

## شبیه‌سازی سه‌بعدی حفره‌مقیاس جریان سیال در محیط متخلخل به منظور برداشت صیانتی از منابع نفت و گاز کشور: تحلیل و اعمال فناوری برتر

علی‌اکبر کاکویی<sup>۱\*</sup>، علی وطنی<sup>۲</sup>، محمد محمدی خان‌آپشتانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> مدرس و پژوهشگر، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

alia.kakouei@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

avatani@ut.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده فنی فومن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

muhammadi\_mu@ut.ac.ir

**چکیده:** متخصصان حوزه نفت و گاز نظیر مهندسان مخازن، زمین‌شناسان و ژئوفیزیکدان‌ها دریافته‌اند که حصول حداکثر بازدهی تولید برای موفقیت در آینده صنعت نفت و در نتیجه تنظیم میزان عرضه و تقاضا امری ضروری است. در این راستا، لزوم بهبود بازیابی حجم عظیمی از نفت و گاز باقی‌مانده در مخازن هیدروکربوری، در کنار رقابت جهانی برای تولید بیشتر، ضرورت عملیات مدیریت مخازن و اهمیت تعیین دقیق راهبرد تولید را مشخص می‌سازد. از این رو توجه ویژه به آینده‌پژوهی توسعه فناوری‌های مرتبط، منجر به تولید صیانتی و هرچه هدفمندتر شدن این منابع می‌شود. در این راستا، با دستیابی به درک درست و دقیق‌تر از جریان سیال در محیط متخلخل حین برداشت از ذخایر هیدروکربوری، از مسائل حائز اهمیت در تولید صیانتی در صنعت نفت و گاز کشور است. در این تحقیق، فناوری‌های مختلف در شبیه‌سازی جریان در محیط متخلخل مورد تحلیل قرار گرفته و اعمال فناوری برتر شبیه‌سازی شبکه بولتزن با استفاده از توموگرافی اشعه ایکس که در سال‌های اخیر توانسته است توجه جامعه علمی را در حوزه دینامیک سیال محاسباتی به خود جلب کند، نمایش داده شده است. به این منظور، هندسه محیط متخلخل با استفاده از یک فایل متنی وارد کد محاسباتی گردید و جریان حفره‌مقیاس گاز طبیعی با استفاده از مدل شبکه بولتزن با زمان بازآرایی چندگانه، به‌طور مستقیم روی هندسه سه‌بعدی حل شد. به این ترتیب تراوایی نمونه محیط متخلخل حاضر، در نسبت فشارهای مختلف محاسبه شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی و عددی ارائه شده در متون فنی مرتبط، تطابق رضایت‌بخشی را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** شبیه‌سازی حفره‌مقیاس جریان، محیط متخلخل، برداشت صیانتی، شبکه بولتزن، فناوری برتر.

## ۱. مقدمه

جهانی است به‌گونه‌ای که مراکز سرآمد، رویکرد مناسبی برای کسب، انتقال، بهره‌برداری و توسعه فناوری انتخاب کرده‌اند. با نگاهی بر سیر مفهومی و زمانی تغییرات الگوهای مختلف تولید در سطح جهانی با لحاظ نمودن فناوری، روشن می‌شود که روند تغییرات در چهار مرحله قابل جمع‌بندی است: تولید معیشتی، تولید انبوه، تولید ناب و تولید چابک.

در مرحله نخست، فناوری به‌صورت سخت‌افزاری و به فرم بسیار ساده و اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مرحله دوم، فناوری در طراحی و ساخت واحدها و فرایندهای تولید نقش بارزتری نسبت به الگوی معیشتی دارند. مبنای مرحله سوم، کمترین ضایعات در فرایند تولید است و در نتیجه فناوری اهمیت برجسته‌تری را نسبت به شرایط الگوی تولید انبوه پیدا می‌کند. اینجاست که یکی از مصادیق مورد مذکور، در توسعه فناوری‌های مرتبط با تولید و ازدیاد برداشت صیانتی، به‌جای اتخاذ سیاست افزایش برداشت صرف از مخازن هیدروکربوری کشور است. در مرحله چهارم که پارادایم حاکم بر نگاه‌های تولید در سطح رقابت جهانی است، الگوی تولید چابک مطرح است که اهمیت فناوری بسیار برجسته‌تر شده است.

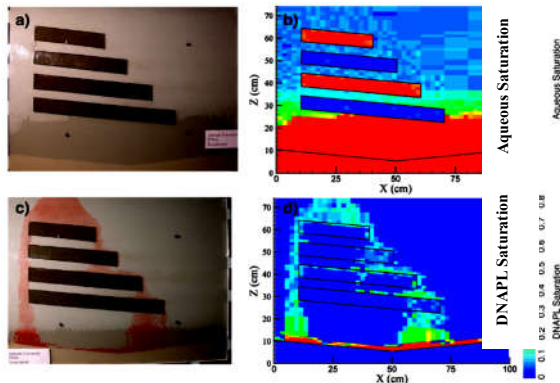
در این تحقیق، با توجه به تمرکز بر موضوع تولید صیانتی و نقش فناوری‌های مربوط در تحول صنعت نفت، یکی از مواردی که در چشم‌انداز صنعت نفت کشور در افق ۱۴۰۴ و برگرفته از قابلیت‌ها، امکانات، ارزش‌ها، آرمان‌ها و نیات راهبردی کشور و برنامه‌های دولت و مصوبات مجلس و نیازهای جامعه به‌صورت ذی‌نفعان کلان این بخش است، توجه اساسی به ضریب ازدیاد برداشت صیانت‌شده از مخازن و میادین بزرگ کشور، و همچنین توجه ویژه به فاصله سطح فناوری کشور با برترین‌های جهان و بررسی آینده‌پژوهانه فاصله و شکاف در آینده است. یکی از حوزه‌های فناورانه دارای قابلیت تأثیر مستقیم بر عملکرد برداشت از منابع هیدروکربوری کشور، پایش و شبه‌سازی جریان سیال در محیط متخلخل و بررسی‌هایی است که به‌منظور آشکارسازی این محیط و جریان عبوری از آن صورت می‌گیرد، که اکثراً شامل اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم (مثلاً استفاده از پرتو ایکس و تصویربرداری) و یا اندازه‌گیری‌های مستقیم محدود به چند نقطه هستند.

بررسی روند توسعه فناوری در این زمینه با استفاده از ابزار تحلیل پتنت که در ادامه بدان پرداخته شده است، حاکی از این واقعیت است که برای اندازه‌گیری‌های مستقیم در نقاط محدود، یک روش متعارف استفاده از یک ردیاب در چاه تزریقی و لحظه رسیدن آن به چاه تولیدی است؛ هرچند در این روش پیش‌بینی رفتار سیالات در محیط

