

بررسی اثر سرعت تزریق اسید بر عملکرد فرایند اسید زنی در یک مدل دو بعدی ناهمگن

سپیده معارف، پوریا مال میر، ابوذر سلیمان زاده، حمیدرضا عرفانی، خلیل شهبازی*⁺

دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران

چکیده: مدل سازی اسید زنی در مخازن کربناته یک ابزار مناسب برای تعیین رفتار دینامیک برای طراحی عملیات اسید زنی می باشد. یک فرایند اسید زنی مناسب باید موجب ایجاد کرم چاله های عمیق و نازک با کمترین میزان اسید مصرفی شود. در این مقاله با استفاده از مدل پیوستگی دو مقیاسی و حل معادله ها به روش عددی تفاضل محدود، مدل سازی بهتری از فرایند اسید زنی و تشکیل کرم چاله ها به دست آمده است. در مدل سازی انجام شده از یک مدل دو بعدی با شرط شدت جریان تزریقی ثابت در ورودی و فشار ثابت در خروجی استفاده شده است و مرزهای جانبی مدل به صورت بسته در نظر گرفته شده است. تعداد بلوک بهینه برای بررسی استقلال از شبکه، با استفاده از رسم غلظت نرمالایز شده اسید بر حسب تعداد بلوک به دست آمده است. برای حل معادله های حاکم از روش تفاضل محدود با اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی استفاده شده است. نتیجه های اعتبارسنجی نشان داده است که در مدل دو بعدی همگن، جبهه حرکت اسید به طور کامل یکنواخت است و شیب تغییرهای غلظت اسید در طول نمونه کاهش یافته است. آنالیز حساسیت برای بررسی اثر سرعت تزریقی اسید بر روی مدل ناهمگن نشان داد که سرعت تزریق بین ۰/۳۳ تا ۱/۵ سانتی متر بر ثانیه، حجم بهینه اسید برای تزریق را مشخص کرده است. همچنین با گذشت زمان و حرکت اسید به انتهای مدل، واکنش ها صورت پذیرفته و موجب افزایش تخلخل و دامنه های تغییرهای آن شده است. نتیجه های این مدل قابلیت آن را برای ارزیابی کیفی رشد و نفوذ کرم چاله ها به خوبی نشان داده است.

واژه های کلیدی: اسید زنی، کرم چاله؛ تفاضل محدود؛ آنالیز حساسیت؛ سرعت تزریقی.

KEYWORDS: Acidizing; Wormhole; Finite difference; Sensitivity study; Injection velocity.

مقدمه

شبیه سازی عددی اسید زنی مخازن کربناته یک ابزار مناسب برای تعیین رفتار دینامیک برای طراحی مناسب یک عملیات اسید زنی است [۱-۳].

هافنر در سال ۱۹۸۸ میلادی با آنالیز عکس های کانال های ایجاد شده به وسیله اسید نتیجه گرفت فرایند ایجاد حفره توسط عدد دامکولر^(۱) برای جریان و واکنش، کنترل می شود. وقتی عدد دامکولر بزرگ است،

افزایش تراوایی ساختارهای کربناته و همچنین آسان سازی جریان نفت به سمت دهانه چاه در فرایندهای تحریک چاه به طور معمول به وسیله اسید زنی ماتریکس صورت می گیرد. این عملیات با تزریق یک سیال فعال در زیر فشار شکست سنگ برای حل کردن سنگ صورت می گیرد. این کار موجب ایجاد تعدادی کرم چاله^(۱) با هدایت پذیری بالا می شود. مدل سازی و

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: shahbazi@put.ac.ir

(۱) Wormhole

(۲) Damkohler

رژیم سینتیک معتبر می‌باشد درحالی‌که مدل گلفیر تنها در رژیم تحت کنترل انتقال جرم معتبر می‌باشد. آن‌ها در مدل خود یک مدل پیوستگی ارای [دادند که هم سینتیک و هم انتقال جرم را به‌صورت همزمان با استفاده از دو متغیر غلظت و یک پارامتر انتقال جرم در نظر می‌گیرد. این مدل این اجازه را می‌دهد که بازه گسترده‌ای از اسیدها را با آن مورد تحلیل قرار داد [۷].

کالیا و بالاکوتایا در سال ۲۰۰۷ میلادی برای شبیه‌سازی انحلال واکنشی سنگ‌های کربناته در جریان شعاعی از مدل پیوستگی دو مقیاسی استفاده کردند. ماهیت فرکتالی کرم‌چاله‌ها که در آزمایشگاه دیده می‌شوند در طی شبیه‌سازی تأیید شدند و اندازه‌های فرکتالی به‌صورت کمی انطباق پیدا کردند. وابستگی ابعاد فرکتالی کرم‌چاله، نرخ بهینه تزریق و کمینه‌ی حجم مورد نیاز برای میان‌شکنی به میزان ناهمگنی و نسبت منظری را مورد بررسی قرار دادند [۸].

کالیا و بالاکوتایا در سال ۲۰۰۹ میلادی با استفاده از مدل پیوستگی دو مقیاسی برای یک سامانه‌ی دو بعدی اثر ناهمگنی محیط متخلخل بر روی پدیده کرم‌چالگی را بررسی کردند. آن‌ها نخست کاربرد شرایط مرزی متناوب را برای غلظت و جریان بررسی کرده و آن را نسبت به روش پانگا مقایسه کردند. سپس اثر پارامترهای ناهمگنی بر روی پدیده‌ی کرم‌چالگی را بررسی کرده و سرانجام برای شرایط تزریق گوناگون یک پارامتر ناهمگنی یکتا را توسعه دادند. افزون بر این موردها، الگوهای سازند با تخلخل اولیه گوناگون را نیز بررسی کردند [۹].

راتناکار و همکاران در سال ۲۰۱۲ میلادی شدت جریان تزریق بهینه برای تشکیل کرم‌چاله و یک رابطه برای عرض و سرعت نفوذ اسید و جبهه واکنش به عنوان تابعی از ویژگی‌های رئولوژیک را با استفاده از آنالیز مقیاس‌بندی^(۱) پیش‌بینی کردند [۱۰].

پارامتر مهم و اثرگذار در فرایند اسید زنی، شدت جریان تزریق اسید است. در سرعت پایین تزریق، نخست کل اسید پیش از نفوذ در ساختار سنگ و حل کردن دیواره‌ی سنگ مصرف می‌شود ولی در سرعت بالای تزریق، عکس این اتفاق رخ داده و اسید به عمق بیش‌تری نفوذ کرده و واکنش در منطقه بزرگ‌تری انجام می‌شود. درحالی‌که اگر تزریق در شدت جریان بهینه صورت پذیرد، موجب ایجاد و نفوذ مناسب کرم‌چاله در ساختار کربناته می‌شود [۱۱، ۱۲، ۴].

یک عملیات اسید زنی موفق نیاز به ایجاد کرم‌چاله‌های عمیق و نازک با کم‌ترین میزان اسید تزریقی دارد. افزون بر این‌ها باید شاهد افزایش میزان بهره‌وری نفت هم بود [۱۳، ۱۴].

اثر افزایش شدت جریان تزریق یا کاهش سرعت واکنش موجب افزایش راندمان عملیات انگیزش می‌شود. با کاهش عدد دامکولر شاهد مسیرهای نفوذ یکنواخت و ساختار کانال به شاخه‌های زیاد هستیم [۱، ۴].

داکورد و همکاران در سال ۱۹۸۹ میلادی اولین مطالعه کمی و کامل‌ترین مدل پدیده‌ی کرم‌چاله را برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی عملیات اسید زنی در سنگ‌های کربناته ارائه کردند. پژوهش‌های آزمایشگاهی روی مدل سنگ گچ و یک شبیه‌سازی کامپیوتری برای یک هندسه خاص نشان داد که کرم‌چاله به‌وسیله‌ی یک پارامتر واحد، طول هیدرولیک معادل، اندازه‌گیری می‌شود. رفتار این پارامتر در مقابل همه پارامترهای سامانه‌ی مطالعه شده و یک پیش‌بینی بهینه از عملیات اسید زنی ارائه می‌دهد [۵].

گلفیر و همکاران در سال ۲۰۰۲ میلادی مدل ابعاد داری و ویژگی‌های مؤثر مرتبط با آن را به ویژگی‌هایی در اندازه‌های حفره‌های مرتبط ساختند. آن‌ها نشان دادند این مدل ریاضی می‌تواند همه رژیم‌های انحلال مشاهده شده در پژوهش‌های پیشین را بازتولید نماید. شایان ذکر است که مدل ارائه شده توسط آن‌ها تفسیری فیزیکی از مکانیسم‌های انحلال ارائه می‌دهد و در کنار آن میزان شدت جریان بهینه تزریقی هم به دست می‌آید. آن‌ها نتیجه گرفتند که حساس‌ترین پارامتر این مدل ضریب انتقال گرما می‌باشد که با مقایسه بین نتیجه‌های آزمایشگاهی و حل عددی مدل، محتمل‌ترین مقدار این ضریب را محاسبه کردند [۶].

