

بررسی مدل ظرفیت-مقاومت در مهندسی نفت

حجت محمدزاده^۱، میترا دادور^۲

دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر
h.mohamadzadeh@aut.ac.ir

چکیده

مدل ظرفیت-مقاومت (CRM) به عنوان روشی سریع برای شبیه‌سازی مخازن مورد توجه قرار گرفته است. این روش به مدل زمین‌شناسی نیازی ندارد و تنها توسط داده‌های تزریقی و تولیدی ساخته می‌شود. در این روش مخزن نرخ تزریق را به عنوان محرک ورودی دریافت کرده و پاسخ به این محرک از طریق چاه‌های تولیدی برای تعیین نحوه ارتباط کمی چاه‌های تزریقی و تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی متداول مخازن برای شبیه‌سازی یک میدان با چاه‌های متعدد و تاریخچه تولید طولانی به شدت زمان‌بر هستند. برتری روش ظرفیت-مقاومت ارئه مدلی سریع و پیش‌بینی رفتار این‌گونه مخازن پیچیده است. در این کار ابتدا مفهوم این مدل و معادلات آن بررسی شده است. سپس این روش در چند مدل بررسی شده و نتایج آن با واقعیت تطبیق داده شده است که حاکی از قابل اعتماد بودن پاسخ‌های این روش است.

واژه‌های کلیدی: مدل ظرفیت-مقاومت، ثابت زمانی، ضریب وزنی، تاریخچه تولید، شبیه‌سازی

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مخازن

۲- دانشیار دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۱- مقدمه

شبیه‌سازی جامع عددی مخزن در کلیه تصمیم‌گیری‌های توسعه و مدیریتی مخزن نقش مهمی دارد. اگر چه شبیه‌سازی عددی به طور گسترده استفاده می‌شود، با این حال هنوز محدودیت زیادی در کاربرد آن به خصوص برای طرح‌های با عدم اطمینان بالا وجود دارد. عواملی از قبیل زمان و منابع موجود محدود، عدم اطمینان اجتناب‌پذیر داده‌های ورودی و آماده‌سازی زمان‌بر، محاسبه و آنالیز نتایج برای کلیه سناریوهای قابل امکان، مانع از استفاده از شبیه‌سازی همه جانبه مخزن حتی با کامپیوترهای سریع امروزی می‌شود. قابلیت ارزیابی دقیق عملکرد مخزن در مدت زمان کوتاه موضوع اصلی در اتخاذ تصمیم است. در میان روش‌های شناخته‌شده مهندسی مخزن، مدل‌های پیش‌بینی‌کننده عموماً از معادلات موازنه مواد یا انرژی در هندسه ساده برای ارزیابی عملکرد مخزن و پارامترهای آن استفاده می‌کنند. به دلیل روند ساده، این مدل‌ها بسیار سریع و ارزان هستند. بنابراین، با حداقل داده‌های مخزن مانند تنها داده‌های تزریق و تولید، و با سرمایه‌گذاری کمی در محاسبات و زمان، امکان یک ارزیابی اولیه، پیش‌بینی پارامترهای مخزن و تولید در آینده قبل از اجرای شبیه‌سازی عددی وجود خواهد داشت. چون مدل ظرفیت-مقاومت تنها به داده‌های تزریق و تولید نیاز دارد، می‌تواند به طور گسترده در بسیاری از برنامه‌های میدانی استفاده شود. اطلاعات حاصل شده از اجرای این مدل برای ارزیابی شرایط عملیاتی مخزن و راندمان سیلاب‌زنی در طول تاریخچه تولید استفاده می‌گردد.

