

# اولین همایش ملی انجمن محیط‌های متخلخل ایران

۳ و ۴ مهر ۱۴۰۳

## محورهای اصلی همایش

محیط‌های متخلخل در حوزه‌های مختلف بین رشته‌ای و همگرا:

- ژئوتکنیک / مکانیک خاک
- مخازن هیدروکربنی / جریان در محیط متخلخل
- انرژی‌های نو / ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز
- سنگ دیجیتال / یادگیری ماشین
- موضوعات متنوع در محیط‌های متخلخل



خیابان کارگر شمالی، پردیس دانشکده‌گان فنی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی مکانیک (ساختمان جدید)

<https://events.interpore.org/event/54/>

[iran\\_chapter@interpore.org](mailto:iran_chapter@interpore.org)



## دیباچه

دو صد دانا در این محفل سخن گفت  
ولی با من بگو آن دیده‌ور کیست؟

سخن نازک‌تر از برگ سمن گفت  
که خاری دید و احوال چمن گفت

اقبال لاهوری

سپاس خدای که ما را یاری رساند تا اولین همایش ملی انجمن محیط‌های متخلخل ایران، با موفقیت به انجام رسد. شعبه ایران انجمن در سال ۱۳۸۷ به همت برخی اساتید پیش‌کسوت راه‌اندازی شد و از حدود سه سال پیش، فعالیت خود را پیرو رویکرد نوی انجمن بین‌المللی محیط‌های متخلخل در زمینه رعایت عدالت جغرافیایی، جنسیتی و نیز گوناگونی حوزه‌های علوم مرتبط، دوباره از سر گرفته است. این همایش که با تلاش و پیگیری مستمر اعضای کمیته راهبردی انجمن از حدود یک سال پیش برنامه‌ریزی شد، در نهایت با همکاری مؤثر و صمیمانه هیأت رئیسه محترم دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران در روزهای دوم الی چهارم مهرماه ۱۴۰۳ با شرکت ۸۳ دانشجو و عضو هیأت علمی و بیش از ۳۰ نفر از علاقمندان و تلاشگران در حوزه‌های صنعتی مرتبط، با موفقیت برگزار شد. علاوه بر ارائه ۴۰ مقاله به صورت شفاهی و ۳۰ مقاله به صورت پوستر که هسته مرکزی همایش را تشکیل می‌داد، خوشوقتی آن بود که از آموزه‌های چهار سخنران کلیدی، چهار کارگاه تخصصی، دو نشست تخصصی و یک مسابقه عکاسی دانشجویی بدین شرح بهره‌مند شدیم:

**سخنرانان مراسم آغازین:** آقایان دکتر میشل کوئینتارد رئیس پیشین انجمن بین‌المللی، دکتر مجید حسنی‌زاده مدیر اجرایی انجمن بین‌المللی، دکتر احسان هوشفر معاون پژوهشی دانشکده مهندسی مکانیک و دبیر همایش

**سخنرانان کلیدی:** آقایان دکتر بهروز گتمیری، دکتر شهاب آیت‌اللهی، دکتر نیما شکری و نماینده محترم شرکت بنش مدیکال

**کارگاه‌های تخصصی:** مجموع چهار کارگاه تخصصی با ارائه آقایان دکتر حجت‌اله ماهانی، دکتر امیر اکبری گرکانی، دکتر نیما شکری، دکتر حسین قدیری، دکتر سعید صادق‌نژاد و دکتر جعفر قاجار

**نشست‌های تخصصی:** دو نشست تخصصی پیرامون زمین‌انرژی و غشاء با ارائه آقایان دکتر مرتضی حسین‌پور، دکتر داور ابراهیمی، دکتر سعید کیمیایی، دکتر پوریا احمدی، دکتر حسن ماهانی، دکتر تورج محمدی، دکتر محمدحسین صراف‌زاده، دکتر محمد کریمی، مهندس مهدی نوری و دکتر علیرضا بازارگان

**مسابقه عکاسی دانشجویی:** در دو حوزه عکس واقعی و عکس تولید شده با هوش مصنوعی

**گزارش نهایی در مراسم پایانی:** دبیران محترم اجرایی و علمی همایش

در پایان، ارزیابی و داوری دقیق همه مقالات و عکس‌ها طی چند مرحله توسط دبیران محترم علمی و اجرایی همایش انجام شد. در نتیجه، جوایز مقالات برتر و عکس‌های منتخب به دو ارائه شفاهی، دو ارائه پوستر، یک عکس واقعی و یک عکس تولید شده با هوش مصنوعی تعلق گرفت. بنا به تصمیم اتخاذ شده در کمیته راهبردی انجمن، جوایز و الواح تقدیر برندگان، طی مراسمی حضوری

در پاییز ۱۴۰۳ با دعوت از ایشان، اهداء خواهد شد. همچنین پیرو نوید داده شده از پیش، از نویسندگان ۱۵ مقاله برتر به انتخاب دبیرخانه علمی همایش و با جمع‌بندی آراء هیأت محترم داوران همایش، جهت ارسال نسخه مبسوط مقاله خود به یک شماره ویژه مجله نوپای انجمن بین المللی محیط‌های متخلخل دعوت خواهد شد.

جای بسی قدردانی از سه حامی محترم مالی همایش یعنی شرکت بهین‌نگاره، شرکت بنش مدیکال و شرکت کوپال انرژی بابت حسن اعتماد و حمایت بی‌دریغشان کماکان باقی است. پایان سخن، از تلاش بی‌وقفه و بی‌مزد همه همکاران و دوستان عزیز به ویژه دبیر محترم اجرایی سرکار خانم دکتر مژده سجادی، دبیر محترم علمی جناب آقای دکتر حسن ماهانی، مسئول محترم کمیته تبلیغات و مجری همایش سرکار خانم دکتر فهیمه حوری‌آباد صبور، مسئول محترم فناوری اطلاعات و تارنما جناب آقای مهندس داود زیور، مسئول محترم کمیته حمایت مالی جناب آقای دکتر حسین قدیری و سایر همکاران گرامی در کمیته راهبردی انجمن آقایان دکتر علیرضا بازارگان، دکتر سعید صادق‌نژاد، دکتر جعفر قاجار و دکتر احسان نیکویی صمیمانه سپاسگزارم. همچنین به نمایندگی از انجمن از تلاش شبانه‌روزی دانشجویان عزیزمان در کمیته اجرایی و دبیرخانه همایش قدردانی می‌کنم.

با آرزوی تندرستی و شادابی

حامد صادقی

دبیر همایش



عکس دسته‌جمعی حاضرین مراسم اختتامیه اولین دوره همایش انجمن محیط‌های متخلخل ایران

## اسامی دبیران همایش:



از چپ: جناب آقای دکتر حامد صادقی (دبیر همایش)، مهندس داوود زیور (مسئول تارنما و فناوری اطلاعات)، جناب آقای دکتر حسن ماهانی (دبیر علمی همایش)، خانم دکتر فهیمه حوری آباد صبور (مسئول کمیته تبلیغات)، و خانم دکتر مژده سجادی (دبیر اجرایی همایش)

## اسامی اعضای کمیته برگزاری:



از چپ: جناب آقای دکتر علیرضا بازارگان، جناب آقای دکتر احسان نیکویی، جناب آقای دکتر حسین قدیری، جناب آقای دکتر جعفر قاجار، و جناب آقای دکتر سعید صادق نژاد

# BONASH

MEDICAL

بنش مدیکال در سال ۱۳۹۴ بر پایه دانش فنی موسسان آن در حوزه‌های مهندسی پزشکی، مهندسی بافت و تکنولوژی‌های تولید و با هدف ارائه خدمات به بیماران و متخصصین حوزه سلامت آغاز به فعالیت نمود.

نگرش مجموعه از ابتدا انتقال آخرین تکنولوژی‌های ساخت پروتزهای استخوانی به داخل کشور و به کارگیری نوآوران آن‌ها به منظور عرضه محصولات که ارائه آن‌ها پیش از آن در داخل کشور میسر نبود، بوده‌است.

با چنین نگرشی و به کمک متخصصین پزشکی و مهندسی، بنش مدیکال مفتخر است طی سال‌هایی که از آغاز فعالیت‌های آن می‌گذرد، توانسته اعتماد دست اندرکاران حوزه سلامت را جلب نموده و دسترسی بیماران به آخرین نسل پروتزهای استخوانی را تسهیل کند.

هدف ما همواره پیشرفت روزافزون و ارائه محصولات خلاقانه می‌باشد و امید است به کمک پزشکان و سایر توانمندان حوزه سلامت بتوانیم نقشی مفید در بهبود سلامت جامعه ایفا نماییم.

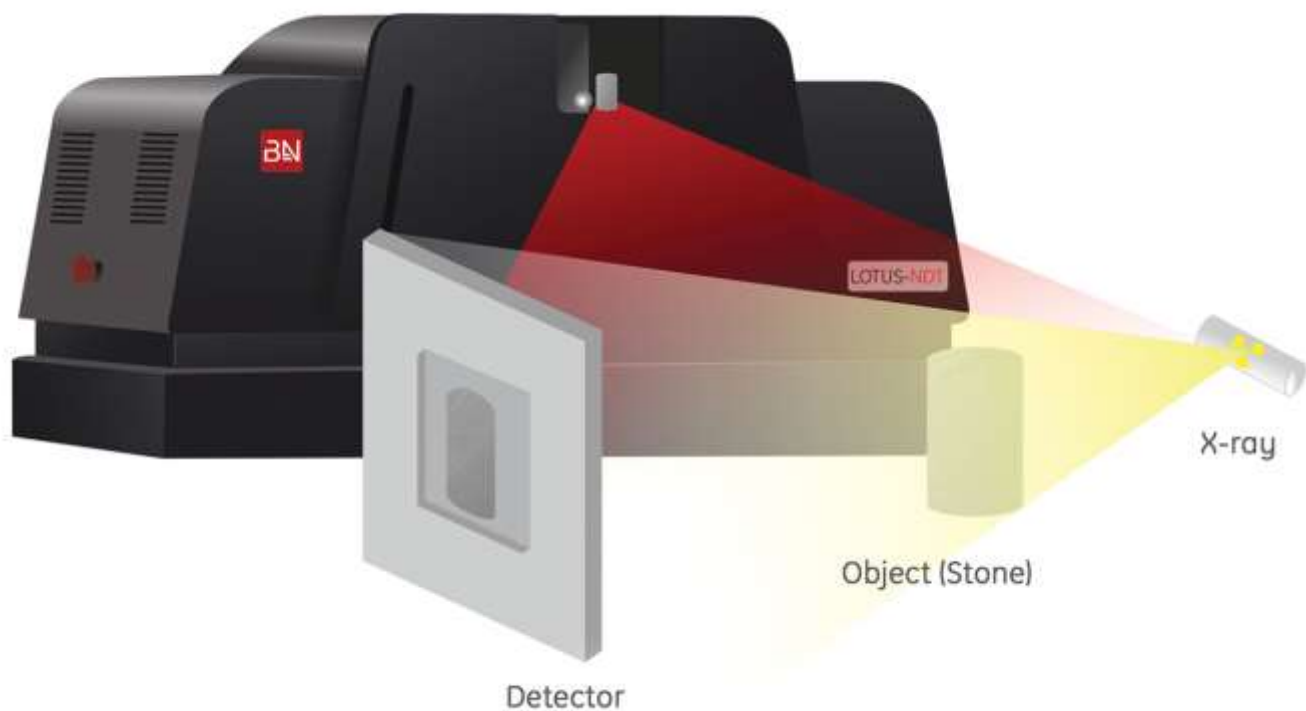
از جمله محصولات بنش مدیکال می‌توان به پروتزهای شخصی‌سازی‌شده، سیستم ثابت‌سازی یا فیکسیشن ستون فقرات و همچنین کیچ‌های کم‌ری و گردنی ستون فقرات اشاره کرد.



بهین نگاره اولین و تنها تولیدکننده دستگاه‌های تصویربرداری میکروسی‌تی در کشور و خاورمیانه است. میکروسی‌تی ابزاری با تکنولوژی بالا برای انجام تصویربرداری سه بعدی به صورت غیرمخرب از ساختار درونی اجسام با استفاده از پرتوی ایکس در ابعاد میکرون است.

با توجه به نبود این فناوری در کشور و منطقه و نیاز روزافزون به آن در حوزه‌های مختلف صنعت و پژوهش از جمله پزشکی، دندانپزشکی، گیاه‌شناسی، حشره‌شناسی، مهندسی بافت، زمین‌شناسی و مهندسی نفت، باستان‌شناسی و فسیل‌شناسی، مهندسی مواد، مهندسی عمران، مهندسی الکترونیک، مهندسی مکانیک و بسیاری حوزه‌های دیگر، شرکت بهین نگاره با حمایت معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری و دانشگاه علوم

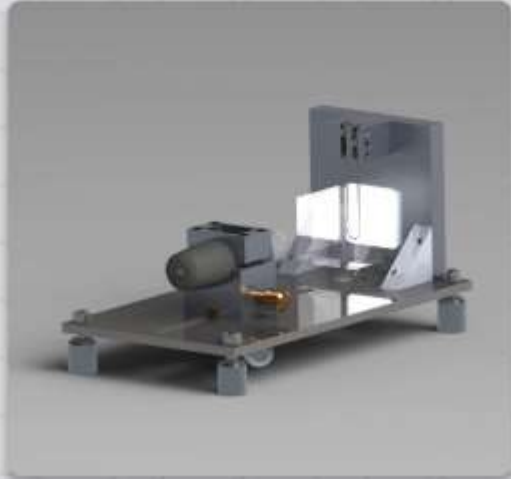
پزشکی تهران، بر آن شد تا اولین نوع از این اسکنرها را داخل کشور با کیفیتی در سطح جهانی طراحی و تولید کند و بدین ترتیب برای اولین بار زیرساخت فناورانه‌ی تجهیزات تصویربرداری با پرتوی ایکس به ویژه میکروسی‌تی در کشور توسط بهین نگاره ایجاد شد.



شرکت کوپال انرژی سازنده دستگاه‌های آزمایشگاهی و صنعتی با فناوری‌های پیشرفته و مبتنی بر تحقیقات است. این شرکت با تیمی از متخصصان تمامی مراحل تولید دستگاه شامل طراحی، ساخت و راه‌اندازی دستگاه‌های مختلف مانند شستشوی مغزه، اشباع مغزه، و تراوایی و تخلخل‌سنجی را انجام می‌دهد.

در کوپال ما این افتخار را داریم که با بهترین ذهن‌های دنیای آکادمیک در زمینه مهندسی نفت در ایران همکاری می‌کنیم. اساتید دانشگاه صنعتی شریف، دانشگاه

تهران و دانشگاه صنعتی نفت اهواز همگی به ما کمک می‌کنند تا به بهترین کیفیت در ساخت راه‌اندازی دست یابیم.





# 1<sup>st</sup> Iran Interpore Chapter Conference on Porous Media

## 24-25 September 2024

### Diverse Applications of Porous Media in:

- 01 Geosciences
- 02 Energy
- 03 Medicine, Biology and Environmental Engineering
- 04 Industry

Submission Deadline: June 20, 2024

Review: July 21, 2024

Early Bird Registration: August 14, 2024

Late Registration: September 14, 2024



School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, North Kargar Street  
<https://events.interpore.org/event/54/> [iran\\_chapter@interpore.org](mailto:iran_chapter@interpore.org)





# پنل زمین انرژی

در امتداد اولین همایش ملی انجمن محیط‌های متخلخل ایران

با محور پتانسیل‌های  
توسعه انرژی زمین گرمایی  
و بافرهای انرژی

## اعضای پنل تخصصی

- آقای دکتر مرتضی حسین پور  
عضو هیئت علمی پژوهشگاه نیرو، گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشگر حوزه ذخیره‌سازی هیدروژن
- آقای دکتر داور ابراهیمی  
عضو هیئت علمی پژوهشگاه نیرو، گروه انرژی‌های تجدیدپذیر و پژوهشگر حوزه انرژی زمین گرمایی
- آقای مهندس سعید کیمیایی  
پژوهشگر مقطع دکتری دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا در حوزه زمین گرمایی
- آقای دکتر حیدر جعفری زاده  
هیئت علمی دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، پژوهشگر حوزه ذخیره‌سازی انرژی

همهانگ‌کننده پنل: جناب آقای دکتر حسن ماهانی

سه‌شنبه ۳ مهرماه ۱۴۰۳، از ساعت ۱۶:۰۰ الی ۱۸:۰۰



# مجموعه کارگاه‌های تخصصی

در امتداد اولین همایش ملی انجمن محیط‌های متخلخل ایران  
با همکاری انجمن علمی مهندسی نفت دانشگاه تهران

تصویربرداری دیجیتال سه بعدی سنگ؛  
آنالیز مغزه دیجیتال و کاربردهای  
هوش مصنوعی در مقیاس حفره

در دو بخش تئوری و عملی

آقای دکتر سعید صادق‌نژاد

عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس



آقای دکتر جعفر قاجار

عضو هیأت علمی دانشگاه شیراز



آقای دکتر حسین قدیری

عضو هیأت علمی دانشگاه علوم پزشکی تهران



۲ مهرماه ۱۴۰۳، از ساعت ۸:۳۰ الی ۱۵:۰۰



# پنل غشاء

در امتداد اولین همایش ملی انجمن محیط‌های متخلخل ایران

ساخت، تجاری‌سازی،  
و بهره‌برداری از  
غشاءهای متخلخل

## اعضای پنل تخصصی

- آقای دکتر محمد کریمی (موضوع سخنرانی: غشاءهای پلیمری اولترافیلتر)  
عضو هیئت علمی دانشکده نساجی دانشگاه امیرکبیر
- آقای دکتر تورج محمدی (موضوع سخنرانی: غشاءهای پلیمری نمک‌زدایی)  
عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه علم و صنعت
- جناب مهندس مهدی نوری (موضوع سخنرانی: غشاءهای سرامیکی)  
رئیس هیأت مدیره شرکت نیکسو، تولیدکننده غشاءهای SIC در ایران
- آقای دکتر محمدحسین صرافزاده (موضوع سخنرانی: آنالیز و اتوپسی غشاء)  
عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تهران

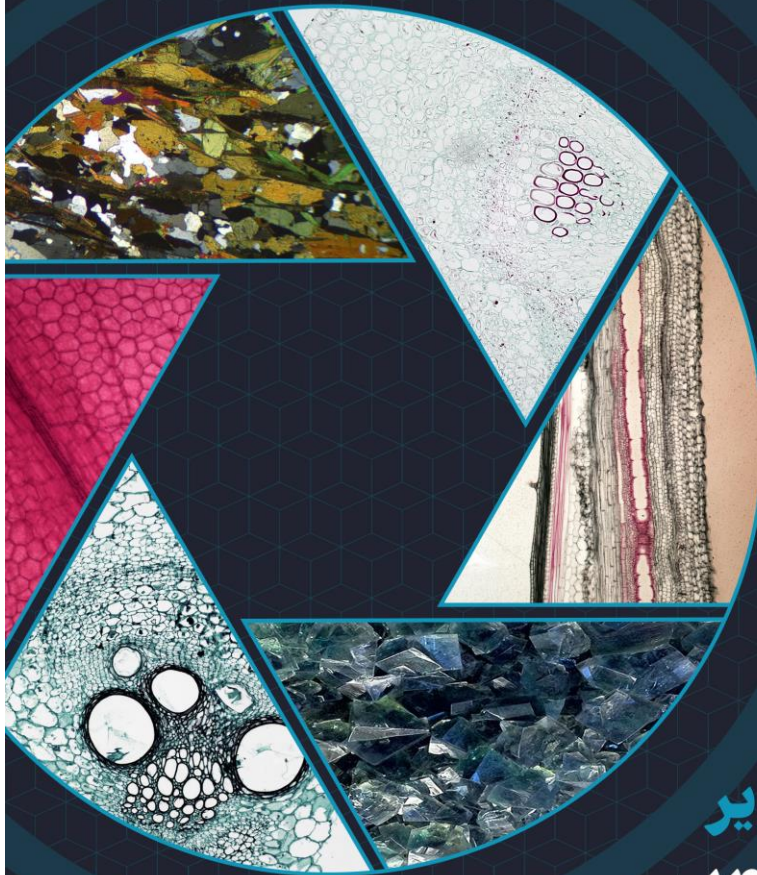
هماهنگ‌کننده پنل: جناب آقای دکتر علیرضا بازارگان

چهارشنبه ۴ مهرماه ۱۴۰۳، از ساعت ۱۵:۳۰ الی ۱۷:۰۰



# مسابقهٔ بهترین عکس از محیط‌های متخلخل

در امتداد اولین همایش ملی انجمن محیط‌های متخلخل ایران



مهلت ارسال تصاویر

۲۸ شهریورماه ۱۴۰۳



خیابان کارگر شمالی، پردیس دانشکده‌گان فنی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی مکانیک (ساختمان جدید)



<https://events.interpore.org/event/54/>



[iran\\_chapter@interpore.org](mailto:iran_chapter@interpore.org)



# مجموعه کارگاه‌های تخصصی

در امتداد اولین همایش ملی انجمن محیط‌های متخلخل ایران



## ثبت اختراع یا چاپ مقاله؟

آقای دکتر حجت‌اله ماهانی

عضو هیأت علمی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای



۳ مهرماه ۱۴۰۳، از ساعت ۱۱:۰۰ الی ۱۲:۰۰



# مجموعه کارگاه‌های تخصصی

در امتداد اولین همایش ملی انجمن محیط‌های متخلخل ایران



امکان‌سنجی، طراحی و اجرای  
شمع‌های ساختمانی زمین‌گرمایی  
سطحی

آقای دکتر امیر اکبری گرکانی

عضو هیأت علمی پژوهشگاه نیرو



۳ مهرماه ۱۴۰۳، از ساعت ۱۵:۰۰ الی ۱۶:۰۰



# مجموعه کارگاه‌های تخصصی

در امتداد اولین همایش ملی انجمن محیط‌های متخلخل ایران



## نگارش پروپزال تحقیقاتی (گرنٹ)

آقای دکتر نیما شکری  
استاد دانشگاه صنعتی هامبورگ آلمان



۴ مهرماه ۱۴۰۳، از ساعت ۱۳:۴۵ الی ۱۵:۱۵



جدول برنامه کنفرانس

|                            |                    |  |                        |                 |   |             |                        |         |   |                        |                      |
|----------------------------|--------------------|--|------------------------|-----------------|---|-------------|------------------------|---------|---|------------------------|----------------------|
| ۶-۴                        | ۴-۳                |  | ۲:۴۵-۱:۴۵              |                 | ۱۲:۴۵-۱۲                                  | ۱۲-۱۱       | ۴۵:۱۰-۹:۴۵             |         | ۹:۳۰-۸:۳۰                               | ۸:۳۰-۸                 |                      |
|                            |                    |  |                        | -۱۲:۴۵<br>۱:۴۵  |   |             |                        |         |   |                        | دوشنبه<br>۱۴۰۳/۷/۲   |
|                            |                    | بازدید از دستگاه میکرو سی تی (۱ تا ۳)                                      |                        |                 | کارگاه تصویربرداری دیجیتال مغزه (۸ تا ۱۲) |             |                        |         |   |                        |                      |
| پنل انرژی های<br>زیرزمینی  | کارگاه<br>ژئوترمال | پذیرا<br>یی  | ارائه شفاهی و<br>پوستر | ناهار<br>و نماز | سخنرانی                                   | کارگاه پتنت | ارائه شفاهی و<br>پوستر | پذیرایی | افتتاحیه و<br>پخش سخنرانی های<br>آنلاین | ثبت<br>نام و<br>آشنایی | سه شنبه<br>۱۴۰۳/۷/۳  |
| [Blank Row]                |                    |  |                        |                 |   |             |                        |         |   |                        |                      |
| اختتام<br>یه<br>-۵<br>۶:۳۰ | پنل غشا<br>۵-۳:۳۰  | کارگاه رزومه نویسی ۱۵:۳-۱۰:۴۵  |                        | ناهار<br>و نماز | سخنرانی اسپانسر                           |             | ارائه شفاهی و پوستر    | پذیرایی | سخنرانی<br>کلیدی                        | ثبت<br>نام و<br>آشنایی | چهارشنبه<br>۱۴۰۳/۷/۴ |
|                            |                    | پذیرایی و فرصت ایجاد شبکه<br>ارتباطی<br>بازدید از عکس های چالش<br>دانشجویی |                        |                 | سخنرانی آنلاین                            |             |                        |         |   |                        |                      |



## فهرست عناوین:

- ۱..... تزریق و ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید در مخازن نفت و گاز تخلیه شده به منظور ازدیاد برداشت نفت و حفظ محیط زیست (پوستر).....
- ۸..... بررسی سورفکتانت های طبیعی در برهمکنش با یون های دو ظرفیتی و اثرات آنها بر محیط زیست (شفاهی).....
- CFD-DEM مطالعه تاثیر نیروهای چسبندگی بر مهاجرت ریز ذرات به داخل مدل حفرات دو گانه (*Pore Doublet*) با استفاده از روش (شفاهی).....
- ۱۳.....
- ۱۷..... بررسی تاثیر مورفولوژی محیط متخلخل و عدد موینگی بر بازیافت نفت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (پوستر).....
- ۲۱..... ارتباط نوع حفرات و واحدهای جریان مخزنی در یکی از مخازن ناهمگن کربناتی (شفاهی).....
- ۲۵..... پیش بینی خواص سنگ مخزن در مقیاس حفره به کمک فیزیک سنگ دیجیتال (شفاهی).....
- ۳۰..... بررسی رفتار سیالاتی مخلوط دود و هوا در قسمت فیلتر متخلخل فیری سیگار (شفاهی).....
- ۳۴..... مدل سازی ترموهیدرومکانیکی باز توزیع تنش در مجاورت ترک های عمیق ناشی از خشک شدگی خاک در مناطق گرم و خشک (شفاهی).....
- ۳۹..... بهبود آنالیز داده های تصویر سه بعدی سنگ های کربناته با استفاده از یادگیری عمیق (شفاهی).....
- ۴۳..... عوامل کنترل کننده حفرات و کیفیت مخزنی در یک مخازن کربناته (شفاهی).....
- ۴۷..... تجزیه و تحلیل مقایسه ای مواد آلی و معدنی متخلخل برای دارورسانی (پوستر).....
- بهبود چالش وضوح تصویر و میدان دید در محاسبه تراوایی به کمک تصاویر چندمقیاسی سنگ کربناته با استفاده از یادگیری عمیق (شفاهی).....
- ۵۱.....
- ۵۵..... بازیابی زمین گرمایی چاه های متروک نفتی: اثر عایق کاری روی بازدهی مبدل حرارتی دو لوله درون چاهی هم محور (شفاهی).....
- ۵۹..... بررسی اثرات محیط متخلخل بر کمترین فشار امتزاجی یک نمونه نفت آسفالتینی و گاز (شفاهی).....
- مدلسازی تغییر ترشوندگی و افزایش بازیافت نفت در مخازن کربناته با استفاده محاسبه مجموع پیوند های الکتروشیمیایی بین نفت و سنگ در تزریق آب مهندسی شده (شفاهی).....
- ۶۴.....
- ۶۹..... دولومیت های متخلخل عامل ایجاد لایه های فوق تراوا در سازندهای پر مین-تریاس خلیج فارس (شفاهی).....
- ۷۴..... بررسی آسیب سازند ناشی از رسوب آسفالتین و رفع آن با استفاده از آنالیز دیجیتال مغزه (شفاهی).....
- ۷۹..... بررسی جامع رفتار رژیم جریان حبایی برای بهینه سازی تجهیزات و طراحی خط لوله (پوستر).....
- ۸۴..... مدلسازی عددی جریان وابسته به چگالی در محیط های متخلخل ترک دار با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته (شفاهی).....
- ۸۹..... توسعه مدل پروکسی هوشمند برای تزریق فوم در مخزن کربناته شکاف دار جهت ازدیاد برداشت نفت (شفاهی).....
- ۹۴..... بررسی اثر نفوذپذیری ذاتی اولیه آبخوان تحت تزریق گاز کربن دی اکسید بر روی توزیع فشار گاز در آن (شفاهی).....
- ۹۹..... تخمین تراوایی نسبی سنگ مخزن ناهمسانگرد با استفاده از پردازش داده دیجیتال (شفاهی).....
- ۱۰۳..... بررسی اثر توزیع ترشوندگی بر قابلیت ذخیره سازی هیدروژن در آبدۀ های زیرزمینی ناهمگن در مقیاس منفذ (شفاهی).....
- ۱۰۸..... بررسی تاثیر امواج فراصوت در رسوب آسفالتین ها درون محیط متخلخل (شفاهی).....
- ۱۱۳..... انتخاب چند معیاره سناریو بهینه ذخیره سازی زیر زمینی هیدروژن بر مبنای شبیه سازی مونت کارلو و آنالیز عدم قطعیت (شفاهی).....
- ۱۱۹..... مروری بر روش های افزایش راندمان بهره برداری از چاه های نفت (پوستر).....

- ۱۲۴.....بهسازی بیولوژیک خاک (پوستر).....
- ۱۲۸.....کاربرد آنالیز آماری تصاویر CBCT در ارزیابی ناهمگنی سنگ مخزن های هیدروکربنی و مطالعات مخزن (شفاهی).....
- ۱۳۳.....تأثیر حلال بر تخلخل، بلورینگی و پایداری حرارتی چارچوب فلزی-آلی ZIF-8 (شفاهی).....
- ۱۳۷.....مطالعه مروری استخراج لیتیوم از آب شور مخازن زمین گرمایی (پوستر).....
- ۱۴۲.....شبیه سازی عددی و مطالعه تجربی تزریق بخار اشباع/گرم شده به ناحیه غیر اشباع خاک (شفاهی).....  
مقایسه خصوصیات مهندسی ژئوتکنیکی ماسه بادرفتی کویر مصر ایران با سه ماسه یکنواخت دیگر جهت استفاده در تحقیقات آزمایشگاهی (شفاهی).....
- ۱۴۸.....
- ۱۵۴.....تجزیه و تحلیل کتابشناسی در پژوهش های علمی در حوزه خاک های غیر اشباع (پوستر).....
- ۱۵۸.....مطالعه جذب ترکیبات رنگی آنیونی و کاتیونی از آب با استفاده از چارچوب فلز-آلی نانومتخلخل ZIF-8 (پوستر).....
- ۱۶۲.....بهینه سازی فرآیند استخراج انرژی از سیستم های زمین گرمایی بهبود یافته با شکاف محدود (شفاهی).....
- ۱۶۷.....روش ترکیبی نانوهیبرید- آب کم شور و ماده فعال سطحی سبز برای بهبود بازیافت نفت (شفاهی).....  
بررسی آزمایشگاهی تأثیر مواد ژل پلیمری و ژل نانوکامپوزیتی در محیط متخلخل به منظور انسداد آب اضافی و ازدیاد برداشت نفت (شفاهی).....
- ۱۷۲.....
- مطالعه آزمایشگاهی مقایسه جذب و دفع ترکیبات قطبی نفتی بر روی کوارتز و رس های کائولینیت و ایلیت در حضور آب کم شور و پر شور (شفاهی).....
- ۱۷۸.....
- ۱۸۲.....مروری بر کاربرد پردازش تصویر در محیط های متخلخل (پوستر).....
- ۱۸۳.....شبیه سازی عددی مستقیم جریان سیال تک فاز در رسانه متخلخل دوبعدی (پوستر).....
- ۱۸۷.....شبیه سازی عددی مستقیم جریان سیال دوفاز در رسانه متخلخل دوبعدی (پوستر).....
- ۱۹۱.....بررسی تأثیر زاویه شیب بر عملکرد موانع شکافدار در استهلاک انرژی جنبشی جریان های واریزه ای (شفاهی).....
- ۱۹۵.....تأثیر شوری بر روی رفتار جریان فوم جهت کنترل همنوایی در فرایندهای تزریق گاز پایه: مطالعه در مقیاس میکرو (شفاهی).....
- ۱۹۹.....اثر شوری بر رفتار جریان کف برای کنترل انطباق در فرایندهای تزریق مبتنی بر گاز: مطالعه در مقیاس میکرو (شفاهی).....
- ۲۰۰.....تأثیر ثابت زمانی و پیچیدگی فضای منفذی بر روی ضریب جابجایی برای جریان سیالات غیر نیوتنی در محیط متخلخل (شفاهی).....
- ۲۰۵.....ارزیابی پتانسیل شبکه های عصبی کانولوشنال با وضوح فوق العاده در بهبود وضوح تصاویر سنگ دیجیتال (شفاهی).....
- ۲۰۷.....مطالعه شبیه سازی لحاظ ناهمسانگردی ناشی از وجود شکستگی های مایل در محیط متخلخل شکافدار (شفاهی).....
- ۲۱۱.....مطالعه عددی نفوذ خود بخودی سیالات توانی در بسترهای متخلخل نیمه اشباع (شفاهی).....
- ۲۱۵.....شبیه سازی تست ردیاب شیمیایی تک چاهی (SWCT) برای اندازه گیری اشباع نفت باقی مانده (شفاهی).....
- ۲۱۹.....مدل سازی شبکه حفره ای فرآیند تزریق گاز غیر تعادلی در مخازن شکافدار (پوستر).....
- ۲۲۳.....مقایسه چرخه عمر زیست محیطی شیروانی های پایدار شده به دو روش میخکوبی و مهاربندی (پوستر).....
- ۲۲۷.....بررسی تأثیر زبری شکاف بر تراوایی نسبی محیط متخلخل شکافدار به کمک شبیه سازی عددی مقیاس حفره (شفاهی).....
- ۲۳۲.....مطالعه عددی اثر توزیع مکانی بارش مصنوعی بر جریان غیر اشباع در شیروانی خاکی محدود (شفاهی).....
- ۲۳۶.....بررسی هدایت هیدرولیکی ناهمسان خاک های حاوی بنتونیت با تراوانج سه محوری مکعبی (شفاهی).....
- ۲۴۰.....پیش بینی میزان ذخیره سازی دی اکسید کربن در مخازن زیر زمینی با استفاده از هوش مصنوعی (شفاهی).....

- ۲۴۴.....تولید تصاویر سنگ مخزن کربناته شکافدار طبیعی با استفاده از معماری یادگیری عمیق (شفاهی).
- ۲۴۸.....مدلسازی دو مقیاسی فرآیندهای شیمیایی-هیدرولیکی-مکانیکی در محیطهای متخلخل (پوستر).
- ۲۵۲.....شکست ترموهیدرولیک محیط متخلخل غیراشباع با استفاده از اجزای محدود بسط یافته و روش زیرگام زمانی (شفاهی).
- ۲۵۶.....بررسی فرایندهای رهایش دارو: مدل سازی (پوستر).



## تزریق و ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید در مخازن نفت و گاز تخلیه شده به منظور ازدیاد برداشت نفت و حفظ محیط زیست

محمدامین بهنام مطلق؛ امیرحسین سعیدی دهقانی\*؛ هادی تنهایی<sup>۱</sup>

### چکیده

اخیراً انتشار فزاینده گازهای گلخانه‌ای ناشی از سوختن سوخت‌های فسیلی، آسیب‌های جبران‌ناپذیری به محیط زیست وارد کرده و باعث گرمایش جهانی شده است. گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسید کربن، به عنوان عامل اصلی گرمایش جهانی شناخته شده‌اند. در نتیجه، دی‌اکسید کربن به یک آلاینده محیط زیستی مهم تبدیل شده است و به تحلیل دقیق نیاز دارد، زیرا نقش مهمی در فرآیندهای تغییرات آب و هوایی ایفا می‌کند. به همین دلیل، پژوهشگران به راهبردهای مختلفی دست یافته‌اند که یکی از آنها تزریق دی‌اکسید کربن به مخازن نفت و گاز تخلیه شده است. پروژه‌های تحقیقاتی نشان داده‌اند که سنگ پوششی که قبلاً برای ذخیره‌سازی نفت و گاز استفاده می‌شده است، می‌تواند مجدداً برای محدود کردن دی‌اکسید کربن تزریقی و جلوگیری از مهاجرت به سمت بالا استفاده شود. مخازن نفت و گاز تخلیه شده فرصت‌های برتری برای ذخیره‌سازی زمین‌شناسی در مقایسه با مخازن آب شور عمیق ارائه می‌دهند. یکی از عناصر کلیدی برای ظرفیت ذخیره‌سازی مخازن، درک فشار ایده‌آل برای تزریق دی‌اکسید کربن است، که مسئله‌ای مهم برای مهندسان مخزن می‌باشد. در واقع، تزریق و ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن در مخازن نفت و گاز تخلیه شده نه تنها به کاهش گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به افزایش برداشت نفت از مخازن تخلیه شده نیز منجر شود و در نهایت به دستیابی به سطح اقتصادی سودآور برای کشورهای تولیدکننده نفت کمک کند.

### کلیدواژه‌ها

گازهای گلخانه‌ای، کربن دی‌اکسید، مخازن تخلیه شده، ذخیره‌سازی، افزایش برداشت نفت

<sup>۱</sup>مشخصات و ایمیل نویسنده اول (گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران) ([m\\_behnammotlagh@modares.ac.ir](mailto:m_behnammotlagh@modares.ac.ir))

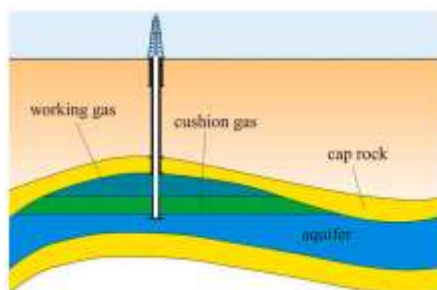
<sup>۲</sup>مشخصات و ایمیل نویسنده دوم (گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران) ([asaedi@modares.ac.ir](mailto:asaedi@modares.ac.ir))

\*نویسنده مسئول

<sup>۳</sup>مشخصات و ایمیل نویسنده سوم (گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران) ([hadi.tanhaei@modares.ac.ir](mailto:hadi.tanhaei@modares.ac.ir))

## ۱. مقدمه

اتحادیه اروپا، ژاپن، کره جنوبی، ایالات متحده و سایر کشورها دستیابی به کربن خنثی را قبل از سال ۲۰۵۰ هدف‌گذاری کرده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که فعالیت‌های مرتبط با ذخیره‌سازی یا استفاده از کربن‌دی‌اکسید یک روند جهانی است [۱]. در حال حاضر، مهمترین سازندهای زمین شناسی برای ذخیره‌سازی کربن در جهان شامل مخازن نفت و گاز تخلیه شده، آبخوان‌های شور عمیق، لایه‌های زغال غیرقابل استخراج و ذخیره‌سازی زیردريا می‌باشد. مخازن هیدروکربنی تخلیه شده به دلیل مشخص بودن ساختار زمین شناسی، درز و بند خوب و یکپارچگی پوش سنگ آنها و وجود تاسیسات زیرسطحی و سطحی مورد نیاز، مناسب‌ترین گزینه‌ها برای ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز هستند. علاوه بر این، عدم نفوذپذیری پوش سنگ مخازن گاز تخلیه شده نیز ثابت شده است. وجود گاز باقی‌مانده در یک مخزن گاز تخلیه شده، به عنوان یک مزیت محسوب می‌شود زیرا می‌تواند نقش می‌تواند نقش گاز بالشتک را ایفا کند [۲]. به دلیل جابه‌جایی آب آبخوان، یک مخزن گاز تخلیه شده (با در شرف تخلیه) به طور کلی با فشار پایین و اشباع آب بالا در منطقه‌ای که قبلاً توسط گاز اشغال شده بود، مشخص می‌شود. به عبارت دیگر، مخزن گاز تخلیه شده می‌تواند به عنوان بخشی از یک آبخوان در نظر گرفته شود که در آن تنها مقادیر کمی از آب درون منافذ وجود دارد که عمدتاً توسط گاز محبوس اشغال شده‌اند [۳]. شکل ۱ یک مخزن گاز تخلیه شده را نشان می‌دهد که عناصر کلیدی مورد نیاز برای عملیات ایمن را شامل می‌شود، یعنی (الف) یک سازند متخلخل و نفوذپذیر برای ذخیره‌سازی  $CO_2$ ، (ب) یک پوشش نفوذناپذیر برای جلوگیری از مهاجرت عمودی به دلیل شناوری، و (ج) یک تله تقادیسی برای محدود کردن حرکت جانبی  $CO_2$  که به منظور ایجاد تجمع مؤثر کربن-دی‌اکسید است [۴].



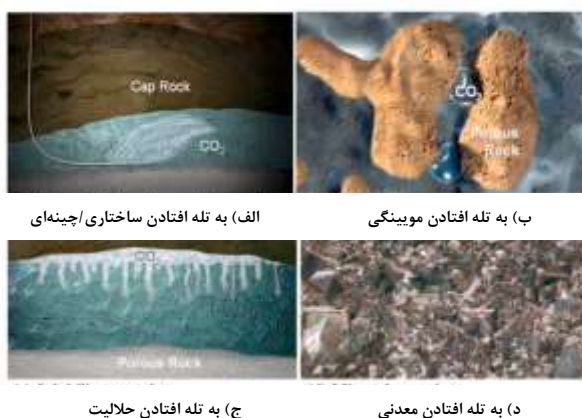
شکل ۱: ذخیره  $CO_2$  در مخزن گاز تخلیه شده [۵]

چندین بررسی جامع در مورد ذخیره‌سازی  $CO_2$  انجام شده است. بررسی‌های قبلی دانش مربوط به زمینه ذخیره‌سازی، وضعیت پروژه، مدل‌سازی و پایش، تخمین ظرفیت، ذخیره‌سازی کربن و تولید هیدروژن و ذخیره‌سازی زیردريایی را پوشش می‌دهد. با این حال، بررسی‌های دقیق کمی بر روی پروژه‌های موجود، عوامل تأثیرگذار و مکانیزم‌های تله‌گذاری ذخیره‌سازی  $CO_2$  در مخازن نفت و گاز تخلیه شده که فاقد تجزیه و تحلیل ارزیابی پتانسیل ذخیره‌سازی  $CO_2$  هستند، تمرکز کرده‌اند [۶]. در این مقاله با بررسی مکانیزم‌های تله افتادن گاز و سپس تعیین عوامل تأثیرگذار زمین‌شناسی و مهندسی در موفقیت یا شکست ذخیره‌سازی  $CO_2$  انتظار می‌رود به مهندسان در جهت شناسایی سایت‌های بالقوه ذخیره‌سازی گاز کربن‌دی‌اکسید و تسریع در انجام فرآیندهای مرتبط کمک شایانی کند.

## ۲. مکانیزم‌های تله افتادن گاز

ذخیره‌سازی گاز در مخازن تخلیه شده یک مفهوم تثبیت شده است. اولین گزارش مستند به سال ۱۹۱۵ در شهرستان ولاند، انتاریو، کانادا برمی‌گردد که از یک عملیات ذخیره‌سازی در یک میدان گازی فعال بدست آمده

است [۷]. از آن زمان، دانشمندان و مهندسان از شباهت‌های موجود بین عملیات ذخیره‌سازی با محدودیت‌های فنی، زمین‌شناسی و هیدرولیکی مشابه مانند ذخیره‌سازی گاز طبیعی در زیر زمین و تا حد کمتری ذخیره‌سازی  $\text{CO}_2$  در زیر زمین استفاده کرده‌اند تا رفتار  $\text{H}_2$  در زیر سطح زمین را نیز بهتر درک کنند. با این حال، چندین ویژگی (فیزیکی و عمدتاً شیمیایی) که خاص ذخیره‌سازی  $\text{CO}_2$  هستند باید مورد توجه قرار گیرند. علی و همکاران (۲۰۲۲) در زمینه ذخیره‌سازی گاز  $\text{CO}_2$  اشاره کردند که به دام افتادن ساختاری/چینه‌ای در پوش‌سنگ و سازندهای رسوبی بیشتر غالب است [۸]، [۹]. این در حالی است که به دام افتادن باقیمانده/مویبندی در تشکیلات رسوبی بیشترین فراوانی را دارد. هر دو مکانیزم انحلال/حل‌شدگی و به دام افتادن معدنی در سازندهای بازالتی و رسوبی غالب هستند [۱۰]، [۱۱]. شکل ۲ مکانیزم‌های به دام افتادن گاز  $\text{CO}_2$  در یک مخزن زیرزمینی را نشان می‌دهد.



شکل ۲: مکانیزم به دام افتادن گاز [۱۲]

## ۳. فرآیندهای فنی

ذخیره‌سازی  $\text{CO}_2$  در مخازن نفت و گاز تخلیه‌شده ابتدا شامل جمع‌آوری، آب‌زدایی و فشرده‌سازی  $\text{CO}_2$  است و سپس آن را به صورت  $\text{CO}_2$  مایع یا  $\text{CO}_2$  فوق بحرانی به داخل مخازن تخلیه شده برای ذخیره‌سازی دائمی تزریق می‌کنند. تأسیسات و فناوری‌های مورد استفاده در عملیات افزایش برداشت نفت و گاز با  $\text{CO}_2$  تقریباً همان‌هایی هستند که برای ذخیره‌سازی  $\text{CO}_2$  مورد نیاز هستند [۱۳]. گردش کارهای ذخیره‌سازی  $\text{CO}_2$  در مخازن تخلیه شده عمدتاً به مراحل جمع‌آوری  $\text{CO}_2$ ، تصفیه (مانند جداسازی گاز دودکش و جداسازی آب و گاز)، تزریق مایع فشرده (سیلاب‌زنی امتزاجی و سیلاب‌زنی غیرامتزاجی)، ذخیره‌سازی و پایش تقسیم می‌شوند (شکل ۳).



شکل ۳: فناوری جذب و ذخیره‌سازی زمین‌شناسی CO<sub>2</sub> [۱۴]

#### ۴. عوامل زمین‌شناسی و مهندسی مؤثر بر فرآیند ذخیره‌سازی در مخازن تخلیه شده

یکپارچگی پوش سنگ عامل اصلی برای ارزیابی ایمنی طولانی‌مدت ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در مخازن نفت و گاز تخلیه‌شده است. ضخامت، ارتفاع، امتداد جانبی ستون نفت و گاز و تحمل سنگ پوششی در برابر تغییرات مکانیکی و فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی ناشی از تعاملات کربن‌دی‌اکسید-آب-سنگ از عوامل مهمی هستند که باید مورد توجه قرار گیرند [۱۵]. همچنین ترک‌ها و گسل‌ها می‌توانند مسیرهای جریان CO<sub>2</sub> باشند و با تغییر فشار و واکنش‌های شیمیایی طی و پس از تزریق CO<sub>2</sub> فعال شوند، که این می‌تواند منجر به لغزش یا تشکیل گسل‌های جدید شود [۱۶]. انحلال و ته‌نشینی مواد معدنی نیز می‌تواند ترک‌ها را گسترش یا بسته کند، که نیازمند بررسی بیشتری است. جریان دو فازی سیال به تعادل نیروهای ویسکوز، موینگی و گرانشی بستگی دارد. نیروهای موینگی، ویسکوز و شناوری در مجموع ایمنی ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> را تعیین می‌کنند و در صورت غلبه نیروهای موینگی و ویسکوز بر شناوری، CO<sub>2</sub> در منافذ سنگ به دام می‌افتد [۱۷]. از سوی دیگر در مخازن نفت و گاز تخلیه‌شده، وجود مواد معدنی حساس به اسید و مقدار زیادی آب تشکیل‌دهنده تأثیر زیادی بر ظرفیت ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> دارند [۱۸]. تعامل CO<sub>2</sub>، سنگ مخزن و آب تشکیل‌دهنده عمدتاً تحت تأثیر نوع سنگ مخزن، دما، فشار و شوری آب قرار دارد [۱۹]. خاصیت ترشوندگی سنگ‌ها بر قابلیت تزریق، امنیت نگهداری، ظرفیت به دام اندازی ساختاری و موینگی CO<sub>2</sub> تأثیر مستقیم دارد و در حال حاضر رابطه کمی مستقیم بین زاویه تماس و شبیه‌سازی نشت CO<sub>2</sub> به‌طور عمیق بررسی نشده است [۲۰]. رسوب‌گذاری نمک فرآیندی ترکیبی از نشت گاز-مایع و تبلور مواد معدنی است که عمدتاً در نزدیکی چاه‌های تزریق CO<sub>2</sub> در مناطق با جریان بالا اتفاق می‌افتد [۲۱]. این فرآیند باعث کاهش احتمال نشت CO<sub>2</sub> از طریق گسل‌ها می‌شود، اما مکانیزم دقیق رسوب‌گذاری نمک در مخازن نفت و گاز تخلیه‌شده، به ویژه در حضور آب، نفت و گاز به‌طور کامل بررسی نشده است [۲۲].

نشت چاه یکی از ریسک‌های بالا برای نشت CO<sub>2</sub> است که به دلیل نفوذ CO<sub>2</sub> به ماتریس سیمانی، می‌تواند باعث تغییر شکل و تخریب آن شود. نفوذ CO<sub>2</sub> منجر به تشکیل مناطق مختلف در ماتریس سیمان، از جمله ناحیه رسوب کربنات کلسیم و ژل سیلیکا می‌شود که خطر نشت را افزایش [۲۳]، [۲۴]. برای جلوگیری از این خطر، می‌توان از مواد مرکب مانند سیمان مقاوم در برابر خوردگی و آلیاژهای مقاوم به اسید استفاده کرد [۲۵]. فشاردهی مجدد مخازن تخلیه‌شده نفت و گاز به سطحی برابر یا پایین‌تر از فشار اولیه می‌تواند باعث تغییر در خواص الاستیک کلاهدک و شکست آن شود [۲۶]. تغییرات فشار و استرس می‌تواند منجر به نشتی موینگی و ایجاد میکروتورک‌ها در کلاهدک شود. در حالی که تأثیر این عوامل بر ذخیره CO<sub>2</sub> به خوبی تحلیل شده، اما ارتباط بین مکانیسم‌های به‌تله‌افتادن در مقیاس میکرو و اثرات ذخیره‌سازی در مقیاس ماکرو به خوبی توضیح داده نشده است. به ویژه، چگونگی تغییر قابلیت ترشوندگی سطح سنگ‌ها توسط CO<sub>2</sub> فوق بحرانی در سیستم سه‌فازی کربن‌دی‌اکسید-

آب-نفت و مسیرهای نشستی از طریق گسل‌ها نیاز به تحقیقات بیشتری دارند[۱].

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی و تحلیل ذخیره سازی CO<sub>2</sub> در مخازن نفت و گاز تخلیه شده به منظور استفاده در عملیات ازدیاد برداشت پرداخته شد. مزایای این روش شامل ظرفیت بالا، عملکرد خوب در مهار کردن CO<sub>2</sub>، تجربه زیاد در شناخت مخازن، زیرساخت چاه‌های موجود و سهولت اجرا است. با این حال ارزیابی‌های دقیق برای انتخاب مخزن مناسب الزامی است. عوامل تأثیرگذار بر ذخیره‌سازی شامل عوامل زمین‌شناسی (پوش سنگ، گسل، فشار مویینگی) و مهندسی (استحکام چاه، فشار تزریق) می‌باشد. در آینده باید ارتباط بین مکانیزم‌های تله‌گذاری در مقیاس میکرو و تأثیر آن بر کل مخزن (مقیاس کلان) بررسی شود. همچنین برای اطمینان از عدم نشستی، از مواد مقاوم در برابر خوردگی در ساختار چاه استفاده شود. مکانیزم‌های اصلی به تله‌افتادن CO<sub>2</sub> شامل به تله‌افتادن ساختاری/چینه‌ای، تله مویینگی، تله انحلال و تله معدنی است. با این حال درک کاملی از چگونگی عملکرد همزمان این تله‌ها، به خصوص در مقیاس میکرو و نانو تحت فشار و دمای بالا وجود ندارد. مطالعات بیشتر برای درک رفتار و حل‌پذیری CO<sub>2</sub> و تغییر فاز آن در شرایط پیچیده زمین‌شناسی مورد نیاز است. ارزیابی پتانسیل ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> شامل مراحل انتخاب حوضه، انتخاب مخزن، ارزیابی امنیت ذخیره‌سازی و محاسبه ظرفیت می‌باشد. برای محاسبه ظرفیت، پیشنهاد شده است از مدل عددی مخزن با در نظر گرفتن ناهمگنی‌های مختلف استفاده شود.

## ۶. فهرست مراجع

- [1] B. Wei, B. Wang, X. Li, M. Aishan, and Y. Ju, "CO<sub>2</sub> storage in depleted oil and gas reservoirs: A review," *Advances in Geo-Energy Research*, vol. 9, no. 2, Art. no. 2, Jul. 2023, doi: 10.46690/ager.2023.08.02.
- [2] R. Tarkowski, "Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 105, pp. 86–94, May 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.01.051.
- [3] R. L. Wallace, Z. Cai, H. Zhang, K. Zhang, and C. Guo, "Utility-scale subsurface hydrogen storage: UK perspectives and technology," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 49, pp. 25137–25159, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.05.034.
- [4] M. Lysy, M. Fernø, and G. Erslund, "Seasonal hydrogen storage in a depleted oil and gas field," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 49, pp. 25160–25174, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.05.030.
- [5] R. Tarkowski, "Perspectives of using the geological subsurface for hydrogen storage in Poland," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 347–355, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.10.136.
- [6] B. Yang, C. Shao, X. Hu, M. R. Ngata, and M. D. Aminu, "Advances in Carbon Dioxide Storage Projects: Assessment and Perspectives," *Energy Fuels*, vol. 37, no. 3, pp. 1757–1776, Feb. 2023, doi: 10.1021/acs.energyfuels.2c03826.
- [7] J. Taylor, J. Alderson, K. Kalyanam, A. Lyle, and L. Phillips, "Technical and economic assessment of methods for the storage of large quantities of hydrogen," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 11, no. 1, pp. 5–22, 1986, doi: 10.1016/0360-3199(86)90104-7.
- [8] M. Ali, N. K. Jha, N. Pal, A. Keshavarz, H. Hoteit, and M. Sarmadivaleh, "Recent advances in carbon dioxide geological storage, experimental procedures, influencing parameters, and future outlook," *Earth-Science Reviews*, vol. 225, p. 103895, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.earscirev.2021.103895.
- [9] S. Iglauer *et al.*, "Hydrogen Flooding of a Coal Core: Effect on Coal Swelling," *Geophysical Research Letters*, vol. 49, no. 6, p. e2021GL096873, Mar. 2022, doi:



- 10.1029/2021GL096873.
- [10] M. Arif, H. Rasool Abid, A. Keshavarz, F. Jones, and S. Iglauer, "Hydrogen storage potential of coals as a function of pressure, temperature, and rank," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 620, pp. 86–93, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jcis.2022.03.138.
- [11] A. Keshavarz, H. Abid, M. Ali, and S. Iglauer, "Hydrogen diffusion in coal: Implications for hydrogen geo-storage," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 608, pp. 1457–1462, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jcis.2021.10.050.
- [12] X. Zhao, X. Liao, W. Wang, C. Chen, Z. Rui, and H. Wang, "The CO<sub>2</sub> storage capacity evaluation: Methodology and determination of key factors," *Journal of the Energy Institute*, vol. 87, no. 4, pp. 297–305, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.joei.2014.03.032.
- [13] O. Ozotta, M. Ostadhassan, K. Liu, B. Liu, O. Kolawole, and F. Hadavimoghaddam, "Reassessment of CO<sub>2</sub> sequestration in tight reservoirs and associated formations," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 206, p. 109071, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.petrol.2021.109071.
- [14] X. Wang, J. Chen, and T. Zhang, "Research progress in CO<sub>2</sub> adsorption using activated carbon," *Chemical Research*, vol. 29, no. 1, pp. 1–11, 2018.
- [15] A. Rezaeyan, S. A. Tabatabaei-Nejad, E. Khodapanah, and M. Kamari, "Parametric analysis of caprock integrity in relation with CO<sub>2</sub> geosequestration: capillary breakthrough pressure of caprock and gas effective permeability," *Greenhouse Gases*, vol. 5, no. 6, pp. 714–731, Dec. 2015, doi: 10.1002/ghg.1516.
- [16] B. H. Hager *et al.*, "A process-based approach to understanding and managing triggered seismicity," *Nature*, vol. 595, no. 7869, pp. 684–689, 2021.
- [17] Z. Wang, H. Li, S. Liu, J. Xu, J. Liu, and X. Wang, "Risk evaluation of CO<sub>2</sub> leakage through fracture zone in geological storage reservoir," *Fuel*, vol. 342, p. 127896, 2023.
- [18] I. Hutcheon *et al.*, "Interactions of CO<sub>2</sub> with formation waters, oil and minerals and CO<sub>2</sub> storage at the Weyburn IEA EOR site, Saskatchewan, Canada," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 53, pp. 354–370, 2016.
- [19] H. Koide *et al.*, "Subterranean containment and long-term storage of carbon dioxide in unused aquifers and in depleted natural gas reservoirs," *Energy Conversion and Management*, vol. 33, no. 5–8, pp. 619–626, 1992.
- [20] S. Iglauer, C. H. Pentland, and A. Busch, "CO<sub>2</sub> wettability of seal and reservoir rocks and the implications for carbon geo-sequestration," *Water Resour. Res.*, vol. 51, no. 1, pp. 729–774, Jan. 2015, doi: 10.1002/2014WR015553.
- [21] D. He, P. Jiang, and R. Xu, "The influence of heterogeneous structure on salt precipitation during CO<sub>2</sub> geological storage," *Advances in Geo-Energy Research*, vol. 7, no. 3, 2023, Accessed: Jun. 02, 2024. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Di-He-7/publication/368461088\\_The\\_influence\\_of\\_heterogeneous\\_structure\\_on\\_salt\\_precipitation\\_during\\_CO2\\_geological\\_storage/links/63f434ee0d98a97717a676e8/The-influence-of-heterogeneous-structure-on-salt-precipitation-during-CO2-geological-storage.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Di-He-7/publication/368461088_The_influence_of_heterogeneous_structure_on_salt_precipitation_during_CO2_geological_storage/links/63f434ee0d98a97717a676e8/The-influence-of-heterogeneous-structure-on-salt-precipitation-during-CO2-geological-storage.pdf)
- [22] D. Akindipe, S. Saraji, and M. Piri, "Salt precipitation in carbonates during supercritical CO<sub>2</sub> injection: A pore-scale experimental investigation of the effects of wettability and heterogeneity," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 121, p. 103790, 2022.
- [23] S. A. Carroll, J. Iyer, and S. D. C. Walsh, "Influence of Chemical, Mechanical, and Transport Processes on Wellbore Leakage from Geologic CO<sub>2</sub> Storage Reservoirs," *Acc. Chem. Res.*, vol. 50, no. 8, pp. 1829–1837, Aug. 2017, doi: 10.1021/acs.accounts.7b00094.
- [24] R. K. Haghi, A. Chapoy, L. M. Peirera, J. Yang, and B. Tohidi, "pH of CO<sub>2</sub> saturated water and CO<sub>2</sub> saturated brines: Experimental measurements and modelling," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 66, pp. 190–203, 2017.
- [25] J. J. Chen, J. J. Thomas, H. F. Taylor, and H. M. Jennings, "Solubility and structure of

- calcium silicate hydrate,” *Cement and concrete research*, vol. 34, no. 9, pp. 1499–1519, 2004.
- [26] B. Orlic, “Geomechanical effects of CO<sub>2</sub> storage in depleted gas reservoirs in the Netherlands: Inferences from feasibility studies and comparison with aquifer storage,” *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 8, no. 6, pp. 846–859, 2016.



## بررسی سورفکتانت های طبیعی در برهمکنش با یون های دو ظرفیتی و اثرات آنها بر محیط زیست

محمد رضا صنیعی<sup>۱</sup>؛ امیرحسین سعیدی دهقانی<sup>\*</sup>

### چکیده

اگرچه در دهه های اخیر تزریق آب و گاز در بهبود بازیافت نفت توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده است، اما برخی از مهندسان معتقدند که روش های جایگزین و مقرون به صرفه تر می توانند نقش محوری تری در این زمینه ایفا کنند. استفاده از موادی مانند سورفکتانت ها و پلیمرها به عنوان یک تکنیک نوآورانه در نظر گرفته می شود که تأثیر قابل توجهی بر بخش نفت گذاشته است. با این حال، تولید در مقیاس بزرگ چنین موادی از نظر مالی بسیار گران است. علاوه بر این، ساخت این مواد منجر به تولید پسماند های سمی و خطرناکی می شود که میتواند تهدیدهای مختلفی را برای سلامت انسان و محیط زیست ایجاد کنند و در نهایت منجر به آلودگی گسترده و غیرقابل برگشت می شوند. استفاده از سورفکتانت های طبیعی به عنوان یک راه حل مناسب با کارایی نسبتاً بالایی ظاهر می شوند. این سورفکتانت های طبیعی از برگ گیاهان بومی استخراج می شوند که می توانند به عنوان روشی مقرون به صرفه استفاده شوند. همچنین این مواد زیست تخریب پذیر هستند و هیچ تهدیدی برای سلامت انسان و محیط زیست ایجاد نمی کنند. ترکیب این سورفکتانت های طبیعی در آزمایش های مرتبط با نفت نتایج رضایت بخشی را به همراه داشته است، که اثربخشی آنها را در کاهش کشش سطحی بین آب و نفت، اصلاح ویسکوزیته نفت خام، افزایش نرخ استخراج آسفالتین و جداسازی سنگین نفت خام نشان می دهد.

### کلیدواژه‌ها

سورفکتانت های طبیعی، آسفالتین، کشش بین سطحی، زیست تخریب پذیر

<sup>۱</sup> مشخصات و ایمیل نویسنده اول (گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران) ([mr.saniee@modares.ac.ir](mailto:mr.saniee@modares.ac.ir))

<sup>۲</sup> مشخصات و ایمیل نویسنده دوم (گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران) ([asaedi@modares.ac.ir](mailto:asaedi@modares.ac.ir))

<sup>\*</sup> نویسنده مسئول

## ۱. مقدمه

استفاده از فرایندهای تولید متعارف بسته به نیروهای محرکه طبیعی منجر به بازیابی تنها ۳۰ درصد از نفت کل مخازن را شامل می‌شود که این امر قادر به برآوردن تقاضای رو به رشد انرژی نیست. به همین دلیل با استفاده از فناوری‌های جدید و مدرن میزان تولید از مخازن را افزایش می‌دهند. تزریق سورفکتانت به عنوان یک رویکرد بازیابی نفت افزایش یافته است به طوری که با کاهش کشش سطحی میان آب و نفت منجر به افزایش راندمان جابجایی می‌شود، سورفکتانت‌ها یا مواد فعال سطحی موادی هستند که هنگامی که به مقدار بسیار اندک استفاده می‌شوند، کشش سطحی سیالات را تغییر می‌دهند [۱]. سورفکتانت‌ها جزو مواد آلی طبقه بندی می‌شوند و به لحاظ ساختاری آمفیپاتیک اند، یعنی شامل دو گروه آبگریز و آبدوست هستند. به عبارت دیگر، سورفکتانت‌ها یک جزء نامحلول در آب و یک جزء محلول در آب دارند. سورفکتانت‌ها کشش سطحی را در مرز مشترک بین دو فاز به حداقل رسانده و همین امر لزوم استفاده از آن‌ها را در محلول بسیار آشکار می‌کند [۲]. با توجه به تاثیر سورفکتانت‌ها در کاهش کشش سطحی و افزایش تحرک پذیری نفت خام و تاثیر بر قسمت‌های قطبی نفت خام کمک شایانی به فرایند کار می‌کند. استفاده از ظرفیت‌های پایین نمک‌ها، یکی از فرایندهای متناسب با صنعت می‌باشد چرا که هر چه میزان یون‌های محلول کمتر باشد، واکنش میان مواد به حداقل می‌رسد یعنی استفاده از ظرفیت‌های کم شوری باعث تقویت کارایی موادی مثل سورفکتانت‌ها می‌شود بنابراین با بهره‌گیری از این امر می‌توان با استفاده از ظرفیت‌های پایین یون‌های دو ظرفیتی کمک شایانی به بهره‌وری از مخازن نفتی کرد و همچنین یون‌های تعیین‌کننده (منیزیم، کلسیم و سولفات) در محلول سورفکتانتی با توجه به بار الکتریکی یون‌ها و ترکیب شیمیایی سورفکتانت‌ها (ساپونین) قادر به بهبود و یا کاهش اثرگذاری این مواد هستند. با توجه به اینکه استخراج این مواد از برگ گیاهان صورت می‌گیرد زیست‌تخریب‌پذیر هستند و سلامتی انسان و محیط زیست را به خطر نمی‌اندازند و تولید این گونه مواد زیستگاه طبیعی را دچار آسیب نمی‌کنند و ترکیب آن‌ها با یون‌های دو ظرفیتی نیز ایجاد مشکل نمی‌کند.

## ۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش نفت خام مورد استفاده از قسمت شمالی میدان آزادگان است که از جمله هیدروکربن‌های سنگین به‌شمار می‌آید، ویسکوزیته نفت خام با دستگاه آنتوان پار اندازه‌گیری شد و عدد ۵۰۰ سنتی پواز گزارش شد و همچنین کشش بین سطحی آن عدد ۴۶٫۹ میلی نیوتن بر متر گزارش شد، این نفت خام دارای ۱۷٫۴ درصد آسفالتین بود. با استفاده از خشک‌شده برگ گیاهان سدر، رزماری، توت، نارنج و ترکیب آن‌ها با آب مقطر، به مدت ۲۰ روز داخل آون ۹۰ درجه قرار گرفت و سپس با استفاده از کاغذ صافی، محلول‌های آن‌ها را خالص‌سازی کرده و بعد از خشک کردن آن‌ها، مواد اصلی کار یعنی ساپونین‌ها بدست می‌آیند، که نقطه غلظت بحرانی این مواد یعنی برگ سدر ۵ درصد وزنی، برگ رزماری ۸ درصد وزنی، برگ توت ۱٫۵ درصد وزنی و برگ نارنج ۱ درصد وزنی بدست آمدند. ما در این پژوهش برای برگ‌های سدر و رزماری ۴ درصد وزنی و برگ توت ۱٫۳ درصد وزنی و برگ نارنج را ۱٫۵ درصد وزنی برای محلول‌سازی در نظر گرفتیم و این غلظت‌ها را به گونه‌ای ثابت در نظر گرفتیم تا بتوانیم اثر گذاری ظرفیت پایین یون‌های دو ظرفیتی را روی مواد سورفکتانتی و ترکیب آن‌ها با نفت خام مشاهده کنیم. یون‌های دو ظرفیتی مورد استفاده در این پژوهش شامل یون منیزیم، کلسیم و سولفات است که با استفاده از رابطه‌ی استوکیومتری محاسبه غلظت آن‌ها، غلظت انتخابی ثابت ۰٫۰۱ درصد وزنی از آن‌ها در آزمایشات منظور گردید.



شکل ۱: تصویر قطره نفت خام و عدد گزارش شده ی کشش بین سطحی آن

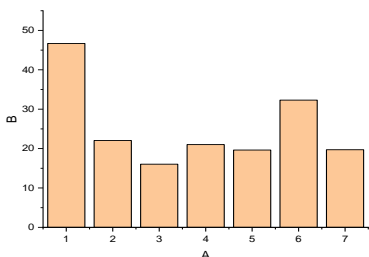
## ۱,۲ تست استخراج آسفالتین

آسفالتین مستخرج از نفت خام آزادگان ، حاوی ۱۷,۴ درصد آسفالتین بود که این عامل بسته به شرایط متغیر می‌شود، این تست با استفاده از منتل ، بالن ، سوکسله ، کاغذ واتمن سایز ۴۲، نرمال هپتان، تولوئن، ظروف شیشه‌ای و قیف شیشه‌ای انجام می‌شود، به این صورت که پنج گرم از نفت را در بالن شیشه‌ای می‌ریزیم و به ازای هر گرم از نفت، سی برابر نرمال هپتان برای ترکیب کردن اولیه استفاده می‌شود یعنی معادل ۷۳ گرم نرمال هپتان. محلول را به مدت ۱۰ الی ۱۵ دقیقه هم می‌زنیم روی منتل قرار داده و کندانسور را روی آن می‌گذاریم اجازه می‌دهیم تا نقطه جوش حرارت ببیند. محلول را به مدت ۲۴ ساعت در جای تاریک و خشکی نگه می‌داریم و سپس آن را خارج کرده، از کاغذ واتمن و قیف رد نموده و اجازه می‌دهیم فاز سنگینی که روی کاغذ رسوب کرده خشک شود سپس آن را داخل سوکسله گذاشته با نرمال هپتان شست و شو می‌دهیم و در قسمت آخر با تولوئن داخل بالن شیشه‌ای را که در ابتدا نفت اولیه را با نرمال هپتان ترکیب کرده بودیم، می‌ریزیم و اجازه می‌دهیم مرحله آخر شست و شو نیز صورت گیرد این مراحل تا سفید شدن محلول داخل سوکسله صورت می‌گیرد و نهایت کاغذ واتمن را خارج نموده و محلول داخل پایین بالن را به ظروف شیشه‌ای منتقل کرده اجازه می‌دهیم خشک شود و درصد آن را اندازه گیری می‌کنیم .

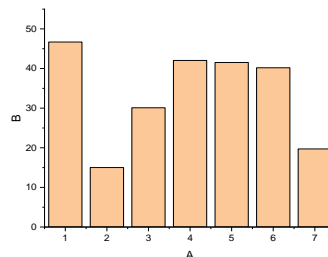


شکل ۲: هیتر و بالن و سوکسله

### ۳. بحث و نتایج



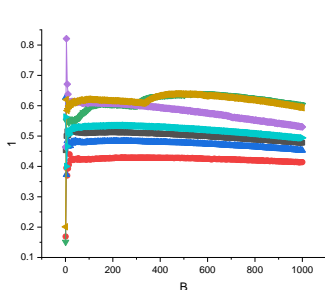
شکل (۴)



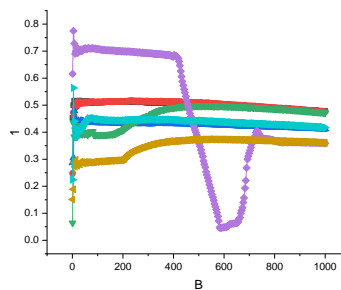
شکل (۳)

شکل ۳: عدد ۱ نشان دهنده نفت خام و عدد های ۲، ۳، ۴ مربوط به برگ سدر به همراه ۰،۰۱ یون های منیزیم، کلسیم و سولفات و عدد های ۵، ۶، ۷ به برگ رزماری به همراه ۰،۰۱ یون های منیزیم، کلسیم و سولفات هستند. شکل ۴: عدد های ۲، ۳، ۴ مربوط به برگ توت همراه با ۰،۰۱ یون های منیزیم، کلسیم و سولفات و عدد های ۵، ۶، ۷ مربوط به برگ نارنج همراه با ۰،۰۱ یون های منیزیم، کلسیم و سولفات هستند.

با توجه به نمودار کشتش بین سطحی بهترین سازگاری را برگ سدر با یون منیزیم، برگ رزماری با یون سولفات، برگ توت با یون کلسیم و برگ نارنج با یون های منیزیم و سولفات داشته است و باعث کاهش کشتش بین سطحی شده‌اند و بهترین سازگاری را از خود نشان داده‌اند.



شکل (۶)



شکل (۵)

شکل ۵: تغییرات ویسکوزیته نفت در مجاورت محلول های برگ سدر و رزماری همراه با ۰،۰۱ یون های تعیین کننده. شکل ۶: تغییرات ویسکوزیته نفت در مجاورت محلول های برگ توت و نارنج همراه با ۰،۰۱ یون های تعیین کننده.

افزودن یون های دو ظرفیتی به سورفکتانت ها و برهمکنش آن ها با نفت باعث کاهش ویسکوزیته نفت خام شدند و این امر نشان دهنده سازگاری یون های دو ظرفیتی با سورفکتانت ها را نشان می‌دهد و اثر آن ها را بهبود می‌بخشد.

جدول ۱: استخراج آسفالتین تحت تاثیر سورفکتانت ها به همراه ۰،۰۱ یون های تعیین کننده

| ۴ wt% سدر + یون سولفات    | ۴ wt% سدر + یون کلسیم    | ۴ wt% سدر + یون منیزیم    |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| ۱۶٪                       | ۱۰،۳۰٪                   | ۱۲٪                       |
| ۴ wt% رزماری + یون سولفات | ۴ wt% رزماری + یون کلسیم | ۴ wt% رزماری + یون منیزیم |
| ۱۵،۸۰٪                    | ۱۵،۹۰٪                   | ۱۶،۲۰٪                    |
| ۱،۳ wt% توت + یون سولفات  | ۱،۳ wt% توت + یون کلسیم  | ۱،۳ wt% توت + یون منیزیم  |

|                               |                           |                            |
|-------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| ٪۱۶,۹۰                        | ٪۱۸,۶۰                    | ٪۱۵                        |
| ۱,۵ wt٪ نارنج + یون<br>منیزیم | ۱,۵ wt٪ نارنج + یون کلسیم | ۱,۵ wt٪ نارنج + یون سولفات |
| ٪۱۸,۷۰                        | ٪۱۶,۵۰                    | ٪۱۷                        |

در بعضی از موارد اضافه کردن یون ها به سورفکتانت ها اثر بخش بوده و توانسته اند آسفالتین های موجود در نفت خام را کاهش داده و میزان آن ها را به حداقل برسانند.

#### ۴. نتایج مستخرج

- (۱) افزودن یون های دو ظرفیتی تعیین کننده به سورفکتانت ها با توجه به ماهیت سورفکتانت ها و سازگاری آن ها با یکدیگر موجب کاهش کشش بین سطحی نفت خام شده اند.
- (۲) برهمکنش میان محلول سورفکتانت ها - یون ها با نفت خام باعث کاهش ویسکوزیته نفت خام شدند و گر انرژی نفت خام کاهش پیدا کرد.
- (۳) در واکنش میان نفت خام و محلول سورفکتانت ها - یون ها و تاثیر آن ها بر یکدیگر باعث کاهش و افزایش میزان مستخرج آسفالتین شده اند.

#### ۵. فهرست مراجع

- [1] P.Tavakolia – S.Reza Shadizadeha- F.Hayatib –M.Fattahib- Effects of synthesized nanoparticles on oil/ water interfacial tension: Nanofluids stability considerations . Department of Petroleum Engineering, Abadan Faculty of Petroleum Engineering, Petroleum University of Technology (PUT), Abadan, Iran 2405-6561 , (2020)
- [2] M.AliAhmadi and S. Reza Shadizadeh. Spotlight on the New Natural Surfactant Flooding in Carbonate Rock Samples in Low Salinity Condition . Scientific Reports . , University of Calgary, Canada 8-10985 , (2018)
- [3] S. Emadi , S. Reza Shadizadeh , A. Khaksar Manshad , A. Moghani Rahimi , I. Nowrouzi , Amir H. Mohammadi. Effect of using Zyziphus Spina Christi or Cedr Extract (CE) as a natural surfactant on oil mobility control by foam flooding . Department of Petroleum Engineering, Abadan Faculty of Petroleum Engineering, Petroleum University of Technology (PUT), Abadan, Iran 0167-7۳۲۲ , (۲۰۱۹)
- [4] A. Moslemizadeh , A. Shirmardi Dezaki , S. Reza Shadizadeh. Mechanistic understanding of chemical flooding in swelling porous media using a bio-based nonionic surfactant . Department of Petroleum Engineering, Ahwaz Faculty of Petroleum Engineering, Petroleum University of Technology, Ahwaz 63134, Iran ,(2017)



## مطالعه تاثیر نیروهای چسبندگی بر مهاجرت ریز ذرات به داخل مدل حفرات دوگانه (*Pore Doublet*) با استفاده از روش CFD-DEM

محمد قدسی<sup>۱</sup>؛ محمد رضا رسایی<sup>۲\*</sup>

### چکیده

این مقاله به حرکت و انتقال ذرات در ابعاد میکرو در یک مدل حفره دوگانه که دارای حفرات با اندازه متفاوت است می پردازد. برای شبیه سازی یک جریان معلق (*Suspension flow*) دوفازی ذرات در سیال، از روش CFD-DEM استفاده شده است که معادله‌های ناویر-استوکس را با قانون دوم نیوتن حرکات ذرات ترکیب می‌کند. نیروهای چسبندگی بین ذرات و حفرات با استفاده از مدل تماس جانسون-کندال-رابرتز (SJKR) پیاده سازی شده اند که در این شبیه سازی به منظور شناسایی مکان های تجمع و گرفتگی ها به کار گرفته شده اند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که تغییر چگالی انرژی چسبندگی ذرات از  $10000 \text{ J/m}^3$  به  $100000 \text{ J/m}^3$  به صورت محسوسی احتمال گرفتگی حفره کوچکتر توسط ذرات را افزایش می دهد. همچنین مشاهدات این تحقیق نشان می دهند که مکان های نزدیک به گلوگاه های محیط متخلخل، محتمل ترین نقاط برای تجمع ذرات هستند که در نهایت گرفتگی حفرات باعث ایجاد افت فشار در سیستم می شود. تشکیل کلوخه های ریز ذرات به هم چسبیده در حفرات، زمانی تشدید می شود که هم تعداد ذرات و هم سرعت آب تزریق شده از  $0.01 \frac{m}{s}$  به  $0.01 \frac{m}{s}$  افزایش پیدا می کند. در نهایت مشخص شده است که کاهش سرعت تزریق تا  $0.001 \frac{m}{s}$  به قدری ناکافی است که عملاً نمیتواند با متحرک سازی ذرات گیر افتاده، گرفتگی های موقت را از بین ببرد.

### کلیدواژه‌ها

گرفتگی حفرات؛ مدل حفره دوگانه؛ چسبندگی ذرات؛ مدل Unresolved CFD-DEM؛ شبیه سازی مقیاس حفره

### ۱. مقدمه

مدل سازی مقیاس حفره یک روش پرکاربرد برای مطالعه فیزیک تک فازی یا چند فازی جریان معلق است. مدل های حفرات دوگانه (PDM) که برای اولین بار توسط Chatzis و همکاران [۱] معرفی شدند، آن دسته از ساختارهای منفذی هستند که می‌توانند برای بررسی به دام افتادن یک فاز توسط فاز دیگر یا یک مدل سیال-ذره دوفازی استفاده شوند [۲] اخیراً شبیه‌سازی‌های سیال-ذره در موضوعات مهمی همچون مهاجرت ریز ذرات [۳]، سیال‌سازی‌ها (Fluidizations) و محیط متخلخل [۴] محبوب شده‌اند. این پژوهش به تأثیر نیروهای چسبندگی بر حرکات ذرات در ابعاد میکرو در یک مدل حفره دوگانه، تأثیر چسبندگی بر تشکیل توده‌های ذرات، مناطق تجمع و افت فشار ایجاد شده توسط گرفتگی ها می پردازد. ما

<sup>۱</sup> انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران. [engmohammadghodsi@ut.ac.ir](mailto:engmohammadghodsi@ut.ac.ir)

<sup>۲</sup> انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران. [mrasaei@ut.ac.ir](mailto:mrasaei@ut.ac.ir)

\* نویسنده مسئول



یک روش Unresolved CFD-DEM را برای شبیه سازی حرکات ذرات و حرکت آن‌ها با سیال را معرفی می‌کنیم. نرم افزار OpenFOAM [۵] برای پردازش محاسبات CFD و LIGGGHTS برای شبیه سازی ذرات انتخاب شده‌اند. هر دو ابزار با یکدیگر ادغام شده و به صورت موازی اجرا می‌شوند تا شبیه سازی پیاده سازی شود.

## ۲. مدل سازی ریاضی

روش Discrete Element Method (DEM) یا Cundall که توسط برای اولین بار ارائه شد فرض می‌کند که هر ذره به صورت یک عنصر مستقل عمل کرده و محاسبات آن به صورت جداگانه حل می‌شود. نیروهای دینامیکی که بر هر ذره وارد می‌شوند عبارت‌اند از نیروهای گرانش، تماسی، نیرو ناشی از سیال (معادله ۱) و نیروهای گشتاور وارد بر هر ذره (معادله ۲).

$$m_i \frac{dU_i^p}{dt} = m_i g + F_i^{f,p} + \sum_{j=1, i \neq j}^{N_c} F_{c,ij} \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1, i \neq j}^{N_c} M_{ij} \quad (2)$$

از نظریه Hertz برای مدل سازی نیروهای بین ذرات استفاده می‌شود. این روش، هر دو نیروی مماسی و نرمال را در برخورد ذرات با یکدیگر در نظر می‌گیرد (معادله ۳).

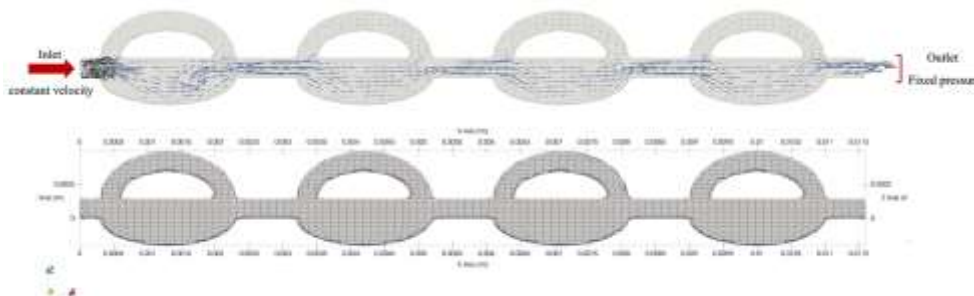
$$F_{c,ij} = F_n + F_t = (k_n \delta_{n,ij} - r_n v_{n,ij}) + (k_t \delta_{t,ij} - r_t v_{t,ij}) \quad (3)$$

مدل ساده شده جانسون-کندال-رابرتز [۶] SJKR یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای مدل سازی جاذبه بین دو ذره است. فرمول بندی نیروی چسبندگی در معادله ۴ آمده است که در آن A سطح تماس ذرات و K چگالی انرژی چسبندگی یا CED (Cohesive Energy Density) است.

$$F = K \times A \quad (4)$$

## ۳. پیاده سازی شبیه سازی

مدل ما شامل چهار مدل حفره دوگانه به هم پیوسته است که دارای طول ۱۱٫۶ میلی متر، عرض ۰٫۳ میلی متر و ارتفاع ۱٫۴ میلی متر است و به  $20 \times 10 \times 100$  (در مجموع ۲۰۰۰ سلول) تقسیم شده است. اندازه هر سلول، ۱۱۶ میکرومتر در ۳۰ میکرومتر در ۷۰ میکرومتر می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱: هندسه مدل استفاده شده در شبیه سازی به همراه شرایط مرزی اعمال شده

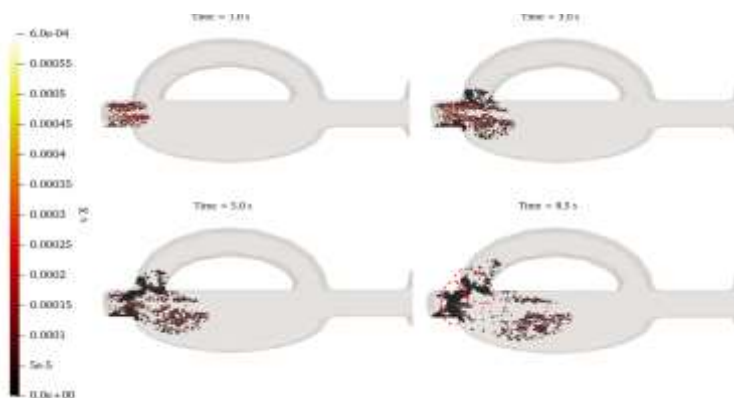
شرط مرزی سرعت ثابت به ورودی (۰,۰۰۱ متر بر ثانیه و ۰,۰۱ متر بر ثانیه)، شرط فشار ثابت (صفر پاسکال) به خروجی و شرط مرزی بدون لغزش (No-slip) برای حرکت سیال نیوتونی به دیواره‌ها اعمال شده‌اند. در ابتدا ۱۰۰ ذره در مرز ورودی وارد می‌شوند. متعاقباً، یک مکانیسم کنترل دوره‌ای برای تنظیم جمعیت ذرات در این ناحیه به کار گرفته می‌شود که از شمارش مداوم ۱۰۰ ذره اطمینان حاصل می‌کند.

#### ۴. نتایج

در این پژوهش، نتایج ۴ شبیه‌سازی مجزا که شامل تغییرات در سرعت سیال تزریقی و CED آورده شده است که عبارتند از: ۱. کاهش سرعت سیال و نیروی چسبندگی ذرات ۲. افزایش سرعت سیال و نیروی چسبندگی سیال ۳. افزایش سرعت سیال و کاهش نیروی چسبندگی ۴. کاهش سرعت سیال و افزایش نیروی چسبندگی

#### ۱-۴ شکل گیری انسدادها در حفرات

شبیه‌سازی با تزریق سیال و ذرات از قسمت ورودی مدل آغاز می‌شود. وقتی که سیال وارد حفرات می‌شود، ذرات را با خود در حفرات کوچکتر و بزرگتر پخش می‌کنند. در CED بالا، نیروهای چسبندگی بین ذرات، نیروهای غالب در شبیه‌سازی‌ها هستند و به طبع آن ذرات، تمایل زیادی به چسبندگی به دیواره‌ها از خود نشان می‌دهند. شکل ۲، روند تشکیل گرفتگی حفره کوچکتر و پل زدن ذرات را در شرایط سرعت کم و CED بالا نشان می‌دهد. نواحی گرفتگی به درستی با دایره‌های قرمز رنگ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲: تجمع ذرات با در نظر گرفتن سرعت جریان سیال  $\frac{10^{-2}m}{s}$  و  $10^5 J/m^3$  CED

با ۱۰ برابر کردن نرخ سیال ورودی ( $\frac{10^{-2}m}{s}$ )، ذرات بسیار گسترده‌تر در محیط حفرات پخش می‌شوند. همچنین بر خلاف شبیه‌سازی قبلی، به دلیل سرعت سیال بالاتر، احتمال پدیده پل زدن در نزدیکی ورودی سیال کاهش پیدا می‌کند. کاهش چگالی انرژی چسبندگی از  $10^5 J/m^3$  به  $10^2 J/m^3$  باعث می‌شود که نیروی سیال به عنوان نیروهای غالب در شبیه‌سازی عمل کنند و از اثر نیروی چسبندگی بین ذرات و دیواره‌ها بکاهد. اندازه گلوله‌ها، نقش مهمی را در پراکندگی ذرات هنگامی که سیال نیروی قالب است ایفا می‌کند. تعداد ذرات گذرنده از حفره کوچکتر به دلیل محدودیت فضا، کمتر و بالعکس در حفره بزرگتر بیشتر است. این شبیه‌سازی به مدت ۵,۵ ثانیه ادامه پیدا کرد و هیچ‌گونه آثاری از گرفتگی مشاهده نشد. کاهش سرعت سیال تزریقی به یک دهم مقدار قبلی ( $\frac{10^{-2}m}{s}$ )، تاثیر شگرفی بر کاهش تحرک ذرات و ایجاد گرفتگی‌ها نداشته است. تنها تاثیر کاهش سرعت سیال وقتی نیروهای چسبندگی ضعیفی بین ذرات برقرار است، افزایش مدت زمان شبیه‌سازی برای رسیدن به یک الگوی خاص از پخش ذرات است که نهایتاً هیچ اثری از پل زدن ذرات یا تشکیل کلوخه ذرات دیده نمی‌شود. در نهایت از بین هر ۴ شبیه‌سازی این نتیجه می‌شود که تاثیر نیروهای چسبندگی، به مراتب بیشتر از همان نسبت کاهش سرعت سیال است.

## ۵. نتیجه‌گیری

نتایج چهار شبیه‌سازی متمایز انجام‌شده در این مطالعه، فرآیند به هم پیوسته بین نیروهای چسبندگی بین ذرات، سرعت جریان سیال، تجمع ذرات را در یک مدل حفره دوگانه نشان می‌دهد. مشاهدات نشان می‌دهند که تحت شرایط نیروهای چسبندگی بالا، این نیروها نقش غالب را در انتقال ذرات دارند. سرعت سیال بالاتر در نزدیکی ورودی، تمایل ذرات به تجمع را کاهش می‌دهد که باعث می‌شود زمان بیشتری طول بکشد تا انسداد کامل حفرات انجام شود. در واقع، کاهش CED منجر به عدم تجمع بخش زیادی از ذرات معلق در محیط و کاهش کلوخه‌های ذرات می‌گردد. در این شرایط، توزیع ذرات تحت تأثیر اندازه حفره‌های منافذ قرار می‌گیرد، که در آن منافذ بزرگ‌تر باعث پراکندگی ذرات بیشتر و تجمع کمتری می‌شوند. با این حال، کاهش سرعت سیال تأثیر حداقلی بر تجمع ذرات دارد. تعداد ذرات موجود در منافذ کوچکتر و بزرگتر نقش حیاتی در تشکیل تجمعات را ایفا می‌کند که این امر بر نقش حیاتی توزیع ذرات و CED در تشکیل تجمعات و انسدادها در سیستم تأکید می‌کند.

## ۶. فهرست مراجع

- [۱] I. Chatzis and F. A. L. Dullien, "Dynamic immiscible displacement mechanisms in pore doublets: Theory versus experiment," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 91, no. 1, pp. 199–222, 1983, doi: [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(83\)90326-0](https://doi.org/10.1016/0021-9797(83)90326-0).
- [۲] M. Alizadeh and M. Fatemi, "Pore-doublet computational fluid dynamic simulation of the effects of dynamic contact angle and interfacial tension alterations on the displacement mechanisms of oil by low salinity water," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 143, p. 103771, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103771>.
- [۳] H. Zhou, X. Tian, M. Kou, S. Wu, and Y. Shen, "Numerical study of fine particles behaviors in a packed bed with lateral injection using CFD-DEM," *Powder Technol.*, vol. 392, pp. 317–324, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.019>.
- [۴] B. Ju and T. Fan, "Experimental study and mathematical model of nanoparticle transport in porous media," *Powder Technol.*, vol. 192, no. 2, pp. 195–202, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.12.017>.
- [۵] H. G. Weller, G. Tabor, H. Jasak, and C. Fureby, "A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques," *Comput. Phys.*, vol. 12, no. 6, pp. 620–631, Nov. 1998, doi: [10.1063/1.168744](https://doi.org/10.1063/1.168744).
- [۶] K. L. Johnson, K. Kendall, A. D. Roberts, and D. Tabor, "Surface energy and the contact of elastic solids," *Proc. R. Soc. London. A. Math. Phys. Sci.*, vol. 324, no. 1558, pp. 301–313, Sep. 1971, doi: [10.1098/rspa.1971.0141](https://doi.org/10.1098/rspa.1971.0141).



## بررسی تاثیر مورفولوژی محیط متخلخل و عدد مویینگی بر بازیافت نفت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

محمد قدسی؛ محمد رضا رسایی\*<sup>۲</sup>

### چکیده

شبیه‌سازی مقیاس منافذ و تجزیه و تحلیل جابجایی نفت در سنگ‌های دیجیتال، نویدبخش ردیابی بازیافت نفت در محیط‌های متخلخل است. این مقاله به بررسی اثر سیلاب زنی با آب برای برداشت نفت از سه سنگ دیجیتال با تخلخل یکسان اما با شعاع‌های حفرات و گلوگاه‌های متفاوت می‌پردازد. دینامیک سیالات محاسباتی برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی برای مشاهده تأثیر مورفولوژی سنگ بر زمان‌های رخنه آب، اشباع نفت باقی‌مانده و الگوهای جابجایی نفت استفاده شده است. در این پژوهش، تعداد زیادی شبیه‌سازی بر روی مدل‌های سنگ‌ها با مقادیر نسبت تحرک، کشش‌سطحی و سرعت تزریق متفاوت انجام شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که سنگ‌های دارای حفرات و گلوگاه‌های ریز تر باعث نفوذ سریع‌تر آب به تمامی حفرات می‌شوند و زمان ایجاد رخنه کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. در این حالت سنگ، بستر مناسبی را برای انگشتی شدن مؤئینه فراهم می‌کند در حالی که در همان مقدار تخلخل، افزایش اندازه حفرات و گلوگاه‌های سنگ، راه را برای انگشتی شدن ویسکوز هموار می‌کند.

### کلیدواژه‌ها

دینامیک سیالات محاسباتی؛ محیط متخلخل؛ بازیافت نفت غیر انتزاجی؛ منافذ میکروسکوپی؛ سنگ دیجیتال

### ۱. مقدمه

به هم پیوستگی فضا‌های محیط متخلخل امکان حرکت و در نهایت استخراج نفت به دام افتاده را فراهم می‌کنند، در حالی که فضاهایی با منافذ بسته (Deadend pores) این اجازه را نمی‌دهند و عملاً امکان برداشت نفت از این نواحی از بین می‌رود [۱]. به همین دلایل، اندازه‌های شعاع‌های منافذ و گلوگاه‌ها، عامل حیاتی در تعیین میزان برداشتی از سنگ مخزن هستند. تجربه‌های اخیر پژوهشگران نشان می‌دهد که شعاع منافذ بر تراوایی نسبی فاز تر کننده [۲]، فشار مویینگی [۳] و نحوه توزیع حرکت سیال در محیط متخلخل [۴] تأثیر دارد. نسبت تحرک سیال تزریقی به سیال تولیدی حدود یک و کمتر از آن نشان می‌دهند که سیال تزریقی به طور پایدار می‌تواند سیال تولیدی را حرکت دهد [۵]. هنگامی که آب به عنوان فاز تر کننده در حال جابجایی نفت است، کشش سطحی بین دو سیال نقش مهمی را به عنوان عاملی که

<sup>۱</sup> انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران. [engmohammadghodsi@ut.ac.ir](mailto:engmohammadghodsi@ut.ac.ir)

<sup>۲</sup> انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران. [mrasaei@ut.ac.ir](mailto:mrasaei@ut.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

روی پخش شدن و حرکت نفت اثر گذار است ایفا می کند. کشش سطحی بالا می تواند با ایجاد فشار موئینگی بالا (PC)، مانع پیشروی زیاد نفت و خروج از محیط متخلخل می شوند در حالی که فشار موئینگی پایین، باعث پخش شدن بهتر نفت و حرکت سریع تر آن برای خروج از مدل می شود [۶]. تجزیه و تحلیل پژوهش های پیشین نشان می دهد که اکثر مطالعات تنها تأثیر ویژگی های سیال، مانند نسبت تحرک، کشش سطحی، عدد موئینگی و ترشوندگی را بر جابجایی نفت در یک سنگ یا محیط متخلخل بررسی کرده اند. با این حال، تحقیقات زیادی در مورد رابطه بین بازیابی نفت و مورفولوژی سنگ ها وجود ندارد.

## ۲. مدل سازی ریاضی

شبیه سازی مقیاس حفره توسط OpenFOAM، که یک کتابخانه عظیم نوشته شده به زبان ++C است انجام شده که معادلات ناویر-استوکس را با استفاده از روش المان حجمی در یک محیط پیوسته (Continuum) حل می کند. در این شبیه سازی، آب و نفت به عنوان دو سیال تراکم ناپذیر و هم دما (Isothermal) در نظر گرفته شده اند و خواص فیزیکی هر سیال در قسمتی که اشباع شده یکسان است ولی برای شبیه سازی حالت بین فازی و دنبال کردن مرز بین آب و نفت از روش VOF (Volume of Fluid) استفاده شده است.

معادله حرکت سیال برای یک تابع نشانگر (Indicator function) که کسر حجمی یک فاز را نشان می دهد، به طور همزمان با معادلات پیوستگی و تکانه حل می شود:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (U\gamma) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p + \nabla \cdot T + \rho g + f_{st} \quad (3)$$

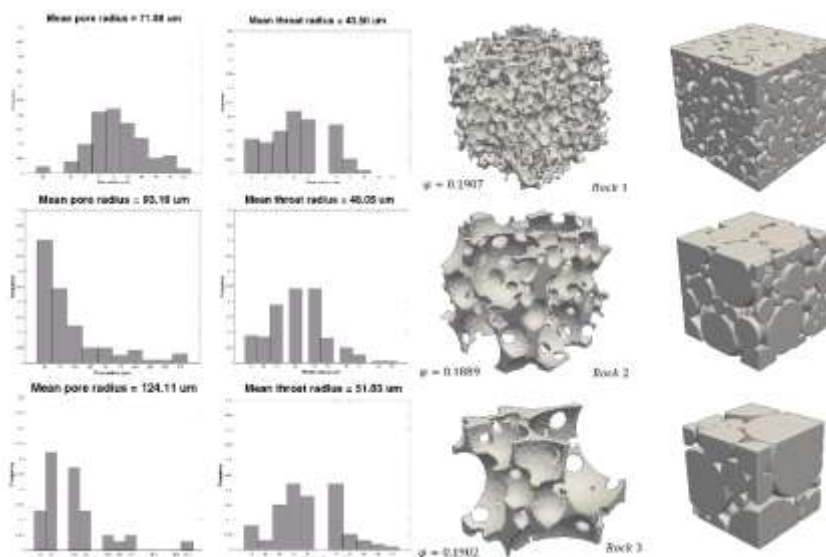
که در آن  $U$  نشان گر سرعت متوسط دو سیال،  $\rho$  چگالی متوسط دو سیال،  $\gamma$  نشان گر کسر حجمی فاز آب،  $f_{st}$  نیروی کشش سطحی و  $T$  تانسور تنش ویسکوز انحرافی است. برای حفظ ثبات حل و همگرایی مسئله، عدد کورانت (Courrant number) که در رابطه (۴) آورده شده است، بایستی در تمام طول شبیه سازی کمتر از ۱ باشد:

$$Co = \frac{U \Delta t}{\Delta x} \quad (4)$$

که در آن  $\Delta x$  طول هر سلول، و  $\Delta t$  گام زمانی حل مسئله می باشد که به ترتیب  $10^{-5} s$  و  $10^{-6} s$  در نظر گرفته شده است تا این عدد در حدود ۰٫۲ در طول شبیه سازی باقی بماند.

## ۳. پیاده سازی شبیه سازی

سه شکل هندسی سنگ متخلخل توسط نرم افزار PGM ایجاد شده و برای تمرکز بر مطالعه اندازه حفرات، تخلخل یکسان (حدوداً ۰٫۱۹) در نظر گرفته شده است. شکل ۱، به صورت جامع، فضای متخلخل سه سنگ به همراه میانگین اندازه حفرات و گلوگاه ها را نشان می دهد. هر مدل در ابعاد  $1000 \times 1000 \times 1000$  ایجاد شده است و شبکه دارای ۱ میلیون سلول محاسباتی است. آب به عنوان یک سیال جابجا کننده انتخاب شده است که نفت باقی مانده در سنگ را جابجا می کند.



شکل ۱. توزیع منافذ و شعاع گلوگاه‌ها از سه سنگ متخلخل مجزا که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرند. سنگ ۳ بزرگترین اندازه حفره گلو را دارد، در حالی که سنگ ۱ کوچکترین را دارد. همچنین مدل واقعی سنگ نیز در ستون اول نشان داده شده است.

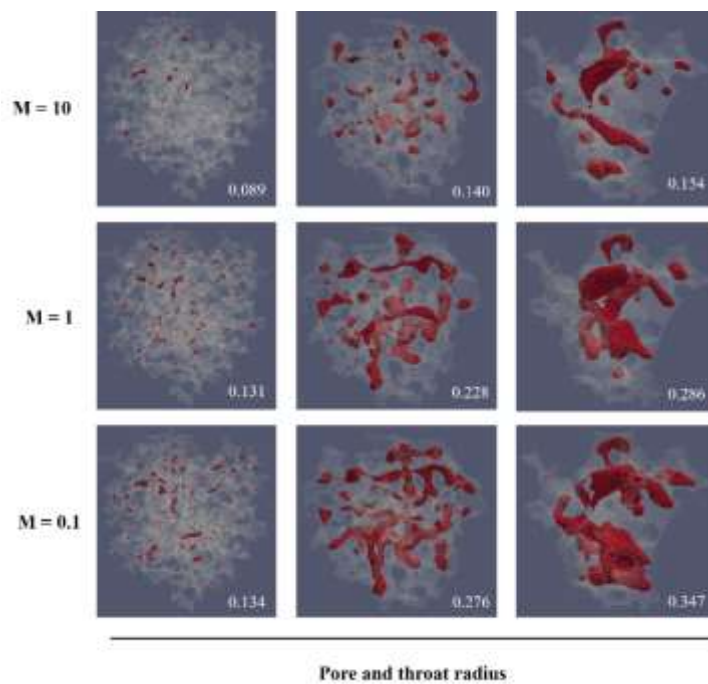
#### ۴. نتایج

##### ۴-۱ تأثیر مورفولوژی سنگ بر نمودارهای CDC و زمان رخنه

تغییرات چشم‌گیری در روند نمودارهای CDC سه نوع سنگ مدل مشاهده می‌شود. سنگ ۱ با کوچکترین شعاع حفرات کمترین میزان تغییر در اشباع نفت باقی مانده را نسبت به سنگ ۳ با حفرات بزرگتر دارد. محیط متخلخل با حفرات کوچکتر، باعث تسریع پخش شدن آب در حفرات نفتی شده و به دلیل کوچک تر بودن لخته‌های نفتی (Oil ganglions) آب راحت‌تر می‌تواند نفت‌های هر حفره را جابجا کند و در نتیجه زمان رسیدن آب به خروجی سنگ و ایجاد حالت رخنه کوتاه‌تر خواهد شد. در سنگ سوم، به دلیل گیر افتادن ذرات نفت بزرگتر در هر حفره، پخش شدن آب با کندی صورت می‌گیرد و در نهایت به دلیل زمان دیرتر ایجاد رخنه آب در انتهای سنگ، نفت بیشتری بازیابی می‌شود. افزایش عدد موئینه هم می‌تواند نیروی‌های ویسکوز جریان سیال را بیشتر کند که سبب می‌شود زمان ایجاد رخنه کم‌تر شود. افزایش نیروهای ویسکوز باعث ایجاد Viscous fingering و کاهش پدیده Capillary fingering می‌شود که به دلیل نفوذ سریع‌تر آب، زمان رخنه را کاهش می‌یابد.

##### ۴-۲ تأثیر مورفولوژی سنگ بر اشباع نفت باقی مانده

شکل ۲ تأثیر همزمان نسبت تحرک ( $M$ ) و مورفولوژی سنگ‌ها را در اشباع نفت باقی مانده نشان می‌دهد. اشباع نفت باقی مانده با در نظر گرفتن IFT ثابت ( $0.01 N/m$ ) و سرعت تزریق یکسان آب ( $1 \mu m/s$ ) در نظر گرفته شده است. با افزایش نسبت تحرک، مقدار نفت باقی مانده کاهش خواهد یافت. تغییرات اشباع نفت باقی مانده با تغییر نسبت تحرک در سنگ‌هایی با حفرات و گلوگاه‌های بزرگتر بیشتر است. به دلیل افزایش نسبت تحرک (افزایش ویسکوزیته آب نسبت به نفت) حرکت آب پایدارتر است و احتمال نفوذ به خروجی سنگ و ایجاد حالت رخنه را کاهش می‌دهد.



شکل ۲. بررسی تاثیر همزمان تحرک نسبی و تغییر اندازه حفرات در میزان نفت باقی مانده

## ۵. فهرست مراجع

- [۱] I. Fatt, "Influence of Dead-End Pores on Relative Permeability of Porous Media," *Science (80-. )*, vol. 134, no. 3492, pp. 1750–1751, Dec. 1961, doi: 10.1126/science.134.3492.1750.
- [۲] S. Bryant and M. Blunt, "Prediction of relative permeability in simple porous media," *Phys. Rev. A*, vol. 46, no. 4, pp. 2004–2011, Aug. 1992, doi: 10.1103/PhysRevA.46.2004.
- [۳] R. Askarinezhad, "A new statistical approach to pore/throat size distribution of porous media using capillary pressure distribution concept," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 75, no. 1, pp. 100–104, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2010.10.011>.
- [۴] A. Mehmani and M. Prodanović, "The effect of microporosity on transport properties in porous media," *Adv. Water Resour.*, vol. 63, pp. 104–119, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.10.009>.
- [۵] A. B. Dyes, B. H. Caudle, and R. A. Erickson, "Oil Production After Breakthrough as Influenced by Mobility Ratio," *J. Pet. Technol.*, vol. 6, no. 04, pp. 27–32, Apr. 1954, doi: 10.2118/309-G.
- [۶] V. Hornof and N. R. Morrow, "Flow Visualization of the Effects of Interfacial Tension on Displacement," *SPE Reserv. Eng.*, vol. 3, no. 01, pp. 251–256, Feb. 1988, doi: 10.2118/14930-PA.



## ارتباط نوع حفرات و واحدهای جریان‌ی مخزنی در یکی از مخازن ناهمگن کربناتی

بهروز اسرافیلی دیزجی\*؛ محمد پور رحمت<sup>۲</sup>

### چکیده

ناهمگنی در مخازن کربناتی با منشأ مختلف رسوبی، دیاژنزی و شکستگی، چالش بزرگی در راستای شناسایی واحدهای جریان‌ی و زون بندی مخزنی است. در این مطالعه به منظور شناسایی واحدهای اصلی تولیدی، درک رابطه بین ماهیت حفرات با نحوه تشکیل آنها و توسعه زون‌های مختلف مخزنی از داده‌های مغزه و لاگ‌های پتروفیزیکی در یک چاه استفاده شد. بر اساس پلات تغییر یافته لورنز، ابتدا سنگ مخزن به ۱۰ واحد مخزنی تفکیک شد. ارزیابی‌های ناهمگنی مخزنی نشان داد که برخی زون‌ها کماکان از ناهمگنی بالایی برخوردار است، لذا بر اساس روش‌های دیگر مانند پلات تجمعی تراوایی، پلات تجمعی نورمال شده شاخص کیفیت جریان، و محاسبه شعاع گلوگاه حفرات، زون‌های شناسایی شده به ۲۰ زیر زون یا واحدهای جریان‌ی سریع، تله‌ای و سدی مورد تقسیم شد.

واحد جریان‌ی سریع (هشت واحد) که تقریباً با ضخامت تجمعی حدود ۱۰۲ متر در تولید بیش از سه چهارم چاه مشارکت دارند، منطبق بر رخساره‌های گرینستون دولومیتی با نوع حفرات بین دانه‌ای و بین بلوری و اندازه میانگین شعاع گلوگاه بیش از ۵ میکرون (ماکرو و مگاپور) است. واحدهای تله‌ای منطبق بر گرینستون‌های با تخلخل قالبی و رخساره‌های گل غالب دولومیتی شده با اندازه حفرات بزرگتر از یک میکرون (مزوپور) است. واحدهای سدی با کمتر از یک درصد مشارکت در تولید چاه مورد مطالعه، یک سوم ضخامت سنگ مخزن را دارند و غالباً منطبق بر رخساره‌های کم تخلخل واحدهای مخزنی K3 و K1 و توالی نزدیک مرز پرموتریاس گسترش دارند.

### کلیدواژه‌ها

انتخاب کلیدواژه؛ سیستم حفرات، واحدهای جریان‌ی، زون بندی مخزنی، مخازن کربناتی

### ۱. مقدمه

سیستم حفرات در مخازن هیدروکربنی کربناتی نتیجه شرایط رسوبگذاری، فرآیندهای مختلف دیاژنزی و شکستگی است و لذا از دیدگاه نوع، اندازه و شکل بسیار متنوع است. این موضوع با پیچیده کردن رابطه بین حفرات، موجب افزایش ناهمگنی مخزنی شده، زون بندی مخزنی و تعیین نوع واحدهای جریان‌ی را در این مخازن

<sup>۱</sup> عضو هیأت علمی گروه اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران، [esrafilidizaji@ut.ac.ir](mailto:esrafilidizaji@ut.ac.ir)  
\* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> دانشجوی ژئومکانیک نفت، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران، [mohamadpt8021@gmail.com](mailto:mohamadpt8021@gmail.com)



با دشواری روبرو می‌کند. مطالعات گسترده در نیم قرن گذشته در این ارتباط صورت گرفته است و روش‌های بسیار گوناگونی برای درک پیچیدگی‌های این نوع مخازن و زون بندی آنها توسعه یافته است. در این مطالعه بر مبنای روش‌های تلفیقی و داده‌های مختلف مخزنی (داده‌های مغزه و اطلاعات پتروگرافی)، به ارتباط بین نوع حفرات، نحوه تشکیل آنها و توسعه زون‌های مختلف (زون‌های تولیدی، تله و سدی) پرداخته شده است.

## ۲. میدان مورد مطالعه و چینه‌شناسی

میدان مورد مطالعه یکی از بزرگترین مخازن گازی ایران است که در خلیج فارس واقع است. تولید این میدان از سازندهای پرموتریاس گروه دهرم صورت می‌گیرد. بخش فوقانی سازند دالان و سازند کنگان با ضخامت ۴۵۰ متر و سنگ‌شناسی غالب دولومیتی و آهکی با میان لایه‌های نازک انیدریتی، سنگ مخزن بسیاری از مخازن جنوب ایران است که رخساره‌ها، دیاژنز و کیفیت مخزنی آن موضوع مطالعات متعددی بوده است [۱].

## ۳. داده‌ها و روش مطالعه

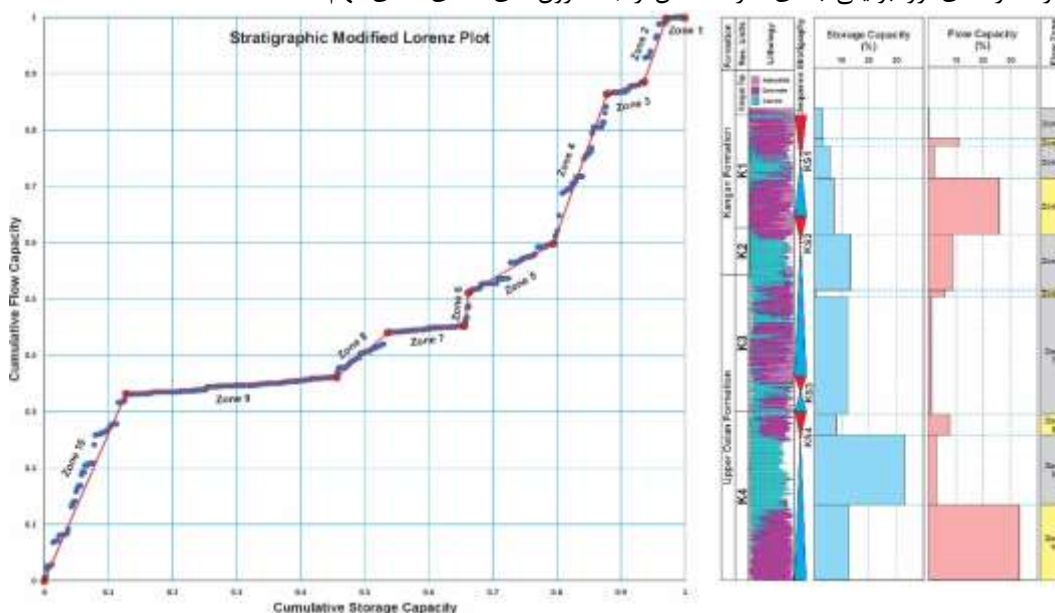
این مطالعه بر اساس داده‌های مغزه و لاگ‌های پتروفیزیکی از یکی از چاههای میدان مورد مطالعه است. جهت نیل به اهداف مطالعه، نتایج مطالعات پتروگرافی، سکانس استراتیگرافی، داده‌های MICP و SEM با زون‌های مخزنی تعیین شده تلفیق شد تا ارتباط بین نوع حفرات و نحوه تشکیل شدن زونهای مختلف مورد بررسی قرار گیرد. به منظور زون بندی مخزنی و تعیین زون‌های تولیدی، بافل و سد مخزنی، ابتدا از روش پلات لورنز تغییر یافته بر مبنای چینه‌شناسی (SMLP) جهت شناسایی و جدایش زون‌های اصلی استفاده شد سپس با محاسبه ناهمگنی مخزنی (با روش ضریب Dykstra-Parsons)، برای افزایش دقت زون بندی از روش‌های پلات تجمعی تراوایی (CPP) و شاخص کیفیت مخزنی تجمعی نرمالایز شده (NCRQI) استفاده شد [۲-۴]. در نهایت ضمن شناسایی زون‌های مهم تولید، سهم هر یک از زونها در جریان سیال و ویژگی‌های آن مانند نوع و اندازه حفرات، قطر شعاع گلوگاه حفرات و نحوه تشکیل آن از دیدگاه رسوبشناسی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. برای بررسی نوع و اندازه حفرات در هر زون نتایج مطالعات میکروسکوپی پلاریزان و الکترون روبشی (SEM) با نتایج حاصل از محاسبه شعاع گلوگاه حفرات به روش تزریق جیوه (MICP) و تعیین اندازه حفرات به روش وینلند تلفیق شد.

## ۴. نتایج

بر اساس روش پلات لورنز تغییر یافته بر مبنای چینه‌شناسی (SMLP) و محاسبه ظرفیت جریان و ظرفیت ذخیره سازی، ۱۰ زون اصلی در سنگ مخزن شناسایی شد (شکل ۱). به دلیل ناهمگنی مخزنی و تغییرات زیاد در مقادیر تخلخل و تراوایی، ماهیت مخزنی و ضخامت این زون‌ها بسیار مختلف است. زون‌های ۱ تا ۵ منطبق بر سازند کنگان و زونهای ۶ تا ۱۰ منطبق بر بخش فوقانی سازند دالان است. زون‌های شماره زوج (با رنگ زرد در شکل ۱) از نسبت ظرفیت جریان به ظرفیت ذخیره قابل توجهی برخوردار هستند و در واقع زون‌های تولیدی یا سرعت بالای جریان (high speed zones) می‌باشند، درحالی‌که زون‌های شماره فرد (با رنگ خاکستری در شکل ۱) شامل زون‌های تله و حتی سدی (baffle and barrier zones) می‌باشند.

زون‌های تولیدی عمدتاً در رخساره‌های دانه غالب دولومیتی با سیمان انیدریتی اندک است که در بخش تحتانی سیستم تراکت پیشرونده (TST) و بخش فوقانی سیستم تراکت پسروده (RST) سکانس‌های رسوبی گسترش یافته‌اند. حفرات در این زون‌ها عمدتاً از نوع بین دانه‌ای و بین بلوری با اندازه بیش از ۲ میکرون شعاع گلوگاه حفرات (ماکرو و مگاپور) است. زون‌های تله‌ای-سدی غالباً در رخساره‌های آهکی دانه غالب با حفرات قالبی در اندازه کمتر از ۲ میکرون است (بویژه در واحد K4، K2 و K1) است و همچنین بخش اعظم واحد K3

و رخساره های ترومبولیتی ابتدای سازند کنگان از جمله زون های تله ای-سدی مهم است.



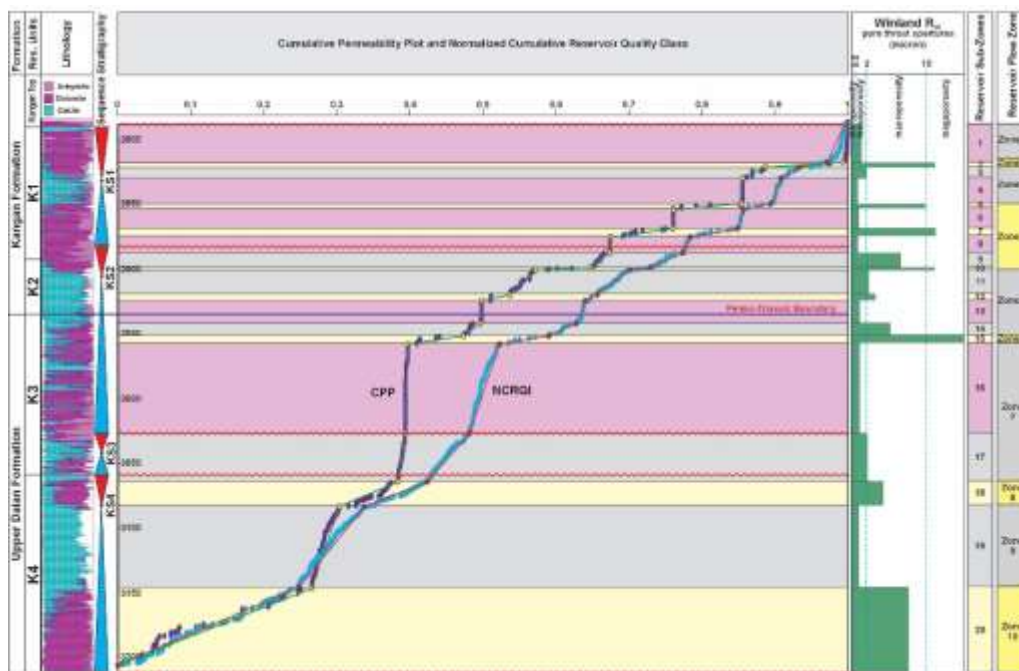
شکل ۱: دیاگرام لورنز تغییر یافته بر مبنای چینه شناسی (SMLP) برای داده های چاه مورد مطالعه (سمت چپ) که منجر به شناسایی ده زون اصلی بر مبنای ظرفیت جریان و ظرفیت ذخیره سازی شده است (سمت راست).

محاسبه ناهمگنی مخزنی (با روش ضریب Dykstra-Parsons) در زون های شناسایی شده نشان می دهد که برخی از زون ها از ناهمگنی تراوایی بالایی برخوردار هستند. این موضوع بویژه در زون های مربوط به سازند کنگان که دارای تغییرات زیاد تخلخل و تراوایی است دیده می شود. به منظور کاهش ناهمگنی زونها و افزایش دقت زون بندی از روش های پلات تجمعی نورمال شده تراوایی (CPP) و منحنی تجمعی نورمال شده شاخص کیفیت جریان (NCRQI) جهت شناسایی زیرزون ها استفاده شد. ارزیابی ها منجر به شناسایی و تفکیک ۲۰ زیر زون با سه کیفیت زون جریان سریع (رنگ زرد)، تله ای (خاکستری) و سدی (صورتی) شد (شکل ۲). سپس ماهیت حفرات (نوع، اندازه، شکل) و اندازه شعاع گلوگاه حفرات با روش وینلند به همراه داده های پتروگرافی و MICP در هر زون مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲).

بر اساس پلات تجمعی نورمال شده تراوایی (CPP)، بهترین زون های مخزنی (رنگ زرد شکل ۲) مربوط به رخساره گرینستون دولومیتی شده است که در مجموع بیش از سه چهارم تولید چاه را از حدود یک چهارم ضخامت سنگ مخزن دارند و اندازه میانگین حفرات در این زیر زون ها بیش از ۵ میکرون (ماکرو و مگاپور) است. این زون ها منطبق بر رخساره های دولومیتی با نوع حفرات بین دانه ای و بین بلوری است.

زون های تله ای (رنگ خاکستری شکل ۲) در افق های دانه غالب آهکی نهشته شده در پشته های ماسه ای با تخلخل قالبی و رخساره های گل غالب دولومیتی لاگون و پهنه جزرومدی با اندازه حفرات بزرگتر از یک میکرون (مزوپور) گسترش یافته اند. هر یک از این زون ها معمولاً در حد چند درصد از تولید کل چاه را دارد.

زون های سدی معمولاً کمتر از یک درصد از تولید چاه مورد مطالعه را دارند و در مجموع کمتر از ۲ درصد تولید چاه را از یک سوم ضخامت سنگ مخزن دارند. این زون های منطبق بر رخساره های انیدریتی و دولومیت های به شدت سیمانی شده است که عمدتاً در واحدهای مخزنی K1 و K3 (بویژه در مرزهای سکاسی) و توالی نزدیک مرز پرموتریاس گسترش دارند.



شکل ۲: پلات لورنز تغییر یافته بر مبنای چینه شناسی (SMLP) برای داده های چاه مورد مطالعه

۵. فهرست مراجع

- ۱) Esrafil-Dizaji, B. and H. Rahimpour-Bonab, *A review of permo-triassic reservoir rocks in the zagros area, sw iran: Influence of the qatar-fars arch*. Journal of Petroleum Geology, 2013. **36**(3): p. 257-279.
- ۲) Gunter, G.W., et al. *Early Determination of Reservoir Flow Units Using an Integrated Petrophysical Method*. in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 1997.
- ۳) Siddiqui, S., et al., *Improvements in the selection criteria for representative special-core-analysis samples*. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 2006. **9**(6): p. 647-653.
- ۴) Lyons, W.C., *Chapter 4 - Fluid Movement in Waterflooded Reservoirs*, in *Working Guide to Reservoir Engineering*, W.C. Lyons, Editor. 2010, Gulf Professional Publishing: Boston. p. 241-277.



## پیش بینی خواص سنگ مخزن در مقیاس حفره به کمک فیزیک سنگ دیجیتال

محمدرضا پیله کوهی\*؛ سعید صادق نژاد<sup>۱</sup>؛ داود خوزان<sup>۲</sup>

### چکیده

این مطالعه بر توصیف ویژگی‌های سنگ مخزن بمنظور بهبود بازیابی هیدروکربن، مدیریت آب‌های زیرزمینی و استخراج انرژی زمین گرمایی تمرکز دارد. روش‌های سنتی برای تعیین خواص مانند تخلخل، نفوذپذیری و توزیع اندازه منافذ اغلب کاری فشرده و زمانبر هستند. در عوض، این تحقیق از یک مدل شبکه حفرات برای شبیه‌سازی و تحلیل جریان سیال در شبکه‌های متخلخل استفاده می‌کند. این مطالعه فرآیند ایجاد مدل‌های شبکه منفذ دیجیتال از تصاویر میکروسی‌تی، کالیبره کردن آنها با داده‌های تجربی، و استخراج خواص پتروفیزیکی از طریق شبیه‌سازی را تشریح می‌کند. تجزیه و تحلیل یک سازند سنگ کربناته تخلخل  $14/03\%$  را نشان می‌دهد که نشان دهنده فضای منافذ محدود برای ذخیره سازی و جریان سیال است. مقدار پیچاپیچی  $2/96$  نشان دهنده یک شبکه منفذی پیچیده است که مانع حرکت سیال می‌شود. علیرغم فاکتور مقاومت سازندی کم ( $0/2$ )، که دلالت بر پیوستگی خوب دارد، نرخ جریان مولی کم است که با کاهش تخلخل موثر مطابقت دارد.  $1/0046$  اهم متر به عنوان مقاومت سنگ و مقاومت آب سازندی  $0/2009$  اهم متر نشان دهنده حضور هیدروکربن است. مقدار انتشار موثر  $2/1879$  یک عامل موثری در استخراج سیال به دلیل خواص ذاتی مخزن است که باعث پایین بودن سطح این پارامتر می‌شود. به طور کلی، این یافته‌ها نشان می‌دهد که مخزن بهره‌وری محدودی دارد، که نیازمند بهبود تکنیک‌های استخراج است.

