

توسعه شبیه‌ساز نفت سیاه با استفاده از شبکه‌بندی بی‌سازمان هوشمند

فروغ عاملی^{۱*} و بهرام دبیر^۲

۱- دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۴/۲/۹

تاریخ دریافت: ۹۳/۸/۱۵

چکیده

بررسی جریان دوفازی در مخزن، نقش مهمی در مدیریت و پیش‌بینی عمل‌کرد مخازن نفتی و گازی دارد و شامل حل معادلات غیرخطی، ترکیبی و وابسته به زمان در مخازن ناهمگن است. مهم‌ترین موضوع در این باره شبکه‌بندی مخزن برای دسترسی به بهترین پاسخ است. تولید دقیق شبکه محاسباتی با توجه به ویژگی‌های سیستم همواره یکی از نکات کلیدی در دستیابی به پاسخ‌های مناسب محاسباتی است؛ لذا مهم‌ترین موضوعی که در این مقاله درباره آن بحث شده ارایه الگوریتمی مناسب به عنوان عامل کلیدی برای دستیابی به پاسخ مناسب است. در این تکنیک برای نخستین بار با ترکیب ویژگی‌هایی چون توزیع عبورپذیری در مخزن، مکان چاه‌ها و بررسی مسیرهای کلیدی جریان به تولید شبکه زمینه پرداخته شده است و با یکی از روش‌های رایج تولید شبکه به تولید شبکه محاسباتی بی‌سازمان پرداخته می‌شود. مدل دوفازی برمبنای فرمولاسیون حجم محدود توسعه یافته و با مدل ریزسلول مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: شبکه‌بندی هوشمند، میدان عبورپذیری، خطوط جریان، شبیه‌سازی نفت سیاه، فرمولاسیون حجم محدود.

مقدمه

محدودیت‌های روش تفاضل محدود، در سال‌های اخیر از روش‌هایی دیگر به این منظور استفاده شده که شامل شبکه‌بندی مبتنی بر جریان هستند که در مناطقی با دبی بالاتر ریزتر شده‌اند تا پاسخی دقیق‌تر از مخزن واقعی به دست آید. درلوسک یاز جمله کسانی بود که در این زمینه مطالعاتی را انجام داده است [۱-۴]. همچنین از روش‌های خطوط جریان برای غلبه بر مشکلات احتمالی ناشی از تغییرات سرعت در مسیر شکاف‌ها یا مناطق با عبورپذیری بالا استفاده شده است [۵-۸].

در سال‌های اخیر فعالیت‌های بسیاری در زمینه شبیه‌سازی مخازن نفتی انجام شده‌اند. با ارایه این شبیه‌سازی‌ها می‌توان به بازدهی بالاتر و بهبود اقتصادی در زمینه فعالیت‌های مربوط به بازیابی نفت رسید. روش‌های بسیاری در مدل‌سازی مخازن نفتی ارایه شده‌اند که از آن جمله می‌توان به روش تفاضل محدود اشاره کرد که در شبیه‌سازی‌های عددی بسیار به کار رفته است. با توجه به

$$\nabla \cdot (k \lambda_i \nabla p) = -\frac{q_w}{\rho_w} - \frac{q_o}{\rho_o} \quad (1)$$

مخزن به صورت یک شبکه متعارف 512×512 تقسیم‌بندی و سپس، با حل معادلات فشار، کانتور توزیع فشار در شکل ۱ ترسیم شده است. در این نمونه یک چاه تولیدی و یک چاه تزریقی در دو گوشه مخزن قرار دارند و توزیع عبورپذیری میدان مشخص و غیریک‌نواخت در نظر گرفته شده است. برای ترسیم کانتور سرعت، ابتدا در هر وجه بلوک گریدها سرعت از راه قانون دارسی محاسبه می‌شود (شکل ۲). پس از محاسبه سرعت در وجه گرید بلوک‌ها، سرعت در مرکز هر گرید بلوک از رابطه زیر تعیین و با استفاده از آن کانتور سرعت در مخزن رسم می‌شود:

$$u_{i,j} = \sqrt{\left((u_{ix} (i,j) + u_{ix} (i,j)) / 2 \right)^2 + \left((u_{iy} (i,j) + u_{iy} (i,j)) / 2 \right)^2} \quad (2)$$

مسیریابی خطوط جریان

یک روش ابتکاری در آشکارسازی مسیره‌های کلیدی جریان استفاده از مفهوم متداول زمان مهاجرت در شبیه‌سازی‌ها به روش خطوط جریان است. زمان مهاجرت اصطلاحاً به زمانی گفته می‌شود که یک ذره نیاز دارد تا مسیر جریان از محل چاه تزریقی تا نقطه موردنظر را طی کند. برای یافتن زمان لازم برای طی این مسیر داریم:

$$\Delta t_{e,x} = \frac{1}{m_x} \ln \left\{ \frac{V_{x,o} + m_x (x_e - x_o)}{V_{x,o} + m_x (x_i - x_o)} \right\} \quad (3)$$

که در آن x_o, x_i, x_e به ترتیب موقعیت‌های خروجی، ورودی و دستگاه مختصات محلی هستند [۱۴].

