

پیش بینی رفتار جریان در محیطی با تخلخل دوگانه با استفاده از الگوریتم عددی استفس و اصل برهم نهی

مسعود نصیری^{*}، ایمان جعفری^۱، دانشگاه سمنان • محسن مسیحی^۲، دانشگاه صنعتی شریف • بهداد پربان خوی^۳، دانشگاه صنعت نفت

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۵/۰۸/۰۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۵/۰۸/۰۳

تاریخ پذیرش داور: ۹۵/۰۹/۱۳

واژگان کلیدی:

مخازن شکاف دار، چاه آزمایی، الگوریتم استفس، اصل برهم نهی

چاه آزمایی شامل یک تلاطم در مخزن از طریق تغییر نرخ تولید و ثبت پاسخ مخزن به تغییرات فشار ایجاد شده در دهانه‌ی چاه است. تعیین دقیق مشخصات مخزن مهندسان مخزن جهت بررسی رفتار کنونی و پیش بینی بهره‌دهی مخزن در آینده بسیار سودمند است. آزمایش‌های چاه آزمایی در حقیقت ابزاری جهت کمی کردن متغیرها و خصوصیات مخزن هستند. اگرچه مخازن شکاف دار در سراسر جهان گسترده‌اند اما جنوب غربی ایران یکی از مناطقی است که بیشترین تعداد مخازن شکاف دار را به خود اختصاص داده است. طی بیست سال اخیر مطالعات فراوانی در زمینه‌ی زمین شناسی و مهندسی مخازن شکاف دار انجام شده که در این میان چاه آزمایی اهمیت ویژه‌ای یافته و روش‌هایی برای تشخیص وجود شکاف‌ها، جهت تقریبی شکاف‌ها و متغیرهای مهمی مثل قابلیت ذخیره (W)، ضریب جریان بین تخلخلی (λ) و ضریب پوسته توسعه داده شده است. آزمایش‌های افت فشار و ساخت فشار از آزمایش‌های مهم در چاه آزمایی است. در این مطالعه با استفاده از آزمایش ساخت فشار مدل مناسبی جهت پیش‌بینی رفتار سیال در محیطی با تخلخل دوگانه ارائه شده است. در این کار با کدنویسی متلب، حل معادله‌ی انتشار با استفاده از سری‌های نامحدود، توابع بسل و با توجه به اصل برهم نهی و الگوریتم استفس نتایج واقعی و نتایج پیشنهادی شده مقایسه شده که تطابق حاصل نشان‌دهنده‌ی کیفیت برنامه‌ی ارائه شده در پیش‌بینی رفتار سیال با شرایط مذکور است.

مقدمه

چاه را اندازه‌گیری می‌کنند. با بستن چاه فشار افزایش می‌یابد. شکل ۲- روند کامل انجام این آزمایش را نشان می‌دهد [۲]. این مدل از بلوک‌های مکعبی تشکیل شده که مکعب‌ها نشان‌دهنده‌ی ماتریکس و فواصل بین آنها نشانگر شکستگی‌های ماتریکس است. همگن و متجانس بودن تخلخل دوگانه‌ی محیط، پراکندگی یکنواخت اندازه‌ی بلوک، جریان سیال از ماتریکس به شکاف و از شکاف به چاه، از فرضیات اصلی مدل هستند. جریان سیال از ماتریکس به شکاف‌ها حالت شبه پایدار دارد.

روت کاظمی [۳] حالت مخصوصی از مدل وارن و روت ارائه شده است که در آن چاه در مرکز و شکاف‌ها به صورت افقی فرض می‌شوند. در مدل کاظمی فرض می‌شود جریان تک‌فاز، در جهت عمودی، شعاعی و ناپایدار باشد، سیال از ماتریکس به شکاف‌ها جریان یابد و از شکاف‌ها وارد چاه گردد. کاظمی سه حالت فرضی فوق را شبیه‌سازی و واکنش‌های ساختاری افت را تجزیه و تحلیل کرد و نتیجه گرفت که در صورتی مدل وارن و روت برای مخازن شکاف دار قابل قبول است که جریان ناپایدار باشد. ضریب جریان بین تخلخلی نیز به نوع جریان از ماتریکس به شکاف بستگی دارد. در مدل دی‌سوان [۴] راه‌حل‌های تحلیلی برای جریان ناپایدار بین تخلخلی در حالت‌های هندسی متفاوت ارائه شد که کاظمی آنها را استفاده کرد و نتایجی مشابه به صورت

