



مقایسه مدل‌های تحلیلی و عددی در تفسیر داده‌های چاه آزمایشی

دکتر سیاوش عاشوری^۱ ■ دانشگاه صنعت نفت

یعقوب دستخوان^۱ ■ شرکت بهره‌برداری نفت و گاز گچساران

ظهرا ب دستخوان^۲ ■ شرکت مناطق نفت خیز جنوب

چکیده

برای تحلیل داده‌های چاه‌آزمایی، دو روش یا مدل تحلیلی و عددی وجود دارد. مدل‌های تحلیلی از حل معادلات جریان در محیط متخلخل با دبی ثابت در شکل‌های ساده چاه و مخزن به‌دست آمده‌اند و از ابتدای تاریخچه چاه‌آزمایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش‌های عددی که برای شبیه‌سازی شرایط پیچیده‌تر جریان در مخازن واقعی توسعه یافته‌اند، بعداً در تحلیل چاه‌آزمایی نیز به کار گرفته شده‌اند. امروزه کاربرد روش‌ها و مدل‌های عددی در تحلیل چاه‌آزمایی در حال گسترش است. در این مقاله مدل‌های تحلیلی و عددی در چاه‌آزمایی تشریح می‌شوند و با انجام یک مطالعه موردی، ویژگی‌ها، برتری‌ها و مشکلات هر یک بررسی می‌گردد.

تحلیل داده‌های چاه آزمایشی، حل معادله انتشار، مدل‌های تحلیلی، مدل‌های عددی، تعیین خواص مخزن

واژه‌های کلیدی

مقدمه

که در سال ۱۹۳۵ توسط Theis معرفی شد، مثال‌هایی از این دست است [۱]. اولین تلاش برای تعیین خواص مخزن با استفاده از داده‌های تغییر فشار درون چاه نسبت به زمان، در سال ۱۹۳۷ توسط Muskat انجام شد. او به صورت تئوری، روشی را برای برون‌یابی فشار اندازه‌گیری شده درون چاه به‌منظور به دست آوردن فشار ساکن متوسط مخزن ارائه داد [۲]. روش‌های تحلیل چاه‌آزمایی که در دهه ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ رواج داشت، بر اساس رسم خطوط راست در داده‌های نیمه‌لگاریتمی زمان میانی یا تأثیرات ساده مرزها در زمان پایانی کاربرد داشتند. در این دوره، نمودارهای MDH و Horner بسیار مورد استفاده قرار می‌گرفتند. مهم‌ترین روش ریاضی استفاده شده در آن زمان، تبدیل لاپلاس بود که توسط Van Everdingen و Hurst به کار گرفته شد. روش‌های تفسیر به‌گونه‌ای طراحی شده بودند که به صورت دستی با مداد و کاغذ گراف قابل انجام بودند. نتایج تحلیل چاه‌آزمایی معمولاً به تعیین تراوایی مخزن، ضریب پوسته، شاخص بهره‌دهی، مساحت ناحیه تخلیه و فشار متوسط مخزن محدود می‌شد. در اواخر دهه ۱۹۶۰ و اوایل دهه ۱۹۷۰، اکثر پیشرفت‌ها در دانشگاه‌ها و به‌ویژه با گسترش تحلیل نوع منحنی‌ها توسط Ramey ایجاد شد. در آن زمان تلاش‌ها بر فهمیدن رفتار آغازین پاسخ فشار تمرکز داشت؛ زیرا مشخص شده بود که برخی از نتایج حاصل از تحلیل‌های خط راست نیمه لگاریتمی در زمان میانی ممکن است مبهم باشد. در اواخر دهه ۱۹۷۰، با معرفی متغیرهای مستقل توسط Gringarten و همکارانش، تحلیل نوع منحنی‌ها بسیار گسترش یافت. در کنار این موضوع، روش تحلیل چاه‌آزمایی یکپارچه توسعه پیدا کرد و این امر سبب دستیابی به نتایج دقیق و قابل اطمینان شد. در این دوره تحلیل‌های دستی پایان یافت و روش‌هایی که به رایانه نیاز داشتند، توسعه یافت [۳].

