

تطابق تاریخچه تولید برای یکی از مخازن نفتی شکافدار ایران

مجتبی رحیمی، احمد رضانی*، محسن مسیحی

تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

پیام‌نگار: ramazani@sharif.edu

چکیده

برای این که بتوانیم پیش‌بینی معتبری از عملکرد آینده مخزن تحت سناریوهای مختلف داشته باشیم، اجرای تطابق تاریخچه تولید^۱ ضروری است. ضرورت تطابق تاریخچه تولید هنگامی آشکار می‌شود که مدل جامع دینامیک مخزن، حتی اگر بهترین تقریب برای پارامترهای مخزن را در نظر بگیرد، نمی‌تواند تمام داده‌های مشاهده‌ای را دقیقاً تولید کند. تطابق تاریخچه دستی و تطابق تاریخچه خودکار، دو روش موجود در فرایند تطابق تاریخچه تولید هستند.

چنانچه برای مخزن شکافداری، مطالعه ترک^۲ انجام نشده باشد در فرایند شبیه‌سازی مقدار مشابهی برای خصوصیات ترک در همه سلول‌ها، تخصیص داده می‌شود و عدم تجانس ترک‌های مخزن نادیده گرفته می‌شود به این ترتیب نتایج بدست آمده با استفاده از روش متعارف نمی‌تواند با دقت زیاد، عملکرد آینده مخزن را پیش‌بینی کند. زیرا طبیعت عدم تجانس ترک‌های مخزن را توصیف نمی‌کند. در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار Simopt برای مدل دینامیک مخزن نفتی شکافدار انتخاب شده، تطابق تاریخچه خودکار انجام شده است. نرم‌افزار Simopt با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی نه تنها باعث کاهش مدت مورد نیاز برای رسیدن به یک تطابق قابل قبول نسبت به روش سنتی می‌شود (بخصوص اگر تعداد چاه‌های موجود زیاد باشد)، بلکه دقت پارامترهای تخصیص داده شده به مدل را نیز افزایش می‌دهد. بعلاوه چنانچه نقشه خصوصیت^۳ پارامتر خاصی را درست نداشته باشیم، نرم‌افزار Simopt با تخصیص مقادیر متفاوت برای گریدهای مختلف، در سه مُد ارزیابی^۴، گرادینت^۵ و خطی سازی^۶، تطابق تاریخچه را با دقت بالا بدست می‌آورد و بنابراین می‌توان به مدل معتبرتری برای پیش‌بینی عملکرد آینده مخزن تحت سناریوهای مختلف، دست یافت.

کلمات کلیدی: آنالیز حساسیت، تطابق تاریخچه تولید، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، مخازن شکافدار

1. Production History Matching
2. Fracture Study
3. Property Map
4. Evaluation
5. Gradient
6. Regression

۱- مقدمه

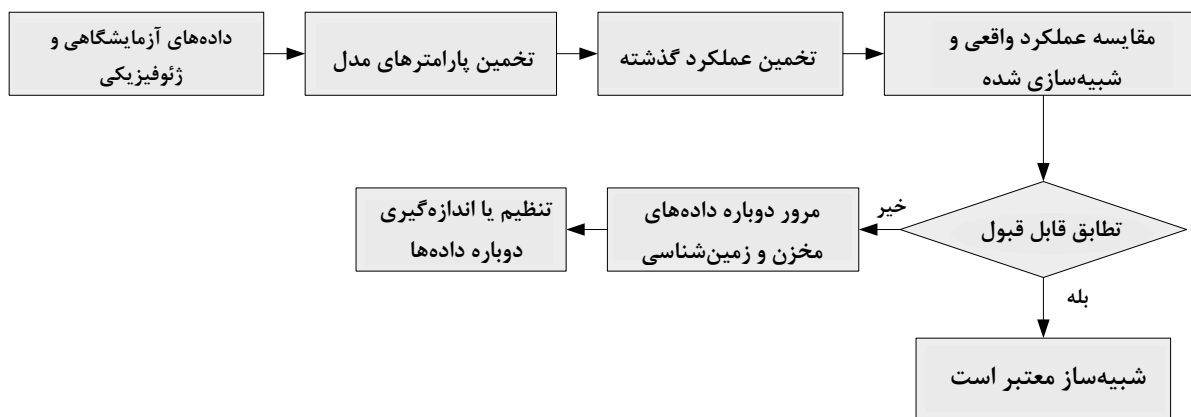
روند نمای تطابق تاریخچه تولید را نشان می‌دهد. نگرش‌های زیادی در تطابق تاریخچه تولید خودکار وجود دارند که معمولاً همه آن‌ها سعی در حداقل کردن تابع هدف^۳ دارند. تابع هدف به عنوان تابعی از تفاوت میان عملکرد مشاهده شده مخزن و عملکرد شبیه‌سازی شده مخزن در طول دوره تاریخچه تولید تعریف می‌شود [۴و۵]. تابع هدف، به صورت زیر است:

$$S_{E_2} = \sum_{i=1}^{n_{\text{parm}}} [\omega_j (X_{i0} - X_{is})^2] \quad (1)$$

X_i به هر پارامتر تولیدی ارجاع می‌شود که در طول فاز تطابق تاریخچه تولید مطالعه شبیه‌سازی، تطبیق می‌گردد. این پارامتر ممکن است فشار استاتیک مخزن، کسر آب، نسبت گاز به نفت و غیره باشد [۴]. پارامترها بین مقادیر حداقل $\bar{\mu}$ و مقادیر حداکثر $\bar{\nu}$ قرار می‌گیرند یعنی $\bar{\nu} < \bar{X}_i < \bar{\mu}$. تحمیل کردن مرزها بر روی پارامترها در نواحی معنی‌دار فیزیکی باعث بهبود همگرایی الگوریتم خطی‌سازی می‌شود [۶].

دلایلی که کاربرد الگوریتم‌های حداقل کردن را برای مسائل تطابق تاریخچه تولید، ضروری نشان می‌دهند، عبارت‌اند از: (۱) مدل‌های شبیه‌سازی مخزن عموماً به میزان زیادی نسبت به پارامترهای مخزن، ناخطی هستند. (۲) مسائل تطابق تاریخچه تمایل زیادی برای بد حالت شدن^۴ دارند، زیرا مجموعه‌های مختلفی از پارامترها ممکن است تطابق یکسان برای ما ایجاد کنند [۴].

تطابق تاریخچه تولید عبارت است از تنظیم پارامترهای مدل دینامیک مخزن مانند نفوذپذیری، تخلخل و غیره، به طوری که نتایج محاسبه شده برای یک دوره تاریخی با داده‌های واقعی آن دوره برابر یا نزدیک به آن شود [۱و۲]. قانون عمومی در تطابق تاریخچه تولید این است که پارامترهایی که بیشترین عدم قطعیت و بیشترین تاثیر را بر روی حل دارند، تغییر یابند [۱]. تطابق تاریخچه متعارف^۱ و خودکار^۲ دو روش موجود در فرایند تطابق تاریخچه تولید هستند. تطابق تاریخچه تولید متعارف شامل اجرای مدل شبیه‌سازی برای دوره تاریخی معین و مقایسه نتایج مدل و رفتار واقعی میدان در آن دوره می‌باشد. در این روش، معمولاً نیاز به آزمون و خطا برای تنظیم پارامترهای مخزنی مختلف است. آزمون و خطا تا زمانی که تطابق قابل قبولی بین عملکرد محاسبه شده و عملکرد واقعی میدان حاصل شود، ادامه می‌یابد [۲و۳]. بنابراین حتی با وجود تعداد اندک پارامتر مخزنی، به دلیل تاثیرات متقابل میان پارامترها و عملکرد محاسبه شده، این روش می‌تواند کاملاً خسته‌کننده و وقت‌گیر باشد [۳]. تطابق تاریخچه تولید خودکار شبیه تطابق تاریخچه تولید دستی است جز این که در این روش، از منطق کامپیوتری به جای دخالت مستقیم مهندسی برای تنظیم داده‌های مخزن استفاده می‌شود [۴]. انتخاب تطابق تاریخچه متعارف یا خودکار برای فاز تطابق تاریخچه تولید، مطالعه شبیه‌سازی، بستگی به اهداف تطابق تاریخچه تولید، منابع اختصاص یافته برای تطابق تاریخچه تولید و مهلت زمانی مطالعه شبیه‌سازی دارد [۵]. شکل (۱)



شکل ۱- روند نمای تطابق تاریخچه تولید

1. Conventional History Matching
2. Automatic History Matching
3. Objective Function
4. Ill-Conditioned

بهینه‌سازی ناحیه‌ای^۹ تقسیم‌بندی می‌شوند. چون به طور تئوری آن‌ها همیشه به حداقل ناحیه‌ای تابع هدف همگرا می‌شوند. اما در عمل، تعداد تکرارها محدود است و ممکن است حداقل ناحیه‌ای بدست نیاید [۷].