نفت و گاز همواره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نیازهای امروز بشر مطرح بوده و بسیاری از روابط و سیاست‌گذاری‌های کشورها نیز تحت‌تأثیر آن صورت می‌پذیرد. این حوزه در کشور ما علاوه بر تأمین نیازهای رفاهی و نیز ایفای نقش به‌عنوان نهاد تولید در بخش‌های مختلف اقتصادی، دو کارکرد مهم دیگر نیز برای جمهوری اسلامی ایران داشته است. در وهله اول، ثبات، رونق و رشد در حوزه نفت و گاز که زمینه‌ساز رشد اقتصادی در سایر بخش‌ها، و از سوی دیگر تبادل‌های حامل‌های انرژی که وسیله‌ای برای توسعه روابط بین‌المللی و تقویت‌کننده امنیت ملی است. در این راستا، تعیین و حفظ یک موقعیت بهینه را باید از مهم‌ترین سیاست‌های راهبردی کلان کشور برشمرد. توسعه صنعت نفت برای کشورمان ایران که دارای ۳۳ تریلیون مترمکعب ذخایر متعارف گاز طبیعی و ۱۵۷ میلیارد بشکه ذخایر قابل برداشت نفت خام است، اهمیت ویژه‌ای دارد. این اهمیت زمانی دوچندان می‌شود که به این نکته توجه کنیم که بر مبنای برآوردها، تنها کشوری هستیم که می‌تواند ۱۵۰ سال به‌طور مستمر به جهان عرضه نفت داشته باشیم و این ویژگی فقط مختص ایران است. این در حالی است که ذخایر اثبات‌شده عربستان بیشتر از ذخایر اثبات‌شده ایران است، با این تفاوت که برداشت دولت عربستان از منابع هیدروکربوری خود، بیش از ۱۰ تا ۱۱ میلیون بشکه است. همچنین روسیه نیز ذخایر و میزان برداشت بالایی داشته، اما نمی‌تواند عمر بالایی در عرضه نفت داشته باشد. به‌عبارت دیگر، اقتصاد کلان ایران به صنعت بالادستی، به‌عنوان یکی از مسیرهای فائق آمدن بر فشارها و نیل به توسعه پایدار می‌نگرد؛ لذا هر راهبردی که به ارتقای کارایی و اثربخشی این صنعت منجر شود، به تحقق اقتصاد مقاومتی در سطح ملی یاری می‌رساند. یکی از سناریوهای اصلی در این حوزه پیش‌بینی می‌کند که تقاضای جهانی نفت تا سال ۲۰۴۰ در حدود ۲۵٪ افزایش خواهد یافت. از بین مصرف‌کنندگان مختلف، بیشترین رشد تقاضا در حدود ۴۴٪ بوده و متعلق به بخش حمل‌ونقل خواهد بود.

به‌منظور دست‌یابی به توسعه پایدار صنعت نفت کشور، نیازمند تغییر پارادایم توسعه در این صنعت هستیم؛ زیرا امروزه یکی از ابعاد مهم در توسعه و ارزیابی شرایط محیط رقابتی صنعت مورد مطالعه قرار می‌گیرد، مباحث مربوط به تحقیق، پژوهش، فناوری و نوآوری است. در این راستا الگوهای مختلفی برای چگونگی تولید، توسعه فناوری و سازمان‌دهی آن مطرح است که با مرور کوتاه در سیر تحول تاریخی و مفهومی این مدل‌ها، چگونگی روندهای آینده نمایان می‌شود. پشتوانه طراحی هر یک از مدل‌ها، مکاتب فکری مختلف توسعه در سطح

می‌توان بر اساس میزان تابش پرتو گاما، سیالات مختلف را از یکدیگر تشخیص داد (شکل ۲).



شکل (۲): تصویر تهیه شده توسط اشعه گاما (سمت چپ) و تعیین اشباع فازهای آبی و آلی به ترتیب بالا و پایین (سمت راست) [۲]

عکس برداری با استفاده از پرتو گاما، توانایی تصویربرداری از نمونه‌های با اندازه بزرگ‌تر (از چند سانتی‌متر تا چندین متر) را دارد. دیگر مزیت عمده این روش این است که مجموعه داده‌های تخلخل و اشباع سیالات نسبت به سایر روش‌ها از دقت بیشتری برخوردار است. در مقابل، یکی از محدودیت‌های این روش، تأخیر در به دست آوردن جواب است، به طوری که حتی برای تعیین یک سیگنال (حدود یک سانتی‌متر مربع) به زمان حدود ۴۵ ثانیه نیاز دارد و برای حالتی که جریان به شرایط پایدار نزدیک می‌شود، این روش در تحلیل‌ها ممکن است با خطا همراه شود [۳].

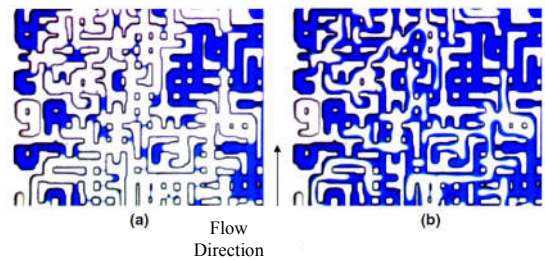
### ج. روش توموگرافی اشعه ایکس

در این روش، با استفاده از جذب اشعه ایکس تابیده شده به محیط متخلخل می‌توان رفتار سیالات درون این محیط را آشکار ساخت. در واقع موادی که جرم اتمی بالاتری دارند، میزان جذب بیشتری از اشعه ایکس را داشته و هنگامی که موادی با اختلاف چگالی قابل توجهی درون محیط متخلخل حضور داشته باشند، تشخیص آن‌ها با استفاده از این روش راحت‌تر خواهد شد. مطابق شکل زیر، اشعه ایکس عبوری توسط سینتیلاتور تک‌کریستاله به نور مرئی تبدیل شده و بر روی سطحی آشکار می‌شود، و سپس با یک دوربین با کیفیت بالا تصویربرداری می‌شود. با استفاده از اشعه ایکس می‌توان به ساختار محیط متخلخل، توزیع سیالات درون محیط متخلخل در مقیاس حفره، توزیع کلئیدهای درون حفره و شناسایی میان رویه سیالات و جبهه حرکت آن رسید.

متخلخل، برهم کنش سیال-سطح و ویژگی‌های محیط متخلخل امکان‌پذیر نیست و تنها می‌توان به یک دید کلی دست یافت که محدودیت این دیدگاه را آشکار می‌سازد. در مقابل، چهار دیدگاه پایش غیرمستقیم جریان و تصویربرداری از محیط متخلخل، شامل تصویربرداری نوری با استفاده از اشعه UV یا نور مرئی، تابش انرژی گاما، میکروتوموگرافی X-ray و تصویربرداری رزونانس مغناطیسی (MRI) و رزونانس مغناطیسی هسته‌ای (NMR) می‌باشد که در ادامه به اجمال بررسی شده‌اند.

### الف. روش نوری<sup>۱</sup> (UV و مرئی)

ساده‌ترین روش تصویربرداری محیط متخلخل، عکس برداری مستقیم نوری است؛ البته استفاده از این روش مستلزم این است که محیط متخلخل با عکس برداری نوری قابل مشاهده باشد که یک مثال آن میکرومدل شیشه‌ای است که نمونه‌ای از تصاویر مربوط در شکل (۱) نشان داده است. معمولاً محیط متخلخل مورد مطالعه، ساختاری ساده و دوبعدی داشته و جریان سیالات، به دام افتادگی فازی، جابه‌جایی کلئیدی و واکنش‌های سطح سیال را می‌توان با این روش مطالعه کرد.



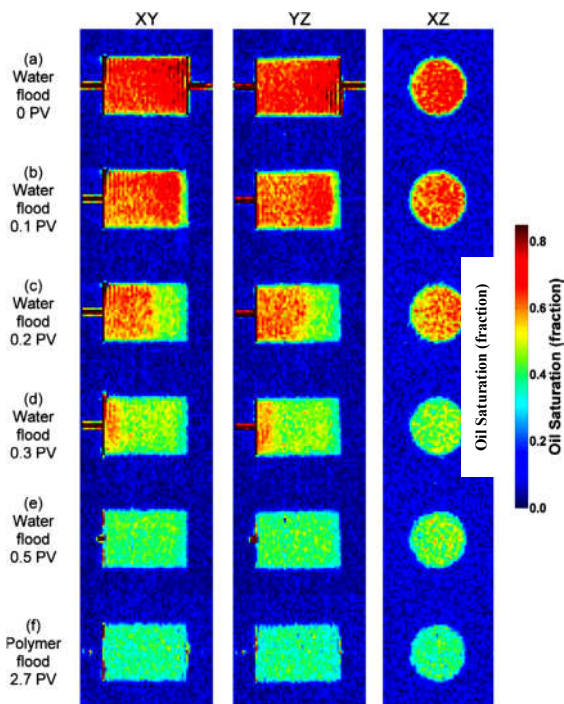
شکل (۱): تصویربرداری با نور مرئی از میکرومدل شیشه‌ای [۱]

مزیت این روش تصویربرداری محیط متخلخل، هزینه پایین، درجه تفکیک و سرعت بالای آن است. مهم‌ترین محدودیت این روش این است که مدل محیط متخلخل (معمولاً دوبعدی) در این روش بایستی بسیار ساده و گاه دور از واقعیت باشد. همچنین از آنجا که محیط متخلخل در این روش شیشه‌ای است، اعمال شرایط مخزنی (فشار و دمای بالا) با محدودیت روبه‌روست.

### ب. روش پرتو گاما

با تابش مستقیم پرتو گاما به یک قسمت معمولاً کوچک از محیط متخلخل (۱×۱ سانتی‌متر مربع) و سیالات در حالت جریان در دو بعد و دریافت این امواج در سمت دیگر نمونه، می‌توان مناطق حضور سیال را از طریق بالاتر بودن شدت تابش گاما عبوری تشخیص داد و به توزیع سیالات در بخش مورد مطالعه رسید. البته با این روش

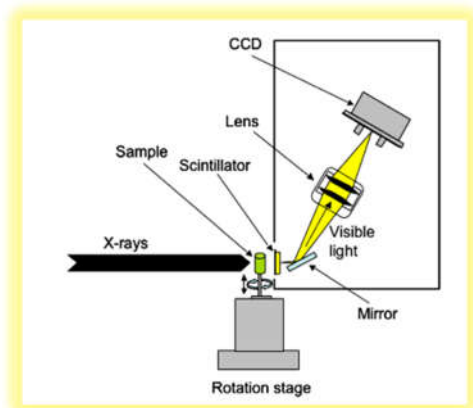
پارامغناطیس (اتم مستعد مغناطیسی) است، به کمک یک میدان خارجی قابل شناسایی می‌شود. میدان خارجی اعمال‌شده باعث می‌شود تا زمان‌های بازآرایی<sup>۲</sup> پروتون‌های موجود در سیال به‌اندازه کافی کم شود تا تصاویر تهیه‌شده بتواند اختلاف قابل قبولی بین قسمت‌های حاوی ردیاب با سایر قسمت‌ها نشان دهد (شکل ۵).



شکل (۵): نمونه‌ای از تصاویر تهیه‌شده با روش NMR [۶]

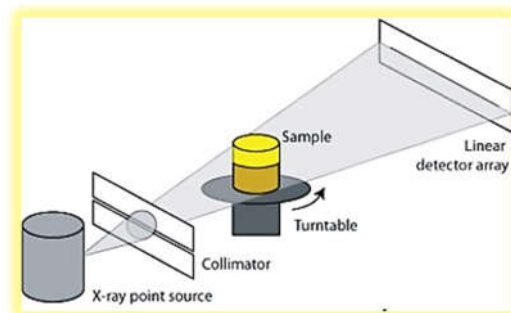
در سال ۱۹۹۱، گویلو و همکاران اولین کسانی بودند که به مطالعه پخش ردیاب حاوی منگنز ( $Mn^{2+}$ )، که درون سیال آبی استفاده شده بود، در محیط متخلخل حاوی دانه‌های شیشه‌ای با استفاده از NMR پرداختند [۷]. محققان مختلفی در سال‌های بعد با استفاده از این روش پدیده انگشتی شدن<sup>۳</sup> [۸]، تشخیص آلودگی‌های زیست‌محیطی مغناطیسی [۹]، تخمین تراوایی و ترشوندگی سطوح محیط متخلخل را مطالعه کردند [۱۰-۱۲].

گایگالاس و همکاران در سال ۱۹۸۸ با استفاده از تصویربرداری رزونانس مغناطیسی (MRI) به آشکارسازی جریان آب درون محیط متخلخل پرداختند [۱۳]. با استفاده از این آنالیز می‌توان پارامترهای مختلفی چون اشباع سیالات درون محیط متخلخل سه‌بعدی، مسیرهای عبور جریان و رسوب درون محیط متخلخل را بررسی کرد [۱۴-۱۶]. در این روش می‌توان میدان مغناطیسی خارجی را طوری تنظیم کرد که تنها به ماده خاصی حساس باشد که این مورد یکی از مزیت‌های مهم



شکل (۳): طرح‌واره دستگاه اشعه ایکس [۴]

از آنجا که اشعه ایکس تابیده‌شده بسیار باریک و کوچک است، به‌منظور به‌دست‌آوردن توزیع سه‌بعدی و جامع محیط متخلخل، نمونه مورد نظر با زاویه حدود ۱ درجه چرخیده و مجدداً پویش توموگرافی انجام می‌گیرد؛ زمانی که پویش ۳۶۰ درجه‌ای تکمیل شد، اشعه ایکس در راستای طولی در حدود ۱ میلی‌متر پایین می‌آید و دوباره نمونه را به صورت ۳۶۰ درجه‌ای پویش می‌کند. بنابراین تصاویر متعددی در قالب لایه‌های تصویربرداری شده برای فراهم نمودن توزیع سه‌بعدی محیط متخلخل تولید و مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۴).



شکل (۴): تهیه تصویر ۳۶۰ درجه به کمک اشعه ایکس [۵]

این روش تصویربرداری که نسبت به سایر روش‌ها دارای برتری قابل توجهی است، دارای درجه تفکیک بالا در محدوده ۱ تا ۱۰ میکرون و در موارد گزارش‌شده در تحقیقات اخیر، تا مقیاس نانو است، در نتیجه می‌توان با این روش شبکه حفرات را با دقت مناسبی مدل‌سازی کرد. این روش نیازمند دسترسی به تابش سینکروترون (دستگاه تقویت و تسریع ذرات باردار الکترونی) است و نمونه نیز می‌تواند حداکثر تا ابعاد چند سانتی‌متر بزرگی داشته باشد.

### د. روش آنالیز NMR<sup>۱</sup>

در این روش، حرکت و پخش شدن سیالی که حاوی ردیاب

2. Relaxation Time  
3. Fingering

1. Nuclear Magnetic Resonance

جدول (۱): مقایسه روش‌های تصویربرداری از محیط متخلخل

روش	کاربرد	مثال‌ها
		مقیاس، ابعاد (تفکیک)، حداقل زمان
نوری	اشباع فازها	حفره، $10^2 \text{ mm}^3$ ( $0.7^2 \mu\text{m}^2$ )، $400$ [۲۱]
	جریان	مغزه، $260 \times 600 \times 20$ ( $0.5^2$ )، $20$ [۲۲] مغزه، $0.2 \times 0.18 \times 0.13$ ( $0.3^2$ ) [۲۳]
گاما	منش‌نمایی	مغزه، $30 \text{ mm}^3$ ، $45$ [۳]
	اشباع فازها	مغزه، $30 \text{ mm}^3$ ، $45$ [۲۴، ۲]
اشعه X	منش‌نمایی	حفره، $10^2 \text{ mm}^3$ ( $10-1$ $\mu\text{m}$ )، $900$ [۲۵]
	اشباع فازها	حفره، $10^2 \text{ mm}^3$ ( $10-1$ $\mu\text{m}$ )، $900$ [۲۶]
MRI	منش‌نمایی	حفره، $39^2 \text{ mm}^3$ ( $0.15^2$ )، - [۲۷]
	اشباع فازها	مغزه، $120 \times 240 \text{ mm}^2$ ( $1.875 \times 2.25$ )، $2 \times 12$ [۱۴]
	جریان	مغزه، $12 \times 25 \times 1.875 \text{ mm}^3$ ، $2$ [۲۸]

