



نشریه مهندسی گاز ایران

سال سیزدهم / شماره ۱ / جلد ۲۵

بهار ۱۴۰۵

EISSN:25885-5251

IJGE®

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

نشریه مهندسی گاز ایران

◀ سال سیزدهم . شماره اول . جلد بیستم و پنجم . بهار ۱۴۰۵

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 مسعود ریاضی (دانشگاه نظربایف، قزاقستان)
دکتر جعفر قاجار (دانشگاه اترخت، هلند)
دکتر علی وطنی (دانشگاه تهران)
دکتر رضا مسیبی بهبهانی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر وحید نقی‌خانی (دانشگاه صنعتی شریف)
دکتر سید علیرضا طباطبائی نژاد (دانشگاه صنعتی سهند)
دکتر رهبر رحیمی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر مسعود آقاجانی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر محمدرضا احسانی (دانشگاه صنعتی اصفهان)
دکتر علیمراد رشیدی (پژوهشگاه صنعت نفت)
دکتر محسن مسیحی (دانشگاه صنعتی شریف)
دکتر منصور فرزاد (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر محمدرضا خسروی نیکو (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر فهیمه حوری آبادصبور (دانشگاه محقق اردبیلی)
دکتر لیلا خازینی (دانشگاه تبریز)
دکتر حمید عرفان نیا (دانشگاه تبریز)
دکتر محمدحسین صابری (دانشگاه تبریز)
دکتر ابوالفضل کیان (دانشگاه صنعتی اسفرااین)

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 ۲۵

- دکتر علی وطنی (دانشگاه تهران)
دکتر امید رافهی (دانشگاه تبریز)
دکتر مسعود بیژنی (دانشگاه گرمسار)
دکتر زهرا نرگسی (دانشگاه تهران)
دکتر حسن اقدسی نیا (دانشگاه تبریز)
دکتر مرتضی اسفندیاری (دانشگاه بجنورد)
دکتر جمشید خورشیدی (دانشگاه هرمزگان)
دکتر مهدی رضوی فر (دانشگاه تبریز)
دکتر زهرا آقایی فر (دانشگاه صنعتی سهند)
دکتر مجتبی ساعی مقدم (دانشگاه قوچان)
دکتر آراد کیانی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)
دکتر مسعود آقاجانی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر ابوالفضل کیان (دانشگاه صنعتی اسفرااین)
دکتر مرتضی زیودار (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر بهاره بیدار (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر محمد رضا امیدخواه (دانشگاه تربیت مدرس)
دکتر وجیهه یوسفی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر آرمین ثابت قدم امفهان (شرکت گاز استان هرمزگان)
دکتر محمدرضا سرتیپی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)

فهرست مطالب

◀ سرمقاله

- تجاری سازی فناوری و ارتقای سطح کیفی تجهیزات راهبردی؛ از بلوغ علمی تا خلق ارزش صنعتی ۷
محمدحسین مهرآراد

◀ مقالات

- بهینه سازی انرژی در صنایع انرژی بر با رویکرد اقتصاد مهندسی: مطالعه موردی بهره‌وری در شرکت‌های بین‌المللی ۹
رضا رفیعی، آرمین ثابت‌قدم اصفهانی، یگانه داود بیگی، سید محمود لطیفی
- مدل سازی ساختاری - تفسیری پیشایندهای مدیریت منابع انسانی ناب شرکت پالایش گاز سرخون و قشم ۳۷
محسن صفری، زینب زارع‌پور، زیبا سالمی، عیسی باخدا
- آنالیز حساسیت و بهینه‌سازی اقتصادی پیکربندی‌های چندمرحله‌ای غشایی برای جداسازی دی‌اکسید کربن از متان ۵۳
سعید خادمی، ابوالفضل کیان، بصیر ملکی
- تبدیل متانول به آروماتیک‌های سبک با استفاده از نانوزئولیت HZSM5: اثرات شرایط عملیاتی ۷۱
میثم مصطفائی، فرانک اخلاقیان طاب
- بهینه‌سازی خواص مکانیکی جرم نسوز ریختنی آلومینا بالا از طریق اصلاح فرمولاسیون / مطالعه کاربردی در صنعت گاز و پتروشیمی ۹۰
علیرضا رحیمی
- پیش‌بینی میزان ماسه عبوری از لوله‌ی مشبک کاری شده به کمک الگوریتم‌های یادگیری ماشین ۱۰۳
محمدالیاس خداشناس

