

ویژه نامه توسعه زنجیره فناوری های هیدروژنی

بهینه سازی چندهدفه ذخیره سازی زیرزمینی هیدروژن در یک مخزن گازی تخلیه شده با استفاده از مدل های جایگزین هوشمند

حسین خیرالهی، سید شهاب الدین آیت اللهی* و حسن ماهانی*

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۰

چکیده

گرم شدن کره زمین و تغییرات اقلیمی منجر به کاهش مصرف یا جایگزینی سوخت های فسیلی با منابع تجدیدپذیر شده است. با این حال، به دلیل وابستگی جوی-فصلی تولید انرژی های تجدید پذیر نیاز به یک سیستم ذخیره سازی بزرگ مقیاس برای برطرف کردن ناترازی انرژی می باشد. استفاده از هیدروژن به عنوان حامل انرژی و ذخیره سازی زیرزمینی آن راهکار جدید برای حل این چالش است. اما ویژگی ها و رفتار خاص گاز هیدروژن در محیط متخلخل نیازمند شبیه سازی های متعدد و زمان بر، برای تعیین بهترین سناریو ذخیره سازی گاز بر اساس بهینه سازی چندهدفه می باشد. در این مقاله ذخیره سازی زیرزمینی گاز هیدروژن در یک مخزن گازی تخلیه شده شبیه سازی شد و در ادامه با مدل هوش مصنوعی جایگزین گردید و بهینه سازی متغیرهای تصمیم گیری توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه انجام گرفت. با توجه به حضور گازهای بازمانده از قبل در مخزن و اختلاط آن با گاز هیدروژن تزریقی، دو پارامتر مهم خلوص گاز تولید شده و ضریب بازیافت هیدروژن تزریقی در اولویت بررسی قرار گرفتند. به کمک روش طراحی آزمایش، داده های مورد نیاز برای بررسی پارامترهای تأثیرگذار و آموزش روش های داده-محور از طریق شبیه سازی میدانی تولید شد. در ادامه یک شبکه عصبی مصنوعی با ۱۰ نرون و تابع فعال سازی سیگموئیدی به عنوان مدل جایگزین مبتنی بر هوش مصنوعی برای آموزش و صحت سنجی به ترتیب با دقت برابر با ۰/۹۷ و ۰/۹۴، بهترین عملکرد را برای پیش بینی میزان خلوص و بازیافت هیدروژن ارائه داد. پاسخ های بهینه عملیاتی برای متغیرهای تصمیم گیری نشان دهنده درصد غالب گاز نیتروژن در گاز پایه با ترکیب ۷۵، ۲۰ و ۵٪ 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. نتایج این پژوهش برای طراحی آزمایشات و انجام بهینه مدل سازی های مقیاس بزرگ هیدروژن که به امکانات محاسباتی و زمان بسیار طولانی نیاز دارند مفید خواهد بود.

کلمات کلیدی: ذخیره سازی زیرزمینی هیدروژن، مخازن تخلیه شده گاز، مدل جایگزین، بهینه سازی**چندهدفه، هوش مصنوعی، الگوریتم ژنتیک***مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکیshahab@sharif.edu
hmahani@sharif.edu

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2024.5442.3420)

مقدمه

حضور گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر یکی از ملزومات ایجاد اثر گلخانه‌ای^۱ 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 درحال توسعه باعث افزایش بی‌رویه انتشار گازهای گلخانه‌ای و به دام افتادن انرژی خورشید در اتمسفر زمین و گرمایش جهانی زمین شده است [۱ و ۲].

براساس اعلام آژانس بین‌المللی انرژی و سازمان بین‌دولتی تغییرات اقلیمی^۲، مقدار دی‌اکسید کربن انتشار یافته به جو زمین برابر با ۳۷/۲ گیگا تن در سال بوده است. پژوهش‌های انجام‌شده 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^۳ با شالوده مرتبط با کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و نگه‌داشتن دمای زمین در محدود تغییرات کمتر از ۲ °C و با هدف رسیدن به ۱/۵ °C در میان اکثر کشورها منعقد گردید. اسناد و آمارهای جمع‌آوری‌شده توسط IPCC حاکی از آن است که به‌ترتیب کشورهای چین، ایالات‌متحده آمریکا، هند، روسیه، ژاپن، اندونزی و ایران از جمله کشورهای اصلی انتشاردهنده گاز گلخانه‌ای کربن دی‌اکسید می‌باشند. با این وجود لازم به ذکر است که ایران از لحاظ میزان سرانه انتشار دی‌اکسید کربن در رتبه ۳۶ جهان قرار دارد. میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط ایالات‌متحده در یک بازه مشخص به‌صورت تقریباً ثابت بوده و اخیراً روند نزولی داشته است. کشورهای درحال توسعه و اقتصادهای نوظهور همانند چین و هند با افزایش بسیار شدید تولید کربن دی‌اکسید در مقایسه با سایر کشورها نقش بسیار قابل‌توجهی داشته‌اند [۳]. روند صعودی انتشار کربن دی‌اکسید، اقتصاد جهانی را ملزم کرده 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 باشد [۱]. منشأ اصلی انتشار بی‌رویه گاز کربن دی‌اکسید احتراق سوخت‌های فسیلی (نفت، گاز و ذغال سنگ) به منظور تأمین انرژی برای مصارف روشنایی، گرمایش خانگی و حمل‌ونقل است. علاوه‌براین عوامل تشدیدکننده‌ای همچون جنگل‌زدایی و تغییر کاربری اراضی موجب برهم خوردن چرخه کربن در طبیعت گردیده است. 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 کربن دی‌اکسید در سازندهای زمین‌شناسی جهت کاهش غلظت کربن دی‌اکسید و استفاده از منابع تجدید پذیر از قبیل انرژی خورشید و باد دنبال می‌شود. نکته درخور توجه وابستگی جوی^۴ (یا فصلی) و اختلاف بین میزان تولید و مصرف این منابع انرژی می‌باشد. بنابراین ذخیره‌سازی انرژی به‌صورت حامل‌های انرژی همانند هیدروژن در سازندهای زمین‌شناسی یک راهکار مناسب می‌تواند باشد. در حال حاضر، چندین پروژه میدانی در حال مطالعه و بررسی ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز هیدروژن در کشورهایی مانند ایالات‌متحده آمریکا، انگلستان و اتحادیه اروپا می‌باشد [۴]. با این حال عملیات ذخیره‌سازی گاز هیدروژن با عدم قطعیت، ریسک و ناشناخته‌های زیادی همراه است. به‌عنوان نمونه، عدم قطعیت درخصوص یکپارچگی چاه و سازند و پوش سنگ مخزن، ضریب برداشت هیدروژن، نشت و هدررفت و جنبه‌های ایمنی و اقتصادی آن وجود دارد. از دیگر جنبه‌های مرتبط، تغییر ترشوندگی پوش سنگ مخزن و نفوذ گاز به آن، کاهش مقاومت

1. Greenhouse Effect

2. Intergovernmental Panel on Climate Change

3. Paris Agreement Temperature Goal

4. Weather Dependent

فشار بیشتری در مقایسه با متان می‌باشد [۴]. همان‌طور که در **جدول ۲** مشاهده می‌گردد، گاز متان تقریباً هشت برابر هیدروژن (در دما و فشار استاندارد) چگال‌تر است. این نکته اهمیت ظرفیت ذخیره‌سازی در طول عملیات ذخیره‌سازی هیدروژن را نشان می‌دهد. ویسکوزیته کم‌تر هیدروژن در مقایسه با متان (به‌عنوان گاز پایه یا گاز عملیاتی) تحرک بیشتر هیدروژن را موجب می‌شود که می‌تواند به چالش‌هایی از جمله پدیده انگشتی شدن در برخی از موارد بینجامد و یا تزریق آن به مخازن گازی منجر به هیدروژن باقی‌مانده کم‌تری در محیط متخلخل حاوی هیدروژن و متان می‌شود [۱۴].

حلالیت هیدروژن زمانی مهم است که ذخیره‌سازی در سفره‌های آب شور یا مخازن نفت و گاز تخلیه‌شده انجام شود. در مقایسه با متان، هیدروژن حلالیت کمتر و در نتیجه هدر رفت ناشی از انحلال کم‌تری دارد که به‌عنوان یک مزیت در نظر گرفته می‌شود [۱۵]. علاوه‌براین، در آب با شوری بالا و حضور نمک بیشتر حلالیت هیدروژن در آب کاهش می‌یابد.

ژئومکانیکی سنگ مخزن و فعال شدن مجدد گسل‌های زیرزمینی می‌باشد. تغییرات متناوب دما و فشار در حین دوره تزریق و تولید موجب ایجاد تنش‌های حرارتی و فشاری بر روی سیمان و لوله جداری می‌گردد. این عامل در کنار خوردگی ناشی از فعالیتهای میکروبی می‌تواند منجر به از دست رفتن یکپارچگی چاه شود. علاوه‌براین فعالیت میکروبی، واکنش‌های ژئو شیمیایی و برهم‌کنش سنگ و سیالات مخزن و هیدروژن می‌تواند باعث هدررفت هیدروژن و کاهش بازده عملیات ذخیره‌سازی گردد [۵].

