



# IJGE<sup>®</sup>

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

نشریه  
مهندسی گاز  
ایران

سال دوازدهم / شماره ۱ / جلد ۲۱

تابستان ۱۴۰۴

EISSN:25885-5251



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

صاحب امتیاز: انجمن مهندسی گاز ایران  
مدیر مسئول: دکتر محمدرضا امیدخواه  
سردبیر: دکتر مرتضی زیودار  
دبیر تخصصی: دکتر مهدی رضوی فر  
ویراستاری: ناهید امینی  
صفحه آرایی: مهندس حمیدرضا کریمی  
شماره شاپا: ۵۲۵۱-۲۵۸۸



## هیأت تحریریه:

دکتر امیرحسین محمدی (دانشگاه کوازولو-ناتال، آفریقای جنوبی)  
دکتر غلامرضا وکیلی تژاد (دانشگاه سلطان قابوس، عمان)  
دکتر علی وطنی (دانشگاه تهران)  
دکتر رضا مسیبی بهبهانی (دانشگاه صنعت نفت)  
دکتر وحید نقی‌خانی (دانشگاه صنعتی شریف)  
دکتر سید علیرضا طباطبائی تژاد (دانشگاه صنعتی سهند)  
دکتر رهبر رحیمی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)  
دکتر سید حسام نجیبی (دانشگاه صنعت نفت)  
دکتر ابوالقاسم امام زاده (دانشگاه آزاد - واحد علوم تحقیقات تهران)  
دکتر مسعود آقاجانی (دانشگاه صنعت نفت)  
دکتر محمدرضا احسانی (دانشگاه صنعتی اصفهان)  
دکتر علیمیراد رشیدی (پژوهشگاه صنعت نفت)  
دکتر سید رضا شادی زاده (دانشگاه صنعت نفت)  
دکتر محسن مسیحی (دانشگاه صنعتی شریف)  
دکتر منصور فرزام (دانشگاه صنعت نفت)  
دکتر محمدرضا خسروی نیکو (دانشگاه صنعت نفت)  
دکتر عبدالنسی هاشمی (دانشگاه صنعت نفت)  
دکتر هوشنگ جزایری راد (دانشگاه صنعت نفت)

## نشانی انجمن مهندسی گاز ایران

تهران / خیابان سپهد قرن / نبش خیابان سپند / پلاک ۱۹۶  
کدپستی: ۱۵۹۸۹-۹۵۷۱۲

پست الکترونیکی نشریه

ijge.igi@gmail.com

برای ارسال مقالات به سایت نشریه مهندسی گاز ایران  
به نشانی (www.ijge.irangi.org) مراجعه فرمایید.



### اعضاء هیئت داوران نشریه شماره ۲۱

- دکتر علی وطنی (دانشگاه تهران)  
دکتر مسعود آقاجانی (دانشگاه صنعت نفت)  
دکتر مسعود بیژنی (دانشگاه گرمسار)  
دکتر مهدی رضوی فر (دانشگاه تبریز)  
دکتر آراد کیانی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)  
دکتر محمدحسین مابری (دانشگاه سمنان)  
دکتر رضا مسیبی بهبهانی (دانشگاه صنعت نفت)  
دکتر بهاره بیدار (دانشگاه سیستان و بلوچستان)  
دکتر محمد رضا امیدخواه (دانشگاه تربیت مدرس)  
دکتر مجتبی ساعدی مقدم (دانشگاه صنعتی قوچان)  
دکتر مرتضی زیودار (دانشگاه سیستان و بلوچستان)  
دکتر غلامرضا وکیلی نژاد (دانشگاه سلطان قابوس، عمان)  
دکتر وحیده یوسفی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)  
دکتر محمد رضا خسروی نیکو (دانشگاه صنعت نفت)  
دکتر مسعود درفشان (دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان)  
مهندس سپیده امیری توسلی (شرکت گاز استان هرمزگان)  
دکتر حمید مقدم دیمه (دانشگاه سیستان و بلوچستان)  
دکتر مستانه حاجی‌پور (دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات)  
دکتر میر محمد خلیلی پور لنگرودی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)  
دکتر امیرحسین محمدی (دانشگاه کوازولو-ناتال، آفریقای جنوبی)  
دکتر محمد رضا سردشتی بیرجندی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)  
دکتر زهره خلیفات

## فهرست مطالب

۶	<b>سرمقاله</b> نقش ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن در تأمین انرژی پایدار کشور مهدی رضوی فر
	<b>مقالات</b>
۸	بررسی مکانیزم و علل تخریب محل نشستی خط لوله مدفون خروجی ایستگاه تقلیل فشار گاز مجتبی سلطانیپور، ابراهیم محسنی هماگرانی، فرزاد عباسیان، میثم رسولی
۱۸	ارائه مدل نیمه تجربی برای دانسیته مایع هیدروکربن‌های سنگین در محدوده فشار و دماهای مشخص میرحسین عودی، صالحه علامی، یگانه داودبیگی
۳۰	مروری بر نانو کامپوزیت‌های چارچوب فلز-آلی و کاربرد آن در ذخیره‌سازی گاز محمد رضا عبدی، ناهید سرلک، محمدحسین مهرآراد، مهرناز شهرآیینی
۵۴	کاربرد یادگیری ماشین در پیش‌بینی و مدیریت تولید ماسه در چاه‌های نفت و گاز - مطالعه‌ی مروری محمد الیاس خدانشناس، میثم محمدزاده شیرازی، بهنام شاهسونی
۷۰	مقایسه فرآیندهای تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای و چشم‌انداز آینده آن‌ها در ایران سبحان حرفت، میلاد پیرهادی، مجید چگنی، مجید زندی
۹۱	مروری بر ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> در ساختارهای زیرزمینی: پیشرفت‌ها، چالش‌ها و چشم‌اندازها حسین حیدری، مهدی رضوی فر
۱۱۶	راهنمای نگارش مقالات در نشریه علمی مهندسی گاز ایران





## سر مقاله

دکتر مهدی رضوی فر

عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی شیمی و نفت  
دانشگاه تبریز

## نقش ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن در تأمین انرژی پایدار کشور

هیدروژن مورد استفاده قرار می‌گیرند که هر یک مزایا و ملاحظات خاص خود را دارند. مخازن تخلیه‌شده نفت و گاز به دلیل زیرساخت‌های موجود و شناخت زمین‌شناسی نسبتاً خوب، گزینه‌ای سریع‌الوصول و اقتصادی محسوب می‌شوند. سفره‌های آب‌شور عمیق نیز که حاوی آب‌شور غیرقابل شرب هستند، پتانسیل ذخیره‌سازی حجم بسیار بالایی از گاز را دارا بوده و در عین حال نیازمند مطالعات زمین‌شناسی دقیق‌تر و ارزیابی واکنش‌های شیمیایی احتمالی هیدروژن با سنگ و سیالات موجود در محیط متخلخل سنگ می‌باشند. در این میان، گنبد‌های نمکی<sup>۱</sup> که با انحلال کنترل‌شده لایه‌های نمک ایجاد می‌شوند، به دلیل نفوذناپذیری بالای نمک، امکان ذخیره‌سازی ایمن هیدروژن با حداقل اتلاف و قابلیت پاسخ‌گویی سریع به تغییرات تقاضا را فراهم می‌کنند. برای مدیریت و پایش این ساختارهای زیرزمینی، می‌توان از فناوری‌های نوین هوش مصنوعی بهره گرفت. الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین با تحلیل حجم عظیمی از داده‌های لرزه‌نگاری، چاه‌نگاری، فشار و دما، قادر به مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار مخزن، تشخیص نشت‌های احتمالی در مراحل اولیه، بهینه‌سازی عملیات تزریق و برداشت، و ارزیابی ریسک‌های مرتبط با واکنش‌های میکروبی یا

گذار به سوی منابع انرژی پاک و پایدار، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن حاضر به شمار می‌رود. در این میان، هیدروژن سبز، که از منابع تجدیدپذیر مانند باد و خورشید تولید می‌شود، به‌عنوان یک حامل انرژی امیدبخش برای کربن‌زدایی شناخته شده است. با این حال، یکی از چالش اصلی در بهره‌برداری گسترده از هیدروژن، ذخیره‌سازی ایمن، مقرون‌به‌صرفه و در مقیاس بزرگ آن است. در این راستا، ذخیره‌سازی هیدروژن در ساختارهای زیرزمینی<sup>۱</sup> به‌عنوان راه‌حل کلیدی و استراتژیک برای تضمین امنیت و پایداری انرژی مطرح می‌شود.

ایران با برخورداری از پتانسیل‌های زمین‌شناسی مناسب، از جمله مخازن تخلیه‌شده نفت و گاز، سفره‌های آب‌شور عمیق<sup>۲</sup> و سازندهای نمکی<sup>۳</sup> فرصتی استثنایی برای توسعه این فناوری پیشرفته در اختیار دارد. توسعه این ظرفیت نه تنها امکان ذخیره‌سازی حجم انبوهی از هیدروژن تولیدی در زمان‌های مازاد تولید انرژی را فراهم می‌کند، بلکه به‌عنوان یک منبع انعطاف‌پذیر، تضمین‌کننده تأمین پایدار انرژی در زمان اوج مصرف یا کاهش موقت تولیدات انرژی تجدیدپذیر خواهد بود. انواع مختلفی از ساختارهای زیرزمینی برای ذخیره

1. Underground Hydrogen Storage (UHS)
2. Aquifers
3. Salt Caverns
4. Salt Dome



شیمیایی هیدروژن خواهد بود.

چشم‌انداز آینده ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن در جهان و به‌ویژه برای کشور ما، بسیار روشن و حیاتی است. با شتاب‌گرفتن تولید هیدروژن سبز در مقیاس جهانی، نیاز به راه‌حل‌های ذخیره‌سازی مقیاس‌پذیر و اقتصادی بیش از پیش احساس می‌شود. کشورهای پیشرو در اروپا (مانند انگلیس، آلمان، هلند) و آمریکای شمالی در حال اجرای پروژه‌های پایلوت و تجاری‌سازی این فناوری هستند.

برای ایران، توسعه ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن، نه تنها یک گزینه، بلکه یک ضرورت استراتژیک به‌شمار می‌آید. این اقدام می‌تواند کشور را به یک قطب منطقه‌ای در زنجیره ارزش هیدروژن سبز تبدیل کند، امنیت انرژی را با ایجاد یک حامل انرژی پاک تقویت نماید، از زیرساخت‌های موجود نفت و گاز در دوران گذار انرژی بهره‌مند شود و سهم قابل توجهی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تحقق تعهدات زیست‌محیطی داشته ایفا نماید.

سرمایه‌گذاری در پژوهش‌های کاربردی، توسعه فناوری‌های پیشرفته پایش مبتنی بر هوش مصنوعی، تدوین چارچوب‌های نظارتی مناسب و جذب مشارکت بخش خصوصی و بین‌المللی، ارکان اصلی موفقیت در بهره‌برداری از این پتانسیل عظیم زیرزمینی برای تضمین آینده‌ای پایدار برای کشور خواهند بود.

آدرس پست الکترونیکی: [m.razavifar@tabrizu.ac.ir](mailto:m.razavifar@tabrizu.ac.ir)



# بررسی مکانیزم و علل تخریب محل نشتی خط لوله مدفون خروجی ایستگاه تقلیل فشار گاز

مجتبی سلطانیپور<sup>۱</sup>، ابراهیم محسنی هماگرانی<sup>۲</sup>، فرزاد عباسیان<sup>۱</sup>، میثم رسولی<sup>۱</sup>

۱. واحد بازرسی فنی، شرکت گاز استان اصفهان، اصفهان، ایران

۲. مدیرعامل، شرکت گاز استان اصفهان، اصفهان، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: [mojtaba\\_sol@yahoo.com](mailto:mojtaba_sol@yahoo.com)

مقاله علمی-کاربردی

صفحه ۸ - ۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

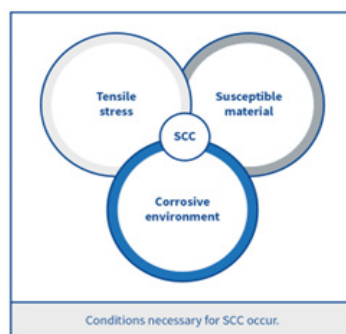
## چکیده

ایستگاه‌های تقلیل فشار، نقش کلیدی در توزیع گاز طبیعی به صنایع و مشترکان خانگی ایفا می‌کنند. بروز نشتی در خطوط لوله این ایستگاه‌ها علاوه بر ایجاد خطر انفجار، می‌تواند منجر به قطع گاز در مناطق پایین‌دست شود. با توجه به اهمیت موضوع در این پژوهش، نشتی مشاهده شده در خط لوله ۶ اینچ مدفون در خاک، در خروجی یکی از ایستگاه‌های تقلیل فشار متعلق به شرکت گاز استان اصفهان مورد بررسی قرار گرفته است. پس از جداسازی ناحیه معیوب و بررسی چشمی، آزمایش‌های متالوگرافی، آنالیز شیمیایی، سختی‌سنجی و کشش بر روی نمونه انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها، همراه با بررسی سوابق لوله و مشخصات خاک اطراف، نشان داد که دو مکانیزم خوردگی شیاری و خوردگی توأم با تنش همراه با خوردگی سوابق لوله و مشخصات خاک اطراف، نشان داد که دو مکانیزم خوردگی شیاری و خوردگی توأم با تنش (Stress Corrosion Cracking - SCC) در فرآیند تخریب نقش داشته‌اند. در نهایت، مکانیزم خوردگی توأم با تنش منجر به ایجاد ترک و عامل اصلی نشتی در لوله شده است. وجود تنش کششی در لوله و حضور محیط خورنده، شرایط لازم برای وقوع SCC را فراهم کرده و با جوانه‌زنی و رشد ترک، نشتی به وقوع پیوسته است.

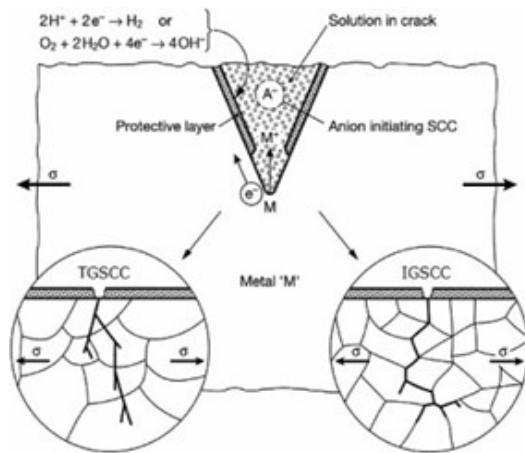
کلیدواژه‌ها: لوله، خوردگی شیاری، خوردگی توأم با تنش، نشتی، ترک

## ۱. مقدمه

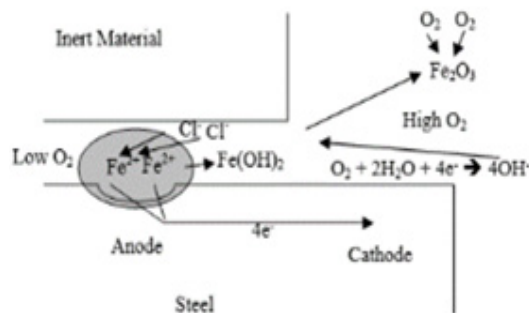
ترک خوردگی توأم با تنش (SCC) نوعی از ترک در فلز است که به دلیل اثر ترکیبی خوردگی و تنش کششی رخ می‌دهد [۱]. مطابق شکل این نوع خوردگی در اثر وجود توأم محیط خورنده، فلز مستعد به خوردگی و تنش کششی اتفاق می‌افتد.



شکل ۱: شماتیک شرایط لازم برای خوردگی [۲]



شکل ۲: شماتیک جوانه‌زنی و رشد خوردگی SCC [۵]



شکل ۳: شماتیک مکانیزم خوردگی شیاری [۸]

با توجه به خسارات خوردگی توأم با تنش، بررسی آن از اهمیت بالایی برخوردار است. برای نمونه در سال ۲۰۰۱، بخشی از خط لوله Trans-Alaska به دلیل SCC ترک خورد و باعث شکست و گسیختگی یک بخش ۳۴ فوتی از خط لوله شد که منجر به نشت بیش از ۲۸۵۰۰۰ گالن نفت خام گردید [۹]. همچنین در سال ۲۰۰۹، یک اتوکلاو کوارتز ۵۰ فوتی در کارخانه‌ای در Belvidere، ایلینویز به دلیل SCC به شدت پاره شد و این حادثه یک کشته و یک مجروح بر جای گذاشت [۱۰].

## ۲. روش تحقیق

شرایط عملیاتی و متریال لوله مورد تحقیق در (جدول ۱) آمده است. پس از برشکاری لوله و جداسازی نمونه ترک خورده مطابق (شکل ۴) اقدام به انجام آزمایشات مختلف به شرح ذیل بر روی نمونه لوله مورد نظر گردید تا بتوان مکانیزم تخریب محل نشستی را تعیین نمود.

ترک‌های SCC شبیه به ترک‌هایی که در شکست ترد ایجاد می‌شوند، می‌باشند. ترک‌های SCC به دو شکل بین‌دانه‌ای و مرزدانه‌ای رشد می‌کنند که ترک‌های بین‌دانه‌ای از داخل دانه‌ها و ترک‌های مرزدانه‌ای از مرز دانه‌ها عبور می‌کنند. نوع ترک ایجادشده به محیط خورنده و ساختار فلز بستگی دارد. از آنجا که مرز دانه‌ها جزو نواحی پراثری ریزساختار محسوب می‌شوند، معمولاً محل تجمع رسوبات بوده و در نتیجه ترک نیز تمایل دارد از این نواحی رشد کند. با این حال، مقدار pH محیط نیز در نوع و شکل ترک نقش مؤثری ایفا می‌کند [۳].

مکانیزم‌های متفاوتی برای خوردگی SCC وجود دارد اما مهم‌ترین آن‌ها مکانیزم حل شدن می‌باشد. این مکانیزم شامل جوانه‌زنی و رشد ترک می‌باشد که مرحله جوانه‌زنی توسط واکنش‌های حل شدن خوردگی اتفاق می‌افتد. این مکانیزم شامل مراحل زیر می‌باشد [۴]:

- ۱) حل شدن اولیه سطح فلز در اثر خوردگی و تشدید حل شدن در اثر تنش،
- ۲) تشکیل فیلم محصولات خوردگی در دیواره ترک و شکست آن در اثر تنش،
- ۳) نفوذ مجدد عوامل اکسید کننده به داخل ترک و خورده شدن نوک ترک،
- ۴) شکست فیلم غیرفعال و شکست مجدد آن در اثر تنش.

خوردگی موضعی شیاری نیز یکی از خوردگی‌های موضعی خطرناک می‌باشد که در خطوط لوله می‌تواند به دلیل پوشش نامناسب رخ دهد. این نوع خوردگی به دلیل نفوذ سیال خورنده یا رطوبت به روزنه‌ها و سطوحی مانند زیر واشرها، زیر رسوبات و شیارهای پیچ و مهره‌ها و ایجاد محیط مرده بوجود می‌آید [۶].

ابتدا واکنش اکسیداسیون و احیا مطابق (شکل ۳) به‌طور یکنواخت روی تمام سطح از جمله داخل شیار اتفاق می‌افتد. با تخلیه یا تمام شدن اکسیژن شیار و تشکیل پیل اختلاف دمشی اکسیژن داخل شیار خورده شده و بیرون محافظت می‌گردد. با تجمع یون‌های فلزی در داخل شیار و میل یون کلر جهت ترکیب با آن‌ها، یون‌های کلر به داخل شیار مهاجرت کرده و در حضور آب می‌تواند باعث تشکیل HCl شود و با ایجاد یک فرایند اتوکاتالیتیک سرعت پیشرفت خوردگی افزایش می‌یابد [۷].

جدول ۱: شرایط عملیاتی و متریال خط لوله مورد تحقیق

نوع لوله	نوع پوشش	عمق دفن (متر)	سال نصب خط	فشار لوله PSI	سایز لوله اینچ
API 5L Grade B	نوار دستی	۱/۷	۱۳۷۰	۶۰	۶

### ۳. نتایج

#### ۳-۱. مشاهدات چشمی

پس از بررسی چشمی لوله معیوب مطابق (شکل ۵) موارد زیر مشهود می‌باشد:

(۱) وجود نشستی به دلیل وجود ترک‌های عرضی ایجاد شده روی بدنه لوله بوده است.

(۲) ضخامت اطراف محل ترک روی لوله به صورت میانگین ۴/۴ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید.

(۳) خوردگی موضعی داخلی یا کاهش ضخامت محسوسی در لوله مورد بررسی مشاهده نگردید.

(۴) مطابق (شکل ۵) آثار خوردگی موضعی زیر پوشش به همراه تجمع محصولات خوردگی مشاهده گردید به نحوی که در محل قرار گرفتن لوله نوارها، شیارهایی روی سطح خارجی لوله به دلیل خوردگی ایجاد شده است. هم‌چنین در بسیاری از نواحی لوله، خوردگی باعث جدا شدن پوشش از سطح لوله گردیده است.



(ب)

(الف)

شکل ۵: تصاویر لوله خورده شده و محصولات خوردگی زیر پوشش

(۵) هم‌پوشانی نوارهای پوشش اجرا شده روی خط لوله در حدود ۲۵ درصد بوده است.

(۱) در ابتدا نمونه ترک به صورت چشمی مورد بررسی قرار گرفت و کلیه شواهد و مشاهدات بازرسی چشمی گزارش گردید.

(۲) آنالیز شیمیایی و تعیین ترکیب شیمیایی نمونه لوله مورد آزمایش مطابق استاندارد (ASTM E415(2021) Spark Atomic Emission Spectrometry [۱۱] به روش انجام پذیرفت.

(۳) آزمون کشش که پس از ساختن ۲ نمونه استاندارد از لوله مورد آزمایش مطابق استاندارد مرجع ISO 6892 [۱۲] انجام پذیرفت و نتایج به صورت میانگین گزارش گردید.

(۴) آزمون سختی سنجی به روش ویکرز بر روی سه جایگاه از نمونه مورد نظر مطابق استاندارد ملی ۱-۷۸۱۰ انجام گرفت و نتایج به صورت میانگین گزارش گردید.

(۵) آزمون متالوگرافی: پس از سنباده کاری و پولیش دو نمونه جدا شده از محل ترک و اطراف آن، با محلول نایتال ۲ درصد عملیات اچ کردن انجام شد و ریزساختار نمونه زیر میکروسکوپ نوری توسط نرم‌افزار آنالیز تصویری Clemex مورد بررسی قرار گرفت و با عکس‌های واقعی جمع‌آوری شده در تحقیق صورت گرفته توسط دولت فدرال آمریکا مقایسه و راستی آزمایی گردید [۱۳ و ۱۴].



شکل ۴: نمونه تمیزکاری شده از محصولات خوردگی جهت انجام آزمایشات و نمایش ترک اصلی منجر به نشستی

(۶) به منظور بررسی محیط خورنده، آنالیز خاک اطراف محل نشستی مطابق استاندارد ASTM C25 [۱۴] انجام گرفت.





شکل ۸: ناحیه تغییر فرم یافته انتهای محل برش

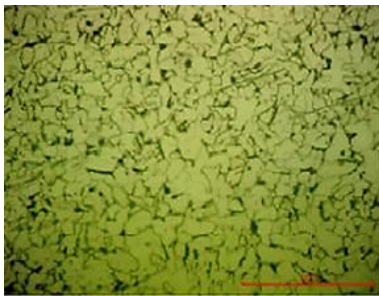


شکل ۶: هم پوشانی نوار پوشش اجرا شده

### ۲-۳. متالوگرافی

نتایج متالوگرافی از دو جایگاه نمونه ترک اصلی و ترک ثانویه که منجر به نشتی نشده است در (شکل های ۹، ۱۰ و ۱۱) قابل مشاهده می باشد. با توجه به ریزساختار نمونه و مقایسه با تصاویر ترک های SCC [۱۳ و ۱۴] موارد زیر مشهود می باشد:

- ۱) ساختار لوله شامل فریت و پرلیت می باشد و تغییر محسوسی در سایز یا شکل دانه بندی ریزساختار مشاهده نمی شود.
- ۲) فاز ثانویه یا ناخالصی مشهودی در ساختار وجود ندارد.
- ۳) ضخیم شدن مرز دانه به دلیل تجمع رسوبات روی مرز دانه ها در ساختار مشاهده نمی شود.
- ۴) اطراف محل ترک محصولات خوردگی مشاهده می شود که در دهانه ترک تجمع یافته است.
- ۵) در اطراف محل ترک، میکرو ترک های زیادی وجود دارد که هنوز به مرحله رشد نرسیده اند.



شکل ۹: اطراف محل ترک در بزرگنمایی ۵۰۰ و میکرو ترک های موجود در ساختار

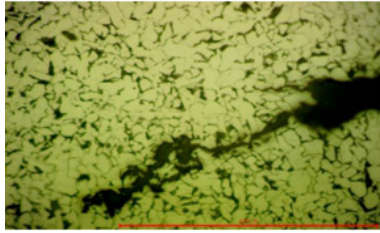
۶) مطابق (شکل ۷) ترک های دیگری نیز در اطراف محل نشتی مشاهده گردید که هنوز منجر به نشتی نشده بود.

۷) بررسی وضعیت ظاهری لوله بریده شده نشان می دهد که این قسمت از لوله خم غیر اصولی دارد و تحت تنش جوشکاری شده است. محل اصلی ترک ها نیز در مرکز خم لوله قابل مشاهده می باشد.



شکل ۷: ترک های مشاهده شده روی سطح لوله

۸) مطابق (شکل ۸) در مقطع برش لوله (در لوله مورد بررسی) مشخص است که ناحیه انتهایی برش با تغییر فرم پلاستیک همراه بوده و این گواهی بر تحت تنش بودن لوله می باشد.

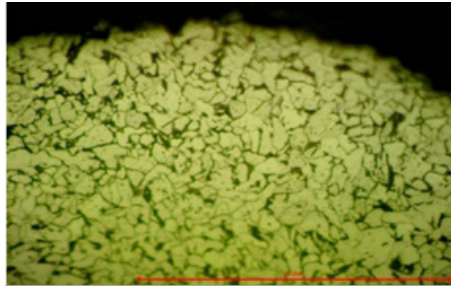


(ب)



(الف)

شکل ۱۰: نتایج متالوگرافی نمونه معیوب مربوط به ترک شماره یک منجر به نشستی: الف) بزرگنمایی ۲۰۰ برابر ب) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر



شکل ۱۱: نتایج متالوگرافی نمونه معیوب (ترک شماره دو)

### ۳-۳. سختی سنجی

درصد وزنی بوده که در نمونه ارسالی ۰/۰۱۶ درصد وزنی گزارش شده است لیکن با توجه به ریزساختار و نتایج آزمون کشش تأثیر چندانی روی استحکام و ریزساختار لوله نداشته است.

سختی سنجی ویکرز اطراف محل ترک در سه نمونه و در سه نقطه برای هر نمونه انجام شده است که نتایج به صورت میانگین مطابق (جدول ۲) می باشد.

جدول ۳: نتایج آزمون آنالیز شیمیایی نمونه

ترکیب شیمیایی (wt%)						
Cr	Ni	S	P	Si	Mn	C
۰/۰۱۸	۰/۰۱۵	۰/۰۱۶	۰/۰۱۳	۰/۰۶۳	۰/۷۵۱	۰/۱۲۲

جدول ۲: نتایج سختی سنجی ویکرز نمونه

نمونه	نقطه ۱	نقطه ۲	نقطه ۳	میانگین (HV)
۱	۱۳۵/۸	۱۳۷/۳	۱۳۸/۳	۱۳۷/۱
۲	۱۳۲/۵	۱۴۰	۱۵۲/۲	۱۴۱/۵
۳	۱۳۹/۳	۱۳۳/۳	۱۴۱	۱۳۷/۸
	میانگین کل			۱۳۷/۸

### ۳-۵. استحکام کششی

نتایج آزمون کشش بر روی دو نمونه لوله مطابق (جدول ۴) می باشد.

جدول ۴: نتایج آزمون کشش نمونه

نمونه	استحکام تسلیم MPa	استحکام کششی MPa
جوش طولی	۳۷۸/۸	۴۵۰/۲
بدنه لوله	۳۴۲/۸	۴۴۱/۸

با توجه به استاندارد ساخت لوله API-5L [۱۷] نتایج آزمون کشش (استحکام تسلیم و کششی) نمونه مورد آزمایش مورد تأیید می باشد و استحکام کششی و تسلیم لوله مورد آزمایش در محدوده قابل قبول قرار دارد.

با توجه به نتایج سختی سنجی، سختی لوله در اطراف محل ترک با استاندارد IGS-M-PL-001 [۱۶] مطابقت داشته و مورد تأیید می باشد.

### ۳-۴. آنالیز شیمیایی

نتایج آنالیز شیمیایی و تعیین ترکیب شیمیایی نمونه لوله مورد آزمایش مطابق (جدول ۳) می باشد.

با توجه به درصد ترکیب شیمیایی و مطابقت با استاندارد ساخت لوله (API 5L)، کلیه عناصر در محدوده مجاز قرار دارند و تنها عنصر گوگرد مجاز در لوله API-5L Grade B مقدار ۰/۰۱۵

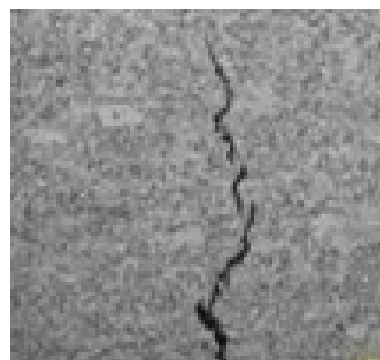
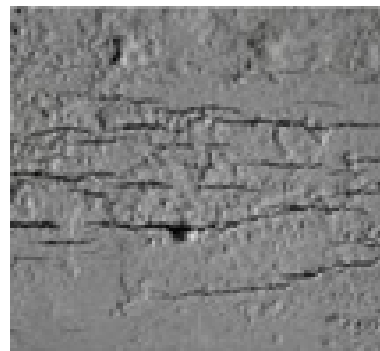
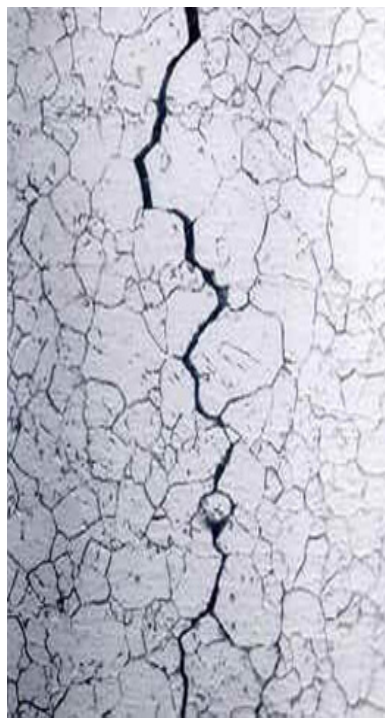
### ۳-۶. علل و مکانیزم تخریب

فرم پلاستیک ایجاد شده در لوله، تنش اعمالی از تنش تسلیم بیشتر بوده و از نظر تنشی شرایط برای وقوع خوردگی SCC فراهم بوده است. از آنجا که لوله Grade B مطابق استاندارد API 5L دارای استحکام تسلیم PSI ۳۵۵۰۰ می‌باشد و با توجه به تغییر فرم پلاستیک ایجاد شده در لوله، تنش پسماند کششی بیش از استحکام تسلیم (PSI ۳۵۵۰۰) بوده است [۱۷]. تنش‌های SCC از نوع کششی بوده و می‌توانند از نوع اعمالی، پسماند و حرارتی باشند. در نمونه حاضر به دلیل عدم فیت آپ مناسب و اعمال تنش بیش از حد به لوله زمان فیت آپ و جوشکاری، اعمال تنش کششی به لوله صورت گرفته است.

در (شکل ۱۲) چند نمونه ترک SCC جهت مطابقت با ترک‌های مشاهده شده در نمونه مورد آزمایش مشاهده می‌شود.

با توجه به مشاهدات انجام شده و نتایج آزمایشات، دو مکانیزم خوردگی برای لوله مورد نظر غالب می‌باشد: خوردگی توأم با تنش (SCC) و خوردگی شیاری که آثار خوردگی شیاری در محل قرار گرفتن پوشش روی لوله مشاهده گردید اما با توجه به جوانه‌زنی و رشد ترک و بروز نشستی از این ترک‌ها، علی‌رغم حضور خوردگی شیاری دلیل اصلی نشستی ایجاد شده در لوله، خوردگی توأم با تنش می‌باشد. در خصوص نمونه مورد آزمایش نیز به نظر می‌رسد ابتدا شروع ترک از نواحی مرز دانه بوده و با پیشرفت ترک در برخی مناطق، ترک از داخل دانه نیز عبور کرده است.

حد تنش مجاز برای مصونیت از نظر SCC بستگی به درجه حرارت، ترکیب شیمیایی فلز و ترکیب شیمیایی محیط دارد. به‌طور کلی حد تنش مجاز ۱۰ تا ۷۰ درصد تنش تسلیم می‌باشد که در لوله مورد نظر به دلیل تغییر



شکل ۱۲- ترک‌های SCC [۱۸]

SCC معمولاً در محیط‌های آبی واقع می‌شود و وجود اکسید کننده‌ها غالباً اثر زیادی بر تمایل به ترک خوردن نمونه دارد. محیط‌های مستعد به خوردگی SCC برای فولاد ساده کربنی در (جدول ۵) آمده است.

مطابق (شکل ۱۳) پس از جوانه‌زنی ترک در ابتدا سرعت حرکت ترک تقریباً ثابت است اما با پیشروی ترک سطح مقطع نمونه کاهش یافته و تمرکز تنش روی سایر سطح مقطع باقیمانده افزایش می‌یابد تا زمانی که شکست اتفاق افتد.



جدول ۵: شرایط مستعد جهت ایجاد خوردگی SCC در فلزات و آلیاژ [۱۹]

Aluminum alloys	NaCl-H <sub>2</sub> O, NaCl solutions, seawater, mercury
Copper alloys	Ammonia vapors and solutions, mercury
Gold alloys	FeCl <sub>3</sub> solutions, acetic acid-salt solutions
Inconel	Caustic soda solutions
Lead	Lead acetate solutions
Magnesium alloys	NaCl-K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> solutions, rural and coastal atmospheres, distilled water
Nickel	Fused caustic soda
Carbon steels	NaOH solutions; NaOH-NaSiO <sub>3</sub> solutions; CaNO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> , and NaNO <sub>3</sub> solutions; mixed acids, (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -HNO <sub>3</sub> ); HCN; H <sub>2</sub> S; seawater; NaPb alloy
Stainless steels	BaCl <sub>2</sub> , MgCl <sub>2</sub> solutions; NaCl-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> solutions; seawater, H <sub>2</sub> S, NaOH-H <sub>2</sub> S solutions
Titanium	Red fuming nitric acid

#### ۴. نتیجه‌گیری (جدول ۶) آنالیز خاک اطراف محل نشستی را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج آزمایش‌ها، مشاهدات و بررسی‌های صورت گرفته علل تخریب لوله ترک خورده به شرح ذیل می‌باشد:

(۱) لوله تحت تنش و به‌صورت ناصحیح قبل از جوشکاری، فیت آپ شده و یک خم حدود ۱۰ میلی‌متری در لوله ایجاد کرده است که از محل ایجاد خم در حضور محیط خورنده، میکرو ترک‌ها فعال گردیده و با پیشروی مطابق مکانیزم‌های فوق‌الذکر منجر به نشستی شده است.

(۲) عدم پوشش کاری صحیح و رعایت نکردن دستورالعمل اعمال پوشش نوار سرد و نفوذ رطوبت به زیر پوشش و مهیا شدن شرایط خوردگی سطح خارجی لوله

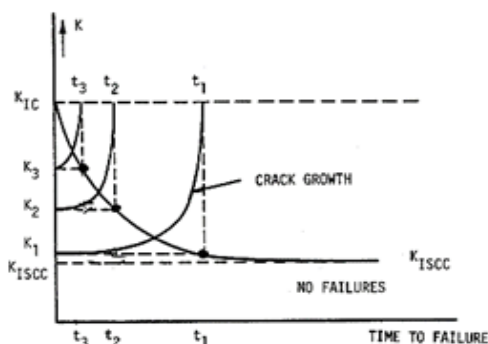
(۳) عدم تمیزکاری و آماده‌سازی سطح قبل از پوشش کاری باعث عدم پیوستگی پوشش و جلوگیری از چسبیدن نوار به روی لوله شده است.

با توجه به وجود محیط خورنده و تنش اعمالی ناشی از خم شدن در لوله، شرایط جهت ایجاد خوردگی SCC مهیا بوده و با جوانه‌زنی و رشد ترک، نشستی در لوله ایجاد شده که می‌توانست در آینده منجر به شکست و گسیختگی لوله شود. لذا با فیت آپ مناسب مطابق استاندارد ASME B31.8 [۲۰] و جلوگیری از تمرکز تنش در لوله و استفاده از پوشش‌های مقاوم به رطوبت مانند پلی‌اتیلن سه لایه می‌توان عامل تنش و خوردگی را حذف نمود و از خوردگی توأم با تنش جلوگیری کرد. از آنجا که فرایند

با توجه به وجود کانال آب در مجاورت محل نشستی مشاهده می‌گردد که رطوبت خاک نسبتاً بالا است و ضمن مشاهده محصولات خوردگی که معمولاً اکسید و هیدروکسیدهای آهن هستند و همچنین وجود کربنات و سولفات‌های کلسیم و سدیم در خاک و رسانایی الکتریکی بالای خاک، شرایط محیطی جهت وقوع SCC برای لوله دفنی مورد نظر وجود داشته است. حضور یون کلر نیز می‌تواند شرایط وقوع خوردگی SCC را مهیاتر نماید [۱۹].

جدول ۶: آنالیز خاک اطراف محل نشستی

pH	رطوبت (درصد)	یون کلر (درصد)	هدایت الکتریکی (ds/m)
۷/۹	۱۶/۱۱	۰/۰۵	۳/۷۳
یون سولفات محلول (درصد)	آهک (درصد)	بی کربنات (mg/lit)	
۰/۸۸	۱۹/۴۵	۶۱/۰۱	



شکل ۱۳: تمرکز تنش و رشد ترک تا مرحله گسیختگی

(2007), Crevice corrosion theory, mechanism and prevention methods, proceeding of the 3rd annual GRASP symposium, Wichita State University 27.

[8]. A. Salam, H. Makhlof, A. Botello, (2017), failure of the metallic structure due to microbiologically induced corrosion and the techniques for protection”, Handbook of Materials Failure Analysis.

[9]. Busenberg, J. George (2011), “The Policy Dynamics of the Trans-Alaska Pipeline System”, Review of Policy Research. 28 (5), 401–422.

[10]. NDK Crystal Case Study: Final Investigation Report (2013). US Chemical Safety and Hazard Investigation Board.

[11]. ASTM E415-21. (2021): Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry.

[12]. ISO 6892-1, (2019), Metallic materials Tensile testing, Part 1: Method of test at room temperature.

[13]. Jean A. Nehme, (2024), “Exploratory Testing of Stress Corrosion Cracking in Stainless Steels at Low Temperature, FHWA-HRT-24-132.

[14]. A. Turnbull. (2016). Stress Corrosion Cracking in Metals – Mechanism. in Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.

[15]. ASTM G25(2024): Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime.

[16]. IGS-M-PL-001-2(1), (2016): SMLS/HFW/SAWL and SAWH Carbon Steel Pipes, Grades B to X80, Sizes: 6 to 56 inch.

جوشکاری لوله و میزان حرارت ورودی (Heat Input) بر حساسیت فولاد به خوردگی توأم با تنش تأثیرگذار است لذا با انتخاب فرایند جوشکاری مناسب (کاهش حرارت ورودی)، انتخاب مواد مقاوم به خوردگی SCC و طراحی صحیح و استاندارد (عمق دفن، محل عبور لوله، آنالیز خاک، مقاومت خاک، حفاظت کاتدی و ...) نیز می‌توان از بروز خوردگی SCC تا حد امکان ممانعت به عمل آورد [۲۱].

#### مراجع:

[1]. M.G. Fontana, (1987), Corrosion Engineering, Third Edition, McGraw-Hill Book Co.

[2]. V. Kain, (2011), stress corrosion cracking (SCC) in stainless steel, wood publishing series in metals and surface engineering, 199-244.

[3]. J. Beavers and T.A. Bubenik, (2017), stress corrosion cracking, trend in oil and gas corrosion research and technologies, 295-314.

[4]. C.A. Loto, (2017), stress corrosion cracking: characteristic, mechanism and experimental study, the international journal of advanced manufacturing technology, 93(9), 3597-3582, 2017.

[5]. S. Nuthalapati, K.E. Kee, S.R. Pedapati and Kh. Jumbri, (2024), areview of chloride induced stress corrosion cracking characterization in austenitic stainless steel using acoustic emission technique, Nuclear Engineering and Technology, 56(2), 688-705.

[6]. Q. Hu, G. Zhang, Y. Qiu and X. Guo, (2011), the crevice corrosion behavior of stainless steel in soldium chloride solution”, Corrosion Science, 53(12), 4065-4072.

[7]. N. Rashidi, S.A. Soltani, R. Asmatulu,

- [17]. API Specification 5L, Line Pipe, Forty-Sixth Edition, April 2018.
- [18]. U. Ehrnstén, PL. Andresen, Z. Que. (2024). A review of stress corrosion cracking of austenitic stainless steels in PWR primary water. Journal of Nuclear Materials. 588.
- [19]. R. Roberge. (2020). Corrosion Basics Corrosion Basics: Stress Corrosion Cracking, Materials Performance.
- [20]. ASME B31.8 (2022): Gas Transmission and Distribution Piping Systems.
- [21]. Y. Frank Cheng (2013), "Stress Corrosion Cracking of Pipelines", A John Wiley & Sons, Inc., Publication.



## Investigation of the Mechanism and Causes of the Destruction of the Leakage Damage of the Underground Pipeline Outlet of the Gas Pressure Reduction Station

Mojtaba Soltanpour<sup>1\*</sup>, Ebrahim Mohsseni Homagerani<sup>2</sup>, Farzad Abbasian<sup>1</sup>, Meysam Rasooly<sup>1</sup>

1. Technical Inspection Unit, Isfahan Province Gas Company, Isfahan, Iran

2. Managing Director, Isfahan Province Gas Company, Isfahan, Iran

### ARTICLE INFO

APPLIED RESEARCH ARTICLES

#### Article History:

Received: 18 February 2025

Revised: 15 April 2025

Accepted: 07 May 2025

#### Keywords:

Pipe

Stress Corrosion Cracking

Crevice Corrosion

Crack

Leakage

### ABSTRACT

Pressure reduction stations serve as gas distribution centers for industries and households. Leakage in these stations' pipelines poses explosion hazards and can disrupt gas supply to downstream areas. Highlighting the importance of this issue, this study examines observed leakage on a 6-inch underground pipeline at the outlet of a pressure reduction station connected to the Isfahan Gas Company. After cutting out the damaged section and conducting a visual inspection of the sample, we performed metallographic tests, chemical analysis, hardness testing, and tensile tests. The results of these tests, along with a review of the pipeline's history, indicated that two corrosion mechanisms—crevice corrosion and stress corrosion cracking (SCC)—contributed to the failure of the sample. Notably, the SCC mechanism led to the formation of cracks and subsequent leakage in the pipeline. The presence of tensile stress in the pipeline, combined with a corrosive environment, created the conditions necessary for SCC to occur, resulting in the initiation and growth of cracks that caused the leakage.

DOR: [20.1001.1.2502.1088.1404.02.17](https://doi.org/10.1001.1.2502.1088.1404.02.17)

#### How to cite this article

M. Soltanpour, E.M. Homagerani, F. Abbasian, M. Rasoolyi, Investigation of the Mechanism and Causes of the Destruction of the Leakage Damage of the Underground Pipeline Outlet of the Gas Pressure Reduction Station. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025; 12(1): 8-17. ([https://www.ijge.irangi.org/article\\_725964.html](https://www.ijge.irangi.org/article_725964.html))

\* Corresponding Author.

E-mail address: [mojtaba\\_sol@yahoo.com](mailto:mojtaba_sol@yahoo.com), (M. Soltanpour).

Available online 22 Jun 2025

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



# ارائه مدل نیمه تجربی برای دانسیته مایع هیدروکربن‌های سنگین در محدوده فشار و دماهای مشخص

امیرحسین عودی<sup>۱</sup>، صالحه علامی<sup>۱</sup>، یگانه داودیگی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران  
۲. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران  
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: [y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir](mailto:y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir)

مقاله علمی- پژوهشی

صفحه ۱۸ - ۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۶

## چکیده

در صنعت نفت شناخت خواص فیزیکی و شیمیایی به‌عنوان عنصر کلیدی در توسعه و کنترل این صنعت است. دانسیته از جمله خواص مهم برش‌های نفتی می‌باشد که پژوهش حاضر باهدف دستیابی به یک مدل نیمه‌تجربی ساده برای دانسیته مایع هیدروکربن‌های سنگین در محدوده فشار و دماهای مشخص انجام شد. دانسیته هشت هیدروکربن سنگین بعد از گردآوری اطلاعات تجربی و خواص بحرانی با استفاده از معادلات حالت (EOS) سوآو - ردلیچ - وانگ (SRK) و پنگ رابینسون (PR) محاسبه و تابع هدف بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) کمینه شد. نتایج حاصل از مقادیر مربوط به ضرایب ثابت مدل نیمه تجربی به ترتیب گویای نسبت عکس و مستقیم دانسیته با دما و فشار است. از طرفی مقدار کم‌تر میانگین نسبی خطا برای مدل نیمه تجربی به دست آمده در مقایسه با معادلات حالت SRK و PR برای هیدروکربن‌های با تعداد کربن کم‌تر حاصل شد. همچنین در محدوده دمایی پایین‌تر این مدل عملکرد و تطابق بهتری با داده‌های تجربی دارد و به‌طور کلی رابطه حاصل در عین سادگی دارای دقت و انعطاف بالایی است. نتایج نشان داد که میانگین درصد خطای نسبی حاصل از محاسبه دانسیته مایع ۸ هیدروکربن سنگین طبق مدل نیمه‌تجربی ارائه شده ۱/۱۸ درصد می‌باشد که ۱۷/۳۳ درصد از معادله حالت SRK کمتر و ۷/۶۷ درصد از معادله حالت PR بهتر می‌باشد.

کلید واژه‌ها: هیدروکربن سنگین، الگوریتم ازدحام ذرات، خواص فیزیکی و شیمیایی، دانسیته مایع، معادلات حالت

## ۱. مقدمه

هیدروکربن‌ها بزرگ‌ترین اجزاء تشکیل‌دهنده برش‌های نفتی هستند و در حال حاضر به دلیل کاهش سریع منابع نفتی معمولی، بازیافت و پالایش ذخایر نفت سنگین‌تر و همچنین قیرها جزء فعالیت‌های عمده اقتصادی به حساب می‌آیند. در صنعت نفت خواص ترمودینامیکی، فیزیکی و شیمیایی را می‌توان به‌عنوان عنصر کلیدی در توسعه و کنترل این صنعت در نظر گرفت [۱-۳]. چگالی از جمله خواص

است که به‌عنوان یک پارامتر مهم برای درک تراکم مولکولی، پایداری و واکنش‌پذیری برش‌های نفتی به حساب می‌آید [۴]. بیش‌تر روغن‌های سنگین و قیرها برای تولید و انتقال بسیار چسبناک هستند و برای کاهش ویسکوزیته و چگالی آن‌ها از گرما یا رقیق‌سازی استفاده می‌شود؛ بنابراین چگالی نفت خام رقیق شده به‌عنوان تابعی از دما و فشار برای مدل‌سازی فرآیند مورد نیاز است و از طرفی چگالی یک پارامتر مهم



برای جداسازی نفت سنگین و آب است. برای تعیین چگالی مخلوط مایع یا تعیین چگالی مایع با گاز محلول، روش‌هایی چون حجم مولی جزئی، حجم اضافی، روابط نیمه تجربی چگالی و معادله حالت وجود دارند که معادلات حالت مکعبی به‌طور گسترده در نرم‌افزارهای تجاری برای مدل‌سازی رفتار فازی هیدروکربن‌ها و نفت خام معمولی استفاده می‌شوند [۵].

فیسو و همکاران (۲۰۱۹) پژوهشی را باهدف پیش‌بینی دمای نقطه‌جوش و چگالی نسبی مایع برش‌های نفتی و هیدروکربن‌های خالص از طریق یک شبکه عصبی مصنوعی چندلایه<sup>۱</sup> بر اساس توصیف‌کننده‌های مولکولی انجام دادند. از مقایسه مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی-ارتباط کمی ساختار<sup>۲</sup> توسعه یافته در این پژوهش با مدل‌های پیشین، به دست آمد که برای پیش‌بینی دمای نقطه‌جوش و چگالی نسبی مایع، مدل ارائه شده در این تحقیق بهترین عملکرد را دارد [۶]. اطلاع از خواص حرارتی - فیزیکی مواد تغییر فاز دهنده<sup>۳</sup> برای مدل‌سازی و طراحی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان<sup>۴</sup> ضروری است. پارافین‌ها که به نام نرمال دکان شناخته می‌شوند، کاندیدهای خوبی برای PCM در میان سایر مواد بالقوه هستند. در همین راستا عبدی و همکاران (۲۰۲۰) مطالعه‌ی را باهدف شناخت خواص حرارتی-فیزیکی، از جمله آنتالپی نهان، هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی را برای دو نرمال آلکان یعنی نرمال اکتادکان و نرمال ایکوسان انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که اندازه‌گیری‌های هدایت حرارتی انجام شده تطابق خوبی با مطالعات تجربی در فاز جامد دارد و حداکثر انحراف ۲ درصد است [۷]. خواص ترموفیزیکی سیستم‌های دارای آلکان با محلول دی‌اکسید کربن<sup>۵</sup> در جنبه‌های جذب و ذخیره‌سازی کربن<sup>۶</sup> [۸، ۹]، افزایش باز یافت نفت<sup>۷</sup> [۱۰، ۱۱]، سنتز فیشر - تروپش<sup>۸</sup> [۱۲، ۱۳] و ... اهمیت دارند که سیو و همکاران (۲۰۲۱) ویسکوزیته مایع، کشش سطحی و نفوذ حرارتی را برای نرمال تترادکان با محلول CO<sub>2</sub> در شرایط تعادل ترمودینامیکی از ۳۲۳ تا ۴۷۳ کلوین در محدوده

فشار ۵/۶ مگاپاسکال بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ویسکوزیته مایع و کشش سطحی با افزایش فشار سیستم یا کسر مولی CO<sub>2</sub> در فاز مایع کاهش می‌یابد [۱۴]. در پژوهش یانگ و همکاران (۲۰۲۱) چگالی و ویسکوزیته مخلوط دوتایی نرمال دکان با CO<sub>2</sub> در دمای بین ۳۰۳/۱۵ تا ۳۷۳/۱۵ کلوین و فشار ۸۰ مگاپاسکال بررسی شد که داده‌های حاصل با آنچه در پژوهش‌های پیشین است تطابق خوبی داشت و نشان داد که افزودن CO<sub>2</sub> به نرمال دکان در فشار و دمای معین، ویسکوزیته را تا حد زیادی کاهش و چگالی را اندکی افزایش می‌دهد [۱۵]. در ادامه پژوهش‌های سیو و همکاران (۲۰۲۴) ویسکوزیته مایع، کشش سطحی و نفوذ حرارتی را برای نرمال ایکوسان با محلول CO<sub>2</sub> به روش پراکندگی نور دینامیکی<sup>۹</sup> در شرایط اشباع بین ۳۲۳ و ۴۷۳ کلوین و فشار ۰/۱ و ۵/۶ مگاپاسکال بررسی شد که انحراف داده‌های تجربی و همبستگی مربوطه ۳ درصد برای ویسکوزیته مایع به دست آمد [۱۶].

در هیچ یک از پژوهش‌های گذشته، به‌طور خاص روی پیش‌بینی دانسیته مایع هیدروکربن‌های سنگین که در مخازن نفت بسیار پر کاربرد می‌باشد بررسی صورت نگرفته است. همچنین در صورت استفاده از معادلات حالت جهت پیش‌بینی دانسیته مایع هیدروکربن‌های سنگین، درصد خطا بالا خواهد بود. پژوهش حاضر باهدف دستیابی به یک رابطه نیمه‌تجربی برای دانسیته مایع هیدروکربن‌های سنگین خالص در محدوده فشار و دماهای مشخص انجام شد که رابطه به دست آمده قابلیت پیش‌بینی و تطابق حداکثری را با داده‌های تجربی دارد و از طرفی در مقایسه با دیگر معادلات حالت دارای انعطاف، دقت و سادگی خوبی است.

## ۲. روش تحقیق

### ۲-۱. جمع‌آوری داده‌ها

به ترتیب خواص بحرانی و اطلاعات تجربی هیدروکربن‌های سنگین به‌منظور دستیابی به مدل نیمه‌تجربی در (جدول ۱ و ۲) گردآوری شد.

1. MLP-ANN
2. QSPR-ANN
3. PCM
4. LTES
5. CO<sub>2</sub>
6. CCS
7. EOR
8. FT
9. DLS

جدول ۱: خواص بحرانی هیدروکربن‌های سنگین

ترکیبات	دمای بحرانی ( $T_c$ )	فشار بحرانی ( $P_c$ )	ضریب بی‌مرکزی ( $\omega$ )	مرجع
نرمال اکتان	۵۶۸/۷۰۰	۲/۴۹۰	۰/۴۰۰	[۱۷]
نرمال نونان	۵۹۴/۶۰۰	۲/۲۹۰	۰/۴۴۴	[۱۷]
نرمال دکان	۶۱۷/۷۰۰	۲/۱۱۰	۰/۴۹۲	[۱۷]
نرمال اوندکان	۶۳۸/۳۰۰	۱/۹۶۵	۰/۵۳۵	[۱۸]
نرمال تری‌دکان	۶۷۵/۸۰۰	۱/۷۲۴	۰/۶۲۳	[۱۸]
نرمال هپتادکان	۷۳۳/۴۰۰	۱/۳۱۷	۰/۷۷۰	[۱۹]
نرمال آپیکوسان	۷۶۸/۰۰۰	۱/۱۶۰	۰/۹۰۷	[۱۹]
نرمال تری‌آکونتان	۸۶۳/۰۰۰	۰/۸۶۸	۱/۳۰۷	[۱۸]

جدول ۲: اطلاعات تجربی هیدروکربن‌های سنگین

ترکیبات	$P_{min}$	$P_{max}$	$T_{min}$	$T_{max}$	$\rho_{min}$	$\rho_{max}$	مرجع
نرمال اکتان	۰/۱	۱۰	۳۷۳/۱۵	۵/۵۵۷	۶/۰۵۱	۶۶	[۱۷]
نرمال نونان	۰/۱	۱۰	۳۷۳/۱۵	۵/۰۹۱	۵/۵۳۷	۷۲	[۱۷]
نرمال دکان	۰/۱	۱۰	۳۷۳/۱۵	۴/۶۹۶	۵/۰۷۷	۷۲	[۱۷]
نرمال اوندکان	۵	۱۰۰	۵۷۳/۱۵	۳/۱۹۹	۵/۰۴۵	۴۲	[۱۸]
نرمال تری‌دکان	۵	۱۰۰	۵۷۳/۱۵	۲/۹۱۹	۴/۳۵۰	۴۲	[۱۸]
نرمال هپتادکان	۵	۱۰۰	۵۷۳/۱۵	۲/۴۲۲	۳/۳۶۹	۳۶	[۱۹]
نرمال آپیکوسان	۵	۱۰۰	۵۷۳/۱۵	۲/۱۳۶	۲/۸۱۹	۳۰	[۱۹]
نرمال تری‌آکونتان	۵	۱۰۰	۵۷۳/۱۵	۱/۵۱۵۰۷۶	۱/۹۲۶۵۱۷	۳۰	[۱۸]

## ۲-۲. معادله حالت

واندروالس در سال ۱۸۷۳ اولین معادله حالت را معرفی کرد [۲۰]، سپس ردلیچ و وانگ وابستگی حجم در عبارت جاذبه‌ی معادله حالت واندروالس را اصلاح کردند و همچنین وابستگی دمایی در عبارت جاذبه‌ی معادله را در نظر گرفتند [۲۱]؛ بعد از آن سوآ و معادله‌ی حالت ردلیچ-وانگ<sup>۱</sup> را به معادله حالت SRK تغییر داد و با جایگزین کردن عبارت  $\frac{a}{T^{0.5}}$  با یک اصطلاح کلی تر  $\alpha(T)$  که به ضریب بی‌مرکزی محاسبه شد.

واندروالس در سال ۱۸۷۳ اولین معادله حالت را معرفی کرد [۲۰]، سپس ردلیچ و وانگ وابستگی حجم در عبارت جاذبه‌ی معادله حالت واندروالس را اصلاح کردند و همچنین وابستگی دمایی در عبارت جاذبه‌ی معادله را در نظر گرفتند [۲۱]؛ بعد از آن سوآ و معادله‌ی حالت ردلیچ-وانگ<sup>۱</sup> را به معادله حالت SRK تغییر داد و با جایگزین کردن عبارت  $\frac{a}{T^{0.5}}$  با یک اصطلاح کلی تر  $\alpha(T)$  که به ضریب بی‌مرکزی محاسبه شد.

1. RK



جدول ۳: روابط مربوط به معادلات حالت SRK و PR

SRK	PR
$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+b)}$	$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+b) + b(v-b)}$
$Z = \frac{v}{v-b} - \frac{a}{RT(v+b)}$	$Z = \frac{v}{v-b} - \frac{av}{RT[v(v+b) + b(v-b)]}$
$a = 0.42747\alpha(T) \frac{R^2 T_c^2}{P_c}$	$a = 0.45724\alpha(T) \frac{R^2 T_c^2}{P_c}$
$\alpha(T) = [1 + m(1 - T_r^{0.5})]^2$	$\alpha(T) = [1 + m(1 - T_r^{0.5})]^2$
$m = 0.48 + 1.574\omega - 0.176\omega^2$	$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2$
$b = 0.08664 \frac{RT_c}{P_c}$	$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c}$

خود را با استفاده از (معادلات ۱ و ۲) به روزرسانی می‌کند.

$$v^i[t+1] = wv^i[t] + C_1 r_1 (x^{i,pbest}[t] - x^i[t]) + C_2 r_2 (x^{gbest}[t] - x^i[t]) \quad (1)$$

$$x^i[t+1] = x^i[t] + v^i[t+1] \quad (2)$$

$x^i[t+1]$  و  $v^i[t+1]$  موقعیت و سرعت ذره  $i$  در تکرار جدید،  $r_1$  و  $r_2$  عدد تصادفی بین صفر و یک،  $C_1$  و  $C_2$  پارامترهای ثابت مثبت تحت عنوان ضرایب شتاب و  $w$  ضریب اینرسی هستند. همچنین  $x^{i,pbest}[t]$  بهترین موقعیت قبلی ذره  $i$  و  $x^{gbest}[t]$  بهترین موقعیت را در بین تمام ذرات موجود بیان می‌کند. طبق (شکل ۱) که فلوجارت PSO را بیان می‌کند، تابع هدف بیان شده در (رابطه ۳) توسط الگوریتم PSO کمینه شد [۲۴-۲۶].

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\rho_{exp} - \rho_m)^2 \quad (3)$$

در (رابطه ۳)،  $MSE$  میانگین مربعات خطا،  $\rho_{exp}$  دانسیته تجربی،  $\rho_m$  دانسیته به‌دست آمده از مدل نیمه تجربی و  $n$  تعداد دیتاها می‌باشد.

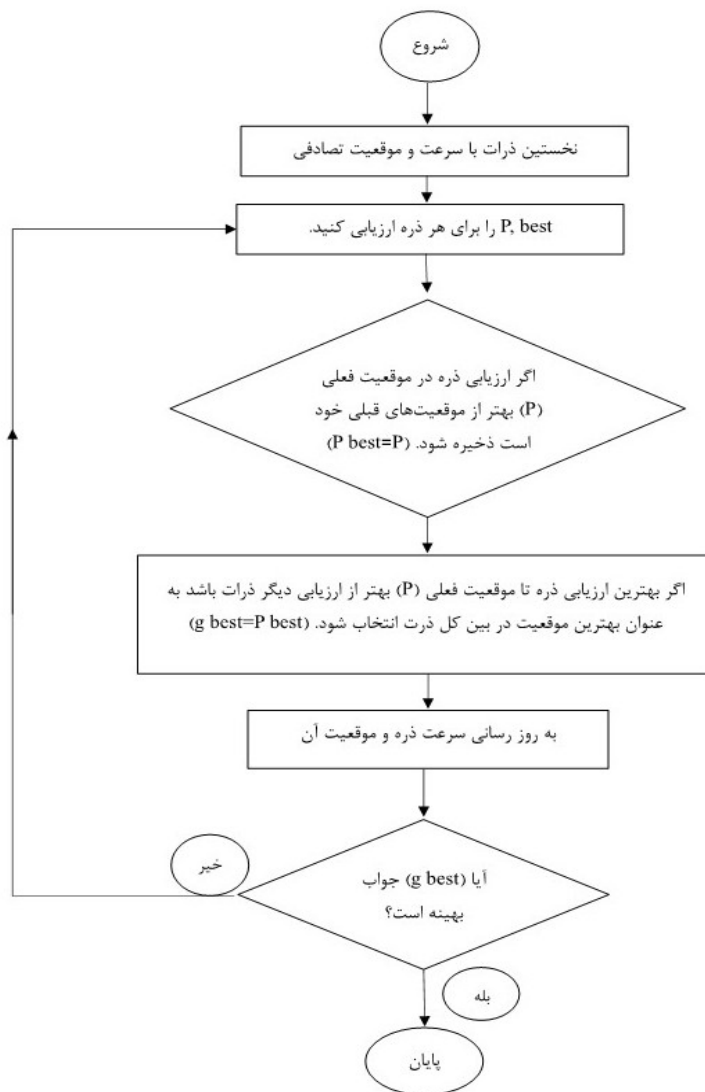
1. PSO

در (جدول ۳) به ترتیب  $P$  فشار برحسب مگاپاسکال،  $v$  حجم مولی برحسب مترمکعب بر کیلومول،  $T$  دما برحسب کلوین،  $R$  ثابت جهانی گازها،  $T_c$  دمای بحرانی و  $P_c$  فشار بحرانی می‌باشد.

### ۳-۲. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۱</sup> توسط دکتر راسل ابرهارت و دکتر جیمز کندی در سال ۱۹۹۵ ارائه شده است، این الگوریتم یک تکنیک مبتنی بر قوانین احتمال است که بر پایه جمعیتی از پاسخ‌های اولیه عمل می‌کند. PSO با مجموعه‌ای از راه‌حل‌های شانسی و تصادفی شروع می‌شود و چون دارای حافظه است هر ذره از اطلاعات گذشته سود می‌برد و هر عضو جامعه موقعیت خود را با توجه به تجربیات شخصی و کل جامعه تغییر می‌دهد، در نتیجه همکاری سودمند بین ذرات وجود دارد و ذرات در گروه اطلاعاتشان را با یکدیگر به اشتراک می‌گذارند. PSO در مقایسه با دیگر روش‌های بهینه‌سازی مرسوم ساده‌تر می‌باشد و می‌تواند مسائل با اندازه بزرگ را به‌طور مؤثر حل کند. در هر تکرار ذره با پیروی از بهترین مقادیر به‌روز رسانی می‌شود و پس از یافتن دو مقدار  $x^{i,pbest}[t]$  و  $x^{gbest}[t]$  سرعت و موقعیت





شکل ۱: فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

### ۳. نتایج

در (جدول ۴)، پارامترهای استفاده شده در الگوریتم PSO جهت تنظیم ضرایب مدل نیمه‌تجربی آورده شده است.

