

تفسیر تغییرات اثر انباشتگی دهانه چاه طی فرایند چاه

آزمایی در یکی از چاه‌های جنوب کشور

مهدی ملکوتی خواه، محمد شریفی*، مسعود فولادگر

دانشکده نفت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران

m_sharifi@aut.ac.ir

چکیده

تفسیر داده‌های چاه آزمایشی یکی از مهمترین عواملی است که مهندسان نفت از آن برای رسیدن به خصوصیات سنگ مخزن استفاده می‌کنند. تفسیر داده‌های چاه آزمایشی دارای قسمت‌های مختلفی است که یکی از آن‌ها شامل اثر انباشت چاه است که می‌تواند اثر قابل توجهی بر روی داده داشته باشد. اثر انباشت چاه خود دارای حالت مختلف است که این حالات شامل اثر انباشت چاه ثابت و متغیر است. اثر انباشت متغیر چاه می‌تواند به دلایل متفاوتی رخ دهد اما یکی از حالات آن وجود یک ناحیه بسیار محدود اطراف چاه با تراوایی بسیار بالا است که می‌تواند موجب اثر انباشت متغیر چاه شود. در این مطالعه با بررسی داده‌های چاه آزمایشی یکی از چاه‌های جنوب کشور ایران، این نتیجه حاصل شد که اسید کاری چاه، با ایجاد یک ناحیه محدود ولی بسیار تراوا می‌تواند موجب ایجاد اثر انباشت متغیر چاه شود و مقدار اثر انباشت ثابت چاه را از 0.014 bbl/psi به مقدار انباشت متغیر نهایی 0.024 bbl/psi برساند. تفسیر حاضر با مقایسه داده‌های چاه آزمایشی قبل و بعد از اسید کاری و بررسی نمودارهای مشتق فشار، رفتار چاه با اثر انباشتگی متغیر مدلسازی و تفسیرهای مربوطه بیان شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند در تفسیر بهتر داده‌های چاه آزمایشی به همراه توجیه فیزیکی مدل‌های انتخابی مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی:

چاه آزمایشی، اثر انباشت چاه، اثر انباشت چاه متغیر، اسید کاری

۱- مقدمه

یکی از روش‌های مهم برای به دست آوردن خصوصیات سنگ مخزن، استفاده از تحلیل فشار گذار به دست آمده از آزمایش چاه آزمایشی است [1-3]. برای تحلیل فشار گذار از روش‌های متفاوتی مانند نمودار مشتق فشاری و نمودارهای منحنی مشخصه (Type curves) استفاده می‌شود که می‌توان با استفاده از این روش‌ها مشخصات سنگ مخزن را با دقت خوبی به دست آورد [4,5]. یکی

از مشکلات بزرگی که در چاه آزمایشی وجود دارد، اثر انباشت چاه است که می‌تواند داده‌های اولیه جمع‌آوری شده را تحت تاثیر قرار داده و یا باعث عدم برداشت صحیح از داده‌ها شود [6]. مشکل اثر انباشت چاه اکثراً زمانی بیشتر تاثیر خود را نشان می‌دهد که برای کنترل دبی چاه از شیر سطحی استفاده شود [7].

در کل می‌توان انواع اثر انباشت چاه را به دو دسته کلی ۱- اثر انباشت چاه ثابت و ۲- اثر انباشت متغیر^۱ دسته بندی کرد [8-12]. اثر انباشت چاه ثابت به خاطر تراکم پذیری سیال در حجم چاه و یا تغییر سطح سیال داخل چاه می‌تواند رخ دهد [7]. از دلایل اصلی ایجاد اثر انباشت نفت به صورت متغیر، جدا شدن فازهای تولیدی^۲ در طول مسیر چاه است. از اولین نفراتی که به این موضوع اشاره کردند استیگر و متیوس [13] در سال ۱۹۵۸ بودند که به این موضوع اشاره داشتند که حدود ۷۵ درصد از چاه‌ها در جنوب تگزاس که در میدین متوسط قرار گرفته‌اند نمودار افزایش فشار آن‌ها در آزمایش ساخت فشار به یک اندازه حداکثری می‌رسد و سپس شروع به کاهش می‌کند. این پدیده در گزارشات دیگری نیز مشاهده شده است [14-16]. اولین مدل ریاضیاتی برای اثر انباشت چاه که به دلیل جدا شدن فازها در طول مسیر چاه اتفاق می‌افتد را فیر در سال ۱۹۸۱ [17] ارائه کرد. او با فرض قرار دادن این نکته که حجم گاز در زمان بالا آمدن در طول مسیر چاه ثابت می‌ماند مدل خویش را ارائه داد. هگمنند در سال ۱۹۹۳ [10] مدل خویش را با توجه به مدل فیر [17] ارائه داد که در واقع یک حالت بهینه شده مدل فیر [17] بود.

