Journal of Applied Research in Chemical-Polymer Engineering. (Persian), Vol. 8, No. 1 (Spring 2024) 1-11

Journal of
Applied Research in Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: www.arcpe.modares.ac.ir

Research Paper

Effect of Operating Parameters on the Injection of Carbon Dioxide and Sour Gas as Cushion Gas in the Process of Underground Hydrogen Gas Storage

Mohammad Ramsari[1], Arezou Jafari[1,*], Hamed Namdar[1], Davood Khoozan[1], Aras Roomi[2]

[1] *Petroleum Engineering Department, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*
[2] *Petroleum Engineering and Development Company (PEDEC), Tehran, Iran.*

ARTICLE INFO

Received 2024-05-18
Revised 2024-11-02
Accepted 2024-11-02
Available online 2025-03-09
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:

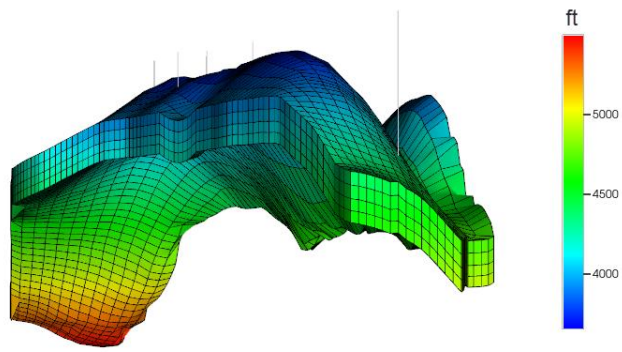
Underground hydrogen gas storage

Cushion gas; Sour gas

Renewable energy

Energy storage

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Research subject: The disparity between supply and demand is one of the main obstacles in transitioning from fossil fuels to renewable energy. Underground hydrogen storage derived from renewable sources is a suitable method for storing energy from these sources. However, a portion of the stored gas remains in the reservoir as cushion gas, which can add to the operational costs. It is therefore recommended to replace this cushion gas with less expensive alternatives, such as CO_2 or sour gas, to reduce these costs. Nevertheless, this replacement can affect the purity and recovery factor of hydrogen, which can be controlled by specific operating parameters. This study will investigate how these parameters can be adjusted to maintain high purity and recovery factor for stored hydrogen.

Research approach: In this section, a model of a partially depleted gas reservoir was initially constructed using the commercial simulator CMG. Following validation, this model was employed to evaluate the desired parameters. For this purpose, approximately 50% of the reservoir was depleted initially, followed by the injection of the cushion gas for one year. Subsequently, the hydrogen storage process was conducted over a period of 10 years. This research investigates the impact of various parameters, including the duration and rate of hydrogen injection and production, the soaking time and duration of cushion gas injection, the utilization of sour gas as the cushion gas, and the concentration of H_2S within it, on the purity and recovery factor of the produced hydrogen.

Main results: The results showed that increasing the rate of hydrogen injection and production enhances its purity and recovery factor. Reducing the injection period while increasing the extraction period decreases purity but improves recovery, provided that the extraction period does not exceed the injection period. Extending the cushion gas injection time and the interval between injection and hydrogen storage supports the purity and recovery factor of hydrogen. Additionally, in the cushion gas composition, increasing the proportion of H_2S above 70% in the sour gas mixture reduces hydrogen purity and recovery by approximately 2% and 3%, respectively, confirming the potential of H_2S as a cushion gas.

* Corresponding author: ajafari@modares.ac.ir – ORCID: 0000-0003-3850-3327

Copyright@ 2025, The Authors. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی–پلیمر

آدرس صفحه: www.arcpe.modares.ac.ir

مقاله تحقیقاتی

بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی تزریق دی‌اکسیدکربن و گاز ترش به‌عنوان گاز پایه در فرایند ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز هیدروژن

محمد رامسری[۱]، آرزو جعفری[۱,*]، حامد نامدار[۱]، داود خوزان[۱]، ارس رومی[۲]

[۱] گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

[۲] شرکت مهندسی و توسعه نفت، تهران، ایران.

چکیده

موضوع تحقیق: عدم تعادل میان عرضه و تقاضا یکی از موانع اصلی در فرایند جایگزین کردن انرژی‌های تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی است. ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز هیدروژن به‌دست‌آمده از منابع تجدیدپذیر، روشی مناسب برای ذخیره انرژی حاصل از این منابع است. از طرفی با توجه به آن که در زمان ذخیره زیرزمینی گاز همواره بخشی از آن به‌عنوان گاز پایه درون مخزن باقی می‌ماند، توصیه می‌شود برای کاهش هزینه‌های عملیاتی این گاز با گازهای ارزان همچون گاز CO_2 و گاز ترش جایگزین شود. اما در این حالت خلوص و ضریب بازیافت هیدروژن برداشت‌شده از مخزن از جمله عواملی هستند که تحت تأثیر قرار می‌گیرند که امکان کنترل آن‌ها توسط پارامترهای عملیاتی وجود دارد. از این رو در این مطالعه به بررسی آن‌ها پرداخته خواهد شد.

روش تحقیق: در این قسمت ابتدا مدل مخزن گازی نیمه‌تخلیه‌شده توسط شبیه‌ساز تجاری CMG ساخته شد و پس از صحت‌سنجی مدل، از آن به‌منظور بررسی پارامترهای مورد نظر استفاده شد. برای این امر پس از تخلیه‌ی ۵۰٪ مخزن، به‌مدت یک سال گاز پایه تزریق شده و سپس برای مدت ۱۰ سال ذخیره‌سازی هیدروژن صورت گرفت. در این پژوهش تأثیر پارامترهای مدت زمان و نرخ تزریق و تولید هیدروژن، مدت زمان تزریق و زمان ماند گاز پایه، استفاده از گاز ترش به‌عنوان گاز پایه و درصد H_2S موجود در آن بر روی خلوص و ضریب بازیافت هیدروژن مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج اصلی: نتایج به‌دست‌آمده نشان داد افزایش نرخ تزریق و تولید هیدروژن باعث افزایش خلوص و ضریب بازیافت آن می‌شود. کاهش دوره تزریق و افزایش دوره برداشت موجب کاهش خلوص و افزایش ضریب بازیافت هیدروژن می‌شود، مشروط بر اینکه دوره برداشت از دوره تزریق بیشتر نشود. افزایش زمان تزریق گاز پایه و فاصله زمانی بین تزریق و ذخیره‌سازی، به خلوص و بازیافت هیدروژن کمک می‌کند. همچنین، در ترکیب گاز پایه، افزایش سهم H_2S به بالای ٪۷۰ در ترکیب گاز پایه، خلوص و بازیافت هیدروژن را به‌ترتیب حدود ۲ و ۳ درصد کاهش می‌دهد که این امر امکان استفاده از H_2S را به‌عنوان گاز پایه تأیید می‌کند.

کلیدواژه‌ها

ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز هیدروژن

گاز پایه

گاز ترش

انرژی تجدیدپذیر

ذخیره انرژی

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲

دسترس آنلاین: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹

ISSN: 2588-5316

Online ISSN: 2588-5324

* نویسنده مسئول: ajafari@modares.ac.ir – ORCID: 0000-0003-3850-3327

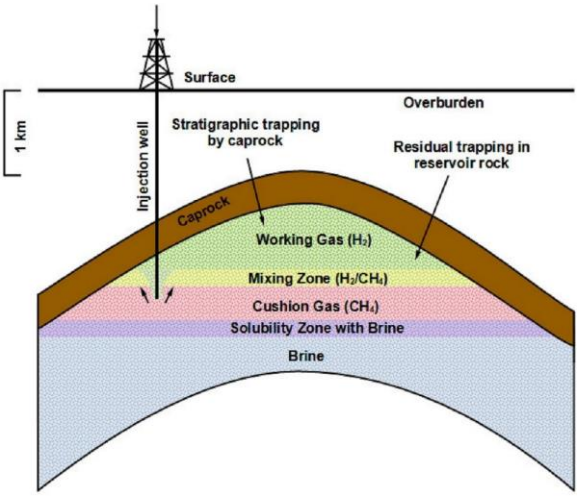
کپی‌رایت © ۲۰۲۵، نویسندگان . این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد. بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

