

# مطالعه افزایش ضریب انتقال حرارت در محیط متخلخل با استفاده از نانوذرات رسانا از راه شبیه‌سازی CFD

محمد رضا رخ‌فروز<sup>۱</sup>، ملیحه برآهویی<sup>۲</sup> و سید شهاب‌الدین آیت‌اللهی<sup>۱\*</sup>

۱- دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۲۸

## چکیده

برای استفاده از نانوفناوری در ازدیاد برداشت حرارتی برای افزایش راندمان انتقال حرارت، در این تحقیق افزایش ضریب انتقال حرارت با استفاده از نانوفناوری بررسی شده است. در بخش آزمایشگاهی این تحقیق، ابتدا با افزودن نانوذره اکسید مس (به‌عنوان یکی از متداول‌ترین نانوذرات استفاده‌شده در این زمینه) به سیال پایه‌آبی، نانوسیالی پایدار و یک‌نواخت برای استفاده از خواص حرارتی بالای آن تهیه و سپس به درون مغزه تزریق شد. نتایج به‌دست‌آمده پس از تزریق نانوسیال با غلظت ۰/۰۱ مولار بیانگر افزایش قابل توجه ضریب هدایت حرارتی نسبت به سنگ خشک‌اند (۰/۲۵٪) در حالی که آب مقطر تنها ۰/۰۶٪ ضریب انتقال حرارت را بهتر کرد. در بخش مدل‌سازی این کار تحقیقاتی، با استفاده از ساختار واقعی سنگ به بررسی عددی انتقال حرارت در این نمونه پرداخته شد. برای این منظور دو تصویر از دو مقطع مغزه آزمایش‌شده تهیه شد و از پردازش آنها دو مدل واقعی به دست آمدند که با اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی موجود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با روش اجزای محدود افزایش ضریب هدایت حرارتی موثر تحت‌تاثیر نانوذرات رسانا را تایید کردند. نتایج شبیه‌سازی پس از تزریق نانوسیال با استفاده از مدل‌های شماره یک و شماره دو بیانگر افزایش ۱۴٪ و ۸٪ ضریب هدایت حرارتی نسبت به سنگ خشک و در نتیجه افزایش بازده انتقال حرارت‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان دادند که روش دینامیک سیالات محاسباتی را می‌توان به‌عنوان یک روش قابل‌اعتماد در حل این مسئله به کار برد.

**کلمات کلیدی:** محیط متخلخل، شبیه‌سازی عددی، ضریب هدایت حرارتی، پردازش تصویر، انتقال حرارت.

## مقدمه

بیتومین که در سرتاسر دنیا توزیع شده‌اند حدود دوسوم دخیار نفت باقی‌مانده جهان را تشکیل می‌دهند [۱]؛ لذا مخازن نفت سنگین به‌دلیل حجم زیاد و توزیع متنوع در سرتاسر جهان نقشی مهم در معادلات انرژی جهانی و به‌خصوص در آمریکای شمالی دارند.

نفت سنگین به نفتی گفته می‌شود که گرانیروی نفت مرده<sup>۱</sup> آن ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ cp و درجه API آن ۱۰ تا ۲۰ باشد. نفتی که وزن مخصوص آن کم‌تر از ۱۰ و گرانیروی آن بیش از ۱۰۰۰۰ cp باشد نیز نفت فوق‌سنگین<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. مخازن نفت سنگین و

1. Dead Oil  
2. Extra Heavy Oil

گوناگون نیز ساخته شده‌اند [۹ و ۱۰]. ابدل اگاتوف و همکارانش در یک پژوهش آزمایشگاهی ضریب هدایت حرارتی موثر مغزه در حالت خشک از جنس ماسه‌سنگ را در بازه دمایی ۲۷۵ تا ۵۲۳ K و بازه فشاری ۰/۱ تا ۴۰۰ MPa و در تحقیقی مشابه، ضریب هدایت حرارتی موثر مغزه اشباع از نفت از جنس ماسه‌سنگ را در بازه دمایی ۲۸۸ تا ۵۲۰ K و بازه فشاری ۰/۱ تا ۲۵۰ MPa اندازه‌گیری کردند [۱۱ و ۱۲].

محققان روابط ریاضی گوناگونی را نیز برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی موثر پیشنهاد داده‌اند که اخیراً کوکارد آنها را مرور کرده است [۱۳]. مهندس و همکارانش نیز روشی ساده و موثر را برای ارزیابی ضریب حرارتی موثر در ساختارهای فوم‌مانند<sup>۳</sup>، براساس ساختار واقعی محیط متخلخل به‌دست‌آمده از تصاویر CT Scan، ارائه دادند [۱۴ و ۱۵]. دینامیک سیالات محاسباتی یک تکنیک کاربردی برای ارزیابی و تایید نتایج تجربی است که محدودیت‌های روش‌های آزمایشگاهی را ندارد و ضمن صرفه‌جویی در زمان و هزینه، می‌توان آن را در حالت‌های پایا و وابسته به زمان اجرا کرد. عزیزاده و همکارانش شروع ناپایداری در محیط متخلخل حین فرآیند همرفت مارگونی را به‌صورت عددی مطالعه و دو نوع جابه‌جایی در مقیاس میکرو و ماکرو را مدل و آن را به کمک شبیه‌ساز چندمنظوره کامسول به روش اجزای محدود حل کردند [۱۶]. آنها برای اولین بار عدد بدون بعد مارگونی را معرفی و برای آنالیز پدیده مارگونی و مرزهای پایداری‌اش از آن استفاده کردند. آنها نشان دادند که تراوایی یک عامل موثر در کنترل ناپایداری است و تخلخل نقش مهمی در این پدیده ندارد. اخلاقی و هامودا فرآیند غیرهم‌دمای جابه‌جایی آب-نفت را در مقیاس حفرات و در محیط متخلخل شبیه‌سازی کردند [۱۷].

ازدیاد برداشت را می‌توان به‌کارگیری روش‌های مختلف برای استخراج نفت باقی‌مانده و یک ابزار مناسب برای افزایش بازیافت تولید، افزایش طول عمر مخزن و به تاخیر انداختن زمان ترک مخزن تعریف کرد [۲]. در بین روش‌های متفاوت ازدیاد برداشت، طی سه دهه اخیر به روش‌های حرارتی، به‌دلیل برخی مزایا، بسیار توجه شده که از جمله این مزایا می‌توان به شناخته‌شده بودن<sup>۱</sup> افزایش سطح جاروب‌شده، انبساط هم‌زمان سنگ و سیال و تبخیر سیالات اشاره کرد. هدف اساسی ازدیاد برداشت حرارتی کاهش گرانشی نفت‌های سنگین با درجه API کم‌تر از ۲۰ است [۳-۵]. برخی محققان نیز مواد افزودنی همانند نانوسیال‌ها را برای کاهش گرانشی به سنگ مخزن تزریق کرده‌اند. نانوفناوری از سال‌ها پیش به صنعت نفت وارد و از مزایای آن استفاده شده است. برای مثال در سال‌های گذشته نانوذرات به‌عنوان مواد افزودنی به درون گل حفاری تزریق شده‌اند [۶]. نانوسیال حاوی یک سیال پایه و نانوذرات معلق در آن است که خواصی منحصر به فرد دارد که آن را از مخلوط‌های متداول جامد-مایع جدا می‌کنند. نانوذرات استفاده‌شده می‌توانند فلزی و یا غیرفلزی با ابعاد میلی‌متر و میکرون باشند [۷].