این مدل تاریخچه طولانی در صنعت نفت دارد. برای اولین بار در سال ۱۹۴۰ در صنعت نفت مورد استفاده قرار گرفت. وال و همکارانش از این روش در سال ۱۹۶۲ در عربستان سعودی برای تطبیق تاریخچه تولید و پیش‌بینی موفقیت آمیز استراتژی تزریق آب و گاز برای یکی از چهار میدان بزرگ نفتی جهان استفاده نمودند. موضوع ارتباط بین چاهی در ابتدا با هدف تعیین کمی ارتباط بین یک جفت چاه در یک پروژه تزریق آب و همچنین تأثیر چاه‌های متعدد در یک مخزن شروع شد. آلبرتونی و لیک (۲۰۰۳) ارتباط بین چاه‌ها را بر اساس یک مدل خطی با ضرایب تخمین زده شده توسط تکنیک رگرسیون چند متغیره خطی برآورد کردند. در ادامه یوسف و همکارانش (۲۰۰۶) از مدل کامل‌تری استفاده کردند. در این مدل اثرات ظرفیت به کمک مفهوم تراکم‌پذیری و مقاومت به کمک انتقال‌پذیری بود. به این ترتیب برای هر جفت از چاه‌های تولیدی دو ضریب تعیین می‌شود، یک پارامتر (ضریب وزنی) میزان ارتباط دو چاه و پارامتر دیگر (ثابت زمانی) میزان ذخیره شدن سیال بین دو چاه را به طور کمی مشخص می‌کند. لیانگ و همکارانش (۲۰۰۷) نیز با استفاده از این روش، یک آنالیز حساسیت بر روی تأثیر قیمت نفت و هزینه تزریق آب در تولید انجام داد. سیارپور و همکارانش (۲۰۰۸) روابط ریاضی برای سه حجم کنترل مختلف شامل حجم کنترلی برابر با حجم کل میدان، حجم کنترلی برابر با حجم ناحیه تخلیه برای هر چاه تولیدی، حجم کنترلی برابر با حجم ناحیه تخلیه بین هر جفت چاه تولیدی و تزریقی ارائه کردند. با داشتن حل تحلیلی این سه حالت مختلف، مدل ظرفیت-مقاومت قابلیت کاربرد در تطبیق تاریخچه و تخمین عملکرد میدان، گروهی از چاه‌ها و یا یک چاه خواهد داشت. در این مقاله شرحی از مدل ظرفیت-مقاومت ارائه می‌شود سپس معادلات آن بررسی می‌شود و در نهایت صحت مدل ظرفیت-مقاومت و کاربرد در تطبیق تاریخچه با مطالعات موردی نشان داده شده است.

۲- مدل ظرفیت-مقاومت

مدل ظرفیت-مقاومت بر اساس معادله موازنه مواد است که برای یک حجم کنترل مشخص اثرات تراکم‌پذیری کل را در نظر می‌گیرد. اگر یک شبه چاه تولیدی و یک شبه چاه تزریقی، به ترتیب، نشان دهنده کلیه چاه‌های تولیدی و تزریقی میدان باشد، (شکل ۱) یا در میدانی با تنها یک تولیدکننده و یک تزریق‌کننده، موازنه مواد برای نرخ تولیدی $q(t)$ و نرخ تزریق $i(t)$ به معادله زیر منجر می‌شود:

$$c_i V_p \frac{d\bar{p}}{dt} = i(t) - q(t)$$

(۱)

که تراکم‌پذیری کل، V_p حجم حفرات مخزن و p فشار میانگین مخزن است. بر اساس تعریف شاخص تولید J نرخ تولیدی کل در حجم مخزن، $q(t)$ ، برابر است با:

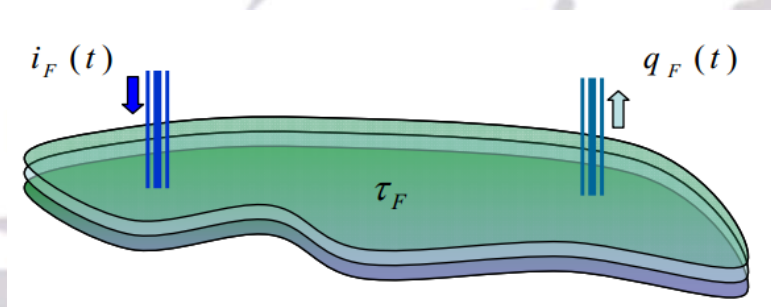
$$q(t) = J(\bar{p} - p_{wf}) \quad (۲)$$

حذف فشار میانگین از معادلات ۱ و ۲ به معادله بنیادی دیفرانسیلی برای مدل ظرفیت-مقاومت انجامید:

$$\frac{dq(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} q(t) = \frac{1}{\tau} i(t) - J \frac{dp_{wf}}{dt} \quad (۳)$$

که J ثابت فرض می‌شود و ثابت زمانی τ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau = \frac{c_i V_p}{J} \quad (۴)$$



شکل ۱- طرح نشان‌دهنده‌ی یک میدان با یک چاه تزریقی و یک چاه تولیدی

معادله (۳) یک معادله دیفرانسیلی مرتبه اول است که حل آن به صورت زیر است:

$$q(t) = q(t_0) e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}} + e^{-\frac{t}{\tau}} \int_{\xi=t_0}^{\xi=t} \frac{1}{\tau} e^{\frac{\xi}{\tau}} i(\xi) d\xi - e^{-\frac{t}{\tau}} \int_{\xi=t_0}^{\xi=t} J e^{\frac{\xi}{\tau}} \frac{dp_{wf}}{d\xi} d\xi \quad ; t > t_0 \quad (۵)$$

سیگنال خروجی، $q(t)$ ، از سه جزء در سمت راست معادله (۵) تشکیل شده است. تغییر نرخ در چاه تولیدی به ترتیب شامل تخلیه اولیه، سیگنال ورودی تزریق، و تغییر فشار ته‌چاهی در چاه تولیدی است. [۱]
 پارامتر ثابت زمانی حساسیت نرخ تولید به نرخ تزریق را نشان می‌دهد. برای یک مخزن با ناحیه تخلیه کوچک و تراکم‌پذیری کم یا شاخص تولیدی بالا، این پارامتر کوچک است. بنابراین هر گونه تغییر در نرخ تزریق روی نرخ تولید تاثیرگذار است. به عنوان مثال برای یک مخزن با تراکم‌پذیری بالا یا نفوذپذیری پایین، ثابت زمانی بزرگ خواهد بود و این بدان معنا خواهد بود که نرخ تولید با تغییرات نرخ تزریق چندان تغییر نخواهد کرد. پارامتر ضریب وزنی نیز بخشی از نرخ تزریق است که توسط چاه تولیدی دریافت می‌شود. در حقیقت مقادیر این پارامتر مشارکت هر چاه تزریقی در چاه‌های تولیدی مجاور را نشان می‌دهد. [۲]

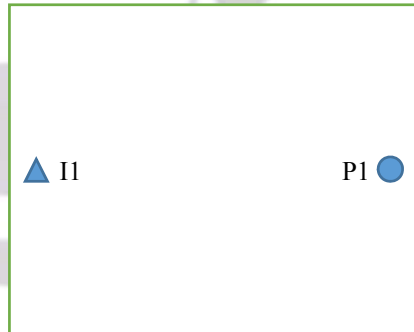
بنابراین در حالت کلی برای هر جفت چاه تزریقی و تولیدی دو پارامتر ضریب وزنی و ثابت زمانی مجهول هستند که از طریق رگرسیون جواب این معادلات دیفرانسیلی با داده‌های مربوط به نرخ‌های تزریق و تولید به ازای زمان‌های مختلف، تعیین می‌شوند. با تعیین این پارامترها که نوعی تطبیق تاریخچه محسوب می‌شود، می‌توان نرخ تولید تک تک چاه‌ها و مجموع چاه‌ها را به ازای سناریوهای مختلف تزریق به مخزن پیش‌بینی نمود و در نهایت نرخ تزریق به مخزن را به لحاظ فنی و اقتصادی بهینه کرد.

۳- مطالعات موردی

در این قسمت دو مخزن به طور خاص مورد بررسی قرار گرفته که خصوصیات و ویژگی‌های آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. اولین مطالعه موردی مربوط به یک مخزن تنها با یک جفت چاه تزریقی و تولیدی است. مطالعه موردی دوم مربوط به مخزنی کاملاً همگن متشکل از یک چاه تزریقی و چهار چاه تولیدی در اطراف آن است.

۳-۱- مطالعه موردی اول: مخزنی با یک جفت چاه تزریقی و تولیدی

در این مطالعه مخزنی با یک جفت چاه تزریقی و تولیدی در نظر گرفته شده است که همگی چاه‌ها عمودی بوده و در تمام لایه‌ها مشبک کاری شده‌اند. این مدل از ۳۱، ۳۱ و ۵ گره به ترتیب در جهات X ، Y و Z تشکیل شده است. خصوصیات مخزن در جدول ۱ آورده شده‌اند. همچنین فشارهای جریانی ته چاه‌ها در این مطالعه ثابت فرض شده است. در شکل ۲ نمایی از این مخزن نشان داده شده است.



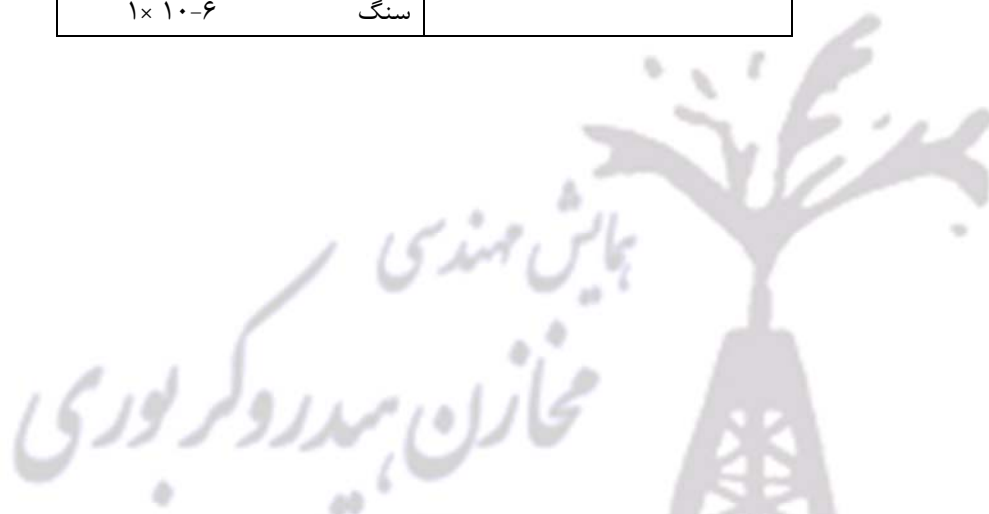
شکل ۲- شکل مربوط به مخزن مطالعه موردی اول شامل یک جفت چاه تزریقی و تولیدی

پارامتر	مقدار
تعداد گره‌ها	در جهت X ۳۱
	در جهت Y ۳۱
	در جهت Z ۵
اندازه گره‌ها فوت	در جهت X ۸۰
	در جهت Y ۸۰

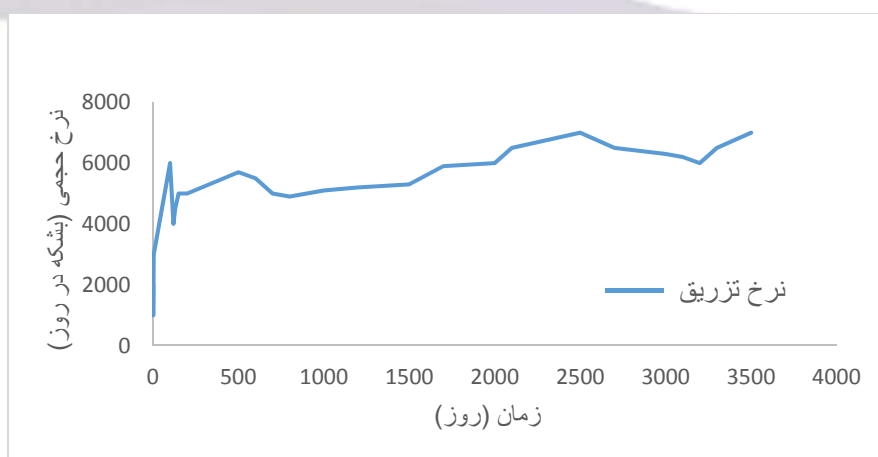
مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی
 ۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
 مجری: هم‌اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱
 www.Reservoir.ir

در جهت Z	۴۰	
تخلخل	.۱۸	سیال و مخزن برای
تراوایی، md	۵۰	
ویسکوزیته نفت، cp	۲	
ویسکوزیته آب، cp	.۵	
میزان تراکم‌پذیری،	نفت	۵× ۱۰-۶
	آب	۱× ۱۰-۶
	سنگ	۱× ۱۰-۶

جدول ۱- خصوصیات مطالعه موردی اول



هم چنین نوسانات نرخ تزریق چاه II در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- تغییرات نرخ تزریق به چاه تزریقی با گذشت زمان

با ورود نرخ‌های تولید و تزریق به مدل ظرفیت - مقاومت پارامترهای بین چاه‌ها به صورتی که در جدول ۲ نشان داده شده است بدست می‌آیند.

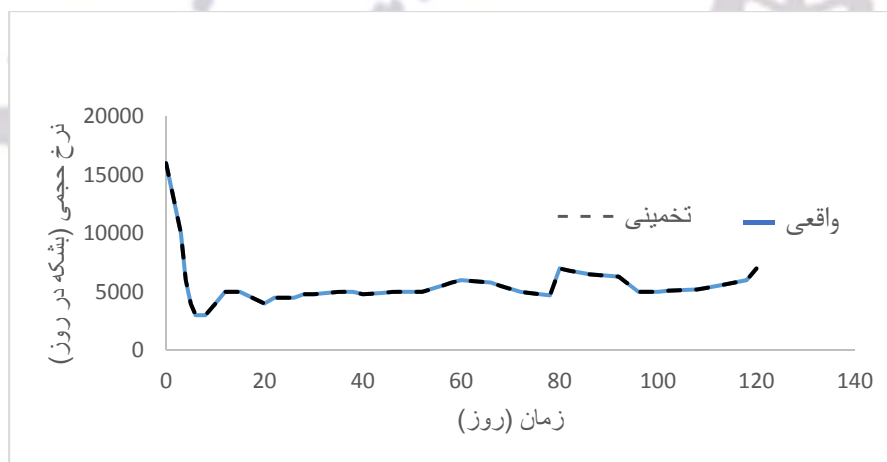
جدول ۲- پارامترهای مدل ظرفیت- مقاومت در مورد این مدل

	τ	λ	q_0	qt, correlation ratio
P1	۰,۵۹۳	۱	۱۵۶۵۷	۰,۹۷

در این حالت فقط یک جفت چاه تزریقی و تولیدی وجود دارد. ضریب وزنی باید برابر با مقدار یک شود که جدول نیز موید همین امر است. همچنین مقدار q_0 نشان دهنده‌ی اثر تولید اولیه است که پیشتر راجع به آن در فرمول بندی روش ظرفیت- مقاومت به آن اشاره کردیم. در حقیقت، این پارامتر بیانگر این مطلب است که اگر تزریق به مخزن صورت نگیرد و فشار جریانی ته چاه‌های تولیدی ثابت فرض شود، کاهش نرخ حجمی تولید به صورت یک تابع نمایی خواهد بود که پارامتر q_0 همان مقدار ثابت در این عبارت است. qt, correlation ratio نیز همبستگی میان مقادیر واقعی نرخ حجمی تولید و مقادیر تخمین زده

شده را نشان می‌دهد که در واقع نشان دهنده‌ی میزان تشابه بین تغییرات نرخ تولید حجمی تخمین زده شده با روش ظرفیت- مقاومت و روند تغییرات نرخ حجمی تولید واقعی است.

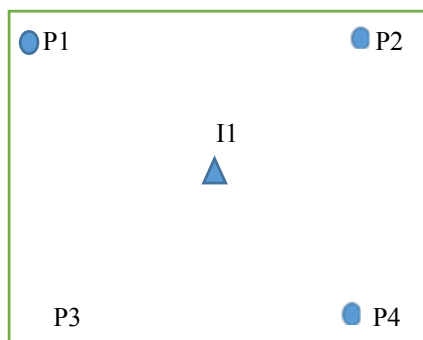
در شکل ۴ مقایسه بین نرخ تولیدی واقعی و نرخ تولیدی تخمین زده شده با استفاده از مدل ظرفیت-مقاومت نشان داده شده است که نسبت همبستگی ارائه شده در جدول ۲ مبین تطابق قابل قبول بین نرخ تولیدی تخمین زده شده و واقعی است.



شکل ۴- مقایسه نرخ حجمی تولیدی واقعی و تخمین زده شده با مدل ظرفیت-مقاومت

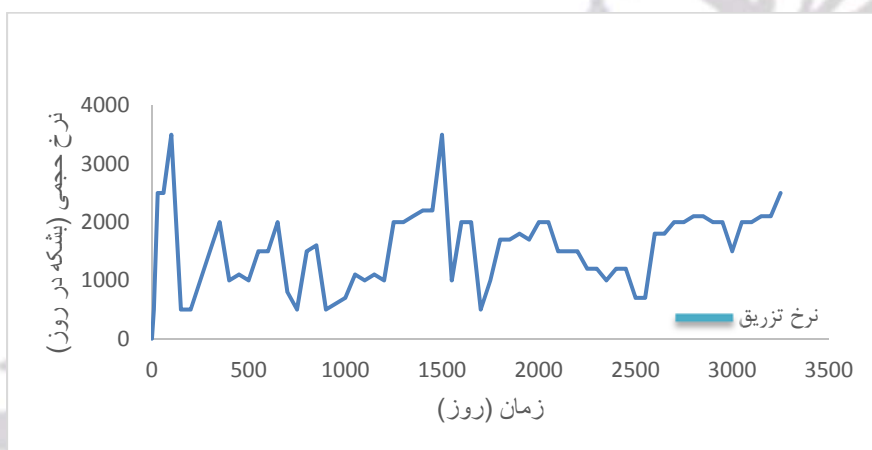
۳-۲- مطالعه موردی دوم: مخزنی با یک چاه تزریقی و چهارچاه تولیدی

در این مطالعه، مخزنی کاملاً همگن با یک چاه تزریقی و چهار چاه تولیدی در نظر گرفته شده است که همگی چاه‌ها عمودی بوده و در تمام لایه‌ها مشبک کاری شده‌اند. این مدل از ۳۱، ۳۱ و ۵ گره به ترتیب در جهات x ، y و z تشکیل شده است. خصوصیات متوسط مخزن مشابه مطالعه موردی اول (جدول ۱) است. همچنین فشارهای ته چاه‌ها در این مطالعه ثابت فرض شده است. در شکل ۵ نمایی از این مخزن نشان داده شده است.



شکل ۵. شکل مربوط به مخزن کاملاً همگن مطالعه موردی دوم شامل یک چاه تزریقی و چهار چاه تولیدی

همچنین نوسانات نرخ تزریق چاه I1 در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- تغییرات نرخ تزریق به چاه تزریقی با گذشت زمان

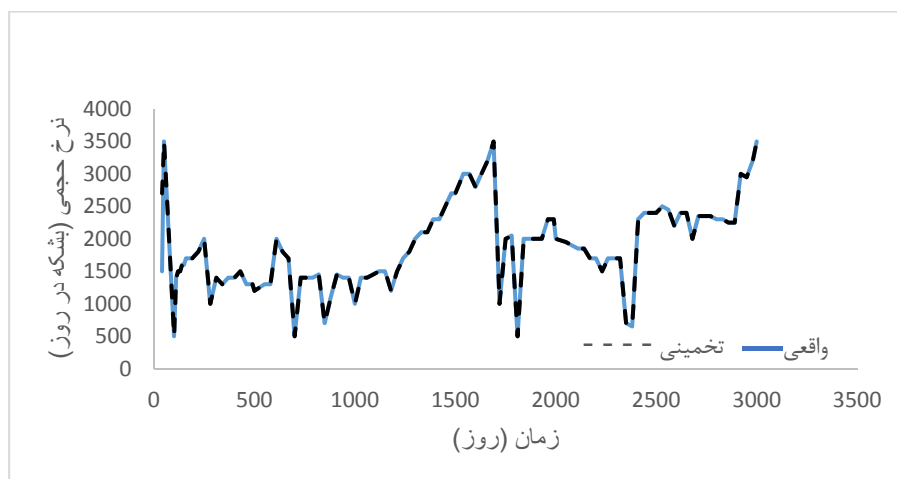
با استفاده از مدل ظرفیت-مقاومت پارامترهای بین چاه‌ها به صورتی که در جدول ۴ نشان داده شده است، به دست آمده‌اند.

جدول ۳- پارامترهای مدل در مدل ظرفیت - مقاومت

Parameter	P1	P2	P3	P4
λ	۰,۲۴	۰,۳۰	۰,۲۲	۰,۲۴
τ	۹,۱۵	۹,۷۴	۸,۸۲	۹,۱۶
q0, RB/T	۹۶۲۵۷	۹۶۲۵۷	۹۶۲۵۷	۹۶۲۵۷
qt, correlation ratio	۰,۹۹۴	۰,۹۹۶	۰,۹۹۶	۰,۹۹۴

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، در این مدل تمامی چاه‌های تولیدی در موقعیتی مشابه با چاه تزریقی قرار دارند و لذا انتظار می‌رود که مقدار ضریب وزنی برای هر چهار چاه برابر با ۰/۲۵ شود. با مراجعه به جدول مشاهده می‌کنیم که ضرایب وزنی محاسبه شده مربوط به هر جفت چاه تزریقی و تولیدی نزدیک به ۰/۲۵ می‌باشد. به عبارت دیگر، اثر تزریق به چاه تزریقی I1، روی هر چهار چاه تزریقی تقریباً به یک نسبت بوده و این ناشی از همگن بودن و حالت متقارن مخزن است.

ثابت زمانی مربوط به هر چاه تولیدی نیز دارای مقداری حدود ۹/۱۵ است. در شکل ۷ مقایسه نرخ تولیدی مجموع چاه‌ها به صورت واقعی و تخمین زده شده با استفاده از مدل ظرفیت-مقاومت نشان داده شده است.



شکل ۷- مقایسه نرخ حجمی تولید مجموع چاه‌ها بصورت واقعی و تخمین زده شده با مدل ظرفیت-مقاومت

همان‌طور که نسبت همبستگی ارائه شده در جدول ۳ و همچنین شکل ۷ نشان می‌دهند، نرخ تولیدی تخمین زده شده با نرخ تولیدی واقعی تطابق قابل قبولی نشان می‌دهند و بنابراین در این حالت نیز مدل ظرفیت-مقاومت قابلیت تخمین نرخ حجمی تولیدی از چاه‌ها (مجموع آب و نفت) را خواهد داشت.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله مدل ظرفیت-مقاومت و معادلات آن بیان شد. هم‌چنین بررسی این مدل در دو نمونه مطالعاتی برای بررسی عملکرد مخزن با نتایج واقعی صورت گرفت که نشان داد:

۱- مدل ظرفیت-مقاومت قادر به تولید نتایجی سازگار با آنچه از مدل‌های شبیه‌سازی عددی مخزن حاصل می‌شود، می‌باشد.

۲- مدل ظرفیت-مقاومت قابلیت تطبیق سریع تاریخچه تولید و پیش‌بینی عملکرد مخزن را دارد.

علائم

Ct	تراکم‌پذیری کل
I	نرخ تزریق
J	شاخص تولید
q	نرخ تولید
Vp	حجم حفرات مخزن
τ	ثابت زمانی
λ	ضریب وزنی
ξ	متغیر انتگرال‌گیری

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

مراجع

1. Sayarpour M., Zaluaga E., Kabir C.C. and Lake L.W., The Use of Capacitance – Resistance Models for Rapid Estimation of Waterflood Performance and Optimization, Paper SPE 11081 Presented at the Annual Technical Conference and Exhibition, Anohem, California USA, 2007.
2. Delshad, M., Bastami, A., Pourafshary, P., The Use of Capacitance-Resistive Model for Estimation of Fracture Distribution in the Hydrocarbon Reservoir, SPE 126076, *SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium*, Khobar, Saudi Arabia, 2009.
3. Bruce, W. A. An Electrical Devices for Analyzing Oil Reservoir Behavior, *Trans, A/ME*, p. 113-124, 1943.
4. Albertoni, A. and Lake, L.W., Inferring Interwell Connectivity Only From Well-Rate Fluctuations in Waterflood, *SPERE* 6(1): 6-16, 2003.
5. Yousef, A. A., Gentil, P., Jensen, I. 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.
6. Yousef, A. A., Jensen, I. L., and Lake, L. W. Analysis and Interpretation of Interwell Connectivity from Production and Injection Rate Fluctuations Using a Capacitance Model, SPE 99998, *SPEIDOE Symposium on Improved Oil Recovery*, Tulsa, Oklahoma, U.S.A, 2006.
7. Liang, X., Weber, B., Edgar, T.F., Lake, L.W., Sayarpour M., and Yousef, A.A, Optimization of Oil Production in a Reservoir Based on Capacitance Model of Production and Injection Rate, Paper SPE 107713 Presented at the SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, Dallas, Texas, 2007.
8. Weber, D. B., Edgar, T. F., Lake, L. W., Lasdon, L., Kawas, S., and Sayarpour, M. Improvements in Capacitance Resistive Modeling and Optimization of Large Scale Reservoirs, SPE 121299, *SPE Western Regional Meeting*, San Jose California, U.S.A, 2009.
9. Sayarpour, M., Kabir, C. S., and Lake, L. W. Field Applications of Capacitance-Resistive Models in Waterfloods, SPE 114983, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Denver, Colorado, U.S.A, 2008.