

بهبود عملیاتی مدل ظرفیت - مقاومت در پیش‌بینی عملکرد فرآیند سیلاب‌زنی مبتنی بر کل بازه تولید

علی لسان^۱، عباس بحرودی^{۱*}، بابک امین شهیدی^۲ و حسین رحامی^۳

۱- گروه مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۳- دانشکده علوم مهندسی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۳/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۹

چکیده

ارائه یک تحلیل مبتنی بر شرایط عملیاتی فرآیندهای برداشت ثانویه یکی از وظایف اساسی مهندس نفت است؛ روش‌های تحلیل تزریق غیرامتزاجی به‌عنوان یکی از روش‌های ثانویه به دو دسته تحلیلی و عددی تقسیم می‌شوند؛ روش‌های عددی روش‌های زمان‌بر و نیازمند خواص دقیق سنگ و سیال و تغییرات فشار در مخزن هستند ولی روش‌های تحلیلی به داده‌های ورودی کمتری نیازمند هستند؛ روش‌های تحلیلی برای تصمیم‌سازی‌های مدیریتی مناسب‌تر هستند. یکی از روش‌های تحلیلی که اخیراً از آن استفاده می‌شود مدل ظرفیت-مقاومت است، این مدل از نرخ تزریق و فشار جریانی ته‌چاه به‌عنوان تنها داده‌های ورودی استفاده می‌کند این سادگی با وجود مزایا و سرعت، معایبی نیز دارد؛ از مهم‌ترین این معایب می‌توان نیاز به نوسانات بالا در نرخ تزریق اشاره کرد. این موضوع با کاربردهای عملیاتی در تضاد است زیرا در برنامه‌های عملی تزریق معمولاً نرخ تزریق نوسانات بالای را ندارد، دومین نقص راه‌حل فعلی عدم در نظرگیری بازه تولید به‌عنوان یک بازه واحد است به طوری که این بازه به تعداد گام‌های زمانی شکسته می‌شود که این موضوع با طبیعت مخزن در تضاد است زیرا تمامی گام‌های تزریق از ابتدا بر روی نرخ تزریق در یک بازه خاص زمانی اثر دارد. در این پژوهش سعی شد با ارائه تصحیحاتی بر روی راه‌حل مدل ظرفیت-مقاومت نواقص ذکر شده در بخش مربوط به کارکردهای عملیاتی و طبیعت مخزن کاهش پیدا کرده و فرضیات محدودکننده کمتر شوند. نتایج ارائه‌شده نشان می‌دهند که این تصحیحات افزایش دقت تخمین را به‌صورت کمی باعث شده به طوری که در دومین مخزن شبیه‌سازی شده، مخزن دارای نوسانات پایین نرخ تزریق و بازه تطبیق تاریخچه کوتاه‌تر از حد نیاز مدل کلاسیک، بود؛ روابط ارائه شده در پژوهش‌های گذشته توانایی تخمین عملکرد این مخزن را نداشت ولی روابط ارائه شده تخمین بسیار قابل قبولی را فراهم آوردند.

کلمات کلیدی: حل نوین، بهبود تخمین، مدل ظرفیت-مقاومت، نرخ تزریق عملیاتی، کل بازه تطبیق

تاریخچه، سیلاب‌زنی

مقدمه

روش‌هایی مانند تزریق گاز و سیلاب‌زنی برای حفظ فشار مخزن یا افزایش ضریب بازیافت استفاده می‌شود و پس از آن روش‌های پیچیده‌تر که در اواخر عمر مخزن صورت می‌گیرد شامل روش‌های حرارتی، میکروبی و تزریق پلیمر است، استفاده می‌شود [۱ و ۲].

شبیه‌سازی مخازن هیدروکربوری از وظایف اساسی مهندس نفت در پیش‌بینی دقیق عملکرد مخازن نفتی در شرایط عملیاتی متفاوت است، شبیه‌سازی‌های مخزن امروزه بیشتر به صورت پایه شبکه‌ای^۱ صورت می‌پذیرد؛ این روش‌ها نیازمند ورود دقیق خواص سنگ و سیال است که خیلی از اوقات در دسترس نیستند و عدم قطعیت بالایی در این خواص وجود دارد، همچنین این روش‌ها نیازمند زمان طولانی برای اجرای محاسبات هستند، در عین حال معمولاً برای تصمیم‌گیری‌های اولیه مدیریتی دقت خیلی بالایی در شبیه‌سازی لازم نیست و عامل زمان مهم‌ترین نقش را در تصمیم‌گیری‌ها دارد [۳]. مدل ظرفیت-مقاومت^۲ یک روش سریع است که با هزینه و زمان کمتری نسبت به شبیه‌سازهای پایه شبکه‌ای فرآیند شبیه‌سازی و پیش‌بینی را با دقت قابل قبول انجام می‌دهد، دقت این شبیه‌ساز لزوماً به اندازه دقت شبیه‌سازهای پایه شبکه‌ای نیست [۴]. ایده اولیه این مدل، معادلاتی است که جریان الکتریکی را در یک شبکه خازن و مقاومت توصیف می‌کند؛ این مدل مخزن نفتی را با مدار الکتریکی برق هم‌ارز در نظر می‌گیرد بدین صورت که هر ویژگی در مخزن نفتی را به یکی از ویژگی‌ها و اجزای مدار الکتریکی مرتبط می‌داند. هم‌ارزی ذکر شده بدین صورت است که تراوایی با مقاومت الکتریکی، تخلخل و تراکم‌پذیری با خازن، اختلاف فشار در مخزن با ولتاژ و جریان سیال با آمپراژ مدار هم‌ارز است [۴]. نخستین بار مدل ظرفیت-مقاومت در ارتباط با موضوع

ارتباط بین چاهی در مطالعات مخزن و مهندسی نفت مطرح شد و مورد استفاده قرار گرفت [۵]. هدف از این موضوع در ابتدا تعیین کمی ارتباط بین یک جفت چاه در یک پروژه تزریق آب و همچنین آنالیز تأثیر چاه‌های متعدد در یک مخزن بود. نتایج کار آلبرتونی و لیک در سال ۲۰۰۳ نشان داد که حتی چاه تزریقی با فاصله زیاد می‌تواند به‌طور مشخص روی تولید مؤثر باشد. ضرایب این مدل خطی که همان ضرایب وزنی است، ارتباط بین یک چاه تولیدی و یک چاه تزریقی در فرآیند سیلاب‌زنی را به صورت کمی نشان می‌دهد، ضریب وزنی یک پارامتر زمین‌شناسی است که در زمین‌آمار نیز وجود دارد که جمع آن‌ها برای تمام چاه‌های تزریقی برابر عدد ۱ می‌شود [۵]. یوسف و همکارانش در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ مدل کامل‌تری را ارائه کرده‌اند که شامل اثرات ظرفیت به کمک مفهوم تراکم‌پذیری و مقاومت به کمک مفهوم انتقال‌پذیری بود، شکل ریاضی این رابطه در رابطه ۷ به صورت کامل برای یک میدان نفتی ارائه شده است. به این ترتیب برای هر جفت از چاه‌های تولیدی و تزریقی دو ضریب تعیین می‌شود؛ اولین پارامتر، ماهیت زمین‌آماري دارد و ضریب وزنی نام دارد که با علامت (λ) مشخص شده است؛ این پارامتر میزان ارتباط زمین‌شناسی دو چاه را بیان می‌کند و تابع خواص سنگ مخزن است؛ دومین پارامتر، ماهیتی کنترل فرآیندی دارد که آن را ثابت زمانی (τ) می‌نامند که زمان تأخیر رسیدن اثر سیگنال ورودی از چاه تزریق به تولید را مشخص می‌کند؛ این پارامتر تابع خواص سنگ و سیال و برهم‌کنش آن‌ها بر یکدیگر است؛ در این روش اگر اطلاعات مربوط به فشار جریانی ته‌چاه موجود باشد می‌توان از آن‌ها برای تعیین دقیق‌تر میزان ارتباط چاه‌ها، استفاده کرد [۶ و ۷].

1. Grid Base

2. Capacitance- Resistive Model

سیگنال خروجی تبدیل می‌کند [۱۲-۱۳]. این روش برای میادین مختلفی در سراسر دنیا مورد اجرا قرار گرفت که همگی از فرمول‌بندی سیارپور استفاده کرده‌اند و نتایج قابل قبولی را گرفتند [۱۴-۱۸].