۱ مقدمه

افزایش دمای کره زمین و آلودگی‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی موجب شده تا امروزه دولت‌ها به‌منظور جلوگیری از نابودی زیستگاه جانداران و همچنین پیشگیری از مواجهه با بحران‌های انرژی، به منابع انرژی جایگزین همچون انرژی‌های تجدیدپذیر رو بیاورند. این منابع به‌دلیل ماهیتی که دارند برای محیط‌زیست عموماً کم‌خطر و بی‌خطر هستند. همچنین بر خلاف انرژی‌های فسیلی که تولید آن‌ها در زیر زمین سالیان بسیار زیادی طول می‌کشد، تولید و بهره‌برداری از این منابع با محدودیت‌های بسیار کمتری همراه است و تولید آن‌ها از طریق مواردی همچون پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی و غیره به سرعت انجام می‌شود. با وجود مزایای بسیار زیاد، اما این منابع نمی‌توانند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های هیدروکربوری باشند. اصلی‌ترین معضل این منابع وابستگی آن‌ها به عواملی همچون تغییرات آب‌وهواست. علاوه بر این یکی دیگر از مشکلات تأمین انرژی که سوخت‌های فسیلی نیز با آن مواجه هستند، افزایش تقاضا برای انرژی در برخی از فصول سال است. با توجه به آنکه نرخ تولید انرژی به‌صورت میانگین در تمامی فصول سال ثابت است، با افزایش تقاضای انرژی در فصول مختلف سال، مشکلات ناشی از بر هم خوردن تعادل میان عرضه و تقاضا به وجود می‌آید که این خود دغدغه‌ای مهم و معضلی اساسی در فرایند جایگزین کردن منابع تجدیدپذیر به‌جای منابع انرژی موجود است [۳-۱].

با توجه به موارد بیان‌شده، ذخیره‌سازی انرژی مازاد به‌دست‌آمده از این منابع در دوران کاهش تقاضا و استفاده از آن در دوره‌های مورد نیاز، راه حل مناسبی برای جایگزین‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر به جای انرژی‌های فسیلی به نظر می‌رسد. در میان روش‌های موجود برای ذخیره این انرژی مازاد، ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز هیدروژن (Underground Hydrogen Storage (UHS)) حاصل از انرژی‌های تجدیدپذیر اقتصادی و منطقی به نظر می‌رسد. از دلایل آن می‌توان به دو مورد اشاره کرد؛ اولاً محصول واکنش سوختن گاز هیدروژن گرما و بخار آب است که به محیط‌زیست آسیب نمی‌رساند؛ ثانیاً با توجه به ماهیت گاز هیدروژن برای تأمین انرژی توسط این گاز، نیاز به ذخیره‌سازی حجم بسیار زیادی از آن است. مخازن تحت فشار سطح الارضی به‌دلیل هزینه‌ی تولید و نگه‌داری بسیار زیادی که دارند گزینه‌ی مناسبی برای ذخیره‌سازی گاز هیدروژن در حجم‌های بسیار زیاد نیستند. اما مخازن زیر زمینی به‌دلیل ظرفیت بسیار زیادی که دارند و همچنین پیوستگی و یکپارچگی (Integrity) آن‌ها به جهت جلوگیری از نشت گاز از درون مخزن به بیرون، گزینه‌های مناسبی به حساب می‌آیند. در این میان مخازن گازی بنا به دلایلی همچون وجود اطلاعات کافی و مناسب جمع‌آوری‌شده در دوران بهره‌برداری، وجود تله‌های مناسب برای به دام افتادن گاز هیدروژن درون آن‌ها، وجود ادوات سرچاهی و در نتیجه کاهش هزینه‌ها گزینه‌ی بسیار مناسبی برای UHS به‌دست‌آمده از انرژی‌های تجدیدپذیر به شمار می‌آیند [۴-۶].

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، به‌صورت کلی گازها در فرایند UHS به دو دسته‌ی گاز اصلی (Working Gas) و گاز پایه (Cushion Gas) تقسیم می‌شوند. گاز اصلی همان گاز مورد تقاضا است که به‌صورت دوره‌ای به مخزن تزریق و از آن تولید می‌شود. در این پژوهش گاز اصلی، گاز هیدروژن است. اما گاز پایه گازی است که همواره بخش بسیار زیادی از آن به‌دلیل کمبود فشار، در مخزن باقی می‌ماند. گاز پایه همواره بخش اعظمی از سرمایه‌ی پروژه‌های ذخیره‌سازی گاز را به خود اختصاص می‌دهد. وظیفه‌ی اصلی این گاز تأمین فشار برای بازتولید گاز اصلی تزریق‌شده به مخزن است. معمولاً از گاز طبیعی باقی‌مانده در مخازن گازی یا گازهای ارزان به‌عنوان گاز پایه با هدف کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری استفاده می‌شود. اما نکته‌ی بسیار مهم در خصوص استفاده از این گازها به‌عنوان گاز پایه کاهش خلوص هیدروژن برداشت‌شده از مخزن به‌دلیل اختلاط گاز پایه با گاز هیدروژن است که باید تأثیرات حضور آن در مخازن ذخیره‌سازی گاز مورد ارزیابی قرار گیرد [۷-۹].



شکل ۱ طرح‌واره ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز هیدروژن در حضور گاز پایه [۱۰]

Figure 1 Schematic of underground storage of hydrogen gas in the presence of cushion gas [10]

ژاوو و همکاران [۱۱] در پژوهش خود به بررسی تزریق گاز پایه به آب‌خوان با هدف ذخیره‌سازی گاز هیدروژن پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در صورت استفاده از گاز دی‌اکسیدکربن به‌عنوان گاز پایه، به‌دلیل انحلال زیاد CO_2 در آب چگالی سیال در اطراف محل تزریق زیاد می‌شود و این امر موجب ناپایداری گرانشی و در نتیجه حرکت به سمت پایین محلول حاوی CO_2 می‌شود. این حرکت اولاً به‌دلیل جریانی که ایجاد می‌کند موجب می‌شود تا شوری آب در نواحی سطح تماس آب و گاز بیشتر شود و این موجب افزایش انحلال هیدروژن درون آب و به دام افتادن آن می‌شود؛ ثانیاً حرکت رو به پایین محلول آبی حاوی گاز CO_2 موجب به‌وجودآمدن فضای مناسب برای نفوذ بیشتر هیدروژن به درون آب می‌شود که این نیز به گیرافتادن گاز هیدروژن کمک می‌کند و موجب کاهش تولید نهایی هیدروژن از مخزن می‌شود.

در سال ۲۰۲۳ سعید و همکاران [۱۲] به مطالعه‌ی اثر گازهای CH_4، N_2 و CO_2 به‌عنوان گاز پایه پرداختند؛ نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد با تزریق

حجم برابر از این سه گاز، زمانی که CO_2 به مخزن تزریق می‌شود، حجم بیشتری گاز هیدروژن را می‌توان به مخزن تزریق کرد. علت این موضوع ابتدا حلالیت دی‌اکسیدکربن است که نسبت به دو گاز دیگر بیشتر است و ثانیاً چگالی گاز دی‌اکسیدکربن است که نسبت به دو گاز دیگر بیشتر است و این موضوع موجب می‌شود تا در صورت تزریق حجم یکسان از هر سه گاز، گاز CO_2 نسبت به دو گاز دیگر فضای کمتری را اشغال کند که این امر فضای بیشتری را برای تزریق گاز هیدروژن فراهم می‌سازد. علاوه بر این نتایج آن‌ها نشان داد که حضور گاز پایه موجب افزایش نرخ ضریب بازیافت هیدروژن می‌شود که علت این امر افزایش فشار ناشی از تزریق گاز پایه است.

کنعانی و همکاران [۱۳] نیز به مطالعه‌ی تأثیرات حضور و عدم حضور گاز پایه در فرایند UHS در یک مخزن نفتی پرداختند. پژوهش آن‌ها نشان داد با وجود افزایش فشار بیشتر ناشی از تزریق گاز نیتروژن به مخزن، این گاز متان است که موجب افزایش بیشتر ضریب بازیافت نهایی هیدروژن می‌شود. علت این امر اختلاف وزن مولکولی میان سه گاز پایه با گاز هیدروژن است. تزریق هیدروژن به صورت خالص و بدون پیش‌تزریق گاز پایه به مخزن موجب می‌شود تا گاز به سرعت حرکت کند و پدیده‌ای مشابه با پیشروی گاز (Gas Overriding) در فرآیند ازدیاد برداشت با نفت، در اینجا صورت بگیرد. اما نزدیک بودن وزن مولکولی گاز متان به گاز هیدروژن موجب می‌شود تا این پدیده بسیار کاهش پیدا کند.