مخازن شکاف دار طبیعی که حاوی شکستگی‌های طبیعی هستند بخش بسیار مهمی از ذخایر هیدروکربنی جهان را تشکیل می‌دهند و تأثیرات مثبت یا منفی بر جریان سیال دارند. مخازن شکاف دار طبیعی دو نوع محیط متفاوت دارند؛ یکی ماتریس که ذخیره‌ی زیاد و ظرفیت جریانی کم دارد و دیگری شکاف‌ها (شکستگی‌ها) که مسیر جریانی زیادی فراهم می‌کنند اما ذخیره‌ی کمی دارند. بعضی محققان مدل‌هایی را جهت توصیف رفتار فشار درون مخازن شکاف دار طبیعی پیشنهاد کرده‌اند؛ از جمله خصوصیات مورد توجه در این زمینه می‌توان به جریان از ماتریس به شکاف‌ها، جهت‌یابی شکاف‌ها، توزیع قطعات شکسته از نظر اندازه‌ی بلوک شکستگی اشاره کرد. خصوصیات رفتاری واکنش فشار با دو متغیر بدون بعد نسبت ذخیره (W) و ضریب جریان بین تخلخلی (λ) توصیف می‌شود [۱]. آزمایش افت فشار بدین صورت است که ابتدا قبل از انجام آزمایش، چاه را می‌بندند تا فشار مخزن در فشار ثابت آن تثبیت شود. سپس تولید از چاه با نرخ ثابت آغاز می‌گردد. به عبارت ساده‌تر چاهی که برای مدتی بسته بوده با نرخ جریان ثابت شروع به تولید می‌کند که با تولید از چاه، فشار کاهش می‌یابد. شکل ۱- روند انجام این آزمایش را به‌طور کامل نشان می‌دهد.

آزمایش ساخت فشار بدین صورت است که چاه تولیدی پس از مدتی تولید با نرخ ثابت، بسته می‌شود و فشارهای استاتیک

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (mnasiri@semnan.ac.ir)

مطالعه با در نظر گرفتن این دو متغیر، با استفاده از الگوریتم عددی استفسست و اصل برهم نهی، رفتار جریان و مبادله‌ی سیال بین ماتریس و شکاف پیش‌بینی شده است. در این مطالعه با استفاده از آزمایش ساخت فشار، مدل مناسبی جهت پیش‌بینی رفتار سیال در محیطی با تخلخل دوگانه ارائه شده که در آن از کدنویسی متلب، حل معادله‌ی انتشار با استفاده از سری‌های نامحدود و توابع بسط طبق اصل برهم نهی و الگوریتم استفسست استفاده شده است.

۱- شرح کار

۱-۱- الگوریتم عددی استفسست

روش لاپلاس معکوس عددی ابتدا توسط گراور معرفی و سپس الگوریتم آن در ۱۹۷۰ توسط استفسست [۷] پیشنهاد شد. تبدیل لاپلاس معکوس را می‌توان به روش‌های مختلفی از جمله با داشتن جدولی از تبدیلات به دست آورد. روش دیگر، انتگرال در صفحه‌ی مختلط است که در بیشتر مشکلات مربوط به چاه‌آزمایی محاسبه از طریق روش دوم مشکل است. با ارائه‌ی الگوریتم استفسست نتایج قابل قبولی در حوزه‌ی چاه‌آزمایی به دست آمد که حل بعد زمان را با استفاده از معادله‌ی $f(t)$ تخمین می‌زند [۷].

$$F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (1)$$

$$f(t) = \frac{\ln 2}{t} \sum_{i=1}^n v_i f\left(\frac{\ln 2}{t} i\right) \quad (2)$$

که v_i از معادله‌ی ۳- به دست می‌آید:

