

بهینه‌سازی چندهدفه ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن در یک مخزن گازی تخلیه‌شده با استفاده از مدل‌های جایگزین هوشمند

حسین خیرالهی، سید شهاب‌الدین آیت‌اللهی*، حسن ماهانی*

shahab@sharif.edu

hmahani@sharif.edu

دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، خیابان آزادی، تهران، ایران

چکیده

گرم شدن کره زمین و تغییرات اقلیمی منجر به کاهش مصرف یا جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع تجدیدپذیر شده است. با این حال، وابستگی جوی-فصلی تولید این انرژی‌ها به یک سیستم ذخیره بزرگ مقیاس برای برطرف کردن ناترازی انرژی دارد. استفاده از هیدروژن به عنوان حامل انرژی و ذخیره‌سازی زیرزمینی آن راهکاری جدید برای این حل چالش است. اما ویژگیها و رفتار خاص گاز هیدروژن در محیط متخلخل نیازمند شبیه‌سازی‌های متعدد و زمان‌بر، برای تعیین بهترین سناریو ذخیره‌سازی گاز بر اساس بهینه‌سازی چندهدفه می باشد. در این مقاله ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز هیدروژن در یک مخزن گازی تخلیه‌شده شبیه‌سازی شد و در ادامه با مدل هوش مصنوعی جایگزین گردید و بهینه‌سازی متغیرهای تصمیم‌گیری توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه انجام گرفت. با توجه به حضور گازهای بازممانده از قبل در مخزن، دو پارامتر مهم خلوص گاز تولید شده و ضریب بازیافت هیدروژن تزریقی در اولویت بررسی قرار گرفتند. به کمک طراحی آزمایش، داده‌های مورد نیاز برای بررسی پارامترهای تأثیرگذار و آموزش روش‌های داده-محور از طریق شبیه‌سازی میدانی تولید شد. شبکه عصبی مصنوعی با ۱۰ نرون و تابع فعال‌سازی سیگموئیدی به عنوان مدل جایگزین مبتنی بر هوش مصنوعی به ترتیب با دقت برابر با ۰/۹۷ و ۰/۹۴، برای داده آموزش و داده صحت سنجی، بهترین عملکرد را برای پیش‌بینی میزان خلوص و بازیافت هیدروژن ارائه داد. پاسخ‌های بهینه عملیاتی برای متغیرهای تصمیم‌گیری نشان دهنده درصد غالب گاز نیتروژن با ترکیب گاز پایه ۷۵، ۲۰ و ۵ درصد به ترتیب برای نیتروژن، کربن دی اکسید و متان می باشد. علاوه بر این، تولید بهینه از بازه مشبک کاری چاه تولیدی از قسمت بالا و مشبک کاری تزریقی هیدروژن از قسمت پایین مخزن به صورت یک مجموعه جواب مطلوب (جبهه پارتو) مشخص گردید. خروجی این کار برای طراحی آزمایشات و انجام بهینه مدل‌سازی‌های مقیاس بزرگ که به امکانات محاسباتی و زمان بسیار طولانی نیاز دارند مفید خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: ذخیره‌سازی زیر زمینی هیدروژن، مخازن تخلیه‌شده گاز، پروکسی مدل، بهینه‌سازی چندهدفه، طراحی آزمایش، هوش مصنوعی

۱- مقدمه

حضور گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر یکی از ملزومات ایجاد اثر گلخانه‌ای (Greenhouse Effect) و فراهم کردن دمای مناسب برای بقای حیات انسان و سایر جانداران روی کره خاکی می‌باشد. با این وجود، افزایش جمعیت، نیاز و تلاش برای تأمین انرژی موردنیاز کشورهای در حال توسعه باعث افزایش بی‌رویه انتشار گازهای گلخانه‌ای و به دام افتادن انرژی خورشید در اتمسفر زمین و گرمایش جهانی زمین شده است [۲،۱]. بر اساس اعلام آژانس بین‌المللی انرژی و سازمان بین‌دولتی تغییرات اقلیمی (Intergovernmental Panel on Climate Change)، تا سال ۲۰۲۳ مقدار دی‌اکسید کربن انتشار یافته به جو زمین برابر با ۳۷/۲ گیگا تن گزارش شده است. پژوهش‌های انجام شده نشان‌دهنده ارتباط و همبستگی میان افزایش غلظت دی‌اکسید کربن با افزایش میانگین دمای سطح زمین بوده است. بنابراین در سال‌های اخیر معاهده‌ای تحت عنوان معاهده پاریس با شالوده مرتبط با کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و نگاه داشتن دمای زمین در محدود تغییرات کمتر از ۲ درجه سانتی‌گراد و با هدف رسیدن به ۱/۵ درجه سانتی‌گراد (Paris agreement temperature goal) در میان اکثر کشورها منعقد گردید. اسناد و آمارهای جمع‌آوری شده توسط IPCC حاکی از آن هست که تا سال ۲۰۲۲ به ترتیب کشورهای چین، ایالات متحده آمریکا، هند، روسیه، ژاپن، اندونزی و ایران از جمله کشورهای اصلی انتشاردهنده بی‌رویه گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن می‌باشند. با این وجود لازم به ذکر است که میزان سرانه انتشار دی‌اکسید کربن برای ایران در رتبه ۳۶ جهان قرار دارد. میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط ایالات متحده در یک بازه مشخص به صورت تقریباً ثابت بوده و اخیراً روند نزولی را شاهد هستیم. کشورهای در حال توسعه و اقتصادهای نوظهور همانند کشور چین و هند با افزایش بسیار شدید تولید دی‌اکسید کربن (سال ۲۰۰۰ الی ۲۰۲۲) در مقایسه با سایر کشورها نقش بسیار قابل توجهی داشته‌اند [۳].

روند صعودی انتشار دی‌اکسید کربن، اقتصاد جهانی را مجبور کرده است تا در پی جست‌وجو و اتخاذ یک راهکار مناسب برای جلوگیری از این معضل و تبعات نامطلوب آن از قبیل گرمایش زمین، تغییرات اقلیمی، ذوب شدن یخ‌های قطبی و بالا آمدن سطح آب دریاها بپردازند [۱]. منشأ اصلی انتشار بی‌رویه گاز دی‌اکسید کربن مربوط به احتراق سوخت‌های فسیلی (نفت، گاز و ذغال سنگ) به منظور تأمین انرژی الکتریکی برای مصارف روشنایی، گرمایش خانگی و حمل‌ونقل است. علاوه بر این عوامل تشدیدکننده‌ای همچون جنگل‌زدایی و تغییر کاربری اراضی موجب برهم خوردن چرخه کربن در طبیعت می‌گردد. بنابراین مباحث گرمایش زمین و تغییرات اقلیمی باعث شده است تا اقتصاد جهانی در پی بررسی چشم‌انداز اقتصاد بدون کربن و استفاده از انرژی الکتریکی از منابع تجدید پذیر باشد. به همین منظور دو استراتژی مهم ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن در سازندهای زمین‌شناسی جهت کاهش غلظت دی‌اکسید کربن و استفاده از منابع تجدید پذیر از قبیل انرژی خورشید و باد می‌باشد. نکته درخور توجه وابستگی جوی یا فصلی (Weather Dependent) و اختلاف بین میزان تولید و مصرف در تأمین انرژی از این منابع می‌باشد. بنابراین ذخیره‌سازی انرژی به صورت حامل‌های انرژی همانند هیدروژن در سازندهای زمین‌شناسی یک راهکار مناسب می‌تواند باشد.

در حال حاضر، چندین پروژه میدانی در حال مطالعه و بررسی برای ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز هیدروژن در کشورهای ایالات متحده، انگلیس و اتحادیه اروپا می‌باشد [۴]. با این حال عملیات ذخیره‌سازی گاز هیدروژن با عدم قطعیت، ریسک و ناشناخته‌های زیادی همراه است. به عنوان نمونه می‌توان عدم قطعیت در خصوص بررسی یکپارچگی چاه و سازند و کلاهدک مخزنی برای ذخیره‌سازی ایمن را نام برد. این موارد شامل تغییر ترشوندگی پوش سنگ مخزن، کاهش مقاومت ژئو مکانیکی و

فعال شدن مجدد گسل‌های زیرزمینی است. تغییرات متناوب دما و فشار در حین دوره تزریق و تولید موجب تنش‌های حرارتی و فشاری بر روی سیمان و لوله جداری می‌گردد. این عامل در کنار خوردگی ناشی از فعالیت میکروبی می‌تواند منجر به از دست رفتن یکپارچگی دیواره چاه نیز شود. علاوه بر این فعالیت میکروبی، واکنش‌های ژئوشیمیایی و برهم‌کنش سنگ و سیالات مخزن و هیدروژن می‌تواند باعث به دام افتادن هیدروژن و کاهش بازده عملیات ذخیره‌سازی گردد [۵]. جدول شماره ۱ اطلاعات لازم در مورد مزایا و معایب هر کدام از این روش‌های ذخیره‌سازی و ریسک‌های مربوط به آن‌ها را دسته‌بندی کرده است.

جدول ۱: بررسی پتانسیل مکان‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن

مخازن هیدروکربنی تخلیه‌شده	مغاره‌های نمکی	آبخوان‌ها	
زیاد	کم	زیاد	ظرفیت ذخیره‌سازی [۵، ۶]
بلند مدت	کوتاه مدت	بلند مدت	مدت زمان ذخیره‌سازی [۸]
کم	متوسط	زیاد	هزینه مقدار تزریق گاز پایه [۹]
زیاد	کم	کم	اطلاعات زمین‌شناسی از محل ذخیره‌سازی [۸]
متوسط (و متغیر بر حسب موقعیت جغرافیایی هر کشور)	کم (و تا حدی متغیر بر حسب موقعیت جغرافیایی هر کشور)	زیاد	فراوانی محل ذخیره‌سازی و سطح دسترسی [۹]
بالا	کم	بالا	احتمال خوردگی تجهیزات [۱۰]
متوسط	خیلی کم	زیاد	احتمال نشست گاز هیدروژن از پوش سنگ [۱۱]
کم	زیاد	متوسط	هزینه اولیه و سرمایه‌گذاری تجهیزات سطح الارضی [۸، ۱۱]
باکتری کاهنده سولفات و آهن	عدم فعالیت یا فعالیت کم	باکتری کاهنده سولفات	فعالیت بیولوژیکی میکروارگانیسم‌ها [۱۳]

آگاهی از خواص فیزیکی هیدروژن به عملکرد ایمن و ذخیره‌سازی موفق کمک می‌کند. در **Error! Reference source not found.** با توجه به اهمیت ذخیره‌سازی گازهای دی‌اکسید کربن، متان و گاز هیدروژن ویژگی‌های ترموفیزیکی این سه گاز به تفصیل آورده شده است. به عنوان مثال از آنجایی که هیدروژن نسبت به گاز طبیعی تراکم‌پذیری بیشتری دارد، برای ذخیره‌سازی جرم یکسانی از این دو گاز، هیدروژن نیازمند فشار بیشتری در مقایسه با متان است [۴]. همان‌طور که در جدول شماره ۲ مشاهده می‌گردد، گاز متان تقریباً هشت برابر هیدروژن در دما و فشار استاندارد چگال‌تر است. این نکته اهمیت ظرفیت ذخیره‌سازی را در طول عملیات ذخیره‌سازی هیدروژن افزایش می‌دهد. ویسکوزیته کم‌تر هیدروژن در مقایسه با متان (به‌عنوان گاز پایه یا گاز عملیاتی) تحرک بیشتر هیدروژن را نشان می‌دهد که می‌تواند به چالش‌هایی از جمله پدیده انگشتی شدن در برخی از موارد بیانجامد و یا در تزریق در مخازن گازی منجر به هیدروژن باقیمانده کم‌تر در محیط متخلخل حاوی هیدروژن و متان شود [۱۴].