پانگا و همکاران در سال ۲۰۰۵ میلادی در یک روش برای شرح واکنش حل شونده‌ی استفاده از مدل پیوستگی را ارائه دادند. برخلاف مدل شبکه‌ای که حل‌شوندگی را در مقیاس حفره‌ها شرح داده و مدل‌های با فرضیه‌های وجود کرم‌چاله‌ها، مدل پیوستگی حل‌شوندگی را بر اساس مقیاس داری بیان می‌کند. پیش‌بینی مدل مقیاس داری به ساختار حفره‌ها بستگی دارد که آن‌ها با حل شدن و گذر زمان تغییر می‌کنند. دیدن جزئی ساختار حفره‌های یک مغزه و پیش‌بینی تغییرهای آن در زمان حل شدن بسیار سخت بوده و یکی از عیب‌های استفاده از مدل داری می‌باشد. مدل پیوستگی برای اسیدکاری کربناته‌ها توسط *لیو و همکاران* و *چن و همکاران* و *گلفیر* توسعه داده شده است. این مدل‌ها با هدف کمی‌سازی و کیفی‌سازی ویژگی‌های حل شدن ارائه شده‌اند. مدل ارائه شده توسط *لی و همکاران* و *چن و همکاران* اثر انتقال جرم بر روی سرعت واکنش را در نظر نگرفته‌اند و مدل آن‌ها برای

(۱) Scaling analysis

از آنجا که تخمین دقیق میزان حجم اسید تزریقی در زمان میان‌شکنی پارامتر بسیار مهمی پیش از طراحی هر فرایند اسید زنی است و همچنین با توجه به اینکه مدل پیوسته نسبت به مدل‌های لوله موئین و شبکه‌ی حفره‌های این پارامتر را به درستی پیش‌بینی می‌کند، در نتیجه در این مطالعه از مدل پیوسته برای شبیه‌سازی فرایند اسید زنی استفاده شده است.

قومم و همکاران در سال ۲۰۱۵ میلادی یک مدل پیش‌بینی سه‌بعدی در مقیاس مغزه با استفاده از مدل پیوستگی دو مقیاسی برای اسید زنی کربناته ارائه کردند و آن را با آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه مقایسه نمودند. مدل آن‌ها جریان اسید در ساختارهای کربناته در مقیاس داری را شبیه‌سازی می‌کند و تطابق‌پذیری بسیار خوبی با مورفولوژی (ساختارشناسی) آزمایشگاهی کرم‌چاله‌ی مشاهده شده داشته و میزان حجم خالی حفره^(۴) را به‌صورت کمی پیش‌بینی می‌کند. همچنین آن‌ها برای توصیف ایجاد و نفوذ کرم‌چاله‌ها در شرایط عملیاتی گوناگون از فناوری برچسب‌زنی چندگانه خوشه‌ای^(۵) استفاده کردند [۲۶، ۲۷].

بخش نظری

مدل جریانی واکنش در سنگ‌های کربناته

برای شبیه‌سازی واکنش و حرکت اسید در سنگ و تشکیل کرم‌چاله در طی فرایند اسید زنی از مدل پیوسته‌ی دو مقیاسی^(۶) استفاده شده است. این مدل، واکنش را در مقیاس داری و تحت فیزیک مقیاس حفره^(۷) و با مرتبط کردن ویژگی‌های ساختاری با تراوایی، تخلخل، شعاع حفره و سطح تماس سنگ و سیال محاسبه می‌کند. در ادامه به بررسی معادله‌های حاکم در این مدل پرداخته شده است.

مدل مقیاس داری^(۸)

معادله‌های مقیاس داری مورد استفاده به‌صورت زیر است [۲۶]:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{U} = \nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu} \mathbf{K} \cdot \nabla P \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{U}C) = \nabla \cdot (\varepsilon D_e \cdot \nabla C), \quad \pi = \varepsilon \left(C + \frac{P_s}{\alpha} \right) \quad (2)$$

پژوهشگران گوناگونی مدل‌های ریاضی متفاوتی را برای مرتبط ساختن واکنش شیمیایی با جریان سیال در محیط متخلخل و فعل و برهم‌کنش‌های بین حرکت اسید و ناهمگنی سنگ در مقیاس‌های گوناگون ارائه داده‌اند. این مدل‌ها شامل فرضیه‌های زیر است:

• مدل لوله موئین^(۱)

• مدل شبکه حفره‌ها^(۲)

• مدل پیوستگی^(۳)

این فرضیه‌ها و مدل‌ها تطابق خوبی با آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه برای بهینه‌سازی و کنترل فرایند اسید زنی دارند [۲، ۱۵]. در مدل‌های لوله موئین [۱۷، ۱۶، ۵] فرض می‌شود که کرم‌چاله‌هایی با اندازه مشخص از آغاز در سامانه وجود داشته است و سپس فرایند اسید زنی را در این کرم‌چاله‌های از پیش تعیین شده شبیه‌سازی می‌کند. این مدل‌ها توانایی شبیه‌سازی فرایند شکل‌گیری اولیه‌ی کرم‌چاله‌ها را نداشته و نمی‌توانند اندازه و پراکندگی کرم‌چاله‌ها را در طول فرایند اسید زنی پیش‌بینی کنند. اما باید به این نکته توجه کرد که این مدل‌ها می‌توانند اطلاعاتی در رابطه با اثر پارامترهای کنترلی بر روی فرایند انحلال را ارائه دهند.

در مدل‌های شبکه حفره‌ها [۱۸-۲۰، ۱]، سازند کربناته با مجموعه‌ای از حفره‌ها و گلوگاه‌های متصل بهم ساخته می‌شود و فرایند انحلال در مقیاس حفره‌ها بررسی می‌شود. این مدل‌ها در پیش‌بینی کیفی رفتارهای آزمایشگاهی مانند رخداد یک شدت جریان تزریقی بهینه موفق بوده‌اند، اما میزان حجم فضای خالی تزریقی در زمان میان‌شکنی در این مدل‌ها بسیار بیش‌تر از این میزان در آزمایش‌های سیلاب‌زنی بوده است که این عامل به‌طور عمده به علت کوچک بودن اندازه‌ی شبکه حفره‌ها اتفاق افتاده است [۲۰].

در مدل‌های پیوسته [۲۱-۲۵، ۱۰، ۲]، فرایند واکنش و انحلال سازند کربناته طی فرایند اسید زنی در مقیاس داری بررسی می‌شود که بر اساس آن، واکنش اسید با سنگ کربناته با یک مدل مقیاس حفره که واکنش میان سنگ و سیال را نیز در بر می‌گیرد بیان می‌شود. این مدل‌ها می‌توانند رفتارهای گوناگون انحلال را که در آزمایش‌ها مشاهده شده است، به خوبی پیش‌بینی کنند و همچنین میزان حجم تزریقی در زمان میان‌شکنی را به درستی تخمین می‌زنند [۱۰، ۲۲].

(۱) Capillary tube

(۲) Pore network

(۳) Continuum

(۴) Pore volume

(۵) Cluster multiple labeling

(۶) Two-scale continuum model

(۷) Pore scale

(۸) Darcy-scale model

$$-\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} = U_0, \quad \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial P}{\partial z} = 0, \quad x=0 \quad (۸)$$

$$P = P_e, \quad \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad (\text{at } x=L) \quad (۹)$$

$$C=0 \quad \text{at } t=0 \quad (۱۰)$$

$$m \cdot \nabla P = 0 \quad \text{and} \quad n \cdot \nabla C = 0 \quad (۱۱)$$

سرعت تزریق اسید با U_0 ، غلظت اسید ورودی با C_0 ، فشار در مرز خروجی با P_e و بردار واحد عمود بر مرز عرضی با n نشان داده شده‌اند.

مدل مقیاس حفره (۲)

بر اثر واکنش‌هایی که موجب حل شدن سنگ توسط تزریق اسید می‌شود، تغییر پی‌درپی در ساختار سنگ کربناته انجام می‌شود. این تغییرها شامل تخلخل، تراوایی، میانگین شعاع حفره‌ها و سطح تماس سنگ و سیال می‌باشد. در این کار، از معادله‌های زیر برای بیان کمیت‌های یاد شده استفاده شده است [۲۶].

$$K = KI, \quad \frac{K}{K_0} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^\gamma \left(\frac{\varepsilon(1-\varepsilon_0)}{\varepsilon_0(1-\varepsilon)} \right)^{2\beta} \quad (۱۲)$$

$$\frac{r_p}{r_0} = \sqrt{\frac{K\varepsilon_0}{K_0\varepsilon}} \quad (۱۳)$$

$$\frac{a_v}{a_0} = \frac{\varepsilon r_0}{\varepsilon_0 r_p} \quad (۱۴)$$

در معادله‌های بالا I ماتریکس واحد، زیروند 0 بیانگر حالت اولیه، β پارامتر گسترش حفره (۳) و γ پارامتر اتصال‌پذیری حفره‌ها (۴) است. این پارامترها به نوع سنگ کربناته و نوع اسید مصرفی بستگی دارند [۲۴، ۲۶].