## ۲. توموگرافی اشعه ایکس

با توجه به مزیت فناوری پویش توموگرافی اشعه ایکس و امکان دستیابی به درجه تفکیک بالا در تصویربرداری از محیط متخلخل، که در ارزیابی‌های سنگ واقعی مخزن به‌شدت مورد نیاز است، در این تحقیق از این روش به‌منظور تصویربرداری محیط متخلخل و جریان سیال مورد مطالعه، در قالب به‌کارگیری یکی از فناوری‌های نوین در تحلیل‌های مرتبط با محیط متخلخل استفاده شده است. هندسه مورد استفاده در این مقاله بر اساس یک نمونه سنگ به همراه نتایج تجربی مبتنی بر تحقیقات انجام‌شده توسط دانگ ایجاد شده است [۲۹]. ساختار این نمونه توسط اشعه ایکس عکس‌برداری شده و هندسه آن به‌صورت یک فایل دودویی ارائه شده است. در شکل (۶)، تصویر نمونه سنگ مذکور که از جنس ماسه‌ای است، نشان داده شده است [۲۹]. درجه تفکیک این تصویر  $8/638$  میکرومتر و دارای ابعاد مکعبی  $300^3$  بوده و در قالب فایل دودویی ارائه شده است. در این فایل متنی، یک ناحیه جامد (با کد ۱) و حفره (با کد صفر) تعریف می‌شود. تخلخل این نمونه سنگ ۱۴٪ است. با توجه به زمان‌بر بودن محاسبات شبیه‌سازی جریان سیال در نمونه با ابعاد ذکرشده، یک قسمت مکعبی از نمونه فوق با ابعاد  $50^3$  انتخاب شده است. برنامه‌ای بر اساس روش میان‌مقیاس شبکه بولتزمن، به‌منظور تحلیل دینامیکی جریان در محیط متخلخل مورد نظر در محیط ++C نوشته شده است که این فایل را به فرمت قابل استفاده برای کتابخانه محاسباتی این کد متن‌باز با نام Palabos تبدیل کند.

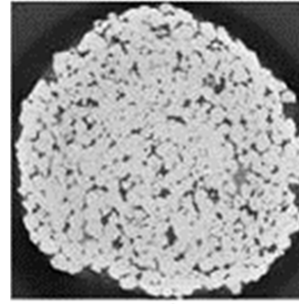
این روش محسوب می‌شود. همچنین با استفاده از این روش می‌توان تصاویری با درجه تفکیک مناسب و سرعت بالا به همراه ثبت اثرات انتقالی (تابع زمان) تهیه کرد. مهم‌ترین نقطه‌ضعف این روش این است که سیگنال MRI علاوه بر مواد پارامغناطیسی، توسط مواد فرومغناطیسی نیز تضعیف می‌شود؛ بنابراین تا حد ممکن، محیط متخلخل نبایستی حاوی مواد فرومغناطیسی چون دانه‌های شیشه، سیلیکا، ژل، ماسه کواترز و مواد آهکی و کربناته باشد. همچنین هزینه استفاده از این روش بالا بوده و استفاده از آن نیز به‌سادگی میسر نیست.

علاوه بر روش‌های متعارف یادشده، روش‌های دیگری مانند آنالیز صوتی نیز می‌تواند برای آشکارسازی جریان در محیط متخلخل به کار رود. در سال ۱۹۸۴، باکری و همکاران با اندازه‌گیری زمان و سرعت صوت، جریان سیال را درون محیط متخلخل حاوی دانه‌های شیشه‌ای مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. با قرار دادن فرستنده‌ها و گیرنده‌ها در مقاطع عرضی مختلف محیط متخلخل، زمان عبور موج صوتی اندازه گرفته می‌شود. به‌علاوه، از سال ۲۰۱۳ روش فلورسانس اشعه ایکس<sup>۱</sup> که به‌اختصار XRF خوانده می‌شود، از سال ۲۰۱۳ به‌طور ویژه مورد توجه محققان حوزه نفت قرار گرفته است [۱۷ و ۱۸]. این روش که برای شناسایی عناصر موجود در نمونه به کار می‌رود، می‌تواند نمونه‌های بزرگ را با تفکیک بالا و بدون آسیب اسکن نماید؛ لذا استفاده از آن در حوزه دیرین‌شناسی نیز رو به افزایش است [۱۹]. ماهیت عنصرشناسی روش مذکور برخی محققان را به‌سمت توسعه روابط تجربی برای تعمیم نتایج این روش برای کانی‌شناسی سوق داده است [۲۰]، اما به‌طور کلی در مواردی نظیر مخازن بسیار کم‌تراوا که سنگ مخزن از لحاظ کانی‌شناسی پیچیدگی بالایی دارد، روش XRF در کنار سایر روش‌ها می‌تواند نقشی کلیدی را بر عهده بگیرد.

در جدول (۱)، مقایسه‌ای بین روش‌های یادشده بر مبنای کاربرد آن‌ها در شناسایی فضای متخلخل و اشباع سیالات موجود در آن انجام گرفته است. شایان ذکر است این روش‌های تصویربرداری قابلیت‌های دیگری نیز دارند. بر اساس توانمندی‌های روش توموگرافی اشعه ایکس به‌خصوص قابلیت ارائه تصویر سه‌بعدی با قدرت تفکیک بالا [۴]، در ادامه روش فوق‌الذکر بررسی شده و در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

حفره و گلوگاه شبیه‌سازی و ساده‌سازی می‌کند. این منطبق به‌رغم ساده نمودن محاسبات در هندسه‌های پیچیده، ساختار واقعی محیط را به حالتی ساده و غیرواقعی تغییر می‌دهد. از مطالعات انجام‌شده در این زمینه می‌توان به پژوهش‌های بریانت و همکاران در سال ۱۹۹۳ و جدیدتر اشاره کرد [۳۷ و ۳۸]. در مجموع در ارتباط با روش‌های ذکرشده می‌توان بیان کرد که این روش‌ها برای مطالعه دقیق جریان سیال در یک محیط متخلخل واقعی با هندسه پیچیده و با هدف بررسی خواص میکروسکوپی و در نهایت رسیدن به درک درست هیدرودینامیک جریان سیال مناسب نیستند؛ زیرا در این روش‌ها از فرض پیوسته بودن محیط استفاده شده و در نتیجه صرفاً برای مطالعات جریان سیال در مقیاس بزرگ کاربرد داشته و مناسب‌اند.

از آنجایی که فهم و شبیه‌سازی خواص مطلوب ریزمقیاس جریان سیال در محیط متخلخل در تعیین ویژگی‌های ماکرو مورد نظر حائز اهمیت است، مدل‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌های عددی با توجه به رویکرد دوم ذکرشده در بالا می‌بایست در مقیاس حفرات (ریز مقیاس یا میان مقیاس) انجام شود. در این قسمت، دسته‌ای از تحقیقات در مقیاس مولکولی، به بررسی و ردیابی حرکت و برخورد انفرادی هر مولکول می‌پردازد که روش‌های دینامیک مولکولی، شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو و دینامیک ذره پراکنده از نمونه‌های آن در این زمینه است. البته باید خاطرنشان شود که زمان محاسباتی روش‌های مولکولی زیاد بوده و از طرف دیگر تعداد مولکول‌های مورد مطالعه نیز محدود است. از مطالعات اخیر در این زمینه می‌توان به تحقیق گانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ اشاره کرد که از این روش به همراه روش شبکه بولتزمن به‌صورت توأمان استفاده شده و به تلاش برای مرتفع کردن محدودیت‌های موجود در شبیه‌سازی جریان سیال در یک سامانه سیال-جامد واقعی پرداخته شده است [۳۹]. گفتنی است که این روش‌ها کمتر در بررسی جریان سیال در زیر زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ زیرا دقت در حد مولکولی در این مطالعات اولویت ندارد. برای رفع این محدودیت‌ها، به‌جای در نظر گرفتن هر مولکول به‌صورت انفرادی، گروهی از آن‌ها در غالب اجزای سیال در مقیاس مزوسکوپی مورد بررسی قرار می‌گیرند. این دیدگاه حد فاصل دیدگاه بزرگ مقیاس و دیدگاه مولکولی بوده و بر مبنای علم مکانیک آماری استوار است. با استفاده از این دیدگاه و توسط نگاه آماری مورد استفاده در آن، رابطه‌ای بین کمیت‌های ریزمقیاس و درشت‌مقیاس برقرار می‌شود. از روش‌هایی که با توجه به این دیدگاه در چند سال اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته و در حال توسعه و کاربرد در زمینه مطالعه جریان سیال در محیط متخلخل است، روش شبکه



