



IJGE[®]

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

نشریه مهندسی گاز ایران

سال دوازدهم / شماره ۳ / جلد ۲۳

پاییز ۱۴۰۴

EISSN:25885-5251



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

نشریه مهندسی گاز ایران

◀ سال دوازدهم . شماره سوم . جلد بیستم و سوم . پاییز ۱۴۰۴

صاحب امتیاز: انجمن مهندسی گاز ایران
مدیر مسئول: دکتر محمدرضا امیدخواه
سر دبیر: 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 علی وطنی (دانشگاه تهران)
دکتر رضا مسیبی بیهانی (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 شادی زاده (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر محسن مسیحی (دانشگاه صنعتی شریف)
دکتر منصور فرزاد (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر محمدرضا خسروی نیکو (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر عبدالنی هاشمی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر لیلا خازینی (دانشگاه تبریز)
دکتر جعفر قاجار (دانشگاه شیراز)

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 ۲۳

دکتر علی وطنی (دانشگاه تهران)

دکتر مسعود آقاجانی (دانشگاه صنعت نفت)

دکتر مرتضی آسمانی (دانشگاه خوارزمی)

دکتر مسعود بیژنی (دانشگاه گرمسار)

دکتر مهدی رضوی فر (دانشگاه تبریز)

دکتر مرتضی اسفندیاری (دانشگاه بجنورد)

دکتر آراد کیانی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

دکتر مینا صیدی اسفهلان (دانشگاه تبریز)

دکتر مرتضی زیودار (دانشگاه سیستان و بلوچستان)

دکتر فرهاد فرامرزیپور (شرکت ملی نفت ایران)

دکتر محمدحسین صابری (دانشگاه سمنان)

دکتر بهاره بیدار (دانشگاه سیستان و بلوچستان)

دکتر محمد رضا امیدخواه (دانشگاه تربیت مدرس)

دکتر مجتبی ساعدی مقدم (دانشگاه صنعتی قوچان)

دکتر وجیهه یوسفی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)

دکتر رضا عابدینی (دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل)

دکتر هادی مهدوی بصیر (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

دکتر مسعود درفشان (دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان)

دکتر میرمحمد خلیلی پور لنگرودی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)

دکتر محمد رضا سردشتی بیرجندی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)

دکتر زهره خلیفات

دکتر یاسین خلیلی

دکتر محمود رحمتی (دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته-کرمان)

فهرست مطالب

◀ سرمقاله

- ۷ آینده گاز: گذار انرژی، هیدروژن و سوخت‌های کم‌کربن
یاسین خلیلی

◀ مقالات

- ۱۰ مروری بر کاربردهای امواج فراصوت در بهبود برداشت از مخازن نفتی
پانید نخعی، مهدی رضوی

- ۲۵ بهینه‌سازی ارزیابی پتروفیزیکی با بهره‌گیری از ضریب سیمان‌شدگی متغیر جهت
شناسایی زون‌های مخزنی در یکی از میادین حوضه زاگرس
کورش کرامتی، احمدرضا ربانی، خالد معروفی، علی کدخدائی

- ۳۹ بررسی عملکرد جداسازی گاز طبیعی با استفاده از غشای ماتریس آمیخته AC/PES:
بخش آزمایشگاهی
سعید خادمی، ابوالفضل کیان، بصیر ملکی

- ۵۷ توسعه مدل منشور پایداری انرژی: چارچوبی برای مدیریت یکپارچه زیست‌بوم انرژی
مصطفی ابراهیمی مقدم، محمدمهدی نجفی، افشین امامی‌خواه

- ۶۹ شبیه‌سازی مولکولی جداسازی گازها به روش غشایی: مرور کلی، چالش‌ها و چشم‌انداز آتی
امیر آقایی لیواری، سیما مجیدی، سیامک پاکدل، حمید عرفان‌نیا

- ۸۵ تدوین الگوی توسعه و ترویج فرهنگ‌سازمانی شرکت پالایش گاز سرخون و قشم
زینب زارع‌پور، محسن صفری، عیسی باخدا، محمود درویش نژاد، علی مرادپور جغدیری، علیرضا صالحی

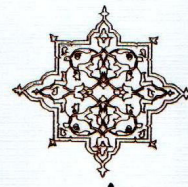


انتخاب انجمن مهندسی گاز ایران به عنوان انجمن علمی برگزیده کشور در سال ۱۴۰۴

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 اقدار علمی کشور مرمون تلاش ارزشمند استادان، پژوهشگران و فناورانی است که با اندیشه خلاق و قلم‌پویای 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 شایسته و پاسکاری 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





سرمقاله

یاسین خلیلی

دکتری مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

آینده گاز: گذار انرژی، هیدروژن و سوخت‌های کم‌کربن

۲. پیوند گاز و هیدروژن: مسیر آینده سوخت‌های پاک
هیدروژن یکی از امیدوارکننده‌ترین حامل‌های انرژی آینده است. با این حال، امروزه بیش از ۷۰ درصد هیدروژن جهان از گاز طبیعی تولید می‌شود. به همین دلیل، گاز نه تنها رقیب هیدروژن نیست، بلکه پایه فعلی توسعه آن محسوب می‌شود.

دو مسیر اصلی تولید هیدروژن از گاز عبارت‌اند از:

۱. هیدروژن آبی^۱: تولید از گاز طبیعی همراه با جذب و ذخیره کربن؛ مناسب برای کاهش قابل توجه انتشار CO₂
۲. هیدروژن فیروزه‌ای^۲: تولید از گاز به روش پیرولیز و تولید کربن جامد؛ روشی با انتشار اندک و ارزش افزوده بالا

زیرساخت گسترده خطوط لوله گاز و فناوری‌های انتقال و ذخیره‌سازی آن می‌توانند با کمترین سرمایه‌گذاری تکمیلی برای انتقال هیدروژن ترکیبی استفاده شوند؛ بنابراین، صنعت گاز عملاً سکوی پرتاب اقتصاد هیدروژنی آینده است.

۳. LNG و نقش آن در بازار جهانی گاز

توسعه بازار گاز طبیعی مایع‌شده^۴ آینده این صنعت را متحول کرده است. LNG امکان انتقال گاز به مسافت‌های طولانی و خارج از چارچوب خطوط لوله را فراهم می‌کند. رشد تقاضا در شرق آسیا و اقیانوسیه، اروپا و آمریکای جنوبی باعث شده است که LNG یکی از سریع‌ترین بخش‌های بازار انرژی جهان باشد.

صنعت انرژی جهان در دهه‌های اخیر با سرعتی بی‌سابقه در حال تغییر است. فشارهای زیست‌محیطی، محدودیت منابع فسیلی، توافق‌های بین‌المللی کاهش انتشار کربن و نیاز روزافزون به انرژی پایدار کشورها را وادار کرده است تا مسیر تازه‌ای در تولید و مصرف انرژی ترسیم کنند. در این میان، گاز طبیعی جایگاهی کلیدی یافته است؛ نه تنها به‌عنوان یک سوخت فسیلی پاک‌تر نسبت به نفت و زغال‌سنگ، بلکه به‌عنوان پلی عملیاتی در گذار انرژی و بستری برای توسعه سوخت‌های نوینی همچون هیدروژن. آینده گاز دیگر صرفاً در حفظ جایگاه فعلی آن خلاصه نمی‌شود، بلکه در ادغام آن با فناوری‌های کم‌کربن و انرژی‌های نو معنا پیدا می‌کند.

۱. گاز طبیعی؛ سوخت انتقالی در مسیر کربن‌زدایی

گاز طبیعی در مقایسه با سایر سوخت‌های فسیلی کمترین میزان انتشار دی‌اکسید کربن را دارد و به همین دلیل «سوخت انتقالی» در مسیر گذار به انرژی‌های پاک شناخته می‌شود. نیروگاه‌های گازی به‌واسطه راندمان بالاتر و انعطاف‌پذیری عملیاتی، مکمل ایده‌آلی برای انرژی‌های تجدیدپذیر هستند؛ زیرا می‌توانند نوسانات تولید برق خورشیدی و بادی را جبران کنند. بسیاری از کشورها، از جمله در اروپا و شرق آسیا، راهبرد انتقال از زغال‌سنگ به گاز را به‌عنوان اولین گام در کاهش انتشار کربن اجرا کرده‌اند. در کنار آن، توسعه فناوری‌هایی مانند کربن‌گیری و ذخیره‌سازی^۱ می‌تواند نقش گاز را برای دهه‌های آینده پایدارتر کند.

1. Carbon Capture and Storage (CCS)
2. Blue Hydrogen
3. Turquoise Hydrogen
4. Liquefied Natural Gas (LNG)



در دوران گذار انرژی، LNG به عنوان منبعی با آلاینده‌گی کمتر و انعطاف‌پذیری بالا نقش مهمی در امنیت انرژی کشورها ایفا می‌کند. هم‌زمان، شرکت‌های بزرگ انرژی در حال توسعه LNG کم‌کربن با استفاده از فناوری‌های کاهش انتشار از زنجیره تولید تا مصرف هستند.

۴. چالش‌های آینده گاز

با وجود فرصت‌های وسیع، صنعت گاز با چند چالش اساسی روبه‌رو است:

۱. فشار جهانی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای
۲. سرمایه‌گذاری سنگین مورد نیاز برای زیرساخت‌های انتقال هیدروژن
۳. رقابت روزافزون انرژی‌های تجدیدپذیر ارزان‌تر
۴. چالش‌های ژئوپلیتیکی و امنیت انرژی
۵. کاهش حاشیه سود در پروژه‌های LNG با ورود بازیگران جدید
۶. این چالش‌ها نشان می‌دهد که آینده گاز وابسته به نوآوری، دیجیتالی شدن و توسعه فناوری‌های کم‌کربن است.

۵. آینده کربن‌زدایی در ایران و راهکارهای پیشرو

ایران به عنوان یکی از بزرگ‌ترین دارندگان ذخایر گاز جهان، در مسیر گذار انرژی با فرصت‌ها و چالش‌های ویژه‌ای مواجه است. ساختار اقتصاد انرژی کشور وابستگی بالایی به سوخت‌های فسیلی دارد و سهم قابل توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از بخش انرژی، صنایع سنگین و حمل‌ونقل است. با وجود این، ایران ظرفیت‌های فنی و زیرساختی مهمی برای حرکت به سوی کاهش انتشار کربن و شکل‌دهی به یک آینده انرژی پایدار در اختیار دارد.

۵-۱. وضعیت کنونی انتشار و چالش‌ها

چالش‌های کربن‌زدایی در ایران را می‌توان در چند محور کلیدی خلاصه کرد:

۱. شدت انرژی بالا: مصرف انرژی نسبت به تولید اقتصادی در کشور بالاتر از میانگین جهانی است.
۲. اتکای سنگین به گاز طبیعی: هرچند گاز سوخت پاک‌تری نسبت به نفت و زغال سنگ است، اما همچنان منبع اصلی انتشار CO₂ محسوب می‌شود.
۳. فلرینگ قابل توجه: با وجود پیشرفت‌های سال‌های اخیر، میزان سوزاندن گازهای همراه در برخی میادین

همچنان بالاست و این موضوع سهم چشمگیری در انتشار دارد.

۴. زیرساخت محدود تجدیدپذیرها: سهم انرژی‌های خورشیدی و بادی هنوز بسیار پایین است.

۵. سرمایه‌گذاری ناکافی در فناوری‌های نوین: پروژه‌های CCS، تولید هیدروژن کم‌کربن و بهینه‌سازی شبکه گاز به سرمایه و سیاست جامع نیاز دارند.

۵-۲. فرصت‌های ایران در مسیر کربن‌زدایی

با وجود محدودیت‌ها، ایران چند مزیت رقابتی قابل توجه برای حرکت در مسیر کاهش کربن دارد:

۱. گستره و دسترسی به منابع عظیم گاز طبیعی
۲. پتانسیل بسیار بالا در انرژی خورشیدی و بادی
۳. وجود زیرساخت گسترده خطوط لوله گاز
۴. بازار توسعه‌نیافته اما ظرفیت‌دار برای هیدروژن
۵. توان علمی مناسب در دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی

۵-۳. راهکارهای کلیدی کربن‌زدایی در ایران

یک نقشه راه عملی برای آینده کم‌کربن ایران می‌تواند شامل مراحل زیر باشد:

یک نقشه راه عملی برای آینده کم‌کربن ایران می‌تواند شامل مراحل زیر باشد:

۱. توسعه پروژه‌های جمع‌آوری و مدیریت فلرینگ کاهش فلرینگ نه تنها انتشار را کم می‌کند، بلکه گاز ارزشمند تلف‌شده را به چرخه مصرف بازمی‌گرداند. فناوری‌های کمپرسورهای بازبافت گاز، ریز شبکه‌های کوچک LNG/CNG و تبدیل گازهای دورافتاده به برق محلی از بهترین گزینه‌ها هستند.

۲. حرکت به سوی تولید هیدروژن کم‌کربن

سه مسیر قابل اتکا:

- هیدروژن آبی با استفاده از گاز طبیعی + CCS
 - هیدروژن فیروزه‌ای از طریق پیرولیز متان
 - هیدروژن سبز با بهره‌گیری از انرژی خورشیدی گسترده مناطق مرکزی و جنوب ایران
- وجود شبکه گاز کشور امکان مخلوط‌سازی هیدروژن یا توسعه تدریجی شبکه اختصاصی آن را فراهم می‌کند.

۳. استقرار فناوری‌های کربن‌گیری و ذخیره‌سازی

۷. جمع‌بندی

آینده صنعت گاز، آینده‌ای ترکیبی است؛ ترکیبی از گاز طبیعی به‌عنوان سوخت انتقالی، هیدروژن به‌عنوان حامل انرژی پاک و فناوری‌های کم‌کربن که این گذار را ممکن می‌سازند. دنیای انرژی به سمت سامانه‌ای انعطاف‌پذیر، پاک و متنوع حرکت می‌کند و گاز در قلب این تحول قرار دارد. حرکت ایران به‌سوی یک آینده کم‌کربن نه‌تنها یک ضرورت زیست‌محیطی، بلکه یک فرصت اقتصادی برای توسعه صنایع نو، کاهش اتلاف انرژی و افزایش رقابت‌پذیری جهانی است. ترکیب هوشمندانه گاز طبیعی با فناوری‌های نوین، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و اصلاحات ساختاری در مصرف انرژی می‌تواند مسیر کربن‌زدایی پایدار و مبتنی بر مزیت‌های ملی را برای کشور ترسیم کند.

آدرس پست الکترونیک: yassinkhalili.pe@aut.ac.ir

میادین تخلیه‌شده نفت و گاز ایران ظرفیت مناسبی برای ذخیره CO₂ دارند. استفاده از CCS در صنایع انرژی‌بر مانند پتروشیمی، فولاد و نیروگاه‌ها از مؤثرترین راهکارهاست.

۴. افزایش سهم تجدیدپذیرها با تمرکز بر خورشیدی

ایران می‌تواند در مناطق یزد، کرمان، خراسان جنوبی، سیستان و بلوچستان و مناطق جنوب یک شبکه خورشیدی گسترده ایجاد کند. ترکیب گاز + خورشیدی به‌عنوان «سیستم انرژی ترکیبی» می‌تواند هم به امنیت انرژی و هم به کاهش انتشار کمک کند.

۵. بهینه‌سازی مصرف و ارتقای راندمان

راهکارهای مؤثر:

- ایجاب‌گزینی تجهیزات فرسوده در شبکه گاز
- ارتقای راندمان نیروگاه‌های گازی به سیکل ترکیبی
- مدیریت هوشمند مصرف خانگی و صنعتی
- بهبود استانداردهای انرژی در ساختمان‌ها و خودروها

۶. دیجیتالی‌سازی شبکه گاز

به‌کارگیری فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی، اینترنت اشیا^۱ و سیستم‌های پیش‌نشت گاز می‌تواند هم امنیت شبکه و هم راندمان کلی را افزایش دهد.

۶. چشم‌انداز آینده

با توجه به روند فعلی، می‌توان چند واقعیت مهم درباره آینده گاز ترسیم کرد:

۱. گاز طبیعی تا چند دهه آینده همچنان یکی از منابع اصلی انرژی جهان خواهد بود.
۲. نقش گاز از یک سوخت فسیلی به رکن اصلی زنجیره تولید هیدروژن و سوخت‌های کم‌کربن تغییر خواهد کرد.
۳. ادغام گاز با فناوری‌های CCS، انرژی‌های تجدیدپذیر و دیجیتالی‌سازی شبکه‌ها، بهره‌وری و پایداری آن را افزایش می‌دهد.
۴. کشورهایی که از امروز در توسعه زیرساخت‌های مرتبط با هیدروژن و LNG کم‌کربن سرمایه‌گذاری کنند، بازیگران کلیدی آینده بازار انرژی خواهند بود.



فناوری فراصوت: رویکردی نوین در پایش، بهره‌برداری و بهینه‌سازی میادین نفت و گاز

پانید نخعی^۱، مهدی رضوی فر^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، 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 ۱۰ - ۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰

چکیده

فناوری‌های مبتنی بر امواج فراصوت به‌عنوان روش‌هایی مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست، نقش مهمی در بهبود برداشت نفت از مخازن هیدروکربنی ایفا می‌کنند. این فناوری با استفاده از امواج فراصوت پرتوان، آسیب‌های سازند نزدیک چاه را کاهش داده و موانع جریان نفت به سمت چاه تولیدی را برطرف می‌کند. در همین راستا، طبق گزارشات میدانی موجود استفاده از امواج فراصوت به‌عنوان یک روش انگیزش چاه در چاه‌های نفت روسیه و آمریکا منجر به بهبود بازده تولید نفت در حدود ۳۰ درصد شده است. این مقاله مروری جامع بر مطالعات آزمایشگاهی، میدانی و مدل‌سازی مرتبط با کاربرد امواج فراصوت در بهبود برداشت نفت ارائه می‌دهد. همچنین، با تحلیل پژوهش‌های موجود، شکاف‌های تحقیقاتی موجود و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی (مانند فرکانس و توان) و توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق به‌عنوان عوامل کلیدی برای ارتقای بهره‌وری پیشنهاد شده‌اند. این مطالعه بر ضرورت استفاده از فناوری امواج فراصوت در چاه‌های نفت به‌منظور بهبود برداشت نفت و مزایای محیط زیستی و اقتصادی آن تأکید دارد. نتایج ارائه شده در این پژوهش، در عملیات بهره‌برداری از مخازن و مدیریت تولید در میدان‌های نفت کاربرد خواهد داشت.

کلیدواژه‌ها: امواج فراصوت، بهبود برداشت نفت، آسیب سازند، کاهش گرانیروی، رسوب آسفالتین

۱. مقدمه

تزریق اسید، گران‌قیمت بوده و نگرانی‌های زیست‌محیطی ایجاد می‌کنند [۲، ۳]. استفاده از امواج فراصوت با کاهش گرانیروی نفت خام، بهبود نفوذپذیری سنگ مخزن و حذف رسوبات آلی و معدنی در محیط متخلخل سنگ، برداشت نفت را بهبود می‌بخشد [۴]. انتخاب این موضوع به دلیل نیاز صنعت به استفاده از روش‌های کم‌هزینه، کم‌خطر و سازگار با محیط‌زیست برای مقابله با چالش‌های تولید و افزایش بازگشت نفت بوده است. در مورد مکانیزم‌های بهبود بازگشت نفت با استفاده از امواج فراصوت، نظرات مختلفی ارائه شده است؛ (۱) تغییر در

کاهش تولید هیدروکربن‌ها در برابر تقاضای روبه رشد انرژی در جهان، چالشی اساسی در صنعت نفت و گاز ایجاد کرده است. در همین راستا، توسعه فناوری‌های نوین برای آزادسازی هیدروکربن‌های غیرقابل تولید و افزایش برداشت نفت از اهمیت بالایی برخوردار است [۱]. این موضوع به‌ویژه در مخازن با آسیب‌های سازند که ناشی از نفوذ مایعات حفاری، رسوب آسفالتین و واکس، یا جابه‌جایی ذرات ریز است، ضروری است. فناوری‌های متداول مانند ایجاد شکاف هیدرولیکی و

1. Viscosity



ترشوندگی سنگ: امواج با فرکانس بالا باعث ارتعاش سنگ‌ها و سیالات می‌شوند. با این حال سرعت و شتاب ارتعاش در اجسام مختلف، متفاوت است، بنابراین می‌توانند منجر به حرکت نسبی سطح سیال و سنگ شوند. وقتی این حرکت به شدت خاصی برسد، به آن «تمایل به درهم آمیختن»^۱ گفته می‌شود و در نتیجه نیروی جاذبه بین سیال و سنگ کاهش یافته و سیال از سطح سنگ جدا می‌شود؛ (۲) کاهش گرانشی: سنگ مخزن تحت تأثیر ارتعاش امواج فراصوت قرار می‌گیرد که این امر باعث تغییرات متناوب در تنش برشی و فشار صوتی می‌شود. برای هیدروکربن‌های سنگین، گرانشی سیال با افزایش تنش برشی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، حرارتی که به دلیل ارتعاشات امواج فراصوت تولید می‌شود، می‌تواند منجر به کاهش گرانشی شود. این پدیده به این دلیل رخ می‌دهد که موج صوتی در سنگ جذب شده و انرژی صوتی به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود. همچنین، حفره‌زایی^۲ مقدار زیادی انرژی حرارتی را از طریق فرآیند حفره‌زایی (ترکیدن حباب‌ها)^۳ آزاد می‌کند؛ (۳) کاهش تنش سطحی: به دلیل اثر حرارتی امواج فراصوت و تغییر در خواص رئولوژی آن‌ها پس از تابش امواج (کاهش گرانشی نفت خام)، تنش بین سطحی آب و نفت در شرایط مخزن کاهش می‌یابد؛ (۴) شکستن ترکیبات بزرگ هیدروکربن: این پدیده می‌تواند به دلایل مختلفی مانند حفره‌زایی، ارتعاش و اثر تصادفی مکانیکی امواج فراصوت ایجاد شود. ارتعاشات مکانیکی ناشی از امواج با فرکانس بالا باعث ایجاد حرکت نسبی بین مولکول‌های مختلف می‌شود. این حرکت به دلیل تفاوت در شتاب مولکول‌ها رخ داده و در نهایت منجر به شکستن مولکول‌های سنگین می‌گردد. این امر به همراه تأثیر حفره‌زایی باعث کاهش گرانشی نفت سنگین شده و بهبود برداشت از مخازن را در پی دارد؛ (۵) بهبود تخلخل و نفوذپذیری سنگ به دلیل تغییر شکل منافذ، حذف پلاگ‌های ریز، حل شدن پارافین و آسفالتین‌ها و ...؛ (۶) اتصال قطرات نفت به دلیل نیروی بیرکنس^۴ که منجر به جریان پیوسته نفت می‌شود. علاوه بر این، امواج فراصوت قطرات نفتی را که در حفرات ریز محبوس شده‌اند را به دلیل انرژی تولید شده توسط حفره‌زایی و ارتعاشات مکانیکی در سنگ‌ها و سیالات، به حرکت درمی‌آورند؛ (۷) انتقال پریستالتیک^۵: ارتعاشات مکانیکی می‌توانند باعث تغییر شکل دیواره‌های منافذ شده

و سیالات را به داخل حفرات مجاور منتقل کنند. این فرآیند، انتقال پریستالتیک را آغاز می‌نماید؛ (۸) امولسیون‌سازی ناشی از ارتعاشات صوتی؛ (۹) امولسیون‌زدایی: گرمای تولید شده توسط امواج فراصوت در مدت زمان طولانی، می‌تواند گرانشی امولسیون‌ها را کم کرده و باعث شکستن آن‌ها، به خصوص مخازن نفت سنگین، شود.

با توجه به مزایای بهبود بازیافت نفت با استفاده از امواج فراصوت و تحقیقات مستمر در این زمینه، مطالعات پیشین در این حوزه عمدتاً به موضوعات خاصی محدود شده‌اند. در این مقاله، پیشرفت‌های اخیر در بهبود بازیافت نفت که با به‌کارگیری فناوری‌های مبتنی بر امواج فراصوت حاصل شده‌اند، به‌طور جامع بررسی شده‌اند. همچنین، مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی مربوط به تأثیر امواج فراصوت در تولید نفت، آسیب‌های سازند، جریان سیال و گرانشی سیالات بررسی شده‌اند. در ادامه، نتایج مطالعات میدانی مربوط به تابش امواج فراصوت در بهبود بازیافت نفت ارائه شده‌اند.

۲. مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی مربوط به تابش امواج فراصوت

۱-۲. تأثیر امواج فراصوت بر بهبود برداشت نفت از مخازن
مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که امواج فراصوت توانایی جابجایی نفت باقی‌مانده، افزایش نفوذپذیری سنگ مخزن و بهبود بازیافت نفت را دارند. آگی و همکاران تأثیر استفاده ترکیبی از امواج فراصوت و سورفکتانت را در عملیات ازدیاد برداشت نفت بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که استفاده هم‌زمان از سورفکتانت و امواج فراصوت (فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، توان ۵۰۰ وات) منجر به بهبود حدود ۱۲ درصد بازده تولید نفت خام را می‌شود. تشکیل میکروامولسیون‌ها مکانیزم اصلی در تزریق سورفکتانت بود. امواج فراصوت در توان بالا و غلظت سورفکتانت بیشتر از غلظت بحرانی میسل، کارایی بیشتری نشان دادند [۵]. در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از میکرومدل‌های شفاف دوعدی (مدل هل-شاو^۶) و امواج فراصوت (۴۰ کیلوهرتز، ۵۰۰ وات)، آگی و همکاران نشان دادند که امواج متناوب نسبت به پیوسته برای بهبود برداشت نفت سنگین کاربردی‌تر هستند. ترکیب امواج متناوب، توان

1. Mangling tendency
2. Cavitation
3. Bubble collapse
4. Bjerknes force
5. Peristaltic transport
6. Hele-Shaw model



بالا و فاصله کوتاه از منبع انرژی بهترین شرایط برای بهبود برداشت نفت خام را فراهم کرد [۶]. قمرطالع و همکاران تأثیر ساختار حفرات سنگ را در این عملیات بررسی کردند. پنج نمونه سنگ کربناته و ماسه‌سنگی با ساختارهای مختلف تحت تابش متناوب امواج (۲۰ کیلوهرتز، ۳۰۰ وات، ۱۰ دقیقه، ۷ ثانیه تابش و ۳ ثانیه استراحت) قرار گرفتند. تحلیل‌های پتروگرافی و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که امواج فراصوت با ایجاد میکروشکاف‌ها یا جدا شدن ذرات، ریخت‌شناسی سنگ را تغییر می‌دهند. میکروشکاف‌ها نفوذپذیری را افزایش دادند، اما جدا شدن ذرات گاهی نفوذپذیری را کاهش داد. نفوذپذیری کربنات‌های اولیتیک به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت، اما نتایج در ماسه‌سنگ‌ها متفاوت بود [۷]. این یافته‌ها با مطالعات رضایی دهشیمی و همکاران در میکرومدل‌ها سازگار است. طبق نتایج این پژوهش، بازیافت نفت به هندسه میکرومدل وابسته است [۸].

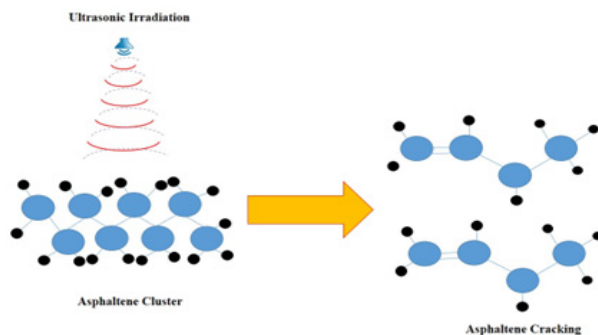
هی و همکاران تأثیر امواج فراصوت بر بازیافت نفت از لجن نفتی و نمونه‌های ماسه اشباع‌شده با وازلین و نفت‌سفید را بررسی کردند. آزمایش‌های سیلاب‌زنی با فرکانس‌های ۲۵، ۴۰ و ۶۵ کیلوهرتز و توان ۵۰-۵۰۰ وات نشان داد که توان خروجی مهم‌ترین عامل در بازده عملیات است. افزایش توان امواج، بازیافت نفت را بهبود می‌دهد، درحالی‌که فرکانس بالاتر فرآیند را تسریع می‌کند. به‌عنوان مثال، بازده تولید نفت در امواج با توان‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ وات به ترتیب ۱۰ درصد، ۱۴ درصد و ۱۷ درصد افزایش یافت. حجم منافذ (PV)، به معنای حجم قابل‌برداشت نفت در مخزن) معیاری کلیدی بود؛ بازیافت در ۱۰۰ وات و ۲۰۰ دقیقه تابش برای فرکانس ۲۵ کیلوهرتز ۵۱ درصد PV، برای ۴۰ کیلوهرتز ۵۳ درصد PV و برای ۶۵ کیلوهرتز ۵۷ درصد PV بود [۹]. وانگ و همکاران کاهش اشباع آب در مغزه‌های سنگی را با امواج فراصوت، تزریق شیمیایی و ترکیب این دو روش مقایسه کردند. امواج با فرکانس پایین‌تر و توان بالاتر بازده را بهبود دادند، اما اثر تابش با زمان کاهش یافت که نیاز به کنترل دقیق مدت تابش را نشان می‌دهد. فناوری ترکیبی فراصوت-شیمیایی بیشترین بهبود نفوذپذیری را نسبت به روش‌های تکی داشت. این فناوری به‌عنوان روشی مکمل، نه جایگزین روش‌های موجود معرفی شد [۱۰]. وانگ و همکاران کاهش گرانیوی نفت فوق‌سنگین (با گرانیوی اولیه ۱۲۵۰ مگاپاسکال ثانیه) را بررسی کردند. امواج با فرکانس‌های ۱۸، ۲۰ و ۲۵ کیلوهرتز و توان ۱۰۰-۱۰۰۰ وات گرانیوی نفت خام را به‌ترتیب به ۴۸۰، ۸۹۰ و ۹۲۰ مگاپاسکال ثانیه کاهش دادند. طبق نتایج،

حفره‌زایی ناشی از امواج فراصوت مولکول‌های سنگین نفت را به هیدروکربن‌های سبک‌تر تجزیه کرد. همچنین، فرکانس، توان و زمان تابش امواج عوامل کلیدی در بازده عملیات معرفی شدند [۱۱]. مولاکایف و همکاران تأثیر امواج فراصوت بر گرانیوی نفت با ترکیبات مختلف را بررسی کردند. طبق نتایج، نفت‌های دارای پارافین کم یا آسفالتین بالا، کاهش گرانیوی قابل‌توجهی را نشان دادند [۱۲]. افزایش زمان تابش امواج، بازده عملیات را بهبود داد. این یافته‌ها با نتایج ارائه شده در پژوهش‌های رحیمی و همکاران [۱۳] و علی‌یف و همکاران [۱۴] سازگار است. نادری و بباداغلی تأثیر امواج فراصوت بر بازده تولید نفت و برهم‌کنش سیال-سنگ را در شرایط مختلف ترشوندگی سنگ مخزن بررسی کردند. سطوح نفت‌دوست بازده تولید نفت بیشتری را در فرکانس‌های بالاتر امواج فراصوت نشان دادند، اما ضریب بازده تولید نهایی تغییر چندانی نداشت [۱۶، ۱۵]. موسوی و همکاران رفتار رئولوژیکی نفت خام را بررسی کردند. طبق نتایج، امواج فراصوت (۴۵ کیلوهرتز) اجزای سنگین نفت خام (به‌ویژه آسفالتین) را حل کردند. همچنین، نفت خام کوه‌موند پس از ۴۰ دقیقه تابش امواج فراصوت، رفتار شبه‌پلاستیک نشان داد. در همین راستا، شناسایی زمان بهینه تابش امواج فراصوت برای جلوگیری از رسوب آسفالتین ضروری است [۱۷]. شماتیک از شکستن توده‌های آسفالتین موجود در نفت خام تحت تابش امواج فراصوت در (شکل ۱) ارائه شده است.

محمدیان و همکاران تزریق آب هم‌زمان با تابش امواج فراصوت (۴۰ کیلوهرتز، ۱۰۰-۵۰۰ وات) را بررسی کردند. طبق نتایج آزمایشگاهی، حفره‌زایی ناشی از امواج فراصوت، کاهش گرانیوی نفت خام و امولسیون‌سازی مکانیزم‌های اصلی در بهبود برداشت نفت بودند. همچنین، افزایش دمای نفت خام، گرانیوی و کشش سطحی را کاهش داد [۱۸]. حمیدی و همکاران افت فشار و گرانیوی نفت خام در محیط متخلخل را بررسی کردند. طبق نتایج، گرمای ایجاد شده در مقیاس حفرات سنگ، حفره‌زایی و کاهش گرانیوی نفت خام از مکانیزم‌های اصلی در بهبود برداشت نفت تحت تابش امواج فراصوت بودند [۱۹]. الهمدی و همکاران تحرک‌پذیری نفت را در مغزه‌های سنگی بررسی کردند. امواج فراصوت (۵۰ کیلوهرتز) نفوذپذیری نسبی و نرخ تولید نفت خام را در حالت‌های افقی و عمودی بهبود دادند [۲۰]. حمیدی و همکاران تأثیر تابش امواج فراصوت و تزریق هم‌زمان سورفکتانت را در یک مدل هل-شاو بررسی کردند. طبق نتایج، امولسیون‌سازی و کاهش سورفکتانت موردنیاز تحت تابش امواج فراصوت مشاهده شد [۲۱، ۲۲].

امواج فراصوت اثبات شد [۲۳]. موصین و مریبوت بازده تولید نفت حدود ۸۰ درصد را پس از ۳۰ دقیقه تابش (۲۰ کیلوهرتز، ۱۰۰-۳۵۰ وات) گزارش کردند که نشانگر تأثیر محسوس امواج فراصوت در بهبود برداشت نفت از مخازن است [۲۴].

همچنین آن‌ها تزریق گاز CO₂ هم‌زمان با تابش امواج فراصوت را بررسی کردند. طبق نتایج، بازده تولید نفت در شرایط دمایی کنترل‌نشده بیشتر بهبود یافت. همچنین، کاهش گرانروی نفت خام و فشار مویبگی در محیط متخلخل سنگ تحت تابش



شکل ۱: شماتیک شکستن توده‌های آسفالتین موجود در نفت خام تحت تابش امواج فراصوت

داد که امواج فراصوت (با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، ۱۰۰۰ وات) نفوذپذیری سنگ را بهبود می‌بخشد [۲۹، ۳۰]. فرکانس‌های بالاتر از ۴۰ کیلوهرتز ممکن است به مغزه آسیب برسانند که محدودیتی کلیدی در این عملیات است. مطالعات انجام شده به روش تصویربرداری از میکرومدل‌های شفاف دوبعدی در فرکانس‌های ۲۰ کیلوهرتز (۴۰ وات) و ۳۰ کیلوهرتز (۱۰۰ وات) نشان داد که امواج فراصوت رسوب آسفالتین را کاهش داده و از تشکیل آن در محیط متخلخل سنگ جلوگیری می‌کند [۳۱، ۳۲]. ارتعاشات مکانیکی ایجاد شده توسط امواج فراصوت، مکانیزم اصلی این فرآیند است. امواج فراصوت با فناوری‌های دیگر برای حذف آسیب‌های ناشی از سیالات حفاری، رسوبات آلی، ذرات گل و پلی‌اکریل‌امید ترکیب شده‌اند [۳۳-۳۶]. موحسین و مریبوت مدلی صوتی-حرارتی برای تخمین تأثیر امواج فراصوت در برداشت نفت تک‌فازی توسعه دادند. طبق نتایج این مدل، افزایش فشار ناشی از تابش امواج فراصوت بازده تولید نفت خام را بهبود می‌دهد [۲۴]. گوو و همکاران ارتعاشات فرکانس بالا را مدل‌سازی کردند. استفاده از این روش در چاه نفتی در چین غربی نفوذپذیری سنگ مخزن را از ۱۱/۴ میلی‌داری به ۲۲ میلی‌داری، گرانروی نفت خام را از ۶۳/۵ مگاپاسکال ثانیه به ۳۷ مگاپاسکال ثانیه کاهش داد [۳۴]. خلاصه برخی مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های انجام شده در مورد استفاده از امواج فراصوت در بهبود برداشت نفت و همچنین، خلاصه مطالعات انجام شده در مورد استفاده از این امواج در کاهش آسیب‌سازند به ترتیب در (جدول‌های ۱ و ۲) ارائه شده‌اند.

۲-۲. تأثیر امواج فراصوت در کاهش آسیب‌های سازند

آسیب‌سازند مانعی در تولید نفت از مخازن است. تابش امواج فراصوت با تحریک (انگیزش) نواحی نزدیک به چاه، آسیب‌های ناشی از انتقال ذرات ریز، رسوب آسفالتین، واکس و رسوبات معدنی را کاهش می‌دهند. پو و همکاران تأثیر توان، فرکانس و زمان تابش امواج فراصوت بر حذف رسوبات معدنی نزدیک چاه را بررسی کردند. طبق نتایج، افزایش توان و زمان تابش امواج (۸۰-۱۲۰ دقیقه) بازده کاهش آسیب‌سازند (تمیزکاری چاه) را بهبود می‌دهد [۲۵]. طاهری شکیب و همکاران از امواج فراصوت برای حذف رسوبات NaCl و بازگرداندن نفوذپذیری ناحیه نزدیک به چاه استفاده کردند. طبق نتایج، استفاده ترکیبی از امواج فراصوت و تزریق آب، نفوذپذیری (تراوایی) مغزه‌های سنگی آسیب‌دیده را حدود ۸۰ درصد بازگرداند، درحالی‌که تزریق آب به‌تنهایی حدود ۳۰ درصد در بازگردانی نفوذپذیری سنگ مؤثر بود. هم‌افزایی امواج فراصوت و تزریق آب در مخازن با نفوذپذیری کم تأثیر قابل‌توجهی در بهبود برداشت نفت داشت [۲۶]. نتایج مشابهی برای حذف رسوبات KCl با این روش گزارش شده است [۲۷]. کونانز و ولفل حذف رسوبات ژپس در لوله‌ها را با امواج فراصوت بررسی کردند. طبق نتایج، دامنه ارتعاشات و زمان تابش امواج فراصوت بازده حذف این رسوبات معدنی را افزایش می‌دهد. این روش به‌عنوان رویکردی سازگار با محیط‌زیست، مکمل فناوری‌های سنتی معرفی شد [۲۸]. آزمایش‌ها روی مغزه‌های آسیب‌دیده توسط پارافین و رسوبات معدنی نشان



جدول ۱: خلاصه برخی مطالعات آزمایشگاهی و مدل سازی انجام شده در مورد تأثیر امواج فراصوت

پژوهشگران	نتیجه اصلی	زمان تابش	توان امواج	فرکانس امواج
آگی و همکاران [۵]	استفاده ترکیبی از امواج فراصوت و تزریق سورفکتانت منجر به بهبود برداشت نفت از مخازن هیدروکربنی می شود.	۳-۹۰ دقیقه	۵۰۰ وات	۴۰ کیلوهرتز.
تان و همکاران [۹]	توان امواج فراصوت نسبت به سایر پارامترها مانند فرکانس، زمان، دما و pH، مهم ترین عامل در بهبود بازیافت نفت است.	۱۵-۱۲۰ دقیقه	۱۲۰-۳۰۰ وات	۲۵-۱۲۵ کیلوهرتز
وانگ و همکاران [۱۱]	مهم ترین عوامل برای کاهش گرانیوی نفت سنگین، فرکانس امواج فراصوت، توان و زمان تابش امواج فراصوت هستند.	۵-۶۰ دقیقه	۱۰۰-۱۰۰۰ وات	۱۸-۲۵ کیلوهرتز
مولاکایف و همکاران [۱۲]	کارایی تابش امواج فراصوت بر روی نفت خام بستگی به ترکیب نفت دارد.	تا ۱۵ دقیقه	۴۰۰ وات	۲۴/۳ کیلوهرتز
موسوی و همکاران [۱۷]	تابش امواج فراصوت انحلال اجزاء سنگین در نفت خام را افزایش می دهد.	۵-۲۴۰ دقیقه	۷۲ وات	۴۵ کیلوهرتز
حمیدی و همکاران [۱۹]	بهبود برداشت نفت تحت تابش امواج فراصوت ناشی از حفره زایی، تولید گرما و کاهش گرانیوی نفت خام است.	۶۰ دقیقه	۱۰۰-۵۰۰ وات	۲۵-۴۰-۶۸ کیلوهرتز
حمیدی و همکاران [۲۱]	امواج فراصوت باعث پخش فازهای آب شور-نفت و همچنین تولید امولسیون ها شد. درحالی که امولسیون زدایی در تابش طولانی امواج فراصوت رخ داد.	تا ۳۰ دقیقه	۵۰۰ وات	۴۰ کیلوهرتز
حمیدی و همکاران [۲۳]	استفاده ترکیبی از امواج فراصوت و تزریق گاز کربن دی اکسید در مخازن نفتی منجر به بهبود برداشت نفت می شود. کاهش گرانیوی نفت خام به عنوان مکانیسم اصلی در این عملیات ارائه شده است.	تا ۶۰ دقیقه	۵۰۰ وات	۴۰ کیلوهرتز
پوو و همکاران [۲۵]	انسداد حفرات سنگ مخزن با افزایش توان و زمان تابش امواج فراصوت کاهش پیدا می کند.	۸۰-۱۲۰ دقیقه	۱۰۰-۶۰ وات	۵۰-۱۸ کیلوهرتز
طاهری شکیب و همکاران [۲۶]	اثر ترکیبی تحریک توسط امواج فراصوت و تزریق آب، حذف رسوبات NaCl تشکیل شده در مغزه های سنگی را بهبود بخشید.	تا ۸۰ دقیقه	۱۰۰۰ وات	۲۲ کیلوهرتز
کونانز و ولفل [۲۸]	رسوب گچ ایجاد شده در محیط متخلخل سنگ، می تواند توسط امواج فراصوت حذف شود. این موضوع به دامنه ارتعاشات و مدت زمان تابش امواج فراصوت بستگی دارد.	۵-۱۰ دقیقه	۲۰۰۰ وات	۲۰ کیلوهرتز



جدول ۲: خلاصه برخی پژوهش‌های انجام شده در مورد تأثیر امواج فراصوت بر روی آسیب سازند

فرکانس امواج	نوع آسیب	نتیجه اصلی	پژوهشگران
۲۰-۴۰ کیلوهرتز	تغییر ساختار منافذ سنگ	امواج فراصوت ساختار منافذ سنگ را اصلاح کرده و نفوذپذیری آن را افزایش می‌دهد.	قمرطالع و همکاران [۷]
۲۲-۴۴ کیلوهرتز	گرانروی بالای نفت خام و رسوب ترکیبات آلی	امواج فراصوت گرانروی نفت خام را کاهش داده و نفوذپذیری سنگ مخزن را بهبود می‌بخشد.	مولاکایف و همکاران [۱۲]
۲۰-۴۰ کیلوهرتز	رسوب آسفالتین	امواج فراصوت با کاهش رسوبات آسفالتین، تراوایی سنگ را بهبود داده و برداشت نفت را افزایش می‌دهد.	رضوی فر و همکاران [۳۷]
۲۰ کیلوهرتز	گرفتگی حفرات با رسوب کربنات کلسیم	امواج فراصوت با توان بالا، انسداد حفرات سنگ ناشی از رسوب کربنات کلسیم را به‌طور مؤثری حذف می‌کند.	ژانگ و همکاران [۳۸]
۲۰-۲۵ کیلوهرتز	رسوبات کلئیدی در محیط متخلخل سنگ	امواج فراصوت رسوبات کلئیدی را تجزیه کرده و گرفتگی حفرات سنگ را برطرف می‌کند.	مو و همکاران [۳۹]
۲۰-۳۰ کیلوهرتز	انسداد معدنی حفرات سنگ	ترکیب امواج فراصوت با روش تزریق اسید، انسداد معدنی را بهتر از سایر روش‌ها حذف می‌کند.	خان و همکاران [۴۰]
۲۰ کیلوهرتز	کاهش تراوایی سازند	تابش امواج فراصوت آسیب‌های نزدیک چاه را کاهش داده و تولید از چاه را افزایش می‌دهد.	شو و همکاران [۴۱]
۱۵-۲۵ کیلوهرتز	کاهش تراوایی سازند	تابش امواج صوتی با فرکانس بالا تراوایی سازند را بازیابی کرده و تحریک چاه را بهبود می‌بخشد.	وانگ و همکاران [۴۲]

۳-۲. چالش‌ها و محدودیت‌های استفاده از امواج فراصوت در مخازن نفتی

مطالعات آزمایشگاهی امواج فراصوت، در بازه فرکانسی ۲۰ تا ۱۲۵ کیلوهرتز، توان ۳۰ تا ۲۰۰۰ وات و زمان تابش تا ۲۴۰ دقیقه، روی نمونه‌های مغزه سنگی و میکرومدل‌های شفاف دوبعدی انجام شده‌اند. با این حال، این آزمایش‌ها اغلب در شرایط محیطی استاندارد اجرا شده‌اند که با فشار و دمای بالای مخازن واقعی هیدروکربنی تفاوت دارند. فشار و دما، به‌عنوان عوامل کلیدی در بازیافت نفت، می‌توانند اثر امواج فراصوت را تقویت یا تضعیف کنند، اما این تأثیر به‌طور جامع بررسی نشده است. برای مثال، مشخص نیست آیا افزایش دما باعث تشدید پدیده حفره‌زایی می‌شود یا تغییرات فشار مویبندی را مختل می‌کند. این شکاف تحقیقاتی، کاربرد صنعتی امواج فراصوت را با تردید مواجه می‌کند.

یکی از محدودیت‌های اصلی، تمرکز مطالعات روی شرایط آزمایشگاهی غیرواقعی است. آزمایش‌ها معمولاً نفوذپذیری یا بازیافت نفت را در نمونه‌های کوچک و تحت شرایط کنترل‌شده بررسی کرده‌اند، اما مخازن واقعی دارای

پیچیدگی‌های هندسی، ناهمگنی سنگ و جریان‌های چندفازی هستند. نبود آزمایش‌های مقیاس‌پذیر در شرایط مخزنی، قابلیت تعمیم نتایج را کاهش داده است. برای رفع این مشکل، لازم است آزمایش‌هایی در محیط‌های شبیه‌سازی شده با فشار و دمای بالا انجام شود تا اثرات واقعی امواج فراصوت مشخص گردد.

طراحی تابشگرهای فراصوت نیز چالش دیگری است که کمتر مورد توجه قرار گرفته. اندازه، محل قرارگیری و نحوه انتقال امواج در چاه‌ها بر کارایی، هزینه تعمیرات و جریان نفت خام تأثیر می‌گذارد، اما این جنبه‌ها به‌صورت سیستماتیک بررسی نشده‌اند. برای مثال، ابزارهای بزرگ ممکن است جریان سیال درون چاه را مختل کنند، درحالی‌که ابزارهای کوچک ممکن است عمق نفوذ کافی نداشته باشند. این عدم توجه به طراحی ابزار، مانع از تبدیل نتایج آزمایشگاهی به فناوری‌های عملیاتی شده است.

آسیب‌های سازند، مانند رسوب آسفالتین یا تورم ذرات گل، اغلب نتیجه چندین مکانیزم هم‌زمان هستند. مطالعات فعلی تأثیر امواج فراصوت را روی مکانیزم‌های جداگانه





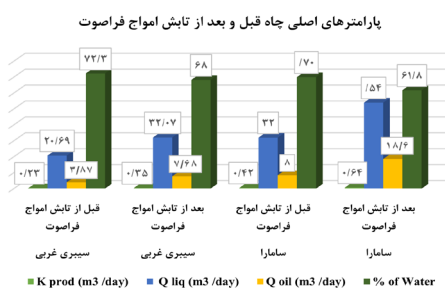
۳. نتایج مطالعات میدانی استفاده از امواج فراصوت
 کاربرد امواج فراصوت در تحریک چاه‌ها و بهبود بازیافت نفت در چندین آزمایش میدانی، به‌ویژه در کشور روسیه بررسی شده است. آبراموف و همکاران اثر تحریک چاه‌های آسیب‌دیده را با امواج فراصوت (فرکانس ۲۵ کیلوهرتز) در مخازنی با نفوذپذیری ۲۰ میلی‌داری و تخلخل ۱۵ درصد بررسی کردند. نتایج میدانی نشان داد که تابش امواج فراصوت، دبی تولید نفت را حدود ۵۰ درصد افزایش می‌دهد و در مخازن با نفوذپذیری و تخلخل بالاتر بهبود برداشت نفت تا حدود ۸۰ درصد مشاهده شد. با این حال، در مخازن با نفوذپذیری و تخلخل پایین‌تر، تأثیر امواج فراصوت به‌طور قابل‌توجهی کمتر بود که نشان‌دهنده وابستگی شدید بازده این عملیات به ویژگی‌های سنگ مخزن است [۳۵]. این محدودیت کاربرد فناوری در مخازن با تراوایی کم را با چالش مواجه می‌کند.

همچنین آن‌ها اجرای فناوری امواج فراصوت را در بیش از ۱۰۰ چاه در دو منطقه با شرایط زمین‌شناسی متفاوت، یعنی سیبری غربی و سامارا، بررسی کردند. طبق نتایج، امواج با فرکانس ۱۳-۲۶ کیلوهرتز بازده موفقیت ۹۰ درصد و افزایش تولید نفت بین ۴۰ درصد تا ۱۰۰ درصد ایجاد کردند. این فناوری به‌دلیل توانایی در بهبود نفوذپذیری سنگ مخزن آسیب‌دیده و کاهش تولید آب، به‌عنوان روشی کارآمد معرفی شد [۳۶]. (شکل ۲)، افزایش دبی تولید نفت خام (Qoil) و تغییر در پارامترهای چاه (نفوذپذیری سنگ و درصد آب تولیدی) را پس از تابش امواج فراصوت در بازه زمانی سه‌ساله نشان می‌دهد. با این حال، نبود داده‌های بلندمدت‌تر (بیش از سه سال) و عدم بررسی تأثیر امواج در مخازن عمیق‌تر، تعمیم نتایج را محدود می‌کند.

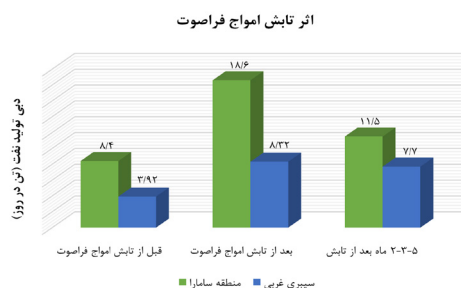
بررسی کرده‌اند، اما اثر آن‌ها روی ترکیب مکانیزم‌ها (مثل مسدود شدن حفرات همراه با رسوب معدنی) ناشناخته است. این شکاف می‌تواند کارایی امواج فراصوت را در شرایط واقعی مخزن محدود کند. تحقیقات آینده باید آزمایش‌هایی با سناریوهای چندگانه آسیب‌سازند را طراحی کنند تا اثرات متقابل این مکانیزم‌ها روشن شود.

پرتودهی طولانی‌مدت امواج فراصوت نیز می‌تواند مشکل‌ساز باشد. تابش بیش از حد ممکن است به ساختار سنگ مخزن آسیب برساند یا امولسیون‌های ناخواسته ایجاد کند که جریان نفت را مختل می‌کنند. تعیین زمان بهینه تابش، با توجه به نوع سنگ و سیالات مخزن، ضروری است اما به‌طور کامل بررسی نشده است.

امواج فراصوت با کاهش فشار موینگی، کشش سطحی و گرانروی نفت خام، نفوذ سیال در محیط‌های متخلخل را بهبود می‌دهند، اما مکانیزم‌های دقیق این فرآیند همچنان مورد اختلاف است. ارتعاش مکانیکی، حفره‌زایی، تولید حرارت و امولسیون‌سازی به‌عنوان مکانیزم‌های احتمالی مطرح شده‌اند، اما وابستگی آن‌ها به ویژگی‌های مخزن (مثل تخلخل یا ترشوندگی سنگ مخزن) و پارامترهای موج (مثل فرکانس و توان) به‌طور کامل درک نشده است. این نبود اجماع، طراحی عملیات بهینه را در شرایط واقعی دشوار می‌کند. برای کاربرد موفق امواج فراصوت، باید عوامل کلیدی مانند هندسه مخزن، ویژگی‌های سیال، عمق نفوذ امواج و روش تابش (پیوسته یا متناوب) به‌دقت بررسی شوند. بدون این تحلیل‌ها، فناوری امواج فراصوت ممکن است در مقیاس صنعتی ناکارآمد یا پرهزینه باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۲: تأثیر تابش امواج فراصوت در بازده تولید نفت خام (الف) و در سایر پارامترهای تولید از چاه (ب)، برای چاه‌های سیبری غربی و سامارا [۳۶]

آبراموف و همکاران از تجهیزات ویژه‌ای برای انجام یک آزمایش میدانی بر روی چاه‌های عمودی در دو منطقه از روسیه استفاده کردند. این تجهیزات شامل یک مولد امواج فراصوت ارتقاء یافته بود که به ابزار درون‌چاهی با محدوده فرکانس

استفاده کردند. این تجهیزات ویژه‌ای برای انجام یک آزمایش میدانی بر روی چاه‌های عمودی در دو منطقه از روسیه

عملیاتی ۱۵ تا ۳۰ کیلوهرتز و توان خروجی ۱۰ کیلووات متصل شده بود. تجهیزات درون چاهی که در شرایط دما و فشار بالا کار می‌کردند (با دمایی تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و حداکثر فشار ۸۷۰۲ psi)، یک سیستم تزریق مواد شیمیایی (برای عملیات سونوشیمیایی) و یک پروب جهت اندازه‌گیری ویژگی‌های درون چاهی از جمله فشار و جریان بود. این آزمایش میدانی

برای مقایسه بین دو روش تابش امواج فراصوت و سونوشیمیایی (ترکیب امواج فراصوت با تزریق مواد شیمیایی) طراحی شده بود. در فاصله سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳، بیش از ۱۰۰ عملیات مرتبط با امواج فراصوت و سونوشیمیایی انجام شد. (جدول ۳) میزان تولید نفت خام قبل و بعد از تحریک چاه توسط روش‌های سونوشیمیایی و تابش امواج فراصوت را نشان می‌دهد [۴۳].

جدول ۳: تأثیر تحریک چاه توسط روش‌های سونوشیمیایی و تابش امواج فراصوت بر تولید نفت خام

منطقه	روش تحریک چاه	زمان تابش امواج (دقیقه)	تولید نفت (تن بر روز)		
			۳ ماه بعد از تابش	بعد از تابش	قبل از تابش
سیبری غربی	سونوشیمی	۳۰	۸/۴	۹/۱	۳/۹۲
	امواج فراصوت	۶۰	۷/۷	۸/۳۲	۳/۹۲
منطقه سامارا	سونوشیمی	۴۰	۱۵/۸	۱۹/۸	۸/۴
	امواج فراصوت	۶۰	۱۱/۵	۱۸/۶	۸/۴

طبق نتایج، پس از استفاده از روش سونوشیمیایی، تولید نفت بهبود یافت و اثر آن برای مدت طولانی‌تری پایدار ماند. این بهبود می‌تواند ناشی از تأثیر هم‌افزایی امواج فراصوت و مواد شیمیایی تزریق شده باشد. تابش امواج فراصوت به تنهایی به‌طور متوسط تولید نفت را حدود ۲۰۰ درصد افزایش داد، اما ترکیب امواج فراصوت با تزریق مواد شیمیایی افزایش تولید بیشتری (تا ۰/۴ تن در روز) با نصف زمان تابش امواج فراهم کرد که نشان‌دهنده کارایی بالاتر این روش است. با این حال، وابستگی بازده عملیات به ویژگی‌های مخزن (مثل نفوذپذیری سنگ و خواص سیال) و نبود داده‌های بلندمدت، تعمیم این یافته‌ها را به سایر میدان‌های نفتی محدود می‌کند.