جدول ۱ اطلاعات لازم در مورد مزایا و معایب هر کدام از این روش‌های ذخیره‌سازی و ریسک‌های مربوط به آن‌ها را دسته‌بندی کرده است. آگاهی از خواص فیزیکی هیدروژن به عملکرد ایمن و ذخیره‌سازی موفق کمک می‌کند. در **جدول ۲** با توجه به اهمیت ذخیره‌سازی گازهای کربن دی‌اکسید، متان و هیدروژن ویژگی‌های ترموفیزیکی این سه گاز مقایسه شده‌اند. به‌عنوان مثال از آنجایی که هیدروژن نسبت به گاز طبیعی تراکم‌پذیری بیشتری دارد، برای ذخیره‌سازی جرم یکسانی از این دو گاز، برای هیدروژن نیازمند

جدول ۱ بررسی پتانسیل مکان‌های مختلف 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 تزریق گاز پایه [۹]
زیاد	کم	کم	وجود 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
متوسط	خیلی کم	زیاد	احتمال نشت گاز هیدروژن از پوش سنگ [۱۱]
کم	زیاد	متوسط	هزینه اولیه و سرمایه‌گذاری تجهیزات سطح‌الارضی [۸ و ۱۱]
باکتری کاهنده سولفات و آهن	عدم فعالیت یا فعالیت کم	باکتری کاهنده سولفات	فعالیت بیولوژیکی میکروارگانیسم‌ها [۱۳]

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

ویژگی گاز / نوع گاز	هیدروژن (H_2)	متان (CH_4)	کربن دی‌اکسید (CO_2)
وزن مولکولی (g/mol)	۲/۰۱۶	۱۶/۰۴۳	۴۴/۰۹
چگالی گاز در شرایط استاندارد (kg/m^3)	۰/۰۸۹	۰/۶۵۷	۱/۹۸
گران‌روی گاز در شرایط استاندارد (Pa.sec)	$۰/۸۹ \times 10^{-5}$	$۱/۱۰۹ \times 10^{-5}$	$۱/۴۹ \times 10^{-5}$
حلالیت گاز در آب در شرایط استاندارد (g/L)	۰/۰۰۱۶۰	۰/۰۲۲۷۰	۰/۰۰۱۴۵
نقطه جوش ($^{\circ}C$)	-۲۵۳	-۱۶۲	-۷۸/۴۴
دمای بحرانی ($^{\circ}C$)	-۲۳۹/۹۵	-۸۲/۳	-۳۱
فشار بحرانی (atm)	۱۲/۸	۴۵/۷۹	۷۲/۷۹
ارزش حرارتی (kJ/g)	۱۲۰-۱۴۲	۵۰-۵۵/۵	-
ضریب نفوذ در آب در شرایط استاندارد (m^2/s)	$۵/۱۳ \times 10^{-9}$	$۱/۸۵ \times 10^{-9}$	$۱/۱۶ \times 10^{-3}$

بسته به فشار، دما و سطح تماس، سرعت انحلال هیدروژن می‌تواند متغیر باشد. با توجه به اندازه و وزن مولکولی کم، احتمال نشت هیدروژن به درون لایه‌های پوش‌سنگ 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 کماکان آنقدر بالا می‌باشد که نشت را امکان پذیر نماید. 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. مطالعات متعددی در زمینه ذخیره‌سازی هیدروژن در مقیاس‌های مختلف شبیه‌سازی از ابعاد مولکولی تا میدانی انجام شده است. کومار و حاجی بیگی به شبیه‌سازی به‌صورت 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]. اما با توجه به ماهیت زمان‌بر و بار محاسباتی بالای مطالعات مختلف شبیه‌سازی عددی (مبتنی بر فیزیک^۱ و حل روابط حاکم بر جریان)، در سالهای اخیر جهت آنالیز ریسک و حساسیت‌سنجی، مطالعات بررسی عدم قطعیت و بهینه‌سازی تک هدفه و چند هدفه، از مدل‌های جایگزین^۲ هوشمند در استفاده گردیده است. در جدول ۳ مجموعه‌ای از مطالعات انجام‌شده به‌همراه تابع هدف و نوع مخزن مورد استفاده برای ذخیره‌سازی گاز گزارش شده است. بر این اساس، هدف اصلی این مقاله، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند ذخیره‌سازی متناوب گاز هیدروژن در یک مخزن گازی تخلیه‌شده است.

1. Physics-Based Simulation
2. Proxy Model

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

نویسندگان	فرآیند ذخیره‌سازی گاز	تابع هدف
فانگینگ و همکاران [۱۹]	کربن دی اکسید در مخزن نفتی	بهینه‌سازی ریسک ژئومکانیکی
پارک و همکاران [۲۰]	کربن دی اکسید در آبد	بهینه‌سازی فشار ته‌چاهی و حجم گاز به تله افتاده
بهرامی کشکولی و همکاران [۲۱]	کربن دی اکسید در مخزن نفتی و عملیات ازدیادبرداشت	بهینه‌سازی بازیافت نفت و ذخیره‌سازی گاز کربن دی اکسید
وزیری و صدایی [۲۲]	کربن دی اکسید در آبد عمیق	ذخیره‌سازی کربن دی اکسید و تعیین زمان میان شکنی
سعید و جاده‌آوار [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

بدین منظور از روش‌های هوش مصنوعی به‌عنوان مدل جایگزین هوشمند برای کاهش زمان محاسباتی و هزینه در تعیین بهترین شرایط و یافتن جواب مساله استفاده شد. در ادامه جزئیات مربوط به روش پژوهش شامل نحوه جمع‌آوری داده، نحوه آموزش مدل جایگزین و بهینه‌سازی به کمک الگوریتم‌های تکاملی آورده شده است. در بخش آخر نیز نتایج حاصل از مطالعه به‌همراه بحث و بررسی ارائه شده است.

روش پژوهش

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 ذکرشده 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 بسیار بیشتر نسبت به غارهای نمکی، وجود گاز پایه باقی‌مانده در مخزن و وجود تأسیسات سطح الارضی است. به همین منظور از روش‌های هوش

مصنوعی به‌عنوان مدل جایگزین هوشمند در تعیین بهترین شرایط عملیاتی استفاده شد. در این راستا در ابتدا یک مدل مفهومی ۳ بعدی از یک مخزن گازی ساخته شد تا به‌عنوان مدل پایه در ادامه شبیه‌سازی استفاده شد. پارامترهای عملیاتی مهم و قابل‌کنترل در فرآیند ذخیره‌سازی گاز و پارامترهای ارزیابی فرآیند ذخیره‌سازی به‌ترتیب به‌عنوان متغیرهای تصمیم و متغیر هدف در نظر گرفته شدند. در ادامه به کمک روش‌های طراحی آزمایش، یک مجموعه داده جدولی شامل ۵۰۲ نمونه داده برای شبیه‌سازی حالت‌های مختلف مدل پایه ایجاد گردید. پس از اتمام فرآیند شبیه‌سازی، این پایگاه داده ارزشمند برای ایجاد و توسعه مدل‌های مبتنی بر داده استفاده گردید. با ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف آموزش دیده شده، در نهایت یکی از مدل‌ها به‌عنوان مدل جایگزین شبیه‌ساز تجاری در فرآیند شبیه‌سازی‌های آتی و بهینه‌سازی استفاده گردید. در ادامه جزئیات مربوط به روش کار و الگوریتم‌های مورد استفاده توضیح داده شده است. ساختار مخزن به‌صورت مکعبی و مدل سنگ مخزن به‌صورت همگن در نظر گرفته شد و در ادامه مدل سیال مخزن شامل اجزا تشکیل‌دهنده 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 بلوک‌های مدل در جهت افقی و عمودی (N_x, N_y, N_z)	(۵ و ۲۱ و ۲۱)	-
۲	اندازه هر بلوک در جهت‌های مختلف ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)	(۲۸ و ۴۰ و ۴۰)	ft
۳	عمق بالاترین لایه مخزن	۴۵۰۰	ft
۴	تخلخل مخزن	۰/۲۰	بی‌بعد
۵	تراوایی مطلق در جهت افقی و عمودی (k_x, k_y, k_z)	(۲۰ و ۲۰۰ و ۲۰۰)	mD
۶	تراکم‌پذیری سنگ در فشار مرجع برابر ۱۰۰۰ پام	$4/0 \times 10^{-6}$	1/psi
۷	دمای مخزن	۲۱۰	°F
۸	ترکیب درصد اجزا گاز مخزن ($N_2, CO_2, n-C_5, n-C_4, C_3, C_2, C_1$)	(۹۰ و ۲ و ۲ و ۲ و ۲ و ۱ و ۱)	درصد مولی
۹	فشار اولیه مخزن	۱۰۰۰	psia
۱۰	اشباع اولیه گاز مخزنی	۰/۹۱	بی‌بعد
۱۱	اشباع اولیه آب	۰/۰۹	بی‌بعد

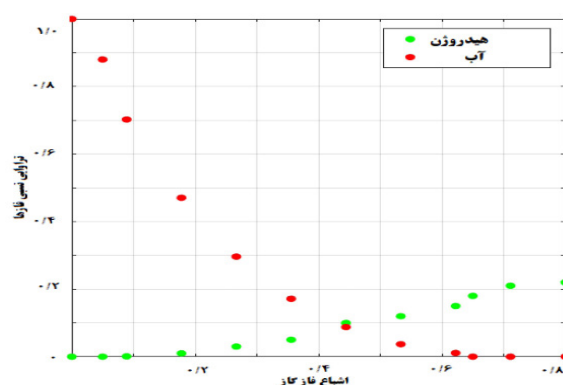
برای شبیه‌سازی ذخیره‌سازی در مخزن گازی از شبیه‌ساز ترکیبی CMG-GEM و با مدل خواص گاز با استفاده از معادله حالت پنگ-راینسون استفاده گردید. مقادیر توابع جریانی هیدروژن-آب مورد استفاده در این مطالعه براساس پژوهش‌های قبلی انجام شده در این راستا، به صورت **شکل ۱** می‌باشد. لازم به ذکر است که فشار موینگی بین فازی برابر صفر در نظر گرفته شد.

