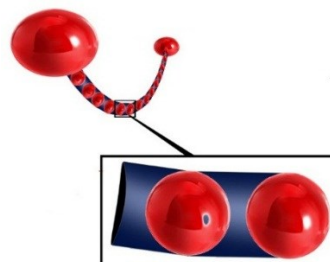
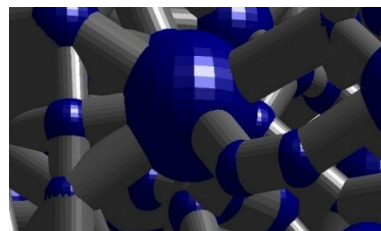
$$\alpha_p = \begin{cases} 1 & \text{if } L - (R+r) < \min\{D\} \ \& \\ & z(i,j,k)=1 \ \& \ \omega_n > 0 \ \& \ \lambda_1 \leq 0 \ \& \ \lambda_2 \leq 1 \quad n=1,2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

$P_\delta = 1$ به معنای بیشتر تعداد وکسل‌های مربوط به حفرات در ناحیه میان دو حفره از آستانه‌ی در نظر گرفته شده است. بعد از شناسایی یک گلوگاه مختصات متناظر با آن ذخیره‌سازی می‌شود. پارامترهای \mathcal{L} و ω در معادلات ۸ و ۱۶ قابل مشاهده است. D نشان‌دهنده‌ی مجموعه قطر کره‌های تشکیل‌دهنده‌ی فضای متخلخل است که در مرحله قبلی به دست آمده است.

همان‌طور که در معادله (۶) مشخص است، فاصله‌ی سطح خارجی دو حفره، $L - (R+r)$ ، نیز باید از قطر کمترین حفره کوچک‌تر باشد. این بدین معنا است که این منطقه در پالایه‌های کره به‌عنوان کره تشخیص داده نشده است بنابراین می‌تواند گلوگاه باشد. این ویژگی علاوه بر این که مدل را به هندسه‌ی واقعی نزدیک‌تر می‌کند، از تقاطع گلوگاه‌ها نیز جلوگیری می‌کند.



شکل ۴. پارامترهای تعیین‌کننده‌ی شرایط هندسی برای تعریف گلوگاه میان دو کره



شکل ۳. شماتیک (شکل پایین) و نمای حاصل از مدل (شکل بالا) در ارتباط نحوه ایجاد گلوگاه‌های شبه منحنی.

معادله (۵) احتمال احاطه گلوگاه^۱ میان دو نقطه را نشان می‌دهد. در شکل ۴ نحوه‌ی شناسایی هندسی و شماتیک ناحیه‌ی گلوگاه و در معادلات ۸ تا ۱۶ روابط جبری تحلیلی متناظر با پارامترهای موجود در این شکل نشان داده شده است. نقاطی که فاصله آن‌ها از خط واصل میان مراکز کره‌ها از شعاع کره‌ی کوچک کمتر است و همچنین مجموع فواصل آن‌ها از دو صفحه موازی گذرنده از مراکز کره‌ها و عمود بر خط رابط میان آن‌ها همواره از یک مقدار مشخصی که در شکل ۴ نشان داده شده است کم‌تر است؛ در محدوده‌ی گلوگاه میان آن حفره‌ها قرار دارند.

$$P_\delta = \begin{cases} 1 & \text{if } \delta > T_p \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \alpha_p}{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \beta_p}$$

P_δ نشان‌دهنده تابع شمارشگر گلوگاه‌ها و δ تابع اندازه‌گیری احتمال وجود حفره در محدوده گلوگاه است. روابط (۶) و (۷) نیز به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تابع شمارشگر پیکسل‌های دورن

¹ Throat spanning probability

و معادله (۱) نشان دهنده‌ی تابع معرف سطح است. در مدل بازسازی شده تخلخل نسبت تعداد درایه‌های ۱ به کل تعداد درایه‌ها است، در واقع برای یک ماتریس سه بعدی، $a \times b \times c$ ، تخلخل، ϕ ، را می‌توان طبق معادله‌ی (۱۷) تعریف کرد.

$$\phi = \frac{1}{a \times b \times c} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c z(i, j, k) \quad (17)$$