مدل بدون بعد (۵)

به منظور سهولت در روند محاسبه‌ها، معادله‌های حاکم بر فرایند اسیدزنی به همراه شرایط اولیه و شرایط مرزی به صورت بدون بعد تعریف شده است. در زیر به معرفی متغیرها و پارامترهای بدون بعد پرداخته شده است [۲۶].

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{a_v \alpha}{\rho_s} \left(\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_c} \right)^{-1} C \quad (۳)$$

در رابطه‌های بالا ε تخلخل، U بردار سرعت دارسی، K تنسور تراوایی، μ گرانروی اسید، P فشار، C غلظت اسید، D_e تانسور پراکندگی مؤثر، ρ_s دانسیته ی سنگ کربناته، α قدرت حل شوندگی اسید برحسب مقدار گرم جامد حل‌شده برحسب یک مول اسید واکنش داده شده، a_v سطح تماس در دسترس برای واکنش برحسب واحد حجم سنگ، k_s نرخ واکنش انحلال و k_c ضریب انتقال جرم موضعی هستند.

در مدل ارائه شده فرض شده است که اسید واکنش خطی داشته و برای سامانه‌های اسید غیر نیوتنی مانند اسیدهای امولسیون شده یا ژل شده درست و معتبر نیست.

ضریب انتقال جرم و ضریب پراکندگی (۱) مؤثر به صورت زیر تعریف شده‌اند [۲۶]:

$$Sh = \frac{2k_c r_p}{D_m} = Sh_\infty + \frac{0.7}{m^2} Re_p^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}} \quad (۴)$$

$$D_{eT} = \alpha_{os} D_m + \frac{2\lambda_T |U| r_p}{\varepsilon}, \quad T=y, z \quad (۵)$$

$$D_{eT} = \alpha_{os} D_m + \frac{2\lambda_T |U| r_p}{\varepsilon}, \quad T=y, z \quad (۶)$$

در رابطه‌های بالا Sh همان عدد بدون بعد شروود، Sh_∞ عدد شروود تقریبی، Re_p عدد رینولدز در مقیاس حفره است که نسبت جابه‌جایی به نیروهای ویسکوز را نشان می‌دهد ($Re_p = 2|U|r_p/\nu$)، Sc نیز عدد اشمیت است ($Sc = \nu/D_m$). در این معادله‌ها ν گرانروی دینامیکی، D_m ضریب نفوذ اسید، r_p میانگین شعاع حفره‌ها، D_{eT} و D_{eX} به ترتیب ضریب طولی و عرضی پراکندگی هستند. α_{os} عدد ثابتی است که به متصل بودن حفره‌ها به هم ربط دارد. λ_T و λ_X ثوابتی هستند که ساختار حفره‌ها را شرح می‌دهند و برای یک بستر از کره به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۰/۱ می‌باشند.

شرایط مرزی و اولیه برای حل معادله‌های (۱) تا (۳) در زیر آمده است [۲۶]:

$$UC - \varepsilon D_{eX} \frac{\partial C}{\partial x} = U_0 C_0 \quad (۷)$$

(۱) Dispersion coefficient

(۲) Pore-scale model

(۳) Pore-broadening

(۴) Pore-connectivity

(۵) Dimensionless-model

ویژگی‌های مدل

در این برنامه یک مدل دو بعدی با شرط ورودی شدت جریان ثابت تزریقی و شرط خروجی فشار ثابت در نظر گرفته شده است. غلظت ورودی اسید برابر با C_0 بوده و غلظت اسید در لحظه اولیه برابر صفر می‌باشد. مرزهای بالا و پایین به صورت بسته و بدون جریان می‌باشند. شمای مدل در شکل ۱ نشان داده شده است. ویژگی‌های کلی و پارامترهای در نظر گرفته شده برای اجرای مدل در جدول ۱ داده شده است.

بررسی استقلال از شبکه و استقلال از گام زمانی

به منظور بررسی استقلال از شبکه و گام زمانی برای این سامانه دو بعدی، تغییرهای حجم فضای خالی تزریقی در زمان میان‌شکنی با افزایش تعداد بلوک‌ها برای گام‌های زمانی متفاوت محاسبه شده است. شکل ۲ نمودار تغییرهای حجم فضای خالی تزریقی در زمان میان‌شکنی بر حسب تعداد بلوک‌ها را برای گام‌های زمانی متفاوت را نشان می‌دهد.

با توجه به نمودار مشخص است که در هر گام زمانی با افزایش تعداد بلوک‌ها، میزان حجم اسید تزریقی در زمان میان‌شکنی روند افزایشی داشته و سپس ثابت شده است. همچنین، با کاهش گام زمانی، میزان حجم اسید تزریقی در لحظه‌ی میان‌شکنی در یک تعداد بلوک مشخص افزایش یافته است اما در گام‌های زمانی کوچک، این مقادیرها به تقریب به هم نزدیک بوده است. همچنین در گام‌های زمانی کوچک‌تر، روند افزایشی نمودار در تعداد بلوک‌های کم‌تری به روند ثابت تغییر پیدا می‌کند. به منظور تعیین تعداد بلوک بهینه، هم‌زمان باید به ثابت شدن روند تغییرهای حجم فضای خالی میان‌شکنی هم در گام‌های زمانی و هم در تعداد بلوک‌های متفاوت توجه کرد. بنابراین با توجه به نمودار مشخص است که با افزایش تعداد بلوک از ۵۰۰ به بالا، تغییرهای حجم فضای خالی میان‌شکنی برای تمامی گام‌های زمانی ناچیز است. از سویی در همین تعداد بلوک به بالا، تغییرهای حجم فضای خالی میان‌شکنی در گام‌های زمانی ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۵ و ۰/۰۰۰۴ ثانیه بسیار ناچیز بوده است. بنابراین به منظور افزایش دقت در محاسبه‌ها، تعداد ۵۰۰ بلوک (۵۰ بلوک در راستای x و ۱۰ بلوک در راستای y) و گام زمانی ۰/۰۰۰۵ ثانیه به ترتیب به عنوان تعداد بلوک بهینه و گام زمانی بهینه انتخاب شده است.

روش حل معادله‌های حاکم

معادله‌های حاکم بر فرایند اسید زنی شامل دو بخش معادله‌های مقیاس داری و مقیاس حفره است. معادله‌های مقیاس داری

$$\begin{aligned} \hat{t} &= \frac{t}{L/U_0}, \quad r = \frac{r_p}{r_0}, \quad A_v = \frac{a_v}{a_0}, \quad k = \frac{K}{K_0}, \quad \hat{C} = \frac{C}{C_0} \\ \hat{x} &= \frac{x}{L}, \quad \hat{y} = \frac{y}{L}, \quad a_y = a_z = \frac{H}{L}, \quad \hat{U} = \frac{U}{U_0} \\ \hat{P} &= \frac{P - P_e}{(\mu U_0 L / K_0)}, \quad \hat{\pi} = \frac{\pi}{C_0}, \quad D_a = \frac{k_s a_0 L}{U_0} \\ \phi^2 &= \frac{2k_s r_0}{D_m}, \quad \phi^2 = \frac{k_s a_0 L^2}{D_m}, \quad N_{ac} = \frac{\alpha C_0}{\rho s}, \quad \eta = \frac{2r_0}{L} \end{aligned}$$

در اینجا U_0 سرعت تزریق اسید، طول مشخصه برابر با طول مغزه L ، زمان مشخصه برابر با L/U_0 و فشار مشخصه برابر با $U_0 \mu L / K_0$ می‌باشد

معادله‌های بدون بعد مدل داری و مدل مقیاس حفره به صورت زیر نوشته می‌شوند [۲۶]:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{U} = \nabla \cdot (\kappa \cdot \nabla P) \quad (15)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}C) = \nabla \cdot (\varepsilon D_e \cdot \nabla C) \quad (16)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{D_a A_v N_{ac} C}{\left(1 + \frac{\phi^2 r}{Sh}\right)} \quad (17)$$

$$D_e = \left(\frac{a_{os} D_a}{\phi^2}\right) + \left(\frac{\lambda |U| r \eta}{\varepsilon}\right) \quad (18)$$

$$\kappa = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^\gamma \left(\frac{\varepsilon(1-\varepsilon_0)}{\varepsilon_0(1-\varepsilon)}\right)^{2\beta}, \quad r = \sqrt{\frac{\kappa \varepsilon_0}{\varepsilon}}, \quad A_v = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0 r} \quad (19)$$

با توجه به پارامترهای بدون بعد تعریف شده، شرایط مرزی و اولیه بدون بعد به صورت زیر بیان می‌شود [۲۴، ۲۶]:

$$C - \varepsilon D_e \frac{\partial C}{\partial X} = 1 \text{ at } x=0 \quad (20)$$

$$-\kappa \frac{\partial P}{\partial x} = 1, \quad \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial P}{\partial z} = 0, \quad x=0 \quad (21)$$

$$P=0, \quad \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad \text{at } x=1 \quad (22)$$