طراحی آزمایشات (شبیه‌سازی‌ها)

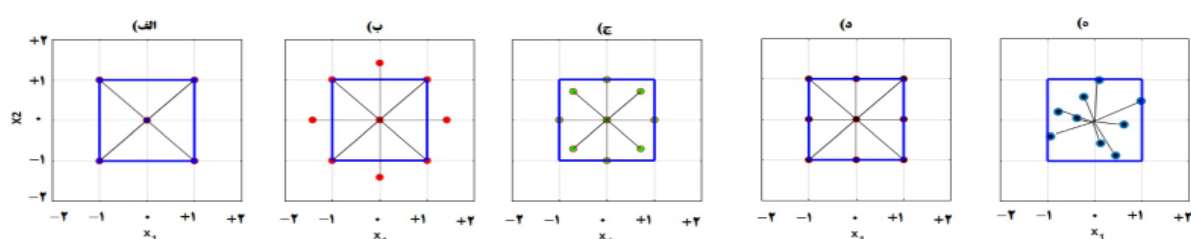
با توجه به نیاز به ایجاد جایگشت‌های متعدد، انتخاب هوشمندانه و خودکار از متغیرهای تصمیم‌گیری دخیل در مساله (فاکتورها) و مقادیر یا حالت‌های مختلف (سطح‌ها)، از روش طراحی آزمایش به‌عنوان ابزار مفید و کاربردی جهت ایجاد پایگاه داده به‌صورت سیستماتیک و با کیفیت استفاده گردید [۱۸]. همان‌طور که در **شکل ۲** دیده 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 براساس سطح‌های مختلف این روش‌ها برای ایجاد جدول انتخاب سطح متغیرها استفاده می‌شود. روش طراحی فوق مکعب لاتین^۱ به‌عنوان یک روش چند سطحی و به‌صورت تصادفی برای ایجاد جدول آزمایش براساس 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. همان‌طور که در **شکل ۳** نمایش داده شده است، از مدل پایه برای شبیه‌سازی فرآیند به‌مدت ۱۴ سال شامل: (۱) تزریق گاز پایه به‌مدت ۱ سال به منظور افزایش فشار مخزن و تأمین فشار تولید گاز عملیاتی، (۲) تزریق و تولید متناوب گاز هیدروژن به‌مدت ۱۰ سال و (۳) تولید گاز هیدروژن به‌مدت ۳ سال استفاده شد. پارامترهای عملیاتی مختلف اعم از بازه مشبک‌کاری، دبی تزریق و تولید گاز هیدروژن، ترکیب درصد گاز پایه و دبی تزریق گاز پایه به‌عنوان متغیر تصمیم‌گیری انتخاب گردید.

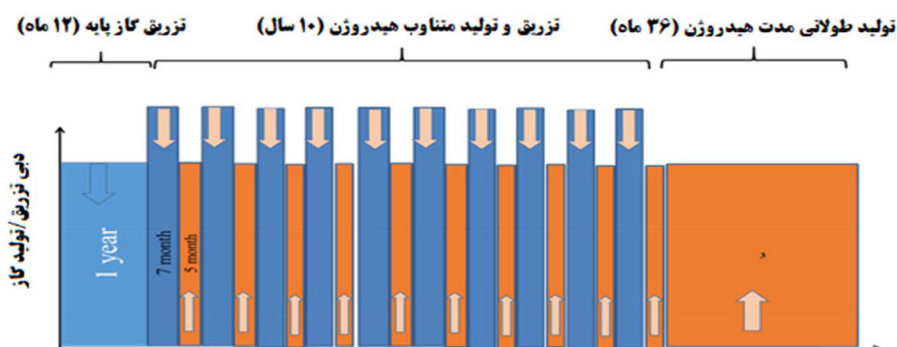
1. Latin Hypercube



شکل ۱ مقادیر تراوایی نسبی و گاز هیدروژن به‌عنوان ورودی شبیه‌سازی [۲]



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



شکل ۳ شماتیک فرآیند تزریق و تولید هیدروژن

یک از آزمایش‌ها مشخص گردید.

ایجاد مدل جایگزین

در مهندسی مخازن به طور معمول از شبیه‌سازی عددی (مبتنی بر فیزیک) برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی تولید، تطبیق تاریخچه، آنالیز ریسک و آنالیز حساسیت استفاده می‌گردد. این مدل‌ها با تقسیم مخزن به بلوک‌های شبیه‌سازی با ابعاد کوچک‌تر و با اعمال فرضیات مساله، شرایط اولیه و شرایط مرزی شروع به حل روابط حاکم (مانند موازنه جرم و اندازه حرکت) می‌کنند.

در ادامه **جدول ۵** شامل پارامترهای مذکور به‌همراه مقادیر گسسته و پیوسته در بازه تعیین‌شده به‌کمک طراحی آزمایش ایجاد گردید. در ابتدا بر اساس یک قاعده سرانگشتی در علم یادگیری ماشین، داده حاصل از طراحی آزمایش به‌روش فوق مکعب لاتین برای آموزش مدل‌های مبتنی بر داده به‌ترتیب با نسبت ۷۰ به ۳۰ برای 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 طولانی‌مدت هیدروژن) و خلوص هیدروژن برای هر

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	کربن دی‌اکسید [۰/۲۵-۱/۰]	-
		نیتروژن [۰/۰-۰/۶۰]	
		متان [۰/۰-۰/۶۰]	
۲	دبی تزریق گاز پایه	[۱/۵-۲/۵]	MMscf
۳	دبی کل تولید چاه	[۷-۴]	MMscf
۴	دبی تزریق هیدروژن	[۷-۴]	MMscf
۵	بازه مشبک‌کاری چاه تولیدی	باز (۱) - بسته (۰)	-
۶	بازه مشبک‌کاری چاه تزریقی	باز (۱) - بسته (۰)	-
۷	مدت زمان تزریق و تولید	تزریق (۶ و ۷) تولید (۵ و ۶)	ماه

جایگزین، متا مدل، مدل تقریبی از مدل عددی استفاده می‌گردند [۷ و ۸]. در ادامه جزئیات روش هوش مصنوعی به‌عنوان مدل جایگزین شرح داده می‌شود.

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 و نوع تابع فعال‌سازی با توجه به پیچیدگی و غیرخطی بودن مساله انتخاب و بهینه‌سازی می‌گردند. علاوه‌براین 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 (رابطه ۱ و ۲). در ادامه اختلاف مقادیر واقعی با مقادیر خروجی مدل محاسبه می‌گردد (رابطه ۳ و ۴). این مقادیر برای به‌روزرسانی مجدد وزن‌ها بر اساس نرخ یادگیری^۱ در نظر گرفته‌شده می‌پردازد (رابطه ۵ و ۶).

در نگاه اول، برای دستیابی به‌دقت، مناسب افزایش تعداد بلوک‌های شبیه‌سازی و کاهش بازه زمانی می‌تواند راهکار خوبی باشد. با این وجود با توجه به ماهیت پیچیده و غیرخطی این فرآیندها، شبیه‌سازها همواره با چالش زمان طولانی اجرا 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 مساله، اهمیت توسعه روش‌های جایگزین محاسباتی افزایش یافته است. علاوه‌براین در روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی عددی مخزن نیاز به بروز رسانی مدل توسعه مخزن در مدت زمان کوتاه از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. بنابراین در سالیان اخیر برای حل این مساله از مدل جایگزین آماری برای کاهش بار محاسباتی و دستیابی به پردازش سریع در مسیر رسیدن به پاسخ مناسب استفاده می‌گردد. به‌صورت کلی این مدل‌ها به‌عنوان یک مدل درون‌یابی پیشرفته در یک محدود مشخص عمل می‌کنند و در مطالعات پیشین با عناوین متعدد همچون مدل

1. Learning Rate

مشخصی از تابع هدف صورت می‌گیرد. محققان با مطالعه عمیق و الهام گرفتن از تکامل زیستی موجودات، به الگوریتم ژنتیک دست یافته‌اند [۲۸]. مراحل الگوریتم ژنتیک را به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد:

- (۱) ایجاد جمعیت تصادفی اولیه^۱ و ارزیابی آن‌ها
- (۲) انتخاب والدین از میان جمعیت اصلی و ترکیب آن‌ها برای ایجاد جمعیت فرزندان^۲
- (۳) انتخاب تعدادی از اعضا جمعیت اصلی برای اعمال جهش و ایجاد جمعیت جهش‌یافتگان^۳
- (۴) تعیین تعدادی از اعضا جمعیت اصلی به عنوان جمعیت نخبگان^۴ برای شرکت در جمعیت نسل بعد
- (۵) ادغام جمعیت اصلی، فرزندان و جهش‌یافتگان و مرتب‌سازی اعضا

(۶) ایجاد جمعیت اصلی جدید براساس 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 بهینه‌سازی تک هدفه و چندهدفه به دلیل مسائلی همچون احتمال کم به دام افتادن این روش در بهینه محلی (با وجود عملکرد جهش اعمالی بر روی جواب‌ها) و همچنین ماهیت مساله و وجود متغیرهای عددی صحیح در میان متغیرهای تصمیم‌گیری از این روش استفاده شد. تعداد جمعیت اصلی اولیه، با توجه به تعداد متغیرهای مساله و بر اساس یک قاعده سرانگشتی 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 ۰/۵ به ترتیب برای تعداد جمعیت تقاطع، جهش و نخبگان استفاده شد. مراحل الگوریتم ژنتیک چندهدفه در شکل ۴ نمایش داده شده است.

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].

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

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

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

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

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

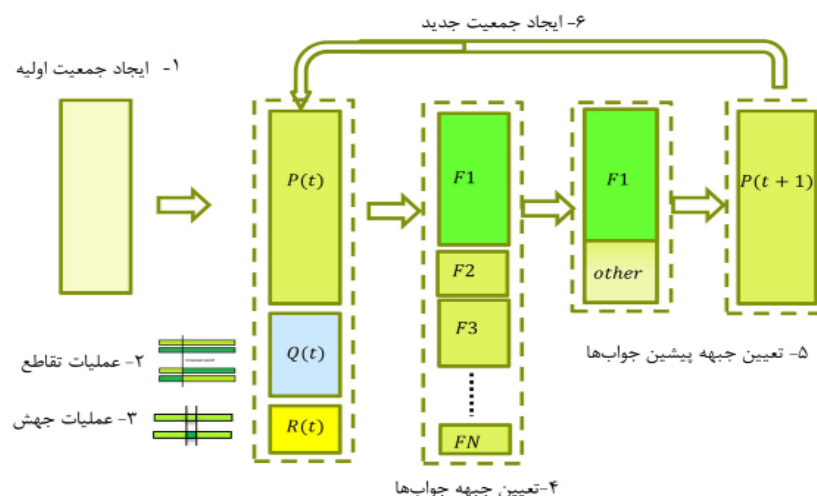
$$\begin{cases} b_j = b_j + \alpha e_j \\ b_y = b_y + \alpha e_y \end{cases} \quad (6)$$

در روابط 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 و j نشان داده شده است. پارامتر v_{ij} ، b_j و w_j به ترتیب بیانگر مقادیر سوگیری^۱ 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.