نخستین ضعف حل ارائه شده در پژوهش‌های قبلی این مدل به بازه زمانی حل مربوط می‌شود. اگر زمان آغاز تولید صفر و زمان نهایی بازه تطابق تاریخچه t_n در نظر گرفته شود، این معادله برای زیر بازه‌های زمانی (t_{k-1}, t_k) در تاریخچه تولید به صورت جداگانه محاسبه شده است در صورتی که در واقعیت عملکرد فرآیند سیلاب‌زنی متأثر از ابتدا تا انتهای تولید به صورت مستقیم است. نقص قابل ذکر دیگر در بحث بازه زمانی به طول بازه تطبیق تاریخچه مربوط می‌شود؛ این بازه باید به اندازه کافی بلند باشد که این اطمینان وجود داشته باشد که تأثیر نرخ تزریق به چاه تولیدی رسیده است. در نتیجه این مدل برای داشتن مفهوم فیزیکی مطابق با واقعیت باید در بازه زمانی (t_0, t_n) بدون در نظر گرفتن کافی بودن طول بازه، حل شود. ضعف دیگر، لزوم وجود نوسانات بالا به طبیعت پارامتر ثابت زمانی باز می‌گردد؛ برای مشاهده رسیدن تأثیر تزریق (سیگنال ورودی) به تولید (سیگنال خروجی) و چگونگی عملکرد مخزن بر روی سیگنال ورودی، تغییرات در سیگنال ورودی که همان نرخ تزریق است، الزامی به نظر می‌رسد. این میزان تغییر و نوسان در نرخ تزریق در پروژه‌های عملیاتی امری دشوار است که اکثر اوقات عملی نیست. در این مطالعه سعی شد که نواقص ذکر شده رفع شود؛ ابتدا سعی شد که راه‌حلی ارائه شود و معادلات به نحوی حل شوند که تأثیرات تمام طول بازه زمانی تزریق (بدون در نظر گرفتن کافی بودن طول بازه تطابق تاریخچه) بر روی تولید هر چاه در هر لحظه دیده شود.

سیارپور در سال ۲۰۰۸ معادلات این مدل را برای سه حالت مختلف حل کرد؛ حالت اول ساده‌ترین حالت استفاده از این روش است، در این حالت مخزن به صورت یک ناحیه تخلیه متشکل از یک جفت چاه تزریقی و تولیدی در نظر گرفته می‌شود در نتیجه مخزن دارای یک ثابت وزنی که برابر با عدد ۱ و یک ثابت زمانی است؛ این حالت مدل ظرفیت-مقاومت^۱ T نامیده می‌شود. حالت دوم حل این مدل برای تعدادی دلخواه از چاه‌های تزریقی و یک چاه تولیدی بدون در نظر گرفتن سایر چاه‌های تولیدی است که ضرایب وزنی برای هر جفت چاه تولیدی و تزریقی تعریف می‌شود که جمع این ضرایب برای هر چاه تزریقی برابر ۱ است و به تعداد چاه‌های تولیدی در مخزن مقدار ثابت زمانی مستقل خواهیم داشت؛ این حالت را مدل ظرفیت-مقاومت^۲ P نامیده می‌شود. حالت سوم که پیچیده‌ترین حالت این حل است مخزن به صورت تعداد دلخواهی از چاه‌های تولیدی و تزریقی در نظر گرفته می‌شود که در آن ثابت زمانی و ضریب وزنی برای هر جفت چاه تزریقی و تولیدی متفاوت بوده و باید محاسبه شود؛ این حالت را مدل ظرفیت-مقاومت^۳ IP نامیده می‌شود [۸]. وبر و همکاران در سال ۲۰۰۹ استفاده از این مدل را برای میدان‌های بزرگ با تعداد چاه‌های زیاد گسترش دادند و مدل ظرفیت-مقاومت را در کاربرد وسیع‌تری استفاده کردند [۹]. دلشاد و همکاران در سال ۲۰۰۹ این مدل را برای مخازن شکاف‌دار استفاده کرده و توانستند به وسیله مدل ظرفیت-مقاومت توزیع شکاف و تراوایی شکاف را محاسبه کردند [۱۰]. انگوین و همکاران در سال ۲۰۱۱ از مدل ظرفیت-مقاومت برای خصوصیت سنجی مخزن در حین برداشت اولیه و ثانویه استفاده کردند، همچنین از این روش برای بهینه‌سازی نرخ تزریق در میدان‌های نفتی تک‌زاس استفاده کردند [۱۱]. سیاف‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۱ ماهیت مدل ظرفیت-مقاومت را به یک تابع تبدیل تشبیه کردند که سیگنال ورودی را به

1. CRMT
2. CRMP
3. CRMIP

اگر رابطه ۲ در رابطه ۱ جایگزین کنیم، معادله دیفرانسیلی زیر به وجود می‌آید [۸]:

$$\frac{C_t \cdot V_p}{j} \cdot \frac{dq}{dt} + q(t) = i(t) - C_t \cdot V_p \cdot \frac{dP_{wf}}{dt} \quad (3)$$

یکی از پارامترهای مدل ظرفیت مقاومت به نام ثابت زمانی (τ) با رابطه ۴ به صورت زیر تعریف می‌شود [۸]:

$$\tau = \frac{C_t V_p}{j} \quad (4)$$

با جای‌گذاری رابطه ۴ در معادله ۳ رابطه زیر به دست می‌آید [۸]:

$$\tau \frac{dq}{dt} + q(t) = i(t) - \tau \cdot j \cdot \frac{dP_{wf}}{dt} \quad (5)$$

در این پژوهش برای حل معادله دیفرانسیلی ۵ بدین صورت عمل شد که در ابتدا طرفین معادله دیفرانسیلی (۵) در فاکتور انتگرال ساز که به صورت $e^{t/\tau}$ است، ضرب می‌شود تا معادله جدایی‌پذیر شکل بگیرد؛ پس از طی مراحل حل و در نظر گرفتن بازه حل به صورت $[t_0, t_n]$ ، سمت چپ معادله جدایی‌پذیر به دست آمده به شکل رابطه زیر تبدیل می‌شود:

$$\int_{t_0}^{t_n} d \left(e^{\frac{t+c}{\tau}} \times q(t) \right) = e^{\frac{t_n+c}{\tau}} q(t_n) - e^{\frac{t_0+c}{\tau}} q(t_0) \quad (6)$$

در معادله ۶ پارامتر جدیدی به نسبت راه‌حلی که توسط سیارپور در سال ۲۰۰۸ ارائه شد، مشاهده می‌شود. این پارامتر که با C نمایش داده شده است در تحقیقات گذشته برابر صفر در نظر گرفته می‌شد؛ در این پژوهش دارای مقدار است و مکملی برای مفهوم پارامتر ثابت زمانی است که در آن اثر مخزن بر روی سیگنال خروجی در نظر گرفته می‌شود که با مفهوم ثابت بعدی که در حل سمت راست معادله جدایی‌پذیر به دست خواهد آمد، تکمیل می‌شود؛ ثابت بعدی به اثر مخزن بر روی سیگنال ورودی مربوط می‌شود.

گسترش مدل ظرفیت- مقاومت برای شبکه‌ای از چاه‌های تولیدی و تزریقی

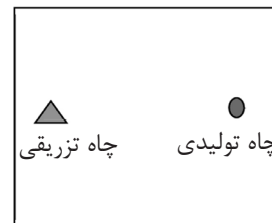
در این حالت که در شکل ۲ نشان داده شده است؛ مدل ظرفیت مقاومت برای تمامی چاه‌ها نوشته

دومین فرض ساده شونده که در این پژوهش سعی در رفع آن صورت گرفت، حل موضوع نوسان بالا در نرخ تزریق چاه‌های تزریقی به عنوان پیش فرض بود که این موضوع نیز تا حد خوبی با ارائه راه حل جدید حل شد. این راه حل با معرفی یک پارامتر جدید تکمیل شده است که بیان گر خصوصیات طبیعی مخزن نفتی است که به وسیله آن می‌توان میزان تأثیر مخزن بر روی سیگنال ورودی و تبدیل آن به سیگنال خروجی را در قالب این پارامتر مشاهده کرد. این پارامتر مکملی بر مفهوم فیزیکی ثابت زمانی است که به وسیله آن می‌توان اثر فرضیات ساده شونده را از بین برد. توضیح دقیق این پارامتر از لحاظ فیزیکی در حال حاضر امکان پذیر نیست.

روش اجرا

مدل ظرفیت مقاومت برای یک چاه تولیدی و یک چاه تزریقی

معادلات اصلی این مدل بر پایه معادلات موازنه جرم است، در نهایت معادله اصلی مدل ظرفیت- مقاومت برای مخزنی شامل یک چاه تولیدی و یک چاه تزریقی (شکل ۱) به صورت معادله ۱ بیان می‌شود [۸].



شکل ۱ مخزن با یک چاه تولید و یک چاه تزریق.

$$V_p \cdot C_t \cdot \frac{d\bar{P}}{dt} = i(t) - q(t) \quad (1)$$

معادله ۱ بیان می‌کند اگر نرخ تزریق، $i(t)$ ، را به عنوان سیگنال ورودی به مخزن در نظر گرفته شود و نرخ تولید، $q(t)$ ، به عنوان سیگنال خروجی باشد، مقدار سیال باقی مانده به صورت حاصل ضرب ضریب ذخیره در تغییرات فشار بیان می‌شود. با استفاده از رابطه ۲ فشار را به نرخ تولید تبدیل می‌کنیم [۸]:

$$q = j \cdot (\bar{P} - P_{wf}) \quad (2)$$

عکس‌العمل نشان داده و تولیدش در اثر تزریق زودتر صورت می‌گیرد. حال برای رسیدن به معادله دیفرانسیلی جامع که برای مدل ظرفیت-مقاومت باید حل شود، مقدار فشار متوسط مخزن در رابطه ۷ با استفاده از رابطه ۲ جایگزین می‌شود در نتیجه رابطه ۹ حاصل می‌شود [۸]:

$$\frac{dq_j}{dt} + \frac{1}{\tau_j} q_j(t) = \frac{1}{\tau_j} \sum_{i=1}^I \lambda_{ij} i_i(t) - j_j \frac{dP_{wf}}{dt} \quad (9)$$

در این حالت پارامتر ثابت زمانی (τ_j) برای چاه تولیدی است و ضریب وزنی (λ_{ij}) برای جفت چاه‌های تولیدی و تزریقی استفاده می‌شود [۸]. برای حل این رابطه مانند رابطه ۵ در فاکتور انتگرال‌ساز ضرب شده و تمام مراحل حل مشابه است. حاصل سمت چپ معادله جدایی‌پذیر بدون تغییر است و سمت راست معادله با اضافه شدن پارامتر دوم مدل ظرفیت-مقاومت که ضریب وزنی است به شکل رابطه ۱۰ تبدیل می‌شود که برای گسسته‌سازی آن باید به شکل زیر نوشته شود:

$$\int_{t_0}^{t_n} \left(e^{\frac{1}{\tau} t} \frac{\sum_{i=1}^{N_{inj}} \lambda_{ij} \cdot i_i(t)}{\tau} - j e^{\frac{1}{\tau} t} \frac{dP_{wf}}{dt} \right) dt = \int_{t_0}^{t_1} \left(e^{\frac{t+c'}{\tau}} \frac{\sum_{i=1}^{N_{inj}} \lambda_{ij} \cdot i_i(t)}{\tau} - e^{\frac{t+c'}{\tau}} j \frac{dP_{wf}}{dt} \right) dt + \int_{t_{n-1}}^{t_n} \left(e^{\frac{t+c'}{\tau}} \frac{\sum_{i=1}^{N_{inj}} \lambda_{ij} \cdot i_i(t)}{\tau} - e^{\frac{t+c'}{\tau}} j \frac{dP_{wf}}{dt} \right) dt \quad (10)$$

رابطه ۱۰ ترکیبی از تأثیر دو پارامتر بر روی تخمین به روش مدل ظرفیت-مقاومت است که پارامتر اول نرخ تزریق و تغییرات آن و پارامتر دوم فشار جریانی

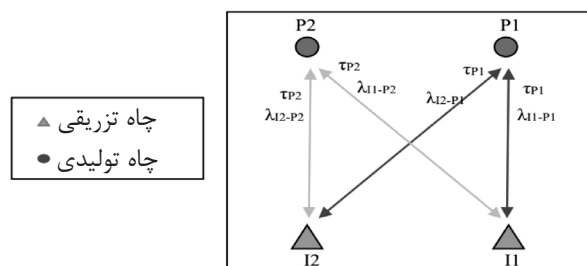
و جمع زده می‌شود که بیان ریاضی آن به شکل رابطه ۷ است؛ این نوع نگارش برای حالت دوم که CRMP نام دارد و در مورد آن توضیح داده شد، است. از این حالت بیشترین استفاده صورت می‌گیرد [۸]:

$$C_{t_j} \cdot V_{p_j} \cdot \frac{dP_j}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{inj}} \lambda_{ij} \cdot i_i(t) - q_j \quad (7)$$

پارامتر دوم مدل ظرفیت-مقاومت که ضریب وزنی ارتباط بین چاه‌های تولیدی و تزریق را بیان می‌کند در این حالت به وجود می‌آید که تأثیر هر چاه تزریقی بر چاه‌های تولیدی را نشان می‌دهد، این پارامتر یک پارامتر زمین‌شناسی بوده و از تعریف آن در زمین‌آمار مجموع آن برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود، بیان ریاضی این موضوع به شکل رابطه ۸ است [۸].

$$\sum_{i,j=1}^n \lambda_{ij} = 1 \quad (8)$$

در این معادله برای هر جفت چاه تزریقی و تولیدی یک ضریب وزنی (λ_{ij}) وجود دارد که ارتباط زمین‌شناسی چاه تولیدی زو چاه تزریقی i را مشخص می‌کند؛ برای هر چاه تولیدی یک ثابت زمانی (τ_j) موجود است. وجود ثوابت زمانی و وزنی متفاوت بین چاه‌ها این امکان را می‌دهد که تفاوت بین میزان میرایی اثر تزریق هر یک از چاه‌های تزریقی روی هریک از چاه‌های تولیدی در این جفت چاه‌های تزریقی و تولیدی در نظر گرفته شود. هرچه اندازه ضریب وزنی برای جفت چاه تولیدی زو تزریقی i بیشتر باشد یعنی چاه تولیدی ذکر شده زبیشتر تولیدش در اثر تزریق از چاه تزریقی ذکر شده i است. ثابت زمانی در حالت CRMP فقط برای چاه‌های تولیدی است. مقدار ثابت زمانی هر چقدر پایین‌تر باشد یعنی چاه تولیدی زودتر به تزریق



شکل ۲ شبکه‌ای از چاه‌های تولید و تزریق.

معادله جدایی‌پذیر حاصل از حل معادله دیفرانسیلی اصلی مدل ظرفیت- مقاومت (معادله ۵) دارای دو بخش شامل معادلات ۱۱ و ۱۲ است، با برابر قرار دادن روابط ۱۱ و ۱۲ خواهیم داشت:

$$q(t_n) = q(t_0)e^{-\frac{(t_n-t_0)}{\tau}} + \frac{B}{A} \left\{ \sum_{k=1}^n [e^{\frac{t_k}{\tau}} \sum_{i=1}^{N_{inj}} \lambda_{ij} \cdot i_i(t_k) - e^{\frac{t_{k-1}}{\tau}} \sum_{i=1}^{N_{inj}} \lambda_{ij} \cdot i_i(t_{k-1})] \right. \\ \left. - \tau \sum_{k=1}^n \left[\sum_{i=1}^{N_{inj}} \lambda_{ij} \frac{\Delta i_i^k}{\Delta t_k} \left(e^{\frac{t_k}{\tau}} - e^{\frac{t_{k-1}}{\tau}} \right) \right] \right\} - \frac{\tau j B}{A} \sum_{k=1}^n \left[(e^{\frac{t_k}{\tau}} - e^{\frac{t_{k-1}}{\tau}}) \left(\frac{\Delta P_{wf}^k}{\Delta t_k} \right) \right] \quad (13)$$

اعتبارسنجی

برای صحت‌سنجی معادله ۱۳ از دو مدل سینتیک استفاده شده، مدل اول توسط سیارپور شبیه‌سازی شده است در این مدل پنج چاه تزریقی با نوسان بالای نرخ تزریق و چهار چاه تولیدی وجود دارد همچنین در این مدل دو شکاف با تراوایی بسیار بالا وجود دارد؛ مدل دوم یک مدل مصنوعی با پنج چاه تزریقی و چهار چاه تولیدی در یک مخزن همگن مستطیلی با نوسانات کم در نرخ تزریق استفاده شد:

نمونه اول با نوسان بالای نرخ تزریق

برای تعیین عملکرد فرآیند سیلاب‌زنی در مخزن شکل ۳ از رابطه ۱۳ استفاده شد تغییرات نرخ تزریق در شکل ۴ آمده است [۸]. مقادیر به‌دست آمده حاصل از رابطه ۱۳ به‌صورت جدول ۱ است که در این جدول تأثیر نرخ تزریق از بازه اول تا آخر در نظر گرفته شده است، با توجه به وجود این شکافها مقدار ضریب وزنی برای چاه تولیدی اول و تزریقی اول باید بیشتر باشد که نتایج بهینه‌سازی این موضوع را تأیید می‌کند همچنین به‌علت وجود شکاف بین چاه تزریقی سوم و تولید چهارم باید این مقدار بیشتر باشد که این موضوع نیز تأیید شده است. پارامترهای مدل ظرفیت- مقاومت به‌صورت جدول ۱ آمده است. نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که معادله ۱۳ به خوبی توانایی تخمین عملکرد فرآیند سیلاب‌زنی که دارای دقت تخمین بسیار قابل‌قبولی برای این مخزن ارائه می‌دهد.

ته‌چاه است. نکته قابل ذکر دیگر وجود پارامتر جدیدی به نسبت حلی که توسط سیارپور ارائه شد مشاهده می‌شود این پارامتر که با C' نمایش داده شده است در تحقیقات گذشته برابر صفر در نظر گرفته می‌شد ولی در این پژوهش دارای مقدار است و همان‌طور که ذکر شد نماینده اثر فرآیندهای طبیعی در مخازن بر روی سیگنال ورودی است. ترکیب دو پارامتر C و C' فرضیات ساده‌شونده مدل ظرفیت- مقاومت را از بین برده و به این مدل اجازه مشاهده تأثیر نرخ تزریق بر روی نرخ تولید با وجود نوسانات کم- کاربرد عملیاتی- را می‌دهد.

گسسته‌سازی معادلات مدل ظرفیت- مقاومت

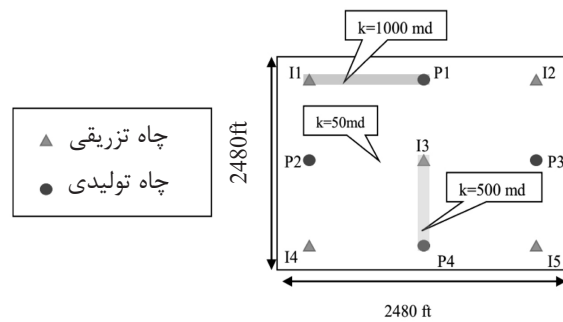
این دو پارامتر از فرآیند بهینه‌سازی ریاضی به‌دست می‌آیند، تابع هدف به‌صورت مجموع قدر مطلق اختلاف مقادیر خروجی نرم‌افزار شبیه‌ساز به‌عنوان مقدار واقعی و مقدار نرخ تخمینی از مدل ظرفیت- مقاومت $(\sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^n |q_{j,real}^k - q_{j,est}^k|)$ تعریف می‌شود که برای انجام این بهینه‌سازی باید تابع هدف تعریف شده، کمینه شود؛

معادله انتگرالی ۶ به‌صورت زیر گسسته می‌شود که در آن $A=e^{C/\tau}$ است:

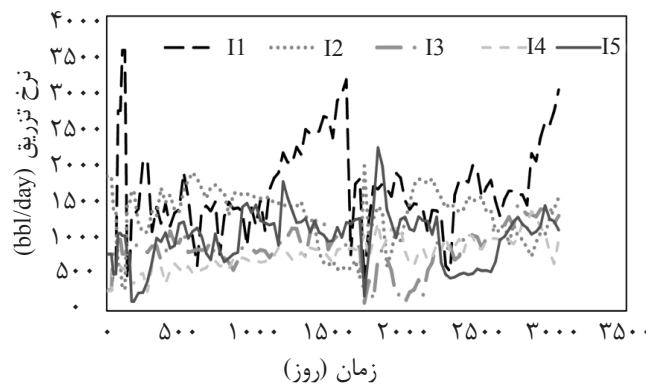
$$\int_{t_0}^{t_n} d(e^{\frac{t}{\tau}} q) = A \cdot [e^{\frac{t_n}{\tau}} q(t_n) - e^{\frac{t_0}{\tau}} q(t_0)] \quad (11)$$

برای حاصل انتگرال رابطه ۱۰، می‌توان سمت راست این معادله را به دو بخش تقسیم کرد و با حل انتگرال‌ها به‌صورت جز به جز و در نظر گرفتن $\frac{dP_{wf}}{dt} = \frac{\Delta P_{wf}^k}{\Delta t_k}$ و $\frac{di_j(t)}{dt} = \frac{\Delta i_j^k}{\Delta t_k}$ معادله زیر حاصل می‌شود که در آن $A=e^{C/\tau}$ است.

$$\int_{t_0}^{t_n} \left(e^{\frac{t}{\tau}} \sum_{i=1}^{N_{inj}} \lambda_{ij} \cdot i_i(t) - j e^{\frac{t}{\tau}} \frac{dP_{wf}}{dt} \right) dt = \\ \left\{ \left[e^{\frac{t_k}{\tau}} \sum_{i=1}^{N_{inj}} \lambda_{ij} \cdot i_i(t_k) - e^{\frac{t_{k-1}}{\tau}} \sum_{i=1}^{N_{inj}} \lambda_{ij} \cdot i_i(t_{k-1}) \right] \right\} - B \cdot \tau \\ \left\{ \left[\sum_{i=1}^{N_{inj}} \lambda_{ij} \frac{\Delta i_i^k}{\Delta t_k} \right] \left[e^{\frac{t_k}{\tau}} - e^{\frac{t_{k-1}}{\tau}} \right] \right\} - \tau \cdot j \cdot B \sum_{k=1}^n \left[(e^{\frac{t_k}{\tau}} - e^{\frac{t_{k-1}}{\tau}}) \left(\frac{\Delta P_{wf}^k}{\Delta t_k} \right) \right] \quad (12)$$



شکل ۳ مطالعه موردی اول با چهار چاه تولیدی و پنج چاه تزریقی دارای دو شکاف تراوا [۸].



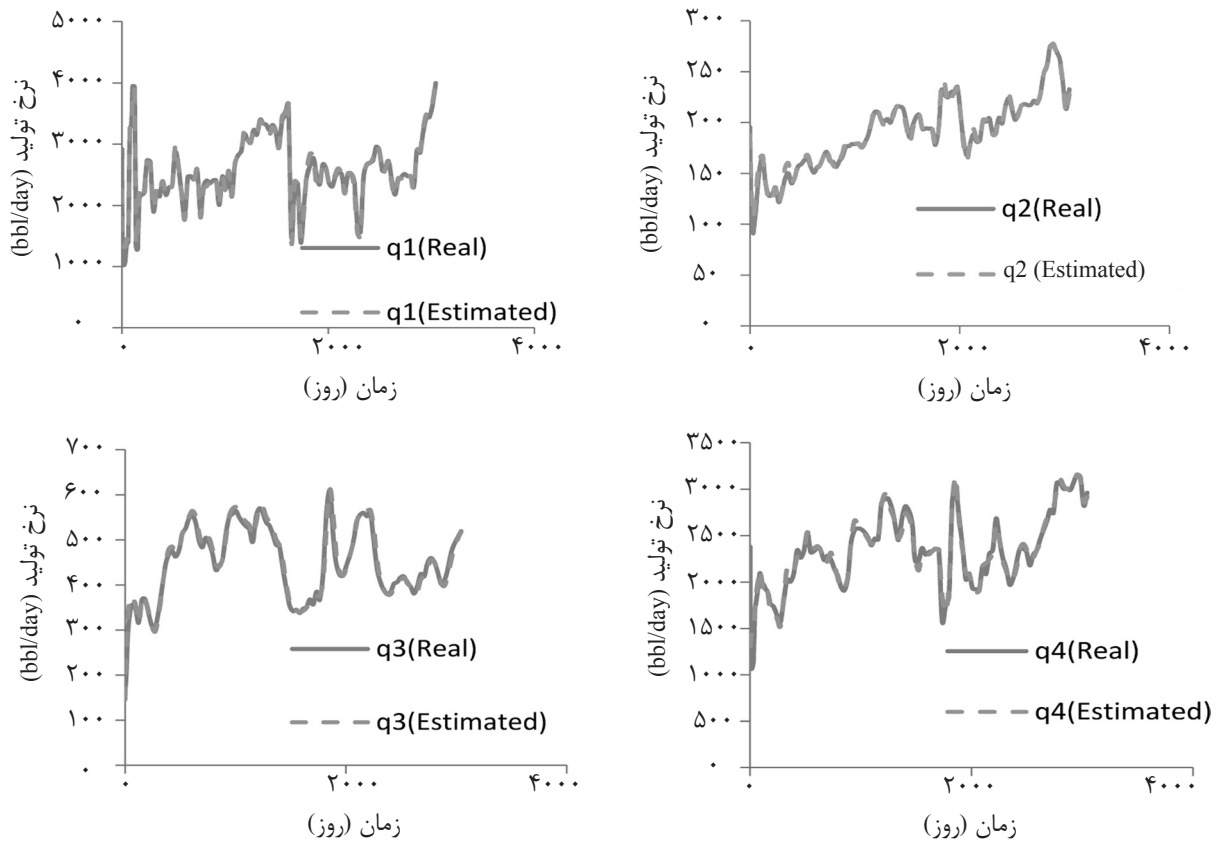
شکل ۴ تغییرات نرخ تزریق چاه‌های تزریقی (I01 چاه تزریقی اول تا I05 چاه تزریقی پنجم) مخزن مطالعه موردی ۱.

جدول ۱ پارامترهای مدل ظرفیت-مقاومت (معادله ۲۶) برای مطالعه موردی اول.

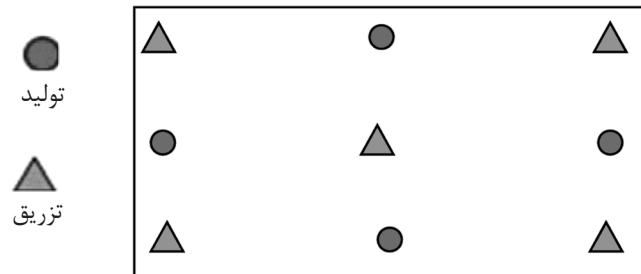
λ_{ij}	I_1	I_2	I_3	I_4	I	$q_p (t_0)$	$\frac{B}{A}$	τ_p (day)
P_1	۰/۹۸	۰/۴۸	۰/۰۹	۰/۱۶	۰/۱۳	۲۳۸۸	۰/۹۹۹۹۸۴۰۴۶۱۵	۱/۹۶۵
P_2	۰/۰۱۲	۰/۰۱۶	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۰۱۵	۱۷۹	۰/۹۹۹۹۸۴۰۴۶۱۵۷۲۳	۱۶/۴۶۶
P_3	۰/۰۰۴	۰/۱۹۴	۰/۰۲	.	۰/۱۹	۱۳۱	۱	۳۵/۷۱۵
P_4	۰/۰۰۴	۰/۳۱	۰/۸۷	۰/۶۹	۰/۶۶۵	۱۳۶۱	۱	۱۳/۲۸۶
sum	۱	۱	۱	۱	۱			

نرخ تزریق به صورت پلکانی است و نوسانات پیوسته مشاهده نمی‌شود در حالی که اگر در شکل ۴ دقت شود این نوسان پیوسته است. همان‌گونه که در شکل ۸ مشخص است، مدل سیارپور توانایی تخمین عملکرد برای این مخزن را ندارد، دلیل آن هم به عدم توانایی اختصاص دهی مقداری درست برای ثابت زمانی باز می‌گردد.

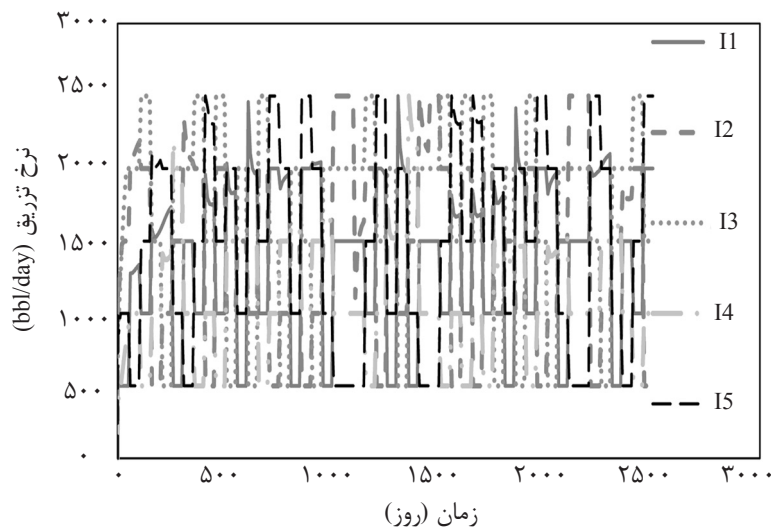
تخمین عملکرد فرآیند سیلابزنی توسط رابطه سیارپور در کارهای وی به چاپ رسیده است [۸]. روابط سیارپور نیز توانایی قابل قبول برای تخمین عملکرد را داراست که به مقدار جزئی دقت کمتری نسبت به راه ارائه شده دارد. برای تعیین عملکرد فرآیند سیلابزنی در مخزن شکل ۶ از رابطه ۱۳ استفاده شد تغییرات نرخ تزریق در شکل ۷ آمده است؛ همان‌گونه که مشاهده می‌شود تغییرات



شکل ۵ تطابق نرخ تخمینی با استفاده از معادله ۱۳ و نرخ واقعی مطالعه موردی اول برای همه چاه‌های تولیدی.



شکل ۶ مطالعه موردی دوم؛ مخزنی همگن با پنج چاه تزریقی و چهار چاه تولیدی.



شکل ۷ تغییرات نرخ تزریق چاه‌های تزریقی مخزن مطالعه موردی ۲.

میل می‌کند و توانایی همگرایی به عددی با مفهوم فیزیکی را ندارد. دلیل دوم احتمالاً به کافی نبودن طول بازه تطبیق تاریخچه باز می‌گردد چون طول این بازه کافی نیست بزرگ شدن این پارامتر به ما نشان می‌دهد که به افزایش طول بازه تطبیق تاریخچه نیاز است و بازه فعلی که شامل ۲۵۰۰ روز است کافی نیست این طول بازه برای مدل ارائه شده اول در شکل ۵، بیشتر از مقدار فعلی و در حدود ۳۲۰۰ روز بود؛ همان‌گونه که ذکر شد مدل سیارپور دقت قابل قبول برای تخمین عملکرد مدل اول را داشت.

شکل ۱۰ از تخمین قابل قبول و مناسب حکایت دارد که این تخمین به وسیله راه سیارپور اصلاً مناسب نیست و دلیل آن هم به نبود نوسانات کافی باز می‌گردد به طوری که راه حل سیارپور توانایی تخمین برای پارامتر ثابت زمانی را ندارد و تمام ثابت‌های زمانی برای تمامی چاه‌های تولیدی را عددی یکسان گزارش می‌کند که این عدد بستگی به حد بالای محدودیتی دارد که در الگوریتم بهینه‌سازی برای ثابت زمانی تعریف می‌شود. حال اگر از رابطه ارائه شده در این پژوهش استفاده شود پارامترهای مدل به صورت جدول ۴ گزارش می‌شوند؛ با توجه به این که مخزن از لحاظ زمین‌شناسی همگن است، ضریب وزنی باید با عکس فاصله چاه‌های تولیدی و تزریقی رابطه داشته باشد که نتایج بهینه‌سازی ارائه شده در جدول ۴ این موضوع را تأیید می‌کند، همان‌گونه که از مقایسه دو جدول مشخص است، پارامتر زمین‌شناسی برای مدل سیارپور و مدل ارائه شده دارای روند مشابه است. انتظار تطابق روند در ثابت وزنی برای مدل سیارپور و معادله ۱۳ وجود داشت زیرا گسترش صورت گرفته بر روی پارامتر ثابت زمانی است و در مورد خواص سنگ تغییری صورت نگرفته است.

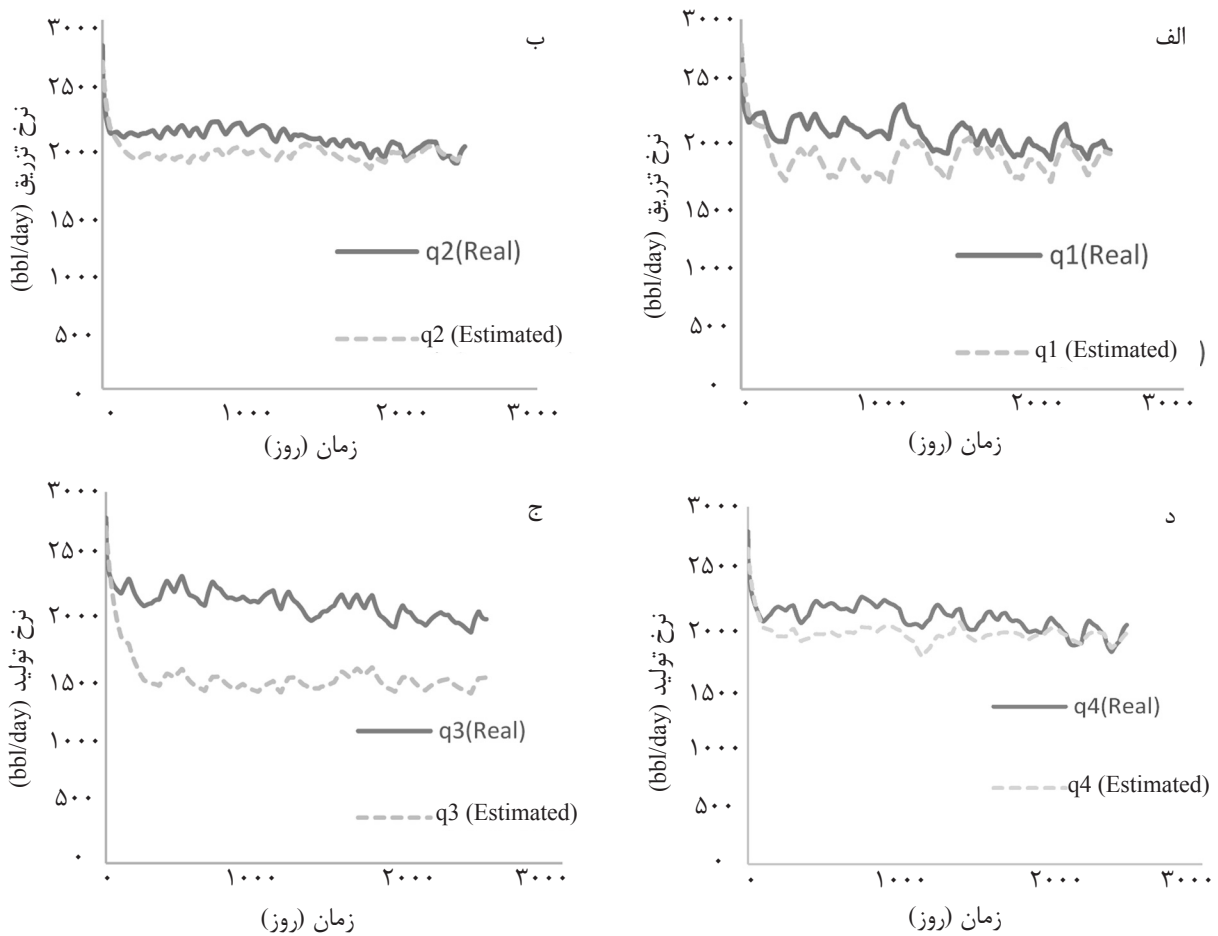
همان‌گونه که انتظار می‌رفت به علت نبود نوسانات کافی در نرخ تزریق و احتمالاً کافی نبودن طول بازه تطبیق تاریخچه، پارامتر ثابت زمانی دچار محدودیت فیزیکی شد و نتوانست تأثیر تزریق بر روی تولید را به درستی نشان دهد جدول ۲ مقادیر پارامترهای بهینه‌سازی مدل سیارپور ارائه شده است، این نتایج نشان می‌دهند که رابطه سیارپور در تخمین ثابت وزنی مشکلی ندارد ولی پارامتر ثابت زمانی را به هیچ‌عنوان نتوانست تخمین بزند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار یکسان ثابت زمانی برای چاه‌ها گزارش شده است که در عمل امری غیرممکن است، مقدار گزارش شده ناشی از حد محدودیت تعریف شده در الگوریتم بهینه‌سازی برای پارامتر ثابت زمانی است که این مقدار در الگوریتم اجرا شده مقدار ۱۰۰ بود؛ اگر هر محدودیت دیگری نیز اعمال می‌شد مقدار ثابت زمانی به آن عدد می‌رسید. معمولاً در پروژه‌های بهینه‌سازی برای پارامترهای حل مسئله محدودیت^۱ تعریف می‌شود تا الگوریتم‌های اجرا شده توانایی به دست آوردن این پارامترها با مفهوم فیزیکی را داشته باشند، در ادامه به تخمین عملکرد مخزن شبیه‌سازی شده بدون اعمال محدودیت پرداخته خواهد شد و مشاهده خواهد شد که اعمال محدودیت به مفهوم فیزیکی کمک بیشتری خواهد کرد.

اگر محدودیت اعمال شده بر حد بالای ثابت زمانی در الگوریتم بهینه‌سازی حذف شود، مقادیر ثابت زمانی اعداد بسیار بزرگی گزارش می‌شود که همان حد از دقت تخمین ارائه شده در شکل ۸ را نیز از دست می‌دهد که نتایج آن در جدول ۳ و شکل ۹ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقادیر ثابت زمانی اعداد بسیار بزرگی شده‌اند این موضوع احتمالاً دو دلیل دارد. دلیل اول این که نبود نوسان باعث می‌شود که چاه تولیدی هیچ پاسخی را دریافت نکند و از آنجایی که این مقدار نمی‌تواند منفی باشد به سمت اعداد بزرگ

1. Constrain

جدول ۲ پارامترهای مدل ظرفیت- مقاومت برای مدل سیارپور با اعمال محدودیت برای ثابت زمانی در مطالعه موردی دوم.

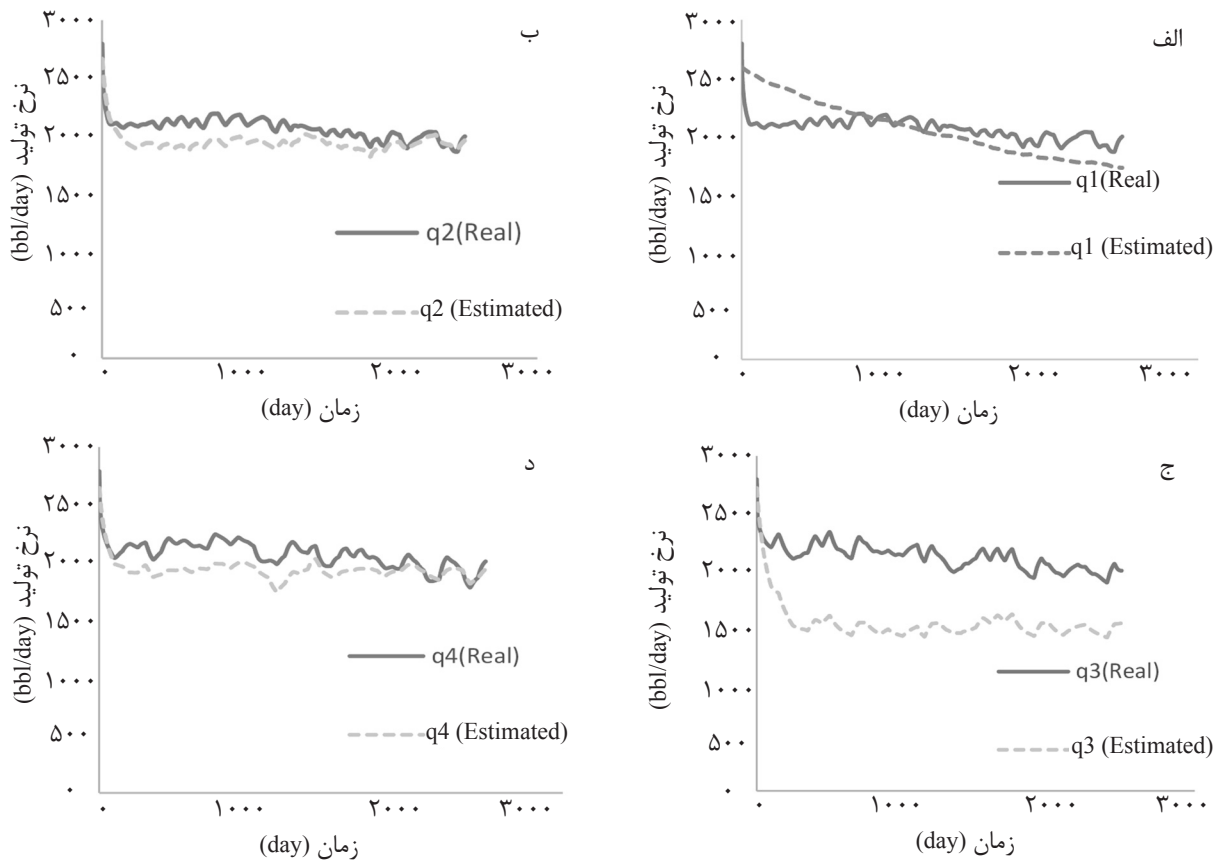
λ_{ij}	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	$q_p(t_0)$	τ_p (day)
P_1	۰/۴۳	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۰۵	۰/۱۳	۲۸۰۸/۳۳	۱۰۰
P_2	۰/۳۶	۰/۱۵	۰/۲۸	۰/۴۳	۰/۱۷	۲۶۷۲/۵۳	۱۰۰
P_3	۰/۱۱	۰/۲۷	۰/۲۱	۰/۱۱	۰/۲۹	۲۷۳۰/۸۹	۱۰۰
P_4	۰/۱	۰/۲۵	۰/۲	۰/۴۱	۰/۴۱	۲۶۵۹/۸۶	۱۰۰
sum	۱	۱	۱	۱	۱		



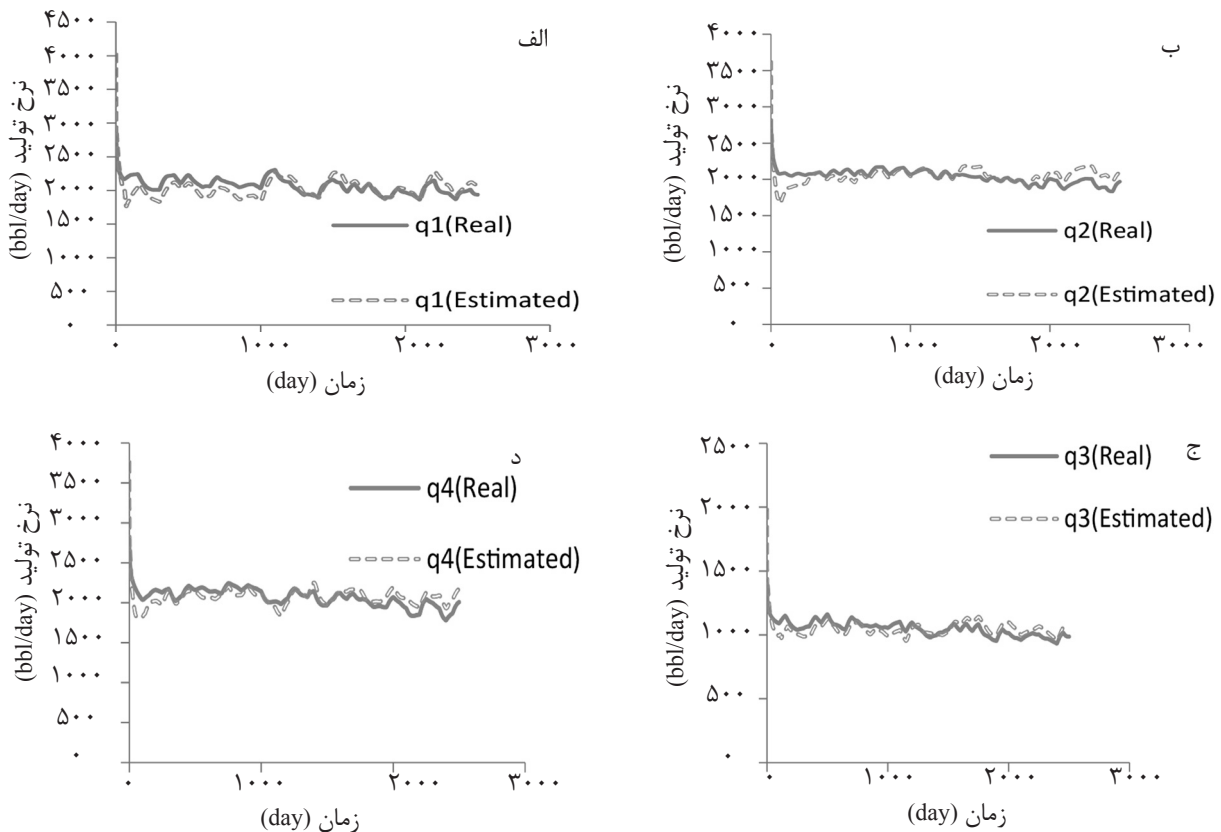
شکل ۸ تطابق نرخ تخمینی معادله سیارپور و نرخ واقعی چاه مطالعه موردی دوم.

جدول ۳ پارامترهای مدل ظرفیت- مقاومت برای مدل سیارپور بدون محدودیت برای ثابت زمانی در مطالعه موردی ۲.

λ_{ij}	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	$q_p(t_0)$	τ_p (day)
P_1	۰/۳۱	۰/۷۰	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۱۴	۲۴۲۷	۴۷۲/۴۳
P_2	۰/۴۳	۰	۰	۰/۶۸	۰	۲۵۸۳	۱۹۴۸/۸۱
P_3	۰/۱۲	۰/۳۰	۰/۵۴	۰/۱۹	۰/۱۸	۲۴۱۲	۴۷۶/۲۲
P_4	۰/۱۵	۰	۰/۳۲	۰/۰۵	۰/۶۸	۲۴۱۴	۱۱۳۷/۳۰
sum	۱	۱	۱	۱	۱		



شکل ۹ تطابق نرخ تخمینی معادله سیارپور بدون محدودیت برای ثابت زمانی و نرخ واقعی چاه مطالعه موردی ۲.



شکل ۱۰ تطابق نرخ تخمینی معادله ۱۳ و نرخ واقعی چاه مطالعه موردی ۲.

جدول ۴ پارامترهای مدل ظرفیت- مقاومت (معادله ۱۳) برای مطالعه موردی ۲.

	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	$q_p (t_0)$	B/A	τ_p (day)
P_1	۰/۳۸۸	۰/۳۵۱	۰/۲۲۱	۰/۰۹	۰/۱	۴۰۵۹/۷۵	۱/۲۲۳	۸۸/۹۵۲
P_2	۰/۴۰۵	۰/۱۳۵	۰/۲۷۱	۰/۴۳	۰/۱۱	۳۶۷۵/۴۶	۱/۱۱	۵۵/۲۳۴
P_3	۰/۱۱	۰/۳۷	۰/۱۹۵	۰/۰۹۱	۰/۴۳۱	۴۰۰۰/۷۷	۱/۱۸۸	۸۶/۹۹
P_4	۰/۰۹۷	۰/۱۴۴	۰/۳۱۳	۰/۳۸۹	۰/۳۵۹	۳۸۱۵/۵۸	۱/۱۲۴	۵۵/۰۶۸
sum	۱	۱	۱	۱	۱			

باید حتما همه شرایط برای رسیدن اثر سیگنال ورودی به چاه تولیدی (لزوم وجود نوسان و مناسب بودن طول بازه تطبیق تاریخچه) وجود داشته باشد. برای رفع نقص در تعریف پارامتر ثابت زمانی باید در راه حل این مدل تغییراتی دیده می شود، تغییراتی که در پژوهش برای نخستین بار اعمال شد و باعث اضافه شدن دو پارامتر جدید به این مدل شد توضیح منشأ فیزیکی این دو پارامتر در حال حاضر ممکن نیست ولی پارامتر A که از رابطه $\frac{c}{c'}$ به دست می آید که c به سیگنال خروجی که همان نرخ تولید است، مربوط می شود؛ پارامتر B از رابطه $\frac{c'}{c}$ به دست می آید که c' به سیگنال ورودی که همان نرخ تزریق است، مربوط می شود.

این پژوهش تمام بازه $[t_0, t_n]$ مورد بررسی قرار داد؛ همانطور که در فرض های مطرح شده توسط سیارپور بیان شده است؛ علاوه بر نیاز به وجود نوسانات کافی برای دیدن تأثیر محرک بر پاسخ، مدل ظرفیت- مقاومت هنگامی دقیق تر عمل می کند که بازه تطبیق تاریخچه به میزان کافی بلند باشد- در نمودارهای خطا مشاهده خواهد شد که در انتهای بازه تطبیق تاریخچه مدل سیارپور بهبود می یابد- که حتما سیگنال ورودی به چاه تولیدی برسد که این فرض با کاربردهای عملی در خیلی از مواقع در تضاد است؛ در این پژوهش نیاز به بلند بودن بازه تطبیق تاریخچه نیز رفع شد؛ نتیجه نهایی این پژوهش معنای کامل بخشیدن به پارامتر ثابت زمانی، بدون نیاز به پیش فرض های

در مورد پارامتر دیگر که ثابت زمانی است، موضوع به کلی متفاوت است به طوری که روابط سیارپور (چه با اعمال محدودیت چه بدون اعمال محدودیت) توانایی تشخیص را ندارند ولی همان گونه که مشاهده می شود در روابط ارائه شده مقدار ثابت زمانی حاصل می شود و با توجه به همگن بودن مخزن و هم رده بودن میزان نرخ های تزریقی چاه ها به یکدیگر این مقادیر به یکدیگر نزدیک هستند (از لحاظ مرتبه عددی لزوماً به لحاظ عددی مساوی نیستند) در صورتی که در مطالعه موردی اول چاه تولیدی که در مجاورت چاه تزریقی با نرخ بالا و شکاف بود دارای ثابت زمانی کمتر از ۲ روز بود که بسیار کم است.

نتیجه گیری

اگر در معادله ۱۳ دقت شود، این معادله حاصل جمع چندین عبارت متفاوت است که عبارت اول بیان گر تأثیرات آغاز فرآیند تزریق بر روی تولید است که با گذشت زمان به مقادیر بسیار کوچک میل می کند، عبارت دوم و سوم نمایانگر اثر تزریق بر روی تولید است و عبارت چهارم بیانگر تأثیر فشار جریانی ته چاه بر روی تولید است. خلاصه شدن مدل ظرفیت- مقاومت به این چهار عبارت یک نوع حسن است که باعث سریع تر شدن تخمین می شود ولی این خلاصه شدن و کوتاهی دارای مشکلات خاص خود است؛ مهم ترین محدودیت در تعریف فیزیکی پارامتر ثابت زمانی است که

نتایج و دستاوردهای حاصل از این پژوهش را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

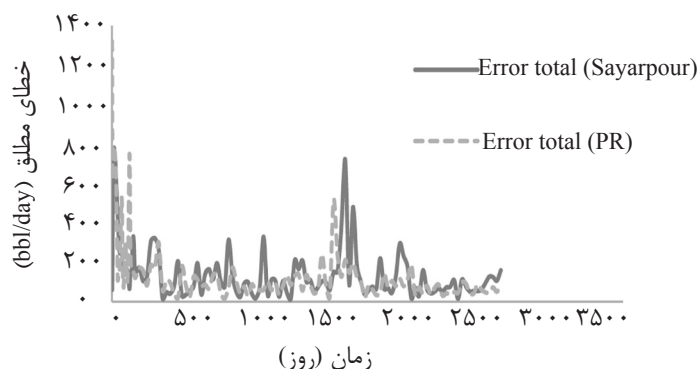
- ۱- معرفی راه حلی متفاوت برای مدل ظرفیت- مقاومت به طوری که بتواند تخمین عملکرد برای مخازنی که راه حل قبل این مدل نمی‌توانست به خوبی تخمین بزند را تا حد ممکن بهبود ببخشد.
- ۲- طولانی بودن بازه تطابق تاریخچه در راه حل قدیم مدل ظرفیت- مقاومت امری بسیار ضروری بود؛ راه ارائه شده در این پژوهش این نقص و نیاز و به طولانی بودن بازه تطابق تاریخچه برطرف می‌شود.
- ۳- وجود نوسان مداوم در نرخ تزریق یکی از فرضیاتی است که عملی کردن آن امری بسیار دشوار است در نتیجه باید مدل ظرفیت- مقاومت بتواند خود را با شرایط عملیاتی تطابق بدهد.
- ۴- حل مدل ظرفیت- مقاومت در تمام طول بازه تطابق تاریخچه امکان کنترل و مشاهده اثرات تزریق بر روی تولید را فراهم می‌آورد.
- ۵- با توجه به نیاز به ارائه پارامترهای جدید برای معنا بخشی به ثابت زمانی، نکته‌ای که باید مد نظر قرار گیرد این است که این تصحیحات نبایستی باعث کاهش سرعت تخمین و عملکرد سریع محاسباتی مدل ظرفیت- مقاومت شود، در نتیجه اضافه کردن بعضی تصحیحات دیگر، وجود الگوریتم اجرای مناسب را طلب می‌کند.

ساده کننده و غیر عملی، است.

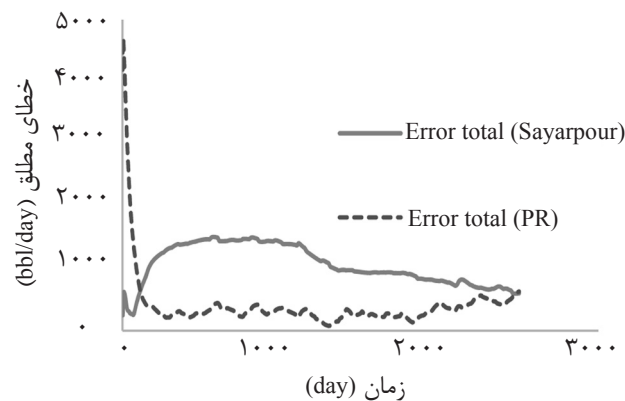
شکل ۱۱ مقایسه خطای تخمین عملکرد مربوط به کل میدان با استفاده از این دو رابطه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود خطاهای ارائه شده نزدیک به هم هستند و مدل ارائه شده در این پژوهش با مدل سیارپور، برای مخزنی که شرایط فرض‌های ساده شونده مدل ظرفیت- مقاومت را داشته باشد، تفاوت چندانی ندارد.

مدل همگن ساخته شده از لحاظ زمین‌شناسی نسبت به مدل ساخته شده توسط سیارپور دارای پیچیدگی کمتری است بنابراین انتظار می‌رفت که مدل سیارپور بتواند تخمین بهتر و دقیق‌تری برای این مدل ارائه دهد ولی این اتفاق به وقوع نپیوست؛ دلیل آن هم از کار افتادن مفهوم فیزیکی پارامتر ثابت زمانی بود، ثابت زمانی توانایی تعیین زمان تاخیر رسیدن تأثیر نرخ تزریق بر روی نرخ تولید را از دست داد. همان‌گونه که ذکر شد مدل ارائه شده در این پژوهش سعی در رفع این نقیصه برای پارامتر ثابت زمانی را داشته و تا حد زیادی موفق بوده است؛ همان‌گونه که در شکل‌های ۱۲ کاهش چشم‌گیر خطای دقیق دیده می‌شود.

شکل ۱۲ مقایسه خطای مطلق تخمین از مدل سیارپور و مدل ارائه شده برای کل میدان با مخزن همگن.



شکل ۱۱ مقایسه خطای تخمین از مدل سیارپور و مدل ارائه شده برای کل میدان.



شکل ۱۲ مقایسه خطای مطلق تخمین از مدل سیارپور و مدل ارائه شده برای کل میدان با مخزن همگن.

مراجع

- [1]. Latil M., "Enhanced oil recovery," 1st ed., Technip, Paris, France.
- [2]. Green D. W., Willhite G. P., "Enhanced oil recovery," SPE Textbook Series Vol. 6, 2nd ed., Texas, USA. 1980, 2003.
- [3]. Ertekin T., "Basic applied reservoir simulation," Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas, USA. 2001.
- [4]. Bruce W. A., "An electrical devices for analyzing oil reservoir behavior," Trans., AIME, Vol. 151, Issue 01, pp. 113-124, December 1943.
- [5]. Albertoni A. and Lake L. W., "Inferring connectivity only from well-rate fluctuations in waterfloods," SPE Reservoir Evaluation and Engineering Journal, Vol. 6, Issue 1, 2003.
- [6]. Yousef A. A., Gentil P., Jensen J. L. and Lake L. W., "A capacitance model to infer interwell connectivity from production and injection rate fluctuations," SPE 95322, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, U.S.A. 2005.
- [7]. Yousef A. A., Jensen J. L. and Lake L. W., "Analysis and interpretation of interwell connectivity from production and injection rate fluctuations using a capacitance model," SPE 99998, SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, U.S.A. 2006.
- [8]. Sayarpour M., "Development and application of capacitance-resistive models to water/CO₂ floods," PhD. Thesis in Petroleum Engineering, The University of Texas at Austin, USA. 2008.
- [9]. Weber D. B., Edgar T. F., Lake L. W., Lasdon L.S., Kawas S. and Sayarpour M., "Improvements in capacitance-resistive modeling and optimization of large scale reservoirs," Proceeding of SPE Western Regional Meeting, San Jose, CA, March 24-26, SPE Paper 121299. 2009.
- [10]. Delshad M., Bastami A. and Pourafshary P., "The use of capacitance-resistive model for estimation of fracture Distribution in hydrocarbon reservoir," SPE Technical Symposium and Exhibition, Alkhobar, Saudi Arabia, Paper No. 126076-MS. 2009.
- [11]. Nguyen A. P., "Capitance resistance modeling for primary recovery, waterflood, and water-CO₂ flood," Ph.D. Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, Texas. 2012.