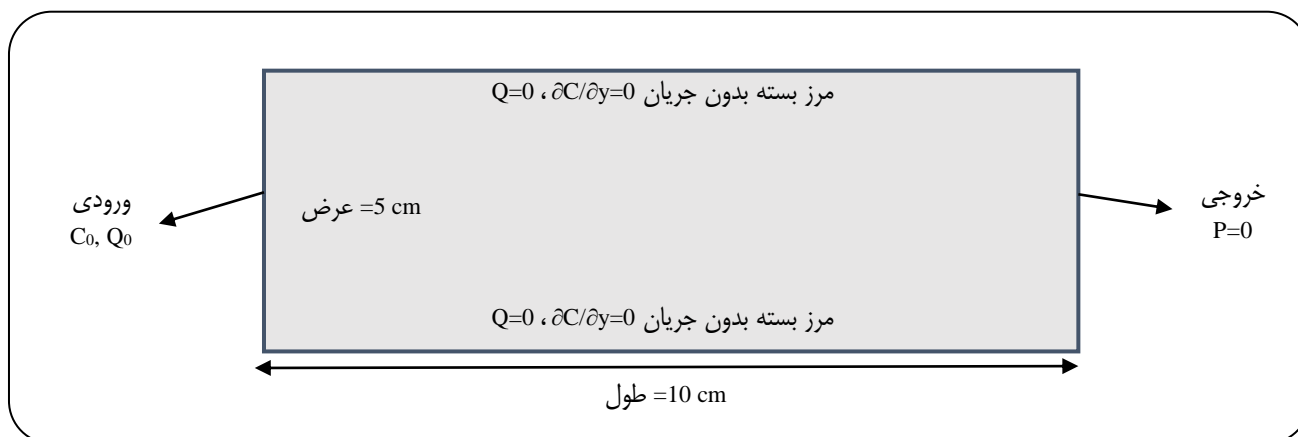
$$n \cdot \nabla P = 0, \quad n \cdot \nabla C = 0 \quad (23)$$

بر روی مرزهای جانبی داریم:

$$\text{at } t=0 \rightarrow C=0 \quad (24)$$

جدول ۱- پارامترهای شبیه‌سازی فرایند اسید زنی.

واحد	مقدار	خصوصیات
سانتی‌متر	۱۰	L
سانتی‌متر	۵	H
میکرون	۱۰	r_0
یک بر سانتی‌متر	۰/۱	a_0
میلی داریسی	۱	k_0
سانتی‌متر بر ثانیه	۰/۲	k_s
-	۰/۰۰۰۰۵	D_m
گرم بر سانتی‌متر مکعب	۲/۷۱	ρ_s
سانتی پویز	۱	μ
-	۳/۶۶	Sh
-	۰/۱۵	ε_0
-	۰ - ۰/۰۲	$\Delta\varepsilon$
-	۲	β
-	۱	γ
-	۰/۵	α_{os}
-	۰/۵	λ_x
-	۰/۱	λ_T
مول بر سانتی‌متر مکعب	۰/۰۰۴	C_0



شکل ۱ - شمای مدل مورد استفاده در مدل‌سازی.

قرار داده شود و تا زمانی که اختلاف میان مقادیرهای پیش و پس به 10^{-1} برسد، این مرحله ادامه یافته است. الگوریتم اجرای برنامه با روشی بیش تر در شکل ۳ نشان داده شده است.

نتیجه‌ها و بحث

اعتبار سنجی مدل

به منظور بررسی پایداری مدل و صحت نتیجه‌های آن، مدل دو بعدی برای یک نمونه با تخلخل همگن بررسی شده و نمودارهای تغییرهای غلظت اسید و تغییرهای تخلخل در طول نمونه بررسی شده است. شکل ۴ نمودار تغییرهای غلظت بدون بعد اسید در لحظه‌ی میان‌شکنی اسید را نشان می‌دهد. محور عمودی تغییرهای غلظت نرمالایز شده نسبت به غلظت اولیه می‌باشد.

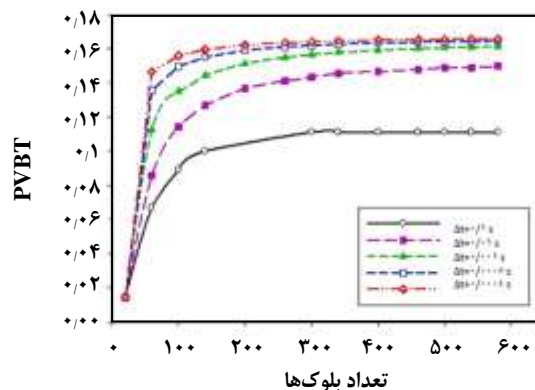
با توجه به شکل ۴ مشخص است که در مدل دو بعدی همگن، تغییرهای غلظت نرمالایز شده در طول نمونه از مقدار یک شروع به کاهش کرده و در لحظه میان‌شکنی به کمینه مقدار خود می‌رسد. همچنین همان‌گونه که انتظار می‌رود، جبهه‌ی حرکت اسید در حالت همگن به صورت به طور کامل یکنواخت است و از آنجایی که تخلخل و تراوایی تمامی بلوک‌ها یکسان است، هیچ رقابتی برای جریان ناهمگن اسید وجود ندارد و کل جبهه به صورت یکنواخت جابه‌جا می‌شود.

شکل ۵ پروفیل غلظت بدون بعد اسید را با گذشت زمان برای مدل همگن نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۵، با گذشت زمان جبهه‌ی غلظت بدون بعد اسید به سمت جلو حرکت کرده تا با سطح جدید سنگ در تماس قرار گیرد و سرانجام در لحظه‌ی میان‌شکنی اسید، کل مدل را در بر می‌گیرد. جبهه حرکت یکنواخت اسید و پروفیل غلظت آن با گذشت زمان که در نمودارها مشخص است، درستی کد را به خوبی تأیید می‌کند.

آنالیز حساسیت

با توجه به اعتبارسنجی مدل با حالت همگن، در این مرحله مدل دو بعدی تعمیم یافته تا اثر سرعت تزریقی اسید بر عملکرد فرایند اسیدزنی بررسی شود که در بخش بعدی به آن‌ها پرداخته شده است.



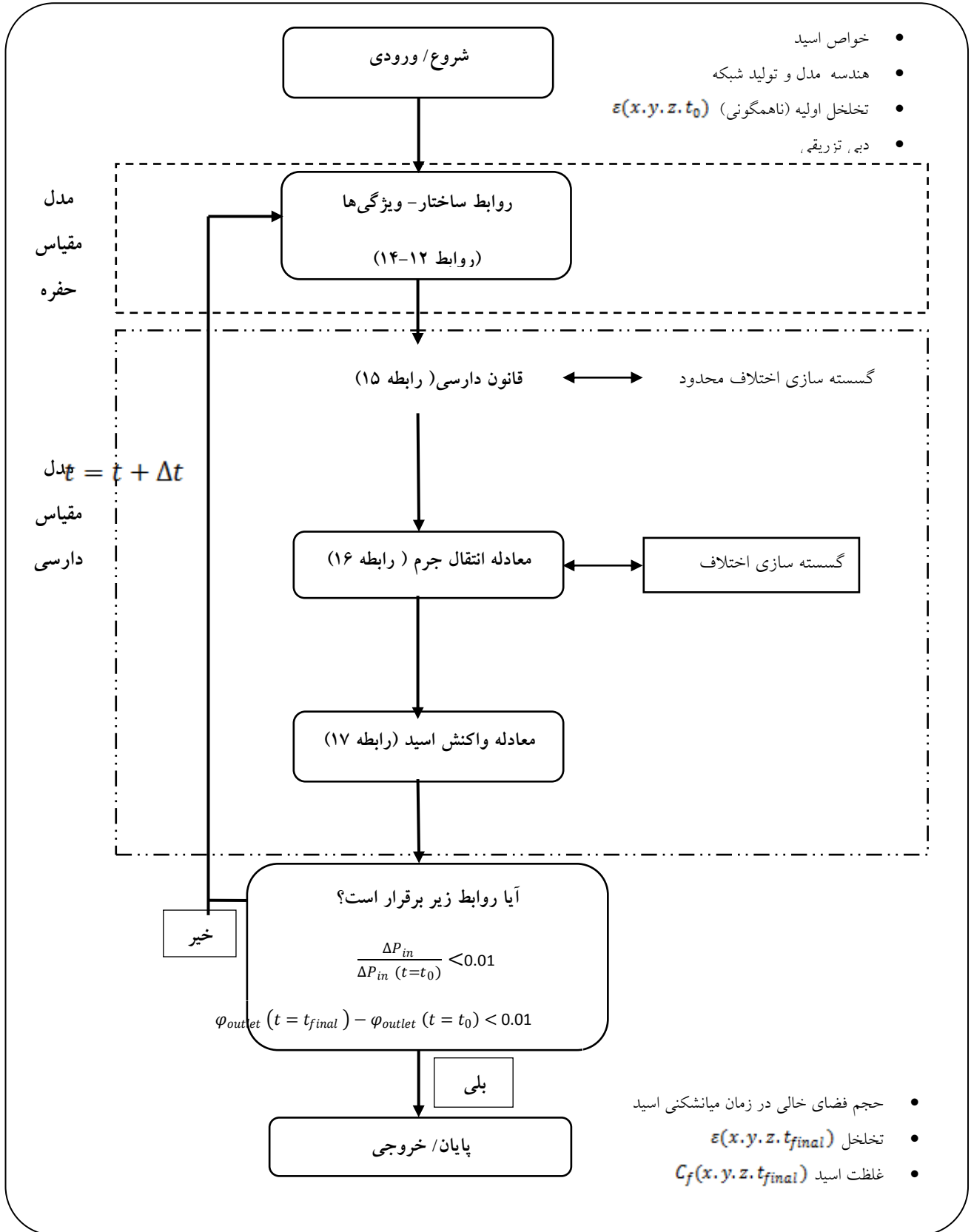
شکل ۲- تغییرهای حجم فضای خالی تزریقی در لحظه میان‌شکنی برحسب تعداد بلوک‌ها در گام‌های زمانی گوناگون.