با استفاده از داده‌های تجربی و به کمک برآزش منحنی یک مدل نیمه‌تجربی وابسته به دما و فشار مطابق با (رابطه ۴) به‌دست آمد که این رابطه در عین سادگی دارای دقت و انعطاف بالایی است.

$$\rho_m = a_0 T^{a_1} P^{a_2} \quad (4)$$

در این رابطه  $T$  برحسب کلوین،  $P$  برحسب مگاپاسکال و  $a_0, a_1, a_2$  پارامترهای ثابتی هستند که مقادیر آنها برای هر هشت هیدروکربن سنگین در (جدول ۴) خلاصه شده است.

جدول ۴: پارامترهای تنظیم‌شده الگوریتم PSO

پارامتر	مقدار
متغیرها	۳
جمعیت	۱۰۰
تکرار	۱۰۰۰
جهش	۰/۰۵
$C_1$	۱/۴۹۶۲
$C_2$	۱/۴۹۶۲
ضریب اینرسی	۰/۷۳

جدول ۵: مقادیر مربوط به ضرائب ثابت رابطه ۴

ترکیبات	فرمول مولکولی	$a_0$	$a_1$	$a_2$
نرمال اکتان	$C_8 H_{18}$	۶۹/۴۴۰۸	-۰/۴۲۵۰	۰/۰۰۳۳
نرمال نونان	$C_9 H_{20}$	۵۲/۰۶۵۳	-۰/۳۹۱۲	۰/۰۰۲۹
نرمال دکان	$C_{10} H_{22}$	۴۳/۶۹۴۵	-۰/۳۷۵۷	۰/۰۰۲۸
نرمال اوندکان	$C_{11} H_{24}$	۴۲/۳۱۴۰	-۰/۴۰۲۴	۰/۰۴۴۹
نرمال تریدکان	$C_{13} H_{28}$	۲۹/۳۷۷۳	-۰/۳۶۱۹	۰/۰۴۰۱
نرمال هپتادکان	$C_{17} H_{36}$	۲۱/۲۷۰۸	-۰/۳۴۵۳	۰/۰۳۸۳
نرمال آیکوسان	$C_{20} H_{42}$	۱۹/۶۵۱۹	-۰/۳۵۵۹	۰/۰۳۹۴
نرمال تری آکونتان	$C_{30} H_{62}$	۱۰/۹۸۵۰	-۰/۳۱۸۱	۰/۰۳۳۵

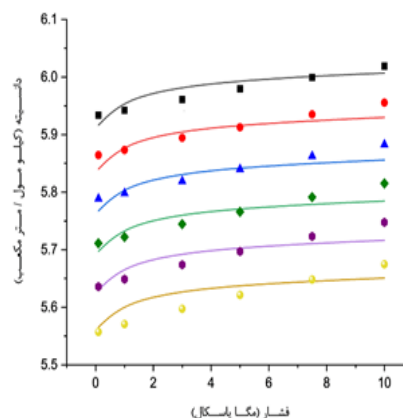
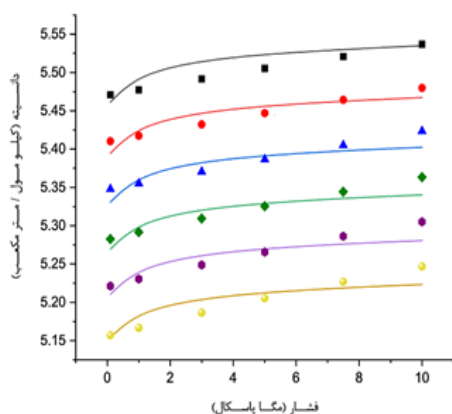
(جدول ۶) میانگین نسبی خطا (رابطه ۴) را در مقایسه با تئوری کرات سخت استفاده شود دقت در پیش‌بینی دانسیته این دو معادله حالت SRK و PR نشان می‌دهد. همان‌طور که از (جدول ۶) مشخص است در تمام هیدروکربن‌های مورد بررسی و در تمام بازه‌های بررسی شده، مدل نیمه تجربی ارائه شده نسبت به معادله حالت PR و SRK از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد. محسن‌نیا و همکاران [۲۷] نشان دادند که اگر برای ترم دافعه مولکولی در معادله حالت از هیدروکربن‌های سنگین نسبت به معادله حالت PR و SRK، بسیار بالاتر از معادله MMM می‌باشد. همچنین در فشارهای بالا معادله حالت PR و SRK دارای خطای بسیار زیادی می‌باشد در صورتیکه (رابطه ۴) حتی در فشارهای بالا نیز دقیق عمل می‌کند.

جدول ۶: میانگین نسبی خطا رابطه ۴ در مقایسه با معادلات حالت PR و SRK

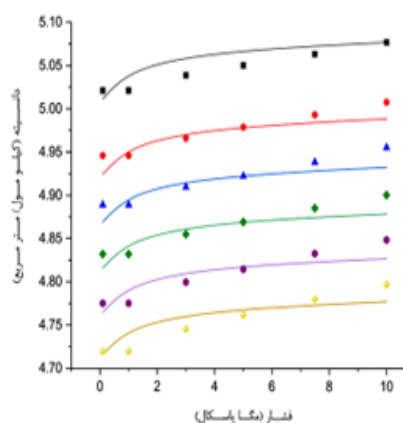
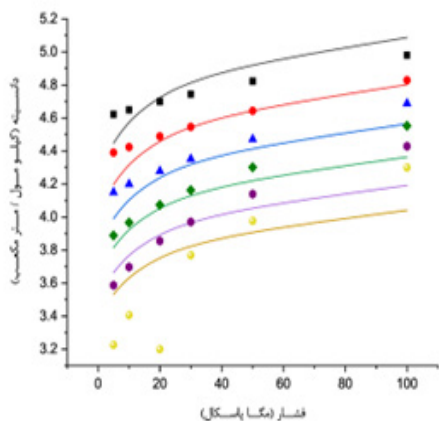
ترکیبات	$T(K)$	$P(MPa)$	PR	SRK	رابطه ۴
نرمال اکتان	۳۱۳-۳۷۳	۰/۱-۱۰	۲/۲۰	۱۳/۱۰	۰/۲۷
نرمال نونان	۳۱۳-۳۷۳	۰/۱-۱۰	۳/۹۳	۱۴/۵۵	۰/۲۴
نرمال دکان	۳۱۳-۳۷۳	۰/۱-۱۰	۵/۶۹	۱۶/۰۵	۰/۲۵
نرمال اوندکان	۳۰۳-۵۷۳	۵-۱۰۰	۵/۷۰	۱۵/۱۳	۲/۶۳
نرمال تریدکان	۳۰۳-۵۷۳	۵-۱۰۰	۷/۷۲	۱۷/۴۰	۱/۹۶
نرمال هپتادکان	۳۲۳-۵۷۳	۵-۱۰۰	۱۴/۸۵	۲۳/۷۱	۱/۵۷
نرمال آیکوسان	۳۷۳-۵۷۳	۵-۱۰۰	۱۵/۱۲	۲۳/۹۱	۱/۳۷
نرمال تری آکونتان	۳۷۳-۵۷۳	۵-۱۰۰	۱۵/۶۲	۲۴/۲۴	۱/۱۵
میانگین درصد خطای نسبی					۱/۱۸



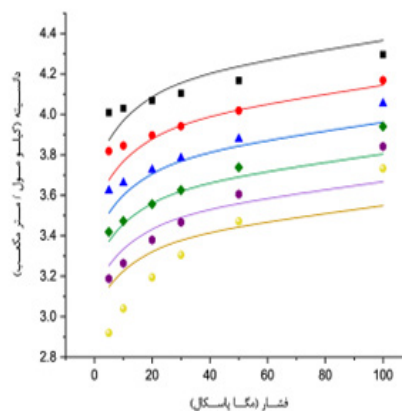
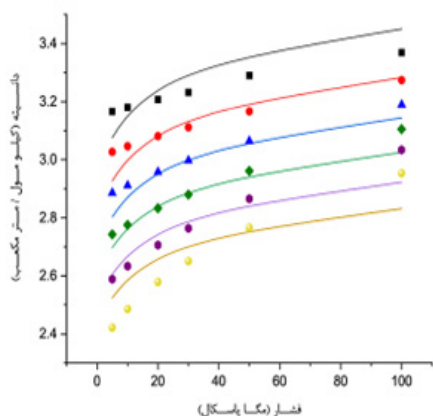
مطابق با نتایج (جدول ۶) مشخص است که با افزایش تعداد کربن‌ها ضریب ثابت  $a_0$  کاهش می‌یابد و همچنین پارامترهای ثابت  $a_1$  و  $a_2$  در مقایسه با داده‌های موجود در مطالعات پیشین که برای دیگر هیدروکربن‌ها می‌باشد به‌وضوح نشان‌دهنده نسبت عکس و مستقیم دانسیته به ترتیب با دما و فشار است [۲۸]. در (جدول ۶) برای هیدروکربن‌های سبک‌تر



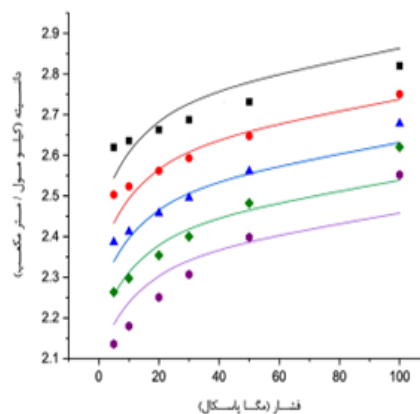
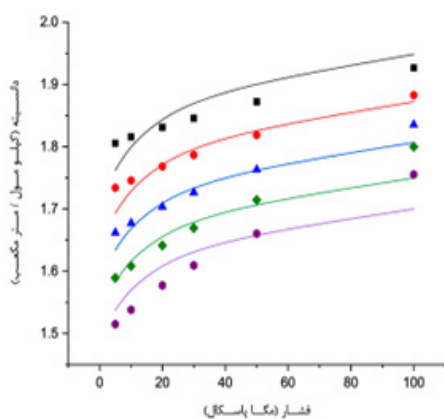
شکل ۲: الف) دانسیته تجربی اکتان. مشکی ■، ۲۲۳ کلوین؛ قرمز ●، ۲۳۳ کلوین؛ آبی ▲، ۳۲۴ کلوین؛ سبز ◆، ۳۵۳ کلوین؛ بنفش ●، ۳۶۳ کلوین؛ زرد ● (۳۷۳ کلوین. ب) دانسیته تجربی نونان. مشکی ■، ۳۱۳ کلوین؛ قرمز ●، ۳۲۳ کلوین؛ آبی ▲، ۳۳۳ کلوین؛ سبز ◆، ۳۴۳ کلوین؛ بنفش ●، ۳۵۳ کلوین؛ زرد ●، ۳۶۳ کلوین



شکل ۳: الف) دانسیته تجربی دکان. مشکی ■، ۳۱۳ کلوین؛ قرمز ●، ۳۲۷ کلوین؛ آبی ▲، ۳۳۸ کلوین؛ سبز ◆، ۳۴۸ کلوین؛ بنفش ●، ۳۵۸ کلوین؛ زرد ● (۳۶۸ کلوین. ب) دانسیته تجربی اوندکان. مشکی ■، ۳۲۳ کلوین؛ قرمز ●، ۳۷۳ کلوین؛ آبی ▲، ۴۲۳ کلوین؛ سبز ◆، ۴۷۳ کلوین؛ بنفش ●، ۵۲۳ کلوین؛ زرد ●، ۵۷۳ کلوین



شکل ۴: الف) دانسیته تجربی تریبدکان. مشکی ■، ۳۲۳ کلوین؛ قرمز ●، ۳۷۳ کلوین؛ آبی ▲، ۴۲۳ کلوین؛ سبز ◆، ۴۷۳ کلوین؛ بنفش ●، ۵۲۳ کلوین؛ زرد ●، ۵۷۳ کلوین. ب) دانسیته تجربی هپتادکان. مشکی ■، ۳۲۳ کلوین؛ قرمز ●، ۳۷۳ کلوین؛ آبی ▲، ۴۲۳ کلوین؛ سبز ◆، ۴۷۳ کلوین؛ بنفش ●، ۵۲۳ کلوین؛ زرد ●، ۵۷۳ کلوین



شکل ۵: الف) دانسیته تجربی آیکوسان. مشکی ■، ۳۷۳ کلوین؛ قرمز ●، ۴۲۳ کلوین؛ آبی ▲، ۴۷۳ کلوین؛ سبز ◆، ۵۲۳ کلوین؛ بنفش ●، ۵۷۳ کلوین. ب) دانسیته تجربی تری آکونتان. مشکی ■، ۳۷۳ کلوین؛ قرمز ●، ۴۲۳ کلوین؛ آبی ▲، ۴۷۳ کلوین؛ سبز ◆، ۵۲۳ کلوین؛ بنفش ●، ۵۷۳ کلوین

سنگین نیز در دماهای کم تر تطابق بهتری نسبت به دماهای بیشتر وجود دارد. همچنین در هیدروکربن‌های با بیش از ۱۰ کربن که فشار حتی تا ۱۰۰ مگاپاسکال نیز ارائه شده است، مشخص است که بیشترین میزان خطا در فشار بالا یعنی ۱۰۰ مگاپاسکال می‌باشد. با اینکه طبق (جدول ۵)، اثر فشار روی دانسیته کم است اما در فشارهای بالا معمولاً معادلات حالت نمی‌توانند پیش‌بینی خوبی در مورد دانسیته مایعات داشته باشند اما مدل نیمه تجربی پیشنهاد شده در این پژوهش، حتی قادر به پیش‌بینی دانسیته مایع هیدروکربن‌های سنگین تا فشار ۱۰۰ مگاپاسکال می‌باشد.

در (شکل‌های ۲ تا ۵) مشاهده می‌شود که با افزایش دما، دانسیته کاهش می‌یابد و همچنین با سنگین‌تر شدن هیدروکربن یا در واقع افزایش تعداد کربن‌ها شیب نمودار مربوط به تغییرات دانسیته نسبت به فشار در دماهای مختلف بیش تر و تندتر می‌شود. همان‌طور که از (جدول ۵) نتیجه شد، در شکل‌ها نیز قابل مشاهده است که برای هیدروکربن‌های سبک‌تر که محدوده تغییرات دمایی کوچک‌تری بررسی شده نسبت به هیدروکربن‌های سنگین‌تر که بازه دمایی بزرگ‌تری مورد بررسی قرار گرفته، تطابق معادله به دست آمده با داده‌های تجربی بیش تر است. همچنین برای هیدروکربن‌های

- Fuels, 22(1), 455–462.
- [3]. Riazi, M. R. (2005). Characterization and properties of petroleum fractions (Vol. 50). ASTM international.
- [4]. Carbognani, L., Carbognani-Arambarri, L., Lopez-Linares, F., & Pereira-Almao, P. (2011). Suitable density determination for heavy hydrocarbons by solution pycnometry: Virgin and thermal cracked Athabasca vacuum residue fractions. *Energy & Fuels*, 25(8), 3663–3670.
- [5]. Saryazdi, F., Motahhari, H., Schoeggl, F. F., Taylor, S. D., & Yarranton, H. W. (2013). Density of hydrocarbon mixtures and bitumen diluted with solvents and dissolved gases. *Energy & Fuels*, 27(7), 3666–3678.
- [6]. Fissa, M. R., Lahiouel, Y., Khaouane, L., & Hanini, S. (2019). QSPR estimation models of normal boiling point and relative liquid density of pure hydrocarbons using MLR and MLP-ANN methods. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 87, 109–120.
- [7]. Abdi, A., Ignatowicz, M., Gunasekara, S. N., Chiu, J. N. W., & Martin, V. (2020). Experimental investigation of thermo-physical properties of n-octadecane and n-eicosane. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 161, 120285.
- [8]. Leung, D. Y. C., Caramanna, G., & Maroto-Valer, M. M. (2014). An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 426–443.
- [9]. Murshid, G., Butt, W. A., & Garg, S. (2019). Investigation of thermophysical properties for aqueous blends of sarcosine with 1-(2-aminoethyl) piperazine and
- در پژوهش حاضر به‌منظور دستیابی به یک رابطه نیمه‌تجربی مربوط به دانسیته هیدروکربن‌های سنگین، ابتدا با توجه به اطلاعات موجود در مطالعات پیشین، داده‌های تجربی هیدروکربن‌های سنگین مورد بررسی، گردآوری شد. سپس بر اساس روابط مربوط به معادلات حالت SRK و PR و با استفاده از داده‌های گردآوری شده، دانسیته مایع هشت هیدروکربن سنگین محاسبه شد. در نهایت با استفاده از الگوریتم PSO که یک تکنیک مبتنی بر قوانین احتمال است، تابع هدف مطابق با رابطه مربوط به میانگین مربعات خطا کمینه شد. بر این اساس مدل نیمه‌تجربی که وابسته به دما، فشار و سه پارامتر  $a_1, a_0$  و  $a_2$  است، به‌دست آمد. مقادیر حاصل مربوط به ثوابت، نشان داد که برای  $a_0$  با افزایش تعداد کربن‌ها و سنگین‌تر شدن هیدروکربن مقادیر آن کاهش می‌یابد و از طرفی با توجه به تحقیقات پیشین انجام شده در این راستا که به ترتیب وابستگی عکس و مستقیم دانسیته به دما و فشار را نشان داده‌اند، مقادیر منفی  $a_1$  و مثبت  $a_2$  به‌دست آمده در پژوهش حاضر گواه بر این نتیجه اثبات شده است. همچنین از قیاس رابطه نیمه‌تجربی با معادلات حالت SRK و PR به‌دست آمد که میانگین نسبی خطا برای سه هیدروکربنی که تعداد کربن‌های آن‌ها ده و زیر ده است یعنی نرمال اکتان، نرمال نونان و نرمال دکان، کم‌تر و به ترتیب  $0/27$ ،  $0/24$  و  $0/25$  می‌باشد که مطابق با نمودارهای رسم شده نیز این نتیجه قابل مشاهده است به این صورت که تطابق بهتر و بیش‌تری بین مدل نیمه‌تجربی با داده‌های تجربی وجود دارد و در واقع با افزایش تعداد کربن میانگین نسبی خطا افزایش می‌یابد. علاوه بر این در محدوده دماهای پایین‌تر مدل به‌دست‌آمده تطابق بهتری را برای هر هشت هیدروکربن نشان داد.

مراجع:

- [1]. Poling, B. E., Prausnitz, J. M., & O'Connell, J. P. (2001). The properties of gases and liquids (Vol. 5). McGraw-hill New York.
- [2]. Nji, G. N., Svrcek, W. Y., Yarranton, H. W., & Satyro, M. A. (2008). Characterization of heavy oils and bitumens. 1. Vapor pressure and critical constant prediction method for heavy hydrocarbons. *Energy &*



temperature between (303.15 to 373.15) K and pressures up to 80 MPa. *Journal of Molecular Liquids*, 338, 116646.

- [16]. Cui, J., Yang, T., Bi, S., & Wu, J. (2024). Liquid viscosity, interfacial tension, thermal and mutual diffusivities of mixtures of n-eicosane with dissolved carbon dioxide. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 190, 107212.
- [17]. Banipal, T. S., Garg, S. K., & Ahluwalia, J. C. (1991). Heat capacities and densities of liquid n-octane, n-nonane, n-decane, and n-hexadecane at temperatures from 318.15 K to 373.15 K and at pressures up to 10 MPa. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 23(10), 923–931.
- [18]. Doolittle, A. K. (1964). Specific Volumes of n-Alkanes. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 9(2), 275–279.
- [19]. Baled, H. O. (2012). Density and viscosity of hydrocarbons at extreme conditions associated with ultra-deep reservoirs-measurements and modeling. University of Pittsburgh.
- [20]. Van Der Waals, J. D., & Rowlinson, J. S. (2004). On the continuity of the gaseous and liquid states. Courier Corporation.
- [21]. Redlich, O., & Kwong, J. N. S. (1949). On the thermodynamics of solutions. V. An equation of state. Fugacities of gaseous solutions. *Chemical Reviews*, 44(1), 233–244.
- [22]. Soave, G. (1972). Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state. *Chemical Engineering Science*, 27(6), 1197–1203.
- [23]. Peng, D.-Y., & Robinson, D. B. (1976). A new two-constant equation of state. diethylenetriamine as solvents for CO<sub>2</sub> absorption. *Journal of Molecular Liquids*, 278, 584–591.
- [10]. Wei, B., Gao, H., Pu, W., Zhao, F., Li, Y., Jin, F., Sun, L., & Li, K. (2017). Interactions and phase behaviors between oleic phase and CO<sub>2</sub> from swelling to miscibility in CO<sub>2</sub>-based enhanced oil recovery (EOR) process: a comprehensive visualization study. *Journal of Molecular Liquids*, 232, 277–284.
- [11]. Chen, Y., Sari, A., Xie, Q., & Saeedi, A. (2019). Insights into the wettability alteration of CO<sub>2</sub>-assisted EOR in carbonate reservoirs. *Journal of Molecular Liquids*, 279, 420–426.
- [12]. Philippe, R., Lacroix, M., Dreibine, L., Pham-Huu, C., Edouard, D., Savin, S., Luck, F., & Schweich, D. (2009). Effect of structure and thermal properties of a Fischer-Tropsch catalyst in a fixed bed. *Catalysis Today*, 147, S305–S312.
- [13]. Mahmoudi, H., Mahmoudi, M., Doustdar, O., Jahangiri, H., Tsolakis, A., Gu, S., & LechWyszynski, M. (2017). A review of Fischer Tropsch synthesis process, mechanism, surface chemistry and catalyst formulation. *Biofuels Engineering*, 2(1), 11–31.
- [14]. Cui, J., Wu, J., & Bi, S. (2021). Liquid viscosity, interfacial tension, thermal diffusivity and mutual diffusivity of n-Tetradecane with dissolved carbon dioxide. *Fluid Phase Equilibria*, 534, 112951.
- [15]. Yang, T., Sun, Y., Meng, X., Wu, J., & Siepmann, J. I. (2021). Simultaneous measurement of the density and viscosity for n-Decane+ CO<sub>2</sub> binary mixtures at



Industrial & Engineering Chemistry  
Fundamentals, 15(1), 59–64.

- [24]. Oudi, A., Hosseini, M., Azimi, S., & Davoodbeygi, Y. (2022). Modeling of Diffusion Coefficients for Binary Gas at  $P= 101.325$  kPa using Particle Swarm Optimization Algorithm. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 56(2), 317–329.
- [25]. Oudi, A., Faramarzi, S., Yarmohammadian, S., & Davoodbeygi, Y. (2022). Developing a model for calculating pure gas thermal conductivity at  $P= 1$ bar using particle swarm optimization algorithm. *Gas Processing Journal*, 10(1), 113–124.
- [26]. Oudi, A., Yarmohammadian, S., Hosseini, M., & Nemati Lay, E. (2023). Optimizing the coefficients of the particle swarm optimization algorithm to solve the problem of economic dispatching to reduce the emission of environmental pollutants. *Journal of Modeling in Engineering*, 21(75), 297–307.
- [27]. Mohsen-Nia, M., Modarress, H., & Mansoori, G. A. (2003). A cubic hard-core equation of state. *Fluid phase equilibria*, 206(1-2), 27-39.
- [28]. Yang, J., Meng, X., & Wu, J. (2018). Liquid Density of n-Pentene, n-Hexene, and n-Heptene at Temperatures from 283.15 to 363.15 K and Pressures up to 100 MPa. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 63(6), 2280–2289.



## A Semi-Empirical Correlation for the Liquid Density of Heavy Hydrocarbons in Certain Pressure and Temperature Ranges

Amirhossein Oudi<sup>1</sup>, Salehe Allami<sup>1</sup>, Yegane Davoodbeygi<sup>2\*</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
2. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

### ARTICLE INFO

ORIGINAL ARTICLE

#### Article History:

Received: 25 January 2025

Revised: 02 May 2025

Accepted: 20 May 2025

#### Keywords:

Heavy hydrocarbons

PSO algorithm

Physical and chemical properties

Liquid density

Equation of state

### ABSTRACT

In the oil industry, knowing the physical and chemical properties is a key element in the development and control of this industry. The present research was conducted with the aim of obtaining a simple semi-empirical correlation for the liquid density of heavy hydrocarbons in certain pressure and temperature range. Density of eight heavy hydrocarbons after collecting experimental data and critical properties using equations of state SRK and PR Calculation and objective function based on optimization algorithm PSO It was minimized. The results obtained from the values related to the constant coefficients of the semi-empirical correlation are indicative of the inverse and direct relationship of density with temperature and pressure, respectively. On the other hand, a lower value of relative average error for the obtained semi-empirical correlation compared to SRK and PR equations of state was obtained for hydrocarbons with less carbon number. Also, in the lower temperature range, this correlation has a better performance and agreement with the experimental data, and in general, the resulting relationship is simple and has high accuracy and flexibility. The results showed that the average percentage of relative error resulting from calculating the liquid density of 8 heavy hydrocarbons according to the presented semi-empirical model is 1.18%, which is 17.33% less than the SRK equation of state and 7.67% better than the PR equation of state.

DOR: [20.1001.1.2501.1082.1404.02.30](https://doi.org/10.1001.1.2501.1082.1404.02.30)

#### How to cite this article

A. Oudi, S. Allami, Y. Davoodbeygi, A Semi-Empirical Correlation for the Liquid Density of Heavy Hydrocarbons in Certain Pressure and Temperature Ranges. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025 12(1): 18-29. ([https://www.ijge.irangi.org/article\\_725703.html](https://www.ijge.irangi.org/article_725703.html))

\* Corresponding Author.

E-mail address: [y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir](mailto:y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir), (Y. Davoodbeygi).

Available online 22 Jun 2025

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



# مروری بر نانو کامپوزیت‌های چارچوب فلز-آلی و کاربرد آن در ذخیره‌سازی گاز

محمد رضا عبدی<sup>۱</sup>، ناهید سرلک<sup>۲\*</sup>، محمد حسین مهرآراد<sup>۳</sup>، مهرناز شهرآیینی<sup>۴</sup>

۱. دانشجو دکتری، گروه شیمی تجزیه، دانشکده شیمی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲. دانشیار، گروه شیمی تجزیه، دانشکده شیمی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۳. معاون تجاری‌سازی، مدیریت پژوهش و فناوری، شرکت ملی گاز ایران، تهران، ایران

۴. کارشناس ارشد کنترل طرح‌های انرژی و کربن، مدیریت انرژی و کربن، شرکت ملی گاز ایران، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: [sarlak.n@lu.ac.ir](mailto:sarlak.n@lu.ac.ir)

مقاله‌ی مروری

صفحه ۳۰ - ۵۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴

## چکیده

این مطالعه به بررسی جامع نانو کامپوزیت‌های چارچوب فلز-آلی (MOFs) و نقش آن‌ها در ذخیره‌سازی گاز می‌پردازد. MOFها به دلیل دارا بودن سطح ویژه بالا، ساختار متخلخل قابل تنظیم و پایداری حرارتی-شیمیایی مطلوب، از جمله مواد نویدبخش برای ذخیره‌سازی گازهای صنعتی و انرژی‌زا (مانند هیدروژن، متان و کربن دی‌اکسید) محسوب می‌شوند. در این پژوهش، ابتدا ساختار و روش‌های سنتز این مواد (از جمله هیدروترمال، سونوشیمیایی و روش‌های مبتنی بر میکروویو) تحلیل شده‌اند. سپس مکانیسم‌های ذخیره‌سازی گاز (جذب فیزیکی و شیمیایی) و کاربردهای آن در ذخیره‌سازی گازهای مختلف (هیدروژن، متان، کربن دی‌اکسید، گازهای نجیب و گازهای سمی) مورد بحث قرار گرفته است. علاوه بر این، تأثیر ترکیب MOFها با نانوذراتی (مانند پالادیوم و نانولوله‌های کربنی) بر افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی، بهبود انتخاب‌پذیری و ارتقای پایداری بررسی شده است. همچنین، طبقه‌بندی MOFها شامل IRMOF، ZIF و MIL و نقش آن‌ها در کاربردهای مختلف ارائه شده است. با این حال، چالش‌هایی نظیر هزینه تولید بالا، مسائل مقیاس‌پذیری و محدودیت‌های زیست‌محیطی، استفاده گسترده از این مواد را با دشواری مواجه کرده‌اند. در پایان، راهکارهای آینده‌نگرانه‌ای مانند به‌کارگیری روش‌های سنتز سبز، همکاری‌های بین‌رشته‌ای و پیشرفت‌های فناورانه به‌عنوان راه‌حل‌هایی برای دستیابی به فناوری‌های پایدار انرژی و حفاظت محیط‌زیست پیشنهاد شده‌اند.

کلیدواژه‌ها: نانو کامپوزیت‌های چارچوب فلز-آلی، ذخیره‌سازی گاز، جذب و جداسازی گازها، متان، هیدروژن، کربن دی‌اکسید

۱. مقدمه

در دنیای امروز، نیاز به فناوری‌های پیشرفته برای ذخیره‌سازی گازهای صنعتی و انرژی‌بر به‌طور فزاینده‌ای احساس می‌شود. یکی از چالش‌های اساسی در این حوزه، توسعه موادی با ظرفیت بالا، پایداری مناسب و قابلیت استفاده در شرایط عملیاتی گوناگون است. در این میان، نانو کامپوزیت‌های چارچوب فلز-آلی<sup>۱</sup> (MOFs) به‌عنوان یکی از گزینه‌های نوین و مؤثر مطرح شده‌اند [۱].

1. Metal-Organic Frameworks



ذخیره‌سازی کارآمد گازها یکی از چالش‌های مهم در حوزه انرژی، محیط‌زیست و صنایع شیمیایی محسوب می‌شود. استفاده از مواد متخلخل نظیر زئولیت‌ها، کربن فعال و چارچوب‌های فلز-آلی (MOFs) به‌عنوان جاذب‌های مؤثر برای این منظور مورد توجه قرار گرفته است. در میان این مواد، نانوکامپوزیت‌های چارچوب فلز-آلی به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، جایگاه ویژه‌ای در ذخیره‌سازی گاز پیدا کرده‌اند [۲ و ۳].

MOFs ساختارهای کریستالی متخلخلی هستند که از اتصال یون‌های فلزی یا خوشه‌های فلزی به لیگاند‌های آلی تشکیل می‌شوند و به دلیل دارا بودن سطح ویژه بالا، اندازه منافذ قابل تنظیم و پایداری حرارتی و شیمیایی مناسب، برای کاربردهای مختلف بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۴ و ۵]. به‌عنوان مثال، MOF-199 که یکی از شناخته‌شده‌ترین انواع MOF هاست و از ترکیب مس با بنزن تری کربوکسیلات تشکیل می‌شود به دلیل تنوع در انتخاب فلز و لیگاند، قابلیت طراحی برای کاربردهای خاص از جمله ذخیره‌سازی گاز را دارد [۶-۸]. MOFs با استفاده از روش‌هایی مانند هیدروترومال یا سولوترومال سنتز می‌شوند که امکان کنترل دقیق شرایط واکنش و دستیابی به ساختارهای کریستالی منظم را فراهم می‌کنند. این مواد به دلیل ویژگی‌هایی همچون سطح ویژه بالا، قابلیت تنظیم ساختار و پایداری شیمیایی و حرارتی، به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین مواد در حوزه جذب و جداسازی گازها شناخته می‌شوند. همچنین، ترکیب این مواد با نانوذرات، ظرفیت و کارایی آن‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش داده است [۹].

MOFs به دلیل ساختار منحصر به فردشان، کاربردهای وسیعی در زمینه‌های مختلف مانند جذب و جداسازی گازها، کاتالیز، ذخیره‌سازی انرژی و دارورسانی دارند [۱۰-۱۴]. این چارچوب‌ها نه تنها به‌عنوان مواد جاذب قوی شناخته می‌شوند، بلکه به دلیل تنظیم پذیری بالا، امکان بهینه‌سازی برای کاربردهای خاص را نیز فراهم می‌کنند. برای مثال، MOFsی که در جذب دی‌اکسید کربن استفاده می‌شوند، می‌توانند با تغییر در نوع فلز یا لیگاند، انتخاب پذیری بالایی نسبت به این گاز نشان دهند. این قابلیت‌ها MOFs را به یکی از پرکاربردترین مواد در صنایع پیشرفته تبدیل کرده است؛ اما محدودیت‌هایی مانند پایداری ساختاری در شرایط عملی، هزینه‌های بالا و فرآیندهای پیچیده سنتز،

نیازمند بهینه‌سازی و به‌کارگیری فناوری‌های جدید نظیر نانوکامپوزیت‌های MOF هستند. این مواد ترکیبی با بهبود عملکرد MOFs معمولی، خواص جذبی و مکانیکی بهتری ارائه می‌دهند و راه‌حل‌های نوینی برای ذخیره‌سازی گاز فراهم می‌کنند [۶].

در این مقاله، ابتدا به معرفی نانوکامپوزیت‌های MOF، ساختار و روش‌های تولید آن‌ها می‌پردازیم و سپس کاربردهای آن‌ها در ذخیره‌سازی گازهای مختلف را بررسی می‌کنیم. همچنین، چالش‌های موجود و آینده این فناوری مورد بحث قرار خواهد گرفت.

## ۲. مفاهیم اولیه و ساختار نانوکامپوزیت‌های MOF

نانوکامپوزیت‌های MOF ترکیباتی هستند که در آن‌ها نانوذرات فلزی یا غیرفلزی درون چارچوب‌های فلز-آلی تعبیه شده‌اند تا ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها بهبود یابد. این مواد با حفظ خواص منحصر به فرد MOFs، از جمله قابلیت تنظیم اندازه منافذ، انعطاف پذیری ساختاری و پایداری شیمیایی بالا، عملکردهای جدیدی مانند افزایش ظرفیت جذب گاز و پایداری ساختاری را فراهم می‌کنند. ساختار MOF ها را می‌توان با استفاده از واحدهای ساختمانی ثانویه<sup>۱</sup> (SBUs) طراحی کرد. این واحدها که شامل یون‌های فلزی و لیگاند‌های آلی هستند، از طریق پیوندهای کووالانسی و واندروالس به یکدیگر متصل شده و یک شبکه سه‌بعدی متخلخل را ایجاد می‌کنند. ساختار این نانوکامپوزیت‌ها شامل: گره فلز مرکزی (معمولاً از فلزاتی مانند مس، روی، زیرکونیوم، کبالت و یا آهن تشکیل شده‌اند)، لیگاند‌های آلی (پلیمرهای آلی که چارچوب سه‌بعدی ماده را ایجاد می‌کنند) و نانوذرات ترکیبی که به‌عنوان افزودنی برای بهبود عملکرد جذب گاز و افزایش استحکام مکانیکی MOFs استفاده می‌شوند، می‌باشد. این ساختار به MOFs اجازه می‌دهد تا علاوه بر حفظ خواص اولیه خود، عملکرد بهتری در فرآیند ذخیره‌سازی گازها داشته باشند [۱۵ و ۱۶].

با انتخاب پیوندهای آلی کارآمد و یون‌های فلزی برای استفاده بهتر از نور مرئی، می‌توان MOFsی را با ویژگی‌های منحصر به فرد تنظیم کرد. با توسعه چارچوب‌های فلز-آلی که در برابر آب و شرایط اسیدی مقاوم هستند، MOFs

1. Secondary Building Units



مختلفی برای طیف متنوعی از کاربردها از جمله حذف و اندازه‌گیری فلزات سنگین، دارورسانی، حذف فتوکاتالیستی آلاینده‌ها، تصویربرداری زیستی، حذف و اندازه‌گیری رنگ‌های طبیعی و سنتزی، جداسازی گاز، جذب و ذخیره گاز، تولید گاز هیدروژن، تثبیت کربن دی‌اکسید، ذخیره انرژی و کاتالیز ناهمگن انتخابی به کار گرفته می‌شوند [۱۵-۲۰].

### ۳. روش‌های سنتز نانو کامپوزیت‌های MOF

چارچوب‌های فلز-آلی را می‌توان با ترکیب اجزای معدنی و آلی برای تولید ساختارهای مختلف سنتز کرد [۲۱]؛ که اندازه حفره‌ها، مساحت سطوح و عملکردهای آن را می‌توان با انتخاب بلوک‌های ساختمانی مختلف تنظیم کرد. یون‌های فلزات واسطه، یون‌های فلز قلیایی و قلیایی خاکی، یون‌های فلزات خاکی کمیاب، خوشه‌های فلزی و یا اکسیدهای فلزی می‌توانند به‌عنوان واحدهای معدنی عمل کنند و هر پیوند کننده آلی چند موضعی را می‌توان به‌عنوان واحدهای آلی در نظر گرفت [۲۲]. آن‌ها توسط فعل و انفعالات کئوردینگی بین مولکول‌های پیوند دهنده و یون‌های فلزی سازماندهی می‌شوند و از این رو پلیمرهای کئوردینه متخلخل نامیده می‌شوند [۲۳ و ۲۴]. این درجه بالای سفارشی‌سازی ویژگی‌های چارچوب‌های فلز-آلی توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. تا به امروز، بیش از ۳۳ هزار ساختار مختلف MOF در حال گزارش و مطالعه است [۱]. روش‌های مختلفی برای سنتز MOFها وجود دارد و هر یک دارای مزایا و معایب خاص خود هستند و بسته به کاربرد نهایی، از رویکردهای مختلفی استفاده می‌شود. [۲۵-۲۷] که در ادامه به آن خواهیم پرداخت. انتخاب روش سنتز نیز تا حد زیادی به اهداف تحقیقاتی خاص و انواع تجهیزات و منابع موجود بستگی دارد [۲۸]. همچنین مزایا و معایب هر یک از روش‌های سنتز در (جدول ۱) نمایش داده شده است.

یکی از این روش‌ها سنتز سولوترمال<sup>۱</sup> و هیدروترمال<sup>۲</sup> می‌باشد که متداول‌ترین روش برای تهیه MOFها است. این روش شامل گرما دادن واکنش نمک‌های فلزی (مانند مس نیترات) و لیگاند‌های آلی (مانند ترمزیک اسید) در یک حلال در یک اتوکلاو با پوشش تفلون در دمای بالاتر از نقطه جوش حلال در یک سیستم بسته است. وقتی حلال آب باشد، به آن هیدروترمال می‌گویند. معمولاً مخلوط در یک

اتوکلاو تفلون در دمای ۱۰۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد برای چند ساعت تا چند روز گرم می‌شود. انتخاب حلال، دما و زمان واکنش بر کریستاله شدن، قابلیت تنظیم اندازه ذرات و مورفولوژی MOF تأثیر می‌گذارد. این روش برای تولید کریستال‌های تکی با کیفیت بالا مناسب است که برای آنالیز ساختاری با پراش اشعه ایکس مناسب است. با این حال، زمان واکنش طولانی (ساعات تا روزها)، مصرف زیاد انرژی و نیاز به حجم زیاد حلال که ممکن است سمی یا گران باشد و همچنین احتمال تشکیل محصولات فرعی ناخواسته از جمله معایب این روش است. همچنین، استفاده از حلال‌هایی مثل DMF به دلیل سمیت و دشواری در حذف از ساختار MOF مشکل‌ساز است. با وجود این، این روش به دلیل قابلیت اطمینان و کیفیت محصولات برای تولید انواع مختلف MOFها کاربردهای مختلفی دارد و به‌عنوان استاندارد اولیه برای سنتز MOFها به کار گرفته می‌شود [۲۹-۳۰].

روش دیگر روش سونوشیمی<sup>۳</sup> است که از امواج فراصوت با فرکانس بالا (۲۰ تا ۱۰۰۰ کیلوهرتز) برای ایجاد شرایط انرژی بالا از طریق پدیده حفره‌زایی جهت تشکیل MOFها استفاده می‌کند که با فروپاشی، دماهای تا ۵۰۰۰ کلوین و فشارهای تا ۱۸۰۰ اتمسفر تولید می‌کنند. این شرایط هسته‌زایی و رشد کریستال‌ها را تسریع می‌کند. این روش شامل تابش فراصوت به مخلوط فلزات و لینکرهای آلی در یک حلال است. برای مثال، MOF-5 می‌تواند در ۳۰ دقیقه با استفاده از فراصوت تولید شود که منجر به تولید نانوذرات با مساحت سطح بالا می‌شود. این روش برای تولید MOFهای نانوساختاری مناسب است و می‌تواند در دمای اتاق انجام شود که آن را از نظر انرژی کارآمد می‌کند. مزایای آن شامل سرعت بالا، تولید مواد نانوساختاری، عمل در دمای اتاق، دوستدار محیط‌زیست بودن، کنترل مورفولوژی و خلوص بالا است؛ اما تولید کریستال‌های تکی دشوار است و مقیاس پذیری برای تولید صنعتی پیچیده است، همچنین سنتز مجدد و تکرارپذیری این روش به دلیل تغییر در شدت امواج فراصوت قابل اطمینان نیست و احتمال تشکیل مواد آمورف نیز در آن بالا می‌باشد. با این حال، این روش برای کاربردهایی که نیاز به اندازه ذرات کوچک MOF مانند MOF-5 و ZIF-8 دارند مناسب است و در کاربردهایی مثل تحویل دارو، کاتالیز و ذخیره‌سازی گاز مفید است [۳۲ و ۳۳].

1. Solvothermal
2. Hydrothermal
3. Sonochemical

جدول ۱: مزایا و معایب روش‌های سنتز MOFها

معایب	مزایا	روش سنتز
<ul style="list-style-type: none"> <li>• زمان طولانی</li> <li>• نیاز به حلال بیشتر</li> <li>• تولید محصولات ناخواسته</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• سنتز یک مرحله‌ای</li> <li>• تولید کریستال‌های تکی</li> <li>• دمای متوسط</li> </ul>	سولوترمال/هیدروترمال
<ul style="list-style-type: none"> <li>• دشواری تولید کریستال‌های تکی</li> <li>• مشکلات مقیاس‌پذیری</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• سنتز سریع</li> <li>• خلوص بالا</li> <li>• مورفولوژی یکنواخت</li> <li>• دوستدار محیط‌زیست</li> </ul>	مایکروویو
<ul style="list-style-type: none"> <li>• دشواری تولید کریستال‌های تکی</li> <li>• مشکلات مقیاس‌پذیری</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• سنتز سریع</li> <li>• دوستدار محیط‌زیست</li> <li>• دمای اتاق</li> <li>• هسته‌زایی یکنواخت</li> </ul>	سونوشیمیایی
<ul style="list-style-type: none"> <li>• نیاز به اتمسفر نیتروژن</li> <li>• ساختار متغیر</li> <li>• بازده پایین</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• عدم نیاز به نمک‌های فلزی</li> <li>• شرایط ملایم</li> <li>• سنتز سریع</li> </ul>	الکتروشیمیایی
<ul style="list-style-type: none"> <li>• کاهش حجم منافذ</li> <li>• کریستاله شدن پایین</li> <li>• بازده پایین</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• دمای اتاق</li> <li>• سنتز سریع</li> <li>• دوستدار محیط‌زیست</li> </ul>	مکانوشیمیایی
<ul style="list-style-type: none"> <li>• پرهزینه</li> <li>• محدود به برخی MOF</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• سنتز بدون حلال</li> <li>• کنترل دقیق ضخامت</li> <li>• مناسب برای فیلم‌های نازک</li> </ul>	بخار شیمیایی

مشکلات در مقیاس بندی برای تولید انبوه و صنعتی هنوز چالش برانگیز است. این روش به دلیل کارایی و پتانسیل برای غربالگری اولیه با توان بالا و بهینه‌سازی ترکیبات جدید مفید در حال افزایش محبوبیت است و برای سنتز MOFهایی مثل UiO-66، MOF-5 و ZIF-8 مناسب است [۳۴ و ۳۵].

روش چهارم الکتروشیمیایی<sup>۲</sup> است که سنتز الکتروشیمیایی از یک سلول الکتروشیمیایی برای تشکیل MOFها استفاده می‌کند، جایی که در آن یون‌های فلزی از یک الکتروود فلزی تولید می‌شوند و فلز در آند اکسید می‌شود و با لیگاند آلی در محلول واکنش می‌دهد تا MOF روی الکتروود رسوب کند. این روش برای رشد فیلم‌های نازک MOF مانند آنالوگ‌های پروسین آبی که برای کاربردهای الکتروشیمیایی مهم هستند مناسب است. مزایای آن شامل تولید در محل الکتروود، عدم نیاز به نمک‌های فلزی پیش‌ساز، شرایط ملایم (دمای اتاق و فشار محیط)، مناسب بودن برای فیلم‌های نازک، سرعت بالا

روش سوم روش میکروویو<sup>۱</sup> یا ریزموج است که در آن از تابش مایکروویو برای گرم کردن سریع مخلوط واکنش استفاده می‌شود که منجر به کاهش قابل توجه زمان سنتز از چند روز به چند دقیقه یا ساعت می‌شود. این روش با تعامل مستقیم تابش مایکروویو با مولکول‌های قطبی در حلال، گرمایش یکنواخت و سریع ایجاد می‌کند، گرمایش یکنواخت از طریق مکانیزم‌های دی‌الکتریک باعث تسریع در هسته‌زایی و رشد کریستال‌ها می‌شود که منجر به خلوص بالا و مورفولوژی ذرات یکنواخت می‌شود. برای مثال، HKUST-1، یک MOF مبتنی بر مس، می‌تواند در تنها ۵ دقیقه با استفاده از گرمایش مایکروویو سنتز شود، در حالی که روش سولوترمال ۲۴ ساعت طول می‌کشد. مزایای آن شامل سرعت بالا، خلوص بالا، مورفولوژی یکنواخت و دوستدار محیط‌زیست بودن به دلیل مصرف کمتر حلال است. با این حال، تولید کریستال‌های تکی دشوار است و نیاز به تجهیزات ویژه و گران قیمت مانند راکتورهای مایکروویو و

1. Microwave  
2. Electrochemical



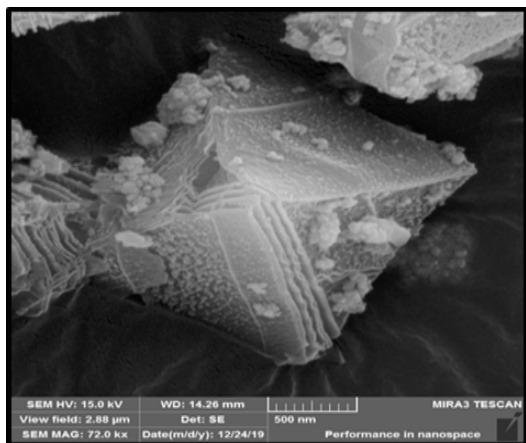
و کنترل رسوب است؛ اما نیاز به تجهیزات الکتروشیمیایی، ساختار متغیر و بازده پایین، خلوص کمتر نسبت به روش‌های دیگر و مشکلات در مقیاس بندی برای تولید انبوه از معایب آن است. محدودیت دیگر این روش در انتخاب فلزات و لیگاندها می‌باشد. این روش برای تولید فیلم‌های نازک ZIF-8 و MOF-5 برای کاربردهایی مثل جداسازی گاز، کاتالیز و حسگرهای الکتروشیمیایی که نیاز به کنترل دقیق و فیلم‌های نازک دارند، ارزشمند است [۳۶ و ۳۷].

پنجمین روش بخار شیمیایی<sup>۱</sup> است که شامل واکنش مواد فلزی و لینکرهای آلی در فاز گاز است که منجر به تشکیل MOFها بر روی یک سطح می‌شود. برای مثال، سنتز MOFها از پیش‌سازهای کربونیل فلزی مانند مولیبدن و تنگستن با جایگزینی CO با لینکرهای دوتایی مانند  $4,4'$ -بی‌پیریدین در فاز گاز گزارش شده است. این روش برای تولید فیلم‌های نازک MOF، پوشش دهی سطوح مختلف و کنترل دقیق ضخامت لایه مناسب است. مزایای آن شامل سنتز بدون حلال، کنترل دقیق ضخامت فیلم، مناسب بودن برای فیلم‌های نازک و پوشش‌ها و قابلیت انجام بر روی زمینه‌های بزرگ است. معایب آن شامل نیاز به تجهیزات ویژه و پرهزینه، پیچیدگی فرآیند و محدود بودن به برخی MOFها است. این روش به دلیل پتانسیل در کاربردهایی مانند حسگرهای گاز و دی‌الکترونیک‌ها در حال توسعه است [۳۸].

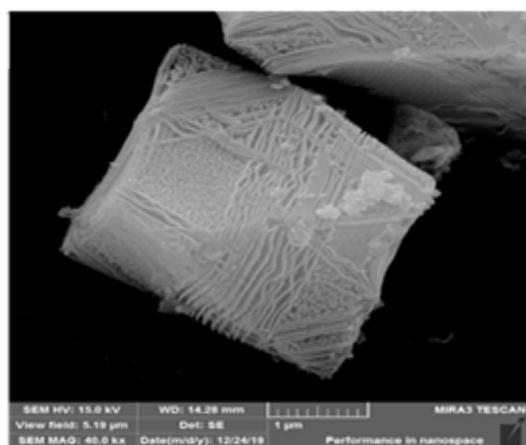
روش مکانوشیمیایی<sup>۲</sup> ششمین روش سنتز MOFها است که از انرژی مکانیکی مثل آسیاب یا خرد کردن برای واکنش بین پیش‌سازهای فلزی مانند زیرکونیوم کلرید و لیگاندهای آلی مانند ترفتالیک اسید استفاده می‌کند. این روش در دمای اتاق و بدون حلال یا با استفاده بسیار کم از حلال انجام می‌شود که آن را از نظر محیط‌زیست پایدارتر می‌کند. برای مثال، UiO-66 می‌تواند در ۳۰ دقیقه با این روش تولید شود. مزایای آن شامل دمای اتاق، تولید محصولات کمتر خطرناک، دوستانه محیط‌زیست بودن از طریق استفاده کم حلال یا بدون حلال، زمان واکنش کوتاه، قابلیت مقیاس بندی برای تولید انبوه و انعطاف‌پذیری با پیش‌سازهای نامحلول است؛ اما ممکن است حجم منافذ کاهش یابد، کریستاله شدن کم و بازده نسبت به روش سولوترمال کمتر باشد. همچنین دشواری در کنترل اندازه و مورفولوژی ذرات و مناسب نبودن برای همه MOFها از دیگر معایب این روش است. این روش برای تولید MOFهایی مثل ZIF-8 و UiO-66 به دلیل

پایداری محیطی و پتانسیل برای تولید بزرگ‌مقیاس مناسب است و برای تولید پایدار و مقیاس‌پذیر در صنعت مورد توجه قرار گرفته است [۳۹-۴۰].

انتخاب روش سنتز بستگی به نوع کاربرد و خواص مورد نیاز MOF دارد. برای مثال، برای کاربردهای صنعتی که به تولید انبوه نیاز دارند، روش‌های هیدروترمال و سولوترمال ترجیح داده می‌شوند، در حالی که برای کاربردهای خاص مانند پوشش‌دهی، روش بخار شیمیایی مناسب‌تر است [۲۹]. (شکل ۱) تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی HKUST-1 اصلاح شده با نانوذرات مغناطیسی که به روش هیدروترمال سنتز شده و دارای ساختارهای هشت وجهی هستند را نمایش می‌دهد [۸،۶].



الف)



ب)

شکل ۱: تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی بعضی از نانوکامپوزیت‌های MOF اصلاح شده با نانوذرات مغناطیسی (الف) نانوکامپوزیت HKUST-1 اصلاح شده با  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ، (ب) نانوکامپوزیت HKUST-1 اصلاح شده با  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  [۸،۶]

1. Chemical Vapor Deposition
2. Mechanochemical

در ادامه، انواع مختلف MOFها که در زمینه ذخیره‌سازی گازها استفاده می‌شوند، بر اساس ویژگی‌های ساختاری، ظرفیت ذخیره‌سازی، پایداری و کاربرد در (جدول ۲) مقایسه شده‌اند.

جدول ۲: مقایسه ویژگی‌های ساختاری، ظرفیت ذخیره‌سازی، پایداری و کاربرد MOFها در زمینه ذخیره‌سازی گازها

MOF	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	پایداری	ظرفیت گاز			مزایا	معایب
			H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>		
MOF-5	~ ۳۰۰۰	پایین	بالا	متوسط	متوسط	بالا	حساس به رطوبت، پایداری سنتز ساده، ظرفیت H <sub>2</sub> بالا
HKUST-1	~ ۱۵۰۰-۲۰۰۰	متوسط	متوسط	متوسط	بالا	جذب انتخابی CO <sub>2</sub> ، سایت‌های فلزی باز	حساس به رطوبت
ZIF-8	~ ۱۵۰۰	بالا	پایین	بالا	بالا	پایداری بالا، مقاومت به رطوبت	ظرفیت H <sub>2</sub> محدود
UiO-66	~ ۱۰۰۰-۱۵۰۰	بسیار بالا	پایین	بالا	بالا	پایداری عالی، مناسب کاربرد صنعتی	سطح ویژه کمتر
MIL-101	~ ۴۰۰۰-۵۵۰۰	متوسط	بالا	بالا	بالا	ظرفیت بالا، منافذ بزرگ	سنتز پیچیده، پایداری متوسط

#### ۴. مکانیزم‌های ذخیره‌سازی گاز در نانوکامپوزیت‌های MOF

نانوکامپوزیت‌های چارچوب فلز-آلی (MOFs) به دلیل ساختار متخلخل و سطح ویژه بالا، قابلیت ذخیره‌سازی گازهای مختلف را دارند. این ذخیره‌سازی به دوروش اصلی انجام می‌شود: یکی روش جذب فیزیکی که در طی آن، مولکول‌های گاز از طریق نیروهای واندروالس به سطح و منافذ MOF متصل می‌شوند و برای ذخیره‌سازی گازهای سبک مانند هیدروژن و متان کاربرد دارند. مزیت اصلی جذب فیزیکی، برگشت‌پذیری بالا و مصرف انرژی کم در فرآیند آزادسازی گاز است. روش دیگر جذب شیمیایی است که در این نوع جذب، پیوندهای کووالانسی قوی‌تری بین گاز و سطح نانوکامپوزیت شکل می‌گیرد. همچنین این روش بیشتر برای ذخیره‌سازی گازهای فعال مانند دی‌اکسید کربن استفاده می‌شود. چالش اصلی جذب شیمیایی، دشواری در آزادسازی گاز ذخیره‌شده است. منافذ نانوکامپوزیت‌های MOF باید به اندازه کافی کوچک باشند تا مولکول‌های گاز درون آن‌ها گیر بیفتند. افزایش سطح ویژه منجر به افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی می‌شود. با مهندسی نانوکامپوزیت‌ها می‌توان میزان جذب و رهایش گاز را بهینه کرد [۲۵].

#### ۵. بررسی کاربردهای مختلف نانوکامپوزیت‌های MOF در ذخیره‌سازی گاز

نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر MOF به دلیل ساختار متخلخل، سطح ویژه بالا و قابلیت تنظیم شیمیایی، به عنوان موادی امیدوارکننده در زمینه ذخیره‌سازی گاز مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته‌اند. این مواد ترکیبی از MOFها با

برای ذخیره‌سازی هیدروژن، MOF-5 و MIL-101 به دلیل سطح ویژه بالا و ظرفیت مناسب در دماهای پایین (77 K) مناسب هستند. با این حال، برای کاربردهای عملی، نیاز به بهبود پایداری MOF-5 یا استفاده از MIL-101 با طراحی بهینه وجود دارد. همچنین برای ذخیره‌سازی متان، UiO-66 و ZIF-8 به دلیل پایداری بالا و ظرفیت خوب در فشارهای متوسط تا بالا توصیه می‌شوند. این MOFها برای استفاده در مخازن سوخت و وسایل نقلیه مناسب‌اند. ضمن آنکه برای ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن، HKUST-1 و UiO-66 به دلیل تعامل قوی با CO<sub>2</sub> و پایداری مناسب، گزینه‌های عالی برای جذب و جداسازی CO<sub>2</sub> هستند.

اما ذخیره‌سازی گازها می‌تواند با چالش‌های مختلفی از جمله پایداری کم در برابر رطوبت و شرایط صنعتی به‌ویژه برای MOF-5 و HKUST-1 همراه باشد، همچنین هزینه سنتز بالا و مقیاس‌پذیری برای MOFهای پیچیده مانند MIL-101 و نیاز به بهینه‌سازی اندازه منافذ و تعاملات شیمیایی برای بهبود گزینش‌پذیری و ظرفیت از دیگر چالش‌ها در این زمینه است. در مجموع انتخاب MOF مناسب به نوع گاز، شرایط عملیاتی (دما، فشار، رطوبت) و الزامات صنعتی بستگی دارد. برای کاربردهای عمومی، UiO-66 به دلیل پایداری بالا و MIL-101 به دلیل ظرفیت ذخیره‌سازی بالا گزینه‌های برجسته‌ای هستند. با این حال، تحقیقات در حال توسعه MOFهای هیبریدی و کامپوزیتی است که ترکیبی از پایداری و ظرفیت بالا را ارائه می‌دهند.





گزینه‌ای ایده‌آل برای ذخیره‌سازی متان در وسایل نقلیه گازسوز مورد توجه قرار گیرند. علاوه بر این، تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که ترکیب MOFها با نانوذرات نیکل می‌تواند ظرفیت جذب متان را در دماهای پایین‌تر افزایش دهد که این موضوع برای کاربردهای صنعتی بسیار مهم است [۴۶]. همچنین، استفاده از نانوذرات مس در ساختار MOFها نیز باعث بهبود جذب متان در فشارهای پایین شده است [۴۷].

علاوه بر گازهای انرژی‌زا، نانوکامپوزیت‌های MOF مانند UiO-66 و MOF-74 در ذخیره‌سازی گازهای گلخانه‌ای مانند کربن دی‌اکسید ( $CO_2$ ) نیز کاربرد دارند. با توجه به افزایش نگرانی‌ها درباره تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی، جذب و ذخیره‌سازی  $CO_2$  به‌عنوان یک راه‌حل کلیدی برای کاهش انتشار این گاز گلخانه‌ای اهمیت زیادی دارد. نانوکامپوزیت‌های MOF با ساختارهای متخلخل، سطح ویژه بالا، پایداری شیمیایی بالا و توانایی جذب بالا قادر به جذب انتخابی  $CO_2$  از مخلوط گازها هستند و بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این ویژگی به دلیل امکان طراحی و تنظیم شیمیایی ساختار MOFها برای ایجاد برهمکنش‌های قوی با مولکول‌های  $CO_2$  است. استفاده از اصلاحات سطحی بر روی MOFها، جذب انتخابی  $CO_2$  را افزایش می‌دهد. برای مثال، ترکیب MOFها با نانو ذرات اکسید فلزی می‌تواند ظرفیت جذب  $CO_2$  را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد [۴۸]. همچنین، استفاده از نانولوله‌های کربنی در ساختار MOFها باعث بهبود پایداری حرارتی و افزایش ظرفیت جذب  $CO_2$  در دماهای بالا شده است [۴۹]. این ویژگی‌ها باعث شده تا نانوکامپوزیت‌های MOF به‌عنوان موادی پیشرفته در فناوری‌های جذب و ذخیره‌سازی کربن مورد استفاده قرار گیرند. علاوه بر این، تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که ترکیب MOFها با نانوذرات سیلیکا می‌تواند ظرفیت جذب  $CO_2$  را در فشارهای پایین‌تر افزایش دهد که این موضوع برای کاربردهای صنعتی بسیار مهم است [۵۰]. همچنین، استفاده از نانوذرات طلا در ساختار MOFها نیز باعث بهبود جذب  $CO_2$  در فشارهای پایین شده است [۵۱].

یکی دیگر از کاربردهای نوظهور نانوکامپوزیت‌های MOF، ذخیره‌سازی گازهای نجیب مانند آرگون و نئون است. این گازها در صنایع پزشکی، الکترونیک و روشنایی کاربردهای گسترده‌ای دارند، اما ذخیره‌سازی و انتقال آن‌ها به دلیل ماهیت بی‌اثر و چگالی پایین چالش‌برانگیز است [۶۵]. نانوکامپوزیت‌های MOF با ساختارهای متخلخل و قابلیت جذب انتخابی، می‌توانند به‌عنوان مخازن کارآمد برای ذخیره‌سازی این گازها

نانومواد دیگر مانند نانوذرات فلزی، نانولوله‌های کربنی یا گرافن هستند که عملکرد آن‌ها را در جذب و ذخیره‌سازی گازها بهبود می‌بخشند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای نانوکامپوزیت‌های MOF، ذخیره‌سازی گازهای انرژی‌زا مانند هیدروژن و متان است. هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی و سوخت پاک، تجدیدپذیر و پایدار، به دلیل چگالی انرژی بالا و انتشار صفر آلاینده‌ها، یکی از گازهای مهم برای ذخیره‌سازی است و مورد توجه بسیاری از صنایع قرار دارد. با این حال، ذخیره‌سازی ایمن و کارآمد هیدروژن در فشار و دمای محیط چالشی بزرگ است. نانوکامپوزیت‌های MOF با افزایش ظرفیت جذب، افزایش سطح ویژه، کاهش فشار ذخیره‌سازی و بهبود پایداری حرارتی، راه‌حلی مناسب برای این مشکل ارائه می‌دهند. برخی از MOFهای پیشرفته مانند HKUST-1 و MIL-101 توانایی جذب بالای هیدروژن را دارند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ترکیب MOFها با نانوذرات پالادیوم می‌تواند ظرفیت جذب هیدروژن را تا ۲/۵ درصد وزنی در دمای اتاق افزایش دهد [۴۱]. علاوه بر این، استفاده از نانولوله‌های کربنی در ساختار MOFها نیز باعث بهبود پایداری مکانیکی و افزایش چگالی ذخیره‌سازی هیدروژن شده است [۴۲]. همچنین، تحقیقات نشان می‌دهند که ترکیب MOFها با نانوذرات منیزیم می‌تواند ظرفیت جذب هیدروژن را در دماهای پایین‌تر افزایش دهد که این موضوع برای کاربردهای صنعتی بسیار مهم است [۴۳]. علاوه بر این، استفاده از نانوذرات نیکل در ساختار MOFها نیز باعث بهبود جذب هیدروژن در فشارهای پایین شده است [۴۴].

یکی دیگر از کاربردهای مهم نانوکامپوزیت‌های MOF، ذخیره‌سازی گاز متان است. متان به‌عنوان یک سوخت فسیلی پاک‌تر نسبت به نفت و زغال سنگ، به دلیل انتشار کمتر دی‌اکسید کربن، جایگزین مناسبی برای سوخت‌های سنتی محسوب می‌شود که نیاز به ذخیره‌سازی ایمن و کارآمد دارد. با این حال، ذخیره‌سازی متان در فشارهای بالا نیازمند مخازن سنگین و پرهزینه است. نانوکامپوزیت‌های MOF با افزایش چگالی ذخیره‌سازی متان در فشارهای پایین‌تر، امکان استفاده کارآمدتر از این گاز را فراهم می‌کنند. MOFهایی مانند ZIF-8 و MOF-177 با ظرفیت بالای جذب، می‌توانند متان را در فشار پایین ذخیره کنند. مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب MOFها با نانومواد کربنی مانند گرافن می‌تواند ظرفیت جذب متان را تا ۲۰ درصد افزایش دهد [۴۳]. همچنین، استفاده از نانوذرات اکسید فلزی در ساختار MOFها باعث بهبود جذب متان در فشارهای پایین شده است [۴۵]. این ویژگی‌ها باعث شده تا نانوکامپوزیت‌های MOF به‌عنوان

عمل کنند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ترکیب MOFها با نانولوله‌های کربنی می‌تواند ظرفیت جذب گازهای نجیب را تا ۳۰ درصد افزایش دهد [۶۶]. همچنین، استفاده از نانوذرات فلزی در ساختار MOFها باعث بهبود جذب انتخابی گازهای نجیب در دماهای پایین شده است [۶۷]. این ویژگی‌ها باعث شده تا نانوکامپوزیت‌های MOF به‌عنوان موادی امیدوارکننده در صنایع پزشکی و الکترونیک مورد توجه قرار گیرند. علاوه بر این، تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که ترکیب MOFها با نانوذرات طلا می‌تواند ظرفیت جذب گازهای نجیب را در فشارهای پایین‌تر افزایش دهد که این موضوع برای کاربردهای صنعتی بسیار مهم است [۶۸]. همچنین، استفاده از نانوذرات نقره در ساختار MOFها نیز باعث بهبود جذب گازهای نجیب در فشارهای پایین شده است [۶۹].