شکل (۶): برشی از تصویر توموگرافی اشعه ایکس از نمونه سنگ ماسه‌ای

### ۳. روش شبکه بولتزمن

در شبیه‌سازی جریان سیال در محیط متخلخل، توسعه و ارائه روشی کاربردی و عددی در تحلیل مسائل مربوط به رفتار ریزمقیاس جریان‌های سیال در محیط‌های ناهمگون در چند بعد حائز اهمیت است. در این راستا مقیاس‌های بررسی رفتار جریان در محیط متخلخل در در سه حالت مولکولی (ریز مقیاس یا میکروسکوپی)، بین مولکولی (میان مقیاس یا مزوسکوپی) و هیدرودینامیکی (بزرگ مقیاس یا ماکروسکوپی) عنوان شده است [۳۴]. بر اساس این مقیاس‌ها و نیز رویه‌های دینامیکی مرسوم در بررسی رفتار جریان (چند جرمی، سینتیکی و هیدرودینامیکی)، دو رویکرد کلی در شبیه‌سازی در مطالعات قابل مشاهده است. رویکرد اول مبتنی بر اعمال فرض پیوستگی محیط و رویکرد دوم بر مبنای فرض ناپیوستگی محیط استوار است. به این ترتیب با توجه به رویکرد اول، خصوصیات محیط با توجه به دیدگاه هیدرودینامیک (ماکرو) مورد مطالعه قرار گرفته و از روش‌ها و مدل‌های عددی پرکاربرد در این راستا می‌توان به روش‌های مرسوم دینامیک سیال محاسباتی شامل المان محدود، اجزای محدود و حجم محدود اشاره کرد.

روش المان یا اجزای محدود نیازمند کتابخانه‌های عددی و شبکه گسترده محاسباتی است که مدل‌سازی‌ها با این روش را زمان‌بر و هزینه‌بر کرده است. از نمونه کارهای انجام‌شده برای حل معادله ناویه-استوکس با این روش می‌توان به تحقیق سایگر و همکاران در سال ۱۹۹۵ اشاره کرد. از طرف دیگر روش تفاضل محدود با وجود سادگی اجرا، از دقت کافی در محاسبات مربوط به مدل‌سازی جریان در محیط پیچیده متخلخل برخوردار نیست (به دلیل وجود مرزهای کاملاً پیچیده حفرات در یک محیط متخلخل واقعی). از نمونه کارهای انجام‌شده با این روش می‌توان به شبیه‌سازی جریان سیال در یک هندسه پیچیده توسط آدلر و همکاران در سال ۱۹۹۰ اشاره کرد [۳۵ و ۳۶]. همچنین مدل‌سازی شبکه حفرات رویکردی مشابه دو روش ذکرشده در مدل‌سازی‌ها داشته است. به‌طوری که فضای حفرات را به‌صورت

بولتزمن می‌باشد که روش مورد استفاده در این مطالعه نیز انتخاب شده است [۴۰، ۴۱ و ۴۲].

استفاده از روش شبکه بولتزمن در این تحقیق، به‌عنوان نوآوری اصلی پژوهش حاضر در نظر گرفته شده است. به‌عبارت دیگر، این روش میان‌مقیاس، در زمره روش‌های نوین دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی میدان جریان سیال است که برای اولین بار در ایران به‌منظور دستیابی به ارزیابی صحیح‌تر میزان تولید نفت و گاز و برنامه‌ریزی برداشت بهینه و صیانتی از مخازن زیرزمینی کشور مورد استفاده قرار گرفته است. در روش‌های کلاسیک دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی عددی جریان سیال، معادلات بقای جرم، ممتوم و انرژی با دیدگاه بزرگ‌مقیاس حل می‌شدند. اما در روش‌های ذره‌منا، فرایندهای برخورد و انتشار ذرات سیال میان‌مقیاس مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نتیجه می‌توان با استفاده از کمیت‌های مزوسکوپی، به تخمین درستی از پارامترهای بزرگ‌مقیاس نظیر فشار، سرعت، چگالی و تراوایی دست یافت. الگوریتم شبکه بولتزمن را می‌توان به این صورت خلاصه کرد: ۱. خواص سیال در یک شبکه گسسته نگاشته می‌شود. ۲. حالت فیزیکی سیال در هر نقطه از شبکه با استفاده از تابع توزیع ذره بیان می‌شود. ۳. فرایند برخورد ذرات در مقیاسه با حالت تعادل محاسبه می‌شوند. ۴. انتشار ذرات با در نظر گرفتن جهت‌های سرعت شبکه صورت می‌پذیرد. ۵. کمیت‌های ماکروسکوپی سیال (سرعت، فشار، چگالی) با توجه به تابع توزیع ذرات در نقاط شبکه محاسبه می‌شوند [۳۰]. روش شبکه بولتزمن بر مبنای حل معادله گسسته بولتزمن با مدل‌های برخورد مختلف استوار است. این معادله در حالت پیوسته همانند معادله ناویر-استوکس، دارای حل پیچیده و دشواری است. در نتیجه برای حل این معادله می‌بایست از فرض‌های ساده‌کننده و همچنین گسسته‌سازی‌های عددی استفاده کرد [۳۱]. یکی از این فرض‌ها، ساده‌سازی عملگر برخورد این معادله است که تابعی غیرخطی از تابع توزیع احتمال ذره می‌باشد. یکی از این ساده‌سازی‌های مشهور و پرکاربرد در سال ۱۹۵۴ توسط پاتانگار، گروس و کروک ارائه و به تقریب BGK معروف شده است. با استفاده از این تقریب، تابع توزیع احتمال، بعد از هر برخورد، با استفاده از یک ثابت زمانی به سمت تابع توزیع تعادلی میل داده می‌شود و مقدار این ثابت نیز با کمیت  $\tau$ ، معروف به «زمان بازآرایی» و یا زمان آرامش، از طریق روابط ذیل وارد محاسبات می‌گردد [۳۱]. در این مقاله مدل برخورد با زمان بازآرایی چندگانه (MRT) مورد استفاده قرار گرفته است. معادله بولتزمن در معادله (۱) آورده شده است.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + c \cdot \nabla f = \Omega \quad (1)$$

طرف چپ معادله بیانگر پدیده انتشار ذرات و طرف راست معادله فوق شامل عبارتی است که پدیده برخورد را لحاظ می‌کند. پارامتر  $c$  نیز بیانگر سرعت انتشار است. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، می‌توان طرف راست معادله فوق را بر اساس مدل‌هایی مانند BGK ساده‌تر کرده و حل نمود. در این صورت عبارت حاوی پدیده برخورد در معادله بولتزمن به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$f_i(\bar{x} + c\delta_i, t + \delta_i) - f_i(\bar{x}, t) = \frac{1}{\tau_f} (f_i^{eq} - f_i) \quad (2)$$

که در این رابطه،  $f_i^{eq}$  معرف تابع توزیع تعادلی و  $\tau$  نیز بیانگر زمان بازآرایی است. به‌دلیل اینکه در مدل تقریبی BGK تنها از یک زمان بازآرایی ( $\tau$ ) استفاده شده است، به آن مدل با زمان بازآرایی منفرد<sup>۱</sup> (SRT) نیز می‌گویند. این مدل به‌رغم اینکه قادر است که دامنه گسترده‌ای از مسائل دینامیک سیالات محاسباتی را حل کند اما دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد (رابطه ۳). به‌عبارت دیگر، طبق فرضیات مدل BGK، عدد پراوتل و نسبت لزجت جنبشی به حجمی باید ثابت باشند. همچنین لزجت با استفاده از از قید هم‌ارزی با معادلات ماکروسکوپی، با زمان بازآرایی دارای رابطه‌ای مستقیم است [۳۲].

$$\nu = \left(\tau - \frac{1}{2}\right) c_s^2 \delta_i \quad (3)$$

که در آن،  $c_s$  سرعت صوت و  $\nu$  لزجت سینماتیکی است. این باعث می‌شود که با تعیین لزجت، زمان بازآرایی تثبیت شود یعنی با تغییر لزجت سیال مورد مطالعه، زمان بازآرایی نیز تغییر خواهد کرد.