شامل سه بخش معادله‌های تغییرهای فشار و سرعت داری، معادله‌های انتقال جرم برای تغییرهای غلظت اسید و معادله واکنش اسید می‌باشد. معادله‌های مقیاس حفره شامل روابط میان تراوایی، تخلخل و اندازه حفره‌های طی تغییرهای اعمالی می‌باشد.

معادله‌های مقیاس داری با استفاده از روش تفاضل محدود و اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی گسسته‌سازی شده است. سامانه خطی گسسته‌شده‌ی معادله‌های جبری هر بازه‌ی زمانی به‌علاوه‌ی نتیجه‌ی گسسته‌سازی فشار و معادله‌های تعادلی اجزا بر اساس فرضیه‌ی تفاضل محدود به صورت زیر حل می‌شوند.

برای حل این معادله‌ها در ابتدا معادله گسسته‌سازی شده (۱۵) تا رسیدن به تغییرهای فشار بدون بعد و سرعت بدون بعد در هر بلوک حل شده است. سپس مطابق سرعت بدون بعد محاسبه شده، میزان غلظت بدون بعد اسید در هر بلوک با استفاده از رابطه (۱۶) به دست آمده است و در مرحله آخر با داشتن تغییرهای غلظت بدون بعد اسید در هر بلوک، معادله واکنش اسید، معادله (۱۷)، تا رسیدن به تغییرهای تخلخل در هر بلوک حل شده است. این مرحله‌ها تا رسیدن به شرایط میان‌شکنی^(۱) اسید ادامه یافته است. شرایط میان‌شکنی اسید در این برنامه حالتی گرفته شده است که تغییرهای افت فشار اسید برابر با 0.01 تغییرهای فشار اولیه، و اختلاف تخلخل ماتریکس در قسمت خروجی در زمان میان‌شکنی با تخلخل اولیه ماتریکس در خروجی برابر 0.01 باشد. لازم به ذکر است که از روش تکرارپذیری در هر گام زمانی نیز استفاده شده است تا مقادیرهای تغییر یافته‌ی جدید (تخلخل و غلظت بدون بعد اسید) در همان گام زمانی دوباره درون معادله‌ها

(۱) Breakthrough



شکل ۳- الگوریتم اجرای برنامه.

بررسی اثر سرعت تزریق اسید

به طور کلی عملکرد تولیدی چاه در فرایند اسیدزنی بستگی به تعداد، طول، قطر و توزیع کرم‌چاله‌ها در راستای دیواره چاه دارد. ساختارشناسی کرم‌چاله‌ها نیز با استفاده از نرخ واکنش، شدت جریان تزریق اسید، لیتولوژی سنگ و ناهمگنی آن کنترل می‌شود. در این میان پارامتر مهم و اثرگذار در فرایند اسیدزنی، سرعت بهینه‌ی تزریق اسید است. یک عملیات اسید زنی موفق نیاز به ایجاد کرم چاله‌های عمیق و نازک با کمترین میزان اسید تزریقی دارد [۲۶].

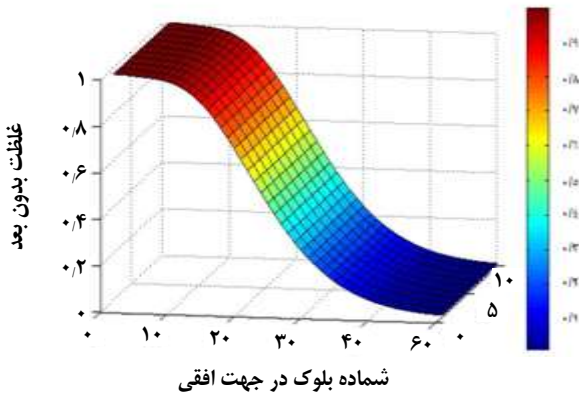
در این کار سرعت تزریق اسید برای سامانه با تخلخل در بازه (۰/۱۴۵ - ۰/۱۵۵) از ۰/۰۳۳ تا ۳۳ سانتی‌متر بر ثانیه افزایش یافته و نمودار تغییرهای حجم فضای خالی (PVBT) برحسب سرعت تزریق بدون بعد اسید در شکل ۶ نشان داده شده است. سرعت تزریق بدون بعد اسید طبق رابطه زیر محاسبه شده است.

$$D_a^{-1} = \frac{U_0}{K_s a_0 L} \quad (25)$$

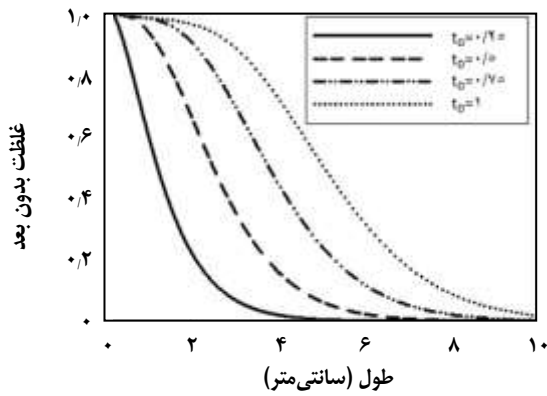
که در این رابطه U_0 سرعت تزریق اسید بر حسب سانتی‌متر بر ثانیه، K_s نرخ واکنش انحلال بر حسب سانتی‌متر بر ثانیه، a_0 سطح اولیه در تماس با اسید به ازای واحد حجم بر حسب یک بر سانتی‌متر و L طول نمونه بر حسب سانتی‌متر می‌باشد.

با توجه به شکل ۶، برای سرعت‌های تزریق بدون بعد زیاد و کم، میزان اسید زیادی لازم است تا میانشکنی انجام شود. این میزان اسید مصرفی برای بازه‌ای از مقدارهای متوسط سرعت تزریق بدون بعد به کمترین میزان خود می‌رسد. بنابراین یک میزان بهینه برای سرعت تزریق بدون بعد اسید وجود دارد که در این مدل در بازه‌ی سرعت تزریق بدون بعد ۱/۶۶ تا ۸/۳۳ و طبق معادله (۲۵) معادل سرعت تزریق ۰/۳۳ تا ۱/۵ سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد. در این سرعت بهینه، میزان حجم اسید تزریقی کمینه بوده و جبهه اسید زودتر میانشکنی می‌کند. در این حالت بازدهی فرایند اسید زنی بهینه بوده و منجر به ایجاد کرم‌چاله‌های عمیق و نازک می‌شود که یکی از مهم‌ترین موارد در طراحی فرایند اسیدزنی است.