تحت تابش امواج فراصوت کاهش می‌یابد. این نتیجه به مکانیزم‌هایی مثل ارتعاش مکانیکی وابسته است. با این حال، کارایی این روش در مخازن عمیق یا با آسفالتین پیچیده‌تر هنوز به‌طور کامل بررسی نشده است. شباهتی بین اثرات زلزله و امواج فراصوت وجود دارد، زیرا هر دو ارتعاش مکانیکی ایجاد می‌کنند. اوتانی و همکاران در میدان نفتی ژاپن ارتباطی بین زلزله و کاهش مشکلات رسوب آسفالتین در میدان‌های نفتی پیشنهاد کردند. این میدان دچار رسوب شدید آسفالتین و کاهش فشار سیال تولیدی بود. پس از زلزله‌های با شدت بیش از ۳ ریشتر، تولید چاه‌ها افزایش یافت [۴۵]. این افزایش در تولید نفت خام به تحریک ارتعاشی ناشی از زلزله نسبت داده شد، اما نبود داده‌های کنترل‌شده، تحلیل دقیق این نتایج را دشوار می‌کند. این یافته‌ها کاربرد بالقوه امواج فراصوت برای رفع مشکلات آسفالتین را تقویت می‌کند. برای تأیید این مکانیسم، آزمایش‌های میدانی با امواج فراصوت در مناطق با رسوب شدید آسفالتین ضروری است.

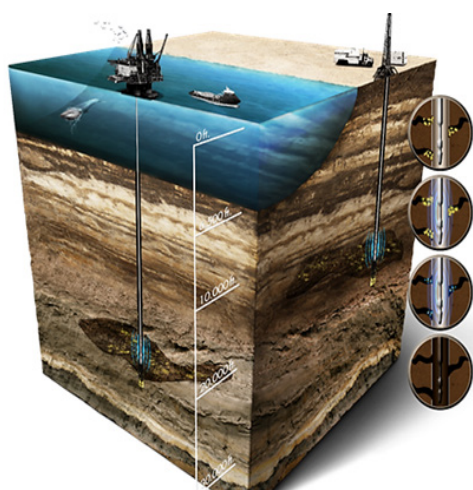
آبراموف و همکاران آزمایش‌های میدانی در میدان نفتی تاتارستان انجام دادند تا اثر امواج فراصوت بر گرانروی سیال در شرایط مخزنی بررسی شود. در همین راستا، تابش ۲۴ ساعته با مولد فراصوت سطحی (توان ۹ کیلووات، فرکانس ۱۹ کیلوهرتز) انجام شد. ابزار درون‌چاهی مقابل نواحی مشبک‌کاری شده قرار گرفت و به حسگر دما مجهز بود. نتایج نشان داد که دبی تولید نفت خام، ۰/۴ تن در روز افزایش یافت و گرانروی نفت خام پس از ۴ ساعت تابش از ۱۸۳ میلی‌پاسکال ثانیه به ۱۵۴ میلی‌پاسکال ثانیه کاهش یافت. این نتایج به شرایط مخزن (مثل تراوایی سنگ و دما) وابسته بود [۴۴].

آبراموف و همکاران استفاده از روش تابش امواج فراصوت را برای چاه‌های افقی با تولید آب شدید پیشنهاد کردند. این روش شامل شناسایی نواحی هدف با مطالعات ژئوفیزیکی، تحریک فراصوتی و تخلیه با پمپ جت بود. مدل‌سازی نشان داد که قرارگیری ابزار فراصوت نزدیک دیواره چاه، نفوذ امواج را افزایش می‌دهد. در آزمایش روی چاه افقی در سیبری

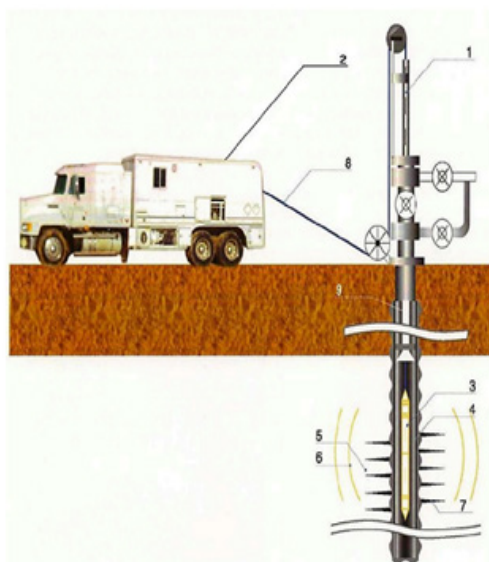
مطالعات میدانی نشان داده‌اند که رسوب آسفالتین،

1. Mangling tendency

برداشت نفت را نشان می‌دهد. در این سامانه، یک مولد امواج فراصوت در مقابل چاه مشبک کاری شده، نصب شده و برق را از طریق میله‌ای به انتهای چاه منتقل می‌کنند. این تابش امواج فراصوت منجر به تحریک مکانیکی سنگ مخزن، کاهش گرانیوی نفت خام، از بین بردن انسدادهای ناشی از رسوبات آلی و در نتیجه بهبود نفوذپذیری سنگ می‌شود. (شکل ۴)، شماتیکی از تجهیزات مورد استفاده در انگیزش چاه‌های نفت با استفاده از امواج فراصوت را نمایش می‌دهد.



شکل ۳: شماتیکی از به‌کارگیری فناوری امواج فراصوت درون چاهی برای بهبود برداشت نفت



شکل ۴: شماتیکی از تجهیزات مورد استفاده در انگیزش چاه‌های نفت با استفاده از امواج فراصوت

1. Lubricator; 2. Well logging truck hoist; 3. Downhole tool; 4. Casing; 5. Oil formation; 6. Zone of acoustic stimulation; 7. Perforated zone; 8. Cable and 9. Tubing

غربی، تولید آب تا حدود ۲۰ درصد کاهش یافت و همچنین، تولید نفت خام در نواحی با آب کم ۹۱ درصد افزایش یافت [۴۶]. با این حال، وابستگی نتایج به شکستگی‌های مخزن (ناهمگونی سنگ مخزن) و شرایط مخزن، نیاز به آزمایش‌های گسترده‌تر را نشان می‌دهد.

مولاکایف و همکاران، فناوری گرماصوتی (ترکیب امواج فراصوت، ایجاد حرارت و تزریق مواد شیمیایی) را در ۱۴ چاه میدان ساموتلورسک و ۳ چاه منطقه سامارا آزمایش کردند. استفاده از این روش، دبی تولید نفت خام در میدان ساموتلورسک را از ۳/۹۹ به ۷ تن در روز و در منطقه سامارا از ۱۰ به ۲۰ تن در روز افزایش داد [۴۷]. این نتایج به شرایط زمین‌شناسی منطقه وابسته بود و تعمیم آن‌ها نیازمند آزمایش در مخازن متنوع است. در مطالعه دیگری توسط مولاکایف و همکاران، فناوری فراصوت برای بهبود باز یافت نفت در سیبری غربی و سامارا آزمایش شدند. میانگین افزایش دبی تولید نفت خام در سامارا ۲/۱۰ تن در روز و در سیبری غربی ۴/۴ تن در روز بود. در سازند گرین ریور (یوتا)، استفاده از امواج فراصوت بر روی ۳ چاه، دبی تولید نفت خام را ۴/۴۵ تن در روز افزایش داد [۴۸]. نبود داده‌های بلندمدت و هزینه‌های عملیاتی بالا، از محدودیت‌های این روش مطرح شدند. همچنین تحریک فراصوتی را در ۲۷ چاه میدان ساموتلورسک آزمایش کردند. این فناوری دبی تولید نفت خام را به‌طور میانگین ۴/۴ تا ۲/۱۰ تن در روز افزایش داد و به دلیل کاهش رسوبات آلی در محیط متخلخل سنگ و بهبود تراوایی سنگ مخزن، مؤثر بود [۴۹]. در همین راستا، برای کاربردهای میدانی گسترده از این فناوری، آزمایش در مخازن عمیق یا کربناته ضروری است.

وانگ و همکاران توسعه فناوری امواج فراصوت برای بهبود باز یافت نفت در چین را بررسی کردند. این تحقیقات بر کاهش گرانیوی نفت خام، امولسیون‌زدایی، حذف آسیب‌های مکانیکی (انسداد یا تخریب سازند) و رفع رسوبات آلی در مقیاس حفرات سنگ متمرکز بود [۵۰]. مطالعات میدانی نشان دادند که این فناوری بازده تولید نفت خام را در برخی مخازن تا ۴۰ درصد افزایش داد، اما وابستگی نتایج به ویژگی‌های مخزن (مثل تراوایی سنگ و خواص سیالات مخزن) و نبود داده‌های میدانی گسترده، کاربرد آن را محدود می‌کند. برای پیشرفت این فناوری، توسعه تجهیزات بهینه و آزمایش در مخازن متنوع (مثل مخازن کربناته یا عمیق) و شناسایی شرایط بهینه انجام عملیات ضروری است. (شکل ۳)، شماتیکی از به‌کارگیری فناوری امواج فراصوت درون چاهی برای بهبود

مطالعات میدانی امواج فراصوت در بازه فرکانسی ۱۳ تا ۳۰ کیلوهرتز و توان ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ وات انجام شده‌اند. تنوع ویژگی‌های مخزن، مانند تراوایی و ناهمگنی سنگ مخزن، ایجاب می‌کند که فرکانس و توان بهینه برای هر مخزن به صورت جداگانه تعیین شود، اما این فرآیند به دلیل هزینه‌های بالا و پیچیدگی‌های آزمایشگاهی اغلب با چالش همراه است.

امواج فراصوت در برخی موارد تولید نفت را تا ۳۵ درصد افزایش داده و آب تولیدی را کاهش داده‌اند. با این حال، نفوذ این امواج به دلیل طول موج کوتاه (حداکثر ۰/۵ فوت) در مخازن عمیق یا با تراوایی کم، ناکافی است. علاوه بر این، نبود داده‌های بلندمدت درباره پایداری این بهبود در بازده تولید نفت خام، قابلیت اطمینان فناوری را در مقیاس صنعتی زیر سؤال می‌برد. برای مثال، در مخازن ناهمگن، امواج ممکن است تنها به نواحی نزدیک چاه اثر کنند و بخش‌های دورتر دست‌نخورده باقی بمانند.

روش سونوشیمی با بهبود نفوذ مواد شیمیایی به منافذ کوچک، کارایی تزریق شیمیایی را افزایش داده و مصرف مواد را کاهش داده است؛ اما هزینه‌های بالای تجهیزات و نبود آزمایش‌های میدانی در مخازن متنوع (مثل مخازن عمیق یا کربناته) مانع از کاربرد گسترده این روش شده است. همچنین، اثرات سونوشیمی در شرایط فشار و دمای بالا ممکن است با نتایج آزمایشگاهی متفاوت باشد که این شکاف تحقیقاتی هنوز بررسی نشده است.

برای غلبه بر این چالش‌ها، لازم است آزمایش‌های میدانی در شرایط واقعی مخزن، با تأکید بر نفوذ عمیق‌تر امواج، انجام شود. طراحی ابزارهای فراصوت با هزینه کمتر و کارایی بالاتر، همراه با مدل‌سازی عددی برای پیش‌بینی اثرات در مخازن ناهمگن، می‌تواند فناوری را کاربردی‌تر کند.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مطالعات آزمایشگاهی و میدانی پتانسیل بالای امواج فراصوت را برای بهبود بازیافت نفت نشان داده‌اند. در آزمایشگاه، فرکانس‌های ۲۰ تا ۱۲۵ کیلوهرتز و توان‌های ۴۰ تا ۴۰۰۰ وات، از طریق مکانیزم‌هایی مانند حفره‌زایی و کاهش گرانیوی نفت خام، نفوذ سیال در محیط‌های متخلخل را افزایش داده‌اند. در مطالعات میدانی با فرکانس ۱۳ تا ۳۰ کیلوهرتز و توان ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ وات، کارایی این فناوری در مخازن خاص تأیید شده و تولید نفت در برخی موارد تا

۳۵ درصد افزایش یافته و آب تولیدی کاهش یافته است. روش سونوشیمی نیز با بهبود نفوذ مواد شیمیایی به منافذ کم‌تراوا، اثربخشی تزریق شیمیایی را بهبود داده و مصرف مواد را کاهش داده است.

با این حال، محدودیت‌های کلیدی کاربرد این فناوری را در مقیاس صنعتی چالش‌برانگیز کرده است. نفوذ محدود امواج فراصوت (حداکثر ۰/۵ فوت) کارایی آن‌ها را در مخازن عمیق یا ناهمگن کاهش می‌دهد. در همین راستا، نبود داده‌های بلندمدت درباره پایداری نتایج، اطمینان به فناوری را کم می‌کند. هزینه‌های بالای تجهیزات، به‌ویژه در روش سونوشیمی و وابستگی نتایج به ویژگی‌های مخزن (مثل تراوایی سنگ مخزن و خواص سیالات مخزن) از موانع اصلی هستند. همچنین، کمبود آزمایش‌های میدانی در مخازن پیچیده (مثل کربناته یا عمیق) و ناشناخته بودن اثرات سونوشیمی در شرایط فشار و دمای بالا، شکاف‌های تحقیقاتی مهمی را نشان می‌دهد.

برای رفع محدودیت‌های امواج فراصوت و سونوشیمی، آزمایش‌های میدانی در شرایط واقعی مخزن، با تأکید بر نفوذ عمیق‌تر امواج و کاهش هزینه‌های عملیاتی، ضروری است. طراحی ابزارهای فراصوت کارآمدتر و ارزان‌تر، همراه با توسعه مدل‌های عددی پیشرفته برای پیش‌بینی رفتار امواج در مخازن ناهمگن، می‌تواند این فناوری را به مرحله عملیاتی نزدیک‌تر کند. امواج فراصوت و سونوشیمی به‌عنوان مکمل روش‌های موجود از دید برداشت نفت پتانسیل بالایی دارند، اما بدون این اقدامات، کاربرد صنعتی آن‌ها ممکن است پرهزینه و غیر بهینه باقی بماند.

مراجع:

- [1]. Hamidi, H., Rafati, R., Junin, R. B., & Manan, M. A. (2012). A role of ultrasonic frequency and power on oil mobilization in underground petroleum reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2, 29-36.
- [2]. Hays, J., Finkel, M. L., Depledge, M., Law, A., & Shonkoff, S. B. (2015). Considerations for the development of shale gas in the United Kingdom. *Science of The Total Environment*, 512, 36-42.



- chemical agent for enhanced oil recovery. *Ultrasonics Sonochemistry*, 42, 754-758.
- [11]. Wang, Z., Xu, Y., & Gu, Y. (2015). Lithium niobate ultrasonic transducer design for Enhanced Oil Recovery. *Ultrasonics Sonochemistry*, 27, 171-177.
- [12]. Mullakaev, M. S., Volkova, G. I., & Gradov, O. M. (2015). Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 49, 287-296.
- [13]. Rahimi, M. A., Ramazani SA, A., Alijani Alijanvand, H., Ghazanfari, M. H., & Ghanavati, M. (2017). Effect of ultrasonic irradiation treatment on rheological behaviour of extra heavy crude oil: A solution method for transportation improvement. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 95(1), 83-91.
- [14]. Aliev, F., Mukhamatdinov, I., & Kemalov, A. (2017). The influences of ultrasound waves on rheological and physico-chemical properties of extra heavy oil from Ashalcha field. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 941-948.
- [15]. Naderi, K., & Babadagli, T. (2011). Visual analysis of immiscible displacement processes in porous media under ultrasound effect. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 83(5), 056323.
- [16]. Naderi, K., & Babadagli, T. (2010). Influence of intensity and frequency of ultrasonic waves on capillary interaction and oil recovery from different rock types. *Ultrasonics sonochemistry*, 17(3), 500-508.
- [3]. Werner, A. K., Vink, S., Watt, K., & Jagals, P. (2015). Environmental health impacts of unconventional natural gas development: a review of the current strength of evidence. *Science of the Total Environment*, 505, 1127-1141.
- [4]. Mullakaev, M. S., Abramov, V. O., & Abramova, A. V. (2017). Ultrasonic automated oil well complex and technology for enhancing marginal well productivity and heavy oil recovery. *Journal of petroleum science and engineering*, 159, 1-7.
- [5]. Agi, A., Junin, R., Shirazi, R., Afeez, G., & Yekeen, N. (2019). Comparative study of ultrasound assisted water and surfactant flooding. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 31(3), 296-303.
- [6]. Agi, A., Junin, R., & Chong, A. S. (2018). Intermittent ultrasonic wave to improve oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 166, 577-591.
- [7]. Ghamartale, A., Escrochi, M., Riazi, M., & Faghieh, A. (2019). Experimental investigation of ultrasonic treatment effectiveness on pore structure. *Ultrasonics sonochemistry*, 51, 305-314.
- [8]. Dehshibi, R. R., Mohebbi, A., Riazi, M., & Danafar, F. (2019). Visualization study of the effects of oil type and model geometry on oil recovery under ultrasonic irradiation in a glass micro-model. *Fuel*, 239, 709-716.
- [9]. He, S., Tan, X., Hu, X., & Gao, Y. (2019). Effect of ultrasound on oil recovery from crude oil containing sludge. *Environmental Technology*, 40(11), 1401-1407.
- [10]. Wang, Z., & Huang, J. (2018). Research on removing reservoir core water sensitivity using the method of ultrasound-



- CO₂ flooding to improve oil recovery. *Ultrasonics sonochemistry*, 35, 243-250.
- [24]. Mohsin, M., & Meribout, M. (2015). An extended model for ultrasonic-based enhanced oil recovery with experimental validation. *Ultrasonics sonochemistry*, 23, 413-423.
- [25]. Pu, C., Shi, D., Zhao, S., Xu, H., & Shen, H. N. (2011). Technology of removing near wellbore inorganic scale damage by high power ultrasonic treatment. *Petroleum Exploration and Development*, 38(2), 243-248.
- [26]. Taheri-Shakib, J., Naderi, H., Salimidelshad, Y., Teymouri, A., & Shekarifard, A. (2018). Using ultrasonic as a new approach for elimination of inorganic scales (NaCl): an experimental study. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 8, 553-564.
- [27]. Taheri-Shakib, J., Naderi, H., Salimidelshad, Y., Kazemzadeh, E., & Shekarifard, A. (2018). Application of ultrasonic as a novel technology for removal of inorganic scales (KCl) in hydrocarbon reservoirs: An experimental approach. *Ultrasonics sonochemistry*, 40, 249-259.
- [28]. Kunanz, H., & Wölfel, S. (2014, May). Scale removal with ultrasonic waves. In *SPE International Oilfield Scale Conference and Exhibition* (p. D022S012R004). SPE.
- [29]. Wang, Z., Zeng, J., Song, H., & Li, F. (2017). Research on ultrasonic excitation for the removal of drilling fluid plug, paraffin deposition plug, polymer plug and inorganic scale plug for near-well ultrasonic processing technology. [17]. Mousavi, S. M., Ramazani, A., Najafi, I., & Davachi, S. M. (2012). Effect of ultrasonic irradiation on rheological properties of asphaltenic crude oils. *Petroleum science*, 9, 82-88.
- [18]. Mohammadian, E., Junin, R., Rahmani, O., & Idris, A. K. (2013). Effects of sonication radiation on oil recovery by ultrasonic waves stimulated water-flooding. *Ultrasonics*, 53(2), 607-614.
- [19]. Hamidi, H., Mohammadian, E., Junin, R., Rafati, R., Manan, M., Azdarpour, A., & Junid, M. (2014). A technique for evaluating the oil/heavy-oil viscosity changes under ultrasound in a simulated porous medium. *Ultrasonics*, 54(2), 655-662.
- [20]. Alhomadhi, E., Amro, M., & Almobarky, M. (2014). Experimental application of ultrasound waves to improved oil recovery during waterflooding. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 26(1), 103-110.
- [21]. Hamidi, H., Mohammadian, E., Asadullah, M., Azdarpour, A., & Rafati, R. (2015). Effect of ultrasound radiation duration on emulsification and demulsification of paraffin oil and surfactant solution/brine using Hele-shaw models. *Ultrasonics sonochemistry*, 26, 428-436.
- [22]. Hamidi, H., Mohammadian, E., Rafati, R., Azdarpour, A., & Ing, J. (2015). The effect of ultrasonic waves on the phase behavior of a surfactant-brine-oil system. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 482, 27-33.
- [23]. Hamidi, H., Haddad, A. S., Mohammadian, E., Rafati, R., Azdarpour, A., Ghahri, P., ... & Zink, A. (2017). Ultrasound-assisted

- Dmitriy Pashin. "Ultrasonic technology for enhanced oil recovery." Engineering 2014 (2014).
- [37]. Razavifar, M., Yunusov, T., Mukhametdinova, A., Bakulin, D., Qajar, J., Cheremisin, A., & Riazi, M. (2025). Improving oil recovery with ultrasound: mitigating asphaltene-induced formation damage. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 15(4), 78.
- [38]. Zhang, X., Zang, C., Ma, H., & Wang, Z. (2020). Study on removing calcium carbonate plug from near wellbore by high-power ultrasonic treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 62, 104515.
- [39]. Mo, L., Sun, W., Jiang, S., Zhao, X., Ma, H., Liu, B., & Feng, L. (2020). Removal of colloidal precipitation plugging with high-power ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 69, 105259.
- [40]. Khan, N., Pu, J., Pu, C., Li, X., Zhang, L., Gu, X., & Zheng, H. (2017). Comparison of acidizing and ultrasonic waves, and their synergetic effect for the mitigation of inorganic plugs. *Energy & Fuels*, 31(10), 11134-11145.
- [41]. Xu, H., & Pu, C. (2013). Removal of near-wellbore formation damage by ultrasonic stimulation. *Petroleum science and technology*, 31(6), 563-571.
- [42]. Wong, S. W., van der Bas, F., Zuiderwijk, P., Birchak, B., Han, W., Yoo, K., & van Batenburg, D. (2004). High-power/high-frequency acoustic stimulation: a novel and effective wellbore stimulation technology. *SPE Production & Facilities*, 19(04), 183-188.
- [43]. Abramov, V. O., Abramova, A. V., Bayazitov, V. M., Altunina, L. K., Gerasin, Ultrasonics sonochemistry, 36, 162-167.
- [30]. Xu, H., & Pu, C. (2013). Removal of near-wellbore formation damage by ultrasonic stimulation. *Petroleum science and technology*, 31(6), 563-571.
- [31]. Salehzadeh, M., Akherati, A., Ameli, F., & Dabir, B. (2016). Experimental study of ultrasonic radiation on growth kinetic of asphaltene aggregation and deposition. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 94(11), 2202-2209.
- [32]. Dehshibi, R. R., Mohebbi, A., Riazi, M., & Niakousari, M. (2018). Experimental investigation on the effect of ultrasonic waves on reducing asphaltene deposition and improving oil recovery under temperature control. *Ultrasonics Sonochemistry*, 45, 204-212.
- [33]. Khan, N., Pu, C., Li, X., He, Y., Zhang, L., & Jing, C. (2017). Permeability recovery of damaged water sensitive core using ultrasonic waves. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 381-389.
- [34]. Guo, X., Du, Z., & Li, Z. (2010, June). Computer modeling and simulation of high frequency vibration recovery enhancement technology in low-permeability reservoirs. In *SPE Trinidad and Tobago Section Energy Resources Conference* (pp. SPE-132866). SPE.
- [35]. Abramov, V. O., Mullakaev, M. S., Abramova, A. V., Esipov, I. B., & Mason, T. J. (2013). Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implementation. *Ultrasonics sonochemistry*, 20(5), 1289-1295.
- [36]. Abramova, Anna, Vladimir Abramov, Vadim Bayazitov, Artyom Gerasin, and



stimulating low-productivity wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 158, 529-534.

- [50]. Wang, Z., Xu, Y., & Suman, B. (2015). Research status and development trend of ultrasonic oil production technique in China. *Ultrasonics Sonochemistry*, 26, 1-8.
- A. S., Pashin, D. M., & Mason, T. J. (2015). Sonochemical approaches to enhanced oil recovery. *Ultrasonics sonochemistry*, 25, 76-81.
- [44]. Abramov, V. O., Abramova, A. V., Bayazitov, V. M., Mullakaev, M. S., Marnosov, A. V., & Ildiyakov, A. V. (2017). Acoustic and sonochemical methods for altering the viscosity of oil during recovery and pipeline transportation. *Ultrasonics sonochemistry*, 35, 389-396.
- [45]. Uetani, T., Matsuoka, T., & Honda, H. (2014, February). Removal of Plugged Asphaltene in a Reservoir by Earthquakes. In *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control* (p. D011S004R006). SPE.
- [46]. Abramov, V. O., Abramova, A. V., Bayazitov, V. M., Marnosov, A. V., Kuleshov, S. P., & Gerasin, A. S. (2016). Selective ultrasonic treatment of perforation zones in horizontal oil wells for water cut reduction. *Applied Acoustics*, 103, 214-220.
- [47]. Mullakaev, M. S., Abramov, V. O., & Prachkin, V. G. (2015). Development of a combined technology and ultrasonic scheme for stimulation of oil recovery. *Chemical and Petroleum Engineering*, 51, 237-242.
- [48]. Mullakaev, M. S., Abramov, V. O., & Abramova, A. V. (2015). Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery. *Journal of petroleum science and engineering*, 125, 201-208.
- [49]. Mullakaev, M. S., Abramov, V. O., & Abramova, A. V. (2017). Ultrasonic piezoceramic module and technology for



Ultrasonic Technology: A Novel Approach to Monitoring, Production and Optimization of Oil and Fields

Paniz Nakhaei¹, Mahdi Razavifar^{2*}

1. M.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: 19 April 2025

Revised: 21 May 2025

Accepted: 07 June 2025

Keywords:

Ultrasonic waves

Enhanced oil recovery

Formation damage

Viscosity reduction Asphaltene deposition

ABSTRACT

Ultrasound-based technologies, as cost-effective and environmentally friendly methods, play a significant role in enhancing oil recovery from hydrocarbon reservoirs. By utilizing high-power ultrasonic waves, this technology reduces formation damage near the wellbore and removes obstacles to oil flow toward production wells. In this context, according to existing field reports, the application of ultrasound as a well stimulation method in Russian and American oil wells has led to a 30% improvement in oil production efficiency. This paper provides a comprehensive review of laboratory studies, field applications, and modeling related to the use of ultrasonic waves in oil recovery enhancement. Furthermore, by analyzing existing research, it identifies critical research gaps and proposes optimizing operational parameters (such as frequency and power) and developing accurate predictive models as key factors for improving productivity. This study emphasizes the necessity of adopting ultrasonic technology in oil wells to boost recovery rates and highlights its environmental and economic benefits. The findings presented in this research will have practical applications in reservoir management and production optimization in oil fields.

DOR: [20.1001.1.2504.1094.1404.01.30](https://doi.org/10.1001.1.2504.1094.1404.01.30)

How to cite this article

P. Nakhaei, M.razavifar, Ultrasonic Technology: A Novel Approach to Monitoring, Production and Optimization of Oil and Fields. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025; 12(3): 10-24. (https://ijge.irangi.org/article_735121.html)

* Corresponding Author.

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

Available online 21 December 2025

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

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



بهینه‌سازی ارزیابی پتروفیزیکی با بهره‌گیری از ضریب سیمان‌شدگی متغیر جهت شناسایی زون‌های مخزنی در یکی از میادین حوضه زاگرس

کوروش کرامتی^۱، احمدرضا ربانی^۲، خالد معروفی^۳، علی کدخدائی^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت و زمین انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲. استاد، گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت و زمین انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۳. استادیار، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی تبریز، تبریز، ایران

۴. استاد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: maroufi@sut.ac.ir

مقاله علمی- پژوهشی

صفحه ۲۵ - ۳۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷

چکیده

شناسایی زون‌های تولیدی هیدروکربنی به‌عنوان هدف اصلی پروژه‌های اکتشافی و تولیدی، نیازمند تحلیل دقیق داده‌های پتروفیزیکی است. یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی پتروفیزیکی، ضریب سیمان‌شدگی است که از آن جهت محاسبه اشباع آب (مانند معادلات آرچی و اندونزی) استفاده می‌شود. این ضریب، اثر سیمان‌شدگی و فشردگی را بر تخلخل مشخص کرده و در سنگ‌های کربناته وابسته به نوع حفرات است. تغییرات جزئی این پارامتر می‌تواند برآوردهای اشباع سیال را تحت تأثیر قرار داده و شناسایی دقیق زون‌های تولیدی را با چالش روبرو سازد. هدف این مطالعه، بررسی اثر استفاده از مقادیر متغیر ضریب سیمان‌شدگی بجای مقادیر ثابت بر نتایج تحلیل پتروفیزیکی از طریق نرم‌افزار ژئولاگ (مدل‌سازی مولتی‌مین) است. برای انجام این مهم، مقادیر نگاره تخلخل مؤثر خروجی نرم‌افزار در رابطه بورای (۱۹۸۷) اعمال و مقادیر ضریب سیمان‌شدگی به‌صورت متغیر و عمقی محاسبه و با مقادیر ثابت متداول مقایسه شد. نتایج نشان داد که مقادیر اشباع آب حاصل از دو روش متفاوت بوده (اختلاف ۱ تا ۹ درصد) و بر همین اساس، ضخامت زون‌های تولیدی و موقعیت مرز آب - نفت، تغییر می‌یابد. ضمناً، مقایسه زون‌های مخزنی شناسایی شده، دقت بالاتر مدل مبتنی بر ضریب سیمان‌شدگی متغیر را آشکار نمود. زون اصلی مخزنی در چاه مورد مطالعه در بخش‌های ۳ و ۴ سازند سروک واقع شده است و از تخلخل و اشباع هیدروکربن مناسبی برخوردار است. درنهایت، نتایج این مطالعه مشخص نمود که سنجش دقیق مقادیر اشباع سیالات براساس ضریب سیمان‌شدگی متغیر منجر به شناسایی دقیق‌تر زون‌های مخزنی و موقعیت سطوح سیالات شده و در نتیجه، خطای تخمین‌های حجمی را کاهش می‌دهد.

کلید واژه‌ها: زون تولیدی، چاه‌نگاری، اشباع سیالات، نرم‌افزار ژئولاگ، سازند سروک





۱. مقدمه

هدف اصلی یک برنامه اکتشافی و تولیدی موفق، شناسایی توالی‌های واجد ذخایر هیدروکربن اقتصادی است. زمانی که در مورد بخش‌های واجد ذخایر هیدروکربن اقتصادی صحبت می‌شود، مفهوم زون مخزنی^۱ یا زون بهره‌ده مطرح می‌شود که به بازه‌ای از سازند مخزنی گفته می‌شود که حاوی نفت و گاز در مقادیر قابل استحصال^۲ و اقتصادی است. برای شناسایی این زون‌ها از روش‌هایی نظیر تجزیه و تحلیل داده‌های چاه‌نگاری، لرزه‌ای و تست‌های مخزنی استفاده می‌شود [۱].

در ارزیابی پتروفیزیکی با استفاده از داده‌های چاه‌نگاری، با اندازه‌گیری خواص فیزیکی سنگ و سیال، امکان شناسایی و مطالعه مخازن هیدروکربنی میسر می‌شود. این روش به‌ویژه در شناسایی زون‌های تولیدی در مخازن کاربرد فراوانی دارد. ویژگی‌هایی نظیر تخلخل، حجم شیل، اشباع آب و هیدروکربن، سنگ‌شناسی، سطوح تماس سیالات و درنهایت، زون‌های تولیدی، از طریق تحلیل و تفسیر داده‌های چاه‌نگاری استخراج می‌شوند [۲]. کاربرد گسترده نگاره‌های چاه و امکان تلفیق آن‌ها باعث تبدیل آن‌ها به معمول‌ترین ابزار برای شناسایی و ارزیابی زون‌های مخزنی شده است.

آرچی در سال ۱۹۴۲ با بیان مزایای نگاره مقاومت الکتریکی، ضمن اشاره به توانایی این نگاره در شناسایی سیالات، از ظرفیت این نگاره جهت تعیین پارامترهای مخزنی نیز صحبت کرد [۳]. همچنین متخصصان دیگر با بهره‌گیری از تحقیقات آرچی امکان بررسی کیفی میزان اشباع‌شدگی سیالات مخزنی را به کمک روش چاه‌نگاری بررسی کردند [۴]. فونس در سال ۱۹۶۹ کاربردهای نگاره‌های چاه را برای ارزیابی ذخایر نفتی بررسی کرده و رویکردی کلی برای برقراری ارتباط مابین داده‌های نگاره و ویژگی‌های زمین‌شناسی مخازن نفتی و ذخایر معدنی ارائه داد [۵]. برخی محققان نیز با بهره‌گیری از داده‌های متنوع و تلفیق آن با نگاره‌های چاه و استفاده از روش‌های یادگیری ماشین (نظیر روش‌های طبقه‌بندی) اقدام به افزایش سرعت و دقت

شناسایی زون‌های مخزنی کرده‌اند [۶، ۷].

یکی از پارامترهای موردنیاز برای محاسبات اشباع سیالات مخزنی در نرم‌افزار ژئولاگ، ضریب سیمان‌شدگی است. ضریب سیمان‌شدگی پارامتری کلیدی در معادلات محاسبه اشباع آب (مانند معادلات آرچی و اندونزی) است. این ضریب، اثر سیمان‌شدگی و فشردگی را بر تخلخل مشخص کرده و بیانگر میزان پیچیدگی مسیرهای جریان در محیط متخلخل سنگ است. با توجه به وابستگی آن به نوع حفرت، تعیین مقدار ضریب سیمان‌شدگی در سنگ‌های کربناته چالش‌برانگیز می‌باشد. تغییرات این ضریب می‌تواند برآوردهای اشباع سیال را تحت تأثیر قرار دهد، لذا شناخت دقیق‌تر رفتار این پارامتر برای ارزیابی ذخایر هیدروکربنی ضروری است. مقدار ضریب سیمان‌شدگی برابر با ۲ تنها در شرایط ایده‌آل محقق می‌شود. شرایط ایده‌آل به حالتی گفته می‌شود که منافذ سنگ به مانند لوله‌های استوانه‌ای موازی و مستقیم در امتداد جریان قرار گیرند؛ اما در سنگ‌های واقعی، وجود دانه‌های با اشکال نامنظم موجب کاهش سطح مقطع مؤثر هادی (فضای تخلخل اشباع‌شده) می‌گردد. این پدیده افزایش مقاومت الکتریکی سنگ و در نتیجه مقادیر ضریب سیمان‌شدگی متغیر را به دنبال دارد [۸].

روش‌های متداول محاسبه پارامتر سیمان‌شدگی برای ارزیابی‌های پتروفیزیکی شامل اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، تخمین بر اساس دیگر پارامترها و همچنین با استفاده از مقدار مقاومت ویژه در نواحی و زون‌های ۱۰۰ درصد آبدار می‌باشد [۹]. بسته به انواع لیتولوژی، معادلات مختلفی جهت تعیین مقدار این ضریب معرفی شده است [۱۰، ۱۱]. یکی از معادلات مهم که برای سنجش ضریب سیمان‌شدگی در سازندهای کربناته معرفی شده است، معادله بورای است که در سال ۱۹۷۸ ارائه شد [۱۲]. معادله بورای (۱۹۷۸) معادله‌ای تجربی است که در آن از میزان تخلخل مؤثر جهت سنجش ضریب سیمان‌شدگی استفاده می‌شود. توضیحات بیشتر در مورد این معادله در بخش ۳-۳ ارائه شده است.

هدف از این پژوهش، شناسایی دقیق‌تر زون‌های مخزنی با بهره‌گیری از ضریب سیمان‌شدگی متغیر می‌باشد. برای انجام این مهم، اثرات اعمال مقادیر

1. Reservoir pay zone

2. Exploitable

ثابت و متغیر ضریب سیمان‌شدگی بر خروجی ارزیابی پتروفیزیکی به کمک داده‌های چاه‌نگاری در یکی از چاه‌های واقع در حوضه زاگرس مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. زمین‌شناسی منطقه

حوضه زاگرس که بخش اعظم آن در جنوب غرب ایران واقع شده است، بخشی فعال از کمربند کوه‌زایی آلپ-همالیا به شمار می‌آید. این حوضه از رسوبات بسیار ضخیم دوره‌های پالئوزوئیک تا سنوزوئیک تشکیل شده است که ضخامت آن‌ها در برخی مناطق به بیش از ۱۰ کیلومتر می‌رسد. ترکیب این رسوبات عمدتاً شامل توالی‌هایی از سنگ‌های کربناته (مانند سازندهای آسماری، ایلام، سروک، داریان و فهلیان)، تبخیری (به‌ویژه سازند گچساران که به‌عنوان پوش سنگ اصلی منطقه ایفای نقش می‌کند) و آواری (نظیر سازندهای بختیاری، میشان و آجاجاری) است. ساختار تکتونیکی این منطقه تحت تأثیر فرورانش صفحه عربی به زیر صفحه ایران مرکزی شکل گرفته است و منجر به ایجاد مجموعه‌ای از طاق‌دیس‌های کشیده با روند شمال غربی- جنوب شرقی همراه با سامانه‌های گسلی رانده شده است. این ساختارهای چین‌خورده، محل اصلی انباشت مخازن هیدروکربنی در کشور به شمار می‌روند [۱۳، ۱۴].

مخازن هیدروکربنی حوضه زاگرس عمدتاً در درون سازندهای کربناته شکسته و دولومیتی‌شده متعلق به دوران‌های مزوزوئیک و سنوزوئیک گسترش یافته‌اند که کیفیت مخزنی آن‌ها عمدتاً توسط تخلخل ثانویه (شکستگی‌ها و کارست) کنترل می‌شود [۱۵، ۱۶]. (شکل ۱) موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را به تصویر کشیده است.

توالی سازندهای مورد مطالعه (از قدیم به جدید) به شرح زیر است:

- سازند سروک (سنومانین^۱ - تورونین^۲): ضخیم‌ترین واحد کرتاسه در منطقه را تشکیل می‌دهد و عمدتاً از سنگ آهک‌ها و دولومیت‌های ستبرلایه تا توده‌ای

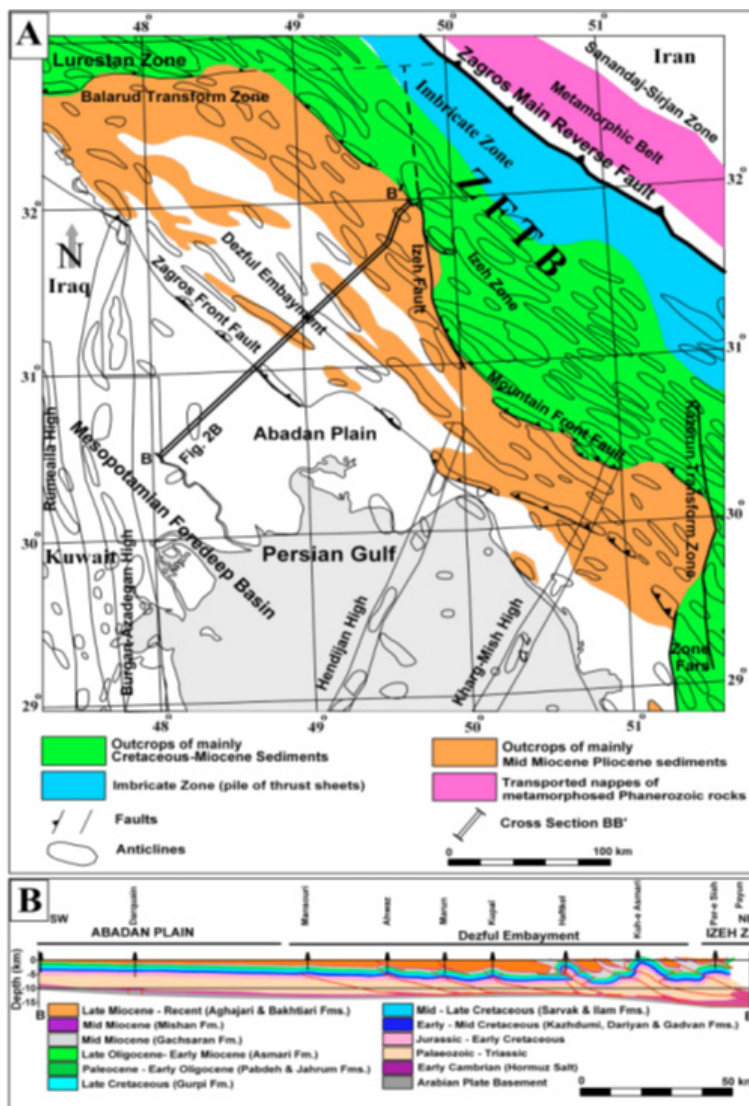
با ویژگی‌های ریفی و پلاتفرمی تشکیل شده است. تخلخل بالا و گسترش رخساره‌های کربناتی، این سازند را به یکی از مهم‌ترین مخازن هیدروکربوری ایران و جهان تبدیل کرده است [۱۷]. در این مطالعه با توجه به تقسیم‌بندی مخزنی، سازند سروک به چهار بخش تقسیم و مطالعه شده است.

- سازند ایلام (سانتونین^۳ - کامپانین^۴): شامل سنگ‌آهک‌های نازک تا متوسط لایه با میان‌لایه‌های شیل است که نشان‌دهنده محیط رسوبی عمیق‌تر نسبت به سازند سروک است. ضخامت این سازند به‌طور معمول کمتر از چند صد متر است و در برخی از میداین مخازن مهمی را شکل داده است [۱۷].

- سازند گورپی (کامپانین - ماستریشتین^۵): شامل شیل‌ها و مارن‌های تیره‌رنگ با میان‌لایه‌های نازک آهکی است که در محیط‌های عمیق دریایی نهشته شده‌اند. این سازند علاوه بر عملکرد به‌عنوان سنگ منشأ ثانویه، سنگ پوش مخازن سروک و ایلام محسوب می‌شود و از ضخامت قابل توجهی برخوردار است [۱۷، ۱۸]. لیتولوژی عمدتاً آهکی سازند گورپی در میدان مورد مطالعه موجب شد تا سازند مذکور نیز تحت ارزیابی پتروفیزیکی قرار گیرد.

- سازند پابده (پالئوسن - ائوسن میانی): متشکل از تناوب شیل‌ها و مارن‌های تیره‌رنگ با میان‌لایه‌های آهکی بوده و تداوم محیط‌های رسوبی نسبتاً عمیق را نشان می‌دهد. این سازند به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین سنگ‌های منشأ هیدروکربنی در حوضه زاگرس شناخته می‌شود و همراه با سازند گورپی، به‌عنوان پوش سنگ مخازن گروه بنگستان (سروک و ایلام) ایفای نقش کرده است [۱۷، ۱۸]. لیتولوژی آهکی بخش‌های میانی و زیرین سازند پابده در میدان مورد مطالعه موجب شد تا سازند مذکور نیز تحت ارزیابی پتروفیزیکی قرار گیرد.

1. Cenomanian
2. Turonian
3. Santonian
4. Campanian
5. Maastrichtian



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه: نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده غرب منطقه زاگرس بر اساس نقشه زمین‌شناسی جنوب غربی ایران در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ (A) و مقطع عرضی فرافتادگی دزفول (B) [۱۹]

۳. داده‌ها و روش‌ها

تجمیع مدل‌های مربوط به هر سازند، آنالیز مولتی‌مین و آنالیز زون‌های مخزنی^۵ بر روی کل چاه انجام و زون‌بندی مخزنی مشخص شد. روندنا (نمودار جریان) مطالعه در قالب (شکل ۲) ارائه شده است.

در این مطالعه، ابتدا داده‌های چاه‌نگاری جمع‌آوری شده و پس از پیش‌پردازش اولیه، به نرم‌افزار ژئولاگ وارد شدند. سپس یک طرح^۱ در نرم‌افزار از تمام نمودارها به همراه سرسازندهای زمین‌شناسی^۲ تهیه و کنترل شد. پس از آن دما و فشار سازندی برای هر عمق از طریق پیش‌محاسبات^۳، به دست آمد و پس از آن برای هر سازند مطابق با خصوصیات و ویژگی‌های آن یک مدل مولتی‌مین^۴ تهیه و در نهایت با

۳-۱. تأیید کیفیت و کالیبراسیون داده‌ها

داده‌های نمودارگیری مورداستفاده در این مطالعه شامل نگاره‌های صوتی، مقاومت، چگالی، فوتوالکتریک، گاما (به‌صورت ساده و طیفی)، نوترون و قطرسنجی می‌باشند.

1. Layout
2. Geological tops
3. Pre-calculation
4. Multimin
5. Pay summary analysis

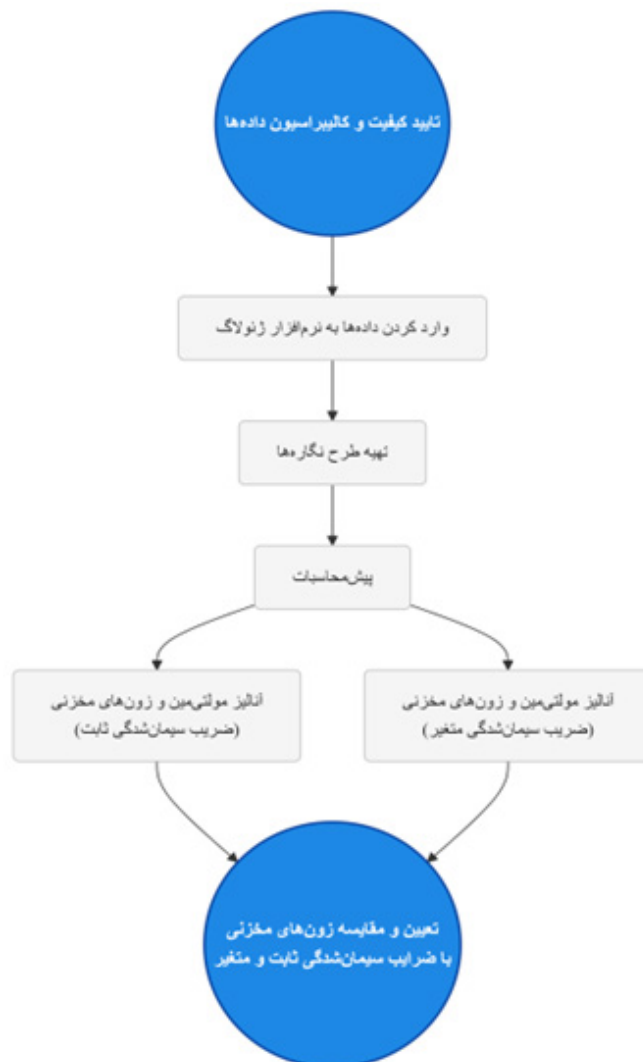
نگاره‌های اخذشده در برداشت‌های مختلف بر اساس نگاره گاما (به‌عنوان نگاره مرجع) هم‌عمق‌سازی گردید و از نتایج حاصل از نگاره قطرسنج به‌منظور اطمینان از صحت دیگر نگاره‌ها استفاده شد، زیرا ریزش دیواره چاه می‌تواند بر کیفیت نگاره‌ها اثرگذار باشد. همچنین نگاره‌های خام با اتکا به نقاط کنترل عمقی^۱ موجود در نگاره مرجع، کالیبره شدند. این فرایند با تطبیق عمودی^۲ بر مبنای سازندهای شاخص (سرسازندهای مشخص در گزارش زمین‌شناسی) انجام گرفت.

۲-۳. تهیه طرح اولیه

پردازش داده‌های چاه‌پیمایی در این پژوهش با به‌کارگیری

نرم‌افزارهای پارادایم^۳ انجام شد. پس از ایجاد پروژه و وارد کردن داده‌ها، پیکربندی و تنظیم پارامترهای پایه شامل نرم‌افزار تخصصی ژئولاگ ۲۰۲۲^۳ (وابسته به مجموعه تنظیم واحدهای اندازه‌گیری (عمق برحسب متر، مقاومت الکتریکی برحسب اهم‌متر) و تنظیم مشخصات نمودارها (همچون شناسایی نگاره‌ها) انجام شد.

سپس مرزهای چین‌شناختی (سرسازندها) بر پایه بررسی‌های زمین‌شناسی پیشین تعیین گردید. آنگاه با بهره‌گیری از بخش نمایش نمودارها، تغییرات عمقی نمودارها همراه با محدوده‌های سازندی در قالب یک طرح بر مبنای عمق ترسیم شد.



شکل ۲: نمودار جریان مطالعه

1. Depth Control Points - DCPs
2. Vertical shifting
3. Geolog software 2022



۳-۳. انجام پیش محاسبات و ساخت مدل‌های

مولتی‌مین

جهت تعیین فشار مخزن، دمای مخزن، مقاومت‌های گل^۱، فیلتره گل^۲ و کیک گل^۳ و غیره در راستای عمقی، در بخش پیش محاسبات داده‌های مدنظر طبق گزارش نمودارگیری وارد و نتایج به صورت یک سری جدید دریافت شد. برای هر سازند، بر اساس مشخصات کلی، لیتولوژی، دقت نگاره‌ها و غیره، مدلی در بخش مدل‌سازی مولتی‌مین نرم‌افزار ایجاد شد. به عنوان مثال، در سازند پابده مقدار عدم قطعیت تخصیص‌یافته به نمودار چگالی به دلیل کیفیت پایین این نگاره، به طور محسوسی افزایش داده شد تا اثرات خطاهای احتمالی در آن کاهش یابد. در مقابل، باتوجه به کیفیت بالای داده‌های نمودار صوتی در همان سازند، مقدار عدم قطعیت مربوط به این نمودار کاهش یافت. این تنظیمات منجر به بهبود چشمگیر تطابق مدل با واقعیت زمین‌شناسی و در نهایت، حصول نتایج مطلوب‌تر و قابل‌اطمینان‌تر در تخمین پارامترهای پتروفیزیکی شد.

آنالیز مولتی‌مین در دو حالت استفاده از ضریب سیمان‌شدگی ثابت و متغیر انجام گرفت. برای حالت دوم، پس از محاسبه تخلخل مفید می‌توان با اعمال روابطی، ضریب سیمان‌شدگی را به صورت متغیر و تابعی از تخلخل به دست آورد. بسیاری از پتروفیزیست‌ها این روش را به‌ویژه در مخازن کربناته ناهمگون ترجیح می‌دهند، زیرا اشباع‌شدگی آب حاصل از این روش از اطمینان بیشتری برخوردار است [۲].

در این مطالعه، با استفاده از نگاره تخلخل مؤثر تعیین‌شده توسط نرم‌افزار در مرحله پیش محاسبات و اعمال آن در رابطه (۱) (معادله بورای ۱۹۷۸)، مقادیر ضریب سیمان‌شدگی به صورت متغیر و عمقی برای افزایش دقت محاسبات اشباع سیالات به دست آمد.

$$m = 2.2 - \frac{0.035}{\phi + 0.042} \quad (1)$$

که در آن m ضریب سیمان‌شدگی و ϕ تخلخل مؤثر

می‌باشند [۱۲].

۳-۴. اعمال حدود برش جهت تعیین زون‌های مخزنی

برای جداسازی زون‌های مخزنی از غیرمخزنی، ۳ حد برش یا آستانه شامل تخلخل مؤثر حداقل ۳ درصد، اشباع آب حداکثر ۵۰ درصد و حجم شیل حداکثر ۴۰ درصد در نظر گرفته شد. این اعداد بر پایه مطالعات پیشین مربوط به مخازن کربناته و تجربه‌های میدانی انتخاب شده‌اند. در واقع، بخش‌های واجد تخلخل کمتر از ۳ درصد توانایی ذخیره‌سازی اقتصادی هیدروکربن را ندارند [۲۰] و حجم شیل بالاتر از ۴۰ درصد، کاهش قابل‌ملاحظه نفوذپذیری مخزن را در پی خواهد داشت و بر همین اساس، کارایی تولید به شدت افت خواهد کرد [۲۱].

۴. بحث و بررسی

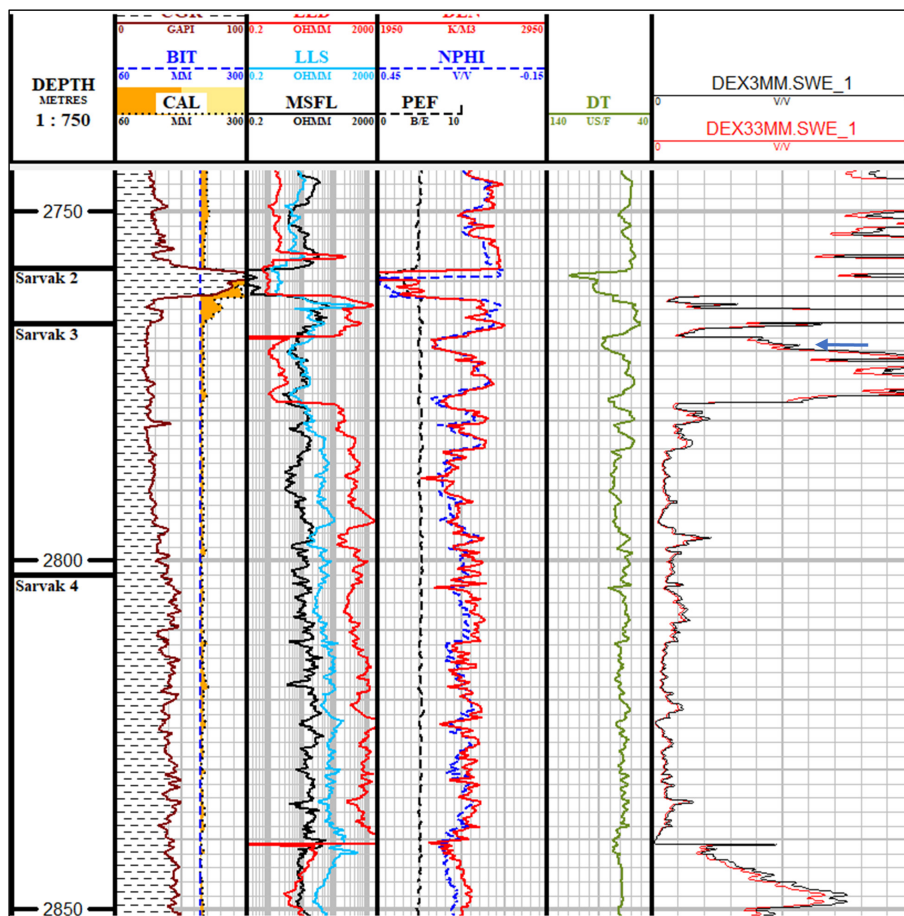
بخشی از نتایج حاصل از محاسبه اشباع‌شدگی با اعمال ضریب سیمان‌شدگی ثابت (به مقدار ۲) و متغیر در (جدول ۱) و (شکل ۳) ارائه شده است. در برخی نواحی در صورت اعمال ضریب سیمان‌شدگی ثابت، تفکیک زون مخزنی از غیرمخزنی باتوجه به حدود برش مخزنی چالش‌برانگیز خواهد بود که مؤید اهمیت استفاده از ضریب متغیر می‌باشد. از سوی دیگر، اختلاف خروجی دو روش برای بخش‌های واجد اشباع آب بالا نسبت به بخش‌های دارای اشباع آب پایین، بیشتر است. در واقع، میزان اشباع آب محاسبه‌شده از طریق دو روش، تفاوت معناداری (عمدتاً بیشتر از ۵ درصد) در بخش‌های واجد آب بیشتر از ۴۰ درصد نشان می‌دهد و با افزایش میزان اشباع آب تفاوت مذکور به حدود ۱۰ درصد نیز می‌رسد. با توجه به فرض حد برش ۵۰ درصدی برای اشباع آب، قاعدتاً مرز سطوح سیالات مشخص شده بر اساس نتایج دو روش تا حدودی متفاوت خواهد بود که در ادامه به این مهم پرداخته می‌شود.

