

شبیه‌سازی یک بعدی و یک فازی جریان نفت در یک مخزن افقی با استفاده از نرم افزار متلب

ایمان جعفری، دکتری مهندسی نفت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندر جاسک

چکیده

تئوری روش خطوط جریان بر مبنای اصل ساده فیزیکی حرکت سیال از ناحیه پر فشار به ناحیه کم فشار می‌باشد که همان حرکت طبیعی سیال در امتداد خطوط جریان در نواحی مختلف از جمله نواحی متخلخل است. تأثیرات ترم نفوذپذیری در ناحیه متخلخل و شرایطی که چاه‌های تولید و یا تزریق اعمال می‌کند، مسیر خطوط جریان را در حالت سه بعدی مشخص می‌نماید، در حالی که فیزیک جابجایی توسط حل معادله یک بعدی در امتداد خط جریان اعمال می‌شود. در این مطالعه، حل معادله یک بعدی جریان در حالت تک فاز در قالب سه فرمولاسیون پیوسته، گسسته‌سازی و کامپیوتری با استفاده از کدنویسی در متلب به مدل‌سازی مسئله پرداخته شد و با توجه به برخی از مشکلات بوجود آمده در حل مساله با استفاده از نرم افزار متلب که از لحاظ فیزیک مسائل مهندسی نفت قابل قبول نبود راه‌حلهایی منطقی با در نظر گرفتن برخی فرضیات برای حل آن به کار گرفته شد و صحت اطلاعات وارد شده با توجه به خروجی نمودارها مورد تایید قرار گرفت.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۸/۰۳/۲۰

تاریخ ارسال به داور: ۹۸/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش داور: ۹۸/۰۵/۱۹

واژگان کلیدی:

جریان سیال، نفت، تک فاز، متلب، شبیه سازی

مقدمه

سال‌های ۱۹۸۰ میادی باز می‌گردد. پژوهشگرانی مانند نوریشاد و همکاران برای اولین بار در سال ۱۹۸۲ این روش را برای یافتن توزیع فشار در طول یک شکاف در شبکه با استفاده از روش امان محدود به کار بردند [۳]. اما توسعه این روش در مهندسی نفت توسط کریمی فرد و فیروزآبادی در سال ۲۰۰۱ میلادی صورت پذیرفت. آنها از روش امان محدود برای جلوگیری از بروز مشکلات ناشی از شکاف‌های با حجم کم در مقایسه با ماتریکس کمک گرفتند [۴]. سپس عزیز و همکاران در سال ۲۰۰۳ از روش تفاضل محدود ارتقا یافته برای توسعه بیشتر روش شبکه شکاف گسسته استفاده نموده و آن را تفاضل محدود در حجم کنترل نامیدند [۵]. هرچند این روش چند سال قبل و در سال ۱۹۹۱ میلادی توسط پروس در زمینه زمین‌گرایی به کار برده شده بود و با نام روش تفاضل محدود پیوسته شناخته می‌شد [۶].

بررسی و پیش‌بینی عملکرد مخازن نفتی یکی از مهم‌ترین فعالیت‌هایی است که در حوزه‌ی بهینه‌سازی فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت انجام می‌پذیرد. یکی از اصلی‌ترین ابزارهای این مهم شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب، شرایط مخزن و جریان سیال در زمان‌های مختلف در آن است. برای شبیه‌سازی مخازن نفتی مدل‌های فیزیکی مختلف و روش‌های عددی گوناگونی در نرم‌افزار متلب به کار گرفته شده‌اند. مدل نفت سیاه یکی از این مدل‌های فیزیکی است که جریان را مرکب از سه جزء نفت، گاز و آب که در فازهای مایع، بخار و آبی قرار دارند، در نظر می‌گیرد. در این پژوهش با استفاده از مدل نفت سیاه و با وجود تک فاز

وجود ناهمگنی مسئله‌ای غیر قابل اجتناب در شبیه‌سازی مخازن هیدروکربوری است. این ناهمگنی و تفاوت در خواص محیط متخلخل، می‌تواند دلایل متعددی داشته باشد که یکی از مهمترین آنها، وجود شبکه شکاف در سنگ است. مخازن شکافدار از پیچیده‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی در علم مهندسی نفت و در عین حال یکی از عمده‌ترین منابع تولید هیدروکربن در سراسر جهان و بالاخص کشورمان به حساب می‌آیند. لذا مشخصه‌سازی و مدل‌سازی آنها همواره محل چالش مهندسان نفت بوده است. وجود انبوهی از شبکه شکاف‌ها در این گونه از مخازن، نقش بسزایی در هدایت سیالات به سمت چاه و در پاره‌ای موارد، ممانعت در امر تولید ایفاء می‌نماید. شبیه‌سازی عددی این مخازن دشوارتر از مخازن عادی است. این پیچیدگی هم از جهت توصیف مخزن و هم به خاطر دینامیک حاکم بر آنهاست [۱].

به دلایل زمین‌شناختی، بیشتر مخازن شکافدار طبیعی دارای تراوایی بسیار اندکی در توده سنگ است و شکاف‌ها نقش اصلی در هدایت سیال را بر عهده دارند. به طور معمول هیدروکربن‌ها در محیط متخلخل سنگ انباشته و از طریق شکاف‌های تراوا به چاه‌های تولیدی منتقل می‌شوند [۲]. به طور کلی در این روش سعی شده است که شبکه شکاف به صورت ناحیه‌ای با تراوایی بسیار بالا شبیه‌سازی شود. این روش به تخمین دقیق‌تر ذخایر و نمودار پیش‌بینی تولید و در نتیجه بهینه‌سازی میزان باز یافت منجر خواهد شد.

مطالعات بر روی شبیه‌سازی مخازن و تمرکز بر شبکه شکاف به اوایل

با جای‌گذاری این پارامترها در معادله اساسی پیوستگی به معادله دیفرانسیل جزئی زیر برای جریان تک فاز یک بعدی در محیط متخلخل خواهیم رسید:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\mu B} \frac{\partial p}{\partial x} \right) - q' = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right)$$

برای ادامه کار می‌بایست سمت راست معادله فوق را باز کرد که خواهیم داشت:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right) = \frac{1}{B} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{B} \right)$$

با استفاده از مفهوم تراکم‌پذیری در دمای ثابت و وابستگی فاکتور حجمی سازند به فشار به طریق زیر:

$$c_r = \frac{1}{\phi} \left(\frac{d\phi}{dp} \right)_T$$

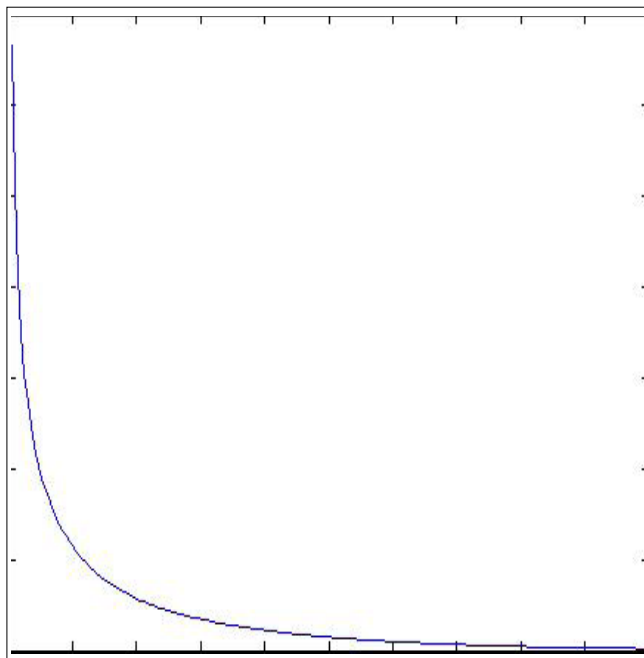
$$\rho = \frac{\text{const}}{B} \rightarrow B = f(P)$$

می‌توان عبارت سمت راست را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right) = \frac{1}{B} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{B} \right) = \frac{1}{B} \frac{d\phi}{dp} \frac{\partial p}{\partial t} + \phi \frac{d}{dp} \left(\frac{1}{B} \right) \frac{\partial p}{\partial t}$$

عبارت فوق را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right) = \phi \left[\frac{c_r}{B} + \frac{d}{dp} \left(\frac{1}{B} \right) \right] \frac{\partial p}{\partial t}$$



شکل ۲ | تولید روزانه نفت از چاه وسط سلول‌های ۷ و ۸ در شعاع ۱۴۰ ft پس از ۱۰۰ روز

نفت در شرایط مخزن جریان سیال مورد بررسی قرار می‌گیرد و برای گسسته‌سازی معادلات در مکان از یک شبکه سازمان یافته یک بعدی و روش تفاضل محدود استفاده می‌شود.

۱- روش کار

در این مطالعه در زمینه تولید از مخزن در حالت یک بعدی که حاوی سیال نفتی که به دلیل افت فشار به زیر نقطه حباب به صورت چند فاز در آمده است ولی به دلیل اینکه فاز گازی متحرک نمی‌باشد لذا جریان سیال به صورت تک فاز می‌باشد مورد بررسی قرار گرفته شده است، شبیه‌سازی یک بعدی و تک فاز مخزن در قالب سه فرمولاسیون پیوسته، گسسته و کامپیوتری با استفاده از نرم افزار متلب انجام شده است.

۲- فرمولاسیون پیوسته

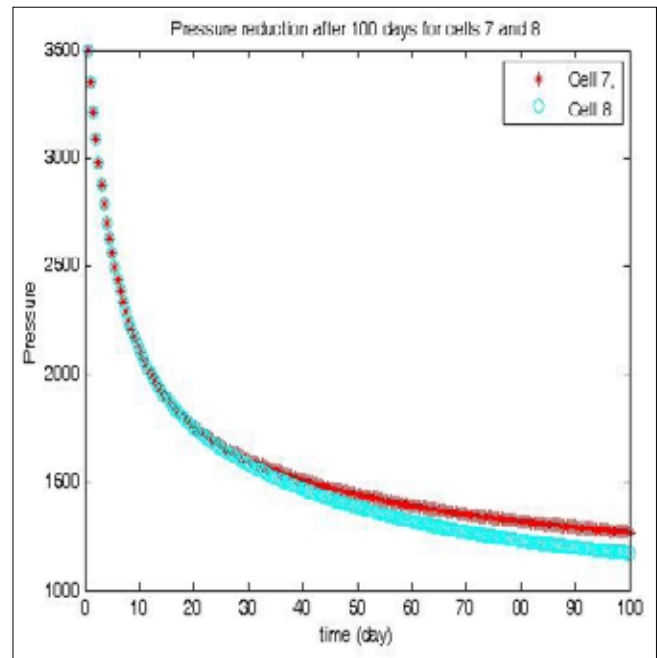
همانطور که می‌دانیم شبیه‌سازی یک بعدی مخزن تک فاز که به همان معادله پیوستگی معروف است برای حالت تک فاز به صورت زیر بیان می‌شود

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = \frac{\partial(\rho \phi)}{\partial x}$$

در ادامه با تعریف کردن سرعت و چگالی سیال به صورت زیر:

$$u = \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\rho = \frac{\text{const}}{B}$$



شکل ۱ | افت فشار سلول‌های ۷ و ۸ درگیر با تولید از چاه در شعاع ۱۴۰ ft

پس از استخراج و به دست آوردن معادلات، لازم است به صورت مناسب گسسته شود تا بتوان برای فرمولاسیون کامپیوتری از آن استفاده نمود.

۳- فرمولاسیون گسسته

در این مرحله می‌بایست معادله دیفرانسیل جزئی به دست آمده را گسسته سازی کرد. در ابتدا سمت چپ را گسسته سازی می‌کنیم. با توجه به توضیحات بیان شده مبتنی بر گسسته سازی عبارت سمت چپ معادله پیوستگی آن را در راستای جهت افقی (x) با روش گسسته سازی پسر و به صورت زیر گسسته نمود:

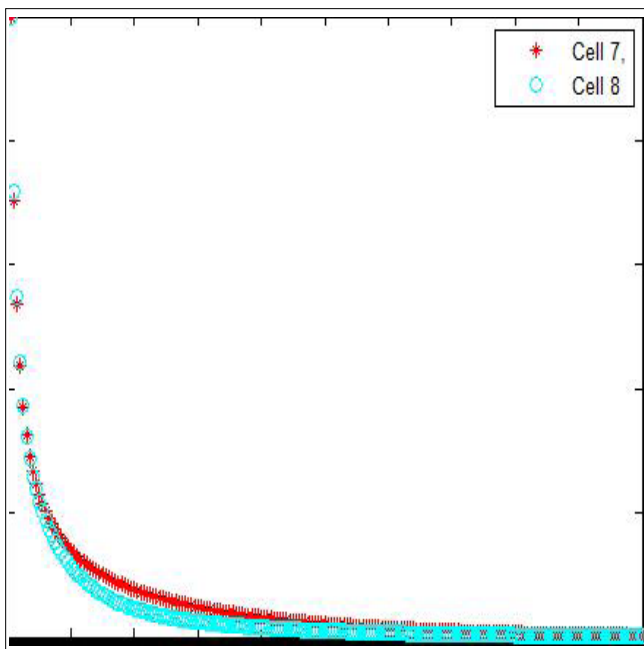
$$\left(\frac{\partial \left(\frac{k}{\mu B} \frac{\partial p}{\partial x} \right)}{\partial x} \right)_i = Tx_{i+\frac{1}{2}}(P_{i+1} - P_i) - Tx_{i-\frac{1}{2}}(P_i - P_{i-1})$$

به طوری که:

$$Tx_{i+\frac{1}{2}} = \frac{2}{(\Delta x_{i+1} + \Delta x_i)} \Delta x_i \left(\frac{k}{\mu B} \right)_{i+\frac{1}{2}} \quad \text{Transmissibility in positive direction}$$

$$Tx_{i-\frac{1}{2}} = \frac{2}{(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} \Delta x_i \left(\frac{k}{\mu B} \right)_{i-\frac{1}{2}} \quad \text{Negative direction}$$

مشکل در بالا تعیین عبارت‌های $\left(\frac{k}{\mu B} \right)_{i-1/2}$ و $\left(\frac{k}{\mu B} \right)_{i+1/2}$ می‌باشد که برای حل آن از تکنیک Up winding به صورت زیر استفاده می‌نماییم:



شکل ۴ | افت فشار سلول‌های ۷ و ۸ درگیر با تولید از چاه در شعاع ۱۴۰ ft

بنابراین می‌توان با ترکیب سمت راست و چپ معادله پیوستگی به صورت زیر رسید:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\mu B} \frac{\partial p}{\partial x} \right) - q' = \phi \left[\frac{c_r}{B} + \frac{d \left(\frac{1}{B} \right)}{dp} \right] \frac{\partial p}{\partial t} \quad (*)$$

از طرفی دیگر با توجه به تعریف پارامتر تراکم‌پذیری سیال، به صورت زیر:

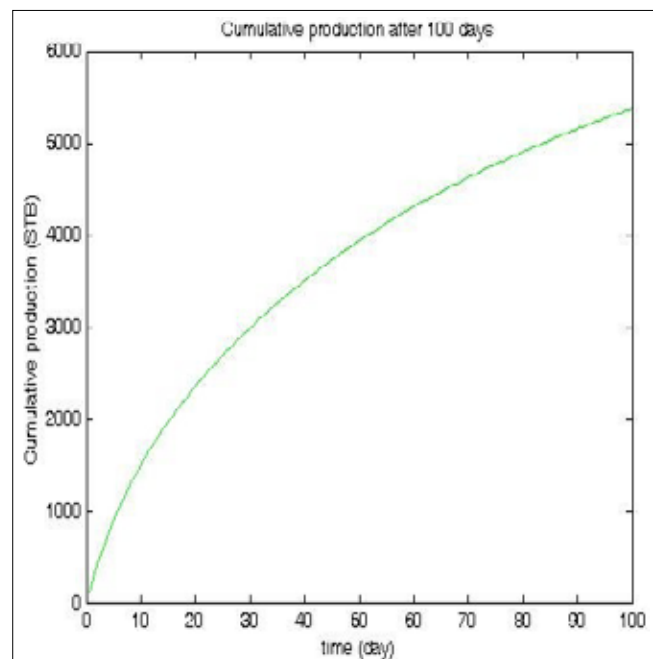
$$c_f = B \frac{d \left(\frac{1}{B} \right)}{dp}$$

می‌توان معادله (*) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{\mu B} \frac{\partial p}{\partial x} \right) - q' = \frac{\phi}{B} [c_f + c_r] \frac{\partial p}{\partial t}$$

جدول ۱ | مدل مورد بررسی در این مطالعه

Number of grid blocks	10
Cross sectional area, ft ²	500
Porosity	0.20
Permeability, md	100
Well Pwf, psi	1000
System compressibility, psi	20*10 ⁻⁶
Fluid viscosity, cp	0.5
Initial pressure, psi	3500
Production well position	Grid No 7 or 8 from left



شکل ۳ | تولید تجمعی نفت از چاه وسط سلول‌های ۷ و ۸ در شعاع ۱۴۰ ft پس از ۱۰۰ روز

۴- فرمولاسیون کامپیوتری

در ادامه فرمول گسسته سازی پیوستگی را برای به کارگیری در نرم افزار متلب به شرح زیر آماده شد و پارامترهای معادله گسسته سازی شده به صورت زیر تعریف شده است.

$$a_i = Tx_{i+\frac{1}{2}}$$

$$c_i = Tx_{i-\frac{1}{2}}$$

$$b_i = -\left(Tx_{i+\frac{1}{2}} + Tx_{i-\frac{1}{2}}\right) - Cp_i$$

$$d_i = -Cp_i * p_i^t + q_i$$

$$a_i p_{i+1}^{t+\Delta t} + b_i p_i^{t+\Delta t} + c_i p_{i-1}^{t+\Delta t} = d_i$$

پارامترهای تغییر یافته در شبیه سازی

مقدار تغییر یافته	پارامتر تغییر یافته
۱۰ C.P	ویسکوزیته نفت
۲۰۰۰ × ۱۰ ^{-۶} Psi ⁻¹	تراکم پذیری سیال
۰/۱ مقدار قبلی آنها	نفوذ پذیری سلولها

$$\left(\frac{k}{\mu B}\right)_{i+1/2} = \left(\frac{k}{\mu B}\right)_{i+1} \text{ if } p(i+1) > p(i)$$

$$\left(\frac{k}{\mu B}\right)_{i+1/2} = \left(\frac{k}{\mu B}\right)_i \text{ if } p(i) > p(i+1)$$

$$\left(\frac{k}{\mu B}\right)_{i-1/2} = \left(\frac{k}{\mu B}\right)_i \text{ if } p(i) > p(i-1)$$

$$\left(\frac{k}{\mu B}\right)_{i-1/2} = \left(\frac{k}{\mu B}\right)_{i-1} \text{ if } p(i-1) > p(i)$$

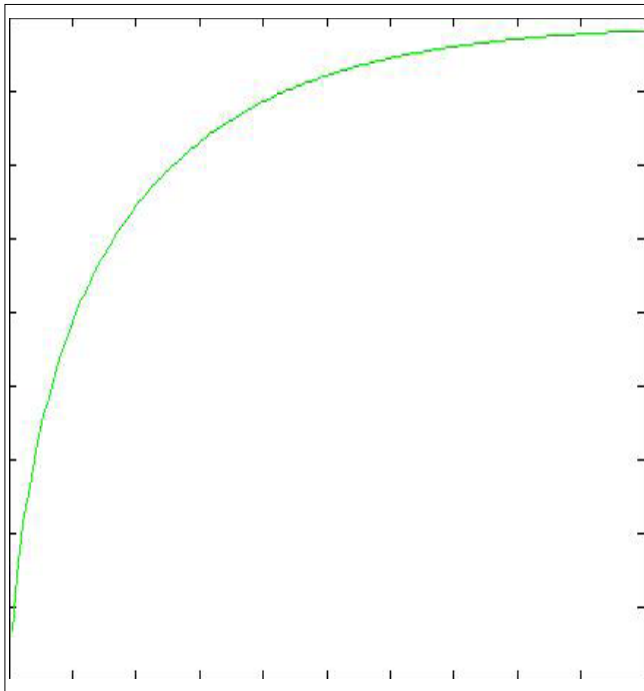
همانطور که مشاهده شد سمت چپ معادله پیوستگی گسسته سازی انجام شد، در ادامه سمت راست معادله باید با استفاده از روش پسر و به صورت زیر گسسته سازی شد:

$$\phi \left[\frac{c_r}{B} + \frac{d}{dp} \right] \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_i = \frac{\phi}{\Delta t} \left[\frac{c_r}{B} + \frac{d}{dp} \right] (p_i^{t+\Delta t} - p_i^t)$$

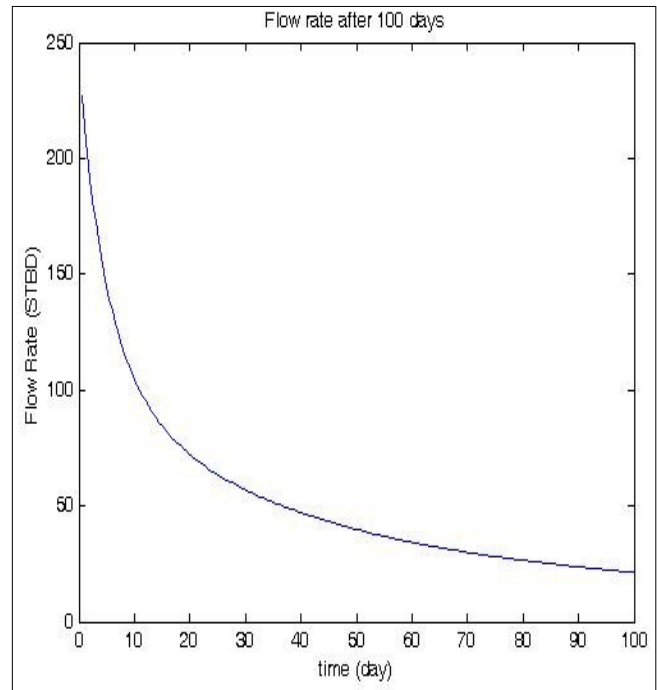
$$Cp_i = \frac{\phi}{\Delta t} \left[\frac{c_r}{B} + \frac{d}{dp} \right]$$

در انتها می توان به فرم گسسته معادله پیوستگی به صورت زیر رسید:

$$Tx_{i+\frac{1}{2}}(p_{i+1}^{t+\Delta t} - p_i^{t+\Delta t}) - Tx_{i-\frac{1}{2}}(p_i^{t+\Delta t} - p_{i-1}^{t+\Delta t}) = Cp_i(p_i^{t+\Delta t} - p_i^t)$$



۶ | تولید تجمعی نفت از چاه وسط سلولهای ۷ و ۸ در شعاع ۱۴۰ ft پس از ۱۰۰ روز



۵ | تولید روزانه نفت از چاه وسط سلولهای ۷ و ۸ در شعاع ۱۴۰ ft پس از ۱۰۰ روز

۵- مدل مورد مطالعه

$dx=10$ ، بین دو سلول ۷ و ۸ و روی مرز آنها قرار می‌گیرد در نتیجه می‌بایست هر دو سلول ۷ و ۸ در معادلات با شرط چاه درگیر شوند که حل آن مشکل بود، برای حل آن تولید از چاه را به نسبت تحرک سیال در هر سلول ۷ و ۸ تقسیم گردید. بنابراین در هر دو سلول چاه تولیدی وجود دارد و تولید کلی از چاه وسط سلول‌های ۷ و ۸ برابر است با جمع این تولید این دو سلول ضربدر ضریب تحرک آنها که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q_t = q_7 * \left(\frac{\lambda o_7}{\lambda o_7 + \lambda o_8} \right) + q_8 * \left(\frac{\lambda o_8}{\lambda o_7 + \lambda o_8} \right)$$

۸- بحث‌ها و نتایج

در ادامه سه نمودار تولید روزانه، تولید تجمعی پس از ۱۰۰ روز و افت فشار هر یک از سلول‌های شبیه سازی در طول دوره ۱۰۰ روزه تولید آورده شده است. با اعمال و درگیر نمودن هر دو سلول ۷ و ۸ با شرط مرزی چاه نمودار افت فشار آنها در اینجا آورده شده است که روند کاهشی منطقی را تا رسیدن به فشار ته چاهی به همراه دارد.

نتیجه گیری

با توجه به مطالعه انجام شده در هنگامی که چاه در مرز بین دو سلول قرار دارد با در نظر گرفتن فیزیک رفتار سیال در محیط متخلخل به طور صحیح هر دو سلول تولیدی با شرط مرزی مناسب شبیه سازی گردید و مشاهده کردیم با افزایش میزان ویسکوزیته نفت اثر افت فشار دیرتر به حاشیه مخزن می‌رسد و دبی تولیدی نیز دیرتر به صفر نزدیک می‌شود و با کاهش میزان تراوایی اثر افت فشار دیرتر به حاشیه مخزن می‌رسد و دبی دیرتر به صفر نزدیک می‌شود همچنین با افزایش میزان c اثر افت فشار دیرتر به حاشیه مخزن می‌رسد و دبی دیرتر به صفر نزدیک می‌شود. ■

برای جریان یک بعدی و تک فاز سیال درون محیط متخلخل، با داده‌های ارائه شده در جدول-۱ تا صد روز شبیه سازی انجام شد و نمودار توزیع فشار سلول مربوط به چاه تولیدی بر حسب زمان، دبی تولید نفت و تولید انباشتی بر حسب زمان آن در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت.

۶- نتایج حاصل از نرم افزار متلب

بعد از اعمال پارامترهای فوق و کد نویسی در برنامه متلب، برنامه اجرا گردید و سه نمودار تولید روزانه، تولید تجمعی پس از ۱۰۰ روز و افت فشار هر یک از سلول‌های شبیه سازی در طول دوره ۱۰۰ روزه تولید نشان داده شده است.

۷- محدودیت‌ها و راه حل‌ها

بعد از اعمال پارامترهای فوق و کد نویسی در برنامه متلب، برخی از مشکلات بوجود آمد که از لحاظ فیزیک مسائل مهندسی نفت قابل قبول نبود بنابراین لازم بود راه‌حلی منطقی برای حل آن به کار گرفت، یکی از مشکلات این بود که فشار در مخزن به سرعت و در کمتر از ۲ یا ۳ روز از تولید مخزن می‌افتد، برای حل آن دو روش عمده وجود دارد، در اولین روش، شرط مرزهای خارجی را فشار ثابت قرار دهیم تا به وسیله تأثیر سفره آبی قوی در تثبیت فشار، این افت شدید در فشار مخزن را جبران کند. دومین روش مربوط به تغییر پارامترهای خواص سنگ و سیال مخزن از جمله ویسکوزیته و یا تراکم‌پذیری سیال می‌باشد چرا که می‌توان با تغییر صحیح آن جلوی این افت شدید فشار را گرفت. در این مطالعه روش دوم یعنی همان تغییر خواص سنگ و سیال را لحاظ کردیم که در جدول-۲ پارامترهای تغییر یافته در شبیه سازی بیان شده است. مشکل دوم مربوط به اعمال شرط مرزی چاه است که به دلیل اینکه از لحاظ مکانی با توجه به سلول بندی مشخص شده با

منابع

[1]. Reiss, L.H., "The Reservoir Engineering Aspects of Fractured Reservoirs", Gulf Pub. Co., Houston, 1980.
[2]. Tran, N.H., Characterization and Modeling Of Naturally Fractured Reservoirs, PhD dissertation, The University of New South Wales, School of Petroleum Engineering, Sydney, Australia, July 2004.
[3]. Noorishad J. and Mehran M. An Upstream Finite Element Method for Solution of Transient Transport Equation in Fractured Porous Media. Water Resources Research, 18(3): 588-596, 1982.

[4]. Karimi-Fard, M. and Firazoobadi, A. Numerical Simulation of Water Injection in 2D Fractured Media Using Discrete-Fracture Model, Paper SPE 71615, October 2001.
[5]. Karimi-Fard, M., Durlofsky, L. J., and Aziz, K. An Efficient Discrete Fracture Model Applicable for General Purpose Reservoir Simulators. Paper SPE 79699 February, 2003.
[6]. Pruess, K. TOUGH2: A general numerical simulator for multiphase fluid and heat flow. Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-29400.