



IJGE[®]

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

نشریه مهندسی گاز ایران

سال دوازدهم / شماره ۴ / جلد ۲۴

زمستان ۱۴۰۴

EISSN:25885-5251



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

نشریه مهندسی گاز ایران

◀ سال دوازدهم، شماره چهارم، جلد بیستم و چهارم، زمستان ۱۴۰۴

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
کارشناس نشریه: مهندس میثم غلامی پور
شماره شاپا: ۲۵۸۸-۵۲۵۱



هیأت تحریریه:

دکتر امیرحسین محمدی (دانشگاه کوازولو-ناتال، آفریقای جنوبی)
دکتر غلامرضا وکیلی نژاد (دانشگاه سلطان قابوس، عمان)
دکتر مسعود ریاضی (دانشگاه نظربایف، قزاقستان)
دکتر جعفر قاجار (دانشگاه اترخت، هلند)
دکتر علی وطنی (دانشگاه تهران)
دکتر رضا مسیبی بهبهانی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر وحید نقی‌خانی (دانشگاه صنعتی شریف)
دکتر سید علیرضا طباطبائی نژاد (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 علیمراد رشیدی (پژوهشگاه صنعت نفت)
دکتر سید رضا شادی‌زاده (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر محسن مسیحی (دانشگاه صنعتی شریف)
دکتر منصور فرزام (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر محمدرضا خسروی نیکو (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر عبدالنی هاشمی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر فهیمه حوری آبادمبور (دانشگاه محقق اردبیلی)
دکتر لیلا خازینی (دانشگاه تبریز)

نشانی انجمن مهندسی گاز ایران

تهران / خیابان ایرانشهر / نبش خیابان اراک / پلاک ۱۶۰
کدپستی: ۱۵۸۳۷-۱۸۹۶۷

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 ۲۴

- دکتر علی وطنی (دانشگاه تهران)
دکتر امید رافهی (دانشگاه تبریز)
دکتر مسعود آفاجانی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر مسعود بیژنی (دانشگاه گرمسار)
دکتر زهرا نرگسی (دانشگاه تهران)
دکتر مهدی رضوی فر (دانشگاه تبریز)
دکتر علی پالیزدار (دانشگاه تهران)
دکتر آراد کیانی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)
دکتر ابوالفضل کیان (دانشگاه صنعتی اسفراين)
دکتر مرتضی زیودار (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر اسدالله فرهادی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر کاظم کاشفی (پژوهشگاه صنعت نفت)
دکتر بهاره بیدار (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر محمد رضا امیدخواه (دانشگاه تربیت مدرس)
دکتر وجیهه یوسفی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر راضیه کشاورز فرد (دانشگاه آزاد اسلامی تهران شمال)
دکتر مسعود درفشان (دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا، بهبهان)
دکتر امیرحسین محمدی (دانشگاه کوازولو-ناتال، آفریقای جنوبی)
دکتر محمد رضا سردشتی بیرجندی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر زهره خلیفات

فهرست مطالب

◀ سرمقاله

- ۷ زمان تبدیل تهدید به فرصت
مصطفی ابراهیمی مقدم

◀ مقالات

- ۱۰ مقایسه فنی - اقتصادی بازیابی هلیوم از گاز طبیعی توسط شبیه‌سازی فرآیند
غشاهای پلیمری
محمد مهدی یوسفی، مصطفی جعفری

- ۲۱ موانع و چالش‌های جایگزینی گاز طبیعی فشرده در چرخه حمل و نقل
مهران شکیبائی، امید مجنون، قنبرعلی شیخ زاده نوش آبادی

- ۳۶ مروری بر روش‌های ذخیره گاز هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی
نگار شاهدعلی، فائزه برزگری، مهدی رضوی‌فر

- ۵۸ بررسی تأثیر ذرات جامد در سیال بر سایش لوله فولادی: مدل‌سازی CFD و آزمایش‌های
تجربی
آرمین ثابت‌قدم اصفهانی، یگانه داود بیگی، سید محمود لطیفی

- ۸۰ مروری جامع بر کاربرد نانومواد در ازدیاد برداشت نفت (EOR): مکانیسم‌ها، چالش‌ها
و روندهای آینده
مسعود بیژنی، امیرحسین سپه‌وند

- ۹۴ انتخاب پروژه در سبب پروژه‌ها با به‌کارگیری معیارهای اقتصادی و غیراقتصادی و با
استفاده از منطق فازی
محمد ابراهیم طیبی عراقی، سید جواد سیدیان هاشمی، علی قاسمی کیانی

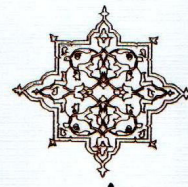


انتخاب انجمن مهندسی گاز ایران به عنوان انجمن علمی برگزیده کشور در سال ۱۴۰۴

انجمن مهندسی گاز ایران با کسب بالاترین امتیاز به عنوان انجمن علمی برگزیده کشور در بیست و ششمین جشنواره تجلیل از پژوهشگران، فناوران و نوآوران کشور معرفی شد و با اهدای تندیس و لوح تقدیر توسط وزیر محترم علوم، تحقیقات و فناوری از انجمن تجلیل به عمل آمد.



جمهوری اسلامی ایران
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری



وزیر

جناب آقای مهندس منصور دقیریان

رئیس محترم انجمن علمی مهندسی گاز ایران

پادشاهت ارزش‌های دینی و فرهنگی و اقتدار علمی کشور مرمون تلاش ارزشمند استادان، پژوهشگران و فناورانی است که با اندیشه خلاق و قلم پویای خود آینده‌ای روشن و سرشار از امید را به ایران اسلامی هدیه می‌کنند. بدین وسیله انتخاب آن انجمن را به عنوان «انجمن علمی برگزیده کشور» در بیست و ششمین جشنواره تجلیل از پژوهشگران، فناوران و نوآوران کشور در سال ۱۴۰۴ تبریک می‌گویم و به پاس مساعی و توانمندی‌های علمی شام‌آب پاسکزاری و قدردانی خود را ابراز می‌دارم.

تندرستی و توفیق روز افزون جناب عالی را در عرصه دانش‌اندوزی، پژوهشگری و تداوم خدمت به ایران اسلامی از درگاه حضرت حق خواستارم.

حسین سیامی





دکتر مصطفی ابراهیمی مقدم
رئیس امور پژوهش و فناوری
شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران

زمان تبدیل بحران به فرصت

بخش‌هایی با بیشترین ارزش افزوده گره زد؛ رویکردی که هم بهره‌وری را افزایش می‌دهد و هم وابستگی‌های پریسک را کاهش می‌دهد.

۲. تمرکززدایی؛ درسی که نباید دوباره از آن غفلت کرد

تمرکز بیش از اندازه پالایشگاه‌های گازی در یک منطقه خاص، آن منطقه را به نقطه آسیب‌پذیری راهبردی تبدیل کرده است. همین تجربه تلخ نشان می‌دهد که امنیت انرژی، تنها با تولید بیشتر تضمین نمی‌شود؛ بلکه به پراکندگی هوشمندانه و تاب‌آوری زیرساخت‌ها نیز نیاز دارد.

از این‌رو، در بازسازی پالایشگاه‌های آسیب‌دیده، باید جدی‌تر به امکان انتقال یا توسعه آن‌ها در مناطق دیگر کشور اندیشید. بهره‌گیری از فناوری‌های ماژولار و کانتینری، این امکان را فراهم می‌کند که واحدهای پالایشی در مقیاس‌های کوچک‌تر، سریع‌تر و در نقاط مختلف کشور مستقر شوند. چنین رویکردی نه تنها ریسک تمرکز را کاهش می‌دهد، بلکه با منطق آمایش سرزمین و توسعه متوازن نیز هم‌سو است.

۳. واگذاری پالایش گاز به بخش خصوصی؛ گذار از اپراتوری به حکمرانی

کیفیت گاز تحویلی به صنایع و نیز استحصال حداکثری محصولات با ارزش همراه گاز از جمله اتان، پروپان، بوتان، میعانات، هلیوم و مشتقات گوگردی، همواره یکی از چالش‌های جدی صنعت گاز کشور بوده است. در این میان، ایده واگذاری پالایش گاز به بخش خصوصی سال‌هاست مطرح می‌شود، اما موانعی چون مقاومت در واگذاری و فقدان مدل اقتصادی شفاف، مانع تحقق آن شده‌اند.

حمله نظامی و آسیب به بخشی از پالایشگاه‌های گازی منطقه پارس جنوبی در جریان جنگ رمضان، یکی از تلخ‌ترین رخداد‌های صنعت انرژی کشور بود؛ رخدادی که نه تنها حجم قابل توجهی از تولید گاز را کاهش داد، بلکه نگرانی‌های جدی درباره تأمین انرژی صنایع و خانوارها برانگیخت. با این حال، در دل همین خسارت سنگین می‌توان یک پرسش بنیادین را پیش کشید:

آیا این بحران می‌تواند به نقطه آغاز یک بازآرایی ساختاری در صنعت گاز و انرژی کشور تبدیل شود؟

پاسخ به این پرسش، بیش از آنکه به ترمیم صرف خسارت‌ها مربوط باشد، به نوع نگاه ما به آینده انرژی کشور وابسته است. امروز، بیش از هر زمان دیگر، فرصت آن فراهم شده است که از دل تهدید، راهی تازه برای اصلاحات عمیق و ماندگار گشوده شود.

۱. بازآرایی سبد انرژی؛ از انتخاب به اجبار

سال‌هاست کارشناسان بر ضرورت کاهش وابستگی شدید سبد انرژی کشور به گاز تأکید می‌کنند، اما این تأکیدها کمتر به برنامه‌های عملیاتی، زمان‌بندی شده و الزام‌آور تبدیل شده‌اند. اکنون، کاهش اجباری تولید گاز در پارس جنوبی هرچند دردناک می‌تواند همان محرکی باشد که اصلاح ساختار انرژی را از سطح شعار به عرصه عمل بیاورد.

این وضعیت، فرصتی است برای آنکه کشور با جدیت بیشتری به سمت انرژی‌های نوین مانند خورشیدی و بادی حرکت کند و هم‌زمان، اقتصاد هیدروژن را به‌عنوان یک افق راهبردی دنبال نماید. همچنین می‌توان بازگشت تدریجی ظرفیت ازدست‌رفته را به تخصیص هوشمند خوراک به



اکنون اما شرایط بحرانی می‌تواند فرصتی تاریخی برای بازتعریف نقش دولت باشد. دولت اگر از لایه اجرایی و اپراتوری فاصله بگیرد و به نقش اصلی خود یعنی حکمرانی، تنظیم‌گری و نظارت بازگردد، می‌تواند زمینه را برای مشارکت واقعی بخش خصوصی فراهم کند. در چنین مدلی، روش‌های نوین تأمین مالی، از جمله ساخت، بهره‌برداری و انتقال، می‌توانند جایگزین شیوه‌های سنتی شوند.

این تحول، تنها یک تغییر ساختاری نیست؛ بلکه مستلزم ورود جدی به ادبیات جدید حکمرانی، از جمله حکمرانی شبکه‌ای است؛ مفهومی که سال‌ها در کشور مغفول مانده و اکنون بیش از همیشه به آن نیاز داریم.

۴. تأمین مالی نوین؛ پایان بودجه‌محوری

واقعیت این است که بودجه دولتی و منابع داخلی شرکت‌های بزرگ دولتی، پاسخ‌گوی هزینه‌های سنگین بازسازی و نوسازی نیستند؛ اما این محدودیت، لزوماً به معنای بن‌بست نیست؛ بلکه می‌تواند محرکی برای عبور از بودجه‌محوری و حرکت به سمت تأمین مالی نوین باشد.

انتشار اوراق با پشتوانه فروش محصولات آینده پالایشگاه‌ها، تشکیل صندوق‌های پروژه با مشارکت نهادهای مالی عمومی و جذب سرمایه‌های مردمی از طریق بازار سرمایه، از جمله ابزارهایی هستند که می‌توانند مسیر تازه‌ای برای بازسازی صنعت انرژی بگشایند. این ابزارها، اگر درست طراحی و شفاف اجرا شوند، هم سرمایه را به سمت پروژه‌های مولد هدایت می‌کنند و هم بار مالی دولت را کاهش می‌دهند.

۵. بهره‌برداری تدریجی؛ پایان انتظار یکپارچه

در مدل‌های سنتی، پالایشگاه تنها زمانی «به‌حساب می‌آید» که ۱۰۰ درصد تکمیل باشد؛ اما عصر پروژه‌های یکپارچه و غول‌پیکر رو به پایان است. امروز، با مدولارسازی و استفاده از (EPC 4.0) می‌توان هر ماژول فرآیندی را به‌محض تکمیل، مستقل راه‌اندازی کرد؛ گویی پالایشگاه مرحله‌به‌مرحله از زمین جوانه می‌زند. اینجا نقش دوقلوی دیجیتال حیاتی است: شبیه‌سازی زنده، دوبخشی و لحظه‌ای که خطا را پیش از وقوع شکار می‌کند، راه‌اندازی را تسریع می‌کند و امکان بهره‌برداری تکاملی را فراهم می‌سازد.

۶. مدیریت فناوری و نوآوری؛ فراتر از اکتساب، به

سوی خلق ارزش

در بسیاری از پروژه‌ها، تأمین تجهیز ساده‌ترین مسیر به نظر می‌رسد؛ اما ساده‌ترین مسیر لزوماً پربازده‌ترین نیست. پرسش کلیدی این است: آیا می‌توانیم در هر بار ورود فناوری به کشور، هم‌زمان ارزش‌افزوده‌ی دانشی خلق کنیم؟ پیوسته‌های فناوری، انتقال دانش، مهندسی معکوس، هوشمند و طراحی مجدد، ابزارهایی هستند که یک «خرید ساده» را به یک «جریان ارزش‌سازِ بلندمدت» تبدیل می‌کنند. زمان آن رسیده است که اکتساب فناوری از یک فعالیت جانبی، به هدف راهبردی پروژه تبدیل شود.

۷. فشرده‌سازی فرآیندی؛ گمشده طراحی شبکه

انرژی پایدار

دهه‌هاست فلسفه طراحی واحدهای انرژی بر مفهوم «بزرگ‌تر یعنی بهتر» بنا شده است؛ اما این فلسفه امروز در تقابل با اصلِ تاب‌آوری و بهره‌وری قرار دارد. فشرده‌سازی فرآیندی (Process Intensification) می‌گوید:

تجهیزات کوچک‌تر + مصرف انرژی کمتر + انعطاف بیشتر = همان خروجی، اما هوشمندتر.

از راکتورهای غشایی تا مبدل‌های فشرده و میکرو راکتورها، فناوری‌هایی وجود دارند که می‌توانند اندازه واحدها را تا یک‌دهم کاهش دهند و هم‌زمان سرعت نصب و ایمنی را افزایش دهند.

آیا این بهترین فرصت برای بازسازی پالایشگاه‌های آسیب‌دیده نیست؟

۸. بازتعریف امنیت؛ از خودکفایی مطلق تا یکپارچگی

زنجیره تأمین داخلی

سال‌ها شعار «خودکفایی مطلق» بر سیاست‌های صنعتی کشور سایه انداخته است، اما این مفهوم نه دست‌یافتنی است و نه حتی مطلوب. آیا زمان آن نرسیده که به‌جای خودکفایی مطلق، بر «یکپارچگی زنجیره تأمین داخلی» تمرکز کنیم؟ یکپارچگی زنجیره به معنای ایجاد شبکه‌ای از تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان و دانش‌بنیان‌هاست که در آن، وابستگی آسیب‌پذیر به منابع خارجی کاهش یافته و کل زنجیره در برابر اختلالات، مقاوم می‌شود. در این رویکرد، امنیت یعنی اینکه از کار افتادن

یک تأمین‌کننده، خط تولید را متوقف نکند. نقش دولت نیز از تصدی‌گری به تنظیم استانداردها، تضمین خرید و تسهیل ارتباط میان ذینفعان تغییر می‌کند.

۹. تغییر پارادایم در طراحی؛ از تمرکزگرایی عظیم به توزیع‌گرایی ماژولار

تاکنون فلسفه سنتی صنعت نفت و گاز بر «اقتصاد مقیاس» استوار بوده است: هرچه واحد تولیدی بزرگ‌تر، هزینه تمام‌شده کمتر. اما این مدل در شرایط جنگی و تحریم، آسیب‌پذیرترین ساختار ممکن است. آیا گذار از مدل «واحد متمرکز و عظیم» به سمت مدل «واحدهای کوچک، متعدد و توزیع‌شده» برای افزایش تاب‌آوری ضروری نیست؟ در این رویکرد، به‌جای تمرکز بر احداث واحدهای عظیم در نقاط حساس، از صدها واحد کوچک ماژولار در سراسر کشور استفاده می‌شود. در این مدل هر منطقه صنعتی می‌تواند یک یا چند «ریزپالایشگاه» محلی داشته باشد که هم به شبکه سراسری متصل باشد و هم در صورت بروز بحران، به‌صورت جزیره‌ای به فعالیت خود ادامه دهد. مزیت این رویکرد روشن است: اختلال در یک واحد کوچک، تنها بخش ناچیزی از تولید کشور را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

کلام پایانی

حوادث تلخ، اگرچه در ظاهر فقط ویرانی به‌جا می‌گذارند، اما در سطحی عمیق‌تر می‌توانند آغازگر تحول باشند. آسیب به پالایشگاه‌های گازی پارس جنوبی، تنها یک بحران فنی یا زیرساختی نیست؛ بلکه هشدار است برای بازاندیشی در ساختار انرژی کشور.

اکنون زمان آن رسیده است که از این تهدید، فرصتی تاریخی ساخته شود: فرصتی برای بازآرایی سبد انرژی، تمرکززدایی از زیرساخت‌ها، واگذاری واقعی به بخش خصوصی و تأمین مالی نوین. اگر این لحظه را جدی بگیریم، شاید بتوان گفت که بحران، به‌جای آنکه فقط خسارت‌بار باشد، به نقطه آغاز یک اصلاح بزرگ تبدیل شده است.

این مطلب را با این امید به پایان می‌بریم که اندوه این روزها، بذری برای فردایی تاب‌آورتر، غیرمتمرکزتر و هوشمندتر باشد.

آدرس پست الکترونیک: m.brahimi@nigceng.ir



مقایسه فنی - اقتصادی بازیابی هلیوم از گاز طبیعی توسط شبیه‌سازی فرآیند غشاء‌های پلیمری

محمد مهدی یوسفی^۱، مصطفی جعفری^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. پژوهشگر، انستیتو گاز طبیعی مایع، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: mustafa.jafari@ut.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

صفحه ۱۰ - ۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳

چکیده

در این پژوهش، بازیابی هلیوم از گاز طبیعی با فرآیند غشاء سه‌مرحله‌ای در نرم‌افزار PRO/II و با معادله حالت پنگ-رابینسون شبیه‌سازی شد. سه نوع غشاء پلیمری شامل پلی‌آمید^۱، پلی‌پیرول^۲ و پلی‌سولفون^۳ تحت خوراک یکسان و معیارهای طراحی مشخص (خلوص ۹۰ درصد و بازیافت ۹۵ درصد) مقایسه شدند. اعتبارسنجی مدل با داده‌های مرجع انجام شد و روند افزایش خلوص به‌خوبی طی شد. ارزیابی فنی-اقتصادی نشان داد تراوایی بالاتر پلی‌آمید و پلی‌پیرول موجب کاهش مساحت غشاء و توان تراکم و در نتیجه بهبود هم‌زمان CAPEX و OPEX می‌شود. در سناریوی بهینه، سرمایه‌گذاری کل ۸ تا ۹ میلیون دلار، دوره بازگشت سرمایه حدود ۵ تا ۵.۵ سال و نرخ بازگشت نزدیک به ۱۹ درصد برآورد شد. از این رو پلی‌آمید گزینه برتر اقتصادی و پلی‌پیرول جایگزین نزدیک آن است. همچنین تحلیل حساسیت نشان می‌دهد شاخص‌های اقتصادی به قیمت هلیوم حساس‌تر از تعرفه برق اند.^{۴۵}

کلید واژه‌ها: بازیابی هلیوم، غشاء پلیمری، تراوایی، انتخاب پذیری، ارزیابی اقتصادی

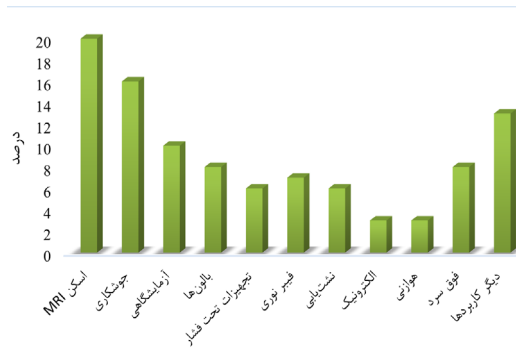
۱. مقدمه

هلیوم به‌عنوان دومین عنصر سبک و پایدار در جدول تناوبی، به دلیل داشتن ویژگی‌های خاص مثل خنثی بودن، چگالی کم، نقطه‌جوش خیلی پایین (۴/۲ کلوین) و هدایت حرارتی بالا جایگاه ویژه‌ای در کاربردهای صنعتی و تحقیقاتی پیدا کرده است [۱]. با توجه به خواص و ویژگی‌هایی که برای هلیوم ذکر شد، این گاز استفاده فراوانی در صنایع مختلف از جمله فناوری‌های برودتی و فوق سرد، تجهیزات تصویربرداری پزشکی، جوشکاری قوس تنگستن، صنایع

نیمه‌هادی و تأسیسات فضایی دارد که در (شکل ۱) نمایش داده شده است. بر اساس داده‌های موجود، مصرف سالانه هلیوم در جهان از ۱۷۰ میلیون مترمکعب گذشته و همچنان رشد قابل توجهی دارد [۲]. بخش عمده هلیوم از ذخایر گاز طبیعی به دست می‌آید که غلظت آن در منابع مختلف بسیار متغیر است. مثلاً از کمتر از ۰/۰۵ درصد در میدان‌هایی مانند پارس جنوبی^۴ در ایران تا بیش از ۱/۵ درصد در ذخایری مانند کلیف ساید^۵ در آمریکا.

1. Polyimidee
2. Polypyrrrole
3. Polysulfone
4. South Pars
5. Cliffside





شکل ۱: کاربردهای هلیوم [۳]

چنین دامنه وسیعی در ترکیب خوراک، انتخاب فناوری مناسب بازیابی و ارزیابی اقتصادی پروژه را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. فناوری‌های اصلی برای بازیابی هلیوم عبارتند از تقطیر فوق سرد، جذب با نوسان فشار^۲ و فرآیندهای مبتنی بر غشاء. در حال حاضر بیش از ۸۰ درصد هلیوم تولیدی جهان با فناوری فوق سرد، حدود ۱۵ تا ۱۸ درصد با فناوری جذب فشار نوسانی و حدوداً ۳ درصد توسط فناوری‌های غشائی بازیابی می‌شود [۴].

هرچند سهم غشاء بسیار کم است، اما برتری‌هایی همچون مصرف انرژی کمتر، طراحی ساده‌تر، قابلیت مقیاس‌پذیری و ترکیب‌پذیری با سایر فناوری‌ها باعث شده این روش در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گیرد. تحولات نوین در مواد و معماری غشاءهای پلیمری، غشاءهای کامپوزیت ماتریس مختلط^۳ [۵]، و روش‌های ترکیبی مثل Membrane-PSA [۶] و Membrane-EHP [۷] مسیر را برای افزایش خلوص و بازده اقتصادی هموار کرده‌اند. این حال، استفاده صنعتی از غشاء برای بازیابی هلیوم با چالش‌هایی مواجه است. مهم‌ترین چالش، افت شدید بازده اقتصادی در خوراک‌های با غلظت کم هلیوم (کمتر از ۰.۳ درصد) و هزینه بالای فشرده‌سازی گاز است. مطالعاتی مثل توفیقی و محمدی [۸] و آلدرس و همکاران [۹] نشان داده‌اند که طراحی بهینه تعداد مراحل، بازیافت جریان‌های عبور کرده از غشاء و استفاده از غشاءهای با انتخاب‌پذیری بالا برای He/CH₄ و He/N₂ می‌تواند بازده را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد. اگرچه مطالعات پیشین به بررسی بازیابی هلیوم از گاز طبیعی پرداخته‌اند، اما همان‌طور که در (جدول ۱) نمایش داده شده است بیشتر آن‌ها یا بر فرآیندهای تقطیر

فوق سرد و جذب توسط نوسان فشار تمرکز داشته‌اند، یا تنها نتایج یک نوع غشاء پلیمری را گزارش کرده‌اند [۵]. در این پژوهش‌ها، عملکرد غشاء معمولاً در شرایط ثابت تحلیل شده و مقایسه هدفمند میان انواع مختلف غشاءها انجام نشده است. پتانسیل غشاءهای پیشرفته مانند غشاءهای غیرآلی، غشاءهای ماتریس مختلط و ساختارهای نوظهور بر پایه گرافن مطرح شده است، اما ارزیابی‌های فنی-اقتصادی جامع همچنان محدود باقی‌مانده‌اند. به‌ویژه تاکنون هیچ مطالعه شبیه‌سازی جامعی گزارش نشده است که انواع غشاءها را تحت خوراک یکسان مقایسه و اثر آن‌ها بر راندمان بازیابی، خلوص محصول، مصرف انرژی و اقتصاد کلی فرآیند را بررسی کند. این پژوهش، شکاف موجود را با توسعه یک شبیه‌سازی مبتنی بر نرم‌افزار PRO/II برای فرآیند غشاء چندمرحله‌ای و با استفاده از یک خوراک ثابت گاز طبیعی حاوی هلیوم بر می‌کند. در این مدل، عملکرد انواع مختلف غشاء پلیمری به‌طور هدفمند از نظر بازیابی هلیوم، خلوص محصول، نیاز انرژی و امکان‌سنجی اقتصادی ارزیابی می‌شود. این تحلیل مقایسه‌ای، دیدگاه‌های عملی درباره اثر جنس غشاء بر کارایی و اقتصاد فرآیند را فراهم کرده و راهنمایی برای انتخاب غشاء بهینه در کاربردهای صنعتی آینده ارائه می‌دهد.

جدول ۱: مرور پژوهش‌های پیشین

محدودیت	درصد هلیوم خوراک	نوع غشاء مرجع
انتخاب‌پذیری پایین، ارزیابی اقتصادی محدود	۰/۶ - ۰/۲	پلیمری [۵]
عدم تمرکز بر یک نوع غشاء و کار با غشاءهای ترکیبی	~ ۰/۳	پلیمری [۱۰]
مقیاس آزمایشگاهی، عدم ارزیابی اقتصادی	۰/۱	پلیمری [۹]
عدم ارزیابی هزینه‌ها	۰/۴	معدنی [۱۱]
عمدتاً مروری، ارزیابی اقتصادی بدون مقایسه	۰/۶ <	ماتریس مختلط [۴]
محدود به کار با یک جنس و عدم مقایسه	۰/۶ - ۰/۳	ترکیبی [۶]
فقط مروری، بدون شبیه‌سازی	~ ۰/۳	ترکیبی [۷]

1. Cryogenic Distillation
2. Pressure swing adsorption (PSA)
3. Mixed matrix membrane

۲. روش کار

از جریان‌های گاز طبیعی به کار گرفته شده است [۵]. اطلاعات خوراک ورودی به فرآیند در (جدول ۲) نمایش داده شده است. مدل غشاء در نرم‌افزار PRO/II توسط پارامترهای نفوذپذیری که کاربر وارد می‌کند کنترل می‌شود. فقط مؤلفه‌هایی از غشاء عبور می‌کنند که ثابت نفوذ آن‌ها مقداری بزرگ‌تر از صفر داشته باشد. حداقل باید برای یک مؤلفه، ثابت نفوذ با مقدار مثبت توسط کاربر تعیین شود. معادله (۱) معادله حاکم بر این مدل را نمایش می‌دهد:

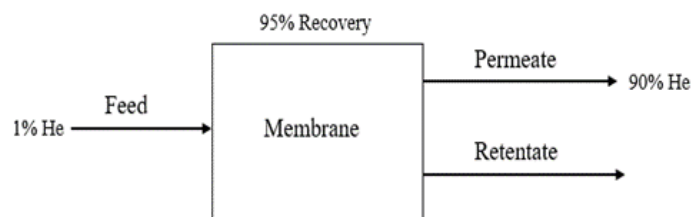
$$F_i = K_i \times A \times (P_{i,r} - P_{i,s}) \quad (1)$$

که در آن F_i دبی نفوذ جزء i از طریق غشاء، K_i ثابت تراوایی جزء A ، i سطح مقطع مؤثر قابل نفوذ غشاء، $P_{i,r}$ فشار جزئی جریان باقی‌مانده و $P_{i,s}$ فشار جزئی جریان عبور کرده از غشاء است. فرآیند نفوذ از سمت خوراک در سراسر غشاء به سمت جریان عبور کرده^۱ انجام می‌شود. تمام مؤلفه‌هایی که از غشاء عبور نمی‌کنند، جریان باقی‌مانده^۲ در سمت خوراک را تشکیل می‌دهند.

جدول ۲: مشخصات خوراک

مشخصات خوراک	
دبی (کیلومول بر ساعت)	۵۰۰
فشار (بار)	۵۰
دما (درجه سانتی‌گراد)	۲۵
ترکیب درصد مولی	
متان	۰/۸
نیتروژن	۰/۱۹
هلیوم	۰/۰۱

در (شکل ۲) شماتیکی از فرآیند قابل مشاهده است که هدف آن رسیدن به خلوص ۹۰ درصدی هلیوم در خروجی آخرین غشاء و ۹۵ درصد بازیابی هلیوم موجود در خوراک ورودی به فرآیند است.



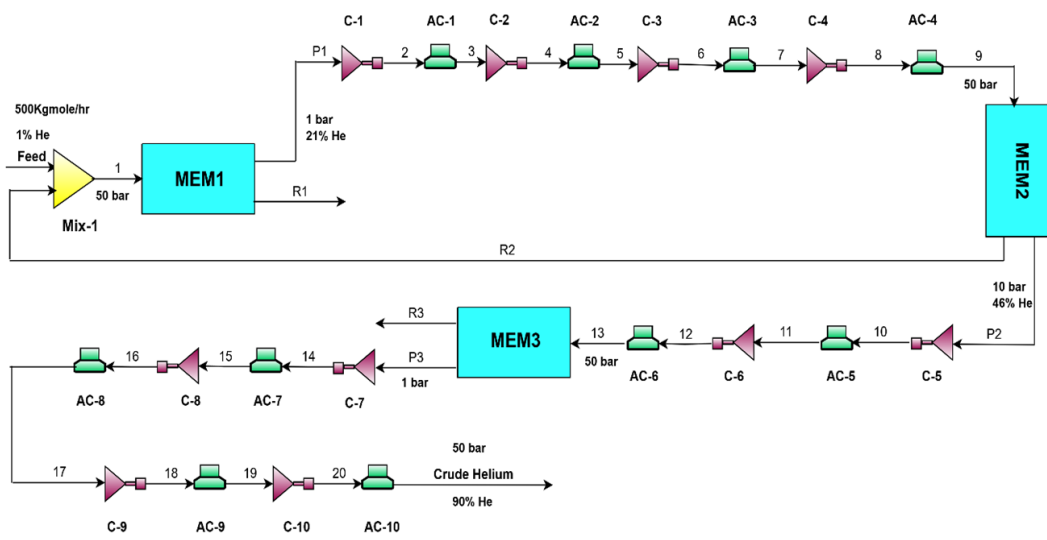
شکل ۲: شماتیک کلی از فرآیند

1. Permeate
2. Retentate

۳. شرح فرآیند

مرحله دوم جریان عبور کرده از غشاء دوم (P2) حاوی ۴۶ درصد مولی هلیوم است که در فشار ۱۰ بار قرار دارد و مجدداً توسط کمپرسورهای چندمرحله‌ای (C-5 و C-6) و خنک‌کننده‌های میانی (AC-5 و AC-6) به فشار ۵۰ بار و دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد تا وارد غشاء بعدی شود. جریان باقی‌مانده (R2) نیز به دلیل داشتن مقداری هلیوم برای افزایش بازده و عملکرد فرآیند به مرحله اول بازگردانده می‌شود. در نهایت جریان خروجی از آخرین غشاء (P3) که در فشار ۱ بار قرار دارد توسط کمپرسورهای چندمرحله‌ای (C-7 تا C-10) و خنک‌کننده‌های هوایی میانی (AC-7 تا AC-10) به فشار ۵۰ بار و دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و هلیوم خام با خلوص ۹۰ درصد تولید می‌شود.

فلوشیت فرآیند بازیابی هلیوم در نرم‌افزار PRO/II به صورت غشاء‌های چندمرحله‌ای همراه با واحدهای تراکم و خنک‌سازی میانی طراحی شد که در (شکل ۳) نمایش داده شده است. در مرحله اول خوراک ورودی طبق مشخصات خط انتقال گاز طبیعی شیرین‌سازی و نم‌زدایی شده با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۵۰ بار وارد غشاء اول می‌شود. جریان عبور کرده از غشاء اول (P1) در فشار ۱ بار قرار دارد و حاوی ۲۱ درصد مولی هلیوم است که طی افزایش فشار چندمرحله‌ای (C-1 تا C-4) همراه خنک‌کننده‌های هوایی میانی (AC-1 تا AC-4) فشار آن به ۵۰ بار و دمای آن به ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در



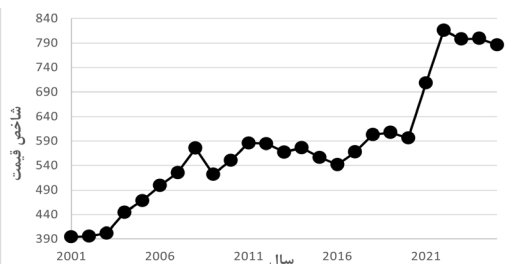
شکل ۳: شماتیک فرآیند غشاء سه مرحله‌ای

این فرآیند توسط سه جنس غشاء پلیمری شامل پلی‌آمید، پلی‌پیرول و پلی‌سولفون شبیه‌سازی شد است.

جدول ۳: مشخصات غشاء‌های پلیمری

مرجع	تراوایی (Barrer)			انتخاب پذیری		جنس غشاء
	هلیوم	متان	نیتروژن	He/CH ₄	He/N ₂	
[۹]	۹۸/۵	۰/۶۳	۱/۲۷	۱۵۶	۷۷/۵	پلی‌آمید
[۹]	۸۹	۰/۵۴	۱/۲	۱۶۵	۷۴	پلی‌پیرول
[۱۲]	۱۲	۰/۰۷	۰/۰۹	۱۷۱	۱۳۳	پلی‌سولفون

1. Barrer = 2.736E-9 (m³(STP).m/m².bar.h)



شکل ۴: شاخص هزینه ساخت واحدهای فرآیندی (مهندسی شیمی)

جدول ۴: هزینه تجهیزات و نصب آن‌ها

تجهیزات	هزینه نصب (دلار)	هزینه تجهیز (دلار)	مرجع
کمپرسور	هزینه تجهیز $\times 2/5$	$4450 + (57 \times ACVF^2)^{0.8}$	[۱۴]
خنک‌کننده هوایی	هزینه تجهیز $\times 3/5$	$30000 \times Area^{0.4}$	[۱۶]
غشاء			
پلی‌آمید	هزینه تجهیز $\times 1/1$	$Area \times 75$	[۱۷]
پلی‌پیرول	هزینه تجهیز $\times 1/1$	$Area \times 40$	[۱۸]
پلی‌سولفون	هزینه تجهیز $\times 1/1$	$Area \times 50$	[۱۷]

جدول ۵: هزینه خوراک، محصول و تعرفه برق

پارامتر	مقدار	منبع
قیمت گاز طبیعی	۲ GJ/\$	[۱۹]
قیمت هلیوم	۱/۹ \$/m ³	[۱۲]
قیمت برق	۰/۰۸ \$/Kwh	[۱۲]

هزینه برق مصرفی طبق توان مصرفی کمپرسورها و کولرهای هوایی با فرض زمان عملیاتی ۷۹۲۰ ساعت در سال محاسبه شد.

۵. نتایج و بحث

برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از واحد شبیه‌سازی شده، درصد خلوص هلیوم در ورودی و خروجی هر مرحله از غشاءها با داده‌های مرجع [۹] مقایسه شد که در (جدول ۶) نشان داده شده است. انطباق مناسبی مشاهده گردید و انحرافها در بازه قابل قبول مدل‌سازی قرار گرفتند. تفاوت جزئی به دلیل وجود فرض‌های فرآیندی در تعریف نفوذپذیری برای غشاءها است. این هم‌خوانی نشان می‌دهد پارامترهای انتخاب شده توان بازتولید روند افزایشی خلوص در طول سه مرحله را دارند و نتایج شبیه‌سازی از نظر کیفی و کمی قابل اتکا هستند.

1. utility
2. Actual Volume Flow

معمولاً نفوذپذیری‌ها به صورت تراوایی وجود دارند، اما در نرم‌افزار PRO/II امکان وارد کردن مستقیم تراوایی وجود ندارد و باید به صورت نفوذپذیری سطحی وارد شود که برای انجام این کار و تبدیل واحدها از معادله مربوطه استفاده می‌شود [۱۲]، که در آن با در اختیار داشتن مقادیر تراوایی و ضخامت غشاء مورد استفاده می‌توان نفوذپذیری سطحی را محاسبه و وارد نرم‌افزار کرد.

۴. ارزیابی اقتصادی فرآیند

پیش از احداث هر واحد صنعتی باید مطالعه امکان‌سنجی انجام شود تا از توجیه اقتصادی طرح اطمینان حاصل گردد. پیش‌نیاز ارزیابی اقتصادی، دو گام اصلی است: جمع‌آوری اطلاعات و قیمت‌های روز بازار و سپس طراحی واحدهای عملیاتی. نخستین خروجی محاسبات اقتصادی، برآورد سرمایه‌گذاری لازم و هزینه‌ها باتکیه بر تخمین قیمت تجهیزات فرآیندی است. یک طراحی پذیرفتنی باید امکان بهره‌برداری سودآور را نشان دهد، بنابراین آشنایی مهندس شیمی با انواع هزینه‌های تولیدی ضروری است [۱۳]. سرمایه پروژه به دو بخش تقسیم می‌شود: سرمایه ثابت (تأمین تسهیلات^۱ و تجهیزات فرآیندی، لوله‌کشی، عایق، سازه‌ها و ساختمان) و سرمایه در گردش (وجوه لازم برای عملیات روزمره). مجموع این دو، سرمایه‌گذاری کل را تشکیل می‌دهد. برای انجام موارد ذکر شده از کتاب طراحی مهندسی شیمی [۱۴]، به همراه تبدیل شاخص‌ها به سال ۲۰۲۵ توسط شاخص هزینه ساخت واحدهای فرآیندی در (شکل ۴) و معادله (۲) استفاده شد [۱۵]. به منظور شفافیت در ارزیابی اقتصادی، هزینه‌ها در دو دسته مستقل ارائه شده‌اند. جدول هزینه تجهیزات شامل برآورد سرمایه‌گذاری ثابت واحد (کمپرسورها، خنک‌کننده‌های هوایی، غشاءها و هزینه نصب آنها) است پس از اعمال ضرایب نصب و تعدیل شاخص به سال هدف تبدیل شده‌اند که در (جدول ۴) نشان داده شده است. در مقابل جدول هزینه‌های عملیاتی به مواد اولیه، محصولات و تسهیلات اختصاص دارد، یعنی هزینه‌های متغیر و ثابت سالانه مانند برق کمپرسورها که اطلاعات (جدول ۵) بیان‌کننده آن است.

$$Cost \text{ in Year } A = Cost \text{ in Year } B \times \frac{Cost \text{ in Year } A}{Cost \text{ in Year } B} \quad (2)$$

جدول ۶: اعتبار سنجی نتایج

خطا (درصد)	شبهه سازی ما (درصد)	مقاله مرجع (درصد)	
۵/۸	۲۱	۲۲/۳	خلوص هلیوم در خروجی اولین غشاء
۴	۴۴	۴۵/۸	خلوص هلیوم در خروجی دومین غشاء
۰/۲	۹۰	۹۰/۲	خلوص هلیوم در خروجی سومین غشاء

پس از تعیین چارچوب هزینه‌ها، طراحی ابعادی غشاءها انجام شد. مساحت مؤثر هر غشاء بر مبنای نفوذپذیری سطحی، اختلاف فشار، انتخاب‌پذیری و قیود طراحی شامل خلوص هلیوم ۹۰ درصد و بازده فرآیند ۹۵ درصد محاسبه شد که در (جدول ۷) قابل مشاهده است.

جدول ۷: سطح مقطع غشاءها (متر مربع)

پلی آمید	پلی پیرول	پلی سولفون
MEM 1: ۴۰۰	MEM 1: ۴۵۰۰	MEM 1: ۳۷۳۰۰
MEM 2: ۱۵۰۰	MEM 2: ۲۰۰۰	MEM 2: ۱۴۰۰۰
MEM 3: ۱۰۰	MEM 3: ۱۲۰	MEM 3: ۹۳۵

برای مقایسه سه جنس غشاء یک آمار خلاصه جامع در (جدول ۸) ارائه می‌شود که در آن برای هر کدام از مواد استفاده شده در غشاء، اجزای اصلی سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری گزارش شده‌اند. بخش سرمایه‌های شامل ستون‌های هزینه کل تجهیزات و نصب آنها، هزینه‌های داخل و خارج واحد، هزینه سرمایه‌گذاری ثابت و سرمایه در گردش است. در بخش بهره‌برداری برای هر یک از مواد انتخاب شده هزینه سالانه خوراک گاز، تعرفه برق و هزینه برق مصرفی بر اساس مصرف برق واحد طراحی شده وجود دارند. این اعداد با استفاده از همبستگی‌های هزینه و پس از تعدیل به سال ۲۰۲۵ با شاخص موردنظر محاسبه شده‌اند تا قابلیت مقایسه بین مواد مختلف حفظ شود. به این ترتیب می‌توان اثر انتخاب جنس غشاء را بر هزینه‌های سرمایه‌های

(از مسیر مساحت غشاء و توان کمپرسورها) و بر هزینه‌های عملیاتی^۲ (از مسیر برق و هزینه‌های مرتبط با غشاء) به صورت مستقیم ردیابی و سه جنس غشاء پلیمری را مقایسه کرد.

جدول ۸: خلاصه اطلاعات OPEX و CAPEX مربوط به هر جنس غشاء پلیمری

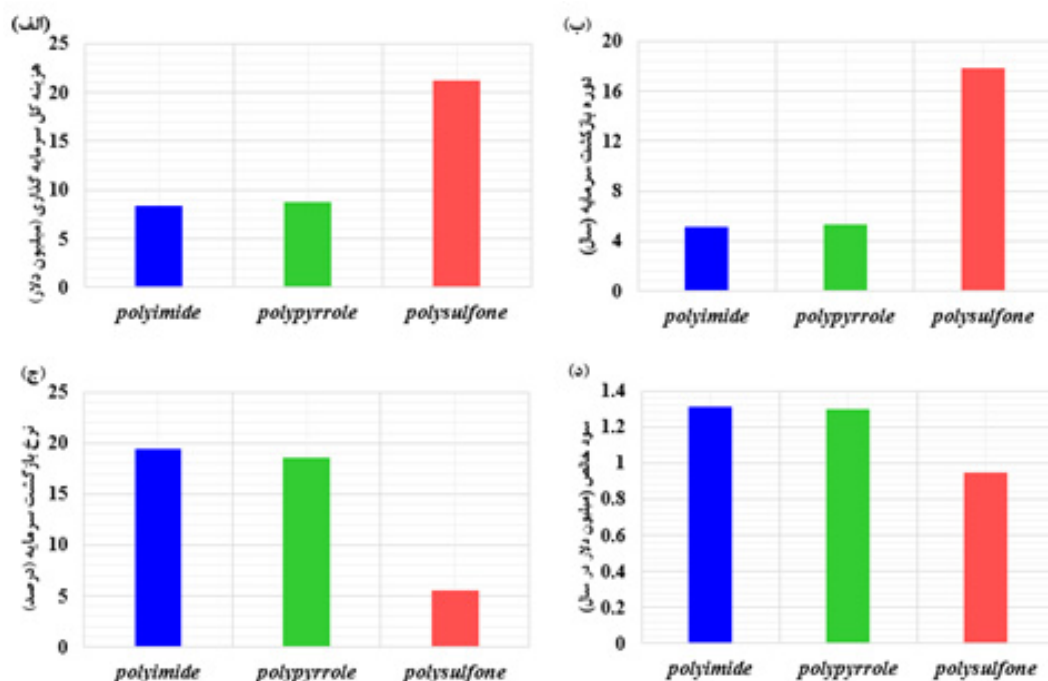
پارامتر	واحد	پلی پیرول	پلی آمید	پلی سولفون
هزینه‌های سرمایه‌ای				
هزینه کل تجهیزات	میلیون دلار	۰/۹۲	۰/۸۷	۳/۲۰
هزینه نصب تجهیزات	میلیون دلار	۲/۳۰	۲/۲۴	۴/۶۰
هزینه‌های داخل محدوده	میلیون دلار	۳/۲۱	۳/۱۱	۷/۸۰
هزینه‌های خارج محدوده	میلیون دلار	۱/۲۹	۱/۲۴	۳/۱۲
هزینه سرمایه‌گذاری ثابت	میلیون دلار	۶/۹۷	۶/۷۵	۱۶/۹۳
سرمایه در گردش	میلیون دلار	۱/۷۴	۱/۶۹	۴/۲۳
هزینه سرمایه‌گذاری کل	میلیون دلار	۸/۷۲	۸/۴۴	۲۱/۱۷
هزینه‌های سرمایه‌ای				
هزینه گاز خوراک	میلیون دلار	۵/۶۰	۵/۶۰	۵/۶۰
هزینه برق	میلیون دلار	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۸
جمع هزینه‌های عملیاتی	میلیون دلار	۵/۶۷	۵/۶۶	۵/۶۸

در این بخش بر مبنای روابط و فرض‌های ارائه شده در بخش روش کار، ابتدا مقادیر سرمایه‌گذاری کل^۳ (از تجمیع هزینه‌های تجهیز و نصب) در (شکل ۵-الف) و سپس هزینه‌های عملیاتی سالانه (برق کمپرسورها، تعویض دوره‌ای غشاء و نگه‌داری) گزارش می‌شود. شاخص‌های عملکرد اقتصادی شامل دوره بازگشت سرمایه^۴ (شکل ۵-ب)، نرخ بازگشت سرمایه^۵ (شکل ۵-ج) و سود خالص

1. CAPEX
2. OPEX
3. Total Capital Investment
4. Payback Period
5. Rate of Return

با احتساب هزینه‌های داخل واحد^۱ و خارج واحد^۲ به همراه هزینه‌های مهندسی و طراحی و پیش‌بینی ریسک، محاسبه شده است. سپس سود خالص و دوره بازگشت سرمایه که حاصل تقسیم هزینه سرمایه‌گذاری بر حاشیه سود است محاسبه شد و در نهایت نرخ بازده سرمایه از طریق جریان‌های نقدی سالانه به دست آمد.

سالانه (شکل ۵-د) محاسبه و گزارش می‌شود. تمامی نتایج در قیود عملیاتی ثابت فرآیند و از جمله خلوص هلیوم ۹۰ درصد و بازیابی ۹۵ درصد به دست آمده‌اند تا مقایسه‌ها منصفانه و معتبر باشد. هزینه سرمایه‌گذاری کل از جمع سرمایه‌گذاری ثابت و سرمایه در گردش به دست آمده است. در این طرح سرمایه‌گذاری ثابت



شکل ۵: مقایسه شاخص‌های عملکرد اقتصادی غشاءها

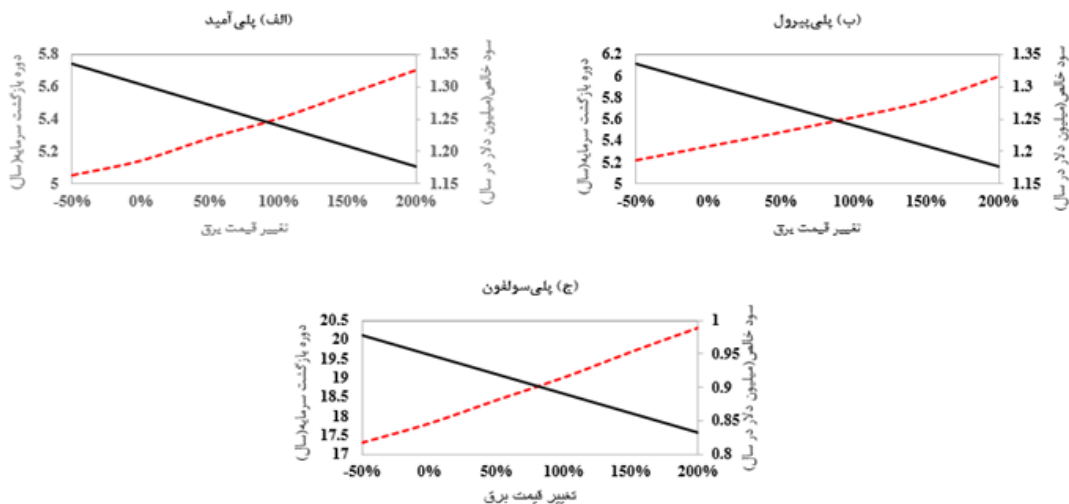
اقتصادی دیگر مثل مشخصات خوراک، خلوص هلیوم تولید شده، مقدار بازیافت هلیوم و قیمت تجهیزات ثابت در نظر گرفته شد. قیمت برق و هلیوم در بازه ۵۰- تا ۲۰۰+ درصد نسبت به قیمت کنونی تغییر داده شد و محاسبات برای هر جنس غشاء به‌طور مستقل تکرار شد و در هر حالت دو شاخص اقتصادی دوره بازگشت سرمایه و سود خالص در (شکل‌های ۶ و ۷) گزارش شد. همانطور که از نتایج به دست آمده مشخص است حساسیت اقتصادی فرآیند نسبت به تغییرات قیمت برق کاهش کمی دارد و تغییرات شاخص‌های اقتصادی برای هر سه جنس پلیمر انتخاب شده حدود ۸ تا ۱۰ درصد است.

^{۱۲} بر پایه شواهد منتشر شده از مراجع و داده‌های نیمه‌صنعتی، سطح آمادگی یا بلوغ فناوری^۳ فرآیند بازیابی هلیوم توسط غشاء در بازه ۵ تا ۶ یعنی ارزیابی میدانی قرار دارد. همچنین با توجه به اینکه در حال حاضر امکان ساخت واحد نیمه‌صنعتی بازیابی هلیوم در ایران وجود ندارد، سطح بلوغ فناوری این فرآیند^۳ خواهد بود.

۶. تحلیل حساسیت

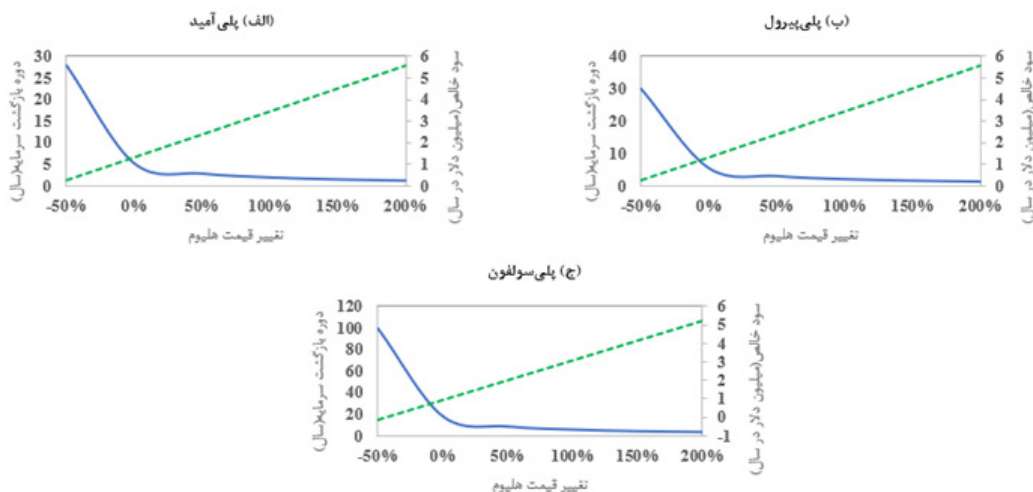
برای سنجش پایداری نتایج اقتصادی و نقش متغیرهای مستقل، تحلیل حساسیت‌های شاخص‌های اقتصادی مثل دوره بازگشت سرمایه و سود خالص نسبت به تغییرات قیمت برق و هلیوم انجام شد. در این تحلیل فروض فرآیندی و

1. Inside Battery Limits (ISBL)
2. Outside Battery Limits (OSBL)
3. Technology Readiness Level (TRL)



شکل ۶: تغییرات شاخص‌های اقتصادی نسبت به تغییر قیمت برق

اما فرآیند طراحی شده نسبت به تغییرات قیمت قیمت هلیوم چیزی در حدود ۷۰ تا ۳۵۰ درصد دچار تغییر می‌شوند. هلیوم کشش زیادی دارد و شاخص‌های اقتصادی با تغییر



شکل ۷: تغییر شاخص‌های اقتصادی نسبت به تغییر قیمت هلیوم

پس نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد با تغییر قیمت برق تغییرات در هر سه غشاء تقریباً خطی و محدود است، اما تغییر قیمت هلیوم شاخص‌های اقتصادی را به‌طور چشم‌گیری تغییر می‌دهد؛ بنابراین رتبه‌بندی اقتصادی به ترتیب از آن پلی‌آمید، پلی‌پیرول و پلی‌سولفون خواهد بود و محرک اصلی اقتصاد این فرآیند قیمت هلیوم است.

۷. نتیجه‌گیری

جمع‌بندی اقتصادی سه سناریوی غشایی در (شکل ۵) نشان می‌دهد پلی‌آمید و پلی‌پیرول از نظر شاخص‌های کلیدی کمتر (۸ تا ۹ میلیون دلار) و دوره بازگشت سرمایه حدود ۵ تا

تقریباً هم‌تراز و به‌مراتب اقتصادی‌تر از پلی‌سولفون هستند. به دلیل اینکه غشای جنس پلی‌سولفون تراوایی کمتری نسبت به دو جنس دیگر دارد هزینه بیشتری برای ساخت غشاء برای رسیدن به درصد خلوص هلیوم بالا و در نتیجه هزینه سرمایه‌گذاری بیشتری نیاز دارد. پس به همین دلیل ساخت واحد بازیابی هلیوم توسط غشاء پلی‌سولفون علاوه بر داشتن هزینه سرمایه‌گذاری زیاد، دارای دوره بازگشت سرمایه زیادی هم نسبت به دو جنس غشاء دیگر است. در مقابل پلی‌آمید و پلی‌پیرول با داشتن هزینه سرمایه‌گذاری کل کمتر (۸ تا ۹ میلیون دلار) و دوره بازگشت سرمایه حدود ۵ تا

climate science plan—Future research directions,” US Geological Survey, 2330-5703, 2024.

- [3]. Z. Dai et al., “Helium separation using membrane technology: Recent advances and perspectives,” *Separation and Purification Technology*, vol. 274, p. 119044, 2021.
- [4]. Z. Hu and J. Li, “A review of helium resources and development,” *Natural Gas Industry B*, 2025.
- [5]. C. A. Scholes, U. K. Gosh, and M. T. Ho, “The economics of helium separation and purification by gas separation membranes,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 56, no. 17, pp. 5014-5020, 2017.
- [6]. D. D. Nikolić and E. S. Kikkinides, “Modelling and optimization of hybrid PSA/membrane separation processes,” *Adsorption*, vol. 21, no. 4, pp. 283-305, 2015.
- [7]. W. Xiao et al., “Design and Optimization of a Novel Hybrid Membrane–Electrochemical Hydrogen Pump Process for Recovering Helium from NRU off Gas,” *Membranes*, vol. 13, no. 7, p. 689, 2023.
- [8]. M. A. Tofighy and T. Mohammadi, “Helium removal from natural gas by membrane technologies,” in *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications. Volume 5: Natural Gas Impurities and Condensate Removal*: Elsevier, 2024, pp. 267-290.
- [9]. M. Alders, D. Winterhalder, and M. Wessling, “Helium recovery using membrane processes,” *Separation and Purification Technology*, vol. 189, pp. 433-440, 2017.
- [10]. M. A. Quader, T. E. Rufford, and S. Smart,

۵/۵ سال نرخ بازگشت سرمایه نزدیک به ۱۹ درصد عملکرد قابل قبولی ارائه می‌دهند. همچنین درآمد عملیاتی و سود خالص سالیانه برای پلی‌آمید و پلی‌پیرول بیشتر از پلی‌سولفون است. از دید فنی-اقتصادی این نتایج با انتظار ناشی از تراوایی بالاتر و سطح مقطع کمتر برای پلی‌آمید و پلی‌پیرول سازگار است که هم مساحت غشاء و هم توان کمپرسورها را کاهش می‌دهد و بهبود هم‌زمان CAPEX و OPEX را رقم می‌زند. براین اساس، مگر آنکه الزامات ویژه فرایندی (مثل مقاومت شیمیایی و دما) انتخاب دیگری را تحمیل کند، پلی‌آمید گزینه برتر اقتصادی برای واحد سه‌مرحله‌ای جداسازی هلیوم است و پلی‌پیرول به‌عنوان جایگزین نزدیک قابل توصیه است. طول عمر ماژول‌های غشائی تابع ترکیب خوراک، فشار، دما و نحوه بهره‌برداری است و معمولاً به‌صورت چندساله گزارش می‌شود. در حضور ترکیبات اسیدی و هیدروکربن‌های سنگین به علت پدیده‌هایی مانند پیرشدگی پلیمر، آلودگی و گرفتگی افت کارایی غشاء زودتر رخ می‌دهد. این افت کارایی به‌صورت کاهش نفوذپذیری و انتخاب‌پذیری غشاء، افزایش مساحت مؤثر موردنیاز و در نهایت کاهش بازافت ظاهر می‌شود. در این مدل‌سازی شرایط پایا و تقریباً هم‌دما فرض شده، نفوذپذیری و انتخاب‌پذیری مستقل از زمان و تغییرات آنها نسبت به فشار نادیده گرفته شده است؛ بنابراین نتایج اقتصادی بیشتر نماینده عملکرد اولیه فرآیند هستند و اثر فرسودگی تدریجی در طول زمان به‌طور مستقیم مدل نشده‌اند. در عمل، پیشنهاد می‌شود ضریب دسترسی و هزینه تعویض دوره‌ای به تحلیل اقتصادی افزوده شود و با داده‌های آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی (پایش بلندمدت نفوذپذیری و انتخاب‌پذیری روی خوراک واقعی) کالیبره گردد تا عدم قطعیت ناشی از عمر غشاء و افت کارایی کاهش یابد. برای ادامه کار پیشنهاد می‌شود انواع خوراک گاز طبیعی حاوی هلیوم موجود در جهان برای بررسی عملکرد اقتصادی فرآیند بررسی شوند. همچنین مقایسه واحدهای مبتنی بر غشاء با واحدهای فوق سرد تولید هلیوم می‌تواند به ارزیابی و بهینه‌سازی این فرآیندها کمک قابل توجهی کند.

