Archive of SID

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی
۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
مجری: هم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ – ۰۲۱
www.Reservoir.ir

مطالعه گسترده خطاهای مربوط به چاه آزمایی

میلاد غفوری[۱]، علیرضا طباطبایی نژاد[۲]
دانشگاه صنعتی سهند تبریز
Milad1370gh@gmail.com

چکیده

تفسیر چاه آزمایی از مجموعه ای از عدم قطعیت ها که در مجموع دقت پاسخ ها را کاهش می دهند؛ رنج می برد. چاه آزمایی و داده های مربوط به آن کمک شایانی به آنالیز مستقیم مخزن می کند و باید تا آنجا که امکان دارد خطاها و عدم قطعیت ها را کاهش داد. چندین منشأ عدم قطعیت در چاه آزمایی وجود دارد که اصلی ترین آن ها عبارتند از :خطاهای فیزیکی در داده های فشار شامل نویزها، خطای راندگی، تأثیرات دما و انتقال زمان؛ خطا در اطلاعات مربوط به دبی جریان، ابهام در پاسخ ها و انتخاب مدل ها، ابهام در تخمین پارامترها و عدم قطعیت در خواص سنگ و سیال. پیشرفت تکنولوژی در دقت اندازه گیری های فشار بهبود ایجاد کرده و اندازه گیری های فشار به عنوان کمترین ابهام در اطلاعات چاه آزمایی در نظر گرفته می شود. در این مقاله مطالعات انجام شده در این زمینه به صورت نسبتاً گسترده ای بررسی شده است، منشأ خطا و عدم قطعیت و میزان تأثیر هریک از آن ها روی تخمین پارامترها مورد مطالعه قرار گرفته است و راهکارهایی برای رفع این عدم قطعیت ها ارائه خواهد شد. خطای راندگی در دو حالت شکاف با قابلیت انتقال بالا و شکاف با قابلیت انتقال پایین بررسی می شود و روابط جدیدی ارائه خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: چاه آزمایی، عدم قطعیت، خطای راندگی، تخمین پارامتر

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مخازن هیدروکربوری
۲- دانشیار

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

دو نقش اصلی تفسیر گذرای فشار در چاه آزمایی، شناسایی مدل مخزن و تخمین پارامترهاست. شناسایی مدل مخزن به تفسیر شکل منحنی فشار و مشتق فشار بستگی دارد که باید با سایر اطلاعات زمین شناسی، ژئوفیزیکی و پتروفیزیکی جمع بندی شود. تخمین دقیق پارامترها به چندین عامل بستگی دارد که شامل: انتخاب مدل مخزنی صحیح، داده های تست کافی در رژیم جریانی مورد مطالعه و داده های ورودی دقیق است [۱].

تفسیر چاه آزمایی از مجموعه ای از عدم قطعیت ها که دست به دست هم می دهند تا دقت پاسخ ها را کاهش دهند رنج می برد. این خطاها و عدم قطعیت ها منشأ های متفاوتی دارد. انجام چاه آزمایی و داده های مربوط به آن کمک شایانی به آنالیز مستقیم مخزن می کند و باید تا آنجا که امکان دارد خطاها و عدم قطعیت ها را کاهش داد.[۲] داده های ورودی بیشترین تأثیر را روی تخمین پارامترها دارد. با توجه به این، یک مهندس مخزن باید روی داده های به دست آمده تمرکز کند تا تخمین بهتری از داده های ورودی به دست آورد و بدین ترتیب از صرف هزینه و وقت برای اصلاح تخمین های غیرمعتبر در اثر داده های نادرست جلوگیری شود و با دانستن مقدار و جهت تأثیر خطاها در داده های ورودی روی نتایج محاسباتی، سریعاً در داده های ورودی تجدیدنظر کند بدون این که کل آنالیز را تکرار کند [۱].

در سال ۱۹۵۱ چارلز هاتچینسون تأثیر خطای داده ها روی محاسبات مهندسی مخزن را بررسی کرد. او روش های آماری تأثیر خطای اندازه گیری روی محاسبات مهندسی مخزن مانند فشار مخزن، میزان آسیب چاه و میزان نفت درجا را مورد مطالعه قرار داد. او در این مطالعه توجه ویژه ای به خطا در فشار ته چاه داشت و نتیجه گرفت که تقریباً در تمام حالت های بررسی شده میزان خطای اندازه گیری فشار ته چاه بیشترین خطا را در محاسبات مهندسی مخزن ایجاد می کند [۳]. در سال ۱۹۸۶ گیلوت و هورن روش تفسیر داده های فشار گذرا را ارائه دادند و از رگراسیون غیرخطی برای انطباق داده های میدانی با مدل مخزن استفاده کردند. تأثیر خطای داده های دبی را بررسی کردند و متوجه شدند این خطاها نسبت به خطای فشاری اهمیت کمتری دارد [۴]. در سال ۱۹۹۲ رمی یکسو روی (bias) را در نمودار خط راست هورنر نشان داد. تقریباً در همه ی موارد خط راست هورنر خیلی شیب دار رسم شد و تراوایی را کم تر تخمین زد. در بررسی های او خط راست هورنر ضریب پوسته را نیز از نظر مقداری کمتر تخمین می زد. در نتایج او آمده است داده های ساخت فشار نیازمند تنظیم و تصحیح داده های فشار جریانی و زمان بست چاه یا هر دو مورد است [۵]. در سال ۱۹۹۲ هورن یک مقدار برای بازه ی اطمینان پیشنهاد کرد که به اعتبارسنجی تخمین های زده شده ی پارامترها کمک می کند [۶]. در سال ۱۹۹۳ آنراکو و هورن روش «احتمال پیش بینی کننده ی متوالی (sequential predictive probability method)» را به عنوان روشی برای انتخاب در بین مدل های پیشنهادی مخزنی ارائه کردند که در روش های معمول نظیر آنالیز گرافیکی با استفاده از منحنی مشتق فشار و رگراسیون غیر خطی با بازه های اطمینان، تشخیص آن ها ابهام دارد. روش خود را به داده های چاه آزمایی واقعی و ساختگی اعمال کردند و مشاهده کردند حتی در حالتی که روش های گرافیکی و بازه های اطمینان جواب نمی دهد، به خوبی

www.SID.ir

Archive of SID

کارساز است [۷]. در سال ۱۹۹۴ هورن عدم قطعیت های آنالیزهای چاه آزمایی را بررسی کرد و به معرفی روش هایی که در حذف یا کاهش آن ها کاربرد دارد پرداخت. در مطالعه ی او حالتی که چاه دارای شکاف است مورد بررسی قرار نگرفته است. او اظهار داشت که خطای اندازه گیری فشار به صورت نرمال پخش می شود [۲]. در سال ۱۹۹۸ اسپیوی روی تأثیر داده های ورودی بر تخمین پارامترهای مخزنی شامل ضخامت ناحیه، تخلخل، ویسکوزیته، ضریب حجمی سازند، دبی جریانی و تراکم پذیری، متمرکز شد و تأثیر آن ها بر پارامترهای چاه آزمایی را بررسی کرد. دو مدل شامل چاه عمودی با ضریب انباره ی چاه و ضریب پوسته و مدل چاه با شکاف هیدرولیکی با هدایت پذیری محدود مورد مطالعه قرار گرفت و به صورت خاصی رفتار تخلخل دوگانه را هم بررسی کرد [۱]. آرچر در سال ۲۰۰۲ تأثیر نویز تصادفی در اندازه گیری های فشار، خطای راندگی و خطاهای اندازه گیری دبی را بررسی کرد. از ۲۰۰۰ پاسخ چاه آزمایی ساختگی استفاده کرد و به منظور بررسی نتایج، رگراسیون غیرخطی و نمودارهای ویژه ای را به کار برد. او در مطالعه ی خود دو حالت چاه شکافدار و بدون شکاف را در نظر گرفت [۸]. امیت ماداهار در سال ۲۰۰۹ تأثیر موازنه ی جرم روی آنالیز چاه آزمایی را مورد مطالعه قرار داد و تعریف جدیدی از تابع شبه زمان (pseudo time function) برای ترکیب اثر تراکم پذیری سازند ارائه داد. او افت فشار مخزن را در نظر گرفت و از ضریب تصحیحی در این تابع شبه زمان استفاده کرد تا فشار متوسط مخزن را دقیقتر کند و خطا در تخمین میزان گاز درجا را کاهش دهد [۹].

در این مقاله جزییات مطالعات انجام گرفته شده در زمینه ی خطا در چاه آزمایی بررسی می شود، منشأ خطا و عدم قطعیت و میزان تأثیر هریک از آن ها در تخمین پارامترها مورد مطالعه قرار می گیرد و راهکارهایی برای رفع این عدم قطعیت ها پیشنهاد خواهد شد. خطای راندگی در دو حالت شکاف با قابلیت انتقال بالا و شکاف با قابلیت انتقال پایین بررسی می شود و روابط جدیدی ارائه خواهد شد.

۲- منشأ عدم قطعیت و خطا در چاه آزمایی

عدم قطعیت در هر مسئله ی معکوس غیرخطی ذاتی است. چندین منشأ عدم قطعیت (خطا) در چاه آزمایی وجود دارد. اصلی ترین آن ها عبارتند از: خطاهای فیزیکی در داده های فشار شامل نویزها، خطای راندگی، تأثیرات دما و انتقال زمان (Time shift)، خطا در اطلاعات مربوط به دبی جریان، ابهام در پاسخ ها و انتخاب مدل ها، ابهام در تخمین پارامترها و عدم قطعیت در خواص سنگ و سیال [۲].

اندازه گیری های فشار با عناصر مکانیکی، الکتریکی و انسانی درگیر است و بنابراین خطا در آن وجود خواهد داشت. پیشرفت تکنولوژی در دقت اندازه گیری های فشار بهبود ایجاد کرده و اندازه گیری های فشار به عنوان کمترین نامعلومی در اطلاعات چاه آزمایی در نظر گرفته می شود. به هرحال بهتر است که تأثیر خطای اندازه گیری آن در نتایج نهایی بررسی شود. اولین خطای اندازه گیری نویز است. اگر خطای تصادفی عادی رخ دهد، تردید در تخمین پارامترهای مخزن افزایش می یابد. به دلیل غیرخطی بودن تابع فشار نسبت به پارامترهای مخزن تخمین های مربوط به داده های نویزی به صورت نرمال در مقادیر پخش شده است (توزیع نرمال). شکل ۱ الف توزیع ۱۲۰۰۰ تخمین k، S، c، P_i در مجموعه داده های نویزدار که با میانه صفر و انحراف معیار psi ۱ توزیع شده اند را نشان می دهد. همانند نویز، تخمین پارامترها توزیع به شدت نرمالی

www.SID.ir

Archive of SID

دارند. این مشاهده است که اعمال بازه ی اطمینان روی تخمین ها را عملی و مفید می سازد. در شکل ۱ الف تخمین پارامترهای مخزن با یک نویز مشخص درجه ی نامعلومی (Uncertainty degree) متفاوتی دارند و دامنه ی مقادیر پارامترها ±۱% نسبت به مقدار واقعی است. برای بررسی توزیع تخمین پارامترها دامنه ی آن ها به ۱۰۰ قسمت تقسیم شده که در آن ۱۲۰۰۰ تخمین قرار دارند. تصویر کلی داده های نویزی در شکل ۱ ب آمده است. شکل ۱ نشان می دهد که P_i بیشترین قطعیت را در حضور داده های نویزی دارد، خطای ضریب پوسته نامعلومی بیشتری نسبت به تراوایی دارد و ضریب انباره ی چاه نسبت به تراوایی و ضریب پوسته عدم قطعیت کمتری دارد [۲].

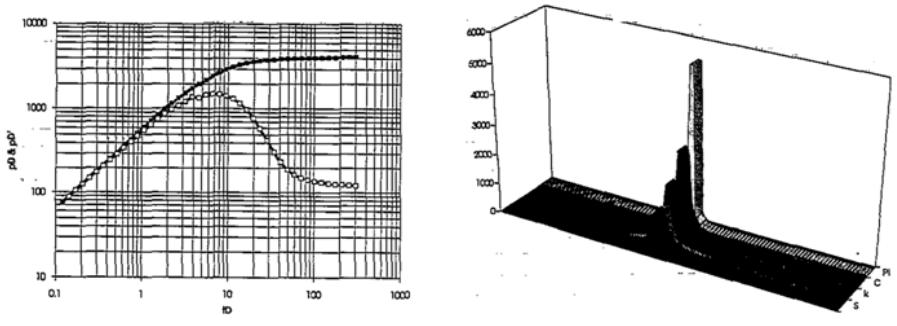
خطای رایج بعدی در فشار، راندگی (Drift) است. راندگی یک خطای قطعی است و معمولاً ثابت فرض می شود و به صورت تصادفی نیست [۸]. بر خلاف نویز تصادفی، راندگی باعث یکسوروی در تخمین پارامترها می شود. شکل ۲ الف توزیع تخمین پارامترها در حالت راندگی psi ۵۰۰ در ۳۰۰ ساعت را در ارتباط با داده های آزمایش نشان می دهد. می توان این نتیجه را با شکل ۱ الف مقایسه کرد زیرا همان دامنه ی psi ±۱% را در مقادیر پارامترهای تخمین زده شده نشان می دهد. شکل ۲ ب تصویر این داده ها را در نمودار نشان می دهد. وقتی شکل ۲ ب با شکل ۱ ب مقایسه می شود، راندگی به تنهایی مشهود نیست. خطای راندگی حدود ۱ درصد یکسوروی در تخمین تراوایی و ضریب پوسته ایجاد می کند، در حالی که فشار اولیه و ضریب انباره ی چاه به ترتیب بیشتر و کمتر تحت تأثیر یکسوروی قرار گرفته اند [۲]. آرچر در سال ۲۰۰۲ تأثیر خطای راندگی روی تخمین تراوایی در حالت چاه بدون شکاف را مورد بررسی قرار داده و یک رابطه ی تحلیلی برای آن ارائه داده است. اگر تغییر فشار ثبت شده در اثر سنجش با خطای راندگی به شکل زیر باشد: [۸]

$$\Delta p_{meas} = \Delta p_{true} - \alpha t \quad (۱)$$

Δp_{meas}: اختلاف فشار اندازه گیری شده psi
Δp_{true} : اختلاف فشار واقعی psi
α : ثابت خطای راندگی (psi/hr)
t : زمان بر حسب ساعت

تابع مشتق فشار طبق رابطه ی زیر برابر است با:

$$\Delta p'_{rf} = ۷۰/۶ \, q\mu B/(k'h) \quad (۲)$$

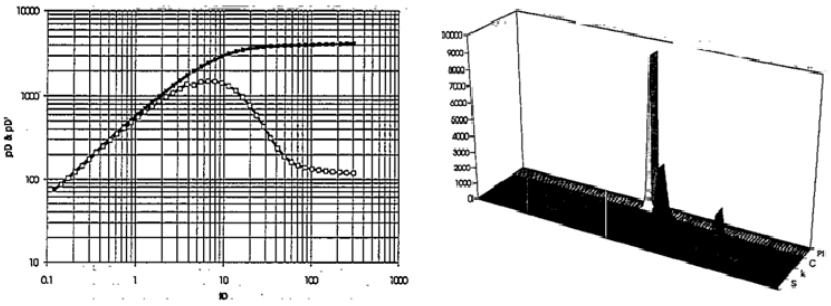


ب الف

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱: الف. توزیع ۱۲۰۰۰ تخمین پارامتر بر اساس نویز تصادفی نرمال با انحراف معیار psi ۱؛ ب. نمودار حاصل از نویز تصادفی نرمال با انحراف معیار psi ۱ [۲].



ب الف

شکل ۲: الف. توزیع تخمین ۱۲۰۰۰ پارامتر بر اساس نویز راندگی psi ۵ در ۳۰۰ ساعت؛ ب. نمودار حاصل از نویز راندگی psi ۵ در ۳۰۰ ساعت[۲].

بنابراین در حالت مخزن نامحدود شعاعی مقدار این مشتق به خاطر خطای راندگی ثابت نخواهد بود. به هر حال اگر میزان خطای راندگی بسیار کوچک باشد آن گاه می توان این تابع مشتق فشار چاه آزمایی را تقریباً ثابت فرض کرد. می توان تابع مشتق فشار چاه آزمایی بر اساس مقدار تخمینی تراوایی (k')، اختلاف فشار اندازه گیری شده و مقدار واقعی تراوایی (k)، اختلاف فشار واقعی همراه با راندگی فشاری (α) نوشت. برای حالت چاه بدون شکاف که با نرخ ثابت در یک مخزن نامحدود تولید می کند داریم:

$$\Delta p'_{rf} = ۷۰/۶\ q\mu B/(kh) - \alpha t \qquad (۳)$$

برای بررسی تأثیر راندگی باید رابطه ای بین k ، k' و α بدست آوریم:

$$k'^{-1} = k^{-1} - h\alpha\ t/(۷۰/۶\ q\mu B) \qquad (۴)$$

بنابراین رابطه ی میان تراوایی تخمینی و واقعی به این صورت است:

$$k' = k/(1 - k\ h\alpha\ t/(۷۰/۶ q\mu B)) \qquad (۵)$$

اندازه گیری دبی جریان خیلی سخت تر از اندازه گیری فشار است. سیالی که از چاه خارج می شود مخلوطی از چند فاز است. بر خلاف فشار که تغییر کوچکی دارد، دبی جریان بین حالت کاملاً باز و کاملاً بسته تغییر می کند. معمولاً دبی جریان را فقط در سطح اندازه گیری کنند زیرا اندازه گیری های ته چاهی خیلی گران است و چندان هم منطقی نیست. بنابراین بر این باورند که اندازه گیری های دبی جریان دارای دقت کمتری نسبت به فشار است. به همین دلیل می توان متوجه شد که چرا آزمایش ساخت فشار مفید خواهد بود؛ زیرا دبی جریانی که ما به طور منطقی نسبت به آن می توانیم مطمئن باشیم همان مقدار «صفر» است. هر چند جریان داخلی در یک چاه از یک سطح به سطح دیگر می تواند این مقدار را به اشتباه بیندازد [۲]. در سال ۱۹۸۶ گیلوت و هورن تأثیر خطای داده های دبی را بررسی کردند و متوجه شدند این خطاها نسبت به خطای فشاری اهمیت کمتری دارد [۴]. برای آزمایش ساخت فشار (build up) و برگشت فشار (fall off) بخشی از مشکل مربوط به دبی جریانی به تاریخچه ی قبل از بسته شدن چاه بر می گردد.

نکته ی مهم در تفسیر چاه آزمایی ابهام در انتخاب مدل بر اساس چند آنالیز محتمل است. ابهامات واقعی بین مدل ها تشخیص مدل درست را سخت خواهد کرد زیرا داده های کافی به ندرت موجود است. اگر آزمایش به مدت کافی انجام شده

www.SID.ir

Archive of SID

باشد خیلی از اطلاعات گذرای فشار باعث اندازه گیری غیرمبهم در خواص مخزن خواهد شد؛ اما بسیاری از تست های چاه آزمایی به مدت کافی انجام نمی شوند و این ابهامات برطرف نمی شود. وقتی یک مدل مخزنی پیشنهاد می شود باید تخمین پارامترهای مدل و روش تخمین ارائه شود. این تخمین ها می تواند از روش های گرافیکی- تجاری مثل نمودار هورنر یا عملکردهای کامپیوتری مثل رگراسیون غیر خطی باشد [۲]. در سال ۱۹۹۲ رمی یک سوروی را در نمودار خط راست هورنر نشان داد. تقریباً در همه ی موارد خط راست هورنر خیلی شیب دار رسم شد و تراوایی را کم تر تخمین زد. در بررسی های او خط راست هورنر ضریب پوسته را نیز از نظر مقداری کمتر تخمین می زد [۵]. اگر چه رگراسیون غیرخطی می تواند قابل قبول بودن تخمین پارامترها را افزایش دهد اما به خاطر طبیعت پروسه ی گذرای فشار و رابطه ی بین پارامترها هنوز عدم قطعیت وجود دارد. در عمل چندین پارامتر مهم به شدت با هم رابطه دارند که اساساً به صورت مستقل تخمین زده نمی شوند. به عنوان مثال رابطه با درجه ی بالای وابستگی بین تراوایی و ضریب پوسته برقرار است.

علاوه بر عدم قطعیت دبی جریان، بر اساس روابط چاه آزمایی واضح است تخمین تراوایی به عدم قطعیت ویسکوزیته، ضریب حجمی سازند و ضخامت ناحیه ی بهره ده؛ و تخمین ضریب پوسته به عدم قطعیت تخلخل، ویسکوزیته، ضریب تراکم پذیری کل، شعاع چاه؛ و تخمین ناحیه ی ریزش (A) به عدم قطعیت ضخامت ناحیه ی بهره ده، تراکم پذیری کل، ضریب حجمی سازند و تخلخل بستگی دارد [۲]. داده های ورودی شامل ضخامت ناحیه ی بهره ده (h)، تخلخل، ویسکوزیته، ضریب حجمی سازند، دبی جریانی و تراکم پذیری است. داده های ورودی به طور اجتناب ناپذیری عدم قطعیت دارند بنابراین تخمین پارامترها هم به عدم قطعیت می رسد [۱]. اگر بخواهیم منشأ خطا در داده های چاه آزمایی را بررسی کنیم عبارتند از: آنالیز چاه پیمایی حفره باز، خواص سیال، داده های چاه و مخزن نظیر تراکم پذیری سازند، قطر چاه. تفسیر تست گذرای فشار به ضخامت ناحیه ی بهره ده، تخلخل و اشباع آب بستگی دارد که از آنالیز چاه پیمایی به دست می آید. ضخامت ناحیه ی بهره به طور مستقیم روی محاسبات تراوایی تأثیر می گذارد. تخلخل و اشباع آب هر دو روی تراکم پذیری کل تأثیر می گذارند. تراکم پذیری کل هم روی تخمین ضریب پوسته، نیم طول شکاف (L_f) و فاصله تا مرز تأثیر می گذارد. چاه پیمایی حفره باز به طور مستقیم تخلخل، میزان شیل و اشباع آب را اندازه نمی گیرد، بلکه شاخص هیدروژنی، زمان گذر، دانسیته ی الکترونی و رادیواکتیویته ی طبیعی سازند را اندازه می گیرد. فردی که داده های چاه پیمایی را آنالیز می کند روابط تجربی را برای تعیین تخلخل، اشباع آب و میزان شیل و ضخامت ناحیه ی بهره ده استفاده می کند. حتی اگر آنالیز کننده بهترین رابطه ی تجربی را استفاده کند به دلیل خطاهای مربوط به درجه بندی (Log calibration) چاه پیمایی، تأثیر فرورفتگی و بیرون زدگی چاه روی چاه پیمایی و یا درجه بندی نکردن نتایج براساس مقادیر حاصل از آنالیز مغزه، خطا در نتایج وجود خواهد داشت. خطای درجه بندی نکردن مناسب چاه پیمایی می تواند باعث عدم دقت در تخمین h، Φ، S_w شود که توسط الی و همکارانش بررسی شده است [۱۰]. همچنین عدم تصحیح تأثیر پستی و بلندی چاه در محاسبات تخلخل و ضخامت ناحیه ی بهره ده به شدت تأثیر می گذارد. مک کین و همکارانش[۱۱] نشان دادند عدم محاسبه ی تأثیر شستگی چاه (Wash out) و پستی و بلندی روی نمودار چاه پیمایی دانسیته می تواند

www.SID.ir

Archive of SID

ضخامت ناحیه ی بهره ده را تا ۲۰۰% بیشتر تخمین بزند و عدم مقایسه ی آنالیز چاه پیمایی و داده های مغزه باعث خطا می شود. اگر آنالیز چاه پیمایی همه ی فاکتورهای بالا را در نظر بگیرد می تواند تخمین هایی از پارامترهای سازند با دقت نشان داده شده در جدول ۱ را ارائه دهد.

جدول ۱: دامنه ی عدم قطعیت حاصل از تفسیر چاه پیمایی[۱]

پارامتر	انحراف بر حسب درصد	
	بدون تصحیح	همراه با تصحیح
تخلخل	±۱۵	±۵
اشباع آب	±۴۰	±۱۰
ضخامت ناحیه ی بهره ده	±۵۰	±۱۵

در داده های ورودی تفسیر گذرای فشار از خواص سیال هم استفاده می شود. این داده ها شامل ویسکوزیته، ضریب حجمی سازند و تراکم پذیری سیال است. این داده ها از روابط تجربی یا آنالیز آزمایشگاهی به دست می آید. مک کین در سال ۱۹۹۱ محدوده ی خطای روابط تجربی مربوط به خواص سیال را نشان داده است. اگر از روابط تجربی استفاده شود، تراکم پذیری نفت در بالای فشار حباب ۵۰% کمتر محاسبه می شود. در نزدیک نقطه ی حباب دقت بیشتر است و در زیر نقطه ی حباب به دامنه ی فشار بستگی دارد. تراکم پذیری نفت برای فشار بالای psi ۵۰۰ تا ۱۰% و برای فشار زیر psi ۵۰۰ حدود ۲۰% خطا دارد. اگر نسبت گاز به نفت دقیق محاسبه شده باشد، ضریب حجمی نفت در زیر نقطه ی حباب تا ۵۰% خطا دارد و در بالای نقطه ی حباب به ضریب حجمی در نقطه ی حباب و تراکم پذیری نفت در بالای نقطه ی حباب بستگی دارد. روابط تجربی ویسکوزیته ی نفت چه در بالا و چه در پایین نقطه ی حباب دقیق نیست و مک کین اظهار داشته که این روابط فقط درجه ی توان مربوط به ویسکوزیته را تخمین می زند [۱۲]. ضریب حجمی سازند گاز، دانسیته ی گاز و تراکم پذیری گاز از ضریب تراکم پذیری گاز (z) گاز بدست می آید. به علاوه z از گراویته ی گاز و یا ترکیب جزئی گاز بدست می آید. پیپر و همکارانش در سال ۱۹۹۳ روابط تجربی ای برای این ضریب ارائه کردند که خطای مطلقی حدود ۱٫۱% و خطای مطلق ماکزیمم ۵٫۸% از ترکیب جزئی و میانگین خطای مطلق ۱٫۳% و ماکزیمم خطای مطلق ۷٫۳% از گراویته ی گاز را نشان داده است. اگر تأثیر ناخالصی نادیده گرفته شود تا ۲۷% خطا خواهیم داشت [۱۳]. ضریب حجمی سازند گاز مستقیماً با z رابطه دارد، اگر دما و فشار دقیق باشد خطای ضریب حجمی سازند گاز با خطای z یکسان است. مک کین هشدار داده که روابط تجربی تراکم پذیری گاز برای $Tpr<1/4$ و $0/4<Ppr<3$ استفاده شود. ویسکوزیته ی گاز تا ۲% در فشارهای پایین و تا ۴% در فشارهای بالا (وقتی وزن مخصوص گاز کمتر از یک است) خطا دارد. برای گاز میعان معکوس و وزن مخصوص بالای ۱/۵ ویسکوزیته ی محاسبه شده با روابط تجربی تا ۲۰% کمتر محاسبه می شود [۱]. تراکم پذیری سازند خیلی گسترده تغییر می کند. آشناترین رابطه ی تجربی برای تراکم

www.SID.ir

Archive of SID

پذیری سازند رابطه ی تجربی هال [۱۴] بوده که مطالعات نشان می دهد تا یک درجه توان خطا دارد[۱]. تراکم پذیری کل از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$c_t = c_f + S_w c_w + S_o c_o + S_g c_g \qquad (۶)$$

بنابراین دقت تراکم پذیری کل به دقت اشباع های بدست آمده از چاه نگاری و روابط تجربی تراکم پذیری سازند و سیال بستگی دارد. خطای مربوط به دبی جریان معمولاً بیشترین چیزی است که اتفاق می افتد زیرا در ثبت دبی قبل از آزمایش ساخت فشار معمولاً نقصان وجود دارد. وقتی چنین اتفاقی می افتد، آنالیزگر باید دبی جریان را تخمین بزند. این تخمین اغلب از حجم تولید ماهیانه به دست می آید. اگر روزهای تولید مشخص نباشد میانگین دبی جریانی تخمین زده شده اشتباه خواهد بود. علاوه بر این دبی جریانی میانگین نمی تواند دقیقاً بیانگر دبی قبل از تست باشد. شعاع چاه که در سازند سنگ آهک از قطر سنج به دست می آید فقط بر ضریب پوسته و ضریب جریان درون تخلخلی (λ) تأثیر می گذارد. بر این باورند که شعاع چاه باید به گونه ای انتخاب شود که معقول ترین مقدار برای ضریب پوسته حاصل شود. این مقدار بهینه قطر مته خواهد بود [۱]. تأثیر خطای داده ها روی نتایج چاه آزمایی به مخزن همگن با عملکرد نامحدود و مخزن همگن با مرز در جدول ۲ آمده است. نتایج به دست آمده به هر نوع مرزی می تواند اعمال شود. تنها تأثیر مقدار خطا در ویسکوزیته روی تراوایی است که به همان نسبت خطا دارد. تراوایی و ویسکوزیته همیشه در نسبت k/μ ظاهر می شوند، این خطاها در هر پیش بینی بدست آمده (اگر به یک اندازه خطا داشته باشند) یکدیگر را خنثی می کنند. تخلخل و تراکم پذیری همیشه با هم ظاهر می شوند و حاصلضرب تخلخل-تراکم پذیری می تواند به عنوان یک پارامتر در نظر گرفته شود. دقت شود که خطا در حاصلضرب تخلخل-تراکم پذیری روی مقادیر تراوایی و ضریب انباره ی چاه تأثیری ندارد اما در ضریب پوسته و فاصله تا مرز تأثیر می گذارد. خطا در ضریب پوسته تقریباً کم است. خطا در فاصله تا مرز اهمیت بیشتری دارد. بنابراین تخمین دقیق ناحیه ی ریزش و فاصله تا مرز به تخمین دقیق تخلخل و تراکم پذیری کل بستگی دارد [۱]. به خوبی می دانیم که خطا در ضخامت ناحیه ی بهره ده باعث خطایی در تراوایی می شود که طبق جدول ۲ حاصلضرب kh ثابت می ماند. به هر حال خطا در h محاسبه شده، روی ضریب پوسته و فاصله تا مرز به خوبی تأثیر می گذارد. برای مثال اگر h دو برابر شود ضریب پوسته به اندازه ی $0/5\ln 2$ یا ۰/۳۴۷ زیاد می شود و فاصله تا مرز ۱/۴۱۴ برابر کم خواهد شد. توجه شود که خطا در تخلخل، تراکم پذیری و ضخامت ناحیه ی بهره ده به شدت با هم رابطه دارند، زیرا همه با تفسیر چاه پیمایی به دست می آیند. برای مثال یک مخزن گازی با فشار کم را در نظر بگیرید؛ اگر تخلخل حدس زده شده از چاه آزمایی سیستماتیکی خیلی کم باشد، اشباع آب خوانده شده از نمودار مقاومت خیلی زیاد خواهد بود. بنابراین اشباع آب زیاد باعث تخمین کمتر اشباع گاز خواهد شد و در نتیجه طبق معادله ی (۶) تراکم پذیری کل خیلی کم تخمین زده می شود. خوشبختانه حجم خلل و فرج هیدروکربن ها نسبتاً از خطا در تخلخل، اشباع و ضخامت ناحیه ی بهره ده تأثیر نمی پذیرد. چون دبی جریان و ضریب حجمی سازند با هم ظاهر می شوند می توان آن ها را یک پارامتر منفرد در نظر گرفت. خطا در دبی جریان مخزن همه ی مقادیر محاسباتی را تحت تأثیر قرار می دهد و بیشترین تأثیر خود را روی تراوایی، ضریب انباره ی چاه و A، و حداقل تأثیر را روی ضریب پوسته دارد و سرانجام خطا در شعاع چاه فقط روی تخمین ضریب پوسته تأثیر می گذارد. این مشاهده این واقعیت را منعکس می

www.SID.ir

Archive of SID

کند که شعاع چاه به عنوان یک بعد مرجع برای چاه بدون آسیب یا انگیزش به منظور مقایسه ی شرایط چاه مورد نظر استفاده می شود [۱].

جدول ۲: مخزن همگن با مرز[۱]

	تراوایی	ضریب انباره چاه	ضریب پوسته	فاصله تا مرز	ناحیه ریزش
نتیجه / ورودی	k_{calc}	$C_{wb\ calc}$	S_{calc}	$L_{x\ calc}$	A_{calc}
$\mu_{in} = \alpha\mu_{true}$	αk_{true}	-	-	-	-
$\Phi_{in} = \alpha\Phi_{true}$	-	-	$S_{true} + ۰,۵\ln(\alpha)$	$L_{x\ true}/\ \alpha^{1/2}$	$A_{true}/\ \alpha$
$c_{t\ in} = \alpha c_{t\ true}$	-	-	$S_{true} + ۰,۵\ln(\alpha)$	$L_{x\ true}/\ \alpha^{1/2}$	$A_{true}/\ \alpha$
$h_{in} = \alpha h_{true}$	K_{true}/α	-	$S_{true} + ۰,۵\ln(\alpha)$	$L_{x\ true}/\ \alpha^{1/2}$	$A_{true}/\ \alpha$
$q_{in} = \alpha q_{true}$	αk_{true}	$\alpha C_{wb\ true}$	$S_{true} - ۰,۵\ln(\alpha)$	$\alpha^{1/2}\ L_{x\ true}$	$\alpha\ A_{true}$
$B_{in} = \alpha B_{true}$	αk_{true}	$\alpha C_{wb\ true}$	$S_{true} - ۰,۵\ln(\alpha)$	$\alpha^{1/2}\ L_{x\ true}$	$\alpha\ A_{true}$
$r_{w\ in} = \alpha r_{w\ true}$	-	-	$S_{true} + \ln(\alpha)$	-	-

آن چه برای مخزن با تخلخل یگانه دیده شد، برای مخزن با تخلخل دوگانه هم اعمال می شود. در این مورد علاوه بر موارد قبل تفسیر چاه آزمایی، تخمینی از نسبت ذخیره (ω) و ضریب جریان درون تخلخلی (λ) می دهد. جدول ۳ تأثیر خطا در داده های ورودی روی تخمین این دو پارامتر را نشان می دهد. این نتایج به هر جریان شبه پایدار یا گذرا مربوط به سیستم تخلخل دوگانه قابل تعمیم است [۶].

جدول ۳: سیستم تخلخل دوگانه [۱]

	ω	Λ
نتیجه / ورودی		
$\mu_{in} = \alpha\mu_{true}$	-	-
$\Phi_{in} = \alpha\Phi_{true}$	-	$\alpha\lambda_{true}$
$c_{t\ in} = \alpha c_{t\ true}$	-	$\alpha\lambda_{true}$
$h_{in} = \alpha h_{true}$	-	$\alpha\lambda_{true}$
$q_{in} = \alpha q_{true}$	-	λ_{true}/α
$B_{in} = \alpha B_{true}$	-	λ_{true}/α
$r_{w\ in} = \alpha r_{w\ true}$	-	$\alpha^2\lambda_{true}$

نسبت ذخیره به صورت منحصر به فرد به تنهایی از شیب پاسخهای فشاری به دست می آید و مقدار آن مستقل از هر داده ی ورودی است. از طرف دیگر ضریب جریان درون تخلخلی از خطا در هر چیزی به جز ویسکوزیته تأثیر می پذیرد. توجه شود که خطا در شعاع چاه تأثیر بسیار شدیدی روی مقدار محاسبه شده ی ضریب جریان درون تخلخلی دارد. مثلاً ضریب ۲ خطا در شعاع چاه می تواند با ضریب ۴ در λ ظاهر شود، زیرا λ با مجذور شعاع چاه رابطه دارد.

رژیم های جریانی متفاوتی در طول تست چاه دارای شکاف هیدرولیکی ظاهر می شود و شرایط و موقعیت های مختلف در طول تست دیده می شود. فرض شده داده ها یا به جریان دوخطی یا به خطی یا ناحیه ی گذر بین آن ها تعلق دارند و تراوایی یک داده ی ورودی است، نه محاسباتی و خطا در تراوایی مستقل از خطا در سایر متغیرهای ورودی است. جدول ۴ تأثیر داده های ورودی روی نتایج را نشان می دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۴: چاه دارای شکاف هیدرولیکی با تراوایی معلوم [۱]

	wk_f/L_f	نیم طول شکاف	هدایت پذیری شکاف
نتیجه / ورودی	$wk_f/L_{f\,calc}$	$L_{f\,calc}$	$wk_{f\,calc}$
$k_{in} = \alpha k_{true}$	-	$L_{f\,true}/\alpha^{1/2}$	$wk_{f\,true}/\alpha^{1/2}$
$\mu_{in} = \alpha\mu_{true}$	$\alpha wk_f/L_{f\,true}$	$\alpha^{1/2}\, L_{f\,true}$	$\alpha^{3/2}\, wk_{f\,true}$
$\Phi_{in} = \alpha\Phi_{true}$	-	$L_{f\,true}/\alpha^{1/2}$	$wk_{f\,true}/\alpha^{1/2}$
$c_{t\,in} = \alpha c_{t\,true}$	-	$L_{f\,true}/\alpha^{1/2}$	$wk_{f\,true}/\alpha^{1/2}$
$h_{in} = \alpha h_{true}$	$wk_f/L_{f\,true}/\alpha$	$L_{f\,true}/\alpha$	$wk_{f\,true}/\alpha^2$
$q_{in} = \alpha q_{true}$	$\alpha\, wk_f/L_{f\,true}$	$\alpha\, L_{f\,true}$	$\alpha^2\, wk_{f\,true}$
$B_{in} = \alpha B_{true}$	$\alpha\, wk_f/L_{f\,true}$	$\alpha\, L_{f\,true}$	$\alpha^2\, wk_{f\,true}$
$r_{w\,in} = \alpha r_{w\,true}$	-	-	-

۳- ایده، بحث و بررسی

همانطور که گفته شد آرچر در سال ۲۰۰۲ تأثیر خطای راندگی روی تخمین تراوایی در حالت چاه بدون شکاف را مورد بررسی قرار داد و یک رابطه ی تحلیلی برای آن ارائه داد. او پیشنهاد کرد ایده ی وی برای مخازن تخلخل دوگانه و چاه های افقی بررسی شود. بر اساس ایده ی آؤچر خطای راندگی با رابطه ی (۱) بیان می شود. برای جریان های چاه های افقی در حالت جریان شعاعی نتیجه مشابه رابطه ی ارائه شده توسط آرچر است. برای جریان های خطی و دو خطی در این قسمت روابط مربوطه به دست می آیند. در حالتی که شکاف با قابلیت انتقال بالا مدنظر باشد رژیم جریانی خطی بوده و داریم:

$$P_i - P_{wf} = ۴/۰۶۴[qB/(hL'_f)](\mu t/(k\Phi c_t))^{۰.۵} \quad (۷)$$

بر اساس رابطه ی (۱) :

$$۴/۰۶۴[qB/(hL'_f)](\mu t/(k\Phi c_t))^{۰.۵} = ۴/۰۶۴[qB/(hL_f)](\mu t/(k\Phi c_t))^{۰.۵} - \alpha t \quad (۸)$$

و در نهایت:

$$L'_f = L_f/[(1-(h\alpha t^{۰/۵}L_f)/(۴/۰۶۴\ qB\ (\mu/(k\Phi c_t))^{۰.۵}] \quad (۹)$$

رابطه ی ۹ زمانی به کار میرود که تراوایی برابر مقدار واقعی باشد اگر تراوایی به صورت تخمینی به دست آمده باشد در این رابطه به جای k بایستی k' را قرار داد که از رابطه ی (۵) به دست می آید.

برای چاه شکافدار با قابلیت انتقال پایین رابطه ی زیر برقرار است:

$$\Delta p = [۴۴/۱qB\mu/(h(f_c)^{۰.۵}(\Phi\mu c_t k)^{۰.۲۵}]t^{۰.۲۵} \quad (۱۰)$$

به طریق مشابه در نهایت خواهیم داشت:

$$f'_c = f_c/[1-\alpha h f_c^{۰.۵}(\Phi\mu c_t k)^{۰.۲۵}/(۴۴/۱qB)t^{۰.۷۵}]^۲ \quad (۱۱)$$

در این رابطه f_c هدایت پذیری شکاف هیدرولیکی است. اگر تراوایی هم تحت تاثیر راندگی به دست آمده باشد آن گاه به جای تراوایی در این رابطه باید مقدار رابطه ی (۵) را قرار داد.

شکل ۴ الف، ب تأثیر راندگی روی پارامترهای تراوایی و طول شکاف در سه حالت بدون خطای راندگی، یک ساعت تولید و ۹ ساعت تولید را نشان می دهد. داده های استفاده شده در این دو مورد در شکل ۳ آمده است. همانطور که مشخص است چون خطای راندگی معمولا کوچک است نمودارهای تخمین به صورت خطی به دست می آیند. هر چه زمان تولید بیشتر باشد این خطا بیشتر بوده است. خطا در نیم طول شکاف در ۹ ساعت برابر ۰,۲۳ درصد مقدار واقعی و خطا در تراوایی ۵,۸۳۷ درصد است. به نظر می رسد خطای راندگی روی تراوایی تأثیر بیشتری دارد.

www.SID.ir

Archive of SID

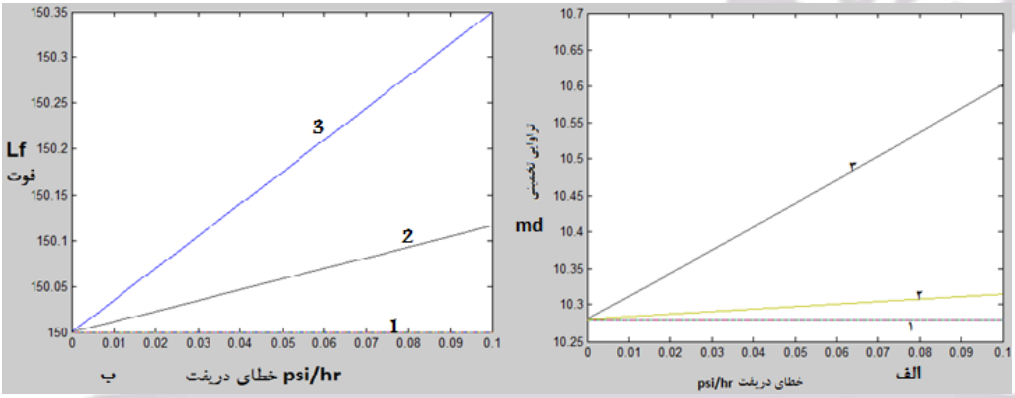
پارامتر	مقدار	واحد
B	1.06	RB/STB
C_s	0.01	STB/psi
c_t	$4.2\text{x}10^{-6}$	psi^{-1}
h	107	ft
k	10.28	md
kfw	4500	md-ft
p_i	3900	psia
q	1000.0 (0 - 50 hr)	STB/D
r_w	0.29	ft
s	2	(dimensionless)
x_f	150	ft
ϕ	0.25	(fraction)
μ	2.5	cp

ب

پارامتر	مقدار	واحد
B	1.06	RB/STB
C_s	0.01	STB/psi
c_t	$4.2\text{x}10^{-6}$	psi^{-1}
h	107	ft
k	10.28	md
p_i	3900	psia
q	174.0	STB/D
r_w	0.29	ft
s	8	(dimensionless)
ϕ	0.25	(fraction)
μ	2.5	cp

الف

شکل ۳: الف. پارامترهای چاه آزمایی در حالت چاه عمودی بدون شکاف ؛ ب. پارامترهای چاه آزمایی برای حالت چاه عمودی شکافدار [۸]



شکل ۴: الف. تاثیر خطای راندگی روی تخمین تراوایی ۱: بدون راندگی ۲: زمان یک ساعت ۳: زمان ۹ ساعت؛ ب. تاثیر خطای راندگی روی تخمین نیم طول شکاف

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه و بررسی توجه ویژه ای به خطا در چاه آزمایی شد. نتایج و پیشنهادات زیر در راستای کاهش خطا در چاه آزمایی مفید است.

۱- داده های ورودی بیشترین تأثیر را روی تخمین پارامترها دارد. با توجه به این، یک مهندس مخزن باید روی داده های به دست آمده متمرکز شود تا تخمین مناسب تری از داده های ورودی به دست آورد.

۲- بیشترین خطای رایج در دبی رخ خواهد داد که نشان داده شده این خطا نسبت به خطای فشاری از اهمیت کمتری برخوردار است. ابهام در انتخاب مدل جدی ترین عدم قطعیت در تفسیر داده های چاه آزمایی است. باید توجه داشت که تفسیر چاه آزمایی به تنهایی کافی نیست و کنترل های زمین شناسی و ژئوفیزیکی لازم است.

۳- تخمین تراوایی از تخلخل و تراکم پذیری تأثیر نمی پذیرد. تخمین دقیق مسافت و ناحیه ی ریزش به مقدار دقیق تخلخل و تراکم پذیری بستگی دارد. خطا در تخلخل، تراکم پذیری،h ، دبی، ضریب حجمی سازند، و شعاع چاه بر ضریب پوسته تأثیر می گذارد. این تأثیر ناچیز است اما همین مقدار ناچیز ممکن است در تصمیم گیری عملیاتی تأثیرگذارد. خطا در ویسکوزیته فقط بر تخمین تراوایی تأثیر می گذارد. در مخازن همگن خطا در شعاع چاه فقط بر تخمین ضریب پوسته اثر دارد. برای مخازن با رفتار تخلخل دوگانه، نسبت ذخیره (ω) به خطا در داده های ورودی بستگی ندارد، زیرا این ضریب از شیب پاسخ های فشاری به دست می آید و مستقل از هر داده ی ورودی است. در

www.SID.ir

Archive of SID

مورد ضریب جریان درون تخلخلی، خطا در شعاع چاه بیشترین تأثیر را روی این ضریب دارد. خطا در h و ضریب حجمی سازند بیشترین تأثیر را بر هدایت پذیری شکاف دارد.

۴- روابط به دست آمده برای بررسی خطای راندگی بر اساس ایده ی آرچر به حذف تأثیر این خطا در داده ها کمک خواهد کرد و هنگام محاسبه ی تراوایی نسبت به نیم طول شکاف این خطا مشهودتر است.

۵- امید است در آینده عملکردی عددی برای بررسی تأثیر خطای راندگی در سایر مدل های مخزنی نظیر مخازن دارای تخلخل دوگانه ارائه شود.

مراجع

1- J. P. Spivey, SPE, and D. A. Pursell, SPE, S. A. Holditch & Associates, "Errors in Input Data and the Effect on Well-Test Interpretation Results", Inc.1998.
2- R.N. Horne, "Uncertainty in Well Test Interpretation" , Stanford U. SPE, U.SA, 1994.
3- Charles A. Hutchinson, Jr., Junior, "Effect Of Data Errors On Typical Reservoir Engineering Calculations", Member AIME, The Atlantic Refining Co., Dallas, Texas, 1951.
4- Guillot, A.Y., and Horne, R.N.: "Using Simultaneous Downhole flow Rate and pressure Measurements to Improve Analysis of WeIl Tests", SPE, 216- 226, (June 1986).
5- Ramey, H.J., Jr.:''Advances in practical Well Test Analysis', 1992.
6- R.N. Horne, ' Advance In Computer Aided Well test Interpretation, SPE,1992.
7- Anraku, T., and Horne, "R.N.: 'Discrimination Between Reservoir Models in Well Test Analysis", SPE 1993.
8- R. A. Archer, "Effect on well test analysis of pressure and flow rate noise", Texas A & M University, SPE, 2002.
9- Amit Madahar and Stewart George, "Effect Of Material Balance On Well test Analysis", SPE, October 2009.
10- Aly, A., Hunt, E. R., Pursell, D. A., McCain, W. D. Jr.: "Application of Multiwell Normalization of Openhole Logs in Integrated Reservoir Studies," 1997.
11- McCain, W. D., Voneiff, G. W., Hunt, E. R., Semmelbeck, M. E.: "A Tight Gas Field Study: Carthage Cotton Valley) Field," paper SPE 26141 SPE Gas Technology Symposium, Calgary, Canada, June 1993.
12- McCain, W. D.: "Reservoir-Fluid Property Correlations- State of the Art," *SPERE* 266-272, May 1991.
13- Piper, L. D., McCain, W. D. Jr., and Corredor, J. H.: "Compressibility Factors for Naturally Occurring Petroleum Gases," paper SPE 26668, 1993.
14- Hall, H. N.: "Compressibility of Reservoir Rocks," *Trans*., AIME 198, 309-311, 1953.

www.SID.ir