ماکسیم و همکاران [۱۴] به بررسی ذخیره‌سازی هیدروژن در مخزن هیدروکربوری پرداختند. آن‌ها در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که استفاده از لایه‌های نازک گازی برای ذخیره‌سازی گاز هیدروژن نتایج به مراتب بهتری در میزان ضریب بازیافت نهایی هیدروژن نسبت به لایه‌های آب‌خوان‌ها دارد. همچنین بیان شد استفاده‌ی از مخازن بدون تزریق گاز پایه، می‌تواند در بیشترین حالت موجب از دست رفتن حدود ۸۴٪ از هیدروژن شود. زامهریان و همکاران [۱۵] به بررسی تزریق گاز هیدروژن در مخزن گاز میعانی پرداختند؛ آن‌ها برای این شبیه‌سازی‌ها و مطالعات، نتیجه‌گیری‌ها را بر پایه میزان ارزش حرارتی گاز هیدروژن گزارش کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد با عبور از سیکل‌های ابتدایی، نرخ اختلاط گاز پایه با گاز هیدروژن کاهش می‌یابد؛ علت اصلی این امر اختلاف میان غلظت گاز هیدروژن و گاز پایه در دوره‌های اول تزریق گاز به مخزن است.

اگرچه در مطالعات گذشته به تأثیر حضور گاز پایه در فرایند UHS پرداخته شد اما تاکنون به بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی همچون مدت زمان و نرخ تزریق و تولید هیدروژن، مدت زمان تزریق و زمان ماند گاز پایه دی‌اکسیدکربن بر روی خلوص و ضریب بازیافت هیدروژن پرداخته نشده است. لذا در این مطالعه به بررسی این مواد پرداخته خواهد شد. همچنین در میان مطالعاتی که تاکنون صورت گرفته است، از گاز ترش به‌عنوان گاز پایه استفاده نشده است و تأثیرات حضور گاز H_2S در گاز پایه مورد ارزیابی قرار نگرفته است که در این پژوهش به آن نیز پرداخته شد.

۲ بخش نظری

۲-۱ اجرای شبیه‌سازی

در این مطالعه به‌منظور شبیه‌سازی فرایند ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز هیدروژن از مجموعه نرم‌افزار تجاری CMG نسخه‌ی ۲۰۲۲ استفاده شد. با توجه به تغییرات ترکیب گاز ناشی از اختلاط گاز پایه و گاز هیدروژن و بررسی این موضوع از شبیه‌ساز ترکیبی (Compositional Simulation) GEM استفاده شد. همچنین به‌منظور تنظیم مدل سیال و ساخت مدل استاتیک و دینامیک مخزن به‌ترتیب از ماژول‌های WINPROP و Builder استفاده شد.

جدول ۱ ترکیب سیال اولیه مخزن

Table 1 Initial fluid composition of the reservoir

Component	Value (%)
CO_2	1.15
N_2	2.28
C_1	91.45
C_{2-6}	5.12

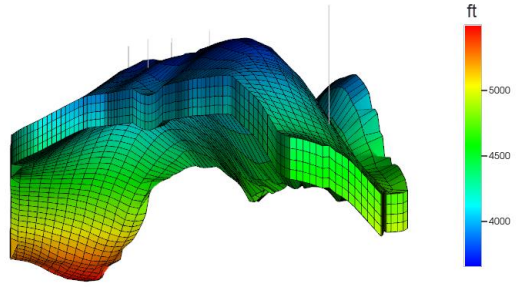
جدول ۲ اطلاعات اولیه‌ی مخزن

Table 2 Initial reservoir parameters

Parameter	Value (Unit)
Porosity	21 (%)
Permeability	23.5 (mD)
Initial Pressure	2600 (psi)
Initial Temperature	155 (F)
Rock Compressibility	$4*10^{-6}$ (1/psi)
Initial Gas Compressibility	$5.02*10^{-2}$ (1/psi)

۲-۲ اطلاعات مخزن

مخزن شبیه‌سازی شده در این پژوهش دارای سیال گاز خشک (Dry Gas) بوده که ترکیب اولیه آن در جدول ۱ بیان شده است. طول، عرض و ارتفاع مخزن مورد نظر به‌ترتیب ۲/۶ km، ۲ km و ۰/۰۷ km است. سایر اطلاعات مربوط به مخزن مورد نظر در جدول ۲ آورده شده است. در ابتدا با توجه به اطلاعات هندسه و نقشه‌های هم ضخامت مخزن اقدام به ساخت مدل استاتیک مخزن به کمک ماژول Builder شد. سپس مدل سیال تنظیم شده توسط ماژول WINPROP به مدل استاتیک وارد می‌شود و با وارد کردن اطلاعات تراوایی‌های نسبی، خصوصیات تولیدی چاه‌ها مدل استاتیک ساخته می‌شود. شکل ۲ طرح‌واره مدل مخزن شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد. مدل مورد نظر دارای ۵۶۰۰ سلول است که در جهت‌های X، Y و Z به‌ترتیب دارای ۱۴ و ۱۰۰ و ۴ سلول است.



شکل ۲ طرح‌واره مخزن موردنظر به همراه محل قرارگیری چاه‌ها و ارتفاع هر سلول

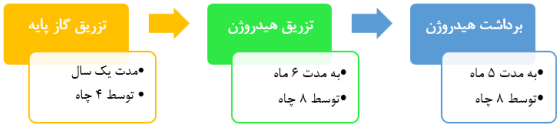
Figure 2 Schematic of the desired reservoir, indicating the locations of wells and grid tops (ft)

۲-۳ اطلاعات چاه‌های مخزن

بهره‌برداری از این مخزن در ابتدا با ۵ چاه تولیدی آغاز شد و به مدت حدود ۴/۵ سال از آن توسط این ۵ چاه تولید صورت گرفته است. اطلاعات موجود از تاریخچه‌ی مخزن نشان می‌دهد که پس از این مدت تولید، ضریب بازیافت مخزن به حدود ۳۰٪ رسیده است. از طرفی ضریب بازیافت نهایی مخازن گاز خشک همواره در بازه ۴۵٪ الی ۷۵٪ است؛ ازاین‌رو به‌منظور توسعه مخزن ۳ چاه دیگر افزوده شد و تولید در مجموع از ۸ چاه صورت گرفت و نهایتاً مخزن پیش از شروع فرایند ذخیره‌سازی هیدروژن به ضریب بازیافت نهایی ۵۵٪ رسید. هر هشت چاه مورد استفاده به‌منظور تخلیه‌ی مخزن به‌صورت عمودی بود. در این پژوهش با توجه به ادوات سر چاهی به‌منظور تولید و انتقال سیال و همچنین با توجه به فشار شکست سازند، حداکثر فشار ته چاهی (Bottom-Hole Pressure(BHP)) (برای چاه‌های تزریق گاز) و حداقل فشار ته چاهی (برای چاه‌های تولیدی) به‌ترتیب برابر ۲۵۶۰psi و ۱۰۰۰psi تعیین شد.

۲-۴ شرایط ذخیره‌سازی گاز هیدروژن

مطالعات صورت‌گرفته پژوهش‌های انجام‌شده بر روی فرایند ذخیره‌سازی هیدروژن نشان می‌دهد که به‌صورت میانگین حدود ۵ ماه از سال به‌دلیل افزایش تقاضا انرژی، تعادل میان تولید و مصرف انرژی‌های از بین می‌رود. از این رو در این پژوهش گاز هیدروژن به‌مدت ۶ ماه و توسط هر ۸ چاه موجود به مخزن تزریق شده و پس از آن به‌مدت ۵ ماه برداشت هیدروژن از مخزن توسط همان ۸ چاه صورت گرفت. همچنین در میان هر دوره و پس از تزریق و یا برداشت هیدروژن از مخزن، چاه‌ها به‌مدت ۱۵ روز بسته شدند. در هر شبیه‌سازی، چرخه تزریق و تولید هیدروژن برای مدت ۱۰ سال (۱۰ دوره) تکرار شد و نتایج آن‌ها گزارش شد. نرخ تزریق و تولید گاز هیدروژن به و از مخزن در هر شبیه‌سازی به نوعی انتخاب شد که میزان هیدروژن تزریق‌شده به مخزن با مجموع گاز تولیدشده از مخزن در هر دوره برابر باشد. همچنین در این مطالعه از گاز دی‌اکسیدکربن با هدف ترسیب (Sequestration) این گاز در زیر زمین، به عنوان گاز پایه استفاده شد و کل حجم آن برابر با حجم هیدروژن تزریق‌شده در طول یک چرخه در نظر گرفته شد که این مقدار فقط یک بار و در طول مدت یک سال پیش از شروع فرایند UHS و توسط ۴ چاه از میان ۸ چاه موجود به مخزن تزریق شد. شکل ۳ طرح تزریق گاز پایه و چرخه‌های تزریق و تولید گاز هیدروژن را نشان می‌دهد.



شکل ۳ طرح چرخه‌های تزریق و تولید گاز هیدروژن به مخزن

Figure 3 Scheme of hydrogen gas injection and production cycles in the reservoir

۲-۵ معادلات حاکم

در این شبیه‌سازی از معادله‌ی حالت پنگ-رابینسون (Peng-Robinson Equation of State)(رابطه‌ی ۱) برای مدل‌سازی سیالات مخزن استفاده شد که پارامترهای P، R، T، a و b و v در این معادله‌ی حالت به‌ترتیب عبارتند از فشار، ثابت گازها، دما، حجم مولی، ضرایب خاص ماده [۱۶]. همچنین برای محاسبه‌ی خواص فیزیکی و خواص بحرانی اجزا (Tc و Vc و Pc) از روابط همبستگی‌های (Correlations) متعلق به Twu [۱۷] که به‌ترتیب در روابط ۲ تا ۴ بیان داده شده است، استفاده شد. به‌علاوه، برای محاسبه‌ی ضریب بی‌مرکزی ω (Acentric Factors) این اجزا از همبستگی‌های متعلق به Lee–Kesler استفاده شد [۱۸, ۱۹].

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a\alpha}{v(v+b)+b(v-b)} \quad (۱)$$

$$Tc=16.6+0.372\times MW-13.2\times\omega \quad (۲)$$

$$Pc=43.8-0.0457\times MW-28.8\times\omega \quad (۳)$$

$$V_c = \frac{R.T_c}{P_c} \quad (۴)$$

همچنین به‌منظور بررسی اثر حلالیت گازها درون آب موجود در مخزن از قانون هنری (Henry's law)(رابطه‌ی ۵) استفاده شد که در آن H_i ضریب هنری، H_i^* ثابت هنری، V_i حجم مولی جزئی، P_i و P_{ref} به‌ترتیب فشار اولیه و فشار مبنا و R و T نیز به‌ترتیب ثابت جهانی گازها و دما هستند [۲۰].

$$H_i = H_i^* \, exp\left[\frac{v_i^{\infty}(P_i-P_{ref})}{RT}\right] \quad (۵)$$

۲-۶ روش مطالعه

به‌صورت کلی پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش به سه دسته تقسیم می‌شوند. در دسته‌ی اول به بررسی پارامترهای مرتبط با تزریق و تولید هیدروژن پرداخته شد. در دسته‌ی دوم موارد مرتبط با تزریق گاز پایه به مخزن مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت نیز تأثیر تزریق گاز ترش و حضور گاز H_2S در گاز پایه مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به مزایای تزریق گاز دی‌اکسیدکربن به زیر زمین با هدف دفن و ترسیب کربن موجود در جو کره‌ی زمین، در این پژوهش از این گاز به‌عنوان گاز پایه برای بررسی پارامترهای مذکور استفاده شد. از این رو ابتدا به‌منظور تعیین نرخ تزریق و تولید هیدروژن به مخزن بر اساس شرایط مخزن و همچنین انرژی مورد نیاز

در زمان افزایش تقاضا، گاز هیدروژن با نرخ‌های مختلف و در ۶ سطح به مخزن تزریق شد. در مدل اول که با نام Base Model مشخص شده است، نرخ تزریق و تولید هیدروژن برابر ۶۵/۶ MMScf/Day و ۸۰ MMScf/Day تعیین شد و در هر شبیه‌سازی به مقدار نرخ تزریق و تولید هیدروژن افزوده شد. همان‌طور که پیش از نیز بیان شد در تمامی این مدل‌ها، مجموع گاز تزریق‌شده به مخزن با گاز تولیدشده از آن برابر قرار داده شد. همچنین نسبت به نرخ تزریق هیدروژن در یک چرخه، میزان حجم گاز پایه تزریق‌شده به مخزن نیز تغییر کرده تا از اثرات احتمالی آن بر روی نتایج جلوگیری شود.

با وجود آن که مطالعات و بررسی‌های صورت‌گرفته تاکنون نشان می‌دهد با توجه به شرایط آب‌وهوایی کره‌ی زمین و همچنین الگوی مصرف انرژی، جوامع به‌صورت میانگین تنها حدود ۵ ماه از سال با کمبود انرژی روبرو هستند، با این وجود در این پژوهش به بررسی تأثیر بازه‌های تزریق و تولید متفاوت هیدروژن پرداخته شد. هدف از بررسی پارامتر ذکرشده این است که در صورت حضور چندین سایت به‌منظور ذخیره‌سازی، بررسی شود که مدت زمان تزریق و برداشت هیدروژن از مخزن به‌منظور ذخیره‌سازی آن چه تأثیری بر روی خلوص و ضریب بازیافت نهایی آن خواهد داشت؛ برای این امر در ۵ حالت شبیه‌سازی صورت گرفت که در هر مدل دو بازه‌ی زمانی ۱۵ روزه (مجموعاً یک ماه) چاه‌ها بسته بودند و از میان ۱۱ ماه موجود، به‌ترتیب در هر مدل از تعداد ماه‌های تزریق هیدروژن به مخزن کاسته شده و به تعداد ماه‌های تولید از مخزن افزوده شد. در این شبیه‌سازی‌ها حداقل مدت زمان تزریق گاز هیدروژن برابر ۵ ماه و بیشترین آن برابر ۹ ماه بود. همچنین در تمامی مدل‌ها نرخ تزریق و تولید چاه‌ها به گونه‌ای تعیین شد که حجم گاز هیدروژن تزریق‌شده به مخزن با حجم گاز برداشت‌شده از آن با هم برابر بودند.

پارامتر بعدی که مورد ارزیابی قرار گرفت، تأثیر مدت زمان تزریق گاز پایه به مخزن بود. همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد، حجم گاز پایه معادل حجم گاز هیدروژن تزریق شده در طول یک چرخه قرار داده شد. این مقدار گاز در ۴ دوره‌ی مختلف به مخزن تزریق شد و تأثیرات آن بر روی خلوص و ضریب بازیافت هیدروژن مورد ارزیابی قرار گرفت. در این شبیه‌سازی‌ها حجم کل گاز پایه‌ی تزریق شده به مخزن ثابت بوده و فقط مدت زمان تزریق آن‌ها افزایش یافته و در نتیجه نرخ تزریق گاز پایه به مخزن کاهش یافته است. برای این امر در ۴ حالت تزریق گاز پایه به مخزن صورت گرفت که در مدل اول کل گاز پایه در مدت ۶ ماه و در مدل دوم، سوم و چهارم به‌ترتیب در مدت ۱۲ماه و ۱۸ ماه و ۲۴ ماه گاز به مخزن تزریق شدند. علاوه بر این یکی دیگر از پارامترهای بررسی شده، فاصله‌ی زمانی میان تزریق گاز پایه تا شروع فرایند ذخیره‌سازی هیدروژن بود؛ برای این امر در ۵ سطح شبیه‌سازی صورت گرفت که شامل فواصل زمانی ۱ ماه، ۶ ماه، ۱۲ ماه، ۱۸ ماه و ۲۴ ماه میان تزریق گاز پایه و شروع ذخیره‌سازی گاز هیدروژن بود. همان‌طور که پیش از نیز بیان شد، در این پژوهش برای اولین بار تزریق گاز ترش به‌عنوان گاز پایه به مخزن صورت گرفت؛ گاز ترش مورد نظر، گاز ورودی به پالایشگاه خانگیران ایران است [۲۱]. ترکیب گاز ترش مورد نظر در جدول ۳ آورده شده است. همچنین در این پژوهش با هدف بررسی تأثیر حضور گاز سولفیدهیدروژن بر روی ضریب بازیافت و خلوص نهایی هیدروژن تولیدی از مخزن، در ۴ سطح به‌ترتیب به سهم هیدروژن سولفید ۱۰٪ و ۳۰٪ و ۵۰٪ و ۷۰٪ افزوده شد و از سهم سایر اجزاء نسبت به سهم آن‌ها در ترکیب اصلی (گاز اولیه) کاسته شد که ترکیبات جدید نیز در جدول ۳ آورده شده‌اند.