هدف از انجام آزمایش روی یک چاه تولیدی بسیار گسترده است. این گستردگی تعیین ساده مقدار و نوع سیال تولید شده تا تحلیل پیچیده فشار گذرا، تعیین پارامترها و شناخت ناهمگونی‌های مخزن را در بر می‌گیرد. آزمایش‌های چاه، دامنه وسیعی را شامل می‌شوند؛ ولی آنچه بیشتر در صنعت نفت به چاه‌آزمایی اطلاق می‌شود، آزمایش‌های فشار گذرای^۴ چاه است. پاسخ‌های چاه‌آزمایی، توانایی سیال برای جریان یافتن در فضای متخلخل مخزن و به سمت چاه را توصیف می‌کند. چاه‌آزمایی بر خلاف داده‌های زمین‌شناسی، مغزه و نمودارهای حفرة باز پتروفیزیکی و شرایط چاه و مخزن را در شرایط پویا (جریانی و دینامیکی) شرح می‌دهد. چون حجمی از مخزن که در چاه‌آزمایی مورد بررسی قرار می‌گیرد نسبتاً بزرگ است، پارامترهای تخمین زده شده مقادیر متوسط هستند. در حقیقت، چاه‌آزمایی مهم‌ترین ابزار برای مشاهده مخزن در مقیاس بزرگ می‌باشد. آزمایش‌های فشار گذرا شامل تغییر دبی و اندازه‌گیری تغییرات فشار نسبت به زمان در یک چاه است و از تحلیل آن‌ها، خصوصیات مخزن و چاه تخمین زده می‌شود. اطلاعات کاربردی که از تحلیل فشار گذرا به‌دست می‌آید، اثر انباری چاه و میزان آسیب را تعیین کرده و در دقیق‌تر نمودن پیش‌بینی فشار مخزن، تراوایی، شکل مرزها و ناحیه تخلیه، حجم در جای نفت، ناپیوستگی‌های مخزن و سیال و غیره کمک می‌کند. تمامی این اطلاعات می‌تواند برای تحلیل، اصلاح و پیش‌بینی عملکرد مخزن به کار گرفته شود. برای پیش‌بینی رفتار فشاری جریان سیال در محیط متخلخل، دو گروه مدل‌های تحلیلی و عددی وجود دارند که با انطباق این مدل‌ها بر مقادیر اندازه‌گیری شده فشار ته چاه در چاه‌آزمایی، خصوصیات مخزن به‌دست می‌آیند. در این مقاله ضمن بررسی مدل‌های تحلیلی و عددی در تحلیل چاه‌آزمایی، با انجام یک مطالعه موردی، توانایی‌های آن‌ها مقایسه خواهد شد.

۱. نگاهی گذرا به تاریخچه چاه‌آزمایی

در آغاز، اکثر روش‌های تحلیل داده‌های چاه‌آزمایی از مباحث شناخت آب‌های زیرزمینی اقتباس می‌شده است. تحلیل خط راست نیمه‌لگاریتمی و تطبیق نوع منحنی‌ها^۵

¹ ydastkhan@yahoo.com

² ashoori39@yahoo.com

³ dastkhan.z@nisoc.ir

⁴ Pressure transient test

⁵ Type curves



در شرایط یاد شده، معادله انتشار از ترکیب معادله بقای جرم، قانون داریسی و معادله سیال با تراکم پذیری کم (معادله حالت) به دست می آید. به طور کلی، معادله انتشاری که در اغلب مدل های تحلیلی چاه آزمایشی استفاده می شود، فرمول بندی شعاعی دارد. نقطه مبدا این حل شعاعی، چاه تولیدی یا چاه تزریقی است. این سیستم، مختصات جریان به چاه را به خوبی مدل سازی می کند. ساده ترین شکل معادله انتشار در مختصات شعاعی مطابق رابطه ۱ است:

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

در این رابطه؛ p ، فشار؛ r ، شعاع یا فاصله از مبدا؛ ϕ ، تخلخل سنگ؛ μ ، گرانیوی سیال؛ c_t ، تراکم پذیری کل سنگ و سیال؛ k ، تراوایی سنگ و t ، متغیر زمان است.

معادله انتشار، یک معادله پارامتری است که برای حل آن به شرایط اولیه و مرزی نیاز است. شرط اولیه معمولاً فشار ثابت اولیه مخزن قبل از چاه آزمایشی می باشد، ولی شرایط مرزی، گستره وسیعی از حالات و ترکیبات مختلف را شامل می شود. به عنوان مثال، وجود اثر انباری ثابت یا متغیر، مرزهای فشار ثابت یا بدون جریان، گسل ها و مرزهای با شکل هندسی غیر دایره ای از انواع معمول شرایط مرزی اند.

۳. آنالیز چاه آزمایشی با روش های تحلیلی

یک دسته شناخته شده مدل ها در چاه آزمایشی، مدل های تحلیلی هستند. مدل های تحلیلی، حل دقیق معادله انتشار را در حالت های ساده یا ساده سازی شده در اختیار قرار می دهند. این مدل ها ساده و سریع بوده و امکان انجام رگرسیون غیر خطی بر روی پارامترهای آن ها وجود دارد. مدل های تحلیلی در حقیقت حالات خاص و ساده ای از معادله انتشارند که به روش های تحلیلی به دست آمده اند.