مراجع:

- [1]. J. S. Serra Leal, J. Incer-Valverde, and T. Morosuk, “Helium: Sources, applications, supply, and demand,” vol. 3, ed: MDPI, 2023, pp. 181-183.
- [2]. T. Wilson et al., “US Geological Survey

129416, 2021.

- [19]. B. Van Ruijven and D. P. Van Vuuren, "Oil and natural gas prices and greenhouse gas emission mitigation," *Energy Policy*, vol. 37, no. 11, pp. 4797-4808, 2009.
- "Modeling and cost analysis of helium recovery using combined-membrane process configurations," *Separation and Purification Technology*, vol. 236, p. 116269, 2020.
- [11]. M. A. Quader, T. E. Rufford, and S. Smart, "Integration of hybrid membrane-distillation processes to recover helium from pre-treated natural gas in liquefied natural gas plants," *Separation and Purification Technology*, vol. 263, p. 118355, 2021.
- [12]. S. Haider, M. Saeed, A. Lindbråthen, and M.-B. Hagg, "Techno-economic evaluation of helium recovery from natural gas; A comparison between inorganic and polymeric membrane technology," 2019.
- [13]. G. D. Ulrich and P. T. Vasudevan, *Chemical engineering: process design and economics; a practical guide*. Process Publ., 2004.
- [14]. G. Towler and R. Sinnott, *Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design*. Butterworth-Heinemann, 2021.
- [15]. D. Mignard, "Correlating the chemical engineering plant cost index with macro-economic indicators," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92, no. 2, pp. 285-294, 2014.
- [16]. R. Turton, R. C. Bailie, W. B. Whiting, and J. A. Shaeiwitz, *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. Pearson Education, 2008.
- [17]. R. W. Baker, *Membrane Technology and Applications*. Chichester: John Wiley & Sons, 2012.
- [18]. J. Sun, G. Wang, H. Zhang, B. Zhang, and C. Hu, "Facile fabrication of a conductive polypyrrole membrane for anti-fouling enhancement by electrical repulsion and in situ oxidation," *Chemosphere*, vol. 270, p.



Techno-Economic Comparison of Helium Recovery from Natural Gas Using Polymeric Membranes Simulation

Mohammad Mahdi Yousefi¹, Mostafa Jafari^{2*}

1. M.Sc. Student, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Researcher, Institute of Liquefied Natural Gas (I-LNG), School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

RESEARCH ARTICLE

Article History:

Received: 25 September 2025

Revised: 09 October 2025

Accepted: 03 November 2025

Keywords:

Helium recovery
Polymeric membrane
Permeability
Selectivity
Economic evaluation

ABSTRACT

We simulated a three-stage membrane process for helium recovery from natural gas in PRO/II using the Peng-Robinson equation of state. Three polymeric membranes: polyimide, polypyrrole, and polysulfone were evaluated under identical feed conditions and design criteria (90% product purity, 95% recovery). The model reproduced literature data and the stagewise increase in purity. Techno-economic analysis shows that the higher permeability of polyimide and polypyrrole lowers the required membrane area and compression power, improving both CAPEX and OPEX. In the optimized design, total investment is USD 8-9 million, the payback period is about 5-5.5 years, and the rate of return is 19%. Accordingly, polyimide is the most economical option, with polypyrrole as a close alternative, while polysulfone remains less competitive. One-way sensitivity analyses indicate limited elasticity to electricity tariff but strong dependence on helium price over the tested range.

DOR: [20.1001.1.2509.1105.1404.08.12](https://doi.org/10.1001.1.2509.1105.1404.08.12)

How to cite this article

S.M. Yousefi, M. Jafari, Techno-Economic Comparison of Helium Recovery from Natural Gas Using Polymeric Membranes Simulation. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2026; 12(4): 10 -20. (https://ijge.irangi.org/article_735758.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: mustafa.jafari@ut.ac.ir, (M. Jafari).

Available online 11 March 2026

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>) 



موانع و چالش‌های جایگزینی گاز طبیعی فشرده در چرخه حمل و نقل

مهران شکیبائی^۱، امید مجنون^۲، قنبرعلی شیخ زاده نوش آبادی^{۳*}

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک - حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استاد، گروه مهندسی مکانیک - حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: sheikhz@kashanu.ac.ir

مقاله علمی-ترویجی

صفحه ۲۱ - ۳۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲

چکیده

گسترش حمل و نقل همواره با چالش‌های اساسی به دلیل فشار ناشی از رشد تقاضای انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن مواجه بوده است. ترکیبات گاز طبیعی دارای متان بالاتری هستند که باعث افزایش کیفیت احتراق می‌شود. مطالعه حاضر به بررسی گاز طبیعی فشرده به‌عنوان سوخت پاک و مناسب برای کاهش آلاینده‌گی هوا در میان مدت پرداخته و چالش‌ها و موانعی که برای استفاده از آن به‌عنوان جایگزین بنزین وجود دارد را بررسی می‌نماید. با توجه به منابع غنی گاز طبیعی در ایران، اهمیت و نقش CNG به‌عنوان سوخت جایگزین در خودروها می‌تواند ترازای تولید بنزین را کنترل کرده و امنیت انرژی را افزایش دهد. به علت قیمت پایین و بارانهای بنزین، مدیریت و اصلاح روش‌های مصرف همواره دچار مشکل می‌باشد؛ به طوری که کشور ایران دارای رتبه ششم میزان انتشار CO₂ دنیا بوده و یک روند صعودی را در پیش گرفته است. از جمله موارد و چالش‌هایی که باعث کاهش مصرف CNG در سال‌های اخیر شده‌اند؛ می‌توان به استهلاک جایگاه‌های عرضه سوخت CNG و گاهای ایمنی پایین، فاصله قیمتی کم CNG با بنزین نسبت به مسافت طی شده، مصرف بالای برق و رطوبت موجود در گاز که بر عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارد، اشاره نمود. جایگزینی بنزین و استفاده بیشتر از CNG به لحاظ اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه بوده و می‌تواند هزینه‌های مربوط به واردات بنزین را کنترل کند.

کلیدواژه‌ها: گاز طبیعی فشرده، آلاینده‌گی، ایستگاه سوخت‌رسانی، صنعت حمل و نقل، خودروی گازسوز

۱. مقدمه

در جهان مدرن با کلان‌شهرهایی پر از خودرو و بزرگراه‌هایی که برای جابجایی نفرات و کالا ساخته شده‌اند، شگفت نیست که بخش حمل و نقل یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان سوخت‌های فسیلی تجدیدناپذیر باشد. با گسترش صنعت حمل و نقل و مصرف روزافزون انرژی، مشکلاتی از قبیل آلودگی زیست‌محیطی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله CO₂ به وجود





آمده است که پیامدهایی چون گرم شدن کره زمین را در پی دارد.

آلودگی هوا یکی از موضوعات اصلی مورد توجه در سراسر جهان است. ذرات معلق ریز با قطر ۲/۵ میکرومتر یا کمتر (PM_{2.5})، به عنوان یکی از عوامل اصلی آلودگی هوا و آسیب‌های جسمی شناخته می‌شود [۱].

مهم‌ترین مسئله در کنترل و کاهش گازهای گلخانه‌ای، شناسایی صحیح منابع انتشار و برآورد دقیق میزان انتشار از این منابع می‌باشد [۲]. در سال ۲۰۰۵، بخش حمل‌ونقل ۲۳ درصد انتشار CO₂ جهانی مربوط به انرژی را به خود اختصاص داد [۳]. این میزان بالا، ضرورت استفاده از انرژی جایگزین را ایجاب می‌نماید زیرا پایداری محیط‌زیست یک الزام برای سیستم‌های حمل‌ونقل شهری مدرن به‌شمار می‌آید [۴]. صنعت حمل‌ونقل همواره نقش مهمی در مصرف انرژی دارد. این بخش عمدتاً انرژی‌های تجدیدناپذیر را مصرف می‌کند که باعث ایجاد تأثیر منفی بر محیط‌زیست شده و همچنین سهم عظیم و رو به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح جهان را به خود اختصاص می‌دهد [۵]. رشد جمعیت شهرنشینی و افزایش سرانه درآمدها به‌طور ناخواسته منجر به افزایش استفاده از خودرو می‌شود. افزایش تقاضای انرژی در حمل‌ونقل به‌دلیل استفاده بیشتر خودروهای موجود از سوخت فسیلی، به معنای آلودگی بالاتر است؛ بنابراین نیاز به جایگزین نمودن با سوخت پاک‌تر وجود دارد [۶].

در سال ۲۰۲۳ حدود ۷۶ درصد از انرژی مورد نیاز منطقه خاورمیانه از گاز طبیعی و ۱۸ درصد نیز از سایر سوخت‌های فسیلی (نفت و زغال‌سنگ) تأمین می‌شد [۷]. در چنین شرایطی استفاده از سوختی پاک و ارزان که بتواند جایگزین سوخت‌های مرسوم مانند بنزین و گازوئیل باشد، ضرورت می‌یابد. گاز طبیعی به‌عنوان سوخت پاک، با راندمان بالا و کربن کم، منبع سوخت بسیار مهمی محسوب می‌شود [۸].

طبق پیش‌بینی آژانس بین‌المللی انرژی، بخش حمل‌ونقل ۴۶/۴۷ درصد از رشد مصرف نفت بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۴۰ را به خود اختصاص خواهد داد. در سال ۲۰۱۸، ۴۳/۵۵ درصد از نفت خام مصرفی و

۲۴/۵ درصد از انتشار CO₂، مربوط به بخش حمل‌ونقل بوده است [۹]؛ بنابراین، سیاست سوخت جایگزین در سیستم حمل‌ونقل، به‌عنوان یکی از سیاست‌های اصلی برای کاهش انتشار CO₂ مطرح است [۱۰]. طبق تعهد ایران به توافق‌نامه پاریس، انتشار CO₂ در ایران باید در سال ۲۰۳۰، به‌طور معمول و در مقایسه با مقدار آن در سناریوی تداوم روند موجود (BAU) ^۱ به میزان ۴ درصد کاهش یابد؛ بنابراین، ایران تنها با جایگزینی سوخت بنزین و دیزل با گاز طبیعی می‌تواند به‌راحتی به تعهدات خود در بخش حمل‌ونقل شهری عمل کند [۱۱].

منابع گاز طبیعی موجود، باعث تمایل برخی کشورها مانند ایران، روسیه، عراق و ... به استفاده از این سوخت در خودروها گردیده است. استفاده از گاز طبیعی فشرده که به‌اختصار سوخت CNG ^۲ نامیده می‌شود، به‌جای بنزین در موتورهای احتراق داخلی، باعث کاهش چشم‌گیر آلاینده‌ها می‌شود که یکی از مزایای مهم این سوخت است [۱۲]. گاز طبیعی سوختی است که معمولاً اثرات زیان‌آور کمتری نسبت به سایر سوخت‌های فسیلی دارد [۱۳]. استفاده از CNG در صنعت حمل‌ونقل می‌تواند به بهبود هوای شهری و کاهش اثرات نامطلوب سلامتی و اجتماعی منجر شود [۱۴]. علاوه بر این، کشور ایران سرشار از منابع گاز طبیعی است و با فراهم نمودن زیرساخت‌های مناسب برای استفاده از CNG، ظرفیت استفاده گسترده از آن در بخش حمل‌ونقل وجود دارد.

لی و همکاران [۱۵] تأثیر مصرف گاز طبیعی روی آلودگی هوا را در شهرهای مختلف کشور چین بررسی کردند و نشان دادند که افزایش ۱ درصدی مصرف گاز طبیعی، انتشار PM_{2.5} را در مناطقی با مصرف بالای گاز طبیعی، به میزان ۰/۱۷ درصد مهار می‌کند؛ بنابراین، گسترش مصرف گاز طبیعی یک راه حل مؤثر برای مقابله با انتشار آلاینده‌ها در مناطقی با مصرف بالای گاز طبیعی است. اسکویاتو و همکاران [۱۶] پیشنهاد کردند که به‌منظور کاهش انتشار PM_{2.5}، مصرف گاز طبیعی برای تولید برق افزایش یابد. هانگ و محمود بیان نمودند که استفاده از CNG، انتشار CO را به میزان ۷۰ درصد، NO_x را تا ۸۷ درصد و CO₂ را تا ۲۰ درصد نسبت به بنزین کاهش می‌دهد [۱۷]. نتیجه مطالعه او و ژانگ [۱۸] که در کشور چین انجام شد، این واقعیت را آشکار کرد که با

1. Business as usual (BAU)

2. Compressed Natural Gas (CNG)

تغییر خودروهای بنزینی به خودروهایی با سوخت CNG و گاز طبیعی مایع^۱ می‌توان به ترتیب به کاهش ۱۰ تا ۲۰ درصدی و ۵ تا ۱۰ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای دست یافت. هاگوس و اهلگرن [۱۹] خودروهای گاز طبیعی را انتخاب کرده و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای آن‌ها را با استفاده از روش چاه تا چرخ بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از سوخت گاز طبیعی فشرده و مایع در حمل‌ونقل جاده‌ای و دریایی، انتشار گازهای گلخانه‌ای را برای انواع خودروها ۱۵ تا ۲۷ درصد در هر کیلومتر کاهش می‌دهد. جیان چای و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۸ در مطالعه‌ای تشریح نمودند که مصرف گاز طبیعی با کاهش قیمت گاز و زغال‌سنگ و همچنین افزایش قیمت برق و نفت، در کوتاه‌مدت افزایش می‌یابد. موسایی و همکاران [۲۱] مدل جامعی برای انتخاب بهترین سوخت در زنجیره ارزش گاز طبیعی برای کشور ایران طراحی نمودند و نتایج نشان داد بهترین گزینه برای کشور گاز طبیعی مایع و بعد از آن، گاز طبیعی فشرده می‌باشد. شمساپور و همکاران [۱۱] سیستم ناوگان حمل‌ونقل شهر تهران را با استفاده از رویکرد پویایی سیستم مدل‌سازی کردند. آن‌ها جایگزینی سوخت بنزین در بخش خودروهای شخصی و تاکسی‌ها و همچنین سوخت دیزل در ناوگان اتوبوس‌رانی با سوخت CNG را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که جایگزینی سوخت CNG با سوخت‌های با انتشار کربن بالا می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در کاهش انتشار CO₂ داشته باشد.

با توجه به مرور انجام شده و مطالبی که بیان شد؛ هدف از انجام این مطالعه، بررسی آمار مصرف CNG و روند گسترش آن در ایران و سایر کشورها و همچنین موانع جایگزینی آن با سایر سوخت‌ها مانند بنزین می‌باشد که می‌تواند به بهبود آلاینده‌گی هوا و صرفه‌جویی در مصرف بنزین که در کشور ایران بخش مهمی از ناترازی‌ها را به همراه دارد، منجر شود. علاوه بر این به چالش‌های صنعت CNG از جمله استهلاک جایگاه‌ها و عدم قابلیت اطمینان این جایگاه‌ها در سال‌های آتی پرداخته می‌شود. همچنین، ارزیابی میزان آلاینده‌گی و امکان‌سنجی اقتصادی جایگزینی گاز طبیعی فشرده به جای بنزین در بخش حمل‌ونقل ایران به‌عنوان راهبرد میان‌مدت برای کاهش انتشار CO₂ و بهبود امنیت انرژی، از دیگر اهداف

این پژوهش است. نوآوری مطالعه حاضر در این است که ابعاد زیرساختی، زیست‌محیطی و اقتصادی استفاده از CNG در ایران به‌صورت هم‌زمان بررسی شده است و چالش‌های عملیاتی نظیر مصرف برق، ایمنی جایگاه‌ها و رطوبت گاز، در کنار عوامل سیاستی، به‌صورت تلفیقی تحلیل شده‌اند. یک تحلیل اقتصادی با مقایسه بین هزینه تبدیل خودروها به CNG و هزینه واردات بنزین نیز ارائه شده است.

۲. آمار وسایل نقلیه گازسوز و مصرف سوخت گاز طبیعی فشرده

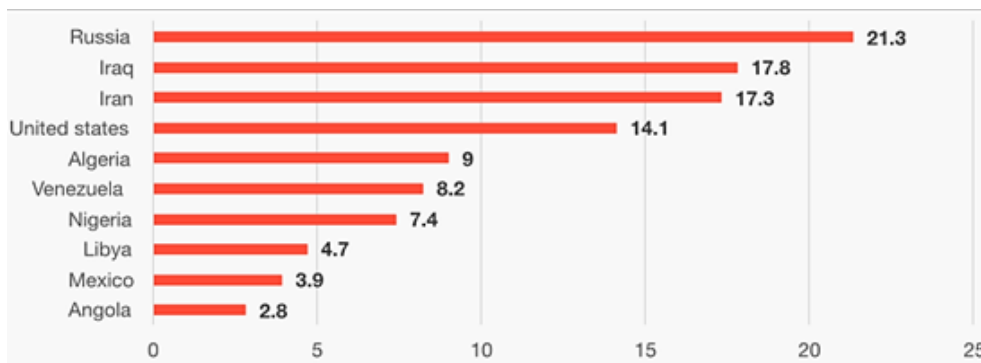
در (شکل ۱)، ده کشور برتر (از نظر مصرف) گازسوز در جهان در سال ۲۰۱۸ نشان داده شده است؛ که در آن ایران به‌عنوان سومین کشور گازسوز جهان با مصرف ۱۷/۳ میلیارد فوت مکعب مشخص می‌باشد [۲۲]. بر اساس اطلاعات اطلس جهانی کربن و طبق آخرین آمار جهانی از کشورهایی با بیشترین میزان انتشار CO₂ تا سال ۲۰۲۳ [۲۳]، ایران به‌ترتیب بعد از کشورهای چین، آمریکا، هند، روسیه و ژاپن در رتبه ششم میزان انتشار CO₂ دنیا قرار دارد (شکل ۲).

بنابراین، ایران نیاز به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه در شهرهای پرجمعیت دارد. نگرانی‌های فزاینده در مورد پایداری انرژی و محیط‌زیست اخیراً منجر به افزایش علاقه عموم به استفاده از حمل‌ونقل پاک‌تر و مؤثرتر شده است [۲۴]. با توجه به پیامدهای بسیار مخرب آلودگی‌های زیست‌محیطی بر سلامت بشر، اغلب کشورهای دنیا به مسئله آلودگی هوا ناشی از سوخت خودروها و همچنین اعمال استانداردهای آلودگی بر خودروهای تولیدی، توجه خاصی مبذول داشته‌اند. استفاده صحیح از گاز طبیعی به‌عنوان سوخت خودرو می‌تواند باعث کاهش آلاینده‌های تولیدی توسط خودروها گردد [۲۵].

بیش از ۲۶۶۷۷ جایگاه سوخت‌رسانی CNG مربوط به وسایل نقلیه گازسوز در سراسر جهان وجود دارد. (شکل ۳)، ده کشور برتر جهان با بیشترین تعداد وسایل نقلیه با سوخت گاز طبیعی (NGV)^۲ را نشان می‌دهد که ایران با بیش از ۴ میلیون خودروی گازسوز در جایگاه نخست جهان است [۲۶].

1. Liquefied Natural Gas (LNG)
2. Natural Gas Vehicle (NGV)

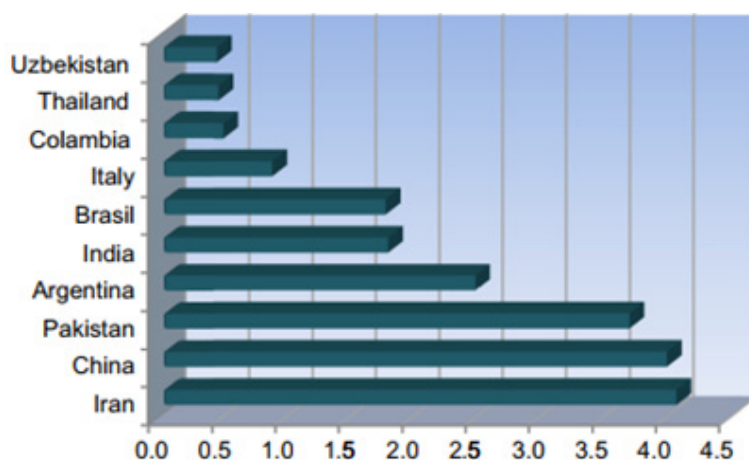




شکل ۱: ده کشور برتر گازسوز جهان در سال ۲۰۱۸ (مصرف برحسب میلیارد فوت مکعب) [۲۲]

Rank	Country	MtCO ₂
1	China	11903
2	United States of America	4911
3	India	3062
4	Russian Federation	1816
5	Japan	989
6	Iran	818
7	Saudi Arabia	736
8	Indonesia	733
9	Germany	596
10	South Korea	577

شکل ۲: کشورهای دارای بیشترین میزان انتشار CO₂ (برحسب مگا تن) [۲۳]

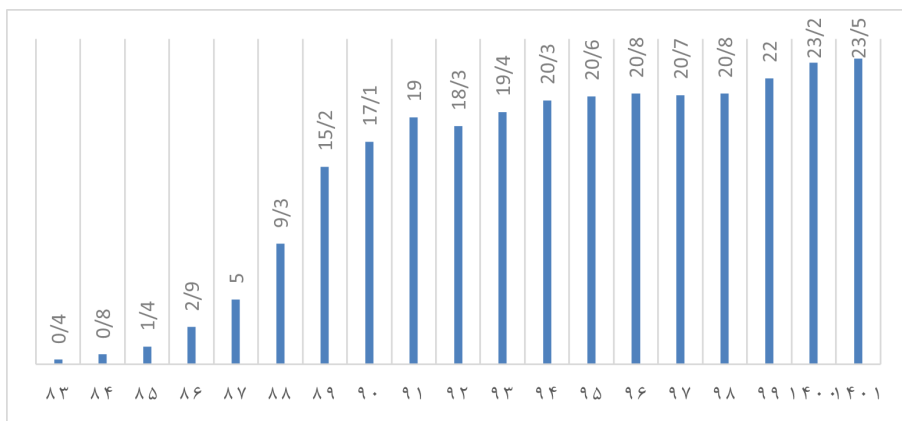


شکل ۳: تعداد وسایل نقلیه با سوخت گاز طبیعی در کشورهای مختلف (برحسب میلیون) [۲۴]

CNG از روزانه ۰/۴ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۸۳ به روزانه ۱۹ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۹۱ رسیده که حاکی از افزایش ۴۷ برابری مصرف این سوخت است؛ اما پس از آن و طی سال‌های اخیر دولت توجه کمتری را به توسعه CNG داشته، به طوری که میزان مصرف روزانه CNG از ۱۹ میلیون مترمکعب در روز در سال ۱۳۹۱ به ۲۳/۵ میلیون مترمکعب در روز در سال ۱۴۰۱ رسیده است و رشد چندانی نداشته است [۲۸].

در سال ۱۴۰۱ مصرف گاز طبیعی فشرده (CNG) در خودروها در ایران روزانه به سطح ۲۳/۵ میلیون مترمکعب رسید که تنها یک درصد نسبت به سال ۱۴۰۰ افزایش داشته است. مجموع تعداد جایگاه‌های عرضه کننده گاز طبیعی نیز طی چند سال اخیر ثابت بوده است [۲۷].

در (شکل ۴) میزان مصرف CNG طی سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۱ در ایران نشان داده شده است. بر این اساس مصرف



شکل ۴: میزان مصرف روزانه CNG در ایران در سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۱ برحسب میلیون مترمکعب در روز [۲۸]

آلاینده‌های سوختی به وجود می‌آید را کاهش دهد. مطابق آمار ارائه شده توسط سازمان جهانی بهداشت (WHO) 'آلودگی هوا که پنجمین عامل مرگ‌ومیر زودرس در جهان بوده، فقط در سال ۲۰۱۷ منجر به مرگ بیش از ۴/۹ میلیون نفر و از دست دادن ۱۴۷ میلیون سال زندگی سالم در جهان شده است [۳۲].

بر اساس اعلام وزارت بهداشت ایران، سالانه ۲۰ هزار مرگ منتسب به آلودگی هوا در ایران وجود دارد. بیش از نیمی از جمعیت کشور در معرض آلودگی هوا قرار دارند و خسارات آلودگی هوا در ایران سالانه به ۷ میلیارد دلار می‌رسد. فقط در شهر تهران سالانه بیش از ۳۷۰۰ نفر به علت آلودگی هوا جان خود را از دست می‌دهند و خسارت این پدیده در تهران بالغ بر ۲/۳ میلیارد دلار است.

۳-۲. امنیت انرژی

امنیت انرژی از کشوری به کشوری دیگر متفاوت است. امنیت انرژی در کشوری که به شدت به واردات نفت و گاز وابسته است به مفهوم امنیت عرضه است. در حالی که امنیت انرژی در کشوری که نفت و گاز صادر می‌کند به مفهوم امنیت تقاضا است [۳۳].

در ایران همواره با ناترازی تولید بنزین به علت مصرف بالای آن مواجه هستیم. به علت قیمت پایین و یارانه‌ای بنزین، مدیریت مصرف و اصلاح روش‌های مصرف همواره دچار مشکل می‌باشد. کل یارانه انرژی در سال ۱۳۸۴ معادل ۴۶/۲۵ میلیارد دلار بوده که بیش از ۲۲ درصد آن صرف بنزین شده است. به این ترتیب یارانه بنزین از ۷/۶ میلیارد دلار در سال ۱۳۸۴ به ۱۰/۲ میلیارد دلار در سال ۱۳۸۵ رسید. این در

ملاحظه می‌شود که پس از جهش مصرف طی دهه هشتاد شمسی و افزایش آرام و تدریجی در دهه نود شمسی، در سال‌های اخیر مقدار مصرف CNG خودروها تقریباً ثابت باقی‌مانده و به مرور میزان سرمایه‌گذاری در این حوزه کمتر شده است که یکی از دلایل آن را می‌توان به افزایش هزینه‌های جایگاه CNG مربوط دانست در حالی که قیمت گاز طبیعی طی این سال‌ها ثابت مانده است.

۳. مزایای CNG به عنوان سوخت خودرو

گاز طبیعی به دو صورت گاز طبیعی فشرده و گاز طبیعی مایع در خودروها مورد استفاده قرار می‌گیرد. گاز طبیعی موجود در ایران دارای متان با درصد مولی ۹۸/۵۷ می‌باشد [۲۹]. مزایای استفاده از گاز طبیعی فشرده به عنوان سوخت در خودرو عبارتند از:

۳-۱. کاهش آلاینده‌گی هوا

خودروهایی که از سوخت بنزین و گازوئیل استفاده می‌کنند آلاینده‌ها و ذرات خطرناکی منتشر می‌کنند. در مقایسه با بنزین و گازوئیل، CNG انتشار CO₂ کمتری دارد [۳۰]. در سال ۲۰۱۲ آلاینده‌های خروجی موتور دیزل توسط سازمان بهداشت جهانی به عنوان عامل سرطان‌زا شناخته شده‌اند [۳۱].

بنابراین انتخاب سوخت پاک و در دسترس در بخش حمل‌ونقل در هر سیستم شهری بخصوص در بخش عمومی می‌تواند منجر به توسعه پایدار در حمل‌ونقل شهری گردد. کاهش آلاینده‌گی هوا می‌تواند بخش زیادی از هزینه‌های اجتماعی که انسان امروزی با آن مواجه است مانند انواع سرطان‌ها و مرگ‌ومیرهایی که در اثر

1. World Health Organization (WHO)



حالی است که درآمد نفتی ایران در سال ۱۳۸۴ معادل ۸۵ میلیارد دلار بوده یعنی در آن سال بیش از ۱۰ درصد کل درآمد کشور صرف یارانه بنزین شده است [۳۴].

بررسی‌ها نشان می‌دهد مصرف بنزین ایران در سال ۱۴۰۲ به‌طور متوسط روزانه ۱۱۲ میلیون لیتر بوده است. درحالی‌که تولید بنزین روزانه بین ۹۸ تا ۱۰۴ میلیون لیتر می‌باشد که ناترازی ۸ تا ۱۴ میلیون لیتر در روز را نشان می‌دهد؛ بنابراین استفاده از سوخت CNG به‌عنوان یک سوخت جایگزین حمل‌ونقل با انتشار کربن کم، امنیت انرژی را افزایش خواهد داد [۶]. بررسی‌ها در ایران نشان می‌دهد که توسعه مصرف گاز طبیعی فشرده در ناوگان حمل‌ونقل می‌تواند روزانه بین ۳۰ تا ۴۰ میلیون لیتر در مصرف بنزین کشور صرفه‌جویی ایجاد کند.

۴. قیمت گاز طبیعی و ارزیابی اقتصادی

در ایران قیمت‌گذاری توسط دولت جهت‌گیری می‌شود و از زمان بهره‌برداری تاکنون قیمت گاز طبیعی نوسانات چندانی نداشته است و برای تشویق مصرف‌کننده قیمت آن تقریباً افزایش نداشته است.

در کشور چین سیاست قیمت‌گذاری گاز طبیعی بسته به نوع مصرف از جمله کاربری مسکونی، استفاده برای وسایل نقلیه و کاربری تجاری فرق می‌کند و قیمت CNG برای استفاده در خودرو به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از قیمت CNG برای سایر مصارف است [۳۵]. مصرف گاز طبیعی چین ۱۸۰ میلیارد مترمکعب در سال ۲۰۱۴ بود که حدود ۶ درصد از کل مصرف انرژی اولیه را تشکیل می‌داد [۳۶]. چین باید استانداردهای بهسازی خودروهای CNG را بهبود داده و نظارت و بازرسی کیفیت را تشدید نماید تا بتواند ایستگاه‌های سوخت‌رسانی گاز طبیعی را با راندمان بسیار بالاتر ایجاد کند [۲۶].

در ارمنستان، قیمت CNG، ۳ تا ۴ برابر ارزان‌تر از بنزین و نیمی از قیمت گازوئیل است [۳۷]. ژانگ نشان داد که قیمت انرژی تأثیرات قابل‌توجهی بر روی فناوری و بهره‌وری انرژی دارد [۳۸].

در ایران از آبان سال ۱۳۹۸ به بعد فاصله قیمت گاز طبیعی با قیمت بنزین آزاد به یک هفتم رسید. قیمت نسبی بنزین به CNG از ۲ به بیش از ۳ افزایش یافت. این شکاف قیمتی، محرک مناسبی برای تبدیل خودروهای سبک معمولی به خودروهای دوگانه‌سوز بود. در نتیجه مصرف

CNG از حدود ۱۹ به ۲۴ میلیون مترمکعب در روز افزایش یافت [۳۹]. اما در سال‌های پس از آن استقبال چندانی از CNG صورت نگرفت و باوجود ارزان بودن این سوخت، مصرف آن طی سالیان اخیر نسبتاً ثابت بوده است.

۵. زیرساخت مورد نیاز برای استفاده از CNG در صنعت حمل‌ونقل

گاز طبیعی با استفاده از تجهیزات فشرده‌سازی به سوخت حمل‌ونقل خودرو تبدیل می‌شود [۴۰] (شکل ۵)، تا بتوان در کمترین زمان سوخت‌گیری را انجام داد. بدین ترتیب تمایل مصرف‌کننده به استفاده از این سوخت پاک افزایش می‌یابد [۲۷].

به‌منظور سرویس‌دهی به ناوگان بزرگ حمل‌ونقل و رقابت با سایر سوخت‌ها باید زمان سوخت‌گیری را کاهش داد. در این حالت از طراحی جایگاه با سیستم سوخت‌گیری سریع^۱ که دارای سه خط فشار است، استفاده می‌شود. در این سیستم گاز به‌طور مستقیم از مخازن ذخیره جایگاه به مخازن خودرو انتقال می‌یابد و این حالت دارای عملکرد بیشینه بوده، به‌طوری‌که دبی جرمی در توزیع‌کننده‌ها قابل مقایسه با دبی جرمی توزیع‌کننده‌های سوخت‌های مایع متداول خواهد بود [۲۵]. در این نوع جایگاه‌ها زمان سوخت‌گیری معمولاً بین ۳ تا ۵ دقیقه می‌باشد.

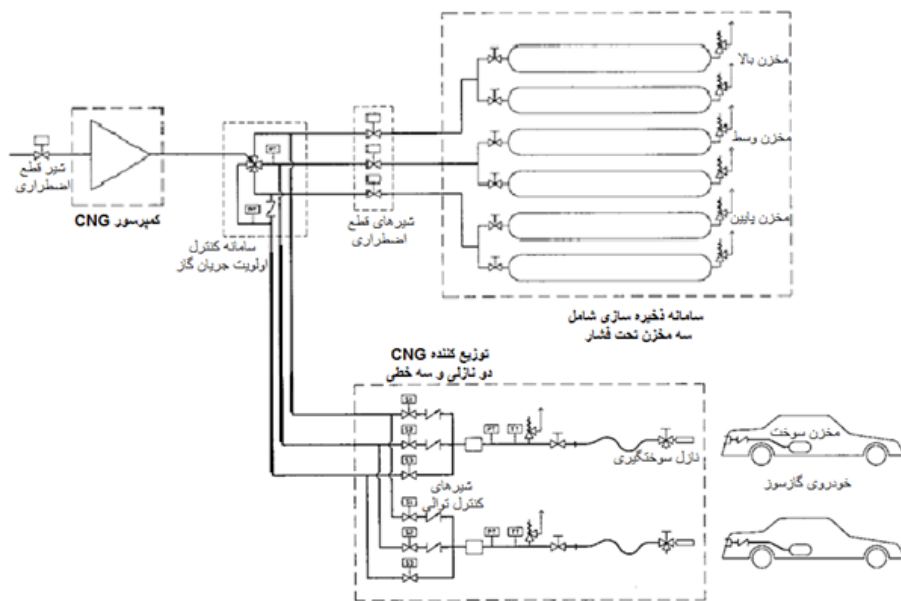
برای کشور در حال توسعه مانند ایران، با توجه به ذخایر عظیم و شبکه گسترده خط لوله گاز طبیعی، ایجاد سیاست‌گذاری انرژی و توسعه آن در بخش حمل‌ونقل می‌تواند به بهره‌وری انرژی کمک کند. ایران با داشتن بیش از ۲۴ تریلیون مترمکعب ذخایر گاز طبیعی، پس از کشور روسیه در جایگاه دوم قرار دارد [۲۵]؛ بنابراین روش شناسایی و توسعه استفاده از گاز طبیعی و عمومی‌سازی خودروهای گازسوز به‌ویژه برای کشورهایی که منابع غنی دارند، می‌تواند به دوام اقتصادی و پایداری انرژی کمک شایانی کند. پژوهش‌های متعدد پژوهشگران در سطح جهان نشان می‌دهد که سرعت روند رشد مصرف انرژی در کشورهای جهان تا حدود زیادی به سطح رشد اقتصادی بستگی دارد.

یک چالش منحصربه‌فرد در استفاده مداوم منابع مختلف انرژی در صنعت حمل‌ونقل نیاز به ذخیره انرژی در وسیله نقلیه است تا بتواند پیمایش بیشتری با صرف هزینه کمتر داشته باشد [۴۱]. با احداث ایستگاه‌های سوخت‌رسانی CNG این امر محقق می‌شود. ایران با مصرف متوسط ۲۳/۵ میلیون مترمکعب سوخت CNG در روز و دارا بودن ۲۵۵۶ ایستگاه CNG در میان پنج

1. Fast Filling Station



کشور نخست جهان از لحاظ این ایستگاه‌ها قرار دارد [۲۷]. جایگزین برای کاهش وابستگی به بنزین و گازوئیل به‌عنوان سوخت حمل‌ونقل وجود دارد. گاز طبیعی به‌عنوان سوخت پل^۱ برای انتقال به انرژی پاک عمل می‌کند [۴۲]. گاز طبیعی به‌عنوان سوختی تمیز و پاک، می‌تواند جایگزین مناسبی باشد و فراوانی گاز طبیعی در ایران در طیف وسیعی از صنایع از جمله صنعت حمل‌ونقل کاربرد پیدا کرده است.



شکل ۵: سیستم سوخت‌رسانی سریع سه خط [۴۰]

۶. چالش‌های صنعت CNG

در این بخش به چالش‌های موجود در صنعت CNG شامل مصرف برق، رطوبت گاز و ایمنی ایستگاه‌های سوخت‌رسانی اشاره می‌شود.

۶-۱. مصرف برق

بیشتر ایستگاه‌های موجود در ایران با واگذاری یک ساله به بخش خصوصی مدیریت می‌شوند و به دلیل قیمت پایین CNG، استهلاک جایگاه‌ها و هزینه بالای برق برای راه‌اندازی کمپرسور، جایگاه‌داران گاهاً با مشکلاتی مواجه می‌شوند که کاهش سرمایه‌گذاران را به دنبال دارد؛ بنابراین تلاش برای کاهش هزینه برق ایستگاه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. رشد ایستگاه‌های سوخت‌رسانی CNG در شهرها، هزینه برق فوق‌العاده زیادی را به همراه داشته است؛ به‌عنوان مثال یک ایستگاه سوخت CNG شهری در چین در سال ۲۰۱۴، حدود ۶۱۹۹۶۸ کیلووات ساعت مصرف می‌کرد [۴۳].

محققان تحقیقات مرتبطی را در مورد بهینه‌سازی عملکرد اولین نوع جایگاه‌های سوخت‌رسانی CNG و کاهش برق مصرفی کمپرسورها انجام داده‌اند. بررسی‌هایی در مورد رفتار ترمودینامیکی کمپرسور رفت و برگشتی در طول تغییر فشار مخزن در [۴۴] انجام شده است. چارلز کاگیری و همکاران [۴۵] یک استراتژی مدیریت انرژی بهینه برای کمپرسور و مخازن در ایستگاه CNG، که انرژی مصرفی کمپرسور را کاهش می‌دهد پیشنهاد کردند. یانگ و همکاران [۴۶] یک مدل برنامه‌ریزی بهینه را توسط یک الگوریتم ژنتیک چند جمعیتی بهبودیافته توسعه دادند و نتایج نشان داد که هزینه‌های عملیاتی برق به‌طور مؤثر ۳۴/۶۲ درصد کاهش یافته است.

پایین بودن قیمت برق به‌طور مؤثر هزینه عملیاتی ایستگاه CNG را کاهش می‌دهد و هزینه صرفه‌جویی شده می‌تواند برای کاهش قیمت گاز طبیعی استفاده شود. هزینه‌های کمتر



می‌تواند جذابیت CNG را به‌عنوان سوخت خودرو افزایش دهد [۴۶]. حتی در برخی موارد می‌توان از گاز طبیعی برای تولید برق بیشتر استفاده کرد؛ اما با توجه به وجود ناترازی گاز در کشور، این امر در شرایط کنونی قابل تحقق نیست. ناترازی گاز در ایران تنها ناشی از کمبود برداشت نیست؛ بلکه مجموعه‌ای از عوامل فنی، مدیریتی و اقتصادی در آن نقش دارند. ضعف در فناوری‌های پیشرفته استخراج و عدم حفظ فشار مخازن در میدان‌های گازی، منجر به کاهش تدریجی تولید شده است. سرمایه‌گذاری ناکافی در زیرساخت‌ها نیز شکاف میان تولید و مصرف را تشدید کرده و باعث کاهش میزان برداشت از میداین گازی شده است.

۲-۶. رطوبت گاز

رطوبت موجود در گاز طبیعی در سیستم‌های انتقال، ایستگاه‌ها و خودروها یکی از عوامل مؤثر در خوردگی، آسیب دیدن تجهیزات و کاهش عمر کاری آن‌ها می‌باشد؛ بنابراین با توجه به حساسیت‌های موجود در سیستم‌های ایستگاه سوخت‌رسانی CNG و همچنین وجود دستگاه‌هایی نظیر کمپرسورهایی با نسبت تراکم بالا که رطوبت هرچند ناچیز موجود در گاز را به نقطه شبنم و چگالش می‌رساند؛ استفاده از سیستم‌های خشک‌کن به امری ضروری تبدیل می‌شود. طی مطالعات انجام گرفته مشخص شده است که آب در گاز طبیعی به‌صورت رطوبت معمولی رفتار نمی‌کند، بلکه موجب تشکیل هیدرات یا یخ متان می‌شود؛ به‌طوری‌که حدود ۱۰ درصد آن را هیدروکربن و ۹۰ درصد آن را آب تشکیل می‌دهد. هیدرات‌ها به‌راحتی می‌توانند موجب انسداد جزئی یا کامل در سیستم سوخت‌رسانی گردند. همچنین تشکیل هیدرات‌ها در فشارهای بالاتر شدت می‌گیرد. یکی دیگر از مضرات وجود آب را می‌توان از این دیدگاه بررسی نمود که وجود بخار آب و گوگرد در گاز موجب تولید اسیدسولفوریک و خوردگی در اجزای تجهیزات سوخت‌رسانی می‌گردد؛ بنابراین برای جلوگیری از این پدیده نامطلوب (خوردگی) باید یکی از دو عامل رطوبت یا گوگرد را از بین برد. این امر ضرورت وجود خشک‌کن‌ها را در ایستگاه‌های سوخت‌رسانی CNG نشان می‌دهد که به‌منظور کاهش محتوای رطوبت موجود در گاز طبیعی و رساندن آن به سطح قابل‌قبول مورد استفاده قرار می‌گیرند. به همین دلیل وجود تجهیزاتی که بتواند رطوبت موجود در گاز را بگیرد تا از آسیب‌های احتمالی جلوگیری کند الزامی است [۲۵].

درخشان و اسفندیاری [۴۷] بیان کردند که دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۵ بار بهترین شرایط فرایندی جهت جلوگیری از تشکیل هیدرات است. همچنین انتقال گاز با خوراک با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۳۰ بار، بیشترین احتمال تشکیل هیدرات مسیر انتقال را داراست.

۳-۶. ایمنی ایستگاه‌ها و خودروهای CNG

مقرون‌به‌صرفه بودن گاز طبیعی فشرده و سهمیه‌بندی بنزین منجر به افزایش توجه به استفاده از CNG به‌عنوان سوخت جایگزین شده است [۴۸]. با این حال، خطر انفجار در جایگاه‌های CNG تهدیدی جدی برای مصرف‌کنندگان و پرسنل است [۴۹]. همچنین ساخت جایگاه‌های CNG در مناطق مسکونی (به‌ویژه در نزدیکی ساختمان‌ها) چالش‌های مختلفی را به همراه دارد که رعایت مقررات ایمنی را ایجاب می‌نماید [۵۰].

از این نظر، اگرچه پارامترهای ایمنی بسیار مهم هستند، اما به‌تنهایی نمی‌توانند ایمنی مطلق جایگاه‌های سوخت‌گیری را تضمین کنند. درواقع عوامل دیگر، از جمله موقعیت ایستگاه، آسیب‌پذیری و عناصر خارجی (مانند بلایای طبیعی و تحریم‌ها) بر بحران تأثیر می‌گذارند؛ بنابراین نادیده گرفتن این عوامل می‌تواند خطر ایمنی موجود در جایگاه‌های سوخت‌گیری CNG را افزایش دهد [۵۱].

ایمنی تجهیزات نیز بسیار مهم است و از دستورالعمل‌های ایمنی پیروی می‌کند. در اینجا، تضمین ایمنی تجهیزات گاز، مانند سیلندر گاز و تجهیزات ایستگاه، یک ضرورت انکارناپذیر است. هر دو مورد، پارامترهای ایمنی مربوط به متصدیان ایستگاه CNG هستند. با این حال، سایر شاخص‌های ایمنی خارجی (به‌عنوان مثال، ایمنی راننده و ایمنی وسایل نقلیه) به‌طور قابل‌توجهی بر ایمنی جایگاه‌های سوخت‌گیری تأثیر می‌گذارد و خارج از کنترل متصدیان جایگاه است. عدم ایمنی در کپسول‌های CNG خودروهای دوگانه‌سوز، خطر انفجار آن‌ها را افزایش می‌دهد [۵۱].

مطالعات پیشین نشان می‌دهد که الگوریتم‌های داده‌کاوی در دستیابی به اهداف پژوهش نقش مؤثری دارند [۵۲]. چائو و همکاران [۵۳] در سال ۲۰۲۲ ریسک ایستگاه‌های انتقال گاز را با استفاده از مدل شبکه چند سطحی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد مواردی چون

دریچه‌های هوای بسته، نقص سیستم کنترل، آسیب ابزار ناشی از گاز، آسیب دریچه و یکپارچگی ضعیف تجهیزات و ابزار، بیشترین تأثیر را بر نشت گاز دارند. اسریواستوا و همکاران [۵۴] از تکنیک‌های فازی برای کاهش خطر در ایستگاه‌های CNG استفاده کردند. آن‌ها یک مدل استنتاج فازی بر اساس قوانین فازی ایجاد کردند و این سیستم آشکار نمود که حالت‌های خرابی پنهان، درنهایت به تحلیل ریسک و قابلیت اطمینان سیستم کمک می‌کند.

مجنونی و شیخ زاده [۲۷] مدل‌سازی انفجار مخازن جایگاه CNG، به صورت تکی و دسته‌ای را انجام دادند؛ نتایج مدل‌سازی در هر دو حالت بسیار نگران کننده بود و پیامدهای جانی و اثرات تخریب بسیار فاجعه بار را پیش‌بینی کردند. طبق نتایج در هر دو حالت مدل‌سازی، مقدار تشعشع حرارتی به $37/5 \text{ kW/m}^2$ رسیده و تشعشعات تا نزدیک شعاع ۱۸ متری در انفجار مخزن تکی و تا شعاع ۵۵ متری در انفجار دسته‌ای مخازن گسترش یافته و منجر به آسیب رساندن به ساختمان‌های اطراف و افراد در این محدوده شده است.

سازمان ملی استاندارد سالانه ایمنی جایگاه‌های سوخت‌گیری CNG را برای اطمینان از رعایت ایمنی ارزیابی می‌کند. با وجود استانداردها، نتایج بازرسی نشان داد که بسیاری از ایستگاه‌هایی که در ابتدا معیارهای ایمنی را برآورده می‌کردند طی یک سال با مشکلات عدم انطباق مواجه شدند و مورد تأیید قرار نگرفتند.

از نکات مهم در به‌کارگیری خودروهای گازسوز، موضوع ایمنی مخازن تحت فشار CNG است. این مخازن معمولاً در فشار کاری حدود ۲۰۰ بار عمل می‌کنند و به دلیل ذخیره‌سازی گاز در حجم بالا، در صورت عدم رعایت استانداردهای طراحی و نگهداری، می‌توانند خطرآفرین باشند. با این حال، مخازن CNG مطابق با استانداردهای بین‌المللی طراحی و آزمایش می‌شوند و پیش از نصب روی خودرو، تحت آزمون‌هایی قرار می‌گیرند تا از مقاومت آن‌ها در برابر ضربه، حرارت و فشار اطمینان حاصل شود. با وجود ایمنی ذاتی بالا در طراحی مخازن، بروز عواملی چون نقص فنی، نصب غیراستاندارد یا بازرسی نشدن دوره‌ای، باعث ایجاد ریسک بالقوه خواهد شد. در این شرایط، نشت گاز یا پوسیدگی مخزن ممکن است منجر به حادثه شود. از این رو، اجرای برنامه‌های

بازرسی دوره‌ای مخازن و تعویض مخازن فرسوده پس از عمر مفید (معمولاً ۱۵ تا ۲۰ سال) الزامی است. در مجموع، در صورتی که استانداردهای نصب، بازرسی و نگهداری به‌درستی رعایت شوند، احتمال وقوع حادثه بسیار پایین می‌باشد اما در صورت عدم رعایت الزامات ایمنی، خطرات بالقوه آن باید جدی گرفته شود.

۷. ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی

همان‌طور که در بخش مقدمه ذکر شد، مطالعات قبلی در این زمینه نشان داده‌اند که در حالت کلی CNG نسبت به بنزین آلاینده‌گی کمتری داشته و سوخت مناسب‌تری برای محیط‌زیست می‌باشد. تلفیق سیاست‌های توسعه خودروهای شخصی با سوخت CNG و حمایت دولت از این سوخت برای بخش حمل‌ونقل عمومی و هم‌زمان رقابتی کردن قیمت CNG، مؤثرترین روش افزایش سهم خودروهای سواری از این سوخت می‌باشد. اجرای این سیاست در شهر تهران موجب کاهش انتشار CO_2 به میزان ۱۱/۴۲ درصد تا سال ۲۰۳۰ نسبت به سناریوی تداوم روند موجود خواهد شد [۱۱]. (جدول ۱) میزان انتشار آلاینده‌های مختلف برای سوخت بنزین و CNG را نشان می‌دهد [۵۵ و ۵۶].

در (جدول ۲) مقایسه‌ای بین این دو سوخت از لحاظ ایمنی، زیرساخت و قیمت صورت گرفته است و همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین قیمت بنزین (با در نظر گرفتن میزان پیمایش) حدود ۶ تا ۷ برابر CNG می‌باشد که با در نظر گرفتن قیمت فعلی بنزین و گاز محاسبه شده است و اختلاف قابل توجهی است. البته در حال حاضر به دلیل پایین بودن قیمت بنزین نسبت به سایر کشورها، استفاده از CNG در کشور مورد استقبال چندانی قرار نمی‌گیرد و رقابتی‌تر شدن قیمت می‌تواند توجهات را به سمت گاز طبیعی فشرده بازگرداند.

بر اساس داده‌های منتشرشده در منابع و وبسایت‌های صنعتی و تجاری مختلف، قیمت مخزن گاز طبیعی فشرده (CNG) با ظرفیت حدود ۱۰۰ لیتر در بازار جهانی بین ۷۵ تا ۲۵۰ دلار آمریکا متغیر است؛ به‌طور میانگین، قیمت این نوع مخزن حدود ۱۵۰ دلار آمریکا برآورد می‌شود. طبق گزارش منتشر شده از سازمان‌های معتبر در ماه مارس سال ۲۰۲۵، قیمت بنزین فوب خلیج فارس حدود ۰/۶ تا ۰/۷ دلار آمریکا (بین ۶۰ تا ۷۰ سنت) به‌ازای هر لیتر گزارش شده است [۵۷].



جدول ۱: مقایسه میزان آلودگی سوخت بنزین و CNG [۵۵ و ۵۶]

نوع آلاینده	سوخت بنزین (گرم بر کیلومتر)	سوخت CNG (گرم بر کیلومتر)	درصد کاهش نسبت به بنزین
کربن مونوکسید (CO)	۱/۲ - ۸/۵	۰/۰ - ۲/۵	۸۰ تا ۷۵
کربن دی‌اکسید (CO ₂)	۲۳۰ - ۲۰۰	۱۵۰-۱۷۰	۲۵ تا ۲۰
هیدروکربن‌های نسوخته (HC)	۰/۰ - ۲/۴	۰/۰ - ۱/۳	۵۰ تا ۲۵
اکسیدهای نیتروژن (NOX)	۰/۰ - ۱۵/۲۵	۰/۰ - ۱/۲	۳۰ تا ۲۰
ذرات معلق (PM)	۰/۰۲-۰/۰۳	کمتر از ۰/۰۰۵	۹۰ تا ۸۵

جدول ۲: مقایسه ایمنی، زیرساخت و قیمت بنزین و CNG

ایمنی و زیرساخت‌های مورد نیاز		
ایمنی / زیرساخت	سوخت بنزین	سوخت CNG
فشار کاری مخزن	بسیار کمتر و در حدود فشار اتمسفر	بسیار بالا و حدود ۲۰۰ بار (نیازمند نگهداری دقیق)
ایمنی احتراق در تصادفات	در صورت پخش بنزین روی زمین، خطر آتش‌سوزی وجود دارد	در صورت طراحی استاندارد و صحیح، خطر کمتری وجود دارد
زیرساخت توزیع و جایگاه‌ها	گسترده و در دسترس	محدودتر در مقایسه با بنزین
قیمت تمام شده سوخت برای مصرف‌کننده		
قیمت فعلی	سوخت بنزین	سوخت CNG
سه‌میه‌ای آزاد	۱۵,۰۰۰ ریال / لیتر	۵,۷۰۰ ریال / مترمکعب
هزینه تقریبی در هر صد کیلومتر پیمایش	۲۰۰,۰۰۰ تا ۲۵۰,۰۰۰ ریال (براساس قیمت آزاد)	۳۰,۰۰۰ تا ۴۰,۰۰۰ ریال

مثال یک میلیون دستگاه خودرو در طول یک سال به این مخازن مجهز شوند، هزینه کل آن برابر با ۱۵۰ میلیون دلار خواهد بود. همچنین اگر در حالت خوش‌بینانه، کسری تراز بنزین ۱۵ میلیون لیتر در روز و قیمت آن ۰/۶ دلار به‌ازای هر لیتر باشد، روزانه حداقل ۹ میلیون دلار صرف واردات بنزین می‌شود. با توجه به تعداد خودروهای موجود در کشور (حدود ۲۲ میلیون دستگاه) و فرض مصرف ۱۱۰ میلیون لیتر بنزین در روز، هر یک میلیون خودروی سواری به‌طور میانگین حدود ۵ میلیون لیتر در روز مصرف دارند؛ بنابراین، در صورت گازسوز کردن یک میلیون خودرو، روزانه حدود ۵ میلیون لیتر صرفه‌جویی در مصرف بنزین حاصل می‌شود که معادل ۳ میلیون دلار در روز است. به‌عبارتی، هزینه ۱۵۰ میلیون

با توجه به این داده‌ها و کسری تراز بنزین در کشور که حدود ۱۵ تا ۲۰ میلیون لیتر در روز تخمین زده می‌شود، جایگزینی سوخت بنزین با CNG از لحاظ اقتصادی می‌تواند مثر و واقع‌گردد. به‌عبارتی، پایین بودن قیمت انرژی در کشور موجب افزایش مصرف و در نتیجه وابستگی به واردات بنزین شده است؛ در حالی که می‌توان این مشکل را با گسترش استفاده از CNG تا حد زیادی برطرف نمود. راهکار منطقی در این زمینه آن است که هزینه واردات بنزین به سرمایه‌گذاری در زمینه تأمین مخازن CNG و تولید خودروهای گازسوز اختصاص یابد و با پرداخت یارانه به این تجهیزات، هزینه نهایی برای مصرف‌کنندگان کاهش یابد. بر این اساس، با فرض قیمت ۱۵۰ دلار برای هر مخزن صد لیتری، چنانچه برای



دلاری برای تجهیز یک میلیون خودرو به سوخت گاز، معادل هزینه ۵۰ روز واردات بنزین برای همان تعداد خودرو است؛ در حالی که این مخازن نه تنها برای ۵۰ روز، بلکه حداقل ۱۵ سال قابل استفاده هستند. لذا از نظر اقتصادی، این اقدام بسیار مقرون به صرفه بوده و می تواند در حل مشکل ناترازی بنزین نقش مهمی ایفا کند. البته در این مسیر چالش هایی وجود دارد که در بخش های دیگر مقاله به آن ها اشاره شده است، اما در مقایسه با هزینه های واردات و مصرف بنزین، حرکت به سمت گسترش استفاده از CNG با هزینه ای به مراتب کمتر امکان پذیر است. همچنین، با اجرای طرح هایی مانند پرداخت یارانه برای مخازن CNG و ارائه گارانتی های بلندمدت برای خودروهای گازسوز، می توان مصرف کنندگان را به استفاده از این سوخت پاک تر و اقتصادی تر ترغیب نمود.

۸. نتیجه گیری

مصرف انرژی و انتشار CO₂ در ایران طی سال های متمادی به طور پیوسته رشد داشته است. با توجه به شرایط اقلیمی کشور و منابع عظیم گاز طبیعی که قبلاً به خوبی شناخته شده اند، قابلیت زیادی برای تأمین انرژی بدون انتشار همان نسبت CO₂ در اتمسفر، وجود دارد. استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوخت پاک با قیمت مناسب در بخش حمل و نقل می تواند همواره برای مصرف کننده جذاب باشد. از جمله چالش هایی که در عرضه CNG وجود دارد می توان به مصرف بالای برق در جایگاه ها، وجود رطوبت در گاز طبیعی و بحث ایمنی در ایستگاه های سوخت رسانی و مخازن خودروها اشاره نمود. با مدیریت و طراحی صحیح و احداث ایستگاه های با تجهیزات به روز تر از نظر ایمنی که به تسریع در روند سوخت گیری نیز کمک می کند، می توان این چالش ها را به فرصت تبدیل نمود. بررسی ها نشان می دهد جایگزین نمودن سوخت هایی مانند بنزین و گازوئیل با CNG در کوتاه مدت می تواند علاوه بر کاهش مرگومیر با انتشار کربن کم، امنیت انرژی را نیز افزایش دهد. برای گسترش استفاده از گاز طبیعی در حمل و نقل باید تحقیقات در موتورهای CNG سوز با حجم موتور پایین تسریع شود. همچنین با توجه به هزینه بالای نگهداری ایستگاه های عرضه CNG، مدل بهینه انرژی برای کنترل مصرف برق کمپرسور ارائه گردد تا با صرفه جویی برق تمایل بخش خصوصی به سرمایه گذاری در این بخش افزایش یابد. کاهش مصرف و جایگزینی سوخت بنزین با گاز طبیعی فشرده از منظر اقتصادی نیز اقدامی مقرون به صرفه به شمار می آید زیرا افزایش سهم مصرف CNG در بخش حمل و نقل می تواند وابستگی کشور به واردات بنزین را کاهش

داده و در نتیجه، هزینه های ارزی و مالی مرتبط با تأمین این فرآورده را تا حد قابل توجهی کاهش دهد؛ بنابراین راهکارهای مشخصی شامل اصلاح سیاست های بارانه ای، بازسازی جایگاه ها و حمایت از مصرف کنندگان خودروهای دوگانه سوز با اختصاص بودجه به این خودروها، به عنوان راه حل های اجرایی می توانند مدنظر قرار گیرند.