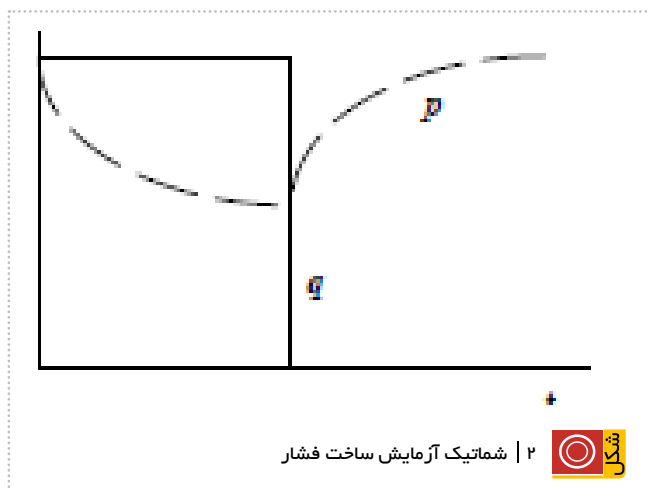
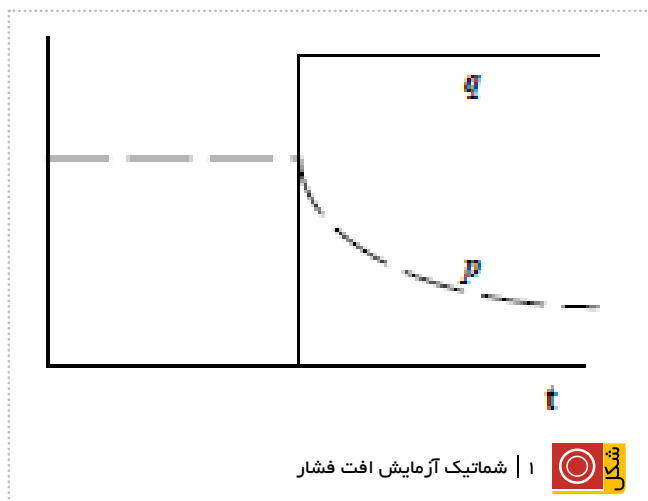
$$v_i = (-1)^{\left(\frac{n}{2}+1\right)} \sum_{k=\left(\frac{i+1}{2}\right)}^{\min\left(\frac{i}{2}, \frac{n}{2}\right)} \frac{k^{\left(\frac{n}{2}+1\right)} (2k)!}{\left(\frac{n}{2}-k\right)! k! (i-k)! (2k-1)!} \quad (3)$$

۱-۲- اصل برهم نهی

اصل برهم نهی یک روش ریاضی قوی برای آنالیز انواع مسائل پیچیده در بسیاری از علوم است. این اصل بیان می‌کند که برای تمامی سیستم‌های خطی، پاسخ ایجاد شده در یک نقطه و زمان مشخص، توسط دو یا چند عامل، برابر است با مجموع پاسخ‌هایی که توسط هر عامل به تنهایی به وجود می‌آید. اصل برهم نهی برای تمامی سیستم‌های خطی قابل استفاده است. در مطالعه‌ی حاضر از این اصل برای تبدیل داده‌های افت فشار به ساخت فشار جهت پیش‌بینی رفتار جریان در محیط متخلخل استفاده شده است [۸]. در تمامی آزمایش‌های چاه‌آزمایی، فشار تابعی از زمان اندازه‌گیری است و داده‌های فشار باید آنالیز شوند.