جدول ۳ ترکیب گاز ترش مورد استفاده به‌عنوان گاز پایه با مقادیر مختلف گاز سولفیدهیدروژن

Table 3 Composition of sour gas used as cushion gas with different amounts of hydrogen sulfide gas

Component	Sour gas	+10% H_2S	+30% H_2S	+50% H_2S	+70% H_2S
N_2 (%)	0.550	0.492	0.378	0.263	0.149
CO_2 (%)	6.410	5.743	4.410	3.077	1.743
H_2S (%)	3.850	13.850	33.850	53.850	73.850
CH_4 (%)	88.352	79.163	60.785	42.407	24.029
C_{2-6} (%)	0.750	0.672	0.516	0.360	0.204
H_2O (%)	0.088	0.079	0.061	0.042	0.024

۳ نتایج و بحث

تأثیر تمامی پارامترهای بررسی‌شده در این پژوهش بر روی ضریب بازیافت و خلوص هیدروژن برداشت‌شده از مخزن مورد ارزیابی قرار گرفت؛ برای محاسبه‌ی میزان خلوص هیدروژن تولیدی از مخزن، سهم کل گاز هیدروژن نسبت به کل گاز برداشت‌شده از مخزن محاسبه شد و به صورت درصد بیان شد. همچنین برای محاسبه‌ی میزان ضریب بازیافت هیدروژن تولیدی از مخزن، میزان کل مول گاز هیدروژن برداشت‌شده از مخزن به کل میزان مول هیدروژن تزریق‌شده به مخزن تقسیم شد و در نهایت به صورت درصد

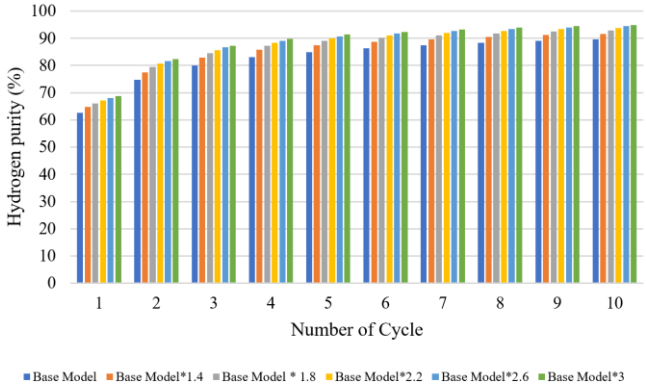
بیان شد (رابطه‌ی ۶).

$$Recovery\ Factor\ of\ H2 = \frac{Total\ H2\ production\ (mole)}{Total\ H2\ injection\ (mole)} * 100 \qquad (۶)$$

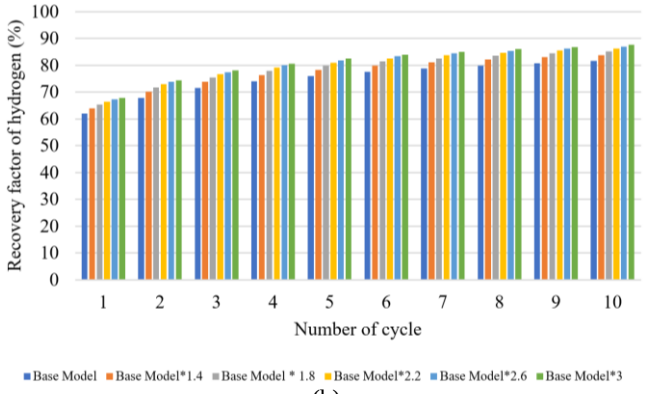
۳-۱ تأثیر نرخ تزریق و تولید هیدروژن

نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۴ نشان می‌دهد با افزایش حجم هیدروژن تزریق‌شده به مخزن، میزان ضریب بازیافت و خلوص نهایی هیدروژن برداشت‌شده در تمامی چرخه‌ها نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر می‌شود. در شکل ۴-الف با سه‌برابر شدن نرخ تزریق و تولید هیدروژن، میزان خلوص آن در هر چرخه به‌صورت میانگین ۵٪ افزایش پیدا می‌کند. مهم‌ترین دلیل این امر عدم حضور گاز پایه (CO_2) و گاز باقی‌مانده درون مخزن (CH_4) در گاز برداشت‌شده از مخزن است. حضور حجم زیاد هیدروژن درون مخزن، موجب جلوگیری از رسیدن این گازها به نواحی تولید چاه می‌شود و این امر به افزایش خلوص هیدروژن تولیدشده از مخزن کمک می‌کند. علاوه بر این همان‌طور که بیان شد حجم گاز پایه‌ی تزریق‌شده با حجم گاز هیدروژن تزریق‌شده به مخزن رابطه‌ی مستقیم دارد؛ بنابراین با افزایش حجم گاز اصلی تزریق‌شده به مخزن، حجم گاز پایه‌ی تزریق‌شده به مخزن نیز افزایش می‌یابد. با افزایش حجم گاز پایه‌ی تزریق‌شده به مخزن، اشباع این گاز در نواحی اطراف چاه‌ها افزایش می‌یابد و موجب می‌شود تا گاز متان به نواحی دورتر انتقال پیدا کند. از سوی دیگر به‌دلیل زیاد بودن چگالی گاز دی‌اکسیدکربن نسبت به گاز متان، احتمال رخ‌دادن جدایش ثقلی میان دو گاز هیدروژن و دی‌اکسیدکربن، بیشتر است و در نتیجه این امر موجب کاهش ناحیه اختلاط دو گاز شده و خلوص هیدروژن افزایش پیدا می‌کند.

شکل ۴-ب نشان می‌دهد با افزایش حجم گاز هیدروژن تزریق‌شده به مخزن، میزان ضریب بازیافت این گاز افزایش پیدا می‌کند؛ به‌صورت‌کلی یکی از مهم‌ترین عوامل تولید سیال از درون مخزن، اختلاف میان میانگین فشار مخزن با فشار دهانه چاه است. با افزایش حجم گاز اصلی و گاز پایه‌ی تزریق‌شده به مخزن، فشار مخزن بیشتر افزایش پیدا می‌کند که در نتیجه‌ی این امر موجب افزایش حجم سیال تولیدشده از مخزن می‌شود. علاوه بر این، به‌دلیل گرانروی بالای گاز دی‌اکسیدکربن و گاز متان نسبت به گاز هیدروژن، ناحیه‌ی مخلوط گازی که این دو گاز با گاز هیدروژن تشکیل می‌دهند، با کاهش سرعت سیال همراه می‌شود. از طرفی با تزریق حجم زیاد گاز هیدروژن به مخزن، این ناحیه اختلاط در نقاط بسیار دورتر از چاه‌های تولیدی تشکیل می‌شود و همچنین حجم بیشتری از گاز هیدروژن وارد این ناحیه نمی‌شود؛ در نتیجه نسبت به سایر مدل‌ها با حجم گاز اصلی کمتر، حجم بیشتری سیال با گرانروی پایین قابلیت تولید دارد که این امر به افزایش ضریب بازیافت کمک بسیاری می‌کند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این بخش و همچنین شرایط مخزن و نیاز منطقه به انرژی، نرخ تزریق و تولید گاز هیدروژن در طول یک دوره به‌ترتیب برابر با ۱۷۰/۷MMScf/Day و ۲۰۸ MMScf/Day برنامه‌ریزی شد.



(a)



(b)

شکل ۴ تأثیر حجم گاز تزریق‌شده به مخزن بر روی الف) میزان خلوص هیدروژن، ب) ضریب بازیافت هیدروژن

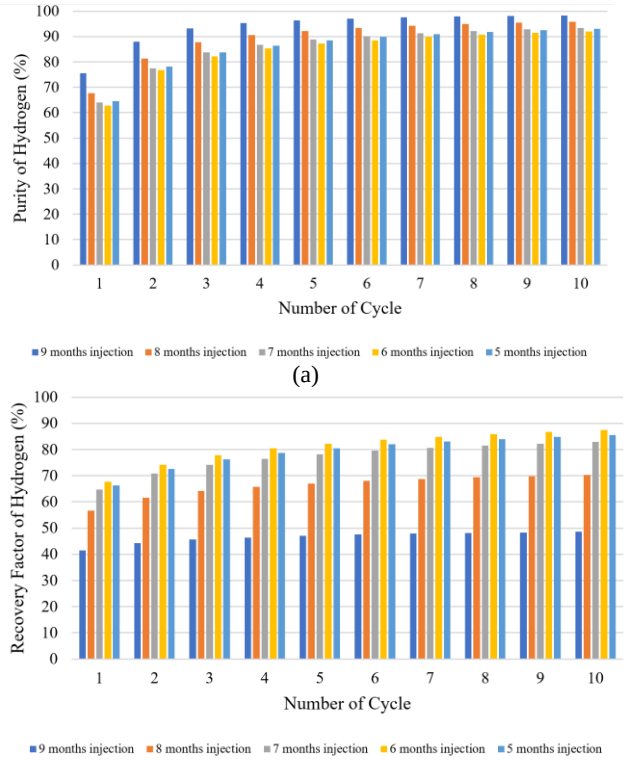
Figure 4 The effect of the volume of gas injected into the reservoir on (a) hydrogen purity and (b) hydrogen recovery factor

۳-۲ تأثیر مدت زمان تزریق و تولید هیدروژن

نتایج به‌دست آمده در شکل ۵ نشان می‌دهد با افزایش مدت زمان تزریق گاز هیدروژن به مخزن و در نتیجه کاهش مدت زمان تولید این گاز، میزان خلوص هیدروژن افزایش پیدا می‌کند. با افزایش مدت زمان برداشت هیدروژن از مخزن، گاز پایه و گاز باقی‌مانده درون مخزن، به محل تولید از چاه رسیده و همراه با گاز هیدروژن تولید می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود زمانی که فقط دو ماه از مخزن تولید هیدروژن صورت می‌گیرد، با وجود نرخ بسیار بالای تولید گاز از مخزن اما ب دلیل مدت زمان کم تولید گاز، گازهای دیگر به چاه تولیدی نرسیده و در نتیجه تولید نمی‌شوند. از طرفی روند شکل ۵-الف نشان می‌دهد که با افزایش بیش از حد مدت زمان برداشت از مخزن، ب دلیل کاهش نرخ برداشت هیدروژن از مخزن، باز هم گازهای متان و دی‌اکسیدکربن دیرتر به محل چاه رسیده و این امر موجب افزایش خلوص هیدروژن تولیدی می‌شود. به همین دلیل است که خلوص هیدروژن برداشت‌شده در حالتی که ۶ ماه برداشت صورت می‌گیرد، از مدلی که در آن ۵ ماه برداشت صورت می‌گیرد بیشتر است.

از طرفی شکل ۵-ب نشان می‌دهد که با افزایش مدت زمان برداشت از مخزن ضریب بازیافت هیدروژن افزایش پیدا می‌کند. با وجود نرخ بسیار بالا

در مدل‌های دارای دوره‌ی برداشت کوتاه مدت به‌دلیل زمان بسیار کوتاه برداشت هیدروژن، بخش بسیار زیادی از این گاز درون مخزن باقی می‌ماند و تولید نمی‌شود که این امر موجب کاهش ضریب بازیافت هیدروژن در این مدل‌ها می‌شود.

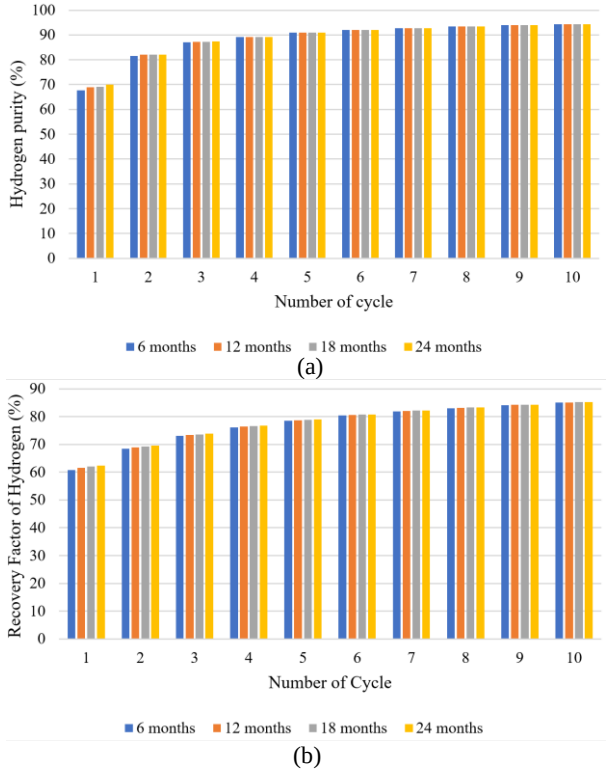


شکل ۵ تأثیر مدت زمان تزریق و تولید گاز هیدورژن در طول یک دوره ذخیره‌سازی بر روی الف) میزان خلوص هیدروژن ب) ضریب بازیافت هیدروژن

Figure 5 The effect of the duration of hydrogen gas injection and production during a storage period on (a) hydrogen purity and (b) hydrogen recovery factor

۳-۳ تأثیر مدت زمان تزریق گاز پایه

نتایج به‌دست آمده در شکل ۶ نشان میدهد با افزایش مدت زمان تزریق گاز پایه به مخزن، میزان ضریب بازیافت و خلوص هیدروژن افزایش پیدا می‌کند. اولین دلیل این امر جدایش ثقلی ناشی از اختلاف چگالی گازها است. با تزریق گاز به‌صورت طولانی‌مدت، گاز پایه فرصت انتقال یافتن به مناطق پایین مخزن را به‌دست می‌آورد و این به معنی دور شدن این گاز از نواحی اطراف چاه است. این امر به افزایش خلوص و ضریب بازیافت هیدروژن کمک می‌کند. علاوه بر این به‌دلیل حرکت سیال، بخش اعظمی از گاز پایه‌ی تزریق‌شده به مخزن به نواحی دورتر از چاه منتقل می‌شود که این نیز اولاً موجب کاهش برخورد گاز هیدروژن با گاز پایه شده و ثانیاً موجب کاهش حضور گاز پایه درون گاز تولیدی از مخزن می‌شود.

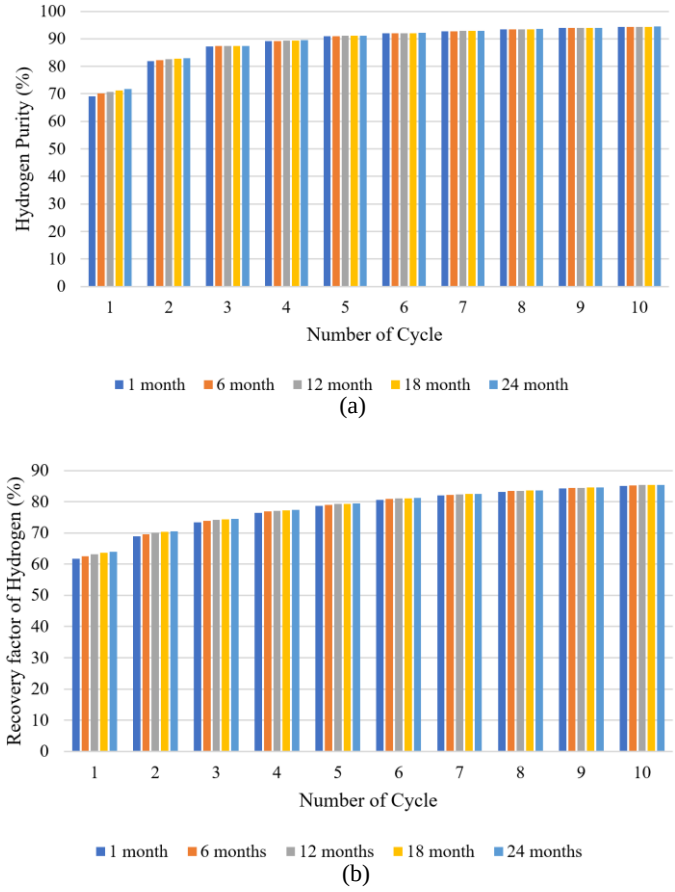


شکل ۶ تأثیر مدت زمان تزریق (نرخ تزریق) گاز پایه به مخزن پیش از شروع فرایند ذخیره‌سازی گاز هیدروژن بر روی الف) خلوص هیدروژن تولیدی و ب) ضریب بازیافت هیدروژن تولیدی از مخزن

Figure 6 The effect of the injection duration (injection rate) of the cushion gas into the reservoir before starting the hydrogen gas storage process on (a) the purity of the produced hydrogen and (b) the recovery factor of the hydrogen produced from the reservoir

۴-۳ تأثیر مدت زمان ماند گاز پایه پیش از ذخیره‌سازی گاز هیدروژن

نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۷ نشان می‌دهد با افزایش مدت زمان خیس‌خوردن (Soak Time) (بازه‌ی زمانی میان پایان تزریق گاز پایه و شروع تزریق گاز هیدروژن) میزان خلوص و ضریب بازیافت هیدروژن افزایش می‌یابد. از دلایل این امر می‌توان به دو مورد اشاره کرد؛ اولاً فاصله‌ی زمانی بیشتر میان تزریق گاز پایه و گاز اصلی این امکان را به گاز دی‌اکسید کربن به‌عنوان گاز پایه می‌دهد تا به بخش‌های دورتر از ناحیه‌ی تولیدی چاه‌ها انتقال پیدا کند که این امر موجب جدایش دو گاز هیدروژن و گاز پایه شده و ناحیه‌ی اختلاط دو گاز کم می‌شود. این موضوع موجب کاهش احتمال حضور گاز پایه و سایر گازهای موجود در مخزن در درون گاز تولیدی می‌شود و در نتیجه میزان خلوص هیدروژن افزایش پیدا می‌کند. ثانیاً با انتقال سیال سنگین‌تر با گرانروی بیشتر یعنی گاز دی‌اکسیدکربن به بخش‌های پایین مخزن و جایگزین‌شدن گاز متان با آن در طول دوران بسته بودن چاه‌ها، امکان برخورد گاز هیدروژن با سیال سنگین‌تر کاهش یافته و در نتیجه‌ی کاهش گرانروی سیال، جریان تولید آن راحت‌تر خواهد بود و در نتیجه ضریب بازیافت نهایی آن افزایش می‌یابد.

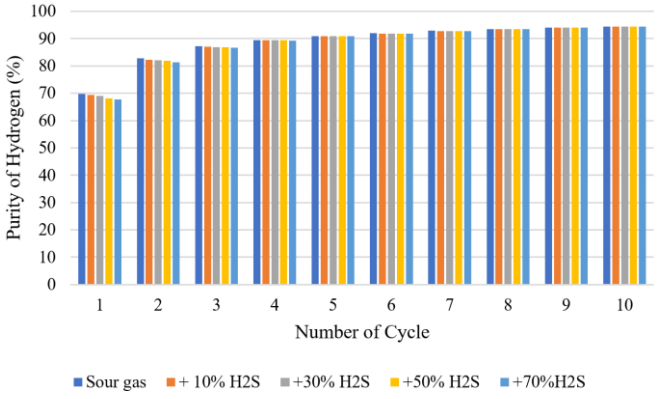


شکل ۷ تأثیر وقفه زمانی میان تزریق گاز پایه و شروع ذخیره‌سازی هیدروژن بر روی الف) خلوص هیدروژن برداشت‌شده و ب) ضریب بازیافت نهایی هیدروژن

Figure 7 The effect of the time interval between the injection of cushion gas and the start of hydrogen storage on (a) the purity of the withdrawn hydrogen and (b) the recovery factor of the hydrogen

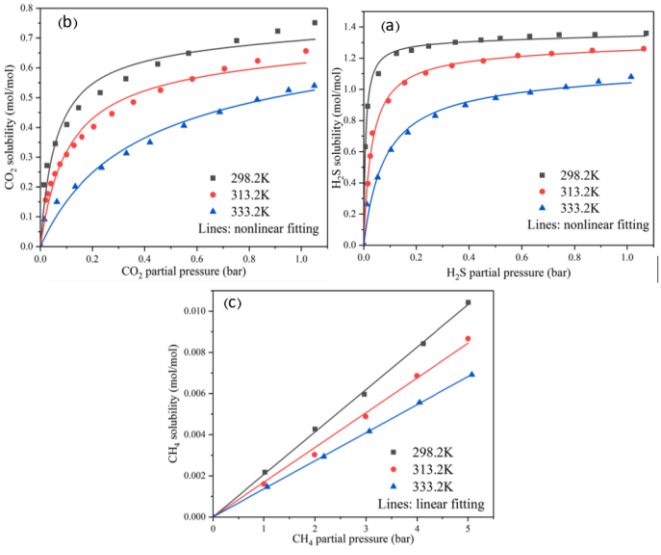
۳-۵ تزریق گاز ترش به‌عنوان گاز پایه به مخزن

نتایج به‌دست آمده در شکل ۸ نشان می‌دهد با افزایش سهم سولفیدهیدروژن درون گاز پایه، میزان خلوص هیدروژن کاهش می‌یابد. همان‌طور که مطالعات پیشین نیز بیان کرده‌اند یکی از عوامل اختلاط گاز هیدروژن با گاز پایه و سایر گازهای درون مخزن اختلاف میان گرانروی گازها است که موجب افزایش نسبت تحرک‌پذیری (Mobility Ratio) و در نتیجه بروز پدیده‌ی انگشتی‌شدن گاز (Gas Fingering) می‌شود [۲۲]. از طرفی مطالعه‌ی ووگل [۲۳] نشان می‌دهد در دماهای مختلف ویسکوزیته‌ی گاز سولفیدهیدروژن از گاز متان بیشتر است در نتیجه احتمال رخ‌دادن پدیده‌ی انگشتی‌شدن زمانی که گاز پایه حاوی مقادیر بیشتری از جزء سولفیدهیدروژن است نسبت به زمانی که گاز متان سهم بیشتری از این گاز را دارد، افزایش می‌یابد. علاوه بر این همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، میزان حلالیت گاز سولفیدهیدروژن نسبت به دو گاز دی‌اکسیدکربن و متان (دو جزء اساسی دیگر گاز ترش) بسیار بیشتر است. حل شدن گاز درون آب نواحی اطراف چاه موجب می‌شود تا حجم بیشتری از این گاز در آن منطقه باقی بماند. از سوی دیگر در هنگام تولید و با کاهش فشار ناشی از تولید، این گاز از آب خارج شده و به‌دلیل نزدیکی به نواحی تولیدی چاه همراه با گاز هیدروژن از مخزن تولید می‌شود و خلوص هیدروژن برداشت‌شده از مخزن را کاهش می‌دهد که این موضوع توسط مطالعه‌ی امیری و همکاران [۲۴] نیز تأیید شده است.



شکل ۸ تأثیر گاز H_2S بر خلوص هیدروژن برداشت‌شده از مخزن

Figure 8 The effect of H_2S gas on the purity of hydrogen withdrawn from the reservoir



شکل ۹ حلالیت گازهای الف) H_2S ، ب) CO_2 و پ) CH_4 در آب [۲۵]

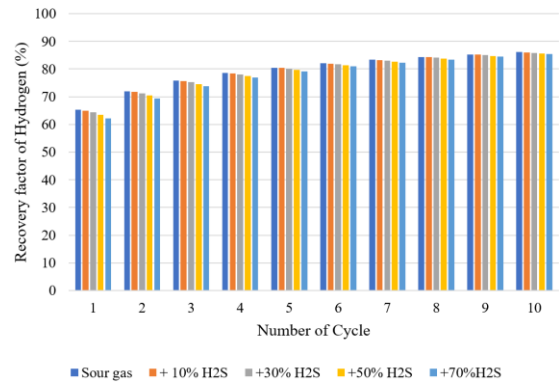
Figure 9 Solubility of (a) H_2S, (b) CO_2, and (c) CH_4 gases in water [25]

همچنین نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۱۰ نشان می‌دهد با افزایش سهم گاز H_2S، میزان ضریب بازیافت مخزن کاهش پیدا می‌کند؛ همان‌طور که پیش از نیز بیان شد مهم‌ترین عامل تولید سیال درون مخزن، اختلاف فشار مخزن با فشار دهانه چاه است. نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۱۱ نشان می‌دهد افزایش سهم گاز H_2S درون گاز پایه‌ی تزریق‌شده به مخزن موجب می‌شود تا فشار مخزن پس از تزریق این گاز به میزان کمتری نسبت به سایر حالت‌ها افزایش یابد. یکی از دلایل این امر می‌تواند اختلاف چگالی گاز H_2S با سایر

اجزای تشکیل‌دهنده‌ی گاز پایه باشد. با افزایش سهم گاز H_2S و در نتیجه کاهش اجزای سبک‌تر مانند متان، با توجه به رابطه‌ی ۷ و رابطه‌ی ۸ میزان چگالی گاز پایه افزایش پیدا می‌کند. در این روابط به‌ترتیب M_a ، y_i، M_i، ρ_g، P، T و R نشان‌دهنده‌ی وزن مولکولی ظاهری ترکیب گازی، کسر مولی هر جزء در ترکیب گاز، وزن مولکولی هر جزء ترکیب، چگالی گاز، فشار، دما و ثابت جهانی گازها است. در نتیجه با کاهش چگالی گاز پایه، این گاز درون مخزن حجم کمتری اشغال کرده و این امر موجب می‌شود تا فشار مخزن نسبت به سایر موارد که جزء H_2S سهم کمتری در گاز پایه دارد در زمان شروع ذخیره سازی گاز کمتر باشد.

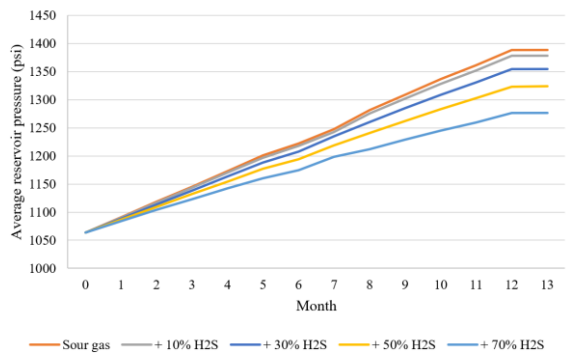
$$M_a = \sum y_i M_i \quad (۷)$$

$$\rho_g = \frac{pM_a}{RT} \quad (۸)$$



شکل ۱۰ تأثیر گاز سولفیدهیدروژن بر ضریب بازیافت هیدروژن

Figure 10 The effect of hydrogen sulfide gas on the hydrogen recovery factor



شکل ۱۱ تأثیر سهم گاز سولفیدهیدروژن در گاز پایه بر فشار مخزن

Figure 11 The effect of the contribution of hydrogen sulfide gas in the base gas on the reservoir pressure.

۴ نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش بررسی پارامترهای عملیاتی اثر گذار بر روی تزریق گاز دی‌اکسیدکربن و گاز ترش به‌عنوان گاز پایه در فرایند ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز هیدروژن است. نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش به شرح زیر است.

- با افزایش نرخ تزریق و تولید گاز هیدروژن میزان خلوص و ضریب بازیافت هیدروژن برداشت‌شده از مخزن افزایش می‌یابد.
- با کاهش دوران تزریق و در نتیجه افزایش دوره‌ی برداشت گاز هیدروژن از مخزن، خلوص این گاز کاهش یافته و ضریب بازیافت آن افزایش می‌یابد. این روند تا زمانی ادامه دارد که مدت زمان برداشت هیدروژن از مخزن از مدت زمان تزریق آن در یک دوره (یک سال) بیشتر نشود.
- با افزایش دوره‌ی تزریق گاز پایه به مخزن و همچنین با افزایش فاصله‌ی زمانی میان تزریق گاز پایه و شروع فرایند ذخیره‌سازی گاز هیدروژن درون مخزن به‌دلیل وجود فرصت کافی به‌منظور انتقال گاز پایه به مناطق دور از چاه، خلوص و ضریب بازیافت هیدروژن برداشت‌شده از مخزن افزایش پیدا می‌کند.
- با افزایش بیش از ٪۷۰ سهم گاز H_2S درون ترکیب گاز پایه، خلوص و ضریب بازیافت نهایی هیدروژن برداشت‌شده از مخزن به‌ترتیب با کاهش ۲ و ۳ درصدی مواجه می‌شوند که این امر امکان ترسیب و استفاده از گازهای خطرناک دارای حجم بسیار زیادی H_2S را تحت عنوان گاز پایه تأیید می‌کند.

دستاوردهای این پژوهش علاوه بر تأیید مطالعات صورت‌گرفته به‌منظور تأثیرات مثبت تزریق گاز پایه برای افزایش ضریب بازیافت هیدروژن ذخیره‌شده درون مخازن زیرزمینی، نشان داد در صورت نیاز می‌توان گازهای خطرناک همچون گاز ترش را که بسیار برای محیط‌زیست و زندگی جانداران خطرناک است، به درون زمین تزریق کرده تا علاوه بر ارتقای میزان ضریب بازیافت هیدروژن ذخیره‌شده، این گاز خطرناک را ترسیب نموده و از انتشار آن در سطح زمین جلوگیری کرد.

۵ تشکر و قدردانی

این پروژه با حمایت و پشتیبانی اداره پژوهش و فناوری شرکت مهندسی و توسعه نفت ایران انجام شده است.

مراجع

1. Tarkowski, R., Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 105, 86-94, 2019.
2. Seo, S.-K., Yun, D.-Y. , and Lee, C.-J., Design and optimization of a hydrogen supply chain using a centralized storage model, *Applied energy,* 262, 114452, 2020.
3. Bai, M., Song, K., Sun, Y., He, M., Li, Y. , and Sun, J., An overview of hydrogen underground storage technology and prospects in China, *Journal of Petroleum Science and Engineering,* 124, 132-136, 2014.
4. Crotogino, F., Donadei, S., Bünger, U. , and Landinger, H., Large-Scale Hydrogen Underground Storage for Securing Future Energy Supplies, *In 18th World hydrogen energy conference,* 78, 37-45, 2010.
5. Zivar, D., Kumar, S. , and Foroozesh, J., Underground hydrogen storage: A comprehensive review, *International journal of hydrogen energy,* 46, 23436-23462, 2021.
6. Muhammed, N.S., Haq, M.B., Al Shehri, D.A., Al-Ahmed, A., Rahman, M.M., Zaman, E. , and Iglauer, S., Hydrogen storage in depleted gas reservoirs: A comprehensive review, *Fuel,* 337, 127032, 2023.
7. Shin, C. and Lee, J., A numerical study on the compositional variation and the validity of conversion of a gas condensate reservoir into underground storage, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects,* 33, 1921-1932, 2011.
8. Ramsari, M., Jafari, A., Namdar, H. , and Khoozan, D., Evaluating the role of cushion gas in underground hydrogen storage: Impacts of wells and reservoir parameters, *International Journal of Hydrogen Energy,* 100, 1338-1352, 2025.
9. Namdar, H., Khodapanah, E. , and Tabatabaei-Nejad, S.A., Comparison of base gas replacement using nitrogen, flue gas and air during underground natural gas storage in a depleted gas reservoir, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects,* 42, 2778-2793, 2020.
10. Muhammed, N.S., Haq, B. , and Al Shehri, D., Role of methane as a cushion gas for hydrogen storage in depleted gas reservoirs, *International Journal of Hydrogen Energy,* 48, 29663-29681, 2023.
11. Zhao, Q., Wang, Y. , and Chen, C., Numerical simulation of the impact of different cushion gases on underground hydrogen storage in aquifers based on an experimentally-benchmarked equation-of-state, *International Journal of Hydrogen Energy,* 50, 495-511, 2024.
12. Saeed, M. and Jadhawar, P., Optimizing underground hydrogen storage in aquifers: The impact of cushion gas type, *International Journal of Hydrogen Energy,* 52, 1537-1549, 2024.
13. Kanaani, M., Sedaee, B. , and Asadian-Pakfar, M., Role of cushion gas on underground hydrogen storage in depleted oil reservoirs, *Journal of Energy Storage,* 45, 103783, 2022.
14. Lysyy, M., Fernø, M. , and Ersland, G., Seasonal hydrogen storage in a depleted oil and gas field, *International Journal of Hydrogen Energy,* 46, 25160-25174, 2021.
15. Zamehrian, M. and Sedaee, B., Underground hydrogen storage in a partially depleted gas condensate reservoir: influence of cushion gas, *Journal of Petroleum Science and Engineering,* 212, 110304, 2022.
16. Peng, D.-y. and Robinson, D., New Two-Constant Equation of State, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals,* 15, 59-64, 1976.
17. Twu, C.H., An internally consistent correlation for predicting the critical properties and molecular weights of petroleum and coal-tar liquids, *Fluid Phase Equilibria,* 16, 137-150, 1984.
18. Buenrostro-Gonzalez, E., Lira-Galeana, C., Gil-Villegas, A. , and Wu, J., Asphaltene precipitation in crude oils: Theory and experiments, *AIChE Journal,* 50, 2552-2570, 2004.
19. Poling, B.E., Prausnitz, J.M. , and O'connell, J.P. *The properties of gases and liquids*. Vol. 5: Mcgraw-hill New York, 2001.
20. Sander, R., Compilation of Henry's law constants (Version 4.0) for water as solvent, *Atmospheric Chemistry and Physics,* 15, 4399-4981, 2015.
21. Nejat, T., Movasati, A., Wood, D.A. , and Ghanbarabadi, H., Simulated exergy and energy performance comparison of physical–chemical and chemical solvents in a sour gas treatment plant, *Chemical Engineering Research and Design,* 133, 40-54, 2018.
22. Shoushtari, S., Namdar, H. , and Jafari, A., Utilization of CO2 and N2 as cushion gas in underground gas storage process: A review, *Journal of Energy Storage,* 67, 107596, 2023.
23. Vogel, E., Reference Viscosities of Gaseous Methane and Hydrogen Sulfide at Low Density in the Temperature Range from (292 to 682) K, *Journal of Chemical & Engineering Data,* 56, 3265-3272, 2011.
24. Amiri, I.I., Zivar, D., Ayatollahi, S. , and Mahani, H., The effect of gas solubility on the selection of cushion gas for underground hydrogen storage in aquifers, *Journal of Energy Storage,* 80, 110264, 2024.
25. Xiong, W., Shi, M., Peng, L., Zhang, X., Hu, X. , and Wu, Y., Low viscosity superbase protic ionic liquids for the highly efficient simultaneous removal of H2S and CO2 from CH4, *Separation and Purification Technology,* 263, 118417, 2021.