**بررسی مزوسکوپیک تاثیر نرخ جریان امولسیون آب و نفت بر میزان نفت محبوس شده در فیلتر شنی با استفاده از شبیه سازی عددی**

علیرضا صادقی نیا\* 1، نصیر مهران بد2

۱دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز، دانشکده نفت و شیمی و گاز، شیراز، ایران

2 استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز، دانشکده نفت و شیمی و گاز، شیراز، ایران

Alireza\_sadeghinia72@yahoo.com \*

**چکيده**

گرفتگی فیزیکی سیستم های تصفیه غشایی و فیلتر های شنی یکی از مشکلات عمده ای است که بر روی عملکرد آنها تاثیر گذار می باشد. بنابراین در این مقاله سعی شده است که با رویکرد مزوسکوپیک[[1]](#footnote-1) به بررسی فرآیند فیلتراسیون امولسیون آب و نفت در فیلتر شنی پرداخته شود در حالی که در پژوهش های گذشته این فرآیند تنها از نقطه نظر ماکروسکوپیک مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این نوشتار بررسی جریان امولسیون آب و نفت درون فیلتر شنی با استفاده از نرم افزار شبیه سازی کامسول و با استفاده از تکنیک عکسبرداری میکرو سی تی می باشد. *از میان مدل های ارئه شده برای جریان های دو فازی، مدل میکسچر یکی از مدل های ساده ولی دقیق جریان های چند فازی می باشد که به منظور شبیه سازی از آن استفاده شده است. بررسی توزیع سرعت و فشار و همچنین محاسبه درصد حجمی نفت باقیمانده داخل بستر پس از فرآیند فیلتراسیون از جمله پارامترهایی می باشند که در این پژوهش به آن پرداخته شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهند که با افزایش دبی جریان میزان نفت باقیمانده در بستر متخلخل کاهش و افت فشار افزایش می یابد.*

**واژگان كليدي:**

امولسیون آب و نفت، فیلتر شنی، دینامیک سیالات محاسباتی، تصویر برداری میکرو سی تی

1. **مقدمه**

توسعه صنایعی همچون نفت و گاز، پالایشی، صنایع دارویی و غذایی موجب رشد فزاینده پساب های نفتی و روغنی در سطح جهانی شده است. آب پاک و فاضلاب یکی از اهداف توسعه پایدار می باشند که توسط مجمع عمومی سازمان ملل تبیین گردیدند. حجم زیادی از پساب های نفتی بواسطه صنایع غذایی و نفتی تولید می شوند اما بخش قابل توجه ای از نفت مخلوط در آب به صنایع پتروشیمی و فلزات مربوط می باشد[1-2]. این ترکیبات روغنی اغلب شامل نفت سفید، گازوئیل، نفت دیزل و کروسن[[2]](#footnote-2) می باشند که اغلب به صورت امولسیون در آب وجود دارند. از میان روش های تصفیه فیزیکی پساب، جداسازی به روش فیلتراسیون به دلیل بازدهی مناسب و همچنین هزینه عملیاتی پایین مورد توجه می باشد. در واقع فیلتراسیون یک روش جداسازی فیزیکی بوده که قطرات نفت در هنگام عبور از یک محیط متخلخل از فاز پیوسته (آب) جداسازی می شوند. گرفتگی مسیر جریان همواره یکی از مشکلات غالب در سیستم های تصفیه غشایی و فیلتراسیون می باشد که در نتیجه به دام افتادن قطرات و ذرات جامد درون حفرات بستر متخلخل رخ می دهد[3]. اخیرا مطالعات آزمایشگاهی و مدلسازی های عددی مختلفی توسط محققین به جهت بررسی عملکرد سیستم های متخلخل در فرآیند فیلتراسون مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس گزارشات ژانگ و همکاران [4] فرآیند های مسدود سازی در سه مرحله مسدود سازی سریع، کاهش مرحله مسدود سازی و در نهایت مرحله پایداری انجام می پذیرد.

قطر قطرات نفت موجود در امولسیون و همچنین تخلخل و مورفولوژی بستر بر میزان نفت به دام افتاده در خلل و فرج موجود در بستر نقش قابل توجهی ایفا می کنند. ژائو و همکاران[5] در یک تقسیم بندی نفت باقیمانده درون بستر را در۵ گروه قرار دادند که شامل Isolated oil droplet، Oil film، Residual oil in dead ends، Residual oil in pore throats و Cluster residual oil می باشند.

مدل پیشنهادی ارائه شده توسط هوستن و فارکس که بر اساس آنالیز ابعادی انجام گرفته است نشان می دهد که فرآیند گرفتگی درون یک بستر متخلخل به تخلخل بستر، نرخ اندازه ذرات و مقدار عددی رینولدز وابسته می باشد[6]. نایاگوم و همکاران [7] یک مدل عددی برای جریان دو فازی و غیرقابل امتزاج و تراکم ناپذیر آب و روغن در یک محیط متخلخل ارائه نموده اند. اساس این مدل ریاضی برپایه فرمولاسیون جریان جزئی شکل گرفته است و شامل دو معادله دیفرانسیل اشباعیت آب و معادله فشار می باشد که برای حل آن از روش عددی [[3]](#footnote-3)MHFE استفاده شده است. اطلاعات محدودی در زمینه جابجایی و توزیع فاز پراکنده درون یک محیط متخلخل ناهمگن وجود دارد. اما امروزه به لطف تکنولوژی تصویر برداری میکرو سی تی با مطالعه مزوسکوپیک رفتار جریان در محیط های متخلخل درک و شناخت ما از الگوی جریان در بستر های متخلخل افزایش یافته است[8]. رائینی و همکاران [9] به مطالعه ی نیرو ها در مقیاس منافذ بر روی رفتار جریان چند فازی داخل نمونه های Sand-pack و ‌ Bera sandstoneپرداختند. در این پژوهش به منظور یافتن خواص فیزیکی در مقیاس دارسی و همچنین درک مکانسیم کنترل کننده جریان دو فازی در محیط متخلخل از تصویر برداری میکرو سی تی جهت شبیه سازی استفاده شده است. . آنها با استفاده از مدل [[4]](#footnote-4)VOF بر پایه [[5]](#footnote-5)FVM اقدام به مطالعه تاثیر نیرو ها در مقیاس منافذ بر روی بازدهی جابجایی نمودند. در این پژوهش ما با استفاده از تکنیک تصویر برداری میکرو سی تی و همچنین دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی تاثیر افزایش سرعت جریان ورودی بر افت فشار و میزان نفت باقیمانده در بستر پرداختیم. مقایسه نتایج شبیه سازی با داده های آزمایشگاهی نشان می دهد که درصد حجمی نفت محبوس شده در بستر به میزان ۷ درصد با داده های آزمایشگاهی اختلاف دارد.

**۱-۱. تصویر برداری میکرو سی تی**

میکرو سی تی یک روش توموگرافی اشعه ایکس با وضوح میکرون می باشد که از یک لوله اشعه ایکس با اشعه مخروطی شکل بعنوان منبع و یک نگهدارنده دوار به جهت عکس برداری استفاده می نماید. تاریخچه تصویر برداری پرتوی ایکس به سال ۱۹۸۵ و کشف اشعه ایکس توسط ویلهام کونراد رونتگن [[6]](#footnote-6)بر می گردد. در دهه ۱۹۷۰، سر گاندفری هانسفیلد[[7]](#footnote-7) اولین توموگرافی کامپیوتری را برای اهداف پزشکی ایجاد کرد. با پیشرفت تکنولوژی امکان تصویر برداری اشعه ایکس با وضوح تصویر بالا فراهم آمد. تصویر برداری میکرو سی تی همان تصویر برداری سی تی اسکن با کاهش نقطه کانونی و کیفیت تصویر بالاتر می باشد که با گذشت زمان با استفاده از پرتوی سنکروترون[[8]](#footnote-8) و اپتیک ویژه اشعه ایکس وضوح تصویر بالاتر و زیر نانومتر قابل حصول شده است[10-12]. در این مقاله ما برای شبیه سازی جریان امولسیون آب و نفت درون ستون شنی از تصویر برداری میکرو سی تی استفاده کردیم، متریال استفاده شده درون بستر شنی موجود در آزمایشگاه دانه های سیلیس با اندازه ۲-۱ میلی متر می باشند که از آن برای ساخت نمونه و در نهایت عکس برداری استفاده شده است. شکل (۱) نشان دهنده بخشی از نمونه تصویر برداری شده و نمونه باینری شده آن با استفاده از نرم افزار Image j می باشد.

|  |  |
| --- | --- |
|  | شکل ۱. شکل سمت چپ بخشی از تصویر نمونه عکس برداری شده و شکل سمت راست همان نمونه بعد از اعمال فیلترمی باشد. |

1. **حل عددی**

**۲-۱. معادلات مدل مخلوط**

از میان معادلات جریان چند فازی، مدل میکسچر در عین سادگی از دقت مطلوبی برخوردار می باشد. این مدل با در نظر گرفتن سرعت متفاوت برای هر فاز اجازه اختلاط فازها درون یکدیگر را می دهد. معادلات حاکم در مدل میکسچر شامل معادله پیوستگی فاز دوم، معادله مومنتم مخلوط، معادله پیوستگی مخلوط و معادله سرعت نسبی می شوند[13]. در ابتدا روابط و متغیر هایی که در مدل میکسچر تعریف شدند را در این بخش معرفی می نماییم[14].

|  |  |
| --- | --- |
| (۱) |  |
| (۲) | = |
| (۳) | = |
| (۴) | = |
| (۵) | = |

در روابط فوق n تعداد فاز جریان چند فازی، ، و بترتیب چگالی مخلوط ، سرعت و کسر حجمی می باشند. همچنین روبط (۵) تا (۷) بترتیب نشان دهنده ی سرعت مخلوط ()، سرعت دیفیوژن () و سرعت نسبی () می باشند. کسر جرمی () به کار برده شده در رابطه (۵) بصورت زیر بیان می شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (۶) |  |

سرعت نسبی دیفیوژن فازهای دوم بر حسب سرعت نسبی به صورت زیر تعریف می شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (۷) | = |

در صورتی که یک فاز ثانویه در جریان چند فازی داشته باشیم رابطه فوق به فرم زیر نوشته می شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (۸) |  |

بر اساس روابط فوق رابطه (۹) در سرعت دیفیوژن برقرار می باشد.

|  |  |
| --- | --- |
| (۹) | = 0 |

در مدل میکسچر فشار مخلوط به صورت زیر مشخص می شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (۱۰) |  |

معادله پیوستگی مخلوط که از مجموع معادله پیوستگی هر یک از فاز ها بدست می آید به شکل زیر بیان می شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (۱۱) |  |

بر اساس قانون بقای جرم سمت راست معادله فوق صفر می شود و می توان آن را به فرم رابطه (۱۲) بازنویسی کرد:

|  |  |
| --- | --- |
| (۱۲) |  |

معادله ممنتوم مخلوط برای مخلوط جریان بر اساس معادله ممنتوم هر فاز به فرم زیر نوشته می شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (۱۳) | = - + |

در رابطه (۱۳) ترم معرف چشمه مومنتم بر اساس تنش سطحی می باشد که می توان از آن صرفنظر نمود. همچنین ، ، بترتیب تنش ویسکوز، تنش دیفیوژن و تنش آشفتگی می باشند که به فرم زیر تعریف می شوند.

|  |  |
| --- | --- |
| (۱۴) | = |
| (۱۵) | = - |
| (۱۶) | = - |

در رابطه (۱۵) مولفه نوسانی سرعت () می باشد. نیز بیانگر سرعت لحظه ای فاز K است. در صورت وجود یک فاز ثانویه رابطه (۱۶) به شکل زیر ساده می شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (۱۷) |  |

با تعریف رابطه مومنتم به فرم زیر نوشته می شود:

در رابطه فوق، از رابطه ی زیر بدست می آید:

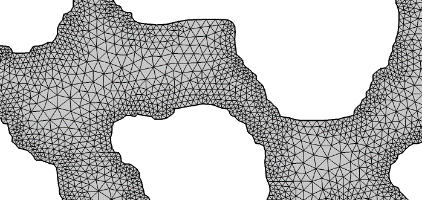
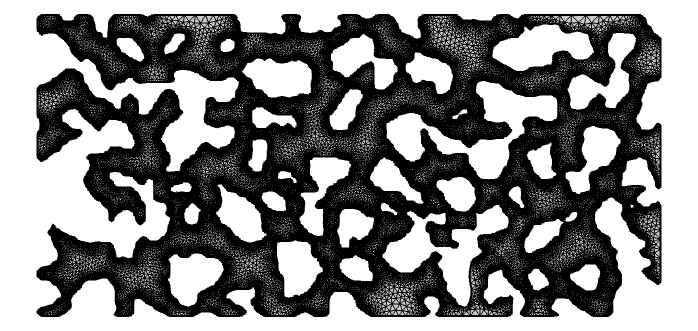
|  |  |
| --- | --- |
| (۱۸) | = |

همچنین معادله سرعت نسبی با فرض در نظر نگرفتن ترم های آشفتگی نوسانی به فرم زیر نوشته می شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (۱۹) | = |

**۲-۲. شبیه سازی**

دراین پژوهش سعی شده است که معادلات اساسی و همچنین شرایط مرزی حاکم بر هندسه مسئله ابتدا تعیین شده و سپس با بهره گیری از روش عددی دینامیک سیالات محاسباتی به حل معادلات به روش المان محدود پرداخته شود. به جهت حل معادلات ارائه شده از نرم افزار کامسول که یک نرم افزار قدرتمند جهت شبیه سازی مسائل مهندسی می باشد استفاده شده است. بنابراین معادلات ارائه شده برای جریان دو فازی ابتدا به روش المان محدود گسسته سازی شده و سپس فرم ضعیف شده آنها در نرم افزار حل گردیده شده است. شبکه بندی دامنه حل با استفاده از المان های مثلثی انجام گرفته است و گام زمانی در طول محاسبات توسط حلگر کنترل می شود. همچنین تکنیک حل به منظور انجام محاسبات [[9]](#footnote-9)BDE می باشد. شرط مرزی اعمال شده بر روی دیواره ها از نوع عدم لغزش[[10]](#footnote-10) می باشد و به منظور شبیه سازی ابتدا فرض شده است که بستر خالی از مایع بوده و امولسیون با سرعت.۰۰۰۰۳۴ /۰. متر بر ثانیه از پایین وارد و در نهایت از بالای بستر خارج می شود. اطلاعات مربوط به شبکه بندی دامنه حل در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیک شبکه بندی دامنه حل

جدول ۱. اطلاعات مربوط به شبکه بندی دامنه حل

|  |  |
| --- | --- |
| Property | Heterogeneous pattern |
| Triangular elements | 81284 |
| Edge elements | 6734 |
| Vertex elements | 70 |
| Mesh area () | 0.01673 |
| Minimum element quality | 0.2894 |
| Average element quality | 0.8206 |
| Element area ratio | 0.002608 |
| Number of elements | 81284 |

جدول ۲. اطلاعات مربوط به شبکه بندی دامنه حل

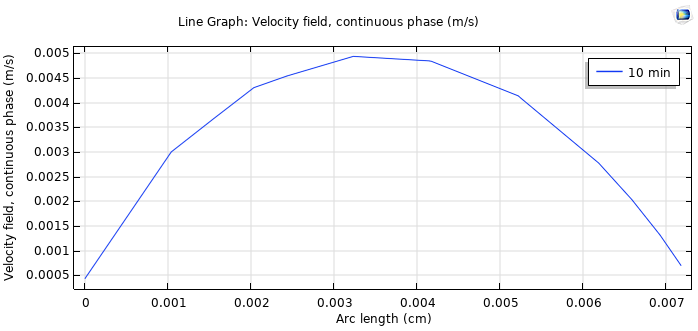
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Parameter | Value | Unit |
| Dimension | 0.2413 |  |
| Oil density | 772 | [kg/m^3] |
| Water density | 1000 | [kg/m^3] |
| Oil viscosity | 1.53 | [Pa..s] |
| Water viscosity | 1e-3 | [Pa..s] |
| porosity | 0.48 | - |
| Permeability | 2.5e-7 | [] |
| The volume fraction of oil | 0.1 | - |
| Inlet velocity | 3.4e-5 | [m/s] |
| pressure | atmosphere | [pa] |

1. **بحث و نتیجه گیری**

در این بخش به بررسی نتایج شبیه سازی خواهیم پرداخت، شکل (۲) توزیع سرعت فاز پیوسته در بستر متخلخل را نشان می دهد که همانطور که در شکل مشخص می باشد سرعت در گلوگاه به علت کاهش سطح مقطع افزایش می یابد و در مرکز آن به حداکثر مقدار خود می رسد. همانطور که در شکل مشخص می باشد؛ جریان از قسمت های میانی بستر به سمت خروجی بستر حرکت می نماید چرا که گلوگاه ها عریض تر می باشند و به دنبال آن مقاومت در برابر جریان کمتر است**.**

شکل ۲. شماتیک کانتور سرعت

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

****

شکل ۳. نمودار توزیع سرعت فاز پیوسته در گلوگاه

پروفایل فشار و توزیع سرعت نشان می دهند که در کنار مورفولوژی ماکزیمم سرعت و افت فشار دو شاخص تاثیر گذار بر رفتار جریان در محیط های متخلخل می باشند. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می کنیم عمده جریان از بخش هایی میانی که عملا بیشترین سرعت جریان در آن نواحی شکل گرفته است عبور می کند. شکل (۳) افزایش افت فشار درون بستر به دنبال افزایش دبی جریان ورودی را نشان می دهد، با افزایش سرعت، تنش سطحی بین دو فاز و سطح جامد افزایش می یابد که همین امر موجب بالا رفتن میزان افت هد درون بستر می شود. با افزایش سرعت جریان ۰۰۰۰۳۴/۰ متر بر ثانیه به ۰۰۰۰۷۸/۰ متر بر ثانیه، افت هد به میزان ۹۷ درصد افزایش می یابد.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Velocity = 4.4e-5 |  | Velocity = 3.4e-5 |  |
|  |  |  |  |
| Velocity = 7.8e-5 |  | Velocity = 6.1e-5 |  |
|  |  |  |  |

شکل۴. شماتیک کانتورهای مربوط به افت فشار ناشی از افزایش سرعت



شکل ۵. نمودار افزایش افت فشار با افزایش سرعت خوراک ورودی

|  |  |
| --- | --- |
| Velocity = 7.8e-5 | Velocity =3.4e-5 |
|  |  |

شکل ۶. بررسی میزان نفت باقیمانده در بستر با افزایش دبی جریان، نواحی آبی فاز نفت و نواحی قرمز فاز آب می باشند.

شکل (۶) نشان می دهد که با افزایش سرعت جریان از ۳۴ میکرو متر بر ثانیه به ۷۸ میکرو متر بر ثانیه میزان نفت باقیمانده درون بستر بعد از فرآیند فیلتراسیون از ۰۸۸/۰ به ۰۴۵/۰ کاهش می یابد. این پدیده را می توان بدین شکل توجیه نمود که با افزایش سرعت، عدد موئینگی که بیانگر نسبت نیروی ویسکوز به نیرو کشش سطحی می باشد افزایش می یابد که همین امر باعث غالب شدن نیروی ویسکوز و در نتیجه کاهش میزان نفت باقیمانده درون بستر شود. بر اساس تقسیم بندی انجام گرفته توسط ژانگ و همکاران همانطور که در شکل (۶) مشخص شده است، نفت باقیمانده در بستر از نوع cluster residual oil و Residual oil in dead zone می باشد. بر اساس نمودار شکل (۷)، داده های بدست آمده از شبیه ساز درصد حجمی نفت باقیمانده بیشتری را نسبت به داده های آزمایشگاهی نشان می دهند؛ میزان خطای نسبی بدست آمده حدودا ۷ درصد می باشد.



شکل ۷. نمودار مقایسه ترکیب درصد نفت باقیمانده در بستر بعد از فرآیند فیلتراسیون با نتایج شبیه سازی

**۳-۱. نتیجه گیری**

در این تحقیق، با استفاده از مدل میکسچر و روش عددی المان محدود به مطالعه مزوسکوپیک جریان امولسیون آب و نفت درون فیلتر شنی پرداخته شده است. بدین منظور از متریال به کار رفته در بستر یک نمونه ایجاد و با استفاده از تکنولوژی تصویر برداری میکرو سی تی از آن عکسبرداری شده است. نتایج بدست آمده در این مقاله نشان می دهند که با افزایش سرعت جریان خوراک ورودی مقدار افت فشار افزایش می یابد. همچنین با افزایش عدد موئینگی ناشی از افزایش سرعت، میزان نفت باقیمانده در بستر به دلیل غالب شدن نیروی ویسکوز بر نیروی کشش سطحی بیشتر می شود. مقایسه ترکیب درصد نفت محبوس شده درون بستر پس از فرآیند فیلتراسیون با نتایج شبیه ساز نشان می دهد که میزان خطای نسبی بدست آمده ۷ درصد می باشد. علاوه بر موارد فوق رفتار جریان و همچنین توزیع سرعت در گلوگاه نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

1. **منابع**

|  |  |
| --- | --- |
| Abuhasel K, Kchaou M, Alquraish M, Munusamy Y, Jeng YT. Oily wastewater treatment: an overview of conventional and modern methods, challenges, and future opportunities. Water. 2021 Jan;13(7):980. | [1] |
| Cai Y, Chen D, Li N, Xu Q, Li H, He J, Lu J. A Self‐Cleaning Heterostructured Membrane for Efficient Oil‐in‐Water Emulsion Separation with Stable Flux. Advanced Materials. 2020 Jun;32(25):2001265. | [2] |
| Tang Y, Yao X, Chen Y, Zhou Y, Zhu DZ, Zhang Y, Zhang T, Peng Y. Experiment research on physical clogging mechanism in the porous media and its impact on permeability. Granular Matter. 2020 May;22(2):1-4. | [3] |
| Zhang J, Ma G, Dai Z, Ming R, Cui X, She R. Numerical study on pore-clogging mechanism in pervious pavements. Journal of Hydrology. 2018 Oct 1;565:589-98. | [4] |
| Guo Y, Zhang L, Zhu G, Yao J, Sun H, Song W, Yang Y, Zhao J. A pore-scale investigation of residual oil distributions and enhanced oil recovery methods. Energies. 2019 Jan;12(19):3732. | [5] |
| Huston DL, Fox JF. Clogging of fine sediment within gravel substrates: Dimensional analysis and macroanalysis of experiments in hydraulic flumes. Journal of Hydraulic Engineering. 2015 Aug 1;141(8):04015015. | [6] |
| Nayagum D, Schäfer G, Mosé R. Modelling two-phase incompressible flow in porous media using mixed hybrid and discontinuous finite elements. Computational Geosciences. 2004 Mar;8(1):49-73. | [7] |
| Li Y, Li Y, Guan Z, Ding Q. Elastic modulus damage model of cement mortar under salt freezing circumstance based on X-ray CT scanning. Construction and Building Materials. 2018 Dec 10;191:1201-9. | [8] |
| Qaseminejad Raeini A. Modelling multiphase flow through micro-CT images of the pore space (Doctoral dissertation, Imperial College London). | [9] |
| Vásárhelyi L, Kónya Z, Kukovecz Á, Vajtai R. Micro-computed tomography-based characterization of advanced materials: a review. Materials Today Advances. 2020 Dec 1;8:100084. | [10] |
| Hounsfield GN. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of system. The British journal of radiology. 1973 Dec;46(552):1016-22. | [11] |
| Niemann B, Rudolph D, Schmahl G. X-ray microscopy with synchrotron radiation. Applied Optics. 1976 Aug 1;15(8):1883-4. | [12] |
| Gharibshahi R, Jafari A, Haghtalab A, Karambeigi MS. Application of CFD to evaluate the pore morphology effect on nanofluid flooding for enhanced oil recovery. RSC Advances. 2015;5(37):28938-49. | [13] |
| بهرنگی ف.، بنی هاشمی م.، نمین م، ۲۴ و ۲۵ آذر ۱۳۹۵، مزایا و محدودیت های مدل چند فازی میکسچر در شبیه سازی پدیده های هیدرولیکی، قزوین، ۸-۱. | [14] |

**A mesoscopic investigation of the effect of water-oil emulsion flow rate on the amount of oil trapped in the sand filter by numerical simulation**

**Alireza Sadeghinia1\*, Nasir Mehranbod2**

1Department of Chemical, Oil and Gas Engineering, Faculty of Chemical engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

2Department of Chemical, Oil and Gas Engineering, Faculty of Chemical engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

\*Alireza\_sadeghinia72@yahoo.com

**Abstract**

Physical clogging of membrane filtration systems and sand filters is one of the significant problems that impact the performance of infiltration systems. Few researchers have addressed the fluid flow in the sand filter from a mesoscopic point of view. Therefore, the purpose of this study is to simulate the water-oil emulsion inside the sand filter using COMSOL Multiphysics software and the micro-CT imaging technique. Among multiphase-flow models presented, the Mixture model is simple and accurate that applied in this study. The mechanism of inlet velocity influenced the pressure drop, and trapping oil is studied from the micro-CT image. The results indicate that pressure drop increases due to increasing inlet velocity. Also, the volume fraction of trapped oil and velocity distribution has been addressed in this study.

**Keywords:** Oil-water emulsion, Sand filter, CFD, Micro-CT

1. Mesoscopic [↑](#footnote-ref-1)
2. Kerosene [↑](#footnote-ref-2)
3. Mix Hybrid Finite Element [↑](#footnote-ref-3)
4. Volume of fluid [↑](#footnote-ref-4)
5. Finite volume model [↑](#footnote-ref-5)
6. Wilhelm Conrad Roentgen [↑](#footnote-ref-6)
7. Sir Godfrey Hounsfield [↑](#footnote-ref-7)
8. synchrotron [↑](#footnote-ref-8)
9. Backward differentiation formula [↑](#footnote-ref-9)
10. No slip [↑](#footnote-ref-10)