برای ارزیابی همگنی در توزیع فضای متخلخل مدل، تصویر را به تعدادی ناحیه هم‌اندازه تقسیم و تخلخل ناحیه‌ای هر قسمت، ϕ_i ، محاسبه می‌شود که در واقع میانگین تخلخل به فرم باقیمانده نرمالایز شده^۱ است. معیار همگنی، μ ، عددی بین صفر و ۱ است و از معادله (۱۸) محاسبه می‌شود. هر چه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد سنگ همگن‌تر است.

$$\mu(N) = \frac{\sum_{i=1}^N |\phi_i - \phi|}{N \phi} \quad (18)$$

به منظور نرمالایز شدن تمام مقادیر، به جای N از نسبت حجم مقیاس ناحیه به حجم کل تصویر استفاده می‌شود که تابعی نرمالایز از N است. شکل ۵ یک نمونه فضای متخلخل شبیه‌سازی شده با توزیع یکنواخت است، همان‌طور که مشخص است نحوه تغییرات μ با نسبت حجم‌ها یک رویه منطقی را طی می‌کند. با انتگرال‌گیری (سری در حالت عددی) از معادله (۱۸) در بازه‌ی خاص از نسبت حجمی می‌توان به یک شاخص همگنی دقیق برای نمونه دست‌یافت. معادله (۱۹) شاخص همگنی مطلق سنگ، μ ، را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} \bar{\mu} &= \frac{1}{v'_2 - v'_1} \sum_{v'=v'_1}^{v'_2} \sum_{i=1}^N \frac{|\phi_i - \phi|}{\phi} v' \Delta v' \\ v' &= \frac{vS}{vt} \\ N &= \frac{vt}{vS} = \frac{1}{v'} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \\ (i - x_1)^2 + (j - y_1)^2 + (k - z_1)^2 - R^2 &> 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$d = \frac{|(X - X_1) \times (X - X_2)|}{|(X_2 - X_1)|} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_2 &= (X_2 - X_1) \cdot (x - x_2, y - y_2, z - z_2) = 0 \\ P_2 &\Rightarrow A_2 x + B_2 y + C_2 z - D_2 = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$d_2 = \left| \frac{(X_2 - X_1) \cdot (i - x_2, j - y_2, k - z_2)}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}} \right| \quad (11)$$

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \\ (i - x_2)^2 + (j - y_2)^2 + (k - z_2)^2 - R^2 &> 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} P_1 &= (X_2 - X_1) \cdot (x - x_1, y - y_1, z - z_1) = 0 \\ P_1 &\Rightarrow A_1 x + B_1 y + C_1 z - D_1 = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$d_1 = \left| \frac{(X_2 - X_1) \cdot (i - x_1, j - y_1, k - z_1)}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}} \right| \quad (15)$$

$$\lambda_2 = \frac{d_1 + d_2}{L}, \lambda_1 = d - r \quad (16)$$

تعریف ارائه شده برای گلوگاه این امکان را فراهم می‌کند که بعد از کنار هم قرار گرفتن چند حفره‌ی هم‌اندازه گلوگاهی با طول بیشتر به وجود بیاید، به همین دلیل مرحله استخراج حفرات با هدف یافتن بیشترین تعداد حفره صورت می‌پذیرد. برای ذخیره‌سازی قطر هر گلوگاه، مقدار احتمال احاطه گلوگاه اندازه‌گیری شده، δ ، در شعاع در نظر گرفته شده ضرب می‌شود. به عبارت دیگر در صورتی شعاع گلوگاه برابر با شعاع حفره‌ی کوچک است که فاصله‌ی میان دو حفره تماماً توسط فضای حفره‌ای اشغال شده باشد.