جدول ۱ اجزای تشکیل دهنده مدل های تحلیلی در چاه آزمایشی را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، مدل چاه آزمایشی شامل سه بخش چاه، مخزن و مرزی است. هر ترکیب از این بخش ها، یک مدل چاه آزمایشی به شمار می رود. به عنوان مثال، می توان یک مدل تحلیلی در نظر گرفت که دارای اثر انباری ثابت، اثر پوسته، مخزن همگن و مرز خارجی بدون جریان باشد. حل مستقیم معادله انتشار با این شرایط مرزی بسیار مشکل است و باید از روش های تبدیل مانند تبدیل لاپلاس یا بولتزمان استفاده نمود. در مورد این مثال، حل تحلیلی معادله انتشار در فضای لاپلاس مطابق رابطه ۲ است [۶]:

$$p_D = \frac{1}{z} \cdot \frac{A + S\sqrt{z} \cdot B}{\sqrt{z} \cdot B + C_D z(A + S\sqrt{z} \cdot B)} \quad (2)$$

در این رابطه، پارامترهای A و B عبارتند از:

$$A = I_1(r_{eD}\sqrt{z})K_0(\sqrt{z}) + K_1(r_{eD}\sqrt{z})I_0(\sqrt{z}) \quad (3)$$

$$B = I_1(r_{eD}\sqrt{z})K_1(\sqrt{z}) - K_1(r_{eD}\sqrt{z})I_0(\sqrt{z}) \quad (4)$$

در این معادلات، p_D فشار بی بعد، z متغیر فضای لاپلاس، S ضریب پوسته، C_D ضریب انباری بی بعد و r_{eD} فاصله چاه تا مرز خارجی بی بعد است. I_0 و I_1 نیز به ترتیب معادلات بسسل اصلاح شده نوع اول درجه صفر و یک و K_0 و K_1 به ترتیب معادلات

با معرفی مشتق نیمه لگاریتمی توسط Bourdet و همکارانش در سال ۱۹۸۳، چاه آزمایشی به ابزاری صحیح و مناسب برای شناخت ویژگی های مخزن تبدیل شد. این نوع مشتق با فراهم کردن قابلیت هایی مانند تشخیص رفتار مخازن ناهمگن، تشخیص نفوذ جزئی^۶ یا ورود محدود^۷ یا دیگر اثرات دهانه چاه، تحلیل چاه های افقی و اثرات مرزی، انقلابی در تحلیل چاه آزمایشی ایجاد کرد.

در سال ۱۹۹۳، Tiab برای تحلیل داده ها روش جدیدی ارائه کرد که به وسیله آن از نمودارهای فشار و مشتق فشار در مختصات لگاریتمی، بدون استفاده از روش تطابق با نوع منحنی ها استفاده می کرد. در این روش از یک سری خواص خطوط متقاطع، شیب خطها و نقاط ابتدایی و انتهایی خطوط رژیم جریانی، با استفاده از نمودارهای مشتق و مشتق فشار استفاده می شود. این نقاط و شیبها به طور مستقیم در فرمول های تحلیلی و دقیق ارائه شده وارد می شوند تا پارامترهای مخزن به دست آیند [۴]. در سال های بعد این روش برای حالات مختلف چاه آزمایشی گسترش یافت.

پیشرفت در روش های تحلیلی که به آن ها اشاره شد، کاملاً به بهبود کیفیت داده ها وابسته است. تا اوایل دهه ۱۹۷۰، اندازه گیری فشار با فشارسنج های مکانیکی بودن^۸ انجام می شد؛ دقت و وضوح این فشارسنج ها محدود بود. کیفیت کلی داده های فشار در اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ با ظهور فشارسنج های الکترونیکی بسیار بهبود یافت. توانایی در طراحی آسان آزمایش ها برای اطمینان از دستیابی به اطلاعات مشخص، استفاده از بسته های نرم افزاری قوی در تحلیل چاه آزمایشی و توانایی دیدن مقدار فشار ته چاه در سطح زمین با تجهیزات خواندن فشار، از ویژگی های این فشارسنج ها است [۳].

۲. معادله انتشار؛ سنگ بنای تحلیل چاه آزمایشی

برای تحلیل چاه آزمایشی به دانستن ماهیت جریان نفت یا سیالات دیگر درون محیط متخلخل، به طرف چاه یا خارج از آن و در ستون چاه نیاز است. واقعیت این جریان از نظر هندسه، تعادل ترمودینامیکی بین اجزای سیال، اصطکاک، اثرات حرارتی، گرانش و غیره، بینهایت پیچیده می باشد. هر چند به طور پیوسته، ابزارهای پیش تر و بهتری به ته چاه فرستاده می شود یا به منظور درک بهتر اتفاقات، مدل های نظری بهتری ارائه می گردد، اما هرگز نمی توان واقعیت کامل را فهمید. بنابراین به منظور داشتن درکی بهتر از داده های جریان دینامیکی به دست آمده و تشخیص و تصمیم گیری صحیح، باید مخزن را مدل سازی نمود. مدل، یک تقریب ریاضی از سیستم واقعی است و زمانی خوب، صحیح یا موفق است که به طور نسبی، ساده و قابل استفاده بوده، به اندازه کافی دقیق باشد و بتواند ویژگی های اصلی و عمده سیستم واقعی را به صورت کمی و کیفی شبیه سازی کند [۵].

