

مدل سازی داده محور یک مخزن نفتی برای تعیین ارتباط دینامیکی بین چاه های تولیدی

عارف عنایتی، حمیدرضا جهانگیری* و محمدتقی صادقی*
دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۲۱

چکیده

مدیریت، مدل سازی و استخراج بهینه مخزن، به درک ارتباط دینامیکی و چگونگی تبادل سیال بین چاه های تولیدی در یک مخزن نفتی بستگی دارد. با استفاده از نرم افزارهای شبیه ساز عددی و با داشتن اطلاعات زمین شناسی مخزن این ویژگی تا حدود زیادی مشخص می شود. از طرفی، زمان بر بودن آن و وجود عدم قطعیت در داده های ورودی به شبیه ساز باعث می شود که از روش ها و راه های دیگری برای درک این ویژگی استفاده کنیم. با ظهور سنسورهای جدید که به طور دائمی در چاه قرار گرفته اند، مقادیر بسیار زیادی از داده های تولید (نرخ تولید و فشار ته چاهی) در دسترس است. در سال های اخیر، استفاده از تکنیک های هوشمند داده محور، برای کار با داده های زیادی که از چاه های تولیدی به دست می آید مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله، از یک روش داده محور که مبنای آن براساس شناسایی رویدادهای مهم چاه ها در طول عمر تولید آن است استفاده شده است. رویدادهای مهم چاه به سه دسته رویدادهای افزایشی، کاهش و بسته شدن چاه توسط اوپراتور تقسیم شده است. با استفاده از مفهوم مشتق و شیب نمودار و با تعیین عوامل محدودکننده ای، این رویدادها شناسایی می شوند. سپس، الگوریتم باید رویدادهای مرتبط را بین چاه ها پیدا کند و براساس میزان اهمیت رویدادهای مرتبط، ارتباط دینامیکی بین چاه های تولیدی مشخص می شود که نتیجه آن به صورت نقشه ارتباط دینامیکی بین چاهی نشان داده شده است. به این ترتیب، ابتدا یک مخزن نمونه در نرم افزار شبیه سازی اکلپس ساخته شد و سه رگه تراوا بین سه جفت چاه در نظر گرفته شد. سپس، از داده های تولید آن به عنوان ورودی مدل داده محور که در نرم افزار متلب برنامه نویسی شده است، استفاده شد تا مدل داده محور آن سه رگه تراوا را شناسایی کند.

کلمات کلیدی: ارتباط دینامیکی بین چاهی، مدل داده محور، شبیه سازی عددی، اکلپس، متلب

*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی: hjahangiri@iust.ac.ir, sadeghi@iust.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2020.4222.2914)

مقدمه

در یک مخزن نفتی، چاه‌های تولیدی در سراسر میدان پراکنده هستند و هر چاه با چاه‌های مجاور خود یک ارتباط متقابل دارد. تعیین ارتباط دینامیکی بین چاهی در مرحله تولید اولیه، یک پارامتر مهم برای مدیریت مخزن است. دانستن ارتباط بین چاهی در چاه‌های تولیدی، برای شرکت‌های بزرگ صنعت نفت بسیار مهم و سود آور می‌باشد. به‌عنوان مثال، در حفر چاه‌های بین چاهی^۱ و تخمین ناهمگنی مخزنی بسیار کمک می‌کند [۱]. همچنین در تحقیق در مورد توزیع نفت باقیمانده و تنظیم برنامه توسعه میدان نفتی قابل توجه است [۲]. روش‌های مستقیم و غیرمستقیم برای توصیف ارتباط دینامیکی چاه‌های یک مخزن وجود دارد. آزمایش‌های ردیاب^۲ و تداخل^۳، جزو روش‌های مستقیم هستند. این آزمایش‌ها با تعیین اولویت مسیر جریان و زمان میان‌شکنی آب^۴، بسیار کمک‌کننده هستند. با این حال، هر دو آزمایش نیاز به زمان قابل توجهی دارند. به‌دلیل محدودیت‌های زیادی که این روش‌ها دارند، مهندسان تمایل پیدا کردند که اطلاعات مربوط به قابلیت ارتباط دینامیکی بین چاهی را از داده‌های تولید استنتاج کنند. این کار از نیاز به بسته شدن چاه که سبب از دست رفتن تولید می‌شود، جلوگیری می‌کند [۳].

در مطالعات پیشین در مورد تعیین ارتباط دینامیکی بین چاهی، به‌روش‌های زیادی اشاره شده است که از آن‌ها به‌عنوان روش‌های غیرمستقیم تعیین ارتباطات بین چاهی یاد شده است. قبل از سال ۲۰۰۰ میلادی، عمده این روش‌ها براساس ابزارهای آماری مثل رتبه‌بندی اسپیرمن، ضریب همبستگی پیرسون و روش‌های مشابه آن بود [۴-۶]. یک ضریب همبستگی بالا بین نرخ‌های تولید چاه‌های تولیدی - تزریقی یا داده‌های فشاری آن‌ها بیانگر یک ارتباط دینامیکی قوی بین این جفت چاه‌ها بود [۳]. در سال‌های اخیر با پیشرفت‌هایی که شبیه‌سازها داشته‌اند، رویکردهای مبتنی بر

مدل مانند مدل خازن - مقاومت^۵ با تعاریف تحلیلی قوی از ساختار زیرزمینی، یک تصویر خوبی از ارتباطات دینامیکی بین چاهی به‌وجود آورده‌اند [۷] و [۸].

آلبرتونی و لیک یک برآزش خطی چندمتغیره را با فیلترهای ضریب نفوذپذیری برای داده‌های تزریق و تولید، به منظور ارائه اطلاعات در مورد روند نفوذپذیری و گذردهی موانع در مخزن ترکیب کردند. فیلتر نفوذپذیری برای به حساب آوردن اثر ثابت زمانی و میرایی بین چاه تزریقی و تولیدی است [۷]. بر اساس کارهای آلبرتونی و لیک، یوسف و همکاران مدل کامل‌تری برای تعیین ارتباط بین چاه‌های عمودی از نوسانات نرخ تولید و تزریق را ارائه می‌دهد که تأثیرات تراکم‌پذیری و گذردهی را در نظر می‌گیرد و به‌عنوان مدل خازن - مقاومت در نظر گرفته شده است. برای هر جفت چاه تزریقی و تولیدی، دو ضریب مستقل از نرخ برای تعیین ارتباط بین آنها تعیین گردید. وزن آن، ارتباط دینامیکی را تعیین می‌کند در حالی که ثابت زمانی میزان ذخیره مایعات بین چاه‌ها را تعیین می‌کند [۸]. همچنین، سیارپور و همکاران یک مدل خازن - مقاومت، براساس مدل یوسف که اساس آن تجزیه و تحلیل سیگنال و موازنه مواد است با استفاده از عملکرد تولیدی و تزریقی چاه‌ها ایجاد کرد. با استفاده از فرآیند تطبیق تاریخچه در داده‌های نرخ تولیدی و تزریقی موجود، این روش می‌تواند از بخش تولید در هر دوره از عمر یک میدان استفاده کند [۹]. در سال‌های اخیر استفاده از تکنیک‌های هوشمند داده محور، برای کار با داده‌های زیادی که از چاه‌های تولیدی به‌دست می‌آید مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰].