۲.۴ تخلخل و شاخص همگنی

طبق آنچه در بخش ۲.۱ گفته شد، در تصاویر سی تی اسکن سه بعدی دودویی شده، تصویر به دو فاز مجزا تبدیل می‌شود

^۱ Average normalize residual porosity

شاخص تخلخل به تنهایی معیار کافی برای مقایسه میان ساختار هندسی بین دو سنگ نیست و پارامترهای دیگر از جمله میزان یکنواختی اندازه حفرات و گلوگاه‌ها، جهت‌گیری فضایی گلوگاه‌ها و نحوه‌ی توزیع عدد هم‌آرایی در نواحی مختلف در این مقایسه تأثیر گذارند. از آنجایی که تا قبل از استخراج مدل حفرات تنها ماتریس دودویی مربوط به تصویر سی‌تی‌اسکن سنگ در اختیار است بنابراین به دست آوردن تخلخل نمونه امکان‌پذیر است و شاخص همگنی ارائه شده در این مطالعه معیار مناسبی برای آنالیز مدل حفره گلوگاه مربوط به هر سنگ، قبل از استخراج آن مدل است. هر چه این شاخص کم‌تر باشد توزیع تخلخل در سنگ یکپارچه‌تر و شکل مدل یکنواخت‌تر است.

۳. بحث و نتایج

برای بررسی مدل توسعه داده شده، از مدل شبکه حفرات استخراج شده از تصاویر سی‌تی‌اسکن یک نمونه سنگ مصنوعی سیلیکا استفاده شده است (Dong & Blunt, 2009).

جدول ۱. مقایسه میان نتایج حاصل از مدل توسعه داده شده و مدل کره بیشینه محاطی اصلاح شده (MMB) (Dong & Blunt, 2009) برای یک نمونه مصنوعی سیلیکا

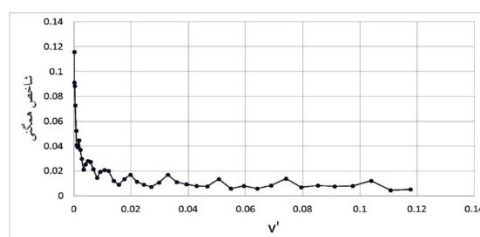
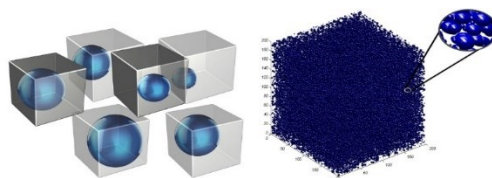
مدل	تخلخل %	میانگین اندازه ذرات (میکرومتر)	میانگین عدد کتوردیناسیون
مدل MMB	۴۲/۹	۱۸/۹	۶/۶۷
مدل توسعه داده شده	۴۱/۸	۲۳/۳	۶/۴۲

جدول ۱ مقایسه میان نتایج حاصل از مدل توسعه داده شده و مدل مذکور را نشان می‌دهد. نمونه مورد بررسی یک نمونه مصنوعی با تخلخل و میانگین عدد هم‌آرایی بالا است. برای نشان دادن تأثیر حذف پله‌ای و شکستن ماتریس ۳ بعدی، با دو روش متفاوت مدل حفره گلوگاه استخراج شده است. زمان اجرای برنامه در حالت پیوسته و تک ماتریسی ۹۸/۲۳ دقیقه و در حالت حذف پله‌ای به همراه شکستن ماتریس ۲۵/۴۳ دقیقه و یکپارچگی مشاهده شده، به دلیل

حجم ناحیه مقیاس بندی و Vt حجم کل نمونه تصویر است. در این مطالعه بازه $v'=0$ تا $v'=0.25$ به‌عنوان محدوده تغییر استاندارد برای محاسبه‌ی شاخص همگنی در نظر گرفته شده است. $\overline{\mu}^*$ حالت استاندارد برای محاسبه شاخص همگنی است.

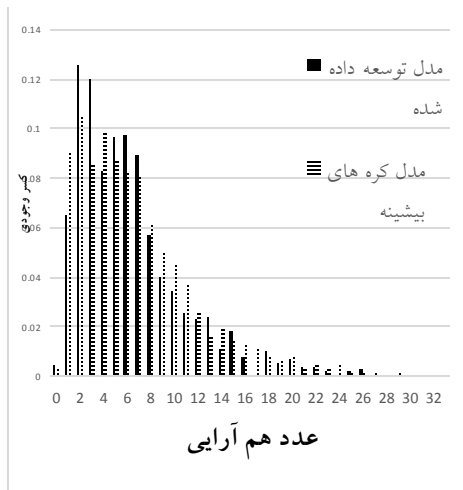
$$\overline{\mu}^* = 8 \sum_{v'=0}^{.125} \sum_{i=1}^N \frac{|\phi_i - \phi|}{\phi} v' \Delta v \quad (20)$$

مطابق شکل ۵ برای ایجاد یک محیط متخلخل با توزیع یکنواخت اندازه ذرات کره‌ای شکل، شعاع حفرات به صورت تصادفی و در بازه‌ای مشخص بین صفر تا طول سلول (L) تعیین می‌شود. به منظور نزدیک شدن ساختار نمونه به ساختار واقعی، مراکز حفرات نیز در بازه‌ای متقارن حول مرکز هر سلول و با استفاده از تابع توزیع یکنواخت، به‌گونه‌ای جابه‌جا می‌شوند که از محدوده‌ی سلول خارج نشوند. ثبت در نظر گرفتن هر سلول از هم‌پوشانی حفره‌ها جلوگیری می‌کند و محیطی با توزیع یکنواخت به وجود می‌آورد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده، $\overline{\mu}^*$ برای یک محیط متخلخل با توزیع یکنواخت اندازه حفرات، حدوداً برابر با ۰/۰۱ است.



شکل ۵. چیدمان در نظر گرفته شده برای حفرات در یک محیط متخلخل با توزیع یکنواخت (شکل بالا سمت چپ). محیط متخلخل ایجاد شده با توزیع یکنواخت اندازه حفرات و تخلخل ۴۰ درصد (شکل بالا سمت راست). نمودار شاخص همگنی برای نمونه ایجاد شده (شکل پایین).

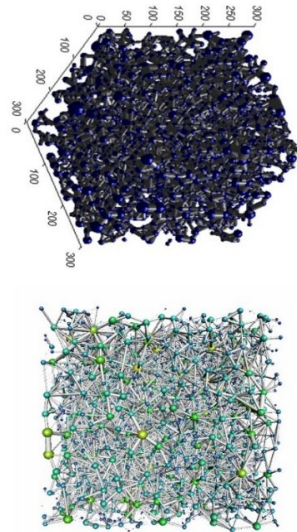
مقادیر در محدوده‌های کم‌تر از این دقت به صورت مستقیم ممکن نیست. وجود این مقادیر در مدل مرجع موجب وجود اختلافی میان جواب‌های حاصل از مدل توسعه داده شده و آن شده‌اند.



شکل ۷. مقایسه توزیع عدد هم آرای حاصل از مدل (نمودار آبی رنگ) با نتایج مدل مرجع (Dong & Blunt, 2009) برای نمونه سنگ مصنوعی (نمودار قرمز رنگ).

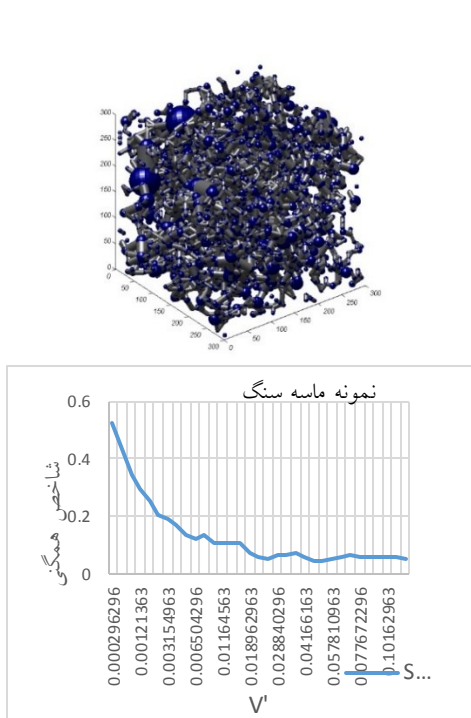
برای آنالیز ساختار مدل شبکه حفرات ایجاد شده، شاخص همگنی معیار مناسبی است. هر چه این شاخص کم‌تر باشد توزیع تخلخل در سنگ یکپارچه‌تر و در نتیجه شکل مدل یکنواخت‌تر است. در شکل ۹ تا ۱۱ به ترتیب نمودار شاخص همگنی حاصل از تصاویر سی تی اسکن مربوط به نمونه‌های سنگ مصنوعی، ماسه سنگی و کربنات همراه مدل شبکه حفرات متناظر آن نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است عدد شاخص همگنی برای سنگ‌های کربناته به دلیل وجود کانال‌های داخلی نسبت به ماسه سنگ‌ها بیشتر است؛ بنابراین سنگ دارای توزیع تخلخل ناهمگن‌تری است. همچنین نمونه‌های مصنوعی به علت ساختار یکپارچه و تخلخل بالا دارای توزیع تخلخل یکنواخت‌تری هستند، بنابراین دارای شاخص همگنی کمتری نسبت به سنگ‌های کربناته و ماسه سنگی هستند. نمودار شاخص همگنی برای نمونه‌ی مورد مقایسه نیز در شکل ۹ نمایش داده شده است. همان‌طور که گفته شده این مدل مربوط به یک نمونه مصنوعی با تخلخل بالا است بنابراین توزیع تخلخل آن به صورت یکپارچه است و شاخص همگنی آن نزدیک به صفر است.