در نهایت، نانوکامپوزیت‌های MOF در ذخیره‌سازی گازهای سمی و خطرناک مانند آمونیاک و سولفید هیدروژن نیز کاربرد دارند. این گازها در صنایع شیمیایی و پتروشیمی به وفور تولید می‌شوند و مدیریت ایمن آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. نانوکامپوزیت‌های MOF با قابلیت جذب انتخابی و پایداری شیمیایی بالا، می‌توانند به‌عنوان فیلترهای کارآمد برای جذب و ذخیره‌سازی این گازها استفاده شوند [۷۰ و ۷۱]. برای مثال، ترکیب MOFها با نانوذرات نقره می‌تواند جذب سولفید هیدروژن را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد [۷۲]. همچنین، استفاده از نانوذرات اکسید فلزی در ساختار MOFها باعث بهبود جذب آمونیاک در

فشارهای پایین شده است [۷۳]. این ویژگی‌ها باعث شده تا نانوکامپوزیت‌های MOF به‌عنوان موادی پیشرفته در صنایع شیمیایی و پتروشیمی مورد استفاده قرار گیرند. علاوه بر این، تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که ترکیب MOFها با نانو ذرات مس می‌تواند ظرفیت جذب گازهای سمی را در فشارهای پایین‌تر افزایش دهد که این موضوع برای کاربردهای صنعتی بسیار مهم است [۷۴]. همچنین، استفاده از نانوذرات نیکل در ساختار MOFها نیز باعث بهبود جذب گازهای سمی در فشارهای پایین شده است [۴۲].

به‌طور کلی، نانوکامپوزیت‌های MOF با توجه به تنوع ساختاری و قابلیت‌های عملکردی، به‌عنوان موادی پیشرفته در زمینه ذخیره‌سازی گازها مطرح هستند. تحقیقات گسترده‌ای برای بهینه‌سازی و تجاری‌سازی این مواد در حال انجام است. با این حال، چالش‌هایی مانند هزینه تولید بالا، پایداری طولانی‌مدت و مقیاس‌پذیری صنعتی هنوز نیاز به بررسی بیشتر دارند. با پیشرفت فناوری‌های تولید نانوکامپوزیت‌ها و کاهش هزینه‌ها، انتظار می‌رود که این مواد در آینده‌ای نزدیک به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرند. MOFها به دلیل تنوع ساختاری و قابلیت‌های عملکردی گسترده، برای جذب گازهای مختلف طراحی و بهینه‌سازی شده‌اند. (جدول ۳)، دسته‌بندی کامل و دقیقی از انواع MOFها برای جذب گازهای مختلف ارائه می‌دهد. این دسته‌بندی نتایج مساحت سطح MOF برای جذب گاز در دما و فشار مورد نظر را نشان می‌دهد.

جدول ۳: MOFها برای جذب گازهای مختلف

منبع	فشار (bar)	دما (k)	BET (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	MOFs	گاز
[۵۲]	۲۰	۷۷	۲۶۳۰	MOF-650	H <sub>2</sub>
[۵۳]	۱۰۰	۷۷	۳۰۰۰	NPF-200	H <sub>2</sub>
[۵۴]	۴۰	۷۷	۳۵۱۲	MOF-5	H <sub>2</sub>
[۵۵]	۷۰	۷۷	۴۵۹۰	IRMOF-20	H <sub>2</sub>
[۵۶]	۷۶	۲۷۳	۲۷۱۰	MIL-101(Cr)	CH <sub>4</sub>
[۵۷]	۶۵	۲۷۳	۱۰۱۸	A100	CH <sub>4</sub>
[۵۸]	۴۰	۲۹۸	۱۸۵۰	HKUST-1	CH <sub>4</sub>
[۵۹]	۱	۲۹۸	۹۸۰	MIL-101(Cr)	CO <sub>2</sub>
[۶۰]	۴۰	۲۹۸	۹۱۵	MIL-101(Fe)	CO <sub>2</sub>
[۶۱]	۱	۲۹۸	۶۹۰	MOF-177	CO <sub>2</sub>
[۶۲]	۱	۷۷	۴۲۳	ZIF-8	Xe
[۶۳]	۱	۲۹۸	۲۳۵	MOF-801	H <sub>2</sub> S
[۶۴]	۱	۲۹۸	۱۱۸۶	Ni <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> BTDD	NH <sub>3</sub>



## ۶. دسته‌بندی و نام‌گذاری MOFs

MOFها وقتی با مواد خاصی مانند اکسیدهای فلزی، نقاط کوانتومی، مواد کربنی، مولکول‌ها، پلی‌اکسومتالات‌ها، پلیمرها و آنزیم‌ها ترکیب می‌شوند، می‌توانند نانوکامپوزیت‌های MOF را تهیه کنند که دارای تنوع گروه‌های عاملی هستند. بسته به واحد جزء آن‌ها، MOFها را می‌توان به دسته‌های مختلفی تقسیم کرد [۷۵].

### ۱-۶. MOFهای ایزورتیکولی<sup>۱</sup>

MOFهای ایزورتیکولی توسط SBUهای  $[Zn_4O]^{6+}$  و یک سری کربوکسیلات‌های آروماتیک سنتز می‌شوند. آن‌ها مواد کریستالی ریز متخلخل هشت وجهی هستند. در سال‌های اخیر برای پیشرفت سنسورها از IRMOF-3 به‌وفور استفاده شده است. ژو و همکارانش نانوصفحات IRMOF-3 را با حساسیت و گزینش عالی سنتز کردند [۷۶ و ۷۷].

### ۲-۶. چارچوب‌های امیدازولات زئولیتی<sup>۲</sup> (ZIFs)

ZIFها با استفاده از عناصر مختلفی که دارای الکترون‌های ظرفیت و مشتقات امیدازول هستند، سنتز می‌شوند. ZIFها شامل ZIF-7، ZIF-67، ZIF-71، ZIF-L، ZIF-90، ZIF-8، و غیره می‌باشند [۷۵]. ZIF-8 به دلیل عملکرد مهم آن، مانند حساسیت در برابر اسید، مساحت سطح بیش از حد، سمیت سلولی کمتر، اندازه منافذ بسیار زیاد فراتر از سایر ZIFها مورد بررسی قرار گرفته است. ZIFها دارای اندازه منافذ بزرگ و پایداری شیمیایی و حرارتی عالی هستند که به‌عنوان شبکه‌ای برای توسعه کامپوزیت‌های MOF جدید استفاده می‌شود [۷۸ و ۷۹].

### ۳-۶. شبکه‌های کئوردیناسیون متخلخل<sup>۳</sup> (PCN)

PCNها، مواد هشت وجهی، با توپولوژی حفره-قفس-حفره و ساختار سه بعدی هستند. برخی از آن‌ها PCN-333، PCN-224، PCN-222 و PCN-57 هستند که PCN-222 به‌طور گسترده در شیمی استفاده می‌شود [۷۵].

## ۴-۶. مؤسسه مواد لاوزیر<sup>۴</sup> (MIL)

MILها با استفاده از عناصر مختلفی که دارای الکترون‌های ظرفیت و یک ترکیب آلی حاوی دو گروه عاملی کربوکسیلیک هستند، سنتز می‌شوند. ترتیب اندازه منافذ MILها می‌تواند آزادانه تحت تحریک بیرونی باشد. MILها حاوی MIL-88، MIL-53، MIL-100، MIL-101، MIL-125 و غیره هستند [۷۵]. ژانگ و همکارانش MIL-101(Cr) را از طریق روش هیدروترمال برای ساخت موادی با حساسیت بالا سنتز کردند [۸۰]. به‌طور خاص، MILها چندین ویژگی منحصر به‌فرد مانند سطح فوق‌العاده بالا، منافذ یکنواخت و تخلخل دائمی را نشان می‌دهند که آن‌ها را به‌عنوان نامزدی مناسب برای کاربردهای مختلف معرفی می‌کند.

### ۵-۶. پلیمرهای کئوردینه کننده متخلخل<sup>۵</sup> (PCP)

مواد پلیمری متخلخل توسط کربوکسیلیک اسید، پیریدین و مشتقات آن به‌عنوان واحدهای سازنده اولیه<sup>۶</sup> (PBU) و یون‌های فلزات واسطه به‌عنوان SBU سنتز می‌شوند [۷۵]. لودی و همکاران برای اولین بار مجموعه شبکه سه‌بعدی آبی پروس را به‌عنوان PCP سنتز کردند [۸۱]. PCPها در جداسازی ماکرومولکول‌های زیستی و کاتالیز ناهمگن ویژگی‌های فوق‌العاده‌ای از خود نشان داده‌اند [۸۲ و ۸۳].

### ۶-۶. دانشگاه اسلو<sup>۷</sup> (UiO)

MOF دانشگاه اسلو بر اساس دی کربوکسیلیک اسید به‌عنوان PBU و  $(\mu_3\text{-OH})_4(\mu_3\text{-O})_6$  Zr به‌عنوان SBU برای اولین بار توسط لیلرود و همکارانش سنتز شد. UiO-66 (Zr) با یک روش سولوترمال از  $ZrCl_4$  و BDC با حفره‌های قفس هشت وجهی و چهاروجهی ساخته شد [۸۴]. UiO-66 پایداری ترمودینامیکی بسیار بالایی دارد و نتایج تجربی نشان می‌دهد که چارچوب در  $\text{pH} = 14$  پایدار است [۸۵]. UiO-66 با موفقیت برای ذخیره‌سازی گاز استفاده شده است. UiOهای مختلفی مانند UiO-66، UiO-67 و UiO-68 تاکنون ساخته و به‌کاربرده شده‌اند.

1. Isoreticular MOFs
2. Zeolitic Imidazolate Frameworks
3. Porous Coordination Networks
4. Materials Institute Lavoisier
5. Porous Coordination Polymers
6. Primary Building unit
7. University of Oslo

علاوه بر این، بر اساس طبقه‌بندی فوق، MOF‌های متعددی مانند دانشگاه نورث وسترن (NU) [۸۶]، دانشگاه علم و فناوری پوهانگ (POST) [۸۷]، دانشگاه فناوری درسدن (DUT) [۸۸]، دانشگاه ناتینگهام (NOTT) [۸۹]، دانشگاه علم و فناوری هنگ‌کنگ (HKUST) [۹۰] و دانشگاه کیل (CAU) [۹۱] در سال‌های اخیر وجود داشته‌اند.

#### ۶-۷. نام‌گذاری MOFs

اخیراً اجزای مختلفی که متشکل از یون‌های فلزی مرتبط با پیوندهای آلی هستند گزارش شده است. این مواد با نام‌های مختلفی مانند چارچوب‌های فلز-آلی، مواد آلی-غیرآلی هیبریدی، پلیمرهای فلز-آلی، پلیمرهای کئوردینه و آنالوگ‌های زئولیت آلی شناخته می‌شوند. کلمه MOF حضور یک ساختار جاذب و همچنین یک پیوند قوی سخت-چارچوب را با یک هندسه مشخص نشان می‌دهد که در آن SBU را می‌توان در طول فرآیند سنتز جایگزین کرد [۹۲]. مخفف MOF به‌طور کلی به‌عنوان یک نام مشترک از دسته ترکیبات استفاده می‌شود. هنگامی که با یک عدد ترتیبی دنبال می‌شود، نشان دهنده یک MOF خاص است [۹۳-۹۵]. UiO-۹۶، [۹۶، ۹۷]، MIL-۹۸-۱۰۰، [۱۰۰]، HKUST-۱۰۱ [و غیره. علاوه بر این، یک خانواده بزرگ از MOF، چارچوب ایمیدازولات زئولیت است که در آن فلزات واسطه (Zn، Fe، Cu، Co و غیره) از طریق اتم‌های N<sub>2</sub> پیوند می‌خورند و با حلقه‌های ایمیدازول مرتبط می‌شوند [۱۰۲ و ۱۰۳].

#### ۷. نانوذرات در بهبود عملکرد MOFها

نانوذرات در بهبود عملکرد MOFها به‌ویژه در افزایش ظرفیت جذب، اصلاح شیمی سطح و بهبود خواص مکانیکی نقش مهمی ایفا می‌کنند، تعامل بین نانوذرات و MOFها معمولاً از طریق پیوندهای شیمیایی، نیروهای واندروالسی یا ادغام فیزیکی نانوذرات در ساختار MOF صورت می‌گیرد. به‌عنوان مثال: نانوذرات فلزی (طلا و نقره) با افزودن سایت‌های فعال به سطح MOFها، ظرفیت جذب گازهای خاصی مانند CO<sub>2</sub> و CH<sub>4</sub> را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند [۱۰۴]. نانوذرات مغناطیسی علاوه بر بهبود ظرفیت جذب، امکان جداسازی آسان MOFها پس از استفاده را فراهم می‌کنند [۸]. نانوذرات کربنی نظیر گرافن و نانولوله‌های کربنی به دلیل خواص رسانایی و سطح فعال بالا، ظرفیت

جذب و پایداری MOFها را تقویت می‌کنند [۱۰۵]؛ و در نهایت نانوذرات اکسید فلزی که استفاده از نانوذرات اکسید تیتانیوم یا زیرکونیوم در MOFها باعث افزایش انتخاب‌پذیری و پایداری در برابر شرایط سخت محیطی می‌شود [۱۰۶ و ۱۰۷]

نانوذرات فلزی مانند پالادیوم، پلاتین و نیکل به دلیل فعالیت کاتالیستی بالا و قابلیت جذب گاز، به‌طور گسترده‌ای برای بهبود ظرفیت جذب گاز در MOFها مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مثال، ترکیب MOF-5 با نانوذرات پالادیوم باعث افزایش ظرفیت جذب هیدروژن در دمای اتاق شده است [۴۱]. این بهبود به دلیل تشکیل پیوندهای قوی بین اتم‌های هیدروژن و نانوذرات پالادیوم است. همچنین، نانوذرات نیکل در ساختار MOF-74 باعث افزایش ظرفیت جذب متان تا ۲۰ درصد در فشارهای پایین شده است [۴۶]. این بهبود به دلیل افزایش سطح فعال و ایجاد برهمکنش‌های قوی بین مولکول‌های متان و نانوذرات نیکل است.

یکی از کاربردهای ترکیب نانوذرات با MOFها، استفاده در جداسازی گازهای صنعتی مانند متان و هیدروژن است. به‌عنوان نمونه، ترکیب MOF-74 با نانوذرات پالادیوم توانسته است ظرفیت جذب هیدروژن را تا ۳۰ درصد افزایش دهد [۱۰۸]. همچنین در کاربردهای زیست‌محیطی، استفاده از نانوذرات اکسید روی در MOFها به حذف مؤثر گازهای سمی مانند H<sub>2</sub>S کمک کرده است [۱۰۹].

یکی از چالش‌های اصلی MOFها، پایداری حرارتی و مکانیکی پایین است که محدودیت‌هایی را در کاربردهای صنعتی ایجاد می‌کند. نانوذرات اکسید فلزی مانند ZrO<sub>2</sub> و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به دلیل پایداری حرارتی بالا، به‌طور گسترده‌ای برای بهبود پایداری MOFها مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مثال، ترکیب UiO-66 با نانوذرات ZrO<sub>2</sub> باعث افزایش پایداری حرارتی تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد شده است [۱۱۰]. این بهبود به دلیل تشکیل پیوندهای قوی بین نانوذرات ZrO<sub>2</sub> و ساختار MOF است. همچنین، نانوذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در ساختار MIL-53 باعث افزایش پایداری مکانیکی و مقاومت در برابر فشارهای بالا شده است [۱۱۱].

سرعت جذب و واجذب گاز یکی از پارامترهای مهم در کاربردهای صنعتی است. نانوذرات فلزی به دلیل فعالیت کاتالیستی بالا، به‌طور گسترده‌ای برای افزایش سرعت جذب و واجذب گاز در MOFها مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مثال، ترکیب MOF-5 با نانوذرات پلاتین باعث افزایش





سرعت جذب هیدروژن تا ۵۰ درصد شده است، این بهبود به دلیل فعالیت کاتالیستی بالای نانوذرات پلاتین و کاهش انرژی فعال‌سازی فرآیند جذب است [۱۱۲]. همچنین، نانوذرات مس در ساختار HKUST-1 باعث افزایش سرعت و جذب کربن دی‌اکسید شده است [۱۱۳].

جذب انتخابی گازهای خاص در حضور گازهای دیگر، یکی از چالش‌های اصلی در کاربردهای صنعتی است. نانوذرات فلزی و غیرفلزی به دلیل قابلیت تنظیم شیمیایی، به‌طور گسترده‌ای برای بهبود جذب انتخابی گاز در MOF ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مثال، ترکیب ZIF-8 با نانوذرات نقره باعث افزایش جذب انتخابی  $CO_2$  در حضور گاز  $H_2$  شده است. این بهبود به دلیل تشکیل پیوندهای قوی بین مولکول‌های  $CO_2$  و نانوذرات نقره است [۱۱۴].

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در بهبود عملکرد MOF ها با استفاده از نانوذرات، چالش‌هایی مانند هزینه تولید بالا، مقیاس‌پذیری صنعتی و پایداری طولانی‌مدت هنوز نیاز به بررسی بیشتر دارند. ز همچنین، پایداری طولانی‌مدت MOF ها در شرایط عملیاتی مختلف نیاز به بررسی بیشتر دارد. با این حال، پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های تولید نانوذرات و کاهش هزینه‌ها، امیدواری‌هایی را برای استفاده گسترده از MOF ها در صنایع مختلف ایجاد کرده است.

## ۸. چالش‌ها و محدودیت‌های استفاده از نانوکامپوزیت‌های MOF

علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر در استفاده از MOF ها و نانوذرات، چالش‌هایی نیز در این زمینه وجود دارد. هزینه‌های تولید و تجاری‌سازی بالای فرآیندهای پیچیده سنتز نانوکامپوزیت MOF ها هزینه‌های تولید را افزایش می‌دهند؛ که نیاز به روش‌های مقرون‌به‌صرفه برای تولید انبوه MOF ها احساس می‌شود. برای مثال، هزینه تولید نانوذرات فلزی مانند پالادیوم و پلاتین بسیار بالا است که محدودیت‌هایی را در کاربردهای صنعتی ایجاد می‌کند. یکی از اصلی‌ترین چالش‌های استفاده از MOF ها در ذخیره‌سازی گازها، پایداری ساختاری و شیمیایی آن‌ها در شرایط عملیاتی است. بسیاری از MOF ها در مواجهه با رطوبت، دماهای بالا یا فشارهای شدید، دچار تخریب ساختاری می‌شوند. برای مثال، MOF-5 که یکی از پرکاربردترین MOF ها است، در حضور رطوبت به سرعت تجزیه می‌شود [۱۱۵]. این مسئله باعث کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی و عمر مفید ماده می‌شود؛ بنابراین، بهبود پایداری MOF ها در شرایط محیطی

مختلف برای افزایش مقاومت مکانیکی و شیمیایی از جمله چالش‌های اصلی در این حوزه است.

اگرچه MOF ها به دلیل سطح ویژه بالا و تخلخل قابل تنظیم، ظرفیت ذخیره‌سازی بالایی برای گازهایی مانند هیدروژن، متان و دی‌اکسیدکربن دارند، اما در برخی موارد ظرفیت ذخیره‌سازی آن‌ها در فشارهای پایین محدود است. علاوه بر این، انتخاب‌پذیری MOF ها در جذب گازهای خاص نیز نیاز به بهبود دارد. برای مثال، در کاربردهای جداسازی گازها، MOF ها باید بتوانند به‌طور انتخابی گازهای هدف را جذب کنند، اما در بسیاری از موارد، این انتخاب‌پذیری به دلیل شباهت در اندازه و خواص شیمیایی گازها، محدود است [۱۱۶]. فرآیند سنتز MOF ها اغلب پیچیده و پرهزینه است. استفاده از پیش‌ماده‌های گران‌قیمت و شرایط سنتز دقیق (مانند دمای بالا و فشار کنترل شده) باعث افزایش هزینه تولید این مواد می‌شود. علاوه بر این، مقیاس‌پذیری تولید MOF ها برای کاربردهای صنعتی نیز یک چالش بزرگ است. بسیاری از روش‌های سنتز MOF ها در مقیاس آزمایشگاهی قابل اجرا هستند، اما در مقیاس صنعتی با مشکلاتی مانند کنترل کیفیت و یکنواختی ساختار مواجه می‌شوند [۱۱۷].

استفاده از فلزات سنگین و مواد آلی در ساختار MOF ها ممکن است مسائل زیست‌محیطی و ایمنی ایجاد کند. برخی از فلزات مورد استفاده در ساختار MOF ها (مانند کادمیوم یا سرب) سمی هستند و می‌توانند برای محیط‌زیست و سلامت انسان مضر باشند. علاوه بر این، برخی از MOF ها در شرایط خاص ممکن است گازهای سمی منتشر کنند که این موضوع نیاز به بررسی دقیق‌تر در کاربردهای عملی دارد [۱۱۸]. در کاربردهای عملی مانند ذخیره‌سازی هیدروژن در وسایل نقلیه یا جداسازی دی‌اکسید کربن از گازهای خروجی، MOF ها باید در شرایط دینامیکی و تحت فشارهای متغیر عملکرد مناسبی داشته باشند. با این حال، بسیاری از MOF ها در شرایط عملیاتی واقعی، عملکرد مطلوبی از خود نشان نمی‌دهند. برای مثال، در ذخیره‌سازی هیدروژن، MOF ها باید بتوانند در دمای محیط و فشارهای پایین، گاز را به‌طور مؤثر جذب و آزاد کنند، اما در بسیاری از موارد، این عملکرد محدود است [۱۱۹].

برخی مواد اولیه مورد استفاده در سنتز MOF ها ممکن است سمی باشند، تحقیقات بیشتری برای یافتن جایگزین‌های ایمن‌تر لازم است. همچنین بازیافت مواد از جمله چالش‌های

اصلی است. علاوه بر این، محدودیت در دسترسی به مواد اولیه باکیفیت و فناوری‌های پیشرفته تولید، مشکلات دیگری ایجاد کرده است [۲۱]. برای رفع و یا کاهش این چالش‌ها استفاده از مواد اولیه ارزان‌تر مانند فلزات در دسترس‌تر، توسعه روش‌های سنتز سبز و کم‌هزینه، بهبود تکنیک‌های بازیافت MOFها و نانوذرات پس از استفاده و همچنین تحقیقات بیشتر روی ترکیبات هیبریدی برای افزایش پایداری و کاهش هزینه‌ها تاکنون پیشنهاد شده است [۹]. با این حال، پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های تولید نانوذرات و کاهش هزینه‌ها، امیدواری‌هایی را برای استفاده گسترده از MOFها در صنایع مختلف ایجاد کرده است.

## ۹. نتیجه‌گیری

MOFها به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین مواد متخلخل در حوزه جذب و جداسازی گازها معرفی شده‌اند که ویژگی‌های منحصر به فردی مانند سطح ویژه بالا، تخلخل قابل تنظیم، پایداری شیمیایی و حرارتی دارند، توانایی ترکیب با نانوذرات، این مواد را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای صنعتی و زیست‌محیطی تبدیل کرده است. استفاده از نانوذرات در کنار MOFها، کارایی و پایداری این مواد را بهبود بخشیده و امکان توسعه فناوری‌های نوین در جذب و ذخیره‌سازی گازها را فراهم می‌کند. این بررسی جامع، ساختار، روش‌های سنتز، مکانیزم‌های ذخیره‌سازی گاز، کاربردهای متنوع، طبقه‌بندی، نقش نانوذرات و چالش‌های پیش‌رو را پوشش داده است.

ساختار MOFها که از گره‌های فلزی (مانند مس، روی) و لیگندهای آلی تشکیل شده‌اند، به همراه نانوذرات، شبکه‌ای سه‌بعدی و متخلخل ایجاد می‌کند که ظرفیت جذب گاز را افزایش می‌دهد. روش‌های سنتز مانند هیدروترمال، سونوشیمیایی، میکروویو، الکتروشیمیایی و مکانیوشیمیایی هر کدام مزایا و محدودیت‌هایی دارند؛ مثلاً روش سونوشیمیایی سریع و دوستدار محیط‌زیست است، اما مقیاس‌پذیری آن چالش‌برانگیز است. مکانیزم‌های ذخیره‌سازی شامل جذب فیزیکی (برای گازهای سبک مانند هیدروژن و متان) و جذب شیمیایی (برای گازهای واکنش‌پذیر مانند CO<sub>2</sub>) است که با مهندسی سطح و تخلخل بهینه می‌شود.

کاربردهای نانوکامپوزیت‌های MOF شامل ذخیره‌سازی گازهای انرژی‌زا (هیدروژن، متان)، گازهای گلخانه‌ای (دی‌اکسید کربن)، گازهای نجیب (آرگون، نئون) و گازهای سمی (آمونیاک، سولفید هیدروژن) است. مثال‌هایی مانند HKUST-1 برای هیدروژن، ZIF-8 برای متان و UiO-66

برای CO<sub>2</sub> نشان‌دهنده کارایی آن‌ها هستند. (جدول ۲)، ظرفیت‌های ذخیره‌سازی را برای MOFهای مختلف ارائه می‌دهد؛ مثلاً MOF-650 با سطح ۲۶۳۰ مترمربع بر گرم برای هیدروژن در ۷۷ کلوین و ۲۰ بار [۵۲] و MIL-101(Cr) با سطح ۲۷۱۰ مترمربع بر گرم برای متان در ۲۷۳ کلوین و ۷۶ بار [۵۶]. عملکرد بالایی دارند. طبقه‌بندی MOFها به دسته‌هایی مانند MIL، ZIF، IRMOF، UiO، تنوع و قابلیت سفارشی‌سازی آن‌ها را نشان می‌دهد. نقش نانوذرات، مانند نانوذرات پالادیوم برای افزایش ظرفیت هیدروژن و نانولوله‌های کربنی برای متان و CO<sub>2</sub>، اهمیت زیادی دارد. با این حال، چالش‌هایی مانند هزینه تولید بالا، ناپایداری ساختاری در شرایط رطوبت و دمای بالا، انتخاب‌پذیری محدود و مقیاس‌پذیری صنعتی همچنان وجود دارند. نگرانی‌های زیست‌محیطی از استفاده از اجزای سمی و نیاز به روش‌های سنتز پایدار نیز مطرح است. برای رفع این چالش‌ها، تحقیقات آینده باید بر توسعه روش‌های سنتز مقرون‌به‌صرفه و مقیاس‌پذیر، بهبود پایداری و افزایش ظرفیت و انتخاب‌پذیری تمرکز کند [۱۲۰ و ۱۲۱]. استفاده از اصول شیمی سبز، مواد اولیه ارزان‌تر و تکنیک‌های بازیافت می‌تواند هزینه‌ها را کاهش دهد و تأثیر زیست‌محیطی را کم کند. همکاری‌های بین‌رشته‌ای بین شیمی دانان، مهندسان و دانشمندان مواد برای انتقال این مواد از آزمایشگاه به صنعت ضروری است. در نهایت، نانوکامپوزیت‌های MOF پتانسیل بالایی برای حل چالش‌های جهانی مانند ذخیره‌سازی انرژی پاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند و با پیشرفت مداوم در حوزه‌ی نانوفناوری، هوش مصنوعی و مدل‌سازی محاسباتی، انتظار می‌رود که طراحی MOFهای جدید با ظرفیت‌های بهینه‌تر نویدبخش کاربرد گسترده آن‌ها در آینده باشد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از تحصیلات تکمیلی دانشگاه لرستان و شرکت ملی گاز ایران به‌خاطر حمایت مالی و همچنین داوران و سردبیر این ژورنال به‌خاطر پیشنهادهای سازنده و تأثیرگذارشان در ارتقا سطح این اثر اعلام می‌دارند.

## مراجع:

- [1]. H. Furukawa, K. Cordova, M. O'Keeffe, O.M. Yaghi, The chemistry and applications of metal-organic frameworks,



- organic Frameworks for Determination of Heavy Metals in Different Cosmetic Products Available in Iran Market by Flame Atomic Absorption Spectroscopy, *Analytical and Bioanalytical Chemistry Research*, 12 (2025) 11-25 <https://doi.org/10.22036/abcr.22024.457668.452108>.
- [9]. M.R. Abdi, Fabrication of novel magnetic metal-organic framework (MOF): cobalt Ferrite@ Cu<sub>3</sub> (BTC) 2 nanocomposite, *Biological and Molecular Chemistry*, 1 (2023) 1-14 <https://doi.org/10.22034/bmc.22023.408859.401000>.
- [10]. R. Xin, X. Y. Yu, W.-P. Gao, N. Wang, J.-J. Yang, X.-S. Qu, X. Zhang, Hydrothermal syntheses, crystal structures and luminescence properties of Cd (II) coordination polymers based on 2-(pyridine-2-yl)-1H-imidazole-4, 5-dicarboxylic acid, *Inorganic Chemistry Communications*, 35 (2013) 38-41 <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2013.1005.1019>.
- [11]. H. Wang, X. Yuan, G. Zeng, Y. Wu, Y. Liu, Q. Jiang, S. Gu, Three dimensional graphene based materials: Synthesis and applications from energy storage and conversion to electrochemical sensor and environmental remediation, *Advances in colloid and interface science*, 221 (2015) 41-59 <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.1004.1005>.
- [12]. W.-X. Xu, J. Li, R.-P. Liu, W.-X. Zhou, W.-Y. Ma, F.-X. Zhang, A novel 1D linear zinc (II) coordination polymer based 2, 2'-bipyridine-4, 4'-dicarboxylic acid: Synthesis, crystal structure and photoluminescence property, *Inorganic Chemistry Communications*, 28 (2013) 12-15 <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2012.1011.1008>.
- [13]. Y. Liu, Z. . Wang, H.C. Zhou, Recent Science, 341 (2013) 1230444 <https://doi.org/10.1016/j.science.2013.1230444>.
- [2]. J.-R. Li, R.J. Kuppler, H.-C. Zhou, Selective gas adsorption and separation in metal-organic frameworks, *Chemical Society Reviews*, 38 (2009) 1477-1504 <https://doi.org/10.1039/B802426J>.
- [3]. M.H. Yap, K.L. Fow, G.Z. Chen, Synthesis and applications of MOF-derived porous nanostructures, *Green Energy & Environment*, 2 (2017) 218-245 <https://doi.org/10.1016/j.gee.2017.1005.1003>.
- [4]. J.-E. Cun, X. Fan, Q. Pan, W. Gao, K. Luo, B. He, Y. Pu, Copper-based metal-organic frameworks for biomedical applications, *Advances in Colloid and Interface Science*, 305 (2022) 102686 <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102686>.
- [5]. S. Roy, J. Darabdhara, M. Ahmaruzzaman, ZnO-based Cu metal-organic framework (MOF) nanocomposite for boosting and tuning the photocatalytic degradation performance, *Environmental Science and Pollution Research*, 30 (2023) 95673-95691, <https://doi.org/10.1007/s11356-095023-29105-95674>.
- [6]. M.R. Abdi, N. Sarlak, Utilization of CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@HKUST-1 for Solid-phase Microextraction and HPLC-UV Determination of NSAIDs in Serum, Plasma, and Urine Samples, *Analytical and Bioanalytical Chemistry Research*, 12 (2025) 137-158 <https://doi.org/10.22036/abcr.22025.488638.482220>.
- [7]. P. Silva, S. .F. Vilela, J.P.C. Tome, F.A.A. Paz, Multifunctional metal-organic frameworks: from academia to industrial applications, *Chemical Society Reviews*, 44 (2015) 6774-6803 <https://doi.org/10.1039/C6775CS00307E>.
- [8]. M.R. Abdi, N. Sarlak, Magnetic Metal-



- A.K. Cheetham, J. Wang, Binder-free 3D printing of covalent organic framework (COF) monoliths for CO<sub>2</sub> adsorption, *Chemical Engineering Journal*, 403 (2021) 126333 <https://doi.org/126310.121016/j.cej.122020.126333>.
- [20]. H.K. Machhi, K.K. Sonigara, S.N. Bariya, H.P. Soni, S.S. Soni, Hierarchically porous metal-organic gel hosting catholyte for limiting iodine diffusion and self-discharge control in sustainable aqueous zinc-I<sub>2</sub> batteries, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13 (2021) 21426-21435 <https://doi.org/21410.21021/acsami.21421c03812>.
- [21]. K.K. Gangu, S. Maddila, S.B. Mukkamala, S.B. Jonnalagadda, A review on contemporary metal-organic framework materials, *Inorganica Chimica Acta*, 446 (2016) 61-74 <https://doi.org/10.1016/j.ica.2016.1002.1062>.
- [22]. S. Yuan, L. Feng, K. Wang, J. Pang, M. Bosch, C. Lollar, Y. Sun, J. Qin, X. Yang, P. Zhang, Stable metal-organic frameworks: design, synthesis, and applications, *Advanced Materials*, 30 (2018) 1704303 <https://doi.org/1704310.1701002/adma.201704303>.
- [23]. R.E. Morris, P.S. Wheatley, Gas storage in nanoporous materials, *Angewandte Chemie International Edition*, 47 (2008) 4966-4981 <https://doi.org/4910.1002/anie.200703934>.
- [24]. D.J. Tranchemontagne, J.L. Mendoza-Cortés, M. O'keeffe, O.M. Yaghi, Secondary building units, nets and bonding in the chemistry of metal-organic frameworks, *Chemical Society Reviews* 38 (2009) 1257-1283, <https://doi.org/1210.1039/B817735J>.
- [25]. J.A. Martens, J. Jammaer, S. Bajpe, A. Aerts, Y. Lorgouilloux, C.E.A. Kirschhock, Simple synthesis recipes of porous materials, *Microporous and Mesoporous advances in carbon dioxide capture with metal-organic frameworks*, *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2 (2012) 239-259 <https://doi.org/210.1002/ghg.1296>.
- [14]. S. Wang, G. Li, Q. Huo, Y. Liu, Syntheses, crystal structures of two coordination polymers constructed from imidazole-based dicarboxylate ligands containing alkyl group, *Inorganic Chemistry Communications*, 30 (2013) 115-119 <https://doi.org/110.1016/j.inoche.2013.1001.1005>.
- [15]. M. Luo, J. Yang, X. Li, M. Eguchi, Y. Yamauchi, Z.-L. Wang, Insights into alloy/oxide or hydroxide interfaces in Ni-Mo-based electrocatalysts for hydrogen evolution under alkaline conditions, *Chemical Science*, 14 (2023) 3400-3414 <https://doi.org/3410.1039/D3402SC06298D>.
- [16]. Z.-Y. Zhang, H. Tian, L. Bian, S.-Z. Liu, Y. Liu, Z.-L. Wang, Cu-Zn-based alloy/oxide interfaces for enhanced electroreduction of CO<sub>2</sub> to C<sub>2</sub><sup>+</sup> products, *Journal of Energy Chemistry*, 83 (2023) 90-97 <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.1004.1034>.
- [17]. Z. Zhang, L. Bian, H. Tian, Y. Liu, Y. Bando, Y. Yamauchi, Z.L. Wang, Tailoring the surface and interface structures of copper-based catalysts for electrochemical reduction of CO<sub>2</sub> to ethylene and ethanol, *Small*, 18 (2022) 2107450 <https://doi.org/2107410.2101002/sml.202107450>.
- [18]. A. Domán, S. Klébert, J. Madarász, G. Sáfrán, Y. Wang, K. László, Graphene oxide protected copper benzene-1, 3, 5-tricarboxylate for clean energy gas adsorption, *Nanomaterials*, 10 (2020) 1182 <https://doi.org/1110.3390/nano10061182>.
- [19]. X. Liu, G. .H. Lim, Y. Wang, L. Zhang, D. Mullangi, Y. Wu, D. Zhao, J. Ding,

- Zhao, Synthesis of magnetic porous  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C@ HKUST-1 composites for efficient removal of dyes and heavy metal ions from aqueous solution, *RSC Advances*, 5 (2015) 5164-5172 <https://doi.org/5110.1039/C5164RA12468E>.
- [32]. K. Akhbari, A. Morsali, P. Retailleau, Effect of two sonochemical procedures on achieving to different morphologies of lead (II) coordination polymer nano-structures, *Ultrasonics sonochemistry*, 20(2013) 1428-1435, <https://doi.org/1410.1016/j.ultsonch.2013.1403.1013>.
- [33]. M.R. Armstrong, S. Senthilnathan, C.J. Balzer, B. Shan, L. Chen, B. Mu, Particle size studies to reveal crystallization mechanisms of the metal organic framework HKUST-1 during sonochemical synthesis, *Ultrasonics sonochemistry*, 34 (2017) 365-370 <https://doi.org/310.1016/j.ultsonch.2016.1006.1011>.
- [34]. N.A. Khan, S.H. Jhung, Synthesis of metal-organic frameworks (MOFs) with microwave or ultrasound: Rapid reaction, phase-selectivity, and size reduction, *Coordination Chemistry Reviews*, 285 (2015) 11-23, <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2014.1010.1008>.
- [35]. F.A. Sofi, K. Majid, O. Mehraj, The visible light driven copper based metal-organic-framework heterojunction: HKUST-1@ Ag-Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> for plasmon enhanced visible light photocatalysis, *Journal of Alloys and Compounds*, 737 (2018) 798-808 <https://doi.org/710.1016/j.jallcom.2017.1012.1141>.
- [36]. D. Ma, X. Huang, Y. Zhang, L. Wang, B. Wang, Metal-organic frameworks: Synthetic methods for industrial production, *Nano Research*, 16 (2023) 7906-7925 <https://doi.org/7910.1007/s12274-12023-14000-0>.
- Materials, 140 (2011) 2-8 <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2010.1009.1018>.
- [26]. N. Pal, A. Bhaumik, Soft templating strategies for the synthesis of mesoporous materials: Inorganic, organic-inorganic hybrid and purely organic solids, *Advances in colloid and interface science*, 189 (2013) 21-41, <https://doi.org/10.1016/j.cis.2012.1012.1002>.
- [27]. X. Zhang, H. Zhao, C. Li, S. Li, K. Liu, L. Wang, Facile coordination driven synthesis of metal-organic gels toward efficiently electrocatalytic overall water splitting, *Applied Catalysis B: Environmental*, 299 (2021) 120641, <https://doi.org/120610.121016/j.apcatb.122021.120641>.
- [28]. S. Roy, J. Darabdhara, M. Ahmaruzzaman, Recent advances of Cu- BTC MOF based engineered materials for the photocatalytic treatment of pharmaceutical wastewater towards environmental remediation, *RSC Sustainability*, 1 (2023) 1952-1961 <https://doi.org/1910.1039/D1953SU00276D>.
- [29]. Y. Qiao, C. Sun, J. Jian, T. Zhou, X. Xue, J. Shi, G. Che, G. Liao, Efficient removal of organic pollution via photocatalytic degradation over a TiO<sub>2</sub>@ HKUST-1 yolk-shell nanoreactor, *Journal of Molecular Liquids*, 385 (2023) 122383 <https://doi.org/122310.121016/j.molliq.122023.122383>.
- [30]. Y. Wu, Y. Li, H. Li, H. Guo, Q. Yang, X. Li, Tuning heterostructures interface of Cu<sub>2</sub>O@ HKUST-1 for enhanced photocatalytic degradation of tetracycline hydrochloride, *Separation and Purification Technology*, 303 (2022) 122106 <https://doi.org/122110.121016/j.seppur.122022.122106>.
- [31]. Y. Xiong, F. Ye, C. Zhang, S. Shen, L. Su, S.



Organic Frameworks for Separations, *Chemical Reviews*, 112 (2012) 869-932 <https://doi.org/810.1021/cr200190s>.

- [44]. Y. Li, J. Yu, Emerging applications of zeolites in catalysis, separation and host-guest assembly, *Nature Reviews Materials*, 6 (2021) 1156-1174 <https://doi.org/1110.1038/s41578-41021-00347-41573>.
- [45]. C.A. Grande, A. Kaiser, K.A. Andreassen, Methane storage in metal-organic framework HKUST-1 with enhanced heat management using 3D printed metal lattices, *Chemical Engineering Research and Design*, 192 (2023) 362-370 <https://doi.org/310.1016/j.cherd.2023.1003.1003>.
- [46]. C. Jeong, M. . Ansari, A. Hakeem Anwer, S.-H. Kim, A. Nasar, M. Shoeb, F. Mashkooor, A review on metal-organic frameworks for the removal of hazardous environmental contaminants, *Separation and Purification Technology*, 305 (2023) 122416 <https://doi.org/122410.121016/j.seppur.122022.122416>.
- [47]. Z. Zhao, Y. Wang, Y. Tang, X. Wang, F. Zhang, J. Yang, Copper-based metal-organic framework with two methane traps for efficient CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> separation, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, (2025) In Press <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2024.12.002>.
- [48]. D. Kumar, P. . Neelratan, A. Gupta, N. Sharma, M. Sharma, S. Shukla, S.P. Singh, J.-S. Yu, A. Kaushik, S.K. Sharma, Carbon-based metal-oxides and MOFs for efficient CO<sub>2</sub> detection/reduction to chemical/fuels, *Materials Today Sustainability*, 28 (2024) 100952 <https://doi.org/100910.101016/j.mtsust.102024.100952>.
- [49]. S.T.H. Zaidi, A. Ahmad, M. Ismail, 15441-12274.
- [37]. H. Ren, T. Wei, Electrochemical synthesis methods of metal-organic frameworks and their environmental analysis applications: a review, *ChemElectroChem*, 9 (2022) e202200196 <https://doi.org/202200110.202201002/celc.202200196>.
- [38]. M. Bellusci, A. Masi, M. Albino, D. Peddis, M. Petrecca, C. Sangregorio, A. La Barbera, F. Varsano, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ HKUST-1 magnetic composites by mechanochemical route for induction triggered release of carbon dioxide, *Microporous and Mesoporous Materials*, 328 (2021) 111458 <https://doi.org/111410.111016/j.micromeso.112021.111458>.
- [39]. N. Faaizatunnisa, R. Ediati, H. Fansuri, H. Juwono, S. Suprpto, A.R.P. Hidayat, L.L. Zulfa, Facile green synthesis of core-shell magnetic MOF composites (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ SiO<sub>2</sub>@ HKUST-1) for enhanced adsorption capacity of methylene blue, *Nano-Structures & Nano-Objects*, 34 (2023) 100968 <https://doi.org/100910.101016/j.nanoso.102023.100968>.
- [40]. L. Zhu, H. Yang, T. Xu, F. Shen, C. Si, Precision-engineered construction of proton-conducting metal-organic frameworks, *Nano-Micro Letters*, 17(2025) 87. <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01558-3>
- [41]. H. Zhou, J. Long, O. Yaghi, Introduction to Metal-Organic Frameworks, *Chemical Reviews*, 112 (2012) 673-674, <https://doi.org/610.1021/cr300014x>.
- [42]. X. Zhang, Hydrogen Storage Property of Carbon Nitride Nanotubes, in, University of New South Wales (Australia), 2023, <https://doi.org/10.26190/unsworks/24660>.
- [43]. J.R. Li, J. Sculley, H.C. Zhou, Metal-



- developments and challenges, *Materials Advances*, 2 (2021)7139-7186, <https://doi.org/7110.1039/D7131MA00630D>.
- [55]. S. Palla, N. . Kaisare, Evaluating the impact of pellet densification and graphite addition for design of on-board hydrogen storage in a fixed bed of MOF-5 pellets, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (2020)25875-25889, <https://doi.org/25810.21016/j.ijhydene.22020.25803.25165>.
- [56]. A.K. Adhikari, K.-S. Lin, M.-T. Tu, Hydrogen storage capacity enhancement of MIL-53(Cr) by Pd loaded activated carbon doping, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 63 (2016) 463-472 <https://doi.org/410.1016/j.jtice.2016.1002.1033>.
- [57]. Z. Chen, P. Li, R. Anderson, X. Wang, X. Zhang, L. Robison, L.R. Redfern, S. Moribe, T. Islamoglu, D.A. Gómez-Gualdrón, Balancing volumetric and gravimetric uptake in highly porous materials for clean energy, *Science*, 368 (2020) 297-303 <https://doi.org/210.1126/science.aaz1888>.
- [58]. P.S. Gauna, A.A.G. Blanco, D. Barrera, J. Villarroel-Rocha, J.P. Hinestroza, M. Kimura, M.L. Kim, E.H. Otal, K. Sapag, Influence of defect engineering on the hydrogen and methane adsorption capacity in HKUST-1 – like structure MOF, *Adsorption*, 29 (2023) 351-361 <https://doi.org/310.1007/s10450-10023-00413-y>.
- [59]. T.K. Vo, W.-S. Kim, J. Kim, Ethylenediamine-incorporated MIL-101 (Cr)-NH<sub>2</sub> metal-organic frameworks for enhanced CO<sub>2</sub> adsorption, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 37 (2020) 1206-1211 <https://doi.org/1210.1007/s11814-11020-10548-11818>.
- N.A.H.M. Nordin, M.A. Bustam, M. Usman, D. Asubonteng, S.M.W. ul Hasnain, Enhanced CO<sub>2</sub> adsorption and selectivity in CNT and piperazine modified Ni-MOF-74 nanocomposites, *Solid State Sciences*, 161 (2025) 107855 <https://doi.org/107810.101016/j.solidstatedsciences.102025.107855>.
- [50]. C. Chen, H. Wang, Y. Chen, X. Wei, W. Zou, H. Wan, L. Dong, G. Guan, Layer-by-layer self-assembly of hierarchical flower-like HKUST-1-based composite over amino-tethered SBA-15 with synergistic enhancement for CO<sub>2</sub> capture, *Chemical Engineering Journal*, 413 (2021) 127396 <https://doi.org/127310.121016/j.cej.122020.127396>.
- [51]. F. Zheng, S. Cao, Z. Yang, Y. Sun, Z. Shen, Y. Wang, H. Pang, Review: Synthesis and Catalytic Application of MOF Complexes Containing Noble Metals, *Energy & Fuels*, 38 (2024) 11494-11520 <https://doi.org/11410.11021/acs.energyfuels.11494c01963>.
- [52]. S. Yu, G. Jing, S. Li, Z. Li, X. Ju, Tuning the hydrogen storage properties of MOF-650: A combined DFT and GCMC simulations study, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (2020) 6757-6764 <https://doi.org/6710.1016/j.ijhydene.2019.6712.6114>.
- [53]. X. Zhang, R. . Lin, J. Wang, B. Wang, B. Liang, T. Yildirim, J. Zhang, W. Zhou, B. Chen, Optimization of the pore structures of MOFs for record high hydrogen volumetric working capacity, *Advanced materials*, 32 (2020) 1907995 <https://doi.org/1907910.1901002/adma.201907995>.
- [54]. B. Yeskendir, J. P. Dacquin, Y. Lorgouilloux, C. Courtois, S. Royer, J. Dhainaut, From metal-organic framework powders to shaped solids: recent

- micropore metal–organic framework using for argon/oxygen adsorption separation, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, (2025) In Press <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2025.01.013>.
- [66]. D.D. Chronopoulos, H. Saini, I. Tantis, R. Zbořil, K. Jayaramulu, M. Otyepka, Carbon nanotube based metal–organic framework hybrids from fundamentals toward applications, *Small*, 18 (2022) 2104628 <https://doi.org/2104610.2101002/sml.202104628>.
- [67]. C. Yao, S. Chen, L. Wang, H. Deng, S. Tong, Low cost and rapid fabrication of copper sulfides nanoparticles for selective and efficient capture of noble metal ions, *Chemical Engineering Journal*, 373 (2019) 1168-1178 <https://doi.org/1110.1016/j.cej.2019.1105.1070>.
- [68]. L. Kong, C. Yu, Y. Chen, Z. Zhu, L. Jiang, Rational MOF Membrane Design for Gas Detection in Complex Environments, *Small*, 20 (2024) 2407021 <https://doi.org/2407010.2401002/sml.202407021>.
- [69]. J. Liu, D. . Strachan, P.K. Thallapally, Enhanced noble gas adsorption in Ag@MOF-74Ni, *Chemical Communications*, 50 (2014) 466-468 <https://doi.org/410.1039/C1033CC47777K>.
- [70]. S.-F. Wu, G.-L. An, W.-G. Pan, T. Yan, L.-W. Wang, Emerging working pairs of MOF-ammonia for sustainable heat transformation and storage, *Matter*, 8 (2025) 101903, <https://doi.org/10.1016/j.matt.2024.10.021>
- [71]. A. Sheokand, V. Kumar, S. Sindhu, M. Bulla, R. Dahiya, A. Jatrana, Development of low detection limit ultra-sensitive H<sub>2</sub>S sensor based on MIL 88B (Fe) derived  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *Sensors and Actuators A: Physical*, 382 (2025) 116121. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.116121>.
- [60]. H.R. Mahdipoor, R. Halladj, E.G. Babakhani, S. Amjad-Iranagh, J.S. Ahari, Synthesis, characterization, and CO<sub>2</sub> adsorption properties of metal organic framework Fe-BDC, *RSC advances*, 11 (2021) 5192-5203 <https://doi.org/5110.1039/D5190RA09292D>.
- [61]. S. Gaikwad, Y. Kim, R. Gaikwad, S. Han, Enhanced CO<sub>2</sub> capture capacity of amine-functionalized MOF-177 metal organic framework, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9 (2021) 105523 <https://doi.org/105510.101016/j.jece.102021.105523>.
- [62]. L. Dumée, L. He, M. Hill, B. Zhu, M. Duke, J. Schütz, F. She, H. Wang, S. Gray, P. Hodgson, Seeded growth of ZIF-8 on the surface of carbon nanotubes towards self-supporting gas separation membranes, *Journal of materials chemistry A*, 1 (2013) 9208-9214 <https://doi.org/9210.1039/C9203TA11483J>.
- [63]. F.E. Chen, R.M. Mandel, J.J. Woods, J.-H. Lee, J. Kim, J.H. Hsu, J.J. Fuentes-Rivera, J.J. Wilson, P.J. Milner, Biocompatible metal–organic frameworks for the storage and therapeutic delivery of hydrogen sulfide, *Chemical science*, 12 (2021) 7848-7857 <https://doi.org/7810.1039/d7841sc00691f>.
- [64]. D.W. Kim, D.W. Kang, M. Kang, D.S. Choi, H. Yun, S.Y. Kim, S.M. Lee, J.-H. Lee, C.S. Hong, High Gravimetric and Volumetric Ammonia Capacities in Robust Metal–Organic Frameworks Prepared via Double Postsynthetic Modification, *Journal of the American Chemical Society*, 144 (2022) 9672-9683 <https://doi.org/9610.1021/jacs.9672c01117>.
- [65]. F. Yan, P. Liu, Y. Dai, Z. Kang, Y. Chen, J. Li, L. Li, An amino-functionalized ultra-

- Chemistry, 39 (2015) 5108-5111 <https://doi.org/5110.1039/C5105NJ00153F>.
- [78]. T.-T. Han, J. Yang, Y.-Y. Liu, J.-F. Ma, Rhodamine 6G loaded zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) nanocomposites for highly selective luminescent sensing of Fe<sup>3+</sup>, Cr<sup>6+</sup> and aniline, *Microporous and Mesoporous Materials*, 228 (2016) 275-288 <https://doi.org/210.1016/j.micromeso.2016.1004.1005>.
- [79]. T.-T. Han, H.-L. Bai, Y.-Y. Liu, J.-F. Ma, Two host-guest hybrids by encapsulation AlQ<sub>3</sub> in zeolitic imidazolate framework-8 as luminescent sensors for Fe<sup>3+</sup>, CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and acetone, *Journal of Solid State Chemistry*, 269 (2019) 588-593 <https://doi.org/510.1016/j.jssc.2018.1010.1044>.
- [80]. J. Zhang, L. Sun, C. Chen, M. Liu, W. Dong, W. Guo, S. Ruan, High performance humidity sensor based on metal organic framework MIL-101 (Cr) nanoparticles, *Journal of Alloys and Compounds*, 695 (2017) 520-525 <https://doi.org/510.1016/j.jallcom.2016.1011.1129>.
- [81]. H.J. Buser, D. Schwarzenbach, W. Petter, A. Ludi, THE CRYSTAL STRUCTURE OF PRUSSIAN BLUE-FE<sub>4</sub> (Fe (CN)<sub>6</sub>)<sub>3</sub>. XH<sub>2</sub>O, *Inorganic chemistry*, 16 (1977) 2704-2710 <https://doi.org/2710.1021/ic50177a50008>.
- [82]. N. Yanai, K. Kitayama, Y. Hijikata, H. Sato, R. Matsuda, Y. Kubota, M. Takata, M. Mizuno, T. Uemura, S. Kitagawa, Gas detection by structural variations of fluorescent guest molecules in a flexible porous coordination polymer, *Nature materials*, 10 (2011) 787-793 <https://doi.org/710.1038/nmat3104>.
- [83]. J.-W. Ye, X.-Y. Li, H.-L. Zhou, J.-P. Zhang, Optimizing luminescence sensitivity and moisture stability of porous coordination [org/10.1016/j.sna.2024.116121](https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.116121).
- [72]. A. Kumar, R. Kataria, MOFs as versatile scaffolds to explore environmental contaminants based on their luminescence bustle, *Science of The Total Environment*, 926 (2024) 172129 <https://doi.org/172110.171016/j.scitotenv.172024.172129>.
- [73]. H. Kim, J. . Choe, H. Yun, J.F. Kurisigal, S. Yu, Y.H. Lee, J.-H. Lee, C.S. Hong, High ammonia storage capacity in LiCl nanoparticle-embedded metal-organic framework composites, *Chemical Engineering Journal*, 489 (2024) 151319 <https://doi.org/151310.151016/j.cej.152024.151319>.
- [74]. L. Song, Y. Yuan, Y. Wang, T.C. Zhang, G. He, S. Yuan, Cu-MOF-derived Cu nanoparticles decorated porous N-doped biochar for low-temperature H<sub>2</sub>S desulfurization, *Fuel*, 368 (2024) 131682 <https://doi.org/131610.131016/j.fuel.132024.131682>.
- [75]. P. Tong, J. Liang, X. Jiang, J. Li, Research progress on metal-organic framework composites in chemical sensors, *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 50 (2020) 376-392 <https://doi.org/310.1080/10408347.10402019.11642732>.
- [76]. M. Zhu, X. Wu, B. Niu, H. Guo, Y. Zhang, Fluorescence sensing of 2, 4, 6-trinitrophenol based on hierarchical IRMOF-3 nanosheets fabricated through a simple one-pot reaction, *Applied Organometallic Chemistry*, 32 (2018) e4333 <https://doi.org/4310.1002/aoc.4333>.
- [77]. S. Abedi, A. . Tehrani, A. Morsali, Mechanochemical synthesis of isorecticular metal-organic frameworks and comparative study of their potential for nitrobenzene sensing, *New Journal of*



- [89]. S. Yang, J. Sun, A.J. Ramirez-Cuesta, S.K. Callear, W.I.F. David, D.P. Anderson, R. Newby, A.J. Blake, J.E. Parker, C.C. Tang, Selectivity and direct visualization of carbon dioxide and sulfur dioxide in a decorated porous host, *Nature chemistry*, 4 (2012) 887-894 <https://doi.org/810.1038/nchem.1457>.
- [90]. S.S.Y. Chui, S.M.F. Lo, J.P.H. Charmant, A.G. Orpen, I.D. Williams, A chemically functionalizable nanoporous material [Cu<sub>3</sub>(TMA)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>3</sub>]<sub>n</sub>, *Science*, 283 (1999) 1148-1150 <https://doi.org/1110.1126/science.1283.5405.1148>.
- [91]. T. Ahnfeldt, N. Guillou, D. Gunzelmann, I. Margiolaki, T. Loiseau, G. Férey, J. Senker, N. Stock, [Al<sub>4</sub>(OH)<sub>2</sub>(OCH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>(H<sub>2</sub>N-bdc)<sub>3</sub>]<sub>x</sub>·x H<sub>2</sub>O: A 12-Connected Porous Metal–Organic Framework with an Unprecedented Aluminum-Containing Brick, *Angewandte Chemie International Edition*, 48 (2009) 5163-5166 <https://doi.org/5110.1002/anie.200901409>.
- [92]. J.L.C. Rowsell, O.M. Yaghi, Metal–organic frameworks: a new class of porous materials, *Microporous and mesoporous materials*, 73(2004) 3-14 <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2004.1003.1034>.
- [93]. [93] N. Getachew, Y. Chebude, I. Diaz, M. Sanchez-Sanchez, Room temperature synthesis of metal organic framework MOF-2, *Journal of Porous Materials*, 21 (2014) 769-773 <https://doi.org/710.1007/s10934-10014-19823-10936>.
- [94]. Y. Li, R. . Yang, Gas adsorption and storage in metal– organic framework MOF-177, *Langmuir*, 23 (2007)12937-12944, <https://doi.org/12910.11021/la702466d>.
- [95]. B. Chen, X. Wang, Q. Zhang, X. Xi, J. Cai, H. Qi, S. Shi, J. Wang, D. Yuan, M. Fang, Synthesis and characterization of frameworks by varying ligand side groups, *Science China Chemistry*, 62 (2019) 341-346 <https://doi.org/310.1007/s11426-11018-19369-11426>.
- [84]. J.H. Cavka, S. Jakobsen, U. Olsbye, N. Guillou, C. Lamberti, S. Bordiga, K.P. Lillerud, A new zirconium inorganic building brick forming metal organic frameworks with exceptional stability, *Journal of the American Chemical Society*, 130 (2008) 13850-13851 <https://doi.org/13810.11021/ja8057953>.
- [85]. Y. Wang, J. Yan, N. Wen, H. Xiong, S. Cai, Q. He, Y. Hu, D. Peng, Z. Liu, Y. Liu, Metal-organic frameworks for stimuli-responsive drug delivery, *Biomaterials*, 230 (2020) 119619, <https://doi.org/119610.111016/j.biomaterials.112019.119619>.
- [86]. O.V. Gutov, W. Bury, D.A. Gomez-Gualdron, V. Krungleviciute, D. Fairen-Jimenez, J.E. Mondloch, A.A. Sarjeant, S.S. Al-Juaid, R.Q. Snurr, J.T. Hupp, Water-stable zirconium-based metal–organic framework material with high-surface area and gas-storage capacities, *Chemistry–A European Journal*, 20 (2014) 12389-12393 <https://doi.org/12310.11002/chem.201402895>.
- [87]. J.S. Seo, D. Whang, H. Lee, S.I. Jun, J. Oh, Y.J. Jeon, K. Kim, A homochiral metal–organic porous material for enantioselective separation and catalysis, *Nature*, 404 (2000) 982-986 <https://doi.org/910.1038/35010088>.
- [88]. R. Grünker, V. Bon, P. Müller, U. Stoeck, S. Krause, U. Mueller, I. Senkowska, S. Kaskel, A new metal–organic framework with ultra-high surface area, *Chemical Communications*, 50 (2014) 3450-3452 <https://doi.org/3410.1039/C3454CC00113C>.

- functionalized magnetite nanoparticles and HKUST-1 (MOF-199) for preconcentration of Cd (II), Pb (II), and Ni (II), *Microchimica Acta*, 183 (2016) 2639-2647 <https://doi.org/2610.1007/s00604-00016-01896-00602>.
- [102]. J.R. Ramirez, H. Yang, C.M. Kane, A.N. Ley, K.T. Holman, Reproducible synthesis and high porosity of mer-Zn (Im) 2 (ZIF-10): exploitation of an apparent double-eight ring template, *Journal of the American Chemical Society*, 138 (2016) 12017-12020 <https://doi.org/12010.11021/jacs.12016b06375>.
- [103]. Y. Pan, Y. Liu, G. Zeng, L. Zhao, Z. Lai, Rapid synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) nanocrystals in an aqueous system, *Chemical communications*, 47 (2011) 2071-2073 <https://doi.org/2010.1039/C2070CC05002D>.
- [104]. H. Laeim, V. Molahalli, P. Prajongthat, A. Pattanapokratan, G. Pathak, B. Phettong, N. Hongkarnjanakul, N. Chattham, Porosity Tunable Metal-Organic Framework (MOF)-Based Composites for Energy Storage Applications: Recent Progress, *Polymers*, 17 (2025) 130. <https://doi.org/10.3390/polym17020130>.
- [105]. S. Loera-Serna, J. Cortés-Suárez, R. Sanchez-Salas, D. Ramírez-Rosales, M. Oliver-Tolentino, E.V. Ramos-Fernández, CO<sub>2</sub> adsorption on a water-resist HKUST-1 by incorporation of Graphene Oxide, *Adsorption*, 31 (2025) 5. <https://doi.org/10.1007/s10450-024-00553-9>.
- [106]. F. Yue, Y. Meng, S. Zhang, C. Li, M. Shi, X. Qian, L. Wang, Y. Song, J. Li, Y. Ma, Efficient solar-driven: Photothermal catalytic reduction of atmospheric CO<sub>2</sub> at the gas-solid interface by CuTCPP/MXene/TiO<sub>2</sub>, *Journal of Colloid and Interface* the interpenetrated MOF-5, *Journal of Materials Chemistry*, 20 (2010) 3758-3767 <https://doi.org/3710.1039/B922528E>.
- [96]. X. Zhu, B. Li, J. Yang, Y. Li, W. Zhao, J. Shi, J. Gu, Effective adsorption and enhanced removal of organophosphorus pesticides from aqueous solution by Zr-based MOFs of UiO-67, *ACS applied materials & interfaces*, 7 (2015) 223-231, <https://doi.org/210.1021/am5059074>.
- [97]. M. Kandiah, M. Nilsen, S. Usseglio, S. Jakobsen, U. Olsbye, M. Tilset, C. Larabi, E.A. Quadrelli, F. Bonino, K.P. Lillerud, Synthesis and stability of tagged UiO-66 Zr-MOFs, *Chemistry of Materials* 22 (2010) 6632-6640, <https://doi.org/6610.1021/cm102601v>.
- [98]. T. Ahnfeldt, D. Gunzelmann, T. Loiseau, D. Hirsemann, J.r. Senker, G. Férey, N. Stock, Synthesis and modification of a functionalized 3D open-framework structure with MIL-53 topology, *Inorganic chemistry*, 48 (2009) 3057-3064 <https://doi.org/3010.1021/ic8023265>.
- [99]. C.H. Hendon, D. Tiana, M. Fontecave, C.m. Sanchez, L. D'arras, C. Sassoeye, L. Rozes, C. Mellot-Draznieks, A. Walsh, Engineering the optical response of the titanium-MIL-125 metal-organic framework through ligand functionalization, *Journal of the American Chemical Society*, 135 (2013) 10942-10945 <https://doi.org/10910.11021/ja405350u>.
- [100]. S. Surblé, C. Serre, C. Mellot-Draznieks, F. Millange, G. Férey, A new isoreticular class of metal-organic-frameworks with the MIL-88 topology, *Chemical communications*, (2006) 284-286 <https://doi.org/210.1039/B512169H>.
- [101]. E. Ghorbani-Kalhor, A metal-organic framework nanocomposite made from

organic frameworks-5, International journal of hydrogen energy, 36 (2011) 8381-8387 <https://doi.org/8310.1016/j.ijhydene.2011.8303.8038>.