در ادامه بررسی اثر انباشت متغیر چاه، اسپایوی در سال ۱۹۹۹ [18] در عوض بررسی جدایش فازها در طول مسیر چاه، به بررسی تاثیر وجود یک حجم محدود ثانویه در کنار حجم چاه، بر روی اثر انباشت متغیر چاه پرداخت. او تاثیر این حجم محدود ثانویه را به دو صورت مدل کرد. در حالت اول این موضوع مد نظر قرار گرفت که اگر پیکر استفاده شده در چاه به خوبی محکم نشده باشد و دارای نشستی باشد این حجم ثانویه اضافه شده می‌تواند باعث اثر انباشت متغیر در طول عملیات چاه آزمایشی شود. البته این حالت فقط منبع غیر مخزنی نداشته بلکه اگر مخزن دارای دو ناحیه که یکی از ناحیه‌ها شعاع خیلی محدود تری نسبت به لایه دیگر داشته باشد و از لحاظ تراوایی نیز بسیار تراواتر باشد نیز این حالت صدق می‌کند. حالت دوم زمانی است که مخزن به دلیل وجود شکاف در اطراف چاه به صورت چند لایه به صورت شعاعی درآمده باشد که لایه نزدیک تر به چاه دارای تراوایی تقریباً بی نهایت است. در این حالت نیز اثر انباشت چاه به صورت متغیر خود را نشان می‌دهد.

در این پژوهش سعی می‌شود با توجه به مدلی که اسپایوی در سال ۱۹۹۹ [18] ارائه داد بررسی شود که با عملیات تزریق اسید در چاه و اثر این اسید بر سنگ مخزن نزدیک به چاه، با بالارفتن تراوایی این مناطق ممکن است که حالت اثر انباشت چاه از ثابت به متغیر، تغییر کند. برای این منظور اطلاعات فشار و دبی برای یکی از چاه‌ها در یکی از میدین جنوب کشور ایران در دو حالت قبل و بعد از اسید کاری مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از کد نوشته شده تحلیل می‌شوند.

۲- روش انجام کار

برای بررسی اثر اسید کاری بر روی حالت انباشت یکی از چاه‌های جنوب کشور، اطلاعات مربوط به آزمایش چاه را برای قبل و بعد از اسید کاری با استفاده از کد نوشته شده مورد بررسی قرار داده.

معادلاتی که توسط اسپایوی در مورد اثر انباشت چاه متغیر مطرح شده اند به این صورت است که با فرض تک فاز بودن سیال داخل چاه اگر این سیال از منبعی غیر از خود مخزن وارد چاه شود مقدار دبی آن به مقدار افت فشار در آن ناحیه بستگی دارد و برای این موضوع اسپایوی یک حالت ضریب پوسته مانند معادله ۱ در نظر گرفت:

$$S_2 \equiv \frac{0.00708kh\Delta p_2}{q_2B\mu} \quad \text{معادله ۱}$$

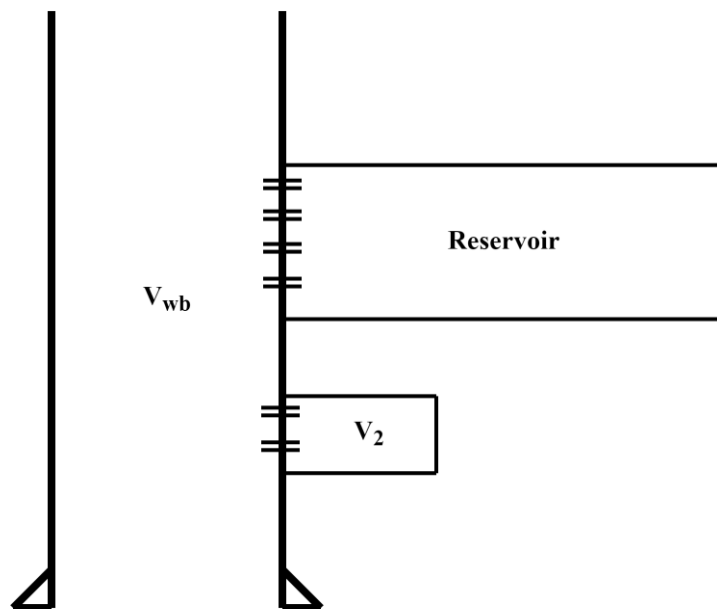
برای حجم منبع غیر مخزنی نیز یک ضریب به اسم C_2 تعریف شده که در معادله ۲ آمده است:

$$C_2 \equiv V_2C_{wb} \quad \text{معادله ۲}$$

حالت بی بعد حجم منبع غیر مخزنی نیز به این صورت تعریف شد:

$$C_{2D} = \frac{0.894C_2}{\phi C_t h r_w^2} \quad \text{معادله ۳}$$

برابر این دو پارامتر بی بعد برای توصیف پاسخ فشاری مدل نیاز است. به علاوه پارامتر C_{De}^{2s} نیز برای توصیف چاه با عملکرد محدود شعاعی، اثر انباشت چاه ثابت و اثر ضریب پوسته لازم است. اسپایوی این دو پارامتر را در اثر "leak skin factor (s_2)" و نسبت ضرایب دو حجم مخزن و منبع غیر مخزنی دانست (C_{2D}/C_D). با توجه به این معادلات که اسپایوی در مقاله خود آن‌ها را با استفاده از الگوریتم "Stehfes" در دومین زمان حل کرده، کد نوشته شده نیز از این الگوریتم برای حل معادلات استفاده می‌کند. نمونه ای از شماتیک چاه، مخزن و حجم غیر مخزنی در شکل ۱ آمده است.



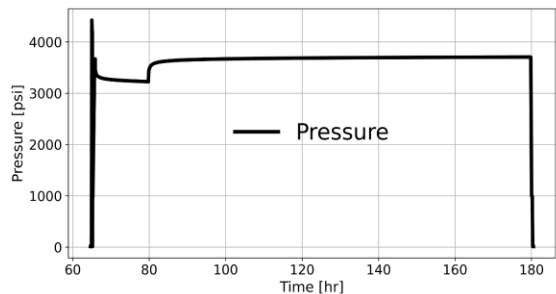
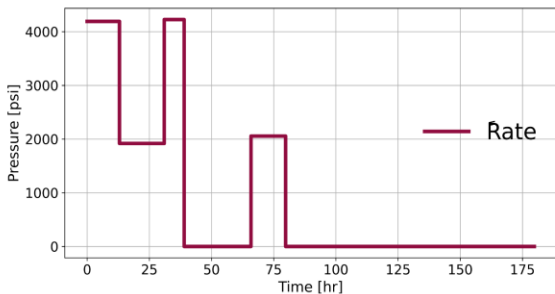
شکل ۱: نمایی از وجود یک لایه محدود با تراوایی بسیار بالا

برای این منظور ابتدا اطلاعات فشار و دبی چاه را قبل از اسید کاری وارد کرده شکل ۲(آ) و با توجه به این اطلاعات نمودارهای مشتق به صورت Log-Log و semi-Log را استخراج کرده شکل ۲(ب و ج) سپس با استفاده از کد این نمودارها تحلیل می‌شوند. در مورد داده‌های بعد از اسید کاری نیز ابتدا اطلاعات فشار و دبی را وارد کرده شکل ۳(آ) و از این اطلاعات نمودارهای Log-Log و semi-Log استخراج و تحلیل می‌شوند شکل ۳(ب و ج). خواص سیال مخزن در جدول ۱ مشخص شده است:

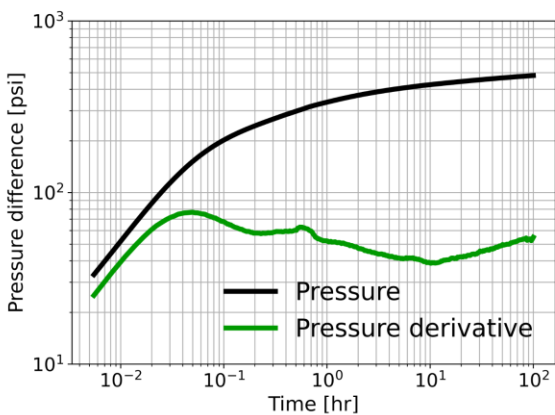
جدول ۱: خواص سیال

مقدار	خواص سیال
تک فاز نفت	نوع مدل
۳۷۴۷	فشار اولیه مخزن، P_i (psi)
۳.۵	گرانروی نفت، μ_o (cP)
۴۳.۶۹	چگالی نفت، ρ_o (lb/ft ³)
3×10^{-6}	تراکم پذیری نفت، C_o (psi ⁻¹)