1. Resistivity of mud sample, RMS
2. Resistivity of filtrate sample, RMFS
3. Resistivity of mudcake sample, RMCS

جدول ۱: بخشی از مقادیر اشباع آب محاسبه شده در سازند سروک با استفاده از ضریب سیمان شدگی ثابت و متغیر

عمق	مقادیر اشباع آب محاسبه شده با ضریب سیمان شدگی برابر با ۲	مقادیر اشباع آب محاسبه شده با ضریب سیمان شدگی متغیر	تفاوت دو حالت
۲۸۴۵/۰۰	۰/۴۲	۰/۴۷	۰/۰۵
۲۸۴۵/۱۶	۰/۴	۰/۴۵	۰/۰۵
۲۸۴۵/۳۱	۰/۳۸	۰/۴۳	۰/۰۵
۲۸۴۵/۴۶	۰/۳۷	۰/۴۱	۰/۰۵
۲۸۴۵/۶۱	۰/۳۷	۰/۴۲	۰/۰۵
۲۸۴۵/۷۷	۰/۳۹	۰/۴۴	۰/۰۵
۲۸۴۵/۹۲	۰/۴۱	۰/۴۶	۰/۰۵
۲۸۴۶/۰۷	۰/۴۲	۰/۴۸	۰/۰۵
۲۴۴۶/۲۲	۰/۴۹	۰/۵۵	۰/۰۶
۲۴۴۶/۳۷	۰/۴۸	۰/۵۴	۰/۰۶
۲۴۴۶/۵۳	۰/۴۷	۰/۵۳	۰/۰۶
۲۴۴۶/۶۸	۰/۴۸	۰/۵۴	۰/۰۷
۲۴۴۶/۸۳	۰/۵۱	۰/۵۸	۰/۰۷
۲۴۴۶/۹۸	۰/۵۲	۰/۵۹	۰/۰۷
۲۸۴۷/۱۴	۰/۵۴	۰/۶۰	۰/۰۷
۲۸۴۷/۲۹	۰/۵۶	۰/۶۴	۰/۰۸
۲۸۴۷/۴۴	۰/۶	۰/۶۹	۰/۰۹
۲۸۴۷/۵۹	۰/۶۱	۰/۶۹	۰/۰۸
۲۸۴۷/۷۵	۰/۶۵	۰/۷۴	۰/۰۹
۲۸۴۷/۹۰	۰/۶۶	۰/۷۵	۰/۰۹
۲۸۴۸/۰۵	۰/۶۵	۰/۷۳	۰/۰۹
۲۸۴۸/۲۰	۰/۶۱	۰/۶۹	۰/۰۸
۲۸۴۸/۳۶	۰/۶	۰/۶۸	۰/۰۸
۲۸۴۸/۵۱	۰/۶۲	۰/۷۱	۰/۰۹
۲۸۴۸/۶۶	۰/۶۳	۰/۷۱	۰/۰۹
۲۸۴۸/۸۱	۰/۶۶	۰/۷۵	۰/۰۹
۲۸۴۸/۹۷	۰/۶۵	۰/۷۴	۰/۰۹





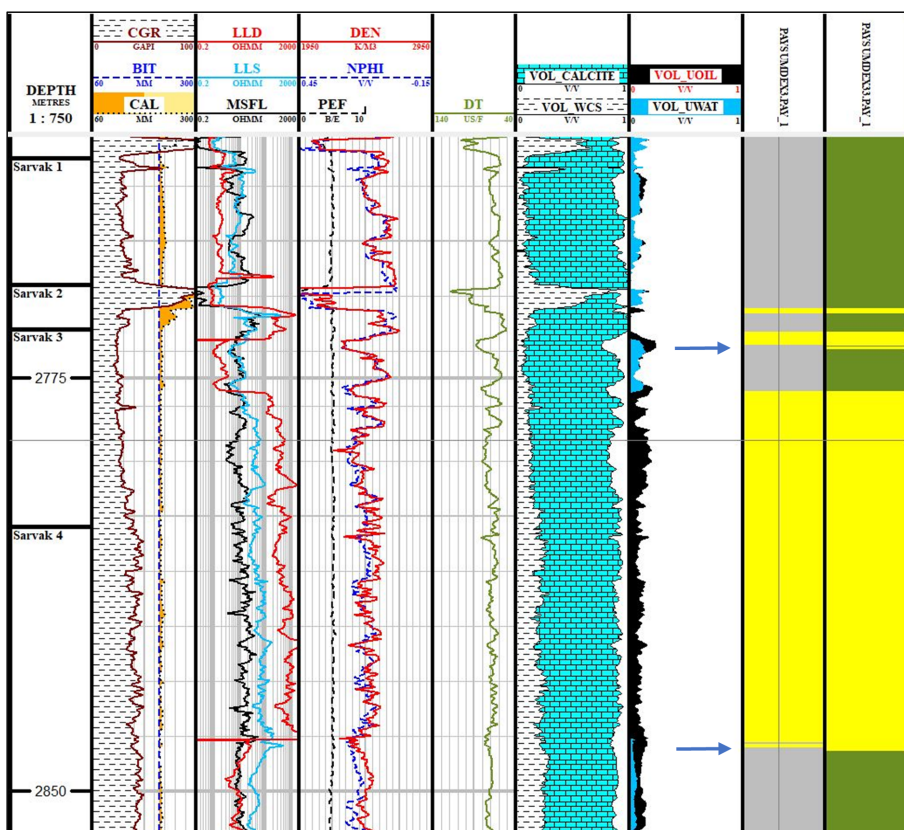
شکل ۳: طرح نگاره‌های اشباع آب حاصل از اعمال ضریب سیمان‌شدگی ثابت (نمودار قرمز رنگ در ستون اول از سمت راست) و متغیر (نمودار مشکی رنگ در ستون اول از سمت راست)

بیشتری برخوردار خواهد بود زیرا بر برنامه‌های تولیدی نظیر عملیات سوراخ‌کاری تأثیرگذار خواهد بود.

زون‌های مخزنی شناسایی شده 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 (مشخص شده 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

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 سازندهای کربناته با توجه به دقت بالاتر آن، ضرورت دارد. به‌عنوان مثال، عمق ۲۷۷۹ متر مشخص شده 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

صادق می‌باشد. در این موقعیت‌ها، با توجه به کاهش نگراره مقاومت الکتریکی عمیق، وجود ذخایر هیدروکربنی اقتصادی سیمان‌شدگی متغیر می‌باشد.



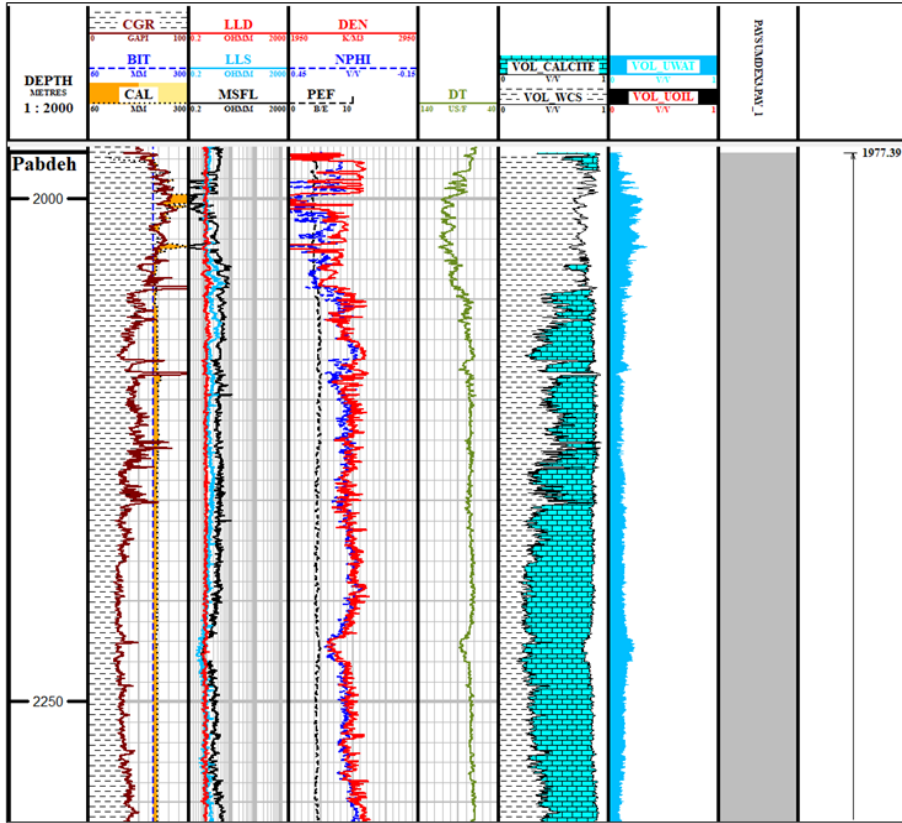
شکل ۴: نتایج آنالیز زون‌های مخزنی برای هر دو حالت ضریب سیمان‌شدگی متغیر و ثابت

سروک ۳ و نیمه بالایی سروک ۴ متمرکز باشد. مشخصات پتروفیزیکی زون‌های مخزنی موجود در سازندهای ایلام و سروک در قالب (جدول ۲) ارائه شده است. با اعمال حدود برش شامل تخلخل مؤثر، اشباع آب و حجم شیل، در مجموع ۴ زون مخزنی با ضخامت کل ۷۱/۷۸ متر شناسایی شد. زون اول با ضخامت ۴/۴۲ متر در سازند ایلام واقع شده است. این زون از میزان تخلخل مناسبی برخوردار بوده لیکن اشباع آب بالایی نشان می‌دهد. زون‌های دوم و سوم به ترتیب در سروک ۲ و بخش بالایی سروک ۳ واقع شده‌اند و ضخامت اندکی دارند. تخلخل این بخش‌ها مناسب بوده و اشباع آب پایینی دارند. زون مخزنی اصلی در بخش‌های سروک ۳ و ۴ واقع شده است و با ضخامت بالا (حدود ۶۴ متر) از تخلخل و اشباع هیدروکربن بالایی برخوردار می‌باشد. ضمناً نسبت زون مخزنی به کل سازند برای سازند ایلام حدود ۴ درصد و برای سازند سروک حدود ۳۰ درصد است. شایان ذکر است، ضخامت زون‌های اول تا سوم در حدی نیست تا به‌عنوان زون‌های بهره‌ده معرفی شوند.

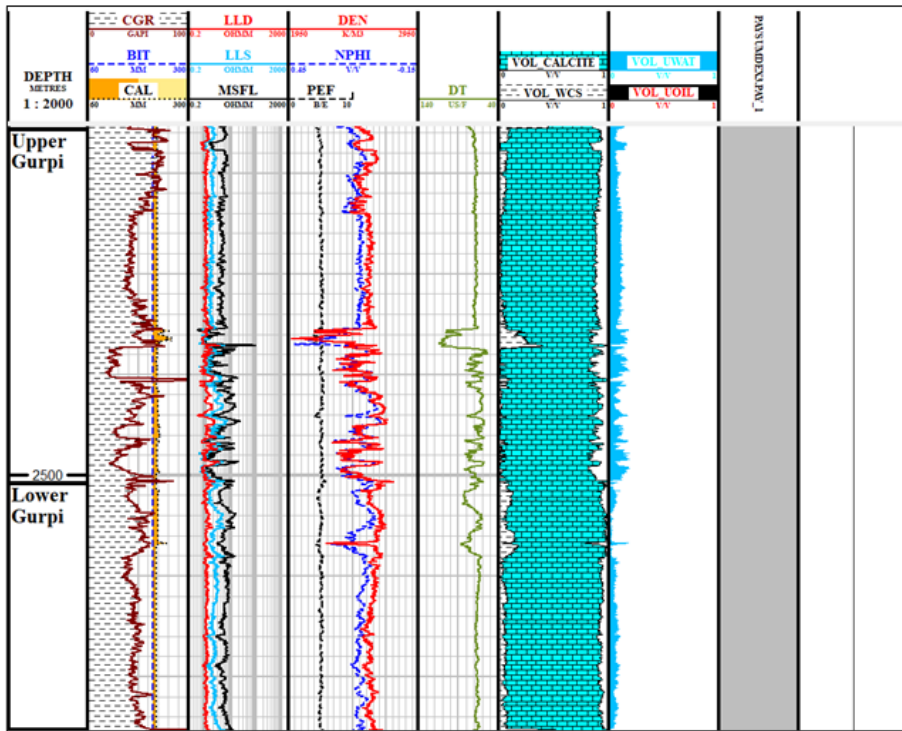
نتایج نهایی حاصل از تحلیل مولتی‌مین سازندهای پایده، گورپی، ایلام و سروک بر اساس اعمال ضریب سیمان‌شدگی متغیر در (شکل‌های ۵ تا ۷) ارائه شده است. در این شکل‌ها، از سمت چپ، ستون اول مؤید عمق و زون‌های سازندی، ستون‌های ۲ تا ۵ نگراره‌های اصلاح‌شده، ستون ۶ تغییرات سنگ‌شناسی، ستون ۷ مقادیر اشباع سیالات، ستون ۸ بخش‌های مخزنی و غیرمخزنی و ستون ۵ ضخامت این زون‌ها را نشان می‌دهد.

سازند گورپی و بخش پایینی سازند پایده در این چاه عمدتاً سنگ‌شناسی آهکی دارند. این سازندها، فاقد زون مخزنی بوده و فضای متخلخل آن‌ها اشباع از آب می‌باشد. سازندهای ایلام و سروک در این چاه عمدتاً از نوع آهکی بوده و تنها بخش سروک ۲، لیتولوژی شیلی/مارنی دارد. تنها بخش واجد ویژگی‌های مخزنی در سازند ایلام، بازه ۲۶۴۹ تا ۲۶۵۳/۵ متری می‌باشد و مابقی سازند اشباع از آب است. بخش‌های سروک ۲ تا ۴ عمدتاً از اشباع نفت بالایی برخوردار بوده و این مهم باعث شده است تا زون اصلی مخزنی در نیمه پایینی



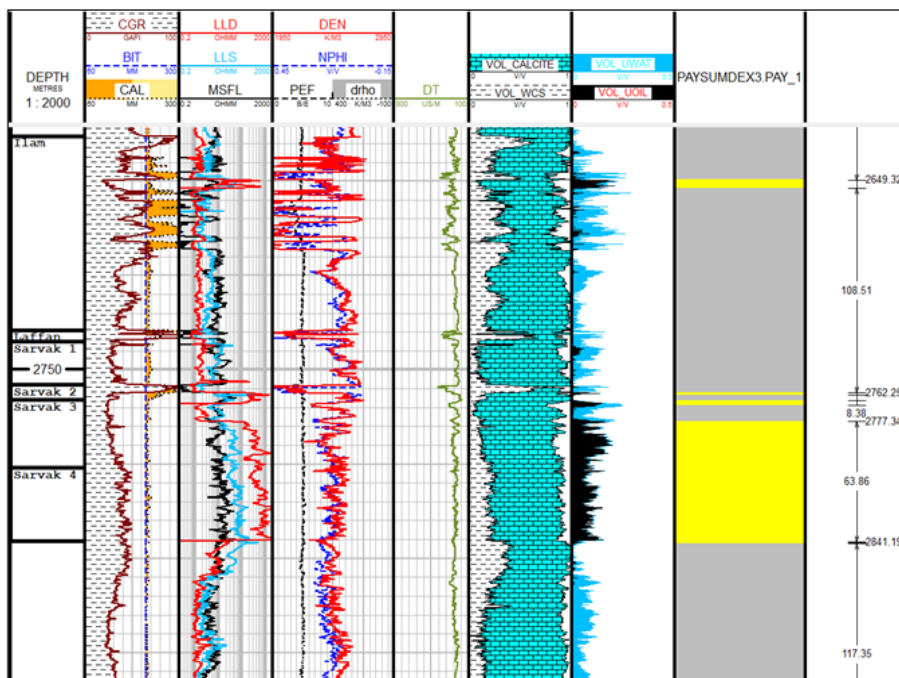


شکل ۵: نتیجه نهایی آنالیز زون های مخزنی سازند پابده



شکل ۶: نتیجه نهایی آنالیز زون های مخزنی سازند گورپی





شکل ۷: نتیجه نهایی آنالیز زون‌های مخزنی سازند ایلام و سروک

جدول ۲: زون‌های مخزنی شناسایی شده توالی مورد مطالعه

عنوان سازند	عمق شروع زون (متر)	عمق پایان زون (متر)	ضخامت زون (متر)	میانگین تخلخل (درصد)	میانگین اشباع آب (درصد)	حجم شیل (درصد)	نسبت زون مخزنی به کل سازند
ایلام	۲۶۴۹/۲۴	۲۶۵۳/۶۶	۴/۴۲	۳.۱۸	۱۵/۲	۱۰/۹	۰/۰۴
سروک ۲	۲۷۶۲/۱۷	۲۷۶۳/۲۴	۱/۰۷	۱۰	۹	۲۰/۳	
ابتدای سروک ۳	۲۷۶۶/۴۴	۲۷۶۸/۸۷	۲/۴۴	۱۵	۳۰	۷	۰/۳
سروک ۳ و ۴	۲۷۷۷/۳۴	۲۸۴۱/۲	۶۳/۸۶	۱۲	۶/۵	۱۷	

۵. نتیجه‌گیری

ارزیابی پتروفیزیکی و شناسایی زون‌های مخزنی در سازندهای آئوسن تا کرتاسه میانی یکی از چاه‌های حوضه زاگرس نشان داد که بهینه‌سازی ضریب سیمان‌شدگی با استفاده از رابطه بورای منجر به بهبود دقت محاسبات اشباع سیالات می‌گردد. این رویکرد، وابستگی ضریب سیمان‌شدگی به تغییرات تخلخل را لحاظ کرده و خطای ناشی از کاربرد مقادیر ثابت در مخازن ناهمگن کربناته را مرتفع می‌سازد. مقایسه مقادیر اشباع آب محاسبه‌شده بر اساس ضریب سیمان‌شدگی ثابت و متغیر، اختلاف معنادار خروجی دو روش را مشخص نمود که این اختلاف در زون‌های حاوی اشباع آب بالا، بیشتر می‌باشد. ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای مورد مطالعه همگام با بهینه‌سازی ضریب سیمان‌شدگی منتج به شناسایی ۴ زون مخزنی در سازندهای ایلام و سروک شد. زون مخزنی اصلی در بخش میانی سازند آهکی سروک (سروک ۳ و ۴) واقع شده است و از تخلخل و اشباع هیدروکربن بالایی برخوردار می‌باشد. در نهایت، سنجش دقیق مقادیر اشباع سیالات بر اساس ضریب سیمان‌شدگی متغیر منجر به شناسایی دقیق‌تر زون‌های مخزنی و عمق سطوح سیالات شده و خطای تخمین‌های حجمی را کاهش می‌دهد.

- [9]. Pickett, G. R. (1966). A review of current techniques for determination of water saturation from logs. *Journal of petroleum Technology*, 18(11), 1425-1433.
- [10]. Nugent, W. H., Coates, G. R., & Peebler, R. P. (1978, June). A new approach to carbonate analysis. In *SPWLA Annual Logging Symposium* (pp. SPWLA-1978). SPWLA.
- [11]. Rasmus, J. C. (1983). A variable cementation exponent, m , for fractured carbonates. *The Log Analyst*, 24(06).
- [12]. Borai, A. M. (1987). A new correlation for the cementation factor in low-porosity carbonates. *SPE formation evaluation*, 2(04), 495-499.
- [13]. Alavi, M. (2004). Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American journal of Science*, 304(1), 1-20.
- [14]. Vergés, J., Saura, E., Casciello, E., Fernández, M., Villasenor, A., Jimenez-Munt, I., & García-Castellanos, D. (2011). Crustal-scale cross-sections across the NW Zagros belt: implications for the Arabian margin reconstruction. *Geological Magazine*, 148(5-6), 739-761.
- [15]. Bordenave, M. L., & Hegre, J. A. (2010). Current distribution of oil and gas fields in the Zagros Fold Belt of Iran and contiguous offshore as the result of the petroleum systems. *Geological Society, London, Special Publications*, 330(1), 291-353. <https://doi.org/10.1144/SP330.14>.
- [16]. Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., & Mouthereau, F. (2005). Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. *International journal of earth sciences*, 94,
- [1]. Dembicki, H. (2022). *Practical petroleum geochemistry for exploration and production*. Elsevier.
- [2]. Kadkhodaie, A. (2022). *Formation Evaluation* (5th ed.). Dayereh Danesh. [In Persian]
- [3]. Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(01), 54-62.
- [4]. Wyllie, M. R. J., & Rose, W. D. (1950). Some theoretical considerations related to the quantitative evaluation of the physical characteristics of reservoir rock from electrical log data. *Journal of Petroleum Technology*, 2(04), 105-118.
- [5]. Fons, L. (1969, May). Geological applications of well logs. In *SPWLA Annual Logging Symposium* (pp. SPWLA-1969). SPWLA.
- [6]. Daniel, D. (2022). Machine learning for pay zone identification in the Smørbukk field using well logs and XRF data (Master's thesis, University of Stavanger).
- [7]. Zhang, J., He, Y., Zhang, Y., Li, W., & Zhang, J. (2022). Well-Logging-Based Lithology Classification Using Machine Learning Methods for High-Quality Reservoir Identification: A Case Study of Baikouquan Formation in Mahu Area of Junggar Basin, NW China. *Energies*, 15(10), 3675.
- [8]. Olsen, C., Hongdul, T., & Lykke Fabricius, I. (2008). Prediction of Archie's cementation factor from porosity and permeability through specific surface. *Geophysics*, 73(2), E81-E87.



401-419.

- [17]. Motiei, H. (1993). Geology of Iran: stratigraphy of Zagros. Geological survey of Iran, 1, p-536.
- [18]. Bordenave, M. L. (2002, March). The Middle Cretaceous to Early Miocene petroleum system in the Zagros domain of Iran, and its prospect evaluation. In AAPG annual meeting (Vol. 6, pp. 1-9). Houston: Am. Assoc. Petrol. Geol..
- [19]. Fard, I. A., Braathen, A., Mokhtari, M., & Alavi, S. A. (2006). Interaction of the Zagros Fold-Thrust Belt and the Arabian-type, deep-seated folds in the Abadan Plain and the Dezful Embayment, SW Iran. *Petroleum Geoscience*, 12(4), 347-362.
- [20]. Rider, M. (1996). The geological interpretation of well logs; 2.
- [21]. Asquith, G. B., Krygowski, D., & Gibson, C. R. (2004). *Basic well log analysis* (Vol. 16, pp. 305-371). Tulsa: American Association of Petroleum Geologists.



Optimization of Petrophysical Evaluation Utilizing Variable Cementation Factor for Identification of Pay-Zones in a Field within Zagros Basin

Koorosh Keramati¹, Ahmad Reza Rabbani², Khaled Maroufi^{3*}, Ali Kadkhodaie⁴

1. M.Sc. Student, Department of Petroleum Engineering, Faculty of Petroleum and Geoenergy Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2. Professor, Department of Petroleum Engineering, Faculty of Petroleum and Geoenergy Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Faculty of Petroleum and Natural Gas Engineering, Tabriz University of Technology, Tabriz, Iran
4. Professor, Earth Sciences Department, Agriculture Faculty, Tabriz University, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

RESEARCH ARTICLE

Article History:

Received: 08 July 2025

Revised: 27 September 2025

Accepted: 17 October 2025

Keywords:

Pay-zone

Well logging

Fluid saturation

Geolog software

Sarvak Formation

ABSTRACT

Identification of hydrocarbon-bearing zones, as a primary objective of exploration and production projects, requires precise analysis of petrophysical data. Cementation factor is one of the key parameters in petrophysical evaluation, which is used to calculate water saturation (such as the Archie and Indonesia equations). This coefficient describes the degree of cementation and consolidation on porosity. For carbonate rocks, cementation factor depends on pore type. Minor variations in this factor can influence fluid saturation estimates, thereby posing challenges for accurate identification of pay-zones. This study aims to investigate the effect of employing variable cementation exponent values instead of fixed ones on petrophysical analysis results using Geolog software (Multimin modeling). Effective porosity data resulted from the software were applied into the Borai equation (1987) and variable and depth-dependent cementation exponent values were calculated. They were then compared to the commonly used constant values. The results demonstrated evident differences between water saturation values obtained from two methods ranging from 1% to 9%. Accordingly, pay-zone thickness and oil-water contact location varied. Comparison of the identified pay-zones revealed higher accuracy of the variable cementation exponent-based model. The main pay-zone of the studied well is within units 3 and 4 of the Sarvak formation, exhibiting favorable porosity and hydrocarbon saturation. Ultimately, the findings of this study revealed that the precise determination of fluid saturation values, based on the variable cementation exponent, facilitates more accurate identification of reservoir zones and fluid contact surfaces, thereby minimizing errors in volumetric estimations.

DOR: [20.1001.1.2507.1099.1404.04.17](https://doi.org/10.1001.1.2507.1099.1404.04.17)

How to cite this article

K. Keramati, A.R. Rabbani, K. Maroufi, A. Kadkhodaie, Optimization of Petrophysical Evaluation Utilizing Variable Cementation Factor for Identification of Pay-Zones in a Field within Zagros Basin. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025 12(3): 25-38. (https://ijge.irangi.org/article_735139.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: maroufi@sut.ac.ir, (K. Maroufi).

Available online 21 December 2025

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

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



بررسی عملکرد جداسازی گاز طبیعی با استفاده از غشای ماتریس آمیخته AC/PES: بخش آزمایشگاهی

سعید خادمی^۱، ابوالفضل کیان^{۲*}، بصیر ملکی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی اسفراین، اسفراین، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی اسفراین، اسفراین، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی اسفراین، اسفراین، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: a.jomekian@esfarayen.ac.ir

مقاله علمی- پژوهشی

صفحه ۳۹ - ۵۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷

چکیده

مطالعه حاضر بر سنتز کربن فعال کم‌هزینه و کارآمد از پوست‌گروه‌های ضایعاتی و کاربرد آن در غشاهای ماتریس مخلوط پلی اتر سولفون (PES) برای جداسازی انتخابی CO_2/CH_4 متمرکز بود. پس از کربونیزه کردن، پوست‌گروه‌ها به صورت شیمیایی با ZnCl_2 و KOH فعال شدند. ویژگی‌های ساختاری و شیمیایی کربن فعال با استفاده از طیف‌سنجی فرورسرخ تبدیل فوریه (FTIR) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد که توزیع موفقیت‌آمیز ذرات کربن در سراسر ماتریس پلیمری را تأیید کرد. همچنین، سطح ویژه و ساختار منافذ کربن فعال تولیدشده با استفاده از روش برون‌آور-امت-تلا (BET) شناسایی شد. علاوه بر این، مقادیر مختلفی از کربن فعال با استفاده از روش حلال‌آمیختگی (solution-mixing) در PES گنجانده شد و سپس از طریق تکنیک وارون‌سازی فاز (Phase inversion) روی یک زیرلایه پلی‌استری ریخته شد. عملکرد جداسازی غشاهای ساخته‌شده از طریق آزمایش‌های نفوذپذیری گاز خالص ارزیابی شد. نتایج نشان داد که غشاهای ماتریس مخلوط (MMMs) نسبت به غشاهای PES خالص، بهبود قابل‌توجهی در عملکرد جداسازی CO_2/CH_4 از خود نشان دادند. همچنین، مقایسه با حد بالای رابسون نشان داد که غشاهای ماتریس آمیخته به حد تبادل نفوذپذیری-انتخاب‌پذیری گزارش‌شده نزدیک شده‌اند. اگرچه برای فراتر رفتن از این حد و به‌طور کامل بهینه‌سازی عملکرد غشا، به تحقیقات بیشتری نیاز است، نتایج به‌وضوح مؤثر بودن پرکننده‌های استخراج‌شده از ضایعات کشاورزی در طراحی پیشرفته غشاها را برجسته می‌کند. به‌طور کلی، این مطالعه پتانسیل تبدیل پوست‌گروه به کربن فعال با ارزش را برای توسعه غشاهای ماتریس آمیخته‌ی مقرون‌به‌صرفه، دوستدار محیط‌زیست و با عملکرد بالا در جداسازی گاز طبیعی نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: جداسازی متان-دی‌اکسید کربن، غشای ماتریس آمیخته، کربن فعال، نمودار روبسون

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد جمعیت و توسعه شتابان صنایع ایران، موجب افزایش چشمگیر تقاضا برای جداسازی و مصرف‌کننده انرژی، به‌ویژه در کشورهای نفت‌خیز نظیر تصفیه‌گازها شده است [۱]. جداسازی مؤثر گازهایی مانند





CH₄، CO₂ و H₂ در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی نقشی راهبردی داشته و به کاهش مصرف انرژی، افزایش راندمان فرایند و بهبود کیفیت محصولات نهایی کمک می‌کند.

گاز طبیعی استخراج‌شده در فرآیندهای پالایشگاهی و پتروشیمی معمولاً حاوی مقادیر قابل توجهی CO₂ و H₂S است که باید برای استانداردسازی کیفیت سوخت و جلوگیری از خوردگی تجهیزات حذف شود [۲]. فناوری‌های جداسازی گاز علاوه بر این، در بازیافت گازهای همراه نفت، واحدهای LNG، جداسازی هیدروژن و شیرین‌سازی گاز طبیعی نیز کاربرد دارند. از سوی دیگر، مصرف بالای انرژی الکتریکی و حرارتی در این فرآیندها، ضرورت استفاده از فناوری‌های کم‌مصرف‌تر را برجسته می‌سازد [۳].

تکنولوژی‌های رایج جداسازی گاز شامل جذب سطحی (ADS)، جذب فیزیکی-شیمیایی (ABS)، تقطیر برودتی، فشار متناوب (PSA) و فناوری غشا هستند [۳،۴]. گرچه روش‌های مبتنی بر حلال (مانند آمین‌ها) بازده بالایی دارند، اما با چالش‌هایی همچون هزینه عملیاتی زیاد، سمیت و پیچیدگی فرآیند مواجه‌اند [۵]. در مقابل، فناوری غشا به دلیل مصرف انرژی کمتر، سادگی بهره‌برداری، عدم نیاز به مواد شیمیایی خطرناک، طراحی فشرده و ماژولار بودن، به‌طور فزاینده‌ای در صنایع نوین جایگزین روش‌های سنتی می‌شود.

کربن فعال به دلیل گستره وسیع و مقرون‌به‌صرفه کاربردهای خود در حوزه‌هایی همچون الکتروشیمی، کاتالیز، جذب و ذخیره‌سازی گاز و همچنین فرایندهای جداسازی، از جایگاه علمی و صنعتی ویژه‌ای برخوردار است. کربن فعال به دلیل مساحت سطح بالا و تخلخل بالا، یک جاذب شناخته شده است [۶،۷]. با این حال، کاربرد آن در مقیاس بزرگ اغلب به دلیل هزینه‌های بالای تولید و چالش‌های بازسازی با مشکل مواجه می‌شود. این امر منجر به افزایش علاقه به جایگزین‌های مقرون‌به‌صرفه و تجدیدپذیر، به‌ویژه جاذب‌های مشتق شده از زیست‌توده که از پسماندهای کشاورزی و جنگلی مانند پوسته بادام‌زمینی، خاک اره، کاه گندم و پوسته برنج به دست می‌آیند، شده است که عمدتاً با پتاسیم هیدروکسید و کلرید روی فعال‌سازی شده‌اند [۸،۹]. پژوهش‌های پیشین، نشان دادند که مواد کربنی متخلخل با موفقیت به‌عنوان پرکننده در ساخت غشاهای ماتریس

آمیخته (MMMs) برای جداسازی گاز به کار گرفته شده و کارایی چشمگیری از خود نشان دادند. این موضوع بیانگر آن است که مواد کربنی متخلخل می‌توانند به‌عنوان پرکننده‌هایی نویدبخش در MMMها مطرح شوند و مزایا و چشم‌اندازهای قابل توجهی را ارائه دهند. برترین ویژگی کربن فعال در تخلخل پیچیده و قابل تنظیم آن نهفته است؛ ساختار ذاتی منافذ به‌هم‌پیوسته در این مواد، مسیری کارآمد برای انتشار گازها فراهم می‌آورد و بدین ترتیب بستری مناسب برای کاربردهای اختصاصی جداسازی گاز ایجاد می‌کند [۱۰،۱۱]. افزون بر این، سطح ویژه بالای مواد کربنی متخلخل همچون کربن فعال، امکان تعامل گسترده‌تری با مولکول‌های گاز فراهم می‌سازد که به‌طور هم‌زمان منجر به جذب مؤثر و انتقال آسان‌تر آن‌ها می‌شود. این عملکرد دوگانه می‌تواند فرایندهای جداسازی در MMMها را به شکل قابل توجهی تقویت کند. ویژگی مهم دیگر مواد کربنی متخلخل، استحکام ذاتی آن‌ها در برابر شرایط مختلف حرارتی و شیمیایی است که دوام و پایداری عملکرد غشاهای MMM را تضمین می‌کند. همچنین، سازگاری بالای این مواد با انواع ماتریس‌های پلیمری، امکان تولید کامپوزیت‌هایی یکنواخت، پایدار و از نظر ساختاری مقاوم را فراهم می‌سازد.

در ایران، ضایعاتی همچون پوست گردو، کاه گندم، پوست بادام و تفاله میوه‌ها، فراوان و ارزان هستند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که کربن فعال تولیدشده از این مواد در جداسازی گازهای گلخانه‌ای، عملکردی معادل یا حتی بهتر از کربن فعال‌های تجاری دارد و هزینه تمام‌شده را نیز تا یک‌پنجم کاهش می‌دهد. همچنین، توسعه فناوری داخلی تولید کربن فعال از منابع بومی و به‌کارگیری آن در فرایندهای غشایی، با اهداف توسعه پایدار صنعت نفت و گاز کشور و کاهش واردات مواد اولیه پرهزینه، هم‌راستا است. از این مزیت می‌توان در ساخت غشاهای ماتریس آمیخته که ماده معدنی مانند کربن فعال در ماتریس پلیمر وارد می‌شود به‌صورت مقرون‌به‌صرفه استفاده نمود. مطالعات داخلی بر تولید و آزمون غشاهای MMM با کربن فعال از پوست گردو، بادام‌زمینی و کاه گندم متمرکز بوده و نمونه غشاهای AC/PES عملکرد بهتری (افزایش نفوذپذیری و گزینش‌پذیری تا ۵۰ درصد) نسبت به غشاهای پلی‌سولفون ساده نشان داده‌اند [۱۲،۱۳]. علاوه بر این، استفاده از کربن فعال اصلاح‌شده، زئولیت و نانولوله

از آن، مخلوط به دست آمده فیلتر و داخل اتوکلاو فولادی ریخته شد. درب اتوکلاو به طور کامل بسته شد تا از ورود هوا در حین گرمادهی جلوگیری شود. سپس نمونه به مدت ۵ ساعت در آن در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پودر حاصل دوبار با آب مقطر و دوبار با اتانول شسته شد، سپس سانتریفیوژ گردید و در نهایت به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد. این پودر به عنوان کربن فعال خام نام گذاری شد.

برای فعال سازی ذرات کربن خام با استفاده از کلرید روی یا هیدروکسید پتاسیم، مراحل زیر انجام شد:

۱ گرم از پودر کربن خام با کلرید روی به نسبت وزنی ۱:۱ در ۵۰ میلی لیتر آب مقطر مخلوط شد. مخلوط حاصل در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت بر روی هات پلیت مگنتی هم زده شد و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آن در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. نمونه خشک شده در کوره قرار گرفت؛ به طوری که دما به صورت تدریجی از ۲۵ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد طی دو ساعت افزایش یافت و یک ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد نگه داری شد در ادامه، پودر به دست آمده با محلول آبی (1 M) HCl شسته شد، سپس چندین بار با آب مقطر شست و شو داده شد و پس از سانتریفیوژ، در دمای محیط به مدت ۱۸ ساعت خشک گردید. در نهایت پودر خشک شده برای یکنواخت سازی و خرد کردن ذرات درشت و کلوخه شده، دوباره در خردکن برقی قرار گرفت. (شکل ۱) تصویری از کربن فعال خام تولید شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱: کربن خام پس از عملیات کربنیزاسیون

کربنی را بررسی کرده‌اند که اگرچه عملکرد عالی ارائه کرده‌اند، اما هزینه اولیه بسیار بالاتر بوده است [۱۴، ۱۵].

مطالعات نشان داده‌اند که غشاهای MMM به ویژه از نوع AC/PES، با افزودن ۲۰ درصد وزنی کربن فعال، نفوذپذیری CO_2 را تا ۳۵-۷۰ بار و گزینش پذیری CO_2/CH_4 را تا ۲۵ افزایش داده‌اند؛ این مقدار در غشاهای پلی‌سولفون خالص معمولاً ۱۰ تا ۲۰ بار و گزینش پذیری ۱۵ تا ۱۸ است [۱۵]. همچنین هزینه تولید کربن فعال حاصل از ضایعات کشاورزی حدود ۱۵ دلار به ازای هر کیلوگرم بوده که به مراتب پایین تر از هزینه تهیه نانوذرات و جذب کننده‌های سنتی است. در نتیجه، غشاهای MMM علاوه بر مدولار بودن و قابلیت افزایش مقیاس، مصرف انرژی را حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد در مقایسه با فرایندهای جذب یا تقطیر کاهش می‌دهند [۱۶].

در این پژوهش، کربن فعال تولید شده با استفاده از دو ماده مختلف (ZnCl₂ و KOH) فعال سازی شد. سپس کربن فعال تولید شده در داخل ماتریس پلیمر ادغام گردید. غشای ماتریس آمیخته ساخته شده با استفاده از آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، عملکرد غشای ماتریس آمیخته در جداسازی کربن دی‌اکسید از متان بکار گرفته شد.

۲. مواد و روش‌ها

پوست گردوی خشک شده، اسید هیدرو کلرید (HCl)، پلی اتر سولفون (PES)، پلی استر نابافته^۱ از غشاهای منقذی شده تصفیه آب، محلول آبی آمونیاک ۳۰ درصد وزنی، آب مقطر، هگزادستیل تری متیل آمونیوم برومید (CTAB)، کلرید روی (ZnCl₂)، دی متیل فرمامید (DMF)، ان متیل پیرولیدون (NMP) و هیدروکسید پتاسیم (KOH) تهیه شد.

۳. روش ساخت پودر کربن و روند فعال سازی آن

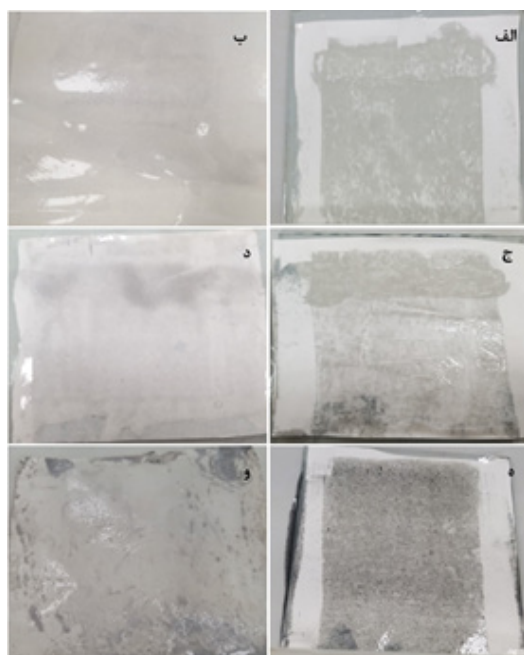
ابتدا پوست‌های گردو شسته و در محیط خشک شدند. سپس توسط خردکن برقی به پودر تبدیل گردیدند. مقدار ۲ گرم از پودر گردو با ۵۰ میلی لیتر آمونیاک آبی و ۰/۶ گرم CTAB در یک ظرف دارای همزن مغناطیسی بر روی هات پلیت به مدت ۴ ساعت هم زده شد. پس

برای فعال کردن ذرات کربن خام توسط هیدروکسید پتاسیم، دقیقاً روش فعال‌سازی ذکر شده با کلرید روی تکرار شد. فقط تنها تفاوت، استفاده از هیدروکسید پتاسیم به جای کلرید روی به‌عنوان عامل فعال‌ساز بود.

۴. ساخت غشاهای ماتریس آمیخته AC/PES

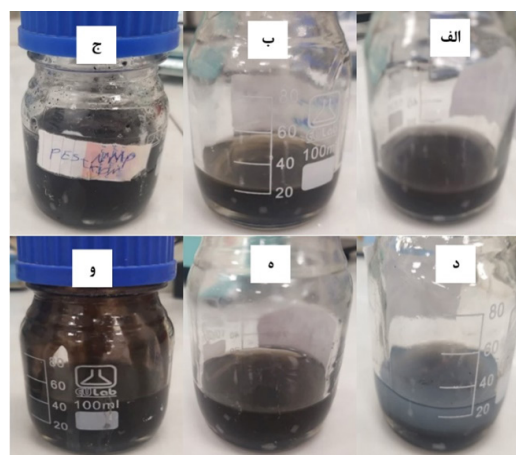
برای تهیه محلول ریخته‌گری غشاهای ماتریس آمیخته، ابتدا ۴ گرم PES در ۹۰ NMP در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت هم‌زده شد. سپس مقدار مشخصی از پودر کربن فعال در ۱۰ میلی‌لیتر NMP پراکنده گردید و به مدت ۲ ساعت تحت هم‌زدن شدید قرار گرفت. سوسپانسیون حاصل به محلول PES اضافه شد و هم‌زدن به مدت ۲ ساعت دیگر ادامه یافت. در ادامه، برای توزیع بهتر ذرات و جلوگیری از تجمع یا کلوخه‌شدن، امواج فراصوت به مدت ۱۰ دقیقه اعمال گردید. در نهایت، محلول ریخته‌گری به‌منظور حذف حباب‌های داخلی به مدت ۲۴ ساعت در حالت سکون نگهداری شد. نمونه‌های محلول‌های ریخته‌گری با کربن‌های فعال متفاوت و با درصد‌های وزنی متفاوت در (شکل ۲) آورده شده است.

جداشده از لایه زیرین غشاهای تصفیه آب، با استفاده از چسب نواری بر روی شیشه ثابت شد. ریخته‌گری محلول بر روی این لایه پلی‌استر متصل به سطح شیشه انجام گرفت. برای این منظور از یک میله ریخته‌گری ساخته‌شده از جنس PTFE استفاده شد که فاصله بین تیغه‌های آن برای پوشش‌دهی سطح بر روی ۱۰۰ میکرومتر تنظیم شده بود. فرآیند ریخته‌گری تا حد امکان به‌صورت یکنواخت و هموار انجام گردید. (شکل ۳) نمونه‌های محلول‌های غشایی پخش‌شده بر روی سطح پلی‌استر نفاخته متصل به شیشه صاف را نشان می‌دهد.



شکل ۳: نمونه‌های قبل از حمام انعقاد غشاهای پلیمری پلی اتر سولفون حاوی کربن فعال شده با KOH به مقدار الف) ۰/۵ گرم، ب) ۱ گرم و ج) ۲ گرم و غشاهای پلیمری به همراه کربن فعال شده با $ZnCl_2$ به مقدار د) ۰/۵ گرم، ه) ۱ گرم و و) ۲ گرم

پس از ریخته‌گری، شیشه حاوی محلول غشا به مدت حدود ۳۰ دقیقه در حمام انعقاد شامل آب مقطر قرار گرفت. پس از ۲۴ ساعت، حلال و ناحلال از حمام انعقاد جابجا شده و غشا از روی شیشه جدا شد. نمونه‌ها در محیط قرار گرفتند تا آب آن‌ها تبخیر و خشک شود؛ این فرآیند بسته به دمای محیط بین ۲۴ تا ۴۸ ساعت طول می‌کشد. پس از خشک شدن، غشاها آماده آزمون تراوایی می‌باشند. (جدول ۱) نام اختصاری نمونه‌های غشایی ساخته‌شده و ترکیب وزنی کربن فعال هر نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۴: نمونه‌های محلول‌های پلی‌اتر سولفون در آن متیل پیرولیدون به همراه کربن فعال شده با KOH به مقدار الف) ۰/۵ گرم، ب) ۱ گرم و ج) ۲ گرم و محلول‌های یکسان پلیمری به همراه کربن فعال شده با $ZnCl_2$ به مقدار د) ۰/۵ گرم، ه) ۱ گرم و و) ۲ گرم

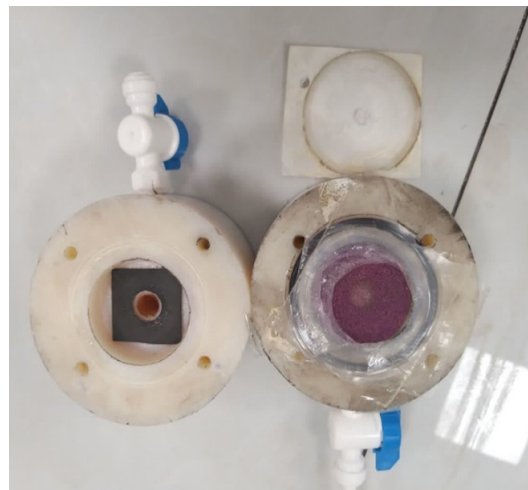
به‌منظور دستیابی به یک لایه انتخابی یکنواخت برای غشای نامتقارن، از روش ریخته‌گری محلول همراه با وارونگی فاز استفاده شد. یک قطعه شیشه‌ای مستطیل‌شکل صاف به‌عنوان تکیه‌گاه ریخته‌گری انتخاب گردید. سپس قطعه‌ای مربعی از پلی‌استر نفاخته،

جدول ۱: نام اختصاری نمونه‌های غشاهای ماتریس آمیخته ساخته شده به همراه نوع ماده فعال کننده و وزن پودر سازنده

نام اختصاری نمونه	ماده فعال کننده کربن	جرم پودر کربن فعال در ساخت غشا (گرم)
AP-K-0.5	KOH	۰/۵
AP-K-1	KOH	۱
AP-K-2	KOH	۲
AP-Zn-0.5	ZnCl ₂	۰/۵
AP-Zn-1	ZnCl ₂	۱
AP-Zn-2	ZnCl ₂	۲

۵. اندازه‌گیری تراوایی گازها در تست‌های تراوایی

تراوایی گازهای دی‌اکسید کربن و متان با استفاده از یک ماژول غشایی تخت PTFE مجهز به یک دی‌سینج حبابی اندازه‌گیری شد. کیسول‌های گازهای خالص دی‌اکسید کربن و متان با خلوص ۹۹ درصد حجمی به‌عنوان خوراک غشاها مورد استفاده قرار گرفتند. (شکل ۴) تصویری از ماژول غشایی استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۴: ماژول غشایی مورد استفاده در این تحقیق

اندازه‌گیری تراوایی گازها توسط تست تراوایی گاز خالص انجام شد یعنی به این صورت که تراوایی هر گاز به‌صورت مستقل از گاز دیگر اندازه‌گیری شد. تراوایی گازهای CO₂ و CH₄ بر طبق رابطه زیر محاسبه گردید [۱۷، ۱۸]:

$$P_i = \frac{Q_i}{A(p_{f_i} - p_{p_i})} \quad (1)$$

در معادله (۱) P_i نشان دهنده تراوایی گاز i در غشا برحسب Q_i، (cm³(STP) s⁻¹ cm⁻² cmHg⁻¹)، نشان دهنده دبی حجمی گاز i در غشا برحسب A، (cm³(STP) s⁻¹)، سطح مقطع عبور گاز از غشا برحسب p_{p*i*}، (cm²)، فشار گاز i در غشا در سمت تراویده و p_{f*i*} فشار گاز i در غشا در سمت خوراک هر دو برحسب (cmHg) می‌باشند. انتخاب پذیری ایده‌آل گاز A نسبت به گاز B که با α_{A/B} نمایش داده می‌شود، از تقسیم کردن تراوایی گاز A در غشا به تراوایی گاز B در غشا در حالت تست گاز خالص به دست می‌آید و به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\alpha_{A/B} = \frac{P_A}{P_B} \quad (2)$$

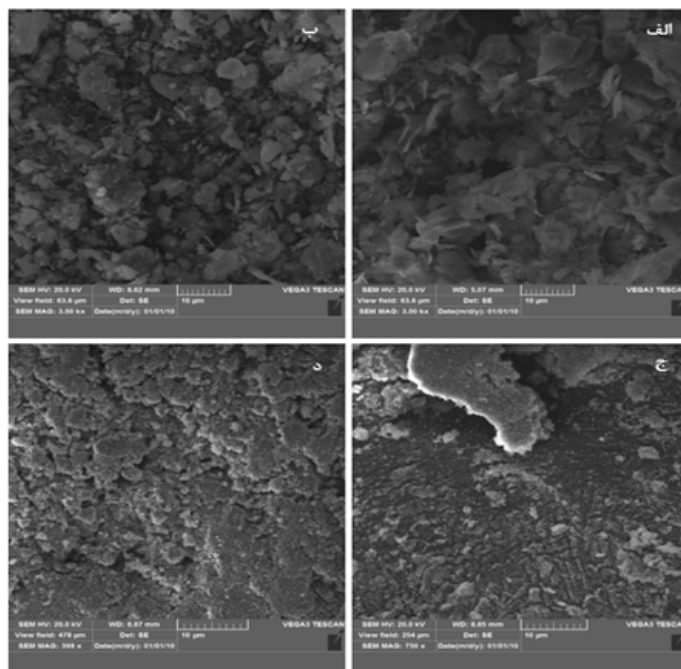
۶. مشخصه‌یابی ذرات کربن فعال و غشای ساخته شده برای بررسی مورفولوژی ذرات کربن فعال و غشاهای ماتریس آمیخته حاصل، آنالیز میکروسکوپی SEM (VEGA-TESCAN) انجام شد. توزیع اندازه ذرات کربن فعال با استفاده از آنالیز لیزری ارزیابی گردید تا یکنواختی و دامنه اندازه ذرات مشخص شود. همچنین برای شناسایی گروه‌های عاملی سطحی و تأیید اثربخشی فرآیند فعال‌سازی، طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR, IRAffinity-1S, Shimadzu) در محدوده ۴۰۰-۴۰۰۰ cm⁻¹ به کار گرفته شد. این مجموعه آنالیزها به درک ساختار، اندازه و ترکیب شیمیایی ذرات کربن فعال و تأثیر آن‌ها بر خواص غشاها کمک می‌کند و مبنایی برای بهینه‌سازی فرآیند تولید غشاهای با عملکرد بالا فراهم می‌آورد.

۷. نتایج و بحث

۷-۱. آنالیز SEM و توزیع لیزری اندازه ذرات از کربن

خام و فعال

آنالیز SEM از نمونه‌های کربن ساخته شده در (شکل ۵) به تصویر کشیده شده است. تصاویر SEM مربوط به کربن خام (شکل ۵ الف و ب) و کربن فعال شده (شکل ۵ ج و د) آورده شده است.



شکل ۵: عکس‌های SEM گرفته شده از پودر کربن (الف) فعال نشده خام، (ب) فعال نشده بعد از شستشو، (ج) فعال شده با KOH و (د) فعال شده با $ZnCl_2$

با روش پرایمینگ در ساخت غشا می‌توان این اثر را تا حد زیادی کاهش داد. در مورد تخلخل ذرات، قضاوت دقیق از SEM دشوار است؛ با این حال، از ظاهر تصاویر به نظر می‌رسد نمونه فعال شده با KOH دارای تخلخل قابل مشاهده بیشتری نسبت به نمونه فعال شده با $ZnCl_2$ باشد. این امر را می‌توان به ماهیت بازی و قابلیت حل بیشتر فعال‌سازی با KOH نسبت به فعال‌سازی با نمک‌های فلزی نسبت داد که با نتایج گزارش شده توسط سایر محققان نیز همخوانی دارد [۱۹].

آنالیز لیزری توزیع اندازه ذرات چهار نمونه ذکر شده در (شکل ۶) ارائه شده است. همان‌طور که در زیر شکل‌ها دیده می‌شود، نتایج حاصل از SEM و تحلیل اندازه ذرات لیزری تطابق نسبتاً خوبی دارند. در (شکل ۶ الف)، میانگین اندازه ذرات نمونه خام حدود ۶ میکرومتر است، در حالی که برای نمونه شستشو شده این مقدار کمی کمتر و حدود ۵/۵ میکرومتر گزارش شده است. این تفاوت به این دلیل است که در نمونه خام، تعداد ذرات با اندازه حدود ۶ میکرومتر بیشتر بوده و به عبارت دیگر، انحراف معیار اندازه ذرات در این نمونه نسبت به نمونه شستشو شده کمتر است. در نمونه شستشو شده، ذرات کوچک‌تر شده و در عین حال، انحراف معیار اندازه ذرات افزایش یافته است، به این معنا که گستره اندازه ذرات وسیع‌تر شده است. این تغییرات عمدتاً ناشی از اثر حلال در کوچک‌تر کردن ذرات و همچنین اعمال سانتریفیوژ به‌عنوان

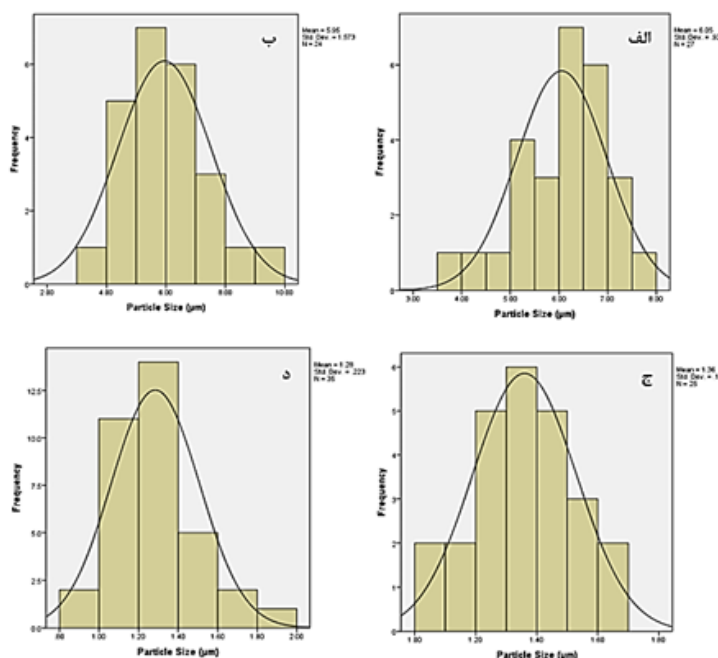
(شکل ۵ الف)، تصویر SEM نمونه کربن پس از قرارگیری در آن و قبل از شستشو را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، ذرات کربن خام دارای اندازه بزرگ و شکل صفحه‌ای با لبه‌های تیز هستند. این شکل ذرات ناشی از ساختار اولیه ذرات گردو و همچنین نحوه خروج گازها از پوسته گردو است. در (شکل ۵ ب)، مشاهده می‌شود که اندازه ذرات و تیزی لبه‌ها کاهش یافته است. این تغییر عمدتاً به دلیل شستشوی چندباره با حلال‌های مختلف و سانتریفیوژ کردن ذرات رخ داده است. شستشو می‌تواند حاشیه‌های تیز ذرات را از بین ببرد و سانتریفیوژ، با اعمال فشار نسبی در حین چرخش، موجب خرد شدن جزئی و صاف‌تر شدن ذرات می‌شود. با وجود کاهش اندازه و صاف‌تر شدن ذرات، این نمونه‌ها همچنان برای استفاده در ماتریس پلیمر جهت ساخت غشای ماتریس آمیخته مناسب نیستند؛ زیرا شکل ذرات می‌تواند باعث ایجاد نقایص در سطح مشترک ذره-پلیمر و افزایش احتمال نفوذ گاز از این نقایص شود.