- [113]. H.P. Toledo-Jaldin, A.B. Flores, C.L. Pinzón-Vanegas, D.M. Ávila-Marquez, I.A.R. Domínguez, H. Mahdavi, A. Dorazco-González, Novel Hybrid Composites Based on HKUST-1 and a Matrix of Magnetite Nanoparticles with Sustainable Materials for Efficient CO<sub>2</sub> Adsorption, *Arabian Journal for Science and Engineering*, (2024) 1-13 <https://doi.org/10.1007/s13369-13024-09305-x>.
- [114]. M. Usman, M. Suliman, Silver-Doped zeolitic imidazolate framework (Ag@ ZIF-8): an efficient electrocatalyst for CO<sub>2</sub> conversion to syngas, *Catalysts*, 13 (2023) 867 <https://doi.org/810.3390/catal13050867>.
- [115]. S. Yu, Y. Zhang, C. Zhang, Y. Zi, Y. Feng, J. Hu, Stability regulation of metal-organic framework materials for electrocatalysis, *Journal of Materials Chemistry A*, 13 (2025) 4814-4837 <https://doi.org/4810.1039/D4814TA08090D>.
- [116]. X. Chen, D. Menon, X. Wang, M. He, M.R.A. Kiapi, M. Asgari, Y. Lyu, X. Tang, L.L. Keenan, W. Shepard, Flexibility-frustrated porosity for enhanced selective CO<sub>2</sub> adsorption in an ultramicroporous metal-organic framework, *Chem*, (2025) (In Press) <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2024.1011.1020>.
- [117]. Z. Han, Y. Yang, J. Rushlow, J. Huo, Z. Liu, Y.-C. Hsu, R. Yin, M. Wang, R. Liang, K.-Y. Wang, Development of the design and synthesis of metal-organic frameworks (MOFs)-from large scale attempts, functional oriented modifications, to artificial intelligence (AI) predictions, *Science*, 677 (2025) 758-770. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.08.018>
- [107]. T.R. Menezes, K.M.C. Santos, H. Mao, K. Santos, J.F. De Conto, J.A. Reimer, S.M.E. Dariva, C.C. Santana, Efficient separation of carbon dioxide and methane in high-pressure and wet gas mixtures using Zr-MOF-808, *Separation and Purification Technology*, 354 (2025) 129033. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129033>.
- [108]. X. Zhang, Q. r. Zheng, H.-z. He, Multicomponent adsorptive separation of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub> over M-MOF-74 and AX-21@ M-MOF-74 composite adsorbents, *Microporous and Mesoporous Materials*, 336 (2022) 111899. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2022.111899>.
- [109]. Y. Nikparast, A. Moghadassi, F. Parviziyan, A. Mohammadi, Effect of modification of ZIF-8 nanoparticles by triethylenetetramine on hydrogen sulfide uptake, *Journal of the Indian Chemical Society*, 102(2025)101510. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2024.101510>.
- [110]. M. Liu, T. Liu, J. Xu, L. Shao, X. Shi, Z. Sun, Metal-organic frameworks based solid-state electrolytes for lithium metal batteries: Modifications and future prospects, *Next Energy*, 6 (2025) 100191 <https://doi.org/100110.101016/j.nxener.102024.100191>.
- [111]. A. Lyubchik, I. A.C. Esteves, F.J.A.L. Cruz, J.P.B. Mota, Experimental and theoretical studies of supercritical methane adsorption in the MIL-53 (Al) metal organic framework, *The Journal of Physical Chemistry C*, 115 (2011) 20628-20638 <https://doi.org/20610.21021/jp207326d>.
- [112]. S.-Y. Lee, S.-J. Park, Effect of platinum doping of activated carbon on hydrogen storage behaviors of metal-



Chemical Society Reviews, 54 (2025)  
367-395 [https://doi.org/310.1039/  
D1034CS00432A](https://doi.org/310.1039/D1034CS00432A).

- [118]. M.W.N. Leoi, X.T. Zheng, Y. Yu, J. Gao, D.H.S. Ong, C.Z.H. Koh, P. Chen, L. Yang, Redefining Metal Organic Frameworks in Biosensors: Where Are We Now?, ACS Applied Materials & Interfaces, (2025) (In Press) [https://doi.org/10.1021/  
acsami.1024c19307](https://doi.org/10.1021/acsami.1024c19307).
- [119]. A.C. Ishola, I. Albayati, B. Sohani, F. Iqbal, A.M. Aliyu, Assessment of materials for energy-efficient low-pressure hydrogen storage, in: Hydrogen Energy, CRC Press, 2025, pp. 222-251 [https://  
doi.org/210.1201/9781003537816-  
9781003537813](https://doi.org/210.1201/9781003537816-9781003537813).
- [120]. B.Y. Guan, L. Yu, X. Wang, S. Song, X.W. Lou, Formation of Onion-Like NiCO<sub>2</sub> S<sub>4</sub> Particles via Sequential Ion-Exchange for Hybrid Supercapacitors, Advanced Materials, 29 (2017) 1605051 [https://doi.  
org/1605010.1601002/adma.201605051](https://doi.org/1605010.1601002/adma.201605051).
- [121]. L. Yu, J. . Yang, X.W. Lou, Formation of CoS<sub>2</sub> nanobubble hollow prisms for highly reversible lithium storage, Angewandte Chemie International Edition, 55 (2016) 13620-13624 [https://doi.org/13610.11002/  
anie.201606776](https://doi.org/13610.11002/anie.201606776)



## A Review of Metal-Organic Framework Nanocomposites and their Application in Gas Storage

Mohammad Reza Abdi<sup>1</sup>, Nahid Sarlak<sup>2\*</sup>, Mohammad Hossein Mehrarad<sup>3</sup>, Mehrnaz Shahraeini<sup>4</sup>

1. Ph.D. student, Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry, Lorestan University, Khorramabad, Iran
2. Associate professor, Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry, Lorestan University, Khorramabad, Iran
3. Deputy of Commercialization, Research and Technology Management, National Iranian Gas Company, Tehran, Iran
4. Senior Expert in Energy and Carbon Project Control, Energy and Carbon Management, National Iranian Gas Company, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

#### Article History:

Received: 02 February 2025

Revised: 26 April 2025

Accepted: 07 May 2025

#### Keywords:

Metal-organic framework nanocomposites  
Gas storage  
Gas absorption and separation  
Methane  
Hydrogen  
Carbon dioxide

### ABSTRACT

This article comprehensively reviews metal-organic framework (MOF) nanocomposites and their role in gas storage, which are considered to be one of the newest and most efficient materials for storing industrial and energy gases. Due to their high specific surface area, tunable porous structure, and good thermal and chemical stability, these materials are combined with nanoparticles to improve the adsorption capacity and selectivity of gases such as hydrogen, methane, and carbon dioxide. This study reviews the structure, synthesis methods (e.g., hydrothermal, sonochemical, etc.), storage mechanisms (physical and chemical adsorption), and applications in storing of hydrogen, methane, carbon dioxide, noble and toxic gases. MOFs are produced using various methods such as hydrothermal, sonochemical, and microwave, each of which has its characteristics. A table of storage capacities is provided for gases. In addition, the incorporation of MOFs with various nanoparticles increases their capacity and performance, and improves their stability and selectivity. The classification of MOFs (IRMOF, ZIF, MIL) and the role of nanoparticles (palladium, carbon nanotubes) are also reviewed. Despite the high potential, challenges such as production costs, stability, scalability, and environmental constraints remain. Suggestions for new research include green synthesis methods interdisciplinary collaborations and technological advances, promising a bright future for sustainable energy technologies and environmental protection.

DOR: [20.1001.1.25021087.1404.02.17](https://doi.org/10.1001.1.25021087.1404.02.17)

#### How to cite this article

M.R. Abdi, N. Sarlak, M.H. Mehrarad, M. Shahraeini, A review of Metal-Organic Framework Nanocomposites and their Application in Gas Storage. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025; 12(1): 30-53. ([https://www.ijge.irangi.org/article\\_725704.html](https://www.ijge.irangi.org/article_725704.html))

\* Corresponding Author.

E-mail address: [sarlak.n@lu.ac.ir](mailto:sarlak.n@lu.ac.ir), (N. Sarlak).

Available online 22 Jun 2025

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



# کاربرد یادگیری ماشین در پیش‌بینی و مدیریت تولید ماسه در چاه‌های نفت و گاز - مطالعه‌ی مروری

محمد الیاس خدائیان<sup>۱</sup>، میثم محمدزاده شیرازی<sup>۲</sup>، بهنام شاهسونی<sup>۳\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: [b.shahsavani@shirazu.ac.ir](mailto:b.shahsavani@shirazu.ac.ir)

مقاله‌ی مروری

صفحه ۵۴ - ۶۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

## چکیده

تولید ماسه در چاه‌های نفت و گاز، مشکلات متعددی مانند کاهش بهره‌وری از چاه و خرابی تجهیزات را به همراه دارد. به‌منظور جلوگیری از مشکلات و پیامدهای تولید ماسه، اجرای فرایندهای پیش‌بینی و کنترل ماسه در چاه‌ها توصیه می‌شود. این فرایندها شامل بررسی عوامل متعددی از جمله: عمق چاه، گرادیان شکست سازند و سایر پارامترهای زمین‌شناسی می‌باشد. به‌علت حجم انبوه داده‌ها و پیچیدگی‌های تحلیل، روش‌های مرسوم سنتی، زمان‌بر و با عدم قطعیت و احتمال خطای زیادی مواجه‌اند؛ به همین دلیل، استفاده از روش‌های کارآمدتر از اهمیت زیادی برخوردار است؛ در سال‌های اخیر، به‌کارگیری تکنیک‌های یادگیری ماشین برای تحلیل داده‌های زیاد و پیچیده، به‌عنوان روشی مناسب و دقیق در جهت بهبود دقت پیش‌بینی‌ها مطرح شده است. از این‌رو مهندسان بهره‌بردار نیز از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، برای تحلیل داده‌های مرتبط با تولید ماسه استفاده کردند. در این مطالعه، مروری بر تحقیقات پیشین، در زمینه‌ی استفاده از یادگیری ماشین در مدیریت تولید ماسه ارائه شده است. همچنین به‌منظور فهم بهتر، مطالعات ذکر شده براساس موضوع به دسته‌های مناسب تفکیک و سازماندهی شده‌اند؛ به‌علاوه، الگوریتم‌ها و روش‌های اعتبارسنجی در هر مطالعه ذکر شده است تا به‌عنوان راهنما مورد استفاده قرار گیرد؛ بنابراین مطالعه‌ی حاضر می‌تواند همچون مرجعی برای مطالعات آینده در این زمینه عمل کند.

کلید واژه‌ها: پیش‌بینی تولید ماسه، تولید و بهره‌وری، تولید نفت، هوش مصنوعی، یادگیری ماشین

## ۱. مقدمه

امروزه، با پیشرفت فناوری و توسعه‌ی هوش مصنوعی<sup>۱</sup>، کاربرد یادگیری ماشین<sup>۲</sup> در صنایع مختلف به‌طور چشمگیری رو به افزایش است. تا آنجا که در سال‌های اخیر، در اکثر صنایع و کسب و کارهای جهان در زمینه‌های متعددی، در جهت بهبود نتایج و تحلیل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از سری کاربردهای مهم یادگیری ماشین می‌توان به مواردی مانند اینترنت اشیا<sup>۳</sup> اشاره کرد که به‌عنوان یک شبکه به کار گرفته می‌شود و می‌تواند تعداد زیادی از دستگاه‌های هوشمند

1. Artificial Intelligence
2. Machine Learning
3. Internet of Things



را به هم متصل کند [۱]. در زمینه‌ی تصفیه‌ی آب نیز مدل‌های ماشینی می‌توانند جهت بهبود تصفیه و کاهش آلودگی‌ها مؤثر باشند [۲]. گسترش کاربرد یادگیری ماشین در زمینه‌ی مهندسی نفت نیز قابل مشاهده است. از سری کاربردهای آن می‌توان به مطالعه‌ی پاندی و همکاران در زمینه‌ی تحلیل داده‌ها در بهینه‌سازی عملیات بالادستی اشاره کرد [۳]. در سال ۲۰۱۷، انیفوسه و همکاران نیز به مدل‌سازی مخازن و توصیف خصوصیات مخزن با استفاده از یادگیری ماشین گروهی پرداختند [۵]. در سال ۲۰۱۹، انیفوسه و همکاران نیز، به پیش‌بینی تراوایی<sup>۱</sup> در مخازن کربناته با استفاده از داده‌های نگاره<sup>۲</sup> و الگوریتم‌های یادگیری ماشین پرداختند [۷]. در سال ۲۰۱۹، صباح و همکاران نیز به کمک داده‌های پتروفیزیکی و نگاره با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به پیش‌بینی نرخ نفوذ حفاری در چاه‌ها پرداختند [۱۳]. در سال ۲۰۲۱ ژانگ و همکاران نیز به کمک تکنیک‌های یادگیری ماشین، تراوایی مخازن ماسه سنگی مستحکم<sup>۳</sup> را بررسی کردند [۸]. در سال ۲۰۲۱، اویشر و همکاران پارادایم‌های یادگیری ماشین نظارت‌شده را برای پیش‌بینی خصوصیات مخازن نفتی به کار گرفتند [۴]. در سال ۲۰۲۲، سالم و همکاران نیز به مطالعه و پیش‌بینی خرابی‌های یکپارچگی<sup>۴</sup> چاه به کمک الگوریتم‌های یادگیری ماشین پرداختند [۶]. در سال ۲۰۲۲، لعلام و همکاران نیز برای تشخیص و پیش‌بینی ترکیب کانی‌شناسی در منطقه‌ی نفتی باکن، به بررسی داده‌های نگاره و روش‌های یادگیری ماشین پرداختند [۹]. در سال ۲۰۲۳، ژی و همکاران نیز به کمک چهار مکانیزم ادغام اطلاعات فیزیکی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به حل مسائل چندفیزیکی و چندمقیاسی در مهندسی نفت پرداختند [۱۰]. در سال ۲۰۲۲، مای-کائو و ترونک-کخ به پیش‌بینی تولید نفت با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین را بررسی کردند [۱۱]. در سال ۲۰۲۲، اوجداپو و همکاران نیز به کمک یادگیری ماشین مدل‌هایی ایجاد کردند که بتوانند با روش‌های داده

محور تولید از مخازن نفتی را پیش‌بینی کنند [۱۲]. با توجه به عملکرد بهتر در پیش‌بینی نتایج واقعی توسط مدل‌های ماشینی در مقایسه با روش‌های سنتی، کاربردهای یادگیری ماشین در زمینه‌های مختلف صنعت نفت و گاز، رو به افزایش است.

### ۱-۱. مروری بر یادگیری ماشین و هوش مصنوعی

در این بخش، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین به‌عنوان مفاهیم اساسی مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر، تعریف شده است و انواع زیرشاخه‌های هوش مصنوعی و دسته‌بندی تکنیک‌های یادگیری ماشین، به همراه الگوریتم‌های متداول آن به اختصار، توضیح داده شده است:

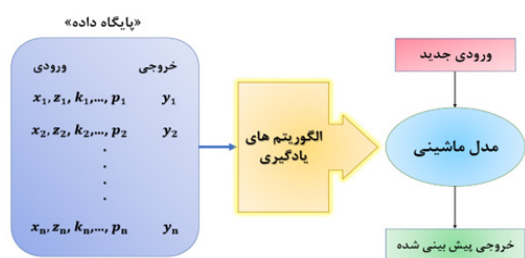
#### ۱-۱-۱. هوش مصنوعی

هپگود هوش مصنوعی را به‌عنوان «علم تقلید تعریف کرد؛ یعنی گنجاندن توانایی‌های ذهنی انسان در کامپیوتر». به‌طور کلی هوش مصنوعی سعی در ایجاد سهولت در کارهای متنوع هوش مصنوعی به مدت ۵۰ سال، به‌عنوان یکی از شاخه‌ی فعال تحقیقاتی برای دانشمندان کامپیوتر و محققان در حال توسعه بوده است. از سری کاربردهای هوش مصنوعی می‌توان به ابزارها و تکنیک‌های کارآمد و متنوعی از جمله: قوانین، فریم‌ها، استدلال مبتنی بر مدل، استدلال مبتنی بر مورد، به‌روزرسانی بیزی، منطق فازی، سیستم‌های چندعاملی<sup>۵</sup>، هوش جمعی، الگوریتم‌های ژنتیک و ... اشاره کرد [۱۴]. هوش مصنوعی دارای زیرشاخه‌های متعددی است که می‌تواند جنبه‌ها و کاربردهای مختلفی از مسائل مختلف را پوشش دهند؛ از جمله‌ی این زیرشاخه‌ها می‌توان به: یادگیری ماشین، یادگیری عمیق<sup>۶</sup>، شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۷</sup>، پردازش زبان طبیعی<sup>۸</sup>، ریاتیک<sup>۹</sup>، سیستم‌های خبره<sup>۱۰</sup>، هوش مصنوعی فازی<sup>۱۱</sup> و ... اشاره کرد [۱۵]. زیر شاخه‌های متداول هوش مصنوعی در (شکل ۱) نمایش یافته‌اند:

1. Permeability
2. Log
3. Consolidate
4. Integrity
5. Multi-Agent Systems
6. Deep Learning
7. Artificial Neural Networks
8. Natural Language Processing
9. Robotics
10. Expert Systems
11. Fuzzy Logic



که در آن به ازای هر یک از نمونه داده‌های ورودی، یک نتیجه‌ی خروجی متناظر وجود دارد و الگوریتم‌ها به کمک این داده‌های برچسب‌گذاری شده آموزش داده می‌شوند. از آنجا که در یادگیری نظارت شده، خروجی‌ها از قبل در پایگاه داده<sup>۲</sup> مشخص شده‌اند؛ هدف مدل ساخته شده، ایجاد یک رابطه‌ی درست و منطقی بین ویژگی<sup>۳</sup> ورودی و نتایج خروجی می‌باشد تا بتواند مقادیر خروجی را برای ورودی‌های جدید و بدون برچسب خروجی، پیش‌بینی کند. الگوریتم‌های رگرسیون خطی<sup>۴</sup>، رگرسیون لجستیک<sup>۵</sup>، جنگل تصادفی<sup>۶</sup>، درخت تصمیم‌گیری<sup>۷</sup>، ماشین بردار پشتیبان<sup>۸</sup>، نزدیک‌ترین همسایگی<sup>۹</sup>، شبکه‌ی عصبی مصنوعی<sup>۱۰</sup> و نایو بیس<sup>۱۱</sup> از تکنیک‌های رایج مورد استفاده در یادگیری نظارت شده به شمار می‌روند. این روش نیاز به مجموعه بزرگی از نمونه‌های برچسب‌گذاری شده دارد و در کاربردهایی مانند شناسایی ایمیل‌های اسپم و تشخیص تصویر مورد استفاده قرار می‌گیرد. شماتیکی از نحوه‌ی کارکرد یادگیری نظارتی در (شکل ۲) نمایش یافته است:



شکل ۲: نحوه‌ی عملکرد یادگیری نظارت شده

### ۱-۲-۲-۱ یادگیری غیر نظارتی<sup>۱۲</sup>

یادگیری غیر نظارتی زمانی اتفاق می‌افتد که نمونه‌های موجود در پایگاه داده، حاوی برچسب یا همان نتیجه‌ی خروجی نیست. در این حالت از یادگیری،

1. Supervised Learning
2. Dataset
3. Feature
4. Linear Regression
5. Logistic Regression
6. Random Forest
7. Decision Trees
8. Support Vector Machines
9. k-Nearest Neighbors
10. Neural Networks
11. Naive Bayes
12. Unsupervised Learning



شکل ۱: زیرشاخه‌های متداول هوش مصنوعی

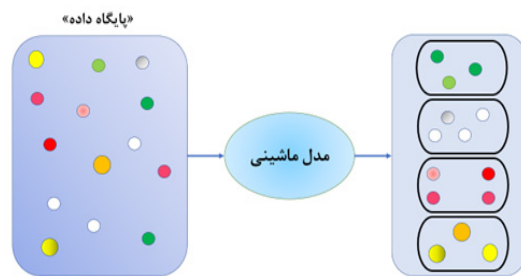
### ۱-۲-۱ یادگیری ماشین

یادگیری ماشین یکی از شاخه‌های مهم هوش مصنوعی است که حول ایده‌ی یادگیری و هوشمندسازی سیستم‌ها از طریق تحلیل اطلاعات، به‌وسیله‌ی به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین شکل گرفته است. به‌طور کلی یادگیری ماشین به مطالعه‌ی چگونگی بهره‌جویی از یک سیستم ماشینی، در جهت شبیه‌سازی فعالیت‌های یادگیری انسانی می‌پردازد. از مزیت‌های مهم یادگیری ماشینی نسبت به مکانیزم‌های یادگیری انسانی، توانایی یادگیری سریع‌تر و تحلیل داده‌های با حجم زیاد و پیچیده و نیز کشف و درک روابط و الگوهای پنهان بین داده‌های ورودی و خروجی اشاره کرد [۱۶]. در فرایند حل مسئله به کمک یادگیری ماشین از روش‌ها و الگوریتم‌های متفاوتی (بسته به نوع مسئله‌ی موجود) استفاده می‌شود [۱۷] که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود:

### ۱-۲-۱-۱ یادگیری نظارت شده<sup>۱</sup>

یادگیری نظارت شده نوعی از یادگیری می‌باشد

الگوریتم‌ها در مدل ماشینی به کار گرفته می‌شوند تا از طریق مشابهت‌یابی و بررسی ساختار پنهان در داده‌های ورودی، الگوی ذاتی بین داده‌ها را یاد بگیرند و بتوانند آن‌ها را در مجموعه‌های مناسب قرار دهند. الگوریتم‌های: میانگین  $k$ - خوشه‌بندی<sup>۱</sup>، خوشه‌بندی سلسله‌ای<sup>۲</sup>، DBSCAN<sup>۳</sup>، تحلیل مؤلفه‌های اصلی<sup>۴</sup> و... از تکنیک‌های رایج مورد استفاده در یادگیری غیر نظارتی بشمار می‌روند. در (شکل ۳) نحوه‌ی عملکرد یادگیری غیر نظارتی نمایش داده شده است:



شکل ۳: نحوه‌ی عملکرد یادگیری غیر نظارتی

### ۱-۲-۳. یادگیری نیمه نظارتی<sup>۵</sup>

یادگیری نیمه نظارتی به روشی اطلاق می‌شود که در آن، پایگاه داده شامل تعداد کمی از داده‌های برچسب‌دار و تعداد زیادی از داده‌های بدون برچسب باشد. این روش بین یادگیری نظارتی و غیر نظارتی قرار می‌گیرد و عموماً این اتفاق زمانی رخ می‌دهد که دسترسی به داده‌های برچسب‌دار هزینه‌بر یا زمان‌بر باشد، اما تعداد زیادی از داده‌های بدون برچسب در دسترس باشد؛ در

این صورت از داده‌های برچسب‌دار جهت هدایت فرایند یادگیری استفاده می‌شود و از داده‌های بدون برچسب نیز برای تعمیم‌دهی و بهبود مدل استفاده می‌شود. از الگوریتم‌های: خودآموزی<sup>۶</sup>، هم‌آموزی<sup>۷</sup>، انتشار برچسب<sup>۸</sup>، مدل‌های مولد<sup>۹</sup> و روش‌های مبتنی بر گراف<sup>۱۰</sup> می‌توان به‌عنوان تکنیک‌های متداول موجود در این روش یادگیری نام برد. یادگیری نیمه‌نظارتی در کاربردهایی مانند دسته‌بندی تصاویر، تشخیص گفتار و پردازش زبان طبیعی<sup>۱۱</sup> استفاده می‌شود.

### ۱-۲-۴. یادگیری تقویتی<sup>۱۲</sup>

نوعی یادگیری ماشینی که دارای یک عامل تقویت کننده می‌باشد و در ازای اقداماتی که به تشخیص درست منجر می‌شوند نتایج مثبت بیشتر و بیشتری کسب می‌کند. یادگیرنده در ابتدا هیچ سرنخی در مورد اینکه در انتظار چه اقدامی باید انجام دهد ندارد اما در ادامه با اجرای سیستم پاداش، الگوریتم‌هایی که به جواب درست منجر شده‌اند تقویت می‌شوند و وزن بیشتری می‌یابند. الگوریتم‌های یادگیری تقویتی برای یادگیری بهینه‌تر جهت تصمیم‌گیری از طریق تعامل با یک محیط طراحی شده‌اند. الگوریتم‌های روش‌های مونت کارلو<sup>۱۳</sup>، یادگیری ارزش<sup>۱۴</sup>، شبکه‌ی عمیق یادگیری ارزش<sup>۱۵</sup>، روش گرادیان پلیسی<sup>۱۶</sup> و SARSA<sup>۱۷</sup> از تکنیک‌های متداول در بحث یادگیری تقویتی به شمار می‌روند. یادگیری تقویتی در طبقه‌بندی تصویر و سیستم‌های توصیه و رانندگی خودران استفاده می‌شود [۱۶].

1. k-Means Clustering
2. Hierarchical Clustering
3. Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
4. PCA
5. Semi-supervised Learning
6. Self-Training
7. Co-Training
8. Label Propagation
9. Generative Models
10. Graph-Based Methods
11. Natural Language Processing
12. Reinforcement Learning
13. Monte Carlo Methods
14. Q-Learning
15. Deep Q-Network
16. Monte Carlo Methods
17. State-Action-Reward-State-Action





## ۲-۱. مطالعات پیشین به‌کارگیری یادگیری ماشین در حوزه‌های مختلف صنعت نفت

در سال ۲۰۱۹، لیو و همکاران به ایجاد یک مدل یادگیری عمیق شبکه عصبی حافظه بلندمدت- کوتاه‌مدت<sup>۱</sup> برای پیش‌بینی تولید نفت در میدان‌های نفتی چین پرداختند. نتایج نشان داد که مدل مذکور با دقت ۷۵ درصد میزان تولید را پیش‌بینی می‌کند و با داده‌های واقعی مطابقت دارد، این مدل پیش‌بینی تولید، به‌عنوان مدلی با دقت و سرعت بالا معرفی شد [۱۷]. در سال ۲۰۲۰، صباح و همکاران به‌منظور پیش‌بینی نرخ نفوذ حفاری<sup>۲</sup> با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی و نگاره‌های گل حفاری به ایجاد یک مدل ماشینی پرداختند. آن‌ها از الگوریتم‌های مختلفی از جمله شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون بردار پشتیبان<sup>۳</sup> و مدل هیبریدی بهینه شده با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۴</sup> را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل بهینه‌سازی ادغام ذرات با دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها نرخ نفوذ حفاری را پیش‌بینی می‌کند [۱۳]. در سال ۲۰۲۱، ژانگ و همکاران با استفاده از یک مدل ماشینی به پیش‌بینی تراوایی در مخازن ماسه‌سنگی تحکیم‌یافته<sup>۵</sup> پرداختند. آن‌ها از داده‌های نگاره‌های سیمی مانند تراکم، مقاومت و سایر اطلاعات ژئوفیزیکی برای سه مدل پشتیبان بردار رگرسیون، جنگل تصادفی و شبکه عصبی بازمانده<sup>۶</sup> استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی بازمانده با استخراج بهترین الگوهای غیرخطی، عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشت [۸]. در سال ۲۰۲۲، سالم و همکاران به‌منظور پیش‌بینی خرابی‌های یکپارچگی چاه<sup>۷</sup> به ایجاد یک مدل ماشینی پرداختند. آن‌ها به بررسی انواع مدل‌های ماشینی برای فیزیک سنگ، حفاری، بهینه‌سازی تولید، و شبیه‌سازی مخزن پرداختند. مهم‌ترین هدف این مطالعه، ارائه یک مدل یادگیری ماشین برای ارزیابی ریسک خرابی یکپارچگی چاه بود. نتایج نشان داد مدل

ماشینی توسعه یافته، می‌تواند در کاهش خطر خرابی یکپارچگی چاه و بهبود بهره‌وری مؤثر باشد [۶]. در سال ۲۰۲۳، مای-کائو و ترونک-کخ به ایجاد یک مدل ماشینی و تطبیق نتایج الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین برای پیش‌بینی تولید نفت پرداختند. این مطالعه بر اساس داده‌های تولیدی یک چاه نفتی در جنوب ویتنام انجام شد. الگوریتم‌های نزدیک‌ترین همسایگی، جنگل تصادفی، رگرسیون بردار پشتیبان و مدل‌های شبکه عصبی عمیق به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که الگوریتم‌های کلاسیک، به‌ویژه رگرسیون بردار پشتیبان، کارایی بالاتری در پیش‌بینی داده‌ها داشتند. مدل‌های شبکه عصبی در برخی موارد تطابق خوبی با داده‌های واقعی داشتند؛ اما در پیش‌بینی تغییرات ناگهانی عملکرد ضعیف‌تری نشان دادند [۱۱].

در مطالعه‌ی حاضر، به‌منظور گردآوری و تدوین یک مرجع راهنما برای پژوهشگران، مطالعات پیشین در زمینه‌ی به‌کارگیری مدل‌های ماشینی در مدیریت تولید ماسه شرح داده شده است و نتایج حاصل از مطالعات، براساس موضوع و کاربرد آن‌ها در بخش‌های مختلف مدیریت ماسه، شامل: پیش‌بینی تولید ماسه، کنترل و مدیریت تولید ماسه، مطالعات نرخ آستانه‌ی<sup>۸</sup> تولید ماسه، پیش‌بینی شرایط و رفتار تولید ماسه، نرخ و حجم تولید ماسه، توزیع اندازه‌ی ذرات تولید ماسه و پیش‌بینی کاهش فشار بحرانی کل برای تولید ماسه از چاه‌ها، مورد بررسی و تفکیک قرار گرفته است. در نهایت با جمع‌بندی و تفسیر نقاط قوت و ضعف این مطالعات، پرداخته شده است؛ بنابراین مطالعه‌ی حاضر با ارائه‌ی راهکارهای کارآمد و دقیق، می‌تواند در انجام مطالعات آینده، مدنظر قرار گیرد.

## ۲. مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه‌ی کاربردهای یادگیری ماشین در تولید و مهار ماسه

در این بخش مقالات پیشین بر اساس موضوع مورد

1. LSTM
2. ROP
3. SVR
4. MLP-PSO
5. Consolidate
6. ResNet
7. Well Integrity
8. Critical Rate

مطالعه، در چند گروه (بر اساس موضوعات پرتکرار و حائز اهمیت) تفکیک و طبقه‌بندی شده است:

## ۱-۲. پیش‌بینی تولید ماسه

در سال ۲۰۱۱، آزاد و همکاران با داده‌های جامع حاصل از ۳۸ چاه در سه میدان نفتی به کمک یادگیری ماشین، به پیش‌بینی تولید ماسه از میادین پرداختند در مطالعه‌ی آن‌ها از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی فشار بحرانی تولید ماسه در میادین جنوب غربی ایران استفاده شد و داده‌های ورودی شامل: پارامترهای زمین‌شناسی و فشار مخزن بود که فرایند آموزش برای مدل با استفاده از ۲۴ مجموعه داده و اعتبارسنجی مدل با ۷ مجموعه داده انجام شد. نتایج نشان داد که مدل ماشینی در مقایسه با مدل‌های تحلیلی سنتی، در پیش‌بینی شروع تولید ماسه دقت بالاتری دارد [۱۸]. در سال ۲۰۱۶، قراقیضی و همکاران با استفاده از داده‌های ۳۱ چاه در میدان‌های شمالی دریای آدریاتیک، یک مدل پیش‌بینی شرایط تولید ماسه از چاه را توسعه دادند. آن‌ها با داده‌هایی شامل: عمق عمودی کل، زمان عبور، نرخ جریان آب و... به کمک روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان کمترین مربعات<sup>۱</sup> در مدل به کار گرفتند. در نهایت جهت بهینه‌سازی عملکرد مدل از تابع پایه شعاعی استفاده شد تا دقت بیشتری در تشخیص پیش‌بینی تولید ماسه حاصل گردد. نتایج نشان داد که مدل ارائه شده در این مطالعه، عملکرد بالایی در پیش‌بینی تولید ماسه از چاه‌ها دارد و می‌تواند جهت طراحی تکمیل چاه به مهندسان کمک کند [۱۹]. در سال ۲۰۱۷، اولادپس و همکاران با استفاده از داده‌های مخازن نفتی منطقه دلتای نیجر در چاه‌ها، یک مدل ماشینی را توسعه دادند و برای اولین بار از الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی تولید ماسه استفاده کردند. در مطالعه آن‌ها ترکیبی از الگوریتم‌ها و شبیه‌سازی نرم‌افزاری برای غلبه بر محدودیت‌ها و نقاط ضعف الگوریتم‌ها استفاده شد؛ همچنین جهت تنظیم بهینه وزن پارامترها نیز از روش هسته‌ی RBF استفاده شد. آن‌ها برای ارزیابی خطا از تکنیک اعتبارسنجی متقابل استفاده کردند نتایج نشان داد که مدل ماشینی می‌تواند با دقت بالایی تولید ماسه را پیش‌بینی کند؛ همچنین استفاده از ماشین بردار پشتیبان توانست تصمیم‌گیری‌ها را بهبود بخشد و هزینه‌های تولید را کاهش دهد [۲۰]. در سال ۲۰۲۱، نوآشی

و همکاران به پیش‌بینی تولید ماسه در مخازن ماسه‌سنجی، به کمک الگوریتم‌های یادگیری ماشین پرداختند. آن‌ها از الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان و شبکه‌ی عصبی مصنوعی دو لایه با الگوریتم پس‌انتشار خطا برای ساخت مدل بهینه استفاده کردند و پایگاه داده شامل: ویژگی‌های مخزنی و زمین‌شناسی چهار چاه در مخازن منطقه‌ی دلتای نیجر بود که فرایند پیش‌پردازش<sup>۲</sup> داده‌ها، تحلیل پیاده‌سازی و اعمال الگوریتم‌ها صورت گرفت و در نهایت به ارزیابی عملکرد هر یک از الگوریتم‌ها پرداخته شد. نتایج نشان داد که ماشین بردار پشتیبانی نسبت به شبکه عصبی مصنوعی عملکرد بهتری دارد و با دقت و کارایی بالاتری می‌تواند احتمال وقوع تولید ماسه را پیش‌بینی کند [۲۱]. در سال ۲۰۲۲، سونگ و همکاران به کمک داده‌های آزمایشگاهی حاصل از مخازن حاوی هیدرات‌های گاز طبیعی به توسعه‌ی یک مدل پیش‌بینی تولید ماسه با الگوریتم‌های یادگیری ماشین پرداختند. در مطالعه‌ی آن‌ها چهار الگوریتم اصلی یادگیری ماشین، شامل: نزدیک‌ترین همسایه، رگرسیون بردار پشتیبان، درخت تقویتی و پرسپترون چندلایه بر روی پایگاه داده اعمال شد و یک مدل پیش‌بینی ترکیبی برای تولید ماسه از طریق به‌کارگیری هر دو الگوریتم رگرسیون بردار پشتیبان و پرسپترون چندلایه نیز حاصل شد. نتایج نشان داد که الگوریتم درخت تقویتی می‌تواند با دقت بالایی تولید ماسه را پیش‌بینی کند و به‌عنوان بهترین الگوریتم شناخته شد [۲۲]. در سال ۲۰۲۳، جینگ و همکاران با استفاده از داده‌های نگاره و فرمول‌های تجربی، به کمک الگوریتم شبکه عصبی پیش‌خور به توسعه مدل پیش‌بینی تولید ماسه پرداختند. در مطالعه‌ی آن‌ها از اعمال فرمول‌های تجربی بر روی داده‌های نگاره برای یک چاه تولیدی خالص، محاسبات پیش‌بینی تولید ماسه انجام شد و در ادامه از این داده‌ها به‌عنوان ورودی برای آموزش یک مدل شبکه عصبی پس‌انتشار استفاده کردند تا برای سایر چاه‌های بلوک، یک مدل ماشینی جهت پیش‌بینی تولید ماسه ایجاد شود و دقت این مدل را از طریق تنظیم مداوم وزن‌ها و مقادیر بهبود بخشیدند و مشاهده کردند که نتایج حاصل مدل ماشینی با نتایج فرمول‌های تجربی همخوانی دارند. نتایج نشان داد که استفاده از این مدل یادگیری، می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی تولید ماسه منجر شود [۲۳]. در سال ۲۰۲۳، آبه و همکاران با استفاده از ۴۵۷ مجموعه داده‌ی حاصل

1. LSSVM
2. Preprocessing



از ۴۳ چاه واقع در میدان‌های نفتی دلتای نیجر، به ایجاد یک مدل ماشینی به‌منظور پیش‌بینی تولید ماسه پرداختند. در مطالعه‌ی آن‌ها پارامترهای ورودی مورد بررسی، شامل: پیش‌بینی پارامترهای فشار دهانه چاه، اندازه گلوگاه، فشار مخزن و... و پارامترهای خروجی شامل: درصد مواد جامد و آب و درصد ماسه بود و الگوریتم‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی بر این پایگاه داده اعمال شدند. نتایج نشان داد که مدل‌های عصبی چندورودی تک‌خروجی<sup>۱</sup> و چندورودی چندخروجی<sup>۲</sup> دقت بالایی در پیش‌بینی این پارامترها دارند و به‌عنوان ابزارهای کارآمدی برای پیش‌بینی در میدان نفتی توصیه شدند [۲۴]. در سال ۲۰۲۳، عبدالقانی و همکاران با استفاده از داده‌های دو چاه نفتی میدان هلال به توسعه‌ی یک مدل ماشینی به‌منظور پیش‌بینی تولید ماسه و ارزیابی پارامترهای ژئومکانیکی به‌وسیله‌ی شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرداختند. برای محاسبه‌ی پارامترهای ژئومکانیکی مانند: مدل زمین مکانیکی و پارامترهای استحکام سنگ، داده‌های مربوط به فشار منفذی<sup>۳</sup> به کمک روش‌های ایتون و بانرز تخمین زده شد و برای ساخت مدل زمین مکانیکی و ارزیابی پایداری چاه‌ها از پارامترهایی مانند: مدول یانگ، ضریب بایوت و نسبت پواسون بهره گرفتند و در نهایت برای جایگزینی معادلات تجربی، جهت پیش‌بینی نگاره‌های کلیدی از روش‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل مبتنی بر یادگیری ماشین با داده‌های تولید واقعی همخوانی دارد و خطر تولید ماسه را به‌درستی پیش‌بینی می‌کند؛ درحالی‌که مدل مبتنی بر معادله گاردنر نتایج نادرستی ارائه داد [۲۵]. در سال ۲۰۲۴، انجوپیندو و ژوزف به‌منظور بهینه‌سازی پیش‌بینی تولید ماسه در چاه‌های نفت از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی، شبکه‌ی عصبی مصنوعی و نزدیک‌ترین همسایگی استفاده کردند. آن‌ها با داده‌های موجود از ۶۳ چاه نفت، شامل پارامترهای زمین‌شناسی و مکانیکی به توسعه‌ی مدل ماشینی پرداختند و در نهایت اعتبار مدل ساخته شده را به کمک داده‌های میدانی و تکنیک‌های اعتبارسنجی متقابل و روش‌های آماری مانند: دقت، حساسیت، ضریب همبستگی متیو و ... بررسی و ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مدل ساخته شده به کمک ماشین بردار پشتیبان دقت بالایی در

پیش‌بینی آغاز تولید ماسه دارد و قابل اطمینان و کارآمد می‌باشد [۲۶]. در سال ۲۰۲۴، شابدیروا و همکاران به کمک داده‌های ۴۳ چاه واقع در میدان گاز کارازان‌باس، به ایجاد یک مدل ماشینی پیش‌بینی مقدار تولید ماسه پرداختند. در مطالعه‌ی آن‌ها، ابتدا داده‌هایی مانند: ضخامت و عمق مخزن از طریق محاسبه فواصل چاه، به پایگاه داده اضافه شد و یک سیستم برای اندازه‌گیری بر پایه‌ی تخلخل و نسبت ناحیه خالص به ناخالص ایجاد شد و سپس از الگوریتم‌هایی مانند: جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم‌گیری و نزدیک‌ترین همسایه استفاده شد و داده‌ها بر اساس نزدیکی به گسل‌ها به دو گروه نزدیک و دور تفکیک و ارزیابی شدند. در نهایت به اعتبارسنجی مدرن و ارزیابی دقت آن‌ها با روش‌های خطای ریشه‌ی مربعات میانگین و ضریب تعیین  $R^2$  پرداخته شد. نتایج نشان داد که عوامل زمین‌شناسی به‌ویژه نزدیکی به گسل‌ها تأثیر زیادی بر دقت پیش‌بینی دارند. همچنین برای ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین، معیارهای جدیدی مانند دقت پیش‌بینی اوج تولید ماسه معرفی شد [۲۷]. در سال ۲۰۲۴، اسفحا و همکاران به بررسی مکانیزم‌های تولید ماسه و پیش‌بینی تولید ماسه از طریق به‌کارگیری روش‌های یادگیری نظارت‌شده، یادگیری غیر نظارتی و یادگیری عمیق پرداختند. آن‌ها در یادگیری نظارت‌شده از مدل‌هایی مانند: شبکه‌های عصبی مصنوعی و جنگل‌های تصادفی برای داده‌های تاریخی برچسب‌دار چاه، به‌منظور پیش‌بینی تولید ماسه استفاده کردند؛ در یادگیری بدون نظارت در تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی برای کشف الگوهای مخفی در داده‌های بدون برچسب، به‌جای استفاده از الگوریتم K-means پرداخته شد. بررسی‌ها نشان داد که تجمیع این روش‌ها می‌تواند دقت پیش‌بینی را افزایش دهد و مشکلات حاصل از تولید ماسه را بهبود بخشد [۲۸].

## ۱-۱-۲. پیش‌بینی نرخ یا حجم تولید ماسه

در سال ۲۰۲۰، کولا و همکاران با استفاده از داده‌های ۱۴۰ مورد از مطالعات پیشین، به‌منظور پیش‌بینی نرخ ماسه آستانه<sup>۴</sup> در مانیتورهای صوتی ماسه، به توسعه‌ی یک مدل ماشینی پرداختند. در مطالعه‌ی آن‌ها با کمک سه الگوریتم یادگیری نظارت‌شده، شامل: جنگل تصادفی، ماشین بردار

1. MISO
2. MIMO
3. Pore Pressure
4. Threshold Sand Rate

پشتیبان و الاستیک خالص به منظور پیش‌بینی نسبت سیگنال به نویز آکوستیک<sup>۱</sup> از داده‌هایی شامل: نرخ ماسه آستانه، اندازه لوله‌ها، نرخ گاز و مایع و همچنین فرسایش (محاسبه شده توسط یک مدل مکانیکی) استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل توسعه داده شده می‌تواند نرخ آستانه‌ی ماسه را تحت شرایط مختلف پیش‌بینی کند. همچنین تطابق خوب بین مدل ماشینی با داده‌های آزمایشی وجود داشت و در نهایت این مدل به‌عنوان یک ابزار پیش‌بینی کارآمد در صنعت معرفی شد [۲۹]. در سال ۲۰۲۱، ویرا و همکاران با استفاده از حدود ۲۵۰ مورد از مطالعات قبلی در زمینه‌ی تعیین نرخ آستانه ماسه در شرایط عملیاتی مختلف، به ایجاد یک مدل ماشینی پیش‌بینی نرخ آستانه تولید ماسه پرداختند. در مطالعه‌ی آن‌ها از الگوریتم‌هایی شامل: شبکه الاستیک، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان استفاده شد و پس از آموزش و ارزیابی مدل‌ها، به تحلیل رابطه نرخ آستانه ماسه و تغییرات پارامترهای ورودی پرداختند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی نرخ آستانه‌ی ماسه توسط مدل‌ها دقیق است و می‌تواند در جهت پیش‌بینی و مدیریت تولید ماسه راهگشا باشد [۳۰]. در سال ۲۰۲۳، شابدیروا و همکاران به منظور پیش‌بینی حجم تولید ماسه در مخازن ماسه‌سنگی غیرمستحکم آقزاقستان، یک مدل ماشینی توسعه دادند. آن‌ها با استفاده از پایگاه داده‌های چاه‌های و از ابزارهای آماری مانند برای شناسایی مقادیر پرت هر ویژگی استفاده کردند و با نمودارهای همبستگی، روابط بین ویژگی‌ها را بررسی کردند. در نهایت شش الگوریتم یادگیری ماشین شامل: رگرسیون خطی، مدل خطی تعمیم یافته با استفاده از تنظیمات لاسو یا لاستیک خالص، ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم‌گیری، رگرسیون کارترین و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه را در مدل برای تحلیل داده‌ها به کار گرفتند. نتایج نشان داد که الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه می‌تواند به‌خوبی رفتار و حجم تولیدی ماسه را پیش‌بینی کند [۳۱]. در سال ۲۰۲۳، چیکوی و همکاران با استفاده از داده‌های چاه‌های نفت منطقه‌ی دلتای نیجر، یک مدل ماشینی را به منظور پیش‌بینی نرخ تولید ماسه توسعه دادند. در مطالعه‌ی آن‌ها، پارامترهای بی‌بعد ورودی شامل: عدد رینولدز، عامل بارگذاری، نسبت گاز به مایع و درصد آب تولیدی و پارامتر خروجی، نرخ تولید ماسه در نظر گرفته

شده است و به منظور ارزیابی مدل از نرم‌افزار طراحی آزمایش و معادلات ریاضی استفاده شده است؛ همچنین برای تحلیل داده‌ها از روش سطح پاسخ استفاده شده است. نتایج نشان داد که مدل ماشینی توسعه یافته می‌تواند در مدیریت مخازن طراحی تکمیل چاه و برنامه‌ریزی‌های میدانی جهت بهینه‌سازی به کار رود [۳۲].

## ۲-۱-۲. پیش‌بینی افت فشار بحرانی کل و پیش‌بینی تولید ماسه

در سال ۲۰۱۴، خامه‌چی و همکاران به کمک داده‌های حاصل از ۳۱ چاه مربوط به ۹ میدان گازی در نواحی شمالی و مرکزی دریای آدریاتیک، یک مدل یادگیری ماشین برای پیش‌بینی تولید ماسه ایجاد کردند. در مطالعه‌ی آن‌ها افت فشار بحرانی کل به‌عنوان معیار پیش‌بینی تولید ماسه قرار داده شد؛ همچنین به منظور توسعه‌ی مدل از الگوریتم‌های رگرسیون خطی ساده، رگرسیون خطی بهبود یافته با الگوریتم ژنتیک و دو شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم‌های پس‌انتشار خطا و بهینه‌سازی ازدحام ذرات، استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل‌های شبکه عصبی، به‌ویژه شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، توانایی و عملکرد بالاتری در پیش‌بینی تولید ماسه از خود نشان می‌دهند و نسبت به مدل‌های سنتی دقیق‌تر هستند [۳۳]. در سال ۲۰۲۲، الاکبری و همکاران به منظور پیش‌بینی افت فشار بحرانی کل و تولید ماسه، از یک مدل ماشینی استفاده کردند. آن‌ها از یک پایگاه داده شامل: ۲۳ مجموعه داده از ۱۵ چاه و اعمال الگوریتم‌های روش سطح پاسخ و ماشین بردار پشتیبان برای توسعه‌ی مدل ماشینی استفاده کردند و برای ارزیابی مدل‌ها و اطمینان از برقراری ارتباط صحیح و معنادار بین پارامترهای ورودی با خروجی، از روش‌های آماری مختلفی شامل: آزمون F، آزمون آنالیز واریانس<sup>۲</sup>، آمارهای تناسب برازش و نمودارهای تشخیصی استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل ماشین بردار پشتیبان با دقت بیشتری نسبت به مدل‌های موجود عمل می‌کند و خطای نسبی و مطلق کمتری دارد [۳۴]. در (جدول ۱) خلاصه‌ای از کارهای صورت گرفته در زمینه‌ی کاربرد یادگیری ماشین در پیش‌بینی تولید ماسه ذکر شده است:

1. Acoustic
2. Unconsolidated
3. ANOVA

جدول ۱: مطالعات پیشین در زمینه کاربرد یادگیری ماشین در پیش‌بینی تولید ماسه

نویسندگان مقاله (سال چاپ)	شماره منبع	هدف مطالعه	داده‌های ورودی	روش‌شناسی	اعتبارسنجی
آزاد و همکاران (۲۰۱۱)	[۱۸]	پیش‌بینی تولید ماسه	۳۸ چاه از سه میدان نفتی	شبکه‌های عصبی مصنوعی	$R^2$
قراقیسی و همکاران (۲۰۰۶)	[۱۹]	پیش‌بینی شرایط تولید ماسه	۳۱ چاه در دریای آدریاتیک	طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان کمترین مربعات	محاسبه‌ی ماتریسی <sup>۱</sup>
اولادیو و همکاران (۲۰۱۷)	[۲۰]	پیش‌بینی وقوع تولید ماسه در چاه‌ها	منطقه‌ی دلتای نیجر	الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی، روش هسته‌ی RBF برای تنظیم وزن پارامترها	اعتبارسنجی کراس به روش یک‌به‌یک <sup>۲</sup>
نواشی و همکاران (۲۰۲۱)	[۲۱]	پیش‌بینی تولید ماسه در مخازن ماسه‌سنگی	چهار چاه در مخازن منطقه دلتای نیجر	ماشین بردار پشتیبان و شبکه‌ی عصبی مصنوعی دو لایه	Confusion Matrix, Precision, Recall, F1-Score
سونگ و همکاران (۲۰۲۲)	[۲۲]	توسعه‌ی یک مدل پیش‌بینی تولید ماسه	مخازن حاوی هیدرات‌های گاز طبیعی	نزدیک‌ترین همسایه، رگرسیون بردار پشتیبان، درخت تقویتی و پرسپترون چند لایه	$R^2$ و میانگین مربعات خطا <sup>۳</sup>
جینگ و همکاران (۲۰۲۳)	[۲۳]	پیش‌بینی تولید ماسه	داده‌های نگاره و فرمول‌های تجربی	شبکه عصبی پیش‌خور	تطابق با نتایج فرمول‌های تجربی
آبوه و همکاران (۲۰۲۳)	[۲۴]	پیش‌بینی تولید ماسه	۴۵۷ مجموعه داده‌ی حاصل از ۴۳ چاه در نیجر	الگوریتم‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی	$R^2$ و میانگین مربعات خطا <sup>۳</sup>
عبدالقانی و همکاران (۲۰۲۳)	[۲۵]	پیش‌بینی تولید ماسه و ارزیابی پارامترهای ژئومکانیکی	دو چاه نفتی میدان هلال	شبکه عصبی مصنوعی	تطابق با داده‌های واقعی تولیدی
انجوپیندو و ژوزف (۲۰۲۴)	[۲۶]	بهینه‌سازی پیش‌بینی تولید ماسه در چاه‌های نفت	۶۳ چاه نفت	ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی، شبکه‌ی عصبی مصنوعی و نزدیک‌ترین همسایگی	دقت، حساسیت، ضریب همبستگی متیو و ...
شایدیرو و همکاران (۲۰۲۴)	[۲۷]	ایجاد یک مدل پیش‌بینی مقدار تولید ماسه در میدان کارازان‌بایس	۴۳ چاه واقع در میدان گاز کارازان-بایس	جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم‌گیری و نزدیک‌ترین همسایگی	$R^2$ و میانگین مربعات خطا <sup>۳</sup>
اسفخا و همکاران (۲۰۲۴)	[۲۷]	مکانیزم‌های تولید ماسه در چاه‌های نفت و گاز و روش‌های پیش‌بینی تولید ماسه	داده‌های تاریخی چاه منتخب	انواع روش‌های یادگیری نظارت‌شده، روش‌های یادگیری غیرنظارتی و یادگیری عمیق	تطابق با نتایج حاصل از ارزیابی چاه
کولا و همکاران (۲۰۲۰)	[۲۹]	پیش‌بینی نرخ ماسه آستانه	۱۴۰ مورد از مطالعه‌های پیشین	جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و الاستیک خالص	تطابق خوب با داده‌های آزمایشی
ویرا و همکاران (۲۰۲۱)	[۳۰]	تعیین نرخ آستانه‌ی ماسه در شرایط عملیاتی مختلف	حدود ۲۵۰ مورد از مطالعات قبلی	شبکه الاستیک، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان	تطابق با مدل مکانیکی چاه
شایدیرو و همکاران (۲۰۲۳)	[۳۱]	پیش‌بینی حجم تولید ماسه در مخازن ماسه‌سنگی ضعیف قزاقستان	مخازن ماسه‌سنگی قزاقستان	رگرسیون خطی، مدل خطی تعمیم یافته، ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم‌گیری، رگرسیون کارترین و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی	تطابق با تاریخچه‌ی تولید ماسه‌ی میدان
چیکوی و همکاران (۲۰۲۳)	[۳۲]	پیش‌بینی نرخ تولید ماسه	چاه‌های نفت منطقه‌ی دلتای نیجر	منحنی سطح پاسخ <sup>۴</sup>	تحلیل خطا <sup>۵</sup> و کراس پلات‌ها <sup>۶</sup>
خامه‌چی و همکاران (۲۰۱۴)	[۳۳]	پیش‌بینی تولید ماسه و افت فشار بحرانی کل	۳۱ چاه گازی در دریای آدریاتیک	رگرسیون خطی ساده، رگرسیون خطی بهبود یافته با الگوریتم ژنتیک و دو شبکه عصبی مصنوعی متفاوت	APE, AAPE, MSE, MINAPE, MAXAPE, $R^2$
الاکبری و همکاران (۲۰۲۳)	[۳۴]	پیش‌بینی افت فشار بحرانی کل و پیش‌بینی تولید ماسه	۲۳ مجموعه داده از چاه‌ها	روش سطح پاسخ و ماشین بردار پشتیبان	آزمون F، آزمون آنالیز واریانس و نمودارهای تشخیصی

1. Evaluation of the quality of a classification model is to compute a confusion matrix of the actual class versus predicted class
2. Leave-one-out cross validation
3. MSE
4. Response Surface Method (RSM)
5. Error Analysis
6. Cross Plots

## ۲-۲. کنترل و مدیریت تولید ماسه در چاهها

در سال ۲۰۱۸، کتملی و باندیوپاندیاه، به توسعه‌ی یک مدل ماشینی بر اساس الگوریتم شبکه‌های عصبی مصنوعی برای مدیریت تولید ماسه با داده‌های حاصل از نگاره عبور صوتی و چگالی حجمی و سایر نگاره‌ها پرداختند. در مطالعه‌ی آن‌ها برای یادگیری الگوهای پاسخ از سایر نگاره‌های مرتبط، مانند مقاومت الکتریکی، گامای شعاعی و تخلخل نوترونی، یک مدل ساخته شد. در نهایت مدل آموزش‌دیده بر روی داده‌های جدید نیز آزمایش شد و مشخص شد که قابلیت تعمیم‌پذیری دارد و عملکرد مدل توسط سایر روش‌های مصنوعی مانند معادله گاردنر، سنتز عمق، سنتز تخلخل و وارونگی لرزه‌ای ارزیابی شد. نتایج نشان داد که پیش‌بینی‌های این مدل‌های جدید با تولید واقعی ماسه همخوانی دارند و استفاده از این روش باعث کاهش هزینه‌ها و ریسک‌ها در زمینه‌ی مدیریت مخازن می‌شود [۳۵]. در سال ۲۰۲۲، لوفی و همکاران با استفاده از یک پایگاه داده‌ی کنترل تولید ماسه‌ی مربوط به بیش از ۱۹۰۰ چاه، به ایجاد یک مدل ماشینی برای بهینه‌سازی کنترل ماسه پرداختند. در مطالعه‌ی آن‌ها داده‌ها ابتدا پیش‌پردازش شدند و ویژگی‌های کلیدی برای ساخت یک مدل طبقه‌بندی شده‌ی کنترل تولید ماسه مشخص شدند.

چهار الگوریتم، شامل: نزدیک‌ترین همسایگی، ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم‌گیری و جنگل تصادفی بر روی داده‌ها اعمال شدند. نتایج نشان داد که مدل جنگل تصادفی، بهترین عملکرد را نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد و با دقت بالا می‌تواند به‌عنوان یک مدل تشخیصی برای ارزیابی و انتخاب روش‌های کنترل ماسه در مخازن مختلف به‌صورت مؤثر عمل کند [۳۶]. در سال ۲۰۲۳، عبدالحمید و همکاران با استفاده از پایگاه داده‌ی غیرساختاریافته‌ی مربوط به ۳۶۱ چاه، به توسعه‌ی یک مدل ماشینی بهینه‌سازی کنترل تولید ماسه پرداختند. در مطالعه‌ی آن‌ها از الگوریتم‌هایی مانند: شبکه مصنوعی عمیق، پردازش زبان طبیعی و تشخیص کاراکترهای نوری استفاده شد و اطلاعات جدولی تصاویر به‌صورت جدول طبقه‌بندی و پردازش شدند. آن‌ها برای تحلیل داده‌های بزرگ مقیاس، فرایندهایی طراحی کردند که جستجو و تحلیل داده‌ها را با دقت بالا انجام دهد. نتایج نشان داد که این تکنیک می‌تواند به بهبود کنترل تولید ماسه در میدان‌های نفتی نروژ کمک شایانی کند [۳۷]. در (جدول ۲) خلاصه‌ای از کارهای صورت گرفته در زمینه‌ی کاربرد یادگیری ماشین در کنترل تولید ماسه ذکر شده است:

جدول ۲: مطالعات پیشین در زمینه‌ی کاربرد یادگیری ماشین در کنترل و مدیریت تولید ماسه

نویسندگان مقاله (سال چاپ)	شماره منبع	هدف مطالعه	داده‌های ورودی	روش‌شناسی	اعتبارسنجی
کتملی و باندیوپاندیاه (۲۰۱۸)	[۳۵]	مدیریت تولید ماسه	نگار عبور صوتی و چگالی حجمی و سایر نگاره‌ها	اساس الگوریتم شبکه‌های عصبی مصنوعی	تطابق با تولید واقعی ماسه
لوفی و همکاران (۲۰۲۲)	[۳۶]	بهینه‌سازی کنترل ماسه	داده‌ی کنترل تولید ماسه‌ی مربوط به بیش از ۱۹۰۰ چاه	نزدیک‌ترین همسایگی، ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم‌گیری و جنگل تصادفی	F1 score, Precision, Recall
عبدالحمید و همکاران (۲۰۲۳)	[۳۷]	بهینه‌سازی مدیریت و کنترل تولید ماسه در میدان‌های نفتی نروژ	داده‌های غیر ساختاریافته‌ی ۳۶۱ چاه	شبکه مصنوعی عمیق، پردازش زبان طبیعی و تشخیص کاراکترهای نوری	-

## ۲-۳. توزیع اندازه‌ی دانه‌ها و تأثیر آن‌ها بر روی تولید ماسه

در سال ۲۰۲۴، لیو از داده‌های یک میدان نفتی در خلیج بیبو<sup>۱</sup> در دریای جنوبی چین به‌منظور توسعه‌ی یک مدل ماشینی برای پیش‌بینی پروفایل اندازه دانه‌های متوسط<sup>۲</sup> در مخازن ماسه‌ای غیرمستحکم و کنترل تولید ماسه پرداخت.

در مطالعه‌ی وی دو مدل یادگیری ماشینی XG Boost و شبکه عصبی مصنوعی را به‌منظور افزایش دقت پیش‌بینی به‌صورت ترکیبی به‌کار گرفته شده‌اند. در این مدل با وزن‌دهی به مدل‌ها با روش معکوس خطا و مهندسی ویژگی‌ها، یک

1. Beibu Gulf
2. d50



دادند و داده‌های به‌دست آمده از چاه اول برای آموزشی مدل ماشینی به کار گرفته شد و مدل به‌دست آمده بر روی داده‌های چاه دوم آزمایش شد و مدل به‌دست آمده، برای تخمین توزیع اندازه دانه‌های ماسه در سایر چاه‌ها نیز به کار گرفته شد و توانست خواص ماسه‌ی تولیدی از جمله: ترکیب مواد تشکیل دهنده، اندازه متوسط دانه‌ها و سایر عوامل تأثیرگذار بر تولید ماسه را پیش‌بینی کند. نتایج نشان داد که انتخاب نرخ تولید بهینه و فشارهای ایمن برای جلوگیری از انباشت ماسه در چاه مذکور ضروری است و باید از سیستم‌های کنترل ماسه مانند گراول‌پک و نیز طراحی مناسب حفاری استفاده شود [۳۹]. در (جدول ۳) خلاصه‌ای از کارهای صورت گرفته در زمینه‌ی کاربرد یادگیری ماشینی برای توزیع اندازه‌ی دانه‌ها و تأثیر آن‌ها بر روی تولید ماسه ذکر شده است:

جدول ۳: مطالعات پیشین در زمینه‌ی کاربرد یادگیری ماشینی برای توزیع اندازه‌ی دانه‌ها و تأثیر آن‌ها بر روی تولید ماسه

نویسندگان مقاله (سال چاپ)	شماره منبع	هدف مطالعه	داده‌های ورودی	روش‌شناسی	اعتبارسنجی
لیو (۲۰۲۴)	[۳۸]	پیش‌بینی پروفایل اندازه دانه‌های متوسط در مخزن ماسه‌ای غیر مستحکم و کنترل تولید ماسه	یک میدان نفتی در خلیج بیبو	XG Boost و شبکه عصبی مصنوعی به‌صورت ترکیبی	تطبیق با داده‌های اندازه‌گیری شده
حکیمی داوود و همکاران (۲۰۲۴)	[۳۹]	پیش‌بینی و تخمین توزیع اندازه سازندهای تحت‌الارضی و تأثیر آن بر روی عوامل تولید ماسه	یک مخزن در نواحی فراساحل مالزی	شبکه عصبی مصنوعی	تطبیق با داده‌های مخزن

بررسی مطالعات و نتایج حاصل از آن‌ها نشان داد:

۱. الگوریتم‌های یادگیری ماشینی با توانایی تحلیل داده‌های پیچیده، در پیش‌بینی نتایج، عملکرد قابل توجهی ارائه کردند؛ به‌طوری‌که دقت مدل‌های توسعه‌یافته‌ی ماشینی نسبت به روش‌های سنتی تحلیل داده‌های ماسه، دارای دقت بالاتر و عملکرد بهتری می‌باشند. از این‌رو می‌توانند جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی محسوب شوند.

۲. با توجه به مطالعات ارائه شده و نتایج حاصل از (جدول ۱، ۲ و ۳)، می‌توان دریافت که ماشین بردار پشتیبان، شبکه‌ی عصبی مصنوعی و جنگل تصادفی پرتکرارترین الگوریتم‌های به کار گرفته شده در زمینه‌ی تولید ماسه می‌باشند که نشانگر توانایی این تکنیک‌ها در ایجاد مدل‌های دقیق برای تشخیص و پیش‌بینی تولید ماسه می‌باشد. در برخی از مطالعات نیز از ترکیب چند روش

مدل ترکیبی شامل اطلاعات چند بعدی ارائه شد. نتایج نشان داد که این مدل ترکیبی می‌تواند دقت پیش‌بینی پروفایل اندازه دانه‌های متوسط را تا ۱۶/۵ درصد نسبت به مدل‌های منفرد بهبود بخشد و کاربرد موفق‌تری در طراحی لایه‌بندی ماسه برای کنترل تولید ماسه در چاه‌های مجاور داشته باشد [۳۸]. در سال ۲۰۲۴، حکیمی داوود و همکاران با استفاده از داده‌های یک مخزن در نواحی فراساحل مالزی به توسعه‌ی مدل ماشینی برای پیش‌بینی و تخمین توزیع اندازه سازندهای تحت‌الارضی و تأثیر آن بر روی عوامل تولید ماسه پرداختند. در مطالعه‌ی آن‌ها برای تطبیق داده‌های مخزن با داده‌های NMR از تکنیک‌های آماری و الگوریتم‌هایی مانند شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. آن‌ها برای حذف اثرات هیدروکربن‌ها در مخزن یک فرایند جایگزینی سیال انجام

به‌طور کلی در سال‌های اخیر به دلیل اهمیت روزافزون بهره‌گیری از تکنیک‌های یادگیری ماشینی برای حل مسائل مرتبط با چالش‌ها و معضلات ایجاد شده‌ی ناشی از تولید ماسه در چاه‌ها می‌باشد که نشانگر حرکت صنعت نفت و گاز، در سراسر جهان، در جهت استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشینی در مواجهه با چالش تولید ماسه می‌باشد.