### کلیدواژه‌ها

تخلخل، تراوایی، مدل شبکه حفرات، تصاویر میکرو سی تی، استراتژی بهینه سازی

### ۱. مقدمه

تعیین دقیق خواص سنگ مخزن برای کاربردهای مختلف زیرسطحی، از جمله استخراج هیدروکربن، مدیریت آب های زیرزمینی و تولید انرژی زمین گرمایی، اساسی است. پارامترهای کلیدی مانند تخلخل، نفوذپذیری و توزیع اندازه منافذ برای درک ذخیره‌سازی سیال و ویژگی‌های جریان در مخزن حیاتی هستند. به طور سنتی، این ویژگی‌ها از طریق ترکیبی از اندازه

<sup>۱</sup> (دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تربیت مدرس، [m\\_pilehkouhi@modares.ac.ir](mailto:m_pilehkouhi@modares.ac.ir))

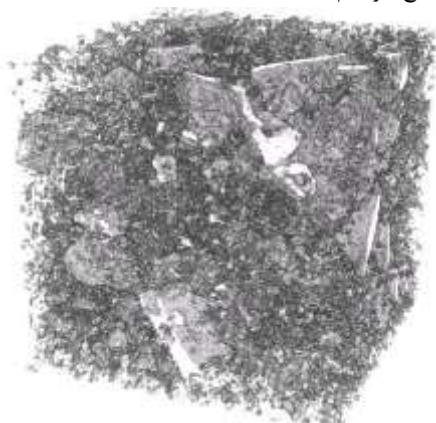
<sup>۲</sup> (هیات علمی، گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تربیت مدرس، [sadeghnejad@modares.ac.ir](mailto:sadeghnejad@modares.ac.ir))

<sup>۳</sup> (هیات علمی، گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تربیت مدرس، [khoozan@modares.ac.ir](mailto:khoozan@modares.ac.ir))

گیری های آزمایشگاهی، نمونه برداری هسته و همبستگی های تجربی تعیین می -شوند. این روش‌های مرسوم در حالی که مؤثر هستند، اغلب کار فشرده، زمان‌بر هستند و ممکن است ناهمگونی مخزن را در مقیاس‌های ظریف نشان ندهند. در سال های اخیر، فیزیک سنگ دیجیتال به عنوان یک رویکرد دگرگون کننده برای توصیف سنگ های مخزن پدیدار شده است. با استفاده از تکنیک‌های تصویربرداری با وضوح بالا مانند تصاویر میکرو سی تی ، می توان مدل‌های سنگ دیجیتال را ساخت که امکان تجسم و تجزیه و تحلیل دقیق ساختار منافذ را فراهم می‌کند. مدل شبکه حفرات به عنوان یک تکنیک محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال در این مدل‌های سنگ دیجیتال، اهمیت پیدا کرده است. در میان ابزارهای مختلف مدل شبکه حفرات موجود، به دلیل ماهیت منبع باز، انعطاف‌پذیری و عملکرد گسترده آن متمایز است [۱]. مدل شبکه حفرات یک چارچوب قدرتمند مبتنی بر پایتون است که برای شبیه‌سازی فرآیندهای در مقیاس منافذ طراحی شده است. ساخت، دستکاری و تجزیه و تحلیل شبکه های منفذی حاصل از تصاویر سنگ دیجیتال را تسهیل می کند. این ابزار محققان و مهندسان را قادر می سازد تا شبیه سازی های جامعی را برای تخمین خواص مخزن ضروری انجام دهند. با ادغام پردازش تصویر، استخراج شبکه و شبیه‌سازی جریان، مدل شبکه حفرات رویکردی جامع برای توصیف رسانه‌های متخلخل ارائه می‌کند [۲]. ما در مورد چارچوب روش شناختی، از جمله آماده سازی نمونه های سنگ دیجیتال، استخراج شبکه، و فرآیندهای کالیبراسیون بحث خواهیم کرد. علاوه بر این، ما مزایای استفاده از مدل شبکه حفرات را نسبت به روش‌های سنتی برجسته می‌کنیم و بر توانایی آن در افزایش دقت، کارایی و مقیاس‌پذیری مشخصه‌های زیرسطحی تأکید می‌کنیم. با استفاده از مدل شبکه حفرات ، می توان به تجزیه و تحلیل با وضوح بالا، قابل تکرار و مقیاس پذیر سنگ های مخزن دست یافت. این پیشرفت به ویژه برای بهبود مدیریت مخزن و استراتژی‌های بهینه‌سازی ارزشمند است و در نهایت به استخراج منابع کارآمدتر و نظارت بر محیط‌زیست کمک می‌کند [۳].

## ۲. روش کار

مطابق شکل ۱، تصویر نمونه ای که از یک سازند کربناته با تخلخل پایین در منطقه خاورمیانه بدست آمده مشاهده می شود که در ادامه درباره روند انجام کار توضیح خواهیم داد.



شکل ۱. نمونه سنگ کربناته

مدل شبکه حفرات، یک پلتفرم قوی برای شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل خواص سنگ‌های مخزن فراهم می‌کند. این روش شامل چندین مرحله کلیدی، از جمله اکتساب داده، ساخت مدل، شبیه‌سازی و اعتبار سنجی است. نمونه‌های سنگ مخزن معمولاً از نمونه‌های مغزه در طول عملیات حفاری جمع‌آوری می‌شوند. این نمونه‌ها مبنای فیزیکی مدل دیجیتالی را فراهم می‌کنند. تکنیک‌های تصویربرداری با وضوح بالا مانند میکرو سی تی اسکن برای ثبت ساختار داخلی نمونه‌های سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. این اسکن‌ها تصاویر سه بعدی تولید می‌کنند که هندسه فضای منافذ و اتصال را نشان می‌دهد. تصاویر خام به دست آمده از اسکن پردازش می‌شوند تا کیفیت را افزایش داده و فضای منافذ را از ماتریس جامد تقسیم کنند. نرم افزار پردازش تصویر برای باینریزه کردن تصاویر، مشخص کردن منافذ و گلو استفاده می‌شود. تصاویر پردازش شده برای استخراج یک مدل شبکه حفرات استفاده می‌شود. اینکار شامل شناسایی منافذ بسته و گلوگاه هایی است که آنها را به هم

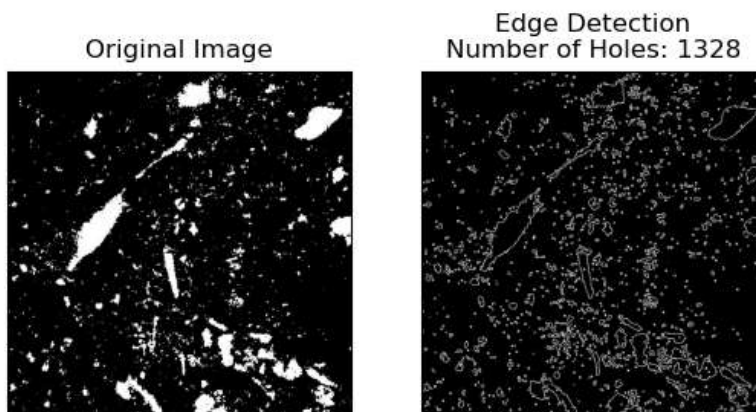
متصل می‌کند. الگوریتم‌های مختلفی مانند تقسیم‌بندی حوزه آبخیز و روش اسنو<sup>۱</sup> برای ترسیم دقیق این ویژگی‌ها اعمال می‌شوند. شبکه منفذی استخراج شده در قالبی سازگار با مدل شبکه حفرات نشان داده شده است. اینکار شامل تعیین مختصات فضایی منافذ، اتصال بین منافذ، و خواص منافذ و گلوگاه (به عنوان مثال، اندازه، شکل). مدل شبکه منفذی به مدل شبکه حفرات وارد شده است. مدل شبکه حفرات یک محیط انعطاف پذیر برای تعریف خواص فیزیکی و شرایط مرزی لازم برای شبیه سازی فراهم می‌کند. در گام بعدی نتایج بدست آمده را اعتبار سنجی میکنیم. بر اساس نتایج اعتبارسنجی، مدل کالیبره شده بدست می‌آید. ممکن است شامل تنظیم توزیع اندازه منافذ، اتصال و سایر خصوصیات شبکه برای تطبیق بهتر داده های تجربی باشد.

محاسبه پارامترهای مختلف در زمینه جریان سیال از طریق محیط متخلخل، مانند سرعت جریان مولی، تخلخل، پیچاپیچی، فاکتور مقاومت سازند، مقاومت سنگ مخزن، مقاومت آب سازندی و انتشار موثر، مستلزم درک مفاهیم کلیدی در مهندسی مخزن و دینامیک سیالات است. نرخ جریان مولی تعداد مول های ماده ای را که از یک سطح معین در واحد زمان عبور می کنند، کمیت می کند. این به عواملی مانند گرادیان غلظت، سطح مقطع و سرعت جریان بستگی دارد. این نرخ بمنظور تعیین راندمان و بهره وری استخراج سیال در مخازن بسیار مهم است. نرخ جریان مولی در واقع نسبت نرخ جریان حجمی به حجم مولی گاز می باشد. تخلخل اندازه گیری فضاهای خالی در یک سنگ است که به صورت کسری از حجم کل بیان می شود. این نشان می دهد که یک سنگ می تواند چقدر مایع را نگه دارد. تخلخل با بررسی نمونه های مغزه و با استفاده از تکنیک های تصویربرداری برای ارزیابی حجم منافذ نسبت به حجم کلی سنگ تعیین می شود. پیچاپیچی، پیچیدگی مسیریابی را که سیال در یک محیط متخلخل از طریق آنها جریان می یابد، توصیف می کند. این معیار اندازه گیری طول مسیر جریان واقعی در مقایسه با فاصله خط مستقیم است. پیچاپیچی بیشتر به معنی مسیرهای پیچیده تر است و سرعت انتشار موثر سیالات را کاهش می دهد. فاکتور مقاومت سازندی یک عدد بدون بعد است که مقاومت در برابر جریان را در یک محیط متخلخل بصورت کمی نشان می دهد. این مقاومت در یک محیط متخلخل را با مقاومت در یک ستون معادل آب مقایسه می کند. این عامل به درک چگونگی تأثیر ساختار زمین شناسی مخزن بر حرکت سیال کمک می کند که نسبت مقاومت سازند با هیدروکربن به مقاومت آب سازند است. مقاومت سنگ مخزن مانعی است که سیال هنگام حرکت در سنگ مخزن با آن مواجه می شود. این مقاومت تحت تأثیر عواملی مانند نفوذپذیری سنگ، تخلخل و ویسکوزیته سیال است. این یک پارامتر حیاتی در پیش بینی سهولت استخراج سیال از مخزن است. مقاومت سنگ مخزن نسبت پیچاپیچی، به تخلخل به توان ضریب سیمان شدگی (که معمولاً بین ۱/۸ تا ۲ می باشد) است. مقاومت آب سازندی به مقاومت ایجاد شده توسط آب موجود در سازند اشاره دارد. بر مقاومت کلی در برابر جریان سیال تأثیر می گذارد و تحت تأثیر شوری و ویسکوزیته آب و همچنین شرایط دما و فشار مخزن که مقدار عکس رسانایی الکتریکی آب سازندی است. انتشار موثر سرعت واقعی پخش یا مخلوط شدن مولکول ها در یک محیط متخلخل را با در نظر گرفتن اثرات تخلخل و پیچاپیچی بحساب می آورد. این یک عامل کلیدی در مدلسازی انتقال آلاینده ها یا مواد مغذی از طریق خاک و سنگ است که حاصل ضرب ضریب انتشار در فضای آزاد در نسبت تخلخل به پیچاپیچی می باشد. درک این پارامترها شامل ادغام دانش زمین شناسی، دینامیک سیالات و مهندسی مخازن است.

### ۳. نتایج و بحث

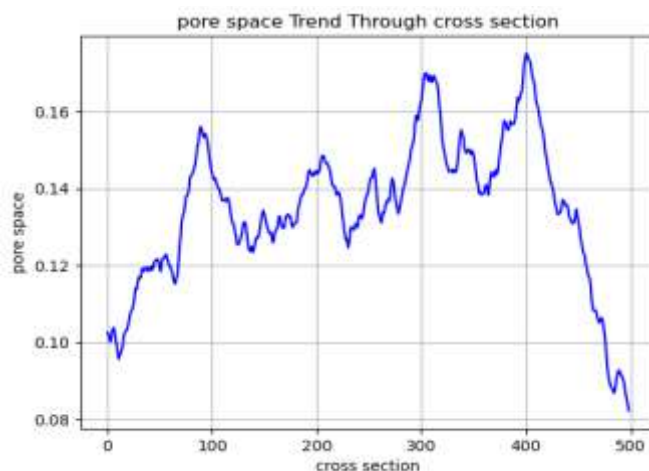
شکل ۲ تصویر ارائه شده یک تکنیک پردازش تصویر دو مرحله ای را نشان می دهد که برای شمارش تعداد حفرات در یک تصویر باینری طراحی شده است. تعداد حفرات شناسایی شده ۱۳۲۸ است. این عدد بالا نشان دهنده وجود شکاف ها یا حفرات زیادی در داخل سنگ است. الگوریتم های تشخیص لبه، مانند ردیاب لبه کنی<sup>۲</sup>، مرزهای حفرات درون تصویر را با شناسایی نواحی دارای تغییرات شدید برجسته می کند. لبه های شناسایی شده با رنگ سفید نشان داده می شوند، در حالی که بقیه تصویر سیاه باقی می ماند، ساختار را ساده می کند و شمارش حفرات موردنظر را آسان تر می کند.

<sup>۱</sup>Watershed extraction  
<sup>۲</sup>Snow extraction  
 3 Canny edge detection



شکل ۲. نتیجه پردازش تصویر مقطعی باینری از نمونه

مطابق نمودار ۱ پارامتر تخلخل را در مقاطع مختلف نمونه بدست آوردیم که نشان‌دهنده ناهمگنی بالای سنگ می باشد. در ناحیه اولیه (۰ تا ۵۰) تخلخل از مقدار کمتری شروع می شود (~۰/۰۸) و تا حدود ۰/۱۱ افزایش می یابد. این افزایش اولیه می تواند انتقال از یک منطقه متراکم تر به منطقه متخلخل تر را نشان دهد. در منطقه میانی (~۵۰ تا ~۴۵۰) تخلخل به طور قابل توجهی با چندین قله و دره در نوسان است که تخلخل بین ۰/۱۱ و ۰/۱۶ می باشد. این نوسانات ترکیب مواد ناهمگن، با چگالی و توزیع فضاهای خالی را نشان می دهد. در ناحیه نهایی (~۴۵۰ تا ۵۰۰) تخلخل به شدت به سمت انتهای نمونه کاهش می یابد و به مقدار کمتری (~۰/۰۸) باز می گردد. این تغییرات بالقوه می تواند نتیجه ترکیب مواد، فرآیند ساخت و عوامل محیطی باشد. درک کامل این توزیع تخلخل برای بهینه سازی طراحی مواد، بهبود فرآیندهای تولید و اطمینان از عملکرد مطلوب در سناریوهای خاص برنامه ضروری است. این تجزیه و تحلیل بر اهمیت تکنیک های پردازش تصویر در ارائه بینش دقیق در مورد ساختار داخلی مواد تأکید می کند، که برای زمینه های مختلف علمی و صنعتی بسیار ارزشمند است.



نمودار ۱. روند تغییرات تخلخل نسبت به مقاطع مختلف نمونه

مطابق جدول ۱ تقریباً ۱۰/۱۳٪ از کل حجم سنگ قادر به ذخیره و انتقال سیالات است. بمنظور محاسبه این مقادیر ابتدا شبکه و فازها را ایجاد می کنیم، پس از تعریف شرایط مرزی و اضافه کردن مدل های فیزیکی به شبکه شبیه سازی را اجرا می کنیم. تنها وجه تمایز این پارامترها فرمول های متمایز آنهاست. سرعت جریان مولی بسیار کم، حرکت سیال محدود را نشان می دهد، که نشان دهنده نفوذپذیری کم یا تشکیل سنگ های محکم است که می تواند بر راندمان استخراج سیال تأثیر بگذارد.

پیچاپچی معمولاً به بافت یا بی نظمی روی سطح سنگ اشاره دارد. این سطح تخلخل نشان می دهد که سنگ دارای ظرفیت متوسطی برای ذخیره سیالات (مانند آب، نفت یا گاز) است. تکنیک های بازیابی پیشرفته، مانند اسیدی کردن یا

شکستگی هیدرولیکی، ممکن است برای بهبود نفوذپذیری و راندمان استخراج مورد استفاده قرار گیرند. مقادیر زبری بالاتر می‌تواند مقاومت در برابر جریان سیال را از طریق سنگ افزایش دهد و به طور بالقوه نفوذپذیری و راندمان استخراج سیال را کاهش دهد. ضریب مقاومت کم (۰/۲) نشان می‌دهد که سازند مقاومت نسبتاً کمی در برابر جریان سیال ارائه می‌دهد که برای استخراج سیال مطلوب است. یک مقدار کم نشان می‌دهد که سنگ مقاومت کمی دارد که ممکن است نشان دهنده نفوذپذیری بالاتر باشد. مقاومت کمتر (۰/۲۰۰۰۹) به معنای رسانایی بالاتر است، که نشان می‌دهد آب سازند احتمالاً شور است، که می‌تواند بر اندازه‌گیری‌های مقاومت و محاسبات اشباع سیال تأثیر بگذارد.

جدول ۱. خواص مخزنی محاسبه شده از روی نمونه سنگ کربناته

| انتشار موثر<br>(مترمربع بر<br>ثانیه) | مقاومت آب<br>سازندی<br>(اهم متر) | مقاومت<br>سنگ مخزن<br>(اهم متر) | فاکتور مقاومت<br>سازندی | پیچاپیچی | تخلخل   | نرخ جریان مولی<br>(مول بر ثانیه) |
|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|----------|---------|----------------------------------|
| ۲/۱۸۷۹                               | ۰/۲۰۰۰۹                          | ۱/۰۰۰۴۶                         | ۰/۲                     | ۲/۹۶     | ۱۰/۱۳ % | ۴/۷۲۴۴*۱۰ <sup>-۱۱</sup>         |

#### ۴. نتیجه گیری

مهمترین نتایج بدست آمده شامل موارد زیر می‌باشد:

- پیچاپیچی بالای سنگ می‌تواند مقاومت در برابر جریان سیال را افزایش دهد و همچنین می‌تواند بر نحوه تعامل سیالات با سطح سنگ تأثیر بگذارد (به عنوان مثال، جذب و اثرات مویبندی).
- ضریب مقاومت پایین نشان می‌دهد که سنگ دارای رسانایی بالاتری است، که معمولاً وجود مواد رسانا مانند آب را در منافذ نشان می‌دهد. در زمینه نفت و گاز، مقاومت سازند کم ممکن است به جای مناطق حامل هیدروکربن، نشان دهنده مناطق دارای آب باشد.
- مقاومت کم سازند در برابر آب به این معنی است که آب موجود در سازند رسانایی بالایی دارد که اغلب به دلیل شوری زیاد است. آب شور بهتر از آب شیرین جریان الکتریسیته را هدایت می‌کند که منجر به اندازه گیری مقاومت کمتری می‌شود.

#### فهرست مراجع

FOROUGH, SAJJAD, et al. "Incorporation of Sub-Resolution Porosity into Two-Phase Flow Models with a Multiscale Pore Network." *Authorea Preprints* (2023).

Qin, Xiangjie, et al. "Modeling of multiphase flow in low permeability porous media: Effect of wettability and pore structure properties." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 16.4 (2024): 1127-1139.

Gao, Ying, et al. "Pore-scale imaging with measurement of relative permeability and capillary pressure on the same reservoir sandstone sample under water-wet and mixed-wet conditions." *Advances in Water Resources* 146 (2020): 103786.





## بررسی رفتار سیالاتی مخلوط دود و هوا در قسمت فیلتر متخلخل فیبری سیگار

سیدرضا حسینی؛ حسن اقدسی‌نیا<sup>۱</sup>؛ سید جمال‌الدین پیغمبردوست<sup>۲</sup>

### چکیده

بررسی رفتار سیالاتی محیط سیگار شامل قسمت توتون و بستر فیبری فیلتر آن به دلیل آثار مخرب گازهای ناشی از سوختن سیگار بر سلامتی انسان و محیط زیست از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، با اطلاعات مبتنی بر داده‌های مطالعات پیشین، و همچنین فرآیند شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار COMSOL، شبیه‌سازی قسمت فیلتر سیگار مبتنی بر معادلات بسترهای فیبری برای تخلخل و نفوذپذیری انجام شد و کانتورهای سرعتی، فشاری و رفتار انتقال حرارتی آن بررسی شد. نتایج کلی نشان دادند که با توجه به فرآیند مکش، سرعت موجود در نزدیکی منبع مکش (دهان انسان) بیشتر خواهد بود و به طور معکوس فشار در ورودی فیلتر یا نزدیکی سطح مشترک قسمت فیلتر و توتون بیشتر خواهد بود و فشار بیشتری برای مکش در آن قسمت مورد نیاز است. همچنین اشباعیت و حضور سیال هوا در نزدیکی منبع مکش به طور طبیعی بیشتر خواهد بود که منجر به بیشتر شدن ویسکوزیته و دانسیته هوا در آن قسمت نیز می‌شود.

### کلیدواژه‌ها

سیگار؛ قسمت فیلتر؛ قسمت توتون؛ نیکوتین؛ کانتور سرعت؛ کانتور فشار؛ کانتور دما

### ۱. مقدمه

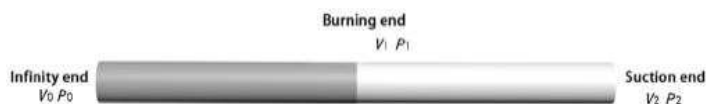
دود سیگار یکی از منابع مهم آلودگی هوا می‌باشد زیرا حاوی آلاینده‌های بسیاری از جمله کربن دی‌اکسید، کربن مونواکسید و حداقل ۶۰ نوع آلاینده دیگر می‌باشد که سرطان‌زا تشخیص داده شده‌اند [۱]. برای جلوگیری از آثار مخرب آن‌ها یک قسمت فیلتر در انتهای سیگار قرار داده شده است که یک بستر فیبری است و دارای تخلخل مشخصی می‌باشد. این قسمت بیشتر به عنوان یک جاذب سطحی عمل می‌کند و بسیاری از گازهای سمی حاصل از سوختن سیگار را جذب می‌کند و از ورود به قسمت تنفسی جلوگیری می‌کند و تنها اجازه عبور فازهای لازم مانند مخلوط هوا و نیکوتین و مواد دیگر را می‌دهد.

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی شیمی و نفت دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ایمیل: sr.hosseini.sr@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی و نفت دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ایمیل: hassan.aghdasinia@gmail.com \* نویسنده مسئول

<sup>۳</sup> استاد، دانشکده مهندسی شیمی و نفت دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ایمیل: j.peighambardoust@tabrizu.ac.ir

به جهت آشنایی بیشتر با این فرآیند ابتدا باید با ساختار کلی سیگار و فرآیند کلی دود سیگار آشنا شد. سیگار یک حالت استوانه ای دارد که به طور کلی از دو قسمت میله توتون و قسمت فیلتر تشکیل شده است. با روشن کردن سیگار در ابتدای قسمت توتون دود سیگار حاصل می‌شود که حاوی گازهای مختلفی است که به آن اشاره شد. با مکش سیگار یک فشار منفی ایجاد خواهد شد که هوا را مکش می‌کند. به دلیل اعمال نیروی فشاری منفی حاصل از مکش، جریان هوا در جهت مخالف دود ایجاد شده خواهد بود و به سمت دهان و سیستم تنفسی جاری خواهد شد. این فاز (هوا) به عنوان یک حامل عمل می‌کند و گازهای موجود در دود سیگار را حمل خواهد کرد و ابتدا به قسمت فیلتر و سپس با عبور از قسمت فیلتر به سیستم تنفسی خواهد رسید. شکل ۱ قسمت‌های مختلف سیگار را برای درک شماتیکی بهتر ارائه داده است [۲].



شکل ۱- شماتیک یک سیگار و قسمت‌های مختلف آن [۲]

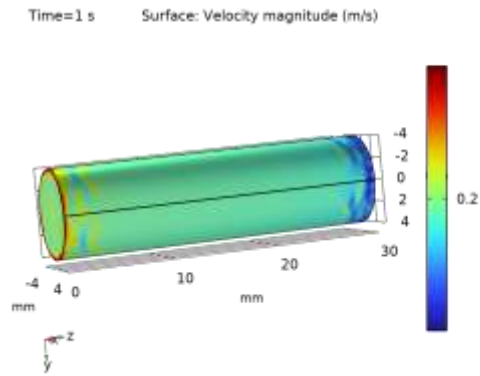
با توجه به قسمت‌های نشان داده شده در شکل ۱، از نظر جریان سیال و معادلات فشاری، سیگار شامل سه بخش عمده می‌باشد که پایانه‌های مکش، سوختن و بی‌نهایت نام دارند. پایانه بی‌نهایت در واقع به ابتدای قسمت توتون گفته می‌شود که سوختن در آنجا آغاز می‌شود. پایانه سوختن به قسمتی گفته می‌شود که سوختن توتون در آنجا به پایان می‌رسد و به قسمت فیلتر می‌رسد. در واقع این پایانه نقطه اتصال بین قسمت توتون و قسمت فیلتر می‌باشد. پایانه مکش به نقطه آغاز مکش گفته می‌شود که نزدیک دهان و سیستم تنفسی انسان می‌باشد و در واقع با توجه به جهت جریان هوای حامل، می‌توان آن را خروجی فیلتر نامگذاری کرد. با توجه به منابع، قانون دارسی می‌تواند در جریان سیگار استفاده شود [۳] و با توجه به جریان با سرعت خیلی کم، این جریان را خزشی می‌توان فرض کرد. مطالعه سیالاتی بر روی قسمت‌های مختلف مذکور موجود در سیگار نیازمند داشتن اطلاعات در مورد تخلخل آن‌هاست زیرا هر دو قسمت توتون و فیلتر متخلخل هستند و باید معادلات مربوط به آن‌ها در نظر گرفته شود. در این گزارش سعی شده است با استفاده از معادلات مربوط به تخلخل و نفوذپذیری بسترهای فیبری، جریان دارسی مخلوط هوا و نیکوتین و انتقال حرارت قسمت فیلتر بررسی شود. برای این منظور از نرم‌افزار COMSOL استفاده شده است.

## ۲. ابزار شبیه‌سازی مورد استفاده

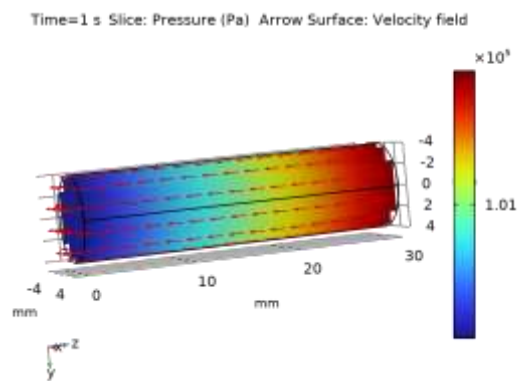
نرم‌افزار مورد استفاده برای شبیه‌سازی بستر فیبری موجود در سیگار (قسمت فیلتر) ورژن COMSOL 6.0 انتخاب شده است. به جهت انجام شبیه‌سازی در نرم‌افزار مربوطه برخی از ملاحظات باید در نظر گرفته شوند. به طور مثال، فیزیک‌های مورد استفاده در این مطالعه برای اعمال شرایط، فیزیک‌های "heat transfer in solids" و "Two-Phase Darcy's Law" (فیزیک‌های انتقال حرارت و جریان دارسی دوفازی) می‌باشند. هندسه مورد نظر حالت استوانه‌ای، ماده در نظر گرفته شده سلولز استات متخلخل (موادی مانند کربن فعال نیز می‌توانند استفاده شوند)، مش‌بندی "Extra Fine"، و شرایط مرزی به خصوص می‌باشند. شبیه‌سازی در حالت "stationary" انجام شده است.

## ۳. نتایج

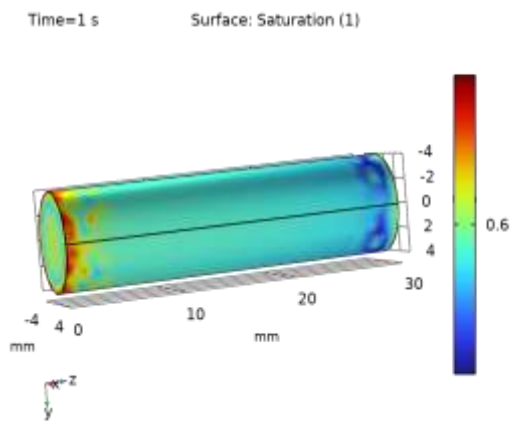
نتایج حاصل از شبیه‌سازی قسمت فیلتر سیگار با توجه به فیزیک‌های انتخابی، می‌توانند شامل توزیع‌های سرعتی و فشاری، توزیع دانسیته و اشباعیت و نتایج توزیع دمایی و حرارتی باشند. برخی از این نتایج در شکل‌های ۲ تا ۵ آورده شده‌اند.



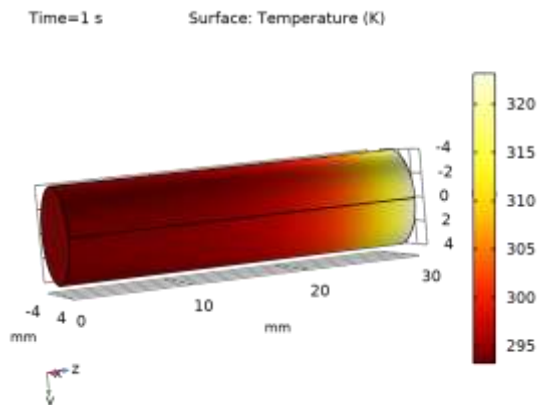
شکل ۲- توزیع سرعت در نقاط مختلف فیلتر سیگار در این مطالعه



شکل ۳ - توزیع فشار وارده در سرتاسر فیلتر (پیکان‌ها برای نشان دادن جهت جریان استفاده شده اند و اشاره به میدان سرعت دارند)



شکل ۴- اشباعیت هوا در سراسر فیلتر در این مطالعه



شکل ۵- توزیع دمایی سراسر فیلتر مورد مطالعه

به طور طبیعی، تفاوت رفتار در نقاط مختلف فیلتر مورد نظر، به تفاوت در میزان فشار، سرعت و دمای فیلتر مرتبط است و تحلیل مفصلی را می‌توان برای هر کدام در نظر گرفت.

#### ۴. نتیجه‌گیری

درک رفتار سیالاتی درون فیلتر سیگار اهمیت ویژه‌ای از جهت کنترل مواد ورودی به بدن انسان و همچنین کنترل آلودگی محیط زیستی دارد. با توجه به حالت فیبری قسمت متخلخل فیلتر سیگار، روابط فیزیک‌های متخلخل فیبری را می‌توان برای این قسمت به کار برد و با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند COMSOL شبیه‌سازی آن را انجام داد. در این مقاله، این کار با تکیه بر به دست آوردن توزیع‌ها و کانتورهای فشاری، سرعتی و حرارتی صورت پذیرفته است و رفتار سیال از جهت فیزیک‌های مختلف اشاره شده در نقاط مختلف میله فیلتر سیگار مقایسه شده است.

#### ۵. فهرست مراجع

- [1] X. Z. D.Y. Deng, S.J. Chen, "Indoor smoke pollution in the different burning patterns," *Environmental Science & Technology*, vol. 29 (12), pp. 26-27, 2006.
- [2] D. Tang, J. Wu, J. Zeng, W. Gao, and L. Du, "Research on cigarette during smoking based on reverse engineering and numerical simulation," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 27, no. 10, pp. 2359-2375, 2019.
- [3] R. R. Baker, "Gas velocities inside a burning cigarette," *Nature*, vol. 264, no. 5582, pp. 167-169, 1976.



## مدل‌سازی ترموهیدرومکانیکی باز توزیع تنش در مجاورت ترک‌های عمیق ناشی از خشک‌شدگی خاک در مناطق گرم و خشک

میلاذ جبارزاده<sup>۱\*</sup>؛ مهدی ولی‌پور<sup>۲</sup>؛ حامد صادقی<sup>۳</sup>

### چکیده

ترک‌خوردگی خاک عمدتاً حاصل از ایجاد تنش‌های کششی در بین ذرات خاک است که به دلیل انقباض ناشی از خشک‌شدگی لایه‌های سطحی خاک رخ می‌دهد. تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی منجر به تشدید ترک‌خوردگی خاک‌های مستعد با خصوصیات خمیری بالا می‌شود که می‌تواند منجر به آسیب‌های جبران‌ناپذیر به زیرساخت‌ها و سازه‌های روزمینی و زیرزمینی شود. علاوه بر آن ترک‌خوردگی با تشدید خشک‌شدگی در ناحیه غیراشباع خاک شده و منجر به تشدید پدیده فرونشست شده که به عنوان معضل اساسی در جهان و ایران شناخته می‌شود. در طی مسیر خشک‌شدگی، حالت تنش در خاک ترک‌خورده دائماً در حال تغییر است که توزیع تنش بین ذرات را تغییر می‌دهد. بنابراین، به عنوان مکانیزم اساسی پدیده ترک‌خوردگی ناشی از خشک‌شدگی خاک، بررسی باز توزیع تنش در ناحیه غیراشباع خاک ضروری است. در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی ترموهیدرومکانیکی، تغییرات اقلیمی شهر قم به یک خاک ترک‌خورده اعمال شد تا تغییر تنش‌ها از نوع فشاری به کششی در مجاورت ترک‌ها بررسی شود. بدین منظور، قوانین حاکم بر مسئله شامل جریان آب و گاز در خاک و انتقال انرژی به همراه معادلات مسئله اندرکنش خاک و اتمسفر در مدل عددی تعریف شد. نتایج نشان داد که توزیع تنش اولیه فشاری در خاک ترک‌خورده، ناهمسان بوده و در سطح زمین و نوک ترک به نحو متفاوتی توزیع یافته است. با پیشروی خشک‌شدگی، تنش‌های کششی در سطح زمین و نواحی دیواره و نوک ترک ظاهر می‌شود که می‌تواند منجر به توسعه ترک‌های موجود در عرض و عمق، همچنین شروع ترک‌خوردگی در سطح زمین شود.

### کلیدواژه‌ها

باز توزیع تنش؛ ترک خشک‌شدگی؛ مناطق گرم و خشک؛ مدل‌سازی ترموهیدرومکانیکی؛ خاک غیراشباع

### ۱. مقدمه

خاک در مناطق گرم و خشک در اثر تغییرات شدید رطوبتی و دمایی دچار ترک‌های عمیق و گسترده‌ای

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [milad.jabbarzadeh@sharif.edu](mailto:milad.jabbarzadeh@sharif.edu)

\* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [mehdi.valipour799@sharif.edu](mailto:mehdi.valipour799@sharif.edu)

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [hsadeghi@sharif.edu](mailto:hsadeghi@sharif.edu)

می‌شود [۱،۲]. خاک در مجاورت اتمسفر تحت مسیره‌های رطوبتی تر و خشک‌شوندگی قرار دارد که مکانیزم رفتار هیدرومکانیکی زمین را تغییر می‌دهد و منجر به گسترش شبکه ترک می‌شود [۳،۴]. این ترک‌ها می‌توانند منجر به تشدید پدیده فرونشست، کاهش پایداری سازه‌های مهندسی مانند سدها، جاده‌ها و زیرساخت‌ها شوند و به عنوان یک خطر پنهان برای ایمنی این سازه‌ها مطرح می‌شود [۵]. مطالعات گذشته توانسته است مکانیزم وقوع و گسترش ترک خوردگی زمین را در اثر خشک‌شدگی لایه سطحی خاک را تعریف کند. ترک خوردگی می‌تواند در اثر برش [۶] و کشش رخ دهد که غالباً نوع ترک‌های خشک‌شدگی کششی است که در اثر انقباض خاک حاصل از افزایش مکش در ناحیه غیراشباع زمین رخ می‌دهد [۷،۸]. با وقوع و گسترش ترک خوردگی زمین بررسی و تحلیل مکانیزم بازتوزیع تنش در مجاورت ترک‌های ناشی از خشک شدن خاک، اهمیت زیادی در طراحی و ارزیابی ایمنی سازه‌های مهندسی دارد. در این زمینه ونگ و همکاران [۹] بر اساس تحلیل‌های انجام شده نتیجه گرفتند که تمرکز تنش در ناحیه نوک ترک رخ می‌دهد که ممکن است گسترش ترک در این ناحیه موضعی کنترل شود. با این وجود، مطالعات بیشتری جهت بررسی بازتوزیع ناهمسان ترک در برابر تغییرات اقلیمی مختلف مورد نیاز است. بنابراین هدف این پژوهش، بررسی بازتوزیع تنش در مجاورت ترک‌های عمیق ناشی از خشک شدن خاک در مناطق گرم و خشک با استفاده از مدل‌سازی ترموهیدرومکانیکی است. برای این منظور رویکرد مدل‌سازی المان محدود با در نظرگیری معادلات ترموهیدرومکانیکی حاکم بر مسئله جهت شبیه‌سازی جریان آب و گاز و انتقال انرژی در محیط متخلخل و در اثر تبادل با محیط اتمسفری اطراف استفاده شد.

## ۲. مدل عددی ترموهیدرومکانیکی

شبیه‌سازی‌ها با هدف بررسی بازتوزیع تنش در خاک ترک خورده تحت تغییرات اقلیمی انجام شد. بدین منظور، از برنامه المان محدود CODE\_BRIGHT [۱۰] با مجوز خریداری شده و قانونی استفاده گردید. این کد به دلیل توانایی در انجام تحلیل‌های حرارتی، هیدرولیکی و مکانیکی با در نظر گرفتن شرایط جوی، امکان بررسی تأثیر تبدلات انرژی و رطوبتی بین هوا و خاک را مهیا می‌کند. معادلات اساسی حاکم بر این مسئله شامل معادلات تعادل، معادلات رفتاری ترموهیدرومکانیکی، محدودیت‌های تعادلی و معادلات حاکم بر مسئله اندرکنش خاک و اتمسفر است. در چارچوب نظری اتخاذ شده برای این پژوهش، از روش چند فاز و چند گونه استفاده شد. فازهای جامد، مایع و گاز در کنار گونه‌های آب و هوا در مدل عددی در نظر گرفته شده‌اند. به این ترتیب، متغیرهای حالت (مجهولات) شامل جابجایی،  $u$  (متر)؛ فشار مایع،  $P_l$  (مگاپاسکال)؛ فشار گاز،  $P_g$  (مگاپاسکال)؛ و دمای خاک،  $T$  (درجه سانتی‌گراد) است.

### ۲-۱ چارچوب نظری مدل عددی

برای بررسی مسئله ترموهیدرومکانیکی، سه معادله تعادل جرمی جامد، مایع و انرژی و معادله تعادل مومنوم به ترتیب زیر در نظر گرفته شد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s(\lambda - \phi)) + \nabla \cdot (\mathbf{j}_s) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}((\omega_l^w \rho_l S_l + \omega_g^w \rho_g S_g)\phi) + \nabla \cdot (\mathbf{j}_l^w + \mathbf{j}_g^w) = f^w \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(E_s \rho_s(\lambda - \phi) + E_l \rho_l S_l \phi + E_g \rho_g S_g \phi) + \nabla \cdot (\mathbf{i}_c + \mathbf{j}_{Es} + \mathbf{j}_{El} + \mathbf{j}_{Eg}) = f^E \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0 \quad (4)$$

این دسته از معادلات به ترتیب منجر به محاسبه پارامترهای تخلخل ( $\phi$ )، فشار مایع، دما و تغییر شکل‌ها در محیط متخلخل خاک می‌شود. شارهای همرفتی ( $\vec{j}_E, \vec{j}_L, \vec{j}_S$ ) و غیرهمرفتی ( $\vec{j}_C$ ) به عنوان مجهولات معادلات تعادل از طریق تعریف معادلات رفتاری محاسبه شدند. بدین منظور، جهت محاسبه جریان همرفتی آب و گاز در محیط متخلخل از قانون داریسی تعمیم‌یافته استفاده شد. تغییرات نفوذپذیری به تغییرات تخلخل از طریق رابطه کوزنی ارتباط داده شد و برای تعریف منحنی SWRC از رابطه ون‌گنوختن استفاده شد. همچنین، قانون فوریه برای محاسبه انتقال حرارت از طریق هدایت حرارتی در نظر گرفته شد. هدایت حرارتی خاک نیز در این پژوهش وابسته به درجه اشباع و تخلخل خاک در نظر گرفته شد که با افزایش درجه اشباع و کاهش تخلخل، افزایش می‌یابد. قانون فیک نیز برای تعریف جریان غیرهمرفت بخار آب اتخاذ شد.

## ۲-۲- هندسه و شرط مرزی جوی

هندسه ترک مطابق شکل ۱ مدل‌سازی شد که پارامترهای آن شامل عرض، عمق و نسبت ترک است که به عنوان نسبت عرض به عمق ترک تعریف می‌شود [۱۱]. در این پژوهش، عرض ترک برابر ۱۳ سانتی‌متر، عمق ترک برابر ۱۰۰ سانتی‌متر و نسبت ترک برابر ۱۳ درصد انتخاب شد تا نماینده‌ای از ترک‌های عمیق باشد. به عنوان شرایط مرزی مدل عددی، اقلیم شهر قم به عنوان یک منطقه گرم و خشک شامل پارامترهای دما، تشعشع خورشید، سرعت باد، بارش باران و رطوبت نسبی اعمال شد.

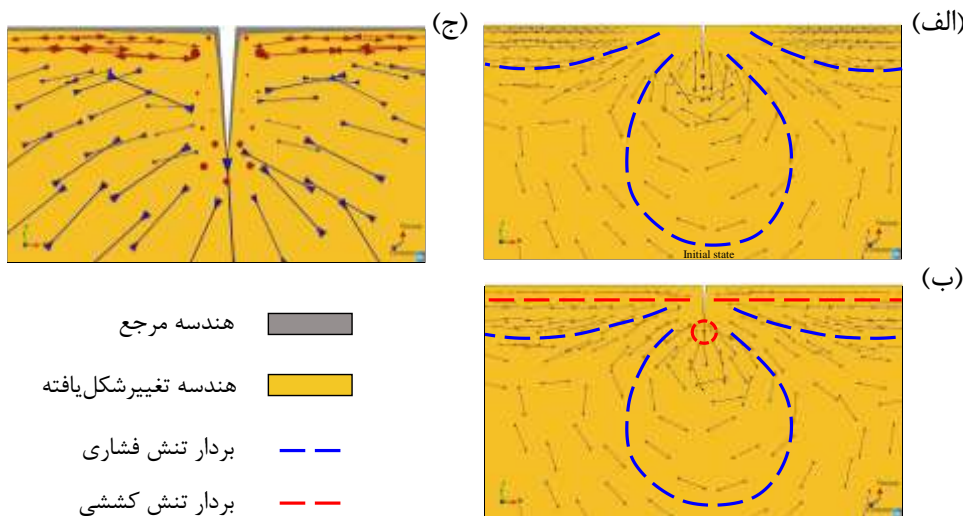


شکل ۱: (الف) ترک‌های عمیق مشاهده شده در دشت قم و (ب) شکل شماتیک ترک خشک‌شدگی و نمایش پارامترهای مورد استفاده در مدل عددی

## ۳. نتایج

مکانیزم وقوع ترک خشک‌شدگی غالباً تحت اثر نیروهای کششی است. خشک‌شدگی سطحی خاک منجر به افزایش مکش در ناحیه غیراشباع خاک شده و در نتیجه تنش‌های کششی در توده خاک بیشتر می‌شود. با افزایش تنش‌های کششی و عبور از مرز مقاومت کششی خاک ترک‌خوردگی رخ می‌دهد. شکل ۲ توزیع تنش فشاری و کششی در خاک ترک‌خورده را قبل و بعد از اعمال شرایط اقلیمی گرم و خشک نشان می‌دهد. مطابق شکل ۲(الف) در ابتدا به دلیل عدم تبادل رطوبتی و انرژی خاک با محیط اطراف، تنش‌های زمین از نوع تنش‌های فشاری است. همانطور که مشاهده می‌شود توزیع تنش در خاک ترک‌خورده به صورت ناهمسان است که تمرکز تنش در نوک ترک رخ می‌دهد. با گذشت زمان و اعمال تأثیر اندرکنش خاک و اتمسفر، لایه‌های سطحی زمین با تغییر مکانیزم تنش روبرو می‌شوند. خشک‌شدگی لایه‌های سطحی منجر به تغییر نوع تنش از فشار به کشش می‌شود که می‌تواند ترک‌های جدیدی در اطراف ترک موجود رخ دهد. در طول زمان و اعمال مسیر خشک‌شوندگی بلندمدت، مطابق شکل ۲(ج) سطح خاک در اثر انقباض لایه‌های سطحی، فرونشست کرده و حضور ترک منجر به ناهمسانی در

پروفیل سطح زمین می‌شود. همزمان با تغییر مکانیزم تغییر شکل زمین، تنش‌های کششی در بخش بازشدگی و نوک ترک افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به گسترش ترک در عرض و عمق شود. مشاهدات این پژوهش درباره تمرکز تنش در نوک ترک با مطالعه ونگ و همکاران [۹] مطابقت دارد.



شکل ۴: بردارهای تنش کششی در مجاورت ترک خشک‌شدگی، (الف) شرایط اولیه، (ب) پس از شروع خشک‌شدگی سطحی و (ج) گسترش تنش‌های کششی در ادامه مسیر خشک‌شوندگی به همراه تغییر شکل خاک ترک‌خورده

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نحوه تغییر تنش‌های فشاری و کششی خاک ترک‌خورده در منطقه گرم و خشک قم مورد مطالعه قرار گرفت. ترک‌خوردگی زمین در نتیجه خشک‌شدگی سطح زمین با خصوصیات خمیری بالا اتفاق می‌افتد. ترک‌ها امکان تبادل رطوبتی و انرژی خاک و محیط اطراف را افزایش می‌دهد و منجر به تشدید فرونشست زمین در ناحیه غیراشباع خاک می‌شود. بدین منظور، با استفاده از برنامه المان محدود CODE\_BRIGHT با مجوز قانونی و رویکرد مدل‌سازی ترموهیدرومکانیکی بازتوزیع تنش در مجاورت ترک بررسی شد. نتایج نشان دادند که توزیع تنش در شرایط اولیه قبل اعمال مسیرهای خشک‌شوندگی از نوع فشاری است که در نزدیکی سطح زمین و اطراف نوک ترک به طور ناهمسان توزیع یافته است. با پیشروی مسیر خشک‌شوندگی تنش‌های کششی در سطح خاک به ویژه مجاورت ترک و نوک آن گسترش می‌یابند که می‌تواند منجر به افزایش احتمال گسترش ترک از نوک ترک موجود و شروع ترک‌خوردگی سطح زمین شود.

#### ۵. فهرست مراجع

- C.S. Tang, Q. Cheng, T. Leng, B. Shi, H. Zeng and H.I. Inyang, "Effects of wetting-drying cycles and desiccation cracks on mechanical behavior of an unsaturated soil," *Catena*, 194, p.104721, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104721>
- S. Tourchi, M. Jabbarzadeh, H. Sadeghi and A.A. Lavasan, "Thermo-hydro-mechanical modelling of rock cliff-atmosphere interaction: the case of the Pozary test site in Czechia," In *EGU, Copernicus Meetings, Austria*, 2024. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-20407>
- M.J. Ghandilou, S. Tourchi and H. Sadeghi, "Numerical investigation of cyclic wetting



- and drying of Boom clay based on the Barcelona Expansive Model," In *84th EAGE Annual Conference & Exhibition*, vol. 2023, No. 1, pp. 1-5, 2023. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202310400>
- M.J. Ghandilou, S. Tourchi, A.G. Darzi and H. Sadeghi, "Numerical modeling of volumetric behavior of unsaturated expansive soil under wetting and drying cycles," In *5th Iranian Conference on Geotechnical Engineering*, 2023. <https://www.researchgate.net/publication/377265206>
- T. Davydzhenka, P. Tahmasebi and N. Shokri, "Unveiling the global extent of land subsidence: The sinking crisis," *Geophysical Research Letters*, 51(4), p.e2023GL104497, 2024. <https://doi.org/10.1029/2023GL104497>
- Z. Mousavi and F. Jafarzadeh, "The influence of gradation on shear behavior of Glass Beads: A DEM study," In *14<sup>th</sup> National Congress on Civil Engineering*, 2024. <https://www.researchgate.net/publication/380667931>
- L. Guo, G. Chen, L. Ding, L. Zheng and J. Gao, "Numerical simulation of full desiccation process of clayey soils using an extended DDA model with soil suction consideration," *Computers and Geotechnics*, 153, p.105107, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.105107>
- M. Valipour, M. Jabbarzadeh and H. Sadeghi, "The influence of different hydraulic conductivities on two-phase flow characteristics of gas-injected sand-bentonite soil considering embedded fractures," In *14<sup>th</sup> National Congress on Civil Engineering*, 2024. <https://www.researchgate.net/publication/380760042>
- X. Wang, J. Yu, Q. Li, Y. Yu and H. Lv, "Study on the crack evolution process and stress redistribution near crack tip in soil," *International Journal of Geomechanics*, 22(1), p.04021255, 2022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002236](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002236)
- S. Olivella, A. Gens, J. Carrera and E.E. Alonso, "Numerical formulation for a simulator (CODE\_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media," *Engineering computations*, 13(7), pp.87-112, 1996. <https://doi.org/10.1108/02644409610151575>
- M. Jabbarzadeh, H. Sadeghi, S. Tourchi and A.G. Darzi, "Thermo-hydraulic analysis of desiccation cracked soil strata considering ground temperature and moisture dynamics under the influence of soil-atmosphere interactions," *Geomechanics for Energy and the Environment*, p.100558, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2024.100558>



## بهبود آنالیز داده های تصویر سه بعدی سنگ‌های کربناته با استفاده از یادگیری عمیق

محمد بختیاری\*؛ جعفر قاجار<sup>۲</sup>

### چکیده

با پیشرفت روش‌های تصویربرداری و افزایش توان محاسباتی، استفاده از فیزیک سنگ دیجیتال برای تعیین و محاسبه خواص پتروفیزیکی مغزه‌های مخازن هیدروکربنی گسترش یافته است. تفکیک تصاویر میکروسی‌تی کربناته‌ها به دلیل توزیع گسترده اندازه منافذ و درجه ناهمگنی بالای این سنگ‌ها چالش‌برانگیز است. در این پژوهش، از چارچوبی مبتنی بر شبکه‌های عصبی کانولوشن برای تفکیک تصاویر سنگ کربناته با وضوح فوق‌العاده استفاده شده است تا ریزتخلخل‌ها به‌طور دقیق شناسایی شوند. دو نوع طرح ارائه شده است: (۱) با استفاده از یک شبکه عصبی و (۲) با ترکیب دو شبکه عصبی برای انجام وضوح فوق‌العاده و تفکیک چندفازی تصاویر میکروسی‌تی کربناته به سه فاز جامد، ماکرو منفذ و میکرو منفذ. نتایج نشان داد که رویکرد ترکیبی نسبت به رویکرد انتها به انتها در تفکیک چندفازی تصاویر موفق‌تر بوده و در پیش‌بینی تراوایی و کسرهای حجمی هر فاز عملکرد بهتری از خود نشان داده است.

**کلیدواژه‌ها:** سنگ‌های کربناته، تفکیک، ریزتخلخل، وضوح فوق‌العاده، یادگیری عمیق، آنالیز سنگ دیجیتال، تصویر میکروسی‌تی، ضریب همبستگی

### ۱. مقدمه

فیزیک سنگ دیجیتال به عنوان ابزاری قدرتمند در تحلیل خواص پتروفیزیکی مغزه‌های مخزنی مطرح شده است. این فناوری با استفاده از تکنیک‌های تصویربرداری پیشرفته و مدل‌سازی‌های محاسباتی، امکان بررسی دقیق‌تر و عمیق‌تر ساختارهای داخلی سنگ‌ها را فراهم می‌کند. یکی از مهم‌ترین مراحل در این فرایند، تفکیک (segmentation) تصاویر میکروسی‌تی سنگ‌های کربناته است. این تفکیک به شناسایی و تحلیل دقیق‌تر فازهای مختلف، بویژه فضای منفذی، موجود در سنگ‌ها کمک می‌کند که برای ارزیابی خواص پتروفیزیکی ضروری است [۱،۲].

<sup>۱</sup>بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، (mohammadbakhtiary3049@gmail.com)

\* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup>بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران (jqajar@shirazu.ac.ir)

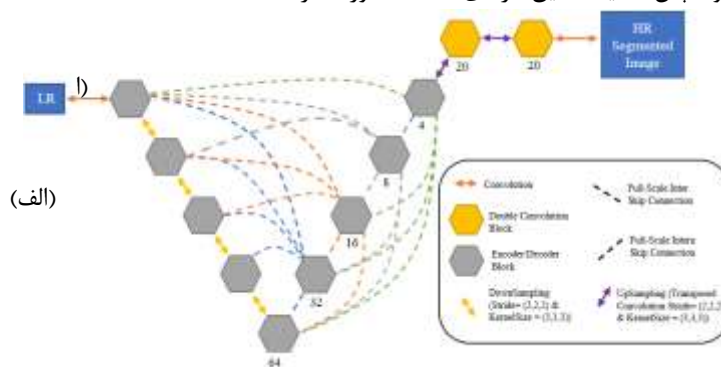
بخش علوم زمین، دانشگاه اوترخت، اوترخت، هلند (j.qajar@uu.nl)

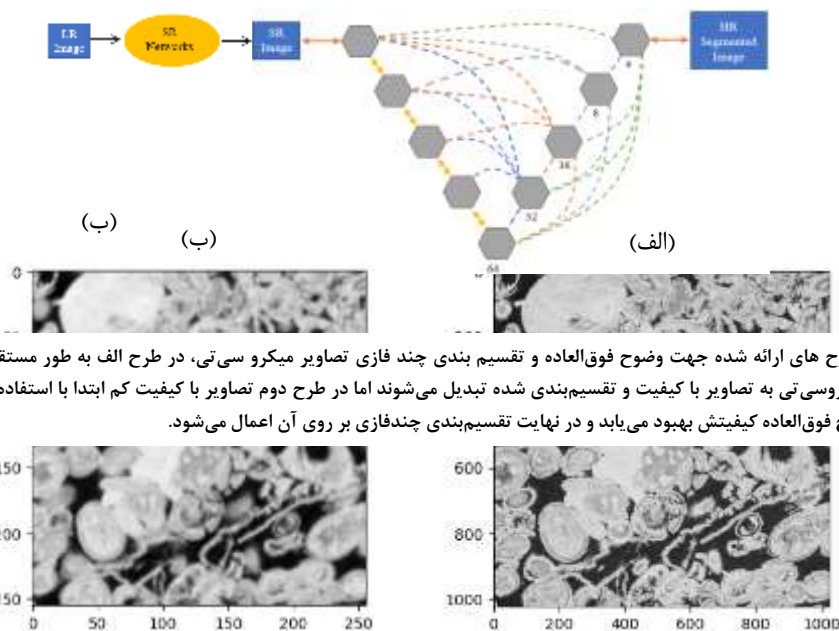
سنگ‌های کربناته به دلیل توزیع وسیع اندازه منافذ و ناهمگنی بالای ساختاری، چالش‌های زیادی در زمینه تفکیک ایجاد می‌کنند. روش‌های سنتی تفکیک، نظیر روش‌های چند آستانه‌ای، معمولاً در شناسایی ریزتخلخل‌ها ناکارآمد هستند و به خطای کاربر حساسیت بالایی دارند. این روش‌ها معمولاً نمی‌توانند به خوبی تفاوت‌های ظریف در ساختارهای میکروسکوپی را شناسایی کنند و اغلب نیازمند تنظیمات دستی و تجربی هستند که دقت و قابلیت اطمینان آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲-۴].

در سال‌های اخیر، استفاده از یادگیری عمیق و به‌ویژه شبکه‌های عصبی کانولوشن (CNN) [۲]، تحول بزرگی در تحلیل سنگ‌های دیجیتالی ایجاد کرده است. این روش‌ها به دلیل توانایی بالای خود در استخراج ویژگی‌ها و شناسایی الگوهای پیچیده، به عنوان ابزارهای مؤثری برای تفکیک تصاویر سنگ‌ها شناخته شده‌اند. در این پژوهش، از شبکه‌های عصبی کانولوشن برای تفکیک تصاویر سنگ کربناته با وضوح فوق‌العاده استفاده شده است [۲،۳]. هدف اصلی این تحقیق، بهبود دقت شناسایی ریزتخلخل‌ها و ارائه یک روش کارآمدتر برای تفکیک فازهای مختلف سنگ‌های کربناته است.

## ۲. روش کار

در این تحقیق، طرح‌های مختلفی از معماری‌های شبکه‌های عصبی کانولوشن پیاده‌سازی شده‌اند. دو نوع طرح ارائه شده است: یکی شامل یک شبکه عصبی که به‌طور همزمان وضوح فوق‌العاده و تفکیک را انجام می‌دهد (شکل ۱(الف))، و دیگری شامل دو شبکه عصبی مجزا که شبکه اول وضوح فوق‌العاده و شبکه دوم تفکیک چندفازی را انجام می‌دهد (شکل ۱(ب)). طرح‌های ارائه شده در این تحقیق برای بهبود کیفیت تصاویر میکروسکوپی، شبکه چند مقیاسی با وضوح فوق‌العاده عمیق (MDSR) [۵] است که در این روش ابتدا فیلتری جهت کنتراست بهتر تصاویر میکروسکوپی با استفاده از شبکه CNN که از معماری ResNet بهره می‌برد، استفاده شده است و برای فاز تفکیک چند فازی نیز Unet3+ می‌باشد [۴]. داده‌های میکروسکوپی یک سنگ‌های کربناته خاورمیانه [۶] (شکل ۲) برای آموزش و ارزیابی این شبکه‌ها استفاده شد. معیارهای ارزیابی شامل دقت تفکیک چندفازی، ویژگی‌های توپولوژیکی و اندازه‌گیری خواص پتروفیزیکی بودند. با این رویکرد، تصاویر اولیه با وضوح پایین به تصاویر با وضوح بالا تبدیل شدند و سپس تفکیک دقیق فازهای مختلف صورت گرفت [۶].





شکل ۱. طرح های ارائه شده جهت وضوح فوق‌العاده و تقسیم‌بندی چند فازی تصاویر میکرو سی‌تی، در طرح الف به طور مستقیم تصاویر میکروسی‌تی به تصاویر با کیفیت و تقسیم‌بندی شده تبدیل می‌شوند اما در طرح دوم تصاویر با کیفیت کم ابتدا با استفاده از شبکه وضوح فوق‌العاده کیفیتش بهبود می‌یابد و در نهایت تقسیم‌بندی چندفازی بر روی آن اعمال می‌شود.

شکل ۲. مقطع های دوبعدی از تصاویر میکرو سی‌تی سنگ کربناته (الف) با وضوح بالا و (ب) با وضوح پایین [۶]

### ۳. نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای ارزیابی مدل پیشنهادی توپولوژی منافذ را با استفاده از پارامترهای استاندارد مورد استفاده در تحلیل کمی سازه‌های فضایی، مساحت و محیط به صورت دو بعدی و حجم، مساحت سطح و عرض متوسط در محیط سه بعدی بررسی کردیم. پارامتر دیگر مشخصه اولر-پوانکاره است که این پارامترها را به اصطلاح می‌توان توابع مینکوفسکی نامید. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که رویکرد ترکیبی (dbMDSR-UNet3Plus)، یعنی استفاده از دو شبکه عصبی مجزا برای وضوح فوق‌العاده و تفکیک چندفازی، عملکرد بهتری نسبت به رویکرد انتها به انتها داشت. این رویکرد توانست در تفکیک دقیق تر فازها و شناسایی ریزتخلخل‌ها موفق تر عمل کند (جدول ۱).

شبیه‌سازی جریان تک فاز با استفاده از روش مدل‌سازی شبکه منفذی توسط نرم‌افزار Avizo انجام شد، که تراوایی محاسبه شده توسط این روش در جدول ۲ با و بدون اختصاص رسانایی مربوط به فاز میکرو منفذ نشان داده شده است. افزودن رسانایی میکرو تخلخل، تراوایی محاسبه شده را افزایش می‌دهد، زیرا سنگ کربناته مورد نظر درصد نسبتاً بالایی از تخلخل حل نشده را دارند. با این حال، سهم در تراوایی محاسبه شده ممکن است به اندازه فاز ماکرو منافذ قابل توجه نباشد. شبکه‌ی پیشنهادی در رویکرد ترکیبی، دقت بالاتری در پیش‌بینی تراوایی کسره‌های حجمی هر فاز نسبت به روش‌های سنتی و پیشین (EDSR-UResNet) نشان دادند (جدول ۲).

این دستاوردها نشان‌دهنده قدرت و کارایی شبکه‌های عصبی کانولوشن در تحلیل و تفکیک تصاویر سنگ‌های کربناته با وضوح فوق‌العاده است، که می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در دقت و کارایی تحلیل‌های پتروفیزیکی فراهم آورد. در نهایت، این پژوهش بر اهمیت استفاده از شبکه‌های عصبی ترکیبی در تحلیل تصاویر سنگ دیجیتال تأکید می‌کند و راه را برای تحقیقات آینده در این زمینه هموار می‌سازد.

جدول ۱. گزارش مجموعه ای از اندازه گیری های ریخت‌شناسی برای روش های تقسیم بندی مختلف.

| عدد اویلر          | مساحت سطح ویژه فاز جامد | مساحت سطح ویژه میکرومنفذ | مساحت سطح ویژه فاز ماکرومنفذ | کسر حجمی جامد       | میکرو تخلخل (microporosity) | ماکرو تخلخل (macroporosity) | روش              |
|--------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------|
| -۱۵۸۳۳<br>(۰.۰۰٪)  | ۰/۱۲۸۷<br>(۰.۰۰٪)       | ۰/۱۰۶۵<br>(۰.۰۰٪)        | ۰/۰۴۳۳<br>(۰.۰۰٪)            | ۰/۶۹۵۳<br>(۰.۰۰٪)   | ۰/۱۲۶۶<br>(۰.۰۰٪)           | ۰/۱۷۸۱<br>(۰.۰۰٪)           | HR-Watershed     |
| -۱۱۲۷۸<br>(٪ ۲۸/۷) | ۰/۰۸۶۷<br>-۳۲/۶<br>(٪)  | ۰/۰۸۰۳<br>(٪ -۲۴/۶)      | ۰/۰۳۷۵<br>(٪ -۱۳/۴)          | ۰/۶۷۰۶<br>(٪ -۱/۱۲) | ۱۱/۶۱<br>۰/۱۴۱۳<br>(٪)      | ٪ ۵/۶۱<br>۰/۱۸۸۱            | EDSR-UResNet     |
| -۱۰۶۷۳<br>(٪ ۳۲/۶) | ۰/۰۷۷۷<br>-۳۹/۶<br>(٪)  | ۰/۰۷۷۷<br>(٪ -۲۷/۱)      | ۰/۰۳۶۹<br>(٪ -۱۴/۸)          | ۰/۶۹۰۹<br>(٪ -۲/۲۳) | ٪ ۱/۸۲<br>۰/۱۲۸۹            | ٪ ۱/۱۸<br>۰/۱۸۰۲            | dBMSDR-UNet3Plus |

جدول ۲. مقدار تراوایی به دست آمده با استفاده از روش های تفکیک مختلف

| تراوایی میکرو و ماکرو منافذ (میلی داری) | تراوایی ماکرو منافذ (میلی داری) | روش              |
|---|---------------------------------|------------------|
| ۱۳۵۹<br>(۰.۰۰٪)                         | ۱۰۵۸<br>(۰.۰۰٪)                 | HR-Watershed     |
| ۱۵۲۶<br>(٪ ۱۲/۳۲)                       | ۱۴۲۴<br>(٪ ۳۴/۶۱)               | EDSR-UResNet     |
| ۱۲۵۲<br>(٪ -۷/۷۸)                       | ۱۱۴۰<br>(٪ ۷/۷۴)                | dBMSDR-UNet3Plus |

#### ۴. فهرست مراجع

- [1] Song, W., Liu, L., Wang, W., & Jiang, X. (2021). Deep Learning Techniques for Digital Rock Physics and Its Applications in the Petroleum Industry: A Review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, 107830.
- [2] Ranneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)* (pp. 234-2۴۱).
- [3] Pham, C. H., Ducournau, A., Fablet, R., & Rousseau, F. (2018). Brain MRI Super-Resolution Using Deep 3D Convolutional Networks. In *2018 IEEE 15th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2018)* (pp. 197-2۰۰).
- [4] Huang, H., Lin, L., Tong, R., Hu, H., Zhang, Q., Iwamoto, Y., ... & Chen, Y. W. (2020). UNet 3+: A Full-Scale Connected UNet for Medical Image Segmentation. In *ICASSP ۲۰۲۰ - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 1055-1059). IEEE.
- [5] Lim, B., Son, S., Kim, H., Nah, S., & Lee, K. M. (2017). Enhanced Deep Residual Networks for Single Image Super-Resolution. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)* (pp. 136-1۴۴).
- [6] Alqahtani, N. J., Niu, Y., Wang, Y. D., Chung, T., Lanetc, Z., Zhuravljov, A., & Mostaghimi, P. (2022). Super-resolved segmentation of X-ray images of carbonate rocks using deep learning. *Transport in Porous Media*, 143(2), 497-525.



## عوامل کنترل‌کننده حفرات و کیفیت مخزنی در یک مخازن کربناته

رقیه ایمانی<sup>۱</sup>، بهروز اسرافیلی دیزجی<sup>\*</sup>

### چکیده

سنگ های مخزنی کربناته به دلیل تأثیر فرآیندهای دیاژنتیکی از نظر زمین شناسی و مخزنی بسیار پیچیده و ناهمگن هستند. در این مقاله مخزن نفتی سازند فهلیان در یکی از بزرگترین میداین هیدروکربوری جنوب غرب ایران مورد مطالعه قرار گرفته است. براساس داده‌های مغزه و لاگ‌های پتروفیزیکی از دو حلقه چاه، عوامل کنترل‌کننده توسعه حفرات و ناهمگنی مخزنی در این میدان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که ناهمگنی مخزنی در این میدان از محیط رسوبی و شرایط حاکم بر آن به ارث نرسیده است و فرآیندهای دیاژنتی در این موضوع نقش برجسته تری داشته‌اند. بخش اعظم حفرات اولیه طی فرآیندهای دیاژنتی مانند سیمانی شدن و تراکم از بین رفته است و فراوانی حفرات با اندازه کمتر از ۴ میکرون (مزو و میکروپور) در مخزن بیشتر است. همچنین تلفیق اطلاعات مغزه، XRD و لاگهای پتروفیزیکی نشان می‌دهد به دلیل دولومیتی شدن در بخش‌های میانی سنگ مخزن شرایط برای تشکیل و توسعه شکستگی‌ها فراهم آمده است که عامل مهمی در تولید نفت در میدان است.

### کلیدواژه‌ها

انتخاب کلیدواژه؛ سازند فهلیان، ناهمگنی مخزنی، شعاع گلوگاه حفرات، فرآیندهای دیاژنتی

### ۱. مقدمه

سازند فهلیان با سن نئوکومین تا آپتین، یکی از سنگ مخزن‌های مهم شناخته شده در میداین نفتی دشت آبادان محسوب می‌شود. طی یک پروژه تحقیقاتی عوامل کنترل‌کننده نوع حفرات و کیفیت مخزنی در این سازند مورد بررسی قرار گرفت. مجموعه داده مورد استفاده در این مطالعه شامل کلیه اطلاعات سنگ شناسی مغزه‌ها، داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه، آنالیزهای XRD و لاگ‌های پتروفیزیکی مربوط به دو حلقه چاه از میدان مورد نظر است.

<sup>۱</sup> دانشجوی ژئومکانیک نفت، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران، [roghayeimani20@gmail.com](mailto:roghayeimani20@gmail.com)

<sup>۲</sup> عضو هیأت علمی گروه اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران، [esrafilidizaji@ut.ac.ir](mailto:esrafilidizaji@ut.ac.ir)  
\* نویسنده مسئول

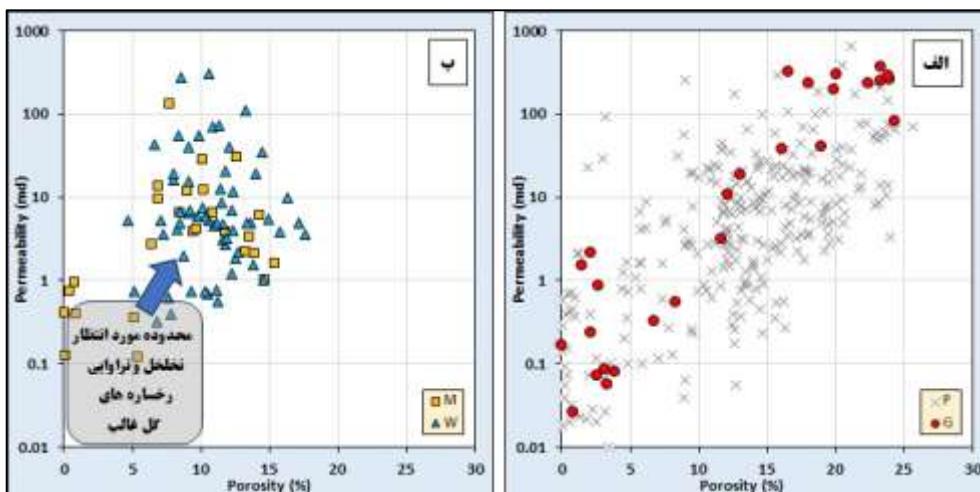
## ۲. هتروژنزی مخزنی و نوع حفرات

بررسی شاخص‌های هتروژنزی مانند ضریب تغییرات و ضریب دیکسترا-پارسونز نشان می‌دهد که مخزن فهلیان در میدان یاد شده به شدت هتروژن است و عمدتاً دارای حفرات شکستگی، انحلالی (واگی)، بین دانه ای است. محاسبه شعاع گلوگاه حفرات به روش وینلد حاکی از فراوانی بالای حفرات مزوپور و ماکرو پور در این مخزن است. اغلب شعاع گلوگاه حفرات اندازه ای کمتر از ۴ میکرون دارند و فراوانی حفرات مگاپور اندک است.

## ۳. ارتباط رخساره‌ها، دیاژنز و کیفیت مخزنی

### ۳-۱ رخساره‌ها و کیفیت مخزنی

برای بررسی اثرات محیط رسوبی بر کیفیت مخزنی، اثر بافت رسوبی بر تخلخل و تراوایی مورد بررسی قرار گرفت. پلات داده‌های تخلخل و تراوایی (شکل ۱) رخساره‌های گل غالب با بافت مادستونی و وکستونی نشان می‌دهد که این رخساره‌ها دارای کیفیت مخزنی به نسبت بالاتری از مقادیر مورد انتظار و معمول در مخازن کربناتی است. همچنین پلات داده‌های تخلخل و تراوایی رخساره‌های دانه غالب (پکستون و گرینستونی) حاکی از پراکندگی بالایی داده‌ها و تغییرات زیاد آنها است. این روندهای مشاهده شده نشان می‌دهد که محیط رسوبی کنترل کمتری در مقام مقایسه با دیاژنز در مخزن مورد مطالعه دارد.



شکل ۱: ارتباط بین بافت نمونه‌ها با میزان تخلخل و تراوایی

### ۳-۲ اثر سیمانی شدن

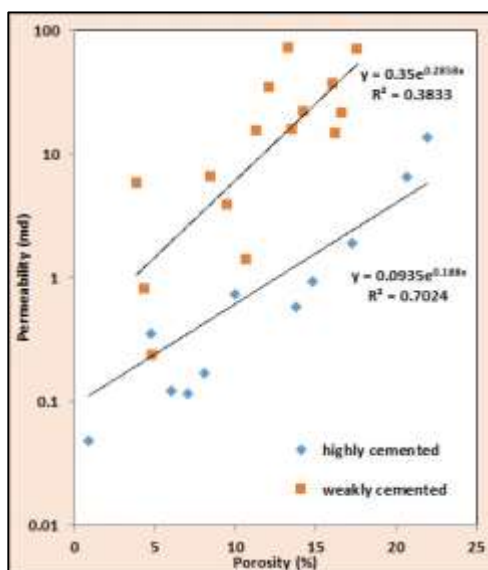
مطالعات پتروگرافی در مخزن فهلیان میدان مورد مطالعه نشان می‌دهد سیمانی شدن یکی از مهمترین فرآیندهای دیاژنزی است که موجب مسدود شدن حفرات شده است. به منظور بررسی نقش سیمانی شدن در کیفیت مخزنی اثر این فرآیند بر تخلخل و تراوایی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات در رخساره‌های دانه غالب (گرینستون و پکستون) نشان می‌دهد که نمونه‌های به شدت سیمانی شده دارای کیفیت مخزنی ضعیفتری نسبت به نمونه‌های بدون یا فقیر از سیمانی شدن هستند. پلات تخلخل و تراوایی نمونه‌های به شدت سیمانی شده در مقابل نمونه‌های سیمانی نشده نشان می‌دهد این فرآیند اثر مهمی بر تراوایی سنگ و پر شدن گلوگاه حفرات داشته است

### ۳-۳ اثر تراکم

سازند فلهلیان در میدان مورد مطالعه بعد از رسوبگذاری بیش از ۴ کیلومتر تدفین شده است. بررسی مغزه‌های حفاری و مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی وجود آثار تراکم فیزیکی و شیمیایی را در این سازند تأیید می‌کند که اثر مهمی بر از دست رفتن تخلخل و کاهش کیفیت مخزنی داشته است. بررسی تعداد استیلولیت در هر متر مغزه حاکی از آن است که با افزایش تعداد این عوارض میزان تخلخل و تراوایی میانگین مغزه کاهش محسوسی نشان می‌دهد. بطوریکه میانگین تخلخل در مغزه فاقد استیلولیت دوبرابر مغزه‌های با بیش از ۱۰ استیلولیت است و این نسبت برای میانگین تراوایی شش برابر است (جدول ۱).

جدول ۱: ارتباط بین توسعه استیلولیت و کیفیت مخزنی

| میانگین تراوایی (میلی داری) | میانگین تخلخل (درصد) | تعداد استیلولیت در یک متر مغزه |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------------|
| ۳۰/۴۲                       | ۱۳/۱۵                | فاقد استیلولیت                 |
| ۲۷/۳۴                       | ۱۰/۱۱                | ۱ تا ۴ عدد                     |
| ۲۳/۱۳                       | ۸/۱۶                 | ۵ تا ۹ عدد                     |
| ۵/۶۱                        | ۶/۱۰                 | ۱۰ تا ۱۵ عدد                   |

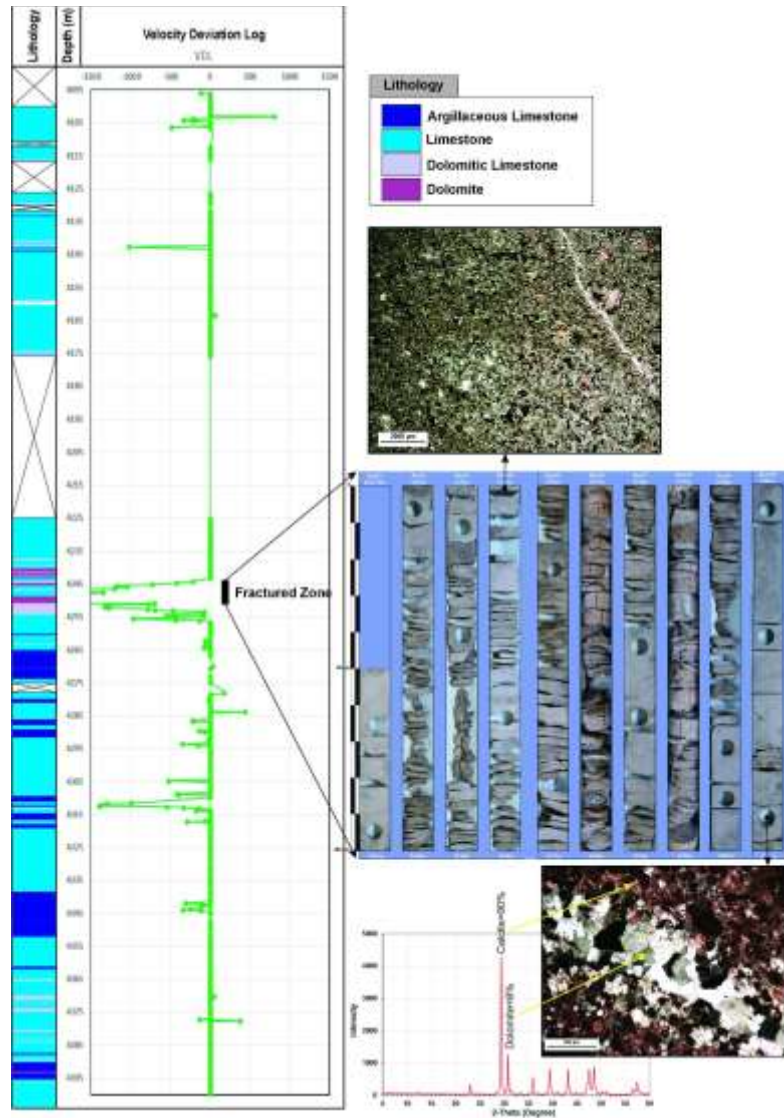


شکل ۲: رابطه بین شدت سیمانی شدن در نمونه‌ها و کیفیت مخزنی

### ۳-۴ دولومیتی شدن و شکستگی

دولومیتی شدن در سازند مورد مطالعه فرآیند فراگیری نبوده و بخش‌های اندکی از توالی رسوبی را تحت تاثیر قرار داده است. مطالعات پتروگرافی نشان می‌دهد که دولومیتی شدن در سازند مورد مطالعه به دو گونه در ارتباط با استیلولیت‌ها و شکستگی‌ها قابل تقسیم است. نکته قابل توجه دیگر اثر این فرآیند بر توسعه شکستگی‌هاست. تلفیق و تطابق مشاهدات مغزه و نتایج حاصل از لاگ انحراف سرعت با اطلاعات سنگ شناسی حاصل از مطالعات مقاطع نازک و XRD نشان می‌دهد بین افق‌های دولومیتی شده و زون‌های شکستگی ارتباط مستقیمی وجود دارد (شکل ۳). دو سناریو در این راستا ممکن به نظر می‌رسد (۱) دولومیتی شدن قبل از شکستگی‌ها رخ داده و شکستگی‌ها در راستای این بخش‌ها به دلیل ناهمگونی سنگ شناسی توسعه یافته است. (۲) شکستگی‌ها مسیری برای مهاجرت و تاثیر شورابه‌های تدفینی دولومیتی کننده بوده است.





شکل ۳: تلفیق داده های لاگ انحراف سرعت با مغزه و XRD برای نشان دادن ارتباط زون های دولومیتی شده و شکستگی

#### ۴. نتیجه گیری

مطالعات نشان می دهد که سنگ مخزن فلهلیان در میدان مورد مطالعه بسیار هتروژن است. بررسی عوامل مختلف نشان می دهد که سنگ مخزن فلهلیان در این میدان به شدت تحت تاثیر دیاژنز قرار گرفته است به طوری که آثار کنترلی محیط رسوبی بر کیفیت مخزنی را از بین برده است. نتایج بررسی تأثیر فرآیندهای دیاژنزی بر کیفیت مخزنی نشان دهنده ی اثر منفی فرآیندهای تراکم و سیمانی شدن و اثر مثبت دولومیتی شدن و شکستگی بر افزایش کیفیت مخزنی است.



## تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای مواد آلی و معدنی متخلخل برای دارورسانی

نوید احدی جمایران؛ علی نعمت اله زاده\*

### چکیده

این مطالعه، به بررسی خواص و کاربردهای مواد آلی و معدنی متخلخل در سیستم‌های دارورسانی می‌پردازد. مواد آلی متخلخل مانند پلی لاکتاید گلایکولاید (PLGA) و کیتوزان به دلیل زیست سازگاری و زیست تخریب پذیری ارزشمند بوده و برای ادغام با بافت‌های بیولوژیکی مناسب هستند. در مقابل، مواد معدنی متخلخل مانند سیلیس و آلومینا پایداری فیزیکی و شیمیایی برتری را ارائه می‌دهند که برای کاربردهای پزشکی مانند درمان سرطان ایده‌آل است. این تجزیه و تحلیل به مقایسه روش‌های سنتز، عامل‌سازی و کاربردهای خاص این دست از مواد متخلخل می‌پردازد و ضرورت انتخاب مواد بر اساس نیازهای درمانی و الزامات انتقال دارو را برجسته می‌کند. این مقاله بر پیشرفت‌های اخیر در اثربخشی این مواد در کاربردهای پزشکی با تکیه بر خواص خلل و فرج ترکیبات متخلخل متمرکز شده است.

### کلید واژه‌ها

خواص مواد متخلخل، آلی، معدنی، دارو رسانی.

### ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر با بهینه‌سازی مواد در زمینه دارورسانی، پیشرفت چشمگیری در سیستم‌های دارویی حاصل شده است. مواد آلی و معدنی متخلخل به دلیل خواص منحصر به فردشان مورد توجه هستند. در این مقاله، مواد ذکر شده در سیستم‌های دارورسانی با یکدیگر مقایسه شده و خواص، روش‌های سنتز، تکنیک‌های عامل‌سازی، کاربردها، مزایا و محدودیت‌های آن‌ها بررسی شده است. با بررسی این موارد، عوامل اساسی در انتخاب مواد دارورسانی مشخص می‌شوند که منجر به بهبود قابل توجهی در عملکرد و تطبیق پذیری آن‌ها می‌شود. خواص منحصر به فرد و قابلیت‌های عملکردی این مواد برای توسعه دارو رسانی موثر، قابل توجه است.

### ۲. مقایسه عملکرد مواد متخلخل در دارو رسانی

#### ۱،۲. خواص مواد

مواد آلی متخلخل معمولاً از پلیمرهای طبیعی یا مصنوعی مانند پلی لاکتاید گلایکولاید<sup>۱</sup> (PLGA)، پلی

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. [navidahadi@uma.ac.ir](mailto:navidahadi@uma.ac.ir)

<sup>۲</sup>\* استاد، مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. [nematollahzadeha@uma.ac.ir](mailto:nematollahzadeha@uma.ac.ir)

<sup>۳</sup>Poly(lactic-co-glycolic acid)

لاکتیک اسید<sup>۱</sup> (PLA)، آلژینات و کیتوزان [۱] مشتق می‌شوند. این مواد دارای خواصی مانند زیست تخریب پذیری، زیست‌سازگاری و قابلیت اصلاح شیمیایی هستند. این مواد همچنین می‌توانند به گونه‌ای مهندسی شوند که صلب یا انعطاف‌پذیر باشد؛ همچنین می‌توانند مقادیر متفاوتی از تخلخل را داشته باشند که برای کاربردهای خاص طراحی شده‌اند. موادی مانند میکروسوزن‌های هیدروژل برای مسیرهای مختلف دارو رسانی مناسب هستند. مواد آلی به طور کلی نرم‌تر هستند، لذا برای ادغام در بافت بدن مناسب‌تر هستند. این مواد می‌توانند مابعات را جذب کنند و بر سینتیک انتشار دارو تأثیر بگذارند.

مواد معدنی متخلخل شامل موادی مانند سیلیس، آلومینا و اکسیدهای فلزی هستند [۲]. این مواد پایداری حرارتی و شیمیایی بالایی دارند و دارای اندازه منافذ کنترل شده‌ای هستند که می‌توان آن‌ها را در طیف وسیعی از ساختارهای ریز متخلخل تا میکرو متخلخل تنظیم کرد. همچنین این مواد، دارای سختی و مقاومت در برابر تنش مکانیکی هستند. بر خلاف مواد آلی، این مواد تجزیه نمی‌شوند و برای کاربردهایی که در شرایط محیطی سخت، به پایداری طولانی مدت نیاز دارند، مناسب هستند [۳]. علاوه بر این، ویژگی‌های سطحی، می‌توان آن‌ها را به طور گسترده‌ای مهندسی کرد تا گروه‌های عملکردی متنوعی داشته باشند و برهمکنش آن‌ها را با مولکول‌های زیستی یا داروها افزایش دهند.

## ۲.۲. سنتز و عملکرد مواد متخلخل

مواد آلی متخلخل با استفاده از تکنیک‌هایی مانند ریخته‌گری با حلال، شستشوی ذرات، یا الکتروریسی برای ماتریس‌های فیبری، سنتز می‌شوند [۴]. سنتز اغلب شامل روش‌هایی است که در دماهای پایین انجام می‌شود تا از تخریب اجزای آلی جلوگیری شود. عامل‌دار کردن معمولاً از طریق پیوند کووالانسی گروه‌های فعال در طول یا پس از پلیمریزاسیون، مانند اتصال پلی اتیلن گلیکول (PEG) یا پپتیدها به دست می‌آید [۵]. این مواد همچنین ممکن است دارای عناصر پاسخگو به محرک بیرونی باشند که مثلاً به تغییرات pH یا دما واکنش نشان می‌دهند که برای رهاسازی هدفمند دارو قابل استفاده است.

روش‌هایی مانند سل-ژل یا روش‌های قالب‌گیری، از جمله سورفکتانت‌ها، برای کنترل اندازه منافذ و ساختار مواد معدنی متخلخل استفاده می‌شوند. روش‌های سنتز اغلب در دماهای بالا انجام می‌شود، اما اندازه و ساختار منافذ را می‌توان به دقت کنترل کرد. عامل‌دار کردن مواد معدنی شامل تکنیک‌های اصلاح سطحی مانند سیلان کردن<sup>۲</sup> است که به لیگاندهای بیولوژیکی یا عوامل درمانی اجازه می‌دهد تا مستقیماً به مواد متصل شوند. علاوه بر این، مواد معدنی را می‌توان برای پاسخ به محرک‌های خارجی مانند میدان‌های مغناطیسی یا نور ساخت و مکانیسم‌های کنترلی اضافی برای انتقال دارو داشته باشند. مواد متخلخل معدنی معمولاً شامل سیلیس، آلومینا و اکسیدهای فلزی مختلف هستند که امکان کنترل دقیق ساختار منافذ را با تکنیک‌هایی مانند رسوب لایه اتمی و تجمع نانوذرات فراهم می‌کنند که برای طراحی پروفایل‌های رهاسازی دارو بسیار مهم است [۶].

## ۳.۲. کاربردهای مواد متخلخل آلی/معدنی در دارو رسانی

مواد آلی متخلخل به طور گسترده در کاربردهایی که نیاز به ادغام با سیستم‌های بیولوژیکی دارند، مانند پزشکی بازسازی و مهندسی بافت، استفاده می‌شوند. آن‌ها به عنوان داربست‌هایی عمل می‌کنند که از رشد سلولی و بازسازی بافت پشتیبانی می‌کنند و در عین حال آزادسازی کنترل شده دارو و هدف‌گیری خاص را ارائه می‌دهند. این مواد به‌ویژه برای تحویل عوامل بیولوژیکی حساس مانند پروتئین‌ها، پپتیدها یا RNA موثر هستند که ممکن است توسط محیط‌های خشن‌تر دناتور<sup>۳</sup> یا غیرفعال شوند. زیست تخریب‌پذیری آن‌ها امکان کاربردهای درمانی

<sup>۱</sup>Polylactic acid  
<sup>۲</sup>Silanization  
<sup>۳</sup>Denaturation

موقت را فراهم می‌کند، یعنی در حالتی که مواد پس از رسیدن به هدف خود به طور طبیعی به محصولات جانبی غیر سمی تجزیه می‌شوند [۷].

در مقابل، مواد معدنی متخلخل در حالت‌هایی که نیاز به عملکرد قوی دارند، مانند تحویل پایدار و کنترل شده دارو در محیط‌های چالش برانگیز مانند درمان سرطان، کاربرد پیدا می‌کنند. آن‌ها در ایمپلنت‌ها یا سیستم‌های تزریقی استفاده می‌شوند و باعث آزادسازی پایدار دارو و محافظت در برابر شرایط سخت فیزیولوژیکی می‌شوند. پایداری حرارتی و شیمیایی بالا، آن‌ها را برای کپسوله کردن و محافظت از داروها از طریق دستگاه گوارش یا سایر محیط‌های خشن داخل بدن مناسب می‌سازد. حامل‌های غیرآلی اغلب با مولکول‌های هدف‌دار، عامل‌دار می‌شوند و امکان انتقال مستقیم دارو به سلول‌های خاص، به‌ویژه در درمان سرطان را فراهم می‌کنند [۸].

#### ۴.۲. مزایا و محدودیت‌ها

##### مواد آلی متخلخل

مزایا: ذاتاً زیست سازگار و اغلب زیست تخریب‌پذیر هستند که خطر عوارض جانبی طولانی مدت در کاربردهای کاشتنی را کاهش می‌دهد. آن‌ها را می‌توان به راحتی تغییر داد تا تعامل مفیدی با بافت‌ها و مایعات بیولوژیکی داشته باشند و از اتصال و رشد سلولی حمایت کنند [۹].

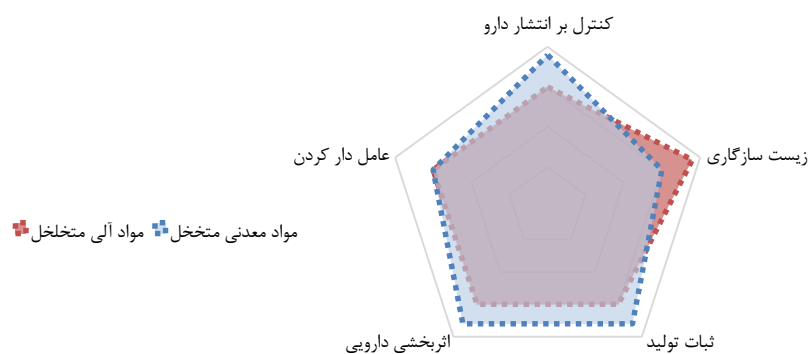
محدودیت‌ها: حساسیت به عوامل محیطی مانند رطوبت و دما می‌تواند منجر به تخریب زودرس یا از دست دادن یکپارچگی مکانیکی شود که به طور بالقوه منجر به نرخ‌های آزادسازی متناقض دارو می‌شود. تنوع در تولید و تعاملات بالقوه غیرقابل پیش‌بینی با سیالات بیولوژیکی ممکن است بر ثبات عملکرد تأثیر بگذارد [۱۰].

##### مواد معدنی متخلخل

مزایا: پایداری عالی در شرایط فیزیولوژیکی، امکان پیش‌بینی پروفایل‌های رهش دارو و ظرفیت‌های بالای دارو را فراهم می‌کند. توانایی تنظیم اندازه منافذ و سطوح برای داروهای خاص، کنترل دقیقی بر سینتیک آزادسازی ارائه می‌دهد [۱۱].

محدودیت‌ها: مشکلات بالقوه با زیست سازگاری و باقی‌ماندن طولانی مدت در بدن، اگرچه اغلب از طریق اصلاحات سطحی برطرف می‌شود. ماهیت بی اثر این مواد می‌تواند نیازمند به برداشتن با جراحی باشد یا ممکن است منجر به تجمع طولانی مدت در بدن شود و نگرانی‌هایی را در مورد اثرات مزمن ایجاد کند [۱۲].

شکل ۱ نمودار عملکرد مواد آلی و معدنی متخلخل را در چندین ویژگی کلیدی مرتبط با دارو رسانی مقایسه می‌کند. این تجسم به درک چگونگی عملکرد هر نوع ماده از نظر زیست سازگاری، کنترل بر رهش دارو، قابلیت‌های عامل‌سازی، اثربخشی درمانی و سازگاری در تولید کمک می‌کند.



شکل ۱. عملکرد مقایسه‌ای مواد متخلخل آلی یا معدنی در انتقال دارو

### ۳. نتیجه‌گیری

با توجه به موارد فوق، انتخاب بین مواد آلی و معدنی متخلخل در سیستم‌های دارورسانی به شدت به نیازهای درمانی خاص و محیط‌های کاربردی بستگی دارد. مواد آلی، به دلیل زیست تخریب‌پذیری و زیست سازگاری بهتر، در کاربردهایی که نیاز به ادغام با بافت‌های بیولوژیکی دارند، ترجیح داده می‌شوند. در مقابل، مواد معدنی به دلیل دوام و پایداری بهتر در شرایط سخت، کاربرد بیشتری دارند. هر دو نوع چالش‌هایی دارند، اما پیشرفت‌های روزافزون در علم مواد باعث افزایش کارایی آن‌ها و گسترش استفاده از آن‌ها در سیستم‌های دارورسانی می‌شود. در نهایت، استفاده از هر یک از آن‌ها باید بر اساس ارزیابی، نیاز دارویی و خواص مواد باشد.

### ۴. فهرست مراجع

- [1] F.-L. Mi, S.-S. Shyu, C.-T. Chen, and J.-Y. Schoung, "Porous chitosan microsphere for controlling the antigen release of Newcastle disease vaccine: preparation of antigen-adsorbed microsphere and in vitro release," *Biomaterials*, vol. 20, no. 17, pp. 1603-1612, 1999.
- [2] S. Kapoor, R. Hegde, and A. J. Bhattacharyya, "Influence of surface chemistry of mesoporous alumina with wide pore distribution on controlled drug release," *Journal of controlled release*, vol. 140, no. 1, pp. 34-39, 2009.
- [3] S. C. Shen, W. K. Ng, L. Chia, Y. C. Dong, and R. B. Tan, "Stabilized amorphous state of ibuprofen by co-spray drying with mesoporous SBA-15 to enhance dissolution properties," *Journal of pharmaceutical sciences*, vol. 99, no. 4, pp. 1997-2007, 2010.
- [4] X. Feng, J. Li, X. Zhang, T. Liu, J. Ding, and X. Chen, "Electrospun polymer micro/nanofibers as pharmaceutical repositories for healthcare," *Journal of Controlled Release*, vol. 302, pp. 19-41, 2019.
- [5] T. Huo *et al.*, "Versatile hollow COF nanospheres via manipulating transferrin corona for precise glioma-targeted drug delivery," *Biomaterials*, vol. 260, p. 120305, 2020.
- [6] C. Boehler, F. Güder, U. M. Kücükbayrak, M. Zacharias, and M. Asplund, "A simple approach for molecular controlled release based on atomic layer deposition hybridized organic-inorganic layers," *Scientific reports*, vol. 6, no. 1, p. 19574, 2016.
- [7] M. T. Rahman, U. Hismat, R. Tripura, P. D. Choudhury, B. Debnath, and S. Das, "Overview on Natural Polymers: A Promising Pharmaceutical excipient in Mucoadhesive Drug Delivery System," *Research Journal of Pharmacy and Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 915-919, 2024.
- [8] G. Kandasamy and D. Maity, "Inorganic nanocarriers for siRNA delivery for cancer treatments," *Biomedical Materials*, vol. 19, no. 2, p. 022001, 2024.
- [9] A. Al-barudi, G. Sinani, and Z. Ulker, "Biodegradable polysaccharide aerogels based on tragacanth and alginate as novel drug delivery systems," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 109, no. 3, pp. 748-756, 2024.
- [10] G. Rengasamy, S. Mahalingam, T. Udaiyar, and M. Kalirajan, "Biocompatibility chitosan/Aloe barbadensis miller loaded moxifloxacin composite film: A multifunctional bio-platform for the treatment of breast cancer," *Journal of Molecular Structure*, p. 138618, 2024.
- [11] Y. Zou, B. Huang, L. Cao, Y. Deng, and J. Su, "Tailored mesoporous inorganic biomaterials: assembly, functionalization, and drug delivery engineering," *Advanced Materials*, vol. 33, no. 2, p. 2005215, 2021.
- [12] R. Mohammadpour, M. A. Dobrovolskaia, D. L. Cheney, K. F. Greish, and H. Ghandehari, "Subchronic and chronic toxicity evaluation of inorganic nanoparticles for delivery applications," *Advanced drug delivery reviews*, vol. 144, pp. 112-132, 2019.



## بهبود چالش وضوح تصویر و میدان دید در محاسبه تراوایی به کمک تصاویر

### چندمقیاسی سنگ کربناته با استفاده از یادگیری عمیق

ایمان نبی پور<sup>۱\*</sup>؛ جعفر قاجار<sup>۲</sup>؛ میثم محمدزاده شیرازی<sup>۳</sup>

#### چکیده

فیزیک سنگ دیجیتال به عنوان یک فناوری پیشرو در توصیف ساختارهای متخلخل با ادغام تصویربرداری پرتونگاری پیشرفته و شبیه‌سازی‌های عددی قدرتمند، به استخراج ویژگی‌های کلیدی سنگ مانند نفوذپذیری می‌پردازد. با این حال، محدودیت‌های وضوح تصویر و میدان دید در مقیاس منافذ، چالش‌های قابل توجهی ایجاد می‌کند. شبیه‌سازی‌های عددی مستقیم در مقیاس‌های بزرگ‌تر یا از نظر محاسباتی غیرعملی هستند یا هزینه‌های بسیار بالایی دارند. این تقابل بین میدان دید و وضوح تصویر به ویژه در ساختارهای پیچیده و چندمقیاسی منافذ سنگ‌های کربناته مشهود است. با هدف ارائه راه حلی برای این مسئله، یک رویکرد نوین یادگیری ماشینی به منظور یکپارچه سازی داده‌های تصویربرداری چندمقیاسی با وضوح‌های مختلف توسعه داده شده است. در این روش، به طور منحصراً به فردی، با طراحی یک مدل شبکه عصبی کانولوشن سه‌بعدی بهینه و یافتن همبستگی‌های پیچیده بین مقیاسی، پیش‌بینی دقیق خواص انتقال جریان، در مقیاس‌های بزرگ‌تر از آنچه تکنیک‌های شبیه‌سازی مستقیم سنتی می‌توانند به دست آورند، تسهیل می‌گردد. همچنین با استفاده از یک روش یادگیری انتقالی بین مقیاسی در حین فاز آموزشی، مدل توسعه یافته به عملکرد کارآمدی با  $R^2$  بیش از ۰/۹۶ هنگام ارزیابی دامنه‌هایی با وضوح پایین‌تر و میدان دید بزرگ‌تر دست می‌یابد. روند کاری پیشنهادی که در ابتدا برای محیط متخلخل پیچیده سنگ‌های کربناته طراحی شده است، قابلیت انطباق با انواع مختلف محیط‌های متخلخل چند مقیاسی را نشان می‌دهد و در نتیجه راه‌حلی امیدوارکننده برای محدودیت ذاتی تقابل بین رزولوشن تصویربرداری و میدان دید در فیزیک سنگ دیجیتال ارائه می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** فیزیک سنگ دیجیتال؛ تصویربرداری پرتونگاری چندمقیاسی؛ مخازن کربناته؛ یادگیری عمیق؛ یادگیری انتقالی

#### ۱. مقدمه

تحلیل سنگ دیجیتال به منظور مشخصه‌سازی و مدل‌سازی خواص انتقال در مواد متخلخل که توسط پرتونگاری اشعه ایکس (CT) و یا دیگر روش‌ها، تصویربرداری می‌شوند، تبدیل به ابزار قدرتمندی شده است. اما در این فناوری یک محدودیت ذاتی در تصویربرداری نهادینه است و آن تقابل بین وضوح تصاویر در مقیاس حفره و میدان دید تصویربرداری می‌باشد. پیشینه مطالعاتی معدودی پیرامون این موضوع و روابط بین مقیاسی وجود دارد. بوتا و شپارد [۱] یک روش آماری چندمقیاسی برای پیش‌بینی و نگاشت تغییرات تراوایی در تصاویر میکروسی‌تی

<sup>۱</sup> بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران (i.nabipour@shirazu.ac.ir). \* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران (jqajar@shirazu.ac.ir)

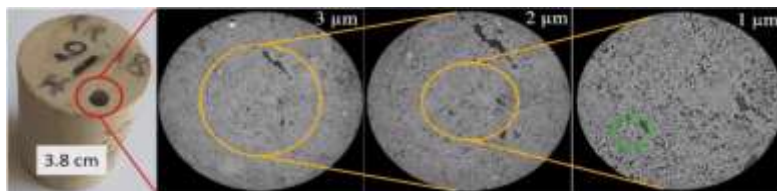
<sup>۳</sup> بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران (m.mohammadzadeh@shirazu.ac.ir)

با وضوح پایین از یک سنگ ماسه‌ای توسعه دادند که شامل محاسبه تراوایی از تصاویر با وضوح بالا و به‌کارگیری مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه برای پیش‌بینی تغییرات تراوایی در تصاویر با مقیاس بزرگ‌تر و وضوح پایین است. اما سانتوس و همکاران [۲] نشان دادند که در ساختارهای متخلخل پیچیده، مدل‌های رگرسیون خطی صادق نبوده و مدلی چندمقیاسی از شبکه‌های عصبی کانولوشن را پیشنهاد دادند که قادر است روابط غیرخطی بین ساختار منافذ و میدان‌های جریان از مدل‌سازی مستقیم را بیاموزد. با این حال، شبکه آن‌ها با بسته‌های ساده کره‌ای آموزش داده شده و ممکن است برای نمونه‌های واقعی قابل تعمیم نباشد. لذا، سهم منحصر به فرد این مطالعه، توسعه یک رویکرد یادگیری عمیق آگاه از وضوح‌های چندمقیاسی، برای برآورد تراوایی در محیط‌های متخلخل واقعی و پیچیده سنگ کربناته می‌باشد. مطالعه ما راه‌حلی نوین برای مسئله بحرانی تقابل وضوح-میدان دید تصویربرداری ارائه داده و قادر به کار در دامنه‌هایی با وضوح پایین‌تر و میدان دید بزرگ‌تر که برای روش‌های شبیه‌سازی مستقیم غیرعملی است، می‌باشد. در این چکیده گسترده پس از بیان مختصر مبانی، پیشینه و اهداف، در مقدمه، به توصیف روندکاری یکپارچه ارائه شده می‌پردازد. سپس نتایج و تحلیل آن‌ها ارائه شده و در نهایت، نتیجه‌گیری به‌طور مختصر بیان می‌گردد.

## ۲. روش پژوهش

مراحل پیاده‌سازی روندکاری مدل چندمقیاسی توسعه داده شده به‌طور خلاصه در ادامه آمده است:

۱. تصویربرداری سه‌بعدی میکروسی‌تی در سه رزولوشن مختلف از یک مغزه کربناته به ترتیب: رزولوشن پایین (LR) که حجم نسبتاً بزرگی از مغزه را پوشش داده، رزولوشن متوسط (MR) و رزولوشن بالا (HR) و اعمال روش‌های پردازش تصویر به منظور بهبود شدت روشنایی و حذف نویز از داده‌ها (شکل ۱).
۲. هم‌ترازی<sup>۱</sup> یا رجیستر سه بعدی تصاویر در سه رزولوشن جهت تنظیم هم‌راستایی و شناسایی ناحیه همپوشانی از طریق پیاده‌سازی یک الگوریتم بهینه‌سازی که توسعه مدل در این ناحیه صورت می‌گیرد.
۳. تفکیک فازهای تصاویر سطح خاکستری به دو فاز حفره و سنگ و تولید تصاویر باینری. سپس جهت محاسبه مقادیر مرجع برای توسعه مدل یادگیری عمیق نظارت شده، از روش شبیه‌سازی مستقیم شبکه بولتزمن<sup>۲</sup> برای محاسبه تراوایی بر روی تصاویر وضوح بالا استفاده شد و همچنین آنالیز حجم نماینده جهت تعیین ابعادی از تصویر که تغییرات خواص انتقال جریان در آن ناچیز باشد، انجام گردید.

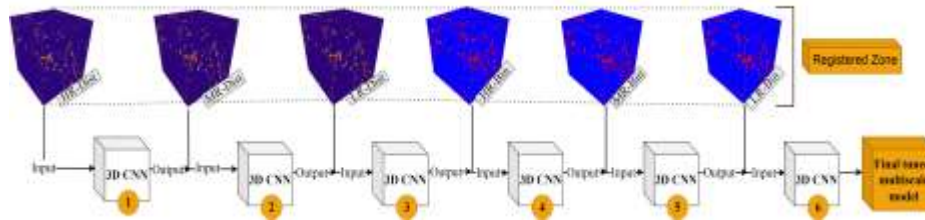


شکل ۱ تصاویر میکروسی‌تی در سه رزولوشن ۱، ۲ و ۳ میکرومتر. اثر تقابل بین رزولوشن تصویر و میدان دید در هر سه مشهود است

۴. جهت ساخت و تکمیل داده‌های آموزش پس از استخراج زیرحجم‌های بسیاری با ابعاد حجم نماینده در هر سه رزولوشن، یک مشخصه مورفولوژی حفره به نام نقشه فاصله اقلیدسی یا به اختصار EDT<sup>۳</sup> از تصاویر باینری استخراج شد که طبق تعریف فاصله هر واکسل حفره تا نزدیکترین دیواره جامد می‌باشد.
۵. ساخت مدل شبکه کانولوشن سه‌بعدی و کالیبراسیون آن در ناحیه هم‌تراز سه رزولوشن تصویر. فرایند

<sup>۱</sup> Registration  
<sup>۲</sup> Lattice Boltzmann Method (LBM)  
<sup>۳</sup> Euclidean Distance Transform

سلسله مراتبی توسعه مدل در فاز آموزش شبکه کانولوشن در شکل ۲ به تصویر در آمده است.  
 ۶. ارزیابی مدل با داده‌های آزمون و پیش‌بینی نفوذپذیری حجم‌های LR با میدان دید وسیع‌تر از کل حجم کربناته و بزرگ مقیاس‌نمایی نتایج تا مقیاس مغزه و اعتبارسنجی نتایج با داده‌های آزمایشگاهی.

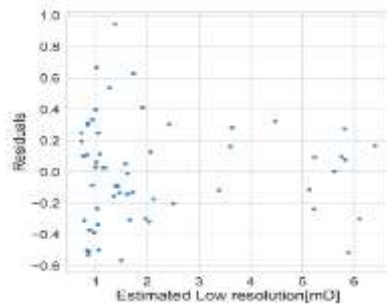


شکل ۲ روندکاری سلسله مراتبی آموزش مدل چند مقیاسی

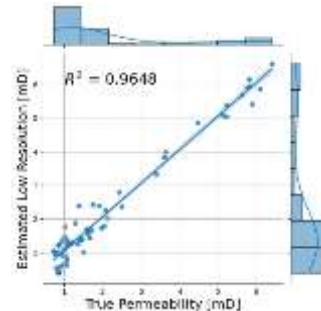
### ۳. نتایج و بحث

نتایج مربوط به پیش‌بینی نفوذپذیری، شامل کالیبراسیون متوالی مدل کانولوشن چندمقیاسی بر اساس ناحیه رجیسترشده، در سه وضوح مختلف است. در مرحله اول، میزان همبستگی بین زیرحجم‌های EDT نرمالایز شده از تصاویر با وضوح بالا، متوسط و پایین، به ترتیب، با نفوذپذیری محاسبه شده از طریق روش LBM در تصاویر با وضوح بالا، محاسبه می‌شود. در مرحله بعد، پارامترهای پیش‌آموزشی مدل قبلی را با آموزش مجموعه داده باینری سه‌بعدی برای هر مقیاس به صورت رگرسیون متوالی، به دقت تنظیم نموده، تا با انتقال مقیاس اطلاعات به مقیاس مدل بعدی، توصیف جامع‌تری از متغیر پاسخ (نفوذپذیری موثر) ایجاد نماید. نتایج در این قسمت به دو بخش تقسیم می‌شوند: قسمت اول نتایج مدل کالیبراسیون، در ناحیه رجیستر شده با سه وضوح تصویر مختلف. و بخش دوم، ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از داده‌های آزمون مربوط به کل حجم کربناته وضوح پایین. سپس یافته‌های این مرحله، افزایش مقیاس شده و اعتبارسنجی مدل با داده‌های آزمایشگاهی صورت می‌گیرد. معیارهای اولیه عملکرد مدل تابع خطای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و همچنین شاخص  $R^2$  به منظور معیاری برای توانایی ویژگی پیش‌بینی‌کننده‌های ورودی، در تجزیه و تحلیل واریانس متغیر پاسخ (تغییرات نفوذپذیری)، محسوب می‌گردد. شکل ۳ نفوذپذیری شبیه‌سازی شده جریان از تصاویر HR را در مقابل نفوذپذیری برآورد شده از تصاویر LR در منطقه رجیستر شده، نشان می‌دهد. ضریب تعیین ( $R^2$ ) بین داده‌های مرجع و تخمینی برای این داده‌های تست، حدود ۰٫۹۶ است برای داده‌های MR و HR نیز به همین ترتیب. با توجه به تنوع وسیع ساختارهای منافذ ناهمگن و تنوع نسبی نفوذپذیری برآورد شده در منطقه ثبت شده، این میزان دقت، مطلوب فرض می‌شود و نشان می‌دهد که همبستگی دقیقی بین نفوذپذیری‌های برآورد شده و هدف (واقعی) برای این مطالعه موردی وجود دارد. شکل ۴ آنالیز مقادیر باقیمانده یا اختلاف داده‌های مرجع و تخمینی LR را نشان می‌دهد. اگرچه شاخص‌هایی نظیر  $R^2$  و RMSE جهت سنجش دقت مدل بسیار قدرتمند هستند، اما برای ارزیابی کیفیت آن، کافی نیستند. لذا جهت ارزیابی کیفیت نتایج مدل، از تحلیل مقادیر باقیمانده استفاده شده است، که می‌بایست حول محور صفر دارای توزیع تصادفی باشند، بدون شواهدی از کلاستر شدن و روند قابل تشخیص در داده‌ها، در غیر این صورت نشان دهنده بایاس سیستمی در مدل است. این توزیع تصادفی در این نمودار مشاهده شده و مبین این است که مدل، فاقد بایاس بوده یا به عبارتی به صورت سیستمی داده‌های پاسخ هدف را دست‌بالا یا دست‌پایین تخمین نمی‌زند و از کیفیت مناسبی برای توزیع داده‌های کربناته برخوردار می‌باشد. از اهداف این مطالعه این است که مدل نهایی در مرحله ارزیابی به راحتی قابل استفاده بوده و تصاویر آزمون را به سرعت و تنها با تصاویر باینری LR تجزیه و تحلیل کند. چنین قابلیت‌هایی برای روش‌های شبیه‌سازی مستقیم بر روی تصاویر کم‌رزولوشن با میدان دید وسیع‌تر مقدور نبوده و حتی برای دامنه‌های رزولوشن بالا نیز هزینه محاسباتی بسیار زیادی دارد.





شکل ۴ آنالیز باقیمانده برای داده‌های پیش بینی LR



شکل ۳ دقت تخمین تراوایی دامنه‌های محاسباتی LR

در ادامه تصاویر آزمون MR و LR مربوط به کل حجم کربناته با توزیع اندازه حفرات بسیار وسیع‌تر که در فاز آموزش مدل دیده نشده‌اند، برای ارزیابی مدل به کار گرفته شدند و همانگونه که ذکر شد به علت نبود مقادیر مرجع LBM در این نواحی، مقادیر پیش‌بینی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و اعتبارسنجی شده‌اند. مقادیر خطای نسبی در این حالت برای تصاویر آزمون MR و LR به ترتیب ۱۶ و ۷ درصد به دست آمده و منعکس کننده دقت قابل قبول مدل در برآورد تراوایی برای این داده‌هاست. دستیابی به چنین دقت‌نسبی حاکی از این است که، مدل توسعه داده شده می‌تواند نتایج خود را به تصاویر با هندسه‌های متنوع دیگر منافذ تعمیم دهد. این امر به دلیل استفاده از مجموعه داده آموزشی نماینده بوده که به کمک رویکرد یادگیری انتقالی، طیف وسیعی از مورفولوژی ساختار منافذ را پوشش می‌دهد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

علی‌رغم طبیعت چندمقیاسی و محدودیت مجموعه داده آموزشی در ناحیه هم‌ترازی سه رزولوشن تصاویر نمونه کربناته، مدل توسعه داده شده به دقت و جامعیت مطلوب با مقدار  $R^2 \sim 0.96$  در هر سه مقیاس تصویر دست یافت که با در نظر گرفتن طیف گسترده‌ای از هندسه‌های حفرات ناهمگن و تنوع نسبی نفوذپذیری تخمین‌زده شده در ناحیه ثبت‌شده، همبستگی‌های دقیقی بین نفوذپذیری‌های تخمینی و مرجع ارائه می‌دهد. علاوه بر این، استراتژی یادگیری انتقالی در فاز آموزش مدل، و به‌خصوص پیش‌آموزش با داده‌های EDT، به دلیل اینکه که اطلاعات بیشتری نسبت به آرایه‌های باینری صرف، به مدل تغذیه نموده و در فرایند یادگیری انتقالی، دانش میکروساختار رزولوشن فعلی را با مشخصه‌های جدید رزولوشن‌های بعدی ترکیب می‌نماید، دقت و قابلیت تعمیم‌پذیری مدل را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

#### ۵. فهرست مراجع

- [۱] P. W. Botha and A. P. Sheppard, "Mapping permeability in low-resolution micro-CT images: A multiscale statistical approach," *Water Resources Research*, vol. 52, no. 6, pp. 4377-4398, 2016.
- [۲] J. E. Santos *et al.*, "Learning a General Model of Single Phase Flow in Complex 3D Porous Media," *arXiv preprint arXiv:2310.14298*, 2023.



## بازیابی زمین‌گرمایی چاه‌های متروک نفتی: اثر عایق‌کاری روی بازدهی مبدل حرارتی دو لوله درون‌چاهی هم‌محور

یاسین احمدپور\*؛ مژده سجادی؛ محمد امامی نیری؛

### چکیده

استفاده از چاه‌های متروک نفت و گاز به‌عنوان مبدل حرارتی درون‌چاهی هم‌محور راه را برای استفاده دوباره از این چاه‌ها برای استخراج انرژی زمین‌گرمایی و تولید برق با رد پای کربن پایین فراهم می‌آورد. در این مطالعه با مدل‌سازی ۱۵۰ سناریوی مختلف چاه‌های متروک نفتی دارای مبدل حرارتی درون‌چاهی هم‌محور، در دو حالت عایق‌دار و بدون عایق تأثیر این پارامتر بر روی خروجی‌های نیروگاه مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که در صورت استفاده و عدم استفاده از عایق به طور میانگین ضریب عملکرد مبدل به ترتیب ۲,۹۴ و ۰,۸۹ خواهد بود. نتایج این پژوهش منجر به استفاده موثرتر از چاه‌های متروک و افزایش بهره‌وری اقتصادی و انرژی این سامانه‌ها خواهد شد.

### کلیدواژه‌ها

انرژی زمین‌گرمایی؛ مبدل حرارتی درون‌چاهی هم‌محور؛ عایق؛ مدل‌سازی؛

### ۱. مقدمه

با توجه به بحران انرژی و مشکلات محیط زیستی ایجاد شده، کشورهای جهان به دنبال یافتن راه‌هایی برای استخراج انرژی‌های تجدیدپذیر هستند. انرژی زمین‌گرمایی یکی از انواع این انرژی‌هاست که علاوه بر پاک بودن یک انرژی پایدار نیز محسوب می‌شود [۱]. یکی از موانع توسعه مخازن زمین‌گرمایی، هزینه حفاری چاه برای دسترسی به لایه‌های داغ زیر زمین است که تقریباً ۵۰ درصد از کل هزینه سرمایه‌گذاری بهره‌برداری از این مخازن را شامل می‌شود [۲]. این در حالی است که بین ۲۰ تا ۳۰ میلیون چاه متروک (چاه‌هایی که کاربری خود را به دلیل افت فشار مخزن، آب‌دهی بالا، و یا دلایل دیگر از دست داده‌اند) در جهان وجود دارد که استفاده از آنها برای بهره‌برداری از انرژی زمین‌گرمایی می‌تواند به طرز چشمگیری هزینه‌ها را کاهش دهد [۳]. مطالعات زیادی به مدل‌سازی استخراج انرژی زمین‌گرمایی از چاه‌های نفتی پرداخته‌اند. در هر یک از این مطالعات پارامترهای مختلفی مانند اثر دبی و دمای آب تزریقی [۴]، اثر عمق و گرادیان زمین‌گرمایی [۵]، اثر

<sup>۱</sup> انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران. [thesisyasinamp@gmail.com](mailto:thesisyasinamp@gmail.com)

\* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران. [Sajjadi.mozhdeh@ut.ac.ir](mailto:Sajjadi.mozhdeh@ut.ac.ir)

<sup>۳</sup> انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران. [emami.m@ut.ac.ir](mailto:emami.m@ut.ac.ir)

استفاده از سیالات غیر از آب (ایزوبوتان) [۶، ۷] و خواص حرارتی سازند [۸] مورد بررسی قرار گرفته است. اثر وجود عایق از پارامترهایی است که با توجه به اهمیت اقتصادی نیاز است که در مطالعات بررسی شود.

استفاده از مبدل‌های حرارتی درون‌چاهی هم‌محور یکی از انواع روش‌های برداشت انرژی زمین گرمایی از چاه‌های نفتی متروک، است که شماتیک آن در شکل ۱-الف نشان داده شده است. در چنین مبدلی یک سیال با خصوصیات مناسب به وسیله پمپ به داخل فضای حلقوی تزریق و از لوله داخلی تولید می‌شود. سیال داخل فضای حلقوی از طریق لوله خارجی و سیمان پشت آن با سازند در ارتباط است و حرارت از این طریق به آن انتقال می‌یابد و گرمای دریافت شده در خروجی لوله داخلی تولید می‌شود. سپس انرژی گرمایی حاصل، با استفاده از سیکل‌های ترمودینامیک مناسب برای محدوده دمای خروجی، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. سیال حامل گرما در مسیر بازگشت به سطح، از طریق دیواره لوله داخلی می‌تواند با سیال فضای حلقوی تبادل حرارت کند و گرمای دریافت شده از زمین را از دست بدهد. این تبادل حرارت، در صورت عدم کنترل، می‌تواند به برعکس شدن مسیر انتقال حرارت از چاه به سنگ در لایه‌های نزدیک به سطح که دمای کمی دارند شود. برای قطع تبادل حرارت بین لوله داخلی و خارجی از عایق استفاده می‌شود. عایق کاری لوله داخلی با وجود اثرگذاری بر بازدهی مبدل، هزینه عملیاتی را افزایش می‌دهد. در این مطالعه هدف آن است تا میزان اثر عایق حرارتی لوله داخلی بر بازدهی مبدل بررسی گردد.

## ۲. روش انجام کار

برای این هدف، فرایند استخراج انرژی گرمایی در یک مبدل حرارتی درون‌چاهی با استفاده از نرم افزار اوپن‌جئوسیس<sup>۱</sup> مدل‌سازی شده است. مدل ایجاد شده برای بررسی اهمیت عایق کاری برای شرایط مختلف چاه، سنگ اطراف چاه، سیال مورد استفاده، و پارامترهای عملیاتی، به کار گرفته شده است. برای این کار مطابق جدول ۱ مجموعه‌ای از ۱۶ متغیر، به‌عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر میزان تولید حرارت، انتخاب شده و دو مجموعه داده با استفاده از روش نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین آتیه شده است. مجموعه داده اول شامل ۵۰ سناریو دارای ضریب رسانایی حرارتی پایین برای لوله داخلی است که شرایط عایق‌دار را شبیه‌سازی می‌کنند. مجموعه داده دوم شامل ۱۰۰ سناریوی بدون عایق است که در آنها ضریب رسانایی حرارتی لوله داخلی کم و نزدیک به مقادیر مشاهده شده برای فلزات در نظر گرفته شده است. در نهایت برای هر کدام از این سناریوها مدل‌سازی انجام شده و دمای سیال خروجی و ته‌چاه ثبت شده است.

متغیرهای هدف در این مطالعه، دمای خروجی، توان حرارتی تولیدی و بهره‌وری برداشت انرژی است. توان حرارتی تولیدی با استفاده از خروجی مدل‌سازی که دمای خروجی سیال در سطح است محاسبه می‌شود و ضریب عملکرد مبدل بر اساس نسبت برق معادل تولیدی سیستم به برق مصرفی برای راه‌اندازی نیروگاه تعریف شده است. روابط ریاضی مورد استفاده برای تعریف پارامترهای خروجی به شکل زیر تعریف شده‌اند:

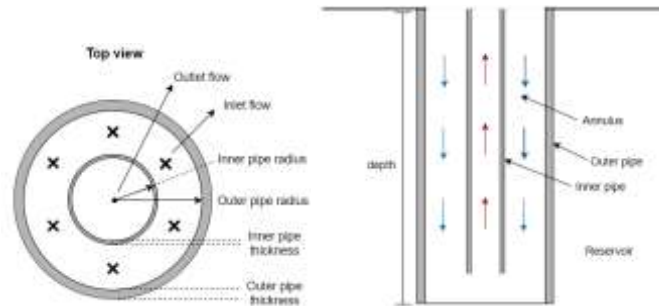
$$W_{\text{مبدل}} = C_p \rho q (T_o - T_i) \quad (1)$$

$$COP = \frac{E_{\text{مبدل}}}{W_p} = \frac{W_{\text{مبدل}} \eta_H}{W_p} \quad (2)$$

$$W_p = \frac{q \rho g h_f}{\eta_p} \quad (3)$$

در این روابط،  $W_{\text{مبدل}}$  توان حرارتی خروجی از چاه بر حسب  $W$ ،  $C_p$  ظرفیت حرارتی ویژه سیال،  $\rho$  چگالی سیال،  $q$  نرخ حجمی تزریق سیال،  $T_o$  دمای سیال خروجی،  $T_i$  دمای سیال ورودی هستند.  $E_{\text{مبدل}}$  برق تأمین شده توسط گرمای تولید شده

است که به  $\eta_H$  که راندمان سیکل تولید برق از حرارت است بستگی دارد. راندمان نیروگاه‌های دو مداره بین ۹ تا ۱۳ درصد است بنابراین متوسط ۱۱٪ برای راندمان سیکل تولید برق از حرارت در نظر گرفته شده است.  $W_p$  توان الکتریکی مورد استفاده برای پمپاژ سیال به داخل چاه و خروج از آن است و با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود. در این معادله  $g$  ثابت جاذبه و  $h_f$  افت هد در مسیر جریان از حلقه بیرونی و لوله داخلی است.