اگر الگوریتم بهینه‌سازی همگرا شود راه‌حلی که توسط این الگوریتم‌ها، ارائه می‌شود تطبیق داده‌های شبیه‌سازی با داده‌های مشاهده‌ای را تضمین می‌کند اما چون مسائل معکوس، راه‌حل یکتایی ندارند تضمینی وجود ندارد که برون‌یابی انجام گرفته با مدل تنظیم شده بتواند واقعیت را منعکس کند. همچنین، ارزیابی عدم قطعیت مدل، ضروری است. تعیین این عدم قطعیت مربوط به پیش‌بینی‌های انجام گرفته توسط مدل شبیه‌سازی، یکی از چالش‌های مهم پیش‌روی مهندسیین مخزن می‌باشد [۷ و ۹]. در کارهای جدید انجام شده، روش‌های آماری و روش‌های گرادیانت با هم ترکیب می‌شوند تا همزمان با بدست آوردن تطابق قابل قبول، بتوان عدم قطعیت مرتبط با مدل زمین‌شناسی اولیه را نیز در نظر گرفت. معمولاً این روش‌ها از نظر ریاضی روش‌های توانمندی هستند اما از نظر اجرائی روش‌های وقت‌گیری می‌باشند. شبیه‌سازی آماری روشی برای ارزیابی عدم قطعیت مدل فراهم می‌کند اما داده‌های دینامیک را در نظر نمی‌گیرد. در واقع در روش‌های ترکیبی از الگوریتم بهینه‌سازی برای در نظر گرفتن داده‌های دینامیک و از شبیه‌سازی آماری برای در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل استفاده می‌شود [۷].

۲- آنالیز حساسیت^{۱۰} و تطابق تاریخچه تولید متعارف

اولین مرحله تطابق تاریخچه تولید یافتن پارامترهایی است که دارای عدم قطعیت هستند. در هر اجرا، مقدار یکی از پارامترها تغییر داده می‌شود و سپس اثر آن بر تولید و فشار، مشاهده می‌گردد. بر اساس میزان تغییر فشار شبیه‌سازی شده با تغییر یک پارامتر می‌توان به میزان حساسیت مدل به آن پارامتر پی برد. این فرایند به ما کمک می‌کند تا پارامترهایی که بیشترین اثر را بر تاریخچه تولید می‌گذارند مشخص کنیم. به این پارامترها، پارامترهای تطابق تاریخچه تولید می‌گویند. بعد از این که پارامترها را با ضرایب بزرگی تغییر دادیم و آثار آن‌ها را مشاهده کردیم، نوبت به تغییرات کوچک و محلی می‌شود تا پارامترها را به مقدار کم تغییر داده و تطابق راضی‌کننده‌ای از مدل

دو روش مختلف بسته به نوع شبیه‌ساز برای فرمول‌بندی برنامه حداقل کردن وجود دارد. برنامه حداقل کردن ممکن است بصورت ناخطی^۱ و یا تغییرپذیر^۲ نوشته شود. در روش اول، مقدار ثابتی به پارامترهای نامعلوم تخصیص داده می‌شود در حالی که در روش دوم، پارامترهای نامعلوم، تابعی از یک یا چند متغیر مستقل هستند. برای مسائلی که تعداد زیادی پارامترهای نامعلوم دارند استفاده از روش تغییرپذیر و برای مسائلی که تعداد اندکی پارامتر نامعلوم دارند روش برنامه‌نویسی ناخطی مناسب‌تر است [۴].

به طور کلی روش‌های موجود برای تطابق تاریخچه تولید خودکار به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: روش‌های جبری^۳ و روش‌های تصادفی^۴. روش‌های جبری براساس تئوری مسئله معکوس^۵ بنا نهاده شده‌اند در حالی که روش‌های تصادفی به طور ساده تقلیدی از روش تطابق تاریخچه متعارف است. موثرترین روش‌های موجود در دسته‌بندی جبری، روش‌های گرادیان^۶ هستند، زیرا در این روش‌ها برای حداقل کردن تابع هدف محاسبه گرادیان مدل ریاضی نسبت به پارامترهای مدل (مانند تخلخل، تراوایی و...) ضروری است. این روش‌ها، همگرایی بسیار سریعی دارند. اما یک عیب اساسی این روش‌ها، این است که در تعدادی از موارد ممکن است این الگوریتم‌ها همگرا نشوند و یا به یک حداقل محلی^۷ مدل ریاضی همگرا شوند [۷]. با این حال به نظر می‌رسد برای تطابق تاریخچه مخازن بزرگ، الگوریتم‌های بهینه‌سازی که فقط گرادیان تابع هدف را محاسبه می‌کنند و از محاسبه صریح تابع هسین اجتناب می‌کنند، بهترین نگرش است. اما در عمل از این نگرش، به مقدار زیاد، استفاده نشده است [۸].

در روش‌های تصادفی، معمولی‌ترین روش‌ها روش‌هایی هستند که بر مبنای گداختگی و سردشدگی تدریجی شبیه‌سازی شده^۸ و الگوریتم‌های ژنتیک بنا نهاده شده‌اند. در این روش‌ها نیاز به محاسبه گرادیان‌ها نیست اما سرعت همگرایی این روش‌ها در مقایسه با روش‌های گرادیان کمتر است. به عبارت دیگر پیاده‌سازی روش‌های گداختگی شبیه‌سازی آسان‌تر از الگوریتم‌های جبری است. روش‌های جبری و گداختگی شبیه‌سازی هر دو به‌عنوان الگوریتم‌های

1. Nonlinear Programming Approach
2. Variational
3. Deterministic
4. Stochastic
5. Inverse Problem
6. Gradient
7. Local Minimum
8. Simulated Annealing

9. Global Optimization Algorithms
10. Sensitivity Analysis

بدست بیاوریم. در طول تطابق تاریخچه تولید باید تغییرات پارامترها بر مبنای واقعیت و در محدوده خاص صورت پذیرد. یعنی هر تغییری باید با مدل زمین‌شناسی و استاتیکی مخزن مقایسه شود. پس تیم مهندسی باید بارها و بارها مدل را به صورت آزمون و خطا اجرا کند تا به نتیجه مطلوبی برسد. بنابراین تطابق تاریخچه تولید متعارف به صورت سیستماتیک و علمی انجام نمی‌شود [۶].