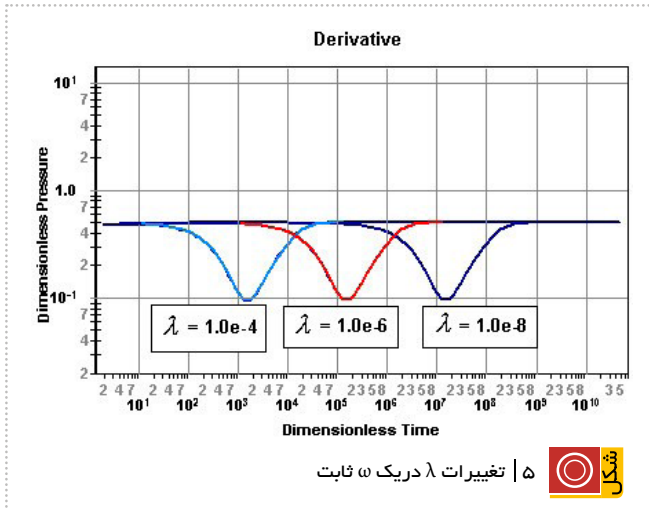
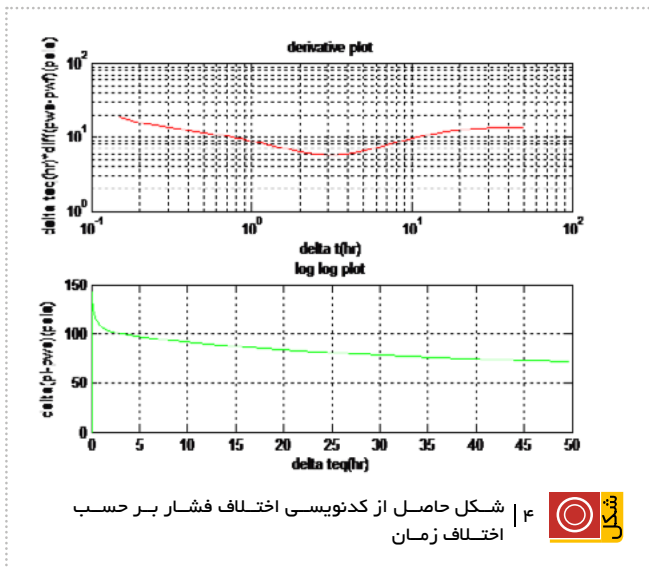
۱-۳- روش حل مسأله

زمانی که در محیطی با تخلخل دوگانه جریان وجود دارد معادله‌ی انتشار آن طبق روابط ۴- تا ۸ است:



خطوط مستقیم نیمه‌لگاریتمی به دست آورد. zeng و younes [۵۶] نسبت پویایی مخازن شکاف دار و نسبت ذخیره را رسم کردند. مطالعات سالیان اخیر نشان می‌دهد که الگوریتم‌های عددی قابلیت بسیار خوبی جهت پیش‌بینی رفتار جریان دارند. مثلاً آنها متوجه شدند که بر اساس نمودارهای فشار بر حسب زمان گذار برای متغیرهای مختلف در λ های بزرگ‌تر، ناحیه‌ی گذار زودتر اتفاق می‌افتد و ω های کوچک‌تر به ناحیه‌ی گذرای طولانی‌مدت نیاز دارند. مطالعه‌ی جریان سیال در سیستم متخلخل شکاف دار در بسیاری از حوزه‌های علوم زمین (از مطالعه‌ی آبهای زیرزمینی تا تولید نفت) انجام می‌شود. چندین مدل برای شرح هیدرودینامیک سیستم متخلخل شکاف دار توسعه یافته‌اند که یکی از آنها مدل تخلخل دوگانه است. این روش در ابتدا توسط Barenblatt و همکاران [۵] معرفی شد.

مهم‌ترین ایده‌ی تخلخل دوگانه، در نظر گرفتن دو تخلخل است که یکی با سیستم ماتریکس و دیگری با سیستم شکاف در ارتباط هستند. در یک مدل تخلخل دوگانه‌ی ایده‌آل، تغییر رفتار از حالت همگن توسط دو متغیر کلیدی λ و ω مشخص می‌شود که در این



۱۱ | برخی از نتایج حاصل از کدنویسی

delta(t), hr	delta (pi-pws) (psia)	eqt 1.0e+003*	diff (pws -pwf)	pws (psia)
۰/۰۰۰۱	۰/۱۴۲۹	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۶/۶۴۶۶
۰/۰۰۰۲	۰/۱۳۳۶	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۸۵	۶/۶۵۵۹
۰/۰۰۰۳	۰/۱۲۴۸	۰/۰۰۰۲	۰/۰۱۴۴	۶/۶۶۴۷
۰/۰۰۰۴	۰/۱۱۹۹	۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۳۰	۶/۶۶۹۶
۰/۰۰۰۵	۰/۱۱۵۳	۰/۰۰۰۴	۰/۰۱۱۶	۶/۶۷۴۲
۰/۰۰۰۶	۰/۱۱۳۲	۰/۰۰۰۵	۰/۰۱۰۹	۶/۶۷۶۳
۰/۰۰۰۷	۰/۱۱۱۶	۰/۰۰۰۶	۰/۰۱۰۳	۶/۶۷۷۹
۰/۰۰۰۸	۰/۱۱۰۸	۰/۰۰۰۷	۰/۰۱۰۰	۶/۶۷۸۷
۰/۰۰۰۹	۰/۱۰۹۶	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۹۵	۶/۶۷۹۹
۰/۰۰۱۰	۰/۱۰۸۵	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۹۱	۶/۶۸۱۰

$$\frac{\partial^2 P_{Df}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial P_{Df}}{\partial r_D} = (1-\omega) \frac{\partial P_{Dm}}{\partial t_D} + \omega \frac{\partial P_{Df}}{\partial t_D} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{\phi_f c_f}{\phi_m c_m + \phi_f c_f} \quad (5)$$

$$t_D = \frac{k_f t}{(\phi_m c_m + \phi_f c_f) \mu r_w^2} \quad (6)$$

$$P_{Dm} = \frac{2\pi K_f h (P_i - P_{r,t im})}{q \mu} \quad (7)$$

$$P_{Df} = \frac{2\pi K_f h (P_i - P_{r,t if})}{q \mu} \quad (8)$$

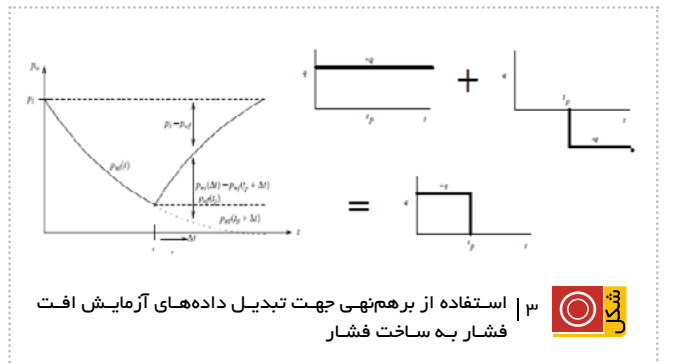
این معادله را می‌توان با استفاده از روش تابع خطا یا با استفاده از روش متغیر فشار بدون بعد حل کرد. در ۱۹۴۹ Van Everdingen و Hurst با استفاده از سری‌های نامحدود و توابع بسط روشی تحلیلی برای حل معادله‌ی ۴- ارائه کردند [۹]. در مطالعه‌ی حاضر از این روش استفاده شده که حل معادله طبق رابطه‌ی ۹- خواهد بود:

$$P_D(z) = \frac{k_1(r_{De}\sqrt{zf(z)})I_0(r_D\sqrt{zf(z)}) + I_1(r_{De}\sqrt{zf(z)})K_0(r_D\sqrt{zf(z)})}{z\sqrt{zf(z)}[k_1(\sqrt{zf(z)})I_1(r_{De}\sqrt{zf(z)}) - K_1(r_{De}\sqrt{zf(z)})I_1(\sqrt{zf(z)})]} \quad (9)$$

این رابطه حل معادله‌ی انتشار برای مخازن شکاف دار بدون اثر پوسته و قابلیت ذخیره‌ی چاه است. در حل معادله‌ی مذکور دو موضوع مهم وجود دارند:

- رابطه‌ی داده شده مربوط به آزمایش افت فشار در حالی است که انجام آزمایش ساخت فشار مدنظر است.
- رابطه‌ی ۹- در فضای لاپلاس نوشته شده و باید به فضای زمان برگردانده شود.

برای موضوع اول محاسبات با استفاده از اصل برهم‌نهی، بر اساس شکل-۳ و توسط رابطه‌ی ۹- انجام می‌شود. برای مورد دوم با استفاده از الگوریتم استفسر رابطه‌ی مورد نظر را



زمان معادل Δt_e در مقیاس لگاریتمی، بدون نیاز به اینکه مدت زمان تولید قبل از بستن چاه طولانی باشد می‌توان در آزمایش ساخت فشار از نمودار الگو استفاده کرد. در این آزمایش برای اینکه بتوان از نمودارهای الگو استفاده کرد باید منحنی $(\Delta p = p_{ws} - p_{wf})$ برحسب Δt_e و منحنی $(\Delta p' * \Delta t_e)$ بر حسب Δt در مقیاس لگاریتمی رسم گردد. بعد از کدنویسی با استفاده برنامه‌ی متلب نتایج طبق شکل ۴ ارائه شد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود نتایج کاملاً با واقعیت منطبق است. بخشی از نتایج حاصل از کدنویسی در جدول ۱- ارائه شده است. جدول ۲- بخشی از داده‌های واقعی ثبت شده را نمایش می‌دهد.

مقایسه‌ی داده‌های جدول ۲- نشان می‌دهد که نتایج به هم نزدیک هستند. سپس تأثیرات تغییرات λ و ω بررسی می‌شود. ابتدا تغییرات λ در یک ω ثابت بررسی شده است. همان‌طور که در شکل ۵- نشان داده شده هر چه λ بزرگ‌تر شود ناحیه‌ی گذرا زودتر اتفاق می‌افتد. به زبان ساده‌تر فرورفتگی منحنی از زمان کمتری آغاز می‌شود. دلیل این رفتار آنست که هر چه λ بزرگ‌تر باشد طبق تعریف، تراوایی ماتریکس بیشتر است و در نتیجه سریع‌تر به کاهش فشار شکاف پاسخ می‌دهد و مبادله‌ی سیال بین ماتریکس و شکاف راحت‌تر انجام می‌شود.

در شکل ۶- نتایج بررسی تغییرات ω در یک λ ثابت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش ω ، فرورفتگی عمیق‌تر می‌شود و این بدان معناست که مدت دوره‌ی گذرا افزایش یافته است. جهت صحت‌سنجی مطالب ارائه شده توسط کدنویسی، مراحل زیر اجرا شد:

■ طبق شکل ۷-، λ ثابت و ω کوچک‌تر فرض می‌شود. مقایسه‌ی دو شکل نشان می‌دهد که با کاهش ω عمق دره افزایش می‌یابد. این مشاهده با واقعیت منطبق است.

■ طبق شکل ۸-، ω ثابت و λ متغیر فرض می‌شود. در اینجا نیز با افزایش λ دره به سمت چپ متمایل می‌شود که این مطلب صحت کدنویسی انجام شده را تأیید می‌کند.

نتیجه‌گیری

■ با انجام کدنویسی و استفاده از الگوریتم استفست، تطابق نتایج واقعی و نتایج برنامه، نشان‌دهنده‌ی کیفیت برنامه‌ی ارائه شده در پیش‌بینی رفتار سیال با شرایط مذکور است.

■ در آزمایش افت فشار با توجه به معادلات موجود نمودار داده‌های واقعی آزمایش کاهش فشار $\log(\Delta p)$ بر حسب $\log t$ نسبت به نمودار $\log p_D$ برحسب $\log(dt_D/C_D)$ شکلی یکسان و موازی دارد.

■ هر چه λ بزرگ‌تر شود ناحیه‌ی گذرا زودتر اتفاق می‌افتد. به زبان ساده‌تر فرورفتگی منحنی از زمان کمتری آغاز می‌شود. دلیل این رفتار آنست که هر چه λ بزرگ‌تر باشد طبق تعریف، تراوایی ماتریکس بیشتر است، سریع‌تر به کاهش فشار شکاف جواب می‌دهد و در نتیجه مبادله‌ی سیال بین ماتریکس و شکاف راحت‌تر انجام می‌شود.

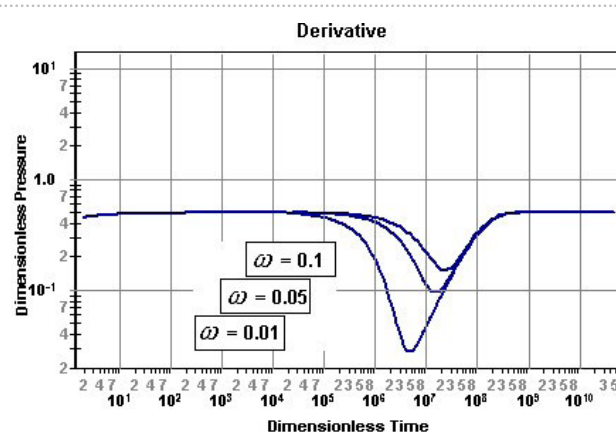
■ با کاهش ω در λ ثابت مدت دوره‌ی گذرا افزایش یافته است.

از فضای لاپلاس به فضای زمان تغییر داده شده و سپس منحنی‌های P_D بر حسب t_D/C_D و $d(P_D)/(dt_D/C_D)$ بر حسب t_D/C_D در مختصات لگاریتمی رسم می‌شود.

در آزمایش افت فشار با توجه به معادلات موجود، نمودار داده‌های واقعی آزمایش کاهش فشار $\log(\Delta p)$ بر حسب $\log t$ نسبت به نمودار $\log p_D$ برحسب $\log(dt_D/C_D)$ شکل یکسان و موازی دارد. در واقع در آزمایش ساخت فشار باید به این نکته توجه شود که تمام نمودارهای الگو جواب‌های گرافیکی آزمایش کاهش فشار هستند و بدون اعمال محدودیت نمی‌توان در آزمایش ساخت فشار از آنها استفاده کرد. تنها محدودیت اینست که زمان تولید t_p قبل از بستن چاه باید طولانی باشد. به همین دلیل در ۱۹۸۰ آکارول به‌طور تجربی بدین نتیجه رسید که با رسم داده‌های آزمایش ساخت فشار $(\Delta p = p_{ws} - p_{wf})$ بر حسب

جدول ۲ | بخشی از داده‌های واقعی ثبت شده

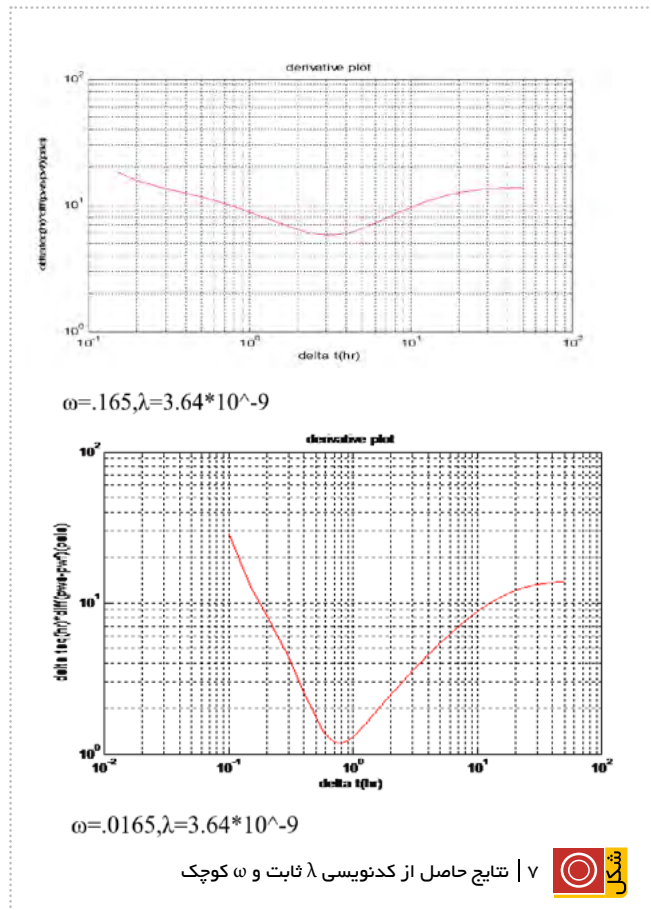
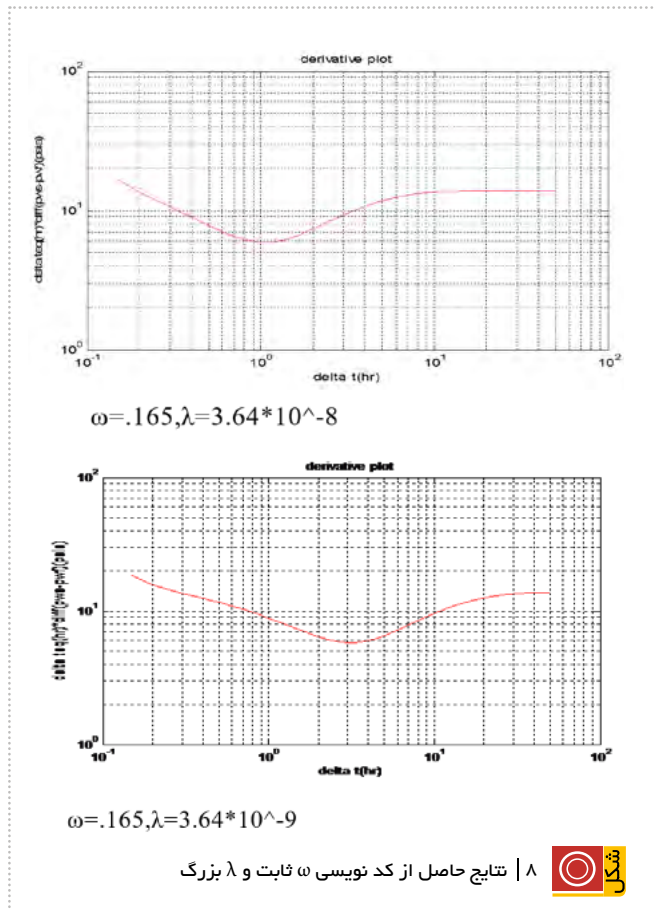
delta(t), hr 1.0e-003*	P _{ws} (psia) 1.0e-003*
۰	۶۳۵۲
۰/۰۰۳	۶۶۱۷
۰/۰۱۷	۶۶۳۲
۰/۰۳۰	۶۶۴۳
۰/۰۷	۶۶۵۰
۰/۱۳	۶۶۵۴
۰/۲۷	۶۶۶۱
۰/۵۳	۶۶۶۶
۱/۰۷	۶۶۶۹



شکل ۶ | تغییرات ω در یک λ ثابت

شکاف به سمت دهانه‌ی چاه می‌شود. پس از مدتی تولید، سیستم شکاف تخلیه شده و کاهش فشار به ماتریس می‌رسد. در این حالت ماتریس شروع به تغذیه شکاف‌ها می‌کند و دوره‌ی گذرا اتفاق می‌افتد.

یک خصوصیت بسیار مهم مدل تخلخل دوگانه در مخازن شکاف‌دار، ماهیت تبادل سیال بین این دو سیستم متخلخل مجزا است. در زمان‌های اولیه‌ی تولید، کاهش فشار ایجاد شده سبب جریان سیال از سیستم



پانویس‌ها

1. jafari3760@gmail.com

2. masihi@sharif.edu

3. behdad.parnian@gmail.com

منابع

- [1] نجف‌پور، مهدی، بررسی آنالیز چاه آزمایشی در مخازن شکاف‌دار طبیعی، اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۱۳۸۹، شماره ۴۷، صفحه ۳-۸
- [2] Warren J.E. and Root P.J. "The behavior of NFR," (September 1963) 245.
- [3] Kazemi, H. "pressure Transient Analysis of NFR with Uniform Fracture Distribution," SPEJ (December 1969) 451.
- [4] De Swaan O.A. "Analytic solutions for determining NFR properties by well Testing," SPEJ (June 1976) 117.
- [5] Younes, A., Fahs, M., "An efficient numerical model for hydrodynamic parameterization in 2D Fractured dual-Porosity media," Advances in water Resources (2014) 179-193
- [6] Zeng, Y., Zhang, L., "Pressure transient behavior analysis in a dual porosity reservoir with partially communicating faults," Journal of Natural Gas Science and Engineering (2016) 373-379.
- [7] Hassanzadeh, H., Darvish, M., "Comparison of different numerical Laplace inversion methods for engineering applications," Applied Mathematics and Computation (2007) 1966-1981.
- [8] Reilly, T., Franke, L. and Bennet, G., "The Principle of Superposition and its Application in Ground Water Hydraulics," U.S. Geological Survey, 1984, 43.
- [9] Van Golf-Racht, T.D. "Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering," pp. 147-605, Elsevier Scientific Pub. Co., Amsterdam (1982), p 170-178.