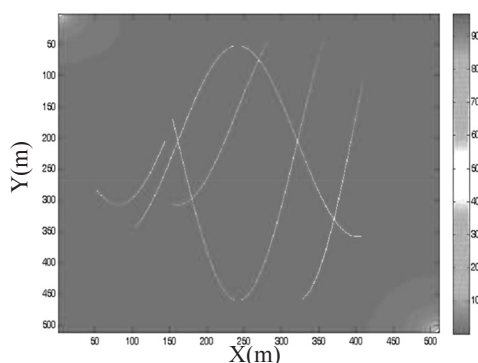
تولید معیار اندازه سلول با توجه به مسیره‌های کلیدی جریان

برای تولید معیار اندازه سلول با توجه به مسیره‌های کلیدی جریان، معادله تک‌فازی و غیرقابل تراکم با فرض نرخ جریان ثابت در چاه‌های تولیدی و تزریقی در مدل ریزسلول حل می‌شود و براساس آن میدان سرعت به دست می‌آید.

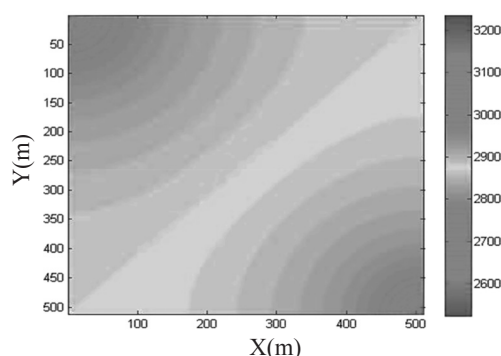
در مطالعه دبیر و همکارانش از ترکیب خطوط جریان و مکان چاه‌ها برای تولید شبکه محاسباتی استفاده شده و نتایج با شبکه زیرسلول مقایسه شده‌اند [۹]. موضوع مهم دیگری که بررسی شده است توزیع میدان عبورپذیری در مخزن است که با بررسی مفهوم فیلترها به تابع اندازه المان تبدیل می‌شود. با استفاده از تکنیک پردازش تصویر نقاط بحرانی شناسایی می‌شوند و نقشه حاصل از فیلتر دیجیتالی عبور می‌کند که در آن اثر مکان چاه با مسیره‌های کلیدی جریان نیز ترکیب می‌شود و توزیع تابع اندازه المان نهایی را به دست می‌دهد که در نهایت به عنوان نقشه‌ای برای تولید شبکه به کار می‌رود [۱۰-۱۲]. در سال‌های اخیر، دبیر و همکارانش از این روش برای تولید شبکه زمینه در مخازن شکافدار استفاده کرده‌اند و نتایج خوبی را در مقایسه با شبکه ریزسلول به دست آورده‌اند که با کاهش قابل توجه زمان محاسباتی همراه بوده است [۱۳]. همان‌گونه که در بالا اشاره شد، تولید دقیق شبکه محاسباتی با توجه به ویژگی‌های سیستم همواره یکی از نکات کلیدی در دست‌یابی به پاسخ‌های مناسب محاسباتی است؛ لذا مهم‌ترین موضوع بحث در این مقاله، ارائه الگوریتم مناسب برای تولید شبکه است که در ادامه به تفصیل درباره آن بحث شده است. در این تکنیک برای نخستین بار با ترکیب ویژگی‌هایی چون توزیع عبورپذیری در مخزن، مکان چاه‌ها و بررسی مسیره‌های کلیدی جریان به این مسئله پرداخته و سپس کارکرد این شبکه در مدل‌های مختلف بررسی شده است. کد تهیه‌شده مربوط به شبیه‌ساز نفت سیاه است و برای جریان دوفازی تهیه شده است.

حل میدان فشار و ترسیم کانتور سرعت

در نخستین گام یافتن خطوط جریان، معادلات فشار در میدان موردنظر حل می‌شوند. برای به دست آوردن میدان فشار در مخزن، به نوشتن معادله انتشار فشار برای هر گرید بلوک نیاز است:



شکل ۲ نحوه توزیع سرعت در مخزن.



شکل ۱ توزیع فشار در مخزن.