یکی از کاربردهای جدید نانوسیال‌ها، با استفاده از پتانسیل بالای نانوذرات فلزی در تسریع انتقال حرارت، افزایش راندمان انتقال حرارت و ازدیاد برداشت حرارتی است. با توجه به این که نقش سازوکار هدایت در محیط‌های متخلخل بسیار بیش از همرفت و تابش است، بررسی و پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی موثر<sup>۲</sup> اهمیت به‌سزایی دارد. لذا برای پیش‌بینی دقیق انتقال حرارت در تمام سیستم‌های حرارتی مانند مبدل‌ها، سیستم‌های احتراقی و عایق‌های حرارتی شناخت مقدار ضریب هدایت حرارتی الزامی است [۸]. محققان به اندازه‌گیری آزمایشگاهی ضریب هدایت حرارتی موثر توجه داشته‌اند و سیستم‌های آزمایشگاهی

1. Well Known

2. Effective Thermal Conductivity

3. Foam-like Structures

نانوسیال و مغزه خشک شده بعد از یک هفته<sup>۳</sup> با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند و مشاهده شد که نتایج حاصل از مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی موافق اند.

### بیان روش آزمایشگاهی

#### مواد

در بخش آزمایشگاهی این پژوهش، از نانوذرات اکسید مس با درصد خلوص بیش از ۹۹٪ به عنوان نانوذرات رسانا و از آب به عنوان سیال پایه استفاده شده است. مایع یونی نیز به عنوان عامل پایدارکننده ساخته و استفاده شد.

#### روش انجام آزمایش

اولین قدم در افزایش ضریب هدایت حرارتی مغزه با تزریق نانوسیال، ساخت نانوسیال اکسید مس است. به طور کلی نانوسیال ها با دو روش یک مرحله ای و دومرحله ای ساخته می شوند. در این تحقیق برای ساخت نانوسیال اکسید مس از روش دومرحله ای استفاده شد. در مرحله اول ابتدا نانوذرات اکسید مس تهیه شدند و سپس در مرحله دوم، با انتخاب سیال پایه مناسب، نانوسیال با غلظت مطلوب ساخته شد. برای پایداری نانوذرات در سیال پایه آب، باید از سورفکتانت های مناسب بهره جست. در این تحقیق برای اولین بار از مایع یونی به عنوان سورفکتانت استفاده شد [۲۱-۲۳]. این سورفکتانت ها با ایجاد یک دافعه الکترواستاتیکی بین نانوذرات سبب پراکنده شدن آنها می شوند. با تعیین مقدار بهینه سورفکتانت برای داشتن پایدارترین نانوسیال و سپس با تعیین pH و زمان مطلوب و بهینه تابش دهی فراصوت محلول، نانوسیال ساخته شد. نانوسیال تولید شده (حداقل) یک ماه پایدار بود. در مرحله بعد مغزه های استوانه ای آهکی تهیه شدند و تخلخل و تراوایی هر یک اندازه گیری شد (شکل ۱).

در این مطالعه از روش میدان فازی برای کنترل سطح مشترک فازها استفاده شد. آنها از یک محیط یک نواخت دوبعدی شامل دایره هایی با فواصل یکسان استفاده و جابه جایی آب- نفت را در حالت های تزریق آب داغ، تزریق پلیمر و تراوایی دوگانه بررسی کردند. چهاردولی و همکارانش نیز فرآیند آزمایشگاهی آشام خودبه خود را شبیه سازی و نتایج آن را ارزیابی کردند [۱۸]. آنها بدین منظور یک سیستم دوبعدی، دوفازی و سه جزیی را به کار بردند و به صورت عددی سازوکارهای غالب بر بازیافت نفت را در حالت های ترشوندگی کامل آب و ترشوندگی جزیی آب مطالعه کردند. نتایج عددی آنها نشان دادند که در حالت ترشوندگی کامل آب سازوکار اصلی تورم حباب های نفت و در حالت ترشوندگی جزیی آب سازوکار غالب تغییر ترشوندگی است. اخیراً برآهویی و همکارانش، در تحقیقی برای پاسخ گویی به چالش ها و مسائل موجود، نانوسیال اکسید مس را با غلظت های مختلف برای بهبود ضریب هدایت حرارتی به مغزه تزریق و نتایج آن را بررسی کردند [۱۹]. نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن اند که با تزریق آب مقطر ضریب هدایت گرمایی آن ۶٪ و با تزریق نانوسیال اکسید مس با غلظت ۰/۰۱ مولار، ۲۵٪ افزایش یافته است. در مرحله قبلی این پژوهش، مدل سازی این فرآیند با استفاده از دو مدل ساده شده<sup>۱</sup> و دسته لوله موینه انجام و نتایج آن بیان شده اند [۲۰].

هدف اصلی این تحقیق بررسی تاثیر نانوذرات رسانای اکسید مس بر ضریب هدایت حرارتی سنگ مخزن بوده است. بدین منظور سیستم آزمایشگاهی شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی با نتایج حاصل از شبیه سازی مقایسه شدند. برای این کار از مغزه آزمایش مقاطع نازک<sup>۲</sup> تهیه شد و پس از عکس برداری از مقاطع، دو تصویر با وضوح مناسب تهیه شدند که پس از پردازش به عنوان محیط متخلخل در شبیه ساز استفاده شدند و نتایج حاصل از حالت های خشک، اشباع از آب، اشباع از

1. Simplified

2. Thin Section

3. Dried After One Week



شکل ۱ نمونه مغزه‌های آماده‌شده و هم‌اندازه برای تزریق آب و نانوسیال [۲۴].

مغزه آشکار و بررسی شود. در بخش دوم آزمایش‌ها، اثر غلظت نانوذرات بر ضریب هدایت حرارتی مغزه بررسی شد. بدین منظور، نانوسیال با غلظت‌های ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ مولار تهیه و مطابق مراحل بالا به مغزه تزریق شد و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند.

#### اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی

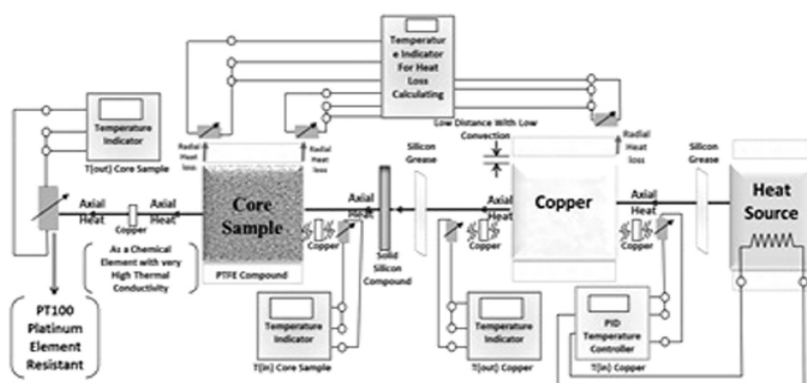
دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی شامل یک محفظه نگه‌دارنده مغزه است که مغزه درون آن قرار می‌گیرد. برای مقایسه گرمای عبوری با یک حالت مبنا، یک قطعه مسی در دستگاه استفاده شده است. چهار حسگر حرارتی در دستگاه تعبیه شده‌اند که دمای ابتدا و انتهای مغزه و نیز دمای دو سر قطعه مسی را ثبت می‌کنند. سه گرم‌کن الکتریکی نیز گرمای سیستم را تامین می‌کنند. دستگاه به نحوی طراحی شده که علاوه بر اندازه‌گیری دمای دقیق دو طرف مغزه، یکی از حسگرها دمای محیط را نیز ثبت کند [۲۴] (شکل ۲).

#### معادلات حاکم

برای به دست آوردن توزیع دما در مغزه، به حل هم‌زمان معادلات بقای انرژی برای قطعه مس (به‌عنوان مرجع اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت) و مغزه نیاز است. باید در نظر داشت که برای قطعه مسی روابط متداول انتقال حرارت در دستگاه مختصات استوانه‌ای معتبر هستند [۲۵].

برای بررسی اثر نانوسیال بر ضریب هدایت حرارتی مغزه، آزمایش‌ها در چهار مرحله طراحی و انجام شدند. در مرحله اول، مغزه به صورت خشک آزمایش و ضریب هدایت حرارتی آن اندازه گرفته شد. در مرحله دوم، مغزه از سیال پایه که در این تحقیق آب بود اشباع و ضریب هدایت حرارتی آن اندازه گرفته شد. در مرحله سوم، نانوسیال تهیه‌شده تا حد اشباع به مغزه تزریق و سپس، بلافاصله بعد از اشباع مغزه، ضریب هدایت حرارتی آن اندازه‌گیری شد. در این مرحله برای اطمینان از اشباع کامل مغزه از نانوسیال، مقدار نانوسیال تزریقی به مغزه پنج برابر حجم فضای خالی<sup>۱</sup> مغزه بود. علاوه بر آن در ابتدای تزریق، سیال خروجی از مغزه شفاف و بی‌رنگ بود و در انتهای تزریق تغییر رنگ داد و تیره‌تر شد که نشان می‌دهد نانوذرات اکسید مس در انتهای تزریق در سیال خروجی وجود داشته‌اند و مغزه از نانوسیال اشباع شده است. برای دیدن اثر محسوس نانوذرات و ایجاد فرصت مناسب برای تبخیر سیال پایه و جذب نانوذرات به سطح، مغزه یک هفته در محیط اجاق گرمای خشک قرار گرفت تا خشک شود. در مرحله چهارم، ضریب هدایت حرارتی این مغزه اندازه‌گیری شد. در واقع در این یک هفته سیال پایه تبخیر شد و ذرات نانو روی سطح سنگ نشستند تا اثر خالص نانوذرات در تغییر هدایت حرارتی مغزه نمایان شود. بعد از انجام چهار مرحله آزمایش، نتایج با هم مقایسه شدند تا اثر نانوسیال اکسید مس بر هدایت حرارتی

1. Pore Volume



شکل ۲ شماتیک دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی [۱۹].

برای معادلات حاکم بر مغزه، معادلات فوریه و دوپلیسیس (۲۰۰۳) [۲۶ و ۲۷] استفاده می‌شوند. این دو رابطه، که براساس ثبت بقای انرژی برای دو فاز سنگ و سیال با فرض غالب بودن سازوکار هدایت در پدیده انتقال حرارت هستند، با روش متوسط‌گیری حجمی محلی<sup>۱</sup> به دست آمده‌اند. در حالت کلی معادله انتقال حرارت در سیستم استوانه‌ای به شکل زیر است که برای قطعه مسی قرار گرفته در دستگاه اندازه‌گیری برقرار است.

برای معادلات حاکم بر مغزه، معادلات فوریه و دوپلیسیس (۲۰۰۳) [۲۶ و ۲۷] استفاده می‌شوند. این دو رابطه، که براساس ثبت بقای انرژی برای دو فاز سنگ و سیال با فرض غالب بودن سازوکار هدایت در پدیده انتقال حرارت هستند، با روش متوسط‌گیری حجمی محلی<sup>۱</sup> به دست آمده‌اند. در حالت کلی معادله انتقال حرارت در سیستم استوانه‌ای به شکل زیر است که برای قطعه مسی قرار گرفته در دستگاه اندازه‌گیری برقرار است.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (۱)$$

### بیان شرایط مرزی و اولیه

مطابق شرایط آزمایشگاه، روابط زیر بیانگر شرایط مرزی سیستم موردنظراند. چون سیالات هیچ حرکتی ندارند، سرعت حرکتشان صفر است و رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\overline{u_{fluids}} = 0 \quad (۵)$$

با توجه به این که سیستم طراحی شده دما ثابت و دمای ورودی ۳۷۳ کلین است:

$$y = 0, \quad \theta_{copper} = 373 K \quad (۶)$$

در سطح مشترک دو قطعه، دمای دو قطعه برابر است و رابطه زیر به دست می‌آید:

$$y = H1, \quad \theta_{Copper} = \theta_{Core} \quad (۷)$$

در قسمت انتهایی نیز شرط عایق بودن برقرار است:

$$y = H2 + H1, \quad \frac{\partial \theta_{Core}}{\partial y} = 0 \quad (۸)$$

با توجه به این که اتلاف حرارت شعاعی در سیستم آزمایشگاهی رخ می‌دهد و سه سنسور حرارتی برای اندازه‌گیری مقدار اتلاف در سیستم تعبیه شده‌اند،

$\theta$ ، دما؛  $t$ ، زمان و  $\Phi$ ،  $r$  و  $z$ ، مولفه‌های دستگاه مختصات استوانه‌ای به ترتیب در راستای شعاعی، قائم و محوری هستند. با در نظر گرفتن این که مجموعه قطعات مسی و سنگ با پوشش تفلونی احاطه شده است، می‌توان از بخش مربوط به انتقال حرارت در جهت شعاعی و قائم صرف‌نظر کرد. با در نظر گرفتن این نکات، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (۲)$$