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

1. Bias
2. Initial Population
3. Crossover Children
4. Mutation Children
5. Elite Population



شکل ۴ مراحل الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای یافتن جبهه جواب‌های بهینه [۳۰]

بهینه متغیرهای عملیاتی در فرآیند ذخیره‌سازی گاز هیدروژن استفاده گردید. مراحل کار را می‌توان به صورت طرح‌واره ارائه شده در شکل ۵ دنبال کرد.

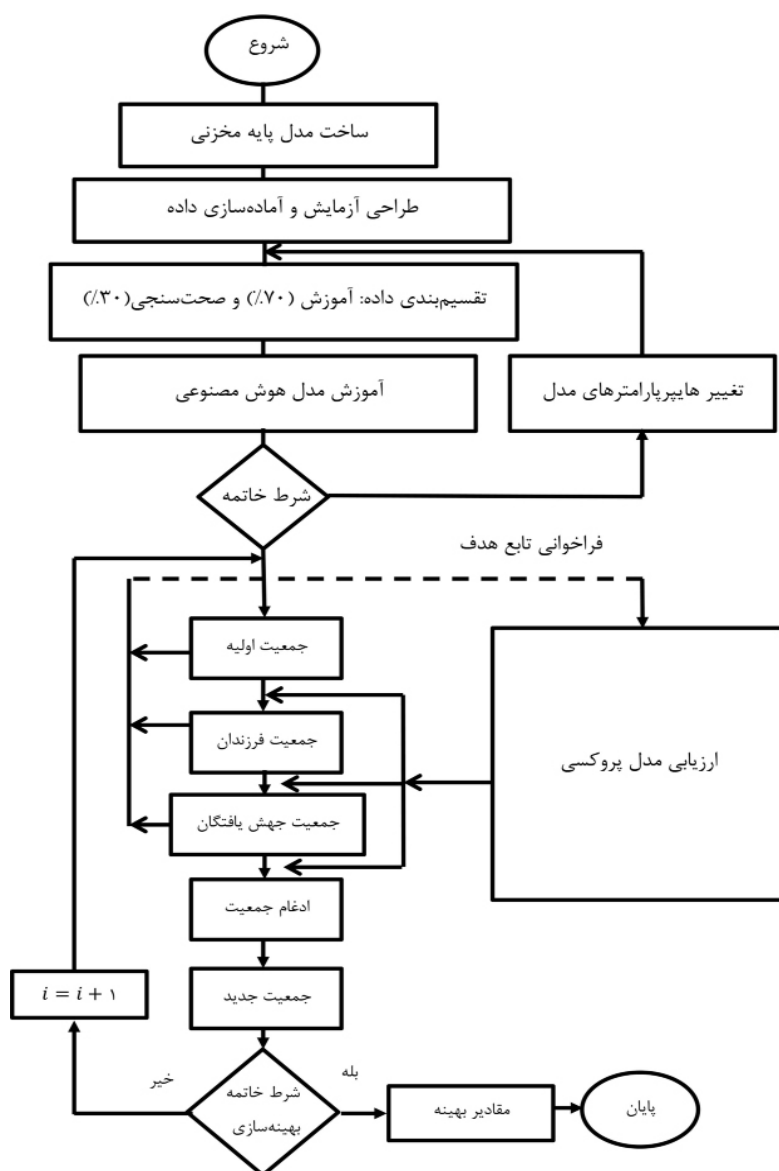
نتایج و بحث

در شکل ۶ نتایج شبیه‌سازی مدل پایه با شبیه‌ساز 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 تشکیل دهنده در جریان گاز تولیدی) براساس زمان به صورت افزایش و کاهش‌های پی‌درپی رخ می‌دهد. ضریب بازیافت هیدروژن 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، پارامتر بازیافت کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، در ابتدای تزریق گاز پایه (به مدت ۱۲ ماه) و در بازه تزریق گاز عملیاتی (به مدت ۵ ماه)، مقدار ضریب بازیافت برابر صفر است و با شروع بازه تولید ۵ ماهه این مقدار به ۰/۷ می‌رسد.

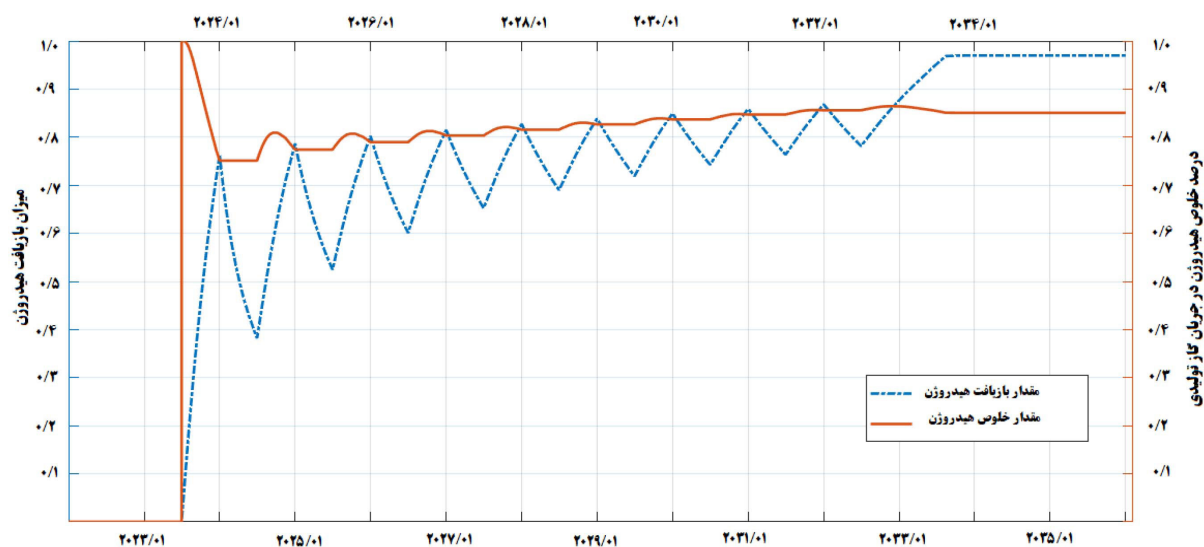
نحوه انتخاب والدین برای عملیات جهش و نحوه تعیین عضو منتخب برای جهش می‌تواند براساس انتخاب تصادفی و براساس مقدار تابع هزینه باشد. ایجاد جمعیت جدید با ترکیب اعضای جمعیت اصلی فعلی، جمعیت نخبگان، فرزندان و جمعیت جهش‌یافتگان با سناریوهای مختلفی قابل انجام است. به عنوان نمونه می‌توان سهم و درصد مشخصی از هر جمعیت را برای ایجاد جمعیت جدید استفاده کرد. در یک رویکرد دیگر، پس از ادغام جمعیت‌های مختلف و رتبه‌بندی آن‌ها، جواب‌های مناسب به عنوان اعضای جمعیت نسل جدید بعدی انتخاب می‌گردند. در توابع چندهدفه عملیات رتبه‌بندی براساس یک معیار قابل پیاده‌سازی نخواهد بود. بلکه بایستی به تعیین تعداد غلبه و مغلوب شدن جواب‌ها در مقایسه با سایرین پرداخت. جواب‌هایی که هیچ‌گونه مغلوب شدن را تجربه نمی‌کنند به عنوان جبهه پیشین در نظر گرفته می‌شوند (رابطه ۷). بنابراین با رتبه‌بندی جواب‌ها بر اساس تعداد غلبه بر سایرین می‌توان به تعیین جبهه‌های مختلف برای جواب‌ها پرداخت [۲۹].

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

همان‌طور که اشاره گردید در این مطالعه از یک رویکرد و روش پژوهش سیستماتیک برای تعیین مقادیر



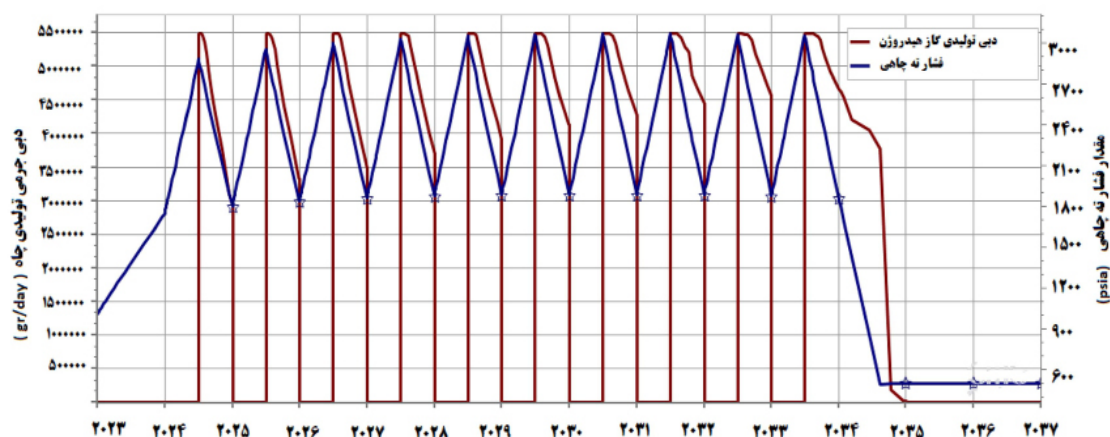
شکل ۵ طرح‌واره مراحل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ذخیره‌سازی هیدروژن با استفاده از مدل جایگزین



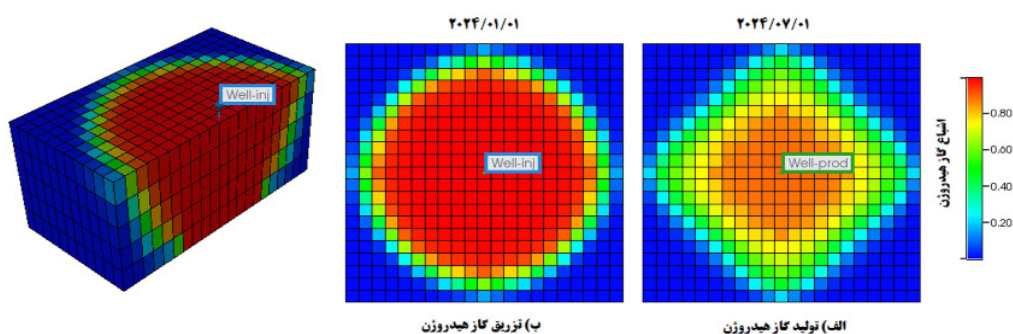
شکل ۶ روند تغییرات میزان خلوص هیدروژن (منحنی قرمز) و میزان بازیافت (منحنی آبی) در طول چرخه تزریق و تولید

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 می یابد. 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 می گردد. **شکل ۸** برشی جانبی از ناحیه نزدیک محل چاه و برشی افقی (لایه شماره ۳) از مخزن را نشان می دهد که از آن نحوه حرکت جبهه گاز تزریقی و تغییرات اشباع قابل ارزیابی است. با تزریق گاز، این جبهه در مخزن حرکت کرده و با تولید از آن روند کاهشی در پیشروی جبهه در عمق های بیشتر را به نمایش می گذارد. همان طور که در شکل دیده می شود، تولید سیالات مخزنی به همراه هیدروژن و گاز پایه منجر به تغییر اشباع می گردد که با توجه به فرض سیستم همگن و خواص ثابت برای بلوک های مخزنی، نحوه تغییرات و حرکت جبهه به صورت شعاعی متقارن هست. همان طور که در پروفایل جبهه تزریق الف) و جبهه تولید ب) در **شکل ۸** مشاهده می گردد، اشباع گاز در طول تولید و تزریق یکسان نیست که به دلیل به دام افتادن گاز و یا اختلاط با گاز پایه تزریق شده و یا گاز اولیه مخزن رخ می دهد.

در ادامه مجدداً به دلیل شروع دوره تزریق/تولید گاز هیدروژن مقدار بازیافت دچار تغییر می گردد. می توان گفت که رفتار کلی منحنی بازیافت یک روند افزایشی (یا بهبود ضریب کلی برداشت) در نقاط انتهایی دوره تولید را دنبال می کند و در نهایت پس از رسیدن به نقطه شروع تولید بلندمدت سه سالانه هیدروژن روند افزایشی داشته و سپس با بسته شدن چاه به مقدار ثابتی می رسد. همان طور که در **شکل ۶** نمایش داده شده است، روند تغییرات میزان 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 هیچ گونه گاز دیگری تولید نمی گردد، مقدار خلوص گاز هیدروژن برابر ۱ خواهد بود. با ادامه تولید و رسیدن جبهه گاز پایه و مخلوط گاز پایه و گاز هیدروژن به چاه تولیدی خلوص به مقدار حدود ۰/۷۵ کاهش می یابد. این رفتار در طی چرخه های متوالی تزریق و تولید تغییرات اندک و به صورت کلی در بازه ۰/۷۰ الی ۰/۹ را تجربه می کند، اما با کاسته شدن از میزان گاز اولیه در مخزن، درصد خلوص گاز تولیدی به تدریج بالا می رود. علاوه بر این، رفتار تغییرات فشار ته چاهی و نحوه کاهش دبی مولی تولید گاز هیدروژن بر حسب زمان شبیه سازی برای مدل پایه با جزئیات بیشتر



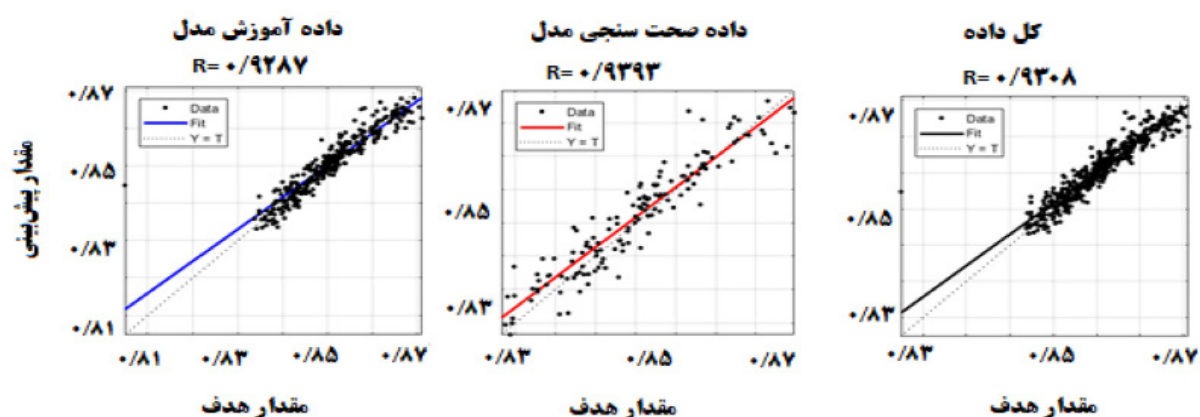
شکل ۷ روند تغییرات فشار ته چاهی و دبی تولیدی هیدروژن ذخیره شده در طول چرخه تولید و تزریق



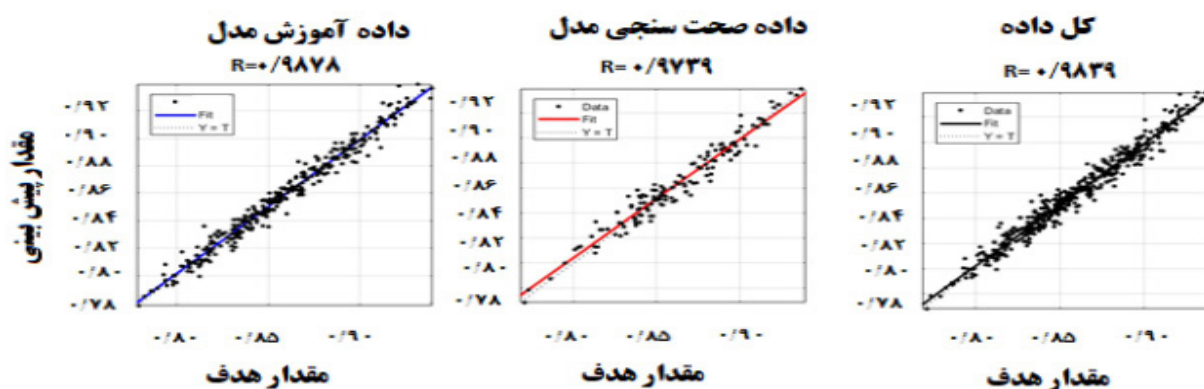
شکل ۸ تغییرات اشباع گاز هیدروژن در زمان تزریق (چپ) و تولید (راست)

مورد استفاده قرار گیرد. همان‌طور که اشاره شد، بهینه‌سازی، آنالیز ریسک و تطبیق 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 براساس مجموع وزن دار نیازمند تعیین وزن‌های هر پارامتر می‌باشد. هریک از جواب‌های بهینه (نقاط قرمز رنگ) متناظر با یک نقطه بهینه شامل پارامترهای تصمیم‌گیری در فرآیند جست‌وجوی بهترین جواب مساله می‌باشند.

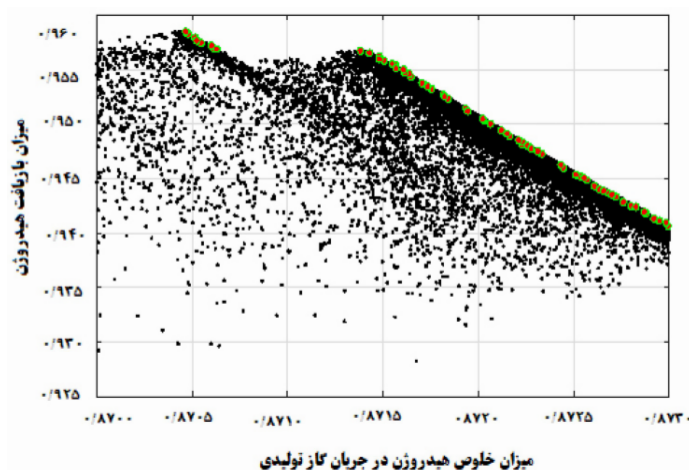
پس از آموزش و ارزیابی مدل‌های متعدد، مدل جایگزین به‌صورت شبکه‌ی عصبی مصنوعی تک‌لایه با تعداد بهینه ۱۰ نرون و تابع فعال‌سازی سیگموئیدی- به‌عنوان مدل مناسب - ساخته شد. نتایج دقت و عملکرد روش شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین پارامترهای هدف شامل میزان بازیافت و خلوص هیدروژن در شکل ۹ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، این مدل با ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۳ و ۰/۹۴ به‌ترتیب برای داده آموزش و صحت‌سنجی در تخمین میزان خلوص هیدروژن، موفق عمل کرده است. علاوه‌براین پارامتر میزان بازیافت هیدروژن در پایان آخرین دوره تولید (قبل از شروع بازه طولانی مدت تولید هیدروژن) به‌عنوان 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 عملکرد مورد قبول شبکه عصبی مصنوعی با دقت برابر با ۰/۹۹ و ۰/۹۷ برای تخمین میزان بازیافت هیدروژن می‌باشد. بنابراین مدل آموزش داده شده به‌عنوان 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



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



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



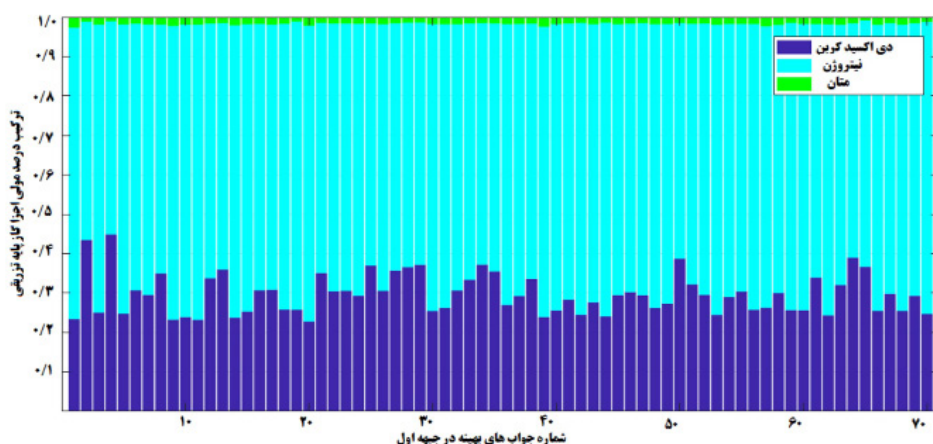
شکل ۱۱ عملکرد الگوریتم در یافتن جبهه جواب‌های بهینه و جواب‌های غیر بهینه

عملیاتی از میان جواب‌های به‌دست‌آمده می‌تواند با روش‌های مختلف و با وزن‌دهی به هریک از پارامترهای مساله به‌دست آید.