در (شکل‌های ۵ ج و د) مربوط به نمونه‌های کربن فعال شده با کلرید روی و هیدروکسید پتاسیم به ترتیب، مشاهده می‌شود که سایز ذرات به‌طور واضح کوچک‌تر شده و زبری سطح کاهش یافته است. فعال‌سازی با این عوامل تا حدودی باعث کلوخه شدن ذرات شده که دلیل آن خیس شدن و شستشوی مجدد با آب و اسید است؛ با این حال،

عامل خردکننده جزئی ذرات است.

همخوانی دارد. علاوه بر این، انحراف معیار اندازه ذرات نمونه‌های فعال شده به‌طور قابل توجهی کمتر از نمونه‌های خام است؛ بدین معنا که ذرات نه‌تنها کوچک‌تر شده‌اند، بلکه یکنواختی اندازه ذرات نیز افزایش یافته است. این ویژگی، نشانه‌ای مثبت برای استفاده از ذرات فعال شده در ماتریس پلیمر جهت ساخت غشاهای ماتریس آمیخته محسوب می‌شود.

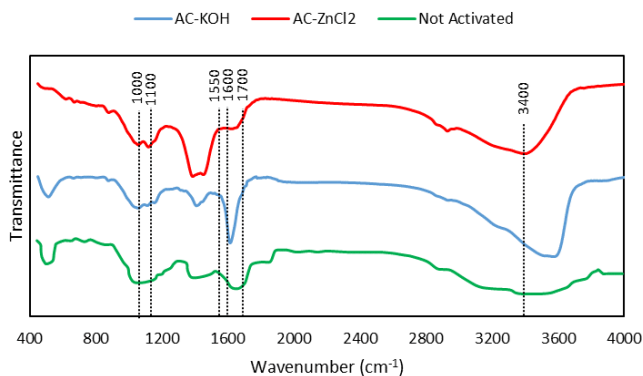
برای نمونه‌های فعال شده (شکل‌های ۶ ج و د)، میانگین اندازه ذرات کربن فعال برای نمونه‌های فعال شده با کلرید روی و هیدروکسید پتاسیم به ترتیب ۳۶/۱ و ۲۸/۱ میکرومتر است. این نتایج نشان می‌دهد که فعال‌سازی کربن خام تأثیر قابل توجهی بر اندازه ذرات داشته و با تصویر SEM نیز



شکل ۶: توزیع لیزری اندازه ذرات کربن الف) فعال نشده خام، ب) فعال نشده بعد از شستشو، ج) فعال شده با KOH و د) فعال شده با $ZnCl_2$

کربن خام قبل از فعال‌سازی را نشان می‌دهد، در حالی که دو نمونه دیگر، کربن‌های فعال شده با KOH و $ZnCl_2$ هستند که به ترتیب با رنگ‌های آبی و قرمز در شکل مشخص شده‌اند.

۲-۷. آنالیز FTIR از نمونه‌های کربن خام و کربن فعال به‌منظور شناسایی گروه‌های عاملی موجود در ساختار مواد ساخته شده، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) انجام شد. نمونه سبز رنگ،



شکل ۷: طیف سنجی FTIR برای نمونه‌های کربن فعال نشده بعد از شستشو (سبز)، کربن فعال شده با کلرید روی (قرمز) و کربن فعال شده با هیدروکسید پتاسیم (آبی)

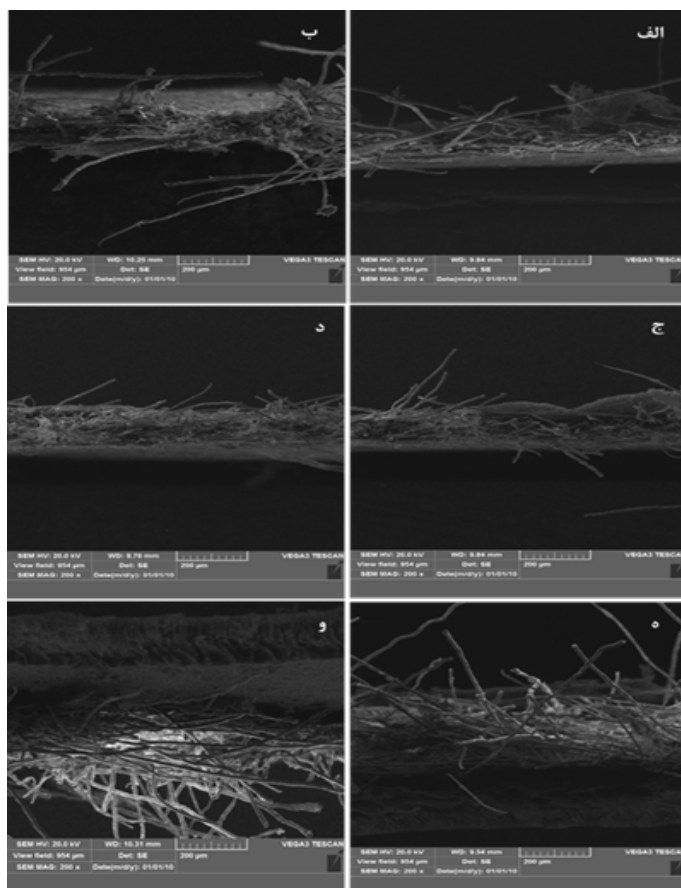


دیگر ضعیف‌تر است. این پیک مربوط به هیدرات‌های کلرید روی است که طی فرآیند شستشو با آب شکل گرفته‌اند [۱۹] و نشان‌دهنده موفقیت آمیز بودن فرآیند فعال‌سازی با $ZnCl_2$ می‌باشد. پیک در محدوده 1700 cm^{-1} نیز نمایانگر گروه کربونیل ($C=O$) است که در اغلب نمونه‌های کربن فعال مشابه گزارش شده است. همچنین پیک در حوالی 1600 cm^{-1} می‌تواند نشان‌دهنده پیوند دوگانه کربن-کربن ($C=C$) باشد؛ اگرچه به دلیل همپوشانی نسبی پیک‌ها، تشخیص قطعی دشوار است، اما احتمال حضور این پیوند وجود دارد و با نتایج سایر محققین مطابقت دارد [۲۰]. در نهایت، پیک‌های موجود در محدوده $1100\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاش کششی پیوند $C-O$ هستند که با شدت‌های متفاوت در هر سه نمونه مشاهده می‌شوند. از آنجا که کربن به‌طور طبیعی با اکسیژن واکنش می‌دهد، وجود این پیک در هر سه نمونه خام و فعال شده انتظار می‌رود.

۳-۷. آنالیز SEM از نمونه‌های غشایی

آنالیز SEM از سطح مقطع تمامی غشاهای ساخته شده در (شکل ۸) آورده شده است.

همان‌طور که در (شکل ۷) مشاهده می‌شود، در محدوده عدد موج حدود 3400 cm^{-1} یک پیک گسترده در هر سه نمونه دیده می‌شود. این پیک (به دلیل نمایش محور عمودی به‌صورت درصد عبور، در واقع یک دره است ولی برای سادگی در اینجا پیک نامیده می‌شود) عمدتاً مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل (OH^-) است که در سطح ذرات کربن حضور دارند. یکی از دلایل این مشاهده ممکن است جذب بخار آب موجود در هوا توسط ذرات کربن قبل از آزمایش باشد. در نمونه فعال شده با KOH ($AC-KOH$)، به دلیل تماس ذرات کربن با گروه‌های هیدروکسیل KOH طی فرآیند فعال‌سازی، غلظت و فراوانی این گروه‌ها و احتمالاً تعداد پیوندهای سطحی آن‌ها با کربن بیشتر است، بنابراین شدت پیک در این نمونه عمیق‌تر و شدیدتر می‌باشد [۱۷، ۱۸]. در نمونه فعال شده با $ZnCl_2$ نیز پیک در محدوده 3400 cm^{-1} نسبت به نمونه خام بزرگ‌تر است که احتمالاً به شستشوی پودر فعال شده با محلول آبی و در معرض آب بودن ذرات مربوط می‌شود. علاوه بر این، در طیف آبی رنگ (نمونه $AC-ZnCl_2$) در محدوده عدد موج $1600\text{--}1550\text{ cm}^{-1}$ یک پیک تیز مشاهده می‌شود که در دو نمونه



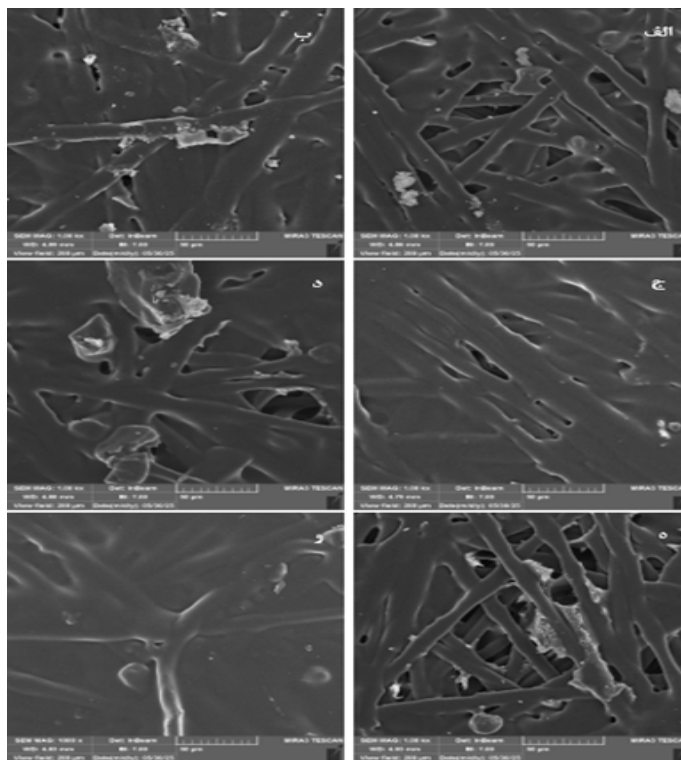
شکل ۸: عکس‌های SEM از سطح مقطع نمونه‌های غشایی الف) AP-K-0.5، ب) AP-Zn-0.5، ج) AP-K-1، د) AP-Zn-1، ه) AP-K-2 و و) AP-Zn-2

ساختار متداول غشاهای نامتقارن پلی اتر سولفون را نشان می‌دهد. به دلیل غلظت کم کربن فعال در پلیمر، اثر قابل توجهی از ذرات کربن فعال در لایه انتخابی و زیرلایه متخلخل مشاهده نمی‌شود که انتظار می‌رفت. برای بررسی حضور ذرات کربن فعال و ساختار سطحی غشا، تصاویر SEM سطح غشاهای ساخته‌شده گرفته شده‌اند که در (شکل ۸) ارائه شده است.

همان‌طور که در تصاویر SEM سطح غشاها مشاهده می‌شود، حضور ذرات کربن فعال بر روی سطح تمامی نمونه‌ها قابل رؤیت است. فیبرهای پلی‌استر نفاخته نیز در این تصاویر دیده می‌شوند که علت آن، نفوذ محلول ریخته‌گری غشای ماتریس آمیخته به درون تار و پود پلی‌استر در برخی نمونه‌ها است. اگرچه این موضوع چندان مطلوب نیست، اما در صورتی که ضخامت لایه پوشش‌دهنده کافی باشد، تأثیری بر عملکرد جداسازی ندارد. استفاده از لایه پلی‌استر نفاخته در ساخت غشا اختیاری است؛ با این حال، در این حالت لایه PES باید به‌تنهایی روی شیشه پخش شده و در حمام انعقاد قرار گیرد. در این شرایط، احتمال چروک شدن لایه نازک در حین خشک شدن بسیار زیاد است و مقاومت مکانیکی کافی برای انجام آزمایش‌های تراوایی نخواهد داشت و احتمال پارگی آن در حین آزمایش بالاست. به‌منظور جلوگیری از این مشکلات، از پلی‌استر به‌عنوان ساپورت غشا استفاده شد که روشی متداول در تولید غشاهای تصفیه آب است [۲۰، ۲۱].

به دلیل عدم دسترسی به نیتروژن مایع در تهیه تصاویر SEM، برای تهیه مقطع سطحی تمیز و قابل رؤیت، تصاویر سطح مقطع غشا از ناحیه پاره شده توسط اپراتور دستگاه گرفته شده است. همان‌طور که در تمامی تصاویر مشاهده می‌شود، فیبرهای پلی‌استر نفاخته که به‌عنوان لایه ساپورت زیر لایه انتخابی PES قرار دارند، مانع مشاهده دقیق سطح مقطع غشا می‌شوند. هنگام پاره شدن لایه پلی‌استر، رشته‌هایی شبیه کاغذ A4 در سطح مقطع ایجاد می‌شوند که در تصاویر قابل مشاهده‌اند.

با این حال، همان‌طور که از تصاویر SEM مشاهده می‌شود، لایه انتخابی بر روی سطح پلی‌استر نفاخته قرار دارد و در (شکل‌های ۹، ج، د) کاملاً مشخص است. نکته قابل توجه این است که ضخامت لایه انتخابی نسبت به لایه پایه (پلی‌استر نفاخته) بسیار کمتر است که این ویژگی منجر به کاهش مقاومت در برابر عبور گاز و افزایش دبی یا فلاکس گاز می‌شود. در (شکل ۹ و)، لایه انتخابی از لایه پلی‌استر جدا شده و به‌وضوح قابل رؤیت است. این لایه پلیمری در حقیقت یک لایه انتخابی کامل نیست و تنها سطح رویه آن در جداسازی مؤثر است؛ قسمت‌های متخلخل داخلی نقش چندانی در فرآیند جداسازی ندارند. با این حال، به دلیل استفاده از روش وارونگی فاز، حفرات مخروطی شکل در ساختار داخلی غشا شکل گرفته‌اند که ناشی از خروج حلال NMP از حفرات PES در تماس با ناحله آب است؛ این ویژگی،



شکل ۹: عکس‌های SEM از سطح مقطع نمونه‌های غشایی (الف) AP-K-0.5، (ب) AP-Zn-0.5، (ج) AP-K-1، (د) AP-Zn-1، (ه) AP-K-2 و (و) AP-Zn-2

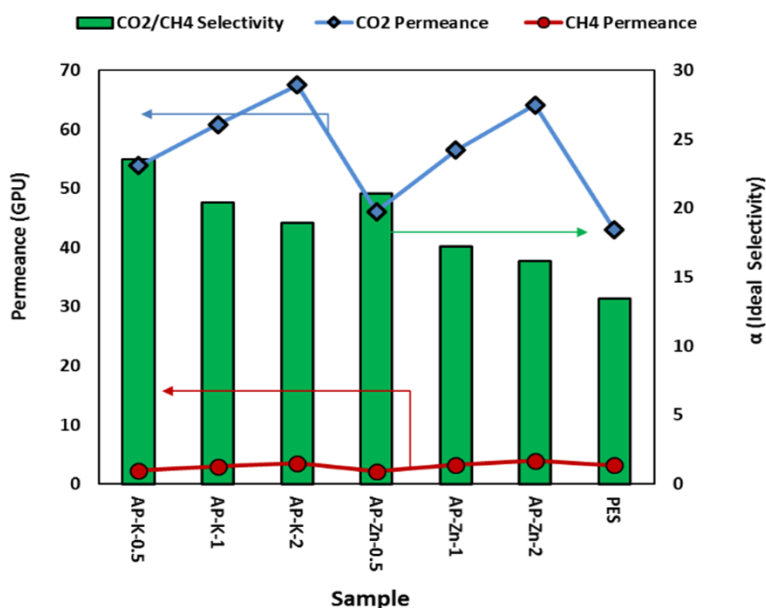
۴-۷. آنالیز BET از نمونه‌های منتخب کربن فعال

در این پژوهش، ویژگی‌های فیزیکی نمونه منتخب کربن فعال (AC) فعال شده یعنی (AP-K-2) با آزمون جذب و واجذب نیتروژن به روش BET بررسی شد. نتایج نشان داد که AP-K-2 دارای سطح ویژه‌ای معادل ۲۰۴/۱۷ مترمربع بر گرم، حجم کل حفرات ۰/۲۹ سانتی‌متر مکعب بر گرم و قطر متوسط حفرات ۷/۴ نانومتر است. این مقادیر نشان‌دهنده ساختار عمدتاً مزوحفره‌ای در نمونه هستند که نقش مهمی در بهبود انتقال و نفوذ مولکول‌های گازی دارند. وجود مزوحفرات باعث می‌شود محدودیت‌های نفوذی کاهش یافته و راندمان جداسازی گاز افزایش یابد. از سوی دیگر، سطح ویژه بالا و توزیع مناسب حفرات شرایطی را برای افزایش تعداد مکان‌های فعال فراهم می‌کند که موجب بهبود ظرفیت جذب و ارتقای انتخاب‌پذیری غشا می‌شود. چنین ویژگی‌هایی به‌ویژه در جداسازی مخلوط‌های گازی نظیر CO_2/CH_4 اهمیت دارند، زیرا ضمن تسهیل انتقال گاز، امکان دستیابی به تعادل میان تراوایی و گزینش‌پذیری

را ایجاد می‌کنند. در مجموع، ساختار مزوحفره‌ای AC آن را به گزینه‌ای کارآمد در غشاهای ماتریس آمیخته و سامانه‌های جذب گاز تبدیل می‌سازد [۲۰، ۲۱]. از سوی دیگر، نتایج آنالیز FTIR (شکل ۷) بیانگر حضور گروه‌های عاملی اکسیژنی همچون $-\text{COOH}$ ، $-\text{OH}$ و $\text{C}=\text{O}$ بود. این گروه‌ها با ایجاد برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و هیدروژنی قوی، به‌ویژه با مولکول‌های قطبی نظیر CO_2 ، نقش مهمی در افزایش ظرفیت جذب انتخابی ایفا می‌کنند. در واقع، وجود چنین گروه‌های عاملی باعث می‌شود تمایل سطحی AC به CO_2 نسبت به CH_4 بیشتر گردد. ترکیب سطح ویژه بالا، توزیع مناسب و یکنواخت مزوحفرات و حضور گروه‌های عاملی فعال شرایطی ایده‌آل برای ارتقای انتقال مولکولی و افزایش گزینش‌پذیری غشا در فرآیندهای جداسازی گاز ایجاد می‌کند [۲۰، ۲۱].

۸. تست‌های تراوایی

نتایج تست‌های حالت خالص نمونه‌های غشایی ساخته شده در (شکل ۱۰) آورده شده است.



شکل ۱۰: تراوایی CO_2 ، تراوایی CH_4 (محور سمت چپ) و انتخاب‌پذیری ایده‌آل CO_2/CH_4 (محور سمت راست) برای همه نمونه‌های غشایی پلیمری خالص و ماتریس آمیخته ساخته شده

۱. قطر کینتیک مولکول CH_4 (۰/۳۸ نانومتر) بزرگ‌تر از قطر مولکول CO_2 (۰/۳۳ نانومتر) است؛ بنابراین، با افزایش بارگذاری ذرات متخلخل کربن فعال در غشا، تراوایی برای مولکول‌های کوچک‌تر CO_2 در مقایسه با مولکول‌های بزرگ‌تر CH_4 در داخل منافذ کربن فعال

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت یا بار کربن فعال در ماتریس PES، تراوایی CO_2 و CH_4 در تمام غشاهای ساخته‌شده به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش برای CO_2 نسبت به CH_4 بیشتر است. دلایل این رفتار را می‌توان به موارد زیر نسبت داد:

آسان تر می‌شود. علاوه بر این، ساختار چهاروجهی مولکول CH_4 حجم بیشتری نسبت به ساختار خطی CO_2 اشغال می‌کند که موجب کندتر شدن حرکت مولکول‌های متان نسبت به دی‌اکسید کربن در غشا می‌شود [۲۲،۲۳].

۲. تمایل ذرات کربن فعال (AC) برای جذب و تعامل با CO_2 بیشتر از CH_4 است. این رفتار عمدتاً به دلیل گرمای ایزواستریک جذب بالای CO_2 می‌باشد که نرخ نفوذ پایین‌تر آن را نسبت به CH_4 جبران می‌کند و موجب افزایش ظرفیت جذب در غشاهایی می‌شود که بارگذاری بالاتری از AC دارند [۲۴].

۳. در حضور حفره‌های میکروسایز و نقص‌های احتمالی در سطح مشترک ذره-پلیمر، این حفره‌ها مسیر عبور مولکول‌های کوچک‌تر را تسهیل می‌کنند. با توجه به اینکه آزمایش‌های تراوش پذیری بر اساس جریان گاز خالص انجام شده است، اثر غلظت و رقابت بین مولکول‌ها در فرآیند تراوش نادیده گرفته می‌شود [۲۵].

بهبود جداسازی ناشی از ترکیبی از اثر غربال مولکولی و تغییرات خواص سطحی و تراوایی ماتریس است. ذرات کربن فعال با منافذ کنترل‌شده مسیرهای نفوذ انتخابی ایجاد کرده و توزیع یکنواخت آن‌ها در ماتریس پلیمر، سطح فعال، تخلخل و تراوایی را افزایش می‌دهد که جذب، تعامل مولکولی و نفوذپذیری غشا را بهبود می‌بخشد [۲۴]. نکته مهم دیگری که از این شکل قابل استخراج است، این است که با افزایش بار ذرات کربن فعال در غشای PES، تراوایی هر دو گاز CO_2 و CH_4 به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد در حالی که انتخاب پذیری کاهش می‌یابد. افت عملکرد جداسازی CO_2/CH_4 با افزایش بارگذاری کربن فعال، اساساً با اختلال در مکانیسم حلالیت-نفوذ که مکانیسم غالب انتقال گاز در غشاهای پلیمری می‌باشد، مرتبط است. در این مدل، تراوش پذیری یک گاز به‌عنوان حاصل‌ضرب ضریب نفوذ در ضریب حلالیت آن گاز در ماتریس غشا تعریف می‌شود. افزودن کربن فعال به پلیمر در ابتدا به دلیل مساحت سطح بالا و ساختار ریزمتخلخل، جذب و حلالیت CO_2 را افزایش می‌دهد و در نتیجه گزینش‌پذیری غشا را بهبود می‌بخشد. با این حال، هنگامی که بارگذاری به‌طور صعودی افزایش یابد، مجموعه‌ای از عوامل ظاهر می‌شوند که عملکرد جداسازی را به‌طور قابل‌توجهی به خطر می‌اندازند.

برخی مطالعات اخیر تأیید کرده‌اند که بارگذاری بیش از حد کربن فعال منجر به تجمع ذرات و پراکندگی ضعیف در ماتریس پلیمر می‌شود و در نتیجه ایجاد حفره‌های غیرانتخابی و نقص‌های سطحی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. این نقص‌ها به‌عنوان مسیرهای میانبر برای متان عمل می‌کنند و توانایی غشا را در جداسازی مؤثر بین CO_2 و CH_4 کاهش می‌دهند حسن و کوروناس [۲۶] تأکید کردند که ناسازگاری بین سطحی و تجمع، چالش‌های عمده‌ای در غشاهای ماتریس مخلوط هستند، به‌ویژه زمانی که محتوای پرکننده زیاد باشد و منجر به کاهش گزینش‌پذیری باوجود افزایش تراوش پذیری شود. علاوه بر این، اشباع مکان‌های جذب به یک عامل محدودکننده تبدیل می‌شود. در حالی که کربن فعال میل ترکیبی زیادی با CO_2 دارد، ظرفیت جذب آن در بارگذاری‌های بالا ثابت می‌ماند و پرکننده اضافی به جذب بیشتر CO_2 کمکی نمی‌کند. در عوض، مانع تحرک زنجیره پلیمری شده و پیچ و خم مسیر انتشار را افزایش می‌دهد. واسیلیو و همکارانش نشان دادند که پرکننده‌های مبتنی بر نانوکربن، از جمله نانولوله‌های کربنی و نانوپلاکت‌های گرافن، به دلیل همین اثرات اشباع و اختلالات ساختاری، در بارگذاری‌های بالا، بازده نزولی نشان می‌دهند [۲۷]. نکته مهم دیگر، تغییر در رفتار انتقال است. در بارگذاری‌های متوسط کربن فعال، انتقال CO_2 از افزایش حلالیت و انتقال تسهیل‌شده از طریق ریزمنافذ سود می‌برد. با این حال، در بارگذاری‌های بالاتر، رفتار گاز تراوایی غشا ممکن است از مکانیسم حلالیت-نفوذ به مکانیسم جریان ناسن یا حتی جریان ویسکوز که گزینش‌پذیری کمتری دارند، تغییر کند. گارسیا و همکارانش این تغییر را در غشاهای ماتریس آمیخته بر پایه PVC مشاهده کردند که در آن محتوای بالای کربن فعال منجر به اختلال در مکانیسم‌های انتقال انتخابی شد [۲۸]. این موضوع توسط وانگ و همکارانش نیز تأیید شد که نشان دادند عملکرد غشاهای ماتریس آمیخته به پراکندگی پرکننده و مورفولوژی سطح مشترک بسیار حساس است. کار آن‌ها بر روی چارچوب‌های آلی پیوند هیدروژنی نشان داد که پراکندگی یکنواخت و اندازه منافذ کنترل شده برای حفظ گزینش‌پذیری بالای CO_2/CH_4 ضروری است که این شروط هنگام بارگذاری بیش از حد کربن فعال به خطر می‌افتند [۲۹]. به‌طور مشابه، توره-سلیزابال و همکارانش دریافتند که



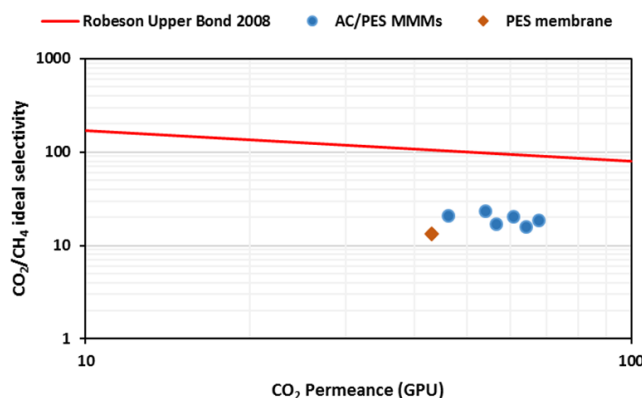
جدول ۲: خطاهای اندازه‌گیری تراوایی‌های گازهای CO_2 و CH_4 عبوری از غشاهای ساخته شده

نمونه غشا	تراوایی دی اکسید کربن (GPU)	تراوایی متان (GPU)
AP-K-0.5	53.9±4.2	2.29±0.22
AP-K-1	60.8±5.1	2.98±0.24
AP-K-2	67.5±5.3	3.56±0.31
AP-Zn-0.5	46.12±4.7	2.19±0.22
AP-Zn-1	56.5±4.5	3.28±0.28
AP-Zn-2	64.1±5.9	3.97±0.26
PES	43±3.9	3.20±0.19

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، محاسبه خطاهای اندازه‌گیری تراوایی‌ها نشان می‌دهد در عمده نمونه‌ها اندازه‌گیری‌ها با خطای زیر ۱۰ درصد انجام شده است که برای آزمایش‌های تراوایی مقدار منطقی و قابل قبولی محسوب می‌گردد. نکته دیگر اینکه، عملکرد جداسازی تمامی غشاهای ماتریس آمیخته ساخته‌شده در این مطالعه، هم از نظر تراوایی و هم انتخاب‌پذیری، بهتر از غشای خالص PES بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که افزودن مقادیر کم کربن فعال می‌تواند به بهبود عملکرد جداسازی غشاهای خالص پلیمری منجر شود. میزان بهبود قابلیت جداسازی غشاهای ماتریس آمیخته نسبت به غشای خالص PES در نمودار روبسون قابل ارزیابی است. نمودار روبسون برای جداسازی CO_2/CH_4 [۲۷،۲۸] همراه با عملکرد غشاهای ساخته‌شده در این مطالعه در (شکل ۱۱) ارائه شده است.

در حالی که غشاهای ماتریس آمیخته بازیابی CO_2 را در بارگذاری‌های پرکننده متوسط افزایش می‌دهند، افزودن بیش از حد افزودنی‌های متخلخل منجر به تورم و کاهش استحکام مکانیکی می‌شود و در نهایت عملکرد جداسازی را مختل می‌کند [۳۰]. کیامهر و همکارانش همچنین مشاهده کردند که افزایش محتوای پرکننده در غشاهای ماتریس آمیخته مبتنی بر PES به دلیل محدودیت‌های ساختاری و انتقال ذکر شده، منجر به کاهش فاکتورهای جداسازی CO_2/CH_4 می‌شود [۳۱]. جانالانگدا و کونچارام با نشان دادن اینکه پرکننده‌های مبتنی بر ایندیوم در غشاهای پلی‌سولفون که در آن بارگذاری بیش از حد پرکننده، یکپارچگی سطح مشترک و گزینش‌پذیری را به خطر می‌اندازد، این موضوع را بیشتر تأیید کردند [۳۲]. در نتیجه، کاهش عملکرد جداسازی CO_2/CH_4 با افزایش بارگذاری کربن فعال، نتیجه اختلالات متعدد در مکانیسم‌های انتقال گاز، از جمله نقص‌های ناشی از تجمع، اشباع مکان‌های جذب، کاهش تحرک زنجیره پلیمری و افزایش پیچ‌خوردگی مسیر انتشار است. این اثرات در مجموع مدل حلالیت-نفوذ را تضعیف کرده و گزینش‌پذیری غشا را کاهش می‌دهند؛ بنابراین، می‌توان گفت که افزایش غلظت کربن فعال اثر دوگانه‌ای بر عملکرد جداسازی دارد: افزایش تراوایی گاز همراه با کاهش انتخاب‌پذیری. تشخیص اینکه کدام غشا عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد، از طریق مقایسه با نمودار روبسون انجام خواهد شد.

با توجه به تکرار سه گانه تست‌های تراوایی برای هر یک از غشاها، خطای اندازه‌گیری برای تراوایی‌های اندازه‌گیری شده CO_2 و CH_4 محاسبه و در (جدول ۲) ارائه شده است.



شکل ۱۱: عملکرد جداسازی CO_2/CH_4 کلیه غشاهای ماتریس آمیخته AC/PES و غشای خالص PES ساخته شده در این کار در مقایسه با حد بالای روبسون

انتخاب پذیری CO_2/CH_4 کاهش می‌یابد که مطابق روند خط روبسوسن است. در عمل، اقداماتی که به بهبود تراوایی گازها منجر می‌شوند، به‌طور طبیعی باعث کاهش انتخاب پذیری نیز می‌شوند؛ پدیده‌ای قابل انتظار و طبیعی در عملکرد غشاهای ماتریس آمیخته محسوب می‌شود.

مقایسه عملکرد یکی از نمونه‌های غشای ساخته شده در این کار که دارای بالاترین انتخاب پذیری و در عین حال کمترین تراوش پذیری گازهاست، با نتایج کار سایر محققین که بر روی غشاهای ماتریس آمیخته بر پایه PES کار می‌کردند که در (جدول ۳) آمده است نشان می‌دهد که غشاهای ساخته شده در این کار از لحاظ تراوش پذیری هر دو گاز دی‌اکسید کربن و متان در محدوده قابل قبولی قرار دارند و با اینکه کارهایی مشاهده می‌شود که تراوایی بسیار بالاتری در CO_2 از غشای کار ما را بروز دادند، اما این کارها انگشت شمار می‌باشند و داده‌های آن‌ها با توجه به مقادیر بسیار بالای انتخاب پذیری‌های گزارش شده قابل تردید می‌باشد. می‌توان در مجموع از بررسی (جدول ۳) این نتیجه‌گیری را کرد که غشای ما در مقایسه با سایر کارهای انجام شده روی PES به‌عنوان پایه غشاهای ماتریس آمیخته تراوایی قابل قبول و انتخاب پذیری بالایی را نشان می‌دهد.

حد بالای نمودار روبسوسن نشان‌دهنده این است که غشاهای ماتریس آمیخته‌ای که عملکرد آن‌ها نزدیک به این خط و حتی در برخی موارد بالاتر از آن باشد، قابلیت مطالعات گسترده‌تر را داشته و می‌توانند توانایی جداسازی فراتر از معمول ارائه کنند. این حد بالا بر اساس بررسی و تحلیل تعداد زیادی داده آزمایشگاهی تعیین شده و نهایتاً از طریق یک رابطه نیمه‌تجربی ارائه شده است. لازم به ذکر است که عملکرد اکثر غشاهای پلیمری در زیر این خط قرار دارد و تنها برخی غشاهای معدنی و ماتریس آمیخته در شرایط خاص ممکن است به این حد نزدیک شده یا کمی از آن عبور کنند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تمامی غشاهای ساخته‌شده در این مطالعه عملکردی زیر خط روبسوسن ارائه می‌دهند. این امر با توجه به استفاده از ماده معدنی بسیار ارزان کربن فعال با سطح ویژه و ظرفیت جذب عمدتاً کم نسبت به جاذب‌های پیشرفته‌تر مانند MOFها، زئولیت‌ها یا CNT ها قابل پیش‌بینی بود. با این حال، عملکرد غشاهای ماتریس آمیخته AC/PES نسبت به غشای PES خالص بهتر بوده و به خط روبسوسن نزدیک‌تر است که نشان‌دهنده موفقیت در ساخت غشای ماتریس آمیخته است. نکته قابل توجه دیگر این است که همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش تراوایی CO_2 .

جدول ۳: مقایسه عملکرد نمونه غشای کار حال حاضر با کارهای مشابه سایر محققین در جداسازی CO_2/CH_4

مرجع	گزینش پذیری CO_2/CH_4	تراوش پذیری CO_2 (GPU)	تراوش پذیری CH_4 (GPU)	ترکیب غشای ماتریس آمیخته	مطالعه
[۳۱]	۸/۳۶	۸۵/۳	۱۰/۲	PES/SAPO-34/APMDES	کیامهر و همکاران (۲۰۲۲)
[۳۲]	۷۵/۲۷	۱۳۲/۴۷	۱/۷۶	PES/PVA/CMS (80/20 blend, 20% CMS)	فرنام و همکاران (۲۰۲۱)
[۳۴]	۸۹/۷	حدود ۱۸۰	حدود ۲	PES/SAPO-34 + ChCl-Glycerol (5 wt%)	کاردوسو و همکاران (۲۰۲۴)
[۳۰]	۸-۱۲	۶۰-۷۰	۵-۸	IL-CS/AM-4/PES composite	توره-سلیزابال و همکاران (۲۰۲۲)
[۵۰]	۱۵/۸۳	۰/۷۶	۰/۰۵	PES/HNT + PDMS coating (3 wt%)	نیام و همکاران (۲۰۲۵)
	۲۳/۵۴	۵۳/۹	۲/۲۹	AC(KOH)/PES (0.5 g AC in PES)	مطالعه کنونی

گزینش پذیرترین نمونه غشایی (AP-K-0.5) انجام پذیرفت. بدین صورت که فشار خوراک از کپسول گاز نیتروژن به ترتیب از ۲ به ۵، ۱۰ و ۱۵ بار فشار افزایش یافت. سپس فشار مکانیکی روی غشا نیز به تدریج از ۲ تا ۸ بار اعمال گردید پس از اعمال فشار مکانیکی، تست تراوایی نیتروژن برای

۹. مقاومت در برابر فشار مکانیکی و فشار ترمودینامیکی

به‌منظور بررسی مقاومت مکانیکی غشاهای در برابر اعمال فشار بالا که در کاربردهای صنعتی اهمیت بسیار بالایی دارد، دو تست اعمال فشار ترمودینامیکی خوراک گازی و همچنین اعمال فشار مکانیکی توسط دستگاه پرس مکانیکی بر روی



بررسی صحت غشا انجام گرفت. تست‌های تراوایی در حین تست فشار ترمودینامیکی و پس از تست فشار مکانیکی نشان دهنده تأثیر فشار بر ساختار غشا می‌باشد که نتایج آن در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۴: نتایج عملکرد غشا حین و پس از تست‌های فشار ترمودینامیکی و مکانیکی بر روی نمونه غشایی AP-K-0.5

فشار ترمودینامیکی (bar)	تراوایی نیتروژن در فشار ترمودینامیکی (bar)	فشار مکانیکی (bar)	تراوایی نیتروژن در فشار ۲ bar (GPU)
۲	۵/۷	۲	۵/۷
۵	۹/۸	۴	۸/۴
۱۰	۱۵/۴	۶	پارگی غشا
۱۵	پارگی غشا	۸	پارگی غشا

همان‌طور که در (جدول ۴) مشاهده می‌شود، نمونه AP-K-0.5 در حین اعمال فشار ترمودینامیکی خوراک توسط گاز نیتروژن افزایش تراوایی را تا فشار ۱۰ بار تقریباً به صورت خطی تجربه می‌کند. این افزایش فشار باعث افزایش نفوذ داخل حفره‌ای و مهم‌تر از این افزایش حلالیت گاز در غشا طبق مکانیسم حلالیت-نفوذ می‌شود که نتیجه آن افزایش نهایی تراوایی می‌باشد؛ اما با افزایش فشار خوراک به ۱۵ بار تراوایی نیتروژن به شدت افزایش می‌یابد که قابل اندازه‌گیری توسط فلومتر حبابی نمی‌باشد این امر تنها به یک دلیل اتفاق می‌افتد و آن ایجاد حفره بزرگ در سطح غشا و یا پارگی سطح غشا در اثر فشار غیرقابل تحمل می‌باشد. نتیجه تست فشار مکانیکی اما متفاوت می‌باشد همان‌طور که در جدول دیده می‌شود تا فشار ۴ بار غشا مقاومت مناسبی را در برابر فشار نشان می‌دهد که در تست تراوایی قابل رؤیت است اما بعد از اعمال فشار مکانیکی به میزان ۶ بار و بالاتر افزایش شدید تراوایی غیرقابل اندازه‌گیری مشاهده شد که دلالت بر پارگی یا سوراخ شدگی غشا دارد. دلیل این امر این است که افزایش فشار مکانیکی روی غشا باعث فشردگی ذرات کربن فعال در ماتریس PES شده و این فشردگی باعث آسیب زدن ذرات به ماتریس پلیمر و زنجیره‌های پلیمری مجاور ذرات می‌شود که مقاومت مکانیکی غشا را به شدت کاهش می‌دهد.

۱۰. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور ارتقای ویژگی‌های ساختاری و عملکردی کربن فعال، فرآیند فعال‌سازی شیمیایی با استفاده از عوامل فعال‌ساز $ZnCl_2$ و KOH انجام شد. این فرآیند موجب کاهش محسوس اندازه ذرات اولیه، افزایش تخلخل و ایجاد توزیع یکنواخت‌تر در ساختار کربن گردید. در ادامه،

غشاهای ماتریس آمیخته کربن فعال/پلی اتر سولفون (PES) به‌عنوان سامانه‌ای نوین برای جداسازی گازها سنتز و بررسی شدند. آنالیز FTIR حضور گروه‌های عاملی مشخص ناشی از فرآیند فعال‌سازی را تأیید کرد و بیانگر تشبیت موفق کربن فعال درون ماتریس پلیمری بود. همچنین، تصاویر SEM نشان دادند که ضخامت لایه PES نسبت به لایه پلی‌استر غیربافته کمتر بوده و این امر سبب کاهش مقاومت در برابر انتقال گاز گردید. نتایج تست‌های تراوایی نشان داد که افزایش درصد کربن فعال در ساختار غشا، نفوذپذیری گازهای CO_2 و CH_4 را بهبود می‌بخشد، هرچند انتخاب‌پذیری CO_2/CH_4 کاهش می‌یابد. در مقابل، کاهش میزان کربن فعال موجب بهبود انتخاب‌پذیری گردید که نشان‌دهنده یک رابطه معکوس میان تراوایی و انتخاب‌پذیری است. در مجموع، تمامی غشاهای ماتریس آمیخته عملکردی برتر از غشای خالص PES در جداسازی CO_2/CH_4 از خود نشان دادند. اگرچه مقادیر به‌دست‌آمده اندکی پایین‌تر از حد بالای رابسون قرار گرفت، اما نزدیکی نتایج به این مرز عملکردی، بیانگر کارایی مطلوب غشاهای سنتز شده است. این مسئله با توجه به سطح ویژه محدود کربن فعال نسبت به جاذب‌های پیشرفته‌تری مانند زئولیت‌ها، چارچوب‌های آلی‌فلزی (MOFs) و چارچوب‌های آلی کووالانسی (COFs)، کاملاً منطقی و قابل انتظار ارزیابی می‌شود. این پژوهش در مقیاس آزمایشگاهی نتایج قابل قبولی از خود نشان داد اما در مقیاس نیمه‌صنعتی و صنعتی به علت اینکه ساختار ماژول غشایی باید تغییر کند غشاها به‌صورت حلزونی یا فیبر توخالی ساخته شوند شاید پوشش دهی پایه غشا به‌صورت مطلوب انجام نشود که نیاز به آزمون‌های نیمه‌صنعتی دارد. همچنین پخش‌شدگی ذرات با توجه به اندازه ذرات نسبتاً درشت کربن فعال نسبت به سایر جاذب‌ها نانو سائز مانند MOF یا

- [6]. M. Chen, J. Zhou, J. Ma, W. Zheng, G. Dong, X. Li, Z. Tian, Y. Zhang, J. Wang, Y. Wang, Merging polymers of intrinsic microporosity and porous carbon-based zinc oxide composites in novel mixed matrix membranes for efficient gas separation, *Green Energy Environ.* 10 (2025) 203.
- نانولوله‌های کربنی یا ژئولیت‌ها و غیره یک معضل جدی در ساخت غشا در مقیاس صنعتی می‌باشد مخصوصاً هنگامی که غلظت کربن فعال قرار باشد افزایش یابد. علاوه بر این موارد مقاومت مکانیکی غشاهای ساخته شده در این کار در مقیاس آزمایشگاهی در برابر فشار خوراک حدوداً ۱۰ بار می‌باشد که نیاز است برای کاربردهای صنعتی بهبود یابد.

مراجع:

- [7]. M.K. Uddin, N.N. Abd Malek, A.H. Jawad, S. Sabar, Pyrolysis of rubber seed pericarp biomass treated with sulfuric acid for the adsorption of crystal violet and methylene green dyes: an optimized process, *Int. J. Phytoremediation* 25 (2023) 393.
- [8]. Q. Zhang, S. Li, C. Wang, H.-C. Chang, R. Guo, Carbon nanotube-based mixed-matrix membranes with supramolecularly engineered interface for enhanced gas separation performance, *J. Memb. Sci.* 598 (2020) 117794.
- [9]. M. Lewoyehu, Comprehensive review on synthesis and application of activated carbon from agricultural residues for the remediation of venomous pollutants in wastewater, *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 159 (2021) 105279.
- [10]. M.S. Muzarpar, A.M. Leman, K.A. Rahman, Z. Shayfull, A.R. Irfan, Exploration sustainable base material for activated carbon production using agriculture waste as raw materials: a review, in: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, IOP Publishing, 2020: p. 12022.
- [11]. Z. Tian, D. Li, W. Zheng, Q. Chang, Y. Sang, F. Lai, J. Wang, Y. Zhang, T. Liu, M. Antonietti, Heteroatom-doped noble carbon-tailored mixed matrix membranes with ultrapermeability for efficient CO₂ separation, *Mater. Horizons* 10 (2023) 3660.
- [12]. A. Jomekian, B. Bazooyar, S.A.A. Mansoori, The Experimental, Technical,
- [1]. M.I.F. Zainuddin, A.L. Ahmad, M.M.H. Shah Buddin, Polydimethylsiloxane/magnesium oxide nanosheet mixed matrix membrane for CO₂ separation application, *Membranes (Basel)*. 13 (2023) 337.
- [2]. R. Mahboubi, E. Joudaki, R.M. Behbahani, N. Azizi, Enhancing CO₂/(light gases) separation performance of Pebax-based mixed-matrix membranes by [BMIM][AC] ionic liquid, *Mater. Today Commun.* 36 (2023) 106542.
- [3]. M.S. Maleh, A. Bahrami, M.S.S. Sadeghian, H. Asadimanesh, M. Sadrzadeh, A comprehensive review on two-dimensional nanomaterials-mixed matrix membranes for sustainable CO₂ separation: from molecular engineering design to efficient modification strategies, *J. Ind. Eng. Chem.* (2025).
- [4]. D. Borah, G. Hazarika, A. Gogoi, S. Goswami, S. V Sawake, D. Yadav, S. Karki, M.B. Gohain, L.R. Sahu, P.G. Ingole, Polymeric membranes for sustainable gas separation: A comprehensive review with challenges, innovations and future perspectives, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 219 (2025) 115868.
- [5]. H.P. Thi, M.V. Nguyen, Removal of toxic pollutants released from plastic sources using activated carbon derived from agricultural waste, *Process Saf. Environ. Prot.* (2025) 107610.



- [19]. V. Gómez-Serrano, M. Adame-Pereira, M. Alexandre-Franco, C. Fernández-González, Adsorption of bisphenol A by activated carbon developed from PET waste by KOH activation, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28 (2021) 24342.
- [20]. S.F. Abdellah Ali, L.A. William, E.A. Fadl, Cellulose acetate, cellulose acetate propionate and cellulose acetate butyrate membranes for water desalination applications, *Cellulose* 27 (2020) 9525.
- [21]. R.I. Gaber, A.H. Konsowa, M.G. Eloffy, E.A. Fadl, S.H. Kandil, The effect of coagulation time on the performance of thin film composite reverse osmosis membrane supported on nonwoven polyester fabric, *Desalin. Water Treat.* 147 (2019) 38.
- [22]. P.F. Zito, A. Caravella, A. Brunetti, E. Drioli, G. Barbieri, Knudsen and surface diffusion competing for gas permeation inside silicalite membranes, *J. Memb. Sci.* 523 (2017) 456.
- [23]. Y. Yoshimoto, Y. Tomita, K. Sato, S. Higashi, M. Yamato, S. Takagi, H. Kawakami, I. Kinefuchi, Gas Adsorption and Diffusion Behaviors in Interfacial Systems Composed of a Polymer of Intrinsic Microporosity and Amorphous Silica: A Molecular Simulation Study, *Langmuir* 38 (2022) 7567.
- [24]. A.A. Abd, M.R. Othman, J. Kim, A review on application of activated carbons for carbon dioxide capture: present performance, preparation, and surface modification for further improvement, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28 (2021) 43329.
- [25]. G.H. Teoh, P.C. Tan, A.L. Ahmad, S.C. Low, Analysis of organic-inorganic compatibility to synthesis defect free composite membrane: A review, *J. Membr. Sci. Res.* 7 (2021) 29.
- and Economical Evaluations of Green Fabricated Activated Carbon/PVA Mixed Matrix Membrane for Enhanced CO₂/CH₄ Separation, *J. Membr. Sci. Res.* 9 (2023) 563685.
- [13]. Z. Tian, S. Wang, Y. Wang, X. Ma, K. Cao, D. Peng, X. Wu, H. Wu, Z. Jiang, Enhanced gas separation performance of mixed matrix membranes from graphitic carbon nitride nanosheets and polymers of intrinsic microporosity, *J. Memb. Sci.* 514 (2016) 15.
- [14]. M.R.A. Hamid, H.K. Jeong, Recent advances on mixed-matrix membranes for gas separation: Opportunities and engineering challenges, *Korean J. Chem. Eng.* 35 (2018) 1577.
- [15]. J. Choi, K. Ideta, H. Yi, T. Kato, K. Saito, H. Watanabe, K. Nakabayashi, J. Miyawaki, Y.A. Kim, S.-H. Yoon, Marine biomass-derived activated carbon as an electrode material for electric double-layer capacitors, *Carbon Lett.* 35 (2025) 1221.
- [16]. W.J. Lee, P.S. Goh, W.J. Lau, A.F. Ismail, N. Hilal, Green approaches for sustainable development of liquid separation membrane, *Membranes (Basel)*. 11 (2021) 235.
- [17]. A. Jomekian, B. Bazooyar, R.M. Behbahani, T. Mohammadi, A. Kargari, Ionic liquid-modified Pebax® 1657 membrane filled by ZIF-8 particles for separation of CO₂ from CH₄, N₂ and H₂, *J. Memb. Sci.* 524 (2017) 652.
- [18]. A. Jomekian, R.M. Behbahani, T. Mohammadi, A. Kargari, Innovative layer by layer and continuous growth methods for synthesis of ZIF-8 membrane on porous polymeric support using poly (ether-block-amide) as structure directing agent for gas separation, *Microporous Mesoporous Mater.* 234 (2016) 43.



- (2021).
- [34]. J.S. Cardoso, Z. Lin, P. Brito, L.M. Gando-Ferreira, Enhancing CO₂/N₂ and CO₂/CH₄ Separation Properties of PES/SAPO-34 Membranes Using Choline Chloride-Based Deep Eutectic Solvents as Additives, Membranes (Basel). 14 (2024) 230.
- [35]. N.N. Niam, S.M. Anissuzaman, C.K. Chiam, M. Sundang, R.F. Mansa, A.R. Razali, N.M. Ismail, Effect of Coating Concentration on Gas Separation Performance of Polysulfone Mixed Matrix Membrane for Biomethane Recovery from Wastewater, J. Appl. Membr. Sci. Technol. 29 (2025) 99.
- [26]. M.R. Hasan, J. Coronas, How Can the Filler-Polymer Interaction in Mixed Matrix Membranes Be Enhanced?, Chempluschem 89 (2024) 202400456.
- [27]. A.N. Vasileiou, G. V Theodorakopoulos, D.S. Karousos, M. Bouroushian, A.A. Sapalidis, E.P. Favvas, Nanocarbon-Based Mixed Matrix Pebax-1657 Flat Sheet Membranes for CO₂/CH₄ Separation, Membranes (Basel). 13 (2023) 470.
- [28]. M.G. García, J. Marchese, N.A. Ochoa, High activated carbon loading mixed matrix membranes for gas separations, J. Mater. Sci. 47 (2012) 3064.
- [29]. Y. Wang, Y. Ren, Y. Cao, X. Liang, G. He, H. Ma, H. Dong, X. Fang, F. Pan, Z. Jiang, Engineering HOF-Based Mixed-Matrix Membranes for Efficient CO₂ Separation, Nano-Micro Lett. 15 (2023).
- [30]. A. Torre-Celeizabal, C. Casado-Coterillo, A. Garea, Biopolymer-Based Mixed Matrix Membranes (MMMs) for CO₂/CH₄ Separation: Experimental and Modeling Evaluation, Membranes (Basel). 12 (2022) 561.
- [31]. Y. Kiamehr, I. Naser, M. Rafizadeh, A.H. Mohammadi, Mixed matrix membranes using SAPO-34/APMDES/PES for carbon dioxide/methane separation, Iran. J. Chem. Chem. Eng. 41 (2022) 566.
- [32]. A. Jonnalagedda, B.V.R. Kuncharam, Novel mixed matrix membranes with indium-based 2D and 3D MOFs as fillers and polysulfone for CO₂/CH₄ mixed gas separation, RSC Adv. 15 (2025) 2996.
- [33]. M. Farnam, H. bin Mukhtar, A. bin Mohd Shariff, Highly permeable and selective polymeric blend mixed matrix membranes for CO₂/CH₄ separation, Chem. Pap. 75



Investigation of Natural Gas Separation Performance Using AC/PES Mixed Matrix Membrane: Laboratory Section

Saeid Khademi¹, Abolfazl Kian^{2*}, Basir Maleki³

1. M.Sc. Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Materials Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran
2. Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Materials Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran
3. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Materials Engineering, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran

ARTICLE INFO

RESEARCH ARTICLE

Article History:

Received: 18 August 2025

Revised: 03 October 2025

Accepted: 03 November 2025

Keywords:

Separation of methane and carbon dioxide

Mixed-matrix membrane

Activated carbon

Robeson diagram

ABSTRACT

The present research focused on synthesizing low-cost, efficient activated carbon from waste walnut shells and applying it in polyethersulfone (PES) mixed matrix membranes for selective CO₂/CH₄ separation. After carbonization, walnut shells were chemically activated with ZnCl₂ and KOH. spectroscopy. The structural and chemical characteristics of the activated carbon were investigated by Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy and scanning electron microscopy (SEM), which confirmed the successful distribution of carbon particles throughout the polymer matrix. Also, the surface area and pore structure of the produced activated carbon were characterized using Brunauer-Emmett-Teller (BET). Moreover, varying amounts of activated carbon were incorporated into PES using the solution-mixing method and subsequently cast onto a polyester support via the phase inversion technique. The separation performance of the fabricated membranes was evaluated through pure gas permeability experiments. The results demonstrated that the MMMs exhibited a significant enhancement in CO₂/CH₄ separation performance compared to pristine PES membranes. Furthermore, comparison with the Robeson upper bound revealed that the MMMs approached the reported permeability-selectivity trade-off limit. Although further optimization is necessary to surpass this limit and fully maximize membrane efficiency, the outcomes clearly underscore the effectiveness of agricultural waste-derived fillers in advanced membrane design. Overall, this research demonstrates the potential of converting walnut shells into valuable activated carbon for the development of cost-effective, environmentally friendly, and high-performance mixed-matrix membranes for natural gas separation.

DOR: [20.1001.1.2508.1100.1404.05.27](https://doi.org/10.1001.1.2508.1100.1404.05.27)

How to cite this article

S. Khademi, A. Kian, B. Maleki, Investigation of Natural Gas Separation Performance Using AC/PES Mixed Matrix Membrane: Laboratory Section. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025; 12(3): 39-56. (https://ijge.irangi.org/article_735140.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: ajomekian@esfarayen.ac.ir, (A. Kian).

