

## مروری بر مهم‌ترین کارهای انجام شده در زمینه مدل‌سازی شبکه‌ی حفرات از ابتدا تا کنون

شکوفه آقابزرگی • بهزاد رستمی\* • دانشگاه تهران

چکیده

اطلاعات مقاله

در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌سازی شبکه‌ی حفرات در شبیه‌سازی فرآیندهای جابه‌جایی در مخزن و محاسبات تراوایی نسبی کاربرد وسیعی یافته است. شبیه‌سازی این فرآیندها به درک بهتر آنچه در مقیاس حفره در مخزن رخ می‌دهد کمک خواهد کرد که نخستین مرحله برای طراحی عملیات‌های انجام شده روی مخزن از جمله ازدیاد برداشت نفت است. ساخت میکرومدل‌ها و مشاهده‌ی میکروسکوپی حرکت سیال بر اثر اختلاف فشار به پیشرفت این روش کمک شایانی کرد. گام نخست در شبیه‌سازی فرآیندها به این روش، ایجاد مدلی از شبکه‌ی حفرات است که تا حد ممکن به سنگ شبیه باشد. پیچیدگی‌های بسیار سنگ‌های رسوبی به خصوص سنگ‌های کربناته که ناشی از دیاژنز رخ داده است سبب شده این مبحث گسترش فراوانی پیدا کند. استفاده از مباحث آماری و روش‌های تصویربرداری به کمک مهندسان در این بخش ارائه شده تا بتوانند ساختار سنگ را هرچه بهتر مدل‌سازی کنند. این مقاله نگاهی به مهم‌ترین تحقیقاتی که در سالیان گذشته در زمینه مدل‌سازی شبکه‌ی حفرات انجام شده خواهد داشت. روش‌های متفاوت شبیه‌سازی ساختار سنگ و روش‌های استفاده شده برای انجام محاسبات، از مباحث بررسی شده در مقاله‌ی حاضر است.

### واژگان کلیدی:

مدل‌سازی شبکه‌ی حفرات، محیط متخلخل، فشار موئینگی، تصویر باینری سنگ

مقدمه

شبکه‌ی حفرات ایجاد شده می‌تواند شبکه‌ای منظم و دوبعدی مانند شبکه‌ی لانه‌زنبوری یا سه‌بعدی مانند مکعب عادی با عدد مختصاتی<sup>۱</sup> شش باشد. اما یک شبکه‌ی منظم نمی‌تواند به‌خوبی یک ساختار نامنظم، محیط متخلخل را توصیف کند. با افزایش یا کاهش طول گلوگاه‌ها می‌توان ساختار منظم شبکه را به هم ریخت یا با حذف تصادفی تعدادی از گلوگاه‌ها عدد مختصاتی (Z) میانگین شبکه را تغییر داد. عدد مختصاتی هر حفره (Z) به تعداد گلوگاه‌های اطراف آن اطلاق می‌شود که با یک گلوگاه به هم متصل شده‌اند. راه دیگر ساخت شبکه‌ای است که ارتباط بین حفرات بر اساس محیط متخلخل واقعی شبیه‌سازی شود. برای این کار بر اساس امکانات موجود ممکن است از تصویر دوبعدی یا سه‌بعدی محیط متخلخل استفاده شود. روش دیگر ایجاد ساختار سنگ، با استفاده از مدل‌سازی گام‌به‌گام شرایط رسوب و تشکیل سنگ است.

به‌طور کلی می‌توان یک شبکه‌ی سنگی را به‌صورت تابعی ریاضی مثل رابطه‌ی ۱- در نظر گرفت [۱]:

$$h(x)=1 \quad x \in \text{solid phase volume} \quad (1)$$

$$h(x)=0 \quad x \in \text{void space volume}$$

که در آن حجم فضای خالی خود به دو گروه حفرات و گلوگاه‌ها تقسیم می‌شود. البته این تعریف ارتباط بین فازها را به‌عنوان عاملی بسیار مهم بیان نمی‌کند. به‌دلیل پیچیدگی ساختار محیط متخلخل نمی‌توان به‌راحتی این تابع ریاضی را حدس زد اما با استفاده از روش‌های مختلف می‌توان این تابع و تا حدودی ارتباط فضایی بین حفرات را تعیین کرد. با الهام از این تابع می‌توان شبکه‌ی حفراتی ایجاد کرد که نمایان‌گر ساختار سنگ باشد و از آن برای شبیه‌سازی فرآیندهایی مانند تغییر ترشوندگی، آشام، ریزش یا تراوایی نسبی سیالات چندفازی استفاده نمود.

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (brostami@ut.ac.ir)