از معادلات مربوط به فوریه و دوپلیسیس رابطه (۳) برای فاز سنگ و رابطه (۴) برای فاز سیال به دست می‌آید:

$$\rho_s c_{p,s} \frac{\partial \langle \theta \rangle_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{ss} \cdot \nabla \langle \theta \rangle_s) + \nabla \cdot (k_{sf} \cdot \nabla \langle \theta \rangle_f) - \frac{h_{sf} A_{sf}}{\varepsilon_s V_0} \left( \langle \theta \rangle_s - \frac{\varepsilon_s}{1 - \varepsilon_s} \langle \theta \rangle_f \right) + \langle I \rangle_s \quad (۳)$$

$$\rho_f c_{p,f} \frac{\partial \langle \theta \rangle_f}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{ff} \cdot \nabla \langle \theta \rangle_f) + \nabla \cdot (k_{fs} \cdot \nabla \langle \theta \rangle_s) - \frac{h_{sf} A_{sf}}{\varepsilon_f V_0} \left( \langle \theta \rangle_f - \frac{\varepsilon_f}{1 - \varepsilon_f} \langle \theta \rangle_s \right) + \langle I \rangle_f \quad (۴)$$

1. Local Volume Averaging  
2. Coupled

### مدل سازی

در این تحقیق از نرم افزار شبیه ساز COMSOL Multiphysics ۴/۲ [۲۸] برای شبیه سازی فرآیند انتقال حرارت استفاده شد. این نرم افزار برای حل معادلات از روش عددی اجزاء محدود استفاده می کند. در این کار از هندسه دوبعدی به عنوان محیط متخلخل استفاده شد. مشخصات فیزیکی و حرارتی به همراه مشخصه های هندسی استفاده شده در شبیه سازی در جدول ۱ ارائه شده اند. ابتدا، از دو مقطع مغزه در حال آزمایش دو عکس گرفته و سپس هر تصویر با استفاده از روش های پردازش تصویر<sup>۱</sup> به یک تصویر دودویی<sup>۲</sup> تبدیل شد. برای آشکار کردن حفرات سنگ هنگام تصویربرداری با میکروسکوپ دیجیتال، نور تنها از اطراف به سطح نمونه تابانده می شود تا حفرات سنگ نور کم تری دریافت کنند و تیره تر باشند.

مقدار حرارت تلف شده از سطح جانبی مغزه و قطعه مسی به ترتیب ۴۰ و ۲۵ وات بود. با داشتن ابعاد قطعه های مسی و مغزه و همچنین توزیع دما در زمان های مختلف ضرایب انتقال حرارت جابه جایی به دست آمده اند:

$$x=0, 0 < y < H1, \quad h = 2 \frac{W}{m^2K} \quad (9)$$

$$x=L, 0 < y < H1, \quad h = 2 \frac{W}{m^2K} \quad (10)$$

$$x=0, H1 < y < H2, \quad h = 5 \frac{W}{m^2K} \quad (11)$$

$$x=L, H1 < y < H2, \quad h = 5 \frac{W}{m^2K} \quad (12)$$

در لحظه صفر دمای تمام سیستم برابر دمای آزمایشگاه یا ۲۹۸ کلوین است (شرط اولیه):

$$t = 0 \text{ min}, \quad \theta = 298 \text{ K} \quad (13)$$

جدول ۱ مشخصات فیزیکی و حرارتی و مشخصه های استفاده شده در شبیه سازی.

علامت اختصاری	مقدار	مشخصه
$\rho$	۲۵۰۰ (kg/m <sup>3</sup> )	جرم مخصوص سنگ آهک
$C_{p,l}$	۹۰۸ (J/kg.K)	ظرفیت گرمایی ویژه سنگ آهک
K	۱/۸۵ (W/m.K)	ضریب هدایت حرارتی سنگ آهک
$\rho$	۸۷۰۰ (kg/m <sup>3</sup> )	جرم مخصوص مس
$C_p$	۳۸۵ (J/kg.K)	ظرفیت گرمایی ویژه مس
K	۴۰۰ (W/m.K)	ضریب هدایت حرارتی مس
$\rho$	۶۳۱۰ (kg/m <sup>3</sup> )	جرم مخصوص اکسید مس
$C_{p,o}$	۵۳۱ (J/kg.K)	ظرفیت گرمایی ویژه اکسید مس
K	۲۰ (W/m.K)	ضریب هدایت حرارتی اکسید مس
L	۴۸ (mm)	طول مغزه
L	۳۸ (mm)	طول قطعه مس
D	۳۸ (mm)	قطر مغزه
D	۳۸ (mm)	قطر قطعه مس

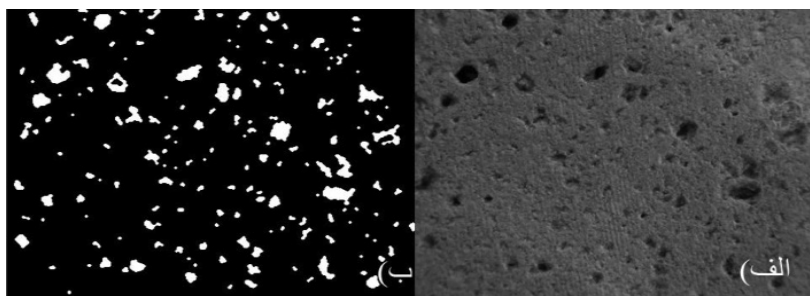


به هندسه سیستم از نوع مثلثی است و اندازه ریز<sup>۴</sup> برای المان‌ها انتخاب شد. در شکل ۷ مش‌بندی برای دو حالت مغزه خشک و اشباع از نانوسیال در مدل شماره یک نمایش داده شده است. پس از قرار گرفتن لایه‌های نازک اکسید مس روی حفرات تعداد المان‌ها افزایشی قابل‌ملاحظه داشت و زمان اجرای شبیه‌ساز نیز به همان نسبت افزایش یافت. برای بررسی استقلال از مش، اختلاف دمای دو سر مغزه در حالت مغزه خشک با استفاده از مدل شماره دو، با دو مش ریز و ریزتر<sup>۵</sup> مقایسه شد که کم‌ترین و بیش‌ترین درصد خطا به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۵ بود که نشان می‌دهد جواب نهایی به مش انتخابی وابسته نیست، لذا از مش با اندازه ریز برای حل معادلات استفاده شد. پس از اجرای شبیه‌ساز توزیع دمای مغزه در زمان‌های مختلف به دست آمد. توزیع دمای به دست آمده برای مدل شماره یک در چهار زمان مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است.

### بررسی و تحلیل نتایج

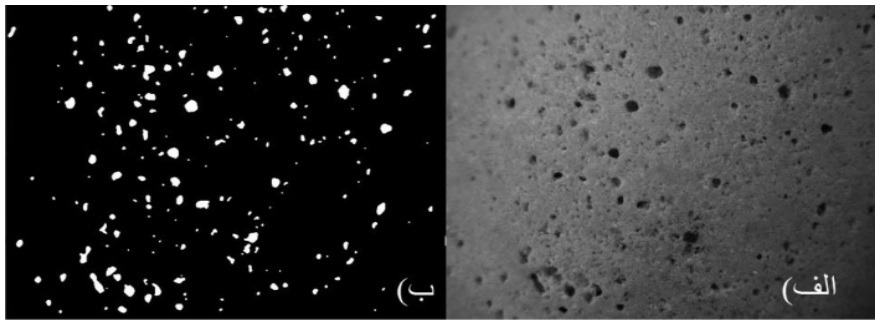
پس از اعمال شرایط مرزی و اجرای شبیه‌ساز، نمودار اختلاف دمای دو سر مغزه در حالت‌های مختلف خشک، اشباع از آب، اشباع از نانوسیال و خشک بعد از یک هفته به دست آمد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی به همراه نتایج آزمایشگاهی در شکل‌های ۹ تا ۱۲ بیان شده‌اند.

برای تبدیل عکس سطح سنگ به یک تصویر دودویی، ابتدا مقیاس آن از تصاویر رنگی<sup>۱</sup> به خاکستری<sup>۲</sup> تغییر می‌کند. سپس عکس با استفاده از الگوریتم اتسو<sup>۳</sup> از نظر روشنایی عکس به دو سطح سیاه و سفید تقسیم‌بندی می‌شود. مبنای اصلی روش اتسو حداقل کردن انحراف معیار روشنایی هر یک از سطوح است. در تصویر حاصل، رنگ سفید نشان‌دهنده حفرات و رنگ سیاه نشانگر دانه‌های سنگ است [۲۹ و ۳۰]. در روند حل مسئله به دلیل طولانی بودن زمان اجرا و پیچیده‌تر شدن مدل در حالت سه‌بعدی، از فرض ساده‌کننده هندسه دوبعدی استفاده شد. همچنین مطابق شرایط آزمایشگاهی، انتقال حرارت عمدتاً در راستای محوری بود و می‌شد از سهم انتقال حرارت در راستای شعاعی و قائم صرف‌نظر کرد، لذا با چنین فرضی از حجم محاسبات کاسته شد. همچنین، فرض شد که نانوذرات تمام سطح سنگ را اشغال می‌کنند، در حالی که در واقعیت تنها بخشی از سطح سنگ را می‌پوشانند. دو تصویر گرفته‌شده از دو مقطع مغزه به همراه تصاویر پردازش‌شده آنها با استفاده از الگوریتم اتسو در شکل ۳ و شکل ۴ نمایش داده شده‌اند. در شکل ۵ نیز شماتیک‌های دو مدل به دست آمده از تصاویر حاصل از مغزه یک و دو، براساس ابعاد گفته‌شده در جدول ۱، به ترتیب آمده‌اند. در شکل ۶ تصویر بزرگ‌شده لایه نانو برای نمایش بهتر آورده شده است. مش‌بندی اعمال شده

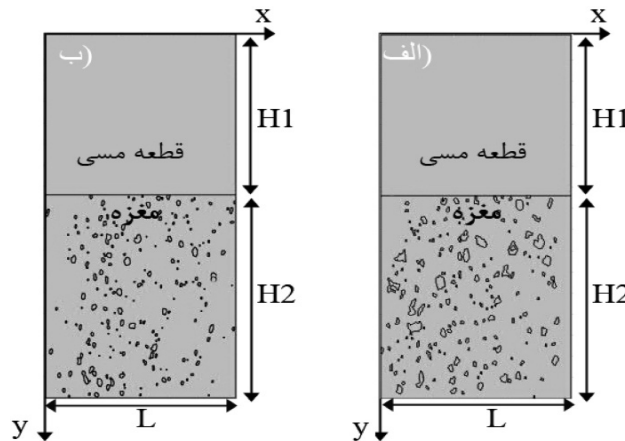


شکل ۳ تصاویر شماره یک مغزه: الف) تصویر واقعی و ب) تصویر پردازش‌شده.

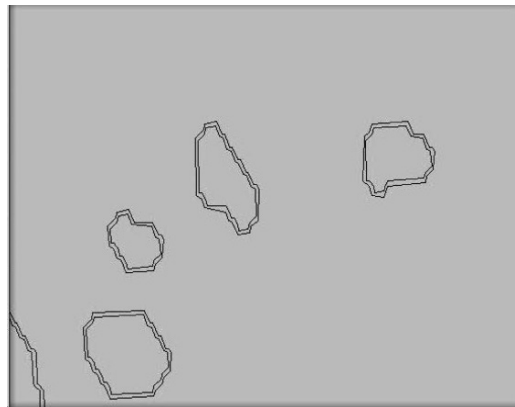
1. RGB
2. Gray Scale
3. Otsu
4. Fine
5. Finer



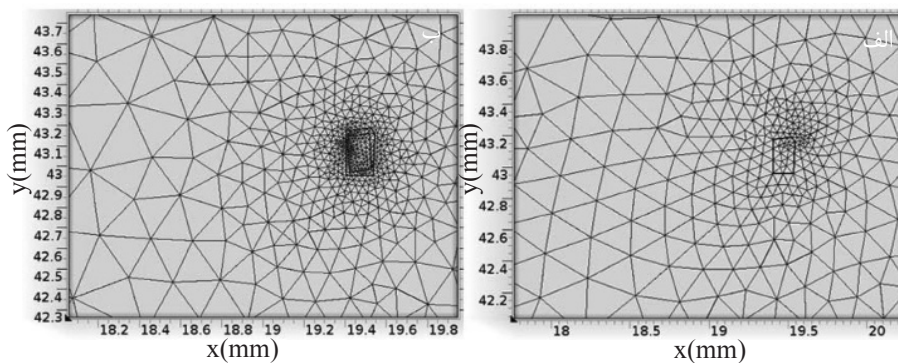
شکل ۴ تصاویر شماره دو مغزه: الف) تصویر واقعی و ب) تصویر پردازش شده.



شکل ۵ شماتیک مدل‌های به دست آمده از تصاویر مغزه: الف) مدل شماره یک و ب) مدل شماره دو.

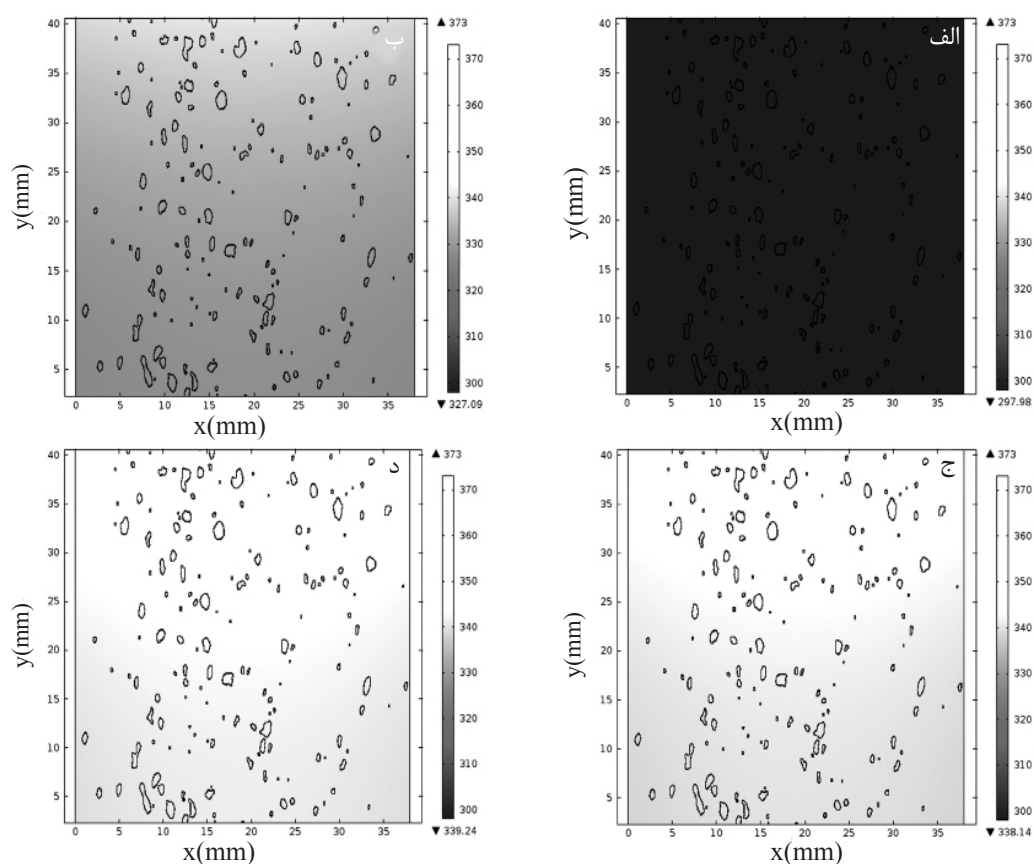


شکل ۶ تصویر بزرگ شده از مدل، نشان دهنده نحوه پوشش نانوذرات روی سطح سنگ.

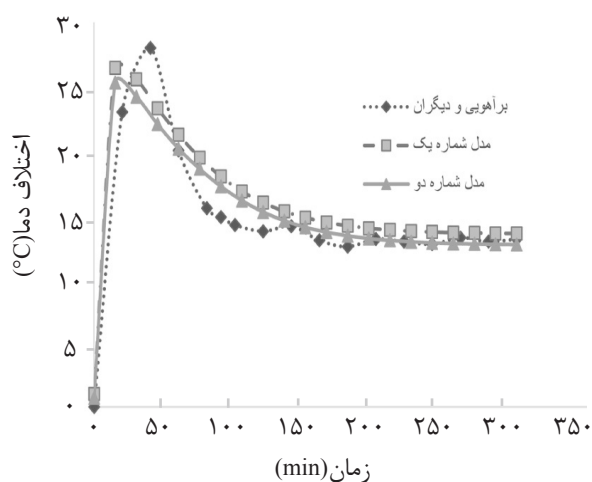


شکل ۷ تصویر بزرگ شده از مش بندی اعمال شده به مدل شماره دو در حالت‌های الف) مغزه خشک و ب) مغزه اشباع از نانوسیال.

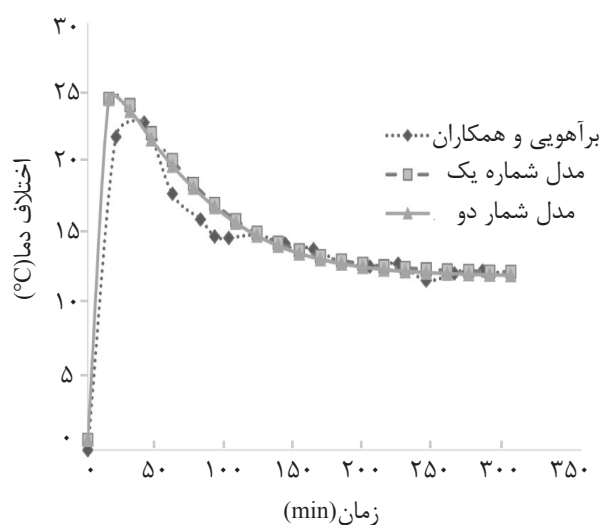




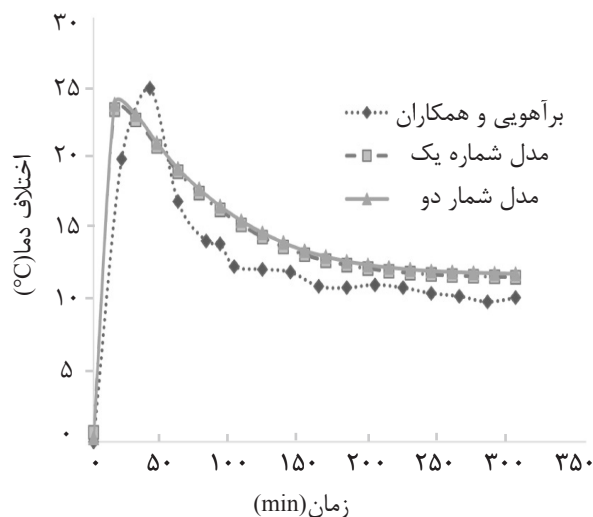
شکل ۸ توزیع دمای به دست آمده بر حسب کلوین از مدل شماره یک در حالت اشباع از نانوسیال در زمان‌های مختلف: الف) زمان شروع صفر؛ ب) ۵۴۰۰ s؛ ج) ۱۲۶۰۰ s و د) ۱۸۰۰۰ s.



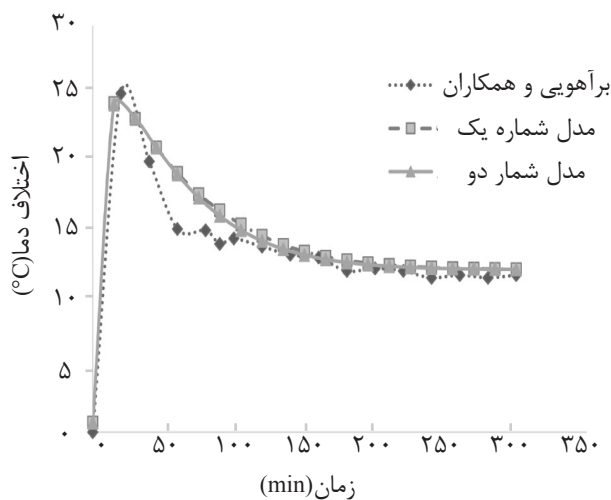
شکل ۹ نمودار اختلاف دمای دو سر مغزه در حالت خشک حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های شماره یک و شماره دو در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برآهویی و همکاران [۱۹].



شکل ۱۰ نمودار اختلاف دمای دو سر مغزه در حالت اشباع از آب حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های شماره یک و شماره دو در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برآهویی و همکاران [۱۹].



شکل ۱۱ نمودار اختلاف دمای دو سر مغزه در حالت اشباع از نانوسیال حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های شماره یک و شماره دو در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برآهویی و همکاران [۱۹].



شکل ۱۲ نمودار اختلاف دمای دو سر مغزه در حالت مغزه خشک‌شده پس از یک هفته حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های شماره یک و شماره دو در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برآهویی و همکاران [۱۹].

زمان‌های ابتدایی آزمایش توانسته ضریب هدایت را افزایش دهد که البته مقدار افزایش از حالت تزریق نانوسیال کم‌تر بوده است. تزریق نانوسیال با غلظت بالاتر و به تبع آن جذب بیش‌تر روی سطح سنگ افزایش بیش‌تر ضریب هدایت حرارتی را به‌همراه خواهد داشت؛ لذا برای نشان دادن تاثیر غلظت بیش‌تر نانوسیال در شبیه‌سازی، می‌توان ضخامت در نظر گرفته‌شده برای نانولایه‌ها را افزایش داد. برای تایید نتایج این تحقیق، می‌توان نانوسیال‌هایی با ذرات فلزی دیگر و با غلظت‌های مختلف را تزریق کرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مدل شماره یک بیانگر افزایش ۱۴٪ به‌ازای تزریق نانوسیال و ۱۰٪ به‌ازای تزریق آب مقطر نسبت به حالت خشک‌اند. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مدل شماره دو افزایش ۸٪ به‌ازای تزریق نانوسیال و ۴٪ به‌ازای تزریق آب مقطر نسبت به حالت خشک را نشان می‌دهند.

سپس مقادیر ضریب هدایت حرارتی محاسبه و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شدند (جدول ۲). همان‌طور که در نمودارهای اختلاف دما نیز مشاهده می‌شود، به‌دلیل بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی آب از هوا، هنگام اشباع شدن مغزه از آب انتقال حرارت هدایتی افزایش می‌یابد، اما با تبخیر آب و خالی شدن منافذ از آن، مغزه دوباره به حالت خشک نزدیک می‌شود. اما در مغزه اشباع از نانوسیال، با پر شدن منافذ از نانوسیال فلزی با ضریب هدایت حرارتی بسیار بالاتر از آب و هوا، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. با تبخیر آب به‌عنوان سیال پایه نانوسیال اکسید مس نیز نانوذرات اکسید مس درون منافذ و روی سطح سنگ باقی می‌مانند و باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیش‌ترین افزایش مربوط به تزریق نانوذرات است و بعد از آن، مغزه در حالت خشک‌شده پس از یک هفته بیش‌ترین بهبود را داشته است. تزریق آب مقطر هم به‌دلیل تبخیر در

**جدول ۲** ضریب هدایت حرارتی سنگ در چهار حالت (الف) خشک؛ (ب) اشباع از آب؛ (ج) اشباع از نانوسیال و (د) مغزه خشک‌شده پس از یک هفته.

انواع حالت‌ها	ضریب هدایت حرارتی (مدل شماره دو) (W/m.K)	ضریب هدایت حرارتی (مدل شماره یک) (W/m.K)	ضریب هدایت حرارتی (آزمایشگاهی) [۱۹] (W/m.K)
مغزه خشک	۱/۵۵	۱/۴۵	۱/۵
مغزه اشباع از آب	۱/۶۰	۱/۶۱	۱/۵۹
مغزه اشباع از نانوسیال	۱/۶۸	۱/۶۵	۱/۸۸
مغزه خشک‌شده پس از یک هفته	۱/۶۳	۱/۶۳	۱/۶۹

### نتیجه‌گیری

پس از یک هفته به دست آمد و نتایج شبیه‌سازی موافقتی قابل قبول با نتایج آزمایشگاهی داشتند که بیانگر صحت روش به‌کاررفته است. نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از تزریق نانوسیال بیانگر افزایش قابل توجه ضریب هدایت حرارتی نسبت به سنگ خشک‌اند (۲۵٪) در حالی که آب مقطر تنها ۶٪ ضریب انتقال حرارت را بهبود بخشید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی پس از تزریق نانوسیال با استفاده از مدل شماره یک بیانگر افزایش ۱۴٪ ضریب هدایت

هدف از این تحقیق بررسی تاثیر نانوذرات رسانای اکسید مس بر ضریب هدایت حرارتی سنگ مخزن بوده است. بدین منظور فرآیند یک سیستم آزمایشگاهی شبیه‌سازی شد و نتایج آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شدند. در این تحقیق ضریب انتقال حرارت و اختلاف دمای دو سر مغزه در چهار حالت خشک، اشباع از آب، اشباع از نانوسیال و مغزه خشک‌شده

نیز خطا ایجاد کرده است. نتایج به دست آمده از شبیه سازی به روش های متفاوت حاکی از آن هستند که ضریب هدایت حرارتی موثر سنگ مخزن تحت تزریق نانوسیال اکسید مس افزایش خواهد یافت. به بیان دیگر، با کاهش اختلاف دمایی دو سر مغزه پس از پایدار شدن سیستم، نانوذرات اکسید مس روی سطح سنگ جذب می شوند و با توجه به رسانا بودن این ذرات، ضریب انتقال حرارت موثر مغزه افزایش می یابد. در غلظت مولار بالاتر نانوسیال تزریقی نیز، نظر به این که سطح بیش تری از سنگ با نانوذرات رسانا پوشیده می شود، افزایش بیش تر ضریب انتقال حرارت هدایتی انتظار می رود که می تواند به افزایش راندمان انتقال حرارت و بهبود شرایط تولید نفت در فرآیند ازدیاد برداشت حرارتی بیانجامد.

حرارتی نسبت به سنگ خشک بودند، در حالی که تزریق آب مقطر فقط ۱۱٪ ضریب هدایت حرارتی را بهبود داد. در حالت مغزه خشک شده پس از یک هفته، ضریب انتقال حرارت ۱۲٪ افزایش یافت. هم چنین، نتایج حاصل از شبیه سازی پس از تزریق نانوسیال با استفاده از مدل شماره دو بیانگر افزایش ۸٪ ضریب هدایت حرارتی نسبت به سنگ خشک بودند در حالی که تزریق آب مقطر فقط ۴٪ ضریب را بهبود داد. در حالت مغزه خشک شده پس از یک هفته، ضریب انتقال حرارت ۵٪ افزایش داشت.

اختلاف نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی ناشی از تفاوت تخلخل مغزه استفاده شده و تصاویر تبدیل شده است که تاثیری بسزا در سهم نانوسیال و حجم پوشیده شده از سنگ با سیال تزریقی داشته است. استفاده از مدل دوبعدی به جای سه بعدی

## مراجع

- [1]. Batzle M., Hofmann R and Han D. "Heavy oils: seismic properties," The Leading Edge, Vol. 25, No. 6, pp. 750-756, 2006.
- [2]. Mateeva A., Lopez J., Hornman K., Wills P., Cox B., Kiyashchenko D., Berlang W., Potters H. and Detomo R., "Recent advances in seismic monitoring of thermal EOR," In: IPTC 2014: International Petroleum Technology Conference, Kuala Lumpur, 2014.
- [3]. Lashanizadegan A., Ayatollahi Sh. and Homayoni M. "Simultaneous heat and fluid flow in porous media: case study: steam injection for tertiary oil recovery," Chemical Engineering Communications, Vol. 195, No. 5, pp. 521-535, 2008.
- [4]. Mohsenzadeh A., Escrochi M., Afraz M., Mansoor Al-wahaibi Y. and Ayatollahi Sh. "Experimental investigation of heavy oil recovery from fractured reservoirs by secondary steam-gas assisted gravity drainage," SPE Heavy Oil Conference Canada. Society of Petroleum Engineers, Calgary, 2012.
- [5]. Homayoni M., Ayatollahi Sh., and Lashanizadegan A., "Enhanced heavy oil recovery using steam injection," 13<sup>th</sup> International Oil, Gas and Petrochemical Congress (IOR 2005), Tehran, pp. 24-26, 2005.
- [6]. Cocuzza M., Candido P., Rocca Vera R. and Francesca V. "Current and future nanotech applications in the oil industry," Am. J. Appl. Sci. Vol. 9, No. 6, p.784, 2012.
- [7]. Singh A. K. "Thermal conductivity of nanofluids," Def. Sci. J., Vol. 58, No. 5, pp. 600-607, 2008.
- [8]. Vadász P. "Emerging topics in heat and mass transfer in porous media," New York, Springer Verlag, 2008.
- [9]. Singh R., and Kasana H. S., "Computational aspects of effective thermal conductivity of highly porous metal foams," Appl. Therm. Eng., Vol. 24, pp. 1841-1849, 2004.

- [10]. Bhattacharya A., Calmidi V. and Mahajan R., "Thermophysical properties of high porosity metal foams," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 45, No. 5, pp. 1017-1031, 2002.
- [11]. Abdulagatova Z., Abdulagatov I. and Emirov V., "Effect of temperature and pressure on the thermal conductivity of sandstone," Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 46, No. 6, pp. 1055-1071, 2009.
- [12]. Abdulagatova Z., Abdulagatov I., and Emirov S., "Effect of pressure, temperature, and oil-saturation on the thermal conductivity of sandstone up to 250 MPa and 520 K," J. Pet. Sci. Eng. Vol. 73, No. 1, pp. 141-155, 2010.
- [13]. Coquard R., Rochais D., and Baillis D., "Conductive and radiative heat transfer in ceramic and metal foams at fire temperatures," Fire Technol., Vol. 48, pp. 699-732, 2012.
- [14]. Mendes M., Ray S., and Trimis D., "A Simple and efficient method for the evaluation of effective thermal conductivity of open-cell foam-like structures," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 66, pp. 412-422, 2013.
- [15]. Mendes M., Asad A., Gotze P., Werzner E., Wulf R., Trimis D., Grob U., and Ray S., "Sensitivity analysis of effective thermal conductivity of open-cell ceramic foams using a simplified model based on detailed structure," Spec. Top. Rev. Porous Media, Vol. 6, No. 1, pp. 1-10, 2014
- [16]. Alizadeh M., Rostami B., and Khosravi M., "Numerical analysis of solutal marangoni convections in porous media," Can. J. Chem. Eng., Vol. 92, pp. 1999-2009, 2014.
- [17]. Amiri H., and Hamouda A., "Pore-scale modeling of non-isothermal two phase flow in 2D porous media: influences of viscosity, capillarity, wettability and heterogeneity," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 61, pp. 14-27, 2014.
- [18]. Chahardowli M., and Bruining J., "Modeling of wettability alteration during spontaneous imbibition of mutually soluble solvents in mixed wet fractured reservoirs", COMSOL Multiphysics Conference, Cambridge, 2014.
- [19]. Barahoei M., A. Zeinolabedini S. Sabbaghi and Ayatollahi Sh., "Copper oxide Nano-Fluid stabilized by ionic liquid for enhancing thermal conductivity of reservoir formation; applicable for thermal enhanced oil recovery processes," Chem. Ind. Chem. Eng., Vol. 23, pp.35-50, 2015.
- [۲۰]. رخ‌فروز، م. ر، م. برآهویی، م. رنجبران، الف. جویبار، ش. آیت‌اللهی و و. تقی‌خانی "مدل‌سازی انتقال حرارت در سنگ مخزن تحت تاثیر نانوذرات رسا نا برای بهبود ازدیاد برداشت حرارتی،" پانزدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی، دانشگاه تهران، ۲۸-۳۰ بهمن ۱۳۹۳.
- [21]. Barahoei M., Sabbaghi S., Zeinolabedini A., and Ayatollahi Sh., "Investigation on stability of CuO Nano-Fluid prepared at presence of ionic liquid and its effectiveness its thermal conductivity," The 8<sup>th</sup> International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2014), Kish, Iran, 24-27 February, 2014.
- [۲۲]. برآهویی، م.، ص. صباغی و ش. آیت‌اللهی. "بررسی اثر سورفکتانت‌های مختلف در سنتز نانوسیال اکسید مس و تزریق آن به مغزه جهت بهبود عمل‌کرد ازدیاد برداشت حرارتی،" اولین همایش ملی توسعه میادین نفت و گاز، دانشگاه صنعتی شریف، ۸-۹ بهمن ۱۳۹۳.
- [۲۳]. برآهویی، م.، ص. صباغی و ش. آیت‌اللهی. "بررسی اثر سیال پایه‌های مختلف در تزریق نانوسیال اکسید مس برای افزایش هدایت حرارتی سنگ مخزن،" اولین همایش ملی توسعه میادین نفت و گاز، دانشگاه صنعتی شریف، ۸-۹ بهمن ۱۳۹۳.
- [۲۴]. برآهویی، م. بررسی آزمایشگاهی اثر تزریق نانوسیال اکسید مس بر هدایت حرارتی سنگ مخزن در فرآیند ازدیاد برداشت حرارتی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، ۱۳۹۲.

- [25]. Holman J., "*Heat transfer*," New York, McGraw-Hill Education, 2009.
- [26]. Fourie J., and Du Plessis P., "*A two-equation model for heat conduction in porous media (I: Theory)*," *Transp. Porous Media*, Vol. 53, No. 2, pp. 145-161, 2003.
- [27]. Fourie J., and Du Plessis P., "*A two-equation model for heat conduction in porous media (II: Application)*," *Transp. Porous Media*, Vol. 53, No. 2, pp. 163-174, 2003.
- [28]. COMSOL Multiphysics. User Guide Version 4.2, 2011
- [29]. Fengjie S., He W., and Jieqing F., "*2D Otsu segmentation algorithm based on simulated annealing genetic algorithm for Iced-cable images*," *International Forum on Information Technology and Applications*, Vol. 2, Chengdu, 2009.
- [30]. Lu C., Zhu P., and Cao Y., "*The segmentation algorithm of improvement a two-dimensional Otsu and application research*," 2<sup>nd</sup> International Conference on Software Technology and Engineering (ICSTE), Vol. 1, Puerto Rico, 2010.