Available online 21 December 2025

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

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



توسعه مدل منشور پایداری انرژی: چارچوبی برای مدیریت یکپارچه زیست‌بوم انرژی

مصطفی ابراهیمی مقدم^۱، محمدمهدی نجفی^{۲*}، افشین امامی‌خواه^۳

۱. رئیس امور پژوهش و فناوری، شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران، تهران، ایران

۲. کارشناس مهندسی انرژی و کربن، شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران، تهران، ایران

۳. کارشناس امور پژوهش و فناوری، شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: m.m.najafi2024@gmail.com

مقاله‌ی مروری

صفحه ۵۷ - ۶۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱

چکیده

منابع انرژی مهم‌ترین عوامل و عناصر توسعه پایدار هستند. کشور ایران علاوه بر برخورداری از مجموع ذخایر غنی سوخت‌های فسیلی، ظرفیت فراوانی برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر دارد، اما در حوزه انرژی (برق، گاز و فراورده) دچار ناترازی شده به طوری که در فصل تابستان با کمبود برق و در پاییز و زمستان با کمبود گاز مواجه شده و اخیراً نیز وضعیت بنزین از ناترازی به کسری تبدیل شده است. در این مقاله سعی شده است تا با نگاهی جامع‌نگر در زیست‌بوم انرژی کشور، مدلی برای توسعه ساختار مناسب به منظور رفع ناترازی در ایران ارائه شود. مدل توسعه داده شده در این پژوهش برای رفع ناترازی، دارای چهار بخش اساسی حکمرانی انرژی، عرضه، تقاضا و تنوع‌گرایی بوده که به صورت وجه‌های یک منشور باهم مرتبط هستند. لازم به ذکر است قاعده این منشور که تجمیع‌کننده و منسجم‌کننده آن به شمار می‌رود، در اصل بخش حکمرانی انرژی است که مهم‌ترین بخش خواهد بود. رویکرد یکپارچه‌نگری در این مدل، انسجام‌دهنده ساختار سیاست‌گذار، تنظیم‌گری و تنظیم روابط میان بخش‌های مختلف است تا به ابعاد درگیر در ناترازی انرژی کشور بپردازد.

کلیدواژه‌ها: زیست‌بوم انرژی، منشور پایداری انرژی، ناترازی، حکمرانی انرژی

۱. مقدمه

ناترازی انرژی یکی از چالش‌های اساسی در بخش‌های انرژی ایران محسوب می‌شود که می‌تواند تأثیرات منفی اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی به همراه داشته باشد. برخورداری از منابع انرژی کافی پس از نیروی انسانی مهم‌ترین عامل در توسعه اقتصادی جوامع صنعتی است، زیرا انرژی، لازمه اساسی تداوم توسعه اقتصادی، رفاه اجتماعی، ارتقای کیفیت زندگی و امنیت اجتماعی است. در سال‌های اخیر بیشترین انرژی مصرفی در ایران از طریق سوخت‌های فسیلی تأمین شده است. با توجه به افزایش مصرف انرژی، توسعه تک‌بعدی بر مبنای گاز و همچنین وابستگی شدید برق تولیدی به گاز و فراورده، کشور ایران را با کاهش منابع فسیلی مواجه نموده است به طوری که به واسطه وابستگی ۹۵ درصدی برق تولیدی به گاز و فراورده، با چالش ناترازی انرژی مواجه شده است. بر اساس ترازنامه ۱۴۰۰، ایران





کمتر از ۰/۵ درصد انرژی عرضه شده در کشور را از منابع تجدیدپذیر تأمین می‌کند که این عدد در سطح جهانی ۱۵ درصد در سال مشابه است [۱]. عدم توسعه متوازن حامل‌ها، در کنار نبود ساختار یکپارچه‌نگر در حوزه عرضه و تقاضای انرژی در ایران، از مهم‌ترین دلایل ایجاد ناترازی انرژی است. در حوزه انرژی الزامات، قوانین و برنامه‌های اجرایی زیادی در کشور ارائه شده است که می‌توان به سیاست‌های کلی نظام در حوزه انرژی، سیاست‌های کلی اصلاح الگوی مصرف، قانون اصلاح الگوی مصرف، قانون رفع موانع تولید رقابت‌پذیر، برنامه‌های توسعه، سند ملی راهبرد انرژی و غیره اشاره کرد که حاوی بخش‌های منحصربه‌فردی در توسعه زیست‌بوم انرژی هستند، اما متأسفانه آیین‌نامه‌هایی با قابلیت اجرا برای آن‌ها تدوین نشده است. یکی از مهم‌ترین موانع موجود در جهت اجرای این قوانین نبود ساختار منسجم یکپارچه‌نگر است. تاکنون راهکارها و برنامه‌های توسعه زیادی برای رفع ناترازی انرژی در کشور ارائه شده که بیشتر آن‌ها مشتمل بر توسعه بخش‌های تولید در کنار مدیریت و بهینه‌سازی بخش‌های مصرف انرژی بوده‌اند. گروهی از اندیشمندان نیز توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر را بهترین راهکار برای رفع ناترازی می‌دانند، در صورتی که این روند تاکنون در ایران توفیق چندانی نداشته است.

در مطالعه Paramati و Gozgor در سال ۲۰۲۲ به بررسی اثر تنوع انرژی بر توسعه اقتصادی کشورهای مختلف پرداخته شده است [۲]. یافته‌ها نشان می‌دهد که اقتصادهای بزرگ با افزایش تنوع انرژی بلندمدت، رشد اقتصادی مثبتی را درک می‌کنند. با این حال، برخی کشورها به دلیل تنوع انرژی در کوتاه‌مدت، رشد اقتصادی منفی را تجربه می‌کنند. همچنین در تحقیقات Drago و Gatto ایجاد سیاست‌ها، قوانین و ساختارهای نهادی برای حفظ انرژی‌های تجدیدپذیر پراهمیت تلقی شده است، زیرا کشورهایی که به دنبال تحریک سرمایه‌گذاری‌ها و تقویت بخش انرژی خود هستند، از همین مقررات برای نیل به اهداف خود بهره می‌برند [۳]. عظیم‌زاده آرانی و همکاران تدریجی بودن روند تغییر ساختار حکمرانی انرژی و اجتناب از اقدامات کوتاه مدت را عاملی مهم در اصلاح ساختار انرژی کشور می‌دانند [۴]. تنوع تأمین انرژی با تفکری استراتژیک، منجر به افزایش انعطاف‌پذیری و سازگاری برای کشورهایی می‌شود که با چالش انرژی مواجه هستند [۵]؛ بنابراین، افزایش مصرف انرژی در جهان، تنوع در منابع انرژی و اهداف ضروری زیست‌محیطی، تعادل عرضه و تقاضای انرژی را به یک چالش بزرگ تبدیل کرده است [۶].

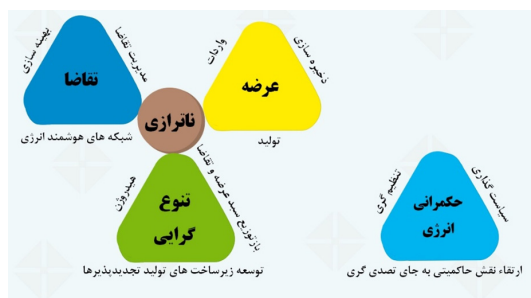
در سال‌های اخیر اصطلاحاتی همانند «انرژی هوشمند» و «سیستم‌های انرژی هوشمند» مطرح شده است تا راهگشای تحولات مقرون به صرفه، پایدار و دست‌یافتنی در آینده باشد، ولی ابتدا نیاز به زیرساخت‌های مناسب در حوزه انرژی است تا پس از آن بهره‌مندی منسجم و بهینه‌ای از راه‌حل‌ها، مدل‌ها و ساختارها در مسیر دستیابی به نوآوری‌ها به وجود آید. در این مقاله با مطالعه اسناد بالادستی، نظریات نخبگان در حوزه‌های مختلف و مرور پژوهش‌های مرتبط با حوزه انرژی تلاش بر آن شده تا مدلی جامع برای یکپارچه‌سازی ساختارهای زیست‌بوم انرژی ایران به‌منظور رفع ناترازی توسعه داده شود. در این مدل، ساختار سیاست‌گذار، تنظیم‌گری و تنظیم روابط میان بخش‌های مختلف به‌منظور مدیریت یکپارچه، به‌عنوان قاعده و نظم‌دهنده زیست‌بوم انرژی در کشور در نظر گرفته شده تا با یک دید کل‌نگر و یکپارچه‌نگر، به مدیریت بخش‌های مرتبط با عرضه، تقاضا و تنوع‌گرایی بپردازد. در اصل نوآوری این مدل به نگاه فراگیر در همه ابعاد درگیر با ناترازی انرژی برمی‌گردد.

۲. روش کار

مطابق آمارهای موجود، مقدار کمبود برق در تابستان و ساعات پیک مصرف تقریباً ۱۸ درصد ظرفیت برق تولیدی است؛ این در حالی است که مقدار ناترازی گاز در زمستان تقریباً ۳۶ درصد از گاز تولیدی کشور است [۷]؛ بنابراین، ناترازی گاز نسبت به ظرفیت تولیدی در وضعیت وخیم‌تری قرار دارد. در حوزه فرآورده نیز کمبود در تأمین بنزین مورد نیاز وجود دارد.

برای رفع ناترازی‌ها لازم است نگاهی به زیست‌بوم انرژی کشور داشت تا با تفکیک بخش‌های مختلف درگیر در بخش‌های عرضه و تقاضا، ملزومات، راهبردها و اقدامات اجرایی آن‌ها را به‌صورت جداگانه ارزیابی نمود. بدین منظور، در دید کلان، عرضه انرژی شامل سه حوزه تولید، واردات و ذخیره‌سازی خواهد بود. بخش تقاضا نیز شامل مدیریت مصرف، بهینه‌سازی مصرف و شبکه‌های هوشمند است. با توجه به ارزیابی‌های انجام شده و وابستگی شدید انرژی در کشور به گاز و فرآورده و حتی فراتر از آن، تأمین بیش از ۹۵ درصد برق کشور با کمک گاز طبیعی و فرآورده، تنوع‌گرایی سومین تنه اصلی در کنترل و رفع ناترازی خواهد بود. در کنار این موارد، به‌منظور یکپارچه‌سازی اقدامات مرتبط با رفع ناترازی و یکپارچه‌نگری در حوزه انرژی، لازم است یک ساختار منسجم بتواند سیاست‌گذاری، تنظیم‌گری و تنظیم روابط را انجام داده و با شکل‌گیری حکمرانی انرژی در کشور،

زیست‌بوم انرژی کشور به شکل یکپارچه مدیریت شود. در (شکل ۱) این ساختار نشان داده شده است.



شکل ۱: ساختار مدیریت ناترازی در زیست‌بوم انرژی

با توجه به موارد بیان شده، مدل منشور پایداری انرژی در (شکل ۲) ارائه شده است.



شکل ۲: مدل منشور پایداری انرژی

۱-۲. حکمرانی انرژی

در بخش انرژی ایران مسائل متفاوت و درهم‌تنیده‌ای همانند بروز ناترازی انرژی در سال‌های اخیر، وابستگی اقتصاد ایران به درآمدهای حاصل از حامل‌های انرژی (نفت و گاز)، یارانه انرژی، شیوه قیمت‌گذاری‌ها، پایین بودن بهره‌وری در بخش تولید، انتقال و توزیع برق، شیوه اختصاص و تأمین و مصرف حامل‌های انرژی، استفاده از موقعیت ژئوپلیتیک در پیشبرد دیپلماسی انرژی و غیره وجود دارد. هریک از این مشکلات دلایل مختص به خود را دارند، اما وقتی به صورت یکپارچه دیده می‌شوند، مشکل ساختاری موجود در بخش انرژی ایران را یادآوری می‌کنند. حکمرانی انرژی به معنای مداخله حاکمیت در اهداف، سیاست‌ها، بازیگران، نهادها و روابط بین آنان در بخش انرژی جهت کسب منفعت عمومی است [۸]. برای بررسی وضعیت حکمرانی انرژی کشورها می‌بایست چهار عنصر اصلی حکمرانی شامل پارادایم سیاستی، اهداف سیاستی، نهادهای سیاستی و ابزارهای سیاستی در آن کشور مورد بررسی قرار گیرد.

نهادهای سیاستی بخش انرژی دارای یکی از چهار نقش سیاست‌گذاری، تنظیم‌گری، تسهیل‌گری و تصدی‌گری هستند. ریشه مشکلات حکمرانی انرژی ایران در تداخل حکمرانی و تصدی‌گری، وابستگی بودجه دولت‌ها به درآمدهای حاصل از انرژی، عدم شفافیت و نبود نظام جامع اطلاعات انرژی، نبود سیاست‌های جامع بخش انرژی و نبود سیاست‌گذار و تنظیم‌گر کارآمد انرژی خلاصه می‌شود [۹]. از این رو باید حکمرانی انرژی را در سه عنصر سیاست‌گذاری، تنظیم‌گری و ارتقاء نقش حاکمیتی بررسی نمود.

۱-۱-۲. سیاست‌گذاری

با توجه به شرایط کنونی زیست‌بوم انرژی کشور که در آن بیش از ۹۸ درصد عرضه اولیه و بیش از ۸۸ درصد مصرف نهایی انرژی کشور توسط وزارت نفت عرضه می‌شود، همچنین با در نظر گرفتن این نکته که وزارت نیرو و مجموعه‌های تولید برق در کشور، خود بزرگترین مصرف‌کننده انرژی در کشور هستند و ائتلاف روزانه انرژی در آن‌ها بیشتر از ۱ میلیون بشکه معادل نفت خام است (سالانه بیش از ۳۸۰ میلیون بشکه معادل نفت خام)، بدیهی است این دو نهاد، در صورت سیاست‌گذاری، تمرکز بخشی محور خواهند داشت. وجود سازمان‌های متعدد در فرایند تصمیم‌سازی و تصمیم‌گیری بخش انرژی، سه نتیجه در پی داشته است:

- ناهماهنگی و ناسازگاری در سیاست‌گذاری (از دید کلان‌نگر)

- کندی تصمیم‌گیری

- عدم اصلاح و به‌روز شدن قوانین کشور در سطح کلان

در هر صورت با تعیین اهداف و سیاست‌گذاری‌ها در بخش‌های مختلف از قبیل امنیت عرضه انرژی، ذخیره‌سازی حامل‌ها، پیشرفت نیروی کار حوزه انرژی، ایجاد جذابیت سرمایه‌گذاری بخش‌های مختلف در حوزه انرژی، توسعه فناوری‌های نوین در صنایع انرژی، بازتوزیع سبب سوخت کشور و افزایش سهم تجدیدپذیرها و متنوع‌سازی سبب انرژی کشور، امکان تقویت سیاست‌گذاری در زیست‌بوم انرژی کشور و ارتقای آن‌ها با نگاهی یکپارچه‌نگر در حوزه انرژی به وجود می‌آید.

۲-۱-۲. تنظیم‌گری

هدف تنظیم‌گری برقراری تعادل و توازن است. در



شرایطی که مقادیر عرضه و مصرف حامل‌ها در فصول مختلف سال هم‌خوانی نداشته و به اصطلاح شرایط ناترازی انرژی پیش آمده است، به‌منظور ایجاد تعادل و توازن لازم است تنظیم‌گری یکپارچه انرژی برقرار شود. در (شکل ۳) موارد مرتبط با تنظیم‌گری نشان داده شده است.

اهمیت مضاعف بوده و تصدی‌گری آن دسته از وظایفی را در برمی‌گیرد که قابل‌واگذاری به مردم و بخش خصوصی باشد. با توجه به گستردگی حوزه انرژی، لازم است دولت نسبت به افزایش حاکمیت و کاهش تصدی‌گری دولتی در حوزه انرژی اقدام نماید و نقش بخش خصوصی و عموم ملت در این حوزه پررنگ‌تر شود.

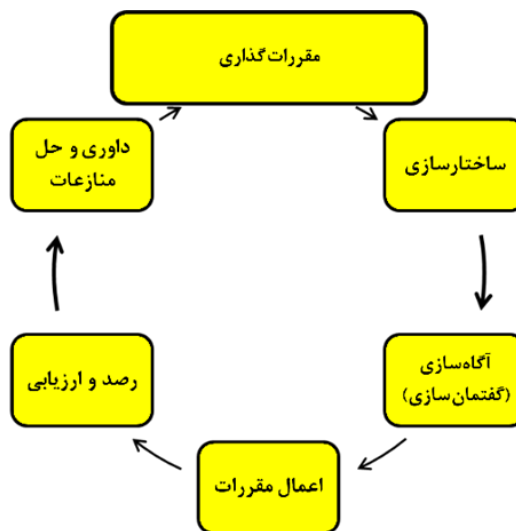
۲-۲. عرضه

بخش عرضه خود به سه زیربخش تولید، واردات و ذخیره‌سازی تقسیم می‌شود.

۲-۲-۱. تولید

با توجه به بروز کمبودها و ناترازی‌های کشور در حوزه سوخت‌های فسیلی و همچنین برق به‌عنوان حامل ثانویه، لازم است در سیاست‌گذاری برای تولید انرژی در کشور، تغییر رویکرد داشته و با نگاهی یکپارچه‌نگر در حوزه حامل‌های مورد نیاز برای مصارف بخش نهایی نسبت به سیاست‌گذاری بخش تولید و عرضه انرژی اقدام کرد. مهم‌ترین اقدامات در حوزه تولید انرژی عبارتند از:

- توسعه سامانه‌های سرچاهی به‌منظور افزایش تولید
- ایجاد جذابیت سرمایه‌گذاری به‌منظور مشارکت بخش خصوصی در بخش تولید نفت و گاز
- افزایش ظرفیت تولید نفت و گاز
- افزایش ظرفیت استخراج زغال‌سنگ حرارتی
- مدیریت منابع زیست‌توده
- ایجاد ظرفیت‌های پالایشی جدید
- افزایش ظرفیت استفاده از انرژی هسته‌ای
- همچنین افزایش سهم تجدیدپذیرها در سبد تولید برق و سبد سوخت که به سه بخش تقسیم می‌شوند:
 ۱. منابع پایدار: منابعی که تولید از آن‌ها در ساعات مختلف شبانه‌روز به‌صورت پایدار است، مانند زمین‌گرمایی، بازیافت حرارتی، زیست‌توده، توربو اکسپندر
 ۲. منابع ناپایدار: منابعی که تولید از آن‌ها در ساعات مختلف شبانه‌روز پایدار نیست و صرفاً در ساعات خاصی امکان تولید برق وجود دارد، مانند بادی، خورشیدی
 ۳. انرژی هیدروژن



شکل ۳: بخش‌های مختلف تنظیم‌گری

بر اساس تجربیات گذشته، موارد مهمی که در تنظیم‌گری انرژی نقش مهمی ایفا می‌کنند، عبارتند از:

- ایجاد رویکرد واحد و یکپارچه
- اتخاذ تدابیر لازم هنجاری و نهادی جهت تسهیل تنظیم‌گری
- مدیریت تنظیم‌گری و راهبری به سمت هدف
- تفکیک میان نهادهای متولی سیاست‌گذاری و تنظیم‌گری

با توجه به ساختار زیست‌بوم انرژی، بازیگران فعال در تنظیم‌گری، نهادهای حاکمیتی مانند وزارتخانه‌های نفت و نیرو و سازمان برنامه و بودجه، سازمان‌ها و شرکت‌های خصوصی مانند نیروگاه‌های خصوصی و همچنین مصرف‌کنندگان و عموم مردم هستند.

۲-۱-۳. ارتقاء نقش حاکمیتی به‌جای تصدی‌گری

در تمام سیستم‌ها و نظام‌های حقوقی و سیاسی دنیا، دولت‌ها دو وظیفه اصلی حاکمیتی و تصدی‌گری را بر عهده دارند که توسط نهادها و دستگاه‌های مسئول به اجرا گذاشته می‌شود. وظایف حاکمیتی از قبیل سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی، نظارت و ارزیابی به دلیل سطح و جایگاه دارای

۲-۲-۲. واردات

مهم‌ترین اقدامات در این زیربخش عبارتند از:

- سیاست‌گذاری در حوزه واردات زغال‌سنگ و توسعه نیروگاه‌های زغال‌سنگ با راندمان بالا
- استفاده از ظرفیت‌های سوآپ برای مبادله حامل‌های وارداتی با صدور خدمات فنی و مهندسی
- توسعه مدل‌های کسب و کار جدید و بهره‌مندی از ظرفیت‌های بخش خصوصی در زمینه واردات و سوآپ حامل‌ها

مهم‌ترین اقدامات در این زیربخش عبارتند از:

- سیاست‌گذاری در زمینه افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی در کشور
- توسعه مدل‌های کسب و کار جدید برای مشارکت بخش خصوصی در ذخیره‌سازی گاز و برق
- کاهش نقش تصدی‌گری بخش دولتی در ذخیره‌سازی
- توسعه فناوری‌های جدید در حوزه ذخیره‌سازی برق و گاز
- توسعه زیرساخت‌های هیدروژن

۲-۳. تقاضا

با توجه به مدل ارائه شده، این حوزه شامل سه زیربخش بهینه‌سازی، مدیریت تقاضا و توسعه شبکه‌های هوشمند انرژی است.

۲-۳-۱. بهینه‌سازی

۹۸/۵ درصد از انرژی عرضه شده در کشور را گاز و فرآورده تشکیل می‌دهد. بخش‌های نیروگاه، خانگی، صنعت و انتقال انرژی، جمعاً ۸۷٪ از گاز تولیدی کشور و بخش‌های حمل و نقل و نیروگاه جمعاً ۷۴٪ درصد از فرآورده تولیدی کشور را مصرف می‌کنند. در حالت کلی بخش‌های نیروگاه، خانگی، صنعت و حمل و نقل، ۸۲٪ درصد از کل گاز و فرآورده عرضه شده در کشور را مصرف می‌کنند. با توجه به بالا بودن مقدار مصرف انرژی به‌ویژه گاز در نیروگاه‌ها (تقریباً ۲۸٪ درصد کل انرژی عرضه شده در کشور و ۳۰٪ از کل گاز عرضه شده در کشور)، همچنین قابلیت پایش میزان هدر رفت انرژی، اجرای بهتر به دلیل تعداد کم نسبت به سایر بخش‌ها و وجود الزامات قانونی متعدد، برنامه‌ریزی برای بهینه‌سازی نیروگاه‌ها را در اولویت قرار می‌دهد.

بنابراین، بر اساس اصل پارتو، با توجه به این که در بخش تقاضا نیازمندی پنج بخش نیروگاه، خانگی، صنعت، حمل و نقل و انتقال به انرژی است که ۸۲٪ درصد از گاز و فرآورده و ۷۲٪ درصد برق عرضه شده کشور را مصرف می‌کنند، برنامه‌ریزی هدفمند تأثیر زیادی بر رفع ناترازی انرژی دارد. در (جدول ۱) سهم بخش‌های مختلف از مصرف نشان داده شده است. همچنین، حامل‌هایی که بیشترین اهمیت در هر بخش را دارند در (جدول ۲) مشخص شده‌اند.

۲-۳-۲. ذخیره‌سازی

ذخیره‌سازی انرژی یکی از مهم‌ترین موارد در رفع ناترازی انرژی است. عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی به این صورت است که در زمان‌هایی که میزان عرضه برق بیشتر از تقاضا است، مازاد تولید را ذخیره کرده و در زمانی که میزان تقاضا از عرضه بیشتر می‌شود، انرژی ذخیره شده خود را برای ایجاد تعادل در شبکه عرضه می‌کنند. ذخیره‌سازی گاز به صورت گاز طبیعی مایع (LNG)، گاز طبیعی جذب‌شده (ANG)، مخازن زیرزمینی (مخازن هیدروکربوری، گنبد‌های نمکی و آبخوان) از جمله روش‌های ذخیره‌سازی گاز هستند.

استفاده از باتری‌ها و پمپ کردن آب به پشت سد در نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای یکی از روش‌های ذخیره‌سازی انرژی برق است. با ظهور فناوری‌های جدید ذخیره‌سازی انرژی و حرکت جهان به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر که نیاز به ذخیره‌سازی را افزایش می‌دهد، نقش کسب‌وکارهای نوآور این حوزه نیز پررنگ‌تر خواهد شد. یکی دیگر از روش‌ها، ذخیره‌سازی گرمایی است. ذخیره‌سازی انرژی گرمایی برای تولید برق از خورشید، حتی در زمانی که خورشید نمی‌تابد، روش دیگری است. در این روش تابش خورشید در یک نقطه متمرکز می‌شود و از حرارت حاصل برای ذخیره کردن انرژی به صورت گرما در آب، نمک‌های مذاب یا مایعات استفاده می‌شود. هیدروژن به‌عنوان یک روش تولید انرژی کاربردهای رو به گسترشی دارد؛ به‌طور مثال، از برق مازاد برای تولید هیدروژن استفاده نموده و سپس آن را ذخیره کرد تا پس از آن در سلول‌های سوختی، موتورها و توربین‌های گازی برای تولید برق مورد استفاده قرار گیرد.



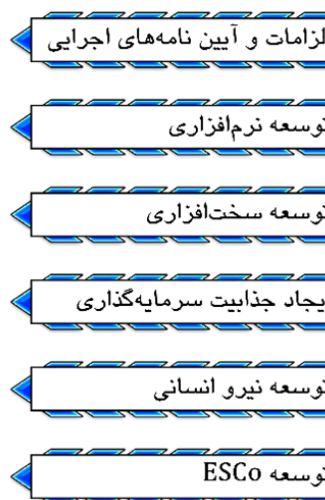
جدول ۱: سهم متقاضیان از مصرف

محل مصرف	سهم از مصرف	
	فرآورده	برق
نیروگاه	۱۹/۴	-
صنعت	۲۲/۶	۳۰
حمل و نقل	۵۵/۳	۰/۱
انتقال انرژی	۴/۸	۱۴/۱
خانگی	۴/۲	۲۷/۶
کشاورزی	۳/۷	۱۱/۹
تجاری و عمومی	۱	۱۳/۷

جدول ۲: محل استفاده حامل‌های انرژی

محل استفاده	حامل‌های انرژی			
	گاز	نیروگاه	خانگی	صنعت
انتقال انرژی				
فرآورده		حمل و نقل	نیروگاه	
برق	کشاورزی	صنعت	خانگی	انتقال انرژی و عمومی

در (شکل ۴) ابزارها و راه‌حل‌هایی قابل استفاده برای بهینه‌سازی در بخش‌های مختلف ارائه شده‌اند. شرکت‌های خدمات انرژی یا ESCO زمینه بهینه‌سازی مصرف انرژی فعالیت کرده و خدماتی مانند مدیریت انرژی، کاهش مصرف، بهره‌وری انرژی و بهینه‌سازی تجهیزات ارائه می‌دهند.



شکل ۴: ابزارهای پیشنهادی در راستای بهینه‌سازی

۲-۳-۲. مدیریت تقاضا

ناترازی انرژی ماحصل عدم هم‌خوانی عرضه و تقاضای انرژی در فصول مختلف سال است، چنان‌که برق در تابستان با کمبود و در زمستان به‌صورت مازاد وجود دارد. گاز نیز در تابستان به‌صورت وفور یافت شده و زمستان دچار کسری می‌شود. ناترازی گاز با وجود افزایش حدود ۷۰ درصدی تولید از سال ۱۳۹۲ الی ۱۴۰۰، کماکان رو به افزایش است. طی سال‌های ذکر شده، روزانه ۳۰۰ میلیون مترمکعب به ظرفیت تولید اضافه شده و اکنون ناترازی گاز در فصول سرد به روزانه ۳۰۰ میلیون مترمکعب رسیده است، یعنی برنامه‌ریزی برای ایجاد بازار مصرف گاز به اندازه دو برابر مقدار تولید بوده است. طی سال‌های مذکور، توسعه نیروگاه‌های حرارتی تقریباً ۲۰ درصد افزایش یافته است، در حالی‌که مصرف گاز در نیروگاه‌ها (به دلیل جایگزینی با فرآورده که تصمیم درستی است) دو برابر شده است.

در شرایط فعلی، توسعه پایگاه داده‌ای قوی برای پیش و مدیریت یکپارچه تولید و مصرف حامل‌ها در فصول مختلف به همراه راهکارهای زیر پیشنهادهایی برای مدیریت تقاضای انرژی هستند:

- ایجاد نهاد تنظیم‌گر مرتبط و مدیریت تولید و مصرف فعلی حامل‌های اولیه و ثانویه بر اساس ظرفیت‌های تولیدی و ترندهای موجود با اولویت ایجاد حداکثر ارزش افزوده
- اختصاص انرژی به مصرف‌کنندگان جدید توسط یک نهاد تنظیم‌گر یکپارچه‌نگر و ایجاد مبادی مصرف جدید، تخصیص سوخت بر اساس ظرفیت‌های خالی موجود و برنامه‌ریزی‌های تولید صورت‌گرفته
- کاهش سهم گاز از سبد سوخت نیروگاه‌ها از طریق جایگزینی با انرژی‌های تجدیدپذیر و استفاده حداکثری از ظرفیت‌های گاز برای توسعه پایدار
- تحدید (حد گذاری) تقاضا به‌منظور کنترل تقاضای انرژی در کشور
- کنترل تقاضا بر اساس ترازنامه‌های انرژی ماهانه و فصلی: با توجه به اینکه ناترازی گاز و برق معمولاً در فصول سرد و گرم روی می‌دهد، لازم است تقاضای انرژی در بخش‌های مختلف به‌صورت فصلی یا ماهانه پایش و کنترل شده و از ظرفیت‌های موجود در سایر فصول برای کنترل وضعیت مصرفی و شبکه سایر حامل‌ها استفاده شود
- تخصیص انرژی به مشترکین جدید با کمک اطلس انرژی و شبکه‌های هوشمند

۲-۳-۳. شبکه‌های هوشمند انرژی

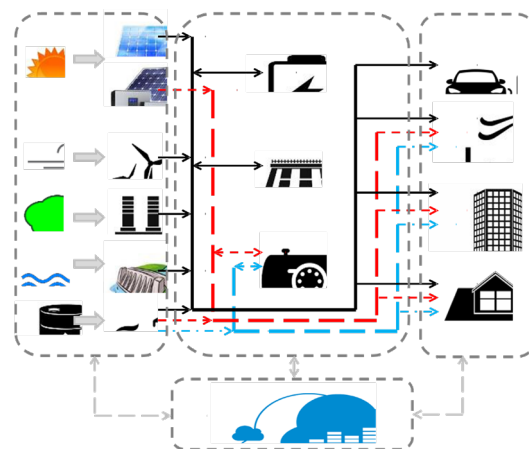
سیستم انرژی هوشمند به‌عنوان رویکردی تعریف می‌شود که در آن شبکه‌های هوشمند برق، حرارت و گاز با فناوری‌های ذخیره‌سازی ترکیب شده و برای تشخیص هم‌افزایی میان بخش‌ها به‌منظور دستیابی به راه‌حل بهینه و همچنین تمام سیستم انرژی، باهم هماهنگ می‌شوند. با در نظر گرفتن یک رویکرد منسجم برای سیستم کامل انرژی هوشمند در مقایسه با نگاه کردن به تنها یک بخش، هم‌افزایی افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، سه نگرش کلی در حوزه سیستم انرژی هوشمند وجود دارد:

۱. تأکید بر هوشمندی - در نگرش اول، به کلمه «هوشمند» تأکید شده است که بر عملکرد کنترل و مدیریت، با سطح هوشمندی بر یک سیستم انرژی تمرکز دارد. تمرکز اصلی این نگرش مبتنی بر درک سیستم انرژی هوشمند به‌عنوان «کنترل هوشمند» است.

۲. تأکید بر انرژی - در این نوع نگرش، «انرژی» هسته یک سیستم انرژی هوشمند است که بر مسیر تکامل سیستم‌های انرژی تمرکز دارد.

۳. تأکید بر سیستم - در نگرش سوم، کلمه «سیستم» به شخصیت اصلی تبدیل شده است که به ادغام سیستم‌های انرژی مختلف از دیدگاه سیستماتیک می‌پردازد.

ترکیب و پیگرندی یک سیستم انرژی هوشمند در (شکل ۵) نشان داده شده است. یک سیستم انرژی هوشمند یکپارچه معمولی به چهار بخش سیستم‌های تولید انرژی، کاربران نهایی انرژی، سیستم‌های توزیع و ذخیره انرژی و سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند تقسیم می‌شود.



شکل ۵: پیگرندی سیستم انرژی هوشمند

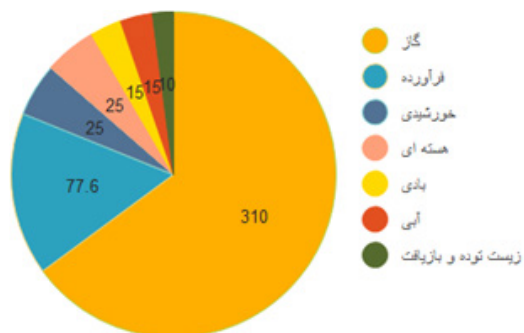
مهم‌ترین اقدامات این بخش عبارتند از:

- توسعه زیرساخت‌ها و پایگاه داده‌های قوی و کنترل هوشمند مصارف در بخش‌های مختلف (مانند پروژه هوشمندسازی در صنعت گاز و ارتباط دادن آن به مصارف برق)
- تحلیل، ارزیابی و توسعه سامانه‌های گرمایش مرکزی با کمک منابع حرارتی موجود بر اساس اطلس انرژی
- توسعه برنامه مدیریت تقاضا (DSM) در گام اول برای حامل‌های مختلف و ادغام آن‌ها برای مدیریت بهتر مصارف حامل‌ها و استفاده از حامل‌های جایگزین برای پیک‌سایبی
- الزام مجتمع و یا برج‌های مسکونی جدید به توسعه یک سیستم کنترل مرکزی مدیریت انرژی و طراحی ساختمان‌های مصرف‌کننده/ساختمان‌های با انرژی کارآمد، سازگار با شبکه و انعطاف‌پذیر انرژی
- توسعه نیروگاه‌های تولید پراکنده CHP به‌منظور افزایش انعطاف‌پذیری شبکه انرژی در نقاط مختلف
- توسعه استفاده از ماشین‌های برقی و زیرساخت‌های لازم و همچنین خودروهای دوگانه‌سوز
- توسعه زیرساخت‌های هیدروژن

۲-۴. تنوع‌گرایی سبب سوختی

با دید یکپارچه به زیست‌بوم انرژی، کمبود عرضه برق در فصل تابستان و به‌تبع آن ناترازی برق، به دلیل کاهش سطوح تولید برق در مقایسه با میزان تقاضا در دوران اوج مصرف و پیک بوده که به ظرفیت پایین نیروگاهی برمی‌گردد. بخش اعظمی از ناترازی گاز نیز ناشی از عدم ذخیره‌سازی گاز در تابستان و تخصیص آن به تولید برق بیشتر است. پس در صورت جایگزینی بخشی از گاز مورد نیاز برای تولید برق در تابستان و زمستان، با حامل انرژی دیگری به‌جز گاز و فرآورده، ضمن تأمین برق مورد نیاز، سطح ناترازی گاز کاهش می‌یابد.

ناترازی در تأمین و عرضه برق مورد نیاز در کشور، چالش‌های زیادی برای بخش‌های مختلف ایجاد کرده است، ولی وجود نیروگاه‌های گازی سیکل باز و کم‌بازده به همراه وابستگی ۷۰ درصدی برق تولیدی به گاز طبیعی و تکرار ناترازی برق و گاز در فصول مختلف، به دلیل توسعه بیش از پیش نیروگاه‌های حرارتی گازسوز است. هرچند به نظر می‌رسد این موضوع در اصل فرصتی مناسب برای گذار به سمت



شکل ۷: وضعیت پیشنهادی سبد سوخت نیروگاه

۲-۴-۱. باز توزیع سبد سوخت

بیشتر اقداماتی که باید در این حوزه اجرا شود، از جنس حکمرانی انرژی و تنظیم‌گری است که برخی از آن‌ها عبارتند از:

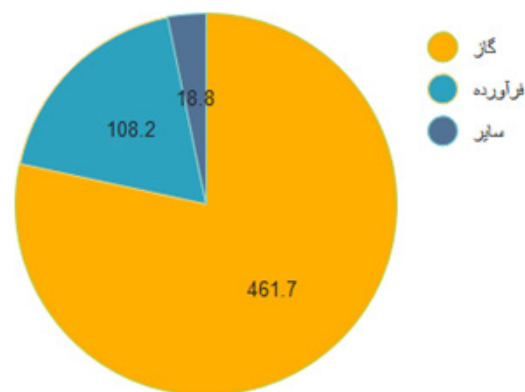
- مدیریت تقاضاهای پیش‌رو در حوزه برق با تأکید بر تولید از منابعی به غیر از فرآورده و گاز
- تأکید بر توسعه استفاده از منابع تجدیدپذیر پایدار
- توسعه زیرساخت‌های تولید و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر
- واردات حامل‌های ارزان به‌منظور کاهش سهم فرآورده و گاز در سبد سوخت نیروگاه‌ها
- تنظیم برنامه جامع مدیریت عرضه نهایی انرژی

۲-۴-۲. توسعه زیرساخت‌های توسعه تجدیدپذیرها

امروزه با افزایش هزینه سوخت‌های فسیلی و کاهش هزینه‌های نصب و راه‌اندازی نیروگاه‌های تجدیدپذیر، به‌کارگیری انرژی‌های نو و تجدیدپذیر نقش بسزایی در سبد انرژی جهان ایفا می‌کند. در دسترس بودن محدود سوخت‌های فسیلی و مشکلات انتشار گازهای گلخانه‌ای، الزامی برای بهره‌مندی از انرژی‌های تجدیدپذیر است. وفق به قانون اساسنامه سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق مصوب سال ۱۳۹۴، وظیفه ارتقاء و توسعه کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر بر عهده سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا) نهاده شده است [۱۰]. از این‌رو بخش انرژی‌های تجدیدپذیر، برخلاف سایر ۱۱ زیربخش از ۱۲ زیربخش تعریف شده برای رفع ناترازی، دارای متولی خاص است. البته شایان ذکر است در برنامه ششم توسعه، وزارت نفت و شرکت‌های تابعه نیز باید در توسعه فناوری‌های تجدیدپذیر نقش ایفا نموده و قانون‌گذار تکالیفی بر عهده آن‌ها سپرده است.

افزایش سهم تولید برق با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است. توسعه نیروگاه‌های حرارتی باهدف افزایش برق تولیدی از طریق سوخت‌های فسیلی، ذخیره‌سازی گاز و گازوئیل را در فصول سرد به‌عنوان سوخت زمستان محدود کرده (مشابه شرایط سال ۱۴۰۳ برای ذخیره گازوئیل) و به‌تبع آن تأمین سوخت مورد نیاز نیروگاه‌ها در فصول گرم نیز چالش‌هایی نظیر قطع گاز صنایع و کاهش گازوئیل بخش حمل و نقل را در پی خواهد داشت.

در ادامه به این موضوع پرداخته می‌شود که ناترازی برق، تهدید یا فرصت است. زمانی که میزان برق مورد نیاز ۲۰ هزار مگاوات بیش از عرضه آن در ساعات پیک مصرف باشد، تقریباً ۲۰ درصد باید به ظرفیت نیروگاهی برق در کشور باید افزوده شود. شاید وجود این ناترازی بهترین فرصت برای تنوع‌گرایی متوازن سبد انرژی نیروگاهی در کشور باشد. در شرایط فعلی ۹۸ درصد برق تولیدی کشور از گاز و فرآورده نفتی است. در صورتی که منابع تجدیدپذیر مانند خورشیدی، بادی، آبی، زیست‌توده، هسته‌ای، پروژه‌های بازیافت حرارت و انرژی اتلافی و یا حتی زغال‌سنگ می‌توانند ضمن تأمین برق مورد نیاز از سایر منابع و با هزینه‌هایی به‌مراتب کمتر، مشکل ناترازی گاز را نیز تا حدود زیادی کاهش دهند. با توجه به (شکل ۶) با مصرف ۴۶۱/۷ میلیون بشکه معادل نفت خام از ظرفیت گاز تولیدی و ۱۰۸/۲ میلیون بشکه معادل نفت خام از ظرفیت فرآورده تولیدی در کشور و ۱۸/۸ از سایر منابع، ۲۰۹ میلیون بشکه معادل نفت خام برق در کشور تولید می‌شود.



شکل ۶: وضعیت فعلی سبد سوخت نیروگاه

با فرض بازده‌های کنونی، برای تولید همین مقدار برق، امکان توزیع سبد سوختی نیروگاه‌ها را بر اساس (شکل ۷) بررسی نمود. در این شرایط همان برق قبلی تولید شده است، با این تفاوت که بیش از ۴۰ درصد در مصرف گاز و فرآورده صرفه‌جویی شده است.

در قانون فوق‌الذکر، منابع تجدیدپذیر انرژی شامل بادی، خورشیدی، زمین‌گرمایی، آبی کوچک (تا ده مگاوات)، دریایی و زیست‌توده یا بیومس (اجزاء قابل‌تجزیه زیستی از محصولات، پسماندها و زائدات کشاورزی همانند مواد گیاهی و دامی، جنگل‌ها و صنایع وابسته و همچنین زائدات صنعتی و شهری قابل‌تجزیه که قابلیت تولید برق، حرارت، سوخت‌های مایع، سوخت‌های گازی و انواع کاربردهای مفید شیمیایی را دارا باشد)، هیدروژنی، پیل سوختی و سایر منابع حاصل از انرژی‌های تجدید شونده و پاک در نظر گرفته است. (با توجه به میزان فراگیری در توسعه، کاربردها و حوزه مصارف و همچنین تأخیر استفاده از انرژی هیدروژنی بر سایر حامل‌های تجدیدپذیر، حامل هیدروژنی در بخش بعدی آورده شده است.)

افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، ملاحظات زیست‌محیطی، امنیت انرژی، کاربردهای پتروشیمی، پیشرفت‌های فناورانه و توجیه اقتصادی برخی از عوامل تعیین‌کننده آینده انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران هستند. در سال‌های اخیر در ایران، ضرورت قرار دادن انرژی‌های تجدیدپذیر در ترکیب انرژی کشور مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که در ایران تنها ۱ درصد از ظرفیت تولید برق از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین می‌شود. وجود منابع بزرگ نفت و گاز و پایین نگه‌داشتن قیمت انرژی باعث شده است که ایران برخلاف کشورهای پیشرفته صنعتی در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر عقب بماند.

ظرفیت نیروگاه‌های بر پایه سوخت فسیلی در کشور (گاز و فرآورده) ۷۲۷۳۷/۹ مگاوات است. ظرفیت نیروگاه هسته‌ای ۱۰۲۰ مگاوات و ظرفیت نیروگاه‌های آبی کشور نیز ۱۲۱۹۱/۵ مگاوات است. ظرفیت اسمی سایر نیروگاه‌های تجدیدپذیر به ۹۶۰/۹ مگاوات می‌رسد. مطابق برنامه ششم توسعه، دولت مکلف بود تا پایان برنامه (سال ۱۳۹۴)، سهم نیروگاه تجدیدپذیر از ظرفیت اسمی نیروگاه‌های نصب شده را به ۵ درصد و بیشتر برساند (به عبارتی ۴۳۴۵ مگاوات از کل ۸۶۹۱۰ مگاوات ظرفیت موجود مطابق ترازنامه انرژی سال ۱۴۰۰ باشد)؛ اما پس از ۶ سال از اتمام برنامه ششم توسعه، ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر در کشور به ۱/۱ درصد از ظرفیت اسمی نیروگاه‌ها رسیده است. از مهم‌ترین عوامل عدم

توسعه تجدیدپذیرها عبارتند از:

- قیمت ارزان گاز و فرآورده در کشور
- نبود دید یکپارچه در حوزه انرژی
- ضعف تنظیم‌گری
- مدل‌های کسب و کاری ضعیف و نبود جذابیت سرمایه‌گذاری
- اشغال فضای زیاد
- نبود زیرساخت‌های مناسب جهت توسعه تجدیدپذیرها
- فقدان سیستم ذخیره‌سازی و نبود زیرساخت‌های تولید باتری‌ها
- ناپایداری تولید برق در ساعات مختلف شبانه‌روز در نیروگاه‌های خورشیدی و بادی
- انحصار انرژی‌های تجدیدناپذیر

در وضعیت فعلی به نظر می‌رسد تأثیر عوامل بازدارنده بیشتر بوده و مرور روند ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های تجدیدپذیر نیز مؤید این مطلب است؛ اما این که در سال‌های آتی نیز همچنان وزن عوامل بازدارنده بر محرک‌ها پیشی بگیرد، مشخص نیست؛ به‌ویژه آن‌که تأثیرات اقتصادی، سیاسی و اجتماعی کمبود برق از یک طرف و شدت گرفتن ناترازی گاز و افت تولید این حامل از طرف دیگر به میزانی است که به نظر نمی‌رسد در طولانی مدت هم بتوان برنده این مواجهه را عوامل بازدارنده دانست.

۲-۴-۳. هیدروژن

امروزه توسعه هیدروژن به‌عنوان یکی از حامل‌های انرژی در کشورهای مختلف یکی از اولویت‌ها در تنوع‌گرایی سبد سوخت است. عمده دلایل جانمایی هیدروژن در سبد سوختی کشورها، ارزش حرارتی بالای آن (ارزش حرارتی هیدروژن سه برابر بنزین در هر واحد وزن [۱۱])، پتانسیل تولید کربن کمتر، تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی (در پیل‌های سوختی) و تفاوت آن نسبت به انرژی فسیلی است که حین احتراق هیدروژن، محصول خروجی فقط بخار آب خواهد بود. از این‌رو هیدروژن در طیف گسترده‌ای از نیازهای انرژی از تولید برق و گرما گرفته تا حمل و نقل کاربرد دارد. ولی مهم‌ترین مشکل هیدروژن این است که به‌طور طبیعی به شکل خاص خود در روی زمین وجود ندارد.

تفاوت هیدروژن با گاز طبیعی در منابع تأمین و

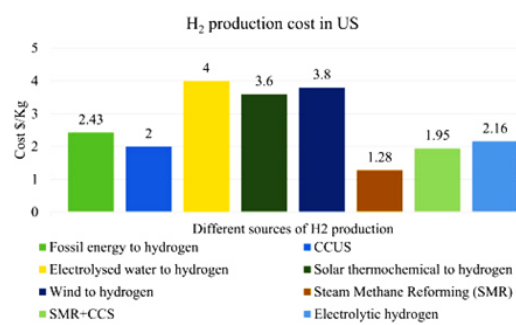


به صورت چند بعدی به آن نگاه کرد. در این پژوهش مدل توسعه داده شده برای رفع ناترازی، دارای چهار بخش اساسی حکمرانی انرژی، عرضه، تقاضا و تنوع‌گرایی بوده که به صورت وجه‌های یک منشور باهم مرتبط هستند. لازم به ذکر است قاعده این منشور که تجمیع‌کننده و منسجم‌کننده آن نیز به شمار می‌رود، در بخش اصلی آن یعنی حکمرانی انرژی است. ویژگی اصلی این مدل، یکپارچه‌نگری در همه حوزه‌ها و بخش‌های درگیر در زیست‌بوم انرژی کشور با تبیین وظایف افراد، نهادها و ذی‌نفعان مختلف در اجرایی کردن آن و جایگاه فناوری در بخش‌های مختلف است.

مراجع:

- [1]. Energy Balance Sheet for the Year 1400 (2021-2022). Office of Macro Planning for Electricity and Energy. 1402 (2023).
- [2]. Gozgor G, Paramati SR. Does energy diversification cause an economic slowdown? Evidence from a newly constructed energy diversification index. *Energy Economics*. 2022; 109:1-10.
- [3]. Worldwide interval-based composite indicator. *Energy Policy*. 2022; 167:1-13.
- [4]. Azimzadeh Arani M, Norouzi M, Parvizi J, Jahantab H. Explaining the current state of energy governance in Iran and proposing policy solutions. *The Fifth Annual Conference on Resilient Economics*. 2018.
- [5]. Lo LH. Diversity, security, and adaptability in energy systems: a comparative analysis of four countries in Asia. *World Renewable Energy Conference*. Sweden; 2011. p. 2401-2408.
- [6]. Fiorini L, Aiello M. Energy management for user's thermal and power needs: A survey. *Energy Reports*. 2019; 5:1048-1077.
- [7]. Report on the Implementation of the Budget Law for the Year 1402 (2023-

هزینه‌های تولید آن است. ارزش حرارتی هر کیلوگرم هیدروژن ۱۴۲-۱۲۰ مگاژول بوده و هزینه تولید هیدروژن بر مبنای منبع تولید آن متفاوت است [۱۲]. پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۳۰ هزینه تولید هیدروژن ارزان‌تر هم شود. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد هزینه تولید هیدروژن به روش اصلاح بخار متان (SMR) در سال ۲۰۳۰ برابر با ۲۸ \$/Kg، روش CCS \$/Kg ۱/۹۵ و الکترولیز هیدروژن ۲/۱۶ \$/Kg باشد (شکل ۸).



شکل ۸: هزینه تولید هیدروژن با روش‌های مختلف [۱۲]

شایان ذکر است ارزش حرارتی هر مترمکعب گاز طبیعی نیز در محدوده ۳۶-۳۹ مگاژول بوده و قیمت آن به ازای هر MMBTU (تقریباً معادل ۱۰۵۵ مگاژول)، ۲/۸ دلار است. به صورت تقریبی قیمت یک کیلووات ساعت هیدروژن ۱۰ سنت بوده که با توجه به سطح فناوری و شرایط موجود در کشور توسعه هیدروژن در زیست‌بوم انرژی و ایفای نقش در سبک سوخت عرضه شده در کشور نسبت به سایر زیر بخش‌ها دارای تأخر زمانی است.

۳. نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین دلایل ناترازی برق، پایین بودن ظرفیت تولید برق در ساعات پیک مصرف و از دلایل اصلی ناترازی گاز، سهم ۷۰ درصدی آن در تولید برق و به تبع آن هدر رفت زیاد انرژی است. برای رفع ناترازی برق باید ظرفیت نیروگاهی توسعه داده شود که اگر سیاست‌گذاری با دید توسعه متوازن سبک سوختی نیروگاه‌ها صورت پذیرد، ناترازی برق به‌عنوان فرصتی برای بهبود سبک سوختی کشور و کاهش ناترازی گاز تلقی خواهد شد. ناترازی انرژی در ایران یک امر تک یا دو بعدی نیست که صرفاً با افزایش تولید، بهینه‌سازی و کاهش مصرف حامل‌های مختلف قابل حل باشد. ناترازی انرژی در کشور ابعاد مختلفی دارد که برای حل این معضل بایستی

2024). Islamic Consultative Assembly (Parliament of Iran), Court of Audit. 1404 (2025).

[8]. Khosropanah Dezfuli A, Baharlou M. A comparative explanation of modern governance and wise governance in three dimensions: Foundations, principles, and objectives. *Journal of Governance*. 2023;1(1): 21-36.

[9]. Akbari I, Abdolhosseinzadeh M, et al. Soft governance tools and their role in enhancing the legislative system. *Research Center of the Islamic Consultative Assembly (Parliament of Iran)*. 2024.

[10]. Charter of the Renewable Energy and Energy Efficiency Organization (SATBA). *Research Center of the Islamic Consultative Assembly (Parliament of Iran)*. 2016.

[11]. Cormos AM, Szima S, Fogarasi S, Cormos CC. Economic assessments of hydrogen production processes based on natural gas reforming with carbon capture. *Chemical Engineering Transactions*. 2018; 70: 1231-1236.

[12]. Pal A, Kakran S, Kumar A, Youssef AB, Singh UP, Sidhu A. Powering squarely into the future: A strategic analysis of hydrogen energy in QUAD nations. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024; 49:16-41.



Development of the Energy Sustainability Prism Model: A Framework for Integrated Management of the Energy Ecosystem

Mostafa Ebrahimi Moghaddam¹, Mohammad Mahdi Najafi^{2*}, Afshin Emamikhah³

1. Head of Research and Technology Affairs, Iranian Gas Engineering and Development Company (IGEDC), Tehran, Iran
2. Energy and Carbon Engineering Expert, Iranian Gas Engineering and Development Company (IGEDC), Tehran, Iran
3. Research and Technology Affairs Expert, Iranian Gas Engineering and Development Company (IGEDC), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

Article History:

Received: 02 September 2025

Revised: 14 October 2025

Accepted: 03 November 2025

Keywords:

Energy Ecosystem

Energy Sustainability Prism

Imbalance

Energy Governance

ABSTRACT

Energy resources are among the most important factors and elements of sustainable development. Iran, in addition to possessing a wealth of fossil fuel reserves, has significant potential for utilizing renewable energy. However, in the energy sector (electricity, gas, and petroleum products), the country faces imbalances, such as electricity shortages in the summer and gas shortages in the fall and winter. Recently, the situation with gasoline has also shifted from imbalance to deficit. This article aims to provide a comprehensive model for developing an appropriate structure to address these imbalances in Iran's energy ecosystem. The model developed in this study to resolve imbalances consists of four fundamental components: energy governance, supply, demand, and diversification, which are interconnected like the facets of a prism. It is worth noting that the base of this prism, which consolidates and integrates the components, is essentially the energy governance section, which is the most critical part. The integrated approach in this model harmonizes the policymaking structure, regulation, and the coordination of relationships among various sectors to address the dimensions involved in Iran's energy imbalances.

DOR: [20.1001.1.2508.1103.1404.03.17](https://doi.org/10.1001.1.2508.1103.1404.03.17)

How to cite this article

M. Ebrahimi Moghaddam, M. M. Najafi, A. Emamikhah, Development of the Energy Sustainability Prism Model: A Framework for Integrated Management of the Energy Ecosystem. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025; 12(3): 57-68. (https://ijge.irangi.org/article_735141.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: m.m.najafi2024@gmail.com, (M. M. Najafi).

Available online 21 December 2025

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

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



شبیه‌سازی مولکولی جداسازی گازها به روش غشایی: مرور کلی، چالش‌ها و چشم‌انداز آتی

امیر آقایی لیواری^۱، سیما مجیدی^۲، سیامک پاکدل^۲، حمید عرفان‌نیا^{۳*}

۱. دانشجوی کارشناس ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲. دکترا، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳. دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: herfan@tabrizu.ac.ir

مقاله‌ی مروری

صفحه ۶۹ - ۸۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵

چکیده

در صنایع گازی، جداسازی مخلوط‌های گازی با استفاده از روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد که نیازمند مصرف بالای انرژی هستند. تکنولوژی غشا امروزه به دلیل نیاز به فضای عملیاتی کمتر، آسیب‌رسانی کمتر به محیط‌زیست، صرفه اقتصادی و راندمان بالای انرژی یکی از تکنولوژی‌های پرکاربرد در صنایع است. کاربرد این تکنولوژی در زمینه‌های صنعتی مختلف مانند نمک‌زدایی و تصفیه آب، صنایع دارویی، پالایش و پتروشیمی و جداسازی گازها منجر به تقاضای بالا برای غشاها و همچنین پیشرفت در این زمینه شده است. مطالعات شبیه‌سازی دینامیک مولکولی به روشن شدن برخی از مسائل مبهم در زیر بخش‌های مختلف تکنولوژی غشا کمک کرده است. شبیه‌سازی‌های مولکولی ابزار قدرتمندی برای کامل کردن شواهد تجربی یا پیش‌بینی خواص انتقال گازهای مختلف برای جداسازی هستند؛ زیرا می‌توانند اطلاعات ساختاری را در سطح اتمی ارائه دهند که در نتیجه آن می‌توان اطلاعات ساختاری غشاها و برهمکنش ذرات در مقیاس اتمی را به دست آورد.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی مولکولی، جداسازی گاز، غشا، فیلتراسیون، نانو فناوری

۱. مقدمه

روش‌های متداول جداسازی گازها شامل تقطیر، فرآیندهای برودتی، جذب و جداسازی غشایی است که برحسب نوع فرآیند و اقتصاد آن انتخاب روش صورت می‌گیرد. فناوری غشایی که برای جداسازی مخلوط‌های گازی به کار می‌رود، از لحاظ جنبه‌های کلی اقتصادی، فنی، اندازه فشرده، عملکرد آسان نسبت به سایر تکنیک‌های جداسازی معمولی، ایمنی و زیست‌محیطی با عملیات واحد معمولی، مانند تقطیر و جذب، رقابت می‌کند [۱-۴]. بازیابی محصولات با ارزش بالا از جریان‌های صنعتی مختلف (مانند بخارات

آلی از جریان‌های گازی، هلیوم از گاز طبیعی) یک کاربرد جالب است که بازار جدیدی را برای غشاهای جداسازی گاز ایجاد کرده و مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی را به همراه داشت [۵]. امروزه غشاهای جداسازی گاز در زمینه‌های متعددی مانند جداسازی هیدروژن، جداسازی اکسیژن از نیتروژن، جداسازی گاز طبیعی (جداسازی دی‌اکسید کربن)، جداسازی بخار-بخار مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶].