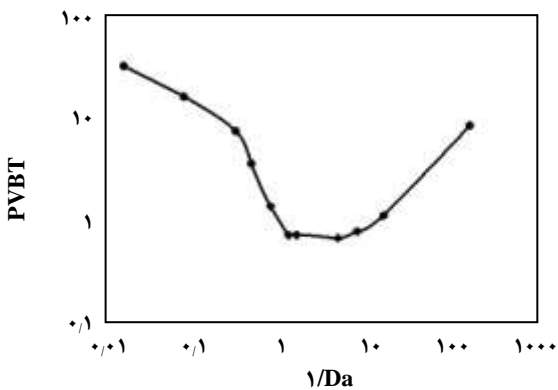
نتیجه‌های به دست آمده از اثر سرعت تزریق بر روند انحلال سازند که در این مطالعه به دست آمده است با نتیجه‌های عددی اخیر توسط ماهسواری و همکاران و قومم و همکاران به طور کیفی مطابقت خوبی دارد [۲۴، ۲۶، ۲۰]. شکل ۷ تغییر حجم



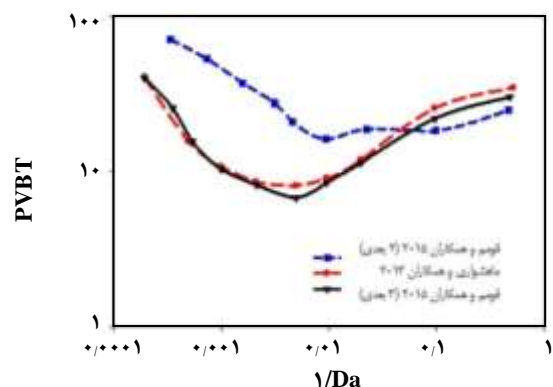
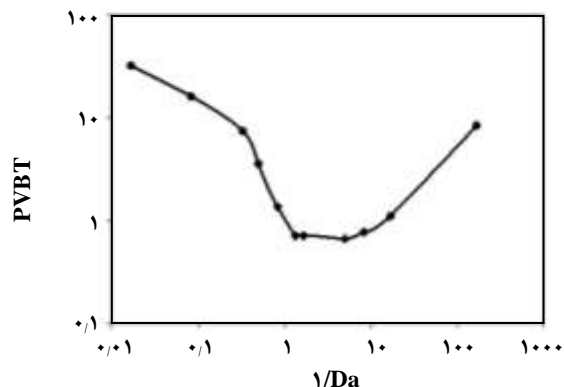
شکل ۴- پروفیل غلظت بدون بعد اسید در لحظه میانشکنی برای مدل همگن.



شکل ۵ - پروفیل غلظت بدون بعد اسید با گذشت زمان برای مدل همگن.



شکل ۶ - تغییر حجم فضای خالی (PVBT) برحسب سرعت تزریق بدون بعد اسید.



شکل ۷- مقایسه‌ی کیفی تغییرهای حجم فضای خالی بر حسب سرعت تزریقی بدون بعد اسید میان (الف) مطالعات پیشین و (ب) مطالعه حاضر.

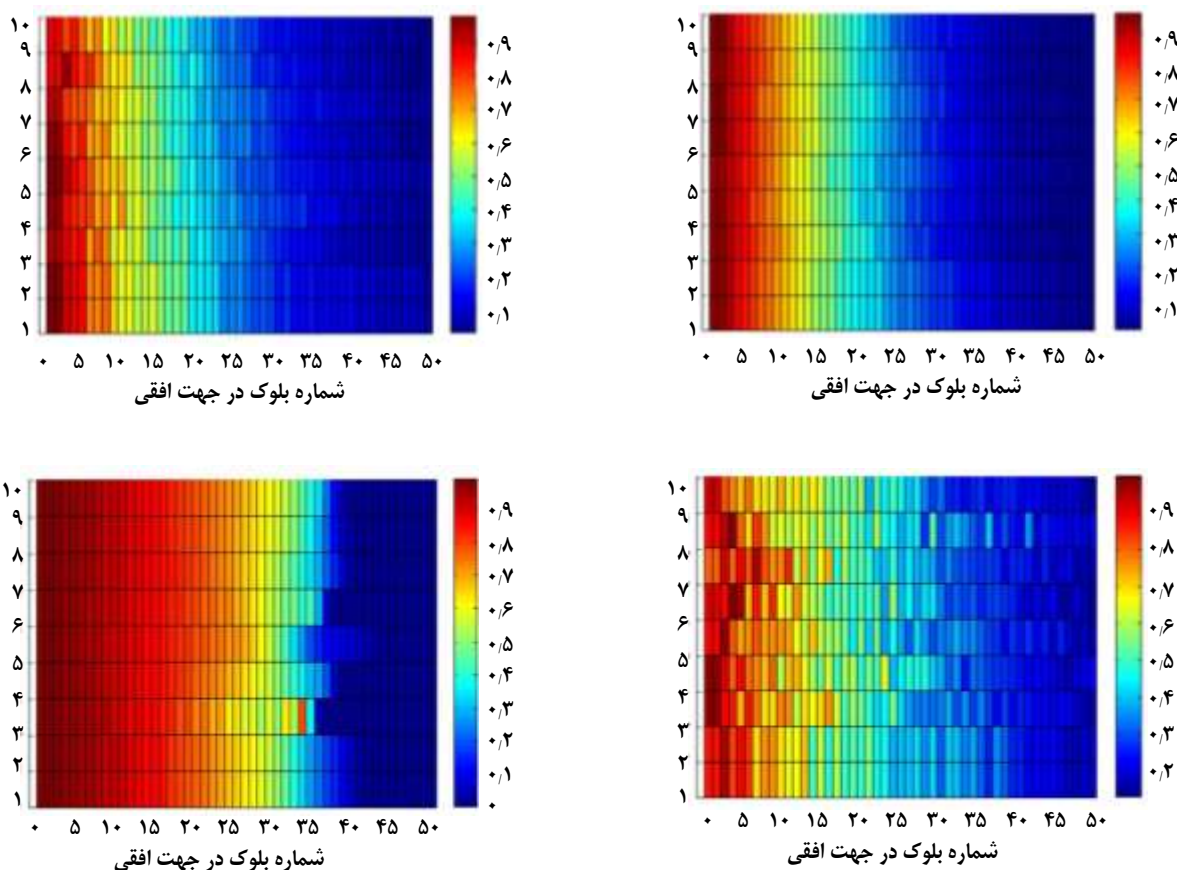
شکل ۸ پروفیل ساختار کرم‌چاله‌ها را به صورت تابعی از سرعت تزریقی اسید نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، در سرعت‌های پایین تزریق، ابتدا کل اسید پیش از نفوذ در ساختار سنگ و حل کردن دیواره‌ی سنگ مصرف شده است و غلظت اسید در سطح پیش‌رونده بیشینه است (شکل ۸ (الف) و (ب)). در سرعت‌های بالای تزریق، اسید تزریقی به عمق بیشتری نفوذ کرده و واکنش در منطقه بزرگ‌تری انجام شده که در این حالت کل سطح در تماس با اسید خورده شده است (شکل ۸ (د)). در هر دو حالت سرعت پایین و سرعت بالا، به میزان حجم اسید زیادی نیاز است، درحالی‌که در سرعت بهینه، مسیرهای کرم‌چاله به خوبی در ساختار کربناته نفوذ کرده است و میزان حجم اسید تزریقی بهینه است (شکل ۸ (ج)). بنابراین با افزایش سرعت تزریقی اسید، روند انحلال سنگ توسط اسید از حالت انحلال سطحی (بدون وجود کرم‌چاله) به سمت کرم‌چاله‌های غالب و عمیق و در انتها به سمت انحلال یکنواخت پیش رفته است.

بررسی تغییرهای تخلخل مدل در سرعت تزریقی بهینه

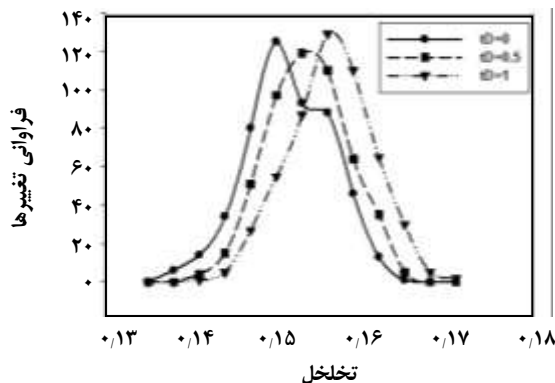
پروفیل تغییرهای تخلخل برای این مدل با استفاده از تابع نرمال با متوسط ε_0 و دامنه تغییرهای $\Delta\varepsilon$ ایجاد شده است. میزان ε_0 و $\Delta\varepsilon$ برای این مدل به ترتیب برابر ۰/۱۵ و ۰/۰۰۵ بوده است و دیگر پارامترهای شبیه‌سازی مطابق جدول ۱ می‌باشند. شکل ۹، نمودار فراوانی تخلخل اولیه را برای این ناهمگنی نشان می‌دهد و شکل ۱۰ تغییرهای فراوانی تخلخل را با گذشت زمان در این ناهمگنی نشان می‌دهد.

فضای خالی بر حسب سرعت تزریقی بدون بعد اسید را برای این مطالعه و مطالعه‌هایی که یاد شد نشان می‌دهد.