از طرف دیگر، در تحقیقات متعددی نشان داده شده است که موقعیت دقیق مرز جامد در شرط مرزی انعکاسی<sup>۲</sup> به زمان بازآرایی وابسته است [۳۲]. در مدل BGK از آنجا که تنها یک زمان بازآرایی وجود دارد و آن نیز با تثبیت لزجت تعیین می‌شود، با تغییر لزجت سیال، هندسه میدان حل تغییر خواهد کرد. در مسائلی که نقاط مجاور مرز جامد نسبت به کل نقاط میدان حل تعداد کمی دارند، این خطا قابل چشم‌پوشی است اما در حل جریان در محیط‌های متخلخل اکثر نقاط میدان در کنار مرزهای جامد واقع هستند، چنین نیست. لذا چنین خطاهایی ممکن است به نتایج کاملاً غیر قابل قبول منجر شود. برای مثال، تراوایی<sup>۳</sup> که یک خاصیت هندسی از محیط متخلخل است، به لزجت جریان وابسته خواهد شد که نتیجه‌ای غیرفیزیکی است. در تحقیقات اخیر برای رفع این مشکل از مدل شبکه بولتزمن با زمان بازآرایی چندگانه<sup>۴</sup> استفاده شده است. برای مرتفع کردن

1. Single Relaxation Time (SRT)  
2. Bounce-Back  
3. permeability  
4. Multiple Relaxation Time (MRT)

شرط مرزی انعکاسی استفاده شده است. شرط مرزی انعکاسی بر اساس فرمول‌بندی میان‌شبکه<sup>۱</sup>، باعث صفر شدن بردار سرعت در نصف فاصله میان دو نقطه مجاور مرز جامد می‌شود. گرادیان فشار در راستای جریان نیز به‌صورت مستقیم با تعریف ورودی و خروجی فشار ثابت ایجاد شد. در چهار وجه دیگر که موازی جهت جریان هستند، شرط مرزی متناوب اعمال شده است.

#### ۴. نتایج

نتایج حاصل از شبیه‌سازی این پژوهش در این بخش ارائه شده است. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، برای تحلیل از مدل شبکه بولتزمن با زمان آرامش چندگانه استفاده شده است. هندسه مورد استفاده یک مکعب با ابعاد  $30 \times 30 \times 30$  بوده که اختلاف فشار مورد نظر به دو صفحه عمود بر محور  $x$  وارد شده است. واحد گرادیان فشار اعمال‌شده  $1/lu$  است. برای به‌دست‌آوردن تراوایی بر اساس واحد شبکه از رابطه (۸) استفاده شده است.

$$k_{ij} = \frac{\Delta x^2 v_{lu} u_{lu,j}}{\left(\frac{dp}{dx}\right)_{lu,j}} \quad (۸)$$

زیرنویس  $lu$  در رابطه (۸) به معنی این است که این کمیت‌ها در واحد شبکه محاسبه شده‌اند. به همین ترتیب نیز عدد رینولدز از رابطه (۹) محاسبه شده است.

$$Re = \frac{u_{lu} D_{lu}}{\nu_{lu}} \quad (۹)$$

برای تبدیل واحدهای شبکه به واحدهای فیزیکی از الگوریتم تشریح‌شده در مستندات تئوری کتابخانه متن‌باز Palabos استفاده شده است [۱۸].

برای مشاهده انحراف جریان از رژیم داری تغییرات تراوایی و گرادیان فشار برحسب عدد رینولدز در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است. این خروج از رژیم داری در هر دو نمودار در اعداد رینولدز بین ۱ تا ۱۰ به‌روشنی قابل مشاهده است. رفتار کیفی این منحنی با اطلاعات موجود در مراجع فنی از تطابق بسیار خوبی برخوردار است. تراوایی این نمونه‌سنگ ماسه‌ای به‌صورت تجربی هم اندازه‌گیری شده و مقدار آن برابر ۱۹۶۹ میکرو داری گزارش شده است [۱۳]. مقدار به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی در ناحیه خطی (رژیم داری) بین ۱۷۹۱ تا ۱۷۹۶ میکرو داری به دست آمده است که خطایی در حدود ۹٪ را نشان می‌دهد.

شکل‌های (۹) و (۱۰) به نمایش خطوط هم‌تراز سرعت و خطوط

محدودیت‌های موجود در مدل SRT، می‌توان از مدل زمان بازآرایی چندگانه که دارای پایداری و دقت بیشتری نسبت روش زمان بازآرایی منفرد است، استفاده کرد. در این مدل، زمان‌های آرامش برای ممان‌های مختلف تابع توزیع ذرات به‌صورت جداگانه محاسبه می‌شوند. این مدل، ماتریسی را برای زمان بازآرایی ارائه می‌دهد که برای شبیه‌سازی فرایند برخورد بسیار دقیق‌تر است. به بیان دیگر، در روش قبل فرایند برخورد در فضای سرعت بود اما این روش در فضای ممتوم اجرا می‌شود. در این صورت، معادله گسسته شبکه بولتزمن در قالب معادله زیر ارائه می‌شود:

$$f_i(x+c\delta t, t+\delta t) - f_i(x, t) = M^{-1} S [m^w(x, t) - m(x, t)] \quad (۴)$$

که در آن،  $f = M^{-1} m$  بوده و  $S$  ماتریس قطری آرامش،  $m$  بردار ممتوم و  $M^{-1}$  نیز بیانگر ماتریس تبدیل بردار سرعت به ممتوم است. همچنین در این رابطه  $m(x, t)$  و  $f_i(x, t)$  با توجه به ساختار شبکه مورد استفاده  $D_n Q_m$  یک بردار  $1 \times m$  است. برای مثال بردار ممتوم  $m(x, t)$  در ساختار  $D_3 Q_{19}$  دارای مؤلفه‌های زیر است [۳۳]:

$$m := (\rho, e, \varepsilon, j_x, q_x, j_y, q_y, j_z, q_z, \quad (۵)$$

$$3p_{xx}, 3\pi_{xx}, p_{ww}, \pi_{ww}, p_{xy}, p_{yz}, p_{xz},$$

$$m_x, m_y, m_z)^T = (m_0, m_1, \dots, m_{18})^T$$

که در آن،  $\rho$  از مجموع توابع توزیع چگالی به دست می‌آید،  $p$  و  $\pi$  از جنس فشار،  $q$  و  $e$  از جنس سرعت و  $j$  و  $m$  نیز عبارت ممتوم را معرفی می‌کنند. ماتریس قطری زمان‌های بازآرایی به‌صورت زیر است:

$$\hat{S} = \text{diag}(0, s_1, s_2, 0, s_4, 0, s_6, s_7, s_8, s_9, s_{10}, s_{11}, s_{12}, s_{13}, s_{14}, s_{15}, s_{16}, s_{16}) \quad (۶)$$

$$= \text{diag}(0, s_p, s_p, 0, s_q, 0, s_q, 0, s_q, s_p, s_p, s_p, s_p, s_p, s_p, s_m, s_m, s_m).$$

در این روش، لزجت سیال با یکی از زمان‌های بازآرایی به‌صورت زیر مرتبط است:

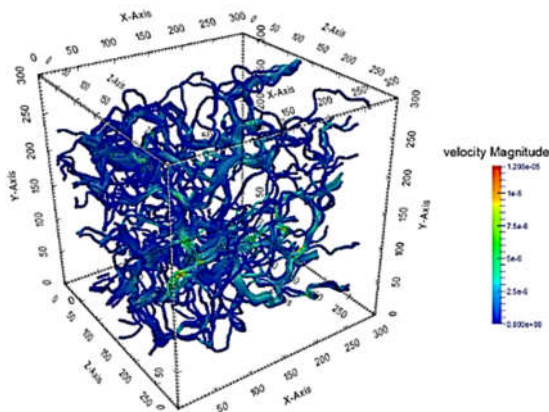
$$\nu = \frac{1}{3} (s_\nu - \frac{1}{2}) \quad (۷)$$

همان‌گونه که در رابطه (۷) مشخص است، تعیین لزجت فقط یکی از زمان‌های بازآرایی را تثبیت می‌کند. در واقع تعداد پارامترهای موجود در مدل MRT از تعداد قیدها بیشتر است. بنابراین این آزادی عمل وجود دارد که بعضی از پارامترها را طوری تعیین کرد که همواره مرز جامد در نصف فاصله میان دو نقطه مجاور دیوار قرار گیرد. به این ترتیب مشکل مذکور در مدل SRT مرتفع خواهد شد. لذا دیگر پارامترهایی نظیر تراوایی وابسته به لزجت نخواهند بود. مجموعه‌های گوناگونی از تعیین این پارامترها برای مدل MRT ارائه شده و در این مقاله از مدل ارائه‌شده گوا و همکاران استفاده شده است [۳۳].

برای این شبیه‌سازی از شبکه  $D_3 Q_{19}$  استفاده شده است. همچنین برای شبیه‌سازی مرز جامد در حفره‌های محیط متخلخل از



جریان حاصل از تحلیل سه بعدی اختصاص یافته است. در شکل (۹)، از طریق خطوط هم تراز سرعت می توان به تصویر تقریبی محیط متخلخل پی برد.



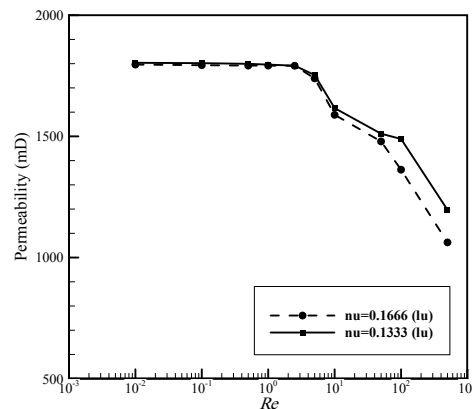
شکل (۱۰): خطوط جریان در محیط متخلخل سه بعدی

### ۵. نتیجه گیری

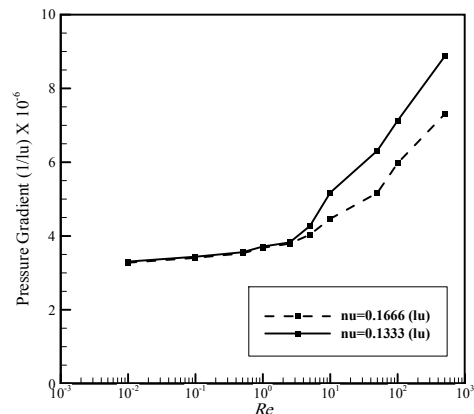
نتایج این تحقیق به خوبی نشان می دهد که مدل محیط متخلخل به دست آمده از پوشش توپوگرافی اشعه ایکس، به همراه شبیه سازی جریان توسط شبکه بولتزمن با زمان بازآرایی چندگانه، ابزار بسیار مناسبی برای تحلیل جریان در نواحی متخلخل با هندسه های پیچیده به منظور نیل به برنامه ریزی صحیح تولید صیانتی از مخازن کشور است. با استفاده از این مدل می توان هندسه محیط متخلخل را به طور مستقیم وارد تحلیل حفره مقیاس کرد و رفتار جریان در رژیم های غیر داری را نیز مورد مطالعه قرار داد. از نتایج مهم اجرای این تحقیق، تخمین درست تر و نزدیک به واقعیت پارامترهای اصلی و مرتبط با شبیه سازی جریان سیال در محیط متخلخل حین برداشت از ذخایر هیدروکربوری، به عنوان یکی از مسائل حائز اهمیت در تولید صیانتی در صنعت نفت و گاز کشور است. قابل ذکر است که از دیگر نتایج این طرح، جلوگیری از بروز خطا در محاسبات مهندسی و نتایج حاصل از شبیه سازی های مرتبط خواهد بود به نحوی که می توان با اعتبار و صحت بالا به تخمین های واقعی تر از میزان تولید منابع هیدروکربوری و در نتیجه بهینه سازی آن دست یافت.

### قدردانی

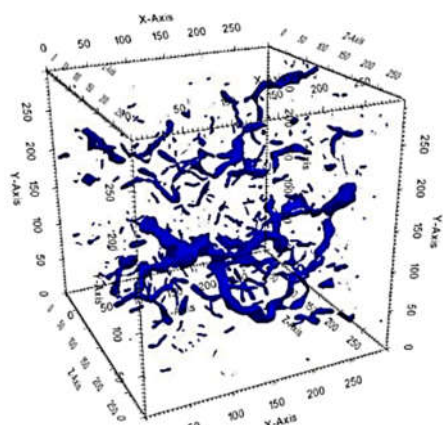
نگارندگان بدین وسیله بر خود لازم می دانند از حمایت مالی «صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور»، در راستای انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورند.



شکل (۷): تغییرات تراوایی برحسب عدد رینولدز



شکل (۸): تغییرات گرادیان فشار برحسب عدد رینولدز



شکل (۹): سطوح هم تراز سرعت که به گونه ای هندسه محیط متخلخل را نمایش می دهد.

- [1] Sohrabi, M., Danesh, A., and Jamiolahmady, M., "Visualisation of Residual Oil Recovery by Near-Miscible Gas and SWAG Injection Using High-Pressure Micromodels", *Transport in Porous Media*, Vol. 74, pp. 239-257, 2008.
- [2] Oostrom, M., White, M.D., Lenhard, R.J., Van Geel, P., and Wietsma, T.W., "A Comparison of Models Describing Residual NAPL Formation in the Vadose Zone", *Vadose Zone Journal*, Vol. 4, pp. 163-174, 2005.
- [3] Oostrom, M., Hofstee, C., Lenhard, R.J., and Wietsma, T.W., "Flow Behavior and Residual Saturation Formation of Liquid Carbon Tetrachloride in Unsaturated Heterogeneous Porous Media", *Journal of contaminant hydrology*, Vol. 64, pp. 93-112, 2003.
- [4] Werth, C.J., Zhang, C., Brusseau, M.L., Oostrom, M. and Baumann, T., "A Review of Non-Invasive Imaging Methods and Applications in Contaminant Hydrogeology Research", *Journal of contaminant hydrology*, Vol. 113, pp. 1-24, 2010.
- [5] Baniak, G.M., La Croix, A.D., Polo, C.A., Playter, T.L., Pemberton, S.G. and Gingras, M.K., "Associating X-ray Microtomography with Permeability Contrasts in Bioturbated Media," *Ichnos*, Vol. 21, pp. 234-250, 2014.
- [6] Li, M., Xiao, D., Shakerian, M., Afrough, A., Goora, F., Marica, F. and et al., "Magnetic Resonance Imaging of Core Flooding in a Metal Core Holder", in the Proceedings of the 32st International Symposium of the Society of Core Analysts, Snowmass, Colorado, pp. 1-1221-26, August 2016.
- [7] Guillot, G., Kassab, G., Hulin, J. and Rigord, P., "Monitoring of Tracer Dispersion in Porous Media by NMR Imaging", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 24, pp. 763, 1991.
- [8] Casieri, C., De Luca, F., Nodari, L., Russo, U. and Terenzi, C., "Detection of Magnetic Environments in Porous Media by Low-Field 2D NMR Relaxometry", *Chemical Physics Letters*, Vol. 496, pp. 223-226, 2010.
- [9] Pearl, Z., Magaritz, M. and Bendel, P., "Nuclear Magnetic Resonance Imaging of Miscible Fingering in Porous Media", *Transport in porous media*, Vol. 12, pp. 107-123, 1993.
- [10] Freedman, R. and Hurlimann, M.D., "Determining Wettability of an Oil Reservoir Using Borehole NMR Measurements", ed: Google Patents, 2004.
- [11] Lenormand, R., Fleury, M., and Egermann, P., "Method of Determining the Permeability of an Underground Medium From NMR Measurements of the Permeability of Rock Fragments from the Medium", ed: Google Patents, 2008.
- [12] Mirotchnik, K., Allsopp, K., Kantzas, A., and Marentette, D., "Quantification of Bitumen Using NMR", ed: Google Patents, 2003.
- [13] Bacri, J.C., Leygnac, C. and Salin, D., "Study of Miscible Fluid Flows in a Porous Medium by an Acoustical Method", *Journal de Physique Lettres*, Vol. 45, pp. 767-774, 1984.
- [14] Zhang, C., Werth, C.J. and Webb, A.G., "Characterization of NAPL Source Zone Architecture and Dissolution Kinetics in Heterogeneous Porous Media Using Magnetic Resonance Imaging", *Environmental science & technology*, Vol. 41, pp. 3672-3678, 2007.
- [15] Chu, Y., Werth, C.J., Valocchi, A.J., Yoon, H. and Webb, A.G., "Magnetic Resonance Imaging of Nonaqueous Phase Liquid During Soil Vapor Extraction in Heterogeneous Porous Media", *Journal of contaminant hydrology*, Vol. 73, pp. 15-37, 2004.
- [16] Song, Y., Zhu, N., Zhao, Y., Liu, Y., Jiang, L. and Wang, T., "Magnetic Resonance Imaging Study on Near Miscible Supercritical CO<sub>2</sub> Flooding in Porous Media", *Physics of Fluids*, Vol. 25, p. 053301, 2013.
- [17] Hosseinijad, S., Pedersen, P.K., Spencer, R.J. and Nicolas, M.P., "Use of XRF Elemental Data to Quantify Mineralogy and Reservoir Properties of An Upper Cretaceous Oil and Gas Shale Reservoir, Eastern Saskatchewan and South Western Manitoba", in *Unconventional Resources Technology Conference*, pp. 2217-2222, 2013.
- [18] Aguilar, G., "XRF Elemental and Mineralogical Analysis of Core Sample and Well Cuttings in Granite

- Wash Area of Wheeler County, Texas*", 2014.
- [19] Ellis, B., Grant, K., Mallela, J. and Abram, N., "Is XRF Core Scanning a Viable Method for Coral Palaeoclimate Temperature Reconstructions", *Quaternary International*, Vol. 514, pp. 97-107, 2019.
- [20] Spencer, R. and Weedmark, T., "Application of X-Ray Fluorescence (XRF) Analyses to the Characterization of Tight Reservoirs", in Gas Mexico Congress and Exhibition held in Viahermosa, Mexico, pp. 1-3, 2015.
- [21] Chomsurin, C. and Werth, C.J., "Analysis of Pore-Scale Nonaqueous Phase Liquid Dissolution in Etched Silicon Pore Networks", *Water resources research*, Vol. 39, 2003.
- [22] Glass, R.J., Conrad, S.H. and Peplinski, W., "Gravity-Destabilized Nonwetting Phase Invasion in Macroheterogeneous Porous Media: Experimental Observations of Invasion Dynamics and Scale Analysis", *Water resources research*, Vol. 36, pp. 3121-3137, 2000.
- [23] Jones, E.H. and Smith, C.C., "Non-Equilibrium Partitioning Tracer Transport in Porous Media: 2-D Physical Modelling and Imaging Using a Partitioning Fluorescent Dye", *Water research*, Vol. 39, pp. 5099-5111, 2005.
- [24] Oostrom, M., Dane, J. and Wietsma, T.W., "A Review of Multidimensional, Multifluid, Intermediate-Scale Experiments: Flow Behavior, Saturation Imaging, and Tracer Detection and Quantification", *Vadose Zone Journal*, Vol. 6, pp. 610-637, 2007.
- [25] Lindquist, W.B., Lee, S.M., Coker, D.A., Jones, K.W. and Spanne, P., "Medial Axis Analysis of Void Structure in Three-Dimensional Tomographic Images of Porous Media", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 101, pp. 8297-8310, 1996.
- [26] Brusseau, M.L., Janousek, H., Murao, A. and Schnaar, G., "Synchrotron X-ray Microtomography and Interfacial Partitioning Tracer Test Measurements of NAPL-Water Interfacial Areas", *Water Resources Research*, Vol. 44, 2008.
- [27] Chen, S., Yao, X., Qiao, J. and Watson, A.T., "MRI Investigations of Fractures and Multiphase Flow in Fractured Media", *AIChE journal*, Vol. 42, pp. 820-828, 1996.
- [28] Yoon, H., Zhang, C., Werth, C.J., Valocchi A.J. and Webb A.G., "Numerical Simulation of Water Flow in Three Dimensional Heterogeneous Porous Media Observed in A Magnetic Resonance Imaging Experiment", *Water resources research*, Vol. 44, 2008.
- [29] Dong, H., "Micro-CT Imaging and Pore Network Extraction, Imperial College, London", PhD dissertation, 2007.
- [30] Sukop, M., *DT Thorne, Jr.* "Lattice Boltzmann Modeling", *Lattice Boltzmann Modeling: Springer*, 2006.
- [31] Mohamad, A., "Lattice Boltzmann Method", *Springer*, Vol. 70, 2011.
- [32] Pan, C., Luo, L.S. and Miller, C.T., "An Evaluation of Lattice Boltzmann Schemes for Porous Medium Flow Simulation", *Computers & fluids*, Vol. 35, pp. 898-909, 2006.
- [33] Guo, X., Zhong, C., Zhuo, C. and Cao, J., "Multiple-Relaxation-Time Lattice Boltzmann Method for Study of Two-Lid-Driven Cavity Flow Solution Multiplicity", *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Vol. 28, pp. 215-231, 2014.
- [34] Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", T. & F. Group, ed., New York, 1980.
- [35] Adler, P.M., Jacquin, C. and Quiblier, J., "Flow in Simulated Porous Media", *Multiphase Flow*, Vol. 16, pp.691-712, 1990.
- [36] Saeger, R.B., Scriven, L. and Davis, H., "Transport Processes in Periodic Media", *Fluid Mechanic*, pp. 299, 1995.
- [37] Fatt, I., "The Network Model of Porous Media", *Trans. Am. Inst. Mem*, Vol. 207, pp.144-181, 1956.
- [38] Bryant, S.L., King, P.R. and Mellor, D.W., "Network Model Evaluation of Permeability and Spatial Correlation in a Real Random Sphere Packing", *Transport in Porous Media*, Vol. 11, pp.53-77, 1993.
- [39] Gong, B., Liu, X. and Yu, J., "From Molecular Dynamics to Lattice Boltzmann: a New Approach for Pore Scale Modelling for Multi-Phase Flow", *International Petroleum Technology Conference*, pp. 16563, 2013.
- [40] Chukwudozie, C. and Tyagi, M., "Pore Scale

- Inertial Flow Simulations in 3-D Smooth and Rough Sphere Packs Using Lattice Boltzmann Method*", AICHE Journal. Vol. 59, pp. 4858–4870, 2013.
- [41] Huang, H. and et al., "Evaluation of Three Lattice Boltzmann Models for Multiphase Flow in Porous Media", Computational Mathematic with application, Vol. 61, pp. 12, 2011.
- [42] Muljadi, B.P., Blunt, M.J., Raeini, A.Q. and Bijeljic, B., "The Impact of Porous Media Heterogeneity on Non-Darcy Flow Behaviour l from Pore-Scale Simulation", Advanced Water Resource, pp. 1–12, 2015.