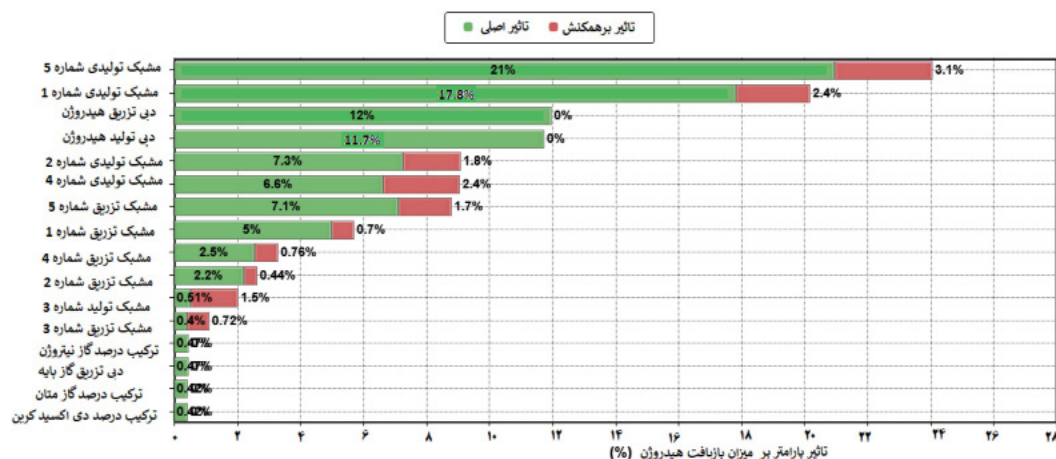
سایر نقاط پشت جبهه پارتو (نقاط مشکی رنگ) نشان‌دهنده جواب‌هایی هستند که در مقایسه با جواب‌های بهینه مغلوب شده‌اند. بنابراین تصمیم‌گیری نهایی درخصوص انتخاب شرایط بهینه

گاز متان - به‌عنوان یک گاز پایه - سهم ناچیزی دارد که می‌توان آنرا را با سایر گازها جایگزین کرد. علاوه‌بر تعیین مقادیر بهینه پارامترهای عملیاتی مختلف، می‌توان به آنالیز حساسیت پارامترها به کمک مدل جایگزین پرداخت. **شکل ۱۳ و شکل ۱۴** نشان‌دهنده نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای تصمیم‌گیری در مساله به‌ترتیب برای پارامتر هدف میزان بازیافت هیدروژن و میزان خلوص می‌باشد. همان‌طور که در **شکل ۱۳** نشان داده شده است، میزان تأثیر نسبی پارامترهای مربوط به باز یا بسته بودن مشبک‌های شماره ۵ (مشبک پایینی) و مشبک شماره ۱ (مشبک بالایی) به‌ترتیب با ۲۱ و ۱۸٪ دارای بیشترین تأثیر بر ضریب بازیافت هیدروژن می‌باشند.

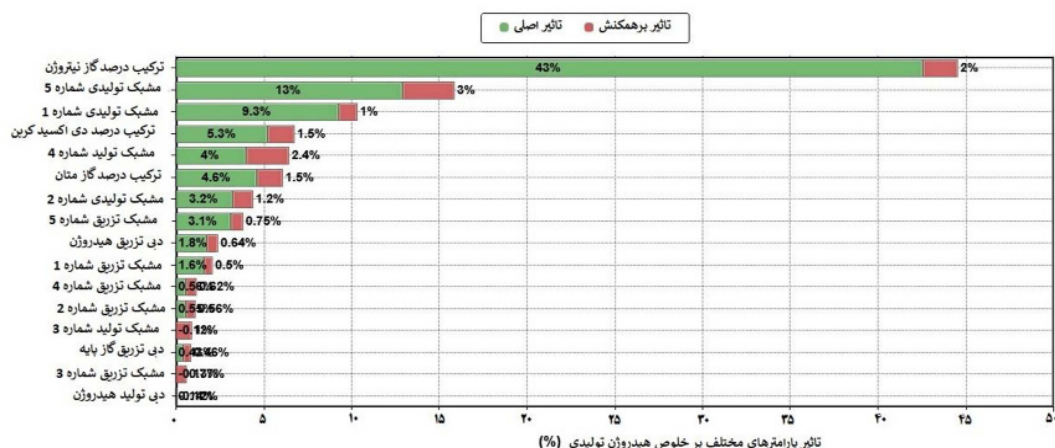
تعیین مقدار ترکیب درصد بهینه گاز پایه یکی از متغیرهای تصمیم‌گیری و عملیاتی در حین تزریق گاز پایه می‌باشد. در **شکل ۱۲** ترکیب درصد بهینه حاصل برای گازهای کربن دی‌اکسید، متان و نیتروژن برای جواب‌های موجود در جبهه پارتو نشان داده شده است. با توجه به نتایج، گاز نیتروژن، کربن دی‌اکسید و متان به‌ترتیب دارای مقادیر تقریبی نزدیک به ۰/۷۰، ۰/۲۵ و ۰/۰۵ می‌باشند. بر اساس این نتایج، گاز بی اثر نیتروژن عملکرد بهتری دارد. اما از آنجا که کربن دی‌اکسید به‌عنوان یک گاز مهم در فرآیندهای زیست‌محیطی تلقی می‌گردد، استفاده از آن به‌عنوان یک گاز پایه می‌تواند در جهت کاهش اثرات مربوط به گرمایش زمین و تغییرات اقلیمی مؤثر واقع شود. علاوه‌براین



شکل ۱۲ ترکیب درصد اجزا تشکیل‌دهنده گازهای مختلف در گاز پایه



شکل ۱۳ آنالیز حساسیت پارامترهای تأثیرگذار بر میزان بازیافت هیدروژن در فرآیند ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن



شکل ۱۴ آنالیز حساسیت پارامترهای تأثیرگذار بر میزان خلوص هیدروژن در فرآیند ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن

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 می‌دهد. همان‌طور که اشاره گردید، هدف اصلی این پژوهش بررسی پتانسیل کارکرد روش‌های هوش مصنوعی به‌عنوان یک ابزار محاسباتی دقیق و سریع برای بهینه‌سازی عملیات ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز می‌باشد. با بررسی انجام‌شده مشخص گردید که مدت‌زمان شبیه‌سازی براساس شبیه‌سازهای تجاری بسیار زمان‌بر (در مقیاس زمانی ده دقیقه) نسبت به ارزیابی مدل جایگزین در حدود (چند ثانیه) می‌باشد. بنابراین این ابزار محاسباتی کارآمد با فراهم کردن دقت معادل شبیه‌ساز و سرعت کافی (صد مرتبه سریع‌تر) می‌تواند در مطالعات بهینه‌سازی به‌کار گرفته شود.

نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی پتانسیل و کارکرد مدل‌های جایگزین داده محور برای شبیه‌سازی فرآیند ذخیره زیرزمینی گاز هیدروژن در یک مخزن گازی تخلیه‌شده می‌پردازد. معیارهای اصلی تصمیم‌گیری و قابل‌کنترل برای ذخیره‌سازی هیدروژن به معیارهای عملیاتی مربوط به ترکیب درصد گاز پایه (گاز متان، نیتروژن و کربن دی‌اکسید)، نرخ تولید و

که به‌دلیل گرانش و وزن مولکولی کم هیدروژن و در نتیجه مکانیزم حرکت و تولید آن در اثر مهاجرت گاز به‌سمت بلوک‌ها و مشبک‌های بالایی می‌باشد. علاوه‌براین، دبی تزریق و تولید هیدروژن تأثیر تقریباً سهم یکسانی بر میزان بازیافت هیدروژن دارند. همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده‌شده است، سهم و تأثیر پارامترهای مربوط به ترکیب درصد گاز نیتروژن در مخلوط گاز پایه، باز یا بسته بودن مشبک‌های تولیدی شماره ۵ (مشبک پایینی) و مشبک تولیدی شماره ۱ (مشبک بالایی) به‌ترتیب برابر ۴۳، ۱۳ و ۹/۳٪ در میزان خلوص هیدروژن تولیدشده در سطح زمین را دارند. نقش اصلی گاز پایه در تامین فشار تولیدی می‌باشد و در حین تزریق گاز هیدروژن، جبهه گاز پایه به عقب رانده می‌شود و نواحی نزدیک مشبک‌های تولید لایه‌های بالایی به‌دلیل جدایش ثقلی دارای اشباع بالای گاز هیدروژن خواهند بود. علاوه‌براین در لایه‌های نواحی پایین مخزن فاز گازی به‌صورت مخلوط گاز هیدروژن و گاز پایه ایجاد می‌گردد که باعث ایجاد ناخالصی در طول چرخه تولید از مخزن خواهد شد. بنابراین همان‌طور که ملاحظه گردید، نتایج تقریباً مشابهی از آنالیز حساسیت تأثیر باز و بسته بودن مشبک‌ها بر روی خلوص هیدروژن تولیدی (همانند آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر میزان بازیافت) به‌دست می‌آید. علاوه‌براین دبی تزریق و تولید

برای تخمین میزان بازیافت و خلوص هیدروژن تولیدی را به‌همراه داشت.

• مدل جایگزین مبتنی بر داده به‌صورت مداوم توسط الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه به‌عنوان 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، کربن دی‌اکسید و متان به‌ترتیب با مقدار درصد مولی ۷۰، ۲۵ 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 بهره‌گردد. باید در نظر داشت که انجام این عملیات در شبیه‌سازی تجاری با مقیاس زمانی بیش از ده دقیقه صورت می‌پذیرد.

تزریق هیدروژن و محل شبکه‌ها اشاره کرد. به همین منظور، این مساله به‌صورت 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 انجام‌شده 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 شبکه‌کاری چاه‌های تزریق، نشان داد که محل شبکه تولیدی در بالای مخزن و در پایین مخزن برروی خلوص و میزان بازیافت هیدروژن ذخیره‌شده تأثیر زیادی دارد.

• روش انجام کار که در آن داده‌های حاصل از شبیه‌سازی و طراحی آزمایش، به‌صورت کاملاً تصادفی به دو مجموعه داده آموزش (۷۰٪) و صحت سنجی (۳۰٪) تقسیم گردید، موفقیت‌آمیز بود. بر این اساس مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی نتایج قابل‌توجهی با دقت نزدیک به ۹۷ و ۹۴٪ به‌ترتیب

مراجع

- [1]. Vanek, F., Albright, L., & Angenent, L. (2008). Energy systems engineering. McGraw-Hill Professional Publishing.
- [2]. Bahrami, M., Izadi Amiri, E., Zivar, D., Ayatollahi, S., & Mahani, H. (2023). Challenges in the simulation of underground hydrogen storage: A review of relative permeability and hysteresis in hydrogen-water system. *Journal of Energy Storage*, 73, 108886. doi:10.1016/j.est.2023.108886.
- [3]. Sampene, A., Li, C., Agyeman, F., & Brenya, R. (2021). Analysis of the BRICS countries' pathways towards a low-carbon environment. *BRICS Journal of Economics*, 2(4), 77-102.
- [4]. Zivar, D., Kumar, S., & Foroozesh, J. (2021). Underground hydrogen storage: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(45), 23436-23462. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.08.138.
- [5]. Zeng, L., Sarmadivaleh, M., Saeedi, A., Chen, Y., Zhong, Z., & Xie, Q. (2023). Storage integrity during underground hydrogen storage in depleted gas reservoirs. *Earth-Science Reviews*, 247, 104625. doi:10.1016/j.earscirev.2023.104625.
- [6]. Pérez-Vigueras, M., Sotelo-Boyás, R., de Guadalupe González-Huerta, R., & Bañuelos-Ruedas, F. (2023). Feasibility analysis of green hydrogen production from oceanic energy. *Heliyon*, 9(9). doi:10.1016/j.heliyon.2023.e20046.
- [7]. Juez-Larré, J., Gonçalves Machado, C., Yousefi, H., Wang, T. K., Groenenberg, R., & Van Gessel, S. (2023, May). (Pre) feasibility study of underground hydrogen storage potential in depleted gas fields and salt caverns in the Netherlands. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU-10005). doi.org/10.5194/egusphere-egu23-10005.
- [8]. Raad, S. M. J., Leonenko, Y., & Hassanzadeh, H. (2022). Hydrogen storage in saline aquifers: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112846. doi:10.1016/j.rser.2022.112846.
- [9]. Talukdar, M., Blum, P., Heinemann, N., & Miocic, J. (2024). Techno-economic analysis of underground hydrogen storage in Europe. *Iscience*, 27(1). doi:10.1016/j.isci.2023.108771.
- [10]. Gloc, M., Szwed, M., Zagórski, A., & Mizera, J. (2018). Hydrogen influence on microstructure, corrosion

- resistance and mechanical properties of low alloy steel and explosively clad steel used for hydrogen storage salt caverns. *Applied Mechanics and Materials*, 875, 47-52. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.875.47.
- [11]. Zhu, S., Shi, X., Yang, C., Li, Y., Li, H., Yang, K., Wei, X., Bai, W. & Liu, X. (2023). Hydrogen loss of salt cavern hydrogen storage. *Renewable Energy*, 218, 119267. doi:10.1016/j.renene.2023.119267.
- [12]. Le Duigou A, Bader A-G, Lanoix J-C, Nadau L.(2017). Relevance and costs of large scale underground hydrogen storage in France. *Int J Hydrog Energy*.;42(36):22987-23003. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.06.239.
- [13]. Thaysen, E. M., McMahon, S., Strobel, G. J., Butler, I. B., Ngwenya, B. T., Heinemann, N., Wilkinson, M., Hassanpouryouzband, A., McDermott, C.I. & Edlmann, K. (2021). Estimating microbial growth and hydrogen consumption in hydrogen storage in porous media. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111481. doi:10.1016/j.rser.2021.111481.
- [14]. Bagheri, M., Mahani, H., Ayatollahi, S., & Zivar, D. (2023). Direct pore-scale simulation of the effect of capillary number and gas compressibility on cyclic underground hydrogen storage & production in heterogeneous aquifers. *Advances in Water Resources*, 181, 104547. doi:10.1016/j.advwatres.2023.104547.
- [15]. Muhammed, N. S., Haq, B., Al Shehri, D., Al-Ahmed, A., Rahman, M. M., & Zaman, E. (2022). A review on underground hydrogen storage: Insight into geological sites, influencing factors and future outlook. *Energy Reports*, 8, 461-499. doi:10.1016/j.egyr.2021.12.002.
- [16]. Kalati, S. S., Khiabani, N. P., Ayatollahi, S., Mahani, H., Zivar, D., & Esmaeilbeig, M. A. (2024). Molecular dynamics simulation of hydrogen diffusion into brine: Implications for underground hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 53, 17-28. doi:10.1016/j.ijhydene.2023.11.318.
- [17]. Kumar, K. R., & Hajibeygi, H. (2021). Multiscale simulation of inelastic creep deformation for geological rocks. *Journal of Computational Physics*, 440, 110439. doi:10.1016/j.jcp.2021.110439.
- [18]. Kanaani, M., Sedae, B., Asadian-Pakfar, M., Gilavand, M., & Almahmoudi, Z. (2023). Development of multi-objective co-optimization framework for underground hydrogen storage and carbon dioxide storage using machine learning algorithms. *Journal of Cleaner Production*, 386, 135785. doi:10.1016/j.jclepro.2022.135785.
- [19]. Zheng, F., Jahandideh, A., Jha, B., & Jafarpour, B. (2021). Geologic CO₂ storage optimization under geo-mechanical risk using coupled-physics models. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 110, 103385. doi:10.1016/j.ijggc.2021.103385.
- [20]. Park, C., Oh, J., Jo, S., Jang, I., & Lee, K. S. (2021). Multi-objective optimization of CO₂ sequestration in heterogeneous saline aquifers under geological uncertainty. *Applied Sciences*, 11(20), 9759. doi.org/10.3390/app11209759.
- [21]. Kashkooli, S. B., Gandomkar, A., Riazi, M., & Tavallali, M. S. (2022). Coupled optimization of carbon dioxide sequestration and CO₂ enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109257. doi:10.1016/j.petrol.2021.109257.
- [22]. Vaziri, P., & Sedae, B. (2024). An application of a genetic algorithm in co-optimization of geological CO₂ storage based on artificial neural networks. *Clean Energy*, 8(1), 111-125. doi:10.1093/ce/zkad077.
- [23]. Saeed, M., & Jadhawar, P. (2024). Optimizing underground hydrogen storage in aquifers: The impact of cushion gas type. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 1537-1549. doi:10.1016/j.ijhydene.2023.08.352.
- [24]. Da Silva, L. M., Avansi, G. D., & Schiozer, D. J. (2020). Development of proxy models for petroleum reservoir simulation: a systematic literature review and state-of-the-art. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 7(10), 36-62. doi:10.22161/ijaers.710.5.
- [25]. Bahrami, P., Sahari Moghaddam, F., & James, L. A. (2022). A review of proxy modeling highlighting applications for reservoir engineering. *Energies*, 15(14), 5247. doi:10.3390/en15145247.
- [26]. Matthew, D. A. M., Jahanbani Ghahfarokhi, A., Ng, C. S. W., & Nait Amar, M. (2023). Proxy model development for the optimization of water alternating CO₂ gas for enhanced oil recovery. *Energies*, 16(8), 3337. doi:10.3390/en16083337.

[۲۷]. مقسمی، ح.، علیزاده سواره، ب. (۱۳۹۴). داده کاوی با MATLAB و IBM SPSS Modeler. انتشارات کاوشگران

جوان رایانه.

- [26]. Haupt, R. L., & Haupt, S. E. (2004). *Practical genetic algorithms*. John Wiley & Sons.
- [27]. Yang X-S.(2010). *Engineering Optimization*. Wiley-Blackwell. doi:10.1002/9780470640425.
- [28]. Sheshbolouky, M., Kheirollahi, H. and Khodapanah, E. (2024). Using multi-objective optimization genetics algorithm for co-estimation of saturation functions by piecewise model. *Journal Petroleum Research*. 2024;34(1403-2):72-90. doi:10.22078/pr.2024.5266.3337.



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

Hossein Kheirollahi, Shahab Ayatollahi*, Hassan Mahani*

Department of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

shahab@sharif.edu, hmahani@sharif.edu

DOI: 10.22078/pr.2024.5442.3420

Received: May 04, 2024

Accepted: June 30, 2024

Introduction

The emission of anthropogenic greenhouse gases, such as carbon dioxide from fossil fuels, is a major driver of the greenhouse effect and global warming in the modern era. However, the growing population and the increasing carbon dioxide emissions have compelled the global economy to seek solutions to mitigate this issue and its severe consequences, including climate change, polar ice melt, and rising sea levels [1, 2]. In recent decades, extensive research has been conducted on net-zero carbon strategies and the transition to a hydrogen economy. Most studies have focused on assessing the feasibility of hydrogen storage in depleted oil and gas reservoirs, saline aquifers, and salt caverns, as well as addressing the challenges associated with simulation and real-world implementation [3–6].

The primary goal of this study is to simulate and optimize the hydrogen storage process in a depleted gas reservoir. To achieve this, an artificial neural network algorithm was employed to develop a surrogate model and identify optimal solutions using a multi-objective evolutionary optimization algorithm.

Research Method

Data Preparation

In this study, underground hydrogen storage in a depleted gas reservoir was simulated using the input data presented in Table 1. Additionally, the rock model of the reservoir was assumed to be homogeneous. This reservoir model served as the base case for design of experiment simulations (see Fig. 1). The physics-based simulations were performed with CMG-GEM.

Table 1 Input data for the reservoir model.

	Parameter	Value	Units
1	Number of cells (N_x, N_y, N_z)	(21,21,5)	-
2	Size of grid cells ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)	(40,40,28)	ft
3	Reservoir Top Depth	4500	ft
4	Reservoir Porosity	0.20	-
5	Reservoir Permeability (k_x, k_y, k_z)	(200,200,20)	mD
6	Reservoir rock compressibility @ P=1000 psia	4.01×10^{-6}	1/psia
7	Initial Reservoir Pressure	1000	psia

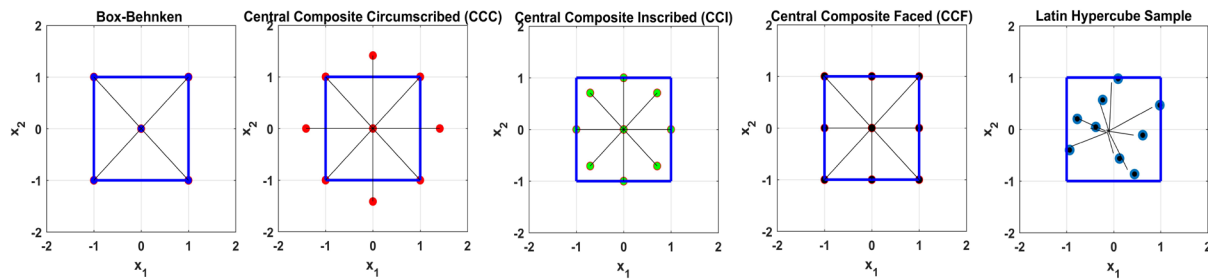


Fig. 1 Schematics of different design of experiment methods in 2D.

Simulation Methodology

Since the primary objective of this study was to evaluate the potential and performance of data-driven models in simulating hydrogen storage in an underground reservoir, artificial intelligence methods were employed as a smart proxy model to identify optimal solutions.

The experiment table consists of decision variables—the key controllable operational parameters in the gas storage process—such as cushion gas and working case injection flow rates, along with their corresponding target variables. A comprehensive tabular dataset was then generated to simulate various states of the base model. This dataset was used to develop data-driven proxy models, and ultimately, the most accurate model was introduced as a smart proxy to replace

the commercial simulator for future simulations and optimization. Simulation data was randomly divided into two subsets: 70% for training and 30% for validation.

Results and Discussion

As shown in Fig. 2, the storage operation begins with the injection of cushion gas (CO_2 , N_2 , CH_4 , or a gas mixture). Subsequently, working gas (hydrogen) is injected and produced, with the well alternating between shut-in and open states over the defined periods during ten years of operation. This is followed by a long-term hydrogen production phase lasting three years. Throughout the well's lifetime, hydrogen purity and recovery factor are evaluated.

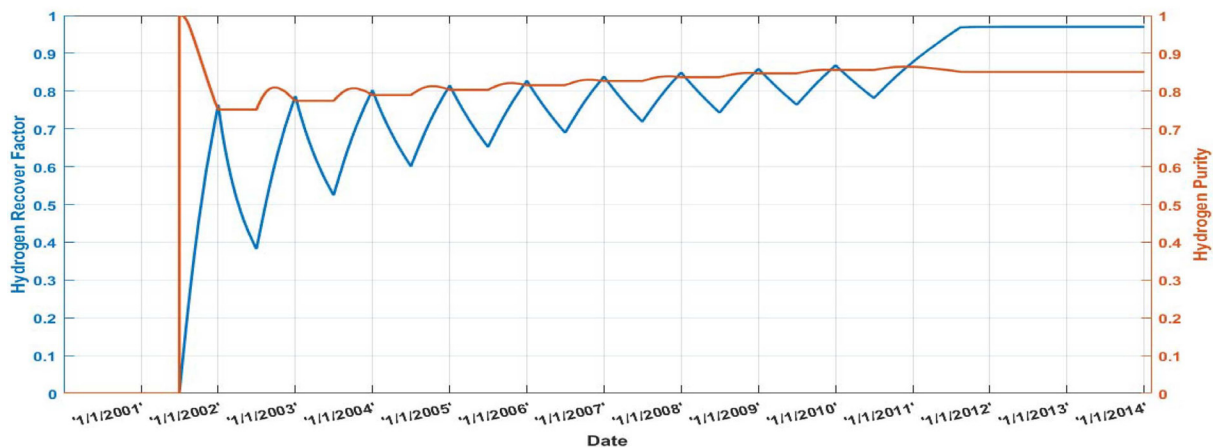


Fig. 2 Hydrogen Recovery factor (right axis) and Purity (left axis) during injection and production cycles.

As previously mentioned, hydrogen purity and recovery factor serve as key decision variables. Fig. 3 illustrates the performance of an artificial feed-forward neural network, configured with 10 neurons in hidden layers and a sigmoid transfer function, in predicting hydrogen purity. The model achieved correlation coefficients of $R=0.93$ for training and $R=0.94$ for

testing subsets.

Following training, the proxy model was employed to identify optimal solutions based on these decision variables. Fig. 4 presents the results of the multi-objective genetic algorithm search, highlighting the Pareto front (red dots) as the set of optimal solutions.

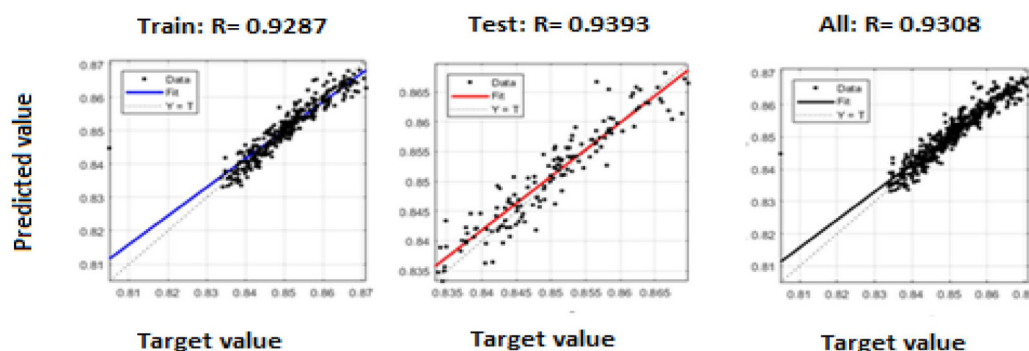


Fig. 3 Cross plot of recovery factor for training and testing subsets.

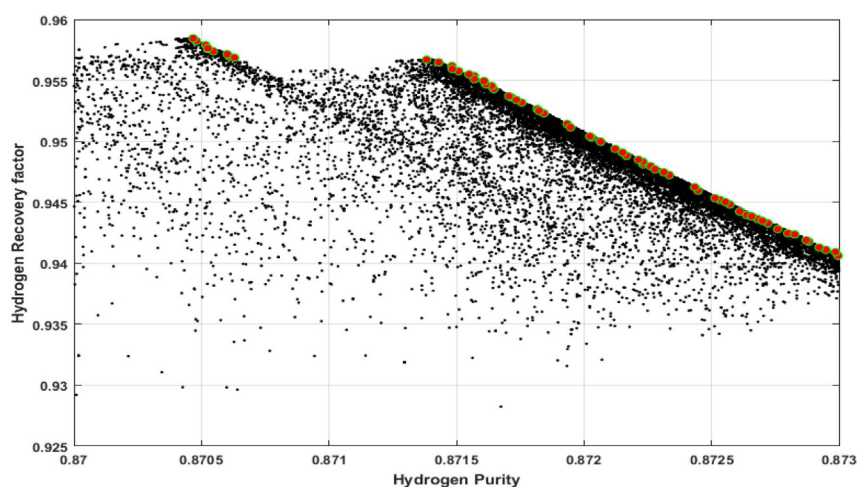


Fig. 4 Pareto-front for multi-objective genetic optimization algorithm.

Conclusions

In this study, a sensitivity analysis was conducted on several operational decision variables in underground hydrogen storage (UHS), including injection and production well conditions, cushion gas composition, and injection/production flow rates. Below is a summary of key findings and conclusions:

- The results indicate high sensitivity indices for the top and bottom perforations of the production well, as well as nitrogen composition, based on the target variables.
- The artificial feed-forward model demonstrated strong predictive performance, achieving accuracies of 97% for recovery and 94% for purity.
- The trained surrogate model proved to be an efficient and accurate tool for optimizing solutions. The findings identified the optimal cushion gas composition as 70% nitrogen, 25% carbon dioxide, and 5% methane.
- Overall, given the high accuracy and significantly reduced computational time (ten times faster than CMG simulations), data-driven algorithms are recommended for simulation and implementation in optimizing hydrogen injection and production operations.

References

1. Pérez-Vigueras, M., Sotelo-Boyás, R., de Guadalupe González-Huerta, R., & Bañuelos-Ruedas, F. (2023). Feasibility analysis of green hydrogen production from oceanic energy. *Heliyon*, 9(9). doi:10.1016/j.heliyon.2023.e20046.
2. Juez-Larré, J., Gonçalves Machado, C., Yousefi, H., Wang, T. K., Groenenberg, R., & Van Gessel, S. (2023, May). (Pre) feasibility study of underground hydrogen storage potential in depleted gas fields and salt caverns in the Netherlands. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU-10005). doi.org/10.5194/egusphere-egu23-10005.
3. Kanaani, M., Sedaei, B., Asadian-Pakfar, M., Gilavand, M., & Almahmoudi, Z. (2023). Development of multi-objective co-optimization framework for underground hydrogen storage and carbon dioxide storage using machine learning algorithms. *Journal of Cleaner Production*, 386, 135785. doi:10.1016/j.jclepro.2022.135785.
4. Yan, H., Zhang, W., Kang, J., & Yuan, T. (2023). The necessity and feasibility of hydrogen storage for large-scale, long-term energy storage in the new power system in China. *Energies*, 16(13), 4837. doi.org/10.3390/en16134837.
5. Le Duigou A, Bader A-G, Lanoix J-C, Nadau L.(2017). Relevance and costs of large scale

- underground hydrogen storage in France. *Int J Hydrog Energy*;42(36):22987-23003. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.06.239.
6. Bahrami, M., Izadi Amiri, E., Zivar, D., Ayatollahi, S., & Mahani, H. (2023). Challenges in the simulation of underground hydrogen storage: A review of relative permeability and hysteresis in hydrogen-water system. *Journal of Energy Storage*, 73, 108886. doi:10.1016/j.est.2023.108886.