



## تخمین میزان شاخص چاه تولیدی نفت در مخازن هیدروکربنی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

سعید حیاتی جعفری<sup>1</sup>، مهدی مشرف دهکردی<sup>2\*</sup>، مسعود ضیائی‌راد<sup>2</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

\* اصفهان، صندوق پستی 81746-73441، m.mosharaf@eng.ui.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 02 آبان 1396

پذیرش: 16 آذر 1396

ارائه در سایت: 15 دی 1396

کلید واژگان:

دینامیک سیالات محاسباتی

مخزن هیدروکربنی

چاه عمودی تولیدی

شاخص چاه

### چکیده

در کار حاضر، جریان سیال درون یک بلوک محاسباتی از مخزن هیدروکربنی و جریان سیال درون حفره چاه تولیدی حفاری شده در این بلوک به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده است. برای این منظور، جریان سیال تک فاز تراکم‌ناپذیر درون مخزن هیدروکربنی بر مبنای قانون داری (جریان درون محیط متخلخل) و جریان سیال درون حفره چاه بر مبنای معادله ناویر-استوکس (جریان آزاد) به صورت همزمان حل شده است. اثرات مربوط به شرایط مرزی اعمال شده روی وجوه بلوک محاسباتی مخزن، میزان خارج از مرکز بودن محل حفاری چاه عمودی درون بلوک مخزن و تراوایی مطلق سنگ مخزن روی رفتار جریان سیال بررسی شده است. در هر مورد، مقدار شاخص چاه به صورت عددی و با استفاده از توزیع فشار و سرعت جریان سیال درون بلوک مخزن و فشار سیال در حفره چاه تخمین زده شده و با مقادیر تحلیلی مقایسه شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که علاوه بر مشخصات هندسی چاه و جنس سنگ مخزن، نوع شرط مرزی اعمال شده روی وجوه بلوک، میزان خارج از مرکز بودن محل حفاری چاه روی شعاع موثر چاه و همچنین شاخص چاه تأثیرگذار هستند.

## An Approximation of Oil Production Well Index in Hydrocarbon Reservoirs Using Computational Fluid Dynamics

Saeed Hayati Jafarbeigi, Mehdi Mosharaf Dehkordi\*, Masoud Ziaei Rad

Department of Mechanical Engineering, Faculty of engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

\* P.O.B. 81746-73441 Isfahan, Iran, m.mosharaf@eng.ui.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 24 October 2017  
Accepted 07 December 2017  
Available Online 05 January 2018

**Keywords:**  
Hydrocarbon reservoir  
Vertical production well  
Well index  
Computational Fluid Dynamics

### ABSTRACT

In the present work, the three dimensional fluid flow inside a hydrocarbon reservoir block along with the fluid flow inside the wellbore of a production well drilled in this reservoir block is numerically simulated. To do this, the single-phase incompressible fluid flow in the hydrocarbon reservoir in terms of Darcy's law (porous media flow) along with the fluid flow inside the wellbore in terms of Navier-Stokes equations (free flow) are simultaneously solved. The effects of boundary conditions imposed on the faces of the reservoir block, the off-centered wellbore, and the reservoir rock permeability on the fluid flow behavior inside a reservoir block are investigated. In each case, the well index is numerically approximated, using the pressure and velocity distributions in the reservoir block and the wellbore pressure, and compared with analytical well index. The numerical results indicate that the well equivalent radius and also the well index not only depend on the geometrical properties of reservoir block and well bore and the rock absolute permeability, but also depend on the boundary conditions imposed on the reservoir block faces and the well drilling location.

### 1- مقدمه

مناطق دور از چاه‌های تولیدی نسبتاً پایین است، عمده شبیه‌سازی‌های صنعتی مانند اکتیپس معادلات مربوط به جریان داری را حل می‌کنند و برای برقراری ارتباط بین مخزن و چاه از یک مدل مناسب استفاده می‌شود. یک مدل چاه، در حقیقت یک رابطه ریاضی است که دبی عبوری از چاه را با اختلاف فشار درون حفره چاه توسط یک ضریب به نام شاخص چاه مرتبط می‌کند. با توجه به شرایط کاری یک چاه، نرخ تولید یا فشار حفره چاه (فشار ته چاهی) مشخص است [1]. در مواردی که دبی عبوری از چاه مشخص است، با استفاده از شاخص چاه اختلاف فشار بین حفره چاه و فشار مخزن

امروزه از دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان یک ابزار قدرتمند برای توصیف رفتار پیچیده سیال در کاربردهای مختلفی از جمله صنعت نفت و گاز استفاده می‌شود. در این میان، شبیه‌سازی جریان سیال در مخازن هیدروکربنی و به خصوص در اطراف چاه‌های تولیدی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که هنوز به طور گسترده با استفاده از دیدگاه دینامیک سیالات محاسباتی بررسی نشده است. با توجه به اینکه سرعت جریان سیال در سنگ مخزن هیدروکربنی (ماتریس محیط متخلخل) و به خصوص در

Please cite this article using:

S. Hayati Jafarbeigi, M. Mosharaf Dehkordi, M. Ziaei Rad, An Approximation of Oil Production Well Index in Hydrocarbon Reservoirs Using Computational Fluid Dynamics, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 01, pp. 177-187, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تخمین زد. در این تحقیق، با استفاده از مدل جریان آشفته میزان تاثیر آشفته‌گی جریان در نرخ بالای تولید چاه بررسی شده است. مولینا و تایگی [13] از رویکرد دینامیک سیالات محاسباتی برای پیش‌بینی افت فشار و رفتار جریان در نزدیکی دیواره چاه استفاده کردند. آن‌ها افت فشار محاسبه شده از طریق شبیه‌سازی عددی را با مقدار تحلیلی آن مقایسه نمودند. بر اساس نتایج این کار، تطابق خوبی بین نتایج حل عددی و تحلیلی مشاهده می‌شود. مارتون و همکاران [14] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی یک مدل نزدیک به دیواره را برای چاه افقی بررسی کردند. آن‌ها میزان دبی وارد شده به چاه را برای شرایط مختلف مخزن محاسبه کردند. همچنین آن‌ها تاثیر الگوی مشبک‌ها بر الگوی خطوط جریان و افت فشار را بررسی کردند.

مقدار شاخص چاه‌های عمودی عمدتاً بر اساس روابط تحلیلی و با در نظر گرفتن فرضیاتی مانند شعاعی بودن جریان (به عنوان یک شرط اساسی) تعیین می‌شود. این در حالی است که شرایط جریان سیال در اطراف چاه و همچنین خواص سنگ مخزن می‌تواند طوری باشد که به راحتی نتوان شاخص چاه را به صورت تحلیلی تعیین نمود. استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، راه را برای تعیین دقیق‌تر مقدار شاخص انواع مختلف چاه‌های تولیدی (عمودی، مایل و افقی) در مخازن نفتی مختلف را هموار می‌کند.

در تحقیق حاضر، با استفاده از ابزار قدرتمند دینامیک سیالات محاسباتی جریان سیال درون یک بلوک محاسباتی از مخزن هیدروکربنی که در آن یک چاه تولیدی عمودی وجود دارد شبیه‌سازی شده است. این بلوک محاسباتی مخزن در حقیقت یک سلول (شامل چاه تولیدی) از شبکه محاسباتی مورد استفاده در شبیه‌سازهای مخازن هیدروکربنی است. بدین علت که ناحیه نزدیک به دیواره چاه از قبل به صورت دقیق قابل پیش‌بینی نیست، کل بلوک مخزن (به جای ناحیه نزدیک به حفره چاه) به عنوان ناحیه محاسباتی در نظر گرفته شده است. درون این بلوک مخزن، یک شبکه محاسباتی محلی ایجاد شده است که از آن برای حل معادلات حاکم بر جریان سیال درون بلوک مخزن و حفره چاه استفاده می‌شود. با توجه به شبیه‌سازی جریان درون بلوک مخزن، امکان مطالعه اثرات مربوط به محل حفاری چاه درون بلوک محاسباتی روی الگوی جریان سیال، میزان شعاعی بودن آن در اطراف حفره چاه در حالت‌های مختلف نیز فراهم شده است. جریان سیال درون بلوک محاسباتی مخزن بر مبنای معادله داری و جریان درون حفره چاه بر مبنای معادله ناویر-استوکس به صورت همزمان شبیه‌سازی شده است. ابعاد بسیار بزرگ بلوک مخزن نسبت به اندازه حفره چاه از یک سو و سرعت بالای جریان در نواحی نزدیک و به خصوص درون حفره چاه از سوی دیگر، شبیه‌سازی همزمان جریان سیال درون کل بلوک مخزن و حفره چاه را به یک مسئله چالش‌زا تبدیل می‌کند. در این تحقیق، مقدار شاخص چاه در مدل پیسمن به صورت عددی و با استفاده از مقدار دبی تولیدی مخزن و توزیع فشار بدست آمده درون بلوک محاسباتی و حفره چاه تعیین شده است. شاخص چاه با در نظر گرفتن عوامل مختلفی مانند شرط مرزی نامتقارن (نسبت به محور عمودی چاه) اعمال شده روی وجوه بلوک مخزن، میزان خارج از مرکز بودن محل حفاری چاه و تراوایی مطلق سنگ مخزن تخمین زده شده و در هر مورد با مقدار تحلیلی آن مقایسه شده است.

## 2- معادلات حاکم و روش حل

جریان نفت درون یک مخزن نفتی و در نواحی اطراف یک چاه تولیدی را در نظر بگیرید. سیال از درون مخزن نفتی (یک محیط متخلخل) وارد حفره چاه شده و در امتداد حفره چاه به سمت بیرون حرکت می‌کند. برای شبیه‌سازی

طوری تعیین می‌شود که جریان عبوری با دبی تعیین شده (در صورت امکان) ایجاد شود. برای مواردی که فشار ته چاهی مشخص است، دبی عبوری از چاه بر مبنای شاخص چاه و اختلاف فشار بین حفره چاه و فشار متوسط بلوک مخزن آن در هر گام زمانی تعیین می‌شود. یکی از مدل‌های پذیرفته شده و متداول برای چاه، مدل پیسمن است که بر اساس منطق قانون داری و با فرض شعاعی بودن جریان سیال در اطراف حفره چاه استخراج شده است [2]. بنابراین تنها در محدوده‌ای که جریان سیال در اطراف چاه کاملاً شعاعی است می‌توان از روابط تحلیلی جهت تعیین فشار و تخمین مقدار شاخص چاه استفاده کرد [3]. این در حالی است که موارد زیادی وجود دارد که می‌تواند فرض شعاعی بودن جریان در اطراف حفره چاه را تا حدودی زیر سوال ببرد. به عنوان مثال، می‌توان به عدم تقارن هندسه و شرایط مرزی در اطراف چاه و وجود جریان چند فاز اشاره نمود. بنابراین لازم است که رفتار جریان سیال درون بلوک مخزن که چاه در آن حفاری شده است، به دقت بررسی شود. دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان ابزاری قدرتمند بستر لازم را برای شبیه‌سازی هر چه دقیق‌تر و توصیف بهتر جریان سیال درون بلوک محاسباتی مخزن و به خصوص نواحی اطراف حفره چاه را فراهم می‌کند.

اولین مطالعه موثر روی معادلات چاه برای یک جریان تک فاز توسط پیسمن [3] انجام شد که در آن تفسیر مناسبی از فشار بلوک چاه ارائه گردید. پیسمن با استفاده از یک ضریب به نام شاخص چاه، رابطه‌ای بین اختلاف فشار مخزن و حفره چاه با دبی ارائه داد. اهمیت تحقیق پیسمن در محاسبه فشار بلوک چاه در شعاع معادل از سه روش متفاوت است. در تحقیق دیگری پیسمن [4] توزیع فشار در شبیه‌سازی عددی یک شبکه مستطیلی با تراوایی مطلق ناهمگن مخزن را بررسی نمود. ولفشتاینر و همکاران [5] شاخص چاه را برای چاه‌های غیر متعارفی (مانند چاه‌های مایل) محاسبه کرده‌اند. در این تحقیق، روشی تقریبی برای در نظر گرفتن تاثیر ناهمگنی مخزن بر شاخص چاه ارائه شده است. علاوه بر این، نشان داده شده است که در بسیاری از موارد روش‌های پیش فرض شبیه‌سازهای تجاری می‌تواند خطاهای قابل توجهی در هر فشار چاه و همچنین توزیع جریان سیال در اطراف چاه داشته باشد. با وجود اینکه شاخص چاه می‌تواند با زمان و شرایط مرزی تغییر کند، نشان داده شد که برای اهداف عملی می‌توان از شرایط حالت پایا استفاده نمود. پلاگی و عزیز [6] با استفاده از مقایسه نتایج حل تحلیلی و حل عددی بر مبنای روش اختلاف محدود حل دقیقی برای شاخص چاه معرفی کردند. برای یک مدل مخزن ناهمگن، آن‌ها به یک حل مرجع، دقیق و ساده دست یافتند. همچنین به این نتیجه رسیدند که در یک مدل با شبکه‌بندی با سلول‌های محاسباتی ابعاد بزرگ نمی‌توان به توصیف درستی از تغییرات فشار در نزدیکی چاه دست یافت. ولفشتاینر و همکاران [7] یک مدل تقریبی برای نرخ تولید چاه‌های غیرمتعارفی (مانند چاه‌های مایل) در مخازن ناهمگن ارائه کردند. در تحقیق دیگری ولفشتاینر و همکاران [8] برآورد موثری از تاثیر هیدرولیک چاه و ناهمگنی مخزن بر بهره‌وری چاه‌های غیرمتعارف ارائه کرده‌اند. باین و همکاران [9] برای اولین بار از دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان سیال در نواحی نزدیک به حفره چاه و بررسی عملکرد چاه استفاده کردند. در تحقیق‌های دیگری [10, 11] باین و همکاران یک مدل سه بعدی از جریان نزدیکی چاه و درون چاه ارائه کردند. همچنین مدل چاه به صورت تماس کامل به مخزن شبیه‌سازی و تاثیر آن بر میزان دبی و افت فشار نزدیک دیواره مطالعه شد. مولینا [12] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی نرخ تولید یک چاه گاز را بررسی نمود و ضریب پوسته چاه (یک پارامتر در مدل تحلیلی چاه) را

دیواره مشبک لوله وارد شده و در طول محور لوله به سمت بالا جریان پیدا می‌کند. با توجه به شرایط حاکم بر جریان سیال به خصوص در نواحی نزدیک چاه و همچنین درون چاه که سرعت جریان سیال بالا بوده (در مسئله حاضر عدد رینولدز در چاه بالاتر از 2300 و برابر 4200) و جریان به صورت آشفته است [16]. در اینجا، رژیم جریان سیال به صورت آشفته در نظر گرفته شده و برای شبیه‌سازی از مدل استاندارد  $k-\varepsilon$  در نرم‌افزار تجاری انسیس فلوئنت 18 استفاده شده است. با توجه به نتایج مراجع [17-19] و مقایسه بین مدل‌های آشفته مختلف از جمله  $k-\varepsilon$  استاندارد،  $k-\omega$  و RSM برای جریان سیال درون حفره چاه مشخص شد که مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه دهد. بنابراین، از مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد برای شبیه‌سازی جریان آشفته سیال استفاده شده است. این روش جریان آشفته را بر اساس دو معادله انرژی جنبشی  $k$  و نرخ اتلاف انرژی آشفته  $\varepsilon$  مدل‌سازی می‌کند که روابط آن طبق معادلات (9) و (10) ارائه شده است [20]. لزجت آشفته از رابطه (11) بدست می‌آید.

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (10)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

در معادله (10) متغیر  $G_k$  نشان‌دهنده تولید انرژی جنبشی آشفته است.  $C_{1\varepsilon}$  و  $C_{2\varepsilon}$  ثوابت معادله و  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  به ترتیب عدد پرناتل آشفته برای  $k$  و  $\varepsilon$  هستند.

شبیه‌سازی عددی بر مبنای دیدگاه حجم محدود و الگوریتم سیمپل انجام شده است. معیار همگرایی باقیمانده‌ها در پیوستگی، مولفه‌های سرعت، انرژی جنبشی و نرخ اتلاف انرژی جنبشی برابر  $10^{-5}$  منظور شده است.

### 3- معرفی هندسه، شرایط مرزی، فرضیات و مدل‌سازی

در کار حاضر، یک محیط متخلخل با ماتریس همگن به شکل مکعبی به عنوان یک بلوک محاسباتی از مخزن و به صورت کاملاً سه بعدی در نظر گرفته شده است. شکل I هندسه مدل را نشان می‌دهد. درون این بلوک مخزن، یک چاه تولیدی به صورت عمودی حفاری شده است که با بلوک مخزن تماس کامل دارد. منظور از تماس کامل این است که کل دیواره در تماس با سنگ مخزن مشبک شده است و بنابراین سیال می‌تواند در تمامی عمق‌ها از مخزن وارد چاه تولیدی شود. تخلخل سنگ مخزن همگن و تراوایی مطلق آن به صورت همگن و همسانگرد در نظر گرفته شده است. فرآیند تولید نفت از مخزن به صورت پایا و بر اساس جریان تک فاز و تراکم‌ناپذیر نفت و با در نظر گرفتن اثرات مربوط به گرانش (در راستای محور چاه عمودی) شبیه‌سازی شده است. دو وجه از وجوه جانبی بلوک مکعبی، شرط مرزی دبی جرمی ورودی و بقیه وجه‌های جانبی دیگر شرط دیواره یا بدون جریان در نظر گرفته شده است. برای سطح مربوط به پایین‌ترین قسمت حفره چاه به شرط مرزی بدون جریان و برای سطح بالایی حفره چاه فشار خروجی اعمال شده است.

برای مطالعه اثرات محل حفاری روی رفتار جریان سیال در اطراف چاه، در حالت کلی، دو گونه چاه در نظر گرفته شده است؛ چاهی که در مرکز یا خارج از مرکز بلوک محاسباتی حفاری شده است. یک چاه خارج از مرکز بلوک، چاهی است که محور آن از مرکز حجم بلوک محاسباتی نمی‌گذرد. لازم به ذکر است که از نظر عملیاتی، یک چاه در یک محل مشخص از

عددی جریان تک‌فاز و تک‌جزیی نفت، لازم است که معادلات بقای جرم و مومنوم نوشته و حل شوند. با توجه به کم بودن سرعت جریان در محیط متخلخل (مخزن)، معمولاً از قانون داریسی به عنوان جایگزینی برای معادله مومنوم استفاده می‌شود. بنابراین، برای توصیف جریان سیال در اطراف و درون حفره یک چاه، علاوه بر معادله بقای جرم به هر دو معادله داریسی و ناویر-استوکس نیاز است. معادله‌های ناویر-استوکس برای جریان تراکم‌ناپذیر سه بعدی و دائم به صورت معادلات (1) و (2) است.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \rho \mathbf{g} + S \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} \quad (3)$$

در اینجا، زیر نویس  $i$  و  $j$  بیانگر جهت در راستاهای دستگاه مختصات است. در معادلات (1) و (2)،  $u_i$  و  $x_i$  به ترتیب مکان و سرعت در جهت  $i$  هستند. که در معادله (2)  $S$  تاثیر وجود محیط متخلخل را در معادله ناویر-استوکس لحاظ می‌کند و به صورت معادله (4) تعریف می‌شود.

$$S = -\frac{\mu}{K} \mathbf{u} \quad (4)$$

که در آن  $K$  تراوایی مطلق محیط متخلخل و  $\mathbf{u}$  بردار سرعت سیال است. بر اساس قانون داریسی سرعت جریان سیال تک‌فازی درون محیط متخلخل با گرادین فشار رابطه مستقیم و با لزجت سیال رابطه معکوس دارد و ضریب تناسب این رابطه تراوایی مطلق محیط متخلخل است. معادله (5) قانون داریسی را نشان می‌دهد.

$$\mathbf{u} = -\frac{1}{\mu} K (\nabla P - \rho \mathbf{g} \nabla z) \quad (5)$$

در شبیه‌سازی مخازن هیدروکربنی اغلب برای برقراری ارتباط بین چاه و مخزن از یک مدل چاه استفاده می‌شود. در مدل پیسمن [3] به عنوان معروف‌ترین مدل، جریان عبوری از چاه  $q$  بر حسب اختلاف فشار بین مخزن و حفره چاه به صورت رابطه (6) بیان می‌شود.

$$q = W(P - P_w) \quad (6)$$

که در آن  $W$  بیانگر شاخص چاه بر حسب  $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{day-bar}}\right)$  است. یک چاه عمودی با شعاع حفره  $r_w$  که از مرکز یک بلوک مکعب مستطیل با ابعاد  $L_x$ ،  $L_y$  و  $L_z$  می‌گذرد را در نظر بگیرید. در صورتی که مشبک‌ها ارتفاعی معادل  $h$  داشته باشد، مقدار شاخص چاه را می‌توان با رابطه تحلیلی (7) محاسبه نمود [15,1].

$$W = \frac{2\pi h \sqrt{K_{xx} K_{yy}}}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + s} \quad (7)$$

در اینجا،  $s$  ضریب پوسته چاه نام دارد و  $r_e$  بیانگر شعاع معادل حفره چاه است که در آن فشار واقعی چاه در حالت پایا با فشار محاسبه شده آن برابر است [16]. مقدار شعاع معادل یک چاه عمودی را می‌توان به صورت تحلیلی از رابطه (8) تعیین نمود [1].

$$r_e = \frac{0.28 \sqrt{(L_x)^2 (K_{yy}/K_{xx})^{0.5} + (L_y)^2 (K_{xx}/K_{yy})^{0.5}}}{(K_{yy}/K_{xx})^{0.5} + (K_{xx}/K_{yy})^{0.5}} \quad (8)$$

دو پارامتر  $K_{xx}$  و  $K_{yy}$  مولفه‌های تانسور تراوایی مطلق در راستاهای  $x$  و  $y$  هستند. با توجه به رابطه‌های (7) و (8) مشخص است که شاخص چاه فقط به متغیرهای هندسی بلوک مخزن و چاه و مولفه‌های تانسور تراوایی مطلق سنگ مخزن مرتبط است و متغیرهای جریان در آن تاثیری ندارند.

رفتار جریان سیال درون حفره یک چاه عمودی، تولیدی مشابه با جریان سیال درون یک لوله عمودی با دیواره مشبک شده است. سیال از طریق

شکل 2 کانتور فشار در صفحه  $X - Y$  در دو شبکه مختلف نشان داده شده است. برای چند صفحه  $X - Y$  در عمق‌های مختلف حداکثر میزان انحراف نرم-2 اقلیدسی و نرم بی‌نهایت در جدول 2 آورده شده است. برای بررسی خطا از سه شبکه محاسباتی ریز (با  $10^6 \times 1.4$  سلول محاسباتی)، میانه (با  $10^6 \times 0.7$  سلول محاسباتی) و شبکه درشت (با  $10^6 \times 0.35$  شبکه محاسباتی) استفاده شده است. با توجه به داده‌های موجود در جدول 2 و همچنین شکل‌های 2-الف و 2-ب مشخص است که نتایج مربوط به دو شبکه محاسباتی میانه و ریز خیلی به هم نزدیک هستند و می‌توان نتایج را مستقل از شبکه در نظر گرفت. لازم به ذکر است که تمامی نتایجی که در بخش 6 آورده شده است بر اساس شبکه محاسباتی ریز تولید و گزارش شده‌اند. علاوه بر این، با بررسی پارامتر  $\gamma^+$  در دیواره چاه عمودی مقدار متوسط این پارامتر حدود 20 است که با توجه به در نظر گرفتن تابع دیواره استاندارد در نزدیکی دیواره در محدوده مجاز این تابع دیواره قرار دارد.

### 5- نتایج

در این قسمت نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی در چهار بخش جداگانه ارائه شده است. در بخش اول، نتایج مربوط به یک مدل ناحیه نزدیک دیواره چاه تولیدی موجود در مرجع [13] ارائه شده و با نتایج تحلیلی مقایسه و اعتباربخشی شده است. در بخش دوم نتایج مربوط به مدل اصلی بلوک مخزن ارائه و با استفاده از روابط تحلیلی صحت‌سنجی شده است. از آنجایی که شرط شعاعی بودن جریان در اطراف چاه یک فرض اساسی در استخراج روابط تحلیلی است، در بخش سوم محدوده شعاعی بودن جریان، در اطراف حفره چاه بررسی شده است. در بخش چهارم اثر خروج از مرکز بودن محل حفاری و همچنین اثر مقدار تراوایی مطلق سنگ مخزن بر عملکرد تولید سیال ارزیابی شده است برای گزارش بهتر نتایج، برخی متغیرها به صورت بی‌بعد گزارش شده است. فشار بی‌بعد شده  $\bar{P} = P/P_w$  که به صورت نسبت فشار بلوک مخزن به فشار حفره چاه و فاصله بی‌بعد  $\bar{r} = r/r_{max}$  که به صورت نسبت فاصله از چاه به بیشترین فاصله (معادل نصف قطر یک صفحه افقی از بلوک مخزن) تعریف شده است. علاوه بر این، تراوایی بی‌بعد شده  $\bar{K} = K/K_{max}$  که به صورت نسبت تراوایی مطلق به مقدار تراوایی مطلق بیشینه تعریف شده است. شاخص بی‌بعد  $\bar{W} = W/W_{ave}$  با استفاده از نسبت شاخص چاه عددی به مقدار متوسط شاخص چاه تحلیلی برای مدل تعریف شده است. مقدار متوسط شاخص تحلیلی با میانگین‌گیری از مقادیر شاخص‌های تحلیلی چاه به ازای تراوایی‌های مطلق در نظر گرفته شده محاسبه شده است.

### 5-1- صحت سنجی مدل ناحیه نزدیک دیواره چاه

در این قسمت نتایج یک مدل در ناحیه نزدیک به دیواره چاه تولیدی ارائه می‌شود. در این مدل ابعاد بلوک اطراف چاه نسبت به شعاع حفره چاه، طوری

جدول 2 حداکثر اختلاف کانتور فشار در شبکه‌های محاسباتی با اندازه‌های مختلف  
Table 2 Maximum discrepancy between pressure contours of different computational grid sizes

اختلاف دو شبکه محاسباتی	انحراف نرم-2 (%)	انحراف نرم-بی‌نهایت (%)
ریز - درشت	0.83	0.91
متوسط - درشت	0.47	0.51
ریز - متوسط	0.38	0.44

مخزن، حفاری می‌شود. این در حالی است که حتی با ثابت بودن محل حفاری چاه، وضعیت قرارگیری آن نسبت به بلوک محاسباتی مخزن، می‌تواند با تغییر اندازه یا شکل بلوک تغییر کند. در کار حاضر، میزان خارج از مرکز بودن چاه توسط یک پارامتر بی‌بعد به صورت  $\bar{l} = \frac{l}{l_{max}}$  مشخص شده است. در یک صفحه افقی از بلوک مخزن،  $l_{max}$  بیانگر فاصله مرکز بلوک از یکی از راس‌های بلوک مخزن است و  $l$  به صورت فاصله مرکز حفره چاه از مرکز بلوک تعریف می‌شود. برای یک چاه مرکزی  $\bar{l} = 0$  و برای یک چاه خارج از مرکز  $0 < \bar{l} < 1$  است. لازم به ذکر است که در اینجا اثر خروج از مرکز فقط روی یک پاره خط که مرکز و یک راس از بلوک را به هم متصل می‌کند، بررسی شده است (شکل 2-ب). بر دو وجه هندسه مکعبی این بلوک از مخزن شرط مرزی دبی ثابت جریان و وجوه دیگر به صورت شرط مرزی بدون جریان اعمال شده است. این شرایط مرزی بر این اساس نسبت به محور عمودی حفره چاه نامتقارن انتخاب شده‌اند که جریان در نواحی دور از حفره چاه کاملاً شعاعی نباشد و همچنین اثرات مربوط به خارج از مرکز بودن محل حفاری چاه عمودی، در نتایج بهتر نمایش داده شود (بخش 6-3). در جدول 1 مشخصات هندسی چاه و بلوک مخزن مربوط به آن همراه با خواص فیزیکی سیال آورده شده است.

### 4- مطالعات شبکه

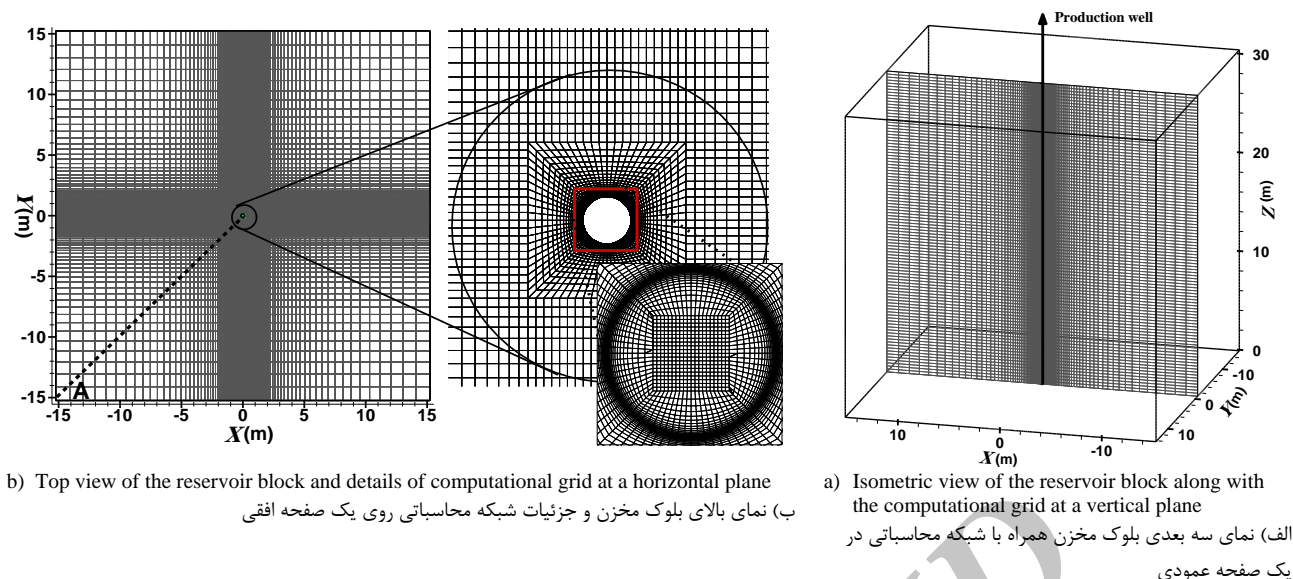
در کار حاضر، از شبکه محاسباتی با سازمان جهت شبیه‌سازی جریان سیال درون یک بلوک مخزن استفاده شده است. بر اساس شرایط جریان سیال در اطراف حفره چاه، برای بلوک مخزن یک شبکه محاسباتی با سازمان همراه با کاهش اندازه سلول‌های محاسباتی به صورت محلی تولید شده است (شکل 2-الف و 2-ب). با انجام این کار، تعداد سلول‌های شبکه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. از آنجایی که خواص سنگ مخازن نفتی عمدتاً روی شبکه محاسباتی با سازمان در دسترس هستند، استفاده از این نوع شبکه محاسباتی فرآیند اختصاص داده‌های ورودی مخزن به شبکه محاسباتی را در حالت کلی تسهیل می‌کند. لازم به ذکر است که این شبکه محاسباتی با استفاده از ابزار تولید شبکه نرم افزار انسیس تولید شده است.

با توجه به اهمیت عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه، نتایج مسئله برای شبکه‌بندی با تعداد سلول‌های محاسباتی متفاوت، بررسی و استقلال نتایج از شبکه برای مدل مورد نظر نیز مطالعه شده است. با افزایش تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی در حالت کلی دقت حل عددی افزایش پیدا می‌کند، با این وجود هزینه محاسباتی نیز همزمان افزایش پیدا می‌کند. در

جدول 1 مشخصات هندسی چاه و بلوک مخزن همراه با خواص سیال

Table 1 Geometric characteristics of the well and the reservoir block along with the fluid properties

اندازه هر ضلع بلوک مکعبی (m)	30.48
تخلخل سنگ مخزن (-)	0.25
چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )	690
لزجت ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	0.001
شعاع چاه (m)	0.1524
تراوایی مطلق بیشینه ( $\text{m}^2$ )	$4.935 \times 10^{-13}$
نسبت تراوایی مطلق به تراوایی بیشینه (-)	0.1 تا 1
نرخ دبی ورودی به بلوک مخزن ( $\text{kgs}^{-1}$ )	1.5
فشار حفره چاه (kPa)	100
عمق ناحیه مشبک شده دیواره چاه (m)	30.48



**Fig. 1** The schematic of a typical reservoir block and its vertical production well along with the illustration of the computational grid at vertical and horizontal planes

شکل 1 شمایی از هندسه یک بلوک از مخزن و چاه عمودی تولیدی مربوط به آن همراه با نمایشی از شبکه محاسباتی در صفحه‌های عمودی و افقی.

است که این مسئله به ازای مقادیر مختلف تراوایی مطلق و در محدوده تغییرات  $\bar{K} = 0.1$  تا  $\bar{K} = 1.0$  شبیه‌سازی شده است تا تاثیر تراوایی مطلق بر مقدار شاخص چاه و همچنین توزیع فشار در اطراف حفره چاه نیز مشخص شود. در شکل 5 توزیع فشار در اطراف چاه برای حالت مرکزی با  $\bar{K}=0.8$  به صورت سه بعدی نشان داده شده است. مشخص است که با نزدیک شدن به حفره چاه، میزان افت فشار جریان سیال به طور قابل توجهی بیشتر می‌شود. در شکل 6 مقادیر عددی شاخص چاه با نتایج تحلیلی به ازای مقادیر مختلف تراوایی‌های مطلق سنگ مخزن مقایسه شده است. در هر مورد، شاخص تحلیلی با استفاده از رابطه (7) و بر اساس مشخصات هندسی چاه و مخزن همراه با مقدار تراوایی مطلق محاسبه شده است. مقادیر عددی شاخص بر اساس فشار موجود در شعاع معادل چاه (برای بلوک و چاه در نظر گرفته شده  $r_w = 6.033\text{m}$ ) یا بر اساس فشار متوسط بلوک مخزن همراه با فشار حفره چاه و دبی عبوری از آن و با استفاده از رابطه (6) محاسبه شده‌اند. برای مطابق انتظار، تمامی این نتایج نشان می‌دهند که با افزایش تراوایی مطلق بلوک مخزن میزان شاخص افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مشخص است که برای حالت عددی، نحوه فشار انتخابی به عنوان فشار مخزن در رابطه (6) روی مقدار محاسبه شده شاخص عددی مستقیماً تاثیرگذار است. برای حالتی که از فشار متوسط کل بلوک برای محاسبه شاخص چاه استفاده شود، اختلاف شاخص چاه عددی و تحلیلی قابل توجه بوده و تا حدود 30 درصد اختلاف مشاهده می‌شود. این درحالی است که اگر شاخص چاه با استفاده از مقدار فشار عددی متوسط محاسبه شده در شعاع معادل چاه انتخاب شود، مقادیر شاخص چاه عددی به مقادیر تحلیلی بسیار نزدیک است. در این حالت، اختلاف دو مقدار تحلیلی و عددی برای شبکه محاسباتی ریز، حداکثر 3 درصد است. بنابراین نتایج عددی با نتایج تحلیلی سازگار هستند. علاوه بر این برای هر مقدار تراوایی مطلق، مشخص است که به ازای هر دو میدان فشار محاسبه شده روی دو شبکه محاسباتی میانه و ریز، مقادیر شاخص عددی یکسان است که به نوعی بیانگر مستقل بودن نتایج از شبکه محاسباتی است. با این وجود، مقدار شاخص عددی پیش‌بینی شده با شبکه محاسباتی درشت، نیز هنوز در مقایسه با مقادیر تحلیلی از دقت قابل قبولی برخوردار

در نظر گرفته شده است که جریان، در نزدیک دیواره چاه مدل شود. توزیع فشار اطراف چاه و میزان شاخص چاه با روابط تحلیلی موجود مقایسه شده است. در اینجا، رویکرد اصلی این است که شرایط فرض شده برای استخراج روابط تحلیلی برای شبیه‌سازی عددی جریان سیال در نواحی نزدیک به دیواره نیز کاملاً برقرار باشد. برای این کار، جریان سیال در نزدیکی چاه به صورت کاملاً شعاعی در نظر گرفته شده است. برای ایجاد چنین شرایطی لازم است که چاه در مرکز بلوک مخزن حفاری شده باشد و همچنین شرایط مرزی کاملاً متقارنی روی وجوه بلوک مخزن اعمال شود. بنابراین، شرط مرزی به صورت فشار ورودی کاملاً متقارن نسبت به محور چاه و تراوایی مطلق سنگ مخزن همگن در نظر گرفته شده است. میزان فشار ورودی 820 کیلوپاسکال و فشار چاه 580 کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. در شکل 3 کانتور فشار بی‌بعد اطراف چاه برای مدل در ناحیه نزدیک دیواره چاه نشان داده شده است. با توجه به شکل 3 مشخص است که یک توزیع فشار کاملاً متقارن مشاهده می‌شود که نشان دهنده وجود جریان کاملاً شعاعی در اطراف چاه است. این کانتور فشار عددی با توزیع فشار تحلیلی نیز کاملاً سازگار است. برای روشن شدن این مطلب، نتایج عددی با نتایج تحلیلی در شکل 4 مقایسه شده است. خطای نتایج عددی، نسبت به نتایج تحلیلی در بیشترین حالت حدود 0.5 درصد است. بنابراین، نتایج روش شبیه‌سازی عددی جریان سیال با نتایج حل تحلیلی تطابق بسیار خوبی دارند.

## 2-5- نتایج مدل اصلی

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی جریان سیال درون یک بلوک مکعبی از مخزن (بخش 3) با اندازه هر ضلع 30.48 متر ارائه شده است. مطابق شکل 1-الف، شرط مرزی روی دو وجه عمودی از این بلوک به صورت دبی ورودی به بلوک چاه و مابقی وجوه بلوک به صورت بدون جریان فرض شده‌اند. دلیل انتخاب این شرط دبی ورودی به بلوک این است که در شبیه‌سازی مخازن، معمولاً نرخ جریان سیال ورودی معلوم است یا می‌توان آن را بر حسب اطلاعات موجود (مانند نرخ دبی تولیدی) به سادگی بدست آورد. لازم به ذکر

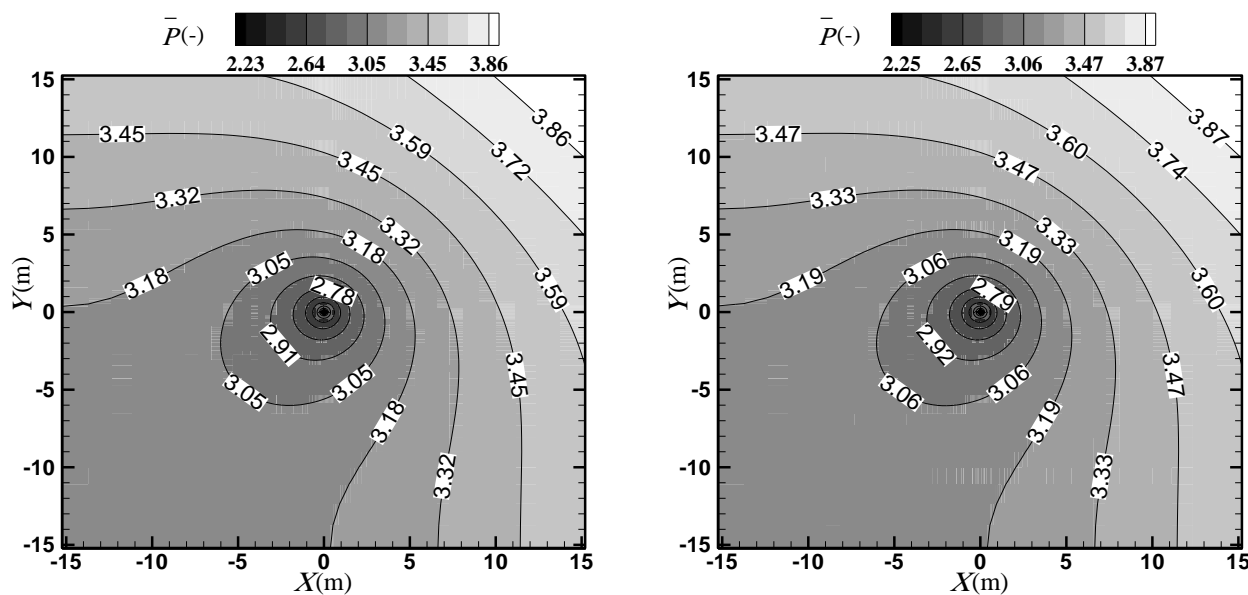
است.

به خطوط جریان اطراف چاهی است که در مرکز بلوک حفاری شده است (یعنی  $\bar{A} = 0$ ). شکل 7-ب خطوط جریان مربوط حالتی که چاه در فاصله 17.5 متری از مرکز بلوک قرار دارد (یعنی  $\bar{A} = 0.875$ ) را نشان می‌دهد. برای هر دو حالت، ناحیه‌ای در اطراف حلقه چاه وجود دارد که می‌توان جریان سیال را شعاعی در نظر گرفت. برای درک بهتر این ناحیه، متغیر بی‌بعد  $\bar{R}$  به صورت نسبت شعاع ناحیه جریان شعاعی به شعاع چاه تعریف شده است. این ناحیه جریان شعاعی، در هر یک از دو شکل 7-الف و ب با دایره‌ای مشخص شده است. شعاع بی‌بعد این دایره برای حالتی که چاه در مرکز بلوک قرار دارد معادل  $\bar{R} = 32.8$  است. بدین مفهوم که تا حدود 33 برابر شعاع چاه، جریان سیال شعاعی محسوب می‌شود. برای چاه خارج از مرکز بلوک، این شعاع به میزان خارج از مرکز بودن حفره چاه وابسته است. برای چاه در نظر گرفته شده با خارج از مرکزی  $\bar{A} = 0.875$  این شعاع بی‌بعد معادل  $\bar{R} = 9.84$  است. با مقایسه ناحیه جریان شعاعی برای دو چاه در مرکز و خارج مرکز بلوک مخزن، مشخص است که خارج از مرکز بودن موقعیت حفاری چاه می‌تواند ناحیه شعاعی بودن جریان را محدود و کوچکتر کند. نتایج شبیه‌سازی برای حالت‌های مختلف خارج از مرکز بودن چاه نشان می‌دهد که یک رابطه تقریباً خطی بین شعاع بی‌بعد ناحیه جریان شعاعی و فاصله بی‌بعد خارج از مرکز بودن چاه وجود دارد. با افزایش میزان خارج از مرکز بودن محل حفاری چاه، شعاع ناحیه جریان شعاعی در اطراف حفره چاه به صورت خطی کاهش پیدا می‌کند.

نکته جالب این است که برای هر دو چاه در مرکز و خارج از مرکز بلوک مخزن، شعاع ناحیه جریان شعاعی همیشه کمتر از شعاع معادل حفره چاه ( $r_e = 6.03\text{m}$ ) محاسبه شده با رابطه (8) است. از نظر فیزیکی، شرایط مرزی نامتقارن (نسبت به محور عمودی چاه) اعمال شده روی وجوه بلوک مخزن (شکل 2-ب) مقداری از شعاعی بودن جریان می‌کاهد. زیرا در حالتی که شرایط مرزی بلوک مخزن متقارن است دامنه ناحیه شعاعی مقدار بسیار بزرگی و محدود به ابعاد بلوک است. علاوه بر شرایط مرزی نامتقارن، انحراف

### 3-5- ناحیه جریان شعاعی اطراف حفره چاه و تاثیر خارج از مرکز بودن چاه

در صورتی که یک چاه عمودی تولیدی در مرکز یک بلوک مخزن با سطح مقطع افقی مربع حفاری شده باشد و شرایط مرزی جریان اعمال روی وجوه بلوک در هر صفحه افقی کاملاً متقارن باشد، جریان سیال در اطراف چاه به صورت کاملاً شعاعی است. با توجه به امکان تخصیص انواع شبکه محاسباتی به یک مخزن هیدروکربنی، الزاماً همیشه چاه در مرکز بلوک محاسباتی مخزن قرار ندارد و در مواردی می‌تواند در فواصل دورتری از مرکز بلوک قرار بگیرد. یک چاه حفاری شده در ناحیه‌های مختلف یک بلوک محاسباتی مخزن، شاخص‌های متفاوتی خواهد داشت [21]. تاثیر خارج از مرکز بودن یک چاه عمودی را می‌توان با استفاده از پارامتر به نام ضریب شکل در مدل چاه لحاظ نمود [22]. لازم به ذکر است که این ضریب شکل تنها برای فرآیند شبه‌پایا و برای حالت‌های خاصی از شکل بلوک محاسباتی مخزن (ناحیه تخلیه) و موقعیت حفاری چاه در آن استخراج شده است. برای جزئیات مناسب در مورد مقادیر ضریب شکل در حالت‌های مختلف و نحوه اعمال آن در مدل چاه به [22] رجوع شود. در این بخش، تاثیر وجود شرط مرزی نامتقارن روی وجوه بلوک مخزن همراه با خارج از مرکز بودن چاه روی میزان شعاعی بودن جریان سیال در کل بلوک مخزن و مخصوصاً در نواحی اطراف چاه تولیدی بررسی می‌شود. برای این منظور، ابتدا لازم است که خطوط جریان سیال درون بلوک مخزن با شرط مرزی نامتقارن (نسبت به محور عمودی چاه) (بخش 3) برای دو حالت شامل چاه در مرکز و خارج از مرکز بلوک در نظر گرفته شود. شکل 7 تاثیر خارج از مرکز بودن محل حفاری چاه را بر خطوط جریان (میدان سرعت) درون بلوک محاسباتی و مخصوصاً در نواحی نزدیک به حفره چاه را نشان می‌دهد. متغیر بی‌بعد  $\bar{A}$  به صورت فاصله مرکز حفره چاه از یک راس بلوک به فاصله بیشینه تعریف شده است (بخش 3). نسبت شکل 7-الف مربوط



b) Fine computational grid

a) Medium computational grid

ب) شبکه محاسباتی ریز

الف) شبکه محاسباتی میانه

**Fig. 2** Pressure contours at computational grids of different sizes for a block centered well (at a depth of 15 m)

شکل 2 کانتور فشار در شبکه‌های محاسباتی مختلف در عمق 15 متری برای حالتی که چاه عمودی از مرکز بلوک مخزن عبور می‌کند

از حالت جریان کاملاً شعاعی با افزایش خارج از مرکز بودن محل حفاری چاه نیز بیشتر شده و بنابراین شعاع ناحیه جریان شعاعی اطراف چاه کمتر می‌شود. یادآوری می‌شود که وجود جریان کاملاً شعاعی در اطراف حفره چاه یکی از شرط‌های اصلی در استخراج روابط تحلیلی مربوط به شعاع معادل چاه و شاخص چاه است. بنابراین طبیعی است که نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تحلیلی مقداری تفاوت داشته باشد. زیرا مدل تحلیلی شاخص چاه، شرایط فیزیکی جریان سیال در بلوک مخزن و همچنین محل حفاری چاه را مستقیماً لحاظ نمی‌کند.

در بخش 2-5 برای محاسبه شاخص چاه از مقدار فشار متوسط عددی در شعاع معادل چاه استفاده شد. در اینجا به علت شعاعی نبودن جریان، در کل مدل می‌توان در مورد انتخاب محل مناسب محاسبه فشار برای تعیین مقدار شاخص چاه بحث نمود. این امکان نیز وجود دارد که با انتخاب شعاع ناحیه جریان شعاعی، شاخص چاه را نیز محاسبه نمود. نتایج عددی نشان می‌دهد که اگر در رابطه تحلیلی به جای شعاع معادل چاه از شعاع ناحیه جریان شعاعی (بدست آمده با شبیه‌سازی) استفاده شود، مقدار شاخص چاه تحلیلی و عددی محاسبه شده اختلاف بسیار ناچیزی دارند. بنابراین، می‌توان تأثیر مربوط به شرایط مرزی و محل حفاری را به نحوی در شعاع معادل چاه لحاظ

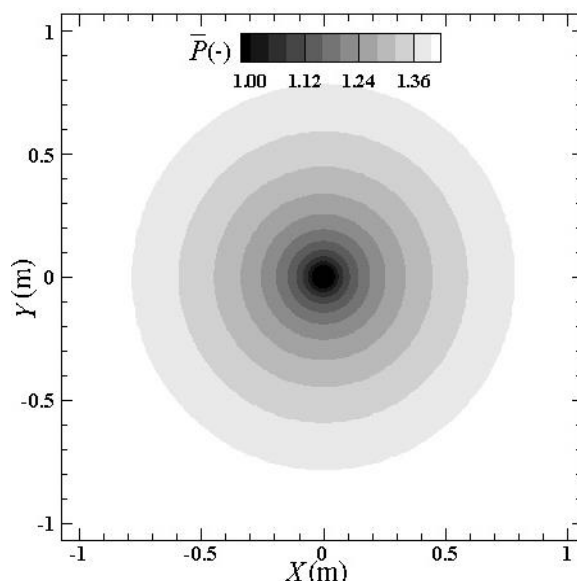
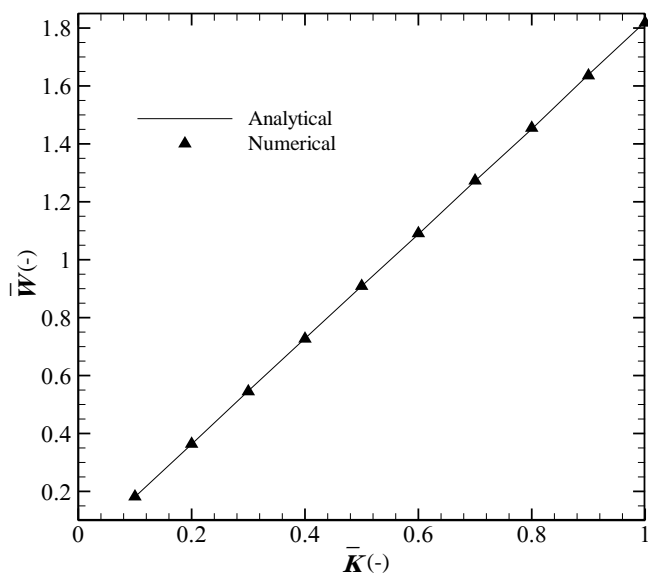


Fig. 3 Pressure contour for the near wellbore region at a depth of 0.3 meters

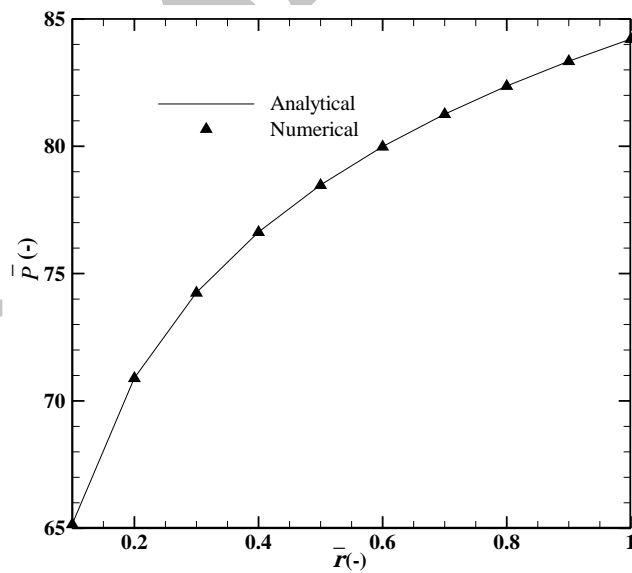
شکل 3 توزیع فشار در نواحی نزدیک به دیواره چاه در عمق 0.3 متری



b) Numerical and analytical dimensionless well indices versus absolute permeability

(ب) مقدار شاخص چاه عددی و تحلیلی به ازای تراوایی‌های مطلق مختلف

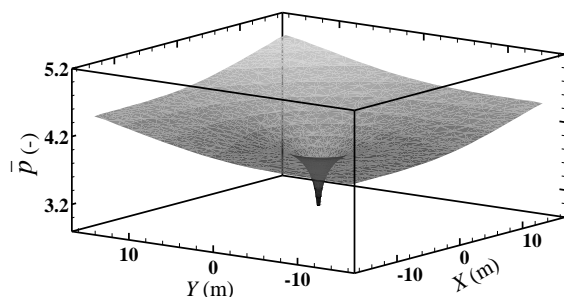
Fig. 4 Comparison of numerical results with an analytical solution in near well region



a) Pressure distribution near the well region at a depth of 0.3 meters

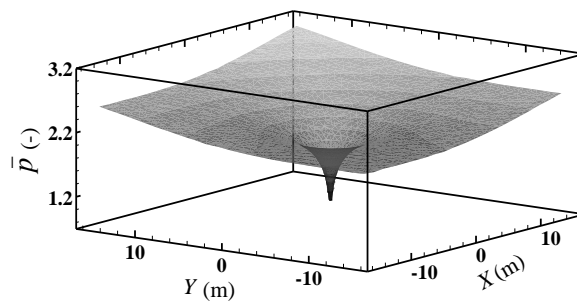
(الف) توزیع فشار در نواحی نزدیک حفره چاه در عمق 0.3 متری

شکل 4 مقایسه نتایج عددی با نتایج تحلیلی در ناحیه نزدیک به دیواره چاه



a) At a depth of 30 meters

(ب) در عمق 30 متری بلوک مخزن



a) At a depth of 2 meters

(الف) در عمق 2 متری بلوک مخزن

Fig. 5 Pressure distribution inside the reservoir block with  $\bar{K}=0.8$  and  $\bar{l}=0.0$

شکل 5 توزیع فشار در بلوک مخزن با  $\bar{K}=0.8$  و  $\bar{l}=0.0$



بلوک مخزن، گرادیان فشار درون مخزن کمتر می‌شود (شکل 8). علاوه بر این، برای هر یک از مقادیر تراوایی مطلق سنگ مخزن، مقدار گرادیان فشار با نزدیک شدن به حفره چاه بیشتر می‌شود. نکته جالب این است که در فاصله‌ای حدود 12 برابر شعاع حفره چاه ( $\bar{R} = 11.8$ ) بیشترین مقدار گرادیان فشار مشاهده می‌شود (فارغ از مقدار تراوایی مطلق سنگ مخزن).

در شکل 9-الف نحوه تغییرات شاخص چاه عددی بی‌بعد بر حسب میزان خارج از مرکز بلوک بودن چاه و به ازای چند مقدار تراوایی مطلق سنگ مخزن نشان داده شده است. مشخص است که برای تمامی مقادیر تراوایی مطلق با افزایش فاصله چاه از مرکز بلوک میزان شاخص آن کاهش می‌یابد که به معنی ضعیف شدن عملکرد چاه در فرآیند تولید نفت از مخزن است. به عنوان مثال، برای بلوک مخزن با تراوایی مطلق  $\bar{K}=0.8$ ، با تغییر موقعیت چاه از مقدار  $\bar{L} = 0$  به  $\bar{L} = 1.0$  میزان شاخص چاه بی‌بعد شده از  $\bar{W} = 1.75$  به  $\bar{W} = 0.99$  کاهش می‌یابد (شکل 9-الف). در تمامی حالت‌های بررسی شده، با دور شدن چاه از مرکز (تا نسبت شعاع بی‌بعد 1) میزان شیب تغییرات شاخص چاه به صورت تدریجی افزایش پیدا می‌کند. با این وجود برای تمامی مدل‌ها، در نسبت شعاع 0.9 تا 1.0 شیب تغییرات شاخص چاه نسبتاً شدیدتری نسبت به بقیه شعاع‌ها مشاهده می‌شود. علت این امر نزدیک شدن محل حفاری چاه به نقطه‌ای در گوشه بلوک مخزن (دورترین نقطه از مرکز بلوک) است که در اینجا نقطه منفرد نامیده می‌شود. برای یک صفحه افقی، این نقطه منفرد در شکل 1-ب با نماد A نمایش داده شده است که نقطه مشترک بین وجهه‌هایی از بلوک محاسباتی است که برای همه آن‌ها شرط مرزی بدون جریان (دیواره) تجویز شده است (بخش 3). با نزدیک شدن محل حفاری حفره چاه به این نقطه منفرد و افزایش تاثیر دیواره‌ها روی جریان اطراف حفره چاه، از میزان شعاعی بودن جریان کاسته می‌شود. با توجه به شکل‌های 7-الف و 7-ب مشخص است که اندازه ناحیه جریان شعاعی مربوط به چاه خارج از مرکز بلوک کوچکتر از اندازه این ناحیه برای حالت چاه مرکزی است. در شکل 9-ب مقدار فشار بی‌بعد در فاصله شعاع معادل برای

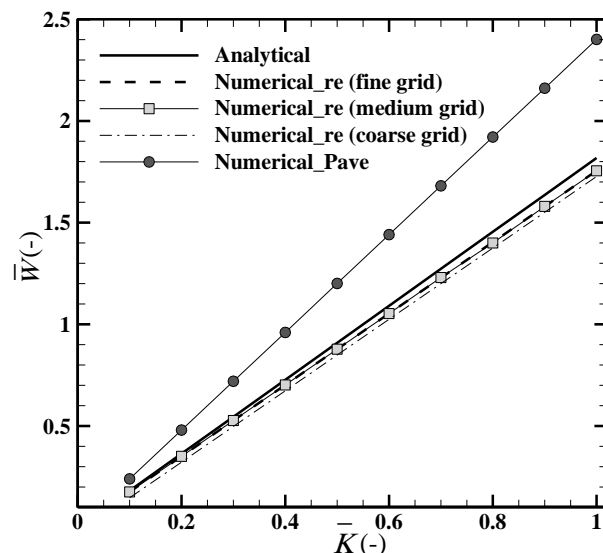
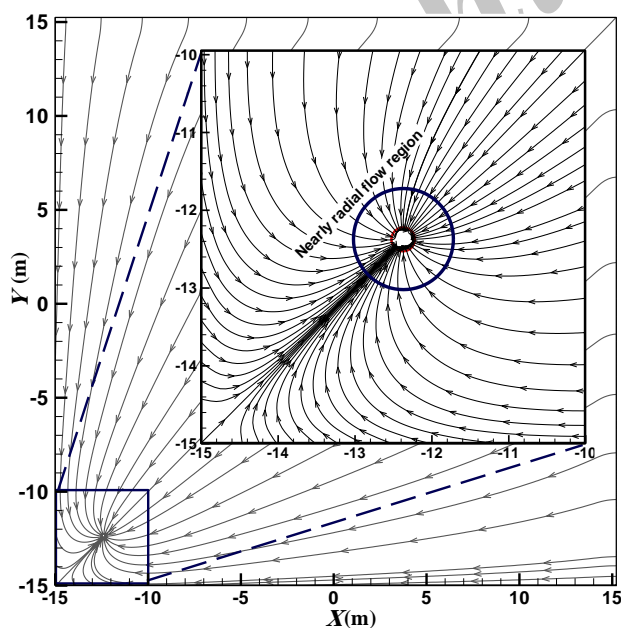


Fig. 6 Comparison of numerical and analytical results of well indices versus absolute permeability for  $\bar{L}=0.0$ .

شکل 6 مقایسه شاخص چاه عددی با مقدار تحلیلی به ازای مقادیر مختلف تراوایی مطلق برای حالتی که  $\bar{L}=0.0$  است

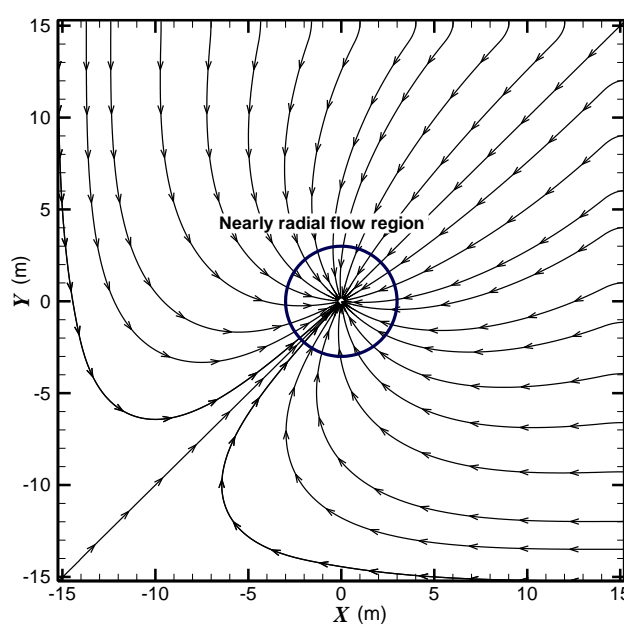
نمود و نتایج قبولی را برای حالت‌هایی که جریان سیال کاملاً شعاعی نیست، از هر دو حالت تحلیلی و عددی بدست آورد.

در شکل 8 نمودار افت فشار بی‌بعد در چند مدل با تراوایی مطلق متفاوت و در عمق 5 متری مخزن نشان داده شده است. در تمامی حالت‌ها شرایط مرزی و مشخصات هندسی چاه و بلوک مخزن یکسان است. لازم به ذکر است که فشار بی‌بعد  $\bar{p}$  به صورت نسبت فشار مخزن به فشار حفره چاه تصحیح شده در عمق مورد نظر تعریف شده است. در اینجا با اضافه نمودن فشار هیدرواستاتیک به فشار حفره چاه، این فشار در عمق تصحیح شده است. با توجه به شکل 8 مشخص است که با افزایش میزان تراوایی مطلق سنگ



b) Off-centered well ( $\bar{L} = 0.875$ )

(ب) چاه در خارج از مرکز بلوک ( $\bar{L} = 0.875$ )



a) Cell centered well

(الف) چاه در مرکز بلوک ( $\bar{L} = 0$ )

Fig. 7 The stream lines inside the reservoir block and around the well bore (at a depth of 15 m)

شکل 7 خطوط جریان سیال در عمق 15 متری بلوک مخزن و همچنین در اطراف حفره چاه تولیدی



چاه خارج از مرکز بلوک، مقدار شاخص کوچکتر از حالت مرکزی است. برای تولید یک دبی مشخص از چاه، لازم است کوچک بودن شاخص با بزرگتر بودن اختلاف فشار بین حفره چاه و فشار مخزن جبران شود (رابطه (6)). با توجه به اینکه در مدل حاضر فشار حفره چاه در سطح فوقانی آن ثابت در نظر گرفته شده است، باید فشار مخزن برای حالت خارج از مرکز بالاتر از حالت مرکزی باشد تا دبی مورد انتظار از آن تولید شود.

### 6- جمع بندی و نتیجه گیری

در کار حاضر، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی رفتار جریان سیال در اطراف یک چاه عمودی تولیدی با دو دیدگاه مختلف شبیه سازی شد. در دیدگاه اول، به عنوان دیدگاهی متداول در تاریخچه، جریان سیال فقط در ناحیه نزدیک به دیواره چاه شبیه سازی شد. در دیدگاه دوم شبیه سازی جریان سیال در فواصل دورتر از چاه و با در نظر گرفتن یک بلوک از شبکه محاسباتی یک مخزن هیدروکربنی انجام شد. بر این اساس، جریان دارسی-ناویراستوکس به صورت همزمان و برای مسئله ای با شرط مرزی نامتقارن به صورت سه بعدی انجام شد.

برخی از نتایج بدست آمده از کار حاضر به صورت زیر خلاصه می شود:

- مدل نزدیک دیواره چاه مطابقت خوبی با روابط تحلیلی دارد. میزان خطا در مقادیر محاسبه شده فشار و شاخص چاه نسبت به نتایج تحلیلی کمتر از 0.5 درصد است.
- در مدل اصلی (شبیه سازی جریان سیال در فواصل دورتر از چاه و با در نظر گرفتن یک بلوک محاسباتی مخزن) با شرط مرزی نامتقارن، جریان سیال فقط در نزدیکی چاه شعاعی است. این فاصله برای چاه عمودی واقع شده در مرکز بلوک، برابر با شعاع معادل است. در حالی که برای یک چاه خارج از مرکز بلوک محاسباتی مقدار شعاع ناحیه جریان شعاعی همیشه کمتر از مقدار شعاع معادل آن است. رابطه تحلیلی موجود برای شعاع معادل اثرات مربوط به خارج از مرکز بودن چاه را در نظر نگرفته و بر این اساس استخراج شده اند که جریان اطراف چاه کاملاً شعاعی است. برای یک چاه عمودی در مرکز بلوک مخزن، در

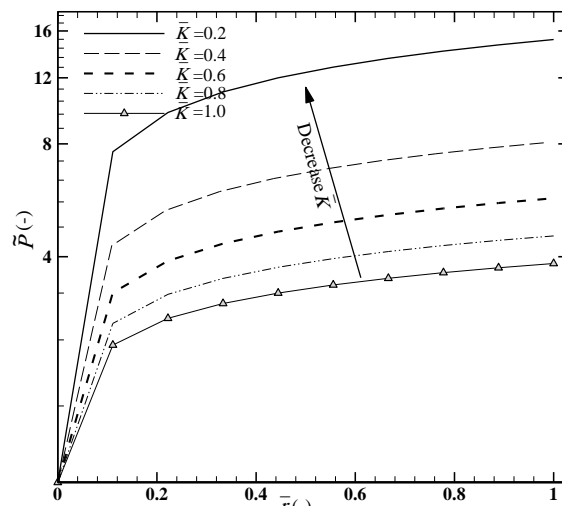
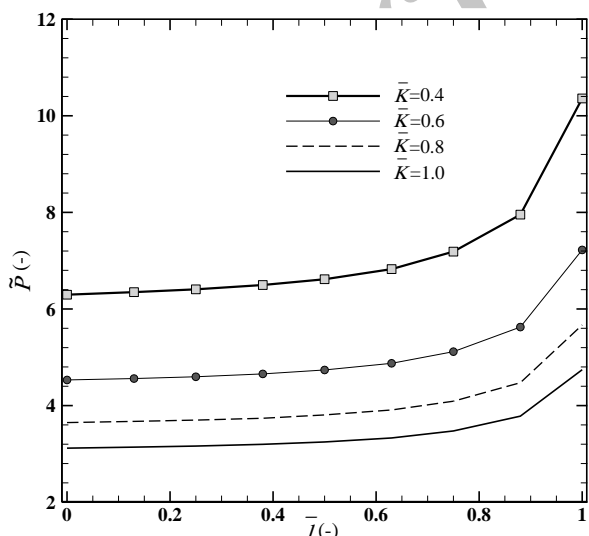


Fig. 8 The variation of non-dimensional pressure at a depth of 5 m versus distance from the well bore for different absolute permeability values

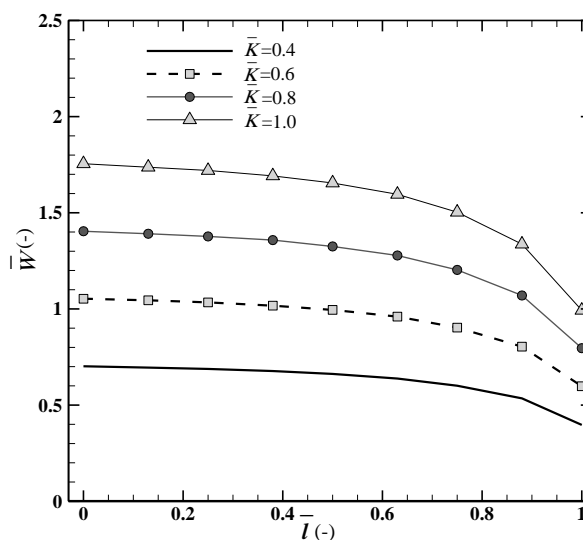
شکل 8 تغییرات فشار بی بعد بر حسب فاصله از حفره چاه به ازای مقادیر مختلف تراوایی بی بعد در عمق 5 متری

نسبت تراوایی های مختلف نشان داده شده است. در هر یک از مقادیر تراوایی مطلق سنگ مخزن، با فاصله گرفتن محل حفاری چاه، از مرکز بلوک، مقدار فشار بی بعد گزارش شده در شعاع معادل ( $r_e = 6.03m$ ) افزایش پیدا می کند. مشابه با تغییرات شاخص چاه، شیب تغییرات فشار در نسبت شعاع بی بعد 0.9 تا 1.0 به طور قابل ملاحظه ای زیاد می شود. از نقطه نظر حل عددی، در مواردی که چاه در نزدیکی نقطه منفرد قرار دارد، همگرایی حل عددی هم تحت تاثیر قرار گرفته و از سرعت همگرایی جوابها کاسته می شود. نتایج عددی نشان می دهند که توزیع فشار اطراف چاه در یک فاصله مشخص از چاهی که خارج از مرکز بلوک مخزن قرار دارد، با توزیع فشار اطراف همان چاه، برای حالتی که در مرکز بلوک واقع شده، متفاوت است و در حالت کلی در هر نقطه مقدار بزرگتری دارد. علت این است که برای یک



b) Non-dimensional pressure at the well equivalent radius and at a depth of 5 m

(ب) فشار بی بعد در شعاع معادل چاه و در عمق 5 متر



a) Non-dimensional well index

(الف) شاخص چاه بی بعد شده

Fig. 9 Effect well drilling location on different parameters for various absolute permeability values.

شکل 9 تاثیر خروج از مرکز بودن چاه روی پارامترهای مختلف به ازای مقادیر مختلف تراوایی مطلق

شعاع (m)	$r$
نسبت فاصله از مرکز چاه به فاصله بیشینه	$\bar{r} = \frac{r}{r_{max}}$
شعاع چاه (m)	$r_w$
شعاع معادل (m)	$r_e$
نسبت شعاع جریان شعاعی به شعاع چاه	$\bar{R} = \frac{r_{rad}}{r_w}$
شاخص چاه ( $m^3 day^{-1} bar^{-1}$ )	$W$
نسبت شاخص چاه عددی به متوسط شاخص چاه تحلیلی	$\bar{W} = \frac{W}{W_{ave}}$
علایم یونانی	
لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )	$\mu$
چگالی ( $kgm^{-3}$ )	$\rho$
زیر نویس ها	
مقدار بیشینه کمیت	max
مشخصه جریان شعاعی	rad
مشخصه مربوط به چاه	w
مقدار متوسط کمیت	ave

## 8- مراجع

- [1] Z. Chen, G. Huan, Y. Ma, *Computational Methods for Multiphase Flows in Porous Media*, pp. 285-290, Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2006.
- [2] Z. Chen, Y. Zhang, Well flow models for various numerical methods, *International Journal of Numerical Analysis and Modeling*, Vol. 6, No. 3, pp. 375-388, 2009.
- [3] D. W. Peaceman, Interpretation of Well-block pressures in numerical reservoir simulation, *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol. 18, No. 3, pp. 1-17, 1978.
- [4] D. W. Peaceman, Interpretation of Well-block pressures in numerical reservoir simulation with Non-square grid blocks and anisotropic permeability, *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol. 23, No. 1, pp. 531-543, 1983.
- [5] C. Wolfsteiner, J. Durlafsky, Kh. Aziz, Calculation of well index for Non-conventional wells on arbitrary grids, *Computational Geosciences*, Vol. 7, No. 1, pp. 61-82, 2003.
- [6] C. L. Palagi, Kh. Aziz, Modeling vertical and horizontal wells with voronoy grid, *Society of Petroleum Engineers Journal (SPE-26301-MS)*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-8, 1994.
- [7] Ch. Wolfsteiner, J. Durlafsky, Kh. Aziz, Approximate model for productivity of nonconventional wells in heterogeneous reservoirs, *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol. 5, No. 2, pp. 218-226, 2000.
- [8] Ch. Wolfsteiner, J. Durlafsky, Kh. Aziz, Efficient estimation of the effects of wellbore hydraulics and reservoir heterogeneity on the productivity of non-conventional wells, *SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management*, Yokohama, Japan, 25-26 April, 2000.
- [9] M. Byrne, M. A. Jimenez, J. C. Chavez, Predicting well inflow using computational fluid dynamics-closer to the truth?, *Society of Petroleum Engineers Journal (SPE-122351-MS)*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-9, 2009.
- [10] M. Byrne, M. A. Jimenez, E. A. Rojas, J. C. Chavez, Modeling well inflow potential in three dimensions using computational fluid dynamics, *SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA, 10-12 February*, 2010.
- [11] M. Byrne, M. A. Jimenez, E. A. Rojas, E. Castillo, Computational fluid dynamics for reservoir and well fluid flow performance modelling, *Society of Petroleum Engineers Journal, SPE-144130-MS*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-7, 2011.
- [12] O. Molina, Analysis of production rates of a gas well using computational fluid dynamics and rate-dependent pseudo-skin factor, *Society of Petroleum Engineers Journal (SPE-184497-STU)*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-14, 2016.
- [13] O. Molina, M. Tyagi, Computational fluid dynamics approach to predict pressure drop and flow behavior in the near wellbore region of a frac-packed gas well, *ASME, International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Volume 10: Petroleum Technology, 2015.
- [14] M. L. Szanyi, C. S. Hemmingsen, W. Yan, J. H. Walther, S. L. Glimberg, Near-wellbore modeling of a horizontal well with computational fluid dynamics, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 160, No. 1, pp. 119-128, 2018.
- [15] M. Mosharaf-Dehkordi, M. T. Manzari, H. Ghafouri, R. Fatehi, A general finite volume based numerical algorithm for hydrocarbon reservoir simulation using blackoil model, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 24, No. 8, pp. 1831-1863, 2014.
- [16] M. Azadi, S. M. Aminossadati, Z. Chen, Large-scale study of the effect of

صورتی شاخص چاه عددی با مقدار تحلیلی آن مطابقت خوبی دارد که از فشار متوسط در شعاع معادل حفره چاه برای محاسبه شاخص چاه عددی استفاده شود.

- گرادیان فشار در بلوک مخزن حاوی چاه متغیر است و در نزدیکی چاه، بیشترین شیب تغییرات فشار مشاهده می شود. فارغ از مقدار تراوایی سنگ بلوک مخزن، محل بیشترین تغییرات فشار در همه مدل ها یکسان و معادل فاصله ای در حدود 12 برابر ( $\bar{R} = 11.8$ ) شعاع حفره چاه است.

- در حالت چاه خارج از مرکز بلوک و برای تمامی مقادیر تراوایی مطلق، با افزایش فاصله چاه از مرکز بلوک محاسباتی میزان شاخص چاه کاهش می یابد. کاهش شاخص چاه به معنی ضعیف شدن عملکرد چاه در فرآیند تولیدی از مخزن است. به عنوان مثال، برای بلوک مخزن با تراوایی مطلق  $\bar{K} = 0.8$ ، با تغییر موقعیت چاه از مقدار  $\bar{L} = 0$  به  $\bar{L} = 1.0$  میزان شاخص چاه بی بعد شده از  $\bar{W} = 1.75$  به  $\bar{W} = 0.99$  کاهش می یابد.

- در حالت چاه خارج از مرکز بلوک محاسباتی، در هر یک از مقادیر تراوایی مطلق سنگ مخزن، با فاصله گرفتن محل حفاری چاه از مرکز بلوک مقدار فشار بی بعد گزارش شده در شعاع معادل ( $r_e = 6.03m$ ) افزایش پیدا می کند.

- مقدار شاخص تحلیلی برای یک چاه عمودی تولیدی در یک بلوک مخزن مکعب مستطیل شکل به مشخصات چاه (شعاع حفره چاه و عمق مشبک کاری شده) و مشخصات بلوک مخزن (ابعاد بلوک) و همچنین تانسور تراوایی مطلق سنگ مخزن وابسته است. نتایج عددی نشان می دهد که مقدار شاخص چاه علاوه بر مشخصاتی که مدل تحلیلی به صورت صریح در نظر می گیرد به عوامل دیگری نیز وابسته است. شرط مرزی اعمال شده روی بلوک مخزن و مهمتر از آن محل حفاری چاه عمودی (میزان خارج از مرکز بودن چاه) روی مقدار شاخص چاه موثر است. با افزایش میزان خارج از مرکز بودن چاه، مقدار شاخص چاه کاهش می یابد.

## 7- فهرست علایم

میزان تماس چاه و مخزن (m)	$h$
تانسور تراوایی مطلق ( $m^2$ )	$K$
تراوایی در راستای x ( $m^2$ )	$K_{xx}$
تراوایی در راستای y ( $m^2$ )	$K_{yy}$
نسبت تراوایی به تراوایی بیشینه	$\bar{K} = \frac{K}{K_{max}}$
طول بلوک (m)	$l_x$
عرض بلوک (m)	$l_y$
فاصله قطری از مرکز بلوک (m)	$l$
نسبت فاصله مرکز حفره چاه از یک راس بلوک به فاصله بیشینه	$\bar{l} = \frac{l}{l_{max}}$
فشار ( $kgm^{-1}s^{-2}$ )	$P$
فشار چاه (kPa)	$P_w$
نسبت فشار بلوک به فشار چاه	$\bar{P} = \frac{P}{P_w}$
نسبت فشار بلوک به فشار چاه تصحیح شده در عمق	$\bar{P} = \frac{P}{P_{bh}}$
دبی ( $m^3s^{-1}$ )	$q$

- [19] M. Azadi, S. M. Aminossadati, Z. Chen, Development of an integrated reservoir-wellbore model to examine the hydrodynamic behavior of perforated pipes, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 156, No.1, pp. 269-281, 2017.
- [20] Ansys. Fluent 12, *Theory Guide*, Ansys Inc, New York, USA, 2009.
- [21] H. J. Su, Modeling of Off-Center wells in reservoir simulation, *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol. 10, No. 1, pp. 176-181, 1995
- [22] S. D. Joshi, *Horizontal Well Technology*, pp. 203-211, Oklahoma: Penn Well Publishing Company, 1991.
- wellbore geometry on integrated reservoir-wellbore flow, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 35, No. 1, pp. 320-330, 2016.
- [17] H. Asheim, J. Kolnes, P. Oudeman, A flow resistance correlation for completed wellbore, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp.97-104, 1992.
- [18] L. B. Ouyang, S. Arbabi, K. Aziz, General wellbore flow model for horizontal, vertical, and slanted well completions, *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol. 3, No. 2, pp.124-133, 1998.

Archive of SID