1. Infill Wells
2. Tracer Test
3. Interference Test
4. Water Breakthrough Time
5. Capacitance Resistance Model

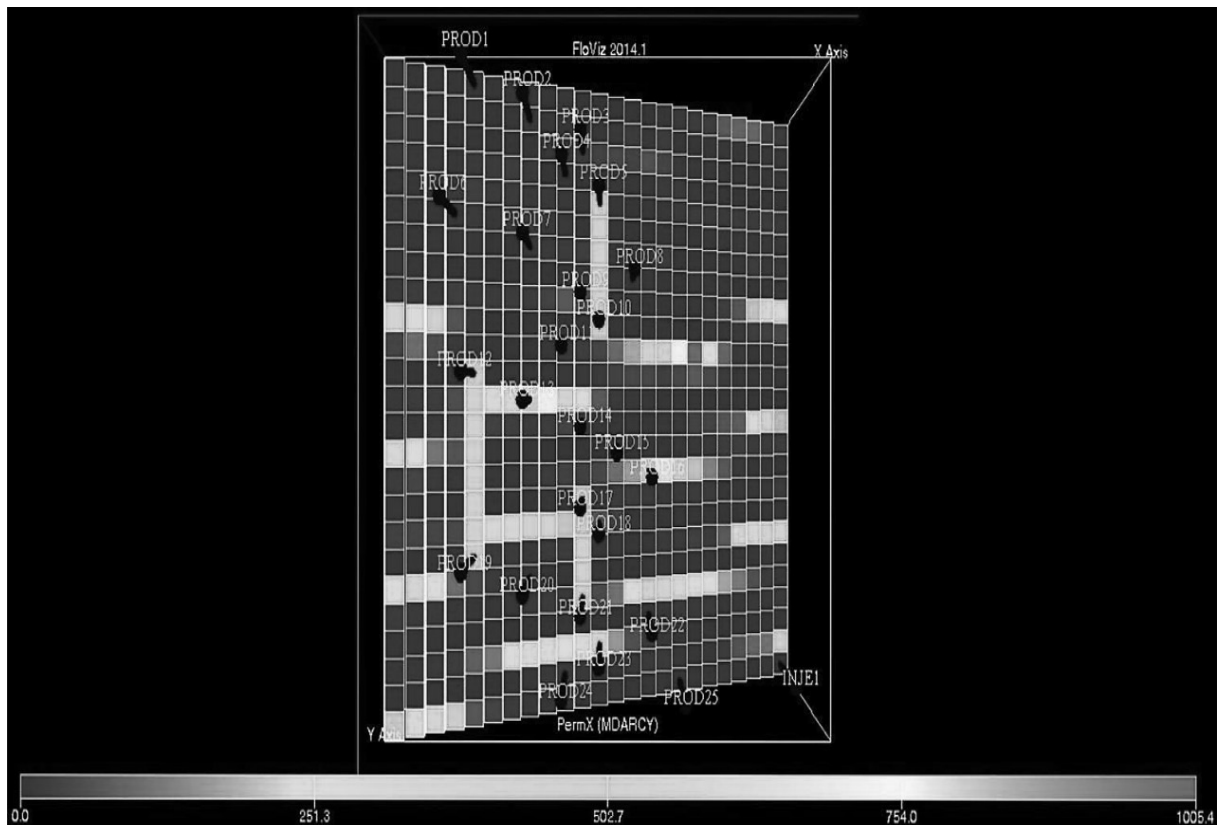
تراوایی هر گرید در جهت‌های X ، Y و Z با هم برابر است. این مخزن ۲۵ چاه تولیدی و یک چاه تزریقی دارد. ۳ رگه تراوا با تراوایی ۵۰۰ mD بین چاه‌های ۵ و ۱۰، ۱۷ و ۲۱، ۱۲ و ۱۹ در نظر گرفته شد. این سه جفت چاه به‌عنوان چاه‌هایی که دو به دو با هم در ارتباط‌اند و رگه‌ای تراوا بین آن‌ها در همه لایه‌ها برقرار است، در نظر گرفته شده است. به‌طور مثال، نقشه تراوایی برای لایه دوم در شکل ۱ نشان داده شده است. که سه رگه سبز رنگ با تراوایی ۵۰۰ mD در آن نشان داده شده است. بیشینه تولید برای چاه‌های تولیدی و تزریقی به‌ترتیب ۳۰۰۰ STBO/D و ۲۰۰۰ STBW/D در نظر گرفته شد و نیز حد پایین فشار ته چاهی برای چاه‌های تولیدی و تزریقی به‌ترتیب ۸۰۰ psia و ۴۰۰۰ psia می‌باشد. بیشینه تولید برای کل چاه‌های تولیدی (گروه تولید) ۱۲۰۰۰ STBO/D در نظر گرفته شد. همه چاه‌ها از روز اول شروع به فعالیت می‌کنند. از روز ۸۰۰ ام تولید، اقدام به بسته شدن سه جفت چاه انتخابی به‌صورت متناوب شد. برای هر جفت چاه، یکی از چاه‌ها ۹۰ روز بسته می‌شود و پس از آن به‌مدت ۹۰ روز دوباره شروع به تولید می‌کند و سپس، چاه مقابل آن ۹۰ روز غیر فعال می‌شود. برای اینکه پاسخ چاه‌های دیگر به بسته یا باز شدن این سه جفت چاه بهتر دیده شود این بازه زمانی انتخاب شد. با این حال، این بازه به انتخاب کاربر می‌تواند باشد و در روند مدل داده‌محور که در ادامه توضیح داده می‌شود، تأثیری ندارد. بقیه چاه‌های تولیدی در طول عمر تولیدشان غیرفعال نمی‌شوند. این مخزن به‌مدت ۱۰ سال تاریخچه تولید دارد. به‌طور نمونه، شکل ۲ نمودار نرخ تولید برحسب زمان را برای چاه‌های ۱۷ و ۲۱ نشان می‌دهد.

در همین راستا، پاندا و همکاران یک روش شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین اثر متقابل بین چاهی، مانند گسل‌ها، نواحی تراوا و غیره بین جفت چاه‌های مختلف در یک الگو را توسعه دادند [۱۱]. کائو و شنگ در مورد کاربرد درخت تصمیم^۱ برای تعیین و طبقه‌بندی ارتباط دینامیکی بین چاهی در یک سیستم تزریق-تولید تحقیق کردند. الگوریتم درخت تصمیم دارای مزایایی مانند ثبات و پایداری، دقت بالا و کاربرد راحت است. در این مقاله، آن‌ها نوعی مدل تفکیک^۲ براساس درخت تصمیم CART با استفاده از داده‌های میدان نفتی داکینگ ایجاد کردند [۱۲]. آرتون براساس فاکتورهای وزنی که از شبکه عصبی مصنوعی به‌دست آمد، کیفیت ارتباطات بین چاه‌های تزریق و تولید در یک میدان نفتی را تعیین و نتایج به‌دست آمده از آن را با نتایج روش خازن-مقاومت مقایسه کرد. نتایج به هم نزدیک و سازگاری مناسبی داشت [۱۲]. بررسی مقالات نشانگر این است که بیشترین توجه مربوط به ارتباط دینامیکی بین چاهی، در مخازنی است که در مراحل ثانویه یا ثالثیه تولید قرار دارند به‌خصوص فرآیند تزریق آب و ارتباط بین چاه‌های تزریقی-تولیدی که بسیار مهم است. ولی همان‌طور که گفته شد، درک عملکرد دینامیکی بین چاه‌های تولیدی نیز بسیار برای شرکت‌های نفتی حائز اهمیت است.

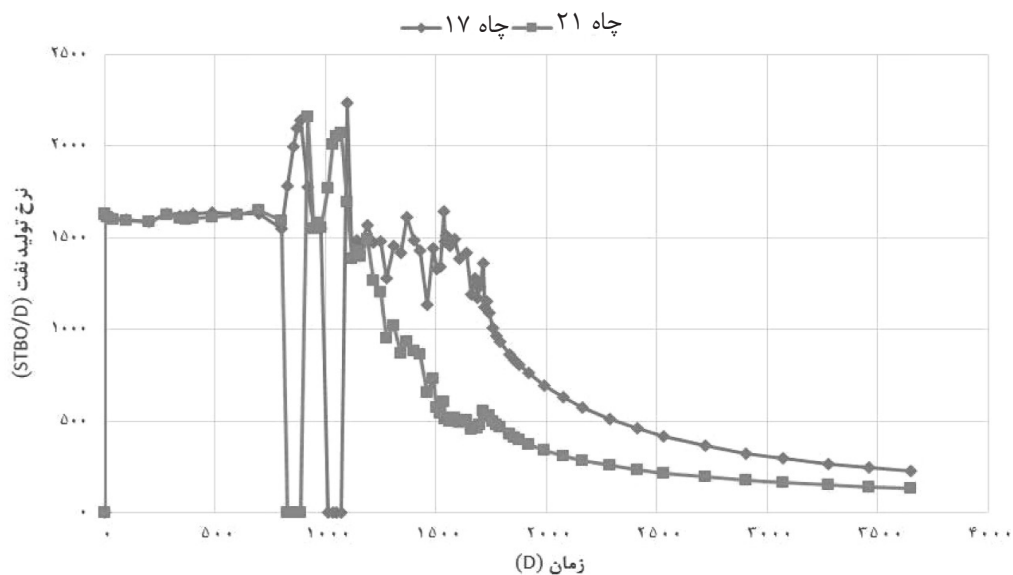
فرآیند ساخت مخزن نمونه

برای ساخت این مخزن، از مدل مخزنی موجود در مقاله SPE9 [۱۳] استفاده شد. این مخزن اندازه‌ای متوسط (۹۰۰۰ گرید) و درجه ناهمگنی تقریباً بالایی دارد. برای بررسی ویژگی‌های این مخزن به مقاله SPE9 مراجعه شود. مقادیر تراوایی در هر گرید متفاوت است و مقادیر تخلخل نیز در هر لایه تغییر می‌کند. مقادیر تراوایی گرفته شده از این مقاله ۰/۱ برابر شد بنابراین گستره تراوایی در مخزن در گریدهای مختلف از صفر تا ۴/۱۰۰۵ mD است.

1. Decision Tree
2. Discrimination Model



شکل ۱ نقشه تراوایی برای لایه دوم مخزن نمونه



شکل ۲ نمودار نرخ تولید برحسب زمان برای چاه‌های ۱۷ و ۲۱

در نظر گرفته شد. این روش داده‌محور که تنها از داده‌های تولیدی استفاده می‌کند، براساس شناسایی رویدادهای مهم یک چاه در طول عمر تولید آن است. هر رویداد در واقع یک تغییر قابل توجه در

تشریح رویکرد داده‌محور

در قدم اول، داده‌های تولید (نرخ تولید و فشار ته‌چاهی برای هر چاه تولیدی) خروجی از نرم‌افزار شبیه‌ساز به‌عنوان ورودی به الگوریتم داده‌محور

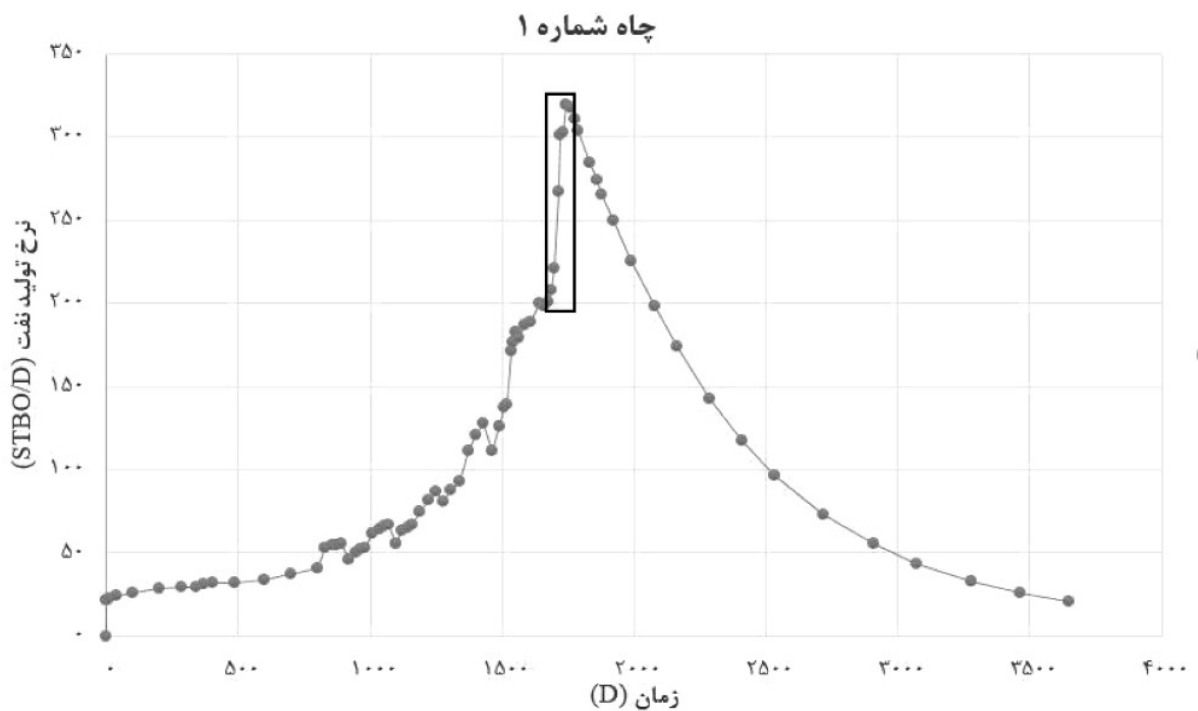
هر چاه باید عوامل محدود کننده‌ای تعیین شود. میزان تغییر (افزایش یا کاهش) نرخ تولید/ فشار ته چاهی، درصد رشد یا افت نرخ تولید/ فشار ته چاهی به‌عنوان عوامل محدودکننده در نظر گرفته شدند. درصد رشد یا افت برای دو مقدار به‌صورت زیر محاسبه می‌شود که F_1 مقدار اولیه و F_2 مقدار ثانویه می‌باشد:

$$(1) \quad 100 * \frac{|F_2 - F_1|}{F_1} = \text{درصد رشد/افت}$$

چاه‌های میدان براساس میزان قدرت تولیدشان به سه گروه تقسیم شدند و برای شناسایی رویدادهای کاهشی و افزایشی هر گروه شرایط محدودکننده‌ای در نظر گرفته شد که به‌صورت زیر است:

(۱) گروه اول (ضعیف): برای چاههایی که نرخ تولیدشان کمتر از ۱۰۰ STBO/D است اندازه (قدر مطلق) تغییر نرخ تولید، بیشتر از ۱۰ STBO/D و درصد رشد/افت بیشتر از ۱۵٪ و همچنین، اندازه (قدر مطلق) تغییر فشار ته‌چاهی بزرگتر از ۷۰ psi و درصد رشد/افت فشار ته‌چاهی بیشتر از ۵٪ در نظر گرفته شد.

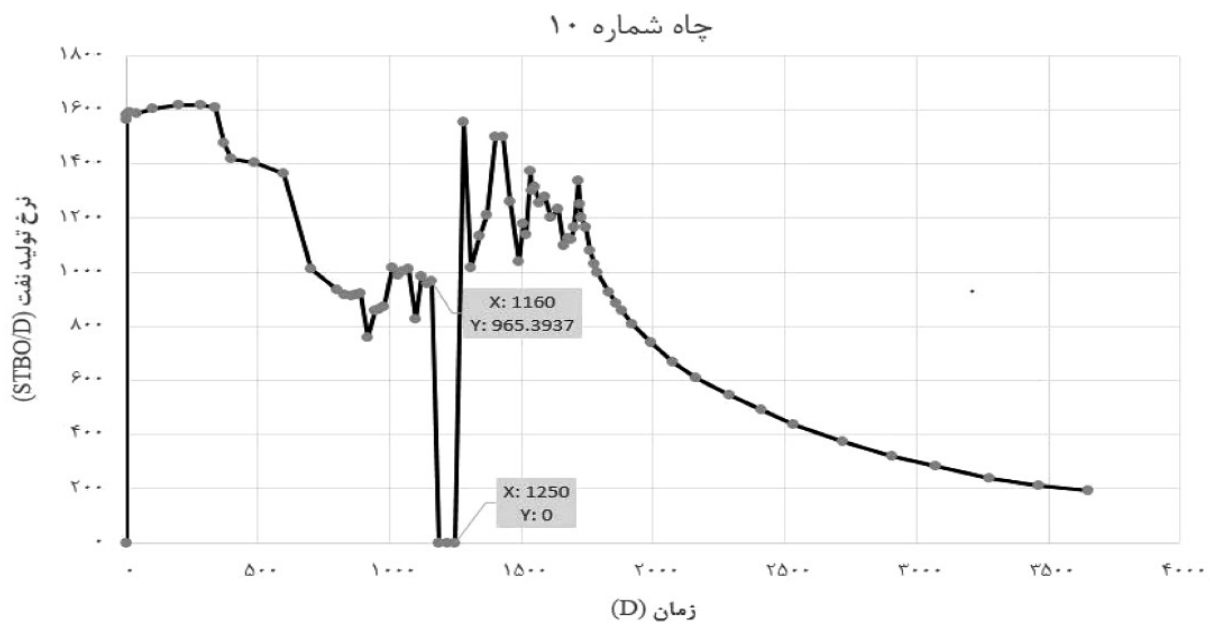
داده‌های نرخ تولید و فشار ته‌چاهی برای هر چاه که در یک بازه زمانی خاص اتفاق افتاده است، تعریف می‌شود. درک و تعیین ارتباط این رویدادهای مهم هر چاه با چاه‌های اطراف آن در مخزن به‌عنوان کلید اساسی تعیین ارتباط دینامیکی چاه‌های تولیدی در نظر گرفته می‌شود. به همین دلیل در گام اول، این رویدادهای مهم باید برای هر چاه مشخص و تقسیم‌بندی شود. برای شناسایی این رویدادهای مهم از مفهوم مشتق و شیب نمودار استفاده شد. مشتق هر نقطه زمانی به‌صورت عددی محاسبه می‌شود که نشانگر شیب بین آن نقطه و نقطه بعدی است. سه رویداد برای هر چاه شناسایی می‌شود که عبارتند از رویداد افزایشی، رویداد کاهشی و رویداد بسته شدن چاه توسط اوپراتور. شکل ۳ یک نمونه از این رویدادهای شناسایی شده که یک رویداد افزایشی مشاهده شده در داده‌های نرخ تولید چاه شماره ۱ است را نشان می‌دهد. افزایش قابل توجه، کاهش قابل توجه و بسته شدن ناگهانی چاه به‌عنوان رویدادهای مهم تلقی می‌شوند. برای تعیین رویدادهای مهم



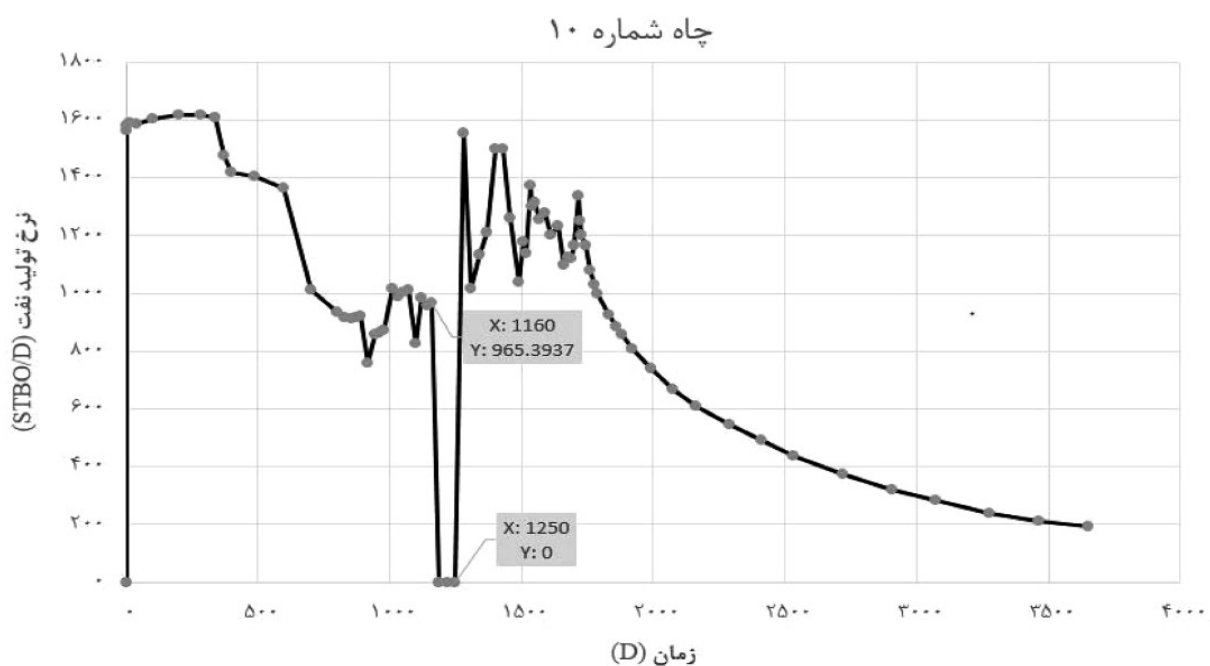
شکل ۳ رویداد افزایشی مشاهده شده در نمودار داده‌های نرخ تولید برحسب زمان چاه شماره ۱

است و به ازای هر رویداد از هر چاه، رویدادهای دیگر چاهها باید بررسی شوند که آیا هر کدام از رویدادهای دیگر چاهها مرتبط با این دوره زمانی برای این رویداد مورد نظر هستند یا خیر. ممکن است برخی از رویدادها در چاههای دیگر از زمانی زودتر از رویداد مورد نظر شروع شده باشد. در این حالت، به روند افزایش یا کاهش رویدادی که زودتر شروع شده است توجه می‌شود. اگر روند افزایشی یا کاهشی آن رویداد تغییر محسوسی کند (شیب حالت افزایشی یا کاهشی بیشتر می‌شود) آن رویداد به‌عنوان رویداد مرتبط احتمالی در نظر گرفته می‌شود. به‌طور مثال، رویداد بسته شدن چاه شماره ۱۰، از ۱۱۶۰ امین روز تولید تا ۱۲۵۰ امین روز تولید می‌باشد که در شکل ۴ نمایان است. یکی از رویدادهای چاه شماره ۵، از ۱۱۴۱ امین روز تولید تا ۱۲۵۰ امین روز تولید می‌باشد (شکل ۵). در واقع رویداد افزایشی چاه شماره ۵ زودتر از رویداد بسته شدن چاه شماره ۱۰ اتفاق افتاده است بدین صورت که چاه شماره ۵، از ۱۱۴۱ امین روز تا ۱۱۶۰ امین روز تولید یک روند افزایشی تدریجی دارد ولی زمانی که رویداد افزایشی چاه شماره ۵ به ۱۱۶۰ امین روز تولید که منطبق با بسته شدن چاه شماره ۱۰ می‌باشد می‌رسد، افزایشی محسوس در ادامه روند افزایشی آن مشاهده می‌شود. بنابراین، این رویداد چاه شماره ۵ به‌عنوان رویداد مرتبط با رویداد بسته شدن چاه شماره ۱۰ در نظر گرفته می‌شود تا در مرحله بعد مورد پردازش قرار گیرد. همین حالت برای برخی از رویدادهایی که دیرتر از رویداد مورد نظر شروع می‌شوند نیز برقرار است. رویدادهایی که از نظر زمانی دقیقاً در بازه رویداد مورد نظر قرار دارند نیز در نظر گرفته می‌شوند. در واقع در گام دوم که توضیح داده شد، رویدادهای احتمالی مرتبط در نظر گرفته می‌شود تا در مراحل بعدی مورد پردازش قرار گیرد. در واقع روند این الگوریتم، فیلترسازی گام به گام رویدادها است تا به یک نتیجه‌گیری دقیق‌تر برسیم.

۲) گروه دوم (متوسط): برای چاههایی که نرخ تولیدشان کمتر از $STBO/D$ ۵۰۰ است، اندازه (قدر مطلق) تغییر نرخ تولید بیشتر از $STBO/D$ ۲۵ و درصد رشد/افت بیشتر از ۱۵٪ و همچنین اندازه (قدر مطلق) تغییر فشار ته‌چاهی بزرگتر از ۱۰۰ psi و درصد رشد/افت بیشتر از ۵٪ در نظر گرفته شد. ۳) گروه سوم (قوی): برای چاههایی که نرخ تولیدشان بیشتر از $STBO/D$ ۵۰۰ است، اندازه (قدر مطلق) تغییر نرخ تولید بیشتر از $STBO/D$ ۱۰۰ و درصد رشد/افت بیشتر از ۱۵٪ و همچنین، میزان تغییر فشار ته‌چاهی بزرگتر از ۱۵۰ psi و درصد رشد/افت بیشتر از ۵٪ در نظر گرفته شد. از آنجایی که با یک شرط محدودکننده خاص نمی‌توان برای همه چاهها که شاخص بهره‌دهی و قدرت تولید متفاوت دارند تصمیم‌گیری کرد، چاههای مخزن دسته‌بندی و شرایط محدودکننده برای آنها در نظر گرفته شد. در واقع، این مقادیر انتخاب شده نشان‌دهنده این هستند که چه میزان تغییر مهم است تا به‌عنوان یک رویداد مهم برای هر چاه در نظر گرفته شود. تعیین این مقادیر به عهده کاربر است و دخالتی در روند و ساختار الگوریتم ندارد. در یک میدان واقعی، یک مهندس بهره‌بردار به‌خوبی می‌تواند با مشاهدات میدانی این دسته‌بندی‌ها و مقادیر شرایط محدود را تعیین کند. در اینجا از داده‌های فشار ته‌چاهی، به‌عنوان پشتیبان داده‌های نرخ تولید استفاده شده است. بدین صورت که ممکن است شروطی که در بالا بیان شد برای داده‌های نرخ تولید یک چاه صادق نباشد ولی برای داده‌های فشار آن صادق باشد. به‌عبارت دیگر، ممکن است رویدادی در داده‌های نرخ تولید یک چاه دیده نشود ولی داده‌های فشار آن را شناسایی کند. این مطلب به‌ویژه در چاههایی که نرخ تولیدی پایینی دارند بیشتر نمود پیدا می‌کند. پس از اینکه رویدادهای هر چاه شناسایی شد، باید رویدادهای احتمالی مرتبط را مشخص کرد. هر رویداد از هر چاه، دارای یک بازه زمانی



شکل ۴ رویداد بسته شدن چاه شماره ۱۰ در نمودار نرخ تولید برحسب زمان



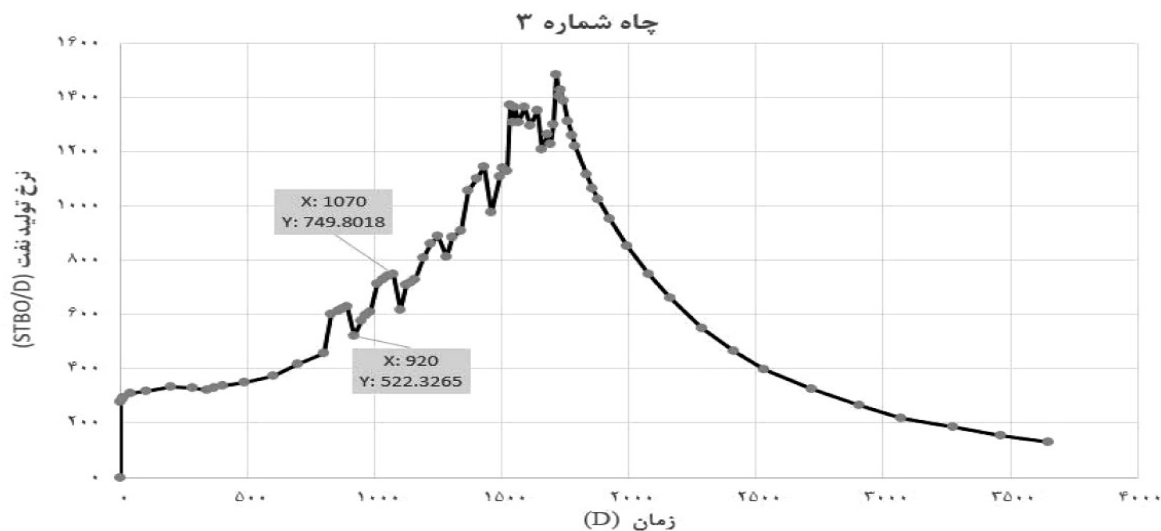
شکل ۵ رویداد افزایشی در نمودار نرخ تولید برحسب زمان چاه شماره ۵ متناظر با رویداد بسته شدن چاه شماره ۱۰

بیافتند و کاهش نرخ تولید قابل توجهی در یکی از چاه‌های اطراف آن رخ دهد نشان‌دهنده این است که آن دو چاه از نظر فشاری و دینامیکی با هم در ارتباط‌اند. یا اگر یک چاه در مدت زمانی معین بسته شود، باعث افزایش تولید قابل توجهی در چاه‌های مجاور که تبادل سیال خوبی با آن دارند می‌شود.

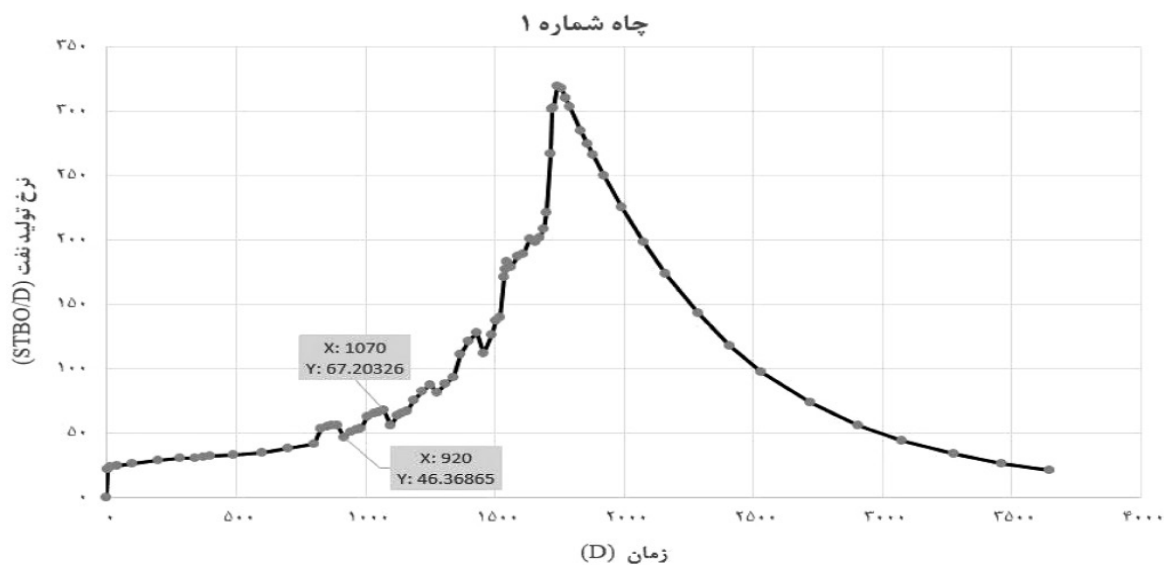
اگر اتفاق غیرعادی برای یکی از چاه‌های میدان اتفاق بیفتد (بسته شدن چاه، افزایش/کاهش ناگهانی در نرخ تولید)، چاه‌هایی که ارتباط دینامیکی و فشاری و تبادل سیال خوبی با آن چاه دارند تحت تأثیر این اتفاق قرار گرفته و متناسب با آن واکنش نشان می‌دهند. به‌طور مثال، اگر افزایش قابل توجهی در نرخ تولید یک چاه اتفاق

چاه ۳، از ۹۲۰ امین روز تا ۱۰۷۰ امین روز تولید به صورت افزایشی است که در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۷ نرخ تولید چاه شماره ۱ را نشان می دهد که در همین بازه زمانی به صورت افزایشی است و کاهش ناگهانی در داده های نرخ تولید آن رخ نداده است. بنابراین، این دو رویداد مرتبط نیستند و در نظر گرفته نمی شوند. از طرف دیگر به طور مثال، چاه شماره ۱۷، از ۹۸۰ امین روز تا ۱۰۷۰ امین روز تولید به مدت ۹۰ روز غیر فعال می شود که در شکل ۸ نمایان است.

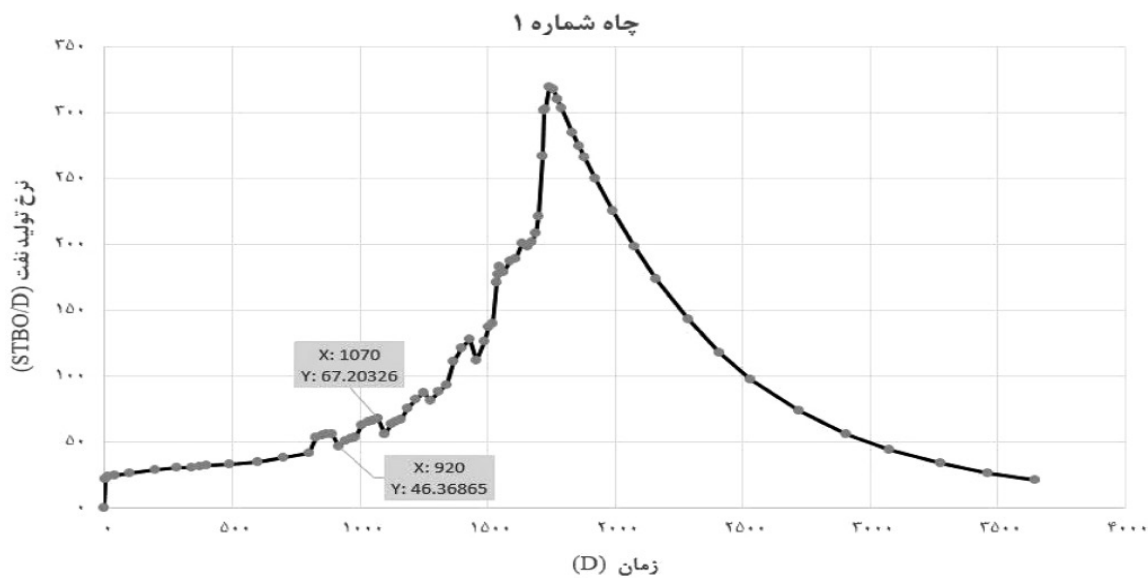
رخ دادن چنین اتفاقاتی نشان دهنده تراوایی خوب بین آن دو چاه و در نتیجه، تبادل خوب سیال است. بدین ترتیب در گام سوم، رویدادهای مرتبط پیدا می شوند. برای هر رویداد از هر چاه بسته به نوع آن (افزایشی، کاهششی یا بسته شدن چاه) رویدادهای مرتبط در دیگر چاه ها پیدا و ذخیره می شوند. اگر رویدادی در نرخ تولید یک چاه افزایشی یا کاهششی باشد، به ترتیب رویداد کاهششی یا افزایشی نرخ تولید چاه های دیگر به عنوان رویداد مرتبط در نظر گرفته می شود. به طور مثال، یکی از رویدادهای



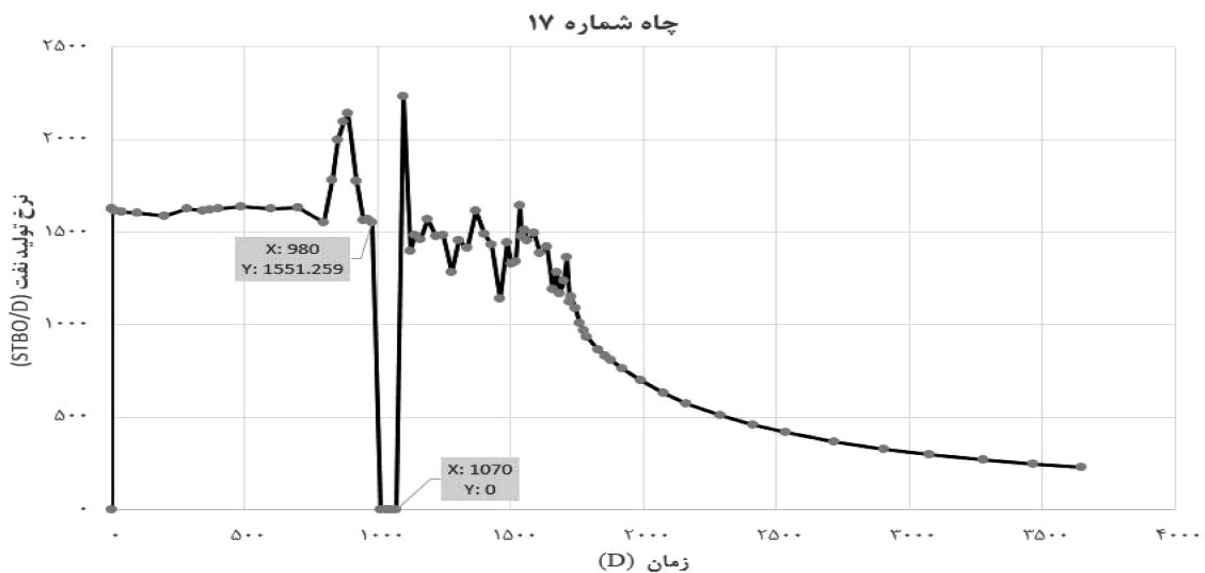
شکل ۶ رویداد افزایشی چاه شماره ۳ در داده های نرخ تولید برحسب زمان



شکل ۷ رویداد افزایشی چاه شماره ۱ در نمودار داده های نرخ تولید برحسب زمان



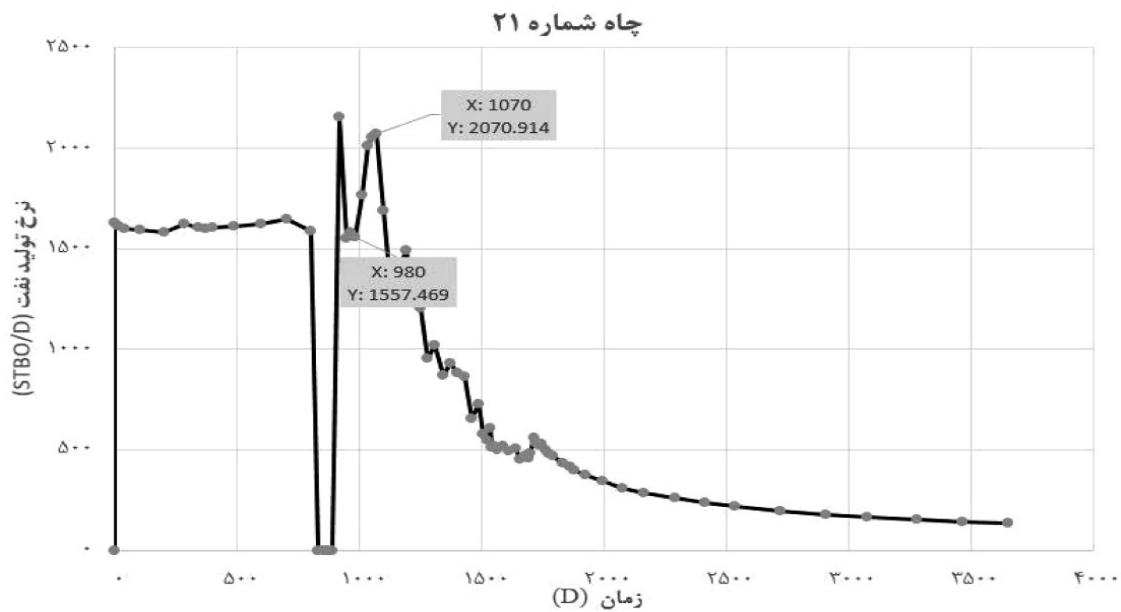
شکل ۷ رویداد افزایشی چاه شماره ۱ در نمودار داده‌های نرخ تولید برحسب زمان



شکل ۸ رویداد بسته شدن چاه شماره ۱۷ در نمودار داده‌های نرخ تولید برحسب زمان

ممکن است دو چاه فاصله زیادی از هم داشته باشند ولی رویداد مرتبطی نیز شناسایی شود که منطقی نباشد. بنابراین، این مشکل به‌عنوان خطای سیستم (الگوریتم) در نظر گرفته می‌شود. علت این خطا ممکن است به‌دلیل خطا در ثبت داده توسط سنسورها و نویز یا تصادفی بودن باشد. به دلایل گفته شده، شعاع بررسی ۲/۵ km برای هر چاه تعریف شد تا رویدادهای مرتبط شناسایی شده موجود، در این شعاع بررسی پردازش نهایی شوند.

چاه ۲۱ در همین بازه زمانی، با افزایش قابل توجهی در تولید روبه‌رو است (شکل ۹). بنابراین، این دو رویداد مرتبط با هم در نظر گرفته می‌شوند. به همین صورت، برای هر رویداد از هر چاه این دستورالعمل انجام می‌شود و رویدادهای مرتبط پیدا و ذخیره می‌شوند. در مرحله بعد، باید عامل محدودکننده دیگری در نظر گرفته شود. این عامل محدودکننده، فاصله بین چاهی است. در واقع، برای چاه‌های میدان یک شعاع بررسی تعریف می‌شود.

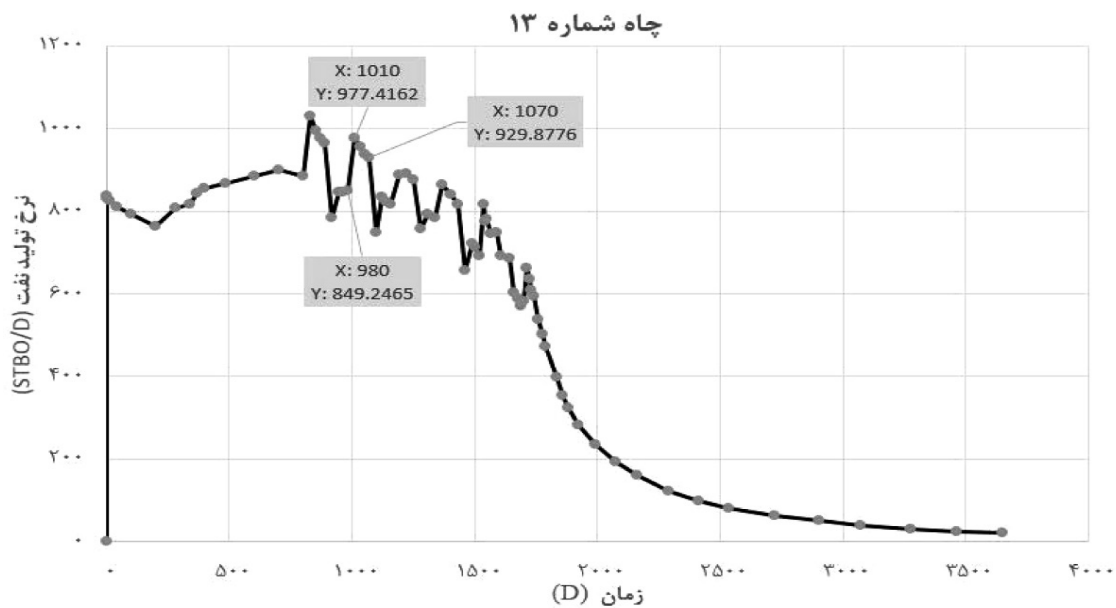


شکل ۹ رویداد افزایشی چاه شماره ۲۱ در نمودار داده‌های نرخ تولید مرتبط با بسته شدن چاه ۱۷

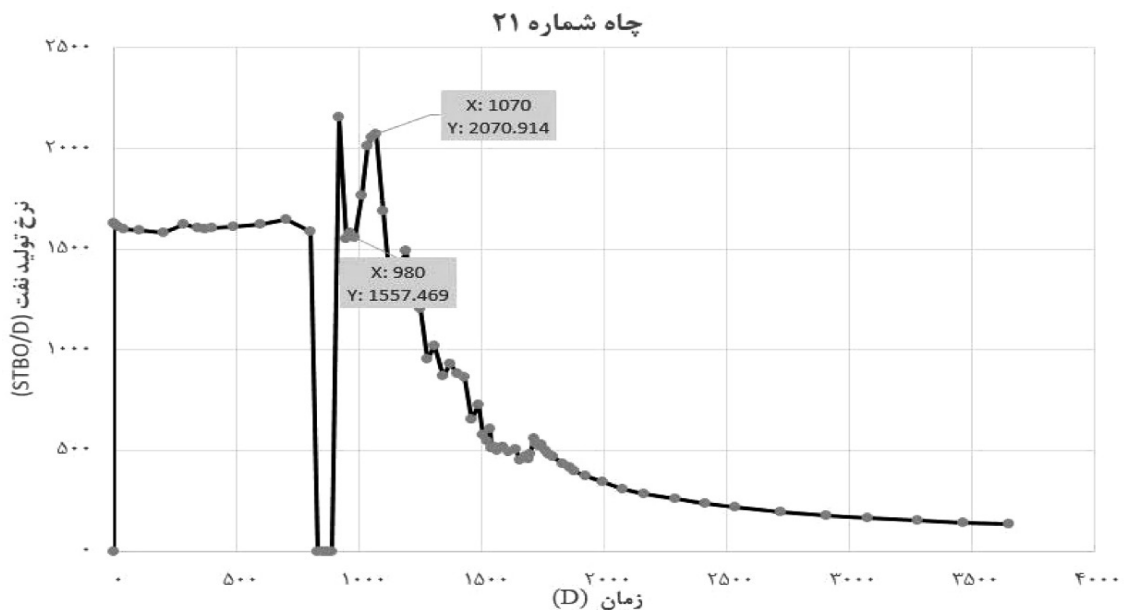
در یک چاه می‌دهند. هر چه مدت زمان به طول انجامیدن پاسخ کوتاه‌تر باشد، آن پاسخ (رویداد) ارزش کمتری برخوردار است. میزان افزایش/کاهش و درصد رشد/افت در نرخ تولید نیز به موازات هم سنجیده می‌شود. چاههایی که بالاتر از STBO/D ۵۰۰ تولید دارند (گروه سوم)، عموماً میزان افزایش/کاهش نرخ تولید بیشتری نسبت به چاه‌های با تولید کمتر از STBO/D ۵۰۰ دارند. به همین دلیل باید درصد رشد/افت نرخ تولید رویدادهای این دو گروه در کنار میزان افزایش/کاهش نیز در نظر گرفته شود. به‌طور مثال، در شکل ۸ نشان داده شد که چاه شماره ۱۷ از ۹۸۰ امین روز تا ۱۰۷۰ امین روز تولید غیر فعال می‌شود. نرخ تولید چاه شماره ۱۳ در ۹۸۰ امین روز تولید افزایش ناگهانی دارد ولی بعد از آن در ۱۰۱۰ امین روز تولید با کاهش تولید تدریجی روبه‌رو می‌شود که در شکل ۱۰ آمده است. از طرف دیگر، نرخ تولید چاه ۲۱ از ۹۸۰ امین روز تولید با افزایش ناگهانی روبه‌رو است و این افزایش تا ۱۰۷۰ امین روز ادامه دارد (شکل ۱۱).

این فاصله براساس فواصل بین سه جفت چاهی که ارتباط قوی دینامیکی دارند و همچنین، شعاع کاوش^۱ هر چاه که براساس خواص پتروفیزیکی و سیال است انتخاب شد و به‌عنوان یک نمونه معرفی شده تا تأثیر آن در روند الگوریتم را نشان دهد. در مرحله بعد باید به این نکته توجه شود که همه این رویدادهای مرتبط دارای یک امتیاز و درجه اهمیت نیستند. بنابراین در گام بعد، نوبت به مرتب‌سازی رویدادهای مرتبط و میزان اهمیت هر کدام از این رویدادها می‌باشد. رویدادهای مرتبط براساس مدت زمان واکنش چاه، مدت زمان به طول انجامیدن آن رویداد، میزان افزایش/کاهش و درصد رشد/افت مرتب می‌شوند. مدت زمان واکنش رویداد به این معنی است که چاه‌های اطراف با چه فاصله زمانی پاسخ رویدادی که در یک چاه اتفاق افتاده است را می‌دهند. اگر چاهی بلافاصله پاسخ متناسب را بدهد، آن پاسخ (رویداد) بیشترین امتیاز و اهمیت را دارد و همچنین، هر چه دیرتر پاسخ دهد بدین معنی است که ارتباط دینامیکی و فشاری ضعیف‌تری بین دو چاه برقرار است. به‌علاوه، مدت زمان به طول انجامیدن رویداد نیز به معنی مدت زمان پاسخی که چاه‌های اطراف به رویداد مورد نظر

1. Radius of Investigation



شکل ۱۰ رویداد افزایشی چاه شماره ۱۳ در نمودار داده‌های نرخ تولید مرتبط با بسته شدن چاه ۱۷



شکل ۱۱ رویداد افزایشی چاه شماره ۲۱ در داده‌های نرخ تولید مرتبط با بسته شدن چاه ۱۷

بین چاه‌ها و مشخص سازی میزان اهمیت هر کدام از رویدادها با معیارهای گفته شده، نتایج از دو جنبه به دست می‌آید. هر چه تعداد رویدادهای مرتبط بین چاه‌ها بیشتر باشد، بدین معنی است که احتمال ارتباط داشتن آن دو چاه زیاد است و با اطمینان بیشتر می‌توان از ارتباط آن دو چاه صحبت کرد. میزان اهمیت هر کدام از رویدادها و امتیازات هر رویداد نشان‌دهنده نوع ارتباط (قوی، متوسط

زمان واکنش رویدادهای چاه‌های ۱۳ و ۲۱ یکسان است و هر دو چاه بلافاصله پاسخ می‌دهند ولی مدت زمان افزایش، میزان افزایش و درصد رشد تولید چاه ۲۱ بیشتر از چاه ۱۳ است. بنابراین، پاسخ چاه ۲۱، ارزش و اهمیت بیشتری نسبت به پاسخ چاه ۱۳ دارد و در اولویت قرار می‌گیرد. در گام آخر برای تعیین نتایج، باید چاه‌های مرتبط با هر چاه مشخص شود. پس از شناسایی رویدادهای مرتبط

اطلاعاتی در دسترس نیست. در واقع هدف تعیین شده، شناسایی سه رگه تراوا و تعیین سه جفت چاه تولیدی که بیشترین ارتباط را با هم دارند بود. مدل داده‌محور در مورد بقیه چاه‌های تولیدی مخزن نیز پیش‌بینی انجام داده است.

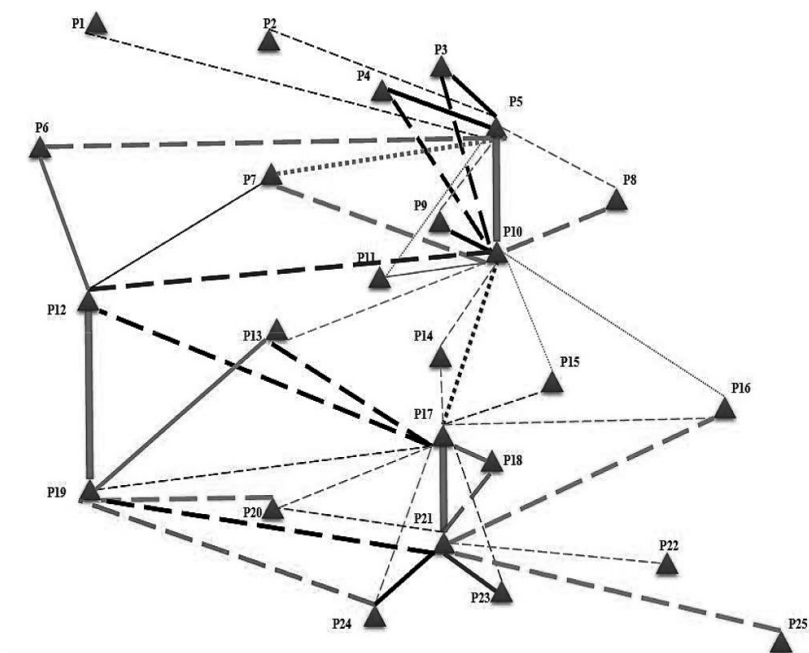
اعتبارسنجی مخزن نمونه

شکل ۱۲ نقشه ارتباطات دینامیکی بین همه چاه‌های تولید مخزن نمونه را نشان می‌دهد که نتیجه مدل داده‌محور است. در شکل ۱۲، چاه‌های تولیدی با مثلث مشخص شده‌اند. خط‌های کشیده شده بین چاه‌ها نشان‌دهنده ارتباط است. ضخامت خطوط رسم شده، بیانگر نوع ارتباط (ضعیف، متوسط و قوی) است و نوع خطوط رسم شده (خط توپر، خط چین بلند و خط چین کوتاه) بیانگر اعتماد به پیش‌بینی انجام شده است. هر چه ضخامت خطوط رسم شده بیشتر باشد ارتباط قوی‌تر است. ۳ مقدار ضخامت در نظر گرفته شد که بیشترین ضخامت، ارتباط قوی را نشان می‌دهد و همچنین، ضخامت متوسط و کم برای ارتباط متوسط و ضعیف در نظر گرفته شد. خط توپر بیانگر اعتماد زیاد به پیش‌بینی انجام شده، است.

و ضعیف) است. تعداد رویدادهای مرتبط نشان‌دهنده قطعیت بیشتر نتیجه و امتیاز و درجه اهمیت رویدادهای مرتبط، نشان‌دهنده نوع ارتباط است.

بحث و نتایج

هدف از ایجاد مخزن نمونه، اعتبارسنجی مدل داده‌محور است. بنابراین، مخزن نفتی نمونه باید به مخازن نفتی واقعی شبیه باشد. پس یک مخزن ناهمگن انتخاب شد و برنامه تولیدی برای آن در نظر گرفته شد. همان‌طور که بیان شد، سه رگه تراوا ۵۰۰ mD بین جفت چاه‌های ۵ و ۱۰، ۱۲ و ۱۹، ۱۷ و ۲۱ در نظر گرفته شد و طبق شبیه‌سازی عددی نتیجه شد که این سه جفت چاه بیشترین ارتباط فشاری و دینامیکی (تبادل سیال) را با هم دارند. بنابراین، مدل داده‌محور باید این سه رگه تراوا را در مخزن شناسایی کند بدون اینکه داده‌های تراوایی یا نقشه تراوایی را به‌عنوان ورودی داشته باشد. در واقع، ورودی مدل داده‌محور فقط داده‌های تولید (نرخ تولید و فشار ته چاهی) چاه‌ها است. با توجه به ناهمگنی بالای مخزن نمونه، در مورد چگونگی ارتباط دینامیکی بقیه چاه‌های تولیدی این مخزن،



شکل ۱۲ نقشه ارتباطات دینامیکی بین چاه‌های تولیدی مخزن نمونه

نتیجه گیری

در این مقاله به تعیین ارتباط دینامیکی بین چاه‌های تولیدی یک میدان توسط مدلی داده‌محور پرداخته شد. برای اعتبارسنجی مدل، مخزنی ساخته شد و رگه‌هایی با تراوایی بالا بین سه جفت چاه تعبیه شد تا مدل داده‌محور این رگه‌ها را شناسایی کند. این مخزن نمونه با درجه ناهمگنی قابل قبول و تعداد چاه‌های زیاد تقریباً به یک مخزن واقعی شبیه شد و به مدت ۱۰ سال تاریخچه تولید داشت که از داده‌های تولید آن به‌عنوان ورودی مدل داده‌محور استفاده شد. نقشه ارتباط دینامیکی به‌عنوان نتیجه مدل داده‌محور ایجاد و در مورد آن و پارامترهای تراوایی و فاصله بین چاهی اثرگذار بر آن نیز بحث شد. از جمله نتایج این تحقیق عبارتند از:

- ۱- مدل داده‌محور با استفاده از شناسایی رویدادهای مهم مرتبط بین چاه‌ها و مرتب‌سازی آن‌ها براساس درجه اهمیت، قادر به تشخیص رگه‌های تراوا و ارتباط دینامیکی قوی بین چاهی است. بدون داشتن اطلاعات زمین‌شناسی، با شناسایی چاه‌هایی که ارتباط دینامیکی قوی‌ای دارند، می‌توان رگه‌های تراوا را پیش‌بینی کرد و به یک نظر کلی در مورد تراوایی مخزن رسید.
- ۲- مزیتی که این مدل داده‌محور نسبت به روش‌هایی مانند شبیه‌سازی عددی دارد این است که با استفاده از داده‌های کمتر، در زمان زودتری به نتیجه می‌رسد. در واقع با استفاده از داده‌هایی که از عدم قطعیت پایین‌تری برخوردارند، به نتیجه می‌رسد.
- ۳- فاصله بین چاهی بر ارتباط دینامیکی دو چاه تأثیرگذار است. در فواصل دورتر، پاسخ‌های مرتبط دو چاه ضعیف‌تر می‌شود.
- ۴- با ارزش‌ترین بخش یک مدل داده‌محور، داده است. اگر داده زیادی در دسترس باشد نقطه قوت آن و کمبود داده نقطه ضعف مدل داده‌محور محسوب می‌شود.

در واقع نوع خطوط بیانگر میزان احتمال درستی نتیجه پیش‌بینی شده، است. خط چین بلند و کوتاه نیز به ترتیب بیانگر اعتماد متوسط و کم به نتیجه است. طبق شکل ۱۲، قوی‌ترین ارتباط بین ۳ جفت چاهی است که رگه‌ای تراوا بین آنها موجود است که با خط توپر و با بیشترین ضخامت رسم شده است. مدل داده‌محور به خوبی ارتباط قوی دینامیکی که بین این سه جفت چاه وجود دارد را شناسایی کرده است. این نشان‌دهنده تراوایی بالا و یکدست بین چاهی است. پس ارتباط قوی و تعداد رویدادهای مرتبط که نشان‌دهنده احتمال ارتباط زیاد نیز است به میزان تراوایی بالای بین چاهی وابسته است. علاوه بر آن، این رگه تراوا در هر پانزده لایه موجود بود و یک فضای همگن را به‌وجود آورد. در واقع همگن بودن نیز بر ارتباط قوی بین سه جفت چاه افزوده است. هرچه درجه ناهمگنی و تغییرات تراوایی بین چاهی بیشتر باشد اثر منفی بر ارتباط دینامیکی می‌گذارد. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است اعتماد به نتایج در حد متوسط و زیاد است که با خطوط توپر و خط چین بلند نمایش داده شده است که نشان‌دهنده این است که نتایج از قطعیت تقریباً بالایی برخوردار است. ارتباطات دینامیکی تعیین شده در این مخزن برای فاصله $2/5$ km برای هر چاه است. در واقع شعاع بررسی برای هر چاه $2/5$ km است و ارتباطات در این شعاع بررسی، مشخص شده است. واضح است که هرچه چاه‌ها از هم فاصله بیشتری داشته باشند، تأثیرپذیری آن‌ها از هم تحت تأثیر قرار می‌گیرد و پاسخ‌ها به رویدادهای یکدیگر ممکن است ضعیف باشد و یا در حدی نباشد که سیستم آن را به‌عنوان پاسخ در نظر بگیرد و آن را نادیده می‌گیرد. این موضوع در تعداد رویدادهای مرتبط می‌تواند تأثیرگذار باشد و به همین دلیل احتمال ارتباط دو چاه کاهش می‌یابد و همچنین، پاسخ‌ها ضعیف‌تر می‌شوند و رویدادهای مرتبط امتیاز کمتری می‌گیرد که نشان‌دهنده ارتباط ضعیف است.

به همین دلیل، هرچه تاریخچه تولید بیشتر باشد، مدل با قطعیت بیشتری می‌تواند پیش‌بینی کند. در اینجا ۱۰ سال تاریخچه تولید برای پیش‌بینی با دقت بالا کافی بود.

۵- چاه‌هایی که ارتباط ضعیفی با چاه‌های مجاور خود دارند می‌توانند گزینه خوبی برای توسعه میدان باشند که با حفر چاه جدیدی در مجاورت آن ضریب بازیافت کل و تولید کل میدان را افزایش داد.

مراجع

- [1]. Chen X, Zhang D, Wang L, Jia N, Kang Z, Zhang Y, Hu S (2016) Design automation for interwell connectivity estimation in petroleum cyber-physical systems, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2, 36: 255-264
- [2]. Cao M, Shang F (2013) Study on inferring interwell connectivity of injection-production system based on decision tree, 2013 10th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 1010-1014
- [3]. Wang Y. (2018) Inferring interwell connectivity by statistical diagnostic tools and signal processing methods, M.Sc thesis, University of Oklahoma, USA
- [4]. Tian C, Horne R (2016) Inferring interwell connectivity using production data, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, OnePetro.
- [5]. Heffer K, Fox R, McGill C, Koutsabeloulis N (1997) Novel techniques show links between reservoir flow directionality, earth stress, fault structure and geomechanical changes in mature waterfloods, *SPE Journal*, 2, 2:91-98
- [6]. Soerawinata T, Kelkar M (1999) Reservoir management using production data, SPE mid-continent operations symposium, OnePetro.
- [7]. Albertoni A, Lake L (2003) Inferring interwell connectivity only from well-rate fluctuations in waterfloods, *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 1, 6: 6-16
- [8]. Yousef A, Gentil P, Jensen J, Lake L (2005) A capacitance model to infer interwell connectivity from production and injection rate fluctuations, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 9, 06: 630-646.
- [9]. Sayarpour M, Kabir C, Lake L (2009) Field applications of capacitance-resistance models in waterfloods, *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 6, 12: 853-864
- [10]. Ballin PR, Solano R, Hird KB, Volz RF (2002) New reservoir dynamic connectivity measurement for efficient well placement strategy analysis under depletion, SPE Annual Technical Conference and Exhibition
- [11]. Panda MN, Chopra AK (1998) An integrated approach to estimate well interactions, SPE India Oil and Gas Conference and Exhibition, OnePetro.
- [12]. Artun E (2017) Characterizing interwell connectivity in waterflooded reservoirs using data-driven and reduced-physics models: a comparative study, *Neural Computing and Applications*, 7, 28: 1729-1743
- [13]. Killough J E (1995) Ninth SPE comparative solution project: a reexamination of black-oil simulation, SPE Reservoir Simulation Symposium



Data Driven Approach to Infer Inter-well Connectivity among Production Wells in an Oil Synthetic Reservoir

Aref Enayati, Hamid Reza Jahangiri* and Mohammad Taghi Sadeghi*

School of Chemical Engineering, Oil and gas, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

sadeghi@iust.ac.ir, hjahangiri@iust.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2020.4222.2914

Received: December/14/2020

Accepted: October/24/2020

Introduction

In an oil reservoir, production wells are scattered throughout the field, and each well has a reciprocal connection with its adjacent wells. Determining the inter-well connection in the primary production stage is an important parameter for reservoir management. Realizing this is very important and profitable for large oil companies. It helps a lot in drilling infill wells, estimating reservoir heterogeneity and in research on the distribution of residual oil [1,2]. There are several direct and indirect methods to determine inter-well connectivity. Tracer testing and pressure-transient testing are among the direct methods [3]. Numerical simulation, statistical tools, capacitance-resistance model and intelligent data-driven techniques are among indirect methods [4-11]. These articles show that the greatest attention is paid to the connectivity between wells in reservoirs that are in the secondary stage of production, especially the water injection process and the connection between injection-production wells, which it is very important. But as mentioned, understanding the inter-well connectivity between production wells is also very important for oil companies.

Materials and Methods Case Study: a Synthetic Reservoir Model

The reservoir model in SPE9 [12] paper was used. The reservoir has 25 production wells and one injection

well. The permeability values obtained from this paper were 0.1 times. The permeability is equal in the directions X, Y and Z. Location of the wells and permeability map for the second layer is shown in Figure 1 that includes three green streaks with 500 mDarcy permeability, were considered between wells 5 and 10, 17 and 21, 12 and 19. These three well pairs are considered as wells that are highly connected.

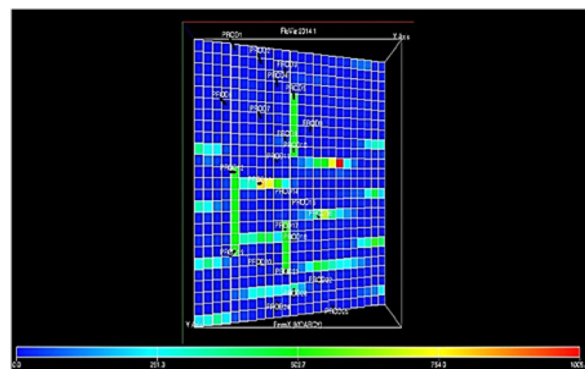


Fig. 1 Permeability map for the second layer with 3 high permeable streaks that is shown with green lines

Data Driven Approach

This method is based on finding relations between events of production wells. The concept of derivative and slope diagram was used to identify important events of wells. Important well events are divided into

three categories: increasing, decreasing and no flow (when the production rate and pressure become zero at a specific time interval). An event may not be detected in a production rate data, but it may be detected in the pressure data. Therefore, the existence of the pressure data is useful to detect the important events of a well. If there is a significant increase or decrease in the production rate of a well, and a significant decrease or increase in the production rate occurs in another well, respectively, it indicates that the two wells are connected. Afterwards, the related events should be evaluated and ranked. The result is shown as a connectivity map.

Results and Discussion

Figure 2 shows the connectivity map for all production wells, which it is the result of a data-driven model.

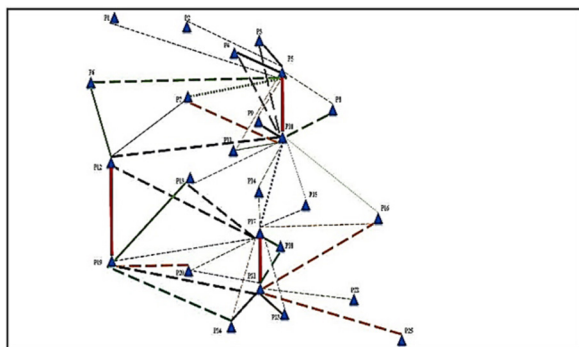


Fig. 2 Connectivity map.

The production wells are represented as blue triangles. The connection strength is shown by line width, and the line style shows the confidence in the estimates. A thick, medium and thin line represents strong, moderate and weak connection, respectively. A solid line, long dashed and short dashed represent high confidence, medium confidence and low confidence, respectively. The inter-well connectivity between producers can be demonstrated in another way to make it easier to understand the results. Figure 3 shows the connections between wells by colors. Red, green, and blue in this figure indicate high confidence (low uncertainty), moderate confidence (moderate uncertainty), and low confidence (high uncertainty), respectively. Dark, common, and light colors also indicate strong, moderate, and poor connectivity, respectively. Dark red, red and light red, green and light green, blue and light blue are used in this figure.

According to Figures 2 and 3, the strongest connection is between 3 well pairs with a high permeable streak, which it is drawn with a solid red line with the greatest thickness and shown in dark red. The data-driven model has well identified the strong connectivity that exists between these three well pairs. As shown in

Figures 3, the confidence in the results is moderate to high, shown by green and red colors, indicating that the results are almost certain.

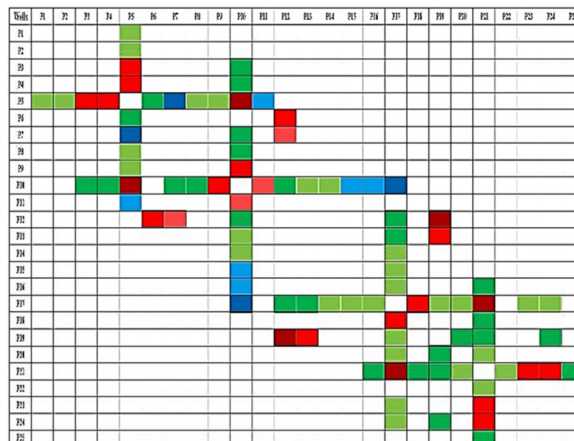


Fig. 3 Data-driven model's result shows the inter-well connectivity between producers.

Conclusions

In this paper, the inter-well connectivity between the production wells is determined by a data-driven model. To validate the model, a synthetic reservoir was used, and high-permeability streaks were embedded between three well pairs, and the data-driven model should identify these 3 well pairs. The results of the data-driven model show that the data-driven model is able to detect permeable streaks and strong connectivity between wells by identifying important events related between wells and sorting them according to their importance.

Without a permeability map, by identifying wells that have a strong connectivity, the permeability streaks can be predicted, and a general view of the reservoir permeability can be reached. The advantage of this data-driven model over methods such as numerical simulation is that using less data, which it results in faster time. In fact, by using data that have lower uncertainty, the mentioned results can be obtained.

References

1. Chen X (2016) Design automation for interwell connectivity estimation in petroleum cyber-physical systems. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 36, 2: 255-264.
2. Cao M, Shang F (2013) Study on inferring interwell connectivity of injection-production system based on decision tree, in 2013 10th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD). IEEE.
3. Wang Y (2018) Inferring Interwell Connectivity by Statistical Diagnostic Tools and Signal Processing Methods, Thesis, University of Central Oklahoma Max Chambers Library, 1-85.

4. Tian C., Horne R N (2016) Inferring interwell connectivity using production data, in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.
5. Heffer K J (1997) Novel techniques show links between reservoir flow directionality, earth stress, fault structure and geomechanical changes in mature waterfloods, SPE Journal, 2, 2: 91-98.
6. Soeriawinata T, Kelkar M (1999) Reservoir management using production data, in SPE mid-continent operations symposium. Society of Petroleum Engineers.
7. Albertoni A, Lake L W (2003) Inferring interwell connectivity only from well-rate fluctuations in waterfloods. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 6, 1: 6-16.
8. Yousef A A (2005) A capacitance model to infer interwell connectivity from production and injection rate fluctuations. in SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
9. Sayarpour M, Kabir C S, Lake L W (2009) Field applications of capacitance-resistance models in waterfloods, SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 12, 6: 853-864.
10. Ballin P (2002) New reservoir dynamic connectivity measurement for efficient well placement strategy analysis under depletion. in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.
11. Panda M, Chopra A (1998) An integrated approach to estimate well interactions. in SPE India Oil and Gas Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.
12. Killough J (1995) Ninth SPE comparative solution project: a reexamination of black-oil simulation. in SPE Reservoir Simulation Symposium, Society of Petroleum Engineers.