مواقع با تغییرات تراوایی هماهنگ‌اند، ولی در حالات خاص به‌ویژه در مناطق نزدیک به چاه‌های تولیدی و تزریقی مستقل از تراوایی و بسته به قدرت نیروهای اینرسی عمل می‌کنند از این رو تمرکز سلول‌هایی با ابعاد کوچک‌تر در نزدیکی چاه‌ها بر دقت حل می‌افزاید. بدین منظور معیار اندازه سلول در محل چاه‌های تولیدی و تزریقی بیشینه منظور می‌شود و سپس به‌صورت هموار به سمت صفر در نواحی دور از چاه‌ها تغییر خواهد کرد. می‌توان تابع ریاضی را که معیار اندازه المان مذکور را در اختیار می‌گذارد به‌صورت زیر نشان داد [۱۴]. شکل ۵ نشان دهنده کمی پارامتر دوری از چاه‌ها است.

$$S = a \exp(b, d) \quad (4)$$

تشخیص کمی مرزهای ناهمگنی در میدان تراوایی مطلق

شکل ۶ میدان تراوایی مربوط به یک مخزن را نمایش می‌دهد که با اعمال الگوریتم فوق مناطق مهم به‌سادگی مشخص شده‌اند. شکل ۷ معیار انرژی میدان‌های عبورپذیری حاصل را نشان می‌دهد.

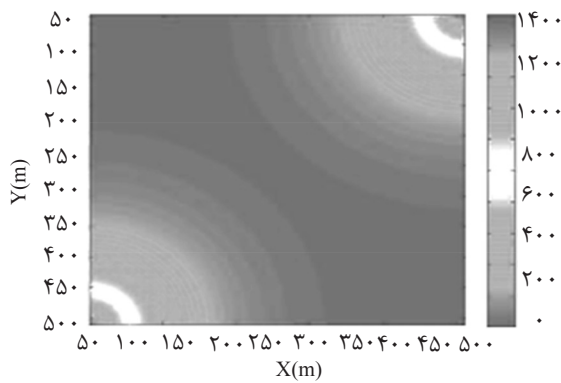
ترکیب توابع اندازه المان و ایجاد معیار اندازه المان نهایی
در بخش‌های قبل، توابع اندازه المان با در نظر گرفتن توزیع تراوایی مطلق، میدان سرعت و اثرات چاه و هم‌چنین مسیرهای کلیدی جریان بررسی شدند.

سپس برای هر سلول مسیر جریانی که از چاه‌های تزریقی آغاز و به چاه‌های تولیدی ختم می‌شود و در عین حال از مرکز سلول نیز می‌گذرد ردیابی و زمان مهاجرت بین چاه‌های تزریقی و تولیدی در امتداد آن محاسبه می‌شود و عکس آن معیاری از اندازه المان در موقعیت مکانی مرکز سلول است. در شکل‌های ۳ و ۴ نمونه‌ای از یک مخزن با یک چاه تولیدی و یک چاه تزریقی آورده شده و رسم خطوط جریان به‌همراه زمان مهاجرت جریان در آن نشان شده است.

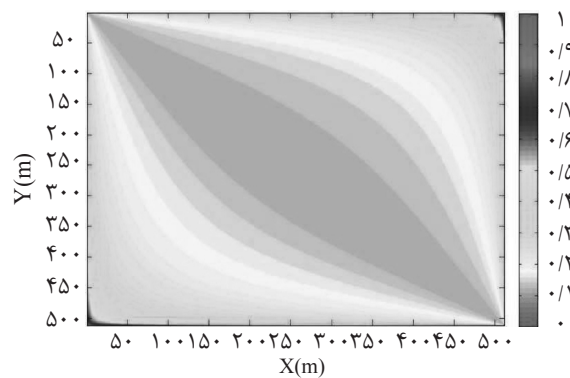
تولید معیار اندازه سلول با توجه به تراوایی مطلق

توزیع تراوایی در یک مخزن هیدروکربوری کمیتی تنسوری و دارای تغییرات شدید است. در اختصاص تراوایی از مدل ریزسلول زمین‌شناسی به مدل درشت‌سلول، نوعی متوسط‌گیری انجام می‌شود که خود می‌تواند بر ماهیت میدان تراوایی ریزسلول در مدل درشت‌سلول به‌شدت تاثیر گذارد، به‌ویژه اگر تغییرات شدید تراوایی در محدوده سلول‌ها رخ دهند. برای جلوگیری از وقوع چنین پدیده‌ای، تابع اندازه سلول باید در مناطقی که تغییرات شدید تراوایی اتفاق می‌افتند، با اختصاص سلول‌هایی با ابعاد کوچک‌تر، مانع از تغییر ماهیت میدان تراوایی در مدل درشت‌سلول شوند [۱۳].