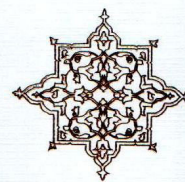


انتخاب انجمن مهندسی گاز ایران به عنوان انجمن علمی برگزیده کشور در سال ۱۴۰۴

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 دقتریان

رئیس محترم انجمن علمی مهندسی گاز ایران

پادشاهت ارزش های دینی و فرهنگی و اقتدار علمی کشور مرمیون تلاش ارزشمند استادان، پژوهشگران و فناورانی است که باندیشه خلاق و قلم پویای خود آینده ای روشن و سرشار از امید را به ایران اسلامی هدیه می کنند. 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 می گویم و به پاس مساعی و توانمندی های علمی شامزاد پاسبانکاری و قدردانی خود را ابراز می دارم.

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

حسین سیابی



نشریه مهندسی گاز ایران

۵



دکتر محمدحسین مهرآراد

معاون تجاری سازی

مدیریت پژوهش و فناوری شرکت ملی گاز ایران

تجاری سازی فناوری و ارتقای سطح کیفی تجهیزات راهبردی؛ از بلوغ علمی تا خلق ارزش صنعتی

در ادامه، مطالعات امکان سنجی، ارزیابی سطح آمادگی فناوری (TRL)^۳، سطح آمادگی ساخت (MRL)^۴، ظرفیت ساخت داخل و تحلیل اقتصادی چرخه عمر، تصویری واقع بینانه از امکان توسعه صنعتی و تجاری فناوری ارائه می دهد. هم زمان، احراز صلاحیت فناورانه سازندگان، تدوین بسته جامع دانش فنی (TDP)^۵، انجام آزمون های پذیرش کارخانه و میدانی (FAT^۶ و SAT^۷)، استقرار نظام های تضمین کیفیت و تکمیل مستندات بهره برداری و نگهداشت (O&M)^۸، موجب می شود فناوری از مرحله ایده و نمونه اولیه عبور کرده و با اطمینان بیشتری برای بهره برداری و قابلیت حضور در محیط عملیاتی صنعت آماده شود. ثبت محصول در سامانه کدینگ کالا و فهرست تأمین کنندگان مورد تأیید (AVL)^۹ نیز نقطه ای است که در آن، دانش فنی به دارایی صنعتی و ارزش اقتصادی تبدیل می شود و فناوری به عضوی پایدار از زنجیره تأمین صنعت گاز بدل می گردد.

امروزه در بسیاری از صنایع پیشرفته، تجاری سازی فناوری صرفاً به انتقال یک دستاورد پژوهشی برای ورود به بازار محدود نمی شود، بلکه فرآیندی نظام مند برای کاهش ریسک فناوری^{۱۰}، کاهش عدم قطعیت سرمایه گذاری و افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات

تجربه کشورهای پیشرو نشان می دهد که چالش اصلی نظام های نوآوری نه در تولید دانش، بلکه در ایجاد پیوندی پایدار میان دانش، فناوری، صنعت و بازار است. بسیاری از دستاوردهای پژوهشی، با وجود برخورداری از پشتوانه علمی، به دلیل فقدان سازوکارهای منسجم برای ارزیابی، اعتبارسنجی، احراز صلاحیت و پذیرش صنعتی، هرگز به مرحله خلق ارزش اقتصادی و اثرگذاری در زنجیره تأمین نمی رسند. از این منظر، تجاری سازی فناوری صرفاً پایان یک پروژه پژوهشی نیست، بلکه یکی از ارکان حکمرانی نوآوری و حلقه اتصال سیاست گذاری، پژوهش، صنعت و بازار به شمار می آید؛ حلقه ای که بدون آن، توسعه فناوری نمی تواند به خوداتکایی در تولید داخل، ارتقای سطح کیفی تجهیزات راهبردی، افزایش امنیت انرژی، بهبود بهره وری و شکل گیری مزیت رقابتی پایدار منجر شود.

در همین چارچوب، الگوهایی نظیر مدل (TQCP)^۱ نشان می دهند که موفقیت در تجاری سازی، حاصل یک تصمیم منفرد یا یک اقدام مقطعی نیست، بلکه نتیجه استقرار زنجیره ای منسجم از فرآیندهای فنی، مدیریتی و اقتصادی است. این زنجیره از شناسایی راهبردی نیازهای صنعت و تحلیل جایگاه تجهیزات در زنجیره تأمین آغاز می شود؛ جایی که تحلیل و نقشه برداری سازندگان اصلی تجهیزات^۲، ارزیابی اهمیت راهبردی تجهیزات و تمرکز بر اقلام دارای بیشترین اثر بر تابآوری صنعت، مسیر سرمایه گذاری فناورانه را هدفمند می کند.

3. Technology Readiness Level (TRL)
4. Manufacturing Readiness Level (MRL)
5. Technical Data Package (TDP)
6. Factory Acceptance Test (FAT)
7. Site Acceptance Test (SAT)
8. Operation and Maintenance (O&M)
9. Approved Vendor List (AVL)
10. Technology Risk

1. Technology Qualification, Commercialization and Productization (TQCP)
2. OEM Mapping



محسوب می‌شود. تجربه صنایع نفت، گاز و نیروگاهی نشان داده است که استفاده از چارچوب‌های استاندارد ارزیابی آمادگی فناوری و ساخت، همراه با مدیریت دانش، تحلیل چرخه عمر تجهیزات^۱ و مدیریت ریسک، موجب کاهش هزینه‌های نگهداشت، افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات^۲ و تسریع ورود فناوری‌های نوآورانه به زنجیره تأمین می‌شود.

از سوی دیگر، تحول دیجیتال و توسعه فناوری‌های مبتنی بر داده، هوش مصنوعی، اینترنت اشیا صنعتی^۳ و دوقلوی دیجیتال^۴، افق جدیدی را پیش روی تجاری‌سازی تجهیزات راهبردی گشوده است. یکپارچه‌سازی این فناوری‌ها با فرآیندهای ارزیابی، آزمون و احراز صلاحیت، امکان پایش مستمر عملکرد تجهیزات، پیش‌بینی خرابی‌ها، بهینه‌سازی تعمیرات و نگهداشت و ارتقای بهره‌وری عملیاتی را فراهم می‌کند. از این منظر، توسعه زیست‌بوم نوآوری در صنعت گاز باید علاوه بر حمایت از ساخت داخل، بر انتقال دانش دیجیتال، توسعه زیرساخت‌های داده‌محور و استانداردسازی فناوری‌های نوین نیز تمرکز داشته باشد تا مزیت رقابتی پایدار در سطح ملی و بین‌المللی ایجاد شود.

در این میان، معاونت تجاری‌سازی مدیریت پژوهش و فناوری شرکت ملی گاز ایران می‌تواند با استقرار فرآیندهای نظام‌مند ارزیابی، اعتبارسنجی، احراز صلاحیت و هدایت فناوری، نقشی محوری در کاهش فاصله میان پژوهش، صنعت و بازار ایفا کند. این معاونت با هدایت هدفمند فرآیندهای توسعه فناوری، حمایت از سازندگان داخلی و تسهیل ورود محصولات فناورانه به زنجیره تأمین صنعت گاز، بستر لازم برای توسعه محصولات راهبردی ساخت داخل، کاهش ریسک سرمایه‌گذاری فناورانه و افزایش اثربخشی تجاری‌سازی را فراهم می‌سازد.

با این حال، تجارب جهانی و شواهد موجود در صنعت گاز ایران نشان می‌دهد که اثربخشی چنین فرآیندی، بیش از آنکه به اجرای مجموعه‌ای از مراحل اجرایی وابسته باشد، به کیفیت تعامل میان بازیگران زیست‌بوم نوآوری بستگی دارد. حکمرانی مؤثر فناوری زمانی تحقق می‌یابد که شرکت ملی گاز ایران، دانشگاه‌ها، مراکز

پژوهشی، شرکت‌های دانش‌بنیان، سازندگان داخلی و نهادهای تخصصی، در چارچوبی منسجم و مبتنی بر اعتماد متقابل، در تولید دانش، توسعه فناوری، اعتبارسنجی، استانداردسازی و انتقال تجربه مشارکت داشته باشند.

در این میان، انجمن مهندسی گاز ایران به‌عنوان یک مرجع علمی و حرفه‌ای، می‌تواند نقشی فراتر از یک نهاد صنفی ایفا کند. این انجمن با ایجاد فضای گفت‌وگوی تخصصی میان صنعت، دانشگاه و جامعه مهندسی، ترویج تجربیات موفق، نقد و ارزیابی علمی فناوری‌های نوظهور، توسعه ادبیات تخصصی، تدوین پیشنهادهای کارشناسی و تقویت ارتباط میان سیاست‌گذاران و جامعه علمی، یکی از ارکان تحقق حکمرانی نوآوری در صنعت گاز به شمار می‌آید. مشارکت فعال این انجمن در کنار دانشگاه‌ها و مراکز علمی، نه تنها به ارتقای کیفیت تصمیم‌سازی فناورانه کمک می‌کند، بلکه زمینه شکل‌گیری اجماع تخصصی، کاهش ریسک توسعه فناوری و تسریع فرآیند تجاری‌سازی را نیز فراهم می‌سازد.

از این منظر، آینده صنعت گاز ایران بیش از هر زمان دیگری به کیفیت حکمرانی فناوری وابسته است؛ حکمرانی‌ای که در آن، پژوهش به نوآوری، نوآوری به فناوری، فناوری به محصول، محصول به بازار و بازار به ارزش‌آفرینی ملی پیوند می‌خورد. استمرار این مسیر، علاوه بر تقویت خوداتکایی فناورانه و افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین، زمینه ارتقای بهره‌وری انرژی، توسعه صادرات خدمات فنی و مهندسی، کاهش وابستگی به فناوری‌های خارجی و تحقق اهداف توسعه پایدار کشور را فراهم خواهد ساخت.

پست الکترونیک: mehrad@nigc.ir

1. Life Cycle Assessment
2. Reliability
3. Industrial Internet of Things (IIoT)
4. Digital Twin

بهینه‌سازی انرژی در صنایع انرژی‌بر با رویکرد اقتصاد مهندسی: مطالعه موردی بهره‌وری در شرکت‌های بین‌المللی

رضا رفیعی^۱، آرمین ثابت‌قدم اصفهانی^۲، یگانه داود بیگی^۳، سید محمود لطیفی^۴

۱. مدیرعامل، شرکت گاز استان هرمزگان، بندرعباس، ایران

۲. مدرس، گروه مهندسی ایمنی و بازرسی فنی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

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

۴. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی خوردگی و حفاظت مواد، پردیس دریاساحلی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، بندرعباس، ایران