غشاهای جداسازی گازی از زمانی که در اوایل دهه ۱۹۸۰ وارد بازار شدند، برای بسیاری از کاربردها مانند



جداسازی نیتروژن، هیدروژن، هلیوم و تولید گاز طبیعی رشد چشمگیری داشته‌اند و از دلایل این رشد می‌توان به سادگی کارکرد، فشرده بودن، وزن سبک، جداسازی سریع، ثبات فیزیکی و شیمیایی قابل قبول، عملکرد قوی در حضور رطوبت یا سایر آلاینده‌ها و سهولت افزایش راندمان انرژی بالا اشاره کرد [۷-۱۱]. نفوذ گاز در غشاء توسط نیروی محرکه اختلاف فشار در سراسر غشاء هدایت می‌شود. کلید توسعه یک فرآیند غشایی موفق، طراحی سیستمی است که به جداسازی هدفمند با مصرف انرژی حداقلی دست می‌یابد. غشاهای بهینه باید دارای گزینش‌پذیری^۱ بالا برای به دست آوردن خلوص محصول مورد نیاز، نفوذپذیری بالا و لایه انتخابی نازک برای افزایش نفوذپذیری و کاهش سطح غشاء مورد نیاز باشند [۹]. این پتانسیل در غشاهای جداسازی گاز وجود دارد که در صورت در دسترس قرار گرفتن غشاهای انتخابی بیشتر، به شدت رشد کنند [۱۲].

توسعه فناوری غشاء اغلب با استفاده از روش‌های آزمون و خطا انجام می‌شود و از این رو فرآیندی کند بوده که مقرون به صرفه اقتصادی نمی‌باشد. یک رویکرد جایگزین، انجام مطالعات بنیادی در سطح مولکولی است که بهتر است ویژگی‌های مولکولی غشاء برای افزایش شار و حفظ نفوذپذیری بالا اندازه‌گیری شود. شبیه‌سازی دینامیک مولکولی یک تکنیک محاسباتی قدرتمند است که با حل معادله حرکت نیوتن، مولکول‌های در حال تعامل در یک سیستم را از طریق میدان نیروی معین بررسی می‌کند. در دهه‌های گذشته، دینامیک مولکولی به دلیل کاربرد وسیع آن برای فیزیک جریان پیچیده و دقت آن، با موفقیت برای مطالعه جریان در مقیاس نانو استفاده شده است. در این مطالعه ابتدا توضیح مختصری از فرآیندهای جداسازی غشایی در گازها و طبقه‌بندی غشاهای پرکاربرد در زمینه جداسازی گازها و سپس شبیه‌سازی دینامیک مولکولی در این زمینه ارائه می‌شود. در نهایت، برخی از تحقیقات شبیه‌سازی دینامیک مولکولی که جداسازی غشایی مخلوط‌های گازی را بررسی کرده‌اند، ارزیابی خواهند شد.

۲. فرآیندهای جداسازی غشایی در گازها

عملکرد غشاهای جداسازی گاز، بر اساس اصل نفوذ انتخابی از سطح غشا، با نیروی محرکه فشار خارجی اعمالی، می‌باشد. سرعت نفوذ هر گاز به حلالیت آن در مواد غشایی

و به سرعت نفوذ گاز بستگی دارد. گازهای با حلالیت بالا و مولکول‌های کوچک و در حالت کلی با ضریب نفوذ بالا، خیلی سریع از غشا عبور می‌کنند. برای جداسازی مخلوط‌های مولکولی، چندین فرآیند غشایی با موفقیت اعمال شده‌اند که این فرآیندها در غشاها و نیروهای محرکه که برای جداسازی استفاده می‌شوند و همچنین در حوزه کاربرد و ارتباط فنی و اقتصادی می‌توانند بسیار متفاوت باشند. فرآیندهای جداسازی غشایی به‌عنوان نیروی محرکه از اختلاف فشار هیدرواستاتیک مانند میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون و نانوفیلتراسیون، گرادیان غلظت مانند دیالیز یا پتانسیل الکتریکی مانند الکترودیالیز استفاده می‌کنند [۱۳].

میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون اساساً فرآیندهای یکسانی هستند و فقط در اندازه ذرات جدا شده و غشاهای مورد استفاده و در نتیجه میزان اعمال فشار خارجی متفاوت می‌باشند. اصطلاح میکروفیلتراسیون زمانی استفاده می‌شود که ذرات با قطرهای بین ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر از یک حلال و سایر اجزای با وزن مولکولی کم جدا شوند [۱۳، ۱۴]. غشاهای مورد استفاده برای میکروفیلتراسیون ساختارهای متقارن ریز متخلخل و برای اولترا فیلتراسیون ساختارهای نامتقارن هستند. فرآیند جداسازی اولترافیلتراسیون زمانی استفاده می‌شود که اجزایی که قرار است جدا شوند، مولکول‌های واقعی یا ذرات کوچکی باشند که قطر آنها از ۰/۳ میکرومتر که مطابق با حد تفکیک میکروسکوپ نوری است، بزرگتر نباشد [۱۳]. پیشرفت‌های اخیر در نانو مواد، فرآیند توسعه غشاهای جداسازی گاز را به شدت متحول کرده است و سطوح غیرقابل دسترس، کنترل بر عملکرد و ویژگی‌های غشا را فراهم می‌کند. در سال‌های اخیر تأثیر نانو مواد بر کارایی جداسازی، گزینش‌پذیری و یکپارچگی ساختاری در سناریوهای مختلف جداسازی گاز مورد توجه و ارزیابی قرار گرفته است [۱۵]. غشای نانوفیلتراسیون به‌عنوان یک فرآیند غشایی تحت فشار طبقه‌بندی می‌شود که بین غشای اسمز معکوس و اولترافیلتراسیون قرار می‌گیرد. اندازه منافذ غشا در محدوده ۰/۲ تا ۲ نانومتر با برش وزن مولکولی (MWC) از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ دالتون می‌باشد.

با نظر به اینکه نفوذ مولکول‌ها وابسته به نفوذپذیری و ضخامت غشا است و با توجه به اینکه نفوذ با کاهش ضخامت غشا، افزایش می‌یابد، در نتیجه غشاهای خیلی نازک به‌ویژه غشاهای نانوساختار کامپوزیتی، بارزترین نفوذپذیری را ارائه

1. Selectivity
2. Molecular weight cut off

می‌کنند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای غشاهای لایه نازک نانو کامپوزیت^۱ جداسازی و فیلتراسیون گازهای مختلف از مخلوط بر اساس اندازه مولکولی، شکل و قطبیت آن‌هاست [۱۶].

۳. مکانیزم عمل

فرآیند غشایی جداسازی گاز مبتنی بر جذب ماده نفوذپذیر به غشاء، نفوذ با انتشار از طریق غشاء و دفع در سمت فشار پایین غشا می‌باشد [۱۲]. در جداسازی غشایی، گازها تحت یک گرادیان فشار، در لایه‌های غشا حل شده و نفوذ می‌کنند. مولکول‌های غیر تراوا که در سمت جریان خوراک باقی می‌مانند، به‌عنوان جریان نگهدارنده از واحد غشایی خارج می‌شوند. انتخاب مناسب غشا در جداسازی غشایی مخلوط گازها بسیار مهم است چرا که عملکرد نهایی ماژول جداسازی گاز را تعیین می‌کند [۵].

نفوذ مولکول‌های گاز را می‌توان برحسب نیروی محرکه غلظت توسط قانون اول فیک تعریف کرد:

$$J_i = -D_i \frac{dC_i}{dx} \quad (1)$$

در اینجا J_i ، شار جزء i در غشا است، D_i و C_i ضریب انتشار و غلظت گاز محلول در غشاء هستند و x یک مختصات جهت است. اگر در فرآیند نفوذ، انحلال و شستشوی گاز در حالت تعادل فرض شود، غلظت C_i گاز محلول در سطح مشترک در غشاء ممکن است به فشار جزئی یک جزء توسط قانون هانری مرتبط باشد:

$$C_i = K_i P_i \quad (2)$$

K_i ثابت حلالیت است و P_i و C_i فشار جزئی و غلظت در غشای جزء i هستند. با ادغام و کاربرد معادلات (۱) و (۲) در سیستم‌های غشایی، معادله (۳) حاصل می‌شود:

$$J_i = \frac{D_i k_i (P_i' - P_i'')}{\Delta x} \quad (3)$$

در اینجا Δx ضخامت غشاء، P_i' و P_i'' فشار جزئی جزء i ، به ترتیب، در دو طرف بالادست و پایین‌دست غشا هستند. اگر جزء نفوذ کننده گاز باشد، ضریب توزیع با ضریب حلالیت قانون هنری یکسان خواهد بود. باید در نظر گرفت که نفوذپذیری یک گاز غیر ایده‌آل ثابت نیست، بلکه تابعی از غلظت و فشار است. در بسیاری از موارد، فرآیندهای چند

مرحله‌ای برای جداسازی مؤثر اجزایی که فقط کمی از نظر نفوذپذیری متفاوت هستند، ضروری هستند [۱۳].

۴. غشاها مورد استفاده در فرایند فیلتراسیون گازی

برای کاربرد جداسازی گازها، بر اساس خواص فیزیکی و شیمیایی هر گاز یک ماده غشایی انتخاب می‌گردد، زیرا این مواد باید به روشی پیشرفته برای جداسازی مخلوط‌های گازی خاص طراحی شوند. علاوه بر این مورد، مواد پایدار باید در فرآیند جداسازی غشایی گاز مورد اعمال قرار گیرند [۱۲]. خواص جداسازی گازی غشاها به مواد از لحاظ نفوذپذیری، عوامل جداسازی و پیکربندی غشاء به‌عنوان مثال غشاهای تخت و فیبر توخالی، ساختار و ضخامت غشاء، طراحی سیستم و ماژول بستگی دارد. غشاء می‌تواند همگن یا ناهمگن، باردار یا بدون بار، متقارن یا نامتقارن، متراکم یا متخلخل باشد [۱۲، ۱۳].

۴-۱. غشاهای پلیمری یا آلی

در صنعت کاربردهای مختلفی برای غشاهای پلیمری وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به جداسازی گاز اشاره کرد [۷]. پلیمرها قابلیت تحمل دماهای بالا و محیط‌های شیمیایی تهاجمی را ندارند. علاوه بر این، زمانی که این نوع غشا به‌ویژه ماژول‌های فیبر توخالی در محیط‌هایی مانند کارخانه‌های پتروشیمی، پالایشگاه‌ها و تصفیه گاز طبیعی اعمال می‌شوند، هیدروکربن‌های سنگین در جریان‌های گاز خوراک می‌توانند مشکل‌ساز باشند. به‌طور معمول غشاهای پلیمری در مقایسه با مواد متخلخل، به دلیل داشتن حجم آزاد کم، گزینش‌پذیری بالا و توان عملیاتی پایینی از خود بروز می‌دهند [۱۲].

۴-۲. غشاهای غیر آلی یا معدنی

با گذر زمان کارایی غشاهای پلیمری به دلیل رسوب‌گیری، تخریب شیمیایی و ناپایداری حرارتی روند کاهشی پیدا می‌کند. تمام این عوامل منجر به تغییر گرایش به سمت غشاهای معدنی شده است [۷]. این غشاها علاوه بر داشتن پایداری حرارتی و شیمیایی قابل توجه در مقایسه با غشاهای پلیمری، شار گازی بسیار بالاتری دارند و از این رو، به مرور زمان به‌طور فزاینده‌ای برای جداسازی مخلوط‌های گازی مورد بررسی قرار می‌گیرند [۱۷]. غشاهای معدنی متراکم در رفتارهای جداسازی خود بسیار خاص هستند [۷].



۴-۲-۱. غشاهای بر پایه گرافن

گرافن و مشتقات آن پتانسیل قابل توجهی برای توسعه غشاهای فیلتراسیون فوق نازک نانومتخلخل با قابلیت جداسازی مولکولی دارند. غشاهای نانو فیلتراسیون مبتنی بر گرافن با ساختارهای متمایز می‌توانند پدیده‌های جدید انتقال را برای جداسازی گاز ارائه دهند [۱۸، ۱۹].

گرافن اکسید (GO)^۱، مشتقی از گرافن با تعداد زیادی گروه کربوکسیل، هیدروکسیل، اپوکسی و کربونیل، به دلیل ساختار دو بعدی منحصر به فرد و خواص فیزیکوشیمیایی قابل کنترل خود، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. علاوه بر این، این ماده به دلیل دارا بودن خواص بسیار عالی مانع انتخابی و الک دقیق در جداسازی مولکول‌ها، به‌طور گسترده در بسیاری از زمینه‌ها از جمله تصفیه هوا و جداسازی آب استفاده می‌شود [۲۰].

نانولوله‌های کربنی (CNT)^۲، از غشاهای سه بعدی بر پایه گرافن، استوانه‌های در مقیاس نانو از گرافن رول شده بوده و می‌توان آن‌ها را در یک یا هر دو انتها با نیم فولرن پوشاند. CNT های تک جداره (SWNT)^۳ دارای قطر بیرونی در محدوده ۵۰-۲۰ نانومتر با قطر داخلی ۴۰-۱۰ نانومتر هستند. نانولوله‌های چند جداره (MWNT)^۴ می‌توانند قطر بیرونی از ۲ نانومتر (نانولوله‌های دو جداره) تا ۱۰۰ نانومتر با ده‌ها دیوار داشته باشند [۲۱]. این نانولوله‌ها خواص بسیار مناسبی از جمله سطح ویژه بالا، ساختار منافذ باز به هم پیوسته و قابل تنظیم را نشان می‌دهند. CNT ها به دلیل خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و شیمیایی قابل توجه آن‌ها مورد توجه قرار گرفتند. [۲۲].

۴-۲-۲. زئولیت‌ها

زئولیت‌ها، آلومینوسیلیکات‌های کریستالی تشکیل شده توسط یک شبکه سه بعدی از چهار وجهی SiO_4 و AlO_4 ، با اندازه منافذ در سطح مولکولی و کمتر از ۲ نانومتر و خاصیت جذب مناسب هستند. معمولاً این غشاهای بر روی تکیه گاه‌های متخلخل برای ایجاد استحکام مکانیکی آماده می‌شوند، زیرا لایه خود بسیار شکننده

است [۲۳]. تقریباً ۱۰۰ نوع ساختاری مختلف از زئولیت شناخته شده است که هر کدام اندازه، شکل و اتصال متقابل متمایز خود را دارند. علاوه بر این، چارچوب ساختار می‌تواند باعث ایجاد خواص آبدوستی، آبگریزی، اسیدی یا بازی در این ساختار منفذی شود [۲۴].

۴-۲-۳. چهارچوب‌های فلزی-آلی (MOF)^۵

MOF ها به‌عنوان مواد نانو متخلخل کریستالی با پتانسیل کاربردهای مختلف ظهور کرده‌اند. سطح تماس بالا (اغلب ۷۰۰۰-۵۰۰۰ مترمربع بر گرم)، منافذ قابل تنظیم، انعطاف‌پذیری و پایداری حرارتی و فیزیکی، MOF ها را به رقیبی در حال ظهور برای مواد متخلخل مانند زئولیت‌ها و کربن‌های فعال تبدیل می‌کند. ترکیب سیستماتیک منابع فلزی که معمولاً از فلزات واسطه تشکیل شده‌اند و لیگاندهای آلی آنیونی چند دندانه، ایجاد انواع ساختارها و مواد شیمیایی MOF را با طیف وسیعی از امکانات کاربردی، مانند جداسازی گاز با صرفه‌جویی در انرژی و ذخیره‌سازی گاز ممکن می‌سازد [۲۵]. MOFs فرصت‌های بی‌سابقه‌ای را برای جداسازی گازهای مبتنی بر غشاء (به‌عنوان مثال، جداسازی الفین/پارافین) به دلیل کنترل آسان بر اندازه منافذ و عملکرد ارائه می‌دهند [۲۶].

۴-۲-۴. غشاهای ماتریس مخلوط (MMMs)^۶

ساخت غشاهای ماتریس مخلوط جهت بهبود عملکرد و اصلاح ساختار غشاهای پلیمری، مطرح شدند [۵، ۶]. غشای ماتریس مخلوط پتانسیل افزایش گزینش‌پذیری، نفوذپذیری یا هر دو را نسبت به غشاهای پلیمری موجود، ناشی از افزودن ذرات معدنی با ویژگی‌های جداسازی برتر ذاتی خود دارند [۷]. با وجود تمام مزیت‌های ذکر شده، این نوع غشاهای با چالش‌های مهمی مانند پراکندگی ناهمگن در محتوای پرکننده بالا، هزینه بالا، مشکلات تولید در مقیاس تجاری و شکنندگی مواجه هستند [۵، ۱۲].

۵. اهداف و روش دینامیک مولکولی

در طی دهه‌های گذشته، مواد متداولی که به‌صورت گسترده‌ای برای جداسازی تحت شرایط دمایی بالا به دلیل

1. Graphen oxide
2. Carbon nanotube
3. Single wall nano tube
4. Multi wall nano tube
5. Metal organic framwork
6. Mixed matrix membranes

مقاومت حرارتی و خوردگی بالا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند عبارتند از غشاهای معدنی از جمله زئولیت، چارچوب‌های فلزی آلی (MOFs) و ساختارهای مبتنی بر کربن از جمله غشاهای خانواده گرافن [۲۷، ۱۱]. در میان آن‌ها، مواد کربنی عمدتاً به دلیل دسترسی آسان، هزینه کم بودن و پایداری حرارتی بالا به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۲۸، ۱۱]. توصیف تجربی این مواد با تعدادی چالش، از جمله تعیین سطح تماس، توزیع اندازه حفرات، تراکم و گونه‌های گروه‌های سطحی و ماهیت توپولوژیک ساختارهای حفره-دار و غیره مواجه است. در این راستا، شبیه‌سازی‌های مولکولی مسیری مستقیم از خواص مولکول‌های برهمکنش به خواص ترمودینامیکی فازهای حجیم آن‌ها را ارائه می‌کنند [۲۹، ۱۱]؛ بنابراین، توصیف بهبود یافته از مواد و درک بیشتر از مکانیسم نفوذ و جذب تنها می‌تواند از یک تلاش مشترک ترکیبی از تحقیقات ساختاری حاصل شود [۱۱].

است، نتایج دو مرحله اول تعادل در مرحله تولید به کار گرفته شده است. این مراحل داده‌های خام را برای تخمین خواص و تجزیه و تحلیل ایجاد می‌کنند [۳۲، ۳۳].



شکل ۱: مراحل شبیه‌سازی دینامیک مولکولی (خطوط نقطه چین گام‌های بازگشتی را نشان می‌دهد)

دو ابزار اصلی مدل‌سازی مولکولی مورد استفاده روش مونت کارلو (MC) و دینامیک مولکولی می‌باشند. اطلاعات اساسی مورد نیاز در این شبیه‌سازی‌ها که به‌طور انحصاری قابلیت اطمینان و دقت نتایج شبیه‌سازی را تعیین می‌کند، تعاملات مولکولی هستند [۱۱]. شبیه‌سازی‌ها می‌توانند معمولاً در یک رویکرد ارزان‌تر در مقایسه با روش‌های تجربی برای رسیدگی به جنبه‌های ناشناخته خاصی از یک سیستم استفاده شوند [۳۰].

یک شبیه‌سازی دینامیک مولکولی معمولی با ایجاد ساختارهای اولیه و مسیرهای ورودی شروع می‌شود. چندین جنبه مهم اعم از اندازه سیستم شبیه‌سازی، شرایط مرزی و تعداد اتم‌ها نیز در این مرحله تعیین می‌گردند. انتخاب یک پتانسیل بین اتمی مناسب، لازمه اصلی برای توسعه یک مدل اتمی است؛ بنابراین، قبل از تولید داده‌ها، بر اساس یک میدان نیروی انتخاب شده (FF)، همبستگی بین اتم‌ها باید تعریف شود [۳۰]. چند نمونه از میدان‌های نیرو متداول شامل UFF، DREIDING، CVFF، CHARMM، COMPASS، OPLS می‌باشند.

اصطلاح «شبیه‌سازی مولکولی» به روش‌های محاسباتی اشاره می‌کند که در آن برهمکنش‌های مولکولی به‌صراحت در نظر گرفته می‌شوند. شبیه‌سازی مولکولی یک مزیت نسبت به آزمایش‌ها در امکان مطالعه سیستماتیک و کنترل شده متغیرهای مختلف در ارتباط با سیستم مورد مطالعه، جداسازی و کمی کردن اثر هر یک از آن‌ها دارد [۳۱].

۶. اجرای شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی

تمرکز دینامیک مولکولی بر ایجاد مسیرها و سپس تجزیه و تحلیل آن‌ها برای توضیح ویژگی‌های سیستم در نظر گرفته شده است. ایجاد مسیرهای فاز-فضا به‌طور کلی شامل سه روش مرحله اصلی مقداردهی اولیه، تعادل و تولید است. همان‌طور که در (شکل ۱) نشان داده شده

۷. پارامترهای بررسی عملکردی سیستم‌های جداسازی گازی

دسته‌ای از پارامترهای دینامیک مولکولی، خواص ساختارهای مولکولی خاص در مجاورت غشاها را هدف قرار می‌دهند. یک نمونه عالی از این مفهوم، رفتار مولکول‌ها در نزدیکی غشاها است. جهت‌گیری، رفتار پیوند و خواص انتقال این مولکول‌ها می‌تواند بر عملکرد غشاء تأثیر بگذارد. در اینجا به معرفی این دسته از خواص می‌پردازیم.

۷-۱. مقادیر انرژی

میزان انرژی دسته‌ای از داده‌های اولیه مهم است که

1. Monte-Carlo
2. Force field



می‌توان از شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی دریافت کرد [۳۴]. با استفاده از یک FF، می‌توان همبستگی‌های پیوندی و غیرپیوندی را تعریف کرد. برهمکنش‌های پیوندی با کشش پیوند، زاویه پیوند و زاویه دو وجهی بیان شده و برهمکنش‌های غیرپیوندی توسط واندروالس و برهمکنش‌های الکترواستاتیک پوشش داده می‌شوند.

۲-۷. میانگین جابجایی مربع، نفوذ، عبوردهی گاز و گزینش پذیری

ضریب نفوذ (D) یک پارامتر مهم در علم غشاء برای توصیف گذردهی مولکول‌ها و انتخاب پذیری است. در سیستم‌هایی با رفتارهای نفوذی بخصوص در سیستم‌های گازی، میانگین جابجایی مربع (MSD)^۱ به صورت خطی با زمان افزایش پیدا می‌کند که بر این اساس، اکثر مقالات هنگام گزارش چنین پارامتری، طرح‌های خطی و متناسب را منعکس می‌کنند. MSD نشان دهنده جابجایی یک ذره (نافوذ) از طریق محیط متخلخل است. ضریب نفوذ (D) می‌تواند از شیب رابطه MSD با زمان بر اساس معادله انیشتین به دست آید [۳۵، ۳۶].

محاسبه میزان نفوذ گاز و گزینش‌پذیری برای بررسی عملکرد غشا در شرایط مختلف ضروری است. در سیستم‌های جداسازی غشایی گازها، اغلب از اصطلاح نفوذ (ρ)^۲ برای بیان بهره‌وری غشا استفاده می‌شود. نفوذ گاز به عنوان تعداد مولکول‌های گاز (n) که در یک زمان معین (t) در اثر اختلاف فشار در امتداد غشا (ΔP)، از سطح غشا (A) عبور می‌کنند [۳۷، ۳۸]، معمولاً با واحد GPU^۳ در قالب معادله زیر گزارش می‌شود:

$$\rho = \frac{n}{A \cdot t \cdot \Delta P} \quad (4)$$

گزینش‌پذیری نشان‌دهنده توانایی یک غشا برای انجام جداسازی انتخابی یک مولکول خاص از یک مخلوط گازی است [۳۹]. در واقع، گزینش‌پذیری یک عامل تعیین‌کننده در دستیابی به خلوص بالای یک محصول است. گزینش‌پذیری مولکول A نسبت به B به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$S_{A/B} = \frac{y_A/x_A}{y_B/x_B} \quad (5)$$

که در آن x و y به ترتیب کسر مولی مولکول‌ها در بخش خوراک و بخش خلأ است.

مولکول‌های گازی که برهمکنش‌های وان‌دروالسی قوی با غشا دارند به راحتی جذب سطح غشا می‌شوند، اما به دلیل همین برهمکنش‌های نسبتاً قوی‌تر و اندروالسی نمی‌توانند از منافذ غشا عبور کنند. انتظار معمول در نانومواد غشایی این است که گونه‌های به شدت جذب شونده کندتر از گونه‌هایی که جذب ضعیف‌تری دارند، نفوذ می‌کنند [۴۰].

۳-۷. پتانسیل نیروی متوسط (PMF)^۴

PMF یکی از عوامل تعیین‌کننده تغییرات ترمودینامیکی انرژی آزاد یک سیستم در شبیه‌سازی دینامیک مولکولی است که برای مطالعه انرژی سیستم به عنوان تابعی از پارامتر مختصات استفاده می‌شود. در واقع، PMF می‌تواند مانع انرژی را که یک جزء حین عبور از یک فاصله خاص و در مختصات خاص نزدیک و از میان غشا با آن روبرو شود، تعیین کند. با توجه به اینکه نمی‌توان به تعداد کافی از فضای سیستم در حین شبیه‌سازی نمونه‌برداری کرد، لذا آنالیز PMF با استفاده از روش نمونه‌برداری چتری^۵ محاسبه می‌شود [۴۱]. در این خصوص، محاسبه بین مرکز جرم گاز که از یک موقعیت مشخص و در امتداد جهت مشخص تا مرکز حفره غشا با یک گام معین تا موقعیت نهایی منتقل می‌شود، خروجی این آنالیز، پروفایل انرژی تک گونه‌ای است که با در نظر گرفتن اثرات گونه‌های دیگر از میان منافذ غشا عبور می‌کند.

۸. بررسی منابع

مطالعات نشان داده‌اند که یک غشای ایده‌آل برای جداسازی گاز باید تا حد امکان نازک و از نظر مکانیکی مقاوم بوده و اندازه منافذ به خوبی تعریف شده باشد. این ویژگی‌ها شار حلال آن را به حداکثر رسانده، آن را از شکستگی حفظ کرده و گزینش‌پذیری آن را تضمین می‌کند [۴۲]. همان‌طور که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد، غشاهای مختلفی از نظر جنس و ساختار، برای جداسازی گازها مورد مطالعه قرار گرفته و عملکرد آن‌ها با به کارگیری شبیه‌سازی دینامیک

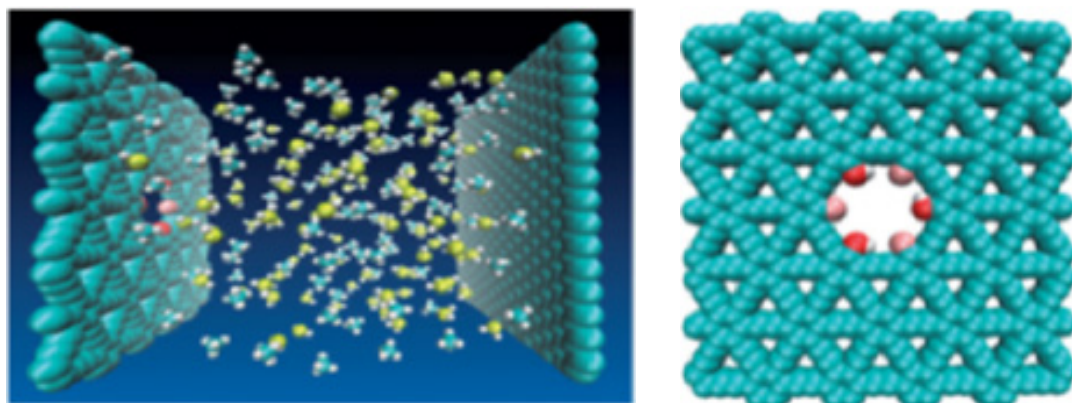
1. Mean square displacement
2. Permeance
3. Gas Permeation Unit
4. Potential of mean force
5. Umbrella sampling

مولکولی بررسی شده است. در ادامه به مرور مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر مربوط به عملکرد هر دسته از غشاها در جداسازی گازها پرداخته خواهد شد.

۸-۱. غشاهای کربنی

در سال ۲۰۱۹ جعفرزاده و همکاران [۴۳] عملکرد غشای

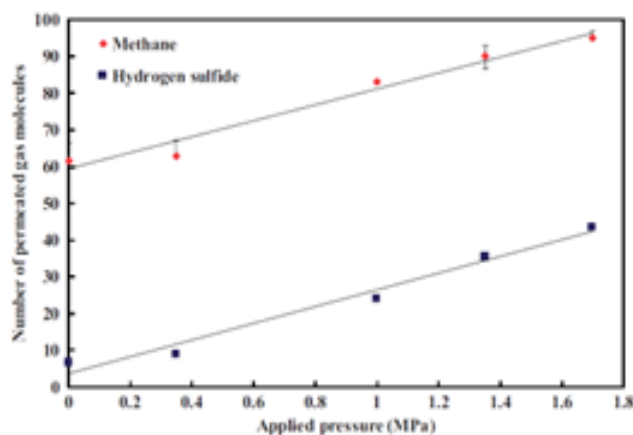
گرافن با یک حفره عامل‌دار شده با هیدروکسیل و فلئور برای جداسازی مخلوط $\text{CH}_4/\text{H}_2\text{S}$ را مورد بررسی قرار دادند (شکل ۲). نتایج نشان دادند اگرچه اندازه حفره غشا برای عبور مولکول‌های گاز CH_4 و H_2S بزرگ است، اما عملکرد مؤثر گروه‌های عاملی روی لبه منافذ، غشای گرافینی نانومتخلخل را برای جداسازی متان از مخلوط $\text{CH}_4/\text{H}_2\text{S}$ مناسب و انتخابی می‌کند (شکل ۳).



(ب)

(الف)

شکل ۲: (الف) غشای گرافین نانومتخلخل با هیدروکسیل (-OH) و فلئور (-F) به عنوان عملکردهای شیمیایی در لبه منافذ، (ب) جعبه شبیه‌سازی شده که حاوی غشای گرافین، نانوصفحه گرافین، متان و مولکول‌های سولفید هیدروژن است [۴۳]

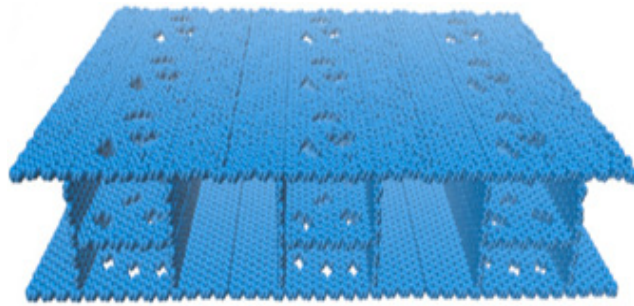


شکل ۳: تعداد مولکول‌های متان و سولفید هیدروژن تراوش شده از طریق منافذ غشاء گرافین در فشارهای مختلف اعمال شده در طول زمان شبیه‌سازی ۲۰ نانوثانیه [۴۳]

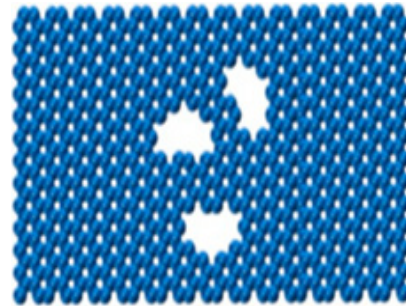
در سال ۲۰۲۰ سباستین مورارو و همکاران [۴۴] در مطالعه خود، یک ساختار غشایی محوری بهینه‌سازی شده را برای دستیابی به نفوذپذیری و انتخاب پذیری بالا ارائه کردند که ساخته شده از چندین لایه گرافینی پوشیده شده از دیواره‌های گرافینی بوده (شکل ۴) و برای جداسازی تدریجی هیدروژن از مخلوطی از گازهای حاوی مولکول‌های H_2 ، CO ،

CH_4 ، CO_2 ، N_2 و آب استفاده شد. شبیه‌سازی‌های غیرتعادلی (NEMD) با اعمال نیروی خارجی بر روی مولکول‌های گاز به منظور تسریع نفوذ انجام شدند. در این مطالعه نشان داده شد که نفوذپذیری کلی مجموعه نزدیک به مقادیر تعیین شده برای منافذ گرافین تک لایه و به طور قابل توجهی بالاتر از غشاهای پلیمری است.

1. Nonequilibrium molecular dynamics



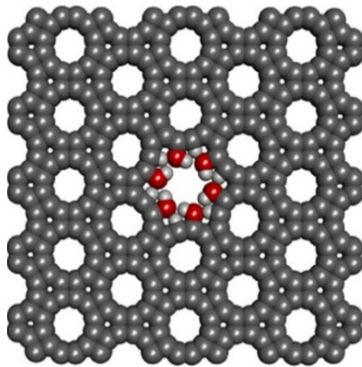
(ب)



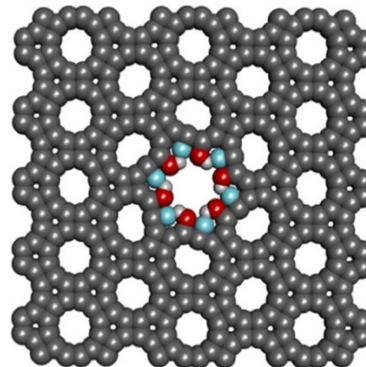
(الف)

شکل ۴: ویژگی‌های ساختاری سیستم شبیه‌سازی. (الف) غشاء استفاده شده؛ (ب) ساختار واحد مورد استفاده در شبیه‌سازی [۴۴]

پاکدل و همکاران [۴۵] در سال ۲۰۲۲ دو نوع حفره عامل‌دار شده را بر روی غشای گرافنیلین (شکل ۵) برای مطالعه و مقایسه عملکرد جداسازی هلیوم و متان با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی مورد بررسی قرار دادند.



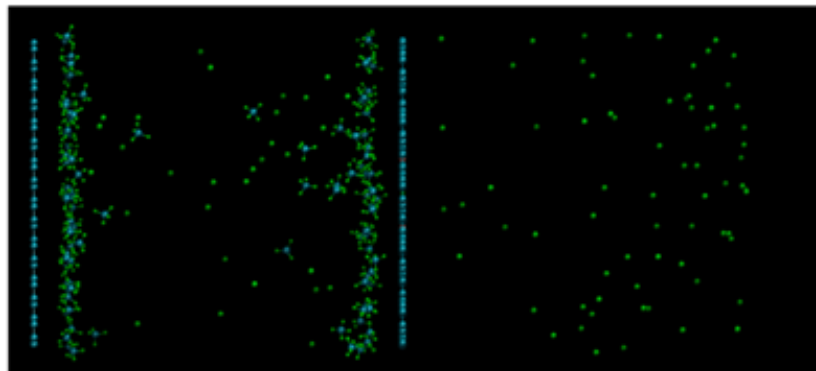
(ب)



(الف)

شکل ۵: غشای گرافنیلین با (الف) منافذ کربوکسیل و فلئوئور و (ب) منافذ کربوکسیل و هیدروژن. (رنگ های خاکستری، قرمز، سفید و فیروزه‌ای به ترتیب H، O، C و F هستند) [۴۵]

حداکثر نفوذ هلیوم در این سیستم حدود 10^7 GPU از طریق غشای گرافنیلین عامل‌دار در دمای اتاق به دست آمد که بسیار بالاتر از غشای گرافنیلین دست نخورده است که نشان دهنده نفوذپذیری و گزینش‌پذیری بالا غشای گرافنیلین عامل‌دار برای جداسازی هلیوم می‌باشد (شکل ۶). همچنین برهمکنش‌های واندروالس (vdW) بین مولکول‌های گاز و سطح غشا، محاسبات پتانسیل نیروی میانگین (PMF) برای مطالعه نفوذ مولکول‌های گاز در سراسر غشاء نشان دهنده سد انرژی بالاتر در مقابل مولکول‌های متان، علیرغم برهمکنش‌های قوی‌تر بین آن‌ها و سطح غشاء می‌باشد.



شکل ۶: تصویر نقشه پروفایل دانسیته مخلوط گازی در گرافنیلین با منافذ عامل‌دار در فشار ۵۰۰ kPa کیلو پاسکال و دمای اتاق، پس از ۱۰ نانوثانیه، رنگ‌های سبز، سفید و فیروزه‌ای نشان دهنده اتم‌های H، He، C می‌باشند [۴۵]

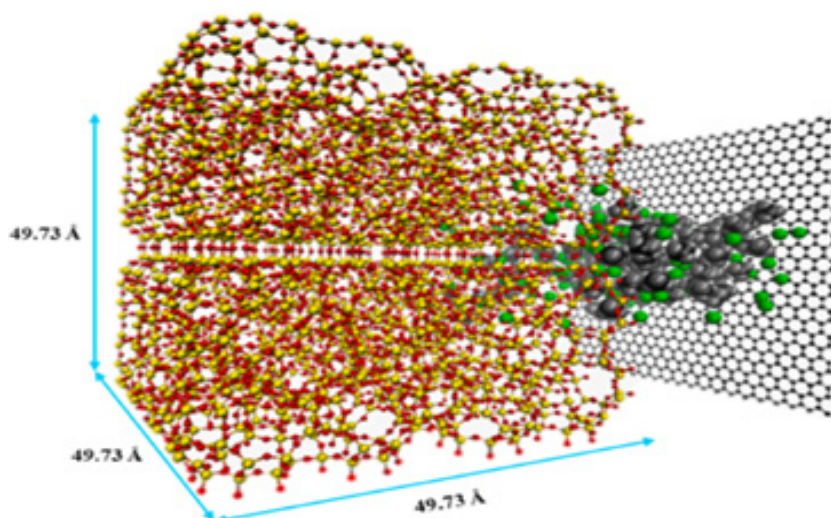
۲-۸. غشاهای پلیمری اصلاح شده ماتریس مخلوط (MMM)

در مطالعه ای توسط ریاست و همکاران [۴۶] شبیه‌سازی مولکولی شامل دینامیک مولکولی و روش‌های مونت کارلو برای تعیین ضرایب نفوذ و حلالیت مولکول‌های گاز، H_2 ، CH_4 ، O_2 ، CO_2 و N_2 برای تخمین نفوذ گاز در غشاهای ماتریس مخلوط (MMM) ساخته شده از پلی کربنات (PC)، پلی نیترو آنیلین (pNA) و ژئولیت A4 انجام دادند. آنالیزهای تابع توزیع شعاعی و جداسازی مانند جابجایی میانگین مربع، چگالی و ایزوترم‌های جذب در MMM ها نشان دادند که غشای PC ساده بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر MMM‌های آماده شده نشان می‌دهد. مطالعه دیگر باهدف بررسی اثر نانوذرات سیلیس بر رفتار انتقال گازها با غلظت‌های متفاوت در غشاهای سیلیس/PSF انجام شد. تکنیک‌های شبیه‌سازی دینامیک مولکولی بر روی MMM‌ها تحت شرایط مخلوط گازهای CO_2/CH_4 و اثر افزایش درصد وزنی سیلیس انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد افزایش فضای خالی با افزایش درصد

وزنی سیلیس باعث افزایش نفوذ گازهای مخلوط شد [۴۷]. سلحشوری و همکاران [۴۸] از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی برای بررسی اثر بارگذاری نانوذرات سیلیس بر خواص انتقال گازهای H_2 ، CH_4 و N_2 در یک غشای پلیمری کامپوزیت پلی سولفون/سیلیکا استفاده کردند. این مطالعه با مقادیر متغیر بارگذاری سیلیس در شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. نتایج تجربی و شبیه‌سازی با هم تطابق خوبی داشتند و نشان دادند که بارگذاری ذرات سیلیس عامل مهم در عملکرد غشاء بود.

۳-۸. غشای ژئولیتی

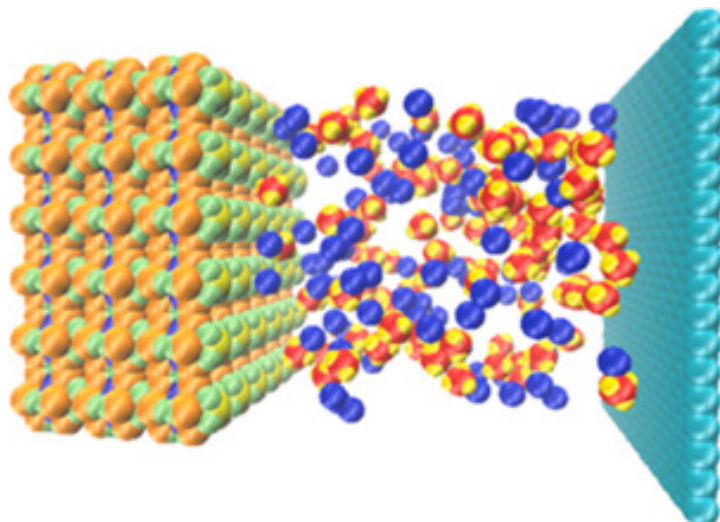
در مطالعه‌ای محمدزاده و همکاران [۴۹]، شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی جداسازی گاز هلیوم از متان را از طریق غشای ژئولیت نوع PWN سیلیس خالص (Si-PWN) (شکل ۷) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که این غشای می‌تواند نفوذپذیری بالا برای هلیوم $10^6 \times 1/22$ GPU و گزینش‌پذیری فوق‌العاده هلیوم نسبت به مولکول‌های متان را برآورده کند.



شکل ۷: شماتیک سیستم شبیه‌سازی جداسازی هلیوم و متان شامل غشای ژئولیتی Si-PWN [۴۹]

۴-۸. غشاهای نانو متخلخل چارچوب فلزی آلی (MOF) رضایی و همکاران [۵۱] توانایی غشاء SIFSIX-3-Cu(MOF) (شکل ۸) برای جداسازی دو گاز هلیوم و متان توسط شبیه‌سازی دینامیک مولکولی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داده‌اند که غشاء SIFSIX-3-Cu(MOF) می‌تواند هم گزینش‌پذیری و هم نفوذپذیری بالا را برای جداسازی He داشته و با نفوذ بالای به دست آمده هلیوم در حدود $10^6 \times 1/64$ GPU و گزینش‌پذیری فوق‌العاده بالای He نسبت به مولکول‌های CH_4 از حد بالایی رابسون پیشی بگیرد.

حسن‌زاده و همکاران [۵۰] شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی برای ارزیابی عملکرد غشاء نوع DDR سیلیس خالص برای جداسازی کریپتون و زنون (Kr/Xe) انجام دادند. شبیه‌سازی‌ها در فشار خارجی صفر تا ۵۰ مگاپاسکال به مدت ۲۰ نانوثانیه انجام شدند. غشاء بهترین نفوذپذیری و گزینش‌پذیری را در فشار ۱۰ MPa و دمای ۳۷۳ کلون برای کریپتون و برابر $10^{-10} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ را نشان داد.



شکل ۸: شماتیک جعبه شبیه‌سازی شامل غشای SIFSIX-3-Cu برای جداسازی مخلوط گازی هلیوم و متان. رنگ‌های قرمز، زرد، آبی، فیروزه‌ای، نارنجی و سبز به ترتیب C، H، He، C و در غشا سبز تیره هیدروژن، سبز کم رنگ فلورین، بنفش نیتروژن و نارنجی کربن است [۵۱]

در نهایت پردازش مقیاس‌ها است. هدف و چشم‌انداز فرایندی که در زمینه غشاها تحقیق و بررسی می‌شود، ادغام مواد طراحی شده از ساختارهای اتمی و ارزیابی عملکرد در این فرایند است. یکی از فعالیت‌های کلیدی در زمینه فناوری غشایی، توسعه مداوم مواد غشایی است و از طرفی برای اطمینان از یک سیستم جذب غشایی موفق، طراحی فرایند و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی بسیار مهم است. جنبه‌هایی نیز باید در مورد طراحی سیستم غشایی برای جذب مورد بررسی قرار گیرند که شامل بررسی سیستماتیک در مورد تأثیر پارامترهای عملیاتی (به‌عنوان مثال، ترکیب خوراک، ظرفیت غشایی، خلوص، فشار، دما و ...) بر عملکرد جداسازی غشایی و شناسایی شرایط عملیاتی بهینه برای یک ماده غشایی خاص می‌باشد [۵۳].

با پیشرفت در مدل‌سازی و شبیه‌سازی، مطالعات نظری باعث تحقیقات تجربی شده است. یک مثال برجسته که در آن شبیه‌سازی رایانه‌ای بینش‌هایی را ارائه می‌دهد، غشای جداسازی گاز نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، استفاده از مواد جدید (به‌عنوان مثال، CNTها و گرافن) را در غشاها توسعه داده است. در کاربردهای غالب، شبیه‌سازی و مدل‌سازی رایانه‌ای تا حد زیادی به جامعه مهندسی با چشم‌انداز پیش‌بینی ترکیب، دینامیک و ساختار مخلوط‌های سیال بسیار پیچیده کمک کرده است. دانستن همه این‌ها کمک می‌کند تا مواد و استراتژی‌های جدیدی برای فناوری‌های

نتایج به دست آمده از این سه مطالعه مقایسه خوبی از عملکرد سه نوع غشا در بررسی جداسازی گازهای هلیوم و متان به دست می‌دهد و انجام مطالعات بعدی را در زمینه رفتار این گازها در حضور غشاها با ساختار مختلف روشن می‌سازد.

در مطالعه دیگر با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی، ضریب نفوذ و گزینش پذیری و خواص ساختاری CH_4 و H_2S خالص و مخلوط آن‌ها در چارچوب آلی-فلزی MIL-47(V) مورد بررسی قرار گرفت. مکان‌های جذب مولکول‌های گاز در شبکه با استفاده از توابع توزیع شعاعی (RDFs) و رفتار نفوذ مولکول‌های گاز با استفاده از نمودارهای چگالی دوبعدی و پروفیل‌های انرژی آزاد مورد بررسی قرار گرفت [۵۲].

۹. چشم‌انداز و چالش‌ها: مسیرهای آینده

با توجه به چشم‌انداز فناوری ۲۰۲۰ منتشر شده توسط روکو، علوم مولکولی محاسباتی و فناوری‌های محاسباتی یکی از زمینه‌های بسیار مهم برای حال و آینده است. با توجه به فرایند وقت‌گیر سنتز تجربی مواد غشایی جدید با آزمون و خطا در آزمایشگاه برای کاربردهای مختلف، یک روش راه حل ممکن طراحی مواد مناسب با مدل‌سازی مولکولی است. هدف نهایی مدل‌سازی چند مقیاس پیش‌بینی خواص ماکروسکوپی یک فرایند از اصول اولیه، یعنی شروع از مقیاس کوانتومی و انتقال اطلاعات به مقیاس‌های مولکولی و



۱۰. نتیجه‌گیری

فناوری غشایی که برای جداسازی مخلوط‌های گازی به کار می‌رود، از لحاظ جنبه‌های کلی اقتصادی، فنی، اندازه فشرده، عملکرد آسان نسبت به سایر تکنیک‌های جداسازی معمولی، برتری دارند. محققان به‌طور گسترده غشاهای کارآمدتری برای جداسازی گازها را بررسی و توسعه داده‌اند. اخیراً چندین غشا و جاذب بهبود یافته متشکل از نانو ورقه‌ها و نانولوله‌های مبتنی بر کربن، زئولیت‌ها و MOF‌های نانوساختار برای بهبود انتخاب‌پذیری، نفوذپذیری و ظرفیت جذب پیشنهاد شده‌اند. پژوهش‌ها در فناوری‌های غشایی در سطح مولکولی از طریق شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، مشاهده و مقایسه ویژگی‌ها و برهم‌کنش‌ها بین غشاها و مخلوط‌های گازی را ممکن می‌سازد که معمولاً به دست آوردن و ارزیابی با روش‌های تجربی دشوار است. شبیه‌سازی دینامیک مولکولی می‌تواند نقش مؤثری در پیش‌بینی عملکرد جداسازی گازها از طریق غشاهای نانوساختاری داشته باشد.

مراجع:

- [1]. Aniqat Imtiaz, Mohd Hafiz Dzarfan Othman, Asim Jilani, Imran Ullah Khan, Roziana Kamaludin, Javed Iqbal, & Abdullah G Al-Sehemi, (2022). "Challenges, opportunities and future directions of membrane technology for natural gas purification: a critical review". *Membranes*, 12(7), 646.
- [2]. Amir Hossein Behroozi, Vahid Vatanpour, Louise Meunier, Mohammad Mehrabi, & Ehssan H Koupaie, (2023). "Membrane fabrication and modification by atomic layer deposition: processes and applications in water treatment and gas separation". *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(11), 13825-13843.
- [3]. José M Luque-Alled, César Moreno, & Patricia Gorgojo, (2023). "Two-dimensional materials for gas separation membranes". *Current Opinion in Chemical Engineering*, 39, 100901.
- [4]. Maria-Chiara Ferrari, (2023). "Recent developments in 2D materials for gas

جداسازی کارآمد طراحی کردند. انجام مدل‌سازی رایانه‌ای در سطح منافذ، مسیری را برای توصیف عملکرد غشا با دقت بسیار بالا باز می‌کند. دینامیک مولکولی یک رویکرد قوی برای شبیه‌سازی جریان مایعات و گازها در محیط‌هایی با دامنه نانومتری یا کمتر است [۲۷].

در حالی که مزایای سیستم‌های جداسازی غشایی از نظر تطبیق‌پذیری و هزینه‌های اقتصادی روشن است، تعدادی از ویژگی‌ها باید بهبود یابند و تحقیقات در این جهت قرار دارند [۱۱]. پیش‌نیاز هر شبیه‌سازی دینامیک مولکولی واقع‌بینانه یک مدل مناسب است و روش‌های آماده‌سازی و پتانسیل‌های تعامل نباید دست‌کم گرفته شوند. به شرطی که این موارد تحقق یافته باشند، دینامیک مولکولی نه تنها می‌تواند داده‌های تجربی واقعی را تکمیل کند، بلکه به‌عنوان راهی برای کشف مشکلاتی که در مطالعه تجربی دشوار است، پیش‌بینی شود [۵۴].

رویکردهای دینامیک مولکولی می‌تواند به کشف رمز و راز مواد پیچیده، چگونگی تعامل آن‌ها با محیط خود و نحوه رفتار فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی کمک کند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، دینامیک مولکولی می‌تواند برای بررسی موارد فعلی در حال انجام یا پیش‌بینی مسیر آینده علوم مواد و زمینه‌های بیولوژیکی استفاده شود. طرف اول برنامه‌های کاربردی ابزارهای محاسباتی به‌خوبی تثبیت شده است، در حالی که نقش دوم دینامیک مولکولی همچنان یک چالش است. فرایند پیش‌بینی به خودی خود یک کار پیچیده است و زمانی که به دنبال پیش‌بینی آینده است، می‌تواند پیچیده‌تر باشد. حتی اگر پیش‌بینی‌های آینده مبتنی بر دینامیک مولکولی، مبتنی بر علوم مواد ۲ تا ۳ بعدی باشد، این کار هنوز چالش برانگیز است. با نشانه‌های پیشرفت در این زمینه، گفته می‌شود که تا سال ۱۰ سال آینده قابلیت‌های محاسباتی، یک میلیون برابر مهم‌تر و کارآمدتر از فناوری‌های فعلی خواهد بود که می‌تواند شبیه‌سازی‌های بزرگتر و طولانی‌تر را به شیوه‌ای سریع‌تر و کارآمدتر انجام دهد. اعتقاد بر این است که دینامیک مولکولی به‌طور خاص و چارچوب‌های محاسباتی در یک تصویر گسترده‌تر، باید با رویکردهای تجربی کار کند تا دارای درجه بالاتری از اعتبار باشد [۳۰].

- science, 9(1-2), 121-189.
- [14]. JW McBain & SS Kistler, (1928). "Membranes for ultrafiltration, of graduated fineness down to molecular sieves". The Journal of General Physiology, 12(2), 187-200.
- [15]. Gauri Hazarika & Pravin G Ingole, (2024). "Nano-enabled gas separation membranes: Advancing sustainability in the energy-environment Nexus". Science of The Total Environment, 173264.
- [16]. Didem Aydin, İlkay Hilal Gübbük, & Mustafa Ersöz, (2024). "Recent advances and applications of nanostructured membranes in water purification". Turkish Journal of Chemistry, 48(1), 1-20.
- [17]. Majid Pakizeh & Minoo Soltani, (2011). "An overview of various type of nanocomposite membranes, manufacturing methods and their application in gas separation". Journal of Iranian Chemical engineering, 9.
- [18]. Byung Min Yoo, Jae Eun Shin, Hee Dae Lee, & Ho Bum Park, (2017). "Graphene and graphene oxide membranes for gas separation applications". Current opinion in chemical engineering, 16, 39-47.
- [19]. Poonam Kumari, Kumud Malika Tripathi, Lokesh Kumar Jangir, Ragini Gupta, & Kamalendra Awasthi, (2021). "Recent advances in application of the graphene-based membrane for water purification". Materials Today Chemistry, 22, 100597.
- [20]. Liu Yang, Fengchun Jia, Zhaoge Juan, Dehao Yu, Liyue Sun, Yu Song, Yanxin Wang, Linjun Huang, & Jianguo Tang, (2023). "High-permeable graphene oxide/graphitic carbon nitride composite nanofiltration membrane for selective separation of dye and desalination". Journal of Environmental Chemical Engineering, 11(2), 109306.
- separation membranes". Current Opinion in Chemical Engineering, 40, 100905.
- [5]. Paola Bernardo & Gabriele Clarizia, (2013). "30 years of membrane technology for gas separation". Chem. Eng., 32, 1999-2004.
- [6]. MA Aroon, AF Ismail, T Matsuura, & MM Montazer-Rahmati, (2010). "Performance studies of mixed matrix membranes for gas separation: A review". Separation and purification Technology, 75(3), 229-242.
- [7]. Reza Abedini & Amir Nezhadmoghadam, (2010). "Application of membrane in gas separation processes: its suitability and mechanisms". Petroleum & Coal, 52(2), 69-80.
- [8]. Yong Ding, (2019). "Perspective on gas separation membrane materials from process economics point of view". Industrial & Engineering Chemistry Research, 59(2), 556-568.
- [9]. Haiqing Lin, (2014). "Integrated membrane material and process development for gas separation". Current Opinion in Chemical Engineering, 4, 54-61.
- [10]. Pratibha Pandey & RS Chauhan, (2001). "Membranes for gas separation". Progress in polymer science, 26(6), 853-893.
- [11]. Daniel Bahamon, Mohammad RM Abu-Zahra, & Lourdes F Vega, (2019). "Molecular simulations of carbon-based materials for selected CO₂ separation and water treatment processes". Fluid Phase Equilibria, 492, 10-25.
- [12]. Paola Bernardo, Enrico Drioli, & Giovanni Golemme, (2009). "Membrane gas separation: a review/state of the art". Industrial & engineering chemistry research, 48(10), 4638-4663.
- [13]. H Strathmann, (1981). "Membrane separation processes". Journal of membrane





- [28]. R Ben-Mansour, MA Habib, OE Bamidele, M Basha, NAA Qasem, ABDULMALIK Peedikakkal, T Laoui, & MJAE Ali, (2016). "Carbon capture by physical adsorption: materials, experimental investigations and numerical modeling and simulations—a review". *Applied Energy*, 161, 225-255.
- [29]. N Quirke, (1986). "Molecular simulation: progress and prospects". *Fluid Phase Equilibria*, 29, 283-306.
- [30]. Arash Mollahosseini & Amira Abdelrasoul, (2021). "Molecular dynamics simulation for membrane separation and porous materials: A current state of art review". *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 107, 107947.
- [31]. Linghong Lu, Shanshan Wang, Erich A Müller, Wei Cao, Yudan Zhu, Xiaohua Lu, & George Jackson, (2014). "Adsorption and separation of CO₂/CH₄ mixtures using nanoporous adsorbents by molecular simulation". *Fluid Phase Equilibria*, 362, 227-234.
- [32]. Hannah Ebro, Young Mi Kim, & Joon Ha Kim, (2013). "Molecular dynamics simulations in membrane-based water treatment processes: A systematic overview". *Journal of membrane science*, 438, 112-125.
- [33]. Sima Majidi, Hamid Erfan-Niya, Jafar Azamat, Soroush Ziaei, Eduardo R Cruz-Chú, & Jens Honore Walther, (2023). "Membrane based water treatment: insight from molecular dynamics simulations". *Separation & Purification Reviews*, 52(4), 336-352.
- [34]. Arash Mollahosseini, Srija Argumeedi, Amira Abdelrasoul, & Ahmed Shoker, (2020). "A case study of poly (aryl ether sulfone) hemodialysis membrane interactions with human blood: Molecular
- [21]. SM Sanip, AF Ismail, PS Goh, T Soga, M Tanemura, & H Yasuhiko, (2011). "Gas separation properties of functionalized carbon nanotubes mixed matrix membranes". *Separation and Purification Technology*, 78(2), 208-213.
- [22]. Ahmed O Rashed, Andrea Merenda, Takeshi Kondo, Marcio Lima, Joselito Razal, Lingxue Kong, Chi Huynh, & Ludovic F Dumée, (2021). "Carbon nanotube membranes—strategies and challenges towards scalable manufacturing and practical separation applications". *Separation and Purification Technology*, 257, 117929.
- [23]. Catia Algieri & Enrico Drioli, (2021). "Zeolite membranes: Synthesis and applications". *Separation and purification technology*, 278, 119295.
- [24]. JDF Ramsay & S Kallus, "Zeolite membranes", in *Membrane Science and Technology*. 2000, Elsevier. p. 373-395.
- [25]. Qihui Qian, Patrick A Asinger, Moon Joo Lee, Gang Han, Katherine Mizrahi Rodriguez, Sharon Lin, Francesco M Benedetti, Albert X Wu, Won Seok Chi, & Zachary P Smith, (2020). "MOF-based membranes for gas separations". *Chemical reviews*, 120(16), 8161-8266.
- [26]. Miral Shah, Michael C McCarthy, Sonny Sachdeva, Alexander K Lee, & Hae-Kwon Jeong, (2012). "Current status of metal-organic framework membranes for gas separations: promises and challenges". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(5), 2179-2199.
- [27]. Majid Shahbabaei & Daejoong Kim, (2022). "Nanofluidics for gas separation applications: the molecular dynamics simulation perspective". *Separation & Purification Reviews*, 51(2), 245-260.

- in molecular simulation of nanoporous graphene membranes for gas separation". *Journal of the Korean Physical Society*, 71, 54-62.
- [43]. Roghayeh Jafarzadeh, Jafar Azamat, & Hamid Erfan-Niya, (2019). "Molecular dynamics study for CH₄/H₂S separation through functionalized nanoporous graphyne membrane". *Petroleum Science and Technology*.
- [44]. Sebastian Muraru & Mariana Ionita, (2020). "Super carbonaceous graphene-based structure as a gas separation membrane: a non-equilibrium molecular dynamics investigation". *Composites Part B: Engineering*, 196, 108140.
- [45]. Siamak Pakdel, Hamid Erfan-Niya, & Jafar Azamat, (2022). "Efficient separation of He/CH₄ mixture by functionalized graphenylene membranes: A theoretical study". *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 115, 108211.
- [46]. Hossein Riasat Harami, Amir Dashti, Pooria Ghahramani Pirsalami, Suresh K Bhatia, AF Ismail, & PS Goh, (2020). "Molecular simulation and computational modeling of gas separation through polycarbonate/p-nitroaniline/zeolite 4A mixed matrix membranes". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(38), 16772-16785.
- [47]. Khadija Asif, Serene Sow Mun Lock, Syed Ali Ammar Taqvi, Norwahyu Jusoh, Chung Loong Yiin, Bridgid Lai Fui Chin, & Adrian Chun Minh Loy, (2021). "A molecular simulation study of silica/polysulfone mixed matrix membrane for mixed gas separation". *Polymers*, 13(13), 2199.
- [48]. Iman Salahshoori, Ahmad Seyfaee, Aziz Babapoor, Frances Neville, & Roberto Moreno-Atanasio, (2021). "Evaluation of the effect of silica nanoparticles, temperature dynamics simulation and experimental analyses". *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 197, 105742.
- [35]. Doros N Theodorou, (1996). "Molecular simulations of sorption and diffusion in amorphous polymers". *PLASTICS ENGINEERING-NEW YORK-*, 32, 67-142.
- [36]. Yuri Yampolskii, Ingo Pinnau, & Benny D Freeman, "Materials science of membranes for gas and vapor separation". 2006, Wiley Online Library.
- [37]. Dmitri D Iarikov & S Ted Oyama, "Review of CO₂/CH₄ separation membranes", in *Membrane science and technology*. 2011, Elsevier. p. 91-115.
- [38]. Ahmad Fauzi Ismail, K Chandra Khulbe, & Takeshi Matsuura, (2015). "Gas separation membranes". Switz. Springer, 10, 973-978.
- [39]. Zhongde Dai, Jing Deng, Xuezhong He, Colin A Scholes, Xia Jiang, Bangda Wang, Hongfang Guo, Yulie Ma, & Liyuan Deng, (2021). "Helium separation using membrane technology: Recent advances and perspectives". *Separation and Purification Technology*, 274, 119044.
- [40]. Sang Eun Jee & David S Sholl, (2009). "Carbon dioxide and methane transport in DDR zeolite: insights from molecular simulations into carbon dioxide separations in small pore zeolites". *Journal of the American Chemical Society*, 131(22), 7896-7904.
- [41]. Glenn M Torrie & John P Valleau, (1977). "Nonphysical sampling distributions in Monte Carlo free-energy estimation: Umbrella sampling". *Journal of computational physics*, 23(2), 187-199.
- [42]. S Mahmood Fatemi, Aminreza Baniasadi, & Mahrokh Moradi, (2017). "Recent progress





and pressure on the performance of PSF/PEG/SiO₂ mixed matrix membranes: A molecular dynamics simulation (MD) and design of experiments (DOE) study”. *Journal of Molecular Liquids*, 333, 115957.

- [49]. Mina Mohammadzadeh, Siamak Pakdel, Jafar Azamat, & Hamid Erfan-Niya, (2024). “High-efficient helium purification through a novel Si-PWN zeolite membrane: Insights from molecular simulations”. *Computational Materials Science*, 237, 112895.
- [50]. Amir Hasanzadeh, Siamak Pakdel, Jafar Azamat, Hamid Erfan-Niya, & Alireza Khataee, (2021). “Atomistic understanding of gas separation through nanoporous DDR-type zeolite membrane”. *Chemical Physics*, 540, 110985.
- [51]. Hossein Rezaei, Hamid Erfan-Niya, Jafar Azamat, & Siamak Pakdel, (2023). “Efficient helium separation through SIFSIX-3-Cu membrane: a molecular dynamics study”. *Computational Materials Science*, 223, 112143.
- [52]. Rungroj Chanajaree, Wutthigrai Sailuam, & Kompichit Seehamart, (2022). “Molecular self-diffusivity and separation of CH₄/H₂S in metal organic framework MIL-47 (V)”. *Microporous and Mesoporous Materials*, 335, 111783.
- [53]. Xuezhong He, Daniel R Nieto, Arne Lindbråthen, & May-Britt Hägg, (2017). “Membrane system design for CO₂ capture: from molecular modeling to process simulation”. *Process Systems and Materials for CO₂ Capture: Modelling, Design, Control and Integration*, 249-281.
- [54]. Sylvie Neyertz, (2013). “Gas transport in dense polymeric membranes, molecular dynamics simulations”. *Encyclopedia of Membrane Science and Technology*, 1-21.

Molecular Dynamics Simulations of Membrane-Based Gas Separation: Overview, Challenges and Future Perspectives

Amir Aghaei- Livar¹, Sima Majidi², Siamak Pakdel², Hamid Erfan-Niya^{3*}

1. M.Sc. Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2. Ph.D., Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
3. Associated Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

Article History:

Received: 07 October 2025

Revised: 07 November 2025

Accepted: 10 November 2025

Keywords:

Molecular dynamics simulation

Gas separation

Nanotechnology

Membrane

Filtration

ABSTRACT

The gas separation from the mixture of gases is carried out using different methods in the industries. The membrane technology was expanded in the separation field since its efficiency and appropriate operational characteristics were elucidated using various kinds of membranes. Today, the membrane technology is one of the most widely used processes in the industries due to lower energy requirements, compact size, less damage to the environment, and higher economic efficiency. Computational studies and molecular dynamics (MD) simulations have clarified some obscure aspects in the field of the membrane technology. MD simulations are powerful tools to complement experimental evidence or predict the transport phenomena of various gases for separation of the special molecules. Particularly due to integrating Newton's equations of motion for all atoms in a system, as they can provide direct structural and dynamical information at the atomic level. As a result, the interaction of the particles on the atomic scale can be obtained.

DOR: [20.1001.1.2510.1106.1404.07.15](https://doi.org/10.1001.1.2510.1106.1404.07.15)

How to cite this article

A. Aghaei- Livar, S. Majidi, S. Pakdel, H. Erfan-Niya, Molecular Dynamics Simulations of Membrane-Based Gas Separation: Overview, Challenges and Future Perspectives. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025; 12(3): 69-84. (https://ijge.irangi.org/article_735143.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: herfan@tabrizu.ac.ir, (H. Erfan-Niya).

Available online 21 December 2025

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

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



تدوین الگوی توسعه و ترویج فرهنگ سازمانی شرکت پالایش گاز سرخون و قشم

زینب زارع پور^{۱*}، محسن صفری^۱، عیسی باخدا^۲، محمود درویش نژاد^۲، علی مرادپور جغدیری^۲، علیرضا صالحی^۲

۱. گروه پژوهشی مدیریت راهبردی، جهاد دانشگاهی واحد هرمزگان، بندرعباس، ایران

۲. رئیس امور پژوهش و فناوری، شرکت پالایش گاز سرخون و قشم، مری، بندرعباس، ایران

۳. شرکت پالایش گاز سرخون و قشم، مری، بندرعباس، ایران

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

مقاله علمی - پژوهشی

صفحه ۸۵ - ۱۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷

چکیده

پژوهش حاضر باهدف تدوین الگوی توسعه و ترویج فرهنگ سازمانی در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم انجام شد. این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، کیفی است که با استراتژی نظریه داده بنیاد انجام شده است. داده‌ها از طریق مصاحبه نیمه ساختار یافته با ۱۹ نفر از خبرگان (مدیران و کارشناسان ارشد) که به روش نمونه‌گیری هدفمند انتخاب شدند، گردآوری گردید و فرآیند نمونه‌گیری تا رسیدن به مرحله اشباع نظری ادامه یافت. در مرحله کدگذاری باز، ابتدا ۶۰ مقوله فرعی استخراج و پس از اعتبارسنجی توسط خبرگان، ۵۵ مقوله تأیید گردید. در مرحله کدگذاری محوری، این مقوله‌ها در قالب ۶ بعد پارادایمی و ۱۰ مقوله اصلی شامل: شرایط علی (عوامل سازمانی و فردی)، پدیده محوری (توسعه و ترویج فرهنگ سازمانی)، شرایط زمینه‌ای (عوامل سازمانی و فردی)، شرایط مداخله‌گر (عوامل سازمانی و فردی)، راهبردها (رهبری سازمانی و منابع انسانی) و پیامدها (اثربخشی سازمانی و رشد فردی) دسته‌بندی شدند. نتایج پژوهش بیانگر آن است که این الگو با شناسایی شاخص‌های نوآورانه‌ای همچون عدالت سازمانی، فرهنگ ایمنی، تعلق سازمانی و احساس افتخار به شرکت، که در مطالعات پیشین این سازمان مغفول مانده بودند، ابعاد جدیدی از فرهنگ سازمانی را ترسیم می‌کند. در نهایت، پیوستگی میان این ابعاد منجر به طراحی مدلی جامع گردیده است که می‌تواند به‌عنوان یک نقشه‌راه عملیاتی، مسیر ارتقای سرمایه انسانی و بهبود مستمر عملکرد در صنعت گاز را تسهیل نماید.

کلید واژه‌ها: فرهنگ سازمانی، مدل‌سازی فرهنگ سازمانی، نظریه داده بنیاد، صنعت گاز، مدل پارادایمی

۱. مقدمه

فرهنگ سازمانی به‌عنوان مجموعه‌ای از ارزش‌ها، باورها و هنجارهای مشترک، نقشی تعیین‌کننده در موفقیت یا شکست سازمان‌ها دارد. تجربه نشان داده است که سازمان‌هایی با حداقل امکانات مادی، در صورت برخورداری از فرهنگ سازمانی قوی، قادر به دستیابی به موفقیت‌های چشمگیر هستند؛ در حالی که سازمان‌هایی با بهترین توانایی‌های مادی، در نبود فرهنگ مناسب، با شکست مواجه می‌شوند [۱]. اهمیت این موضوع در صنایع نفت و گاز که محیطی پیچیده، پرخطر و سرمایه‌بر دارند، دوچندان است. وجود فرهنگ سازمانی قوی می‌تواند به ارتقای ایمنی، افزایش





بهره‌وری و تقویت همکاری میان کارکنان منجر شود و از این رو مدیریت فرهنگ‌سازمانی یک ضرورت راهبردی برای پایداری و توسعه محسوب می‌شود [۲،۳].

فرهنگ‌سازمانی در ساختار، قوانین و خط‌مشی‌ها تبلور می‌یابد، اما این انسان‌ها هستند که به آن روح می‌بخشند. هر سازمان دارای فرهنگ موجود و فرهنگ مطلوب است که می‌توان از طریق نگرش کارکنان و مدیران آن را شناسایی کرد [۴]. پژوهشگران متعددی فرهنگ‌سازمانی را به‌عنوان عامل اساسی موفقیت سازمان‌ها بررسی کرده‌اند. به گفته دنیسون و لایف، قانون فرهنگ در سازمان‌ها از هر قانون دیگری قوی‌تر است [۵]. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که فرهنگ‌سازمانی بر جنبه‌هایی چون انگیزش، رضایت شغلی، خلاقیت و نوآوری، نحوه تصمیم‌گیری و میزان مشارکت کارکنان اثرگذار است [۶،۷]. همچنین فرهنگ‌سازمانی دارای کارکردهایی چون تسهیل تعهد گروهی، ثبات اجتماعی، شکل‌دهی رفتار افراد و سازگاری با محیط بیرونی است [۸].

فرهنگ‌سازمانی علاوه بر ارزش‌ها و باورها، شامل نمادها و سنت‌هایی است که رفتار و هویت سازمان را شکل می‌دهند؛ نمادهای آشکار مانند عناوین شغلی و نوع پوشش به‌راحتی تغییر می‌یابند، اما نمادهای پنهان همچون باورها و ارزش‌ها در برابر تغییر مقاوم‌ترند و نشانگر قدرت فرهنگ‌سازمانی محسوب می‌شوند [۹].

مدل‌های متعددی برای فرهنگ‌سازمانی ارائه شده است. برای مثال، کاظمی و فرجلو مطلق (۱۳۹۶) با استفاده از مدل کویین نشان دادند که فرهنگ گروهی مناسب‌ترین فرهنگ برای ایجاد دانشگاه یادگیرنده است [۱۰]. قدسیان و همکاران (۱۳۹۴) الگویی سه‌بعدی شامل انطباق بیرونی، هماهنگی درونی و روابط انسانی ارائه کردند [۱۱]. فرهی و همکاران (۱۳۹۴) فرهنگ مطلوب را در پنج بعد مقصد و مسیر، ساختار، منافع انسانی، عوامل محیطی و ارزشی معرفی کردند [۱۲]. همچنین انصاری و همکاران (۱۳۹۰) الگویی شامل مؤلفه‌هایی چون مشتری‌مداری، احترام متقابل، انگیزش، انسجام و کار تیمی ارائه کردند [۱۳]. در پژوهش‌های بین‌المللی نیز عواملی چون رهبری خدمتگزار، رفتار شهروندی و عملکرد کارکنان به‌عنوان عناصر مؤثر بر توسعه فرهنگ‌سازمانی گزارش شده است [۱۴، ۱۵]. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد فرهنگ‌سازمانی ساختاری ثابت ندارد و شرایط سازمانی تعیین‌کننده آن است.

با وجود این مطالعات، تاکنون مدلی جامع و بومی برای فرهنگ‌سازمانی شرکت پالایش گاز سرخون و قشم ارائه نشده است. ضرورت انجام این پژوهش از آنجا ناشی می‌شود که شرایط خاص این شرکت، شامل ویژگی‌های محیطی، انسانی و ساختاری، موجب می‌شود مدل‌های موجود پاسخگوی نیازهای آن نباشند؛ بنابراین شناسایی و طراحی مدلی جامع که بتواند فرهنگ‌سازمانی این شرکت را به‌طور دقیق تبیین کند، ضروری است.

نوآوری پژوهش حاضر در آن است که مدل محوری فرهنگ‌سازمانی نه صرفاً بر اساس نظریه‌های موجود، بلکه با اتکا به داده‌های واقعی کارکنان و مدیران شرکت پالایش گاز سرخون و قشم شکل می‌گیرد. این مدل با تحلیل داده‌های میدانی و ارتباط مستقیم با شرایط سازمانی طراحی شده و می‌تواند تصویری روشن از وضعیت موجود و مسیر مطلوب فرهنگ‌سازمانی ارائه دهد. بدین ترتیب، پژوهش حاضر نخستین تلاش برای ارائه مدلی جامع و بومی فرهنگ‌سازمانی در این شرکت محسوب می‌شود.

۲. اهداف پژوهش

۲-۱. هدف اصلی

طراحی و ارائه‌ی مدل جامع توسعه و ترویج فرهنگ‌سازمانی در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم بر اساس داده‌های میدانی و تحلیل شرایط سازمانی.

۲-۲. اهداف فرعی

- برای دستیابی به هدف اصلی، پژوهش حاضر اهداف زیر را دنبال می‌کند:
- بررسی و ارزیابی وضعیت موجود مؤلفه‌های فرهنگ‌سازمانی در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم.
- تحلیل شرایط علی، زمینه‌ای و مداخله‌گر مؤثر بر توسعه و ترویج فرهنگ‌سازمانی.
- استخراج راهبردهای عملی برای ارتقای فرهنگ‌سازمانی متناسب با شرایط شرکت.
- شناسایی و تبیین پیامدهای ناشی از توسعه و ترویج فرهنگ‌سازمانی در عملکرد و تعاملات سازمانی.
- مقایسه نتایج سنجش فرهنگ‌سازمانی با داده‌های مطالعات پیشین به‌منظور آشکارسازی روند تغییرات و نقاط قوت و ضعف.

۳. پرسش‌های تحقیق

بودن بخش قابل‌توجهی از آن، اکثر نظریه‌پردازان معتقدند فرهنگ‌سازمانی نقطه محوری عملکرد سازمان است [۲۰].

فرهنگ‌سازمانی مجموعه‌ای از اعتقادات، باورها و ارزش‌های مشترک است که بر رفتار، اندیشه و تغییر سازمان اثر می‌گذارد [۲۱]. این فرهنگ به مثابه شیوه‌های زندگی درون‌سازمانی و الگویی پیش‌فرض اولیه است که گروه‌ها برای سازگاری با محیط بیرونی و تعاملات درونی توسعه می‌دهند [۲۲]. یک فرهنگ‌سازمانی منسجم و قوی موجب افزایش مسئولیت‌پذیری، تعهد و رضایت شغلی کارکنان می‌شود [۲۳]. پژوهش‌ها نشان داده‌اند فرهنگ‌سازمانی بر متغیرهایی چون انگیزش، خلاقیت، تصمیم‌گیری، مشارکت، فداکاری و اثربخشی اثرگذار است [۲۴]. تغییر فرهنگ‌سازمانی دشوار، زمان‌بر و هزینه‌بر است، اما شرط لازم برای تغییرات پایدار در سازمان محسوب می‌شود [۲۵].

فرهنگ‌سازمانی ارزش‌های غالبی است که سازمان از آن حمایت می‌کند و فلسفه‌ای که خطمشی سازمان را هدایت می‌کند [۲۶]. این فرهنگ سراسر سازمان را احاطه کرده و بر همه ابعاد آن اثرگذار است [۲۷]. درنهایت، فرهنگ‌سازمانی روش‌های سازمانی را شکل داده، قابلیت‌های سازمانی را یکپارچه می‌کند و می‌تواند مانع یا عامل دستیابی به اهداف باشد [۲۸].

فرهنگ‌سازمانی در این تحقیق به معنای ارزش‌ها و باورهای مشترک کارکنان شرکت گاز سرخون و قشم است که در قالب ۶ بعد مدل پارادایمی (شرایط علی، زمینه‌ای و...) شناسایی شده‌اند.

۴-۲. مدل‌های فرهنگ‌سازمانی

مدل‌های متعددی برای تبیین فرهنگ‌سازمانی ارائه شده‌اند. هریسون و هندی چهار گونه فرهنگ قدرت، نقش، وظیفه و شخص را معرفی کردند [۲۹]. شاین سه نوع فرهنگ مدیریتی شامل فرهنگ متصدی، فرهنگ مهندسی و فرهنگ اجرایی را بیان نمود [۳۰]. شولز پنج گونه فرهنگی (ثبات، فعال، آینده‌نگر، اکتشاف و خلاق) را با توجه به ابعاد تحول، عوامل داخلی و عوامل خارجی معرفی کرد [۳۱].

کویین و کامرون^۱ چهار گونه فرهنگ عقلایی، مرامی، قومی و سلسله‌مراتبی را مطرح کردند [۳۲]. دنیسون^۲ نیز مدلی با چهار محور اصلی شامل درگیر شدن در کار، سازگاری، انطباق‌پذیری و رسالت ارائه داد که هر یک با شاخص‌های مشخص قابل‌سنجش هستند [۳۳]. رابینز^۳ چهار نوع فرهنگ

با توجه به ماهیت اکتشافی پژوهش حاضر، به‌جای فرضیه‌ها، پرسش‌های تحقیق به‌صورت روشن و دقیق تدوین شده‌اند. این پرسش‌ها مسیر تحقیق را مشخص کرده و مبنای طراحی مدل فرهنگ‌سازمانی در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم خواهند بود:

- وضعیت موجود مؤلفه‌های فرهنگ‌سازمانی در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم چگونه است؟
- چه شرایط علی بر توسعه و ترویج فرهنگ‌سازمانی در این شرکت اثرگذارند؟
- چه شرایط زمینه‌ای در شکل‌گیری و تقویت فرهنگ‌سازمانی نقش دارند؟
- چه شرایط مداخله‌گر می‌توانند روند توسعه فرهنگ‌سازمانی را تسهیل یا تضعیف کنند؟
- چه راهبردهایی برای توسعه و ترویج فرهنگ‌سازمانی در این شرکت مناسب‌ترند؟
- پیامدهای توسعه و ترویج فرهنگ‌سازمانی در عملکرد و تعاملات سازمانی چیست؟
- نتایج سنجش فرهنگ‌سازمانی در این پژوهش چه تفاوتی با یافته‌های مطالعات گذشته دارد؟

۴. مبانی نظری تحقیق

۴-۱. فرهنگ‌سازمانی

موفقیت چشمگیر سازمان‌های کوچک با حداقل سرمایه و امکانات و شکست سازمان‌های بزرگ با حداکثر سرمایه و امکانات بیانگر نقش قابل‌توجه عوامل غیرمادی و معنوی در موفقیت سازمان‌هاست که در میان این عوامل، فرهنگ‌سازمانی به‌عنوان یک عامل مؤثر نقش مهمی در عملکرد سازمان‌ها دارد [۱۶]. بررسی نظریه‌های مدیریت نیز نشان می‌دهد فرهنگ‌سازمانی رفتار کارکنان را شکل داده و بر تصمیمات مدیران در تمام سطوح اثر می‌گذارد [۱۷].

فرهنگ الگویی از مفروضات مشترک است که گروه برای حل مشکلات انطباق‌پذیری خارجی و هماهنگی داخلی فرا می‌گیرد [۱۸]. فرهنگ‌سازمانی با فرهنگ عمومی جامعه پیوند نزدیک دارد و بخش گسترده‌ای از رفتار و بالندگی سازمان را پوشش می‌دهد [۱۹]. با وجود پیچیدگی و غیرملموس

1. Quinn & Cameron
2. Denison
3. Robbins



علمی، باشگاهی، تیمی و تدافعی را معرفی کرد [۳۴]. هافستد^۱ فرهنگ‌سازمانی را در پنج بعد فاصله قدرت، اجتناب از عدم اطمینان، فردگرایی-گروه‌گرایی، مردسالاری-زن‌سالاری و جهت‌گیری بلندمدت-کوتاه‌مدت بررسی کرد [۳۵]. مدل اوریلی و کالدول^۲ نیز با رویکرد تناسب فرد-سازمان^۳ ارائه شده است که ابعاد خاصی از فرهنگ‌سازمانی را مورد توجه قرار داده است [۳۶].

مقایسه این مدل‌ها نشان می‌دهد برخی بیشتر بر ابعاد فرهنگی ملی و تفاوت‌های بین‌المللی تمرکز دارند (مانند هافستد)، در حالی که برخی دیگر ابعاد درونی سازمان و

۵. پیشینه پژوهشی تحقیق

در این بخش و در (جدول ۱) برخی از مطالعات داخلی و خارجی صورت گرفته در حوزه ی فرهنگ‌سازمانی آورده شده است:

جدول ۱: پیشینه پژوهشی تحقیق (مطالعات داخلی و خارجی)

ردیف	نویسندگان	سال	عنوان پژوهش	نوع مطالعه	عوامل کلیدی
۱	مهرآراد، حمدی، خلیلی عراقی [۳۷]	۱۴۰۳	طراحی مدل فرهنگ‌سازمانی بازارمحور و رابطه‌مدار با استفاده از روش دلفی برای بررسی عملکرد مدیریت مالی در شرکت ملی گاز ایران	دلفی / مدل سازی	فرهنگ رابطه‌مدار (رهبری، عملکرد مالی، تعهد، توسعه منابع انسانی)، فرهنگ بازارمحور (جمع‌گرایی، مأموریت‌گرایی، رقابت‌پذیری)، فرهنگ دانش‌محور (نوآوری، ایده‌پردازی)
۲	مخبر دزفولی، رضایی [۳۸]	۱۴۰۳	تدوین الگوی فرهنگ ایمنی یک شرکت فولادی: یک مطالعه آمیخته	مطالعه آمیخته	مدیریت نظام‌مند و متعهد، عوامل فردی، شغلی، اجتماعی، محیطی، سازمانی و پیمانکاری
۳	حسن‌زاده شوئیلی، پیدایی، رزقی رستمی [۳۹]	۱۴۰۳	تدوین و ارائه الگوی ریاضی معماری فرهنگ‌سازمانی مبتنی بر همسویی نقاط مرجع استراتژیک	مدل سازی ریاضی	پیشاپندها (استراتژی کسب‌وکار، رهبری، ساختار سازمانی، تکنولوژی، منابع انسانی)، فرآیند (فرهنگ‌سازمانی، تغییر)، نتایج (فردی، گروهی، سازمانی)، پیامدها (سرمایه اجتماعی)
۴	امیری و همکاران [۴۰]	۱۴۰۲	طراحی الگوی فرهنگ‌سازمانی با رویکرد فرهنگ مشارکتی در مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران	کیفی / مدل سازی	محیط درونی و بیرونی، الزامات نهادی، عوامل تعدیل‌گر، پیامدهای فرهنگ مشارکتی
۵	رنگریز و همکاران [۴۱]	۱۴۰۲	طراحی الگوی فرهنگ‌سازمانی دیجیتال در صنعت بانکداری ایران	مدل سازی / کیفی	شرایط علی (زیرساخت دیجیتال)، عوامل مداخله‌گر (اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، فناورانه)، عوامل زمینه‌ای (نوآوری کسب‌وکار، مدیریت ارتباط با مشتری)، راهبرد تحول دیجیتال، پیامدها (عملکرد تعالی محور)
۶	رنگریز و همکاران [۴۲]	۱۴۰۱	ارائه مدل تحول فرهنگ‌سازمانی تعالی محور در صنعت فولاد	مدل سازی / کیفی	شرایط علی (سازمانی، فناورانه، فردی)، شرایط زمینه‌ای (فرهنگ و محیط، ساختار و فرآیند)، شرایط مداخله‌گر (عدالت سازمانی، پایش و ارزیابی)، راهبردها (مدیریت مشارکتی، انگیزش، توانمندسازی)، پیامدها (رشد فردی و توسعه‌سازمانی)
۷	علیزاده‌مجد، پرگو، داوودی [۴۳]	۱۴۰۱	واکاوی عوامل مؤثر بر فرهنگ‌سازمانی در صنایع پتروشیمی کشور	تجربی / کیفی	سرمایه انسانی، توانمندسازی، دل‌بستگی شغلی، رهبری، انعطاف‌پذیری، استراتژی، ارزش‌ها، فرهنگ یادگیرنده؛ پیامدهای مادی و غیرمادی
۸	افتخاری، فرهی، جمشیدی [۴۴]	۱۴۰۰	طراحی مدل فرهنگ‌سازمانی با عملکرد بالا در صنایع پتروشیمی ایران (رویکرد کیفی)	کیفی	عوامل بسترساز بیرونی و درونی، عوامل فرآیندی، عوامل رفتاری

1. Hofstede

2. O'Reilly & Caldwell

3. Organizational Culture Profile (OCP)

۹	بوگاله، آدیسالم تادسه؛ دببلا، کنیسا لمی ^۱ [۴۵]	۲۰۲۴	مرور نظام مند فرهنگ سازمانی	مرور نظام مند	فرهنگ سازمانی با عملکرد سازمانی، نوآوری، تعهد و رضایت کارکنان رابطه معنادار دارد؛ سبک‌های فرهنگ اثرات متفاوتی دارند
۱۰	گونزالس تورس ^۲ و همکاران [۴۶]	۲۰۲۳	فرهنگ و اقلیم سازمانی: دیدگاه‌های جدید	مروری نظری	مایز و همپوشانی فرهنگ و اقلیم سازمانی تشریح شده؛ مدل‌های ترکیبی برای سنجش هم‌زمان پیشنهاد می‌شود
۱۱	ایراگی، کلود؛ کیونگو، جوزف ^۳ [۴۷]	۲۰۲۳	فرهنگ سازمانی و نوآوری: بررسی تجربی	تجربی (کمی)	فرهنگ‌های نوآورانه مبتنی بر خودمختاری و ریسک‌پذیری با شدت نوآوری محصول/فرآیند همبستگی مثبت دارند
۱۲	آیچوش ^۴ و همکاران [۴۸]	۲۰۲۲	رابطه فرهنگ سازمانی و فرآیندهای مدیریت دانش	فرا-تحلیل (کمی)	فرهنگ‌های حمایتی و یادگیرنده اجرای فرآیندهای مدیریت دانش را تقویت می‌کنند؛ فرهنگ‌های سلسله‌مراتبی مانع جریان دانش می‌شوند
۱۳	هاه [۴۹]	۲۰۲۰	تأثیر فرهنگ سازمانی بر سیستم اطلاعات حسابداری و عملکرد عملیاتی شرکت‌های کوچک و متوسط در شهر هوشی مین	تجربی (کمی)	فرهنگ مشتری‌مدار و یادگیرنده کیفیت سیستم اطلاعات حسابداری را بهبود داده و عملکرد عملیاتی شرکت‌های کوچک و متوسط را ارتقا می‌دهد
۱۴	برت ^۵ [۵۰]	۲۰۱۷	سازمان ارزش‌محور: سلامت فرهنگی و رفاه کارکنان به‌عنوان مسیر دستیابی به عملکرد پایدار	مروری/مفهومی	همسویی ارزش‌ها و رفتارهای رهبری با ارزش‌های سازمانی رفاه کارکنان و اعتماد را افزایش می‌دهد و به عملکرد پایدار می‌انجامد
۱۵	وریک و میلیان ^۶ [۵۱]	۲۰۱۶	هنجارها و انتظارات رفتاری: رویکردی کمی برای ارزیابی فرهنگ سازمانی	ابزار ساز/کمی	مقیاس‌های کمی برای سنجش هنجارها و انتظارات رفتاری ارائه می‌شود؛ همسویی هنجارها با اهداف کسب‌وکار با رفتارهای شهروندی سازمانی مرتبط است
۱۶	نارانجو ^۷ و همکاران [۵۲]	۲۰۱۶	بررسی روابط بین فرهنگ سازمانی، نوآوری و عملکرد در شرکت‌های اسپانیایی	تجربی (کمی)	فرهنگ آدهو کراسی و کلن با نوآوری و عملکرد بهتر همراهان؛ فرهنگ بازار با نتایج مالی کوتاه‌مدت و فرهنگ سلسله‌مراتبی با کارایی و کنترل پیوند دارد

۶. نوع و روش پژوهش

شامل مجموعه‌ای از رویه‌ها برای گردآوری و تحلیل نظام‌مند داده‌هاست که هدف آن تدوین نظریه‌ای برخاسته از داده‌های واقعی است [۵۳].

در این پژوهش از روش نظریه داده‌بنیاد^۸ که یک روش کیفی مبتنی بر رویکرد تفسیری است استفاده شد. این روش

1. Bogale, Addisalem Tadesse; Debela, Kenenisa Lemi
2. González Torres
3. Iragi, Claude; Kyongo, Joseph
4. Aichouche
5. Ha
6. Barrett
7. Warrick & Milliman
8. Naranjo
9. Grounded Theory

**جامعه آماری:**

جامعه آماری پژوهش شامل خبرگان و مدیران ارشد شرکت گاز سرخون و قشم بود. انتخاب نمونه‌ها به صورت نمونه‌گیری هدفمند انجام شد؛ معیار انتخاب خبرگان شامل داشتن حداقل ۱۰ سال سابقه کاری در شرکت گاز سرخون و قشم، آشنایی با فرهنگ سازمانی شرکت و مشارکت در تصمیم‌گیری‌های کلان بود. در مجموع ۱۹ نفر انتخاب شدند.

روش گردآوری داده‌ها:

اطلاعات از سه منبع گردآوری شد:

- بررسی ادبیات موضوع و اسناد بالادستی شرکت (تصویب‌نامه شورای اداری، بیانیه مأموریت، ارزش‌های سازمانی، خط‌مشی شرکت و منشور اخلاقی وزارت نفت).
- مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان.
- یادداشت‌های میدانی پژوهشگر.

مصاحبه‌ها بین ۴۵ دقیقه تا ۷۵ دقیقه طول کشیدند و فاصله زمانی بین مصاحبه‌ها بین ۳ تا ۷ روز بود تا امکان تحلیل تدریجی داده‌ها و اصلاح پرسش‌ها فراهم شود.

مصاحبه‌ها تا رسیدن به اشباع نظری ادامه یافتند. اشباع از مصاحبه شانزدهم به بعد مشاهده شد؛ یعنی داده‌های جدیدی به مقوله‌ها اضافه نمی‌شد و روابط بین مقوله‌ها تثبیت شده بود. با این حال سه مصاحبه دیگر برای اطمینان انجام شد و در نهایت ۱۹ مصاحبه تحلیل گردید [۵۴].

شیوه تحلیل داده‌ها:

تحلیل داده‌ها بر اساس مراحل سه‌گانه کدگذاری در نظریه داده‌بنیاد انجام شد:

- کدگذاری باز: استخراج مفاهیم اولیه از متن مصاحبه‌ها.
- کدگذاری محوری: دسته‌بندی مفاهیم در قالب مقوله‌های اصلی و فرعی.
- کدگذاری انتخابی: شناسایی مقوله هسته و تدوین مدل نهایی.

اعتبار و پایایی (روایی و اعتمادپذیری):

برای اطمینان از کیفیت یافته‌های پژوهش، مجموعه‌ای از

اقدامات سامانمند به شرح زیر انجام شد:

الف) اعتبار (روایی): جهت ارتقای روایی پژوهش، از راهبرد «مثلث‌سازی^۲» استفاده گردید؛ بدین معنا که داده‌ها از منابع متعددی شامل مصاحبه‌های عمیق، تحلیل اسناد بالادستی و یادداشت‌های میدانی گردآوری شدند. همچنین، جهت تأیید نهایی، خلاصه‌ای از کدها و تفاسیر استخراج شده برای مشارکت‌کنندگان (خبرگان) ارسال گردید و صحت انطباق یافته‌ها با تجربیات واقعی آنان مورد تأیید قرار گرفت^۳.

ب) پایایی (اعتمادپذیری): جهت سنجش پایایی تحلیل‌ها، از روش «توافق بین دو کدگذار» استفاده شد. بدین منظور، تعداد ۴ مصاحبه به صورت تصادفی انتخاب و توسط یک کدگذار ثانویه (آشنا به روش داده‌بنیاد) مجدداً کدگذاری گردید. میزان پایایی بازآزمون و توافق میان کدگذاران بر اساس ضریب هولستی^۴ به شرح زیر محاسبه شد:

$$R = \frac{2M}{N_1 + N_2} \quad (1)$$

در این فرمول، M تعداد توافق‌ها و N_1 و N_2 تعداد کدهای استخراج شده توسط هر یک از کدگذاران است. مقدار این شاخص بین صفر (عدم توافق) و یک (توافق کامل) متغیر است و در صورتی که از ۰/۶ بزرگتر باشد، مطلوب ارزیابی می‌شود.

در پژوهش حاضر، میانگین ضریب هولستی برای مصاحبه‌های منتخب برابر با ۰/۸۲ محاسبه شد که با توجه به بالاتر بودن از حدنصاب مذکور، ثبات و قابلیت اعتماد نتایج تأیید گردید. شایان ذکر است که موارد اختلافی در کدگذاری‌ها نیز از طریق بحث مشترک میان پژوهشگر و کدگذار ثانویه و رسیدن به اجماع نهایی برطرف شد تا انسجام تحلیل‌ها حفظ گردد.

ویژگی‌های جمعیت‌شناختی و سوابق تخصصی ۱۹ نفر از خبرگان مشارکت‌کننده در این پژوهش که بر اساس معیارهای تخصص و تجربه انتخاب شده‌اند، در (جدول ۲) خلاصه شده است.

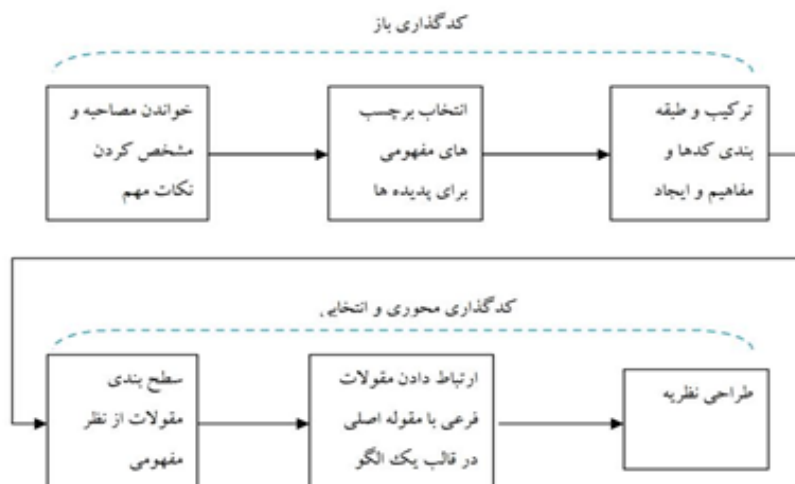
1. Purposeful Sampling
2. Triangulation
3. Member Check
4. Holsti's Coefficient

جدول ۲: ویژگی‌های جمعیت‌شناختی مشارکت‌کنندگان

ردیف	جنسیت	سن	تحصیلات	سمت	سوابق شغلی	حوزه فعالیت
۱	مرد	۴۸	کارشناسی	رئیس واحد پالایش و نم‌زدایی	۲۵	عملیات
۲	زن	۴۸	کارشناسی	کارمند ارشد امور بازرسی فنی	۲۰	ستاد
۳	مرد	۴۷	کارشناسی ارشد	کارشناس ارشد آموزش	۲۳	ستاد
۴	مرد	۵۲	کارشناسی	رئیس بهره‌برداری	۲۵	عملیات
۵	مرد	۵۰	کارشناسی ارشد	رئیس تدارکات	۲۴	ستاد
۶	مرد	۴۷	کارشناسی ارشد	رئیس آموزش، تأمین، طرح و برنامه‌ریزی نیروی انسانی	۲۰	ستاد
۷	مرد	۵۴	کارشناسی ارشد	رئیس تعمیرات مکانیک	۳۳	عملیات
۸	مرد	۴۶	کارشناسی ارشد	رئیس تخصیص منابع و بودجه	۱۵	ستاد
۹	مرد	۵۳	کارشناسی ارشد	رئیس PM	۲۸	عملیات
۱۰	مرد	۵۰	کارشناسی ارشد	رئیس امور پیمان‌ها	۲۳	ستاد
۱۱	مرد	۵۳	کارشناسی ارشد	رئیس مطالعات انرژی و تحلیل سیستم	۲۳	ستاد
۱۲	زن	۳۶	کارشناسی	مشاور بانوان و مسئول خدمات	۱۶	ستاد
۱۳	مرد	۳۹	دکتری	مسئول مهندسی فرآیند	۱۲	عملیات
۱۴	مرد	۵۵	کارشناسی ارشد	رئیس روابط عمومی	۳۴	عملیات
۱۵	زن	۴۲	کارشناسی	کارشناس امور پیمان‌ها	۲۲	ستاد
۱۶	مرد	۵۴	کارشناسی ارشد	رئیس خدمات آب و برق و پساب صنعتی	۳۱	عملیات
۱۷	مرد	۵۰	کارشناسی ارشد	معاون عملیات	۳۰	عملیات
۱۸	مرد	۵۰	کارشناسی ارشد	معاون پشتیبانی	۲۳	ستاد
۱۹	مرد	۴۷	کارشناسی ارشد	معاون مهندسی و توسعه	۲۳	ستاد

تحلیل داده‌های (جدول ۲) نشان‌دهنده ی غنای تجربی و علمی تیم خبرگان پژوهش است. از منظر تحصیلات، بیش از ۸۴ درصد مشارکت‌کنندگان دارای مدرک کارشناسی ارشد و دکتری هستند که عمق نظری تحلیل‌ها را تضمین می‌کند. همچنین، میانگین سوابق شغلی خبرگان حدود ۲۴ سال است که نشان‌دهنده اشراف کامل آن‌ها بر فرهنگ‌سازمانی، چالش‌های عملیاتی و زیرساخت‌های شرکت پالایش گاز سرخون و

قشم است. توزیع خبرگان در دو حوزه عملیات و ستاد و همچنین حضور مدیران ارشد و میانی در تخصص‌های متنوع (نظیر بازرسی فنی، آموزش، مهندسی فرآیند و پشتیبانی)، حکایت از رویکردی همه‌جانبه در استخراج کدهای اولیه دارد. این تنوع باعث شده است که مدل نهایی، هم ابعاد فنی-عملیاتی و هم ابعاد انسانی-مدیریتی سازمان را به دقت پوشش دهد.



شکل ۱: مسیر انجام و تکمیل تجزیه و تحلیل داده‌ها در نظریه داده بنیاد (نقوی، ۱۳۸۸)

۱-۶. طراحی مدل

همچنین برای رسیدن به پایایی در این پژوهش چهار

راهکار زیر به کار گرفته شد:

۱. استفاده از فرایندهای ساخت یافته از مصاحبه‌های همگرا

۲. سازمان‌دهی فرایندهای ساخت یافته برای ثبت، نوشتن و تفسیر داده‌ها

۳. وجود حداقل دو نفر برای انجام مصاحبه به صورت جداگانه و موازی با یکدیگر

۱-۸. روایی و پایایی داده‌ها

۱-۸. آمار توصیفی مشارکت‌کنندگان

در این قسمت (جدول ۳) به توصیف متغیرهای جمعیت‌شناختی (جنسیت، سن، سوابق شغلی و میزان تحصیلات) پاسخ‌دهندگان مرحله کیفی پرداخته شده است:

جدول ۳: اطلاعات جمعیت‌شناختی مشارکت‌کنندگان

متغیر	فراوانی	درصد فراوانی	درصد تجمعی
جنسیت	مرد	۱۶	۸۴/۲۱
	زن	۳	۱۵/۷۹
سن	۳۵-۴۵ سال	۳	۱۵/۷۹
	۴۶-۵۵ سال	۱۶	۸۴/۲۱
تحصیلات	کارشناسی	۵	۲۶/۳۲
	کارشناسی ارشد	۱۳	۶۸/۴۲
	دکتری	۱	۵/۲۶

مطابق با یافته‌های (جدول ۳)، بخش عمده‌ای از خبرگان مشارکت‌کننده در پژوهش (۸۴ درصد) را مردان تشکیل می‌دهند که با توجه به ماهیت عملیاتی و صنعتی شرکت پالایش گاز، این موضوع قابل‌انتظار است. از نظر توزیع سنی، بیش از ۸۴ درصد پاسخ‌دهندگان در بازه سنی ۴۶ تا ۵۵ سال قرار دارند که نشان‌دهنده پختگی دیدگاه‌ها و تجربه بالای آنان در محیط سازمانی است. همچنین از منظر سطح تحصیلات، بیش از ۶۸ درصد خبرگان دارای مدرک کارشناسی ارشد و دکتری هستند. ترکیب «تحصیلات عالی» و «تجربه عملیاتی بالا» در میان مشارکت‌کنندگان، اعتبار درونی یافته‌های کیفی را تقویت کرده و اطمینان می‌دهد که مقوله‌های استخراج‌شده حاصل دیدگاه‌های کارشناسی و اشراف کامل بر پیچیدگی‌های فرهنگ‌سازمانی در صنعت گاز است.

۲-۸. طراحی مدل تحقیق با استفاده از رویکرد تحلیل داده بنیاد

نخستین جزء در پژوهش کیفی، داده‌ها هستند که در این پژوهش از طریق مرور ادبیات و مصاحبه با خبرگان و بررسی اسناد بالادستی شرکت حاصل شده‌اند. جزء دوم گام‌هایی هستند که برای تفسیر و سازمان دادن به داده‌ها استفاده می‌شوند. این گام‌ها شامل مفهوم‌سازی، فروکاهی (کاهش)،

تعیین مقوله‌ها با استفاده از ویژگی‌ها و ابعاد و در پایان ربط‌دهی یا نسبت‌دهی مقوله‌ها هستند. این عمل با استفاده از کدگذاری انجام می‌شود؛ بنابراین، تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از مصاحبه با کارشناسان، مدیران و معاونین شرکت گاز سرخون و قشم شامل تحلیل و تفسیر (کدگذاری) مفاهیم بیان شده بر اساس کدگذاری باز، محوری و انتخابی می‌باشد. در این بخش با تعداد ۱۹ نفر از کارشناسان، مدیران و معاونین شرکت گاز سرخون و قشم مصاحبه شد.

الف) کدگذاری باز

در این مرحله نمونه‌گیری به حدی انجام گردید تا مفاهیم در موقعیت باز کشف گردد، سپس مفاهیم بر اساس ارتباط با موضوعات مشابه طبقه‌بندی شده‌اند. در این مرحله به بررسی دقیق مفاهیم درون مصاحبه‌ها بر اساس ارتباط با موضوع آسایش سازمانی پرداخته شده است. در نتیجه با اطلاعات کسب‌شده از مصاحبه‌های خبرگان نکات و مضامین کلیدی کدگذاری شده‌اند. در (جدول ۴) کدهای باز استخراج‌شده از مصاحبه‌های خبرگان آمده است. به علت گسترده بودن مصاحبه‌ها از آوردن تمامی متون مصاحبه خودداری شده و صرفاً کدهای باز به‌دست آمده در جدول زیر ارائه شده‌اند.

جدول ۴: نتایج کدگذاری باز حاصل از مصاحبه با خبرگان

ردیف	مقوله‌های فرعی استخراجی	ردیف	مقوله‌های فرعی استخراجی
۱	مشارکت و کار تیمی کارکنان	۱۴	اعتمادآفرینی مدیران
۲	توجه به قوانین و مقررات سازمانی (قانون‌گرایی) توسط مدیران و کارکنان	۱۵	تسهیم و انتقال دانش در شرکت
۳	ارتباطات کارکنان (روابط درون سازمانی)	۱۶	توسعه زیرساخت‌ها و استفاده از تکنولوژی‌های جدید در شرکت
۴	وجود ویژگی‌های رهبری در مدیران	۱۷	توجه به حقوق و مزایای دریافتی کارکنان
۵	ایجاد فرصت‌های یادگیری، توانمندسازی و آموزش	۱۸	توجه به رفاهیات و خدمات کارکنان
۶	وجود مسیر شغلی و جانشین‌پروری مدیران	۱۹	نماد افتخار‌آمیز و الگوسازی برای کارکنان
۷	مسئولیت‌پذیری اداری کارکنان	۲۰	فرایندگرایی در شرکت (استاندارد گرایی)
۸	نظارت و ارزیابی عملکرد کارکنان	۲۱	رعایت سلسله‌مراتب سازمانی
۹	شایسته‌سالاری در ارتقاء شغلی و انتصابات کارکنان	۲۲	توجه به رضایت شغلی کارکنان
۱۰	وجود تفویض اختیار و آزادی عمل	۲۳	توسعه احساس افتخار به شرکت
۱۱	خلاقیت و نوآوری کارکنان	۲۴	انضباط کاری کارکنان
۱۲	پاداش‌دهی و انگیزش کارکنان	۲۵	اطلاع‌رسانی چشم‌انداز و مأموریت‌های شرکت
۱۳	رعایت عدالت سازمانی (اجتناب از برخورد سلیقه‌ای و فردی)		



تحلیل یافته‌های کدگذاری باز: بر اساس نتایج مندرج در (جدول ۴)، فرآیند کدگذاری باز منجر به شناسایی ۲۵ مقوله فرعی کلیدی گردید. تحلیل محتوای این کدها نشان می‌دهد که از دیدگاه خبرگان، ترویج فرهنگ‌سازمانی در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم، بیش از هر چیز بر پایه «نظام‌های انگیزشی و رفاهی» (نظیر کدهای ۱۲، ۱۷ و ۱۸) و «اصول اخلاقی و رفتاری» (نظیر کدهای ۲، ۲۱ و ۲۴) استوار است. همچنین، تکرار مفاهیمی همچون «شایسته‌سالاری»،

«اعتمادآفرینی مدیران» و «جان‌شین‌پروری» نشان‌دهنده این واقعیت است که بدنه کارشناسی سازمان، نقش‌الگویی مدیران و عدالت در انتصابات را زیربنای اصلی تغییرات فرهنگی می‌داند. وجود کدهایی نظیر «توسعه احساس افتخار به شرکت» نیز بیانگر آن است که خروجی نهایی این فرآیندها به دنبال پیوند زدن هویت فردی کارکنان با اهداف کلان سازمان است. این مفاهیم خرد در مرحله بعد، زیربنای تشکیل مقولات کلان پارادایمی را فراهم آورده‌اند.