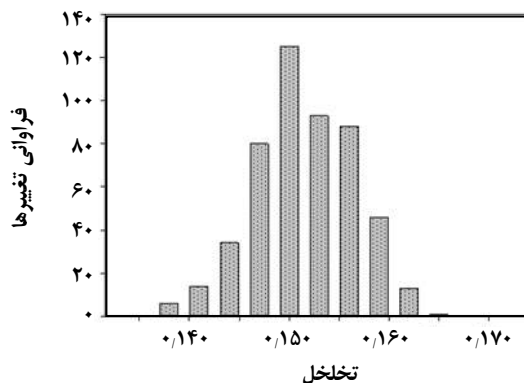
شایان ذکر است که در این مطالعه تنها مقایسه‌ی کیفی انجام شده است و به چند دلیل تطابق کمی داده‌های به دست آمده با مطالعه‌های پیشین انجام نشده است. دلیل اول مربوط به نوع مدل‌سازی در این مطالعه است که در دو بعد صورت گرفته است در حالی که مطالعه‌های ماهسواری و همکاران و قوموم و همکاران در یک مدل سه بعدی بوده است. مورد دیگر به چگونگی حل معادله‌ها برمی‌گردد به طوری که در این مطالعه از روش عددی تفاضل محدود برای حل معادله‌ها استفاده شده است اما در مطالعه‌های پیشین از یک شبیه‌ساز با روش حل المان محدود استفاده شده است. دلیل آخر نیز به علت عدم قطعیت در برخی داده‌های ورودی است. به عنوان نمونه در مطالعه‌های پیشین یک تابع توزیع برای تخلخل مدل به صورت ورودی داده شده است اما به طور دقیق به نوع تابع تخلخل اشاره نشده است و از آنجا که توزیع تخلخل و ناهمگنی محیط به شدت بر روی روند رشد و نفوذ کرم‌چاله‌ها تأثیر می‌گذارد، هر گونه تفاوت در تابع توزیع تخلخل می‌تواند نتیجه‌های نهایی را به شدت تغییر دهد. بنابراین در این پژوهش از یک توزیع تصادفی برای تخلخل ورودی مدل استفاده شده است و به دلیل عدم در دسترس بودن نوع تابع توزیع تخلخل برای مطالعه‌های پیشین، امکان مقایسه کمی فراهم نبوده است. ولی با این وجود، مقایسه‌ی کیفی میان روند پیش‌بینی شده با استفاده از این مطالعه و مطالعه‌های پیشین به خوبی درستی محاسبه‌های این مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۸ - پروفیل تغییرات غلظت بدون بعد اسید در سرعت‌های تزریقی متفاوت. الف) ۰/۱ سانتی‌متر بر ثانیه، ب) ۰/۱۷ سانتی‌متر بر ثانیه، ج) ۰/۳۵ سانتی‌متر بر ثانیه و د) ۴/۳۳ سانتی‌متر بر ثانیه.



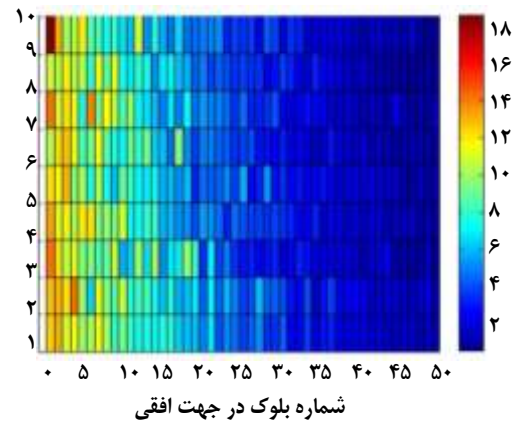
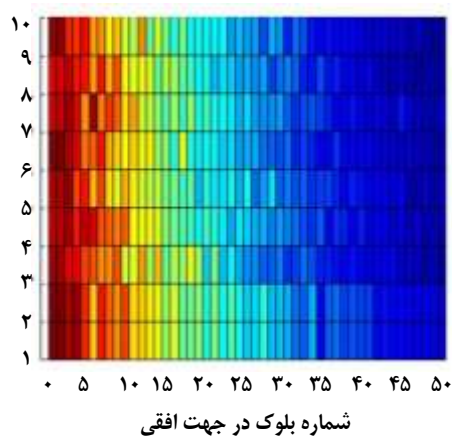
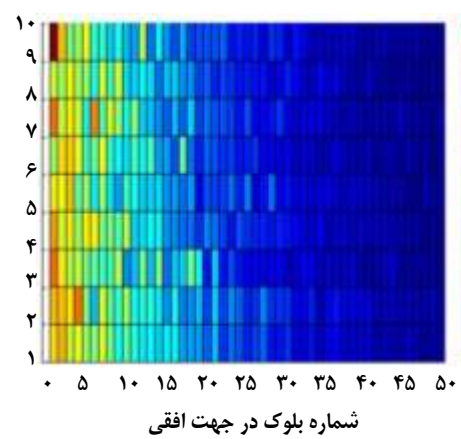
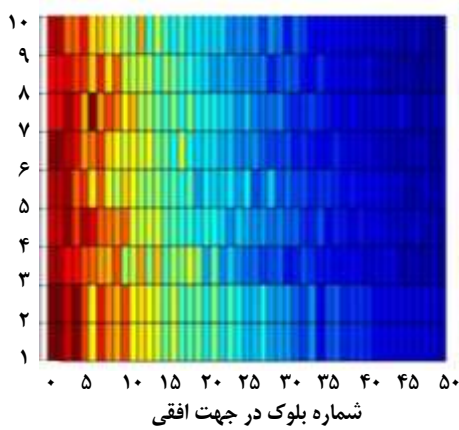
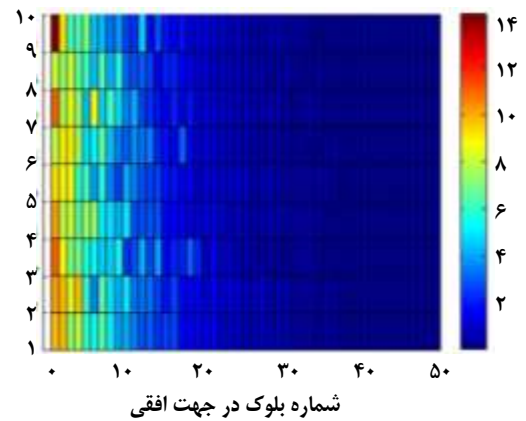
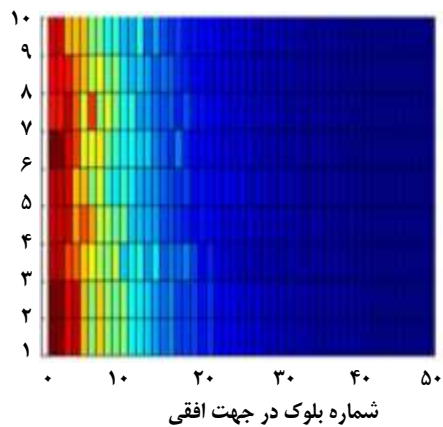
شکل ۱۰ - تغییرهای فراوانی تخلخل با گذشت زمان.



شکل ۹ - فراوانی تخلخل اولیه برای تخلخل 0.15 ± 0.05 .

تخلخل و هم دامنه تغییرهای تخلخل افزایش یافته است و توزیع فراوانی تخلخل اولیه به سمت تخلخل‌های بیشتر تغییر کرده است. در راستای تغییرهای دینامیک تخلخل که یکی از موردها نمایان در فرایند واکنش و انحلال است، جریان اسید درون

همان‌گونه که از شکل ۱۰ مشخص است، با گذشت زمان و حرکت اسید به سمت انتهای مدل، واکنش اسید با سطح سنگ صورت گرفته که سرانجام منجر به تشکیل کرم‌چاله و افزایش تخلخل می‌شود. به همین دلیل با گذشت زمان هم میزان متوسط



شکل ۱۱ - مقایسه الف) پروفیل تغییرات تخلخل و ب) پروفیل غلظت بدون بعد اسید برای دبی بهینه با گذشت زمان.

y	محور عمود بر راستای تزریق
t	زمان
Δt	بازه زمانی
a_0	سطح تماس اولیه بر واحد حجم
a_v	سطح تماس جامد - سیال
r_0	شعاع اولیه حفره بر واحد حجم
r_p	متوسط شعاع حفره
k_0	تراوایی متوسط اولیه
k_c	ضریب انتقال جرم
k_s	نرخ واکنش انحلال
K	تنسور تراوایی
D_m	نفوذ اسید
D_{ex}	ضریب طولی پراکندگی
D_{eT}	ضریب عرضی پراکندگی
λ_x	ثابت ضریب طولی پراکندگی
λ_T	ثابت ضریب عرضی پراکندگی
U_0	سرعت تزریقی اسید
U	بردار سرعت داریسی
C_0	غلظت اسید در ورودی
C یا C_f	غلظت اسید
P	فشار
P_e	فشار خروجی
ε_0	متوسط تخلخل اولیه
$\Delta\varepsilon_0$	ناهمگنی تخلخل
α_{os}	ثابت در ضریب پراکندگی
α	قدرت حلالیت اسید
β	پارامتر گسترش حفره
γ	پارامتر اتصال پذیری حفره‌ها
N_{ac}	ضریب گنجایش اسید
n	بردار نرمال
η	نسبت طول
μ	گرانروی اسید
Sh	عدد شروود
PVBT	حجم فضای خالی تزریقی تا میانشکنی

کرم‌چاله‌ها نیز بررسی شده است. شکل ۱۱ پروفیل غلظت اسید و پروفیل تغییرهای تخلخل را برای سرعت تزریقی بهینه (۰/۳۵ سانتی‌متر بر ثانیه) در لحظه اول تا لحظه میانشکنی اسید نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است که نخست ناحیه‌های زیادی در قسمت ورودی پذیرای اسید بوده است و به تدریج چندین کرم‌چاله در قسمت ورودی تشکیل شده است. با گذشت زمان تنها تعدادی کرم‌چاله‌ی غالب (در نواحی وسط و پایین مدل) پذیرای اسید بوده است. در این حالت سطوح در تماس قرار گرفته با اسید واکنش داده و تخلخل شروع به افزایش کرده تا در پایان که کل اسید با کرم‌چاله‌ها به انتها رسیده و میان‌شکنی انجام شده است.

نتیجه‌گیری

با جمع‌بندی مطالب و تحلیل‌های برگرفته از مدل ساخته شده می‌توان نتیجه‌های زیر را بیان کرد:

- در مدل دو بعدی همگن تغییرهای غلظت نرمالایز شده کاهش یافته و در لحظه میان‌شکنی به کمترین مقدار خود می‌رسد. همچنین جبهه حرکت اسید یکنواخت می‌باشد که دلیل آن یکسان بودن تخلخل و تراوایی در تمامی بلوک‌ها می‌باشد.

- با بررسی حرکت یکنواخت اسید و پروفیل غلظت آن با زمان به طور کامل می‌توان دریافت که مدل ساخته شده در این مطالعه به خوبی توانسته ما را به هدف‌های مورد نظر برساند و درست می‌باشد.

- با انجام آنالیز حساسیت اثر سرعت تزریقی، بازه‌ی سرعت تزریق اسید بهینه در بازه‌ی ۰/۳۳ تا ۱/۵ سانتی‌متر بر ثانیه برای این مدل به دست آمد. در این سرعت‌های تزریقی، حجم اسید تزریقی کمینه بوده و کرم‌چاله‌های عمیق و نازک تشکیل شده است. در واقع با پیدا کردن سرعت بهینه در هر شرایط، بازدهی فرایند اسیدزنی نیز افزایش می‌یابد.

- با گذشت زمان در طی تزریق اسید در سرعت بهینه، کرم‌چاله‌های غالب (در نواحی وسط و پایین مدل) پذیرای اسید بوده است. بدین ترتیب تخلخل مدل با ایجاد و نفوذ کرم‌چاله‌ها افزایش یافته و توزیع نمودار فراوانی تخلخل اولیه به سمت تخلخل‌های بیشتر تغییر مکان داده است.

نمادها

L	طول مدل
h	عرض مدل
x	محور راستای تزریق اسید

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۷

مراجع

- [1] Hoefner M., Fogler H.S., [Pore Evolution and Channel Formation During Flow and Reaction in Porous Media](#), *AICHE Journal*, **34**(1): 45-54 (1988).
- [2] Panga M.K., Ziauddin M., Balakotaiah V., [Modeling, Simulation and Comparison of Models for Wormhole Formation During Matrix Stimulation of Carbonates](#), *Google Patents* (2009).
- [3] Hill A., Zhu D., [Real-Time Monitoring of Matrix Acidizing Including the Effects of Diverting Agents](#), *SPE Production & Facilities*, **11**(02): 95-101 (1996).
- [4] Golfier F., Bazin B., Zarcone C., Lenormand R., Lasseux D., Quintard M., ["Acidizing Carbonate Reservoirs: Numerical Modelling of Wormhole Propagation and Comparison to Experiments"](#), *SPE European Formation Damage Conference*, Society of Petroleum Engineers (2001).
- [5] Daccord G., Touboul E., Lenormand R., [Carbonate Acidizing: Toward a Quantitative Model of the Wormholing Phenomenon](#), *SPE Production Engineering*, **4**(01): 63-68 (1989).
- [6] Golfier F., Zarcone C., Bazin B., Lenormand R., Lasseux D., Quintard M., [On the Ability of a Darcy-Scale Model to Capture Wormhole Formation During the Dissolution of a Porous Medium](#), *Journal of Fluid Mechanics*, **457**: 213-254 (2002).
- [7] Panga M.K., Ziauddin M., Balakotaiah V., [Two-Scale Continuum Model for Simulation of Wormholes in Carbonate Acidization](#), *AICHE Journal*, **51**(12): 3231-3248 (2005).
- [8] Kalia N., Balakotaiah V., [Modeling and Analysis of Wormhole Formation in Reactive Dissolution of Carbonate Rocks](#), *Chemical Engineering Science*, **62**(4): 919-928 (2007).
- [9] Kalia N., Balakotaiah V., [Effect of Medium Heterogeneities on Reactive Dissolution of Carbonates](#), *Chemical Engineering Science*, **64**(2): 376-390 (2009).
- [10] Ratnakar R., Kalia N., Balakotaiah V., ["Carbonate Matrix Acidizing with Gelled Acids: An Experiment-Based Modeling Study"](#), in *SPE International Production and Operations Conference & Exhibition*. Society of Petroleum Engineers (2012).
- [11] Qiu XW., Zhao W., Dyer S.J., Al Dossary A., Khan S., Sultan AS., ["Revisiting Reaction Kinetics and Wormholing Phenomena During Carbonate Acidising"](#), in *IPTC 2014: International Petroleum Technology Conference*. (2014).
- [12] Tardy P.M.J., Lecerf B., Christanti Y., ["An Experimentally Validated Wormhole Model for Self-Diverting and Conventional Acids in Carbonate Rocks under Radial Flow Conditions"](#), *European Formation Damage Conference*. Society of Petroleum Engineers (2007).
- [13] Kalia N., Balakotaiah V., ["Wormholing in Perforated Completions"](#), *SPE International Symposium and Exhibiton on Formation Damage Control*. Society of Petroleum Engineers (2010).
- [14] Fredd C., Miller M., ["Validation of Carbonate Matrix Stimulation Models"](#), *SPE International Symposium on Formation Damage Control*, Society of Petroleum Engineers (2000).

- [15] Cruz-Maya JA., Rosas-Flores JA., Godoy-Alcantar M., Jan-Roblero J., Silva FS., [A Real-Time Virtual Monitoring System of the Skin Factor for Matrix Acidizing Treatments](#), *Flow Measurement and Instrumentation*, **22**(5): 413-420 (2011).
- [16] Buijse M.A., “[Understanding Wormholing Mechanisms Can Improve Acid Treatments in Carbonate Formations](#)”, *SPE European Formation Damage Conference.*, Society of Petroleum Engineers (1997).
- [17] Daccord G., Lenormand R., Lietard O., [Chemical Dissolution of a Porous Medium by a Reactive Fluid—I. Model for the “Wormholing” Phenomenon](#), *Chemical Engineering Science*, **48**(1): 169-178 (1993).
- [18] Tansey, J.F., “[Pore Network Modeling of Carbonate Acidization](#)”, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers. (2014).
- [19] Kamath J., Xu B., Lee S.H., Yortsos Y.C., [Use of Pore Network Models to Interpret Laboratory Experiments on Vugular Rocks](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **20**(3): 109-115 (1998).
- [20] Fredd C.N., Fogler H.S., [Influence of Transport and Reaction on Wormhole Formation in Porous Media](#), *AIChE journal*, **44**(9): 1933-1949 (1998).
- [21] Panga MK., Ziauddin M., Gandikota R., Balakotaiah V., “[A New Model for Predicting Wormhole Structure and Formation in Acid Stimulation of Carbonates](#)”, *SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control*, Society of Petroleum Engineers (2004).
- [22] Maheshwari P., Balakotaiah V., [Comparison of Carbonate HCl Acidizing Experiments with 3D Simulations](#), *SPE Production & Operations*, **28**(04): 402-413 (2013).
- [23] Maheshwari P., Maxey J.E., Balakotaiah V., “[Simulation and Analysis of Carbonate Acidization with Gelled and Emulsified Acids](#)”, *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, Society of Petroleum Engineers (2014).
- [24] Maheshwari P., Ratnakar R.R., Kalia N., Balakotaiah V., [3-D Simulation and Analysis of Reactive Dissolution and Wormhole Formation in Carbonate Rocks](#), *Chemical Engineering Science*, **90**: 258-274 (2013).
- [25] Ratnakar R.R., Kalia N., Balakotaiah V., [Modeling, Analysis and Simulation of Wormhole Formation in Carbonate Rocks with in Situ Cross-Linked Acids](#), *Chemical Engineering Science*, **90**: 179-199 (2013).
- [26] Ghommem M., Zhao W., Dyer S., Qiu X., Brady D., [Carbonate Acidizing: Modeling, Analysis, and Characterization of Wormhole Formation and Propagation](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **131**: 18-33 (2015).
- [27] Zhu D., Hill A.D., “[Field Results Demonstrate Enhanced Matrix Acidizing Through Real-Time Monitoring](#)”, *Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference*, Society of Petroleum Engineers (1996).