مراجع:

- [1]. Wang, H., Ji, G., Xia, J. (2019). Analysis of regional differences in energy-related PM2.5 emissions in China: Influencing factors and mitigation countermeasures. *Sustainability* 11 (5), 1409. DOI: 10.3390/su11051409
- [2]. کاشفی ک، سیف س ش، یوسف زادگان م ص، قاسمی کفرودی ا، میاندهی م، تسبندی م. (۱۳۹۷). شناسایی منابع و برآورد میزان انتشار گازهای گلخانه ای از خطوط و تجهیزات انتقال گاز ایران. *مهندسی گاز ایران*، ۵ (۱)، ۶۳-۷۱. DOR: 20.1001.1.25885251.1397.5.1.6.9
- [3]. Vanek, F., Albright, L. and Angenent, L. (2016). *Energy Systems Engineering: Evaluation and Implementation*. Third Edition, New York: McGraw-Hill Education.
- [4]. Muñoz-Villamizar, A., Santos, J., Montoya-Torres, J.R., & Velázquez-Martínez, J.C. (2020). Measuring environmental performance of urban freight transport systems: A case study. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101844. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101844
- [5]. Raza, S.A., Shah, N., & Sharif, A. (2019). Time frequency relationship between energy consumption, economic growth and environmental degradation in the United States: Evidence from transportation sector. *Energy*, 1, 20-73. DOI: 10.1016/j.energy.2019.01.077
- [6]. Dioha, M.O. and Kumar A. (2020). Sustainable energy pathways for land transport in Nigeria. *Utilities Policy* 64:

- Mitigating Air Pollution? Fresh Evidence from National and Regional Analysis in China. *Sustainable Production and Consumption*. 27. 325-336. DOI: 10.1016/j.spc.2020.11.010
- [16]. Squizzato, S., Masiol, M., Rich, D.Q., Hopke, P.K. (2018). PM 2.5 and gaseous pollutants in New York State during 2005–2016: Spatial variability, temporal trends, and economic influences. *Atmos. Environ.* 183, 209–224. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.03.045
- [17]. Haeng, M.C. and Mahmud, M.I. (2009). Benefit analysis of CNG as an automobile fuel. *CLEAN Technol.*, 15(1), 1-8.
- [18]. Ou, X. and Zhang, X. (2013). Life-cycle analyses of energy consumption and GHG emissions of natural gas-based alternative vehicle fuels in China, *Energy*. DOI: 10.1155/2013/268263
- [19]. Hagos, D.A., Ahlgren, E.O. (2018). Well-to-wheel assessment of natural gas vehicles and their fuel supply infrastructures – Perspectives on gas in transport in Denmark. *Transp. Res. Part D Transp. Environ* 65:14–35. DOI: 10.1016/j.trd.2018.07.018
- [20]. Chai, J., Shi, H., Zhou, X. & Wang, S. (2018). The Price Elasticity of Natural Gas Demand in China: A Meta-Regression Analysis. *Energies*. 11. DOI: 10.3390/en11123255
- [21]. موسایی، هاتفی م، ع، حیدری اصل م م (۱۳۹۹). طراحی مدل جامع انتخاب بهترین سوخت در زنجیره ارزش گاز طبیعی (مطالعه موردی: کشور ایران)، پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، دوره ۱۰، شماره ۳۷. DOI: 10.22054/jice.2022.61414.1852.
- [22]. PWC, assessing the impact of gas flaring on the Nigeria economy. Pricewaterhouse Coopers Limited. (2019). <https://globalcarbonatlas.org/>
101034. DOI: 10.1016/j.jup.2020.101034
- [7]. <https://www.irna.ir/news/85736262>
- [8]. Tahami Pour, M., Abedi, S., Karimi Baba Ahmadi, R. and Ebrahimi Zadeh, M. (2016). The Investigation of Renewable Energy Effects on Iranian Per Capita Real Economic Growth. *Journal of Iranian Energy Economics*, Vol. 5, No. 19, pp. 53-77. (In Persian) DOI: 10.22054/jice.2017.7304
- [9]. IEA. (2019). Data & Statistics – IEA. In *Electricity Information*.
- [10]. Liu, W., Safdari Shadloo, M., Tlili, I., Maleki, A., Bach, QV. (2020). The effect of alcohol–gasoline fuel blends on the engines performances and emissions. *Fuel*. 266:117977. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117977
- [11]. Shamsapour, N., Hajinezhad, A. & Noorollahi, Y. (2020). Developing a system dynamics approach for CNG vehicles for low-carbon urban transport: a case study. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 16. DOI: 10.1093/ijlct/ctaa085. DOI: 10.1093/ijlct/ctaa085
- [12]. Alrazen, H.A., & Ahmad, K.A. (2018). HCNG fueled spark-ignition (SI) engine with its effects on performance and emissions. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 82, 324-342. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.035
- [13]. یساوول س، سلاطین پ. (۱۴۰۱). کشش تقاضای گاز در گروه کشورهای منتخب. *مهندسی گاز ایران*، ۹ (۲)، ۲۹-۴۶. DOI: 10.22054/jice.2022.61414.1852.
- [14]. Khan, M.I., Yasmin, T., & Shakoor, A. (2015). International experience with compressed natural gas (CNG) as environmental friendly fuel. *Energy Systems*, 6, 507-531. DOI: 10.1007/s12667-015-0152-x
- [15]. Li, H., Shahbaz, M., Jiang, H.D. & Dong, K. (2020). Is Natural Gas Consumption



pdf Tippee, B. (2012). Defining Energy Security. Oil and Gas Journal.

[34]. ستاری س، حوری جعفری ح، روشندل ر، ناصری ا، مشایخی م (۱۳۸۷). توجیه فنی اقتصادی CNG در ایران، شرکت هزاره سوم اندیشه، تهران.

[35]. NDRC. (2015). Notification on rationalizing non-residential-use natural gas prices. Beijing: National Development and Reform Commission.

[36]. NBS. (2015). China statistical yearbook 2000-2014. Beijing: National Bureau of Statistics.

[37]. Harutunian, M. (2006). Isolated Armenia leads the way in using cleaner car fuel. industryweek, Dec. 05, 2006.

[38]. Zhang, K. (2012). Target versus price: improving energy efficiency of industrial enterprises in China. [Doctoral dissertation]. The Pennsylvania State University. etda. libraries.psu.edu/paper/13729/

[39]. عادل برخوردار ز س، وهرامی و. (۱۴۰۳). ارزیابی تأثیر جایگزینی سوخت در بخش حمل‌ونقل بر انتشار گازهای گلخانه‌ای. نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، ۱۱ (۱)، ۹۰-۹۹. DOI: 10.22034/jrenew.2024.186881.

[40]. Paul, C. Hanlon (2001). COMPRESSOR HANDBOOK.

[41]. مجنونى ا، شیخ زاده ق ع، شکیبائی م. (۱۴۰۳). تجزیه و تحلیل انفجار مخزن ذخیره گاز مایع (LPG) در یک خودروی جاده‌ای بر اثر پدیده بخار مایع در حال جوش (BLEVE). مهندسی مکانیک مدرس. ۲۴ (۷): ۴۲۱-۴۳۱. DOR: 10.22054/jee.2022.61414.1852.

[42]. Paltsev, S., Jacoby, H., Reilly, J.M., Ejaz, Q.J., O'Sullivan, F., Morris, J., Rausch, S., Winchester, N., & Kragha, O.C. (2011). The future of U.S. natural gas production, use, and trade. Energy Policy, 39, 5309-5321. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.05.033

emissions/carbon-emissions/

[23]. Holmberg, K. & Erdemir, A. (2019). The impact of tribology on energy use and CO₂ emission globally and in combustion engine and electric cars. Tribology International, 135, 389-396. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.03.024

[24]. اصفهانیان و بهرامی بالاجاده ح، کردی م (۱۳۸۵). ایستگاه سوخت‌رسانی CNG، شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت، تهران.

[25]. Hao, H., Liu, Z., Zhao, F., & Li, W. (2016). Natural gas as vehicle fuel in China: A review. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 62, 521-533. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.015

[26]. مجنونى ا، شیخ زاده ق ع (۱۴۰۳). مدل‌سازی و مطالعه انفجار مخازن ذخیره گاز در ایستگاه‌های سوخت گاز طبیعی فشرده (CNG)، نشریه مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، دوره ۱۴، شماره ۲، ۴۵-۶۳.

[27]. DOI: 10.22044/jsfm.2024.13730.3802

[28]. <https://farsnews.ir/news/14020715000328>

[29]. Neeraas, O.b., Hennine, E. and Stenersen, D. (2002). NGV Master Plan for Iran, Conceptual of Filling Station and Vehicle System, Marintek Report.

[30]. Akbar, S. and Kojima, M. (2000). International experience with CNG vehicles. World Bank Tech. Pap. No. 516, vol. Paper No., pp. 3-6.

[31]. Geng, P., Yao, C., Wei, L., Liu, J., Wang, Q., Pan, W., & Wang, J. (2014). Reduction of PM emissions from a heavy-duty diesel engine with diesel/methanol dual fuel. Fuel, 123, 1-11. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.01.056

[32]. Health Effects Institute (2019). State of Global air 2019.

[33]. https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga_2019_fact_sheet.



- M. (2021). Safety systems for the oil and gas industrial facilities: Design, maintenance policy choice, and crew scheduling. *Reliability Engineering & System Safety*. DOI: 10.1016/j.res.2021.107545
- [51]. Khan, M., Yasmin, T. & Shakoor, A. (2015). Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. DOI: 10.1016/j.rser.2015.06.053
- [52]. Liu, Y., Alzahrani, I., Adnan Jaleel, R. & Sulaie, S. (2023). An efficient smart data mining framework based cloud internet of things for developing artificial intelligence of marketing information analysis. *Information Processing & Management*. DOI: 10.1016/j.ipm.2022.103121
- [53]. Gao, P., Li, W., Sun, Y., & Liu, S. (2022). Risk assessment for gas transmission station based on cloud model based multilevel bayesian network from the perspective of multi-flow intersecting theory. *Process Safety and Environmental Protection*, 159, 887-898. DOI: 10.1016/j.psep.2022.01.036
- [54]. Srivastava, P., Agarwal, M., Narayanan, A., Tandon, M. & Tulsian, M. (2019). Mitigation of Risk in CNG Station Using Fuzzy-Integrated Technique. DOI: 10.1007/978-981-13-6577-5_50
- [55]. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2022). Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle. Washington, D.C. Retrieved.
- [56]. International Energy Agency (IEA). (2023). The Role of Natural Gas in Transport— Comparative Emissions Analysis. Paris: IEA Publications.
- [57]. <https://petrorate.com/price-per-liter-of-gasoline-fob-persian-gulf/>
- [43]. Xiaoye Han, P.D., Zhang, X., Zheng, M., & Tjong, J. (2022). Energy efficiency improvements and CO₂ emission reduction by CNG use in medium- and heavy-duty spark-ignition engines. *Energy*, 263, 125769. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125769
- [44]. Mäkká, K., Kampová, K., Lovecek, T., Petřlová, K. (2021). An Environmental Risk Assessment of Filling Stations Using the Principles of Security Management. A Case Study in the Slovak Republic. *Sustainability*. DOI: 10.3390/su132212452
- [45]. Kagiri, C., Zhang, L. & Xia, X. (2019). A Hierarchical Optimisation of a Compressed Natural Gas Station for Energy and Fuelling Efficiency under a Demand Response Program. *Energies*. DOI: 10.3390/en12112165
- [46]. Liang, Y.L., Guo, C.X., Li, K.J. & Li, MY. (2021). Economic scheduling of compressed natural gas main station considering critical peak pricing. *Applied Energy*. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116937
- [47]. درخشان م، اسفندیاری ن. (۱۳۹۸). مدل سازی شرایط تشکیل هیدرات گازی در خط انتقال دریایی سروش- ابوذر. *مهندسی گاز ایران*، ۶(۱)، ۳۵-۴۰. DOR: 20.1001.1.25885251.1398.6.1.4.4
- [48]. Sadeghi Yarandi, M. & Karimi, A. (2018). Evaluation of Consequence Modeling of Fire and Explosion on Methane Storage Tanks in a CNG refueling Station. *Injury Control and Safety Promotion*. 6. 236-247.
- [49]. Altuwair, I. & Khan, F. (2020). Safety analysis of instantaneous release of compressed natural gas from a cylinder. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104284
- [50]. Redutskiy, Y., Camitz-Leidland, C., Vysochyna, A., Anderson, K. & Balycheva,



Barriers and Challenges to the Adoption of Compressed Natural Gas (CNG) in the Transportation Sector

Mehran Shakibaei¹, Omid Majnoui², Ghanbar Ali Sheikhzadeh Nooshabadi^{3*}

1. Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering-Heat and Fluid, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
2. Ph.D. Student, Department of Energy Systems Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Professor, Department of Mechanical Engineering-Heat and Fluid, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW PAPER

Article History:

Received: 14 October 2025

Revised: 03 November 2025

Accepted: 11 November 2025

Keywords:

Compressed Natural Gas (CNG)

Pollution

Fuel station

Transportation industry

Natural Gas Vehicle (NGV)

ABSTRACT

The expansion of the transportation sector has consistently faced significant challenges due to rising energy demand and increasing carbon dioxide emissions. Natural gas, with its higher methane content, offers superior combustion quality. This study investigates compressed natural gas (CNG) as a clean and viable fuel for reducing air pollution in the medium term and examines the challenges and barriers associated with its adoption as a substitute for gasoline. Considering Iran's abundant natural gas resources, CNG can play a critical role as an alternative vehicular fuel, contributing to the optimization of gasoline production and enhancing energy security. Nonetheless, due to the low and subsidized price of gasoline, managing and reforming consumption patterns remains challenging, placing Iran among the top six CO₂-emitting countries globally and following an upward emission trend. Key factors limiting CNG adoption in recent years include the deterioration and occasional safety concerns of refueling stations, the relatively small price differential between CNG and gasoline relative to travel distance, high electricity consumption, and moisture content in the gas affecting system performance. Economically, substituting gasoline with increased CNG usage is cost-effective and can help reduce expenses related to gasoline imports.

DOR: [20.1001.1.2510.1110.1404.08.20](https://doi.org/10.1001.1.2510.1110.1404.08.20)

How to cite this article

M. Shakibaei, O. Majnoui, G.A. Sheikhzadeh Nooshabadi, Barriers and Challenges to the Adoption of Compressed Natural Gas (CNG) in the Transportation Sector. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2026; 12(4): 21-35. (https://ijge.irangi.org/article_735801.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: sheikhz@kashanu.ac.ir, (M. Sheikhzadeh Nooshabadi).

Available online 11 March 2026

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 روش‌های ذخیره گاز هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی

نگار شاهدعلی^۱، فائزه برزگری^۱، مهدی رضوی فر^{۲*}

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 الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: m.razavifar@tabrizu.ac.ir

مقاله‌ی مروری

صفحه ۳۶ - ۵۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲

چکیده

هیدروژن به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی در کربن‌زدایی سیستم انرژی جهانی، نقش حیاتی در جایگزینی سوخت‌های فسیلی در بخش‌های مختلف از جمله صنعت، تولید برق، حمل‌ونقل و گرمایش ایفا می‌کند. برای تحقق این هدف، علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید هیدروژن، توسعه زیرساخت‌های کارآمد برای ذخیره‌سازی، حمل‌ونقل و توزیع آن ضروری است. ذخیره‌سازی هیدروژن به دو روش اصلی انجام می‌شود؛ ذخیره‌سازی فیزیکی که شامل نگه‌داری هیدروژن در حالت گازی فشرده، مایع یا فوق‌بحرانی است و نیز ذخیره‌سازی مبتنی بر مواد مانند استفاده از حامل‌های آلی هیدروژن مایع، هیدریدهای فلزی یا سوخت‌های توان‌زا می‌باشد. همچنین، ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن به‌عنوان یک راه‌حل امیدوارکننده مطرح است، هرچند که تجربه عملی در این زمینه هنوز محدود است. با وجود پتانسیل بالای هیدروژن در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، چالش‌های علمی و عملیاتی متعددی از جمله ایمنی ذخیره‌سازی، بهینه‌سازی زیرساخت و مدیریت هزینه‌ها وجود دارد. در این مطالعه به بررسی جامع ذخیره‌سازی زیرزمین هیدروژن پرداخته و رویکردهای پیشروی این فناوری ارائه شده است. نتایج ارائه شده در این مقاله، بسترسازی مناسبی به‌منظور استفاده از این روش در ایران باهدف تولید انرژی پایدار است.

کلید واژه‌ها: هیدروژن، حامل انرژی، ذخیره‌سازی زیرزمینی، مخازن نفت و گاز، تولید پایدار انرژی

۱. مقدمه

تولید هیدروژن با استفاده از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر می‌تواند در کاهش دادن معایب این سیستم‌ها کمک کند، به‌عنوان مثال هیدروژن تولید شده از طریق الکترولیز آب که با نام هیدروژن سبز شناخته می‌شود، بهترین گزینه برای این منظور در نظر گرفته می‌شود اما از نظر اقتصادی به‌صرفه نیست [۴].

هیدروژن در میان تمام مواد شناخته شده دارای بیش‌ترین

نقش همه‌جانبه هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی کم‌کربن در ارائه یک راه‌حل انرژی پاک برای کربن‌زدایی از صنایع با مصرف سوخت بالا، تأمین انرژی و کاهش چشم‌گیر انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد توجه قرار گرفته است [۱-۳]. هیدروژن از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند پنل‌های خورشیدی، بادی و تولید برق آبی پشتیبانی می‌کند. با این حال عرضه انرژی تجدیدپذیر تحت تأثیر نوسانات روزانه تا فصلی قرار دارد.



دانسیتته انرژی گرانشی (۱۲۰ کیلوژول بر گرم) و کمترین وزن اتمی (۱/۰۰۷۸۴ amu) و دانسیته انرژی حجمی پایینی است. (جدول ۱) ویژگی‌های فیزیکی هیدروژن را مورد بررسی قرار داده است [۵].

جدول ۱: ویژگی‌های فیزیکی هیدروژن [۵]

تشریح	هیدروژن
وزن مولکولی (amu)	۱/۰۹۷۴
جرم مولکولی (g mol ⁻¹)	۲/۰۱۵۹
نقطه سه‌گانه	
دما (K)	۱۳/۸
فشار (KPa)	۷/۰۴۱
نقطه بحرانی	
دما (K)	۳۲/۹۳۸
فشار (MPa)	۱/۲۸۵۸
دانسیته در دما و فشار نرمال (Kg m ⁻³)	۰/۰۸۹۹۰
گرانروی در دما و فشار نرمال (μPoise)	۸۹/۴۸
حلالیت در آب در دما و فشار نرمال (g gas per Kg water)	۰/۰۰۱۶
ضریب نفوذپذیری در دما و فشار نرمال (m ² s ⁻¹)	۰/۰۰۰۰۱۶
سرعت انتشار در دما و فشار نرمال (ms ⁻¹)	۰/۰۲>
سرعت شناوری (ms ⁻¹)	۱/۲-۹
ثابت گرمای ویژه گاز در دما و فشار نرمال (KJ/Kg K)	۱۴/۸۵
هدایت حرارتی گاز در دما و فشار نرمال (W/m K)	۰/۱۸۷
محدودیت اشتعال پذیری در هوا (/)	۴-۷۵
محدودیت انفجار در هوا (/)	۱۵-۵۹
دمای احتراق خودکار در هوا (/)	۷۹۳-۱۰۲۳(۸۵۸)
دما و فشار نرمال: (K) ۲۹۳ و (Pa) ۱۰۱۳۲۵	

مایع کردن هیدروژن هزینه‌های بالایی دارد و برای ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس‌های مورد نیاز مقرون‌به‌صرفه نمی‌باشد [۶]. گاز هیدروژن دارای ویژگی‌هایی مانند اندازه کوچک، وزن مولکولی کم، گرانروی کم، دانسیته پایین، شناوری مثبت و نفوذپذیری بالا و همچنین حلالیت کم در آب می‌باشد، هرچند تحقیقات نشان داده است که این حلالیت با افزایش فشار بیش‌تر می‌شود [۷].

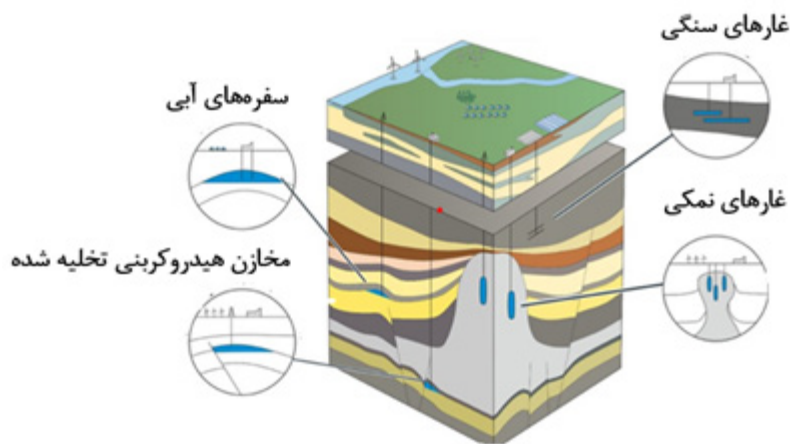
فناوری‌های موجود برای ذخیره‌سازی و انتقال هیدروژن به‌صورت مستقیم از فناوری‌های مرتبط و تکامل یافته در صنایع شیمیایی و گازی توسعه یافته‌اند. این موضوع به‌ویژه در مورد ذخیره‌سازی فیزیکی و انتقال هیدروژن از طریق جاده، خط لوله یا کشتی صادق است. هرچند نفوذپذیری بالای هیدروژن، مواد قابل استفاده برای خطوط لوله هیدروژن را محدود کرده و نیازمند انجام اقدامات اضافی برای بازسازی و تغییر کاربری شبکه‌های موجود خطوط لوله است. یک ویژگی منحصر به فرد هیدروژن در مقایسه با سوخت‌های فسیلی و مشتقات آن، این است که می‌توان آن را از طریق ترکیب کردن شیمیایی یا فیزیکی با مواد مایع یا جامد مناسب ذخیره کرد. با وجود سطح پایین آمادگی فناوری در این زمینه، فناوری‌های ذخیره‌سازی هیدروژن مبتنی بر مواد، کاربرد هیدروژن را به‌عنوان یک واسطه ذخیره‌سازی انرژی بهبود بخشیده و راه‌های جایگزینی برای انتقال هیدروژن ارائه می‌دهند [۸].

هوش مصنوعی (به‌ویژه تکنیک‌هایی مانند ANN و KNN) می‌تواند روند پیدا کردن مواد جدید را سریع‌تر کند، هزینه‌های تحقیق و توسعه را پایین بیاورد و عملکرد سیستم‌ها را بهتر کند. به‌همین دلیل، استفاده از آن در توسعه روش‌های کارآمد و مقرون‌به‌صرفه برای ذخیره‌سازی هیدروژن بسیار مهم است و نشان می‌دهد که فناوری دیجیتال و انرژی پاک چطور می‌توانند کنار هم آینده‌ای پایدار بسازند.

گزینه‌های مختلف زمین‌شناسی برای ذخیره‌سازی هیدروژن پیشنهاد شده‌اند، مانند غارهای نمکی، سفره‌های آب‌شور، یا مخازن هیدروکربنی تخلیه شده که در (شکل ۱) آورده شده است. خواص فیزیکی و شیمیایی هر کدام از این ذخیره‌سازی‌ها متفاوت است و همچنین پارامترهایی مانند نیاز به گاز بالشتی، هزینه نگهداری، آماده‌سازی سایت، نظارت، نرخ تولید و ریسک نشتی که باید برای توسعه تجاری در نظر گرفته شود نیز متفاوت خواهد بود [۹-۱۲].

1. Artificial Neural Network - ANN
2. K-Nearest Neighbors - KNN





شکل ۱: گزینه‌های مختلف زمین‌شناسی برای ذخیره‌سازی هیدروژن [۹]

۲. روش‌های تولید هیدروژن

کربن^۲ یا بدون آن انجام شود. همچنین هیدروژن از طریق الکترولیز آب نیز تولید می‌شود [۱۳].

تعدادی از فناوری‌های جدید تولید هیدروژن با استفاده از کربن که به مقدار کم در حال توسعه هستند، در (جدول ۲) شرح داده شده‌اند. این جدول دسته‌بندی روش‌های تولید هیدروژن از منابعی مانند گاز طبیعی، بیوگاز و الکترولیز آب را ارائه کرده و فرایندهای شیمیایی و میکروبی مربوطه را مشخص می‌کند.

هیدروژن را می‌توان از طریق روش‌های مختلفی تولید کرد که هر کدام بازدهی، هزینه‌ها و شدت کربن متفاوتی دارند. متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده تولید هیدروژن از سوخت‌های فسیلی از طریق رفرمینگ بخار متان^۱، رفرمینگ خودگرمایی^۲، اکسیداسیون جزئی^۳، گازی‌سازی زغال سنگ یا پیرولیز است که ممکن است با استفاده از جذب و ذخیره‌سازی

جدول ۲: فناوری‌های جدید تولید هیدروژن با استفاده از کربن

استفاده از میکروپها	میکروپهایی که از انرژی نور برای تولید هیدروژن از آب به‌عنوان بخشی از فرآیندهای متابولیک خود استفاده می‌کنند [۱۴].
تخمیر زیست‌توده	تولید هیدروژن از طریق تخمیر زیست‌توده [۱۵].
پیرولیز یا گازی‌سازی زیست‌توده	تبدیل زیست‌توده به هیدروژن از طریق پیرولیز یا گازی‌سازی [۱۶].
شکافت فوتوالکتروشیمیایی آب	تولید هیدروژن با استفاده از فرآیندهای فوتوالکتروشیمیایی [۱۷].
شکافت حرارتی خورشیدی آب	تولید هیدروژن با استفاده از انرژی حرارتی خورشیدی [۱۸].
الکترولیز با انرژی هسته‌ای	تولید هیدروژن از طریق الکترولیز آب با استفاده از انرژی هسته‌ای.
پیرولیز متان	تولید هیدروژن و کربن جامد از طریق پیرولیز متان.

که این انتشارات جذب شوند. از طرف دیگر، هیدروژن تولید شده از منابع خورشیدی و بادی معمولاً با محیط‌زیست سازگارند [۱۹]. علاوه بر این، در صورتی که انتشارات جذب شوند، استفاده از زیست‌توده برای تولید هیدروژن می‌تواند به انتشارات منفی منجر شود.

یک نکته مهم در فرآیندهای تولید هیدروژن، در نظر گرفتن انتشار گازهای گلخانه‌ای در چرخه عمر مرتبط با خود فرآیند تولید و همچنین فرآیندهای مرتبط دیگر (مانند استخراج سوخت) است. تولید هیدروژن از سوخت‌های فسیلی منجر به انتشار نسبتاً بالای کربن می‌شود، حتی زمانی

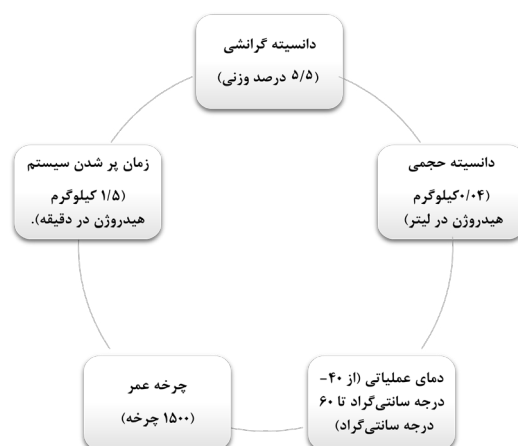
1. Steam Methane Reforming
2. Autothermal Reforming
3. Partial Oxidation (POX)
4. Carbon Capture and Storage

امروزه بیش‌تر هیدروژن تولید شده (۹۶ درصد) از طریق رفرمینگ بخار متان بدون جذب و ذخیره‌سازی کربن است [۲۰]. تنها ۴ درصد از هیدروژن تولید شده، هیدروژن سبز است که با فرض قیمت‌های گاز طبیعی در سال ۲۰۲۰، در این دو روش به ترتیب از ارزان‌تر به گران‌تر است [۲۱].

روند هزینه‌ای نشان می‌دهند که هزینه تولید هیدروژن سبز در دهه آینده ارزان‌تر از هیدروژن تولید شده از گاز طبیعی خواهد شد، زیرا هزینه‌های انرژی‌های باد، خورشید، آب و سایر منابع انرژی غیرفسیلی و همچنین الکترولیزرها با افزایش استقرار کاهش می‌یابد. پیش‌بینی می‌شود که هزینه‌های هیدروژن سبز در برخی مناطق تا سال ۲۰۳۰ حتی کم‌تر از هزینه‌های هیدروژن آبی شود [۲۲].

۳. ذخیره‌سازی هیدروژن

فناوری‌های ذخیره‌سازی هیدروژن نقش اساسی در ایجاد زیرساخت هیدروژن ایفا می‌کنند. فرمی که هیدروژن در آن ذخیره می‌شود نه تنها روش حمل و نقل آن را تعیین می‌کند، بلکه روش‌های استفاده از هیدروژن را نیز مشخص می‌کند. پیشرفت در فناوری‌های ذخیره‌سازی هیدروژن می‌تواند زمینه‌های کاربرد هیدروژن را گسترش داده و تقویت کند. از دیدگاه فنی، معمولاً پنج عامل اصلی برای توصیف سیستم‌های ذخیره‌سازی هیدروژن در نظر گرفته می‌شود که در (شکل ۲) ارائه شده است. این عوامل به بررسی ویژگی‌ها و عملکرد سیستم کمک می‌کنند و معیارهایی برای مقایسه روش‌های مختلف ذخیره‌سازی فراهم می‌آورند [۲۳].



شکل ۲: پنج عامل اصلی برای توصیف سیستم ذخیره‌سازی هیدروژن [۲۳]

به‌طور کلی، سیستم‌های ذخیره‌سازی هیدروژن را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: ذخیره‌سازی مبتنی بر روش‌های فیزیکی و ذخیره‌سازی مبتنی بر مواد که جزئیات این دسته‌بندی در (شکل ۳) ارائه شده است. در مورد دسته اول، هیدروژن با تغییر حالت فیزیکی آن ذخیره می‌شود، یعنی با افزایش فشار (ذخیره‌سازی هیدروژن گازی فشرده) یا کاهش دما به زیر نقطه تبخیر آن (ذخیره‌سازی هیدروژن مایع) یا استفاده از هر دو روش (ذخیره‌سازی هیدروژن فشرده و سرد) [۲۴].

در مورد ذخیره‌سازی مبتنی بر مواد، از مواد اضافی تحت عنوان «حامل» استفاده می‌شود. این مواد می‌توانند به‌صورت فیزیکی یا شیمیایی با مولکول‌ها یا اتم‌های هیدروژن پیوند برقرار کنند. با این حال، بیش‌تر فناوری‌های ذخیره‌سازی مبتنی بر مواد هنوز در مراحل آزمایشگاهی و نمایشی قرار دارند.



شکل ۳: مروری از تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی هیدروژن [۲۴]

۳-۱. ذخیره‌سازی هیدروژن گازی فشرده

۳-۱-۱. مخازن تحت فشار

ساده‌ترین و کامل‌ترین روش برای ذخیره‌سازی هیدروژن گازی، فشرده‌سازی و پر کردن آن در مخازن تحت فشار است. در (جدول ۳) مقایسه‌ای بین چهار نوع مخزن موجود در زمینه ذخیره‌سازی هیدروژن صورت گرفته است. انتخاب نوع مخزن بر اساس حوزه کاربردی و تعادل بین عملکرد فنی و هزینه انجام می‌شود.

1. Compressed Gaseous Hydrogen Storage
2. Liquid Hydrogen
3. Cryo-Compressed Hydrogen

جدول ۳: دسته‌بندی و مقایسه انواع مختلف مخازن تحت فشار

نوع	مواد / توضیحات	فشار معمولی (MPa)	قیمت (kgH2/\$)	دانسیتته گرانشی معمولی (%wt)	کاربردهای اصلی
اول	مخزن تحت فشار کاملاً فلزی (مثلاً فولاد و آلومینیوم)	۱۵-۳۰ [۲۵]	۲۴۰ [۲۶]	۱/۷ [۲۷]	ذخیره‌سازی هیدروژن به‌عنوان گاز صنعتی [۲۵]
دوم	مخزن تحت‌فشار فلزی پیچیده شده با کامپوزیت الیاف شیشه‌ای	۱۰-۹۵ [۲۵] حداکثر تحمل فشار (امکان دستیابی به بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال)	۳۶۰ [۲۶]	۲/۱ [۲۷]	کاربردهای ثابت مانند ذخیره‌سازی هیدروژن تحت‌فشار بالا در ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن (HRS) [۲۸]
سوم	پوشش کامپوزیت کامل با لایه فلزی داخلی	۳۰-۷۰	۷۰۰ [۲۷]	۴/۲ [۲۷]	تریلی حامل لوله‌های هیدروژن [۲۹] تریلی هیدروژن [۲۵] ذخیره‌سازی هیدروژن بر روی کشتی
چهارم	کاملاً کامپوزیتی (مثلاً پلی‌اتیلن با دانسیته بالا به‌عنوان لایه داخلی همراه با الیاف شیشه یا کربن)	۳۰-۷۰	۵۰۰-۱۲۰۰ [۳۰]	۵/۷ [۲۷]	ذخیره‌سازی هیدروژن تحت‌فشار پایین در ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن (HRS) [۲۸] تریلی حامل لوله‌های هیدروژن [۲۹] تریلی هیدروژن ذخیره‌سازی هیدروژن بر روی کشتی

نوع چهارم وجود دارد. اگرچه می‌توان همان مقدار هیدروژن را در مخازن نوع یک با هزینه‌های سرمایه‌گذاری مشابه ذخیره کرد، اما این مخازن به فضای بیش‌تری نیاز دارند [۲۸].

فرآیندهای تولید سیلندر فلزی بدون درز و لایه داخلی برای مخازن تحت‌فشار نوع اول، دوم و سوم بسیار مشابه هستند: قطعات فلزی اولیه یا صفحات به‌صورت عمیق کشیده شده و به شکل پوسته درمی‌آیند، سپس با استفاده از فرآیندهای پرس یا چرخش گرم، گردن سیلندر تشکیل می‌شود. لایه‌های داخلی مخازن نوع چهارم معمولاً از پلی‌اتیلن با دانسیته بالا^۲ یا پلی‌آمید^۴ ساخته می‌شوند و از روش‌هایی مانند قالب‌گیری چرخشی، قالب‌گیری بادی یا جوش دادن بخش‌های گنبدی تزریقی به لوله‌های اکستروژن شده پلیمری استفاده می‌شود. برای تقویت لایه‌های داخلی مخازن، الیاف (مانند شیشه، آرامید، کربن و غیره) می‌توانند به‌صورت دورپیچ، قطبی‌پیچ یا مارپیچی روی آن‌ها پیچیده شوند.

۳-۱-۲. ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن

علاوه بر مخازن تحت‌فشار، یکی دیگر از روش‌های امیدوارکننده برای ذخیره‌سازی هیدروژن گازی فشرده، استفاده از غارهای نمکی موجود و مناسب، سفره‌های آب زیرزمینی و مخازن گاز تخلیه‌شده است. ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن^۵

مخازن تحت فشار نوع اول، برای ذخیره‌سازی هیدروژن در پایان قرن نوزدهم ظاهر شدند. به دلیل دانسیته گرانشی پایین، تنها می‌توان از آن‌ها برای کاربردهای ثابت، به‌ویژه ذخیره‌سازی هیدروژن به‌عنوان گاز صنعتی در محل استفاده کرد [۲۵]؛ بنابراین، برای ذخیره‌سازی هیدروژن در فشار بالاتر، می‌توان به‌راحتی مخزن فلزی را با پیچیدن الیاف آغشته به رزین در قسمت استوانه‌ای میانی تقویت کرد. بسته به ضخامت الیاف پیچیده شده، مخازن تحت فشار تولید شده به این روش که به‌عنوان مخازن نوع دوم شناخته می‌شوند، بیش‌ترین تحمل در برابر فشار را دارند [۳۱]. مخازن تحت فشار نوع دوم معمولاً برای ذخیره‌سازی گاز در فشار بالا استفاده می‌شوند، مانند ذخیره‌سازی آبشاری هیدروژن^۱ در ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن^۲ با فشار ۸۷/۵ مگاپاسکال. وقتی لایه‌های داخلی فلزی یا پلیمری به‌طور کامل با الیاف پیچیده می‌شوند، مخازن تحت فشار (به ترتیب به نام‌های نوع سوم و چهارم) به‌طور قابل‌توجهی سبک‌تر می‌باشند و بنابراین می‌توانند نیازهای دانسیته گرانشی هیدروژن ذخیره‌شده برای کاربردهای خودروپی را برآورده کنند. به همین دلیل، مخازن تحت‌فشار نوع سوم و چهارم ترجیحاً در ماشین‌های یدک‌کش لوله‌ای و مخازن یکپارچه برای حمل هیدروژن استفاده می‌شوند. در مورد ذخیره‌سازی هیدروژن ثابت با فشار پایین در ایستگاه‌های سوخت‌گیری، علاقه فزاینده‌ای به استفاده از مخازن

1. Cascade Hydrogen Storage
2. Hydrogen Refueling Station
3. High-Density Polyethylene
4. Polyamide
5. Polyamide



به‌ویژه برای ذخیره‌سازی میان‌مدت و بلندمدت حجم زیادی از هیدروژن مازاد ناشی از واردات یا تولید انرژی‌های تجدیدپذیر فصلی توسعه‌یافته است. غارهای نمکی به‌طور کلی بهترین گزینه برای ذخیره‌سازی هیدروژن خالص هستند. این موضوع نه‌تنها به دلیل نفوذناپذیری ذخایر نمک، خواص مکانیکی مطلوب نمک و مقاومت آن در برابر واکنش‌های شیمیایی بلکه به دلیل وجود سنگ‌های تبخیری ویسکوالاستیک است که به‌عنوان یک سپر بسیار خوب برای گازها عمل می‌کنند [۱۱، ۳۲]. علاوه بر این، شرایط شوری موجود در این غارها، مصرف میکروبی هیدروژن ذخیره‌شده را سرکوب می‌کند [۱۱]. متأسفانه، حجم غارهای نمکی نسبتاً کم است و به‌طور گسترده توزیع نشده‌اند. مخازن گاز تخلیه‌شده حجم بیشتری دارند و مزایای قابل‌توجهی از این نظر نشان می‌دهند که ساختار و ویژگی‌های زمین‌شناسی آن‌ها در طول اکتشاف و بهره‌برداری

به‌خوبی شناسایی شده‌اند [۳۲]. با این حال، خلوص هیدروژن ذخیره‌شده ممکن است به دلیل وجود گاز طبیعی باقی‌مانده کاهش یابد. اگر ویژگی‌های مخزنی خوبی از سنگ میزبان و یک لایه نفوذناپذیر برای جلوگیری از مهاجرت هیدروژن ذخیره شده وجود داشته باشد، سفره‌های آب زیرزمینی که حجم بسیار بزرگی دارند و به راحتی یافت می‌شوند، گزینه‌ای برای ذخیره‌سازی هیدروژن خواهند بود. با این حال، معایب آن‌ها شامل احتمال نشت در امتداد گسل‌های کشف نشده به دلیل ماهیت متخلخل سفره‌های آب زیرزمینی، واکنش‌های بیوشیمیایی و واکنش‌های هیدروژن با مواد معدنی در سنگ مخزن است. تاکنون، ذخیره‌سازی هیدروژن خالص در سفره‌های آب زیرزمینی گزارش نشده است. کاربردهای هیدروژن با ذخیره‌سازی مناسب آن‌ها مقایسه شده و در (جدول ۴) فهرست شده‌اند.

جدول ۴: سایت ذخیره‌سازی مناسب و کاربرد انرژی بر اساس ترکیب جریان تزریق‌شده (درصد هیدروژن در مخلوط گاز) [۳۳]

جریان گاز	تبدیل	کاربرد	سایت ذخیره‌سازی مناسب
هیدروژن خالص	سلول‌های سوختی	برق و وسایل نقلیه	غارهای نمکی که تقریباً کاملاً نفوذناپذیر هستند از درجه بالایی از تمیزی برخوردارند و با خطر بسیار کم آلودگی گاز توسط ناخالصی‌ها مشخص می‌شوند
گاز طبیعی کم هیدروژن (۱۵-۶ درصد H_2)	برق به گاز	توربین‌های گازی یا تزریق آن به خط لوله گاز طبیعی	مخزن گاز تخلیه شده
مخلوط غنی از هیدروژن همراه با CO_2 , CH_4 , CO (گاز سنتز یا گاز شهری ۲۰-۴۰ درصد H_2)	برق به گاز و گاز به برق	برق از طریق تبدیل ترمودینامیکی در توربین‌های گازی و به‌عنوان سوخت (درمکرد گاز شهری) برای روشنایی و گرمایش بدون نیاز به هیچ‌گونه تبدیل	سفره آب زیرزمینی، مخزن گاز تخلیه شده یا غار نمکی
مخلوطی از هیدروژن و CO_2	برق به گاز	سوخت و برق	سفره آب زیرزمینی، مخزن گاز تخلیه شده

۳-۲. ذخیره‌سازی هیدروژن مایع

هیدروژن در حالت مایع، دانسیته جرمی و حجمی بسیار بالاتری نسبت به ذخیره‌سازی گازی فشرده دارد. با این حال، تکنیک مایع کردن هیدروژن بسیار دشوارتر و نیازمند مصرف انرژی بیشتر نسبت به فشرده‌سازی هیدروژن یا مایع کردن گازهای متعارف دیگر است. این موضوع عمدتاً به دلایل زیر است:

- دمای تبخیر (۲۰/۲۸ کلوین در فشار ۱ اتمسفر) و نقطه بحرانی (۳۳ کلوین) هیدروژن بسیار پایین است.
- اندازه مولکول هیدروژن بسیار کوچک است، به‌طوری‌که در دمای نسبتاً بالا به گاز ایده‌آل نزدیک می‌شود. ضریب ژول-تامسون آن تنها در صورتی مثبت است که دما کم‌تر از ۲۰۲ کلوین باشد (دمای وارونگی ژول-تامسون هیدروژن) [۳۴].



توجه داشته باشید که نرخ تغییرات دمای یک گاز واقعی نسبت به فشار در فرآیند هم‌آنتروپی به‌عنوان ضریب ژول-تامسون تعریف می‌شود. با کاهش فشار (افزایش حجم)، اگر دمای گاز کم‌تر از دمای وارونگی باشد، ضریب ژول-تامسون مثبت است و گاز سرد می‌شود. اگر دمای گاز بالاتر از دمای وارونگی باشد، ضریب ژول-تامسون منفی است و گاز گرم می‌شود.

یکی از چالش‌های اصلی فناوری مخزن کرایوژنیک برای ذخیره‌سازی هیدروژن مایع، کاهش تلفات ناشی از تبخیر است. گرمای جذب‌شده توسط هیدروژن مایع باعث تبخیر آن می‌شود. از آنجا که مخزن داخلی فلزی برای تحمل فشار بالاتر طراحی نشده است، هیدروژن تبخیر شده باید آزاد شود که این امر منجر به تلفات تبخیر مواد می‌شود. هدایت حرارتی، تابش، همرفت از منابع اصلی نشت حرارت هستند.

مخازن کرایوژنیک پیشرفته برای ذخیره‌سازی هیدروژن مایع از مخازن توسعه‌یافته برای نیتروژن مایع با تغییرات بسیار کمی نشت گرفته‌اند. در عمل، استفاده مناسب از هیدروژن تبخیر شده و در نتیجه کاهش تلفات مؤثر تبخیر، روز به روز محبوب‌تر شده است [۳۵،۳۶].

اخیراً، تلاش‌های زیادی برای کاهش بیش‌تر تلفات تبخیر مخازن هیدروژن مایع انجام شده است. یکی از روش‌های نماینده، استفاده از فناوری عایق‌بندی چندلایه در ترکیب با خلاً بالا (در محدوده ۱۰-۴ میلی‌بار) است که به‌عنوان یک فناوری استاندارد برای ذخیره‌سازی هلیوم مایع استفاده می‌شود [۳۷].

۳-۳. ذخیره‌سازی هیدروژن به‌صورت کرایو-فشرده^۱

اگر چه ذخیره‌سازی هیدروژن به‌صورت مایع به دانسیته بالاتری نسبت به حالت گازی دست می‌یابد، اما تلفات جوش‌شده^۲ اجتناب‌ناپذیر، کاربرد آن را به‌ویژه در مورد ذخیره‌سازی برای خودروها محدود می‌کند [۳۸]. مزیت اصلی ذخیره‌سازی هیدروژن به‌صورت کرایو-فشرده این است که می‌تواند به دانسیته بالاتری نسبت به هیدروژن مایع در دماهای نسبتاً بالاتر دست یابد. آماده‌سازی کرایو-فشرده هیدروژن از هیدروژن گازی به

یک واحد فشرده‌سازی چندمرحله‌ای با یک کمپرسور و سیستم خنک‌کننده نیاز دارد. واضح است که افزایش فشار و کاهش دما به‌سادگی منجر به دانسیته بسیار بالای هیدروژن می‌شود، اما از نظر مصرف انرژی و امکانات ذخیره‌سازی، از نظر اقتصادی چندان مقرون‌به‌صرفه نیست [۳۹]. افزایش دانسیته ذخیره‌سازی هیدروژن از طریق فشرده‌سازی از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است؛ اما اگر فشار خیلی بالا باشد، این مزیت به‌تدریج خنثی می‌شود.

اگر کرایو-فشرده هیدروژن تهیه شده مستقیماً به یک وسیله نقلیه الکتریکی سلول سوختی^۳ تزریق شود، نیازی به واحد ذخیره‌سازی میانی نیست؛ بنابراین، این فناوری می‌تواند به‌راحتی با ایستگاه‌های سوخت‌گیری هیدروژن مبتنی بر هیدروژن مایع سازگار شود. برخلاف هیدروژن گازی فشرده و هیدروژن مایع، اکثر مطالعات درباره کرایو-فشرده هیدروژن بر روی کاربردهای ذخیره‌سازی و زمینه‌های مرتبط متمرکز شده‌اند [۴۰،۴۱]. در عمل، مخزن کرایو-فشرده هیدروژن ترکیبی از مخزن فشار هیدروژن گازی فشرده و مخزن هیدروژن مایع است. این مخزن به‌طور کلی شامل یک مخزن فشار نوع سوم برای هیدروژن گازی فشرده است که با عایق کاری چندلایه مورد استفاده برای هیدروژن مایع پوشانده شده است. علاوه بر این، مخزن باید در خلاً محصور شود [۴۲].

۳-۴. ذخیره‌سازی هیدروژن در حامل‌های آلی هیدروژن مایع

ذخیره‌سازی هیدروژن با ترکیب شیمیایی یا فیزیکی آن با مواد مایع یا جامد مناسب (ذخیره‌سازی هیدروژن مبتنی بر مواد) وجود دارد. حامل‌های آلی هیدروژن مایع^۴ یکی از مواد امیدوارکننده برای این منظور هستند. در دمای محیط، این مواد، مایع یا نیمه مایع هستند و دارای پیوندهای غیراشباعی می‌باشند که به آن‌ها امکان ذخیره‌سازی مولکول‌های هیدروژن از طریق یک واکنش شیمیایی (هیدروژناسیون) در حضور کاتالیزورها را می‌دهد. برای آزادسازی هیدروژن، واکنش دهیدروژناسیون کاتالیزوری تحت شرایط دمایی و فشار

1. Cryo-Compressed Hydrogen Storage (CCH₂)
2. Boil-Off
3. Fuel Cell Electric Vehicle
4. Liquid Organic Hydrogen Carriers

مناسب انجام می‌شود. علاوه بر این، معیارهای باید برای طراحی مهندسی یک ماده حامل‌های آلی هیدروژن مایع در نظر گرفته شوند که این معیارها به طراحی و ارزیابی کارآمد مواد حامل کمک می‌کنند. جزئیات این معیارها در (جدول ۵) ارائه شده است [۴۳،۴۴]:

جدول ۵: معیارهای طراحی حامل‌های آلی هیدروژن مایع [۴۴]

ایمن و غیر سمی در طول حمل‌ونقل و استفاده

دانشیته ذخیره‌سازی هیدروژن حجمی کافی (مثلاً بیش‌تر از ۵۶ کیلوگرم بر مترمکعب) و گرمایی (مثلاً بیش‌تر از ۶ درصد وزنی)؛

نقطه ذوب پایین، مثلاً کم‌تر از ۳۰- درجه سانتی‌گراد

نقطه‌جوش نسبتاً بالا، مثلاً بیش‌تر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد

پایداری شیمیایی کافی حامل‌های آلی هیدروژن مایع هیدروژنه و مصرف انرژی کم‌تر برای واکنش دهیدروژناسیون آن (این نشان می‌دهد که انرژی پیوند هیدروژن حامل‌های آلی هیدروژن مایع نباید خیلی کم یا خیلی زیاد باشد؛ محدوده بهینه بین ۴۰ تا ۷۰ کیلوژول بر مول هیدروژن است)؛

انتخاب‌پذیری واضح بین حامل‌های آلی هیدروژن مایع هیدروژنه و دهیدروژنه در طول چرخه عمر طولانی؛

عدم وجود یا مقدار بسیار کم محصولات تجزیه‌شده پس از واکنش دهیدروژناسیون؛

قابلیت ادغام مستقیم در زیرساخت‌های سوختی موجود و تثبیت‌شده؛

هزینه تولید پایین

هیچ‌یک از حامل‌های آلی هیدروژن مایع‌های موجود نمی‌توانند به‌طور کامل تمام این معیارها را برآورده کنند. مطالعات پیشرفته امروزی عمدتاً بر دو دسته از مواد متمرکز هستند: ترکیبات هوموسیكلیک (حلقوی همگن) و ترکیبات هتروسیکلیک (حلقوی ناهمگن). در سیستم‌های هوموسیكلیک متیل‌سیکلوهگزان^۱ تولوئن یکی از اولین سیستم‌های حامل‌های آلی هیدروژن مایع مورد بررسی بود که امروزه به مرحله تجاری‌سازی رسیده است. تولوئن با استفاده از کاتالیزورهای ناهمگن مختلف تبدیل می‌شود. در شرایط محیطی، متیل‌سیکلوهگزان مایع دارای دانشیته

ذخیره‌سازی هیدروژن ۶/۲ درصد وزنی است؛ اما به دلیل نیاز انرژی نسبتاً بالا (۶۸.۳ کیلوژول بر مول هیدروژن)، دهیدروژناسیون در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد معمولاً با تشکیل کک و سایر محصولات جانبی همراه است [۴۵].

نفتالین نیز یک سیستم جالب حامل‌های آلی هیدروژن مایع هوموسیكلیک است که نه‌تنها به دلیل دانشیته ذخیره‌سازی هیدروژن بالا در دکالین (۷/۳ درصد وزنی)، بلکه به این دلیل که ترکیب دهیدروژنه شده آن (نفتالین) در دمای اتاق جامد است، مورد توجه قرار گرفته است. این ویژگی با طراحی نوآورانه کاتالیزور و بستر، دامنه کاربردهای سیستم حامل‌های آلی هیدروژن مایع دکالین/نفتالین را گسترش می‌دهد. امیدوارکننده‌ترین سیستم حامل‌های آلی هیدروژن مایع هوموسیكلیک، یک سیستم چند جزئی شامل پرهیدرو-بنزیل تولوئن/بنزیل تولوئن و پرهیدرو-دی‌بنزیل تولوئن یا دی‌بنزیل تولوئن است [۴۳].

حامل‌های آلی هیدروژن مایع هتروسیکلیک^۲ رقیبی برای سیستم‌های هوموسیكلیک هستند. در سال‌های اخیر، حامل‌های هیدروژن هتروسیکلیک (به‌ویژه انواع مبتنی بر N-هتروسیکل) به دلیل واکنش‌پذیری بهتر، سینتیک و ترمودینامیک مطلوب، دمای پایین‌تر دهیدروژناسیون و برگشت‌پذیری بالاتر، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند.

این ترکیبات از نظر سینتیک و دمای عملیاتی مطلوب هستند، اما دانشیته ذخیره‌سازی هیدروژن کم‌تر از ۶ درصد وزنی ممکن است کاربرد آن‌ها را در سناریوهای پیشرفته محدود کند. این مطالعات نشان می‌دهد که اگرچه حامل‌های آلی هیدروژن مایع‌های هتروسیکلیک مزایای قابل‌توجهی دارند، اما هنوز چالش‌های عملیاتی نیاز به بهبود بیش‌تر دارند.

۳-۵. ذخیره‌سازی هیدروژن در هیدریدهای فلزی

به‌طور کلی، هر ماده جامدی که بتواند به‌صورت فیزیکی یا شیمیایی با هیدروژن ترکیب شود و ترکیب حاصل در دمای نگهداری معمولی پایدار بوده و در دما و فشار متعادل قادر به آزادسازی هیدروژن باشد، می‌تواند به‌عنوان ذخیره‌سازی هیدروژن به‌صورت جامد مورد استفاده قرار گیرد. واضح است که ذخیره‌سازی حالت جامد، ایمن‌ترین روش است و بالاترین

1. Methyl Cyclohexane
2. Heterocyclic Liquid Organic Hydrogen Carriers





دانسیتته ذخیره‌سازی حجمی را ارائه می‌دهد. ترکیبات بین‌فلزی، گزینه‌های سنتی اما با دانسیته کم از دهه ۱۹۸۰ به‌عنوان مواد بالقوه ذخیره‌سازی هیدروژن در نظر گرفته شده‌اند.

نانوساختارهای کربنی، پتانسیل بالا اما چالش‌های فنی متعددی دارند. مواد متخلخل یا نانوساختار کربنی مانند نانولوله‌های کربنی نیز به‌عنوان گزینه‌ای برای ذخیره‌سازی هیدروژن مطرح شده‌اند؛ اما:

- امیزان هیدروژن جذب شده و انرژی پیوند C-H به‌شدت به مساحت سطح ویژه و چیدمان موضعی اتم‌های کربن بستگی دارد.
- از آنجا که تولید انبوه نانولوله‌های کربنی خالص با انحرافات مورفولوژیک کم و روش‌های مشخصه‌یابی قابل اطمینان هنوز محدود است، نتایج گزارش شده برای چگالی ذخیره‌سازی هیدروژن در آن‌ها پراکنده و غیرقابل تکرار است [۴۶، ۴۷].
- مواد سبک با چگالی ذخیره‌سازی بالاتر
- برای دستیابی به چگالی بالاتر، انتخاب مواد ذخیره‌سازی به عناصر سبک مانند Li, Be, B, Na, Mg و Al محدود می‌شود. علاوه بر چگالی ذخیره‌سازی، ویژگی‌های زیر باید در نظر گرفته شوند [۴۸]:
- دمای تفکیک پایین و فشار متعادل
- اتلاف گرمای کم در طول تشکیل هیدرید (واکنش گرمازا)
- گرمای تشکیل کم برای کاهش انرژی مورد نیاز آزادسازی هیدروژن
- اتلاف انرژی محدود در طی شارژ و دشارژ هیدروژن (جلوگیری از آزادسازی خود به خودی هیدروژن)
- سینتیک سریع
- پایداری چرخه‌ای
- پایداری بالا در برابر اکسیژن و رطوبت برای عمر چرخه‌ای طولانی
- هزینه پایین بازیافت و زیرساخت شارژ
- ایمنی

در حالی که هیدریدهای فلزی و نانوساختارهای کربنی پتانسیل ذخیره‌سازی هیدروژن را دارند، چالش‌هایی مانند چگالی ذخیره‌سازی پایین، مشکلات تولید و پایداری هنوز نیاز به تحقیقات بیشتر دارند. مواد سبک مانند منیزیم و ترکیبات لیتیوم به‌عنوان گزینه‌های امیدوارکننده برای بهبود مشکل چگالی در ذخیره‌سازی مطرح هستند، اما باید معیارهای عملیاتی و اقتصادی نیز در نظر گرفته شوند.

به دلیل پتانسیل بالای جذب هیدروژن، هزینه نسبتاً پایین و برگشت‌پذیری خوب، هیدریدهای فلزی مبتنی بر منیزیم و آلایزهای آن، امیدوارکننده‌ترین مواد برای ذخیره‌سازی هیدروژن در حالت جامد هستند. در دما و فشارهای بالا، مثلاً ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۳ مگاپاسکال، مولکول‌های هیدروژن با منیزیم واکنش داده و هیدرید منیزیم را تشکیل می‌دهند که از نظر تئوری، حاوی ۷/۶ درصد وزنی هیدروژن است؛ اما این مقدار هرگز در مواد حجیم قابل‌دستیابی نیست. جذب هیدروژن توسط منیزیم، یک جذب شیمیایی تجزیه شده روی سطح منیزیم است که به دنبال آن انتشار هیدروژن رخ می‌دهد. با پیشرفت واکنش، لایه هیدرید منیزیم رشد می‌کند که تقریباً نفوذناپذیر است و در نتیجه فرآیند هیدروژنه شدن بیش‌تر را متوقف می‌سازد. علاوه بر این، به دلیل میل شدید منیزیم به اکسیژن، لایه اکسیدی فشرده‌ای که پس از مدت کوتاهی قرار گرفتن در معرض هوا تشکیل می‌شود، مانع از انتشار هیدروژن می‌گردد. افزایش نسبت سطح به حجم، ساده‌ترین راه برای افزایش چگالی ذخیره‌سازی هیدروژن و سرعت هیدروژنه شدن است [۴۹].

۳-۶. مقایسه و بحث فناوری‌ها

بر اساس مطالب ارائه شده در بخش‌های قبلی، در این بخش مقایسه جامعی بین فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی هیدروژن در سه دسته انجام می‌دهیم: ویژگی‌های فنی کلیدی، مصرف انرژی و زمینه‌های کاربردی مناسب. در (جدول ۶) مقایسه مصرف انرژی و زمینه کاربرد بین روش‌های مختلف ذخیره‌سازی هیدروژن ارائه شده است [۴۹].

جدول ۶: مقایسه مصرف انرژی و زمینه کاربرد بین روش‌های مختلف ذخیره‌سازی هیدروژن [۴۹]

ذخیره هیدروژن مبتنی بر مواد			ذخیره هیدروژن مبتنی بر فیزیک			روش‌ها	
هیدریدهای	حامل‌های آلی	سوخت	کرایو-فشرده	هیدروژن مایع	هیدروژن گازی		
فلزی	هیدروژن	انرژی‌زا	هیدروژن		فشرده		
		آمونیاک / متانول	زیرزمین	۷۰ مگاپاسکال	۳۵ مگاپاسکال		
انرژی مصرفی بالا برای فرایند هیدروژن‌زدایی جداسازی یا تصفیه هزینه بالا مواد نرخ انتشار پایین هیدروژن، انتشار دمایی نسبتاً بالا	انرژی مصرفی بالا برای فرایند هیدروژن‌سازی	اعتبارسنجی از گاز موردنیاز: برای متانول: جذب مستقیم هوا برای تولید متانول سبز آمونیاک:	تبخیر انرژی مصرفی برای فرایند مایع‌سازی دلیل هزینه بالا	مشکلات برای یافتن مکان جغرافیایی مناسب برای ذخیره هیدروژن در زیرزمین	نسبتاً ذخیره‌سازی کم سیستم ظرفیت هزینه بالای مخزن، فقط برای برای وسیله نقلیه سبک	نسبتاً ذخیره‌سازی کم سیستم ظرفیت (گرانشی و حجمی)	محدودیت تکنولوژی امروزی برای کاربرد
حمل و نقل هیدروژن به مسافت طولانی، ذخیره هیدروژن بلندمدت، ذخیره هیدروژن در وسیله نقلیه سنگین و سبک	حمل و نقل هیدروژن به ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن، ذخیره هیدروژن در وسیله نقلیه سنگین	مقدار زیادی از هیدروژن برای مدت زمان طولانی	ذخیره هیدروژن در وسیله نقلیه سبک	ذخیره هیدروژن در وسیله نقلیه سنگین		کاربرد پتانسیلی با امروزی	

دسته مصرف انرژی از یک سو بر انرژی مورد نیاز برای ایجاد شرایط ذخیره‌سازی (مانند برق مورد استفاده برای فشرده‌سازی و مایع‌سازی هیدروژن، انرژی مورد نیاز برای ترکیب هیدروژن با حامل‌های شیمیایی و غیره) و از سوی دیگر بر انرژی لازم برای انجام واکنش‌های دهیدروژناسیون تمرکز دارد. به‌استثنای هیدروژن فشرده‌گازی و حامل‌های آلی مایع هیدروژن، برای ذخیره‌سازی هیدروژن باید حدود یک سوم انرژی موجود در هیدروژن (بر اساس ارزش حرارتی پایین) یا بیش‌تر صرف شود. حامل‌های آلی مایع هیدروژن به‌عنوان کم‌مصرف‌ترین فناوری ذخیره‌سازی هیدروژن شناخته می‌شود. باین‌حال، این درک مبتنی بر استفاده کامل از گرمای آزادشده در فرآیند دهیدروژناسیون است. در مواردی که از حامل‌های آلی مایع هیدروژن برای انتقال هیدروژن در مسافت‌های طولانی استفاده می‌شود، محل‌های دهیدروژناسیون و دهیدروژناسیون معمولاً از نظر جغرافیایی فاصله زیادی دارند.

مشخص است که فناوری‌های ذخیره‌سازی فیزیکی هیدروژن بالاترین دانسیته (۱۰۰ درصد) را دارند، درحالی‌که حامل‌های مبتنی بر مواد معمولاً دانسیته حجمی بیش‌تری نشان می‌دهند. این ویژگی، حامل‌های مبتنی بر مواد را به گزینه‌های امیدوارکننده‌ای برای ذخیره‌سازی میان‌مدت تا بلندمدت و انتقال هیدروژن در مسافت‌های طولانی تبدیل می‌کند. اگر چه دانسیته حجمی هیدروژن مایع قابل‌مقایسه با این فناوری‌ها است، اما دمای کرایوژنیک و مسئله تبخیر آن، هیدروژن مایع را به گزینه‌ای مناسب برای ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت تبدیل می‌کند. به دلیل عمر چرخه‌ای طولانی سیستم، نرخ سوخت بالا و نرخ آزادسازی هیدروژن و البته خلوص، هیدروژن فشرده‌گازی تاکنون تنها راه‌حل ذخیره‌سازی هیدروژن در خودرو بوده است. برای افزایش دانسیته ذخیره‌سازی، توسعه فناوری‌های هیدروژن مایع و هیدروژن فشرده سرد در بین خودروسازان عمده محبوبیت فزاینده‌ای یافته است.



۴. نقاط عطف تاریخی و وضعیت کنونی فناوری

باوجود تجربه گسترده در ذخیره‌سازی گاز طبیعی و سایر فعالیت‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی، تجربه ذخیره‌سازی هیدروژن در زیرزمین، به‌ویژه هیدروژن با خلوص بالا (بیش از ۹۰ درصد)، بسیار محدود است (جدول ۲).

۴-۱. ذخیره‌سازی در غارهای نمکی

غارهای نمکی، حفره‌هایی هستند که از طریق استخراج محلول در سازندهای نمکی مناسب (عمدتاً متشکل از هالیت) با استفاده از آب شیرین برای حل کردن سنگ نمک ایجاد می‌شوند [۵۰]. ویژگی‌های اطراف این غارها شامل نفوذپذیری پایین، قابلیت آب‌بندی بسیار بالا، رفتار شیمیایی خنثی نسبت به هیدروژن و خواص مکانیکی مطلوب امکان برداشت و تزریق‌های چرخه‌ای را فراهم می‌کند و اجازه می‌دهد مایعات برای مدت طولانی به‌صورت ایمن ذخیره شوند [۵۱، ۵۲]. ذخیره‌سازی در غارهای نمکی زیرزمینی به‌عنوان یک گزینه مناسب برای ذخیره‌سازی زمین‌شناختی برای هیدروژن شناخته شده است. در دهه گذشته، ذخیره‌سازی هیدروژن در غارهای نمکی مورد توجه چشم‌گیری قرار گرفته است و عملیات جدیدی در بریتانیا (مثل ترمال و اکوئینور، آلدبرو)، ایالات متحده (مثل یوتا)، هلند (مثل گاسونی، ویندام) و فرانسه (مثل نوول آکیتن و اترز) در حال توسعه هستند [۵۳].

۴-۲. ذخیره‌سازی در سفره‌های آب‌شور

ترکیبی از سنگ‌های متخلخل که با سنگ‌های گلی نفوذناپذیر پوشیده شده‌اند و یک لایه درپوش آب‌بندی را تشکیل می‌دهند، شرایطی را در اعماق زیرسطحی ایجاد می‌کنند که به‌طور کامل برای به دام انداختن و نگهداری گازهایی مانند متان، گاز طبیعی و کربن‌دی‌اکسید، همراه با آب‌نمک سازند، مناسب هستند. این سازندها که طی هزاران سال گازها را به‌طور ایمن نگه‌داری می‌کنند، می‌توانند گزینه‌ای مناسب برای ذخیره‌سازی هیدروژن در مقیاس‌های عظیم باشند.

تجربه مهم در زمینه ذخیره‌سازی هیدروژن در سفره‌های آب‌شور در دهه‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰، از طریق ذخیره‌سازی گاز شهری در این حفره‌ها، به‌دست‌آمده است. گاز شهری از گاز‌سازی زغال‌سنگ تولید می‌شود که در آن اکسیژن و بخار، زغال‌سنگ را اکسید می‌کنند

تا مخلوطی گازی شامل حدود ۵۰-۶۰ درصد هیدروژن، حدود ۳۰ درصد متان و حدود ۲۰ درصد کربن‌دی‌اکسید و کربن مونواکسید تولید شود. ذخیره‌سازی گاز شهری در این سفره‌ها در فرانسه (بین)، جمهوری چک (لوبودیس) و آلمان (انگلبورشتل، باد لاوشتات) انجام شد. طی دهه‌ها فعالیت تجاری، هیچ گزارشی از نقص در نگهداری در این سایت‌های ذخیره‌سازی گاز شهری ثبت نشده؛ هرچند، ممکن است برخی تغییرات در ترکیب گاز ذخیره‌شده به دلیل واکنش‌های بیوژئوشیمیایی در مخازن ذخیره‌سازی رخ دهد [۵۴-۵۶]. همچنین احتمال تولید هیدروژن سولفید و تولید متان توسط باکتری‌های متانوژن در مخزن وجود دارد.

در حالی‌که ذخیره‌سازی هیدروژن در محیط‌های متخلخل اخیراً توجه بیش‌تری را به خود جلب کرده است، تنها دو مطالعه آزمایشی که تاکنون هیدروژن را تزریق و بازیابی کرده‌اند، پروژه‌های متان سبز در اتریش و آرژانتین هستند که در (جدول ۲) نیز آورده شده است [۵۷].

۵. چالش‌های عملیات چرخه‌ای

برای متعادل کردن عرضه و تقاضا در سیستم انرژی، هیدروژن باید برای زمانی که تقاضای انرژی از تولید انرژی بیش‌تر باشد ذخیره شود. ذخیره‌سازی در غارهای نمکی و سنگ‌های متخلخل می‌تواند نرخ تزریق و برداشت را فراهم کند تا منبعی انعطاف‌پذیر و در مقیاس فصلی برای انرژی ایجاد شود. این تزریق و برداشت چرخه‌ای هیدروژن، فشار و دما را در اطراف چاه و تا اعماق مخزن تغییر می‌دهد و منجر به تغییراتی می‌شود که ممکن است بر یکپارچگی چاه، مخزن و کل مجموعه ذخیره‌سازی تأثیر بگذارد و باعث آسیب‌هایی مثل فعال‌سازی مجدد گسل‌ها و خرابی چاه شود. این جنبه‌های ژئومکانیکی و واکنش آن‌ها به ذخیره‌سازی هیدروژن باید ارزیابی شوند تا خطرات ناشی به حداقل برسد و یکپارچگی ذخیره‌سازی هیدروژن تضمین شود. برای غارهای نمکی که احتمالاً نرخ چرخه‌های سریع‌تری نسبت به مخازن متخلخل تجربه می‌کنند، یکپارچگی و پایداری یک غار به عوامل ژئومکانیکی و زمین‌شناسی نمک و شکل غار و همچنین فشار گاز ذخیره‌شده بستگی دارد [۹]. در طول عملیات غارهای نمکی، فرآیندهای پیچیده مکانیکی، حرارتی

و هیدرولیکی را تجربه خواهند کرد. وضعیت تنش غار به عمق، وضعیت تنش زمین‌شناسی، فشار داخلی گاز و نرخ‌های تزریق یا برداشت بستگی دارد [۵۸]. همچنین توسط رفتار نمک و هندسه غار کنترل می‌شود که خود تحت تأثیر ناهمگونی است و این ناهمگونی بر بار توزیع تنش در طول چرخه‌های بارگذاری و تخلیه اثر می‌گذارد [۵۹،۶۰]. نمک دارای ویژگی‌هایی است که مقاومت در برابر شکستگی هیدرولیکی را فراهم می‌کند و انعطاف‌پذیر است و به‌صورت ویسکوالاستیک تحت تنش‌ها رفتار می‌کند، بنابراین توانایی ترمیم ترک‌ها و گسل‌های القایی را دارد [۶۱]. این موارد باید در انتخاب محل به حداقل برسند. ضروری است که تغییرات تنش در طول چرخه‌های تزریق و برداشت از مرز عبور نکنند، مرزی که رفتار گشادشدگی را از رفتار تراکم‌پذیری جدا می‌کند و منجر به افزایش نفوذپذیری، کاهش استحکام سنگ و خرابی احتمالی می‌شود که به از دست رفتن یکپارچگی غار می‌انجامد [۶۲]. دمای گاز در غار به دلیل فرآیندهای ترمودینامیکی و تبادل حرارت نوسان می‌کند که معمولاً به نزدیکی دیواره غار منتقل می‌شود. از آنجا که نمک ضریب انبساط حرارتی نسبتاً پایینی دارد، تغییرات حرارتی کوچک در دیواره غار می‌تواند تغییرات تنش نسبتاً بزرگی ایجاد کند و بر یکپارچگی غار تأثیر بگذارد [۶۳]. فشار داخلی غار باید محدود شود تا اطمینان حاصل شود که تنش‌های غار زیر مرز گشادشدگی باقی می‌مانند. این کار احتمال وقوع ترک‌های ریز و گسترش آسیب را که ممکن است به خرابی ناشی از خستگی منجر شود، کاهش می‌دهد [۶۴].

برای ذخیره‌سازی هیدروژن در محیط متخلخل، جنبه‌های ژئومکانیکی در بسیاری از جهات مشابه ذخیره‌سازی گاز طبیعی هستند و شامل تغییرات فشار دوره‌ای (سالانه یا فصلی)، تعامل شیمیایی کوتاه‌مدت و بلندمدت هیدروژن با سنگ‌ها و گسل‌ها و تأثیر تنش بر رفتار مکانیکی می‌شوند [۶۵]. برای حفظ یکپارچگی محل ذخیره‌سازی، بسیار مهم است که فشار، زیر فشار ورود مویرگی و فشارهای شروع شکستگی سنگ‌های پوششی و گسلی نگه داشته شود [۶۶،۶۷]. ترشوندگی و نقش آب‌بندی در ذخیره‌سازی زمین‌شناختی هیدروژن در سال‌های اخیر به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [۶۸،۶۹].

در مواردی که هیدروژن در مخازن گازی تخلیه‌شده ذخیره می‌شود، فشارهای مخزن نباید از فشارهای اولیه پیش از تولید فراتر روند، زیرا این امر ممکن است به شکست ژئومکانیکی مخزن منجر شود [۷۰]. توجه داشته باشید که به دلیل دانسیته پایین‌تر هیدروژن در مقایسه با متان، حجم هیدروژنی که می‌تواند به‌طور ایمن در مخازن گازی تخلیه‌شده ذخیره شود، کم‌تر از مقدار گاز اولیه موجود است [۷۱].

در چرخه تولید هیدروژن دانسیته پایین و گرانشی کم سیال، مؤثر است. با این حال، مدل‌سازی کامپیوتری نشان می‌دهد که تولید انبوه هیدروژن از یک سفره آب نمکی می‌تواند به ایجاد یک منطقه کم‌فشار در اطراف چاه تولید منجر شود [۷۲]. اگر محل ذخیره‌سازی به‌صورت محفظه‌بندی شده (تقسیم‌شده به محفظه‌های جدا با شرایط متفاوت) باشد و ارتباط فشاری محدود یا هیچ ارتباطی بین محل واقعی و سازند اطراف وجود نداشته باشد، ظرفیت ذخیره‌سازی بسیار پایین خواهد بود، مگر این‌که اقدامات پیش‌تری اعمال شود. با این حال، اگر این ساختارهای محفظه‌بندی شده، میدان‌های گازی تخلیه‌شده باشند، مانند جنوب دریای شمال، فشار پس از تولید و اشباع آب آن‌ها می‌تواند نسبتاً پایین باشد. گاز تزریق شده یک منطقه کم‌فشار را پر می‌کند و ظرفیت عمدتاً به فشرده‌سازی گاز وابسته است.

استراتژی‌های بهینه‌سازی برای اطمینان از عملیات ذخیره‌سازی هیدروژن در مقیاس بزرگ در محیط متخلخل هنوز نادر هستند، اما تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که نسبت دقیق گاز بالشتکی^۱ به گاز کاری و همچنین یک روش انتخاب دقیق محل می‌تواند کارایی عملیات را افزایش دهد [۷۲]. دوره‌ای بودن ذخیره‌سازی هیدروژن به نوسانات تنش در داخل مخزن و گسل‌های نزدیک منجر خواهد شد که ممکن است باعث فشرده‌گی مخزن، فرونشست یا فعال‌سازی مجدد گسل‌ها شود. چرخه‌ای بودن ذخیره‌سازی هیدروژن منجر به نوسانات تنش در مخزن و گسل‌های مجاور آن می‌شود که ممکن است باعث فشرده‌گی مخزن، فرونشست یا فعال‌سازی مجدد گسل‌ها گردد.

ذخیره‌سازی هیدروژن در محیط‌های متخلخل ممکن است به واکنش‌های انحلال-رسوب منجر شود که به‌نوبت خود ممکن است به افزایش تغییر شکل الاستیک





و غیرالاستیک مخزن منجر شود [۷۳]. علاوه بر این، تورم یا خشک شدن رس‌ها در داخل مخزن و سنگ‌پوششی ممکن است طی عملیات ذخیره‌سازی هیدروژن رخ دهد که می‌تواند به ایجاد مسیرهای نشست منجر شود [۷۴].

الف) تعیین دقیق حد بالای فشار تزریق

ب) بهینه‌سازی مکان چاه‌ها برای مدیریت فشار

ج) انجام ارزیابی دقیق داده‌های تاریخی درباره فشار مخزن، روش‌های تحریک و تاریخچه مدیریت تولید مرتبط با انرژی

د) اطمینان از اینکه طراحی حفاری چاه‌های جدید از ایجاد شکستگی‌های جدید جلوگیری کند و مهم‌تر از همه ه) انجام آزمایش یکپارچگی چاه برای تمام چاه‌های موجود.

۶. تحلیل هوش مصنوعی، مدل‌سازی و نرم‌افزاری

شبکه عصبی مصنوعی یک مدل محاسباتی است که از ساختار مغز انسان و شبکه‌های عصبی بیولوژیکی الهام گرفته شده است. این شبکه از واحدهای ساده‌ای به نام نورون^۱ تشکیل شده که در لایه‌های مختلف (ورودی، پنهان و خروجی) مرتب شده‌اند. هر نورون داده‌های ورودی را دریافت می‌کند، آن‌ها را با وزن‌های خاصی (که اهمیت هر ورودی را نشان می‌دهند) ترکیب می‌کند و در نهایت یک خروجی تولید می‌کند. شبکه عصبی مصنوعی، هسته اصلی یادگیری عمیق^۲ است. KNN یکی از ساده‌ترین الگوریتم‌های دسته‌بندی و رگرسیون است. ایده آن بر اساس شباهت است. این الگوریتم تمام داده‌های آموزشی را به خاطر می‌سپارد. هنگامی که یک داده جدید به آن داده می‌شود، فاصله آن داده از تمام داده‌های موجود را محاسبه می‌کند. سپس، K داده‌ای که بیشترین شباهت (کم‌ترین فاصله) را به داده جدید دارند، انتخاب می‌شوند.

ذخیره‌سازی ایمن و کارآمد هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی پاک، یکی از چالش‌های کلیدی در اقتصاد هیدروژنی است. هوش مصنوعی و به‌طور خاص مدل‌هایی مانند ANN و KNN می‌توانند به‌طور مستقیم و غیرمستقیم به حل این چالش کمک کنند. کشف و طراحی مواد جدید برای ذخیره‌سازی هیدروژن (کاربرد ANN)، در یافتن موادی است که بتوانند هیدروژن را با دانسیته بالا، در دما و فشار متعارف و

با ایمنی کافی جذب و ذخیره کنند (مانند هیدریدهای فلزی، چارچوب‌های آلی-فلزی^۳ و نانومواد). کاربرد دیگر ANN بهینه‌سازی فرآیندها و کنترل سیستم‌های ذخیره‌سازی در مدیریت شرایط عملیاتی (دما، فشار، سرعت شارژ/دشارژ) در مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن برای به حداکثر رساندن کارایی و ایمنی است. تحلیل داده‌های آزمایشگاهی و شناسایی الگوها در آزمایش‌های مربوط به جذب و واجذب هیدروژن، نیازمند تولید حجم زیادی از داده‌های پیچیده توسط ANN و KNN می‌باشد. هر دو می‌توانند برای تحلیل این داده‌ها و یافتن الگوهای پنهان به کار روند.

مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای به‌عنوان مهم‌ترین بخش توسعه فناوری‌های نوین ذخیره‌سازی هیدروژن در ایران عمل می‌کنند. این ابزارها امکان تحلیل سیستم‌های پیچیده را در چندین سطح، از مقیاس اتمی تا مقیاس سیستم کامل، فراهم می‌سازند.

در سطح اتمی و مولکولی، از روش‌هایی نظیر دینامیک مولکولی و تئوری تابعی دانسیته به‌طور گسترده‌ای برای تحقیق در مورد مواد پیشرفته ذخیره‌سازی استفاده می‌شود. هدف اصلی این مطالعات، بررسی برهم‌کنش هیدروژن با مواد میزبان مختلف، از جمله هیدریدهای فلزی پیچیده (مانند هیدرید منیزیم و سدیم آلانیت) و جاذب‌های متخلخل نوین مانند چارچوب‌های آلی-فلزی و نانومواد کربنی است. این مدل‌سازی‌ها به غربالگری سریع مواد، پیش‌بینی سینتیک جذب یا واجذب و شناسایی مکانیسم‌های بنیادی در سطح اتمی می‌پردازند.

در سطح مخازن، شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای طراحی و بهینه‌سازی مخازن ذخیره‌سازی به کار گرفته می‌شوند. نرم‌افزارهایی مانند ANSYS Fluent و COMSOL Multiphysics برای مدل‌سازی میدان‌های جریان، انتقال حرارت و توزیع فشار در حین فرآیندهای شارژ و دشارژ مخازن فشار بالا و بسترهای هیدرید فلزی استفاده می‌شوند.

در سطح سیستم، از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی فرآیند (مانند Aspen HYSYS) و پلتفرم‌های دینامیک سیستم (مانند MATLAB) برای یکپارچه‌سازی واحد ذخیره‌سازی هیدروژن با سایر اجزای سیستم انرژی، از جمله الکترولیزرها،

1. Neuron
2. Deep Learning
3. metal-organic frameworks - MOFs

پیل‌های سوختی و منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌شود. این مدل‌های یکپارچه به ارزیابی کارایی ترمودینامیکی، پایداری دینامیکی و بهینه‌سازی اقتصادی کل سیستم می‌پردازند [۷۵].

۷. موانع اصلی و فرصت‌های آینده

تجربه چندین دهه ذخیره‌سازی مخلوط گازهای غنی از هیدروژن، امکان کاهش ریسک واکنش‌های بیولوژیکی و ژئوشیمیایی ناشی از تزریق هیدروژن را از طریق انتخاب مکان مناسب و استراتژی‌های کاهش فراهم می‌کند.

سازندهای ذخیره‌سازی هیدروژن که شامل یک مخزن مناسب، سنگ‌پوششی که هیدروژن ذخیره‌شده را حفظ کند و یک ساختار تله مانند که امکان بازتولید کارآمد را فراهم کند، می‌تواند راه‌حل انعطاف‌پذیرتری از نظر جغرافیایی برای ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ نسبت به غارهای نمکی ارائه دهد [۷۶]. به دلیل دانسیته پایین هیدروژن، حجم‌های بزرگ هیدروژن تزریق‌شده، مایعات موجود در منافذ (معمولاً آب‌شور و یا هیدروکربن‌های باقی‌مانده) را جابه‌جا می‌کند و منجر به افزایش فشار سازند می‌شود که اگر به‌درستی مدیریت نشود، می‌تواند یکپارچگی محل ذخیره‌سازی را به خطر بیندازد. این موضوع، نیاز به پایش فشار در مخزن ذخیره‌سازی را برجسته می‌کند.

تحقیقات اخیر در مورد گازهای بالشتکی جایگزین، مانند نیتروژن، متان یا کربن‌دی‌اکسید، برای کاهش هزینه‌ها یا ذخیره گازهای گلخانه‌ای اضافی، چشم‌انداز امیدوارکننده دیگری است. استفاده از این گازهای بالشتکی جایگزین می‌تواند هزینه‌های سرمایه‌ای در ذخیره‌سازی آبخوان شور را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد [۷۷]. با این حال، خطر اختلاط گازها نگران‌کننده است، به‌ویژه زمانی که میزان اختلاط بین گاز کاری و گاز بالشتکی به سطحی برسد که کیفیت تولید را کاهش دهد، به‌طوری‌که جداسازی اجزای سطحی برای دستیابی به خلوص مورد نیاز هیدروژن ضروری شود [۷۸]. با این حال، بسته به کاربردهای هیدروژن تولید شده، ممکن است پردازش سطحی بدون توجه به سطح اختلاط در مخزن مورد نیاز باشد.

در ذخیره‌سازی در محیط متخلخل، هیدروژن ممکن است به‌طور بالقوه واکنش‌های ژئوشیمیایی با سنگ‌ها

و سیالات سازند داشته باشد که می‌تواند کیفیت مخزن را بهبود بخشد یا کاهش دهد [۷۹]. علاوه بر این، برای ذخیره‌سازی هیدروژن، تأثیر این واکنش‌ها بر عملیات ذخیره‌سازی نیاز به اعتبارسنجی دارد، زیرا واکنش‌های معدنی اغلب در دوره‌های طولانی رخ می‌دهند و علاوه بر این، هیدروژن حلالیت پایینی در آب دارد. سوابق تاریخی پروژه‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن در (جدول ۷) مورد بررسی قرار گرفته است. به همین دلیل انحلال قابل‌توجهی در مواد معدنی ایجاد نمی‌کند، خطری که با خشک شدن تدریجی اشباع آب در چرخه‌های تزریق و تولید بعدی بیش‌تر کاهش می‌یابد [۷۹].

افزایش غلظت هیدروژن در یک مکان ذخیره‌سازی ممکن است رشد میکروارگانیسم‌های اکسیدکننده هیدروژن را تحریک کند که انتظار می‌رود تأثیراتی بر ذخیره‌سازی در محیط متخلخل داشته باشند. رشد آن‌ها می‌تواند منجر به مصرف هیدروژن، تولید متان، رشد فیلم که مسیرهای جریان سیال را مسدود می‌کند، رسوب مواد معدنی و تولید سولفید هیدروژن شود که می‌تواند به خوردگی زیرساخت‌های فلزی منجر گردد.

غارهای نمکی و میدان‌های گازی تخلیه‌شده محدوده وسیعی از مقیاس‌ها و قابلیت تحویل هیدروژن را فراهم می‌کنند که قادر به پاسخگویی به نیازهای فصلی و روزانه انرژی ما هستند. غارهای نمکی انعطاف‌پذیری تحویل کوتاه‌مدت را همراه با یک سیستم عملیاتی چرخه‌ای تثبیت‌شده با ریسک کاهش‌یافته تولید هیدروژن ارائه می‌دهند. با این حال، آن‌ها از نظر جغرافیایی محدود هستند و نمی‌توانند مقیاس ظرفیت ذخیره‌سازی هیدروژن مورد نیاز برای کربن‌زدایی عمیق سیستم انرژی جهانی را فراهم کنند. میدان‌های گازی تخلیه‌شده قادر به تأمین ذخیره‌سازی انرژی فصلی هستند [۸۰، ۸۱]. این موضوع به‌ویژه در صورتی مرتبط است که هیدروژن تولیدشده از اصلاح بخار متان همراه با جذب و ذخیره کربن (هیدروژن آبی) در فاز انتقالی استفاده شود، درحالی‌که پیشرفت‌های فناوری مورد نیاز و کاهش هزینه‌ها برای تولید هیدروژن از انرژی تجدیدپذیر و الکترولیز (هیدروژن سبز) به دست آید. با این حال، این محاسبات بر اساس برآوردهای حجمی استاتیک است و اولاً نیاز به گاز بالشتکی را به‌درستی در نظر نمی‌گیرد و ثانیاً اطلاعاتی در مورد نرخ‌های تزریق و تولید قابل‌دستیابی ارائه نمی‌دهد. میدان‌های گازی طی دهه‌ها خالی شده‌اند.



جدول ۷: سوابق تاریخی پروژه‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن [۷۹]

سال	وضعیت	عمق (m)	حجم مخزن (m ³)	ترکیب گاز	نوع ذخیره‌سازی	مکان
۱۹۷۲	فعال	۳۵۰	۳×۷۰۰۰۰	% 95 H ₂ , % 4-3 CO ₂	غار نمکی (نمک بستر)	Teesside، بریتانیا
۱۹۸۳	فعال	۱۰۰۰	۵۸۰۰۰۰	% 95 H ₂	غار نمکی (گنبد نمکی)	Clemens، آمریکا
۲۰۰۷	فعال	۱۲۰۰	۵۶۶۰۰۰	H ₂	غار نمکی (گنبد نمکی)	MossBluff، آمریکا
۲۰۱۷	فعال	۱۳۴۰	۹۰۶۰۰۰	% 95 H ₂	غار نمکی (گنبد نمکی)	Spindletop، آمریکا
--	تحت توسعه	--	۵۷۰۰۰۰	--	غار نمکی	STOPIIL-H2, Etzel، فرانسه
--	برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی پس گرفته شده	۱۳۳۰	۷,۸×۱۰ ^۷	گاز شهری	غار نمکی	Kiel، آلمان
--	برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی پس گرفته شده	۸۰۰	۶,۸×۱۰ ^۸	گاز شهری	غار نمکی و محیط متخلخل میدان گاز تخلیه شده	BadLauchstädt، آلمان
۲۰۱۷	تحت توسعه	۱۲۰۰	۱۱۵۰۰۰	% 10 H ₂	مخزن متخلخل (میدان تخلیه شده)	UndergroundSun Storage، اتریش
۲۰۱۰	فعال	--	--	--	مخزن متخلخل (میدان تخلیه شده)	Yakshunovskoe Field، روسیه
--	برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی پس گرفته شده	۹۰۰	۲,۴×۱۰ ^۸	گاز شهری	مخزن متخلخل (میدان تخلیه شده)	Kirchheiligen، آلمان
--	برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی پس گرفته شده	۵۰۰	۱,۶×۱۰ ^۸	گاز شهری	مخزن متخلخل (سفره آبی)	Hähnlein، آلمان
--	برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی پس گرفته شده	۶۰۰	۱,۶×۱۰ ^۸	گاز شهری	مخزن متخلخل (سفره آبی)	Eschenfelden، آلمان
۱۹۶۴-۲۰۰۰	برطرف شده	۲۵۰-۴۰۰	۱,۳×۱۰ ^۸	گاز شهری	مخزن متخلخل (سفره آبی)	Ketzin، آلمان
۱۹۶۵-۱۹۹۵	برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی پس گرفته شده	۴۰۰-۵۰۰	۱×۱۰ ^۸	گاز شهری	مخزن متخلخل (سفره آبی)	Lobodice، جمهوری چک
۱۹۵۶-۱۹۷۲	برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی پس گرفته شده	۴۳۰	۳,۳×۱۰ ^۸	گاز شهری	مخزن متخلخل (سفره آبی)	Beynes، فرانسه
۲۰۱۶	تحت توسعه	۳۰	۱۰۰	% 100 H ₂	غار سنگی	HyBRIT، سوئد



۸. بحث و نتیجه‌گیری

شیمیایی (مانند چین)، تولید هیدروژن در مقیاس بزرگ، ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت تا میان‌مدت و انتقال داخلی هیدروژن باید اهداف اصلی در ساخت زیرساخت هیدروژنی باشد. علاوه بر این، سوخت‌های نیروگاهی می‌توانند به‌عنوان پیوندی بین بخش‌های مختلف انرژی و صنایع شیمیایی عمل کنند.

با توجه به چالش‌های فنی، اقتصادی و ایمنی موجود در زمینه ذخیره‌سازی هیدروژن، پیشنهادهای برای تحقیقات و اقدامات آتی ارائه می‌گردد. تمرکز تحقیقات بر سنتز و بهینه‌سازی مواد نوین از قبیل نانوکامپوزیت‌های هیدرید فلزی با سینتیک جذب و واجذب سریع تر و چارچوب‌های آلی-فلزی با ظرفیت جذب سطحی بالاتر در دما و فشار نزدیک به محیط، امری ضروری است. انجام مطالعات شبیه‌سازی و آزمایشگاهی برای کاهش هزینه‌های تولید مخازن کامپوزیتی فشار بالا و همچنین بهبود سیستم‌های عایق‌بندی برای کاهش تلفات تبخیر در مخازن هیدروژن مایع پیشنهاد می‌شود. ایجاد و بومی‌سازی استانداردها و پروتکل‌های ایمنی برای طراحی، تولید، نصب و بهره‌برداری از تمامی سیستم‌های ذخیره‌سازی هیدروژن، جهت جلب اعتماد عمومی و تضمین ایمنی، بسیار حیاتی است.

مراجع:

- [1]. Hanley, E.S., J. Deane, and B.Ó. Gallachóir, The role of hydrogen in low carbon energy futures—A review of existing perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. 82: p. 3027–3045.
- [2]. McPherson, M., N. Johnson, and M. Strubegger, The role of electricity storage and hydrogen technologies in enabling global low-carbon energy transitions. *Applied Energy*, 2018. 216: p. 649–661.
- [3]. UNIDO, Towards Hydrogen Societies: Expert Group Meeting. 2018.
- [4]. EIA, U., California's curtailment of solar electricity generation continues to increase. 2021.
- [5]. Lemmon, E.W., Thermophysical properties of fluid systems. NIST chemistry WebBook, 2010.

به‌طور کلی، تاکنون هیچ شکل واحدی از هیدروژن بر کل زنجیره ارزش هیدروژن مسلط نشده است. با توجه به نیازهای مختلف ذخیره‌سازی (مقدار، مدت‌زمان و غیره)، مشخصات متفاوت حمل‌ونقل (فاصله، حجم و غیره) و مصارف نهایی گوناگون، حالت فیزیکی و شیمیایی هیدروژن باید تعدیل شود تا به اهداف اقتصادی دست یابد؛ بنابراین، ممکن است لازم باشد سیستم‌های زیرساختی متفاوتی برای پشتیبانی از سناریوهای کاربردی مختلف ایجاد شوند. از آنجا که سلول‌های سوختی هیدروژن به آلودگی گازی بسیار حساس هستند، زیرساخت هیدروژن مربوطه (برای خودروهای برقی سلول سوختی، تولید برق با سلول سوختی و غیره) معمولاً بر اساس زیرساخت فناوریانه بالغ‌تر هیدروژن خالص در حالت گازی و یا مایع ساخته می‌شود. خط لوله مقرون به‌صرفه‌ترین روش برای انتقال حجم عظیمی از هیدروژن گازی فشرده در مسافت‌های طولانی است. با این حال، ساخت آن‌ها نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه بالایی است. در سناریوهای کاربردی شامل ذخیره‌سازی هیدروژن میان‌مدت و بلندمدت، فناوری‌های ذخیره‌سازی مبتنی بر مواد به دلیل دانسیته حجمی بالاتر، پایداری شیمیایی و ایمنی بهتر ترجیح داده می‌شوند. به‌محض حل مشکل فرآیند انرژی‌بر آزادسازی هیدروژن در آن‌ها، آمونیاک و حامل‌های آلی هیدروژن علاوه بر هیدروژن مایع می‌توانند حامل‌های امیدوارکننده‌ای برای حمل هیدروژن در مسافت‌های طولانی باشند. ترمودینامیک و سینتیک نامطلوب در فرآیندهای هیدروژنه کردن و دهیدروژنه کردن، در حال حاضر اصلی‌ترین موانع در راه کاربرد و تجاری‌سازی گسترده هیدریدهای فلزی هستند. بالاخره هر کشور و منطقه باید استراتژی خود را برای ساخت زیرساخت مبتنی بر هیدروژن با توجه دقیق به ویژگی‌های انرژی خود و نقشش در سیستم جهانی انرژی هیدروژنی طراحی کند. برای کشورها و مناطقی با سهم بالاتر انرژی‌های تجدیدپذیر، تحقیق و توسعه در تولید هیدروژن با پیوند پیشرفته با انرژی‌های تجدیدپذیر و ساخت زیرساخت برای ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت تا میان‌مدت و انتقال داخلی هیدروژن باید در اولویت قرار گیرد. برای کشورها و مناطقی که وابستگی بالایی به واردات یا صادرات هیدروژن دارند (مانند ژاپن و استرالیا)، ذخیره‌سازی ایمن، کم‌هزینه و کارآمد میان‌مدت و بلندمدت و انتقال بین‌قاره‌ای هیدروژن و یا حامل‌های آن (مانند حامل‌های آلی هیدروژن و هیدریدهای فلزی) باید تمرکز اصلی باشد. برای کشورها و مناطقی با انرژی تجدیدپذیر متمرکز، مصرف انرژی بالا و نیاز زیاد به مواد اولیه



- M., Okoroafor, R., ... & Hoteit, H. (2025). Recent progress in underground hydrogen storage. *Energy & Environmental Science*.
- [15]. Łukajtis, R., et al., Hydrogen production from biomass using dark fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. 91: p. 665–694.
- [16]. Cao, L., et al., Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects. *Environmental research*, 2020. 186: p. 109547.
- [17]. Kumar, S.S. and V. Himabindu, Hydrogen production by PEM water electrolysis—A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2019. 2(3): p. 442–454.
- [18]. Safari, F. and I. Dincer, A review and comparative evaluation of thermochemical water splitting cycles for hydrogen production. *Energy Conversion and Management*, 2020. 205: p. 112182.
- [19]. Reitenbach, V., Ganzer, L., Albrecht, D., & Hagemann, B. (2015). Influence of added hydrogen on underground gas storage: a review of key issues. *Environmental Earth Sciences*, 73(11), 6927–6937.
- [20]. Global, I., *Hydrogen review 2021*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2021.
- [21]. Union, I., *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*. Brussels. <http://www.w.xploiteu.com/pdfs/Europe>, 2014. 202020: p. 20.
- [22]. Commission, E.T., *Making the hydrogen economy possible: Accelerating clean hydrogen in an electrified economy*. 2021.
- [23]. Dutta, S., A review on production, storage
- [6]. Yin, L. and Y. Ju, Review on the design and optimization of hydrogen liquefaction processes. *Frontiers in Energy*, 2020. 14: p. 530–544.
- [7]. Chabab, S., et al., Measurements and predictive models of high-pressure H₂ solubility in brine (H₂O+ NaCl) for underground hydrogen storage application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020. 45(56): p. 32206–32220.
- [8]. Miao Yang , R.H., Stefano Berrettoni , Bernd Sprecher , Baodong Wang, A review of hydrogen storage and transport technologies *Clean Energy*, February 2023. 7(1): p. 190–216.
- [9]. Ozarslan, A., Large-scale hydrogen energy storage in salt caverns. *International journal of hydrogen energy*, 2012. 37(19): p. 14265–14277.
- [10]. Amid, A., D. Mignard, and M. Wilkinson, Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir. *International journal of hydrogen energy*, 2016. 41(12): p. 5549–5558.
- [11]. Sáinz-García, A., et al., Assessment of feasible strategies for seasonal underground hydrogen storage in a saline aquifer. *International journal of hydrogen energy*, 2017. 42(26): p. 16657–16666.
- [12]. Johannes Micioc, N.H., Katriona Edlmann, Jonathan Scafidi, v, *Underground hydrogen storage: a review*. 2023. 528: p. 73 – 86.
- [13]. Nikolaidis, P. and A. Poullikkas, A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017. 67: p. 597–611.
- [14]. Ali, M., Isah, A., Yekeen, N., Hassanpouryouzband, A., Sarmadivaleh,



www.fibatech.com/2014/11/24/type-2-hydrogen-vessel/ (1 August 2022, d.l.a.

- [32]. Tarkowski, R., Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019. 105: p. 86–94.
- [33]. Zivar D, K.S., Foroozesh J. Underground hydrogen storage: A comprehensive review. *International journal of hydrogen energy*. 2021 Jul 1;46(45):23436-62.
- [34]. Valenti G. Hydrogen liquefaction and liquid hydrogen storage. In: Gupta RB, B.A., Veziroğlu TN (eds). *Compendium of Hydrogen Energy. Volume 2: Hydrogen Storage, Transportation and Infrastructure*. Sawston, UK: Woodhead Publishing, 2016, 27–51.
- [35]. Derking, H., et al., Liquid hydrogen storage: status and future perspectives. *Cryogenic Heat and Mass Transfer*, 2019.
- [36]. Petitpas, G., Boil-off losses along LH2 pathway. 2018, Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States).
- [37]. Swanger, A., et al. Large scale production of densified hydrogen to the triple point and below. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. IOP Publishing.
- [38]. Brunner, T. and O. Kircher, Cryo-compressed hydrogen storage. *Hydrogen science and engineering: materials, processes, systems and technology*, 2016: p. 711–732.
- [39]. Yanxing, Z., et al., Thermodynamics analysis of hydrogen storage based on compressed gaseous hydrogen, liquid hydrogen and cryo-compressed hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, of hydrogen and its utilization as an energy resource. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014. 20(4): p. 1148–1156.
- [24]. US Department of Energy. Hydrogen Storage (Chapter 3.3 from Multi-Year Research, D., and Demonstration Plan). DOE, 2015. https://www.energy.gov/sites/default/files/2015/05/f22/fcto_myrd_d_storage.pdf, 2015.
- [25]. Barthélémy, H., M. Weber, and F. Barbier, Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives. *International journal of hydrogen energy*, 2017. 42(11): p. 7254–7262.
- [26]. Legault M. Pressure vessel tank types. 2012. <https://www.compositesworld.com/articles/pressure-vessel-tank-types> (14 September 2021, d.l.a.
- [27]. Rivard, E., M. Trudeau, and K. Zaghbi, Hydrogen storage for mobility: a review. *Materials*, 2019. 12(12): p. 1973.
- [28]. Parks, G., et al., Hydrogen station compression, storage, and dispensing technical status and costs. 2014, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States).
- [29]. Elgowainy, A., et al., Tube-trailer consolidation strategy for reducing hydrogen refueling station costs. *International journal of hydrogen energy*, 2014. 39(35): p. 20197–20206.
- [30]. https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress11/iv_e_3_low_2011.pdf (14 September 2021, date last accessed), L.K.F.A.P.R.I.E.C.A.o.H.S.M.a.O.-B.S.D.H.a.F.C.P.
- [31]. FIBA Technologies Inc. High Pressure Hydrogen Type II Vessel. 2014. <https://>



- Hirscher, Metal hydride materials for solid hydrogen storage: a review. *International journal of hydrogen energy*, 2007. 32(9): p. 1121–1140.
- [49]. Zaluska, A., L. Zaluski, and J. Ström-Olsen, Nanocrystalline magnesium for hydrogen storage. *Journal of Alloys and Compounds*, 1999. 288(1-2): p. 217–225.
- [50]. Li, J., et al., Modeling the construction of energy storage salt caverns in bedded salt. *Applied Energy*, 2019. 255: p. 113866.
- [51]. Evans, D., et al., Salt cavern exergy storage capacity potential of UK massively bedded halites, using compressed air energy storage (CAES). *Applied Sciences*, 2021. 11(11): p. 4728.
- [52]. Lux, K.-H., Design of salt caverns for the storage of natural gas, crude oil and compressed air: Geomechanical aspects of construction, operation and abandonment. 2009.
- [53]. Le Duigou, A., et al., Relevance and costs of large scale underground hydrogen storage in France. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017. 42(36): p. 22987–23003.
- [54]. Buzek, F., et al., Carbon isotope study of methane production in a town gas storage reservoir. *Fuel*, 1994. 73(5): p. 747–752.
- [55]. Kruck, O., et al., Assessment of the potential, the actors and relevant business cases for large scale and seasonal storage of renewable electricity by hydrogen underground storage in Europe. *KBB Undergr. Technol. GmbH*, 2013: p. 1–32.
- [56]. Panfilov, M., Underground and pipeline hydrogen storage, in *Compendium of hydrogen energy*. 2016, Elsevier. p. 91–115.
2019. 44(31): p. 16833–16840.
- [40]. Ahluwalia, R., et al., Supercritical cryo-compressed hydrogen storage for fuel cell electric buses. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018. 43(22): p. 10215–10231.
- [41]. Xu, Z., et al., Supply system of cryo-compressed hydrogen for fuel cell stacks on heavy duty trucks. *international journal of hydrogen energy*, 2020. 45(23): p. 12921–12931.
- [42]. Stolten, D., R.C. Samsun, and N. Garland, *Fuel cells: data, facts, and figures*. 2016: John Wiley & Sons.
- [43]. Perera, M. S. A. (2023). A review of underground hydrogen storage in depleted gas reservoirs: Insights into various rock-fluid interaction mechanisms and their impact on the process integrity. *Fuel*, 334, 126677.
- [44]. Rao, P.C. and M. Yoon, Potential liquid-organic hydrogen carrier (LOHC) systems: A review on recent progress. *Energies*, 2020. 13(22): p. 6040.
- [45]. Yan, J., et al., Dehydrogenation of methylcyclohexane over PtSn supported on MgAl mixed metal oxides derived from layered double hydroxides. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018. 43(19): p. 9343–9352.
- [46]. Hirscher, M. and M. Becher, Hydrogen storage in carbon nanotubes. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 2003. 3(1-2): p. 3–17.
- [47]. Mohan, M., et al., Hydrogen storage in carbon materials—A review. *Energy Storage*, 2019. 1(2): p. e35.
- [48]. Sakintuna, B., F. Lamari-Darkrim, and M.





- scale hydrogen storage in porous media—the scientific challenges. *Energy & Environmental Science*, 2021. 14(2): p. 853–864.
- [66]. Vavra, C.L., J.G. Kaldi, and R.M. Sneider, Geological applications of capillary pressure: a review. *AAPG bulletin*, 1992. 76(6): p. 840–850.
- [67]. Miocic, J.M., G. Johnson, and C.E. Bond, Uncertainty in fault seal parameters: implications for CO₂ column height retention and storage capacity in geological CO₂ storage projects. *Solid earth*, 2019. 10(3): p. 951–967.
- [68]. Hashemi, L., et al., A comparative study for H₂–CH₄ mixture wettability in sandstone porous rocks relevant to underground hydrogen storage. *Advances in Water Resources*, 2022. 163: p. 104165.
- [69]. Ali, M., et al., Assessment of wettability and rock-fluid interfacial tension of caprock: Implications for hydrogen and carbon dioxide geo-storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022. 47(30): p. 14104–14120.
- [70]. Tenthorey, E., et al., Modelling the geomechanics of gas storage: A case study from the Iona gas field, Australia. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013. 13: p. 138–148.
- [71]. Birkholzer, J.T., Q. Zhou, and C.-F. Tsang, Large-scale impact of CO₂ storage in deep saline aquifers: A sensitivity study on pressure response in stratified systems. *International journal of greenhouse gas control*, 2009. 3(2): p. 181–194.
- [72]. Tarkowski, R. (2019). Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable*
- [57]. Biegger, P., F. Kittinger, and M. Lehner. Underground Sun Conversion. in *Book of Abstracts*. 2018.
- [58]. Ramesh Kumar, K., et al., Geomechanical simulation of energy storage in salt formations. *Scientific Reports*, 2021. 11(1): p. 19640.
- [59]. Spiers, C., et al., Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rock salt by pressure solution. *Geological Society, London, Special Publications*, 1990. 54(1): p. 215–227.
- [60]. Asgari, A., et al., Stability analysis of salt cavern gas storage using 2D thermo-hydro-mechanical finite-element software. *Journal of Mining and Environment*, 2020. 11(1): p. 77–97.
- [61]. Urai, J., J. Schmatz, and J. Klaver, Over-pressured salt solution mining caverns and leakage mechanisms Phase 1: Micro-scale processes (Project KEM-17), MaP–Microstructure and Pores GmbH. Aachen. [Google Scholar], 2019.
- [62]. Hunsche, U. and A. Hampel, Rock salt—the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository. *Engineering geology*, 1999. 52(3-4): p. 271–291.
- [63]. Leister, N., et al., *Salt Cavern Appraisal for Hydrogen and Gas Storage. Stage 2*. 2018, ETI, Atkins.
- [64]. Khaledi, K., et al., Stability and serviceability of underground energy storage caverns in rock salt subjected to mechanical cyclic loading. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 2016. 86: p. 115–131.
- [65]. Heinemann, N., et al., Enabling large-

- [81]. Scafidi, J., et al., A quantitative assessment of the hydrogen storage capacity of the UK continental shelf. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021. 46(12): p. 8629–8639.
- [73]. Pijnenburg, R., et al., Inelastic deformation of the Slochteren sandstone: Stress-strain relations and implications for induced seismicity in the Groningen gas field. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019. 124(5): p. 5254–5282.
- [74]. Wentinck, H.M. and A. Busch, Modelling of CO₂ diffusion and related poro-elastic effects in a smectite-rich cap rock above a reservoir used for CO₂ storage. 2017.
- [75]. Zahra Amiri, Negar ShahedAli, Faezeh Barzegari, Application of artificial intelligence in exploitation of hydrocarbon reservoirs, 1403, <https://civilica.com/doc/2047335/>
- [76]. Zivar, D., S. Kumar, and J. Foroozesh, Underground hydrogen storage: A comprehensive review. *International journal of hydrogen energy*, 2021. 46(45): p. 23436–23462.
- [77]. Misra, B., et al. The use of inert base gas in underground natural gas storage. in *SPE Unconventional Resources Conference/ Gas Technology Symposium*. 1988. SPE.
- [78]. Pfeiffer, W.T. and S. Bauer, Subsurface porous media hydrogen storage–scenario development and simulation. *Energy Procedia*, 2015. 76: p. 565–572.
- [79]. Hassanpouryouzband, A., et al., Thermodynamic and transport properties of hydrogen containing streams. *Scientific data*, 2020. 7(1): p. 222.
- [80]. Mouli-Castillo, J., N. Heinemann, and K. Edlmann, Mapping geological hydrogen storage capacity and regional heating demands: An applied UK case study. *Applied Energy*, 2021. 283: p. 116348.



A Review of Hydrogen Gas Storage Methods as an Energy Carrier

Negar Shahedali¹, Faezeh Barzegari¹, Mehdi Razavifar^{2*}

1. B.Sc. Student, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2. Assistant Professor, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

Article History:

Received: 14 October 2025

Revised: 15 November 2025

Accepted: 18 November 2025

Keywords:

Hydrogen

Energy Carrier

Underground Storage

Oil and Gas Reservoirs

Sustainable Energy Production

ABSTRACT

Hydrogen, as a key component in decarbonizing the global energy system, plays a vital role in replacing fossil fuels in various sectors, including industry, power generation, transportation, and heating. To achieve this goal, in addition to reducing hydrogen production costs, the development of efficient infrastructure for its storage, transportation, and distribution is essential. Hydrogen storage is primarily accomplished through two main methods: physical storage, which involves storing hydrogen in compressed gas, liquid, or supercritical states, and material-based storage, such as using liquid organic hydrogen carriers, metal hydrides, or synthetic fuels. Additionally, underground hydrogen storage is emerging as a promising solution, although practical experience in this area is still limited. Despite hydrogen's high potential in renewable energy systems, there are numerous scientific and operational challenges, including storage safety, infrastructure optimization, and cost management. This study comprehensively investigates underground hydrogen storage and presents the approaches to this technology. The results presented in this article lay a good foundation for using this method in Iran with the aim of producing sustainable energy.

DOR: [20.1001.1.2510.1111.1404.08.27](https://doi.org/10.1001.1.2510.1111.1404.08.27)

How to cite this article

N. Shahedali, F. Barzegari, I. Bakhoda, M. Razavifar, Hydrogen, Energy Carrier, Underground Storage, Oil and Gas Reservoirs, Sustainable Energy Production. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025 12(4): 36-57. (https://ijge.irangi.org/article_732285.html)

* Corresponding Author.

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

Available online 11 March 2026

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>)



بررسی تأثیر ذرات جامد در سیال بر سایش لوله فولادی: مدل سازی CFD و آزمایش های تجربی

آرمین ثابت قدم اصفهانی^۱، یگانه داود بیگی^۲، سید محمود لطیفی^۳

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲. شرکت گاز استان هرمزگان، صندوق پستی ۹۸۴۶۹۹۵۱۹۷، بندرعباس، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۴. کارشناسی، گروه مهندسی ایمنی و بازرسی فنی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir

مقاله علمی- پژوهشی

صفحه ۵۸ - ۷۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۶

چکیده

سایش ناشی از ذرات جامد معلق در جریان سیال یکی از مشکلات کلیدی در صنایع نفت و گاز است که می تواند عمر مفید لوله های فولادی را کاهش دهد. در این پژوهش، آزمایش های تجربی متعددی برای بررسی و اعتبارسنجی سه روش مدل سازی مختلف انجام شد: دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، مدل اویلری و مدل لاگرانژی. ابتدا جریان گاز حاوی ذرات جامد در یک لوله مستقیم به طول ۱۰ متر و قطر ۵۶ اینچ و یک زانویی ۹۰ درجه برقرار گردید و نرخ سایش روی دیواره های بیرونی زانویی با استفاده از هر سه روش پیش بینی شد. سپس با آزمایش های سایش پین-روی-دیسک روی نمونه فولاد ST37، نتایج مدل سازی ها با داده های تجربی مقایسه شد. یافته ها نشان دادند که مدل CFD-لاگرانژی با انحراف کمتر از ۱۷/۱۷ درصد و مدل CFD-اویلری با انحراف کمتر از ۱۰/۷ درصد نسبت به نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارند. این مقایسه دقیق، برتری روش CFD-اویلری را در پیش بینی دقیق تر سایش فولاد ST37 نشان داد. نتایج این مطالعه می تواند راهگشای بهبود طراحی و نگهداری لوله های فولادی در صنایع نفت و گاز بوده و هزینه های ناشی از سایش و خرابی تجهیزات را کاهش دهد.

کلید واژه ها: ذرات جامد، سایش، خواص مکانیکی، نرخ سایش، دینامیک سیالات محاسباتی، مدل سازی عددی

۱. مقدمه

جریان های ذرات گازی رقیق دسته ای از جریان ها هستند که ذرات در امتداد یا درون میدان گاز حرکت می کنند و کاربردهایی در مهندسی شیمی، تبدیل انرژی، فرآوری مواد معدنی، ایمنی راکتور هسته ای و کنترل آلودگی هوا دارند. در این گروه از جریان ها، برخی از داده های مربوط به ذرات مانند سرعت متوسط ذرات و غلظت ذرات، تحت تأثیر میدان جریان گاز آشفته حائز اهمیت است [۱].



نفت و گاز باهم بیش از ۶۸ درصد کل انرژی جهان را تأمین می‌کنند و انتقال این انرژی از طریق خطوط لوله انجام می‌شود [۲]. با این حال، پدیده پودر سیاه (ترکیبی از سولفید آهن، اکسیدهای آهن و کربنات آهن) در خطوط لوله گاز، تهدیدی جدی برای تجهیزات ایجاد می‌کند. این ذرات با ایجاد ساییش در اجزای کمپرسور، شیرهای کنترل و فیلترها، عملکرد سیستم را مختل کرده و کیفیت گاز تحویلی را کاهش می‌دهند [۳-۵]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که عواملی مانند سرعت جریان، اندازه ذرات و جنس لوله تأثیر قابل توجهی بر شدت ساییش دارند [۶, ۷]. برآوردها نشان می‌دهد که هزینه‌های مرتبط با خوردگی و ساییش در این صنعت سالانه به میلیاردها دلار می‌رسد که شامل هزینه‌های تعمیرات، تعویض تجهیزات، توقف تولید و خسارات زیست‌محیطی می‌شود. تحلیل اقتصادی این خسارات و هزینه‌های نگهداری می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های بهینه در طراحی، بهره‌برداری و برنامه‌ریزی تعمیرات کمک کرده و ارزش اقتصادی پژوهش‌های مرتبط با ساییش را برجسته‌تر سازد [۸].

همچنین در صنایع نفت و گاز، ساییش به‌عنوان یکی از عوامل اصلی کاهش یکپارچگی ساختاری و افزایش ریسک‌های ایمنی شناخته می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که ساییش می‌تواند منجر به نشت مواد خطرناک، انفجار یا آلودگی محیطی گردد که تأثیرات جبران‌ناپذیری بر ایمنی کارکنان و محیط‌زیست دارد؛ بنابراین، تحلیل دقیق ساییش و ارزیابی ریسک‌های مرتبط با آن برای طراحی و بهره‌برداری ایمن از خطوط لوله ضروری است [۹].

زانویی‌ها به‌عنوان اجزای کلیدی در سیستم‌های انتقال پنوماتیکی، به دلیل افت فشار، جداسازی ذرات و ساییش دیواره لوله، چالش‌هایی را به همراه دارند. مطالعات نشان می‌دهند که هندسه زانویی (مانند شعاع انحنا و جهت‌گیری) و توزیع اندازه ذرات، بر الگوی جریان و نرخ ساییش تأثیر مستقیم دارند [۱۰-۱۲]. برای مثال، افزایش شعاع انحنای زانویی می‌تواند ساییش ناشی از برخورد ذرات را کاهش دهد [۱۳]. با این حال، طراحی بهینه این تجهیزات مستلزم درک دقیق برهم‌کنش ذرات با جریان آشفته گاز است.

فولاد ST37، یکی از پرکاربردترین فولادهای ساختمانی و صنعتی با کربن پایین است که به‌ویژه در صنایع کلیدی مانند ساخت لوله‌های انتقال نفت و گاز، سازه‌های فلزی و تجهیزات صنعتی به کار می‌رود. این فولاد به لطف ترکیبی از خواص مکانیکی مطلوب، شامل مقاومت تسلیم حداقل 235 N/mm^2 ، مقاومت کششی $360-510 \text{ N/mm}^2$ و شکل‌پذیری بالا، همراه با قابلیت جوشکاری و تراشکاری عالی، به انتخابی ایده‌آل برای پروژه‌های صنعتی بزرگ تبدیل شده است. علاوه بر این، هزینه نسبتاً پایین آن در مقایسه با فولادهای آلیاژی پیشرفته، جذابیت اقتصادی آن را دوچندان می‌کند. استاندارد قدیمی DIN 17100:1980 آلمان که در گذشته برای تعریف این فولاد استفاده می‌شد، اکنون جای خود را به استاندارد مدرن EN 10025-2:2004 داده و نام جدید آن S235JR است. از نظر خواص فیزیکی، این فولاد دارای تراکم 7.85 g/cm^3 ، نقطه ذوب $1420-1460^\circ \text{C}$ و سختی حداکثر HBW 120 است که نشان‌دهنده تعادل مناسب بین استحکام و انعطاف‌پذیری آن است [۱۵, ۱۶].

با این حال، یکی از چالش‌های اصلی فولاد ST37، مقاومت محدود آن در برابر ساییش ناشی از ذرات جامد موجود در سیالات انتقالی، به‌ویژه در کاربردهایی مانند لوله‌های نفت و گاز، است. این ساییش می‌تواند به مرور زمان باعث فرسودگی سطحی، کاهش ضخامت دیواره لوله‌ها و درنهایت کوتاه شدن عمر مفید آن‌ها شود که نتیجه آن افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و حتی ریسک‌های عملیاتی است. به همین دلیل، مهندسان و پژوهشگران در تلاشند تا با استفاده از روش‌هایی مانند پوشش‌دهی سطحی، بهبود آلیاژ یا طراحی بهینه سیستم‌ها، مقاومت ساییشی این فولاد را ارتقا دهند. این موضوع به‌ویژه در پروژه‌های انتقال سیالات با ذرات معلق، مانند خطوط لوله در مناطق بیابانی یا محیط‌های خورنده، از اهمیت بیشتری برخوردار است [۱۶, ۱۷].

دو مورد از مهم‌ترین مشکلاتی که هنگام ورود ذرات به یک جریان آشفته به وجود می‌آید، پراکندگی ذرات توسط آشفتگی و تغییر خواص آشفتگی در فاز گاز توسط ذرات است [۱۲]. این پراکندگی با دو دیدگاه بررسی می‌شود: اول، فرض اینکه خواص میدان جریان گاز تحت

1. Black Powder





تأثیر ذرات قرار نمی‌گیرد (اتصال یک‌طرفه) و دوم، در نظر گرفتن تغییراتی که ذرات در میدان جریان ایجاد می‌کنند (اتصال دوطرفه).