شکل ۱: الف) شماتیکی از مبدل حرارتی درون‌جایی هم‌محور

برای همه سناریوهای مختلف موجود در مجموعه داده‌ها، مشخصات سیمان پشت لوله خارجی ثابت در نظر گرفته شده است و به همین دلیل در جدول متغیرها نیامده است. چگالی سیمان، ظرفیت حرارتی ویژه سیمان، رسانایی حرارتی سیمان و تخلخل سیمان به ترتیب برابر با ۲۰۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ۷۳۶ ژول بر کیلوگرم کلوین، ۰٫۵۳ وات بر مترکلوین و صفر هستند. همچنین تخلخل سازند نیز برابر با صفر در نظر گرفته شده است. در همه سناریوها زمان فعال بودن مبدل ۱۰۰ روز بوده است. دمای اولیه مبدل نیز برابر با ۲۹۳ کلوین و ابعاد مدل سه بعدی، ۴۰ متر در ۴۰ متر در عمق چاه در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۱: متغیرهای مورد استفاده در تهیه سناریوها

| متغیر  | میانگین                            | انحراف معیار                     | متغیر   | میانگین | انحراف معیار |
|--|------------------------------------|----------------------------------|---|---------|--------------|
| دبی سیال (متر مکعب بر ثانیه)                   | ۰٫۰۰۵۱۵                            | ۰٫۰۰۱۶                           | قطر لوله خارجی (متر)                          | ۰٫۱۴۶۰۵ | ۰٫۰۱۰۵       |
| دمای سیال ورودی (کلوین)                        | ۳۰۳                                | ۱۰                               | ضخامت لوله خارجی (متر)                        | ۰٫۰۱۳۷  | ۰٫۰۰۲۸       |
| چگالی سازند (کیلوگرم بر مترمکعب)               | ۲۲۵۰                               | ۲۵۰                              | قطر لوله داخلی (متر)                          | ۰٫۰۷    | ۰٫۰۱۴۶       |
| ظرفیت حرارتی ویژه سازند (ژول بر کیلوگرم کلوین) | ۷۰۰                                | ۶۶                               | ضخامت لوله داخلی (متر)                        | ۰٫۰۰۹۳۷ | ۰٫۰۰۲۱       |
| رسانایی حرارتی سازند (وات بر متر کلوین)        | ۳٫۲۵                               | ۰٫۴۱۶                            | چگالی سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)               | ۱۲۰۰    | ۱۳۳          |
| گرادیان زمین گرمایی (کلوین بر متر)             | ۰٫۰۳۲۵                             | ۰٫۰۰۲۸                           | گرانروی سیال (کیلوگرم بر ثانیه)               | ۰٫۰۳۵   | ۰٫۰۰۸۳       |
| عمق (متر)                                      | ۴۰۰                                | ۷۰۰                              | رسانایی حرارتی سیال (وات بر متر کلوین)        | ۲٫۶۵    | ۰٫۷۸۳        |
| رسانایی حرارتی لوله داخلی (وات بر کلوین)       | عایق‌دار: ۰٫۰۴۵<br>بدون عایق: ۲۲٫۵ | عایق‌دار: ۰٫۱۱<br>بدون عایق: ۷٫۵ | ظرفیت حرارتی ویژه سیال (ژول بر کیلوگرم کلوین) | ۳۵۰۰    | ۶۶۶          |

### ۳. نتیجه‌گیری

در جدول ۲ پارامترهای آماری به‌دست آمده برای متغیرهای هدف برای هر دو مجموعه عایق‌دار و بدون عایق آورده شده‌است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد به‌طور میانگین در صورت استفاده از عایق برای لوله داخلی می‌توان ضریب عملکرد مبدل را تا ۳/۳ برابر افزایش داد. مقایسه توان خروجی نیز نشان می‌دهد که توان خروجی مبدل به‌طور میانگین در حالت عایق‌دار ۳/۲۷ برابر حالت بدون عایق است. توان خروجی مبدل به‌طور میانگین برای حالت بدون عایق ۰/۲ مگاوات و برای حالت عایق‌دار ۰/۶۶ مگاوات است. این مسئله برای تخمین توان تولیدی از یک میدان نفتی متروک با تعداد چاه مشخص، کاربردی است.

جدول ۲: پارامترهای آماری مجموعه عایق‌دار و بدون عایق

| مجموعه داده           | متغیر هدف                    | میانگین | کمینه  | بیشینه  |
|-----------------------|------------------------------|---------|--------|---------|
| مجموعه داده بدون عایق | دمای سیال خروجی (کلوین)      | ۳۱۲     | ۲۸۷    | ۳۳۵     |
|                       | دمای سیال ته چاه             | ۳۸۰     | ۳۲۰    | ۴۶۸     |
|                       | ضریب عملکرد مبدل             | ۰.۸۹    | ۰      | ۵.۲۵    |
|                       | توان حرارتی خروجی مبدل       | ۲۰۱۳۲۵  | ۰      | ۶۲۳۵۲۴  |
| مجموعه داده عایق‌دار  | دمای سیال خروجی (کلوین)      | ۳۳۵     | ۳۰۷    | ۳۶۵     |
|                       | دمای سیال ته چاه             | ۳۴۲     | ۳۰۸    | ۳۸۳     |
|                       | ضریب عملکرد مبدل             | ۲.۹۴    | ۰.۱۶   | ۱۱.۵    |
|                       | توان حرارتی خروجی مبدل (وات) | ۶۶۸۰۲۲  | ۱۰۵۴۹۸ | ۱۵۸۹۸۹۸ |

### ۴. فهرست مراجع

- [1] N. Böttcher, N. Watanabe, U.-J. Görke and O. Kolditz, Geothermal Energy. In: Geoenery Modeling I, 2016, pp. 1–8.
- [2] E. Barbier, "Geothermal energy technology and current status: an overview," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, no. 1–2, pp. 3-65, 2002.
- [3] S. Kotler, "Abandoned Oil and gas Wells Are Leaking," 2011. [Online]. Available: <https://znetwork.org/zmagazine/abandoned-oil-and-gas-wells-are-leaking-by-steven-kotler/>.
- [4] T. Kujawa, W. Nowak and A. Stachel, "Analysis of the exploitation of existing deep production wells for acquiring geothermal energy," *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 78, pp. 127–135, 2005.
- [5] R. A. Caulk and I. Tomac, "Reuse of abandoned oil and gas wells for geothermal energy production," *Renewable Energy*, vol. 112, pp. 388-397, 11 2017.
- [6] W.-L. Cheng, T.-T. Li, Y.-L. Nian and C.-L. Wang, "Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells," *Energy*, vol. 59, pp. 248-254, 9 2013.
- [7] A. P. Davis and E. E. Michaelides, "Geothermal power production from abandoned oil wells," *Energy*, vol. 34, no. 7, pp. 866-872, 7 2009.
- [8] J. Templeton, S. Ghoreishi-Madiseh, F. Hassani and M. Al-Khawaja, "Abandoned petroleum wells as sustainable sources of geothermal energy," *Energy*, vol. 70, pp. 366-373, 6 2014.
- [9] N. Wight and N. Bennett, "Geothermal energy from abandoned oil and gas wells using water in combination with a closed wellbore," 10 2015. [Online].
- [10] M. D. McKay, R. J. Beckman and W. J. Conover, "A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code," *Technometrics*, vol. 21, pp. 239–245, 1979.



## بررسی اثرات محیط متخلخل بر کمترین فشار امتزاجی یک نمونه نفت آسفالتینی و گاز

فاطمه کیوانی<sup>۱\*</sup>؛ علی صفایی<sup>۲</sup>؛ یوسف کاظم‌زاده<sup>۳</sup>؛ مسعود ریاضی<sup>۴</sup>؛ جعفر قاجار<sup>۵</sup>

### چکیده

تزریق گاز در مخازن نفتی با چالش‌های بسیاری نظیر وجود نانوحفرات، ترسیب آسفالتین و جذب مولکول‌های سیال روی دیواره محیط متخلخل مواجه است. در بسیاری موارد، تزریق امتزاجی گاز بیشترین بازده را در بین روش‌های موجود نشان داده است. از این رو، تخمین کمترین فشار امتزاجی (MMP) در این فرآیند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از سوی دیگر، حضور سیال در محیط متخلخل اثرات قابل‌توجهی بر رفتار فازی آن دارد؛ به گونه‌ای که پارامترهای مختلف از جمله MMP متفاوت از توده سیال خواهد بود. در این پژوهش با استفاده از معادلات حالت اصلاح‌شده پنگ-رابینسون (PR) و تجمعی (CPA) اثرات محصورشدگی (تغییر در خواص بحرانی اجزاء، جذب مولکول‌های سیال روی دیواره محیط متخلخل، فشار مویینه) و ترسیب آسفالتین به طور همزمان بر امتزاج‌پذیری یک نمونه نفت آسفالتینی و گازهای CO<sub>2</sub> و NGL بررسی شده است. نتایج نشان دادند که ترسیب آسفالتین به طور قابل‌توجهی باعث تعویق در روند امتزاج‌پذیری می‌شود. این پدیده برای CO<sub>2</sub> با شدت بیشتری رخ می‌دهد. همچنین اثرات محیط متخلخل بر MMP در شعاع‌های کمتر از ۱۰۰ نانومتر غیرقابل چشم‌پوشی است؛ در حالی که در شعاع‌های بیشتر از این مقدار رفتار فازی به رفتار توده سیال (bulk phase) نزدیک می‌شود.

### کلیدواژه‌ها

کمترین فشار امتزاجی؛ تزریق امتزاجی گاز؛ رفتار فازی؛ معادله حالت؛ اثرات محصورشدگی؛ آسفالتین

### ۱. مقدمه

تزریق گاز به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در ازدیاد برداشت از مخازن نفتی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. این فرآیند به سه روش امتزاجی، غیرامتزاجی و نزدیک به امتزاجی انجام می‌شود. در بسیاری

<sup>۱</sup> بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، [fa.keyvani91@gmail.com](mailto:fa.keyvani91@gmail.com)  
\* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> بخش مهندسی شیمی و نفت، دانشکده فنی فومن، دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، [ali.safaei@ut.ac.ir](mailto:ali.safaei@ut.ac.ir)

<sup>۳</sup> گروه ازدیاد برداشت، پژوهشکده بهبود تولید و ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

<sup>۴</sup> بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران، [yusefkazemzade@pgu.ac.ir](mailto:yusefkazemzade@pgu.ac.ir)

<sup>۵</sup> بخش مهندسی نفت، دانشکده معدن و علوم زمین، دانشگاه نظریابف، آستانا، قزاقستان، [masoud.riazi@nu.edu.kz](mailto:masoud.riazi@nu.edu.kz)

<sup>۶</sup> بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، [jqajar@shirazu.ac.ir](mailto:jqajar@shirazu.ac.ir)

<sup>۷</sup> بخش علوم زمین، دانشگاه اوترخت، اوترخت، هلند [j.qajar@uu.nl](mailto:j.qajar@uu.nl)

موارد، تزریق گاز به روش امتزاجی بازدهی بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. بنابراین تعیین MMP در این روش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۲]. بر این اساس، محققان به روش‌های مختلف از جمله مطالعات آزمایشگاهی، توسعه معادلات تجربی و شبیه‌سازی عددی سعی در تخمین این پارامتر مهم داشته‌اند. در این میان، شبیه‌سازی عددی ابزاری کارآمد جهت پیش‌بینی MMP به شمار می‌رود. چرا که مطالعات آزمایشگاهی به زمان و هزینه بالا نیاز دارند و معادلات تجربی تنها در بازه خاصی قابل استفاده هستند.

مخازن نامتعارف، مانند مخازن شیلی، به طور گسترده در سراسر دنیا وجود دارند. این مخازن که یکی از منابع مهم تأمین انرژی هستند، در سال‌های اخیر به گزینه‌های مناسبی برای اهداف ازدیاد برداشت تبدیل شده‌اند. از میان روش‌های مختلف، تزریق امتزاجی گاز به عنوان رویکردی متداول برای این مخازن مطرح می‌شود. بنابراین محاسبه شرایط امتزاجی در این مخازن حائز اهمیت است [۳، ۴].

مخازن نامتعارف با سایز کوچک حفرات (نانوحفرات) و تخلخل و تراوایی اندک شناخته می‌شوند. نانوحفرات موجب می‌شوند که رفتار سیال درون محیط متخلخل متفاوت از توده سیال باشد. این انحراف به دلیل برهم‌کنش بین مولکول‌های سیال و دیواره محیط متخلخل اتفاق می‌افتد و اثرات قابل توجهی بر رفتار فازی دارد [۵]. این اثرات، موسوم به "اثرات محصورشدگی" (confinement)، از جمله باعث تغییر در شرایط امتزاج‌پذیری نفت و گاز درون محیط متخلخل می‌شوند.

ترسیب آسفالتین پدیده مهم دیگری است که در فرآیند تزریق گاز رخ می‌دهد. تزریق گاز با برهم زدن تعادل فازی نفت، باعث جدا شدن آسفالتین از توده سیال می‌شود. این مولکول‌های عظیم و قطبی، به عنوان ماده فعال سطحی، روی سطح مشترک نفت و گاز تجمع می‌کنند و موجب تغییر در فرآیند امتزاج‌پذیری می‌شوند.

پژوهش‌های پیشین تنها با در نظر گرفتن یکی از عوامل فوق (محصورشده‌گی یا ترسیب آسفالتین) سعی در توضیح اثرات این دو پدیده بر MMP داشته‌اند. هر دو عامل مطرح شده می‌توانند روند کاهش کشش سطحی بین نفت و گاز (IFT) را تغییر داده و بر مقدار MMP اثر بگذارند. با این حال، چگونگی اثرگذاری این پدیده‌ها تاکنون به طور همزمان مورد بررسی قرار نگرفته است. در این پژوهش، سعی بر آن است که با استفاده از معادلات حالت پنگ-رابینسون (PR) و تجمعی (CPA) نحوه اثرگذاری محصورشدگی و ترسیب آسفالتین بر MMP به طور همزمان، مورد بررسی قرار گیرد.

## ۲. مدل‌سازی

اثرات محصورشدگی شامل جذب مولکول‌های سیال روی دیواره حفرات، تغییر در خواص بحرانی اجزاء سیال و فشار مویینه (اختلاف فشار بین فاز مایع و بخار) درون محیط متخلخل می‌باشد. نحوه اعمال این تغییرات بر معادله PR و توسعه معادله اصلاح شده توسط song و همکاران [۶] مورد بررسی قرار گرفته‌است. همچنین معادله PR، به عنوان بخش درجه سوم معادله CPA، با موفقیت توسط Li و فیروزآبادی مورد استفاده قرار گرفته‌است [۷]. معادله CPA قادر است پدیده‌هایی مانند ترسیب آسفالتین را نیز لحاظ کند، در حالی که معادلات درجه سه تنها نیروهای فیزیکی بین مولکول‌ها را در نظر می‌گیرند. بنابراین با قرار دادن معادله PR اصلاح شده در بخش درجه سوم معادله CPA، قادر خواهیم بود که به طور همزمان اثرات محصورشدگی و ترسیب آسفالتین را بر فشار امتزاجی مورد بررسی قرار دهیم. در این پژوهش از این معادلات حالت به همراه الگوریتم‌های محاسبات فلش و محاسبه کشش سطحی پیشنهاد شده توسط song و همکاران [۸] برای محاسبه MMP بین یک نمونه نفت آسفالتینی و گازهای CO<sub>2</sub> و NGL (حاوی حدود ۶۰٪ متان) استفاده شده‌است. کدنویسی‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB R2021b انجام شده‌است.

خروجی مدل توسعه داده شده، عبارت است از کشش سطحی بین نفت و گاز درون محیط متخلخل که در فشارهای مختلف تخمین زده می‌شود. MMP فشاری است که در آن IFT به صفر نزدیک شود. صحت‌سنجی مدل طی دو مرحله، با استفاده از تست‌های ناپدید شدن کشش سطحی (VIT) و لوله قلمی (slim tube) انجام شد و نتایج تطبیق مناسبی را با داده‌های آزمایشگاهی نشان دادند. نمونه نفت مورد استفاده از یکی از مخازن کربناته جنوب غربی ایران به دست آمده‌است. دمای مخزن ۳۷۲ کلوین و تخلخل و تراوایی آن به ترتیب ۱ میلی‌داری و ۰.۸٪ گزارش شده‌است. بنابراین متوسط شعاع حفره برای این مخزن طبق رابطه  $\sqrt{k/\phi}$  معادل ۱۱۲ نانومتر در نظر گرفته شده‌است.

### ۳. نتایج و بحث

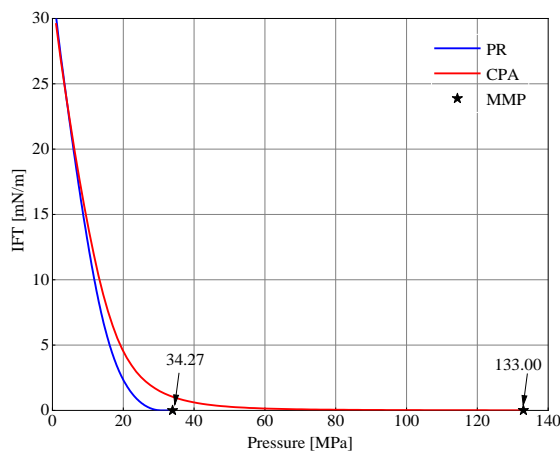
#### ۱،۳ تأثیر ترسیب آسفالتین

شکل ۱ نمودار کاهش IFT با فشار را برای گازهای NGL و CO<sub>2</sub> با استفاده از هر دو معادله PR و CPA نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود برای هر دو گاز، مقدار MMP تخمینی توسط معادله CPA بیشتر از معادله PR است. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که نمودار کاهش IFT با فشار برای نفت‌های آسفالتینی دارای دو یا سه شیب متفاوت است [۹]. شیب اول ناشی از تبادل جرم بین نفت و گاز و انحلال آن‌ها در هم است. پس از آن با حل شدن گاز در نفت، به تدریج مولکول‌های آسفالتین از توده نفت جدا شده و با تجمع روی سطح مشترک، باعث کاهش حلالیت می‌شوند. بنابراین IFT با شیب کمتری کاهش می‌یابد و امتزاج‌پذیری به تعویق می‌افتد. به همین دلیل هنگامی که معادله CPA پدیده ترسیب آسفالتین را لحاظ می‌کند، مقدار MMP بیشتری را محاسبه می‌کند و شیب نمودار IFT متفاوت از معادله PR است.

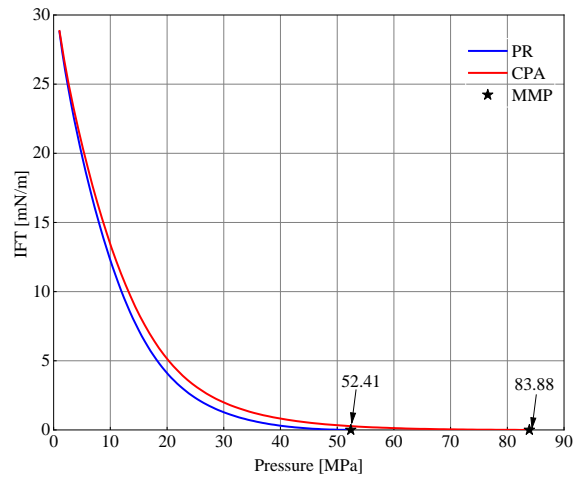
از سوی دیگر، با مقایسه MMP‌های محاسبه شده توسط معادله PR، مشاهده می‌شود که CO<sub>2</sub> در فشار کمتری به امتزاج‌پذیری می‌رسد. این امر نشان‌دهنده حلالیت بهتر CO<sub>2</sub> در نفت است. مولکول‌های غیرقطبی این گاز با اندازه کوچک خود به راحتی در نفت نفوذ می‌کنند. به علاوه بررسی شرایط بحرانی CO<sub>2</sub> (دمای ۳۰۴ کلوین و فشار ۷/۳۸ مگاپاسکال) نشان می‌دهد که این گاز در شرایط مخزنی به حالت فوق‌بحرانی می‌رسد و با ایجاد یک فاز چگال شرایط مساعدتری جهت انحلال در نفت فراهم می‌شود. مجموعه این عوامل موجب حلالیت بیشتر CO<sub>2</sub> شده و امتزاج‌پذیری آن در فشارهای کمتری رخ می‌دهد.

نکته قابل توجه دیگر آن است که اختلاف فشار محاسبه شده توسط معادله PR و CPA، برای CO<sub>2</sub> بیشتر از NGL است. این اختلاف نشان می‌دهد که تزریق CO<sub>2</sub> موجب ترسیب مقدار بیشتری آسفالتین می‌گردد. به عبارت دیگر، انحلال‌پذیری بیشتر این گاز باعث جدا شدن مقدار بیشتری از مولکول‌های آسفالتین از توده نفت و تجمع آن‌ها روی سطح مشترک شده و بنابراین رسیدن به امتزاج‌پذیری را با شدت بیشتری به تعویق می‌اندازد.





CO<sub>2</sub> (ب)



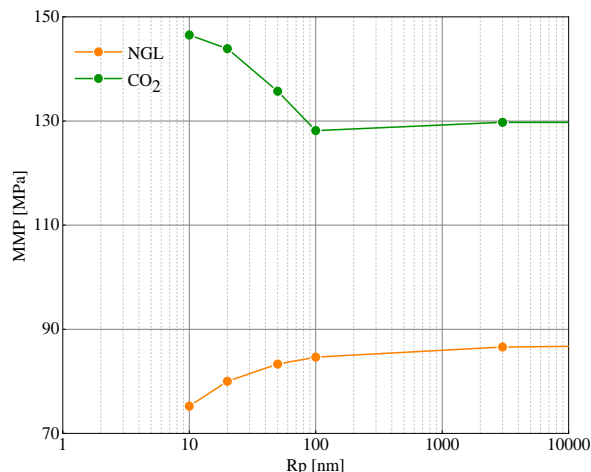
NGL (الف)

شکل ۱: تفاوت کمترین فشار امتزاجی پیش‌بینی‌شده توسط معادله PR و CPA بین نفت و الف (NGL ، ب) CO<sub>2</sub> در دمای ۳۲۲ کلوین و شعاع حفره ۱۱۲ نانومتر

### ۲،۳ تأثیر شعاع حفره

شکل ۲ چگونگی تغییر MMP را برای شعاع حفرات مختلف نشان می‌دهد. چنان که مشاهده می‌شود، برای هر دو گاز، تغییرات MMP برای شعاع حفره کمتر از ۱۰۰ نانومتر قابل توجه و در شعاع‌های بیشتر از ۱۰۰ نانومتر تقریباً ثابت است. در شعاع‌های کمتر از ۱۰۰ نانومتر، اندازه مولکول‌های سیال در مقایسه با شعاع حفرات قابل توجه است و به همین دلیل برهم‌کنش‌های دیواره محیط متخلخل با مولکول‌های سیال بر رفتار آن اثرگذار خواهد بود. اما با افزایش شعاع حفره به تدریج تأثیر محیط متخلخل بر سیال کاهش یافته و رفتار آن به سمت فاز توده پیش می‌رود.

تغییرات MMP با افزایش شعاع حفره برای NGL به صورت صعودی و برای CO<sub>2</sub> روند نزولی را نشان می‌دهد. در توجیه این پدیده می‌توان گفت که رسیدن به امتزاج‌پذیری بین یک نفت آسفالتینی و گاز، حاصل رقابت دو پدیده حلالیت و تجمع آسفالتین روی سطح مشترک دو فاز است. کاهش شعاع حفره باعث افزایش فشار موئینه و فشرده شدن سیال درون محیط متخلخل می‌شود. فشرده شدن گاز باعث حلالیت بیشتر آن در نفت می‌شود. حلالیت بیشتر نیز شرایط را به سمت امتزاج‌پذیری پیش می‌برد. بنابراین انتظار می‌رود که با کاهش شعاع حفره، مقدار MMP نیز کاهش یابد. این روند برای NGL قابل مشاهده است. اما رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که با کاهش شعاع حفره، MMP افزایش می‌یابد. حلالیت بیشتر باعث جدا شدن تعداد بیشتری آسفالتین و تجمع آن‌ها روی سطح شده و رسیدن به امتزاج‌پذیری را با مشکل مواجه می‌کند. در واقع می‌توان گفت درون محیط متخلخل، برای گاز NGL پدیده حلالیت، و برای CO<sub>2</sub> ترسیب آسفالتین مکانیزم‌های غالب هستند.



شکل ۲: تأثیر شعاع حفره بر مقدار کمترین فشار امتزاجی بین نفت و گاز با استفاده از معادله CPA در دمای ۲۷۲ کلوین

#### ۴. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که حضور سیال درون محیط متخلخل باعث انحراف رفتار فازی از توده سیال می‌شود. بنابراین فرآیند تزریق گاز در مخازن نامتعارف که دارای تعداد زیادی نانوحفره هستند باید با دقت بیشتری صورت گیرد. چرا که فشار امتزاجی درون محیط متخلخل می‌تواند به مقدار قابل توجهی متفاوت از شرایط اندازه‌گیری برای توده سیال باشد.

رقابت بین دو پدیده حلالیت و تجمع آسفالتین روی سطح، تعیین‌کننده رسیدن به شرایط امتزاجی بین نفت و گاز است. در مقایسه بین NGL و CO<sub>2</sub> به ترتیب حلالیت و تجمع آسفالتین مکانیزم‌های غالب هستند. بنابراین مخازنی که برای تزریق و ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> انتخاب می‌شوند، مستعد ترسیب آسفالتین و آسیب‌های ناشی از آن خواهند بود.

#### ۵. فهرست مراجع

- [۱] H. Belhaj, H. Abukhalifeh, and K. Javid, "Miscible oil recovery utilizing N<sub>2</sub> and/or HC gases in CO<sub>2</sub> injection," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 111, pp. 144-152, 2013
- [۲] H. Sun and H. Li, "Minimum miscibility pressure determination in confined nanopores considering pore size distribution of tight/shale formations," *Fuel*, vol. 286, p. 119450, 2021
- [۳] M. Elturki and A. Imqam, "Application of Enhanced Oil Recovery Methods in Unconventional Reservoirs: A Review and Data Analysis," presented at the 54th US rock mechanics/geomechanics symposium, 2020.
- [۴] S. Zendejboudi and A. Bahadori, *Shale oil and gas handbook: theory, technologies and challenges*. Gulf Professional Publishing, 2016.
- [۵] Z. Zheng, Y. Di, and Y.-S. Wu, "Nanopore confinement effect on the phase behavior of CO<sub>2</sub>/hydrocarbons in tight oil reservoirs considering capillary pressure, fluid-wall interaction, and molecule adsorption," *Geofluids*, vol. 2021, pp. 1-18, 2021
- [۶] Z. Song, Y. Song, J. Guo, Z. Zhang, and J. Hou, "Adsorption induced critical shifts of confined fluids in shale nanopores," *Chemical Engineering Journal*, vol. 38, p. 123837, 2020
- [۷] Z. Li and A. Firoozabadi, "Cubic-plus-association equation of state for asphaltene precipitation in live oils," *Energy & fuels*, vol. 24, no. 5, pp. 2956-2963, 2010
- [۸] Y. Song, Z. Song, J. Guo, D. Feng, and X. Chang, "Phase behavior and miscibility of CO<sub>2</sub>-hydrocarbon mixtures in shale nanopores," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 60, no. 14, pp. 5300-5309, 2021
- [۹] Y. Kazemzadeh, R. Parsaei, and M. Riazi, "Experimental study of asphaltene precipitation prediction during gas injection to oil reservoirs by interfacial tension measurement," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 466, pp. 138-146, 2015



## مدلسازی تغییر ترشوندگی و افزایش بازیافت نفت در مخازن کربناته با استفاده محاسبه مجموع پیوند های الکتروشیمیایی بین نفت و سنگ در تزریق

### آب مهندسی شده

پوریا الماسیان؛ حسن ماهانی\*

#### چکیده

تغییر ترشوندگی سنگ مهم ترین اثر سیلاب‌زنی با آب مهندسی شده در نظر گرفته می‌شود اما بیشتر رویکردهای موجود برای مدلسازی تغییر ترشوندگی و افزایش بازیافت نفت توسط معیارهای ساده ای توصیف می‌شوند و معمولاً نقش واکنش های ژئوشیمیایی موجود در هر فصل مشترکهای آب-نفت و نفت-سنگ را در این فرآیند نادیده می‌گیرند. این پژوهش با استفاده از رویکردی جدید بر اساس محاسبات ژئوشیمیایی، استفاده از مدل هایی مبتنی بر واکنش های تشکیل کمپلکس سطحی (SCM) و محاسبه تعداد پیوند های شیمیایی، این ملاحظات مهم را به منظور بهینه سازی ترکیب یونی آب تزریقی در نظر می‌گیرد. در این روش، تغییر ترشوندگی با در نظر گرفتن یک پارامتر درونیابی ( $\theta$ ) برای به‌روزرسانی تراوایی نسبی و فشار موئینگی فازها به عنوان یک تابع از مجموع پیوندهای شیمیایی انجام می‌شود. این روش از طریق مقایسه نتایج شبیه سازی با نتایج مطالعات آزمایشگاهی منتشر شده، اعتبار سنجی شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اجزا نفتی که به صورت مستقیم جذب می‌شوند و شرایط نفت دوست را ایجاد می‌کنند، فقط تحت شرایط pH خاص، به ویژه در  $\text{pH} > 8$  و برای نفت هایی با عدد اسیدی بالا می‌تواند منجر به افزایش بازیافت نفت در فرآیند تزریق آب مهندسی شده شود. در مقابل اجزا نفتی که به طور غیر مستقیم (توسط فیلم آب) جذب سنگ می‌شوند، شرایط ترشوندگی مخلوط را ایجاد می‌کنند که می‌تواند باعث افزایش بازیافت نفت با این روش شود. این مدل توانایی پیش بینی دقیق عملکرد آب مهندسی شده در میدان را دارد.

#### کلیدواژه‌ها

مدل‌سازی تغییر ترشوندگی، تزریق آب مهندسی شده، واکنش های کمپلکس سطحی، شبیه‌سازی ژئوشیمیایی، مجموع تعداد پیوندهای شیمیایی، ازدیاد برداشت نفت

<sup>1</sup> پوریا الماسیان، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. رایانامه: [pouriyaalmasiyan@gmail.com](mailto:pouriyaalmasiyan@gmail.com)

<sup>2</sup> حسن ماهانی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. رایانامه نویسنده مسؤل: [hmahani@sharif.edu](mailto:hmahani@sharif.edu)

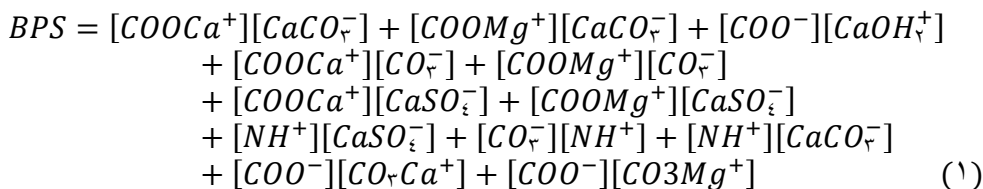
## ۱. مقدمه

نرخ بازیافت اولیه نفت از مخازن کربناته معمولاً پایین است و بین ۱۰٪ تا ۲۰٪ برآورد می‌شود. با توجه به اینکه ۵۰٪ تا ۶۰٪ از نفت متعارف جهان در سنگهای کربناته قرار دارد، یافتن روش های افزایش ضریب بازیافت ضروری است. در سال های اخیر، توجه به استفاده میدانی از تزریق آب کم شور (LSWF) افزایش یافته است که به عنوان تزریق آب با شوری مهندسی شده (EWF) نیز شناخته می‌شود [۱، ۲].

با وجود افزایش علاقه به EWF برای بهبود بازیافت نفت، مدل سازی و شبیه سازی این روش در مخازن کربناته محدود بوده است. برای توصیف دقیق مکانیسم های تغییر ترشوندگی در تزریق آب مهندسی شده، نیاز به یک مدل پیش بینی کننده می‌باشد که تعاملات سطح نفت-آب-سنگ را در نظر بگیرد. مدل های اولیه EWF بیشتر بر حل معادلات جریان و جایجایی فازها تمرکز دارند و از فرضیات ساده کننده برای مدل سازی تغییر ترشوندگی استفاده می کنند. اخیراً، مدل های تشکیل کمپلکس سطحی (SCM) برای محاسبه پتانسیل زتا و ارزیابی رفتار کمپلکس های سطحی توسعه یافته‌اند، اما هنوز نمی‌توانند رفتار EWF را در فرایند سیلاب زنی، آشام و یا کاربردهای میدانی را به دقت پیش بینی کنند مگر اینکه با شبیه ساز های مبتنی بر انتقال اجزا واکنش دهنده جفت شوند [۳-۶].

## ۲. روش پژوهش

در این پژوهش یک رویکرد مکانیزم محور و ترمودینامیکی شبیه سازی ازدیاد برداشت نفت و پیش بینی تغییر ترشوندگی بر اساس مدل سازی تشکیل کمپلکسهای سطحی و محاسبه مجموع پیوند های شیمیایی بین نفت و سنگ (BPS) توسعه داده شده است. روش های مکانیزم محور از غلظت های گونه های سطحی خاص برای تعریف تغییر ترشوندگی استفاده می کنند و امکان مدل سازی در مقیاس های مختلف را فراهم می‌سازند [۵، ۷]. نوع جذب نفت به سطح سنگ نیز عاملی مهم در تعیین حالت ترشوندگی سیستم نفت-آب-سنگ است [۸، ۹]. این مدل با جفت سازی IPHreeqc و کدهای MATLAB پیاده سازی شده و روش BPS برای محاسبه پیوندها (طبق معادله ۱) به کار رفته است که نتایج تعاملات بین گروه های قطبی نفت، یونهای آب و گروه های (باردار) سطح سنگ را به صورت کمی بیان می کند. این محاسبات برای ارزیابی میزان تغییر ترشوندگی در طول EWF لازم هستند. این مدل شامل واکنش های ژئوشیمیایی مختلف درون فاز آبی و در سطح مشترک نفت-آب-سنگ می‌باشد. این رویکرد می‌تواند بهبود قابل توجهی در پیش بینی عملکرد EWF در سناریو های مقیاس میدانی ایجاد کند و در نهایت به استراتژیهای بهینه سازی بازیافت نفت منجر شود.



### ۱،۲ آلگوریتم شبیه سازی

فرآیند شبیه سازی شامل یک سری مراحل سیستماتیک است که برای مدل سازی فرایند EWF با استفاده از روش BPS توسعه داده شده است و مراحل اصلی آن به شرح زیر می باشد:

۱. تعریف پارامتر های ورودی: شامل تعریف شرایط اولیه و مرزی، ویژگی‌های سیال و خواص پتروفیزیکی سنگ مانند ابعاد سیستم (مغزه)، نفوذ پذیری نسبی ( $K_r$ )، فشار موئینگی ( $P_c$ )، ویسکوزیته ( $\mu$ ) و تخلخل ( $\phi$ ).

۲. محاسبه غلظت تعادلی یون ها: قبل از شروع شبیه‌سازی، پارامتر BPS برای حالات اولیه و نهایی سیستم نفت/آب/سنگ که با استفاده از نرم افزار PHREEQC محاسبه می‌شود. این محاسبات چارچوبی برای محاسبه حدود بالایی و پایینی پارامتر BPS جهت درون‌یابی را فراهم می‌کند. برای درون‌یابی از پارامتر  $\theta$  بر اساس محاسبات BPS به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\theta = \frac{BPS(x, t) - BPS^{LS}}{BPS^{HS} - BPS^{LS}}, \quad 0 \leq \theta \leq 1$$

۳. حل معادلات حاکم بر جریان سیال و محاسبات انتقال جرم در محیط متخلخل: در این مرحله معادلات حاکم بر جریان سیال در محیط متخلخل توسط روش IMPES در نرم افزار MATLAB حل می‌شوند و پروفایل های فشار و اشباع آب و نفت محاسبه می‌شوند.

۴. حل محاسبات ژئوشیمیایی: در این مرحله نرم افزار های MATLAB و PHREEQC با یکدیگر ادغام شده تا غلظت صحیح یون ها محاسبه شوند.

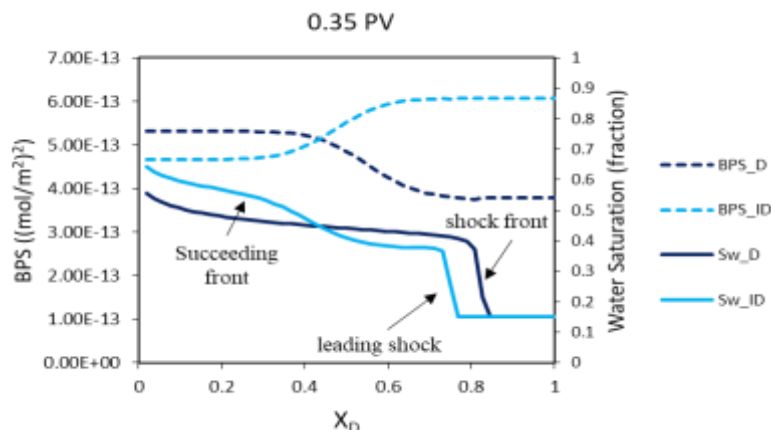
۵. به روز رسانی پارامترها: پس از محاسبه غلظت صحیح یون ها براساس محاسبات ژئوشیمیایی و محاسبه پارامتر درون‌یابی  $\theta$  بر اساس پارامتر BPS، پارامتر های نفوذپذیری نسبی و فشار موئینگی طبق روابط زیر به روز رسانی می‌شوند و این پروسه تا آخرین گام زمانی تکرار می‌شود.

$$K_{rl}^{altered} = (1 - \theta) K_{rl}^{water-wet} + \theta K_{rl}^{oil-wet}, \quad l = o, w$$

$$P_c^{altered} = (1 - \theta) P_c^{water-wet} + \theta P_c^{oil-wet}, \quad l = o, w$$

### ۳. نتایج و بحث

شکل ۱ مقایسه جامعی از روند تغییرات اشباع آب و پارامتر BPS در طول مغزه تحت شرایط جذب مستقیم و غیر مستقیم را پس از تزریق ۰٫۳۵ cc آب دریا نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل ها مشاهده می‌شود، در حالت جذب مستقیم نفت، فقط یک جبهه اشباع سیال وجود دارد که نشان دهنده عدم تغییرات ترشوندگی می‌باشد. در مقابل، در حالت جذب غیر مستقیم نفت، دو جبهه اشباع سیال مشاهده می‌شود که یکی مربوط به حالت گذرا بین آب با شوری کم و زیاد است (succeeding shock) و جبهه جلوتر (leading shock) مرتبط با ناحیه گذرا بین آب با شوری زیاد و آب ابتدایی مخزن می‌باشد. علاوه بر این، پروفایل BPS در حالت جذب غیر مستقیم نفت با پیشروی جبهه آب کاهش می‌یابد که نشان دهنده شکستن پیوند های بین نفت و سنگ است. همچنین قابل توجه است که سرعت جبهه سیال در حالت جذب مستقیم نفت بیشتر بوده و سریعتر به چاه تولیدی میرسد که این موضوع اشاره به عدم تغییر ترشوندگی در این حالت دارد.



شکل ۱: مقایسه روند تغییرات اشباع آب و پارامتر BPS در حالت‌های جذب مستقیم و غیرمستقیم نفت پس از تزریق ۰.۳۵ PV آب دریا. زیرنویس 'D' نشان دهنده جذب مستقیم و زیرنویس 'ID' نشان دهنده جذب غیرمستقیم می‌باشد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد رقیق‌سازی آب احتمالاً در شرایط جذب مستقیم در pH های بالا ( $\text{pH} < 8$ ) فقط منجر به تغییر ترشوندگی به سمت آب-دوستی و افزایش تولید نفت می‌شود. اما در حالت جذب غیر مستقیم، دستیابی به افزایش بازیافت نفت در فرایند تزریق آب مهندسی شده در محدوده وسیعتری از شوری و pH قابل حصول است چون ترشوندگی اولیه سنگ به صورت مخلوط می‌باشد. از مدل توسعه یافته می‌توان برای پیش‌بینی دقیق ضریب بازیابی نفت با آب مهندسی شده در ناحیه گذار (یا میزان تزریق کم)، به ویژه قبل از رسیدن به اشباع نفت باقی‌مانده (Sor) که برای برنامه‌ریزی و طراحی میدانی بسیار مهم است، استفاده کرد.

#### ۵. فهرست مراجع

- Brady, P.V., J.L. Krumhansl, and P.E. Mariner. *Surface complexation modeling for improved oil recovery*. in *SPE improved oil recovery symposium*. 2012. OnePetro.
- Mahani, H., Thyne, G., *Low-salinity (Enhanced) waterflooding in carbonate reservoirs*, Book chapter, OIL AND GAS CHEMISTRY MANAGEMENT, Edited by Qiwei Wang, Elsevier Publication. 2023, [https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823263-4\\_00007-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823263-4_00007-8).
- Tetteh, J.T., E. Rankey, and R. Barati. *Low salinity waterflooding effect: Crude oil/brine interactions as a recovery mechanism in carbonate rocks*. in *OTC Brasil*. ۲۰۱۷ OnePetro.
- Mahani, H., et al., *Electrokinetics of carbonate/brine interface in low-salinity waterflooding: Effect of brine salinity, composition, rock type, and pH on zeta-potential and a surface-complexation model*. *Spe Journal*, 2018. **22**(01): p. 53-6.
- Brady, P.V. and G. Thyne, *Functional wettability in carbonate reservoirs*. *Energy & Fuels*, 2016. **30**(11): p. 9217-9225.
- Dang, C., et al., *Mechanistic modeling of low salinity water flooding*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016. **146** :p. 191-209.

۷. Chen, Y., et al., *Oil/water/rock wettability: Influencing factors and implications for low salinity water flooding in carbonate reservoirs*. Fuel, 2018. **215**: p. 171-177.
۸. Nasralla, R.A., et al., *Potential of low-salinity waterflood to improve oil recovery in carbonates: Demonstrating the effect by qualitative coreflood*. SPE Journal, 2016. ۲۱(۰۵): p. ۱۶۴۳-۱۶۵۴.
۹. Mahani, H., et al., *Insights into the mechanism of wettability alteration by low-salinity flooding (LSF) in carbonates*. Energy & Fuels, 2015. **29**(3): p. 1352-1367.



## دولومیت‌های متخلخل عامل ایجاد لایه‌های فوق تراوا در سازندهای پرمین -

تریاس خلیج فارس

مهرانگیز نادری<sup>۱</sup>؛ علی عظیم‌وند<sup>۲</sup>

### چکیده

در مطالعه مغزه‌ها و مقاطع نازک بخش‌های دولومیتی سازندهای کنگان و دالان مشخص گردید که دولومیت‌ها حاصل فرایندهای دیاژنزی هستند. در طی فرایندهای دیاژنزی تبدیل کلسیت به دولومیت با کاهش حجم از طریق تشکیل تخلخل بین بلوری همراه و افزایش تخلخل را سبب شده است. از آنجایی که دولومیت زیرسطحی از طریق انحلال و رسوب مجدد تکامل می‌یابد، یک بستر دولومیت می‌تواند تخلخل و تراوایی را حفظ یا ایجاد کند. تأثیر اصلی دولومیتی شدن در افزایش مقدار تراوایی از طریق افزایش راه‌های ارتباطی (corridors) در داخل سنگ می‌باشد و از این طریق تراوایی افزایش می‌یابد. در اثر پیوستن تخلخل‌های بین بلوری ایجاد شده، کانال‌هایی شکل گرفته است که شبه شکستگی بوده و باعث بالا رفتن مقادیر تراوایی شده است. مقادیر تراوایی ثبت شده حاصل از آنالیز مغزه‌ها برای بخش‌های دولومیتی شده حاکی از شکل‌گیری لایه‌های فوق تراوا در بخش‌های دولومیتی است.

### کلیدواژه‌ها

خلیج فارس، کنگان، دالان، دولومیت، دولومیتی شدن، تخلخل بین بلوری، تراوایی، لایه‌های فوق تراوا

### ۱. مقدمه

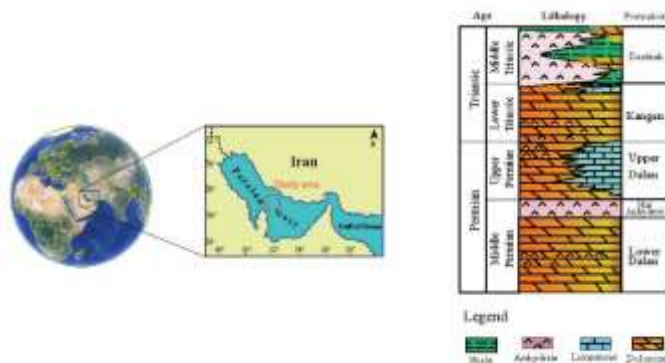
مخازن گازی پرمین - تریاس در خلیج فارس شامل سازند دالان (به سن پرمین) و سازند کنگان (به سن تریاس) می‌باشد. این سازندها مهمترین سازندهای مخزنی در خلیج فارس به ویژه میدان گازی پارس جنوبی هستند که در آبهای ایران و قطر واقع شده است. ترکیب سنگ‌شناسی سازند کنگان و دالان از آهک، دولومیت و انیدریت تشکیل شده است (شکل ۱). دولومیت به عنوان یکی از کانی‌های تشکیل‌دهنده مخازن کنگان و دالان در حقیقت محصول پدیده دیاژنزی دولومیتی شدن می‌باشد. دولومیت کانی ساده‌ای نیست. این کانی می‌تواند به عنوان یک رسوب اولیه، یک جایگزین دیاژنتیکی یا به عنوان یک فاز هیدروترمال / متامورفیک تشکیل شود و تنها چیزی که نیاز دارد نفوذپذیری است به عنوان مکانیزمی که جریان سیال و تامین منیزیم کافی را تسهیل می‌کند [۱] از

<sup>۱</sup> شرکت نفت و گاز پارس، تهران، ایران، [mnaderi@pogc.ir](mailto:mnaderi@pogc.ir) \* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> شرکت نفت و گاز پارس، تهران، ایران، [aazimvand@pogc.ir](mailto:aazimvand@pogc.ir)



آنجایی که دولومیت زیرسطحی از طریق انحلال و رسوب مجدد تکامل می‌یابد، یک بستر دولومیت می‌تواند تخلخل و تراوایی را حفظ یا ایجاد کند. دولومیتی شدن همچنین بلورهای جدیدی را با رشد لوزی‌های جدید به دنبال انحلال کانی‌های پیشین با پایداری کمتر ایجاد می‌کند. تکرار این فرآیند، بدون سیمان شدن کامل منافذ، می‌تواند تخلخل بین بلوری را چندین بار در تاریخچه تدفین سنگ ایجاد کند. تخلخل بین کریستالی یک نوعی از تخلخل بسیار به هم پیوسته است که به ظرفیت ذخیره سیال و زهکشی (تراوایی) کارآمد را برای مخازن دولومیتی ایجاد می‌کند [۱].



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و همچنین ستون چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی سازندهای کنگان و دالان

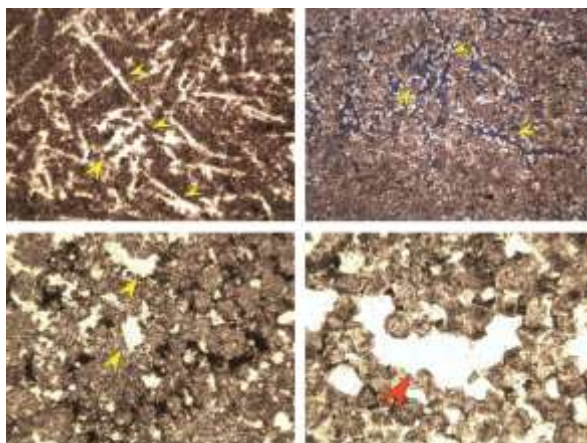
در خصوص ارتباط بین دولومیت‌ها و افزایش کیفیت مخزنی در مخازن کنگان و دالان مطالعات زیادی انجام شده است [۶][۵][۴][۳][۲]. در این مطالعه به این موضوع پرداخته می‌شود که تخلخل‌های بین بلوری که مهمترین تخلخل در دولومیت‌ها هستند در بخش‌هایی از مخازن کنگان و دالان به هم پیوسته و کانال‌هایی شبیه به شکستگی ایجاد می‌کنند که باعث بالا رفتن تراوایی در مخزن می‌شود.

## ۲. داده‌ها، نتایج و تفسیر

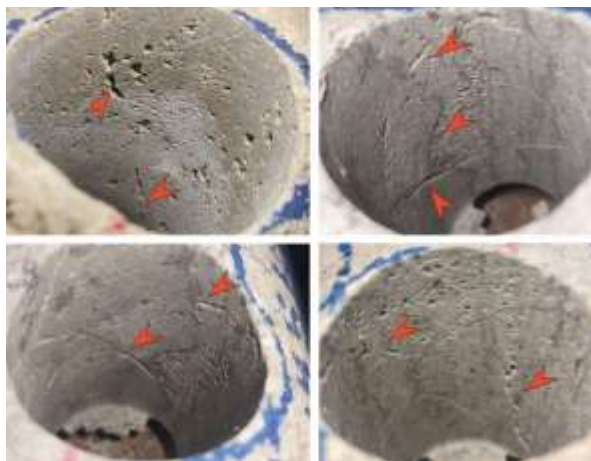
در این مطالعه ۸۰ متر مغزه، تعداد ۲۴۰ مقطع نازک، داده‌های تخلخل و تراوایی اخذ شده از ۸۰ مغزه استفاده شد. به طور خاص بخش‌های دولومیتی شده مورد مطالعه قرار گرفت. مطالعه ماکروسکوپی و میکروسکوپی نمونه‌ها به همراه مقایسه مقادیر تخلخل و تراوایی اندازه‌گیری شده از مغزه‌ها نشان می‌دهد که دولومیتی شدن تا حد خاصی در سازندهای کربناته کیفیت مخزنی را افزایش داده و از آن پس با افزایش مقدار دولومیت (over dolomitization) کیفیت مخزنی کاهش می‌یابد. تبدیل کلسیت به دولومیت اغلب با کاهش حجم از طریق تشکیل تخلخل بین بلوری همراه و افزایش تخلخل را سبب شده است (شکل ۲). همچنین در مطالعه بخش‌های دولومیتی شده به ویژه در روی مغزه‌ها کانال‌هایی مشاهده گردید که در اثر پیوستن تخلخل‌های بین بلوری ایجاد شده‌اند، کانال‌هایی شکل گرفته است که شبه شکستگی بوده و باعث بالا رفتن مقادیر تراوایی می‌شود. این کانال‌ها به این دلیل که می‌توانند مسیر خوبی برای جریان عبور سیال باشند در صورت اتصال به زون آبدی می‌توانند به عنوان دلیل افزایش تولید آب از مخازن نیز مطرح شوند (شکل ۳).

تأثیر اصلی دولومیتی شدن در افزایش مقدار تراوایی از طریق افزایش راه‌های ارتباطی (corridors) در داخل سنگ می‌باشد و از این راه تراوایی افزایش می‌یابد. نمودار تخلخل-تراوایی یکی از چاه‌های میدان مورد مطالعه نشان می‌دهد که بالاترین تراوایی‌های ثبت شده مربوط به بخش‌های دولومیتی مخزن است (شکل ۴). مطالعه‌ای که

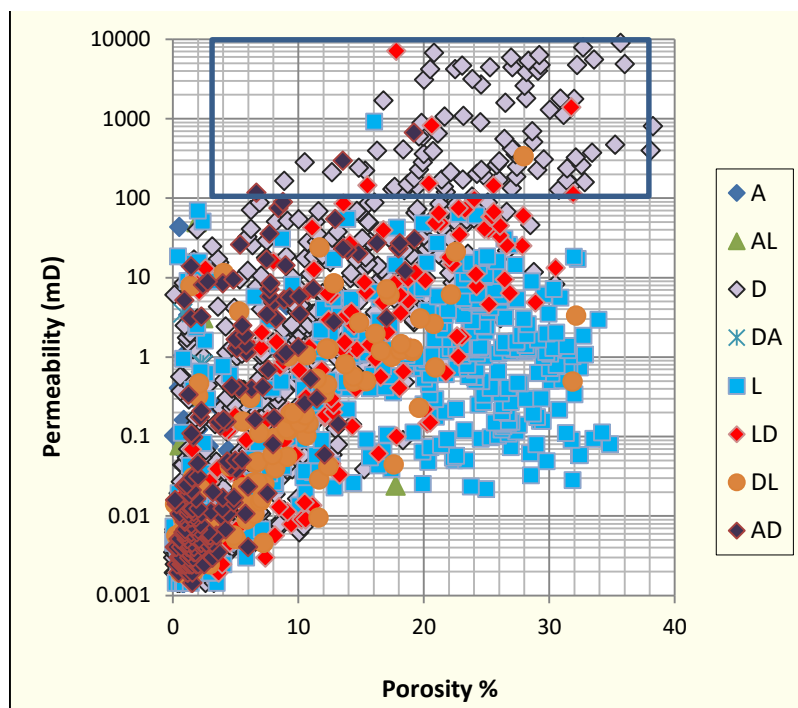
توسط شرکت توتال بر روی رخنمون مشابه برای بررسی سازند خوف (معادل کنگان و دالان در سمت قطر و کشورهای مجاور عربی) انجام شده، نشان داده است که لایه‌های دولومیتی دارای تراوایی بالای ۱۰۰۰ میلی داری دارند که به همین دلیل آنها این لایه‌ها را لایه‌های فوق تراوا (Super K) نامیدند [۷]. این لایه‌ها مسیر اصلی تخلیه سیال هستند و نقشه‌ها نشان داده است که این مسیر در جهت گسل‌ها و شکستگی‌ها نبوده است. با توجه به گسترش لایه‌های فوق تراوا در بخش‌های دولومیتی سازند خوف و مقایسه ویژگی‌های این لایه‌ها در مخازن کنگان و دالان در خلیج فارس، موید حضور لایه‌ها و گسترش لایه‌های فوق تراوا در این دو مخزن گازی است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود اعداد تراوایی مربوط به این لایه‌ها تا ۱۰۰۰۰ میلی داری نیز می‌رسد که در بازه تعریف شده برای لایه‌ها فوق تراوا (Super K) قرار می‌گیرند.



شکل ۲: تصاویر میکروسکوپی از مقاطع نازک و گسترش بلورهای دولومیت، تخلخل بین بلوری در میان آنها و نیز پیوند تخلخل‌های بین بلوری با هم و تشکیل کانال‌های عبور سیال



شکل ۳: تصاویر ماکروسکوپی از مغزه‌های مورد مطالعه گسترش تخلخل بین بلوری و تشکیل کانال‌های شبه شکستگی که تراوایی سنگ را به بازه تراوایی لایه‌های فوق تراوا نزدیک می‌کند.



### نتیجه‌گیری

دولومیت‌ها یکی از اصلی‌ترین تشکیل‌دهنده سنگ‌شناسی مخازن کنگان و دالان در میدین گازی خلیج فارس به ویژه میدان پارس جنوبی هستند. دولومیت‌ها حاصل فرایندهای دیاژنزی در این دو سازند می‌باشند. تبدیل کلسیت به دولومیت اغلب همراه با کاهش حجم از طریق تشکیل تخلخل بین بلوری شده و افزایش تخلخل را سبب شده است. تأثیر اصلی دولومیتی شدن در افزایش مقدار تراوایی از طریق افزایش راه‌های ارتباطی (corridors) در داخل سنگ می‌باشد و از این راه تراوایی افزایش می‌یابد. در اثر پیوستن تخلخل‌های بین بلوری ایجاد شده، کانال‌هایی شکل گرفته است که شبه شکستگی بوده و باعث بالا رفتن مقادیر تراوایی شده است. مقادیر تراوایی ثبت شده برای بخش‌های دولومیتی شده حاکی از شکل‌گیری لایه‌های فوق تراوا در بخش‌های دولومیتی است.

### فهرست مراجع

|     |  |
|-----|--|
| [1] | J. Warren, "Dolomite: occurrence, evolution and economically important association", <i>Earth-Science Reviews</i> 52-2000. 1–81, July 2000.  |
| [2] | V. Tavakoli, "Permeability's response to dolomitization, clues from Permian–Triassic reservoirs of the central Persian Gulf", <i>Marine and Petroleum Geology</i> 123(2), DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2020.104723, Jan 2021.  |
| [3] | V. Tavakoli, A. Jamaljan "Porosity evolution in dolomitized Permian–Triassic strata of the Persian Gulf, insights into the porosity origin of dolomite reservoirs", <i>Journal of Petroleum Science and Engineering</i> 181(4):106191 DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106191, Jun 2019. |
| [4] | H. Rahimpour-Bonab, B. Esrafil-Dizaji, V. Tavakoli, "Dolomitization and anhydrite precipitation in permo-triassic carbonates at the south pars gasfield, offshore Iran: controls on reservoir quality", <i>Journal of Petroleum Geology</i> , Vol. 33(2), pp 1 - 24, January 2010. |

|     |  |
|-----|--|
| [5] | B. Esrafil-Dizaji, H. Rahimpour-Bonab, "Effects of depositional and diagenetic characteristics on carbonate reservoir quality: a case study from the South Pars gas field in the Persian Gulf", <i>Petroleum Geoscience</i> , Vol. 15 2009, pp. 325–344, DOI:10.1144/1354-079309-817, February 2009. |
| [6] | M. Hosseinzadeh, V. Tavakoli, "The Effect of Geological Parameters on the Ratio of Horizontal to Vertical Permeability in Carbonate Reservoirs of Kangan and Upper Dalan Formations", <i>Petroleum Research</i> , Vol. 32, No. 123, 15–16 DOI:10.22078/pr.2022.4465.3020. (June–July) 2022.          |
| [7] | F. Gisquet, M. Floquet, B. Caline, A. Virgone, J. Borgomano, " Dolomite Outcrop Analogues as a Key to Understand the Development of Super-K Layers in a Giant Carbonate Reservoir (Upper Khuff Formation, Middle-East)", ICE Cancun 2016, Mexico, Gisquet et al, September 2016.                     |



## بررسی آسیب سازند ناشی از رسوب آسفالتین و رفع آن با استفاده از آنالیز دیجیتال مغزه

علیرضا جورکش<sup>۱\*</sup>؛ جعفر قاجار<sup>۲</sup>؛ مسعود ریاضی<sup>۳</sup>

### چکیده

در این مطالعه، رسوب آسفالتین و رفع آن با استفاده از حلال تولوئن در مقیاس منفذی و نیز تأثیر آن بر پارامترهای پتروفیزیکی یک نمونه بستر شنی با استفاده از روش تصویربرداری میکرو سی تی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این کار، یک سری آزمایش در سه مرحله تعریف شده است: مرحله اول قبل از ایجاد آسیب، مرحله دوم پس از آسیب و مرحله سوم پس از رفع آسیب می‌باشد. پس از اتمام هر مرحله، نمونه مورد استفاده تحت تصویربرداری میکرو سی تی اسکن قرار می‌گیرد. هدف این مطالعه، بررسی تأثیر رسوب آسفالتین و حذف آن بر تغییرات پارامترهای فیزیکی و ارتباط بین آنها با استفاده از فناوری دیجیتال مغزه می‌باشد. تست‌های سیلابزنی بر روی نمونه بستر شنی برای ایجاد آسیب و همچنین رفع آن توسط تولوئن در دبی‌های مشخص با فشار روباره ۷۵۰ پوند بر اینچ مربع (psi) در دمای محیط انجام گردید. تصاویر بدست آمده توسط نرم افزارهای Avizo، ImageJ و MATLAB با دقت قابل قبولی انجام شد. سپس با استفاده از نرم افزار PoreFoam شبیه سازی جریان تک فازی بر روی تصاویر تفکیک شده انجام و تراوایی نمونه به روش حجم محدود (finite volume) و فاکتور سازند به روش حل معادله لاپلاس جریان الکتریکی محاسبه گردید. نتایج بدست آمده از تصاویر تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاه نشان دادند. در ضمن نشان داده شد که کاهش چشمگیر ارتباط بین حفرات باعث کاهش قابل توجه تراوایی نمونه مورد مطالعه شده است. نتایج مرحله سوم، افزایش تخلخل، تراوایی و ارتباط بین حفرات را در بستر شنی نشان داد.

### کلیدواژه‌ها

بستر شنی؛ تصویربرداری میکرو سی تی؛ تولوئن؛ رسوب آسفالتین؛ سیلابزنی مغزه؛ فناوری دیجیتال مغزه

### ۱. مقدمه

تعیین توزیع تخلخل و تراوایی و ویژگی‌های تحت تأثیر جریان تک فاز و چند فازی در طول یک مغزه توسط تصویربرداری سی تی اسکن به عنوان یک ابزار قدرتمند و غیر مخرب یکی از روش‌های رایج در صنایع نفت و گاز تبدیل شده است [۱]. بر این اساس، پدیده رسوب آسفالتین درون حفرات نیز از طریق تفکیک تصاویر میکرو سی

<sup>۱</sup> علیرضا جورکش، دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ([jorkesharsalan@gmail.com](mailto:jorkesharsalan@gmail.com))

\* علیرضا جورکش

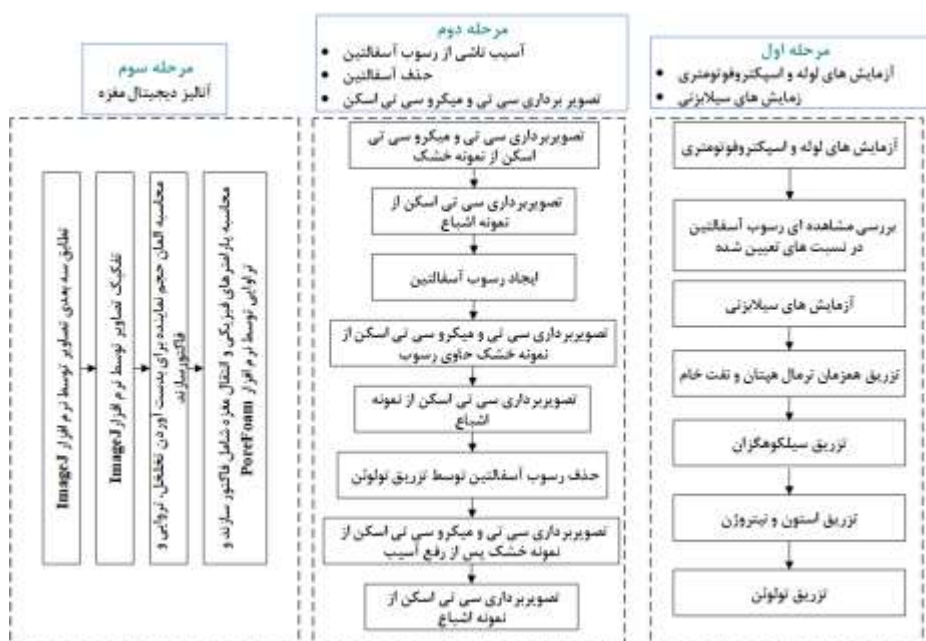
<sup>۲</sup> جعفر قاجار، دانشیار، مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ([jqajar@shirazu.ac.ir](mailto:jqajar@shirazu.ac.ir))

<sup>۳</sup> مسعود ریاضی، استاد، مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ([miriaz@shirazu.ac.ir](mailto:miriaz@shirazu.ac.ir))

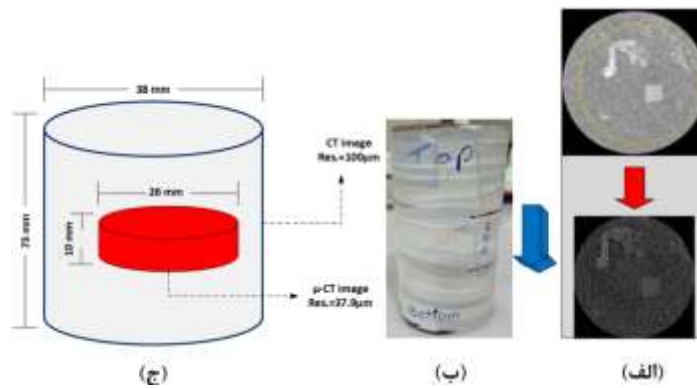
تی به سه بخش حفره، ماتریکس سنگ و آسفالتین قابل مشاهده و بررسی است [۲]. چینگ یانگ و همکاران تصویربرداری میکرو سی تی از حفرات مسدود شده توسط آسفالتین القا شده در سنگ‌های کربناته را انجام دادند [۳]. اهداف این مقاله، مطالعه و آنالیز تصویربرداری در مقیاس منفذی از آسیب ناشی از رسوب آسفالتین و رفع آن و پیدا کردن رابطه بین پارامترهای پتروفیزیکی می‌باشد.

## ۲. روش انجام پژوهش و نکات کلیدی

بستر شنی از ترکیب ۲۳٪ کوآرتز و ۷۷٪ آنورتیت بر اساس آنالیز پراش پرتوی ایکس با رزین اپوکسی و هاردنر تحت فشار روباره ۱۴۰۰۰ جهت استحکام تشکیل شده و دارای ابعادی به طول ۷،۳۰۰، حجم ۳،۱۳۰۰۰، قطر ۳،۷۸۰۰ و حجم حفرات ۲۹،۵۴۰۰۰ می‌باشد. جریان کاری پژوهش در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. تصویربرداری سی تی اسکن از کل حجم بستر شنی با رزولوشن ۱۰۰۰۰ و میکرو سی تی اسکن از بخشی از بستر شنی با رزولوشن میانگین ۳۷،۹۰۰ و در جهت تزریق از بالا به پائین مطابق شکل ۲-۲ انجام گرفت.

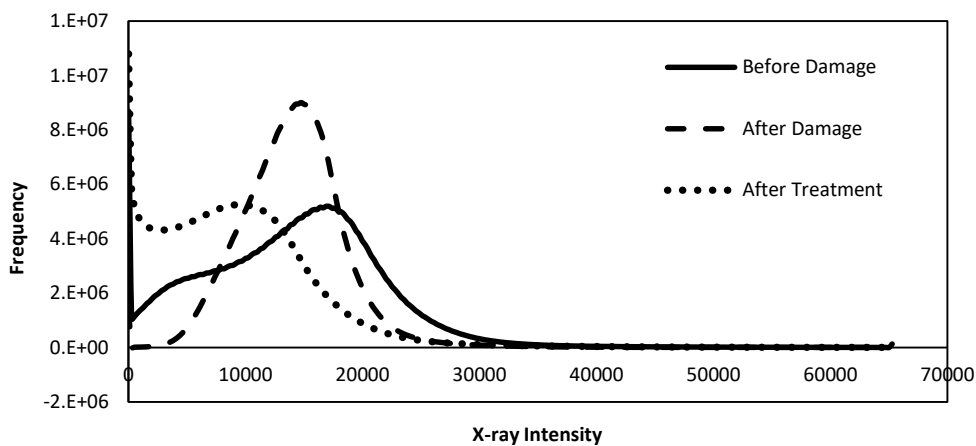


شکل ۲-۱: جریان کاری (work flow) پژوهش انجام شده



شکل ۲-۲: الف) یک برش دو بعدی از تصویر سی تی (بالا) در فاصله ۳۷.۲۰۰ از مغزه و یک برش دو بعدی از تصویر میکرو سی تی (پائین) در فاصله ۹.۲۰۰ از نمونه ب) جهت تزریق و تصویربرداری ج) ابعاد تصویربرداری سی تی و میکرو سی تی

در آنالیز دیجیتال مغزه در ابتدا تطابق تصاویر و سپس تفکیک مهمترین بخش‌ها می باشد. برای اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی، مقدار المان حجم نماینده ۱۵۰ واکسل محاسبه گردید و تصاویر میکرو سی تی بدست آمده از هر مرحله مطابق **Error! Reference source not found.** به ۷۲ دو بخش تقسیم شد. با استفاده از کد متن باز OpenFOAM که حل کننده جریان ناشی از شبیه سازی معادلات ناویر استوکس بر روی تصاویر دودویی با ایجاد یک گرادیان فشار ثابت است، پارامترهای پتروفیزیکی محاسبه می گردند. شکل ۲-۳ هیستوگرام بدست آمده از تصویر میکرو سی تی قبل از آسیب دارای دو قله که نشاندهنده دو فاز حفره و سنگ، پس از آسیب نمایانگر حضور آسفالتین است که سبب افزایش چگالی و از بین رفتن فاز مجزای حفره در چگالی های کم شده است و پس از رفع آسیب، پدیدار شدن مجدد فاز حفره و عملکرد تولوئن در یکنواخت سازی حفرات را نشان می دهد.

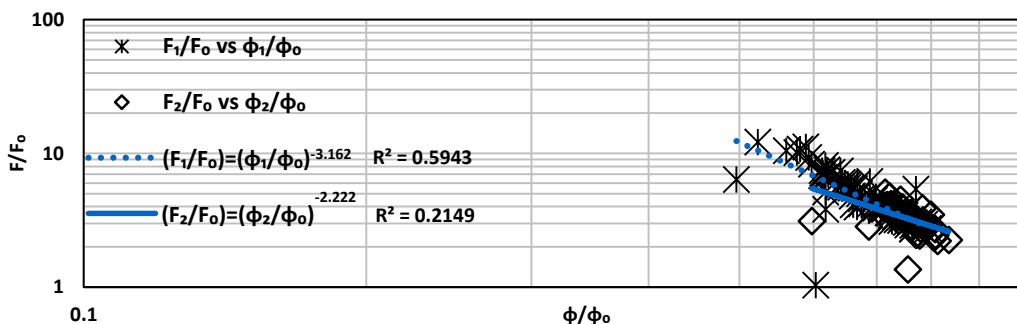


شکل ۲-۳: هیستوگرام تصاویر میکرو سی تی قبل از آسیب (خط توپر)، پس از آسیب (خط چین) و پس از رفع آسیب (نقطه چین)

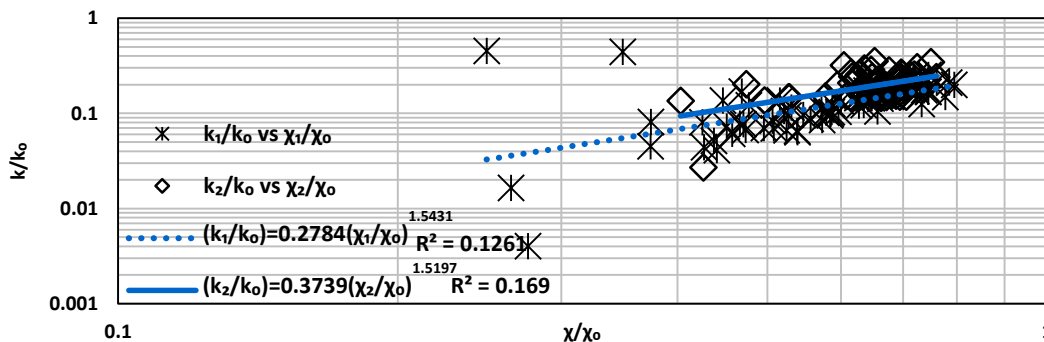
### ۳ نتایج و بحث

مقادیر آزمایشگاهی تخلخل قبل از آسیب، پس از آسیب و پس از رفع آسیب به ترتیب، ۳۵.۹۶٪، ۲۷.۰۴٪ و ۳۱.۰۸٪ و مقادیر بدست آمده با استفاده از آنالیز تصاویر به ترتیب، ۳۰.۵۱٪، ۱۹.۱۱٪، ۲۳.۰۵٪ می باشند. مقادیر

آزمایشگاهی تراوایی برای تصاویر قبل و بعد از آسیب و پس از رفع آسیب به ترتیب، ۱۳،۸ و ۱۲،۷۵، ۱۵،۱۰، ۴،۴۴ و ۲،۹۱، ۲۳،۰۸، در شکل ۱-۳، تغییرات فاکتور سازند پس از آسیب و پس از رفع آسیب بر حسب تغییرات تخلخل رزولوشن است. در شکل ۱-۳، تغییرات فاکتور سازند پس از آسیب و پس از رفع آسیب بر حسب تغییرات تخلخل به صورت یک تابع توانی با رابطه عکس نشان داده شده است و در شکل ۲-۳، تغییرات تراوایی پس از آسیب و پس از رفع آسیب بر حسب تغییرات عدد اویلر پس از آسیب و پس از رفع آسیب نشان داده شده که هر چقدر نسبت عدد اویلر بر روی محور افقی افزایش یابد یعنی ارتباط بین حفرات بیشتر می شود بنابراین نسبت تراوایی به تراوایی اولیه برای حالت پس از رفع آسیب به دلیل افزایش ارتباط بین حفرات و حذف آسفالتین نسبت به حالت پس از ایجاد آسیب که آسفالتین گلوگاه های ارتباطی را پر کرده، مقدار بیشتری دارد.



شکل ۱-۳: تغییرات فاکتور سازند به فاکتور سازند اولیه بر حسب تغییرات تخلخل به تخلخل اولیه بعد از آسیب (ستاره، خط چین) و پس از رفع آسیب (مربع، خط توپر)



شکل ۲-۳: تغییرات تراوایی به تراوایی اولیه بر حسب تغییرات عدد اویلر به عدد اویلر اولیه بعد از آسیب (ستاره، خط چین) و پس از رفع آسیب (مربع، خط توپر)

#### ۴ نتیجه گیری

مقادیر تخلخل بدست آمده از آزمایشگاه تطابق خوبی را با نتایج بدست آمده از سی تی اسکن نشان دادند. نتایج بدست آمده از شبیه سازی تصاویر، ارتباط بین پارامترهای تخلخل، تراوایی و فاکتور سازند را نمایش داد و در این مطالعه مشاهده شد می توان با حداقل انجام تست های آزمایشگاهی بوسیله تصویربرداری در مقیاس منفذی البته در رزولوشن های قابل قبول از مدل توانی برای نشان دادن ارتباط بین پارامترهای پتروفیزیکی استفاده نمود.

#### ۵ فهرست مراجع

[1] S. Akin and A. Kovsky, "Computed tomography in petroleum engineering



- research," *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 215, pp. 23-38, 2003.
- [2] X. Feng, J. Zeng, Y. Ma, K. Jia, J. Qiao, Y. Zhang, *et al.*, "Asphaltene Deposition Preference and Permeability Reduction Mechanisms in Oil Reservoirs: Evidence from Combining X-ray Microtomography with Fluorescence Microscopy," *Energy & Fuels*, vol. 31, pp. 10467-10478, 2017.
- [3] Q. Lin, T. Akai, M. J. Blunt, B. Bijeljic, H. Iwama, K. Takabayashi, *et al.*, "Pore-scale imaging of asphaltene-induced pore clogging in carbonate rocks," *Fuel*, vol. 283, p. 118871, 2021.



## بررسی جامع رفتار رژیم جریان حبابی برای بهینه سازی تجهیزات و طراحی خط لوله

هادی تنهایی؛ امیرحسین سعیدی دهقانی\*؛ محمد امین بهنام مطلق<sup>۳</sup>

### چکیده

جریان حبابی یکی از انواع رژیم های جریان دو فازی گاز- مایع است که در آن فاز گاز در فاز مایع به صورت حباب های کوچک پراکنده می شود. این نوع جریان معمولاً در سرعت های گاز کم و سرعت مایع بالا مشاهده می شود و می تواند نقش مهمی در صنعت نفت و گاز داشته باشد. در جریان حباب دار، حباب های گاز به دلیل چگالی کمتر در مقایسه با مایع تمایل به تجمع در قسمت بالایی لوله دارند. این توزیع غیر یکنواخت فاز گاز در مایع می تواند بر پارامترهای جریان مانند افت فشار و انتقال جرم تأثیر بگذارد. آگاهی دقیق از رژیم جریان حبابی و عوامل مؤثر بر آن، مانند نسبت حجمی گاز به مایع، سرعت سیال و خواص فیزیکی آنها، برای طراحی و عملکرد بهینه تجهیزات صنعتی مانند راکتورهای حبابی و مبدل های حرارتی که از این نوع جریان استفاده کنید. مطالعات تجربی و مدل سازی عددی در این زمینه منجر به پیشرفت قابل توجهی در درک و پیش بینی رفتار جریان حبابی شده است. این پیشرفت ها می تواند به بهبود طراحی و کارایی این تجهیزات صنعتی کمک کند. هدف این تحقیق ارائه یک درک جامع از عوامل مؤثر بر انتقال رژیم جریان حبابدار، بررسی کاربردهای مختلف آن در زمینه های مختلف و پیشنهاد روش های تشخیص است. با انجام این کار، چشم انداز جدیدی برای طراحی، بهره برداری و بهینه سازی ایمنی و کارایی سیستم های خط لوله محقق خواهد شد.

<sup>۱</sup>مشخصات و ایمیل نویسنده اول (گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
([hadi.tanhaei@modares.ac.ir](mailto:hadi.tanhaei@modares.ac.ir))

<sup>۲</sup>مشخصات و ایمیل نویسنده دوم (گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
([asaedi@modares.ac.ir](mailto:asaedi@modares.ac.ir))

\* نویسنده مسئول

<sup>۳</sup>مشخصات و ایمیل نویسنده سوم (گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
([m\\_behnamotlagh@modares.ac.ir](mailto:m_behnamotlagh@modares.ac.ir))

## کلیدواژه‌ها

جریان حبایی، پراکنده، افت فشار، انتقال جرم، راندمان

### ۱. مقدمه

عبارت سیال دوفازی برای توصیف یک جریان ترکیبی گاز - مایع، گاز - جامد، مایع - مایع و یا مایع - جامد بکار می‌رود که در میان آنها جریان گاز - مایع به دلیل قابلیت تغییر شکل و تراکم‌پذیری فازها از بقیه پیچیده‌تر می‌باشد. به‌طور معمول با بکارگیری دو عبارت الگوی جریان و رژیم جریان، سیالات دو فازی طبقه‌بندی می‌شوند. یک الگوی جریان بیانگر توزیع یا ساختار قابل مشاهده فازها می‌باشد. در مقابل یک رژیم جریان بیانگر این است که چگونه توزیع‌های فازی بر طبیعت فیزیکی سیستم تأثیر می‌گذارد. الگوهای گوناگون جریان به عبارت دیگر یک تفاوت قابل دیدن در ساختار فازی را بیان می‌کنند که این امر به معنی نیاز به یک مدل جدید نمی‌باشد. پیش‌بینی‌های الگوهای جریان افقی نسبت به جریان عمودی مشکل‌تر می‌باشد. در جریان افقی، عامل تمایل به جدایش فازها تفاوت در دانسیته می‌باشد که این امر باعث شکل‌گیری جریان لایه‌ای در لوله شده و فاز سنگین‌تر (مایع) تمایل به قرارگیری در قسمت پایین لوله پیدا کند. (پهلوان‌زاده و همکاران، ۲۰۱۱).

جریان همزمان گاز و مایع در داخل کانال، بسته به شکل هندسی سطح مشترک دوفاز، با الگوهای مختلفی صورت می‌گیرد. در این میان یکی از محتمل‌ترین الگوها، رژیم جریان حباب‌های تیلور است. این رژیم به دلیل ماهیت متناوب و ناپایا، یکی از پیچیده‌ترین الگوهای جریان دوفازی است و مشخصه بارز آن، حرکت حباب‌های بزرگ و کشیده‌ای از فاز گاز و در میان محیط پیوسته‌ای از فاز مایع است. این رژیم که به رژیم پلاگ نیز معروف است در بسیاری از صنایع مانند کارخانه‌های شیمیایی، بیوراکتورها و نیروگاه‌های هسته‌ای دیده می‌شود. در فرایندهایی که با انتقال حرارت همراه هستند، حضور حباب‌های تیلور سبب ایجاد تغییرات قابل توجهی در ضریب انتقال حرارت داخل کانال شده و باعث ایجاد شوک‌های حرارتی به دیواره لوله می‌شود. این مورد بعنوان یکی از عوامل اصلی سوختن لوله‌های بویلر در نیروگاه‌ها مطرح است. علاوه بر این، حرکت حباب‌های تیلور نوسانات شدیدی در پروفایل فشار داخل کانال ایجاد کرده و سبب تشدید فرایندهای خوردگی می‌شوند (انصاری و همکاران، ۲۰۱۵). این جریان شامل چندین مقیاس طول مشخصه است، که از قطر حباب (مقیاس میکرو) تا ساختار کلی جریان (مقیاس ماکرو) شامل می‌شود. همان‌طور که بسیاری از محققان گزارش کرده‌اند، تزریق حباب‌های هوا باعث تغییر ساختار جریان می‌شود و ساختار چند مقیاسی جریان حبایی نقش

مهمی در تعدیل جریان ایفا می‌کند. حتی در پدیده‌های مقیاس میکرو، به دلیل رفتار آلاینده روی سطح حباب، با یک مسئله چند مقیاسی مواجه هستیم. رفتار یک حباب در حال افزایش در کاربردهای صنعتی، کاملاً متفاوت از رفتار حباب در یک سیستم مایع خالص است. به عبارت دیگر، مقادیر بسیار کمی از آلاینده حل شده در مایع، رفتار حباب را به‌طور چشم‌گیری تغییر می‌دهد [۲،۱]. برای مثال، ضریب درگ یک حباب تقریباً کروی در یک مایع آلوده بسیار بیشتر از ضریب درگ یک حباب در یک مایع خالص است و مقدار آن تقریباً با ضریب یک کره سفت و سخت برابر است [۳].

## ۲. الگوی جریان حبابی برای یک جریان گاز-مایع به سمت بالا در لوله عمودی

در جریان حبابی، گاز یا فاز بخار در داخل فاز مایع پیوسته به‌صورت حباب پراکنده شده است. در یک قسمت از لوله حباب‌ها ممکن است بسیار کوچک و کروی باشند و در قسمت دیگر بزرگ و کشیده (سر کروی و دم تخت) باشند. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که دبی فاز گاز نسبت به مایع خیلی کم باشد. در این نوع خطوط لوله، حباب‌ها به دلیل نیروی جاذبه به سمت بالا حرکت می‌کنند. اندازه حباب‌ها معمولاً به سرعت فاز گاز و فاز مایع، خواص فیزیکی سیالات و قطر لوله وابسته است و با افزایش سرعت فاز گاز، اندازه حباب‌ها افزایش می‌یابد. همچنین به صورت کلی سرعت حباب‌ها از سرعت فاز مایع کمتر بوده و فراوانی حباب‌ها با افزایش سرعت فاز گاز، افزایش می‌یابد. به‌علاوه حباب‌ها در خطوط لوله عمودی تمایل به توضع یکنواخت در سطح مقطع لوله دارند. انواع مختلفی از شکل‌گیری جریان حبابی در خطوط لوله عمودی ممکن است شکل گیرد. یکی از انواع این جریان‌ها شکل‌گیری جریان حبابی با حباب‌های کوچک می‌باشد. در این نوع جریان، حباب‌ها به‌صورت جداگانه و بدون اتصال به هم به سمت بالا حرکت می‌کنند. شکل ۱ نمونه‌ای از شکل‌گیری این نوع جریان را خطوط لوله عمودی نشان می‌دهد [۴].



شکل ۱: جریان حبابی در یک لوله عمودی [۴]

### ۳. الگوهای جریان حبابی در یک لوله افقی برای جریان گاز-مایع

در این حالت الگوی جریان شبیه حالت عمودی است با این تفاوت که حباب‌ها اکثراً در نیمه بالایی لوله جریان دارند. در خطوط لوله افقی در مواردی که دبی گاز نسبتاً کم و دبی مایع نسبتاً زیاد باشد، جریان حبابی بصورت حباب‌های کوچک گاز تحت تأثیر اختلاف چگالی در قسمت فوقانی لوله ظاهر می‌شود. با افزایش دبی گاز، اندازه حباب‌ها به تدریج افزایش می‌یابد. سرعت ظاهری مایع در این رژیم جریان در محدوده ۱,۵ تا ۴,۵ متر بر ثانیه و سرعت ظاهری گاز بین ۰,۳ تا ۳ متر بر ثانیه می‌باشد. بگز-بریل در سال ۱۹۷۳ سه نوع الگوی اصلی جریان افقی را شامل جریان مجزا، جریان متناوب و جریان توزیع شده پیشنهاد کرد. بر اساس این تعریف، الگوی جریان مجزا وقتی شکل خواهد گرفت که فازهای گاز و مایع در امتداد محور جریان، پیوسته باشند. چنانچه دو فاز مایع و گاز بصورت بسته‌های متناوب جاری شوند، الگوی جریان متناوب بوجود خواهد آمد. هنگامی که یکی از فازهای مایع یا گاز بطور پیوسته و نسبی در دو امتداد موازی و عمود بر محور لوله جریان یابد، الگوی جریان توزیع شده شکل می‌گیرد. در این حالت لزومی ندارد که فاز دیگر در همان بخش از لوله به طور یکنواخت توزیع شود، ولی باید بطور محلی پیوسته باشد. جریان حبابی در خطوط لوله افقی را در این دسته قرار گرفته شد. شکل ۲ نمونه‌ای از شکل‌گیری این نوع جریان حبابی را در خطوط لوله افقی نشان می‌دهد [۵].



شکل ۲: جریان حبابی در یک لوله افقی [۵]

پایان جریان حبابی زمانی خواهد بود که با به هم پیوستن حباب‌ها، حباب بزرگتری تولید شود و به این رژیم جریان، جریان اسلاگ می‌گویند. این جریان، حباب‌های گلوله‌شکل موسوم به حباب‌های تیلور دارد و این حباب‌ها با حجمی از مایع، از یکدیگر جدا شده‌اند. این حجم مایع (اسلاگ) نیز به‌طور معمول شامل حباب‌هایی کوچک است.

### ۴. نتیجه‌گیری

در نتیجه، درک جامع از رفتار رژیم جریان حباب برای بهینه‌سازی عملکرد تجهیزات و طراحی سیستم‌های

خط لوله کارآمد در کاربردهای صنعتی ضروری است. اپراتورها و مهندسان با شناخت ویژگی‌ها و چالش‌های مرتبط با رژیم جریان حباب، و همچنین اجرای استراتژی‌های بهینه‌سازی مناسب، می‌توانند کارایی عملیاتی را افزایش دهند، ایمنی را بهبود بخشند و طول عمر تجهیزات را افزایش دهند. ادامه تحقیق و توسعه در این زمینه توانایی ما را برای مدیریت موثر رژیم جریان حباب در فرآیندهای صنعتی متنوع بیشتر خواهد کرد.

## ۵. فهرست مراجع

- [1] Mathai, V., Lohse, D., & Sun, C. (2020). Bubbly and buoyant particle-laden turbulent flows. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 11, 529-559.
- [2] Lance, M., Marie, J. L., Moursali, E., Bataille, J., Suzanne, C., Roig, V., ... & Masbernat, L. (1996). Experimental study of turbulent bubbly shear flows. *Chemical Engineering Communications*, 141(1), 51-70.
- [3] Sugiyama, K., Takagi, S., & Matsumoto, Y. (2001). Multi-scale analysis of bubbly flows. *Computer methods in applied Mechanics and Engineering*, 191(6-7), 689-704.
- [4] Furukawa, T., & Fukano, T. (2001). Effects of liquid viscosity on flow patterns in vertical upward gas-liquid two-phase flow. *International journal of multiphase flow*, 27(6), 1109-1126.
- [5] Tzotzi, C., Bontozoglou, V., Andritsos, N., & Vlachogiannis, M. (2011). Effect of Fluid Properties on Flow Patterns in Two-Phase Gas- Liquid Flow in Horizontal and Downward Pipes. *Industrial & engineering chemistry research*, 50(2), 645-655.
- [6] Bröder, D., & Sommerfeld, M. (2004). Examination of bubble collisions and coalescence in bubbly flows. In *Bubbly Flows: Analysis, Modelling and Calculation* (pp. 21-36). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [7] Gnotke, O., Jeschke, R., & Loth, R. (2004). Experimental and theoretical investigation of bubble break-up and coalescence in bubbly flows. *Bubbly Flows: Analysis, Modelling and Calculation*, 85-99.
- [8] Godo, S., Junghans, K., Lapin, A., & Lübbert, A. (2004). Dynamics of the Flow in Bubble Column Reactors. *Bubbly Flows: Analysis, Modelling and Calculation*, 53-66.
- [9] Shaikh, A., & Al-Dahhan, M. H. (2007). A review on flow regime transition in bubble columns. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*.



## مدلسازی عددی جریان وابسته به چگالی در محیط های متخلخل ترک دار با استفاده از روش المان محدود توسعه یافته

سعید سعیدمنیر<sup>۱\*</sup>؛ امیررضا خوئی<sup>۲</sup>

### چکیده

مطالعه انتقال ماده در ساختارهای زمینی ترک دار برای کاربردهای مختلفی چون انتشار آلودگی، مدیریت منابع زیرزمینی، ذخیره سازی کربن دی اکسید برای کنترل تغییرات آب و هوایی و همچنین ذخیره سازی هیدروژن برای انرژی پاک ضروری به نظر می‌رسد. این مقاله یک مدل عددی بر اساس روش المان محدود توسعه یافته و به منظور تحلیل جریان وابسته به چگالی در محیط های متخلخل ترک دار ارائه می‌کند. در حقیقت، تفاوت چگالی در سیال ها که ناشی از عوامل مختلفی چون دما یا وجود محلول ها می‌باشد، مهمترین عامل ایجاد عامل محرک برای پدیده انتقال است. بدین منظور، معادله انتقال-انتشار برای در نظر گرفتن راه های مختلف پدیده انتقال جرم با معادله پیوستگی جریان به صورت همبسته حل می‌شوند. همچنین روش المان محدود توسعه یافته برای اعمال اثرات ناپیوستگی در محیط استفاده شده است. نهایتاً دو مثال متداول در ادبیات فنی برای نشان دادن کارکرد روش ارائه می‌گردند.

### کلیدواژه‌ها

انتقال ماده- محیط متخلخل ترک دار- جریان وابسته به چگالی- المان محدود توسعه یافته

### ۱. مقدمه

موضوع انتقال جرم در زمین در مسائل مختلف صنعتی و محیط زیستی به شکل جدی مطرح است. در سالهای اخیر، فرآیند کاهش توزیع دی اکسید کربن در هوا برای جلوگیری از گرمایش زمین و همچنین ذخیره سازی هیدروژن برای تامین انرژی پاک، اهمیت این موضوع را دوچندان کرده است. هرچندکه انتقال ایمن و مؤثر به لایه های زیرین زمین همچنان یک چالش اساسی در این حوزه می‌باشد. یکی از این چالش ها نحوه ذخیره سازی ایمن دی اکسید کربن در درازمدت است که چالش خروج دی اکسید کربن از مخزن ذخیره شده را منجر می‌شود. وجود ترک ها در ساختارهای سنگی می‌توانند در نقش یک مسیر برای انتقال دی اکسید کربن عمل کنند و در نتیجه، خطر نفوذ آن به حوزه های مسطح را افزایش دهند. بنابراین مطالعه محوه رفتار حرکت دی اکسید کربن در محیط ترک دار برای دست یابی به آثار بلندمدت ذخیره سازی کربن ضروری خواهد بود. [۱]

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. (saeedmonir@ut.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. (arkhoei@sharif.edu)

هیدروژن نیز به عنوان یک حامل انرژی پاک و قدرتمند با پتانسیل کربن زدایی بخش‌های مختلف شناخته می‌شود. هرچند که ذخیره‌سازی مؤثر و ایمن این ماده نیز همچنان یک چالش اساسی برای دانشمندان می‌باشد. ساختارهای زمینی که عمدتاً دارای ترک‌های متعدد هستند، به عنوان یک پتانسیل مهم برای ذخیره‌سازی هیدروژن مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. با این وجود، همانند دی‌اکسید کربن، حضور ترک‌ها می‌تواند چالش‌های اساسی در این مسیر ایجاد کنند. نفوذ هیدروژن از ترک‌ها می‌تواند مشکلات ایمنی شدید ایجاد کرده و منجر به آثار سوء اقتصادی شود. همچنین چگالی پایین هیدروژن نیاز به استراتژی‌های مؤثر برای ذخیره‌سازی و انتقال آن را افزایش می‌دهد. بنابراین توسعه مدل‌های دقیق برای تحلیل انتقال جرم در محیط ترک‌دار برای بررسی و حل چالش‌های پیش‌رو ضروری خواهد بود. این مدل‌ها می‌توانند نحوه حرکت و انتقال جرم را در محیط‌ها پیش‌بینی نموده و مسیرهای احتمالی نفوذ را روشن کند تا نحوه تزیق و برداشت بهینه‌تر گردند. [۲]

در پژوهش حاضر، روش از المان محدود توسعه یافته که یکی از مناسب‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌ها برای مدلسازی ناپیوستگی‌ها در محیط‌های مختلف می‌باشد، برای مدلسازی ترک‌های محیط متخلخل استفاده شده است.

## ۲. معادلات حاکم

در این بخش معادلات حاکم بر فیزیک مسأله بیان می‌شوند. لازم به ذکر است که در این پژوهش، از اثرات تغییرشکل خاک بر روی جریان سیال صرف نظر می‌شود. بنابراین دو معادله حاکم اصلی معادله پیوستگی جریان سیال و معادله انتقال جرم خواهد بود. این معادلات به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho \mathbf{w}) + \frac{\partial (n\rho)}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{J} + \nabla \cdot (\rho c \mathbf{w}) + \frac{\partial (n\rho c)}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن  $\mathbf{w}$  سرعت سیال،  $\rho$  چگالی سیال،  $n$  تخلخل محیط،  $\mathbf{J}$  شار انتشار و پراکندگی جرم و  $c$  نسبت جرمی ماده حل‌شونده می‌باشند. جریان سیال لایه‌ای فرض شده و بنابراین فرض می‌شود که قانون داری برقرار است. همچنین شار جرم در معادله (۱) با استفاده از قانون فیک به صورت تابعی از گرادینان نسبت جرمی در نظر گرفته می‌گردد: همچنین چگالی به صورت تابعی از نسبت جرمی  $c$  تغییر می‌کند:  $\rho = \rho_0 + \gamma c$  که  $\gamma = \rho_s - \rho_0$  می‌باشد. با توجه به حضور ترک در محیط، این ترک‌ها به صورت یک مرز داخلی در نظر گرفته می‌شوند. بدین ترتیب، حضور ترک در محیط منجر به ناپیوسته شدن جریان سیال و شار جرم در محل ترک می‌گردد. در حقیقت، ترک به عنوان یک مانع برای گذر سیال و جرم عمل کرده و در نتیجه جریان و شار در جهت عمود بر ترک ناپیوسته خواهند بود. بنابراین، سیال و جرم در داخل ترک به صورت مستقل جریان خواهند داشت. معادلات مربوط به جریان سیال و جرم درون ترک به صورت یک بعدی و در راستای طولی ترک در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x'} (\rho w_d) + \frac{\partial}{\partial t} (n_d \rho) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial x'} (J_d) + \frac{\partial}{\partial x'} (\rho c w_d) + \frac{\partial}{\partial t} (n_d \rho c) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

که مختصه  $x'$  در جهت طول ترک تعریف شده و اندیس  $d$  تصویر کمیت در جهت ترک را نشان می‌دهد.



معادلات (۱) به صورت فرم ضعیف نوشته شده و سپس توسط روش المان محدود گسسته سازی می‌شوند. شایان ذکر است که با توجه به حضور ناپیوستگی در محیط، از روش المان محدود توسعه یافته برای گسسته سازی در ناحیه ترک استفاده می‌گردد. [۳]

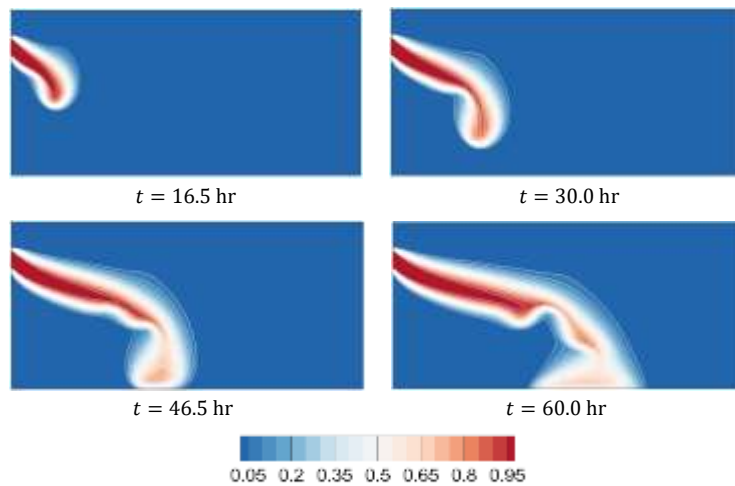
### ۳. گسسته سازی

معادلات (۱) به صورت فرم ضعیف نوشته شده و سپس توسط روش المان محدود گسسته سازی می‌شوند. شایان ذکر است که با توجه به حضور ناپیوستگی در محیط، از روش المان محدود توسعه یافته برای گسسته سازی در ناحیه ترک استفاده می‌گردد. در روش المان محدود توسعه یافته، به منظور ایجاد ناپیوستگی مطلوب در میدان‌های اصلی یا گرادیان آنها، المان‌هایی که ترک از آنها عبور می‌کند، توسط توابع ناپیوسته مناسبی غنی سازی می‌شوند. شایان ذکر است که در مسأله حاضر، میدان‌های فشار و نسبت جرمی در محل ترک بایستی پیوستگی خود را حفظ کنند و بنابراین گرادیان آنها که با جریان و شار مربوطه متناسب است، بایستی ناپیوسته شوند. این ناپیوستگی را ضعیف می‌نامند. به منظور ایجاد ناپیوستگی ضعیف، از تابع ریح استفاده می‌گردد. به منظور مدلسازی ترک‌های متقاطع نیز با تعریف توابع فاصله مستقل برای هر ترک، از تابع اتصال ریح استفاده شده است.

با اعمال توابع تقریب فشار و نسبت جرمی، معادلات فرم ضعیف گسسته سازی شده و فرم جبری معادلات تعیین می‌گردد. با توجه به حضور عبارات شامل نرخ زمانی، گسسته سازی زمانی توسط روش نیومارک انجام می‌گیرد. معادلات گسسته شده در زمان و مکان به صورت کاملاً همبسته در نظر گرفته شده و نهایتاً توسط روش‌های تکراری چون نیوتن-رافسون حل می‌شوند.

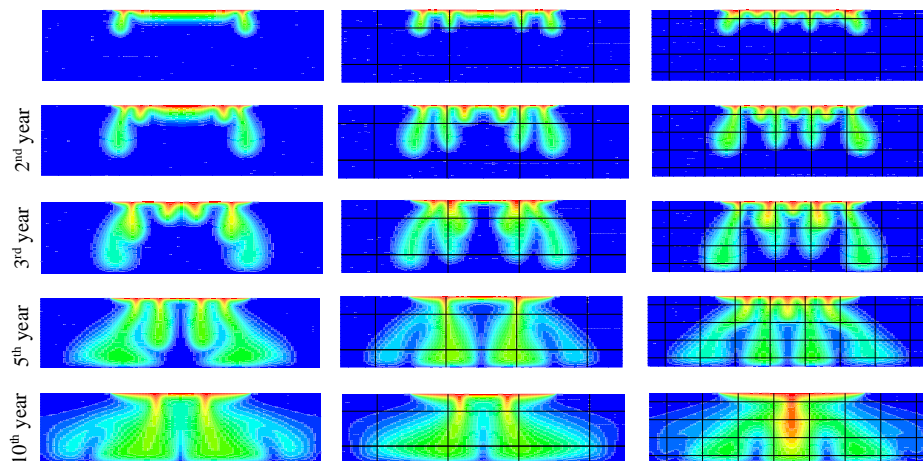
### ۴. نتایج

به منظور نشان دادن کارکرد روش ارائه شده، دو مثال متداول عددی حل شده و نتایج آن ارائه خواهند شد. مثال اول مربوط به یک محیط متخلخل همگن بوده که در سمت چپ و راست این محیط مستطیلی فشار هیدرواستاتیکی اعمال می‌شود. در قسمت  $0.42 < \gamma < 0.36$  سمت چپ ماده ای وارد محیط می‌شود. اطلاعات کامل مربوط به مسأله در مرجع [۴] ارائه شده است. نتایج حل در زمان‌های مختلف در شکل ۱ نشان داده شده اند.



شکل ۱- توزیع جرم در محیط در زمان های مختلف

همچنین مسأله Elder به عنوان مثال بعدی انتخاب شده است. این مسأله در نوع اولیه خود هیچ ترکی ندارد، اما در پژوهش حاضر ترک های متقاطع برای آن در نظر گرفته شده است تا کارایی روش حاضر سنجیده شود. در این مسأله، محلول از بالای یک محیط متخلخل مستطیلی وارد می-شود و به دلیل چگالی بالای آن، در محیط ترک دار پخش می-گردد. نتایج حل برای سیستم ترک های مختلف در شکل ۲ دیده می-شود.



شکل ۲- توزیع جرم در محیط ترک دار در زمان های مختلف ۱سال، ۲سال، ۳سال، ۴سال و ۵ سال

## ۵. نتیجه گیری

در این پژوهش یک روش قدرتمند برای شبیه سازی انتقال محلول و جرم در محیط متخلخل ترک دار ارائه شد. با استفاده از این رویکرد می-توان فرآیندهای متعددی چون ذخیره سازی دی اکسید کربن و هیدروژن و دیگر مسائل مربوط به جریان وابسته به چگالی را مورد بررسی قرار داد. پژوهش حاضر را می-توان برای جریان های چندفازی و همبسته با انتقال حرارت که تأثیرات شگرفی در روند مسأله می-توانند داشته باشند، گسترش داد. نتایج حاصل از این پژوهش می-تواند در مباحث مختلف ژئوتکنیکی و محیط زیستی به کار رود.

## ۶. فهرست مراجع

۱. Diersch, H.-J. and O. Kolditz, *Variable-density flow and transport in porous media: approaches and challenges*. Advances in water resources, 2002. **25**(8-12): p. 899-944.
۲. Kumar, K.R., et al., *Comprehensive review of geomechanics of underground hydrogen storage in depleted reservoirs and salt caverns*. Journal of Energy Storage, 2023. **73**: p. 108912.
۳. Khoei, A.R., *Extended finite element method: theory and applications*. 2014: John Wiley & Sons.
۴. Khoei, A., et al., *An X-FEM technique for numerical simulation of variable-density flow in fractured porous media*. MethodsX, 2023. **10**: p. 102137.



## توسعه مدل پروکسی هوشمند برای تزریق فوم در مخزن کربناته شکاف‌دار

### جهت ازدیاد برداشت نفت

همدم مجدتموری<sup>۱</sup>؛ محمد سیم‌جو\*<sup>۲</sup>؛ محمد چهاردولی<sup>۳</sup>

#### چکیده

اغلب مخازن جهان کربناته هستند و غالباً در مرحله دوم تولید قرار گرفته‌اند. تزریق فوم یک روش بسیار موثر برای بهبود جابجایی، افزایش نرخ تولید و ضریب بازیافت نفت است که مشکلاتی مانند انگشتی شدن و کانالی شدن را در فرآیند تزریق گاز کاهش می‌دهد. در این مطالعه، با استفاده از یک نرم‌افزار شبیه‌ساز مخزن، برای بررسی رفتار فوم در محیط متخلخل به شبیه‌سازی یک مخزن کربناته شکافدار پرداخته شده است و آنالیز حساسیت را روی پارامترهای موثر تزریق فوم مانند ویسکوزیته فوم، نرخ جریان فوم، اشباع بحرانی نفت، عرض و ارتفاع ماتریس سنگ انجام داده شد تا بتوان میزان بازیافت نفت را تخمین زد. سپس، با ایجاد یک مدل پروکسی هوشمند با بکارگیری دو الگوریتم یادگیری ماشین به هدف جایگزینی مدل‌های پیچیده شبیه‌ساز مخزن به پیش‌بینی میزان بازیافت نفت پرداخته شد. این الگوریتم‌ها شامل ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی هستند. در بین این دو الگوریتم، الگوریتم جنگل تصادفی، با ضریب همبستگی برابر ۰/۹۹۹۰ و خطای میانگین جذر مربعات برابر ۰/۲۵۶۴ برای پیش‌بینی بازیافت نفت عملکرد بهتری نشان داد. در نهایت دریافته شد برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی ضریب بازیافت نفت با استفاده از تزریق فوم میتوان از مدل‌های پروکسی هوشمند به عنوان جایگزینی برای مدل‌های شبیه‌سازی پیچیده استفاده نمود که در این روش زمان محاسبات پیچیده کاهش می‌یابد و فرآیند را بهینه‌تر می‌کند.

#### کلیدواژه‌ها

مخازن کربناته؛ تزریق فوم؛ شبیه‌سازی؛ یادگیری ماشین؛ ازدیاد برداشت؛ مدل پروکسی هوشمند

#### ۱. مقدمه

پس از تولید اولیه و ثانویه، مقدار زیادی نفت در مخازن باقی می‌ماند. روش‌های مرسوم تزریق گاز و آب مشکلاتی مانند میان‌شکنی زودهنگام و انگشتی شدن دارند [۱، ۲]. تزریق فوم با افزایش ویسکوزیته گاز و کاهش تراوایی نسبی، این مشکلات را حل می‌کند و افزودن سورفکتانت به افزایش پایداری لاملا کمک می‌کند. فوم با افزایش ویسکوزیته، کاهش تنش سطحی و هدایت جریان به لایه‌های کم تراوا به بهبود برداشت نفت کمک می‌کند.

<sup>۱</sup> همدم مجدتموری (دانشکده مهندسی نفت و گاز، تبریز، ایران، h\_majdteymouri400@sut.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> محمد سیم‌جو (دانشکده مهندسی نفت و گاز، تبریز، ایران، simjoo@sut.ac.ir)

<sup>۳</sup> محمد چهاردولی (دانشکده مهندسی نفت و گاز، تبریز، ایران، chahardoli@sut.ac.ir)

دو روش تولید فوم شامل تزریق همزمان گاز و سورفکتانت یا تزریق متناوب آن‌ها وجود دارد [۳،۴]. مدل‌سازی سنتی پارامترهای مهمی مثل دما و فشار را در نظر نمی‌گیرد و مدل‌های پروکسی هوشمند جایگزین کارآمدتری هستند. این مدل‌ها با استفاده از پارامترهای ورودی منتخب، نتایج شبیه‌سازی را با دقت بالا تکرار می‌کنند و در بهینه‌سازی تولید و پیش‌بینی بازیافت نفت کاربرد دارند. همچنین، این مدل‌ها می‌توانند در تعیین عدم قطعیت، تطابق تاریخچه، بهینه‌سازی تولید، بهینه‌سازی زمان‌بندی چاه و پیش‌بینی احتمالی بازیافت نفت مؤثر باشند. برای ساخت این مدل‌ها، آشنایی با یادگیری ماشین لازم است [۵]. آلماسو و همکاران با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز مخزن، یک مدل پروکسی هوشمند برای بهینه‌سازی پارامترهای تزریق گاز کربن‌دی‌اکسید در یک مخزن ناهمگن در آمریکای شمالی به مدت ۶۰۰ روز ساختند. پارامترهای ورودی شامل فشار ته چاه، نرخ و مدت زمان تزریق و تولید بودند. از دو الگوریتم رگرسیون حداقل مربعات و رگرسیون فرایند گاوسی استفاده شد که ارزش فعلی مخزن را به ترتیب از ۳۰۴۱/۱ میلیون دلار به ۴۱۸۵/۱ و ۴۱۸۴/۱ میلیون دلار افزایش دادند. ضریب همبستگی الگوریتم‌ها به ترتیب ۰/۹۵۸ و ۰/۹۵۱ بود [۶]. هونگ و همکاران با استفاده از شبکه عصبی رگرسیون عمومی و چندین مدل دیگر، با جمع‌آوری ۲۶۰ داده شامل پارامترهایی چون تراوایی و اشباع اولیه نفت، به پیش‌بینی بازیافت نفت پرداختند. شبکه عصبی رگرسیون عمومی با دقت ۰/۹۹۹ بهترین عملکرد را داشت و مشخص شد که اشباع اولیه نفت بیشترین تأثیر را بر بازیافت نفت دارد [۷].

## ۲. روش انجام مطالعه

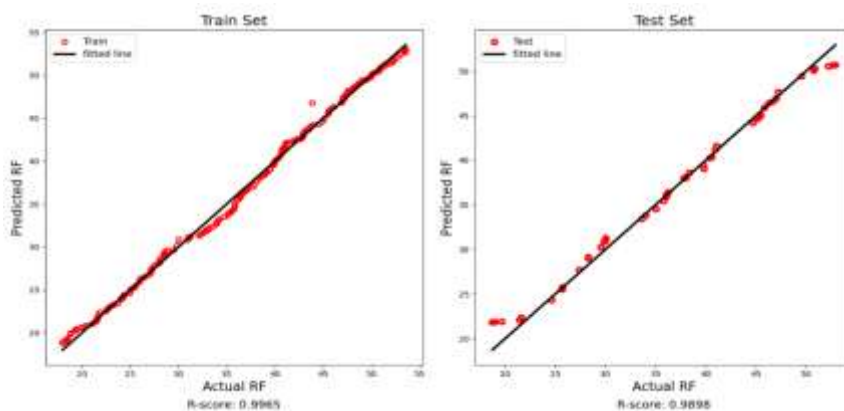
در این مطالعه به بررسی تأثیر تزریق فوم بر میزان بازیافت نفت و تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف فوم و مخزن مانند تراوایی، تخلخل، ابعاد ماتریس، اشباع اولیه و بحرانی نفت و ویسکوزیته فوم پرداخته شده است. ابتدا با استفاده از داده‌های مطالعات گذشته و شبیه‌سازی مخزن، ۲۵۲ داده جمع‌آوری شد و مدل پروکسی هوشمند با استفاده از دو الگوریتم یادگیری ماشین، ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی، توسعه یافت [۸،۹]. جنگل تصادفی به عنوان الگوریتم یادگیری تجمعی با ترکیب پیش‌بینی‌های چندین درخت تصمیم‌گیری و ماشین بردار پشتیبان به عنوان الگوریتم یادگیری نظارت‌شده با تعیین بهترین ابرصفحه برای جداسازی کلاس‌ها عمل می‌کنند [۱۰]. پارامترهای ورودی این الگوریتم‌ها در جدول ۱ آورده شده است. برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها و کاهش ریسک بیش‌برازش، بخشی از داده‌ها به طور سیستماتیک برای آموزش و بخشی دیگر برای ارزیابی استفاده شدند. همچنین، از اعتبارسنجی متقاطع با تقسیم‌بندی پنج‌تایی برای مقابله با بیش‌برازش استفاده شد. این روش شامل تقسیم داده‌های آموزشی به پنج زیرمجموعه مجزا و طی پنج تکرار، استفاده از هر زیرمجموعه برای اعتبارسنجی است. مدل‌ها با معیارهایی مانند ضریب همبستگی ( $R^2$ )، میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین مربعات خطا (MSE) و خطای میانگین جذر مربعات (RMSE) ارزیابی شدند.

جدول ۱: پارامترهای ورودی مدل پروکسی هوشمند جمع‌آوری شده از شبیه‌ساز مخزن

| مقدار        | پارامتر                              |
|--------------|--------------------------------------|
| ۱۰۰۰ - ۱۰۰۰۰ | تراوایی شکاف (D)                     |
| ۵ - ۱۶       | تراوایی ماتریس (mD)                  |
| ۰/۰۵ - ۰/۳۵  | تخلخل ( $\phi$ )                     |
| ۲ - ۴۰       | ارتفاع ماتریس (m)                    |
| ۴۰ - ۲       | عرض ماتریس (m)                       |
| ۱۰ - ۳۰      | ویسکوزیته فوم (cP)                   |
| ۰/۷ - ۰/۹    | اشباع اولیه نفت                      |
| ۱۰۰ - ۲۰۰    | نرخ تزریق فوم ( $\frac{ft^3}{day}$ ) |
| ۰/۲ - ۰/۵    | اشباع بحرانی نفت                     |

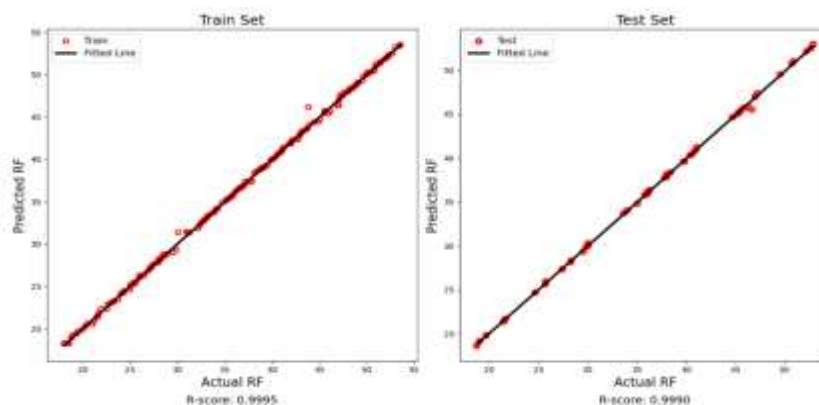
### ۳. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مدل‌های پروکسی هوشمند با استفاده از دو الگوریتم یادگیری ماشین، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان، ساخته شدند. برای آموزش مدل‌ها، ۸۰٪ از داده‌ها برای آموزش و ۲۰٪ برای آزمون استفاده شد. اعتبارسنجی متقابل با تقسیم داده‌ها به پنج زیرمجموعه و استفاده دوره‌ای از هر زیرمجموعه برای اعتبارسنجی و آموزش مابقی داده‌ها انجام شد. در الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، برای پیش‌بینی میزان بازیافت نفت، از کرنل RBF با درجه ۲، مقدار گاما ۰/۰۰۱، مقدار C برابر ۱۰۰ و مقدار اپسیلون ۰/۱ استفاده شد. در الگوریتم جنگل تصادفی، پارامترها شامل عمق ۱۱، تعداد برآوردکننده‌ها ۱۲ و حداقل نمونه تقسیم ۵ بودند. این روش ۱۰۰ بار تکرار شد و معیارهای آماری مانند ضریب همبستگی، میانگین خطای مطلق، میانگین مربعات خطا و خطای میانگین جذر مربعات محاسبه و در جدول ۲ نشان داده شد. هر چه نقطه‌ای به خط قطری نزدیک‌تر باشد، پیش‌بینی الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای آن مورد دقیق‌تر است. شکل ۱ نشان‌دهنده کاربرد الگوریتم ماشین بردار پشتیبان و شکل ۲ نشان‌دهنده کاربرد الگوریتم جنگل تصادفی برای پیش‌بینی میزان بازیافت نفت هستند. نتایج به دست آمده از ارزیابی و کراس پلات‌ها نشان داد که جنگل تصادفی عملکرد بهتری نسبت به ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی میزان بازیافت نفت دارد.



شکل ۱: کراس پلات الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای داده‌های آموزش و آزمون جهت پیش‌بینی میزان بازیافت نفت

| میزان ضریب بازیابی نفت |        |        |        | دیتاست         | الگوریتم‌های یادگیری ماشین |
|------------------------|--------|--------|--------|----------------|----------------------------|
| $R^2$                  | RMSE   | MSE    | MAE    |                |                            |
| ۰/۹۹۶۵                 | ۰/۵۹۷۱ | ۰/۳۵۶۵ | ۰/۴۴۵۳ | داده‌های آموزش | ماشین بردار پشتیبان        |
| ۰/۹۸۹۸                 | ۰/۹۵۹۹ | ۰/۹۲۱۵ | ۰/۶۳۷۹ | داده‌های آزمون |                            |
| ۰/۹۹۹۵                 | ۰/۲۳۶۶ | ۰/۰۵۴۶ | ۰/۱۴۵۴ | داده‌های آموزش | جنگل تصادفی                |
| ۰/۹۹۹۰                 | ۰/۲۵۶۴ | ۰/۰۶۵۷ | ۰/۱۴۸۳ | داده‌های آزمون |                            |



شکل ۲: کراس پلات الگوریتم جنگل تصادفی برای داده‌های آموزش و آزمون جهت پیش‌بینی میزان بازیافت نفت

جدول ۲: معیارهای ارزیابی داده‌های آموزش و آزمون برای پیش‌بینی میزان ضریب بازیابی نفت

#### ۴. فهرست مراجع

- [1] L. Eriksson, Modeling and Control of TC SI and DI engines, Oil Gas Sci. Technol. 63 (2008) 9–19. <https://doi.org/10.2516/ogst>.
- [2] V. Alvarado, E. Manrique, Enhanced Oil Recovery: An Update Review, (2010) 1529–1575. <https://doi.org/10.3390/en3091529>.
- [3] R. Farajzadeh, A. Andrianov, P.L.J. Zitha, Investigation of immiscible and miscible foam for enhancing oil recovery, Ind. Eng. Chem. Res. 49 (2010) 1910–1919. <https://doi.org/10.1021/ie901109d>.
- [4] H. Guo, R. Faber, M. Buijse, P.L.J. Zitha, A novel alkaline-surfactant-foam EOR process, Soc. Pet. Eng. - SPE Enhanc. Oil Recover. Conf. 2011, EORC 2011. 2 (2011) 1475–1491. <https://doi.org/10.2118/145043-ms>.
- [5] E. Motaei, T. Ganat, Smart proxy models art and future directions in the oil and gas industry: A review, Geoenergy Sci. Eng. 227 (2023) 211918. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211918>.
- [6] A. Almasov, M. Onur, A.C. Reynolds, U. Tulsa, SPE-200360-MS Production

- Optimization of the CO<sub>2</sub> Huff-N-Puff Process in an Unconventional Reservoir Using a Machine Learning Based Proxy, (2020).
- [7] H. Vo, D. Sheini, H. Zhang, B. Min, Machine-learning-based prediction of oil recovery factor for experimental CO<sub>2</sub>-Foam chemical EOR: Implications for carbon utilization projects, *Energy*. 278 (2023) 127860. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127860>.
- [8] A. Zoeir, M. Chahardowli, M. Simjoo, Foam Application in Fractured Carbonate Reservoirs: A Simulation Study, *Pet. Eng. Iran. J. Oil Gas Sci. Technol.* 8 (2019) 18–34. <https://doi.org/10.22050/IJOGST.2019.147229.1476>.
- [9] R. Farajzadeh, B.M. Wassing, P.M. Boerrigter, Foam assisted gas-oil gravity drainage in naturally-fractured reservoirs, *J. Pet. Sci. Eng.* 94–95 (2012) 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.06.029>.
- [10] M. Christopher M. Bishop, Jordan, J. Kleinberg, *Pattern Recognition and Machine Learning*, n.d.





## بررسی اثر نفوذپذیری ذاتی اولیه آبخوان تحت تزریق گاز کربن دی اکسید

### بر روی توزیع فشار گاز در آن

مهدی ولی‌پور\*؛ میلاد جبارزاده؛ حامد صادقی<sup>۳</sup>

#### چکیده

گاز کربن دی اکسید یکی از گازهای گلخانه‌ای مهم و اثرگذار در پدیده گرمایش جهانی است. یکی از روش‌های کاهش اثرات گاز کربن دی اکسید بر روی اتمسفر و محیط زندگی انسان‌ها، دفن کردن این گاز در مخازن عمیق در زیرزمین می‌باشد. امروزه دفن گاز کربن دی اکسید در لایه‌های زیرزمینی یکی از رایج‌ترین و ضروری‌ترین روش‌ها برای جلوگیری از انتشار بی‌رویه این گاز به اتمسفر کره زمین تلقی می‌شود. از آن جایی که نفوذپذیری ذاتی لایه آبخوان اثر بسیار مهمی در مشخصات مربوط به جریان دوفازی به هنگام تزریق گاز کربن دی اکسید در آن دارد، پژوهش حاضر با انجام یک مطالعه هیدرولیکی پارامتریک، روابطی را برای محاسبه مقدار فشار بیشینه گاز در مخزن مورد تزریق و نیز فاصله‌ای از محل تزریق در مخزن که بعد از مدت زمانی تزریق دو ساله خصوصیات جریان دوفازی سیال در آن حاکم است بر اساس نفوذپذیری ذاتی اولیه مخزن ارائه می‌دهد. مدل‌سازی عددی پژوهش حاضر با استفاده از برنامه تحلیل اجزای محدود CODE\_BRIGHT و به صورت تحلیل دوبعدی متقارن محور صورت گرفت. نتایج حاصل از پژوهش نشان می‌دهد که مقدار مربوط به فشار بیشینه گاز در مخزن مورد تزریق از یک رابطه نمایی بر حسب نفوذپذیری ذاتی مخزن تبعیت می‌کند. هم‌چنین فاصله‌ای از محل تزریق در مخزن که در اثر تزریق گاز خصوصیات جریان دوفازی در آن حاکم است، یک رابطه لگاریتمی بر حسب نفوذپذیری ذاتی مخزن دارد.

#### کلیدواژه‌ها

دفن گاز کربن دی اکسید؛ ذخیره‌سازی ژئولوژیکی، جریان دوفازه؛ مدل‌سازی هیدرولیکی

#### ۱. مقدمه

امروزه موضوع بررسی کاهش گازهای گلخانه‌ای و به خصوص کربن دی اکسید موضوع تحقیق اکثر محققین می‌باشد. یکی از راه‌هایی که برای جلوگیری از انتشار گاز کربن دی اکسید به اتمسفر زمین در متون فنی پیشنهاد شده‌است، دفن این گاز توسط تزریق آن در لایه‌های مستعد در اعماق زمین است [۱]. بدین ترتیب بررسی اندرکنش

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [mehdi.valipour799@sharif.edu](mailto:mehdi.valipour799@sharif.edu)

\* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [milad.jabbarzadeh@sharif.edu](mailto:milad.jabbarzadeh@sharif.edu)

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [hsadeghi@sharif.edu](mailto:hsadeghi@sharif.edu)

بین گاز تزریق شده و محیط متخلخل دارای اهمیت بالایی در امور مهندسی از جمله مهندسی ژئوتکنیک و ژئوتکنیک زیست محیطی می‌باشد. تاکنون در مطالعات گذشته جریان دوفازی در محیط متخلخل با در نظر گیری جریان آب و گاز بررسی شده است [۲]. هم‌چنین گاز می‌تواند به صورت طبیعی در اثر اندرکنش خاک و اتمسفر در ناحیه غیراشباع خاک حضور داشته باشد [۳،۴،۵،۶]. در اثر تزریق گاز در لایه‌های خاکی تغییراتی در ساختار خاک در اثر اندرکنش میان گاز تزریقی و خاک به وجود می‌آید [۷،۸،۹]. نتایج حاصل از پژوهش [۲،۷،۸] نشان‌دهنده این است که به هنگام تزریق گاز در خاک، بسته به مقدار اولیه نفوذپذیری ذاتی خاک، ممکن است در داخل خاک ترک‌های داخلی رخ دهد. هدف این پژوهش بررسی اثر نفوذپذیری ذاتی اولیه آبخوان تحت تزریق گاز کربن دی اکسید بر روی توزیع فشار گاز در آن است.

## ۲. مدل عددی هیدرولیکی

در این پژوهش برای تحلیل مسأله هیدرولیکی با در نظر گیری جریان دوفازی گاز و مایع از برنامه اجزای محدود CODE\_BRIGHT [۷] با مجوز خریداری شده و قانونی استفاده شد. برنامه حاضر ابزار بسیار مناسبی برای انجام تحلیل‌های کاملاً همبسته است. در این پژوهش، برای تعریف جریان دوفازی در محیط متخلخل از دو مجموعه معادلات حاکم بر مسأله شامل معادلات تعادل و معادلات رفتاری استفاده شد. معادلات تعادل شامل تعادل جرمی آب و هوا در محیط متخلخل بوده و معادلات رفتاری شامل تعریف قوانین حاکم بر جریان همرفتی در محیط متخلخل می‌شوند.

### ۱،۲ چارچوب نظری مدل عددی

برای بررسی مسئله هیدرولیکی، دو معادله تعادل جرمی هوا (۱) و آب (۲) به ترتیب به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$\frac{\partial \left( (\omega_l^a \rho_l S_l + \omega_g^a \rho_g S_g) \phi \right)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{j}_l^a + \mathbf{j}_g^a) = f^a \quad (5)$$

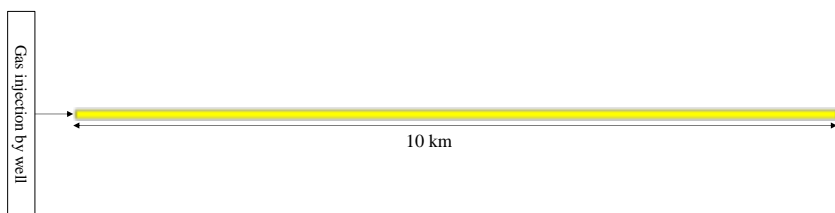
$$\frac{\partial \left( (\omega_l^w \rho_l S_l + \omega_g^w \rho_g S_g) \phi \right)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{j}_l^w + \mathbf{j}_g^w) = f^w \quad (6)$$

این دسته از معادلات به ترتیب منجر به محاسبه فشار گاز ( $P_g$ ) و فشار مایع ( $P_l$ ) در محیط متخلخل خاک می‌شوند. شارهای همرفتی ( $\mathbf{j}_l, \mathbf{j}_g$ ) به عنوان مجهولات معادلات تعادل از طریق تعریف معادلات رفتاری محاسبه شدند. بدین منظور، جهت محاسبه جریان همرفتی آب و گاز در محیط متخلخل از قانون دارسی تعمیم یافته استفاده شد. تغییرات نفوذپذیری به تغییرات تخلخل از طریق رابطه کوزنی ارتباط داده شد و برای تعریف منحنی نگه‌داشت آب - خاک از رابطه ون‌گنوختن استفاده شد. مسأله حاضر در شرایط هم‌دما انجام شد.

### ۲،۲ هندسه مورد بررسی و شرایط مرزی

هندسه مورد بررسی در این پژوهش در شکل نشان داده شده است. مخزنی به طول ۱۰ کیلومتر و با عمق ۱۰۰ متر و قرار گرفته در عمق ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰ متری از سطح زمین مورد بررسی واقع شد. در شکل که برشی جانبی از مخزن مورد بررسی در پژوهش است، این مخزن با رنگ زرد نمایش داده شده است. از مرز قائم چپ مخزن تزریق گاز کربن دی اکسید به مخزن صورت می‌گیرد. تحلیل‌ها شامل تزریق گاز کربن دی اکسید به مدت ۷۳۰ روز (دوسال) می‌شود. تزریق با استفاده از لوله‌ای که دارای قطر ۳۰ سانتی‌متر است انجام می‌شود. هم‌چنین لایه مربوط به مخزن به صورت شعاعی گسترش یافته است. تخلخل اولیه مخزن برابر با ۰/۱۵ در نظر گرفته شد.

خصوصیات ماده استفاده‌شده در مدل عددی در جدول ارائه شده‌است. گاز با نرخ  $0/84$  کیلوگرم بر ثانیه از طریق مرز قائم سمت چپ به داخل مخزن تزریق می‌شود. تحلیل اجزای محدود مخزن با در نظر گیری  $510$  المان دو بعدی و در حالت متقارن محور انجام شد. لایه سنگی دیگری نیز در انتهای راست مخزن در نظر گرفته شد که از آن برای اعمال شرایط مرزی هیدرولیکی به محیط مورد بررسی استفاده می‌شود. خصوصیات هیدرولیکی مربوط به این لایه نیز در جدول ارائه شده‌است. همچنین تخلخل این لایه نیز برابر با  $0/3$  در تحلیل‌ها در نظر گرفته شد. با استفاده از موارد بیان‌شده، مطالعه پارامتریکی برای بررسی اثر تغییرات نفوذپذیری ذاتی مخزن در تغییرات خصوصیات هیدرولیکی و دوفازی جریان انجام شد. بدین منظور، همان‌طور که از جدول نیز قابل مشاهده است، از آن جا که رفتار هیدرولیکی مخزن حاوی گاز کربن دی اکسید تابع نفوذپذیری ذاتی اولیه آن است، با اختصاص نفوذپذیری‌های اولیه متفاوت به بررسی رفتار هیدرولیکی مخزن تحت جریان دوفازی آب و گاز پرداخته‌شد.



شکل ۱: شکل شماتیک جانی مخزن مورد بررسی در پژوهش

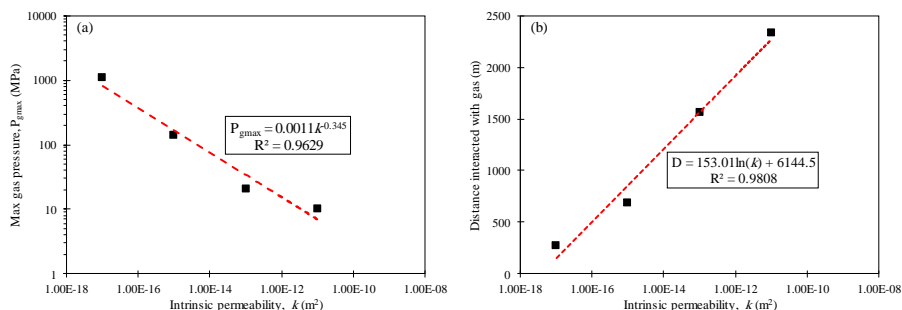
جدول ۱: خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده مخزن و لایه سنگی مورد بررسی در پژوهش

| نام پارامتر  | مقدار مربوطه برای مخزن                            | مقدار مربوطه برای لایه سنگی |
|--|---|-----------------------------|
| <b>منحنی نگه‌داشت آب</b>                                 |   |                             |
| مقدار اندازه‌گیری‌شده فشار در دمای معین، $P$ (مگاپاسکال) | $0/02$  | $0/01$                      |
| کشش سطحی، $\sigma$ (نیوتون بر متر)                       | $0/072$   | $0/072$                     |
| تابع شکل، $\lambda$                                      | $0/8$   | $0/8$                       |
| بیشینه اشباع‌شدگی، $S_{IG}$                              | $1$   | $1$                         |
| پارامتر اثر تخلخل بر منحنی نگه‌داشت، $a$                 | $0/001$   | $0$                         |
| <b>نفوذپذیری ذاتی</b>                                    |   |                             |
| نفوذپذیری ذاتی (متر مربع)                                | $10^{-17}$ و $10^{-15}$ و $10^{-13}$ و $10^{-11}$ | $10^{-10}$                  |
| <b>نفوذپذیری نسبی فازهای گاز و مایع</b>                  |   |                             |
| پارامتر مدل برای فاز گاز و مایع، $A$                     | $1$   | $1$                         |
| پارامتر مدل برای فاز گاز و مایع، $\lambda$               | $3$   | $3$                         |

### ۳. نتایج حاصل از تحلیل عددی

نتایج حاصل از تحلیل عددی اجزای محدود پژوهش در شکل ۱ (الف) و (ب) نشان داده شده‌است. بر اساس شکل ۱ (الف)، با افزایش نفوذپذیری ذاتی مخزن، مقدار مربوط به فشار بیشینه گاز در داخل مخزن به صورت نمایی

کاهش می‌یابد. این بدین دلیل است که زمانی که هدایت هیدرولیکی مخزن بالا باشد، به هنگام تزریق گاز، گاز تزریق شده به راحتی می‌تواند در محیط مخزن گسترش یافته و به عبارتی فضای خالی کافی برای این امر در داخل مخزن وجود دارد و به همین دلیل فشار گاز زیادی در مخزن به وجود نمی‌آید. همین‌طور، بر اساس شکل ۱(ب)، حجمی از مخزن که بعد از دو سال تزریق گاز کربن دی‌اکسید خصوصیات جریان دوفازی در آن حاکم است به صورت لگاریتمی با افزایش نفوذپذیری ذاتی مربوط به مخزن افزایش می‌یابد. به همین دلیل در حالت با نفوذپذیری ذاتی برابر با  $10^{-11}$  متر مربع، حجم بیش‌تری از مخزن دچار تغییرات ساختاری می‌شود.



شکل ۲: تغییرات الف) فشار بیشینه گاز در مخزن و ب) فاصله‌ای از محل تزریق در مخزن که بعد از دو سال تزریق گاز خصوصیات جریان دوفازی سیال در آن حاکم است در برابر نفوذپذیری ذاتی

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از برنامه تحلیل اجزای محدود CODE\_BRIGHT خصوصیات هیدرولیکی مخزن عمیق تحت اثر تزریق گاز کربن دی‌اکسید در مدت زمانی دو ساله مورد بررسی قرار گرفت. طبق تحلیل هیدرولیکی مخزن حاوی گاز کربن دی‌اکسید، به بررسی جریان دوفازی گاز و مایع با استفاده از تعریف معادلات تعادل برای محاسبه فشار گاز و مایع و همچنین معادلات رفتاری برای تعریف جریان همرفتی گاز و مایع پرداخته شد. بنابراین، وابستگی خصوصیات هیدرولیکی مخازن عمیق تحت تزریق گاز کربن دی‌اکسید به نفوذپذیری ذاتی لایه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از پژوهش بیانگر این هستند که با افزایش نفوذپذیری ذاتی، فشار بیشینه گاز در مخزن کاهش یافته و نیز مقدار بیش‌تری از مخزن تحت اثر خصوصیات جریان دوفازی قرار می‌گیرد. همچنین نتایج تحلیل‌های عددی نشان دادند که روند تغییرات فشار بیشینه گاز در مخزن دارای رابطه‌ای نمایی با نفوذپذیری ذاتی می‌باشد. همچنین مقدار فاصله‌ای از محل تزریق در مخزن که در آن خصوصیات دوفازی جریان به دلیل تزریق گاز حاکم است، دارای رابطه‌ای لگاریتمی با نفوذپذیری ذاتی می‌باشد.

#### ۵. فهرست مراجع

- Kumar, S., Foroozesh, J., Edlmann, K., Rezk, M. G., & Lim, C. Y. (2020). A comprehensive review of value-added CO<sub>2</sub> sequestration in subsurface saline aquifers. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 81, 103437. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103437>
- Alfonso Rodriguez-Dono, Yunfeng Zhou, Sebastia Olivella, Antonio Gens, Modelling a gas injection experiment incorporating embedded fractures and heterogeneous material properties, *Geomechanics for Energy and the Environment*, Volume 38, 2024, 100552, ISSN 2352–3808, <https://doi.org/10.1016/j.gete.2024.100552>
- S. Tourchi, M. Jabbarzadeh, H. Sadeghi and A.A. Lavasan, "Thermo-hydro-mechanical modelling of rock cliff-atmosphere interaction: the case of the Pozary test site in

- Czechia," In *EGU, Copernicus Meetings, Austria, 2024*.  
<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-20407>
- M.J. Ghandilou, S. Turchi and H. Sadeghi, "Numerical investigation of cyclic wetting and drying of Boom clay based on the Barcelona Expansive Model," In *84th EAGE Annual Conference & Exhibition*, vol. 2023, No. 1, pp. 1-5, 2023.  
<https://doi.org/10.3997/2214-4609.202310400>
- M.J. Ghandilou, S. Turchi, A.G. Darzi and H. Sadeghi, "Numerical modeling of volumetric behavior of unsaturated expansive soil under wetting and drying cycles," In *5th Iranian Conference on Geotechnical Engineering*, 2023.  
<https://www.researchgate.net/publication/377265206>
- M. Jabbarzadeh, H. Sadeghi, S. Turchi and A.G. Darzi, "Thermo-hydraulic analysis of desiccation cracked soil strata considering ground temperature and moisture dynamics under the influence of soil-atmosphere interactions," *Geomechanics for Energy and the Environment*, p.100558, 2024.  
<https://doi.org/10.1016/j.gete.2024.100558>
- Mwenketishi, G. T., Benkreira, H., & Rahmanian, N. (2023). A Comprehensive Review on Carbon Dioxide Sequestration Methods. *Energies*, 16(24), 7971.  
<https://doi.org/10.3390/en16247971>
- M. Valipour, M. Jabbarzadeh and H. Sadeghi, "The influence of different hydraulic conductivities on two-phase flow characteristics of gas-injected sand-bentonite soil considering embedded fractures," In *14th National Congress on Civil Engineering*, 2024. <https://www.researchgate.net/publication/380760042>
- Z. Mousavi and F. Jafarzadeh, "The influence of gradation on shear behavior of Glass Beads: A DEM study," In *۴۰۲۴ National Congress on Civil Engineering*.  
<https://www.researchgate.net/publication/380667931>



## تخمین تراوایی نسبی سنگ مخزن ناهمسانگرد با استفاده از پردازش داده دیجیتال

احمد زعیر<sup>۱</sup>؛ جعفر قاجار<sup>۲\*</sup>؛ احسان نیکویی<sup>۳</sup>

### چکیده

در این مقاله با حل همزمان قانون دارسی و معادله استوکس به محاسبه تراوایی نسبی سه فازیه پرداختیم. برای انجام محاسبات ابتدا شبکه حفرات به هم پیوسته از داده سی تی اسکن استخراج و توزیع سیالات درون حفرات در جریان دو فازیه پیش بینی شد. سپس با استفاده از معادلات پیوستگی و مومنتوم به محاسبه توزیع فشار هر یک از فازها در شبکه حفرات پرداخته شد. در ادامه، دبی جریان عبوری و فشار دیفرانسیلی پیرامون برش‌های عمود بر جهت جریان، برای محاسبه تراوایی موثر مورد استفاده قرار گرفت. سپس مقادیر تراوایی موثر با توجه به میزان اشباع سیالات در هر یک از برش‌ها جهت تعیین منحنی‌های تراوایی نسبی دو فازیه استفاده شد. نتایج نشان دادند که توابع پیش‌بینی توزیع سیال دارای دقت کافی برای محاسبه تراوایی نسبی چند فازیه در مقیاس مغزه می‌باشند. نتایج همچنین نشان می‌دهند که استفاده از تصویر تفکیک شده حجم نماینده پایه در محاسبات پارامترهای محیط متخلخل روش کارآمدتری نسبت به استفاده از مدل‌های ساده شده شبکه حفرات لستخراج شده از داده‌های میکرو سی تی می‌باشد.

### کلیدواژه‌ها

داده دیجیتال؛ تراوایی نسبی؛ سنگ مخزن ناهمسانگرد؛ اشباع سیالات

### ۱. مقدمه

برخلاف روش‌های معمول اندازه‌گیری که در آن‌ها خواص اصلی همیشه پس از هر مرحله کمی تغییر می‌کند، در روش تصویربرداری اشعه ایکس، نمونه‌های مغزه در معرض آسیب جدی قرار نمی‌گیرند. علاوه بر آن، تکنیک میکرو سی تی امکان تجزیه و تحلیل نمونه سنگ شکننده و تثبیت نشده، برش‌های دیواره جانبی و قطعات کوچک مغزه فراهم می‌کند. نفوذپذیری ذاتاً تابعی از ساختار داخلی نمونه سنگ است، یعنی عمدتاً به پیچ‌خوردگی، نسبت منافذ و توپولوژی بستگی دارد. با این حال،

<sup>۱</sup> بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، [ah.zoeir@hafez.shirazu.ac.ir](mailto:ah.zoeir@hafez.shirazu.ac.ir)

<sup>۲</sup> بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، [jqajar@shirazu.ac.ir](mailto:jqajar@shirazu.ac.ir)

بخش علوم زمین، دانشگاه اوترخت، اوترخت، هلند [j.qajar@uu.nl](mailto:j.qajar@uu.nl)

\* نویسنده مسئول

<sup>۳</sup> بخش مهندسی راه، ساختمان و محیط زیست، دانشکده مهندسی مواد و عمران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، [enikooee@shirazu.ac.ir](mailto:enikooee@shirazu.ac.ir)

هیچ رابطه دقیقی برای همبستگی نفوذپذیری سنگ های واقعی به چنین پارامترهای ساکن وجود ندارد، اگرچه چندین همبستگی ساده شده پیشنهاد شده است. بنابراین باید معادلات اساسی بقای جرم و انتقال را حل کرد که سعی می‌کند فیزیک مربوطه را در مقیاس منافذ مستقیماً بر روی تصویر یا نمایش‌های ساده‌شده شبکه منافذ متصل به تصویر بکشد. اگرچه مدل‌های شبکه هندسه و توپولوژی پیچیده ساختارهای منفذی را ساده می‌کنند، اما هنوز نمی‌توانند ویژگی‌های هندسی پیچیده ساختار منفذی اصلی را به تصویر بکشند [۱۰-۱]. در این مقاله، ما نفوذپذیری سه فاز گاز/نفت/آب را در مطالعات موردی ماسه سنگ تخمین زدیم که فایل‌های داده میکروسیتی آنها موجود بود. منحنی‌های نفوذپذیری نسبی دو فاز نفت/آب و گاز/نفت از حل معادله استوکس در شبکه فاز متصل استخراج شده در مطالعات موردی با توجه به توزیع سیال دو فاز نفت/آب و گاز/نفت در هر منفذ محاسبه شد. سپس از معادله استون برای به دست آوردن نمودارهای سه تایی نفوذپذیری نسبی سه فاز از منحنی‌های نفوذپذیری نسبی مربوط به دو فاز استفاده شد. تازگی این مطالعه در مقایسه با تمام کارهای قبلی این است که ما نفوذپذیری نسبی چند فازی را برای شرایط آشام و ریزش با تنظیم زوایای تماس متوسط مختلف گزارش شده برای هر فرآیند محاسبه کردیم. علاوه بر آن، از آنجایی که محققان معمولاً از مدل‌سازی شبکه منفذی برای ساده‌سازی ساختار داخلی رسانه متخلخل پیچیده استفاده می‌کنند، تفاوت دیگر این تحقیق با چنین مطالعاتی این است که با کاهش حجم داده، نیاز به این فرآیند زمان‌بر را از بین بردیم.

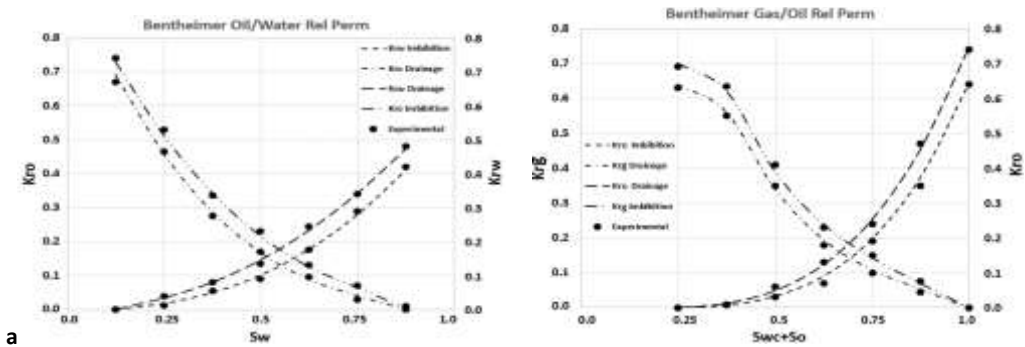
## ۲. روش انجام محاسبات

ویژگی‌هایی مانند اندازه متوسط کانال، مساحت سطح و تخلخل را می‌توان از تصاویر دو بعدی جدا شده محاسبه کرد، در حالی که ویژگی‌های جریان مانند نفوذپذیری را نمی‌توان محاسبه کرد، زیرا شبکه متصل منفذی را نمی‌توان از دامنه دو بعدی به حوزه سه بعدی گسترش داد. ما از گزینه شش متصل برای وکسل‌ها استفاده کردیم که به طور گسترده برای به دست آوردن اتصال منافذ در فرآیند داده میکروسیتی سنگ مخزن استفاده می‌شود. توزیع فاز برای میزان اشباع محاسبه شد، از همبستگی یک فاز تا باقیمانده فاز دیگر. در هر اشباع کلی، فضای اشغال شده با هر فاز در هر منفذ را با این فرض که میانگین اشباع در هر مقطع عمود بر جهت جریان برابر با اشباع کلی است، تخمین زدیم. یک دیفرانسیل فشار در سطح داده های میکروسیتی به صورت متعامد با محور مطالعه موردی نمونه مرکزی قرار می‌گیرد و نرخ جریان متناظر با فرض شرایط بدون جریان برای دیگر وجوه نمونه مغزه و شرایط بدون لغزش در مایع جامد محاسبه می‌شود.

میدان سرعت با حل معادلات استوکس و بقای جرم در داده های تصویر دیجیتالی تعیین می‌شود. برای این منظور، ما مقاطع شبکه منفذی را به عنوان مجرای بسته در نظر گرفتیم و میانگین قطرهای هیدرولیکی آنها را در فضاهای اشغال شده با فازهای تر و غیرترکننده محاسبه کردیم. در واقعیت، وکسل‌های منفذی که در تماس با فاز جامد هستند، وضعیت بدون لغزش را نشان می‌دهند، در حالی که آنهایی که در مرکز منافذ قرار دارند، بیشترین سرعت خطی را دارند. برای تنظیم این اثر ما از تبدیل فاصله اقلیدسی به عنوان راه حلی برای این تضاد استفاده کردیم. به وکسل‌های منافذی که با فاز جامد در تماس هستند، عدد صفر و به وکسل‌های منافذی که از فاز جامد دورتر هستند، عدد بزرگ‌تر را اختصاص می‌دهد. این عدد با افزایش فاصله وکسل از فاز جامد افزایش می‌یابد.

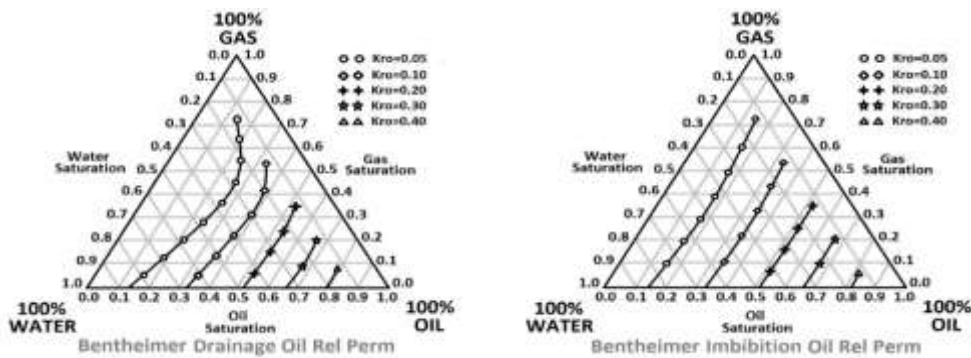
## ۳. نتایج محاسبات

توابع همبستگی نوع کوری برای به دست آوردن منحنی‌های نفوذپذیری نسبی آب و نفت استفاده می‌شود در حالی که منحنی‌های نوع LET برای همبستگی داده های نفوذپذیری نسبی گاز استفاده می‌شود. دلیل انجام این کار این است که مقادیر محاسبه شده و همچنین مقادیر گزارش شده نفوذپذیری گاز افزایش کاهش سرعت را در نزدیکی اشباع سیال غیر قابل کاهش نشان می‌دهد. منحنی‌های نفوذپذیری نسبی دو فاز محاسبه‌شده نفت/آب و گاز/نفت با داده‌های تجربی گزارش شده مطابقت خوبی دارند. برآورد نفوذپذیری نسبی برای دو فرآیند آشام و ریزش در مطالعه موردی ماسه سنگ انجام شد. زاویه تماس بین سیالات ترکننده و غیرترکننده با توجه به مقدار متوسط گزارش شده برای محاسبه توزیع فاز تنظیم شد. در طول فرآیند آشام در آب ترکننده نمونه مغزه نفوذپذیری نسبی نفت کمتر از فرآیند جذب است. برعکس نفوذپذیری نسبی آب در فرآیند آشام بیشتر از جذب است. این دلیل تفاوت بین منحنی‌های نفوذپذیری نسبی آب و نفت در فرآیندهای آشام و ریزش در مطالعه موردی ماسه سنگ است.



شکل ۱: مقایسه مقادیر تراوایی نسبی محاسبه شده و آزمایشگاهی

منحنی‌ها مناطقی را در نمودار سه تایی که در آنها اشباع آب یا نفت کوچکتر از مقادیر تقلیل ناپذیر مربوطه است، پوشش نمی‌دهند. نفوذپذیری نسبی نفت بالاتر در شرایطی با اشباع نفت بالاتر و حداقل (صفر) اشباع گاز رخ می‌دهد. همانطور که اشباع نفت در محیط متخلخل کاهش می‌یابد، نفوذپذیری نسبی نفت با افزایش ترتیب کاهش می‌یابد. نفوذپذیری نسبی نفت در مطالعه موردی ماسه سنگ به ندرت به ۰.۵ حتی در بالاترین اشباع نفت می‌رسد. نتایج محاسبه شده نشان می‌دهد که نفوذپذیری مؤثر نفت در طول فرآیند آشام کمتر از نفوذپذیری مؤثر تحت فرآیند جذب است. اشباع نفت در مقادیر کمتر تأثیر بیشتری بر این رفتار دارد و در اشباع‌های بالاتر تأثیر خود را از دست می‌دهد.



شکل ۲: مقادیر محاسبه شده تراوایی نسبی سه فازی آشام و ریزش

#### ۴. فهرست مراجع

- T. Ramstad, P. E. Oren, S. Bakke, "Simulation of Two Phase Flow in Reservoir Rocks Using a Lattice Boltzmann Method", SPE Journal, 15, 917-927, 2010.
- C. J. Landry, Z. T. Karpyn, O. Ayala, "Relative Permeability of Homogenous-Wet and Mixed-Wet Porous Media as Determined by Pore-Scale Lattice Boltzmann Modeling", Water Resources Research, 50, 3672-3689, 2014.



- F. Hussain, W. V. Pinczewski, Y. Cinar, J. Y. Arns, C. H. Arns & M. L. Turner ,  
 “Computation of Relative Permeability from Imaged Fluid Distributions at the  
 Pore Scale”, *Transport in Porous Media*, 104, 91-107, 2014.
- M. J. Blunt, B. Dong, P. Mostaghimi, O. Gharbi, “Pore-Scale Imaging and  
 Modelling”, *Advances in Water Resources*, 51, 197-216, 2013.
- D. Wildenschild, A. P. Sheppard, “X-Ray Imaging and Analysis Techniques for  
 Quantifying Pore-Scale Structure and Processes in Subsurface Porous Media  
 Systems”, *Advances in Water Resource*, 51, 217-246, 2013.
- M. Piller, G. Schena, M. Nolich, S. Favretto, F. Radaelli, E. Rossi, “Analysis of  
 Hydraulic Permeability in Porous Media: from High Resolution X-ray  
 Tomography to Direct Numerical Simulation”, *Transport in Porous Media* 80:57-  
 78, 2009.
- D. D’Humières, I. Ginzburg, “Viscosity Independent Numerical Errors or Lattice-  
 Boltzmann Models: from Recurrence Equations to Magic Collision Numbers”,  
*Computers & Mathematics with Applications* 58:823-840, 2009.
- D. B. Silin, T. W. Patzek, “Predicting Relative-Permeability Curves Directly from  
 Rock Images”, *Proceedings of SPE annual technical conference exhibition*, New  
 Orlean, LA, SPE 124974, 2009.
- T. Bultreys, J. Van Stappen, J., “Investigating the Relative Permeability Behaviour  
 of Micoporosity-Rich Carbonates and Tight Sandstones with Multi-Scale Pore  
 Network Models”, *American Geophysical Union*, 2016.



## بررسی اثر توزیع ترشوندگی بر قابلیت ذخیره‌سازی هیدروژن در آبدۀ های زیرزمینی ناهمگن در مقیاس منفذ

منصور نظری؛ حسن ماهانی\*؛ شهاب آیت‌اللهی<sup>‡</sup>؛

### چکیده

درک دینامیک جریان هیدروژن و آب در آبدۀ های زیرزمینی برای بهینه‌سازی قابلیت ذخیره‌سازی و بازیابی هیدروژن ضروری است. هدف این مقاله بررسی تأثیر توزیع ترشوندگی سنگ بر الگوی جریان، مکانیسم‌های به دام افتادن و کارایی بازیابی هیدروژن از طریق شبیه‌سازی‌های مستقیم دینامیک سیالات محاسباتی در مقیاس منفذ است. در این خصوص، با در نظر گرفتن توزیع ترشوندگی مختلف با استفاده از شبیه‌سازی عددی مستقیم و تکنیک‌های حجم محدود، معادلات حاکم بر جریان در هندسه‌های واقعی در مقیاس منفذ حل گردیدند. نتایج نشان می‌دهد که در فرآیند تخلیه اولیه (یا ذخیره‌سازی) تغییر ترشوندگی به سمت آب‌دوستی کمتر منجر به افزایش اشباع نهایی هیدروژن می‌شود و فضای بیشتری برای ذخیره‌سازی هیدروژن فراهم می‌کند. دلیل این امر این است که هیدروژن با مقاومت موئینه کمتری مواجه می‌شود و نفوذپذیری مؤثر بیشتری به دست می‌آورد. با این حال، در فرآیند آشام (یا تولید)، به طور جزئی به دام افتادن هیدروژن در حفرات نسبتاً بزرگ افزایش می‌یابد که به دلیل فشار موئینه بیشتر در گلوگاه‌های حفرات است و در نتیجه کارایی برداشت هیدروژن را کاهش می‌دهد. همچنین افزایش انحراف معیار تابع توزیع غیر یکنواخت ترشوندگی به طور چشمگیری به دام افتادن هیدروژن افزایش می‌یابد. از این نتایج برای تعیین ترشوندگی اولیه بهینه برای ذخیره سازی و تولید هیدروژن می‌توان استفاده کرد.

### کلیدواژه‌ها

ذخیره زیرزمینی هیدروژن؛ شبیه سازی مقیاس منفذ؛ توزیع ترشوندگی؛ OpenFOAM؛ اثری های نو

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، mansournzi3@gmail.com

\* نویسنده مسوول

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، hmahani@sharif.edu

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، ayatolahi@gmail.com

## ۱. مقدمه

با توجه به افزایش تقاضا برای انرژی پاک و نیاز به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، ذخیره زیرزمینی هیدروژن به عنوان یک راهکار موثر برای مدیریت تقاضای انرژی و استفاده بهینه از منابع تجدیدپذیر مطرح شده است. ذخیره‌سازی هیدروژن برای مقابله با گرمایش زمین اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا هیدروژن یک منبع انرژی پاک و تجدیدپذیر است که می‌تواند جایگزین سوخت‌های فسیلی شود. استفاده از هیدروژن به عنوان سوخت، انتشار گازهای گلخانه‌ای را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد [۱]. برای ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن، ساختارهای زمین‌شناسی باید ویژگی‌های خاصی داشته باشند تا ایمنی و کارایی مطلوب ذخیره‌سازی زیرزمینی را فراهم کنند. این ویژگی‌ها شامل داشتن حجم خالی زیاد، فشار طبیعی بالا، تراوایی مناسب برای تزریق گاز و پوش سنگ‌های غیرقابل نفوذ برای جلوگیری از نشت هیدروژن به محیط اطراف است. سازندهای نمکی، آبد‌های زیرزمینی و مخازن تخلیه‌شده از جمله ساختارهای زیرزمینی هستند که به طور بالقوه تمامی این ویژگی‌ها را دارا می‌باشند [۲]. در محیط‌های متخلخل طبیعی مانند ساختارهای زیرزمینی، ترشوندگی هیدروژن نسبت به سنگ در زیرزمین به دلیل ناهمگنی شیمیایی سطح سنگ، هندسه منافذ و ترکیب معدنی به صورت غیر یکنواخت توزیع شده است. این عوامل در مجموع، ترشوندگی سنگ‌ها را تعیین می‌کنند [۳]. این غیر یکنواختی در ترشوندگی می‌تواند تأثیرات مهمی بر رفتار جریان سیالات و توزیع آنها در محیط‌های متخلخل داشته باشد. علاوه بر این، بر ظرفیت ذخیره‌سازی هیدروژن، فشار مؤثر، قابلیت تزریق و میزان اشباع باقیمانده هیدروژن نیز اثر می‌گذارد. چالش‌های اصلی ذخیره هیدروژن در آبد‌های زیرزمینی از مکانیسم‌های مقیاس منفذی ناشی می‌شود که جریان چند فاز را در ساختار متخلخل کنترل می‌کنند. با اینکه چندین مطالعه بر روی رفتار جریان در مقیاس بزرگ هیدروژن انجام شده است، تعداد مطالعات تجربی و شبیه‌سازی در مورد رفتار مقیاس منفذی هیدروژن در ساختارهای متخلخل زیرزمینی محدود است. با وجود پیشرفت‌هایی که در مطالعات قبلی در درک جریان چندفازی هیدروژن و آب در مقیاس منفذی حاصل شده است [۴-۶]، هنوز ابهاماتی وجود دارد که نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر می‌باشد. یکی از این ابهامات شامل اثر توزیع غیریکنواخت ترشوندگی بر عملکرد ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن در یک آبد‌ می‌شود. هدف اصلی این مطالعه، بهبود درک ما از تعامل بین پارامترهای مختلف در جریان دوفازی هیدروژن و آب در مقیاس منفذی است. برای این منظور، از شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS) و رویکردهای حجم محدود به همراه در نظر گرفتن تراکم پذیری گاز در هندسه واقعی مقیاس منفذی استفاده شد.

## ۲. روش پژوهش

روش این پژوهش حل معادلات ناویه-استوکس به طور مستقیم برای جریان دوفازی هیدروژن و آب در مقیاس منفذ است. معادلات اساسی که پایستگی جرم و اندازه حرکت را تعیین می‌کنند، در معادلات (۱) تا (۳) ارائه شده‌اند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (۷)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla (P - \rho g h) - g h \nabla \rho + \nabla \cdot \tau + \rho g + F_S \quad (۲)$$

$$\frac{\partial (\alpha_w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_w U) + \nabla \cdot (\alpha_w \alpha_{H_2} U_r) = \alpha_w \alpha_{H_2} \left( \frac{\psi_w}{\rho_w} - \frac{\psi_{H_2}}{\rho_{H_2}} \right) \frac{\partial P}{\partial t} \quad (۳)$$

در اینجا،  $\rho$  چگالی سیال،  $t$  زمان،  $U$  بردار سرعت است،  $\alpha_w$  و  $\alpha_{H_2}$  کسری حجمی آب و هیدروژن هستند، و  $P$  نشانگر فشار است. سمبل‌های  $g$  و  $h$  نیز به ترتیب شتاب جاذبه و ارتفاع سیستم را نشان می‌دهند.  $\tau$  پارامتر تنش

برشی موثر بر جریان و  $F_s$  نمایانگر نیروهای سطحی است.  $U_r$  و  $\psi$  به ترتیب سرعت نسبی و تراکم پذیری هر فاز است.

معادلات (۱) تا (۳) برای حل عددی مستقیم با استفاده از روش حجم محدود (FVM) گسسته سازی شدند؛ رویکرد حجم سیال (VoF) با استفاده از حلگر CompressibleInterFoam از بسته نرم‌افزاری OpenFOAM برای مدل‌سازی جریان چند فاز و پیگیری رابطه بین دو سیال مورد استفاده قرار گرفت. برای ساختن هندسه حاکم بر جریان از تصویر دودویی یک میکرومدل ناهمگن به عنوان پایه برای ساخت هندسه استفاده شد. یک بخش ۱ سانتیمتر در ۱ سانتیمتر از این تصویر به عنوان زمینه مورد بررسی انتخاب و شبکه بندی شد.

در جدول ۱ شرایط مرزی و اولیه شبیه‌سازی‌ها ارائه شده است. دو مجموعه از سناریوهای شبیه‌سازی طراحی شدند تا اثر توزیع ترشوندگی بر نتایج بدست آید. در بخش اول توزیع همگن ترشوندگی با زاویه تماس‌های مختلف برای سیستم در نظر گرفته شده است تا مطلوب‌ترین زاویه تماس برای ذخیره سازی هیدروژن شناسایی شود. در بخش دوم از شبیه‌سازی توزیع غیر یکنواختی از ترشوندگی در نظر گرفته می‌شود و اثر توزیع‌های مختلف بر روی ذخیره سازی و به دام افتادن هیدروژن بررسی می‌شود. هر شبیه‌سازی شامل دو مرحله است: (۱) مرحله تخلیه که در آن هیدروژن از سمت چپ تزریق می‌شود و آب از سمت راست خارج می‌شود، و (۲) مرحله آشام که در آن آب از سمت راست تزریق و هیدروژن از چپ تولید می‌شود.

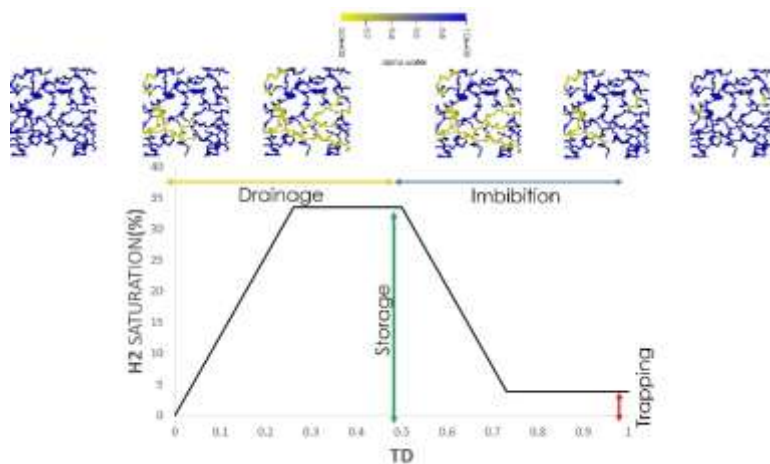
جدول ۱: شرایط مرزی و اولیه سیستم استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها

| شرط اولیه       | شرط مرزی ورودی | شرط مرزی خروجی | شرط مرزی دیواره               | پارامتر           |
|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------|
| $\alpha = 1$    | $\alpha = 0$   | Zero Gradient  | $\Theta_a = 10$ to 90 degrees | آلفا ( $\alpha$ ) |
| P = 300 bar     | P = 300 bar    | Zero Gradient  | Calculated                    | فشار (p)          |
| $u = (0, 0, 0)$ | Zero Gradient  | q=0.1 cc/min   | No slip                       | سرعت (u)          |
| T = 300 K       | T = 300 K      | T = 300 K      | T = 300 K                     | دما (T)           |

## ۳. نتایج و بحث

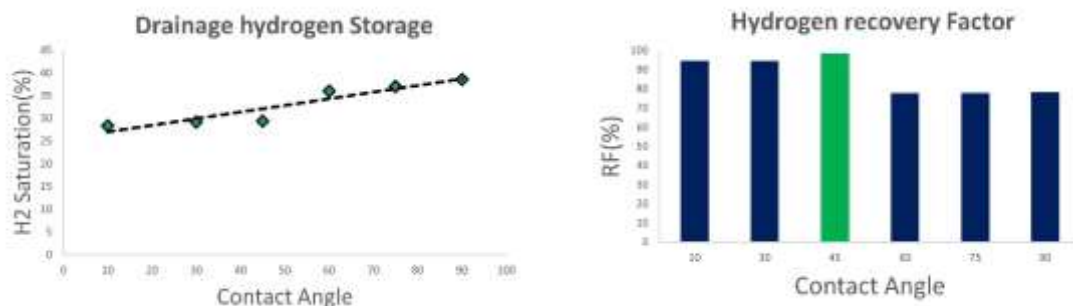
### ۳.۱ اثر ترشوندگی یکنواخت روی عملکرد ذخیره سازی هیدروژن

نتایج اثر ترشوندگی یکنواخت بر قابلیت ذخیره‌سازی هیدروژن و الگوهای جریان با شبیه‌سازی یک چرخه تخلیه/آشام در شکل ۱ برای زاویه تماس‌های مختلف نشان داده شده است. طبق این نتایج، در طی فرآیند تخلیه (یا ذخیره‌سازی) تغییر ترشوندگی به سمت کم‌آب‌دوست کمتر منجر به کاهش اشباع نهایی آب می‌شود (شکل ۲)، که این امکان را فراهم می‌کند که فضای منفذی بیشتری برای ذخیره‌سازی هیدروژن در دسترس باشد. این به دلیل کاهش مقاومت مؤثر هیدروژن (به عنوان فاز غیر ترکننده) و افزایش نفوذپذیری مؤثر است. با این وجود، در طی فرآیند آشام (یا بازآبی هیدروژن)، به دام افتادن هیدروژن در حفرات نسبتاً بزرگ به دلیل فشار مؤثر بیشتر در گلوگاه‌های منافذ مقداری افزایش می‌یابد، که باعث کاهش کارایی تولید هیدروژن می‌شود.



شکل ۱- نمودار اشباع هیدروژن بر حسب زمان بدون بعد برای یک چرخه تخلیه/آشام

شکل ۳، نشان‌دهنده ضریب بازیافت هیدروژن برای زوایای تماس مختلف است. نتایج نشان می‌دهد که برای سیستم‌هایی با ترشوندگی یکنواخت، بالاترین بازیابی هیدروژن برای یک سیستم آبدوست با زاویه تماس نزدیک به ۴۵ درجه خواهد بود.

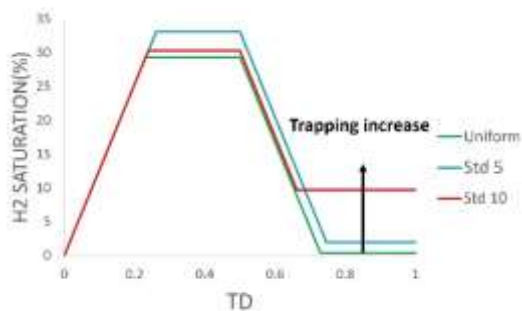


شکل ۲- نمودار اشباع هیدروژن بر حسب زاویه تماس در فرآیند تخلیه

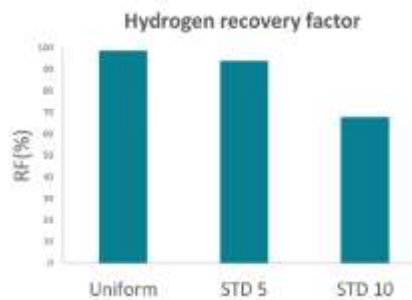
شکل ۳- نمودار ضریب بازیافت هیدروژن بر حسب زاویه تماس در فرآیند آشام

### ۲,۳ اثر ترشوندگی غیریکنواخت روی عملکرد ذخیره سازی هیدروژن

برای بررسی اثر توزیع ترشوندگی اولیه غیریکنواخت بر عملکرد ذخیره‌سازی، از بهترین سناریوی ذخیره‌سازی هیدروژن با زاویه تماس ۴۵ درجه به عنوان پایه استفاده گردید. سپس چندین توزیع نرمال با میانگین یکسان ۴۵ درجه و انحراف معیارهای مختلف (۰، ۵ و ۱۰ درجه) برای مقایسه نتایج در نظر گرفته شد. شکل ۴ میزان اشباع هیدروژن نسبت به زمان بدون بعد برای سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش انحراف معیار تابع توزیع ترشوندگی، انتخاب مسیر برای حرکت سیال افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن اینکه میانگین همه توزیع‌ها در فرآیند تخلیه ۴۵ درجه است، مقدار کل ذخیره‌سازی به طرز چشمگیری تغییر نمی‌کند، اما در فرآیند آشام، با افزایش انحراف معیار، به طور چشمگیری به دام افتادن هیدروژن افزایش می‌یابد. در شکل ۵، روند بازیابی از ۹۸٪ در توزیع یکنواخت به کمتر از ۷۰٪ در توزیع غیریکنواخت کاهش یافته است.



شکل ۴- نمودار اشباع هیدروژن برحسب زمان بدون بعد در توزیع های مختلف ترشوندگی



شکل ۵- نمودار ضریب بازیافت هیدروژن در فرایند آشام برای توزیع های مختلف ترشوندگی

#### ۴. نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که برای سیستمی با توزیع ترشوندگی یکنواخت بیشترین بازیافت برای زاویه تماس ۴۵ درجه خواهد بود. همچنین در توزیع ترشوندگی همگن در فرآیند تخلیه با حرکت به سمت آبدوستی کمتر میزان ذخیره سازی هیدروژن افزایش می‌یابد و در توزیع غیریکنواخت ترشوندگی با افزایش انحراف معیار میزان به دام افتادن هیدروژن افزایش می‌یابد.

#### ۵. فهرست مراجع

Bahrami, Mehdi, et al. "Challenges in the simulation of underground hydrogen storage: A review of relative permeability and hysteresis in hydrogen-water system." *Journal of Energy Storage*, 73, 2023.

Zivar, Davood, Sunil Kumar, and Jalal Foroozesh. "Underground hydrogen storage: A comprehensive review." *International journal of hydrogen energy*, 46 (45) 2021.

Aslannezhad, Masoud, et al. "A review of hydrogen/rock/brine interaction: Implications for Hydrogen Geo-storage." *Progress in Energy and Combustion Science*, 95, 2023.

Hashemi, Leila, Martin Blunt, and Hadi Hajibeygi. "Pore-scale modelling and sensitivity analyses of hydrogen-brine multiphase flow in geological porous media." *Scientific reports*, 11, 2021.

Bagheri, Matin, et al. "Direct pore-scale simulation of the effect of capillary number and gas compressibility on cyclic underground hydrogen storage & production in heterogeneous aquifers." *Advances in Water Resources*, 181, 2023.

Lysy, Maksim, Geir Ersland, and Martin Fernø. "Pore-scale dynamics for underground porous media hydrogen storage." *Advances in Water Resources*, 163, 2022.



## بررسی تاثیر امواج فراصوت در رسوب آسفالتین‌ها درون محیط متخلخل

مهدی رضوی فر<sup>۱\*</sup>؛ جعفر قاجار<sup>۲</sup>؛ مسعود ریاضی<sup>۳</sup>

### چکیده

بهبود برداشت نفت از مخازن به عنوان یک چالش مهم در صنعت نفت مطرح است. در سال‌های اخیر، استفاده از امواج فراصوت به منظور انگیزش چاه‌های نفتی (کاهش آسیب سازند) و تغییر در خواص رئولوژی نفت خام بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. تابش امواج فراصوت از دیدگاه‌های اقتصادی، محیط زیستی و ایمنی عملیات نسبت به سایر روش‌های معمول بهبود برداشت نفت مانند تزریق اسید و ایجاد شکاف هیدرولیکی، دارای مزایای قابل توجهی است. در همین راستا، تابش امواج فراصوت به نفت خام منجر به کاهش گرانروی نفت و بهبود تراوایی نسبی نفت در محیط متخلخل سنگ می‌شود. پدیده حفره‌زایی و لرزش ایجاد شده در نفت خام عوامل اصلی در تغییر خواص نفت خام با تابش امواج فراصوت هستند. در این پژوهش به بررسی تاثیر امواج فراصوت در میزان رسوب آسفالتین‌ها درون یک میکرومدل محیط متخلخل شفاف پرداخته شده است. طبق نتایج بدست آمده، تابش امواج فراصوت به نفت خام منجر به کاهش میزان رسوب آسفالتین‌ها در محیط متخلخل شده و در نتیجه انسداد حفرات سنگ را کاهش داده‌اند. آنالیز تصاویر گرفته شده از میکرومدل نشان می‌دهد که تابش امواج فراصوت به نفت خام با شکستن خوشه‌های آسفالتین موجود در نفت خام از رسوب آن‌ها در حفرات سنگ به ویژه نزدیکی شکاف جلوگیری می‌کند. نتایج حاصل از این پژوهش در عملیات بهبود برداشت از مخازن نفت دارای مشکل رسوب آسفالتین کاربرد دارد.

### کلیدواژه‌ها

میکرومدل محیط متخلخل؛ امواج فراصوت؛ بهبود برداشت نفت؛ رسوب آسفالتین، محیط متخلخل شفاف

### ۱. مقدمه

رسوب مواد آلی و معدنی درون محیط متخلخل سنگ منجر به انسداد شدید حفرات شده و در نتیجه آسیب سازند را در پی دارد. در همین راستا، رسوب آسفالتین به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های تولید نفت خام سنگین مطرح است. آسفالتین‌ها، سنگین‌ترین و پیچیده‌ترین ترکیبات آلی درون نفت خام هستند که در ساختار مولکولی خود علاوه بر کربن و هیدروژن، دارای ترکیبات دیگری مانند نیتروژن، اکسیژن، سولفور و فلزات سنگین نیز هستند [۱]. به منظور کاهش آسیب سازند (از بین بردن گرفتگی حفرات) از روش‌های انگیزش (تحریک) چاه

\*<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱، تبریز، ایران، M.razavifar@tabrizu.ac.ir

<sup>۲</sup> بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، Jafar.qajar@shirazu.ac.ir

<sup>۳</sup> بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، M.riazi@shirazu.ac.ir

استفاده می‌شود. این روش‌ها، نواحی اطراف چاه تولیدی را که دچار آسیب شده‌اند، تحت تاثیر قرار داده و منجر به افزایش تراوایی (نفوذپذیری) سنگ و بهبود برداشت نفت می‌شوند. تزریق اسید، ایجاد شکاف‌های هیدرولیکی و تابش امواج فراصوت از جمله روش‌های متداول انگیزش چاه‌های نفتی هستند. روش تابش امواج فراصوت در مقایسه با روش‌های معمول ازدیاد برداشت نفت، از لحاظ اقتصادی، زیست محیطی و فنی دارای مزایای قابل توجهی است [۲-۱].

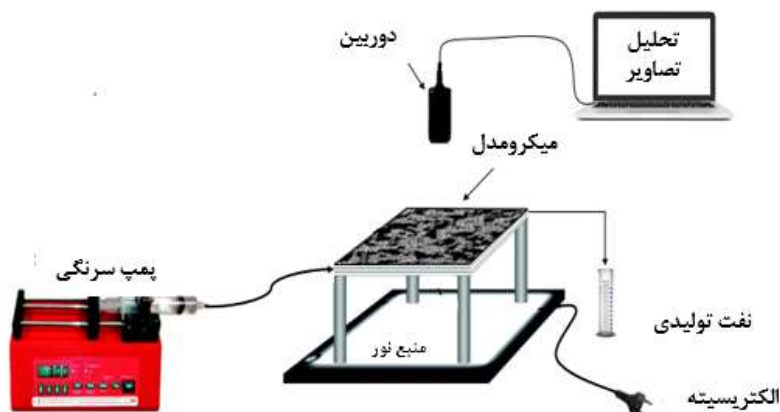
تحقیقات انجام شده در میادین نفت کشورهای روسیه و آمریکا نشان داده‌اند: میانگین افزایش دبی نفت تولیدی بعد از تحریک چاه به روش امواج فراصوت بیش از دو برابر بوده است. افزایش ضریب بهره‌دهی چاه به صورت میانگین ۳۳٪ بوده و کاهش میزان آب تولیدی از چاه‌ها در حدود ۴٪ گزارش شده است. طبق پژوهش‌های انجام شده، تابش امواج فراصوت منجر به دو پدیده حفره‌زایی و لرزش درون سیال می‌شوند. در همین راستا، به دلیل حفره‌زایی درون سیال، دما و فشار به شدت افزایش یافته و در نتیجه خواص رئولوژی (به ویژه گرانروی سیال) دچار تغییر می‌شود. استفاده از امواج فراصوت منجر به کاهش قابل توجه گرانروی نفت خام شده و ترکیبات سنگین به ویژه توده‌های آسفالتین موجود در نفت خام را می‌شکنند [۳-۴].

در این پژوهش به بررسی تاثیر تابش امواج فراصوت در رسوب آسفالتین درون محیط متخلخل پرداخته شده است. هدف از این پژوهش، اثبات تاثیر مثبت استفاده از امواج فراصوت در کاهش تشکیل رسوبات آسفالتین در مقیاس حفرات سنگ به روش تصویربرداری است. در همین راستا، از آنالیز تصاویر گرفته شده از میکرومدل‌های شفاف محیط متخلخل برای بررسی تاثیر امواج فراصوت در انسداد حفرات به وسیله رسوب آسفالتین‌ها استفاده شد. نتایج این پژوهش در عملیات ازدیاد برداشت نفت از مخازن، عملیات بهره‌برداری و هم چنین پروژه‌های انتقال نفت با هدف کاهش تشکیل رسوبات آلی به ویژه آسفالتین‌ها کاربرد خواهد داشت.

## ۲. روش انجام پژوهش

در این پژوهش، برای تابش امواج فراصوت با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و توان ۱۰۰ وات از دستگاه فراصوت پروبدار TOPSONICS مدل UHP-400 استفاده شد؛ نفت سنگین مورد استفاده مربوط به یکی از میادین نفت جنوب ایران، دارای ۸٪ آسفالتین و گرانروی حدود ۱۴۵ سانتی‌پویز در شرایط استاندارد است. هم‌چنین، با هدف تشکیل رسوب آسفالتین از نرمال هپتان ساخت شرکت Merck آلمان با خلوص بیش از ۹۹٪ استفاده شد. به منظور بررسی رسوب آسفالتین‌ها از میکرومدل‌های شفاف محیط متخلخل دارای شکاف استفاده شد. این میکرومدل دارای طول و عرض حدود ۱۰۰ میلی‌متر، اندازه حفره ۱/۵ میلی‌متر، اندازه گلوگاه حفره ۰/۳۵ میلی‌متر و تخلخل ۲۷٪ است. شماتیک استفاده از میکرومدل محیط متخلخل در شکل ۱ ارائه شده است.





شکل ۱: شماتیک استفاده از میکرومدل‌های شفاف محیط متخلخل

ابتدا میکرومدل با نفت خام اشباع شده و سپس نرمال هپتان به منظور تشکیل رسوبات آسفالتین در حفرات و هم چنین جاروب نفت خام هپتان با نرخ  $0/1$  سی سی بر ساعت و حجم تزریقی  $2/5$  سی سی به مدل تزریق شد. در گام بعد، مدل با نفت تابانده شده در شرایط بهینه از تابش امواج فراصوت (زمان ۱۰ دقیقه از تابش) اشباع شده و عملیات تزریق نرمال هپتان تکرار شد. در انتها تصاویر بدست آمده از میکرومدل برای نفت خام و نفت تابانده شده با امواج فراصوت مقایسه شدند.

### ۳. نتایج و یافته‌ها

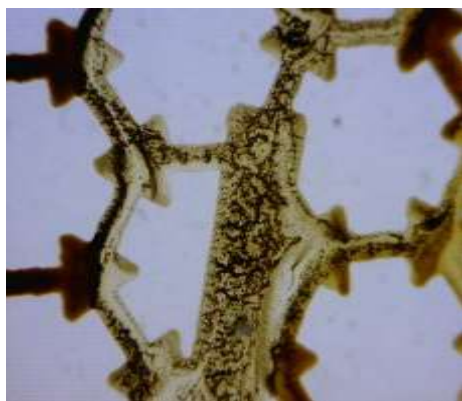
آنالیز تصاویر گرفته شده از میکرومدل‌های محیط متخلخل نشان می‌دهند که رسوب آسفالتین‌ها درون محیط متخلخل در حالتی که نفت خام استفاده شده نسبت به حالتی که تابش امواج فراصوت را داشته‌ایم، بیشتر است؛ چون تابش امواج فراصوت به نمونه نفت باعث کاهش اندازه و مقدار توده‌های آسفالتین درون نفت شده است و کلوخه‌ای شدن و ترسیب آسفالتین‌ها با تابش امواج فراصوت کاهش داشته است (طبق شکل ۲). هم چنین، طبق تصاویر گرفته شده بازده تولید نفت از مدل برای نمونه حاوی نفت خام حدود  $43\%$  بوده که نسبت به مدل حاوی نفت تابانده شده  $7\%$  بیشتر است؛ چون رسوب آسفالتین در گلوگاه‌ها و کانال‌های محیط متخلخل در نفت خام نسبت به نفت تابانده شده بیشتر است و در نتیجه نرمال هپتان تزریقی به نفت از مسیرهای بیشتر و متنوع‌تری حرکت کرده است (بخش‌های بیشتری از مدل را پوشش داده‌اند). به بیانی دیگر، تابش امواج فراصوت با شکست ترکیبات سنگین نفت خام (به ویژه آسفالتین‌ها) و در نتیجه کاهش اندازه خوشه‌های آسفالتینی، رسوب آسفالتین‌ها را در گلوگاه‌های حفرات کاهش داده است. طبق تصاویر بدست آمده، در صورت تزریق هپتان در مدل شکافدار دارای نفت خام، رسوب شدیدی درون شکاف ایجاد شده است و این در حالی است که برای نفت تابانده شده توسط امواج فراصوت، رسوب آسفالتین درون شکاف بسیار محدود و کم بوده است. نتایج بدست آمده نشانگر تاثیر محسوس امواج فراصوت در ساختار مولکولی نفت و کاهش اندازه توده‌های آسفالتین موجود در نفت است.

### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر تابش امواج فراصوت در رسوب آسفالتین‌ها درون یک محیط متخلخل شفاف پرداخته شد. نتایج اصلی حاصل از آنالیز تصاویر گرفته شده از میکرومدل عبارتند از:

(۱) رسوب آسفالتین‌ها درون محیط متخلخل حاوی نفت خام نسبت مدل حاوی نفت تحت تابش امواج

- فراصوت بیشتر است؛ چون تابش امواج باعث کاهش اندازه و مقدار توده‌های آسفالتین شده است.
- (۲) بازده تولید نفت از مدل حاوی نفت خام حدود ۴۳٪ بوده که نسبت به مدل حاوی نفت تابانده شده ۷٪ بیشتر است؛ چون رسوب آسفالتین درون محیط متخلخل برای مدل حاوی نفت خام بیشتر است و در نتیجه نرمال هپتان تزریقی از مسیرهای بیشتر و متنوع‌تری حرکت کرده است.
- (۳) با تزریق هپتان در مدل دارای نفت خام، رسوب شدیدی درون شکاف مشاهده شد؛ در حالی که برای نفت تابانده شده توسط امواج فراصوت، رسوب آسفالتین درون شکاف بسیار محدود و کم بوده است.
- (۴) نتایج بدست آمده نشانگر تاثیر محسوس امواج فراصوت در ساختار مولکولی نفت خام و شکستن توده‌های آسفالتین موجود در نفت است.



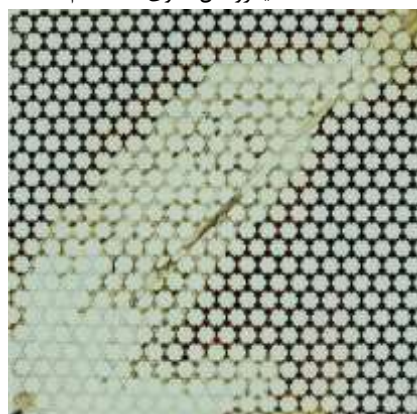
ب) شکاف دارای نفت خام



الف) میکرومدل حاوی نفت خام



د) شکاف دارای نفت تابانده شده



ج) میکرومدل حاوی نفت تابانده شده

شکل ۲: تصاویر گرفته شده از میکرومدل محیط متخلخل شکافدار قبل (الف و ب) و بعد از تابش امواج فراصوت (ج و د)

## ۵. فهرست مراجع

Razavifar, M. and J. Qajar (2020). "Experimental investigation of the ultrasonic wave effects on the viscosity and thermal behaviour of an asphaltenic crude oil." Chemical Engineering and Processing-Process Intensification **153**: 10796

Razavifar, M. and J. Qajar (2022). "Synergistic effects of ultrasonic irradiation and  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on the viscosity and thermal properties of an asphaltenic crude oil and their application to in-situ combustion EOR." Ultrasonics **120**: 106655.

Qajar, J., M. Razavifar and M. Riazi (2024). "A mechanistic study of the synergistic and counter effects of ultrasonic and solvent treatment on the rheology and asphaltene structure of heavy crude oil." Chemical Engineering and Processing-Process Intensification **195**: 109619.

Razavifar, M., J. Qajar and M. Riazi (2022). "Experimental study on pore-scale mechanisms of ultrasonic-assisted heavy oil recovery with solvent effects." Journal of Petroleum Science and Engineering **214**: 110553.



## انتخاب چند معیاره سناریو بهینه ذخیره‌سازی زیر زمینی هیدروژن برمبنای شبیه‌سازی مونت کارلو و آنالیز عدم قطعیت

حسین خیرالهی<sup>۱</sup>؛ سید شهاب‌الدین آیت‌اللهی<sup>۲</sup>؛ حسن ماهانی<sup>۳</sup>

### چکیده

مسائل زیست محیطی همچون تغییرات اقلیم مرتبط با گرم شدن دمای زمین در اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، چالشی اساسی برای ادامه حیات بشر است. تکاپوی محققان برای مقابله با این مساله باعث ایجاد راهکارهای جدید مانند ذخیره‌سازی زیرزمینی دی‌اکسید کربن، کربن صفر و گذار انرژی به سمت انرژی‌های تجدید پذیر شده است. در طی سالیان اخیر، ذخیره‌سازی هیدروژن به‌عنوان سوخت پاک و حامل انرژی در مخازن هیدروکربنی تخلیه‌شده، آبخوان‌ها و غارهای زیرزمینی، به‌عنوان به صورت راهکاری جدید و مؤثر مطرح شده است. ارزیابی پتانسیل این موضوع نیازمند در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و شبیه‌سازی‌های سناریوهای مختلف و متعدد برای بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی و یافتن بهترین سناریوهای ذخیره‌سازی است. هدف اصلی این مقاله، شبیه‌سازی ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز هیدروژن، آنالیز حساسیت سنجی و بررسی عدم قطعیت (شبیه‌سازی مونت‌کارلو) پارامترهای خلوص هیدروژن در جریان گاز تولیدی و ضریب بازیافت هیدروژن می باشد. این مطالعه با استفاده از پروکسی مدل ساخته‌شده با روش هوش مصنوعی انجام شده است. علاوه بر این نتایج آنالیز عدم قطعیت سناریوهای متعدد تولید و تزریق به کمک الگوریتم‌های تصمیم‌سازی چند معیاره بر اساس پتانسیل مطلوب و ریسک نامطلوب رتبه‌بندی شد. نتایج حساسیت سنجی نشان می دهد تولید هیدروژن از مشبک‌کاری قسمت بالای چاه تولیدی و تزریق هیدروژن از پایین مخزن تأثیر به‌سزایی بر متغیرهای هدف دارند. نتایج نهایی نمایانگر مطلوبیت کل برابر با ۰/۴۹ و متناظر با سناریو چرخه تزریق (۶ ماه) و تولید (۶ ماه) به عنوان بهترین سناریو عملیات ذخیره‌سازی هیدروژن می باشد.

**کلیدواژه‌ها:** ذخیره‌سازی زیر زمینی هیدروژن، عدم قطعیت، مخزن گازی تخلیه شده، گذار انرژی، مونت کارلو

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، h.kheirollahi@che.sharif.edu

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، shahab@sharif.edu

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، hmahani@sharif.edu

## ۱. مقدمه

حضور گاز دی اکسید کربن در اتمسفر یکی از ملزومات ایجاد اثر گلخانه‌ای و فراهم کردن دمای مناسب برای بقای حیات انسان و سایر جانداران روی کره خاکی می‌باشد. با این وجود، افزایش جمعیت، نیاز و تلاش برای تأمین انرژی موردنیاز کشورهای در حال توسعه باعث افزایش بی‌رویه انتشار گازهای گلخانه‌ای و به دام افتادن انرژی خورشید در اتمسفر زمین و گرمایش جهانی زمین شده است [۱، ۲]. بر اساس اعلام آژانس بین‌المللی انرژی و سازمان بین‌دولتی تغییرات اقلیمی تا سال ۲۰۲۳ مقدار دی‌اکسید کربن انتشار یافته به جو زمین برابر با ۳۷/۲ گیگا تن گزارش شده است. پژوهش‌های انجام‌شده نشان‌دهنده ارتباط و همبستگی میان افزایش غلظت دی‌اکسید کربن با افزایش میانگین دمای سطح زمین بوده است.

روند صعودی انتشار دی‌اکسید کربن، اقتصاد جهانی را مجبور کرده است تا در پی جست‌وجو و اتخاذ یک راهکار مناسب برای جلوگیری از این معضل و تبعات نامطلوب آن از قبیل گرمایش زمین، تغییرات اقلیمی بپردازند [۱]. بنابراین در سال‌های اخیر معاهده‌ای تحت عنوان معاهده پاریس با شالوده مرتبط با کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و نگهداشتن دمای زمین در محدود تغییرات کمتر از ۲ درجه سانتی‌گراد و با هدف رسیدن به ۱/۵ درجه سانتی‌گراد در میان اکثر کشورها منعقد گردید. منشأ اصلی انتشار بی‌رویه گاز دی‌اکسید کربن مربوط به احتراق سوخت‌های فسیلی (نفت، گاز و ذغال سنگ) به منظور تأمین انرژی الکتریکی برای مصارف روشنایی، گرمایش خانگی و حمل‌ونقل است. بنابراین مباحث گرمایش زمین و تغییرات اقلیمی باعث شده است تا اقتصاد جهانی در پی بررسی چشم‌انداز اقتصاد بدون کربن و استفاده از انرژی الکتریکی از منابع تجدید پذیر باشد. به همین منظور دو استراتژی مهم ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن در سازندهای زمین‌شناسی جهت کاهش غلظت کربن دی‌اکسید و استفاده از منابع تجدید پذیر از قبیل انرژی خورشید و باد می‌باشد. نکته درخور توجه وابستگی جوی (فصلی) و اختلاف بین میزان تولید و مصرف در تأمین انرژی از این منابع می‌باشد. بنابراین ذخیره‌سازی انرژی به صورت حامل‌های انرژی همانند هیدروژن در سازندهای زمین‌شناسی یک راهکار مناسب می‌تواند باشد [۳، ۴].

با اینکه تعداد مقالات منتشر شده در زمینه ذخیره‌سازی هیدروژن در مقیاس‌های مختلف از شبیه‌سازی در ابعاد مولکولی تا میدانی رو به افزایش می‌باشد، عملیات میدانی ذخیره‌سازی گاز هیدروژن با عدم قطعیت‌ها، ریسک‌ها و ناشناخته‌های زیادی همراه است. در این مطالعه به منظور تعیین پارامترهای موثر و انتخاب چند معیاره سناریو مناسب عملیاتی از پروکسی مدل و بر اساس آنالیز نمودار تورنادو و شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده گردید. علاوه بر این جهت اتخاذ تصمیم نهایی و انتخاب سناریو بهینه از روش‌های آنالیز عدم قطعیت در سود و عدم قطعیت در ریسک و تعیین مطلوبیت سناریوهای شبیه‌سازی برای رتبه‌بندی و تصمیم‌گیری کلی استفاده گردید.

## ۲. روش پژوهش

این مطالعه به بررسی پتانسیل و کارکرد مدل‌های جایگزین داده محور برای شبیه‌سازی فرآیند ذخیره زیرزمینی گاز هیدروژن در یک مخزن گازی تخلیه‌شده با اشباع گاز برابر با ۰/۹۱ و اشباع آب همزاد برابر با ۰/۰۹ می‌پردازد. در ابتدا یک مدل پایه همگن مکعبی شکل برای شبیه‌سازی فرآیند به مدت ۱۴ سال شامل: (۱) تزریق گاز پایه به مدت ۱ سال به منظور افزایش فشار اولیه مخزن (از ۱۰۰۰ پام به ۲۷۰۰ پام) و تأمین فشار تولید گاز عملیاتی، (۲) تزریق و تولید متناوب گاز هیدروژن به مدت ۱۰ سال و (۳) تولید گاز هیدروژن به مدت ۳ سال ساخته شد. پارامترهای عملیاتی مختلف اعم از بازه مشبک‌کاری، دبی تزریق و تولید گاز هیدروژن، ترکیب درصد گاز پایه و دبی تزریق گاز پایه به‌عنوان متغیر تصمیم‌گیری انتخاب گردید. در ادامه به منظور تسریع در حساسیت‌سنجی و ارزیابی عدم قطعیت پارامترهای هدف از پروکسی مدل استفاده گردید. در نهایت از یک روش تصمیم‌گیری آماری جایگزین به منظور طراحی و تعیین بهترین سناریو تزریق/تولید هیدروژن بر اساس پارامتر مطلوبیت کل استفاده گردید.

برای پارامترهای تصمیم‌گیری نهایی عموماً مقادیر آماری رایج  $P_1$ ،  $P_5$  و  $P_9$  اتخاذ می‌گردد که نتیجه محتمل (P50)، نتیجه بدبینانه (P90) و نتیجه خوش‌بینانه (P10) می‌باشد. در این مطالعه از معادلات (۱) و (۲) استفاده گردید که در آن علاوه بر ارزش مورد انتظار برای تمایز هر سناریو، مقادیر پراکندگی (نیمه واریانس) ریسک نامطلوب و پتانسیل مطلوب در نظر گرفته شده است [۵].

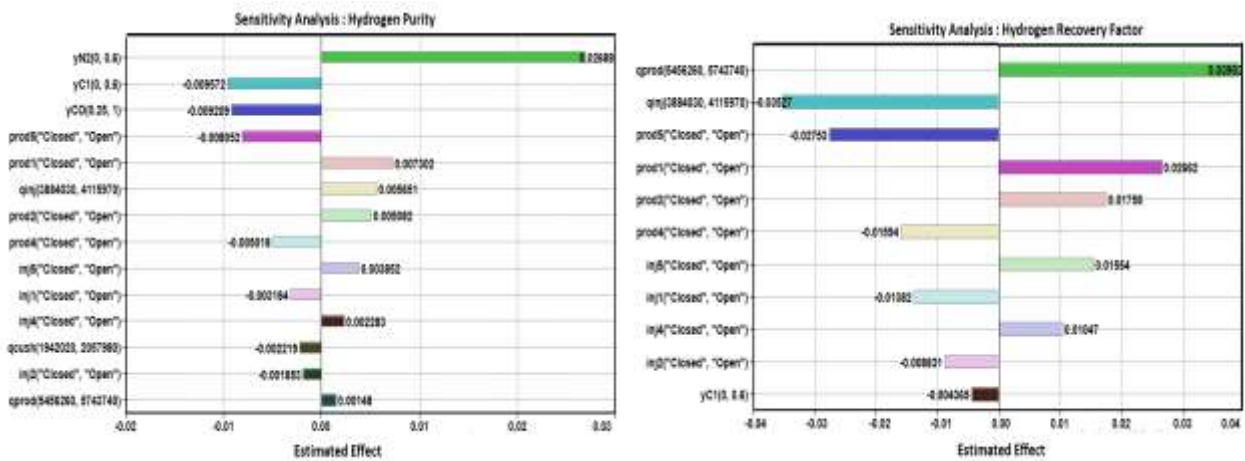
$$\varepsilon(X) = E(X) - \frac{S_B^-}{\tau_{dr}} + \frac{S_B^+}{\tau_{up}} \quad (1)$$

$$u[X_1, X_r] = k \times \varepsilon[X_1]_{norm} + (1 - k) \times \varepsilon[X_r]_{norm} \quad (2)$$

در معادلات بالا پارامترهای  $S_B^+$  و  $S_B^-$  بیانگر نیمه واریانس بالا و پایین از نمونه تجربی B است. پارامتر  $\tau_{up}$  و  $\tau_{dr}$  بیانگر سطح تفرانس (یا سطح بی‌تفاوتی) نسبت به پتانسیل مطلوب و ریسک نامطلوب برای متغیر X می‌باشد. پارامترهای  $\varepsilon$  و u نیز به ترتیب بیانگر ارزش تک معیار X و مطلوبیت کلی معیارهای مدنظر می‌باشد. مقدار پارامتر k به‌عنوان پارامتر مصالحه و عموماً برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.

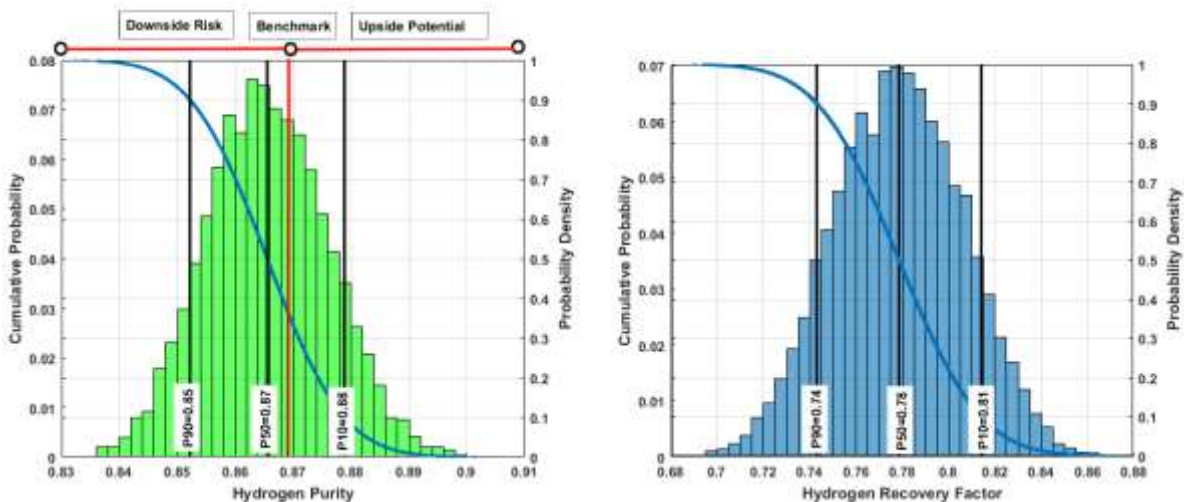
### ۳. نتایج و بحث

نقش اصلی مخلوط گاز پایه در تأمین فشار تولیدی می‌باشد و در حین تزریق گاز هیدروژن، جبهه گاز پایه به عقب رانده می‌شود و نواحی نزدیک مشبک‌های تولید لایه‌های بالایی به دلیل جدایش ثقلی دارای اشباع بالای گاز هیدروژن خواهند بود. علاوه بر این در لایه‌های نواحی پایین مخزن فاز گازی به‌صورت مخلوط گاز هیدروژن و گاز پایه ایجاد می‌گردد که باعث ایجاد ناخالصی در طول چرخه تولید از مخزن خواهد شد. بنابراین همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌گردد، نتایج آنالیز حساسیت برای تأثیر مقدار ترکیب درصد اجزا گاز به همراه حالت باز و بسته بودن مشبک‌های بالا و پایین بر روی خلوص هیدروژن تولیدی میزان بازیافت دارای اهمیت زیادی است. علاوه بر این پارامترهای دبی تزریق/تولید و مجدداً به همراه حالت باز و بسته بودن مشبک بالا و پایین بر میزان بازیافت هیدروژن سهم زیادی دارند. برخلاف آنالیز حساسیت انجام‌شده بر روی میزان بازیافت، میزان دبی تولید هیدروژن تأثیر بسیار ناچیزی بر روی خلوص هیدروژن از خود نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمودار تورنادو حاصل از آنالیز حساسیت مقدار خلوص (چپ) و بازیافت هیدروژن (راست) پارامترهای تصمیم‌گیری.

نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو (با تعداد  $10^5$  تکرار) برای پارامترهای خلوص و بازیافت هیدروژن تولیدی به صورت توزیع نرمال است. این نتایج بر اساس عدم قطعیت پارامترهای در نظر گرفته شده با صورت توزیع گاوسی  $N(\mu, \sigma)$  با میانگین  $\mu$  و انحراف معیار  $\sigma$  برای دبی تزریق گازپایه  $(2 \times 10^6, 24924.35)$  فوت مکعب در روز، دبی تزریق هیدروژن  $(4 \times 10^6, 49848.7)$  فوت مکعب در روز و دبی تولید هیدروژن  $(5.6 \times 10^6, 61788.2)$  فوت مکعب در روز و همچنین تابع توزیع یکنواخت  $U(a,b)$  با کران پایین  $a$  و کران بالای  $b$  برای ترکیب درصد گاز نیتروژن  $U(0,0.60)$ ، دی اکسید کربن  $U(0.25,1.0)$ ، و متان  $U(0,0.60)$  حاصل گردید. به‌عنوان نمونه مقدار خلوص متناظر با نتیجه محتمل، نتیجه خوش‌بینانه و نتیجه بدبینانه به ترتیب برابر با  $0.87$ ،  $0.88$  و  $0.85$  می‌باشد. تصمیم‌گیرندگان معمولاً نسبت به مقادیر بالاتر از نمونه تجربی گریزان نیستند و انتظار تحقق آن سناریو خوش‌بینانه را دارند ولی نسبت به مقادیر کمتر از نمونه تجربی نگران هستند. بر این اساس، نیمه واریانس معیار مناسب‌تری از واریانس کلی برای ایجاد تمایز بین پتانسیل مطلوب و ریسک نامطلوب می‌باشد.



شکل ۲: آنالیز عدم قطعیت خلوص (چپ) و بازیافت هیدروژن (راست).

## جدول ۲ و

جدول ۳ به ترتیب نشان‌دهنده خلاصه نتایج حاصل از آنالیز عدم قطعیت و محاسبه ارزش مورد انتظار، پتانسیل مطلوب، ریسک نامطلوب و ارزش پارامترهای خلوص هیدروژن و بازیافت برای سناریو مختلف تزریق/تولید می‌باشد. در این میان سناریو ۷ ماه تزریق و ۵ ماه تولید هیدروژن با ارزش خلوص برابر با  $0.86$  و همچنین سناریو ۶ ماه تزریق و ۶ ماه تولید با ارزش بازیافت برابر با  $0.87$  هستند. اما برای تصمیم‌گیری نهایی از روش وزن‌دار بر اساس مقادیر نرمال‌سازی شده خلوص و بازیافت هیدروژن استفاده گردید که در نهایت نتایج نشان‌دهنده مطلوبیت و بهینه بودن سناریو ۶ ماه تزریق و ۶ ماه تولید هیدروژن بر اساس عدم قطعیت با مقدار مطلوبیت  $0.48$  همراه بود (جدول ۴).

جدول ۲: تصمیم‌گیری برای انتخاب سناریو بر اساس خلوص هیدروژن.

| $\varepsilon$<br>[Purity] | Upside<br>potential | Downside<br>risk | E[Purity] | P10    | P50    | P90    | سناریو تزریق   |
|---------------------------|---------------------|------------------|-----------|--------|--------|--------|----------------|
| $0.85$                    | $0.005$             | $0.044$          | $0.85$    | $0.86$ | $0.85$ | $0.84$ | ۸ ماه تزریق، ۴ |

|      |       |       |      |      |      |      |                          |
|------|-------|-------|------|------|------|------|--------------------------|
|      |       |       |      |      |      |      | ماه تولید                |
| ۰/۸۷ | ۰/۰۴۲ | ۰/۰۳۷ | ۰/۸۷ | ۰/۸۸ | ۰/۸۷ | ۰/۸۵ | ۷ ماه تزریق، ۵ ماه تولید |
| ۰/۸۶ | ۰/۰۲۱ | ۰/۰۳۸ | ۰/۸۶ | ۰/۸۸ | ۰/۸۷ | ۰/۸۵ | ۶ ماه تزریق، ۶ ماه تولید |

جدول ۳: تصمیم‌گیری برای انتخاب سناریو بر اساس بازیافت هیدروژن.

| [RF] $\epsilon$ | Upside potential | Downside risk | E[RF] | P10  | P50  | P90  | سناریو تزریق             |
|-----------------|------------------|---------------|-------|------|------|------|--------------------------|
| ۰/۸۶            | ۰/۱۰۱            | ۰/۰۹۷         | ۰/۸۶  | ۰/۹۰ | ۰/۸۶ | ۰/۸۲ | ۸ ماه تزریق، ۴ ماه تولید |
| ۰/۸۲            | ۰/۰۰۹            | ۰/۱۸۱         | ۰/۷۸  | ۰/۸۶ | ۰/۸۵ | ۰/۸۴ | ۷ ماه تزریق، ۵ ماه تولید |
| ۰/۸۷            | ۰/۰۹۷            | ۰/۰۸۰         | ۰/۸۷  | ۰/۹۱ | ۰/۸۷ | ۰/۸۳ | ۶ ماه تزریق، ۶ ماه تولید |

جدول ۴: تصمیم‌گیری برای انتخاب سناریوها بر اساس مطلوبیت کل.

| u[RF, Purity] | $\epsilon [Purity]_{norm}$ | $\epsilon [RF]_{norm}$ | سناریو تزریق             |
|---------------|----------------------------|------------------------|--------------------------|
| ۰/۳۸          | ۰/۲۴                       | ۰/۵۲                   | ۸ ماه تزریق، ۴ ماه تولید |
| ۰/۳۴          | ۰/۳۸                       | ۰/۲۹                   | ۷ ماه تزریق، ۵ ماه تولید |
| ۰/۴۸          | ۰/۳۷                       | ۰/۶۰                   | ۶ ماه تزریق، ۶ ماه تولید |

#### ۴. نتیجه‌گیری

آنالیز حساسیت انجام‌شده برای بررسی تأثیرگذاری پارامترهای عملیاتی مهم در طول چرخه ذخیره‌سازی شامل پارامترهای ترکیب درصد و نرخ تزریق گاز پایه، نرخ تزریق و تولید گاز عملیاتی (هیدروژن) و بازه مشبک‌کاری چاه‌های تزریق، نشان داد که محل مشبک تولیدی در بالای مخزن و در پایین مخزن بر روی خلوص و میزان بازیافت هیدروژن ذخیره‌شده تأثیر زیادی دارد. با توجه به سرعت پردازش سریع در ارزیابی تابع هدف در مطالعات شبیه‌سازی ترکیبی ذخیره‌سازی مقیاس بزرگ گاز هیدروژن و تسریع شبیه‌سازی عدم قطعیت به روش مونت‌کارلو از پتانسیل روش‌های مبتنی بر داده (پروکسی مدل) استفاده شد. علاوه بر این جهت اتخاذ تصمیم نهایی در خصوص انتخاب سناریو بهینه از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده گردید و چرخه ۶ ماه تزریق و ۶ ماه تولید هیدروژن با مقدار مطلوبیت برابر با ۰/۴۸ در رتبه نخست بر اساس مقدار بازیافت و خلوص هیدروژن از میان سناریوهای در نظر گرفته‌شده انتخاب گردید.

#### ۵. فهرست مراجع

- [1] F. Vanek and L. D. Albright, *Energy Systems Engineering*. New York, NY: McGraw-Hill Professional, 2008.



- [2] M. Bahrami, E. Izadi, D. Zivar, S. Ayatollahi, and H. Mahani, "Challenges in the simulation of underground hydrogen storage : A review of relative permeability and hysteresis in hydrogen-water system," *J. Energy Storage*, vol. 73, p. 108886, 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108886.
- [3] S. M. Jafari Raad, Y. Leonenko, and H. Hassanzadeh, "Hydrogen storage in saline aquifers: Opportunities and challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 168, no. 112846, p. 112846, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112846.
- [4] J. Juez-Larré, C. Gonçalves Machado, H. Yousefi, T.-K. Wang, R. Groenenberg, and S. Van Gessel, "(Pre)feasibility study of underground hydrogen storage potential in depleted gas fields and salt caverns in the Netherlands," EGU23 Abstract, Available: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-10005>.
- [5] M. Mahaseni and B. Sedaee, "Selection of The Best EOR Method under Uncertainty with Probabilistic Response Surface Model and Quantitative Decision Criteria for One of Iran'S Giant Heterogeneous Reservoir," *J. Pet. Res.*, vol. 31, no. 117, pp. 78–95, 2021, doi: 10.22078/pr.2021.4350.2971.



## مروری بر روش‌های افزایش راندمان بهره‌برداری از چاه‌های نفت

زهرا میرعزیزی<sup>\*</sup>؛ مصطفی زمانیان<sup>۲</sup>

### چکیده

در دنیایی که منابع نفت خام رو به کاهش و تقاضا برای انرژی به طور مداوم در حال افزایش است، فناوری‌های ازدیاد برداشت نفت اهمیت حیاتی پیدا کرده‌اند. با وجود اینکه روش‌های سنتی تولید تنها قادر به بازیافت ۲۰ تا ۴۰ درصد نفت موجود در مخازن هستند، فناوری‌های پیشرفته ازدیاد برداشت نفت امکان دسترسی به مقادیر قابل توجهی از نفت باقیمانده را فراهم می‌آورند. این فناوری‌ها، که شامل روش‌های متنوعی از جمله سیلاب‌زنی شیمیایی، تزریق آب، گاز، بخار، احتراق، و تحریک اولتراسونیک هستند، به طور قابل ملاحظه‌ای به بهبود راندمان جابجایی نفت کمک می‌کنند. این مقاله مروری به بررسی این تکنیک‌های نوآورانه می‌پردازد و تأثیر آنها بر کاهش کشش سطحی، کنترل تحرک سیال و افزایش کارایی سیالات تزریقی را مورد تحلیل قرار می‌دهد. همچنین، به بررسی فرایندهای امتزاج‌پذیر و غیرامتزاج‌پذیر سیلاب‌زنی گازی و تکنیک‌های تزریق بخار و احتراقی می‌پردازد که هر کدام به نوبه خود، رویکردهای متفاوتی را برای افزایش بازیافت نفت ارائه می‌دهند.

### کلیدواژه‌ها

ازدیاد برداشت نفت؛ کاهش کشش سطحی؛ تزریق شیمیایی؛ تزریق بخار؛ تزریق بیولوژیکی؛ تزریق نانو مواد؛

### ۱. مقدمه

با رشد سریع صنعت، تقاضای جهانی انرژی رو به افزایش است و پیش بینی می‌شود تا سال ۲۰۴۰، ۳۰ درصد افزایش یابد. طبق گزارش سازمان کشورهای صادرکننده نفت (اوپک)، تقاضای نفت خام تا سال ۲۰۴۰ به ۱۰۹/۴ بشکه نفت در روز خواهد رسید [۱]. در طول چند دهه گذشته، نفت خام یکی از مهم‌ترین منابع اصلی انرژی است که منجر به تغییرات اجتناب ناپذیر و قابل توجهی در خروجی مخازن متعارف شده است، زیرا اکثر میادین نفتی معمولی در سراسر جهان به مرحله تولید نیمه تا انتهای خود رسیده‌اند [۲]. تکنیک‌های مرسوم قادر به حداکثر رساندن استخراج نفت خام از مخازن نیستند و مقدار زیادی نفت در مخزن باقی می‌ماند. چنانچه ۶۷ درصد از کل ذخایر نفتی در جهان، باقیمانده نفت خام در مخازن است که با استفاده از فناوری امروزی، تنها بین ۲۰ تا ۴۰ درصد از نفت اصلی موجود در مخزن را می‌توان بازیافت کرد [۳]. برداشت ثانویه نفت زمانی صورت می‌گیرد که برداشت طبیعی نفت شروع به کاهش کند. هدف از روش‌های ازدیاد برداشت نفت، افزایش راندمان جاروب کردن،

<sup>\*</sup> زهرا میرعزیزی، دانشکده مهندسی عمران آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی عباسپور، تهران، ایران، z\_mirazizii@sbu.ac.ir

<sup>۲</sup> مصطفی زمانیان، دانشکده مهندسی عمران آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی عباسپور، تهران، ایران، m\_zamanian@sbu.ac.ir

کاهش ویسکوزیته نفت، یا تغییر نیروهای موئینگی در مخزن است [۴-۶].

## ۲. ازدیاد برداشت نفت (EOR)

فرآیندهای برداشت نفت به سه دسته اصلی برداشت اولیه، ثانویه و ثالثیه نفت طبقه بندی می‌شوند که از طریق فشار طبیعی مخزن، استخراج مصنوعی (مانند پمپ‌ها یا دستگاه‌های دیگر)، با فوران طبیعی نفت حاصل از رانش با گاز محلول، رانش با کلاهک گاز، رانش با آب، رانش‌های انبساط سنگ و سیال، رانش‌های ترکیبی و زهکشی گرانشی، صورت می‌گیرد [۸، ۷، ۱]. فرآیندهای برداشت اولیه و ثانویه نفت قادر به برداشت ۱۰ تا ۲۰ درصد از نفت اصلی در محل هستند. روش‌های بازیافت ثالثیه نفت شامل روش‌های شیمیایی، حرارتی، میکروبی، الکترومغناطیسی، گازی، احتراق و گرمایش الکتریکی باشند [۹]. برای افزایش ضریب بازیافت نفت، باید پارامترهای مخزن نفت مانند نفوذپذیری، تخلخل، دما و ویسکوزیته در نظر گرفته شوند که نفوذپذیری یکی از مهم‌ترین پارامترهاست، زیرا اگر سنگ مخزن متخلخل نباشد، ضریب بازیافت نفت کم خواهد بود [۱۱، ۱۰]. در ادامه مروری بر روش‌های افزایش راندمان برداشت نفت می‌شود:

### ۱،۲ تزریق آب

تزریق آب از مهم‌ترین روش‌های بازیافت نفت بخصوص مخازن دریایی است. تزریق آب با شوری کم باعث ازدیاد برداشت نفت در مقایسه با تزریق آب با شوری بالا می‌باشد [۱۲]. تزریق آب، اشباع نفت باقی‌مانده را به حداقل و با جابجایی ذرات، ساختار منافذ را تغییر و با افزایش راندمان انتقال گرما و جرم مخزن تولید نفت را افزایش می‌دهد. همچنین با انبساط خاک رس، تغییرات ناشی از خصوصیات ترشوندگی سنگ، غلظت آب تزریقی، غلظت یونی، نرخ جریان، حجم تزریق، دمای مخزن، فشار سازند، نیز می‌تواند راندمان جابجایی و بازیافت نفت را تقویت کنند [۱۴، ۱۳].

### ۲،۲ تزریق گاز

تزریق گاز یکی از موثرترین روش‌های بازیافت نفت است که به طور گسترده استفاده می‌شود که شامل گازهای هیدروکربنی، نیتروژن ( $N_2$ )، دی اکسید کربن ( $CO_2$ ) می‌باشد. تزریق گاز می‌تواند بصورت تزریق مداوم، تزریق متناوب آب و گاز و یا تزریق چرخه‌ای، امتزاج پذیر و غیرامتزاج پذیر به مخزن باشد. این روش‌ها با حفظ فشار مخزن، باعث تورم و کاهش ویسکوزیته نفت می‌شوند. گاز  $CO_2$  بیشترین کاربرد را در ازدیاد برداشت نفت دارد. البته این روش با افزایش فشار مخزن نیز باعث انبساط نفت و برداشت آسان‌تر آن می‌شود. ویژگی‌های مخزن و سیال مانند تخلخل و نفوذپذیری، سرعت و فشار تزریق، نقش مهمی در به حداکثر رساندن برداشت نفت دارند. سیلاب‌زنی‌های گازی، از جمله فرآیندهای غیرقابل امتزاج و امتزاج‌پذیر هستند که معمولاً توسط سیالات تزریقی (دی اکسید کربن، نیتروژن یا هیدروکربن) صورت می‌گیرد [۱۱].

### ۳،۲ روش حرارتی

روش‌های حرارتی، بیشتر در مخازن تنگ به دلیل نفوذپذیری کم محیط متخلخل بکار می‌رود. اعمال گرما به مخزن باعث کاهش نیروهای چسبندگی و کشش سطحی، ویسکوزیته نفت و بهبود برداشت نفت می‌شود و برای نفت‌های سنگین و بسیار ویسکوز مفید می‌باشد. سه نوع روش حرارتی EOR شامل: تزریق بخار، احتراق درجا (تزریق سیالات داغ به مخزن) و گرمایش الکتریکی وجود دارند که تزریق بخار محبوب‌ترین و از نظر تجاری کارآمدترین روش‌ها است. روش‌های بخار شامل تحریک دوره‌ای با بخار یا رانش با بخار است. فن‌آوری‌های احتراقی

را نیز می‌توان به خود اشتعال‌ها و آن‌هایی که نیاز به منبع گرمایی در انژکتورها دارند، تقسیم کرد [۱۵].

#### ۴.۲ روش شیمیایی

با افزودن مواد شیمیایی به آب تزریق شده به مخزن انجام می‌شود. این روش‌ها یا افزایش ویسکوزیته آب باعث افزایش عدد موئینگی، کاهش نیروهای موئینگی، کاهش کشش سطحی، کاهش ویسکوزیته نفت می‌شوند. آنها با افزایش ویسکوزیته آب، بهبود نفوذپذیری نسبت به نفت و کاهش نفوذپذیری نسبت به آب، باعث افزایش راندمان برداشت می‌شوند. زیرا هنگام جریان در محیط‌های متخلخل، تحت انبساط و انقباض قرار گرفته و ویسکوالاستیسیته (گران‌روی کشسانی) ایجاد می‌کنند و پلیمرهای دارای کشسانی بالا می‌توانند مقاومت بیشتری از طریق محیط متخلخل یا ویسکوزیته بالاتر در برابر جریان داشته باشند. در روش‌های شیمیایی از سه ماده شیمیایی مواد قلیایی شامل پلیمرها و سورفکتانت‌ها، فوم و نانوسیال‌ها استفاده می‌شود. از بین سه ماده شیمیایی، مواد قلیایی یکی از پرمصرف‌ترین مواد شیمیایی جهت EOR به‌ویژه در سیلاب‌زنی پلیمری می‌باشند [۱۶].

#### ۵.۲ روش بیولوژیک

روش‌های بیولوژیک شامل تزریق میکروارگانیزم‌های زنده با مواد مغذی ضروری به چاه جهت کاهش تولید آب و ازدیاد برداشت نفت است. میکروارگانیزم‌های تزریقی در شرایط محیطی مطلوب مخزن به صورت تصاعدی رشد می‌کنند و محصولات متابولیکی آنها نفت باقیمانده را به حرکت درمی‌آورند. رشد این میکروارگانیزم‌ها و اثرات آنها به عواملی مانند: فشار، تخلخل و نفوذپذیری، دما، pH، مواد جامد محلول، و شوری مخزن، در دسترس بودن مواد مغذی برای باکتری‌ها بستگی دارد که قادر هستند تا ۵۰٪ از نفت باقیمانده در مخزن را پس از اتمام فرآیندهای بازیافت اولیه و ثانویه خارج کنند [۳].

#### ۶.۲ روش اولتراسونیک

این روش از جدیدترین روشهای ازدیاد برداشت نفت است که با ایجاد امواج فراصوت به داخل مخزن، ارتعاشات و نوساناتی ایجاد می‌کند که ماتریس مخزن را شکسته، نفت به دام افتاده را خارج و حرکت آن را به سمت چاه‌های تولیدی پیش می‌برد. این روش غیرنفوذی و سازگار با محیط زیست، در افزایش سرعت برداشت نفت، به ویژه در سازندهای با نفوذپذیری پایین مؤثر است. اجرای آسان، مقرون به صرفه بودن، سازگاری با روش‌های دیگر، عدم آلودگی مزایای آن است. در این روش نیازی به تزریق ماده خاص و خرید دستگاههای پمپ سیال به منظور تحریک چاه نیست. حفاری چاه‌های افقی و شکاف هیدرولیکی باعث افزایش سطح تماس، کاهش افت فشار، به تاخیر انداختن تشکیل میعانات و افزایش میزان بهره‌دهی از مخازن گاز میعانی می‌شود [۱۷].

### ۳. نتیجه‌گیری

با گذشت زمان و برداشت اولیه نفت از مخازن، بخش قابل توجهی از این ماده ارزشمند همچنان در زیر زمین محبوس باقی می‌ماند. EOR مجموعه‌ای از تکنیک‌های پیچیده است که با تزریق سیالات یا مواد شیمیایی به مخزن، به جابجایی و استخراج نفت باقیمانده کمک می‌کند. این روش‌ها به طور کلی به سه دسته ثانویه، ثالثیه و پیشرفته تقسیم می‌شوند. روش‌های ثانویه شامل تزریق آب یا گاز، متداول‌ترین روش‌های EOR هستند که با افزایش فشار مخزن، رانش نفت به سمت چاه‌ها را تسهیل می‌کنند. روش‌های ثالثیه مورد استفاده در مخازن پیچیده‌تر شامل روش‌های حرارتی مانند تزریق بخار یا احتراق درون مخزنی برای کاهش ویسکوزیته نفت و افزایش سیالیت آن هستند. روش‌های پیشرفته تکنولوژی‌های نوینی مانند تزریق نانوذرات، امواج صوتی و میکروارگانیزم‌ها هستند که می‌توانند با مکانیزم‌های خاص، به استخراج نفت محبوس در اعماق مخازن کمک کنند. انتخاب روش

EOR مناسب به عوامل متعددی مانند نوع مخزن، خواص نفت، شرایط اقتصادی و ملاحظات زیست‌محیطی بستگی دارد. بطور کلی EOR نقشی حیاتی در تامین امنیت انرژی و حفظ منابع طبیعی ایفا می‌کند. با این روش‌ها می‌توان از هدر رفتن ثروت ملی و حفظ این سرمایه ارزشمند برای نسل‌های آینده اطمینان حاصل کرد.

#### ۴. فهرست مراجع

- S. Sim Sze Lim, H. Elochukwu, J. Nandong, Z. Bennour and M. A. Hamid, "A review on the mechanisms of low salinity water/surfactant/ nanoparticles and the potential sy Topics on Oil and Gas, 2023\*intechopen.comnergistic application for c-EOR.," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 8, p. 324, 2023.
- M. K. Uoda, H. Q. Hussein, and R. Rana, " Experimental investigation of combined carbon nanoparticles (CNPs), ionic liquid (I.L), and low salinity water to enhance oil recovery (EOR) at Iraq's southern oil fields.," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 391, p. 123322, 2023.
- C, Nikolova and T. Gutierrez, "Use of Microorganisms in the Recovery of Oil From Recalcitrant Oil Reservoirs: Current State of Knowledge, Technological Advances and Future Perspectives," *Frontiers in Microbiology*, vol. 10, p. 2996, 2020.
- L. B. L. Santos, A. C. M. Silva, K.R.O. Pereira, C, Moraes, A. C. Leiras Gomes, J. P. L. Santos, G. Simonelli and L. C. L. Santos, "Microemulsions stabilized with nanoparticles for EOR: A review," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 391, p. 123271, 2023.
- S. Sikiru, "Graphene: Outlook in the enhance oil recovery (EOR)," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 321, p. 114519, 2021.
- A, H, Alagorni, Z. B. Yaacob, A. H. Nour, "An overview of oil production stages: enhanced oil recovery techniques and nitrogen injection," *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 6, p. 693, 2015.
- V. Alvarado, and E. J. E. Manrique, "Enhanced oil recovery: an update review," *Energies*, vol. 3, p. 1529, 2010.
- G. Kumar Pothula, R. Kumar Vij and A. Bera, " An overview of chemical enhanced oil recovery and its status in India," *Petroleum Science*, vol. 20, p. 2305, 2023.
- J. Fink, *Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids*, Leoben, Austria: University of Leoben, 2020.
- Y. Afeez, "Investigation On Nanoparticles' Effect On Interfacial Forces For Enhanced Oil Recovery," *Pet. Coal*, vol. 61, P. 1158, 2019.
- D. S. Eyinla, S. Leggett a, F. Badrouchi, H. Emadi, O. Adamoleku and O. Akinsanpe, "A comprehensive review of the potential of rock properties alteration during CO2 injection for EOR and storage," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 353, p. 129219, 2023.
- T. G. Sorop., "Integrated approach in deploying low salinity waterflooding," in *SPE Enhanced Oil Recovery Conference, 2013*.
- N. Morrow and J. Buckley, "Improved oil recovery by low-salinity waterflooding," *Journal of petroleum, Technology*, vol. 63, pp. 106, 2011.
- R. A. Nasralla, "Low salinity waterflooding for a carbonate reservoir: Experimental evaluation and numerical interpretation," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 164, pp. 640-654, 2018.
- S. Thomas, "Enhanced oil recovery-an overview," *Oil & Gas Science and Technology-*

Revue de l'IFP, vol. 63, p. 9, 2008.

- T. S. Urbissinova and E. Kuru, "Effect of elasticity during viscoelastic polymer flooding: a possible mechanism of increasing the sweep efficiency," Journal of Canadian Petroleum Technology, vol. 49, p.49, 2010.
- R. Tahmasebi-Boldaji, The Effect of Ultrasonic Waves on Crude Oil Recovery, Topics on Oil and Gas, intechopen.com, 2023.



## بهسازی بیولوژیک خاک

عباس پوردیلمی\*؛ بهزاد پوزشی؛ بهفر کرمی؛

### چکیده

مفهوم استفاده از فرآیند بیولوژیکی در بهسازی خاک که به بهسازی خاک با واسطه زیستی معروف است، پتانسیل بیشتری را در کاربردهای مهندسی ژئوتکنیک از نظر عملکرد و پایداری محیطی نشان داده است. این نوشتار مروری بر میکروارگانیسم‌های خاک مسئول این فرآیند و عواملی که بر فعالیت‌های متابولیکی و سازگاری آن‌ها با خاک تأثیر می‌گذارد و همچنین، مکانیزم زیست کانی‌سازی ارائه می‌کند. عوامل محیطی و سایر عواملی که ممکن است در محل در طی بارش کلسیت ناشی از میکروبی (MICP) و تأثیرات آنها بر فرآیند شناسایی و ارائه شوند، شناسایی و ارائه شدند. بهبود در خواص مهندسی خاک مانند استحکام، سختی و نفوذپذیری همانطور که در برخی مطالعات ارزیابی شده است مورد بررسی قرار گرفته است.

### کلیدواژه‌ها

اصلاح خاک با واسطه زیستی؛ میکروارگانیسم‌ها؛ MICP؛ زیست کانی‌سازی؛

### ۱. مقدمه

روش با واسطه زیستی بهسازی خاک به عنوان یک رویکرد ابداعی در مهندسی ژئوتکنیک در نظر گرفته شده است که می‌تواند برای جلوگیری از روانگرایی و لغزش زمین در ماسه سست مورد استفاده قرار گیرد. روش با واسطه زیستی بهبود خاک، به طور کلی به واکنش بیوشیمیایی اطلاق می‌شود که در داخل یک توده خاک برای تولید رسوب کلسیتی برای اصلاح برخی از خواص مهندسی خاک رخ می‌دهد. در همین حال، اخیراً استفاده از دانش میان رشته‌ای مهندسی عمران، شیمی و میکروبیولوژی برای تغییر خواص مهندسی خاک در زیرسطح پدیدار شده است. این تکنیک از فرآیندهای میکروبی خاک، که از نظر فنی به عنوان رسوب کلسیتی ناشی از میکروبی (MICP) نامیده می‌شود، برای رسوب کربنات کلسیم به ماتریکس خاک استفاده می‌کند. کربنات کلسیم تولید شده ذرات خاک را به هم متصل می‌کند و از این رو استحکام را بهبود می‌بخشد و هدایت هیدرولیکی خاک را کاهش می‌دهد. انتظار می‌رود که درک واضح از تأثیر میکروارگانیسم‌ها و فعالیت بیولوژیکی بر رفتار خاک بتواند به شناسایی و یا طبقه‌بندی مناسب خاک و حتی راه‌حل‌های مهندسی ژئوتکنیکی جایگزین منجر شود. این پژوهش به بررسی مفهوم زیست کانی‌سازی و کاربردهای آن در بهبود خواص مهندسی خاک می‌پردازد.

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران، [a.pourdeilami@du.ac.ir](mailto:a.pourdeilami@du.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران، [beh.spider@gmail.com](mailto:beh.spider@gmail.com)

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران، [behfar.kk@gmail.com](mailto:behfar.kk@gmail.com)

## ۲. میکروارگانیسم‌های خاک

خاک حاوی گونه‌های میکروارگانیسم بیشتری نسبت به سایر زیستگاه‌های میکروبی است. این می‌تواند به این دلیل باشد که حاوی مواد مغذی زیادی است و معمولاً مقداری سیال را در فضاها می‌نماید خود حفظ می‌کند. میکروارگانیسم‌ها با شرایط مختلف هم از نظر ژنتیکی و هم از نظر فیزیولوژیکی بسیار سازگار هستند، زیرا بیش از ۳٫۵ میلیارد سال است که وجود دارند [۱]. از جمله میکروارگانیسم‌های موجود در خاک می‌توان به باکتری‌ها، آرکیا و یوکاریا اشاره کرد. شناسایی، خصوصیات و طبقه‌بندی میکروارگانیسم‌ها معمولاً با استفاده از نوع دیواره سلولی، شکل، مواد مغذی، نوع تبدیل بیوشیمیایی و توالی‌های DNA و RNA بدست می‌آیند [۲]. به گفته میچل و سانتامارینا (۲۰۰۵) [۳]، فراوان‌ترین میکروارگانیسم‌ها در خاک باکتری‌ها هستند. تعدادی از گونه‌های باکتری قادر به تولید آنزیم اوره آز هستند و در تکنیک‌های اصلاح خاک با واسطه زیستی استفاده می‌شوند عبارتند از نوع *Bacillus*، *Sporosarcina*، *Sporolactobacillus*، *Clostridium* و *Desulfotomaculum* [۴]. فعالیت میکروارگانیسم‌های تولیدکننده اوره آز را می‌توان بر اساس پاسخ آنها به حضور زیاد آمونیوم به دو دسته مختلف تقسیم کرد. گروه اول شامل باکتری‌هایی است که فعالیت اوره آز آنها به دلیل غلظت بالای آمونیوم سرکوب نمی‌شود، در حالیکه گروه دوم شامل *Bacillus megaterium*، *Alcaligenes eutrophus*، *Klebsiella* و *aerogenes Pseudomonas aeruginosa* است [۵] که فعالیت اوره آز آن توسط غلظت‌های بالای آمونیوم سرکوب می‌شود. بنابراین، میکروارگانیسم‌هایی که فعالیت اوره آز آنها توسط محتوای بالای آمونیوم سرکوب نمی‌شود، در بهبود خاک با واسطه زیستی ترجیح داده می‌شوند زیرا غلظت‌های بالایی از اوره در این فرآیند هیدرولیز می‌شوند [۶].

## ۳. بیومرینالیزاسیون یا زیست کانی‌سازی

فرآیندی که موجودات زنده مواد معدنی تولید می‌کنند را بیومرینالیزاسیون یا زیست کانی‌سازی می‌گویند. فرآیندهای زیست کانی‌سازی همانطور که در بسیاری از مطالعات گزارش شده مستند شده است توسط لیان و همکاران (۲۰۰۶) تقریباً در تمام محیط‌های روی زمین فعال هستند و بیشتر فعالیت‌های میکروبی منجر به تشکیل مواد معدنی کربناته در نزدیکی سطح زمین می‌شود. فعالیت میکروبی نقش اساسی در تشکیل کربناته به عنوان رسوبات و رسوبات کربناته خاک ایفا می‌کند. بنابراین میکروب‌های خاک و برخی محیط‌های آبی عمدتاً مسئول القای رسوبات کربنات کلسیم در هر دو محیط طبیعی و آزمایشگاهی هستند. بارزترین کانی‌های حاصل از فرآیند بیومرینالیزاسیون کربنات‌ها هستند. رسوب کربنات کلسیم ناشی از میکروبی MICP، به عنوان یک فرآیند طبیعی که شامل فعالیت‌های متابولیکی میکروارگانیسم‌ها است شناخته می‌شود که البته، برخی واکنش‌های شیمیایی به طور کلی توسط برخی شرایط محیطی کنترل می‌شود. مورتسنس و همکاران (۲۰۱۱) [۷] اثرات برخی از عواملی را که ممکن است در خاک زمین در طول درمان MICP با آن مواجه شوند و احتمالاً بر رشد باکتری، متابولیسم و بارش ناشی از باکتری با استفاده از باکتری *Sporosarcina pasteurii* تأثیر می‌گذارند، ارزیابی کردند.

## ۴. بهبود خواص مهندسی خاک

مطالعات زیادی برای ارزیابی استحکام/سفتی، نفوذپذیری خاک‌های مختلف با استفاده از بارش کلسیت ناشی از میکروب‌ها MICP انجام شده است. به همین ترتیب، مطالعاتی در مورد تأثیر درجات مختلف اشباع بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی ماسه‌های سیمانی زیستی توسط Cheng و همکاران انجام شد (۲۰۱۳) [۸]. از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای نمونه‌های شن و ماسه آزمایش شده استفاده شد. مشخص شد که توزیع رسوبات کلسیتی به درجه اشباع نمونه‌ها بستگی دارد، به طوری که نمونه‌های کاملاً اشباع بلورهای پراکنده روی سطح دانه تشکیل می‌دهند، در حالی که نمونه‌هایی با درجه اشباع پایین‌تر پوشش کلسیتی قوی را روی دانه‌های ماسه تشکیل



می‌دهند که آنها را به یکدیگر پیوند می‌دهد. تکنیک استفاده از میکروارگانیزم‌ها برای بهبود مقاومت خاک دانه‌ای که بیوسمانتاسیون گفته می‌شود در سال ۲۰۰۱ در استرالیا آغاز شد. همانطور که توسط کوچارسکی و همکاران (۲۰۰۶) [۹] گزارش شده است، یک کیسه شن و ماسه به ستون‌هایی از ماسه سنگ آهکی تبدیل شد. مطالعات اخیر Soon و همکاران (۲۰۱۳) [۱۰] اثربخشی بارش کلسیت ناشی از میکروبی را در بهبود مقاومت برشی و کاهش نفوذپذیری خاک و ماسه باقیمانده مناطق گرمسیری نشان می‌دهد.

بیولوگ را می‌توان به عنوان کاهش رسانایی هیدرولیکی خاک یا سنگ‌های متخلخل توسط مواد پرکننده منافذ تولید شده توسط فرآیندهای میکروبی تعریف کرد. رسوب کربنات تولید شده به صورت میکروبی مسئول مسدود کردن فضاهای منافذ خاک و در نتیجه محدود کردن جریان آب و کاهش نفوذپذیری خاک است. نگرانی اصلی در رابطه با روش‌های معمولاً اتخاذ شده برای تزریق معرف سیمان سازی از سطح به پایین، توزیع تفاضلی کلسیت است که بسیاری از آنها در سطح رسوب می‌کنند. چو و همکاران (۲۰۱۲) [۱۱] کاهش قابل توجهی در هدایت هیدرولیکی و بهبود استحکام برشی، هم در سطح و هم در بخش عمده خاک با استفاده از باکتری اورئولیتیک *Sporosarcina pasteurii* جدا شده از شن و ماسه سواحل استوایی مشاهده کردند. به همین ترتیب، Filet و همکاران (۲۰۱۲) [۱۲] MICP را به عنوان یک روش بهسازی رقابتی برای تحکیم خاک خوب دانه بندی شده توصیف کردند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که حجم خاک بهسازی شده بدون تغییر قابل توجهی در نفوذپذیری اولیه خاک در چند روز مانند ماسه سنگ آهکی تبدیل می‌شود. کربنات کلسیم بیومرینالیزه شده کارایی خود را هم در گرفتگی و هم در بیوسمانتاسیون خاک ثابت کرده است و می‌تواند به عنوان جایگزینی برای روش‌های سنتی فشرده‌سازی مکانیکی و روش‌های تزریق شیمیایی که گران هستند و گاهی اوقات برای محیط‌زیست مضر هستند، استفاده شوند. نعمتی و ووردو (۲۰۰۳) [۱۳] اثرات غلظت‌های مختلف آنزیم اوره آز، معرف‌های سیمانی و دما را بر نفوذپذیری محیط‌های متخلخل تجمیع نشده در نظر گرفتند. آنها دریافتند که افزایش غلظت آنزیم اوره آز از ۰٫۰۱ گرم در لیتر به ۰٫۱ گرم در لیتر باعث افزایش تولید  $\text{CaCO}_3$  می‌شود، در حالی که افزایش اوره و کلرید کلسیم بیش از ۳۶ گرم در لیتر و ۹۰ گرم در لیتر به ترتیب افزایش نمی‌یابد. مقدار کلسیت به دست آمده توسط MICP. از این رو، محدوده دمایی ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد تولید  $\text{CaCO}_3$  را در غلظت کم آنزیم افزایش می‌دهد. اگرچه اثر دما توسط برخی از نویسندگان در رابطه با بارش کربنات میکروبی ارزیابی شده است، سایر عوامل محیطی مانند رطوبت، کاتیون‌های محلول، درجه اشباع خاک و بسیاری موارد دیگر نیز نیاز به ارزیابی دارند. یاسوهارا و همکاران (۲۰۱۲) [۱۴] پتانسیل استفاده از آنزیم اوره آز از منابع دیگر متفاوت از باکتری‌ها را برای کاتالیز هیدرولیز اوره در حضور کلرید کلسیم برای رسوب کربنات کلسیم به منظور بهبود خواص مهندسی نمونه‌های ماسه گزارش کردند. یافته‌های این مطالعه نشان داد که مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های بهسازی شده به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و هدایت هیدرولیکی اولیه نمونه‌های تیمار شده به میزان ۶۰ تا ۷۰ درصد کاهش می‌یابد.

## ۵. نتیجه گیری

MICP را می‌توان به عنوان یک تکنیک عملی در نظر گرفت که می‌تواند در بسیاری از کاربردهای مهندسی ژئوتکنیک مانند تثبیت شیب و تقویت زیربنا استفاده شود. برای ارزیابی امکان سنجی MICP با تزریق سنتی، به ویژه با توجه به پیامدهای زیست محیطی و اقتصادی، باید مطالعات مقایسه‌ای انجام شود و مطالعات بیشتری در زمینه امکان سنجی ترکیب این تکنیک با روش‌های دیگری که استحکام و دوام طولانی مدتی مانند آهک را فراهم می‌کند، توصیه می‌شود. میکروارگانیزم‌های خاک نقش مهمی در تشکیل خاک‌های ریزدانه و تغییر رفتار خاک‌های درشت دانه دارند. از این رو، علیرغم ارتباط آنها در تأثیرگذاری بر خواص و رفتار خاک، کار کمتری در بررسی اهمیت، ارتباط، سودمندی و کاربرد این میکروارگانیزم‌ها در مهندسی ژئوتکنیک انجام شده است. اگرچه MICP

به طور گسترده هم در محیط‌های طبیعی و هم در شرایط آزمایشگاهی کنترل شده مورد بررسی قرار گرفته است، مکانیسم دقیق بارش و عملکرد این فرآیند در اکولوژی میکروبی ارگانیسم رسوب کننده حل نشده باقی مانده است. بنابراین، وجود مکانیسم‌های ممکن مختلف با توجه به نقش میکروارگانیسم‌ها در رسوب کربناته، پیچیدگی فرآیند زیست کانی‌سازی و نیاز به کاوش بیشتر در این فرآیند را توصیف می‌کند.

## ۶. فهرست مراجع

- [1] Stotzky G. "Soil as an environment for microbial life," In: van Elsas JD, Trevors JT, Wellington EMH, editors. *Modern soil microbiology*. Taylor & Francis; p. 1–20, 1997.
- [2] Ehrlich HL. "Geomicrobiology: its significance for geology", *Earth-Science Reviews*; 45(1–2): p. 45–60, 1998.
- [3] Mitchell JK, Santamarina JC. "Biological considerations in geotechnical engineering", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*; 131(10): p. 1222–33, 2005.
- [4] Kucharski ES, Cord-Ruwisch R, Whiffin V, Al-Thawadi SMJ. "Microbial biocementation", *World Patent* 066326, 2006.
- [5] Friedrich B, Magasanik B. "Urease of *Klebsiella aerogenes*: control of its synthesis by glutamine synthetase", *Journal of Bacteriology*; 131(2): p. 446–52. 1977.
- [6] Whiffin VS. "Microbial CaCO<sub>3</sub> precipitation for the production of biocement", PhD Thesis. Murdoch University; 2004.
- [7] Mortensen, B.M., Haber, M.J., DeJong, J.T., Caslake, L.F. and Nelson, D.C., "Effects of environmental factors on 943 microbial induced calcium carbonate precipitation", *Journal of applied microbiology*, 111(2), pp.338-349, 2011.
- [8] Cheng L, Cord-Ruwisch R, Shahin MA. "Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation", *Canadian Geotechnical Journal*; 50(1): p. 81–90, 2013.
- [9] Kucharski ES, Cord-Ruwisch R, Whiffin V, Al-Thawadi SMJ. "Microbial biocementation", *World Patent* 066326, 2006.
- [10] Soon NW, Lee LM, Khun TC, Ling HS. "Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation", *KSCE Journal of Civil Engineering*; 17(4): p. 718–28, 2013.
- [11] Chou, C.-W., Seagren, E. A., Aydilek, A. H. & Lai, M., "Biocalcification of sand through ureolysis". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 137, p. 1179-1189, 2012.
- [12] Filet, A. E., Gadret, J.-P., Loygue, M. & Borel, S., "Biocalcification and its applications for the consolidation of sands. In: 840 Grouting and deep mixing 2012...", pp. 1767-1780, 2012.
- [13] Nemati M, Voordouw G., "Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ". *Enzyme and Microbial Technology*; 33 (5): 635–42, 2003.
- [14] Yasuhara H, Neupane D, Hayashi K, Okamura M., "Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation", *Soils and Foundations*; 52(3): 539–49, 2012.



## کاربرد آنالیز آماری تصاویر CBCT در ارزیابی ناهمگنی سنگ مخزن‌های هیدروکربنی و مطالعات مخزن

شیرین سامانی<sup>۱</sup>؛ محسن نصرآبادی<sup>۲</sup>؛ سعادت محمدحسین زاده<sup>۳</sup>؛ رفعت پارسایی<sup>۱</sup>؛ احسان بهرام پور<sup>۴</sup> و مهدی اسکروچی<sup>۱\*</sup>

### چکیده

بررسی تغییرات سیستم منفذی سنگ مخزن در مطالعات جریان چندفازی در محیط متخلخل بویژه موارد مرتبط با فرآیندهای ازدیاد برداشت، ذخیره‌سازی زیرزمینی دی‌اکسیدکربن و دفع پساب بسیار با اهمیت بوده و عدم توجه به ناهمگنی مغزه‌ها در مطالعات آزمایشگاهی می‌تواند به شدت بر نتایج و امکان ارتقا مقیاس آن به مخزن تاثیر بگذارد. در این مطالعه ۳۱ نمونه سنگ آهک انتخاب شده از سازند ایلام با تغییرات تخلخل و تراوایی با دستگاه سی‌تی‌اسکن دندانه‌پزشکی (Cone Beam Computed Tomography : CBCT) تصویربرداری شده‌اند. به منظور ارزیابی ناهمگنی از هر نمونه ۹ یا ۱۲ برش عرضی انتخاب شده و به کمک نرم‌افزار پردازش تصویر برای هر تصویر نمودار هیستوگرام براساس عدد سی‌تی تمامی وکسل‌ها رسم شده و انحراف معیار آن محاسبه شده است. با این ترتیب، شدت ناهمگنی به صورت کمی مشخص و بر مبنای پراکندگی داده‌ها، ۵ ناحیه از نظر ناهمگنی، ناحیه همگن (ناحیه آبی)، نسبتاً همگن (ناحیه سبز)، نسبتاً ناهمگن (ناحیه زرد)، ناهمگن (ناحیه نارنجی) و آسیب‌دیده (ناحیه قرمز) طبقه‌بندی شدند. نتایج نشان می‌دهد که از ۳۱ نمونه مورد مطالعه ۱۴ نمونه در ناحیه آبی‌رنگ، ۱۱ نمونه در ناحیه سبزرنگ، ۳ نمونه در ناحیه زردرنگ، یک نمونه در ناحیه نارنجی و ۲ نمونه در ناحیه قرمز قرار گرفته‌اند و پیشنهاد می‌شود به ترتیب در اولویت اول تا پنجم برای انجام مطالعات آزمایشگاهی سنگ مخزن مورد استفاده قرار گیرند.

### کلیدواژه‌ها

ناهمگنی؛ ویژگی‌های پتروفیزیکی؛ تخلخل؛ عدد سی‌تی اسکن، تصویربرداری CBCT؛

### ۱. مقدمه

ناهمگنی به صورت تغییر در یک یا مجموعه‌ای از ویژگی‌های مختلف در فضا و یا زمان در مقیاس‌های مختلف تعریف می‌شود [۱]. مخازن کربناته به دلیل ویژگی‌های پیچیده رسوبی و دیانرژی طور ذاتی ناهمگن هستند و

<sup>۱</sup> بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

<sup>۲</sup> شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب، اهواز، ایران

<sup>۳</sup> مرکز تصویربرداری آترا، شیراز، ایران

\* نویسنده مسئول (escrochi@shirazu.ac.ir)

ویژگی‌های پتروفیزیکی این مخازن به صورت افقی و عمودی در مقیاس میدان در محیط‌های متنوع رسوبی و در اثر تحول حوضه رسوبی در طول زمان تغییر می‌کنند [۲]. رخساره‌ها و محیط رسوبی آن‌ها، تغییرات محیط آبی طی رسوب گذاری و فرآیندهای دیاژنزی عوامل اصلی کنترل‌کننده توزیع همگن یا ناهمگن ویژگی‌هایی همچون کانی‌شناسی، نوع و مقدار تخلخل، تراوایی و ویژگی‌های بافت سنگ (مانند اندازه دانه و جورشدگی)، از مقیاس ماکروسکوپی تا میکروسکوپی هستند [۳]، [۴]، [۵]، [۶]. که در نهایت بر ویژگی‌های جریانی سیالات در محیط متخلخل به شدت تاثیر خواهند داشت. در این میان، ناهمگنی به ویژه تغییرات سیستم منفذی (تخلخل و تراوایی) در مطالعاتی که با هدف بررسی جریان چندفازی در محیط متخلخل انجام می‌شوند، از جمله ازدیاد برداشت نفت، دفع و ذخیره سازی زیر زمینی دی‌اکسید کربن و دفع پساب به چاه‌های نفتی، بسیار موثر و مهم خواهند بود و از این رو مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند.

برای نمونه، کرور و همکاران در سال ۲۰۱۶ ناهمگنی را منبع احتمالی عمده تغییرات نفوذپذیری نسبی در سیستم‌های تزریقی مورد هدف ذکر کردند. آنها گزارش کردند که با مقیاس‌بندی مناسب، امکان انتخاب پارامترهای سیلاب‌زنی جهت حذف اثر ناهمگنی، فراهم می‌شود [۷]. همچنین، نتایج پژوهش کو و همکارانش در سال ۲۰۲۱ نشان داد که عدم توجه به ناهمگنی در طول تزریق CO<sub>2</sub> می‌تواند عدم قطعیت قابل توجهی در شرایط ذخیره‌سازی و جریان سیال ایجاد کند [۸]. از این رو ارزیابی ناهمگنی در درک صحیح ویژگی‌های آن‌ها در مقیاس آزمایشگاهی تا میدان اهمیت دارد. هرچند ارزیابی ناهمگنی به روش‌های غیرمستقیم همواره دشوار و با عدم قطعیت مواجه بوده است. در دهه‌های اخیر استفاده از روش‌های تصویربرداری ضمن شناخت ساختار درونی به ارزیابی ناهمگنی کمک کرده است. محدودیت‌های روش‌های تصویربرداری از جمله دقت تصویربرداری، هزینه و سرعت، استفاده از این روش‌ها را چالش برانگیز کرده است. در این پژوهش با توجه استفاده از تصاویر سی‌تی‌اسکن دندانپزشکی (CBCT) ضمن بررسی کیفی تصاویر، به کمک آنالیز آماری عدد سی‌تی به ارزیابی ناهمگنی پرداخته شده است. دقت قابل قبول در تفکیک، سرعت و دسترسی را می‌توان از مزیت‌های اصلی این روش دانست. هرچند چالش‌های موجود در تصویربرداری در این روش اجتناب‌ناپذیر است.

## ۲. روش مطالعه

### ۲.۱ نمونه‌های مورد مطالعه

با توجه به هدف مطالعه، یعنی مشخص نمودن نمونه‌های مغزه همگن جهت مطالعات ازدیاد برداشت، تعداد ۳۱ نمونه سنگ آهک از سازند ایلام با محدوده مشخصی از تخلخل و تراوایی برای تصویربرداری انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مقادیر تخلخل با استفاده از تخلخل سنج با گاز هلیوم و تراوایی گازی در حالت پایا با گاز نیتروژن در آزمایشگاه پتروآزما اندازه‌گیری شده است.

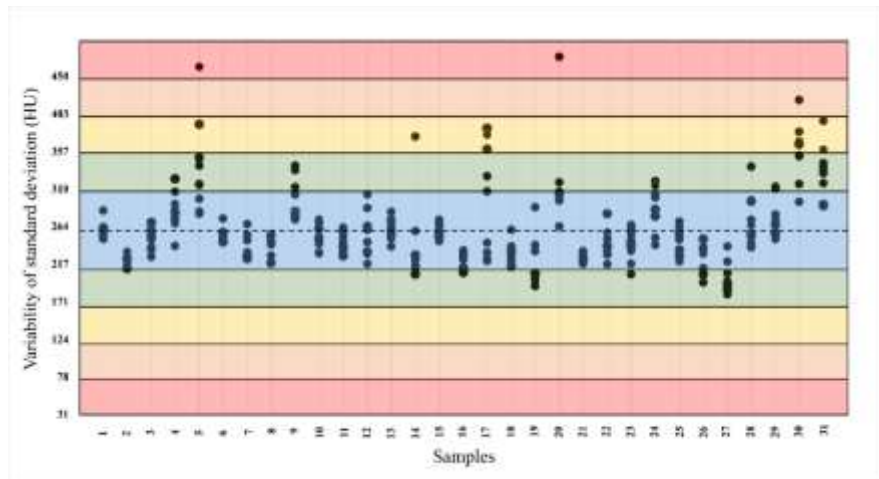
### ۲.۲ سی‌تی‌اسکن دندانپزشکی (CBCT)

توموگرافی کامپیوتری اشعه مخروطی (CBCT) نوع خاصی از تجهیزات اشعه ایکس است. این مدل تصویربرداری معمولاً در امور پزشکی به دلیل محدودیت‌هایی که در نمایش بافت نرم دارد پرکاربرد نیست. در عوض، در ارائه تصاویر با دقت از بخش‌های چگال‌تر، مزیت‌های چشمگیری دارد که به کارگیری آن را برای تصویربرداری از نمونه سنگ با توجه به چگالی بالای کانی‌ها و قدرت تفکیک آن‌ها از فضای خالی، کمک به شناسایی تغییرات بافتی و همگنی سنگ و همچنین سرعت و دقت بیشتر در تصویربرداری ارجح می‌سازد. این روش تصویربرداری به این صورت است که نمونه پلاگ در جایگاه سر بیمار در مرکز دستگاه تصویربرداری قرار می‌گیرد و اشعه ایکس به شکل یک بازوی مخروطی و با زاویه ۳۶۰ درجه به دور نمونه چرخیده و در انتها با کنار

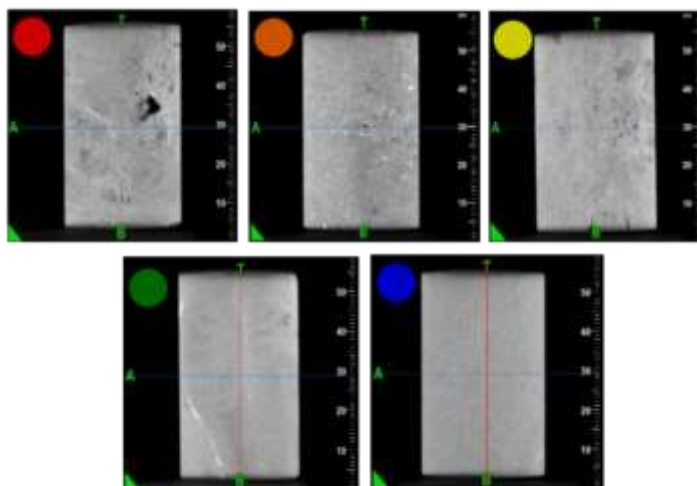
هم قرار دادن عکس‌های متوالی دوبعدی یک عکس سه‌بعدی به دست می‌آید. مدت زمان تصویربرداری در CBCT، بسیار کمتر از سی‌تی‌اسکن (CT) پزشکی است. در این مطالعه تصویربرداری نمونه‌ها در مرکز تصویربرداری تخصصی رادیولوژی دهان، فک و صورت آترا توسط دستگاه CBCT مدل GiANO HR تولید شرکت NewTom کشور ایتالیا استفاده شده است.

### ۳. نتایج مطالعه

به منظور تجزیه و تحلیل تصویر و ارزیابی ناهمگنی از هر نمونه ۹ یا ۱۲ برش عرضی (بسته به طول نمونه با فواصل ۵۰ اسلایس و ضخامت یک وکسل) انتخاب شده و به کمک نرم‌افزار پردازش تصویر Fiji-2.15.0 برای هر تصویر نمودار هیستوگرام براساس عدد سی‌تی تمامی وکسل‌ها رسم شده و انحراف معیار آن محاسبه به منظور توصیف ناهمگنی استفاده شده است. شکل ۱ نمای کلی از وضعیت همگنی همه نمونه‌های اسکن شده را نشان می‌دهد. در این شکل، انحراف معیار عدد سی‌تی برای هر مغزه به کمک انحراف معیار متوسط مغزه‌ها در برش‌های مختلف استاندارد شده و بر مبنای پراکندگی داده‌ها، ۵ ناحیه مشخص شده است. این ناحیه‌ها شامل ناحیه همگن (ناحیه آبی)، نسبتاً همگن (ناحیه سبز)، نسبتاً ناهمگن (ناحیه زرد)، ناهمگن (ناحیه نارنجی) و به شدت ناهمگن یا آسیب‌دیده (ناحیه قرمز) طبقه‌بندی شده‌اند. براساس این نتایج، مغزه‌های مشابه را می‌توان با توجه به میزان پراکندگی تغییرات انحراف معیار انتخاب کرد. شکل ۲ برش طولی از نمونه‌هایی که براساس ناحیه‌بندی در تواحی قرمز تا آبی قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج ارائه شده در این دو شکل همخوانی نتایج کیفی تصاویر و داده‌های عدد سی‌تی تایید می‌شود.



شکل ۱: تغییرات انحراف معیار عدد سی‌تی در برش‌های مختلف در نمونه‌های مورد مطالعه



شکل ۲: نمای طولی (Coronal) از نمونه‌هایی که براساس ناحیه‌بندی همگنی در ناحیه قرمز تا آبی فرار گرفته‌اند.

#### ۴. نتیجه‌گیری

نتایج این بررسی نشان می‌دهد که از ۳۱ نمونه مورد مطالعه ۱۴ نمونه در ناحیه آبی‌رنگ (همگن)، ۱۱ نمونه در ناحیه سبز رنگ (نسبتاً همگن)، ۳ نمونه در ناحیه زرد رنگ (نسبتاً ناهمگن)، یک نمونه در ناحیه نارنجی و ۲ نمونه در ناحیه قرمز قرار گرفته‌اند و پیشنهاد می‌شود به ترتیب در اولویت اول تا پنجم برای عملیات سیلاب‌زنی مورد استفاده قرار گیرند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بررسی داده‌های انحراف معیار عدد سی تی روش مناسبی برای کمی‌سازی وضعیت ناهمگنی نمونه مغزه دارد.

#### ۵. فهرست مراجع

- [1] P. Fitch, M.A. Lovell, S.J. Davies, T. Pritchard, P.K. Harvey, "An integrated and quantitative approach to petrophysical heterogeneity", *Mar Pet Geol* vol. 63, p. 82, 2015.
- [2] D. Tiab, and E.C. Donaldson, "Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties", Elsevier. 2024.
- [3] V. Tavakoli, "Carbonate Reservoir Heterogeneity, Overcoming the Challenges", Springer, 2020.
- [4] F.H. Nader, "Multi-scale quantitative diagenesis and impacts on heterogeneity of carbonate reservoir rocks, *Advances in Oil and Gas Exploration and Production*", Springer, 2017.
- [5] Z. Li, S. Wu, D. Xia, X. Zhang, and M. Huang, "Diagenetic alterations and reservoir heterogeneity within the depositional facies: A case study from distributary-channel belt sandstone of Upper Triassic Yanchang Formation reservoirs (Ordos Basin, China)". *Mar Pet Geol* vol.86, p. 950, 2017.

[6] Ma, Y.Z., "Multiscale Heterogeneities in Reservoir Geology and Petrophysical Properties, in: Quantitative Geosciences: Data Analytics, Geostatistics, Reservoir Characterization and Modeling" p.175. 2019.

[7] Krevor, S., Reynolds, C., Al-Menhali, A. and Niu, B., "The impact of reservoir conditions and rock heterogeneity on CO<sub>2</sub>-brine multiphase flow in permeable sandstone. Petrophysics", vol. 57(01), p.12, 2016.

[8] Kou, Z., Wang, H., Alvarado, V., McLaughlin, J.F. and Quillinan, S.A., "Impact of sub-core scale heterogeneity on CO<sub>2</sub>/brine multiphase flow for geological carbon storage in the upper Minnelusa sandstones". Journal of Hydrology, vol.599, p.126481 ,2021.



## تأثیر حلال بر تخلخل، بلورینگی و پایداری حرارتی چارچوب فلزی-آلی ZIF-8

سعید زاهدی اصل<sup>۱</sup>؛ فهیمه حوری آباد صبور<sup>۲\*</sup>؛ داود سیف‌زاده<sup>۳</sup>

### چکیده

در این مطالعه، تأثیر سه حلال مختلف شامل آب، متانول و اتانول بر خواص ساختاری و پایداری چارچوب‌های فلزی-آلی (MOFs) از نوع ZIF-8 بررسی شده است. سنتز ZIF-8 با استفاده از نیترات روی و ۲-امتیل ایمیدازول در حلال‌های مذکور انجام شده و ویژگی‌های مواد سنتز شده با آنالیزهای XRD، BET، FTIR و TG مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که حلال‌های مختلف تأثیرات قابل توجهی بر درصد بلورینگی، ساختار بلوری، مساحت سطح ویژه، تخلخل و پایداری حرارتی ZIF-8 دارند. به طور خاص، ZIF-8 سنتز شده با متانول و اتانول بلورینگی و پایداری حرارتی بالاتری نسبت به نمونه سنتز شده در حضور آب دارد. یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که با تنظیم شرایط سنتز می‌توان به خواص ساختاری، کریستالی و مورفولوژی مناسب از چارچوب فلزی-آلی ZIF-8 برای کاربردهای جذب و کاتالیست دست یافت.

### کلیدواژه‌ها

چارچوب‌های فلزی-آلی (MOFs)؛ ZIF-8؛ تخلخل؛ بلورینگی؛ پایداری حرارتی

### ۱. مقدمه

چارچوب‌های فلزی-آلی (MOFs) به عنوان مواد نانوساختاری که از یون‌های فلزی و لیگاندهای آلی تشکیل شده‌اند، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود از جمله سطح ویژه بالا، قابلیت تنظیم شیمیایی و پایداری حرارتی بالا، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. یکی از مهم‌ترین انواع MOFها، ZIF-8 است که ساختاری با پیوندهای قوی میان یون‌های فلزی روی و لیگاندهای ایمیدازول دارد. کاربردهای متنوعی برای ZIF-8<sup>۱</sup> شناخته شده است، از جمله در ذخیره‌سازی گاز، جداسازی مواد، کاتالیست‌ها و تصفیه آب شناخته شده است [۱]. اهمیت بررسی انواع حلال در سنتز ZIF-8 از آنجا ناشی می‌شود که حلال‌های مختلف می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر روی ویژگی‌های نهایی ماده سنتز شده داشته باشند. حلال‌ها نقش مهمی در نرخ هسته‌زایی و رشد بلور، اندازه و شکل بلورها و خصوصیات سطحی و تخلخل ماده نهایی ایفا می‌کنند [۲]. به عنوان مثال، حلال‌های پروتیک

<sup>۱</sup> گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران (s.zahedi@student.uma.ac.ir)

<sup>۲</sup> گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران (f.saboor@uma.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

<sup>۳</sup> گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران (seifzadeh@uma.ac.ir)



مانند آب، متانول و اتانول می‌توانند با تأثیرات متفاوتی بر فرآیند سنتز، به دست‌یابی به مواد با خواص فیزیکی و شیمیایی مختلف منجر شوند. بررسی این تأثیرات می‌تواند به بهبود فرآیند سنتز و دستیابی به مواد با ویژگی‌های مطلوب‌تر کمک کند. برای روشن‌تر شدن این موضوع، می‌توان به پژوهشی ژانگ و همکاران [۳]، در مورد سنتز  $\text{Cu}_3(\text{BTC})_2$  اشاره کرد. در این پژوهش، سیستم‌های حلال آب/اتانول مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج نشان داد که این ماده در غیاب اتانول یا با مقادیر کم اتانول تشکیل نمی‌شود. اما با افزایش مقدار اتانول به بیش از ۳۰ درصد حجمی،  $\text{Cu}_3(\text{BTC})_2$  در دمای اتاق به دست می‌آید. اندازه بلورهای سنتز شده بین ۲۰ تا ۳۰۰ نانومتر گزارش شده است که با تنظیم ترکیب حلال قابل تغییر بوده است. این تحقیق نشان داد که قدرت پیوند هیدروژنی بین مولکول‌های حلال و لیگاندها نقش کلیدی در تشکیل و خواص  $\text{Cu}_3(\text{BTC})_2$  دارد. بر همین اساس، شناخت تأثیر حلال‌ها در فرآیند سنتز، چه برای ZIF-8 و چه برای سایر MOFها، از اهمیت بالایی برخوردار است.

در پژوهش حاضر، سه حلال مختلف شامل آب، متانول و اتانول برای سنتز ZIF-8 مورد استفاده و خواص مواد سنتز شده با استفاده از آنالیزهای XRD، BET، FTIR و TG مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. هدف این مطالعه، بررسی تفاوت‌ها و مقایسه خواص فیزیکی و شیمیایی مواد سنتز شده در حضور حلال‌های مختلف است. این بررسی‌ها شامل تحلیل ساختار بلوری، مساحت سطح ویژه و تخلخل، ترکیب شیمیایی و پایداری حرارتی مواد خواهد بود. نتایج این تحقیق می‌تواند به درک بهتر از تأثیر حلال‌ها بر سنتز MOFها و بهینه‌سازی شرایط سنتز برای کاربردهای خاص کمک کند.

## ۲. روش سنتز و مشخصه‌یابی

مقدار معین از نیترات روی ۶آبه و ۲متیل ایمیدازول به ترتیب، پیش ماده فلزی و لیگاند آلی در ۶۰ میلی‌لیتر از هر یک از حلال‌های آب، متانول و اتانول مخلوط شد. این مخلوط در حمام آب  $70^\circ\text{C}$  به مدت مشخص قرار داده شد تا سنتز چارچوب فلزی-آلی کامل شود. محلول شیری رنگ حاصل با استفاده از سانتریفیوژ با سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه جدا و چندین مرتبه شسته شد. رسوب خیس نهایی در آون با دمای  $60^\circ\text{C}$  خشک و آنالیزهای مذکور بر روی هر یک انجام شد. این سه نمونه با کدهای ZIF-8/M، ZIF-8/E، و ZIF-8/W بترتیب برای حلال‌های متانول، اتانول و آب مشخص شده است.

## ۳. نتایج و بحث

آنالیز BET جهت ارزیابی مساحت سطح ویژه، حجم تخلخل و میانگین قطر حفرات برای سه نمونه انجام شده است. گازدایی هر سه نمونه در دمای  $100^\circ\text{C}$  به مدت ۹ ساعت انجام شد. نتایج حاصل از این آنالیز در جدول ۱ ارائه شده است. مقایسه سه نمونه ZIF-8 سنتز شده با آب، متانول و اتانول نشان می‌دهد که نمونه ZIF-8/M دارای بالاترین مساحت سطح ویژه و حجم مجموع حفرات است، که نشان‌دهنده ایجاد ساختارهای بسیار متخلخل و سطح بالا به دلیل توانایی متانول در کمک به تشکیل کریستال‌های کوچک‌تر و متخلخل‌تر است. اندازه مولکولی کوچک، ویسکوزیته کم و انحلال‌پذیری بالای متانول باعث پخش و نفوذ سریع‌تر و در نتیجه تراکم هسته‌زایی بالا و متخلخل می‌باشد. نمونه ZIF-8/W کمترین مساحت سطح ویژه را دارد که این امر به علت هیدرولیز در حضور آب است، که باعث کاهش کارایی سنتز و ایجاد ساختارهایی با تخلخل پایین می‌شود. همچنین، میانگین قطر حفرات در ZIF-8/E بیشتر است که به دلیل اثرات اتانول در تسهیل رشد کریستال‌ها نسبت به هسته‌زایی می‌باشد.

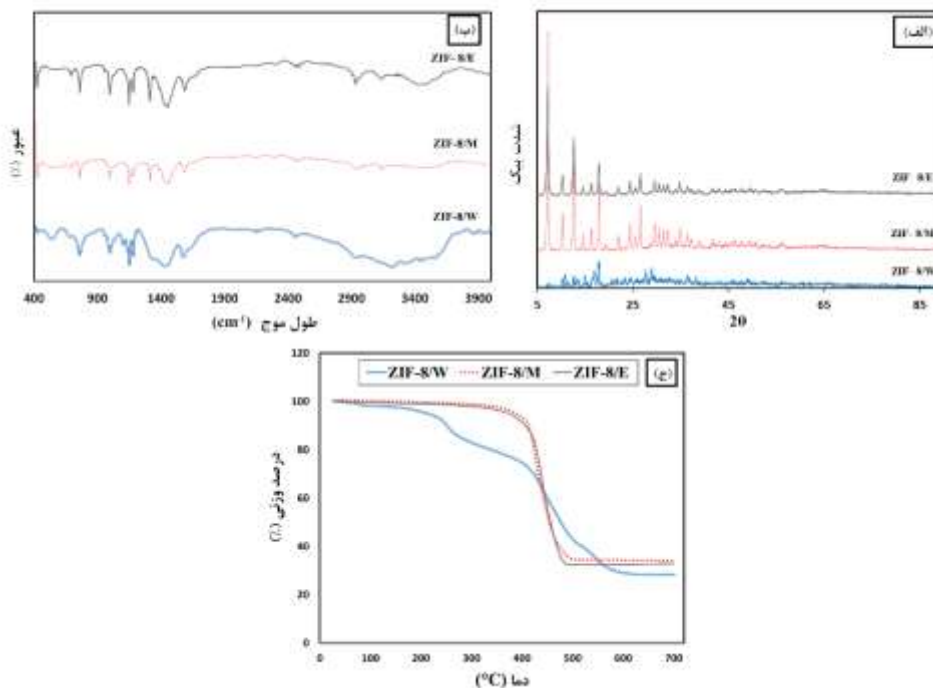
جدول ۱) نتایج مساحت سطح ویژه، حجم حفرات، میانگین قطر حفرات و درصد بلورینگی نمونه های ZIF-8 سنتز شده

| نمونه   | مساحت سطح ویژه<br>[m <sup>2</sup> /g] | حجم مجموع حفرات<br>[cm <sup>3</sup> /g] | میانگین قطر حفرات<br>[nm] | بلورینگی<br>[%] |
|---------|---------------------------------------|---|---------------------------|-----------------|
| ZIF-8/W | ۲۶۸/۱۱                                | ۰/۱۳۷                                   | ۲/۰۵۳۶                    | ۱۰/۷۸           |
| ZIF-8/M | ۲۱۲۷/۷                                | ۱/۵۴۱۲                                  | ۲/۸۳۷۴                    | ۳۱/۸۵           |
| ZIF-8/E | ۱۳۲۷/۸                                | ۱/۳۳۶۴                                  | ۴/۰۲۵۹                    | ۲۸/۸۳           |

همانطور که در آنالیز XRD گزارش شده در شکل ۱(الف) نشان داده شده است، در نمونه‌های ZIF-8/E و ZIF-8/M، تمامی پیک‌های شاخص ZIF-8 شامل زوایای ۷/۲۱، ۱۰/۴۳، ۱۲/۷۸، ۱۴/۸۲، ۱۶/۴۸ و ۱۸/۱۵ درجه مشاهده می‌شود [۴]. با این تفاوت که شدت پیک‌ها در نمونه ZIF-8/M بیشتر از نمونه ZIF-8/E بود، که نشان‌دهنده بلورینگی بالاتر نمونه ZIF-8/M می‌باشد. اما در نمونه ZIF-8/W، پیک‌های شاخص ZIF-8 به وضوح مشاهده نشد. این امر نشان می‌دهد که سنتز ZIF-8 به خوبی انجام نشده و وجود ناخالصی‌ها سبب عدم مشاهده پیک‌های شاخص شده است.

همچنین درصد بلورینگی که با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده در جدول ۱ ارائه شده است. بلورینگی نمونه ZIF-8/W که فقط با تعداد محدودی از پیک‌های شاخص بدلیل مشخص نبودن همه پیک‌های ZIF-8 محاسبه شده است، بسیار کمتر از نمونه‌های ZIF-8/E و ZIF-8/M می‌باشد و همچنین تاثیر شدت پیک بیشتر نمونه ZIF-8/M بر بلورینگی بیشتر این ماده را می‌توان در این جدول مشاهده کرد.

$$\text{رابطه (۱): } 100 \times \frac{\text{مساحت زیر نمودار پیک‌های شاخص}}{\text{مساحت کل زیر نمودار}} = (\%) \text{ درصد بلورینگی}$$



شکل ۱) نتایج مشخصه‌یابی (الف) XRD، (ب) FTIR، (ج) TGA برای نمونه‌های مختلف ZIF-8 سنتز شده در حضور حلال‌های اتانول، متانول و آب

طیف FT-IR نمونه‌های ZIF-8 در شکل ۱(ب) نشان داده شده است. باندهای اصلی در ۲۹۲۹، ۳۱۳۵، ۳۴۵۵، ۱۶۳۵، ۱۵۸۵، ۱۴۵۸، ۱۴۲۵، ۱۳۸۵، ۱۳۰۹، ۱۱۴۶، ۹۹۵، ۷۶۰، ۶۹۴ و ۴۲۶ cm<sup>-1</sup> در تمامی نمونه‌ها مشاهده

می‌شوند. این باندها با نتایج گزارش شده در مراجع همخوانی دارند. باند ارتعاش کششی Zn-N در  $426 \text{ cm}^{-1}$  به وضوح مشاهده شد، که پیوند شیمیایی یون‌های روی با اتم‌های نیتروژن گروه‌های متیل ایمیدازول را نشان می‌دهد. باند  $3455 \text{ cm}^{-1}$  به ارتعاش کششی N-H از لیگاند باقی‌مانده و ارتعاش کششی O-H از رطوبت KBr نسبت داده می‌شود. پیک‌های  $3135 \text{ cm}^{-1}$  و  $2929 \text{ cm}^{-1}$  به ترتیب به ارتعاشات کششی نامتقارن C-H آروماتیک و آلیفاتیک مرتبط هستند. باند در حدود  $1635 \text{ cm}^{-1}$  ناشی از مد ارتعاشی کششی C=C و باند  $1585 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش کششی C=N است. سیگنال‌های  $1300-1460 \text{ cm}^{-1}$  برای ارتعاشات کششی کل حلقه و باند  $1146 \text{ cm}^{-1}$  از مد ارتعاش کششی C-N آروماتیک است. پیک‌های  $995 \text{ cm}^{-1}$  و  $760 \text{ cm}^{-1}$  به ترتیب به ارتعاشات خمشی C-N و C-H نسبت داده می‌شوند. باند  $694 \text{ cm}^{-1}$  به ارتعاش خمشی خارج از صفحه حلقه لیگاند مربوط است [۵].

نتایج آنالیز TG سه نمونه ZIF-8 سنتز شده در شکل ۱(ج) نشان داده شده است. کاهش وزن قابل ملاحظه تمامی نمونه‌ها در دمای حدود  $40-450^\circ \text{C}$  را می‌توان به تجزیه چارچوب فلزی-آلی مرتبط نمود. با این وجود، شروع تجزیه برای نمونه ZIF-8/W در دمای پایین‌تر مشاهده شده است و همچنین این نمونه کاهش وزن بیشتری تا دمای  $450^\circ \text{C}$  دارد. این امر می‌تواند به دلیل وجود ناخالصی‌ها و ساختار ضعیف‌تر باشد. نمونه‌های ZIF-8/M و ZIF-8/E از پایداری حرارتی بالاتر برخوردار بوده و شروع تجزیه در دمای بالاتری مشاهده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از متانول و اتانول به عنوان حلال، منجر به سنتز ZIF-8 با پایداری حرارتی بالاتر و مستحکم‌تر می‌شود.

#### ۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که نوع حلال مورد استفاده در سنتز ZIF-8 تأثیر بسزایی بر ویژگی‌های نهایی ماده دارد. بررسی آنالیزهای مختلف مشخص شد مساحت سطح ویژه، حجم مجموع حفرات و درصد بلورینگی در نمونه ZIF-8/M بالاتر از دو نمونه دیگر و میانگین حجم حفرات نمونه ZIF-8/E بالاتر از بقیه می‌باشد. خواص متانول همانند اندازه مولکولی کوچک، ویسکوزیته کم و انحلال‌پذیری بالا که موجب افزایش نرخ هسته‌زایی می‌باشد، دلیل این رفتار در ZIF-8/M می‌باشد. علاوه بر این ویسکوزیته بیشتر اتانول نسبت به متانول باعث افزایش رشد کریستال و در نتیجه افزایش اندازه حفرات در ZIF-8/E می‌باشد. نتایج TG نشان داد که نمونه‌های ZIF-8/M و ZIF-8/E پایداری حرارتی بالاتری دارند و شروع تجزیه در دمای بالاتری مشاهده می‌شود. همچنین در طیف FT-IR با اینکه باندهای اصلی ZIF-8 در تمامی نمونه‌ها بود، اما شدت و وضوح این باندها در نمونه‌های ZIF-8/M و ZIF-8/E بیشتر می‌باشد.

#### فهرست مراجع

- [۱] K. Li *et al.*, "Sustainable application of ZIF-8 for heavy-metal removal in aqueous solutions," *Sustainability*, vol. 13, no. 2, p. 984, 2021.
- [۲] M. Lahav and L. Leiserowitz, "The effect of solvent on crystal growth and morphology," *Chemical Engineering Science*, vol. 56, no. 7, pp. 2245-2253, 2001.
- [۳] B. Zhang *et al.*, "Solvent determines the formation and properties of metal-organic frameworks," *RSC Advances*, vol. 5, no. 47, pp. 37691-37696, 2015.
- [۴] A. Paul, G. Vyas, P. Paul, and D. N. Srivastava, "Gold-nanoparticle-encapsulated ZIF-8 for a mediator-free enzymatic glucose sensor by amperometry," *ACS Applied Nano Materials*, vol. 1, no. 7, pp. 3600-3607, 2018.
- [۵] Y. Zhang, Y. Jia, M. Li, and L. a. Hou, "Influence of the 2-methylimidazole/zinc nitrate hexahydrate molar ratio on the synthesis of zeolitic imidazolate framework- $\alpha$  crystals at room temperature," *Scientific reports*, vol. 8, no. 1, p. 9597, 2018.



## مطالعه مروری استخراج لیتیوم از آب شور مخازن زمین گرمایی

حامد اوجاچی؛ متین شاهین؛ محمد سیم‌جو\*

### چکیده:

فلز قلیائی لیتیوم به عنوان یکی از مهم‌ترین فلزات شناخته شده با ارزش بالا است که برای تولید انرژی و صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در میان منابع مختلف استحصال لیتیوم از جمله آب دریا، رس‌های گرمایی و پگماتیک-ها، مخازن آب شور زمین گرمایی دارای پتانسیل بالایی جهت استخراج لیتیوم می‌باشند. با این حال، چالش‌هایی در توسعه روش‌های استحصال لیتیوم از مخازن زمین گرمایی وجود دارد که شامل تولید پایدار در زمان، نگرانی‌های زیست محیطی، هزینه و روش مناسب جداسازی می‌شود. در این مطالعه به طور خلاصه به چالش‌های تولید لیتیوم از نظر اقتصادی از چاه‌های زمین گرمایی پرداخته شده است که می‌توان در بلند مدت برای تولید همزمان انرژی زمین گرمایی و استحصال لیتیوم سازگار با محیط زیست از آن استفاده نمود. مطابق نتایج حاصله، در غلظت‌های بیشتر از یک گرم بر لیتر لیتیوم، بازدهی استخراج این ماده از سیال آب نمک مخازن زمین گرمایی بیش از ۹۰ درصد بوده و استخراج لیتیوم با استفاده از جاذب بازدهی مناسبی داشته و دوستدار محیط زیست است.

**کلمات کلیدی:** مخزن زمین گرمایی، تولید انرژی، استخراج مستقیم لیتیوم، آب نمک زمین گرمایی

### مقدمه:

لیتیوم یک فلز قلیایی است که معمولاً در آب نمک به صورت کلرید لیتیوم وجود دارد. محلول کلرید لیتیوم از طریق فرآیندهای مختلف خالص می‌شود و سپس به کربنات لیتیوم با خلوص بالا تبدیل می‌شود. لیتیوم سبکترین عنصر در میان فلزات بوده که تولید آن به عنوان سنگ معدن چالش برانگیز است. تقاضا برای لیتیوم به دلیل کاربردهای متنوع آن مانند باتری‌های قابل شارژ، آلیاژهای سبک هواپیما، تصفیه هوا، پزشکی و همجوشی هسته‌ای، به سرعت در حال افزایش است. لیتیوم در سه نوع ذخایر اصلی یافت می‌شود: آب‌های زیرسطحی شور (آب‌های

<sup>۱</sup> حامد اوجاچی (دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، hamedojaghi42@gmail.com)

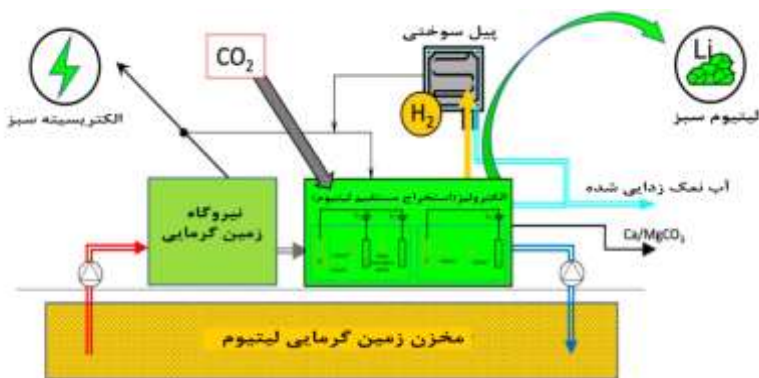
<sup>۲</sup> متین شاهین (دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، Matin.shahin97@gmail.com)

<sup>۳\*</sup> نویسنده مسئول: محمد سیم‌جو (دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، simjoo@sut.ac.ir)

شور قاره‌ای)، رس‌های دگرسانی گرمایی<sup>۱</sup> به صورت ته نشست رسوبی و پگماتیت‌ها<sup>۲</sup> یا سنگ سخت کریستالی<sup>۳</sup> مواد معدنی لیتیوم‌دار عمدتاً فسفات‌ها و آلومینوسیلیکات‌های پیچیده هستند [۱]. ذخایر لیتیوم موجود در آب نمک دریاچه‌های نمک، آب دریا و آب مخازن زمین گرمایی حدوداً ۷۰ تا ۸۰ درصد از کل ذخایر لیتیوم جهان را تشکیل می‌دهند. غلظت لیتیوم در آب دریا بسیار کم و میانگین آن نزدیک به ۰/۱۷ پی پی ام (ppm) است. تغییر غلظت لیتیوم در آب‌های زمین گرمایی از ۱ تا ۱۰۰ پی پی ام (ppm) در سرتاسر جهان است و به همین دلیل منابع آب نمک زمین گرمایی منابع سرشاری از لیتیوم تلقی می‌شوند [۲]. محدودیت‌ها و پیشرفت‌های کنونی فناوری‌های تولید لیتیوم بر توسعه و بهبود روش‌های استخراج و پالایش لیتیوم متمرکز است که شامل انواع روش‌ها از جمله؛ ته نشست<sup>۴</sup>، جاذب‌های آلی و معدنی از جمله جاذب<sup>۵</sup> روی رزین آلی و مواد پلیمری، رسوب شیمیایی<sup>۶</sup>، حلال‌ها، جداسازی غشایی و الکتروشیمیایی (الکترودیالیز) است. اگرچه فناوری‌های متعددی در حال توسعه هستند اما پیشرفته‌ترین روش از نظر فناوری برای استخراج مستقیم لیتیوم از آب نمک‌های زمین گرمایی، جذب لیتیوم با استفاده از جاذب‌های معدنی است. فناوری دیگر برای استخراج لیتیوم از آب شور زمین گرمایی، استفاده از روش جذب یون کلرید از آب به کمک هیدروکسید لایه‌ای دوگانه لیتیوم-آلومینیوم و اسمز مستقیم است که مؤثر و دوستدار محیط زیست است. همچنین استخراج لیتیوم مبتنی بر الکترودیالیز کلاسیک کلر-قلیایی فناوری دیگری است که از میدان الکتریکی برای حرکت در یک سری از غشاهای استفاده می‌کند و می‌تواند برای استخراج مستقیم لیتیوم<sup>۷</sup> از آب نمک‌های زمین گرمایی طبیعی استفاده شود [۳]. در فرآیند جداسازی لیتیوم به صورت غشاء، اجزای کلیدی فناوری، الکترودیالیز غشاهای انتخابی یونی هستند که امکان پذیری و استحکام خود را در پوشش طیف وسیعی از ترکیبات شیمیایی آب نمک نشان داده‌اند (شکل ۱). شکل ۱ شامل دو محفظه الکترودیالیز است، یکی برای جداسازی لیتیوم از آب نمک و دومی برای تولید هیدروکسید لیتیوم است. بخشی از انرژی تولید شده توسط نیروگاه زمین گرمایی در محیط متخلخل می‌تواند برای استخراج مستقیم لیتیوم از آب زمین گرمایی استفاده شود، فرآیندی که لیتیوم سبز، هیدروژن (H<sub>۲</sub>) و دی اکسید کربن (CO<sub>۲</sub>) را جدا می‌کند. با استفاده از یک پیل سوختی، هیدروژن به آب نمک زدایی شده تبدیل و شیرین می‌شود و در نتیجه انرژی به فرآیند چرخه باز می‌گردد [۴].

---

<sup>۱</sup>Hydrothermally Altered Clays  
<sup>۲</sup>Pegmatites  
<sup>۳</sup>Crystalline Hard Rock  
<sup>۴</sup>Precipitation  
<sup>۵</sup>Sorption  
<sup>۶</sup>Direct Lithium Extraction (DLE)



شکل ۳: تأسیسات استخراج مستقیم لیتیوم از سیال مخازن زمین گرمایی [۴].

### امکان سنجی اقتصادی استخراج لیتیوم از منابع زمین گرمایی

ارزیابی فنی-اقتصادی بر قابلیت اقتصادی فناوری تولید لیتیوم از محیط متخلخل مخازن زمین گرمایی تأکید می‌کند. مطابق گزارش‌های موجود، استخراج و بازیابی لیتیوم در محیط متخلخل از آب نمک‌های زمین گرمایی از نظر فنی امکان‌پذیر است، اما همچنان چالش‌هایی در توسعه فرآیندهای پایدار از نظر اقتصادی و زیست محیطی در مقیاسی که می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای اقتصاد کم‌کربن وابسته به لیتیوم عمل کند، وجود دارد. با این حال در مقیاس مطالعات آزمایشگاهی هنوز سؤالات عمده‌ای درباره توسعه فرآیندهای مستقیم استخراج لیتیوم وجود دارد. برای پیشرفت فرآیندها در استخراج منابع لیتیوم زمین گرمایی در مقیاس تجاری، نیاز به مطالعات میدانی گسترده‌تری وجود دارد که بتواند به طور مستقیم از آب نمک مخازن زمین گرمایی استفاده شود. از نظر اقتصادی، ویژگی‌های آب شور، ظرفیت کارخانه و قیمت انرژی تأثیر قابل توجهی بر اقتصادی بودن فرآیند دارد. خلاصه‌ای از پروژه‌های اقتصادی استخراج مستقیم لیتیوم و هزینه تخمینی تولید لیتیوم از آب نمک در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱: خلاصه‌ای از پروژه‌های اقتصادی استخراج مستقیم لیتیوم

| شرکت پارامتر                | Lake Resources    | Pure Energy Minerals | Anson Resources  | E3 Metals Corp | Standard Lithium | Vulcan Energy Resources | SRI International |
|-----------------------------|-------------------|----------------------|------------------|----------------|------------------|-------------------------|-------------------|
| مکان                        | کالیفرنیا، آمریکا | جنوب غربی آلمان      | آرکانساز، آمریکا | آلبرتا، کانادا | یوتا، آمریکا     | نوادا، آمریکا           | آرژانتین          |
| نوع آب نمک                  | زمین گرمایی       | زمین گرمایی          | تبخیر            | مخزن نفتی      | تبخیر            | تبخیر                   | گودال نمک         |
| غلظت لیتیوم (mg/L)          | ۴۰۰               | ۱۸۱                  | ۱۶۸              | ۷۴/۶           | ۵۰۰-۱۰۰          | ۲۲۱-۶۵                  | ۲۸۹               |
| تولید (تن در سال)           | ۲۰۰۰*             | ۴۰۰۰                 | ۲۰۹۰۰            | ۲۰۰۰           | ۱۵۰۰             | ۱۱۵۰۰                   | ۲۵۵۰۰             |
| هزینه تولید (تن در هر دلار) | ۳۸۴۵              | ۳۲۱۷**               | ۴۳۱۹             | ۳۶۵۶***        | ۴۵۴۵             | ۳۲۱۷****                | ۴۱۷۸              |
| هزینه سرمایه‌ای (۱۰۰۰ دلار) | ۵۲۳۰۰             | ۱۲۸۷۶۰۰              | ۴۳۷۱۶۲           | ۶۰۲۰۰۰         | ۱۲۰۰۰۰           | ۳۵۸۶۰۱                  | ۵۴۴۰۰۰            |

|  |                                 |                       |                                 |                       |                                 |                       |                                 |
|--|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| هزینه عملیاتی (۱۰۰۰ دلار بر سال)   | ۷۶۹۰۰                           | ۱۲۸۶۸۸                | ۹۰۲۵۹                           | ۷۳۲۰۰                 | ۶۸۱۸۰                           | ۳۶۵۱۶                 | ۱۰۶۵۳۹                          |
| تکنولوژی   | تغییر یون                       | جذب                   | تغییر یون                       | تغییر یون             | تغییر یون                       | استخراج با حلال       | تغییر یون                       |
| بازدهی لیتیوم  | %۹۰                             | %۹۰                   | %۹۰                             | %۹۰ >                 | %۷۵                             | %۹۰                   | %۸۳/۲۰                          |
| محصول  | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | LiOH·H <sub>2</sub> O | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | LiOH·H <sub>2</sub> O | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | LiOH·H <sub>2</sub> O | Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> |
| * تخمین تولید تجاری با هزینه‌ها و عملکرد بر اساس آزمایش‌های مقیاس آزمایشگاهی و مدل‌سازی ASPEN (ونتورا و همکاران ۲۰۲۰). |                                 |                       |                                 |                       |                                 |                       |                                 |
| ** نرخ مبادله یورو به دلار ۱/۲؛ ۳۶۵۶ دلار در هر تن Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .                                   |                                 |                       |                                 |                       |                                 |                       |                                 |
| *** هزینه تولید هر تن کربنات لیتیوم، ۴۱۵۵ دلار است.  |                                 |                       |                                 |                       |                                 |                       |                                 |
| **** برای تبدیل LiOH به Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ممکن است قبل از الکترولیز یک مرحله تبادل یونی لازم باشد.       |                                 |                       |                                 |                       |                                 |                       |                                 |

وایناند و همکاران در سال ۲۰۲۳ نشان دادند که استقرار ۳۳ نیروگاه زمین گرمایی عمیق در منطقه راین در کشور آلمان می‌تواند لیتیوم کافی برای تولید حدود ۱/۲ میلیون بسته باتری خودروی الکتریکی در سال را فراهم کند. اولین پروژه از استخراج مستقیم لیتیوم روی چاه‌های زمین گرمایی با در دسترس بودن نیروگاه زمین گرمایی ریترشوفن در فرانسه نشان داد که غنی‌سازی لیتیوم از ۰/۱۸ گرم در لیتر در آب نمک تا ۰/۸ گرم در لیتر در محلول حاصل شد. در شرایط بهینه، بهره‌وری لیتیوم می‌تواند تا ۰/۵۴ گرم لیتیوم بر ساعت لیتر (gLi/h/L) با بازده استخراج ۹۶ درصد باشد [۵]. گلودبرگ و همکاران در سال ۲۰۲۳ با ارائه مدلی از مخزن زمین گرمایی طی دوره ۳۰ ساله نشان دادند که کاهش ۴۰ درصدی لیتیوم در طی دوره استخراج مشاهده می‌شود و همچنین تولید گرما نیز ثابت باقی می‌ماند. با این وجود، این مدل همچنین میانگین تولید لیتیوم ۲۳۱ تن در سال (معادل ۱۲۳۰ تن در سال معادل کربنات لیتیوم) را نشان داد که می‌تواند چشم انداز اقتصادی یک نیروگاه زمین گرمایی را به طور قابل توجهی افزایش دهد. یکی از چالش‌های موجود در این مسیر، مدیریت و کنترل تغییرات غلظت آب شور در طول فرآیند استخراج لیتیوم است که برای بهینه‌سازی فرآیند و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی اهمیت دارد. همچنین مشخصه مواد و کنترل کیفیت محصول در پایداری و عملکرد بلند مدت جاذب و کنترل کیفیت محصول برای اطمینان از تولید لیتیوم با کیفیت ثابت و بالا نیاز به بررسی بیشتر دارد. از نقطه نظر زیست محیطی، تولید هیدروکسید لیتیوم (LiOH) از طریق الکترولیز، بیشترین مزیت زیست‌محیطی را به ارمغان می‌آورد و به طور قابل توجهی تأثیر زیست‌محیطی را در مقایسه با روش‌های سنتی استحصال لیتیوم کاهش می‌دهد. استفاده مجدد و بازیافت جاذب نیز عمر مفید تولید لیتیوم را افزایش و تولید ضایعات را کاهش می‌دهد. استفاده از انرژی زمین گرمایی علاوه بر همسو شدن با شیوه‌های پایدار، تأثیر زیست محیطی را در مقایسه با ترکیب منابع تولید برق در شبکه برق بیشتر کاهش می‌دهد. ارزیابی دوره عمر لیتیوم در استفاده مجدد و بازیافت جاذب نشان می‌دهد که این فرآیند تا ۹۵ درصد کاهش اثر زیست‌محیطی (به ویژه در مصرف آب)، انتشار سموم و تخریب زمین را به همراه دارد. این دستاورد قابل توجه ناشی از جذب و تغلیظ کارآمد لیتیوم، به حداقل رساندن تولید ضایعات و مصرف انرژی است [۳].

### نتیجه گیری

در تولید و استخراج لیتیوم از منابع زمین گرمایی چالش‌هایی از قبیل هزینه، میزان پایداری تولید، روش‌های جداسازی لیتیوم، تولید اقتصادی و مزایای زیست‌محیطی وجود دارد. موثرترین روش استخراج مستقیم لیتیوم،

جذب با استفاده از اکسیدها و هیدروکسیدهای فلزی است. فناوری‌های غشایی بیشتر برای حذف آب یا یون‌های مداخله‌گر استفاده می‌شوند و کاربرد گسترده‌ای در استخراج مستقیم لیتیوم ندارند. استفاده از جاذب‌های اکسید و هیدروکسید فلزی به دلیل ویژگی‌های بلوری و لایه‌ای برای استخراج لیتیوم مؤثر هستند. اگرچه استخراج لیتیوم از شورابه‌های زمین‌گرمایی فنی ممکن شده است، اما چالش‌های اقتصادی و زیست‌محیطی مختلفی برای کاربرد در مقیاس بزرگ وجود دارد که نیازمند مطالعات میدانی و آزمایش‌های مقیاس بزرگ‌تر است. استفاده از آب نمک زمین‌گرمایی امکان تولید لیتیوم با هزینه کمتر نسبت به دیگر انواع ذخایر لیتیوم را فراهم می‌آورد که این مورد به غلظت لیتیوم، تولید پایدار در زمان و تکنولوژی جداسازی لیتیوم بستگی دارد.

## منابع

- [1] H. Aydin, R. Şengün, and F. T. Haklıdır, "Potential assessment of lithium extraction from geothermal reservoirs," 2022.
- [2] H. Vikström, S. Davidsson, and M. Höök, "Lithium availability and future production outlooks," *Appl. Energy*, vol. 110, pp. 252–266, 2013.
- [3] W. T. Stringfellow and P. F. Dobson, "Technology for the Recovery of Lithium from Geothermal Brines. *Energies* 2021, 14, 6805." 2021.
- [4] H. Lebit, B. Brunner, N. Kharitonova, and E. Deemer, "Direct Lithium Extraction from Geothermal Brines: The New Oil," in *Offshore Technology Conference*, 2024, p. D011S011R006.
- [5] D. Fries *et al.*, "Lithium extraction through pilot scale tests under real geothermal conditions of the Upper Rhine Graben," in *Proceedings European Geothermal Congress*, 2022, p. 7.





## Numerical simulations and experimental study of saturated/superheated steam injection into unsaturated zone of soil

Taraneh Janfada,<sup>۱</sup> Norollah Kasiri <sup>\*۲</sup>, Holger Class<sup>۳</sup>

**Abstract:** In this research, two- and three-dimensional simulation of saturated and supersaturated steam injection process in the unsaturated zone of soil is carried out using some simplified assumptions via DuMu<sup>x</sup> Simulator. The simulator is developed in the Department of Hydromechanics and Modeling of Hydrosystems (LH<sup>2</sup>), Institute for Modeling Hydraulic and Environmental Systems (IWS), Stuttgart University, for Multi-{Phase, Component, Scale, Physics, ...} flow and transport in porous media. The main objective of the study is observation and comparing the progress of the saturated temperature front and the supersaturated temperature front during the process of injecting saturated and supersaturated steam in the unsaturated zone of the soil. Moreover, some experiments are performed for supersaturated and saturated steam injection in the unsaturated zone of soil using the available sand box of Research Facility for Subsurface Remediation, VEGAS, Stuttgart University. Particular purpose of this part of study is evaluation of the heat-up efficiencies of supersaturated steam as opposed to saturated steam. Based on the experimental conditions, values of the local heat-up efficiency are calculated over time concerning the heat-up of defined points in the sandbox. The acquired values are 14.3% and 6.3% for mass based calculated local heat-up efficiency and energy based calculated local heat-up efficiency, respectively.

### کلید واژه‌ها

پاکسازی حرارتی به روش تزریق بخار اشباع و بخار فوق‌اشباع، آزمایشات و شبیه‌سازی، جریان‌های دوفازی غیرهمدم، محیط‌های متخلخل، ناحیه غیراشباع خاک

### ۱. مقدمه

در این تحقیق، بطور آزمایشی در یک جعبه شن، جبهه‌های دمایی اشباع در هر دو حالت تزریق بخار به صورت بخار اشباع و نیز تزریق بخار به صورت بخار فوق‌اشباع و نیز راندهای حرارتی مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین شبیه‌سازی فرآیند تزریق بخار فوق‌اشباع و بخار اشباع در منطقه غیراشباع خاک نیز انجام گردید [۱]، [۲].

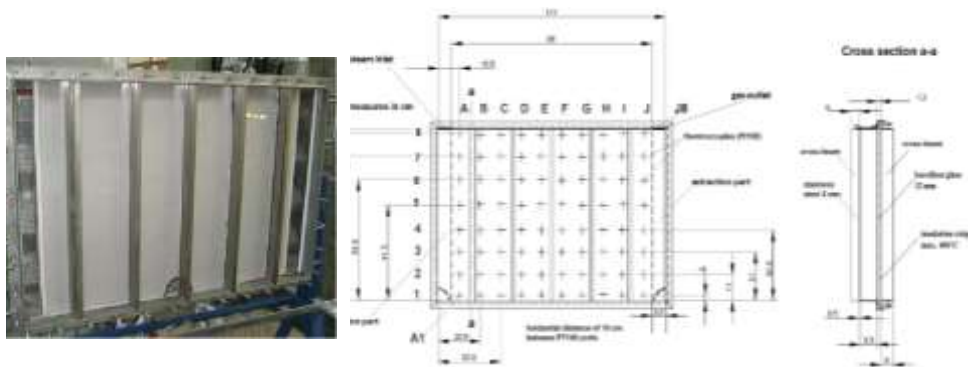
<sup>۱</sup>Computer Aided Process Engineering (CAPE) Laboratory, School of Chemical, Petroleum & Gas Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: tsj\_janfada@yahoo.com

<sup>۲\*</sup>Computer Aided Process Engineering (CAPE) Laboratory, School of Chemical, Petroleum & Gas Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: kasiri@iust.ac.ir

<sup>۳</sup>Department of Hydromechanics and Modeling of Hydrosystems, Institute for Modelling Hydraulic and Environmental Systems, Stuttgart University, Germany, Email: holger.class@iws.uni-stuttgart.de

## ۲. روش آزمایشگاهی و تجهیزات مورد استفاده برای آزمایشات تزریق بخار فوق اشباع و بخار اشباع در خاک غیراشباع از آب

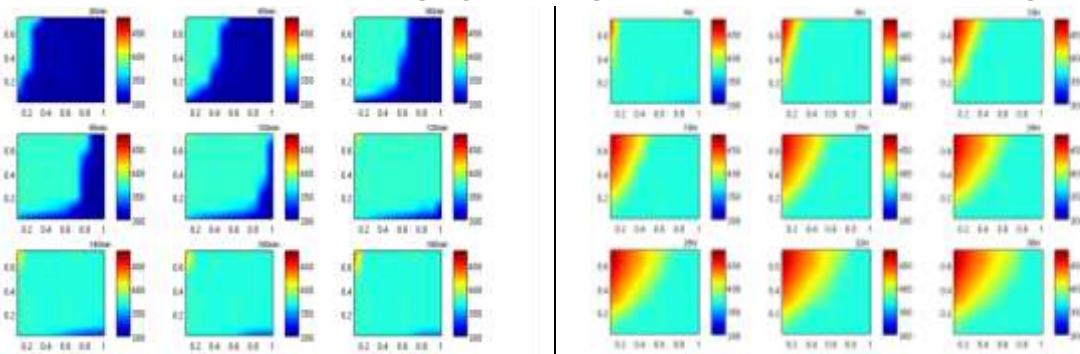
در این قسمت از تحقیق، جهت انجام آزمایشات تزریق بخار فوق اشباع و تزریق بخار اشباع در منطقه غیراشباع خاک، از تجهیز آزمایشگاهی جعبه شن موجود در مرکز تحقیقاتی پاک‌سازی خاک‌های سطحی در دانشگاه اشتوتگارت، VEGAS، استفاده می‌گردد. همانگونه که در شکل ۱ مشخص است، تعداد هشتاد عدد سنسور دمایی Pt-100 با دقت اندازه‌گیری  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  کالیبره شده و سپس برای اندازه‌گیری دماهای محلی و رصد فرآیند حرارتی آزمایشات در آرایش چیدمانی هشت ردیفه و ده ستونه در قسمت پشتی جعبه شن نصب شده‌اند. همچنین برای نمایش اندازه‌گیری‌های دمایی از مبدل‌های آنالوگ-دیجیتال استفاده شده است.



شکل ۱- نمایی از جعبه شن دو بعدی و ابعاد جعبه شن مورد استفاده برای انجام آزمایشات

## ۳. چگونگی پیشروی طی زمان جبهه‌های حرارتی بخار اشباع و فوق اشباع در جعبه شن غیراشباع از آب در طی آزمایشات

نتایج آزمایشگاهی تزریق بخار فوق اشباع و اشباع در جعبه شن غیراشباع از آب، به ترتیب در دماهای  $200^{\circ}\text{C}$  و  $100^{\circ}\text{C}$  و نرخ‌های جریان بخار  $2/4 \text{ kg/hr}$  و  $1/4 \text{ kg/hr}$  ارائه شده‌اند. همانگونه که در شکل ۲ مشخص است تزریق بخار فوق اشباع در جعبه شن شامل دو مرحله مجزا می‌باشد. مرحله اول، مرحله گذر است که در آن تغییرات فازی و تغییرات دمایی در سیستم رخ می‌دهد. بعد از مرحله گذر، سیستم به مرحله حالت پایا می‌رسد. در طی این مرحله، میزان جریان ورودی حرارتی، میزان جریان خروجی حرارتی، انباشت حرارتی و نیز میزان افت‌های حرارتی با یکدیگر به تعادل رسیده‌اند و دیگر تغییر دمایی در سیستم رخ نمی‌دهد.

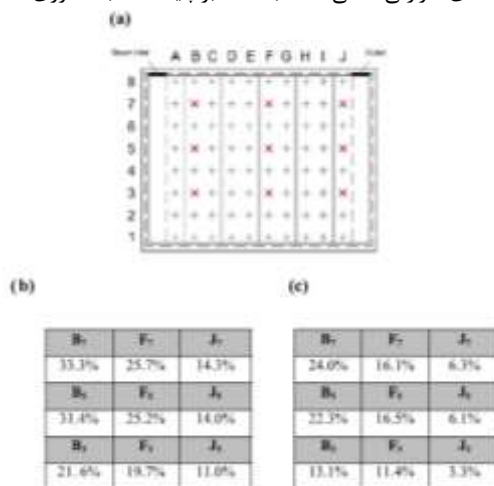


شکل ۲- توزیع دمایی اندازه‌گیری شده جعبه شن و نحوه پیشروی جبهه‌های دمایی اشباع و فوق اشباع در زمانهای مختلف

(۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ دقیقه و همچنین در زمان‌های ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۴، ۲۸، ۳۲ و ۳۶ ساعت) طی آزمایش تزریق بخار فوق‌اشباع در دمای بخار تزریق شده  $200^{\circ}\text{C}$  و نرخ جریان بخار  $2/4 \text{ kg/hr}$

در جدول ۱، با استفاده از روش‌های محاسبه راندمان حرارتی، راندمان‌های حرارتی بر پایه محاسبات جرم و انرژی حاصل شده از اطلاعات آزمایشگاهی، برای نرخ جرمی جریان بخار فوق‌اشباع و اشباع  $2/4 \text{ kg/hr}$  ارائه شده است.

**جدول ۱- (a)** نمایی از موقعیت‌های نقاط انتخاب شده بین جعبه شن برای اندازه‌گیری راندمان‌های حرارتی در حالت تزریق بخار با نرخ جریان  $2/4 \text{ kg/hr}$ ؛ **(b)** راندمان‌های حرارتی محلی محاسبه شده بر پایه محاسبات جرمی؛ **(c)** راندمان‌های حرارتی محلی محاسبه شده بر پایه محاسبات انرژی



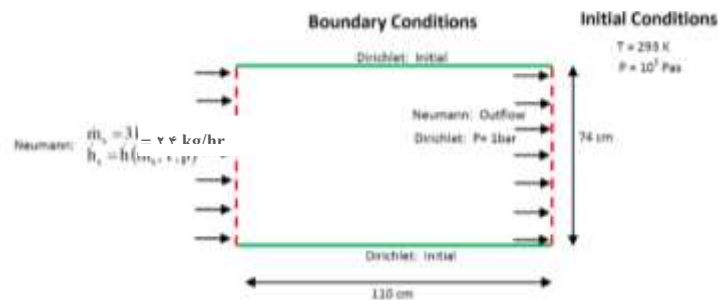
### ۳-۱ مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند تزریق بخار فوق‌اشباع و بخار اشباع در منطقه

#### غیراشباع خاک با استفاده از نرم افزار DuMu<sup>x</sup>

هدف این شبیه‌سازی تخمین چگونگی عمق نفوذ بخار اشباع و فوق‌اشباع در منطقه غیراشباع خاک طی زمان‌های فرآیندی، چگونگی تاثیرات تزریق بخار فوق‌اشباع بر جبهه پیشرونده دمایی و نیز تخمین چگونگی پیشروی جبهه اشباع آب می‌باشد. فرایندهای انتقال و جریان در محیط متخلخل غیرهمدمای شامل جابجایی، دیفیوژن، پراکندگی، فرایندهای انتقال جرمی، هدایت حرارتی و همرفت حرارتی می‌باشد [۵]، [۴]، [۳].

#### ۴. شرایط مرزی، شرایط اولیه و مشخصات محیط متخلخل جعبه‌شن

شرایط مرزی و شرایط اولیه جعبه شن در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی فرآیند تزریق بخار فوق‌اشباع و بخار اشباع در منطقه غیراشباع خاک با استفاده از نرم افزار DuMu<sup>x</sup> به شرح زیر می‌باشند.

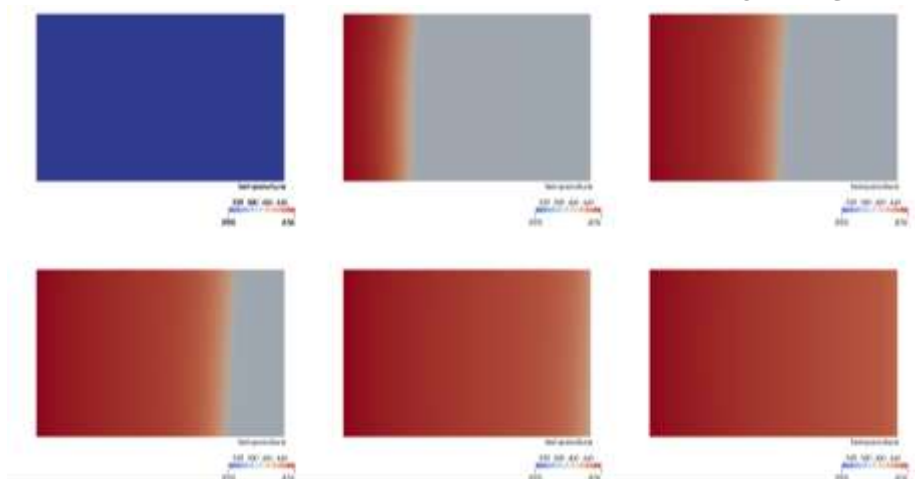


شکل ۳- ابعاد جعبه شن، شرایط مرزی و شرایط اولیه در شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار DuMu<sup>x</sup>

## ۵. نتایج شبیه‌سازی فرآیند تزریق بخار فوق اشباع و بخار اشباع در منطقه غیراشباع

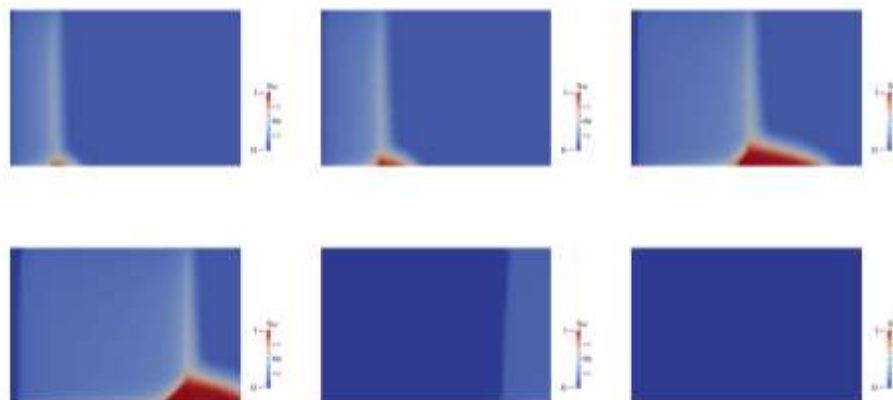
### خاک با استفاده از نرم افزار DuMu<sup>x</sup>

نتایج حاصل از این شبیه‌سازی، انجام شده توسط نرم افزار DuMu<sup>x</sup>، در شکل‌های ۴ و ۵ آمده است. در شکل ۴ نتایج توزیع دمایی در جعبه شن طی تزریق بخار فوق اشباع با حدود دمای  $200^\circ\text{C}$  و نرخ جریان بخار  $2/4 \text{ kg/hr}$  در زمان‌های مختلف آمده است. تزریق بخار فوق اشباع از قسمت چپ جعبه در زمان اولیه، یعنی تصویر اول سمت چپ، صورت می‌پذیرد. در این زمان، جعبه‌شن در دمای محیط است. تصاویر شکل ۴ نشان می‌دهند که چگونه طی زمان، ابتدا ناحیه دمایی اشباع و پس از آن به تدریج ناحیه دمایی فوق اشباع کل جعبه‌شن را جاروب می‌نماید. جاروب شدن جعبه‌شن با مرز دمایی اشباع در چند ساعت اول فرآیند سرعت بالاتری نسبت به جاروب شدن جعبه‌شن با مرز دمایی فوق اشباع در زمان‌های بعدی فرآیند دارد.



شکل ۴- نتایج توزیع دمایی در جعبه شن طی تزریق بخار فوق اشباع با دمای  $200^\circ\text{C}$  و نرخ جریان بخار  $2/4 \text{ kg/hr}$  در زمان‌های مختلف ابتدای فرآیند، ۶ ساعت و ۴۰ دقیقه، ۱۳ ساعت و ۲۰ دقیقه، ۲۶ ساعت و ۴۰ دقیقه، ۳۳ ساعت و ۲۰ دقیقه و نیز ۴۰ ساعت، حاصل از شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار DuMu<sup>x</sup>

نتایج شبیه‌سازی حاصل از شبیه‌سازی فرآیند تزریق بخار فوق اشباع در منطقه غیراشباع خاک با استفاده از نرم افزار DuMu<sup>x</sup> برای توزیع اشباع آب مایع در جعبه شن طی تزریق بخار فوق اشباع با حدود دمای  $200^\circ\text{C}$  و نرخ جریان بخار  $2/4 \text{ kg/hr}$  در زمان‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- نتایج توزیع اشباع آب در جعبه شن طی تزریق بخار فوق‌اشباع با حدود دمای  $200^{\circ}\text{C}$  و نرخ جریان تزریق بخار  $2/4 \text{ kg/hr}$  در زمان‌های مختلف ۱۵ دقیقه، ۲۰ دقیقه، ۴۰ دقیقه، ۱ ساعت، ۲۴ ساعت و ۴۰ ساعت حاصل از شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار DuMu<sup>x</sup>

## ۶. نتیجه‌گیری

- مهمترین پارامترهای تأثیرگذار شناسایی شده بر فرآیند این موارد به طور خلاصه در زیر بیان شده‌اند.
- یکی از عوامل اصلی در ایجاد تفاوت‌های موجود بین میزان پیشروی جبهه‌های دمایی در حالت‌های مختلف تزریق بخار و در طی زمان‌های فرآیندی، حاصل از تفاوت در اختلاف‌های خالص بین مقادیر آنتالپی‌های ورودی و افت‌های حرارتی در هر یک از فرآیندها می‌باشد. محاسبات مشخص نمود که اختلاف خالص مابین نرخ جریان ورودی آنتالپی و اتلاف حرارتی در حالت تزریق بخار فوق‌اشباع، در مقایسه با حالت تزریق بخار اشباع، بالاتر می‌باشد و در نتیجه همانگونه که انتظار می‌رود انتقال حرارت در مورد تزریق بخار فوق‌اشباع نیز سریعتر است.
- در نرخ‌های جریان گرمی یکسان، به دلیل اینکه حجم ویژه بخار فوق‌اشباع نسبت به بخار اشباع بالاتر است، در نتیجه نرخ جریان حجمی بخار فوق‌اشباع در مقایسه با بخار اشباع نیز بالاتر خواهد بود. حجم ویژه بالاتر بخار فوق‌اشباع نیز یکی دیگر از علت‌های پیشروی سریع‌تر جبهه دمایی اشباع در حالت تزریق بخار فوق‌اشباع می‌باشد.
- طی انجام محاسبات مشخص گردید، استفاده از بخار فوق‌اشباع در مقایسه با بخار اشباع، راندمان حرارتی بیش‌تری دارد. نتایج آزمایشات، بیانگر روند نزولی مقادیر راندمان، از بالا به پایین و از چپ به راست در جعبه شن می‌باشد. کاهش راندمان حرارتی مشاهده شده در جهت عمودی یعنی از سمت بالا به پایین در جعبه شن به دلیل تجمع میعان‌ها در پایین جعبه شن و نیز تأثیر اثرات موینگی در این ناحیه می‌باشد. کاهش راندمان حرارتی مشاهده شده در جهت افقی یعنی از سمت چپ به راست در جعبه شن، عمدتاً به دلیل کاهش کیفیت بخار در آن راستا می‌باشد.
- مقایسه نتایج کمی بدست آمده نشان می‌دهد که با کارگیری جریان بخار در نرخ‌های بالاتر، میزان راندمان حرارتی محلی محاسبه شده بر پایه درصد نسبت تفاوت جرم بخار اشباع و بخار فوق‌اشباع تزریقی به جرم بخار فوق‌اشباع تزریقی، افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از نرخ‌های بالاتر جریان بخار باعث افزایش راندمان حرارتی محلی محاسبه شده بر پایه درصد نسبت تفاوت انرژی بخار اشباع و بخار فوق‌اشباع تزریقی به بخار انرژی فوق‌اشباع تزریقی نیز می‌گردد.

## فهرست مراجع

- [1] T. S. Janfada, H. Class, and N. Kasiri, "Simulation of superheated steam injection for soil

- remediation,” in *International 20th Conference of Computational Methods in Water Resources, (CMWR)*, University of Stuttgart, Germany, 2014.
- [2] T. S. Janfada, H. Class, and N. Kasiri, “Experimental investigation and numerical simulations of superheated steam injection into soil,” in *7th International conference on porous media & annual meeting*, Padova, Italy, 18-12.05.2015, 2015.
- [3] *DuMux Handbook, Version 3.7*. Department of Hydromechanics and Modelling of Hydrosystems, Stuttgart University, Germany, 2024.
- [4] B. Flemisch *et al.*, “DuMux: DUNE for Multi- {Phase, Component, Scale, Physics, ...} Flow and Transport in Porous Media,” *Advances in Water Resource*, vol. 34, no. 9, pp. 1102–1112, 2011.
- [5] T. Koch *et al.*, “DuMux 3 – an open-source simulator for solving flow and transport problems in porous media with a focus on model coupling,” no. 81, pp. 423–443, 2021.



## مقایسه خصوصیات مهندسی ژئوتکنیکی ماسه بادرفتی کویر مصر ایران با سه ماسه یکنواخت دیگر جهت استفاده در تحقیقات آزمایشگاهی

فردین جعفرزاده<sup>\*</sup>؛ زهرا موسوی؛ علی‌اکبر کریمزاده<sup>۱</sup>

### چکیده

خاک‌های ماسه‌ای در طبیعت بخش عمده رسوبات آبرفتی و بادرفتی سطح زمین را تشکیل می‌دهند. بررسی مشخصات و خصوصیات مختلف رفتاری و مقاومتی این نوع خاک‌ها در مهندسی ژئوتکنیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای این منظور در آزمایشگاه‌های مکانیک خاک و ژئوتکنیک آزمایش‌های متنوع استاتیکی و دینامیکی با استفاده از دستگاه‌ها و تجهیزات مختلف انجام می‌گیرد. این آزمایش‌ها را به دو گروه آزمون‌های المان و مدل فیزیکی می‌توان تقسیم نمود. جهت انجام هر دو گروه نیاز به نمونه‌های خاک ماسه‌ای است. امروزه در آزمایشگاه‌های دنیا انواع خاک‌های ماسه‌ای طبیعی با مصنوعی برای این منظور استفاده می‌شود. در تحقیقات حال حاضر ایران نیز چند نوع ماسه استفاده می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به ماسه طبیعی و ساحلی بابلسر و ماسه مصنوعی فیروزکوه اشاره نمود. در این مقاله یک ماسه بادرفتی بنام ماسه مصر که از کویر مصر ایران قابل تهیه است، معرفی می‌شود. برخی خصوصیات این ماسه با ماسه‌های بابلسر و فیروزکوه و همچنین ماسه تویورای ژاپن، که یک ماسه شناخته شده در مهندسی ژئوتکنیک است، مقایسه می‌شود.

### کلیدواژه‌ها

خاک ماسه‌ای؛ کویر مصر؛ خصوصیات ژئوتکنیکی؛ ماسه تویورا؛ شکل ذرات؛ مورفولوژی

### ۱. مقدمه

خاک‌ها عموماً به دو قسمت خاک‌های درشت‌دانه و ریزدانه تقسیم‌بندی می‌شوند. خاک‌های ریزدانه به دلیل خاصیت خمیری بالا عمدتاً خاک‌های با چسبندگی بالایی هستند که در معرض شرایط اتمسفریک و قابلیت تورمی و انقباضی بالا ترک می‌خورند [۱]. دسته دیگر خاک‌ها، درشت‌دانه هستند که توزیع اندازه دانه یک خاک (اندازه متوسط  $D_{50}$ )، نیروهای حاکم بر سطح ذرات، چینش ذرات و درشت‌ساختار خاک رفتار متعاقب آن را تعیین می‌کند. [۲]. بنابراین، توزیع اندازه دانه یکی از نقش‌های اصلی را در سیستم‌های طبقه‌بندی و رفتاری خاک‌ها ایفا می‌کند. از سوی دیگر، مطالعات گذشته بر نقش عامل دیگری به نام شکل دانه‌ها را در بررسی دقیق‌تر رفتار خاک‌های دانه‌ای تأکید کردند [۳،۴]. شکل ذرات نقش مهمی در مطالعه خواص فیزیکی و مکانیکی خاک، از جمله طبقه‌بندی،

<sup>۱</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [fardin@sharif.edu](mailto:fardin@sharif.edu)

\* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [zahra.s.moosavi@sharif.edu](mailto:zahra.s.moosavi@sharif.edu)

<sup>۳</sup> دکتری، دانشگاه علم و صنعت هنگ‌کنگ، هنگ‌کنگ، [a.a.karimzadeh@gmail.com](mailto:a.a.karimzadeh@gmail.com)

نفوذپذیری، تراکم‌پذیری، زاویه اصطکاک بحرانی، مقاومت برشی، فرآیندهای میکرومکانیکی زیربنایی و سایر مسائل مهندسی زمین‌شناسی و ژئوتکنیک ایفا می‌کند [۵۶]. شکل یک ذره معمولاً با سه پارامتر مستقل مشخص می‌شود: گردگوشگی، کرویت و منظمی. البته پارامترهای دیگری نیز در مطالعات گذشته معرفی شده‌اند که امکان مقایسه نوع ذرات را با تنوع بیشتری فراهم می‌کنند.

بنابراین، هدف از این پژوهش بررسی خصوصیات فیزیکی، دانه‌بندی و شکل دانه مربوط به چهار نوع مصالح دانه‌ای بنامهای ماسه فیروزکوه، ماسه بابلسر، ماسه کویر مصر و ماسه توپورا است. این چهار نوع مصالح به دلیل کاربری متفاوت آن‌ها و نحوه ساختار آن‌ها از قبیل مصنوعی، بادرفتی و طبیعی خصوصیات فیزیکی و شکل دانه متفاوتی دارند.

## ۲. مصالح دانه‌ای مورد استفاده با شکل ذرات مختلف

به منظور ارائه مقایسه مطلوبی از شکل و ویژگی‌های ژئوتکنیکی، از ۴ نوع ماسه با اشکال مختلف شامل ماسه فیروزکوه، بابلسر، کویر مصر و توپورا استفاده شده‌است. شکل ذرات یک خاک تأثیر قابل توجهی بر رفتار و ویژگی‌های خاک از جمله مقاومت برشی، نشست خاک و ظرفیت نگهداشت آب در خاک دارد. علاوه بر این، مصالح استفاده شده ساختگاه و روش ایجاد متفاوتی دارند که این امر بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی آن‌ها از جمله نوع دانه‌بندی مؤثر است.

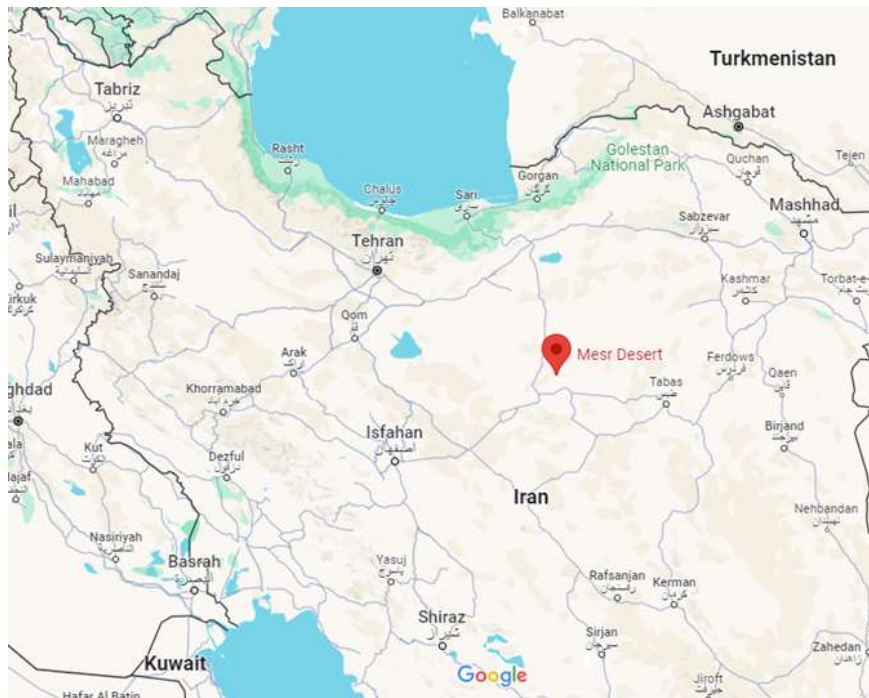
ماسه فیروزکوه یک ماسه تجاری و شکسته شده در کارخانه است که به واسطه این موضوع دانه‌های تشکیل‌دهنده آن بسیار تیزگوشه بوده و دانه‌بندی آن‌ها عمدتاً گستره کاملی از ابعاد ماسه‌ها را شامل می‌شوند.

ماسه بابلسر که از سواحل جنوبی دریای خزر نزدیک شهر بابلسر در شمال ایران تهیه می‌شود، از جمله ماسه‌های طبیعی و پرکاربرد در ایران است که ذرات آن به علت حمل توسط آب، از ذرات گردگوشه‌تری نسبت به ماسه فیروزکوه تشکیل شده است.

ماسه کویر مصر که یک ماسه بادرفتی است که از کویر مصر ایران (مختصات:  $34^{\circ}04'00''$   $54^{\circ}47'00''$ ) قابل تهیه است. این منطقه در دهستان جندق بخش مرکزی خور و شهرستان بیابانک استان اصفهان قرار گرفته است (شکل‌های ۱ و ۲). ماسه بدست آمده از این کویر ماسه مصر نامگذاری شده و مصالح جدیدی است که به طور خاص در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرسایش ناشی از باد منجر به از بین رفتن گوشه‌های تیز ذرات شده و این ماسه دارای ذراتی گردگوشه‌تر است. علاوه بر این، انتقال ناشی از باد ذرات باعث ایجاد دانه‌بندی با غیاب برخی ابعاد شده‌است.

ماسه توپورا نیز یک ماسه شکسته شده مربوط به کشور ژاپن است که ذرات تشکیل‌دهنده آن اشکال مختلفی از جمله نسبتاً گردگوشه تا تیزگوشه را تشکیل می‌دهند. این ماسه یکنواخت یکی از معروفترین ماسه‌های استفاده شده در تحقیقات آزمایشگاهی در ژاپن و جهان است. با هدف بررسی دقیق‌تر شکل ذرات، از تصاویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مصالح برای مقایسه آن‌ها استفاده شد که این تصاویر در شکل ۳ قابل مشاهده هستند. تصاویر ارائه شده برای ماسه‌های فیروزکوه، بابلسر و مصر از طریق مرکز خدمات فناوری دانشگاه صنعتی شریف و تصویر مربوط به ماسه توپورا با استفاده از پژوهش جعفرزاده و زمانیان [۷] تهیه شده‌است.

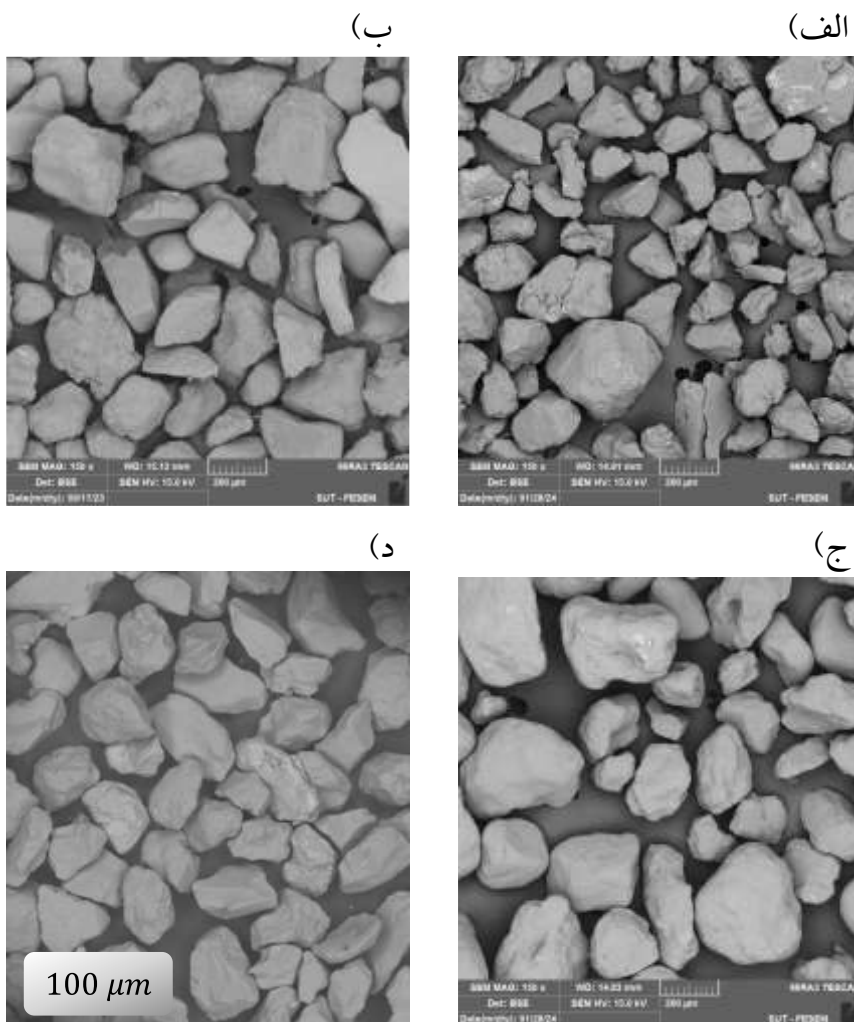




شکل ۱: نقشه موقعیت کویر مصر در استان اصفهان ایران



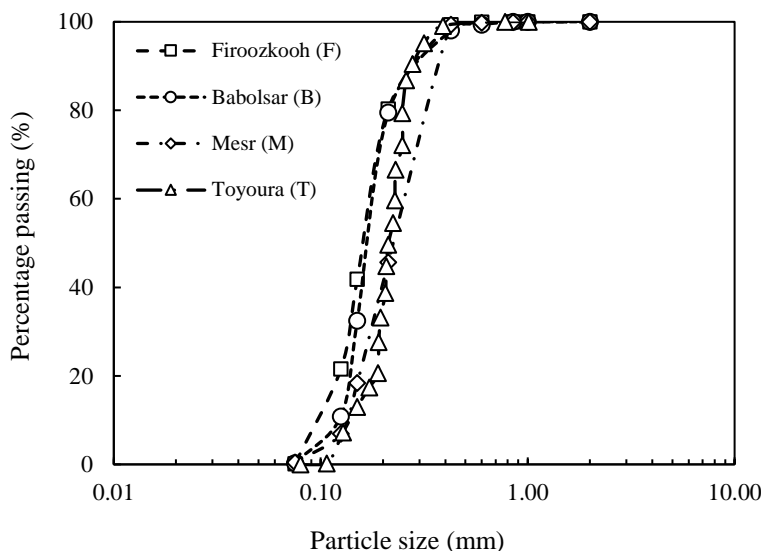
شکل ۲: عکسی از تپه‌ها و رمل‌های ماسه‌ای کویر مصر



شکل ۳: تصویر SEM از مصالح استفاده شده: الف) ماسه فیروزکوه، ب) ماسه بابلسر، ج) ماسه مصر، د) ماسه توبرا [۷]

### ۳. خصوصیات فیزیکی و مورفولوژی مصالح دانه‌ای

با هدف بررسی ویژگی‌های پایه‌ای ماسه مصر و مقایسه آن با مصالح متداول موجود در ایران، آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های پایه ژئوتکنیکی بر روی تمام مصالح بر اساس استانداردهای مربوطه انجام شد. منحنی دانه‌بندی این مصالح در شکل ۴ ارائه شده است. همانطور که در این شکل نیز می‌توان مشاهده کرد، ماسه‌های فیروزکوه و بابلسر دانه‌بندی یکنواخت و نزدیکی با یکدیگر دارند؛ در صورتیکه دانه‌بندی ماسه مصر به دلیل ماهیت بادرستی، نسبت به دو ماسه دیگر چندان یکنواخت نیست. لازم به ذکر است با توجه به نحوه تشکیل این خاک‌ها، دانه‌بندی ارائه شده برای این خاک، لزوماً برای خاک تمام نقاط کویر مصر یکسان نبوده و این آزمایش برای هر نمونه‌ای باید انجام شود. علاوه بر این، چگالی ویژه این مصالح نیز مطابق استانداردها تعیین شدند. مقادیر  $G_s$  و شاخص‌های مربوط به آزمایش دانه‌بندی در جدول ۱ ارائه شده است. ضمناً هر چهار نوع ماسه طبق طبقه بندی متحد خاک (Uniform Soil Classification System) استاندارد ASTM، بصورت SP طبقه بندی می‌شوند.



شکل ۴: منحنی دانه‌بندی مصالح

جدول ۵: مشخصات پایه‌ای ژئوتکنیکی مصالح

| شاخص‌های دانه‌بندی |          |               |               | $G_s$ | نام مصالح | نماد مصالح |
|--------------------|----------|---------------|---------------|-------|-----------|------------|
| $C_c$              | $C_{ul}$ | $D_{50}$ (mm) | $D_{10}$ (mm) |       |           |            |
| ۱/۲۱۶              | ۱/۸۶۰    | ۰/۱۶۷         | ۰/۰۹۵         | ۲/۶۵  | فیروزکوه  | F          |
| ۱/۰۱۷              | ۱/۴۱۵    | ۰/۱۷۹         | ۰/۱۳۰         | ۲/۷۹  | بابلسر    | B          |
| ۰/۸۶۱              | ۱/۷۴۱    | ۰/۲۲۸         | ۰/۱۴۷         | ۲/۶۶  | مصر       | M          |
| ۱/۰۷۴              | ۱/۷۱۴    | ۰/۲۱۲         | ۰/۱۴۰         | ۲/۶۵  | تویورا    | T          |

همچنین مطابق آنچه در شکل ۳ ارائه شد، ماسه مصر موجود در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شریف، از دانه‌های نسبتاً گردگوشه‌ای تشکیل شده‌است که شکل آن ناشی از نحوه تشکیل آن است. فرسایش ناشی از باد، منجر به از بین رفتن گوشه‌های تیز دانه‌ها شده و ذراتی حتی گردگوشه‌تر از ماسه بابلسر که یک ماسه ساحلی است، ایجاد می‌کند. شکل این ذرات می‌تواند بر ویژگی‌هایی از جمله مقاومت برشی خاک تأثیرگذار باشد، زیرا ذرات گرد، سطح تماس و قفل‌شوندگی کمتری با یکدیگر دارند که منجر به کاهش مقاومت برشی خاک می‌شود.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای اولین بار یک ماسه یکنواخت بادرفتی بدست آمده از کویر مرکزی ایران بنام کویر مصر که "ماسه مصر" نامگذاری شده است؛ معرفی گردید. خصوصیات نشانه (index properties) این ماسه و مقایسه شکل و ویژگی‌های ژئوتکنیکی آن با سه نوع خاک ماسه‌ای دیگر شامل ماسه‌های فیروزکوه، بابلسر که متعلق به ایران بوده و ماسه تویورا ژاپن، پرداخته شد. با توجه به تصاویر SEM تهیه شده از نمونه‌ها، مشاهده شد که ذرات ماسه مصر نسبت به سایر نمونه‌ها گردگوشه‌تر هستند. علاوه بر این، بر اساس آزمایش‌های دانه‌بندی انجام گرفته، مشخص شد که به علت نحوه ایجاد این ماسه، یکنواختی دانه‌بندی آن کمتر از سایر ماسه‌ها است.

## ۵. فهرست مراجع

- M. Jabbarzadeh, H. Sadeghi, S. Tourchi and A.G. Darzi, "Thermo-hydraulic analysis of desiccation cracked soil strata considering ground temperature and moisture dynamics under the influence of soil-atmosphere interactions," *Geomechanics for Energy and the Environment*, p.100558, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2024.100558>
- Santamarina, J.C. and Cho, G.C., 2004. Soil behaviour: The role of particle shape. In *Advances in geotechnical engineering: The Skempton conference: Proceedings of a three day conference on advances in geotechnical engineering, organised by the Institution of Civil Engineers and held at the Royal Geographical Society, London, UK, on 29–31 March 2004* (pp. 604-617). Thomas Telford Publishing.
- M.A. Hosseini and P. Tahmasebi, "A novel graph-based 3D breakage method for angular particles with an image-based DEM," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 174, p.105640, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2024.105640>
- M.A. Hosseini and P. Tahmasebi, "On the influence of the natural shape of particles in multiphase fluid systems: Granular collapses," *Computers and Geotechnics*, 162, p.105654, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105654>
- Z. Lu, A. Yao, A. Su, X. Ren, Q. Liu, and S. Dong, "Re-recognizing the impact of particle shape on physical and mechanical properties of sandy soils: a numerical study," *Engineering geology*, 253, pp.36-46, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.03.011>
- Z. Mousavi and F. Jafarzadeh, "The influence of gradation on shear behavior of Glass Beads: A DEM study," In *14<sup>th</sup> National Conference on Civil Engineering*, 2024. <https://www.researchgate.net/publication/380667931>
- F. Jafarzadeh, and M. Zamanian, "Effect of stress direction on the undrained monotonic and cyclic behavior of dense sands," *Scientia Iranica*, 27(2), pp.551-565, 2020. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.20318>



## تجزیه و تحلیل کتابشناسی در پژوهش‌های علمی در حوزه خاک‌های غیر اشباع

محمد اسمعیل سیف؛ حسین ملاعباسی\*؛ حامد صادقی<sup>۳</sup>

### چکیده

در دهه‌های گذشته، اهمیت پرداختن و فهم رفتار خاک‌های غیراشباع به دلیل چالش‌های موجود در طراحی ایمن و مقرون به صرفه سازه‌های ژئوتکنیکی بر اساس اصول موضوعه این حوزه علمی، افزایش یافته است. بنابراین، پژوهش حاضر به تحلیل کتابشناسی پژوهش‌های انجام گرفته در حوزه خاک‌های غیر اشباع در مهندسی ژئوتکنیک می‌پردازد. بدین منظور، از ابزار Vosviewer برای تجزیه و تحلیل محتوای متون فنی مرتبط استفاده شد. اطلاعات ورودی و داده‌های تحلیل مشتمل بر ۲۴۷۸ مقاله از پایگاه داده Web of Science جمع‌آوری شد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تعداد انتشارات در سال ۲۰۲۲ با ۲۳۰ مقاله و ۸,۳۷ درصد کل مجموعه داده‌ها بوده است. تحلیل کلیدواژه‌ها نشان می‌دهد که واژگانی مانند «خاک‌های غیراشباع» و «مدل» بیشترین تکرار را دارد که خود گویای پیچیدگی توسعه دستگاه‌ها و روش‌های آزمون‌های در این حوزه است. این مطالعه، پیشرفت‌های قابل توجه در روش‌شناسی و افزایش توجه به تحقیقات خاک‌های غیر اشباع را نشان می‌دهد.

### کلیدواژه‌ها

خاک‌های غیر اشباع، Vosviewer، تحلیل کتاب‌شناسی، مهندسی ژئوتکنیک

### ۱. مقدمه

در چهار دهه گذشته، اهمیت خاک‌های غیر اشباع به دلیل چالش‌هایی که در طراحی مهندسی ژئوتکنیک بر اساس اصول کلاسیک مکانیک خاک‌های اشباع با آن‌ها مواجه می‌شویم، افزایش یافته است [۱]. خاک‌های غیر اشباع به دلیل وجود همزمان آب و هوا در فضای خالی دانه‌ها، دارای خواص منحصر به فردی هستند که به طور قابل توجهی بر رفتار مکانیکی و هیدرولیکی آنها تأثیر می‌گذارد. تحلیل بیبلیومتریک<sup>۴</sup> یک رویکرد کمی است که برای مطالعه‌ی تکامل دانش در حوزه‌های مختلف پژوهشی از طریق بررسی انتشارات مرتبط به کار می‌رود، [۲]. این تحلیل شامل استفاده از روش‌های آماری برای ارزیابی تأثیر و پیشرفت پژوهش‌های علمی است و بینش ارزشمندی در مورد تکامل دانش، شناسایی پیشگامان و آثار بنیادی ارائه می‌دهد [۶]–[۴]. این مقاله قصد دارد یک تحلیل کتابشناسی مختصر از تحقیقات موجود در زمینه خاک‌های غیر اشباع در مهندسی ژئوتکنیک ارائه دهد، با تأکید بر تکامل روش‌شناسی، انتشارات سالانه، تجزیه و تحلیل کلیدواژه‌ها و تجزیه و تحلیل هم‌نویسندگی

<sup>۱</sup> گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران، [is.seifi@gmail.com](mailto:is.seifi@gmail.com)

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [hossein.molaabasi@reseracher.sharif.edu](mailto:hossein.molaabasi@reseracher.sharif.edu)

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [hsadeghi@sharif.edu](mailto:hsadeghi@sharif.edu)

\* نویسنده مسئول

بر اساس کشورها را ارائه دهد. بدین منظور از ابزار Vosviewer برای تجزیه و تحلیل بدنه ادبیات در مورد خاک‌های غیر اشباع استفاده شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

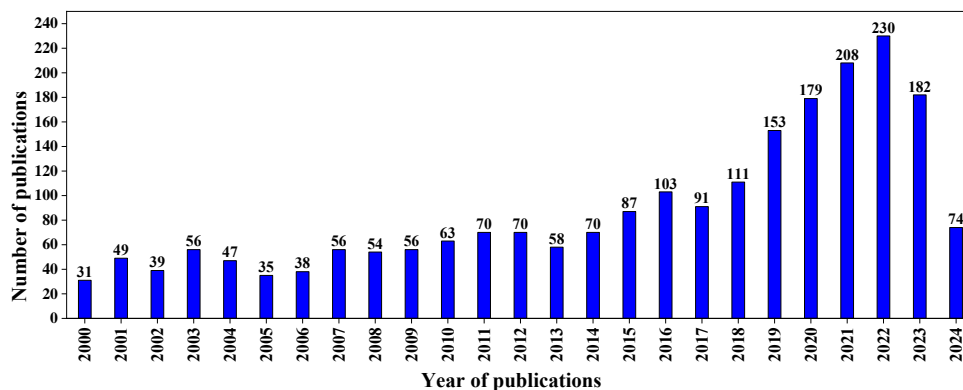
### ۱.۲ منبع داده

پایگاه داده Web of Science یک منبع اطلاعاتی معتبر و پرکاربرد است که داده‌های جامع ارجاعی را برای رشته‌های مختلف علمی ارائه می‌کند [۷]. پژوهشگران از Web of Science برای تحلیل‌های کتابشناسی به منظور تجزیه و تحلیل مقالات علمی، ردیابی موضوعات و روندهای تحقیقاتی، ارزیابی عملکرد انتشارات و شناسایی چشم‌اندازهای تحقیقاتی استفاده می‌کنند [۱۰]–[۸]. در این پژوهش، از پایگاه داده Web of Science برای جمع‌آوری انتشارات مرتبط با خاک غیر اشباع در مهندسی ژئوتکنیک استفاده شد. جستجوی اصلی برای یافتن انتشارات مرتبط در خرداد ۱۴۰۳ انجام گرفت. در این پژوهش، از کلیدواژه «خاک غیر اشباع» برای ساختن عبارات جستجو در عنوان، چکیده و بخش کلیدواژه‌های پایگاه داده Web of Science به کار رفت. سپس، مقالاتی که بر کاربرد خاک غیر اشباع در مهندسی ژئوتکنیک تمرکز نداشتند غربال شدند. همچنین، پایگاه داده تنها به مقالات انگلیسی محدود شد. بر این اساس، تعداد ۲۴۷۸ مقاله برای این مطالعه انتخاب گردید.

## ۳. نتایج و بحث

### ۳.۱ انتشارات سالانه

الگوی رشد انتشارات مرتبط با خاک‌های غیر اشباع از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ در شکل ۱ نشان داده شده است، بررسی سال انتشار مقالات نشان می‌دهد که حوزه خاک‌های غیر اشباع در مهندسی ژئوتکنیک، به ویژه در دو دهه اخیر، رشد چشمگیری داشته است. بین سال‌های ۲۰۲۴ تا ۲۰۰۰، این حوزه شاهد افزایش تدریجی تولیدات پژوهشی بوده است. از ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴، تمرکز بیشتری بر این حوزه مشاهده می‌شود و تعداد مقالات به طور مداوم افزایش یافته است؛ بیشترین تعداد انتشارات در سال ۲۰۲۲ با ۲۳۰ مقاله و ۸,۳۷ درصد کل مجموعه داده‌ها بوده است. دهه ۲۰۱۰ نیز خروجی پژوهشی قابل توجهی داشته است، به‌ویژه در سال ۲۰۱۹ با ۱۵۳ مقاله (۵,۵۷ درصد). در این دهه، تعداد انتشارات ثابت نسبی داشته است، به عنوان مثال در سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۴ به ترتیب ۱۰۳، ۸۷ و ۷۰ مقاله منتشر شد. در دهه ۲۰۰۰، سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۳ هر کدام با ۵۶ مقاله (۲,۰۴ درصد) بیشترین تعداد انتشارات را دارند. این الگو نشان می‌دهد که پژوهش در این حوزه در سال‌های اخیر با شتاب بیشتری پیشرفت کرده است. افزایش تعداد انتشارات اخیر بیانگر علاقه و سرمایه‌گذاری بیشتر در این حوزه است.

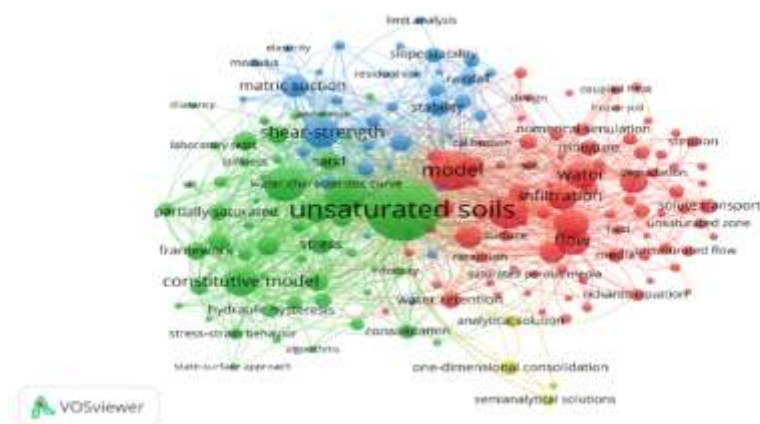


Unsaturated soil

شکل ۱: الگوی رشد انتشارات مرتبط با خاک‌های غیر اشباع از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴

### ۳,۲ تجزیه و تحلیل کلیدواژه‌ها

تجزیه و تحلیل کلید واژه‌ها امری ضروری است. در شکل ۱ نقشه پراکندگی کلیدواژه‌ها بر اساس روابط همزمانی تألیفات مرتبط با خاک‌های غیر اشباع طی سالهای ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۴ نشان داده شده است. مطابق تحلیل انجام شده، خاک‌های غیر اشباع (۹۳۲ بار تکرار، ۸,۸۶ درصد). کلیدواژه «خاک‌های غیر اشباع» با بیشترین فراوانی ظاهر شد. خاک‌های غیر اشباع طیف وسیعی از مطالعات را دربرمی‌گیرد. مدل (۴۲۰ بار تکرار، ۳,۹۹ درصد) تکرار زیاد واژه «مدل» بر تأکید بر مدل‌های نظری و محاسباتی برای پیش‌بینی رفتار خاک‌های غیر اشباع دلالت دارد. پژوهشگران از مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی واکنش خاک تحت شرایط گوناگون استفاده می‌کنند که به طراحی و تحلیل سیستم‌های ژئوتکنیکی کمک می‌کند. رفتار (۳۳۰ بار تکرار، ۳,۱۴ درصد): کلیدواژه «رفتار» نشان‌دهنده‌ی تمرکز قابل توجهی بر درک پاسخ‌های مکانیکی و هیدرولیکی خاک‌های غیر اشباع است. این امر شامل مطالعه‌ی واکنش این خاک‌ها به تغییرات محیطی، شرایط بارگذاری و سایر عوامل خارجی می‌شود. مکش (۳۲۴ بار تکرار، ۳,۰۸ درصد). فراوانی بالای این واژه، اهمیت آن را در مشخص کردن ویژگی‌های خاک و توسعه‌ی مدل‌های دقیق نشان می‌دهد.



شکل ۲: نقشه پراکندگی کلیدواژه‌ها بر اساس روابط همزمانی تألیفات مرتبط با خاک‌های غیر اشباع طی سالهای ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۴

### ۴. نتیجه‌گیری

این مطالعه با استفاده از تحلیل کتابشناسی، روند و الگوهای تحقیقاتی در زمینه خاک‌های غیر اشباع در مهندسی ژئوتکنیک را بررسی کرد. نتایج نشان داد که تحقیقات در این حوزه در سال ۲۰۱۹ با ۱۵۳ مقاله ۵,۵۷ درصد از کل انتشارات را به خود اختصاص داد. تحلیل کلیدواژه‌ها نیز نشان می‌دهد که واژه‌هایی مانند «خاک‌های غیر اشباع» و «مدل» بیشترین تکرار را داشت. این پژوهش نه تنها به شناسایی روندهای موجود کمک کرده، بلکه بینش‌های ارزشمندی را برای تحقیقات آینده در زمینه خاک‌های غیر اشباع ارائه می‌دهد.

### ۵. فهرست مراجع

- [1] A. Abeyrathne, T. Islam, J. Kodikara, and H. Bui, "Application of MPK framework to interpret volume change behavior of compacted unsaturated soils," in *Unsaturated Soil Mechanics from Theory to Practice - Proceedings of the 6th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils*, 2016, pp. 749–752. doi: 10.1201/b19248-125.

- [2] B. Toaza and D. Esztergár-Kiss, "Automated bibliometric data generation in Python from a bibliographic database[Formula presented]," *Softw. Impacts*, vol. 19, 2024, doi: 10.1016/j.simpa.2023.100602.
- [3] I. R. C. Bienert, R. C. de Oliveira, P. B. de Andrade, and C. A. Caramori, "Bibliometric indexes, databases and impact factors in cardiology," *Brazilian J. Cardiovasc. Surg.*, vol. 30, no. 2, pp. 254–259, 2015, doi: 10.5935/1678-9741.20150019.
- [4] G. M. Martínez-Toro, D. Rico-Bautista, E. Romero-Riaño, C. J. Galeano-Barrera, C. D. Guerrero, and J. A. Parra-Valencia, "Analysis of the intellectual structure and evolution of research in human-computer interaction: A bibliometric analysis," *RISTI - Rev. Iber. Sist. e Tecnol. Inf.*, no. E17, pp. 363–378, 2019, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85061181015&partnerID=40&md5=72fdfb7321e66b3928d81e1217268265>
- [5] J. I. Robaina Castillo, "Identifying promising research areas in health using bibliometric analysis," *Data Metadata*, vol. 1, 2022, doi: 10.56294/dm202210.
- [6] A. Sillet, "Definition and use of bibliometrics in research," *Soins*, vol. 58, no. 781, pp. 29–30, 2013, doi: 10.1016/j.soin.2013.10.002.
- [7] C. Birkle, D. A. Pendlebury, J. Schnell, and J. Adams, "Web of science as a data source for research on scientific and scholarly activity," *Quant. Sci. Stud.*, vol. 1, no. 1, pp. 363–376, 2020, doi: 10.1162/qss\_a\_00018.
- [8] S. Liang, "Trend Analysis of Journal of Finance Based on Web of Science Database," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1852, no. 4. doi: 10.1088/1742-6596/1852/4/042010.
- [9] S. Sofik, D. Z. Rahman, and D. S. Nausheen, "Productivity Trends and Pattern of Scientific Collaboration of Bibliometric Research: An Exploratory Analysis," *Libr. Philos. Pract.*, vol. 2021, pp. 1–24, 2021, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85112831974&partnerID=40&md5=349a67f0ebe704a9a1fe934f24a8a954>
- [10] S. Janzen, "Advancing the Advanced Search: Improving the Web of Science User Experience with a Spreadsheet Search Query Tool," in *Communications in Computer and Information Science*, 2022, vol. 1580 CCIS, pp. 292–299. doi: 10.1007/978-3-031-06417-3\_40.





## مطالعه جذب ترکیبات رنگی آنیونی و کاتیونی از آب با استفاده از چارچوب

### فلز-آلی نانومتخلخل ZIF-8

سعید زاهدی اصل<sup>۱</sup>؛ فهیمه حوری آباد صبور<sup>۲\*</sup>؛ داود سیف‌زاده<sup>۳</sup>

#### چکیده

در این پژوهش، کارایی چارچوب فلز-آلی ZIF-8 برای حذف رنگ‌های صنعتی از آب بررسی شده است. ZIF-8 به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود مانند سطح ویژه بالا، پایداری ساختاری مناسب و قابلیت استفاده مجدد مورد توجه در این کاربرد قرار گرفته است. آنالیزهای طیف سنجی مرئی-فرابنفش با استفاده از رنگ‌های متیلن‌بلو، متیل‌اورانژ و متیل‌گرین در شرایط مختلف pH انجام شده است. نتایج نشان داده است که ZIF-8 در محیط بازی جذب بیشتری برای رنگ‌های کاتیونی و در محیط اسیدی جذب بیشتری برای رنگ‌های آنیونی دارد. این مطالعه نشان می‌دهد که ZIF-8 می‌تواند به عنوان یک جذب مؤثر برای حذف آلاینده‌های رنگی از پساب‌های صنعتی استفاده شود. البته باید توجه شود که تنظیم pH نقش مهمی در بهینه‌سازی فرآیند جذب دارد.

#### کلیدواژه‌ها

چارچوب فلز-آلی (MOF)، رنگ‌های کاتیونی و آنیونی، تصفیه آب، تاثیر pH

#### ۱. مقدمه

آب یکی از منابع حیاتی است که ۷۱ درصد سطح زمین را پوشش می‌دهد، در حالی که تنها ۲۹ درصد باقی‌مانده را خشکی‌ها تشکیل می‌دهند. از این ۷۱ درصد آب موجود، ۹۷ درصد آن آب شور بوده و تنها ۳ درصد آب شیرین است. با این حال، بخش عمده‌ای از این آب شیرین نیز در یخچال‌ها و مناطق یخ‌زده گیر افتاده و قابل استفاده نیست. به گزارش سازمان ملل متحد، رابطه مستقیمی بین سلامت و تمیزی آب با سلامت انسان‌ها وجود دارد. بنابراین، تصفیه آب از آلاینده‌های مختلف آبی یکی از امور مهم و با ارزش برای حفظ سلامتی انسان‌ها و محیط‌زیست می‌باشد [۱].

آلاینده‌های آبی به دو دسته کلی آلاینده‌های آلی و آلاینده‌های معدنی تقسیم می‌شوند. آلاینده‌های آلی خود به دو زیرمجموعه زیست‌تخریب‌پذیر و زیست‌تخریب‌ناپذیر و همچنین، آلاینده‌های معدنی به دو دسته فلزی و

<sup>۱</sup> گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران (s.zahedi@student.uma.ac.ir)

<sup>۲\*</sup> گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران (f.saboor@uma.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

<sup>۳</sup> گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران (seifzadeh@uma.ac.ir)

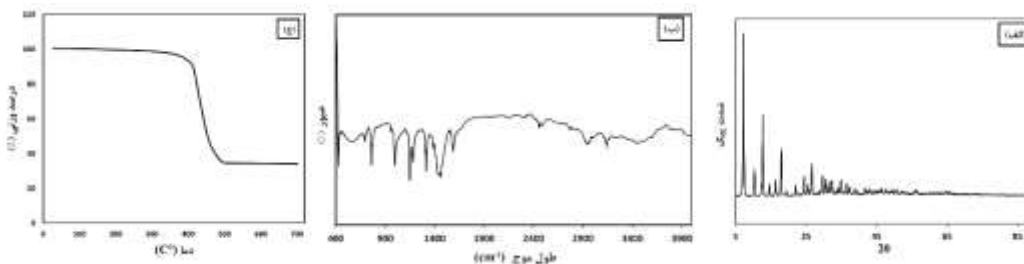
غیرفلزی طبقه‌بندی می‌شوند. یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های آلی، آلاینده‌های رنگی هستند که به دلیل استفاده فراوان در صنایع، اهمیت ویژه‌ای دارند. این آلاینده‌ها در دسته آلاینده‌های زیست‌تخریب‌ناپذیر قرار می‌گیرند و به همین دلیل حذف آن‌ها از منابع آبی بسیار حائز اهمیت است. رنگ‌ها بر اساس معیارهایی همچون ساختار شیمیایی، منبع، حلالیت و کاربردهایشان تقسیم‌بندی می‌شوند، اما اصلی‌ترین آلاینده رنگی، رنگ‌های حاوی ترکیبات آزو (-N=N-) است که مضرات و خطرات شدیدتری نسبت به بقیه رنگ‌ها دارند. این نوع رنگ‌ها به دلیل کارایی بالا و قیمت مناسب، تقریباً در ۷۰ درصد صنایع بزرگ استفاده می‌شود. لذا، تصفیه آب از آلاینده‌های آبی به ویژه آلاینده‌های رنگی نیز امری ضروری و مهم به شمار می‌آید [۲].

تا کنون از فرآیندهای تصفیه بسیاری برای حذف رنگ از آب استفاده شده است، از جمله تجزیه فوتوکاتالیستی، تجزیه سونوشیمیایی، غشاهای تصفیه بیولوژیکی و غیره. اگرچه این روش‌ها در حذف رنگ از آب و فاضلاب موثر هستند، اما معمولاً به سیستم‌های پیچیده و هزینه‌های عملیاتی بالایی نیاز دارند. در میان فناوری‌های مختلف تصفیه، جذب سطحی به دلیل راندمان بالا، عملیات آسان، امکان‌سنجی اقتصادی و سازگاری با محیط‌زیست، بهینه‌ترین روش محسوب می‌شود. یکی از روش‌های نوین و کارآمد در زمینه جذب، استفاده از چارچوب‌های فلز-آلی (MOFs) است. این مواد متخلخل به دلیل سطح ویژه بالا، تخلخل بالا و ساختار و عملکرد قابل تنظیم، موقعیت مهمی را در جذب و جداسازی آلاینده‌ها از آب اشغال کرده‌اند. چارچوب‌های فلز-آلی از یون‌ها و یا خوشه‌های فلزی که توسط لیگاندهای آلی به هم متصل شده‌اند، تشکیل شده و در نهایت مواد کریستالی با شبکه‌های یک‌بعدی، دو‌بعدی و سه‌بعدی ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، باید به ویژگی‌هایی نظیر غیرسمی بودن، پایداری در آب، آبدوست یا آبگریز بودن و زیست‌تخریب‌پذیر بودن یا نبودن MOFs نیز توجه کرد، چرا که این عوامل تأثیرات مهمی بر نتیجه نهایی دارند. از میان انواع MOFs، نوع ZIF-8 به دلیل مساحت سطح بالا، غیرسمی بودن، پایداری حرارتی ساختاری بالا و قابلیت استفاده مجدد، یکی از گزینه‌های مناسب برای جذب رنگ به شمار می‌رود [۳].

در این پژوهش به بررسی ظرفیت حذف رنگ از آب با استفاده از یک نوع چارچوب فلز-آلی پرداخته شده است. در این مطالعه، پس از سنتز ZIF-8 تحت شرایط بهینه، مشخصه‌یابی آن با استفاده از آنالیزهای BET، XRD، FT-IR و TG انجام شد تا خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن به‌طور دقیق تعیین شود. سپس، این جاذب برای تست میزان و رفتار حذف رنگ‌های مختلف از آب مورد آزمایش قرار گرفت.

## ۲. سنتز و مشخصه‌یابی ZIF-8

مقدار معینی از نیترات روی ۶ آبه به عنوان پیش‌ماده فلزی و ۲ متیل‌ایمیدازول به عنوان لیگاند آلی، در متانول مخلوط شدند. این مخلوط حرارت دهی شد تا فرآیند سنتز چارچوب فلز-آلی به طور کامل انجام شود. محلول شیری رنگ به دست آمده، با استفاده از سانتریفیوژ با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه جدا شده و چندین بار شستشو داده شد. رسوب نهایی سپس در آون با دمای ۶۰°C خشک گردید و آنالیزهای مذکور بر روی نمونه انجام شد.



شکل (۱) نتایج مشخصه‌یابی (الف) XRD، (ب) FTIR، (ج) TGA برای ZIF-8

آنالیز BET برای ارزیابی مساحت سطح ویژه، حجم تخلخل و میانگین قطر حفرات نمونه سنتز شده انجام شد. مساحت سطح ویژه  $2127/7 \text{ m}^2/\text{g}$ ، حجم مجموع حفرات  $1/5412 \text{ cm}^3/\text{g}$  و میانگین قطر حفرات  $2/8374 \text{ nm}$  به دست آمد، که نشان‌دهنده پتانسیل خوب نمونه برای حذف و جذب ذرات رنگ است. آنالیز XRD که در شکل الف نشان داده شده است، وجود تمامی پیک‌های شاخص ZIF-8 شامل زوایای  $2\theta$  برابر  $7/21$ ،  $10/43$ ،  $12/78$ ،  $14/82$ ،  $16/48$  و  $18/15$  درجه را تایید می‌کند. همچنین درصد بلورینگی نمونه که با نسبت مساحت زیر پیک‌های شاخص ذکر شده بر مساحت کل زیر نمودار محاسبه شد،  $31,85\%$  می‌باشد. طیف FT-IR که در شکل اب نشان داده شده است باندهای اصلی در  $3455$ ،  $3135$ ،  $2929$ ،  $1635$ ،  $1585$ ،  $1458$ ،  $1425$ ،  $1385$ ،  $1309$ ،  $1146$ ،  $995$ ،  $760$ ،  $694$  و  $426 \text{ cm}^{-1}$  را نشان داد که با نتایج مراجع همخوانی دارد. همچنین آنالیز TG نشان داده شده در شکل اج مشخص کرد ZIF-8 سنتز شده، در دمای  $400-450^\circ\text{C}$  کاهش وزن قابل ملاحظه‌ای دارد که به تجزیه چارچوب فلزی-آلی مرتبط است، این نتیجه نشان می‌دهد که نمونه سنتز شده ZIF-8 پایداری حرارتی مناسب و ساختار مقاوم در برابر دما از خود نشان می‌دهد.

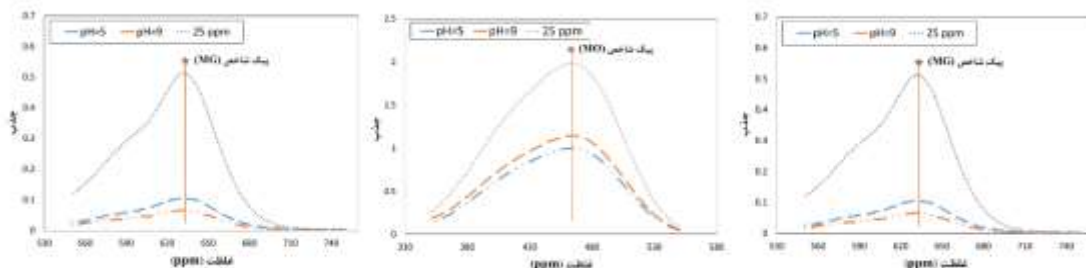
### ۳. تست جذب رنگ

برای تست توانایی جذب ZIF-8، از رنگ‌های متیلن‌بلو (MB)، متیل‌اورانژ (MO) و متیل‌گرین (MG) استفاده شده است. در این آزمایش، از محلول رنگ با غلظت  $25 \text{ ppm}$  استفاده شده است. این تست‌ها در دو محیط اسیدی ( $\text{pH}=5$ ) و بازی ( $\text{pH}=9$ ) تکرار شد و نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین آنالیزهای طیف سنجی مرئی-فرابنفش این رنگ‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱) درصد حذف رنگ‌های MB، MO و MG در غلظت  $25 \text{ ppm}$  و در دو محیط اسیدی و بازی توسط ZIF-8

| درصد حذف (%) | رنگ مورد تست | pH محیط تست |
|--------------|--------------|-------------|
| 64/4         | MB           | pH=5        |
| 42/43        | MO           |             |
| 81/9         | MG           |             |
| 76/22        | MB           | pH=9        |
| 93/3         | MO           |             |
| 87/0.3       | MG           |             |

با توجه به pH نقطه بار صفر ZIF-8 که برابر با ۹ است و خصوصیات الکتروشیمیایی رنگ‌ها، نتایج جدول قابل توجیه است [۴]. در  $\text{pH}=5$ ، سطح ZIF-8 بار مثبت دارد و جذب رنگ‌های کاتیونی (متیلن‌بلو و متیل‌گرین) کمتر موثر است، زیرا دافعه الکتروستاتیکی بین سطح جاذب و این رنگ‌ها وجود دارد. در این شرایط، جذب رنگ آنیونی (متیل‌اورانژ) بهتر است. در  $\text{pH}=9$  و بالاتر، سطح ZIF-8 بار منفی دارد و جذب رنگ‌های کاتیونی به دلیل جذب الکتروستاتیکی بیشتر است، در حالی که جذب رنگ آنیونی کمتر می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در محیط اسیدی، درصد حذف متیلن‌بلو و متیل‌گرین به ترتیب  $64/4\%$  و  $81/9\%$  است، در حالی که در محیط بازی این مقادیر به  $76/22\%$  و  $87\%$  افزایش می‌یابد. برعکس، درصد حذف متیل‌اورانژ در محیط اسیدی  $4/24\%$  است و در محیط بازی به  $3/39\%$  کاهش می‌یابد. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر pH و بار الکتریکی سطح جاذب بر کارایی حذف رنگ‌ها توسط ZIF-8 است و اهمیت تنظیم pH برای بهینه‌سازی فرآیند جذب را برجسته می‌سازد.



شکل ۲) آنالیزهای طیف سنجی مرئی- فرابنفش رنگ‌های MB، MO و MG قبل و بعد از جذب

طیف‌های نشان داده شده در شکل ۲ برای هر رنگ در سه حالت مختلف گرفته شده است:

رنگ در غلظت ۲۵ ppm، پس از جذب در محیط بازی (pH=9) و پس از جذب در محیط اسیدی (pH=5). همانطور که مشخص است، جذب درصد قابل توجهی از غلظت رنگ را کاهش می‌دهد و نتایج بیان شده در پاراگراف قبل کاملاً مشهود است. به طور خاص، متیلن بلو (MB) و متیل گرین (MG) در pH=9 جذب بیشتری نسبت به pH=5 از خود نشان می‌دهند، که این امر با توجه به خاصیت کاتیونی این رنگ‌ها و بار منفی سطح ZIF-8 در محیط بازی توجیه پذیر است. برعکس، متیل اورانژ (MO) در pH=5 جذب بیشتری نسبت به pH=9 دارد، که این نتیجه به دلیل آنیونی بودن این رنگ و بار مثبت سطح ZIF-8 در محیط اسیدی می‌باشد. این نتایج، تأثیر pH بر کارایی جذب رنگ‌ها توسط ZIF-8 را به خوبی نشان می‌دهد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، توانایی چارچوب فلز-آلی ZIF-8 در حذف رنگ‌های متیلن بلو (MB)، متیل اورانژ (MO) و متیل گرین (MG) از محلول‌های آبی با غلظت ۲۵ ppm مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، مقدار معین از ZIF-8 به محلول‌های رنگ در دو محیط اسیدی (pH=5) و بازی (pH=9) اضافه شد و نتایج جذب پس اختلاط ارزیابی شد. نتایج نشان داد که ZIF-8 در محیط بازی جذب بیشتری برای رنگ‌های کاتیونی (MB و MG) و در محیط اسیدی جذب بیشتری برای رنگ آنیونی (MO) دارد. درصد حذف برای MB و MG به ترتیب از ۶۴/۴٪ و ۸۱/۹٪ در pH=5 و ۷۶/۲٪ و ۸۷/۰۳٪ در pH=9 افزایش یافت، در حالی که درصد حذف MO از ۴۲/۴٪ در pH=5 به ۳۹/۳٪ در pH=9 کاهش یافت. این نتایج تأثیر pH و بار الکتریکی سطح جاذب بر کارایی حذف رنگ‌ها توسط ZIF-8 را به خوبی نشان می‌دهد و اهمیت تنظیم pH برای بهینه‌سازی فرآیند جذب را برجسته می‌سازد. با توجه به طیف‌های اسپکترومتر، کاهش قابل توجه غلظت رنگ‌ها پس از جذب تأیید شده است.

#### ۵. فهرست مراجع

- [۱] R. K. Mishra, "Fresh water availability and its global challenge," *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, vol. 4, no. 3, pp. 1-78, 2023.
- [۲] L. Rani, J. Kaushal, A. L. Srivastav, and P. Mahajan, "A critical review on recent developments in MOF adsorbents for the elimination of toxic heavy metals from aqueous solutions," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, pp. 44771-44796, 2020.
- [۳] Y. Yao *et al.*, "Macroscopic MOF architectures: Effective strategies for practical application in water treatment," *Small*, vol. 18, no. 8, p. 2104387, 2022.
- [۴] N. Hassan, A. Shahat, A. El-Didamony, M. El-Desouky, and A. El-Bindary, "Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic studies of adsorption of cationic dyes from aqueous solution using ZIF-8," *Moroccan Journal of Chemistry*, vol. 8, no. 3, pp. 8-3 (2020) 627-637, 2020.



## بهینه‌سازی فرآیند استخراج انرژی از سیستم‌های زمین‌گرمایی بهبودیافته با شکاف محدود

محمد نوروزی دلاویز\*؛ مزده سجادی<sup>۱</sup>؛ محمد امامی نیری<sup>۲</sup>

### چکیده

با افزایش آگاهی جهانی به لزوم استفاده از انرژی‌های سبز، بهره‌برداری از انرژی سنگ‌های داغ زیر زمین بعنوان در دسترس‌ترین نوع منبع زمین‌گرمایی در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. استفاده از این منابع مستلزم ایجاد تراوایی در سنگ با ایجاد شکاف هیدرولیکی، و تزریق سیال برای دریافت گرما و انتقال آن به سطح است که بطور کلی به آن سیستم زمین‌گرمایی بهبود یافته<sup>۴</sup> گفته می‌شود. در این مطالعه، با مدل‌سازی عددی یک سیستم زمین‌گرمایی بهبود یافته با شکاف محدود، حساسیت مقدار تجمعی استخراج انرژی و نرخ بهینه تزریق سیال به ابعاد شکاف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شعاع شکاف، و متعاقباً افزایش فاصله بین دو چاه، انرژی تولیدی تجمعی افزایش می‌یابد. همچنین نرخ بهینه تزریق سیال که به بیشینه شدن انرژی تولیدی تجمعی می‌انجامد، در شکاف‌های بزرگتر بیشتر است. نتایج حاصل می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های زمین‌گرمایی بهبود یافته مورد استفاده قرار گیرد.

### کلیدواژه‌ها

انرژی زمین‌گرمایی، سیستم‌های زمین‌گرمایی بهبود یافته، شبه‌سازی، شکاف محدود، بهینه‌سازی، انتقال حرارت در محیط متخلخل، شکاف هیدرولیکی، سنگ داغ خشک.

### ۱. مقدمه

منابع انرژی زمین‌گرمایی، شامل انواع سیستم‌های هیدروترمال (مخازن زمین‌گرمایی آبی) و سیستم‌های زمین‌گرمایی بهبود یافته، جایگزینی تجدیدپذیر برای گرمایش خانگی و تولید پایدار برق با استفاده از حرارت زیرزمین هستند. مخازن زمین‌گرمایی به نفوذپذیری بالای سنگ و حضور آب‌های زیرزمینی متکی هستند، در حالی که سیستم‌های بهبود یافته برای استخراج گرما از سنگ‌های خشک داغ ناتراوا طراحی شده‌اند و نیاز به ایجاد

<sup>۱</sup> انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران  
\* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۴</sup> Enhanced Geothermal System (EGS)

شکاف‌های مصنوعی برای استخراج گرما دارند. ساخت این سیستم‌ها شامل اکتشاف سنگ‌های خشک داغ، نقشه‌برداری از توزیع شکاف‌ها، حفاری چاه‌های تزریق و تولید، ایجاد شکاف هیدرولیکی برای توسعه مخزن، و ایجاد یک حلقه بسته جریان سیال کاری برای استخراج انرژی و تولید برق است [۱]. یکی از گروه‌هایی که به طور گسترده در زمینه مدل‌سازی سیستم‌های زمین‌گرمایی بهبودیافته مطالعه کرده‌اند، قاسمی و همکارانش هستند [۲]. آن‌ها با معرفی یک روش معادله انتگرالی برای استخراج گرما از شکاف مسطح درون سنگ خشک داغ فرضیات سنتی هدایت حرارتی یک‌بعدی که در حل تحلیلی معادلات انتقال حرارت این سیستم‌ها به کار می‌رود را به چالش کشیدند [۴]. در مدل‌سازی سیستم‌های گرمایی بهبودیافته پدیده‌های مختلف طبیعی، شامل تأثیر دما بر بازشدگی شکاف و رفتار مکانیکی سنگ [۵]، و رخ دادن واکنش‌های شیمیایی بین سنگ و سیال [۶] می‌توانند پیچیدگی سیستم را افزایش دهند. مطالعات قبلی به اهمیت تأثیر پارامترهای عملیاتی نظیر نرخ جریان و فاصله چاه‌ها بر میزان استخراج حرارت و توجیه‌پذیری اقتصادی این سیستم‌ها اشاره کرده‌اند [۷]. یکی از پارامترهایی که اندازه‌گیری و طراحی آن به قطعیت ممکن نیست، ابعاد شکاف ایجاد شده است. در این مطالعه با مدل‌سازی عددی یک سیستم زمین‌گرمایی بهبودیافته با شکاف محدود، حساسیت میزان استخراج انرژی به ابعاد شکاف مورد بررسی قرار گرفته است. به علاوه نرخ بهینه تزریق سیال که به بیشینه شدن انرژی تولیدی تجمعی می‌انجامد در شکاف‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. ارزیابی تولید تجمعی انرژی به تخمین سودآوری و طراحی نیروگاه زمین‌گرمایی کمک می‌کند.

## ۲. مدل‌سازی عددی

مبنای مدل‌های ریاضی برای مخازن EGS پایستگی جرم، انرژی و مومنتوم در شکاف و سنگ متخلخل هستند. رفتار جریان سیال با ترکیب معادله پایستگی جرم و قانون دارسی برای سنگ و شکاف توصیف می‌شود. انتقال حرارت در محیط متخلخل با ترکیب معادله پایستگی انرژی و قانون فوریه تعریف می‌شود، با فرض تعادل حرارتی بین فازهای جامد و سیال و ثابت ماندن خواص:

$$(\rho c_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f c_{p,f} u \cdot \nabla T - K_{\text{eff}} \nabla^2 T = -Q \quad (1)$$

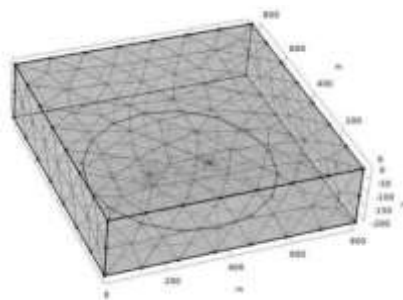
که در آن،  $T$  دما،  $\rho c_{p,f}$  ظرفیت حرارتی ویژه سیال و  $Q$  انرژی گرفته‌شده از سنگ و داده‌شده به سیال در شکاف هستند.  $(\rho c_p)_{\text{eff}}$  نشان‌دهنده ظرفیت حرارتی معادل سنگ و سیال است که از میانگین‌گیری حجمی خواص سنگ و سیال به دست می‌آید.  $K_{\text{eff}}$  نیز بطور مشابه میانگین حجمی رسانایی‌های حرارتی سنگ و سیال است. عبارت توصیف‌کننده انتشار حرارت در شکاف به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$Q = (\rho c_p)_{\text{eff,frac}} \frac{\partial T_{\text{frac}}}{\partial t} - \rho_f c_{p,f} u \cdot \nabla T_{\text{frac}} + \nabla \cdot K_{\text{eff,frac}} \nabla T \quad (2)$$

مجدداً  $(\rho_s c_p)_{\text{eff,frac}}$  ظرفیت حرارتی حجمی متوسط سیال و سنگ شکاف است و  $K_{\text{eff,frac}}$  نیز میانگین رسانایی‌های حرارتی سیال شکاف و سنگ شکاف است. در آغاز فرآیند استخراج گرما، دمای اولیه مخزن و شکاف برابر با دمای اولیه سنگ است و دما در نقطه تزریق برابر با دمای آب تزریقی است. کناره شکاف نسبت به عبور آب بسته است. یک مدل سه‌بعدی از سنگ به شکل بلوک مکعبی با یک شکاف دایره‌ای افقی با مرز بسته در وجه زیرین بلوک و دو چاه که با نرخ یکسان در داخل شکاف تزریق و تولید می‌کنند، در نرم‌افزار تعریف شده است (شکل ۱). اتلاف یا کسب حرارت سیال در داخل چاه‌ها نادیده گرفته شده است. یک گرادین دمای ثابت به عنوان شرط اولیه در سنگ تعریف شده است. در این مطالعه، برای یافتن شرایط بهینه بر حسب ابعاد شکاف، تولید تجمعی انرژی در دوره ۳ ساله با تغییر نرخ جریان سیال مورد بررسی قرار گرفته است.

معادله ۳ میزان انرژی الکتریکی تولید شده در طول N سال را محاسبه می‌کند. در این رابطه  $T_{inj}$  دمای سیال در محل تزریق است که جزو شرایط مرزی ثابت تعریف شده و  $T_{ex}$  دمای سیال تولیدی در سطح است که از محاسبات مدل عددی به دست می‌آید. بهره‌وری تولید برق از حرارت استخراج شده در سطح است و مقدار آن بر اساس تخمین‌هایی که از عملکرد سیکل رنکین برای محدوده دمای ۱۲۰-۱۰۰ درجه سانتیگراد ارائه شده، ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است [۸].

$$E_T = \sum_{i=1}^N \rho_f c_{p,f} q (T_{ex} - T_{inj}) \eta_R \quad (3)$$



شکل ۴- شماتیک مدل ۳ بعدی از مخزن زمین گرمایی پیشرفته در نرم‌افزار

انرژی الکتریکی که در طی مدت N سال صرف تأمین فشار برای تزریق سیال می‌شود از رابطه ۴ به دست می‌آید، و از انرژی الکتریکی تولیدی کم می‌شود.

$$E_p = \frac{q \Delta P}{\eta_p} N \quad (4)$$

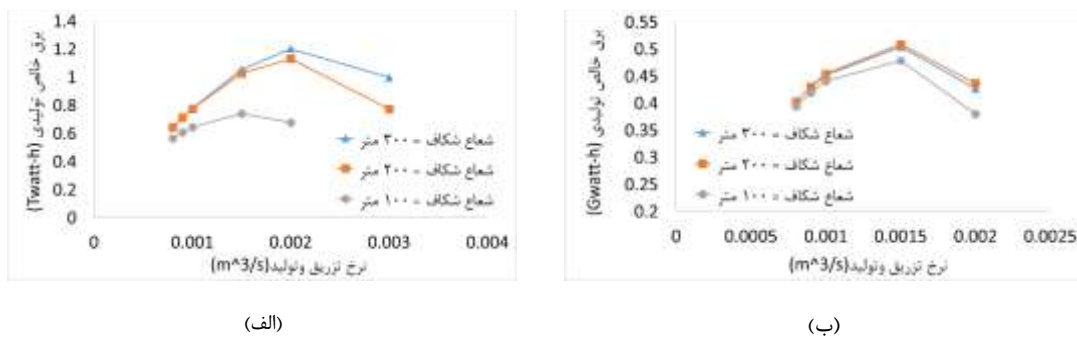
در این رابطه  $E_p$  نشان‌دهنده انرژی ورودی پمپ، و  $\eta_p$  ضریب بهره‌وری پمپ است که برای سادگی ثابت و برابر ۴۰ درصد در نظر گرفته شده است.  $\Delta P$  مجموع افت فشار در چاه‌ها و در شکاف است. سناریوهای مختلف استخراج انرژی با استفاده از داده‌های جدول ۱ و برای سه شعاع شکاف (۳۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ متر) بررسی شدند تا نرخ تزریق بهینه برای هر اندازه شکاف به دست بیاید.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای استفاده شده برای ارائه مدل

| پارامتر          | نماد      | مقدار                         |
|------------------|-----------|-------------------------------|
| هدایت حرارتی سنگ | $K_r$     | 2.58 W/m <sup>2</sup> K       |
| چگالی آب         | $\rho_w$  | 1000 kg/m <sup>3</sup>        |
| چگالی سنگ        | $\rho_f$  | 2650 kg/m <sup>3</sup>        |
| ظرفیت حرارتی آب  | $c_w$     | 4.05 × 10 <sup>3</sup> J/kg K |
| ظرفیت حرارتی سنگ | $c_f$     | 1.1 × 10 <sup>3</sup> J/kg K  |
| دمای اولیه مخزن  | $T_0$     | 140°C                         |
| دمای تزریق آب    | $T_{inj}$ | 60°C                          |
| بازشدگی شکاف     | $a_f$     | 1 mm                          |
| شعاع چاه         | $r_w$     | 2 cm                          |

خالص انرژی دریافتی در طول ۳ سال که از تفاضل انرژی الکتریکی استخراجی (رابطه ۳) و انرژی الکتریکی مصرفی پمپ (رابطه ۴) به دست می‌آید برای نرخ‌های مختلف تزریق و تولید و در شکاف‌های با ابعاد مختلف محاسبه شده و در نمودار شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به اینکه افزایش نرخ تزریق، در دمای ثابت، به معنای افزایش

نرخ برداشت انرژی است، در بخشی از نمودار با افزایش نرخ تزریق روند مثبتی برای انرژی دریافتی مشاهده می‌شود. با این حال افزایش نرخ جریان مستلزم استفاده از فشار بیشتر در پمپ است که می‌تواند خالص دریافت انرژی را کاهش دهد و به روند منفی در نیمه دوم منحنی‌ها بیانجامد. بنابراین برای هر شکاف یک سرعت بهینه تزریق وجود دارد که به بیشینه برداشت انرژی منجر می‌شود. چنان‌که اشاره شد، در سناریوهای مورد بررسی در نمودار شکل ۲(الف) فاصله چاه‌ها متناسب با شعاع چاه در نظر گرفته شده است. بنابراین با افزایش ابعاد شکاف، فاصله بین دو چاه نیز افزایش یافته است و امکان تزریق با نرخ بیشتر، بدون میان‌شکنی سیال سرد در چاه تولید فراهم شده است. در نمودار شکل ۲(ب) با ثابت نگه داشتن فاصله بین دو چاه، تأثیر شعاع شکاف به تنهایی بر دبی بهینه و میزان تولید جمعی انرژی مورد ارزیابی قرار گرفته است. چنان‌که مشاهده می‌شود با آنکه بزرگ‌تر شدن شکاف از قطر ۱۰۰ متر به ۲۰۰ متر باعث افزایش تولید جمعی شده، اما بیشتر کردن قطر شکاف به ۳۰۰ متر تأثیری بر خروجی انرژی نداشته است.



شکل ۲- برق خالص تولید شده از سیستم زمین‌گرمایی بهبودیافته با شکاف افقی به ازای ابعاد مختلف شکاف (شعاع‌های ۱۰۰، ۲۰ و ۳۰۰ متر). الف) وقتی فاصله بین دو چاه هم‌اندازه شعاع شکاف است. ب) وقتی فاصله بین دو چاه ثابت و برابر با ۵۰ متر است. نقطه بیشینه برای هر منحنی، نرخ تزریق بهینه را مشخص می‌کند.

### ۳. نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که در سیستم‌های زمین‌گرمایی بهبودیافته با شکاف افقی محدود، وقتی فاصله دو چاه متناسب با اندازه شکاف افزایش می‌یابد، افزایش اندازه شکاف باعث افزایش نرخ بهینه تزریق و متعاقباً میزان تولید جمعی انرژی می‌شود. با ثابت نگه داشتن فاصله دو چاه، افزایش ابعاد شکاف می‌تواند به میزان محدود (حدود ۵٪) روی مقدار جمعی انرژی تولیدی تأثیرگذار باشد. در محدوده بررسی شده، نرخ بهینه تزریق و تولید وابسته به اندازه شکاف نیست. همچنین ملاحظه شد که بهینه‌سازی نرخ‌های ورودی برای اندازه‌های مختلف شکاف بسیار حیاتی است و می‌تواند به افزایش قابل توجهی در استخراج انرژی بیانجامد.

### ۴. فهرست مراجع

۱. Gao, X., et al., A Review of simulation models of heat extraction for a geothermal reservoir in an enhanced geothermal system. *Energies*, 2022. **15**(19): p. 7148.
۲. Ghassemi, A., S. Tarasovs, and A.H.-D. Cheng, An integral equation solution for three-dimensional heat extraction from planar fracture in hot dry rock. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 2003. **27**: p. 989-1004.
۳. Ghassemi, A. and X. Zhou, A three-dimensional thermo-poroelastic model for fracture response to. *GEothermics*, 2011. **40**: p. 39-49.
۴. Ghassemi, A., S. Tarasovs, and A. H.-D. Cheng, An integral equation solution for three-dimensional heat extraction from planar fracture in hot dry rock. *International Journal for Numerical and Analytical*



- Methods in Geomechanics, 2003. **27**(12): p. 989-1004.
۵. Salimzadeh, S., et al., A three-dimensional coupled thermo-hydro-mechanical model for deformable fractured geothermal systems. *Geothermics*, 2018. **71**: p. 212-224.
۶. Kong, Y., et al., Optimization of well-doublet placement in geothermal reservoirs using numerical simulation and economic analysis. *Environmental earth sciences*, 2017. **76**: p. 1-7.
۷. Pandey, S. and V. Vishal, *Sensitivity analysis of coupled processes and parameters on the performance of enhanced geothermal systems*. *Scientific reports*, 2017. **7**(1): p. 17057.
۸. Liu, X., G. Falcone, and C. Alimonti, *A systematic study of harnessing low-temperature geothermal energy from oil and gas reservoirs*. *Energy*, 2018. **142**: p. 346-355.



## روش ترکیبی نانوهیبرید- آب کم‌شور و ماده فعال سطحی سبز برای بهبود بازیافت نفت

سید مجتبی حسینی نسب\*؛ آذین خواجه کولکی<sup>۲</sup>

### چکیده

در سال‌های اخیر برای افزایش اثربخشی ازدیادبرداشت از ترکیب چند روش یا چند ماده استفاده می‌شود، هنگامی که ترکیبی از آب کم‌شور، مواد فعال سطحی و نانوذرات به طور همزمان استفاده می‌شوند، می‌توانند نفت به دام افتاده بیشتری را جابجا کند و ضریب بازیافت نفت را بهبود بخشند. در این مطالعه از نانوذرات اکسید فلزی گاما-آلومینا و سیلیکا بخاطر خاصیت آب‌دوستی بالایی که دارند استفاده شد. از صمغ عربی به عنوان تثبیت‌کننده نانوذرات در حضور نمک‌های موجود در سیالات پایه استفاده شد. صمغ عربی یک ماده فعال سطحی دوست‌دار محیط‌زیست است و همچنین می‌تواند با کاهش کشش سطحی به بهبود بازیابی نفت کمک کند. آب مقطر و آب‌هایی با غلظت‌های ppm (۴۱۱۷، ۸۱۴۲، ۲۰۴۰۰ و ۴۱۱۷۰) به عنوان سیالات پایه در نظر گرفته شدند. ترکیبات مختلف نسبت جرمی نانوذرات، آب نمک و ماده فعال سطحی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت پس از بررسی پایداری محلول‌ها، نانوسیال‌هایی با پایداری قابل قبول شناسایی و انتخاب شد. بیشترین ضریب بازیافت نفت در آزمون سیلابزنی با میکرومدل شیشه‌ای مربوط به نانوهیبرید گاما-آلومینا و سیلیکا با نسبت جرمی ۱۰:۹۰ به میزان ۶۰/۳۴٪ بدست آمد. کمترین کشش بین سطحی برای نانوهیبرید گاما-آلومینا و سیلیکا با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ در آب با غلظت شوری ppm ۴۱۷۱ گزارش شد.

کلیدواژه‌ها: ازدیاد و برداشت نفت، آب کم‌شور، نانوهیبرید، صمغ عربی، میکرومدل.

### ۱. مقدمه

سازمان مدیریت اطلاعات انرژی ایالات متحده آمریکا افزایش چشم‌گیر مصرف انرژی تا حدود ۴۸٪ از سال ۲۰۱۲ تا سال ۲۰۴۰ را پیش‌بینی کرده است و بیشترین مصرف انرژی مربوط به کشورهای چین و هند است از طرفی دیگر سوخت‌های فسیلی همچنان در رتبه اول مصرف انرژی قرار دارند [۱]. نانوذرات می‌توانند اکسید فلزی، اکسید سرامیک، فلز کاربید، نیتريد فلزی یا کربن باشند و سیال پایه می‌تواند آب، سیالات آلی، نفت‌ها و روغن‌ها در نظر گرفته شود. از نظر تئوری نانوسیال هدایت حرارتی بهتری نسبت به سیال پایه خود دارند [۲]. مونو نانوسیالات از یک نوع نانوذره که در سیال پایه پراکنده شده، تشکیل شده‌اند [۳]، نانوسیالات ترکیبی اصطلاحاً به نانوسیالاتی

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران ([hosseininasab@iust.ac.ir](mailto:hosseininasab@iust.ac.ir))

\* نویسنده مسئول: سید مجتبی حسینی نسب

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران ([azinnkhajeh@gmail.com](mailto:azinnkhajeh@gmail.com))

گفته میشود که حداقل از دو نوع ذره که در ابعاد نانو پراکنده شده باشد، تشکیل شده‌اند. نانوسیالات ترکیبی بصورت کلی در سه گروه ماتریکس فلزی، ماتریکس سرامیکی و ماتریکس پلیمری قرار می‌گیرند [۴]. نانوسیالات هیبرید بدلیل اثر هم‌افزایی دارای شبکه حرارتی و خواص رئولوژیکی بهتری نسبت به مونو نانوسیالات هستند [۳]. سیلابزنی آب به علت دسترسی آسان به آب و مقرون به صرفه بودن آن از لحاظ اقتصادی به عنوان یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای افزایش تولید نفت از مخازن دنیا است. در ابتدا آب به عنوان روش ازدیاد برداشت ثانویه تقسیم‌بندی شد که در جهت تثبیت فشار مخازن و افزایش تولید نفت مورد استفاده قرار گرفت و توجه کمتری به اثرات شیمیایی و ترکیب یونی آب شور شد [۵]. در سال‌های گذشته گزارشات زیادی مبنی بر این‌که تغییر شوری آب همراه با رقیق‌سازی می‌تواند منجر به افزایش بازیافت نفت شود ارائه شده است [۶-۸]. مواد فعال سطحی باعث کاهش کشش بین‌سطحی آب و نفت می‌شوند و می‌توانند ترشوندگی مخزن را تغییر دهند [۹]. افزودن مواد فعال سطحی به نانوسیال یک روش کاملاً مقرون به صرفه است که در نهایت منجر به پایداری نانوسیال‌ها می‌شود. ساختار متفاوت مواد فعال سطحی که دارای یک بخش آب‌گریز و یک بخش آب‌دوست است این قابلیت را به آن‌ها می‌دهد تا به عنوان پلی رابط بین نانوذرات و سیال پایه در نظر گرفته شوند [۱۰]. با توجه به نتایج خاکسار و همکاران [۱۱]، استفاده از نانوکامپوزیت اصلاح‌شده با مواد فعال سطحی سبز می‌تواند بازیافت نفت را تا ۱۴٪ بهبود بخشد. نتایج آنها، اثربخشی نانومحلول‌های سبز فرموله شده را در بازیافت نفت به عنوان یک روش پایدار و سازگار با محیط زیست نشان می‌دهند. لیانگ و همکاران اذعان داشتند که ارزیابی پایداری نانوسیال‌ها قبل از تزریق به مخازن پیچیده امری ضروری است. بنابراین، بهبود پایداری نانوسیال‌ها در شرایط مخزن (دمای بالا، شوری بالا و غیره) باید به دقت مورد توجه قرار گیرد. زیرا هنگامی که نانوسیال‌های ناپایدار به مخزن تزریق می‌شوند، رسوباتی ایجاد می‌کنند که می‌توانند به نفوذپذیری مخزن، منافذ و ساختارهای گلوگاه آسیب برسانند [۱۲].

در این کار ترکیبی از نانوذره- آب شور و ماده فعال سطحی سبز استفاده شد. ترکیب‌های متفاوتی از نسبت جرمی نانوذرات، آب شور و ماده فعال سطحی مورد بررسی قرار گرفت. کارایی نانوهیبریدها در غلظت‌های بسیار کم جهت بهبود عملکرد آب شور در تغییر ترشوندگی میکرومدل شیشه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. هم‌چنین تلاش شد تا نسبت جرمی بهینه برای نانوهیبرید گاما-آلومینا و سیلیکا، غلظت شوری نمک‌های موجود در آبهای شور و غلظت ماده فعال سطحی بهینه برای آزمون‌های پایداری و سیلابزنی و کشش بین‌سطحی شناسایی گردد. هدف اصلی این مقاله بررسی اثر بالقوه پایداری نانوهیبرید گاما-آلومینا و سیلیکا اصلاح‌شده با ماده فعال سطحی سبز صمغ‌عربی بر روی مکانیسم کاهش کشش بین‌سطحی و تغییر ترشوندگی است که بتواند در نهایت خروج نفت بیشتری از منافذ میکرومدل شیشه‌ای منجر گردد.

## ۲. مواد و روش‌ها

از نفت واقع در میدان جنوب‌غربی ایران که وزن مخصوص و API آن در دمای  $60^{\circ}\text{F}$  به ترتیب برابر با  $0.8683$  و  $31.47$  گزارش گردید، استفاده شد. از میکرومدل شیشه‌ای دو-بعدی با تخلخل  $41/13\%$  و حجم حفرات ( $\text{cm}^3$ )  $0.5141$  به عنوان فضای متخلخل برای آزمون‌های سیلابزنی استفاده شد. شکل ۱ میکرومدل اشباع شده از نفت را نشان می‌دهد. از نمک‌های سدیم کلرید، منیزیم کلریدشش‌آبه، کلسیم کلرید دوآبه، سدیم سولفات، سدیم بی‌کربنات برای افزودن به آب مقطر استفاده شد. اندازه‌گیری کشش بین‌سطحی برای نفت خام و نانوسیال‌های پراکنده شده در فاز آبی با استفاده از روش قطره‌آویزان و در دماهای  $60^{\circ}\text{C}$  و  $25^{\circ}\text{C}$  انجام شد. این سیستم مجهز به یک دوربین CCD و یک لنز ماکرو کامپیوتری است. طراحی آزمایش‌ها بر مبنای ۳ سطح و ۵ فاکتور با استفاده از روش تاگوچی صورت گرفت. با استفاده از نرم‌افزار تعداد آزمایش‌ها ۲۵ آزمایش تخمین زده شد. شاخص کیفی برای مدت زمان پایداری نانوسیالات بر اساس هرچه بیشتر - بهتر صورت پذیرفت. برای آماده‌سازی نانوسیالات از غلظت  $0.1$  درصد وزنی استفاده شد. نانومحلول‌های تهیه شده به مدت ۱۵ دقیقه با دستگاه همزن مغناطیسی و یک ساعت با دستگاه همزن‌نایزر التروسونیک همگن شدند. سیلابزنی میکرومدل در این چند مرحله صورت پذیرفت: آ- میکرومدل با آب

سازندی اشباع شد. ب- میکرومدل با نفت اشباع شد. ج - میکرومدل با سیالات تزریقی مورد سیلابزنی قرار گرفت.

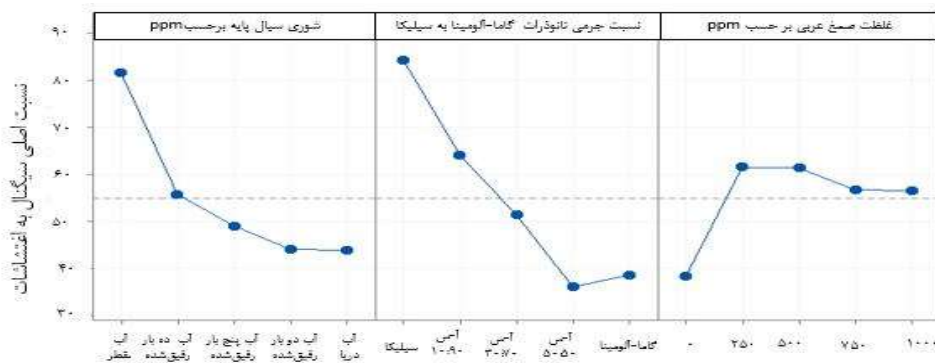


شکل ۱. میکرومدل اشباع شده با نفت

### ۳. بحث و نتایج

#### ۳-۱. پایداری

از میان ۲۵ نانومحلول تهیه شده ۱۵ نانومحلول مدت زمان پایداری بیشتری گزارش کردند. نتایج نشان داد نانومحلولهای پراکنده در آب مقطر پایداری بیشتری دارند، به عبارتی دیگر حضور یون‌های پراکنده در آب نمک باعث غلبه نیروی جاذبه واندروالسی در مقایسه با نیروی دافعه الکترواستاتیکی مابین نانوذرات می‌گردد و از پایداری نانومحلولها کاسته می‌شود [۱۳]. از طرفی دیگر مشاهده شد هرچه نسبت جرمی گاما-آلومینا به سیلیکا کمتر باشد پایداری بیشتر است. همچنین در نتایج دیده شد نانو محلولهایی که در آماده‌سازی آنها از صمغ عربی استفاده نشد مدت زمان کمتری پایدار هستند. شکل ۲ نتایج بدست آمده از آزمون پایداری را نشان می‌دهد.



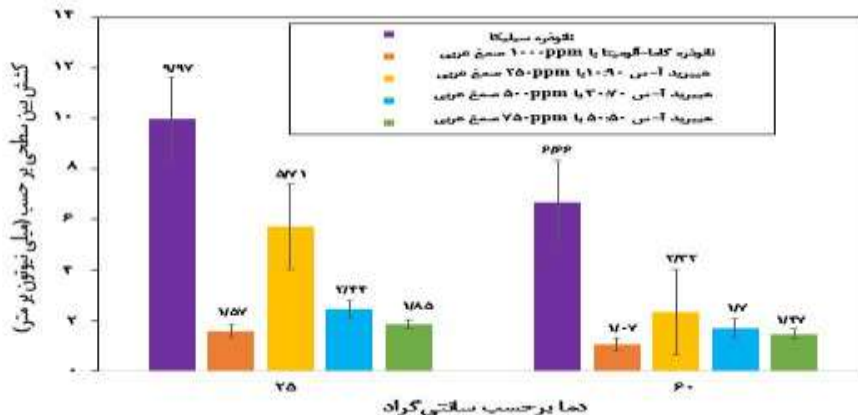
تمودار اثرات اصلی برای نسبت سیگنال به اغتشاشات

شکل ۲. نتایج بدست آمده از آزمون پایداری

#### ۳-۲. کشش بین سطحی

در تمامی نانو محلول‌های بهینه با افزایش دما روند کاهشی در کشش بین‌سطحی مشاهده شد که دلیل این امر می‌تواند بخاطر افزایش حرکت براونی نانوذرات یا برهمکنش ضعیف بین مولکولی باشد [۱۴]. جذب نانوذرات اصلاح‌شده با صمغ عربی در سطح مشترک نفت و آب‌نمک بخاطر گروه‌های عاملی آب‌دوست و آب‌گریز نانوذرات اصلاح‌شده صورت می‌گیرد و باعث می‌شود که نانوذرات اصلاح‌شده مانند یک ماده فعال سطحی دوخصلتی عمل کنند. در نهایت گروه‌های عاملی نانوذرات اصلاح‌شده یک لایه اضافی در سطح مشترک آب‌نمک و نفت ایجاد

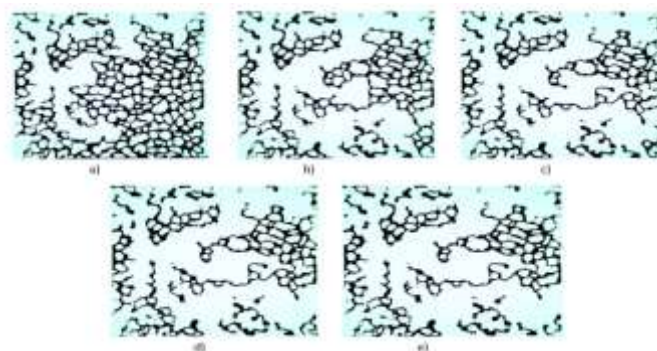
می‌کنند تا کشش بین‌سطحی کاهش یابد [۱۵]. شکل ۳ نانومحلول‌های پراکنده در آب مقطر را نشان می‌دهد.



شکل ۳. بررسی کشش بین‌سطحی نانوسیالات بهینه پراکنده در آب مقطر

### ۳-۳. سیلابزنی

سیلابزنی نانو ذرات اصلاح شده با صمغ عربی توانایی زیادی در جاروب کردن نفت در مقایسه با سیلابزنی آب دارد و با افزایش بازیافت نهایی همراه است. افزایش بازیافت نهایی نفت بخاطر توانایی نانوذرات اصلاح شده برای کاهش کشش بین سطحی بین نفت خام و محلول‌های نانوسیالات است که در نهایت باعث می‌شود فشارمویبینگی در داخل منافذ کاهش یابد. علاوه بر این نانوسیالات اصلاح شده بر روی دیواره‌های منافذ در طول تزریق نانوسیالات ترشوندگی سطح منافذ را به آب دوست قوی تغییر می‌دهند [۱۵]. در شکل ۴ تصاویر سیلابزنی نانو هیبرید گاما-آلومینا و سیلیکا با نسبت جرمی ۱۰:۹۰ با ۱۰۰۰ ppm صمغ عربی بعد از تزریق یک برابر حجم حفرات در میکرومدل مشاهده می‌شود.



شکل ۴. سیلابزنی نانو هیبرید گاما-آلومینا و سیلیکا با نسبت جرمی ۱۰:۹۰ با ۱۰۰۰ ppm صمغ عربی به ترتیب (a) بعد از تزریق ۰/۲ برابر حجم حفرات، (b) بعد از تزریق ۰/۴ برابر حجم حفرات، (c) بعد از تزریق ۰/۶ برابر حجم حفرات، (d) بعد از تزریق ۰/۸ برابر حجم حفرات، (e) بعد از تزریق ۱ برابر حجم حفرات

### ۴. نتیجه‌گیری

بیشترین مدت زمان پایداری برای نانوذره سیلیکا پراکنده در آب مقطر و حدود ۶۳ روز گزارش شد. کمترین کشش بین سطحی برای نانو هیبرید گاما-آلومینا و سیلیکا با نسبت جرمی ۵۰:۵۰ در آب با شوری ۴۱۱ ppm

بدست آمد. بیشترین بازیافت نهایی نفت برای نانوهیبرید با نسبت جرمی ۱۰:۹۰ و پراکنده در آب با شوری ppm ۲۰۴۰۰ گزارش گردید.

### فهرست مراجع

۱. US Energy Information Administration(2016). Available from: [http://www.eai.gov/today\\_in\\_energy/detail.php?id=26212-MAY12-2016](http://www.eai.gov/today_in_energy/detail.php?id=26212-MAY12-2016).
۲. W, N Septiadi . I, N Trisnadewi . N Putra and I Setyawan ."Synthesis of hybrid nanofluid with two-step method". *E3S Web of Conferences*. 2018. **67**.
۳. D, P Kshirsagar and M.A. Venkatesh ."A review on hybrid nanofluids for engineering applications". *Materials Today: Proceedings*, 2021. **44**: p. 744-755.
۴. S Wciślik. "*Efficient Stabilization of Mono and Hybrid Nanofluids*". *Energies*, 2020.
۵. D Egbe.A Jahanbani Ghahfarokhi. N Amar & O Torsæter ."Application of Low-Salinity Waterflooding in Carbonate Cores: A Geochemical Modeling Study". *Natural Resources Research*. 2020. **30**.
۶. A. Lager, K. J. Webb, I. R. Collins, and D. M. Richmond."LoSal enhanced oil recovery: Evidence of enhanced oil recovery at the reservoir scale," in *SPE symposium on improved oil recovery, OnePetro*.
۷. S Strand. T Austad. T Puntervold. E Høgnesen. M Olsen and S, M, F. Barstad ."Smart Water" for Oil Recovery from Fractured Limestone: A Preliminary Study". *Energy & fuels*. 2008.
۸. H. H. Al-Attar, M. Y. Mahmoud, A. Y. Zekri, R. Almehaideb, and M. Ghannam. "Low salinity flooding in a selected carbonate reservoir: experimental approach," in *EAGE Annual Conference & Exhibition incorporating SPE Europec, OnePetro*
۹. S Mahmoudi. A Jafari and S Javadian. "Temperature effect on performance of nanoparticle/surfactant flooding in enhanced heavy oil recovery". *Petroleum Science*. 2019. 16(6): p. 1387-1402.
۱۰. Yu, W. and H. Xie. "A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications". *Journal of Nanomaterials*. 2012. **2012**: p. 1-17.
۱۱. A Khaksar Manshad. M Mobaraki. J Ali. M Akbari. A, A Abdulrahman. T Pshtiwan. H Bahraminejad and S Mohammad ."Performance Evaluation of the Green Surfactant-Treated Nanofluid in Enhanced Oil Recovery: Dill-Hop Extracts and SiO<sub>2</sub>/Bentonite Nanocomposites ".*Energy Fuels*. 2024.
۱۲. T Liang .J, R Hou. M Qu. J Xi. & I Raj. "Application of nanomaterial for enhanced oil recovery". *Petroleum Science*. **19**(2), 882–899 (2022).
۱۳. A. H. Bornae, M. Manteghian, A. Rashidi, M. Alaei, and M. Ershadi."Oil-in-water Pickering emulsions stabilized with functionalized multi-walled carbon nanotube/silica nanohybrids in the presence of high concentrations of cations in water," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 20, no. 4, pp. 1720-1726, doi: 10.1016/j.jiec.2013.08.022
۱۴. Gh Zargar . T Arabpoura .A Khaksar Manshada . J Ali. S M Sajadi. A Keshavarzf A. A, H Mohammadig ."Experimental investigation of the effect of green TiO<sub>2</sub>/Quartz nanocomposite on interfacial tension reduction, wettability alteration, and oil recovery improvement". *Fuel*. 263
۱۵. S. S. Hamdi, H. H. Al-Kayiem, and A. S. Muhsan, "Natural polymer non-covalently grafted graphene nanoplatelets for improved oil recovery process: A micromodel evaluation" *.Journal of Molecular Liquids*, vol. 310, 2020, doi: 10.1016/j.molliq.2020.113076



## بررسی آزمایشگاهی تاثیر مواد ژل پلیمری و ژل نانو کامپوزیتی در محیط متخلخل به منظور انسداد آب اضافی و ازدیاد برداشت نفت

سحرملکی خالان! سید مجتبی حسینی نسب\*

### چکیده

از جمله رایج‌ترین مشکلات در صنعت نفت، تولید آب اضافی از چاه‌های نفتی است. این مسئله زمانی رخ می‌دهد که همراه با نفت، آب زیادی نیز از چاه خارج می‌شود. در بسیاری از موارد، این آب به میزان زیادی تولید می‌شود و عملاً به سیال اصلی تولیدی تبدیل می‌شود، که مشکلاتی چون افزایش هزینه‌های جداسازی آب و نفت، خوردگی تجهیزات و کاهش بازده اقتصادی تولید را به دنبال دارد. برای کاهش تولید آب، روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از آنها استفاده از راه‌حل‌های شیمیایی مانند تزریق ژل‌های پلیمری است. در این مطالعه تاثیر مقدار مشخص ۰.۳ درصد وزنی نانو ذره بر روی رفتار ژل پلیمری بررسی شد. سپس به منظور بررسی بازیافت نفت و مقایسه عملکردی دوماه ژل پلیمر و ژل نانو کامپوزیتی برای افزایش بازیافت نفت و انسداد آب در هنگام سیلاب زنی با آب شور در مخازن هیدروکربوری با استفاده از میکرومدل شیشه‌ای با طرح منظم یک چهارم از پنج نقطه‌ای انجام شد. سپس فاکتورهای بازیابی نفت در برابر حجم منافذ آب تزریقی از طریق تکنیک تجزیه و تحلیل تصویر، که بر روی ریزمدل تصاویر با وضوح بالا انجام شد. نتایج نشان داد که حضور نانو ذره سیلیکا استحکام ژل پلیمر را بهبود بخشیده و منجر به ۵.۵٪ تورم ژل در حضور شوری افزایش داده است. نتایج تست میکرومدل نشان داد ژل نانو کامپوزیتی سیلیکا نسبت به ژل پلیمر باعث مسدود سازی بهتر نواحی پرتراوا شده و میزان تولید نفت در حضور ژل پلیمر و ژل نانو کامپوزیتی سیلیکا به ترتیب ۶۲.۶٪ و ۷۰.۲۴٪ است

### کلیدواژه‌ها

کنترل تولید آب اضافی، افزایش بازیافت نفت، ژل پلی‌مر، ژل نانو کامپوزیتی، می‌کرومدل

### ۱. مقدمه

تولید آب اضافی در مخازن نفتی مسئله‌ای است که به طور مداوم برای صنعت نفت و گاز اهمیت دارد. این مسئله می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های تولید نفت و گاز، کاهش عمر مفید مخزن، و ایجاد مشکلات فنی و محیطی شود. همچنین، ممکن است منجر به کاهش کیفیت نفت استخراجی و افت فشار در مخزن شود. از جمله مسائل چالش برانگیز در مخازن شکاف دار است. با توجه به اینکه شکاف‌ها و مسیرهای پرتراوا در مخزن، مسیری برای حرکت سیال آب فراهم می‌کنند که کارایی فرآیندهای ازدیاد برداشتی را کاهش می‌دهد [۱]. همچنین تولید بیش از حد آب می‌تواند باعث فرسایش خطوط لوله، کاهش

<sup>۱</sup> تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، ایمیل: sahar\_maleki@chemeng.iust.ac.ir

<sup>۲</sup> تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، ایمیل: hosseininasab@iust.ac.ir

راندمان پمپ و تصفیه فاضلاب شود. انتخاب مناسب کنترل پروفایل و عامل قطع آب کلید موفقیت در کاربرد میدان نفتی است اصلاح کننده نفوذپذیری نسبی می تواند به طور انتخابی نفوذپذیری آب را بدون کاهش نفوذپذیری نفت یا گاز کاهش دهد [۲]. تزریق ژل پلیمرها، که از سال ۲۰۰۷ آغاز شد، نمونه ای از یک روش شیمیایی است و یک راه حل مقرون به صرفه برای بستن مناطق تولید کننده آب است که کارایی جاروب و بازیابی هیدروکربن ها را افزایش می دهد [۳]. تزریق ژل پلیمر باعث کاهش ظرفیت شکستگی ها یا نواحی پرتراوا می شود. در واقع، با تزریق ژل پلیمر، کانال های آبی که معمولاً به عنوان مسیر اصلی جریان در مخازن نفتی شکافدار عمل می کنند، مسدود می شوند. این اقدام باعث می شود که سیال تزریقی (آب) به سمت مناطق نفتی جاروب نشده جابه جا شود، که در نتیجه، تولید آب بیش از حد کاهش می یابد و بازیابی بیشتری از هیدروکربن باقی مانده انجام می شود [۴].

## ۲. مواد و روش آمایش

پلیمر استفاده شده در آزمایشات، پلی اکریل آمید سولفاته شده (SPAM) با وزن ملکولی ۲,۵ میلیون دالتون و درجه سولفاته شده ۲۵٪ از شرکت SNF فرانسه، عامل شبکه ساز کروم استات سه ظرفیتی (Cr(III)-Ac) قابل حل در آب از شرکت ایتالیا و از نانوذرات سیلیکا استفاده شد. به منظور بررسی تاثیر ژل پلیمر ها بر روی بازیافت نفت در محیط متخلخل یک سری آزمایشات طراحی و اجرا شدند. آزمایشات انجام شده در محیط متخلخل با استفاده از آب سازندی یکی از مخازن نفتی ایران در جنوب انجام شدند.

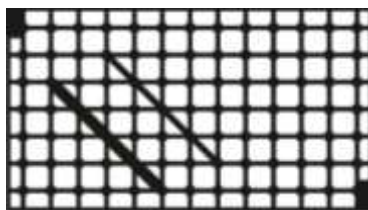
### ۱,۲ آماده سازی نمونه های آزمایش

ابتدا محلول پلیمر توسط آب مقطر به عنوان حلال به مدت ۱۲ ساعت با همزن مغناطیسی تهیه شد. سپس محلول عامل شبکه ساز و نانو ذرات به طور جداگانه در آب مقطر حل شده و به محلول پلیمری اضافه می شود، برای رسیدن به یک محلول همگن (ژلانت) به مدت ۱۵ دقیقه با همزن برقی هم زده می شود سپس ژلانت در بطری مقاوم در برابر حرارت ریخته و در آون با دمای ۸۶ درجه سانتیگراد قرار داده شدند. سپس در فاصله زمانی متفاوت نمونه ها از آون بیرون آورده و معکوس گردیده و با توجه به استحکام و مقاومت ژل ها با استفاده از کد بندی سیدانسک از A تا J می باشد که کدگذاری شدند [۵] بر مبنای آزمایش بطری ۱۸ تست جهت انتخاب نمونه بهینه ژل انجام گرفت. بر این اساس نمونه با غلظت وزنی پلیمر ۰,۲۵٪ و وزنی عامل شبکه ساز به عنوان غلظت بهینه برای انجام آزمایش تاثیر ۳٪ وزنی نانو ذره سیلیکا بر استحکام ژل پلیمر انتخاب شد. این غلظت بهینه براساس عدم چروکیدگی<sup>۱</sup> در مدت یک ماه و زمان بندش در ۱۲ ساعت بود و خصوصیات کد H را داشت انتخاب گردید.

### ۱,۴ آماده سازی میکرومدل

برای آماده سازی میکرومدل ها ابتدا طرح مورد نظر که در نرم افزار Corel Draw طراحی شده است را بر روی شیشه ای با ضخامت ۴ میلی متر حکاکی کرده. سپس شیشه ای که طرح روی آن حکاکی شده است را درون هیدروفلوریک اسید به مدت ۵ دقیقه غوطه ور می گردد سپس با آب شستشو می شود. به منظور تماس اسید صرفاً با نواحی حکاکی شده، قبل از اینکه شیشه حکاکی گردد، تمام سطح شیشه با چسب نواری پوشانده شده است. بعد از انجام مراحل فوق شیشه ای دقیقاً با ابعاد همان شیشه اولیه روی آن قرار داده و درون کوره با برنامه مشخص گذاشته تا این دوشیشه به یک دیگر بچسبند و سیالی که در ادامه قصد تزریق آن را داریم صرفاً از مسیر حکاکی شده عبور نماید شکل ۱ شماتیک طرح میکرومدل های حکاکی شده را نشان می دهد. توصیف فیزیکی چنین الگوهایی در جدول ۱ ارائه شده است بعد از آماده شدن میکرومدل ها ابتدا آن ها را با نمونه آب شور که از قبل آماده کردیم اشباع می کنیم. سپس با استفاده از پمپ سرنگی نمونه نفت مورد نظر با دبی ۰,۱ میلی لیتر بر ساعت به میکرومدل تزریق می کنیم تا به طور کامل از نفت اشباع گردد.





شکل (۱) الگوی طراحی شده متفاوت توسط نرم افزار Corel Draw برای میکرومدل مورد استفاده در آزمایشات تزریق

جدول (۱) اطلاعات میکرومدل

| مقدار | خواص فیزیکی       |
|-------|-------------------|
| ۷۰۳   | ابعاد (CM) (CM)   |
| ۸۰۰   | قطر حفرات (μm)    |
| ۳۰۰   | قطر گلوله ها (μm) |
| ۰.۱۲  | قطر شکاف ۱ (μm)   |
| ۰.۰۶  | قطر شکاف ۲ (μm)   |
| ۳     | طول شکاف ها (CM)  |
| ۰     | زاویه (درجه)      |
| ۳۸.۵  | تخلخل (%)         |

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱ تاثیر غلظت پلیمر و عامل شبکه کننده بر زمان بندش

برای بررسی تاثیر غلظت پلیمر سولفات شده و غلظت عامل شبکه ای کننده بر زمان بندش، محلول هایی با غلظت پلیمر ۱ تا ۳٪ وزنی و غلظت عامل شبکه ساز ۰.۱۵ تا ۰.۳۵٪ وزنی تهیه و زمان بندش با استفاد از تست بطری، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش غلظت پلیمر باعث کاهش زمان بندش می شود. همچنین با افزایش غلظت پلیمر مدت زمان انتظار برای دست یابی به استحکام مشخص از ژل پلیمر کاهش می یابد، بنابراین غلظت ۲.۵٪ وزنی به عنوان غلظت بهینه در نظر گرفته شد. همچنین افزایش غلظت عامل شبکه کننده باعث کاهش زمان بندش می شود اما در غلظت های پایین از عامل شبکه ای کننده، بیشتر زنجیره های پلیمری به حالت محلول باقی میماند و میزان ژل شدگی کل محلول پایین خواهد بود. در غلظت های خیلی بالا عامل شبکه ای کننده، همه زنجیره های پلیمر به حالت ژل درآمده و زمان بندش ژل کاهش می یابد و از طرفی افزایش عامل شبکه ای کننده باعث چروکیدگی سریع تر ژل پلیمرها می شود. بنابراین غلظت ۰.۲۵٪ وزنی را به عنوان عامل شبکه ای کننده در نظر گرفته شد.

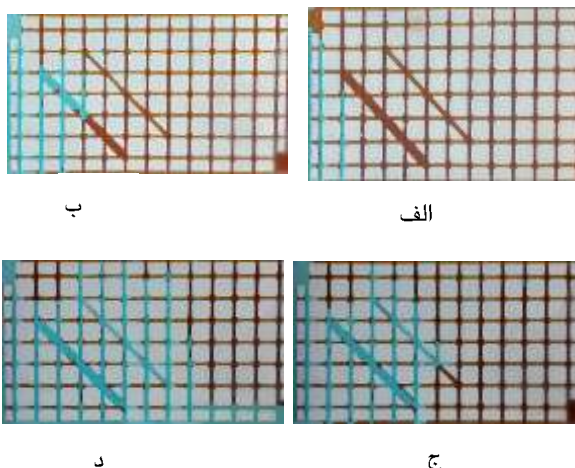
#### ۳.۲ تاثیر نانو ذره سیلیکا بر روی زمان بندش و استحکام ژل پلیمر

حضور نانو ذرات سیلیکا زمان ژل شدگی ژل پلیمر را تقریباً به ۱۴ ساعت رساند و این نانو ذرات زیاد بر روی زمان ژل شدگی تاثیر نگذاشت. ژل نانو کامپوزیتی سیلیکا نسبت به ژل پلیمر بدون نانو ذره از استحکام و پایداری بیشتری برخوردار بوده و حضور نانو ذرات سیلیکا باعث عدم چروکیدگی نانو ذرات در طول یک ماه شد. نانو ذره سیلیکا به کار رفته در ساختار ژل می تواند بر روی زنجیره پلیمری جذب شوند میزان تجمع پلیمر را کاهش دهد و ساختار ژل را بهبود ببخشد. بنابراین تجمع پلیمرها را محدود می کنند این نانو ذرات می تواند با گروه های آزاد (آمیدها و اسیدهای کربوکسیلیک) پلیمر، پیوند هیدروژنی تشکیل دهد، که باعث افزایش بیشتر آب دوستی پلیمر شده و از تخریب پلیمر جلوگیری کند و آب دوستی پلیمر را افزایش دهد.

#### ۳.۳ بررسی کارایی ژل پلیمر و ژل نانو کامپوزیتی در محیط متخلخل

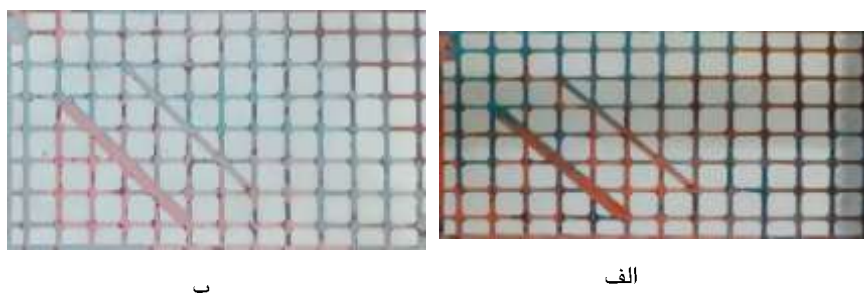
برای تهیه آب شور تزریقی از رنگ متیلن بلو استفاده شد در ابتدا، میکرومدل ها کاملاً با آب شور اشباع شدند و سپس با نفت

خام غرق شدند تا به اشباع آب کاهش نیافتنی  $SW_f$  برسند سپس دو سناریو در نظر گرفته شد. در سناریوی اول، یک فرآیند معمولی سیلاب زنی با آب شور از نقطه ورودی انجام شد و بازیافت نفت محاسبه شد. اما در سناریوی دوم، با رسیدن به اشباع آب غیرقابل کاهش در میکرومدل‌ها، این بار محلول ژل و ژل نانوکامپوزیتی سیلیکا به مقدار ۰٫۲۵ پروالیوم افزوده شده به میکرومدل و برای مدتی در دمای مطلوب ۸۶ درجه سانتی‌گراد در آن که بر اساس شرایط بهینه محاسبه شده از طریق آزمایش‌های استاتیکی انجام شده باقی ماند تا سیستم پلیمر ژل پلیمر و ژل نانوکامپوزیتی به فرم نهایی خود برسد. پس از آن، میکرومدل دوباره وارد تنظیمات آزمایشی شد تا سیلاب زنی با آب شور انجام شود، و در نهایت در برابر حجم منافذ آب تزریقی فاکتورهای بازیافت نفت در میکرومدل‌ها محاسبه شد. و در نهایت نتایج ژل پلیمر و ژل نانوکامپوزیتی با حالت بدون حضور ژل پلیمر در میکرومدل مقایسه شد. شکل ۷) سیلاب زنی اولیه آب شور را در میکرومدل نشان می‌دهد که نواحی سیاه رنگ مربوط به نفت و نواحی آبی رنگ مربوط به آب شور می‌باشد. تصاویر مربوط به اشباع میکرومدل در تزریق آب به منظور شبیه‌سازی فرایند ازدیاد برداشت را نشان می‌دهد که آب به خوبی نمی‌تواند نفت را از نواحی مختلف میکرومدل جاروب کند و به تولید برساند. به عبارت دیگر در شکل ۷) در میکرومدل با طرح منظم آب شور تزریقی سریعاً از مسیرهای کوتاه به بخش تولیدی رسیده و میان شکنی اتفاق می‌افتد. بنابراین به منظور افزایش مساحتی که آب میتواند جاروب کند و جلوگیری از حرکت آب از وسط میکرومدل ژل پلیمرها با غلظت بهینه تزریق می‌شود.



شکل ۲) مراحل متخلف تزریق و اشباع میکرومدل توسط آب شور در سیلاب زنی اولیه قبل از تزریق ژل پلیمرها (الف)  $0.2pv$  (ب)  $0.4pv$  (ج)  $0.8pv$  (د)  $pv$

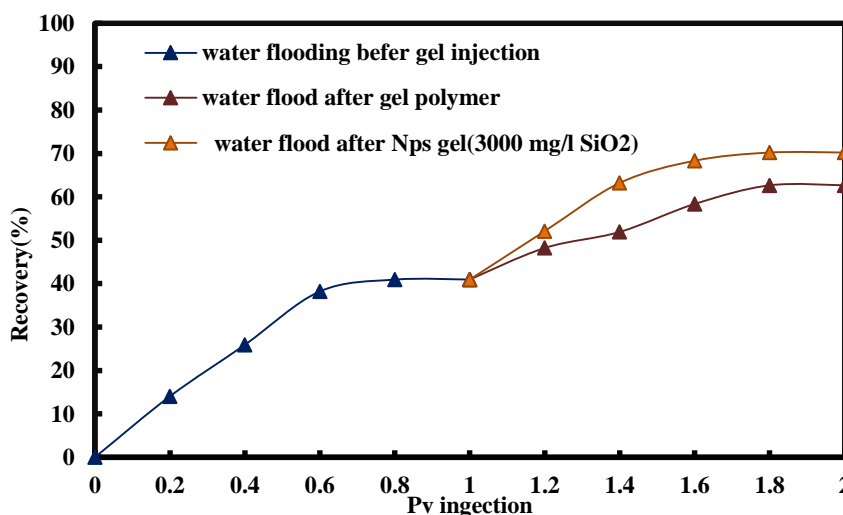
شکل ۳ الف و ب) به ترتیب تصاویر سیلاب زنی با آب شور را در میکرومدل پس از تزریق ژل پلیمر و ژل نانو کامپوزیتی سیلیکا را در میکرومدل منظم نشان می‌دهد. در این شکل نواحی صورتی کمرنگ مربوط به ژل پلیمرها می‌باشد همانگونه که در این شکل مشخص است ژل پلیمری قادر است که نواحی میانی میکرومدل منظور قسمت‌های شکاف دار هستند را مسدود کند و آب تزریقی را به نواحی کناری فضای متخلخل هدایت کند، ژل نانو کامپوزیتی سیلیکا نسبت به ژل پلیمر بدون نانو ذره بهتر نواحی شکاف دار را مسدود کرده و مساحت بیشتری از میکرومدل را جاروب شده است همچنین باعث می‌شود آب تزریقی دیرتر به چاه تولیدی برسد و میزان تولید آب از چاه تولیدی کاهش یابد.



الف ب

شکل ۳) تزریق و اشباع میکرومدل منظم توسط آب شور به ترتیب پس از الف) تزریق ژل پلیمر ب) تزریق ژل نانو کامپوزیتی سیلیکا

نمودار مربوط به تولید نفت در میکرومدل در فرایند سیلاب زنی با آب شور قبل و بعد از تزریق ژل پلیمر و ژل نانو کامپوزیتی رابرای میکرومدل با طرح منظم در شکل ۴ نمایش داده شده است. همانگونه که قبلا هم ذکر شده حضور ژل پلیمر و ژل نانو کامپوزیتی سیلیکا، باعث مسدود سازی ناحیه پرتراوا و افزایش تولید نفت از میکرومدل و کاهش تولید آب واز طرفی افزایش بازیافت نفت نسبت به حالت بدون تزریق ژل پلیمرها می‌شود.



شکل ۴) بازیافت نفت در فرایند سیلاب زنی با آب شور قبل و بعد از تزریق ژل پلیمر و ژل نانو کامپوزیتی سیلیکا در میکرومدل منظم

#### ۴. نتیجه گیری

- ۱- افزایش غلظت عامل شبکه‌ای کننده باعث کاهش زمان بندش می‌شود و در غلظت های پایین از عامل شبکه‌ای کننده بیشتر زنجیره‌های پلیمر به حالت محلول باقی می‌ماند و میزان ژل شدگی کل محلول پایین خواهد بود و در غلظت های خیلی بالا عامل شبکه‌ای کننده نیز، همه زنجیره‌های پلیمر به حالت ژل درآمده و زمان بندش به شدت کاهش یافته و امکان چروکیدگی ژل پلیمرها بیشتر است. بنابراین غلظت ۰.۲۵٪ وزنی به عنوان غلظت بهینه عامل شبکه‌ای کننده در نظر گرفته شد.
- ۲- در حضور ۰.۳٪ وزنی نانوذرات سیلیکا ژل پلیمر استحکام و پایداری ژل پلیمر را بهبود بخشیده است .
- ۳- در میکرومدل ژل پلیمر نواحی میانی را بهتر مسدود کرده و در این حالت تزریق ژل نانو کامپوزیتی سیلیکا در محیط متخلخل نسبت به ژل پلیمر بدون نانو ذره مساحت بیشتری از میکرومدل جاروب شده و آب دیرتر به چاه تولیدی می‌رسد.

۴- میزان تولید نفت در حضور ژل پلیمری ژل نانو کامپوزیتی سیلیکا در میکرومدل منظم به ترتیب ۶۲,۶٪ و ۷۰,۲۴٪ است .

#### ۵- فهرست مراجع

۱. Eslahati, M., et al., Experimental investigation of Alfalfa natural surfactant and synergistic effects of Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ions for EOR applications: Interfacial tension optimization, wettability alteration and imbibition studies. *Journal of Molecular Liquids*, 2020. **310**: p. 113123.
۲. Chiappa, L., et al. Polymer design for relative permeability modification treatments at high temperature. in *SPE International Conference on Oilfield Chemistry? 2003*. SPE.
۳. Simjou, M., et al., Polyacrylamide gel polymer as water shut-off system: preparation and investigation of physical and chemical properties in one of the Iranian oil reservoirs conditions. 2007.
۴. Ghoumrassi-Barr, S. and D. Aliouche, A rheological study of xanthan polymer for enhanced oil recovery. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 2016. **55**(8): p. ۷۹۳-۸۰۹.
۵. Sydansk, R.D. A New Conformance-Improvement-Treatment Chromium(III) Gel Technology. in *SPE Enhanced Oil Recovery Symposium*. 1988.



## مطالعه آزمایشگاهی مقایسه جذب و دفع ترکیبات قطبی نفتی بر روی کوارتز و رس‌های کائولینیت و ایلیت در حضور آب کم‌شور و پرشور

زهرا آقایی فر<sup>۱\*</sup>؛ Tina Puntervold؛ Skule Strand<sup>۲</sup>

### چکیده

ترشوندگی مخازن یکی از پارامترهای مهم برای تعیین پتانسیل تولید بیشتر نفت در طی اعمال روشهای ازدیاد برداشت به شمار می‌رود. مخازن ماسه سنگی قبل از نفوذ نفت به آن‌ها دارای ترشوندگی آب‌دوستی بالا می‌باشند، اما بعد از نفوذ نفت و جذب مواد آلی قطبی اسیدی و بازی و نیز رسوب انواع رزین و آسفالتن‌ها، تغییر ترشوندگی سطح سنگ بسمت آبدوستی کمتر مشاهده می‌گردد. هر دو گروه ترکیبات قطبی بازی و اسیدی در فصل مشترک نفت، آب و سنگ وجود دارند و در طی واکنش‌های اسید-باز که منجر به تغییر pH در فصل مشترک می‌گردند می‌توانند با جداسدن از سطح سنگ میزان آبدوستی آن را افزایش دهند. در این مطالعه آزمایشگاهی میزان جذب کینولین بعنوان یک نمونه آلی بازی بر روی سطح رس کائولینیت و ایلیت که بعنوان ماده معدنی با فعالیت سطحی و قابلیت بالای تبادل کاتیونی در مخازن ماسه سنگی شناخته شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از وابستگی بالای میزان جذب به pH را داشته و میزان جذب بر روی سطح ایلیت در مقایسه با کائولینیت بخصوص در حضور آب کم‌شور بیشتر می‌باشد.

### کلیدواژه‌ها

ازدیاد برداشت نفت، ترشوندگی، مخازن ماسه سنگی، آب کم‌شور، ترکیبات آلی قطبی، رس

### ۱. مقدمه

تزریق آب کم‌شور در مخازن نفتی ماسه سنگی بعنوان یکی از روش‌های دوستدار محیط زیست و نیز کم‌هزینه‌تر نسبت به سایر روش‌ها در طی دهه اخیر مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است. تور استاد و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۱] مکانسیمی را برای تولید بیشتر با استفاده از آب کم‌شور بیان کردند که شامل تبادل کاتیونی بر روی سطوح معدنی می‌باشد که منجر به جذب/دفع ترکیبات یونی آب‌نمک و نیز ترکیبات اسیدی و بازی قطبی موجود در نفت و در نتیجه تغییر ترشوندگی و تولید بیشتر نفت می‌باشد. یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر شدت ترشوندگی مخزن بسمت آبدوستی و نفت دوستی میزان جذب ترکیبات آلی قطبی، اعم از اسیدی و بازی، از فاز نفت بر روی سطح سنگ و بالاخص سطح رس‌ها می‌باشد [۲]. آزمایش‌های بسیار گسترده و کامل با استفاده نمونه‌های سنگ مخزن و نیز نمونه‌های سینتتیک بصورت دینامیک و استاتیک حاکی از اهمیت حضور انواع مختلف

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، آذربایجان شرقی، ایران، [aghaeifar@sut.ac.ir](mailto:aghaeifar@sut.ac.ir)

<sup>۲</sup> Department of Energy Resources, University of Stavanger, Norway, [tina.puntervold@uis.no](mailto:tina.puntervold@uis.no)

<sup>۳</sup> Department of Energy Resources, University of Stavanger, Norway, [skule.strand@uis.no](mailto:skule.strand@uis.no)

رس در تعیین ترشوندگی اولیه و نیز وابستگی شدید میزان جذب و دفع به pH می‌باشد [۳ و ۴]. ترکیبات اسیدی در نفت خام‌ها عمدتاً شامل اسیدهای کربوکسیلیک، RCOOH هستند، در حالیکه مواد بازی به صورت مولکول‌های آروماتیک حاوی نیتروژن، R<sub>3</sub>N: وجود دارند. مواد آلی قطبی در فرم اسیدی که با نماد R<sub>3</sub>NH<sup>+</sup> و R-COOH نشان داده می‌شود در pH حدوداً برابر با ۵ بر روی سطح رس جذب شده و از طریق یک واکنش اسید و باز معمولی توسط باز قوی OH<sup>-</sup> به فرم‌های بازی R<sub>3</sub>N: و RCOO<sup>-</sup> تبدیل می‌شوند (معادلات ۱ و ۲) که تمایل به جذب کمتری بر روی سطح رس با بار منفی را خواهند داشت [۵].



## ۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق سه ماده معدنی کوارتز و رس‌های کائولینیت و ایلیت مورد استفاده قرار گرفته شده است. کوارتز بصورت پودری با درصد خلوص بالا از شرکت Sibelco تهیه گردید. کائولینیت نیز بصورت پودری با ذرات ریز چند میکرومتری و سطح فعال ۱۳ m<sup>2</sup>/g از شرکت PROLABO تهیه گردیده و ایلیت با درجه خلوص بالای ۸۵٪ از شرکت Ward's Natural Science Establishment بصورت قطعات سنگ تهیه گردید. ایلیت اولیه ابتدا پودر گردیده و با اسید کلریک ۵ مولار و آب دوبار مقطر در طی چند مرحله شستشو و خشک گردید. اندازه ذرات ایلیت نیز در محدوده چند میکرون بوده و نتیجه تست مساحت سطح ذرات ۲۲ m<sup>2</sup>/g می‌باشد.

کینولین (C<sub>9</sub>H<sub>7</sub>N) ماده آروماتیک آلی با خلوص بالای ۹۷٪ از شرکت Merck خریداری گردیده است، بعنوان نماینده ماده نفتی قطبی مورد استفاده گردید.

دو نمونه آب نمک کم شور (LSQ) و آب با شوری بالا (HSQ) در این مطالعه، بعنوان نماینده فاز آبی، بصورت سینتتیک تهیه و مورد استفاده واقع گردیدند که در جدول ۱ اطلاعات تکمیلی آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات آب‌نمک‌های مورد استفاده

| Ion<br>Brine | Na <sup>+</sup><br>(mM) | Mg <sup>2+</sup><br>(mM) | Ca <sup>2+</sup><br>(mM) | Cl <sup>-</sup><br>(mM) | TDS<br>(mg/l) |
|--------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------|
| HSQ          | 295.9                   | 37.1                     | 37.5                     | 445.1                   | 24 990        |
| LSQ          | 11.7                    | 1.5                      | 1.5                      | 17.6                    | 990           |

برای مطالعه اندرکنش سطحی نمونه قطبی آلی و سطح ذرات کوارتز و رس‌ها، نمونه‌های مختلف بصورت موازی، شامل ۱۰٪ درصد وزنی از ذرات سنگ اعم از کوارتز و رس‌های کائولینیت و ایلیت، هر یک بصورت جداگانه، در تماس با محلول ۱۰ میلی مولار آب‌نمک-کینولین در دمای ۲۳ °C در ظروف آب‌بندی شده تهیه گردیدند.

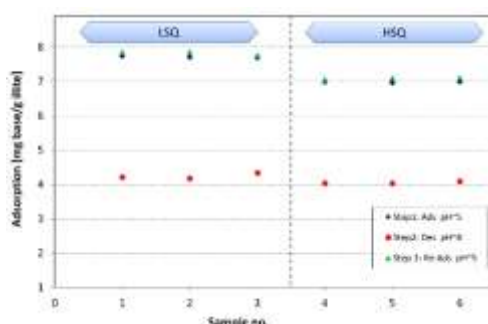
به منظور بررسی میزان جذب ماده آلی قطبی بر روی سطح هر یک از رس‌ها، بصورت جداگانه، pH سه عدد از نمونه‌ها که حاوی LSQ بوده و سه نمونه دیگر که حاوی HSQ بوده بصورت موازی در مرحله اول به مقدار ۵ و سپس در مرحله دوم برای بررسی دفع آن‌ها به مقدار ۸ و در مرحله سوم، برای بررسی جذب مجدد، باز هم به مقدار ۵ تنظیم گردیدند. در هر مرحله نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در تماس کامل با هم قرار گرفته و سپس با سانتریفیوژ کردن نمونه‌ها با سرعت ۲۵۰۰ rpm و بررسی غلظت کینولین در فاز آبی و مقایسه آن با مقدار اولیه و

نوشتن روابط موازنه جرم، میزان جذب بررسی و گزارش گردیدند.

در انتها به جهت بررسی میزان جذب بر روی کوارتز، به عنوان ماده اصلی ماسه سنگ‌ها، ۷ نمونه محتوی LSQ به همراه ۱۰٪ وزنی کوارتز، با pH های مختلف، در محدوده ۲-۸، بصورت موازی مورد مطالعه قرار گرفتند.

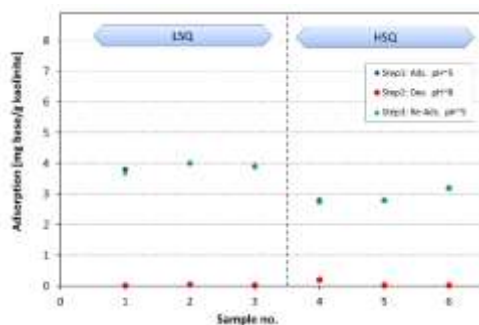
### ۳. بحث و نتایج

در مجموعه تست‌های اول، جذب کینولین در دمای ۲۳ °C بر روی سطح ایلیت در طی شش آزمایش موازی در pH تنظیم شده‌ی ۵ مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاکی از حداکثر میزان جذب حدوداً ۷٫۷ و ۷ mg از کینولین به ازاء هر گرم از ایلیت در معرض به ترتیب آب با شوری کم (LSQ) و زیاد (HSQ) می‌باشد که در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۲. نتایج تست‌های استاتیک جذب/دفع کینولین بر/از روی سطح رس ایلیت

در حالیکه مقادیر جذب کینولین بر روی سطح کائولینیت در حضور LSQ و HSQ به ترتیب ۴ و ۳ mg به ازاء هر گرم از کائولینیت اندازه‌گیری گردید (شکل ۲).

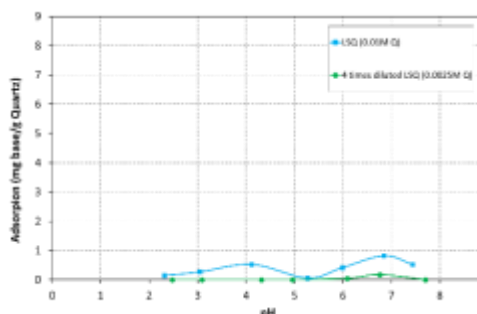


شکل ۳. نتایج تست‌های استاتیک جذب/دفع کینولین بر/از روی سطح کائولینیت.

در مرحله دوم تست‌ها، دفع در pH تنظیم شده‌ی ۸ در نمونه‌هایی بصورت موازی مورد مطالعه قرار گرفت که مشاهده گردید که در نمونه‌های حاوی آب LSQ و HSQ میزان جذب بر روی ایلیت به ترتیب به حدود ۴٫۲ و ۴ mg کینولین رسید که حاکی از دفع به ترتیب ۴۵٪ و ۴۲٪ از میزان ماده آلی جذب شده در دمای اتاق می‌باشد (شکل ۱). نکته قابل توجه دفع ۱۰۰٪ ای ماده آلی از روی سطح کائولینیت در شرایط مشابه می‌باشد (شکل ۲). زمانی که pH با اضافه کردن چند میکرولیتر HCl دوباره به ۵ کاهش می‌یابد، تقریباً تمام کینولین دفع شده از روی سطح نمونه‌های رس مجدداً جذب می‌شود، که تأییدکننده تکرارپذیری قابل قبول تست‌ها بوده و همچنین تأییدی بر اینکه فرآیندهای جذب و دفع به طور کامل وابسته به pH هستند و جذب بستگی به مقدار حضور کینولین با بار مثبت دارد که آن هم بشدت وابسته به pH می‌باشد.

در مجموعه تست دوم، جذب کینولین در دمای ۲۳ °C بر روی سطح کوارتز بعنوان ماده معدنی پایه در مخازن

ماسه سنگی در معرض LSQ مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۳ ارائه گردیده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد در هر دو حالت میزان جذب در همه محدوده pH در مقایسه با نتایج حاصل از رس‌های مذکور، بسیار پایین و قابل چشم‌پوشی می‌باشد. با توجه به کمتر بودن سطح فعال ذرات کوارتز، ۷ تست دیگر در شرایط مشابه، در معرض آب کم شور ۴ بار رقیق شده مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج یکسانی مشاهده گردید.



شکل ۱. نتایج تست‌های استاتیک جذب/دفع کینولین بر/از روی سطح کوارتز

#### ۴. نتیجه‌گیری

مطالعات انجام شده نشان داد که کینولین تمایل بسیاری به جذب روی سطح فعال رس نسبت به سطح کوارتز با بار منفی دارد. میزان جذب بر روی رس ایلیت در مقایسه با کائولنیت بیشتر می‌باشد و میزان جذب بر روی کوارتز قابل چشم‌پوشی می‌باشد. جذب کینولین روی کائولنیت معکوس پذیر بوده، در حالیکه جذب بر روی ایلیت به طور کامل معکوس پذیر نمی‌باشد به عبارت دیگر دفع ۱۰۰٪ رخ نمی‌دهد. علاوه بر این، آخرین و جالب‌ترین نکته این است که مقدار جذب در هنگامی که آب‌نمک با شوری پایین خاک رس را احاطه می‌کند، در مقایسه با آب نمک با شوری بالا بیشترین است. این شاهدی در نقض مکانیسم لایه دوتایی است که توسط بسیاری از محققان و برنامه‌های مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.

#### ۵. فهرست مراجع

- [1] A. RezaeiDoust, T. Puntervold, and T. Austad, "Chemical verification of the EOR mechanism by using low saline/smart water in sandstone", *Energy & Fuels*, 25, pp: 2151-2162, 2011.
- [2] J. S. Buckley, "Effective wettability of minerals exposed to crude oil", *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 6, (3), pp 191-196, 2001.
- [3] T. Puntervold; A. Mamonov, Z. Aghaeifar, G. O. Frafjord, G. M. Moldestad, S. Strand, T. Austad, "The role of kaolinite clay minerals in EOR by low salinity water injection", *Energy Fuels*, 32 (7), pp: 7374-7382, 2018.
- [4] A. Mamonov, P. Aslanidis, N. Fazilani, T. Puntervold, S. Strand, "Influence of sandstone mineralogy on the adsorption of polar crude oil components and its effect on wettability", *Energy & Fuels*, , 36(18), pp: 10785-10793, 2022.
- [5] H. Aksulu, D. Håmsø, S. Strand, T. Puntervold, and T. Austad, "Evaluation of low-salinity enhanced oil recovery effects in sandstone: Effects of the temperature and pH gradient". *Energy & Fuels*, 26(6), pp:3497-3503, 2012.





## مروری بر کاربرد پردازش تصویر در محیط‌های متخلخل

علیرضا اکبرزاده<sup>۱</sup>؛ حسن اقدسی نیا<sup>۲\*</sup>؛ مجید احمدلوی داراب<sup>۳</sup>؛

### چکیده

امروزه بررسی جریان سیال و پدیده‌های انتقال در محیط‌های متخلخل به دلیل اهمیت آن در کاربردهای صنعتی، مهندسی، زیست‌شناختی و زیست‌محیطی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. هندسه، فضای حفره‌ها و توپولوژی از جمله شاخصه‌های کلیدی محیط متخلخل است. این مولفه‌ها نقش مهمی در تعیین خصوصیات محیط متخلخل ایفا می‌کنند. پردازش تصویر به عنوان یکی از زیر شاخه‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، قابلیت‌های منحصر به فردی در تحلیل تصاویر را دارا می‌باشد. شناسایی تصویر در حال تبدیل شدن به یک مرحله بسیار مهم در اکثر سیستم‌های حل مسئله دنیای مدرن می‌باشد. روش‌های دریافت، آنالیز و دسته‌بندی تصویر به تعداد فراوان در دسترس هستند. روش‌ها و الگوریتم‌های پردازش تصویر به صورت تصویر برداری ماهواره‌ای و از دور، تصاویر ویدئویی، تصاویر سه بعدی می‌باشد. در محیط‌های متخلخل، پردازش تصویر می‌تواند به تفکیک و شناسایی مواد موجود در محیط، محاسبه پارامترهای فیزیکی مانند دانسیته، آب و هوای موجود در محیط، بهبود فرایندهای مربوط به محیط‌های متخلخل و غیره کمک کند. پردازش تصویر در محیط‌های متخلخل ابزاری قدرتمند برای تحلیل و شناخت ویژگی‌های محیط است. در این پژوهش به مطالعات انجام گرفته در زمینه محیط متخلخل و کاربردهای مختلف پردازش تصویر در محیط‌های متخلخل پرداخته شده است. تکنیک‌های اندازه‌گیری مبتنی بر پردازش تصویر مزایای غیر مخرب بودن، عملکرد آسان، قابلیت دید سه بعدی عمیق و وضوح بالا را دارند. ناحیه کاربرد مواد متخلخل را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های تصویربرداری مناسب گسترش داد. تکنیک‌های پردازش تصویر شامل همترازی تصویر، چسباندن تصویر، افزایش کنتراست، آستانه گذاری، جداسازی تصویر، بازسازی سه‌بعدی و غیره می‌شود. استفاده از این مواد به شدت تحت تاثیر خواص مواد اندازه‌گیری شده قرار می‌گیرد. روش‌های پردازش تصویر را می‌توان به نواحی دیگر با ویژگی‌های تصویر مشابه منتقل کرد. برای دستیابی به نتایج دقیق، اندازه‌گیری مبتنی بر پردازش تصویر باید از جنبه‌های سخت‌افزاری، آزمایشی و الگوریتم‌های پردازش تصویر بهبود یابد.

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، [akbarzadeh@tabrizu.ac.ir](mailto:akbarzadeh@tabrizu.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، [aghdasinia@tabrizu.ac.ir](mailto:aghdasinia@tabrizu.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، [mahmadlouydarab@tabrizu.ac.ir](mailto:mahmadlouydarab@tabrizu.ac.ir)



## شبیه‌سازی عددی مستقیم جریان سیال تک‌فاز در رسانه متخلخل دوبعدی

محمدرضا پورفرخ<sup>۱</sup>؛ سروش یوسفی<sup>۲\*</sup>

### چکیده

در پژوهش حاضر شبیه‌سازی جریان سیال تراکم‌ناپذیر آب توسط نرم‌افزار OpenFOAM در یک محیط متخلخل مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش جامد توسط فایل به فرمت stl. به نرم‌افزار وارد شده و با استفاده از snappyHexMesh این بخش جامد از هندسه خام جدا می‌گردد. جهت تحلیل مسئله به صورت دوبعدی، تعداد یک سلول شبکه در جهت عمود بر صفحه ایجاد می‌شود. سپس، مطالعه شبکه بررسی و شبکه بهینه انتخاب می‌گردد. نتایج نشان داد که اختلاف فشار یک پاسکال بین جریان آرام ورودی و خروجی برقرار است. همچنین، با کاهش سطح مقطع عبوری جریان، سرعت سیال افزایش می‌یابد.

### کلیدواژه‌ها

محیط متخلخل؛ مقیاس حفره؛ جریان تک‌فاز؛ شبیه‌سازی عددی مستقیم؛ روش حجم محدود

### ۱. مقدمه

محیط متخلخل به ماده‌ای گفته می‌شود که دارای منافذ بوده و سیال می‌تواند درون منافذ جریان پیدا کند. محیط متخلخل معمولاً از دو بخش بدنه اصلی و حفره‌ها تشکیل شده‌است. به دلیل هندسه خاص این گونه مواد، تحلیل جریان در آن‌ها بسیار چالش‌برانگیز است. ناکشائاترالا و همکاران [۱] پژوهشی با معرفی یک پایه نظری برای جریان سیالات تک‌فاز تراکم‌ناپذیر در محیط‌های متخلخل صلب با تخلخل و نفوذپذیری مضاعف، ارائه یک مدل ریاضی و راه‌حل‌های تحلیلی ارائه دادند؛ این مطالعه همچنین تفاوت در پروفایل‌های فشار و سرعت را در مقایسه با معادلات داری کلاسیک نشان می‌دهد. فوکوان و همکاران [۲] به چالش مدل‌سازی جریان مایع در مخازن با نفوذپذیری کم پرداختند و یک مدل غیر خطی بر اساس مفهوم لایه چسبندگی مرزی استخراج کردند.

در ادامه ابتدا معادلات حاکم بر مسئله ارائه می‌شوند. سپس، مطالعه شبکه بر روی هندسه متخلخل بررسی می‌شود. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی عددی ارائه شده و پژوهش با نتیجه‌گیری به پایان می‌رسد.

### ۲. معادلات حاکم

جهت شبیه‌سازی جریان تک‌فاز آب از simpleFoam استفاده شده‌است؛ معادلات این مدل در ادامه ارائه شده‌است [۳]. شبیه‌سازی برای مدت زمان ۱۰۰۰ ثانیه با گام زمانی ۱ ثانیه انجام شده‌است. برای حل معادله فشار در هر تکرار از حلگر GAMG و برای سرعت از smoothSolver استفاده شده‌است. همچنین، چگالی و لزجت آب مقادیر ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، [m\\_pourfarokh1375@mecheng.iust.ac.ir](mailto:m_pourfarokh1375@mecheng.iust.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، [yousefi\\_sorush@mecheng.iust.ac.ir](mailto:yousefi_sorush@mecheng.iust.ac.ir)

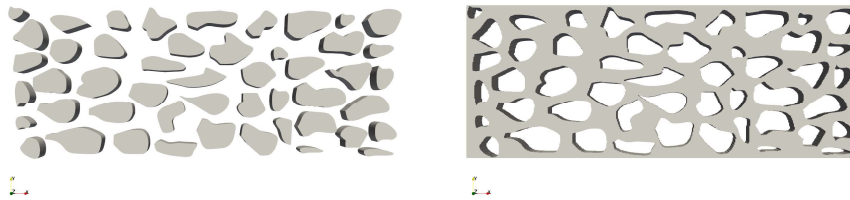
\* نویسنده مسئول

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (1)$$

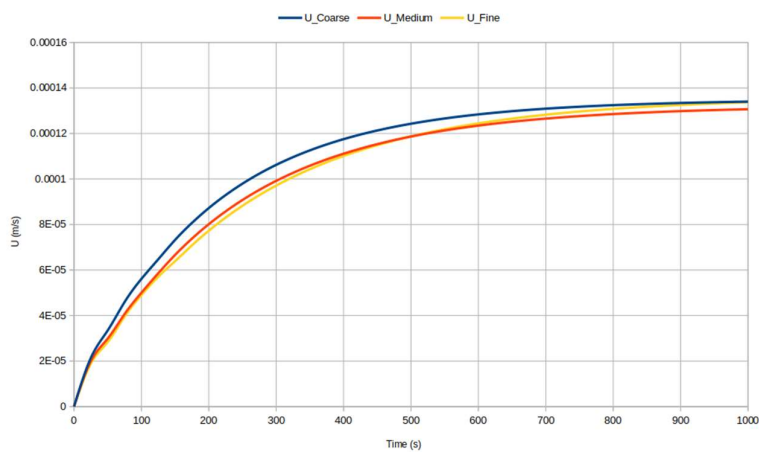
$$\nabla \cdot (\vec{U} \otimes \vec{U}) - \nabla \cdot \vec{R} = -\nabla p + S \quad (2)$$

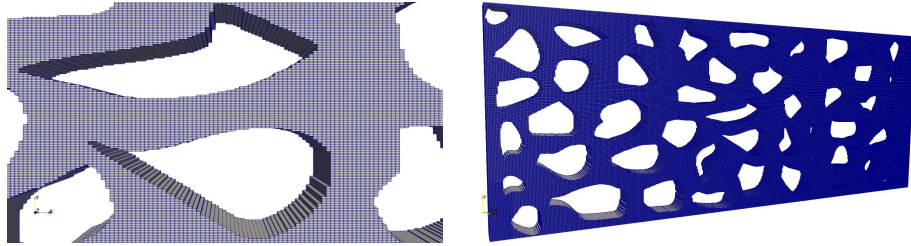
### ۳. هندسه مسئله و مطالعه شبکه

هندسه دوبعدی رسانه متخلخل در شکل ۱ آورده شده است. به منظور دستیابی به استقلال حل از شبکه، هندسه مسئله با اندازه‌های متفاوت شبکه مورد تحلیل قرار گرفت. تعداد تقسیمات در سه جهت مختصات کارترین برای شبکه درشت (۱ ۴۲۵ ۴۲۵)، متوسط (۱ ۴۵۰ ۴۵۰) و ریز (۱ ۴۷۵ ۴۷۵) در نظر گرفته شد. مطابق شکل ۲، با توجه به اینکه تغییر قابل توجه‌ای در نتایج شبکه متوسط در مقایسه با شبکه ریزتر مشاهده نمی‌شود، این شبکه از دقت کافی برخوردار بوده و به عنوان شبکه بهینه انتخاب می‌شود. شبکه بهینه با سازمان شکل ۲ توسط blockMesh و snappyHexMesh ایجاد شده است؛ لازم به ذکر است که تعداد کل سلول‌های محاسباتی ۱۱۶۹۲۸ می‌باشد.



شکل ۱: هندسه مسئله

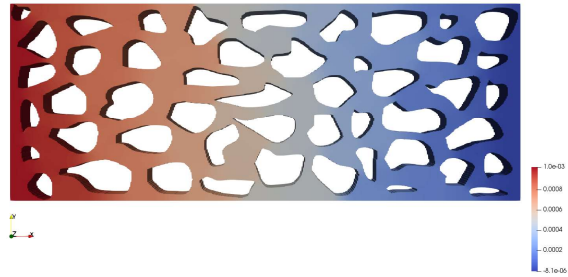




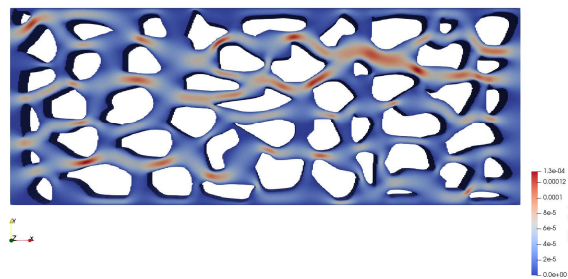
شکل ۲: مطالعه شبکه

#### ۴. نتایج

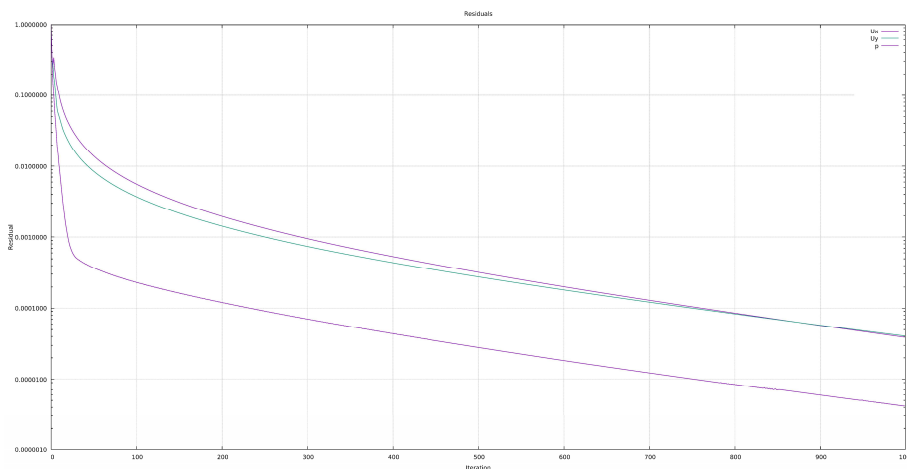
نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۳ ارائه شده است. نمودار باقی‌مانده‌ها از شروع حل تا پایان روندی نزولی داشته که نشان دهنده همگرایی حل و کاهش خطای محاسباتی است. کانتور فشار بر واحد چگالی همانند شرط مرزی فشار اعمال شده، اختلاف فشار یک پاسکال بین ورودی و خروجی را نشان می‌دهد.



(الف) کانتور فشار



(ب) کانتور سرعت



(ت) باقی‌مانده‌ها

شکل ۳: نتایج شبیه‌سازی

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش جریان تک‌فاز آب به روش حجم محدود در یک محیط متخلخل دوبعدی مورد بررسی قرار گرفت. در بخش قبل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی ارائه و تحلیل گردید. نتایج بدست آمده از کانتور سرعت حاکی از این بوده که با کاهش سطح مقطع عبوری جریان، سرعت سیال افزایش می‌یابد. جهت ادامه کار در آینده، شبیه‌سازی مسئله حاضر می‌تواند به صورت دوفاز مورد بررسی قرار گیرد.

## ۶. فهرست مراجع

- [1] K. B. Nakshatrala, S. Joodat, R. Ballarini. "Modeling flow in porous media with double porosity/permeability: Mathematical model, properties, and analytical solutions." *J. Appl. Mech.*, vol. 85, 2016. <https://doi.org/10.1115/1.4040116>
- [2] S. Fuquan, S. Xingxing, W. Yong, S. Yeheng. "Single- and two-phase flow model in low-permeability reservoir." *Petroleum*, vol. 5, pp. 183-190, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.PETLM.2018.05.004>
- [3] OpenCFD, OpenFOAM 2023.



## شبیه‌سازی عددی مستقیم جریان سیال دوفاز در رسانه متخلخل دوبعدی

سروش یوسفی<sup>۱</sup>؛ محمدرضا پورفرخ<sup>۲\*</sup>

### چکیده

در پژوهش حاضر شبیه‌سازی جریان سیالات تراکم‌ناپذیر آب - نفت توسط نرم افزار OpenFOAM در یک محیط متخلخل مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نحوه تولید هندسه متخلخل و مطالعه شبکه بررسی می‌گردد. جهت تحلیل مسئله به صورت دوبعدی، تعداد یک سلول شبکه در جهت عمود بر صفحه ایجاد می‌شود. سپس، مخلوط آب - نفت با کسر حجمی فاز نفت ۰/۵ از سمت چپ وارد دامنه شده و به دلیل وجود اختلاف فشار بین مرز چپ و راست، جریان سیال به سمت خروجی حرکت کرده و از مرز سمت راست خارج می‌گردد. نتایج نشان داد که اختلاف فشار یک پاسکال بین جریان آرام ورودی و خروجی برقرار است. همچنین، به دلیل چگالی کم‌تر نفت نسبت به آب، فاز نفت به مرور روی فاز آب قرار می‌گیرد.

### کلیدواژه‌ها

محیط متخلخل؛ مقیاس حفره؛ جریان دوفاز؛ شبیه‌سازی عددی مستقیم؛ روش حجم محدود

### ۱. مقدمه

جریان سیال در محیط‌های متخلخل از اوایل قرن نوزدهم مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. محیط متخلخل معمولاً از دو بخش بدنه اصلی و حفره‌ها تشکیل شده‌است. به دلیل هندسه خاص این گونه مواد، تحلیل جریان در آن‌ها بسیار چالش‌برانگیز است. رامستاد و همکاران [۱] به شبیه‌سازی مقیاس حفره جریان تک‌فازی و دوفازی در محیط متخلخل پرداختند. این پژوهش ترکیبی از تصویربرداری در مقیاس منافذ پیشرفته و شبیه‌سازی است و می‌تواند ورودی بسیار مفیدی در زمینه‌های مختلف علم و صنعت باشد. موحدی و همکاران [۲] یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی را برای شبیه‌سازی جریان سیال در محیط متخلخل دارای سوراخ ارائه دادند، که تأثیر پارامترهای هندسی و خواص ناحیه خرد شده را بر روی پروفایل‌های فشار و سرعت تحلیل می‌کند. این مدل با موفقیت افت فشار و تغییرات دما را برای سیستم‌های هوا - آب در شرایط حالت پایدار پیش‌بینی کرد.

در ادامه ابتدا معادلات حاکم بر مسئله ارائه می‌شوند. سپس، هندسه محیط متخلخل و مطالعه شبکه بررسی می‌شود. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی عددی ارائه شده و پژوهش با نتیجه‌گیری به پایان می‌رسد.

### ۲. معادلات حاکم

جهت شبیه‌سازی جریان دوفاز تراکم‌ناپذیر آب - نفت از twoLiquidMixingFoam استفاده شده‌است؛ معادلات این مدل در ادامه ارائه شده‌است [۳]. شبیه‌سازی برای مدت زمان ۱۰۰ ثانیه با گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، [yousefi\\_soroush@mecheng.iust.ac.ir](mailto:yousefi_soroush@mecheng.iust.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، [m\\_pourfarokh1375@mecheng.iust.ac.ir](mailto:m_pourfarokh1375@mecheng.iust.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

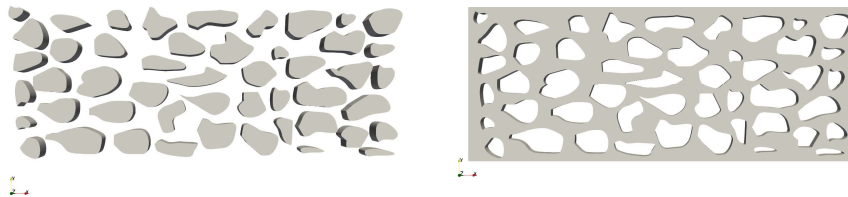
انجام شده‌است. برای حل معادله فشار در هر تکرار از حلگر GAMG و برای سرعت و کسر حجمی نفت از smoothSolver استفاده شده‌است. همچنین، چگالی و لزجت آب - نفت مقادیر ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U}\alpha) = \nabla \cdot \left( (D_{AB} + \frac{v_t}{Sc_t}) \nabla \alpha \right) \quad (1)$$

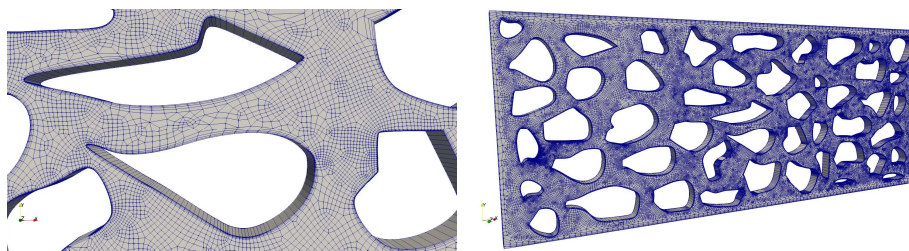
$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (2)$$

### ۳. هندسه مسئله و مطالعه شبکه

هندسه دوبعدی رسانه متخلخل در شکل ۱ آورده شده‌است. بخش جامد توسط فایل به فرمت .stl. به نرم افزار تولید هندسه در انسیس وارد شده و این بخش جامد از یک هندسه خام مستطیل شکل جدا می‌گردد تا هندسه نهایی رسانه متخلخل تولید گردد. شبکه بی سازمان شکل ۲ توسط نرم افزار Ansys Meshing ایجاد شده‌است؛ لازم به ذکر است که تعداد کل سلول‌های محاسباتی ۶۱۷۹۰ و اندازه هر شبکه  $3/5475 \times 10^{-6}$  متر می‌باشد.



شکل ۱: هندسه مسئله

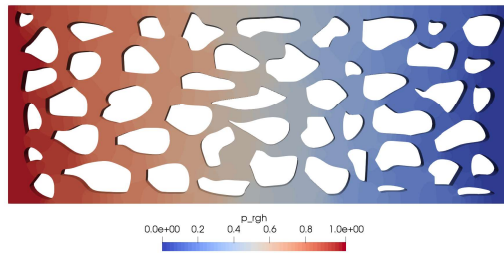


شکل ۲: مطالعه شبکه

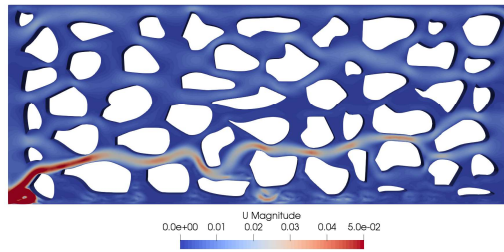
### ۴. نتایج

نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۳ ارائه شده‌است. در نمودار باقی‌مانده‌ها رنگ بنفش، سبز، آبی و نارنجی به ترتیب مربوط به مولفه‌های افقی و عمودی سرعت، فشار و کسر حجمی نفت است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جریان تقریباً از ثانیه ۳۰ به بعد، پایا شده و نیازی به ادامه شبیه‌سازی نمی‌باشد؛ با این حال جهت اطمینان از

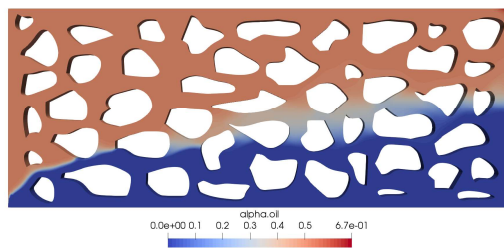
همگرایی کامل، نتایج برای مدت زمان ۱۰۰ ثانیه ارائه شده است. مشاهده می‌شود که به دلیل چگالی کم‌تر نفت نسبت به آب، نفت به مرور روی آب قرار می‌گیرد و همچنین به دلیل لزجت کم‌تر آب، این فاز سرعت بیش‌تری نسبت به فاز نفت دارد.



(الف) کانتور فشار

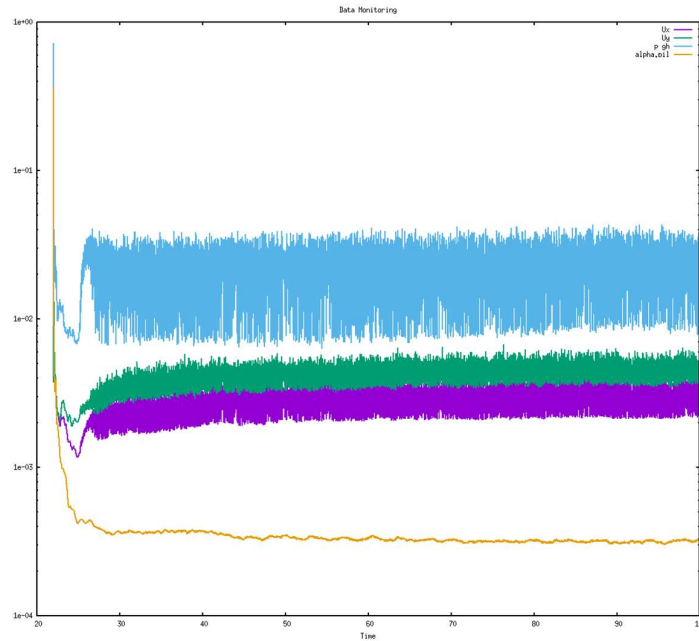


(ب) کانتور سرعت



(پ) کانتور کسر حجمی نفت





(ت) باقی‌مانده‌ها

شکل ۳: نتایج شبیه‌سازی

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش جریان دوفاز آب - نفت به روش حجم محدود در یک محیط متخلخل دوبعدی مورد بررسی قرار گرفت. در بخش قبل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی ارائه و تحلیل گردید. نتایج بدست آمده از کانتور سرعت حاکی از این بوده که سرعت سیال در سطح مشترک دوفاز افزایش یافته‌است. جهت ادامه کار در آینده، شبیه‌سازی یک رسانه متخلخل سه‌بعدی به صورت تک‌فاز و دوفاز می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

## ۶. فهرست مراجع

- [1] T. Ramstad, C. F. Berg, K. E. Thompson. "Pore-Scale Simulations of Single- and Two-Phase Flow in Porous Media: Approaches and Applications." *Transport in Porous Media*, vol. 130, pp. 77-104, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11242-019-01289-9>
- [2] H. Movahedi, M. V. Farahani, M. Masihi. "Development of a Numerical Model for Single- and Two-Phase Flow Simulation in Perforated Porous Media." *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 142, 2020. <https://doi.org/10.1115/1.4044574>
- [3] OpenCFD, OpenFOAM 2023.



## بررسی تأثیر زاویه شیب بر عملکرد موانع شکافدار در استهلاک انرژی جنبشی جریان‌های واریزه‌ای

آناهیتا آقاگلی<sup>۱\*</sup>؛ حامد صادقی<sup>۲</sup>

### چکیده

جریان‌های واریزه‌ای، مخلوط آب و توده‌های گسیخته شده خاک و سنگ هستند، که در مناطق کوهستانی، در اثر بارندگی‌های شدید، رخ می‌دهند. از آنجایی که سرعت و حجم قابل توجه این جریان‌ها، باعث ایجاد خسارات جدی به زیرساخت‌های موجود در پایین‌دست می‌شود، موانعی در مسیر جریان تعبیه می‌شود، که باعث استهلاک انرژی جریان شوند. اما کارایی این موانع، به شدت تحت تأثیر سرعت جریان است، به نحوی که عدم توجه به آن می‌تواند منجر به افزایش انرژی و قدرت تخریب جریان در پایین‌دست نیز، شود. از این روی، در این پژوهش، به تأثیر زاویه شیب بستر بر عملکرد موانع، که از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر سرعت جریان است، پرداخته شده است. نتایج مدل‌سازی با نرم‌افزار FLOW-3D، نشان داد تعبیه یک ردیف از موانع مکعبی در شیب‌های تند، باعث افزایش انرژی جنبشی جریان می‌شود، در شیب‌های متوسط، تأثیری بر استهلاک انرژی ندارد و در شیب‌های ملایم، بیش از ۵۰٪، از انرژی جریان، می‌کاهد.

### کلیدواژه‌ها

جریان واریزه‌ای، موانع صلب، موانع شکافدار، مستهلک‌کننده انرژی، FLOW-3D

### ۱. مقدمه

در مناطق کوهستانی، هنگامی که بستر فرسایش‌پذیر، در معرض عواملی همچون بارندگی‌های شدید قرار می‌گیرد، دچار گسیختگی شده و حجم قابل توجهی از مخلوط آب، خاک و سنگ، با قدرت تخریب بسیار زیاد، به سمت پایین‌دست، جاری می‌شود [1]. سرعت بسیار بالا و همچنین حجم این جریان‌ها که گاهی از  $10^6$  متر مکعب نیز فراتر می‌رود، باعث ایجاد خسارات جدی به مناطق مسکونی، راه‌ها و سایر زیرساخت‌ها در پایین‌دست می‌شود [2]. به منظور کاهش قدرت تخریب جریان‌های واریزه‌ای، موانعی در مسیر جریان تعبیه می‌شوند، تا انرژی و سرعت جریان در اثر برخورد به این موانع، مستهلک شود [3-5]. موانع شکافدار، نوعی از موانع هستند، که معمولاً در ردیف‌های متوالی و با فواصل مشخص، در مسیر جریان تعبیه می‌شوند، که ساده‌ترین و نیز متداول‌ترین نوع آن‌ها، موانع مکعبی است. اما یکی از نکاتی که طراحی این موانع را با چالش مواجه می‌کند، این است که عملکرد این موانع، به شدت، تحت تأثیر زاویه شیب بستر است و فاکتورهای طراحی، از قبیل عرض، ارتفاع و نحوه چیدمان موانع، باید با توجه به شیب بستر، طراحی شود [6].

جریان‌های واریزه‌ای، معمولاً، در شیب‌های تندتر از  $30^\circ$  شکل می‌گیرند [2]؛ با این حال، استثنائاتی نیز، وجود

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [anahita.aghagoli78@sharif.edu](mailto:anahita.aghagoli78@sharif.edu)

\* نویسنده مسئول

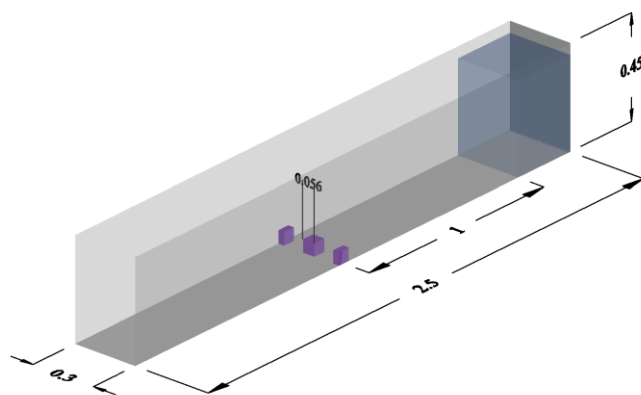
<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [hsadeghi@sharif.edu](mailto:hsadeghi@sharif.edu)

دارد. به‌عنوان مثال، جریان واریزه‌ای واشنگتن در سال ۲۰۱۴، در شیب کم‌تر از  $20^\circ$  رخ داد؛ اما، سرعت و انرژی جنبشی جریان، قابل توجه بود و با وجود شیب نسبتاً ملایم بستر، مسافت بیشتر از ۱/۵ کیلومتر را طی کرد [7]. با استناد به نتایج بررسی‌های چن و همکاران بر روی موانع بسته، در شیب‌های تند، برای کنترل حجم فرسایش و رسوبات افزوده‌شده به جریان، ارتفاع مانع، باید بیشتر از حالتی که شیب بستر، ملایم است، در نظر گرفته شود [8]. در مقابل، با کاهش زاویه شیب بستر، ارتفاع موانع را باید کاهش داد و به تبع آن، تعداد ردیف‌های متوالی را افزایش داد.

کنگ و گوان، چگونگی اندرکنش جریان‌های واریزه‌ای با موانع شکاف‌دار را بررسی کردند [9]. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد میزان کاهش اندازه حرکت جریان، به‌شدت، متأثر از سرعت جریان، در لحظه برخورد به موانع است و با افزایش سرعت جریان، موانع، نه‌تنها باعث کاهش اندازه حرکت جریان در پایین‌دست نمی‌شود، بلکه تأثیر منفی نیز بر دینامیک جریان داشته و باعث افزایش مومنتم می‌شوند. بنابراین، با توجه به اهمیت سرعت برخورد جریان در تعیین راندمان موانع و ابعاد آن‌ها و همچنین وجود مطالعات محدود در خصوص چگونگی تأثیر سرعت برخورد جریان بر اندرکنش آن با موانع، در این مطالعه، به بررسی نقش زاویه شیب بستر که یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر سرعت جریان است، در استهلاک انرژی جنبشی، پرداخته شده است.

## ۲. روش‌شناسی پژوهش

مدل‌سازی چگونگی اندرکنش جریان با موانع شکاف‌دار مکعبی، مطابق شکل ۱، در کانالی با طول ۲/۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع دیواره‌های ۰/۴ متر، با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D، انجام شد. حجم جریان واریزه‌ای، برابر با ۰/۰۳۶ متر مکعب اتخاذ شد. با فرض ایجاد ۳۷٪ انسداد در مقطع عرضی فلوم بر اساس پیشنهاد اینگ و همکاران، طول، عرض و ارتفاع مانع مکعبی، ۰/۰۵۶ متر در نظر گرفته شد [10]. موانع، مطابق شکل ۱، ۱ متر پایین‌تر از دریچه، به نحوی تعبیه شدند که یک مانع کامل در وسط و دو مانع با عرض ۰/۰۲۸ متر، در مجاورت دیواره‌های کانال، قرار گیرند. همچنین، برای بررسی میزان تأثیر موانع بر استهلاک انرژی جنبشی جریان‌های واریزه‌ای در زوایای شیب مختلف، ۳ زاویه شیب  $5^\circ$ ،  $15^\circ$  و  $25^\circ$ ، به‌ترتیب، نماینده شیب‌های ملایم، متوسط و تند، مورد بررسی قرار گرفت.



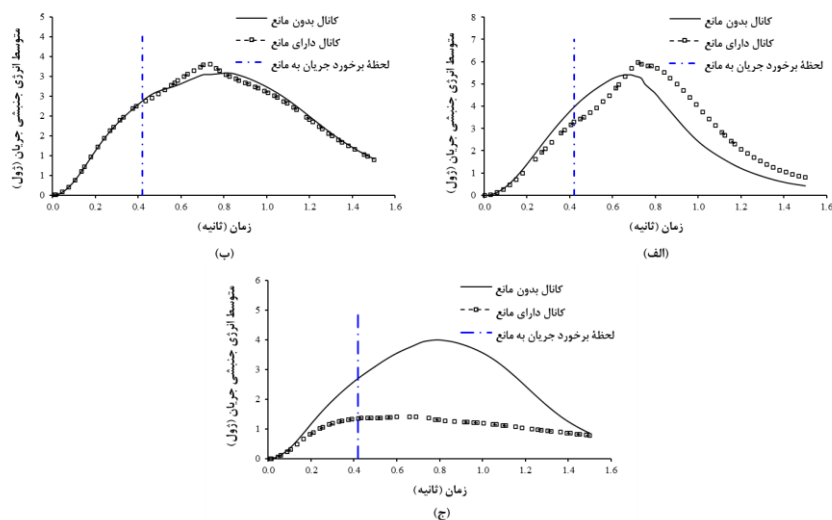
شکل ۱: طرح شماتیک هندسه مدل در نرم‌افزار FLOW-3D (ابعاد مشخص شده در شکل، بر حسب متر هستند).

به منظور شبیه‌سازی جریان‌های واریزه‌ای در محیط نرم‌افزار FLOW-3D، یک سیال تک‌فازی غیرنیوتنی با خصوصیات سیال بینگهام، در نظر گرفته شد. جریان مورد بررسی، دارای جرم حجمی ۱۶۹۲ کیلوگرم بر متر مکعب، لزجت بینگهام ۰/۳۸۵ پاسکال ثانیه و تنش تسلیم ۰/۳ پاسکال است. نحوه برقراری جریان در نرم‌افزار، از فرآیند شکست سد، یعنی بالا کشیدن ناگهانی دریچه در آزمون‌های کوچک‌مقیاس، تبعیت می‌کند.

### ۳. تحلیل نتایج

با توجه به شکل ۲-الف، در زاویه شیب ۲۵ درجه، انرژی جنبشی جریان، پس از برخورد به مانع، افزایش می‌یابد. علت افزایش انرژی نسبت به وضعیت بدون مانع، سرعت بالای جریان در زاویه شیب ۲۵ درجه است، که باعث می‌شود پس از برخورد جریان به موانع و سرریز شدن، بلافاصله، برخورد به بستر، صورت نگیرد؛ بلکه، پس از طی مسافتی در پایین دست موانع و بعد از چند ثانیه، برخورد جت جریان به بستر، اتفاق می‌افتد. این تأخیر زمانی و رقوم افزایش یافته جریان، باعث افزایش انرژی پتانسیل و به تبع آن، افزایش انرژی جنبشی می‌شود.

همانگونه که از شکل‌های ۲-ب و ۲-ج قابل مشاهده است، با کاهش زاویه شیب، عملکرد موانع در استهلاک انرژی جنبشی جریان، بهبود می‌یابد. در زاویه شیب ۱۵ درجه، سرعت جریان، نسبت به زاویه ۲۵ درجه کم‌تر است و بنابراین بخشی از جریان، به تدریج، از میان شکاف‌های موانع خارج شده و بخش دیگر، به آرامی، سرریز می‌شود. این موضوع، باعث می‌شود بیشینه انرژی جنبشی در وضعیت بدون مانع و دارای مانع، در زاویه شیب ۱۵ درجه، تقریباً، به صورت همزمان رخ دهد؛ اما با توجه به شکل ۲-ب، موانع، در استهلاک انرژی جنبشی زاویه شیب ۱۵ درجه، کارایی ندارند. در مقابل، بر اساس شکل ۲-ج، با کاهش زاویه شیب به ۵ درجه، راندمان موانع در مستهلک کردن انرژی جریان، افزایش یافته و پس از برخورد جریان به موانع، بیشینه انرژی، حدود ۶۳٪ کاهش می‌یابد. بنابراین، می‌توان استنتاج نمود که تعبیه یک ردیف از موانع شکاف‌دار مکعبی، در استهلاک انرژی جریان‌های شکل گرفته بر روی شیب‌های ناچیز مؤثر است اما در شیب‌های تند، کارایی ندارد.



شکل ۲: تغییرات انرژی جنبشی جریان پیش و پس از برخورد به مانع در زوایای شیب (الف) ۲۵ درجه، (ب) ۱۵ درجه و (ج) ۵ درجه

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر شیب بستر بر راندمان موانع مکعبی در استهلاک انرژی جنبشی جریان‌های واریزه‌ای، بررسی شد. نتایج، نشان داد در شیب‌های تند، به‌علت سرعت قابل توجه جریان، تعبیه یک ردیف از موانع مکعبی، نه تنها باعث کاهش متوسط انرژی جنبشی جریان نمی‌شود، بلکه افزایش انرژی را نیز در پی دارد. در شیب‌های ملایم‌تر، در یک زاویه مشخص، متوسط انرژی جنبشی پس از تعبیه موانع، با وضعیت بدون مانع، تفاوتی نداشته و در زوایای کم‌تر از این مقدار، برخورد جریان به یک ردیف از موانع مکعبی، با کاهش بیش از ۵۰٪ انرژی اولیه، همراه است.

#### ۵. فهرست مراجع

- [1] R. M. Iverson, "The physics of debris flows," *Reviews of Geophysics*, vol. 35, no. 3, pp. 245–296, 1997.
- [2] R. M. Iverson, M. E. Reid, M. Logan, R. G. LaHusen, J. W. Godt, and J. P. Griswold, "Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment," *Nature Geosci*, vol. 4, no. 2, pp. 116–121, 2011.
- [3] Y. Kong, M. Guan, X. Li, J. Zhao, and H. Yan, "How Flexible, Slit and Rigid Barriers Mitigate Two-Phase Geophysical Mass Flows: A Numerical Appraisal," *JGR Earth Surface*, vol. 127, no. 6, 2022.
- [4] H. Liu, C. E. Choi, S. Poudyal, Z. Jia, and C. W. W. Ng, "A New Overflow Number for Analyzing and Designing Dual Rigid Barriers with Basal Clearance," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 150, no. 6, p. 04024036, 2024.
- [5] N. Li, G. G. D. Zhou, H. Hu, K. F. E. Cui, and Y. Huang, "Influence of trapping efficiency on the pile-up geometry of granular flows behind slit dams," *Engineering Geology*, vol. 326, p. 107333, 2023.
- [6] Y. Bi, Y. Huang, B. Zhang, and J. Pu, "CFD-DEM numerical investigation of the effects of water content and inclination angle on interactions between debris flows and slit dam," *Computers and Geotechnics*, vol. 170, p. 106273, 2024.
- [7] R. M. Iverson *et al.*, "Landslide mobility and hazards: implications of the 2014 Oso disaster," *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 412, pp. 197–208, 2015.
- [8] J. Chen *et al.*, "The effect of the check dam on the sediment transport and control in debris flow events," *Engineering Geology*, vol. 329, p. 107397, 2024.
- [9] Y. Kong and M. Guan, "Hydro-mechanical simulations aid demand-oriented design of slit dams for controlling debris flows, debris avalanches and rock avalanches," *Engineering Geology*, vol. 326, p. 107314, 2023.
- [10] C. W. W. Ng, C. E. Choi, J. S. H. Kwan, R. C. H. Koo, H. Y. K. Shiu, and K. K. S. Ho, "Effects of Baffle Transverse Blockage on Landslide Debris Impedance," *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 9, pp. 3–13, 2014.



## تأثیر شوری بر روی رفتار جریان‌ی فوم جهت کنترل هم‌نوایی در فرایندهای تزریق گاز پایه: مطالعه در مقیاس میکرو

امیرحسین مولایی؛ محمد سیم‌جو\*؛ متین شاهین<sup>۳</sup>

### چکیده

یکی از روش‌های مؤثر جهت ارتقای عملکرد فرایندهای گاز پایه در شرایط محیط متخلخل، فوم نمودن گاز تزریقی است. با این حال، شوری محیط یکی از عوامل تأثیرگذار بر روی عملکرد فوم برای کاربردهای زیرسطحی است. این مطالعه به بررسی عملکرد جریان‌ی فوم با استفاده از عامل فوم ساز سدیم‌دودسیل‌سولفات در دو سطح شوری آب (۵۰۰۰ و ۳۵۰۰۰ پی‌پی‌ام از کلرید سدیم) در یک محیط متخلخل لایه‌ای ناهمگن می‌پردازد. برای انجام این آزمایش‌ها، از یک میکرومدل شیشه‌ای که شامل دو لایه با تراوایی مختلف و در ارتباط سیالی بوده، استفاده شده است. نتایج نشان داد که فوم تشکیل شده در شرایط شوری پایین دارای حباب‌های ریزتری بوده که این امر منجر به افزایش ویسکوزیته ظاهری و متعاقباً کنترل بهتر تحرک پذیری فاز گازی در هر دو لایه شده است. مطابق نتایج حاصله تشکیل فوم پایدار سبب کنترل بهتر هم‌نوایی جریان گاز در لایه پر تراوا شد به طوری که جبهه پیش رونده فوم، هر دو لایه کم تراوا و پر تراوا را در بر گرفت. در مقابل، در شرایط شوری بالا، حباب‌های فوم درشت تر بوده و پایداری کمتری از خود نشان دادند، که این امر منجر به میان شکنی سریع تر فاز گاز از لایه پر تراوا و متعاقباً کاهش کارایی تزریق فوم جهت کنترل هم‌نوایی شد. نتایج حاصل از این مطالعه بیانگر عملکرد مطلوب فوم در شرایط شوری پایین جهت کنترل هم‌نوایی در فرایندهای تزریق گاز پایه در یک سیستم لایه ای ناهمگن است که می‌تواند سبب ارتقای بازده جاروبی گاز تزریقی در محیط متخلخل شود.

### کلیدواژه‌ها:

فوم، میکرومدل لایه‌ای، تحرک‌پذیری، کنترل هم‌نوایی، شوری

### ۱- مقدمه

تزریق گاز یک روش رایج و پر کاربرد در فرایندهای زیر سطحی از جمله رخدادهای مرتبط با ذخیره‌سازی گاز و یا تزریق در مخزن است. با این حال، به دلیل تحرک بالای گاز، فاکتورهای بازیابی به دست آمده در طی تزریق گاز اغلب کمتر از حد انتظار است. علاوه بر این، پدیده انگشتی شدن و انتقال گاز از طریق لایه‌های با نفوذپذیری بالا در محیط متخلخل، منجر به بازده جاروبی ضعیف‌تر آن و عدم کنترل هم‌نوایی می‌شود [۱-۳]. یک روش مؤثر برای کاهش تحرک گاز و در نتیجه افزایش بازده جاروبی، فوم کردن گاز تزریقی است. فوم شامل یک فاز گاز ناپیوسته، یعنی حباب‌های گاز، در یک فاز مایع پیوسته است. تشکیل فوم از طریق افزودن یک عامل فوم کننده، به عنوان

<sup>۱</sup> امیرحسین مولایی (دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، moolaei76@gmail.com)

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول: محمد سیم‌جو (دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، simjoo@sut.ac.ir)

<sup>۳</sup> متین شاهین (دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، matin.shahin97@gmail.com)

مثال، یک سورفکتانت در فاز مایع ایجاد می‌شود [۴]. یکی از عواملی که بر پایداری فوم تاثیر می‌گذارد، شوری محلول است. یون‌های نمک موجود در آب شور، پتانسیل سطحی را در فصل مشترک بین مایع و گاز کاهش می‌دهند. این امر باعث می‌شود که دافعه بین دو لایه گاز-مایع نیز کاهش یابد. کاهش دافعه بین دو لایه در اثر افزایش شوری، سبب تخلیه مایع از فیلم فوم می‌شود [۵]. فعل و انفعالات یونی بین عامل فوم کننده و نمک می‌تواند نحوه رفتار پایداری فوم را تعیین کند. این فعل و انفعالات می‌توانند پایداری فوم را افزایش و یا کاهش دهند [۶]. مطالعات مختلفی در زمینه تاثیر شوری بر روی فوم انجام شده است. بلو و همکاران پایداری فوم را با استفاده از سورفکتانت سدیم آلفا الفین سولفونات و با شوری‌های مختلف آزمایش کردند. نتایج نشان داد که پایداری فوم فقط در شوری کم افزایش می‌یابد و زمانی که میزان نمک از ۲٪ بالاتر می‌رود، پایداری کاهش می‌یابد [۷]. لی و همکاران پایداری فوم را در شرایط دینامیکی برای شوری ۵ تا ۲۵ درصد وزنی کلرید سدیم بررسی کردند. در این مطالعه اتومین به عنوان عامل فوم کننده استفاده شد. بر اساس یافته‌های آنها، فوم حاصله در شوری بالاتر پایداری بهتری از خود نشان داد [۸]. اگرچه شوری بالا به طور کلی باعث کاهش پایداری فوم می‌شود؛ با این حال، در برخی موارد، فعل و انفعالات یونی بین عامل فوم کننده و نمک می‌تواند پایداری فوم را در شرایط شوری بالا تحت تاثیر قرار دهد. از این رو این مطالعه تلاش دارد که با بررسی تاثیر شوری بر روی رفتار جریان فوم در مقیاس میکرومدل، دید مکانیزمی مناسبی در این زمینه ایجاد نماید. همچنین این مطالعه به بررسی عملکرد فوم جهت کنترل هم نوایی گاز تزریقی در شرایط یک میکرومدل لایه ای ناهمگن با شرایط جریان متقاطع نیز پرداخته است. بدین منظور، نتایج آزمایش های تزریق فوم در شرایط دو شوری مختلف (۵۰۰۰ و ۳۵۰۰۰ پی‌پی‌ام از کلریدسدیم) با هم مقایسه شده‌اند. سپس نتایج میکروسکوپی جریان سیال از طریق آنالیز تصاویر میکرومدل مورد بررسی قرار گرفتند.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- طراحی و ساخت میکرومدل

یک میکرومدل دولایه‌ای ناهمگن با اختلاف تراوایی ۲ برابری طراحی و ساخته شد (شکل ۱) تا تأثیر شوری بر رفتار جریان فوم بررسی شود. جزئیات کامل مشخصات میکرومدل دولایه‌ای ناهمگن که در آن لایه‌ها با هم در تماس سیالی هستند در جدول ۱ ارائه شده است. برای ساخت میکرومدل از دو صفحه شیشه‌ای با ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شد. الگوی موردنظر بر روی سطح یکی از صفحات شیشه‌ای با استفاده از دستگاه لیزر حکاکی شده است. سپس دو صفحه شیشه روی هم قرار گرفته و تحت عملیات فرایند دمایی گرم شدند تا محیط متخلخل موردنظر را تشکیل دهند.

جدول ۱- مشخصات میکرومدل

| پارامتر                          | کم‌تراوا | پر تراوا |
|----------------------------------|----------|----------|
| طول (cm)                         | ۸.۱۲     | ۸.۱۲     |
| عرض (cm)                         | ۱.۶      | ۱.۶      |
| عمق (cm)                         | ۰.۰۲     | ۰.۰۲     |
| حجم فضای خالی (cm <sup>3</sup> ) | ۰.۱۱۳    | ۰.۱۴۲    |
| تخلخل (%)                        | ۴۸       |          |



شکل ۱- الگوی میکرومدل

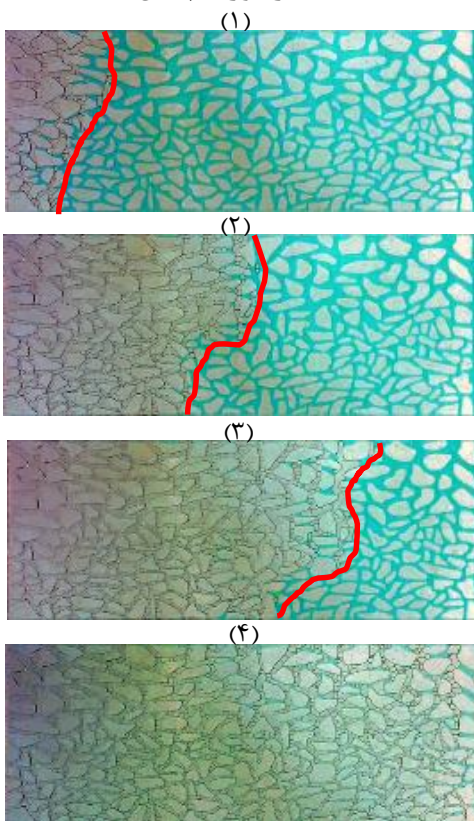
## ۲-۲- مواد و طراحی آزمایش

در این پژوهش، از محلول فوم‌ساز سدیم دودسیل سولفات در آب شور با دو سطح شوری مختلف ۳۵۰۰۰ و ۵۰۰۰ پی‌پی‌ام کلرید سدیم استفاده شد. غلظت عامل فوم ساز برابر با ۰/۳۳ درصد وزنی بود. جهت سهولت در تصویربرداری از میکرومدل، محلول آب‌نمک با متیلن بلو رنگ‌آمیزی گردید. سیستم تزریق شامل دو پمپ سرنگی برای تزریق سیال، دوربین دیجیتال و منبع نور بود. در ابتدای آزمایش، میکرومدل با محلول آب‌نمک رنگی اشباع شد. سپس، سناریوهای تزریق در محیط متخلخل اجرا شدند. دو نوع تزریق فوم با شوری بالا و پایین مورد بررسی قرار گرفتند که به صورت تزریق هم‌زمان گاز (۰/۰۰۶ میلی‌لیتر بر دقیقه) و محلول سورفکتانت (۰/۰۰۲ میلی‌لیتر بر دقیقه) تزریق شدند.

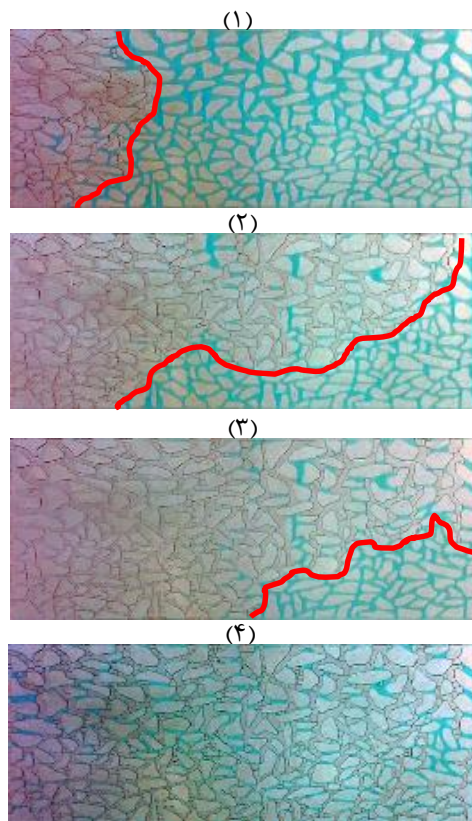
## ۳- نتایج و بحث

در تمامی آزمایش‌های این مطالعه، سمت چپ تصاویر نشان‌دهنده ناحیه ورودی سیستم و سمت راست بیانگر ناحیه خروجی است. باتوجه به شکل ۲ در تزریق فوم با شرایط شوری پایین، فوم به طور موثری جبهه حرکت گاز را کنترل کرد و فوم پایداری (با حباب‌های ریز) در محیط مشاهده شد. این امر نشان می‌دهد که فوم در این شوری به طور کارآمد به حفره‌ها نفوذ می‌کند و منجر به افزایش ویسکوزیته ظاهری فاز گازی و در نتیجه ارتقای کنترل هم‌نوایی جریان گاز در دو لایه شده است. اما در تزریق فوم با شوری بالا، دو جبهه فوم در گستره محیط مشاهده شد. فوم ضعیف که در جلوی جبهه پیشرونده قرار داشته و از حباب‌های درشت‌تر تشکیل شده است. این جبهه عملکرد ضعیف‌تری در کنترل هم‌نوایی جریان گاز داشته و منجر به حضور حداکثری فاز گازی در لایه پرتراوا شد. اما با گذشت زمان، جبهه پایدارتر که عقب‌تر قرار دارد، پیشروی خود را آغاز کرد و وارد نواحی با تراوایی کمتر شده و در نهایت کل محیط را در بر گرفت.

### درشوری پایین



### درشوری بالا



شکل ۲- تصاویر میکرومدل در طول تزریق فوم در دو شوری مختلف در زمانهای مختلف به ترتیب: ۶، ۱۸، ۲۲، ۳۶ دقیقه

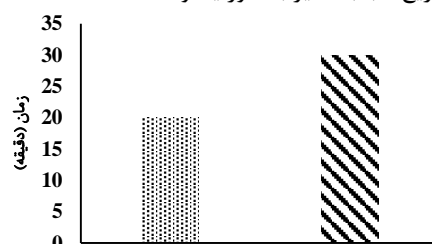


همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در شوری پایین به دلیل تشکیل فوم پایدارتر، زمان میان شکنی گاز افزایش می‌یابد. اما در شوری بالا، تخریب لاملها منجر به تشکیل فوم ناپایدار می‌شود و این فوم ناپایدار به طور موثری نمی‌تواند جبهه گاز را کنترل کند و باعث میان شکنی سریع‌تر گاز می‌شود.

جهت تحلیل بهتر پایداری فوم، شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی از تست بالک در دو سطح شوری متفاوت را نشان می‌دهد. در سطوح شوری بالا، حباب‌های فوم ساختاری ناهمگن دارند، به طوری که اندازه و شکل حباب‌ها به طور قابل توجهی متغیر است. همچنین، توزیع حباب‌ها در سرتاسر نمونه به طور یکنواخت نیست، اما در شوری پایین ساختار حباب‌های فوم یکنواخت و همگن است. اندازه و شکل حباب‌ها در سرتاسر نمونه تقریباً یکسان است و توزیع حباب‌ها نیز به طور یکنواخت است.



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی در تست بالک (سمت راست در شوری بالا، سمت چپ در شوری پایین)



شکل ۳- زمان میان شکنی فوم در دو شوری مختلف

#### ۴- نتیجه گیری

این مطالعه به بررسی رفتار جریان فوم در دو سطح شوری مختلف (۵۰۰۰ و ۳۵۰۰۰ پی‌پی‌ام از کلرید سدیم) در یک محیط متخلخل ناهمگن لایه‌ای پرداخته است. نتایج نشان داد که فوم در شرایط شوری پایین عملکرد مطلوب‌تری برای کنترل هم‌نوایی در فرایندهای تزریق گاز پایه دارد که متعاقباً سبب حضور فوم در هر دو لایه پرتراوا و کم تراوا می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که در شرایط شوری بالا، عملکرد فوم ضعیف‌تر است و جبهه حرکت گاز تزریقی به طور کامل توسط فوم کنترل نمی‌شود. این امر منجر به کنترل هم‌نوایی ضعیف‌تر فاز گاز در بین دو لایه و پیشروی سریع‌تر گاز از لایه پرتراوا می‌شود. با این حال در شرایط شوری پایین، فوم از حباب‌های ریزتری تشکیل شده که این امر باعث افزایش ویسکوزیته ظاهری فاز گاز و در نتیجه کنترل بهتر هم‌نوایی جریان گاز در بین دو لایه می‌شود. این امر منجر به تأخیر در زمان میان شکنی گاز نسبت به شرایط شوری بالا شد. نتایج حاصله از رفتار جریانی فوم در محیط متخلخل با آزمایش بالک فوم نیز هم‌راستا بود به طوری که حباب‌های فوم در شرایط شوری‌های پایین ساختاری منظم و یکنواخت داشتند، در حالی که در شرایط شوری‌های بالا، حباب‌های فوم ساختار ناهمگنی و با سایز بزرگتری داشتند.

#### ۵- منابع

۱. Zhu T, Ogbé D, Khataniar S. Improving the foam performance for mobility control and improved sweep efficiency in gas flooding. *Industrial & engineering chemistry research*. 2004;43(15):4413-21.
۲. Rossen WR, Van Duijn C, Nguyen QP, Vikingstad AK, editors. Injection strategies to overcome gravity segregation in simultaneous gas and liquid injection into homogeneous reservoirs. *SPE Improved Oil Recovery Conference*; 2006: SPE.
۳. Farajzadeh R, Andrianov A, Bruining H, Zitha PL. Comparative study of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> foams in porous media at low and high pressure-temperatures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2009;48(9):4542-52.
۴. Simjoo M, Dong Y, Andrianov A, Talanana M, Zitha P. CT scan study of immiscible foam flow in porous media for enhancing oil recovery. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013;52(18):6221-33.
۵. Obisesan O, Ahmed R, Amani M. The effect of salt on stability of aqueous foams. *Energies*. 2021;14(2):279.
۶. Pandey A, Sinha A, Chaturvedi KR, Sharma T. Experimental investigation on effect of reservoir conditions on stability and rheology of carbon dioxide foams of nonionic surfactant and polymer: Implications of carbon geo-storage. *Energy*. 2021;235:121445.
۷. Bello A, Ivanova A, Cheremisin A. Enhancing N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> foam stability by surfactants and nanoparticles at high temperature and various salinities. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022;215:110720.
۸. Le L, Ramanathan R, Nasr-El-Din H, editors. Evaluation of an ethoxylated amine surfactant for CO<sub>2</sub>-foam stability at high salinity conditions. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference; 2019: SPE.

# Effect of Salinity on Foam Flow Behavior for Conformance Control in Gas-Based Injection Processes: A Micro-scale Study

<sup>1</sup>Amirhossein Molaei, <sup>2\*</sup>Mohammad Simjoo, <sup>3</sup>Matin Shahin

## Abstract:

Foam injection is an effective technique for enhancing the performance of gas-based processes in porous media. However, brine salinity is one of the factors that can significantly impact foam performance for subsurface applications. This study investigates the flow performance of foam generated using sodium dodecyl sulfate (SDS) as a foaming agent in two brine salinity levels (5000 and 35000 ppm NaCl) within a heterogeneous layered porous medium. A glass micromodel consisting of two layers with different permeabilities and fluid connectivity was used to conduct the experiments. The results revealed that the foam formed under low salinity conditions exhibited smaller bubbles, leading to increased apparent viscosity and consequently better control of gas phase mobility in both layers. The formation of a stable foam effectively controlled gas flow conformance in the high-permeability layer, resulting in the foam front advancing through both low-permeability and high-permeability layers. In contrast, under high salinity conditions, foam bubbles were larger and less stable, leading to faster gas phase breakthrough in the high-permeability layer and consequently reducing the effectiveness of foam injection for conformance control. The findings of this study demonstrate the superior performance of foam under low salinity conditions for conformance control in gas injection processes in a heterogeneous layered system. This can lead to improved sweep efficiency of the injected gas in the porous medium.

## Keywords:

Foam, Layered Micromodel, Mobility, Conformance Control, Salinity

---

<sup>1</sup> Amirhossein Molaei (Faculty of Petroleum Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, [moolaei76@gmail.com])

<sup>2\*</sup> Corresponding author: Mohammad Simjoo (Faculty of Petroleum Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, [simjoo@sut.ac.ir])

<sup>3</sup> Matin Shahin (Faculty of Petroleum Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, [matin.shahin97@gmail.com])



## تأثیر ثابت زمانی و پیچیدگی فضای منفذی بر روی ضریب جابجایی برای

### جریان سیالات غیر نیوتنی در محیط متخلخل

مهدی امیری<sup>۱\*</sup>؛ جعفر قاجار<sup>۲</sup>؛ علی قاسمی نژاد رایینی<sup>۳</sup>

#### چکیده

جریان سیال غیر نیوتنی در محیط متخلخل نظیر جریان پلیمری در مخازن نفتی و سیستم‌های آب زیرزمینی، چالش‌های پیچیده‌ای را به دلیل رفتار رئولوژیکی پیچیده سیالات در ساختارهای منافذ پرپیچ‌وخم ایجاد می‌کند. این پژوهش، یک شبیه‌ساز جریان در مقیاس منفذی را بر اساس کتابخانه منبع باز OpenFOAM معرفی می‌کند که برای مدل‌سازی جریان نازک‌کننده برشی در محیط متخلخل طراحی شده است. با استفاده از این حل‌گر توسعه‌یافته، شبیه‌سازی‌های جریان در مقیاس منفذی بر روی تصاویر میکروسکوپی از محیط‌های متخلخل مختلف واقعی با پیچیدگی‌های متفاوت برای مدل Cross-fluid انجام می‌شود. هدف ما بررسی انحراف ویسکوزیته توده سیال بدون و با حضور محیط متخلخلی باشد که معمولاً با پارامتری تحت عنوان ضریب جابجایی (shift factor) مشخص می‌شود. ما یک ارزیابی عمیق از نحوه وابستگی ضریب جابجایی به ثابت زمانی سیال و پیچیدگی فضای منافذ سنگ ارائه می‌کنیم. تأثیر ثابت زمانی بر ضریب جابجایی بسیار اندک است. یافته‌های ما نشان می‌دهند که چگونه ضریب جابجایی بر اساس پیچیدگی، طول منافذ مشخصه، و توان سیمانی شدن نوسان می‌کند. به طور خاص، سیستم‌های متخلخل/نفوذ کمتر با طول منافذ مشخصه کوچک‌تر، به دلیل تغییرات بالاتر نرخ برش و ویسکوزیته موضعی در مسیرهای جریان باریک‌تر، ضریب جابجایی‌های بزرگ‌تری را نشان می‌دهند. علاوه بر این، با افزایش پیچ و خم و ناهمگن شدن سنگ، ضریب جابجایی افزایش می‌یابد.

#### کلیدواژه‌ها

جریان غیر نیوتنی، محیط متخلخل، ضریب جابجایی، ثابت زمانی، پیچیدگی فضای منفذی

#### ۱. مقدمه

جریان سیالات غیر نیوتنی در محیط‌های متخلخل به دلیل طیف وسیعی از کاربردهای آن در زمینه‌های زیست‌شناسی، علوم زمین و مهندسی مورد توجه جدی دانشمندان و مهندسان است [۱]. از کاربردهای مهندسی مهم جریان سیال غیر نیوتنی در محیط متخلخل می‌توان به افزایش بازیافت نفت در صنعت نفت و نیز بهبود منابع آب زیرزمینی اشاره کرد. بهبود در بازیافت نفت ممکن است با تزریق آب مخلوط با سیالات پلیمری حاصل شود که منجر به رئولوژی غیر نیوتنی می‌شود [۲، ۳، ۴]. علاوه بر مواد پلیمری در صنعت نفت از مواد غیر نیوتنی زیادی استفاده می‌شود. به عنوان مثال گل حفاری به عنوان روان‌کننده استفاده می‌شود.

<sup>۱</sup> بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، [mehdiamiri.put83@yahoo.com](mailto:mehdiamiri.put83@yahoo.com)

\* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، [jqajar@shirazu.ac.ir](mailto:jqajar@shirazu.ac.ir)

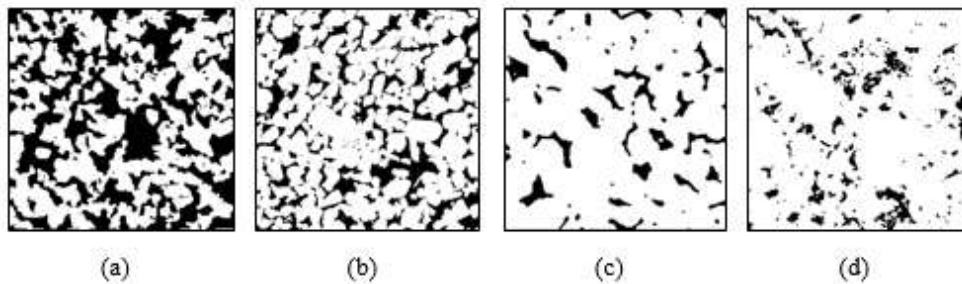
بخش علوم زمین، دانشگاه اوترخت، اوترخت، هلند [j.qajar@uu.nl](mailto:j.qajar@uu.nl)

<sup>۳</sup> بخش مهندسی و علوم زمین، دانشگاه امپریال کالج، لندن، انگلستان [a.q.raeini@gmail.com](mailto:a.q.raeini@gmail.com)

## ۲. مواد و روش ها

### ۱.۲. توصیف تصاویر $\mu$ -CT

شبهه‌سازی‌های جریان نیوتنی و غیرنیوتنی روی تصاویر فضای منافذ وکسل شده سه‌بعدی چهار نمونه موجود در وبسایت امپریال کالج لندن [۵] انجام شد. نام و مشخصات نمونه‌ها در شکل ۱ و جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: نمونه‌هایی از تصاویر دوبعدی binarized شده (a) synthetic silica A1 (b) Bentheimer sandstone (c) sandstone (d) S1 Estaillasses carbonate

- در این مطالعه، ویژگی‌های زیر را به عنوان شاخص پیچیدگی منافذ محیط در نظر می‌گیریم:
- ریشه دوم نفوذپذیری ( $\sqrt{k}$ ) که مقیاس طول مشخصه معمول یک محیط متخلخل است.
  - حاصلضرب ضریب تشکیل و تخلخل،  $F \cdot \phi$ . معیاری از پیچش (tortuosity) الکتریکی یک محیط متخلخل است.
  - توان سیمانی،  $m_c$ . از معادله Archi تعیین می‌شود:  $F = \phi^{-m_c}$

جدول ۱: خواص تصویر و پارامترهای محاسبه شده از شبهه‌سازی جریان نیوتنی تک فاز

| Sample               | Image size (voxels) | Voxel size ( $\mu\text{m}$ ) | $\phi$ (-) | $k$ (D) | $F$ (-) | Characteristic length ( $\mu\text{m}$ ) <sup>*</sup> | $F \cdot \phi$ | $m_c$ <sup>†</sup> |
|----------------------|---------------------|------------------------------|------------|---------|---------|--|----------------|--------------------|
| Synthetic silica A1  | 300×300×300         | 3.85                         | 0.428      | 9.316   | 4.439   | 3.302  | 1.899          | 1.756              |
| Bentheimer Sandstone | 400×400×400         | 3.0035                       | 0.215      | 3.621   | 14.792  | 1.891  | 3.187          | 1.755              |
| S1                   | 300×300×300         | 8.683                        | 0.141      | 2.645   | 36.348  | 1.616  | 5.107          | 1.831              |
| Estaillasses         | 400×400×400         | 3.31136                      | 0.081      | 0.289   | 150.310 | 0.534  | 12.209         | 1.997              |

<sup>\*</sup> computed by  $\sqrt{k}$

<sup>†</sup>  $m_c = -\log(F)/\log(\phi)$

### ۲.۲. شبهه‌سازی جریان در مقیاس منافذ و توسعه حل کننده

ما از بسته نرم افزاری poreFoam [۶] جهت بدست آوردن تراوایی سیالات نیوتونی استفاده می‌کنیم. حل کننده poreFoam یک نرم‌افزار CFD منبع باز مبتنی بر کتابخانه حجم محدود OpenFOAM است. همچنین برای سیالات غیرنیوتونی این حل کننده اصلاح و استفاده شده است.

شبهه‌سازی جریان در مقیاس منافذ برای چندین گرادیان فشار در سراسر نمونه انجام شد. از شبهه‌سازی‌ها، سرعت سطحی را از داده‌های ورودی افت فشار ماکروسکوپی ( $\Delta p$ ) در دامنه‌ای به طول  $L$  به دست آوردیم. ما

فقط داده‌ها را روی محور X در نظر گرفتیم. برای تعیین ضریب جابجایی، روش زیر در این مطالعه استفاده شد:

۱. نفوذپذیری محیط متخلخل، k، با قانون دارسی با استفاده از داده‌های سرعت سطحی و افت فشار ارائه شده از شبیه‌سازی جریان در مقیاس منفذی برای سیالات نیوتنی به دست می‌آید.

۲. شبیه‌سازی جریان سیالات غیر نیوتنی انجام می‌شود و  $\mu_{pm}$  از معادله (۱) تعیین می‌شود.

۳. ضریب جابجایی بر حسب داده‌های شبیه‌سازی  $\mu_{pm}$  (از مرحله ۲)، سرعت جریان (u)، نفوذپذیری نمونه (k) و تخلخل ( $\phi$ ) و شاخص (n) power law، محاسبه می‌شود. ما از نرم افزار CurveExpert به منظور برازش منحنی استفاده کردیم.

$$(1) \quad \mu_{pm}(\dot{\gamma}_{pm}) = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{\left[1 + m^n \left(\alpha \frac{u}{\sqrt{k\phi}}\right)^n\right]} \quad \text{مدل cross fluid}$$

### ۳. نتایج

جدول ۲ پارامترهای مدل cross fluid مورد استفاده در شبیه‌سازی جریان در pore scale را نشان می‌دهد. مقادیر عددی پارامترهای این مدل بر اساس داده‌های گزارش شده در تحقیقات پیشین محلول‌های Xanthan gum انتخاب شدند [۲، ۷].

جدول ۲: مقادیر پارامترها در مدل‌های قانون قدرت و سیال متقاطع سیالات نازک‌کننده برشی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های ما

| Rheological model | K<br>(Pa.s <sup>n</sup> ) | $\mu_{\infty}$<br>(Pa.s) | $\mu_0$<br>(Pa.s) | m<br>(-) | n<br>(-) |
|-------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------|----------|----------|
| Cross-fluid model | -                         | 0.001                    | 3.52              | 10.1     | 0.1      |
|                   |                           |                          |                   | 1        | 0.1      |
|                   |                           |                          |                   | 5        |          |
|                   |                           |                          |                   | 10.1     |          |
|                   |                           |                          |                   | 20       |          |

### ۱.۳. تاثیر ثابت زمانی بر ضریب جابجایی

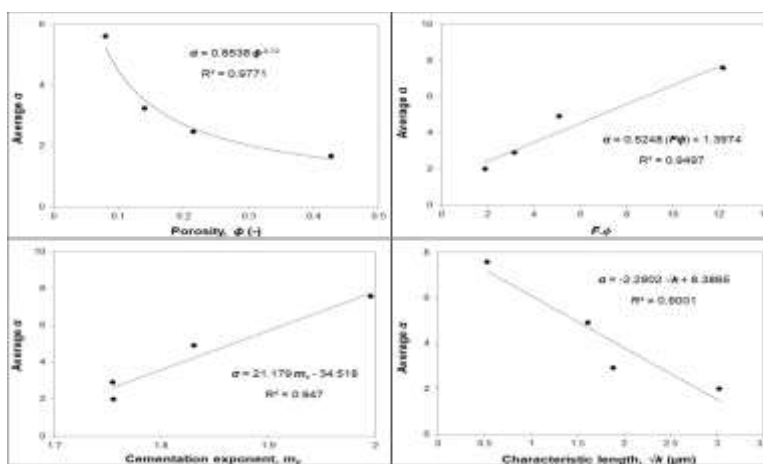
جدول ۳ مقادیر محاسبه شده ضریب جابجایی را برای مقادیر مختلف ثابت زمانی، برای مدل cross fluid نشان می‌دهد.

جدول ۳: ضریب جابجایی تخمینی ( $\alpha$ ) از برازش منحنی برای مقادیر مختلف ثابت زمانی برای مدل cross fluid. ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) برای همه موارد نیز گزارش شده است

| m    | Synthetic silica A1 |                | Bentheimer |                | Sandstone S1 |                | Estailades |                |
|------|---------------------|----------------|------------|----------------|--------------|----------------|------------|----------------|
|      | $\alpha$            | R <sup>2</sup> | $\alpha$   | R <sup>2</sup> | $\alpha$     | R <sup>2</sup> | $\alpha$   | R <sup>2</sup> |
| 1    | 2.5889              | 0.9975         | 3.3399     | 0.9978         | 8.4393       | 0.9929         | 9.5139     | 0.9974         |
| 5    | 2.4520              | 0.9981         | 3.2115     | 0.9980         | 7.7077       | 0.9942         | 9.1735     | 0.9979         |
| 10.1 | 2.4493              | 0.9980         | 3.2312     | 0.9980         | 7.3645       | 0.9950         | 9.0683     | 0.9984         |
| 20   | 2.3820              | 0.9981         | 3.1829     | 0.9980         | 7.1623       | 0.9964         | 9.0046     | 0.9985         |

### ۲,۳. تاثیرات پیچیدگی منافذ سنگ بر ضریب جابجایی

استفاده از شبیه‌سازی‌های جریان در مقیاس منافذ، فرصتی منحصر به فرد برای ارزیابی پارامترهای کلیدی مؤثر بر پیچیدگی فضای حفره‌ها و تأثیر آنها بر ضریب جابجایی، که معمولاً از طریق روش‌های سنتی مانند آزمایش‌های آزمایشگاهی غیرقابل دسترس است، فراهم می‌کند. شکل ۲ تغییرات را برای مدل cross fluid برجسته می‌کند.



شکل ۲. تغییرات میانگین ضریب جابجایی به عنوان توابع تخلخل، حاصلضرب ضریب تشکیل و تخلخل (به عنوان نشانه پیچ خوردگی منافذ)، توان سیمانی، و طول منافذ مشخصه برای مدل cross fluid

### ۴. نتیجه‌گیری

- ✓ **تأثیر ثابت زمانی:** ویسکوزیته محیط متخلخل با افزایش ثابت زمانی در تمام نرخ‌های برشی کاهش می‌یابد. همچنین تأثیر ثابت زمانی بر روی ضریب جابجایی بسیار ناچیز می‌باشد.
- ✓ **تأثیر تخلخل:** یک همبستگی منفی واضح بین ضریب جابجایی و تخلخل وجود دارد. با افزایش تخلخل، ضریب جابجایی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.
- ✓ **نقش Tortuosity:** پیچ خوردگی بیشتر با افزایش ضریب جابجایی مطابقت دارد. این به ویژه برای نمونه کرنات Estailades مشهود است.
- ✓ **تأثیر توان سیمانی:** روند افزایشی در نمای سیمانی شدن باعث افزایش ضریب جابجایی می‌شود و به این واقعیت اشاره می‌کند که نمونه‌هایی که ناهمگونی بیشتر و کاهش اتصال فضای منافذ را نشان می‌دهند، ضریب جابجایی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.
- ✓ **تأثیر طول منافذ مشخصه:** سنگ‌هایی که با طول منافذ کوچکتر مشخص می‌شوند (مشابه با نفوذپذیری کمتر) ضریب جابجایی بزرگتری را نشان می‌دهند.

## ۵. فهرست مراجع

- [1] Shabro V, Torres-Verdín C, Javadpour F, Sepehrnoori K (2012) Finite-difference approximation for fluid-flow simulation and calculation of permeability in porous media *Transport in porous media* 94:775-793.
- [2] Lopez, X., Valvatne, P. H., & Blunt, M. J. (2003). Predictive network modeling of single-phase non-Newtonian flow in porous media. *Journal of Colloid and Interface Science*, 264(1), 256-265.
- [3] Sorbie, K. S., Clifford, P. J., & Jones, E. R. W. (1989). The rheology of pseudoplastic fluids in porous media using network modeling. *Journal of Colloid and Interface Science*, 130(2), 508-534.
- [4] Tosco, T., Marchisio, D. L., Lince, F., & Sethi, R. (2013). Extension of the Darcy–Forchheimer law for shear-thinning fluids and validation via pore-scale flow simulations. *Transport in Porous Media*, 96(1), 1-20.
- [5] <https://www.imperial.ac.uk/earth-science/research/research-groups/pore-scale-modelling/micro-ct-images-and-networks/>
- [6] Raeini, A. Q., Blunt, M. J., & Bijeljic, B. (2012). Modelling two-phase flow in porous media at the pore scale using the volume-of-fluid method. *Journal of Computational Physics*, 231(17), 5653-5668. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcp.2012.04.011>
- [7] Sochi, T. (2010). Non-Newtonian flow in porous media. *Polymer*, 51(22), 5007-5023.

## **Benchmarking the potential of Super-Resolution Convolutional Neural Networks in Improving the Resolution of Digital Rock Images**

Pouya Sadeghi<sup>1</sup>, Abolfazl Moslemipour<sup>1,2</sup>, Saeid Sadeghnejad<sup>1,2</sup>, Frieder Enzmann<sup>2</sup>, Michael Kersten<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Petroleum Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Teheran, Iran

<sup>2</sup> Geosciences Institute, Johannes Gutenberg-University, Mainz 55099, Germany

### **Abstract**

The ultimate objective of digital rock physics is to accurately predict rock properties. However, the resolution of rock images obtained from imaging techniques often involves a trade-off between image resolution and field of view (FoV) (Bai, Berezovsky et al. 2020, Sadeghnejad, Enzmann et al. 2021). The presence of heterogeneous rocks presents a significant challenge in accurate modeling due to the need to capture information at various scales. Various multi-scale modeling approaches have been employed to address this issue. In response, alternative methods have been explored to reconstruct rock images using advanced artificial intelligence algorithms, such as artificial neural networks. These state-of-the-art methods offer improved connectivity features in final images, reduced computational costs, and the ability to incorporate large-scale heterogeneities into reconstructed structures (Da Wang, Armstrong et al. 2019). However, it is crucial to recognize the challenges associated with these approaches. Super-resolution (SR) methods have emerged as a prominent solution to enhance resolution (Da Wang, Shabaninejad et al. 2021). Super resolution (SR) is an eminent system in the field of computer vision and image processing to improve the visual perception of the poor-quality images (Lepcha, Dawa Chyophel, et al. 2023).

This research aims to evaluate the speed and accuracy of deep learning methods, specifically the SR-Convolutional Neural Network (SRCNN), its modified counterpart, and the Fast-SRCNN (FSRCNN). The dataset for model evaluation consisted of a Berea sandstone sample that was scanned at the DESY PETRA-III X-ray synchrotron light source in Hamburg, Germany. In this study, an SRCNN architecture underwent two significant modifications (referred to as transient architectures) to transform into an FSRCNN architecture. Firstly, an additional deconvolution layer was integrated into the last layer of the network, enabling direct mapping between input and output images and eliminating the need for pre-processing on Low-Resolution (LR) images.



Secondly, a mapping layer was formulated to compress and expand input features to enhance the mapping process. Lastly, smaller-sized filters with additional mapping layers were employed.

The results demonstrate that the FSRCNN surpasses the SRCNN and all transient architectures in terms of speed and resolution enhancement, achieving a significant improvement of over 20 times. Additionally, the petrophysical properties of super-resolved images generated by FSRCNN, SRCNN, and the modified architectures, as well as the HR images, were calculated. The porosity and permeability of the digital twins reconstructed by the FSRCNN exhibit similar values to HR images, underscoring the superiority of the FSRCNN approach in accurately capturing the intricate details of digital rocks and enhancing the reliability of subsequent petrophysical analysis.

**Keywords:** Digital Rock Physics; Super Resolution; Convolutional Neural Network; Petrophysical Analysis; Accuracy, Speed

## References

- Bai, Y., V. Berezovsky and V. Popov (2020). Super Resolution for Digital Rock Core Images via FSRCNN. Proceedings of the 2020 4th High Performance Computing and Cluster Technologies Conference & 2020 3rd International Conference on Big Data and Artificial Intelligence.
- Da Wang, Y., R. T. Armstrong and P. Mostaghimi (2019). "Enhancing resolution of digital rock images with super resolution convolutional neural networks." Journal of Petroleum Science and Engineering **182**: 106261.
- Da Wang, Y., M. Shabaninejad, R. T. Armstrong and P. Mostaghimi (2021). "Deep neural networks for improving physical accuracy of 2D and 3D multi-mineral segmentation of rock micro-CT images." Applied Soft Computing **104**: 107185.
- Sadeghnejad, S., F. Enzmann and M. Kersten (2021). "Digital rock physics, chemistry, and biology: challenges and prospects of pore-scale modelling approach." Applied Geochemistry **131**: 105028.
- Lepcha, Dawa Chyophel, et al. "Image super-resolution: A comprehensive review, recent trends, challenges and applications." *Information Fusion* 91 (2023): 230-260.

# مطالعه شبیه سازی لحاظ ناهمسانگردی ناشی از وجود شکستگی های مایل در محیط متخلخل شکافدار

محمد زارع ارزنه ئی<sup>۱</sup>؛ محسن مسیحی<sup>۲</sup>

## چکیده

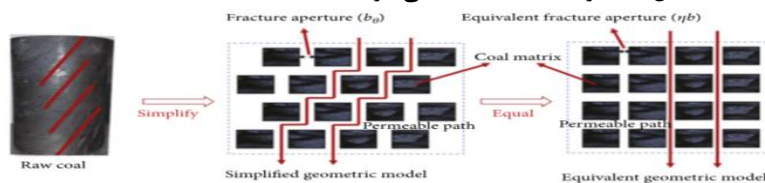
وجود شکستگی ها در سنگ های شکافدار الزام بکارگیری روش های عددی مناسبی را برای در نظر گرفتن اثرات آنها ایجاب می کند. رویکرد متعارف در شبیه سازی مخازن شکافدار استفاده از مدل وارن و روت است. که شرایط همگن را برای سنگ فرض می کند. در واقعیت وجود مخازن ناهمگن با خصوصیت های پیچیده باعث انحراف زیاد در نتایج مدل های پایه با نتایج داده های میدانی می شود. در این کار به بررسی نحوه لحاظ ناهمسانگردی ناشی از وجود شکستگی های مایل نسبت به جهت جریان با رویکرد عددی پرداخته می شود. یک روش لحاظ کردن این عامل، در نظر گرفتن ضریب تصحیح موثر برای تعمیم رویکرد وارن روت می باشد. مدل سازی در نرم افزار COMSOL Multiphysics انجام می شود که با بکارگیری مدل های تک فاز و دو فاز بررسی شده است. نتایج شبیه سازی تحت شرایط مرزی و خواص سنگ و سیال یکسان نشان می دهد که ضرایب شکست تصحیح معادل متفاوتی برای شکستگی های با زوایای مختلف بدست می آید. بررسی فشار سیال درون شبکه شکاف نشان می دهد که این ضریب معادل وابسته به زاویه شکاف، شکل ماتریکس، اندازه ماتریکس و چگالی شکاف است. نتایج این تحقیق می تواند در شبیه سازی درست سنگ های شکافدار هتروژن بکار گرفته شود.

## کلمات کلیدی

1- بازشدگی شکاف معادل 2-مدل وارن-روت 3-شکاف مایل 4- جریان دو فازی

## 1. مقدمه

مخازن نفتی و به خصوص مخازن شکافدار با ادامه تولید دچار افت فشار و کاهش تولید شده و برای برنامه ریزی توسعه آنها و بکارگیری روش های تثبیت فشار و ازدیاد برداشت نیاز به مدل سازی درست آنها می باشد. وجود شکستگی های موجود در سنگ با اندازه-جهت-وطبیعت مختلف نیازمند در نظر گرفتن رویکرد مناسب برای مدل سازی و شبیه سازی آنهاست. رویکرد متعارف و البته ساده در مدل سازی چنین مخازنی استفاده از مدل وارن - روت [1] برای شبیه سازی جریان تک فاز و تعمیم یافته آن برای شبیه سازی جریان چندفازی است. در این مدل ماتریکس به شکل مکعب و یکنواخت و شکستگی هایی فاصله بین آنهاست. محدودیت های این مدل برای بکارگیری در مخازن ناهمگن با خصوصیات پیچیده مانند ناهمسانگردی باعث انحراف های زیادی در نتایج آن با داده های میدانی می گردد. یک روش لحاظ کردن ناهمسانگردی در خواص جریانی سنگ ناشی از حضور شکاف های مایل (نسبت به جهت جریان) بر اساس نظر یانگ و همکارانش [2] استفاده از مقدار موثر باز شدگی شکاف در مدل سازی وارن روت است. همچنین ژانگ کی و همکارانش [3] با استفاده از این رویکرد به بررسی مخازن گازی با بستر ذغال سنگی پرداخته که مشخص شده مقدار باز شدگی شکاف معادل، تاثیر قابل توجهی بر پیش بینی تولید گاز دارد (شکل 1). در این پروژه با توجه به این رویکرد و بر مبنی مدل وارن روت به این پرداخته می شود که یک مدل وارن روت بهبود یافته ایجاد شود که با در نظر گرفتن باز شدگی شکاف معادل، اثر ناهمگنی ناشی از جهت گیری مایل شکاف ها در نظر گرفته شود در این کار پژوهشی از این روش بهره جسته و با بکار گیری شبیه سازی عددی در محیط نرم افزار COMSOL Multiphysics به بررسی عوامل موثر بر این ضریب اصلاحی زاویه شکاف، ابعاد ماتریس، شکل ماتریکس و چگالی شکاف ها پرداخته می شود. برای این کار از مدل سازی جریان تک فازی و جریان دوفازی در محیط متخلخل به همراه شکاف استفاده می گردد.



<sup>1</sup> دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [mohammadzareee1379@gmail.com](mailto:mohammadzareee1379@gmail.com)

<sup>2</sup> دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [masihi@sharif.edu](mailto:masihi@sharif.edu)

شکل 1: (چپ) مغزه با شبکه شکاف مایل (وسط) مدل وارن روت با تغییرات موقعیت ماتریکس ها برای لحاظ نمودن جهت شکافها (راست) مدل وارن روت با اندازه بازشدگی مختلف برای لحاظ

نمودن ناهمسانگردی [3]

## 2. مبانی نظری و مدل سازی

در این بخش به بررسی برخی مبانی نظری در مورد مدل پایه و فرضیات آن و روابط موجود و روش شبیه سازی مدل پرداخته می شود.

### 1.2 مدل پایه

در مدل وارن روت فرض شده است که شبکه شکافها در سه راستا در جهت های عمود بر هم قرار گرفته و لذا سنگ دارای تخلخل همگن و همسانگرد است در این مدل ماتریکس به صورت به صورت یک متوازی الاضلاع مستطیل شکل به صورت تصویر سمت راست شکل (1) می باشد. تخلخل ثانویه ناشی از وجود شکاف، در یک سیستم شبکه شکاف متعامد قرار دارد که موازی یکی از محور های اصلی مختصات می باشد. مجموع تخلخل اولیه و ثانویه همگن بوده ولی با فرض ماتریکس های غیر مکعبی می تواند ناهمسانگرد باشد. همچنین در مدل ساده تخلخل دوگانه که اکثر مواقع بکار می رود فرض شده که جریان بین ماتریکس و شکاف رخ می دهد ولی بین دو ماتریکس رخ نمی دهد.

### 2.2 بازشدگی شکاف، تخلخل و تراوایی معادل

تخلخل کل سیستم (با در نظر گرفتن شکاف ها) را می توان برای مدل وارن روت با رابطه (1) محاسبه کرد.

$$\varphi = \frac{(b+s)^3 - s^3}{(b+s)^3} = \frac{3b}{s} \quad (1)$$

$b$  بازشدگی شکاف،  $s$  ارتفاع بلاک ماتریکس،  $\varphi$  تخلخل سیستم است.

اگر مدل وارن روت را حالت اولیه یا پایه در نظر گرفته شود بازشدگی شکاف معادل را می توان با در نظر گرفتن یک ضریب تصحیح برای سایر مدل های ناهمسانگرد به صورت رابطه (2) تعریف کرد

$$b_{\theta} = \eta b \quad (2)$$

$b$  بازشدگی شکاف در مدل پایه وارن روت،  $b_{\theta}$  بازشدگی شکاف در یک سیستم ناهمسانگرد با حالت شکاف با زاویه  $\theta$  نسبت به جریان و  $\eta$  ضریب تصحیح معادل سازی شده می باشد.

از آنجاییکه تغییر بازشدگی موثر سبب تغییر در مقادیر تخلخل کل و تراوایی شکاف می شود. لذا می تواند مبتایی برای لحاظ کردن اثر ناهمسانگردی سیستم جدید گردد با توجه به رابطه خطی بین تخلخل و بازشدگی شکاف مطابق با رابطه (1)، ضریب تصحیح معادل بر تخلخل هم به صورت زیر اثر می گذارد:

$$\varphi_{\theta} = \frac{3b_{\theta}}{s} = \frac{3\eta b}{s} = \eta \varphi \quad (3)$$

$\varphi_{\theta}$  تخلخل سیستم در حالت شکاف با زاویه  $\theta$  است.

از طرفی دیگر از آنجاییکه مطالعات آزمایشگاهی نشان می دهد که تراوایی با تخلخل یک رابطه درجه سوم به صورت رابطه (4) دارند لذا تاثیر ضریب تصحیح معادل بر تراوایی نیز به صورت زیر تعیین می گردد. [4]

$$\frac{k_{\theta}}{k} = \left(\frac{\varphi_{\theta}}{\varphi}\right)^3 \rightarrow k_{\theta} = \eta^3 k \quad (4)$$

$k_{\theta}$  تراوایی سیستم در حالت شکاف با زاویه  $\theta$  است. لذا به کمک روابط 3 و 4 برای تخلخل و تراوایی سیستم جدید می توان با انجام شبیه

سازی عددی مناسب عملکرد دینامیک چنین سیستمی را با عملکرد مدل پایه وارن روت مقایسه و از این طریق مقادیر ضریب تصحیح را تعیین نمود. در ادامه با استفاده از معادلاتی که در بخش 3.2 آورده شده مدل سازی و شبیه سازی جریان در این دو مدل انجام می شود.

### 3.2 رویکرد شبه سازی جریان

با توجه به اینکه مدل سازی براساس، مدل تخلخل دوگانه صورت می گیرد و با فرض برقراری رابطه داری در محیط متخلخل، معادلات

زیر برای محیط شکاف و ماتریکس برقرار می باشد. [5]

ماتریکس

$$f_M \left( \rho S_{pM} \frac{\partial p_M}{\partial t} + \nabla(\rho u_M) \right) = f_M Q_M - Q_{ip} \quad (5)$$

$f_M$  نسبت حجم سیال موجود در ماتریکس به حجم کل سیستم ،  $\rho$  چگالی سیال ،  $S_{pM}$  رابطه ذخیره سیال در ماتریکس ،  $p_M$  فشار سیال در ماتریکس ،  $u_M$  سرعت سیال درون ماتریکس (رابطه داریسی  $u_M = \frac{k}{\mu} \nabla p_M$ ) ،  $Q_M$  ترم سورس و سینک سیال از ماتریکس و  $Q_{ip}$  میزان سیال انتقالی بین ماتریکس و شکاف که از رابطه 7 محاسبه می شود .

شکاف

$$(1 - f_M) \left( \rho S_{pf} \frac{\partial p_f}{\partial t} + \nabla(\rho u_f) \right) = (1 - f_M) Q_f - Q_{ip} \quad (6)$$

$$Q_{ip} = \alpha_w (p_M - p_m) \quad (7)$$

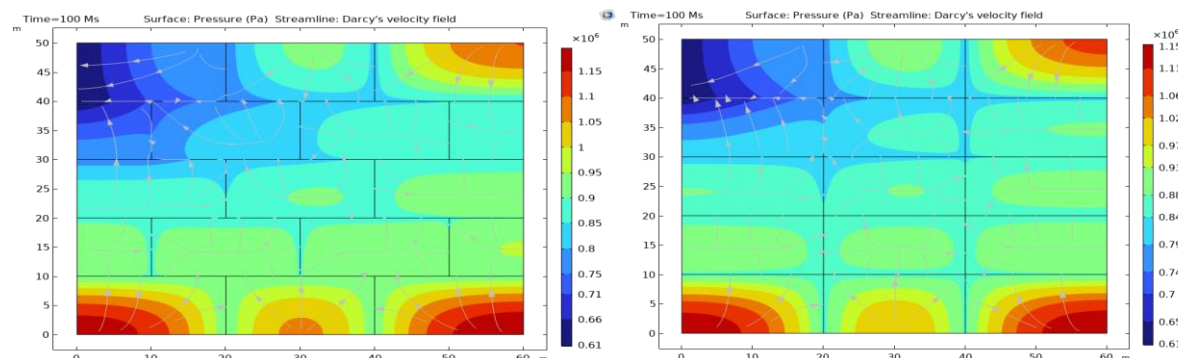
$\alpha_w$  تابع انتقال سیال می باشد.

$S_{pf}$  رابطه ذخیره سیال در شکاف ،  $p_f$  فشار سیال در شکاف ،  $u_f$  سرعت سیال درون شکاف (رابطه داریسی  $u_f = \frac{k}{\mu} \nabla p_f$ ) ،  $Q_f$  ترم سورس و سینک سیال از شکاف .

برای حل معادلات (5) و (6) و شبیه سازی مدل گفته شده از نرم افزار COMSOL Multiphysics استفاده شده است . از فیزیک Darcy این نرم افزار برای مدل سازی جریان تک فاز درون محیط شکاف و ماتریکس استفاده شده است که شبکه شکاف با استفاده از شرایط مرزی موجود در این فیزیک با نام fracture تعریف می شود. برای مدل سازی جریان دوفازی هم از فیزیک Multiphase flow in porous media استفاده شده که در فیزیک از ترکیب فیزیک Darcy و Phase transport in porous media بدست می آید.

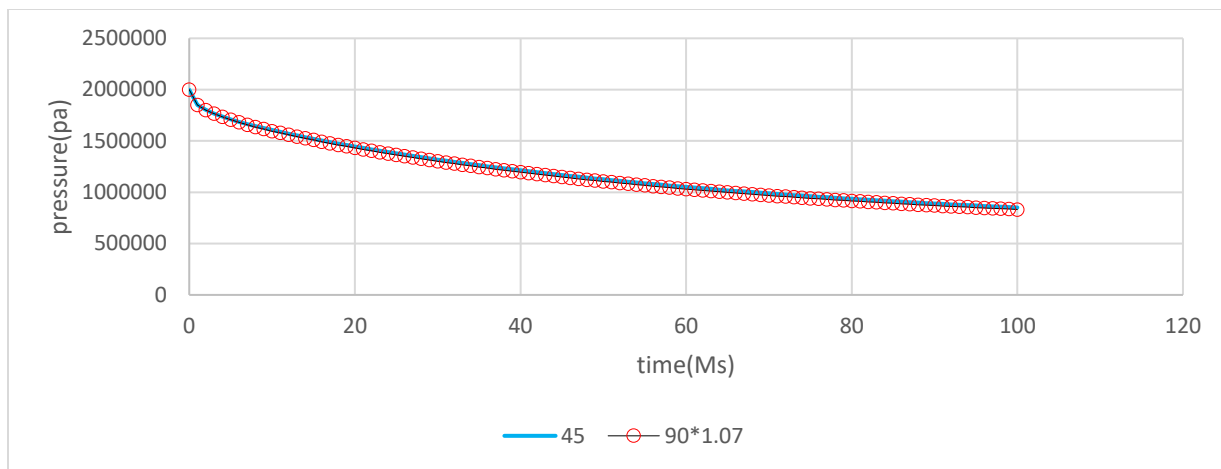
برای مدل سازی جریان تک فاز ، یک مخزنی با ارتفاع 50 و طول 60 متر در نظر گرفته شده که دارای فشار اولیه 2 مگاپاسکال می باشد. چاه حفر شده به اندازه 10 متر آن مشبک کاری شده و فشار دیواره چاه به اندازه 6 اتمسفر در نظر گرفته شده است. چگالی و گرانیوی سیال به ترتیب 1000 کیلو گرم بر متر مکعب و 1 سانتی پواز در نظر گرفته شده . تخلخل ماتریکس 12 درصد بوده و تراوایی آن 0.1 میلی داریسی می باشد برای شکاف این مقادیر به ترتیب 1 و 10000 میلی داریسی در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار پایه بازشدگی شکاف 1 سانتی متر می باشد.

در ادامه نتایج مدل سازی با پارامترهای بالا و فرض بلوک های ماتریکس به اندازه 10 در 20 متر و زاویه شکاف 45 درجه آورده شده است:



شکل 2: تصویر توزیع فشار در محیط متخلخل برای مدل وارن روت (سمت راست) و مدل شکاف با زاویه 45 درجه (سمت چپ)

در شکل 2 تصویر سمت راست معادل تصویر سمت چپ بوده چرا که در آن مقدار بازشدگی شکاف معادل در نظر گرفته شده است که این بازشدگی از روی تطابق نتایج فشار متوسط محاسبه شده است به این صورت که فشار در نقطه وسط همه شکاف ها محاسبه شده و برای آن زمان خاص (مثلا 100 روز) از این فشار ها متوسط گیری می شود و این کار برای تمام زمان ها تکرار می شود. برای این دو مدل فشار از 0.69 مگا پاسکال تا 2 مگا پاسکال متغیر می باشد و مقادیر میانگین فشار در هر زمان در شکل 3 رسم شده است . مقدار ضریب معادل سازی بازشدگی شکاف در این مورد 1.07 بدست آمد. شکل 3 مقایسه منحنی های فشار برای این دو مدل (مدل پایه و مدل ناهمسانگرد) مشاهده می شود. تطابق نتایج بخوبی عملکرد ضریب تصحیح در مدل جدید را نشان می دهد.



شکل 3: منحنی تطابق فشار متوسط شکاف برای مدل 90 درجه اصلاح شده و 45 درجه

در ادامه این کار برای زوایای دیگر شکاف مانند 20، 30 و 60 درجه انجام و ضرایب تصحیح در هر مورد محاسبه گردید. هم چنین تاثیر شکل بلوک های ماتریکس بر ضریب تصحیح با در نظر گرفتن اشکال دایره یا لوزی بجای مکعب در نظر گرفته شد نتایج ضریب اصلاحی در جدول زیر آورده شده است.

جدول 1: مقادیر ضریب تصحیح بازشدگی شکاف معادل

| مقدار ضریب تصحیح | ناهمگنی                    |
|------------------|----------------------------|
| 1.035            | شبكة شکاف با زاویه 60 درجه |
| 1.15             | شبكة شکاف با زاویه 30 درجه |
| 1.17             | شبكة شکاف با زاویه 20 درجه |
| 1.13             | ماتریکس های دایره شکل      |
| 1.04             | ماتریکس های لوزی شکل       |
| 1.16             | ماتریکس های بیضی شکل       |

### 3. نتیجه گیری

شبیه سازی مناسب سنگ های شکافدار در بررسی فیزیک جابجایی جریان در مخازن شکافدار مهم است. با توجه به نتایجی که از رویکرد تعمیم مدل سازی وارن روت در شبیه سازی سنگ های شکافدار بدست آمده می توان مشاهده کرد که روش بازشدگی شکاف تصحیح شده معادل برای سنگ های شکافدار واقعی با ناهمگنی ناشی از جهت گیری مایل شکاف ها روش موثری بوده که این بازشدگی معادل در شرایط سنگ و سیال یکسان به مقادیر اندازه بلوک های ماتریکس، زاویه شکاف و شکل ماتریکس وابسته بوده و شناخت آن می تواند در تعمیم رویکرد مدل سازی وارن روت کاربردی باشد.

### 4. مراجع

- [1] J. E. Warren and P. J. Root, "The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs," SPE Journal, Vol. 3, No. 3, 1963, pp. 245-255.
- [2] D. Yang, X. Qi, W. Chen, S. Wang, and F. Dai, "Numerical investigation on the coupled gas-solid behavior of coal using an improved anisotropic permeability model," Journal of Natural Gas Science and Engineering, vol. 34, pp. 226-235, 2016.
- [3] Xianyin Qi, Shengwei Wang, "Numerical Investigation of an Anisotropic Permeability Model for Bedded Coal Based on the Equivalent Fracture Aperture Coefficient," Shock and Vibration, 2022
- [4] Li, B. Li, Q. Cheng, and Z. Gao, "Evolution of anisotropic coal permeability under the effect of heterogeneous deformation of fractures," Natural Resources Research, vol. 30, no. 5, pp. 3623-3642, 2021
- [5] H. Gerke and M. van Genuchten, "A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media." *Water Resources Research*. 29. pp. 305-319. 1993



## مطالعه عددی نفوذ خودبخودی سیالات توانی در بسترهای متخلخل نیمه اشباع

هانیه اسدی حمزه‌کندی<sup>۱\*</sup>؛ محمد پورجعفر چلیکدانی<sup>۲</sup>؛ کیوان صادقی<sup>۳</sup>

### چکیده

در این پژوهش حل عددی معادله ریچاردز جریان سیالات فیزیولوژیکی با رفتار رئولوژیک توانی در بسترهای متخلخل دولایه موازی از نوع نیمه اشباع با استفاده از مفهوم ویسکوزیته موثر ارائه شده است. جهت حل عددی معادلات حاکم از نرم‌افزار کامسول استفاده شده است. بر اساس نتایج عددی بدست آمده، با کاهش اندیس توانی (تقویت رفتار نازک‌شوندگی سیال) مقدار جرم سیال جذب شده توسط سیستم متخلخل بطور قابل توجهی افزایش یافته است. بطور متناظر برای یک سیال توانی معین، افزایش ضخامت لایه با نفوذپذیری بزرگتر نیز با افزایش مقدار جرم جذب شده توسط سیستم متخلخل دولایه همراه بوده است.

### کلیدواژه‌ها

معادله ریچاردز؛ سیالات فیزیولوژیک؛ مدل توانی؛ ویسکوزیته موثر؛ نرم افزار کامسول؛

### ۱. مقدمه

نفوذ خودبخودی سیالات بدون نیاز به مکانیزم خارجی جهت به حرکت واداشتن سیال در بسترهای متخلخل تحت خاصیت موئینگی رخ می‌دهد. مکانیزمی که کاربرد نسبتاً گسترده و قابل توجهی نه تنها در صنعت بلکه در علم پزشکی نیز دارد. بطور واضح‌تر با توجه به اهمیت جریان سیالات فیزیولوژیکی در کیت‌های تشخیص سریع پزشکی و کاربردهای مختلف آن، پدیده « نفوذ خود به خود » اساس کار کیت‌های تشخیص پزشکی از نوع کاغذی است. در این نوع کیت‌ها، سیال مورد آزمایش همچون قطره خون پس از قرار گرفتن بر روی قسمت خاصی از کیت به طور خود به خود (بدون نیاز به پمپ) به سرعت و در اثر فشار موئینگی در بستر متخلخل کاغذی کیت حرکت نموده و خود را به سلول شناسایی (خط تست) می‌رساند. در سلول شناسایی، از کاغذی با ساختار فیزیکی متفاوت استفاده می‌شود به نحوی که سرعت حرکت سیال کاهش یافته و زمان کافی برای تجزیه و تحلیل بر روی سیال مورد آزمایش وجود داشته باشد. نتایج آزمایش (به عنوان مثال، تست قند خون و یا تست حاملگی) به صورت خطوط رنگی و یا به صورت دیجیتال بر روی کیت‌های مجهز به برد الکترونیکی نمایش داده می‌شود. برای موفقیت‌آمیز بودن کارکرد کیت‌های مزبور، لازم است جنس و خصوصیات ساختاری کاغذ مورد استفاده در این کیت‌ها به طور مناسب انتخاب شوند. در واقع، با استفاده از پارامترهای کاغذ (تخلخل، ترکندگی، سائز حفره، و سائز فیبرهای سلولز) می‌توان سرعت سیال در سلول تست را افزایش یا کاهش داد و کیتی قابل کنترل و کارآمد طراحی نمود [۱].

در مورد سیالات نیوتنی در گذشته تحقیقات وسیعی در رابطه با پدیده « آشام خود به خود » صورت پذیرفته

<sup>۱</sup> (دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران، [hanieh.asadi.ham@ut.ac.ir](mailto:hanieh.asadi.ham@ut.ac.ir))<sup>\*</sup>

<sup>۲</sup> (دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی دانشگاه تهران، دانشکده فنی کاسپین، رضوانشهر، ایران، [m\\_pourjafar@ut.ac.ir](mailto:m_pourjafar@ut.ac.ir))

<sup>۳</sup> (دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران، [sadeghy@ut.ac.ir](mailto:sadeghy@ut.ac.ir))

است. در این رابطه می‌توان به معادله ریچاردز<sup>۱</sup> اشاره کرد که از دقت بسیار بالایی برای پیش بینی این پدیده برای این دسته از سیالات برخوردار است. ولی در رابطه با سیالات غیرنیوتنی تحقیق قابل ذکر و جامعی در گذشته انجام نشده است. با توجه به اینکه سیالات فیزیولوژیکی مورد استفاده در کیت‌های کاغذی از خود رفتار غیرنیوتنی بروز می‌دهند اهمیت چنین مطالعه‌ای دو چندان می‌گردد. لازمه این کار وجود مدل ریاضی مناسب برای بررسی این پدیده برای سیالات غیرنیوتنی در محیط‌های متخلخل از نوع غیراشباع است. در این تحقیق، معادله ریچاردز کلاسیک به دسته خاصی از سیالات غیرنیوتنی با رفتار مدل توانی تعمیم داده شده است. تمایل به مطالعه چنین سیالاتی برگرفته از این واقعیت است که ویسکوزیته متغیر (تابع نرخ برش) متداول‌ترین رفتار غیرنیوتنی در سیالات صنعتی و سیالات فیزیولوژیکی است و مدل توانی، علیرغم سادگی ظاهری آن، قادر است این رفتار را به خوبی تبیین نماید. برای نیل به این هدف در نظر است از « معادله ریچاردز تعمیم‌یافته » استفاده شود. با توجه به اینکه معادله کلاسیک ریچاردز فقط برای سیالات نیوتنی معتبر است، در نظر داریم با استفاده از مفهوم « ویسکوزیته موثر » معادله مزبور را به سیالات غیرنیوتنی از نوع توانی تعمیم دهیم. ایده مورد نظر در این تحقیق، استفاده از معادله ریچاردز با به کارگیری مفهوم ویسکوزیته موثر به جای عبارت ویسکوزیته است.

## ۲. معادلات حاکم

در پژوهش حاضر در نظر است جهت ارائه شماتیک کاربردی از کیت‌های تشخیص پزشکی، عملکرد نفوذ خودبخود سیالات فیزیولوژیکی در بستر متخلخل دولایه‌ای موازی (دولایه با خواص تخلخلی متفاوت که بصورت موازی روی یکدیگر قرار گرفته‌اند و هر دو لایه از یک سمت در تماس با منبع سیال قرار می‌گیرند) مورد مطالعه قرار گیرد. برای مدل‌سازی پدیده نفوذ سیالات نیوتنی در بستر متخلخل از نوع غیر اشباع، می‌توان از «معادله کلاسیک ریچاردز» [۲] برای حل معادلات حاکم بر مسئله استفاده نمود. معادله ریچاردز یک معادله دیفرانسیل جزئی غیرخطی است که توسعه‌ای از قانون داریسی در محیط متخلخل (با فرض ناچیز بودن اینرسی جریان) می‌باشد که از ترکیب معادله داریسی و معادله پیوستگی برای سیالی غیر قابل تراکم در محیط متخلخل غیر اشباع به شرح زیر بدست می‌آید [۲]:

$$\varepsilon \frac{\partial S}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[ \frac{K(S)}{\mu} \nabla P_c(S) \right] = -\nabla \cdot (D(S) \nabla S) \quad (1)$$

که در آن  $\frac{\beta}{\varepsilon} = k$  بیان‌گر میزان رطوبت موجود در محیط متخلخل بوده (که اصطلاحاً «اشباع» نیز نامیده می‌شود) و به صورت نسبت حجم مایع جذب شده  $\beta$  توسط ماده متخلخل بر حجم فضای خالی موجود (تخلخل)  $\varepsilon$  تعریف می‌شود که عددی بین صفر و یک است.  $\nabla P_c$  گرادیان فشار موینگی در فصل مشترک هوا/مایع،  $K$  نفوذپذیری،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی و  $D(S)$  ضریب پخش می‌باشد. به منظور حل معادله (۱)، از مدل تجربی «بروکس و کوری» برای بیان وابستگی عبارات فشار موینگی و نفوذپذیری به صورت توابعی نمایی از میزان اشباع بهره گرفته شده است:

$$D(S) = \frac{K(S)}{\varepsilon \mu} \left( \frac{\partial P_c(S)}{\partial S} \right) = D_0 S^n. \quad D_0 = \frac{4\sigma \cos\theta}{\mu \lambda} \left( \frac{K_{max}}{d_{max}} \right) \quad (2)$$

در روابط فوق،  $D_0$  ضریب پخش ماکزیمم نام دارد.  $\sigma$  کشش سطحی،  $\theta$  زاویه تماس،  $d_{max}$  سایز مشخصه منافذ است و پارامتر  $\lambda$  شاخص توزیع اندازه منافذ معرف توزیع پراکندگی سایز حفره‌های موجود در محیط متخلخل می‌باشد. در نهایت از حل معادله ریچاردز می‌توان برای یافتن میدان اشباع  $S = S(x, y, t)$  در یک محیط متخلخل نیمه اشباع استفاده کرد.

با توجه به اینکه سیالات فیزیولوژیکی رفتارهای غیرنیوتنی مختلفی را از خود نشان می‌دهند که اغلب در میان آن‌ها سیالات با ویسکوزیته وابسته به برش اهمیت بخصوصی دارند در پژوهش حاضر برای توصیف جریان سیالات وابسته به نرخ برش «سیالات نیوتنی تعمیم یافته» در مقیاس دارسی از مفهوم ویسکوزیته مؤثر بهره گرفته شده است به طوری که معادله ریچاردز تعمیم یافته با جایگزین کردن ویسکوزیته مؤثر بجای ویسکوزیته ثابت بکار رفته در معادله (۱) قابل بازیابی خواهد بود که با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{eff}(S) = m \left( \frac{3n+1}{4n} \right) \left( \frac{1}{2m} \right)^{\frac{n-1}{n}} \left( - \frac{dP_c(S)}{dx} \right)^{\frac{n-1}{n}} \left( \frac{\sqrt{8\xi k(S)}}{\varepsilon} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (3)$$

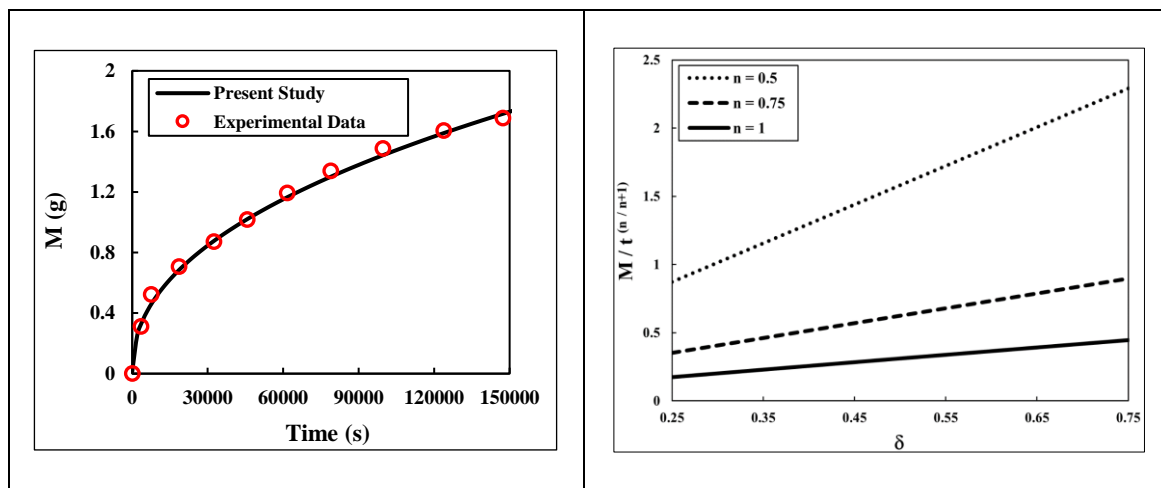
ویسکوزیته مؤثر به پارامترهای رئولوژیکی سیال  $(m, n)$ ، ترم گرادین فشار و میزان پیچ خوردگی منافذ بستگی دارد. به منظور حل معادله ریچاردز در مورد شرایط اولیه و مرزی بترتیب فرض می‌شود که در ابتدا سیستم کاملاً خشک است و همچنین در قسمت ورودی کیت، ماده همیشه کاملاً اشباع باقی می‌ماند و در تمام مرزهای دیگر، شرط مرزی بدون شار اعمال می‌شود.

### ۳. روش حل عددی و نتایج

در پژوهش حاضر جهت حل معادله ریچاردز تعمیم یافته با توجه به غیر خطی بودن معادله مذکور نسبت به متغیر اشباع، از نرم افزار کامسول به عنوان نرم افزار مناسب با قدرت انعطاف پذیری بالا جهت تحلیل معادلات حاکم به همراه جزئیات حاکم بر فیزیک مساله بهره گرفته شده است. جهت اطمینان از عملکرد نرم افزار در شبیه سازی مسئله مورد بررسی در این پژوهش و صحت سنجی معادله ریچاردز تعمیم یافته، از داده های تجربی گزارش شده توسط «ژو و همکاران» [۳] برای جذب خود بخودی محلول پلیمری در یک نمونه ماسه سنگ برگرفته از یک مخزن معمولی نفت/گازی بهره گرفته شده است. همچنین در این پژوهش اثرات اندیس توانی بر عملکرد محیط متخلخل در فرایند نفوذ خودبخودی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج شکل (۱-الف) موید کارایی خوب مدل ریچاردز تعمیم یافته در پیش بینی مقدار جرم سیال جذب شده توسط بستر متخلخل و انطباق نتایج عددی پژوهش حاضر با نتایج حاصل از آزمایشات «ژو و همکاران» [۳] می‌باشد. شکل (۱-ب) اثر نازک شونده گی برشی را بر میزان جرم سیال جذب شده توسط سیستم دو لایه موازی به ازای ضخامت های مختلف لایه پایینی نشان می‌دهد. همچنین شکل (۲-ب) نشان می‌دهد که هر چه ضخامت لایه بالایی بیشتر باشد (بطور متناظر ضخامت کمتر لایه پایینی) اثر نازک شونده گی برشی بیشتر نمایان می‌شود بطوری که میزان جرم جاروب شده توسط سیستم دولایه با تقویت نفوذ پذیری لایه بالایی (با افزایش پارامتر ضخامت) بیشتر می‌شود.





(الف)

(ب)

شکل ۱. الف) تاریخچه زمانی مقدار جرم جذب شده توسط بستر متخلخل در پژوهش « ژو و همکاران » [۳] به ازای:  $n=0.8$  و ب) اثر نازک‌شوندگی برشی بر میزان جرم جذب شده به ازای ضخامت‌های مختلف لایه پایینی.

#### ۴. نتیجه گیری

هدف اصلی کار حاضر، بررسی اثر این نوع رفتار در سیالات غیرنیوتنی بر رژیم شبه دائم در کیت بوده است به نحوی که بتوان سرعت سیال در خط تست را بازه زمانی مورد نیاز (تقریباً) ثابت نگه داشت. با توجه به اینکه سیالات فیزیولوژیکی معمولاً از خود رفتار نازک‌شوندگی بروز می‌دهند برای افزایش در زمان شبه دائم برای این دسته از سیالات لازم است از میکروساختار مناسب برای افزایش در زمان مزبور استفاده شود. علاوه بر آن، بر طبق نتایج بدست آمده می‌توان با استفاده از مواد افزودنی خاص، رفتار نازک‌شوندگی یا ضخیم‌شوندگی را به دلخواه در سیالات نیوتنی القا نمود و از آن به عنوان روشی « غیر فعال » برای کنترل رژیم شبه دائم کمک گرفت.

#### ۵. فهرست مراجع

- [۱] P. Sadeghi and E. Kjeang, "Computational modelling of paper-based capillary-driven microfluidic flow cells," *Journal of Power Sources*, vol. 548, p. 232084, 2022.
- [۲] L. A. Richards, "Capillary conduction of liquids through porous mediums," *Physics*, vol. 1, no. 5, pp. 318-333, 1931.
- [۳] Y. Zhu, Z. Li, J. Ni, F. Lai, and D. Wu, "Modeling the spontaneous imbibition of non-Newtonian fluids into the fractal porous media of tight reservoirs," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 209, p. 109892, 2022.



## شبیه‌سازی تست ردیاب شیمیایی تک چاهی (SWCTT) برای

### اندازه‌گیری اشباع نفت باقیمانده

مصطفی رضانی قهفرخی<sup>۱</sup>؛ روح‌الدین میری<sup>۲\*</sup>

#### چکیده

تعیین میزان اشباع نفت باقی‌مانده ( $S_{or}$ ) در مخازن هیدروکربنی از اهمیت بالایی در ارزیابی ذخایر و طراحی روش‌های ازدیادبرداشت برخوردار است. تست ردیاب شیمیایی تک چاهی (SWCTT) روشی کارآمد، اقتصادی و دقیق برای برآورد  $S_{or}$  در محدوده حدود ۲۰ تا ۳۰ متری چاه است که می‌تواند داده‌های با ارزشی برای تصمیم‌گیری‌های بهینه‌سازی تولید فراهم کند. این تکنیک از تفاوت زمانی بین تولید استر و الکل هیدرولیز شده که ناشی از جداسازی کروماتوگرافیک ردیاب ثانویه از ردیاب تفکیک‌پذیر است، بهره می‌برد. این مطالعه با هدف شبیه‌سازی SWCTT برای اندازه‌گیری  $S_{or}$  با استفاده از شبیه‌ساز سیلاب‌زنی شیمیایی دانشگاه تگزاس (UTCHEM) در یک سیستم سیلاب‌زنی پک شیشه‌ای انجام شده است. ابتدا SWCTT در این سیستم آزمایشگاهی با تزریق اتیل استات انجام گرفت. سپس تلاش شد با استفاده از نرم افزار UTCHEM که یک شبیه‌ساز چندبعدی، چندفازی و چندجزئی است و قابلیت مدل‌سازی ردیاب و واکنش‌پذیر تفکیک‌شونده را دارد، رفتار ردیاب و نتایج حاصل از آزمایش را شبیه‌سازی کند. نتایج نشان داد شبیه‌سازی SWCTT توسط UTCHEM با داده‌های تجربی از آزمایش‌های سیلاب‌زنی پک شیشه‌ای برای تخمین  $S_{or}$  همخوانی خوبی دارد. علاوه بر این، تحلیل‌های حساسیت انجام شده روی پارامترهای کلیدی مانند ضریب نفوذپذیری، میزان تزریق و غلظت ردیاب نشان داد که نتایج شبیه‌سازی به این پارامترها حساس است. این یافته‌ها حاکی از توانایی تکنیک SWCTT و نرم افزار شبیه‌ساز UTCHEM در ارزیابی دقیق ناحیه اشباع شده نفت در اطراف چاه است که می‌تواند اطلاعات با ارزشی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریت مخزن از جمله انتخاب سیال و فرآیند مناسب ازدیاد برداشت فراهم کند.

#### کلیدواژه‌ها

تست ردیاب شیمیایی تک چاهی (SWCTT)؛ اشباع نفت؛ جداسازی کروماتوگرافیک؛ ضریب نفوذپذیری؛ UTCHEM

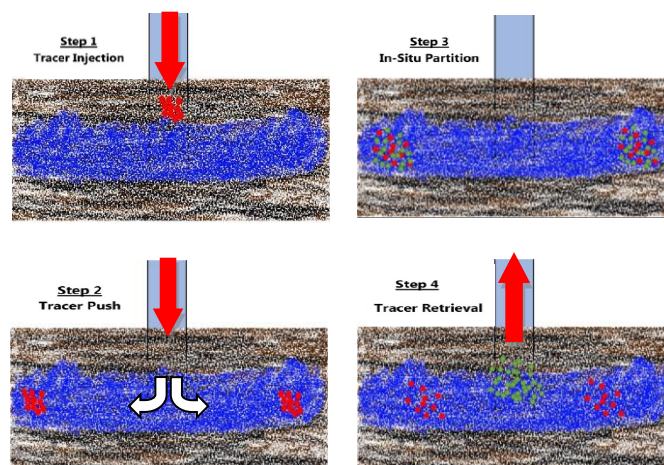
#### ۱. مقدمه

در فرایند تولید طبیعی نفت از مخازن، بخش قابل توجهی از نفت درون خود مخزن باقی می‌ماند و بازده اولیه نفت قابل استخراج از این مخازن نسبتاً کم است. رایج‌ترین تکنیک برای افزایش بازیافت نفت، تزریق آب است. نفتی که پس از تزریق آب در محیط متخلخل باقی می‌ماند، اشباع نفت باقیمانده ( $S_{or}$ ) نامیده می‌شود. تعیین میزان  $S_{or}$  در مخازن هیدروکربنی از اهمیت بالایی در ارزیابی ذخایر و طراحی روش‌های ازدیاد برداشت برخوردار است [۱]. آنالیز مغزه و نمودارگیری از چاه، دو تکنیک محبوب برای تعیین  $S_{or}$  هستند که هر دو دارای محدودیت‌های شناخته‌شده‌ای می‌باشند. یکی از ضعف‌های اصلی هر دو روش این است که مقادیر ارائه شده، میانگین حجم‌های بسیار کوچکی از مخزن است [۲].

تست ردیاب شیمیایی تک چاهی (SWCTT) روشی کارآمد، اقتصادی و دقیق برای  $S_{or}$  در محدوده حدود ۲۰ تا ۳۰ متری چاه است که می‌تواند داده‌های با ارزشی برای تصمیم‌گیری‌های بهینه‌سازی تولید فراهم کند و از محدودیت‌های اضافی روش‌های دیگر نیز اجتناب می‌کند. اولین کاربرد میدانی SWCTT در سال ۱۹۶۸ توسط دنز و همکارانش در شرکت تحقیقات تولید ESO در میدان شرق تگزاس انجام شد [۳]. اندازه‌گیری اشباع با ردیابها بر اساس اصل تأخیر کروماتوگرافیک و با استفاده از دو نوع ردیاب عمل می‌کند. یکی از این ردیاب‌ها می‌تواند هم در آب و هم در نفت حل شود، در حالی که ردیاب دیگر فقط می‌تواند در آب حل شود. در اکثر عملیات‌های SWCTT گزارش شده، اتیل استات (EtAc) به عنوان ردیاب اصلی، نرمال پروپیل الکل (NPA) و ایزوپروپیل الکل (IPA) به عنوان ردیاب پوششی و ردیاب موازنه جرمی استفاده می‌شوند. بانک اولیه ردیاب شامل یک استر واکنش‌پذیر (ردیاب تفکیک‌پذیر) است که به درون سازند تزریق می‌شود و به دنبال آن حجم جابه‌جاکننده (بانک آب بدون ردیاب) قرار می‌گیرد تا استر را در فاصله معینی از چاه قرار دهد. چاه برای مدت زمان مشخصی به طور موقت بسته می‌شود تا به استر اجازه دهد هیدرولیز شده و ردیاب ثانویه (الکل) را تشکیل دهد. هنگامی که تولید از سر گرفته می‌شود، هر دو ردیاب اولیه و ثانویه به سمت چاه حرکت می‌کنند (شکل ۱). این روش از تأخیر زمانی بین استر تولیدی و الکل هیدرولیز شده بهره می‌برد. این تأخیر زمانی به دلیل جداسازی کروماتوگرافیک بین ردیاب ثانویه و ردیاب تفکیک‌پذیر است و با اشباع فاز راکد (نفت) و ضریب تفکیک ردیاب ( $K_d$ ) ارتباط دارد. بنابراین، با پایش غلظت خروجی ردیاب‌های اولیه و ثانویه، می‌توان  $S_{or}$  را از تأخیر زمانی دو پیک تعیین کرد.

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران، [mostafa.ramezani77@gmail.com](mailto:mostafa.ramezani77@gmail.com)

<sup>۲\*</sup> دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران، [rohaldinmiri@iust.ac.ir](mailto:rohaldinmiri@iust.ac.ir)



شکل ۱: خلاصه مراحل اصلی مورد نیاز برای تست ردیاب شیمیایی تک چاهی (SWCTT). نقاط سبز - ردیاب ثانویه (الکل)، نقاط قرمز - ردیاب اولیه (استر)

در این مطالعه، یک مدل عددی گسترده با استفاده از نرم افزار شبیه‌ساز UTCHEM توسعه داده شد تا فرآیند کامل SWCTT شامل تزریق ردیاب، واکنش شیمیایی آن و تولید محصولات واکنش به طور دقیق شبیه‌سازی شود. هدف اصلی، شناسایی و بررسی پارامترهای موثر بر سینتیک واکنش هیدرولیز ردیاب EtAc در محیط متخلخل و تعیین مقادیر بهینه آن‌ها برای کسب بهترین تطابق با داده‌های آزمایشگاهی است. علاوه بر این، اثر شرایط و پارامترهای مختلف از جمله اندازه سلول شبکه، خواص پتروفیزیکی و شرایط اولیه سیستم بر نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل توسعه یافته در این تحقیق می‌تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند برای پیش‌بینی دقیق رفتار ردیاب واکنش‌پذیر و طراحی بهینه SWCTT در مطالعات آینده مورد استفاده قرار گیرد. این مدل همچنین قابلیت اعمال بر سایر واکنش‌های شیمیایی مرتبط با فرآیندهای ازدیاد برداشت را نیز دارد.

## ۲. مطالعات آزمایشگاهی

برای انجام SWCTT، یک سیستم سیلابزنی پک شیشه‌ای (Glass Bead Pack) آماده شد. این سیستم شامل یک ستون عمودی از جنس شیشه با خواص پتروفیزیکی و شرایط سیال خاص بود که در جدول ۱ خلاصه شده است. سیستم دارای سیستم گردش سیال بسته می‌باشد که امکان تزریق سیالات با دبی ثابت را فراهم می‌کند. دمای سیستم در ۱۴۹ درجه فارنهایت تنظیم شد تا شرایط مخزن را شبیه‌سازی کند.

جدول ۱: خواص پتروفیزیکی و مشخصات سیال

| مقدار  | پارامتر                           |
|--------|-----------------------------------|
| ۴/۹۲   | طول (ft)                          |
| ۰/۲۶   | قطر (ft)                          |
| ۴۰/۳۴  | تخلخل (/.)                        |
| ۴      | تراوایی (D)                       |
| ۸۶۴    | دبی تزریق (ml/day)                |
| ۵۷۶    | دبی تولید (ml/day)                |
| ۰/۲۳۳۸ | اشباع نفت باقیمانده ( $S_{orw}$ ) |

ابتدا، بانک ردیاب حاوی آب نمک با غلظت ۵۰۰۰ پی‌پی‌ام و ترکیبات EtAc، NPA و IPA با دبی ۸۶۴ میلی لیتر بر روز تزریق شد. سپس، حجم جابه‌جا کننده با همان سرعت و غلظت ثابت آب نمک و IPA تزریق گردید. پس از تزریق، سیستم برای یک دوره واکنش ۲۱ ساعت بسته شد تا واکنش هیدرولیز EtAc در حضور IPA انجام شده و ردیاب محصول اتانول (EtOH) تولید گردد. در این مدت، فرض شد هیچ گونه جریان سیال در سیستم وجود ندارد. پس از پایان دوره واکنش، مرحله تولید آغاز شد و محصولات خروجی برای ۲/۴ ساعت با دبی ۵۷۶ میلی لیتر بر روز برای آنالیز غلظت ردیاب‌ها جمع‌آوری شدند. جدول ۲ خلاصه‌ای از فرآیند تزریق و تولید ردیاب در طول SWCTT را نشان می‌دهد. این آزمایش به مطالعه رفتار ردیاب‌های شیمیایی و واکنش‌های شیمیایی آن‌ها در یک محیط متخلخل شبیه‌سازی شده کمک می‌کند. داده‌های حاصل از آن می‌تواند برای درک بهتر فرایندهای سیال-سنگ در مخازن هیدروکربنی و تفسیر نتایج آزمایش‌های ردیاب در میدان مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۲: فرایند تزریق و تولید ردیاب در طول SWCTT

| دوره تزریق: ۰/۸۶ ساعت؛ ۰/۸ حجم منفذی |                      |
|--------------------------------------|----------------------|
| حجم تزریق (حجم منفذی)                | بانک ردیاب           |
| ۰/۱۱۶                                | استر (Primary)       |
| ۰/۶۸۴                                | جابه‌جا کننده (Push) |
| دوره بسته شدن: ۲۱ ساعت               |                      |
| دوره تولید: ۲/۴ ساعت؛ ۱/۵ حجم منفذی  |                      |

### ۳. شبیه‌سازی

برای مدل‌سازی SWCTT از نرم افزار شبیه‌ساز UTCHEM استفاده شد. این نرم افزار توانایی شبیه‌سازی فرایندهای پیچیده سیلاب‌زنی چندبعدی، چندفازی و چندجزئی را داراست. علاوه بر این، قابلیت مدل‌سازی ردیاب‌های واکنش‌پذیر تفکیک شونده و همچنین تزریق مواد شیمیایی مانند سورفکتانت، پلیمر و آلكالین را نیز دارد. برای این منظور، از یک مدل کارترین همگن تک‌بعدی با اندازه‌ی سلول افقی برابر با ۱ میلی متر استفاده شد و بهترین تطابق بین داده‌های مدل‌سازی شده و اندازه‌گیری شده با این اندازه‌ی سلول به دست آمد. مطالعات پیشین نشان داده اند که ابعاد سلول تأثیری بر موقعیت پیک غلظت ردیاب روی محور حجم تولیدی ندارد، اما بر مقدار پیک غلظت اثرگذار است [۴]. برای ساده سازی، سیستم در دمای ثابت ۱۴۹ درجه فارنهایت شبیه سازی گردید و خواص پتروفیزیکی و مشخصات سیال مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شد. شکل ۲ پروفایل‌های غلظت مدل‌سازی شده برای هر دو ردیاب اولیه (EtAc) و ثانویه (EtOH) را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با گذشت زمان، غلظت ردیاب اولیه کاهش و غلظت ردیاب ثانویه افزایش می‌یابد که نشان دهنده انجام واکنش هیدرولیز اتیل استات و تولید اتانول است.

انتخاب یک ردیاب اولیه واکنش‌پذیر مناسب و تعیین پارامترهایی مانند ضریب تفکیک ( $K_d$ ) و سرعت واکنش هیدرولیز ( $K_H$ ) آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دمای مخزن، عامل کلیدی در تعیین ردیاب اولیه بهینه محسوب می‌شود. در این مطالعه، قابلیت استفاده از ترکیبات شیمیایی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. دو ترکیب استر واکنش‌پذیر رایج در صنعت، نرمال پروپیل فرمات (NPF) و EtAc بودند. NPF معمولاً برای مخازن دمای پایین و EtAc برای مخازن دمای بالا توصیه می‌شود. با توجه به دمای بالای سیستم (۱۴۹ درجه فارنهایت)، EtAc به دلیل سینتیک واکنش مناسب در این دما، به عنوان ردیاب اولیه انتخاب گردید.

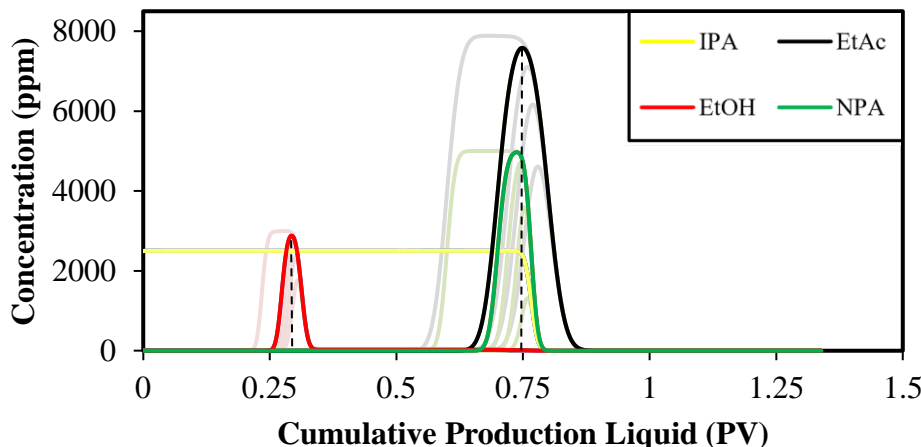
برای مدل‌سازی دقیق‌تر، پارامترهای سینتیکی واکنش EtAc از قبیل سرعت هیدرولیز، ضریب نفوذ ( $D_H$ ) و ضریب تفکیک آن در محیط متخلخل باید تعیین شود. این پارامترها می‌توانند از طریق آزمایش‌های جداگانه یا با استفاده از روش‌های تجربی موجود در ادبیات محاسبه گردند. سرعت واکنش هیدرولیز EtAc برابر با ۰/۵ بر روز و ضریب نفوذ برابر با ۰/۱۹ فوت مربع بر روز در نظر گرفته شد. ضریب تفکیک EtAc بین فاز آبی و نفتی ۵/۱ محاسبه گردید. این پارامترها برای شبیه سازی دقیق سینتیک واکنش هیدرولیز در مدل UTCHEM استفاده شدند. از آنجایی که آزمایش در یک سیستم سیلاب‌زنی آزمایشگاهی انجام شده بود، اثرات مقیاس مهم نبودند. با این حال، در مطالعات میدانی، اثرات مقیاس باید در نظر گرفته شوند. دما، pH، شوری، شعاع نفوذ ردیاب در ماتریس سنگ و زمان واکنش از جمله عوامل مهمی هستند که می‌توانند بر سینتیک واکنش ردیاب تأثیرگذار باشند. سایر فرضیات در نظر گرفته شده در این مدل‌سازی عبارتند از: الف) سیال تزریقی تک فاز آبی و غیرقابل تراکم در نظر گرفته شد، ب) از اثرات گرمایی صرف نظر شد و سیستم ایزوترم فرض گردید، ج) هیچ گونه واکنش جانبی یا تولید گاز در سیستم در نظر گرفته نشد و د) خواص پتروفیزیکی سنگ همگن و مستقل از فشار فرض شدند. این فرضیات معمولاً برای ساده سازی مدل و کاهش پیچیدگی محاسبات هستند. در مطالعات آتی می‌توان با در نظر گرفتن اثرات پیچیده‌تر، مدل را به واقعیت نزدیک‌تر کرد. پس از تعریف ورودی‌های لازم، مدل UTCHEM برای شبیه‌سازی فرایند تزریق، واکنش هیدرولیز و تولید در آزمایش SWCTT اجرا گردید. نتایج شبیه سازی برای مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت.

### ۴. نتایج و تفسیر

در شکل ۲، پروفایل‌های غلظت ردیاب‌های اندازه‌گیری شده برای EtAc، NPA، IPA و EtOH در برابر حجم کل سیال تولیدی (PV) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، منحنی غلظت EtAc دارای یک پیک گسترده به مرکزیت ۰/۷۵ حجم منفذی است که پس از آن با گذشت زمان، غلظت آن کاهش می‌یابد. منحنی غلظت EtOH دارای یک پیک تیز در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ حجم منفذی می‌باشد که بیانگر تولید و افزایش غلظت آن ناشی از واکنش هیدرولیز EtAc است.

برای تعیین  $S_{or}$ ، از اختلاف یا نگهداشت بین پیک‌های غلظت ردیاب ثانویه و ردیاب تفکیک‌پذیر استفاده می‌شود. با اندازه‌گیری این اختلاف و با استفاده از روابط تجربی، مقدار  $S_{or}$  محاسبه می‌گردد. در این مطالعه، با تحلیل نگهداشت بین پیک‌های ردیاب،  $S_{or}$  برابر با

۰/۰۰۱۵۶ ± ۰/۲۳۳۱۴ به دست آمد. این مقدار با  $S_{or}$  در پیک شیشه‌ای (۰/۲۳۳۸) که در شرایط آزمایشگاهی تنظیم شده بود، بسیار مطابقت خوبی داشت. علاوه بر این، تحلیل‌های حساسیت انجام شده روی پارامترهای کلیدی مانند ضریب نفوذپذیری، میزان تزریق و غلظت ردیاب نشان داد که نتایج شبیه‌سازی به این پارامترها حساس است.



شکل ۲: پروفایل ردیاب‌های EtAc، NPA، IPA و EtOH تولید شده در مقابل حجم کل سیال تولیدی

نتایج حاصل از این آزمایش نشان می‌دهد که مدل شبیه‌سازی توسعه یافته در این مطالعه توانسته است رفتار و سینتیک واکنش هیدرولیز ردیاب EtAc را به خوبی پیش‌بینی و شبیه‌سازی کند. این امر اهمیت تعیین صحیح پارامترهای سینتیکی و انجام مدل‌سازی دقیق را برای تفسیر صحیح داده‌های آزمایش SWCTT نشان می‌دهد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، SWCTT برای یک سیستم سیلاب‌زنی پیک شیشه‌ای با موفقیت با استفاده از نرم افزار شبیه ساز UTCHEM مدل‌سازی شد. مدل عددی توسعه یافته توانست فرایند کامل شامل تزریق ردیاب EtAc، واکنش هیدرولیز آن و تولید محصول EtOH را به خوبی شبیه‌سازی کند. مقدار  $S_{orw}$  تعیین شده از مدل، برابر با  $۰/۰۰۱۵۶ ± ۰/۲۳۳۱۴$  بود که با اشباع نفت در سیستم پیک شیشه‌ای تطابق بسیار نزدیکی داشت. این نتیجه نشان دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی سینتیک واکنش هیدرولیز ردیاب و محاسبه صحیح  $S_{or}$  از داده‌های آزمایش SWCTT است. علاوه بر این، تحلیل‌های حساسیت انجام شده روی پارامترهای کلیدی مانند ضریب نفوذپذیری، میزان تزریق و غلظت ردیاب نشان داد که نتایج شبیه‌سازی به این پارامترها حساس است. این یافته‌ها حاکی از توانایی تکنیک SWCTT و نرم افزار شبیه ساز UTCHEM در ارزیابی دقیق ناحیه اشباع شده از نفت در اطراف چاه است که می‌تواند اطلاعات با ارزشی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریت مخزن از جمله انتخاب سیال و فرآیند مناسب ازدیاد برداشت فراهم کند.

با این حال، استفاده از EtAc به عنوان ردیاب اولیه دارای برخی محدودیت‌ها و مشکلات از جمله اشتعال پذیری، فراریت بالا، هزینه نسبتاً بالا و مسائل ایمنی است. بنابراین، در مطالعات آینده، استفاده از ردیاب‌های جدید و جایگزین با ویژگی‌های بهتر پیشنهاد می‌شود. این ردیاب‌های جدید نسبت به مواد شیمیایی سنتی مورد استفاده در SWCTT مانند EtAc، دارای مزایای متعددی هستند. از جمله اینکه نیاز به حجم و غلظت تزریق بسیار کمتری دارند و در سطوح بسیار پایین تر در محدوده ppb (قسمت در میلیارد) قابل ردیابی و تشخیص هستند. این ویژگی باعث کاهش چشمگیر هزینه‌های مربوط به ردیاب و افزایش ایمنی فرایند می‌شود. بنابراین، برای افزایش دقت، ایمنی و کاهش هزینه‌های SWCTT، انجام مطالعات بیشتر برای شناسایی، ارزیابی و بهینه‌سازی استفاده از ردیاب‌های جدید و نوآورانه پیشنهاد می‌شود. توسعه مدل‌های شبیه‌سازی برای ردیاب‌های جدید نیز می‌تواند در تفسیر بهتر نتایج آزمایش‌های آینده SWCTT بسیار کمک کننده باشد.

## ۶. فهرست مراجع

1. Al-Abbad, M., et al. A Step-Change for Single Well Chemical Tracer Tests (SWCTT): Field Pilot Testing of New Sets of Novel Tracers. in SPE Annual Technical Conference and Exhibition? 2016. SPE.
2. Tomich, J., et al., Single-well tracer method to measure residual oil saturation. Journal of Petroleum Technology, 1973. 25(02): p. 211-218.
3. Deans, H., Method of determining fluid saturations in reservoirs. 1971.
4. Khaledialidusti, R., J. Kleppe, and K. Skrettingland. Numerical interpretation of single well chemical tracer (SWCT) tests to determine residual oil saturation in snorre reservoir. in SPE Europec featured at EAGE Conference and Exhibition? 2015. SPE.



## مدل‌سازی شبکه حفره‌ای فرآیند تزریق گاز غیرتعدالی در مخازن شکافدار

مهدی مهرپرور<sup>۱\*</sup>؛ روح‌الدین میری<sup>۲</sup>؛

### چکیده

بسیاری از مخازن کربناته گروه بنگستان ایران دارای ماتریس‌های متراکم و شکافدار هستند. برخی از این مخازن، علیرغم داشتن شرایط لازم برای تشکیل کلاهدک گازی، به دلیل کوتاهی ماتریس‌ها و فشار موئینگی بالا، از مکانیزم ریزش ثقلی به خوبی بهره‌مند نمی‌شوند. از سوی دیگر، برخی از این مخازن بسیار زیر اشباع بوده و فشار ترک آن‌ها معمولاً بالاتر از فشار اشباع نفت است. در چنین مخازنی، مکانیزم اصلی تولید، انبساط سنگ و سیال می‌باشد که منجر به بازیافت درصد کمی از نفت می‌شود. با وجود پتانسیل بالای تولید، این مخازن به دلیل ضریب بازیافت پایین، نیازمند روش‌های تولید بهینه‌تری هستند.

تزریق گاز غیرتعدالی با فعال کردن مکانیزم نفوذ مولکولی می‌تواند راه‌حلی کارآمد برای این مشکل باشد. این مطالعه با هدف مدل‌سازی دقیق این فرآیند، از رویکرد شبکه حفره‌ای بهره می‌برد. در این روش، فرآیند نفوذ مولکولی در یک بلوک ماتریسی که با شبکه شکاف احاطه شده است، شبیه‌سازی می‌شود. مدل توسعه‌یافته، میکرو-مکانیزم‌های فرآیند خشک شدن محیط متخلخل را نیز در نظر می‌گیرد.

مزیت اصلی این مدل، توجه به توزیع میکروسکوپی فازهای مایع و گاز و آرایش حفره‌ها و گلوگاه‌ها در محیط متخلخل است. این ویژگی‌ها منجر به درک عمیق‌تری از فرآیند نفوذ مولکولی و ارائه مدل دقیق‌تری برای پیش‌بینی تولید اضافی از مخازن شکافدار می‌شود.

این مدل می‌تواند در انتخاب گاز تزریقی مناسب، تخمین پتانسیل تولید اضافی، بهینه‌سازی دبی تزریق گاز و سایر پارامترهای مرتبط با فرآیند نفوذ مولکولی در مخازن شکافدار مورد استفاده قرار گیرد.

### کلیدواژه‌ها

مخزن شکافدار، تزریق گاز غیرتعدالی، نفوذ مولکولی، مدل‌سازی شبکه حفره‌ای، مدل شبکه‌ای بولتزن؛

### ۱. مقدمه

بسیاری از مخازن کربناته گروه بنگستان ایران دارای ماتریس‌های متراکم و شکافدار هستند. در مرحله برداشت اولیه از این مخازن، با توجه به تراوایی بالای شکاف‌ها نسبت به ماتریس‌ها، نفت به سرعت از طریق شکاف‌ها به چاه‌های تولیدی می‌رسد و شکاف‌ها سهم عمده‌ای در تولید نفت ایفا می‌کنند. در این مرحله، ماتریس‌ها تقریباً اشباع از نفت باقی می‌مانند و تا زمانی که فشار نفت موجود در شکاف‌ها بالاتر از فشار اشباع باشد، روش تولید غالب انبساط نفت خواهد بود.

با ادامه برداشت و کاهش فشار، گاز جایگزین نفت در شکاف‌ها می‌شود و ماتریس‌های اشباع از نفت توسط شکاف‌های پر شده از گاز محاصره می‌گردند. در این وضعیت، نفت موجود در ماتریس‌ها تنها می‌تواند با غلبه نیروی وزن و اختلاف چگالی سیالات موجود در شکاف‌ها بر نیروی موئینگی از ماتریس‌ها خارج شود. با خروج نفت از

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران. [mahdimehrparvar1999@gmail.com](mailto:mahdimehrparvar1999@gmail.com)

<sup>۲</sup> \* دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران. [rohaldinmiri@iust.ac.ir](mailto:rohaldinmiri@iust.ac.ir)

ماتریس‌ها و حرکت آن به سمت چاه‌های تولیدی از طریق شکاف‌ها، گاز موجود در شکاف‌ها از بالای ماتریس وارد آن شده و جای نفت را می‌گیرد. این امر باعث کاهش نیروی ثقل و افزایش نیروی موئینگی می‌شود که در نهایت منجر به کاهش تدریجی تولید نفت تا توقف کامل تولید در اثر تعادل ترمودینامیکی بین نفت درون ماتریس و گاز درون شکاف‌ها می‌شود.

در چنین شرایطی، مقدار قابل توجهی از نفت درون ماتریس‌ها به دام می‌افتد که برای بازیافت آن نیاز به نیروی خارجی وجود دارد. متداول‌ترین گزینه برای ازدیاد برداشت از مخازن شکاف‌دار، تزریق گاز می‌باشد. گاز تزریقی (مانند دی‌اکسید کربن و متان) با برهم زدن تعادل ترمودینامیکی بین سیالات موجود در ماتریس و شکاف‌ها، یک سیستم غیرتعادلی ایجاد می‌کند. این عدم تعادل، فرآیند نفوذ مولکولی را فعال می‌سازد که طی آن مولکول‌ها بین فازهای گاز و مایع در ماتریس و شکاف‌ها جابجا می‌شوند [1].

فرآیند نفوذ مولکولی شامل تبخیر نفت در ماتریس و انتقال آن به گاز موجود در شکاف‌ها از طریق مکانیزم‌هایی نظیر همرفت و نفوذ مولکولی است. این فرآیند باعث ایجاد جریان دو فازی با تغییر فاز در محیط متخلخل و انتقال جرم میان ماتریس و شکاف‌ها می‌شود. تغییراتی همچون کاهش فشار اشباع، کاهش کشش سطحی، کاهش گرانشی نفت، افزایش تورم و محتوی گاز محلول در نفت، از نتایج این فرآیند هستند.

با توجه به پدیده‌شناسی، می‌توان فرآیند تزریق گاز را به فرآیند خشک شدن محیط متخلخل شکاف‌دار اشباع از مایعات فرار در شرایط هم‌دما تشبیه کرد. در این فرآیند، مایع محبوس در محیط متخلخل به دلیل نیروی موئینگی می‌تواند توسط گاز تزریقی که از شکاف‌ها عبور می‌کند، تبخیر شود. پدیده خشک شدن شامل مکانیزم‌های متعددی نظیر نفوذ در فاز گاز و مایع، حرکت سطح مشترک نفت/گاز، جریان ویسکوز در هر دو فاز، جریان سیال از طریق باریکه‌های متصل به هم و خاصیت موئینگی است [2].

در مخازن شکاف‌دار، مکانیزم‌هایی همچون انبساط سنگ و سیال، تراکم‌پذیری حفره‌ها و ریزش ثقلی می‌توانند موثر باشند. اما شاید بتوان ریزش ثقلی را مهم‌ترین عامل مکانیزم تولید در این مخازن دانست که تفاوت چگالی و ارتفاع ماتریس تاثیر مستقیمی در عملکرد آن دارد. نیروی موئینگی یکی از نیروهای ممانعت کننده در راستای تولید نفت است که با توجه به شرایط سنگ و سیال مخزن و کم بودن تراوایی و تخلخل و کوتاهی ماتریس‌ها، می‌تواند بر نیروی ریزش ثقلی غلبه کرده و مانع از تولید نفت شود. در این شرایط، مکانیزم نفوذ مولکولی می‌تواند نقش موثری در تولید داشته باشد [3].

فرآیند خشک شدن یک فرآیند جابجایی ساده با اعمال نیروی خارجی مانند ریزش ثقلی نیست. آنچه در مخازن شکاف‌دار اهمیت دارد، شکاف خوردگی سنگ مخزن است. برخلاف مخازن غیرشکاف‌دار که دارای محیط متخلخل پیوسته هستند، شکاف‌ها سطح تماس بیش‌تری برای انتقال جرم بین نفت درون ماتریس و گاز تزریقی در شکاف‌ها فراهم می‌کنند. هرچه فاصله شکاف‌ها کم‌تر و ماتریس‌ها کوچک‌تر و شکاف خوردگی بیش‌تر باشد، انتقال جرم بیش‌تری رخ خواهد داد [4].

با توجه به اینکه بسیاری از میادین هیدروکربوری ایران مانند گچساران، پارسی، کرنج و مارون دارای شکاف‌خوردگی بالایی هستند و برخی از آنها ماتریس‌های به شدت متراکم دارند، در این مخازن با تراوایی پایین، دبی غیراقتصادی نفت و فشار موئینگی بالا، درصد زیادی از نفت غیرقابل بازیافت می‌شود. ضریب بازیافت در این مخازن بین ۵ تا ۲۵ درصد است. با توجه به تاریخچه تولید طولانی این مخازن، نواحی وسیعی از آنها مورد تهاجم گاز قرار گرفته و ماتریس‌های آن‌ها تا حدی اشباع از گاز شده‌اند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که این مخازن مستعد تزریق گاز غیرتعادلی برای بازیافت بیش‌تر نفت هستند.

هدف این مطالعه، مدل‌سازی دقیق فرآیند تزریق گاز غیرتعادلی در مخازن شکاف‌دار با استفاده از رویکرد شبکه حفره‌ای است. این مدل‌سازی شامل شبیه‌سازی فرآیند نفوذ مولکولی در بلوک‌های ماتریسی احاطه شده توسط شبکه شکاف‌ها است. مدل توسعه یافته به توزیع میکروسکوپی فازهای مایع و گاز و آرایش حفره‌ها و گلوگاه‌ها

در محیط متخلخل توجه می‌کند و به درک عمیق‌تری از فرآیند نفوذ مولکولی و ارائه مدل دقیق‌تری برای پیش‌بینی تولید اضافی از مخازن شکاف‌دار می‌پردازد. این مدل می‌تواند در انتخاب گاز تزریقی مناسب، تخمین پتانسیل تولید اضافی، بهینه‌سازی دبی تزریق گاز و سایر پارامترهای مرتبط با فرآیند نفوذ مولکولی در مخازن شکاف‌دار مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲. مدل بررسی شده در این مطالعه

در این مطالعه، مدل شبکه‌ای بولتزن برای شبیه‌سازی تبخیر هم‌دما با دو جزء در محیط متخلخل پیاده‌سازی شده است. این مدل بر پایه مدل چندفازی با شبه‌پتانسیل با دو جزء بنا شده است تا بتواند جزء با تغییر فاز (مثل آب و بخار آن) و جزء غیرقابل تراکم (مثل هوای خشک) را مدل کند. برای اعتبارسنجی مدل، از راه‌حل نظری مربوط به مسئله تبخیر نفوذی هم‌دما استفاده شده است. سپس، این روش برای شبیه‌سازی تبخیر همرفتی در محیط با تخلخل دوگانه به کار گرفته می‌شود و تأثیر غلظت بخار ورودی و زاویه تماس بر روی تبخیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مدل شبکه‌ای بولتزن که اخیراً به طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است، به ویژه برای مدل‌سازی تبخیر در مقیاس منافذ در محیط‌های متخلخل بسیار مناسب است. برخلاف مدل‌های پیوسته، مدل شبکه‌ای بولتزن یک حل‌کننده برای معادله گسسته خاص بولتزن است که برای بازیابی معادلات ناویر-استوکس در محدوده عدد ماخ پایین طراحی شده است. ماهیت مقیاس مدل شبکه‌ای بولتزن امکان گنجاندن مستقیم فیزیک میکرو و مزو را فراهم می‌کند که منجر به یک روش مستقیم سطح تماس دینامیک چندفازی، مانند جداسازی فاز و شکستن و/یا ادغام سطح‌های تماس فاز می‌شود.

در مقایسه با روش‌های مدل‌سازی شبکه منافذی، مدل شبکه‌ای بولتزن یک روش دقیق‌تر در مقیاس منافذ است زیرا روش‌های مرزی از نوع بازگشتی در مدل شبکه‌ای بولتزن برای ساختارهای منافذ واقعی و پیچیده بسیار مناسب هستند و نیازی به ساده‌سازی‌های بزرگ هندسه‌های واقعی ندارند. در نهایت، الگوریتم «برخورد-جریان» در مدل شبکه‌ای بولتزن استاندارد تنها شامل تبادل اطلاعات بین گره‌های شبکه همسایه است و این امر باعث کارایی بسیار بالا در محاسبات موازی در مقیاس بزرگ می‌شود [5].

مدل شبیه‌سازی شده شامل دو بخش است: سطح آزاد مدل که یک لایه نفوذ خارجی است و بخش شامل شبکه حفره‌ها می‌باشد. در سطح آزاد مدل هیچ شبکه‌ای وجود ندارد و ضخامت آن برابر با ضخامت حفره‌های شبکه است. این لایه و شبکه حفره‌ای در ابتدا شبیه‌سازی به ترتیب کاملاً از فاز بخار و مایع اشباع شده‌اند. لایه‌ای در مجاورت شبکه حفره‌ای قرار دارد که تنها مکانیزم انتقال در آن نفوذ مولکولی بخار می‌باشد. با توجه به این مدل، همگام‌سازی دو بخش و تعیین شرایط مرزی در مرز خارجی منطقه مرزی (شرایط مرزی در فاز گاز در مرز خارجی لایه نفوذی)، که غلظت بخار مایع در این مرز صفر می‌باشد، از چالشی‌ترین مراحل این مدل‌سازی است.

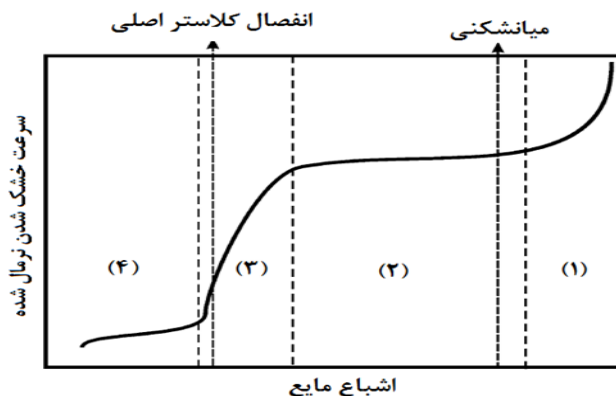
## ۳. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان به توصیف سه بازه مهم خشک شدن با سرعت ثابت، افت سرعت خشک شدن و عقب نشینی کلاسترها و هم‌چنین دو مرحله میان‌شکنی و نقطه انتهای جابه‌جایی در فرآیند اشغال، در پدیده خشک شدن پرداخت. بازه انفصال کلاستر اصلی، که مرز مایع در کلاسترها عقب‌نشینی می‌کند. این مرحله زمانی رخ می‌دهد که کلاستر اصلی اتصال خود را از ورودی مدل از دست بدهد. در بازه خشک شدن با سرعت ثابت، مایع از طریق حفره‌های کاملاً تر یا حدوداً تر که حاوی لایه‌های نازک مایع هستند جریان می‌یابد. در این بازه نیروی موئینگی، حرکت مایع از درون محیط متخلخل به جایی که مایع تبخیر می‌شود را کنترل می‌کند.

در بازه افت سرعت خشک شدن، سرعت بازیافت به شدت کاهش می‌یابد. خشک شدن این بازه در نواحی که



محیط متخلخل خشک است، توسط فرآیند انتقال جرم کنترل می‌شود. این بازه خود به دو بخش تقسیم می‌شود، بازه اولیه که در آن جداره حفرات به اندازه کافی تر می‌باشد که انتقال جرم تحت شرایط هم‌دما رخ دهد. در بازه ثانویه، به دلیل تبخیر لایه‌های نازک مایع دمای سطح مدل، جایی که اشباع مایع کم است، بالاتر از عمق آن می‌شود که باعث ایجاد یک گرادیان دمایی ناخواسته از سطح تا عمق مدل می‌شود. همین امر سبب یک مقاومت اضافی در برابر انتقال جرم به سمت خارجی مدل می‌شود که سرعت خشک شدن را بیش از پیش کاهش می‌دهد.



شکل ۱ بازه‌های خشک شدن محیط متخلخل

۱. جابجایی غیرقابل امتزاج پذیر CO<sub>2</sub> در مخازن شکافدار مقدار بیش تری از نفت به دام افتاده در ماتریس را در مقایسه با موارد امتزاج پذیر و نزدیک به امتزاج پذیر، به ویژه در الگوهای ناهمگن باقی می‌گذارد.
۲. افزایش نرخ در طول تزریق غیرقابل امتزاج پذیر CO<sub>2</sub>، مقدار نفت به دام افتاده در ماتریس را کاهش می‌دهد.
۳. افزایش نرخ در طول جابجایی قابل امتزاج پذیر CO<sub>2</sub> منجر به بازیافت سریع تر می‌شود. با این حال، برای رسیدن به همان مقدار تولید به CO<sub>2</sub> بیش تری نیاز دارد.
۴. تغییر ترشوندگی ماتریس از آب دوست به نفت دوست، مقدار نفت به دام افتاده در ماتریس را پس از جابجایی غیرقابل امتزاج پذیر CO<sub>2</sub> افزایش می‌دهد و انتشار CO<sub>2</sub> را در جابجایی قابل امتزاج پذیر به تاخیر می‌اندازد.

#### ۴. فهرست مراجع

- [۱] J. F. Gabitto, "Matrix-fracture mass transfer", *SPE Improved Oil Recovery Conference*, SPE, ۱۹۹۸, pp. SPE--39702, المجلد ۱۲.
- [۲] Yiotis, "Pore-network modeling of isothermal drying in porous media", Springer, ۲۰۰۵, pp. 63--86.
- [۳] D. Silva, "Molecular diffusion in naturally fractured reservoirs: a decisive recovery mechanism", *SPE*, pp. SPE--1967, ۱۹۸۹.
- [۴] A. Jamili, "Modeling effects of diffusion and gravity drainage on oil recovery in naturally fractured reservoirs under gas injection", *University of Kansas*, ۲۰۱۰.
- [۵] L. Fei, "Lattice Boltzmann modelling of isothermal two-component evaporation in porous media", *Journal of Fluid Mechanics*, ۹۵۵, p. A18, المجلد ۹۵۵, ۲۰۲۳.
- [۶] H. a. F. Hoteit, "Numerical modeling of diffusion in fractured media for gas-injection and-recycling schemes", *Spe Journal*, ۱۴, pp. 323--337, المجلد ۱۴, ۲۰۰۹.



## مقایسه چرخه عمر زیست‌محیطی شیروانی‌های پایدار شده به دو روش

### میخکوبی و مهاربندی

فرشاد یزدانی<sup>۱\*</sup>؛ پویا علی‌پناهی<sup>۲</sup>؛ حامد صادقی<sup>۳</sup>

#### چکیده

زمین لغزش‌های ناشی از بارش باران یکی از مهمترین چالش‌های مهم طراحی و نگهداری زیرساخت‌های شهری و برون شهری است. بارش باران عمدتاً مقاومت برشی خاک را کاهش می‌دهد و در نتیجه زمین لغزش اتفاق می‌افتد. همچنین در حین چرخه‌های خشک و ترشوندگی هدایت هیدرولیکی و منحنی نگهداشت خاک آب تغییر پیدا می‌کند. این تغییرات به نحوی در پایداری شیروانی‌ها تأثیر می‌گذارد. روش‌های مختلفی از جمله میخکوبی و مهاربندی برای محافظت از شیب‌ها در برابر زمین لغزش استفاده می‌گردد. این المان‌ها با افزایش مقاومت برشی در خاک باعث تقویت شیب‌ها می‌شود. با توجه به گرمایش جهانی و توجه همگانی به مقدار گاز کربن‌دی‌اکسید انتشاری، بررسی جنبه زیست‌محیطی استفاده از این دو روش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و تاکنون مغفول مانده است. مقدار گاز کربن‌دی‌اکسید انتشاری حاصل از مصالح اولیه این دو روش با استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر مورد مطالعه قرار گرفت. مقدار گاز کربن‌دی‌اکسید روش‌های میخکوبی و مهاربندی در یک شیب با ارتفاع ۲۰ متر و زاویه شیب ۴۵ درجه به ترتیب برابر با ۷۳۸۱ و ۸۸۷۱ کیلوگرم شد. بنابراین استفاده از روش میخکوبی به دلیل انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید کمتر توصیه شد.

#### کلیدواژه‌ها

پایداری شیب‌ها، میخکوبی، مهاربندی، ارزیابی چرخه عمر، انتشار کربن

#### ۱. مقدمه

زمین لغزش‌های ناشی از بارندگی‌های شدید باعث تلفات جانی و خسارات اقتصادی به زیرساخت‌ها و صنایع داخلی در سراسر جهان شده است [1]. روش‌های مختلفی مانند میخکوبی، مهاربندی و روش جدید پوشش گیاهی برای پایداری شیب توصیه شده است. میخکوبی شامل قرار دادن عناصر تقویت کننده، معمولاً میله‌های فولادی، به طور منظم در شیب است [2]. این میخ‌ها سپس به خاک اطراف دوغاب یا چسباننده می‌شوند و باعث افزایش پایداری و مقاومت در برابر نیروهای بالقوه لغزش یا فروپاشی می‌شوند. روش مهاربندی مشابه به روش میخکوبی است با این تفاوت که در آن از کابل‌های فولادی استفاده می‌شود که از ابتدا کشیده شده است [3].

ارزیابی چرخه عمر روشی است که به طور گسترده برای تعیین کمیت و ارزیابی اثرات زیست محیطی مرتبط با یک محصول یا فرآیند در کل چرخه عمر آن استفاده می‌شود. این ابزار ارزشمندی برای درک مصرف انرژی، انتشار کربن و تأثیر کلی محیطی است [4]. ارزیابی چرخه عمر به طور کلی شامل چهار مرحله است: تعریف هدف و محدوده، فهرست چرخه عمر، ارزیابی تأثیر و تفسیر نتایج [5, 6]. تعداد محدودی از تحقیقات به طور خاص بر

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، (farshad.yazdani@sharif.edu)\*  
نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، (pouya.alipanahi@sharif.edu)

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، (hsadeghi@sharif.edu)

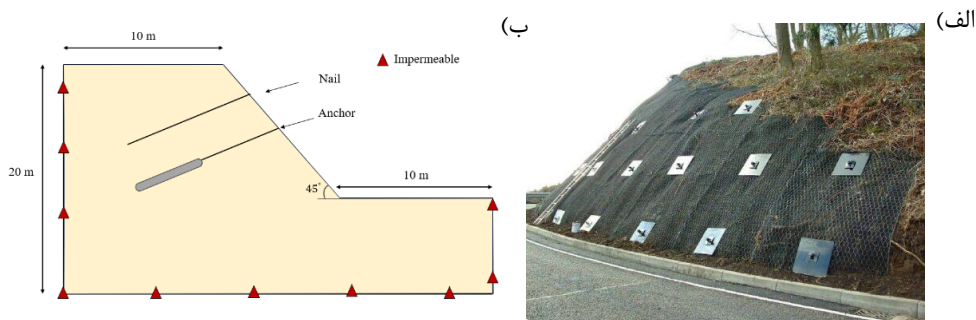
جنبه های زیست محیطی تثبیت شیب متمرکز است. استورسوند و همکاران [7] اثرات زیست محیطی چرخه حیات را بین دیوار حایل بتن مسلح معمولی و شیب مهندسی زیستی مقایسه کرد. این پژوهش به بررسی اثرات زیست محیطی استفاده از دو روش میخکوبی و مهاربندی در پایداری شیبها می‌پردازد. ابتدا به صورت عددی پایداری شیبها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس بر اساس آیین نامه FHWA شیبها با سیستم میخکوبی و مهاربندی شد. در مرحله آخر با روش ارزیابی چرخه عمر، به جنبه‌های محیط زیستی این دو روش بررسی شد.

## ۲. روش شناسی پژوهش

یک مطالعه پارامتریک به منظور بررسی پایداری شیبها در بسته نرم افزاری GeoStudio انجام شد. شرایط شیب ابتدا برای مدت کوتاهی در حالت پایدار است. هنگامی که بارندگی شروع می‌شود، تجزیه و تحلیل حالت گذرا انجام می‌شود و در همان زمان، پایداری شیب محاسبه می‌شود.

### ۱.۲ مشخصات خاک و هندسه شیب

خاک گرانیت کاملاً تجزیه شده طبق سیستم طبقه‌بندی یکپارچه خاک به عنوان ماسه سیلتی، در این مدلسازی استفاده شده است [8, 9]. چسبندگی مؤثر و زاویه اصطکاک این خاک به ترتیب برابر با صفر و ۲۹/۹ درجه است [10]. مطابق با شکل ۱ هندسه شیب با ارتفاع ۲۰ متر و زاویه ۴۵ درجه برای این مدلسازی در نظر گرفته شد. پایداری این شیب با شدت بارش باران ۷۶ میلی‌متر بر ساعت، معادل دوره بازگشت ۱۰ ساله هنگ کنگ، مورد ارزیابی قرار گرفت [8]. سه مرز راست، چپ و پایین دست نفوذناپذیر در نظر گرفته شد. سطح آب زیرزمینی ۱۰ متر پایین تر از سطح خاک قرار دارد.



شکل ۱: الف تصویری از یک شیب تقویت‌شده با روش میخکوبی و ب) هندسه شیب و شرایط مرزی

### ۲.۲ طراحی سیستم میخکوبی و مهاربندی

برای مقایسه عملکرد دو سیستم میخکوبی و مهاربندی، طراحی این دو سیستم با آیین‌نامه FHWA صورت گرفت [11]. طبق این آیین‌نامه حداقل ضریب اطمینان شیب‌های دارای سیستم میخکوبی و مهاربندی برابر ۱/۵ است. بنابراین طراحی‌های بر اساس این معیار صورت گرفت.

### ۳.۲ ارزیابی و مقایسه زیست‌محیطی استفاده از سیستم میخکوبی و مهاربندی

بررسی جنبه‌های محیط زیست یک محصول یا فرایند با استفاده از ارزیابی چرخه عمر صورت می‌گیرد. این روش مقدار کربن‌دی‌اکسید انتشاری در تولید یا ساخت یک فرایند را محاسبه می‌کند. در زمینه تثبیت شیب با استفاده از سیستم میخکوبی و مهاربندی، مصالح مورد استفاده در فرآیند ساخت و ساز شامل سیمان، ماسه، میلگرد و کابل فولادی است. نسبت‌های افزودنی برای شاتکریت و دوغاب بر اساس دستورالعمل‌های ارائه شده توسط FHWA استفاده شد [11]. جدول ۱ اطلاعات مربوط به واحدهای انتشار کربن مصالح را ارائه می‌دهد.

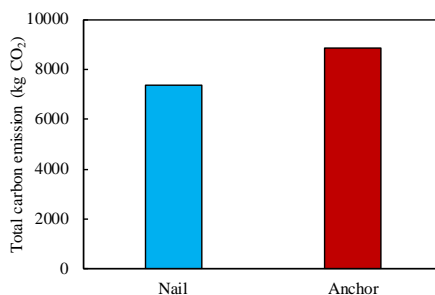
جدول ۱: مقدار کربن‌دی‌اکسید انتشاری مصالح

| مصالح: تن   | ضریب انتشار کربن‌دی‌اکسید (کیلوگرم کربن دی اکسید به ازای واحد) | مرجع |
|-------------|--|------|
| سیمان       | ۸۷۴  | [12] |
| ماسه        | ۴۶   | [13] |
| میلگرد      | ۳۵۰۰   | [12] |
| کابل فولادی | ۷۴۰۸   | [14] |

### ۳. بررسی پایداری و زیست‌محیطی روش‌های میخکوبی و مهاربندی

با بررسی پایداری شیب، مشخص شد که ضریب اطمینان شیب در حالت اولیه برابر با ۰/۸۰ است. بنابراین این شیب ناپایدار بوده و نیازمند تقویت دارد. طراحی سیستم‌های میخکوبی و مهاربندی به نحوی صورت گرفت که ضریب اطمینان آن‌ها به ترتیب برابر ۱/۵۵ و ۱/۵۰ شد که طبق آیین‌نامه FHWA این دو شیب در این حالت پایدار هستند. تعداد المان‌ها روش‌های میخکوبی و مهاربندی به ترتیب برابر با ۸ و ۵ عدد است.

شکل ۲ مقدار کربن‌دی‌اکسید انتشاری حاصل از مصالح دو روش میخکوبی و مهاربندی را نمایش می‌دهد. مقدار کل کربن‌دی‌اکسید در دو روش میخکوبی و مهاربندی به ترتیب برابر با ۷۳۸۱ و ۸۸۷۱ کیلوگرم است. روش میخکوبی به لحاظ محیط زیستی روشی بهتر از مهاربندی است. دلیل بیشتر بودن مقدار کربن‌دی‌اکسید انتشاری روش مهاربندی حتی با تعداد المان تقویتی کمتر، زیاد بودن مقدار کربن‌دی‌اکسید انتشاری مصالح مورد استفاده در این روش است.



شکل ۲: مقایسه مقدار کربن‌دی‌اکسید انتشاری در دو روش میخکوبی و مهاربندی

#### ۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش جهت ارزیابی جنبه زیست‌محیطی استفاده از روش میخکوبی و مهاربندی در تثبیت شیروانی‌های خاکی صورت گرفت. مقدار کربن‌دی‌اکسید انتشاری روش میخکوبی و مهاربندی به ترتیب برابر با ۷۳۸۱ و ۸۸۷۱ کیلوگرم محاسبه گردید. با توجه به زیاد بودن مقدار کربن‌دی‌اکسید مصالح روش مهاربندی، استفاده از روش میخکوبی در یک شیب با ارتفاع ۲۰ متر و زاویه شیب ۴۵ درجه توصیه می‌شود.

#### ۵. فهرست مراجع

- [1] H. Sadeghi, F. Yazdani, M. Gholami, P. Alipanahi, and D. Song, "Hydro-mechanical modeling of a vegetated slope subjected to rainfall", *8th International Conference on Unsaturated Soils*, Vol. 382, p. 13004, 2023.
- [2] Y. Kim, S. Lee, S. Jeong, and J. Kim, "The effect of pressure-grouted soil nails on the stability of weathered soil slopes", *Computers and Geotechnics*, vol. 49, p. 253-263, 2013.
- [3] H. Sadeghi, M. Gholami, P. AliPanahi, D. Song, "The influence of isotropic loading and unloading on anisotropic evolution of saturated hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures in a cube triaxial permeameter", *Engineering Geology*, p. 107454, 2024.
- [4] M. Khodayari, and M. Ahmadi, "Excess pore water pressure along the friction sleeve of a piezocone penetrating in clay: Numerical study", *International Journal of Geomechanics*, 20(7), 04020100, 2024.
- [5] K. Lu, X. Jiang, J. Yu, V. Tam, and M. Skitmore, "Integration of life cycle assessment and life cycle cost using building information modeling: A critical review." *Journal of Cleaner Production*, vol. 285, p. 125438, 2021.
- [6] F. Yazdani, P. AliPanahi, and H. Sadeghi, "A comparative study of environmental and economic assessment of vegetation-based slope stabilization with conventional methods", *Journal of Environmental Management*, vol. 359, p. 121002, 2024.
- [7] R. Soresund, J. Massey, and Y. Kim, "Life cycle impacts for concrete retaining walls vs. bioengineered slopes", *In GeoCongress 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation*, p. 875-882, 2008.
- [8] C.W.W. Ng, J.J. Ni, and A.K. Leung, "Effects of plant growth and spacing on soil hydrological changes: a field study", *Géotechnique*, vol. 70, p. 867-881, 2020.
- [9] F. Yazdani, H. Sadeghi, P. AliPanahi, M. Gholami, and A.K. Leung. "Evaluation of plant growth and spacing effects on bioengineered slopes subjected to rainfall", *Biogeotechnics*, 100080, 2024.
- [10] M. Ho Governing parameters for stress-dependent soil-water characteristics, conjunctive flow and slope stability. PhD Thesis, 2007.
- [11] P. Sabatini, D. Pass, and R. Bachus. "Ground Anchors and Anchored Systems Federal Highway Administration", *Office of Bridge Technology*, 1999
- [12] H. Ghayeb, H. Razak, and N. Sulong, "Evaluation of the CO2 emissions of an innovative composite precast concrete structure building frame", *Journal of Cleaner Production*, vol. 242, p. 118567, 2020.
- [13] D. Flower, and J. Sanjayan, "Green house gas emissions due to concrete manufacture" *The international Journal of life cycle assessment*, vol. 12, p. 282-288, 2007.
- [14] H. Trinh, S., Chowdhury, J. Doh, and T. Liu, "Environmental considerations for structural design of flat plate buildings–Significance of and interrelation between different design variables", *Journal of Cleaner Production*, vol. 315, p. 12812, 2021.



## بررسی تاثیر زبری شکاف بر تراوایی نسبی محیط متخلخل شکافدار به کمک

### شبیه سازی عددی مقیاس حفره

پارسا رضائی<sup>۱</sup>؛ محسن مسیحی<sup>۲</sup>

#### چکیده

مدل سازی خصوصیات جریانیه محیط های متخلخل شکافدار به علت دارا بودن تقابل قابل توجه در خصوصیات ذخیره پذیری و هدایت پذیری جریان در بخش های ماتریکس و شکاف حائز اهمیت است. در شرایط جریان دوفازی یکی از خواص جریانیه محیط که می تواند تحت تاثیر مکانیسم های حرکت سیالات در مقیاس حفره باشد، منحنی های تراوایی نسبی فازها می باشد. در هر صورت وضعیت قرار گیری شکاف در محیط متخلخل و زبری سطح شکاف از عواملی است که می تواند بر این منحنی ها موثر باشد. در این پژوهش، از تصویر میکرو سی تی یک برش دو بعدی سنگ به عنوان محیط متخلخل پایه استفاده شده و سپس با اضافه نمودن یک شکاف به صورت افقی به شبیه سازی جریان دو فازی آب و نفت پرداخته و منحنی های تراوایی نسبی دو فاز با روش JBN توسعه یافته استخراج می شود. شبیه سازی جریان دو فازی با استفاده از معادلات روش میدان فاز و در محیط نرم افزار کامسول صورت گرفته و تأثیر پارامترهایی چون عرض شکاف و زبری دیواره شکاف بر منحنی های تراوایی نسبی فازها بررسی می گردد. نتایج شبیه سازی نشان داد که وجود شکاف باعث کشیدگی تاخیری در منحنی های تراوایی نسبی گردیده و با افزایش عرض شکاف، مقادیر تراوایی نسبی فازها به طور قابل توجهی خصوصاً برای فاز تر افزایش می یابد. همچنین، وجود زبری در سطح شکاف باعث کاهش مقادیر تراوایی نسبی فازها می شود. به کمک نتایج حاصل شده می توان شناخت کامل تری از جریان در محیط متخلخل شکافدار به دست آورد.

کلیدواژه ها: ۱- تراوایی نسبی ۲- محیط متخلخل شکافدار ۳- سیلاب زنی ۴- مقیاس حفره ۵- زبری شکاف

#### ۱. مقدمه

درصد قابل توجهی از ذخایر هیدروکربنی جهان در مخازن شکافدار قرار دارند که معمولاً دارای ضریب بازیافت کمتری در مقایسه با مخازن معمولی هستند. حجم نفت باقیمانده در این نوع مخازن بیانگر یک ظرفیت مناسب برای افزایش ضریب بازیافت با بهره گیری از فرایندهای ازدیاد برداشت می باشد. به همین جهت درک مکانیسم های بازیافت نفت در این مخازن که به ابعاد نیروهای موجود در آن که شامل گرانشی، موینگی و ویسکوز هستند، بستگی دارد. هر کدام از این نیروها پایداری و توزیع اشباع سیالات را در فرایندهای جا به جایی غیر قابل امتزاج کنترل می کنند [1]. نیروهای فوق در مقیاس منفذ هستند و تأثیر قابل توجهی بر رفتار ماکروسکوپی جریان چند فازی درون محیط متخلخل و ابعاد بزرگتر از آن دارند. از این رو بررسی خصوصیات جریان با استفاده از روش های شبیه سازی در مقیاس منفذ بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از پارامترهای جریانیه، تراوایی نسبی فازها است. لاپورت و همکاران [2] با انجام شبیه سازی در مدل نفت سیاه نرم افزار اکلیپس دریافتند که با افزایش

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [parsa.rezaei@che.sharif.edu](mailto:parsa.rezaei@che.sharif.edu)

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، [masihi@sharif.edu](mailto:masihi@sharif.edu)

بازشدگی شکاف، مقادیر تراوایی نسبی افزایش خواهد یافت. در مطالعه‌ی و همکاران [3] که وجود زبری را در دیواره شکاف با استفاده از شبیه‌سازی عددی لیتیس-بولتزمن مورد بررسی قرار دادند، نتیجه گرفتند که وجود زبری باعث کاهش مقادیر تراوایی نسبی خواهد شد.

## ۲. مبانی نظری و شبیه‌سازی

در این مطالعه از نرم افزار شبیه‌ساز کامسول استفاده شده است. به کمک این نرم افزار می‌توان جریان سیالات در محیط متخلخل شکافدار را با روش شبیه‌سازی مستقیم بررسی نمود. مدل توزیع حفرات مورد استفاده در این مطالعه شامل یک محیط متخلخل شکافدار است که از سی تی اسکن یک لایه نازک از یک سنگ کربناته به دست آمده است. این عکس به صورت باینری می‌باشد که پس از آن به کمک توابع موجود در نرم افزار کامسول به صورت یک فایل قابل اجرا در محیط نرم افزار تغییر خواهد کرد. طول این مدل ۶۴۰ میکرومتر و عرض آن ۳۲۰ میکرومتر است.

### ۲-۱ شبیه‌سازی جریان سیال در محیط متخلخل

به منظور بررسی دینامیک سیستم‌های چند فازی و جریان سیال در مقیاس حفره از روش‌های شبیه‌سازی عددی استفاده می‌گردد که خود شامل ۳ رویکرد مدل سازی شبکه حفرات، لیتیس-بولتزمن و مستقیم است. رویکرد مدل سازی مستقیم شامل ۲ بخش محاسباتی می‌باشد. بخش اول محاسبات به منظور توصیف چگونگی حرکت بدنه اصلی جریان به کار می‌رود و بخش دیگر آن برای بررسی حرکت سطح تماس سیالات و تغییرات آن استفاده می‌شود. حال به منظور بررسی حرکت سیالات در کنار هم و در تماس با دیواره‌های حفرات سنگ می‌بایست این دو گروه از معادلات با یکدیگر ترکیب و حل شوند تا به وسیله آن شبیه‌سازی جریان انجام گیرد. با توجه به اهمیت توصیف صحیح فصل مشترک سیالات در محیط‌های متخلخل پیچیده از رویکردی به نام ثبت سطح مشترک بهره می‌بریم که بر اساس الگوریتم‌های اوپلرین است. این رویکرد شامل ۳ روش می‌باشد که عبارتند از: ۱- حجم سیال ۲- تنظیم سطح ۳- میدان فاز

در روش میدان فاز از مجموعه معادلات کان-هیلارد استفاده شده است. این معادلات قابلیت حفظ پایداری جرم را دارند و در ساختارهای چند بعدی قابل استفاده هستند. به همین جهت، این روش به دلیل حفظ پایداری جرم، درک تأثیرگذاری ترشوندگی بر روی دیواره حفرات، مدل سازی صحیح و پایدار سطح مشترک بین سیالات و زمان حل مناسب میان سایر روش‌ها ارجحیت دارد. در روش میدان فاز از یک لایه نازک یا ضخامت متغیر بین دو سیال استفاده می‌گردد که نیروهای مرزی روی آن به صورت همگن توزیع شده‌اند. به جهت بررسی این لایه پارامتر میدان فاز ( $\varphi$ ) تعریف شده است که در بخش‌های تک فازی ثابت می‌باشد؛ اما در لایه مرزی دچار تغییراتی خواهد شد که به صورت معادله ۱ تعریف می‌گردد:

$$V_{f1} = \frac{1 - \varphi}{2}, \quad V_{f2} = \frac{1 + \varphi}{2} \quad (1)$$

در معادلات فوق،  $V_{fi}$  به پارامتر میدان فاز مرتبط است که با توجه به موقعیت آن در جریان سیالات به دو بخش تقسیم می‌گردد:

۱. زمانی که پارامتر میدان فاز برابر ۱ و ۱- باشد، موقعیت مورد بررسی در بدنه اصلی جریان قرار دارد.

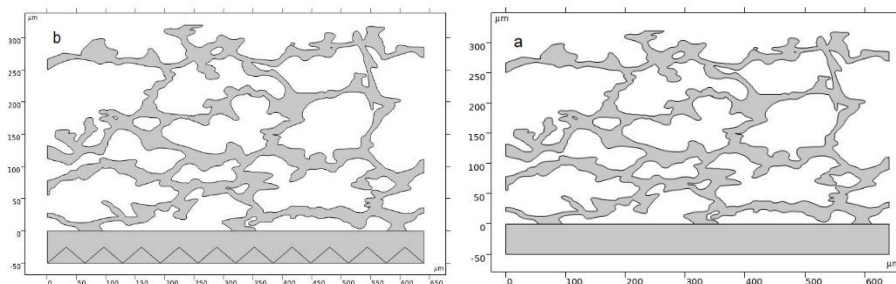
۲. زمانی که پارامتر میدان فاز بین ۱ و ۱- باشد، موقعیت مورد بررسی بر روی لایه مرزی قرار دارد.

### ۲-۲ شرایط اولیه و مرزی

شرایط اولیه در مدل به این صورت است که محیط متخلخل به صورت کامل اشباع از نفت بوده و آب به درون آن تزریق می‌گردد. همچنین، سرعت سیالات در سرتاسر محیط برابر صفر بوده و فشار به صورت اتمسفری می‌باشد. هم‌چنین، شرایط مرزی در مدل نیز به این شرح است که سرعت تزریق سیال آب برابر با ۰/۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است که از سمت چپ محیط متخلخل می‌باشد. همچنین، فشار در خروجی محیط برابر با فشار اتمسفری است که در سمت راست محیط متخلخل می‌باشد.

### ۲-۳ شماتیک محیط‌های متخلخل شکافدار

در این پژوهش از ۲ مدل شکافدار استفاده شده است که محیط اول دارای شکاف صاف به صورت افقی و محیط دوم دارای شکاف افقی به همراه زبری می‌باشد که شماتیک کلی آنها در شکل ۱ قرار داده شده است.



شکل ۱: شماتیک مدل‌های شکافدار دارای (a) شکاف به صورت افقی و (b) شکاف افقی همراه با زبری

### ۲-۴ محاسبه تراوایی نسبی فازها در محیط متخلخل شکافدار

در این پژوهش از روش JBN توسعه یافته به منظور محاسبه تراوایی نسبی سیالات در حالت غیر پایا در شرایط دو فازی که متناسب با فرضیات مسئله است، استفاده شده است [4]. با استفاده از این پارامتر می‌توان سهولت حرکت هر یک از فازها، اشباع باقیمانده فازها و نوع ترشوندگی محیط رسوبی را به دست آورد. برای محاسبه تراوایی نسبی دو فاز آب و نفت درون محیط متخلخل مد نظر می‌بایست از معادله ۲ استفاده کرد.

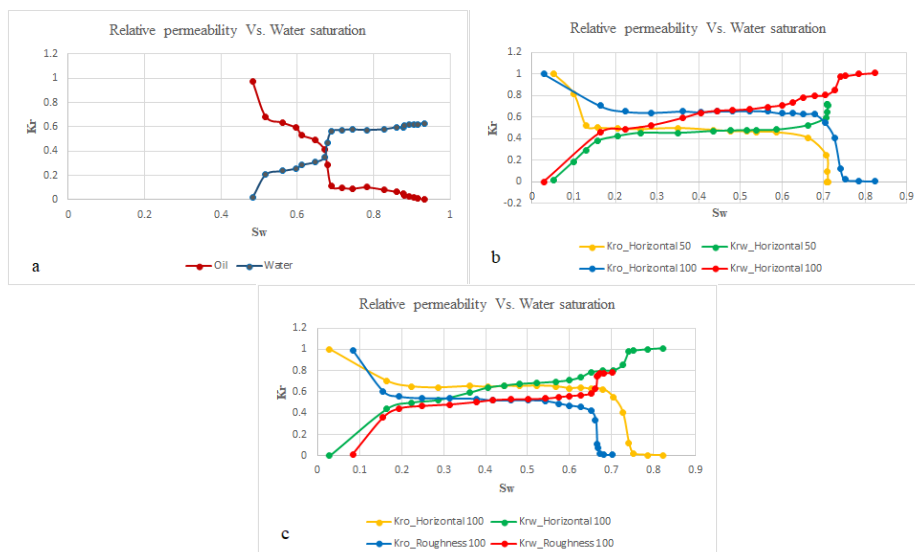
$$K_{rw} = \frac{u_{fw} L \mu_w}{K} \frac{d \left( \frac{1}{t_d} \right)}{d \left( \frac{\Delta P}{t_d} \right)}, \quad K_{ro} = \frac{(1 - f_w) \mu_o}{f_w \frac{\mu_w}{K_{rw}}} \quad (2)$$

در روابط تراوایی نسبی،  $f_w$  کسر جریانی آب در خروجی محیط و  $t_d$  حجم سیال تزریقی به داخل محیط متخلخل می‌باشد.

### ۳. نتایج و بحث

منحنی‌های تراوایی نسبی در سه حالت پایه (محیط متخلخل بدون شکاف)، محیط با شکاف صاف و محیط با شکاف دارای زبری در شکل ۲ نمایش داده شده است.





شکل ۲: منحنی های تراوایی نسبی بر حسب اشباع آب برای سه حالت (a) مدل پایه (بدون شکاف) ، (b) مدل با شکاف صاف و (c) مدل با شکاف دارای زبری در دیواره

همان‌طور که در نمودارهای a و b مشاهده می‌گردد، با افزایش عرض شکاف مقادیر تراوایی نسبی برای هر دو فاز افزایش خواهد یافت که نتیجه آن حرکت منحنی‌های تراوایی نسبی برای هر دو فاز آب و نفت به سمت بالا می‌باشد. این امر بیانگر حرکت بهتر فازها درون محیط متخلخل شکافدار با افزایش عرض شکاف است. به علاوه، محل تلاقی منحنی‌ها برای هر دو محیط شکافدار در محدوده ۵۰٪ می‌باشد که مطابق با فرضیات شکاف است. هم‌چنین، همان‌طور که در نمودار c مشاهده می‌گردد با در نظر گرفتن زبری در سطح شکاف منحنی‌های تراوایی نسبی برای هر دو فاز آب و نفت به سمت پایین حرکت کرده و مقادیر آن کاهش می‌یابد که بیانگر حرکت محدودتر این فازها درون محیط متخلخل شکافدار همراه با زبری است. هم‌چنین، همان‌طور که مشاهده می‌گردد، محل تلاقی منحنی‌ها برای هر دو محیط شکافدار در محدوده ۵۰٪ می‌باشد که مطابق با فرضیات شکاف است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

با انجام شبیه‌سازی در مقیاس حفره میزان تاثیر وجود شکستگی در محیط متخلخل بر نمودارهای تراوایی نسبی بررسی گردید و نتایج زیر به دست آمد:

- وجود شکاف در جهت جریان در محیط متخلخل باعث کانالیزه شدن جریان و لذا کشیدگی تاخیری در منحنی‌های تراوایی نسبی می‌گردد.
- با افزایش اندازه عرض شکاف در مدل محیط متخلخل شکافدار، مقادیر تراوایی نسبی فازها افزایش می‌یابد.
- در نظر گرفتن زبری در سطح دیواره شکاف باعث کاهش مقادیر تراوایی نسبی هر دو فاز می‌گردد.

## ۵. منابع

- [1] R. Kharrat, M.Zallaghi and H. Ott, "Performance quantification of Enhanced Oil Recovery Methods in fractured reservoirs," *Energies*, vol. 14, no. 16, p. 4739, 2021.
- [2] J. J. De la Porte, C. A. Kossack and R. W. Zimmerman, "The Effect of Fracture Relative Permeabilities and Capillary Pressures on the Numerical Simulation of Naturally Fractured Reservoirs," in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, Texas, 2005.
- [3] J. Yi, H. Xing, J. Wang, Z. Xia and Y. Jing, "Pore-scale study of the effects of surface roughness on relative permeability of rock fractures using lattice Boltzmann method," *Chemical Engineering Science*, vol. 209, 2019.
- [4] X. Chen, A. Kianinejad and D. A. DiCarlo, "An extended JBN method of determining unsteady-state two-phase relative permeability," *Water Resources Research*, vol. 52, no. 10, pp. 8374-8383, 2016.



## مطالعه عددی اثر توزیع مکانی بارش مصنوعی بر جریان غیراشباع در

### شیروانی خاکی محدود

ثمین سادات خشوعی اصفهانی<sup>۱\*</sup>؛ افشین تقوایی<sup>۲</sup>؛ حامد صادقی<sup>۳</sup>؛

#### چکیده

زمین لغزش سطحی سالانه باعث خسارات مالی و جانی قابل توجهی می‌شود. علیرغم اینکه بیشتر مطالعات قبلی بر روی دامنه‌های بزرگ مقیاس مناطق کوهستانی متمرکز بوده‌اند، بررسی زمین لغزش در مقیاس کوچک شیروانی‌های درون شهری نیازمند تحلیل جریان دوفازه تحت بارندگی است. بنابراین، هدف این پژوهش بررسی تأثیر توزیع بارش مصنوعی موضعی ناشی از آبیاری بر جریان غیراشباع در شیب‌های خاکی کوچک مقیاس در سناریوهای مختلف بارش است. برای نیل به این هدف، یک مدل عددی از یک شیب خاکی با استفاده از نرم‌افزار چندفازه کامسول ایجاد شد و بارش مصنوعی با توزیع‌های مکانی مختلف در چهار سناریو اعمال شد. به طور خاص، بارش در مرز بالای شیب، میانه شیب، پایین شیب و کل مرز شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که کمترین تغییرات فشار آب منفذی در پنجه‌ی شیب زمانی رخ می‌دهد که بارش در مرز بالای شیب توزیع می‌شود و بحرانی‌ترین حالت زمانی است که بارش در کل سطح مدل اعمال می‌شود. این یافته‌ها نقش توزیع بارش در پایداری شیب را به ویژه در زمین‌های کشاورزی و پارک‌های تفریحی که آبیاری مصنوعی در آن رایج است، برجسته می‌کند.

#### کلیدواژه‌ها

خاک غیراشباع؛ شیروانی محدود؛ پایداری شیب؛ بارش مصنوعی؛ الگوی توزیع مکانی؛

#### ۱. مقدمه

یکی از عوامل اصلی در بروز زمین لغزش، بارش باران می‌باشد. در واقع، نفوذ باران باعث کاهش میزان مکش ساختاری شده و احتمال گسیختگی شیب را افزایش می‌دهد [۱]. از این رو شناخت جریان درون محیط غیراشباع ضروری است. پژوهش‌های پیشین به مطالعه عددی شیروانی‌های خاکی محدود در شرایط مختلف شدت بارش و زاویه شیب پرداخته‌اند. اینگ و شی با مدل‌سازی عددی، تأثیر بارش با شدت‌های مختلف بر شیروانی خاکی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بارش باران بر سطح شیب‌دار، سطح آب زیرزمینی را در ناحیه غیراشباع خاک ایجاد می‌کند که این افزایش در ناحیه پایینی شیب بیشتر است [۲]. برای بررسی زمین لغزش در مقیاس کوچک در مناطق شهری، تحلیل جریان در شیروانی خاکی تحت بارندگی ضروری است. مهم‌تر از آن، مهندسان زمین‌شناسی دریافته‌اند که زمین لغزش‌های کوچک مقیاس می‌توانند عواقب شدیدتری نسبت به لغزش‌های بسیار بزرگ داشته باشند [۳]. پاجالی و همکاران، دریافته‌اند که در شیروانی‌های کوچک مقیاس استحکام مربوط به مکش خاک در مقایسه با مقاومت برشی کل غالب است و بنابراین مکش نقش عمده‌ای در حفظ پایداری شیب تحت بارندگی ایفا می‌کند [۴]. به دلیل این که شکست‌های شیب ناشی از بارندگی معمولاً کم‌عمق و با عمق کمتر از ۳

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران  
([samin.khoshouei99@sharif.edu](mailto:samin.khoshouei99@sharif.edu)) \* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، ([afshin.ta31@sharif.edu](mailto:afshin.ta31@sharif.edu))

<sup>۳</sup>دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران ([hsadeghi@sharif.edu](mailto:hsadeghi@sharif.edu))

متر هستند، می‌توان نتیجه گرفت که مکش خاک در شیروانی‌های کوچک مقیاس غالب‌تر است [۵]. آبیاری هوشمند به‌عنوان یک رویکرد برای بهینه‌سازی مصرف آب و افزایش بهره‌وری محصول است. آبیاری هوشمند شامل روش‌های مختلف همچون آبیاری قطره‌ای، آبیاری بارانی و غیره می‌باشد. آبیاری بارانی شامل آبیاری گیاهان از طریق فرآیندی است که تقلید از بارش طبیعی است. آبیاری بارانی قابلیت استفاده در شیب‌های مختلف زمین را دارد [۶]. شناخت جریان غیر اشباع در شیروانی‌های خاکی در شرایط آبیاری بارانی مختلف، برای بررسی تغییرات مکش حائز اهمیت است. از محدودیت‌های پژوهش‌های اخیر می‌توان به عدم بررسی اثر توزیع مکانی بارش مصنوعی در شیب‌های خاکی اشاره کرد. از مصادیق بارز این پدیده می‌توان به بارش مصنوعی ایجاد شده توسط سیستم‌های آبیاری هوشمند در هنگام عمل‌آوری بذرها در زمین‌های کشاورزی اشاره کرد.

در این پژوهش به اثر توزیع مکانی بارش مصنوعی بر جریان غیر اشباع در شیروانی‌های خاکی محدود با هدف مقایسه نتایج مرتبط با تغییرات مکش در چهار حالت بارش مختلف پرداخته‌ایم. یک شیروانی خاکی تحت بارندگی مصنوعی توسط چندفازه کامسول<sup>۱</sup> مدل‌سازی شده و به تحلیل اثر توزیع مکانی مختلف بارش مصنوعی بر میزان فشار آب حفره‌ای پرداخته شده است.

## ۲. روش‌شناسی پژوهش

در مدل عددی شیروانی خاکی معادله ریچاردز<sup>۲</sup> برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک‌های غیراشباع و مدل ون گنوختن<sup>۳</sup> برای توصیف خصوصیات نگهداشت آب-خاک غیراشباع استفاده شد. نوع خاک رسی فرض می‌شود. پارامترهای هیدرولیکی بر اساس لیو و همکاران است [۷]. پارامترهای مدل در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱: پارامترهای ورودی مدل عددی

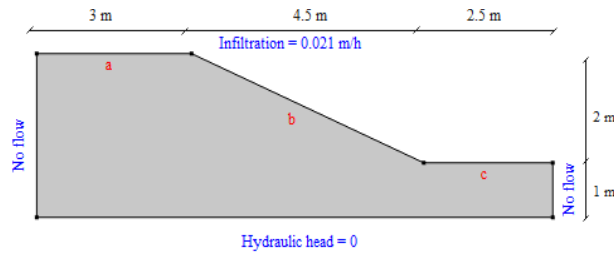
| پارامتر    | تعریف                     | مقدار | واحد              |
|------------|---------------------------|-------|-------------------|
| $K_S$      | هدایت هیدرولیکی اشباع خاک | ۰/۸   | m/day             |
| $\theta_S$ | رطوبت حجمی در حالت اشباع  | ۰/۴   | -                 |
| $\theta_r$ | رطوبت حجمی پسماند         | ۰/۱   | -                 |
| rho        | وزن مخصوص خاک             | ۱۷۴۳  | kg/m <sup>3</sup> |
| $\alpha$   | پارامتر ون گنوختن         | ۱     | 1/m               |
| n          | پارامتر ون گنوختن         | ۲/۳   | -                 |

شکل ۱ هندسه و شرایط مرزی مدل را نشان می‌دهد. ابعاد مدل مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است. سطح آب زیرزمینی در مرز پایین و هد هیدرولیکی صفر متر در نظر گرفته شده است. مرزهای چپ و راست اجازه عبور جریان را ندارند. نرخ بارش ۰/۰۲۱ متر در ساعت در مرز بالا در چهار سناریو بارش مختلف به عنوان شرایط مرزی هیدرولیکی به مدت یک ساعت اعمال شده است. سناریوی اول بارش در مرز a، سناریوی دوم بارش در مرز b، سناریوی سوم بارش در مرز c و سناریوی چهارم بارش در کل مرز بالای مدل می‌باشد.

<sup>1</sup> COMSOL Multiphysics

<sup>2</sup> Richards

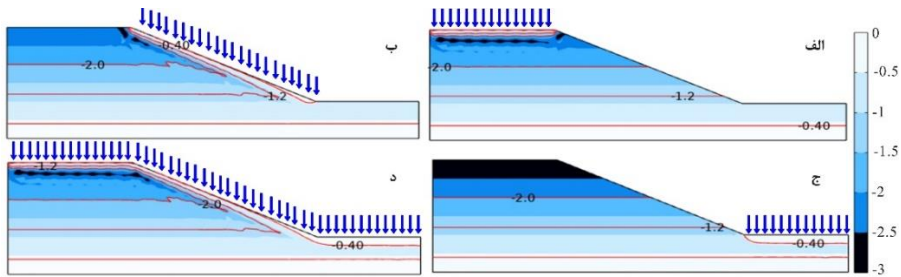
<sup>3</sup> van Genuchten



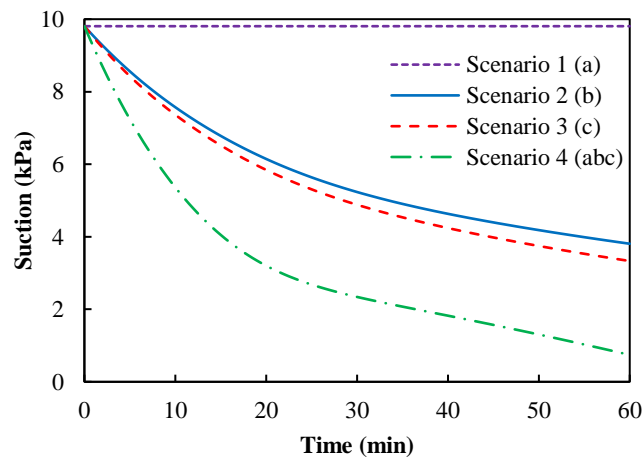
شکل ۱: هندسه و شرایط مرزی شیب خاکی مدلسازی شده

### ۳. تحلیل نتایج

شکل ۲ تغییر ارتفاع فشار آب حفره‌ای در شیب خاکی در مدت زمان ۱ ساعت بعد از شروع بارندگی را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل‌ها مشخص است، بیشترین ارتفاع فشار آب (کمترین مکش خاک) حفره‌ای در سطح شیب زمانی اتفاق می‌افتد که آبیاری در سراسر مرز بالای مدل انجام شود. پس از آن، به ترتیب در سناریو دوم، اول و سوم مکش افزایش می‌یابد.



شکل ۲: تغییر ارتفاع فشار آب حفره‌ای بعد از گذشت یک ساعت از شروع بارندگی: الف) سناریوی اول، ب) سناریوی دوم، ج) سناریوی سوم، د) سناریوی چهارم



شکل ۳: تغییرات مکش در پنجه‌ی شیب نسبت به زمان در چهار سناریوی متفاوت

با توجه به پژوهش‌های پیشین، بحرانی‌ترین نقطه در شیب‌های خاکی در پنجه‌ی شیب قرار دارد. به همین دلیل در شکل ۳ نتایج تغییر مکش در طول زمان بر اساس سناریوهای مختلف مقایسه شده است. همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است، کمترین مکش در این نقطه در طول کل مدت زمان بارش مربوط به سناریو چهارم است که با گذشت زمان همان‌طور که انتظار می‌رود، مکش کاهش می‌یابد. در سناریوهای دوم و سوم، نرخ کاهش و مقادیر مکش در طول زمان مشابه هستند، با این تفاوت که میزان مکش در سناریو سوم اندکی کمتر از سناریو دوم است. دلیل این تفاوت این است که وقتی بارش فقط در روی شیب اتفاق می‌افتد، روان‌آب بیشتری تولید می‌شود و میزان نفوذ کمتر است، در حالی که با ایجاد بارش در پایین‌دست شیب، نرخ نفوذ در پنجه بیشتر بوده و مکش کمتری ایجاد می‌کند. در سناریو اول تغییر قابل توجهی در طول زمان مشاهده نمی‌شود که می‌توان نتیجه گرفت بارش مصنوعی در بالادست شیب کمترین تأثیر را بر تغییرات میزان مکش در پنجه دارد و باعث ایجاد مکش بیشتر و ثابتی در طول زمان شده و پایداری بیشتر شیب را تضمین می‌کند.

#### ۴. نتیجه‌گیری

مدلسازی عددی شیروانی خاکی با سناریوهای مختلف بارش مصنوعی انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد برای آبیاری زمین‌های کشاورزی شیب‌دار، بارش در سراسر مرز بالای مدل باعث بیشترین میزان فشار آب حفره ای در نزدیک سطح شیب و بحرانی‌ترین حالت برای پایداری شیب و پس از آن حالتی که تنها روی شیب بارش داریم، می‌باشد. همچنین بارش در بالادست و پایین‌دست شیب تأثیر اندکی در تغییرات مکش در مرز شیب دارد. علاوه بر آن، می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین میزان پایداری در شیب در طول بارش مربوط به حالتی است که بارش در بالادست شیب اتفاق می‌افتد.

#### ۵. فهرست مراجع

- [۱] C. Gallage, T. Abeykoon, and T. Uchimura, 'Instrumented model slopes to investigate the effects of slope inclination on rainfall-induced landslides', *Soils Found.*, vol. 61, no. 1, pp. 160–174, 2021, doi: 10.1016/j.sandf.2020.11.006.
- [۲] C. W. W. Ng and Q. Shi, 'A Numerical Investigation of the Stability of Unsaturated Soil Slopes Subjected to Transient Seepage', *Comput. Geotech.*, vol. 22, no. 1, pp. 1–28, 1998, doi: 10.1016/S0266-352X(97)00036-0.
- [۳] H. Q. Yang, Y. Yan, X. Wei, Z. Shen, and X. Chen, *Probabilistic Analysis of Highly Nonlinear Models by Adaptive Sparse Polynomial Chaos: Transient Infiltration in Unsaturated Soil*, vol. 20, no. 8. 2023. doi: 10.1142/S0219876223500068.
- [۴] S. Pajalić, J. Peranić, S. Maksimović, N. Čeh, V. Jagodnik, and Ž. Arbanas, 'Monitoring and data analysis in small-scale landslide physical model', *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 11, 2021, doi: 10.3390/app11115040.
- [۵] L. L. Zhang, J. Zhang, L. M. Zhang, and W. H. Tang, 'Stability analysis of rainfall-induced slope failure: A review', *Proc. Inst. Civ. Eng. Geotech. Eng.*, vol. 164, no. 5, pp. 299–316, 2011, doi: 10.1680/geng.2011.164.5.299.
- [۶] M. Sultan, *Irrigation and Drainage - Recent Advances*, no. February. 2022. doi: 10.5772/intechopen.100884.
- [۷] C. Liu, Y. Yan, and H. Q. Yang, 'Numerical modeling of small-scale unsaturated soil slope subjected to transient rainfall', *Geosystems and Geoenvironment*, vol. 2, no. 4, 2023, doi: 10.1016/j.geogeo.2023.100193.



## بررسی هدایت هیدرولیکی ناهمسان خاک‌های حاوی بنتونیت با تراواسنج

### سه‌محوری مکعبی

مصطفی غلامی<sup>۱\*</sup>؛ پویا علی‌پناهی<sup>۲</sup>؛ حامد صادقی<sup>۳</sup>

#### چکیده

درک خصوصیات هیدرولیکی از جمله هدایت هیدرولیکی خاک‌ها به عنوان یک محیط متخلخل برای کاربردهای مختلف ژئوتکنیکی بسیار مهم است. دلیل اهمیت این موضوع، حاکمیت جریان‌های زیرسطحی دوبعدی و تأثیرگذاری مستقیم درجه ناهمسانی به نسبت هدایت هیدرولیکی بر بازتوزیع فشار آب حفره‌ای در حین بارندگی و در نتیجه ناپایداری شیروانی‌های طبیعی و مصنوعی از جمله خاکریزهای راه و راه‌آهن است. با توجه به تأثیرگذار بودن عوامل متعدد بر هدایت هیدرولیکی ناهمسان، در پژوهش‌ها اجماع کلی بر نتایج حاصل نشده زیرا رفتارهای متفاوت و بعضاً متضادی مشاهده شده است. بنابراین هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی خصوصیات تراوایی ناهمسان خاک‌های حاوی بنتونیت با یک رویکرد آزمایشگاهی است. ابتدا به منظور رفع منابع شناخته‌شده خطا در روش‌های متداول اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی و همچنین مشکلات ناشی از نمونه‌گیری در خاک‌های حساس، یک دستگاه تراواسنج سه‌محوری مکعبی توسعه یافت. در گام بعدی به مطالعه هدایت هیدرولیکی ناهمسان خاک‌های مصنوعی بر پایه بنتونیت پرداخته شد و بینش‌های جدیدی در مورد تکامل پیچیده هدایت هیدرولیکی ناهمسان با درصد بنتونیت و مسیر تنش بارگذاری ارائه شد. نتایج با افزایش سی درصدی بنتونیت رشد نسبت ناهمسانی از  $4/5$  به  $7$  را نشان داد. با این حال نسبت ناهمسانی با بارگذاری همه‌جانبه برای نمونه‌های با  $40$  و  $70$  درصد بنتونیت کاهش یافت. از نظر عملکرد طولانی مدت یک لاینر دفن زباله با بنتونیت متوسط تا بالا، علیرغم کاهش  $10$  تا  $30$  درصدی هدایت هیدرولیکی با بارگذاری، جریان شیرابه در مقایسه با شرایط اولیه ناهمسانی کمتری خواهد داشت که این موضوع با کاهش نسبت ناهمسانی نشان داده شد.

#### کلیدواژه‌ها

هدایت هیدرولیکی، ناهمسانی، دستگاه تراواسنج سه‌محوری با نمونه مکعبی، بنتونیت

#### ۱. مقدمه

جریان در اکثر سازه‌های مهندسی مانند مدفن‌های زباله، خاکریزها، هسته سدها و روسازی راه‌ها به علت روش تراکم، ذاتاً دوبعدی است [1]. اگرچه عموماً خاک را به عنوان یک ماده همسانگرد از نظر هدایت هیدرولیکی فرض می‌کنیم، این فرض ممکن است همیشه معتبر نباشد اگر اجزای خاک از ذرات ورقه‌ای تشکیل شده باشند. به عنوان مثال، جزء اصلی بنتونیت، مونت‌موریلونیت با هندسه صفحه‌ای شکل است [2]. بر این اساس، یک ناهمسانی ذاتی اولیه در رس‌های متراکم وجود دارد که از جهت‌گیری عمدتاً افقی ذرات رس پوسته‌ای ناشی می‌شود. همچنین بر اساس بررسی اخیر صادقی و علی‌پناهی، حدود  $12$  درصد لایه‌های طبیعی خاک زمین را را

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، (mostafa.gholami@sharif.edu)\*  
نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، (pouya.alipanahi@sharif.edu)

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، (hsadeghi@sharif.edu)

خاک‌های متورم‌شونده با مقدار معینی کانی‌های رسی از جمله مونت‌موریلونیت تشکیل می‌دهند [3]. پژوهش‌هایی تا به امروز با دو روش آزمایشگاهی برای ارزیابی هدایت هیدرولیکی ناهمسان انجام شده‌است. اولین و متداول‌ترین روش، نمونه‌گیری از خاک به صورت متعامد است [4]. با این حال، نمونه‌های بازیابی‌شده از یک نمونه متراکم‌شده بزرگتر قطعاً در معرض درجه‌ای از دست‌خوردگی قرار می‌گیرند. روش دوم تهیه نمونه‌های مکعبی و آزمایش آن‌ها در جهت دلخواه در تراوانسج جدارصلب معمولی است [5]. نتایج حاصل از این روش نیز در معرض منابع شناخته‌شده خطا مانند اشباع ناقص، ارزیابی اشتباه تغییرات حجم نمونه، و ایجاد مسیرهای جریان ترجیحی در سلول‌های جدارصلب است [6, 7].

بنابراین، هدف اصلی این مطالعه، بررسی سیر تکاملی هدایت هیدرولیکی ناهمسان در خاک‌های با درصد بنتونیت متوسط تا بالا در امتداد مسیر تنش بارگذاری است. برای دستیابی به این هدف، یک تراوانسج سه محوری مکعبی طراحی و به کارگیری شد.

## ۲. روش شناسی پژوهش

### ۱.۲ دستگاه تراوانسج سه‌محوری با نمونه مکعبی

دستگاه مورد استفاده در این پژوهش در واقع یک نسخه اصلاح‌شده از یک تراوانسج سه‌محوری است به نحوی که بتواند نمونه‌های مکعبی را جهت بررسی هدایت هیدرولیکی ناهمسان مورد آزمون قرار دهد. تراوانسج توسعه‌یافته با اعمال فشار برگشتی برای اطمینان از اشباع کامل، بر چالش دست‌خوردگی نمونه به علت نمونه‌برداری غلبه می‌کند. همچنین اندازه‌گیری دقیق نسبت تخلخل نیز از طریق ارزیابی تغییرات حجم به دست می‌آید. در مقایسه با تراوانسج‌های جدارصلب معمولی امتیازهایی وجود دارد. جدار انعطاف‌پذیر، هرگونه مسیر جریان ترجیحی را حذف می‌کند و امکان اشباع کامل را از طریق فشار همه‌جانبه و پس‌فشار فراهم می‌کند. به علاوه امکان بارگذاری-باربرداری دلخواه و انعطاف‌پذیر نمونه آزمایشی نیز فراهم است. جزئیات تکمیلی از طراحی و توسعه این دستگاه در پژوهش صادقی و همکاران قابل مشاهده است [8].

### ۲.۲ مشخصات خاک

به منظور تولید مخلوط‌های مختلف بنتونیت-ماسه در این پژوهش، مصالح پایه بنتونیت تجاری و خاک ماسه‌ای غیرچسبنده فیروزکوه انتخاب و در درصدهای مختلف مخلوط شدند. دو خاک آزمایشی هدف با اختلاط خاک بنتونیت-ماسه برای بررسی تأثیر محتوای بنتونیت بر هدایت ناهمسان در نسبت‌های جرمی ۷۰-۳۰ و ۴۰-۶۰ تولید شد. بنابراین، درصد بنتونیت به عنوان معیاری برای تعریف نام خاک انتخاب شد و به ترتیب دو خاک B70 و B40 نام‌گذاری شد. خاک‌های B70 و B40 بر اساس سیستم طبقه‌بندی یکپارچه خاک (USCS) به ترتیب به عنوان CH و MH طبقه‌بندی شدند. مشخصات کامل پایه خاک در جدول ۱ قابل مشاهده است.

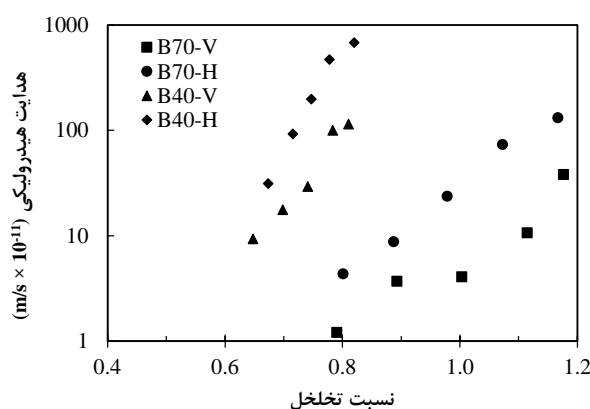


جدول ۱: مشخصات پایه خاک

| Properties  | Soil samples |       |
|---|--------------|-------|
|   | B70          | B40   |
| Constituents (%)                                      |              |       |
| Firuzkuh soil   | 30           | 60    |
| Commercial bentonite                                  | 70           | 40    |
| Fines content, $FC$ (%)                               | 77           | 64    |
| Specific gravity, $G_s$                               | 2.68         | 2.69  |
| Atterberg limits (%)                                  |              |       |
| Liquid limit, $w_L$                                   | 79           | 54    |
| Plastic limit, $w_P$                                  | 35           | 30    |
| Plastic Index, $PI$                                   | 44           | 24    |
| Compaction characteristics                            |              |       |
| Dry unit weight, $\gamma_d \max$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 14.81        | 16.77 |
| Optimum water content (%)                             | 26.5         | 19.0  |

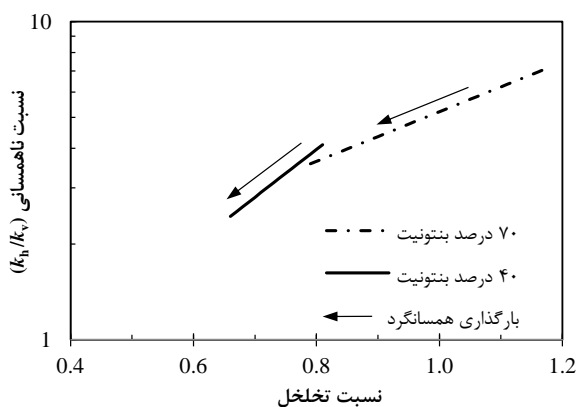
### ۳. نتیجه‌گیری

شکل ۱ توابع هدایت هیدرولیکی در مقابل نسبت تخلخل را در امتداد هر دو جهت قائم و افقی برای همه آزمایش‌ها به طور جداگانه نشان می‌دهد. نتایج تمام آزمایش‌ها تأیید می‌کند که صرف‌نظر از درصد بنتونیت و شرایط تراکم، روندهای خطی در فضای نیمه لگاریتمی هدایت هیدرولیکی به نسبت تخلخل می‌تواند به خوبی تمام توابع هدایت هیدرولیکی را توصیف کند. نتایج نشان می‌دهد که جهت‌گیری موازی ذرات پوسته‌ای در انرژی تراکم بالا و در درصد بنتونیت متوسط تا زیاد غالب است. به عبارت دیگر، هم انرژی تراکم و هم درصد بنتونیت منجر به ساختار پراکنده بارزی شده است. بنابراین، برای نمونه‌های B70-95 و B40-95 در کل محدوده نسبت تخلخل هدایت هیدرولیکی افقی بالاتر از قائم است. نتایج را می‌توان با توجه به ویژگی‌های تراکم خاک‌های رسی توضیح داد. در واقع افزایش انرژی تراکم در حین آماده‌سازی نمونه، ذرات رس صفحه‌ای شکل را مجبور می‌کند تا به صورت عمود بر جهت تراکم قرار بگیرند، بنابراین درجه کمتری از لخته‌سازی حاصل می‌شود.



شکل ۱: مقایسه توابع هدایت هیدرولیکی ناهمسان برای تمامی نمونه‌ها

با توجه به نتایج شکل ۲، بارگذاری همسانگرد منجر به کاهش نسبت ناهمسانی نمونه‌ها با درصد بنتونیت متوسط به بالا می‌شود. نسبت ناهمسانی B40-95 از ۴/۵ به ۲ کاهش می‌یابد در حالی که مقادیر متناظر B70-95 و B40-95 کاهش بیشتری را از ۷ به ۳/۵ تجربه می‌کنند. توضیح احتمالی از ساختار پراکنده غالب B40-95 و B70-95 در شرایط اولیه ناشی می‌شود. بنابراین، به دلیل آرایش لبه به لبه ذرات صفحه‌ای شکل، ساختار بسیار ضعیف‌تری در جهت افقی در مقایسه با ساختار عمودی وجود دارد. در نتیجه، هر گونه افزایش تنش محصورکننده، ذرات پوسته‌ای را وادار به چرخش نسبت به افق می‌کند و درجه لخته‌ای را افزایش می‌دهد. در نتیجه، درجه ناهمسانی با بارگذاری همسانگرد برای کل محدوده تنش در نظر گرفته‌شده در این مطالعه کم شد.



شکل ۲: تکامل نسبت ناهمسانی با نسبت تخلخل برای خاک‌های با درصد بنتونیت مختلف

#### ۴. فهرست مراجع

- [1] Dos Santos, R.A., Esquivel, E.R., "Saturated anisotropic hydraulic conductivity of a compacted lateritic soil" *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* vol. 10, p. 986–991, 2018.
- [2] Jia, R., Lei, H., Hino, T., Li, K., "Changes in the permeability and permeability anisotropy of reconstituted clays under one-dimensional compression and the corresponding micromechanisms" *Int. J. Geomech.* vol. 22, 04021282, 2022.
- [3] Sadeghi, H., AliPanahi, P., "Saturated hydraulic conductivity of problematic soils measured by a newly developed low-compliance triaxial permeameter." *Eng. Geol.* 278, 105827, 2020
- [4] Shafiee, A., "Permeability of compacted granule-clay mixtures." *Engineering Geology* vol. 97, p. 199–208, 2008.
- [5] Qiu, Z.F., Wang, J.J., "Experimental study on the anisotropic hydraulic conductivity of a sandstone–mudstone particle mixture." *J. Hydrol. Eng.* vol. 20 (11), 04015029, 2015.
- [6] Kuncoro, P.H., Koga, K., Kanayama, M., Muto, Y., "Anisotropy of transport properties of a remolded, compacted Andisol." *Soil Sci. Soc. Am. J.* vol. 79, p. 1267–1274, 2015.
- [7] Yazdani, F., AliPanahi, P., and Sadeghi, H., "A comparative study of environmental and economic assessment of vegetation-based slope stabilization with conventional methods", *Journal of Environmental Management*, vol. 359, p. 121002, 2024.
- [8] Sadeghi, H., Gholami, M., AliPanahi, P., Song, D., "The influence of isotropic loading and unloading on anisotropic evolution of saturated hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures in a cube triaxial permeameter", *Engineering Geology*, p. 107454, 2024.



## پیش‌بینی میزان ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در مخازن زیر زمینی با استفاده از هوش مصنوعی

سعید آقاییک<sup>۱</sup>، سید جواد رضوی نژاد<sup>۱</sup>، سعید صادق نژاد<sup>۱</sup>

### چکیده

ذخیره‌سازی زیرزمینی دی‌اکسیدکربن یکی از راه‌های کاهش اثرات منفی انتشار گازهای گلخانه‌ای بر تغییرات آب‌وهوایی کره زمین است. این روش به‌عنوان یکی از راهکارهای اساسی برای محدود کردن افزایش دمای جهانی به کمتر از ۲ درجه سانتی‌گراد تا پایان قرن بیست و یکم در نشست تخصصی کنوانسیون ملل متحد در دسامبر سال ۲۰۱۵ پاریس مورد توافق قرار گرفت. همچنین یک روش راهبردی است که از یک سو، امکان تداوم کار کارخانه‌های تولیدی را فراهم نموده و کنترل هوای پاک را امکان‌پذیر می‌سازد و از سوی دیگر به ایجاد و حفظ جایگاه بین‌المللی صنعت نفت و تداوم تولید نفت، از مخازن نفتی را باهدف ازدیاد برداشت، برای مخازن کم‌بازده کمک می‌نماید؛ بنابراین ذخیره‌سازی زیر زمینی CO<sub>2</sub> نه تنها توجیه‌پذیر است؛ بلکه ضرورت توسعه نیز دارد. در این مقاله، هدف ارزیابی مکانیزم جذب و ذخیره‌سازی گاز دی‌اکسیدکربن در مخازن آب شور زیرزمینی است. این مکانیزم عبارت است از تزریق گاز دی‌اکسیدکربن به مخزن دارای آبخوان آب‌شور که در آن گاز دی‌اکسیدکربن با آب مخلوط شده و به‌صورت حلال یا به‌دام‌افتاده در مخزن باقی می‌ماند. در این پروژه ما با استفاده از نرم افزار شبیه ساز اکلیپس ۳۰۰ تعداد ۹۰۰ مخزن مختلف را شبیه سازی کردیم و با استفاده از داده های بدست آمده از شبیه سازی در این نرم افزار شبکه هوش مصنوعی که با استفاده از الگوریتم (CNN) ساخته شده است را آموزش داده ایم. این شبکه با استفاده از ۶۵۰۰۰ پارامتر برای آموزش با لرنینگ ریت ۰.۱ ساخته شده و دارای دقت  $R^2=0.98$  می باشد. ما شبکه را به گونه ای طراحی کردیم که ۳ پارامتر تخلخل، نفوذپذیری و مکان چاه تولید آب در مخزن به صورت یک عکس خاکستری و نرخ تزریق گاز دی اکسید کربن و نرخ تولید آب به صورت یک پارامتر عددی به عنوان ورودی به شبکه وارد و در نهایت میزان ذخیره نهایی گاز دی اکسید کربن پیش بینی می گردد.

**کلیدواژه‌ها** ذخیره دی‌اکسیدکربن؛ تزریق؛ هوش مصنوعی؛ آب‌خوان؛ مکانیسم

### ۱. مقدمه

ذخیره سازی زیرزمینی دی اکسید کربن یکی از راه های کاهش اثرات منفی انتشار گاز های گلخانه ایی بر تغییرات آب و هوایی کره ی زمین است . این روش به عنوان یکی از راهکار های اساسی برای محدود کردن افزایش دمای جهانی به کمتر از ۲ درجه ی سانتی گراد تا پایان قرن بیست و یکم در نشست تخصصی کنوانسیون ملل متحد در دسامبر سال ۲۰۱۵ پاریس مورد توافق قرار گرفت. با بررسی شاخص های مختلف مشخص گردید که ذخیره سازی زیرزمینی دی اکسید کربن به عنوان روش دوستدار محیط زیست قلمداد می شود (۱). بنابراین

<sup>۱</sup> گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، [s.aghabeigy@modares.ac.ir](mailto:s.aghabeigy@modares.ac.ir)

\*سعید آقاییک

<sup>۲</sup> گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، [shahab.razavi@modares.ac.ir](mailto:shahab.razavi@modares.ac.ir)

<sup>۳</sup> گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران، [sadeghnejad@modares.ac.ir](mailto:sadeghnejad@modares.ac.ir)

ذخیره سازی زیرزمینی دی اکسید کربن نه تنها توجیه پذیر است، بلکه ضرورت توسعه نیز دارد (۲). به همین سبب تلاش های بسیار زیادی برای جذب و ذخیره سازی دی اکسید کربن به همراه استفاده از روش های عددی انجام گرفته است. مکان های ذخیره سازی و زمین شناسی دی اکسید کربن شامل سفره های زیر زمینی عمیق شور، مخازن نفت و گاز تخلیه شده، بستر ذغال سنگ و کانی سازی در سازند واکنش پذیر، استفاده از دی اکسید کربن برای افزایش بازیافت و جداسازی نفت در سفره های زیرزمینی برای چندین دهه انجام شده است (۳).

روش های مختلفی برای مدل سازی ظرفیت ذخیره سازی از جمله مطالعات تحلیلی، نیمه تحلیلی و رویکرد های عددی توسعه داده شده اند، که نمی توانند برای موارد خاصی مورد استفاده قرار گیرند، از سوی دیگر شبیه سازی های مخزن عددی از نظر محاسباتی پرهزینه و زمان بر هستند. بنابراین برای کاربردهای با مقیاس بزرگ زمانی که محاسبات متعدد مورد نیاز است این نیاز به جز با استفاده از روش های هوش مصنوعی پاسخ داده نخواهد شد.

در این پژوهش میزان ذخیره سازی گاز دی اکسید کربن در یک مخزن آب پیش بینی می گردد که می توان از نتایج آن برای انتخاب مخازن با شرایط فیزیکی متفاوت و همچنین سرمایه گذاری اقتصادی آن استفاده کرد. این پژوهش همچنین به این پرسش پاسخ میدهد که در طول سالیان مکانیزم ذخیره سازی گاز دی اکسید کربن در آب شور تا چه میزان ظرفیت پذیرش گاز دی اکسید کربن را دارد.

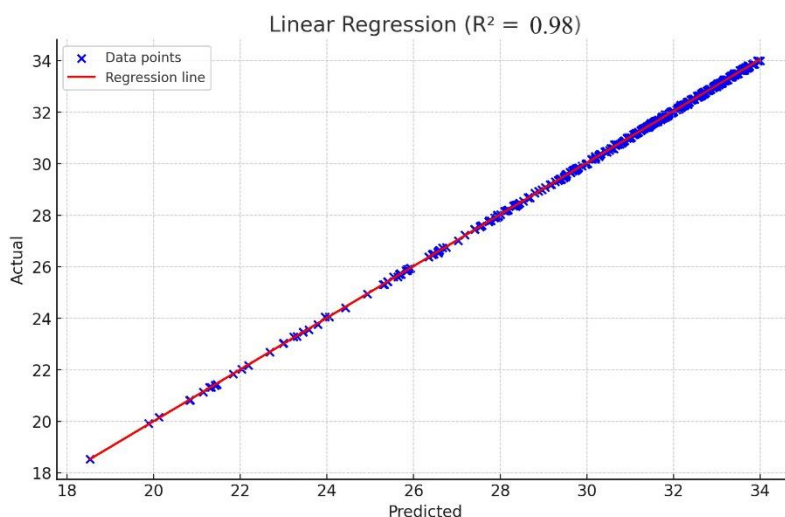
## ۲. روش پژوهش

ما در این پژوهش دو مخزن تخلیه شده از نفت و مخزن دارای آبدی را با مشخصات مشابه شبیه سازی کرده ایم. این مخزن با ابعاد  $17 \times 17$  متر در  $17$  لایه با اندازه های  $400$  فوت در جهت  $X$  و  $400$  فوت در جهت  $Y$  و  $3.28$  فوت در جهت  $Z$  در نظر گرفته شده است. در این مخزن تخلخل ها به صورت تصادفی و رندوم بین رنج های  $[0.1, 0.3]$  و  $[0.15, 0.25]$  و  $[0.2, 0.4]$  می باشد. این مخزن در عمق  $1700$  متری از سطح زمین و دارای  $4$  ماده  $CO_2, H_2O, NaCl, CaCl_2$  با مقادیر مشخص در این سازند می باشد. همچنین این مخزن دارای فشار  $6500$  پام می باشد. ابتدا در مخزن گفته شده یک چاه تزریقی در وسط مخزن در مکان  $I9, J9$  به صورت ثابت قرار داده ایم که از لایه  $1$  تا  $17$  دارای اتصال به لایه جهت تزریق گاز می باشد. نرخ تزریق گاز با ثابت نگه داشتن فشار مخزن بین بازه  $690$  MCF/DAY تا  $710$  به صورت تجربی تعیین شده است. در این مخزن یک چاه تولیدی نیز در نظر گرفته ایم که مکان این چاه به صورت تصادفی انتخاب می شود. این چاه از لایه های  $9$  تا  $17$  مخزن دارای اتصال با لایه جهت تولید و با نرخ تولید  $230$  BBL/DAY تا  $240$  در نظر گرفته ایم. مکان چاه به صورتی انتخاب می شود که با فاصله  $4$  متر از چاه تزریقی قرار گیرد. برای بررسی میزان ذخیره سازی  $990$  مخزن را شبیه سازی کردیم. در این مخازن به مدت  $50$  سال تزریق صورت گرفته و بعد از یک دوره  $50$  ساله و یک دوره  $100$  ساله مورد رصد قرار گرفته تا رفتار مخازن و همچنین تغییرات فشاری و میزان گاز حل شده در آب شور، گاز به دام افتاده در آب و گاز داخل کلاهک گازی را به عنوان پارامتر های خروجی مخزن که جمع میزان گازی اکسید کربن ذخیره شده هست بررسی می گردد.

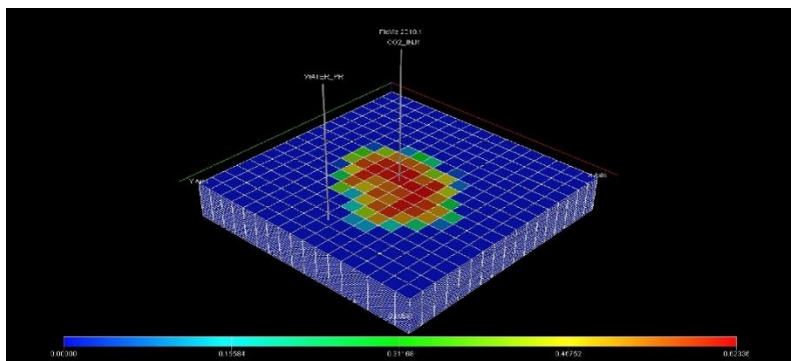
ما شبکه هوش مصنوعی را به گونه ای طراحی کردیم که در ابتدا  $3$  عکس  $17 \times 17$  پیکسل تخلخل، نفوذ پذیری و مکان چاه تولیدی اب را که از هر سناریو مخزن دریافت کرده و آن هارا برای استفاده نرمال سازی نماید و بعد از پشت سرهم قرار دادن و تبدیل آن ها به یک عکس با وارد شدن دو مقدار نرخ تزریق گاز و نرخ تولید آب به صورت عددی محاسبات برای بدست آوردن میزان ذخیره سازی گاز دی اکسید کربن را آغاز می کند. اطلاعات  $990$  مخزن بدست آمده برای آموزش و اعتبار سنجی شبکه استفاده شده است. ما در این مدل از شبکه عصبی کانولوشنی (CNN) استفاده می کنیم که در این شبکه تعداد اپوک ها را نیز  $100$  قرار داده ایم.

### ۳. نتایج

میزان دقت این شبکه برابر  $R^2=0.98$  می باشد که بعد از بررسی مخازن مشخص شد کمترین میزان ذخیره سازی مربوط به مخزنی با تخلخل بین ۰.۱ تا ۰.۳ با تراوایی بین ۲.۵ تا ۱۱۱.۷ میلی داری با چاه تولیدی آب در محل I13,J9 و نرخ تولید آب ۲۳۱ بشکه در روز و نرخ تزریق گاز دی اکسید کربن ۷۰۶ MSCF/DAY میباشد. که میزان ذخیره سازی آن در جدول شماره ۱ آورده شده است. همچنین بیشترین میزان ذخیره سازی نیز برای مخزنی با شرایط با تخلخل بین ۰.۲ تا ۰.۴ با تراوایی بین ۳۰ تا ۱۷۰ میلی داری با چاه تولیدی آب در محل I3,J17 و نرخ تولید آب ۲۳۱ بشکه در روز و نرخ تزریق گاز دی اکسید کربن ۷۱۰ MSCF/DAY میباشد که میتواند بیشترین حجم از ذخیره سازی را انجام دهد که در جدول شماره ۱ مشخص شده است. ما با استفاده از شبیه سازی ها به مشخص کردیم که بیشترین میزان ذخیره سازی در مکانیسم ها مربوط به ذخیره سازی در مخازن آب شور می باشد که در سناریو های ساخته شده به میزان MM lb-m33.82 برآورد شده است. همچنین بررسی نمودار ها برای ما نمایان کرد که در زمانی که میزان تولید آب در حالت ماکزیمم ۲۴۰ بشکه در روز و میزان تزریق گاز در حالت مینیمم که ۶۱۰ MCF/DAY می باشد افت فشار کمی رخ خواهد داد هرچند که ما در این سناریو ها قصد حفظ فشار مخزن را داشته و تغییرات کمی را در فشار مخزن ایجاد میکند. در شکل شماره ۱ میزان همخوانی دیتا های شبیه ساز با دیتا های بدست آمده از شبکه هوش مصنوعی را میتوانید مشاهده کنید.



شکل شماره ۱ مقایسه داده های شبیه ساز و شبکه هوش مصنوعی



شکل شماره ۲ میزان اشباع گاز دی اکسید کربن در سال ۱۰ تزریق

در تصویر شکل شماره ۲ میزان اشباع گاز دی اکسید کربن در مخزن در سال دهم تزریق قابل مشاهده است که چگونه گاز در مخزن در حال پیشروی است.

جدول ۱: بیشترین و کمترین میزان ذخیره سازی گاز کربن دی اکسید در ۵۰ سال ذخیره سازی

| ردیف          | بیشترین میزان ذخیره سازی M M lb-m | کمترین میزان ذخیره سازی M M lb-m |
|---------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| اکلیپس<br>۳۰۰ | ۳۳.۸۲                             | ۱۸.۷۳                            |
| هوش<br>مصنوعی | ۳۴                                | ۱۸.۵۳                            |

#### ۴. نتیجه گیری

پیش‌بینی دقیق میزان ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن: نتایج پژوهش نشان می‌دهند که استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه شبکه‌های عصبی، برای پیش‌بینی دقیق میزان ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در مخازن زیرزمینی در کمترین زمان بهترین نتیجه را برای ما به دست می‌آورد. همچنین تحلیل مکانیزم‌های ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی نشان می‌دهد که چگونه عوامل مختلفی نظیر خصوصیات سنگ‌ها، شرایط جغرافیایی، و ویژگی‌های ژئوشیمیایی می‌توانند بر مکانیزم ذخیره‌سازی تأثیر بگذارند. این نتایج می‌توانند به ارتقای استراتژی‌های استخراج و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در مخازن زیرزمینی کمک کنند. بطور کلی، پژوهش ما نشان می‌دهد که هوش مصنوعی به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در تحقیقات مرتبط با ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن می‌تواند نقش مهمی در بهبود فهم ما از این موضوع ایفا کند و به مدیران سیاست‌گذاری در این زمینه کمک کند.

#### فهرست مراجع

1. Vishal, V. and T. Singh, Geologic carbon sequestration. Environ Geosci, 2016. 16: p. 47.
2. Yan, B., et al., A robust deep learning workflow to predict multiphase flow behavior during geological CO<sub>2</sub> sequestration injection and Post-Injection periods. Journal of Hydrology, 2022. 607: p. 127542
3. Abba, M.K., et al., Solubility trapping as a potential secondary mechanism for CO<sub>2</sub> sequestration during enhanced gas recovery by CO<sub>2</sub> injection in conventional natural gas reservoirs: An experimental approach. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019. 71: p. 103002.
4. Luboń, K., Influence of Injection Well Location on CO<sub>2</sub> Geological Storage Efficiency. Energies, 2021. 14(24): p. 860



## تولید تصاویر سنگ مخزن کربناته شکافدار طبیعی با استفاده از معماری یادگیری عمیق

بهراد تبریزی پور<sup>۱</sup>؛ دکتر سعید صادق نژاد<sup>۲\*</sup>؛ دکتر مستانه حاجی پور شیرازی فرد<sup>۳</sup>؛

### چکیده

استفاده از مخازن کربناته یکی از متداول ترین مخازن در سراسر جهان به خصوص در خاورمیانه است و پیش بینی شکاف ها در این مخازن یک وظیفه چالش برانگیز است. در میان الگوریتم های مختلف هوش مصنوعی، الگوریتم های شبکه مولد متقابل و رمزگذار خودکار می توانند با کمک تصاویر، اهداف مختلفی را براساس نیازها ایجاد و ارائه دهند. یکی از کاربردهای الگوریتم شبکه مولد متقابل تولید تصاویر مشابه تصاویر ورودی و استفاده از الگوریتم رمزگذار خودکار برای رمزگذاری تصاویر اصلی به بردارها و رمزگشایی تصاویر تولید شده است. الگوریتم شبکه مولد متقابل برای کار با تصاویر و تولید آنها مفید و قوی است. در این مطالعه یک الگوریتم شبکه مولد متقابل عمیق را برای تولید تصاویر با استفاده از رزولوشن  $64 \times 64$  پیکسل و مدل رمزگذار برای بازسازی توسعه داده می شود. این رزولوشن فرایند شناسایی شکاف را سرعت می بخشد و تغییرات درون مجموعه آموزش را کاهش می دهد. در این مطالعه، ما می توانیم با کمک شبکه مولد متقابل عمیق، تصاویر متنوعی از مخازن سنگ کربناته شکاف دار طبیعی تولید کنیم که برای افزایش و داشتن داده های بیشتری از تصاویر مقیاس خاکستری ۲ بعدی برای تجزیه و تحلیل بیشتر، از جمله پیش بینی خواص مخازن شکاف دار طبیعی، مفید است. تابع هزینه شبکه مولد متخاصم پیچیده عمیق برای تولید کننده در بازه  $(0/4 - 1/9)$  و برای تبعیض کننده در بازه  $(0/2 - 1/8)$  قرار دارد و تصاویر واقعی متناظر با تصاویر ورودی تولید شده اند.

### کلیدواژه ها

هوش مصنوعی؛ رمزگذار خودکار؛ شبکه مولد متقابل؛ شبکه مولد متقابل پیچیده عمیق؛ بازسازی تصویر؛ مخازن کربناته؛ یادگیری عمیق

### ۱. مقدمه

وجود شکاف های طبیعی در سازند های زمین شناسی از نوع شکافدار طبیعی به طور قابل توجه بر ذخیره سازی و جریان هیدروکربن ها تاثیر میگذارد. برای درک کردن شرایط جریان سیالات در مخازن نفت و گاز که کربناته ها از نوع ویژه آن هستند، شناخت شکاف های طبیعی بسیار اساسی میباشد. تشکیلات زیرزمینی در مقیاس های مختلف تحت تاثیر عواملی از جمله شکاف های طبیعی قرار دارند. برای افزایش سطح درک از سیستم های شکاف زیرزمینی، میتوان از این تحقیق با استفاده از تلفیق تحقیقات پیشرفته و فنون مدرن استفاده کرد. لی هو در مطالعه اش بیان کرده که شکاف های طبیعی موجود در شیل به صورت مستقیم بر کیفیت مخزن و تولید گاز شیل تاثیر گذاشته است. در این مقاله از مدل های مکانیک سنگی جهت شبیه سازی میدان های تنش و پیشبینی شروع و گسترش شکافها در شیل استفاده شده است. روش های محاسباتی پیشرفته، مانند مدل سازی اجزای محدود (FEM) و مدل سازی شبکه شکاف های گسسته (DFN)، به منظور پیشبینی رفتار شکاف ها و شبیه سازی

<sup>۱</sup> بهرادتبریزی پور (دانشکده مهندسی نفت و گاز، تهران، ایران، behradtabrizipour@yahoo.com)

\* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> دکتر سعید صادق نژاد (دانشکده مهندسی شیمی، تهران، ایران sadeghnejad@modares.ac.ir)

<sup>۳</sup> دکتر مستانه حاجی پور شیرازی فرد (دانشکده نفت و مهندسی شیمی، تهران، ایران m.hajipour@srbiau.ac.ir)

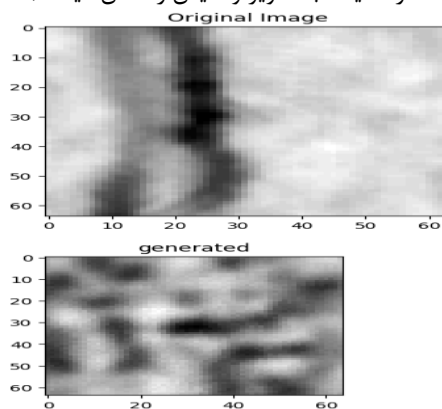
شبکه های شکاف های آن ها تحت رژیم‌های مختلف تنش به کار گرفته شده است. با وجود تکنولوژی هوش مصنوعی میتوان از موارد کم هزینه و پر سرعت تر استفاده کرد [1]. حمید سرخیل و همکاران با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی پیشرفته که توزیع شکاف هارا در مخزن بر اساس نمودارهای تصویری و اندازه گیری های مغزه، توزیع شکاف ها در مخزن شبیه سازی و پیشبینی میکند که ارتباط موجود بین تراکم شکاف ها بسیار به این پیشبینی کمک کرده است. مدل طراحی شده شبکه عصبی مصنوعی یک ارتباط خوبی بین تراکم شکاف های مشاهده شده و پیشبینی شده با ضرائب همبستگی مربع  $0.92$ ،  $0.86$  و  $0.88$  برای داده های آموزش، اعتبارسنجی و آزمون نشان داده است. میتوان به کمک مدل های مولد تصاویر بیشتری جهت استفاده تولید کرد که شبکه عصبی مصنوعی نمیتواند به خوبی مدل های مولد باشد [2]. حامد امیری و همکاران برای بازسازی تصاویر سه بعدی محیط های متخلخل با استفاده از تصاویر ۲ بعدی از مدل SliceGAN اصلاح شده استفاده کرده اند. برای بررسی بیشتر سنگ های مخزن از جمله سنگ مخزن شکافدار طبیعی میتوان به بررسی های بیشتری پرداخت [3]. ژانگ و همکاران با استفاده از مدل های بدون شرط و با شرط و استفاده از شبکه مولد متخاصم پیچیده عمیق برای مدلسازی های سطحی بر روی مخزن را نشان داده اند که میتوان بر روی سنگ های شکافدار نیز به صورت جزئی تر کار کرد. [4]. لینکی ژو و همکاران با استفاده از نسخه بهبود یافته از شبکه های مولد متقابل واسترشتاین (WGANs)، تصاویر فضای منافذ با وضوح بالا و متغیر ساختاری تولید کرده اند. این روش به نام WGAN هرمی بهبود یافته (IPWGAN) نامیده می شود که چالش های تولید تصاویر فضای منافذ چند مقیاسه و پیچیده را برطرف می کند. با استفاده از این روش میتوان به بررسی خصوصیات سنگ مخزن شکافدار پرداخت [5]. رایان سانتوسو و همکاران از الگوریتم مبتنی بر U-Net برای شناسایی و مدلسازی شبکه های شکاف برای تصاویر سازند های شکافدار را ارائه میدهند. این مدل روی مجموعه ای از تصاویر دو بعدی آموزش داده شده و آزمون شده است، در صورتی که این مدل قادر به تولید جزئیات پیچیده و واقعی نخواهد بود، همچنین شبکه های مولد توانایی بهتری از خود در این حوزه نشان داده اند [6]. جیه ژانگ و همکاران در مطالعه شان به کمک شبکه مولد متخاصم پیچیده عمیق به بازسازی مدل های واقعی مقیاس میانی پرداخته اند. مطالعه آن ها با استفاده از فناوری اسکن و پیش پردازش تصویر برای تولید تعداد زیادی از مدل های واقعی مقیاس میانی تمرکز دارد. با استفاده آموزش دادن تصاویر دودویی واقعی به کمک شبکه مولد متقابل پیچیده عمیق توانستند تصاویر مشابه به نمونه های آموزش تولید کنند. استفاده از معماری های شبکه مولد متخاصم مدل های متنوع و واقع گرایانه تر مخصوصا روی سنگ های مخازن شکافدار که دارای پیچیدگی بیشتری هستند بسیار حائز اهمیت است [7]. در این مطالعه با استفاده از شبکه های مولد متخاصم پیچیده عمیق و رمزگذارهای خودکار در سنگ های مخازن شکافدار طبیعی به بهبود و بهینه کردن فرایند اکتشاف، بهره برداری و دستیابی به پارامتر های مخزن کمک شایانی خواهیم کرد. با کمک این تکنولوژی میتوانیم با تولید داده ها و تصاویر بیشتر و شبیه به تصاویر واقعی با افزایش دقت پیشبینی ها و تحلیل، کارایی، میزان تولید نفت و گاز، پیشبینی و محاسبه خواص را به طور قابل توجهی افزایش دهیم.

## ۲. روش انجام مطالعه

ابتدا قسمت های غیر لازم تصاویر که باعث خطا بیشتر در حین یادگیری مدل میشوند حذف شده اند، سپس جهت سهولت عملکرد مدلسازی در یادگیری عمیق با سرعت بهینه، تعداد ۸۸۷ تصویر به  $15281 \times 64 \times 64$  تبدیل شدند. در مرحله بعد از یک ساختار رمزگذار خودکار با شبکه های دو بعدی جهت تبدیل عکس ها به بردار



های ۱۲۸ تایی با فضای پنهان کمتر استفاده شد که این شبکه های رمزگذار و رمزگشا ابتدا آموزش دیده شدند که صرفاً بعد از ۲۰ اپوک این مدل به حالت بهینه خود با تابع هزینه میانگین مربعات خطا و بهینه ساز آدام برای هر دو آموزش و آزمایش رسید. در مرحله بعد بردار های ۱۲۸ تایی شده وارد مدل شبکه مولد متقابل عمیق به صورت یادگیری بدون نظارت شده که شبکه تولید کننده با سه لایه کاملاً متصل، دو تابع فعالساز (Tanh, ReLU) و در شبکه تبعیض کننده از سه لایه کاملاً متصل و دو تابع فعالساز (Leaky ReLU, Sigmoid) استفاده شده تا تصاویر جدید به صورت برداری با تابع بهینه ساز کاهش گرادیان تصادفی و تابع هزینه آنتروپی متقابل دودویی تولید شوند. پس از ۲۰۰۰ اپوک تصاویر برداری جدید تولید شده اند. در پایان تصاویر برداری تولید شده وارد ساختار رمزگشا از پیش آموزش داده شده میشود تا تصاویر برداری ۱۲۸ تایی به تصاویر واضح ۶۴×۶۴ تبدیل شوند (شکل ۳ یک تصویر تولید شده در مقایسه با تصویر واقعی را نشان میدهد).



شکل ۳ تصویر تولید شده در برابر تصویر واقعی

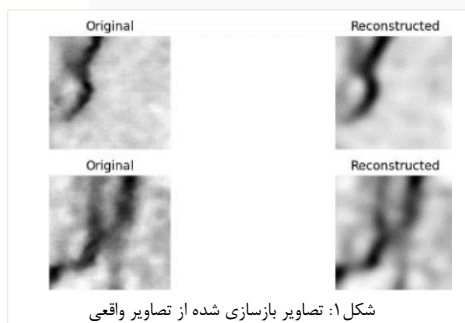
### ۳. نتایج و بحث

در این مطالعه، از این ابزار برای پیش‌بینی شکاف سنگ در زمان‌های مختلف مانند فرآیند اکتشاف استفاده شده که می‌توان خصوصیات نظیر تخلخل و تراوایی را بهتر و دقیق‌تر در مخازن تحلیل کرد. علاوه بر این، آموزش مدل به طور کامل انجام شده است به نحوی که تصاویر تولید شده با تصاویر ایده‌آل بسیار نزدیک باشند. این به معنای این است که مدل ارائه شده در این تحقیق، قادر به تعمیم‌پذیری و استفاده عملی در برنامه‌های علمی و صنعتی می‌باشد. همچنین، تولید تصاویر بیشتر از مخازن شکافدار کربناته طبیعی از طریق این مدل، به ما کمک می‌کند تا بهترین تصویر ممکن از ساختار داخلی این مخازن را بدست آوریم و موانعی چون اندازه و محدودیت تعداد نمونه‌های دسترسی‌پذیر را برطرف سازیم.

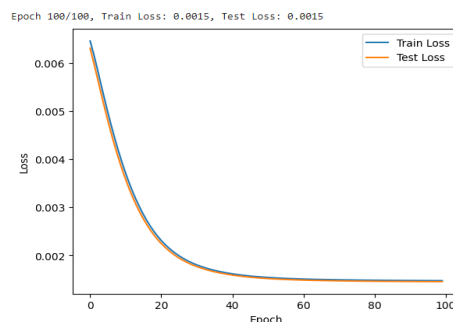
### ۴. نتیجه‌گیری

استفاده از مدل شبکه مولد متقابل عمیق و رمزگذار خودکار به منظور تولید تصاویر مخازن شکافدار کربناته، نتایج قابل توجهی را نشان داده است. این مدل قادر و توانا به تولید و بازسازی تصاویری نزدیک و شبیه به تصاویر واقعی مخزن تولید کند که دارای تراوایی بالایی هستند. پس از پایان آموزش رمزگذار خودکار به تابع هزینه مقدار ۰/۰۰۱۵ که در این عدد به حالت بهینه خود رسید. (شکل ۱: تصاویر بازسازی شده از تصاویر واقعی) (شکل ۲ به ما نمودار تابع هزینه و تعداد اپوک آموزش مدل رمزگذار رمزگشا را نشان میدهد)، همچنین در شبکه مولد متخاصم پیچیده عمیق تابع هزینه برای

تولید کننده در بازه (۰/۴ - ۱/۹) و برای تبعیض کننده در بازه (۰/۲ - ۱/۸) پس از ۲۰۰۰ ایپوک قرار داشتند که در ایپوک های انتهایی تابع هزینه تبعیض کننده در بیشتر ایپوک ها کمتر از ۱ بود.



شکل ۱: تصاویر بازسازی شده از تصاویر واقعی



شکل ۲: نمودار تابع هزینه و تعداد ایپوک مدل رمزگذار مرگشا

## ۵. فهرست مراجع

- [1] Li Hu, A review of mechanical mechanism and prediction of natural fracture in shale, Arabian Journal of Geosciences, 15: 474, 2022
- [2] Hamid Sarkheil, Firouz Alinia, Hossein Hassani, The Fracture Network Modeling in Naturally Fractured Reservoirs Using Artificial Neural Network Based on Image Loges and Core Measurements, Australian Journal Of Basic And Applied Sciences, October 2009,
- [3] Hamed Amiri, Hannah Vogel, and Oliver plumper, True 2D-to-3D Reconstruction of Heterogeneous Porous Media via Deep Generative Adversarial Networks (GANs), JGR: Machine Learning and Computation, Netherlands, 2024
- [4] Chengkai Zhang<sup>1</sup>, Xianzhi Song, Leonardo Azevedo, U-net generative adversarial network for subsurface facies modeling, Springer, Computational Geosciences, 2021
- [5] Linqi Zhu, Branko Bijeljic, Martin J. Blunt, Generation of heterogeneous pore-space images using improved pyramid Wasserstein generative adversarial networks, Journal Pre-proof,m (Advances in Water Resources), 2024
- [6] Ryan Santoso, Xupeng He, Hussein Hoteit, King Abdullah, Application of Machine-Learning to Construct Simulation Models from High-Resolution Fractured Formation, Society of petroleum engineers, November 2019, SPE-197439-MS
- [7] Yifan Liu, Jie Zhang, Tingting Zhao, Zhiyong Wang, Zhihua Wang, Reconstruction of the meso-scale concrete model using a deep convolutional generative adversarial network (DCGAN), 0950-0618/Elsevier, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130704>



## مدلسازی دومقیاسی فرآیندهای شیمیایی-هیدرولیکی-مکانیکی در

### محیطهای متخلخل

سعید سعیدمنیر<sup>۱\*</sup>؛ امیررضا خوئی<sup>۲</sup>

#### چکیده

در این پژوهش، یک روش همگن سازی چند مقیاسی جدید به منظور تحلیل فرآیند همبسته شیمیایی-مکانیکی-هیدرولیکی در محیطهای متخلخل ارائه شده است. فرآیندهای شیمیایی-مکانیکی-هیدرولیکی و اثرات متقابل این فیزیکها نقش مهمی در زمینههای مختلف از جمله مهندسی ژئوتکنیک دارند. روش پیشنهادی بر مبنای یک فرمول بندی دو مقیاسی با همگن سازی مرتبه اول است. ناهمگنیهای موجود در مقیاس میکروسکوپی در نظر گرفته می شود، در حالی که مقیاس ماکروسکوپی به صورت یک دامنه همگن می باشد که رفتار کلی آن از پاسخ مقیاس میکروسکوپی استخراج می شود. مدلسازی کارآمد محیطهای متخلخل ناهمگن پیچیده به کمک چارچوب پیشنهادی امکان پذیر است. سیستم هم بسته معادلات حاکم و روابط رفتاری با در نظر گرفتن جریان سیال، تغییر شکل فاز جامد و واکنشهای شیمیایی ارائه شده است. در نظر گرفتن ترمهای گذرا در معادلات میکروسکوپی نیز سبب افزایش دقت محاسبات می شود. همچنین، اصل تعمیم یافته هیل-مندل سازگاری بین دو مقیاس را برقرار می کند. به منظور تامین قیود میانگین گیری، شرایط مرزی خطی و متناوب اعمال می شود. کارایی و دقت روش پیشنهادی در فرآیندهای شیمیایی-مکانیکی-هیدرولیکی در محیطهای متخلخل ناهمگن با حل چند مثال عددی نشان داده شده است.

**کلیدواژه ها:** فرآیندهای شیمیایی-هیدرولیکی-مکانیکی، تحلیل چندمقیاسی-المان محدود-معادلات همبسته

#### ۱. مقدمه

در فرآیندهای شیمیایی-مکانیکی-هیدرولیکی، که در آن واکنشهای شیمیایی با جریان سیال و تغییر شکل مکانیکی همراه است، از اهمیت خاصی در زمینههای مختلف مهندسی و علوم زمین ایفا می کند. درک و پیش بینی رفتار این فرآیندها در محیط متخلخل جهت بررسی چالشهای عملی بسیاری حائز اهمیت است. از جمله کاربردهای کلیدی این موضوع، می توان به کاربرد آن در مهندسی ژئوتکنیک و به ویژه در حوزه پایداری چاه حین استخراج نفت و گاز اشاره نمود. تشکیلات سنگی متخلخلی که در روند حفاری وجود دارند، می توانند ناهمگنی قابل توجهی در ترکیب و خصوصیاتشان داشته باشند. برای مثال رس یکی از ترکیبات رایج این تشکیلات است. زمانی که رس در تماس با آب قرار می گیرد، ممکن است دچار تورم و یا جمع شدگی شود. این تغییرات حجمی، می تواند تنش قابل توجهی را به دیواره چاه وارد نماید و حتی منجر به ریزش چاه یا به خطر افتادن یکپارچگی عملیات حفاری گردد [۱]. از این رو، مدلسازی صحیح فرآیندهای شیمیایی-مکانیکی-هیدرولیکی به منظور پیش بینی این رفتارهای تورم و جمع شدگی، ارزیابی ریسک پایداری چاه و پیاده سازی استراتژیهای مناسب

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. (saeedmonir@ut.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. (arkhoei@sharif.edu)

## ضرورت دارد [۲].

علاوه بر مساله پایداری چاه، فرآیندهای شیمیایی- مکانیکی- هیدرولیکی در حوزه های دیگری نیز دخیل هستند. برای نمونه، در موضوع کاهش انتشار گاز دی اکسید کربن، درک چگونگی تعامل تزریق گاز دی اکسید کربن با ماتریس سنگی و سیال‌های منفذی جهت اطمینان از ایمنی و ذخیره سازی بلند مدت دی اکسید کربن زیر زمینی ضرورت دارد [۳]. همچنین، در ارتباط با انتقال آلاینده‌های زیرزمینی مدلسازی فرآیندهای شیمیایی- مکانیکی- هیدرولیکی جهت پیش بینی انتقال آلاینده‌ها در سیستم‌های آب زیرزمینی اهمیت دارد. در این حالت، واکنش‌های شیمیایی می‌توانند روی تحرک و سرنوشت این آلاینده‌های تاثیرگذار باشند.

روش های سنتی موجود برای مدلسازی محیط‌های متخلخل، معمولاً هنگام در نظر گرفتن پیچیدگی‌های ناشی از ناهمگنی‌های موجود با مشکل رو به رو می‌شوند. این ناهمگنی‌ها ممکن است در اثر تغییرات در توزیع اندازه منافذ، ترکیبات معدنی و یا شبکه ترک موجود در تشکیلات سنگی ایجاد شوند. به منظور برطرف کردن این محدودیت، در این پژوهش یک روش همگن سازی محاسباتی چند مقیاسی برای تحلیل فرآیندهای شیمیایی- مکانیکی- هیدرولیکی در محیط‌های متخلخل ناهمگن پیشنهاد شده است. مفهوم اصلی این رویکرد در فرمول‌بندی دو مقیاسی نهفته است. در اینجا، ناهمگنی‌ها به صورت صریح در مقیاس میکروسکوپی در نظر گرفته می‌شود. این مقیاس میکروسکوپی معمولاً همان حجمی نمونه (RVE) نامیده می‌شود. معادلات حاکم برای جریان سیال، تغییر شکل فاز جامد و واکنش شیمیایی در همان حجمی نمونه با به صورت کاملاً همبسته در نظر گرفتن جزئیات تغییرات مشخصات ماده حل خواهد شد. از سوی دیگر، در مقیاس ماکروسکوپی یک دامنه همگن در نظر گرفته می‌شود. این دامنه نشان دهنده رفتار مقیاس بالاتر محیط متخلخل، با استفاده از رفتار ساختاری کلی استخراج شده از پاسخ مقیاس میکروسکوپی است. به این ترتیب، مدلسازی کارآمد کل سیستم، ضمن حفظ اطلاعات ضروری از ناهمگنی موجود، امکان پذیر است.

معادلات حاکم و روابط ساختاری در هر دو مقیاس به صورت هم بسته می‌باشند. به عبارت دیگر، در معادلات موجود وابستگی‌های متقابل جریان سیال، تغییر شکل فاز جامد و غلظت املاح در نظر گرفته می‌شود. برای نمونه، جریان سیال‌ها می‌تواند منجر به ایجاد تنش در ماتریس جامد شود و یا واکنش‌های شیمیایی بر تخلخل و نفوذپذیری محیط و همچنین تورم و یا جمع‌شدگی تاثیرگذارند. به منظور افزایش دقت محاسبات، ترم‌های گذرا در معادلات مقیاس میکروسکوپی لحاظ شده‌اند. این ترم‌های گذرا روند وابسته به زمان فرآیندهای شیمیایی- مکانیکی- هیدرولیکی را در نظر می‌گیرند و یک نمایش واقع بینانه را از پدیده‌های دینامیکی مانند تورم و جمع‌شدگی ارائه می‌دهند. همچنین، به منظور برقراری سازگاری بین دو مقیاس از فرم تعمیم یافته اصل هیل- مندل استفاده شده است. اساساً این اصل تضمین کننده آن است که رفتار کلی ماده همگن شده در مقیاس ماکروسکوپی به درستی بازتاب کننده پاسخ متوسط اجزای میکروسکوپی باشد [۴].

در نهایت، شرایط مرزی میکروسکوپی مناسب اعمال می‌شوند. این شرایط مرزی، که شامل انواع خطی و متناوب هستند، قیود متوسط گیری را برقرار می‌کنند. قیود متوسط گیری، سازگاری میان رفتار مشاهده شده در مقیاس میکروسکوپی و پاسخ کلی بدست آمده در مقیاس ماکروسکوپی را تامین می‌کنند. با ترکیب این اجزا، رویکرد همگن سازی محاسباتی چند مقیاسی یک ابزار قدرتمند برای تحلیل فرآیندهای شیمیایی- مکانیکی- هیدرولیکی در محیط‌های متخلخل ناهمگن ارائه می‌دهد.

## ۲. مدل فیزیکی و معادلات حاکم

لایه‌های رس دارای بار منفی بوده و در صورتیکه در فاصله بخصوصی از یکدیگر قرار گیرند، میدان الکتریکی بین آنها ایجاد شده و این موضوع باعث ممانعت از حرکت یون‌ها بین لایه‌ها می‌شود. در حقیقت خاک رس مانع از حرکت محلول شده و بعنوان یک ماده نیمه نفوذپذیر شناخته می‌شود. این پدیده منجر به تورم اسمزی خاک رس شده و بنابراین خاک رس بعنوان یک محیط واکنش‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. بمنظور تحلیل محیط مذکور، معادلات تعادل نیرو برای تغییرشکل محیط، پیوستگی جریان سیال و انتشار ماده به صورت کاملاً همبسته بیان می‌شوند [۵]:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f}_1 &= \mathbf{0} & \text{with} & \quad \mathbf{f}_1 = -\rho \ddot{\mathbf{u}} + \rho \mathbf{b} \\ \nabla \cdot \dot{\mathbf{w}} + \zeta_f &= 0 & \text{with} & \quad \zeta_f = \alpha'_c \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}} + \frac{1}{M_c} \dot{p} - \left( \lambda_b C_c \mathcal{R} T_0 - \frac{\alpha'_c \alpha_\mu}{K_T} \right) \dot{c} \\ \nabla \cdot \mathbf{J} + \zeta_c &= 0 & \text{with} & \quad \zeta_c = \phi \dot{c} \end{aligned} \quad (1)$$

در معادلات بالا، با توجه به جریان لایه‌ای سیال، سرعت سیال با فرض داری در نظر گرفته می‌شود و شار ماده حل شونده نیز با استفاده از قانون Fick به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{J} = (1 - \lambda) c_0 \mathbf{k}_f \nabla p - (1 - \lambda) D_c \nabla c \quad (2)$$

که در آن،  $\lambda$  ضریب بازتاب بوده که میزان نفوذپذیری لایه رس را نشان می‌دهد. همچنین،  $D_c$  ضریب انتشار و  $\mathbf{k}_f$  نفوذپذیری مطلق هستند. معادلات فوق بر اساس متغیرهای اصلی جابجایی، فشار سیال و غلظت حل شونده بیان گردیده‌اند. جزئیات روابط فوق در مرجع [۱] ارائه شده‌اند. شایان ذکر است که غلظت ماده حل شونده می‌تواند به صورت تابعی از فشار اسمزی نوشته شود:

$$c = \left( \alpha \lambda_a / \alpha_\mu \right) p_{osmoz} \quad (3)$$

بدین ترتیب، تنش مؤثر بین دانه‌ای بر حسب تنش کل به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - \alpha p \mathbf{I} + \alpha_\mu c \mathbf{I} \quad (4)$$

که در آن  $\alpha$  ضریب بیو و  $\alpha_\mu$  ضریب تنش مؤثر شیمیایی می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود، اثر غلظت ماده در معادله تعادل و تنش ظاهر شده و بنابراین با افزایش میزان حل شونده در محیط، اثرات تغییرشکلی آن نیز مدلسازی می‌شوند.

## ۳. مدلسازی چندمقیاسی

برای مدلسازی محیط‌های متخلخل ناهمگن، معادلات فوق بایستی در دو مقیاس به صورت همزمان حل گردند. این روش بسیار بهینه‌تر از روش مدلسازی مستقیم می‌باشد که برای در نظر گرفتن ناهمگنی‌ها، بایستی تمام ریزساختارهای ماده توسط شبکه المان محدود مدلسازی شوند. روش پیشنهادی مزایای مختلفی دارد: به طور مؤثر ناهمگنی را در نظر می‌گیرد، بدین معنی که با تجزیه مساله به دو مقیاس میکروسکوپی و ماکروسکوپی، این روش در عین حال که تاثیرات ناهمگنی را در نظر می‌گیرد، کارایی محاسباتی لازم برای شبیه سازی سیستم‌های بزرگ مقیاس را داراست. همچنین، فرمول‌بندی کاملاً هم‌بسته معادلات حاکم، نمایش جامع از وابستگی‌های متقابل جریان سیال، تغییرشکل فاز جامد و انتقال املاح را تضمین می‌کند. علاوه، در نظر گرفتن ترم‌های گذرا در مقیاس میکروسکوپی دقت محاسبات را به ویژه هنگام شبیه سازی دینامیکی فرآیندهای شیمیایی - مکانیکی - هیدرولیکی (مثلاً تورم و یا جمع شدگی) ارتقا می‌دهد.

در همین راستا، از همگن سازی مرتبه اول استفاده می‌گردد. در این فرمول‌بندی، به ازای هر نقطه ماکروسکوپی (مانند نقاط انتگرال‌گیری گاوس) یک محیط میکروسکوپی در نظر گرفته و میدان متغیری آن با استفاده از اطلاعات نقطه ماکروسکوپی (مانند جابجایی، کرنش، فشار و ...) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{H}^T \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} + \tilde{\mathbf{u}}$$

$$p = \bar{p} + \mathbf{x}^T \bar{\nabla} \bar{p} + \tilde{p} \quad (5)$$

$$c = \bar{c} + \mathbf{x}^T \bar{\nabla} \bar{c} + \tilde{c}$$

که در آن متغیرهای به صورت  $\tilde{\mathbf{u}}$  متغیرهای مربوط به نقطه ماکروسکوپی هستند و متغیرهای به صورت  $\tilde{c}$  متغیرهای نامعلوم میدان در مقیاس میکروسکوپی می‌باشند که با حل مساله مقدار مرزی در مقیاس میکرو تعیین می‌گردند. به منظور برقراری سازگاری بین دو مقیاس، قیدی بر روی گرادیان میدان‌ها اعمال می‌شود تا متوسط گرادیان میدان را با گرادیان میدان در نقطه ماکروسکوپی برابر کند. همچنین، بر اساس اصول ترمودینامیک، متوسط انرژی مقیاس میکروسکوپی بایستی با انرژی نقطه ماکروسکوپی برابر باشد. بر همین اساس، معادلات دو مقیاسی همزمان برقرار گردیده و با روش المان محدود حل می‌شوند.

#### ۴. نتیجه‌گیری

مثال‌های عددی کارآمدی این روش را در شبیه سازی دقیق سناریوهای مختلف شیمیایی- مکانیکی- هیدرولیکی نشان می‌دهند. پژوهش حاضر مبنایی برای پیشرفت‌های بعدی در زمینه مدل‌سازی چند مقیاسی برای فرآیندهای شیمیایی- مکانیکی- هیدرولیکی است. به کارگیری این روش در سناریوهای خاص مهندسی، مانند تحلیل پایداری چاه در یک سازند زمین شناسی مشخص، می‌تواند تایید کننده کاربرد عملی آن باشد.

#### فهرست مراجع

- [1] Mody, F.K. and A.H. Hale, *Borehole-stability model to couple the mechanics and chemistry of drilling-fluid/shale interactions*. Journal of petroleum technology, 1993. **45**(11): p. 1093-1101.
- [2] Shams, M.A., M.A. Shahin, and M.A. Ismail, *Simulating the behaviour of reactive soils and slab foundations using hydro-mechanical finite element modelling incorporating soil suction and moisture changes*. Computers and Geotechnics, 2018. **98**: p. 17-34.
- [3] Sherwood, J., *Biot poroelasticity of a chemically active shale*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1993. **440**(1909): p. 365-377.
- [4] Khoei, A. and S. Saeedmonir, *Computational homogenization of fully coupled multiphase flow in deformable porous media*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021. **376**: p. 113660.
- [5] Cheng, A.H.-D., *Poroelasticity*. Vol. 27. 2016: Springer.



شکست ترموهیدرولیک محیط متخلخل غیراشباع با استفاده از اجزای محدود

بسط یافته و روش زیرگام زمانی

علیرضا مختاری<sup>۱\*</sup>؛ بهروز گتمیری<sup>۲</sup>

چکیده

در این مقاله روش جدیدی برای گسترش ترموهیدرولیکی ترک در محیط متخلخل غیراشباع ارائه می‌شود. براساس مدل ترموهیدرومکانیکی قبلی نگارندگان، ترک به عنوان سطح مشترکی در نظر گرفته می‌شود که با معادلات تعادل کلی و بقای جرم و انرژی کوپله می‌شود. کوپلینگ ترک با محیط متخلخل باعث غیرخطی شدن دستگاه معادلات حاصل می‌شود که از روش تکراری نیوتن-رافسون برای حل این معادلات استفاده می‌شود. با شکست محیط و پیشروی جبهه اشباع در امتداد ترک، گرما در راستای ترک، سریع‌تر از محیط متخلخل بکر منتقل می‌شود و نیروی چسبندگی کمتری در یک تغییر مکان مشخص به سطح ترک وارد می‌شود. برای جداسازی مکانی معادلات از روش اجزای محدود بسط یافته استفاده می‌شود و روش زیر گام زمانی برای محدود کردن سرعت پیشروی نوک ترک برای به دست آوردن یک حل سازگار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

کلیدواژه: ترک هیدرولیکی، ترک چسبنده، اجزای محدود بسط یافته، پیشرفت پله‌ای ترک، روش زیر گام زمانی، محیط متخلخل غیراشباع

۱. مقدمه

مفهوم ترک هیدرولیکی برای رسوبات زیرسطحی با نفوذپذیری کم برای ایجاد شکستگی‌های با نفوذپذیری بیشتر برای اهداف مختلف مانند بازیافت انرژی، عملیات معدنی، شکست زیست‌محیطی، استخراج انرژی زمین‌گرمایی و ترسیب کربن صورت می‌گیرد. علاوه بر این، شکستگی‌های ایجاد شده با مایع راهی برای انتقال سریع یخ ذوب شده از سطح به کف یخچال‌ها هستند. نخستین تلاش‌ها برای تحلیل ترک‌های هیدرولیکی مبتنی بر رامحل‌های تحلیلی بود. تلاش‌های پیشگام برای تحلیل ترک‌های هیدرولیکی بر مبنای ارائه حل بسته مسئله ترک هیدرولیک در محیط نیمه بی‌نهایت توسط کریستانوویچ و ژلتوف [1]، گرتسما و دی کلارک [2] و اسپنس و شارپ [3] انجام شد. اگرچه بسیاری از محققان هنوز روی رامحل‌های تحلیلی کار می‌کنند [4]، این رویکرد اغلب به یک شکست هیدرولیکی تکی در محیط‌های دست‌نخورده همگن بیش از حد ایده آل سازی شده با شرایط مرزی محدودکننده محدود می‌شود.

مدل‌سازی عددی ترک هیدرولیکی برای غلبه بر محدودیت‌های رامحل‌های تحلیلی توسعه داده شده است. روش‌های عددی ابتدایی با هندسه‌هایی با پیچیدگی کمتر و جفت‌سازی‌های هیدرو مکانیکی ضعیف ایجاد شدند. کارهای اخیر اغلب نفوذپذیری محیط را با سیستم‌های هیدرو مکانیکی کاملاً جفت شده برای شبیه‌سازی مسئله شکست هیدرولیکی در نظر می‌گیرند. به‌طور خاص، روش‌های عددی مختلف، مانند عناصر باضخامت صفر، روش‌های بدون مش، روش المان محدود توسعه یافته (XFEM)، و روش‌های مبتنی بر مکانیک محیط پیوسته مانند روش کرنش افزایش یافته فرضی (AES)، روش میدان فاز و پری دینامیک برای بررسی انتشار ترک در شکست هیدرولیکی استفاده شده‌اند.

شکست هیدرولیکی خود شامل چندین اندرکنش جفت شده است که به‌صورت (۱) جریان سیال در محیط متخلخل (۲) تغییر شکل محیط به دلیل بارهای مکانیکی و هیدرولیکی اعمال شده به سطوح ترک و

<sup>۱</sup> علیرضا مختاری و ونوسفادرنی، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، تهران، ایران، a.varnosfaderani@gmail.com

\* نویسنده مسئول

<sup>۲</sup> بهروز گتمیری، دانشکده مهندسی پل و راه پاریس، پاریس، فرانسه، gatmirib@yahoo.com

(۳) جریان سیال در امتداد ترک و نشت آن به محیط متخلخل طبقه‌بندی می‌شود. در ادامه، مطالعات قبلی مرتبط با این سه اندرکنش و مفروضات آن‌ها مورد بازبینی قرار می‌گیرد.

### (۱) جریان سیال در محیط متخلخل

سه نظریه مهم برای توصیف رفتار محیط متخلخل ایجاد شده است که عبارت‌اند از: نظریه مخلوط، نظریه میانگین‌گیری و نظریه مخلوط ترکیبی. در نظریه مخلوط، معادلات تعادل برای هر یک از اجزای محیط متخلخل با روابط تبادل مناسب بین فازهای مختلف در مقیاس ماکرو دیکته می‌شود. قوانین ترمودینامیکی (نابرابری کلاسیوس-دوهم) برای ایجاد معادلات رفتاری استفاده می‌شود. در نظریه میانگین، قوانین بقا و معادلات رفتاری در مقیاس میکروسکوپی تعریف می‌شود. معادلات مربوطه در مقیاس ماکرو با استفاده از تکنیک‌های میانگین‌گیری مکانی به دست می‌آیند. نظریه مخلوط ترکیبی دو روش را ترکیب می‌کند: نظریه مخلوط و نظریه میانگین‌گیری. این رویکرد معادلات تعادل را در سطح میکروسکوپی توسعه می‌دهد و برای به دست آوردن معادلات ماکروسکوپی مربوطه از آن‌ها میانگین‌گیری می‌کند. معادلات رفتاری مستقیماً در سطح ماکروسکوپی شکل می‌گیرند.

در دهه‌های اخیر، تلاش‌های قابل‌توجهی برای پیاده‌سازی این نظریه‌ها به صورت عددی برای درک پیچیدگی‌ها و مکانیسم‌های حاکم بر محیط متخلخل شکل گرفته است. رفتار دینامیکی محیط متخلخل الاستیک کاملاً اشباع توسط گتمیری [5] بر اساس نظریه مخلوط مدل شد، که بعداً برای رفتارهای ناهمسانگرد و غیرخطی در شرایط شبه الاستیک توسعه داده شد [6]. گتمیری و دلاژ [7] رفتار غیر همدمای محیط متخلخل اشباع را با تعریف سطح حالت نسبت تخلخل مدل کردند. این مدل بعداً در حالت غیر اشباع با نوشتن معادله بقای جرم هوا و تعریف سطح حالت جدید برای درجه اشباع توسعه یافت [8,9]. ورنوسفادرائی و همکاران [10,11] این مدل را با غیرفعال در نظر گرفتن فاز هوا بازنویسی کردند و از آن برای شبیه‌سازی انتشار ترک در محیط متخلخل غیر اشباع تحت بارهای مکانیکی و حرارتی استفاده کردند.

### (۲) تغییر شکل ناشی از بارهای مکانیکی و هیدرولیکی وارد بر سطوح ترک

دو روش به‌طور گسترده برای توصیف ترک مورداستفاده قرار می‌گیرد: روش پیوسته و روش ناپیوسته. در روش پیوسته، ریزترک‌ها به‌طور صریح مدل‌سازی نمی‌شوند، اما در مقیاسی بالاتر به وسیله‌ی یک اسکالر یا همان متغیر آسیب نشان داده می‌شوند. از طرف دیگر روش ناپیوسته نیازی به نرمی و پیوستگی برای توصیف شکست ندارد. میدان جابجایی می‌تواند جهشی در صفحه شکست را نشان دهد، که این نظریه را به‌طور بالقوه برای توصیف رفتار اجسام کاملاً ترک‌خورده مناسب می‌کند. دو روش استاندارد برای مدل‌سازی رفتار ترک در رویکرد ناپیوسته وجود دارد: یکی مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) و دیگری مبتنی بر مدل ترک چسبیده است.

LEFM پیش‌بینی‌های قابل قبولی را برای شکستگی‌های سنگ‌های ترد ارائه می‌کند که در آن منطقه فرآیند شکست در جلوی نوک ترک نادیده گرفته می‌شود. با این حال، نمی‌تواند به‌طور دقیق خاصیت شکل‌پذیری جلوی نوک ترک را برای سنگ‌های انعطاف‌پذیر به تصویر بکشد. مدل ترک چسبیده بر فرآیند شکست انعطاف‌پذیر جامداتی که تغییر شکل پلاستیک بالایی را تجربه می‌کنند، تمرکز دارد. یک رابطه نرم شدن برای اتصال نیروی پلاستیک جلوی نوک ترک به بازشدگی ترک تعریف می‌شود که امکان اضمحلال پلاستیک در ناحیه فرآیند شکست را فراهم می‌کند. برای مواد شبه ترد، می‌توان یک رابطه نرم شوندگی تعریف کرد که نیروی چسبندگی را با در نظر گرفتن اتلاف انرژی در ناحیه‌ی فرآیند شکست به باز شدن ترک پیوند می‌دهد. در اینجا، محیط متخلخل ناپیوسته، شبه ترد در نظر گرفته می‌شود، که در آن نیروهای ناشی از سیالات حفره‌ای بین سطوح ترک، علاوه بر نیروی چسبندگی در هنگام شکست ماده، وارد می‌شوند.

### (۳) جریان سیال در امتداد ترک و نشت آن به محیط متخلخل

چندین مدل برای جریان سیال در محیط متخلخل آسیب‌دیده برای رویکردهای پیوسته و ناپیوسته وجود دارد. مدل‌های پیوسته عموماً نتایج خوبی برای شبکه‌ای از ریزترک‌های متصل پراکنده به دست می‌دهند، در حالی‌که مدل‌های ناپیوسته برای ترک‌های بزرگ به‌عنوان کانال‌های جریان ترجیحی ترجیح داده می‌شوند. جریان در امتداد ترک معمولاً با استفاده از نظریه روان کاری برای یک سیال نیوتنی تراکم ناپذیر که از قانون مکعب پیروی می‌کند، مدل می‌شود. معادله روان کاری یک معادله دیفرانسیل جزئی غیرخطی است که عرض ترک و گرادیان فشار را به هم مرتبط می‌کند. مدل کارتر یک‌بعدی [12] اغلب جریان عمود بر ترک یا نشت مایع به داخل محیط متخلخل را مدل می‌کند. مدل کارتر را می‌توان به مسائل



پیچیده‌تر تعمیم داد. اخیراً ری‌توره و همکاران [13,14]، نشت به محیط متخلخل را با بازنویسی معادله بقای جرم مایع در اطراف ترک محاسبه کردند. آن‌ها فرض کردند که نشت سیال برابر با تغییرات زمانی جرم سیال به‌اضافه جریان در طول ترک است. محمدزاد و خوبی [15] مدل ری‌توره و همکاران را با فعال در نظر گرفتن فاز گاز تعمیم دادند. [13,14]، آن‌ها شتاب فاز جامد را در معادلات معرفی کردند تا نیروهای اینرسی وارد بر محیط متخلخل را در نظر بگیرند. ورنوسفادرانی و همکاران [10,11] از روش ری‌توره و همکاران برای محاسبه نشت رطوبت و گرما به محیط متخلخل استفاده کردند. آن‌ها مدلی برای جریان رطوبت و گرما در محیط متخلخل ترک‌خورده ارائه کردند. این رویکرد در این مطالعه اتخاذ شده است.

انتشار ترک هیدرولیکی یک پدیده بسیار پیچیده و غیرخطی است. این پیچیدگی ناشی از جفت شدن شدید جریان سیال، گزادیان زیاد در نزدیکی نوک ترک، و شرایط مرزی متحرک به دلیل انتشار ترک است که مجموعه‌ای از معادلات هیدرو مکانیکی غیرخطی را به دست می‌دهد. این معادلات معمولاً با یک روش تکراری مانند روش نیوتن-رافسون حل می‌شوند. در روش المان محدود سنتی، در هنگام انتشار ترک از مش بندی مجدد تطبیقی استفاده می‌شود، درحالی‌که در روش‌های مدرن مانند اجزای محدود بسط یافته، مش در هنگام انتشار ترک ثابت می‌ماند. برای غلبه بر شرایط غیرخطی در مدل‌سازی انتشار ترک با استفاده از روش اجزای محدود بسط یافته، علاوه بر ریز کردن مش به‌اندازه کافی، گسترش ترک به یک یا تعداد کمی المان محدود می‌شود. در این شرایط، یک گام زمانی ثابت منجر می‌شود که شبیه‌سازی‌های بین عدم گسترش ترک و یا گسترش ترک به یک یا چند المان تغییر کند [16]. هگمن و دی بورست [17] برای یافتن اندازه گام زمانی مناسب، زمان انتشار ترک را به‌عنوان یکی از مجهولات علاوه بر درجات آزادی سنتی فرض کردند. آن‌ها فرض کردند که هنگامی‌که تنش در نوک ترک برابر با مقاومت کششی ماده باشد، ترک یک المان به جلو می‌رود. آن‌ها این محدودیت انتشار شکست را یک معادله مکمل در کنار سیستم معادلات معمول در نظر گرفتند. از آنجایی‌که میدان تنش در اطراف نوک ترک به‌شدت تغییر می‌کند، تنش نوک ترک برای پیش‌بینی رشد ترک قابل‌اعتماد نیست. میدان‌های تنش غیرموضعی برای ارزیابی تنش در مکانیک آسیب، مناسب‌تر از تنش‌های موضعی هستند [18]. علاوه بر این، از آنجایی‌که جریان در امتداد ترک به‌صورت صفحه‌ای در نظر گرفته می‌شود، غیر منفی بودن فشار در نوک ترک می‌تواند به‌عنوان یک معادله اضافی در سیستم معادلات در نظر گرفته شود که از مواجهه با مشکلات در مدل‌سازی ناحیه تأخیر جلوگیری می‌کند.

این مطالعه بر روی انتشار ترک (مود اول شکست) در محیط متخلخل غیراشباع تحت تاثیر حرارت متمرکز است. مدلی که نگارندگان برای توصیف رفتار ترموهیدرو مکانیکی محیط متخلخل غیراشباع در مطالعات قبلی توسعه دادند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. فشار هوا در این مدل ثابت و برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. نخست مدل ترک چسبنده، پلاستیسیته در نوک ترک را نشان می‌دهد. روش لاگرانژ افزوده، فشار تماس را برای جلوگیری از نفوذ متقابل ترک به دلیل تنش و مکش درجا اعمال می‌کند [19]. فرض می‌شود که فشار آب و دما در اطراف شکستگی ناپیوسته ضعیف است. این فرض منجر به تبادل مایع و انرژی بین ترک و محیط متخلخل می‌شود. این تبدلات با بازنویسی معادله بقای جرم مایع و انرژی در اطراف ترک محاسبه می‌شود. معادله بقای جرم از دو بخش تشکیل شده است: تغییرات زمانی جرم آب و جریان آب در امتداد ترک مرتبط با فرض قانون پویسوله یا مکعبی (جریان آرام). عبارات مکانیکی و ترموهیدرولیکی حاصل برای برهم‌کنش ترک و محیط بکر به اشکال انتگرالی معادلات بقای حرکت و جرم و انرژی اضافه می‌شود که معادلات حاکم را غیرخطی می‌کند.

یکی از ابداعات کلیدی این مقاله، استفاده از روش زیرگام زمانی برای مدل‌سازی انتشار ترک است. این روش زیرگام زمانی پویا، یک گام زمانی را به چند گام زمانی کوچکتر تقسیم می‌کند که حل در این گام‌های زمانی کوچکتر همگرا می‌شود. برای انتشار ترک، پس از ارضای معیار پیشرفت غیرموضعی در نوک، ترک یک عنصر به جلو رانده می‌شود. حداکثر تنش اصلی و فشار آب در دو نقطه گاوسی در مسیر رشد بالقوه ترک به ترتیب بایستی بیشتر از مقاومت کششی ماده و غیر منفی باشند. کنترل اول و دوم به ترتیب از گسیختگی ماده و پیشرفت همزمان جبهه اشباع با نوک ترک اطمینان می‌دهند. گام زمانی بر اساس رابطه‌ای کوچکتر می‌شود که تضمین می‌کند گام زمانی در محدوده‌ی قابل قبولی برای همگرایی مسئله است، که در قسمت‌های بعد به‌تفصیل توضیح داده می‌شود. زمان انتشار ترک هنگامی است که حل در زیر گام زمانی انتخاب شده همگرا شود. شکستگی ترموهیدرولیکی یک صفحه تحت شرایط کرنش صفحه‌ای بررسی می‌شود. الگوریتم ذکر شده در بالا با استفاده از روش زیر گام زمانی برای انتشار هموار ترک اعمال می‌شود. اثر دو پارامتر، یعنی درجه اشباع اولیه و تخلخل، در نتایج به‌دست‌آمده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲. فهرست مراجع

- [1] A. Zheltov and Khristianovic, "Formation of vertical fractures by means of highly viscous liquid," in 4th world petroleum congress, 1955.
- [2] J. Geertsma and F. De Klerk, "A rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures," *Journal of petroleum technology*, vol. 21, pp. 1571-1581, 1969.
- [3] D. Spence and P. Sharp, "Self-similar solutions for elastohydrodynamic cavity flow," *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 400, pp. 289-313, 1985.
- [4] J. Desroches, E. Detournay, B. Lenoach, P. Papanastasiou, J. Pearson, M. Thiercelin, et al., "The crack tip region in hydraulic fracturing," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, vol. 447, pp. 39-48, 1994.
- [5] B. Gatmiri, "A simplified finite element analysis of wave-induced effective stresses and pore pressures in permeable sea beds," *Geotechnique*, vol. 40, pp. 15-30, 1990.
- [6] B. Gatmiri, "Response of cross-anisotropic seabed to ocean waves," *Journal of geotechnical engineering*, vol. 118, pp. 1295-1314, 1992.
- [7] B. Gatmiri and P. Delage, "A formulation of fully coupled thermal-hydraulic-mechanical behaviour of saturated porous media—numerical approach," *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, vol. 21, pp. 199-225, 1997.
- [8] B. Gatmiri and A. Hoor, "Effect of excavation on the thermo-hydro-mechanical behaviour of a geological barrier," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 32, pp. 947-956, 2007.
- [9] B. Gatmiri and C. Arson, "θ-STOCK, a powerful tool of thermohydrromechanical behaviour and damage modelling of unsaturated porous media," *Computers and Geotechnics*, vol. 35, pp. 890-915, 2008.
- [10] A. Varnosfaderani, B. Gatmiri, and E. Haghghi, "A model for moisture and heat flow in fractured unsaturated porous media," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 41, pp. 828-858, 2017.
- [11] A. Varnosfaderani, E. Haghghi, B. Gatmiri, and S. Na, "Investigation of Climate Change on Unsaturated Porous Media via a Discrete Thermo-Hydro-Mechanical Model," *Applied Sciences*, vol. 11, p. 7617, 2021.
- [12] R. Carter, "Derivation of the general equation for estimating the extent of the fractured area," Appendix I of "Optimum Fluid Characteristics for Fracture Extension," *Drilling and Production Practice*, GC Howard and CR Fast, New York, USA, American Petroleum Institute, pp. 261-269, 1957.
- [13] J. Réthoré, R. De Borst, and M. Abellan, "A two-scale approach for fluid flow in fractured porous media," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 71, pp. 780-800, 2007.
- [14] J. Réthoré, R. De Borst, and M. Abellan, "A two-scale model for fluid flow in an unsaturated porous medium with cohesive cracks," *Computational Mechanics*, vol. 42, pp. 227-238, 2008.
- [15] T. Mohammadnejad and A. Khoei, "Hydro-mechanical modeling of cohesive crack propagation in multiphase porous media using the extended finite element method," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 37, pp. 1247-1279, 2013.
- [16] P. Moonen, J. Carmeliet, and L. Sluys, "A continuous-discontinuous approach to simulate fracture processes in quasi-brittle materials," *Philosophical Magazine*, vol. 88, pp. 3281-3298, 2008.
- [17] T. Hageman and R. De Borst, "Stick-slip like behavior in shear fracture propagation including the effect of fluid flow," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 45, pp. 965-989, 2021.
- [18] G. Wells and L. Sluys, "A new method for modelling cohesive cracks using finite elements," *International Journal for numerical methods in engineering*, vol. 50, pp. 2667-2682, 2001.
- [19] R. Borja, *Plasticity* vol. 2: Springer, 2013.



## بررسی فرایندهای رهایش دارو: مدل سازی

شیوا دهقان\*

### چکیده

رهایش دارو به عنوان یکی از روش‌های نوین انتقال دارو توجه محققان را به خود معطوف داشته است. از محاسن این گونه سامانه‌ها خروج تدریجی دارو با سرعت ثابت می‌باشد که بالطبع از تعداد دفعات مصرف دارو و تاثیرات جانبی سوء به نحو قابل توجهی می‌کاهد. هدف این مقاله فراهم کردن مروری کامل بر مدل‌های موجود ریاضی می‌باشد که به عملکردهای شناخته شده آزادسازی دارو پاسخگو می‌باشند؛ که به سامانه‌های کنترل شونده-نفوذی، -تورمی و -فرسایشی طبقه بندی می‌شوند. مدل سازی انتقال دارو از طریق سامانه‌های رهایش دارو همراه واکنش شیمیایی و فرسایش پلیمر، در پوست برای سامانه‌های انتقال دارو از پوست بررسی شده است و مدل ریاضی برای پیش‌بینی سرعت رهایش دارو و موقعیت لایه متحرک نفوذی در سامانه در هر لحظه ارائه گردیده است. مدل ارائه شده با در نظر گرفتن تغییرات خطی و غیرخطی فرسایش ماتریس پلیمری به صورت نیمه تحلیلی و با استفاده از روش گالرکین و لی حل شده است. حاصل آن ارائه منحنی‌هایی است که وابستگی سرعت رهایش دارو، میزان داروی رها شده، موقعیت لایه متحرک نفوذی و زمان عملکرد سامانه را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که سرعت رهایش دارو و میزان داروی رها شده با افزایش نسبت ثابت سرعت واکنش به ضریب نفوذ و غلظت داروی اولیه افزایش می‌یابد. همچنین زمان عملکرد سامانه با افزایش نسبت ثابت سرعت واکنش به ضریب نفوذ و غلظت اولیه دارو کاهش می‌یابد. حل مدل ارائه شده به روش گالرکین و لی نتایج مشابهی را نشان می‌دهند.

### 1. مقدمه

یکی از روش‌های نوین دارورسانی استفاده از این تکنولوژی و ساخت سامانه‌های پلیمری می‌باشد که قابلیت رهایش کنترل شده دارو در محیط بدن را دارا هستند. سامانه‌های رهایش دارو<sup>1</sup> در اثر تماس با آب و سیالات فیزیولوژیکی، رهایش تدریجی دارو با سرعت قابل تنظیم و ثابت و زمان عملکرد طولانی را میسر می‌کند. بر اساس مشخصات فیزیکی و شیمیایی پلیمر، عملکرد رهایش دارو از یک ماتریس پلیمری با توجه به سه فرایند اصلی می‌تواند به سه گروه کنترل شونده-نفوذی، -تورمی و -فرسایشی طبقه بندی شود [1].

از دو جهت مدل‌های ریاضی که در ارتباط با سینتیک رهایش می‌باشند از اهمیت خاصی برخوردارند؛ اول آنکه با پیش بینی نرخ رهایش دارو از روی رفتار نفوذی حل شونده در پلیمر، از انجام آزمایش‌های مکرر و بی شمار جلوگیری می‌شود. دوما عملکرد فیزیکی رهایش دارو مانند موقعیت دقیق دارو در محمل در زمان‌های مختلف، مقدار داروی رها شده در بدن و ... بوسیله مقایسه ساده داده‌های حاصل از رهایش دارو و مدل ریاضی روشن می‌گردد.

این مقاله مفاهیم موجود در مدل‌های ریاضی مهم و در دسترس را برای رهاسازی کنترل شده ارائه می‌کند. مدلی برای سامانه‌های رهایش دارو از ماتریس پلیمری همراه واکنش شیمیایی و فرسایش جداره پلیمری در هندسه کارتیزین ارائه شده است و حل معادلات ریاضی به دو روش انجام گرفته است. روش اول بر پایه روشی است که لی در سال 1980 ارائه داده است.

\* ( دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، shivadehghan.iut@gmail.com )

روش دوم از اصول بسط ریاضی بر حسب توابع ویژه و استفاده از روش بفنوف-گالرکین<sup>۱</sup> پیروی می‌کند که از مبانی ریاضی قوی برخوردار است. در قسمت نهایی این مقاله، نتیجه‌گیری حاصل از حل معادلات در ارائه گردیده است.

## 2. روش پژوهش

در ابتدا از روابط اولیه نفوذ استفاده می‌کنیم. بسیاری از سامانه‌های رهایش دارو را می‌توان به وسیله‌ی دو قانون نفوذ فیک<sup>۲</sup> بیان نمود:

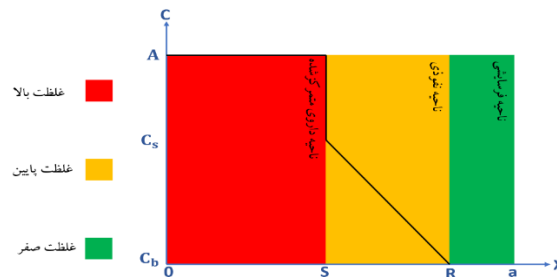
$$J_i = -D_{ip} \frac{dc_i}{dx} \quad (1)$$

$$J_i = -D_{ip} \frac{dc_i}{dx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = D_{ip} \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} \quad (3)$$

که در آن  $D_{ip}$  ضریب نفوذ حل شونده از میان پلیمر می‌باشد. در بیان این قانون دو فرض در نظر گرفته شده‌است. در فرض اول، نفوذ یک بعدی در نظر گرفته شده، این فرض برای تشریح خروج دارو از سامانه‌های مسطح ضخیم و یا سامانه‌های استوانه‌ای کوتاه مناسب می‌باشد. فرض دوم، مستقل بودن ضریب نفوذ ( $D_{ip}$ ) از غلظت می‌باشد (در صورتیکه غلظت کم باشد فرض صحیح خواهد بود).

هندسه محمل به صورت شکل 1 در نظر گرفته می‌شود:



شکل 1: شمائی از تغییرات غلظت برای رهایش داروی توزیع گردیده در ماتریس پلیمر در حال فرسایش

زمانیکه لایه متحرک فرسایشی  $R$  به صورت خطی فرسایش یابد، با حل معادلات 1 تا 3 به روش لی، می‌توان موقعیت لایه متحرک فرسایشی و نفوذی را در زمان‌های مختلف تعیین نمود. متعاقباً حل معادلات نفوذ با سری گالرکین، نتایج مشابهی با روش لی بدست می‌دهد. روش گالرکین موقعیت لایه متحرک نفوذی، سرعت رهایش دارو و مقدار داروی آزاد شده در بدن و وابستگی آنان به ضریب نفوذ جداره محمل، سرعت سینتیک واکنش دارو با خون و ضریب نفوذ دارو در محمل را نمایان می‌کند.

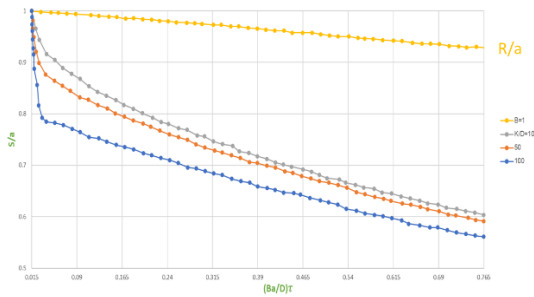
<sup>1</sup> Bufnov-Galerkin

<sup>2</sup> Fick's law of diffusion

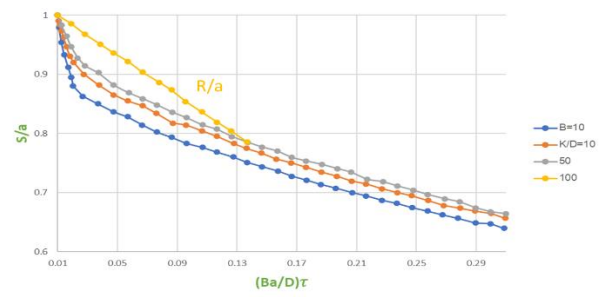
### 3. نتایج

نتایج حاصل از حل معادلات در مدل ارائه شده در انتقال دارو از طریق سامانه‌های رهایش دارو همراه با واکنش شیمیایی به دو روش لی و گالرکین به ازای مقادیر متفاوت ضریب نفوذ و ثابت سرعت واکنش به دست آمده و در شکل‌های 2 تا 9 موجود در پیوست نشان داده شده است. شکل‌های 2 تا 7 مربوط به روش گالرکین و شکل‌های 8 و 9 مربوط به روش لی می‌باشد.

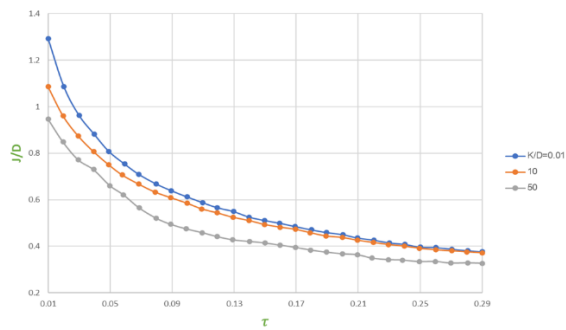
نتایج روش لی نشان‌دهنده آن است که با افزایش  $Ba/D$  (نسبت فرسایش به نفوذ پلیمر)، لایه  $R$  سریعتر فرسوده می‌شود و رهایش دارو زودتر رخ می‌دهد. همچنین با کاهش مقدار داروی اولیه بارگذاری شده، می‌توان جزء داروی رها شده‌ی بیشتری داشت [2]. [1]. روش گالرکین نتایج مشابهی می‌دهد. در فرسایش خطی  $R$ ، با کاهش  $K/D$  (نسبت ثابت واکنش به نفوذ پلیمر)، لایه  $S$  سریعتر نفوذ کرده، سرعت رهایش دارو افزایش یافته و متعاقباً داروی بیشتری در زمان معین خارج می‌سازد. در فرسایش غیرخطی  $R$ ، بررسی شده است که با افزایش  $K/D$  می‌توان زمان عملکرد سامانه را به‌طور چشمگیری کاهش داد و نفوذ دارو را سریعتر کرد. در آخر با افزایش  $K/D$  می‌توان مقدار داروی آزاد شده بیشتری در بدن داشت.



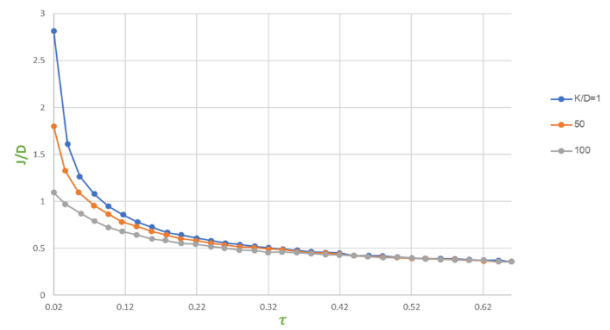
شکل 2: موقعیت لایه متحرک نفوذی بدون بعد بر حسب زمان بی بعد ( $N=1$ )



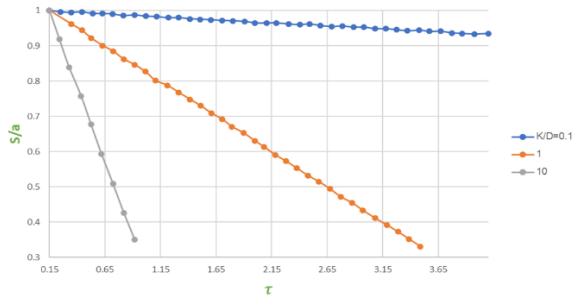
شکل 3: موقعیت لایه متحرک نفوذی بدون بعد بر حسب زمان بی بعد ( $N=2$ )



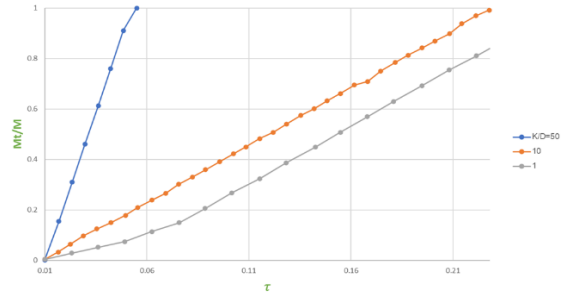
شکل 4: سرعت رهایش دارو بر حسب زمان بدون بعد ( $N=1$ )



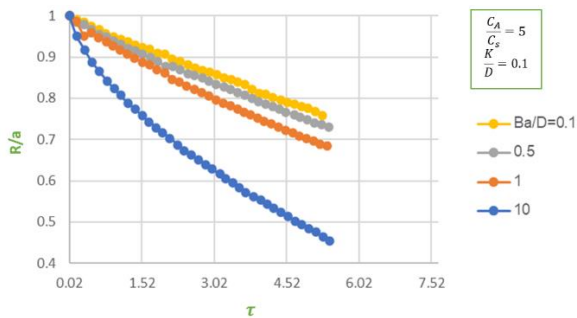
شکل 5: سرعت رهایش دارو بر حسب زمان بدون بعد ( $N=2$ )



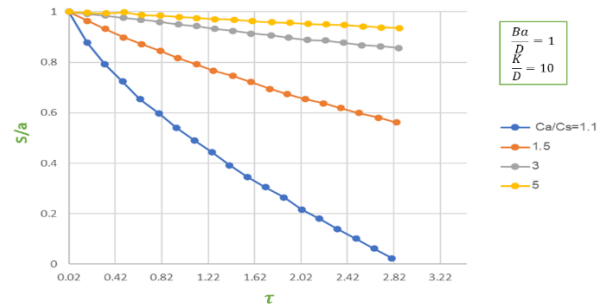
شکل 6: موقعیت لایه متحرک نفوذی بدون بعد و تغییرات غیر خطی ( $R$ ) در تخریب سطحی پلیمر بر حسب زمان بدون بعد



شکل 7: میزان داروی رها شده ( $\frac{M_t}{M_{\infty}}$ ) بر حسب زمان بدون بعد برای مقادیر مختلف ( $\frac{K}{D}$ )



شکل 8: موقعیت لایه متحرک در تخریب سطح متحرک بر حسب زمان بی بعد



شکل 9: موقعیت لایه متحرک نفوذی بدون بعد بر حسب زمان بی بعد

#### 4. نتیجه گیری

با اعمال روش لی و گالرکین بر معادلات ریاضی موجود، توانستیم روابطی برای پیش بینی موقعیت لایه متحرک فرسایشی و نفوذی، سرعت رهایش دارو و میزان داروی رها شده بیابیم. همچنین وابستگی این پارامترها را به متغیرهای مربوط به غلظت داروی اولیه، ضریب نفوذ، ضریب فرسایش و ثابت سینتیک واکنش بررسی کردیم. در نهایت با مقایسه تمامی داده‌ها می‌توان استنتاج کرد که بهترین سامانه دارورسانی کنترل‌شونده فرسایشی دارای غلظت اولیه داروی پایین، ثابت سرعت واکنش بالا با خون و غشاء پلیمری با تجزیه پذیری بالا در محیط بدن می‌باشد

#### 5. فهرست مراجع

- [1] K.W. Leong and R. Langer, Polymeric controlled Drug Delivery, Advanced Drug Delivery Reviews 1 (1987) 199–233.
- [2] P.I. Lee, Diffusional release of a solute from a polymeric matrix: approximate analytical solutions, J.Membr.Sci. (1980) 255-275.