

مدل سازی و بهینه سازی بهره وری چاه نفت با در نظر گرفتن اثر ضریب پوسته، شعاع چاه و ضخامت مخزن به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک

سپیده شمشیری، فهیمه حوری آباد صبور⁺، امیر حیدری، بهروز میرزایی

گروه مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده



واژه های کلیدی:

بهره وری، ضریب پوسته، شعاع چاه، ضخامت مخزن، بهینه سازی، دینامیک سیالات محاسباتی، روش سطح پاسخ، الگوریتم ژنتیک

:Keywords

Productivity, Skin Factor, Wellbore Radius, Reservoir Thickness, Optimization, Computational Fluid Dynamics, Response Surface Methodology, Genetic Algorithm

بهره وری چاه های نفت یکی از عوامل کلیدی در بهینه سازی تولید و کاهش هزینه ها در عملیات استخراج نفت است. ویژگی های مختلف مخازن نفتی، از جمله تغییرات فشار، تخلخل و نفوذپذیری، چالش هایی را برای بهره برداری بهینه از چاه ها ایجاد می کنند. این تحقیق به بررسی بهینه سازی بهره وری چاه نفت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک پرداخته است. تأثیر سه پارامتر کلیدی شامل ضریب پوسته، شعاع چاه و ضخامت مخزن بر بهره وری چاه نفت با استفاده از شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی و تحلیل روش سطح پاسخ بررسی شده است. سپس این پارامترها در یک طرح عاملی کامل با ۲۷ حالت مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. در نهایت با استفاده از الگوریتم ژنتیک، این پارامترها برای دستیابی به حداکثر بهره وری بهینه سازی شدند. نتایج به دست آمده نشان می دهند که بهینه سازی این پارامترها با الگوریتم ژنتیک، منجر به حداکثر بهره وری می شود. مقادیر ضریب همبستگی (R^2) و ضریب همبستگی تعدیل شده ($adj R^2$) برای مدل حاصل به ترتیب برابر با ۰/۹۶۳ و ۰/۹۵۲ بدست آمده است. مقادیر بهینه پارامترها شامل ضریب پوسته ۰/۴۱۲، شعاع چاه ۰/۲۵ متر و ضخامت مخزن ۳۹۹ متر می باشد، که در این شرایط شاخص بهره وری برابر با ۰/۶۳۹ محاسبه گردید. نتایج این تحقیق اطلاعات ارزشمندی در خصوص حساسیت پارامترها و تنظیمات بهینه جهت افزایش بهره برداری از مخازن نفتی ارائه می دهند.

دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵

نوع مقاله: علمی - پژوهشی

* عهده دار مکاتبات

+E- mail: f.saboor@uma.ac.ir

رجاع: سپیده شمشیری، فهیمه حوری آباد صبور، امیر حیدری، بهروز میرزایی، مدل سازی و بهینه سازی بهره وری چاه نفت با در نظر گرفتن اثر ضریب پوسته، شعاع چاه و ضخامت مخزن به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴۴(۳): ۱۲۱ تا ۱۳۳ (۱۴۰۴).

مقدمه

آگاهی از نرخ تولید سیالات استخراج شده از یک چاه در صنعت نفت و گاز به منظور بهینه‌سازی تولید و مدیریت مخزن ضروری است [۱]. شاخص بهره‌وری^۱ چاه‌های نفتی، پارامتری اساسی است که شرکت‌های نفتی برای توسعه برنامه تولید میادین از طریق اندازه‌گیری پتانسیل تولید از آن استفاده می‌کنند [۲]. ظرفیت بهره‌وری چاه نفت به میزان تولید روزانه نفت در زمانی که نرخ تولید ۱۰۰ درصد است، اشاره دارد [۳]. عوامل تأثیرگذار بر ظرفیت بهره‌وری چاه نفت از سه جنبه انتخاب می‌شوند: زمین‌شناسی، مهندسی و تولید [۴]. یکی از اهداف مهندسی تولید، افزایش شاخص بهره‌وری هر چاه تا حد ممکن و در عین حال مطابق با ملاحظات اقتصادی است. استراتژی‌های مختلفی برای حفاری چاه‌های نفت وجود دارد که هدف آن‌ها به حداکثر رساندن بهره‌وری در عین کاهش هزینه‌ها است [۵]. امروزه افت فشار پدیده‌ای رایج در جریان سیال از طریق چاه‌های نفت است و عاملی حیاتی در تعیین کارایی تولید هیدروکربن و عملکرد کلی در هنگام استخراج سیالات مخزن می‌باشد. برآورد افت فشار موضوعی است که همواره مورد تحقیق قرار گرفته و این فرآیند در صورت وجود چندین فاز (گاز، نفت و آب) در خط لوله پیچیده می‌شود [۶]. روش‌های بهینه‌سازی از اواخر دهه ۵۰ میلادی به طور مکرر در صنعت نفت مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۷]. شبیه‌سازی جریان سیال در مخازن هیدروکربنی، به‌ویژه در ناحیه اطراف چاه‌های تولیدی، نقش مهمی در تحلیل رفتار تولید و طراحی بهینه چاه ایفا می‌کند [۸]. در سال‌های اخیر، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی^۲ برای مدل‌سازی دقیق‌تر جریان در محیط متخلخل و اطراف چاه مورد توجه قرار گرفته است. این مدل‌ها معمولاً با استفاده از معادلات ناویر-استوکس^۳ توسعه می‌یابند. مدل‌سازی دقیق چاه در این چارچوب، نه تنها امکان تخمین دقیق‌تر شاخص بهره‌دهی چاه را فراهم می‌سازد، بلکه در طراحی بهینه تکمیل چاه، پیش‌بینی افت فشار و تحلیل رسوبات یا آسیب‌های اطراف چاه نیز کاربرد دارد [۹]. بهره‌وری تولید چاه‌های افقی [۱۰] و چاه‌های عمودی [۱۱] در بسیاری از مطالعات در طول سال‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. اجزای اصلی مورد استفاده در این مطالعات عبارتند از معادله داریسی^۴، هندسه مخزن و رژیم جریان که برای چاه‌های عمودی یا افقی متفاوت است. علاوه بر این، مهم‌ترین پارامترهای مورد استفاده شامل نفوذپذیری، طول بخش افقی، ضخامت مخزن، افت فشار، ویسکوزیته سیال، شعاع چاه، محیط خارجی، شعاع حوضچه چاه و ضریب پوسته هستند. رژیم جریان، شعاع حوضچه چاه و ضریب پوسته

از مهم‌ترین عواملی هستند که برای تمایز بهره‌وری چاه‌های عمودی از چاه‌های افقی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ضریب پوسته به آسیب‌هایی اشاره دارد که به دلیل حفاری، تعمیرات یا عملیات تکمیل چاه ایجاد می‌شود [۲]. جلال و همکاران در سال ۲۰۲۴ مدل یکپارچه چاه-مخزن را با استفاده از معادلات سه‌بعدی ناویر-استوکس توسعه دادند و ناحیه آسیب مخزن را در آن گنجانده‌اند. برای شبیه‌سازی رابط‌های متخلخل-متخلخل و متخلخل-سیال، از رویکرد رابط شبکه عمومی^۵ به همراه مدل جریان جرم محافظه‌کارانه استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل دینامیک سیالات محاسباتی قادر است برای شبیه‌سازی مدل‌های مقیاس میدان واقعی گسترش یابد. به‌طور کلی، مدل‌سازی یکپارچه چاه-مخزن بر اساس معادلات سه‌بعدی ناویر-استوکس با استفاده از تکنیک‌های محاسباتی کارآمد می‌تواند به پیشبرد دانش موجود در صنعت نفت کمک کند [۹]. ژائو و همکاران در سال ۲۰۲۳ روشی مبتنی بر یادگیری ماشین برای پیش‌بینی بهره‌وری اولیه چاه‌های نفت در مخازن با تراوایی پایین ارائه کردند. آن‌ها با ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات^۶ و ماشین یادگیری حدی^۸، مدلی با دقت بالا توسعه دادند که توانست بهره‌وری اولیه چاه‌ها را با ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۹۰۵ پیش‌بینی کند. مدل آن‌ها تاکنون در سایر میادین نفتی با شرایط زمین‌شناسی، عوامل مهندسی و دینامیک توسعه متفاوت به کار گرفته نشده است. زیرا جایگزینی منبع داده‌های ورودی می‌تواند موجب ناسازگاری پارامترهای مدل با شرایط جدید شود. بنابراین، ضروری است که برای دستیابی به پیش‌بینی دقیق بهره‌وری اولیه در میادین جدید، پارامترهای مدل پیش‌بینی به‌طور مناسب تنظیم شوند [۱۲]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۲۲ روشی مبتنی بر یادگیری ماشین برای پیش‌بینی بهره‌وری اولیه چاه‌های نفت در میدان نفتی خود ارائه کردند. در این مطالعه، به دلیل طول زیاد ناحیه نفت‌دار، ناهمسان‌گردی شدید و تفاوت قابل توجه در خواص سیالات، پیش‌بینی دقیق نرخ بهره‌وری اولیه چاه‌ها با چالش‌هایی مواجه بود. برای مقابله با این مشکلات، مدل شبکه عصبی مبتنی بر الگوریتم گرادیان تقویتی^۷ توسعه داده شد که قادر بود بهره‌وری اولیه چاه‌ها را با دقت بالا پیش‌بینی کند. در این پژوهش، داده‌های ۱۰۰ حلقه چاه نفت به‌عنوان ورودی به مدل داده شد و شاخص بهره‌وری ویژه در دوره‌ای پایدار از تولید اولیه به‌عنوان خروجی هدف در نظر گرفته شد. پس از آموزش و بهینه‌سازی مدل، نتایج پیش‌بینی با خطای میانگین مربعی کمتر از ۰/۱۵، تطابق بالایی با داده‌های واقعی نشان داد [۱۳]. در بسیاری از پژوهش‌ها از رویکردهای بهینه‌سازی مانند الگوریتم‌های تجمعی نظیر PSO یا روش‌های یادگیری ماشین

(۱) Productivity Index

(۳) Navier-Stokes

(۵) General Grid Interface (GGI)

(۷) Particle Swarm Optimization (PSO)

(۹) Wang

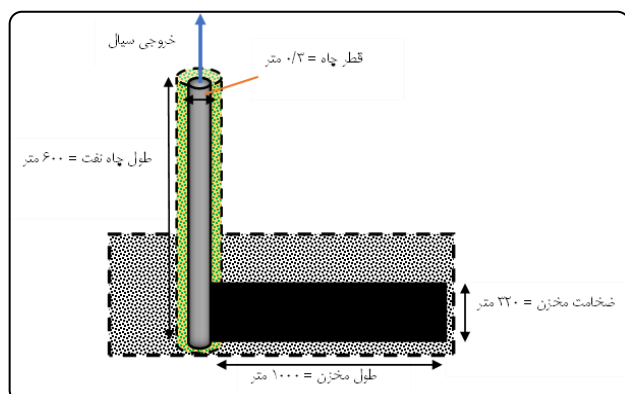
(۲) Computational Fluid Dynamics (CFD)

(۴) Darcy equation

(۶) Zhao

(۸) Extreme Learning Machine (ELM)

(۱۰) eXtreme Gradient Boosting



شکل ۱- هندسه شبیه‌سازی شده

همچنین شرایط مرزی سرعت و فشار برای ورودی و خروجی مخزن متخلخل هیدروکربنی به ترتیب برابر با $u=3 \times 10^{-7}$ m/s و $P=4500$ kPa در نظر گرفته شده است [۱۶، ۱۷].

ویژگی‌های سیال و مخزن

خواص سیال در این شبیه‌سازی مطابق با منابع مورد استفاده بصورت زیر در نظر گرفته شده است؛

دانسیته برابر با 690 kg/m^3 ، ویسکوزیته دینامیکی برابر با 0.01 Pa.s ، میزان نفوذپذیری برابر با $0.1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ ، تخلخل برابر با 0.25 و ضریب حجمی برابر با $1/2$ می‌باشند [۵، ۱۶]. همچنین میزان ضریب پوسته در این شبیه‌سازی از مقادیر تجربی ارائه شده در مقالات بدست آمده است [۱۸] و جریان سیال بصورت آرام، نیوتنی، پایا و تراکم ناپذیر فرض و ساختار متخلخل مخزن به صورت همگن و ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است.

مدل‌سازی و معادلات حاکم

در این مطالعه، به منظور مدل‌سازی میدان جریان سیال در مخزن متخلخل و چاه نفت، از مدل جریان تک‌فازی تراکم‌ناپذیر استفاده شده است. این انتخاب با توجه به هدف تحقیق که بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی و هندسی بر بهره‌وری چاه است و با فرض غالب بودن فاز مایع (نفت) در شرایط مرجع شبیه‌سازی، انجام گرفته است. در این شرایط مرجع، فرض شده که نفت به عنوان فاز غالب در محیط مخزن وجود داشته و سایر فازها مانند گاز و آب تأثیر ناچیزی دارند. بر اساس این مدل، توزیع فشار در اطراف چاه بدست آمد، پس از تحلیل توزیع فشار برای هر تغییر در پارامترها، بهره‌وری چاه محاسبه شده است. با این حال، باید توجه داشت که در شرایط واقعی، حضور فازهای دیگر نظیر گاز و آب نیز ممکن است بر رفتار جریان تأثیرگذار باشد که در این مدل لحاظ نشده است. همچنین در این پژوهش، به منظور حل معادلات دیفرانسیل حاکم از روش المان محدود استفاده گردید و برای حصول اطمینان

مانند شبکه عصبی مصنوعی^۱ استفاده شده است، که با وجود توانایی در پیش‌بینی پاسخ سیستم، نیازمند حجم بالایی از داده و زمان آموزش هستند و اغلب فاقد تفسیر فیزیکی دقیق نسبت به پدیده‌های درون‌چاهی می‌باشند [۱۴، ۱۵]. هدف این تحقیق، بررسی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بهره‌وری چاه نفت در مخزن متخلخل با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و الگوریتم ژنتیک است. شبیه‌سازی بهره‌وری چاه نفت با تغییر سه فاکتور اساسی شامل ضریب پوسته چاه، شعاع چاه نفت و ضخامت مخزن صورت گرفته است. این پارامترها با استفاده از روش شناسی سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک برای دستیابی به حداکثر بهره‌وری بهینه‌سازی شده است. هدف نهایی کاهش میزان خطا میان مقادیر پیش‌بینی شده و داده‌های مدل‌سازی، دستیابی به مقادیر R^2 نزدیک به یک و به حداقل رساندن ریشه میانگین مربعات خطا^۲ است. این رویکرد به شناسایی شرایط بهینه برای بهره‌وری بالاتر چاه و بهبود تصمیم‌گیری در مهندسی نفت کمک می‌کند. در واقع، رویکرد ترکیبی ارائه شده در این پژوهش با بهره‌گیری هم‌زمان از مدل‌سازی عددی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی، طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک، گامی نوین در جهت پر کردن شکاف مطالعات قبلی محسوب می‌شود. برخلاف مطالعاتی که تنها بر یکی از این ابزارها تکیه داشته‌اند، چارچوب این تحقیق نه تنها امکان تحلیل اثرات متقابل پارامترهای کلیدی را فراهم می‌سازد، بلکه به دلیل ماهیت فیزیکی مدل عددی، تفسیرپذیری دقیق‌تری نسبت به رفتارهای درون‌چاهی ارائه می‌دهد.

روش شناسی

هندسه شبیه‌سازی شده

هندسه شبیه‌سازی شده شامل چاه عمودی نفت و مخزن متخلخل است که، چاه دارای طول و شعاعی به ترتیب برابر با 600 m و 0.15 بوده و مخزن متخلخل دارای طول و ضخامتی برابر با 1000 m و 320 می‌باشد [۲، ۵، ۱۶]. با توجه به هندسه تعریف شده، می‌توان بررسی کرد که چگونه تغییرات در پارامترهای چاه و مخزن بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارند. بررسی استقلال از مش نشان داد که استفاده از 9300 المان منجر به نتایج پایدار و مستقل از شبکه می‌شود. شکل ۱ هندسه شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

شرایط مرزی

شرایط مرزی سرعت و فشار برای ورودی و خروجی چاه نفت به ترتیب برابر با $u=1/5 \text{ m/s}$ و $P=100 \text{ kPa}$ در نظر گرفته شده است [۵]. در دیواره چاه فرض شده است که سرعت جریان سیال صفر باشد، به عبارتی دیگر شرط عدم لغزش در دیواره چاه حاکم است.

(۱) Artificial Neural Network (ANN)

(۲) Root Mean Square Error (RMSE)

جدول ۱ - دامنه و سطوح آزمایشی متغیرهای مستقل

متغیرها	واحد	متغیرهای کدگذاری شده	سطوح متغیر	۰	۱	-۱
ضریب پوسته	---	A	۱	۰/۷	۰/۴	
شعاع چاه نفت	متر	B	۰/۲۵	۰/۲	۰/۱۵	
ضخامت مخزن	متر	C	۴۰۰	۳۶۰	۳۲۰	

روش‌شناسی سطح پاسخ^۱

در این روش داده‌ها به صورت آماری با مدلی ریاضی برازش داده می‌شوند تا تعامل‌های ممکن بین متغیرهای وابسته (پاسخ) و مستقل بررسی شده و همچنین پاسخ‌ها پیش بینی و بهینه‌سازی شود [۲۰]. مدل تولید شده در روش RSM با بالاترین دقت می‌تواند کل فرآیند را توصیف نماید [۲۱] و امکان شناسایی دقیق رفتار سیستم یا آزمون را فراهم سازد [۲۲]. علاوه بر این، این روش می‌تواند برای ایجاد و بهینه‌سازی شرایط آزمایشی متنوع در طیف گسترده‌ای از پروژه‌های علمی و مهندسی مورد استفاده قرار گیرد [۲۳]. در هر فرآیندی، عوامل متعددی بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارند. بررسی اثرات هر یک از این عوامل بر پاسخ سیستم مستلزم انجام تعداد زیادی آزمایش است که به دلیل زمان‌بر بودن، مصرف مواد اولیه و نیاز به نیروی کار زیاد، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود [۲۴]. بنابراین، برای غلبه بر این مشکلات و حفظ اطلاعات کافی جهت دستیابی به نتایج آماری قابل قبول، طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ بر اساس طراحی عاملی کامل^۲ انجام شد. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، سه متغیر مستقل یعنی شعاع چاه نفت، ضخامت مخزن و ضریب پوسته چاه برای شاخص بهره‌وری (متغیر وابسته) در سه سطح (۱، ۰، -۱) کدگذاری شده‌اند. برای درک چارچوب آزمایشات و بررسی نتایج، اطلاعات این جدول مورد نیاز است. وابستگی پاسخ به عوامل با استفاده از معادله درجه دوم ۶ ارزیابی شد [۲۵]:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (6) \quad i \neq j$$

در معادله ۶، Y پاسخ پیش‌بینی شده، X_i و X_j متغیرهای ورودی و $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ به ترتیب، مقادیر ثابت، خطی، درجه دوم و تعاملات هستند. k تعداد پارامترهای مستقل و ε خطای تصادفی است. همچنین، با استفاده از تحلیل واریانس^۳ کفایت مدل پیشنهادی با بررسی مقادیر F و P (در سطح اطمینان ۹۵٪)، ضریب همبستگی (R^2) و ضریب همبستگی تعدیل شده ($adj R^2$) ارزیابی شد.

از پایداری حل عددی، معیار همگرایی باقی‌مانده‌ها برای معادلات بقای جرم، ناویراستوکس و دارسی برابر با 10^{-3} در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی جریان سیال در مخزن و چاه نفت، نیاز به حل معادله‌های بقای جرم، ناویراستوکس و معادله دارسی است که در روابط ۱، ۲ و ۳ به ترتیب بیان شده‌اند [۶].

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

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

$$u = -\frac{1}{\mu} K (\nabla P - \rho g \nabla z) \quad (3)$$

در اینجا، زیر نویس i و j بیان‌کننده جهت در راستاهای دستگاه مختصات است. در اینجا u_i و x_i به ترتیب سرعت و مکان در جهت i را نشان می‌دهند. هر پارامتر در معادلات ۱، ۲ و ۳، با واحد مربوطه معرفی شده است: u سرعت (m/s)، P فشار (kPa)، μ ویسکوزیته (Pa.s)، ρ چگالی (kg.m^{-3})، g گرانش (m.s^{-2})، τ تنش برشی (Pa)، K نفوذپذیری مطلق (m^2) و ∇z ارتفاع عمودی از سطح مخزن (m) است. برای تعیین اختلاف فشار میان مخزن و چاه، توزیع فشار در مسیر بین این دو ناحیه بدست آمده و میزان اختلاف فشار محاسبه شده است. برای محاسبه نرخ بهره‌وری در چاه عمودی نفت شبیه‌سازی شده از رابطه ۴ استفاده شده است [۲].

$$J = \frac{2\pi K H_r}{\mu_0 B_0 (\ln r_e - \ln r_w + S)} \Delta P \quad (4)$$

در این رابطه، J نرخ بهره‌وری ($\text{m}^3/\text{Pa.s}$)، K نفوذپذیری (m^2)، H_r ضخامت مخزن (m)، μ_0 ویسکوزیته نفت (Pa.s)، B_0 ضریب حجم تشکیل نفت، r_e شعاع تأثیر (m)، r_w شعاع چاه نفت (m)، S ضریب پوسته و ΔP اختلاف فشار (kPa) بین مخزن و چاه است. برای تعیین میزان شعاع تأثیر در این شبیه‌سازی از رابطه ۵ استفاده شده است [۱۹].

$$r_e = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (5)$$

A (با واحد m^2) در این رابطه مساحت مخزن می‌باشد. به صورت کلی، در این پژوهش، ۲۷ حالت مختلف شبیه‌سازی با تغییر پارامترهای ضریب پوسته، شعاع چاه و ضخامت مخزن بررسی و در هر مرحله، نرخ بهره‌وری از طریق محاسبه اختلاف فشار بین مخزن و چاه محاسبه شد. برای بررسی دقیق‌تر و جامع‌تر این موضوع، با بکارگیری روش سطح پاسخ تأثیر متغیرهای مستقل مورد مطالعه بر نرخ بهره‌وری و اثر متقابل آن‌ها بررسی شده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقادیر بهینه این پارامترها برای دستیابی به حداکثر نرخ بهره‌وری پیش‌بینی شده است.

(۱) Response Surface Methodology (RSM)

(۲) Full Factorial

(۳) Analysis of Variance (ANOVA)

جدول ۲ - اثر پارامترهای مختلف بر میزان افت فشار و نرخ بهره‌وری در شبیه‌سازی انجام شده

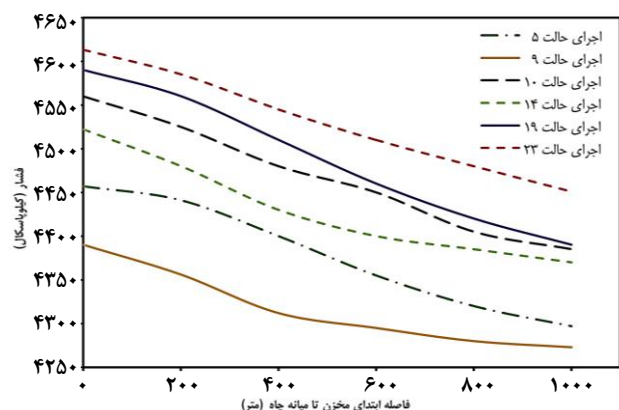
حالت	ضریب پوسته	شعاع چاه نفت (m)	ضخامت مخزن (m)	افت فشار (kPa)	نرخ بهره‌وری
۵	۱	۰/۲	۳۶۰	0.16×10^3	۰/۳۶۶
۹	۱	۰/۱۵	۴۰۰	0.12×10^3	۰/۲۸۰
۱۰	۰/۷	۰/۲۵	۳۲۰	0.18×10^3	۰/۳۹۰
۱۴	۰/۷	۰/۱۵	۴۰۰	0.15×10^3	۰/۳۷۰
۱۹	۰/۴	۰/۲۵	۳۲۰	0.2×10^3	۰/۴۷۰
۲۳	۰/۴	۰/۲	۳۶۰	0.16×10^3	۰/۳۹۲

جدول ۳ - نتایج بررسی استقلال از مش برای اجرای حالت ۵

تعداد المان‌های مش بندی شده	افت فشار (kPa)	نرخ بهره‌وری
۳۲۵۸۹	0.16×10^3	۰/۳۶۶۰
۱۴۱۰۶	0.162×10^3	۰/۳۶۶۲
۹۳۰۰	0.165×10^3	۰/۳۷۳۰

جدول ۴ - مقایسه داده‌های مدل‌سازی با مقادیر گزارش شده در مقالات

مورد مطالعه	مقدار حاصل از مدل‌سازی	مقدار گزارش شده	منابع
افت فشار بین مخزن و چاه (kPa)	۴۳۹۰	۴۴۱۷/۴	[۹]
افت فشار بین مخزن و چاه (kPa)	۴۵۸۰	۴۵۸۵/۴	[۹]
نرخ بهره‌وری ($m^3/Pa.s$)	۰/۲۴۶	۰/۲۵	[۲۹]
نرخ بهره‌وری ($m^3/Pa.s$)	۰/۳۲	۰/۳۱	[۲۹]



شکل ۲ - توزیع فشار از ابتدای مخزن تا چاه نفت برای شش حالت مختلف شبیه‌سازی

به منظور بررسی دقت مدل‌سازی، آزمون استقلال از مش با استفاده از سه شبکه مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد المان‌ها از ۹۳۰۰ به ۳۲۵۸۹، تغییرات در نرخ بهره‌وری کمتر از ۲ درصد بوده و در نتیجه، مدل از نظر مش‌بندی بهینه است. جدول ۳ نتایج بررسی استقلال از مش را در این کار نشان می‌دهد. این بررسی برای اجرای حالت ۵، در شبیه‌سازی انجام گردید. همچنین برای اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی در جدول ۴ برخی از نتایج انتخاب شد و با نتایج گزارش شده در مطالعات پیشین مقایسه گردید. نتایج بدست آمده همخوانی خوبی با داده‌های ارائه شده در مقالات دارد [۲۹، ۹].

الگوریتم ژنتیک^۱

الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزاری قوی برای حل مسائل مهندسی نفت و یکی از پرکاربردترین روش‌ها در حل مسائل بهینه‌سازی مکان چاه‌های نفت می‌باشد که از اصول تکامل طبیعی داروین الهام می‌گیرد [۲۶، ۲۷]. این الگوریتم، روشی برای جستجو در علم کامپیوتر برای یافتن راه حل تقریبی بهینه‌سازی است. الگوریتم ژنتیک از تکنیک‌های زیست‌شناسی مانند وراثت و جهش بهره می‌برد و معمولاً گزینه‌ای مناسب برای تخمین متغیرها بر مبنای رگرسیون است [۲۷، ۲۸]. در این پژوهش، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای ضریب پوسته چاه، شعاع چاه نفت و ضخامت مخزن با هدف بیشینه‌سازی نرخ بهره‌وری چاه نفت استفاده شده است. پایتون یکی از محبوب‌ترین و قدرتمندترین زبان‌های برنامه‌نویسی برای محاسبات علمی است که به دلیل دسترسی آسان، بیان ساده و شفاف و امکان پیاده‌سازی راحت الگوریتم‌های یادگیری ماشین، جایگاه ویژه‌ای در جامعه گسترده دانشمندان دارد. با استفاده از پایتون و پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک می‌توان ابزاری قدرتمند برای بهینه‌سازی مسائل پیچیده بدست آورد. استفاده از این روش در طراحی و مدیریت مخازن نفتی می‌تواند به بهره‌وری بیشتر و کاهش هزینه‌ها منجر شود. بهینه‌سازی در محیط برنامه‌نویسی پایتون^۲ با تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک، اندازه جمعیت، تعداد نسل‌ها، نرخ ترکیب، نرخ جهش برای بهینه‌سازی استفاده شده است.

نتایج و بحث

نتایج شبیه‌سازی

از حالت اجرای شبیه‌سازی در شرایط مختلف، شش نمونه به صورت دلخواه انتخاب و در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهند در هر اجرا اثر سه پارامتر مورد مطالعه، بر میزان افت فشار در مخزن و میزان بهره‌وری بررسی شده است. همچنین برای نشان دادن نحوه افت فشار بین چاه نفت و مخزن، نتایج مربوط به توزیع فشار در شش حالت مختلف شبیه‌سازی در شکل ۲ آورده شده است. طبق شکل ۲ فشار از مخزن به سمت چاه کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل وجود خلل و فرج مخزن، ویسکوزیته سیال و سایر مقاومت‌ها در مسیر جریان است و به خوبی اثر پارامترهای موثر بر میزان افت فشار و در نهایت بر نرخ بهره‌وری را نشان می‌دهد.

(۱) Genetic Algorithm (GA)

(۲) Python

جدول ۵ - متغیرهای مستقل و وابسته برای کل ۲۷ آزمایش و نتایج حاصل از مدل سازی و پیش بینی شده برای نرخ بهره‌وری

اجرا	ضریب پوسته	شعاع چاه نفت (m)	ضخامت مخزن (m)	مدل سازی	پیش بینی شده	اختلاف
۱	۱	۰/۲۵	۳۲۰	۰/۲۴۶	۰/۲۷۶	-۰/۰۳
۲	۱	۰/۲۵	۳۶۰	۰/۳۸۰	۰/۴۰۱	-۰/۰۲۱
۳	۱	۰/۲۵	۴۰۰	۰/۵۶۰	۰/۵۴۹	۰/۰۱۱
۴	۱	۰/۲	۳۲۰	۰/۲۱۵	۰/۲۱۲	۰/۰۰۳
۵	۱	۰/۲	۳۶۰	۰/۳۶۶	۰/۳۱۱	۰/۰۵۵
۶	۱	۰/۲	۴۰۰	۰/۴۳۰	۰/۴۳۵	-۰/۰۰۵
۷	۱	۰/۱۵	۳۲۰	۰/۱۱۹	۰/۱۲۴	-۰/۰۰۵
۸	۱	۰/۱۵	۳۶۰	۰/۲۱۰	۰/۱۹۹	۰/۰۱۱
۹	۱	۰/۱۵	۴۰۰	۰/۲۸۰	۰/۲۹۹	-۰/۰۱۹
۱۰	۰/۷	۰/۲۵	۳۲۰	۰/۳۹۰	۰/۳۵۷	۰/۰۳۳
۱۱	۰/۷	۰/۲۵	۳۶۰	۰/۴۱۶	۰/۴۶۲	-۰/۰۴۶
۱۲	۰/۷	۰/۲۵	۴۰۰	۰/۶۳۳	۰/۵۹۳	۰/۰۴
۱۳	۰/۷	۰/۲	۳۲۰	۰/۲۹۰	۰/۲۷۹	۰/۰۱۱
۱۴	۰/۷	۰/۲	۳۶۰	۰/۳۷۰	۰/۳۶۱	۰/۰۰۹
۱۵	۰/۷	۰/۲	۴۰۰	۰/۴۵۰	۰/۴۶۸	-۰/۰۱۸
۱۶	۰/۷	۰/۱۵	۳۲۰	۰/۱۸۰	۰/۱۸۰	۰/۰۰
۱۷	۰/۷	۰/۱۵	۳۶۰	۰/۲۳۰	۰/۲۳۸	-۰/۰۰۸
۱۸	۰/۷	۰/۱۵	۴۰۰	۰/۳۰۰	۰/۳۲۱	-۰/۰۲۱
۱۹	۰/۴	۰/۲۵	۳۲۰	۰/۴۷۰	۰/۴۴۲	۰/۰۲۸
۲۰	۰/۴	۰/۲۵	۳۶۰	۰/۵۴۰	۰/۵۳۱	-۰/۰۰۹
۲۱	۰/۴	۰/۲۵	۴۰۰	۰/۶۲۲	۰/۶۴۵	-۰/۰۲۳
۲۲	۰/۴	۰/۲	۳۲۰	۰/۳۲۰	۰/۳۵۴	-۰/۰۳۴
۲۳	۰/۴	۰/۲	۳۶۰	۰/۳۹۲	۰/۴۱۸	-۰/۰۲۶
۲۴	۰/۴	۰/۲	۴۰۰	۰/۵۱۲	۰/۵۰۸	۰/۰۱۶۵
۲۵	۰/۴	۰/۱۵	۳۲۰	۰/۲۳۹	۰/۲۴۳	-۰/۰۰۴
۲۶	۰/۴	۰/۱۵	۳۶۰	۰/۳۰۰	۰/۲۸۴	۰/۰۱۶
۲۷	۰/۴	۰/۱۵	۴۰۰	۰/۳۸۰	۰/۳۵۰	۰/۰۳

تحلیل روش سطح پاسخ

در این پژوهش، تحلیل معنی دار آماری روش سطح پاسخ با استفاده از تحلیل واریانس^۱ انجام شد. در جدول ۵ متغیرهای مستقل و وابسته برای کل ۲۷ آزمایش و نتایج حاصل از مدل سازی و پیش بینی شده برای نرخ بهره‌وری ارائه شده است. همان طور که در جدول ۵ نشان داده شده است، دامنه گسترده‌ای از نرخ بهره‌وری (از $0/119 \text{ m}^3/\text{Pa.s}$ تا $0/633$) ضرورت بهینه‌سازی نرخ بهره‌وری را نشان می‌دهد. همچنین اختلاف میان مقادیر پیش‌بینی شده و مدل سازی شده نشان‌دهنده دقت بالای مدل و تطابق خوب آن با داده‌های تجربی است. در اینجا A، B و C مقادیر کدگذاری شده ضریب پوسته، شعاع چاه نفت و ضخامت مخزن هستند. جدول ۶ نشان‌دهنده مناسبت مدل و تعامل بین عوامل و پاسخ است. طبق نتایج آماری، مقدار بالای F ($55/40$) و مقدار p پایین ($0/001$) نشان‌دهنده معنی داری مدل است. ضریب همبستگی ($0/963$) و ضریب

جدول ۶ - نتایج تحلیل واریانس برای مدل درجه دوم و اهمیت مدل RSM

	coef	std err	t	P> t
const	۰/۳۶۰۹	۰/۰۱۵	۲۳/۵۲۸	۰/۰۰۰
A	-۰/۰۵۳۸	۰/۰۰۷	-۷/۵۸۲	۰/۰۰۰
B	-۰/۱۱۲۲	۰/۰۰۷	۱۵/۷۹۷	۰/۰۰۰
C	-۰/۰۹۴۳	۰/۰۰۷	۱/۲۸۵	۰/۰۰۰
AB	-۰/۰۱۱۳	۰/۰۰۹	-۱/۳۰۳	۰/۲۱۰
AC	-۰/۰۱۷۱	۰/۰۰۹	۱/۹۶۴	۰/۰۶۶
BC	-۰/۰۲۳۹	۰/۰۰۹	۲/۷۵۰	۰/۰۱۴
A ²	-۰/۰۰۳۵	۰/۰۱۲	-۰/۲۸۵	۰/۷۷۹
B ²	-۰/۰۱۰۸	۰/۰۱۲	-۰/۸۸۱	۰/۳۹۱
C ²	-۰/۰۱۲۷	۰/۰۱۲	۱/۰۳۰	۰/۳۱۷

همبستگی تعدیل شده ($0/952$) نشان‌دهنده دقت مدل می‌باشد و بنابراین، این نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند در فضای طراحی حرکت کند [۳۰].

(۱) Analysis of Variance (ANOVA)

مستقیمی بر کارایی و بهره‌وری چاه‌های نفتی دارد. این پارامتر مستقیماً به طراحی و ابعاد چاه وابسته بوده و بر نحوه جریان نفت و سایر سیالات به درون چاه تأثیر می‌گذارد [۳۳]. با افزایش شعاع چاه، مقاومت جریان سیال به سمت چاه کاهش می‌یابد، زیرا سطح تماس بیشتری برای جریان فراهم می‌شود. این امر باعث افزایش نرخ بهره‌وری می‌شود. همچنین افزایش شعاع چاه به‌طور مؤثر فضای بیشتری را برای جریان سیال به داخل چاه فراهم می‌آورد و می‌تواند از ایجاد محدودیت در جریان سیال جلوگیری کرده و نرخ تولید را در طول زمان پایدارتر نگه دارد. به‌طور کلی، در سیستم‌های چاه‌های نفتی، تغییرات در شعاع چاه می‌تواند موجب تغییرات قابل توجهی در نحوه عملکرد چاه و نرخ تولید نفت در طول زمان شود. در سیستم‌های پیشرفته‌تر و در پروژه‌های افزایش برداشت از مخزن، شعاع چاه به‌عنوان یک پارامتر مهم در مدل‌سازی‌های شبیه‌سازی شده برای پیش‌بینی عملکرد بلندمدت چاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۴]. طبق معادله ۴ بهره‌وری در چاه عمودی با شعاع چاه به شکل لگاریتمی مرتبط است [۲].

در شکل ۳ (الف) خط آبی نشان دهنده میزان اثر ضریب پوسته بر بهره‌وری می‌باشد. در مهندسی مخازن، ضریب پوسته یک پارامتر مهم برای توصیف اثرات آسیب به چاه است که بر بهره‌وری آن تأثیر می‌گذارد. ضریب پوسته مثبت $S_D > 0$ نشان‌دهنده آسیب به چاه به دلیل عواملی مانند شکستگی‌های ناشی از حفاری، رسوب‌گذاری یا تراکم ذرات است که باعث کاهش بهره‌وری چاه می‌شود. اثر ضریب پوسته بر بهره‌وری چاه از طریق شاخص بهره‌وری محاسبه می‌شود. بهره‌وری چاه با افزایش مقدار ضریب پوسته کاهش می‌یابد. افزایش ضریب پوسته موجب کاهش توانایی چاه در جریان‌دهی سیالات می‌شود. این امر به دلیل افزایش مقاومت در برابر جریان سیال در مناطق آسیب‌دیده اطراف چاه است که بر بهره‌وری کلی چاه تأثیر می‌گذارد. در بسیاری از مطالعات، نشان داده شده است که اثرات منفی ضریب پوسته در چاه‌های نفتی می‌تواند منجر به کاهش بهره‌وری طولانی‌مدت مخزن شود. از این رو، بهینه‌سازی ضریب پوسته و کاهش آن از طریق تکنیک‌های مختلف مانند استفاده از تزریق سیالات مناسب یا بهبود فرآیندهای حفاری می‌تواند تأثیر زیادی بر بهبود بهره‌وری چاه‌ها داشته باشد [۱۹، ۳۵]. برای حداکثر بهره‌وری، بهتر است شعاع چاه بهینه شود و ضریب پوسته با استفاده از روش‌های پاک‌سازی چاه یا تزریق مواد کاهش یابد. استفاده از طراحی تشخیصی یک روش مهم برای تعیین مناسبیت مدل است که اگر مدل با داده‌ها سازگار باشد نتایج قوی و واضحی به همراه دارد [۳۶].

همچنین برای ارزیابی دقت مدل و تحلیل خطا، از دو معیار، مقدار میانگین مربعات خطا^۱ و ریشه میانگین مربعات خطا استفاده شده است. این دو معیار برای مقایسه دقیق مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی در مدل‌های پیش‌بینی به کار رفته‌اند. MSE توسط معادله ۷ محاسبه می‌شود:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

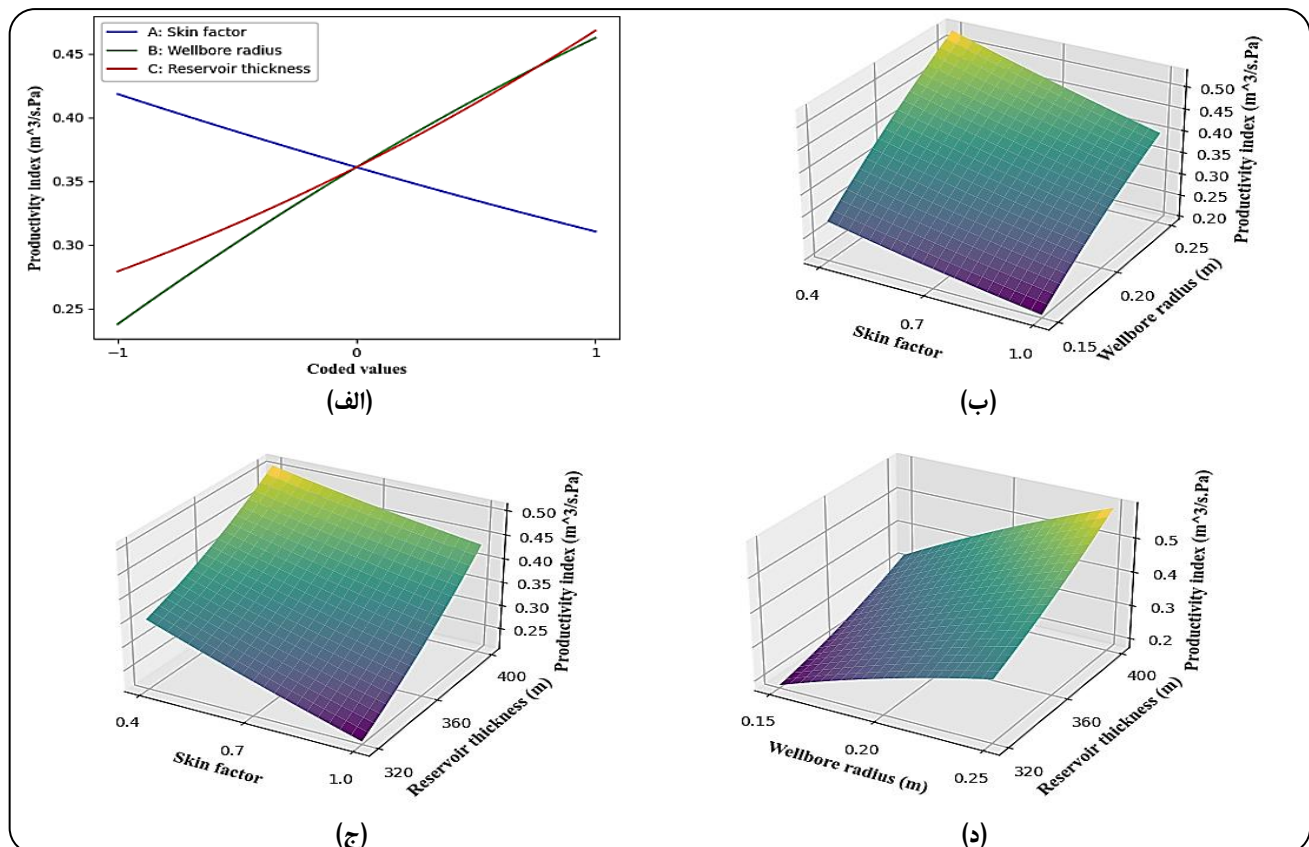
RMSE که به‌عنوان جذر میانگین مربعات خطا بیان می‌شود در معادله ۸ قابل مشاهده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (8)$$

در این معادلات، y_i مقدار واقعی (مشاهده‌شده)، $\hat{y}_i$ مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و n تعداد داده‌ها می‌باشد [۳۱]. در این پژوهش، مقدار میانگین مربعات خطا^۲ برابر با 0.009 و ریشه میانگین مربعات خطا برابر با 0.03 به دست آمد. این مقادیر نشان‌دهنده انطباق مناسب مدل آماری با داده‌های شبیه‌سازی و قابلیت اعتماد بالای آن در پیش‌بینی شاخص بهره‌وری می‌باشند. نمودارهای تغییرات در شکل ۳ (الف) برای بررسی اثرات سه عامل شعاع چاه نفت، ضخامت مخزن و ضریب پوسته بر نرخ بهره‌وری نمایش داده شده است. با توجه به شکل، هر عامل در نقطه مرجع خود تغییر داشته است. در شکل ۳ (الف) خط قرمز نشان دهنده اثر ضخامت مخزن بر میزان بهره‌وری می‌باشد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، افزایش ضخامت مخزن بر میزان بهره‌وری از چاه اثرگذار است. همچنین منجر به افزایش حجم نفت قابل بهره‌برداری در ناحیه پیرامون چاه می‌شود. به عبارت دیگر، یک مخزن با ضخامت بیشتر ظرفیت ذخیره‌سازی بالاتری دارد و می‌تواند در بازه زمانی طولانی‌تری تولید را حفظ کند [۱۸]. در مقابل، در مخازن کم‌ضخامت، حجم نفت محدودتر بوده و نرخ کاهش فشار سریع‌تر اتفاق می‌افتد، که این موضوع می‌تواند عمر اقتصادی چاه را کاهش دهد. یکی دیگر از جنبه‌های مهم ضخامت مخزن، نقش آن در تنظیم فشار مخزن است. افزایش ضخامت مخزن می‌تواند به بهبود توزیع فشار در نواحی مختلف مخزن کمک کند و نرخ افت فشار در حین بهره‌برداری را کاهش دهد. مخازن با ضخامت زیاد قادرند فشار داخلی بیشتری را تحمل کنند و این به خودی خود باعث بهبود بهره‌وری و تولید می‌شود [۳۲]. بنابراین، ضخامت مخزن به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در تحلیل رفتار دینامیکی مخزن و بهره‌وری چاه شناخته می‌شود. در شکل ۳ (الف) خط سبز نشان دهنده اثر شعاع چاه بر میزان بهره‌وری می‌باشد. شعاع چاه یکی دیگر از عواملی است که تأثیر

(۱) Mean Squared Error (MSE)

(۲) Mean Squared Error (MSE)



شکل ۳- (الف) نمودار اغتشاش هر عامل فرآیند، نمودارهای سطح پاسخ سه بعدی نرخ بهره‌وری بر حسب (ب) ضریب پوسته و شعاع چاه نفت (m)، (ج) ضریب پوسته و ضخامت مخزن (متر) و (د) شعاع چاه نفت (m) و ضخامت مخزن (m)

در شکل ۳ (ج)، با کاهش ضریب پوسته و حرکت به سمت چپ در محور X، مشاهده می‌شود که شاخص بهره‌وری افزایش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده کاهش مقاومت اطراف چاه است که به نوبه خود باعث بهبود جریان سیال به داخل چاه و افزایش بهره‌وری می‌شود [۳۷]. همچنین، افزایش ضخامت مخزن در محور Y، به وضوح به بهبود بهره‌وری منجر می‌شود، چرا که ضخامت بیشتر مخزن باعث افزایش حجم نفت قابل بهره‌برداری و کاهش سرعت افت فشار می‌شود. این روند به‌طور کلی نشان می‌دهد که ضخامت بیشتر مخزن و کاهش ضریب پوسته دو عامل مؤثر در بهبود عملکرد چاه و افزایش تولید هستند. این تغییرات به‌طور مستقیم با توانایی چاه در حفظ فشار و بهبود تولید در بلندمدت ارتباط دارند، که در نهایت منجر به بهره‌وری بالاتر و عمر اقتصادی بیشتر چاه می‌شود.

همچنین، مطابق با نتایج ارائه‌شده در شکل ۳ (د)، اگرچه افزایش شعاع چاه باعث کاهش مقاومت جریان در ناحیه اطراف چاه و در نتیجه افزایش نرخ بهره‌وری می‌گردد، اما تأثیر آن در مقایسه با ضخامت مخزن محدودتر است. ضخامت مخزن نقش اساسی‌تری در تعیین ظرفیت تولیدی ایفا می‌کند، چراکه به‌صورت مستقیم با حجم قابل استحصال سیال، سطح مؤثر جریان و فشار درون مخزنی در ارتباط است. در واقع، افزایش ضخامت نه‌تنها موجب افزایش

همچنین شکل ۳ (ب، ج و د) تأثیر عوامل مختلف بر شاخص بهره‌وری را به صورت نمودارهای سه بعدی سطح پاسخ نشان می‌دهد. این نمودارها تأثیر دو متغیر مستقل را بر پاسخ نشان می‌دهند، در حالی که متغیر سوم ثابت است. شکل ۳ (ب) تعامل دو متغیر شعاع چاه نفت و ضریب پوسته بر نرخ بهره‌وری چاه را به‌صورت گرافیکی نشان می‌دهد. در این نمودار، رنگ‌بندی سطح که از زرد به سبز و سپس آبی تغییر می‌کند، نمایانگر تغییرات مقدار شاخص بهره‌وری در سطوح مختلف این دو پارامتر است. رنگ زرد نشان‌دهنده بالاترین مقدار شاخص بهره‌وری است، در حالی که رنگ آبی کمترین مقدار بهره‌وری را نشان می‌دهد. این رنگ‌بندی به وضوح بیانگر رابطه پیچیده میان شعاع چاه و ضریب پوسته در تعیین عملکرد چاه‌ها می‌باشد. با توجه به داده‌های نمودار، مشخص است که افزایش شعاع چاه و کاهش ضریب پوسته منجر به بهبود نرخ بهره‌وری چاه می‌شود و هنگامی که شعاع چاه کوچک‌تر است و ضریب پوسته بیشتر است، شاهد کاهش چشمگیر بهره‌وری خواهیم بود. در این حالت، چاه به دلیل وجود مقاومت بالا در جریان سیال و کاهش سطح تماس با مخزن، کارایی کمتری خواهد داشت. این روند نشان‌دهنده این است که بهینه‌سازی هر دو پارامتر شعاع چاه و ضریب پوسته می‌تواند به‌طور مؤثری بهره‌وری چاه را افزایش دهد.

شرایط زمین‌شناسی مخازن مختلف مانند نوع سنگ مخزن و موقعیت چاه در سازندهای مختلف می‌تواند بر نتایج تأثیرگذار باشد. در این تحقیق، شرایط ساختاری به‌طور کلی در نظر گرفته شده است و تعمیم نتایج به مخازن با ویژگی‌های خاص زمین‌شناسی ممکن است محدودیت‌هایی داشته باشد. علاوه بر این، برای استفاده عملی از نتایج در مقیاس صنعتی، چالش‌ها و محدودیت‌های دیگری نیز وجود دارد که باید در تحقیقات آینده به آن پرداخته شود. به‌طور خاص، تأثیر متغیرهای اقتصادی و عملیاتی نظیر تغییرات قیمت نفت، هزینه‌های عملیاتی و شرایط محیطی بر بهره‌وری چاه‌های نفتی و هزینه‌های تولید باید در نظر گرفته شوند. این متغیرها می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر کارایی فرآیندهای استخراج و بهینه‌سازی بهره‌وری داشته باشند.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از شبیه‌سازی عددی در ترکیب با روش سطح پاسخ و الگوریتم ژنتیک می‌تواند به طور چشمگیری در بهینه‌سازی بهره‌وری چاه‌های نفت مؤثر باشد. در این مطالعه، سه پارامتر کلیدی شامل ضخامت مخزن، شعاع چاه نفت و ضریب پوسته بررسی شد و اثرات هر یک از این پارامترها بر بهره‌وری چاه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و روش سطح پاسخ تحلیل گردید. سپس، الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی این پارامترها به کار گرفته شد که علاوه بر دقت بالا، سرعت بالایی در همگرایی به جواب‌های بهینه داشت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مقدار شاخص بهره‌وری چاه در دامنه‌ای از $0.119 \text{ m}^3/\text{Pa.s}$ تا 0.633 متغیر است. با استفاده از روش سطح پاسخ، ضریب همبستگی $R^2=0.963$ و ضریب همبستگی تعدیل شده $\text{adj } R^2=0.952$ برای مدل به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در تطبیق داده‌های مدل‌سازی با داده‌های پیش‌بینی شده بود. تحلیل واریانس نیز مقدار $F=55/40$ و $P<0.001$ را نشان داد که بیانگر معناداری مدل است. با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مقادیر بهینه برای پارامترهای مورد بررسی تعیین گردید. مقدار بهینه برای ضریب پوسته برابر با 0.412 ، شعاع چاه 0.25 متر و ضخامت مخزن 399 متر تعیین شد که در این شرایط، شاخص بهره‌وری به مقدار $0.639 \text{ m}^3/\text{Pa.s}$ افزایش یافت. این مقدار نسبت به برخی شرایط اولیه تا $42/3$ درصد بهبود نشان می‌دهد. نتایج این تحقیق نشان داد که کاهش ضریب پوسته و افزایش ضخامت مخزن و شعاع چاه نفت به طور مستقیم موجب افزایش بهره‌وری چاه می‌شود. لازم به ذکر است که نتایج این پژوهش در چارچوب یک مدل عددی عمومی توسعه یافته‌اند و می‌توانند برای مخازنی با شرایط ساختاری مشابه (از نظر شعاع چاه، ضریب پوسته و ضخامت مخزن) مورد استفاده قرار گیرند. از این رو، استفاده از نتایج در مقیاس صنعتی باید با در نظر گرفتن شرایط واقعی مخزن هدف همراه باشد.

حجم سیال در دسترس می‌شود، بلکه مسیر جریان گسترده‌تری را در سراسر مخزن فراهم می‌آورد که تأثیر آن بر بهره‌وری در مقیاس کل مخزن مشهودتر است و تأثیر قوی‌تری بر بهره‌وری دارد. همچنین اثر ضخامت مخزن نسبت به تغییرات شعاع چاه در اولویت بالاتری قرار می‌گیرد. این یافته با اصول مهندسی مخزن و رفتار فشاری-جریانی در سیستم‌های زیرسطحی کاملاً منطبق است [۳۲].

تحلیل نتایج با الگوریتم ژنتیک

در این پژوهش، پس از تعریف توپولوژی مسئله و پارامترهای ورودی، الگوریتم ژنتیک در پایتون اجرا شد. هدف اصلی یافتن مقادیر بهینه برای پارامترهای مؤثر شامل ضریب پوسته، شعاع چاه و ضخامت مخزن بود. در هر نسل از الگوریتم، مقادیر جدیدی برای این پارامترها به دست آمد و نرخ بهره‌وری محاسبه شد. مقادیر به دست آمده از الگوریتم ژنتیک با داده‌های تجربی مقایسه شد و در صورت دستیابی به دقت مورد نظر، الگوریتم خاتمه یافت. این فرآیند تکرار شد تا زمانی که مقدار نرخ بهره‌وری به مقدار بهینه با انحراف خطای ناچیز و همگرایی مطلوب برسد. پارامترهای کلیدی این الگوریتم شامل اندازه جمعیت، نرخ ترکیب و نرخ جهش بودند که به‌طور تجربی و بر پایه آزمون و خطا آزموده و تنظیم شدند. برای هر یک از این پارامترها، تنظیمات مختلفی آزمایش شد تا بهترین عملکرد حاصل شود. اندازه جمعیت به گونه‌ای انتخاب شد که تعادلی مناسب میان دقت مدل و زمان محاسباتی برقرار باشد. همچنین، نرخ ترکیب به‌طوری تنظیم گردید که بهترین ترکیب از افراد جمعیت در هر نسل را ایجاد کند و نرخ جهش به منظور حفظ تنوع در جمعیت و جلوگیری از همگرایی زود هنگام به نقطه بهینه محلی انتخاب شد. با وجود اینکه تحلیل حساسیت برای تعیین مقادیر بهینه این پارامترها در این تحقیق انجام نشده است، مقادیر انتخاب شده بر اساس آزمایش‌های مختلف و تجزیه و تحلیل‌های به عمل آمده در فرآیند طراحی آزمایشات تنظیم شدند. در این پژوهش هدف پیشینه‌سازی شاخص بهره‌وری بود. نتیجه بهینه‌سازی برای داشتن حداکثر شاخص بهره‌وری با کمک الگوریتم ژنتیک شرایط ضریب پوسته 0.412 ، شعاع چاه 0.25 متر و ضخامت مخزن 399 متر را تعیین نمود و در این شرایط شاخص بهره‌وری 0.639 تعیین گردید.

محدودیت‌ها و پیشنهاد برای تحقیقات آینده

یکی از محدودیت‌ها در این مطالعه، فرض ثابت بودن خواص فیزیکی سیال از جمله دما، فشار و ویسکوزیته است. این فرض به منظور ساده‌سازی مدل عددی و تمرکز بر تحلیل متغیرهای ساختاری مانند شعاع چاه، ضریب پوسته و ضخامت مخزن در نظر گرفته شده است. با این حال، در شرایط عملیاتی واقعی، این خواص می‌توانند تغییرات قابل توجهی داشته باشند و بر نتایج اثر بگذارند. همچنین یکی دیگر از محدودیت‌ها در این مطالعه، این است که

ضخامت مخزن باید در مطالعات مکان‌یابی چاه به‌عنوان یک پارامتر کلیدی در نظر گرفته شود، چرا که تأثیر زیادی بر پایداری فشار و عملکرد تولید دارد. کاهش ضریب پوسته از طریق روش‌هایی مانند اسیدکاری، تزریق محلول‌های شیمیایی یا شکست هیدرولیکی می‌تواند باعث افزایش قابل توجه بهره‌وری شود. این یافته‌ها می‌توانند به‌عنوان راهنمایی برای تصمیم‌گیری در طراحی و اصلاح چاه‌ها مورد استفاده قرار گیرند و در تدوین برنامه‌های مدیریت بهره‌برداری مؤثر باشند.

این نتایج می‌تواند در صنعت نفت برای انتخاب بهینه پارامترهای عملیاتی و بهبود بهره‌وری چاه‌ها و کاهش هزینه‌ها استفاده شود. همچنین، این مدل عددی می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی عملکرد چاه‌ها در شرایط متنوع و بهینه‌سازی پارامترها در پروژه‌های نفتی آینده به کار گرفته شود. از منظر عملی، توصیه می‌شود، در مراحل طراحی اولیه چاه، افزایش شعاع چاه در محدوده اقتصادی مجاز، می‌تواند مقاومت جریان سیال را کاهش داده و نرخ تولید را بهبود بخشد.

فهرست نمادها و اختصارات

نماد	توضیح	نماد	توضیح
A	مساحت (m^2)	u	سرعت سیال (m/s)
B_0	ضریب حجم تشکیل	X_i و X_j	متغیرهای ورودی
CFD	دینامیک سیالات محاسباتی	Y	پاسخ پیش‌بینی شده
g	گرانش (m/s^2)	y_i	مقدار واقعی
H_r	ضخامت مخزن	$\hat{y}_i$	مقدار پیش‌بینی شده
K	نفوذپذیری (m^2)	z	ارتفاع (m)
k	تعداد پارامترهای مستقل	τ	تنش برشی (Pa)
n	تعداد داده‌ها	ρ	چگالی (Kg/m^3)
P	فشار (Pa)	μ_0	ویسکوزیته نفت (Pa.s)
ΔP	اختلاف فشار (Pa)	β_0	مقادیر ثابت
PI	شاخص بهره‌وری (m^3Pa/s)	β_i	مقادیر خطی
r_e	شعاع تأثیر (m)	β_{ii}	مقادیر درجه دوم
r_w	شعاع چاه نفت (m)	β_{ij}	مقادیر تعاملات
S	فاکتور پوسته	ε	خطای تصادفی

منابع

- [۱] صدیقی محمد باقر، سیاوشی مجید، میری روح الدین، تخمین دبی نفت تولیدی از چاه به‌وسیله روش‌های یادگیری ماشین با استفاده از داده‌های پمپ الکتریکی شناور (ESP)، پژوهش نفت، ۳۴(۴): ۱۵۶-۱۷۳ (۱۴۰۳).
- [2] Nwonodi R.I., A Novel Model for Predicting the Productivity Index of Horizontal/Vertical Wells Based on Darcy's Law, Drainage Radius, and Flow Convergence, *Heliyon*, **10**: (2024).
- [3] Dheyauldeen A., Alkhafaji H., Alfarge D., Al-Fatlawi O., Hossain M., Performance Evaluation of Analytical Methods in Linear Flow Data for Hydraulically-Fractured Gas Wells, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **208**: 109467 (2022).
- [4] Ma K., Wu C., Huang Y., Mu P., Shi P., Oil Well Productivity Capacity Prediction Based on Support Vector Machine Optimized by Improved Whale Algorithm, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **14**(12): 3251-3260 (2024).
- [۵] جعفریگی حیاتی سعید، دهکردی مشرف مهدی، ضیایی راد مسعود، تخمین میزان شاخص چاه برداشت نفت در مخازن هیدروکربنی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، مهندسی مکانیک مدرن، ۱۸(۱): ۱۷۷-۱۸۷ (۱۳۹۷).

- [6] Tavakkoli M., Panuganti SR., Khemka Y., Valdes H., Vargas FM., [Foam-Assisted Gas Lift: A Novel Experimental Setup to Investigate the Feasibility of Using a Commercial Surfactant for Increasing Oil Well Productivity](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **201**: 108496 (2021).
- [7] Pant M., Stanko M., Sales L., [Differential Evolution for Early-Phase Offshore Oilfield Design Considering Uncertainties in Initial Oil-in-Place and Well Productivity](#), *Upstream Oil and Gas Technology*, **7**: 100055 (2021).
- [8] Peng L., Han G., Chen Z., Pagou A.L., Zhu L., Abdoulaye A.M., [Dynamically Coupled Reservoir and Wellbore Simulation Research in Two-Phase Flow Systems: A Critical Review](#), *Processes*, **10(9)**: 1778 (2022).
- [9] Ahammad J.M., Rahman M.A., Butt S.D., Alam J.M., [Integrated Wellbore-Reservoir Modeling Based on 3D Navier–Stokes Equations with a Coupled CFD Solver](#), *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **14(8)**: 2539-2554 (2024).
- [10] Yuan H., Li W., Yuan Y., Luo J., Yan W., [Productivity Evaluation of Horizontal Well in Heterogeneous Reservoir with Composite Water Aquifer](#), *Journal of Petroleum Exploration and Production*, **11**: 1363-1373 (2021).
- [11] Abobaker E., Elsanoose A., Khan F., Rahman M.A., Aborig A., Noah K., [Quantifying the Partial Penetration Skin Factor for Evaluating the Completion Efficiency of Vertical Oil Wells](#), *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **11**: 3031-3043 (2021).
- [12] Zhao B., Ju B., Wang C., [Initial-Productivity Prediction Method of Oil Wells for Low-Permeability Reservoirs Based on PSO-ELM Algorithm](#), *Energies*, **16(11)**: 4489 (2023).
- [13] Wang Z., Tang H., Cai H., Hou Y., Shi H., Li J., Yang T., Feng Y., [Production Prediction and Main Controlling Factors in a Highly Heterogeneous Sandstone Reservoir: Analysis on the Basis of Machine Learning](#), *Energy Science & Engineering*, **10(12)**: 4674-4693 (2022).
- [۱۴] سیدعلی سیدرسول، علیزاده بهرام، زحمت کش ایمان، صراف دخت هاشم، برآورد کل محتوی کربن آلی و نوع کروژن از داده‌های چاه‌پیمایی با بهره‌گیری از ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های فراابتکاری، *پژوهش نفت*، **۳۲(۳)**: ۱۱۲-۱۳۰ (۱۴۰۱).
- [۱۵] حسینی سید احمد، طباطبایی محمودرضا، ارزیابی کارایی مدل‌های ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) در برآورد رسوبات معلق، مطالعه موردی ایستگاه‌های هیدرومتری کوزه توپراقی و هیرچای استان اردبیل، *مهندسی و مدیریت آب‌خیز* (۱۴۰۳).
- [16] Guo B., Sun K., Ghalambor A., ["Well Productivity Handbook"](#), *Gulf Publishing Company*, **368**: (2014).
- [۱۷] قبادی بهنام، نجاتی حمیدرضا، گشتاسبی کامران، بررسی نفوذپذیری وابسته به تنش در مخازن شکاف‌دار با استفاده از روش عددی المان مجزاء، *پژوهش نفت*، **۲۷(۵)**: ۹۸-۱۱۲ (۱۳۹۶).
- [18] Lake L., ["Reservoir Characterization"](#), *Elsevier*, **659** (2012).
- [19] Ahmed T., ["Reservoir Engineering Handbook"](#), *Gulf Professional*, Pub 4 ed (2018).
- [20] Merikhy A., Heydari A., Eskandari H., Ghahraman-Rozegar F., [Carbonized Spent Bleaching Earth as a Low-Cost Adsorbent: A Facile Revalorization Strategy via Response Surface Methodology](#), *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, **158**: 108167 (2020).

- [21] Cao X., Luo X., Heydari A., Barros S.M., Kirk B.P., Tang Y., Raston C.L., [Vortex Fluidic Mediated Generation of Fatty Acid Ethyl Esters from Vegetable Oils for Applications in Cosmetic Emulsions](#), *Journal of Cleaner Production*, 145006 (2025).
- [22] Luo X., Heydari A., Renfrey D., Gardner Zoe., He S., Tang Y., Weiss G.A., Rogers M.L., Raston C.L., [Sustainability-Driven Accelerated Shear-Mediated Immunoassay for Amyotrophic Lateral Sclerosis Detection](#), *ChemSusChem*, **17**(21): e202401008, 20 (2024).
- [23] Motamedisade A., Heydari A., Osborn D., Alotabi A.S., Andersson G.G., [Au9 Clusters Deposited as Co-Catalysts on S-Modified Mesoporous TiO2 for Photocatalytic Degradation of Methyl Orange](#), *Applied Surface Science*, **655**: 159475 (2024).
- [24] Soleimani S., Heydari A., Fattahi M., [Swelling Prediction of Calcium Alginate/Cellulose Nanocrystal Hydrogels Using Response Surface Methodology and Artificial Neural Network](#), *Industrial Crops and Products*, **192**: 116094 (2023).
- [25] Mele M. A., Kumar R., Dada T. K., Heydari A., Antunes E., [Investigation of Gold Adsorption by Ironbark Biochar Using Response Surface Methodology and Artificial Neural Network Modelling](#), *Journal of Cleaner Production*, **456**: 142317 (2024).
- [۲۶] باغبان محبوبه، عصاره مهدی، صادقی محمد تقی، [بهبودسازی مکان چاه‌های تولید و تزریق با استفاده از الگوریتم ژنتیک موازی در یک مورد مطالعاتی](#)، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۴۱**(۲): ۳۸۷-۳۷۷ (۱۴۰۱).
- [۲۷] قبادی بهنام، نجاتی حمیدرضا، گشتاسبی کامران، [بررسی نفوذپذیری وابسته به تنش در مخازن شکافدار با استفاده از روش عددی المان مجزاء](#)، پژوهش نفت، **۲۷**(۵): ۹۸-۱۱۲ (۱۳۹۶).
- [۲۸] احسانی سمانه، ورنوسفاد رانی احمد مانی، یمینی یداله، [تعیین گروه‌های عاملی مؤثر بر شاخص گرانیروی روغن موتورها به وسیله‌ی روش FT-IR و برازش خطی چند متغیره بر پایه‌ی الگوریتم ژنتیک](#)، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۳۹**(۱): ۱۶۶-۱۵۹ (۱۳۹۹).
- [29] Salim M., Sultan H., Al-Shara A., [Effect of Shape and Parameters of Perforation in a Vertical Wellbore with Two Perforations \(Without Porous Media\) on Pressure Drop](#), *Fluid Mech Open Acc*, **4**(162): 2476-2296.1000162 (2017).
- [30] Gammoudi N., Mabrouk M., Bouhemda T., Nagaz K., Ferchichi A., [Modeling and Optimization of Capsaicin Extraction from Capsicum Annuum L. Using Response Surface Methodology \(RSM\), artificial neural network \(ANN\), and Simulink simulation](#), *Industrial Crops and Products*, **171**: 113869 (2021).
- [31] Heydari A., Gardner Z., Luo X., Alotaibi B.M., Motamedisade A., Raston C.L., [Methylene Blue Degradation Using Vortex Fluidic Device Under UV Irradiation: Comparison of Response Surface Methodology and Artificial Neural Network](#), *Environmental Technology & Innovation*, **38**: 104127 (2025).
- [32] Ahmed T., "Reservoir Engineering Handbook", Burlington: Elsevier (2010).
- [33] Ozkan E., Sarica C., Haci M., [Influence of Pressure Drop Along the Wellbore on Horizontal-Well Productivity](#), *SPE Journal*, **04**(03): 288-301 (1999).
- [34] Dake L. P., "Fundamentals of Reservoir Engineering". Elsevier, **03** (1983).

- [35] Chang W., Al-Obaidi S.H., Patkin A., [Assessment of the Condition of the Near-Wellbore Zone of Repaired Wells by the Skin Factor](#), *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, **03(04)**: 1371-1377 (2021).
- [36] Mahmoodi-Babolan N., Heydari A., Nematollahzadeh A., [Removal of Methylene Blue via Bioinspired Catecholamine/Starch Superadsorbent and the Efficiency Prediction by Response Surface Methodology and Artificial Neural Network-Particle Swarm Optimization](#), *Bioresource technology*, **294**: 122084 (2019).

[۳۷] بلوریان مریم، رسایی محمدرضا، نخعی علی، بررسی ضریب پوسته در اطراف دهانه چاه در چاه‌های عمودی برای حالت‌های تک فازی و دو فازی با استفاده از شبیه‌سازی عددی، *پژوهش نفت*، **۳۱(۳)**: ۴۳-۵۵ (۱۴۰۰).