دو تکنیک اصلی برای شبیه‌سازی جریان‌های دوفازی، مدل دو سیال اوپلری-اوپلری (TFM)^۱ و مدل ردیابی ذرات لاگرانژی (LPT)^۲ هستند. در دیدگاه اوپلری، دو فاز (گاز و ذرات جامد) به‌عنوان محیط‌های پیوسته در نظر گرفته می‌شوند که با ضرایب تبادل به هم مرتبط هستند. در دیدگاه لاگرانژی، هر ذره درون حوزه محاسباتی ردیابی می‌شود که پیاده‌سازی ضرایب تبادل را آسان‌تر می‌کند [۱۳].

در همین راستا، انتخاب روش مناسب برای شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی به‌ویژه در حضور ذرات جامد، بستگی مستقیمی به ویژگی‌های جریان و هدف مدل‌سازی دارد. روش اوپلری هر دو فاز سیال و ذرات را به‌عنوان پیوسته‌های درهم‌تنیده در نظر می‌گیرد و معادلات بقا را برای هر فاز بر روی یک شبکه ثابت حل می‌کند. این روش برای جریان‌های ذرات متراکم و شرایط پایدار از نظر محاسباتی کارآمد است، اما ممکن است به مدل‌های بسته پیچیده برای در نظر گرفتن تعاملات ذرات نیاز داشته باشد [۱۸]. در مقابل، روش لاگرانژی ذرات منفرد یا بسته‌های نماینده ذرات را در میدان جریان ردیابی می‌کند و اطلاعات دقیقی در مورد مسیرها و رفتارهای ذرات ارائه می‌دهد. در حالی که این روش برای جریان‌های رقیق و شرایط گذرا دقیق‌تر است، برای سیستم‌هایی با تعداد زیادی ذره به منابع محاسباتی قابل توجهی نیاز دارد [۱۹]. در زمینه مدل‌سازی سایش در لوله‌ها به دلیل ذرات جامد، هر دو روش به کار گرفته شده‌اند و انتخاب بین آن‌ها به عواملی مانند غلظت ذرات، اندازه و ویژگی‌های خاص جریان بستگی دارد. به‌عنوان مثال، در سناریوهایی با غلظت بالای ذرات، روش اوپلری ممکن است مناسب‌تر باشد، در حالی که روش لاگرانژی برای جریان‌های رقیق یا زمانی که داده‌های دقیق برخورد ذرات ضروری است، ترجیح داده می‌شود.

مدل‌سازی سایش مبتنی بر دینامیک سیالات

محاسباتی (CFD)^۳ برای پیش‌بینی سایش در هندسه‌های پیچیده استفاده می‌شود. مقایسه سرعت و سایش ذرات محاسبه‌شده با داده‌های اندازه‌گیری شده در جریان آب و هوا نشان داده که مدل‌های سایش مرکز تحقیقات خوردگی-سایشی و مدل اوکا و همکاران از دقت بیشتری برخوردارند [۲۰-۲۲]. همچنین، روشی برای پیش‌بینی سایش در زانویی‌ها و سه‌راهه‌های مسدود شده با استفاده از داده‌های تجربی توسعه یافته و در کد CFD، CFX 4.2 پیاده‌سازی شده است [۲۳، ۲۴]. مطالعات دیگری شدت نسبی سایش در زانویی‌ها و سه‌راهه‌ها را در جریان‌های رقیق گاز-مایع-جامد بررسی کرده‌اند و نشان داده‌اند که نوع سیال حامل بر میزان سایش تأثیرگذار است [۲۵]. علاوه بر این، تأثیر شعاع انحنای زانویی بر سایش ناشی از برخورد ذرات مورد ارزیابی قرار گرفته و مشخص شده که شعاع خمیدگی بزرگ‌تر، سایش را کاهش می‌دهد [۲۶]. همچنین، جهت‌گیری زانویی بر حرکت ذرات و در نتیجه بر میزان سایش تأثیر دارد [۲۷].

مطالعات قبلی [۲۰-۲۷] درباره سایش در لوله‌های فولادی اغلب بر شبیه‌سازی‌های عددی متمرکز بوده‌اند، اما داده‌های تجربی کافی برای اعتبارسنجی این مدل‌ها ارائه نشده است. اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها نقش بسزایی در تعیین شیوه‌ای واقعی‌تر و صحیح‌تر برای شبیه‌سازی دارد و همچنین، فرآیند شبیه‌سازی را تأیید می‌کند. از این رو، وجود نتایج آزمایشگاهی که در شرایطی منطبق با شبیه‌سازی‌ها به‌دست آمده باشند، برای مقایسه و استخراج درصد خطا ضروری است.

در این پژوهش، مطالعه‌ای جامع برای بررسی سایش لوله‌های فولادی ST37 ناشی از ذرات جامد موجود در جریان گاز انجام شد. تمرکز اصلی این تحقیق بر آزمایش‌های تجربی بود که شامل برقراری جریان گاز حاوی ذرات جامد در یک لوله مستقیم و یک زانویی ۹۰ درجه و همچنین انجام آزمایش‌های سایش پین-روی-دیسک بر روی نمونه‌های فولادی ST37 بود. این آزمایش‌ها داده‌های لازم را برای اعتبارسنجی سه روش مدل‌سازی عددی، یعنی دینامیک سیالات محاسباتی

1. Two-Fluid Model
2. Lagrangian Particle Tracking
3. Computational Fluid Dynamics

(CFD)، مدل اولیری و مدل لاگرانژی، فراهم کردند. با مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط این مدل‌ها با داده‌های تجربی، دقت هر روش در پیش‌بینی سایش ارزیابی شد. این فرآیند اعتبارسنجی نقش مهمی در شناسایی روش مناسب برای تحلیل سایش در سیستم‌های لوله‌کشی دارد و می‌تواند به بهبود طراحی و استراتژی‌های نگهداری در صنعت نفت و گاز کمک کند که در نهایت منجر به کاهش هزینه‌های ناشی از آسیب‌های سایشی و افزایش ایمنی عملیاتی می‌شود.

۲. مطالعات CFD

در این پژوهش، از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به عنوان ابزاری کلیدی برای شبیه‌سازی و تحلیل رفتار جریان سیالات، به‌ویژه برهم‌کنش بین جریان گاز و ذرات جامد، استفاده شده است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی سایش فولاد ST37 در لوله‌های انتقال گاز به دلیل حضور ذرات جامد معلق در سیال است که می‌تواند عمر مفید تجهیزات را کاهش دهد. برای دستیابی به این هدف، شبیه‌سازی‌های CFD بر روی دو هندسه کلیدی انجام گرفت: یک لوله مستقیم و یک زانویی ۹۰ درجه که هر یک شرایط و چالش‌های متفاوتی را در انتقال گاز و ذرات جامد ارائه می‌دهند. این شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار FLUENT 6.3 انجام شده و از رویکردهای مختلف مدل‌سازی چندفازی برای تحلیل دقیق رفتار جریان و سایش استفاده شده است.

۱-۲. هندسه و شرایط جریان

دو هندسه متمایز برای تحلیل سایش لوله‌های فولادی ST37 در این مطالعه در نظر گرفته شده است: یک لوله مستقیم و یک زانویی ۹۰ درجه. این هندسه‌ها نماینده اجزای رایج در سیستم‌های انتقال گاز هستند و برای بررسی پدیده‌های مختلف مرتبط با سایش انتخاب شده‌اند.

- **لوله مستقیم:** این هندسه شامل یک لوله با طول ۱۰ متر و قطر ۵۶ اینچ (تقریباً ۱/۴۲ متر) است. در شبیه‌سازی‌ها، فرض شده است که ذرات جامد در ابتدا در کف لوله ته‌نشین شده‌اند و جریان گاز برای سیال‌سازی و حمل این ذرات وارد می‌شود.

سرعت‌های گاز از ۰/۵ تا ۳۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است تا تأثیر سرعت جریان بر رفتار ذرات، از جمله سیال‌سازی و خروج آن‌ها از لوله، بررسی شود. این هندسه برای مطالعه رفتار کلی ذرات در یک جریان مستقیم و اثرات آن بر سایش دیواره داخلی مناسب است.

- **زانویی ۹۰ درجه:** این هندسه دارای قطر ۵۶ اینچ و نسبت شعاع انحنا به قطر ۱/۵ است. زانویی‌ها به دلیل تغییر جهت جریان و تمرکز ذرات در دیواره خارجی، نقاط حساسی برای سایش هستند. این هندسه برای تحلیل دقیق برهم‌کنش ذرات با دیواره خارجی و پیش‌بینی نرخ سایش طراحی شده است. در شبیه‌سازی‌ها، ذرات با جریان گاز وارد زانویی شده و مسیر آن‌ها تحت تأثیر نیروهای جریان و گریز از مرکز بررسی می‌شود.

- **شرایط جریان:** شرایط جریان برای هر دو هندسه یکسان در نظر گرفته شده است تا امکان مقایسه نتایج فراهم شود. این شرایط شامل موارد زیر است:

۱. نرخ جریان گاز: SMMCF/H ۶۰۰ (میلیون فوت مکعب استاندارد بر ساعت).

۲. فشار عملیاتی: ۸۰ بار که نشان‌دهنده شرایط فشار بالا در خطوط انتقال گاز است.

۳. دما: ۴۰ درجه سانتی‌گراد که دمای عملیاتی استاندارد را بازنمایی می‌کند.

۴. خواص ذرات: ذرات جامد دارای چگالی ۲۳۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب و نرخ جریان جرمی ۰/۶ کیلوگرم بر ساعت هستند. توزیع اندازه ذرات بر اساس الک آزمایشگاهی^۱ تعیین شده است (جدول ۱) [۲۸].

این شرایط جریان و هندسه‌ها امکان تحلیل دقیق رفتار ذرات در سیستم‌های انتقال گاز و تأثیر آن‌ها بر سایش فولاد ST37 را فراهم می‌کنند. برای لوله مستقیم، تمرکز بر سیال‌سازی و حمل ذرات است، در حالی که برای زانویی، تمرکز بر برخورد ذرات با دیواره و سایش ناشی از آن است.

1. Woven Wire Test Sieve, WWTS

جدول ۱: توزیع اندازه و جرم ذرات [۲۸]

شماره دیسک توری	اندازه ذرات (μm)	جرم ذرات (gr)	(Wt%)
۶	۳۳۵.۰ < d	۱۴/۷۳	۷
۸	۲۳۶.۰ < d < ۳۳۵.۰	۱۷/۴۵	۸/۲
۱۲	۱۷۰.۰ < d < ۲۳۶.۰	۱۵/۶	۷/۴
۱۶	۱۱۸.۰ < d < ۱۷۰.۰	۱۹/۴	۹/۲
۲۰	۸۵.۰ < d < ۱۱۸.۰	۴۱	۱۹/۴
۳۰	۶۰.۰ < d < ۸۵.۰	۲۰/۹۴	۹/۹
۴۰	۴۲۵ < d < ۶۰۰	۱۵/۸۸	۷/۵
۵۰	۳۰۰ < d < ۴۲۵	۱۳/۱۸	۶/۱
۷۰	۲۱۲ < d < ۳۰۰	۱۲/۷۲	۶/۰
۱۰۰	۱۵۰ < d < ۲۱۲	۲۸/۴۲	۱۳/۵
۲۰۰	۱۲۵ < d < ۱۵۰	۱۲/۴۲	۵/۸

۲-۲. فرمول‌بندی ریاضی

در این معادله، $\bar{\tau}_s$ تنش برشی فاز جامد، P_s فشار جامد، ρ_s ضریب درگ بین فازی، α_s کسر حجمی فاز جامد، g شتاب چگالی فاز جامد، u_s سرعت فاز جامد، P فشار سیال، g شتاب گرانش و u_g سرعت فاز گاز هستند. تنش برشی فاز جامد $\bar{\tau}_s$ به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۹، ۲۸]:

$$\alpha_s \tau_s = -P_s I + \alpha_s \mu_s (\nabla u_s + (\nabla u_s)^T) + \alpha_s (\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s) \nabla u_k \quad (۳)$$

که در آن μ_s ویسکوزیته برشی جامد و λ_s ویسکوزیته حجمی جامد، \bar{A} تانسور واحد، u_k سرعت فاز k است. فشار جامد با معادله لون محاسبه می‌شود [۲۹، ۲۸]:

$$P_s = \alpha_s \rho_s \Theta_s + 2\rho_s (I + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \Theta_s \quad (۴)$$

در این معادله، e_{ss} ضریب بازیابی برای برخورد ذرات با مقدار پیش فرض ۰/۹ که نشان می‌دهد برخورد ذرات به برخورد الاستیک نزدیک است، $g_{0,ss}$ تابع توزیع شعاعی و Θ_s دمای ذره‌ای \bar{A} است. دمای ذره‌ای متناسب با انرژی جنبشی حرکت نوسانی ذرات است. معادله پایستگی برای دمای ذره‌ای عبارت است از [۲۹، ۲۸]:

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \Theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \Theta_s u_s) \right] = (-P_s \bar{A} + \bar{\tau}_s) : \nabla u_s - \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \Theta_s) - \gamma_{\theta_s} \quad (۵)$$

نرم‌افزار تجاری CFD و نرم‌افزار FLUENT ۶،۳ برای حل معادلات رینولدز میانگین ناویر-استوکس استفاده می‌شوند. برای ارزیابی تأثیر سرعت ورودی گاز بر الگوی سیال‌سازی ذرات، از چارچوب اویلری برای مدل‌سازی جریان گاز-جامد استفاده می‌شود. در این مدل، هر دو فاز (گاز و ذرات جامد) به عنوان فازهای پیوسته‌ای در نظر گرفته می‌شوند که به هم نفوذ می‌کنند. تأثیر فاز گاز پیوسته بر روی ذرات توسط نیروی درگ بین فازی تعیین می‌شود. سهم هر فاز در معادلات پیوستگی و مومنتوم توسط کسر حجمی آن فاز مشخص می‌گردد. معادلات فاز جامد از تئوری جنبشی جریان ذره‌ای^۱ به دست می‌آید. معادله پیوستگی برای هر فاز به صورت زیر است [۲۹، ۲۸]:

$$\frac{\partial (\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \bar{U}_k) = 0 \quad (۱)$$

در این معادله، \bar{U}_k سرعت فاز k ، ρ_k چگالی و α_k کسر حجمی آن فاز هستند. معادله تعادل مومنتوم برای فاز جامد به صورت زیر است [۲۹، ۲۸]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \bar{u}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \bar{u}_s \bar{u}_s) = -\alpha_s \nabla P - \nabla P_s + \nabla \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s g + \sum_{g=1}^n \beta_{gs} (\bar{u}_g - \bar{u}_s) \quad (۲)$$

1. Granular Flow
2. Granular Temperature





درگ بین فازها β_{gs} طبق معادله گیداسپو محاسبه می‌شود [۲۸، ۲۹]:

$$\beta_{Ergun} = 150 \frac{\alpha_s^2 \mu_g}{\alpha_s d_s^2} + 1.75 \frac{\alpha_s \rho_s}{d_s} |v - u| ; \alpha_s < 0.8 \quad (12)$$

ویسکوزیته جنبشی با استفاده از معادله گیداسپو محاسبه می‌شود [۲۸، ۲۹]:

$$\beta_{Wen-yu} = \frac{3}{4 C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g}{d_s} |v - u| \alpha_g^{-2.65}} ; \alpha_g \geq 0.8 \quad (13)$$

که در آن μ_g ویسکوزیته فاز گاز، ρ_g چگالی فاز گاز، α_g کسر حجمی فاز گاز، C_D ضریب پسا و $|v-u|$ اختلاف سرعت نسبی بین فازها است. هندسه مورد استفاده برای ارزیابی الگوی سیال سازی یک لوله ۱۰ متری با قطر ۵۶ اینچ است. فرض بر این است که ذرات در لوله ته‌نشین شده‌اند و تأثیر جریان گاز با سرعت ورودی مختلف روی بستر ذرات در نظر گرفته می‌شود.

۳. مطالعات اویلری

در دیدگاه اویلری که توسط اندرسون و جکسون [۲۲] معرفی شد، هر دو فاز سیال (گاز و ذرات) را به‌عنوان دو محیط پیوسته در نظر می‌گیرد که با یکدیگر در تعامل دینامیکی هستند. این رویکرد برخلاف روش لاگرانژی، به‌جای ردیابی تک‌تک ذرات، به توصیف کلی رفتار فاز پراکنده (ذرات) و فاز حامل (گاز) می‌پردازد. یکی از مزایای اصلی این روش، امکان استفاده مستقیم از روش‌های عددی توسعه‌یافته برای جریان‌های تک‌فاز و تعمیم آن‌ها به سیستم‌های دو فاز است. این امر با در نظر گرفتن تبادلات مومنوم، انرژی و آشفتگی بین دو فاز انجام می‌شود. اخیراً، تلاش‌هایی برای بهبود این روش با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته‌تر مانند شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) صورت گرفته است [۲۳].

با این حال، مدل‌های اویلری با چالش‌هایی مواجه هستند. یکی از اصلی‌ترین محدودیت‌ها، ناتوانی در توصیف دقیق برخورد ذرات با سطوح جامد (به‌ویژه نزدیک دیواره) است. این موضوع به دلیل عدم تفکیک‌پذیری کافی در نزدیکی مرزهای کنترل و نیاز به دقت بالاتر برای نمایش فرآیندهای ضربه و بازتاب ذرات است. شیرولکار، کویمبرا و مک‌کوی [۲۴] اشاره کرده‌اند که مدل‌های اویلری قادر به در نظر گرفتن اثرات

که در آن k_{θ_s} ضریب هدایت دمای ذره‌ای و γ_{θ_s} نرخ اتلاف انرژی ذره‌ای بر اثر برخورد ذرات است. عبارت $-\nabla(k_{\theta_s} \nabla \theta_s)$ شار انتشار انرژی ذره‌ای را توصیف می‌کند. نرخ اتلاف انرژی ذره‌ای در فاز جامد به دلیل برخورد بین ذرات (γ_{θ_s}) به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۸، ۲۹]:

$$\gamma_{\theta_s} = \frac{12(1 - e_{ss}^2) g_{0,ss}}{d_s \sqrt{\pi}} \alpha_s \rho_s \theta_s^{3/2} \quad (6)$$

در این رابطه، d_s قطر ذرات فاز جامد است. معادله لون برای عبارت است از [۲۸، ۲۹]:

$$g_{0,ss} = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right) \right]^{-2.5} \alpha_{s,max} \quad (7)$$

که در آن $\alpha_{s,max}$ حداکثر کسر حجمی فاز جامد در حالت حد تراکم یا چگالی بسته‌بندی ذرات است. ویسکوزیته برشی جامد به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۸، ۲۹]:

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fric} \quad (8)$$

در این معادله، $\mu_{s,col}$ ویسکوزیته برخوردی جامد، $\mu_{s,kin}$ ویسکوزیته جنبشی جامد و $\mu_{s,fric}$ ویسکوزیته اصطکاکی جامد است. بخش اصطکاکی ویسکوزیته جامد تنها زمانی مهم است که کسر حجمی جامد به حد تراکم $\alpha_{s,max}$ نزدیک شود. ویسکوزیته برخوردی جامد عبارت است از [۲۸، ۲۹]:

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (9)$$

ویسکوزیته جنبشی با استفاده از معادله گیداسپو محاسبه می‌شود [۲۸، ۲۹]:

$$\mu_{s,kin} = \frac{10 d_s \rho_s \sqrt{\theta_s \pi}}{96 \alpha_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[1 + \frac{4}{5} \alpha_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \right]^2 \quad (10)$$

ویسکوزیته حجمی فاز جامد با معادله لون داده می‌شود [۲۸، ۲۹]:

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (11)$$

ویسکوزیته حجمی جامد نشان‌دهنده مقاومت ذرات در برابر فشردگی و انبساط است. ضریب



تاریخچه‌ای حرکت ذرات نیستند، زیرا مسیرهای منفرد ذرات را دنبال نمی‌کنند. علاوه بر این، با افزایش لختی ذرات (که با عدد استوکس بالاتر مشخص می‌شود)، دقت این روش کاهش می‌یابد، زیرا مسیرهای متقاطع ذرات برجسته‌تر می‌شوند.

برای غلبه بر برخی از این چالش‌ها، تو و فلچر [۲۵] یک چارچوب اولیری با شرایط مرزی بهبودیافته برای برخورد ذره-دیواره ارائه کردند. این مدل با در نظر گرفتن انتقال مومنوم بین ذرات و دیواره، نتایج همخوانی خوبی با داده‌های تجربی نشان داد. این رویکرد در مطالعات بعدی، مانند تحلیل جریان ذرات در آرایه‌های لوله‌ای [۲۶] و زانوی مربعی [۲۵]، با موفقیت به کار گرفته شد. در این پژوهش‌ها، از یک اتصال دوطرفه بین فاز گاز و ذرات استفاده شد که امکان بررسی دقیق‌تر انتقال مومنوم و آشفتگی در سطح دو فاز را فراهم کرد.

یکی از نکات قابل توجه در این مقاله، عدم استفاده از نظریه جنبشی جریان‌های ذره‌ای است. این نظریه عمدتاً در سیستم‌های با تراکم بالا و تنش‌های برخوردی قابل اعمال است، در حالی که جریان مورد بررسی در این مطالعه رقیق بوده و اتلاف انرژی عمدتاً از طریق ویسکوزیته آشفتنه ذرات مدل‌سازی شده است. این رویکرد به دلیل سادگی و کارایی محاسباتی، برای سیستم‌های رقیق مناسب‌تر است.

۳-۱. هندسه و شرایط جریان

هدف از شبیه‌سازی اولیری، بررسی الگوی سیال‌سازی ذرات جامد ته‌نشین شده در یک لوله مستقیم تحت تأثیر جریان گاز با سرعت‌های مختلف است. هندسه مورد استفاده یک لوله مستقیم با طول ۱۰ متر و قطر ۵۶ اینچ است. در ابتدای شبیه‌سازی، فرض شده است که ذرات جامد در کف لوله ته‌نشین شده‌اند و جریان گاز آن‌ها را به حرکت درمی‌آورد. شرایط استاندارد جریان شامل نرخ جریان گاز ۶۰۰ مترمکعب استاندارد در ساعت (SMMCF/H)، فشار ۸۰ بار و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد است.

ذرات جامد دارای چگالی ۲۳۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب و نرخ جریان جرمی ۰/۶ کیلوگرم بر ساعت هستند. توزیع اندازه ذرات بر اساس داده‌های تجربی با استفاده از الک‌های سیمی استاندارد تعیین شده است که جزئیات آن در (جدول ۱) ارائه شده است. این شرایط امکان بررسی دقیق رفتار ذرات تحت تأثیر سرعت‌های مختلف گاز را فراهم می‌کند.

۳-۲. فرمول‌بندی ریاضی

روش اولیری هر دو فاز گاز و جامد را به‌عنوان محیط‌های پیوسته در نظر می‌گیرد که از طریق نیروهای بین‌فازی مانند نیروی کشش با یکدیگر برهم‌کنش دارند. این روش برای مدل‌سازی جریان‌های دوفازی با کسر حجمی قابل توجه هر دو فاز مناسب است. معادلات حاکم بر این سیستم با استفاده از نرم‌افزار FLUENT 6.3 حل شده‌اند که فرمول‌بندی این روش مشابه با فرمول‌بندی CFD در نظر گرفته شده است.

۴. مطالعات لاگرانژی

در دیدگاه لاگرانژی، رفتار هر ذره به‌صورت مجزا ردیابی می‌شود که امکان توصیف دقیقی از سرعت، مسیر حرکت و زاویه برخورد ذرات را فراهم می‌آورد. این رویکرد به‌ویژه در تحلیل پدیده‌های مرتبط با ذرات منفرد کارآمد است. با این حال، در مسائل چندبعدی و سیستم‌های دارای برهم‌کنش‌های آشفتنه بین دو فاز (مانند اتصال دوطرفه)، پیچیدگی محاسباتی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. این موضوع نیاز به درک عمیق از مکانیزم‌های تعاملی بین ذرات را ضروری می‌سازد [۱۳]. علاوه بر این، در جریان‌های با تراکم ذرات بالا، چالش‌هایی مانند هزینه محاسباتی قابل توجه به دلیل نیاز به ردیابی تعداد زیادی ذره برای دستیابی به داده‌های آماری معتبر پدید می‌آید [۲۷]. در پژوهش حاضر، با بهینه‌سازی محاسبات بر پایه ایستگاه‌های کاری، زمان اجرا تا حد قابل قبولی کاهش یافته و کارایی روش حفظ شده است.

مدل گام تصادفی گسسته (DRW)^۱ به‌عنوان چارچوب اصلی در روش لاگرانژی این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل، حرکت آشفتنه ذرات را از طریق برهم‌کنش با گرداب‌های سیال ایده‌آل شبیه‌سازی می‌کند. پارامترهای کلیدی این گرداب‌ها شامل سرعت متوسط سیال، نوسانات سرعت آشفتنه لحظه‌ای و طول عمر گرداب هستند. در این مدل، نوسانات سرعت آشفتنه با توزیع گاوسی به‌سرعت متوسط حاصل از حل معادلات (RANS)^۲

1. The Discrete Random Walk Model
2. Reynolds-averaged Navier–Stokes

افزوده می‌شود. طول عمر گرداب نیز به‌عنوان بازه زمانی تعامل ذره با گرداب تعریف می‌گردد. نکته حائز اهمیت آن است که زمان تعامل ذره معمولاً کوتاه‌تر از طول عمر گرداب است که نشانگر اثرات گذرای مسیر حرکت است. در هر گام زمانی، سرعت ذره ثابت فرض شده و موقعیت جدید آن محاسبه می‌شود. در گام بعدی، نوسانات سرعت محلی سیال برای به‌روزرسانی مسیر ذره اعمال می‌گردد.

ستون اول از سمت راست در (شکل ۳) تغییرات اشباع آب حاصل از استفاده از ضریب سیمان‌شدگی ثابت (نمودار قرمز رنگ) و متغیر (نمودار مشکی رنگ) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، اختلاف مقادیر به‌دست‌آمده از طریق دو روش در بخش‌های واجد اشباع آب بالا، بیشتر می‌باشد. با اینکه میزان تغییرات در بخش‌های واجد هیدروکربن اقتصادی کم‌تر است (حدود ۵ درصد)، لیکن همین تغییرات اندک می‌تواند اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای را در تخمین‌های حجمی ذخایر ایجاد نماید؛ بنابراین، استفاده از مقادیر ضریب سیمان‌شدگی متغیر برای سازنده‌های کربناته با توجه به‌دقت بالاتر آن، ضرورت دارد. به‌عنوان مثال، عمق ۲۷۷۹ متر مشخص‌شده با فلش آبی‌رنگ در (شکل ۳) با فرض یکسان بودن مابقی حدود برش، بر اساس خروجی اشباع آب حاصل از ضریب سیمان‌شدگی ثابت، به اشتباه، بخشی از زون مخزنی تشخیص داده خواهد شد در صورتی که با محاسبه اشباع آب از طریق معادله بورای، غیرمخزنی خواهد بود. این مهم زمانی که اختلاف در مرز سطوح سیالات باشد از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد بود زیرا بر برنامه‌های تولیدی نظیر عملیات سوراخ‌کاری تأثیرگذار خواهد بود.

زون‌های مخزنی شناسایی‌شده از طریق اعمال ضریب سیمان‌شدگی ثابت و متغیر در (شکل ۴) باهم مقایسه شده‌اند. در این شکل، ستون اول از سمت راست بیانگر نتایج به‌دست آمده با در نظر گرفتن ضریب سیمان‌شدگی ثابت و ستون دوم از سمت راست مربوط به حالتی است که ضریب سیمان‌شدگی به‌صورت متغیر اعمال شده است. همان‌طور که مشخص است، نتایج حاصل از دو روش در بیشتر بخش‌ها مشابه است، اما در مرز سطوح سیالات اختلافاتی مهم در خروجی دو روش دیده می‌شود (مشخص‌شده با فلش آبی‌رنگ در شکل ۴). در اعماق ۲۷۶۹ الی ۲۷۷۰ متر استفاده از ضریب سیمان‌شدگی ثابت باعث شده است که این محدود زون مخزنی تشخیص داده شود لیکن روش ضریب سیمان‌شدگی متغیر این بخش

را غیرمخزنی معرفی می‌نماید و بر همین اساس، ضخامت زون مخزنی ابتدای سروک ۳ کاهش یافته است. این مهم در مورد مرز آب-نفت زون ضخیم مخزنی سروک ۳ و ۴ نیز صادق می‌باشد. در این موقعیت‌ها، با توجه به کاهش نگاره مقاومت الکتریکی عمیق، وجود ذخایر هیدروکربنی اقتصادی منطقی به‌نظر نمی‌رسد که این مهم مؤید صحت نتایج ضریب سیمان‌شدگی متغیر می‌باشد.

۴-۱. هندسه و شرایط جریان

هدف از شبیه‌سازی‌های لاگرانژی، بررسی رفتار ذرات جامد در یک زانویی ۹۰ درجه و تأثیر آن‌ها بر سایش دیواره خارجی است. هندسه مورد مطالعه یک زانویی ۹۰ درجه با قطر ۵۶ اینچ و نسبت شعاع انحنا به قطر ۱/۵ است. این هندسه به دلیل تغییر جهت جریان و تمرکز ذرات در دیواره خارجی، یکی از نقاط بحرانی برای سایش در سیستم‌های انتقال پنوماتیکی محسوب می‌شود. زانویی‌ها در خطوط لوله نفت و گاز به‌طور گسترده استفاده می‌شوند و درک دقیق رفتار ذرات در این اجزا برای طراحی بهینه و کاهش هزینه‌های نگهداری ضروری است.

شرایط جریان برای شبیه‌سازی شامل سرعت ورودی گاز ۳۳ متر بر ثانیه است که نشان‌دهنده شرایط عملیاتی عادی در خطوط لوله گاز است. نرخ جریان گاز ۶۰۰ مترمکعب استاندارد در ساعت (SMMCF/H)، فشار عملیاتی ۸۰ بار و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. ذرات جامد با چگالی ۲۳۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب و نرخ جریان جرمی ۰/۶ کیلوگرم بر ساعت شبیه‌سازی شده‌اند. توزیع اندازه ذرات با استفاده از تابع روزین-راملر مدل‌سازی شده است که پارامترهای آن (قطر متوسط و ضریب پراکندگی) بر اساس داده‌های تجربی تعیین شده‌اند. این تابع امکان بازنمایی دقیق توزیع اندازه ذرات در سیستم را فراهم می‌کند و برای شبیه‌سازی‌های صنعتی مناسب است.

ذرات به‌صورت کروی فرض شده‌اند و برهم‌کنش آن‌ها با دیواره زانویی برای محاسبه نرخ سایش مدل‌سازی شده است. شرایط مرزی شامل ورودی سرعت یکنواخت برای فاز گاز و خروجی فشار ثابت است. دیواره‌های زانویی به‌عنوان شرایط بدون لغزش برای فاز گاز و با ضریب بازتاب برای ذرات جامد تعریف شده‌اند. این شرایط امکان شبیه‌سازی واقع‌گرایانه جریان گاز-جامد و برهم‌کنش ذرات با دیواره را فراهم می‌کند.





۲-۴. فرمول‌بندی ریاضی

بالای گاز (۳۳ متر بر ثانیه) و نرخ کرنش زیاد سیال نزدیک به دیواره لوله، از مدل Realizable k-ε برای مدل‌سازی آشفتگی فاز گاز استفاده شده است [۲۸، ۳۲].

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_g k_g) + \nabla \cdot (\rho_g k_g \bar{U}_g) \\ & = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\rho_{t,g}}{\sigma_k} \right) \nabla k_g \right] + G_{k,g} - \rho_g \varepsilon_g \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \varepsilon_g) + \nabla \cdot (\rho_g \varepsilon_g \bar{U}_g) \\ & = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_{t,g}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon_g \right] + \varepsilon_g \left(-\rho_g C_2 \frac{\varepsilon_g}{k_g + \sqrt{v_g \varepsilon_g}} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

در این معادلات، σ_k و σ_ε اعداد پرانتل آشفتگی و $\mu_{t,g}$ ویسکوزیته آشوبناک، k_g انرژی جنبشی آشوبناک و ε_g نرخ اتلاف آشوبناک هستند. ویسکوزیته آشوبناک (μ_t) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (22)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (23)$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij}} \quad (24)$$

$$A_0 = 4.04, A_S = \sqrt{6} \cos \phi \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \phi & = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W), W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\bar{S}^3}, \bar{S} \\ & = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

معادله تعادل مومنوم برای فاز گاز [۲۸، ۳۱]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \bar{U}_g) + \nabla \cdot (\rho_g \bar{U}_g \bar{U}_g) \\ & = \nabla P + \nabla \bar{\tau}_g + F_D + \rho_g g \end{aligned} \quad (27)$$

در این معادله، \bar{U}_g سرعت فاز گاز، $\bar{\tau}_g$ تنش برشی فاز گاز و F_D نیروی درگ است. نرخ سایش در مرزهای دیواره را می‌توان با ترکیبی جدید از مدل وابسته به زاویه تالسا همراه با مدل هوزر و کوئرولند [۲۰، ۲۱] ارزیابی کرد:

$$ER = 1559 B^{-0.59} F_s v^n F(\alpha) \quad (28)$$

که در این رابطه، ER نشان‌دهنده نرخ سایش، B سختی برینل، F_s ضریب شکل ذره، v سرعت نسبی ذره و $F(\alpha)$ تابع چندجمله‌ای مرتبه پنجم از زاویه برخورد هستند. نرخ سایش با فرض شرط مرزی بازتابی دیواره محاسبه می‌شود. برای ذرات جامد کاملاً گرد مواد فولادی، n برابر ۲/۶ و F_s برابر ۰/۲ می‌باشد.

برای در نظر گرفتن تأثیر توزیع اندازه ذرات بر حرکت و مسیر حرکت ذرات از چارچوب لاگرانژی برای مدل‌سازی جریان رقیق گاز-جامد استفاده می‌شود. ذرات در حال جریان در خط لوله اصلی گاز با استفاده از الک بافته شده، جمع‌آوری و آنالیز شده‌اند تا توزیع اندازه و جرم ذرات مشخص شود (جدول ۱). تابع توزیع ریزین-راملر برای تعیین سهم ذرات با اندازه‌های مشخص به کار رفته است. سهم جرمی ذرات با قطر بزرگ‌تر از d از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۲۸، ۳۰]:

$$Y_d = e^{-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n} \quad (14)$$

در این رابطه، n پارامتر توزیع اندازه و \bar{d} ثابت اندازه است. مسیر حرکت یک ذره فاز گسسته با انتگرال‌گیری از تعادل نیروی وارد بر ذره پیش‌بینی می‌شود. این تعادل نیرو، لختی ذره را با نیروهای وارد بر آن برابر می‌کند و (برای جهت x در مختصات کارتزین) به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۸، ۳۱]:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (15)$$

اینجا u_p سرعت ذره، F_D نیروی درگ، g_x شتاب گرانش در جهت x، ρ_p چگالی ذره و ρ چگالی سیال است. نیروی درگ وارد شده بر ذره (F_D) با معادله (۱۶) به دست می‌آید [۲۸، ۳۰]:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} (u - u_p) \quad (16)$$

در این معادله، μ ویسکوزیته سیال، d_p قطر ذره، C_D ضریب پسا، Re عدد رینولدز ذره و u سرعت سیال است. ضریب پسا (C_D) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (17)$$

و عدد رینولدز ذره به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho d_s |u - u_p|}{\mu} \quad (18)$$

مسیر ذرات با انتگرال‌گیری از (معادله ۱۹) محاسبه می‌شود [۲۸، ۳۱]:

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (19)$$

پراکندگی ذرات ناشی از آشفتگی فاز گاز با مدل گام تصادفی گسسته در نظر گرفته می‌شود. به دلیل سرعت

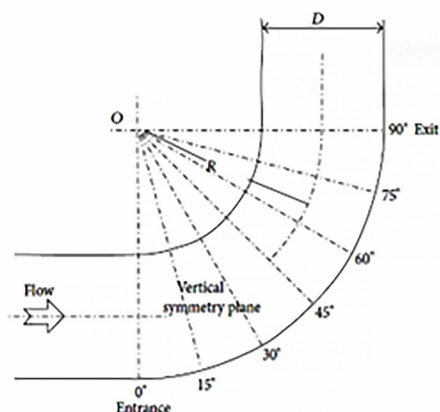
۴-۲-۱. اعتبارسنجی فرمول بندی ریاضی

داده‌های تجربی منتشر شده [۳۳] برای اعتبارسنجی مدل ریاضی مبتنی بر چارچوب لاگرانژی برای مدل‌سازی جریان رفیق گاز-جامد از طریق یک خمیدگی ۹۰ درجه کانال منحنی استفاده شد. خمیدگی منحنی مقطع مربعی (۱۵ سانتی‌متر در ۱۵ سانتی‌متر) است و دارای شعاع انحنای R معادل ۱/۵ برابر قطر هیدرولیک مجرای D (۲/۵ سانتی‌متر) است. اندازه‌گیری‌های فاز گاز با استفاده از یک سرعت‌سنج لیزری دوپلر (LDA) در سرعت حجمی گاز، V_B معادل ۱۰ متر بر ثانیه در غیاب فاز جامد به دست آمد. فاز جامد که کره‌های شیشه‌ای با قطر متوسط ۶۶ میکرومتر است، از بستر سیال‌سازی شده به جریان وارد شد. نسبت بارگذاری جرمی جامدات به گاز به خوبی زیر ۱ درصد است، به طوری که یک رژیم جریان رفیق گاز-جامد را ایجاد کند.

پروفیل‌های سرعت شعاعی گاز و ذرات با داده‌های اندازه‌گیری مشابه که از صفحه‌های مقطع عرضی مختلف از طریق خمیدگی مربعی به دست آمده است، مقایسه می‌شوند (شکل ۱). در (شکل ۲) توزیع شعاعی پیش‌بینی شده سرعت گاز با داده‌های تجربی مقایسه شده است. فاصله شعاعی r ، با معادله (۲۹) محاسبه می‌شود:

$$r = R + \frac{D}{2} - r^* \quad (29)$$

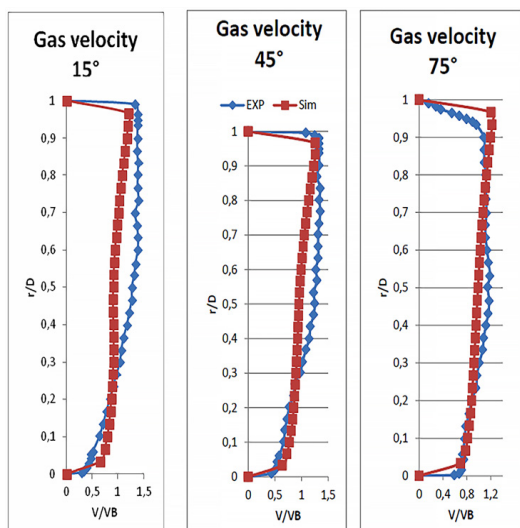
که در آن R شعاع انحنای مجرا، D قطر هیدرولیک مجرا و r^* فاصله هر نقطه‌ای روی یک صفحه مقطع عرضی خاص از مبدأ است.



شکل ۱: نمای عرضی سطح مقطع خمیدگی [۳۴]

همان‌طور که در (شکل ۲) مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه صفحه مقطع عرضی، انطباق بیشتری بین پروفایل‌های پیش‌بینی شده و پروفایل‌های اندازه‌گیری شده حاصل می‌شود. این موضوع می‌تواند به دلیل کاهش مؤلفه شعاعی سرعت گاز

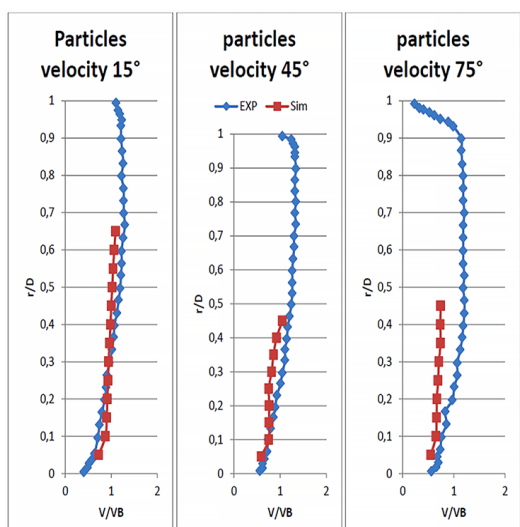
باشد. در این شکل، منحنی آبی مربوط به داده‌های تجربی و منحنی قرمز نتایج حاصل از معادلات ریاضی ارائه شده در این پژوهش است [۲۸، ۳۳].



شکل ۲: توزیع شعاعی سرعت گاز بر روی صفحه‌های مقطع عرضی. منحنی آبی (EXP): داده‌های تجربی [۳۳]؛ منحنی قرمز (Sim):

نتایج معادلات ریاضی [۲۸]

همان‌طور که در (شکل ۳) نشان داده شده است، توزیع شعاعی پیش‌بینی شده سرعت ذرات با اندازه‌گیری‌های تجربی مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، نتایج پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که پروفیل سرعت ذرات به دیواره داخلی ادامه پیدا نمی‌کند. این به دلیل مؤلفه شعاعی سرعت گاز است که باعث حرکت ذرات به سمت دیواره خارجی خمیدگی می‌شود [۲۸، ۳۳]. (شکل ۴) بردارهای سرعت شعاعی گاز داخل خمیدگی را نشان می‌دهد.

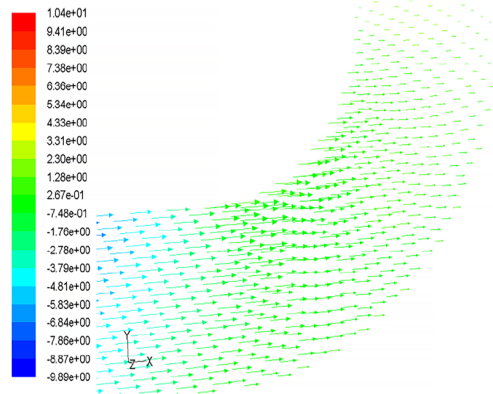


شکل ۳: توزیع شعاعی سرعت ذرات بر روی صفحه‌های مقطع عرضی. منحنی آبی (EXP): داده‌های تجربی [۳۳]؛ منحنی قرمز

۱. Laser Doppler Anemometry

۵-۱. معرفی فولاد ST37

فولاد ST37، یک فولاد ساختمانی کم‌کربن، به دلیل خواص مکانیکی مناسب و هزینه اقتصادی، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف، به‌ویژه در ساخت لوله‌های انتقال نفت و گاز، سازه‌های فلزی و تجهیزات صنعتی دارد. این فولاد که با استاندارد DIN ۱۹۸۰:۱۷۱۰۰ تعریف شده و امروزه تحت نام S235JR (EN 10025-2:2004) شناخته می‌شود، دارای استحکام تسلیم حداقل 235 N/mm^2 و مقاومت کششی 360 N/mm^2 است. شکل‌پذیری بالا و قابلیت جوشکاری آن، این ماده را برای پروژه‌های بزرگ صنعتی ایده‌آل می‌کند. در این مطالعه، یک ورق فولاد ST37 با ابعاد ۲ متر طول، ۱ متر عرض و ضخامت ۲ میلی‌متر از شرکت لوله‌سازی اهواز تهیه شد. جهت‌های نورد و عرضی ورق برای بررسی دقیق خواص مکانیکی و تغییرات ریزساختاری مشخص شدند. نمونه‌ای به ابعاد $25/4 \times 25/4$ میلی‌متر از گوشه ورق با استفاده از دستگاه برش الماسی Struers Sectom-10 جدا شد و برای تحلیل ترکیب شیمیایی به آزمایشگاه متالورژی شریف جهاد ارسال گردید. ترکیب شیمیایی این فولاد مطابق با استاندارد MIL-S-16216K در (جدول ۲) ارائه خواهد شد.



شکل ۴: بردارهای سرعت شعاعی گاز [۳۵]

۵. آزمایش‌های فولاد ST37

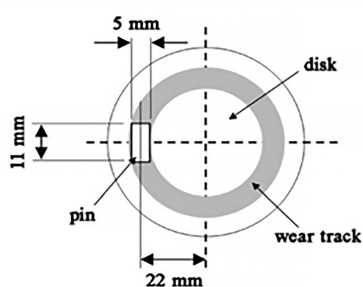
این بخش به بررسی آزمایش‌های انجام‌شده بر روی فولاد ST37 برای ارزیابی خواص مکانیکی و مقاومت سایشی آن اختصاص دارد. فولاد ST37 به دلیل کاربرد گسترده در صنایع نفت و گاز، به‌ویژه در ساخت لوله‌های انتقال، مورد توجه قرار گرفته است. آزمایش‌های انجام‌شده شامل تحلیل ترکیب شیمیایی و تست سایش به روش پین روی دیسک است که نتایج آن‌ها برای اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی شده و

جدول ۲: ترکیب شیمیایی ST37

Mn	Si	C	Fe	St 37
۰/۴۴۵	۰/۰۶۵۷	۰/۱۳۱	پایه	مقدار
Cr	S	P	Mn	St 37
۰/۰۲۰۸	۰/۰۲۰۷	۰/۰۰۹۲	۰/۴۴۵	مقدار
Co	Al	Mo	Ni	St 37
۰/۰۰۴۵	۰/۰۴۰۳	۰/۰۰۲۳	۰/۰۲۸۶	مقدار
V	Ti	Nb	Cu	St 37
۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۰۰۷۲	۰/۰۶۱۶	مقدار
As	Sn	Pb	W	St 37
۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۴۹	مقدار
			Zr	St 37
			۰/۰۰۰۵۴	مقدار

۵-۲. نوع دآزمایش

به مدت ۲۰۰۰ ثانیه انجام شد. سطح دیسک قبل از آزمایش با کاغذ سمباده تا گرید ۱۰۰۰ صیقل داده شد تا شرایط یکنواخت ایجاد شود. وزن دیسک قبل و بعد از آزمایش با ترازوی دقیق (±۱ میلی گرم) اندازه گیری شد تا کاهش وزن ناشی از سایش محاسبه گردد. ضریب اصطکاک نیز با استفاده از حسگر تنش دستگاه ثبت شد. برای اطمینان از صحت نتایج، هر آزمایش سه بار تکرار شد. دستگاه آزمایش سایش و پیکربندی پین روی دیسک به ترتیب در (شکل های ۵ الف و ب) نشان داده شده اند.



(ب)



(الف)

شکل ۵: (الف) دستگاه سایش، (ب) پیکربندی دستگاه تست سایش پین روی دیسک

۶. بررسی تأثیر دما و فشار بر نرخ سایش لوله ها در شرایط عملیاتی

آن ها با دیواره کمتر می شود؛ بنابراین سایش کاهش می یابد. با این حال، در دماهای بسیار پایین ممکن است تنش های حرارتی در ساختار سطحی لوله به وجود آید که خود می تواند موجب ایجاد ترک های موضعی و تخریب سطح شود.

در خصوص افزایش فشار، باید توجه داشت که فشار بالاتر با افزایش سرعت سیال همراه است که این موضوع انرژی جنبشی ذرات را افزایش می دهد و در نتیجه برخوردهای شدیدتری با سطح داخلی لوله ایجاد می کند. این شرایط اغلب در نواحی با جریان های مغشوش تشدید شده و به سایش موضعی و متمرکز منجر می گردد.

در مقابل، کاهش فشار می تواند سرعت جریان و شدت برخوردهای ذرات با دیواره را کاهش دهد که به کاهش سایش منجر می شود. با این وجود، اگر فشار بیش از حد کاهش یابد، ممکن است جریان دچار ناپایداری شود و شرایط دینامیکی خاصی به وجود آید که به نوعی دیگر از سایش های غیرخطی یا غیرمنتظره منجر شود [۳۶].

اثر افزایش یا کاهش فشار و دمای سیال بر میزان سایش سطح داخلی لوله به عوامل متعددی بستگی دارد؛ از جمله جنس لوله، نوع و اندازه ذرات جامد معلق در سیال، سرعت جریان و شرایط کلی بهره برداری. در این مطالعه، تحلیل های تجربی و مدل سازی های عددی (CFD) برای بررسی این متغیرها انجام شده است و نتایج کلی به شرح زیر قابل بیان است:

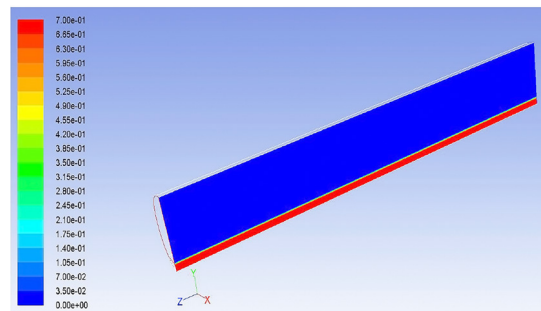
افزایش دما می تواند به کاهش ویسکوزیته سیال منجر شود که این کاهش باعث تسهیل حرکت ذرات جامد و افزایش احتمال برخورد آن ها با دیواره داخلی لوله می شود؛ نتیجه این فرایند، افزایش نرخ سایش خواهد بود. از سوی دیگر، دمای بالا ممکن است خواص مکانیکی ماده لوله، به ویژه سختی سطح را تضعیف کند که این امر نیز آسیب پذیری در برابر سایش را افزایش می دهد. کاهش دما معمولاً موجب افزایش ویسکوزیته سیال می شود که در نتیجه، حرکت ذرات کندتر شده و برخورد

۷. نتیجه گیری

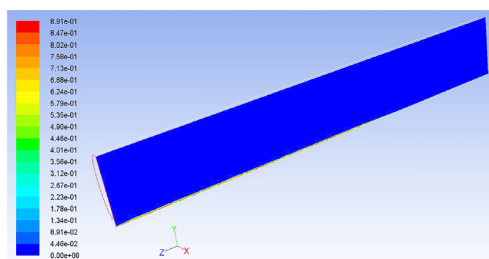
۷-۱. نتایج مدل اویلری-CFD (لوله مستقیم)

عبدالکریمی و همکاران [۲۸، ۳۵]، سیال سازی ذرات جامد در جریان گاز درون یک خط لوله گاز به طول ۱۰ متر و قطر ۵۶ اینچ با سرعت های گاز مختلف بر اساس فرمول بندی اویلری مورد بررسی قرار دادند. در این شبیه سازی، فرض شده که ذرات جامد در ابتدا در کف لوله ته نشین شده و جریان گاز از روی آنها عبور می کند (شکل ۶). (شکل ۷) الگوی جریان سیال ایجاد شده توسط ذرات را در سرعت های ورودی گاز مختلف پس از گذشت زمان کافی از شروع جریان گاز نشان می دهد. در سرعت گاز ورودی ۰/۵ متر بر ثانیه، ذرات جامد سیال می شوند. برای سرعت های گاز بالاتر از ۰/۵ متر بر ثانیه، ذرات توسط

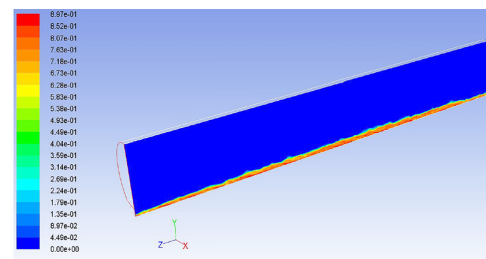
جریان گاز حرکت می کنند. هر چه سرعت حجمی گاز بیش تر باشد، سرعت حرکت ذرات نیز افزایش می یابد. همان طور که در (شکل ۷) مشاهده می شود، در سرعت ورودی گاز ۱ متر بر ثانیه پس از ۱۳۴ ثانیه، بیشتر ذرات از لوله خارج می شوند. با افزایش سرعت ورودی گاز، می توان دید که اگر منبع تولید کننده ذرات جامد در لوله وجود نداشته باشد، کل ذرات به طور کامل خارج می شوند و هیچ ذره سیال شده ای در داخل لوله باقی نمی ماند. با کم ترین سرعت جریان گاز (۳۳ متر بر ثانیه)، می توان نتیجه گرفت که بدون هیچ منبع تولید کننده ذرات جامد، پس از چند دقیقه هیچ ذره ای داخل لوله وجود نخواهد داشت.



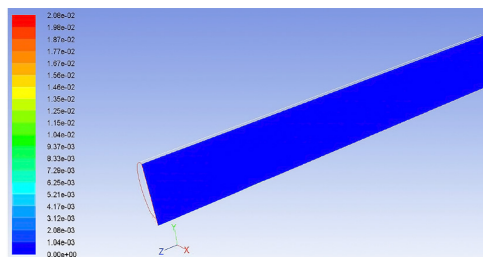
شکل ۶: خطوط اولیه کسر حجمی ذرات جامد در لوله [۳۵]



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۷: خطوط کسر حجمی ذرات؛ الف) در سرعت گاز ۰/۵ متر بر ثانیه پس از ۱۴۰ ثانیه، ب) در سرعت گاز ۱ متر بر ثانیه پس از ۱۳۴ ثانیه، ج) در سرعت گاز ۶ متر بر ثانیه پس از ۴۲ ثانیه [۳۵]

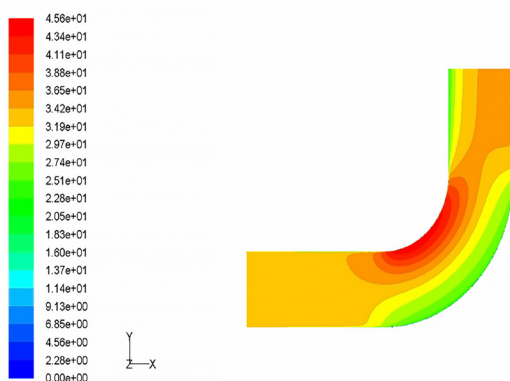
۲-۷. بنتایج مدل لاگرانژی-CFD (زانویی ۹۰ درجه)

در مدل‌سازی دیگر توسط عبدالکریمی و همکاران [۳۵، ۲۸]، جریان ذرات با توزیع اندازه ذرات درون یک زانویی ۹۰ درجه با نسبت شعاع به قطر لوله ۱/۵ و قطر لوله ۵۶ اینچ با استفاده از رویکرد لاگرانژی مورد تحلیل قرار گرفته است. توزیع اندازه ذرات از داده‌های تجربی (جدول ۱) به دست آمده و با استفاده از تابع توزیع روزین-راملر در نظر گرفته شده است. میزان جرمی ذرات با قطر بزرگ‌تر از d با Y_d نشان داده شده و (جدول ۳) رابطه بین d و Y_d را طبق (جدول ۱) توضیح می‌دهد (محاسبه شده بر اساس معادله ۱۴).

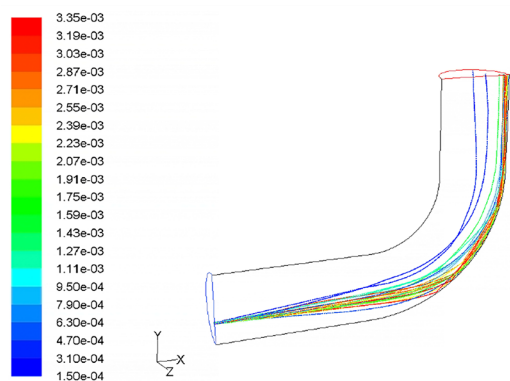
در این مدل‌سازی، سرعت جریان جرمی ذرات برابر با ۰/۶ کیلوگرم بر ساعت در نظر گرفته شده و این مقدار مطابق با توزیع جرمی، میان ذرات با اندازه‌های مختلف تخصیص داده شده است (جدول ۳). (شکل ۸) خطوط تراز سرعت گاز را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداکثر سرعت گاز در نزدیکی دیواره داخلی زانو رخ می‌دهد و مؤلفه شعاعی سرعت گاز باعث حرکت ذرات (به خصوص ذرات بزرگ) به سمت دیواره خارجی می‌شود. مسیر حرکت ذرات بر اساس قطر آن‌ها در (شکل ۹) نشان داده شده است. الگوی پراکندگی ذرات جامد به اندازه آن‌ها بستگی دارد و در (شکل ۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ذرات بزرگ‌تر به دلیل مؤلفه شعاعی سرعت گاز به سمت دیواره خارجی زانو حرکت می‌کنند. در (شکل ۱۱) توزیع اندازه ذرات در مقاطع عرضی مختلف بر اساس (معادله ۲۷) در برابر فاصله شعاعی نسبی ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که در دیواره خارجی ($r/D=0$)، میانگین قطر ذرات نسبت به میانگین قطر ذرات در دیواره داخلی ($r/D=1$) بزرگ‌تر است که با آنچه در مورد (شکل ۱۰) گفته شد مطابقت دارد. همان‌طور که از (شکل ۱۱) می‌توان دید، در مقطع عرضی ۱۵ درجه ذرات کوچکی در نزدیکی دیواره داخلی زانو وجود دارد. این صفحه در ناحیه‌ای قرار دارد که مؤلفه شعاعی سرعت گاز شروع به افزایش می‌کند و هنوز به رشد نهایی خود نرسیده است. (شکل ۱۲) توزیع سرعت متوسط ذرات را در هر صفحه نشان می‌دهد. تغییر سرعت ذرات در هر صفحه تقریباً به یک خط مستقیم نزدیک است. با افزایش زاویه صفحه، شیب تغییرات سرعت افزایش می‌یابد. این به دلیل افزایش سرعت گاز در بخش عمودی زانو است.

جدول ۳: مقادیر تابع توزیع Y_d برای ذرات جامد معلق در سیال برحسب قطر ذرات (μm) [۲۸]

قطر (μm)	Y_d
۱۵۰	۰/۹۴۲
۲۱۲	۰/۸۰۷
۳۰۰	۰/۷۴۷
۴۲۵	۰/۶۸۶
۶۰۰	۰/۶۱۱
۸۵۰	۰/۵۱۲
۱۱۸۰	۰/۳۱۸
۱۷۰۰	۰/۲۲۶
۲۳۶۰	۰/۱۵۲
۳۳۵۰	۰/۰۷

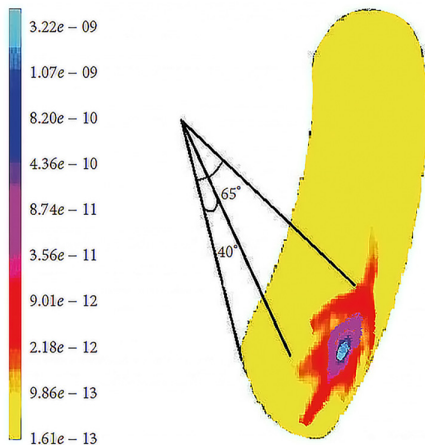


شکل ۸: خطوط تراز (کانتوری) میزان سرعت گاز [۳۵]

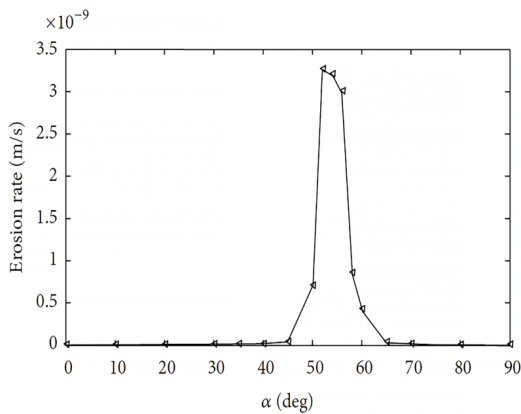


شکل ۹: مسیر ذرات رنگ‌آمیزی شده بر اساس قطر ذره [۳۵]





شکل ۱۳: خطوط نرخ سایش زانویی (m/s) [۲۸]

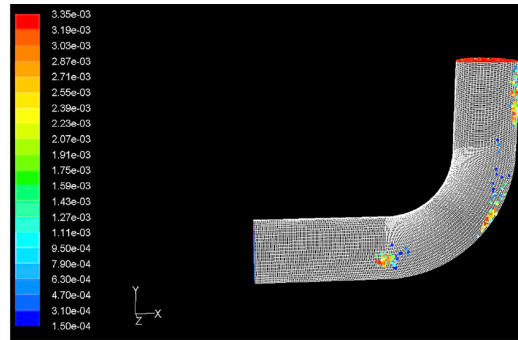


شکل ۱۴: نرخ سایش بر حسب زاویه برخورد [۲۸]

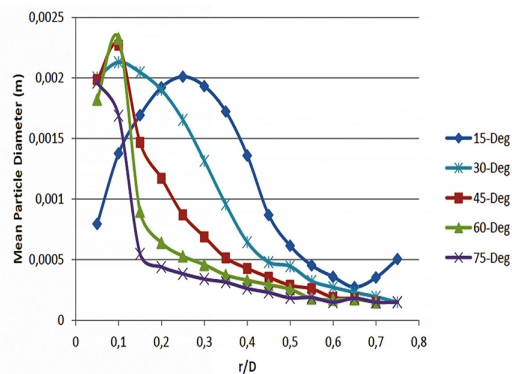
۷-۳. نتایج آزمایشگاهی فولاد ST37

نتایج آزمایش‌های سایش و خواص مکانیکی فولاد ST37 به صورت نمودارها و جداول تحلیل شده و ارتباط بین پارامترهای مختلف و رفتار سایشی این فولاد را نشان می‌دهند. در (شکل ۱۵)، منحنی ضریب اصطکاک نسبت به مسافت لغزش برای فولاد ST37 ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سختی سطح نمونه (از طریق فرآیندهای اصلاحی مانند کارسختی)، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد که حاکی از بهبود مقاومت سایشی فولاد ST37 است.

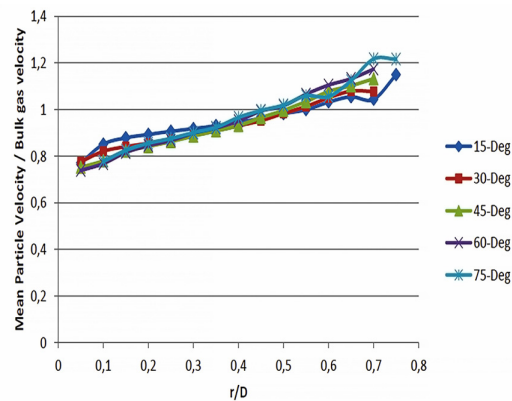
منحنی کاهش وزن نسبت به مسافت لغزش نیز در (شکل ۱۶) نشان داده شده است. این منحنی تأیید می‌کند که نمونه‌های با سختی بالاتر کاهش وزن کمتری را تجربه می‌کنند. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت افزایش سختی بر کاهش نرخ سایش است.



شکل ۱۰: الگوی پراکندگی ذرات رنگ آمیزی شده بر اساس قطر ذرات [۳۵]

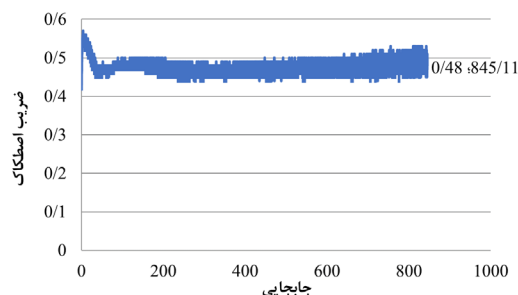


شکل ۱۱: توزیع میانگین قطر ذرات بر روی مقاطع عرضی زانویی [۳۵]

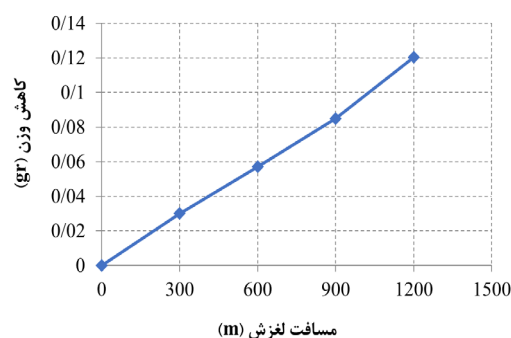


شکل ۱۲: توزیع میانگین سرعت ذرات بر روی مقاطع عرضی زانویی [۳۵]

(شکل ۱۳ و ۱۴) به ترتیب، خطوط تراز (کانتور) نرخ سایش و ترسیم عددی نرخ سایش بر حسب زاویه برخورد را نشان می‌دهند. این تصاویر بیانگر آن هستند که نرخ غیرعادی سایش به زوایای بین ۵۰ تا ۶۰ درجه مرتبط است. حداکثر نرخ سایش، ۳/۲۶ نانومتر بر ثانیه یا ۰/۱ متر بر سال به دست آمده است که در زاویه ۵۲ درجه رخ می‌دهد. این امر به دلیل برخورد ذرات جامد با اندازه حداکثر ۲ میکرون است. این نرخ بالای سایش برای اتصالات خط لوله خطرناک بوده و باید با روش‌هایی مانند حذف ذرات با اندازه حداکثر ۱ میلی‌متر، کنترل شود.



شکل ۱۵: منحنی تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب جابجایی



شکل ۱۶: منحنی کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش

نتایج را افزایش داده است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که تغییرات مشاهده شده در میزان سایش ناشی از تأثیر واقعی پارامترهای بارگذاری است و نمی‌توان آن را صرفاً به اثرات تصادفی نسبت داد که در نهایت اعتبار تحلیل تجربی را بهبود می‌بخشد.

این پژوهش با انجام آزمایش‌های تجربی گسترده، به بررسی و اعتبارسنجی سه روش مدل‌سازی عددی برای پیش‌بینی سایش فولاد ST37 در لوله‌های انتقال گاز پرداخت: دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، مدل اویلری و مدل لاگرانژی. آزمایش‌ها شامل برقراری جریان گاز حاوی ذرات جامد در یک لوله مستقیم به طول ۱۰ متر و قطر ۵۶ اینچ و یک زانویی ۹۰ درجه بود که طی آن نرخ سایش دیواره‌های بیرونی زانویی با استفاده از هر سه روش پیش‌بینی شد. علاوه بر این، آزمایش‌های سایش پین-روی-دیسک بر روی نمونه‌های فولاد ST37 انجام گرفت تا داده‌های تجربی برای مقایسه با نتایج مدل‌سازی فراهم شود. یافته‌ها نشان داد که مدل CFD-لاگرانژی با انحراف کمتر از ۱۷/۷۶ درصد و مدل CFD-ویلری با انحراف کمتر از ۱۰/۷ درصد نسبت به داده‌های آزمایشگاهی همخوانی دارند. این نتایج حاکی از آن است که روش CFD-ویلری به دلیل دقت بالاتر در پیش‌بینی نرخ سایش و توانایی بهتر در مدل‌سازی رفتار میانگین توزیع ذرات در جریان‌های با غلظت ذرات متوسط، برای تحلیل سایش فولاد ST37 مناسب‌تر است. مطالعه ریکاردو و همکاران [۳۷] نشان می‌دهد که مدل‌های اویلری در شرایط جریان‌های با غلظت ذرات متوسط و جریان‌های یکنواخت، به دلیل توانایی در مدل‌سازی رفتار کلی ذرات بدون نیاز به ردیابی جداگانه هر ذره، دقت و کارایی بیشتری دارند. این نتایج می‌توانند به‌عنوان راهنمایی برای طراحی و نگهداری بهینه لوله‌های فولادی در صنایع نفت و گاز مورد استفاده قرار گیرند، هزینه‌های ناشی از سایش و خرابی تجهیزات را کاهش دهند و ایمنی عملیاتی را بهبود بخشند.

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش درباره تأثیر ذرات جامد معلق در جریان گاز بر نرخ سایش لوله‌های فولادی ST37 در خطوط انتقال گاز، توصیه‌های عملی زیر به مهندسان طراح ارائه می‌گردد:

- مدیریت سرعت جریان: سرعت جریان باید در محدوده‌ای بهینه نگه‌داشته شود تا از رسوب ذرات و سایش بیش‌ازحد جلوگیری شود. به‌طور کلی، سرعت باید بالاتر از ۱ متر بر ثانیه باشد تا از رسوب جلوگیری

همان‌طور که از (جدول ۳) و (شکل ۱۶) مشخص است، روند لایه برداری از فولاد ST37 مورد مطالعه به نسبت بارگذاری، خطی نیست و پس از طی نمودن یک اکستریم، از شیب لایه برداری کاسته می‌شود و مجدداً به آرامی صعودی می‌گردد.

برای تحلیل داده‌های سایش به روش پین-روی-دیسک، آزمون‌های آماری شامل t-test و ANOVA به‌منظور بررسی معناداری تغییرات اعمال شده‌اند. این تحلیل‌ها امکان ارزیابی دقیق و سیستماتیک تفاوت‌های عددی میان شرایط مختلف بارگذاری را فراهم آورده و نقش عوامل مؤثر بر میزان سایش را مشخص کرده‌اند. جهت بررسی وابستگی آماری داده‌ها، آزمون نرمال بودن (Shapiro-Wilk) اجرا شده است تا صحت فرضیات اولیه برای تحلیل‌های آماری تأیید گردد. نتایج آزمون t-test مستقل نشان داده‌اند که میزان سایش در گروه‌های مختلف با اختلاف معنادار آماری همراه بوده است، به‌گونه‌ای که مقدار p-value محاسبه شده کمتر از ۰/۰۵ بوده و دلالت بر تأثیر بارگذاری بر رفتار سایش دارد. همچنین، اجرای ANOVA یک‌طرفه مشخص کرده است که تأثیر متغیرهای مورد بررسی بر میزان سایش دارای تفاوت‌های معنادار آماری است که دقت تحلیل و قابلیت تعمیم‌پذیری



- نوآوری در مواد: تحقیق در مورد مواد جدید یا پوشش‌هایی که مقاومت بیشتری در برابر سایش ناشی از ذرات جامد دارند، می‌تواند به توسعه خطوط لوله با عمر طولانی‌تر منجر شود [۴۰].
 - مطالعات پارامتری گسترده: انجام مطالعات بیشتر برای بررسی تأثیر طیف وسیع‌تری از اندازه‌ها، غلظت‌های ذرات و شرایط جریان می‌تواند به تعمیم یافته‌های این مطالعه کمک کند و درک جامع‌تری از مکانیزم‌های سایش ارائه دهد [۴۴].
 - ادغام با داده‌های حسگر: استفاده از داده‌های حسگرهای نصب‌شده در خطوط لوله برای تغذیه مدل‌های یادگیری ماشین می‌تواند امکان نظارت در زمان واقعی و نگهداری پیش‌بینانه را فراهم کند و از خرابی‌های ناگهانی جلوگیری نماید [۴۵].
- فهرست علائم اختصاری**
- | | |
|-------------|---|
| B | سختی برینل Pa |
| C_D | ضریب پسا dimensionless |
| d | قطر ذرات μm |
| d_p | قطر ذره m |
| D | قطر هیدرولیکی m |
| e | ضریب بازگشت dimensionless |
| ER | نرخ سایش m/s یا nm/s |
| F_d | نیروی درگ N |
| F_s | ضریب شکل ذره dimensionless |
| $F(\alpha)$ | تابع وابسته به زاویه dimensionless |
| g | شتاب گرانش m/s^2 |
| $g_{0,ss}$ | تابع توزیع شعاعی dimensionless |
| k | انرژی جنبشی آشوبناک m^2/s^2 |
| m_p | جرم ذره kg |
| n | پارامتر توزیع اندازه ذرات dimensionless |
| P | فشار Pa |
| P_s | فشار فاز جامد Pa |
| Pr_t | عدد پرناتل آشوبناک dimensionless |
- شود و کمتر از حدی باشد که سایش را تشدید نکند که این حد باید بر اساس ویژگی‌های خاص سیستم و مدل‌های سایش تعیین شود [۳۸].
 - کنترل ذرات: استفاده از فیلترها یا جداکننده‌ها برای کاهش غلظت ذرات جامد در سیال می‌تواند سایش را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. به‌عنوان مثال، استفاده از صفحه‌های شن می‌تواند حضور ذرات شن را به حداقل برساند [۳۹].
 - انتخاب مواد: انتخاب موادی با مقاومت بالا در برابر سایش، به‌ویژه در بخش‌های بحرانی مانند زانویی‌ها، می‌تواند عمر لوله را افزایش دهد. مواد کامپوزیتی پلیمری یا پوشش‌های مقاوم می‌توانند گزینه‌های مناسبی باشند [۴۰].
 - بهینه‌سازی طراحی: اجتناب از تغییرات ناگهانی در قطر لوله یا زوایای تند در طراحی می‌تواند مناطق جریان آشوبناک را که مستعد سایش هستند، کاهش دهد. استفاده از خم‌های تدریجی و اطمینان از کیفیت بالای جوشکاری نیز توصیه می‌شود [۳۹].
 - نظارت منظم: اجرای برنامه‌های بازرسی دوره‌ای با استفاده از روش‌های غیرمخرب مانند آزمایش فراصوت یا پیگینگ هوشمند می‌تواند سایش را در مراحل اولیه شناسایی کرده و امکان تعمیرات به‌موقع را فراهم کند [۴۱].
 - به‌منظور ارتقای دانش و بهبود پیش‌بینی سایش ناشی از ذرات جامد در خطوط لوله فولادی انتقال گاز، مسیرهای پژوهشی آینده زیر پیشنهاد می‌گردد:
 - یادگیری ماشین برای پیش‌بینی سایش: توسعه مدل‌های یادگیری ماشین که بر اساس داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های CFD و آزمایش‌های تجربی آموزش دیده‌اند، می‌تواند نرخ سایش را تحت شرایط عملیاتی مختلف پیش‌بینی کند. این مدل‌ها می‌توانند ابزار سریعی برای ارزیابی ریسک سایش بدون نیاز به شبیه‌سازی‌های گسترده فراهم کنند [۴۲].
 - مدل‌های ترکیبی CFD و یادگیری ماشین: ترکیب شبیه‌سازی‌های CFD با تکنیک‌های یادگیری ماشین می‌تواند مدل‌های پیش‌بینی دقیقی ایجاد کند که دقت CFD را با سرعت یادگیری ماشین ادغام می‌کنند و امکان ارزیابی سایش در زمان واقعی را فراهم می‌آورند [۴۳].



- and Y. Davoodbeygi, "Friction-Stir-Processing Effect on Fracture Toughness of Oil Pipelines in ST 37 Group Before/After Nano ZrO₂-Coating", Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME, vol. 17, pp. 79-95, 2016.
- [3]. A. Sherik, "Study examines sources, makeup in dry gas systems", Oil & gas journal, vol. 106, pp. 54-54, 2008.
- [4]. A. Sherik, "Management requires multiple approaches", Oil & Gas Journal, vol. 106, pp. 66-68, 2008.
- [5]. N. A. Tsochatzidis, "Study addresses black powder's effects on metering equipment", Oil and Gas Journal, vol. 106, pp. 56, 2008.
- [6]. A. A. Alghamdi, T. Abadie, S. Cheng, and O. Matar, "(422c) Comparative Study of Erosion Prediction in Elbows Using Machine Learning and CFD", 2023 AIChE Annual Meeting, vol. pp. 2023.
- [7]. K. Gök, H. D. Ada, N. Kilicaslan, and A. Gök, "A Review of CFD Modeling of Erosion-induced Corrosion Formation in Water Jets Using FEA", Journal of Mechanical Materials and Mechanics Research, vol. 6, pp. 14-22, 2023.
- [8]. O. Ige, L. Umoru, O. Olorunniwo, and M. Adeoye, "EROSION CORROSION IN THE OIL AND GAS INDUSTRY: A REVIEW", vol. pp. 2020.
- [9]. Q.-L. Sun, L. Xia, L. Deng, J.-G. Wang, G.-L. Wang, and D. Feng, "Experimental and Numerical Simulation Analyses of Elbow Erosion in Surface Process of Deepwater Gas Well Testing", Journal of Failure Analysis and Prevention, vol. 24, pp. 202-215, 2024.
- [10]. N. A. Tsochatzidis, and K. E. Maroulis,
- q جریان انرژی ذره‌ای $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$
- r فاصله شعاعی m
- R شعاع انحنا m
- Re عدد رینولدز dimensionless
- u سرعت m/s
- \bar{d} قطر متوسط ذرات μm
- α کسر حجمی یا زاویه dimensionless
- β ضریب درگ بین فازها $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$
- γ_{θ_s} نرخ اتلاف انرژی ذره‌ای $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$
- ε نرخ اتلاف انرژی آشوبناک m^2/s^2
- Θ_s دمای ذره‌ای m^2/s^2
- μ ویسکوزیته $\text{Pa} \cdot \text{s}$
- μ_t ویسکوزیته آشوبناک $\text{Pa} \cdot \text{s}$
- ρ چگالی kg/m^3
- σ_k عدد پرائنتل آشفته برای k dimensionless
- σ_ε عدد پرائنتل آشفته برای ε dimensionless
- τ_s تنش برشی فاز جامد Pa
- ψ عامل شکل ذرات dimensionless
- فهرست حروف یونانی**
- ρ چگالی kg/m^3
- α کسر حجمی یا زاویه dimensionless
- β ضریب درگ بین فازها $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$
- μ ویسکوزیته $\text{Pa} \cdot \text{s}$
- ε نرخ اتلاف انرژی آشوبناک m^2/s^2
- Θ دمای ذره‌ای m^2/s^2
- مراجع:**
- [1]. Z. Tian, J. Y. Tu, and G. Yeoh, "Numerical Simulation and Validation of Dilute Gas-Particle Flow Over a Backward-Facing Step", Aerosol Science and Technology, vol. 39, pp. 2005.
- [2]. M. H. Sharifi, A. Sabetghadam-Isfahani,

- methods for multiphase flows”, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, pp. 215-245, 2013.
- [19]. Z. Xu, Z. Han, and H. Qu, “Comparison between Lagrangian and Eulerian approaches for prediction of particle deposition in turbulent flows”, *Powder Technology*, vol. 360, pp. 141-150, 2020.
- [20]. Y. Zhang, E. Reuterfors, B. S. McLaury, S. Shirazi, and E. Rybicki, “Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows”, *Wear*, vol. 263, pp. 330-338, 2007.
- [21]. Y. I. Oka, K. Okamura, and T. Yoshida, “Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation”, *Wear*, vol. 259, pp. 95-101, 2005.
- [22]. Y. Oka, and T. Yoshida, “Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage”, *Wear*, vol. 259, pp. 102-109, 2005.
- [23]. M. Enayet, M. Gibson, A. Taylor, and M. Yianneskis, “Laser-Doppler measurements of laminar and turbulent flow in a pipe bend”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 3, pp. 213-219, 1982.
- [24]. J. K. Edwards, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi, “Modeling solid particle erosion in elbows and plugged tees”, *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 123, pp. 277-284, 2001.
- [25]. X. Chen, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi, “Numerical and experimental investigation of the relative erosion severity between plugged tees and elbows in dilute gas/solid
- “Methods help remove black powder from gas pipelines”, *Oil & Gas Journal*, vol. 105, pp. 52-52, 2007.
- [11]. R. M. Baldwin, “Here are procedures for handling persistent black-powder contamination”, *Oil and Gas Journal*, vol. 96, pp. 1998.
- [12]. K. D. Squires, and J. K. Eaton, “Particle response and turbulence modification in isotropic turbulence”, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, vol. 2, pp. 1191-1203, 1990.
- [13]. J. R. Fessler, and J. K. Eaton, “Particle response in a planar sudden expansion flow”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 15, pp. 413-423, 1997.
- [14]. S. M. H. Sharifi, and A. Sabetghadam-Isfahani, “MICRO-HARDNESS PROFILE AND MICROSTRUCTURE CHARACTERIZATION IN FRICTION-STIR-PROCESSING ZONE OF THE ZrO₂/CNT NANO-COATED ST37 STEEL”, vol. 10, pp. 477-487, 2019.
- [15]. W. Material, “1.0037 Material St37-2 Steel Equivalent, Properties, Composition, DIN 17100”, vol. pp. 2025.
- [16]. B. Benli, and I. Celik, “Surface Modification and Analysis of St37 Steel with Al₂O₃-TiO₂, ZrO₂, and Cr₂O₃ Ceramic Coatings: Structural, Mechanical, and Tribological Properties”, *Tribology International*, vol. 191, pp. 109183, 2024.
- [17]. R. Khan, H. H. Ya, W. Pao, and A. Khan, “Erosion-Corrosion of 30°, 60°, and 90° Carbon Steel Elbows in a Multiphase Flow Containing Sand Particles”, *Materials (Basel)*, vol. 12, pp. 2019.
- [18]. S. Subramaniam, “Lagrangian–Eulerian



Saudi Aramco Journal of Technology, vol. pp. 2010.

- [35]. V. Abdolkarimi, and S. H. Boroojerdi, "CFD MODELING OF PARTICULATES MOTION IN GAS PIPELINES", *Petroleum & Coal*, vol. 55, pp. 2013.
- [36]. S. Hattori, and Y. Motoi, "Effect of temperature on cavitation erosion of SUS304 stainless steel", *Transactions of the JSME (in Japanese)*, vol. 80, pp. SMM0145-SMM0145, 2014.
- [37]. N. Ricardo, A. Guiherme, and M. Sommerfeld, "Comprehensive Euler/Lagrange modelling including particle erosion for confined gas-solid flows", *Particuology*, vol. 84, pp. 209-235, 2024.
- [38]. M. Ganapathy, H. Lakshminarayanan, P. Sundarraj, and C. Bahubali, "Erosion Prediction, Prevention in Pipeline Gas Production", *Pipeline & Gas Journal*, vol. Vol. 249, No. 2, pp. 2022.
- [39]. M. T. Abdu, W. Khalifa, and M. S. Abdelrahman, "Investigation of erosion-corrosion failure of API X52 carbon steel pipeline", *Scientific Reports*, vol. 13, pp. 20494, 2023.
- [40]. R. J.K. Wood, and A. D.C. Cook, "Erosion-Corrosion in Pipe Flows of Particle-Laden Liquids", *IntechOpen*, 2022.
- [41]. H. Yu, H. Liu, S. Zhang, J. Zhang, and Z. Han, "Research progress on coping strategies for the fluid-solid erosion wear of pipelines", *Powder Technology*, vol. 422, pp. 118457, 2023.
- [42]. R. Melendez, M. A. Rojo, A. Vazquez Hernandez, and F. Silva-González, "Predicting erosion in wet gas pipelines/elbows by mathematical formulations two-phase flow", *Wear*, vol. 261, pp. 715-729, 2006.
- [26]. C. Hengshuan, and X. Zhong, "Numerical analysis and experimental investigation of erosion in variable rectangular-section bends by solid particles", *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 3, pp. 111-118, 1991.
- [27]. A. Keating, and S. Nestic, "Prediction of two-phase erosion-corrosion in bends", 1999.
- [28]. V. Abdolkarimi, and R. Mohammadikhah, "CFD modeling of particulates erosive effect on a commercial scale pipeline bend", *International Scholarly Research Notices*, vol. 2013, pp. 105912, 2013.
- [29]. D. Gidaspow, "Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions", *Academic press*, 1994.
- [30]. R. Clift, J. R. Grace, and M. E. Weber, "Bubbles, drops, and particles", vol. pp. 2005.
- [31]. A. Gosman, and E. Loannides, "Aspects of computer simulation of liquid-fueled combustors", *Journal of energy*, vol. 7, pp. 482-490, 1983.
- [32]. T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu, "A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows", *Computers & fluids*, vol. 24, pp. 227-238, 1995.
- [33]. W. Yang, and B. Kuan, "Experimental investigation of dilute turbulent particulate flow inside a curved 90 bend", *Chemical Engineering Science*, vol. 61, pp. 3593-3601, 2006.
- [34]. E. Elsaadawy, and A. M. Sherik, "Black powder erosion in sales gas pipeline bends",



and computational fluid dynamics modeling”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, vol. 232, pp. 135065011774541, 2017.

[43]. H. Chen, H. Huang, R. Wei, and Z. Wang, “A novel AI-driven model for erosion prediction for elbow in gas-solid two-phase flows”, Wear, vol. 540-541, pp. 205241, 2024.

[44]. S. K. Wee, and Y. J. Yap, “CFD study of sand erosion in pipeline”, Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 176, pp. 269-278, 2019.

[45]. N. B. Shaik, K. Jongkittinarukorn, W. Benjapolakul, and K. Bingi, “A novel neural network-based framework to estimate oil and gas pipelines life with missing input parameters”, Scientific Reports, vol. 14, pp. 4511, 2024.



Investigation of the Impact of Solid Particles Suspended in Fluid on Steel Pipe Erosion: CFD Analysis and Experimental Validation

Armin Sabetghadam-Isfahani^{1,2}, Yegane Davoodbeygi^{3*}, Seyed Mahmoud Latifi⁴

1. Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
2. Hormozgan Province Gas Company, P.O. Box: 7915996489, Bandar Abbas, Iran
3. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Chemical and Petroleum Engineering Faculty, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
4. B.Sc., Department of Chemical Engineering, Chemical and Petroleum Engineering Faculty, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

ARTICLE INFO

RESEARCH ARTICLE

Article History:

Received: 26 March 2025

Revised: 17 May 2025

Accepted: 31 May 2025

Keywords:

Solid particles

Erosion

Mechanical properties

Erosion rate, Computational

Fluid Dynamics (CFD)

Numerical modeling

ABSTRACT

Erosion caused by suspended solid particles in fluid flow is a key problem in the oil and gas industry, which can reduce the service life of steel pipelines. In this study, multiple experimental tests were conducted to investigate and validate three different modeling methods: Computational Fluid Dynamics (CFD), the Eulerian model, and the Lagrangian model. Initially, gas-solid flow was established in a straight pipe of 10 m length and 56 inches diameter connected to a 90-degree elbow, and the erosion rate on the outer walls of the elbow was predicted using all three approaches. Subsequently, pin-on-disk wear tests were performed on ST37 steel samples, and the modeling results were compared with experimental data. The findings indicated good agreement between the modeling results and experimental data; the CFD-Lagrangian model showed a deviation of less than 17.76%, while the CFD-Eulerian model showed a deviation of less than 10.7%. This detailed comparison demonstrated the superior accuracy of the CFD-Eulerian method in predicting ST37 steel erosion. The results of this study can pave the way for improving the design and maintenance of steel pipelines in the oil and gas industry and reduce costs associated with erosion and equipment failure.

DOR: [20.1001.1.2509.1089.1404.03.10](https://doi.org/10.1001.1.2509.1089.1404.03.10)

How to cite this article

A. Sabetghadam-Isfahani, Y. Davoodbeygi, S.M. Latifi, Investigation of the Impact of Solid Particles Suspended in Fluid on Steel Pipe Erosion: CFD Analysis and Experimental Validation. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2026 12(4): 58-79. (https://ijge.irangi.org/article_735764.html)

* Corresponding Author.

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

Available online 11 March 2026

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 جامع بر کاربرد نانومواد در ازدیاد برداشت نفت (EOR): مکانیسم‌ها، چالش‌ها و روندهای آینده

مسعود بیژنی^{۱*}، امیرحسین سپه‌وند^۲

۱. استادیار، گروه مهندسی نفت و زمین انرژی، دانشگاه گرمسار، گرمسار، ایران

۲. کارشناسی، گروه مهندسی نفت و زمین انرژی، دانشگاه گرمسار، گرمسار، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: masoudbijani@fmgarmsar.ac.ir

مقاله‌ی مروری

صفحه ۸۰ - ۹۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲

چکیده

در این پژوهش، کاربرد نانومواد در صنعت نفت با هدف بهبود فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت^۱ مورد بررسی جامع و تحلیلی قرار گرفته است. نانومواد شامل نانوذرات، نانوکامپوزیت‌ها، نانوسیالات، نانورس‌ها و نانومولسیون‌ها - به دلیل برخورداری از نسبت سطح به حجم بسیار بالا، واکنش‌پذیری شیمیایی چشمگیر و قابلیت تغییر خواص فیزیکوشیمیایی سیستم‌های سنگ-سیال، نقشی کلیدی در افزایش بهره‌وری برداشت نفت از مخازن ایفا می‌کنند. این مطالعه به تحلیل انواع نانومواد مورد استفاده در روش‌های مختلف EOR از جمله روش‌های شیمیایی، حرارتی، میکروبی و ترکیبی می‌پردازد و مکانیسم‌های اصلی مؤثر در بهبود بازیافت نفت - مانند کاهش کشش بین‌سطحی^۲، تغییر ترشوندگی^۳ بهبود خواص رئولوژیکی سیالات و کنترل نسبت تحرک^۴ را به صورت نظام‌مند تبیین می‌کند. علاوه بر این، پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی توسعه‌ی نانومواد سبز و نانوکامپوزیت‌های هوشمند که با استفاده از مواد سازگار با محیط‌زیست (از قبیل سورفکتانت‌های طبیعی، پلیمرهای زیستی و نانوذرات با منشأ گیاهی) طراحی شده‌اند، مرور و ارزیابی شده است. در پایان، شکاف‌های تحقیقاتی موجود و چشم‌اندازهای آینده در کاربرد نانومواد در فرآیندهای EOR مطرح گردیده تا مسیر پژوهش‌های آینده و توسعه‌ی فناوری‌های نوین در این حوزه ترسیم شود.

کلیدواژه‌ها: فناوری نانو، نانوسیالات، ازدیاد برداشت نفت (EOR)، کشش بین‌سطحی (IFT)، نانومواد سبز، تغییر ترشوندگی

۱. مقدمه

نانوفناوری به مطالعه و کنترل مواد در مقیاس نانومتری، شامل ابعاد هسته‌ای، اتمی و فوق‌مولکولی (بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) می‌پردازد. این مقیاس دارای خواص منحصر به فرد نوری، مغناطیسی، الکتریکی و شیمیایی است [۱]. نانومواد، به

1. Enhanced Oil Recovery, EOR
2. Interfacial Tension, IFT
3. Wettability Alteration, WAG
4. Mobility Ratio



اثر کوانتومی، مساحت سطح بالا و قابلیت خودآرایی اشاره کرد. کاربردهای متنوع نانومواد در حوزه‌های مختلف علمی، نظیر شیمی، زیست‌شناسی، فیزیک، علم مواد و مهندسی، به‌طور چشمگیری در حال گسترش است [۲]. این فناوری در زمینه‌هایی نظیر فناوری اطلاعات، حمل‌ونقل، پزشکی، ایمنی غذایی، انرژی و علوم محیطی نیز جایگاه ویژه‌ای یافته است. در دنیای امروز، کاهش عرضه نفت و افزایش قیمت آن به‌عنوان یک چالش اقتصادی جهانی شناخته می‌شود. این بحران را می‌توان با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته و راه‌حل‌های نوآورانه کاهش داد. فناوری‌هایی مانند تحلیل داده‌های کلان، هوش مصنوعی، هواپیماهای بدون سرنشین، اینترنت اشیا و کاربرد نانوتکنولوژی به‌عنوان ابزارهای مقرون‌به‌صرفه و کارآمد، قابلیت بهبود بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها را فراهم می‌آورند [۳]. مقاله حاضر به بررسی استفاده از نانو ذرات برای بهبود افزایش برداشت از مخازن نفتی می‌پردازد. از آنجائی که مخازن نفتی کشور در نیمه دوم عمر خود هستند استفاده از تکنولوژی نانو می‌تواند برای افزایش تولید حداکثری مقرون‌به‌صرفه باشد و به تولید هرچه بیشتر از مخازن نفتی ما را تسهیل تر کند. این مطالعه یک بررسی جامع و متمرکز بر روی استفاده از نانو ذرات برای بهبود افزایش برداشت و همچنین کاربرد نانوذرات در ترکیب با سایر روش‌های ازدیاد برداشت نفت را ارائه می‌دهد.

۲. طبقه‌بندی نانومواد

نانومواد، اجزای ساختاری با ابعاد خارجی در محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر هستند که در این مقیاس، خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها با مواد در مقیاس بالک متفاوت است [۴]. نانومواد به شکل‌های کروی، لوله‌ای و نامنظم موجود دارند و می‌توانند به‌صورت منفرد، ذوب‌شده، انباشته یا آگلومره یافت شوند. نانومواد بر اساس شکل و ساختار به سه دسته نانوذرات، نانورس و نانومولسیون‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. (شکل ۱) نانوذره به‌عنوان یک ذره بسیار ریز با ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر (nm) نیز شناخته می‌شود. نانوذرات به دو دسته نانو ذرات آلی و معدنی طبقه‌بندی می‌شوند. نانوذرات معدنی شامل نانوذرات فلزی و سرامیکی است. نانوذرات آلی، نانوذرات مبتنی بر کربن، نانوذرات لیپیدی و پلیمری هستند. نانوذرات بیشتر به‌عنوان نانوبلورها، نانوخوشه‌ها، نانولوله‌ها، سوپر مولکول‌ها و غیره طبقه‌بندی می‌شوند. نانورس‌ها نانوذراتی هستند که از لایه‌های سیلیکات معدنی با ضخامت ۱ نانومتر و عرض ۷۰ تا ۱۵۰ نانومتر تشکیل شده‌اند [۵]. مونت

موریلونیت، کائولینیت و ساپونیت چند نمونه از نانورس‌ها هستند. نانومولسیون‌ها سیستم‌های کلوئیدی هستند که در آن‌ها اندازه زیر میکرون از ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر متغیر است [۴]. نانومولسیون‌ها به‌عنوان نانومولسیون‌های روغن داخل آب، نانومولسیون‌های آب در روغن و نانومولسیون‌های دو پیوسته طبقه‌بندی می‌شوند.

۱-۲. نانو ذرات

اندازه نانوذرات بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است [۵]. ساختار نانوذرات به شکل نانوکامپوزیت‌ها یافت می‌شوند. تمام نانساختارها عمدتاً از واحدهای ابتدایی با ابعاد کم (بلوک) تشکیل شده‌اند. آن‌ها ممکن است بدون ابعاد، یک بعد، دوبعدی و سه‌بعدی که اثر اندازه بر مشخصه حاصله نیز به‌عنوان نقاط کوانتومی قابل مشاهده است. همان‌طور که در (جدول ۱) مشاهده می‌گردد نانومواد به‌عنوان بلوک‌های ساختمانی برای ساختن مواد نانساختار به نانوذرات صفر بعدی (نقاط کوانتومی)، یک‌بعدی (سیم‌های، کوانتومی)، دوبعدی (لایه‌های نازک) و نانوذرات سه‌بعدی تقسیم می‌شوند. در نانومواد صفر بعدی، حرکت الکترون در هر سه جهت متفاوت است [۶]. در یک بعد الکترون‌ها فقط می‌توانند در جهت X حرکت کنند. در دو بعد، آن‌ها می‌توانند در Y, X حرکت کنند و سه‌بعدی آن‌ها در جهت X, Y, Z حرکت کنند. نانوذرات بسته به نوع موادشان به دو دسته آلی یا معدنی طبقه‌بندی می‌شوند. رسوب نمک‌های معدنی که توسط فعل و انفعالات فلزی و کووالانسی به مولکول‌ها متصل می‌شود، نانوذرات معدنی تولید می‌کند [۳]. نانوذرات آلی به‌صورت خودآرایی در یک ساختار سه‌بعدی قرار می‌گیرند. برای تهیه نانوذرات آلی از ترکیبات آلی مصنوعی و طبیعی مانند امولسیون شیر، دانه‌های پروتئینی، اجسام لیپیدی و سایر ساختارهای پیچیده برای ساخت نانوذرات آلی (ویروس‌ها و غیره) استفاده می‌گردد [۷].

۲-۲. نانورس‌ها

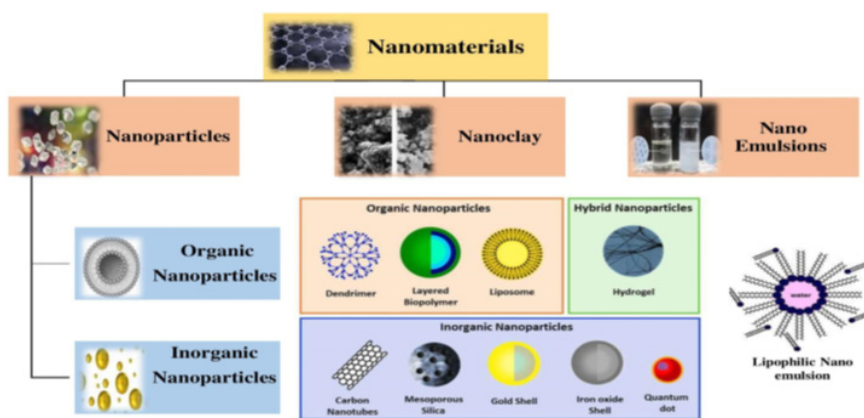
نانورس‌ها نانوذراتی هستند که از لایه‌های سیلیکات معدنی تشکیل شده‌اند. نانورس‌ها بر اساس ترکیب شیمیایی و مورفولوژی نانوذرات به کلاس‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند. نانورس‌هایی که معمولاً یافت می‌شوند عبارتند از مونتموریلونیت، بنتونیت، کائولینیت، هکتوریت و هالوویت را شامل می‌گردند. به‌عنوان مثال، مونت موریلونیت از لایه‌های متعددی از ذرات کریستالی با قطر ۱۰۰ تا ۲۰۰ نانومتر و



۲-۳. نانو امولسیون‌ها

نانوامولسیون‌ها سیستم‌های کلونیدی هستند که اندازه زیر میکرون آن‌ها از ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر متغیر است [۱۰]. پلیمرها، قطرات و مواد جامد در یک مایع چسبناک پراکنده شده و در نتیجه یک ماده نرم جذب می‌شود [۱۰]. فاز داخلی که فاز ناپیوسته نیز نامیده می‌شود، فاز پراکنده است، در حالیکه محیط فاز خارجی است. واسطه یا فاز داخلی به‌عنوان یک عامل امولسیون کننده نیز شناخته می‌شود. امولسیون سازی با انرژی بالا (همگن سازی با فشار بالا، فراصوت، میکروسیال ساز) و امولسیون سازی با انرژی کم (وارونگی دمایی فاز، ترکیب وارونگی فاز و جابجایی حلال) دو روش برای ساخت نانوامولسیون‌ها هستند [۱۱].

ضخامت متوسط ۰/۹۶ نانومتر تشکیل شده است [۸]. ترکیب شیمیایی نانورس‌ها را می‌توان به راحتی با استفاده از پلاسمای جفت شده القایی^۱ تعیین کرد. بسته به بار لایه‌ای سطحی و انواع یون‌های بین لایه‌ای، دو شکل نانورس کاتیونی و آنیونی وجود دارد. برای تهیه نانورس و رس ارگانیک به شکل آبی یا جامد از مولکول‌های باردار (آب دوست) مانند فسفونیوم یا ایمیدازولیوم، آلکیل یا آریل آمونیوم استفاده می‌شود. واکنش تبادل یونی نانوذرات به صورتی است که فاصله بین صفحات منفرد را افزایش می‌دهد، به زنجیره‌های کاتیونی آلی اجازه می‌دهد بین آن‌ها حرکت کنند و کیفیت سطح هر صفحه را از آب دوست به آب گریز یا آلی دوستی تغییر می‌دهد [۹].

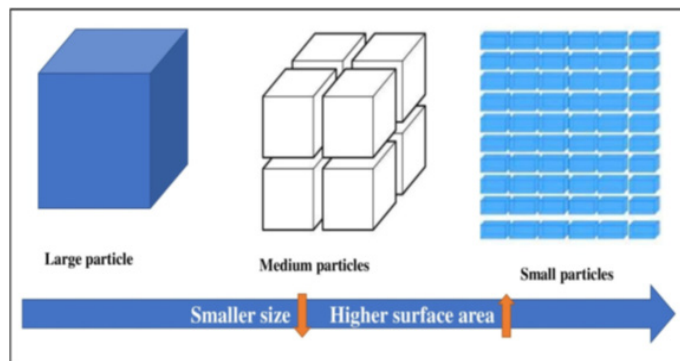


شکل ۱: طبقه بندی نانومواد: نانوذرات، نانورس، نانوامولسیون‌ها [۴]

۳. خصوصیات نانو ذرات

استفاده از تکنیک‌های مختلفی مانند میکروسکوپ نیروی اتمی، پراکندگی نور دینامیکی^۲، میکروسکوپ الکترونی، طیف‌سنجی مرئی، پراش اشعه ایکس و طیف‌سنجی FTIR، طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس (UV) انجام داد [۱۲].

توصیف یا اندازه گیری خواص فیزیکی و شیمیایی نانوذرات شاخه‌ای از نانومترولوژی است؛ بنابراین، شناسایی روش‌های مشخصه یابی مناسب به تحقیق در مورد خواص نانوذرات کمک می‌کند. شناسایی نانوذرات و نانومواد را می‌توان با



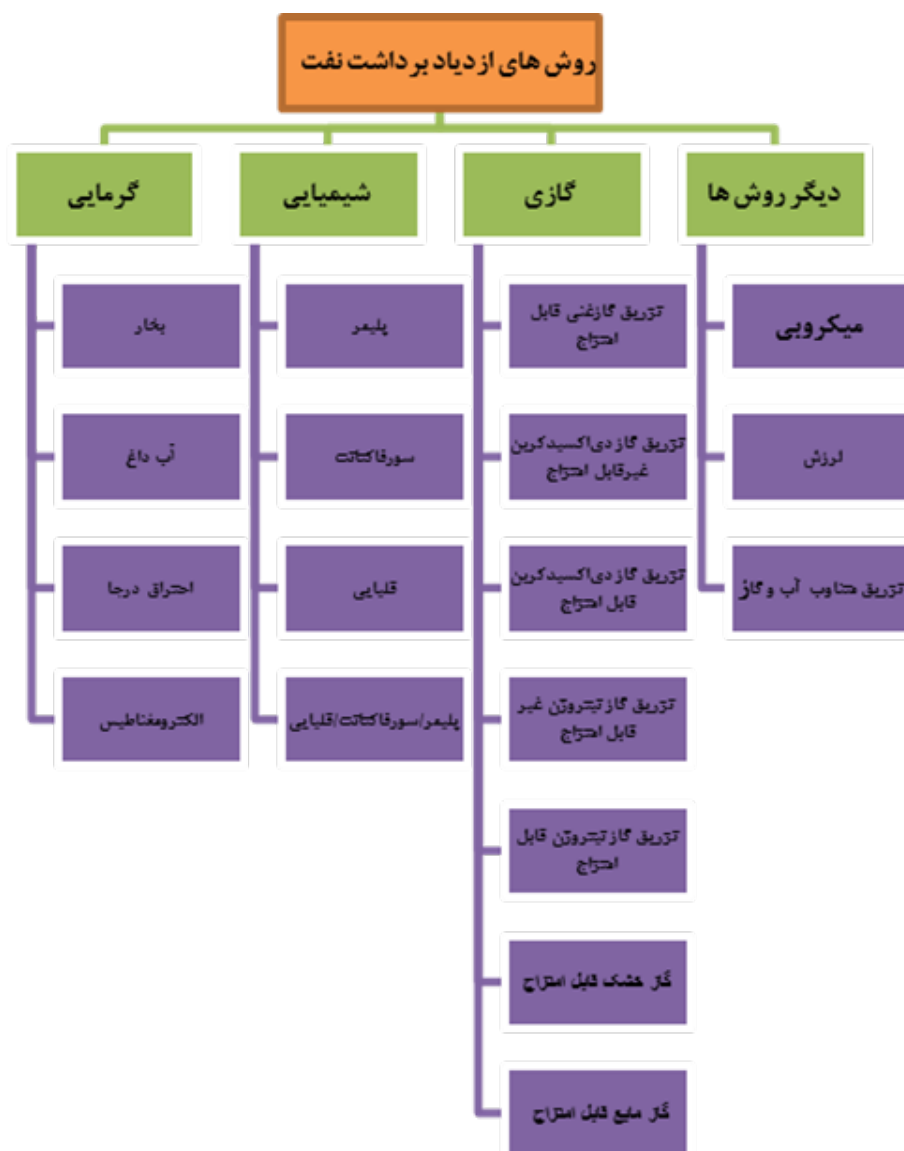
شکل ۲: نانوذرات با نسبت سطح به حجم زیاد [۱۳]

1. Inductively Coupled Plasma, ICP
2. Dynamic Light Scattering

۴. افزایش بازیافت نفت

می‌شوند شامل تغییر ترشوندگی، کاهش ویسکوزیته نفت خام، کاهش کشش بین سطحی آب و نفت و افزایش کارایی جابجایی نفت هستند [۱۴]؛ بنابراین درک پراکندگی فاز نفت، تجهیز قطرات نفت و تشکیل بانک نفت در این مقیاس برای استفاده از پدیده استفاده از نانوذرات در فرآین EOR ضروری است. طیف گسترده‌ای از انواع نانوذرات مختلف مانند اکسید منیزیم، اکسید آلومینیوم، اکسید روی، اکسید زیرکونیوم، اکسید قلع، اکسید آهن، اکسید نیکل، اکسید سیلیکون آب‌گریز و اکسید سیلیکون ترمیم شده برای بررسی فرایند ازدیاد برداشت نفت با روش سیلاب زنی و تزریق به نمونه سنگ در مطالعات تجربی و آزمایشگاهی انجام شده است [۱۴].

پس از بازیافت اولیه و ثانویه نفت، بیش از ۵۰ درصد نفت درجا همچنان در مخزن باقی می‌ماند. در نتیجه، بازیافت ثالثیه فرآیندی است که به فرایندی گفته می‌شود که در صورتی که نفت مخزن با فشار طبیعی و مکانیزیم‌های رانش مخزن قادر به تولید نباشد که برای بازیافت نفت باقیمانده در مخزن استفاده می‌گردد. به صورت کلی روش‌های ازدیاد برداشت نفت در (شکل ۳) نشان داده شده است. یکی از مهم‌ترین کاربردها نانوذرات استفاده از آن‌ها در ازدیاد برداشت نفت (EOR) است که باعث افزایش برداشت نفت در جای و باقیمانده موجود در مخزن می‌گردد و در نتیجه بازگشت سرمایه‌گذاری سریع‌تری را تضمین می‌کند. فرآیندهایی در مقیاس نانو که به EOR مربوط



شکل ۳: طبقه‌بندی روش ازدیاد برداشت نفت



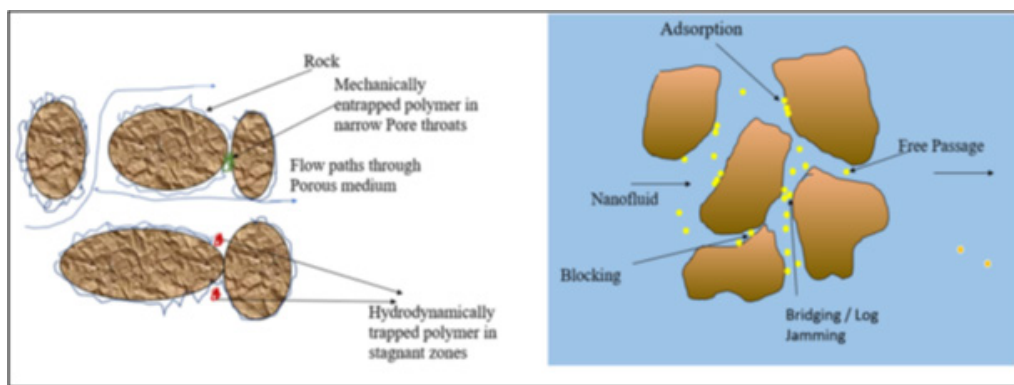
۵. غشاها مورد استفاده در فرایند فیلتراسیون گازی

۱-۵. تخریب و رسوب

کاهش خواص فیزیکی پلیمرها به دلیل تغییرات در استحکام و ترکیب شیمیایی که به عنوان تخریب شناخته می‌شود، رخ می‌دهد. این فرآیند منجر به کاهش پایداری پلیمرها در شرایط خاص می‌شود. رسوب تکنیکی یک روش برای جداسازی و خالص‌سازی پلیمرها است. یک مخزن نفتی دارای شوری، دما و pH مشخصی است. در دماهای بالا، شوری بالا و pH پایین، برخی از ترکیبات تزریقی تخریب شده و ناپایدار می‌شوند. ویسکوزیته محلول پلیمری به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی قرار می‌گیرد. در شرایط شور، مولکول‌های پلیمری توسط کاتیون‌ها در آب نمک مخزن غرق می‌شوند. در این شرایط، با کاهش درهم‌تنیدگی زنجیره پلیمری و افزایش شعاع هیدرودینامیک، ماکرومولکول‌ها انقباض می‌یابند. این امر منجر به کاهش ویسکوزیته محلول پلیمری می‌شود. از سوی دیگر، دماهای بالا باعث هیدرولیز پلیمر و رسوب یون‌های دو ظرفیتی می‌شود [۱۶]. اسیدی شدن مواد شیمیایی نیز می‌تواند به دلیل تزریق محلول‌هایی با pH پایین در شرایط مخزن باشد [۱۷].

۵-۱. جذب و نگهداری

جذب و نگهداری مواد شیمیایی در طول جریان از طریق محیط متخلخل در فرآیند ازدیاد برداشت نفت (EOR) رخ می‌دهد. این تعاملات به نوع مواد شیمیایی تزریق شده به مخزن بستگی دارد. مواد شیمیایی از جمله نانوذرات با سنگ مخزن به روش‌های مختلفی از جمله جاذبه الکترواستاتیکی، نیروهای واندروالسنس، برهمکنش فضایی، کاهش غلظت محلول‌های شیمیایی تزریق شده و غیره با سطح سنگ مخزن تعامل دارند. جذب پلیمر به دلیل چسبندگی مولکول‌های پلیمر به سطح سنگ است. این فرآیند در سطح مشترک جامد-مایع به دلیل انتقال مولکول‌های شیمیایی از فاز محلول حجیم به سطح مشترک جامد و مایع رخ می‌دهد [۱۸]. جاذب‌ها شامل سورفکتانت‌ها و ترکیبات قلبایی هستند. حفظ پلیمر یکی از عوامل ضروری برای کنترل انتشار پلیمر از طریق محیط متخلخل است [۱۹]. گیر افتادن مکانیکی و اندازه ماکرومولکول‌های پلیمری از دلایل اصلی ماندگاری پلیمر هستند. در این راستا، انتشار جریان پلیمر در مخزن به واسطه ویژگی‌های پلیمر و حجم منافذ نفوذ ناپذیر کنترل می‌شود [۲۰]. (شکل ۴) پویایی حفظ پلیمر در سنگ مخزن را به تصویر می‌کشد. به‌طور کلی، اثربخشی فرآیند EOR با جذب شیمیایی یا نگهداری ذرات در محیط متخلخل مخزن تعیین می‌شود [۲۱]. جذب و نگهداری مواد شیمیایی به عواملی چون محتوای معدنی رس، pH، غلظت الکترولیت (شوری)، ترکیب مایع مخزن و دما بستگی دارد [۲۲].



شکل ۴: جذب پلیمرها در محیط متخلخل EOR معمولی (سمت چپ)، EOR نانوسیال (راست) [۱۵، ۱۶]

۶. کاربردهای نانوذرات در ازدیاد برداشت نفت (EOR)

می‌شوند تا تولید نفت را در فرآیند EOR بهبود بخشند. استفاده از نانوذرات در روش‌های EOR به دلیل ویژگی‌های خاص این مواد و چالش‌های مرتبط با مکانیزم‌های مختلف آن‌ها، توجه زیادی را جلب کرده است [۲۵]. (جدول ۱)، طبقه‌بندی نانوذرات و خواص مرتبط با آن‌ها را نشان

فناوری نانو به‌عنوان یک راه‌حل نوآورانه در صنعت نفت و گاز معرفی شده و در حوزه‌های مختلفی مانند حفاری، سیمان‌کاری، شکست هیدرولیک و ازدیاد برداشت نفت (EOR) کاربرد دارد. نانوذرات به سیالات تزریقی اضافه

می‌دهد. همچنین، انواع مختلف نانوذرات مورد استفاده در فرآیند بازیابی نفت به‌روش ثالثیه بازیافت نفت (EOR) و نتایج تحقیقات مختلف در این زمینه آورده شده است [۲۶]. نانوذرات بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مختلف، شامل انواع کربنی، فلزی، لیپیدی، سرامیکی، پلیمری و نیمه‌هادی دسته‌بندی می‌شوند. نانوذراتی مانند نانولوله‌های کربنی (CNT)، گرافن، و حامل‌های لیپیدی نانوساختار، کشش سطحی (IFT) را کاهش داده و بهبود بازیابی نفت را تسهیل می‌کنند. نانوذرات فلزی مانند TiO_2 و SiO_2 نیز در

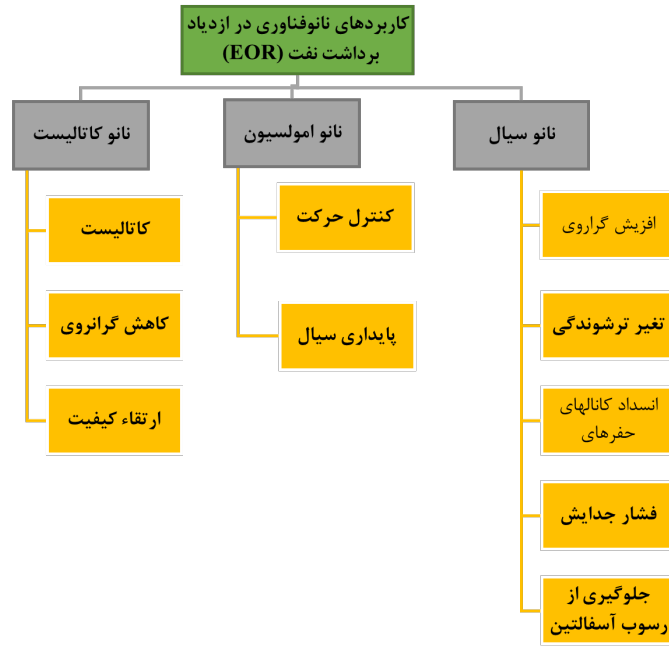
کاهش IFT، تغییر ترشوندگی و تثبیت امولسیون نفت-آب مؤثرند [۲۶ و ۲۷]. علاوه بر این، نانوذرات سرامیکی همچون اکسید آلومینیوم، منیزیم و مس و نانوذرات پلیمری، به کاهش ویسکوزیته نفت و بهبود فرآیند EOR کمک می‌کنند. نانوذرات نیمه‌هادی نیز در کاهش IFT و تغییر ترشوندگی مؤثر هستند. در نهایت، نانوذرات SiO_2 و TiO_2 به‌عنوان پرکاربردترین نانوذرات در صنعت نفت شناخته شده و نقشی کلیدی در بهبود کارایی فرآیندهای EOR دارند [۲۸ و ۲۹].

جدول ۱: طبقه‌بندی و انواع نانوذرات مورد استفاده در فرآیند EOR [۲۶]

طبقه بندی نانوذرات	نوع نانوذرات	ویژگی‌های کلیدی	مکانیسم اثر در EOR
نانوذرات بر پایه کربن	بر پایه نانوذرات کربن	۱. دو ماده اصلی مانند نانولوله‌های کربنی یک لوله از صفحات گرافن و فولرن ساخته شده. ۲. نانولوله‌های کربنی ۱۰۰ برابر قوی‌تر از فولاد هستند.	این نانوذرات به دلیل سطح ویژه بالا و خواص مکانیکی و شیمیایی مناسب می‌توانند به بهبود جریان نفت در مخازن کمک کنند. همچنین، توانایی جذب و نگهداری مواد شیمیایی می‌تواند به افزایش کارایی مواد شیمیایی تزریقی کمک کند.
نانوذرات فلزی	نانوذرات سیلیس	۱. نانوذرات فلزی را می‌توان به‌روش‌های مختلفی مانند شیمیایی سنتز کرد. ۲. سطح انرژی بالایی دارند.	نانوذرات فلزی مانند نقره و طلا می‌توانند به‌عنوان کاتالیزور عمل کنند و واکنش‌های شیمیایی را تسریع کنند. این نانوذرات همچنین می‌توانند به‌عنوان عوامل ضد باکتری برای جلوگیری از ایجاد رسوب در چاه‌های نفت استفاده شوند.
نانوذرات بر پایه لیپید	نانوساختارهای لیپیدی به‌عنوان حامل سورفکتانت	۱. شکل کروی دارند و قطر آن‌ها بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر است. ۲. از لیپید جامد و ماتریکسی از مولکول‌های لیئوفیل محلول تشکیل شده‌اند.	این نانوذرات می‌توانند به‌عنوان حامل‌های دارویی برای انتقال مواد شیمیایی به مخازن نفت عمل کنند. آن‌ها همچنین می‌توانند به کاهش کشش سطحی بین نفت و آب کمک کنند که منجر به افزایش برداشت نفت می‌شود.
نانوذرات پلیمری	نانوذرات پلیمری با پوشش سیلیکات	۱. نانوذرات الی، نانوذرات سیلیکات با پوشش پلیمری هستند. ۲. ساختار نانوکپسول یا نانوکره دارند.	این نانوذرات می‌توانند به‌عنوان مواد افزودنی برای بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی سیالات حفاری و تزریقی استفاده شوند. آن‌ها می‌توانند به افزایش ویسکوزیته و پایداری سیالات کمک کنند و در نتیجه برداشت نفت را افزایش دهند.
نانوذرات سرامیکی	اکسید فلز/ SiO_2 نانوکامپوزیت‌ها	۱. این نوع نانوذرات با استفاده از اکسیدها، کاربیدها، کربنات‌ها و فسفات‌ها و جامدات معدنی هستند. ۲. از نظر شیمیایی بی‌اثر و مقاومت بالایی دارند.	این نانوذرات معمولاً به‌عنوان فیلترها یا مواد جاذب در فرآیندهای تصفیه و جداسازی استفاده می‌شوند. آن‌ها می‌توانند به بهبود کیفیت نفت خام و کاهش ناخالصی‌ها کمک کنند که در نهایت منجر به افزایش برداشت نفت می‌شود.
نانوذرات نیمه‌هادی	نانوذرات اکسید روی	۱. نانوذرات نیمه‌هادی در جدول تناوبی در گروه‌های ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ هستند. ۲. نانوذرات نیمه‌هادی در فتوکاتالیزور، الکترونیک، فتوپنیتیک استفاده شده است.	این نانوذرات می‌توانند در حسگرها و سیستم‌های نظارتی مورد استفاده قرار بگیرند تا شرایط مخزن را بهتر کنترل کنند. با ارائه داده‌های دقیق‌تر، می‌توان استراتژی‌های بهتری برای ازدیاد برداشت نفت طراحی کرد.

۵-۱. کاربرد نانوذرات در سیلاب زنی شیمیایی

سیلاب زنی شیمیایی یک تکنیک بازیابی نفت است که با افزودن مواد شیمیایی مختلف به آب تزریق شده انجام می‌شود. روش‌های شیمیایی EOR عبارتند از پلیمر، قلیایی، سورفکتانت، فوم و سیلاب زنی ترکیبی (قلیایی/سورفکتانت/پلیمر) هستند. EOR شیمیایی به دلیل افزایش کارایی، فناوری، صرفه اقتصادی و هزینه سرمایه پایین، روشی امیدوارکننده است [۱۷].



شکل ۵: کاربرد نانوتکنولوژی در EOR [۱۸]

۱-۱-۶. نانو سیالات پلیمری

دادن ویسکوزیته زمانی رخ می‌دهد که کاتیون‌های موجود در آب‌نمک‌ها با مولکول‌های گروه‌های آمید و کربوکسیلات پلیمرها تماس پیدا کنند [۱۹]. برهمکنش پلیمر با نانوذرات اثر سینرژیک دارد که هم رئولوژی پلیمر و هم پایداری نانوذرات را بهبود می‌بخشد. جاذبه الکترواستاتیکی نانوذرات در حضور آب‌نمک افزایش می‌یابد، که این امر موجب تجمع نانوذرات و تقویت عملکرد سطحی در فرآیند EOR می‌شود [۳۳].

نانوسیالات پایه پلیمری سیالاتی هستند که در آن‌ها نانوذرات پلیمری با پراکندگی نانوذرات در محلول‌های پلیمری ساخته می‌شوند. روش تهیه نانوسیالات مبتنی بر پلیمر به دو دسته تقسیم می‌شود: ۱- نانوذرات پوشش داده شده با پلیمر ۲- نانوذرات پلیمری. برای غلبه بر مشکلات مربوط به تجمع و تراکم نانوذرات در محیط مخزن نفت، نانوذرات پوشش داده شده با پلیمر کارآمدتر هستند [۳۱]. در همین حال، این نانوذرات توسعه یافته‌اند تا از شکست پلیمر در شرایط خاص مخزن جلوگیری کنند؛ بنابراین، نانوسیالات در فرآیند EOR به دلیل اثرات پلیمرها در افزایش رئولوژی، بهبود پایداری و کنترل تحرک، کاهش جذب پلیمر و تغییر ترشوندگی، نقش مؤثری ایفا می‌کنند [۳۱].

۱-۱-۶-۲. مهار جذب برهمکنش

مهار جذب برهمکنش یکی از روش‌های کلیدی در بهینه‌سازی کارایی فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت (EOR) است که به‌ویژه در تعاملات میان مولکول‌های پلیمری و نانوذرات در محیط‌های متخلخل کاربرد دارد. در این فرآیند، هدف اصلی کاهش یا جلوگیری از جذب زیاد مواد شیمیایی تزریقی بر روی سطح سنگ مخزن و حفظ پایداری این مواد در طول جریان در مخزن است [۲۰]. این مهار به‌طور عمده از طریق دو مکانیسم اصلی پیاده‌سازی می‌شود: اول، استفاده از نانوذرات به‌عنوان عامل پراکنده‌کننده که می‌تواند بر تعاملات سطحی میان مولکول‌های پلیمری و سطح سنگ مخزن تأثیر مثبتی بگذارد. دوم، استفاده از پوشش‌دهی مناسب بر روی نانوذرات که به کاهش تجمع و انباشت آن‌ها و جلوگیری از جذب اضافی آن‌ها توسط سطح سنگ مخزن کمک می‌کند. این روش موجب می‌شود که نانوذرات در سیستم باقی بمانند

۱-۱-۶-۱. افزایش ثبات رئولوژی و کنترل تحرک

افزایش ثبات رئولوژی و کنترل تحرک، رفتار جریان و ویژگی‌های تغییر شکل سیالات را به‌طور مؤثری تحت تأثیر قرار داده و به تجزیه و تحلیل خواص ویسکوالاستیک پلیمر کمک می‌کند. برای جلوگیری از چسبندگی و حفظ نسبت تحرک مناسب در مخزن، تقویت رفتار رئولوژیکی ضروری است؛ بنابراین، تزریق پلیمرها و نانوذرات برای برنامه‌های EOR ضروری می‌باشد [۳۲]. پلیمرها و نانوذرات در محیط آب‌نمک مخزن ممکن است دچار تخریب شوند. از دست

و از تجمع و رسوب آن‌ها جلوگیری شود، که در نتیجه کارایی فرآیند EOR بهبود می‌یابد. همچنین، با بهینه‌سازی تعاملات بین مولکول‌ها و نانوذرات، ویژگی‌های جریان و پایداری سیالات تقویت شده و از تجزیه زود هنگام پلیمرها جلوگیری می‌شود [۲۱]. پلیمرها و نانوذرات به صورت هم‌افزایی عمل می‌کنند و ترکیب آن‌ها می‌تواند ویژگی‌های عملکردی بهبود یافته‌ای را ایجاد کند. در این راستا، نانوسیالات پلیمری نسبت به نانوذرات پلیمری حاوی نانوس، جذب کمتری در محیط‌های متخلخل دارند. تحقیقات نشان داده است که نانوذرات پلیمری که حاوی نانوذرات SiO_2 هستند، جذب کمتری روی سطوح سنگ ماسه‌سنگ نسبت به سایر انواع نانوذرات نشان داده‌اند. این ویژگی می‌تواند به افزایش کارایی نانوذرات در فرآیندهای بازیابی نفت و کاهش تداخل‌های غیرضروری در سطح سنگ کمک کند، چرا که جذب کمتر روی سطوح سنگ موجب افزایش تحرک و اثربخشی نانوذرات در محیط‌های متخلخل می‌شود [۲۲].

۴-۱-۶. نانو سیالات پلیمری

نانوسیالات سورفکتانت که ترکیبی از نانوذرات و سورفکتانت‌ها است، به‌عنوان یک عامل مؤثر در فرآیندهای تقویت‌شده بازیابی نفت (EOR) شناخته می‌شود. این نانوسیالات با کاهش کشش سطحی (*IFT*) و تغییر ترشوندگی، می‌توانند کارایی جابجایی میکروسکوپی نفت را به‌طور قابل توجهی بهبود دهند. کاهش *IFT* منجر به کاهش نیروهای چسبندگی بین نفت و سطح سنگ مخزن می‌شود که در نهایت به افزایش توانایی جریان نفت در داخل سنگ‌های متخلخل کمک می‌کند. در محیط‌های مخزنی، نانوسیالات سورفکتانت ممکن است برای ایجاد فوم‌ها و امولسیون‌های پایدار به کار روند [۲۳]. این فوم‌ها و امولسیون‌ها می‌توانند به‌عنوان عامل‌های تثبیت‌کننده برای انتقال نفت و گاز در داخل مخزن عمل کنند و باعث بهبود فرآیند جابجایی نفت از نواحی غیرقابل دسترس شوند [۲۴]. این فرآیندها به‌ویژه در مخازن با ویژگی‌های پیچیده و سخت دسترسی که نیاز به تکنیک‌های پیشرفته دارند، اهمیت پیدا می‌کنند. علاوه بر این، نانوذرات موجود در نانوسیالات می‌توانند ویژگی‌های سطحی را تغییر دهند و از طریق ایجاد امولسیون‌های نفت-آب یا فوم‌های پایدار، موجب افزایش راندمان فرآیندهای بازیابی نفت شوند. این ترکیب‌های نانوذرات و سورفکتانت‌ها به‌ویژه در شرایط محیطی چالش‌برانگیز (مثلاً دماهای بالا یا شوری زیاد) می‌توانند نقش مؤثری ایفا کنند و فرآیند EOR

را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشند. [۲۵]. امولسیون‌ها به تضمین کارایی تزریق سیالات کمک می‌کنند، در حالی که فوم‌های پایدار اجازه می‌دهند تا مایع در سراسر مخزن از مناطق با نفوذ بالا به مناطق با نفوذپذیری پایین‌تر هدایت شود. کشش سطحی (*IFT*) و ترشوندگی سیالات در مخزن از جمله معیارهای کلیدی هستند که باید هنگام ارزیابی و جریان سیالات در نظر گرفته شوند. پس از بازیابی ثانویه نفت، بخشی از نفت به دلیل نیروهای موئینگی در مخزن به دام می‌افتد. عدد موئینگی، که عددی بدون بعد است، توزیع نیروی موئینگی را در معادله نشان می‌دهد [۵]:

$$Nc = \frac{\mu \times V}{\sigma \times \cos \theta} \quad (1)$$

در صورتی که Nc عدد موئینگی، m ویسکوزیته سیال جابجایی (پاسکال-ثانیه)، v سرعت جابجایی داری (متر/ثانیه)، q زاویه تماس و s سیال جابجایی و *IFT* سیال جابجا شده (آب و نفت) است. بازیافت نفت و اشباع نفت باقیمانده به Nc مربوط می‌شود. Nc با کاهش اشباع نفت باقیمانده افزایش می‌یابد [۲۶].

۴-۱-۶-۱. کاهش *IFT*

بررسی اثر سورفکتانت آنیونی و نانوذرات سیلیس (SiO_2) در سطح مشترک نفت و آب برای اندازه‌گیری عملکرد نانوسیالات سورفکتانت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانو سورفکتانت توانست *IFT* را چهار برابر در غلظت ۱۰۰۰ ppm کاهش دهد. در شرایط دمای بالا و شوری زیاد، نانو سورفکتانت‌ها برای استفاده در فرآیندهای EOR توصیه می‌شوند. نانوذرات با تقویت سیستم مکانیزم‌های حاکم، عملکرد سورفکتانت‌ها را بهبود می‌بخشند. علاوه بر این، اضافه کردن نانوذرات به محلول سورفکتانت باعث افزایش بازیابی نفتی می‌شود [۲۷، ۲۸]. تحقیقات همچنین نشان داده‌اند که این مخلوط باعث جذب سطحی سورفکتانت بر روی سطح نانوذرات و ایجاد سطح آب‌گریز می‌شود، که در نهایت منجر به کاهش بیشتر *IFT* می‌گردد. نانوذرات از جذب مولکول‌های سورفکتانت از سطح مشترک جلوگیری می‌کنند، که به کاهش *IFT* کمک می‌کند [۳۹]. هنگامی که نانوذرات به محلول سورفکتانت افزوده می‌شوند، مولکول‌های سورفکتانت به سطح نانوذرات جذب می‌شوند. این فرآیند باعث ایجاد یک سطح آب‌گریز روی نانوذرات شده و مولکول‌های

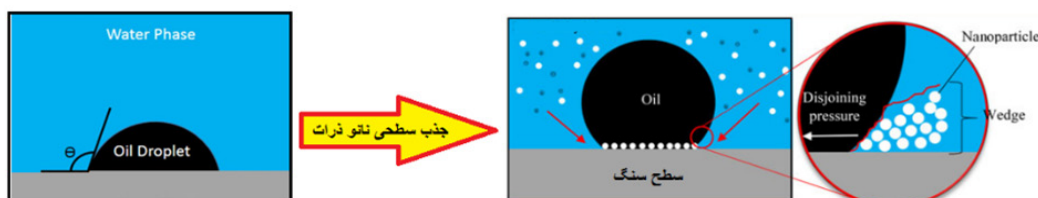


تغییر می‌دهند [۳۱]. این تغییرات موجب می‌شود که نفت به‌جای چسبیدن به سطوح سنگ، به‌راحتی همراه با آب تزریقی حرکت کرده و استخراج شود. همچنین، تحقیقاتی که تأثیر نانوذرات بر ترشوندگی سنگ مخزن را بررسی کرده‌اند، در (جدول ۱) ارائه شده است. نانوسورفکتانت‌ها کشش سطحی در تماس سنگ/نفت/آب نمک را کاهش می‌دهند و به این ترتیب باعث افزایش تغییرات ترشوندگی می‌شوند [۴۰]. هنگامی که نفت و آب با نانوسیال سورفکتانت تعامل می‌کنند، منحنی‌های نفوذپذیری نسبی تغییر می‌کنند. علاوه بر این، استفاده از نانو سورفکتانت‌ها به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های ترشوندگی، میزان نفت بازیافتی از مخازن کربناته را افزایش می‌دهد که به دلیل شکاف‌های طبیعی و آب‌گریزی این مخازن، بازیابی نفت در آن‌ها کم است. این امر نشان‌دهنده چالش‌های فشار مؤینگی ناشی از جذب آب در ماتریس سنگ است [۴۱]. بررسی غلظت نانوسورفکتانت‌ها روی سنگ آهک مرطوب نفتی در دمای بین ۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد که نانوذرات استفاده شده ZrO_2 و نیکل اکسید (NiO) همراه با تریتون X-100 و CTAB به‌عنوان سورفکتانت‌ها، تمایل بیشتری به تغییرات ترشوندگی دارند، که ناشی از تماس الکترواستاتیک قوی بین آن‌ها در تمامی شرایط دما است.

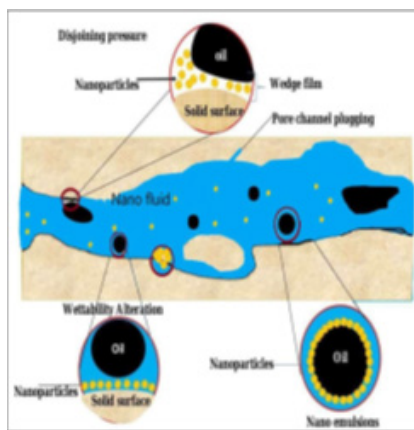
سورفکتانت به سطح مشترک نفت و آب منتقل می‌شوند، که منجر به کاهش کشش سطحی می‌شود. علاوه بر این، نانوذرات از جذب مولکول‌های سورفکتانت به سطح سنگ مخزن یا به یکدیگر جلوگیری می‌کنند، که این باعث می‌شود سورفکتانت‌ها مدت بیشتری در سطح مشترک نفت و آب باقی بمانند و به‌طور مؤثرتری کشش سطحی را کاهش دهند [۲۹]. به دلیل اندازه کوچک نانوذرات، آن‌ها قادرند به‌سادگی وارد سطح مشترک نفت و آب شده و ویژگی‌های سطحی این دو فاز را تغییر دهند. این نفوذ موجب کاهش انرژی سطحی شده و در نتیجه کشش بین سطحی کاهش می‌یابد. این مکانیسم‌ها موجب بهبود فرآیند ازدیاد برداشت نفت می‌شوند، زیرا کاهش کشش سطحی باعث تسهیل جریان نفت در سنگ مخزن و افزایش بازیابی نفت می‌شود [۳۰].

۲-۲-۱-۶. تغییر ترشوندگی

استفاده از نانوذرات در فرآیند تزریق آب باعث تغییر زاویه تماس بین نفت و سطح سنگ مخزن می‌شود (شکل ۶). نانوذرات با ایجاد سطوح آب‌دوست، تمایل سنگ به جذب نفت را کاهش می‌دهند. به‌عبارت دیگر، نانوذرات ترشوندگی سنگ مخزن را از نفت‌دوستی به آب‌دوستی



شکل ۶: تغییر ترشوندگی توسط نانوذرات [۴۲]

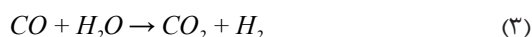


شکل ۷: سورفکتانت‌ها و نانوذرات در محیط متخلخل [۳۲، ۳۳]

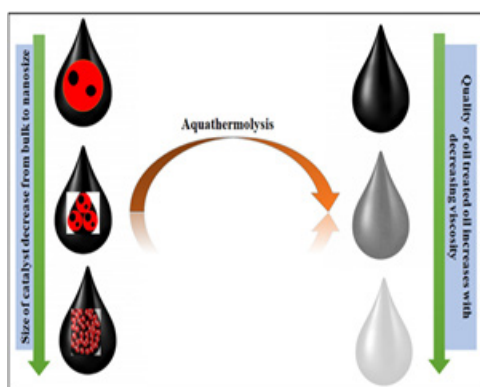
۲-۶. کاربرد نانو ذرات در سیلاب زنی حرارتی

ترکیبات آلی سنگین مانند رزین‌ها و آسفالتین‌ها به‌طور عمده در نفت‌های سنگین حضور دارند. این ترکیبات شامل مولکول‌هایی با حداقل ۶۰ اتم کربن هستند که باعث ویسکوزیته بالا، نقطه جوش بالا و وزن مولکولی زیاد می‌شوند [۴۵]. این ویژگی‌ها موجب چالش‌های قابل توجهی در فرآیندهای بازیافت نفت می‌شوند، چرا که تحرک نفت محدود است و جابجایی آن با سیالات ساده مانند آب یا گاز دشوار است؛ بنابراین، روش‌های حرارتی بازیافت پیشرفته (Thermal EOR) به دلیل بهبود راندمان، توجه زیادی را جلب کرده‌اند. نانومواد به‌عنوان نانو کاتالیست در این فرآیندها به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. نانو کاتالیست‌های مبتنی بر نیکل، آهن و کبالت برای کاهش ویسکوزیته نفت سنگین و همچنین در فرآیند ارتقاء درجا (آکواترمولیز) نقش کلیدی دارند. نسبت سطح به حجم بالای این نانو کاتالیست‌ها سطح تماس بیشتری بین نفت و کاتالیست فراهم کرده و منجر به زمان واکنش طولانی‌تر و کاهش چگالی و ویسکوزیته نفت می‌شود [۴۶]. با اجرای عملیات حرارتی مناسب، نانوذرات به راحتی از محیط واکنش جدا می‌شوند. در فرآیند آکواترمولیز، واکنش‌هایی مانند هیدروژناسیون، سولفورزدایی، هیدروآکسیژناسیون و هیدروکراکینگ باعث شکستن پیوندهای شیمیایی در مولکول‌های حاوی اکسیژن، نیتروژن و گوگرد می‌شوند. این فرآیند در دماهای ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد ویسکوزیته نفت سنگین را کاهش می‌دهد. پیوندهای C-S به‌عنوان ضعیف‌ترین پیوند شکسته شده و موجب تولید مقادیر کمی گوگرد و ترکیبات سنگین مانند رزین‌ها و آسفالتین‌ها می‌شود. جزء اساسی این واکنش‌ها، هیدرولیز پیوندهای گوگردی آلیفاتیک است که در معادلات (۲) و (۳) به‌طور دقیق بیان شده است [۴۷].

ضعیف موجود در ترکیبات نفت سنگین، شامل پیوندهای گوگرد، اکسیژن و نیتروژن را بشکند. فرآیند WGSR نقش کلیدی در ارتقاء کیفیت نفت سنگین در محیط‌های حرارتی و آکواترمولیز دارد. این واکنش به‌صورت زیر قابل نمایش است:



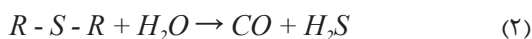
هیدروژن تولیدشده در فرآیند WGSR به‌طور مستقیم در واکنش‌های هیدرولیز و کاهش دخالت کرده و ویسکوزیته، چگالی و میزان گوگرد نفت سنگین را کاهش می‌دهد. این هیدروژن علاوه بر بهبود کیفیت نفت، تجزیه مولکول‌های پیچیده‌ای مانند رزین‌ها و آسفالتین‌ها را تسریع می‌کند. این فرآیند در ارتقاء درجا و بازیافت حرارتی نفت سنگین نقش مهمی دارد و کارایی روش‌های حرارتی EOR را بهبود می‌بخشد. استفاده از نمک‌های فلزی آبی به جای آب در فرآیند تحریک بخار موجب افزایش محتوای آسفالتین و ویسکوزیته نفت بازیافتی شده که به تأثیر کاتالیزوری فلزات در فرآیند آکواترمولیز مرتبط است [۴۸].



شکل ۸: اثر اندازه کاتالیزور بر عملکرد آکواترمولیز در بازیافت حرارتی نفت [۳۴]

۲-۳. کاربرد نانو ذرات در تزریق متناوب آب و گاز (WAG)

مخازن نفت طبیعی دارای ضریب بازیافت پایینی هستند. یکی از روش‌های مؤثر در افزایش بازیافت، مکانیزم جابجایی امتزاج‌پذیر CO_2 است. با توجه به محدودیت‌های تزریق آب و گاز، مانند نسبت تحرک نامطلوب، اثر گرانشی و سیلاب‌زنی ناکارآمد، روش تزریق متناوب آب و گاز (WAG) جایگزین سیلاب‌زنی شده است [۴۹]. استفاده از نانوتکنولوژی می‌تواند راندمان میکروسکوپی و ماکروسکوپی فرآیند WAG را بهبود بخشد. تزریق نانوذرات به‌عنوان نانوپراکنندگی مایع، گزینه‌ای



هیدرولیز در فرآیندهای حرارتی نفت سنگین زمانی رخ می‌دهد که هیدروژن فعال از طریق واکنش تغییر گاز آب (WGSR) تولید شده و به ترکیبات نفت منتقل می‌شود. در این واکنش، آب (H_2O) با کربن مونوکسید (CO) واکنش داده و هیدروژن مولکولی (H_2) و دی‌اکسید کربن (CO_2) تولید می‌شود. هیدروژن حاصل می‌تواند در واکنش‌های کاهش‌دهنده مانند هیدروژناسیون شرکت کرده و پیوندهای

1. Aquathermolysis
2. Water-Alternating-Gas



نوبین و کارآمد برای بازیابی نفت از مخازن بالغ محسوب می‌شود. کاهش فشار مخزن و رسوب آسفالتین از عوامل کاهش تولید هستند. بررسی‌ها نشان داده‌اند که در فرآیند تزریق CO_2 ، استفاده از نانوذراتی مانند اکسید تیتانیوم (TiO_2) و اکسید آهن (Fe_3O_4) می‌تواند رسوب آسفالتین را به تأخیر بیندازد. مقایسه این دو نشان می‌دهد که Fe_3O_4 مؤثرتر از TiO_2 است. همچنین، تأثیر نانوذرات بر قابلیت اختلاط سیال نفتی و کاهش کشش بین سطحی (IFT) در حضور سورفکتانت‌ها بررسی شد [۵۰]. آزمایش‌های IFT با تانسومتر قطره چرخشی و استفاده از نانوذرات SiO_2 پوشش داده شده با سورفکتانت هگزادسیل تری‌متیل آمونیوم بروماید نشان داد که فرآیند Nano-WAG نسبت به WAG سنتی ضریب بازیافت را بیش از ۲۰ درصد بهبود می‌بخشد. نتایج نشان دادند که جذب نانوذرات SiO_2 روی سطح سنگ موجب تغییر ترشوندگی از حالت نفت‌دوست به آب‌دوست شده و IFT را کاهش می‌دهد. این دو مکانیسم می‌توانند مشکلات روش WAG را رفع کرده و عملکرد آن را بهبود بخشند. در نتیجه، این مخازن گزینه‌های مناسبی برای پروژه‌های ترسیب کربن (CGS)^۱ محسوب می‌شوند [۵۱].

۷. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به ارزیابی سیستماتیک کاربردهای نانوفناوری در بهبود فرآیند ازدیاد برداشت نفت (EOR) پرداخته است. استفاده از نانوذرات هوشمند در بازیابی هیدروکربن طی سال‌های اخیر به سرعت پیشرفت کرده است و نتایج قابل توجهی ارائه داده است. در این راستا، نانوذرات با اندازه‌ها و غلظت‌های مختلف در روش‌های گوناگون EOR مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، چالش‌های مهمی در زمینه پیاده‌سازی عملی این فناوری‌ها در مقیاس میدانی وجود دارد. یکی از چالش‌های کلیدی، توسعه روش‌هایی است که علاوه بر کاهش هزینه‌ها، با محیط‌زیست نیز سازگار باشند. تولید مصنوعی نانومواد در روش‌های کنونی عمدتاً به فناوری‌ها و موادی وابسته است که کارایی محدودی دارند و می‌توانند به محیط‌زیست آسیب برسانند. از این رو، ابداع و توسعه روش‌های کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست برای تولید و تحویل نانوذرات، اولویتی مهم در تحقیقات این حوزه محسوب می‌شود. یکی دیگر از چالش‌های اساسی، پراکندگی مؤثر نانوذرات در محیط مخزن نفتی است. برای دستیابی به اثربخشی بیشتر، نیاز به روش‌های کارآمد توزیع و حمل‌ونقل نانوذرات وجود دارد. تحقیقات نشان داده‌اند که

نانوذرات شیمیایی مانند SiO_2 و TiO_2 در بهبود بازیافت نفت پتانسیل بالایی دارند. علاوه بر این، نانومواد سبز که با استفاده از عصاره‌های گیاهی تولید می‌شوند، به‌عنوان یک گزینه پایدار و سازگار با محیط زیست مورد توجه قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، نانوکامپوزیت‌های سبزی که با استفاده از عصاره‌های طبیعی همچون انار، زانتان، پوست تخم‌مرغ، برگ خرما تهیه شده‌اند، توانسته‌اند ویژگی‌هایی نظیر تغییر ترشوندگی، کاهش کشش سطحی (IFT) و افزایش بازیابی نفت در جای مخازن را بهبود دهند. صنعت نفت و گاز می‌تواند به‌طور قابل توجهی از این پیشرفت‌ها در فناوری نانو بهره‌مند شود. این فناوری‌ها نه تنها کارایی تجهیزات و فرآیندهای بازیافت را تحت شرایط عملیاتی سخت بهبود می‌بخشند، بلکه با فراهم کردن ابزارهای مدل‌سازی دقیق، امکان تحلیل بهتر ویژگی‌های سیالات مخزن و فرآیندهای سطحی نظیر کنترل جریان و تغییر ترشوندگی را فراهم می‌کنند. این پیشرفت‌ها به درک عمیق‌تر از مکانیسم‌های مؤثر بر افزایش بازیافت نفت سنگین کمک کرده و راه را برای کاربردهای گسترده‌تر این فناوری در میداین نفتی هموار می‌سازند.

مراجع:

- [1]. Hamad, H.T., et al. A review on nanotechnology and its applications on fluid flow in agriculture and water recourses. in IOP conference series: materials science and engineering. 2020. IOP Publishing.
- [2]. Kazemzadeh, Y., et al., Potential effects of metal oxide/ SiO_2 nanocomposites in EOR processes at different pressures. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018. 559: p. 372-384.
- [3]. Boul, P.J. and P.M. Ajayan, Nanotechnology research and development in upstream oil and gas. Energy Technology, 2020. 8(1): p. 1901216.
- [4]. Mageswari, A., et al., Nanomaterials: classification, biological synthesis and characterization. Nanoscience in Food and Agriculture 3, 2016: p. 31-71.
- [5]. Panchal, H., et al., A systematic review on



- [14]. Nworu, J. and O. Wilberforce, Application of nanotechnology for enhancing oil recovery (EOR) in oil and gas industry: a review. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 2019. 12(2): p. 32-42.
- [15]. Sorbie, K.S., Polymer-improved oil recovery. 2013: Springer Science & Business Media.
- [16]. Gbadamosi, A.O., et al., An overview of chemical enhanced oil recovery: recent advances and prospects. *International Nano Letters*, 2019. 9: p. 171-202.
- [17]. Dordzie, G. and M. Dejam, Enhanced oil recovery from fractured carbonate reservoirs using nanoparticles with low salinity water and surfactant: A review on experimental and simulation studies. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021. 293: p. 102449.
- [18]. Ali, J., et al., Greenly synthesized magnetite@ SiO₂@ xanthan nanocomposites and its application in enhanced oil recovery: IFT reduction and wettability alteration. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020. 45: p. 7751-7761.
- [19]. Tahernejad, E., et al., Evaluation of the simultaneous use of α -Fe₂O₃ nanoparticles and polyacrylamide polymer as an enhanced oil recovery method. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2025. 47(1): p. 12001-12015.
- [20]. Khoramian, R., et al., Surface modification of nanoparticles for enhanced applicability of nanofluids in harsh reservoir conditions: A comprehensive review for improved oil recovery. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2024. 333: p. 103296.
- [21]. Khoramian, R., et al., Impact of Relative Permeability Hysteresis on CO₂ Storage in Saline Aquifers. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2025. 15(1): p. 3-12.
- nanotechnology in enhanced oil recovery. *Petroleum Research*, 2021. 6(3): p. 204-212.
- [6]. Strambeanu, N., et al., Nanoparticles: Definition, classification and general physical properties, in *Nanoparticles' Promises and Risks: Characterization, Manipulation, and Potential Hazards to Humanity and the Environment*. 2014, Springer. p. 3-8.
- [7]. Mohanraj, V. and Y. Chen, Nanoparticles-a review. *Tropical journal of pharmaceutical research*, 2006. 5(1): p. 561-573.
- [8]. Khalili Nezhad, S.S. and G. Cheraghian, Mechanisms behind injecting the combination of nano-clay particles and polymer solution for enhanced oil recovery. *Applied Nanoscience*, 2016. 6(6): p. 923-931.
- [9]. Uddin, F., Clays, nanoclays, and montmorillonite minerals. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008. 39(12): p. 2804-2814.
- [10]. Agista, M.N., K. Guo, and Z. Yu, A state-of-the-art review of nanoparticles application in petroleum with a focus on enhanced oil recovery. *Applied sciences*, 2018. 8(6): p. 871.
- [11]. Kale, S.N. and S.L. Deore, Emulsion micro emulsion and nano emulsion: a review. *Systematic Reviews in Pharmacy*, 2017. 8(1): p. 39.
- [12]. Mughal, B., et al., Biogenic nanoparticles: Synthesis, characterisation and applications. *Applied Sciences*, 2021. 11(6): p. 2598.
- [13]. El-Diasty, A.I. and A.M. Ragab. Applications of nanotechnology in the oil & gas industry: Latest trends worldwide & future challenges in Egypt. in *SPE North Africa Technical Conference and Exhibition*. 2013. SPE.

- [30]. Kazemzadeh, Y., et al., Review on application of nanoparticles for EOR purposes: A critical review of the opportunities and challenges. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2019. 27(2): p. 237-246.
- [31]. Jafarbeigi, E., A. Mohammadidoust, and B. Ranjbar, A review on applications of nanoparticles in the enhanced oil recovery in carbonate reservoirs. *Petroleum Science and Technology*, 2022. 40(15): p. 1811-1828.
- [32]. Ali, J.A., et al., Recent advances in application of nanotechnology in chemical enhanced oil recovery: Effects of nanoparticles on wettability alteration, interfacial tension reduction, and flooding. *Egyptian journal of petroleum*, 2018. 27(4): p. 1371-1383.
- [33]. Eltoun, H., Y.-L. Yang, and J.-R. Hou, The effect of nanoparticles on reservoir wettability alteration: a critical review. *Petroleum Science*, 2021. 18: p. 136-153.
- [34]. Rezk, M.Y. and N.K. Allam, Impact of nanotechnology on enhanced oil recovery: A mini-review. *Industrial & engineering chemistry research*, 2019. 58(36): p. 16287-16295.
- [22]. Moradi, B., et al. Application of SiO₂ nano particles to improve the performance of water alternating gas EOR process. in *SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition? 2015. SPE*.
- [23]. Zafar, M., et al., Mathematical Modeling of Nanofluid Flow for Enhanced Oil Recovery Under the Effect of the High Temperature. *Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer*. 29: p. 86-101.
- [24]. Lao, J., et al., Micro/nanoparticle characteristics and flow in porous media: A review towards enhanced oil recovery. *Energies*, 2024. 17(16): p. 4136.
- [25]. Ivanova, A.A., et al., Effect of nanoparticles on viscosity and interfacial tension of aqueous surfactant solutions at high salinity and high temperature. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2020. 23(2): p. 327-338.
- [26]. Liu, P., et al., Experimental study of rheological properties and oil displacement efficiency in oilfields for a synthetic hydrophobically modified polymer. *Scientific reports*, 2017. 7(1): p. 8791.
- [27]. Asl, H.F., et al., Effect of SiO₂ nanoparticles on the performance of L-Arg and L-Cys surfactants for enhanced oil recovery in carbonate porous media. *Journal of Molecular Liquids*, 2020. 300: p. 112290.
- [28]. Machale, J., et al., Impact of mineralogy, salinity, and temperature on the adsorption characteristics of a novel natural surfactant for enhanced oil recovery. *Chemical Engineering Communications*, 2022. 209(2): p. 143-157.
- [29]. Hu, J., et al., Preparation and Investigation of Temperature-Responsive SiO₂-PSBMA Janus Nanosheet with Salt-Tolerant Properties for Enhanced Recovery of Heavy Oil. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024. 16(51): p. 70851-70862.



A Comprehensive Review of Nanomaterial Applications in Enhanced Oil Recovery (EOR): Mechanisms, Challenges, and Future Trends

Masoud Bijani^{1*}, Amir Hossein Sepahvand²

1. Assistant Professor, Department of Petroleum and Geoenergy Engineering, University of Garmsar, Garmsar, Iran
2. B.Sc., Department of Petroleum and Geoenergy Engineering, University of Garmsar, Garmsar, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

Article History:

Received: 24 August 2025

Revised: 07 October 2025

Accepted: 03 December 2025

Keywords:

Nanotechnology

Nanofluids

Oil recovery

Interfacial tension

Green nanomaterials

Wettability alteration

ABSTRACT

In this paper, the application of nanoparticles in the petroleum industry to enhance oil production of oil reservoirs is comprehensively reviewed. Nanomaterials are employed in various forms, including nanoparticles, nanosensors, nanocomposites, coated nanoparticles, and nanofluids, across different petroleum processes. Nanotechnology plays a pivotal role in enhanced oil recovery (EOR) methods by facilitating the extraction of oil trapped in subsurface reservoirs. Certain nanoparticles have garnered significant attention due to their environmental compatibility and cost-effectiveness. These nanoparticles create favorable conditions for improving oil recovery through their interactions with the rock/oil system. This study explores the types of nanoparticles and nanomaterials utilized in petroleum applications, emphasizing their physicochemical and mechanical properties. Additionally, the role of nanoparticles in chemical, hybrid, thermal, and microbial extraction methods is examined. The research also delves into the various mechanisms associated with nanoparticle usage, such as enhancing rheological properties, controlling fluid mobility, altering rock wettability, and reducing interfacial tension (IFT) between oil and water. Furthermore, the study investigates the potential of green nanomaterials and advanced nanocomposites designed to optimize fluid and oil recovery performance. These materials incorporate environmentally friendly chemical agents, such as surfactants, alcohols, and polymers, to improve the efficiency and sustainability of petroleum extraction processes.

DOR: [20.1001.1.2412.1081.1404.09.12](https://doi.org/10.1001.1.2412.1081.1404.09.12)

How to cite this article

M. Bijani, A.H. Sepahvand, A Comprehensive Review of Nanomaterial Applications in Enhanced Oil Recovery (EOR): Mechanisms, Challenges, and Future Trends. *Iranian Journal of Gas Engineering*, 2025; 12(4): 80-93. (https://ijge.irangi.org/article_735757.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: masoudbijani@fmgarmsar.ac.ir, (M. Bijani).

Available online 11 March 2026

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/>)



انتخاب پروژه در سبد پروژه‌ها با به‌کارگیری معیارهای اقتصادی و غیراقتصادی و با استفاده از منطق فازی

محمدابراهیم طیبی عراقی^{۱*}، سید جواد سیدیان هاشمی^۲، علی قاسمی کیانی^۳

۱. استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد بین‌المللی خرمشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خرمشهر، ایران

۲. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، واحد بین‌المللی خرمشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خرمشهر، ایران

۳. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: tayebi_m@ut.ac.ir

مقاله‌ی کاربردی

صفحه ۹۴ - ۱۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹

چکیده

مدیریت بهینه سبد پروژه‌ها به‌عنوان عاملی کلیدی در حفظ مزیت رقابتی و تحقق اهداف راهبردی سازمان‌های پروژه‌محور شناخته می‌شود. با این حال، بسیاری از مدل‌های متعارف انتخاب پروژه، یا بر معیارهای صرفاً اقتصادی تمرکز داشته و یا فاقد چارچوبی نظام‌مند برای ادغام هم‌زمان معیارهای کیفی غیراقتصادی در شرایط عدم قطعیت هستند. این پژوهش باهدف پر کردن این شکاف، به ارائه و اعتبارسنجی یک مدل نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر منطق فازی برای انتخاب پروژه در شرکت‌های پروژه‌محور می‌پردازد. روش تحقیق از نوع کاربردی بوده و با رویکرد توصیفی-پیمایشی و با استفاده از تکنیک دلفی فازی در بین ۳۰ نفر از خبرگان شرکت مهندسی توان آذران ارونند اجرا شد. چارچوب شش‌معیاره پژوهش (شامل مالی-اقتصادی، الزامات راهبردی، فنی، ریسک پروژه، منابع انسانی و محیط پروژه) از طریق پرسشنامه‌های فازی ارزیابی و با به‌کارگیری روش FTOPSIS فازی و تحلیل رگرسیون تجزیه‌وتحلیل شد. یافته‌ها نشان داد که معیار «الزامات راهبردی» با وزن نهایی ۰/۵۵۳ مهم‌ترین معیار است و «منابع انسانی» با ضریب تأثیر ۰/۵۷۱ قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده موفقیت در انتخاب پروژه محسوب می‌شود. همچنین، تحلیل حساسیت انجام‌شده، پایداری و قابلیت اتکای مدل را تأیید کرد. نوآوری اصلی این مطالعه در تلفیق هم‌زمان شش بُعد کلیدی اقتصادی و غیراقتصادی در یک مدل فازی یکپارچه، اعتبارسنجی عملی آن در بافت یک شرکت پروژه‌محور ایرانی و افزودن تحلیل حساسیت سیستماتیک است. این مدل به‌عنوان ابزاری کارا به مدیران کمک می‌کند تا در فضای عدم قطعیت، تصمیمات انتخاب پروژه را مبتنی بر توازن میان توجیه اقتصادی و الزامات راهبردی-انسانی اتخاذ نمایند.

کلیدواژه‌ها: انتخاب پروژه، سبد پروژه‌ها، معیارهای اقتصادی و غیراقتصادی، منطق فازی

۱. مقدمه

در عصر حاضر، سازمان‌های پروژه‌محور برای حفظ مزیت رقابتی و تحقق اهداف راهبردی خود، ناگزیر به مدیریت بهینه مجموعه پروژه‌های خود در قالب یک سبد پروژه (Project Portfolio) منسجم هستند. انتخاب پروژه‌های مناسب برای گنجاندن در این سبد، یک تصمیم‌گیری پیچیده و چندبعدی است که تأثیر مستقیمی بر بهره‌وری، رشد و بقای سازمان دارد. در غیاب یک نظام یکپارچه و عقلایی برای انتخاب و اولویت‌بندی پروژه‌ها، سازمان‌ها اغلب



شاهد تعارضات داخلی، رقابت ناسالم مدیران پروژه بر سر منابع محدود، پراکندگی در تلاش‌های استراتژیک و در نهایت، شکست در تحقق منافع کلان خواهند بود [۱، ۲].

مدیریت مؤثر سبب پروژه‌ها، تنها منوط به انجام به‌موقع و در بودجه پروژه‌ها نیست، بلکه مستلزم همسویی استراتژیک پروژه‌های انتخابی با مأموریت، چشم‌انداز و اهداف بلندمدت سازمان است [۳]. با این حال، محیط کسب‌وکار امروزی با عدم قطعیت‌های فراوان، محدودیت منابع و وجود معیارهای متعدد و گاه متعارض در ارزیابی پروژه‌ها مشخص می‌شود. این معیارها تنها منحصر به شاخص‌های سخت اقتصادی (مانند NPV، نرخ بازده داخلی) نبوده، بلکه طیف وسیعی از عوامل غیراقتصادی حیاتی از جمله هماهنگی با استراتژی کلی، قابلیت یکپارچه‌سازی با سبب موجود، ریسک‌های فناورانه، اثرات اجتماعی و زیست‌محیطی و افزایش قابلیت‌های محوری سازمان را نیز در برمی‌گیرد [۱].

پیچیدگی ذاتی تصمیم‌گیری در چنین فضای چندمعیاره‌ای، زمانی مضاعف می‌شود که قضاوت‌های کیفی، داده‌های نادقیق و ترجیحات ذهنی تصمیم‌گیرندگان نیز وارد فرآیند ارزیابی شود. در اینجا، منطق فازی (Fuzzy Logic) به‌عنوان یک ابزار ریاضی قدرتمند ظهور می‌کند که قادر است ابهام و عدم قطعیت موجود در زبان و قضاوت انسانی را مدل‌سازی نماید. این منطق، با تبدیل ارزیابی‌های کیفی و زبانی (مانند «خوب»، «متوسط»، «مهم») به اعداد فازی، امکان پردازش ریاضی و ادغام آن‌ها را در یک مدل ساختاریافته فراهم می‌سازد [۴].

در راستای تلفیق معیارهای پایداری با فرآیند انتخاب سبب پروژه، سالوی و همکاران [۵] یک چارچوب تلفیقی ANP-فازی-TOPSIS فازی برای انتخاب سبب پروژه پایدار در عصر تحول دیجیتال ارائه نموده‌اند. تمرکز اصلی این پژوهش بر یکپارچه‌سازی معیارهای زیست‌محیطی، اجتماعی و حکمرانی (ESG) در کنار معیارهای اقتصادی و فنی است. اگرچه این مدل گامی مهم در جهت پایداری محسوب می‌شود، اما تأثیر عمیق قابلیت‌های منابع انسانی و ریسک‌های کیفی اجرایی را به‌عنوان متغیرهای مستقل و حیاتی کمتر مورد توجه قرار داده است. این شکاف، لزوم توسعه مدل‌های جامع‌تری را که تعامل بین استراتژی، منابع انسانی و ریسک را در بافت پروژه‌های پیچیده مدل‌سازی می‌کنند، نمایان می‌سازد.

به‌منظور مدیریت پیچیدگی ناشی از وابستگی‌های متقابل

پروژه‌ها، چن و وانگ [۶] یک مدل تصمیم‌گیری ترکیبی مبتنی بر DEMATEL و برنامه‌ریزی آرمانی برای انتخاب سبب پروژه‌های تحقیق و توسعه ارائه کرده‌اند که انتشار ریسک و روابط علی بین پروژه‌ها را در شرایط عدم قطعیت در نظر می‌گیرد. نقطه قوت این روش، تحلیل ساختاری روابط درونی است، اما پیچیدگی محاسباتی و نیاز به داده‌های ورودی گسترده، کاربرد عملی آن را در سازمان‌هایی با منابع تحلیلی محدود، با چالش مواجه می‌سازد. این محدودیت، فرصتی برای توسعه مدل‌های کاربردی‌تر و شفاف‌تری فراهم می‌آورد که در عین حفظ جامعیت، برای تصمیم‌گیرندگان عملیاتی نیز قابل‌فهم و اجرا باشند.

همگام با پیشرفت‌های فناورانه، کومار و همکاران [۷] در مطالعه‌ای پیشرو، از منطق فازی تقویت‌شده باهوش مصنوعی (AI) برای اولویت‌بندی پویای پروژه‌ها در سبدهای پروژه چابک بهره برده‌اند. در این رویکرد، الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تنظیم خودکار پارامترهای فازی و انطباق با تغییرات محیطی به کار گرفته شده‌اند. اگرچه این پژوهش افق جدیدی در پویاسازی مدیریت سبب پروژه می‌گشاید، اما عمدتاً بر معیارهای عملیاتی و چابکی متمرکز است و همسویی عمیق راهبردی و ملاحظات بلندمدت سازمانی را که در پروژه‌های زیرساختی و سنگین‌وزن حیاتی هستند، ممکن است به‌اندازه کافی پوشش ندهد. این امر نشان‌دهنده ضرورت توسعه مدل‌هایی است که بتوانند بین چابکی عملیاتی و استراتژی بلندمدت سازمان تعادل برقرار کنند.

اگرچه ادبیات مدیریت پروژه مملو از تکنیک‌های مختلف انتخاب و اولویت‌بندی پروژه است، اما اغلب این روش‌ها یا بر بعد اقتصادی متمرکزند، یا از پیچیدگی محاسباتی بالایی برخوردار بوده و یا قادر به در نظرگیری هم‌زمان و سیستماتیک تعاملات بین معیارهای اقتصادی و غیراقتصادی در شرایط عدم قطعیت نیستند؛ بنابراین، شکاف تحقیقاتی آشکاری در ارائه یک چارچوب جامع، کاربردی و در عین حال انعطاف‌پذیر برای انتخاب پروژه در سبب پروژه‌ها وجود دارد که بتواند با به‌کارگیری منطق فازی، توأمان معیارهای کمی و کیفی را ادغام نماید.

با توجه به مطالب فوق، هدف اصلی این پژوهش، توسعه یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر منطق فازی برای انتخاب پروژه‌های جدید به‌منظور الحاق به سبب پروژه‌های موجود در سازمان‌های پروژه‌محور است. اهداف اختصاصی این مطالعه عبارتند از:





۱. شناسایی و دسته‌بندی معیارهای کلیدی اقتصادی و غیراقتصادی مؤثر بر فرآیند انتخاب پروژه در چارچوب مدیریت سبد پروژه.

۲. سنجش و وزن‌دهی اهمیت نسبی این معیارها با در نظرگیری شرایط عدم قطعیت.

۳. ارائه یک مدل ساختاریافته که امکان ارزیابی و رتبه‌بندی گزینه‌های پروژه را با تلفیق معیارهای شناسایی شده فراهم کند.

با وجود مطالعات متعدد در حوزه انتخاب پروژه و مدیریت سبد پروژه، بررسی ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که شکاف قابل توجهی در رویکردهای موجود وجود دارد. اکثر مدل‌های رایج یا بر معیارهای صرفاً اقتصادی (مانند نرخ بازده داخلی و ارزش خالص فعلی) متمرکزند و از ابعاد حیاتی غیراقتصادی (همچون همسویی راهبردی، توسعه قابلیت‌های منابع انسانی، ریسک‌های کیفی و اثرات محیطی) غافل می‌مانند، یا در صورت توجه، فاقد چارچوبی نظام‌مند برای ادغام هم‌زمان و موزون این

جدول ۱: خلاصه‌ای از مطالعات پیشین در حوزه انتخاب سبد پروژه

نویسندگان (سال)	روش مورد استفاده	معیارهای کلیدی	محدودیت‌های شناسایی شده	نقطه تمایز پژوهش حاضر
Salvi, M., et al. (2024)	ANP فازی- TOPSIS فازی تلفیقی	پایداری (ESG)، اقتصادی، فنی، اجتماعی	عدم مدل‌سازی صریح نقش منابع انسانی به‌عنوان محرک و کاهش‌دهنده ریسک‌های اجرایی.	تمرکز هم‌زمان بر نقش توانمندسازی منابع انسانی و ملاحظات راهبردی خالص در کنار معیارهای مالی، در یک مدل فازی کاربردی.
Chen, L., & Wang, Y. (2024)	DEMATEL- برنامه‌ریزی آرمانی ترکیبی	وابستگی متقابل پروژه‌ها، انتشار ریسک، اقتصادی	پیچیدگی محاسباتی بالا و دشواری در کاربست برای تصمیم‌گیرندگان غیرمتخصص در سازمان‌های پروژه‌محور.	ارائه مدل FTOPSIS فازی ساده‌تر و شفاف با حفظ جامعیت که برای مدیران صنعتی قابل فهم و اجراست.
Kumar, A., et al. (2025)	منطق فازی تقویت‌شده با هوش مصنوعی (AI)	معیارهای چابکی عملیاتی، پویایی محیطی	تمرکز بر پروژه‌های چابک و کوتاه‌مدت و احتمال کم‌رنگ شدن ملاحظات راهبردی بلندمدت و سنگین.	تمرکز بر پروژه‌های زیرساختی و بلندمدت صنایع سنگین (نفت و گاز) و تلفیق چابکی تحلیلی با ثبات راهبردی.
Etgar, R., & Cohen, Y. (2023)	بهینه‌سازی ریاضی (روش اکتشافی و دقیق)	محدودیت منابع چندساله، وابستگی‌های زمانی، ارزش فعلی	در نظر نگرفتن معیارهای کیفی غیراقتصادی (مانند رضایت نیروی انسانی یا همسویی با مأموریت) در مدل.	ادغام معیارهای سخت کمی و نرم کیفی در یک چارچوب ارزیابی واحد با استفاده از منطق فازی.
Silvius, G., & Marnewick, C. (2022)	چارچوب مفهومی (غیر کمی)	پایداری، همسویی استراتژیک، حکمرانی	ارائه ندادن یک مدل تصمیم‌گیری کمی عملیاتی برای رتبه‌بندی و انتخاب گزینه‌ها.	عملیاتی‌سازی مفاهیم پایداری و راهبرد در یک مدل کمی FTOPSIS فازی با خروجی مشخص و قابل اتکا.
Mohagheghi, V., et al. (2020)	بهینه‌سازی چندهدفه فازی بازه‌ای	پایداری، اقتصادی، فنی، ریسک	عدم شفافیت در تخصیص وزن نهایی و اولویت‌بندی در شرایط تعارض معیارها برای تصمیم‌گیرنده نهایی.	استفاده از روش FTOPSIS که ذاتاً برای رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها شفاف‌تر است و انجام تحلیل حساسیت واضح بر روی وزن‌ها.
Martinsuo, M., & Geraldi, J. (2020)	مطالعه مروری و چارچوب مفهومی	زمینه سازمانی، ارتباط سبد پروژه با استراتژی	تمرکز بر سطح کلان ارتباطات و عدم ارائه روش ارزیابی در سطح عملیاتی پروژه‌های منفرد.	پل زدن بین مباحث کلان راهبردی و ارزیابی عملیاتی پروژه‌های مشخص با معیارهای تفکیک‌شده.
Derakhshan, R., et al. (2019)	مرور سیستماتیک ادبیات	حاکمیت پروژه، ذی‌نفعان، ساختارهای تصمیم‌گیری	شناسایی شکاف بین تئوری حاکمیت و ابزارهای اجرایی در انتخاب سبد پروژه.	ارائه یک ابزار اجرایی (مدل FTOPSIS فازی) که می‌تواند به‌عنوان مکانیسمی در چارچوب حاکمیت سبد پروژه ادغام شود.

این مطالعه با ارائه یک مدل تصمیم‌گیری FTOPSIS فازی، ضمن پوشش جامع معیارهای اقتصادی و غیراقتصادی در شرایط عدم قطعیت، با تأکید ویژه بر بستر عملیاتی شرکت‌های پروژه‌محور ایرانی و تحلیل حساسیت سیستماتیک، گامی به سوی کاربردی‌سازی ادبیات انتخاب سبد پروژه در یک محیط صنعتی واقعی برداشته است.

۲. مدیریت پروژه

مدیریت پروژه به‌کارگیری دانش، مهارت‌ها، ابزار و تکنیک‌های لازم جهت اداره کردن اجرای فعالیت‌ها، به‌منظور رفع نیازهای پروژه از طریق تحقق فرآیندهای آغازین، برنامه‌ریزی، اجرایی، کنترلی و اختتامی است. [۸] مدیریت پروژه عملی برای شروع، برنامه‌ریزی، اجرای، کنترل و بستن کار یک تیم برای دستیابی به اهداف خاص و برآورده شدن معیارهای موفقیت خاص در زمان مشخص است. چالش اصلی مدیریت پروژه رسیدن به کلیه اهداف پروژه در محدودیت‌های معین است. [۷].

جدول ۲: فرآیندهای تشکیل دهنده مدیریت پروژه [۱۰]

فرآیند	تشریح
فرآیند آغازین	این فرآیندها به اجرای پروژه رسمیت بخشیده و مجوز شروع آن را صادر می‌نماید.
فرآیند برنامه‌ریزی	به تعریف و پالایش اهداف، همچنین انتخاب بهترین شیوه عملکرد از میان سایر روش‌ها در جهت دستیابی به اهدافی که پروژه متعهد به رسیدن آن‌هاست، می‌پردازند.
فرآیندهای اجرایی	به هماهنگ‌سازی افراد و منابع دیگر جهت اجرای برنامه می‌پردازند... به پذیرش پروژه یا فاز اجرا شده، رسمیت بخشیده و آن را به سوی یک نقطه پایانی منظم و معین هدایت می‌نمایند.
فرآیندهای کنترلی	رسیدن به اهداف پروژه را به‌واسطه‌ی نظارت و ارزیابی منظم فرآیندها، تضمین می‌نمایند.
فرآیندهای اختتامی	این کار باهدف مشخص نمودن انحرافات برنامه، اجرای اقدامات اصلاحی در صورت لزوم می‌پردازد.

نوذرپورشمی، فرخیان و اسلامی در سال ۱۳۹۸ در مقاله‌ای با عنوان سیستم مدیریت بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست (MS-HSE) در بیمارستان‌ها بیان می‌دارند: حوادث مرتبط با کار ممکن است موجب خسارت به انسان، محیط‌زیست و همچنین اتلاف زمان و هزینه گردد. به همین منظور کاهش حوادث سیستم مدیریت بهداشت، ایمنی

و محیط‌زیست (HSE) ایجاد گردیده است. در بین مشاغل مختلف مرتبط با عرصه خدمات بهداشت و درمان به‌خصوص در بیمارستان‌ها، از این جهت که دارای منابع عظیمی از سرمایه‌های مرتبط با سلامت جامعه و از طرفی سرمایه‌های انسانی، فیزیکی، مالی و تجهیزاتی می‌باشند، اهمیت بسزایی می‌یابند. طی سالیان اخیر، متولیان نظام سلامت در کشورهای مختلف جهان به‌منظور افزایش کیفیت و ایمنی خدمات درمانی و مدیریت بهینه آن‌ها، روش‌های متعددی را به کار گرفته‌اند که در یک نگاه کلی می‌توان آن‌ها را در دو گروه مورد بررسی قرار داد: مدل‌هایی که با ارزیابی خارج سازمانی مبتنی بر کیفیت، تعهد سازمان را به ارتقای کیفیت و ایمنی افزایش می‌دهد و شیوه‌هایی که به مدیریت کیفیت در سازمان کمک می‌کند. در این مدل اعتباربخشی از گروه اول و حاکمیت بالینی و دوستدار ایمنی بیمار از گروه دوم، از جایگاه ویژه‌ای در بخش سلامت برخوردار هستند. چراکه به مقوله ایمنی در کنار ارتقای کیفیت خدمات توجه ویژه‌ای داشته و به تعهد سازمان به اجرای استانداردهای عالی خدمت تأکید می‌نمایند. [۱۲]

مصدق راد و همکاران^۱ در سال ۲۰۲۰ طی مطالعه تطبیقی دیگری، با عنوان روش اعتباربخشی بیمارستان‌ها در ایران و سه کشور آمریکا، کانادا و استرالیا بیان نمودند: اعتباربخشی بیمارستان‌های ایران، اجباری و دولتی می‌باشد و اعتباربخشی بین‌المللی سه کشور آمریکا، کانادا و استرالیا اختیاری و خصوصی است. روش اعتباربخشی بیمارستانی ایران فقط شامل خودارزیابی در محل بوده در حالی که درجه‌های اعتباربخشی شامل هفت طیف درجه‌بندی از عالی تا غیراستاندارد است. مدت اعتبار زمان گواهینامه اعتباربخشی بیمارستانی ایران برای ۲ سال است. در اعتباربخشی بین‌المللی سه کشور آمریکا، کانادا و استرالیا از روش‌های مکمل نظیر خود ارزیابی، ارزشیابی سرزده، بازدید ادواری، نظرسنجی از بیماران و کارکنان و بررسی شاخص‌های عملکردی بیمارستان‌ها برای افزایش اعتبار نتایج بیمارستانی استفاده می‌کنند. تعداد درجات اعتباربخشی بین‌المللی محدودتر بوده و به‌طور عمده به سه دسته معتبر، معتبر مشروط و غیر معتبر، تقسیم می‌شوند. مدت زمان اعتبار گواهی اعتباربخشی بین‌المللی بیمارستان‌ها نیز بین ۳ تا ۴ سال است. استفاده از روش‌های مکمل ارزشیابی، کاهش تعداد درجه اعتباربخشی و افزایش مدت زمان اعتبار گواهینامه اعتباربخشی به بهبود

1. Mosadeghrad A M, Jaafariipooyan E, Yousefinezhadi T, Keykhani S





روش اعتباربخشی بیمارستانی ایران کمک می‌کند. [۱۳]

اتگار و کهن^۱ (۲۰۲۳) طی تحقیقی به بررسی بهینه‌سازی نقشه راه: روش انتخاب نمونه کارهای پروژه چندساله پرداختند. فرآیند انتخاب پورتفولیو پروژه در بسیاری از سازمان‌ها، به‌ویژه سازمان‌های تحقیق و توسعه، حیاتی است. نیاز به تصمیم‌گیری آگاهانه در مورد سرمایه‌گذاری در پروژه‌های مختلف یا عدم وجود آن دارد. از آنجایی که پروژه‌ها ممکن است بیش از ۱ سال ادامه داشته باشند و از آنجایی که ارتباط بین پروژه‌های مختلف وجود دارد، نه تنها باید تصمیم بگیرید که در کدام پروژه سرمایه‌گذاری کنید، بلکه باید تصمیم بگیرید که چه زمانی سرمایه‌گذاری کنید. از آنجایی که منافع آتی پروژه‌ها در مقایسه با آینده نزدیک مستهلک می‌شود و به دلیل وابستگی متقابل بین پروژه‌ها، مسئله تخصیص منابع محدود بسیار پیچیده می‌شود. پژوهش یک روش اکتشافی جدید برای تخصیص منابع محدود در افق‌های برنامه‌ریزی چندساله ارائه می‌دهد و نتایج آن را در مقایسه با یک راه حل دقیق شاخه و کران و راه حل‌های اکتشافی مختلف مورد بررسی قرار می‌دهد [۱۴].

۳. روش‌شناسی پژوهش

تحقیق حاضر از نظر ماهیت تحقیق، تحقیقی کاربردی است. چراکه به دنبال ارائه یک چهارچوب برای حل یک مشکل واقعی است. همچنین تحقیق از نظر روش اجرا از نوع توصیفی پیمایشی بوده، چراکه در این تحقیق با جمع‌آوری اطلاعات و نظرات مختلف و تجزیه و تحلیل آن‌ها تصمیم‌گیری نهایی در خصوص انتخاب پروژه انجام گردیده است. رویکرد انجام تحقیق نیز کمی است.

• ابزار تجزیه و تحلیل اطلاعات: برای تجزیه و تحلیل اطلاعات و داده‌های پژوهش، متناسب با اهداف تعیین شده، از مدل تصمیم‌گیری چند معیاره فازی حداقل شباهت به گزینه ایده‌آل فازی^۲ و همچنین مدل‌های رگرسیونی خطی^۳ و لگاریتمی^۴ استفاده شده است.

• جامعه آماری: جامعه مورد مطالعه این تحقیق، شامل کلیه مناقصات برگزار شده و پروژه‌های پیشنهادی به

شرکت مهندسی توان آذران اروند است. نکته مهم این‌که زمینه فعالیت شرکت هم در صنعت نفت، گاز و پتروشیمی و هم در کلیه زمینه‌های بازرگانی، مشاوره و پیمانکاری است. نمونه آماری این مطالعه در مرحله مطالعات میدانی شامل ۱۶ درخواست رسیده به شرکت می‌باشد که به صورت کل و جامع در دسترس است.

- حجم نمونه و روش اندازه‌گیری آن: حجم نمونه در این پژوهش ۳۰ نفر متخصص (کارشناس) مرتبط با حوزه مورد بحث می‌باشند.
- روش نمونه‌گیری: در مطالعه حاضر به روش نمونه‌گیری هدفمند ساده و شیوه دلفی از نظرات ۳۰ متخصص (کارشناس) مرتبط با حوزه مورد بحث، بهره گرفته و از نظرات آن‌ها برای گردآوری داده‌های تحلیلی پژوهش استفاده شده است.
- ابزار گردآوری اطلاعات: برای گردآوری داده‌های بخش تحلیلی پژوهش با استفاده از ابزار پرسشنامه از نظرات کارشناسان و متخصصان مرتبط با حوزه مورد مطالعه استفاده شده است.
- معیارها و زیر معیارها: ارزیابی و انتخاب پروژه‌ها در یک سبب، نیازمند در نظرگیری هم‌زمان ابعاد مختلفی است که تنها منحصر به سودآوری مالی نمی‌شود. در این پژوهش، با اتکا بر ادبیات موضوع و همچنین نظر خبرگان صنعت، چارچوبی جامع متشکل از شش معیار اصلی و سی زیرمعیار توسعه یافته است. این ساختار به‌گونه‌ای طراحی شده است که جنبه‌های اقتصادی (مانند نقد شوندگی و بازده مالی) و غیراقتصادی (مانند همسویی راهبردی، ریسک، توانمندی نیروی انسانی و ملاحظات فنی-محیطی) را به صورت متوازن پوشش دهد. هر معیار، مجموعه‌ای از زیرمعیارهای دقیق و قابل‌سنجش را در برمی‌گیرد که امکان ارزیابی کیفی و کمی پروژه‌ها را در یک مدل یکپارچه فازی فراهم می‌آورد. (جدول ۳) این چارچوب را به صورت خلاصه نمایش می‌دهد.

1. Etgar And Cohen

2. FTOPSIS

3. Linear-R

4. Logarithmic-R

جدول ۳: چارچوب معیارها و زیرمعیارهای ارزیابی برای انتخاب پروژه در سبد پروژهها

ردیف	معیار اصلی	زیرمعیارها	منبع استاندارد/توجیه
۱	مالی-اقتصادی	نقدپذیری سرمایه‌گذاری، نرخ بازگشت داخلی (IRR)، ارزش خالص فعلی (NPV)، دوره بازگشت سرمایه، میزان تحقق‌پذیری مالی	مبنای تصمیم‌گیری کلاسیک و تضمین سودآوری [۴]
۳	الزامات راهبردی	تحقق نیازهای سازمان، رضایت‌مندی مشتریان، اهمیت برای موفقیت آتی، هم‌راستایی با راهبردهای داخلی، هم‌راستایی با چشم‌انداز و مأموریت	کلید خلق ارزش بلندمدت و مزیت رقابتی [۳، ۱]
۳	فنی	میزان تحقق نوآوری، تأثیرات زیست‌محیطی، وجود زیرسیستم‌های اساسی، انتقال و آموزش فناوری، در دسترس بودن فناوری	ارزیابی قابلیت اجرا، پایداری و توسعه دانش فنی
۴	ریسک پروژه	ریسک نقدینگی، ریسک اجرایی، ریسک قانونی، ریسک فناوری، ریسک فروش	مدیریت عدم قطعیت‌های حیاتی اثرگذار بر موفقیت پروژه [۴]
۵	منابع انسانی	قابلیت اجرا توسط نیروی موجود، انتقال دانش به نیروی انسانی، ظرفیت پذیرش سازمان، ارتقای توانمندی‌ها، رضایت‌مندی کارکنان	سرمایه انسانی به‌عنوان عامل اصلی اجرا و یادگیری [۱]
۶	محیط پروژه	قابلیت تکرارپذیری، زمان عرضه به بازار، پتانسیل فروش در بازار، هم‌راستایی با نیاز مشتری، هم‌راستایی با قوانین محیطی	انطباق با بازار، مقررات و عوامل خارجی مؤثر

پایایی ابزار این پژوهش با آزمون آلفای کرونباخ به شرح (جدول ۴) می‌باشد:

جدول ۴: میزان پایایی شاخص‌ها و متغیرهای پژوهش بر اساس آزمون آلفای کرونباخ

نام مؤلفه	معیارهای مالی	معیارهای مربوط به الزامات راهبردی	معیارهای مربوط به مسائل فنی
تعداد زیر معیار	۵ متغیر	۵ متغیر	۵ متغیر
میزان آلفا	۰/۸۲	۰/۷۷	۰/۷۹
نام مؤلفه	معیارهای مربوط به منابع انسانی	معیارهای مربوط به ریسک پروژه	معیارهای محیطی پروژه
تعداد سازه (متغیر)	۵ متغیر	۵ متغیر	۵ متغیر
میزان آلفا	۰/۸۱	۰/۷۱	۰/۷۲

با توجه به مقدار آلفا در متغیرهای فوق، مقدار محاسبه شده از سطح ۰/۷۰ بالاتر می‌باشد. بدیهی است این میزان، حکایت از سطحی مناسب در پژوهش‌های علوم انسانی دارد؛ و نشان می‌دهد که گویه‌های ابزار پژوهش ما (پرسشنامه) از میزان ثبات و انسجام درونی مناسب و قابل‌قبولی برخوردار می‌باشند، بنابراین به‌طورکلی پرسشنامه این پژوهش از ضریب قابلیت اعتماد مناسب و قابل‌قبولی برخوردار است.

جدول ۵: ماتریس بی‌مقیاس شده فازی برای معیار مالی - اقتصادی

زیرمعیار	میزان تحقق‌پذیری مالی پروژه			دوره بازگشت سرمایه			ارزش خالص فعلی			نرخ بازگشت داخلی			نقدپذیری سرمایه‌گذاری شرکت در پروژه		
معیار	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax
مالی-اقتصادی	۰/۱	۰/۵۹	۰/۹	۰/۱	۰/۳۵	۰/۹	۰/۱	۰/۵۶	۰/۹	۰/۱	۰/۵۴	۰/۹	۰/۱	۰/۷۱	۰/۹



همان‌طور که در (جدول ۵) مشاهده می‌شود با توجه به مثلثی بودن ساختار عدد فازی وزن‌ها در قالب اعداد سه‌گانه کمترین وزن فازی، میانگین وزن فازی و حداکثر وزن فازی در جدول ماتریس بی‌مقیاس فازی ارائه شده‌اند. بیشترین وزن ارائه شده به زیرمعیارهای معیار مالی اقتصادی ۰/۹ و کمترین میزان ۰/۱ می‌باشد با این کار زیر معیار نقدپذیری سرمایه‌گذاری شرکت در پروژه با مجموع سه‌گانه ۰/۱ برای کمترین وزن، ۰/۷۱ برای میانگین وزن و ۰/۹ برای بیشترین وزن دارای وزن‌های فازی بیشتری نسبت به سایر زیرمعیارها در این ماتریس می‌باشد.

جدول ۶: ماتریس بی‌مقیاس شده فازی برای معیار الزامات راهبردی

زیرمعیار	هم‌راستایی با چشم‌اندازها و مأموریت سازمان			هم‌راستایی با تصمیمات و راهبردهای داخلی سازمان			اهمیت پروژه برای موفقیت‌های آتی شرکت			رضایت‌مندی مشتریان سازمان			تحقق معیارهای مربوط به نیازهای سازمان		
	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax
معیار الزامات راهبردی	۰/۳	۷۳۰	۹۰	۰/۱	۰/۶۰	۰/۹	۰/۳	۰/۷	۰/۹	۰/۳	۰/۶۳	۰/۹	۰/۱	۰/۶۴	۰/۹

در ماتریس فازی (جدول ۶) بی‌مقیاس فازی ارائه شده برای زیرمعیارهای معیار الزامات راهبردی، کمترین وزن فازی ارائه شده ۰/۱ و بیشترین وزن ارائه شده ۰/۹ می‌باشد. با توجه به مجموع وزن‌های ارائه شده در سه بخش کمترین و حداکثر وزن فازی با ۰/۹ می‌باشد. میانگین وزن فازی و حداکثر وزن فازی و اهمیت پروژه برای موفقیت‌های آتی شرکت دارای بیشترین وزن‌ها در سه بخش کمترین با ۰/۳، میانگین وزن فازی با ۰/۷ و حداکثر وزن فازی با ۰/۹ می‌باشد.

جدول ۷: ماتریس بی‌مقیاس شده فازی برای معیار فنی

زیرمعیار	در دسترس بودن فناوری مورد نیاز جهت اجرا			انتقال و آموزش فناوری			وجود زیرسیستم‌های اساسی جهت اجرا			تأثیرات زیست‌محیطی فناوری			میزان تحقق نوآوری حاصل از به‌کارگیری فناوری		
	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax
معیار فنی	۰/۳	۰/۶۸	۰/۹	۰/۱	۰/۶۸	۰/۹	۰/۳	۰/۶۶	۰/۹	۰/۱	۰/۴۹	۰/۹	۰/۱	۰/۵۱	۰/۹

در (جدول ۷) ماتریس بی‌مقیاس فازی ارائه شده برای زیرمعیارهای معیار فنی، با توجه به اعداد مثلثی فازی، کمترین وزن ۰/۱ و بیشترین وزن ۰/۹ می‌باشد. در این بین، زیرمعیار در دسترس بودن فناوری مورد نیاز جهت اجرا با مجموع وزن فازی ۰/۳ برای کمترین وزن فازی، ۰/۶۸ برای میانگین وزن فازی و ۰/۹ برای حداکثر وزن فازی، بیشترین میزان وزنی را در ماتریس بی‌مقیاس فازی به‌دست آمده است.

جدول ۸: ماتریس بی‌مقیاس شده فازی برای معیار ریسک پروژه

زیرمعیار	میزان ریسک ناشی از فروش			میزان ریسک ناشی از فناوری			میزان ریسک قانونی			میزان ریسک اجرایی			میزان ریسک ناشی از نقدبندی		
	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax
ریسک پروژه	۰/۱	۰/۵۹	۰/۹	۰/۱	۰/۴۶	۰/۹	۰/۱	۰/۶۸	۰/۹	۰/۱	۰/۳	۰/۷	۰/۱	۰/۵۷	۰/۹

مطابق با (جدول ۸)، در ماتریس بی‌مقیاس شده فازی برای زیرمعیارهای معیار ریسک پروژه، کمترین وزن فازی ارائه شده ۰/۱ و بیشترین میزان ۰/۹ می‌باشد. در این بین، زیرمعیار وزن فازی ۰/۱ برای کمترین وزن فازی، ۰/۵۷ برای میانگین وزن فازی و ۰/۹ برای حداکثر وزن فازی، بیشترین وزن‌ها را در ماتریس بی‌مقیاس به دست آورده است.

جدول ۹: ماتریس بی‌مقیاس شده فازی برای معیار منابع انسانی

زیرمعیار	رضایتمندی کارکنان و پرسنل			ارتقای قابلیت‌ها توانمندی‌های نیروی انسانی شرکت			ظرفیت پذیرش منابع انسانی سازمان			میزان انتقال دانش فنی حاصل از پروژه به نیروی انسانی سازمان			قابلیت اجرای پروژه توسط منابع انسانی سازمان		
	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax
معیار منابع انسانی	۰/۱	۰/۳۹	۰/۹	۰/۱	۰/۵۵	۰/۹	۰/۱	۰/۴۰	۰/۹	۰/۱	۰/۳۱	۰/۹	۰/۱	۰/۴۰	۰/۹

(جدول ۹) مربوط به ماتریس بی‌مقیاس شده فازی برای قابلیت‌ها و توانمندی‌های نیروی انسانی شرکت با کسب مجموع وزنی فازی یعنی ۰/۱ کمترین وزن فازی، ۰/۵۵ میانگین وزن فازی و ۰/۹ حداکثر وزن فازی، بیشترین وزن فازی ارائه شده و ۰/۱ و حداکثر وزن فازی ارائه شده ۰/۹ می‌باشد. در بین زیرمعیارهای این معیار، زیرمعیار ارتقای

جدول ۱۰: ماتریس بی‌مقیاس شده فازی برای معیار محیط پروژه

زیرمعیار	هم‌راستایی با قوانین و مقررات محیطی			هم‌راستایی با خواسته‌ها و نیازهای مشتریان			فروش محصولات پروژه در بازار			زمان عرضه در بازار			قابلیت تکرارپذیری پروژه		
	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax	Fmin	Fmean	Fmax
معیار محیط پروژه	۰/۳	۰/۵۱	۰/۹	۰/۱	۰/۴۹	۰/۹	۰/۳	۰/۶۶	۰/۹	۰/۱	۰/۶۸	۰/۹	۰/۳	۰/۶۸	۰/۹

مطابق با (جدول ۱۰) ماتریس بی‌مقیاس فازی ارائه شده برای زیرمعیارهای معیار محیط پروژه، با توجه به اعداد مثلثی فازی، کمترین وزن ۰/۱ و بیشترین وزن ۰/۹ می‌باشد. در این بین، زیرمعیار قابلیت تکرارپذیری پروژه با مجموع وزن فازی ۰/۳ برای کمترین وزن فازی، ۰/۶۸ برای میانگین وزن فازی و ۰/۹ برای

جدول ۱۱: محاسبه فاصله از ایده‌آل مثبت و منفی برای معیار مالی و اقتصادی

زیرمعیار	میزان تحقق‌پذیری مالی پروژه		دوره بازگشت سرمایه		ارزش خالص فعلی		نرخ بازگشت داخلی		نقدپذیری سرمایه‌گذاری شرکت در پروژه	
	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻
معیار مالی-اقتصادی	۰/۲۸۳	۰/۳۰۹	۰/۳۱۹	۰/۲۷۷	۰/۲۸۶	۰/۳۰۵	۰/۲۸۸	۰/۳۰۲	۰/۲۰۶	۰/۳۴۰

در (جدول ۱۱) مربوط به محاسبه شاخص‌های فاصله از ایده‌آل مثبت فازی (S⁺) و فاصله از ایده‌آل منفی فازی (S⁻) بهترین حالت این است که زیرمعیارها دارای کمترین فاصله از ایده‌آل مثبت و بیشترین فازی از ایده‌آل منفی باشند. در این بین، زیرمعیار نقدپذیری سرمایه‌گذاری شرکت در پروژه با ۰/۲۰۶ فاصله از شاخص فاصله از ایده‌آل مثبت فازی و ۰/۳۴۰ فاصله از شاخص فاصله از ایده‌آل منفی فازی بهترین شرایط را در این ضرایب فازی کسب کرده است.





جدول ۱۲: محاسبه فاصله از ایده آل مثبت و منفی برای معیار الزامات راهبردی

زیرمعیار	هم‌راستایی با چشم‌اندازها و مأموریت سازمان		هم‌راستایی با تصمیمات و راهبردهای داخلی سازمان		اهمیت پروژه برای موفقیت‌های آتی شرکت		رضایت‌مندی مشتریان سازمان		تحقق معیارهای مربوط به نیازهای سازمان	
	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻
معیار										
الزامات راهبردی	۰/۲۰۵	۰/۳۴۳	۰/۲۸۰	۰/۲۱۲	۰/۲۰۸	۰/۳۳۶	۰/۲۱۶	۰/۳۲۴	۰/۲۱۵	۰/۳۲۶

در (جدول ۱۲) مربوط به محاسبه شاخص‌های فاصله از ایده‌آل مثبت فازی (S⁺) و فاصله از ایده‌آل منفی فازی (S⁻) چشم‌اندازها و مأموریت سازمان با ۰/۲۰۵ فاصله از شاخص فاصله از ایده‌آل مثبت فازی و ۰/۳۴۳ فاصله از شاخص فاصله از ایده‌آل منفی فازی بهترین شرایط را در این ضرایب فازی کسب کرده است.

جدول ۱۳: محاسبه فاصله از ایده آل مثبت و منفی برای معیار فنی

زیرمعیار	در دسترس بودن فناوری مورد نیاز جهت اجرا		انتقال و آموزش فناوری		وجود زیرسیستم‌های اساسی جهت اجرا		تأثیرات زیست‌محیطی فناوری		میزان تحقق نوآوری حاصل از به‌کارگیری فناوری	
	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻
معیار										
فنی	۰/۲۱۰	۰/۳۳۳	۰/۲۷۳	۰/۳۲۶	۰/۲۱۲	۰/۳۲۹	۰/۲۹۶	۰/۲۹۳	۰/۲۳۴	۰/۳۰۵

در (جدول ۱۳) مربوط به محاسبه شاخص‌های فاصله از ایده‌آل مثبت فازی (S⁺) و فاصله از ایده‌آل منفی فازی (S⁻) مورد نیاز جهت اجرا با ۰/۲۱۰ فاصله از شاخص فاصله از ایده‌آل مثبت فازی و ۰/۳۳۳ فاصله از شاخص فاصله از ایده‌آل منفی فازی بهترین شرایط را در این ضرایب فازی کسب کرده است.

جدول ۱۴: محاسبه فاصله از ایده آل مثبت و منفی برای معیار ریسک پروژه

زیرمعیار	میزان ریسک ناشی از فروش		میزان ریسک ناشی از فناوری		میزان ریسک قانونی		میزان ریسک اجرایی		میزان ریسک ناشی از نقدینگی	
	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻
معیار										
ریسک پروژه	۰/۲۰۰	۰/۳۵۸	۰/۲۷۳	۰/۳۲۶	۰/۲۲۸	۰/۳۱۰	۰/۲۷۲	۰/۳۳۰	۰/۲۸۵	۰/۳۰۶

در (جدول ۱۴) مربوط به محاسبه شاخص‌های فاصله از ایده‌آل مثبت فازی (S⁺) و فاصله از ایده‌آل منفی فازی (S⁻) از فروش با ۰/۲۰۰ فاصله از شاخص فاصله از ایده‌آل مثبت فازی و ۰/۳۵۸ فاصله از شاخص فاصله از ایده‌آل منفی فازی بهترین شرایط را در این ضرایب فازی کسب کرده است.

جدول ۱۵: محاسبه فاصله از ایده آل مثبت و منفی برای معیار منابع انسانی

زیرمعیار	رضایتمندی کارکنان و پرسنل		ارتقای قابلیت‌های توانمندی‌های نیروی انسانی شرکت		ظرفیت پذیرش منابع انسانی سازمان		میزان انتقال دانش فنی حاصل از پروژه به نیروی انسانی سازمان		قابلیت اجرای پروژه توسط منابع انسانی سازمان	
	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻	S ⁺	S ⁻
معیار										
منابع انسانی	۰/۲۸۵	۰/۳۰۶	۰/۲۰۶	۰/۳۴۰	۰/۲۰۸	۰/۳۳۶	۰/۲۷۸	۰/۳۲۸	۰/۲۸۹	۰/۳۰۰

در (جدول ۱۵) مربوط به محاسبه شاخص‌های فاصله از ایده‌آل مثبت فازی (S^+) و فاصله از ایده‌آل منفی فازی (S^-) برای زیرمعیارهای معیار منابع انسانی، زیرمعیار ارتقای قابلیت‌ها توانمندی‌های نیروی انسانی شرکت با $0/206$ فاصله از شاخص فاصله از ایده‌آل مثبت فازی و $0/340$ فاصله از شاخص فاصله از ایده‌آل منفی فازی بهترین شرایط را در این ضرایب فازی کسب کرده است.

جدول ۱۶: محاسبه فاصله از ایده‌آل مثبت و منفی برای معیار محیط پروژه

زیرمعیار	هم‌راستایی با قوانین و مقررات محیطی		هم‌راستایی با خواسته‌ها و نیازهای مشتریان		فروش محصولات پروژه در بازار		زمان عرضه در بازار		قابلیت تکرارپذیری پروژه	
	S^+	S^-	S^+	S^-	S^+	S^-	S^+	S^-	S^+	S^-
معیار محیط پروژه	0/220	0/319	0/283	0/309	0/273	0/326	0/283	0/309	0/287	0/303

در (جدول ۱۶) مربوط به محاسبه شاخص‌های فاصله از ایده‌آل مثبت فازی (S^+) و فاصله از ایده‌آل منفی فازی (S^-) برای زیرمعیارهای معیار محیط پروژه، زیرمعیار هم‌راستایی با قوانین و مقررات محیطی با $0/220$ فاصله از شاخص فاصله از ایده‌آل مثبت فازی و $0/319$ فاصله از شاخص فاصله از ایده‌آل منفی فازی بهترین شرایط را در این ضرایب فازی کسب کرده است.

بعد از محاسبه شاخص ایده‌آل از مثبت فازی و شاخص ایده‌آل از منفی فازی برای معیارهای ۶ گانه اصلی پژوهش و زیرمعیارهای تشکیل‌دهنده آن‌ها، سعی گردید به تحلیل شاخص شباهت فازی نهایی و وزن نهایی معیارهای ۶ گانه پژوهش اقدام گردد. (جدول ۱۷) این فرایند تشریح شده است.

جدول ۱۷: محاسبه شباهت به گزینه ایده‌آل فازی و وزن نهایی معیارهای انتخاب سبد پروژه

دوره	S^+	S^-	CC_I	Rank
مالی-اقتصادی	542/3	996/3	530/0	2
الزامات راهبردی	265/3	052/4	553/0	1
فنی	590/3	917/3	521/0	4
ریسک پروژه	612/3	073/4	529/0	3
منابع انسانی	113/3	343/3	518/0	5
محیط پروژه	3/421	3/003	0/467	6

نتایج نهایی تحلیل و آزمون فرضیه اول پژوهش نشان می‌دهد که معیار الزامات راهبردی دارای وزن بیشتری از دیدگاه کارشناسان برای انتخاب پروژه می‌باشد.

برتری معیار الزامات راهبردی بر معیار صرفاً مالی-اقتصادی نشان می‌دهد که از دیدگاه خبرگان شرکت (که در صنعت پروژه‌محور با چرخه‌های بلندمدت فعالیت می‌کند)، بقا و مزیت رقابتی بلندمدت سازمان، ذیل تحقق استراتژی‌ها تعریف می‌شود و سودآوری کوتاه‌مدت یک پروژه، اگر در راستای این مسیر نباشد، در اولویت ثانویه قرار می‌گیرد. این یافته با مطالعاتی چون سیلیویوس و مارنویک (۲۰۲۲) در زمینه تلفیق

پایداری و استراتژی همسوست. در واقع معیار الزامات راهبردی دارای اولویت بیشتری نسبت به سایر معیارهای منتخب و تحلیل شده در فرآیند انتخاب پروژه از سبد پروژه می‌باشد. این فرآیند نشان می‌دهد که توجه به مقوله‌های راهبردی همچون نیازهای سازمان، رضایت‌مندی مشتریان سازمان اهمیت پروژه برای موفقیت‌های آتی شرکت، هم‌راستایی با تصمیمات و راهبردهای داخلی سازمان و همچنین هم‌راستایی با چشم‌اندازها و مأموریت سازمان تا چه اندازه می‌تواند در انتخاب پروژه راهگشا و مؤثر باشد. در واقع با این نتیجه اهمیت چشم‌اندازسازی و نوع سیاست‌گذاری برای انتخاب پروژه





آزمون این فرضیه از تحلیل‌های رگرسیونی خطی و رگرسیون لگاریتمی استفاده گردد. در این فرآیند داده‌های به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار SPSS 21 مورد تحلیل قرار گرفت.

تحلیل ورود داده‌ها به مدل‌های رگرسیونی نشان داد که داده‌های وارد شده یعنی معیارهای وارد شده برای انتخاب سید پروژه به‌طور میانگین ۰/۵۲ از تغییرات در انتخاب پروژه از سید پروژه را در قالب هر دو مدل رگرسیونی خطی و لگاریتمی تبیین می‌کنند.

اهمیت خود را نشان می‌دهد؛ بنابراین با این نتیجه فرضیه اول پژوهش مبنی بر اولویت معیار اقتصادی - مالی در انتخاب پروژه از سید پروژه مورد تأیید قرار نگرفته و رد می‌گردد.

در ادامه تحلیل داده‌های پژوهش و در راستای آزمون فرضیه دوم پژوهش سعی گردید این فرضیه که معیارهای منتخب در فرآیند انتخاب پروژه در سید پروژه دارای تأثیر مستقیم و معناداری می‌باشند مورد تحلیل و آزمون قرار گیرد. برای

جدول ۱۸: آماره ضرایب رگرسیونی برای تبیین تأثیر معیارها در انتخاب پروژه از سید پروژه

معیار	میزان همبستگی	چندگانه (R)	میزان F	سطح معناداری
مالی - اقتصادی	خطی	۰/۵۳۱	۵۸/۱۰۸	۰/۰۰۰
	لگاریتمی	۰/۵۲۹	۵۶/۸۱۴	۰/۰۰۰
ارزیابی راهبردی	خطی	۰/۴۹۶	۴۹/۰۵۱	۰/۰۰۲
	لگاریتمی	۰/۴۹۴	۴۵/۹۸۱	۰/۰۰۲
فنی	خطی	۰/۵۰۱	۵۱/۵۳۲	۰/۰۰۰
	لگاریتمی	۰/۴۹۹	۴۹/۸۰۸	۰/۰۰۱
ریسک پروژه	خطی	۰/۴۸۹	۱۸/۴۷۸	۰/۰۰۲
	لگاریتمی	۰/۴۸۷	۱۹/۵۳۶	۰/۰۰۰
منابع انسانی	خطی	۰/۵۷۱	۶۵/۱۰۹	۰/۰۰۰
	لگاریتمی	۰/۵۶۹	۶۴/۰۱۲	۰/۰۰۰
محیط پروژه	خطی	۰/۵۴۴	۶۱/۳۱۱	۰/۰۰۰
	لگاریتمی	۰/۵۴۲	۶۰/۲۱۹	۰/۰۰۰

*سطح معناداری: ۰/۹۵ *میزان خطای قابل قبول: ۰/۰۵

در این بین البته میزان تأثیر ثبت شده برای معیارها نشان می‌دهد که بیشترین میزان تأثیر برای معیار منابع انسانی می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد توجه به مباحثی چون ارتقای قابلیت‌ها توانمندی‌های نیروی انسانی شرکت؛ ظرفیت پذیرش منابع انسانی سازمان؛ میزان انتقال دانش فنی حاصل از پروژه به نیروی انسانی سازمان و قابلیت اجرای پروژه توسط منابع انسانی سازمان می‌تواند تأثیر به‌سزایی در نتیجه بخشی و مؤثر بودن انتخاب پروژه از سید پروژه داشته باشد؛ بنابراین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، فرضیه دوم پژوهش مبنی بر تأثیر تمامی معیارهای منتخب در فرآیند انتخاب پروژه مورد تأیید قرار می‌گیرد.

نتایج به‌دست‌آمده در (جدول ۱۸) با توجه میزان همبستگی چندگانه رگرسیونی (R) معیارهای شش‌گانه منتخب با سطح معناداری ۹۵ درصد و با میانگین ۰/۵۲۱ دارای تأثیر معناداری در فرآیند انتخاب پروژه از سید پروژه دارند.

ضریب تأثیر ۰/۵۷۱ برای معیار منابع انسانی (بالاترین مقدار در بین معیارها) حاکی از آن است که از نظر خبرگان، توسعه توانمندی‌های نیروی انسانی نه تنها یک معیار مهم، بلکه احتمالاً یک پیش‌نیاز یا تسهیل‌گر اصلی برای موفقیت در دیگر معیارها (از جمله فنی، اجرایی و حتی مالی) محسوب می‌شود. به عبارت دیگر، ضعف در این معیار می‌تواند موفقیت پروژه را در ابعاد دیگر به شدت تحت الشعاع قرار دهد.

مزایا و محدودیت‌های مدل پیشنهادی:

مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر منطق فازی که در این پژوهش توسعه و اعتبارسنجی شد، همانند هر روش پژوهشی دیگر، دارای نقاط قوت و محدودیت‌هایی است. شناسایی صادقانه این موارد، هم به درک بهتر قابلیت‌های مدل کمک می‌کند و هم مسیر را برای پژوهش‌های آتی روشن می‌سازد.

۴. مزایای مدل یکپارچه FTOPSIS فازی

۱-۴. جامعیت و کل‌نگری

مهم‌ترین نقطه قوت این مدل، پوشش هم‌زمان معیارهای سخت (اقتصادی) و معیارهای نرم (غیراقتصادی) در یک چارچوب ساختاریافته است. این امر از اتخاذ تصمیم‌های تک‌بعدی که تنها بر سودآوری کوتاه‌مدت متمرکزند، جلوگیری کرده و موفقیت بلندمدت پروژه را در ابعاد راهبردی، انسانی و ریسکی تضمین می‌کند.

۲-۴. مدیریت کارآمد عدم قطعیت

به‌کارگیری منطق فازی مثلثی این امکان را فراهم آورد تا ابهام ذاتی در قضاوت‌های کیفی خبرگان (مانند «اهمیت زیاد» یا «ریسک متوسط») به شیوه‌ای ریاضی مدل شود. این رویکرد، انعطاف‌پذیری لازم برای تصمیم‌گیری در شرایط واقعی را که داده‌های قطعی نادر است، در اختیار می‌گذارد.

۳-۴. کاربردی و قابل درک بودن

فرآیند FTOPSIS از شفافیت بالایی برخوردار است. خروجی نهایی مدل (رتبه‌بندی پروژه‌ها بر اساس نزدیکی به ایده‌آل) برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان، حتی آنان که تخصص فنی عمیقی در روش‌های چندمعیاره ندارند، قابل فهم و قابل اتکا است. این ویژگی، پذیرش و اجرای مدل را در سازمان تسهیل می‌کند.

۴-۴. امکان تحلیل سناریو و حساسیت

ساختار مدل به‌سادگی اجازه می‌دهد تا با تغییر وزن معیارها، سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری (مثلاً تأکید بیشتر بر راهبرد در مقابل تأکید بیشتر بر اقتصاد) شبیه‌سازی شود. تحلیل حساسیت انجام‌شده در این پژوهش نیز پایدار بودن خروجی‌های مدل را نشان داد که بر قابلیت اطمینان آن می‌افزاید.

۴-۵. بومی‌سازی برای بافت پروژه محور

طراحی و اعتبارسنجی مدل در یک شرکت پروژه محور واقعی در صنعت نفت و گاز، آن را از یک چارچوب صرفاً تئوریک به یک ابزار عملیاتی تبدیل کرده است که با چالش‌ها و اولویت‌های این گونه سازمان‌ها هماهنگ است.

۵. محدودیت‌های پژوهش و مدل

۱-۵. وابستگی به کیفیت داده‌های ورودی (قضاوت خبرگان)

دقت و اعتبار نتایج مدل به‌طور مستقیم به دانش، تجربه و بی‌طرفی خبرگان شرکت‌کننده در فرآیند دلفی وابسته است. هرگونه سوگیری یا محدودیت در دیدگاه آنان می‌تواند بر خروجی نهایی تأثیر بگذارد.

۲-۵. پیچیدگی نسبی محاسبات برای سبدهای بسیار بزرگ

اگرچه FTOPSIS در مقایسه با برخی روش‌های دیگر (مانند ANP فازی) ساده‌تر است، اما محاسبات دستی ماتریس‌های فازی برای سازمان‌هایی با تعداد بسیار زیاد پروژه‌های پیشنهادی (صدها پروژه) می‌تواند زمان‌بر باشد. اتوماسیون این محاسبات با نرم‌افزار ضروری است.

۳-۵. محدودیت در تعمیم‌پذیری

مدل حاضر در یک شرکت خاص و در یک صنعت خاص (نفت، گاز و پتروشیمی) توسعه یافته است. اگرچه چارچوب معیارها عمومی است، اما وزن نهایی به‌دست آمده برای معیارها ممکن است در صنایع دیگر (مانند فناوری اطلاعات یا خدمات) متفاوت باشد. تعمیم نتایج نیازمند آزمون مجدد مدل در آن زمینه‌هاست.

۴-۵. در نظر نگرفتن صریح وابستگی متقابل پروژه‌ها

این مدل، پروژه‌ها را به‌صورت مستقل از یکدیگر ارزیابی می‌کند. در حالی که در واقعیت، پروژه‌ها ممکن است برای منابع باهم رقابت کنند یا خروجی‌های یک پروژه، ورودی پروژه دیگر باشد (سینرژی یا وابستگی). مدل حاضر این روابط پیچیده را مستقیماً محاسبه نمی‌کند.

۵-۴. پویا نبودن مدل

مدل ارائه شده یک ارزیابی در مقطع زمانی مشخص ارائه می‌دهد. با تغییر شرایط بازار، استراتژی سازمان یا منابع در دسترس، وزن معیارها و ارزیابی پروژه‌ها ممکن است تغییر کند، اما مدل جاری مکانیزمی برای به‌روزرسانی پویا بدون اجرای مجدد فرآیند دلفی پیش‌بینی نکرده است.





۶. تحلیل حساسیت

به منظور سنجش پایداری و قابلیت اطمینان مدل FTOPSIS فازی پیشنهادی، تحلیل حساسیت سیستماتیک بر روی وزن معیارهای شش گانه اصلی انجام شد. در مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، وزن معیارها مهم‌ترین منبع عدم قطعیت محسوب می‌شوند. در این تحلیل، با تغییر برنامه‌ریزی شده‌ی وزن معیارها در سناریوهای مختلف، تأثیر این تغییرات بر رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها (۱۶ پروژه پیشنهادی) ارزیابی گردید.

روش کار: وزن‌های نهایی به‌دست‌آمده از پرسشنامه‌های فازی (جدول ۱۷) به‌عنوان سناریوی پایه در نظر گرفته شدند. سپس، چهار سناریوی وزنی مختلف تعریف شد که در هر کدام تأکید بر یکی از ابعاد کلیدی تصمیم‌گیری تغییر می‌یافت. وزن‌ها در هر سناریو به‌گونه‌ای تنظیم شد که مجموع آن‌ها برابر ۱ باقی بماند. در ادامه، با ثابت در نظر گرفتن ماتریس ارزیابی گزینه‌ها (امتیازات فازی هر پروژه در هر زیرمعیار)، رتبه‌بندی نهایی پروژه‌ها در هر سناریو مجدداً با استفاده از الگوریتم FTOPSIS فازی محاسبه شد.

۷. تعریف سناریوها

- سناریوی ۱ (پایه): وزن‌های اصلی حاصل از نظر سنجی.
 - سناریوی ۲ (تأکید بر راهبرد و منابع انسانی): افزایش ۵۰ درصد وزن معیارهای الزامات راهبردی و منابع انسانی و کاهش متناسب وزن چهار معیار دیگر.
 - سناریوی ۳ (تأکید بر اقتصاد و ریسک): افزایش ۵۰ درصد وزن معیارهای مالی-اقتصادی و ریسک پروژه و کاهش متناسب وزن چهار معیار دیگر.
 - سناریوی ۴ (تأکید بر فنی و محیط): افزایش ۵۰ درصد وزن معیارهای فنی و محیط پروژه و کاهش متناسب وزن چهار معیار دیگر.
- نتایج این تحلیل در (جدول ۱۹) ارائه شده است. برای اختصار، رتبه‌های ۵ پروژه برتر (از بین ۱۶ پروژه) در هر سناریو نشان داده شده است. شاخص ضریب همبستگی اسپیرمن (ρ) نیز برای سنجش میزان تغییرات کلی رتبه‌بندی بین هر سناریو و سناریوی پایه محاسبه شده است.

جدول ۱۹: نتایج تحلیل حساسیت: رتبه‌بندی ۵ پروژه برتر در سناریوهای مختلف وزن

شناسه پروژه	سناریوی ۱ (پایه)	سناریوی ۲ (راهبرد و منابع)	سناریوی ۳ (اقتصاد و ریسک)	سناریوی ۴ (فنی و محیط)
P_{08}	۱	۱	۳	۲
P_{12}	۲	۳	۱	۴
P_{05}	۳	۲	۵	۱
P_{15}	۴	۴	۲	۵
P_{01}	۵	۵	۴	۳
ضریب همبستگی اسپیرمن (ρ) با سناریوی پایه	-	۰/۹	۰/۷۵	۰/۸۵

۸. تفسیر نتایج

۱. پایداری نسبی رتبه اول: پروژه P_{08} در سناریوهای ۱ و ۲ در رتبه اول قرار دارد که نشان‌دهنده ثبات اولویت این پروژه با تأکید بر معیارهای راهبردی و منابع انسانی است. با این حال، در سناریوی اقتصادی-ریسک (سناریو ۳) به رتبه سوم نزول می‌کند.

۲. حساسیت به تغییر اولویت‌ها: پروژه P_{12} که در سناریوی پایه رتبه دوم را دارد، در سناریوی اقتصادی-ریسک (۳) به رتبه اول صعود می‌کند، اما با تأکید بر فنی و محیط (سناریو ۴) به رتبه چهارم تنزل می‌یابد. این نشان می‌دهد ماهیت این پروژه به‌گونه‌ای است که منافع اقتصادی و ریسک پایین آن برجسته است.

۳. میزان کلی تغییرات: مقادیر بالای ضریب همبستگی اسپیرمن (همگی بالای ۰/۷) حاکی از آن است که اگرچه جابه‌جایی‌هایی در رتبه پروژه‌ها رخ می‌دهد، اما ساختار کلی رتبه‌بندی در بین سناریوها نسبتاً پایدار است. بالاترین همبستگی مربوط به سناریوی ۲ ($\rho = 0/90$) و کمترین آن مربوط به سناریوی ۳ ($\rho = 0/75$) است. این بدان معناست که تغییر جهت به سمت معیارهای اقتصادی-ریسک، باعث بیشترین تغییر در رتبه‌بندی نهایی می‌شود.

۴. کاربرد مدیریتی: نتایج به مدیران نشان می‌دهد که انتخاب نهایی پروژه به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر ترجیحات راهبردی سازمان در تخصیص اهمیت به معیارهاست. سازمان‌هایی که راهبرد توسعه قابلیت‌های داخلی و نیروی انسانی را دنبال می‌کنند (سناریو ۲)، پروژه‌های متفاوتی را نسبت به سازمان‌های با محوریت سودآوری کوتاه‌مدت و مدیریت ریسک (سناریو ۳) در اولویت قرار خواهند داد.

۹. نتیجه‌گیری

۹-۱. یافته‌های مدل FTOPSIS فازی و تفسیر آن‌ها

بر اساس محاسبات انجام‌شده بر مبنای نظرات خبرگان، ماتریس‌های بی‌مقیاس و موزون فازی برای شش معیار اصلی و سی زیرمعیار تشکیل شد (جداول ۴ تا ۹). محاسبه شاخص‌های فاصله از ایده‌آل مثبت ($S+S+$) و منفی ($S-S-$) برای زیرمعیارها (جداول ۱۰ تا ۱۵) و درنهایت، محاسبه ضریب شباهت (CCICCI) برای معیارهای اصلی، منجر به رتبه‌بندی نهایی آن‌ها گردید که در (جدول ۱۶) خلاصه شده است.

تحلیل رتبه‌بندی معیارها: نتایج نهایی نشان می‌دهد که معیار «الزامات راهبردی» با ضریب شباهت ۰/۵۵۳ در رتبه نخست قرار گرفته است. این نتیجه حاکی از آن است که از دیدگاه خبرگان شرکت مهندسی توان آذران ارونند که در صنایع پیچیده و بلندمدت نفت، گاز و پتروشیمی فعال است، همسویی پروژه با اهداف بلندمدت و کلان سازمان، مهم‌ترین فاکتور تصمیم‌گیری است. در محیط‌های پروژه‌محور با سرمایه‌گذاری سنگین، توجیه یک پروژه صرفاً بر مبنای شاخص‌های مالی کوتاه‌مدت (مانند NPV) می‌تواند سازمان را از مسیر راهبردی خود منحرف کند. اولویت این معیار، مکانیسم بقا و ایجاد مزیت رقابتی پایدار را بر مکانیسم سودآوری محض ترجیح می‌دهد.

جالب آنکه معیار «مالی-اقتصادی» با اختلاف کمی (۰/۵۳۰) در رتبه دوم قرار گرفته است. این بدان معنا نیست که توجیه‌پذیری مالی نادیده گرفته شده، بلکه تأکید دارد که شرط لازم اما ناکافی است. یک پروژه باید حتماً از نظر اقتصادی معقول باشد، اما پروژه‌ای که صرفاً اقتصادی است و در راستای راهبرد سازمان نیست، در اولویت نخواهد بود. این یافته با جهت‌گیری نوین مدیریت سبب پروژه که بر همسویی استراتژیک تأکید دارد، همخوانی کامل دارد [۱، ۳].

نکته قابل‌تأمل دیگر، رتبه پنجم معیار «منابع انسانی» (۰/۵۱۸) است. علیرغم پایین بودن رتبه، تحلیل رگرسیون (بخش بعد) تأثیر بسیار بالای این معیار را نشان می‌دهد. این تناقض ظاهری را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که منابع انسانی به‌عنوان یک معیار توانمندساز (Enabler) یا پیش‌نیاز پایه در نظر گرفته می‌شود. خبرگان احتمالاً فرض می‌کنند شرکت به سطح حداقلی از قابلیت‌های انسانی دست یافته است، اما کیفیت و تناسب این منابع است که تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر موفقیت سایر معیارها (به‌ویژه اجرای فنی و مدیریت ریسک) دارد. به‌عبارت دیگر، ضعف در این معیار می‌تواند تمام معیارهای دیگر را با شکست مواجه سازد.

۹-۲. یافته‌های تحلیل رگرسیون و تفسیر روابط

برای آزمون تأثیر معیارهای شش‌گانه بر فرآیند انتخاب پروژه، از رگرسیون خطی و لگاریتمی استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار SPSS (جدول ۱۷) نشان می‌دهد که تمامی معیارها با سطح معناداری ۰/۰۵ بر انتخاب پروژه تأثیر دارند. میانگین ضریب همبستگی چندگانه (RR) برای معیارها ۰/۵۲۱ به دست آمد که نشان‌دهنده قدرت تبیین‌کنندگی مناسب مدل است.

تحلیل ضرایب تأثیر: برجسته‌ترین نتیجه این تحلیل، بالاترین ضریب تأثیر ($R=0/571$ $R=0/571$) مربوط به معیار «منابع انسانی» است. این یافته، تفسیر بخش قبل را تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که در عمل، متغیر منابع انسانی قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده موفقیت در انتخاب و اجرای پروژه قلمداد می‌شود. مکانیسم تأثیر این معیار را می‌توان دوگانه در نظر گرفت:

۱. مکانیسم مستقیم: پروژه‌هایی که مستلزم مهارت‌های تخصصی هستند، در غیاب نیروی انسانی ماهر اساساً غیرقابل اجرا خواهند بود

۲. مکانیسم غیرمستقیم و تعدیل‌گر: حتی پروژه‌های با





توجیه راهبردی و مالی عالی، اگر توسط نیروی انسانی باانگیزه، توانمند و با ظرفیت کافی اجرا نشوند، با تأخیر، هزینه اضافه و کاهش کیفیت مواجه می‌شوند که در نهایت توجیه اولیه آن‌ها را زیر سؤال می‌برد.

ضرایب نسبتاً بالا و معنادار برای معیارهای «محیط پروژه» (۰/۵۴۴) و «مالی-اقتصادی» (۰/۵۳۱) نیز حاکی از اهمیت نگاه به عوامل خارجی (بازار، قوانین) و پایبندی به انضباط مالی در کنار ملاحظات راهبردی است.

۳-۹. تحلیل حساسیت و پایداری نتایج

به منظور اطمینان از قابلیت اتکای مدل و سنجش پایداری رتبه‌بندی نهایی در برابر تغییرات در قضاوت‌های وزنی، تحلیل حساسیت انجام شد. در این تحلیل، وزن معیارهای اصلی در چهار سناریوی مختلف (پایه، تأکید بر راهبرد و منابع، تأکید بر اقتصاد و ریسک، تأکید بر فنی و محیط) تغییر داده شد و تأثیر آن بر رتبه پنج پروژه برتر بررسی گردید.

یافته کلیدی تحلیل حساسیت: نتایج مندرج در (جدول ۱۸) دو نکته مهم را نشان می‌دهد:

۱. پایداری ساختاری بالا: ضرایب همبستگی اسپیرمن بالا (بین ۰/۷۵ تا ۰/۹۰) بین سناریوهای مختلف و سناریوی پایه، حاکی از ثبات کلی در رتبه‌بندی است. این پایداری، هم نشان‌دهنده استحکام درونی مدل و هم نشانگر اتفاق نظر نسبی خبرگان در خصوص اهمیت معیارها است.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش یک چارچوب سلسله‌مراتبی از اولویت‌ها را در فرآیند انتخاب پروژه در یک شرکت پروژه‌محور نشان می‌دهد: در سطح کلان و جهت‌گیری، همسویی راهبردی ملاک اصلی است. در سطح عملیاتی و اجرایی، منابع انسانی به‌عنوان مهم‌ترین عامل توانمندساز و پیش‌بینی‌کننده موفقیت شناسایی شده است. توجیه اقتصادی شرط لازم اما کافی نبوده و در سطح دوم اهمیت قرار دارد. ریسک پروژه، ملاحظات فنی و محیطی نیز به‌عنوان عوامل تکمیلی و ضروری در این چارچوب جای می‌گیرند.

نتایج تحلیل حساسیت نیز اعتبار و انعطاف‌پذیری مدل پیشنهادی را تأیید می‌کند. این یافته‌ها حاکی از گذار از نگرش صرفاً مالی به نگرشی کل‌نگر و راهبردمحور در مدیریت سبد پروژه‌ها است که در آن، انسان در کانون موفقیت پروژه قرار دارد.

۴-۹. پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده

باتوجه به مزایا و محدودیت‌های فوق، مسیرهای زیر برای توسعه بیشتر این حوزه پژوهشی پیشنهاد می‌شود:

۱. تطبیق و آزمون مدل در سایر صنایع پروژه‌محور (مانند ساخت‌وساز، فناوری اطلاعات و انرژی‌های تجدیدپذیر) به منظور افزایش تعمیم‌پذیری و استخراج وزن‌های معیار خاص هر صنعت.

۲. ادغام روش‌های مکمل: ترکیب مدل FTOPSIS فازی با روش‌هایی مانند DEMATEL فازی برای محاسبه وزن معیارها با در نظرگیری روابط علی و اثر متقابل بین آن‌ها (مثلاً تأثیر مستقیم منابع انسانی بر کاهش ریسک اجرایی).

۳. در نظرگیری وابستگی پروژه‌ها: توسعه مدل به گونه‌ای که بتواند سینرژی و رقابت بین پروژه‌ها را در استفاده از منابع مشترک (بودجه، نیروی انسانی، تجهیزات) مورد توجه قرار دهد.

۴. پویاسازی مدل: ایجاد یک چارچوب تصمیم‌گیری پویا که امکان بازنگری دوره‌ای وزن معیارها و امتیاز پروژه‌ها را با توجه به تغییرات محیط داخلی و خارجی سازمان فراهم کند.

۵. اتوماسیون و توسعه نرم‌افزار: طراحی یک داشبورد تصمیم‌گیرنده نرم‌افزاری بر پایه این مدل تا مدیران بتوانند به‌سادگی داده‌های پروژه‌های جدید را وارد کرده و نتایج رتبه‌بندی را به‌صورت بلادرنگ مشاهده نمایند.

مراجع:

- [1]. Silvius, G., & Marnewick, C. (2022). Interlinking Sustainability in Organizational Strategy, Project Portfolio Management and Project Management: A Conceptual Framework. *Procedia Computer Science*, 196, 938-947.
- [2]. Cordeiro, G., Vasconcelos, A., & Fragoso, B. (2021). Reference Architecture for Project, Program and Portfolio Governance. *International Conference on Project Management*. Springer, Cham. (804-832).
- [3]. Derakhshan, R., Turner, R., & Mancini,



- [11]. Akbari, N, Amirkhani, Amirhossein, k. (2020). investigating the relationship between the competencies of project managers based on the ICB standard and project management processes based on the PMBOK standard in project-oriented organizations, <https://civilica.com/doc/1610605>.
- [12]. Martinsuo, M. & Geraldi, J. (2020). Management of project portfolios: Relationships of project portfolios with their contexts. *International Journal of Project Management*, 38(7), 441-453.
- [13]. Jiménez, V. Afonso, P. Fernandes, G. (2020). Using agile project management in the design and implementation of activity-based costing systems. *Sustainability*, 12(24), 10352.
- [14]. Salwin, M. Jacyna-Golda, I., Kraslawski, A., & Waszkiewicz, A. E. (2022). The use of business model canvas in the design and classification of product-service systems design methods. *Sustainability*, 14(7), 4283.
- [15]. Nozarpour Shami, Z. Farkhian, F. Eslami, A. (2018). Health, Safety and Environment Management System (HSE-MS) in hospitals, 7th National Conference on Management and Humanities Research in Iran, Tehran, <https://civilica.com/doc/1022667>.
- [16]. Mosadeghrad A M, Jaafaripooyan E, Yousefinezhadi T, Keykhani S. Hospital accreditation method: A comparative study. *Payesh* 2020; 19 (5):523-540.
- [17]. Etgar, R. Cohen, Y. Roadmap Optimization: Multi-Annual Project Portfolio Selection Method. *Mathematics* 2023, 10, 1601. <https://doi.org/10.3390/math10091601>.
- [18]. Alinejad, A. Simiari, K. (2012). Choosing the optimal project portfolio using DEA/DEMATEL integrated approach, *Industrial Management Studies Quarterly*, No. 28, pp. 41-60.
- M. (2019). Project governance and stakeholders: A literature review. *International Journal of Project Management*, 37(1), 98-116.
- [4]. Mohagheghi, V., Mousavi, S. M., & Vahdani, B. (2020). A new multi-objective optimization approach for sustainable project portfolio selection: A real-world application under interval-valued fuzzy uncertainty. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, 17(1), 15-37.
- [5]. Salvi, M., et al. (2024). An integrated fuzzy ANP-TOPSIS framework for sustainable project portfolio selection in the digital transformation era. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140123.
- [6]. Chen, L., & Wang, Y. (2024). A hybrid decision-making model for R&D project portfolio selection considering interdependencies and risk propagation under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 238, 121756.
- [7]. Kumar, A., et al. (2025). AI-enhanced fuzzy logic for dynamic project prioritization in agile portfolios. *International Journal of Project Management*, 43(1), 102-118.
- [8]. Abbasi, M. Ashrafi, M. Khairkhah, A. Fundad, H. Gurbanzadeh Karimi, H. (2012). Selection of research and development project portfolio using a data envelopment analysis-balanced scorecard hybrid model. *Science and Technology Policy*, 5(3), 67-82. (In Persian).
- [9]. Cordeiro, G. Vasconcelos, A. Frago, B. (2021). Reference Architecture for Project, Program and Portfolio Governance. Springer: Cham, Switzerland, pp. 804-832.
- [10]. Silvius, G. Marnewick, C. (2022). Interlinking Sustainability in Organizational Strategy, Project Portfolio Management and Project Management a Conceptual Framework. *Procedia Computer Science*, (196), 938-947.

Project Selection in the Portfolio of Projects Using Economic and Non-economic Criteria and Using Fuzzy Logic

Mohammad Ebrahim Tayebi Araghi^{1*}, Seyed Javad Sayedian Hashemi², Ali Ghasemi Kian³

1. Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Khorramshahr International Branch, Islamic Azad University, Khorramshahr, Iran
2. M.Sc., Department of Industrial Engineering, Khorramshahr International Branch, Islamic Azad University, Khorramshahr, Iran
3. M.Sc., Department of Industrial Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

APPLIED ARTICLE

Article History:

Received: 21 October 2025

Revised: 01 December 2025

Accepted: 28 December 2025

Keywords:

Project selection

Portfolio of projects

Economic and non-economic criteria

Fuzzy logic

ABSTRACT

Optimizing project portfolio management is recognized as a key factor in maintaining competitive advantage and achieving the strategic objectives of project-oriented organizations. However, many conventional project selection models either focus solely on economic criteria or lack a systematic framework for simultaneously integrating qualitative, non-economic criteria under conditions of uncertainty. Aiming to bridge this gap, this study presents and validates a novel fuzzy-based multi-criteria decision-making model for project selection in project-oriented companies. The research employed an applied methodology with a descriptive-survey approach, utilizing the fuzzy Delphi technique among 30 experts from Tavan Azaran Arvand Engineering Company. The six-criteria framework of the study (including Financial-Economic, Strategic Requirements, Technical, Project Risk, Human Resources, and Project Environment) was evaluated through fuzzy questionnaires and analyzed using the Fuzzy TOPSIS method and regression analysis. The findings revealed that the 'Strategic Requirements' criterion, with a final weight of 0.553, is the most important factor, while 'Human Resources', with an impact factor of 0.571, is the strongest predictor of success in project selection. Furthermore, the conducted sensitivity analysis confirmed the stability and reliability of the model. The primary innovation of this study lies in the simultaneous integration of six key economic and non-economic dimensions into a unified fuzzy model, its practical validation within the context of an Iranian project-oriented company, and the addition of systematic sensitivity analysis. This model serves as an efficient tool to assist managers in making project selection decisions based on a balance between economic justification and strategic-human requirements in an uncertain environment.

DOR: [20.1001.1.2407.1071.1404.10.07](https://doi.org/10.1001.1.2407.1071.1404.10.07)

How to cite this article

M.E. Tayebi Araghi, S.J. Sayedian Hashemi, A. Ghasemi Kian, Project Selection in the Portfolio of Projects Using Economic and Non-economic Criteria and Using Fuzzy Logic. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2026; 12(4): 94-110. (https://ijge.irangi.org/article_735763.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: tayebi_m@ut.ac.ir, (M.E. Tayebi Araghi).

Available online 11 March 2026

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/>) 



IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

VOLUME 12 • ISSUE 4 • NO. 24 • WINTER 2026

EISSN:25885-5251



► Contents

Techno-Economic Comparison of Helium Recovery from 10 Natural Gas Using Polymeric Membranes Simulation

Mohammad Mahdi Yousefi, Mostafa Jafari

Barriers and Challenges to the Adoption of Compressed 21 Natural Gas (CNG) in the Transportation Sector

Mehran Shakibaei, Omid Majnoui, Ghanbar Ali Sheikhzadeh Nooshabadi

A Review of Hydrogen Gas Storage Methods as an Energy 36 Carrier

Negar Shahedali, Faezeh Barzegari, Mehdi Razavifar

Investigation of the Impact of Solid Particles Suspended in 58 Fluid on Steel Pipe Erosion: CFD Analysis and Experimental Validation

Armin Sabetghadam-Isfahani, Yegane Davoodbeygi, Seyed Mahmoud Latifi

A Comprehensive Review of Nanomaterial Applications in 80 Enhanced Oil Recovery (EOR): Mechanisms, Challenges, and Future Trends

Masoud Bijani, Amir Hossein Sepahvand

Project Selection in the Portfolio of Projects Using Economic 94 and Non-economic Criteria and Using Fuzzy Logic

Mohammad Ebrahim Tayebi Araghi, Seyed Javad Sayedian Hashemi, Ali Ghasemi Kian

IJGE
IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

نشریه مهندسی گاز ایران

سال دوازدهم / شماره چهارم / جلد بیستم و چهارم / زمستان ۱۴۰۴
EISSN:25885-5251



◀ سرمقاله

- ۷ زمان تبدیل بحران به فرصت
مصطفی ابراهیمی مقدم

◀ مقالات

- ۱۰ مقایسه فنی - اقتصادی بازیابی هلیوم از گاز طبیعی توسط شبیه‌سازی فرآیند غشاهای پلیمری
محمد مهدی یوسفی، مصطفی جعفری
- ۲۱ موانع و چالش‌های جایگزینی گاز طبیعی فشرده در چرخه حمل و نقل
مهران شکیبائی، امید مجنون، قنبرعلی شیخ زاده نوش آبادی
- ۳۶ مروری بر روش‌های ذخیره گاز هیدروژن به‌عنوان یک حامل انرژی
نگار شاهدعلی، فائزه برزگری، مهدی رضوی‌فر
- ۵۸ بررسی تأثیر ذرات جامد در سیال بر سایش لوله فولادی: مدل‌سازی CFD و آزمایش‌های تجربی
آرمین ثابت‌قدم اصفهانی، یگانه داود بیگی، سید محمود لطیفی
- ۸۰ مروری جامع بر کاربرد نانومواد در ازدیاد برداشت نفت (EOR): مکانیسم‌ها، چالش‌ها و روندهای آینده
مسعود بیژنی، امیرحسین سپه‌وند
- ۹۴ انتخاب پروژه در سبد پروژه‌ها با به‌کارگیری معیارهای اقتصادی و غیراقتصادی و با استفاده از منطق فازی
محمد ابراهیم طیبی عراقی، سید جواد سیدیان هاشمی، علی قاسمی کیانی

IJGE
IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING