

مدل سازی کاهش تراوایی سازند در اثر رسوب آسفالتین با رویکردی بر نظریه های فیلتراسیون

آرش ربانی* و محمدحسین غضنفری

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

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۱ تاریخ پذیرش: ۹۳/۸/۳۰

چکیده

اگرچه تاکنون مدل های بسیاری برای پیش بینی افت تراوایی در اثر تشکیل رسوب ذرات آسفالتین در سازند ارائه شده اند، مدل سازی حاضر، با رویکردی جدید نسبت به تحقیقات قبلی و به صورت نسبتاً تحلیلی به بررسی اثرات هیدرودینامیکی حضور رسوب آسفالتین در سازند خواهد پرداخت. در این پژوهش، برای یافتن میزان کاهش تراوایی مغزه در اثر رسوب آسفالتین، از تغییرات شعاع هیدرولیک محیط متخلخل استفاده می شود. ایده اصلی در مدل سازی حاضر این گونه بیان می شود که با رسوب کردن ذرات درون سازند، علاوه بر آن که فضای خالی در دسترس سیال برای حرکت کاهش پیدا می کند، مقداری از پتانسیل جریان سیال هنگام عبور از لابه لای ذرات رسوب کرده به علت نیروی درگ کاسته می شود. این کاهش پتانسیل جریانی به کم شدن تراوایی سازند می انجامد. در این پژوهش، با استفاده از داده های به دست آمده از تغییر توزیع نسبی شعاع ذرات با گذر زمان و با این فرض که این توزیع در داخل و خارج محیط متخلخل یکسان است، اعدادی برای کاهش تراوایی به دست آمدند که با نتایج حاصل در مقالات موجود مطابقت می کرد. مدل سازی با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام و برنامه ای برای محاسبه تغییر نسبی تراوایی بعد از تخریب سازند نوشته شد. از امتیازات این روش این است که نسبتاً تحلیلی است و در آن از تقریب های عددی استفاده نشده است. این نکته باعث انعطاف پذیری بیشتر مدل در حل مسائل گوناگون تخریب سازندی می شود. علاوه بر آن، این مدل دینامیک می تواند با معلوم بودن تابعیت تغییرات توزیع شعاع ذرات رسوب با زمان، پیشرفت فرآیند رسوب گذاری را پیش بینی کند.

کلمات کلیدی: آسیب سازند، توزیع فراوانی نسبی شعاع ذرات، شعاع هیدرولیک سازند، تراوایی نسبی، فیلتراسیون.

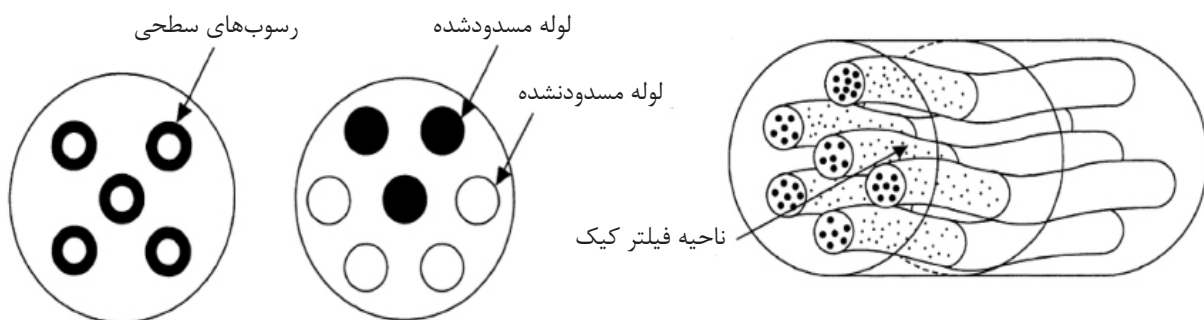
مقدمه

مطرح‌تر در این زمینه است. این مدل مکانیزم‌های متنوعی را برای محاسبه کاهش تراوایی ارائه می‌دهد و در واقع با معرفی سه ضریب برای بسته شدن منافذ، افزایش ضخامت لایه‌های رسوب و مکانیزم رسوب‌گذاری جابه‌جایی و کاهش تراوایی را پیش‌بینی می‌کند. در این روش، در اکثر مواقع ضریب مکانیزم رسوب‌گذاری جابه‌جایی را صفر در نظر می‌گیرند [۵]، در حالی که انسداد گلوگاهی و رسوب‌گذاری سطحی دو سازوکار اصلی هستند که در پژوهش حاضر نیز به آنها پرداخته شده است.

علاوه بر سیوان، یکی دیگر از مدل‌های رایج در این زمینه مدل علی و اسلام است [۶]. در این مدل فرض شده است که حفرات در محیط متخلخل به دو نوع قابل‌انسداد و غیرقابل‌انسداد تقسیم می‌شوند. حفرات قابل‌انسداد شامل تخلخل‌های کوچکتراند که در اثر رسوب آسفالتین می‌توانند کاملاً بسته شوند و حفرات غیرقابل‌انسداد آنهایی هستند که هیچ‌گاه کاملاً بسته نمی‌شوند، زیرا وقتی رسوب تشکیل شد و قطر حفره کاهش یافت، پیش از مسدود شدن کامل حفره، به علت افزایش سرعت جریان سیال مقداری از رسوبات کنده و توسط سیال حمل می‌شود. این مدل که براساس موازنه جرم توسعه یافته است شرایط جذب سطحی آسفالتین را نیز هم‌دما در نظر می‌گیرد.

با توجه به تحقیقات و مدل‌سازی‌هایی که تاکنون روی سازند تخریب‌شده انجام شده‌اند، شبیه‌سازی محیط متخلخل با استفاده از دسته لوله متداول بوده است. آن چه در پژوهش حاضر ارائه شده ترکیبی از مدل‌های رسوب‌گذاری آسفالتین و تئوری‌های فیلتراسیون است. نکته نوین این پژوهش وابسته کردن میزان تخریب سازند به پارامتر مهمی چون توزیع فراوانی نسبی اندازه ذرات آسفالتین است که با استفاده از میکروسکوپ کانفوکال [۱] و یا با استفاده از مدل‌های ترمودینامیکی [۲] در دسترس است.

به‌منظور مدل‌سازی رسوب‌گذاری آسفالتین، گروسبک و کالینز [۳] محیط متخلخل را به شکل دسته لوله^۳ موازی در نظر گرفتند که در اثر رسوب برخی از لوله‌ها مسدود خواهند شد. آن‌گاه با توجه به این فرض، تراوایی هر یک از مسیرهای مسدودنشده را درون محیط متخلخل به دست آوردند و تراوایی کل محیط را با دانستن تراوایی تمام کانال‌های باز و نحوه ارتباط آنها با یکدیگر تخمین زدند. فوگلر و خیلاز [۴] محیط متخلخل یک مغزه را به برش‌های مساوی تقسیم کردند و سیال را به درون این برش‌ها فرستادند و تعداد ذرات به‌جامانده از هر مرحله را تخمین زدند و آن‌گاه به بررسی کاهش تراوایی در اثر این رسوب‌گذاری پرداختند. مدل سیوان^۵ نیز از مدل‌های جدیدتر و



شکل ۱ انواع آسیب سازندی آسفالتین در مدل سیوان [۵].

1. Confocal Microscope
2. Gruesbek and Collins
3. Bundle of tubes
4. Fogler and Khilar
5. Civan

می‌توانند مقعر یا تقریباً صاف باشند. توزیع گاما با توجه به انعطاف‌پذیری و انطباق‌پذیری بالا در این پژوهش استفاده شده است [۸]. در تابع گاما از دو پارامتر اصلی برای توضیح خواص توزیع استفاده می‌شود. این دو عدد به میانگین و انحراف معیار استاندارد داده‌ها مربوط می‌شوند. این توزیع را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \alpha\beta^2 \quad (2)$$

$$\mu = \alpha\beta \quad (3)$$

که μ میانگین داده‌ها و σ انحراف معیار استاندارد داده‌هاست. درباره تابع گاما نیز می‌توان گفت:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} \cdot e^{-t} dt \quad (4)$$

هرچند نمی‌توان برای هر یک از این دو پارامتر آلفا و بتا نقشی کاملاً متفاوت قائل شد، پارامتر آلفا به نوعی بر مکان نقطه ماکزیمم دلالت دارد. در مقابل بتا را می‌توان معرف شکل کلی نمودار و میزان تقعر یال‌های توزیع دانست.

تئوری‌های فیلتراسیون^۱

فیلتر کردن و پاک‌سازی یک سیال از ذرات ریزتر موجود در آن پیشینه‌ای طولانی دارد. اولین سیالی که در فیلترها و صافی‌ها روان شد آب بود. آب رودخانه‌ها برای این که مناسب نوشیدن شود، باید از میان صافی‌هایی معروف به صافی‌های شنی گذر می‌کرد. صافی شنی در حقیقت چیزی جز یک بستر متراکم از خرده‌سنگ‌ها نیست که به دلیل چیدمان خاص می‌تواند به جداسازی ذرات معلق درون آب کمک کند. صافی شنی از چند لایه بستر خرده‌سنگی با دانه‌بندی متفاوت تشکیل شده است. با توجه به جهت جریان سیال، دانه‌ها به تدریج ریز می‌شوند. ابتدا ذرات درشت‌تر و سپس ذرات ریزتر معلق درون آب به دام صافی می‌افتند. گذشتگان ما با این که از قوانین حاکم بر صافی‌ها، فیلترها و تئوری‌های فیلتراسیون

در ادامه لئونتاریتیسی مدلی تحلیلی ارائه داد که رسوب ذرات آسفالتین را به صورت بنیادی‌تر توضیح می‌داد [۷]. وی با ایجاد یک مدل ترمودینامیکی که می‌توانست اندازه متوسطی برای شعاع ذرات آسفالتین در زمان‌های مختلف محاسبه کند، فرض کرد که ذراتی با شعاع بزرگتر از یک سوم شعاع حفره در آن به دام خواهند افتاد و بدین ترتیب توانست یک مدل استوانه‌ای را برای ناحیه اطراف چاه توسعه دهد که در آن، با در نظر گرفتن المان‌هایی به صورت پوسته‌های استوانه‌ای، میزان تخریب سازندی در هر فاصله معین از چاه به دست می‌آمد. نتیجه این کار ایجاد یک مدل بود که به دلیل لخته شدن و به هم پیوستن مستمر ذرات آسفالتین تابعی از زمان نیز بود.

در پژوهش حاضر، ابتدا با استفاده از مدل دسته‌لوله موازی به معادل‌سازی محیط متخلخل پرداخته شده و سپس با معلوم بودن توزیع نسبی شعاع ذرات آسفالتین و تئوری‌های فیلتراسیون، درباره احتمال گیر افتادن ذرات رسوب‌کرده درون حفرات بحث شده است. با تعیین احتمال گیر افتادن این ذرات و مقطع‌بندی محیط متخلخل، می‌توان به‌طور تقریبی تعداد حفره‌های مسدودشده را در هر مقطع از سنگ به دست آورد و با محاسبه افت فشار سیال در اثر عبور از حفرات باقی‌مانده، تراوایی مجموعه مقاطع را محاسبه کرد.

توزیع نسبی شعاع ذرات آسفالتین

در مدل حاضر برای آن که بتوان مقدار کاهش تراوایی در اثر رسوب آسفالتین را تخمین زد، به دانستن توزیع نسبی شعاع ذرات آسفالتین نیاز است. توزیع نسبی پیشنهادشده برای مطالعه رفتار سینتیکی تشکیل رسوب آسفالتین اغلب توزیع گاما بوده است [۷].

این توزیع شباهت‌هایی به توزیع لگاریتمی نرمال دارد، با این تفاوت که دارای نقطه پیشینه‌ای متمایل به یکی از یال‌هاست. دو شاخه جانبی این نمودار

است که ذرات با قطر کمتر از یک‌سوم قطر حفرات می‌توانند از محیط بگریزند و در واقع بقیه ذرات یا اصلاً وارد نشده‌اند، یا درون محیط به دام افتاده‌اند.

حالت سوم: حمل شدن ذرات ریز

همان‌طور که بحث شد، ذرات بسیار کوچک از محیط ما خواهند گریخت و به لایه‌های بعدی محیط متخلخل خواهند رفت. در صورتی که در لایه‌های بعدی منافذ کوچک‌تر و گلوگاه‌های تنگ‌تری یافت شوند، ذره در آن جا به دام می‌افتد، وگرنه باز هم خواهد گریخت تا این که همراه با سیال نفتی به تولید برسد [۱۱].

این نکته قابل‌تامل است که نمی‌توان به‌طور قطع گفت که ذره با شعاع مشخص از محیط خواهد گریخت؛ بلکه سخن تنها بر سر احتمال گریختن است که حدوداً برای ذراتی با شعاع کمتر از یک‌سوم شعاع تنگ‌ترین حفره بیش از ۹۰٪ است. طبیعی است که در صورت وجود جاذبه الکترواستاتیک میان ذره و محیط احتمال جذب بسیار بالا می‌رود. شکل ۲ به‌ترتیب سه مکانیزم بحث‌شده از برهم‌کنش ذرات معلق و محیط فیلتر را نشان می‌دهد.

در بسیاری از شبیه‌سازی‌های بافت متخلخل از فرضیه‌ای با عنوان دسته لوله استفاده شده است. در این فرضیه حفره‌های موثر درون سنگ را با دسته‌ای از لوله‌های مویین تقریب می‌زنند. نکته‌ای که برای نزدیک کردن مسئله به واقعیت می‌توان مطرح کرد این است که طول لوله صاف و بدون پیچ و خم در نظر گرفته نشود. برای وارد کردن این نکته می‌توان از پارامتر تورچواسیتی^۲ بهره گرفت. لانفری و همکارانش [۱۲] مدلی هندسی را برای پیدا کردن تورچواسیتی کانال‌های درون سنگ مطرح کردند که براساس محاسبات هندسی در یک محیط متخلخل با دانه‌بندی کروی تصادفی بنا شده است.

اطلاعی نداشتند، به‌تجربه دریافته بودند: «احتمال جذب یک ذره توسط محیط متخلخل با ریزتر شدن اندازه منافذ عبور سیال بیشتر می‌شود» [۹].

به زبان دیگر می‌توان گفت با کوچکتر شدن ذرات معلق، به‌منظور به دام انداختن آنها باید اندازه منافذ را کوچک‌تر کرد. کوچک شدن اندازه منافذ بستر متخلخل با اندازه ذرات بستر رابطه مستقیم دارد. یک سیستم از بستر ذرات را در نظر بگیرید؛ با توجه به دانه‌بندی ذرات، این سیستم کنش‌هایی مختلف در مقابل ذرات معلق عبوری خواهد داشت.

ممکن است ذره با توجه به اندازه‌اش حتی نتواند وارد این محیط شود. یعنی مانند آنچه در صافی شنی تصفیه آب رخ می‌داد، ذرات در مراحل اولیه که احتمالاً دانه‌بندی درشت است باقی بمانند و وارد قسمت‌های با منافذ ریز نشوند. در این جا سه حالت ممکن برای برهم‌کنش محیط و ذرات معلق توضیح داده خواهند شد:

حالت اول: انباشتگی^۱ ذرات بزرگ در ورودی محیط

در این حالت شعاع ذرات معلق مساوی یا بزرگتر از شعاع منافذ است و به هیچ صورت نفوذ آنها درون محیط متخلخل میسر نیست. وقتی می‌گوییم ذرات در ورودی محیط انباشته می‌شوند، منظور این است که در این حالت ذره آسفالتین بلافاصله پس از تشکیل انباشته می‌شود و به‌همراه سیال به نواحی بعدی منتقل نخواهد شد [۱۰].

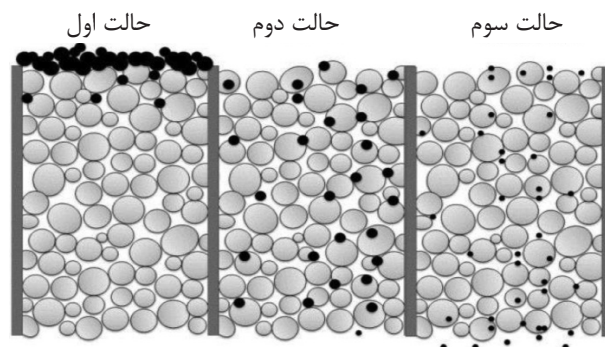
حالت دوم: رسوب‌گذاری ذرات درون محیط

وقتی اندازه ذرات از حد معینی کوچک‌تر باشد، ذرات می‌توانند وارد محیط متخلخل شوند. سپس ممکن است از محیط عبور کنند و از آن خارج شوند و یا در درون آن به دام بیفتند.

این نکته که ذرات با قابلیت عبور از درون محیط باید از چه شعاعی کوچک‌تر باشند تا احتمال گیر افتادن آنها نزدیک به ۱۰۰٪ نباشد، مطلبی است که محققان بارها درباره آن بحث کرده‌اند. آن چه به‌صورت یک قانون سرانگشتی مطرح می‌شود این

1. Size Exclusion

2. Tortuosity



شکل ۲ سه مکانیزم ممکن برهم کنش ذرات معلق و محیط متخلخل فیلتر.

داخلی دیواره لوله‌ها باید برابر با مساحت فضای داخلی محیط متخلخل باشد. در این صورت با حل معادلات فوق بر حسب شعاع و تعداد دسته لوله‌ها:

$$r_p = 2\tau \sqrt{2k/\varphi} \quad (6)$$

$$n_p = \frac{8k\tau A}{\pi r_p^2} \quad (7)$$

که در آن φ تخلخل، A سطح مقطع محیط متخلخل، L طول محیط متخلخل، k تراوایی محیط، n_p تعداد لوله‌ها و r_p شعاع لوله‌هاست.

در این قدم، با تکیه بر مفهوم شعاع هیدرولیک مدل دسته لوله برای محیط متخلخل آماده شده است. شعاع هیدرولیک پارامتری است که برای محاسبه شعاع موثر جریان در مقاطع غیردایره‌ای و پیچیده به کار می‌رود. برای محاسبه شعاع هیدرولیک یک مقطع، کافی است مساحت آن را با اعمال ضریبی بر محیط آن یا، در فضای متخلخل، حجم ترشده را به مساحت ترشده محیط تقسیم کنیم.

مدل سازی آسیب سازند

تشکیل ذرات جامد آسفالتین و به دام افتادن فیزیکی آنها

درون سازند

می‌دانیم ذرات جامد آسفالتین در نفت وجود دارند، اما به دلایلی مانند تزریق گاز، آلکان یا افت

مقدار عدد ثابت در رابطه زیر که آنها ارائه کرده‌اند، براساس محاسبات عددی انجام شده بر تعداد زیادی نمونه‌های تصادفی از سنگ‌های مصنوعی به دست آمده است. این رابطه تابعی از تخلخل و میزان گردشگری^۲ دانه‌های سنگ است.

$$\tau = 0.84 \left(3 \frac{\sqrt{\pi}}{4}\right)^{4/3} \cdot \frac{(1-\varphi)^{4/3}}{\varphi S^2} \quad (8)$$

که در آن φ تخلخل و S میزان گردشگری متوسط دانه‌های سنگ است. هر چه کرویت یا گردشگری دانه‌های سنگ بیشتر باشد، شکل آن به کُره نزدیک‌تر است. تورچواسیتی نسبت میان طول مستقیم لوله موئین و طول خمیده آن را بیان می‌کند که همواره مقداری بزرگ‌تر از یک است. با استفاده از رابطه (۵) می‌توان تخمینی از نسبت تورچواسیتی حفرات یک محیط متخلخل به دست آورد.

در قدم بعدی برای معادل سازی دسته لوله موئین، اندازه شعاع هر کدام از این لوله‌ها و تعداد آنها باید مشخص شود. بدین منظور با توجه به تخلخل و تراوایی محیط متخلخل می‌توان دسته لوله‌ای را تخمین زد که خواص هیدرولیکی تقریباً مشابه با محیط متخلخل داشته باشد [۱۳]. دو معادله اصلی که برای پیدا کردن شعاع و تعداد دسته لوله‌ها باید حل شوند، از این قراراند:

۱- حجم فضای خالی درون دسته لوله باید برابر با حجم فضای خالی درون سنگ باشد و ۲- مساحت

است. مقدار گرادیان فشار لازم برای معلق نگه داشتن ذرات جامد در یک محیط مایع از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\Delta p}{L} = g(1 - \varepsilon_a)(\rho_a - \rho_f) \quad (10)$$

که در آن چگالی سیال، ρ_f چگالی ذرات، g شتاب گرانش، L طول لوله مویین، Δp اختلاف فشار دو سر لوله و ε_a مقدار تخلخل ایجادشده بین ذرات آسفالتین در زمانی است که روی هم انباشته می‌شوند. این مقدار در مقالات معمولاً ۰/۴ ذکر شده است [۱۵]. برای تامین حداقل سرعت سیال‌سازی ذرات باید افت فشار اصطکاکی سیال بعد از عبور از اطراف ذرات حداقل برابر با فشار لازم برای تامین نیروی وزن ذرات باشد. رابطه ارگان^۲ [۱۶] به منظور محاسبه افت فشار در یک سیستم متخلخل برابر است با:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150\mu v(1 - \varepsilon_a)^2}{\bar{x}^2 \varepsilon_a^3} + \frac{1.75 \rho_f v(1 - \varepsilon_a)}{\bar{x} \varepsilon_a^3} \quad (11)$$

که در آن μ گرانشی سیال، ρ_f چگالی سیال، x اندازه متوسط ذرات آسفالتین، v سرعت حرکت سیال، L طول حفره یا لوله و Δp اختلاف فشار دو سر لوله است. ε_a مقدار تخلخل ایجادشده بین ذرات آسفالتین در زمانی است که روی هم انباشته می‌شوند. حال با برابر گرفتن روابط (۱۰) و (۱۱) مقدار v در رابطه (۱۱)، که در این جا معادل همان v^* خواهد بود، به دست می‌آید:

$$v^* = \frac{g(\rho_a - \rho_f)}{150\mu} \frac{\varepsilon_a^3}{(1 - \varepsilon_a)} \bar{x}^2 \quad (12)$$

با به دست آمدن این مقدار می‌توان مقدار تابع $P(x)$ را به ازای اندازه هر ذره خاص به دست آورد. اگر با انجام آزمایش، مقدار تابع $f(x)$ ، که توزیع فراوانی نسبی ذرات آسفالتین را نشان می‌دهد، در دست باشد، می‌توان توزیع فراوانی نسبی ذرات به دام افتاده در محیط را از حاصل ضرب این دو تابع پیدا کرد:

$$f_i(x) = f(x).P(x) \quad (13)$$

نمودار شکل ۳ توزیع فراوانی نسبی ذرات تشکیل شده و

فشار، تعادل ترمودینامیکی و کلوییدی خود را از دست می‌دهند و رسوب می‌کنند. این ذرات، پس از تشکیل، در حفرات گیر می‌کنند و در نتیجه، با بستن حفره‌ها، راه عبور سیال را مسدود می‌کنند و تراوایی سازند را کاهش می‌دهند. هر نمونه نفتی، در هر زمان از رسوب‌گذاری خود، الگوی متفاوتی از ذرات را ته‌نشین می‌کند. این الگو را می‌توان با دانستن توزیع فراوانی نسبی شعاع ذرات بیان کرد. نکته حائز اهمیت در این قسمت توجه به این موضوع است که ذرات جامدی که از سیال جدا می‌شوند، بلافاصله در همان مکان انباشته نمی‌شوند و تا زمان به دام افتادن توسط سیال حمل می‌شوند [۱۴]. احتمال جذب یک ذره در دیواره کانال استوانه‌ای را، براساس آن چه در مقالات آمده، می‌توان این گونه بیان کرد [۹]:

$$P(x) = 4 \left[\left(\frac{\theta \cdot x}{r_p} \right)^2 - \left(\frac{\theta \cdot x}{r_p} \right)^3 \right] + \left(\frac{\theta \cdot x}{r_p} \right)^4 \quad (8)$$

که در آن $P(x)$ تابع احتمال جذب ذره، x شعاع ذره و r_p شعاع حفره است. θ ضریبی برای بیان احتمال جذب ذره است. θ را می‌توان به صورت زیر نشان داد [۱۴]:

$$\theta = \theta_0 e^{-(v/v^*)} \quad (9)$$

که در آن v سرعت حرکت سیال، v^* سرعت بحرانی برای سیال‌سازی^۱ ذرات و θ_0 ضریبی تجربی است که نمایانگر میزان جاذبه الکترواستاتیک بین ذره و دیواره و نیروهای لاندون است [۱۴]. در ابتدا برای سادگی کار می‌توان θ_0 را یک در نظر گرفت و در حقیقت از بار الکتریکی ذرات آسفالتین چشم‌پوشی کرد. در غیر این صورت می‌توان این پارامتر را با انجام آزمایش تخمین زد. ریچ و فوگلر^۲ آزمایش‌هایی را برای یافتن این پارامتر طراحی کرده‌اند [۱۴]. در مدل‌سازی حاضر این پارامتر یک فرض شده است. v^* یک سرعت بحرانی است که اگر سیال از آن آهسته‌تر حرکت کند، نخواهد توانست ذرات جامد را حمل کند [۱۵]. مقدار این سرعت به طور مستقیم تابعی از تفاضل چگالی ذرات جامد و سیال

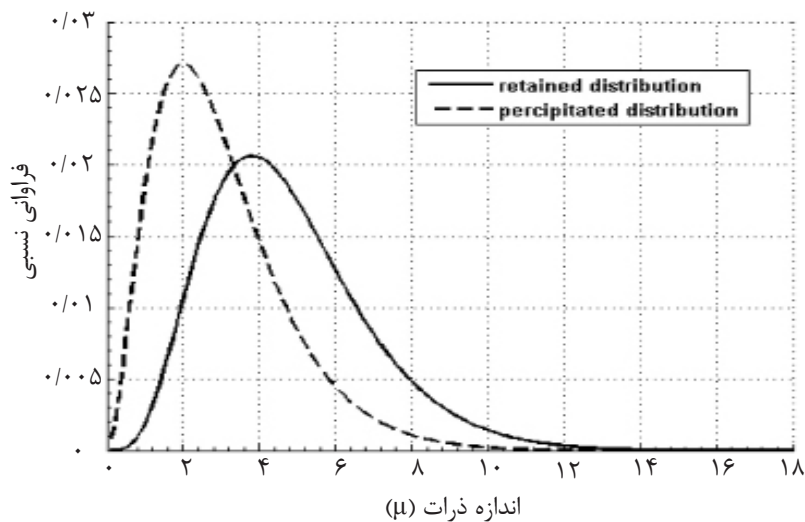
1. Fluidization

2. Rege & Fogler

3. Ergun

توزیع گاما رسم شده است، میانگین اندازه ذرات جامد تشکیل شده μ_2 و انحراف معیار استاندارد آن σ_2 بوده، در حالی که میانگین اندازه ذرات گیرافتاده درون محیط μ_4 و انحراف معیار استاندارد آن σ_4 است.

توزیع فراوانی نسبی ذرات به جامانده درون یک مقطع از یک مغزۀ فرضی را نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود، ذره‌های با شعاع نسبی بزرگتر در محیط به دام افتاده و ذره‌های کوچکتر گریخته‌اند. در این شکل نمادین که با استفاده از



شکل ۳ مقایسه توزیع نسبی ذرات به دام‌افتاده در محیط متخلخل و ذرات فرار کرده.

اتفاق، علاوه بر بیشتر کردن مساحت محیط ترشده، از حجم مفید کانال می‌کاهد و با توجه به تعریف شعاع هیدرولیک، با کم شدن صورت و زیاد شدن مخرج کسر، هر دو عامل در کم شدن تراوایی سازند با هم همکاری می‌کنند.

همان طور که می‌دانیم ذرات آسفالتین در حقیقت کروی نیستند، اما در این جا چنین فرض می‌شود تا معادل‌سازی آسان شود. برای کمی کردن این مسئله، ابتدا باید بدانیم که چه ذراتی و با چه اندازه‌هایی درون سازند رسوب کرده‌اند. علاوه بر دانستن جرم آنها، اگر توزیع فراوانی نسبی اندازه آنها را بدانیم، می‌توانیم با کروی در نظر گرفتن‌شان، حجم کم‌شده از فضای خالی سنگ و مساحت اضافه‌شده به آن را حساب کنیم. برای محاسبه این دو مقدار داریم:

$$A_a = n_a \int_0^{\infty} f_t(x) \cdot 4\pi x^2 \cdot \gamma \cdot dx \quad (14)$$

$$V_a = \frac{m_a}{\rho_a} \quad (15)$$

بررسی مقدار کاهش تراوایی با رسوب‌گذاری آسفالتین

مکانیزم‌هایی مختلف در مدل‌سازی رسوب‌گذاری آسفالتین پیشنهاد شده‌اند. در پژوهش حاضر سه مکانیزم برای مدل‌سازی تحلیلی رسوب‌گذاری آسفالتین در نظر گرفته شده‌اند: رسوب‌گذاری سطحی در دیواره حفرات، مسدود کردن کامل یک حفره و حمل مجدد ذرات آسفالتین در اثر افزایش نیروی اصطکاک سیال.

با پیشرفت رسوب‌گذاری سطحی، علاوه بر کم شدن فضای در دسترس برای حرکت سیال، با حضور ذرات درون سازند به دلیل وارد شدن نیروی تنش سطحی توسط سیال به آنها، از پتانسیل حرکتی سیال کاسته می‌شود و در نتیجه به دلیل افت فشار، سیال از حرکت باز می‌ماند. به زبان دیگر، می‌توان مسئله را این گونه مطرح کرد که با ادامه رسوب‌گذاری و جذب ذرات توسط دیواره، شعاع هیدرولیک سازند کاهش می‌یابد، زیرا این

فرضی و براساس رابطه هاگن پوازیه می‌توان تراوایی کل سازند را در حالت آسیب‌دیده محاسبه کرد [۱۷]:

$$\bar{k} = \frac{\bar{n}_p \cdot \pi \cdot \bar{r}_p^4}{8 \cdot \tau \cdot A} \quad (20)$$

به منظور افزایش دقت مدل‌سازی فوق، در نظر گرفتن برش‌ها و مقاطعی برای محیط متخلخل لازم است. در واقع می‌توان گفت تمام آن چه در باب مدل‌سازی رسوب‌گذاری مطرح شد، مربوط به یک مقطع از محیط متخلخل خواهد بود. برای هر کدام از این مقاطع باید تمام محاسبات قسمت‌های قبل را انجام داد، با این تفاوت که ذرات ورودی هر مقطع از فیلتر مقاطع قبلی عبور کرده‌اند و مقدار ذره‌های درشت‌تر آن کاهش یافته است.

در مقابل، عامل دیگری برای بزرگ کردن اندازه ذرات وجود دارد: رشد تدریجی اندازه توده‌های آسفالتین با گذر زمان؛ لذا در این جا مجبوریم مسئله زمان را نیز در محاسبات دخیل کنیم. خوشبختانه براساس نتایج آزمایش‌های نجفی و همکارانش [۱]، تابعیت تغییر توزیع ذرات آسفالتین با گذر زمان موجود است. در این جا برای حل مسئله فرض می‌کنیم که خروجی هر مقطع ورودی مقطع بعدی است. مقطع زدن فرضی در بافت متخلخل مزیتی دارد: کم شدن تراوایی یک مقطع بر تراوایی مقطع بعدی اثر می‌گذارد و این همان چیزی است که با مسدود شدن لوله‌های یک مقطع خود را نشان می‌دهد؛ یعنی قسمتی از سطح یک مقطع در اثر رسوب از دست می‌رود، اما همان مکان در مقطع بعدی ممکن است برای جریان یافتن سیال استفاده شود. طبیعی است هر چه تعداد مقاطع بیشتر باشد، کار دقیق‌تر است؛ اما در این جا به دلیل افزایش مضاعف حجم محاسبات، به ۴ مقطع برای مغزه ۱۳/۸ cm اکتفا شده است. سرعت تزریق همزمان مخلوط نفت و آلکان نیز در تمام آزمایش‌ها یک سانتی‌متر مکعب بر ثانیه بوده است. مشخصات سنگ و سیال در پژوهش حاضر از این قراراند [۱۸]:

که A_a مساحت افزوده‌شده توسط ذرات، V_a حجم افزوده‌شده، $f_t(x)$ توزیع فراوانی نسبی ذراتی که در سازند به دام افتاده‌اند، x شعاع ذره یا توده، n_a تعداد کل ذرات یا توده‌ها، m_a جرم کل آسفالتین موجود، ρ_a چگالی آسفالتین راسب‌شده و γ ضریبی برای اصلاح سطح موثر افزوده‌شده به درون حفره‌ها به‌زای هر ذره است که در این جا یک فرض شده است. در واقع برای سادگی کار، افزایش مساحت ترشده درون سنگ را به اندازه مساحت همان ذره فرض می‌کنیم. حال برای حل معادلات فوق، باید تعداد توده‌ها یا ذرات آسفالتین را دانست که بدین منظور، با کروی در نظر گرفتن ذرات و دانستن چگالی آنها، می‌توان نوشت:

$$n_a = \frac{V_a}{\int_0^\infty f_t(x) \cdot \frac{4}{3} \pi x^3 dx} \quad (16)$$

مقدار جدید سطح درون حفره‌های سنگ، پس از رسوب‌گذاری، برابر با مجموع سطح اولیه و سطح افزوده‌شده توسط ذره‌های آسفالتین است. با عنایت به این نکته و محاسبه حجم متخلخل باقی‌مانده درون سنگ می‌توان برای شعاع هیدرولیک موثر محیط متخلخل در شرایط آسیب‌دیده نوشت:

$$\bar{r}_H = \frac{n_p \cdot V_p - V_a}{n_p \cdot A_p - A_a} \quad (17)$$

باید دقت کرد که با توجه به تعریف شعاع هیدرولیک که یک‌چهارم قطر هیدرولیک کانال است [۱۵]، برای اندازه شعاع یک حفره در حالت آسیب‌دیده می‌توان نوشت:

$$\bar{r}_p = 2 \cdot \bar{r}_H \quad (18)$$

اکنون برای به دست آوردن تعداد لوله‌های فرضی در حالت آسیب‌دیده، از برابر بودن فضای خالی درون لوله‌های مویین مدل‌سازی‌شده و فضای خالی درون سنگ استفاده می‌کنیم. برای تعداد لوله‌های فرضی در حالت آسیب‌دیده می‌توان نوشت:

$$\bar{n}_p = \frac{A.L.\varepsilon}{\pi \bar{r}_p^2 . L.\tau} \quad (19)$$

حال با معلوم بودن تعداد و اندازه شعاع لوله‌های

جدول ۱ خواص محیط متخلخل مورد مطالعه.

تراوایی اولیه	۶۶/۳ (md)
تخلخل اولیه	۰/۱۶
نسبت آب غیرقابل کاهش در داخل سنگ	۰/۲۳۷
کرویت دانه‌ها	۰/۹۱
طول مغزه	۱۳/۸ cm
مساحت مقطعی مغزه	۱۱/۴۶ cm ²

جدول ۲ خواص سیال مورد استفاده.

چگالی نفت در واحد ای پی آی	۱۷/۴۵
سازند نفتی	سروک
درصد جرمی آسفالتین	۱۲/۹۴
چگالی آسفالتین	۱/۲۶ g/cm ³
غلظت حلال	۰.۵۰٪ نرمال پنتان

رسوب‌گذاری بقیه ذرات و به دام افتادن آنها آسان‌تر می‌کنند.

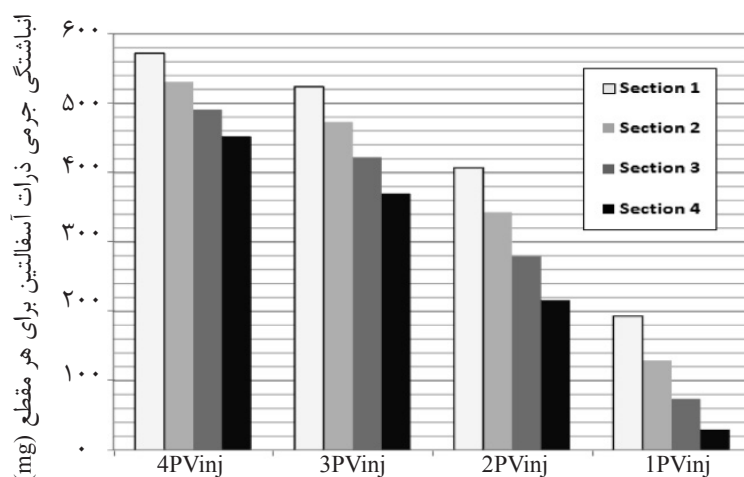
نتایج مربوط به نمودارهای شکل‌های ۴ و ۵ با استفاده از مقطع‌بندی فرضی محیط متخلخل و حل کردن معادلات موازنه جرم به‌دست آمده‌اند. مقدار آسفالتین رسوب‌کرده در هر مقطع برابر با تفاضل مقدار آسفالتین ورودی و تولیدشده با مقدار آسفالتین خروجی و کنده‌شده است. در این جا مقدار رسوب آسفالتین در چهار مقطع سنگ بعد از تزریق به ترتیب یک تا چهار واحد حجمی (حجم فضای متخلخل سنگ) براساس مدل محاسبه شده است. خواص سنگ و سیال مورد استفاده در شبیه‌سازی در جداول ۱ و ۲ ذکر شده‌اند.

همچنین با معلوم بودن تابع توزیع فراوانی نسبی اندازه ذرات، می‌توان نمودار شکل ۴ را برحسب تعداد ذره‌های انباشته‌شده در هر مقطع رسم کرد. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، همواره در مقطع شماره (۱)، که همان مقطع ورودی و ابتدایی سیال تزریقی به درون محیط متخلخل است، بیشترین مقدار انباشتگی ذرات آسفالتین دیده می‌شود.

بررسی نتایج

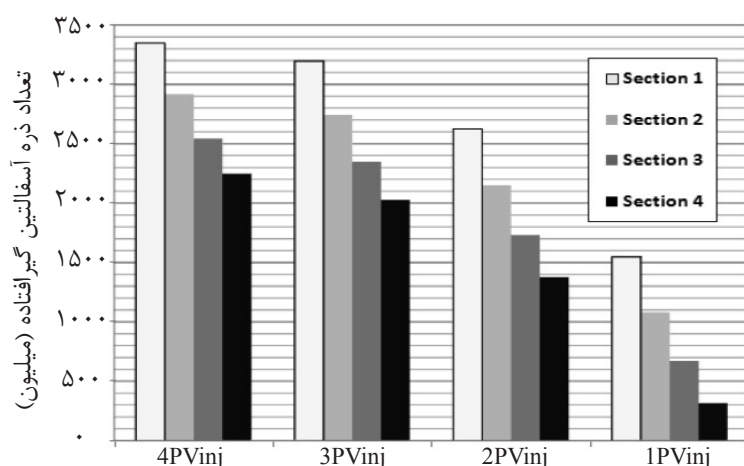
بررسی رسوب‌گذاری در مقاطع مختلف

وقتی ذرات آسفالتین در یک محیط رسوب می‌کنند، اندازه حفرات محیط کاهش می‌یابد. این امر خود باعث خواهد شد که ذرات بیشتری به دام بیفتند. لذا انتظاری که از یک محیط متخلخل داریم این است که در مقاطع اولیه آن انباشتگی بیشتری از ذرات آسفالتین رخ دهد. بدین منظور محیط متخلخل به چهار مقطع تقسیم شد و محاسبات برای آن انجام شدند. نمودار شکل ۴ مقدار جرمی آسفالتین رسوب‌کرده در چهار مقطع را بعد از تزریق مقادیر مختلف سیال (یک، دو، سه و چهار برابر حجم فضای متخلخل) به ترتیب نشان می‌دهد و با استفاده از نتایج مدل‌سازی به‌دست آمده است. متأسفانه با توجه به نبود سیستم آزمایشگاهی به‌منظور اندازه‌گیری جرم و تعداد ذرات آسفالتین رسوب‌کرده در هر مقطع، نمی‌توان درباره دقت این داده‌ها نظر قطعی داد. آن چه از نمودارهای شکل‌های ۴ و ۵ قابل‌استنتاج است این است که همواره در مقطع‌های ابتدایی مغزه رسوب آسفالتین بیشتری انباشته می‌شود، زیرا رسوب‌های ابتدایی آسفالتین مجراها را تنگ‌تر و زمینه را برای



میزان حجم تزریقی همزمان حلال و نفت خام (P.V.)

شکل ۴ انباشتگی جرمی ذرات آسفالتین در مقاطع مختلف مغزه بعد از تزریق چهار واحد حجمی سیال نفتی به همراه نرمال پنتان در مدل‌سازی.



میزان حجم تزریقی همزمان حلال و نفت خام (P.V.)

شکل ۵ تعداد میلیون ذره آسفالتین انباشته‌شده در مقاطع مختلف مغزه بعد از تزریق چهار واحد حجمی سیال نفتی به همراه نرمال پنتان در مدل‌سازی.

بر روی مقادیر و ضرایب جاذبه بین ذرات و دیواره انجام شد.

۷ پارامتری است که مقدار سطح افزوده‌شده به محیط متخلخل را به ازای مساحت یک کره نشان می‌دهد. وقتی گاما بیشتر از یک باشد، به معنی زیاد شدن بیش از حد مساحت درون سیستم است و این باعث کاهش تراوایی خواهد شد. از سوی دیگر θ_0 پارامتری است که از طریق آزمایش حاصل می‌شود و نشان‌دهنده احتمال جذب یک ذره منفرد توسط دیواره است.

بررسی تاثیر تغییر پارامترهای توزیع و پارامترهای چسبندگی بر تراوایی سازند آسیب‌دیده

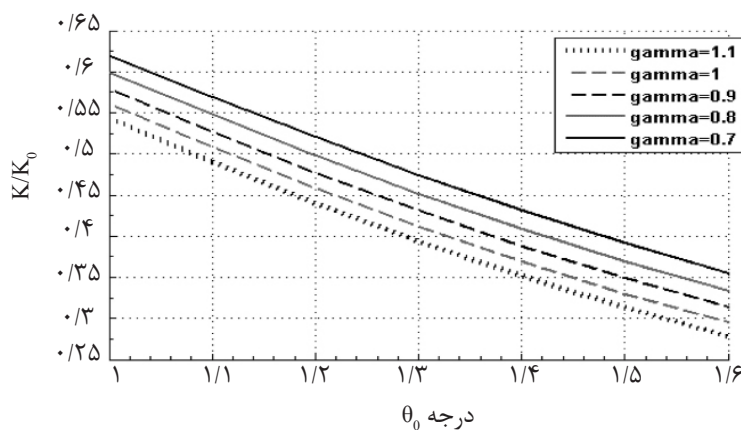
می‌دانیم که چسبندگی ذرات به یکدیگر و به دیواره مستقیماً در پیش‌بینی مقدار تراوایی موثر است. هر چه تمایل ذرات به چسبیدن به یکدیگر بیشتر باشد، توده‌های بزرگتری تشکیل خواهند داد. توده‌های بزرگتر به احتمال زیاد درون سازند به دام می‌افتند و این مسئله به کاهش چشمگیر تراوایی منجر خواهد شد. به منظور بررسی اثر این پارامترها بر کاهش تراوایی، یک حساسیت‌سنجی

بررسی اثر حمل مجدد ذرات آسفالتین

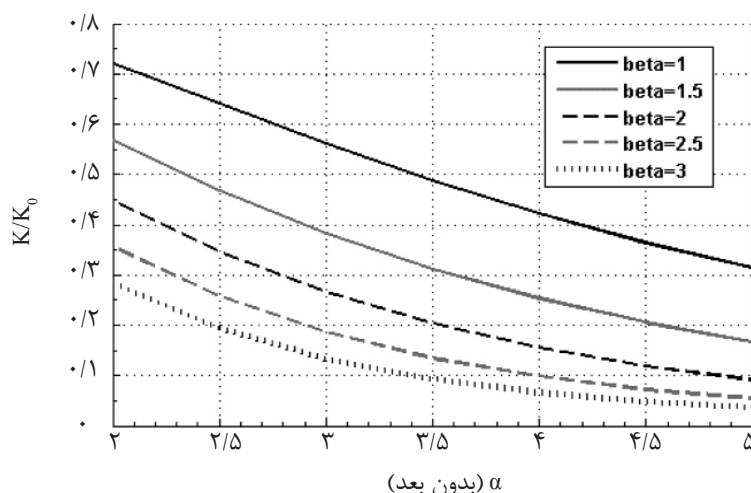
با انجام رسوب‌گذاری در یک سازند، اندازه حفرات آن کاهش می‌یابد. این کاهش اندازه به ثبات بودن دبی باعث افزایش سرعت حرکت سیال درون حفره خواهد شد. این افزایش سرعت باعث ایجاد یک نیروی اصطکاکی اضافی بر سطح ذرات آسفالتین خواهد شد و در صورت ادامه یافتن این مکانیزم می‌تواند به کنده شدن و حمل مجدد ذره منجر شود. نمودار شکل ۸ مقدار تراوایی نسبی یک لوله موئین را با تغییرات نسبت سرعت حرکت سیال درون لوله و سرعت بحرانی حمل ذرات نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت سرعت‌ها در مقیاس لگاریتمی نسبت آسیب سازند کاهش و تراوایی هر یک از لوله‌های موئین فرضی افزایش می‌یابد.

در حساسیت‌سنجی انجام‌شده، اثر متقابل دو پارامتر مطرح‌شده بر کاهش نسبی تراوایی سازند مسئله بررسی شد. همان طور که مشاهده می‌شود، با زیاد شدن مقدار θ_0 مقدار تراوایی کاهش می‌یابد (شکل ۶).

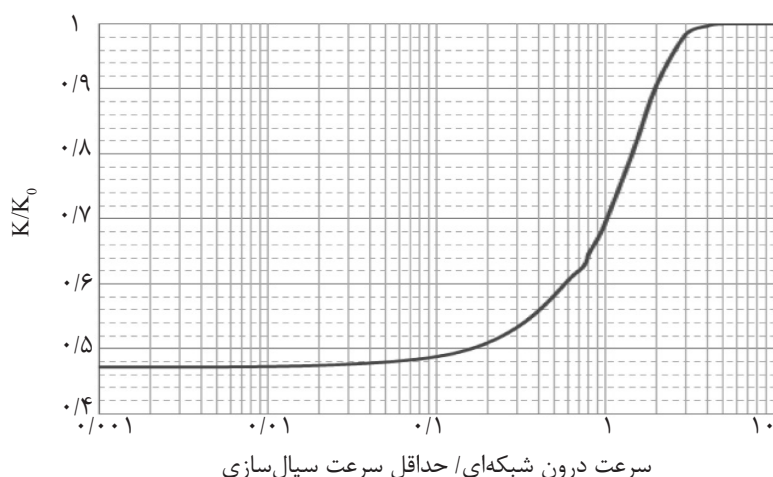
می‌دانیم آلفا و بتا دو پارامتر توزیع احتمال گاما هستند. شکل ۷ نشان‌دهنده یک مطالعه حساسیت‌سنجی روی این دو پارامتر توزیع است. در این نمودار تمام پارامترها غیر از آلفا و بتا ثابت در نظر گرفته شده‌اند. همان طور که دیده می‌شود، با کاهش مقدار آلفا و همچنین کاهش بتا مشکل سازند آسیب‌دیده کمتر خواهد شد. از این رو می‌توان گفت هر چه اندازه ذرات آسفالتین یکنواخت‌تر باشد، رسوب‌گذاری و آسیب سازند از نمونه‌های با ذرات دارای اندازه متنوع کمتر است.



شکل ۶ حساسیت‌سنجی تغییر متقابل بتا و گاما و اثر آن روی تراوایی.



شکل ۷ حساسیت‌سنجی روی مقدار پارامترهای توزیع فراوانی نسبی شعاع ذرات.

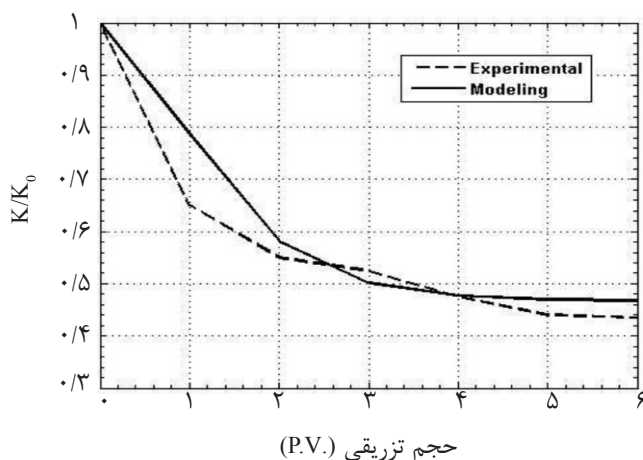


شکل ۸ تغییرات تراوایی نسب به حالت غیرآسیب‌دیده برحسب تغییرات سرعت حرکت سیال درون لوله‌های مویین.

مشاهده می‌شود، با افزایش تزریق سیال شیب نمودار کاهش تراوایی به تدریج کم می‌شود، زیرا مقدار رسوب‌گذاری و حمل مجدد ذرات به تعادل نسبی خواهند رسید. با وجود این، با توجه به افزایش مداوم اندازه ذرات آسفالتین در اثر فرآیند لخته شدن و به هم پیوستن، تراوایی به تدریج در تمام مقاطع سنگ کاهش خواهد یافت. مقدار متوسط خطای مطلق پیش‌بینی افت تراوایی در مغزه مورد آزمایش ۰/۰۳۸ و مقدار متوسط خطای نسبی پیش‌بینی افت تراوایی ۰/۰۰۸ است.

پیش‌بینی مقدار کاهش تراوایی با تزریق سیال

مدل حاضر توانست کاهش نسبی تراوایی در اثر تزریق همزمان نفت آسفالتین‌دار و آلکان را با موفقیت پیش‌بینی کند. نمودار شکل ۹ نتیجه کار آزمایشگاهی هم‌متفر و همکارانش [۱۸] را روی این نمونه سیال و در شرایط مشابه در کنار نتایج مدل‌سازی پژوهش حاضر نشان می‌دهد. ویژگی‌های سازند و سیال مورد استفاده در این آزمایش را می‌توان در جدول‌های ۱ و ۲ ملاحظه کرد. این آزمایش و مدل‌سازی بر روی مغزه سازند سروک انجام شده و نتایجی قابل قبول داشته است. همان طور که



شکل ۹ مقایسه نتایج مدل‌سازی و آزمایشگاهی براساس تحقیق هم‌متفر و همکاران [۱۸].

نتیجه گیری

می شود.

۲- با توجه به تحلیلی بودن این مدل می توان آن را در شرایط مختلف رسوب گذاری استفاده کرد. به عنوان مثال می توان با وارد کردن توزیع فراوانی نسبی اندازه ذرات، این مدل را به انواع مختلف سیال های نفتی تعمیم داد.

۳- با کوچک شدن اندازه متوسط ذرات آسفالتین، ابتدا تراوایی محیط کاهش خواهد یافت، زیرا مساحت تماس سیال با ذرات و نیروی اتلافی در اثر اصطکاک افزایش می یابد. اما اگر این کاهش شعاع ذرات به اندازه ای باشد که آنها بتوانند دوباره حمل و از محیط خارج شوند، مقدار تراوایی محیط بهبود خواهد یافت.

۴- با افزایش رسوب گذاری و تنگ تر شدن حفرات، سرعت حرکت سیال در آنها افزایش خواهد یافت و با کنده شدن ذره های آسفالتین در اثر اصطکاک ناشی از افزایش سرعت، امکان حمل ذرات به مقاطع بعدی سنگ وجود دارد.

در پژوهش حاضر، مدل هیدرودینامیکی جدیدی برای بررسی کاهش تراوایی سازند در اثر تشکیل رسوب آسفالتین ارائه شد. پارامترهای ورودی لازم برای این مدل، تغییرات توزیع نسبی شعاع ذرات و مشخصات سنگ و سیال هستند. با استفاده از شعاع هیدرولیک و با در نظر گرفتن سه مکانیزم رسوب گذاری سطحی، انسداد کامل حفره ها و حمل مجدد ذرات آسفالتین، تغییرات نسبی تراوایی تخمین زده شده اند. می توان نتایج و دست آوردهای زیر را برای مدل حاضر در نظر گرفت:

۱- پیش بینی مدل سازی در شرایط تزریق همزمان آلکان و نفت خام سازند سروک تطابق قابل توجهی با نتایج آزمایشگاهی دارد. داده های آزمایشگاهی که در آنها، علاوه بر افت تراوایی در اثر رسوب آسفالتین، تغییرات شعاع ذرات رسوب کرده نیز ثبت شده باشند، بسیار محدوداند و انجام آزمایش های بیشتری برای بررسی دقت روش ارائه شده توصیه

مراجع

- [1]. Najafi I., Mousavi S. M. R., Ghazanfari M. H., Ghotbi C., Ramazani A., Kharrat R. and Amani M., "Quantifying the role of ultrasonic wave on kinetics of Asphaltene aggregation in toluene-pantane mixture," *Petroleum Science and Technology*, Vol. 29, Issue 9, pp. 966 – 974, 2011.
- [2]. Rastegari K., Svrcek W. Y. and Yarranton H. W., "Kinetics of asphaltene flocculation," *Ind. Eng. Chem. Res.* 43, pp. 6861-6870, 2004.
- [3]. Gruesbeck C. and Collins R. E., "Entrainment and deposition of fine particles in porous media," *SPE Journal*, Vol. 22, No. 6, pp. 847-856, 1982.
- [4]. Khilar K. C., Vaidya R. N. and Fogler H. S., "Colloidally-induced fines release in porous media," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 4, pp. 213-221, 1990.
- [5]. Civan F., "Improved permeability equation from the bundle-of-leaky-capillary-tubes model," In *SPE Production Operations Symposium*, 2005.
- [6]. Ali M. A., and Islam M. R., "The effect of asphaltene precipitation on carbonate-rock permeability: an experimental and numerical approach," *Old Production & Facilities* Vol. 13. No. 3, pp. 178-183, 1998.
- [7]. Leontaritis K., "Asphaltene near-wellbore formation damage modeling," In *SPE Formation Damage Control Conference*, 1998.

- [8]. Leontaritis K., and Ali Mansoori G., "Asphaltene deposition: a survey of field experiences and research approaches," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 1.3, pp. 229-239, 1988.
- [9]. Stein P. C., "A study of the theory of rapid filtration of water through sand. Diss. Massachusetts Institute of Technology," Department of Civil and Sanitary Engineering, 1940.
- [10]. McDowell L. M., Hunt J. R. and Sitar N., "Particle transport through porous media," *Water Resource Research*, Vol. 22, No. 13, pp. 1901-1921, 1986.
- [11]. Zitoun K. B., Sastry S. K. and Guezennec Y., "Investigation of three dimensional interstitial velocity, solids motion and orientation in solid-liquid flow using particle tracking velocimetry," *International Journal of Multiphase Flow* 27, pp. 1397-1414, 2001.
- [12]. Lanfrey P. Y., Kuzeljevic Z. V., and Dudukovic M. P., "Tortuosity model for fixed beds randomly packed with identical particles," *Chemical Engineering Science*, Vol. 65, No. 5, pp. 1891-1896, 2010.
- [13]. Carman P. C., "Flow of gases through porous media," Butterworths Scientific Publications, pp. 12-33, 1956.
- [14]. Rege S. D. and H. Fogler S., "A network model for deep bed filtration of solid particles and emulsion drops," *AIChE Journal*, Wiley Online Library, 1988.
- [15]. McCabe W. L., "Unit Operations of chemical engineering," 7th edition, McGraw Hill Chemical Engineering Series, p. 127, 2005.
- [16]. Ergun S., "Flow through packed columns," *Chemical Engineering Progress*, Vol. 48, pp. 89-94, 1952.
- [17]. Poiseuille J. M., "Recherches experimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de tres-petits diametres," Imprimerie Royale, 1844.
- [18]. Hematfar V., Kharrat R., Ghazanfari M., and Bagheri M., "Modeling and optimization of asphaltene deposition in porous media using genetic algorithm technique," In International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, 2010.