اساس تحلیل جریان سیال در محیط متخلخل، معادله انتشار است. این معادله بیان می کند که چگونه در یک جزء المانی از سنگ متخلخل، فشار به صورت تابعی از خواص سنگ و سیال به زمان وابسته است. تعداد معادلات انتشار^۹ به اندازه فرضیات مربوط به آنچه در محیط متخلخل یا مخزن اتفاق می افتد، می باشد. تئوری اساسی در آنالیز جریان دینامیکی، ساده ترین معادله انتشار ممکن را استفاده می کند که شامل فرضیات ذیل است:

۱. مخزن همگن و همسانگرد^{۱۰} است.
۲. سیال تک فاز و با تراکم پذیری کم است.
۳. اثرات گرانشی و تغییر دما چشم پوشی می شود.
۴. قانون داریسی قابل کاربرد است یعنی آهنگ تغییر فشار در مخزن کوچک

می باشد.

۵. خواص سیال و مخزن مستقل از فشار است.

^۶ Partial penetration

^۹ Diffusivity equation

^۷ Limited entry

^{۱۰} Isotropic

^۸ Bourdon gauges



۱ | اجزای تشکیل دهنده متداول در مدل‌های تحلیلی چاه آزمایی

انرژی	رفتار مخزن	ناحیه نزدیک چاه
مرز بدون جریان مرز فشار ثابت مرز نیمه تراوا	همگن ناهمگن تخلخل دوگانه تراوایی دو گانه نواحی مرکب	اثر انباری چاه ناحیه پوسته شکاف هیدرولیکی نفوذ محدود
زمان های پایانی	زمان های میانی	زمان های اولیه

در نمودارهای MDH و Horner، یک خط راست بر داده‌های بخش جریان شعاعی منطبق می‌گردد. مقادیر تراوایی و اثر پوسته، با استفاده از شیب این خط راست و معادله ۶ محاسبه می‌شوند. یکی از مشکلات این روش، ابهام در تعیین نقاط جریان شعاعی است؛ زیرا ممکن است که این رژیم به وسیله سایر رژیم‌ها پوشانده شده باشد.

۴. آنالیز چاه آزمایی با روش‌های عددی

بررسی مخازن واقعی نشان می‌دهد که فرضیات ساده‌ای که در مدل‌های تحلیلی به کار رفته‌اند، از واقعیت مخازن خیلی دور هستند. چند نمونه از تفاوت‌های مخازن واقعی با مدل فرضی در چاه آزمایی به روش تحلیلی عبارتند از:

۱. مخازن واقعی دارای تراوایی جهتی و ناهمسانگرد هستند.
۲. تخلخل، تراوایی و تراکم‌پذیری سنگ به صورت ناهمگن توزیع شده‌اند.
۳. خواص سیال با عمق تغییر می‌کند.
۴. گاهی در نزدیکی چاه، جریان غیرداری اتفاق می‌افتد.
۵. اثرات گرانشی و لایه‌بندی عمودی روی جریان شعاعی سیال تأثیر می‌گذارد.
۶. گاهی در مخزن، عوارض پیچیده زمین‌شناسی مانند گسل وجود دارد.
۷. مرزهای خارجی مخزن، هم از نظر هندسی و هم از نظر جریان پیچیده‌اند.
۸. جریان سیال گاهی چندفازی است.

مدل‌های تحلیلی نمی‌توانند موارد یاد شده را در برداشته باشند و اگر این موارد با استفاده از مدل‌های تحلیلی شبیه‌سازی شوند، باید معادلات فشار-زمان را با ساده‌سازی یا معادل‌سازی، بازویسی و حل نمود که در این صورت راه‌حل‌ها پیچیده بوده و در کاربردهای عملی، غیرقابل استفاده می‌باشند. روش صحیح برای شبیه‌سازی مخازن پیچیده (مانند مواردی که به آن‌ها اشاره شد)، استفاده از مدل‌های عددی است.

استفاده از مدل‌های عددی در تحلیل چاه آزمایی به‌طور فزاینده‌ای رو به گسترش است؛ زیرا مدل‌های عددی مسایلی را مورد بررسی قرار می‌دهند که خارج از توانایی مدل‌های تحلیلی یا نیمه‌تحلیلی است. استفاده از مدل‌های عددی در مخازن با شکل هندسی پیچیده، چاه‌های تداخل‌کننده و گسل‌های غیرساده، تنها چاره تفسیر داده‌های چاه آزمایی است. کاربرد مدل‌های عددی بیش‌تر به دو علت در حال گسترش است؛ یکی وجود عوامل غیرخطی (مانند جریان‌های چندفازی، غیرداری، تراوایی‌های نسبی) و دیگری اشکال هندسی پیچیده (چاه، مخزن، گسل‌ها و مرزها).

عوامل غیرخطی نیز از دیگر مواردی هستند که برتری مدل‌های عددی را نسبت به مدل‌های تحلیلی نشان می‌دهند. منظور از عوامل غیرخطی متغیرهایی هستند که به فشار، دما، دبی یا درصد اشباع سیالات وابسته بوده و نمی‌توان در هنگام به‌دست آوردن معادله انتشار، آن‌ها را ثابت در نظر گرفت. در این موارد، برای حل معادله انتشار لازم است که از روش‌های حل غیرخطی استفاده گردد. این روش‌ها عموماً نیازمند تعداد محاسبات و تکرار بیش‌تر و در نتیجه زمان پردازش بیش‌تر می‌باشند. از جمله عوامل غیرخطی در چاه آزمایی عبارتند از: خواص سیالات وابسته به فشار و دما، سازندهای ناپوسته، جریان چندفازی و تراوایی نسبی، جریان غیرداری و شبه فشار گاز واقعی^{۱۱}.

تحلیل چاه آزمایی به روش عددی در حقیقت استفاده از یک شبیه‌ساز عددی مخزن است؛ اما شبیه‌سازهای تجاری مخزن نمی‌توانند فشار درون چاه را با دقت کافی

بسیار اصلاح شده نوع دوم درجه صفر و یک می‌باشند. برای آن که معادله ۲ کاربردی شود، لازم است از فضای لاپلاس به فضای واقعی (یعنی زمان) وارون گردد. یافتن تابع وارون یک تبدیل لاپلاس، پیچیده بوده و در اغلب موارد ممکن نیست؛ در چنین حالتی باید از روش‌های عددی مانند الگوریتم Stehfest استفاده کرد.

نگاهی به بخش‌های مدل تحلیلی (جدول ۱) نشان می‌دهد که این مدل‌ها حالات ساده مخزن را شبیه‌سازی می‌کنند. برای حالات واقعی مخزن که جریان و هندسه پیچیده‌ای دارند، یافتن راه حل تحلیلی بسیار مشکل و گاهی غیر ممکن است. به‌عنوان مثال فرض کنید که یک مدل چاه آزمایی، چنین در نظر گرفته شود:

- بخش چاه: چاه مایل با اثر انباری متغیر و دارای ناحیه پوسته
- بخش مخزن: مخزن دولایه‌ای با تخلخل و تراوایی دوگانه
- بخش مرزی: از کنار، متصل به آبد به قدرت متوسط و گسل‌های نامنظم

در چنین مدلی، برای به‌دست آوردن معادله جریان به حل معادله انتشار مخازن شکافدار با شرایط مرزی داخلی و خارجی خاص نیاز است. تاکنون برای این مدل، هیچ راه حل تحلیلی ارائه نشده است. این مثال، مشخص می‌کند که برای همه شرایط چاه، مخزن و مرزها، مدل‌های تحلیلی چاه آزمایی وجود ندارد. با این وجود می‌توان چنین مسایلی را به بخش‌های کوچک‌تر و ساده‌تر تقسیم نمود و برای هر بخش از معادله مناسب استفاده کرد؛ روش‌های تطبیق خط راست بر این اساس ایجاد شده‌اند. روش‌های تطبیق خط راست برای بخشی از داده‌ها که در رژیم‌های جریان شعاعی، خطی، دوخطی، کروی، نیم کروی و شبه‌پایا قرار دارند، استفاده می‌شوند و تخمین سریع و خوبی از ویژگی‌های مخزن و چاه ارائه می‌کنند.

بخشی از روش‌های تحلیلی مانند روش‌های تطبیق خط راست بر داده‌های جریان شعاعی در نمودار نیمه لگاریتمی، از حل ساده‌سازی شده معادله انتشار بهره می‌برند. مثال معروف این روش‌ها، نمودارهای نیمه لگاریتمی MDH و Horner است. در این حالت، رژیم جریان شعاعی با رفتار بی‌نهایت یا IARF در نظر گرفته می‌شود و فشار در هر زمان و مکان از حل منبع خطی ذیل (رابطه ۵) به دست می‌آید:

$$p(r, t) = p_i - \frac{70.6qB\mu}{kh} \left[-E_i \left(-\frac{948.1\phi\mu_c r^2}{kt} \right) \right] \quad (5)$$

در رابطه ۵، E_i تابع انتگرال نامی است. در تحلیل چاه آزمایی، تمرکز بر روی پاسخی از چاه است که در $r=r_w$ واقع می‌شود. بعد از مدت زمانی کوتاه، حل منبع خطی به رژیم می‌رسد که برای تفسیر چاه آزمایی مطلوب‌ترین حالت است. این تقریب، تقریب نیمه‌لگاریتمی است و در واحدهای میدانی به شکل معادله ۶ نوشته می‌شود:

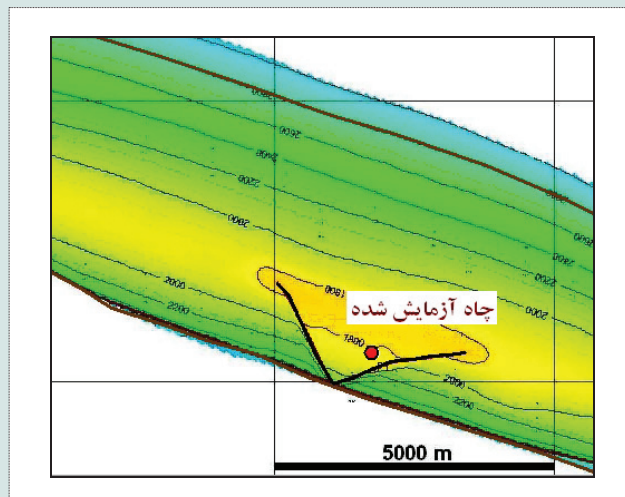
$$p(t) = p_i - \frac{162.6qB\mu}{kh} \left[\log(t) + \log \left(\frac{k}{\phi\mu_c r_w^2} \right) + 0.87S - 3.23 \right] \quad (6)$$

^{۱۱} Real gas pseudo-pressure

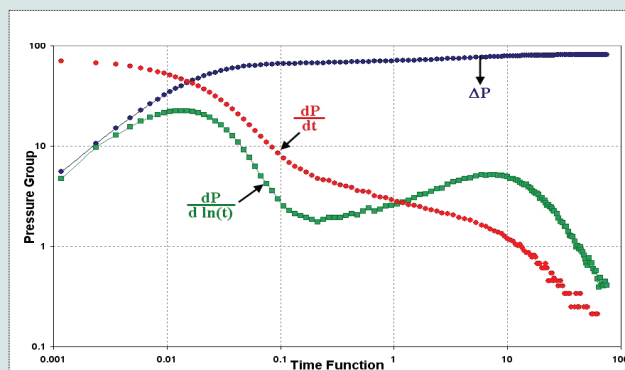


شکل های ۴ و ۵) ایجاد نمود. تولید این نوع شبکه بندی برای شکل هندسی مخازن واقعی و گسل ها به کمک الگوریتم های پیچیده ای انجام می شود. برای خواص بلوک های مخزن، نتایج روش تحلیلی (از قبیل تراوایی، اثر پوسته، اثر انباری چاه) به عنوان حدس اولیه وارد گردید. پس از چندین تکرار، بهترین تطبیق به دست آمد؛ این موضوع در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می شود، مدل عددی به خوبی بر داده های فشار-زمان انطباق دارد.

جدول ۲ نتایج مدل های منطبق شده را در دو حالت تحلیلی و عددی نشان می دهد. با توجه به کیفیت تطبیق مدل عددی در شکل ۶، می توان نتیجه گرفت که نتایج مدل عددی دقیق تر هستند. البته با توجه به شکل ۳، دلیل عدم دقت مدل تحلیلی در زمان های میانی و پایانی مشخص است؛ ولی از آن جا که انطباق مدل تحلیلی با داده ها در زمان های اولیه خوب است، دقت این مدل فقط در تعیین اثر انباری چاه، تراوایی و اثر پوسته هندسی قابل قبول می باشد. یکی از متغیرهایی که فقط به کمک روش تحلیلی می تواند تعیین شود، فاصله چاه از گسل ها و مرزهای خارجی مخزن است که البته در مورد این چاه با توجه به منطبق نبودن مدل بر داده های بخش مرزی، دقیق نیست.



شکل ۱ | موقعیت چاه آزمایش شده در نزدیکی دو گسل متقاطع



شکل ۲ | نمودار تشخیصی لگاریتمی برای بررسی کیفیت داده های فشار

برای اهداف چاه آزمایی محاسبه نمایند؛ زیرا مدل مخزن به کار رفته در آن ها نمی تواند حد تفکیک و سطح جزئیات مورد نظر را در بر داشته باشد. به همین دلیل، شبیه سازی های عددی خاص با در نظر گرفتن نواقص شبیه سازی های تجاری موجود، توسعه یافته اند. یکی از ویژگی های شبیه سازی های عددی چاه آزمایی، شبکه بندی خاص آن هاست. به طور کلی برای این منظور سه روش شبکه بندی پایه ای وجود دارد:

۱. شبکه بندی کارتری با ریزش دگی محلی شبکه ها^{۱۲}
۲. روش اجزای محدود^{۱۳}
۳. روش احجام محدود^{۱۴} با شبکه بندی Voronoi و PEBI^{۱۵}

در شبیه سازی های ویژه چاه آزمایی، برای شبکه بندی فضای اطراف چاه های افقی، مایل، شکافدار هیدرولیکی و نفوذ محدود، روش های پیچیده ای مورد استفاده قرار می گیرند که در شبیه سازی های تجاری مخزن به کار نرفته اند.

۵. مقایسه توانمندی ها

برای بررسی توانمندی روش های عددی در چاه آزمایی، چاهی در نزدیکی دو گسل متقاطع در مخزن آسماری یکی از میدان های جنوب غربی ایران انتخاب شده است (شکل ۱). به منظور داشتن مبنای مناسبی برای مقایسه روش های تحلیلی و عددی، به داده های فشار بر حسب زمان که دارای کیفیت بالایی هستند، نیاز است. از آن جا که معمولاً عملیات چاه آزمایی با مشکلات و پیچیدگی هایی مانند اثرات دینامیکی دهانه چاه، تداخل چاه های دیگر و ناهمگونی های مخزن همراه است، یافتن مجموعه داده با کیفیت دشوار می باشد. به همین دلیل با استفاده از یک شبیه ساز مخزن، داده های مصنوعی چاه آزمایی تولید شد.

چاه مورد بررسی، چاهی به طول ۱۲۰ فوت در لایه ای به ضخامت ۱۹۰ فوت می باشد که تنها ۴۵ فوت آن مشبک شده است؛ بنابراین مدل هندسی چنین چاهی، نفوذ جزئی است. برای سادگی، تراوایی افقی و تخلخل مخزن، همگن و همسانگرد در نظر گرفته شده است؛ اما نسبت تراوایی عمودی به افقی ۰/۳ فرض شده است. تراوایی ناحیه اطراف چاه طوری کاهش داده شده که اثر پوسته ای معادل ۰/۲ به وجود آید. چاه به مدت ۲۱ ساعت با دبی ۸۵۰ بشکه در روز جریان داده شد و سپس برای ۹۶ ساعت بسته شد. هدف، تحلیل بخش رشد فشار برای تعیین خواص چاه و مخزن می باشد.

برای مقایسه توانایی مدل های تحلیلی و عددی در انطباق با مجموعه داده ها از نرم افزار Saphir محصول شرکت Kappa استفاده گردید؛ این نرم افزار در هر دو بخش تحلیلی و عددی، توانایی های پیشرفته ای دارد. برای اطمینان از درستی و کیفیت داده های فشار بر حسب زمان، نمودار لگاریتمی تشخیصی^{۱۶} مطابق شکل ۲ رسم گردید. در این شکل، سه نمودار اختلاف فشار، مشتق نیمه لگاریتمی و مشتق اولیه (dp/dt) ترسیم شده است. روند نزولی داده های مشتق اولیه نشان می دهد که عواملی مانند اثرات دینامیکی دهانه چاه، باعث از دست رفتن کیفیت داده ها نشده است.

پس از بارگذاری داده ها و کنترل کیفیت آن ها، تلاش شد که در بخش تحلیلی این نرم افزار، مدل چاه آزمایی با داده ها تطبیق داده شوند. مدل تحلیلی به کار رفته شامل اثر انباری ثابت، چاه با نفوذ جزئی، مخزن همگن و مرزهایی با دو گسل متقاطع با زاویه ۴۰ درجه می باشد. شکل ۳، نتیجه بهترین تطبیق مدل تحلیلی را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشخص است، مدل تحلیلی نمی تواند تغییرات فشار را در زمان های میانی و پایانی به خوبی پیش بینی کند.

در ادامه تلاش شد که مدل عددی نرم افزار Saphir بر داده ها منطبق شود. برای این منظور، ابتدا شکل مرزهای مخزن و دو گسل متقاطع آن و مختصات محل ورود چاه به مخزن به نرم افزار داده شد. مانند قبل، چاه به صورت عمودی با نفوذ جزئی تعریف گردید. نرم افزار، شبکه بندی PEBI را به صورت خودکار (مانند

¹² LGR: Local Grid Refinement

¹⁵ PEBI: Perpendicular Bisection

¹³ FEM: Finite Element Method

¹⁶ Diagnostic plot

¹⁴ FVM: Finite Volume Method

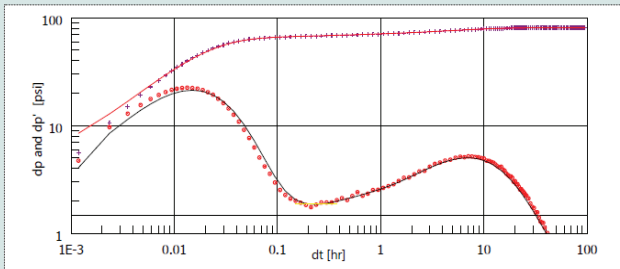


نتیجه گیری

۱. مزیت مدل های تحلیلی این است که سریع و دقیق هستند، ولی بسیاری از مسایل، آن قدر پیچیده می باشند که مستقیماً به صورت تحلیلی نمی توان آن ها را حل کرد. مزیت دیگر مدل های تحلیلی این است که به داده های محدودی از چاه و مخزن نیاز دارند و فرایند تخمین خواص مخزن ساده است.

۲. هر چند مدل های تحلیلی ساده اند، ولی برای تخمین تراوایی، ضریب پوسته و ضریب انباری دقت خوبی دارند. این مدل ها هنگامی که رژیم های جریان شعاعی در اطراف چاه به اندازه کافی توسعه یافتند، قابل استفاده می باشند.

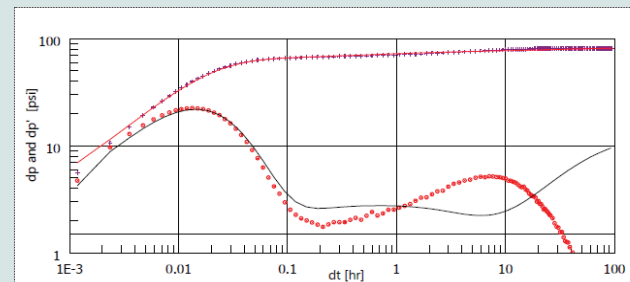
۳. در سال های اخیر کاربرد مدل های عددی برای آنالیز فشار گذرا افزایش یافته است. مدل های عددی دو ویژگی بارز دارند: یکی این که می توانند هندسه های پیچیده را مدل کنند و دیگری این که توانایی حل مسایل انتشار غیرخطی که اصول برهم نهی زمان و مکان در آن ها کاربرد ندارد را دارا می باشند.



شکل ۶ | مدل عددی که به خوبی بر داده های فشار منطبق شده است

۲ | مقایسه نتایج مدل های تحلیلی و عددی در این مطالعه

ویژگی	نماد	واحد	روش تحلیلی	روش عددی
ضریب انباری	c	bbl/psi	-/۰.۰۷۸	-/۰.۰۸۲
تراوایی	K	md	۲۱۰	۲۱۶
ضریب پوسته هندسی	S_g	...	۱۵	۱۵/۶
ضریب پوسته مکانیکی	S	...	-/۰.۴۲۷	-/۰.۱۵۲
نسبت تراوایی عمودی به افقی	k_z/k_r	...	-/۰.۲۱۳	-/۰.۳
فشار برون یابی شده	p^*	psia	۴۷۹۳	۴۷۹۷
فاصله تا مرز اول	L_1	ft	۱۵۲	...
فاصله تا مرز دوم	L_2	ft	۱۶۸۰	...



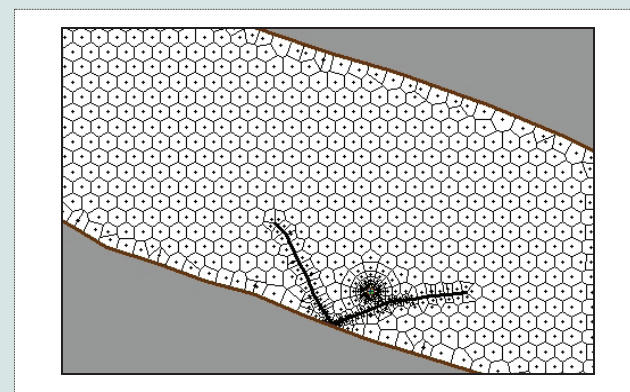
شکل ۳ | کیفیت تطبیق مدل تحلیلی مخزن همگن با دو گسل متقاطع

۴. مدل های عددی، برای مدل سازی مخزن به داده های زیادی نیاز دارند. در حالتی که مخزن به خوبی شناخته نشده یا دارای ناهمگونی های زیاد است، استفاده از مدل های عددی مشکل می باشد. موضوع شبکه بندی و گسسته سازی فضای مخزن هم از چالش های این روش هاست.

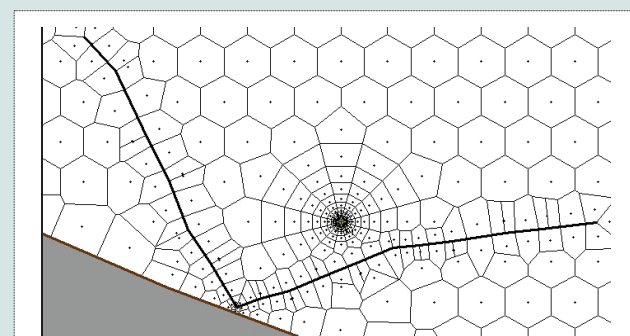
۵. آنالیز چاه مورد مطالعه در این مقاله نشان داد که استفاده از نتایج روش تحلیلی به عنوان حدس اولیه باعث بهبود سرعت و نتایج روش عددی می شود.

منابع

- [1] Theis, C.V.: "The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage," Trans., AGU (1935), 519-524.
- [2] Muskat, M.: "Use of data on the build-up of bottom hole pressures", Trans., AIME, 1937, 123, pp 44-48.
- [3] Gringarten, A.C.: "From straight lines to deconvolution: the evolution of the state of the art in well test analysis", SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 2008, pp 41-42, also paper SPE 102079.
- [4] Tiab, D.: "Analysis of pressure and pressure derivatives without type-curve matching: skin and wellbore storage", Pet. Sci. Eng. J., vol. 12, pp 171-181, 1994.
- [5] Anraku, T.: "Discrimination between reservoir models in well test analysis", PhD Thesis, Stanford University, 1993.
- [6] Dynamic Flow Analysis, Kappa Engineering, Paris, 2003.



شکل ۴ | شبکه بندی PEBI که در نرم افزار Saphir ایجاد شده است



شکل ۵ | بزرگنمایی شبکه بندی ترکیبی با ریزشگی در اطراف چاه و گسل ها