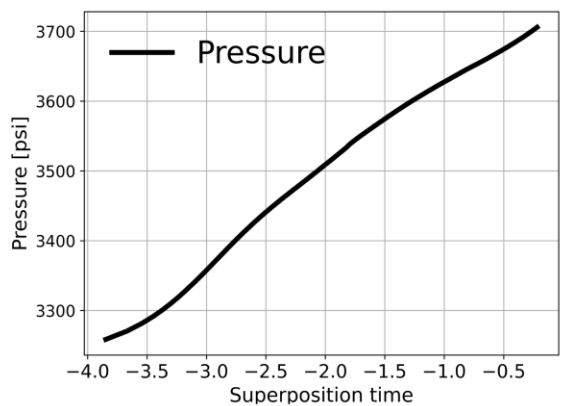
۱.۲	ضریب حجمی نفت سازند، B_o (bbl/STB)
-----	--------------------------------------



(آ)



(ب)

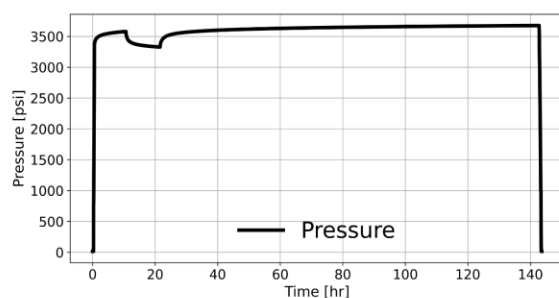
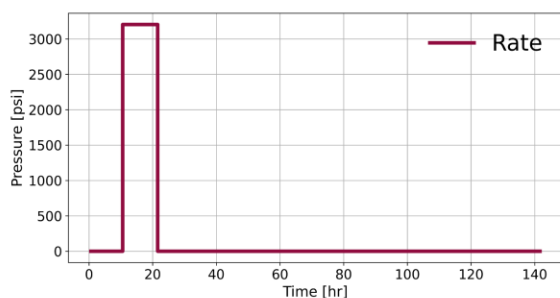


(ج)

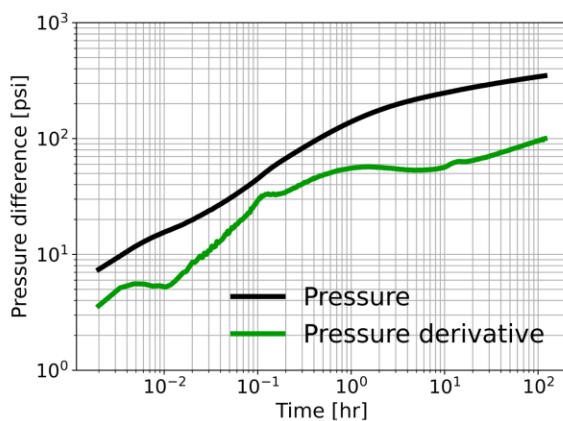
شکل ۲: اطلاعات مربوط به فشار و دبی در طول زمان انجام آزمایش (آ)؛ نمودار **Log-Log** استخراج شده از اطلاعات فشار و

دبی (ب)؛ نمودار **semi-Log** استخراج شده از اطلاعات فشار و دبی (ج)؛ برای قبل از اسیدکاری چاه

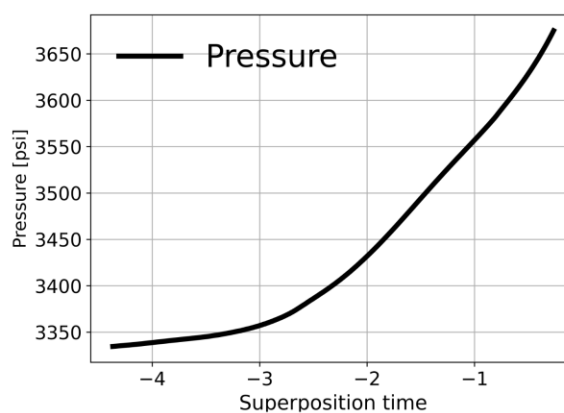
ACCEPTED



(آ)



(ب)



(ج)

شکل ۳: اطلاعات مربوط به فشار و دبی در طول زمان انجام آزمایش (آ)؛ نمودار Log-Log استخراج شده از اطلاعات فشار و

دبی (ب)؛ نمودار semi-Log استخراج شده از اطلاعات فشار و دبی (ج)؛ برای بعد از اسیدکاری چاه

۳- نتایج و بحث

همانطور که گفته شد داده‌های چاه آزمایشی قبل و بعد از اسیدکاری چاه با استفاده از مدل اثر انباشتگی متغیر چاه مورد بررسی قرار گرفت و نتایج تحلیل و بررسی شد.

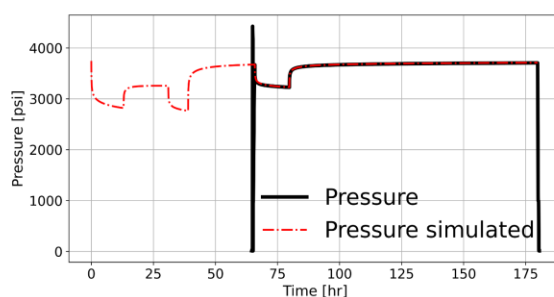
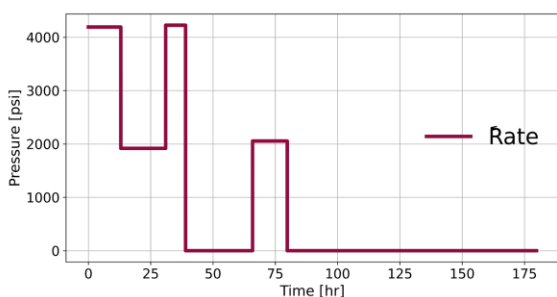
۳-۱- نتایج چاه آزمایشی قبل از اسیدکاری

با توجه به شکل ۴ نتایج حاصل از چاه آزمایشی این چاه قبل از اسیدکاری نشان دهنده این موضوع است که این چاه دارای اثر انباشت ثابت بوده و مقدار این اثر برابر با 0.0117 bbl/psi است. علاوه بر این موضوع اواخر نمودار Log-Log نشان دهنده وجود یک گسل در فاصله ۱۶۰۰ پایی از چاه است. دیگر موارد به دست آمده از این تحلیل در جدول ۲ آمده است.

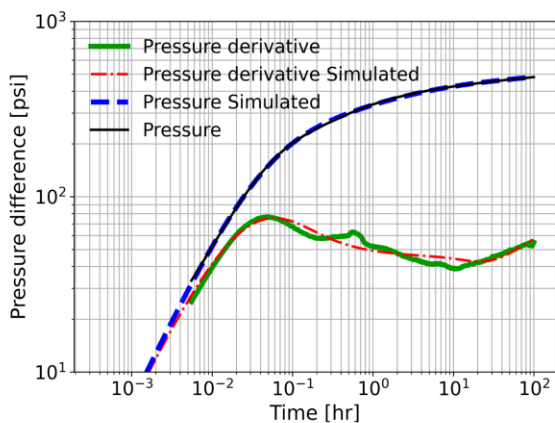
جدول ۲: مشخصات به دست آمده از تحلیل داده‌های چاه آزمایشی قبل از اسیدکاری چاه

مقدار	مشخصه
همگن	نوع مخزن
گسل	مرز
غیر تراوا	نوع گسل
۱۶۰۰ پا	فاصله از گسل
۱۱۷.۳ میلی داریسی	تراوایی
۰.۰۱۴ bbl/psi	مقدار اثر انباشت چاه

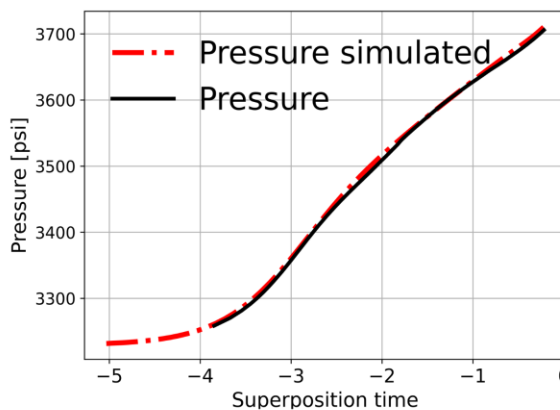
Paper



(ا)



(ب)



(ج)

شکل ۴: تحلیل نمودارهای **semi-Log**، **Log-Log** و فشار و دبی با استفاده از کد نوشته شده، تحلیل و با توجه به نمودار

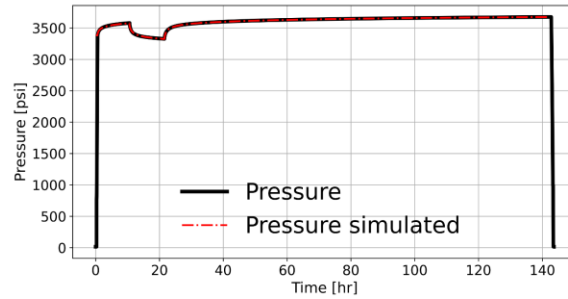
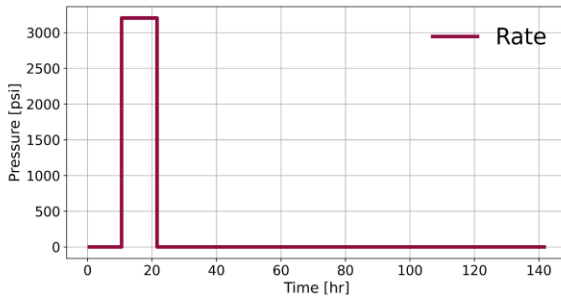
Log-Log، چاه قبل از اسید کاری دارای اثر انباشت چاه ثابت است.

۳-۲- نتایج چاه آزمایشی بعد از اسید کاری چاه

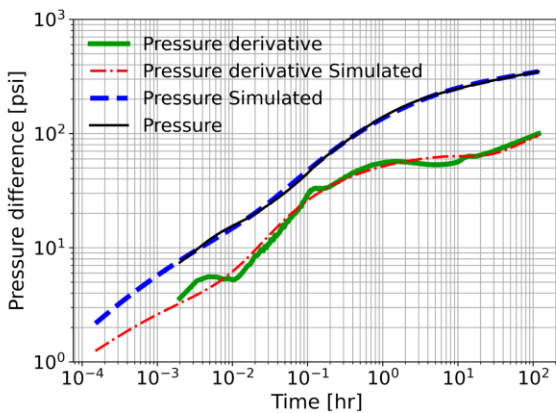
با توجه به داده هایی که از چاه آزمایشی برای بعد از اسید کاری به دست آمده است، این داده ها وارد کد شده و تحلیل شدند. نتایج به دست آمده نشان از این موضوع دارد که این چاه بعد از اسید کاری دچار اثر انباشت متغیر شده است (شکل ۵). تحلیل نمودار Log-Log نشان داده شده در شکل ۵(ب)، نشانگر این است که در ابتدا نمودار مشتق فشاری افزایش یافته و سپس رو به کاهش گذاشته است که این نشانگر متغیر شدن اثر انباشت چاه است. برای همخوانی پیدا کردن بین داده های به دست آمده از داده های چاه آزمایشی و تطبیق تحلیلی از مدل اثر انباشت متغیر اسپایوی [18] استفاده شد. دلیل استفاده از این مدل به خاطر این است که، بعد از اسید کاری چاه می تواند چند حالت رخ دهد، اول آن که اسید اطراف چاه را از بالای ناحیه تولیدی تا پایین آن به خوبی بشوید و اطراف چاه یک ناحیه با تخلخل بسیار بالا ولی محدود ایجاد کند و یا این که اسید به طور کامل به پایین و یا بالای چاه نرسد و فقط قسمتی از ناحیه تولیدی را مورد تاثیر قرار دهد که در این حالت مانند شکل ۱ یک ناحیه بسیار محدود با تراوایی بسیار بالا بوجود می آید که هر دوی این حالات می توانند باعث ایجاد اثر انباشت چاه متغیر شوند. دیگر خصوصیات به دست آمده از این تحلیل چاه آزمایشی به شرح جدول ۳ است. شایان ذکر است که با توجه به کد نوشته شده و اعداد به دست آمده از چاه آزمایشی قبل از اسید کاری (جدول ۲)، فاصله تا گسل و مقدار تراوایی کلی مخزن برای حالت بعد از اسید کاری ثابت و مطابق با اعداد قبل از اسید کاری تنظیم شده اند و فقط پارامترهای مستخرجه از زمان های اولیه عوض شده اند.

جدول ۳: مشخصات به دست آمده از تحلیل داده های چاه آزمایشی بعد از اسید کاری چاه

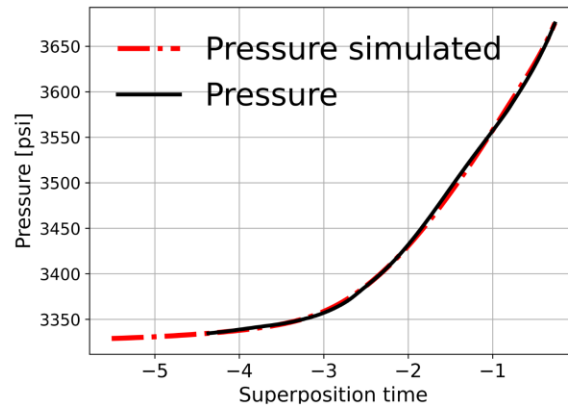
مقدار	مشخصه
همگن	نوع مخزن
گسل	مرز
۱۱۷.۲۶۶ میلی دارسی	تراوایی
۱۶۰۰ پا	فاصله از گسل
غیر تراوا	نوع گسل
bbl/psi ۰.۰۰۲۴	مقدار نهایی اثر انباشت چاه
۰.۰۲۴۷	مقدار اثر انباشت ابتدایی به نهایی
۰.۲۱۳۰	مقدار Leak Skin



(ا)



(ب)



(ج)

شکل ۵: نشان دهنده تحلیل انجام شده بر روی داده های چاه آزمایشی برای بعد از اسید کاری چاه. با توجه به نمودار Log-Log به دست آمده و تحلیل آن، مشخص است که این چاه بعد از اسید کاری دچار اثر انباشت چاه متغیر شده است.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی امکان ایجاد اثر انباشت چاه متغیر بر اثر اسیدکاری چاه پرداخته شد و بررسی شد که اسید کاری می تواند با توجه به مواردی که اسپایوی مطرح کرده است، باعث ایجاد اثر انباشت متغیر شود. در صورت مقایسه نمودارهای مشتق در دو حالت قبل و بعد از اسیدکاری در زمان ابتدایی که اثر انباشت چاه خود را نشان می دهد، مشخص می شود که نمودار مشتق بعد از اسید کاری بر خلاف نمودار مشتق قبل از اسید کاری دچار حالت نزولی و سپس صعودی شده است و این امر نشانگر وجود یک اثر انباشت متغیر چاه است. نتایج به دست آمده از تفسیر حاکی از موارد زیر است:

اسید کاری چاه می تواند باعث ایجاد اثر انباشت متغیر در چاهی که قبل از اسید کاری دارای اثر انباشت ثابت بوده است، شود.

اسیدکاری می‌تواند با اثر بر روی تمام ناحیه تولیدی و ایجاد یک ناحیه با تراوایی بسیار بالا در اطراف آن باعث ایجاد حالت اثر متغیر چاه شود.

حالت دیگری که می‌تواند با اسیدکاری ایجاد شود، آن است که اسید به تمام ضخامت تولیدی نرسد و فقط قسمتی از آن را بشوید در این حالت یک لایه بسیار محدود با تراوایی بسیار بالا ایجاد شده که می‌تواند باعث ایجاد اثر متغیر چاه شود.

موارد فوق نشان می‌دهد که اسید کاری می‌تواند باعث تغییر اثر انباشت ثابت چاه به متغیر شود و این عمل را می‌توان با استفاده از انواع اثر انباشت چاه متغیر اسپایوی بررسی کرد. نتایج حاصله از این پژوهش می‌تواند در تفسیر بهتر داده های چاه آزمایی قبل و بعد از اسیدکاری به همراه توجیه منطقی مدل های انتخابی مورد استفاده قرار گیرد و برای ادامه کار در آینده می‌توان اثر انباشتگی دوگانه را با استفاده از روش های چاه آزمایی دوگانه بررسی کرد.

Accepted Paper

- Kikani J, Horne RN. Pressure-Transient Analysis of Arbitrarily Shaped Reservoirs With the Boundary-Element Method. *SPE Form Eval* 1992;7:53–60. <https://doi.org/10.2118/18159-PA>. [1]
- Kazemi H. Pressure Transient Analysis of Naturally Fractured Reservoirs with Uniform Fracture Distribution. *Soc Pet Eng J* 1969;9:451–62. <https://doi.org/10.2118/2156-A>. [2]
- Mayerhofer MJ, Ehlig-Economides CA, Economides MJ. Pressure Transient Analysis of Fracture Calibration Tests. *J Pet Technol* 1995;47:229–34. <https://doi.org/10.2118/26527-PA>. [3]
- Agarwal RG, Gardner DC, Kleinsteiber SW, Fussell DD. Analyzing Well Production Data Using Combined-Type-Curve and Decline-Curve Analysis Concepts. *SPE Reserv Eval Eng* 1999;2:478–86. <https://doi.org/10.2118/57916-PA>. [4]
- Bourdet D, Ayoub JA, Pirard YM. Use of Pressure Derivative in Well-Test Interpretation. *SPE Form Eval* 1989;4:293–302. <https://doi.org/10.2118/12777-PA>. [5]
- Gholamzadeh Y, Sharifi M, Karkevandi-Talkhooncheh A, Moraveji MK. A new physical modeling for two-phase wellbore storage due to phase redistribution. *J Pet Sci Eng* 2020;195:107706. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107706>. [6]
- Zhuang H. Basic Concepts and Gas Flow Equations. *Dyn. Well Test. Pet. Explor. Dev.*, Elsevier; 2013, p. 35–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397161-6.00002-4>. [7]
- Prats M, Scott JB. Effect of Wellbore Storage on Pulse-Test Pressure Response. *J Pet Technol* 1975;27:707–9. <https://doi.org/10.2118/5322-PA>. [8]
- Dastkhan Z, Zolalemin A, Razminia K, Parvizi H. Minimization and Removal of Wellbore Storage Effect by Direct Deconvolution of Well Test Data. Day 2 Tue, Sept. 15, 2015, SPE; 2015. <https://doi.org/10.2118/175595-MS>. [9]
- Hegeman PS, Hallford DL, Joseph JA. Well-Test Analysis With Changing Wellbore Storage. *SPE Form Eval* 1993;8:201–7. <https://doi.org/10.2118/21829-PA>. [10]
- Jargon JR. Effect of Wellbore Storage and Wellbore Damage at the Active Well on Interference Test Analysis. *J Pet Technol* 1976;28:851–8. <https://doi.org/10.2118/5795-PA>. [11]
- Agarwal RG, Al-Hussainy R, Ramey HJ. An Investigation of Wellbore Storage and Skin Effect in Unsteady Liquid Flow: I. Analytical Treatment. *Soc Pet Eng J* 1970;10:279–90. <https://doi.org/10.2118/2466-PA>. [12]
- Stegemeier GL, Matthews CS. A Study of Anomalous Pressure Build-Up Behavior. *Trans AIME* 1958;213:44–50. <https://doi.org/10.2118/927-G>. [13]
- Kikani J, Fair PS, Hite RH. Pitfalls in pressure-gauge performance. *SPE Form Eval* 1997;12:241–6. [14]
- Veneruso AF, Ehlig-Economides C, Petitjean L. Pressure gauge specification considerations in practical well testing. *SPE Annu. Tech. Conf. Exhib., OnePetro*; 1991. [15]
- Russell DG. Extensions of Pressure Build-Up Analysis Methods. *J Pet Technol* 1966;18:1624–36. <https://doi.org/10.2118/1513-PA>. [16]
- Fair WB. Pressure buildup analysis with wellbore phase redistribution. *Soc Pet Eng J* 1981;21:259–70. [17]

Spivey JP, Lee WJ. Variable Wellbore Storage Models for a Dual-Volume Wellbore. All Days, SPE; 1999. [18]
<https://doi.org/10.2118/56615-MS>.

Accepted Paper

Interpreting changes in the wellbore storage during the well testing process in one of the wells in the southern region of the country

Interpretation of well test data is one of the most crucial factors that petroleum engineers use to determine the characteristics of reservoir rock. Well test data interpretation involves various aspects, one of which includes the wellbore storage effect that can significantly impact the data. The wellbore storage effect itself can be in different forms, including constant and variable wellbore storage effects. Variable wellbore storage effects can occur due to different reasons, one of which is the presence of a very limited region around the well with very high permeability that can cause a variable wellbore storage effect. In this study, by analyzing the well test data of one of the wells in the south of Iran, it was concluded that acidizing the well, by creating a limited but highly permeable zone, can result in a variable wellbore storage effect and can change the constant wellbore storage value from 0.014 bbl/psi to a final variable storage value of 0.0024 bbl/psi. This interpretation, by comparing well test data before and after acidizing and examining the pressure derivative plots, models the well behavior with variable wellbore storage and presents the related interpretations. The results of this research can be used for better interpretation of well test data along with a physical justification of the selected models.

Keywords:

Well Testing, Wellbore Storage, Variable Wellbore Storage, Acidizing