با توجه به این که در مورد مخزن شبیه‌سازی شده، مطالعه ترک^۱ انجام نشده است، آنالیز حساسیت بیشتر بر روی پارامترهای ترک تمرکز می‌یابد. در این پژوهش، آنالیز حساسیت در مورد پارامترهای زیر، انجام شد:

۱. تراوایی شکاف
۲. تخلخل شکاف

۳. ضریب شکل^۲

۴. ارتفاع هر بلوک

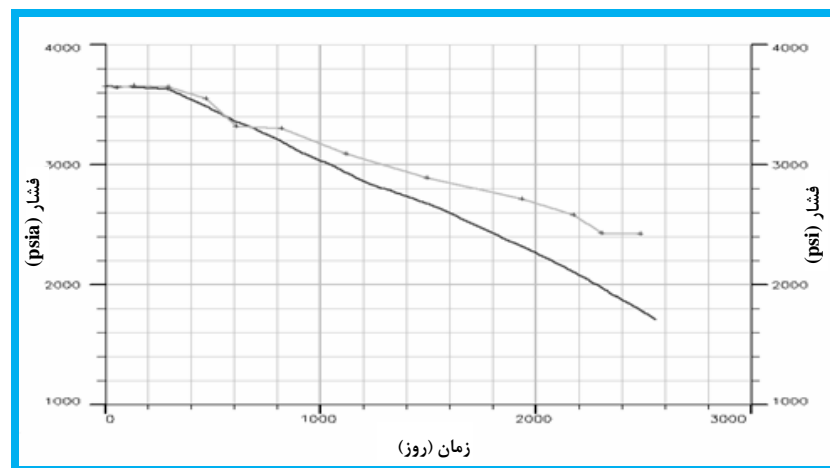
۵. تراوایی ماتریکس

برای انجام عملیات آنالیز حساسیت، میزان هر یک از پارامترهای فوق را در محدوده خاص تغییر می‌دهیم و پاسخ مدل را دریافت می‌کنیم، آن‌گاه می‌توانیم دریابیم که مدل، نسبت به هر کدام از پارامترها به چه میزان، حساسیت دارد. محدوده تغییر هر یک از این پارامترها در جدول (۱) نشان داده شده است.

شکل‌های (۲) تا (۱۲)، تعدادی از نمودارهای مربوط به آنالیز حساسیت و تطابق تاریخچه تولید متعارف را نشان می‌دهند. محور افقی این نمودارها، بازه زمانی را بر حسب روز، از زمان شروع تولید تا زمانی که داده‌ها اندازه‌گیری شده‌اند، نشان می‌دهد.

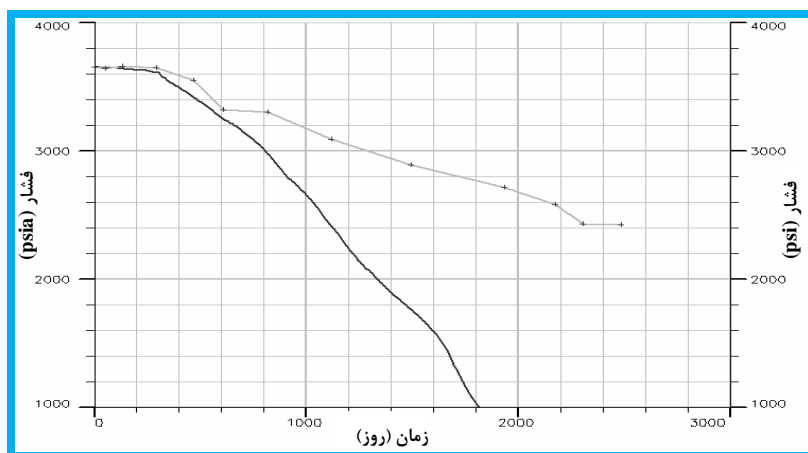
جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترهای انتخاب شده در آنالیز حساسیت

پارامتر آنالیز حساسیت	حداقل	حداکثر	مقدار نهایی انتخاب شده برای مدل دینامیک مخزن
تراوایی شکاف (میلی داری)	۲۲۰	۱۱۰۰	۱۰۰۰
تخلخل شکاف	۰/۰۰۱	۰/۰۱۰	۰/۰۰۸
ضریب شکل	۰/۰۰۰۱۵	۰/۰۱	۰/۰۰۰۱
ارتفاع ماتریکس (فوت)	۱۰	۱۰۰	۵۰
ضریب تراوایی ماتریکس در جهت \perp نسبت به تراوایی افقی	۰/۱	۱	۰/۸

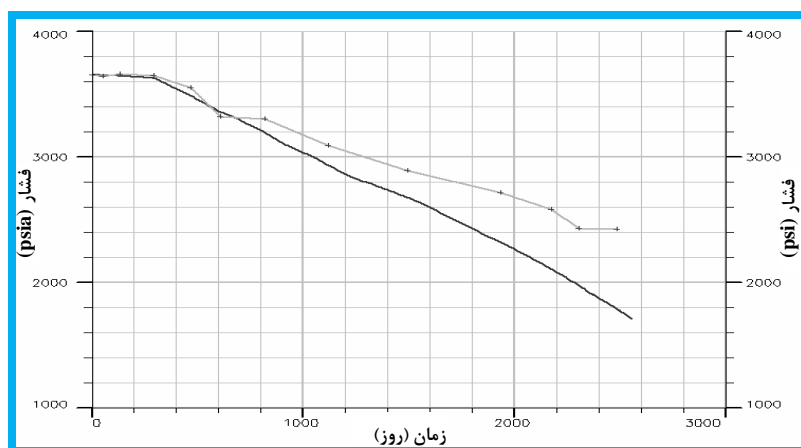


شکل ۲- فشارهای محاسبه شده توسط مدل اولیه و مقایسه آن با فشارهای مشاهده شده میدان [خط پیوسته بالایی، فشارهای مشاهده‌ای و خط پیوسته پایینی، فشارهای محاسبه شده توسط مدل، و محور افقی، زمان را نشان می‌دهد].

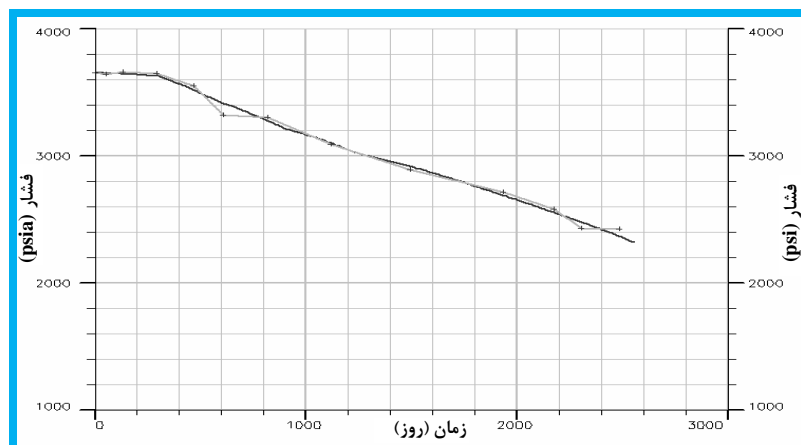
1. Fracture Study
2. Shape Factor



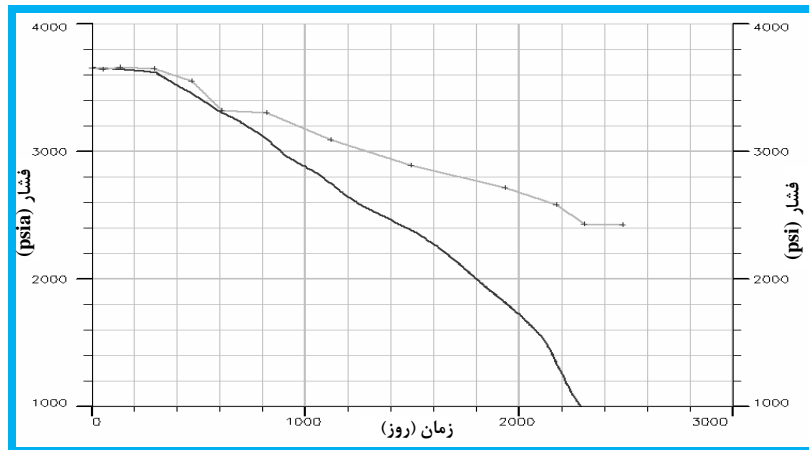
شکل ۳- آنالیز حساسیت برای شکاف با تراوایی ۲۰۰ میلی‌داری [خط پیوسته بالایی، فشارهای مشاهده‌ای و خط پیوسته پایینی، فشارهای محاسبه شده توسط مدل، و محور افقی، زمان را نشان می‌دهد].



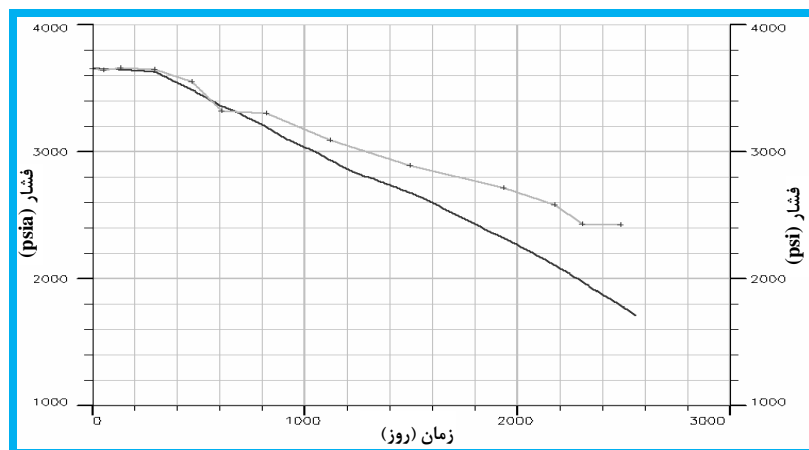
شکل ۴- آنالیز حساسیت برای شکاف با تراوایی ۵۰۰ میلی‌داری [خط پیوسته بالایی، فشارهای مشاهده‌ای، خط پیوسته پایینی، فشارهای محاسبه شده توسط مدل، و محور افقی، زمان را نشان می‌دهد].



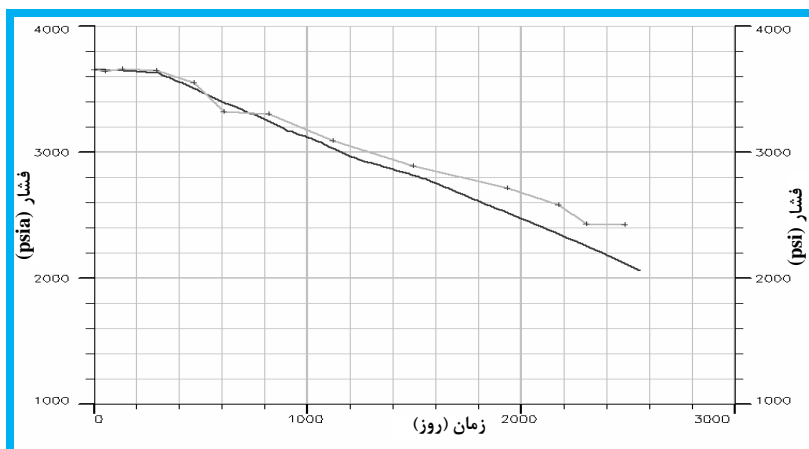
شکل ۵- آنالیز حساسیت برای شکاف با تراوایی ۱۰۰۰ میلی‌داری [تطابق قابل قبول بین فشارهای مشاهده‌ای و فشارهای محاسبه شده در زمان‌های مختلف].



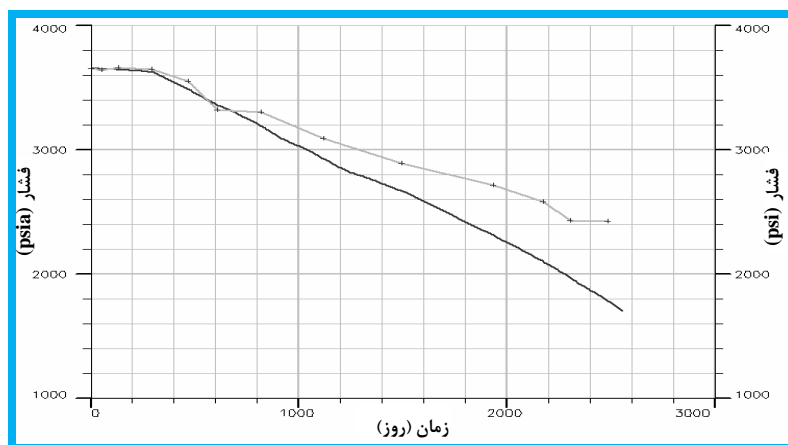
شکل ۶- آنالیز حساسیت برای شکاف با تخلخل ۰/۰۰۱ [خط پیوسته بالایی، فشارهای مشاهده‌ای، خط پیوسته پایینی، فشارهای محاسبه شده توسط مدل، و محور افقی، زمان را نشان می‌دهد].



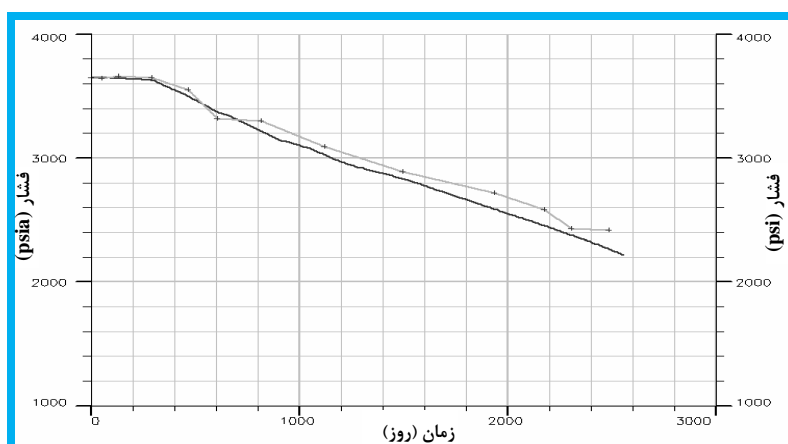
شکل ۷- آنالیز حساسیت برای شکاف با تخلخل ۰/۰۰۵ [خط پیوسته بالایی، فشارهای مشاهده‌ای، خط پیوسته پایینی، فشارهای محاسبه شده توسط مدل، و محور افقی، زمان را نشان می‌دهد].



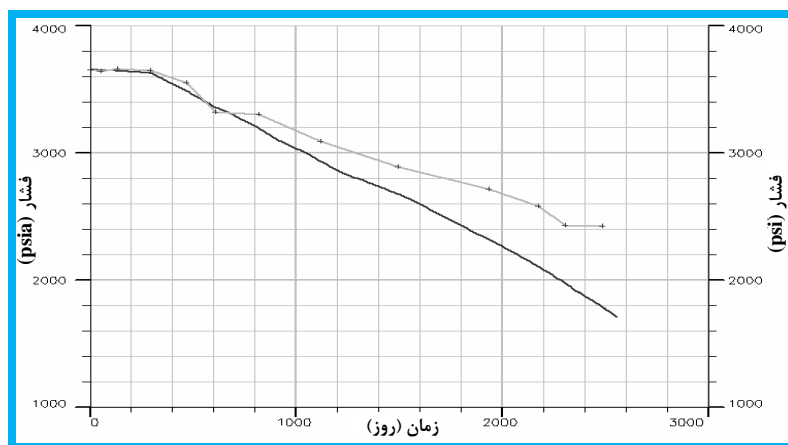
شکل ۸- آنالیز حساسیت برای شکاف با تخلخل ۰/۰۰۸ [تطابق نسبتاً قابل قبول بین فشارهای مشاهده‌ای و فشارهای محاسبه شده در زمان‌های مختلف].



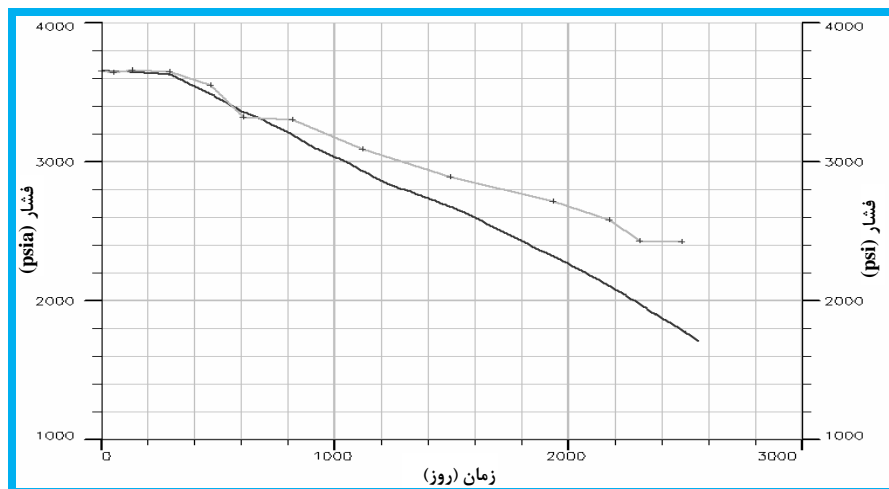
شکل ۹- آنالیز حساسیت برای شکاف با ضریب شکل ۰/۰۱ [خط پیوسته بالایی، فشارهای مشاهده‌ای، خط پیوسته پایینی، فشارهای محاسبه شده توسط مدل، و محور افقی، زمان را نشان می‌دهد].



شکل ۱۰- آنالیز حساسیت برای شکاف با ضریب شکل ۰/۰۰۰۱ میلی‌داری [تطابق قابل قبول بین فشارهای مشاهده‌ای و فشارهای محاسبه شده در زمان‌های مختلف].



شکل ۱۱- آنالیز حساسیت برای ارتفاع ماتریکس ۲۰ فوت [خط پیوسته بالایی، فشارهای مشاهده‌ای، خط پیوسته پایینی، فشارهای محاسبه شده توسط مدل، و محور افقی، زمان را نشان می‌دهد].



شکل ۱۲- آنالیز حساسیت برای ارتفاع ماتریکس ۱۰۰ فوت [خط پیوسته بالایی، فشارهای مشاهده‌ای، خط پیوسته پایینی، فشارهای محاسبه شده توسط مدل و محور افقی، زمان را نشان می‌دهد].

خودکار انجام می‌دهد. نسخه ۲۰۰۴a این نرم‌افزار، در همه موارد، قابل استفاده نیست. از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۰]:

۱. اگر ریزش ثقلی در مخزن، فعال باشد (در مدل ارائه شده، این مکانیزم فعال نیست)، ۲. مدل‌هایی که در آن‌ها از شبکه‌بندی غیرساختاری استفاده شده است، ۳. چنانچه بیش از یک محیط تعادلی ترمودینامیکی یکپارچه داشته باشیم، ۴. شبیه‌سازی‌هایی که در آن از کلمه کلیدی Restart استفاده شده باشد، ۵. چنانچه نیاز به استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی موازی باشد.

هیچ کدام از مواد فوق در مدل مخزن انتخاب شده وجود ندارد. بنابراین در این پژوهش از نرم‌افزار Simopt برای انجام تطابق تاریخچه تولید خودکار استفاده شده است.

۳- بهینه‌سازی در فرایند تطابق تاریخچه تولید

خودکار [۱۰ و ۶]

در این فرایند، پارامترهای مدل مخزن به طور سیستماتیک تا زمانی که تطابق قابل قبول آید، تغییر می‌کنند. محاسبات تطابق تاریخچه تولید خودکار بر اساس خطی سازی حداقل مربعات انجام می‌شود.

وظیفه خطی سازی حداقل مربعات، حداقل کردن تابع هدف زیر است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود مدل ساخته شده برای مقادیر مختلف ارتفاع بلوک، حساسیتی نشان نمی‌دهد بنابراین در مخزن شکافدار مورد مطالعه، مکانیزم ریزش ثقلی^۱ اهمیتی ندارد.

اگر چه با استفاده از تطابق تاریخچه تولید متعارف، تطابق قابل قبولی بدست آمده است اما به دلیل عدم انجام مطالعه ترک در مورد این مخزن، مقدار کمی هر یک از پارامترها در بلوک‌های شبکه‌ای مختلف مشخص نیست. به علاوه، آنالیزهای حساسیت با نگاه کردن به نمودارهای شبیه‌سازی و داده‌های مشاهده‌ای و مقایسه کیفی آن‌ها انجام می‌شود. بنابراین تطابق تاریخچه تولید به صورت سیستماتیک و علمی انجام نمی‌شود. برای تطبیق دقیق‌تر، تعیین خطاهای اندازه‌گیری و وزن‌های نسبی داده‌های مشاهده‌ای، ضروری است. در واقع، برای به حداقل رساندن تعداد اجرای مدل و ذخیره زمان باید از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای حداقل کردن تابع هدف که نمایان‌گر اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهده‌ای است، استفاده کرد. بنابراین فرایند بهینه‌سازی و تطابق تاریخچه به محاسبه گرادیان مدل شبیه‌سازی شده برای هر پارامتر نیاز دارد. از این رو باید با استفاده از زبان برنامه نویسی، فایل‌های متنی Eclipse را تغییر داد و نتیجه را مشاهده کرد. نرم‌افزار Simopt، نرم‌افزاری در مجموعه نرم‌افزارهای GeoQuest است که تطابق تاریخچه تولید را به صورت

1. Gravity Drainage

که در آن

$$f_j = P_i(\bar{x}_0) = P_i^* \quad (7)$$

با تغییر مرتبه سیگما و نوشتن معادله حاصله برای پارامترهای با اندیکس $j=1,2,\dots,N_{pp}$ ، دستگاه معادلات جبری خطی به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$A\Delta x = b_* \quad (8)$$

که در آن:

$$b_{j*} = \frac{R}{2} \left[\frac{r_{1j}}{(x_j - a_j)^2} + \frac{r_{2j}}{(b_j - x_j)^2} \right] - \sum_{i=1}^N F_{w_i}^2 f_i \frac{\partial P_i}{\partial x_j}, \quad (9)$$

$$A_{jk} = \sum_{i=1}^N F_{w_i}^2 \left[f_i \frac{\partial^2 P_i(\bar{x})}{\partial x_j \partial x_k} + \frac{\partial P_i}{\partial x_j} \frac{\partial P_i}{\partial x_k} \right], \quad (10)$$

$$A_{jj} = \sum_{i=1}^N F_{w_i}^2 \left[f_i \frac{\partial^2 P_i}{\partial x_j^2} + \left(\frac{\partial P_i}{\partial x_j} \right)^2 \right] + \left[\frac{r_{1j}}{(x_j - a_j)^2} + \frac{r_{2j}}{(b_j - x_j)^2} \right] \quad (11)$$

از عبارت‌های گردادیان مرتبه دوم در دو معادله آخر با این فرض که مقادیر f_i کوچک هستند یا این فرض که تابع $P(\bar{x})$ تقریباً خطی است، صرف نظر شده است. این تخمین با زدن حدس اولیه نزدیک به راه‌حل واقعی می‌تواند توجیه شود.

چون هدف ما حداقل کردن $\Phi(\bar{x})$ ، به جای $\Omega(\bar{x})$ است مقدار R در طول هر تکرار، کاهش می‌یابد تا $\Omega(\bar{x})$ تخمین بهتری برای $\Phi(\bar{x})$ باشد. یک انتخاب خوب برای R در e امین تکرار به صورت زیر است:

$$R_e = \varepsilon \cdot \Phi(\bar{x}_e) \quad (12)$$

که در آن ε یک مقدار ثابت است. برای مقادیر بزرگتر ε ، توابع پینالتی در محدود کردن پارامترها در محدوده مورد نظر موثرترند. اما

$$\Phi(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N F_{w_i}^2 [P_i(\bar{x}) - P_i^n]^2 \quad (2)$$

بردار \bar{x} می‌تواند هر یک از پارامترهای مخزنی باشد که قرار است تخمین زده شود. پارامترها بین مقادیر حداقل \bar{v} و مقادیر حداکثر \bar{u} قرار می‌گیرند یعنی $\bar{v} < \bar{x} < \bar{u}$. توابع پینالتی، عبارت‌هایی هستند که به توابع هدف اضافه می‌شوند تا زمانی که پارامترها به مرزهایشان می‌رسند، مقدار تابع هدف را افزایش دهند. با افزایش توابع پینالتی به رابطه (2) می‌توان تابع هدف را به تابع هدف نامحدود تبدیل کرد.

$$\Omega(\bar{x}) = \Phi(\bar{x}) + R \sum_{j=1}^{N_{pp}} \left(\frac{r_{1j}}{x_j - u_j} + \frac{r_{2j}}{v_j - x_j} \right) \quad (3)$$

که در آن \bar{r}_1 و \bar{r}_2 و R مقادیر ثابت مثبتی هستند که مقدار سهم توابع پینالتی را کنترل می‌کنند. حداقل کردن $\Omega(\bar{x})$ فرایندی تکراری است چون مدل‌های تنوری برای محاسبات فشار نسبت به پارامترهای مخزن، ناخطی‌اند. برای حداقل کردن تابع هدف تعریف شده $\Omega(\bar{x})$ باید داشته باشیم:

$$\frac{\partial \Omega(\bar{x})}{\partial x_j} = 0 \quad \text{for } j=1,2,\dots,N_{pp} \quad (4)$$

بنابراین باید داشته باشیم:

$$z \sum_{i=1}^N F_{w_i}^2 [P_i(\bar{x}) - P_i^n] \frac{\partial P_i(\bar{x})}{\partial x_i} - R \left[\frac{r_{1j}}{(x_j - u_j)^2} - \frac{r_{2j}}{(v_j - x_j)^2} \right] = 0 \quad (5)$$

اگر \bar{x}_0 تخمینی از بردار پارامتر باشد آنگاه $\bar{x}_0 + \Delta \bar{x}$ مقدار واقعی پارامتر خواهد بود. با جایگزین کردن $\bar{x}_0 + \Delta \bar{x}$ به جای \bar{x}_0 و بسط سری تیلور هر کدام از توابع حول \bar{x}_0 و با صرف نظر کردن از جملات مرتبه دوم و بالاتر، چنین خواهیم داشت:

$$2 \sum_{i=1}^N F_{w_i}^2 \left[f_i \frac{\partial P_i}{\partial x_i} + \sum_{k=1}^M f_i \frac{\partial^2 P_i}{\partial x_j \partial x_k} + \frac{\partial P_i}{\partial x_j} \frac{\partial P_i}{\partial x_k} \right] \Delta x_k + 2R \left[\frac{r_{1j}}{(x_j - u_j)^2} + \frac{r_{2j}}{(v_j - x_j)^2} \right] \Delta x_j - R \left[\frac{r_{1j}}{(x_j - u_j)^2} - \frac{r_{2j}}{(v_j - x_j)^2} \right] = 0 \quad (6)$$

1. Contribution

RMS^۲ نشان می‌دهد. Simopt با مقایسه RMS ها در اجراهای مختلف، نتایج اجراهای مختلف و درجه تطبیق نقاط نظیر را مقایسه می‌کند و با ضرب کردن ضرایبی^۳ در پارامترها، سعی در حداقل کردن RMS دارد. بر اساس کاهش یا افزایش RMS، Simopt، ضرایب را کم یا زیاد می‌کند تا تطبیق بهتری حاصل شود. مقادیر RMS با اجرای شبیه‌سازی در مُد ارزیابی^۴ محاسبه می‌شوند. هدف اجراهای آنالیز حساسیت در نگرش متعارف، تعیین پارامترهای مخزنی است که بر روی تطبیق داده‌ها و عملکرد مخزن تاثیر می‌گذارند. Simopt، این حساسیت‌ها را با اجرا کردن شبیه‌ساز در مُد گرادیان^۵ محاسبه می‌کند. مرحله بعدی، تنظیم پارامترهای انتخاب شده برای بدست آوردن تطابق قانع کننده است. این مرحله، با استفاده از مُد خطی‌سازی^۶ انجام می‌شود. این تغییرات، جهت حداقل کردن تابع هدف است که دو عبارت دارد. یکی از آن‌ها، مجموع مربعات تفاوت میان مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده و دیگری، اندازه عدم قطعیت پارامترهای مخزن است که تضمین می‌کند تغییرات ایجاد شده در پارامترها در طول تطابق بوسیله خطی‌سازی، منطقی و با عدم قطعیت موجود در داده‌ها هماهنگ اند. این تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sum \left[\text{وزن} \times \left(\frac{\text{شبیه سازی شده} - \text{مشاهده شده}}{\text{StdDev}} \right) \right]^2 \quad (16)$$

داده های مشاهده شده

وزن نشان می‌دهد که چه پارامتری در مدل تاثیر بیشتری دارد و کدام داده مشاهده‌ای دارای اعتبار بیشتری است. ما همیشه با مسئله تغییرات پارامترهایی روبرو هستیم که اثر یکسانی بر مدل دارند و یا اثر همدیگر را خنثی می‌کنند. این برهم‌کنش‌ها باعث می‌شود که تعداد زیادی تکرار غیر مفید انجام شود پس باید پارامترهایی را که با هم نوعی وابستگی دارند یا اثر همدیگر را خنثی می‌کنند شناسایی کرد. این کار از طریق کنترل ماتریس‌های هسین، کوواریانس و همبستگی بوسیله کاربر انجام می‌شود. ماتریس

2. Root Mean Square
3. Modifiers
4. Evaluation Mode
5. Gradient Mode
6. Regression Mode

مقادیر بزرگ ε می‌توانند به طور معکوس خصوصیات همگرایی الگوریتم خطی‌سازی را تحت تاثیر قرار دهند. $\varepsilon = 10^{-4}$ مقدار مناسبی است. بردارهای ثابت‌های پنالتهی $\bar{\Gamma}_1$ و $\bar{\Gamma}_2$ در شروع خطی‌سازی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\Gamma_{1j} = X_{0j} - u_j \quad (13)$$

و

$$\Gamma_{2j} = X_j - X_{0j} \quad (14)$$

که X_{0j} تخمین اولیه پارامتر z است.