### ۳. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، نحوه‌ی به‌کارگیری مدل‌های ماشینی و ارزیابی عملکرد آن‌ها برای مدیریت تولید ماسه در چاه‌های نفت و گاز، در مطالعات پیشین شرح داده شد؛ همچنین به‌منظور درک بهتر روش‌های استفاده از یادگیری ماشینی در هریک از مطالعات، الگوریتم‌های به کار گرفته شده و روش انجام کار آن‌ها در دسته‌بندی‌های مرتبط ذکر شد. درنهایت، بررسی و تحلیل نتایج موفقیت‌آمیز مطالعات مذکور می‌تواند برای انجام مطالعات آینده راهگشا باشد.

با یکدیگر برای ایجاد مدل کارآمدتر استفاده شده است و نتایج نشان داد که در صورت ترکیب درست الگوریتم‌ها، می‌توان دقت مدل را افزایش داد.

۳. در مطالعات پیشین، هر یک از محققان با توجه به ویژگی‌ها و ماهیت پایگاه داده‌ی مورد مطالعه، شامل شرایط عملیاتی چاه و خصوصیات مخزن، از الگوریتم‌های مشخصی جهت بهینه‌سازی مدل‌ها

استفاده کرده‌اند که بیشترین همخوانی احتمالی با پایگاه داده را داشته باشد.

۴. در برخی از مطالعات، به‌کارگیری تعداد محدودی از الگوریتم‌ها، می‌تواند در دستیابی به بهترین مدل، محدودیت ایجاد کند؛ بنابراین می‌توان از سایر الگوریتم‌های مرتبط نیز جهت بهبود دقت و عملکرد مدل، در این مطالعات استفاده کرد.

### فهرست علائم اختصاری

AI	هوش مصنوعی (Artificial Intelligence)
ANN	شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network)
SVM	ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine)
RF	جنگل تصادفی (Random Forest)
KNN	نزدیک‌ترین همسایگی (K-Nearest Neighbors)
DT	درخت تصمیم‌گیری (Decision Tree)
XGBoost	گرادیان تقویتی شدید (Extreme Gradient Boosting)
MLP	پرسپترون چندلایه (Multi-Layer Perceptron)
RSM	روش سطح پاسخ (Response Surface Methodology)
LSTM	حافظه بلندمدت-کوتاهمدت (Long Short-Term Memory)
PSO	بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Particle Swarm Optimization)
RBF	تابع پایه شعاعی (Radial Basis Function)
DBSCAN	خوشه‌بندی مبتنی بر چگالی با نویز (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)
PCA	تحلیل مؤلفه‌های اصلی (Principal Component Analysis)
NMR	رزونانس مغناطیسی هسته‌ای (Nuclear Magnetic Resonance)
R <sup>2</sup>	ضریب تعیین (Coefficient of Determination)
MSE	میانگین مربعات خطا (Mean Squared Error)
APE	خطای درصد مطلق (Absolute Percentage Error)
AAPE	میانگین خطای درصد مطلق (Average Absolute Percentage Error)
MINAPE	حداقل خطای درصد مطلق (Minimum Absolute Percentage Error)
MAXAPE	حداکثر خطای درصد مطلق (Maximum Absolute Percentage Error)
F1-Score	معیار اف ۱ (F1 Score)
IoT	اینترنت اشیاء (Internet of Things)



- seismic attributes and wireline data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019. 176: p. 762-774.
- [8]. Zhang, G., et al., Pattern visualization and understanding of machine learning models for permeability prediction in tight sandstone reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021. 200: p. 108142.
- [9]. Laalam, A., et al. Application of Machine Learning for Mineralogy Prediction from Well Logs in the Bakken Petroleum System. in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition? 2022. SPE*.
- [10]. Xie, C., et al., Intelligent modeling with physics-informed machine learning for petroleum engineering problems. *Advances in Geo-Energy Research*, 2023. 8(2).
- [11]. Mai-Cao, L. and H. Truong-Khac, A comparative study on different machine learning algorithms for petroleum production forecasting. *Improved Oil and Gas Recovery*, 2022. 6.
- [12]. Ojedapo, B., S.S. Ikiensikimama, and V.U. Wachikwu-Elechi. Petroleum Production Forecasting Using Machine Learning Algorithms. in *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. 2022. SPE*.
- [13]. Sabah, M., et al., A machine learning approach to predict drilling rate using petrophysical and mud logging data. *Earth Science Informatics*, 2019. 12: p. 319-339.
- [14]. Hopgood, A.A., The state of artificial intelligence. *Advances in computers*, 2005. 65: p. 1-75.
- [15]. Krithiga, G., V. Mohan, and S. Senthilkumar, A BRIEF REVIEW OF THE
- [1]. Cui, L., et al., A survey on application of machine learning for Internet of Things. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2018. 9: p. 1399-1417.
- [2]. Zhu, M., et al., A review of the application of machine learning in water quality evaluation. *Eco-Environment & Health*, 2022. 1(2): p. 107-116.
- [3]. Pandey, R.K., A.K. Dahiya, and A. Mandal, Identifying applications of machine learning and data analytics based approaches for optimization of upstream petroleum operations. *Energy Technology*, 2021. 9(1): p. 2000749.
- [4]. Otchere, D.A., et al., Application of supervised machine learning paradigms in the prediction of petroleum reservoir properties: Comparative analysis of ANN and SVM models. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021. 200: p. 108182.
- [5]. Anifowose, F.A., J. Labadin, and A. Abdulraheem, Ensemble machine learning: An untapped modeling paradigm for petroleum reservoir characterization. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017. 151: p. 480-487.
- [6]. Salem, A.M., M.S. Yakoot, and O. Mahmoud, Addressing diverse petroleum industry problems using machine learning techniques: literary methodology—spotlight on predicting well integrity failures. *ACS omega*, 2022. 7(3): p. 2504-2519.
- [7]. Anifowose, F., A. Abdulraheem, and A. Al-Shuhail, A parametric study of machine learning techniques in petroleum reservoir permeability prediction by integrating



Based on Deep Learning and BP Neural Network. in ARMA US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium. 2023. ARMA.

- [24]. Abuh, F.A., J.U. Akpabio, and A.N. Okon, Machine Learning-Based Models for Basic Sediment & Water and Sand-Cut Prediction in Matured Niger Delta Fields. *Journal of Energy Research and Reviews*, 2023. 15(2): p. 70-93.
- [25]. Abdelghany, W.K., M. Hammed, and A.E. Radwan, Implications of machine learning on geomechanical characterization and sand management: a case study from Hilal field, Gulf of Suez, Egypt. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2023. 13(1): p. 297-312.
- [26]. Ngochindo, G.N. and A. Joseph, Predicting Onset of Sand Production in Oil Wells using Machine Learning. *Journal of Engineering Research and Reports*, 2024. 26(4): p. 165-176.
- [27]. Shabdirova, A., et al., Sand Production Prediction with Machine Learning using Input Variables from Geological and Operational Conditions in the Karazhanbas Oilfield, Kazakhstan. *Natural Resources Research*, 2024: p. 1-17.
- [28]. Asfha, D.T., et al., Mechanisms of sand production, prediction—a review and the potential for fiber optic technology and machine learning in monitoring. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2024: p. 1-40.
- [29]. Kolla, S.S., et al. Utilizing artificial intelligence for determining threshold sand rates from acoustic monitors. in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition?* 2020. SPE.
- [30]. Vieira, R.E., B. Xu, and S.A. Shirazi. DEVELOPMENT PATH OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ITS SUBFIELDS. 2023.
- [16]. Chaudhary, S., et al., A brief review of machine learning and its applications. *SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology*, 2020. 12(SUP 1): p. 218-223.
- [17]. Liu, W., W.D. Liu, and J. Gu. Petroleum production forecasting based on machine learning. in *Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Advances in Image Processing*. 2019.
- [18]. Azad, M., et al., A new approach to sand production onset prediction using artificial neural networks. *Petroleum science and technology*, 2011. 29(19): p. 1975-1983.
- [19]. Gharagheizi, F., et al., Prediction of sand production onset in petroleum reservoirs using a reliable classification approach. *Petroleum*, 2017. 3(2): p. 280-285.
- [20]. Olatunji, O.O. and O. Micheal. Prediction of sand production from oil and gas reservoirs in the Niger Delta using support vector machines SVMs: A binary classification approach. in *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. 2017. SPE.
- [21]. Ngwashi, A.R., D.O. Ogbe, and D.O. Udebhulu. Evaluation of machine-learning tools for predicting sand production. in *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. 2021. SPE.
- [22]. Song, J., et al., Comparison of Machine Learning Algorithms for Sand Production Prediction: An Example for a Gas-Hydrate-Bearing Sand Case. *Energies*, 2022. 15(18): p. 6509.
- [23]. Jing, H., et al. Sand Production Prediction



- [38].Liu, S., A Grain Size Profile Prediction Method Based on Combined Model of Extreme Gradient Boosting and Artificial Neural Network and Its Application in Sand Control Design. SPE Journal, 2024: p. 1-15.
- [39].Daud, M.S.H., S.M. Tabatabai, and F.K. Wong. Cascaded Machine Learning in NMR: Unveiling a Continuous Grain Size Distribution Approach for Tackling Sand Production Challenges. in SPWLA Annual Logging Symposium. 2024. SPWLA.
- Prediction of Sand Transport in Horizontal and Inclined Flow Based on Machine Learning Algorithms. in PSIG Annual Meeting. 2021. PSIG.
- [31].Shabdirova, A., et al. A Novel Approach to Sand Volume Prediction Using Machine Learning Algorithms. in International Petroleum Technology Conference. 2023. IPTC.
- [32].Chikwe, A.O., et al., A Response Surface Model for Predicting Sand Production Rate for Oil Wells in the Niger Delta. Petroleum & Coal, 2024. 66(1).
- [33].Khomehchi, E., I.R. Kivi, and M. Akbari, A novel approach to sand production prediction using artificial intelligence. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014. 123: p. 147-154.
- [34].Alakbari, F.S., et al., Prediction of critical total drawdown in sand production from gas wells: Machine learning approach. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2023. 101(5): p. 2493-2509.
- [35].Ketmalee, T. and P. Bandyopadhyay. Application of neural network in formation failure model to predict sand production. in Offshore Technology Conference Asia. 2018. OTC.
- [36].Laoufi, H., et al. Selection of sand control completion techniques using machine learning. in ARMA/DGS/SEG International Geomechanics Symposium. 2022. ARMA.
- [37].Abdul Hamid, Z.H., et al. A Use Case of Production and Sand Control Benchmarking Through Unstructured Data and Machine Learning Analysis. in SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. 2023. SPE.



## Machine Learning Applications in the Prediction and Management of Sand Production in Oil and Gas Wells-a Review Study

Mohammad Elyas Khodashenas<sup>1</sup>, Meysam Mohammadzadeh Shirazi<sup>2</sup>, Behnam Shahsavani<sup>2\*</sup>

1. M.Sc. student, Department of Petroleum Engineering, School of Chemical Engineering, Oil and Gas, Shiraz University, Shiraz, Iran
2. Assistant Professor, Department of Petroleum Engineering, School of Chemical Engineering, Oil and Gas, Shiraz University, Shiraz, Iran

### ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

#### Article History:

Received: 18 February 2025

Revised: 20 May 2025

Accepted: 07 Jun 2025

#### Keywords:

Sand Production Prediction  
Production and Productivity  
Oil Production  
Artificial Intelligence  
Machine Learning

### ABSTRACT

Sand production in oil and gas wells leads to numerous issues, including reduced well productivity and equipment damage. To mitigate the challenges and consequences of sand production, implementing sand prediction and control processes in wells is recommended. These processes involve evaluating multiple factors, such as well depth, formation failure gradient, and other geological parameters. Due to the vast volume of data and the complexity of analysis, conventional traditional methods are time-consuming and prone to significant uncertainties and errors. Consequently, the adoption of more efficient methods has gained considerable importance. In recent years, the application of machine learning techniques for analyzing large and complex datasets has emerged as an effective and accurate approach to improving prediction accuracy. As a result, production engineers have utilized machine learning algorithms to analyze data related to sand production. This study provides a review of previous research on the application of machine learning in managing sand production. To facilitate better understanding, the referenced studies have been categorized and organized based on their focus. Furthermore, the algorithms and validation methods used in each study are specified to serve as a guide. Therefore, this study can serve as a reference for future research in this field.

DOR: [20.1001.1.25011083.1404.02.30](https://doi.org/10.25011083.1404.02.30)

#### How to cite this article

M.E. Khodashenas, M. Mohammadzadeh Shirazi, B. Shahsavani, Machine Learning Applications in the Prediction and Management of Sand Production in Oil and Gas Wells-a Review Study. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025 12(1): 54-69. ([https://www.ijge.irangi.org/article\\_725750.html](https://www.ijge.irangi.org/article_725750.html))

\* Corresponding Author.

E-mail address: [b.shahsavani@shirazu.ac.ir](mailto:b.shahsavani@shirazu.ac.ir), (B. Shahsavani).

Available online 22 Jun 2025

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



# مقایسه فرآیندهای تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای و چشم‌انداز آینده آن‌ها در ایران

سبحان حرفت<sup>۱</sup>، میلاد پیرهادی<sup>۲</sup>، مجید چگنی<sup>۳</sup>، مجید زندی<sup>۴\*</sup>

۱. دانشجو دکترا، گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، مرکز پژوهشی انرژی، دانشکده انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، مرکز پژوهشی انرژی، دانشکده انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳. شرکت ملی گاز ایران، تهران، ایران

۴. دانشیار، گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، مرکز پژوهشی انرژی، دانشکده انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: [m\\_zandi@sbu.ac.ir](mailto:m_zandi@sbu.ac.ir)

مقاله‌ی مروری

صفحه ۷۰ - ۹۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۶

## چکیده

هیدروژن، به‌عنوان یک عنصر سبک و فراوان، نقشی کلیدی در توسعه انرژی‌های پاک ایفا کرده و ظرفیت بالایی برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی به‌منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. این پژوهش باهدف ارزیابی و مقایسه هیدروژن آبی و فیروزه‌ای، به‌عنوان دو گزینه اصلی تولید هیدروژن کم‌کربن و بررسی پتانسیل آن‌ها در کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی انجام شده است. روش‌های تولید هیدروژن آبی شامل تولید هیدروژن از متان و بخار آب همراه با واحد جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن و روش تولید هیدروژن فیروزه‌ای از طریق فرآیند پیرولیز متان و تولید کربن جامد مورد بررسی قرار گرفتند. در این راستا، مقایسه‌ای میان هزینه‌ها، کارایی و چالش‌های زیست‌محیطی هر دو نوع هیدروژن صورت گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهند که هیدروژن فیروزه‌ای با تولید کربن جامد به‌جای گازهای گلخانه‌ای، گزینه‌ای پایدارتر و مناسب‌تر از نظر زیست‌محیطی است. بر اساس برخی از داده‌ها برای تولید هر کیلوگرم هیدروژن، بین ۱۲ تا ۱۳/۵ کیلوگرم گاز گلخانه‌ای آزاد می‌شود، درحالی‌که هیدروژن فیروزه‌ای با استفاده از پیرولیز متان، انتشار مستقیم صفر دی‌اکسید کربن دارد. از سوی دیگر، میزان مصرف انرژی در تولید هیدروژن فیروزه‌ای تا ۳۰ درصد کم‌تر از روش‌های مرسوم تولید هیدروژن آبی گزارش شده است که نشان‌دهنده مزیت آن از نظر بهره‌وری انرژی است. در ایران، برای گذار از وابستگی به سوخت‌های فسیلی و حرکت به سمت تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای، ایجاد زیرساخت‌ها، فناوری‌های پیشرفته و سیاست‌گذاری‌های کلان ضروری است. این امر نیازمند بهره‌گیری از منابع موجود، توسعه دانش بومی و سرمایه‌گذاری‌های جدید است. پژوهش حاضر بر اهمیت توسعه فناوری‌های مرتبط با تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای تأکید داشته و نیاز به تجهیز و به‌روزرسانی فناوری‌ها برای بهره‌برداری بهینه از این منابع انرژی پاک را مورد توجه قرار داده است.

کلیدواژه‌ها: هیدروژن آبی، هیدروژن فیروزه‌ای، تولید هیدروژن از متان و بخار آب (SMR)، جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن (CCUS)



خالص در طبیعت وجود ندارد اما فرآیندهای مختلفی برای تولید آن از منابع دیگر وجود دارد. هیدروژن را می‌توان از منابع مختلفی مانند گاز طبیعی و زغال‌سنگ (با استفاده از فناوری جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن)، زیست‌توده، هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیر مانند باد و خورشید تولید کرد. این تنوع در منابع تولید، هیدروژن را به گزینه‌ای منعطف برای تأمین انرژی تبدیل کرده است. در مجموع، هیدروژن با ویژگی‌های پاک‌سوزی، انعطاف‌پذیری و قابلیت تولید از منابع گوناگون، یکی از شاخص‌های کلیدی در آینده سبب انرژی جهانی به‌شمار می‌رود و می‌تواند گذار به سامانه پایدارتر و ایمن‌تر را تسهیل کند [۳].

### ۱-۱. مصرف جهانی انرژی

روند مصرف جهانی انرژی نشان می‌دهد، تقاضای برق در سال ۲۰۲۳ حدود ۲/۲ درصد افزایش یافته و انتظار می‌رود این روند تا سال ۲۰۲۶ سالانه ۳/۴ درصد افزایش یابد. در سال ۲۰۲۲، مجموع هزینه‌ی جهانی مصرف‌کنندگان برای انرژی به ۱۰ تریلیون دلار رسید که این رقم نسبت به میانگین پنج‌ساله‌ی گذشته ۲۰ درصد افزایش داشته و نشان‌دهنده‌ی فشار مالی فزاینده‌ی انرژی بر اقتصاد جهانی است. باوجود گسترش سوخت‌های فسیلی در سال ۲۰۲۴ همچنان سهم زیادی در تأمین انرژی جهان داشتند. طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی که در سال ۲۰۲۳ منتشر شد، پیش‌بینی می‌شود که تقاضای جهانی برای نفت، گاز و زغال‌سنگ تا سال ۲۰۳۰ به اوج خود برسد و سهم این سوخت‌ها در تأمین انرژی از ۸۰ درصد به ۷۳ درصد کاهش یابد. همچنین، برآورد شده است که تقاضای نفت در سال ۲۰۲۵ به ۱.۱ میلیون بشکه در روز برسد که نسبت به پیش‌بینی قبلی (۹۹۰ هزار بشکه) افزایش یافته است. با این حال، انتظار می‌رود که رشد تقاضای نفت همچنان محدود باشد. اگرچه آمار دقیق سال ۲۰۲۴ هنوز منتشر نشده است، اما پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که روند افزایش مصرف جهانی انرژی ادامه خواهد داشت و تغییراتی مهم در ترکیب منابع انرژی و الگوی مصرف در مناطق مختلف رخ خواهد داد. نقش هیدروژن در چشم‌انداز جهانی انرژی در سال ۲۰۲۴ گسترش یافت و به‌عنوان یک حامل انرژی پاک مورد توجه قرار گرفت. تولید جهانی هیدروژن در

سامانه انرژی جهانی نیازمند گذار به‌سوی کربن‌زدایی است تا ضمن کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییرهای آب‌وهوایی نیز کنترل شود. امنیت انرژی و مقرون‌به‌صرفه بودن سوخت تولیدی نیز از جنبه‌های کلیدی این گذار محسوب می‌شوند که باید در کنار کاهش آلاینده‌ی مورد توجه قرار گیرند. باوجود افزایش تلاش‌ها برای کاهش کربن، مسیر دقیق آینده کم‌کربن هنوز روشن نیست و به همین دلیل نقش سوخت‌ها و فناوری‌های جایگزین که برای کمک به این گذار در نظر گرفته شده‌اند با عدم قطعیت همراه است. درحالی‌که انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای در حال افزایش است، هیدروژن به‌عنوان یکی از عناصر کلیدی در آینده انرژی جهانی شناخته شده و ظرفیت‌های مهمی برای تأمین امنیت انرژی و کاهش اثر زیست‌محیطی دارد [۱]. هیدروژن به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردش، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده است. به‌عنوان یک حامل انرژی پاک، هیدروژن در حمل‌ونقل نقشی کلیدی ایفا می‌کند و به‌ویژه در سوخت خودروهایی الکتریکی مبتنی بر پیل سوختی، کامیون‌ها، اتوبوس‌ها و حتی کشتی‌ها و هواپیماها به‌کار می‌رود. در حوزه تولید برق، هیدروژن به‌عنوان یک راه‌کار ذخیره‌سازی انرژی عمل می‌کند. در این فرآیند، انرژی مازاد تولیدشده از منابع تجدیدپذیر، مانند باد و خورشید، برای الکترولیز آب استفاده می‌شود. در فرآیند الکترولیز، آب به هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌شود که هیدروژن تولیدشده ذخیره می‌گردد. سپس، در زمان نیاز، هیدروژن ذخیره‌شده از طریق فرآیندهایی مانند احتراق یا استفاده در پیل‌های سوختی، مجدداً به برق تبدیل می‌شود.

در صنایع انرژی‌بر، هیدروژن نقش مهمی در تولید آمونیاک ایفا کرده و به‌عنوان ماده اولیه در تولید کودهای شیمیایی استفاده می‌شود. در پالایشگاه‌ها، هیدروژن برای فرایندهایی مانند هیدروکراکینگ و حذف گوگرد از سوخت‌های فسیلی کاربرد دارد. همچنین در صنعت فولاد، استفاده از هیدروژن به‌عنوان جایگزین کربن در احیای سنگ‌آهن می‌تواند به کاهش قابل توجه انتشار دی‌اکسید کربن کمک کند. این گستره کاربردها، همراه با امکان تولید هیدروژن از منابع تجدیدپذیر و آب‌شیرین‌سازی، آن را به گزینه‌ای استراتژیک برای تحقق اهداف زیست‌محیطی و توسعه پایدار تبدیل کرده است [۲]. هرچند هیدروژن به‌طور عمومی به‌صورت



سال ۲۰۲۳ به ۹۷ میلیون تن رسید و در سال ۲۰۲۴ به حدود ۱۰۰ میلیون تن افزایش یافت، تقاضای هیدروژن در سال ۲۰۲۴ نیز در پالایشگاه‌ها و صنایع متمرکز باقی ماند. این تقاضا نسبت به سال ۲۰۲۲، ۴۰ درصد رشد کرد، اما سهم هیدروژن در بخش‌های جدید مانند صنایع سنگین، حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی انرژی کمتر از ۱ درصد از کل تقاضای جهانی را تشکیل داد [۴].

## ۲-۱. مزایای استفاده از هیدروژن

هیدروژن، منبعی پاک و آینده‌دار، یکی از کلیدی‌ترین راه‌حل‌ها برای چالش‌های انرژی و زیست‌محیطی قرن حاضر محسوب می‌شود. این منبع انرژی با ویژگی‌های منحصربه‌فرد، از کاهش آلودگی هوا تا تقویت امنیت انرژی و ایجاد فرصت‌های اقتصادی، پتانسیل بالایی برای شکل‌دهی به آینده‌ای پایدار ارائه می‌دهد. در ادامه، مزایا و چالش‌های هیدروژن بررسی خواهد شد. از نظر زیست‌محیطی، هیدروژن گزینه‌ای ارزشمند به شمار می‌رود، زیرا احتراق آن تنها بخار آب تولید کرده و هیچ‌گونه گاز گلخانه‌ای یا آلاینده‌ای مانند کربن مونوکسید، اکسیدهای نیتروژن یا ذره‌های معلق ایجاد نمی‌کند. این ویژگی، هیدروژن را راه‌حلی مؤثر برای کاهش آلودگی هوا، به‌ویژه در بخش حمل‌ونقل، معرفی کرده و امکان کاهش چشمگیر انتشار آلاینده‌ها را فراهم می‌آورد. هیدروژن سبز، تولیدشده از منابع تجدیدپذیر، با فرآیند کاملاً پاک و پایدار، هیچ‌گونه اثر مخربی بر محیط‌زیست به‌جا نمی‌گذارد. از منظر امنیت انرژی، هیدروژن با قابلیت تولید از منابع متنوع مانند خورشید، باد، زیست‌توده و انرژی هسته‌ای، وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کم‌رنگ می‌سازد. روش‌های تولید هیدروژن، مانند الکترولیز آب یا اصلاح متان، انعطاف‌پذیری بالایی در تأمین این منبع انرژی به ارمغان آورده و امکان تولید محلی آن را میسر می‌کنند. این ویژگی نه‌تنها امنیت انرژی کشورها را بهبود می‌بخشد، بلکه به‌عنوان راه‌حلی بلندمدت، نیازهای انرژی آینده را به‌صورت پایدار برآورده می‌سازد.

هیدروژن با چگالی انرژی بالا، گزینه‌ای مناسب برای ذخیره و انتقال انرژی محسوب می‌شود. پیل‌های سوختی هیدروژنی با تبدیل انرژی شیمیایی به الکتریسیته، عملکردی کارآمدتر از موتورهای احتراق داخلی نشان داده و مناسب سامانه‌های غیرمتمرکز و مقاومند. این

ویژگی‌ها، همراه با انعطاف‌پذیری هیدروژن، کاربردهای گسترده‌ای در حمل‌ونقل، تولید برق و صنایع ایجاد می‌کند. نمونه آن در حمل‌ونقل، خودروهای پیل سوختی با برد بالا، سوخت‌گیری سریع و عدم تولید آلاینده‌ای است که جایگزین مناسبی برای مدل‌های بنزینی به شمار می‌روند. در صنعت نیز هیدروژن به‌عنوان ماده اولیه در تولید آمونیاک یا پالایش نفت، جایگزینی پاک‌تر از روش‌های متعارف است. فراتر از مزایای زیست‌محیطی و فنی، هیدروژن نقش کلیدی در شکل‌دهی به فرصت‌های اقتصادی و اجتماعی دارد. گسترش صنایع وابسته به هیدروژن، از تولید تا توزیع، زمینه‌ساز اشتغال و محرکی برای رشد اقتصاد است. سرمایه‌گذاری در پژوهش و توسعه فناوری‌های هیدروژنی، مانند پیل‌های سوختی پیشرفته یا روش‌های تولید پاک، عاملی برای کاهش هزینه‌ها و بهبود رقابت‌پذیری این فناوری محسوب می‌شود. چنین تحولاتی، شتاب‌دهنده نوآوری در بخش انرژی و مؤثر در پیشبرد اهداف توسعه پایدار خواهد بود. با این حال، استفاده گسترده از هیدروژن بدون چالش نیست. هزینه بالای تولید هیدروژن، پیچیدگی‌های ذخیره‌سازی به‌دلیل چگالی پایین و نیاز به مخازن خاص و کمبود زیرساخت‌های کافی برای توزیع و سوخت‌رسانی، از موانع اصلی پیش روی این فناوری محسوب می‌شوند. از نظر ایمنی، هیدروژن در صورت رعایت اصول مهندسی قابل کنترل است، اما خطرهای احتمالی مانند نشت یا اشتعال‌پذیری، مدیریت دقیق و استانداردهای سخت‌گیرانه را ضروری می‌سازد. غلبه بر این چالش‌ها مستلزم سرمایه‌گذاری کلان، نوآوری‌های فناورانه و همکاری میان کشورهای مختلف است. در مجموع، هیدروژن با ویژگی‌های زیست‌محیطی، کارایی بالا و تطبیق‌پذیری گسترده، گزینه‌ای کلیدی برای آینده انرژی جهانی به شمار می‌رود. این منبع انرژی با قابلیت کاهش آلودگی و تقویت امنیت انرژی، همراه با خلق فرصت‌های اقتصادی و توسعه نوآوری، عاملی مؤثر در پیشبرد اهداف توسعه پایدار محسوب می‌شود. رفع موانع پیشرو، زمینه‌ساز تحقق جهانی پاک‌تر و پایدارتر با محوریت هیدروژن خواهد بود.

## ۳-۱. مرور مطالعات پیشین

در (جدول ۱) برخی از پژوهش‌ها در زمینه هیدروژن آورده شده است.

جدول ۱: برخی از پژوهش‌های مرتبط در زمینه هیدروژن

ردیف	نام نویسندگان و سال	فناوری	نتایج	شرایط و پارامترها	مرجع
۱	شاوولکینا و همکاران ۲۰۲۱	مشعل پلاسمای DC برای تولید نانوساختارهای کربنی	نسبت C/H تأثیرگذار بر نوع محصول، افزودن نیتروژن برای ترکیب گرافن و نانولوله‌ها	دمای پلاسمای ۳۵۰۰-۲۵۰۰ کلوین، کنترل فشار و ترکیب گازها	[۵]
۲	بلمکار و همکاران ۲۰۲۴	راکتور پلاسمای RF <sup>۱</sup> برای تبدیل متان به نانوذره‌ها کربنی	بازده تولید ۲۱۷ میلی گرم/ساعت، ساختار گرافیتی باکیفیت بالا	هزینه انرژی پایین، عملکرد مشابه کربن سیاه در باتری‌های لیتیوم - بونی	[۶]
۳	چن و همکاران ۲۰۲۴	فوس پلاسمای DC	استفاده از متان برای تولید نانو صفحه گرافن باکیفیت بالا، استفاده از استیلن برای تولید ذره‌های کربن کروی شکل	دمای بالا (تا ۲۵۰۰ کلوین)، مدل سازی شیمیایی و شبیه سازی حرارتی	[۷]
۴	ایشیکاوا و همکاران ۲۰۲۴	رسوب دهی شیمیایی بخار تقویت شده با پلاسمای <sup>۲</sup>	تولید ساختارهای کربنی باکیفیت بالا و حداقل نقص‌های ساختاری، تأثیر تغییر قدرت پلاسمای و ترکیب گازها بر ویژگی‌های محصول	کنترل دما و فشار، قدرت پلاسمای، ترکیب گازها، دمای زیرلایه، سیستم پلاسمای با دیواره‌های گرم و سرد	[۸]
۵	هاتاکیاما و همکاران ۲۰۲۴	رسوب دهی شیمیایی بخار تقویت شده با پلاسمای	تولید نانولوله‌های کربنی باکیفیت بالا، توزیع یکنواخت و ساختار منظم	غلظت مشخص گاز هیدروژن، پلاسمای با دمای پایین	[۹]
۶	احمدنوری ۲۰۲۴	تخلیه جرقه‌ای همراه با پلاسمای القایی لیزری (SD-LIP)	افزایش ولتاژ تخلیه جرقه‌ای، نرخ تجزیه متان را دو برابر کرده و کربن جامد را کاهش می‌دهد	تغییر ولتاژ تخلیه جرقه‌ای برای کنترل نرخ تجزیه متان و تشکیل محصول	[۱۰]
۷	وانگ و همکاران ۲۰۱۶	راکتور پلاسمای - کاتالیست چرخشی	بازده اتیلن ۵۵ درصد، تبدیل ۲۳ درصد متان به هیدروکربن‌های سبک، بهبود انتقال جرم و کارایی انرژی	کاتالیست پایه MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ، بازچرخانی بخشی از محصول	[۱۱]
۸	گائو و همکاران ۲۰۱۸	تخلیه جرقه‌ای پالس‌های میکروثانیه‌ای و نانوثانیه‌ای	بازده تبدیل متان ۹۱/۲ درصد، بازده تولید هیدروژن ۳۸/۴ درصد، کارایی تبدیل انرژی ۴۴/۳۳ درصد	طول فاصله تخلیه، نرخ جریان گاز، ویژگی‌های الکتریکی تخلیه	[۱۲]
۹	ژانگ و همکاران ۲۰۲۲	تخلیه جرقه‌ای پالس نانوثانیه‌ای برای اصلاح خشک متان	انتخاب پارامترهای پلاسمای (چگالی الکترون، دماهای ارتعاشی و چرخشی)، بهبود بازده تبدیل گازها و افزایش کارایی فرآیند	استفاده از طیفسنجی گسیل نوری <sup>۳</sup> (OES) برای تعیین پارامترهای پلاسمای	[۱۳]
۱۰	فولچری و همکاران ۲۰۲۴	تجزیه متان با استفاده از پلاسمای	بازدهی بالا در تبدیل متان به محصول‌های ارزشمند. استفاده از الکترودهای گرافیتی، بهبود عملکرد سیستم	استفاده از الکترودهای گرافیتی، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای	[۱۴]

## ۲. برخی از انواع هیدروژن در صنعت انرژی

### ۲-۱. هیدروژن سبز

هیدروژن سبز، فناوری نویدبخشی است که در سال‌های اخیر با افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی جهانی، به‌عنوان راهکاری برای گذار به انرژی پایدار مطرح شده است. این فناوری با استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی‌های خورشیدی، بادی و برق‌آبی، هیدروژن را از طریق الکترولیز تولید می‌کند، در این فرآیند، آب با الکتریسیته به هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌شود و در صورت تأمین الکتریسیته از منابع تجدیدپذیر، محصول به‌عنوان هیدروژن سبز شناخته می‌شود [۱۵].

### ۲-۲. هیدروژن خاکستری

گاز طبیعی که ۴۸ درصد از تولید جهانی هیدروژن را تأمین می‌کند، یکی از رایج‌ترین خوراک‌ها برای تولید این عنصر به شمار می‌رود. هیدروژن خاکستری از طریق فرآیندهایی مانند تولید هیدروژن از متان و بخار آب (SMR) یا تبدیل خودگرمایشی<sup>۵</sup> (ATR) تولید می‌شود. این نوع هیدروژن، به‌دلیل کارایی و هزینه‌های نسبی پایین، به‌طور گسترده در صنعت استفاده می‌شوند. در این فرآیند، بخار آب با دمای بالا به گاز طبیعی تصفیه‌شده اضافه می‌شود تا طی واکنش‌های شیمیایی، هیدروژن تولید شود [۱۶]. این روش تولید هیدروژن، به‌عنوان هیدروژن خاکستری شناخته می‌شود.

1. Radio Frequency Plasma Reactor
2. Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)
3. Optical Emission Spectroscopy
4. Steam Methane Reforming (SMR)
5. Auto Thermal Reforming (ATR)



## ۳-۲. هیدروژن آبی

هیدروژن آبی، مانند هیدروژن خاکستری از گاز طبیعی تولید می‌شود. این نوع هیدروژن با هدف کاهش انتشار کربن از طریق فناوری‌های پیشرفته مورد توجه قرار گرفته است. به دلیل دسترسی فراوان به منابع گاز طبیعی، در کشورهایی با ذخایر گاز فراوان مانند ایران، هیدروژن آبی جایگاهی راهبردی در تولید هیدروژن دارد. این فناوری می‌تواند با جذب کربن، به‌عنوان راهکاری میانی برای گذار به انرژی‌های پاک مورد استفاده قرار گیرد و نقشی کلیدی در صنایع ایفا کند [۱۷].

## ۴-۲. هیدروژن فیروزه‌ای

هیدروژن فیروزه‌ای از تجزیه گاز متان در دمای بالا به‌دست می‌آید که منجر به تولید هم‌زمان هیدروژن و کربن می‌شود. یکی از مزیت‌های اصلی این روش نسبت به روش‌های دیگر، مانند الکترولیز آب و SMR، کارایی بالای انرژی آن از منظر ترمودینامیکی است. در طول سال‌ها، چندین روش برای تولید هیدروژن فیروزه‌ای از جمله تجزیه حرارتی کاتالیزوری و غیر کاتالیزوری، استفاده از فلز مذاب یا نمک مذاب، انرژی خورشیدی متمرکز و پلاسماهای غیرحرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. هر یک از این روش‌ها دارای مزایا و معایب خاص خود هستند [۱۸].

## ۵-۲. هیدروژن نارنجی

هیدروژن نارنجی از بازیافت پسماندها تولید می‌شود و به‌عنوان راهکاری برای کاهش زباله و تولید هیدروژن پاک مورد توجه قرار گرفته است. این فرآیند شامل تجزیه پسماندها در دمای بالا و استخراج هیدروژن خالص از گاز سنتز است. با توجه به بحران پسماندهای پلاستیکی، تولید هیدروژن نارنجی می‌تواند نقشی مهم در کاهش آلودگی محیط‌زیست و تأمین هیدروژن پایدار ایفا کند [۱۹]. هزینه تولید برخی از رنگ‌های هیدروژن در (جدول ۲) آورده شده است.

جدول ۲: هزینه تولید انواع هیدروژن [۲۰]

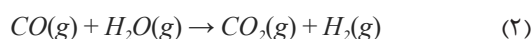
هزینه [USD/Kg]	رنگ
۲/۲۸ - ۷/۳۹	سبز
۰/۶۷ - ۱/۳۱	خاکستری
۱/۲ - ۲/۰	مشکی / قهوه‌ای
۱/۲۵ - ۱/۹۳	فیروزه‌ای
۱/۹۳ - ۳/۵۰	آبی

## ۳. فرآیند تولید هیدروژن آبی

همان‌گونه که در قبل اشاره شد، فرآیند تولید هیدروژن آبی مشابه فرآیند تولید هیدروژن خاکستری است؛ اما در این روش، برخلاف هیدروژن خاکستری، دی‌اکسید کربن به‌عنوان محصول جانبی جمع‌آوری و ذخیره می‌شود. یکی از هدف‌های تولید هیدروژن آبی، کاهش اثر زیست‌محیطی گازهای گلخانه‌ای است. به‌طور معمول از واحدهای جداسازی کربن برای مدیریت و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در فرآیند تولید هیدروژن آبی استفاده می‌شود. این نوع هیدروژن نه تنها توانایی تأمین نیازهای صنعتی را دارد، بلکه می‌تواند به‌عنوان یک منبع پایدار انرژی در جهت کاهش تغییر اقلیمی عمل کند.

## ۳-۱. تولید هیدروژن از متان و بخار آب

تولید هیدروژن از متان و بخار آب (SMR) به‌عنوان اصلی‌ترین فناوری تولید هیدروژن خاکستری و آبی در سطح جهانی شناخته شده و حدود ۷۵ درصد از تولید هیدروژن جهانی را شامل می‌شود. در این فرآیند کاتالیزوری، هیدروکربن‌ها به هیدروژن و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شوند [۲۲]. SMR از چند مرحله پالایش مواد اولیه، پیش‌اصلاح، اصلاح بخار، واکنش جابجایی آب-گاز و تصفیه هیدروژن خام تشکیل شده است [۲۳]. در مرحله پالایش مواد اولیه، گاز طبیعی که متان بیش‌ترین عنصر تشکیل‌دهنده آن است، از اجزای سنگین‌تر مانند، نیتروژن، CO<sub>2</sub> و گوگرد پاک‌سازی می‌شود. سپس، در مرحله پیش‌اصلاح کاتالیزوری، هیدروکربن‌های سنگین‌تر مانند اتان به هیدروژن و اجزای دیگری مانند CH<sub>4</sub> و CO<sub>2</sub> در دماهای پایین‌تر (بین ۴۰۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد) تبدیل می‌شوند. پس از این مرحله، اصلاح بخار انجام می‌شود که طی آن مخلوط متان و بخار آب در حضور یک کاتالیزور از جنس نیکل واکنش داده و هیدروژن به‌همراه CO تولید می‌شود. مراحل فرآیند به‌صورت زیر است.

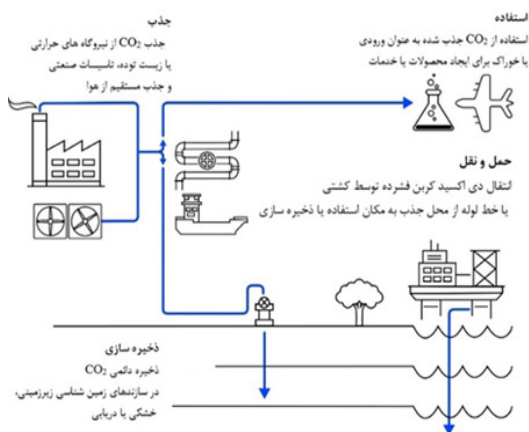


واکنش کلی تولید هیدروژن از متان و بخار آب را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:



### ۳-۲. واحد ذخیره و استفاده از کربن جذب شده<sup>۱</sup>

واحد ذخیره و استفاده از کربن جذب شده (CCUS) به مجموعه‌ای از فناوری‌هایی اطلاق می‌شود که می‌توانند نقش متنوعی در تحقق اهداف جهانی انرژی و زیست‌محیطی داشته باشند. در فرآیند تولید هیدروژن آبی بعد از  $CO_2$ ، SMR، به‌عنوان محصول جانبی تولید می‌شود که توسط سیستم CCUS جذب شده و می‌تواند به روش‌های مختلفی از جمله تزریق به سازندهای زمین‌شناسی یا استفاده در صنایع مختلف ذخیره و مورد استفاده قرار گیرد که در (شکل ۱) نمایش داده شده است.  $CO_2$  همچنین می‌تواند به‌طور مستقیم از جو گرفته شود. دی‌اکسید کربن جذب‌شده توسط خط لوله، کشتی، راه‌آهن یا کامیون حمل می‌شود تا در طیف وسیعی از کاربردها مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱: مراحل فناوری CCUS [۲۴]

### ۴-۴. معرفی فناوری‌های جذب، ذخیره و استفاده از دی‌اکسید کربن

فناوری‌های جذب گاز دی‌اکسید کربن به روش‌ها و فناوری‌هایی گفته می‌شود که هدف آن‌ها جداسازی و ذخیره  $CO_2$  از منابع مختلف است. این فناوری‌ها به‌عنوان یکی از راهکارهای مهم برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مقابله با تغییر اقلیمی مورد توجه قرار دارند.

#### ۴-۱. روش‌های جذب گاز دی‌اکسید کربن

با توجه به احتراق سوخت‌های فسیلی سه سامانه پایه برای جذب دی‌اکسید کربن از گازهای خروجی از منابع تولید این گاز وجود دارد.

### ۴-۱-۱. فناوری جداسازی دی‌اکسید کربن پس از احتراق<sup>۲</sup>

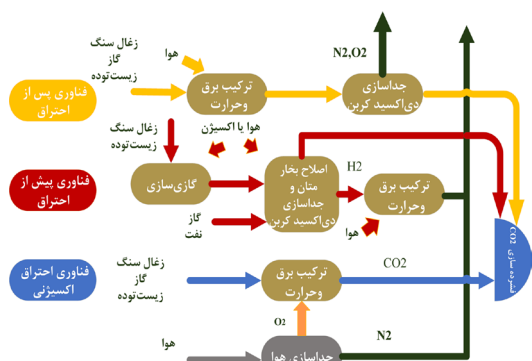
جذب گاز دی‌اکسید کربن ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی و زیستی، جذب پس از احتراق نامیده می‌شود. در این روش، بیش‌تر دی‌اکسید کربن قبل از ورود به جو جدا و در مخازن ذخیره می‌شود. به‌طور معمول برای این کار از مواد شیمیایی جذب‌کننده استفاده می‌شود. هرچند روش‌های دیگری هم برای جذب دی‌اکسید کربن وجود دارد، اما هنوز به‌طور کامل توسعه نیافته‌اند [۲۵].

### ۴-۱-۲. فناوری جداسازی دی‌اکسید کربن پیش از احتراق<sup>۳</sup>

در این فناوری، سوخت در یک راکتور با آب و هوا یا اکسیژن ترکیب می‌شود و محصول آن گاز مونوکسید کربن و هیدروژن است. مونوکسید کربن با بخار آب واکنش داده و هیدروژن بیش‌تری همراه با دی‌اکسید کربن تولید می‌شود. در نهایت، سوخت به دی‌اکسید کربن و هیدروژن، تبدیل می‌شود. این فناوری برای نیروگاه‌های چرخه ترکیبی گاز که در آن‌ها سوخت جامد مانند زغال‌سنگ به دی‌اکسید کربن و مونوکسید کربن تبدیل می‌شود، مناسب است. با این‌که هزینه آن نسبت به فناوری‌های پس از احتراق بالاتر است، بازه بیش‌تری دارد [۲۶].

### ۴-۱-۳. فناوری احتراق اکسیژنی<sup>۴</sup>

در این فناوری سوخت به‌جای احتراق با هوا، با اکسیژن همراه با گاز دی‌اکسید کربن باز یافتی می‌سوزد. گازهای خروجی شامل گاز دی‌اکسید کربن فشرده‌شده، بخار آب و مقدار اندکی از سایر گازهای آلاینده از جمله نیتروژن است. احتراق اکسیژنی یک فناوری نوظهور در حال توسعه بوده که نیاز به پژوهش و مطالعه بیش‌تری برای بهینه‌سازی و کاهش هزینه‌ها دارد [۲۷]. انواع فناوری‌های جذب گاز دی‌اکسید کربن در (شکل ۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: انواع فناوری‌های جذب گاز دی‌اکسید کربن [۲۸]

1. Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS)
2. Post Combustion Carbon Capture
3. Pre\_Combustion Carbon Capture
4. Oxyfuel Combustion Carbon Capture



#### ۲-۴. روش‌های ذخیره‌سازی گاز دی‌اکسید کربن

ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub>: ذخیره‌سازی زمین‌شناسی به‌عنوان گزینه‌ای میان‌مدت و پراهمیت برای ذخیره دی‌اکسید کربن شناخته می‌شود. این روش سال‌ها در صنعت نفت و گاز برای افزایش برداشت نفت و گاز به کاررفته است، اما CO<sub>2</sub> در این فرآیند به جو بازمی‌گردد. تجربه ذخیره‌سازی طولانی مدت CO<sub>2</sub> بسیار محدود بوده و بیش‌تر به پروژه‌های کشور نروژ در میدان‌ها اسلیپنر<sup>۱</sup> و اسنوهویت<sup>۲</sup> مربوط می‌شود. برآورد هیئت بین‌دولتی تغییر آب‌وهوایی<sup>۳</sup> نشان می‌دهد ظرفیت ذخیره‌سازی جهانی حدود ۱۰۰۰ میلیارد تن CO<sub>2</sub> است که برای تمام پروژه‌های CCS در قرن ۲۱، به‌منظور دستیابی به هدف ۱/۵ درجه سانتی‌گراد گرمایش جهانی، کافی خواهد بود. موسسه جهانی جذب و ذخیره‌سازی کربن<sup>۴</sup> نیز از ظرفیت ذخیره‌سازی تا ۱۳۰۰۰ میلیارد تن CO<sub>2</sub> خبر داده است. هرچند بسیاری از این سایت‌ها هنوز در مرحله بررسی بوده و بخش زیادی از آن‌ها در مکان‌هایی غیرقابل دسترسی یا کشف‌نشده قرار دارند [۲۹].

#### ۳-۴. فناوری‌های استفاده از دی‌اکسید کربن

دی‌اکسید کربن به‌عنوان یکی از گازهای اصلی گلخانه‌ای، نقشی مهم در تغییر اقلیمی ایفا می‌کند. با این حال، به‌واسطه پیشرفت‌های علمی و فناوری، از این گاز می‌توان در کاربردهای مختلفی بهره‌برداری کرد. استفاده از CO<sub>2</sub> به دو دسته کلی، استفاده بدون فرآیند تبدیل و استفاده با فرآیند تبدیل تقسیم می‌شود. هرکدام از این دو دسته، شامل کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف هستند.

#### ۱-۳-۴. فناوری استفاده از CO<sub>2</sub> بدون فرآیند تبدیل

در این دسته، CO<sub>2</sub> به شکل مستقیم و بدون تغییر شیمیایی در سامانه‌های مختلف به کار گرفته می‌شود. تعدادی از این روش‌ها به شرح زیر هستند:

- حلال: دی‌اکسید کربن به‌عنوان یک حلال در فرآیندهای شیمیایی و به‌ویژه در استخراج مواد طبیعی و آلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این راستا، CO<sub>2</sub> فوق‌بحرانی به‌دلیل ویژگی‌های حلالیتی بالا و توانایی انحلال ترکیب‌های مختلف، به‌طور گسترده‌ای در فرآیندهای استخراج استفاده می‌شود. این ویژگی باعث افزایش کارایی

و بهبود کیفیت محصول نهایی می‌شود [۳۰].

- از دیاد برداشت نفت: یکی از کاربردهای صنعتی مهم CO<sub>2</sub>، تزریق آن به چاه‌های نفت است. در این روش، CO<sub>2</sub> با کاهش ویسکوزیته نفت و افزایش فشار مخازن، به افزایش بهره‌وری و استخراج نفت کمک می‌کند [۳۱] [۳۰].

- سیال انتقال حرارت: CO<sub>2</sub> به‌عنوان یک سیال انتقال حرارت در سامانه‌های گرمایشی و سرمایشی کاربرد دارد. به‌واسطه‌ی خواص ترمودینامیکی مناسب، CO<sub>2</sub> می‌تواند به‌صورت کارآمد در انتقال حرارت مورد استفاده قرار گیرد [۳۱].

#### ۲-۳-۴. فناوری استفاده از CO<sub>2</sub> با فرآیند تبدیل

در این روش‌ها، CO<sub>2</sub> از طریق واکنش‌های شیمیایی یا بیوشیمیایی به مواد با ارزش‌تر و قابل استفاده در صنایع مختلف تبدیل می‌شود. این فرآیندها به دسته‌های زیر تقسیم می‌شوند:

- تبدیل شیمیایی: CO<sub>2</sub> می‌تواند از طریق واکنش‌های شیمیایی به مواد دیگری مانند متانول یا کربنات‌ها تبدیل شود. این ترکیب‌ها در صنایع مختلف به‌عنوان مواد اولیه یا سوخت استفاده می‌شوند.

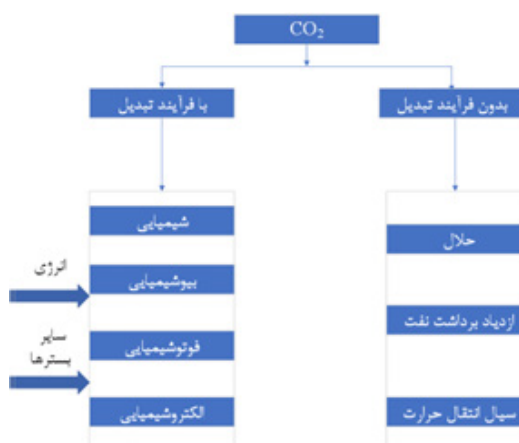
- بیوشیمیایی: برخی میکروارگانیسم‌ها و گیاهان قادرند CO<sub>2</sub> را از محیط جذب کرده و آن را به ترکیب‌های آلی یا زیست سوخت‌ها تبدیل کنند. این فرآیندها نقش مهمی در به‌کارگیری CO<sub>2</sub> در کشاورزی و تولید سوخت‌های تجدیدپذیر دارند.

- فوتوشیمیایی: فرآیندهای فوتوشیمیایی از نور خورشید یا منابع نوری دیگر برای انجام واکنش‌های تبدیل CO<sub>2</sub> استفاده می‌کنند. یکی از کاربردهای این روش، شبیه‌سازی فرآیند فتوسنتز برای تولید مواد آلی است.

- الکتروشیمیایی: در این روش، از جریان الکتریکی برای انجام واکنش‌های شیمیایی روی CO<sub>2</sub> استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، CO<sub>2</sub> می‌تواند به‌وسیله جریان الکتریکی به مواد مفیدی مانند سوخت‌های کربنی یا مواد شیمیایی صنعتی تبدیل شود. استفاده از دی‌اکسید کربن، چه به شکل مستقیم و چه از طریق فرآیندهای تبدیل، به‌عنوان یک استراتژی مؤثر برای کاهش اثر محیط‌زیستی و بهبود

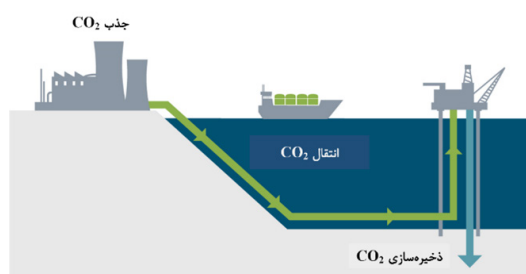
1. Sleipner
2. Snøhvit
3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
4. Global CCS Institute

کارایی صنایع مطرح است. با استفاده از CO<sub>2</sub> به عنوان یک ماده خام یا پیش ماده برای تولید مواد شیمیایی، سوخت‌ها و انرژی، می‌توان به کاهش انتشار آن و توسعه فناوری‌های پاک‌تر کمک کرد. این دسته‌بندی‌ها و روش‌های مختلف استفاده از CO<sub>2</sub> را می‌توان در (شکل ۳) مشاهده کرد که فرآیندهای مختلف بهره‌برداری از این گاز را نمایش می‌دهد.



شکل ۳: روش‌های مختلف استفاده از دی‌اکسید کربن [۳۰]

مقایسه با هیدروژن خاکستری کاهش می‌دهد [۳۳]. این فناوری، علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، امنیت انرژی را نیز تقویت می‌کند، زیرا از زیرساخت‌های موجود گاز طبیعی بهره‌برداری و به‌عنوان یک مسیر انتقالی به سوی اقتصاد کم‌کربن عمل می‌کند [۳۴]. همچنین، هیدروژن آبی در مقایسه با هیدروژن سبز در کوتاه‌مدت و میان‌مدت ناشی از هزینه‌های پایین تولید و استفاده از فناوری‌های پیشرفته از لحاظ اقتصادی به‌صرفه‌تر است. به‌علاوه، این منبع اولیه انرژی به‌دلیل مقیاس‌پذیری بالا و توانایی پاسخ به تقاضای گسترده، به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای اجرایی شدن در کوتاه‌مدت محسوب می‌شود [۳۵]. در (شکل ۴) مراحل جذب، انتقال و ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> نشان داده شده است.



شکل ۴: مراحل جذب، انتقال و ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> [۳۶]

#### ۴-۴. انتقال CO<sub>2</sub>

دی‌اکسید کربن را می‌توان به‌صورت فشرده، مایع، جامد یا در حالت هیدرات از طریق خطوط لوله، مخازن تحت فشار یا کشتی‌ها انتقال داد. زیرساخت‌های خط لوله دی‌اکسید کربن، به‌طور معمول از منبع تولید CO<sub>2</sub> به پروژه‌های ازدیاد برداشت نفت (EOR) متصل می‌شود، مانند خط آلبرتا کربن ترانک<sup>۱</sup>. انتقال CO<sub>2</sub> از طریق کشتی تاکنون در مقیاس کوچک انجام شده است. با این حال، اکنون تلاش‌هایی برای ساخت کشتی‌های بزرگ‌تر و پایانه‌های تخلیه جدید در این بنادر در حال انجام است تا ظرفیت جابجایی CO<sub>2</sub> افزایش یابد. CO<sub>2</sub> منتقل‌شده از طریق خط لوله باید در شرایط فوق بحرانی و دمایی پایین نگهداری شود. برای این منظور، CO<sub>2</sub> باید در فشاری حدود ۱۰۰ بار قرار گیرد. همچنین، غلظت آن باید به بیش از ۹۵ درصد افزایش یابد تا فرآیند فشرده‌سازی و تشکیل هیدرات بهینه‌سازی شده و از پایداری و کارایی انتقال اطمینان حاصل شود [۳۲].

#### ۴-۵. مزایای تولید هیدروژن آبی

هیدروژن آبی، به‌طور قابل توجهی انتشار کربن را در

#### ۴-۶. چالش‌های تولید هیدروژن آبی

چالش‌های تولید هیدروژن آبی به چندین عامل اساسی مرتبط است. یکی از عوامل کلیدی، مصرف بالای انرژی، به‌ویژه در فرآیند SMR، می‌باشد که بر بازده کلی این فرآیند تأثیر منفی می‌گذارد [۳۵]. علاوه بر این، واحد CCUS نقش مهم در کاهش انتشار دی‌اکسید کربن دارد، اما با چالش‌های فنی و اقتصادی جدی از جمله هزینه‌های بالا و نیاز به زیرساخت‌های گسترده مواجه است [۳۷]. همچنین، انتشار متان در مراحل استخراج و حمل‌ونقل گاز طبیعی می‌تواند اثر مثبت زیست‌محیطی هیدروژن آبی را کاهش دهد [۳۸]. از نظر اقتصادی، تولید هیدروژن آبی در مقیاس بزرگ نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجهی است و به‌شدت تحت تأثیر نوسان‌های بازار و تغییر قوانین قرار دارد [۳۹].

#### ۵. فرآیند تولید هیدروژن فیروزه‌ای

هیدروژن فیروزه‌ای به‌عنوان یکی از منابع پایدار انرژی، از فرآیند پیرولیز متان تولید می‌شود. پیرولیز، فرآیند شکست حرارتی در نبود اکسیژن است. گاز طبیعی یا متان طی این

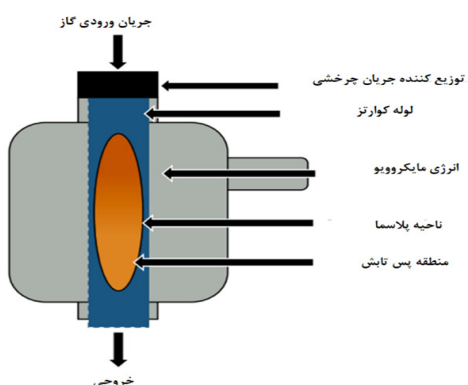
1. Enhanced oil recovery
2. Alberta Carbon Trunk



فرآیند، در اثر حرارت به هیدروژن و کربن جامد تجزیه می‌شود. پیرولیز متان قادر است هیدروژن را با هزینه‌ای پایین و انتشار گازهای گلخانه‌ای بسیار کم یا نزدیک به صفر تولید کند. این روش از گاز طبیعی استفاده می‌کند و پتانسیل آن را دارد که در مقایسه با روش‌های دیگر، انتشار گازهای گلخانه‌ای را به‌طور مؤثری کاهش دهد [۴۰]. سایر فناوری‌های تبدیل متان، مانند فرآیند SMR، محدودیت‌هایی از نظر انتشار دارند به‌عنوان مثال، در فرآیند SMR، از هر کیلوگرم متان حدود ۰/۵ کیلوگرم هیدروژن تولید می‌شود [۴۱]. یکی از مزایای مهم پیرولیز متان این است که در صورت استفاده از گاز طبیعی برای تأمین حرارت، می‌توان انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا ۷۵ درصد نسبت به فرآیند SMR کاهش داد.

## ۲-۵. پیرولیز با پلاسما

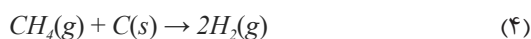
پیرولیز متان با استفاده از پلاسما، روشی نوآورانه و مؤثر برای تولید هیدروژن و کربن جامد بدون انتشار دی‌اکسید کربن است و به همین دلیل، فرآیندی سازگار با محیط‌زیست محسوب می‌شود. در این روش، از مشعل‌های پلاسمای مایکروویو (MPT)<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. (شکل ۶)، شماتیک یک راکتور پلاسما مایکروویو را نشان می‌دهد. علاوه بر این، پلاسماترون قوس لغزنده (GAP)<sup>۳</sup> نیز برای تجزیه متان به‌کار می‌رود و بازدهی بالاتری در تبدیل گاز متان به هیدروژن و کربن جامد دارد [۴۶]. یکی از مزایای این فرآیند، تولید محصول فرعی ارزشمند مانند کربن سیاه است که با انجام فرآیند گرمایشی، ویژگی‌های آن بهبود یافته و در کاربردهایی نظیر تولید انواع باتری‌ها به‌کار می‌رود [۴۷]. بهینه‌سازی شرایط دمایی (تا ۴۳۰۰ کلوین) و تنظیم دقیق زمان واکنش، برای افزایش بازده تولید هیدروژن و بهبود کیفیت کربن تولیدی اهمیت زیادی دارد. به‌طور کلی، کارآمدی اقتصادی این فناوری به کاهش مصرف انرژی و ارتقای ارزش محصول جانبی وابسته است [۴۸].



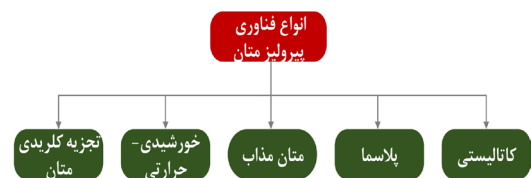
شکل ۶: شماتیک یک راکتور پلاسما مایکروویو برای پیرولیز متان

1. Biocrude
2. Microwave plasma torch
3. Cliding arc plasmatron

محصول جانبی این فرآیند، کربن جامد است که می‌تواند به اشکال مختلفی مانند کربن سیاه آمورف، مواد گرافیتی، نانولوله‌ها و الیاف کربنی تولید شود. ویژگی‌ها و کیفیت کربن جامد تولیدی، قیمت آن را تعیین می‌کند و در نتیجه، تولید محصولی با ارزش می‌تواند درآمد اضافی ایجاد کرده و زمان بازگشت سرمایه را کاهش دهد. پیرولیز متان شامل روش‌های متنوعی است که در (شکل ۵) نمایش داده شده‌اند. علاوه بر گاز طبیعی، زیست‌توده نیز از طریق پیرولیز قابل تبدیل به هیدروژن است.



فرآیند تبدیل متان به هیدروژن و کربن جامد با استفاده از روش‌های مختلف، از جمله فرآیند SMR، فرآیند پلاسما، فرآیند مایکروویو، فرآیند قوس لغزنده (GAP) و فرآیند پلاسما مایکروویو، به‌کار می‌رود. این روش‌ها، با استفاده از انرژی الکتریکی، متان را به هیدروژن و کربن جامد تبدیل می‌کنند. فرآیند پلاسما مایکروویو، با استفاده از انرژی مایکروویو، متان را به هیدروژن و کربن جامد تبدیل می‌کند. فرآیند قوس لغزنده (GAP)، با استفاده از انرژی قوس، متان را به هیدروژن و کربن جامد تبدیل می‌کند. فرآیند پلاسما مایکروویو، با استفاده از انرژی مایکروویو، متان را به هیدروژن و کربن جامد تبدیل می‌کند.



شکل ۵: انواع فناوری پیرولیز متان

## ۱-۵. پیرولیز کاتالیستی

پیرولیز کاتالیستی یک فرآیند ترموشیمیایی است که در آن با استفاده از کاتالیزورها، مواد آلی به محصولی مانند زغال جامد، روغن مایع و گاز پیرولیتیک تبدیل می‌شوند. این روش به‌ویژه برای تبدیل زیست‌توده و ضایعات پلاستیکی به محصول با ارزش بسیار کارآمد است. دما، زمان ماندگاری، نرخ گرمایش و نوع ماده اولیه از پارامترهای کلیدی این فرآیند هستند و برای افزایش کارایی از کاتالیزورهایی مانند زئولیت‌ها،

### ۳-۵. پیرولیز متان مذاب

در این فرآیند متان با استفاده از تجزیه حرارتی به هیدروژن و محصول کربنی تبدیل می‌شود، بدون این‌که دی‌اکسید کربن به‌عنوان محصول جانبی تولید شود. این روش که با فوم نیکل و نمک‌های مذاب بهینه‌سازی شده است، با کاهش رسوب کربن بر سطح فوم نیکل باعث حفظ ساختار و فعالیت کاتالیزور می‌شود. با وجود پتانسیل بالا، این فرآیند هنوز به بهبود پایداری و فعالیت کاتالیزور برای دستیابی به تجاری‌سازی کامل نیاز دارد [۴۹].