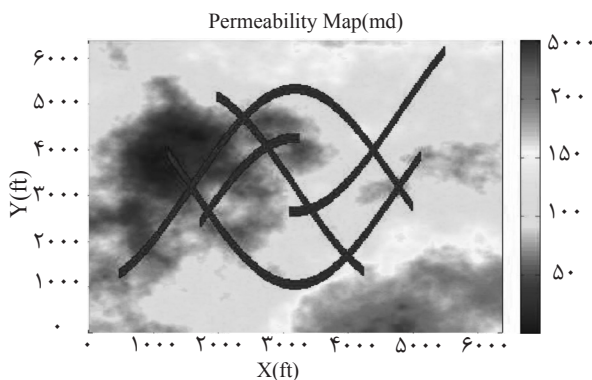
تولید معیار اندازه سلول با توجه به نزدیکی و دوری از چاه‌ها
در حل معادلات جریان سیال، سرعت عاملی تعیین‌کننده است. تغییرات این عامل بسیاری



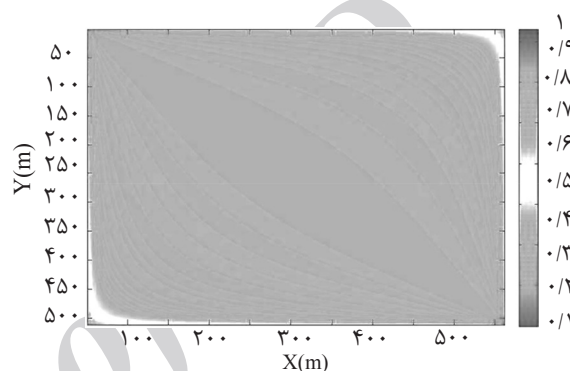
شکل ۴ نمایش زمان مهاجرت در مخزنی با یک چاه تولیدی و تزریقی.



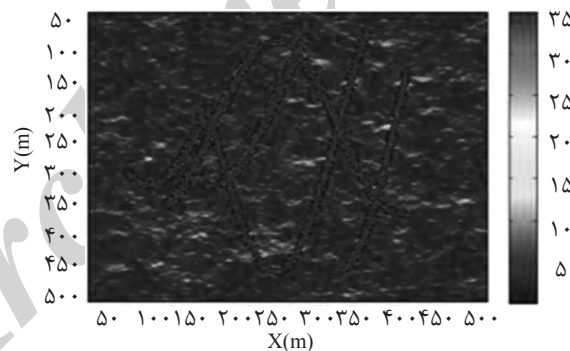
شکل ۳ نمایش شماتیک خطوط جریان.



شکل ۶ میدان تراوایی در مخزن.



شکل ۵ تولید معیار اندازه سلول با توجه به دوری و نزدیکی به چاه.



شکل ۷ معیار انرژی در میدان عبورپذیری.

المان نگاشت. توابع نگاشت اکیداً نزولی تعریف می‌شوند و رابطه‌ای یک‌به‌یک بین معیار اندازه المان و مقادیر واقعی برقرار می‌شود. تابع اندازه سلولی که با استفاده از یک تابع نگاشت به دست می‌آید را می‌توان تابع اندازه المان مطلوب نام نهاد. ما به دنبال تبدیل تابع اندازه المان مطلوب به تابع اندازه المان کاربردی هستیم که به صورت یک مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر قابل بیان است [۱۴]:

هریک از این توابع اندازه المان ویژگی‌هایی منحصر به فرد دارند و یکی از خواص مطلوب در ایجاد یک گسسته‌سازی بهینه را در خود حمل می‌کنند. برای ایجاد یک شبکه بهینه باید به طریقی تمام این توابع اندازه المان را در یک تابع اندازه المان ترکیب کرد [۶].

تبدیل معیار اندازه المان به تابع اندازه المان

با استفاده از توابعی خاص، می‌توان به راحتی معیار اندازه المان را به یک بازه اندازه

*k تعیین می‌شود که از آن برای حل معادلات جریان چندفازی در محیط متخلخل استفاده خواهد شد. نمونه‌ای از فایل خروجی که در میدان آن درشت‌نمایی انجام شده در شکل ۹ نشان داده شده است.

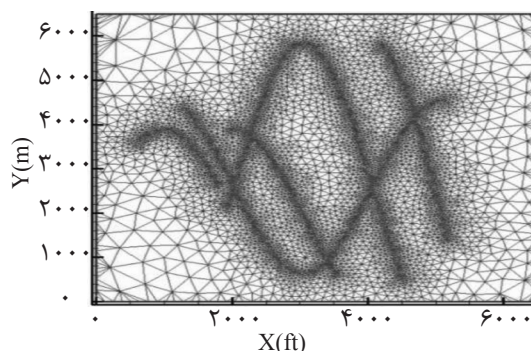
توسعه مدل عددی

روش استفاده‌شده در این مطالعه، که هم پایستاری جرم در آن برقرار است و هم در شبکه‌هایی با ساختار نامتعارف می‌توان از آن استفاده کرد، تقریب تابعی حجم کنترلی (CVFA) است که در شبیه‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی در مخازن نفتی به کار می‌رود. این روش دقت بیشتری در محاسبه سرعت و فشار در جریان چندفازی در مخازن دارد و کمتر تحت تاثیر جهت‌گیری شبکه است و برای هر ساختاری از شبکه می‌توان از آن استفاده کرد. از این روش، به‌خصوص در تولید شبکه‌های هیبریدی در شبیه‌سازی‌ها، بسیار استفاده می‌شود. اگر معادله کلی جریان در مختصات دوبعدی برای چند فاز بررسی شود، خواهیم داشت:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Phi\phi) = \nabla \cdot (K\nabla\phi) + q \quad (7)$$

Φ و K توابعی مشخص و q مجموع عبارت‌های منبع و چاه‌اند. تابع اینترپولاسیون، که بر حجم V اعمال می‌شود، به این ترتیب تقریب زده می‌شود [۱۶]:

$$\phi'(x, t) = \sum_{j=1}^M \phi_j(t) \phi_j(x) \quad x \in V \quad (8)$$



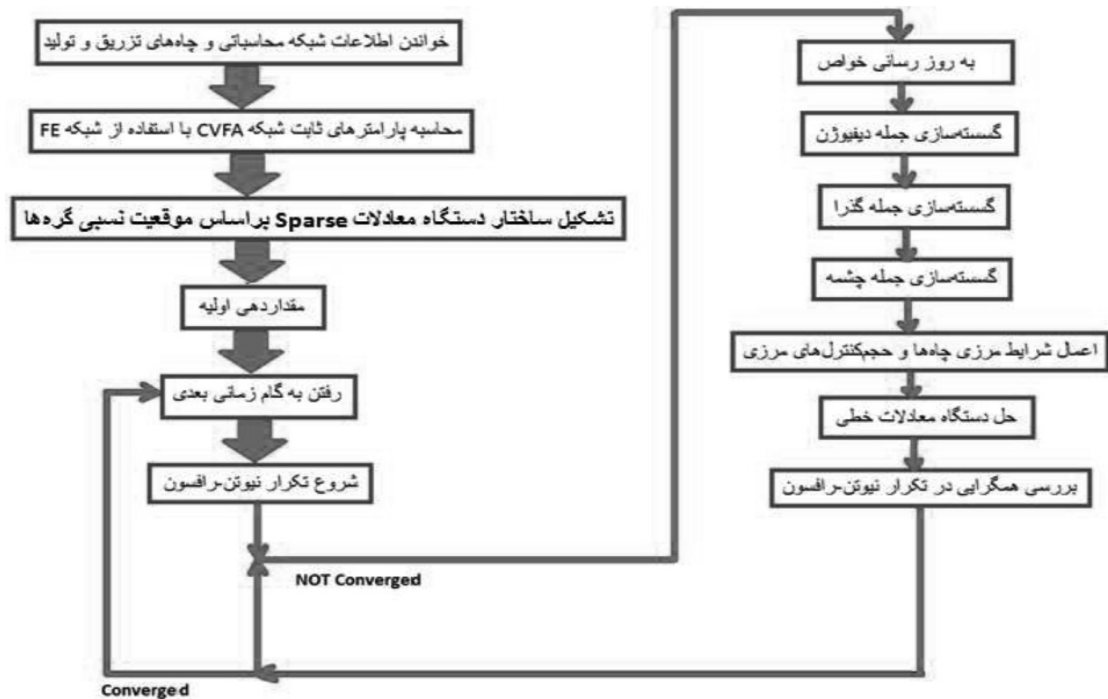
شکل ۸ شبکه‌بندی ارایه‌شده با مثلث‌بندی در روش گرین-سیمپسون.

$$\begin{aligned} Error &= |S_a - S_d| \\ |S_a(x) - S_d(x')| &\leq \|x - x'\| \end{aligned} \quad (5)$$

در این عبارت، توابع اندازه المان کاربردی و مطلوب به ترتیب موقعیت هندسی نقطه در فضای محاسباتی و عملگر norm هستند. روشی که در این مقاله برای حل این معادلات استفاده شده شامل اعمال یک حد برش بر تابع معیار اندازه المان برای یافتن مناطق حساس و نسبت دادن کوچک‌ترین مقدار اندازه المان به این مناطق است. سپس یک مسئله بهینه‌سازی با محدودیت هندسی مذکور حل می‌شود که در آن تابع اندازه المان مطلوب تابع هدف در نظر گرفته شده است. مقادیر جدید این تابع در هر نقطه با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$S_e^{new} = S_e^{old} + \alpha(S_e^{old} - S_d) \quad (6)$$

در این عبارت، ضریب هم‌گرایی یک عدد کوچک مثبت است. پس از محاسبه مقدار آن، با توجه به محدودیت هندسی بررسی می‌شود و اگر محدودیت هندسی را نقض نکند، به‌عنوان مقدار جدید تابع اندازه المان در نظر گرفته می‌شود و گرنه بدون تغییر باقی می‌ماند. این فرآیند تا کمینه شدن مقدار خطا ادامه می‌یابد. در این مطالعه، پس از تعیین تابع اندازه المان، از روش‌گرین-سیمپسون برای تولید شبکه استفاده شده است. شکل ۸ نتایج مربوط به شبکه‌بندی تابع اندازه المان بحث‌شده را نشان می‌دهد که از آن در حل معادلات جریان استفاده شده است. با حل این معادله ماتریس



شکل ۹ الگوریتم کلی برنامه محاسباتی به روش CVFA براساس تکرار نیوتن-رافسون.

است. در بررسی مقدار اشباع‌شوندگی رابطه زیر باید برقرار باشد:

$$s_w + s_o = 0 \quad (13)$$

علاوه بر این، فشار موینگی عبارت است از:

$$P_{cgo} = p_g - p_o \quad (14)$$

در نهایت دبی جرمی چاه با استفاده از معادله پیکمن به این صورت بیان می‌شود:

$$q_o = \sum \sum \frac{\gamma \pi \Delta z_{k,m}}{\mathfrak{F}(r_{e,k,m}/r_{c,k}) + s_{k,m}} \frac{kk_{ro} \rho_{os}}{\mu_o B_o} [p_{bh,k} - p_o - \rho_o g(D_{w,k} - D)] \delta_{k,m} \quad (15)$$

$$q_w = \sum \sum \frac{\gamma \pi \Delta z_{k,m}}{\mathfrak{F}(r_{e,k,m}/r_{c,k}) + s_{k,m}} \frac{kk_{rw} \rho_{ws}}{\mu_w B_w} [p_{bh,k} - p_w - \rho_w g(D_{w,k} - D)] \delta_{k,m}$$

$\delta_{k,m} = \delta(x - X_{k,m})$ تابع دلتای دیراک در نقطه $X_{k,m}$

تعداد کل چاه‌ها و $M_{w,k}$ ، تعداد کل نقاط پرفورات^۱ شده در چاه؛ $\delta_{k,m}$ ، $\Delta z_{k,m}$ ، $X_{k,m}$ ، به ترتیب فاکتور پوسته، طول هر بخش و مکان مرکزی ناحیه پرفورات‌شده در چاه k ؛ $r_{c,k}$ ، $r_{e,k,m}$ شعاع چاه و شعاع تخلیه چاه k ؛ $P_{bh,k}$ فشار ته‌چاهی چاه k است. مدل با ارایه شرایط مرزی و اولیه حل می‌شود. در شرایط زیراشباع $p = p_o$ ، s_w ، P_b مجهولات مسئله و در شرایط مرزی عبارت‌اند از:

M ، تعداد توابع اینترپولاسیون مرتبط با حجم V است. ممکن است توابع تقریب زیادی به‌عنوان تابع اینترپولاسیون به کار روند که در این پژوهش از تابع اسپیلاین استفاده شده است.

معادلات دوفازی آب-نفت در سیستم نفت سیاه

در مدل نفت سیاه فرض می‌شود انتقال جرمی بین فاز آب و دیگر فازها رخ نمی‌دهد و در سیستم هیدروکربنی تنها یک جزء حضور دارد. معادلات پایشگر جرم در مدل نفت سیاه عبارت‌اند از:

$$-\nabla \cdot \left(\frac{\rho_{ws}}{B_w} u_w \right) + q_w = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{\rho_{ws}}{B_w} s_w \right) \quad (9)$$

فاز نفت:

$$-\nabla \cdot \left(\frac{\rho_{os}}{B_o} u_o \right) + q_o = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{\rho_{os}}{B_o} s_o \right) \quad (10)$$

سرعت حجمی نیز برای فاز a با رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$u_\alpha = -\frac{KK_{r\alpha}}{\mu_\alpha} \nabla \phi_\alpha, \quad \alpha = w, o, g \quad (11)$$

که در آن پتانسیل ϕ_α در فاز به این صورت تعریف می‌شود:

$$\phi_\alpha = P_\alpha - \rho_\alpha g D, \quad \alpha = w, o, g \quad (12)$$

P_α ، دانسیته فاز α ؛ g ، ثابت گرانش و D ، تابع عمق

1. Perforate

از نظر زمان اجرای برنامه و صحت پاسخها بررسی شود. چاه تزریق آب با دبی ثابت و چاه تولیدی با افت فشار ثابت شروع به عملیات کردند؛ به این ترتیب با انتقال جریان از چاه تزریقی به چاه تولیدی، فاکتور بازیابی نفت محاسبه و برای حالاتهای مختلف مقایسه شد. برای مقایسه و ارزیابی شبکه بندی تهیه شده برای حل معادلات، از میدانی با عبورپذیری مشخص استفاده شد و ضمن استفاده از روش قبلی، برای تولید شبکه و همچنین روش افزایش مقیاس برای تخصیص میدان عبورپذیری ریزسلول به درشت سلول، نتایج شبکه ساختار نیافته تهیه شده با مدل ریزسلولو شبکه یک نواخت، که تعداد سلول هایش برابر با شبکه ساختار نیافته بود، مقایسه شدند. در شکل ۱۰ فاکتورهای بازیابی نفت شبکه ریزسلول ۲۶۲۱۴۴ سلول، شبکه ساختار نیافته تولیدی ۱۵۱۵۶ و شبکه یک نواخت ۱۵۶۰۷ مقایسه شده اند. با توجه به کاهش ۹۴ درصدی اندازه شبکه که به ۳ درصد خطا در پیش بینی زمان Breakthrough منجر می شود، زمان CPU در اجرای مدل ساختار نیافته و درشت نمایی شده به ۰/۰۰۱ آن در مدل ریزسلول می رسد. از سوی دیگر فشار ته چاهی و فشار هر یک از سلول ها نیز در مدل ریزسلول و مدل تهیه شده مقایسه شد که تطابق بسیار خوبی با هم دارند.

$$\begin{aligned} p(x, 0) &= p'(x) \\ p_b(x, 0) &= p_b'(x) \\ s_w(x, 0) &= s_w'(x) \end{aligned} \quad (16)$$

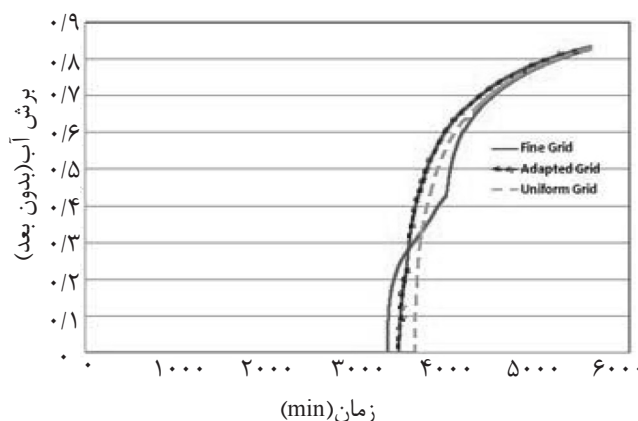
از روش ضمنی کامل برای حل معادلات غیرخطی استفاده می شود و این روش در حل معادلات به روش CVFA به کار می رود. برای مدل سازی، مشخصه های هندسی و زمین شناسی مخزن به شکلی صحیح از شبکه هیبریدی گرفته می شوند. چون روش CVFA مستقیماً معادله را روی گریدهایی به شکل دلخواه حل می کند، از این روش در شبیه سازی نفت سیاه و مدل سازی چاه استفاده می شود. معادلات با استفاده از روش نیوتن-رافسون خطی و سپس حل می شوند. در نهایت فرم انتگرالی معادلات حاکم در هر حجم کنترل برای برقراری پایستاری جرم حل می شود.

الگوریتم محاسباتی کلی

برنامه نوشته شده بر مبنای الگوریتم ارائه شده در شکل ۹ شروع می شود و در گام های زمانی پیش روی می کند.

بحث و نتایج

در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی جریان دوفازی آب و نفت با استفاده از روش شبکه بندی ارائه شده آورده شده اند تا پس از بررسی و صحت سنجی کد تهیه شده، کارایی شبکه حاصل



شکل ۱۰ مقایسه فاکتور بازیابی نفت برای شبکه ریزسلول، شبکه ساختار نیافته تولیدی و شبکه یک نواخت.

نتیجه‌گیری

۴- با توجه به کاهش ۹۴ درصدی اندازه شبکه نسبت به مدل ریزسلول، زمان محاسبات در شبکه تهیه‌شده حدود یک‌بیستم مدل گفته‌شده است.

علائم و نشانه‌ها

$K_{m \times n}$: تابع گسسته ورودی

W : کرنل یک‌بعدی

H : تبدیل هیلبرت کرنل موجک

G_{2a}, G_{2b} : توابع پایه

$\Delta_{te,x}$: زمان پرواز

S_a : تابع اندازه المان کاربردی

S_d : تابع اندازه المان دلخواه

P : میدان فشار

U : سرعت

S_a : اشباع

μ : ویسکوزیته

B : فاکتور حجمی تشکیل

K_r : عبورپذیری نسبی

$W_{lk,m}$: اندیس چاه

در این مقاله یک روش جدید برای تولید نقشه اندازه المان توسعه یافت که در آن اندازه بلوک‌ها در شبکه بی‌سازمان کنترل می‌شود. اثر توزیع عبورپذیری و مکان چاه‌ها در مخزن و هم‌چنین مسیرهای کلیدی جریان با هم ترکیب شدند تا ساختاری دقیق از یک شبکه بی‌سازمان تولید شود. نتایج این کار عبارت‌اند از:

۱- مشخصه‌هایی مختلف در تولید تابع اندازه المان، بدون محدودیت تعداد، وجود دارند که می‌توانند با توابع وزنی مختلفاً هم ترکیب شوند؛

۲- برای نخستین بار، سه پارامتر اصلی شامل مسیرهای کلیدی جریان، میدان عبورپذیری و مکان چاه‌ها برای تولید تابع اندازه المان به کار رفتند؛

۳- صحت این روش با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک دویعدی در یک مخزن ناهمگن به دست آمد. نتایج نشان دادند که برای پیش‌بینی زمان آبی شدن چاه‌ها، شبکه دویعدی درشت‌مقیاس موجود تطابق خوبی با نتایج شبکه ریزسلول دارد؛

مراجع

- [1]. Durlofsky L. J., Efendiev Y. and Ginting V., "An Adaptive local-global multi-scale finite volume element method for two-phase flow simulations," *Adv. Water Resour.*, Vol. 30, No.3, pp. 576-588, 2007.
- [2]. Durlofsky L. J., Behrens R. A., Jonesand R. C. and Bernath A., "Scale up of heterogeneous three dimensional reservoir descriptions," *SPE J.*, Vol. 1, No. 3, pp. 313-326, 1996.
- [3]. Durlofsky L. J., Jones R. C. and Milliken W. J., "A Non-uniform coarsening approach for the scale up of displacement processes in heterogeneous media," *Adv. Water Res.*, Vol. 20, No. 5,6, pp. 335-347, 1997.
- [4]. Durlofsky L. J., "Numerical calculation of equivalent grid block permeability tensors for heterogeneous porous media," *Water Resour. Res.*, Vol. 27, No. 5, pp. 699-708, 1991.
- [5]. Edwards M. G., "Unstructured, control-volume distributed, full-tensor finite volume schemes with flow based grids," *Comput. Geosci.*, Vol. 6, No. 1, pp. 433-452, 2002.
- [6]. Verma S. K. and Aziz K., "A Control volume scheme for flexible grids in reservoir simulation," SPE 37999, SPE Reservoir Simulation Symposium, Dallas, Texas, June 8-11, 1997.
- [7]. Portella R. C. M. and Hewett T. A., "Upscaling, gridding and simulation using stream tubes," *SPE J.*, Vol. 5, No. 1, pp. 315-323, 2000.

- [8]. Bhambri P. and Mohanty K. K., "Two and three hydrocarbon phase streamline-based compositional simulation of gas injections," J. PET. SCI. ENG., Vol. 62, No. 1, pp.16-27,2008.
- [9]. Hesami A. and Dabir B., "Flexible unstructured flow-based gridding for reservoir coarse scale modeling," Pet. Sci. Technol., Vol. 31, No. 10, pp. 1018-1026, 2013.
- [10]. He C. and Durlofsky L. J., "Structured flow-based gridding and upscaling for modeling subsurface flow," Adv. Water Resour., Vol. 29, No. 12, pp. 1876-1892, 2006.
- [11]. Castellini A., Edwards M. G. and Durlofsky L. J., "Flow based modules for grid generation in two and three dimensions," 7th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, Baveno, Italy, Sept. 5-8,2000.
- [12]. Luo W. J., Wang J. I., Wang X. D. and Zhou Y. F., "A streamline approach for identification of the flowing and stagnant zones for five-spot well patterns in low permeability reservoirs," J. Hydrodynamics, Vol. 25, No. 1, pp. 710-717, 2013.
- [13]. Hesami A. and Dabir B., "Flexible unstructured gridding for 2D reservoir coarse scale modeling using fine scale permeability filtering," Transp. Porous Med. Vol. 89, No. 1, pp.15-33,2011.
- [14]. Pollock D. W. "Semi analytical computation of path lines for finite difference models," GroundWater, Vol. 26, No. 6, pp. 743-750, 1988.
- [15]. Wen H., Durlofsky J. and Edwards G., "Upscaling of channel systems in two dimensions using flow-based grids," Transp. Porous. Med., Vol. 51, No. 9, pp. 343-366, 2003.
- [16]. Li B., Chen Z. and Huan G., "Control volume function approximation methods and their applications to modeling porous media flow II: the black oil model," Adv. Water Resour., Vol. 27, No. 2, pp. 99-120, 2004.

Archive of SID