حلالیت هیدروژن زمانی مهم است که در سفره‌های آب شور یا مخازن نفت و گاز تخلیه‌شده باشد. در مقایسه با متان، هیدروژن

حلالیت کمتر و در نتیجه هدر رفت ناشی از انحلال کمتری دارد که به عنوان یک مزیت در نظر گرفته می‌شود [۱۵]. علاوه بر این، در آب با شوری بالا و حضور نمک بیشتر حلالیت هیدروژن در آب کاهش می‌یابد. انحلال هیدروژن در آب نوعی از دست دادن هیدروژن است. بسته به فشار، دما و سطح تماس، سرعت انحلال هیدروژن می‌تواند متغیر باشد. با توجه به وزن مولکولی کم، احتمال نشست هیدروژن به درون لایه‌های پوش سنگ و نفوذ به سطح زیاد است. با وجود اینکه ضریب نفوذ هیدروژن در دما و فشار استاندارد، سه برابر بزرگ‌تر از متان در آب خالص است. در محیط متخلخل، تأثیر تخلخل بر نفوذ باید با مقیاس‌گذاری ضریب نفوذ با پیچش در نظر گرفته شود که منجر به ضریب نفوذ مؤثر می‌شود [۱۶]. اگرچه ضریب نفوذ مؤثر کم‌تر از ضریب نفوذ در آب خالص است، اما مقدار ضریب نفوذ مؤثر، پدیده نشست را امکان‌پذیر می‌سازد. مطابق جدول ۲، ارزش حرارتی هیدروژن ۲/۵ برابر بیشتر از گاز طبیعی است که این امر هیدروژن را به سوختی با بیش‌ترین محتوای انرژی در واحد جرم تبدیل می‌کند.

جدول ۲: مقایسه ویژگی‌های گاز هیدروژن، متان و دی‌اکسید کربن [۱۵].

ویژگی گاز / نوع گاز	هیدروژن (H ₂)	متان (CH ₄)	دی‌اکسید کربن (CO ₂)
وزن مولکولی ($\frac{g}{mol}$)	۲/۰۱۶	۱۶/۰۴۳	۴۴/۰۹
چگالی گاز در شرایط استاندارد ($\frac{kg}{m^3}$)	۰/۰۸۹	۰/۶۵۷	۱/۹۸
گران‌روی گاز در شرایط استاندارد (Pa.s)	0.89×10^{-5}	1.10×10^{-5}	1.49×10^{-5}
حلالیت گاز در آب در شرایط استاندارد ($\frac{g}{L}$)	۰/۰۰۱۶۰	۰/۰۲۲۷۰	۰/۰۰۱۴۵
نقطه جوش (°C)	-۲۵۳	-۱۶۲	-۷۸/۴۴
دمای بحرانی (°C)	-۲۳۹/۹۵	-۸۲/۳	-۳۱
فشار بحرانی (atm)	۱۲/۸	۴۵/۷۹	۷۲/۷۹
ارزش حرارتی ($\frac{kJ}{g}$)	۱۲۰-۱۴۲	۵۵-۵۰/۵	-
ضریب نفوذ در آب در شرایط استاندارد (m ² /s)	5.13×10^{-9}	1.85×10^{-9}	1.6×10^{-3}

مطالعات متعددی در زمینه ذخیره‌سازی هیدروژن در مقیاس‌های مختلف از شبیه‌سازی در ابعاد مولکولی تا میدانی انجام شده است. کومار و حاجی بیگی به شبیه‌سازی به صورت ذخیره‌سازی هیدروژن و بررسی پدیده خزش سنگ نمک در اثر تولید و تزریق متناوب گاز هیدروژن در یک مغاره نمکی پرداختند [۱۷]. کنعانی و همکاران به بهینه‌سازی ذخیره‌سازی هیدروژن در یک مخزن تخلیه‌شده نفتی پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن میزان بازیافت هیدروژن و پارامتر اقتصادی به تعیین پارامترهای عملیاتی در فرآیند ذخیره‌سازی پرداختند [۱۸]. با توجه به ماهیت زمان‌بر و بار محاسباتی زیاد مطالعات مختلف از قبیل آنالیز ریسک، آنالیز حساسیت، مطالعات بررسی عدم قطعیت و بهینه‌سازی تک هدفه و چند هدفه در سالیان اخیر از مدل‌های جایگزین هوشمند در استفاده گردیده است. در جدول ۳ مجموعه‌ای از مطالعات انجام‌شده به همراه تابع هدف و نوع مخزن مورد استفاده برای ذخیره‌سازی گاز گزارش شده است.

جدول ۳: مطالعات بهینه‌سازی چند هدفه ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز دی اکسید کربن و هیدروژن.

نویسندگان	فرآیند ذخیره‌سازی گاز	تابع هدف
فانگینگ و همکاران [۱۹]	دی اکسید کربن در مخزن نفتی	بهینه‌سازی ریسک ژئومکانیکی
پارک و همکاران [۲۰]	دی اکسید کربن در آبد	بهینه‌سازی فشار ته‌چاهی و حجم گاز به تله افتاده
بهرامی کشکولی و همکاران [۲۱]	دی اکسید کربن در مخزن نفتی و عملیات ازدیادبرداشت	بهینه‌سازی بازیافت نفت و ذخیره‌سازی گاز دی اکسید کربن
وزیری و صدایی [۲۲]	دی اکسید کربن در آبد عمیق	ذخیره‌سازی دی اکسید کربن و تعیین زمان میان شکنی
سعید و جاده‌اوار [۲۳]	هیدروژن در آبد	بهینه‌سازی بازیافت هیدروژن
کنعانی و همکاران [۱۸]	هیدروژن در مخزن نفتی تخلیه شده	بهینه‌سازی بازیافت و ارزش خالص
مطالعه فعلی	هیدروژن در مخزن گازی تخلیه شده	بهینه‌سازی بازیافت و خلوص هیدروژن تولیدی

هدف اصلی این مقاله، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند ذخیره‌سازی متناوب گاز هیدروژن در یک مخزن گازی تخلیه‌شده است. به همین منظور از روش‌های هوش مصنوعی به‌عنوان مدل جایگزین هوشمند برای کاهش زمان محاسباتی و هزینه در تعیین بهترین شرایط و یافتن جواب مسئله استفاده شد. در ادامه جزئیات مربوط به روش پژوهش شامل نحوه جمع‌آوری داده، مبانی نحوه آموزش مدل جایگزین و بهینه‌سازی به کمک الگوریتم‌های تکاملی آورده شده است. در بخش آخر نیز نتایج حاصل از مطالعه به همراه بحث و بررسی ارائه شده است.

۲- روش پژوهش

۲-۱- ساخت مدل پایه

در حال حاضر، سه نوع عمده از گزینه‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز وجود دارد که عبارت‌اند از: مخازن نفتی و گازی تخلیه‌شده، آبخوان‌ها و مغاره‌های نمکی. گزینه‌های مناسب ذخیره‌سازی زیرزمینی ذکر شده برای انواع مختلف ذخیره‌سازی هیدروژن استفاده می‌شوند. رویکرد اصلی این مقاله شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند تزریق و تولید متناوب گاز هیدروژن در یک محیط متخلخل گازی تخلیه‌شده به دلایل متعددی همچون فراوانی این نوع از مخازن در ایران، حجم ذخیره‌سازی در مقیاس بسیار بزرگ‌تر نسبت به غارهای نمکی، وجود گاز پایه باقیمانده در مخزن و تأسیسات سطح الارضی است. به همین منظور از روش‌های هوش

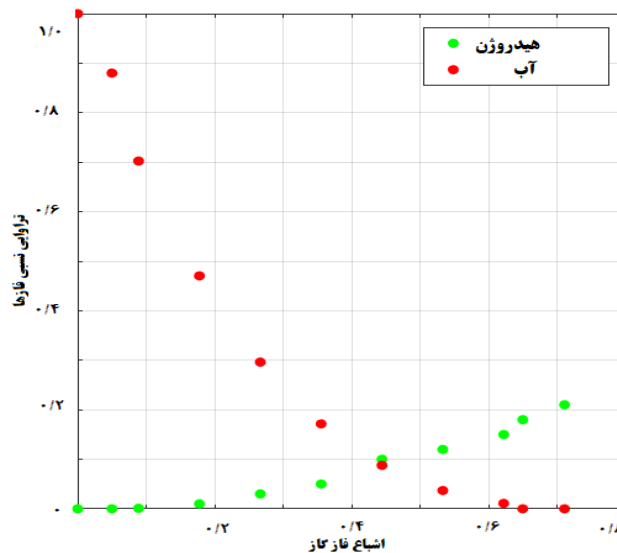
مصنوعی به عنوان مدل جایگزین هوشمند در تعیین بهترین شرایط و یافتن جواب مسئله استفاده شد. برای این کار در ابتدا یک مدل از مخزن گازی ایجاد گردید و به عنوان مدل پایه در ادامه شبیه سازی در نظر گرفته شد. پارامترهای عملیاتی مهم و قابل کنترل در فرآیند ذخیره سازی گاز و پارامترهای ارزیابی فرآیند ذخیره سازی به ترتیب به عنوان متغیرهای تصمیم و متغیر هدف در نظر گرفته شدند. در ادامه به کمک روش های طراحی آزمایش، یک مجموعه داده جدولی شامل ۵۰۲ نمونه داده برای شبیه سازی حالت های مختلف مدل پایه ایجاد گردید. پس از اتمام فرآیند شبیه سازی، این پایگاه داده ارزشمند برای ایجاد و توسعه مدل های مبتنی بر داده استفاده گردید. با ارزیابی عملکرد مدل های مختلف آموزش دیده شده، در نهایت یکی از مدل ها به عنوان مدل جایگزین شبیه ساز تجاری در فرآیند شبیه سازی های آتی و بهینه سازی استفاده گردید. در ادامه جزئیات مربوط به روش کار و الگوریتم های مورد استفاده توضیح داده شده است.

ساختار مخزن به صورت مکعبی و مدل سنگ مخزن به صورت همگن در نظر گرفته شد و در ادامه مدل سیال مخزن شامل اجزا تشکیل دهنده گاز طبیعی مخزن اضافه شد. خلاصه مشخصات و اطلاعات مورد استفاده برای ساخت مدل پایه در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: داده مورد استفاده در ساخت مدل پایه مخزنی.

ردیف	پارامتر	مقدار	واحد
۱	تعداد بلوک ها در جهت افقی و عمودی (N_x, N_y, N_z)	(۲۱, ۲۱, ۵)	-
۲	اندازه بلوک در جهت های مختلف ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)	(۴۰, ۴۰, ۲۸)	ft
۳	عمق بالاترین لایه مخزن	۴۵۰۰	ft
۴	تخلخل مخزن	۰/۲۰	بی بعد
۵	تراوایی در جهت افقی و عمودی (k_x, k_y, k_z)	(۲۰۰, ۲۰۰, ۲۰)	md
۶	تراکم پذیری سنگ در فشار مرجع برابر ۱۰۰۰ پام	4.0×10^{-6}	$\frac{1}{psi}$
۷	دمای مخزن	۲۱۰	°F
۸	ترکیب درصد اجزا گاز مخزن ($N_2, CO_2, n-C_5, n-C_4, C_3, C_2, C_1$)	(۱, ۱, ۲ و ۲, ۲, ۹۰)	درصد مولی
۹	فشار اولیه مخزن	۱۰۰۰	psia
۱۰	اشباع اولیه گاز مخزنی	۰/۹۱	بی بعد
۱۱	اشباع اولیه آب	۰/۰۹	بی بعد

برای شبیه سازی ذخیره سازی در مخزن گازی از شبیه ساز ترکیبی CMG-GEM و با مدل خواص گاز با استفاده از معادله حالت پنگ-رابینسون استفاده گردید. مقادیر توابع جریانی هیدروژن-آب مورد استفاده در این مطالعه بر اساس پژوهش های قبلی انجام شده در این راستا، به صورت شکل ۱ می باشد. لازم به ذکر است که فشار موینگی میان فازهای تشکیل برابر صفر در نظر گرفته شد.

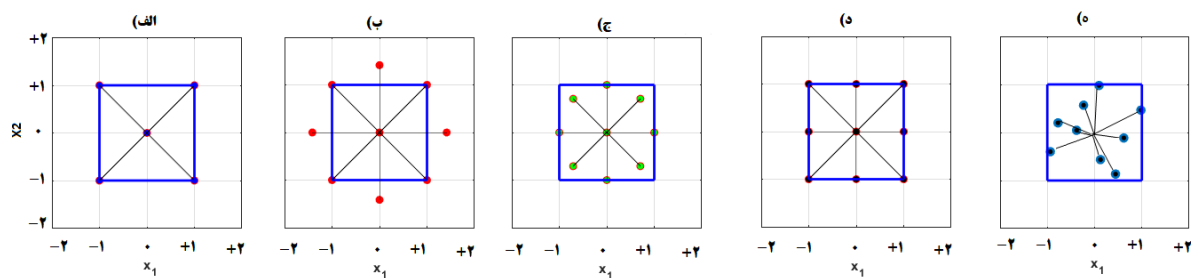


شکل ۱: مقادیر تراوایی نسبی فازهای آب، گاز هیدروژن به عنوان ورودی شبیه‌سازی [۲].

۲-۲- طراحی آزمایشات (شبیه‌سازی‌ها)

با توجه به نیاز به ایجاد جایگشت‌های متعدد، انتخاب هوشمندانه و خودکار از متغیرهای تصمیم‌گیری دخیل در مسئله (فاکتورها) و مقادیر یا حالت‌های مختلف (سطح‌ها)، از طراحی آزمایش به‌عنوان ابزار مفید و کاربردی جهت ایجاد پایگاه داده به‌صورت سیستماتیک و با کیفیت استفاده می‌گردد [۱۸]. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، طراحی آزمایش دارای روش‌های مختلف همچون روش سطح پاسخ که دارای زیرمجموعه‌هایی همچون روش طراحی باکس‌بنکن و روش‌های ترکیب مرکزی می‌باشد. این مجموعه روش‌ها به‌صورت سه سطح در نظر گرفته می‌شوند و با ایجاد و در نظر گرفتن نقاط آزمایش بر اساس سطح‌های مختلف این روش‌ها برای ایجاد جدول انتخاب سطح متغیرها استفاده می‌شود.

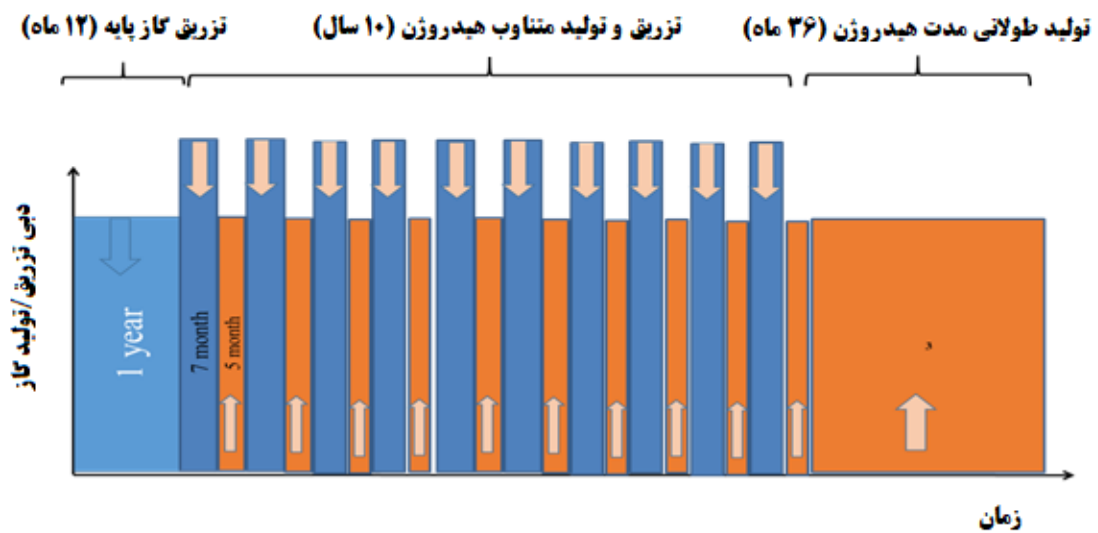
روش طراحی فوق مکعب لاتین (Latine Hypercube) به‌عنوان یک روش چند سطحی و به‌صورت تصادفی برای ایجاد جدول آزمایش بر اساس سطح متغیرها به کار گرفته می‌شود. در این روش، بازه مشخص شده برای هر متغیر به N قسمت مساوی تقسیم می‌گردد و تنها یک عدد به‌صورت کاملاً تصادفی از یکی از آن بازه‌ها در هر اجرا انتخاب می‌گردد.



شکل ۲:

طراحی آزمایش به روش‌های مختلف الف) باکس بنکن (Box Behnken)، ب) ترکیب مرکزی محاط شده (Central Composite Circumscribed (CCC)، ج) ترکیب مرکزی محیط شده (Central Composite Inscribed (CCI)، د) ترکیب مرکزی منطبق (Central Composite Faced (CCF) و ه) فوق مکعب لاتین.

همان‌طور که در شکل ۳ نمایش داده شده است، در ابتدا یک مدل پایه برای شبیه‌سازی فرآیند به مدت ۱۴ سال شامل: ۱) تزریق گاز پایه به مدت ۱ سال به منظور افزایش فشار مخزن و تأمین فشار تولید گاز عملیاتی، ۲) تزریق و تولید متناوب گاز هیدروژن به مدت ۱۰ سال و ۳) تولید گاز هیدروژن به مدت ۳ سال ساخته شد. پارامترهای عملیاتی مختلف اعم از بازه مشبک کاری، دبی تزریق و تولید گاز هیدروژن، ترکیب درصد گاز پایه و دبی تزریق گاز پایه به‌عنوان متغیر تصمیم‌گیری انتخاب گردید. در ادامه جدول ۵ شامل پارامترهای مذکور به همراه مقادیر گسسته و پیوسته در بازه تعیین شده به کمک طراحی آزمایش ایجاد گردید.



شکل ۳: شماتیک فرآیند تزریق و تولید هیدروژن.

جدول ۵: مقادیر پارامترهای عملیاتی مختلف در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی.

ردیف	پارامتر عملیاتی ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز هیدروژن	بازه یا مقادیر	واحد
۱	ترکیب درصد اجزای گاز پایه	دی‌اکسید کربن [۰/۱-۲۵/۰]	-
		نیتروژن [۰/۰-۰/۶۰]	-
		متان [۰/۰-۰/۶۰]	-
۲	دبی تزریق گاز پایه	[۱/۲-۵/۵]	$Mmsft^3$
۳	دبی کل تولید چاه	[۷-۴]	$Mmsft^3$
۴	دبی تزریق هیدروژن	[۷-۴]	$Mmsft^3$
۵	بازه مشبک کاری چاه تولیدی	باز (۱) - بسته (۰)	-
۶	بازه مشبک کاری چاه تزریقی	باز (۱) - بسته (۰)	-

ماه	تزریق (۶ و ۷) تولید (۶ و ۵)	مدت زمان تزریق و تولید	۷
-----	--------------------------------	------------------------	---

در ابتدا بر اساس یک قاعده سر انگشتی در علم یادگیری ماشین، داده حاصل از طراحی آزمایش به روش فوق مکعب لاتین برای آموزش مدل‌های مبتنی بر داده به ترتیب با نسبت ۷۰ به ۳۰ به دو قسمت آموزش و تست تقسیم شد. در طول فرآیند و پس از اجرا و اتمام شبیه‌سازی، مقادیر تابع هدف شامل مقدار بازیافت هیدروژن (در زمان قبل از شروع دوره تولید طولانی مدت هیدروژن) و خلوص هیدروژن برای هر یک از آزمایش‌ها مشخص گردید.

۲-۳- ایجاد مدل جایگزین

در مهندسی نفت استفاده از مدل‌های عددی (Numerical Model) برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی تولید، تطابق تاریخی، آنالیز ریسک، آنالیز حساسیت استفاده می‌گردد. این مدل‌ها با تقسیم مخزن به ابعاد کوچک‌تر و با اعمال فرضیات مسئله، شرایط اولیه و شرایط مرزی شروع به حل آن می‌کنند. در نگاه اول، برای دستیابی به دقت مناسب افزایش تعداد بلوک‌های محاسباتی و کاهش بازه زمانی می‌تواند راهکار خوبی باشد. با این وجود با توجه به ماهیت پیچیده و غیرخطی این فرآیندها، شبیه‌سازها همواره با مسئله و چالش زمان طولانی برای رسیدن به جواب همراه هستند [۲۴]. در سالیان اخیر توسعه سخت‌افزاری و نرم‌افزارها و ظهور سیستم‌های پردازش موازی باعث افزایش سرعت اجرا و کاهش مدت زمان شبیه‌سازی گردیده است. با این حال با توجه به کاهش تعداد فرضیات ساده کننده در روش‌های جدید و افزایش تعداد متغیرهای مورد نیاز در حل مسئله، اهمیت تولید روش‌های جایگزین محاسباتی (Proxy Model) افزایش می‌یابد. علاوه بر این در روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی مخزن نیاز به بروز رسانی مدل توسعه مخزن در مدت زمان کوتاه از اهمیت بسزایی برخوردار است. بنابراین در سالیان اخیر برای حل این مسئله از مدل جایگزین آماری برای کاهش بار محاسباتی و دستیابی به پردازش سریع در مسیر رسیدن به پاسخ مناسب استفاده می‌گردد. به‌صورت کلی این مدل‌های به‌عنوان یک مدل درون‌یابی پیشرفته در یک محدود مشخص عمل می‌کنند و در مطالعات پیشین با عناوین متعدد همچون مدل جایگزین، متا مدل، مدل تقریبی از مدل عددی استفاده می‌گردند [۸،۷]. در ادامه جزئیات روش هوش مصنوعی به‌عنوان مدل جایگزین شرح داده می‌شود.

۱-۳-۲- شبکه عصبی مصنوعی

معماری شبکه عصبی تک لایه شامل یک یا چند متغیر ورودی، لایه مخفی و متغیر هدف می‌باشد. تعداد نرون‌ها در لایه مخفی، نوع تابع فعال‌سازی با توجه به پیچیدگی و غیرخطی بودن مسئله انتخاب و بهینه‌سازی می‌گردد. علاوه بر این برای تعیین وزن‌های شبکه از الگوریتم گرادیان کاهشی و گرادیان برگشتی خطا می‌توان استفاده کرد. در ابتدا مقادیر وزن‌های مدل به‌صورت کاملاً تصادفی مقداردهی می‌گردند و مقدار خروجی لایه مخفی و لایه خروجی به ازای ترکیب خطی داده‌های ورودی و تابع فعال‌سازی مورد استفاده، محاسبه می‌گردند (معادله ۱ و ۲). در ادامه اختلاف مقادیر واقعی با مقادیر خروجی مدل محاسبه می‌گردد (معادله ۳ و ۴). این مقادیر برای به‌روزرسانی مجدد وزن‌ها بر اساس نرخ یادگیری (Learning rate) در نظر گرفته شده می‌پردازد (معادله ۵ و ۶). این مراحل تا زمانی ادامه می‌یابد که مقدار خطا به کمترین مقدار ممکن برسد. علاوه بر این شرایط خاتمه دیگری همچون تعداد تکرار، مدت زمان و تعداد تکرار بدون تغییر را می‌توان در نظر گرفت [۲۷].

$$h_j = f(b_j + \sum_{i=1}^{n_1} v_{ij}x_i) \quad (1)$$

$$y = f(b_y + \sum_{i=1}^{n_2} w_j h_j) \quad (2)$$

$$e_y = (t - y)(y \times (1 - y)) \quad (3)$$

$$e_j = (e_y w_j)(h_j \times (1 - h_j)) \quad (4)$$

$$\begin{cases} v_{ij} = v_{ij} + \alpha e_j x_i \\ w_j = w_j + \alpha e_y h_j \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} b_j = b_j + \alpha e_j \\ b_y = b_y + \alpha e_y \end{cases} \quad (6)$$

در معادلات بالا، پارامترهای x و y دهنده متغیرهای ورودی و خروجی هست. تعداد نمونه‌ها و اندیس هر نمونه داده با n_1 و i و تعداد کل نرون‌ها در لایه میانی و اندیس هر نرون به ترتیب با نماد n_2 ، j نشان داده شده است. پارامتر v_{ij} ، b_j و w_j به ترتیب بیانگر مقادیر بایاس و وزن‌های نرون‌های لایه مخفی (لایه میانی) و لایه خروجی می‌باشند. ضریب α نشان‌دهنده نرخ یادگیری و e_j ، e_y بیانگر مقادیر خطا برای لایه خروجی و لایه میانی می‌باشند.

۴-۲- بهینه‌سازی چندهدفه

بهینه‌سازی را می‌توان به صورت خلاصه به معنای یافتن بهترین پاسخ یا پاسخ‌های ممکن برای یک مساله تعریف کرد. به عبارت بهتر بهینه‌سازی در اصل یک جست‌وجو در یک محدوده مشخص برای یافتن بهترین جواب از میان تعداد زیادی از جواب‌های احتمالی و با در نظر گرفتن معیارهای توقف جست‌جو است. بهترین جواب می‌تواند کمترین یا بیشترین مقدار باشد که با توجه به این موضوع، دو حالت کمینه‌سازی و بیشینه‌سازی را خواهیم داشت که این جست‌جو بر روی محدوده‌ی مشخصی از تابع هدف صورت می‌گیرد. دانشمندان و محققان با مطالعه عمیق و الهام گرفتن از تکامل زیستی موجودات، به الگوریتم ژنتیک دست یافتند [۲۸]. مراحل الگوریتم ژنتیک را به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد:

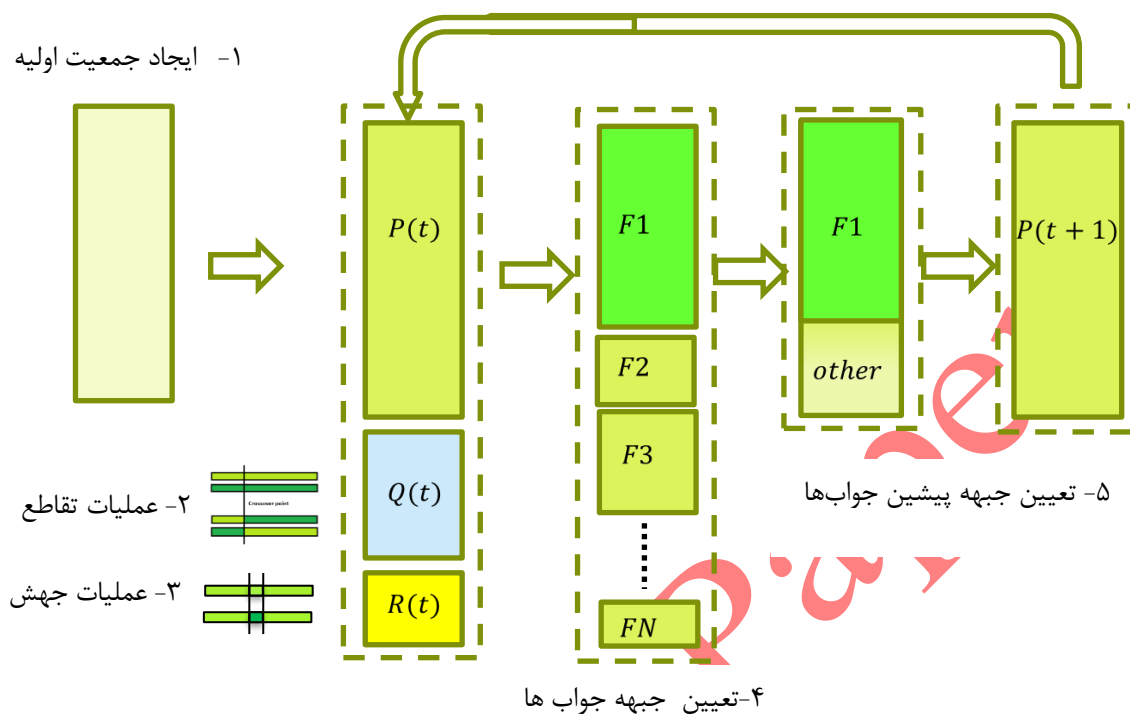
- (۱) ایجاد جمعیت تصادفی اولیه (Initial Population) و ارزیابی آن‌ها
- (۲) انتخاب والدین از میان جمعیت اصلی و ترکیب آن‌ها برای ایجاد جمعیت فرزندان (Crossover Children)
- (۳) انتخاب تعدادی از اعضا جمعیت اصلی برای اعمال جهش و ایجاد جمعیت جهش‌یافتگان (Mutation Children)
- (۴) تعیین تعدادی از اعضا جمعیت اصلی به عنوان جمعیت نخبگان (Elite population) برای شرکت در جمعیت نسل بعد
- (۵) ادغام جمعیت اصلی، فرزندان و جهش‌یافتگان و مرتب‌سازی اعضا
- (۶) ایجاد جمعیت اصلی جدید بر اساس جمعیت نخبگان و اعضا منتخب از جمعیت مرتب‌شده
- (۷) تا زمانی که هیچ‌کدام از شرایط خاتمه محقق نشده باشد، مرحله ۲ تکرار می‌شود.

با توجه به کارکرد مناسب الگوریتم در مسائل بهینه سازی تک هدفه و چندهدفه به دلیل مسائلی همچون احتمال کم به دام افتادن این روش در بهینه محلی (با وجود عملگر جهش اعمالی بر روی جواب ها) و همچنین ماهیت مساله و وجود متغیرهای عددی صحیح در میان متغیرهای تصمیم گیری از این روش استفاده شد. تعداد جمعیت اصلی اولیه، با توجه به تعداد متغیرهای مسئله و بر اساس یک قاعده سر انگشتی برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شد. علاوه بر این، با توجه به قابلیت الگوریتم ژنتیک در جلوگیری از به دام افتادن در جواب بهینه محلی از مقدار برابر با ۰/۸، ۰/۲ و ۰/۰۵ به ترتیب برای تعداد جمعیت تقاطع، جهش و نخبگان استفاده شد.

مراحل الگوریتم ژنتیک چندهدفه در شکل ۴ نمایش داده شده است. نحوه انتخاب والدین برای عملیات جهش و نحوه تعیین عضو منتخب برای جهش می تواند بر اساس انتخاب تصادفی و بر اساس مقدار تابع هزینه باشد. ایجاد جمعیت جدید با ترکیب اعضای جمعیت اصلی فعلی، جمعیت نخبگان، فرزندان و جمعیت جهش یافتگان با سناریوهای مختلفی قابل انجام است. به عنوان نمونه می توان سهم و درصد مشخصی از هر جمعیت را برای ایجاد جمعیت جدید استفاده کرد. در یک رویکرد دیگر، پس از ادغام جمعیت های مختلف و رتبه بندی آن ها، جواب های مناسب به عنوان اعضای جمعیت نسل جدید بعدی انتخاب می گردند. در توابع چندهدفه عملیات رتبه بندی بر اساس یک معیار قابل پیاده سازی نخواهد بود. بلکه بایستی به تعیین تعداد غلبه و مغلوب شدن جواب ها در مقایسه با سایرین پرداخت. جواب هایی که هیچ گونه مغلوب شدن را تجربه نمی کنند به عنوان جبهه پیشین در نظر گرفته می شوند (معادله ۷). بنابراین با رتبه بندی جواب ها بر اساس تعداد غلبه بر سایرین می توان به تعیین جبهه های مختلف برای جواب ها پرداخت [۲۹].

$$x \leq y \Leftrightarrow \begin{cases} \forall_i: x_i \leq y_i \\ \exists_{i_0}: x_{i_0} < y_{i_0} \end{cases} \quad (7)$$

۶- ایجاد جمعیت جدید

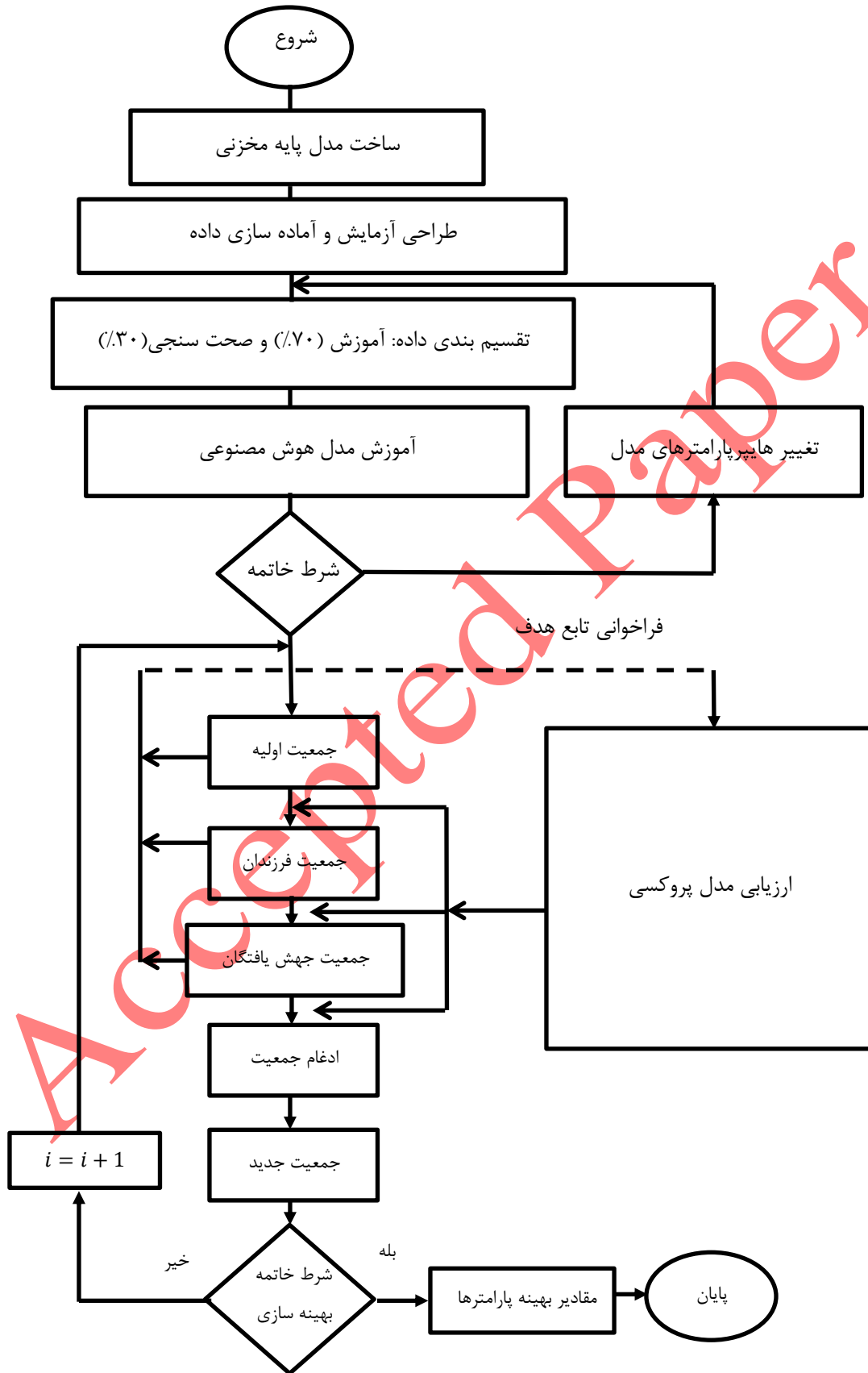


شکل ۴: مراحل الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای یافتن جبهه جواب‌های بهینه.

همان‌طور که اشاره گردید در این مطالعه از یک رویکرد و روش پژوهش سیستماتیک برای تعیین مقادیر بهینه متغیرهای عملیاتی در فرآیند ذخیره‌سازی گاز هیدروژن استفاده گردید. مراحل کار را می‌توان به صورت طرح‌واره ارائه‌شده در شکل ۵ دنبال کرد.

Accepted

شکل ۵: طرح‌واره مراحل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با استفاده از مدل جایگزین.

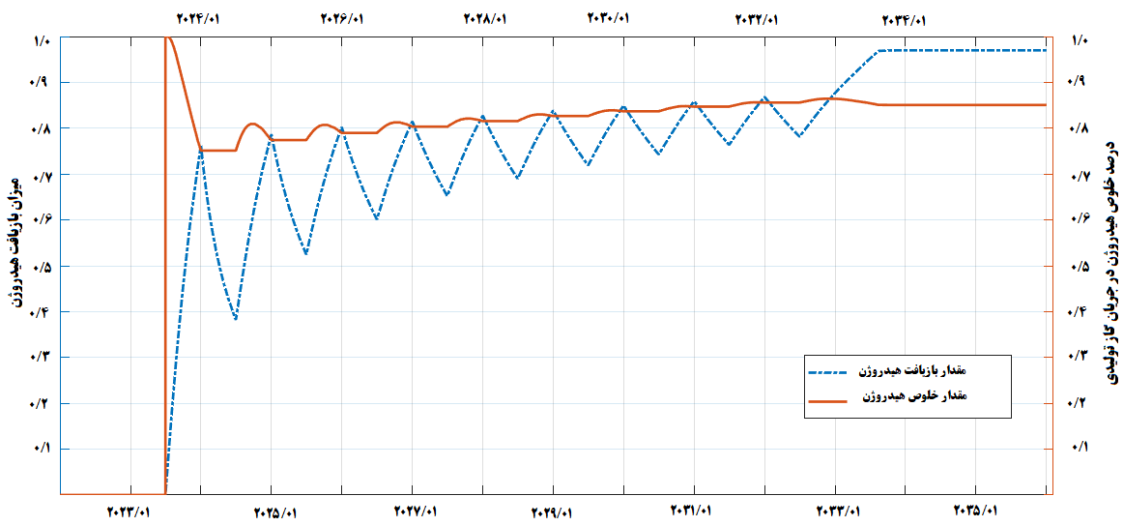


۳- نتایج و بحث

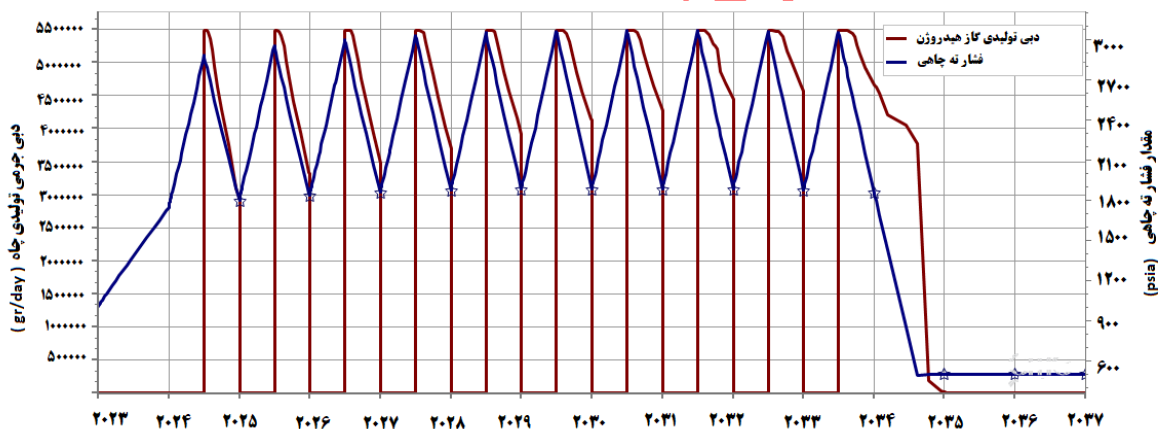
در شکل ۶ نتایج شبیه‌سازی مدل پایه با CMG-GEM ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در فرآیندهای تزریق و تولید متناوب هیدروژن، دو پارامتر مهم میزان بازیافت (نسبت حجم کل هیدروژن تولیدی به کل هیدروژن تزریقی) و میزان خلوص هیدروژن (نسبت مول‌های هیدروژن به کل گازهای تشکیل‌دهنده در جریان گاز تولیدی) بر اساس زمان به صورت افزایش‌ها و کاهش‌های پی‌درپی رخ می‌دهد. مطابق ادبیات مهندسی نفت، میزان بازیافت به صورت مقدار تجمعی سیال تولیدشده به مقدار تجمعی سیال داخل مخزن تعریف می‌گردد. بنابراین با توجه به اینکه در مدت زمان تزریق مقدار هیدروژن تجمعی افزایش می‌یابد باعث کاهش پارامتر بازیافت می‌گردد. برای مثال در ابتدای تزریق گاز پایه (۱۲ ماه) و اولیه بازه تزریق گاز عملیاتی (۵ ماه)، مقدار ضریب بازیافت برابر صفر است و با شروع بازه تولید ۵ ماهه این مقدار به ۰/۷ می‌رسد. در ادامه مجدداً به دلیل شروع دوره تزریق/تولید گاز هیدروژن مقدار بازیافت دچار تغییر می‌گردد. می‌توان گفت که رفتار کلی منحنی بازیافت یک روند افزایشی (یا بهبود ضریب کلی برداشت) در نقاط انتهایی دوره تولید را دنبال می‌کند و در نهایت پس از رسیدن به نقطه شروع تولید بلندمدت سه سالانه هیدروژن روند افزایشی داشته و سپس پروفایل ثابت (بسته شدن چاه) را تشکیل می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۶ نمایش داده شده است، رفتار مقدار خلوص هیدروژن در جریان گاز تولیدی مشابه تغییرات بازیافت هیدروژن است. در بازه تزریق گاز پایه و اولین دوره ۷ ماهه تزریق گاز هیدروژن مقدار خلوص برابر صفر است. در ادامه در یک بازه زمانی بسیار محدود و اندک به دلیل اینکه هیچ‌گونه گاز دیگری تولید نمی‌گردد، مقدار خلوص گاز هیدروژن برابر ۱ خواهد بود. با ادامه تولید و رسیدن جبهه گاز پایه و مخلوط گاز پایه و گاز اولیه به چاه تولیدی خلوص به مقدار حدود ۰/۷۵ کاهش می‌یابد. این رفتار در طی چرخه‌های متوالی تزریق و تولید تغییرات اندک و به صورت کلی در بازه ۰/۷۰ الی ۰/۹ را تجربه می‌کند به نحوی که با کاسته شدن از میزان گاز اولیه در مخزن، درصد خلوص بالا می‌رود.

علاوه بر این رفتار تغییرات فشار ته‌چاهی و نحوه کاهش دبی مولی تولید گاز هیدروژن بر حسب زمان شبیه‌سازی برای مدل پایه با جزئیات بیشتر در شکل ۷ نمایش داده شده است. در ابتدای شروع تزریق گاز پایه فشار اولیه مخزن از مقدار ۱۰۰۰ پام به مقدار نزدیک به ۱۸۰۰ پام افزایش می‌یابد. در ادامه به دلیل تزریق و تولیدهای متناوب هیدروژن مقدار فشار در بازه بین ۱۸۰۰ و ۳۰۰۰ رفتار افزایشی و کاهش را دارد. در نهایت در طول بازه تولید طولانی مدت سه سالانه به دلیل افت زیاد فشار و رسیدن به فشار ۵۰۰ پام باعث بسته شدن چاه تولیدی هیدروژن می‌گردد.

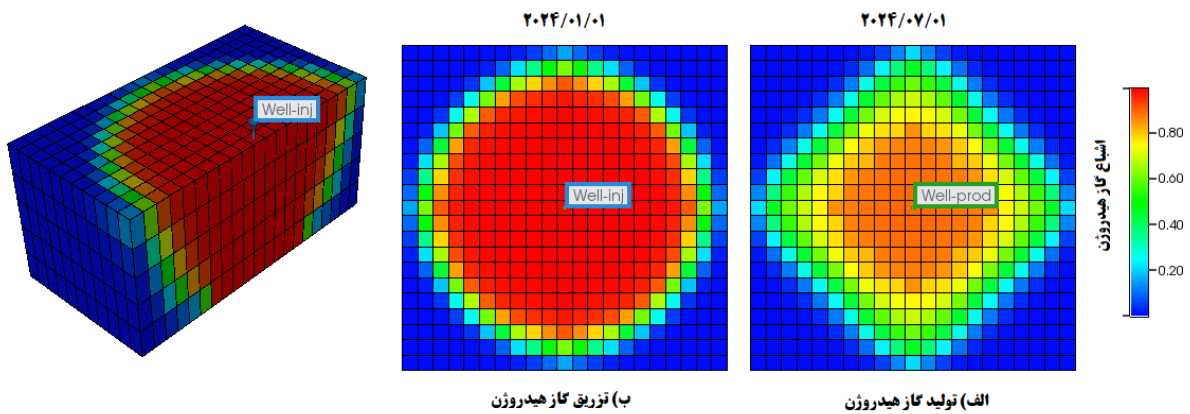


شکل ۶: روند تغییرات میزان خلوص هیدروژن (منحنی قرمز) و میزان بازیافت (منحنی آبی) در طول چرخه تزریق و تولید.



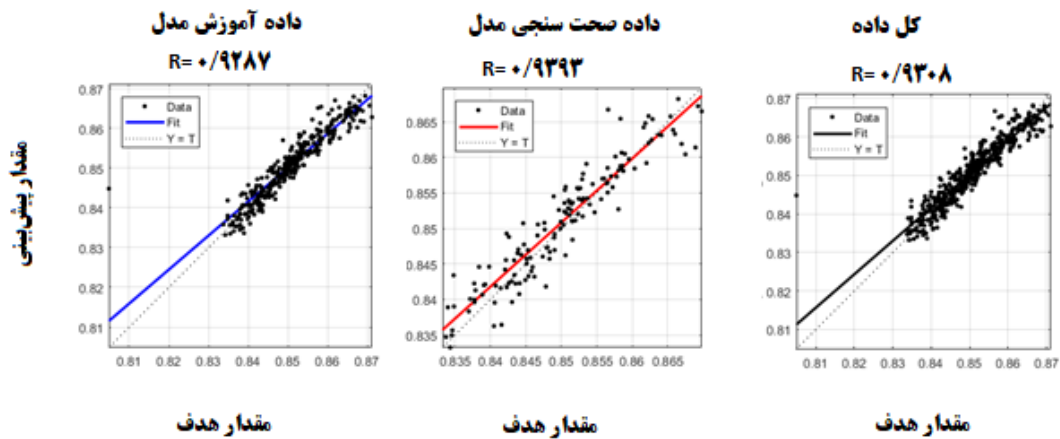
شکل ۷: روند تغییرات فشار ته چاهی و دبی تولیدی هیدروژن ذخیره شده در طول چرخه تولید و تزریق.

شکل ۸ نشان‌دهنده دید جانبی از ناحیه نزدیک محل چاه در مدل شبیه‌سازی و دید از بالا (لایه شماره ۳) برای بررسی نحوه حرکت جبهه گاز تزریقی و تغییرات اشباع در مخزن مورد مطالعه می‌باشد. با تزریق گاز، این جبهه در مخزن حرکت کرده و با تولید از آن روند کاهشی در پیشروی جبهه در عمق‌های بیشتر را به نمایش می‌گذارد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، تولید سیالات مخزنی به همراه هیدروژن و گاز پایه منجر به پروفایل تغییرات اشباع می‌گردند که با توجه به فرض سیستم همگن و خواص ثابت برای بلوک‌های مخزنی، نحوه تغییرات و حرکت جبهه به صورت شعاعی متقارن هست. همان‌طور که در پروفایل جبهه تزریق (الف) و جبهه تولید (ب) در شکل ۸ مشاهده می‌گردد، اشباع گاز در طول تولید و تزریق یکسان نیست و این عدم تطابق تاریخچه به دلیل به دام افتادن گاز به دلایل مختلف از قبیل انحلال در آب سازندی و اختلاط با گاز پایه تزریق شده و یا گاز اولیه مخزن می‌تواند رخ دهد.



شکل ۸: تغییرات اشباع گاز هیدروژن در زمان تزریق (چپ) و تولید (راست).

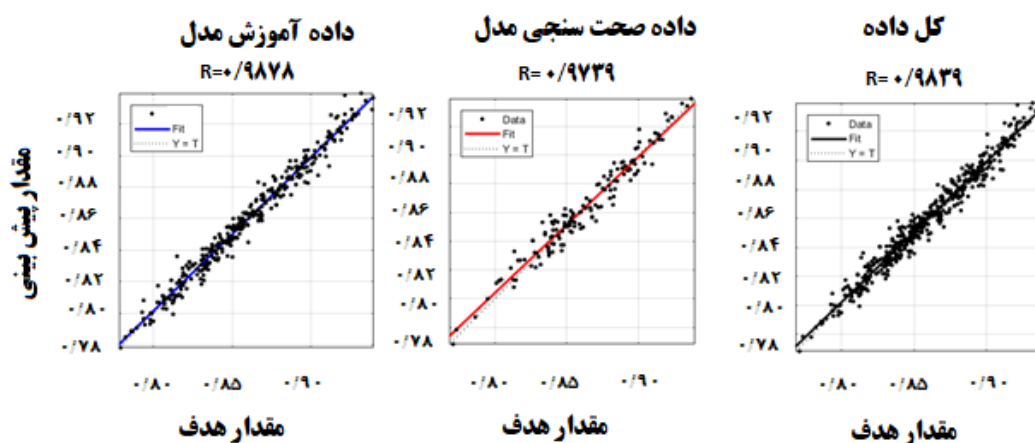
پس از آموزش و ارزیابی مدل‌های متعدد، مدل جایگزین به صورت شبکه‌ی عصبی مصنوعی تک‌لایه با تعداد ۱۰ نرون بهینه و تابع فعال‌سازی سیگموئیدی به عنوان مدل مناسب در نظر گرفته شد. نتایج دقت و عملکرد روش شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین پارامترهای هدف شامل میزان بازیافت و خلوص هیدروژن در شکل زیر نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، این مدل با دقت و ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۲۸۷ و ۰/۹۳۹۳ به ترتیب برای داده آموزش و صحت سنجی در تخمین میزان خلوص هیدروژن ارائه کرده است.



شکل ۹: پیش‌بینی میزان خلوص هیدروژن با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی.

علاوه بر این پارامتر میزان بازیافت هیدروژن در پایان آخرین دوره تولید (قبل از شروع بازه طولانی مدت تولید هیدروژن) به عنوان متغیر هدف در نظر گرفته شد، شکل ۱۰ نشان‌دهنده عملکرد شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی و تخمین میزان بازیافت نهایی قبل از شروع بازه طولانی مدت تولید هیدروژن می‌باشد. نتایج نشان‌دهنده دقت مناسب شبکه عصبی مصنوعی با دقت برابر با ۰/۹۸۷۸ و ۰/۹۷۳۹ برای تخمین میزان بازیافت هیدروژن می‌باشد؛ بنابراین مدل آموزش داده شده به عنوان یک مدل مناسب

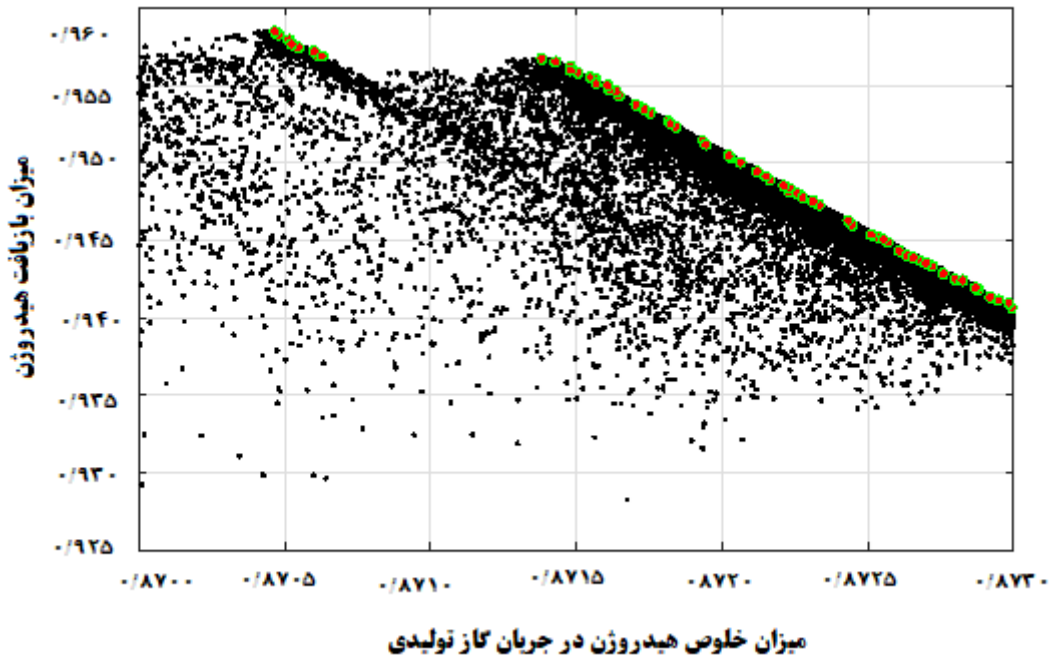
برای تخمین میزان خلوص و بازیافت هیدروژن تولیدی از مخزن می‌تواند استفاده گردد. به عبارت بهتر، این مدل حاصل از آموزش مبتنی بر داده می‌تواند به‌عنوان یک ابزار بسیار سریع و جایگزین شبیه‌سازهای تجاری در طول بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی مخزن مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۰: پیش‌بینی میزان بازیافت هیدروژن با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی.

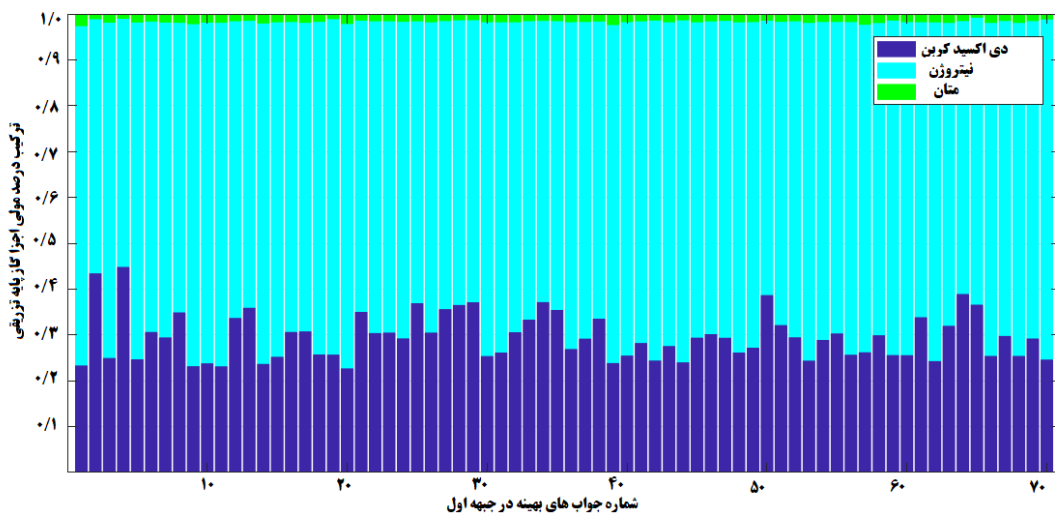
همان‌طور که اشاره شد، بهینه‌سازی، آنالیز ریسک و تطابق تاریخچه از جمله فرآیندهای بسیار زمان‌بر در طول مطالعات و شبیه‌سازی مخزن می‌باشند. بنابراین استفاده از یک راهکار جایگزین و دارای سرعت و دقت کافی می‌تواند به‌عنوان یک ارزش‌افزوده تلقی گردد. در این مطالعه پس از ارزیابی دقت مدل‌های مختلف، شبکه عصبی مصنوعی به‌عنوان یک مدل جایگزین مناسب برای ادامه فرآیند بهینه‌سازی تعیین گردید. شکل زیر نشان‌دهنده نتایج این مدل در طول فرآیند بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی شامل بازه مشبک‌کاری، نرخ تزریق و تولید گاز هیدروژن، ترکیب درصد و نرخ تزریق گاز پایه می‌باشد.

نتایج بهینه‌سازی چندهدفه با در نظر گرفتن پارامتر میزان خلوص (محور افقی) و بازیافت هیدروژن (محور عمودی) در شکل ۱۱ به‌صورت مجموعه‌ای از بهترین جواب‌ها تحت عنوان جبهه پارتو نشان داده شده است. به دلیل رقابت و تضاد رفتاری میان پارامترهای درصد خلوص و مقدار بازیافت هیدروژن، تمرکز اصلی این مطالعه بر بررسی پتانسیل کارکرد روش بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه است. شایان‌الذکر است که استفاده از روش‌های تبدیل تابع هدف به تابع هدف یگانه بر اساس مجموع وزن دار نیازمند تعیین وزن‌های هر پارامتر می‌باشد. هر یک از جواب‌های بهینه (نقاط قرمز رنگ) متناظر با یک نقطه بهینه شامل پارامترهای تصمیم‌گیری در فرآیند جست‌وجوی بهترین جواب مسئله می‌باشند. سایر نقاط پشت جبهه پارتو (نقاط مشکی رنگ) نشان‌دهنده جواب‌هایی هستند که در مقایسه با جواب‌های بهینه مغلوب شده‌اند. بنابراین تصمیم‌گیری نهایی در خصوص انتخاب شرایط بهینه عملیاتی از میان جواب‌های به‌دست‌آمده می‌تواند با روش‌های مختلف و با وزن دهی به هر یک از پارامترهای مسئله به دست آید.



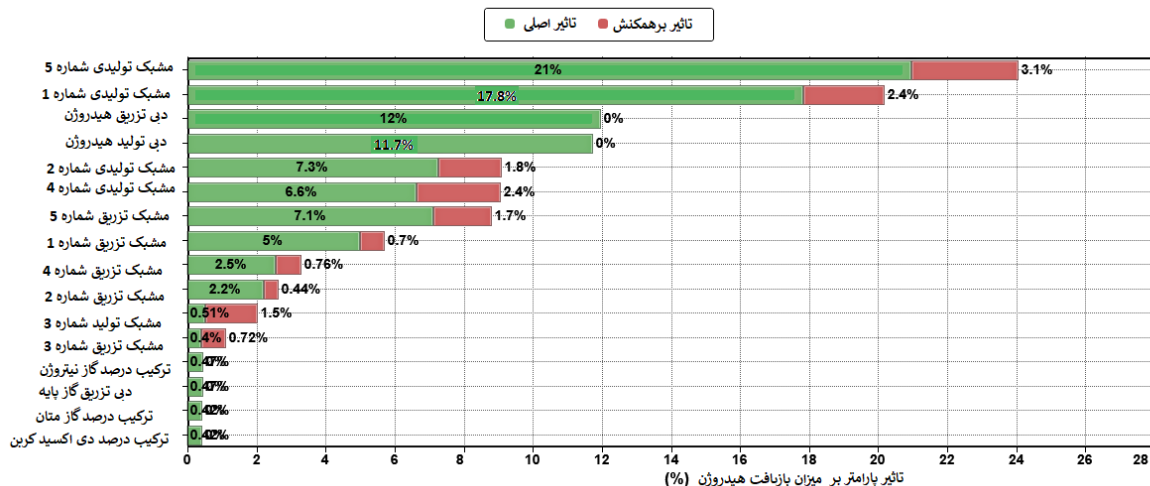
شکل ۱۱: عملکرد الگوریتم در یافتن جبهه جواب‌های بهینه و جواب‌های غیر بهینه.

تعیین مقدار ترکیب درصد بهینه گاز پایه یکی از متغیرهای تصمیم‌گیری و عملیاتی در حین تزریق گاز پایه می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، ترکیب درصد بهینه حاصل برای گازهای دی‌اکسید کربن، متان و نیتروژن برای جواب‌های موجود در جبهه پارتو نشان داده شده است. با توجه به نتایج، گاز نیتروژن، دی‌اکسید کربن و متان به ترتیب دارای مقادیر تقریبی نزدیک به ۰/۷۰، ۰/۲۵ و ۰/۰۵ می‌باشند؛ بنابراین بر اساس نتایج گاز خنثی نیتروژن عملکرد بهتری را می‌تواند ایجاد کند. علاوه بر این گاز دی‌اکسید کربن به‌عنوان یک گاز مهم در فرآیندهای زیست‌محیطی تلقی می‌گردد که با استفاده این گاز به‌عنوان یک گاز پایه می‌توان در جهت کاهش اثرات مربوط به گرمایش زمین و تغییرات اقلیمی مؤثر واقع شود. علاوه بر این گاز متان به‌عنوان یک گاز پایه در سهم ناچیزی را دارد که می‌توان این مقدار را با سایر گازها جایگزین کرد.



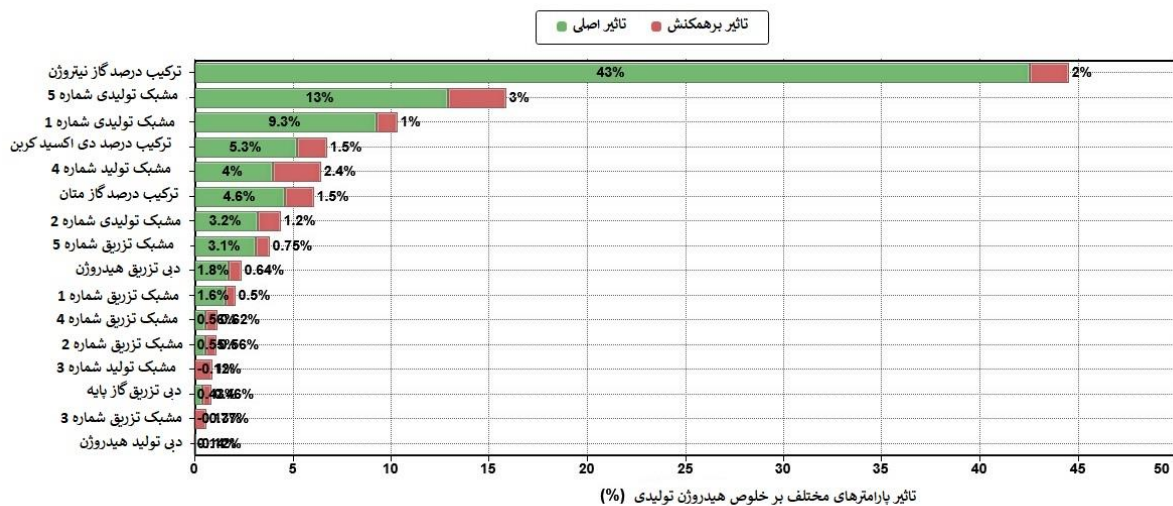
شکل ۱۲: ترکیب درصد اجزا تشکیل دهنده گازهای مختلف در گاز پایه.

علاوه بر تعیین مقادیر بهینه پارامترهای عملیاتی مختلف، می توان به آنالیز حساسیت پارامترها به کمک مدل جایگزین پرداخت. شکل ۱۳ و شکل ۱۴ نشان دهنده نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای تصمیم گیری در مسئله به ترتیب برای پارامتر هدف میزان بازیافت هیدروژن و میزان خلوص می باشد. همان طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، میزان تأثیر نسبی پارامترهای مربوط به باز یا بسته بودن مشبک های شماره ۵ (مشبک پایینی) و مشبک شماره ۱ (مشبک بالایی) به ترتیب برابر ۲۱ و ۱۸ درصد دارای بیشترین مقادیر به دلیل گرانشی و وزن مولکولی کمتر هیدروژن و در نتیجه مکانیزم حرکت و تولید آن در اثر مهاجرت گاز به سمت بلوک ها و مشبک های بالایی می تواند باشد. علاوه بر این پارامترهای دبی تزریق و تولید با تأثیر یکسان بر میزان بازیافت هیدروژن سهم دارند.



شکل ۱۳: آنالیز حساسیت پارامترهای تأثیرگذار بر میزان بازیافت هیدروژن در فرآیند ذخیره سازی زیرزمینی هیدروژن. همان طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، سهم و تأثیر پارامترهای مربوط به ترکیب درصد گاز نیتروژن در مخلوط گاز پایه، باز یا بسته بودن مشبک های تولیدی شماره ۵ (مشبک پایینی) و مشبک تولیدی شماره ۱ (مشبک بالایی) به ترتیب برابر ۲۱، ۱۸ و ۱۷.۸ درصد می باشد.

۱۳ و ۹/۳ درصد در میزان خلوص هیدروژن تولیدشده در سطح زمین را دارند. نقش اصلی مخلوط گاز پایه در تامین فشار تولیدی می باشد و در حین تزریق گاز هیدروژن، جبهه گاز پایه به عقب رانده می شود و نواحی نزدیک مشبک های تولید لایه های بالایی به دلیل جدایش ثقل دارای اشباع بالای گاز هیدروژن خواهند بود. علاوه بر این در لایه های نواحی پایین مخزن فاز گازی به صورت مخلوط گاز هیدروژن و گاز پایه ایجاد می گردد که باعث ایجاد ناخالصی در طول چرخه تولید از مخزن خواهد شد. بنابراین همان طور که ملاحظه گردید، نتایج تقریباً مشابهی از آنالیز حساسیت تأثیر باز و بسته بودن مشبک ها بر روی خلوص هیدروژن تولیدی همانند آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر میزان بازیافت دارای اهمیت زیادی است. علاوه بر این پارامترهای دبی تزریق و تولید با تأثیر یکسان بر میزان بازیافت هیدروژن سهم دارند. برخلاف آنالیز حساسیت انجام شده بر روی میزان بازیافت، میزان دبی تزریق هیدروژن تأثیر بسیار ناچیزی بر روی خلوص هیدروژن از خود نشان می دهد.



شکل ۱۴: آنالیز حساسیت پارامترهای تأثیرگذار بر میزان خلوص هیدروژن در فرآیند ذخیره سازی زیرزمینی هیدروژن. همان طور که اشاره گردید، هدف اصلی این پژوهش بررسی پتانسیل کارکرد روش های هوش مصنوعی به عنوان یک ابزار محاسباتی برای بهینه سازی عملیات ذخیره سازی زیرزمینی گاز می باشد. با بررسی انجام شده مشخص گردید که مدت زمان شبیه سازی بر اساس شبیه سازیهای تجاری بسیار زمان بر (در مقیاس زمانی ده دقیقه) نسبت به ارزیابی مدل جایگزین در حدود (چند ثانیه) می باشد. بنابراین این ابزار محاسباتی کارآمد با فراهم کردن دقت معادل شبیه ساز و سرعت کافی (صد مرتبه سریع تر) می تواند در مطالعات بهینه سازی به کار گرفته شود.

۴- نتیجه گیری

این مطالعه به بررسی پتانسیل و کارکرد مدل های جایگزین داده محور برای شبیه سازی فرآیند ذخیره سازی زیرزمینی گاز هیدروژن در یک مخزن گازی تخلیه شده می پردازد. معیارهای اصلی تصمیم گیری و قابل کنترل برای ذخیره سازی هیدروژن به معیارهای عملیاتی مربوط به ترکیب درصد گاز پایه (گاز متان، نیتروژن و دی اکسید کربن)، نرخ تولید و تزریق هیدروژن و محل مشبک ها

اشاره کرد. به همین منظور این مسئله به صورت یک تابع چندهدفه جهت بهینه‌سازی میزان بازیافت و خلوص هیدروژن و یافتن بهترین جواب‌های احتمالی تعریف گردید. بر این اساس نتایج زیر حاصل گردید:

- آنالیز حساسیت انجام شده برای بررسی تأثیرگذاری پارامترهای عملیاتی مهم در طول چرخه ذخیره‌سازی شامل پارامترهای ترکیب درصد و نرخ تزریق گاز پایه، نرخ تزریق و تولید گاز عملیاتی (هیدروژن) و بازه مشبک کاری چاه‌های تزریق، نشان داد که محل مشبک تولیدی در بالای مخزن و در پایین مخزن بر روی خلوص و میزان بازیافت هیدروژن ذخیره‌شده تأثیر زیادی دارد.
- روش انجام کار که در آن داده‌های حاصل از شبیه‌سازی و طراحی آزمایش، به صورت کاملاً تصادفی به دو مجموعه داده آموزش (۷۰ درصد) و صحت سنجی (۳۰ درصد) تقسیم گردید، موفقیت‌آمیز بود. بر این اساس مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی نتایج قابل توجهی با دقت نزدیک به ۹۷ و ۹۴ درصد به ترتیب برای تخمین میزان بازیافت و خلوص هیدروژن تولیدی را به همراه داشت.
- مدل جایگزین مبتنی بر داده به صورت مداوم توسط الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه به عنوان یک ابزار مهم جهت یافتن جواب‌های بهینه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده ترکیب درصد بهینه گاز پایه با درصد غالب گاز نیتروژن در گاز پایه شامل نیتروژن، دی‌اکسید کربن و متان به ترتیب با مقدار درصد مولی ۲۵، ۷۰ و ۵ درصد بود.
- با توجه به سرعت پردازش سریع در ارزیابی تابع هدف که برای هر اجرا در مقیاس زمانی ثانیه می‌باشد می‌توان پیشنهاد کرد که از پتانسیل روش‌های مبتنی بر داده جهت شبیه‌سازی، پیاده‌سازی و بهینه‌سازی متغیرهای عملیاتی فرآیند تزریق و تولید هیدروژن در کارهای مطالعاتی مشابه بهره گردد. باید در نظر داشت که انجام این عملیات در شبیه‌سازی تجاری با مقیاس زمانی بیش از ده دقیقه صورت می‌پذیرد.

مراجع

- [1] F. Vanek and L. D. Albright, *Energy Systems Engineering*. New York, NY: McGraw-Hill Professional, 2008.
- [2] M. Bahrami, E. Izadi, D. Zivar, S. Ayatollahi, and H. Mahani, "Challenges in the simulation of underground hydrogen storage: A review of relative permeability and hysteresis in hydrogen-water system," *J. Energy Storage*, vol. 73, no. PB, p. 108886, 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108886.
- [3] A. K. Sampene, C. Li, F. O. Agyeman, and R. Brenya, "Analysis of the BRICS countries' pathways towards a low-carbon environment," *BRICS J. Econ.*, vol. 2, no. 4, pp. 77–102, Dec. 27AD, [Online]. Available: <https://globalcarbonatlas.org/emissions/carbon-emissions/> -<https://doi.org/10.38050/2712-7508-2021-4-4>.
- [4] D. Zivar, S. Kumar, and J. Foroozesh, "Underground hydrogen storage: A comprehensive review," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 45, pp. 23436–23462, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.138.
- [5] L. Zeng, M. Sarmadivaleh, A. Saeedi, Y. Chen, Z. Zhong, and Q. Xie, "Storage integrity during underground hydrogen storage in depleted gas reservoirs," *Earth-Science Rev.*, vol. 247, no. October, 2023, doi: 10.1016/j.earscirev.2023.104625.
- [6] M. Pérez-Vigueras, R. Sotelo-Boyás, R. de G. González-Huerta, and F. Bañuelos-Ruedas, "Feasibility analysis of green hydrogen production from oceanic energy," *Heliyon*, vol. 9, no. 9, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e20046.
- [7] J. Juez-Larré, C. Gonçalves Machado, H. Yousefi, T.-K. Wang, R. Groenenberg, and S. Van Gessel, "(Pre)feasibility study of underground hydrogen storage potential in depleted gas fields and salt caverns in the Netherlands," no. Eclipse 300, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-10005>.
- [8] S. M. Jafari Raad, Y. Leonenko, and H. Hassanzadeh, "Hydrogen storage in saline aquifers: Opportunities and challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 168, no. 112846, p. 112846, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112846.
- [9] M. Talukdar, P. Blum, N. Heinemann, and J. Miocic, "Techno-economic analysis of underground

- hydrogen storage in Europe,” *iScience*, vol. 27, no. 1, p. 108771, 2024, doi: 10.1016/j.isci.2023.108771.
- [10] M. Gloc, M. Szwed, A. Zagórski, and J. Mizera, “Hydrogen influence on microstructure, corrosion resistance and mechanical properties of low alloy steel and explosively clad steel used for hydrogen storage salt caverns,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 875, pp. 47–52, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.875.47.
- [11] S. Zhu *et al.*, “Hydrogen loss of salt cavern hydrogen storage,” *Renew. Energy*, vol. 218, no. 119267, p. 119267, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.119267.
- [12] A. Le Duigou, A.-G. Bader, J.-C. Lanoix, and L. Nadau, “Relevance and costs of large scale underground hydrogen storage in France,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 42, no. 36, pp. 22987–23003, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.239.
- [13] E. M. Thaysen *et al.*, “Estimating microbial growth and hydrogen consumption in hydrogen storage in porous media,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 151, no. 111481, p. 111481, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111481.
- [14] M. Bagheri, H. Mahani, S. Ayatollahi, and D. Zivar, “Direct pore-scale simulation of the effect of capillary number and gas compressibility on cyclic underground hydrogen storage & production in heterogeneous aquifers,” *Adv. Water Resour.*, vol. 181, no. 104547, p. 104547, 2023, doi: 10.1016/j.advwatres.2023.104547.
- [15] N. S. Muhammed, B. Haq, D. Al Shehri, A. Al-Ahmed, M. M. Rahman, and E. Zaman, “A review on underground hydrogen storage: Insight into geological sites, influencing factors and future outlook,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 461–499, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2021.12.002.
- [16] S. S. Kalati, N. Pour Khiabani, S. Ayatollahi, H. Mahani, D. Zivar, and M. A. Esmailbeig, “Molecular dynamics simulation of hydrogen diffusion into brine: Implications for underground hydrogen storage,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 53, pp. 17–28, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.11.318.
- [17] K. Ramesh Kumar and H. Hajibeygi, “Multiscale simulation of inelastic creep deformation for geological rocks,” *J. Comput. Phys.*, vol. 440, p. 110439, 2021, doi: 10.1016/j.jcp.2021.110439.
- [18] M. Kanaani, B. Sedae, M. Asadian-pakfar, and M. Gilavand, “Development of multi-objective co-optimization framework for underground hydrogen storage and carbon dioxide storage using machine learning algorithms,” *J. Clean. Prod.*, vol. 386, no. November 2022, p. 135785, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135785.
- [19] F. Zheng, A. Jahandideh, B. Jha, and B. Jafarpour, “Geologic CO₂ Storage Optimization under Geomechanical Risk Using Coupled-Physics Models,” *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 110, no. June, p. 103385, 2021, doi: 10.1016/j.ijggc.2021.103385.
- [20] C. Park, J. Oh, S. Jo, I. Jang, and K. S. Lee, “Multi-objective optimization of CO₂ sequestration in heterogeneous saline aquifers under geological uncertainty,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 20, 2021, doi: 10.3390/app11209759.
- [21] S. B. Kashkooli, A. Gandomkar, M. Riazi, and M. S. Tavallali, “Coupled optimization of carbon dioxide sequestration and CO₂ enhanced oil recovery,” *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 208, no. July, p. 109257, 2022, doi: 10.1016/j.petrol.2021.109257.
- [22] P. Vaziri and B. Sedae, “An application of a genetic algorithm in co-optimization of geological CO₂ storage based on artificial neural networks,” *Clean Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 111–125, 2024, doi: 10.1093/ce/zkad077.
- [23] M. Saeed and P. Jadhawar, “Optimizing underground hydrogen storage in aquifers: The impact of cushion gas type,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 52, pp. 1537–1549, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.08.352.
- [24] L. M. Da Silva, G. D. Avansi, and D. J. Schiozer, “Development of proxy models for petroleum reservoir simulation: a systematic literature review and state-of-the-art,” *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.*, vol. 7, no. 10, pp. 36–62, 2020, doi: 10.22161/ijaers.710.5.
- [25] P. Bahrami, F. Sahari Moghaddam, and L. A. James, “A review of proxy modeling highlighting applications for reservoir engineering,” *Energies*, vol. 15, no. 14, p. 5247, 2022, doi: 10.3390/en15145247.
- [26] D. A. M. Matthew, A. Jahanbani Ghahfarokhi, C. S. W. Ng, and M. Nait Amar, “Proxy model development for the optimization of water alternating CO₂ gas for Enhanced Oil Recovery,” *Energies*, vol. 16, no. 8, p. 3337, 2023, doi: 10.3390/en16083337.
- [27] ح. مقسمی and ب. علیزاده سواره. داده کاوی با *MATLAB* و *IBM SPSS Modeler* انتشارات کاوشگران جوان رایانه. ۱۳۹۴.
- [28] R. L. Haupt, S. E. Haupt, and A. J. Wiley, *Practical Genetic Algorithms*, Second. wiley, 2004.
- [29] X.-S. Yang, *Engineering Optimization*. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 2010.

Multi-Objective Optimization of Underground Hydrogen Storage Operation in a Depleted Gas Reservoir Using Smart Proxy Models

Abstract

The global warming and climate change due to the increase in greenhouse gas emissions are the vital and challenging issues in this period of human life. Human's effort to address this problem has led to provide several solutions including net-zero carbon, i.e., carbon capture and storage and energy transition i.e., reducing or even replacing fossil fuels with renewable energy sources such as solar, wind, hydro etc. However, climate dependence and the highly fluctuating nature of clean energy production from these sources require a large-scale storage system to continuously meet energy demand. Hydrogen as an energy carrier, and underground hydrogen storage (UHS) hold potential for sustainable supply of a large amount of energy in the peak of energy consumption. Hydrogen has different characteristics and dynamical behaviors in the porous media compared to other gases. Thus it is required to create complex compositional models and perform time-consuming simulations to seek for the best gas storage scenario based on operational parameters including cushion gas and working gas injection/production flowrates, perforations and cushion gas composition. In this study, the process of UHS in a depleted gas reservoir was simulated. Due to the reservoir remaining gas saturation and phase behavior of fluids in porous media, both hydrogen recovery factor and purity are considered as target variables. Next, the design of experiment methods (e.g., Latin hypercube) was utilized to generate the required train and test subsets for artificial neural network model. The feed-forward model with 10 neurons and sigmoid activation function as a smart proxy model with accuracy equal to 0.97 and 0.94, respectively, for training and testing subsets provided the best performance for predicting the hydrogen purity and recovery factor or the target parameters in

the multi-objective optimization process of decision variables by genetic algorithm. The optimum solutions, i.e., Pareto front for the decision variables showed the dominant percentage of nitrogen gas with the base gas composition of 75, 20 and 5% respectively for nitrogen, carbon dioxide and methane. Moreover, production from top perforations and hydrogen injection in the lower part of the preformation were determined as optimal conditions. The implemented procedure in this paper can be used for UHS field studies and fast decision making in the large-scale energy storage operations.

Keywords:

Underground Hydrogen Storage; Proxy Model; Artificial Intelligence; Genetic Algorithm

Accepted Paper