## ۱- آغاز مدل سازی شبکه‌ی حفرات

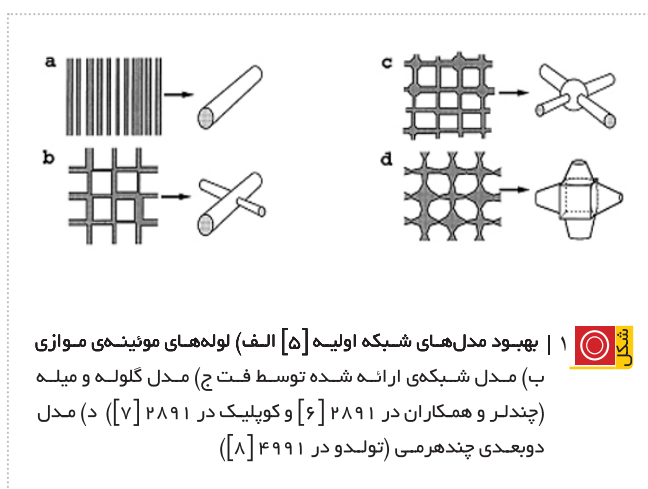
نخستین بار فت<sup>۲</sup> در ۱۹۵۶ [۴-۲] بیان کرد که شبیه‌سازی ساختار پیچیده‌ی سنگ (با مدل‌های موجود تا آن زمان) به‌صورت دسته‌ای از لوله‌های موئینه‌ی موازی یک‌بعدی یا به‌صورت کره‌های کنار هم با ساختار واقعی سنگ بسیار تفاوت دارد. او عقیده داشت با آنکه کره‌های کنار هم تصویر بهتری از ساختار سنگ ایجاد می‌کنند اما روابط ابتدایی موجود در آن زمان برای محاسبه‌ی فشار موئینگی و نرخ برای مدل‌سازی جریان بین کره‌ها بسیار ناکافی بود.

فت برای توصیف ساختار سنگ از شبکه‌ای دوبعدی و منظم تشکیل شده از لوله‌های موئینه‌ی متقاطع با شعاع‌های متفاوت استفاده کرد. در این مدل حفرات و گلوگاه‌ها به‌ترتیب شعاع از سیال پر می‌شدند. او با این کار توانست علاوه بر نمودار فشار موئینه، نمودار تراوایی نسبی را که خصوصیتی شبیه نمودارهای تجربی داشتند نیز برای فرآیند ریزش به‌دست آورد. او شبکه‌های مختلف مربعی، مثلثی و لانه‌زنبوری را بررسی کرده و دریافت که این شبکه‌ها نسبت به مدل لوله‌های موئینه‌ی متقاطع، نتایجی نزدیک‌تر به داده‌های آزمایشگاهی ایجاد می‌کنند. در آن زمان حل عددی معادلات جریان (هدایت) سیال هنوز ممکن نبود و فت برای محاسبات معادله‌ی جریان از یک شبکه‌ی معادل مقاومت‌های الکتریکی کمک می‌گرفت. کار او نقطه‌ی شروع مدل‌سازی شبکه‌ی حفرات سنگ بود که بعدها توسط دیگران ادامه یافت. شکل ۱- مدل‌های اولیه‌ی دیگری را نشان می‌دهد که توسط محققان پیشین استفاده شده است.

که پردازش کامپیوتری در اختیار همگان قرار گرفت به‌تأخیر افتاد. چتریس و دالین<sup>۳</sup> [۹] در ۱۹۷۷ بیان کردند که شبکه‌های دوبعدی نمی‌توانند رفتار سیال در سه‌بعد را به‌خوبی مدل‌سازی کنند؛ زیرا بر اساس نظریه‌ی نفوذ<sup>۴</sup>، شروع حرکت سیال در شبکه<sup>۵</sup> به‌شدت به بُعد شبکه وابسته است. شبکه‌ی آنها متشکل از حفرات و گلوگاه‌هایی بود که حجم مشخص داشتند. سیال مهاجم از سطح ورودی تزریق می‌شد و حفرات و گلوگاه‌ها را بر حسب شعاع پر می‌کرد. فرآیندی که آنها برای پر شدن شبکه در نظر گرفته بودند بسیار شبیه به مفهوم نفوذ تهاجمی<sup>۶</sup> بود که بعداً در ۱۹۸۳ توسط ویلکینسون و ویلمسن<sup>۷</sup> [۱۰] معرفی و به پایه‌ای برای تئوری ریزش در محیط متخلخل تبدیل شد. در مدل چتریس و دالین ممکن بود سیال اولیه توسط سیال مهاجم<sup>۸</sup> احاطه شده و به‌دام افتد. نظریه‌ی نفوذ همراه با به‌دام افتادگی<sup>۹</sup> سیال اولیه نیز بعدها ۱۹۸۶ توسط دیاس و ویلکینسون<sup>۱۱</sup> [۱۱] در به‌صورت کامل‌تر بررسی شد.

آزمایش‌های میکرومدل فرآیندهای آشام و ریزش به فهم بهتر مکانیزم‌های مرتبط در مقیاس حفره کمک کرد. لئورماند<sup>۱۱</sup> در ۱۹۸۳ از مدل‌های موئینه‌ای با سطح مقطع مربعی برای مشاهده و توصیف مکانیزم‌های فعال در فرآیند آشام استفاده کرد [۱۲]. مشاهدات او به سنگ‌بنایی برای مدل‌سازی فرآیند آشام در شبکه‌ی حفرات تبدیل شد. در آن زمان بیشتر شبکه‌های بررسی شده بر اساس شبکه‌های منظم شکل گرفته بودند. از آنجا که ساختار سنگ واقعی بسیار نامنظم است برای آنکه شبکه‌ی حفرات ایجاد شده بیشتر به ساختار واقعی سنگ شبیه باشد شبکه‌هایی بر اساس ساختار بلورهای مربعی یا مکعبی نامنظم با عدد مختصاتی متفاوت ایجاد شد که می‌توان به نمودار ورونی<sup>۱۲</sup>، مثلث‌سازی دیلوناگ<sup>۱۳</sup> یا درخت کلیدی<sup>۱۴</sup> اشاره کرد (شکل ۲-).

جرالد و سالتر<sup>۱۵</sup> [۱۳] در ۱۹۹۰ مطالعه‌ی گسترده‌ای روی تراوایی نسبی انجام داده و نتایج حاصل از مدل‌سازی شبکه‌ی حفرات را بررسی کردند. آنها با استفاده از یک شبکه‌ی منظم مکعبی و گلوگاه‌های استوانه‌ای شکل، قادر بودند برخی ویژگی‌های نمودارهای تراوایی نسبی تجربی را به‌دست آورند. آنها بیان کردند که مهم‌ترین ویژگی شبکه نسبت اندازه‌ی حفرات به گلوگاه‌ها<sup>۱۶</sup> بود. به‌نظر می‌رسید این عامل به‌شدت بر شکل نمودار و تاریخچه‌ی اشباع<sup>۱۷</sup> سنگ اثر بگذارد. ارتباط فضایی حفرات<sup>۱۸</sup>، اندازه‌ی گلوگاه‌ها و نمودار توزیع اندازه‌ی حفرات<sup>۱۹</sup>



پیشرفت‌های بیشتر روش مدل‌سازی شبکه‌ی حفرات تا ۱۹۷۰

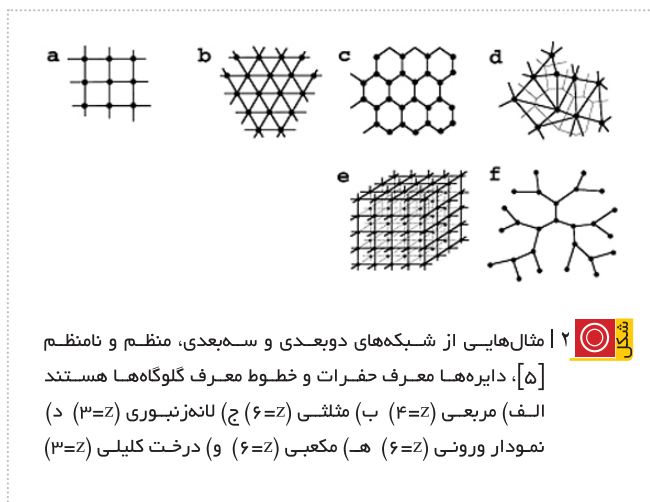
نیز بر شکل نمودار موثر بود.

سنگ نباشد. با این وجود می توان گفت مدلی که توانایی ایجاد داده های تجربی را دارد به احتمال زیاد شبکه ای شبیه به شبکه ی واقعی یک سنگ است [۱۹].

## ۲- شبکه های حفرات پیچیده با توجه به ساختار واقعی سنگ

برای شبیه سازی ارتباط فضایی سنگ واقعی در مدل سازی شبکه ی حفرات، بهتر است ساختار واقعی سنگ آنالیز شود. در این راستا ابتدا باید تصویری باینری و سه بعدی با دقت زیاد از سنگ ایجاد کرد که در آن وکسل های<sup>۲۲</sup> یک نشان دهنده ی قسمت های جامد سنگ و وکسل های صفر نشان دهنده ی فضاهای خالی آن باشند (وکسل معادل سه بعدی پیکسل است). این تصویر اولیه باید تا حد امکان دربرگیرنده ی متغیرهای آماری سنگ باشد. با استفاده از این تصویر می توان شبکه ی معادلی شامل ساختار سنگ، حجم حفرات، شعاع گلوگاه ها و حجم رس موجود در شبکه را به دست آورد که محاسبات مربوط به جریان روی چنین شبکه ای صورت می گیرد [۲۰]. به دلیل آنکه جذب اشعه ی ایکس در سنگ و فضای خالی با هم متفاوت است، می توان تصویر باینری سنگ را مستقیماً با استفاده از میکروتوموگرافی اشعه ی ایکس<sup>۲۳</sup> ایجاد کرد که در آن سنگ با دقتی در حد یک میکرون تصویر می شود [۲۳-۲۱]. مزیت این روش آنست که محیط متخلخل مستقیماً و با دقت زیاد بازسازی می شود. اما روش مذکور به دلیل آنکه نیازمند دستگاه های خاصی است که همواره در دسترس نیستند بسیار پرهزینه خواهد بود. این روش معمولاً برای دقت سنجی سایر روش ها به کار می رود.

روش هایی آماری نیز برای به دست آوردن تصویر باینری سنگ وجود دارد. استخراج داده های آماری از سطح مقطع های نازک<sup>۲۴</sup> دوبعدی یکی از این روش هاست. روش های آماری دیگر عبارتند از روش میدان گوسی دارای آستانه<sup>۲۵</sup> [۲۶]، الگوریتم تیرید شبیه سازی شده<sup>۲۶</sup> [۲۷-۲۹] و روش شیء محور که در آن فرآیند تشکیل سنگ شبیه سازی می شود [۳۰ و ۳۱]. پس از ایجاد تصویر باینری محیط متخلخل، شبکه ی حفرات با روش های متفاوتی از این تصویر باینری ایجاد می شود؛ به صورتی که فضاهای خالی باریک با گلوگاه ها جایگزین می شوند و فضاهای خالی بزرگ تر نشان دهنده ی حفرات هستند. یک روش ساده آنست که سلول هایی شش ضلعی در فضای خالی گنجانند و حجم حفرات و گلوگاه ها را برحسب تعداد این سلول ها مشخص کرد [۳۲]. اما

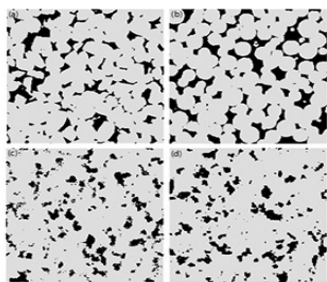


برای ایجاد عدد مختصاتی یک نمونه سنگ که معمولاً بین سه تا هشت است می توان تعدادی از گلوگاه ها را از شبکه ای با عدد مختصاتی بیشتر حذف کرد [۱۳]. برای آنکه مدل بهتری از محیط متخلخل واقعی به دست آید می توان به صورت تصادفی نقاطی در فضا ایجاد کرد و سپس با اتصال هر سه نقطه به هم<sup>۲۰</sup> یک ساختار مثلثی ایجاد نمود. جرالند و همکاران [۱۴ و ۱۵] با استفاده از این روش، شبکه های نامنظمی از نمودار ورونی ایجاد کردند. عدد مختصاتی این شبکه ها ابتدا بیشتر از ۱۵ بود اما با حذف تعدادی از گلوگاه ها به عدد مختصاتی میانگین شش رسید. بلانت و کینگ<sup>۲۱</sup> هم شبکه ای با روش مشابه ایجاد کردند تا تأثیر نیروهای موئینه و ویسکوز را بر جابه جایی در مقیاس حفره بررسی کنند [۱۶ و ۱۷]. دیکسیت و همکاران [۱۸] در ۱۹۹۸ با استفاده از یک شبکه ی منظم مکعبی دریافتند که در یک شبکه با عدد مختصاتی کم (بین چهار تا شش) که حفرات کمتر به هم متصل هستند، نسبت اندازه ی حفرات به گلوگاه ها تأثیر کمتری بر تراوایی نسبی دارد. کاهش ارتباط حفرات در شبکه موجب بیشتر شدن تاریخچه ی اشباع سنگ بین دو فرآیند آشام و ریزش می شود.

شبکه هایی که بر پایه ی شبکه های منظم شکل گرفته اند را می توان آنقدر بهبود بخشید تا داده های اندازه گیری شده برای محیط متخلخل مانند تخلخل، تراوایی مطلق و نمودار فشار موئینگی را ایجاد کنند. اما از آنجا که امکان دارد شبکه های متفاوت یک نوع نمودار موئینگی ایجاد کنند ممکن است بهبود شبکه و ایجاد داده های تجربی نشان دهنده ی شبکه ی واقعی دقیق

دانه‌های سنگ را نیز در نظر گرفتند. برای به دست آوردن توزیع اندازه‌ی حفرات و سایر اطلاعات زمین آماری از سطح مقطع نازک سنگ استفاده شده بود. آنها با این کار توانستند بسیاری از اطلاعات مربوط به ماسه‌سنگ فانتین بلو<sup>۳۲</sup>، نمودارهای فشار موئینه و تراوایی نسبی ماسه‌سنگ بتیمر<sup>۳۳</sup> را به دست آورند. بیسوال<sup>۳۴</sup> و همکاران [۴۱] مدلی ایجاد شده به روش بازسازی زمین شناسی از ماسه‌سنگ فانتین بلو و دو مدل آماری حاصل با استفاده از توابع همبستگی (الگوریتم‌های میدان گوسی، تبرید شبیه‌سازی شده و شیء‌محور) را با تصویر حاصل از میکروتوموگرافی اشعه‌ی ایکس مقایسه کردند. آنها نشان دادند که مدل‌های آماری در پیش‌بینی خواص مربوط به ارتباط فضایی بین حفرات با سنگ واقعی بسیار متفاوت هستند اما این تفاوت در مدل بازسازی شده بسیار کمتر است. آنها نتیجه گرفتند که بازسازی زمین شناسی نمونه، بازتاب بسیار بهتری از ارتباط حفرات سنگ و در نتیجه پیش‌بینی خواص انتقال است. از آنجا که خواصی مانند تراوایی نسبی و مطلق تابعی از ارتباط فضایی سنگ هستند در روش بازسازی زمین شناسی بهتر مدل‌سازی می‌شوند.

با این همه مشکل عمده‌ی ایجاد مدل به روش بازسازی زمین شناسی آنست که الگوریتم بازسازی به صورت صریح فرآیند زمین شناسی تشکیل سنگ را شبیه‌سازی می‌کند که این کار برای سیستم‌های پیچیده‌تر (شامل میکروتخلخل و رس‌ها) بسیار سؤال برانگیز است. مدل‌سازی سنگ‌های کربناته نیز به دلیل ساختار پیچیده به این روش انجام نمی‌شود. علاوه بر این به دست آوردن اطلاعات زمین آماری سنگ (مانند توزیع اندازه‌ی حفرات) نیازمند سطح مقطع نازک سنگ است که ممکن است در دسترس نباشد [۱۹].



۴ | مقایسه‌ی سطح مقطع‌های دوبعدی ایجاد شده از سنگ فانتین بلو با روش‌های مختلف [۱۴]: الف) میکروتوگرافی اشعه‌ی ایکس (ب) روش شیء‌محور (بازسازی زمین شناسی) (ج) روش میدان گوسی (د) روش تبرید شبیه‌سازی شده

این روش برای محیط‌های متخلخل پیچیده چندان مناسب نیست. برخی محققان از روش نازک‌سازی استفاده کرده‌اند که در آن فضای خالی آن‌قدر فرسایش می‌یابد تا تنها اسکلتی خطی از فضای خالی باقی بماند. شعاع حفرات و گلوگاه‌ها بر حسب فاصله‌ی دیواره از این اسکلت خطی مشخص می‌شود [۳۶-۳۳]. بریانت<sup>۲۷</sup> و همکاران [۳۸ و ۳۷ و ۳۲] در شبیه‌سازی شیء‌محور شبکه‌های سه‌بعدی ایجاد شده بر پایه‌ی فرآیندهای زمین شناسی پیشرو بودند. آنها مدل خود را بر اساس شبکه‌ای از کره‌های هم‌اندازه‌ی که کاملاً نزدیک به هم و تصادفی قرار گرفته بودند، ایجاد کردند. آنها فرآیند رشد کوارتز روی دانه‌ها (فرآیند دیاژنز) را با انبساط همگن کره‌ها و هم‌پوشانی آنها مدل‌سازی کردند و برای شبیه‌سازی فرآیند تراکم دانه‌های رسوبی، مرکز کره‌ها را در جهت عمودی به هم نزدیک کرده و اجازه دادند کره‌ها بیشتر در هم فرو بروند. با ایجاد تصویر مکمل<sup>۲۸</sup> از این مدل آنها فضاهای خالی ایجاد شده را به دست آوردند. با استخراج اسکلت این تصویر، گلوگاه‌های سنگ مشخص شد و نقطه‌ی تلاقی گلوگاه‌ها با یکدیگر به عنوان مکان حفرات در نظر گرفته شد. با این کار شبکه‌ای معادل با عدد مختصاتی چهار یا کمتر ایجاد گردید.

آنها با این کار توانستند تراوایی مطلق و نسبی، فشار موئینگی، خواص الکتریکی و الاستیکی محیط‌های متخلخل مصنوعی ساخته شده از ماسه‌های آب‌دوست<sup>۲۹</sup> و کره<sup>۳۰</sup> و ماسه‌سنگ‌های کوارتزی سیمان شده را به خوبی محاسبه کنند. کار آنها نقطه‌ی عطفی در ایجاد یک شبکه‌ی حفرات بود؛ زیرا پیش‌بینی عظیمی از خواص جریان و انتقال برای بار نخست انجام شده بود. علاوه بر این آنان نشان دادند که ارتباط فضایی حفرات در پیش‌بینی صحیح بسیار مهم‌تر از توزیع اندازه‌ی حفرات است. استفاده از توزیع اندازه‌ی حفرات واقعی و ارتباط دادن آن به صورت نادرست به گلوگاه‌های موجود در شبکه، پیش‌بینی‌های غلطی را از تراوایی به دست می‌دهد. مشکل عمده‌ی کار آنها محدود شدن به شبکه‌ای بود که تا حد مناسبی از دانه‌های کروی هم‌اندازه تشکیل شده باشد.

کار فرن<sup>۳۱</sup> و همکاران [۴۰ و ۳۹] پیشرفت دیگری بود. آنها روش دیگری برای بازسازی زمین شناسی محیط متخلخل جهت شبیه‌سازی کره‌هایی با اندازه‌های متفاوت ارائه کردند. آنها در شبیه‌سازی فرآیند دیاژنز و تراکم مثل بریانت و همکاران عمل کردند؛ با این تفاوت که حضور و رشد رس‌ها در اطراف

### ۳- روش‌های محاسبه‌ی خواص جریان در شبکه‌ی بازسازی شده

محاسبات خواص جریان تک‌فازی مانند تراوایی مطلق را می‌توان مستقیماً روی شبکه‌ی سه‌بعدی باینری بازسازی شده انجام داد. برخی محققان با حل معادله‌ی استوکس برای جریان تک‌فازی به روش اختلاف محدود نتایجی به دست آورده‌اند که با داده‌های آزمایشگاهی هم‌خوانی دارد [۴۳ و ۴۲ و ۲۶]. منوارت<sup>۳۵</sup> و همکاران نیز از روش شبکه‌ای بولتزمان<sup>۳۶</sup> برای حل معادله‌ی استوکس استفاده کردند [۴۴]. تأثیر شبیه‌سازی ارتباط دوربرد حفرات در محاسبات تراوایی مطلق کاملاً آشکار است. زیرا روش‌های بازسازی زمین‌شناسی، مقادیر تراوایی را با تقریب خوبی پیش‌بینی می‌کنند؛ در حالی که روش‌های آماری تراوایی سنگ را بسیار کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کنند [۴۴-۴۲ و ۳۹].

روش شبکه‌ای بولتزمان را می‌توان برای حل معادلات جریان چندفازی روی شبکه‌ی سه‌بعدی باینری بازسازی شده به کار برد [۴۵-۴۷]. به دلیل حجم زیاد محاسبات، این روش به نمونه‌های بسیار کوچک محدود می‌شود و معمولاً به جای پیش‌بینی، برای فهم بهتر پدیده‌های اساسی جریان در محیط متخلخل به کار می‌رود. روش دیگر آنست که از بازسازی سه‌بعدی ساختار سنگ صرف‌نظر کرده و محاسبات تراوایی مطلق را مستقیماً روی سطح مقطع نازک دوبعدی سنگ انجام داد. لاک<sup>۳۷</sup> و همکاران [۴۸] با ثبت مساحت و محیط حفرات، توزیعی از ضریب هدایت<sup>۳۸</sup> آنها به دست آوردند. آنها با استفاده از این مقادیر بر اساس تئوری محیط مؤثر<sup>۳۹</sup>، هدایت مؤثر سنگ و در نتیجه تراوایی مطلق سنگ را روی دسته‌ای از سطح مقطع‌های نازک ماسه‌سنگی محاسبه کردند.

محاسباتی که مستقیماً روی شبکه‌ی سه‌بعدی باینری بازسازی شده انجام می‌شود (حتی محاسبات تک‌فازی) بسیار پرهزینه‌اند. یک روش فراگیر برای شبیه‌سازی جریان تک‌فازی و چندفازی روی سیستم‌های بزرگ، ایجاد شبکه‌ی معادلی از ساختار اولیه شامل حفرات و گلوگاه‌هاست و محاسبات در این شبکه در مقیاس حفره انجام می‌شود. تراوایی مطلق با این روش توسط بریانت [۳۲] به خوبی پیش‌بینی شده است. در این روش ابتدا شبکه‌ی سه‌بعدی باینری با مجموعه‌ای از حفرات و گلوگاه‌ها جایگزین می‌شود، فضاهای خالی بزرگ‌تر به صورت کره‌ای در نظر گرفته می‌شوند (حفره) و استوانه‌هایی جایگزین فضاهای خالی باریک می‌گردند (گلوگاه). سطح مشترک دو سیال در حفره‌ها

و گلوگاه‌ها دنبال می‌شود. در هر لحظه یک حفره یا گلوگاه می‌تواند پر از سیال غیرترشونده مانند نفت یا سیال ترشونده مانند آب باشد [۴۹ و ۴۰]. این روش سریع‌تر از روش‌هایی است که به بررسی مولکول‌های سیال می‌پردازند.

### ۴- کالیبره کردن<sup>۴۰</sup> شبکه‌ی ایجاد شده با استفاده از نمودار فشار موئینگی

به دلیل ارتباط تنگاتنگ نمودار فشار موئینه با نمودار توزیع اندازه‌ی حفرات، نمودار فشار موئینه به صورت تابعی از فاز ترشونده برای کالیبراسیون شبکه‌ی حفرات به کار می‌رود [۶۰]. وایز<sup>۴۱</sup> در ۱۹۹۲ از نمودار فشار موئینه و معادله‌ی لاپلاس برای به دست آوردن توزیع اندازه‌ی حفرات استفاده کرد و این شعاع‌ها را به صورت تصادفی در یک شبکه‌ی مکعبی منظم توزیع نمود. او به حذف کوچک‌ترین گلوگاه‌ها پرداخت تا جایی که توانست فشار موئینه‌ی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه را با شبکه‌ی خود به دست آورد. عدد مختصاتی این شبکه کمتر از شش به دست آمد [۶۱].

راجرمان<sup>۴۲</sup> در ۱۹۹۷ شبیه‌سازی‌هایی روی شبکه‌های مکعبی انجام داد. اما شعاع‌های گلوگاه‌ها در یک جهت با هم ارتباط فضایی داشتند<sup>۴۳</sup>. علاوه بر این گلوگاه‌هایی که به یک حفره متصل بودند نیز با هم ارتباط داشتند<sup>۴۴</sup>؛ بدین معنا که گلوگاه‌های متصل به یک حفره‌ی بسیار کوچک باید کوچک و کوچک‌تر از حفره باشند؛ در حالی که گلوگاه‌های متصل به یک حفره‌ی بزرگ باید کوچک‌تر از حفره و نسبتاً بزرگ باشند. عدم توجه به این مسأله سبب می‌شود گلوگاه‌های بسیار باریک به حفره‌های بسیار بزرگ وصل شوند و ناهمگنی محیط متخلخل بسیار زیاد و غیرواقعی گردد. هرچند ممکن است این پدیده در سیستم‌های دارای میکروتخلخل رخ دهد. آنها نتیجه گرفتند که ارتباط فضایی بین گلوگاه‌هایی که به یک حفره متصلند، نمودار فشار موئینه و نمودار تراوایی نسبی را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. با تغییر توزیع اندازه‌ی حفرات و ضرایب ارتباط فضایی مقادیر فشار موئینه اندازه‌گیری شده برای انواع خاک‌ها<sup>۴۵</sup> به خوبی پیش‌بینی شد. این شبکه‌ها برای پیش‌بینی نمودار تراوایی نسبی سیال ترشونده به کار رفتند و نتایج امیدوارکننده‌ای به دست آمد [۶۲].

فیشر و سیلا<sup>۴۶</sup> [۶۳] در ۱۹۹۹ شبکه‌ای که ایجاد کرده بودند را به روشی بسیار شبیه به روش راجرمان [۶۲] کالیبره نمودند. آنها سعی کردند داده‌های آزمایشگاهی فشار موئینگی و تراوایی نسبی

$$N_c = \frac{\mu u}{\sigma} \quad (2)$$

در جریان معمولی آب-نفت در مخزن و در نواحی دور از چاه  $N_c \approx 2 \times 10^{-7}$  است. نیروهای موئینه زمانی مؤثر واقع می‌شوند که عدد موئینگی حدود  $10^{-4}$  تا  $10^{-3}$  باشد [۶۰]. بنابراین مدل‌های شبه پایدار معمولاً دقیق هستند و می‌توانند جریان را در آزمایش‌هایی با نرخ‌های کم به خوبی مدل‌سازی کنند [۱۹ و ۴۰]. مدل‌های شبه پایدار حتی برای بررسی جریان‌های سه‌فازی نیز به کار رفته‌اند [۷۰]. اگر گرانشی زیاد باشد (جریان نفت سنگین یا پلیمر)، سرعت جریان زیاد باشد (در شکاف‌ها یا نواحی نزدیک به چاه) یا تنش میان‌روی<sup>۵۵</sup> بسیار کم باشد (تزریق سورفکتانت‌ها، تزریق امتزاجی گاز یا در مخازن گاز میعانی) عدد موئینگی زیاد خواهد بود و نمی‌توان از نیروی ویسکوز صرف‌نظر کرد [۷۱]. اگرچه گرانشی زیاد است اما اگر افت فشار (نرخ جریان) بسیار کم باشد عدد موئینگی کم است و می‌توان از مدل شبه پایدار استفاده کرد [۷۲].

## ۶- موارد استفاده از مدل‌سازی شبکه‌ی حفرات برای شبیه‌سازی

در سال‌های گذشته از مدل‌سازی شبکه‌ی حفرات برای شبیه‌سازی مسائل زیادی در مهندسی نفت و مهندسی شیمی استفاده شده است. در مهندسی شیمی بعضی انواع کاتالیزورها به صورت محیطی متخلخل هستند که واکنش شیمیایی در فضای خالی درون آنها انجام می‌شود. مدل‌سازی شبکه‌ی حفرات بر اساس شبیه‌سازی این گونه محیط‌های متخلخل نیز به کار می‌رود. بیشتر کاربردهای این روش در مهندسی نفت به منظور پیش‌بینی رفتار محیط متخلخل و متغیرهای جریان بوده اما در پاره‌ای موارد نیز شبیه‌سازی‌ها تنها به منظور بررسی پدیده‌ها یا شناخت بیشتر آنها در مقیاس حفره انجام شده است. در جدول ۱ نمونه‌هایی از این موارد به همراه نام محقق و مقاله ارائه شده است.

آب و گاز برای انواع مختلف خاک را با این روش پیش‌بینی نمایند. پیش‌بینی‌ها برای نمودار فشار موئینگی، تراوایی مطلق و تراوایی نسبی آب خوب بود. با این وجود در نمودار تراوایی نسبی گاز، اختلاف بین نمودارهای ریزش ثانویه<sup>۴۷</sup> و آشام ثالثیه<sup>۴۸</sup> کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی شده بود که حاکی از نتایج نسبتاً ضعیفی بود.

اطلاعات نمودار فشار موئینگی ممکن است برای برخی نمونه‌ها در دسترس نباشد. از طرفی توزیع اندازه‌ی حفرات به دست آمده با استفاده از نمودار فشار موئینگی یکتا نیست [۶۴] زیرا ممکن است اطلاعات چند نمودار توزیع اندازه‌ی حفرات کاملاً متفاوت به گونه‌ای در شبکه قرار گرفته باشند که یک نمودار فشار موئینگی را ایجاد کنند. یک روش جایگزین برای کالیبره کردن شبکه با استفاده از فشار موئینه آنست که اطلاعات آماری به دست آمده از سنگ به روش‌های مختلف را به حفرات و گلوگاه‌های یک شبکه‌ی منظم اختصاص داد.

تسکیر و گلو و پایتکس<sup>۴۹</sup> [۶۹] در سال ۲۰۰۰ استخراج خواص آماری از تصویر بازسازی شده را با کالیبره کردن شبکه با استفاده از نمودار فشار موئینگی در هم آمیختند. در ابتدا توزیع اندازه‌ی حفرات و اطلاعات ارتباط بین حفرات از بررسی سطح مقطع و توزیع اندازه‌ی گلوگاه‌ها از نمودار فشار موئینگی به دست می‌آید. سپس این متغیرها به همراه عدد مختصاتی حفرات آن‌قدر تغییر داده می‌شوند تا نمودار فشار موئینگی به دست آمده با مقادیر اندازه‌گیری شده برابر گردد. کارایی این روش تنها با پیش‌بینی نمودار فشار موئینگی و تراوایی مطلق سنجیده شد که هر دو به خوبی پیش‌بینی شده بودند.

## ۵- جریان شبه پایدار<sup>۵۰</sup> و دینامیک<sup>۵۱</sup>

بیشتر مدل‌های شبکه‌ی حفرات موجود، مدل‌هایی شبه پایدار هستند که در آنها فرض می‌شود نیروهای موئینه، توزیع سیال مهاجم<sup>۵۲</sup> و درجه<sup>۵۳</sup> را در شبکه کنترل می‌کنند [۵۶ و ۵۴ و ۵۲ و ۴۹ و ۴۰ و ۱۹]. در این مدل‌ها اختلاف فشاری در ورودی و خروجی به شبکه اعمال می‌شود که توزیع نهایی و پایدار سیال مهاجم در حفرات و گلوگاه‌ها را مشخص می‌کند. در این مدل‌ها به دلیل نیروهای ویسکوز، از انتشار افت فشار و حرکت سطح مشترک سیال<sup>۵۴</sup> در حفره یا گلوگاه صرف‌نظر می‌شود. حفرات و گلوگاه‌ها یک‌باره از یک سیال خالی می‌شوند و سیال دیگری آنها را پر می‌کند. نسبت نیروی ویسکوز به نیروی موئینه عدد موئینگی نام دارد [۶۰]:

۱۱ | نمونه‌هایی از شبیه‌سازی به کمک مدل‌سازی شبکه‌ی حفرات و نام محقق و مقاله‌ی مربوطه

موضوع شبیه‌سازی به کمک مدل‌سازی شبکه‌ی حفرات	نام محقق و سال انتشار مقاله یا پایان‌نامه
پیش‌بینی ویژگی‌های جریان چندفازی	ولوتن و همکاران [۲۰ و ۷۳]
شبیه‌سازی جریان سیالات غیرنیوتنی	لوپز و همکاران [۷۵ و ۷۴ و ۷۲] / سوچی و همکاران [۷۶-۷۸]
شبیه‌سازی دینامیک جریان دو فازی	الغربی و همکاران [۷۱]
شبیه‌سازی و آنالیز آشام غیرهم‌جهت <sup>۵۶</sup>	بهبهانی و همکاران [۷۹ و ۸۰]
شبیه‌سازی ساختار سنگ‌های کربناته	اکیب و همکاران [۸۱] / بواور و همکاران [۸۲]
شبیه‌سازی جریان سه‌فازی	پیری و همکاران [۸۵-۸۳ و ۷۰] / هویی و همکاران [۸۶ و ۵۶] / سویکمز و همکاران [۸۷-۸۹]
شبیه‌سازی انتقال ماده در محیط متخلخل ناهمگن	رودس و همکاران [۹۱ و ۹۰] / بیجلجیک و همکاران [۹۲ و ۹۳]
شبیه‌سازی مکانیزم‌های تولید در مخازن شکاف‌دار	لو و همکاران [۹۴] / هیوگز و بلانت [۹۵]
شبیه‌سازی پاسخ <sup>۵۷</sup> NMR در محیط متخلخل	تلبی و همکاران [۹۶ و ۹۷]
شبیه‌سازی تأثیر نرخ تزریق در فرآیند تزریق آب	ایدو و همکاران [۹۸ و ۹۹]
شبیه‌سازی سنگ‌های کربناته <sup>۵۸</sup> و سنگ‌های دارای تخلخل دوگانه	بکری و همکاران [۱۰۱ و ۱۰۰] / ایونیدیس و چتریس [۱۰۲]
شبیه‌سازی جریان گاز و گاز میعانی	بوستوس و همکاران [۱۰۳]

## نتیجه‌گیری

دقت بیشتری دارند. برای استفاده‌ی بهینه از این ابزار شبیه‌سازی، محقق باید ابتدا نسبت به ساختار محیط متخلخل مورد بررسی، شرایط فیزیکی مسأله و امکانات موجود آگاهی کامل داشته باشد و سپس متناسب با این شرایط، روش استخراج شبکه‌ی حفرات مناسب و روش انجام محاسبات را انتخاب کند. ممکن است عدم توجه به جزئیات، منجر به اتلاف وقت، انرژی و سرمایه‌ی زیادی شود که محققان آگاه با تحقیق اولیه‌ی مناسب می‌توانند از آن جلوگیری نمایند. ■

در سال‌های گذشته استفاده از مدل‌سازی شبکه‌ی حفرات در شبیه‌سازی فرآیندهای جابه‌جایی در مخزن و شبیه‌سازی مکانیزم‌های فعال در مقیاس حفره بسیار گسترش یافته است. در این مقاله مهم‌ترین تحقیقاتی که طی سالیان گذشته در زمینه‌ی مدل‌سازی شبکه‌ی حفرات انجام شده برای استفاده سایر محققان دسته‌بندی شده است. برای مدل‌سازی شبکه‌ی حفرات روش‌های متفاوتی برای انجام محاسبات استفاده می‌شود که هر کدام در شرایط خاصی

## پانویس ها

1. Coordination Number
2. Fatt
3. Chatzis and Dullien
4. Percolation theory
5. Percolation threshold
6. Invasion percolation
7. Wilkinson and Willemsen
8. Invading Fluid
9. Invasion percolation with trapping
10. Dias and Wilkinson
11. Lenormand
12. Voroni Diagram
13. Delaunay Triangulations
14. Clayley Tree
15. Jerauld and Salter
16. Pore/throat size aspect ratio
17. Saturation hysteresis
18. spatial correlation
19. Pore Size Distribution
20. Triangulation
21. Blunt and King
22. Voxel
23. X-ray microtomography
24. Thin cross section
25. Thresholded Gaussian field techniques
26. Simulated annealing
27. Bryant
28. Complimentary image
29. Water-wet Sand Pack
30. Sphere Pack
31. Øren
32. Fontainbleau
33. Bentheimer
34. Biswal
35. Manwart
36. Lattice Boltzmann
37. Lock
38. Conductance coefficient
39. Effective medium theory
40. Calibration
41. Wise
42. Rajarman
43. Directional correlation
44. Cross correlation
45. Unconsolidated soils
46. Fischer and Celia
47. Secondary Drainage
48. Tertiary imbibition
49. Tsakiroglou and Paytakes
50. Quasi-Static
51. Dynamic
52. Invading fluid
53. Defending fluid
54. Fluid-fluid interface
55. Interfacial tension
56. Counter-Current Imbibition
57. NMR response
58. Vuggy carbonates

## منابع

مقاله‌ی حاضر ۱۰۳ منبع مختلف دارد که ذکر مشخصات آنها در اینجا ممکن نیست. خوانندگان علاقمند می‌توانند عناوین این مقالات را از دفتر ماهنامه دریافت کنند.