### ۴-۵. پیرولیز خورشیدی-حرارتی

پیرولیز خورشیدی-حرارتی، از انرژی خورشید برای تجزیه مواد کربنی مانند زیست‌توده، زغال سنگ و ضایعات استفاده می‌کند [۵۰] این روش به‌عنوان یک نوآوری در حوزه فناوری‌های پاک شناخته می‌شود و با بهره‌وری بالا، کاهش انتشار کربن و قابلیت ذخیره انرژی خورشیدی در قالب محصول پیرولیز، مزایای قابل توجهی نسبت به روش‌های سنتی دارد [۵۱] اما این روش با وجود نوآوری‌های فناورانه و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، برای دستیابی به تجاری‌سازی و حل چالش‌هایی مانند مقیاس‌پذیری و ناترازی انرژی، نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد [۵۲].

### ۵-۵. تجزیه کلریدی متان

تجزیه کلریدی متان، به شکل قابل توجهی بر تشکیل محصول و واسطه‌های شیمیایی اثر می‌گذارد. در طی این فرآیند، مواد تجزیه می‌شوند. در این فرآیند، آزادسازی کلر از پلی‌وینیل کلراید<sup>۱</sup> در دو مرحله صورت می‌گیرد، مرحله اول در دمای ۴۰ تا ۳۴۳ درجه سانتی‌گراد که منجر به دکلره شدن و تولید بنزن و هیدروژن کلراید می‌شود؛ و مرحله دوم در دمای ۳۴۳ تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد که به تولید هیدروکربن‌های آروماتیک تک‌حلقه‌ای و چندحلقه‌ای از طریق واکنش‌های حلقوی منجر می‌شود [۵۳]. در فرآیند پیرولیز، بخش عمده کلر موجود در زباله‌های لاستیکی و پلاستیکی به‌صورت ترکیب‌های کلردار در محصول جامد نهایی، یعنی باقی‌مانده کربنی یا زغال، باقی می‌ماند. این کلر، به‌صورت کلر آلی (کلر ترکیب شده با مواد آلی) است و در این شکل پایدار می‌ماند. با این حال، در دماهای بالا و در حضور ترکیب‌های فلزی، کلر آلی می‌تواند به ترکیب

معدنی تبدیل شود که این واکنش‌ها به تسهیل آزادسازی کلر و ترکیب آن با فلزها کمک می‌کنند [۵۴]. همچنین در پیرولیز زباله‌های جامد شهری، کلر در دماهای بالاتر به اشکال معدنی به زغال تبدیل می‌شود. زئولیت‌های سدیم به‌عنوان کاتالیزور در دکلره‌سازی ترکیب‌های آلکیل و آلکنیل مؤثرند، اما حذف کلر از حلقه‌های آروماتیک تنها به‌طور جزئی انجام می‌شود [۵۵]. در پیرولیز PVC، دو مسیر یکی از طریق واسطه‌های درون مولکولی و دیگری بین مولکولی برای از دست دادن کلر وجود دارد. در مسیر بین مولکولی و در حضور اکسیدهای فلزی، واکنشی مانند اکسید نیکل<sup>۲</sup>، نقش مهمی در تشکیل زغال دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که برای بازیافت بهتر مواد و کنترل آلاینده‌ها، فهم عمیق از واکنش‌های کلر و تغییرهای آن در طول فرآیند پیرولیز ضروری است [۵۶].

### ۶-۵. مزایای تولید هیدروژن فیروزه‌ای

تولید هیدروژن فیروزه‌ای از طریق پیرولیز متان، روشی کارآمد و از نظر ترمودینامیکی کم‌مصرف است که انرژی کم‌تری نسبت به الکترولیز آب نیاز دارد. این فرآیند، در مقایسه با هیدروژن خاکستری و آبی، اثر کربنی به‌مراتب کم‌تری دارد. علاوه بر این، محصول جانبی باارزشی چون کربن سیاه و نانولوله‌های کربنی را تولید می‌کند که به دلیل ارزش بالای بازاری، می‌توانند هزینه‌های تولید را جبران کرده و به جذابیت اقتصادی این روش بیفزایند [۵۷].

### ۷-۵. چالش‌های تولید هیدروژن فیروزه‌ای

راه‌اندازی اولیه تولید هیدروژن فیروزه‌ای به دلیل نیاز به راکتورها و کاتالیزورهای تخصصی هزینه‌بر است. علاوه بر این، تولید مداوم هیدروژن با چالشی نظیر کاهش کارایی کاتالیزورها به‌علت رسوب‌های کربنی مواجه است که به‌مرور زمان آن‌ها را غیرفعال می‌کند. همچنین، هزینه‌های بالای واحدهای جداسازی هوا و سایر زیرساخت‌ها، چالش‌های اقتصادی بیش‌تری ایجاد می‌کنند. با این‌که هیدروژن فیروزه‌ای مزایای قابل توجهی دارد ولی برای اجرای کامل این فناوری به پژوهش و توسعه بیش‌تری نیاز است [۵۸].

### ۶. مقایسه هیدروژن آبی و فیروزه‌ای

در (شکل ۷) پارامترهای مؤثر مقایسه هیدروژن آبی و فیروزه‌ای نشان داده شده است.

1. Polyvinyl Chloride
2. NiO





شاخص زیست‌محیطی در (جدول ۳) نشان داده شده است.

جدول ۳: خروجی AHP برای شاخص زیست‌محیطی

رتبه	ایدئال	نرمال	کلی	برنامه
۱	۰/۵۴	۰/۸۳	۰/۸۵	هیدروژن فیروزه‌ای
۲	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۱۵	هیدروژن آبی

#### ۲-۶. اثر اقتصادی

هزینه‌های اولیه تولید هیدروژن آبی نسبت به تولید هیدروژن سبز و هیدروژن فیروزه‌ای کم‌تر است و از زیرساخت‌های گاز طبیعی موجود بهره می‌برد؛ اما هزینه بالای واحد CCUS همچنان از چالش‌های اقتصادی آن است. در مقابل، تولید هیدروژن فیروزه‌ای با بهره‌گیری از محصول جانبی کربنی با ارزش افزوده مانند نانولوله‌های کربنی می‌تواند هزینه‌های متغیر و هزینه کل تولید را کاهش می‌دهد و قابلیت اقتصادی فرآیند را بهبود می‌بخشد [۶۰]. نتایج تحلیل برای دو رنگ هیدروژن آبی و فیروزه‌ای برای شاخص اقتصادی در (جدول ۴) نشان داده شده است.

جدول ۴: خروجی AHP برای شاخص اقتصادی

رتبه	ایده‌آل	نرمال	کلی	برنامه
۱	۰/۱۷	۰/۷۵	۰/۷۵	هیدروژن فیروزه‌ای
۲	۰/۰۶	۰/۲۵	۰/۲۵	هیدروژن آبی

#### ۳-۶. کارایی

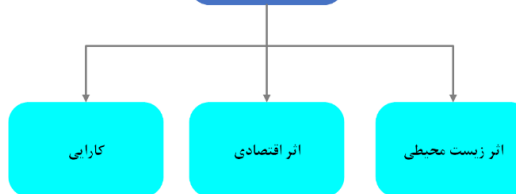
کارایی هیدروژن آبی از طریق ادغام فرآیندهایی مانند احتراق اکسیژنی و بهره‌گیری از گرمای اتلاف، قابل ارتقا است. همچنین، فرآیند پیرولیز متان در تولید هیدروژن فیروزه‌ای در مقایسه با الکترولیز، انرژی کم‌تری مصرف می‌کند که آن را به گزینه‌ای با کربن پایین و امیدوارکننده تبدیل می‌کند [۶۱]. نتایج تحلیل برای دو رنگ هیدروژن آبی و فیروزه‌ای برای شاخص کارایی در (جدول ۵) نشان داده شده است.

جدول ۵: خروجی AHP برای شاخص کارایی

رتبه	ایده‌آل	نرمال	کلی	برنامه
۱	۰/۰۸	۰/۶۷	۰/۶۷	هیدروژن فیروزه‌ای
۲	۰/۰۴	۰/۳۳	۰/۳۳	هیدروژن آبی

1. Analytic Hierarchy Process (AHP)

پارامترهای مهم در مقایسه هیدروژن آبی و فیروزه‌ای



شکل ۷: پارامترهای مهم در مقایسه هیدروژن آبی و فیروزه‌ای

در این بخش با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی<sup>۱</sup> سه شاخص اثر زیست‌محیطی، اقتصادی و کارایی مورد بررسی قرار گرفته که نتایج آن در (جدول ۱، ۲ و ۳) نشان داده شده است. AHP یک روش تصمیم‌گیری است که توسط محقق آمریکایی A. L. Satty در دهه ۱۹۷۰ پیشنهاد شد. روشی است که فرآیند تصمیم‌گیری توسط اشخاص خبره را در مورد مسائل پیچیده، مدل‌سازی و کمی‌سازی می‌کند. اصل اساسی روش AHP تجزیه مسئله به سطوح مختلف با توجه به ماهیت مسئله، هدف کلی و سپس تشکیل ساختار یک مدل تحلیلی در چند سطح است.

در این پژوهش از نرم‌افزار متن‌باز سوپردسیژن که شامل مدل AHP استفاده شده است. هدف مدل سلسله‌مراتبی در این پژوهش انتخاب مسیر فناوری مناسب برای تولید هیدروژن با توجه به شاخص‌های اتخاذ شده در سطح معیار از طریق بهترین گزینه توسط روش AHP است. جمعیت گروهی خبرگی شامل اعضای از صاحبان صنایع، اساتید هیئت علمی، خبرگان بین صنعت و دانشگاه و دانشجویان دکتری بوده‌اند که در به‌صورت عضو دائم و وابسته در مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی حضور دارند.

#### ۱-۶. اثر زیست‌محیطی

در تولید هیدروژن آبی، به ازای هر کیلوگرم هیدروژن، انتشار ۷/۶ تا ۹/۳ کیلوگرم معادل CO<sub>2</sub> بسته به منبع گاز طبیعی (خط لوله یا LNG) تخمین زده شده است. از سوی دیگر، هیدروژن فیروزه‌ای با انتشار کم‌تری معادل ۶/۱ تا ۸/۳ کیلوگرم CO<sub>2</sub> به ازای هر کیلوگرم هیدروژن به‌عنوان گزینه‌ای سازگارتر با محیط‌زیست محسوب می‌شود. همچنین، تولید کربن جامد به‌عنوان یک محصول جانبی در این فرآیند، از انتشار مستقیم CO<sub>2</sub> جلوگیری می‌کند [۵۹]. نتایج تحلیل برای دو رنگ هیدروژن آبی و فیروزه‌ای برای

## ۷. پارامترهای مؤثر تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای

در (جدول ۶) برخی از پارامترهای مؤثر تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای نشان داده شده است [۶۲].

جدول ۶: پارامترهای مؤثر تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای

پارامتر	هیدروژن آبی	هیدروژن فیروزه‌ای
خوراک	گاز طبیعی	گاز طبیعی
فرآیند	SMR+CCS	پیرولیز متان
کارایی انرژی	بالا $50 - 70 \frac{KWh}{Kg H_2}$	پایین $10 - 30 \frac{KWh}{Kg H_2}$
انتشار کربن	متوسط همراه با واحد CCS	کم (کربن جامد)
محصولات	CO <sub>2</sub> (جذب شده)	کربن جامد
اقتصادی	وابسته به کارایی و هزینه‌های CCS	محصولات جانبی کربن با ارزش بالا
زیست‌محیطی	انتشار پایین CO <sub>2</sub> نسبت به هیدروژن خاکستری	انتشار CO <sub>2</sub> کم‌تر نسبت به هیدروژن آبی
کاتالیست	اثر انتخاب کاتالیزور مناسب بر دمای عملیاتی و طول عمر تجهیزها	بهبود راندمان و کاهش دما در صورت استفاده از کاتالیزور مناسب
فشار	بهبود راندمان تولید H <sub>2</sub> همراه با نیاز به تجهیزهای گران‌تر	افزایش نرخ تبدیل متان در فشار بالاتر، هم‌زمان با افزایش خطر رسوب کربن
دمای واکنش	افزایش دما، با بهبود بازده هیدروژن و افزایش مصرف انرژی و امکان انتشار CO <sub>2</sub>	دمای بالاتر، تسریع تجزیه متان به هیدروژن و کربن جامد، همراه با افزایش مصرف انرژی

## ۸. پتانسیل هیدروژن آبی و فیروزه‌ای در ایران

ایران با دارا بودن ذخایر عظیم گاز طبیعی و هزینه‌های پایین استخراج آن، علاوه بر پتانسیل مناسب برای توسعه فناوری‌های مبتنی بر گاز در تولید انرژی‌های پاک از سوئی، دارای ناترازی مصرف گاز طبیعی از سوی دیگر است. این شرایط می‌تواند بستر مناسبی برای تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای جهت ذخیره‌سازی انرژی در رفع ناترازی منحنی مصرف گاز طبیعی نیز فراهم کند. باتوجه به منابع گسترده گاز طبیعی و هزینه‌های رقابتی استخراج در ایران، این کشور می‌تواند به یک بازیگر کلیدی در تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای تبدیل شود و از این طریق، سهمی مؤثر در بازارهای جهانی انرژی پاک به‌دست آورد. همچنین، باتوجه به تغییر سیاست‌های جهانی در حوزه انرژی و ضرورت کاهش انتشار کربن، پیش‌بینی می‌شود زیرساخت‌های مرتبط با تولید هیدروژن در ایران گسترش یابد. باتوجه به مطالب اشاره شده در قبل، از نظر اقتصادی انتخاب هیدروژن فیروزه‌ای نسبت به هیدروژن آبی مقرون‌به‌صرفه‌تر است؛ اما باتوجه به حجم گسترده تولید هیدروژن خاکستری در کشور، با استفاده از واحدهای CCUS تبدیل این حجم از هیدروژن خاکستری به هیدروژن آبی از منظر زیست‌محیطی حیاتی است.

## ۸-۱. اهمیت سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های تولید

### هیدروژن و توسعه فناوری‌های پاک

سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های هیدروژنی و فناوری‌های مرتبط، گامی اساسی در مسیر کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و توسعه اقتصاد پایدار انرژی است. ایجاد ظرفیت‌های لازم برای تولید، ذخیره‌سازی و توزیع هیدروژن، علاوه بر تقویت امنیت انرژی، به رقابت‌پذیری کشور در بازارهای بین‌المللی کمک می‌کند. توسعه فناوری‌های پاک، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید، انتقال هیدروژن و حمایت از صنایع مرتبط، زمینه‌ساز رشد اشتغال فناورانه و بومی‌سازی فناوری‌های نوین خواهد بود. از سوی دیگر، کاهش انتشار آلاینده‌ها و بهبود کیفیت هوا، از مزایای زیست‌محیطی این سرمایه‌گذاری است که در نهایت به بهبود کیفیت زندگی منجر می‌شود [۶۳].

## ۸-۲. اهمیت اقتصادی تولید هیدروژن

### ۸-۲-۱. نقش هیدروژن در تنوع‌بخشی به سبد انرژی و توسعه صنعتی

توسعه تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای گامی اساسی در





راستای کاهش وابستگی به منابع فسیلی و گسترش سهم انرژی‌های پاک در کشور است. به‌ویژه هیدروژن فیروزه‌ای که بدون انتشار مستقیم دی‌اکسید کربن تولید می‌شود و می‌تواند جایگزین مهمی برای سوخت‌های فسیلی باشد. این روند نه تنها به تحقق اهداف زیست‌محیطی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند، بلکه جایگاه ایران را به‌عنوان یکی از بازیگران کلیدی در بازار انرژی منطقه و جهان تقویت می‌نماید. علاوه بر این، توسعه فناوری‌های تولید، ذخیره‌سازی و توزیع هیدروژن، زیرساخت‌های جدیدی در صنایع مرتبط ایجاد کرده و فرصت‌های سرمایه‌گذاری گسترده‌ای را به همراه دارد. شکل‌گیری این اکوسیستم فناورانه موجب رشد صنایع مرتبط با انرژی‌های پاک، افزایش اشتغال در بخش‌های دانش‌بنیان و تقویت توانمندی‌های بومی در زمینه فناوری‌های نوین می‌شود. از این‌رو، تولید هیدروژن نه تنها به تحول ساختار انرژی کشور کمک می‌کند، بلکه به‌عنوان پیش‌رانی برای توسعه صنعتی و اقتصادی نیز عمل خواهد کرد.

#### ۲-۲-۸. نقش هیدروژن در اقتصاد بین‌المللی و توسعه پایدار

با رشد بازار جهانی هیدروژن و افزایش تقاضا برای حامل‌های انرژی کم‌کربن، ایران فرصت قابل توجهی برای تبدیل شدن به یکی از صادرکنندگان بزرگ هیدروژن دارد. تولید و صادرات هیدروژن می‌تواند به متنوع‌سازی سبد صادراتی کشور کمک کرده و وابستگی اقتصادی به درآمدهای حاصل از نفت و گاز را کاهش دهد. جایگاه ژئوپلیتیکی ایران، منابع غنی گازی و ظرفیت‌های زیرساختی موجود، این امکان را فراهم می‌آورد که کشور در آینده به یکی از تأمین‌کنندگان کلیدی هیدروژن در بازارهای بین‌المللی تبدیل شود. علاوه بر مزایای اقتصادی، گسترش استفاده از هیدروژن در داخل کشور به بهبود شاخص‌های توسعه پایدار منجر خواهد شد. کاهش انتشار آلاینده‌ها، افزایش کیفیت هوا، ارتقای امنیت انرژی و کاهش اثر تغییرهای اقلیمی از جمله دستاوردهای این تحول است. با بهره‌گیری از هیدروژن به‌عنوان حامل انرژی، ایران می‌تواند گام بلندی در مسیر توسعه پایدار برداشته و نقش خود را در گذار جهانی به سمت انرژی‌های پاک تثبیت کند.

#### ۹. جایگاه هیدروژن فیروزه‌ای در چشم‌انداز انرژی جهان

در سال ۲۰۲۲ میلادی با افزایش تقاضای جهانی برای هیدروژن به ۹۵ میلیون تن، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید این ماده حیاتی به بیش از ۱۲۹۱ میلیون

تن  $CO_2$  رسید. این بدان معناست که به‌طور متوسط، برای تولید هر کیلوگرم هیدروژن، بین ۱۲ تا ۱۳/۵ کیلوگرم گاز گلخانه‌ای آزاد می‌شود. در این میان، هیدروژن فیروزه‌ای به‌عنوان یک گزینه جذاب برای تولید هیدروژن با انتشار کم‌تر گازهای گلخانه‌ای مطرح شده است. با تغییر سیاست‌های انرژی جهانی به سمت کاهش کربن، هیدروژن فیروزه‌ای پتانسیل بالایی برای ایجاد یک بخش قابل توجه در بازار هیدروژن دارد [۶۴]. این فناوری به‌عنوان گزینه‌ای برای کمک به انتقال انرژی شناخته می‌شود، دولت‌های مختلف در حال حرکت به سمت تولید هیدروژن فیروزه‌ای در استراتژی‌های آینده انرژی خود هستند [۶۵]. هم‌زمان با این تحول‌ها، کشورهای خاورمیانه نیز با اجرای پروژه‌های کلان، نقش پررنگی در توسعه هیدروژن آبی و سبز ایفا می‌کنند. در عربستان سعودی، شرکت آرامکو با همکاری بانک نفتی هیوندای، پروژه‌ای برای تولید هیدروژن آبی از LPG و فناوری جذب و ذخیره‌سازی کربن در کره جنوبی راه‌اندازی کرده است [۶۶]. علاوه بر این، عربستان میدان گازی جافوره را با سرمایه‌گذاری ۱۱۰ میلیارد دلاری به‌منظور تولید هیدروژن آبی توسعه می‌دهد [۶۷]. در عمان نیز پروژه‌های عظیمی با مشارکت شرکت‌های اکوا پاور، اوکیو و ایر پروداکتز در حال اجرا است که هدف آن تولید سالانه ۱ میلیون تن آمونیاک سبز از ۳ گیگاوات انرژی تجدیدپذیر در منطقه الدقم است [۶۸]. این کشور همچنین در حال توسعه نیروگاهی با ظرفیت اولیه ۲۵۰-۵۰۰ مگاوات است که می‌تواند تا ۱ گیگاوات افزایش یابد. در امارات متحده عربی، شرکت ادنوک ابوظبی برنامه‌ریزی کرده است که تا سال ۲۰۲۵ نیروگاه روپس به بهره‌برداری برسد و سالانه ۱ میلیون تن آمونیاک آبی تولید کند [۶۹]. از سوی دیگر، شرکت مصدر با تشکیل اتحادیه‌ای ۵ میلیارد دلاری و همکاری با فرتیگلوب، پروژه‌ای را برای ساخت یک نیروگاه ۲۰۰ مگاواتی به‌منظور توسعه اقتصاد هیدروژن سبز در این کشور آغاز کرده است [۷۰]. این برنامه‌ها نشان‌دهنده عزم جدی کشورهای خاورمیانه برای استفاده از ظرفیت‌های نوآورانه در حوزه انرژی پاک و کاهش انتشار کربن است، که می‌تواند نقشی کلیدی در انتقال جهانی به سمت اقتصاد کم‌کربن ایفا کند. به‌طور کلی، هیدروژن فیروزه‌ای در خاورمیانه هنوز در مراحل اولیه تحقیق قرار دارد، اما با توجه به منابع گاز طبیعی فراوان و اهداف کاهش کربن، در سال‌های آینده پروژه‌های عملیاتی بیشتری در این زمینه به بهره‌برداری خواهند رسید. در برخی از کشورها مانند استرالیا برنامه‌هایی برای

توسعه هیدروژن فیروزه‌ای دارند به‌عنوان مثال شرکت پیور هیدروژن نمونه اولیه‌ای با ظرفیت تولید روزانه ۱۵۰ کیلوگرم هیدروژن فیروزه‌ای ساخته که امکان ارتقا برای تولید گرافن و نانولوله‌های کربنی را نیز فراهم کرده است. در ادامه، مازول‌های تجاری با ظرفیت‌های ۱,۵۰۰ و ۵,۰۰۰ کیلوگرم در کانتینرهای استاندارد ۱۲ متری طراحی و تولید شده‌اند. به‌گونه‌ای که بتوان در مناطقی که منابع کافی گاز متان وجود دارد، به‌سرعت نصب و بهره‌برداری کرد [۷۱]. هم‌چنین شرکت فناوری سیستم نوآورانه (ISTE) در کره جنوبی با شرکت بریتانیایی لویدیان<sup>۱</sup> توافق‌نامه‌ای برای راه‌اندازی کارخانه‌ای به‌منظور تولید هیدروژن فیروزه‌ای و گرافن امضا کرده است [۷۲].

**۱۰. محدودیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی تجزیه‌ی حرارتی متان**  
تجزیه‌ی حرارتی متان، به دماهای بالا (بین ۸۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) نیاز دارد بنابراین فرایندی انرژی‌بر و پرهزینه است؛ به‌ویژه زمانی که از منابع انرژی به‌جز تجدیدپذیرها استفاده شود [۷۳]. هزینه‌ی بالای کاتالیست‌هایی مانند فلزهای مذاب و پیچیدگی طراحی راکتورها، هزینه‌ی کلی این فرایند را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، موفقیت اقتصادی این روش به بازار محصول‌های جانبی کربنی وابسته است؛ به‌طوری که برای دستیابی به سودآوری، قیمت دوده‌ی کربنی باید به میزان قابل توجهی بالا باشد (برای مثال، حدود ۵۰۰ دلار به ازای هر تن) [۷۴]. از جنبه‌ی زیست‌محیطی، این فرایند به‌طور مستقیم دی‌اکسید کربن تولید نمی‌کند؛ اما اگر برق مورد نیاز از منابع فسیلی تأمین شود، ممکن است مزایای زیست‌محیطی آن کاهش یابد. هم‌چنین، مدیریت کربن جامد تولیدشده در مقیاس صنعتی، چالشی جدی به‌شمار می‌رود. افزون بر این، بسیاری از فناوری‌های مرتبط با این روش هنوز در مراحل تحقیق و توسعه قرار دارند و برای تجاری‌سازی، نیازمند مطالعه‌های بیش‌تر و جمع‌آوری داده‌های تجربی گسترده‌تری هستند [۷۵].

#### ۱۱. جهت‌های آینده

فناوری‌های تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای جایگاه ویژه‌ای در آینده انرژی ایران دارند. هیدروژن آبی با هزینه‌های بالا و نیاز به زیرساخت‌های گسترده همراه است. در حالی که هیدروژن فیروزه‌ای بدون تولید دی‌اکسید کربن،

گزینه‌ای پایدارتر محسوب می‌شود. نهادهای حاکمیتی می‌بایست با تدوین سیاست‌های حمایتی، تشویقی و جذب سرمایه‌گذاری‌های داخلی و خارجی، زمینه‌ساز پیشرفت این فناوری‌ها شوند. ترکیب هیدروژن آبی، فیروزه‌ای و سبز، راهکاری برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و ورود ایران به بازار جهانی هیدروژن فراهم می‌کند.

در این مسیر، توجه به توسعه پژوهش‌های نوین فناورانه ضروری به نظر می‌رسد. به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در بهینه‌سازی فرآیندهای تولید، استفاده از نانوذره‌ها به‌عنوان کاتالیست‌های پیشرفته برای ارتقای کارایی واکنش‌ها، توسعه و بهبود راکتورهای مبتنی بر فناوری پلازما یا ماکروویو به‌منظور افزایش بازده و کاهش مصرف انرژی، گسترش سامانه‌های جذب مستقیم کربن از هوا باهدف کاهش ردپای کربنی، طراحی مواد نوین برای ذخیره‌سازی و حمل ایمن‌تر هیدروژن و ارتقای فرآیندهای الکتروشیمیایی به‌منظور تبدیل دی‌اکسید کربن به محصول‌های ارزشمند، از جمله مسیرهای مهم پژوهش‌های آینده به‌شمار می‌روند. پیگیری این محورها می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای فناوری‌های هیدروژن و تسریع حرکت به‌سوی اقتصاد کم‌کربن ایفا کند.

#### ۱۲. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی و مقایسه دو مسیر تولید هیدروژن، یعنی هیدروژن آبی و فیروزه‌ای، با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی از جنبه‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و پایداری پرداخته شد که باتوجه به نتایج هیدروژن فیروزه‌ای رتبه اول دارا است. تولید هیدروژن فیروزه‌ای از طریق پیرولیز متان، به‌عنوان فرآیندی نوآورانه، بدون نیاز به حضور اکسیژن، منجر به شکسته شدن مولکول‌های متان و تولید هیدروژن و کربن جامد به‌عنوان محصول جانبی می‌شود. در این روش، ردپای کربنی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، چرا که کربن تولیدشده به‌صورت جامد جمع‌آوری شده و قابلیت استفاده در صنایع مختلف را نیز دارد. در مقابل، هیدروژن آبی با فناوری‌های متداول‌تر تولید هیدروژن از متان و بخار آب همراه با واحد CCUS تولید می‌شود. اگرچه CCUS تا حدی انتشار CO<sub>2</sub> را کاهش می‌دهد، اما به سرمایه‌گذاری قابل توجه در زیرساخت‌های ذخیره‌سازی نیاز دارد و امکان نشت CO<sub>2</sub> و متان در طول زنجیره‌ی تأمین وجود دارد. علاوه بر این، فرآیند SMR انرژی‌بر است که خود موجب افزایش

1. Levidian



of hydrogen in the 21st century energy transition,” Jan. 01, 2022, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114898.

[3]. [3] M. A. Rosen and S. Koohi-Fayegh, “The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems,” Feb. 01, 2016, Joint Center on Global Change and Earth System Science of the University of Maryland and Beijing Normal University. doi: 10.1007/s40974-016-0005-z.

[4]. [4] mckinsey, “Global Energy Perspective 2024,” 2024.

[5]. [5] M. B. Shavelkina, P. P. Ivanov, A. N. Bocharov, and R. K. Amirov, “Numerical and Experimental Study of the Multichannel Nature of the Synthesis of Carbon Nanostructures in DC Plasma Jets,” Plasma Chemistry and Plasma Processing, vol. 41, no. 1, pp. 171–189, Jan. 2021, doi: 10.1007/s11090-020-10133-8.

[6]. [6] A. Belamkar, B. Wagner, M. Kim, F. Bermudez, and L. Mangolini, “Conversion of Methane to Graphite-Like Carbon Nanoparticles Using a Low-Temperature Dusty Plasma,” ACS Appl Nano Mater, vol. 7, no. 10, pp. 11053–11058, May 2024, doi: 10.1021/acsanm.4c01614.

[7]. [7] X. Chen, H. Hu, W. Xia, and Z. Zhang, “Comparison study on carbon nanomaterial synthesis from methane and acetylene in DC arc plasma,” Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures, vol. 32, no. 5, pp. 471–482, 2024, doi: 10.1080/1536383X.2023.2294142.

[8]. [8] K. Ishikawa, “Effects of Plasma Ions/Radicals on Kinetic Interactions in Nanowall Deposition: A Review,” Aug. 01, 2024, John Wiley and Sons Inc. doi: 10.1002/adem.202400679.

هزینه تولید و اثر زیست‌محیطی جانبی تولید آن می‌شود. هیدروژن فیروزه‌ای به دلیل بر خورداری از مزایای قابل توجه اقتصادی و زیست‌محیطی، گزینه‌ای پایدارتر و مطلوب‌تر برای تأمین هیدروژن در بلندمدت به شمار می‌آید. این مزایا شامل تولید محصول جانبی با ارزش، کاهش نیاز به زیرساخت‌های پیچیده‌ی ذخیره‌سازی کربن و ردپای کربنی به مراتب کم‌تر نسبت به هیدروژن آبی است. در نتیجه توسعه‌ی فناوری‌های پیشرفته پیرولیز و ایجاد زیرساخت‌های مرتبط با هیدروژن فیروزه‌ای مورد توجه و حمایت بیشتر قرار خواهد گرفت.

### تشکر و قدردانی

در انتها مراتب سپاس خود را از مرکز پژوهشی انرژی دانشگاه شهید بهشتی که نتایج پژوهش‌های خود را جهت این پژوهش در اختیار نگارندگان قرار داد، ابراز می‌داریم.

### فهرست علائم اختصاری

SMR	Steam Methane Reforming
ATR	Auto Thermal Reforming
CCUS	Carbon Capture Utilization and Storage
CCS	Carbon Capture Storage
CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide
EOOR	Enhanced oil recovery
MPT	microwave plasma torch
GAP	gliding arc plasmatron
PVC	polymerization of vinyl chloride
LNG	Liquefied natural gas
AHP	Analytic hierarchy process

### مراجع:

- [1]. E. S. Hanley, J. P. Deane, and B. P. Ó. Gallachóir, “The role of hydrogen in low carbon energy futures—A review of existing perspectives,” Feb. 01, 2018, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2017.10.034.
- [2]. T. Capurso, M. Stefanizzi, M. Torresi, and S. M. Camporeale, “Perspective of the role



01, 2023, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2023.113635.

- [17]. A. M. Hamed, T. N. A. T. Kamaruddin, N. Ramli, and M. F. A. Wahab, "A review on blue and green hydrogen production process and their life cycle assessments," in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Institute of Physics, 2023. doi: 10.1088/1755-1315/1281/1/012034.
- [18]. S. S. Niknezhad, D. Staack, and E. N. Pistikopoulos, "Natural gas to hydrogen via a novel process intensified plasma-based reformer," *Appl Energy*, vol. 373, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.123911.
- [19]. A. Midilli, H. Kucuk, M. Haciosmanoglu, U. Akbulut, and I. Dincer, "A review on converting plastic wastes into clean hydrogen via gasification for better sustainability," *Mar. 25, 2022*, John Wiley and Sons Ltd. doi: 10.1002/er.7498.
- [20]. A. R. Razmi, A. R. Hanifi, and M. Shahbakhti, "Techno-economic analysis of a novel concept for the combination of methane pyrolysis in molten salt with heliostat solar field," *Energy*, vol. 301, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.131644.
- [21]. D. P. Minh et al., "Hydrogen production from biogas reforming: An overview of steam reforming, dry reforming, dual reforming, and tri-reforming of methane," in *Hydrogen Supply Chain: Design, Deployment and Operation*, Elsevier, 2018, pp. 111–166. doi: 10.1016/B978-0-12-811197-0.00004-X.
- [22]. A. Iulianelli, S. Liguori, J. Wilcox, and A. Basile, "Advances on methane steam reforming to produce hydrogen through membrane reactors technology: A review," *Catal Rev Sci Eng*, vol. 58, no. 1, pp. 1–35, Jan. 2016, doi: 10.1080/01614940.2015.1099882.
- [9]. [9] R. Hatakeyama and T. Kato, "8 Structural Control of Single-Walled Carbon Nanotubes by Plasma Chemical Vapor Deposition."
- [10]. F. Ahmadiouri, "Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy," 2024.
- [11]. B. Wang and H. M. Guan, "Highly Efficient Conversion of Methane to Olefins via a Recycle-Plasma-Catalyst Reactor," *Catal Letters*, vol. 146, no. 10, pp. 2193–2199, Oct. 2016, doi: 10.1007/s10562-016-1846-y.
- [12]. Y. Gao, S. Zhang, H. Sun, R. Wang, X. Tu, and T. Shao, "Highly efficient conversion of methane using microsecond and nanosecond pulsed spark discharges," *Appl Energy*, vol. 226, pp. 534–545, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.06.006.
- [13]. S. Zhang, X. Zeng, H. Bai, C. Zhang, and T. Shao, "Optical emission spectroscopy measurement of plasma parameters in a nanosecond pulsed spark discharge for CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> dry reforming," *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, vol. 267, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.saa.2021.120590.
- [14]. L. Fulcheri, E. Dames, and V. Rohani, "Plasma-based conversion of methane into hydrogen and carbon black," *Dec. 01, 2024*, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.cogsc.2024.100973.
- [15]. Q. Hassan, S. Algburi, A. Z. Sameen, H. M. Salman, and M. Jaszczur, "Green hydrogen: A pathway to a sustainable energy future," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 50, pp. 310–333, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.08.321.
- [16]. S. Y. Ahn et al., "From gray to blue hydrogen: Trends and forecasts of catalysts and sorbents for unit process," *Oct.*



- utilization: A paradigm shift with CO<sub>2</sub> economy,” Nov. 15, 2020, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.ceja.2020.100013.
- [31]. H. Lu, X. Ma, K. Huang, L. Fu, and M. Azimi, “Carbon dioxide transport via pipelines: A systematic review,” Sep. 01, 2020, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121994.
- [32]. Y. Li, J. Ren, H. Ma, and A. N. Campbell, “Technical and economic performance assessment of blue hydrogen production using new configuration through modelling and simulation,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 134, May 2024, doi: 10.1016/j.ijggc.2024.104112.
- [33]. D. A. Tetteh and S. Salehi, “The Blue Hydrogen Economy: A Promising Option for the Near-to- Mid-Term Energy Transition,” *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, vol. 145, no. 4, Apr. 2023, doi: 10.1115/1.4055205.
- [34]. B. Qin, H. Wang, F. Li, D. Liu, Y. Liao, and H. Li, “Towards zero carbon hydrogen: Co-production of photovoltaic electrolysis and natural gas reforming with CCS,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 78, pp. 604–609, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.337.
- [35]. Solartronisa, “Transport.” Accessed: Mar. 15, 2025. [Online]. Available: solartronisa.com/industries/clean-energy/carbon-capture/transport
- [36]. S. Nešić, S. Fominykh, A. Vertlyugina, A. Sizykh, and U. Božović, “Decarbonization Challenges in Oil Refining: A Perspective on Blue Hydrogen Production at Panchevo Oil Refinery,” in *Society of Petroleum Engineers - SPE Europe Energy Conference and Exhibition, EURO 2024, Society of Petroleum Engineers (SPE)*, 2024. doi:
- [23]. S. Herfat, A. Mosayyebi Jirhandeh, and M. Zandi, “The potential of using CCUS units in the Iran’s industries with an Analytic Hierarchy Process (AHP),” *renewable and new energies*, vol. 11, no. 2, pp. 107–116, 1403.
- [24]. A. Di Gianfrancesco, “Worldwide overview and trend for clean and efficient use of coal,” in *Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants*, Elsevier Inc., 2017, pp. 643–687. doi: 10.1016/B978-0-08-100552-1.00019-1.
- [25]. P. Madejski, K. Chmiel, N. Subramanian, and T. Kuś, “Methods and Techniques for CO<sub>2</sub> Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies,” Feb. 01, 2022, MDPI. doi: 10.3390/en15030887.
- [26]. M. Wohlthan et al., “Oxyfuel combustion based carbon capture onboard ships,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 137, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.ijggc.2024.104234.
- [27]. D. C. Makepa and C. H. Chihobo, “Sustainable pathways for biomass production and utilization in carbon capture and storage—a review,” 2024, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. doi: 10.1007/s13399-024-06010-5.
- [28]. Global CCS Institute, “The Global Status of CCS Report,” 2023.
- [29]. B. Dziejarski, R. Krzyżyńska, and K. Andersson, “Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment,” Jun. 15, 2023, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.fuel.2023.127776.
- [30]. A. Gulzar, A. Gulzar, M. B. Ansari, F. He, S. Gai, and P. Yang, “Carbon dioxide





- porous structure and their performance,” *Renew Energy*, vol. 212, pp. 887–896, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.05.119.
- [44]. B. Qiu, N. Deng, Y. Zhang, and H. Wan, “Application of industrial solid wastes in catalytic pyrolysis,” Jan. 01, 2018, John Wiley and Sons Ltd. doi: 10.1002/apj.2150.
- [45]. S. Kreuznacht et al., “Comparison of the performance of a microwave plasma torch and a gliding arc plasma for hydrogen production via methane pyrolysis,” *Plasma Processes and Polymers*, vol. 20, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.1002/ppap.202200132.
- [46]. T. Li, C. Rehmet, Y. Cheng, Y. Jin, and Y. Cheng, “Experimental Comparison of Methane Pyrolysis in Thermal Plasma,” *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 37, no. 4, pp. 1033–1049, Jul. 2017, doi: 10.1007/s11090-017-9806-x.
- [47]. S. Kreuznacht, M. Böke, and A. von Keudell, “Space-resolved gas temperature of a microwave plasma torch used for hydrogen production via methane pyrolysis,” *Plasma Processes and Polymers*, 2024, doi: 10.1002/ppap.202400089.
- [48]. M. Liu et al., “Optimized Process for Melt Pyrolysis of Methane to Produce Hydrogen and Carbon Black over Ni Foam/NaCl-KCl Catalyst,” *Processes*, vol. 11, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/pr11020360.
- [49]. K. Zeng, D. Gauthier, J. Soria, G. Mazza, and G. Flamant, “Solar pyrolysis of carbonaceous feedstocks: A review,” *Solar Energy*, vol. 156, pp. 73–92, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.05.033.
- [50]. J. Zeaiter, F. Azizi, M. Lameh, D. Milani, H. Y. Ismail, and A. Abbas, “Waste tire pyrolysis using thermal solar energy: An integrated approach,” *Renew Energy*, vol. 10.2118/220018-MS.
- [37]. V. Novotny, “Blue hydrogen can be a source of green energy in the period of decarbonization,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 20, pp. 7202–7218, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.095.
- [38]. D. Bigestans, M. A. Cardin, and N. Kazantzis, “Economic performance evaluation of flexible centralised and decentralised blue hydrogen production systems design under uncertainty,” *Appl Energy*, vol. 352, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121944.
- [39]. H. Dai and R. S. Besser, “Fluidization analysis for catalytic decomposition of methane over carbon blacks for solar hydrogen production,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 79, pp. 39079–39094, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.09.150.
- [40]. B. Parkinson, P. Balcombe, J. F. Speirs, A. D. Hawkes, and K. Hellgardt, “Levelized cost of CO<sub>2</sub> mitigation from hydrogen production routes,” *Energy Environ Sci*, vol. 12, no. 1, pp. 19–40, Jan. 2019, doi: 10.1039/c8ee02079e.
- [41]. M. Gholizadeh and X. Hu, “Progress in understanding the coking behavior of typical catalysts in the catalytic pyrolysis of biomass,” Apr. 14, 2022, Royal Society of Chemistry. doi: 10.1039/d2se00168c.
- [42]. N. Zhou et al., “A structured catalyst of ZSM-5/SiC foam for chemical recycling of waste plastics via catalytic pyrolysis,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 440, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.cej.2022.135836.
- [43]. X. Wang et al., “Catalytic pyrolysis of microalgal lipids to liquid biofuels: Metal oxide doped catalysts with hierarchically

- hybrid approach to pink and turquoise hydrogen production via oxy-fuel combustion,” *Energy Convers Manag*, vol. 314, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.118704.
- [58]. G. H. Patel, J. Havukainen, M. Horttanainen, R. Soukka, and M. Tuomaala, “Climate change performance of hydrogen production based on life cycle assessment,” *Green Chemistry*, vol. 26, no. 2, pp. 992–1006, Jan. 2024, doi: 10.1039/d3gc02410e.
- [59]. D. A. Tetteh and S. Salehi, “The Blue Hydrogen Economy: A Promising Option for the Near-to- Mid-Term Energy Transition,” *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, vol. 145, no. 4, Apr. 2023, doi: 10.1115/1.4055205.
- [60]. S. Yun, J. Lee, H. Cho, and J. Kim, “Oxy-fuel combustion-based blue hydrogen production with the integration of water electrolysis,” *Energy Convers Manag*, vol. 291, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117275.
- [61]. D. K. Park, J. H. Kim, H. S. Kim, J. H. Kim, and J. H. Ryu, “Possibility Study in CO<sub>2</sub> Free Hydrogen Production Using Dodecane (C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>) from Plasma Reaction,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 4, Feb. 2023, doi: 10.3390/en16041589.
- [62]. Q. Hassan, A. Z. Sameen, H. M. Salman, M. Jaszczur, and A. K. Al-Jiboory, “Hydrogen energy future: Advancements in storage technologies and implications for sustainability,” *J Energy Storage*, vol. 72, p. 108404, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.EST.2023.108404.
- [63]. H. Alhamed et al., “From methane to hydrogen: A comprehensive review to assess the efficiency and potential of turquoise hydrogen technologies,” May 28, 2024, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.123, pp. 44–51, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.02.030.
- [51]. M. U. H. Joardder, P. K. Halder, M. A. Rahim, and M. H. Masud, “Solar pyrolysis: Converting waste into asset using solar energy,” in *Clean Energy for Sustainable Development: Comparisons and Contrasts of New Approaches*, Elsevier Inc., 2017, pp. 213–235. doi: 10.1016/B978-0-12-805423-9.00008-9.
- [52]. J. Yang et al., “Insight into the pyrolysis behavior of polyvinyl chloride using in situ pyrolysis time-of-flight mass spectrometry: Aromatization mechanism and Cl evolution,” *Fuel*, vol. 331, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125994.
- [53]. Y. Ren et al., “Evolution and speciation transformation of chlorine during automobile shredder residue pyrolysis,” *Waste Management*, vol. 174, pp. 320–327, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.wasman.2023.12.008.
- [54]. P. Gao et al., “Migration characteristics of chlorine during pyrolysis of municipal solid waste pellets,” *Waste Management*, vol. 172, pp. 208–215, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.wasman.2023.10.037.
- [55]. L. Ye, T. Li, and L. Hong, “Understanding enhanced char formation in the thermal decomposition of PVC resin: Role of intermolecular chlorine loss,” *Mater Today Commun*, vol. 26, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.102186.
- [56]. J. Diab, L. Fulcheri, V. Hessel, V. Rohani, and M. Frenklach, “Why turquoise hydrogen will Be a game changer for the energy transition,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 61, pp. 25831–25848, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.05.299.
- [57]. D. Kim, M. Shin, and J. Park, “A novel



- [72]. NBIC, "ISTE To Develop Eco-friendly Hydrogen with British Company," 2023.
- [73]. S. R. Patlolla, K. Katsu, A. Sharafian, K. Wei, O. E. Herrera, and W. Mérida, "A review of methane pyrolysis technologies for hydrogen production," Jul. 01, 2023, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2023.113323.
- [74]. M. Shokrollahi, N. Teymouri, O. Ashrafi, P. Navarri, and Y. Khojasteh-Salkuyeh, "Methane pyrolysis as a potential game changer for hydrogen economy: Techno-economic assessment and GHG emissions," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 66, pp. 337–353, May 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.04.056.
- [75]. A. Abánades-Velasco and Á. Martínez-Rodríguez, "CHALLENGES FOR THE DEVELOPMENT OF NUMERICAL MODELS FOR METHANE PYROLYSIS WITH LIQUID METAL REACTORS," *Dyna (Spain)*, vol. 98, no. 4, pp. 413–419, Jul. 2023, doi: 10.6036/10880.
- [64]. W. Antweiler and D. Schlund, "The Emerging International Trade in Hydrogen and the Role of Environmental, Innovation, and Trade Policies," *SSRN Electronic Journal*, 2023, doi: 10.2139/ssrn.4417163.
- [65]. W. Antweiler and D. Schlund, "The emerging international trade in hydrogen: Environmental policies, innovation, and trade dynamics," *J Environ Econ Manage*, vol. 127, p. 103035, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.JEEM.2024.103035.
- [66]. C. Lee, "Korea's Hyundai Heavy, Aramco sign blue hydrogen cooperation project." [Online]. Available: <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/natural-gas/030421-s-koreas-hyundai-heavy-aramco-sign-blue-hydrogen->
- [67]. M. Martin and S. El Wardany, "Saudi Arabia to Use \$110 Billion Gas Field for Blue Hydrogen 'We are biggest adventurers' on blue hydrogen: energy minister," 2021. [Online]. Available: [https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-10-24/saudi-arabia-to-use-110-billion-gas-project-for-blue-hydrogen?utm\\_source=chatgpt.com&leadSo](https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-10-24/saudi-arabia-to-use-110-billion-gas-project-for-blue-hydrogen?utm_source=chatgpt.com&leadSo)
- [68]. ACWA Power, "ACWA Power, OQ, and Air Products Sign Joint Development Agreement Toward World-Scale Green Hydrogen-Based Ammonia Production Facility in Oman."
- [69]. ADNOC, "ADNOC to Build World-Scale Blue Ammonia Project," 2021.
- [70]. Masdar, "Masdar and ENGIE sign collaboration agreement with Fertigllobe to co-develop green hydrogen."
- [71]. Pure Hydrogen, "Turquoise Hydrogen."

## Comparison of Blue and Turquoise Hydrogen Production Processes and their Future Prospects in Iran

Sobhan Herfat<sup>1</sup>, Milad Pirhadi<sup>2</sup>, Majid Chegeni<sup>3</sup>, Majid Zandi<sup>4\*</sup>

1. Ph.D. Student, Renewable Energy Department, Energy Research Center, Faculty of Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. M.Sc. Student, Renewable Energy Department, Energy Research Center, Faculty of Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
3. National Iranian Gas Company, Tehran, Iran
4. Associate Professor, Renewable Energy Department, Energy Research Center, Faculty of Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

#### Article History:

Received: 25 January 2025

Revised: 30 April 2025

Accepted: 20 May 2025

#### Keywords:

Blue hydrogen

Turquoise hydrogen

Steam methane reforming (SMR)

Carbon capture utilization and storage (CCUS)

### ABSTRACT

Hydrogen, as a light and abundant element, plays a key role in the development of clean energy and holds significant potential for replacing fossil fuels to reduce greenhouse gas emissions. This study aims to evaluate and compare blue and turquoise hydrogen as two primary options for low-carbon hydrogen production and to assess their potential in mitigating environmental impacts. Blue hydrogen production methods, including hydrogen generation from methane and steam combined with carbon capture, utilization, and storage (CCUS) units, and turquoise hydrogen production through methane pyrolysis and solid carbon generation, were examined. A comparative analysis of costs, efficiencies, and environmental challenges of both types of hydrogen was conducted. The findings indicate that turquoise hydrogen, through the production of solid carbon instead of greenhouse gases, represents a more sustainable and environmentally favorable option. Based on some data, for every kilogram of hydrogen produced, between 12 and 13.5 kilograms of greenhouse gases are released, whereas turquoise hydrogen production via methane pyrolysis results in zero direct carbon dioxide emissions. Moreover, the energy consumption for turquoise hydrogen production has been reported to be up to 30% lower than that of conventional blue hydrogen production methods, highlighting its advantage in terms of energy efficiency. In Iran, transitioning away from fossil fuel dependency toward blue and turquoise hydrogen production requires the development of infrastructure, advanced technologies, and comprehensive policymaking. This effort necessitates leveraging existing resources, fostering indigenous knowledge, and encouraging new investments. The present study emphasizes the importance of advancing technologies related to blue and turquoise hydrogen production and highlights the need for equipping and upgrading facilities to optimize the utilization of these clean energy resources.

DOR: [20.1001.1.25011084.1404.02.30](https://doi.org/10.1001.1.25011084.1404.02.30)

#### How to cite this article

S. Herfat, M. Pirhadi, M. Chegeni, M. Zandi, Comparison of Blue and Turquoise Hydrogen Production Processes and their Future Prospects in Iran. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025; 12(1): 70 -90. ([https://www.ijge.irangi.org/article\\_725916.html](https://www.ijge.irangi.org/article_725916.html))

\* Corresponding Author.

E-mail address: [m\\_zandi@sbu.ac.ir](mailto:m_zandi@sbu.ac.ir), (M. Zandi).

Available online 22 Jun 2025

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



# مروری بر ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در ساختارهای زیرزمینی: پیشرفت‌ها، چالش‌ها و چشم‌اندازها

حسین حیدری<sup>۱</sup>، مهدی رضوی فر<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲. استادیار، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکانبات: [m.razavifar@tabrizu.ac.ir](mailto:m.razavifar@tabrizu.ac.ir)

مقاله‌ی مروری

صفحه ۹۱ - ۱۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۸

## چکیده

آب و هوای زمین تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار گرفته است که شامل سوزاندن سوخت‌های فسیلی و نابودی جنگل‌ها می‌شود. این فعالیت‌ها باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسید کربن (CO<sub>2</sub>) شده‌اند. سوخت‌های فسیلی، از ترکیباتی تشکیل شده‌اند که میلیون‌ها سال پیش از جو زمین جذب شده‌اند. سوزاندن این سوخت‌های فسیلی بیش از ۷۵ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای در سراسر جهان و تقریباً ۹۰ درصد از انتشار کلی CO<sub>2</sub> را تشکیل می‌دهند. علاوه بر این، بر اساس آمار ارائه شده در سال ۲۰۲۴، انتشار سالانه CO<sub>2</sub> ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی به ۳۷/۴ میلیارد تن رسیده است. به همین دلیل، جذب و ذخیره کربن به‌عنوان یک استراتژی مهم برای کاهش انتشار CO<sub>2</sub> در جو زمین مطرح شده است. در همین راستا، این مقاله به بررسی روش‌های مختلف ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در ساختارهای زیرزمینی، از جمله سفره‌های آب زیرزمینی، مخازن نفت و گاز تخلیه‌شده، لایه‌های زغال‌سنگ غیرقابل استخراج و سازندهای بازالتی می‌پردازد. پایداری ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> و ساز و کارهای مختلف به دام انداختن آن از موضوعات اصلی این پژوهش هستند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که فناوری ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در حال تبدیل شدن به یک روش مفید و کارآمد است. در این مقاله، چشم‌اندازها و فرصت‌های اقتصادی ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> بررسی و بر پتانسیل کاربردی آن در مقابله با تغییرات آب و هوایی تأکید شده است. با توجه به اینکه بسیاری از کشورها علاقه‌مند به توسعه زیرساخت‌ها در این حوزه هستند؛ در این مقاله راه‌حلی برای محققان، سیاستمداران و فعالان صنعتی ارائه شده‌اند که می‌توانند بستری برای توسعه فناوری‌های ذخیره گاز فراهم کنند.

کلیدواژه‌ها: کربن دی‌اکسید، ذخیره‌سازی گاز، گازهای گلخانه‌ای، آلودگی محیط‌زیست، گرمای زمین

## ۱. مقدمه

به‌منظور مقابله با تغییرات آب و هوایی، کاهش چشمگیر انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) ضروری است، به‌ویژه انتشار دی‌اکسید کربن که عامل اصلی گرمایش جهانی محسوب می‌شود. گازهای گلخانه‌ای ناشی از سوزاندن هیدروکربن‌ها، عمدتاً شامل CO<sub>2</sub> هستند و مقادیر کمتری از متان (CH<sub>4</sub>) و اکسید نیتروژن (N<sub>2</sub>O) نیز در آن‌ها وجود دارد. انتشار گازهای

1. Greenhouse Gases





گلخانه‌ای را می‌توان بر اساس منبع آن‌ها در سه دسته اصلی طبقه‌بندی کرد؛ که عبارتند از: [۱].

۱) انتشار مستقیم: که مستقیماً از فعالیت‌های تولید هیدروکربن‌ها از جمله نفت خام نشأت می‌گیرد، مانند احتراق سوخت در حین استخراج، پالایش و حمل‌ونقل، انتشار ناشی از فرآوری نفت خام به محصولات مختلف و انتشار گازهایی که به‌طور غیرعمدی از تجهیزات در طول تعمیر و نگهداری، نشت می‌کنند [۲].

۲) انتشار غیرمستقیم: که در فرآیند تأمین برق موردنیاز در عملیات تولید نفت ایجاد می‌شود، به‌ویژه از نیروگاه‌هایی که برق تأسیسات نفتی را تأمین می‌کنند [۳].

۳) سایر انتشارهای غیرمستقیم: که شامل فعالیت‌هایی هستند که به تولیدکنندگان هیدروکربن مرتبط هستند اما مستقیماً توسط آن‌ها کنترل نمی‌شوند. این موارد شامل انتشار ناشی از استفاده از محصولات نفتی توسط مصرف‌کنندگان و حمل‌ونقل می‌شوند [۴].

نظارت و مدیریت جداگانه در این دسته‌بندی‌ها کمک می‌کند تا تأثیرات زیست‌محیطی تولید هیدروکربن‌ها کاهش یافته و فرصت‌های بالقوه برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شناسایی شوند [۳].

بهبود بهره‌وری انرژی و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر نقش اساسی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه CO<sub>2</sub> دارند، اما این راهکارها به‌تنهایی کافی نیستند، زیرا وابستگی جهانی به سوخت‌های فسیلی همچنان زیاد است. یک استراتژی جایگزین برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، شامل جذب، استفاده و ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن در محل انتشار است. به‌طور خاص، فناوری‌های جذب، استفاده و ذخیره‌سازی کربن مورد تأیید نهادهای علمی از جمله هیئت بین‌المللی تغییرات آب و هوایی و آژانس بین‌المللی انرژی قرار گرفته‌اند [۵، ۶].

ترکیب عملیات ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> و ازدیاد برداشت نفت<sup>۱</sup> (EOR) هم‌زمان دو مزیت کلیدی دارد: کاهش انتشار CO<sub>2</sub> در جو زمین و بهبود بازده تولید نفت. همچنین از لحاظ اقتصادی نیز، زیرساخت‌های موجود در مخازن نفت و گاز مانند تجهیزات سرچاهی و درون‌چاهی، سکوهای حفاری و خطوط لوله انتقال سیال،

می‌توانند هزینه‌های اجرای این عملیات را کاهش دهند. مخازن هیدروکربنی معمولاً دارای تله‌های زمین‌شناسی تثبیت‌شده‌ای هستند که برای مدت طولانی، هیدروکربن‌ها را در خود نگه‌داشته‌اند. ظرفیت اثبات‌شده آن‌ها برای تزریق سیالات، امکان ذخیره‌سازی لایه‌ای گاز در آن‌ها و همچنین، ابزارهای موجود برای پایش عملیات، آن‌ها را به گزینه‌های ایده‌آلی برای ذخیره‌سازی دائمی CO<sub>2</sub> تبدیل کرده است [۷]. مکان‌های مناسب برای ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> شامل سفره‌های آب شور عمیق، مخازن هیدروکربنی تخلیه‌شده، سازندهای بازالتی، هیدرات‌ها و لایه‌های زغال‌سنگ غیرقابل استخراج هستند. این مکان‌ها می‌توانند سیالات را در بازه‌های زمانی طولانی به دام انداخته و در نتیجه، راه‌حلی مطمئن و بلندمدت را برای ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> ارائه دهند [۸]. در همین راستا، ذخیره‌سازی مؤثر CO<sub>2</sub> نیازمند ارزیابی دقیق ظرفیت ذخیره‌سازی، قابلیت تزریق و توانایی نگهداری محل ذخیره‌سازی است تا اطمینان حاصل شود که CO<sub>2</sub> به‌صورت ایمن و دائمی ذخیره می‌شود.

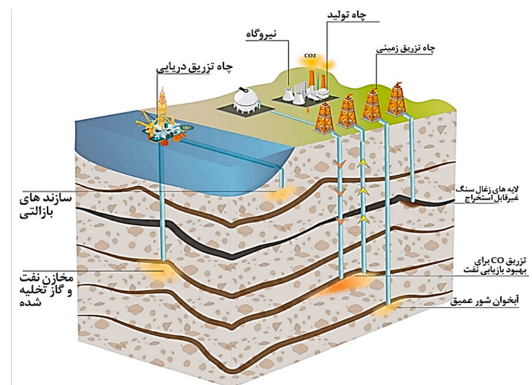
این تحقیق، مروری جامع بر فرآیند ذخیره‌سازی زیرزمینی CO<sub>2</sub> ارائه می‌دهد و به‌طور ویژه بر اصول بنیادی، عوامل مؤثر در بهبود راندمان عملیات و پیشرفت‌های آن تمرکز دارد. همچنین، تأکید بر روش‌های پایدار و ساز و کارهای مؤثر در به دام انداختن CO<sub>2</sub> در ساختارهای زیرزمینی از اهداف اصلی این پژوهش هستند. در همین راستا، با بررسی دقیق نتایج آزمایشگاهی، مدل‌سازی‌های انجام شده و پروژه‌های میدانی، این مقاله تلاش می‌کند تا جنبه‌های عملی مدیریت بهینه این فرآیند و مزایای اقتصادی آن را ارائه کند. همچنین، درباره کاربرد استفاده از هوش مصنوعی در پروژه‌های ذخیره‌سازی گاز نیز اطلاعاتی ارائه شده است و در نهایت به بررسی پتانسیل کشور ایران در این زمینه پرداخته شده است.

## ۲. مکان‌های مناسب برای ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در ساختارهای زیرزمینی

ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در ساختارهای زیرزمینی، شامل جذب CO<sub>2</sub> از منابع تولید آن و سپس ذخیره‌سازی طولانی‌مدت آن برای جلوگیری از انتشار آن در جو زمین است. ذخیره‌سازی

1. Enhanced Oil Recovery (EOR)

گاز در مکان‌های مختلفی امکان‌پذیر است که می‌توان آن‌ها را در سه دسته کلی ذخیره‌سازی در خشکی، مناطق دریایی و اقیانوسی تقسیم‌بندی کرد، شماتیکی از این مکان‌ها در (شکل ۱) ارائه شده‌اند [۹].



شکل ۱: شماتیکی از مکان‌های زیرزمینی ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub>

در فرآیند معمول ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub>، گازهای خروجی از صنایع و نیروگاه‌ها جمع‌آوری شده و به مایع تبدیل می‌شوند. سپس در یک ساختار زیرزمینی بسته، مانند سفره‌های زیرزمینی آب شور، مخازن نفت و گاز تخلیه‌شده یا لایه‌های زغال سنگ غیرقابل استخراج، تزریق می‌شوند. هدف از این فرآیند جلوگیری از ورود مجدد CO<sub>2</sub> به جو زمین است [۱۰، ۱۱]. با اینکه این روش، مؤثرترین راهکار برای جذب و ذخیره CO<sub>2</sub> شناخته می‌شود، اما چالش‌هایی را نیز به همراه دارد؛ زیرا تزریق حجم زیادی از CO<sub>2</sub> تحت فشار به اعماق زمین، ممکن است تعادل مکانیکی مخزن را برهم بزند؛ بنابراین، انتخاب روش مناسب برای تزریق و ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> از اهمیت بالایی برخوردار است. پایداری بلندمدت CO<sub>2</sub> تزریق شده، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در طراحی سیستم‌های ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> است و نقشی کلیدی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد؛ زیرا هدف اصلی از ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در ساختارهای زیرزمینی، جلوگیری از انتشار آن به جو و کاهش اثرات زیست‌محیطی آن است. پایداری این عملیات نیز به برهم‌کنش بین CO<sub>2</sub> و مخزن ذخیره‌سازی مربوط می‌شود. عوامل دیگر مؤثر در این عملیات عبارتند از: خواص سنگ مخزن، توزیع سیالات در محیط متخلخل و شرایط دما و فشار مخزن. در ادامه، گزینه‌های مناسب برای ذخیره‌سازی زیرزمینی CO<sub>2</sub> به تفصیل بررسی شده‌اند [۱۰].

## ۲-۱. سفره‌های آب شور

سفره‌های آب شور، دارای سنگ‌های مخزن متخلخل و نفوذپذیر از جنس ماسه‌سنگ و یا سنگ کربناته هستند. این سفره‌ها معمولاً در اعماقی پایین‌تر از سفره‌های آب شیرین قرار دارند. به همین دلیل یکی از روش‌های امیدوارکننده برای ذخیره‌سازی بلندمدت CO<sub>2</sub> در ساختارهای زیرزمینی، تزریق CO<sub>2</sub> در سفره‌های آب شور است. این سفره‌ها دارای ویژگی‌های زمین‌شناسی شناخته شده و پراکندگی گسترده‌ای هستند [۱۲]. یکی از مزایای ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در سفره‌های آب شور، وقوع واکنش‌های شیمیایی پس از تزریق است. با گذشت زمان، CO<sub>2</sub> تزریق شده با آب و سنگ‌های اطراف خود واکنش داده و کانی‌های پایدار را تشکیل می‌دهد. این کانی‌سازی، منجر به ذخیره‌سازی طولانی‌مدت و پایدار گاز می‌شود. در این مکان‌ها، لایه‌های سنگی نفوذناپذیر و پوشاننده به نام پوش سنگ نیز به‌عنوان یک مانع طبیعی عمل می‌کنند که از مهاجرت CO<sub>2</sub> به سمت بالا جلوگیری کرده و منجر به مهار آن در داخل سفره آب می‌شود [۱۳، ۱۴].

معمولاً سفره‌های آب شور مناسب برای ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در اعماق ۸۰۰ تا ۳۰۰۰ متری سطح زمین قرار دارند [۱۵]. این عمق سفره‌های آب شور باعث می‌شود که CO<sub>2</sub> تزریق شده در وضعیت فوق بحرانی باقی بماند؛ در این وضعیت، CO<sub>2</sub> چگالی بیشتری نسبت به گاز دارد اما از مایع سبک‌تر است که این ویژگی باعث افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و کاهش خطر نشت CO<sub>2</sub> می‌شود [۱۶]. یکی از اولین سفره‌های آب شور در جهان که به‌عنوان محل ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> مورد استفاده قرار گرفت، میدان Sleipner در دریای شمال بود، جایی که CO<sub>2</sub> در سازند ماسه‌سنگی Utsira تزریق شد [۱۷].

پروئس و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۳) گزارش کردند که ظرفیت ذخیره‌سازی بلندمدت CO<sub>2</sub> در سفره‌های آب شور حدود ۳۰ کیلوگرم در مترمکعب است که معادل ۲۰ تا ۵۰ درصد از میزان انتشار CO<sub>2</sub> پیش‌بینی شده تا سال ۲۰۵۰ است [۱۸]. همچنین، دیویدسون و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۳) تخمین زدند که سفره‌های آب شور توانایی ذخیره CO<sub>2</sub> تا ۱۰،۰۰۰ گیگاتن را دارند [۱۷]. در همین راستا، شماتیکی از ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در سفره‌های آب شور در (شکل ۲) ارائه شده است.

1. Pruess et al., 2003

2. Davidson et al., 2003



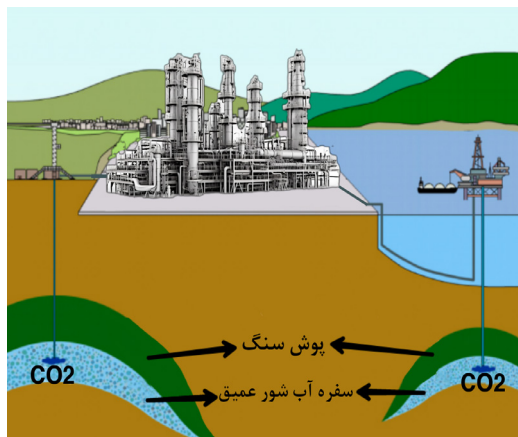
### ۲-۳. لایه‌های زغال سنگ غیرقابل استخراج

لایه‌های زغال سنگ غیرقابل استخراج، به‌ویژه آن‌هایی که عمیق و برای استخراج نامناسب هستند، به‌عنوان یکی از گزینه‌های ایده‌آل برای ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> محسوب می‌شوند. ساز و کارهای ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در این لایه‌ها متفاوت از مخازن تخلیه‌شده نفت و گاز یا سفره‌های آب شور است؛ چون CO<sub>2</sub> به‌جای پر کردن فضاهای متخلخل، به‌صورت لایه نازکی روی سطح زغال سنگ جذب می‌شود [۲۲]. به‌عنوان مثال ظرفیت ذخیره‌سازی لایه‌های عمیق زغال سنگی در آلبرتا کانادا، حدود ۲۰ گیگاتن برآورد شده است [۲۳]، درحالی‌که هم‌اکنون و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) گزارش داده‌اند که حدود ۸ گیگاتن CO<sub>2</sub> را می‌توان در لایه‌های زغال سنگی در هلند ذخیره کرد [۲۴]. البته، ظرفیت نهایی ذخیره‌سازی در این مکان‌ها به عواملی مانند کیفیت زغال سنگ، عمق، فشار، ضخامت و سطح موجود برای جذب CO<sub>2</sub> بستگی دارد [۲۵]. با این حال، نفوذپذیری کم لایه‌های زغال سنگی می‌تواند فرآیند تزریق CO<sub>2</sub> را با چالش همراه کند. علاوه بر این، ردیابی حرکت CO<sub>2</sub> در این لایه‌ها نسبت به سایر ساختارهای زمین‌شناسی دشوارتر است [۲۶].

زغال سنگ به‌طور طبیعی حاوی متان جذب شده است. هنگام تزریق CO<sub>2</sub> به لایه‌های زغال سنگی، این گاز برای جذب در سطح زغال سنگ با متان رقابت می‌کند، اما CO<sub>2</sub> تمایل بیشتری نسبت به متان برای جذب روی سطح زغال سنگ دارد. در نتیجه، متان آزاد و سپس استخراج می‌شود که این فرآیند به بازیافت متان با تزریق CO<sub>2</sub> در لایه زغال سنگ معروف است. این فرآیند یک فناوری نوظهور محسوب می‌شود که نه تنها امکان ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> را در لایه‌های زغال سنگی غیرقابل استخراج فراهم می‌کند، بلکه استخراج متان را نیز بهینه‌سازی کرده و پتانسیل سودآوری این فرآیند را افزایش می‌دهد [۲۲].

### ۲-۴. سازندهای بازالتی

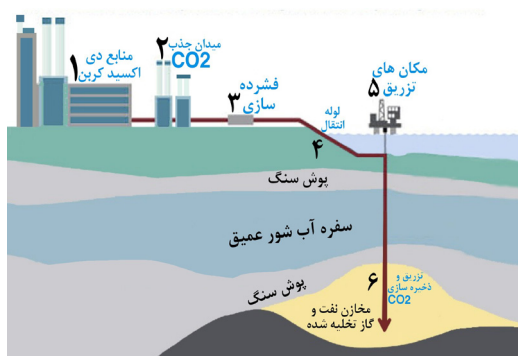
بازالت نوعی سنگ آذرین است که از انجماد گدازه‌های مذاب تشکیل می‌شود. سازندهای بزرگ بازالتی به دلیل ترکیب کانی‌شناسی خاص خود و توانایی واکنش با CO<sub>2</sub>، گزینه‌ای جذاب برای ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> محسوب می‌شوند



شکل ۲: شماتیکی از ذخیره‌سازی زیرزمینی CO<sub>2</sub> در سفره‌های آب شور

### ۲-۲. مخازن نفت و گاز تخلیه شده

مخازن نفت و گاز تخلیه‌شده، ساختارهای زیرزمینی هستند که قبلاً مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. این مخازن به‌خوبی مطالعه شده و داده‌های دقیقی از ویژگی‌های سنگ مخزن، پوش سنگ و گسل‌های آن‌ها در دست است؛ بنابراین، می‌توان CO<sub>2</sub> را پس از پایان استخراج نفت در آن‌ها ذخیره یا در فرآیند ازدیاد برداشت نفت استفاده کرد. به دلیل شناخت زمین‌شناسی دقیق و اثبات توان نگهداری سیال در بلندمدت، این مخازن گزینه‌ای مناسب برای ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> محسوب می‌شوند [۱۳، ۲۰]. علاوه بر این، تزریق CO<sub>2</sub> می‌تواند به استخراج نفت باقی‌مانده در مخزن کمک کند و از سوی دیگر، میدان‌های نفت و گاز تخلیه‌شده معمولاً دارای زیرساخت‌هایی مانند چاه‌ها، خطوط لوله و تأسیسات فرآوری هستند که هزینه و زمان لازم برای تبدیل این مکان‌ها به مخازن ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> را کاهش می‌دهند [۲۱]. شماتیکی از این مکان در (شکل ۳) ارائه شده است.



شکل ۳: شماتیکی از ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در مخازن نفت و گاز تخلیه شده

1. Hamelinck et al., 2006

[۲۷]. ساز و کار اصلی ذخیره‌سازی در این سازندها، کربناته شدن مواد معدنی است. در این فرآیند،  $CO_2$  تزریق شده به بازالت با عناصر کلسیم، منیزیم و آهن واکنش داده و به مواد معدنی پایدارمانند کلسیت، مگنیزیت و سیدریت تبدیل می‌شود. در نتیجه،  $CO_2$  از حالت گازی به یک ماده معدنی جامد تبدیل شده و ذخیره‌سازی دائمی و ایمن آن تضمین می‌شود [۲۸]. به دلیل پایداری بالای این فرآیند، ذخیره‌سازی از طریق کربناته شدن در سال‌های اخیر مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. مواد معدنی حاصل از این واکنش‌ها از نظر زیست‌محیطی بی‌خطر بوده و می‌توانند برای هزاران سال بدون نشست نگهداری شوند [۲۹]. با این حال، سرعت واکنش طبیعی بین  $CO_2$  و کانی‌های سیلیکاتی آهسته است و نیاز به پیش تصفیه مواد معدنی، افزایش دما یا افزودن کاتالیزورها برای تسریع واکنش دارد. انرژی و هزینه مورد نیاز برای پیش تصفیه مواد معدنی و افزایش سرعت واکنش نیز می‌تواند بسیار زیاد باشد؛ بنابراین، تلاش‌هایی برای کاهش مصرف انرژی و افزایش سرعت واکنش در حال انجام است. به‌عنوان مثال، برخی از فناوری‌ها استفاده از گرمای اتلاف شده فرآیندهای صنعتی را پیشنهاد می‌کنند و پروژه‌های آزمایشی در سراسر جهان برای نشان دادن امکان‌سنجی این روش در حال انجام هستند [۳۰].

## ۲-۵. ذخیره‌سازی $CO_2$ به صورت هیدرات گازی

در روش ذخیره‌سازی  $CO_2$  به صورت هیدرات، گاز  $CO_2$  در شرایط خاصی از دما و فشار با آب در یک محیط زیرزمینی واکنش داده و ترکیبی جامد و بلوری تشکیل می‌دهد. این ساختار بلوری شبیه به یخ است و در آن، مولکول‌های  $CO_2$  درون قفسه‌ای از مولکول‌های آب به دام می‌افتند [۳۱، ۳۲].

هیدرات  $CO_2$  در شرایط فشار و دمای موجود در رسوبات عمیق اقیانوسی یا مناطق منجمد پایدار است. مولکول‌های  $CO_2$  توسط مولکول‌های آب از نظر فیزیکی به دام افتاده‌اند. ظرفیت ذخیره‌سازی  $CO_2$  به عوامل مختلفی از جمله شرایط خاص زیرزمینی و خواص تشکیل هیدرات بستگی دارد. با این حال، به دلیل مترکم بودن هیدرات  $CO_2$ ، میزان  $CO_2$  که می‌تواند در یک حجم هیدرات معین ذخیره شود به‌طور قابل توجهی بیشتر از حفظ  $CO_2$  در حالت گازی یا فوق بحرانی است [۳۳]. علاوه بر این، از  $CO_2$  هیدرات می‌توان برای بازیافت گازهای طبیعی نیز استفاده کرد. در این فرآیند،

$CO_2$  جایگزین متان در هیدرات‌های گاز طبیعی شده و متان آزاد شده را می‌توان جمع‌آوری و استفاده کرد [۳۲].

برای ذخیره‌سازی طولانی مدت و ایمن  $CO_2$  در ساختارهای زمین‌شناسی، رعایت معیارهایی مانند ایمنی، پایداری و کاهش آثار زیست‌محیطی ضروری است. به‌طور خاص، ساختارهای زیرزمینی مورد استفاده برای ذخیره‌سازی  $CO_2$  باید تخلخل بالایی برای ذخیره حداکثری  $CO_2$  داشته باشد. علاوه بر این، سنگ باید نفوذپذیری (تراوایی) بالایی برای حرکت و پیشروی  $CO_2$  در محیط متخلخل داشته باشد. این ویژگی‌ها، اغلب در حوضه‌های رسوبی یافت می‌شوند [۹، ۳۴]. یکی دیگر از عناصر ضروری مورد نیاز برای ذخیره موفقیت‌آمیز  $CO_2$ ، وجود شیل با نفوذپذیری کم مانند لایه‌های نمک و انیدریت (که اغلب در صنعت نفت به‌عنوان پوش سنگ نامیده می‌شود) در بالای سازند ذخیره‌سازی است که به‌عنوان مانع فیزیکی اولیه عمل می‌کند و از مهاجرت  $CO_2$  به آب‌های زیرزمینی آشامیدنی کم‌عمق یا به سطح زمین جلوگیری می‌کند [۳۴]. علاوه بر این، پوش سنگ باید نفوذپذیری کم خود را در طول زمان حفظ کند و در برابر واکنش‌های شیمیایی بالقوه با  $CO_2$ ، تنش‌های مکانیکی ناشی از  $CO_2$  تزریق شده و فعالیت‌های تکتونیکی مقاومت کند [۳۵، ۳۶].

عمق سازند نیز نقش مهمی در تضمین ایمنی و پایداری ذخیره‌سازی  $CO_2$  دارد. برای اینکه  $CO_2$  در یک فاز مترکم (به‌عنوان مثال، فوق بحرانی یا مایع) باقی بماند، مخزن معمولاً باید در اعماق بیش از ۸۰۰ متری قرار داشته باشد. در این شرایط،  $CO_2$  دارای چگالی بالاتری است و فضای کمتری را اشغال می‌کند [۳۵، ۳۷]. ذخیره  $CO_2$  در سطوح عمیق‌تر همچنین به نگرداشتن آن در زیر سفره‌های آب شیرین کمک می‌کند و خطرات آلودگی سفره آب و نشست  $CO_2$  را نیز کاهش می‌دهد [۳۴].

انتخاب یک مکان مناسب برای ذخیره  $CO_2$  که فاقد گسل یا شکستگی باشد برای حفظ طولانی مدت  $CO_2$  بسیار مهم است. گسل‌ها یا شکستگی‌های قابل توجه ممکن است به‌عنوان مسیری برای فرار  $CO_2$  به سطح زمین یا آلوده کردن سفره‌های زیرزمینی آشامیدنی عمل کنند [۳۸]. تزریق  $CO_2$  به یک ساختار زیرزمینی، فشار داخلی را افزایش می‌دهد که ممکن است گسل‌های موجود در محل را فعال کرده و منجر به عدم یکپارچگی محل ذخیره‌سازی شود [۳۹]؛ بنابراین،





مدیریت فشار هنگام تزریق  $CO_2$  برای ذخیره‌سازی ایمن و دائمی بسیار مهم است [۴۰]. واکنش‌پذیری ژئوشیمیایی مکان مورد نظر نیز بر موفقیت و ایمنی ذخیره‌سازی  $CO_2$  تأثیر می‌گذارد. به‌طور خاص، ساختارهای زیرزمینی که می‌توانند با  $CO_2$  واکنش داده و مواد معدنی پایدار را تشکیل دهند، کارایی و امنیت ذخیره‌سازی  $CO_2$  را بهبود می‌بخشند [۱۶].

### ۳. ساز و کارهای به دام انداختن $CO_2$ در ساختارهای زیرزمینی

در ادامه بررسی انواع مکان‌های مناسب برای ذخیره‌سازی  $CO_2$ ، در این فصل به بررسی سازوکارهای علمی و فنی می‌پردازیم که موجب تثبیت و نگه‌داری  $CO_2$  در این ساختارهای زیرزمینی می‌شوند. اگرچه انتخاب محل مناسب برای ذخیره‌سازی، گام مهمی در فرآیند جذب و مهار  $CO_2$  است، اما صرف وجود یک ساختار زیرزمینی کافی نیست. پایداری و ایمنی بلندمدت ذخیره‌سازی  $CO_2$  به عملکرد سازوکارهای مختلفی وابسته است که درون این ساختارها فعال می‌شوند و از فرار یا نشت گاز جلوگیری می‌کنند.

ساز و کارهای به دام انداختن  $CO_2$  ترکیبی از فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی هستند که به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و عمدتاً شامل به دام انداختن استاتیک (ساختاری یا چینه‌شناسی)، به دام انداختن مویرگی (باقیمانده)، به دام انداختن انحلالی و به دام انداختن معدنی هستند که در ادامه به تفصیل ارائه شده‌اند. به‌طور خلاصه، به دام انداختن ساختاری و مویرگی  $CO_2$  تأثیر بیشتری در ظرفیت ذخیره‌سازی گاز دارند. در مقابل، به دام انداختن انحلالی و معدنی  $CO_2$  تأثیر کمتری بر ذخیره‌سازی دارند [۵].

### ۳-۱. به دام انداختن فیزیکی $CO_2$ در محیط زمین‌شناسی

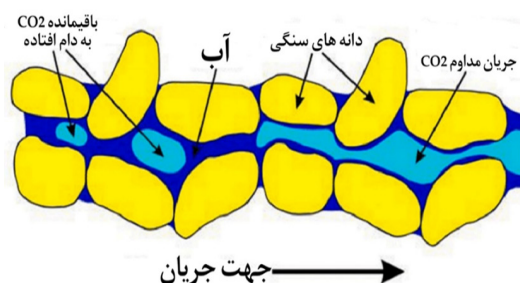
به دام انداختن فیزیکی  $CO_2$  اغلب به‌عنوان اولین و سریع‌ترین روش مهار  $CO_2$  در مخازن زیرزمینی مطرح است و برای موفقیت پروژه‌های ذخیره‌سازی، حیاتی است. این روش از به دام انداختن  $CO_2$  از موانع فیزیکی برای تثبیت  $CO_2$  استفاده می‌کند و از مهاجرت آن جلوگیری می‌کند. ساز و کارهای به دام انداختن فیزیکی و اهمیت آن‌ها در ذخیره‌سازی  $CO_2$  به تفصیل در این بخش مورد بحث قرار گرفته‌اند [۹].

### ۳-۱-۱. به دام انداختن ساختاری $CO_2$

به دام انداختن ساختاری  $CO_2$  به تثبیت  $CO_2$  در یک مخزن بدون جابجایی اشاره دارد. این روش از به دام انداختن  $CO_2$  به ساختار زمین‌شناسی و چینه‌شناسی سنگ منطقه وابسته است. به دام انداختن ساختاری  $CO_2$  زمانی اتفاق می‌افتد که یک لایه پوش سنگ غیرقابل نفوذ از فرار  $CO_2$  به سمت بالا، جلوگیری کند. [۳۴]. به دام انداختن ساختاری معمولاً سازوکاری غالب در زمان اولیه عملیات ذخیره‌سازی گاز است [۴۲].

### ۳-۱-۲. به دام انداختن مویرگی (باقیمانده) $CO_2$

به دام انداختن مویرگی  $CO_2$  به فرآیندی اشاره دارد که توسط آن  $CO_2$  در حفرات ریز سنگ که از نظر نفوذپذیری و فشار مویرگی متفاوت هستند، ذخیره می‌شود. در این روش از نیروهای مویرگی در محیط متخلخل برای تثبیت  $CO_2$  و بهبود ذخیره‌سازی آن استفاده می‌شود [۴۳]. در این سازوکار، مخزن به‌طور کامل با  $CO_2$  اشباع نمی‌شود و فقط حفرات ریز سنگ به دلیل تأثیر شدید نیروهای مویرگی، توده‌های گاز را در خود ذخیره می‌کنند. درحالی‌که جریان سیال تزریقی در مناطق دیگری از مخزن اتفاق می‌افتد. همانطور که در (شکل ۴) نشان داده شده است. به دام انداختن مویرگی  $CO_2$  در زمان‌های ابتدایی از شروع پروژه بسیار مهم است [۴۴]. دو عامل کلیدی در به دام انداختن مویرگی  $CO_2$  مؤثر هستند: (۱) اندازه و اتصال حفرات درون سنگ و (۲) ترشوندگی سنگ که به تمایل سطح سنگ برای جذب  $CO_2$  یا آب اشاره دارد. این تمایل به‌طور قابل توجهی بر میزان به دام انداختن  $CO_2$  تأثیر می‌گذارد [۴۵].



شکل ۴: تصویر شماتیک به دام انداختن مویرگی  $CO_2$  در محیط متخلخل سنگ

### ۳-۱-۳. به دام انداختن جذبی CO<sub>2</sub>

به دام انداختن جذبی CO<sub>2</sub>، به جذب فیزیکی و شیمیایی مولکول‌های CO<sub>2</sub> بر روی سطح دانه‌های سنگ و کانی‌ها اشاره دارد. این فرآیند در ذخیره‌سازی زیرزمینی CO<sub>2</sub>، به‌ویژه در بسترهای زغال‌سنگ و شیل‌های غنی از مواد آلی بسیار مهم است [۴۱]. شیل‌های غنی از مواد آلی ظرفیت بالایی برای جذب CO<sub>2</sub> دارند. ماده آلی در این شیل‌ها که به‌عنوان کروژن شناخته می‌شود، سطح بزرگی را ارائه می‌دهد که جذب CO<sub>2</sub> را تسهیل می‌کند [۴۲]؛ بنابراین، این روش نقشی اساسی در پایداری ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در برخی از ساختارهای زمین‌شناسی ایفا می‌کند. به‌عنوان مثال در مخازن CH<sub>4</sub> با بستر زغال‌سنگ، CO<sub>2</sub> می‌تواند CH<sub>4</sub> را از سطح زغال‌سنگ جدا کند که بازبایی CH<sub>4</sub> را افزایش می‌دهد. CO<sub>2</sub> تزریق شده بر روی زغال‌سنگ جذب می‌شود و CH<sub>4</sub> را آزاد می‌کند [۴۱]. (جدول ۱)، ساز و کارهای به دام انداختن فیزیکی ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> را به‌صورت مقایسه‌ای ارائه می‌کند.

جدول ۱: مقایسه سازوکارهای به دام انداختن فیزیکی CO<sub>2</sub>

نوع ذخیره	روند ذخیره‌سازی	مزایای این روش	چالش‌های این روش	مراجع
به دام انداختن موپینگی	CO <sub>2</sub> آب‌نمک ساکن را در مخازن اشباع شده از آب، جابجا می‌کند. در حین حرکت، نیروهای موپینگی باعث می‌شوند که حباب‌های کوچک CO <sub>2</sub> در حفرات موجود در سنگ باقی بمانند و آن‌ها را از جریان اصلی جدا کنند.	افزایش کارایی ذخیره‌سازی و محدود کردن تحرک CO <sub>2</sub> . کاهش نقاط نشت احتمالی و اطمینان از توزیع یکنواخت CO <sub>2</sub> .	این نوع از به دام انداختن، محدود به سنگ‌های خاصی است. فرآیند به دام انداختن گاز در سازندهایی با نفوذپذیری کم به آهستگی رخ می‌دهد. باگذشت زمان، چرخه‌های بعدی تزریق CO <sub>2</sub> دشوارتر می‌شود. وجود آب شور یا نفت نیز می‌تواند بر بازده تله گذاری تأثیر بگذارد.	Al Hameli و همکاران. (۲۰۲۲)؛ Saadatpoor و همکاران. (۲۰۱۰) [۴۳، ۴۱]
به دام انداختن جذبی	مولکول‌های CO <sub>2</sub> به دلیل نیروهای بین‌مولکولی (جذب فیزیکی) یا از طریق پیوندهای شیمیایی قوی‌تر (جذب شیمیایی)، به‌ویژه در بسترهای زغال‌سنگ و شیل‌های غنی از مواد آلی، جذب و روی سطوح جامد نگه‌داشته می‌شوند.	افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی به‌ویژه در بسترهای زغال‌سنگ و شیل، ایجاد یک مهار پایدارتر و ایمن‌تر، کاهش خطرات نشتی.	فرآیندهای جذب گاز به دلیل محدودیت‌های انتشار به کندی انجام می‌شود. وجود گازهای دیگر در محیط منجر به کاهش بازده عملیات می‌شود. بازده عملیات ذخیره‌سازی، تحت تأثیر نوسانات دمای زمین قرار می‌گیرد.	Busch و همکاران (۲۰۱۶)؛ Golding و همکاران. (۲۰۱۱) [۴۷، ۴۶]
به دام انداختن استاتیک	به دلیل نیروهای شناوری، CO <sub>2</sub> در زیر سنگ ساختارهای زیرزمینی با نفوذپذیری کم (مانند پوش سنگ) به دام می‌افتد.	ایجاد انسداد اولیه، جلوگیری از مهاجرت CO <sub>2</sub> و اطمینان از مهار فوری آن.	شکستگی سنگ یا آب‌بندی ناقص می‌تواند منجر به فرار CO <sub>2</sub> شود. CO <sub>2</sub> می‌تواند به تله‌ها یا نقاط نشت دیگر مهاجرت کند. فشار بیش از حد می‌تواند یکپارچگی آب‌بندی را به خطر بیندازد. برای اطمینان از یکپارچگی CO <sub>2</sub> نیاز به نظارت مستمر در عملیات است.	Ajayi و همکاران. (۲۰۱۹)؛ Al Hameli و همکاران. (۲۰۲۲)؛ Bachu (۲۰۰۸) [۴۸، ۴۱، ۹]





(جدول ۱) به مقایسه سه روش اصلی به دام انداختن فیزیکی  $CO_2$  در فرآیند ذخیره‌سازی زیرزمینی می‌پردازد. روش به دام انداختن موپینگی با استفاده از نیروهای موپینگی،  $CO_2$  را در حفرات ریز سنگ‌های متخلخل محبوس می‌کند که این سازوکار موجب توزیع یکنواخت گاز و کاهش خطر نشست می‌شود، هرچند کارایی آن شدیداً به ویژگی‌های سنگ مخزن وابسته است. روش به دام انداختن جذبی از طریق جذب سطحی مولکول‌های  $CO_2$  بر روی مواد آلی مانند زغال‌سنگ عمل می‌کند که ظرفیت ذخیره‌سازی بالایی دارد، اما تحت تأثیر عوامل محیطی مانند دما و ترکیب گازهای موجود قرار می‌گیرد. در مقابل، روش به دام انداختن استاتیک با استفاده از ساختارهای زمین‌شناسی نفوذناپذیر مانند پوش‌سنگ‌ها،  $CO_2$  را در زیر این لایه‌ها جمع می‌کند که هرچند روشی سریع و با ظرفیت بالا محسوب می‌شود، اما نیازمند یکپارچگی کامل لایه‌های محافظ و نظارت مستمر برای جلوگیری از نشست است. انتخاب هر یک از این روش‌ها یا ترکیبی از آن‌ها مستلزم ارزیابی دقیق ویژگی‌های زمین‌شناسی محل و ملاحظات فنی-اقتصادی پروژه است.

### ۲-۳. به دام انداختن شیمیایی $CO_2$ در ساختارهای زیرزمینی

به دام انداختن شیمیایی  $CO_2$  که شامل به دام انداختن انحلالی و به دام انداختن معدنی  $CO_2$  است، روشی رایج برای تثبیت  $CO_2$  در مخازن زیرزمینی در عملیات ذخیره‌سازی است. این روش از به دام انداختن، شامل واکنش  $CO_2$  تزریق شده با آب شور موجود در مخزن و کانی‌های تشکیل دهنده سنگ مخزن است [۹].

#### ۱-۲-۳. به دام انداختن انحلالی $CO_2$

به دام انداختن انحلالی  $CO_2$ ، یک فرآیند مهم در ذخیره‌سازی زیرزمینی  $CO_2$ ، به‌ویژه در سفره‌های آب شور است. در این ساز و کار،  $CO_2$  در آب شور موجود در مخزن حل می‌شود و منجر به تشکیل آب‌نمک غلیظ‌تر و اشباع شده از  $CO_2$  می‌شود، در نتیجه بازده عملیات ذخیره‌سازی بهبود پیدا می‌کند [۳۴]. یکی از مزایای قابل توجه به دام انداختن انحلالی  $CO_2$ ، توانایی آن در کاهش احتمال نشست  $CO_2$  است. هنگامی که  $CO_2$  در آب شور حل می‌شود، نیروی شناوری خود را از دست می‌دهد و خطر فرار از طریق مسیرهای نشست احتمالی مانند گسل‌ها یا چاه‌های متروکه را کاهش می‌دهد [۴۹]. با این حال، سرعت انحلال، تحت تأثیر

عوامل متعددی از جمله فشار، دما، شوری و خواص ویژه آب شور مخزن قرار می‌گیرد. فشار بالا به‌طور کلی انحلال‌پذیری  $CO_2$  را در آب افزایش می‌دهد، درحالی‌که افزایش دما باعث کاهش انحلال‌پذیری  $CO_2$  می‌شود؛ بنابراین تعامل بین دما و فشار می‌تواند نوع حلالیت گاز را پیچیده کند. علاوه بر این، وجود نمک‌ها می‌تواند بر حلالیت  $CO_2$  تأثیر بگذارد. به‌عنوان مثال، شوری بالاتر معمولاً حلالیت  $CO_2$  در آب شور را کاهش می‌دهد، اگرچه ممکن است تأثیری نسبتاً جزئی داشته باشد [۱۴].

### ۲-۲-۳. به دام انداختن معدنی $CO_2$

به دام انداختن معدنی  $CO_2$  شامل واکنش شیمیایی بین  $CO_2$  محلول (یعنی یون‌های بی‌کربنات) و مواد معدنی موجود در سنگ مخزن میزبان است. این واکنش منجر به رسوب مواد معدنی کربناته پایدار می‌شود و به‌طور مؤثر  $CO_2$  متحرک یا محلول را به یک فاز جامد و بی‌حرکت تبدیل می‌کند [۵۰]. در این فرآیند، ابتدا  $CO_2$  با آب واکنش داده و کربنیک اسید را تشکیل می‌دهد. سپس این اسید ضعیف به تدریج کانی‌های سیلیکات اولیه را در سنگ مخزن حل می‌کند. پس از آن، کاتیون‌های آزاد شده، مانند کلسیم، منیزیم، یا آهن، با یون‌های بی‌کربنات ترکیب می‌شوند تا مواد معدنی کربناته جامد را تشکیل دهند، بنابراین باعث محبوس شدن دائمی  $CO_2$  در محیط می‌شوند [۵۱].

عوامل مختلفی بر اثربخشی به دام انداختن معدنی  $CO_2$  تأثیر دارند، از جمله کانی‌شناسی مخزن، فشار، دما و pH اولیه آب در ساختار زیرزمینی. به‌طور خاص، سنگ‌های غنی از کانی‌های سیلیکاته، به‌ویژه آن‌هایی که دارای کلسیم، منیزیم یا آهن زیاد هستند، بیشتر با روش به دام انداختن معدنی مرتبط هستند، در همین راستا، فشار و دمای بیشتر محیط متخلخل می‌تواند در به دام افتادن  $CO_2$  به روش تشکیل مواد معدنی کربناته کمک کند [۵۲]. با این حال، ساز و کار اولیه برای به دام انداختن معدنی  $CO_2$  این است که زمانی که  $CO_2$  در آب حل می‌شود، با تغییرات در pH آب، منجر به آزاد شدن یون‌های  $H^+$  و در نهایت اسیدی شدن آب، همراه است. این آب اسیدی شده می‌تواند با مواد معدنی اطراف برهمکنش داشته باشد و مواد معدنی کربناته پایدار را تشکیل دهد و به میزان بیشتری  $CO_2$  را در محیط ذخیره کند [۵۰]. زمانی که  $CO_2$  با آب تماس پیدا می‌کند، در آب حل شده و کربنیک اسید ( $H_2CO_3$ ) را تشکیل می‌دهد همانطور که در معادله (۱) نشان داده شده است [۵۳]:



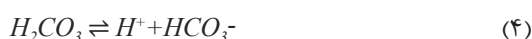
سپس، کربنیک اسید به یون بی کربنات ( $HCO_3^-$ ) و یون کربنات ( $CO_3^{2-}$ ) تفکیک می‌شود و یون‌های  $H^+$  را آزاد می‌کند که باعث کاهش pH آب می‌شود. آزاد شدن یون‌های  $H^+$  می‌تواند انحلال برخی مواد معدنی غنی از کلسیم، منیزیم و آهن را تسریع کند. واکنش‌های بعدی نیز می‌توانند منجر به رسوب‌گذاری مواد معدنی کربناته شوند که به دام انداختن  $CO_2$  را تسهیل می‌کنند، همانطور که در (معادله ۲) نشان داده شده است [۲۳، ۵۱]:



تبدیل  $CO_2$  به مواد معدنی کربناته پایدار، ذخیره‌سازی طولانی‌مدت آن را تضمین می‌کند. با این حال، درک سرعت و میزان این واکنش‌ها برای بهینه‌سازی عملیات ذخیره‌سازی  $CO_2$  ضروری است. این واکنش‌ها معمولاً در دمای محیط، بسیار کند هستند. علاوه بر این، واکنش‌های وابسته به pH می‌توانند ترکیب کانی‌شناختی و تراوایی مخزن را تغییر دهند که ممکن است بر یکپارچگی مکانیکی مخزن تأثیر بگذارد [۲۳، ۵۴].

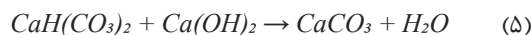
### ۳-۲-۳. تبادل یونی

تبادل یونی یکی از روش‌های به دام انداختن شیمیایی  $CO_2$  است که می‌تواند کارایی ذخیره‌سازی  $CO_2$  در ساختارهای زیرزمینی را بهبود بخشد. این فرآیند شامل تبادل کاتیون‌های موجود در آب با کاتیون‌های موجود در ساختار مواد معدنی است. تزریق و حل شدن  $CO_2$  این فرآیند را تسریع می‌کند. اگرچه تبادل یونی به اندازه روش‌های دیگر شیمیایی (به دام انداختن معدنی یا انحلالی) مورد توجه قرار نگرفته است، اما به بهبود پایداری ذخیره‌سازی  $CO_2$  کمک می‌کند [۵۵]. یون‌های  $H^+$  تولیدشده هنگام حل شدن  $CO_2$  در آب با دیگر کاتیون‌های موجود در آب حفرات سنگ مخزن رقابت می‌کنند و باعث تسریع فرآیند تبادل یونی می‌شوند. این واکنش‌ها در (معادلات ۳ و ۴) ارائه شده‌اند:



افزایش غلظت  $H^+$  می‌تواند دیگر کاتیون‌ها ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ) را از ساختار مواد معدنی موجود به درون آب حفرات سنگ مخزن جابجا کند. این کاتیون‌های آزاد شده می‌توانند با یون بی کربنات و یون کربنات واکنش داده و مواد

معدنی کربناته پایدار را تشکیل دهند [۵۵] که منجر به به دام انداختن  $CO_2$  در حالت جامد می‌شود (طبق معادله ۵):



تبادل یونی، ظرفیت تشکیل مواد معدنی کربناته را افزایش می‌دهد و به ایمنی و پایداری ذخیره‌سازی  $CO_2$  کمک می‌کند. این ساز و کار مکمل سایر روش‌های به دام انداختن  $CO_2$  است و به تبدیل سریع  $CO_2$  به شکل مواد معدنی کمک می‌کند، به‌ویژه در مخازنی که دارای مواد معدنی واکنش‌پذیر فراوانی هستند. با این حال، کارایی تبادل یونی عمدتاً به ترکیب کانی‌شناسی سازند بستگی دارد و در صورت تشدید می‌تواند تخلخل و تراوایی سنگ مخزن را تغییر دهد و ظرفیت ذخیره‌سازی و رفتار  $CO_2$  را تحت تأثیر قرار دهد [۵۶]؛ بنابراین، درک جامع از ژئوشیمی مخزن هنگام استفاده از این روش در ذخیره‌سازی مؤثر  $CO_2$  ضروری است. (جدول ۲)، ساز و کارهای به دام انداختن شیمیایی  $CO_2$  را به صورت مقایسه‌ای ارائه می‌کند.

(جدول ۲) نیز سه سازوکار شیمیایی اصلی برای ذخیره‌سازی  $CO_2$  را مورد بررسی قرار می‌دهد. در روش به دام انداختن معدنی،  $CO_2$  با مواد معدنی موجود در سازند واکنش داده و کربنات‌های پایدار مانند کلسیت و منیزیت تشکیل می‌دهد. این روش اگرچه ذخیره‌سازی بلندمدت و ایمنی را فراهم می‌کند، اما به دلیل سرعت پایین واکنش و وابستگی به نوع کانی‌های موجود با محدودیت‌هایی مواجه است. روش به دام انداختن انحلالی مبتنی بر حل شدن  $CO_2$  در آب و تشکیل اسید کربنیک است که موجب کاهش تحرک مولکول‌های  $CO_2$  در مخزن می‌شود. هرچند این روش از ایمنی بالایی برخوردار است، اما ظرفیت ذخیره‌سازی آن به دلیل محدودیت‌های حلالیت و اثرات اسیدی شدن بر خواص سنگ مخزن، محدود می‌باشد. سازوکار تبادل یونی نیز شامل واکنش‌های شیمیایی پیچیده‌تری است که در آن یون‌های هیدروژن حاصل از اسید کربنیک با کانی‌های مخزن تبادل می‌شوند. این فرآیند اگرچه می‌تواند سایر سازوکارهای به دام انداختن را تکمیل کند، اما به دلیل پیچیدگی واکنش‌ها و اثرات غیرقابل پیش‌بینی بر محیط مخزن نیاز به مطالعات دقیق‌تری دارد. هر یک از این روش‌ها با توجه به شرایط زمین‌شناسی محل و الزامات فنی پروژه می‌توانند به صورت مجزا یا ترکیبی مورد استفاده قرار گیرند. انتخاب روش بهینه مستلزم ارزیابی جامع پارامترهای مخزن و ملاحظات اقتصادی است.



جدول ۲: مقایسه سازوکارهای به دام انداختن شیمیایی CO<sub>2</sub>

نوع ذخیره	روند ذخیره‌سازی	مزایای این روش	چالش‌های این روش	مراجع
به دام انداختن معدنی	CO <sub>2</sub> با مواد معدنی موجود در سازند واکنش می‌دهد و کربنات‌های جامد (کلسیت، منیزیت) تولید می‌کند.	ذخیره‌سازی طولانی‌مدت و پایدار CO <sub>2</sub> را فراهم می‌کند. CO <sub>2</sub> را به فرم جامد تبدیل می‌کند و از تثبیت آن اطمینان می‌دهد.	سرعت واکنش می‌تواند کند باشد. رشد مواد معدنی ممکن است نفوذپذیری را تغییر دهد. بستگی به حضور و واکنش‌پذیری مواد معدنی مناسب در مخزن دارد.	Snæbjornsdottir' و همکاران (۲۰۲۰)؛ Soong و همکاران (۲۰۰۴) [۵۷، ۵۸]
به دام انداختن انحلالی	CO <sub>2</sub> در آب حل شده و منجر به تشکیل کربنیک اسید می‌شود.	امنیت ذخیره‌سازی را به دلیل انحلال CO <sub>2</sub> افزایش می‌دهد. تحرک CO <sub>2</sub> را در مخزن کاهش می‌دهد.	ظرفیت محدود ذخیره‌سازی به دلیل محدودیت حلالیت CO <sub>2</sub> ، تغییرات بالقوه در چگالی آب، پتانسیل اسیدی شدن آب که بر خواص سنگ و سیال موجود تأثیر می‌گذارد.	Benson (2005); Suekane و همکاران (۲۰۰۸) [۵۹، ۶۰]
تبادل یونی	CO <sub>2</sub> کربنیک اسید را تشکیل می‌دهد که یون‌های هیدروژن را آزاد می‌کند که در تبادل یونی با مواد معدنی موجود در مخزن شرکت می‌کنند.	واکنش‌هایی که CO <sub>2</sub> را به دام می‌اندازند سایر سازوکارهای تله‌گذاری را تکمیل می‌کند (بهبود می‌بخشند).	بر حلالیت CO <sub>2</sub> و یکپارچگی مخزن تأثیر می‌گذارد. فعل و انفعالات پیچیده با مواد معدنی موجود در مخزن می‌تواند غیرقابل پیش‌بینی باشد. ممکن است به دلیل تغییرات شیمیایی روی سایر سازوکارهای به دام انداختن گاز تأثیر بگذارد.	Benson (2009); Matter and Kelemen (2009). [۵۲، ۶۱]

عوامل مختلف از جمله نانو سیالات، ترشوندگی سنگ، ناهمگونی محیط متخلخل و شرایط زمین‌شناسی را بر کارایی ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> مورد بررسی قرار داده‌اند. بر اساس نتایج، استفاده از سورفکتانت‌ها و نانوذرات می‌تواند با کاهش کشش سطحی بین CO<sub>2</sub> و آب شور، ظرفیت ذخیره‌سازی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. همچنین مشخص شده است که ترشوندگی سنگ و ناهمگونی محیط متخلخل تأثیر مستقیمی بر بازده عملیات ذخیره‌سازی دارد. مطالعات روی سنگ‌های کربناته نشان می‌دهد که شرایط بهینه ذخیره‌سازی شامل دمای بالا، شوری کم و فشار تزریق پایین است. در مورد سازندهای شیلی مانند شیل باکن، پتانسیل جذب CO<sub>2</sub> تا ۱۷ میلی‌گرم گزارش شده که نشان‌دهنده ظرفیت بالای این سنگ‌ها برای ذخیره‌سازی است. علاوه بر این، تحقیقات نشان می‌دهند که ذخیره‌سازی در اعماق بیشتر، اگرچه هزینه‌بر است، اما به دلیل افزایش کارایی آب‌بندی، گزینه مطلوب‌تری محسوب می‌شود. نانوذرات نیز به‌عنوان راهکاری مؤثر برای مقابله با تغییرات نامطلوب ترشوندگی سنگ ناشی از حضور مواد آلی شناسایی شده‌اند. در مجموع، این یافته‌ها نشان می‌دهند که انتخاب روش و محل ذخیره‌سازی باید با نظر گرفتن ویژگی‌های سنگ مخزن و شرایط عملیاتی صورت گیرد تا هم کارایی افزایش یابد و هم خطر نشت به حداقل مقدار ممکن برسد.

#### ۴. مطالعات تجربی و مدل‌سازی در مورد ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub>

مطالعات آزمایشگاهی و میدانی مختلفی برای بررسی ذخیره‌سازی طولانی‌مدت و پایدار CO<sub>2</sub> انجام شده است. همچنین در بسیاری از این مطالعات، حجم CO<sub>2</sub> که می‌تواند درون حفرات سنگ مخزن ذخیره شود را تعیین کرده‌اند. در ادامه به بررسی این مطالعات پرداخته شده است.

##### ۴-۱. مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی متعددی برای درک ارتباط فیزیکی و شیمیایی بین CO<sub>2</sub>، سیالات و سنگ مخزن انجام شده است. این آزمایش‌ها، محیطی کنترل شده را فراهم می‌کنند که در آن متغیرها به‌صورت سیستماتیک تغییر داده می‌شوند تا اثرات آن‌ها بر ذخیره‌سازی بررسی شود. همچنین، این آزمایش‌ها می‌توانند تعیین کنند که چگونه مولکول‌های CO<sub>2</sub> به سطوح سنگ می‌چسبند یا از آن جدا می‌شوند که برای پیش‌بینی ظرفیت یک سازند برای ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> ضروری است. (جدول ۳)، یافته‌های اصلی مطالعات تجربی در مورد ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> را به‌صورت خلاصه ارائه می‌کند. (جدول ۳) به بررسی مهم‌ترین یافته‌های تجربی در زمینه ذخیره‌سازی زیرزمینی CO<sub>2</sub> می‌پردازد. مطالعات متعددی اثر

جدول ۳: خلاصه‌ای از مطالعات تجربی در مورد ذخیره‌سازی زیرزمینی CO<sub>2</sub>

اهداف پژوهش	محیط متخلخل	نتایج اصلی	مراجع
بررسی نقش نانو سیالات در افزایش ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> در شرایط مخزنی. ارزیابی اثر استفاده ترکیبی از سورفکتانت نانوذرات در پروژه‌های ذخیره‌سازی گاز و ترشوندگی سنگ.	-	سورفکتانت‌ها و نانوذرات، کشش سطحی بین CO <sub>2</sub> و آب شور را کاهش می‌دهند که باعث افزایش ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> می‌شود. سورفکتانت‌ها کشش سطحی را کاهش می‌دهند، اما نانوذرات ترشوندگی سنگ را نیز اصلاح می‌کنند که برای پروژه‌های ذخیره‌سازی گاز در مقیاس بزرگ بسیار مهم است.	Chiquet و همکاران (۲۰۰۷) [۳۷]
بررسی تأثیر کشش سطحی بر روی ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> در محیط متخلخل. بررسی تأثیر ترشوندگی CO <sub>2</sub> در محیط متخلخل.	-	برهم کنش‌های سطحی در محیط متخلخل به‌طور قابل توجهی بر ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> تأثیر می‌گذارد. این تحقیق، پتانسیل پیش‌بینی ترشوندگی CO <sub>2</sub> و تأثیر آن بر ذخیره‌سازی گاز را برجسته می‌کند.	Chalbaud و همکاران (۲۰۰۹) [۶۲]
بررسی تأثیر ناهمگونی محیط متخلخل در بازده عملیات ذخیره گاز	سفره‌های آب شور	تأثیر ناهمگونی محیط متخلخل در ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> بسیار مهم است. نفوذپذیری کم باعث افزایش به دام انداختن و نفوذپذیری بالا باعث کاهش آن در عملیات ذخیره گاز می‌شود.	Oloruntobi and LaForce (۲۰۰۹) [۶۳]
ارزیابی تأثیر تزریق CO <sub>2</sub> بر نفوذپذیری سنگ کربناته	کربنات نمکی	در این عملیات، رسوب تشکیل شده بر اساس نوع سنگ متفاوت است: سنگ‌های با نفوذپذیری بالا، کلسیت تولید می‌کنند، در حالی که سنگ‌های با نفوذپذیری کم عمدتاً آراگونیت تولید می‌کنند.	Mohamed and Nasr-ElDin (۲۰۱۳) [۶۴]
ارزیابی واکنش‌های CO <sub>2</sub> ، پوش سنگ و آب شور در بستر زغال سنگ مقایسه نتایج شبیه‌سازی ژئوشیمیایی برای شناسایی شرایط بهینه ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> .	زغال سنگ	ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> در درزهای زغال سنگ منجر به واکنش‌های شیمیایی قابل توجهی در پوش سنگ می‌شود که منجر به انحلال مواد معدنی می‌شود. این فرآیند امکان به دام انداختن دائمی CO <sub>2</sub> را در کانی‌های تازه تشکیل شده مانند دولومیت و سیدریت فراهم می‌کند. تشکیل مواد معدنی در مقیاس حفرات با کاهش تخلخل سنگ و در نتیجه کاهش احتمال نشت CO <sub>2</sub> همراه است.	Wang و همکاران (۲۰۱۶) [۶۵]
شناسایی شرایط بهینه برای ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> در سازندهای کربناته	کربنات	ذخیره‌سازی بهینه CO <sub>2</sub> در سنگ‌های کربناته به دماهای بالا، شوری کم و فشار تزریق کمتر نیاز دارد.	Arif و همکاران (۲۰۱۷) [۶۲]
بررسی ایمنی ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> و خطرات نشت پوش سنگ، تجزیه و تحلیل کشش سطحی بین CO <sub>2</sub> و آب در شرایط عمیق و اثر شوری بر آن.	-	این مطالعه به بررسی قابلیت ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> در مخازن عمیق می‌پردازد و بر نگرانی‌های مربوط به نشت گاز مرتبط با کشش سطحی تأکید دارد. ذخیره‌سازی عمیق تر، کارایی آب‌بندی را افزایش می‌دهد و علی‌رغم هزینه‌های اضافی، آن را به انتخابی جذاب تبدیل می‌کند.	Espinoza and Santamarina (۲۰۱۷) [۶۷]
بررسی نحوه ازدیاد برداشت نفت و ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> در لایه‌های شیلی.	شیل	شیل باکن <sup>۱</sup> به‌طور بالقوه می‌تواند CO <sub>2</sub> را با ظرفیت جذبی تا حدود ۱۷ میلی گرم، تحت فشارهای مختلف به دام بیندازد که نشان می‌دهد می‌توان از آن برای ذخیره CO <sub>2</sub> استفاده کرد. شیل باکن یک فضای امیدوارکننده برای ذخیره‌سازی دائمی حجم زیادی CO <sub>2</sub> است.	Jin و همکاران (۲۰۱۷) [۶۸]
بررسی عوامل مؤثر در ترشوندگی سنگ در ذخیره‌سازی زیرزمینی CO <sub>2</sub> .	ماسه سنگ	اسیدهای آلی موجود در ساختارهای زیرزمینی ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> ، ترشوندگی سنگ را تغییر می‌دهند، اما نانو سیال‌ها می‌توانند با این تغییر مقابله کنند. نانو سیالات می‌توانند کارایی و ایمنی ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> را افزایش دهند.	Ali و همکاران (۲۰۲۰) [۶۹]
ارزیابی چگونگی تأثیر اسیدهای آلی در بازده ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> . بررسی پتانسیل نانوذرات در بهبود ظرفیت ذخیره‌سازی.	کربنات ماسه سنگ	مواد آلی در مناطق ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> بر مهار تأثیر می‌گذارند، اما نانوذرات می‌توانند این اثرات را خنثی کنند. نقش مواد آلی و نانوذرات در بهینه‌سازی عملیات ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> بررسی شد.	Ali و همکاران (۲۰۲۲) [۷۰]
شرایط مؤثر برای استفاده از سنگ‌های شیلی در ذخیره‌سازی گاز CO <sub>2</sub> مورد بررسی قرار گرفته است.	شیل	شیل به دلیل خواص منحصر به فردش برای جذب CO <sub>2</sub> عالی است. تزریق CO <sub>2</sub> ساختار حفرات شیل را تغییر می‌دهد و درک این موضوع برای مطالعات آینده ذخیره‌سازی ضروری است.	Hazarika و همکاران (۲۰۲۴) [۷۱]

1. Bakken Shale

#### ۴-۲. مدل‌سازی و شبیه‌سازی ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub>

با توجه به نقش حیاتی فناوری‌های جذب و ذخیره‌سازی کربن در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، مدل‌سازی و شبیه‌سازی ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> به‌عنوان یکی از ارکان کلیدی در طراحی، ارزیابی عملکرد و تحلیل ریسک پروژه‌های تزریق در مخازن زیرزمینی مطرح است. این فرآیند پیچیده، شامل تعامل بین جریان سیال، واکنش‌های شیمیایی، تغییرات مکانیکی و فرآیندهای انتقال جرم و گرما در مقیاس‌های زمانی و مکانی گسترده است. در این بخش، انواع روش‌های مدل‌سازی CO<sub>2</sub> به‌صورت جامع بررسی شده‌اند [۳۵]. مدل‌سازی عددی فرآیندهای تزریق و مهاجرت CO<sub>2</sub> در مخازن زیرزمینی شامل شبیه‌سازی جریان چندفازی، انتقال جرم، انحلال CO<sub>2</sub> در آب شور و واکنش‌های ژئوشیمیایی است. مدل‌ها معمولاً در نرم‌افزارهایی مانند TOUGH, CMG-GEM, یا ECLIPSE اجرا می‌شوند که قابلیت تحلیل جریان و انتقال در محیط متخلخل را دارند [۱۸] برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی CO<sub>2</sub> از روابط و فرمول‌های زیر استفاده می‌شوند:

۱) معادلات پایه جریان چند فازی (قانون دارسی):

$$u_{\alpha} = -\frac{k_{r\alpha}}{\mu_{\alpha}} K (\nabla P_{\alpha} - \rho_{\alpha} g) \quad (6)$$

۲) معادله انتقال جرم:

$$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} + \nabla \cdot (u C_{CO_2}) = \nabla \cdot (D \nabla C_{CO_2}) \quad (7)$$

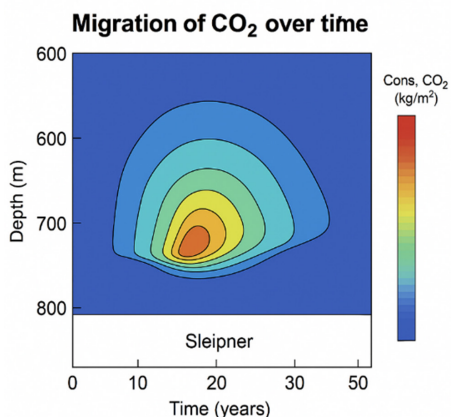
۳) معادله انتقال حرارت:

$$(\rho C_p) \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \sum_{\alpha} \rho_{\alpha} C_{p,\alpha} u_{\alpha} T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (8)$$

مراحل کلیدی مدل‌سازی عملیات ذخیره زیرزمینی گاز کربن دی‌اکسید عبارتند از:

- ۱) تعریف هندسه و ویژگی‌های مخزن: شامل نوع سنگ، تخلخل، تراوایی و فشار-دما.
- ۲) مدل‌سازی جریان سیال: برای بررسی مهاجرت CO<sub>2</sub> و توزیع فازها.
- ۳) تحلیل حساسیت: برای بررسی تأثیر پارامترها مانند نرخ تزریق یا تراوایی بر پایداری ذخیره‌سازی.
- ۴) واکنش‌های ژئوشیمیایی: بررسی تعامل CO<sub>2</sub> با سنگ مخزن و ایجاد کانی‌های جدید.

به‌عنوان مثالی موفق از اجرای این روش، می‌توانیم به پروژه Sleipner در دریای شمال اشاره کنیم که از سال ۱۹۹۶ تاکنون بیش از یک میلیون تن CO<sub>2</sub> را سالانه در سازند Utsira ذخیره می‌کند. در (شکل ۵)، اطلاعاتی از این پروژه ارائه شده است [۱۷].



شکل ۵: نتایج یک شبیه‌سازی عددی مربوط به مهاجرت CO<sub>2</sub> در سازند Utsira [۱۷]

(شکل ۵) خروجی حاصل از شبیه‌سازی عددی تزریق و مهاجرت CO<sub>2</sub> در سازند Utsira در پروژه Sleipner است که با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته‌ای مانند TOUGH2 و ECLIPSE انجام شده است. محور افقی زمان (برحسب سال) و محور عمودی عمق (برحسب متر) را نمایش می‌دهد. خطوط هم‌غلظت نشان می‌دهند که گاز CO<sub>2</sub> پس از تزریق در عمق حدود ۸۰۰ متر، به تدریج به سمت بالا و کناره‌ها گسترش می‌یابد. این مدل‌سازی جریان چندفازی، مهاجرت تحت تأثیر شناوری و انحلال در آب شور را شبیه‌سازی کرده و نتیجه آن اثبات کارایی مخزن در نگهداری بلندمدت گاز CO<sub>2</sub> است. این نوع شبیه‌سازی‌ها ابزار ضروری برای پیش‌بینی عملکرد مخزن و ارزیابی ریسک نشت در پروژه‌های واقعی ذخیره‌سازی هستند. از چالش‌های مدل‌سازی می‌توان به عدم قطعیت در پارامترهای موجود در مخزن اشاره کرد (مانند تخلخل و تراوایی) و همچنین CO<sub>2</sub> موجود در مخزن نیز می‌تواند با سنگ و سیالات موجود برهم‌کنش شیمیایی داشته و شبیه‌سازی را دچار خطا کند [۷۲]. مدل‌سازی و شبیه‌سازی ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> ابزار ضروری برای پیش‌بینی رفتار مخزن و اطمینان از ایمنی فرآیند هستند.

#### ۵. کاربرد هوش مصنوعی در ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub>

با توجه به پیچیدگی‌های زمین‌شناسی، عدم قطعیت‌های

مربوط به مخازن زیرزمینی و ضرورت پایش مستمر فرآیند تزریق، هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری نوین و کارآمد در مدیریت پروژه‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی CO<sub>2</sub> نقش روزافزونی پیدا کرده است. در همین راستا، مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین (Machine Learning) و یادگیری عمیق (Deep Learning) می‌توانند به تحلیل داده‌های حجیم و غیرخطی حاصل از چاه‌های تزریق، لرزه‌نگاری و سنجش‌های ژئوفیزیکی کمک کنند [۷۳]. کاربردهای اصلی هوش مصنوعی در این زمینه عبارتند از:

- پیش‌بینی رفتار مخزن: مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند پاسخ مخزن به تزریق CO<sub>2</sub> را با دقت بالا شبیه‌سازی کنند و نواحی با پتانسیل نشت یا فشار بالا را شناسایی نمایند [۷۳].
- تحلیل داده‌های سنجش زیرسطحی: الگوریتم‌های پردازش تصویر و شبکه‌های عصبی برای تفسیر سریع داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی به‌کار می‌روند [۷۳].
- بهینه‌سازی مکان و نرخ تزریق: مدل‌های یادگیری تقویتی (Reinforcement Learning) برای تنظیم استراتژی‌های تزریق در زمان واقعی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم ذخیره‌سازی به کار گرفته می‌شوند [۷۴].
- کاهش هزینه‌های پایش: استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی در پایش هوشمند نشت CO<sub>2</sub> از طریق داده‌های حسگرها و مدل‌سازی پیش‌گویانه، می‌تواند هزینه‌ها را کاهش داده و زمان واکنش را بهبود بخشد [۷۴].

علاوه بر این، هوش مصنوعی در یکپارچه‌سازی داده‌های چندمنبعی از جمله اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و فیزیکی، نقش کلیدی ایفا می‌کند و به تصمیم‌گیری دقیق‌تر در مورد طراحی و اجرای پروژه‌های ذخیره‌سازی کمک می‌نماید. در یک مطالعه انجام‌شده توسط یانگ و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۲)، از مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی میزان تخلخل و نفوذپذیری مخزن در یک میدان نفتی در ایالت تگزاس آمریکا استفاده شد. داده‌های لرزه‌ای و چاه‌نگاری از ۷۰ حلقه چاه به‌عنوان ورودی مدل استفاده شدند [۷۵]. نتایج مدل نشان داد که:

- خطای میانگین مطلق برای پیش‌بینی تخلخل تنها

±۱/۸ درصد بود.

- مدل توانست مناطقی را شناسایی کند که امکان ذخیره‌سازی بیش از ۴۵ میلیون تن CO<sub>2</sub> را دارند.
- زمان لازم برای تحلیل داده‌ها با استفاده از هوش مصنوعی به کمتر از ۳ ساعت کاهش یافت، درحالی‌که برای تحلیل همین داده‌ها به روش سنتی بیش از ۳ هفته زمان می‌برد.

این دستاورد باعث شد شرکت بهره‌بردار بتواند با هزینه‌ای کمتر از ۶۰ درصد نسبت به روش‌های معمول، برنامه تزریق CO<sub>2</sub> را آغاز کند [۷۵]. با توجه به این قابلیت‌ها، ادغام هوش مصنوعی در طراحی، نظارت و ارزیابی پروژه‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی CO<sub>2</sub> می‌تواند اثربخشی زیست‌محیطی و اقتصادی این فناوری را به‌طور چشم‌گیری افزایش دهد.

#### ۶. پروژه‌های میدانی ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub>

در حال حاضر، چندین پروژه ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در سراسر جهان انجام شده‌اند یا در مراحل برنامه‌ریزی برای اجرا قرار دارند. این پروژه‌ها در مکان‌های مختلف و در ساختارهای گوناگون زیرزمینی از جمله سفره‌های آب شور عمیق، مخازن تخلیه‌شده نفت و گاز و سازندهای بازالتی اجرا شده‌اند. به‌طور خاص، بسیاری از پروژه‌های میدانی در سفره‌های آب شور عمیق مانند پروژه میدان Sleipner در دریای شمال، نروژ [۷۶]، پروژه میدان Rangely در شمال غربی کلرادو [۷۷] و پروژه گاز طبیعی مایع Gorgon در استرالیا برای ارزیابی امکان‌سنجی ذخیره‌سازی گسترده CO<sub>2</sub> اجرا شده‌اند. این سازندها دارای مزایایی مانند عمق کافی، ضخامت مناسب، تخلخل بالا و درپوش سنگی با نفوذپذیری کم هستند که آن‌ها را به گزینه‌های ایده‌آلی برای ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> تبدیل می‌کنند [۷۸]. همچنین، مخازن تخلیه‌شده نفت و گاز در پروژه‌هایی مانند پروژه CRC در استرالیا [۷۶]، میدان SACROC در تگزاس [۸۰] و پروژه Cranfield در Nachez، ایالات متحده [۸۱]، برای ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، سازندهای بازالتی نیز موضوع پروژه‌هایی مانند پروژه Carbfix در جنوب غربی ایسلند [۸۲] و پروژه Wallula Basalt در منطقه سیلابی رودخانه کلمبیا بوده‌اند [۸۳]. خلاصه‌ای از نتایج پروژه‌های میدانی ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در ساختارهای زیرزمینی در (جدول ۴) ارائه شده‌اند.

1. Yang et al., 2022



جدول ۴: خلاصه‌ای از نتایج پروژه‌های میدانی ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در ساختارهای زیرزمینی

پروژه / کشور	ذخیره‌سازی تخمینی	ساختار زیرزمینی	محیط متخلخل	خلاصه پروژه	مراجع
میدان ناگلوکا / ژاپن	۱۲۸ میلیون تن	سفره‌های آب شور عمیق	ماسه‌سنگ / گل‌سنگ	این میدان گازی در جنوب غربی ناگلوکا، ژاپن قرار دارد و در سال ۱۹۷۹ کشف شد و ذخیره‌سازی آن در سال ۲۰۰۰ آغاز شد. CO <sub>2</sub> به‌صورت متناوب با آب و به نسبت ۱:۱ تزریق می‌شود. عمق کل ۱۲۳۰ متر، ضخامت ذخیره‌سازی ۶۰ متر و سرعت تزریق ۲۰-۴۰ تن در روز است.	Kikuta و همکاران (۲۰۰۵) [۸۴]
پروژه Sleipner / نروژ	۲۵ میلیون تن	سفره‌های آب شور عمیق	ماسه‌سنگ / شیل ضخیم	این پروژه در سال ۱۹۹۶ در دریای شمال به دلیل سیاست مالیات‌های کربنی در نروژ آغاز شد، CO <sub>2</sub> به لایه ماسه‌سنگ ضخیم Utsira تزریق شد که توسط پوش سنگی غیرقابل نفوذ محافظت می‌شود. عمق تزریق ۸۰۰ متر با سرعت تزریق ۲۸۰۰ تن در روز از ویژگی‌های این پروژه هستند. این پروژه با موفقیت، امکان ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> را بدون مشکلات عملیاتی عمده نشان داده است.	Kalam و همکاران (۲۰۲۱)؛ Sengul (۲۰۰۶) [۸۵، ۸۶]
پروژه صلاح / الجزایر	۱۷۰ میلیون تن بین سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۱۱	سفره‌های آب شور عمیق	ماسه‌سنگ / شیل	این پروژه که در الجزایر واقع شده، توسط BP و Statoil در سال ۲۰۰۴ آغاز شد، CO <sub>2</sub> را از میدان نفتی Salah به یک ماسه‌سنگ در نزدیکی میدان گازی Kreebha تزریق کرد. بین سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۱۱، CO <sub>2</sub> در سازند Kreebha ذخیره شد. علیرغم توقف تزریق در سال ۲۰۱۱ به دلیل نگرانی‌های موجود در مورد نفوذپذیری پوش سنگ، هیچ‌گونه نشت CO <sub>2</sub> شناسایی نشده است.	Jones و همکاران (۲۰۲۱)؛ Kalam و همکاران (۲۰۲۱) [۸۵، ۸۶]
پروژه Carbfix / جنوب غربی ایسلند	۲/۲ میلیون تن	سازندهای بازالت	بازالت / گدازه‌های بازالتی	این اولین پروژه ذخیره‌سازی کاملاً یکپارچه با ذخیره CO <sub>2</sub> در سنگ‌های بازالتی است. روشی جدید در پروژه Carbfix استفاده شد که در آن CO <sub>2</sub> تزریق شده تمایل به حل شدن در آب برای تولید پوش سنگ را دارد.	Matter و همکاران (۲۰۲۱)؛ Yang و همکاران (۲۰۲۳) [۸۷، ۸۸]
پروژه Wallula / رودخانه Basalt / کلمبیا	مابین ۱۰ تا ۵۰ گیگاتن	سازندهای بازالت	بازالت / سنگ ساختارهای زیرزمینی بانفوذ پذیری کم	این پروژه که در CO <sub>2</sub> را به بازالت آتشفشانی تزریق می‌کند، در سال ۲۰۰۹ راه‌اندازی شد. نتایج، نتایج کانی‌سازی CO <sub>2</sub> پس از دو سال اختلاط با آب صورت گرفت و به‌صورت آنکریت معدنی کربناته روی سطح سنگ‌ها قابل مشاهده بود. این ماده معدنی همچنین شامل آهن، منگنز، کلسیم و منیزیم است. عمق کل ۸۲۵-۸۸۷ متر، ضخامت ذخیره‌سازی تقریباً ۲۰ متر و نرخ تزریق ۴۰ میلیون تن در سال می‌باشد.	McGrail و همکاران (۲۰۲۱)؛ Yang و همکاران (۲۰۲۳) [۸۳، ۸۴]
پروژه Orodos / چین	تقریباً ۰/۱۵ میلیون تن در سال ۲۰۱۴	سفره‌های آب شور عمیق	ماسه‌سنگ / شیل و گل‌سنگ	این پروژه که در چین واقع شده است، در سال ۲۰۱۰ به‌صورت پایلوت باهدف عملیات تجاری تا سال ۲۰۲۰ آغاز شد. در همین راستا، CO <sub>2</sub> که از کارخانه زغال‌سنگ تأمین می‌شود، حمل و به یک سفره آب شور تزریق گردید. نتایج نشان داد که CO <sub>2</sub> در مکانی با عمق ۴۵۰ متری باقی‌مانده است، بدون اینکه هرگونه نشتی شناسایی شود.	Kalam و همکاران (۲۰۲۱)؛ Luo و همکاران (۲۰۱۴) [۸۵، ۸۶]
پروژه Weyburn / کانادا	۲۰۰ میلیون تن از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۰	میدان نفت و گاز خالی شده	گاز / کربنات / آنیدریت	این پروژه که در حوضه Williston در ساسکاچوان، در کشور کانادا واقع شده است، در سال ۲۰۰۰ باهدف ازدیاد برداشت نفت آغاز شد. این پروژه دو واحد Weyburn و Vuggy در میدان Weyburn که حاوی سنگ‌آهک و دولومیت هستند را هدف قرار می‌دهد. شرکت گاز سازی داکوتا CO <sub>2</sub> را برای تزریق تأمین می‌کند که تقریباً ۴۰ میلیون تن CO <sub>2</sub> خواهد بود و به‌طور دائم در پروژه ذخیره می‌شود (انتظار می‌رود مدت اجرای آن ۲۰ تا ۲۵ سال باشد).	Raza و همکاران (۲۰۱۶) [۹۱]
پروژه Cranfield / آمریکا	۸ میلیون تن تزریق و ۵ میلیون تن ذخیره	میدان نفت و گاز خالی شده	ماسه‌سنگ / گل‌سنگ	این پروژه که در می‌سی‌سی‌پی، ایالات‌متحده واقع شده است، شامل تزریق CO <sub>2</sub> از گنبد جکسون به یک سازند ماسه‌سنگی عمیق است. این پروژه بخشی از CO <sub>2</sub> تزرفی برای ازدیاد برداشت نفت با عمق کلی ۳۰۰۰ متر و ضخامت ذخیره‌سازی ۳۰ متر است. برای قضاوت در مورد موفقیت پروژه یک طرح پایش مناسب (لرزه‌نگاری ۴ بعدی) انجام شد و هیچ‌گونه نشت CO <sub>2</sub> در طول این پروژه مشاهده نشد.	Kalam و همکاران (۲۰۲۱) [۸۵]
میدان ذخیره‌سازی جبل‌عریستان سعودی	۹ میلیون تن در سال که از سال ۲۰۲۷ شروع می‌شود	-	کربنات / نامعلوم	این مرکز تا سال ۲۰۲۱، تنها مرکز کاملاً تجاری ذخیره‌سازی کربن جهان برای صنعت آهن و فولاد به شمار می‌رفت. این مرکز CO <sub>2</sub> را از یک کارخانه آهن مستقیماً جذب می‌کند. این کارخانه از سیستم سنتی تولیدی استفاده می‌کند که منجر به یک جریان خروجی غنی از CO <sub>2</sub> (بالای ۹۹ درصد) می‌شود. CO <sub>2</sub> سپس فشرده شده و به‌منظور بهبود برداشت نفت تزریق می‌شود.	Kalam و همکاران (۲۰۲۱)؛ Sheikh (۲۰۱۴) [۸۵، ۸۶]
میدان ذخیره‌سازی جبل‌عریستان سعودی	۹ میلیون تن در سال که از سال ۲۰۲۷ شروع می‌شود	-	کربنات / نامعلوم	آرامکو، SLB <sup>۱</sup> و Linde در حال همکاری برای ساخت یکی از بزرگ‌ترین شبکه‌های بهره‌برداری جهان در منطقه صنعتی جبل‌عریستان سعودی هستند. این هاب تسهیلات حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> مشترک را در بین انتشار کنندگان صنعتی ارتقا می‌دهد و هزینه و ریسک را به حداقل می‌رساند و درعین حال از صرفه‌جویی در مقیاس بزرگ سود می‌برد. از سال ۲۰۲۷، مرکز ذخیره‌سازی جبل‌عریستان دارد سالانه تا ۹ میلیون تن CO <sub>2</sub> جذب کند. سهم آرامکو ۶ میلیون تن خواهد بود که ۳ میلیون تن باقیمانده از گازهای گلخانه‌ای صنعتی مجاور تأمین می‌شود.	Aramco (۲۰۲۳)؛ Ye و همکاران (۲۰۲۳) [۹۲، ۹۴]
پروژه کترین / آلمان	۶۷۲۷۱ تن	سفره‌های آب شور عمیق	ماسه‌سنگ / خاک رس روپلین <sup>۲</sup>	این پروژه که در کترین آلمان واقع شده است، در سال ۲۰۰۸ آغاز شد و در سال ۲۰۰۹ به پایان رسید. هدف اصلی آن تزریق CO <sub>2</sub> به سازند ماسه‌سنگ اشتوتگارت برای نظارت و جمع‌آوری داده‌ها بود. در این پروژه، CO <sub>2</sub> از طریق خط لوله منتقل و با موفقیت در زیر سطح ذخیره شد.	Cheng و همکاران (۲۰۲۰) [۱۰]
میدان Gorgon / جزیره بارو در غرب استرالیا	۱۲۹ میلیون تن	سفره‌های آب شور عمیق	ماسه‌سنگ و سیلت / سنگ / شیل	از زمان شروع این پروژه در سال ۲۰۱۹، ۷ میلیون تن CO <sub>2</sub> تزریق شده است و پیش‌بینی می‌شود که بیش از ۱۰۰ میلیون تن ظرفیت ذخیره‌سازی در این مکان باشد. در این پروژه با جداسازی CO <sub>2</sub> طبیعی از میدانی گازی فراساحلی، آن را به ساختار ماسه‌سنگی Dupuy در عمق ۳۰۰۰ متری تزریق می‌کنند.	Yang و همکاران (۲۰۲۳) [۸۹]
میدان SACROC / نگرانس، ایالات‌متحده آمریکا	۲۵۵ میلیون تن	میدان نفت و گاز خالی شده	سنگ‌آهک کربناته / گل‌سنگ	واحد SACROC که در سال ۱۹۴۸ کشف شد، یکی از بزرگ‌ترین میدانی نفتی حلاوی CO <sub>2</sub> در ایالات‌متحده است. این میدان که حدود ۵۰۰۰۰ هکتار را پوشش می‌دهد، در شهرستان اسکر، نگرانس، در حوضه پریمین واقع شده است. بر اساس پایش، تزریق و ذخیره CO <sub>2</sub> کمترین تأثیر زیست‌محیطی را در این منطقه داشته است.	Yang و همکاران (۲۰۲۳) [۸۹]
پروژه رأس لافان / قطر	۲/۱ میلیون تن در سال	میدان نفت و گاز خالی شده	کربنات / نامعلوم	این پروژه شامل جذب CO <sub>2</sub> از تأسیسات گاز طبیعی مایع رأس لافان است. با این پروژه‌های جدید CCS، صنعت گاز طبیعی مایع قطر تا سال ۲۰۲۵ بیش از ۵ میلیون تن در سال CO <sub>2</sub> را جذب خواهد کرد.	Yusmananto و همکاران (۲۰۲۳) [۹۵]

- Schlumberger
- Rupelian clay

(جدول ۴) به بررسی مهم‌ترین پروژه‌های میدانی ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن در جهان می‌پردازد که نشان‌دهنده تنوع روش‌ها و محیط‌های ذخیره‌سازی است. پروژه ناگائوکا در ژاپن (از سال ۲۰۰۰) به‌عنوان یکی از اولین پروژه‌ها، تزریق متناوب CO<sub>2</sub> و آب را در ماسه‌سنگ با موفقیت آزمایش کرد. در مقابل، پروژه Sleipner (از ۱۹۹۶) با تزریق روزانه ۲۸۰۰ تن CO<sub>2</sub> در ماسه‌سنگ Utsira، الگوی برای ذخیره‌سازی در سفره‌های آب شور شد. پروژه‌های نوآورانه‌ای مانند Carbfix در ایسلند و پروژه Wallula Basalt در آمریکا با معدنی کردن CO<sub>2</sub> در سنگ‌های بازالتی، راه‌حلی برای ذخیره‌سازی دائمی CO<sub>2</sub> ارائه دادند. نتایج نشان می‌دهد کانی‌سازی در بازالت می‌تواند طی دو سال اتفاق بیفتد. از دیگر پروژه‌های شاخص، پروژه Gorgon استرالیا با ظرفیت ۱۲۹ میلیون تن و پروژه SACROC در تگزاس با ۲۵۵ میلیون تن ذخیره‌شده هستند که اثربخشی ذخیره‌سازی در میداین تخلیه‌شده نفت و گاز را تأیید می‌کنند

در خاورمیانه، پروژه البریاده در امارات (از سال ۲۰۱۶) به‌عنوان اولین مرکز تجاری ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در صنعت فولاد، سالانه ۰/۸ میلیون تن گاز را جذب می‌کند، درحالی‌که پروژه جیبیل در عربستان (از سال ۲۰۲۷) با هدف ذخیره‌سازی ۹ میلیون تن در سال، یکی از بزرگترین مراکز جهانی خواهد بود. پروژه رأس لافان در قطر نیز ظرفیت جذب ۲/۱ میلیون تن گاز در سال را دارد. چالش‌های گزارش‌شده شامل نگرانی‌ها درباره یکپارچگی پوش‌سنگ (پروژه صلاح‌الجزایر) و نیاز به سیستم‌های پایش پیشرفته (مانند لرزه‌نگاری چهاربعدی در Cranfield) است. با این حال، موفقیت این پروژه‌ها بدون گزارش نشت، گواهی بر امکان ذخیره‌سازی ایمن CO<sub>2</sub> است. این تجربیات نشان می‌دهد که انتخاب ساختار زیرزمینی مناسب (سفره‌های آب شور، میداین تخلیه‌شده یا سازندهای بازالتی) و تطبیق روش‌های تزریق با شرایط محلی، کلید موفقیت در مقیاس صنعتی است.

## ۷. چشم‌اندازهای ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub>

### ۷-۱. ازدیاد برداشت نفت

یکی از روش‌های مورد استفاده در ازدیاد برداشت نفت، تزریق CO<sub>2</sub> به مخازن هیدروکربنی است. هنگامی که CO<sub>2</sub> به این مخازن تزریق می‌شود، به‌عنوان یک حلال عمل کرده و گرانیروی نفت را کاهش می‌دهد. این امر باعث می‌شود نفت بیشتری به سمت چاه‌های تولیدی جریان یابد و درآمد تولیدکنندگان نفتی افزایش پیدا کند [۹۶]. این فرآیند یک مزیت اقتصادی برای شرکت‌ها ایجاد می‌کند تا CO<sub>2</sub> را ذخیره کنند، زیرا می‌توانند از

آن برای کاربردهای ازدیاد برداشت نفت استفاده کنند؛ بنابراین، تولید منابع هیدروکربنی هم‌زمان با ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> روشی مؤثر برای پوشش هزینه‌های ذخیره‌سازی کربن و کسب مزایای اقتصادی اضافی محسوب می‌شود [۹۷]. علاوه بر این، استفاده از CO<sub>2</sub> در این فرآیند می‌تواند عمر مفید بسیاری از میداین نفتی را نیز افزایش دهد [۹۸].

### ۷-۲. جذب و ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub>

در حال حاضر، حدود ۴۰ پروژه از روش جذب و ذخیره CO<sub>2</sub> در فرآیندهای صنعتی، تبدیل سوخت و تولید برق استفاده می‌کنند، درحالی‌که بیش از ۵۰۰ پروژه ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در مراحل مختلف توسعه قرار دارند. توسعه‌دهندگان پروژه قصد دارند تا سال ۲۰۳۰ پنجاه واحد جدید را راه‌اندازی کنند که از ژانویه ۲۰۲۲ سالانه حدود ۱۲۵ میلیون تن CO<sub>2</sub> را جذب می‌کنند [۹۹]. در واقع، بسیاری از کشورها در سراسر جهان اقداماتی برای کاهش سطح CO<sub>2</sub> انجام می‌دهند. به‌عنوان مثال، ایالات متحده و بریتانیا که در حال افزایش بودجه پروژه‌های ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> هستند [۸۵]. (جدول ۵) پیشرفت‌های اخیر در زمینه ذخیره‌سازی، ابتکارات کشورهای مختلف و ظرفیت بالقوه ذخیره‌سازی آن‌ها را ارائه می‌کند.

(جدول ۵) چشم‌انداز جهانی پروژه‌های ذخیره‌سازی کربن را با تمرکز بر برنامه‌ریزی‌های کلان کشورها ترسیم می‌کند. بر اساس داده‌ها، آمریکا با برنامه‌ریزی برای رسیدن به ظرفیت ۴۲۰ میلیون تن در سال تا ۲۰۳۰ پیش‌تاز است که این امر با تخصیص بودجه از قانون کاهش تورم ۲۰۲۲ و سرمایه‌گذاری در پروژه‌های زیرساختی تسهیل شده است. اتحادیه اروپا نیز با هدف ۸۰ میلیون تن در سال ۲۰۳۰ و برنامه توسعه به ۳۰۰ میلیون تن تا ۲۰۴۰، از طریق تصویب قوانین جدید مانند مجوز پروژه Greensand دانمارک در حال پیشرفت است. چین با ظرفیت بالقوه خیره‌کننده ۴۴۸ گیگاتن و راه‌اندازی سه پروژه جدید در سال ۲۰۲۳ و اندونزی به‌عنوان اولین کشور آسیایی با چارچوب قانونی کامل ذخیره‌سازی، از دیگر بازیگران مهم هستند. بریتانیا نیز با تخصیص ۲۰ میلیارد پوند برای پروژه‌های اولیه، به سمت هدف ۳۰ میلیون تنی تا سال ۲۰۳۰ حرکت می‌کند. این داده‌ها نشان می‌دهند که اگرچه اهداف کشورهای متنوع است، اما رویکردهای مشترکی مانند تصویب قوانین حمایتی (اتحادیه اروپا و اندونزی)، سرمایه‌گذاری‌های کلان (آمریکا و بریتانیا) و ادغام با برنامه‌های کاهش انتشار (خاورمیانه) به‌عنوان عوامل محرک مطرح هستند. موفقیت این برنامه‌ها مستلزم هماهنگی بین سیاست‌گذاری، تأمین مالی و توسعه فناوری است.



جدول ۵: خلاصه‌ای از پروژه‌های ذخیره‌سازی و ظرفیت ذخیره‌سازی بالقوه در کشورها

کشور	پیشرفت در ذخیره‌سازی	ظرفیت ذخیره‌سازی بالقوه	مراجع
UK	۲۰ میلیارد پوند برای استقرار اولیه پروژه‌های ذخیره‌سازی در بهار ۲۰۲۳ در نظر گرفته شده است.	تا سال ۲۰۳۰ تا ۳۰ میلیون تن در سال	Budinis و همکاران Department (۲۰۲۳)؛ for Energy Security (۲۰۲۲) and Net Zero [۱۰۰, ۹۹]
Indonesia	یک چارچوب قانونی و نظارتی برای ذخیره‌سازی در این کشور، در مارس ۲۰۲۳ نهایی شد و این چارچوب، آن را به اولین کشور در منطقه تبدیل کرد که چارچوبی برای فعالیت‌های بهره‌برداری و ذخیره‌سازی ایجاد می‌کند.	تقریباً ۳۰ میلیون تن در سال تا سال ۲۰۴۰	Budinis و همکاران World Energy (۲۰۲۳)؛ (۲۰۲۲) [۱۰۱, ۹۹]
US	در سال ۲۰۲۲، اقداماتی برای توسعه پروژه‌های ذخیره‌سازی گاز انجام شد، از جمله بودجه اضافی از قانون سرمایه‌گذاری زیرساخت و مشاغل سال ۲۰۲۱ و اعتبار مالیاتی بهره‌برداری و ذخیره‌سازی در قانون کاهش تورم ۲۰۲۲ برای این پروژه‌ها لحاظ شد.	۴۲۰ میلیون تن در سال تا سال ۲۰۳۰	Budinis و همکاران Greenfield (۲۰۲۳)؛ and Zhang (۲۰۲۳) [۱۰۲, ۹۹]
EU	در مارس ۲۰۳۰، قانونی وضع شد که هدف آن ذخیره سالانه ۵۰ میلیون تن CO <sub>2</sub> در سال تا سال ۲۰۳۰ است. همچنین، صدور مجوزهای ذخیره‌سازی آزمایشی پروژه Greensand در دانمارک نیز انجام شد.	۸۰ میلیون تن در سال تا سال ۲۰۳۰ و هدف افزایش به ۳۰۰ میلیون تن در سال تا سال ۲۰۴۰	Budinis و همکاران (۲۰۲۳) Simon (۲۰۲۳) [۱۰۳, ۹۹]
China & Japan	در سال ۲۰۲۳، سه پروژه جدید در چین به بهره‌برداری رسید، در حالی که ژاپن هفت پروژه آینده‌نگرانه را برای کمک به تجاری‌سازی تعیین کرده است.	چین: تقریباً ۴۴۸ گیگاتن ژاپن: ۶-۱۲ میلیون تن در سال تا سال ۲۰۳۰	Budinis و همکاران (۲۰۲۳) Reuters (۲۰۲۳)؛ Zhong و همکاران (۲۰۲۳) [۱۰۵, ۱۰۴, ۹۹]

### ۷-۳. فرصت‌های اقتصادی

حمل‌ونقل تخصصی و توسعه تأسیسات ذخیره‌سازی افزایش خواهد یافت؛ بنابراین، در حالی که ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در کوتاه‌مدت به باز یافت نفت کمک می‌کند، اما مزایای بلندمدت آن از نظر کاهش تغییرات آب و هوایی و رشد اقتصادی، این بخش را به زمینه‌ای ارزشمند برای توجه و سرمایه‌گذاری تبدیل کرده است [۱۰۷].

#### ۸. پتانسیل و امکان‌سنجی ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در ایران

ایران به‌عنوان یکی از کشورهای دارای منابع عظیم نفت و گاز، ظرفیت قابل توجهی برای ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در مخازن زیرزمینی دارد. با توجه به انتشار بالای دی‌اکسید کربن ناشی از صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، توسعه فناوری‌های جذب و ذخیره‌سازی کربن می‌تواند نقش مهمی در کاهش اثرات زیست‌محیطی ایفا کند. ایران با داشتن ساختارهای

با افزایش نیاز به کاهش انتشار کربن، پتانسیل قابل توجهی در بخش‌های مرتبط با جذب، حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> وجود دارد که شامل توسعه فناوری‌های جدید، زیرساخت‌ها و خدمات مرتبط می‌شود. استقرار این پایگاه‌ها در مقیاس بزرگ می‌تواند مشاغل متعددی را در زمینه‌های مختلفی مانند تحقیق و توسعه، مهندسی، ساخت‌وساز و بهره‌برداری و نگهداری از تأسیسات ذخیره‌سازی ایجاد کند. علاوه بر این، فرصت‌های شغلی جدیدی در بخش حمل‌ونقل، به‌ویژه برای خطوط لوله یا کشتی‌های انتقال CO<sub>2</sub> ایجاد خواهد شد [۱۰۶]. رشد بخش ذخیره‌سازی همچنین می‌تواند رشد صنایع وابسته را نیز تقویت کند. به‌عنوان مثال، تقاضا برای مواد و تجهیزات مورد نیاز برای جذب CO<sub>2</sub>، وسایل



زمین‌شناسی متنوع، بستر مناسبی برای ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در اعماق زمین دارد. سه نوع ساختار اصلی برای ذخیره‌سازی ژئولوژیکی در ایران قابل شناسایی هستند که عبارتند از: (۱) مخازن نفت و گاز تخلیه شده، (۲) مخازن آب شور عمیق، (۳) سازندهای نمکی.

مخازن نفت و گاز که به پایان عمر تولید خود نزدیک شده‌اند، از جمله گزینه‌های اصلی برای تزریق و ذخیره CO<sub>2</sub> هستند. بنا به گزارش شرکت ملی نفت ایران، بیش از ۲۰۰ میدان نفتی در کشور وجود دارد که از این میان حدود ۶۰ میدان در حال گذار به مراحل انتهایی بهره‌برداری قرار دارند. از جمله مهم‌ترین این مخازن می‌توان به میدان نفتی آغاچاری، میدان نفتی اهواز، میدان نفتی گچساران، میدان گازی خانگیران اشاره کرد. ظرفیت ذخیره‌سازی در

این میادین به‌طور میانگین بین ۵۰ تا ۵۰۰ میلیون تن CO<sub>2</sub> تخمین زده می‌شود. این سازندها بیشترین ظرفیت بالقوه برای ذخیره‌سازی را دارا هستند. بر اساس مطالعات مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران دارای بیش از ۵۰ سازند آب شور در حوضه‌های زاگرس، خلیج فارس و کویر مرکزی است. به‌عنوان مثال، سازند دالان و سازند عرب در جنوب ایران می‌توانند تا چندین میلیارد تن CO<sub>2</sub> را در خود ذخیره کنند. اگرچه ذخیره‌سازی در ساختارهای نمکی در ایران کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است، اما وجود گنبد‌های نمکی در استان‌هایی مانند فارس، هرمزگان و بوشهر ظرفیت بالقوه‌ای برای توسعه فناوری ذخیره‌سازی فشرده CO<sub>2</sub> فراهم می‌کند. (جدول ۶) برخی از مناطق اولویت دار ایران برای پروژه ذخیره‌سازی را نمایش می‌دهد.

جدول ۶: مناطق اولویت‌دار ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در ایران

ملاحظات فنی	برآورد ظرفیت ذخیره‌سازی CO <sub>2</sub> (میلیون تن)	نوع ساختار	منطقه
زیرساخت مناسب نفتی	۱۵۰۰-۱۰۰۰	مخازن نفتی تخلیه شده	جنوب خوزستان (اهواز - گچساران)
نزدیکی به منابع آلاینده صنعتی	۸۰۰-۵۰۰	مخازن آب شور و گازی	بوشهر - عسلویه
دسترسی به گنبد‌های نمکی	۶۰۰-۳۰۰	ساختارهای نمکی و آبی	حوضه فارس داخلی
دور از مراکز جمعیتی، مناسب از نظر ایمنی	۷۰۰-۴۰۰	مخازن شور عمیق	کویر مرکزی ایران (یزد - طبس)
وجود ایستگاه تقویت فشار	۳۵-۲۵	مخزن گازی تخلیه شده	سراجه قم

ایران دارای شبکه گسترده‌ای از خطوط لوله انتقال نفت و گاز است که در صورت توسعه زیرساخت‌های انتقال CO<sub>2</sub>، می‌تواند به‌عنوان مزیت نسبی برای پیاده‌سازی پروژه ذخیره‌سازی تلقی شود. با این حال، عدم تدوین چارچوب‌های قانونی و زیست‌محیطی برای ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub>، نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا برای توسعه فناوری جذب و تزریق، کمبود داده‌های ژئوفیزیکی دقیق از برخی مخازن و فقدان نیروهای متخصص در حوزه‌های مهندسی ذخیره‌سازی از برخی چالش‌های کلیدی ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در ایران به شمار می‌روند. مطالعات انجام‌شده توسط مرکز تحقیقات انرژی دانشگاه صنعتی شریف و پژوهشگاه صنعت نفت نشان می‌دهد که ظرفیت ذخیره‌سازی بالقوه دی‌اکسید کربن در ایران بالغ بر ۵۰ تا ۸۰ میلیارد تن

در بلندمدت می‌باشد. این ظرفیت می‌تواند انتشار کل CO<sub>2</sub> ناشی از فعالیت‌های صنعتی کشور را برای ۴۰ تا ۶۰ سال آینده پوشش دهد، به شرط آن که سرمایه‌گذاری و سیاست‌گذاری مناسبی در این راستا انجام شود.

### ۹. نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش روزافزون چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از تغییرات اقلیمی، ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در ساختارهای زیرزمینی به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهبردهای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شناخته می‌شود. این مقاله با مروری جامع بر ساختارهای مناسب برای ذخیره‌سازی از جمله سفره‌های آب شور، مخازن نفت و گاز تخلیه‌شده، لایه‌های زغال‌سنگ



- footprint in the petroleum industry. *Energies*, 16(3), 1167.
- [4]. Kim, D., Kim, K.-T., & Park, Y.-K. (2020). A comparative study on the reduction effect in greenhouse gas emissions between the combined heat and power plant and boiler. *Sustainability*, 12(12), 5144.
- [5]. Metz, B., Davidson, O., De Coninck, H., Loos, M., & Meyer, L. (2005). IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge: Cambridge University Press.
- [6]. Boot-Handford, M. E., Abanades, J. C., Anthony, E. J., Blunt, M. J., Brandani, S., Mac Dowell, N., Fernández, J. R., Ferrari, M.-C., Gross, R., & Hallett, J. P. (2014). Carbon capture and storage update. *Energy & Environmental Science*, 7(1), 130-189.
- [7]. Farajzadeh, R., Eftekhari, A. A., Dafnomilis, G., Lake, L., & Bruining, J. (2020). On the sustainability of CO<sub>2</sub> storage through CO<sub>2</sub>-Enhanced oil recovery. *Applied energy*, 261, 114467.
- [8]. Ding, S., Li, Y., Zhang, M., Xu, C., Wang, S., Gao, Y., Yu, H., Du, Y., & Ma, J. (2024). Holistic Review on CO<sub>2</sub> Geological Storage Potential Evaluation. *Energy & Fuels*, 38(21), 19946-19965.
- [9]. Bachu, S. (2008). CO<sub>2</sub> storage in geological media: Role, means, status and barriers to deployment. *Progress in energy and combustion science*, 34(2), 254-273.
- [10]. Cheng, Y., Liu, W., Xu, T., Zhang, Y., Zhang, X., Xing, Y., Feng, B., & Xia, Y. (2023). Seismicity induced by geological CO<sub>2</sub> storage: A review. *Earth-Science Reviews*, 239, 104369.
- [11]. Nicol, A., Carne, R., Gerstenberger, M., & Christophersen, A. (2011). Induced seismicity and its implications for CO<sub>2</sub>

غیرقابل استخراج، سازندهای بازالتی و روش‌های نوین مانند ذخیره‌سازی به شکل هیدرات، نشان می‌دهد که هر یک از این گزینه‌ها، فرصت‌ها و چالش‌های خاص خود را دارند.

سازوکارهای فیزیکی و شیمیایی به دام انداختن CO<sub>2</sub> شامل مکانیسم‌های ساختاری، مویبندی، انحلالی و معدنی، نقش مهمی در تضمین ایمنی و پایداری بلندمدت این فرایند ایفا می‌کنند. مطالعات آزمایشگاهی و میدانی انجام‌شده در پروژه‌های مختلف جهانی، کارآمدی این فناوری را اثبات کرده و پتانسیل آن را برای پیاده‌سازی در مقیاس صنعتی نمایان ساخته‌اند. در همین راستا، مدل‌سازی‌های پیشرفته‌تری برای تحلیل رفتار مخزن و ارزیابی خطرات احتمالی نشست فراهم کرده‌اند. هوش مصنوعی نیز می‌تواند به‌عنوان دستیار جدیدی برای پروژه‌های ذخیره‌سازی به کار گرفته شود تا بازدهی پروژه بهبود چشمگیری پیدا کند.

ایران با برخورداری از ظرفیت‌های زمین‌شناسی قابل‌توجه، زیرساخت‌های صنعتی گسترده و تجارب ارزشمند در حوزه نفت و گاز، جایگاه مناسبی برای توسعه فناوری ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> دارد. با این حال، تحقق این پتانسیل مستلزم تدوین سیاست‌های حمایتی، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها و تقویت دانش بومی در حوزه‌های مرتبط است.

در مجموع، توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> نه تنها به کاهش قابل‌توجه انتشار کربن کمک می‌کند، بلکه می‌تواند بستری برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار، امنیت انرژی و اقتصاد فراهم آورد. برای تحقق این مهم، هم‌افزایی میان دانشگاه، صنعت و نهادهای سیاست‌گذار ضرورتی انکارناپذیر است.

#### مراجع:

- [1]. Easterbrook, D. J. (2016). Greenhouse gases. In *Evidence-Based Climate Science* (pp. 163-173). Elsevier.
- [2]. Vásquez, L., Iriarte, A., Almeida, M., & Villalobos, P. (2015). Evaluation of greenhouse gas emissions and proposals for their reduction at a university campus in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 108, 924-930.
- [3]. Bello, A., Ivanova, A., & Cheremisin, A. (2023). A comprehensive review of the role of CO<sub>2</sub> foam EOR in the reduction of carbon





- Liao, J., & Feng, W. (2020). A review of CO<sub>2</sub> storage in view of safety and cost-effectiveness. *Energies*, 13(3), 600.
- [21]. Hannis, S., Lu, J., Chadwick, A., Hovorka, S., Kirk, K., Romanak, K., & Pearce, J. (2017). CO<sub>2</sub> storage in depleted or depleting oil and gas fields: what can we learn from existing projects? *Energy Procedia*, 114, 5680-5690.
- [22]. Shi, J., & Durucan, S. (2005). CO<sub>2</sub> storage in deep unminable coal seams. *Oil & gas science and technology*, 60(3), 547-558.
- [23]. Gunter, W., Wiwehar, B., & Perkins, E. (1997). Aquifer disposal of CO<sub>2</sub>-rich greenhouse gases: extension of the time scale of experiment for CO<sub>2</sub>-sequestering reactions by geochemical modelling. *Mineralogy and petrology*, 59(1-2), 121.
- [24]. Hamelinck, C., Faaij, A. P., Ruijg, G., Jansen, D., Pagnier, H., Van Bergen, F., Wolf, K., Barzandji, O., Bruining, H., & Schreurs, H. (2001). Potential for CO<sub>2</sub> sequestration and enhanced coalbed methane production in the Netherlands.
- [25]. Vishal, V., Singh, T. N., & Ranjith, P. (2015). Influence of sorption time in CO<sub>2</sub>-ECBM process in Indian coals using coupled numerical simulation. *Fuel*, 139, 51-58.
- [26]. Cui, X., Zhang, J., Guo, L., & Gong, X. (2020). Experimental investigation of the use of expansive materials to increase permeability in coal seams through expansive fracturing. *Shock and Vibration*, 2020(1), 7925724.
- [27]. Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Wiese, F., Fridriksson, T., Ármansson, H., Einarsson, G. M., & Gislason, S. R. (2014). CO<sub>2</sub> storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges. *Energy Procedia*, 63, 4585-4590.
- storage risk. *Energy Procedia*, 4, 3699-3706.
- [12]. Michael, K., Golab, A., Shulakova, V., Ennis-King, J., Allinson, G., Sharma, S., & Aiken, T. (2010). Geological storage of CO<sub>2</sub> in saline aquifers—A review of the experience from existing storage operations. *International journal of greenhouse gas control*, 4(4), 659-667.
- [13]. Le Gallo, Y., Couillens, P., & Manai, T. (2002). CO<sub>2</sub> sequestration in depleted oil or gas reservoirs. *SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Environment, and Sustainability?*
- [14]. Rochelle, C. A., Czernichowski-Lauriol, I., & Milodowski, A. (2004). The impact of chemical reactions on CO<sub>2</sub> storage in geological formations: a brief review.
- [15]. Gunter, W. D., Bachu, S., & Benson, S. (2004). The role of hydrogeological and geochemical trapping in sedimentary basins for secure geological storage of carbon dioxide.
- [16]. De Silva, G., Ranjith, P. G., & Perera, M. (2015). Geochemical aspects of CO<sub>2</sub> sequestration in deep saline aquifers: A review. *Fuel*, 155, 128-143.
- [17]. Chadwick, R., Zweigel, P., Gregersen, U., Kirby, G., Holloway, S., & Johannessen, P. (2004). Geological reservoir characterization of a CO<sub>2</sub> storage site: The Utsira Sand, Sleipner, northern North Sea. *Energy*, 29(9-10), 1371-1381.
- [18]. Pruess, K., Xu, T., Apps, J., & Garcia, J. (2003). Numerical modeling of aquifer disposal of CO<sub>2</sub>. *SPE Journal*, 8(01), 49-60.
- [19]. Davidson, J., Freund, P., & Smith, A. (2001). Putting carbon back in the ground.
- [20]. Cao, C., Liu, H., Hou, Z., Mehmood, F.,

- [35]. Shukla, R., Ranjith, P., Haque, A., & Choi, X. (2010). A review of studies on CO<sub>2</sub> sequestration and caprock integrity. *Fuel*, 89(10), 2651-2664.
- [36]. Luo, A., Li, Y., Chen, X., Zhu, Z., & Peng, Y. (2022). Review of CO<sub>2</sub> sequestration mechanism in saline aquifers. *Natural Gas Industry B*, 9(4), 383-393.
- [37]. Chiquet, P., Daridon, J.-L., Broseta, D., & Thibeau, S. (2007). CO<sub>2</sub>/water interfacial tensions under pressure and temperature conditions of CO<sub>2</sub> geological storage. *Energy Conversion and Management*, 48(3), 736-744.
- [38]. Mahmood, M. N., Gupta, A. S., & Islam, M. T. (2024). CO<sub>2</sub> Storage in Natural Gas Hydrate Reservoirs: A Review on Prospects and Challenges Ahead. *Next Research*, 100017.
- [39]. Rutqvist, J., & Tsang, C.-F. (2002). A study of caprock hydromechanical changes associated with CO<sub>2</sub>-injection into a brine formation. *Environmental Geology*, 42, 296-305.
- [40]. Birkholzer, J. T., Zhou, Q., & Tsang, C.-F. (2009). Large-scale impact of CO<sub>2</sub> storage in deep saline aquifers: A sensitivity study on pressure response in stratified systems. *International journal of greenhouse gas control*, 3(2), 181-194.
- [41]. Al Hameli, F., Belhaj, H., & Al Dhuhoori, M. (2022). CO<sub>2</sub> sequestration overview in geological formations: Trapping mechanisms matrix assessment. *Energies*, 15(20), 7805.
- [42]. Jenkins, C. R., Cook, P. J., Ennis-King, J., Undershultz, J., Boreham, C., Dance, T., De Caritat, P., Etheridge, D. M., Freifeld, B. M., & Hortle, A. (2012). Safe storage and 4600.
- [28]. Gislason, S. R., & Oelkers, E. H. (2014). Carbon storage in basalt. *Science*, 344(6182), 373-374.
- [29]. Power, I. M., Harrison, A. L., Dipple, G. M., Wilson, S., Kelemen, P. B., Hitch, M., & Southam, G. (2013). Carbon mineralization: from natural analogues to engineered systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 77(1), 305-360.
- [30]. Bickle, M., Kampman, N., Chapman, H., Ballentine, C., Dubacq, B., Galy, A., Sirikitputtisak, T., Warr, O., Wigley, M., & Zhou, Z. (2017). Rapid reactions between CO<sub>2</sub>, brine and silicate minerals during geological carbon storage: Modelling based on a field CO<sub>2</sub> injection experiment. *Chemical Geology*, 468, 17-31.
- [31]. Circone, S., Stern, L. A., Kirby, S. H., Durham, W. B., Chakoumakos, B. C., Rawn, C. J., Rondinone, A. J., & Ishii, Y. (2003). CO<sub>2</sub> hydrate: synthesis, composition, structure, dissociation behavior, and a comparison to structure I CH<sub>4</sub> hydrate. *The Journal of Physical Chemistry B*, 107(23), 5529-5539.
- [32]. Aminnaji, M., Qureshi, M. F., Dashti, H., Hase, A., Mosalanejad, A., Jahanbakhsh, A., Babaei, M., Amiri, A., & Maroto-Valer, M. (2024). CO<sub>2</sub> gas hydrate for carbon capture and storage applications–Part 2. *Energy*, 131580.
- [33]. Aminu, M. D., Nabavi, S. A., Rochelle, C. A., & Manovic, V. (2017). A review of developments in carbon dioxide storage. *Applied energy*, 208, 1389-1419.
- [34]. Benson, S. M., & Cole, D. R. (2008). CO<sub>2</sub> sequestration in deep sedimentary formations. *Elements*, 4(5), 325-331.



Frontiers in Climate, 1, 9.

- [51]. Giammar, D. E., Bruant Jr, R. G., & Peters, C. A. (2005). Forsterite dissolution and magnesite precipitation at conditions relevant for deep saline aquifer storage and sequestration of carbon dioxide. *Chemical Geology*, 217(3-4), 257-276.
- [52]. Matter, J. M., & Kelemen, P. B. (2009). Permanent storage of carbon dioxide in geological reservoirs by mineral carbonation. *Nature Geoscience*, 2(12), 837-841.
- [53]. Bachu, S. (2000). Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. *Energy Conversion and Management*, 41(9), 953-970.
- [54]. Gunter, W., Perkins, E., & Hutcheon, I. (2000). Aquifer disposal of acid gases: modelling of water-rock reactions for trapping of acid wastes. *Applied geochemistry*, 15(8), 1085-1095.
- [55]. Wang, H., Yan, J., Song, W., Jiang, C., Wang, Y., & Xu, T. (2022). Ion exchange membrane related processes towards carbon capture, utilization and storage: Current trends and perspectives. *Separation and Purification Technology*, 296, 121390.
- [56]. Han, X., Feng, F., Yan, M., Cong, Z., Liu, S., & Zhang, Y. (2022). CO<sub>2</sub>-water-rock reaction transport via simulation study of nanoparticles- CO<sub>2</sub> flooding and storage. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101736.
- [57]. Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Sigfússon, B., Marieni, C., Goldberg, D., Gislason, S. R., & Oelkers, E. H. (2020). Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(2), 90-102.
- [58]. Soong, Y., Goodman, A., McCarthy-Jones, effective monitoring of CO<sub>2</sub> in depleted gas fields. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(2), E35-E41.
- [43]. Saadatpoor, E., Bryant, S. L., & Sepehrnouri, K. (2010). New trapping mechanism in carbon sequestration. *Transport in porous media*, 82, 3-17.
- [44]. Li, X., Akbarabadi, M., Karpyn, Z., Piri, M., & Bazilevskaya, E. (2015). Experimental investigation of carbon dioxide trapping due to capillary retention in saline aquifers. *Geofluids*, 15(4), 563-576.
- [45]. Saadatpoor, E. (2012). Local capillary trapping in geological carbon storage.
- [46]. Busch, A., Bertier, P., Gensterblum, Y., Rother, G., Spiers, C., Zhang, M., & Wentinck, H. M. (2016). On sorption and swelling of CO<sub>2</sub> in clays. *Geomechanics and Geophysics for Geo-energy and Geo-resources*, 2, 111-130.
- [47]. Golding, S., Uysal, I., Boreham, C., Kirste, D., Baublys, K., & Esterle, J. (2011). Adsorption and mineral trapping dominate CO<sub>2</sub> storage in coal systems. *Energy Procedia*, 4, 3131-3138.
- [48]. Ajayi, T., Gomes, J. S., & Bera, A. (2019). A review of CO<sub>2</sub> storage in geological formations emphasizing modeling, monitoring and capacity estimation approaches. *Petroleum Science*, 16, 1028-1063.
- [49]. Iglauer, S. (2011). Dissolution trapping of carbon dioxide in reservoir formation brine-a carbon storage mechanism. INTECH Open Access Publisher London, UK.
- [50]. Kelemen, P., Benson, S. M., Pilorgé, H., Psarras, P., & Wilcox, J. (2019). An overview of the status and challenges of CO<sub>2</sub> storage in minerals and geological formations.



- [67]. Espinoza, D. N., & Santamarina, J. C. (2017). CO<sub>2</sub> breakthrough—Caprock sealing efficiency and integrity for carbon geological storage. *International journal of greenhouse gas control*, 66, 218-229.
- [68]. Jin, L., Hawthorne, S., Sorensen, J., Pekot, L., Kurz, B., Smith, S., Heebink, L., Herdegen, V., Bosshart, N., & Torres, J. (2017). Advancing CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery and storage in unconventional oil play—Experimental studies on Bakken shales. *Applied energy*, 208, 171-183.
- [69]. Ali, M., Sahito, M. F., Jha, N. K., Memon, S., Keshavarz, A., Iglauer, S., Saeedi, A., & Sarmadivaleh, M. (2020). Effect of nanofluid on CO<sub>2</sub>-wettability reversal of sandstone formation; implications for CO<sub>2</sub> geo-storage. *Journal of colloid and interface science*, 559, 304-312.
- [70]. Ali, M., Yekeen, N., Ali, M., Hosseini, M., Pal, N., Keshavarz, A., Iglauer, S., & Hoteit, H. (2022). Effects of various solvents on adsorption of organics for porous and nonporous quartz/ CO<sub>2</sub>/brine systems: Implications for CO<sub>2</sub> geo-storage. *Energy & Fuels*, 36(18), 11089-11099.
- [71]. Hazarika, S., Boruah, A., & Kumar, H. (2024). Study of pore structure of shale formation for CO<sub>2</sub> storage. *Materials Today: Proceedings*, 99, 138-144.
- [72]. Oldenburg, C. M., Bryant, S. L., & Nicot, J.-P. (2004). Certification framework for geologic carbon sequestration. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [73]. Zhou, Y., Yang, D., & Wang, M. (2022). Machine learning for carbon storage: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112114.
- [74]. Zhang, Z., & Agarwal, R. (2022). Machine J., & Baltrus, J. (2004). Experimental and simulation studies on mineral trapping of CO<sub>2</sub> with brine. *Energy Conversion and Management*, 45(11-12), 1845-1859.
- [59]. Benson, S. M. (2005). Overview of geologic storage of CO<sub>2</sub>. *Carbon dioxide capture for storage in deep geologic formations*, 665-672.
- [60]. Suekane, T., Nobuso, T., Hirai, S., & Kiyota, M. (2008). Geological storage of carbon dioxide by residual gas and solubility trapping. *International journal of greenhouse gas control*, 2(1), 58-64.
- [61]. Bickle, M. J. (2009). Geological carbon storage. *Nature Geoscience*, 2(12), 815-818.
- [62]. Chalbaud, C., Robin, M., Lombard, J., Martin, F., Egermann, P., & Bertin, H. (2009). Interfacial tension measurements and wettability evaluation for geological CO<sub>2</sub> storage. *Advances in water resources*, 32(1), 98-109.
- [63]. Oloruntobi, O., & LaForce, T. (2009). Effect of aquifer heterogeneity on CO<sub>2</sub> sequestration. *SPE Europec featured at EAGE Conference and Exhibition?*
- [64]. Mohamed, I., & Nasr-El-Din, H. A. (2013). Fluid/rock interactions during CO<sub>2</sub> sequestration in deep saline carbonate aquifers: laboratory and modeling studies. *SPE Journal*, 18(03), 468-485.
- [65]. Wang, K., Xu, T., Wang, F., & Tian, H. (2016). Experimental study of CO<sub>2</sub>-brine-rock interaction during CO<sub>2</sub> sequestration in deep coal seams. *International Journal of Coal Geology*, 154, 265-274.
- [66]. Arif, M., Lebedev, M., Barifcani, A., & Iglauer, S. (2017). CO<sub>2</sub> storage in carbonates: Wettability of calcite. *International journal of greenhouse gas control*, 62, 113-121.



380-371.

- [83]. McGrail, B., Spane, F., Sullivan, E., Bacon, D., & Hund, G. (2011). The Wallula basalt sequestration pilot project. *Energy Procedia*, 4, 5653-5660.
- [84]. Kikuta, K., Hongo, S., Tanase, D., & Ohsumi, T. (2005). Field test of CO<sub>2</sub> injection in Nagaoka, Japan. *Proceedings of seventh international conference on greenhouse gas control technologies*,
- [85]. Kalam, S., Olayiwola, T., Al-Rubaii, M. M., Amaechi, B. I., Jamal, M. S., & Awotunde, A. A. (2021). Carbon dioxide sequestration in underground formations: review of experimental, modeling, and field studies. *Journal of petroleum exploration and production*, 11, 303-325.
- [86]. Sengul, M. (2006). CO<sub>2</sub> sequestration—a safe transition technology. *SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Environment, and Sustainability?*,
- [87]. Jones, D., Lister, T., Smith, D., West, J., Coombs, P., Gadalia, A., Brach, M., Annunziatellis, A., & Lombardi, S. (2011). In Salah gas CO<sub>2</sub> storage JIP: Surface gas and biological monitoring. *Energy Procedia*, 4, 3566-3573.
- [88]. Matter, J. M., Broecker, W., Gislason, S., Gunnlaugsson, E., Oelkers, E., Stute, M., Sigurdardóttir, H., Stefansson, A., Alfredsson, H., & Aradóttir, E. (2011). The CarbFix Pilot Project—storing carbon dioxide in basalt. *Energy Procedia*, 4, 5579-5585.
- [89]. Yang, B., Shao, C., Hu, X., Ngata, M. R., & Aminu, M. D. (2023). Advances in carbon dioxide storage projects: Assessment and perspectives. *Energy & Fuels*, 37(3), 1757-1776.
- [90]. Luo, T., Zhou, L., Jiao, Z., Bai, Y., & Wang, Learning for Geothermal Reservoir Characterization. Springer.
- [75]. Yang, F., Liu, Y., Zhang, R., & Smith, J. C. (2022). Machine learning-based prediction of reservoir properties for CO<sub>2</sub> geological storage using seismic and well log data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 213, 110317.
- [76]. Kongsjorden, H., Kårstad, O., & Torp, T. A. (1998). Saline aquifer storage of carbon dioxide in the Sleipner project. *Waste management*, 17(5-6), 303-308.
- [77]. Bowker, K. A., & Shuler, P. (1991). Carbon dioxide injection and resultant alteration of the Weber Sandstone, Rangely Field, Colorado. *AAPG bulletin*, 75(9), 1489-1499.
- [78]. Parshall, J. (2010). Gorgon to drive Australian LNG Asia-export surge. *Journal of Petroleum Technology*, 62(11), 32-35.
- [79]. Sharma, S., Cook, P., Berly, T., & Lees, M. (2009). The CO<sub>2</sub> CRC Otway Project: Overcoming challenges from planning to execution of Australia's first CCS project. *Energy Procedia*, 1(1), 1965-1972.
- [80]. Hosseininoosheri, P., Hosseini, S. A., Nuñez-López, V., & Lake, L. (2018). Impact of field development strategies on CO<sub>2</sub> trapping mechanisms in a CO<sub>2</sub>-EOR field: A case study in the permian basin (SACROC unit). *International journal of greenhouse gas control*, 72, 92-104.
- [81]. Weaver, L. K., & Anderson, K. F. (1966). Cranfield Field, Cranfield Unit, Basal Tuscaloosa Reservoir, Adams and Franklin Counties, Mississippi.
- [82]. Snæbjörnsdóttir, S. Ó., & Gislason, S. R. (2016). CO<sub>2</sub> storage potential of basaltic rocks offshore Iceland. *Energy Procedia*, 86,



- [98]. Sambo, C., Liu, N., Shaibu, R., Ahmed, A. A., & Hashish, R. G. (2023). A technical review of CO<sub>2</sub> for enhanced oil recovery in unconventional oil reservoirs. *Geenergy Science and Engineering*, 221, 111185.
- [99]. Budinis, S., Fajardy, M., Greenfield, C. (2023). Carbon Capture, Utilisation and Storage. The IEA.
- [100]. Zero., D. f. E. S. a. N. (2022). Carbon Capture, Usage And Storage.
- [101]. Energy, W. (2022). Indonesia Advances Carbon Capture, Storage and Utilization Ambitions.
- [102]. Greenfield, C., Zhang, F. (2023). CO<sub>2</sub> Transport and Storage - Energy System.
- [103]. Simon, F. (2023). EU sets World's First Target for Underground CO<sub>2</sub> Storage Capacity.
- [104]. Zhong, Z., Chen, Y., Fu, M., Li, M., Yang, K., Zeng, L., Liang, J., Ma, R., & Xie, Q. (2023). Role of CO<sub>2</sub> geological storage in China's pledge to carbon peak by 2030 and carbon neutrality by 2060. *Energy*, 272, 127165.
- [105]. Reuters. (2023). Japan sets Carbon Capture Roadmap with 6-12 MLN tonne/year target by 2030. Reuters.
- [106]. Gowd, S. C., Ganeshan, P., Vigneswaran, V., Hossain, M. S., Kumar, D., Rajendran, K., Ngo, H. H., & Pugazhendhi, A. (2023). Economic perspectives and policy insights on carbon capture, storage, and utilization for sustainable development. *Science of the Total Environment*, 883, 163656.
- [107]. Johansson, E., & Pétursdóttir, V. (2021). Evaluation of Onshore Transportation Methods for Captured CO<sub>2</sub> between Facility and Harbour in Stockholm. In S. (2014). The Ordos Basin: A premier basin for integrating geological CO<sub>2</sub> storage with enhanced oil recovery projects in China. *Energy Procedia*, 63, 7772-7779.
- [91]. Raza, A., Rezaee, R., Gholami, R., Bing, C. H., Nagarajan, R., & Hamid, M. A. (2016). A screening criterion for selection of suitable CO<sub>2</sub> storage sites. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 28, 317-327.
- [92]. Sheikh, F. (2021). Commercialization of Al Reyadah-World's 1st Carbon Capture CCUS Project from Iron & Steel Industry for Enhanced Oil Recovery CO<sub>2</sub>-EOR. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference,
- [93]. Ye, J., Afifi, A., Rowaihy, F., Baby, G., De Santiago, A., Tasianas, A., Hamieh, A., Khodayeva, A., Al-Juaied, M., & Meckel, T. A. (2023). Evaluation of geological CO<sub>2</sub> storage potential in Saudi Arabian sedimentary basins. *Earth-Science Reviews*, 244, 104539.
- [94]. Aramco. (2023). Carbon Capture, Utilization & Storage. Retrieved 9 July 2023 from
- [95]. Yusmananto, S., Fahmi, B., Ferreira, I., Ibrahim, S., & Koeshidayatullah, A. (2023). CO<sub>2</sub> storage and utilization potential in the Middle East: Lessons learned from the Cretaceous carbonate reservoirs. 84th EAGE Annual Conference & Exhibition,
- [96]. Bashir, A., Abdulmoniem, M., Gbadamosi, A., Patil, S., Aljawad, M. S., Mahmoud, M., & Kamal, M. S. (2024). Application of Foam for Enhanced CO<sub>2</sub> Geological Storage: A Mini-Review. *Energy & Fuels*, 38(20), 19208-19221.
- [97]. Núñez-López, V., & Moskal, E. (2019). Potential of CO<sub>2</sub>-EOR for near-term decarbonization. *Frontiers in Climate*, 1, 5.



## An Overview of CO<sub>2</sub> Storage in Subsurface Structures: Advances, Challenges, and Perspectives

Hossein Heydari<sup>1</sup>, Mahdi Razavifar<sup>2\*</sup>

1. B.Sc. Student, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tabriz, Tabriz, 5166616471, Iran
2. Assistant Professor, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tabriz, Tabriz, 5166616471, Iran

### ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

#### Article History:

Received: 17 April 2025  
Revised: 07 June 2025  
Accepted: 21 May 2025

#### Keywords:

Carbon Dioxide  
Gas Storage  
Greenhouse Gases  
Environmental Pollution  
Global Warming

### ABSTRACT

The Earth's climate has been affected by human activities, including the burning of fossil fuels and deforestation. These activities have caused the emission of greenhouse gases such as carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Fossil fuels are composed of compounds that absorbed atmospheric carbon millions of years ago. Burning these fossil fuels accounts for over 75% of global greenhouse gas emissions and nearly 90% of total CO<sub>2</sub> emissions. Furthermore, according to 2024 statistics, annual CO<sub>2</sub> emissions from burning fossil fuels have reached 37.4 billion tons. For this reason, carbon capture and storage (CCS) is considered a crucial strategy for reducing CO<sub>2</sub> emissions. CO<sub>2</sub> storage is proposed as an effective method to mitigate greenhouse gas emissions. In this context, this article examines various methods of CO<sub>2</sub> storage in subsurface structures, including aquifers, depleted oil and gas reservoirs, unminable coal seams, and basalt formations. The stability of CO<sub>2</sub> storage and various trapping mechanisms are the main topics of this research. The findings indicate that CO<sub>2</sub> storage technology is becoming a valuable and effective method. This article also discusses the prospects and economic opportunities of CO<sub>2</sub> storage, emphasizing its practical potential in combating climate change. Many countries are also interested in storing CO<sub>2</sub> in their subsurface structures. Solutions are presented in this article for researchers, policymakers, and industry stakeholders to pave the way for the development of more efficient, sustainable, and safer storage technologies, potentially playing a key role in addressing the challenge of global climate change.

DOR: [20.1001.1.25041093.1404.03.17](https://doi.org/20.1001.1.25041093.1404.03.17)

#### How to cite this article

H. Heydari, M. Razavifar, An Overview of CO<sub>2</sub> Storage in Subsurface Structures: Advances, Challenges, and Perspectives. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025; 12(1): 91-115. ([https://www.ijge.irangi.org/article\\_725705.html](https://www.ijge.irangi.org/article_725705.html))

\* Corresponding Author.

E-mail address: [m.razavifar@tabrizu.ac.ir](mailto:m.razavifar@tabrizu.ac.ir), (M. Razavifar).

Available online 22 Jun 2025

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



# راهنمای نگارش مقالات در مجله علمی مهندسی گاز ایران

رهبر رحیمی<sup>۱</sup>، رضا مسیبی بهبهانی<sup>۲\*</sup>، محمد جامی الاحمدی<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، کد پستی ۹۸۱۶۷-۴۵۸۴۵، زاهدان، ایران

۲. گروه مهندسی گاز، دانشکده نفت اهواز، دانشگاه صنعت نفت، صندوق پستی: ۶۳۴۳۱، خوستان، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: info@irangi.org

**چکیده:** در این راهنما چگونگی تنظیم مقالات جهت مجله انجمن مهندسی گاز ایران شرح داده شده است. رعایت آن در تسریع امر چاپ موثر است.

**کلمات کلیدی:** راهنما، گاز، فونت، B nazanin، فارسی

## ۱. مقدمه:

بخش مقدمه تا مراجع به صورت تک ستونی و تک رویه تایپ شود. برای بخش فارسی مقالات از قلم B Nazanin سایز ۱۲ نازک و متن لاتین از قلم Times New Roman سایز ۱۱ نازک استفاده می شود.

جداول، نمودارها و شکلها داخل متن و به صورت فارسی باشند. در صورت استفاده از نرم افزار حتماً باید مرجع آن مشخص شود از معادل فارسی کلمات انگلیسی در متن استفاده شود. معادل لاتین داخل متن در صورتی که کمتر از ۵۱ کلمه باشند به صورت Footnote<sup>۱</sup> آورده شود بیشتر از ۵۹ کلمه واژه نامه در نظر گرفته شود.

## ۳. صفحه آرایی:

حاشیه بالای صفحه اول ۵ سانتیمتر (۲ اینچ) و در صفحات دیگر ۲/۵ سانتیمتر (۱ اینچ) باشد. فاصله خطوط به صورت Single و متن از سمت راست و چپ Justify تنظیم شود.

## ۴. بخش های هر مقاله به ترتیب زیر است:

۱.۴. عنوان مقاله: کوتاه و معرف محتوی مقاله باشد و از ۲۰ کلمه تجاوز نکند (B Nazanin سایز ۱۸ ضخیم).

۲.۴. اسم یا اسامی و عناوین علمی نویسندگان: عهده دار مکاتبات با علامت \* مشخص گردد (قلم B Nazanin سایز ۱۰ ضخیم).

انجمن مهندسی گاز ایران با هدف افزایش تبادلات علمی و تحقیقاتی جامعه مهندسی شیمی، نفت و گاز و گسترش روحیه ابتکار، ابداع و نوآوری مهندسان و محققان تقویت ارتباطات همه جانبه صنعت با دانشگاه و جامعه مجله علمی مهندسی گاز ایران را در زمینه های تازه های مهندسی گاز، معرفی صنایع مرتبط، آموزش در مهندسی گاز، نفت، پتروشیمی و شیمی، معرفی نوآوری ها و فن آوری های نوین صنعتی و اخبار جامعه مهندسی گاز را منتشر می کند.

## ۲. شرح نوشتار:

از نویسندگان محترم تقاضا می شود به هنگام تهیه مقاله دستورالعمل زیر را رعایت نمایند:

۱.۲. عهده دار مکاتبات می تواند از اعضاء هیأت علمی و یا شاغل در سایر موسسات باشد و وابستگی شغلی وی مشخص باشد.

۲.۲. همراه مقاله نام ۳ نفر داور پیشنهادی را با ذکر تلفن و نشانی کامل پستی و الکترونیکی و تخصص مربوط ارسال نمایند.

۳.۲. مقالات با نرم افزار Microsoft word روی کاغذ A4 بخش چکیده مقاله به صورت تک ستونی و

۱. معادل فارسی کلمات انگلیسی



۳.۴. وابستگی نویسندگان: (B Nazanin سایز ۹ نازک) و در زیر آن آدرس الکترونیکی عهده دار مکاتبات درج می‌شود.

#### ۸. نتیجه‌گیری

۴.۴. کلمات کلیدی: حداکثر ۵ یا ۷ کلمه (B Nazanin سایز ۱۲ ایتالیک).

#### ۵. چکیده:

متن چکیده در حداکثر ۱۵۰ کلمه، به صورت تک ستونی و حاوی نکات اصلی و نتایج مقاله باشد.

(B Nazanin سایز ۱۲ ایتالیک). داشتن قسمت‌های ۱ تا ۵ به انگلیسی در انتهای مقاله نیز ضروری می‌باشد.

#### ۶. متن اصلی:

مقدمه آغاز و با نتیجه‌گیری پایان می‌یابد. کمینه و بیشینه صفحات مقاله به ترتیب ۴ تا ۱۵ صفحه است. چاپ بیشتر از ۱۵ صفحه مشمول هزینه چاپ می‌شود. به رعایت املاء و دستور نگارش زبان فارسی توجه شود.

بسته به نوع اثر، مقاله دارای بخش‌های نظری، شرح دستگاه، روش آزمایش، روش حل، یا محاسبه و نتایج است که به صورت تک ستونی با قلم B Nazanin سایز ۱۲ نازک و Times New Roman سایز ۱۱ نازک و فواصل بین خطوط به صورت single برای رسیدگی و آرایه به داوران نگارش می‌شود. تیتراهای متن مقاله شماره گذاری و با قلم B Nazanin سایز ۱۲ ضخیم می‌باشد.

جدول‌ها و شکل‌ها و معادلات به ترتیب، شماره گذاری و عناوین جدول‌ها در بالای هر جدول و عناوین شکل‌ها در زیر هر شکل آورده شود. جدول و شماره آن و همچنین شکل و شماره آن با قلم B Nazanin سایز ۱۰ ضخیم است. اما شرح آنها با فونت نازک سایز ۱۱ نازک است. معادلات چپ چین و شماره آن راست چین شود.

استفاده از رنگ در جداول و شکل‌ها مشمول هزینه چاپ می‌شود. صفحات شماره گذاری شوند.

شرح حال نویسندگان در حدود ۵۰ کلمه شامل نام و نام خانوادگی، تاریخ و محل تولد، آخرین مدرک تحصیلی همراه با گرایش یا تخصص، سوابق و نشان علمی، اختراع و ابتکارات و عضویت در شرکت‌ها و انجمن‌های علمی با عکس پرسنلی نویسندگان در انتهای مقاله در صفحاتی جداگانه آورده شود.

چاپ و نشر مقالات پس از دریافت تعهدنامه تأیید شده توسط کلیه نویسندگان مبنی بر اصالت اثر نویسندگان امکان‌پذیر می‌شود. رعایت قوانین مربوط به سرقت ادبی-علمی به عهده نویسندگان است. نویسندگان مقالات مسؤوّل نوشته‌ها و نظرات خود هستند، آراء و نظریات آنها لزوماً نظر مدیر مسؤوّل، سردبیر و اعضاء هیأت تحریریه مجله نیست.

#### ارسال مقالات:

از کلیه نویسندگان درخواست می‌شود، فایل docx و pdf مقالات خود را از طریق آدرس پایگاه اینترنتی مجله مهندسی گاز ایران ارسال نمایند. کلیه مقالات توسط داوران تعیین شده از طرف هیأت تحریریه در مدت زمانی کمتر از ۶ هفته ارزشیابی و نتیجه به اطلاع نویسندگان عهده‌دار مکاتبات می‌رسد. مجله در پذیرش، ویرایش، اصلاح و یا کوتاه کردن مقالات با رعایت امانت در ارائه مطالب نوشتاری برای چاپ آزاد است. مقالات ارسالی مسترد نمی‌شوند.

#### مراجع:

منابع مورد استفاده در متن به ترتیب شماره در داخل کروشه [ ] مشخص و فهرست آنها مطابق با شماره‌ای که در متن مشخص شده است و به ترتیب نام نویسنده یا نویسندگان، نام اثر، نام مجله و یا عنوان کتاب و تاریخ نشر با مراعات استانداردهای رایج در ارائه مراجع در بخش مراجع آورده شود.

برای ارسال مقالات به وبسایت نشریه مهندسی گاز ایران  
به نشانی ([www.ijge.irangi.org](http://www.ijge.irangi.org)) مراجعه فرمایید.

# IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

VOLUME 12 • ISSUE 1 • NO. 21 • SUMMER 2025

EISSN:25885-5251



## ► Contents

### **Investigation of the Mechanism and Causes of the Destruction of the Leakage Damage of the Underground Pipeline Outlet of the Gas Pressure Reduction Station 8**

Mojtaba Soltanpour, Ebrahim Mohsseni Homagerani, Farzad Abbasian, Meysam Rasooly

### **A Semi-Empirical Correlation for the Liquid Density of Heavy Hydrocarbons in Certain Pressure and Temperature Ranges 18**

Amirhossein Oudi, Salehe Allami, Yegane Davoodbeygi

### **A Review of Metal-Organic Framework Nanocomposites and their Application in Gas Storage 30**

Mohammad Reza Abdi, Nahid Sarlak, Mohammad Hossein Mehrarad, Mehrnaz Shahraeini

### **Machine Learning Applications in the Prediction and Management of Sand Production in Oil and Gas Wells-a Review Study 54**

Elyas Khodashenas, Meysam Mohammadzadeh Shirazi, Behnam Shahsavani

### **Comparison of Blue and Turquoise Hydrogen Production Processes and their Future Prospects in Iran 70**

Sobhan Herfat, Milad Pirhadi, Majid Chegeni, Majid Zandi

### **An Overview of CO<sub>2</sub> Storage in Subsurface Structures: Advances, Challenges, and Perspectives 91**

Hossein Heydari, Mahdi Razavifari

## ► Guide for Authors

116

**IJGE**  
IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

# نشریه مهندسی گاز ایران

سال دوازدهم / شماره اول / جلد بیستم و یکم / تابستان ۱۴۰۴  
EISSN:25885-5251



## ◀ سرمقاله

- ۶ ..... اهمیت فناوری ذرات جامد در فرآوری گاز طبیعی  
مهدی رضوی فر

## ◀ مقالات

- ۸ ..... بررسی مکانیزم و علل تخریب محل نشستی خط لوله مدفون خروجی ایستگاه تقلیل فشار گاز .....  
مجتبی سلطانیپور، ابراهیم محسنی هماگرانی، فرزاد عباسیان، میثم رسولی
- ۱۸ ..... ارائه مدل نیمه تجربی برای دانسیته مایع هیدروکربن‌های سنگین در محدوده فشار و دماهای مشخص .....  
میرحسین عودی، صالحه علامی، یگانه داودبیگی
- ۳۰ ..... مروری بر نانو کامپوزیت‌های چارچوب فلز-آلی و کاربرد آن در ذخیره‌سازی گاز .....  
محمد رضا عبدی، ناهید سرلک، محمدحسین مهرآراد، مهرناز شهرآیینی
- ۵۴ ..... کاربرد یادگیری ماشین در پیش‌بینی و مدیریت تولید ماسه در چاه‌های نفت و گاز - مطالعه‌ی مروری .....  
محمد الیاس خدشناس، میثم محمدزاده شیرازی، بهنام شاهسونی
- ۷۰ ..... مقایسه فرآیندهای تولید هیدروژن آبی و فیروزه‌ای و چشم‌انداز آینده آن‌ها در ایران .....  
سبحان حرفت، میلاد پیرهادی، مجید چگنی، مجید زندی
- ۹۱ ..... مروری بر ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> در ساختارهای زیرزمینی: پیشرفت‌ها، چالش‌ها و چشم‌اندازها .....  
حسین حیدری، مهدی رضوی فر
- ۱۱۶ ..... راهنمای نگارش مقالات در نشریه علمی مهندسی گاز ایران .....  
◀

**IJGE**  
IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING