

## حساسیت سنجی مدل ظرفیت-مقاومت نسبت به درجه ناهمسانگردی مخزن نفتی حین تزریق آب

سید احسان اشراقی<sup>\*</sup>، محمدرضا رسایی، پیمان پورافشاری، امیرسالار معصومی • انستیتو مهندسی نفت دانشگاه تهران

### چکیده

آینده یک مخزن و سیاستی که باید مهندسان برای تولید از آن استفاده کنند، مهمترین مسئله‌ای است که باید به آن توجه کرد. در همین راستا، پیش‌بینی آینده تولید برای سناریوهای مختلف و پیدا کردن بهترین سناریوی ممکن از لحاظ عملیاتی و اقتصادی، یکی از مهم‌ترین زمینه‌ها در ازدیاد برداشت از مخازن است. بهینه‌سازی تزریق و پیش‌بینی تولید با استفاده از روش‌های ازدیاد برداشت موضوعی است که علاوه بر اهمیت فنی، جهت تولید صیانتی از مخازن نفتی کشور، در ارزیابی‌های اقتصادی نیز مورد توجه می‌باشد. با استفاده از روش سریع "ظرفیت-مقاومت"<sup>۱</sup> که بر اساس موازنه جرمی بین ورودی و خروجی یک حجم کنترلی مشخص عمل کرده و تأثیر تغییرات دبی در چاه‌های تزریقی بر روی یک یا چند چاه تولیدی را مورد بررسی قرار می‌دهد، می‌توان به اهداف شبیه‌سازی یک مخزن که همان تخمین عملکرد مخزن در روش‌های ازدیاد برداشت است، دست یافت. چون این روش فقط به داده‌های دبی تزریقی و تولیدی نیاز دارد، لذا نسبت به شبیه‌سازهای عددی مانند CMG و ECLIPSE سریع‌تر بوده و از کاربردهای میدانی فراوانی برخوردار است. در این پژوهش با بهره‌گیری از مدل‌های مخزنی همگن و ناهمگن، به بررسی نحوه تغییرات ثابت زمانی در مدل ظرفیت-مقاومت با تغییرات درجه ناهمسانگردی مخزن، تغییر ضخامت لایه‌ها و در نهایت، ایجاد نوسان در داده‌های تولید با بستن چاه تولیدی در فواصل زمانی مختلف پرداخته شده است. بر طبق نتایج مدل ظرفیت-مقاومت و با تعریف یک پارامتر جدید، مناسب‌ترین شرایط تولید در مخزن ضخیم همگن با ناهمسانگردی ۰/۵ به دست آمد. همچنین، با تحلیل ثوابت زمانی می‌توان به این نتیجه رسید که این پارامتر از قاعده خاصی پیروی نکرده و برای هر مخزن، مقدار ایده‌آل خود را داراست.

### اطلاعات مقاله

\* دریافت:

۱۳۹۳/۱۲/۵

\* ارسال برای داوری:

۱۳۹۳/۱۲/۶

\* پذیرش:

۱۳۹۴/۵/۳

### واژگان کلیدی

مدل ظرفیت-مقاومت  
تزریق آب  
درجه ناهمسانگردی  
مخزن همگن و ناهمگن

\*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (eshraghi.ipe@ut.ac.ir)

کردن با چنین نرم افزارهایی که به اصطلاح سلول-مبنا<sup>۷</sup> بوده و محاسبات زیادی را شامل می شود، نیازمند تسلط کافی بوده که خود دلیل دیگری بر نیاز به نرم افزارهای ساده شبیه ساز می باشد.

با استفاده از یک روش سریع که ظرفیت-مقاومت نامیده می شود، می توان به اهداف مورد نظر از شبیه سازی یک مخزن که همان تخمین عملکرد مخزن در روش های ازدیاد برداشت است، دست یافت. این روش بر اساس موازنه ی جرمی بین ورودی و خروجی یک حجم کنترلی مشخص عمل می کند. اساس عملکرد این روش دریافت تغییرات دبی در چاه های تزریقی به عنوان ورودی و بررسی تأثیر آن در چاه های تولیدی به عنوان خروجی می باشد. این روش دو پارامتر اصلی ثابت زمانی<sup>۸</sup> و ضریب وزنی<sup>۹</sup> ارتباط چاه ها<sup>۹</sup> را دارد که نقش حیاتی در شبیه سازی مخزن ایفا می کنند. بر اساس مفاهیم فیزیکی سیستم کنترل خطی درجه-۱، ثابت زمانی بیان می کند که تغییر در ورودی چقدر زمان می خواهد تا تأثیر خود را بر روی خروجی نشان دهد. ضریب وزنی هم، اثر نسبی هر چاه تزریقی روی چاه های تولیدی مجاورش را نشان می دهد.

با استفاده از این روش می توان ضمن تطبیق تاریخچه نرخ تولید مخزن به کمک پارامترهایی<sup>۱۰</sup> که در این مدل برای هر جفت چاه تزریقی و تولیدی تعریف می شود، عملکرد تزریق را برای زمان آینده نیز پیش بینی نمود. علاوه بر این، می توان با تعریف یک تابع هدف، از لحاظ اقتصادی تولید مخزن را مطالعه کرد و یا در مخازن شکافدار به تعیین محل شکاف [2] و تعیین تراوایی ها پرداخت. اخیراً عده ای از پژوهشگران در مخازن لایه ای به بهینه سازی شرایط تزریق آب به کمک CRM پرداخته اند. به این منظور آن ها داده های چاه های تزریقی و تولیدی را به همراه داده های ابزارهای نمودارگیری

با توجه به منابع عظیم هیدروکربوری در کشور و ارزش آوری این منابع گران بها و نیاز روزافزون انرژی در جهان، لازم است بهره برداری از آن ها با استفاده از تکنولوژی روز و با بهره گیری از شبیه سازهای مناسب جهت پیش بینی عملکرد مخزن صورت گیرد، تا بتوان به طور بهینه از این مخازن برداشت کرد و علاوه بر این، در صورت نیاز بتوان با انجام اقدامات پیش گیرانه، از کاهش میزان تولید جلوگیری نمود.

روش های فعلی برای شبیه سازی مخازن دارای مشکلات متعددی هستند که مهم ترین این مشکلات عبارتند از:

۱. شبیه سازهای موجود، نیازمند اطلاعات زیادی برای انجام محاسبات هستند که ممکن است این اطلاعات با تمامی جزئیات مورد نیاز، در دسترس نباشد.

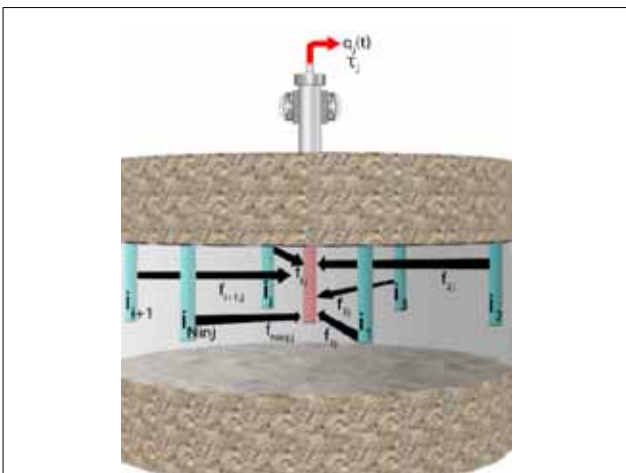
۲. شبیه سازهای موجود با توجه به نحوه کارکرد و حل همزمان معادلات برای تمام گرہ ها، بسیار کند عمل می کنند و به زمان زیادی برای انجام محاسبات نیاز دارند. کاهش تعداد گرہ ها، اگرچه سرعت محاسبات را بالاتر می برد، اما از دقت نتایج به میزان قابل توجهی کم می کند.

۳. کار کردن با نرم افزارهای موجود نیازمند آشنایی و تسلط بر آن هاست و استفاده از آن ها نیازمند مهندسان متخصص و متبحر بوده و دارای پیچیدگی های فراوان است.

علاوه بر مسائل فوق، به دلیل عدم قطعیت ذاتی در داده های ورودی، سناریوهای مختلفی که مدل مخزن (تاریخچه تولید)<sup>۱۱</sup> را نقض نکند باید در نظر گرفت تا به طور دقیق و کامل بتوان تأثیر عدم قطعیت داده های ورودی را روی تابع مورد نظر اندازه گیری نمود.

روش های مرسوم برای بهره برداری از مخازن نفتی که تا به حال استفاده می شدند ترکیبی از علم پتروفیزیک<sup>۴</sup>، ژئوفیزیک<sup>۵</sup>، ترمودینامیک<sup>۶</sup> و همچنین فاکتورهای اقتصادی بوده است [۱].

شبیه سازهای موجود با صرف وقت بسیار زیاد به حل و بهینه سازی تولید می پردازند. ارزش زمان و نیاز به مدیریت سریع و بهینه در زمینه تولید نفت موجب حرکت در مسیر ایجاد شبیه سازهایی شده است که علاوه بر هزینه زمانی کم، توانایی بهینه سازی مطلوب را نیز دارند. همچنین، مطالعه دقیق عوامل تأثیرگذار بر تزریق آب به عنوان یکی از روش های افزایش برداشت از مخازن نفتی عامل کلیدی در این زمینه محسوب می شود. اطلاع از شرایط مخزن به عنوان بستری که سیال از آن تولید می شود نیز ضروری است. دخالت پارامترهای متعدد که توسط محاسبات بسیار زیاد به نتیجه مورد نیاز برسد، بدون شک خطای زیادی را به همراه خواهد داشت. لذا ایجاد مدلی که بتواند علاوه بر زمان کم با انجام محاسبات کمتر به نتیجه مطلوب برسد، خطای کمتری داشته و قابل اعتمادتر است. به علاوه، کار

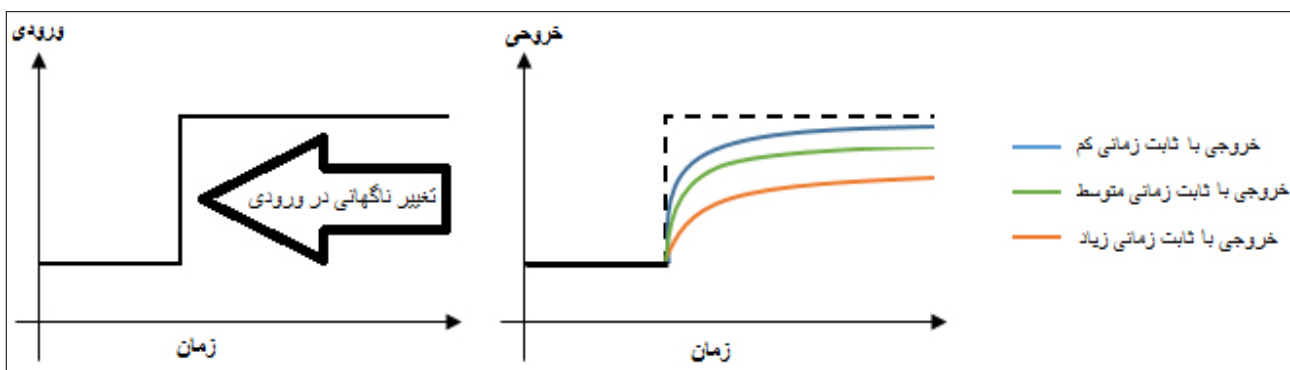


۱ | شماتیک چاه تولیدی، فضای ریزش آن، چاه های تزریقی و پارامترهای مربوط به روش CRM



یک‌ساله کور<sup>۱۴</sup> برای صحت‌سنجی مدل خود استفاده کردند [6]. اخیراً، محققان دانشگاه آستین<sup>۱۵</sup> توانستند با در نظر گرفتن توزیع اشباع در مخزن، حضور گاز را هم در معادلات دخیل سازند. در نتیجه، به علت محاسبه جریان برای کل سیال و نفت به‌طور جداگانه، میزان خطا به‌طور چشمگیری کاهش پیدا کرد و کاربرد میدانی این روش وسیع‌تر از گذشته شد [7]. کاویانی و همکاران مدلی به‌وجود آوردند که حتی اگر فشارهای ته‌چاهی و تعداد چاه تولیدی معلوم نباشند، قادر به شبیه‌سازی است. آن‌ها مدل‌های ظرفیتی جزء به جزء و ظرفیتی جبرانی را معرفی نمودند تا بتوانند شرایط مذکور را تحلیل و ضرایب ارتباط بین چاهی درستی را پیش‌بینی نمایند [8]. در پژوهشی از کاویانی و همکاران، پیشنهاد شد یک آنالیز حساسیت قبل از هر شبیه‌سازی انجام شود. علاوه بر این، آن‌ها دو پارامتر C و L را معرفی کردند که عملکرد CRM را کنترل می‌کنند. بر طبق این یافته‌ها، کاربران می‌توانند با وجود نوسان در داده‌ها با اطمینان بیشتری تصمیم بگیرند و درک بهتری نسبت به تغییرات و تأثیرات آن پیدا کنند [9]. در ادامه، مورنو و لیک با طراحی یک سیگنال ورودی برای کاهش خطایی که بر اثر نوسان تولید به‌وجود می‌آید، توانستند ارتباط چاه‌ها را دقیق‌تر به‌دست آورند. آن‌ها نتیجه گرفتند که سیگنال‌های ثابت قسمت‌بندی شده می‌تواند در صورت تزریق کم، محاسبات را بهینه کنند [10]. سروش و همکاران با طراحی مدلی به نام مدل مقاومتی جبرانی چندچاهی (MCCM) که بر اساس اصول جمع آثار زمانی و مکانی طرح‌ریزی شده است، توانستند تغییرات خاصی که در مدل رخ می‌دهد (مانند ضریب پوسته، تعداد چاه‌های تولیدی و تعداد تولیدی‌های فعال که ممکن است بسته یا نیمه بسته باشند) را درک کنند و نهایتاً نتیجه قابل اعتمادتری به‌دست آورند [11]. سائو و همکاران مدل CRM را با مدل دو فازي جریان تلفیق<sup>۱۶</sup> کردند تا بتوانند به نتایجی بر اساس موازنه جرمی نفت دست پیدا کنند نه موازنه جرمی کل. این مدل تغییرات اشباع را در نظر گرفته و مخصوصاً وقتی برش آبی کم باشد، نتیجه دقیقی را حاصل خواهد کرد [12]. اخیراً

تولید<sup>۱۱</sup> در روش CRM استفاده کرده‌اند. آن‌ها مطالعات خود را در یک مخزن فرضی با یک مدل جزء جبرانی انجام داده‌اند. این گروه، در نهایت، مطالعات حاصل از CRM را به کمک الگوریتم ژنتیک حل کرده و نتایج حاصل را با نتایج حاصل از شبیه‌سازهای تجاری مقایسه کرده و نشان دادند که دقت خوبی در نتایج به‌دست آمده است. همچنین، با بهبود بخشیدن مدل به یک مدل واقعی، بهبود بیشتری در نتایج به‌دست آورده‌اند. [1]. مورنو<sup>۱۲</sup> برای ایجاد یک مدل جدید، به ترکیب معادلات CRM با یک مدل دینامیک ساده پرداخته است که تغییر ارتباطات سیال را در زمان در نظر می‌گیرد. در نتیجه، در مخازن نفتی با توجه به ارتباط چاه‌ها با هم، توانسته نتایج قابل اعتمادتری به‌دست آورد. همچنین، وی با مطالعه یک مخزن لایه‌ای توانست با توجه به ارتباط بین لایه‌ها نتایج قابل قبول‌تری نسبت به مطالعات گذشته ارائه نماید [3]. یک گروه تحقیقاتی به بهینه‌سازی تولید در چاه‌های سکوه‌ای دریایی پرداخته است. در این شبیه‌سازی، مشکلات عملیاتی تولید در این چاه‌ها و شرایط تولید در نظر گرفته شده است. درجه آزادی معادلات، محدودیت‌های تولید و نحوه تولید متفاوت در این چاه‌ها از نظر معادلات تولید عواملی است که در این محاسبات تأثیرگذار بوده است. در نهایت، با مطالعه بر روی تعدادی از میدین، صحت‌سنجی انجام شده و در نتیجه، توانستند تولید را تا ۳ درصد افزایش دهند [4]. در تحقیقی دیگر بر روی یک مخزن ساختگی با ۵ حلقه چاه تزریقی و ۴ حلقه چاه تولیدی، با توجه به رابطه متقابل چاه‌ها با یکدیگر، به مطالعه نحوه‌ی این روابط با تغییر دبی ورودی و خروجی پرداخته شده است. به‌طور کلی تغییرات درون چاه‌ها و تغییر دبی‌های آن‌ها تا مدت طولانی تأثیر خود را خواهد داشت [5]. محققان در پژوهشی دیگر توانستند با ترکیب آنالیزهای منحنی کاهش<sup>۱۳</sup> و ظرفیت-مقاومت، تولید اولیه چاه‌ها را نیز در محاسبات دخیل سازند. آن‌ها با انجام این محاسبات برای تزریق گاز به مخزن کرناتهای شکافدار توانستند توانایی مدل جدید خود را در انجام محاسبات نشان دهند. آن‌ها همچنین از داده‌های آزمایش



شکل ۲ | مفهوم ثابت زمانی در یک سیستم کنترل خطی درجه-۱

پارامترها و نتایج روش ظرفیت-مقاومت بررسی گردیده است.

### ۱- ریاضیات مدل ظرفیت-مقاومت

معادلات اساسی روش ظرفیت-مقاومت و چگونگی رسیدن به معادلات مورد استفاده بر اساس روش موازنه جرمی در این بخش ارائه می شوند:

$$\{ \text{Mass of } j \text{ in c.v at } t + \Delta t \} - \{ \text{Mass of } j \text{ in c.v at } t \} = \{ \text{Mass of } j \text{ entering during } \Delta t \} - \{ \text{Mass of } j \text{ leaving during } \Delta t \} \quad (1)$$

$$\frac{V_p C_t d\bar{P}}{B_o dt} = -\bar{q}_{osc} \quad (2)$$

$$V_p C_t \frac{d\bar{P}}{dt} = i(t) - q(t) \quad (3)$$

$$q = j(\bar{P} - P_{wf}) \quad (4)$$

برای حجم کنترلی یک چاه تولیدی، که در شکل ۱- نشان داده شده است، می توان معادلات حاکم بر CRMP که بیانگر موازنه حجمی در فضای متخلخل موثر چاه می باشد را به دست آورد.

معادلات دیفرانسیلی حاکم بر این مدل عبارتند از [6]:

$$\frac{dq_j(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} q_j(t) = \frac{1}{\tau_j} \sum_{i=1}^{N_{inj}} f_{ij} i_i(t) - J_j \frac{dP_{wf,j}}{dt} \quad (5)$$

و  $\tau_j$  همان پارامتر ثابت زمانی برای چاه تولیدی است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\tau_j = \left( \frac{C_t V_p}{J} \right)_j \quad (6)$$

در معادله فوق،  $V_p$  فضای متخلخل،  $C_t$  تراکم پذیری کل و  $J$  شاخص بهره‌وری بوده که همه مربوط به فضای ریزش چاه تولیدی زمی باشد. شکل ۲- مفهوم این پارامتر را به خوبی نشان می دهد. در واقع، ثابت زمانی نشان می دهد از لحظه تزریق آب به مخزن چه مقدار زمان می برد تا اثر آن در چاه تولیدی مشاهده شود.

$f_{ij}$  یا همان ارتباط پذیری جفت چاه‌ها، میزان دبی پایداری که از سمت چاه تولیدی  $i$  به سمت تولیدی  $j$  می رود را بیان می کند و به روش زیر محاسبه می گردد:

$$f_{ij} = \frac{q_{ij}(t)}{i_i(t)} \quad | \quad f_{ij} \geq 0, \quad \sum_{i=1}^{N_{inj}} f_{ij} \leq 1 \quad (7)$$

طبق شرایط بیان شده در معادله فوق باید مجموع ضرایب وزنی برای هر چاه تزریقی کمتر یا مساوی یک بوده و مقادیر آن مثبت باشند؛ این محدودیت‌ها باید برای حل معادله لحاظ شوند. حل معادله-۵ با در نظر گرفتن تغییرات فشار ته چاهی به شکل زیر خواهد بود:

تائو و برایانت از مدل، CRM برای شبیه‌سازی ذخیره‌سازی کربن دی‌اکسید استفاده کردند. آن‌ها از این مدل برای بهینه‌سازی دبی‌های تولید و تزریق بهره بردند و توانستند حجم تزریقی و ذخیره گاز را به کمک این مدل افزایش دهند [13].

در این مطالعه، با در نظر گرفتن یک مخزن ساختگی با الگوی چاه پنج نقطه<sup>۱۷</sup> در دو حالت همگن و ناهمگن به بررسی اثر ناهمسانگردی مخزن بر روی عملکرد روش ظرفیت-مقاومت در ضخامت‌های مختلف مخزن پرداخته شده است. در هر دو مخزن همگن و ناهمگن، عملکرد این روش در دو ناهمسانگردی ۰/۱ و ۰/۵ بررسی شده است. به علاوه، با ایجاد نوسانات شدید در داده‌های ورودی، نحوه تغییرات

۱ | ابعاد مدل مخزنی استفاده شده در شبیه سازی

تخلخل مخزن همگن (درصد)	تراوایی مخزن همگن (میلی داریسی)	اندازه گرید فوت <sup>(۱)</sup> تعداد گرید <sup>(۲)</sup>	جهت
۱۵	۳۰۰	۱۵۰	X
۱۵	۳۰۰	۱۵۰	Y
۱۵	۱۵۰ و ۳۰	۵۰	Z(ناهمسانگردی=۰,۱ و ۰,۵)

۲ | مقادیر اولیه در شبیه‌سازی به روش ظرفیت-مقاومت

دبی اولیه	ضرایب وزنی (بدون واحد)	ثابت زمانی (بدون واحد)
(بشکه در روز) ۳۰۰	۱	۱۰

۳ | نتایج شبیه‌ساز CRM

EMPR	هزینه (روز/بشکه)	$f_{4j}$	$f_{3j}$	$f_{2j}$	$f_{1j}$	$\tau_j$	نوع مخزن
نتایج شبیه‌سازی بدون ایجاد نوسان در داده‌های تولید							
۰,۰۲۷	۸۱۰,۸۶	۱	۱	۱	۱	۲۲۴,۴۹	مخزن همگن با ناهمسانگردی ۰/۱
۰,۰۲۵	۸۰۴,۴۴	۱	۱	۱	۱	۲۰۹,۹۷	مخزن همگن با ناهمسانگردی ۰/۵
۰,۰۳۶	۲۰۳,۴۳	۱	۱	۱	۱	۹۸۹,۹۶	مخزن ناهمگن با ناهمسانگردی ۰/۱
۰,۰۳۳	۱۹۴,۱۵	۰,۹	۰,۹۴	۰,۹۴	۱	۷۷۶,۶۲	مخزن ناهمگن با ناهمسانگردی ۰/۵
نتایج شبیه‌سازی با افزایش ضخامت لایه‌ها							
۰,۰۲۱	۱۲۰۶,۹۹	۱	۱	۱	۱	۱۹۰,۷۰	مخزن همگن با ناهمسانگردی ۰/۵
۰,۰۱۴	۸۸۶,۱۹	۱	۱	۱	۱	۱۸۰,۸۵	مخزن همگن با ناهمسانگردی ۰/۵
۰,۰۴۶	۵۸۸,۱۹	۱	۱	۱	۱	۳۹,۶۸	مخزن ناهمگن با ناهمسانگردی ۰/۱
۰,۰۳۸	۴۵۴,۷۱	۱	۱	۱	۱	۱۵۰۰	مخزن ناهمگن با ناهمسانگردی ۰/۵
نتایج شبیه‌سازی با افزایش ضخامت لایه‌ها و ایجاد نوسان در داده‌های تولید							
۰,۱۰۱	۶۲۵۹,۲۶	۱	۱	۱	۱	۱۴۹,۳۶	مخزن همگن با ناهمسانگردی ۰/۵
۰,۰۹۳	۶۰۷۷,۵۳	۱	۱	۱	۱	۱۵۲,۵۴	مخزن همگن با ناهمسانگردی ۰/۵
۰,۰۵۱	۷۳۹,۱۸	۱	۱	۱	۱	۵	مخزن ناهمگن با ناهمسانگردی ۰/۱
۰,۰۹۹	۱۴۳۹,۳۹	۱	۱	۱	۱	۵	مخزن ناهمگن با ناهمسانگردی ۰/۵



علاوه بر اینکه نقشی کلیدی در مطالعه دقیق مخزن به کمک این روش ایفا می کند، در تصمیم گیری دقیق و درست نیز کمک شایانی خواهد کرد.

در این مطالعه ابتدا به کمک شبیه ساز Eclipse مدل مخزن فرضی ساخته شده که هندسه مخزن و موقعیت چاهها در شکل ۳- نمایش داده شده است. سپس، با استفاده از داده های خروجی این نرم افزار در دو حالت همگن و ناهمگن و در دو ضخامت مختلف مخزن، به بررسی نحوه تغییرات پارامترهای مدل شبیه ساز ظرفیت- مقاومت نسبت به تغییر ناهمسانگردی مخزن پرداخته شده است. با توجه به اینکه اثر ناهمسانگردی تنها در صورت تأثیر جریان عمودی در تولید قابل بررسی است، از مجموع ۱۵ لایه ی موجود در مخزن، چاه تولیدی در ۷ لایه ی اول و چاه های تزریقی در لایه های ۹ تا ۱۵ تکمیل شده اند. مشخصات استاتیک<sup>۱۸</sup> مخازن استفاده شده در جدول- ۱ آمده است. الگوی تراوایی در مخازن ناهمگن نیز در شکل- ۴ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل- ۳ مشخص شده است، در مدل مخزنی مورد استفاده، چهار حلقه چاه تزریقی و ۱ حلقه چاه تولیدی قرار داده شده است. در تمامی شبیه سازی ها، چه با نرم افزار Eclipse و چه به روش CRM، مدل برای ۱۰۰۰ روز اجرا شده است. مقادیر حدس اولیه روش CRM برای تمامی مدل های مورد مطالعه در این پژوهش به شرح ارائه شده در جدول- ۲ می باشد. تغییر این مقادیر در زمان پردازش شبیه ساز تأثیر گذاشته و نتیجه نهایی تا حدود بسیار زیادی

$$q(t) = q(t_0)e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_j}} + e^{-\frac{t}{\tau_j}} \int_{\varepsilon=t_0}^{\varepsilon=t} e^{\frac{\varepsilon}{\tau_j}} \frac{1}{\tau_j} \sum_{i=1}^{N_{inj}} f_{ij} i_i(\varepsilon) d\varepsilon - e^{-\frac{t}{\tau_j}} \int_{\varepsilon=t_0}^{\varepsilon=t} e^{\frac{\varepsilon}{\tau_j}} J_j \frac{dP_{wf,j}}{d\varepsilon} d\varepsilon \quad (8)$$

با انتگرال گیری جزء به جزء از معادله- ۸ معادله به شکل زیر تبدیل خواهد شد:

$$q(t) = q(t_0)e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_j}} + \sum_{i=1}^{N_{inj}} \left[ f_{ij} \left( i_i(t) - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_j}} i_i(t_0) \right) \right] - e^{-\frac{t}{\tau_j}} \int_{\varepsilon=t_0}^{\varepsilon=t} e^{\frac{\varepsilon}{\tau_j}} \left( \sum_{i=1}^{N_{inj}} f_{ij} \frac{d i_i(\varepsilon)}{d\varepsilon} + J_j \frac{d P_{wf,j}}{d\varepsilon} \right) d\varepsilon \quad (9)$$

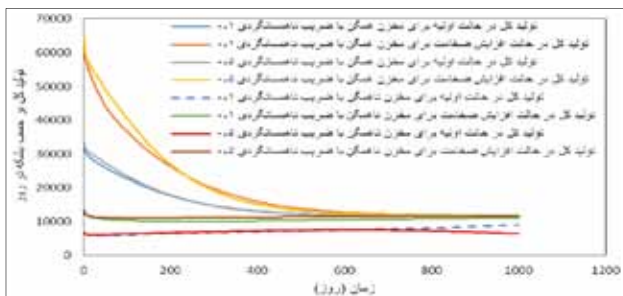
اگر شاخص بهره دهی و دبی چاه های تزریقی ثابت فرض گردد به طوری که  $t_1(t) = I_1$  و افت فشار ته چاهی برای چاه تولیدی ز به صورت خطی در نظر گرفته شود، با انتگرال گیری از معادله- ۹ از زمان  $t_0$  تا  $t$  داریم:

$$q(t) = q(t_0)e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_j}} + \left( 1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_j}} \right) \left[ \sum_{i=1}^{N_{inj}} [f_{ij} I_i] - J_j \tau_j \frac{\Delta P_{wf,j}}{\Delta t} \right] \quad (10)$$

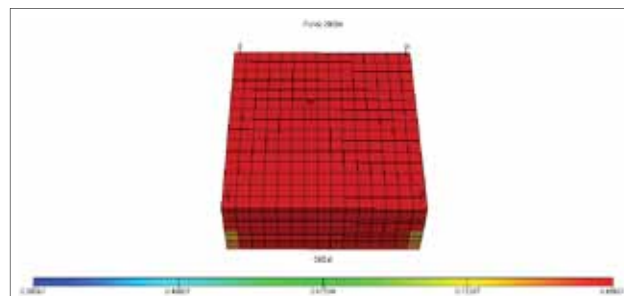
این معادله اساس تمام محاسبات انجام شده در این پژوهش می باشد.

## ۲- تعریف مسأله و شبیه سازی

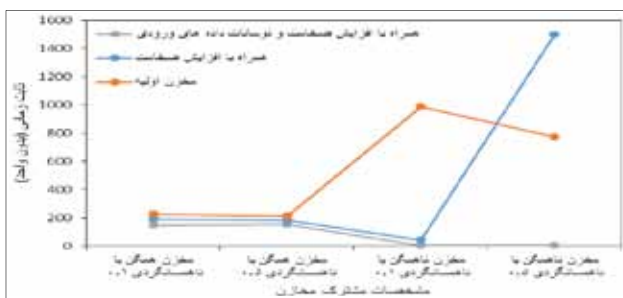
آگاهی دقیق از نحوه تغییرات پارامترهای مدل ظرفیت-مقاومت



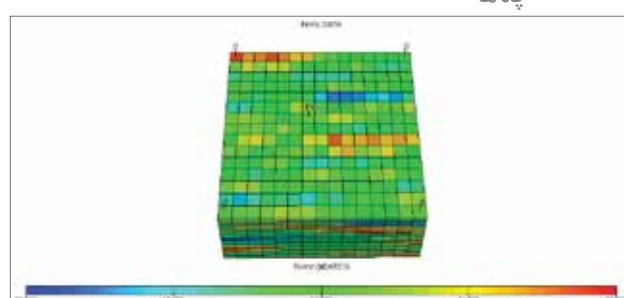
شکل ۵ | نمودار تولید مخازن مورد مطالعه



شکل ۶ | شکل کلی مخزن مورد مطالعه قبل از تولید و نمایش موقعیت چاه ها



شکل ۷ | مقایسه ثوابت زمانی در مخازن مطالعه شده



شکل ۸ | الگوی تراوایی مخازن ناهمگن در جهت X

مستقل از حدس اولیه خواهد بود. باید به این نکته توجه کرد که تعریف حدس اولیه در نواحی مرزی هر پارامتر امکان خطا را بالا می برد و بهتر است از انتخاب چنین مقادیری در شبیه سازی پرهیز گردد.

#### ۲-۱- مقایسه نتایج شبیه سازی در شرایط مختلف مطالعه

شبیه سازی مخزن در شرایط مختلف صورت گرفته و نتایج در جدول ۳ ارائه گردیده است. در قسمت اول، مخزن در دو حالت همگن و ناهمگن با ناهمسانگردی های ۰/۱ و ۰/۵ شبیه سازی شده است. به منظور بررسی تأثیر ضخامت لایه ها، ضخامت آن ها از مقدار ۵۰ به ۱۰۰ افزایش یافت که تأثیر قابل توجهی بر روی نتایج شبیه سازی بر جای گذاشت. در انتها با ایجاد نوسان در داده های دبی تولیدی، مجدداً تغییرات نتایج شبیه سازی نیز بررسی شد. برای قضاوت در نتایج شبیه سازی، به صورت مجزا پارامتر جدیدی به نام EMPR<sup>۱۱</sup> به کمک معادله ۱۱ تعریف می شود که بیانگر نسبت میزان خطای تولیدی به میزان تولید روزانه متوسط در حالت های مورد مطالعه است. بر طبق این معادله، کمترین نسبت، بهترین حالت را از لحاظ تولید نشان خواهد داد.

$$EMPR = \frac{\text{خطای تولید در کل}}{\text{متوسط تولید روزانه}} \quad (11)$$

به منظور آگاهی از شرایط تولید در حالت های مختلف شبیه سازی، شکل ۵- دبی تولیدی نفت را در تمامی سناریوها نشان می دهد. لازم به ذکر است در شبیه سازی مخزن، شرایط چاه تولیدی بر اساس کنترل فشار ته چاهی با مقدار ۲۵۰۰ پام<sup>۲۲</sup> و چاه های تزریقی نیز با دبی ثابت ۲۵۰۰ بشکه در روز تنظیم شده اند.

همانطور که شکل فوق نشان می دهد تولید مخزن همگن در تمامی شرایط از مخزن ناهمگن بیشتر است. طبق شرایط تعیین شده برای تولید چاه ها که به صورت فشار ثابت می باشد، دبی چاه ها با گذشت زمان تغییر می کند. همچنین، بزرگ تر کردن مخزن سبب بیش تر شدن دبی تولیدی می گردد.

بر طبق این جدول، بالا بودن همگنی، ناهمسانگردی و اندازه یک مخزن بهترین شرایط را نتیجه خواهد داد؛ یعنی میزان پارامتر EMPR کاهش می یابد. این در حالی است که مثلاً افزایش ضخامت لایه ها موجب افزایش خطای مطلق در تخمین تولید شده، اما خطای نسبی بر اساس EMPR کاهش یافته است. همچنین، ایجاد نوسان در داده ها مثلاً بستن چاه یا تغییر تعداد چاه ها خطای بسیار زیادی به مدل وارد می کند، به طوری که نسبت های EMPR برای داده های همراه با نوسان افزایش زیادی می یابد.

به منظور بررسی نحوه تغییرات ثابت زمانی، مقدار این پارامتر در دوازده حالت فوق محاسبه گردید (شکل ۶-).

طبق نتایج حاصل از نمودار، پارامتر ثابت زمانی در مخزن همگن در تمامی حالات تغییرات خاصی نداشته و قابل پیش بینی است. این در حالی است که در مخزن ناهمگن رفتار غیر قابل پیش بینی از خود نشان می دهد؛ به طوری که افزایش ضخامت مخزن، روند تغییرات این پارامتر را به کلی عوض خواهد کرد. به همین دلیل، ثابت زمانی بهینه را تنها با در نظر گرفتن میزان تولید متوسط و خطای همراه با تولید می توان تعیین کرد. ایجاد نوسان در داده های تولیدی با بستن چاه تولیدی در فواصل روزهای ۳۷۰ تا ۴۲۰، ۵۰۰ تا ۵۵۰ و ۹۴۰ تا ۹۶۰ صورت گرفته است.

#### ۲-۲- بحث در نتایج شبیه سازی

هدف از شبیه سازی به روش CRM در حقیقت دستیابی به نتایج قابل اعتماد در زمان کمتر و آگاهی از شرایط مخزن به منظور تصمیم گیری برای آینده آن است. با این ابزار، مهندسان می توانند با کمترین حجم اطلاعات و بدون پردازش قبلی داده های تولیدی و تزریقی و دخالت سایر پارامترهای استاتیکی و دینامیک مخزن، برنامه مناسبی برای تولید و تزریق به دست آورند.

در این مطالعه، با بررسی شرایط مختلف مخزن میزان دقت و کارآمدی مدل ظرفیت-مقاومت بررسی شده است. زیاد شدن پارامتر ثابت زمانی در یک مخزن نشان دهنده این است که در زمان مشابه، تأثیرپذیری چاه تولیدی از چاه های تزریقی کمتر خواهد بود. با دانستن این مفهوم و بررسی نمودارهای ۵- و ۶ می توان به این مطلب پی برد که با افزایش ناهمگنی محیط متخلخل، مقدار ثابت زمانی رفتار یکنواختی را از خود نشان نداده و بسته به اندازه مخزن و خصوصیات سنگ، تغییرات زیادی خواهد داشت.

با افزایش تراوایی در جهت عمودی، رسیدن اثر آب به چاه های تولیدی زیاد خواهد شد و در نتیجه، ثابت زمانی کمتری را گزارش خواهد کرد. کاهش ثابت زمانی افزایش تولید را به همراه خواهد داشت و این امر به نوبه خود منجر به کاهش خطای نسبی می شود.

در حالت مخزن ناهمگن با ناهمسانگردی ۰/۵، مجموع ضرایب ارتباط بین چاهی برای هر چاه تزریقی برابر ۱ نشده است؛ زیرا این امر تنها در زمانی اتفاق می افتد که مخزن کاملاً همگن باشد. در ادامه، با افزایش ضخامت لایه ها از ۵۰ فوت به ۱۰۰ فوت، تأثیر این پارامتر نیز بررسی شد. تغییر میزان ثابت زمانی با تحلیل میزان خطا امکان پذیر است. با افزایش ضخامت لایه ها، در مقایسه با شرایط اولیه، میزان خطا به طور کلی افزایش خواهد یافت، اما این نکته را هم باید در نظر گرفت که بزرگ کردن حجم مخزن میزان تولید نهایی را نیز افزایش خواهد داد. لذا میزان خطا نیز باید با در نظر گرفتن تولید نهایی سنجیده شود. همچنین، ایجاد نوسان در داده های تولید نیز تأثیر قابل توجهی بر نتایج شبیه سازی از خود بر جای گذاشته به طوری که



۲- نمی‌توان ادعا کرد تفسیر داده‌های تولید تنها با تفسیر پارامتر ثابت زمانی مخزن امکان‌پذیر است. با مقایسه پارامتر خطای EMPR می‌توان به‌طور همه‌جانبه در مورد عملکرد شبیه‌ساز برای تاریخچه یک مخزن نظر داد.

۳- وارد کردن نوسان در داده‌های تولید مثلاً بستن چاه در بازه زمانی مورد مطالعه، منجر به بروز خطای غیرقابل پیش‌بینی در نتایج شده که برای رفع آن می‌باید از پردازشگر قوی‌تری برای حل معادله استفاده کرد و همچنین، روش حل دقیق‌تری انتخاب نمود. به‌طور مثال، می‌توان از معادلاتی در زمینه ظرفیت-مقاومت استفاده کرد که به‌جای شبیه‌سازی ناحیه‌ی تخلیه‌ی یک چاه تولیدی، به‌طور جزئی‌تر فضای ریزش سیال بین هر جفت چاه تولیدی و تزریقی را شبیه‌سازی نماید. ■

میزان خطا به مقدار بسیار زیادی افزایش یافته است. با تمام این تفاسیر قضاوت در مورد شرایط مختلف تنها با مقایسه میزان تولید و خطای تولید امکان‌پذیر می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

چندین بررسی شبیه‌سازی در شرایط مختلف یک مخزن فرضی انجام و تأثیر این شرایط بر روی پارامتر ثابت زمانی مدل شبیه‌ساز CRM تعیین گردید تا بهترین شرایط عملکرد مخزن در بین موارد مطالعه شده شناسایی شود. بر اساس مطالعات انجام شده، نتایج زیر حاصل شد:

۱- عموماً افزایش ناهمسانگردی تأثیر مثبتی در تولید خواهد داشت به‌طوری که میزان EMPR را کاهش می‌دهد.

### پانویس‌ها

- |                                 |                                   |                                    |
|---------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1. Capacitance-Resistance model | 9. Well connectivity coefficient  | 17. Five-spot                      |
| 2. Anisotropy                   | 10. Parameter                     | 18. Static                         |
| 3. Production history           | 11. Production Logging Tool (PLT) | 19. ft                             |
| 4. Petrophysics                 | 12. Moreno                        | 20. Grid                           |
| 5. Geophysics                   | 13. Decline curve                 | 21. Error to Mean Production Ratio |
| 6. Thermodynamic                | 14. Blind                         | 22. psi                            |
| 7. Grid-Base                    | 15. Austin                        |                                    |
| 8. Time constant                | 16. Couple                        |                                    |

### منابع

- [1] Mamghaderi Azadeh, Pourafshari Peyman, Water flooding performance prediction in layered reservoirs using improved capacitance-resistive model, J. Pet. Sic. Tech., 2013, 108, 107-117.
- [2] Masoumi Amirsalar, Pourafshary Peyman, and Rasaei Mohammadreza, Evaluation of Capacitance-Resistive Model Performance in Locating Fault(s) in hydrocarbon Reservoirs, GJSET, 2013, 7, 1625-.
- [3] Moreno Gustavo A., Multilayer capacitance-resistance model with dynamic connectivities, J. Pet. Sci. Tech., 2013, 109, 298-307.
- [4] Kosmidis Vassileios D., Perkins John D., and Pistikopoulos Efstratios N., Optimization of Well Oil Rate Allocations in Petroleum Fields, Ind. Eng. Chem. Res., 2004, 43, 35133527-.
- [5] 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 Rates. Paper SPE 107713 presented at the SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, 2007, Dallas, Texas, 1-3 April.
- [6] Salazar Martin, Gonzalez Hector, Martinge Sebastien, and Castineira David, Combining Decline-Curve Analysis and Capacitance-Resistance Models to Understand and Predict the Behavior of a Mature Naturally Fractured Carbonate Reservoir under Gas Injection, SPE paper number 153252, 2012, Mexico, 1618- April.
- [7] Cao Fei, Luo Haishan, Lake W., Larry, Development of a Fully Coupled Two phase Flow Based Capacitance Resistance Model (CRM), SPE Improved Oil Recovery Symposium, 2014, 1216-April, Tulsa, Oklahoma, USA.
- [8] Kaviani, D., Jensen, J. L., Lake, L. W., 2012. Estimation of interwell connectivity in the case of unmeasured fluctuating bottomhole pressures. J. Pet. Sci. Tech. 9095-79, 91-.
- [9] Kaviani, D., Soroosh, M., Jensen, J. L., 2014. How accurate are Capacitance Model connectivity estimates? J. Pet. Sci. Tech. 122, 439452-.
- [10] Moreno, G. A., Lake, L. W., 2014. Input signal design to estimate interwell connectivities in mature fields from the capacitance-resistance model, Pet. Sci. 11, 563568-.
- [11] Soroush, M., Kaviani, D., Jensen, J. L., 2014. Interwell connectivity evaluation in cases of changing skin and frequent production interruptions. J. Pet. Sci. Tech. 122, 616630-.
- [12] Cao, F., Luo, H., Lake, L.W., 2014. Development of a Fully Coupled Two-phase Flow Based Capacitance Resistance Model (CRM), SPE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, USA, 12-16 April.
- [13] Tao, Q., Bryant, S. L., 2015. Optimizing Carbon Sequestration with the Capacitance/Resistance Model. SPE J, Preprint.