جدول ۵: مقوله‌های فرعی حاصل از بررسی ادبیات موضوع، مصاحبه با خبرگان و اسناد بالادستی شرکت

ردیف	شاخص	منبع
۱	مشارکت و کار تیمی کارکنان	ادبیات موضوع، مصاحبه، ارزش‌های سازمانی، منشور اخلاقی وزارت نفت
۲	توجه به قوانین و مقررات سازمانی (قانون‌گرایی) توسط مدیران و کارکنان	ادبیات موضوع، مصاحبه، تصویب‌نامه شورای عالی اداری، منشور اخلاقی وزارت نفت
۳	انضباط کاری کارکنان	ادبیات موضوع، مصاحبه، ارزش‌های سازمانی
۴	اخلاق اداری کارکنان	ادبیات موضوع، منشور اخلاقی وزارت نفت
۵	اخلاق اسلامی کارکنان	ادبیات موضوع، منشور اخلاقی وزارت نفت
۶	روحیه خودکنترلی کارکنان	تصویب‌نامه شورای عالی اداری، منشور اخلاقی وزارت نفت
۷	روحیه امانت‌داری کارکنان	ادبیات موضوع، تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۸	صداقت کارکنان	ادبیات موضوع، تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۹	انصاف مدیران و کارکنان	ادبیات موضوع، تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۱۰	تقوی مدیران و کارکنان	ادبیات موضوع، تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۱۱	رعایت کرامت انسانی	ادبیات موضوع، تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۱۲	روحیه خدمت‌گذاری به مردم	ادبیات موضوع، تصویب‌نامه شورای عالی اداری، منشور اخلاقی وزارت نفت
۱۳	وجدان کاری کارکنان	ادبیات موضوع، تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۱۴	تفکر صرفه‌جویی در کارکنان و مدیران	ادبیات موضوع، تصویب‌نامه شورای عالی اداری، خط‌مشی، منشور اخلاقی وزارت نفت
۱۵	تفکر ساده‌زیستی	ادبیات موضوع، تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۱۶	تفکر حفظ بیت‌المال در کارکنان و مدیران	ادبیات موضوع، تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۱۷	توجه به سرمایه انسانی و اجتماعی شرکت	ادبیات موضوع، تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۱۸	رعایت منشور اخلاقی توسط کارکنان	تصویب‌نامه شورای عالی اداری

۱۹	روحیه گشاده‌رویی	ادبیات موضوع، تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۲۰	ارتباطات کارکنان (روابط درون‌سازمانی)	ادبیات موضوع، مصاحبه
۲۱	وجود ویژگی‌های رهبری در مدیران	ادبیات موضوع، مصاحبه
۲۲	ایجاد فرصت‌های یادگیری، توانمندسازی و آموزش	ادبیات موضوع، مصاحبه، خط‌مشی
۲۳	وجود مسیر شغلی و جانشین‌پروری مدیران	ادبیات موضوع، مصاحبه
۲۴	مسئولیت‌پذیری اداری کارکنان	ادبیات موضوع، مصاحبه، تصویب‌نامه شورای عالی اداری، ارزش‌های سازمانی
۲۵	مسئولیت‌پذیری اجتماعی کارکنان	ادبیات موضوع، تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۲۶	پاسخگویی	ادبیات موضوع، تصویب‌نامه شورای عالی اداری، منشور اخلاقی وزارت نفت
۲۷	تکریم ارباب‌رجوع	تصویب‌نامه شورای عالی اداری، منشور اخلاقی وزارت نفت
۲۸	توسعه اشتیاق به کار کارکنان	ادبیات موضوع
۲۹	انجام وظایف به نحو احسن	تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۳۰	نظارت و ارزیابی عملکرد کارکنان	ادبیات موضوع، مصاحبه، خط‌مشی
۳۱	شایسته‌سالاری در ارتقاء شغلی و انتصابات کارکنان	ادبیات موضوع، مصاحبه
۳۲	وجود تفویض اختیار و آزادی عمل	ادبیات موضوع، مصاحبه
۳۳	خلاقیت و نوآوری کارکنان	ادبیات موضوع، مصاحبه، تصویب‌نامه شورای عالی اداری، ارزش‌های سازمانی، منشور اخلاقی وزارت نفت
۳۴	داشتن ابتکار کارکنان	تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۳۵	وجود تفکر پویا در کارکنان	تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۳۶	دقت در انجام وظایف	تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۳۷	سرعت در انجام وظایف	تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۳۸	توجه به بهبود مستمر	ادبیات موضوع، تصویب‌نامه شورای عالی اداری، خط‌مشی، منشور اخلاقی وزارت نفت
۳۹	پاداش‌دهی و انگیزش کارکنان	ادبیات موضوع، مصاحبه
۴۰	رعایت عدالت سازمانی	ادبیات موضوع، مصاحبه، تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۴۱	اعتمادآفرینی مدیران	ادبیات موضوع، مصاحبه
۴۲	تسهیم و انتقال دانش در شرکت	ادبیات موضوع، مصاحبه، منشور اخلاقی وزارت نفت
۴۳	توسعه زیرساخت‌ها و استفاده از تکنولوژی‌های جدید	ادبیات موضوع، مصاحبه، بیانیه مأموریت





۴۴	توجه به حقوق و مزایای دریافتی کارکنان	ادبیات موضوع، مصاحبه
۴۵	توجه به رفاهیات و خدمات کارکنان	ادبیات موضوع، مصاحبه
۴۶	نماد افتخارآمیز و الگوسازی برای کارکنان	ادبیات موضوع، مصاحبه
۴۷	فرایندگرایی در شرکت (استاندارد گرایی خدمات)	ادبیات موضوع، مصاحبه، تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۴۸	نتیجه‌گرایی در راستای اهداف شرکت	تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۴۹	توجه به بهره‌وری فردی و سازمانی	ادبیات موضوع، منشور اخلاقی وزارت نفت
۵۰	تلاش جهت بهبود کیفیت محصولات	ادبیات موضوع
۵۱	تأمین حقوق مراجعان	تصویب‌نامه شورای عالی اداری، منشور اخلاقی وزارت نفت
۵۲	توجه به حقوق و منافع عمومی	تصویب‌نامه شورای عالی اداری، منشور اخلاقی وزارت نفت
۵۳	رعایت سلسله‌مراتب سازمانی	ادبیات موضوع، مصاحبه
۵۴	توجه به رضایت شغلی کارکنان	ادبیات موضوع، مصاحبه، خط‌مشی
۵۵	توسعه تعلق سازمانی کارکنان	تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۵۶	توسعه فرهنگ ایمنی ^۱	خط‌مشی، ارزش‌های سازمانی
۵۷	توجه به فرهنگ بومی کارکنان	ادبیات موضوع
۵۸	توسعه احساس افتخار به شرکت	ادبیات موضوع، مصاحبه
۵۹	شفافیت در عملکرد شرکت	ادبیات موضوع، تصویب‌نامه شورای عالی اداری
۶۰	اطلاع‌رسانی چشم‌انداز و مأموریت‌های شرکت	ادبیات موضوع، مصاحبه، خط‌مشی

۲. تأکید بر اسناد بالادستی: حضور پررنگ کدهایی همچون «حفظ بیت‌المال»، «تکریم ارباب‌رجوع» و «فرهنگ ایمنی» که مستقیماً از منشور اخلاقی وزارت نفت و مصوبات حاکمیتی استخراج شده‌اند، نشان می‌دهد که الگوی نهایی پژوهش، کاملاً با الزامات قانونی و مأموریت‌های استراتژیک صنعت نفت همسویی دارد.

۳. تکامل کدهای باز: این جدول نشان می‌دهد که چگونه ۲۵ کد استخراج شده از مصاحبه‌ها (جدول ۴)، در پیوند با اسناد بالادستی به ۶۰ شاخص تفصیلی ارتقا یافته‌اند تا تمام ابعاد رفتاری، ساختاری و زمینه‌ای موردنیاز برای طراحی مدل پارادایمی را پوشش دهند.

تحلیل یافته‌های حاصل از انطباق منابع پژوهش: نتایج مندرج در (جدول ۵) نشان‌دهنده استخراج ۶۰ شاخص نهایی از طریق ترکیب سه‌گانه «ادبیات موضوع»، «مصاحبه با خبرگان» و «اسناد بالادستی شرکت» است. تحلیل این جدول چند نکته کلیدی را روشن می‌سازد:

۱. تعدد منابع تأییدگر: شاخص‌هایی نظیر «قانون‌گرایی»، «مسئولیت‌پذیری اداری» و «خلاقیت و نوآوری» به دلیل تکرار در هر سه منبع (مصاحبه، ادبیات و اسناد بالادستی)، به‌عنوان هسته‌های سخت و تغییرناپذیر فرهنگ سازمانی در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم شناسایی شدند.

1. HSE

جدول ۶: تحلیل مقوله‌های فرعی نهایی حاصل از نظر خبرگان

ردیف	مقوله فرعی	نمره حاصله (درصد)	تأیید / رد
۱	مشارکت و کار تیمی کارکنان	۱۰۰	تأیید
۲	توجه به قوانین و مقررات سازمانی (قانون‌گرایی) توسط مدیران و کارکنان	۹۵	تأیید
۳	انضباط کاری کارکنان	۹۵	تأیید
۴	اخلاق اداری کارکنان	۴۲	رد
۵	اخلاق اسلامی کارکنان	۴۲	رد
۶	روحیه خودکنترلی کارکنان	۵۳	تأیید
۷	روحیه امانت‌داری کارکنان	۶۳	تأیید
۸	صداقت کارکنان	۶۳	تأیید
۹	انصاف مدیران و کارکنان	۵۸	تأیید
۱۰	تقوی مدیران و کارکنان	۶۳	تأیید
۱۱	رعایت کرامت انسانی	۶۳	تأیید
۱۲	روحیه خدمت‌گذاری به مردم	۶۸	تأیید
۱۳	وجدان کاری کارکنان	۸۴	تأیید
۱۴	تفکر صرفه‌جویی در کارکنان و مدیران	۵۸	تأیید
۱۵	تفکر ساده‌زیستی	۳۲	رد
۱۶	تفکر حفظ بیت‌المال در کارکنان و مدیران	۵۸	تأیید
۱۷	توجه به سرمایه انسانی و اجتماعی شرکت	۷۴	تأیید
۱۸	رعایت منشور اخلاقی توسط کارکنان	۷۹	تأیید
۱۹	روحیه گشاده‌رویی	۴۲	رد
۲۰	ارتباطات کارکنان (روابط درون سازمانی)	۱۰۰	تأیید
۲۱	وجود ویژگی‌های رهبری در مدیران	۱۰۰	تأیید
۲۲	ایجاد فرصت‌های یادگیری، توانمندسازی و آموزش	۱۰۰	تأیید
۲۳	وجود مسیر شغلی و جانشین‌پروری مدیران	۱۰۰	تأیید
۲۴	مسئولیت‌پذیری اداری کارکنان	۱۰۰	تأیید
۲۵	مسئولیت‌پذیری اجتماعی کارکنان	۶۳	تأیید
۲۶	پاسخگویی	۸۴	تأیید
۲۷	تکریم ارباب‌رجوع	۵۸	تأیید
۲۸	توسعه اشتیاق به کار کارکنان	۵۸	تأیید
۲۹	انجام وظایف به نحو احسن	۴۲	رد



تأیید	۹۵	نظارت و ارزیابی عملکرد کارکنان	۳۰
تأیید	۱۰۰	شایسته‌سالاری در ارتقاء شغلی و انتصابات کارکنان	۳۱
تأیید	۱۰۰	وجود تفویض اختیار و آزادی عمل	۳۲
تأیید	۹۰	خلاقیت و نوآوری کارکنان	۳۳
تأیید	۶۳	داشتن ابتکار کارکنان	۳۴
تأیید	۶۳	وجود تفکر پویا در کارکنان	۳۵
تأیید	۷۴	دقت در انجام وظایف	۳۶
تأیید	۷۴	سرعت در انجام وظایف	۳۷
تأیید	۱۰۰	توجه به بهبود مستمر	۳۸
تأیید	۱۰۰	پاداش‌دهی و انگیزش کارکنان	۳۹
تأیید	۱۰۰	رعایت عدالت سازمانی	۴۰
تأیید	۱۰۰	اعتماد آفرینی مدیران	۴۱
تأیید	۷۹	تسهیم و انتقال دانش در شرکت	۴۲
تأیید	۷۴	توسعه زیرساخت‌ها و استفاده از تکنولوژی‌های جدید در شرکت	۴۳
تأیید	۸۴	توجه به حقوق و مزایای دریافتی کارکنان	۴۴
تأیید	۸۴	توجه به رفاهیات و خدمات کارکنان	۴۵
تأیید	۹۰	نماد افتخار آمیز و الگوسازی برای کارکنان	۴۶
تأیید	۹۰	فرایندگرایی در شرکت (استاندارد گرایی خدمات)	۴۷
تأیید	۹۵	نتیجه‌گرایی در راستای اهداف شرکت	۴۸
تأیید	۹۰	توجه به بهره‌وری فردی و سازمانی	۴۹
تأیید	۷۴	تلاش جهت بهبود کیفیت محصولات	۵۰
تأیید	۶۳	تأمین حقوق مراجعان	۵۱
تأیید	۵۸	توجه به حقوق و منافع عمومی	۵۲
تأیید	۹۰	رعایت سلسله‌مراتب سازمانی	۵۳
تأیید	۹۵	توجه به رضایت شغلی کارکنان	۵۴
تأیید	۱۰۰	توسعه تعلق سازمانی کارکنان	۵۵
تأیید	۷۹	توسعه فرهنگ ایمنی	۵۶
تأیید	۶۳	توجه به فرهنگ بومی کارکنان	۵۷
تأیید	۹۰	توسعه احساس افتخار به شرکت	۵۸
تأیید	۶۳	شفافیت در عملکرد شرکت	۵۹
تأیید	۸۴	اطلاع‌رسانی چشم‌انداز و مأموریت‌های شرکت	۶۰



مقیاس ورود مقوله های فرعی به مدل نهایی، کسب حداقل ۵۰ درصد تأیید نظر خبرگان می باشد که بر این اساس، مقوله های ذیل از مدل نهایی حذف گردیدند. مبنای حداقل ۵۰ درصد تأیید به این دلیل انتخاب شد که در مطالعات کیفی، مقوله هایی که کمتر از نصف خبرگان آن ها را تأیید کنند، فاقد اجماع کافی بوده و ورودشان به مدل نهایی می تواند اعتبار نظریه را کاهش دهد؛ بنابراین تنها مقوله هایی با تأیید حداقل ۵۰ درصد خبرگان وارد مدل نهایی شدند.

- اخلاق اداری کارکنان
- اخلاق اسلامی کارکنان
- تفکر ساده زیستی
- روحیه گشاده رویی
- انجام وظایف به نحو احسن

حذف این مقوله ها تأثیر منفی بر پدیده اصلی نداشت، زیرا مقوله های باقی مانده به طور کامل ابعاد فرهنگ سازمانی شرکت را پوشش می دهند و هم پوشانی کافی با مقوله های حذف شده دارند. به عنوان مثال، مقوله های مربوط به وجدان کاری، صداقت و رعایت کرامت انسانی بخش عمده ای از محتوای اخلاقی را پوشش داده و جایگزین مناسبی برای

مقوله های حذف شده محسوب می شوند. در نهایت تعداد ۵۵ مقوله فرعی جهت کدگذاری محوری باقی ماند.

تحلیل نمرات حاصل از نظر خبرگان در (جدول ۶) نشان دهنده اجماع بسیار بالای متخصصان (۱۰۰ درصد) بر روی شاخص های راهبردی نظیر «شایسته سالاری»، «اعتماد آفرینی مدیران»، «عدالت سازمانی» و «جان نشین پروری» است. این میزان تأیید حداکثری بیانگر آن است که در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم، زیرساخت های فرهنگ ساز بیش از آنکه به ویژگی های فردی صرف وابسته باشند، تابعی از نظام های مدیریتی و رهبری سازمان هستند. در واقع، با باقی ماندن ۵۵ مقوله که همگی نمرات بالایی کسب کرده اند، مدل نهایی از غنای محتوایی کافی برخوردار بوده و می تواند به عنوان یک ابزار سنجش معتبر برای ارزیابی فرهنگ سازمانی مورد استفاده قرار گیرد.

ب) کدگذاری محوری^۱

در این مرحله مقوله های ایجاد شده در گام قبل بر اساس الگوی پارادایمی بسط و گسترش یافته اند. در این مرحله با توجه به پاسخ افراد، به کدگذاری باز و محوری و مقوله بندی اصلی پاسخ آنان پرداخته شده است. نتایج کدگذاری محوری در (جدول ۷) نشان داده شده است.

جدول ۶: تحلیل مقوله های فرعی نهایی حاصل از نظر خبرگان

ابعاد	مقوله اصلی	مقوله فرعی
شرایط علی	عوامل سازمانی	وجود ویژگی های رهبری در مدیران
		نتیجه گرایی در راستای اهداف شرکت
		روحیه خودکنترلی کارکنان
		روحیه امانت داری کارکنان
عوامل فردی	عوامل فردی	صداقت کارکنان
		انصاف مدیران و کارکنان
		تقوی مدیران و کارکنان
		مسئولیت پذیری اداری کارکنان
		وجدان کاری کارکنان
		مسئولیت پذیری اجتماعی کارکنان
		داشتن ابتکار کارکنان
		وجود تفکر پویا در کارکنان
روحیه خدمت گذاری به مردم		
		رعایت کرامت انسانی

1. Axial Coding





رعایت عدالت سازمانی	عوامل سازمانی	شرایط زمینه‌ای
وجود تفویض اختیار و آزادی عمل		
اطلاع‌رسانی چشم‌انداز و مأموریت‌های شرکت		
شفافیت در عملکرد شرکت	عوامل فردی	راهبرد
تسهیم و انتقال دانش در شرکت		
ارتباطات کارکنان (روابط درون‌سازمانی)		
فرآیندگرایی در شرکت	رهبری سازمانی	راهبرد
نماد افتخارآمیز و الگوسازی برای کارکنان		
پاسخگویی مدیران		
توجه به رضایت شغلی کارکنان	منابع انسانی	راهبرد
توجه به رفاهیات و خدمات کارکنان		
اعتمادآفرینی مدیران		
توجه به حقوق و مزایای دریافتی کارکنان	عوامل سازمانی	شرایط مداخله‌گر
توجه به سرمایه انسانی و اجتماعی شرکت		
ایجاد فرصت‌های یادگیری، توانمندسازی و آموزش		
مشارکت و کار تیمی کارکنان	عوامل فردی	شرایط مداخله‌گر
خلاقیت و نوآوری کارکنان		
توسعه زیرساخت‌ها و استفاده از تکنولوژی‌های جدید در شرکت		
نظارت و ارزیابی عملکرد کارکنان	عوامل سازمانی	شرایط مداخله‌گر
شایسته‌سالاری در ارتقاء شغلی و انتصابات کارکنان		
پاداش‌دهی و انگیزش کارکنان		
وجود مسیر شغلی و جانشین‌پروری مدیران	عوامل فردی	شرایط مداخله‌گر
توجه به فرهنگ بومی کارکنان		
انضباط کاری کارکنان		
توجه به قوانین و مقررات سازمانی (قانون‌گرایی) توسط مدیران و کارکنان	عوامل فردی	شرایط مداخله‌گر
رعایت منشور اخلاقی توسط کارکنان		
تفکر صرفه‌جویی در کارکنان و مدیران		
تفکر حفظ بیت‌المال در کارکنان و مدیران	عوامل فردی	شرایط مداخله‌گر
رعایت سلسله‌مراتب سازمانی		

توجه به بهره‌وری سازمانی	
تلاش جهت بهبود کیفیت محصولات	
دقت در انجام وظایف	
سرعت در انجام وظایف	
توجه به بهبود مستمر	اثر بخشی سازمانی
تکریم ارباب رجوع	
تأمین حقوق مراجعان	پیامدها
توجه به حقوق و منافع عمومی	
توسعه فرهنگ ایمنی	
توجه به بهره‌وری فردی	
توسعه اشتیاق به کار کارکنان	رشد فردی
توسعه تعلق سازمانی کارکنان	
توسعه احساس افتخار به شرکت	

۳. تنوع پیامدها: پیامدهای مدل از سطح عملیاتی و فنی (مانند فرهنگ ایمنی و کیفیت محصولات) تا سطح عمیق روانی و نگرشی (مانند تعلق سازمانی و احساس افتخار به شرکت) گسترده شده است. این پیوستگی میان «اثر بخشی سازمانی» و «رشد فردی»، تضمین‌کننده پایداری مدل طراحی شده در بلندمدت است.

ج) کدگذاری انتخابی (خلق نظریه)

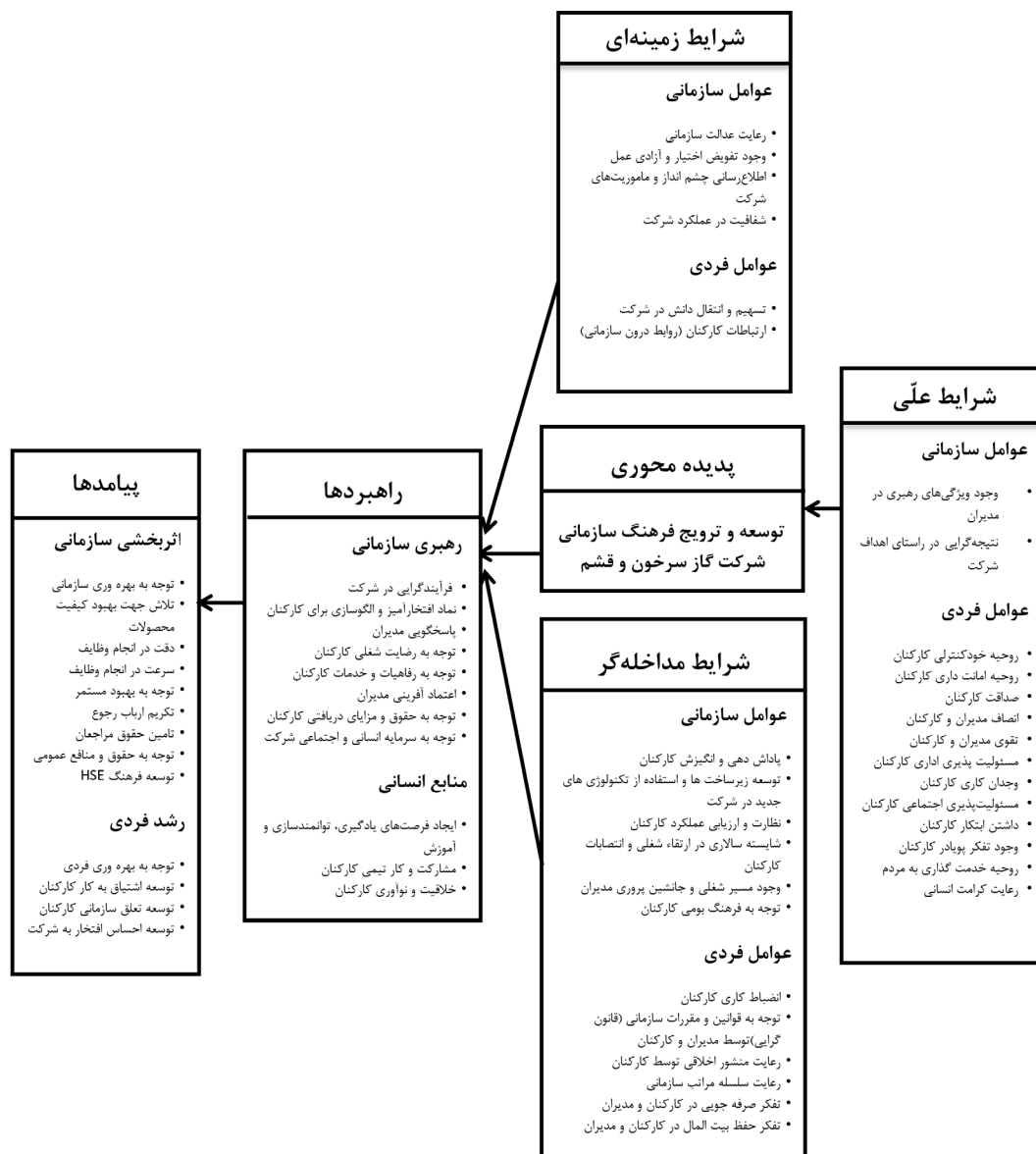
کدگذاری انتخابی نتایج گام‌های قبلی کدگذاری را به کار برده، مقوله اصلی را انتخاب می‌کند و آن را به شکلی نظام‌مند به سایر مقوله‌ها ارتباط داده، ارتباطات را اعتبار می‌بخشد و مقوله‌هایی که نیاز به تصفیه و توسعه بیشتر دارند را توسعه می‌دهد. به‌طور خلاصه، فرآیند تحلیل داده‌ها که منجر به خلق مدل نظری می‌شود، شامل شرایط علی، شرایط زمینه‌ای، شرایط مداخله‌ای، پدیده محوری، راهبردها و پیامدها هستند که پدیده اصلی یعنی توسعه و ترویج فرهنگ سازمانی شرکت گاز سرخون و قشقم را توصیف و تشریح می‌کنند. مدل نظری توسعه و ترویج فرهنگ سازمانی شرکت گاز سرخون و قشقم، با توجه به جداول فوق، به‌صورت زیر ارائه می‌گردد (شکل ۲):

تحلیل یافته‌های کدگذاری محوری (مدل پارادایمی): نتایج حاصل از (جدول ۷) نشان‌دهنده ساختار نهایی مدل پژوهش است که در آن ۵۵ مقوله فرعی در قالب ۶ بعد اصلی و ۱۰ مقوله کلی سازماندهی شده‌اند. تحلیل محتوایی این جدول نشان می‌دهد:

۱. غلبه رویکرد دوسطحی: در ابعاد «شرایط علی»، «شرایط زمینه‌ای» و «عوامل مداخله‌گر»، تفکیک دقیق میان عوامل فردی و عوامل سازمانی صورت گرفته است. این امر بیانگر آن است که فرهنگ سازمانی در شرکت پالایش گاز سرخون و قشقم، محصول تعامل ویژگی‌های شخصیتی کارکنان (نظیر وجدان کاری و صداقت) با ساختارهای حاکمیتی (نظیر ویژگی‌های رهبری و عدالت سازمانی) است.

۲. راهبردهای دوقلو: برخلاف بسیاری از مدل‌های سنتی، راهبردها در این تحقیق به دو حوزه «رهبری سازمانی» و «منابع انسانی» تقسیم شده‌اند. این تفکیک نشان می‌دهد که برای تغییر فرهنگی، صرفاً آموزش‌های فنی (منابع انسانی) کافی نیست و نیاز به تغییر در سبک پاسخگویی و اعتمادآفرینی مدیران (رهبری) وجود دارد.





شکل ۲: الگوی پارادایمی توسعه و ترویج فرهنگ سازمانی شرکت گاز سرخون و قشم بر اساس نتایج تحلیل داده بنیاد

زیرساخت‌های سازمانی (عدالت سازمانی، تفویض اختیار، شفافیت و اطلاع‌رسانی چشم‌انداز) و ویژگی‌های فردی (تسهیم دانش و ارتباطات کارکنان) است، بر پدیده محوری تأثیر می‌گذارند.

در این میان، شرایط مداخله‌گر به‌عنوان متغیرهایی که می‌توانند تسهیل‌کننده یا بازدارنده باشند، در قالب «عوامل سازمانی» (شایسته‌سالاری، جانشین‌پروری، نظارت و ارزیابی عملکرد) و «عوامل فردی» (انضباط کاری، قانون‌گرایی، حفظ بیت‌المال و رعایت منشور اخلاقی) شناسایی شدند.

۳-۸. تبیین و تحلیل روابط مدل پارادایمی پژوهش پس از استخراج مقولات و ترسیم مدل نهایی (شکل ۲)، تحلیل روابط میان ابعاد شش‌گانه مدل بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده به شرح زیر ارائه می‌گردد:

بر اساس مدل ترسیم شده، شرایط علی در دو سطح «عوامل سازمانی» (مانند ویژگی‌های رهبری در مدیران و نتیجه‌گرایی) و «عوامل فردی» (نظیر وجدان کاری، روحیه امانت‌داری، صداقت، مسئولیت‌پذیری و ابتکار کارکنان) به‌عنوان پیشران‌های اصلی فرهنگ‌سازی عمل می‌کنند. این عوامل در بستر شرایط زمینه‌ای که شامل

جهت تحقق اهداف مدل، راهبردها در دو حوزه کلا عملیاتی می‌شوند:

1. رهبری سازمانی: با تمرکز بر اقداماتی چون فرآیندگرایی، پاسخگویی مدیران، اعتمادآفرینی و توجه جدی به رفاهیات و رضایت شغلی کارکنان.
2. منابع انسانی: با تأکید بر ایجاد فرصت‌های یادگیری، توانمندسازی، مشارکت، کار تیمی و شکوفایی خلاقیت و نوآوری.

درنهایت، پیاده‌سازی این الگو منجر به پیامدهایی در دو سطح می‌گردد:

الف) اثربخشی سازمانی: که شامل بهبود بهره‌وری سازمانی، ارتقای کیفیت محصولات، تکریم ارباب‌رجوع، تأمین حقوق مراجعان و به‌طور ویژه توسعه فرهنگ ایمنی است.

ب) رشد فردی: که منجر به افزایش بهره‌وری فردی، توسعه اشتیاق به کار، تقویت تعلق سازمانی و درنهایت ایجاد «احساس افتخار به شرکت» در کارکنان می‌شود.

این پیوستگی منطقی بین مقولات فرعی و اصلی، نشان‌دهنده انسجام درونی مدل پارادایمی و قابلیت اعتماد یافته‌های پژوهش در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم است.

درنهایت، تمامی این ابعاد حول محور توسعه و ترویج فرهنگ سازمانی (پدیده محوری) سازماندهی شده‌اند تا مدلی جامع برای ارتقای بهره‌وری در این صنعت ارائه گردد.

۴-۸. اعتبارسنجی مدل پژوهش

به‌منظور به منظور سنجش نهایی مدل پژوهش و اطمینان از روایی و پایایی آن، مجموعه‌ای از آزمون‌های استاندارد انجام شد. نخست، بارهای عاملی تمامی گویه‌های پرسشنامه محاسبه گردید که همگی بالاتر از مقدار ۰/۴۰ بودند. این امر نشان می‌دهد که واریانس بین سازه و شاخص‌های آن از واریانس خطای اندازه‌گیری بیشتر بوده و بنابراین روایی سازه‌ها قابل قبول است.

در گام بعد، پایایی مدل با استفاده از ضریب آلفای کرونباخ

و پایایی ترکیبی^۱ بررسی شد. مقادیر به‌دست‌آمده برای تمامی سازه‌ها بالاتر از ۰/۷۰ بود که بیانگر ثبات و قابلیت اعتماد ابزار اندازه‌گیری است. فرمول پایایی ترکیبی به‌صورت تبه صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$CR = (\sum \lambda_i)^2 / (\sum \lambda_i)^2 + \sum \theta_i \quad (2)$$

که در آن λ_i بارهای عاملی و θ_i خطای اندازه‌گیری هستند.

برای بررسی روایی همگرا، از میانگین واریانس استخراج‌شده^۲ استفاده شد. مقادیر میانگین واریانس استخراج‌شده برای تمامی سازه‌ها بالاتر از ۰/۵۰ بود که نشان‌دهنده همبستگی بالای شاخص‌های هر سازه و تأیید روایی همگرا است. فرمول میانگین واریانس استخراج‌شده به‌صورت زیر است:

$$AVE = \sum \lambda_i^2 / \sum \lambda_i^2 + \sum \theta_i \quad (3)$$

علاوه بر این، روایی واگرا با معیار فورنل و لارکر بررسی شد. نتایج نشان داد که مقدار میانگین واریانس استخراج‌شده هر سازه بزرگ‌تر از همبستگی آن سازه با سایر سازه‌هاست؛ بنابراین هر سازه به‌طور متمایز از سایر سازه‌ها اندازه‌گیری شده و روایی واگرا تأیید می‌شود. درنهایت، برازش مدل ساختاری با استفاده از ضرایب تعیین^۳ و شاخص‌های ریشه میانگین مجذور باقی‌مانده استاندارد شده^۴ و شاخص برازش نرمال شده^۵ بررسی شد. مقادیر ضرایب تعیین برای سازه‌های درون‌زا بین ۰/۴۳ تا ۰/۸۱ بود که نشان‌دهنده برازش متوسط تا خوب مدل است. همچنین مقدار شاخص‌های ریشه میانگین مجذور باقی‌مانده استاندارد شده برابر با ۰/۰۷۶ و مقدار شاخص برازش نرمال شده برابر با ۰/۹۳۵ به‌دست آمد که هر دو در محدوده قابل قبول قرار دارند. بر اساس این نتایج، می‌توان گفت مدل نهایی پژوهش از اعتبار و برازش مطلوب برخوردار است و قابلیت اتکای لازم برای تحلیل‌های بعدی را دارد.

۹. بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر باهدف طراحی الگوی توسعه و ترویج فرهنگ سازمانی در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم با

1. CR
2. AVE
3. R²
4. SRMR
5. NFI



بهره‌گیری از راهبرد نظریه داده‌بنیاد انجام شد. داده‌های این مطالعه از طریق مصاحبه‌های عمیق با ۱۹ نفر از خبرگان (شامل مدیران و کارشناسان ارشد) گردآوری گردید که بررسی ویژگی‌های جمعیت‌شناختی آنان نشان‌دهنده غنای تجربی و علمی تیم مشارکت‌کننده است؛ به طوری که حدود ۸۴ درصد آنان در بازه سنی پختگی شغلی (۴۶ تا ۵۵ سال) قرار داشته و بیش از ۶۹ درصد دارای تحصیلات تکمیلی (ارشد و دکتری) می‌باشند. فرآیند تحلیل داده‌ها طی یک مسیر سامانمند، از استخراج ۶۰ کد باز اولیه به ۵۵ مقوله فرعی تأیید شده منجر گشت که در نهایت در قالب ۱۰ مقوله اصلی و ابعاد ۶ گانه پارادایمی (شامل ۱۴ مقوله علی، ۶ مقوله زمینه‌ای، ۱۱ راهبرد، ۱۲ مقوله مداخله‌گر و ۱۳ پیامد) سازماندهی شدند.

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که «ترویج فرهنگ سازمانی» در یک صنعت استراتژیک، پدیده‌ای فراتر از ابلاغیه‌های سازمانی است. شناسایی ۱۴ مقوله علی، به‌ویژه «ویژگی‌های رهبری در مدیران» و «انصاف و تقوی»، بیانگر آن است که فرهنگ از طریق «الگوسازی رفتاری» از لایه‌های ارشد به بدنه سازمان نفوذ می‌کند. برخلاف مدل‌های تکنوکراتیک سنتی، این الگو ثابت می‌کند که عوامل علی فردی نظیر وجدان کاری، صداقت و امانت‌داری، زیربنای اصلی هرگونه تحول فرهنگی هستند. از نگاه انتقادی، اگر سازمان صرفاً بر رویه‌های ساختاری تمرکز کند و از تقویت ویژگی‌های اخلاقی مدیران غافل شود، فرهنگ سازمانی در سطح «نمادها» باقی‌مانده و هرگز به «باورهای عمیق» کارکنان تبدیل نخواهد شد.

تحلیل روابط میان مقوله‌ها نشان داد که شاخص‌هایی همچون «عدالت سازمانی» و «تفویض اختیار» جدی‌ترین شرایط زمینه‌ای هستند که می‌توانند پذیرش فرهنگ را تسهیل یا مسدود کنند. سهم نظری و نوآوری اصلی این مطالعه، شناسایی شاخص‌هایی نظیر «فرهنگ ایمنی»، «احساس افتخار به شرکت» و «حفظ بیت‌المال» است که در مطالعات پیشین این سازمان مغفول مانده بودند. نگاه انتقادی به یافته‌ها حاکی از آن است که در محیط‌های صنعتی، ایمنی صرفاً یک دستورالعمل فنی نیست، بلکه بخشی از هویت اخلاقی سازمان است. همچنین، شناسایی «فرهنگ بومی کارکنان» به‌عنوان یک مداخله‌گر، یادآور این نکته است که نادیده گرفتن ارزش‌های منطقه‌ای (هرمزگان) می‌تواند اثربخشی راهبردهای فرهنگی را کاهش دهد.

راهبردهای استخراج شده در این پژوهش (مانند شایسته‌سالاری و جانشین‌پروری)، بر ضرورت پیوند میان «ارزش‌های انسانی» و «ساختارهای منابع انسانی» تأکید دارند. تحلیل نهایی نشان می‌دهد که پیامدهای این الگو دو وجهی است: «اثربخشی سازمانی» برای شرکت و «بالندگی فردی» برای کارکنان. این پژوهش با نقد رویکردهای مکانیکی، مدلی را پیشنهاد می‌دهد که در آن تعالی سازمان از مسیر تعالی فرد می‌گذرد.

در مجموع، این الگو با خروج از نگاه صرفاً مدیریتی و جایگزینی آن با نگاهی ارگانیک و بومی‌شده، سهم مهمی در ادبیات فرهنگ‌سازمانی صنعت گاز ایفا می‌کند. شناسایی ۵۵ مقوله که بسیاری از آن‌ها ریشه در اخلاق اسلامی و اداری دارند، نشان‌دهنده موفقیت این پژوهش در ارائه مدلی است که هم‌زمان «تکنولوژی جدید» را با «اصالت‌های هویتی» پیوند می‌زند.

۹-۱. پیشنهادات کاربردی و سیاست‌گذاری

بر مبنای یافته‌های پژوهش و باهدف تبدیل کدهای استخراج شده به برنامه‌های عملیاتی، پیشنهادات زیر ارائه می‌گردد:

- تدوین پیوست فرهنگی برای پروتکل‌های فرهنگ ایمنی: با توجه به نوظهور بودن «فرهنگ ایمنی» در این مدل، پیشنهاد می‌شود ایمنی از یک «اجبار فنی» به یک «ارزش اخلاقی و فرهنگی» تبدیل شده و رعایت آن در شاخص‌های پاداش‌دهی و انگیزش لحاظ گردد.
- استقرار نظام ارزیابی مبتنی بر کدهای اخلاقی: پیشنهاد می‌گردد شاخص‌های شناسایی‌شده نظیر «وجدان کاری»، «امانت‌داری» و «صداقت» که در این پژوهش تأیید شدند، در فرم‌های ارزیابی عملکرد سالانه وزن‌دهی شوند.
- طراحی پیوند میان برند سازمانی و افتخار ملی: با توجه به مقوله «احساس افتخار به شرکت»، پیشنهاد می‌شود موفقیت‌های فنی پالایشگاه در قالب روایت‌های مستند برای کارکنان و خانواده‌هایشان بازنشر شود تا تعلق سازمانی تقویت گردد.
- شفاف‌سازی نظام عدالت و شایسته‌سالاری: جهت رفع موانع مداخله‌گر، بایستی معیارهای

«ارتقاء شغلی» و «جانشین‌پروری» کاملاً شفاف و بر اساس نتایج عملکرد (نتیجه‌گرایی) بازتعریف شوند.

۲-۹. پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی

- واکوی نقش فرهنگ بومی: انجام مطالعه‌ای کیفی با تمرکز صرف بر تأثیر «فرهنگ عامه منطقه هرمزگان» بر «اخلاق کاری» در صنایع مستقر در جنوب کشور.
- تأثیر رهبری تحول‌آفرین: بررسی رابطه‌ی میان ویژگی‌های رهبری مدیران (استخراج شده در این مدل) با نرخ پذیرش نوآوری و خلاقیت در میان کارکنان عملیاتی.

مراجع:

- Yas. 2010; 23:114-34. [Persian]
- [7]. An Y, Kang J. Relationship between organizational culture and workplace bullying among Korean nurses. *Asian Nurs Res*. 2016;10(3):234-9.
- [8]. Rus CL, Rusu AS. A perspective on organizational culture in Romanian educational institutions. *Procedia Soc Behav Sci*. 2015; 180:1002-8.
- [9]. Zerella S, Treuer K, Albrecht SL. The influence of organizational culture on job satisfaction, organizational commitment and turnover intention. *Leadersh Organ Dev J*. 2017;38(2):364-79.
- [10]. Kazemi A, Farajlou Motlagh F. Shenasaey-e farhang-e sazmani-e matlub bar asas-e model-e Quinn baraye ijad-e daneshgah-e yadgirandeh. 2nd International Conference on Management and Accounting. Tehran: Salehan Institute of Higher Education; 2017. p. 368-77. [Persian]
- [11]. Ghodsian N, Dorani K, Pourshafiei H, Asadi Younesi MR. Olgou-ye farhang-e sazmani-ye sazman-haye amoozeshi (EOCM): mored-e motale'eh, amoozesh va parvaresh-e shahr-e Birjand. *Modiriyat-e Farhang-e Sazmani*. 2015;13(2):341-65. [Persian]
- [12]. Farhi A, Fazayeli A, Ebrahimi E. Moarefi-ye olgou-ye matlub-e farhang-e sazmani ba roykard-e keyfi va zehn-kavi-ye modiran. *Motale'at-e Raftar-e Sazmani*. 2015;4(4):31-64. [Persian]
- [13]. Ansari M, Shaemi Barzaki A, Safari A. Era'eh-ye olgou-ye modiriyat-e farhang-e sazmani ba roykard-e zaminei. *Jame'e Shenasi-ye Karbordi*. 2011;22(2):121-42. [Persian]
- [14]. Harwiki W. The impact of servant
- [1]. Pourazat AA, Tasaddoghi S, Alavi A. Farhang-e noavari baraye kasb-e maziyaat-e raqabati dar sherkat-e Benton dar Iran. *Farayand-e Modiriyat va Towseeh*. 2014;27(3):75-100. [Persian]
- [2]. Choi YS, Seo M, Scott D, Martin J. Validation of the organizational culture assessment instrument. *J Sport Manag*. 2010; 24:169-89.
- [3]. Alvani SM. Motale'at-e modiriyat-e behbod va tahavol. 2007; 55:2. [Persian]
- [4]. Monorian A, Gholipour A, Ahmadi H, Shabani E. Shenasaey-e farhang-e sazmani dar chaharcheb-e arzesh-haye raqabati-ye Quinn va tasir-e an bar nezam-haye jazb-e modiriyat-e manabe ensani dar yek sherkat-e bimeh. *Pazhuheshnameh Bimeh*. 2012;27(105):25-48. [Persian]
- [5]. Denison DR. Corporate culture and organizational effectiveness. New York: Wiley; 1990.
- [6]. Tabarsa GH, Mirzadeh L. Tabyin-e jaygah-e farhang-e sazmani dar erteqa-ye raftar-e shahrevandi-ye sazmani (OCB): mahiat, mohtava va karkardha. *Rahbord-e*



- [21]. Kao CY, Tsaur SH, Wu TC. Organizational culture on customer contact employees' service performance: The mediating effect of person-organization fit. *J Hosp Tour Manag.* 2016;29. <https://doi.org/10.1016/j.jhtm.2016.06.002>
- [22]. Richards TN. An updated review of institutions of higher education's responses to sexual assault: Results from a nationally representative sample. *J Interpers Violence.* 2019;34(10):1983-2012. <https://doi.org/10.1177/0886260516658757>
- [23]. Arditi D, Nayak S, Damci A. Effect of organizational culture on delay in construction. *Int J Proj Manag.* 2017;35(2):136-47. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.10.018>
- [24]. Gu VC, Hoffman JJ, Cao Q, Schniederjans MJ. The effects of organizational culture and environmental pressures on IT project performance: A moderation perspective. *Int J Proj Manag.* 2014;32(7):1170-81. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.12.003>
- [25]. Wong SL, Zapantis A. Oncology pharmacists in health care delivery: Vital members of the cancer care team. *J Oncol Pharm Pract.* 2013;19(1):3-8. <https://doi.org/10.1177/1078155212459665>
- [26]. Alkhorraif A, McLaughlin P. Organisational culture and the implementation of quality management: A case study in the Saudi Arabian manufacturing sector. *Int J Qual Reliab Manag.* 2017;34(9):1437-55. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-11-2015-0175>
- [27]. Jing FF, Avery GC. Missing links in understanding the relationship between leadership and organizational performance. *Int Bus Econ Res J.* 2008;7(5):67-78. <https://doi.org/10.19030/iber.v7i5.3278>
- [15]. Khan I, Usoro A, Majewski G. An organizational culture model for comparative studies: a conceptual view. *Int J Glob Bus.* 2010;3(1):53-82.
- [16]. Iljins J, Skvarciany V, Gaile-Sarkane E. Impact of organizational culture on organizational climate during the process of change. *Procedia Soc Behav Sci.* 2015; 213:944-50. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.509>
- [17]. Desselle SP, Raja L, Andrews B, Lui J. Perceptions of organizational culture and organizational citizenship by faculty in U.S. colleges and schools of pharmacy. *Curr Pharm Teach Learn.* 2018;10(4):403-12. <https://doi.org/10.1016/j.cptl.2017.12.017>
- [18]. Warrick DD. What leaders need to know about organizational culture. *Bus Horiz.* 2017;60(3):395-404. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.01.011>
- [19]. Samadi Miyar Kalai H. Tabyin-e vaziyat-e raftar-e shahrevandi-ye sazmāni va shakhsh-haye an dar parastaran-e bimarestan ba roykard-e model-e mo'adlat-e sakhtari. *Majalleh Daneshgah Oloum Pezeshki Qom.* 2017;11(4):10. [Persian]
- [20]. Bingöl D, Şener İ, Çevik M. The effect of organizational culture on organizational performance: A field study in health sector. *Procedia Soc Behav Sci.* 2013; 81:428-37. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.06.462>



organization fit. *Academy of Management Journal*. 1991;34(3):487–516. <https://doi.org/10.5465/256404>

- [37]. Mehrarad MH, Hamdi K, Khalili Aragi M. Tarahi-ye model-e farhang-e sazmani-ye bazaar-mahvar va rabete-madar ba estefadeh az ravesh-e Delphi baraye barresi-ye amalkard-e modiriyat-e mali dar Sherkat-e Melli Gaz-e Iran. *Danesh-e Sarmayegozari (Scientific-Research Quarterly of Investment Knowledge)*. 2024;13(4):147–178. [Persian]
- [38]. Mokhber Dezfouli A, Rezaei M. Tadvin-e model-e farhang-e imeni-ye yek sherkat-e fooladi: yek motale'e-ye amikhteh. *Pazhohesh-haye Keyfi dar Oloum-e Raftari*. 2024;3(1):37–54. [Persian]
- [39]. Hassanzadeh Shoeyli E, Peydayi MM, Razaghi Rostami AR. Tadvin va era'eh-ye olgou-ye riyazi be-manzoor-e me'mari-ye farhang-e sazmani mobtani bar ijad-e hamsouyi beyn noghat-e marja-ye strategik-e anasor-e sazmani. *Faslnameh Modiriyat va Cheshmandaz-e Amoozesh*. 2024;6(1):124–58. [Persian]
- [40]. Amiri E, Teimournejad K, Saedi L. Tarahi-ye olgou-ye farhang-e sazmani ba roykard-e strategi-ye farhang-e mosharekati dar markaz-e motale'at va barname-rizi-ye shahr-e Tehran. *Faslnameh Motale'at-e Modiriyat-e Shahri*. 2023;11(56):107–24. [Persian]
- [41]. Rangriz H, Golmoradi Adinevand H, Jafari Y. Tarahi-ye olgou-ye farhang-e sazmani-ye digital dar san'at-e bankdari-ye Iran. *Faslnameh Modiriyat-e Noavari dar Sazman-haye Defa'i*. 2023;6(22):177–208. [Persian]
- [42]. Rangriz H, Zarchi M, Abbasian H, Soltani I. Era'eh-ye model-e tahavol-e farhang-e
- [28]. Yilmaz C, Ergun E. Organizational culture and firm effectiveness: An examination of relative effects of culture traits and the balanced culture hypothesis in an emerging economy. *J Bus Res*. 2008;61(8):802–13. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2007.09.008>
- [29]. Guner M. Organizational culture and performance in emerging markets. Istanbul: Bogazici University Press; 2001.
- [30]. Kuofie MHS, Stephens-Craig D, Dool R. A comparison of leadership styles and organizational culture at one South African company. *Int J Bus Manag*. 2010;5(9):30–41. <https://doi.org/10.5539/ijbm.v5n9p30>
- [31]. Schultz M. On Studying Organizational Cultures: Diagnosis and Understanding. Walter de Gruyter; 1995.
- [32]. Quinn RE, Cameron K. Organizational life cycles and shifting criteria of effectiveness: Some preliminary evidence. *Management Science*. 1983;29(1):33–51. <https://doi.org/10.1287/mnsc.29.1.33>
- [33]. Denison DR. Corporate culture and organizational effectiveness. New York: John Wiley & Sons; 1990. ISBN 978-0471500070.
- [34]. Robbins SP. Organizational behavior: Concepts, controversies, applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall; 1996. ISBN 978-0132834872.
- [35]. Hofstede G. Culture's consequences: International differences in work-related values. Beverly Hills, CA: Sage Publications; 1980. ISBN 978-0803913066.
- [36]. O'Reilly CA, Caldwell DF, Chatman J. People and organizational culture: A profile comparison approach to assessing person-



- on the accounting information system and operational performance of small and medium sized enterprises in Ho Chi Minh City. *J Asian Finance Econ Bus.* 2020;7(2):301–8.
- [50]. Barrett R. *The values-driven organization: Cultural health and employee well-being as a pathway to sustainable performance.* 2nd ed. London: Routledge; 2017. <https://doi.org/10.9774/gleaf.9781315558530>
- [51]. Warrick DD, Milliman JF, Ferguson JM. Building high performance cultures. *Organ Dyn.* 2016;45(1):64–70. <https://doi.org/10.1016/j.orgdyn.2015.12.008>
- [52]. Naranjo-Valencia JC, Jiménez-Jiménez D, Sanz-Valle R. Studying the links between organizational culture, innovation, and performance in Spanish companies. *Rev Lat Am Psicol.* 2016;48(1):30–41. <https://doi.org/10.1016/j.rlp.2015.09.009>
- [53]. Seyed Javadin SR, Esfidani MR. *Teorisaazi-ye dadeh bonyad.* Tehran: Institute for Business Studies and Research; 2010. [Persian]
- [54]. Strauss A, Corbin J. *Mabani-ye teori-pardazi-ye dadeh-bonyad: ravesh-e tahghigh-e keyfi* [Basics of grounded theory: Qualitative research method]. Translated by Rezaei B. Tehran: Jahad-e Daneshgahi Publications; 2006. [Persian]
- sazmani-ye ta'ali-mahvar dar san'at-e foolad. *Motale'at-e Ravanshenasi-ye San'ati va Sazmani.* 2022;9(1):227–58. [Persian]
- [43]. Alizadeh Majd AR, Pargo M, Davoudi A. *Vakavi-ye avamel-e mo'asser bar farhang-e sazmani dar sanaye-ye petroshimi-ye keshvar.* *Faslnameh Modiriyat Kasb-o-Kar-e Noavaran.* 2022;15(59):44–65. [Persian]
- [44]. Eftekhari M, Farhi A, Jamshidi M. *Tarahi-ye modeli baraye tabyin-e farhang-e sazmani ba amalkard-e bala dar sanaye-ye petroshimi-ye Iran: roykard-e keyfi.* *Faslnameh Motale'at-e Raftar-e Sazmani.* 2021;10(3):173–97. [Persian]
- [45]. Bogale AT, Debela KL. Organizational culture: a systematic review. *Cogent Business & Management.* 2024;11(1):1–23. <https://doi.org/10.1080/23311975.2024.2340129>
- [46]. González-Torres T, Gelashvili V, Martínez-Navalón JG, Herrera-Enríquez G. Organizational culture and climate: new perspectives and challenges. *Frontiers in Psychology.* 2023; 14:1267945. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1267945>
- [47]. Iragi C, Kyongo J. Organizational culture and innovation: An empirical investigation. *Zenodo / Research Publish Journals.* 2023. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10439019>
- [48]. Aichouche R, Chergui K, Brika SKM, El Mezher M, Musa A, Laamari A. Exploring the relationship between organizational culture types and knowledge management processes: A meta-analytic path analysis. *Frontiers in Psychology.* 2022; 13:856234. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.856234>
- [49]. Ha VD. Impact of organizational culture



Developing a Model for the Enhancement and Promotion of Organizational Culture in Sarkhoon and Qeshm Gas Refining Company

Zeinab Zarepour^{1*}, Mohsen Safari¹, Isa Bakhoda², Mahmoud Darvishnejad³, Ali Moradpour Jaghdari³, Alireza Salehi³

1. Strategic Management Research Group, Academic center for education culture and research of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
2. Head of Research and Technology Affairs, Sarkhoon and Qeshm Gas Refining Company, Instructor, Bandar Abbas, Iran
3. Sarkhoon and Qeshm Gas Refining Company, Instructor, Bandar Abbas, Iran

ARTICLE INFO

RESEARCH ARTICLE

Article History:

Received: 29 September 2025

Revised: 06 November 2025

Accepted: 27 November 2025

Keywords:

Organizational Culture
Organizational Culture Modeling
Grounded Theory
Gas Industry
Paradigmatic Model

ABSTRACT

The present study was conducted to design a model for the development and promotion of organizational culture in Sarkhoon and Qeshm Gas Refining Company. This is an applied research in terms of objective and a qualitative study in nature, utilizing the Grounded Theory strategy. Data were collected through semi-structured interviews with 19 experts (managers and senior specialists) selected via purposive sampling, and the process continued until theoretical saturation was achieved. In the open coding stage, 60 sub-categories were initially extracted, and after expert validation, 55 categories were confirmed. During the axial coding stage, these categories were organized into 6 paradigmatic dimensions and 10 main categories, including: Causal Conditions (organizational and individual factors), Central Phenomenon (promotion of organizational culture), Contextual Conditions (organizational and individual factors), Intervening Conditions (organizational and individual factors), Strategies (organizational leadership and human resources), and Consequences (organizational effectiveness and individual growth). The results indicate that by identifying innovative indicators such as organizational justice, HSE culture, organizational commitment, and pride in the company-which were overlooked in previous studies of this organization-the research depicts new dimensions of organizational culture. Ultimately, the integration of these dimensions has led to a comprehensive model that can serve as an operational roadmap to facilitate human capital enhancement and continuous performance improvement in the gas industry.

DOR: [20.1001.1.2510.1112.1404.07.07](https://doi.org/10.1001.1.2510.1112.1404.07.07)

How to cite this article

Z. Zarepour, M. Safari, I. Bakhoda, M. Darvishnejad, A. Moradpour Jaghdar, A.R. Salehi, Developing a Model for the Enhancement and Promotion of Organizational Culture in Sarkhoon and Qeshm Gas Refining Company. *Iranian Journal of Gas Engineering*, 2025 12(3): 85-109. (https://ijge.irangi.org/article_735122.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: tzarepour@ut.ac.ir, (Z. Zarepour).

Available online 21 December 2025

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

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



IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

VOLUME 12 • ISSUE 3 • NO. 23 • AUTUMN 2025

EISSN:25885-5251



► Contents

A Review of Ultrasonic Wave Applications in Improved Oil Recovery from Reservoirs 10

Paniz Nakhaei, Mahdi Razavifar

Optimization of Petrophysical Evaluation Utilizing Variable Cementation Factor for Identification of Pay-Zones in a Field within Zagros Basin 25

Koorosh Keramati, Ahmad Reza Rabbani, Khaled Maroufi, Ali Kadkhodaie

Investigation of Natural Gas Separation Performance Using AC/PES Mixed Matrix Membrane: Laboratory Section 39

Saeid Khademi, Abolfazl Kian, Basir Maleki

Development of the Energy Sustainability Prism Model: A Framework for Integrated Management of the Energy Ecosystem 57

Mostafa Ebrahimi Moghaddam, Mohammad Mahdi Najafi, Afshin Emamikhah

Molecular Dynamics Simulations of Membrane-Based Gas Separation: Overview, Challenges and Future Perspectives 69

Amir Aghaei- Livar, Sima Majidi, Siamak Pakdel, Hamid Erfan-Niya

Developing a Model for the Enhancement and Promotion of Organizational Culture in Sarkhoon and Qeshm Gas Refining Company 85

Zeinab Zarepour, Mohsen Safari, Isa Bakhoda, Mahmoud Darvishnejad, Ali Moradpour Jaghdari, Alireza Salehi

IJGE
IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

نشریه مهندسی گاز ایران

سال دوازدهم / شماره سوم / جلد بیستم و سوم / پاییز ۱۴۰۴
EISSN:25885-5251



سرمقاله

آینده گاز: گذار انرژی، هیدروژن و سوخت‌های کم کربن ۷
یاسین خلیلی

مقالات

مروری بر کاربردهای امواج فراصوت در بهبود برداشت از مخازن نفتی ۱۰
پانید نخعی، مهدی رضوی

بهینه‌سازی ارزیابی پتروفیزیکی با بهره‌گیری از ضریب سیمان‌شدگی متغیر جهت
شناسایی زون‌های مخزنی در یکی از میادین حوضه زاگرس ۲۵
کوروش کرامتی، احمدرضا ربانی، خالد معروفی، علی کدخدائی

بررسی عملکرد جداسازی گاز طبیعی با استفاده از غشای ماتریس آمیخته AC/PES:
بخش آزمایشگاهی ۳۹
سعید خادمی، ابوالفضل کیان، بصیر ملکی

توسعه مدل منشور پایداری انرژی: چارچوبی برای مدیریت یکپارچه زیست‌بوم انرژی ۵۷
مصطفی ابراهیمی مقدم، محمدمهدی نجفی، افشین امامی‌خواه

شبیه‌سازی مولکولی جداسازی گازها به روش غشایی: مرور کلی، چالش‌ها و چشم‌انداز آتی ۶۹
امیر آقایی لیواری، سیما مجیدی، سیامک پاکدل، حمید عرفان‌نیا

تدوین الگوی توسعه و ترویج فرهنگ‌سازمانی شرکت پالایش گاز سرخون و قشم ۸۵
زینب زارع‌پور، محسن صفری، عیسی باخدا، محمود درویش‌نژاد، علی مرادپور جغداری، علیرضا صالحی

IJGE

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING