

مدل سازی عملکرد تولید چاه نفت با استفاده از مدل چشمه-خط

شهرام قدمی، دانشگاه صنعتی شریف • اسماعیل قاسمی کفودی*، حسن بیگلریان، پژوهشگاه صنعت نفت

چکیده

به منظور پیش‌بینی عملکرد تولید چاه می‌توان از روش‌های تحلیلی، عددی و نیمه‌تحلیلی استفاده کرد. در این مقاله از مدل چشمه-خط که از روش‌های نیمه‌تحلیلی می‌باشد، استفاده شده که با توجه به پیچیدگی معادلات، برای حل‌نیاز به استفاده از روش‌های عددی می‌باشد. بدین منظور در این پژوهش، یک کد عددی توسعه داده شده و نتایج حاصل با پژوهش‌های قبلی مقایسه و اعتبارسنجی شده است. سپس به بررسی اثر شرایط مرزی مختلف بر پروفایل‌های فشار و جریان در داخل چاه، عملکرد کلی آن و بررسی اثر افت فشار اصطکاکی در مسیر چاه، پرداخته شده است. مقایسه تغییرات جریان ورودی به چاه برحسب طول چاه و شرط هدایت نامحدود نشان می‌دهد که پس از ۲۰ روز جریان به حالت شبه‌تعدادی رسیده و پس از آن نیز تغییرات ناچیزی در نتایج مشاهده می‌شود. با افزایش تولید و کاهش قطر، اتلاف‌ها در چاه افزایش می‌یابد و منحنی جریان از حالت متقارن فاصله بیشتری می‌گیرد. افت فشار در داخل چاه دارای اهمیت به‌سزایی است و با مقادیر نادرستی از آن، میزان تولید چاه از مقدار واقعی انحراف خواهد داشت.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۰۲/۱۲

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۶/۱۱

واژگان کلیدی:

مدل چشمه-خط، پروفایل فشار و جریان چاه، عملکرد کلی چاه، شبه‌تعدادی، تقارن در تولید

مقدمه

ارائه نمود. جویشی برای مدل‌سازی عملکرد چاه افقی حالت جریان سه‌بعدی را به دو حالت جریان دو‌بعدی تبدیل نمود. در روش تحلیلی به‌طور کلی ابتدا چاه را به قسمت‌هایی^۱ تقسیم می‌کنند و در هر قسمت با استفاده از فرض‌هایی مانند جریان ثابت یا فشار ثابت به تقریب ضریب چاه می‌پردازند. در روشی که کامکام^۱ و زو^۴ [۴] رایج کردند، ابتدا چاه را به قسمت‌هایی تقسیم کردند و سپس با استفاده از روش‌های تحلیلی ذکر شده، ضریب عملکرد چاه را برای هر قسمت محاسبه کردند که با استفاده از این روش می‌توان اثرات ناشی از افت فشار جریان دو فاز در داخل لوله را نیز تحقیق نمود. به هر حال این روش گرچه از روش‌های تحلیلی دقیق‌تر است، اما دارای این محدودیت است که تنها عملکرد چاه را در حالت پایا یا شبه پایا بررسی می‌کند و نیز در هر مخزن تنها یک چاه می‌تواند وجود داشته باشد. پس برای بررسی عملکرد یک چاه چندشاخه‌ای در داخل یک مخزن نمی‌توان از این روش استفاده نمود.

در روش نیمه‌تحلیلی که توسط گروهی از محققان دانشگاه استنفورد^۲ ارائه شده است (ولف استینر^۳ [۵ و ۶]، واونت^۴ [۷ و ۸])، از مدل خط-چشمه^۵ استفاده می‌شود که چاه به‌صورت یک چشمه عمل می‌کند و سپس با انتگرال‌گیری بر روی مسیر چاه، معادلات حاکم بر چاه به‌دست می‌آید. در این روش برای به‌دست آوردن حل عددی ابتدا چاه به چندین قسمت تقسیم و

برای مدل‌سازی چاه‌ها، مهمترین چالش، به‌دست آوردن ضریب عملکرد چاه^۱ است که رابطه‌ای بین اختلاف فشار بلوک چاه و مخزن و جریان ورودی به چاه می‌باشد. این ضریب بستگی به شکل هندسی مخزن و چاه و همچنین مشخصات فیزیکی مخزن مثل نفوذپذیری^۲، ضریب اصطکاک سیال و ... دارد. روش‌های متفاوتی برای محاسبه ضریب عملکرد چاه وجود دارد که در یک دسته‌بندی می‌توان آنها را در سه دسته‌ی روش‌های کلاسیک، روش‌های تحلیلی و روش‌های نیمه‌تحلیلی جای داد. روش کلاسیک اولین بار توسط پیکمن^۳ [۱] برای چاه‌های افقی ارائه گردید. در این روش با استفاده از ضریب عملکرد تولید چاه، رابطه‌ای بین اختلاف فشار بین بلوک چاه و مخزن و جریان ورودی به چاه به‌دست می‌آید و با استفاده از روش‌های عددی مثل تفاضل محدود^۴، معادلات چاه و مخزن به یکدیگر کوپل می‌گردند.

روش دیگر استفاده از "روش‌های تحلیلی" است که برای بررسی عملکرد چاه هم در حالت پایدار یا شبه‌پایدار به کار می‌روند. در این روش سعی می‌شود تا ضریب تولید کل چاه به‌صورت تحلیلی مورد محاسبه قرار بگیرد و رابطه صریحی^۵ بین افت فشار و تولید به‌دست آید. بنابراین به این گونه مدل‌ها، مدل‌های بسته^۶ نیز گفته می‌شود. اولین مدل از این نوع را جوشی^۷ [۲] ارائه کرد و پس از او اکانیمیدس^۸ [۳] مدلی تحلیلی

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (ghasemies@ripi.ir)

که در آن ϕ تخلخل، μ لزجت دینامیکی سیال، C_t تراکم پذیری کل، k نفوذپذیری ماده متخلخل است.

۱-۱- چشمه نقطه‌ای لحظه‌ای^{۲۰}

تابع گرین لحظه‌ای برای مخزن تخت با طول و عرض بینهایت^{۲۱} در سال ۱۹۷۳ توسط گرینگارتن^{۲۲} و رامی^{۲۳} پیشنهاد شد. این تابع می‌تواند برای حل مسائل جریان مختلفی در مهندسی نفت به کار برده شود. با استفاده از قانون نیومن [۱۰]، تابع گرین لحظه‌ای در دامنه سه بعدی، با ضرب کردن توابع گرین در هر بعد، در یکدیگر به دست می‌آید. به عبارت دیگر ضرب سه جواب یک بعدی، پاسخ مسئله سه بعدی است.

افت فشار در نقطه (x, y, z) در نتیجه تولید ثابت q_0 در نقطه (x_0, y_0, z_0) در یک مخزن مکعبی عبارت است از:

$$\Delta P = P_{ini} - P(x, y, z, t) = \left[\frac{B_0 \mu_0 q_0}{L \alpha} \right] S_x S_y S_z \quad (2)$$

که در این رابطه q_{ini} فشار اولیه نقطه، B_0 ضریب حجمی تشکیل^{۲۴}، L طول چاه و تابع S بستگی به شرایط مرزی مسئله دارد، که با فرض دیواره‌های نفوذناپذیر می‌تواند مطابق روابط (۳ تا ۵) باشد [۱۰].

$$S_x = \frac{1}{a} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi x}{a} \cos \frac{n\pi x_0}{a} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 k_x \tau}{\alpha a^2}\right) \right) \quad (3)$$

$$S_y = \frac{1}{b} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{n\pi y_0}{b} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 k_y \tau}{\alpha b^2}\right) \right) \quad (4)$$

$$S_z = \frac{1}{h} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{l\pi z}{h} \cos \frac{l\pi z_0}{h} \exp\left(-\frac{l^2 \pi^2 k_z \tau}{\alpha h^2}\right) \right) \quad (5)$$

۱-۲- معادله جریان چاه دو بعدی با فرض چشمه خطی

پس از به دست آوردن پاسخ لحظه‌ای چشمه نقطه‌ای تحت شرایط مرزی تعیین شده، برای به دست آوردن معادلات چشمه خطی باید بر روی مسیر چاه و زمان، انتگرال گیری شود. اگر چشمه خطی در نرخ ثابت q_0 تولید کند و شیب خط ثابت باشد، افت فشار در نقطه (x, y, z) و زمان t برای یک چشمه خطی که از نقطه (x_0, y_0, z_0) شروع می‌شود و به نقطه (x_0, y_0, z_0) ختم می‌شود، با فرض یک مخزن همگن مکعبی شکل با دیواره‌های بدون جریان، توابع چشمه از روابط (۳ تا ۵) محاسبه می‌شود که با این توابع می‌توان رابطه (۶) را محاسبه نمود.

سپس با استفاده از تابع‌های گرین^{۱۶} به حل معادله جریان تک فاز پرداخته می‌شود. این روش قابل کاربرد به مخازن نامتناجس ولی همگن است و در آن می‌توان اثرات اصطکاک و جاذبه و انحناهای موجود در مسیر چاه را مدل نمود. از این رو این روش دارای دقت و انعطاف پذیری بسیار بالایی نسبت به سایر روش‌هاست و پیچیده‌ترین حالت‌های چاه را به راحتی مدل می‌کند. همچنین هزینه محاسباتی آن نسبت به روش کلاسیک عددی بسیار کمتر می‌باشد (چن و زو [۹]). این روش نسبت به روش‌های قبلی دارای این مزیت مهم است که در این روش می‌توان عملکرد چاه را در حالت غیر پایا^{۱۷} به دست آورد که برای ارزیابی کردن عملکرد چاه بسیار لازم می‌باشد.

در این مقاله روش نیمه تحلیلی چشمه-چاه مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا تئوری حاکم بیان می‌شود و معادله‌های مربوط به آن در حالت دو بعدی و سه بعدی با توجه به کارهای قبلی [۱۰] شرح داده می‌شود. سپس به بررسی اثر افت فشار در داخل چاه پرداخته و پارامترهای موثر بر آن بیان می‌شود. در ادامه به بررسی شرایط مرزی مختلف چاه که شرط جریان ثابت یا فشار ثابت برای چاه است می‌پردازد و الگوریتم مورد استفاده برای هر حالت با در نظر گرفتن و صرف نظر کردن افت فشار بیان می‌گردد. به طور کلی هدف، مدل سازی چاه‌های افقی و چندشاخه‌ای با استفاده از روش‌های نیمه تحلیلی و تحلیلی است که مدل چاه-چشمه برای حالت دو بعدی در مختصات کروی به حالت سه بعدی تعمیم داده می‌شود.

۱-۱- روش چاه-چشمه^{۱۸} و مدل ریاضی

برای مدل سازی روش چاه-چشمه از معادله پخش که دارای ساختاری مشابه با معادله انتقال حرارت می‌باشد استفاده می‌شود که با معادلات (۱) تا (۳) نشان داده شده است. از این رو می‌توان از روش چشمه-چاه برای حل آنها استفاده نمود. با استفاده از این روش می‌توان معادله جریان را در هر دو حالت گذرا و پایدار با توجه به شرایط مخزن به دست آورد. شرایط مرزی مخزن عبارت است از شرط فشار ثابت، دیواره نفوذناپذیر و ترکیبی از هر دو که قابل کاربرد به بخش گسترده‌ای از مسائل است. ابتدا جواب تحلیلی معادله چشمه و چاه برای حالت دو بعدی مطالعه می‌شود که قابل کاربرد برای پیش بینی عملکرد دامنه گسترده‌ای از چاه‌ها است. معادله پخش^{۱۹} در داخل ماده متخلخل با فرض جریان تک فاز و کمی تراکم پذیر با رابطه (۱) بیان می‌شود [۱۰]:

$$\nabla^2 p = \frac{\phi \mu c_t}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

(۸) به دست می آید:

$$P_{mi} = P_R + \frac{\mu_0 B_0 q_0 t}{abh\alpha} \quad (۸)$$

در ادامه برای محاسبه افت فشار در هر قسمت، باید اثر هر قسمت چاه در نظر گرفته شود و با استفاده از اصل برهم نهی، تمام این اثرها با هم جمع گردد، که معادله (۹) حاصل می شود:

$$P_R - P(x, y, z, t) = q_j F(i, j) \quad (۹)$$

در این معادله $F(i, j)$ اثر چاه واقع در قسمت j بر قسمت i را نشان می دهد که هدف محاسبه فشار آن می باشد. برای تمام قسمت های چاه (N قسمت) می توان دستگاه زیر را تشکیل داد:

$$\begin{aligned} q_1 F(1,1) + q_2 F(1,2) + q_3 F(1,3) + \dots + q_N F(1,N) &= p_{reservoir} - p_1 \\ q_1 F(2,1) + q_2 F(2,2) + q_3 F(2,3) + \dots + q_N F(2,N) &= p_{reservoir} - p_2 \\ &\vdots \\ q_1 F(N,1) + q_2 F(N,2) + q_3 F(N,3) + \dots + q_N F(N,N) &= p_{reservoir} - p_N \end{aligned}$$

که در این رابطه q_j نرخ ثابت تولید در قسمت j و Δp_j افت فشار در قسمت j در اثر تولید در تمام قسمت هاست.

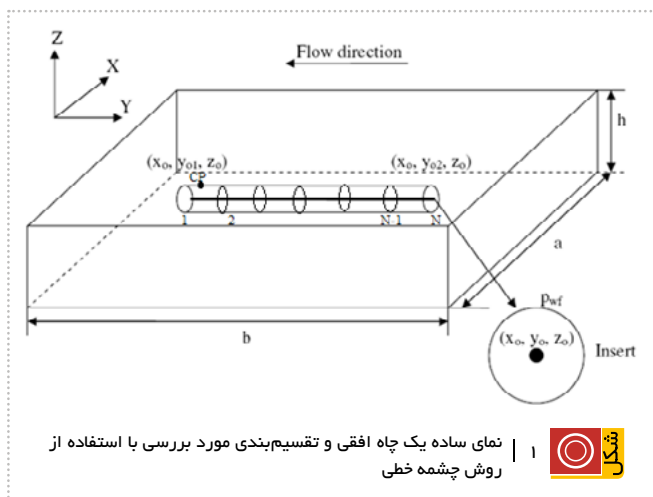
با استفاده از این روش، یک دستگاه معادلات خطی یا غیرخطی (برحسب شرایط مرزی) ایجاد می گردد که با حل آنها عملکرد چاه مشخص می شود. در این مدل فرض شده که در هر المان نرخ جریان ورودی به چاه بر طول لوله ثابت و نیز مقادیر فشار در مرکز هر المان محاسبه می شود.

برای چاه به طور معمول از دو شرط مرزی داخلی زیر استفاده می گردد که هر یک باعث ترکیب مختلفی از روابط بین چاه و مخزن می شود:

■ هدایت نامحدود (چاه بدون افت فشار)

■ هدایت محدود (در نظر گرفتن افت فشار در چاه)

مدل اول زمانی استفاده می شود که تغییرات فشار در داخل چاه کم است و این، مستلزم آن است که جریان در داخل چاه کم و



$$\Delta P \equiv P_{mi} - P(x, y, z, t) = \left[\frac{B_0 \mu_0 q_0 \sqrt{1 + \hat{m}^2}}{L\alpha} \right] \times \quad (۶)$$

$$\int_{y=0}^{y=2r} \int_{x=0}^{x=r} (S_x S_y S_z) dy_0 dL$$

بدیهی است برای به دست آوردن پاسخ شبه پایدار^{۲۵} باید زمان به سمت بی نهایت میل داده شود که جواب در حالت پایدار به دست می آید. با نتایج روابط ارائه شده و داشتن شیب چاه می توان عملکرد چاه های افقی، شیب دار و عمودی را به دست آورد.

۳-۱- معادله جریان چاه سه بعدی با فرض چشمه خطی

اکنون رابطه بین افت فشار و جریان تولیدی برای یک چاه سه بعدی ارائه می شود [۱۰]. نحوه به دست آوردن این رابطه دقیقاً مانند چاه دو بعدی است با این تفاوت که یک بعد دیگر به معادلات اضافه شده است و رابطه تا حدودی پیچیده تر می شود. با فرض چاه به صورت یک چشمه خطی، اگر چشمه خطی در نرخ ثابت، q_0 تولید کند و شیب خط ثابت باشد، معادله (۷) حاصل می شود:

$$\Delta P \equiv P_{mi} - P(x, y, z, t) = \left[\frac{B_0 \mu_0 q_0 \sqrt{1 + \hat{m}^2 + \hat{n}^2}}{abhL\alpha} \right] \times \quad (۷)$$

$$\int_{y=0}^{y=2r} \int_{x=0}^{x=r} (S_x S_y S_z) dy_0 d\tau$$

که با فرض یک مخزن همگن مکعبی شکل با دیواره های بدون جریان، توابع چشمه از روابط (۳ تا ۵) محاسبه می شود. برای به دست آوردن پاسخ شبه پایدار کافی است که زمان به سمت بی نهایت میل داده شود در نتیجه با داشتن شیب چاه، عملکرد حالت پایدار چاه های افقی، شیب دار و عمودی به دست می آید.

۲- بررسی روش حل و شرایط مرزی مختلف

با استفاده از مدل چشمه خطی، می توان عملکرد چاه را بررسی نمود که نمای ساده ای از چاه در شکل (۱) نشان داده شده است. از آنجایی که قطر چاه بسیار کوچک تر از ابعاد مخزن است، فرض چاه به عنوان چشمه خطی منطقی است. با استفاده از پاسخ چشمه خطی، ابتدا شرایط مرزی مشخص می شود. سپس برای در نظر گرفتن افت فشار در دهانه چاه، چاه به N قسمت تقسیم می گردد. اثر افت فشار هر قسمت بر قسمت دیگر با اعمال شرط برهم نهی^{۲۶} به دست می آید.

برای جریان پایدار تحت شرط شبه پایدار، فشار متوسط مخزن با در نظر گرفتن حجم مخزن برابر با $\alpha = \Phi \mu_0 c_i$ و $obh\Phi$ طبق رابطه

نتیجه نیاز به $2N$ معادله است. از معادله (۱۰)، N معادله به دست می‌آید و N معادله دیگر از رابطه مومنتوم بین گره‌های فشار حاصل می‌شود. اثرات ناشی از اصطکاک، شتاب سیال، جریان شعاعی و نیز گرانش باعث اختلاف فشار بین دو گره می‌گردند که در رابطه (۱۱) نشان داده شده است:

$$p_i - p_{i-1} = \Delta p_{frictional} + \Delta p_{accelerational} + \Delta p_{gravity} + \Delta p_{radial} \quad (11)$$

در نتیجه افت فشار بین هر دو گره تابعی از جریان‌های ورودی به چاه است. بدیهی است که روابط بین گره‌های فشار، روابطی غیرخطی است. از این رو باید با استفاده از روش‌های سعی و خطا دستگاه معادلات حاصل و تکنیک‌هایی مثل استفاده از ضریب مادون‌رهایی^{۲۷}، حل گردد.

۴. هدایت محدود- تولید کلی چاه مشخص: در این حالت نیز علاوه بر مقادیر q ، مقادیر فشار در هر المان مجهول است، در نتیجه نیاز به $2N$ معادله است. در این وضعیت مانند حالت ۲، ابتدا سطرهای مجاور از هم تفریق می‌گردند ولی در این حالت، فشارها در گره‌های مجاور با یکدیگر برابر نیستند و باید از معادله (۱۱) استفاده کرد. $1-N$ معادله حاصله از این معادله به اضافه قید

در نتیجه افت فشار قابل صرف‌نظر و در ضمن اثرات گرانش و نیز شتاب سیال در داخل چاه کم باشد، در غیر این صورت باید از مدل دوم استفاده گردد. همچنین برای به دست آوردن جواب باید تولید چاه یا فشار پاشنه مشخص باشد. در ادامه به بررسی هر مدل پرداخته می‌شود:

۱. هدایت نامحدود- فشار پاشنه چاه مشخص: در این حالت با توجه به معادله (۱۰) تمامی مقادیر p_i با هم برابر و در نتیجه مقادیر Δp_i مشخص هستند، و تنها مجهول‌های مسئله q_i ها می‌باشند که تعداد آنها N است و N معادله برای آنها موجود، پس دستگاه معادلات خطی حاصل قابل حل است.

۲. هدایت نامحدود- تولید خروجی از چاه مشخص: در این وضعیت مقادیر فشار مجهول و با هم برابر هستند، در این صورت برای حذف فشارها، سطرهای معادلات از هم کم می‌شوند. به‌طور مثال با کم کردن سطرهای اول و دوم از یکدیگر، رابطه (۱۰) حاصل می‌شود:

$$q_1 [F(1,1) - F(2,1)] + q_2 [F(1,2) - F(2,2)] + \dots + q_N [F(1,N) - F(2,N)] = p_2 - p_1 = 0 \quad (10)$$

به همین ترتیب برای دیگر سطرها این عمل تکرار می‌شود و با این کار $(1-N)$ معادله به دست می‌آید که با اضافه کردن قید تولید کلی چاه دستگاه معادلات بسته می‌شود.

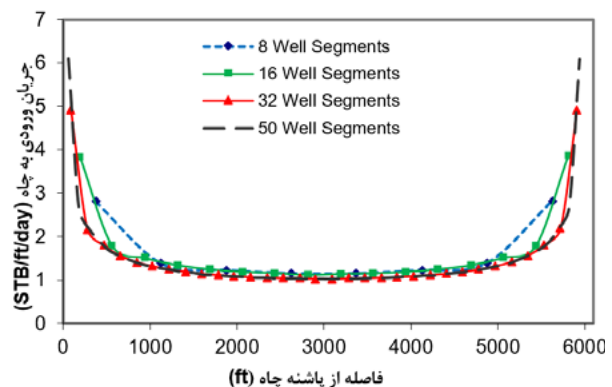
$$q_1 [F(1,1) - F(2,1)] + q_2 [F(1,2) - F(2,2)] + \dots + q_N [F(1,N) - F(2,N)] = p_2 - p_1 = 0$$

$$q_1 [F(2,1) - F(3,1)] + q_2 [F(2,2) - F(3,2)] + \dots + q_N [F(2,N) - F(3,N)] = p_3 - p_2 = 0$$

$$q_1 [F(N-1,1) - F(N,1)] + q_2 [F(N-1,2) - F(N,2)] + \dots + q_N [F(N-1,N) - F(N,N)] = p_N - p_{N-1} = 0$$

$$\sum_{i=1}^N q(i) = Q_{total}$$

۳. هدایت محدود- فشار پاشنه چاه مشخص: در این حالت علاوه بر مقادیر q ، مقادیر فشار در هر المان مجهول است، در



۲ | تغییرات جریان ورودی به چاه بر حسب طول چاه برای تقسیمات چاه به ۸، ۱۶، ۳۲ و ۵۰ قسمت پس از ۲۰ روز

۱ | مشخصات مخزن و چاه مورد بررسی [۱۱]

مشخصات	مقادیر
محل چاه در جهت x(ft)	۳۰۰۰
محل چاه در جهت z(ft)	۲۵
محل پاشنه چاه در جهت y (ft)	۳۰۰۰
محل انتها ^{۳۲} چاه در جهت y (ft)	۹۰۰۰
چگالی نفت در شرایط مخزن (lb/ft ³)	۴۹
تراکم‌پذیری (۱-psi)	$3e^{-5}$
نفوذپذیری در تمام جهات (md)	۶۰۰۰
زبری نسبی چاه	۰/۰۰۰۵
طول مخزن (ft)	۱۲۰۰۰
عرض مخزن (ft)	۶۰۰۰
ضخامت مخزن (ft)	۵۰
فشار اولیه مخزن (psi)	۴۰۰۰
کسر حجمی ^۳ (RB/STB)	۱/۰۵
طول چاه (ft)	۶۰۰۰
قطر چاه (ft)	۰/۲۵
ویسکوزیته نفت (cp)	۱

جریان تولیدی چاه باعث بسته شدن دستگاه معادلات می‌گردد. اکنون با توجه به حالت‌های بررسی شده و تشکیل دستگاه معادلات و حل آن، نتایج زیر به دست می‌آید. شرط مرزی داخلی الگوی وارد شدن جریان به داخل چاه را مشخص می‌کند که می‌تواند یکی از شرایط مرزی شار جریان ورودی یکنواخت^{۲۸} یا هدایت بی‌نهایت^{۲۹} یا هدایت محدود^{۳۰} باشد. پس از اینکه شرایط مرزی مشخص شد، عملکرد چاه با مشخص کردن فشار در پاشنه^{۳۱} یا مشخص کردن تولید کلی چاه مورد محاسبه قرار می‌گیرد. در جدول ۱- مشخصات مخزن و چاه مورد مطالعه آورده شده است.

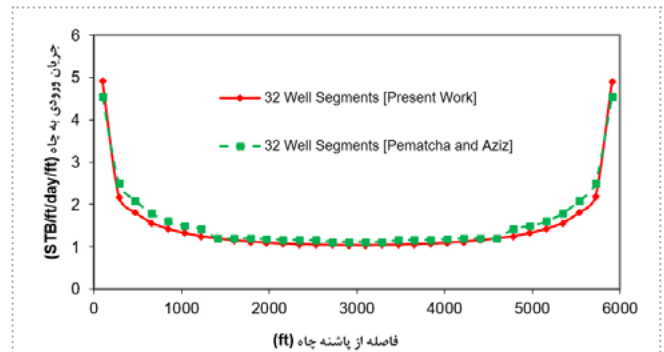
۳- نتایج و بحث

در این قسمت به بررسی نتایج به دست آمده، پرداخته می‌شود و برای بررسی صحت برنامه با نتایج پماتچا^{۳۳} و عزیز^{۳۵} [۱۱] مقایسه و اثر بعضی از پارامترهای موثر بر عملکرد چاه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

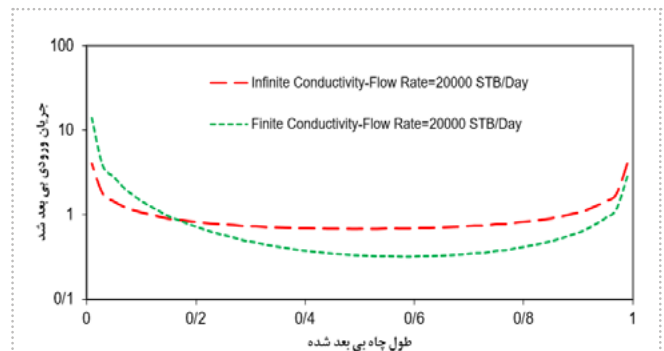
۳-۱- اثر تعداد تقسیم‌های چاه بر توزیع جریان خروجی

در شکل ۲- نحوه تغییرات جریان ورودی به چاه بر حسب طول چاه با تعداد تقسیم‌های متفاوت و شرط هدایت نامحدود پس از ۲۰ روز نشان داده شده است. در واقع پس از ۲۰ روز جریان به حالت شبه تعادلی رسیده و پس از آن نیز تغییرات چندانی در نمودارها مشاهده نمی‌شود. همانطور که در نمودارها دیده می‌شود جریان در دو انتها بیشترین مقدار را دارد و با افزایش تعداد قسمت‌ها مقادیر جریان خروجی بیشتر می‌شود. با این وجود به نظر می‌رسد با تعداد تقسیمات^{۳۲}، دقت جواب‌ها مناسب و مستقل از تعداد تقسیمات می‌باشد. زیرا نتایج تعداد تقسیمات^{۳۲} و ۵۰ بر همدیگر مماس شده‌اند و با وجود اینکه افزایش تعداد تقسیمات زمان محاسبات را افزایش می‌دهد ولی در نتایج تغییری حاصل نشده است.

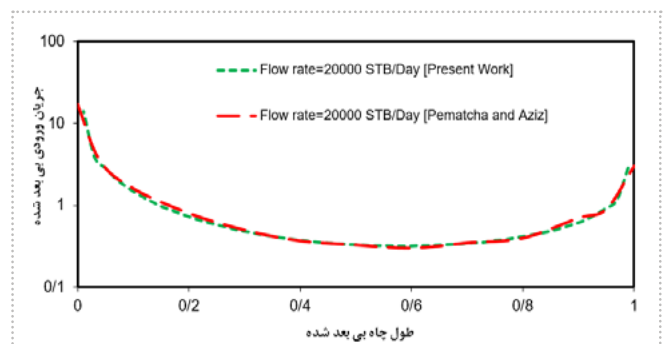
در شکل (۳) تغییرات جریان ورودی به چاه بر حسب طول چاه برای تقسیمات چاه به ۳۲ قسمت، پس از ۲۰ روز با نتایج پماتچا



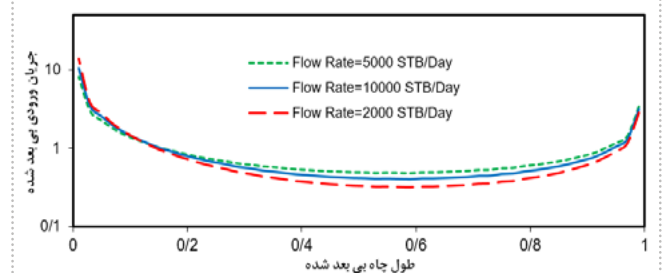
شکل ۳ | تغییرات جریان ورودی به چاه بر حسب طول چاه برای تقسیمات چاه به ۳۲ قسمت (مقایسه با کار پماتچا و عزیز [۱۱])، پس از ۲۰ روز



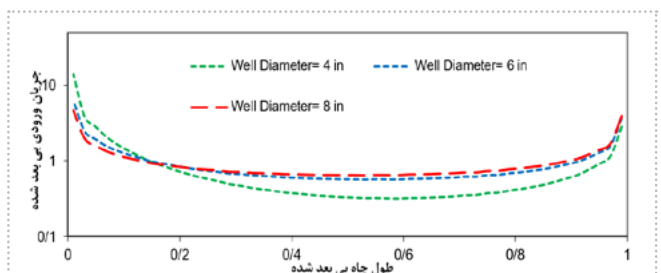
شکل ۴ | مقایسه نمودارهای جریان بر حسب طول چاه با فرض وجود و عدم وجود افت فشار در داخل چاه (در حالت شبه پایدار)



شکل ۵ | مقایسه پروفیل جریان ورودی بر حسب طول چاه در تولید ۲۰۰۰۰ STB/day با نتایج پماتچا و عزیز [۱۱]



شکل ۶- مقایسه نمودارهای جریان در طول چاه با فرض افت فشار در داخل چاه برای دبی‌های متفاوت (در حالت شبه پایدار)



شکل ۷ | مقایسه نمودارهای جریان در طول چاه با فرض وجود افت فشار در داخل چاه برای قطرهای ۴، ۶ و ۸ اینچ (در حالت شبه پایدار)

منحنی جریان از حالت متقارن فاصله بیشتری می گیرد.

۳-۳- تغییرات فشار در داخل چاه

افت فشار در داخل چاه دارای اهمیت به سزایی است زیرا در نظر نگرفتن آن باعث می شود مقدار تولید مخصوص چاه از مقدار واقعی، بیشتر محاسبه شود و برای یک مخزن با کلاهیگ گاز^{۳۶} یا آب^{۳۷} برای جلوگیری از ورود آب به چاه^{۳۸} افت فشار^{۳۹} در دهانه چاه باید کم باشد.

در شکل ۸- تغییرات فشار در زمان $t=0.1$ day برای دو حالت هدایت محدود و نامحدود، رسم و با نتایج پماتچا و عزیز [۱۱] مقایسه شده اند. همانطور که در شکل دیده می شود اثر افت فشار در داخل چاه در زمان های قبل از رسیدن به حالت شبه تعادلی بسیار شدیدتر است، زیرا هنوز تولید چاه پایدار نشده است و باید زمان به سمت بی نهایت میل داده شود که جواب در حالت پایدار به دست آید.

همچنین در شکل ۹- نمودارهای پروفیل فشار در امتداد چاه با دو فرض هدایت محدود و نامحدود نشان داده شده است. با توجه به اینکه در یک حالت، فرض عدم وجود اصطکاک استفاده شده است، در شکل مشاهده می شود که برای این حالت اصطکاک وجود ندارد. در این شکل دیده می شود که پس از گذشت ۱۰ روز که شرایط چاه به حالت شبه تعادلی رسیده، فشار متوسط چاه در این زمان برابر با $3981/8$ psi به دست می آید که به طور تقریبی برابر با فشار انتهای چاه است. این امر نشان می دهد که فرض تولید صفر در انتهای چاه دور از واقعیت نیست.

نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا تئوری چاه-چشمه بررسی شد. این مدل برگرفته از روش حل چشمه-نقطه ای برای حل مسائل انتقال حرارت است. پاسخ چشمه-خطی برای مسائل سه بعدی با ضرب کردن سه جواب یک بعدی در هر جهت و انتگرال گیری بر روی زمان و مسیر چاه به دست می آید. پس از مدل سازی عملکرد تولید چاه، معادلات حاکم گسسته سازی گردید و دستگاه معادلات تشکیل و حل شد که به منظور بررسی صحت روش و اعتبارسنجی کد توسعه داده شده، نتایج کار حاضر با نتایج کارهایی قبلی مقایسه گردید. تطابق نمودارها و حداکثر خطای ۴ درصد، صحت مدل سازی، روش حل و کد توسعه داده شده را تأیید می نماید. در ادامه اثر افت فشار در داخل چاه، ناشی از اصطکاک و شتاب سیال که از ورود سیال به داخل چاه ایجاد می شود، مطالعه و عوامل موثر بر این پدیده مثل قطر چاه بررسی شد. مقایسه تغییرات جریان ورودی به چاه برحسب طول چاه با تعداد

و عزیز [۱۱] مقایسه گردیده که نتایج بر یکدیگر منطبق هستند. در این شکل مشاهده می شود که تعداد تقسیمات ۳۲، سازگاری خوبی با نتایج قبلی داشته و میزان خطا حدود ۴ درصد می باشد.

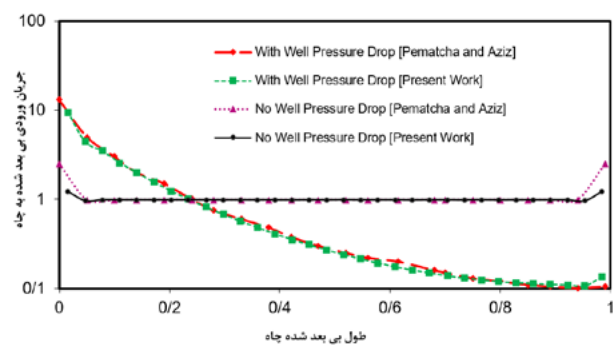
۳-۲- اثر افت فشار بر پروفیل جریان ورودی به چاه

در شکل ۴- پروفیل های جریان ورودی به چاه برای دو حالت هدایت محدود و نامحدود برای حالت بی بعد شده، مقایسه شده اند. در این شکل محور افقی نشان دهنده x/L که x فاصله از دهانه چاه و L طول کلی چاه است؛ محور عمودی نیز به صورت $\frac{q_s L}{Q}$ بی بعد شده، که q_s جریان ورودی به چاه بر واحد طول لوله و Q تولید کلی چاه است.

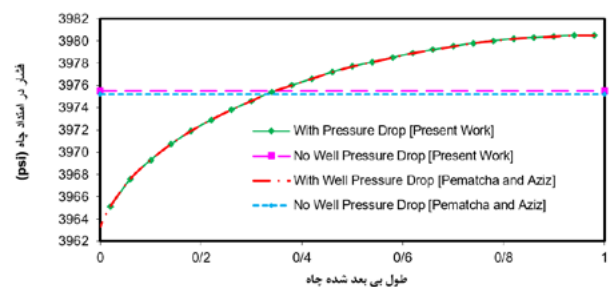
همانطور که در شکل (۴) دیده می شود وجود افت فشار باعث برهم خوردن تقارن نمودار می گردد و نقطه مینیمم تولید به انتهای چاه نزدیک تر می گردد. در شکل ۵- نتایج به دست آمده برای تولید $2000 \frac{STB}{day}$ با نتایج پماتچا و عزیز [۱۱] مقایسه شده است.

در شکل های ۶- و ۷- به ترتیب اثر تغییرات جریان تولیدی چاه و قطر چاه، بر روی نمودار جریان ورودی به چاه نشان داده شده است.

همانطور که در نمودار شکل های ۶- و ۷ مشخص است، با افزایش تولید و کاهش قطر، اتلاف ها در چاه افزایش می یابد و



مقایسه نمودارهای جریان ورودی به چاه در حالت گذرا ($t=0.1$ day) برای دو حالت هدایت محدود و نامحدود و مقایسه آن با نتایج پماتچا و عزیز [۱۱]



مقایسه نمودارهای فشار در چاه با فرض چاه با اصطکاک و بدون اصطکاک و مقایسه آنها با نتایج پماتچا و عزیز [۱۱].



قطر، اتلاف‌ها در چاه افزایش می‌یابد و منحنی جریان از حالت متقارن، فاصله بیشتری می‌گیرد. افت فشار در داخل چاه دارای اهمیت به‌سزایی است و در نظر نگرفتن آن باعث می‌شود مقدار تولید مخصوص چاه از مقدار واقعی، بیشتر محاسبه شود. مقایسه تغییرات فشار برای دو حالت هدایت محدود و نامحدود نشان می‌دهد که اثر افت فشار در داخل چاه در زمان‌های قبل از رسیدن به حالت شبه‌تعادلی بسیار شدیدتر است.

تقسیم‌های متفاوت و شرط هدایت نامحدود نشان می‌دهد که پس از ۲۰ روز جریان به حالت شبه‌تعادلی رسیده و پس از آن نیز تغییرات ناچیزی در نتایج مشاهده می‌شود. همچنین جریان در دو انتها بیشترین مقدار را دارد و با افزایش تعداد قسمت‌ها مقادیر جریان خروجی بیشتر می‌شود. وجود افت فشار باعث برهم خوردن تقارن نمودار تولید می‌گردد و نقطه مینیمم تولید به انتهای چاه نزدیک‌تر می‌شود. با افزایش تولید و کاهش

پانویس‌ها

1 - Well Index	14- Valvante	27- Under Relaxation Factor
2 - Permeability	15- Line-source model	28- Uniform flux
3- Peaceman	16- Green's functions	29- Infinite conductivity
4- Finite difference	17- Unsteady state	30- Finite conductivity
5- Explicit Relationship	18- Sink/source technique	31- Heel
6- Closed Form Models	19- Diffusivity equation	32 - Toe
7- Joshi	20- Instantaneous point source	33 - Formation Volume Factor
8- Economides	21- Infinite Slab Reservoir	34- Pematcha
9- Segments	22- Gringarten	35- Aziz
10-Kamkom	23- Ramey	36- Gas Cap
11- Zhu	24- Formation volume factor	37- Aquifer
12- Stanford University	25- Pseudo-steady state	38- Water breakthrough
13- Wolfsteiner	26- Superposition	39- Pressure drawdown

منابع

- [1] Peaceman, D.W., "Interpretation of Well-Block Pressures in Numerical Reservoir Simulation", paper SPE 6893, presented at the SPE-AIME 52nd Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Denver, (1977).
- [2] Joshi, S.D., "Augmentation of Well Productivity with Slant and Horizontal Wells", Journal of Petroleum Technology, 1988, Vol. 40 (06).
- [3] Economides, M.J., Brand, C.W., and Frick, T.P. "Well Configurations in Anisotropic Reservoirs," SPE Formation Evaluation, 1996, Vol. 11 (04).
- [4] Kamkom R., Zhu D., "Two-Phase Correlation for Multilateral Deliverability", SPE Reservoir Engineering, 2005.
- [5] Wolfsteiner, C., Aziz, K. and Durlofsky, L. J., "Modeling Conventional and Non-Conventional Wells", presented at Sixth International Forum on Reservoir Simulation, Hof/Salzburg, 2009.
- [6] Wolfsteiner, C., Durlofsky, L. J. and Aziz, K., "Calculation of Well Index for Nonconventional Wells on Arbitrary Grids", Computational Geosciences, 7, 2003, pp. 61-82.
- [7] Valvatne, P.H., "A Framework for Modeling Complex Well Configurations", Master's Report, Stanford University, 2000.
- [8] Valvatne P.H., Durlofsky L. J., Aziz K., "Semi-Analytical Modeling of the Performance of Intelligent Well Completions", SPE Reservoir Engineering, 2001.
- [9] Chen W., Zhu D. and Hill A.D., "A Comprehensive Model of Multilateral Well Deliverability", SPE Reservoir Engineering, 2012.
- [10] JIAJING L., "Predicting well performance in complex fracture systems by slab source method", SPE, Texas, USA, 2012.
- [11] Pematcha, V. R., Aziz, K., "Comprehensive Reservoir/Wellbore Model for Horizontal Wells, paper SPE 39521, presented at India Oil and Gas conference held in New Delhi, India, 2008.