ماهیت مصنوعی بودن سنگ است. سنگ‌های مصنوعی همان‌طور که در شکل ۹ هم نشان داده شده دارای توزیع تخلخل یکپارچه‌ای هستند. شکل ۶ مدل شبکه حفرات حاصل از مدل توسعه داده شده در نرم افزار متلب و مدل مرجع را نشان می‌دهد. هر دو مدل بیانگر وجود ساختار منظم و یکپارچه در محیط سنگ هستند.

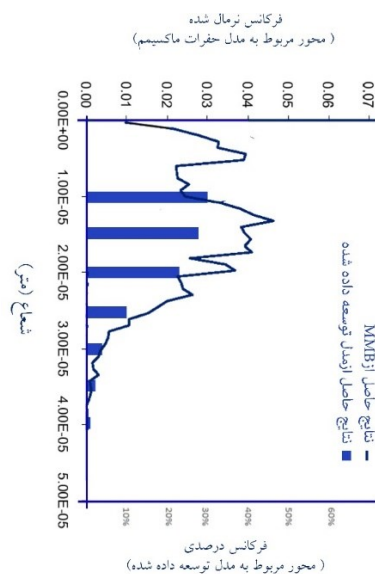


شکل ۶. مقایسه مدل شبکه حفرات استخراج شده از روش بزرگ‌ترین کره اصلاح شده (Dong & Blunt, 2009) (شکل پایین) با مدل شبکه حفرات ایجاد شده مبتنی بر روش توسعه داده شده (شکل بالا).

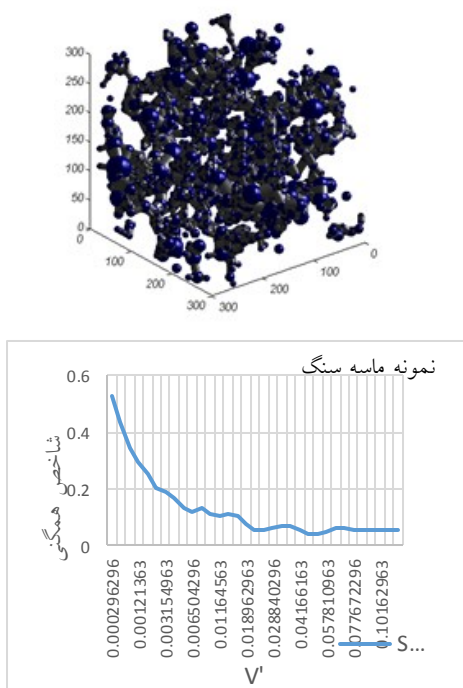
شکل ۷ نمودار توزیع عدد هم آرای حاصل از دو مدل رانمایش می‌دهد. تفاوت به وجود آمده میان جواب‌ها به خصوص در عددهای هم آرای پایین به دلیل تعریف خاص ارائه شده برای گلوگاه‌ها در این مطالعه است. این تعریف خاص به علت تقسیم گلوگاه‌ها به مجموعه‌ای از حفرات مجاور هم باعث افزایش ناچیز در اعداد هم آرای ۲ و هم چنین جلوگیری از ایجاد اعداد هم آرای خیلی بالا می‌شود. شکل ۸ نشان دهنده مقایسه توزیع اندازه حفرات مدل توسعه داده شده و مدل مرجع است. تفاوت ظاهری مشاهده شده به علت عدم پیوستگی مقادیر استفاده شده در مدل مرجع است. اگرچه در داده‌های مربوط به مدل مذکور اندازه حفرات در محدوده‌ی نزدیک به صفر نیز گزارش شده است، اما از آنجایی که رزولوشن تصویر مورد استفاده ۳.۹ میکرومتر است (Dong & Blunt, 2009)، بنابراین وجود



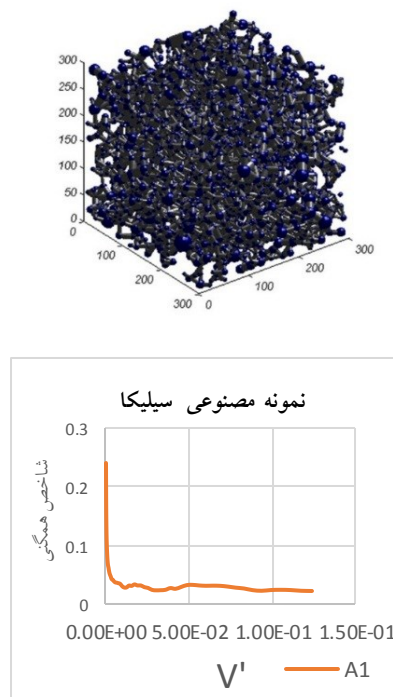
شکل ۱۰. نمودار شاخص همگنی برای یک نمونه‌ی ماسه‌سنگ به همراه مدل شبکه حفرات متناظر



شکل ۸. مقایسه توزیع اندازه حفره‌ها حاصل از مدل (نمودار مستطیلی) با نتایج حاصل از مدل مرجع برای نمونه مصنوعی سیلیکا (نمودار پیوسته سیاه‌رنگ) (Dong & Blunt, 2009).



شکل ۱۱. نمودار شاخص همگنی برای یک نمونه‌ی کربنات به همراه مدل شبکه حفرات متناظر



شکل ۹. نمودار شاخص همگنی برای یک نمونه‌ی سنگ مصنوعی سیلیکا به همراه مدل شبکه حفرات متناظر.

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه روش نوین و سریعی برای استخراج مدل شبکه حفرات ارائه شده که تطابق هندسی مناسبی با ساختار واقعی سنگ دارد. استفاده از روش حذف پله ای و شکستن ماتریس ها موجب کاهش زمان اجرای برنامه نسبت به حالت پیوسته و تک ماتریسی شده است. امکان ایجاد گلوگاه های منحنی شکل در مدل توسعه داده شده وجود دارد. تعریف آستانه احاطه

گلوگاه ارائه شده در این مدل از ایجاد گلوگاه های غیر واقعی جلوگیری می کند. شاخص همگنی ارائه شده در این مطالعه امکان آنالیز و مقایسه ی شماتیک مدل حفره گلوگاه استخراج شده، با ساختار واقعی سنگ را فراهم می نماید.

۵. سیاهه نمادها

در جدول ۲ توضیحات نمادها آورده شده است.

جدول ۲. سیاهه ی نمادها

نماد	واحد	شرح
L	m	فاصله میان دو حفره
$Z(x)$	-	تابع معرف محیطی
Λ	-	شمارشگر حفرات
Ω	-	احتمال وجود حفره
T	-	آستانه ی وجود حفره
C_z	-	تابع تفکیک محیط درون حفره ها
C	-	تابع معرف محیط حفره ها
R	-	شعاع حفره ها
D	m^3	شعاع مورد بررسی
P	-	معادله ی صفحه
d	-	فاصله نقطه از خط
N	m	تعداد تقسیم بندی محیط متخلخل
ϕ	-	تخلخل
a, b, c	-	اندازه ابعاد ماتریس
v'	-	نسبت حجمی
x_c, y_c, z_c	m	مختصات مرکز کره
P_δ	-	شمارشگر گلوگاه ها
δ	-	احتمال وجود گلوگاه
T_p	-	آستانه ی وجود گلوگاه
α_p	-	تابع تفکیک محیط درون گلوگاه
β_p	-	تابع معرف محیط گلوگاه
ω_n	-	تابع تعیین کننده ی وضعیت نقاط نسبت به حفرات
λ_1	-	تابع تعیین کننده ی وضعیت نقاط نسبت به گلوگاه
λ_2	-	تابع تعیین کننده ی وضعیت نقاط نسبت به حفرات و گلوگاه
VS	m^3	حجم مقیاس بندی
vt	m^3	حجم کل
μ	-	معرف همگنی
μ	-	شاخص همگنی
μ^*	-	شاخص همگنی استاندارد
MMP	-	مدل حفرات بزرگ ترین اصلاح شده