اگر تکرارهای مختلف نتوانند مقادیر پارامترها را به طور چشمگیری تغییر دهند، فرض می‌شود که الگوریتم خطی‌سازی به یک راه‌حل بهینه همگرا شده است. معیار همگرایی به فرم زیر بیان می‌شود:

$$|\bar{X}_{e+2} - \bar{X}_e| = \bar{\tau} |\bar{X}_e + \varepsilon| \quad (15)$$

به طوری که $\bar{\tau}$ بردار تولرانس نسبی^۱ است که حاوی مقادیر تولرانس مختلف بین $0/0001$ تا $0/01$ برای پارامترهای مختلف است. مقادیر تولرانس با توجه به دقت مورد نیاز برای پارامترهای خطی‌سازی، انتخاب می‌شوند. به طور عمومی هر چه بردار تولرانس کوچکتر باشد تعداد تکرار بیشتری مورد نیاز است. حساسیت خطی‌سازی به بردار تولرانس تا اندازه‌ای تابعی از مدل مخزن و داده‌هایی است که آنالیز می‌شوند. ε عدد کوچکی مثل $0/001$ است. مهمترین فرضی که برای استفاده موفق از معیار همگرایی فوق مورد نیاز است، این است که تابع هدف، یک حداقل ناحیه‌ای دارد و خطی‌سازی با هر نقطه آغازی می‌تواند به این حداقل همگرا شود. وجود یک حداقل ناحیه‌ای به معادله فشار (مدل مخزن)، پارامترهای معادله فشار و خصوصیات داده‌های اندازه‌گیری شده، مانند توالی و کیفیت، بستگی دارد. معمولاً اگر مدل تئوری مخزن به اندازه کافی داده‌های اندازه‌گیری را باز تولید کند تابع هدف، حداقل ناحیه‌ای خواهد داشت.

Simopt، اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های مشاهده‌ای را با

1. Relative Tolerance

نزدیک به ۱- تا ۱+ داشته باشند، یکی از پارامترها نباید مورد استفاده قرار گیرد.

در این پژوهش، شش پارامتر مربوط به شکاف‌ها برای تطابق توسط Simopt در نظر گرفته می‌شود. ضریب شکل، حجم روزنه‌ها^۱، قابلیت انتقال^۲ در جهت x و تراوایی شکاف در جهت x ، y و z پارامترهای انتخاب شده هستند (انتخاب‌های ما در این بخش محدود است و فقط می‌توانیم از پارامترهای تعریف شده نرم‌افزار استفاده کنیم).

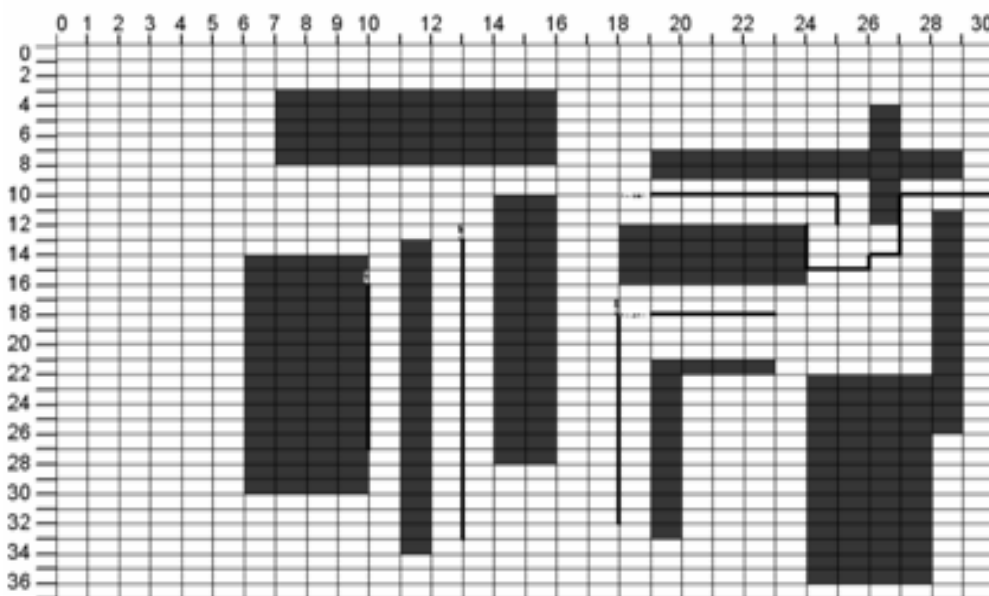
از آن جایی که Eclipse برای مدل‌سازی مخازن شکافدار، ابتدا ماتریس‌ها و سپس شکاف‌ها را نام‌گذاری می‌کند و از آن‌جا که مخزن ما سه لایه دارد برای تعریف و مقداردهی به این پارامترها در مناطق مختلف مخزن، سه صفحه آخر ۴، ۵ و ۶ را که همان شکاف‌ها است در نظر می‌گیریم. در این بخش، تراوایی شکاف‌های نزدیک به گسل تغییر داده می‌شوند چون این شکاف‌های اطراف گسل‌ها هستند که جریان را هدایت می‌کنند. به‌عنوان نمونه، بلوک‌های شبکه‌ای انتخاب شده برای تراوایی شکاف در جهت x در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. بعد از ۱۲ مرحله اجرا توسط Simopt در مُد خطی‌سازی، نتایج جدول (۲) حاصل شدند.

هسین شامل مشتقات مرتبه دوم تابع هدف نسبت به پارامترهای مختلف می‌باشد. ماتریس کوواریانس با استفاده از ماتریس هسین محاسبه می‌شود که المان‌های قطری آن تقریباً واریانس پارامترها و المان‌های غیر قطری آن همان کوواریانس هستند.

ماتریس همبستگی در واقع ماتریس کوواریانس نرمال شده است و مقادیر المان‌های آن بین ۱- تا ۱+ می‌باشد. پر واضح است که المان‌های قطری آن یک است. مقادیر المان‌های غیر قطری از رابطه (۱۷) بدست می‌آید:

$$Corr(i, j) = \frac{Cov(i, j)}{\sqrt{Cov(i, i) \times Cov(j, j)}} \quad (17)$$

المان‌های غیر قطری مثبت نمایانگر نوعی از تطابق هستند که در آن افزایش یک پارامتر با افزایش پارامتر دیگر و کاهش یک پارامتر با کاهش پارامتر دیگر همراه است. المان‌های منفی نمایانگر همبستگی معکوس و تغییرات عکس پارامترها نسبت به هم هستند. المان‌های صفر نشان دهنده عدم همبستگی و مستقل بودن پارامترها نسبت به هم هستند. حالت ایده‌ال، مورد آخر است. وقتی دو پارامتر، تطابق



شکل ۱۳- بلوک‌های شبکه‌ای انتخاب شده برای مولفه تراوایی شکاف

1. Pore Volume
2. Transmissibility

جدول ۲- ماتریس ضرایب همبستگی^۱ برای پارامترهای تطابق

T_x	σ	K_z	K_y	PV	K_x	
-۰/۲۳۱۹۷	۰/۰۶۹۶۵	-۰/۰۵۳۰۱	۰/۰۹۳۸۷	-۰/۳۰۶۷۷	۱	K_x
۰/۱۰۳۳	-۰/۲۸۲۱۸	۰/۴۲۳۲۳	-۰/۱۷۸۱۸	۱	-۰/۳۰۶۷۷	PV
-۰/۰۹۴۱۰۳	-۰/۳۳۳۶۶	-۰/۵۴۸۲۲	۱	-۰/۱۷۸۱۸	۰/۰۹۳۸۷	K_y
۰/۲۹۵۱۳	-۰/۲۷۶۰۴	۱	-۰/۵۴۸۲۲	۰/۴۲۳۲۳	-۰/۰۵۳۰۱	K_z
۰/۳۸۲۰۵	۱	-۰/۲۷۶۰۴	-۰/۳۳۳۶۶	-۰/۲۸۲۱۸	۰/۰۶۹۶۵	σ
۱	۰/۳۸۲۰۵	۰/۲۹۵۱۳	-۰/۰۹۴۱۰۳	۰/۱۰۳۳	-۰/۲۳۱۹۷	T_x

جدول (۴) و شکل (۱۴)، کاهش متوالی RMS در ۱۲ مرحله اجرا توسط Simopt و شکل (۱۵) نیز تطابق تاریخیچه تولید نهایی بدست آمده توسط Simopt را نشان می‌دهد.

نرم‌افزار simopt در هر بار تکرار، ضرایبی را در هر یک از این پارامترها ضرب و مدل تغییر یافته را اجرا می‌کند تا به اصلاح و تعدیل پارامترها بپردازد. به عنوان مثال در تکرار سوم مقادیر جدول (۳) خواهیم داشت:

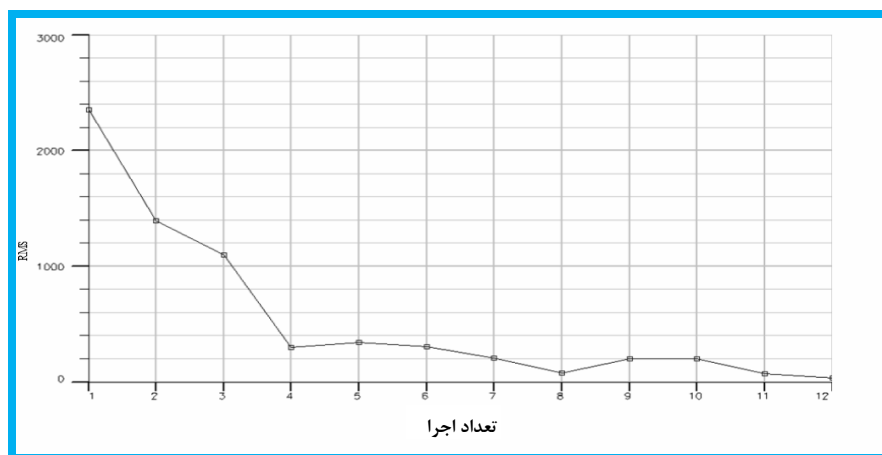
جدول ۴- کاهش متوالی RMS در ۱۲ مرحله اجرا توسط Simopt

RMS	مرحله تکرار
۲۳۵۱/۸	۱
۱۳۸۹/۷	۲
۱۰۹۹/۳	۳
۲۹۸/۲۹	۴
۳۴۰/۱۸	۵
۳۰۶/۳۷	۶
۲۰۳/۷	۷
۷۷/۹۳۹	۸
۱۹۹/۶۵	۹
۱۹۷/۸۹	۱۰
۶۹/۴۷۶	۱۱
۳۶/۵۶۳	۱۲

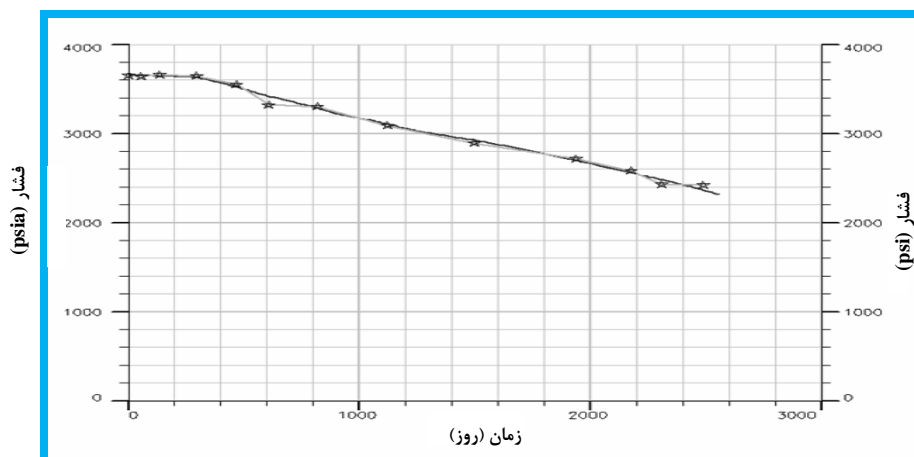
جدول ۳- ضرایب تغییر پارامترهای تطابق در تکرار سوم

تغییر در RMS	ضرایب	پارامتر
۱۸۲/۸۸۸	۱/۵۹۹	K_x
۲۳۲۳/۸۱۴	۱/۴۶۷	PV
۵۰۱/۰۸۵	۱/۶۷۵	K_y
-۲۷/۶۵۲	۲/۰۶۱	K_z
-۷۴۴/۰۵۶	۱/۲۳۵	σ
۵۳۴/۲۴۱	۱/۴۳۳	T_x
تغییر در RMS	ضرایب	پارامتر
۱۸۲/۸۸۸	۱/۵۹۹	K_x
۲۳۲۳/۸۱۴	۱/۴۶۷	PV
۵۰۱/۰۸۵	۱/۶۷۵	K_y
-۲۷/۶۵۲	۲/۰۶۱	K_z
-۷۴۴/۰۵۶	۱/۲۳۵	σ
۵۳۴/۲۴۱	۱/۴۳۳	T_x

1. Correlation Coefficient



شکل ۱۴- کاهش متوالی RMS در ۱۲ مرحله اجرا توسط Simopt [محور عمودی، RMS و محور افقی تعداد اجرا توسط Simopt را نشان می دهد].



شکل ۱۵- تطابق تاریخچه تولید نهایی توسط Simopt [تطابق خوب بین فشارهای مشاهده شده و فشارهای محاسبه شده در زمان‌های مختلف].

۴- نتیجه گیری

همان‌طور که گفته شد، چنان‌چه برای مخزن شکافداری، مطالعه ترک انجام نشده باشد، تطابق بدست آمده با استفاده از روش متعارف نمی‌تواند با دقت زیاد، عملکرد آینده مخزن را پیش‌بینی کند. در این موارد بهتر است از تطابق تاریخچه خودکار استفاده شود. شبیه‌سازی‌های انجام شده در این پژوهش، کاهش زمان مورد نیاز برای دستیابی به تطابق قابل قبول توسط تطابق تاریخچه خودکار را، در مقایسه با تطابق تاریخچه متعارف، نشان می‌دهد. به‌علاوه به هر یک از بلوک‌های شبکه‌ای موجود و برای هر پارامتر، مقداری توسط

Simopt تخصیص داده می‌شود و بنابراین عدم تجانس ترک‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است که با استفاده از این مدل، می‌توان به پیش‌بینی معتبرتری در مورد عملکرد آینده مخزن نسبت به مدل نهایی بدست آمده توسط تطابق تاریخچه متعارف دست یافت. بنابراین، از این روش می‌توان به‌عنوان ابزار مهمی برای بدست آوردن تقریب دقیق‌تر از عملکرد آینده مخازن شکافداری که در مورد آن‌ها مطالعه ترک انجام نشده است، استفاده کرد. هم‌چنین این روش می‌تواند به مقدار قابل توجهی باعث صرفه‌جویی در وقت و هزینه، در مقایسه با روش متعارف، شود.

- [1] K. Aziz. and A. Settari, "Petroleum Reservoir Simulation", Blitzprint Ltd Alberta (2002).
- [2] K.A. Bishop and et al, "An Approach to the Problem of Slow Convergence for Automatic History Matching Procedures", SPE 5424 (1975).
- [3] L.K. Thomas, "A Nonlinear Automatic History Matching Technique for Reservoir Simulation Models", SPE 3475 (1972).
- [4] A.T. Watson and et al, "A New Algorithm for Automatic History Matching Production Data", SPE 15228 (1986).
- [5] T. Ertekin and et al, " Basic Applied Reservoir Simulation", Richardson, Texas (2001).
- [6] M. Abbaszadeh and M. M. Kamal, "Automatic Type Curve Matching for Well Test Analysis", SPE Formation Evaluation (1998).
- [7] R.C.M. Portella and et al, "Use of Automatic History Matching and Geostatistical Simulation to Improve Production Forecast", SPE 53976 (1999).
- [8] G. Gao and et al, "A Stochastic Optimization Algorithm for Automatic History Matching", SPE 90065 (2007).
- [9] F. Bennett and et al, "Use of Geostatistical Modeling and Automatic History Matching to Estimate Production Forecast Uncertainty, A Case Study", SPE 74389 (2002).
- [10] GeoQuest, "Simopt Manual", Schlumberger, 2004A Version.