۶. منابع

- Al-Kharusi, A. S., & Blunt, M. J. (2007). Network extraction from sandstone and carbonate pore space images. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 56(4), 219-231 .
- Baldwin, C. A., Sederman, A. J., Mantle, M. D., Alexander, P., & Gladden, L. F. (1997). Determination and characterization of the structure of a pore space from 3D volume images. *Journal of Colloid and Interface Science*, 181(1), 79-92 .
- Blunt, M., King, M. J., & Scher, H. (1992). Simulation and theory of two-phase flow in porous media. *Physical Review A*, 46(12), 7680 .
- Bryant, S., & Blunt, M. (1992). Prediction of relative permeability in simple porous media. *Physical Review A*, 46(4), 2004 .
- Bryant, S., & Raikes, S. (1995). Prediction of elastic-wave velocities in sandstones using structural models. *Geophysics*, 60(2), 437-446 .
- Bryant, S. L., King, P. R., & Mellor, D. W. (1993). Network model evaluation of permeability and spatial correlation in a real random sphere packing. *Transport in porous media*, 11(1), 53-70 .
- Bryant, S. L., Mellor, D. W., & Cade, C. A. (1993). Physically representative network models of transport in porous media. *AIChE Journal*, 39(3), 387-396 .
- Dong, H., & Blunt, M. J. (2009). Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images. *Physical review E*, 80(3), 036307 .
- Gatos, B., Pratikakis, I., & Perantonis, S. J. (2006). Adaptive degraded document image binarization. *Pattern recognition*, 39(3), 317-327 .
- Gostick, J. T. (2017). Versatile and efficient pore network extraction method using marker-based watershed segmentation. *Physical review E*, 96(2), 023307 .
- Johannsen, G., & Bille, J. (1982). *A threshold selection method using information measures*. Paper presented at the ICPR.
- Kapur, J. N., Sahoo, P. K., & Wong, A. K. (1985). A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram. *Computer vision, graphics, and image processing*, 29(3), 273-285 .
- Kittler, J., & Illingworth, J. (1986). Minimum error thresholding. *Pattern recognition*, 19(1), 41-47 .
- Lindquist, W. B., Lee, S. M., Coker, D. A., Jones, K. W., & Spanne, P. (1996). Medial axis analysis of void structure in three-dimensional tomographic images of porous media. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B4), 8297-8310 .
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 9(1), 62-66 .
- Rabbani, A., Jamshidi, S., & Salehi, S. (2014). An automated simple algorithm for realistic pore network extraction from micro-tomography images. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 123, 164-171 .

- Raeini, A. Q., Bijeljic, B., & Blunt, M. J. (2017). Generalized network modeling: Network extraction as a coarse-scale discretization of the void space of porous media. *Physical review E*, 96(1), 013312
- Silin, D., & Patzek, T. (2006). Pore space morphology analysis using maximal inscribed spheres. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 371(2), 336-360 .
- Thepade, S., Das, R., & Ghosh, S. (2014). A Novel Feature Extraction Technique Using Binarization of Bit Planes for Content Based Image Classification. *Journal of Engineering*. doi:10.1155/2014/439218.
- Xiong, Q., Baychev, T. G., & Jivkov, A. P. (2016). Review of pore network modelling of porous media: experimental characterisations, network constructions and applications to reactive transport. *Journal of contaminant hydrology*, 192, 101-117 .