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

مقاله علمی-ترویجی

صفحه ۹ - ۳۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱

چکیده

این پژوهش با رویکرد اقتصاد مهندسی، راهکارهای صرفه‌جویی انرژی در صنایع انرژی‌بر را بررسی می‌کند و چالش‌های ناترازی گاز را در شرکت‌های بین‌المللی با چشم‌انداز توسعه نتایج برای حوزه انرژی ایران تحلیل می‌نماید. مطالعه موردی چهار شرکت پیشرو (سیمپلوت، جنرال موتورز، جنرال میلز و اینتل) همراه با بررسی تطبیقی در صنعت فولاد ایران، نشان داد که ترکیبی از همکاری چندجانبه (دولت، بخش خصوصی و نهادهای انرژی)، سرمایه‌گذاری هدفمند در فناوری‌های بهینه‌ساز، توسعه نیروی انسانی متخصص و مدل‌های عددی بهینه‌سازی (مانند برنامه‌ریزی خطی و الگوریتم‌های فراابتکاری)، نقش کلیدی در کاهش شدت مصرف انرژی تا ۳۰ درصد و هزینه‌های عملیاتی ایفا می‌کند. به‌عنوان مثال، سیمپلوت با به‌کارگیری طراحی آزمایشی (DOE) و مشارکت در برنامه ENERGY STAR، کاهش ۱۸ درصدی مصرف انرژی در فرآیندهای غذایی را محقق کرد، در حالی که جنرال موتورز با بهینه‌سازی خطوط تولید، ۱۱ درصد کاهش هزینه‌های عملیاتی را ثبت نمود. چالش اصلی در ناترازی گاز، تطبیق راهکارهای بهره‌وری انرژی با فناوری‌های نوین (مانند خودروهای الکتریکی و هیدروژن سبز) و ادغام مدل‌های محاسباتی در فرآیندهای محلی مانند احیای مستقیم آهن (DRI) در ایران بود که پتانسیل کاهش وابستگی به گاز طبیعی را تا ۲۰-۳۰ درصد فراهم می‌آورد. یافته‌ها حاکی از آن است که این اقدامات نه تنها بازدهی مالی کوتاه‌مدت (با نرخ بازده داخلی ۱۵ درصد) دارد، بلکه از طریق کاهش ردپای کربن، تقویت امنیت انرژی و کاربرد مدل‌های هیبریدی جهانی-منطقه‌ای، به توسعه پایدار صنایع کمک می‌کند. نتایج بر ضرورت تبدیل تجربیات موفق به استانداردهای صنعتی یکپارچه و ادغام آن‌ها در سیستم‌های HSE برای مدیریت کارآمد ناترازی گاز تأکید می‌کنند.

کلید واژه‌ها: بهره‌وری انرژی، ناترازی گاز، صنایع انرژی‌بر، توسعه پایدار



۱. مقدمه

صنایع مختلف به دلیل ماهیت فرآیندهای تولیدی خود، با چالش‌های منحصربه‌فردی در مصرف انرژی روبرو هستند. صنایع انرژی‌بر به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مصرف‌کنندگان منابع انرژی، نقش تعیین‌کننده‌ای در چالش‌های جهانی نظیر تغییرات اقلیمی، ناترازی انرژی و افزایش هزینه‌های تولید ایفا می‌کنند. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی^۱ در سال ۲۰۲۴، بخش صنعت مسئول بیش از ۳۷ درصد از مصرف انرژی جهانی و سهم قابل‌توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این آمار، ضرورت بازنگری در الگوهای مصرف انرژی و اتخاذ راهکارهای مبتنی بر اقتصاد مهندسی را بیش از پیش آشکار می‌سازد. در این میان، مسئله ناترازی گاز به‌عنوان یکی از چالش‌های کلیدی در صنایع انرژی‌بر مطرح می‌شود که ناشی از عدم تطابق بین عرضه و تقاضا، محدودیت‌های زیرساختی و نوسانات بازار است. این پدیده نه تنها امنیت انرژی را تهدید می‌کند، بلکه هزینه‌های عملیاتی را افزایش داده و رقابت‌پذیری صنایع را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در دهه‌های اخیر، رویکرد اقتصاد مهندسی با تمرکز بر بهینه‌سازی هزینه‌ها و بازدهی منابع، به‌عنوان چارچوبی مؤثر برای حل چالش‌های انرژی در صنایع مختلف شناخته شده است. این رویکرد، ترکیبی از تحلیل‌های فنی-اقتصادی، فناوری‌های نوین و مدیریت یکپارچه منابع را شامل می‌شود که هدف نهایی آن دستیابی به توسعه پایدار از طریق کاهش شدت مصرف انرژی و همسویی با اهداف زیست‌محیطی است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که پیاده‌سازی برنامه‌های بهره‌وری انرژی در صنایع، می‌تواند تا ۳۰ درصد از مصرف انرژی و انتشار کربن بکاهد [۱-۳]، اما موفقیت این برنامه‌ها مستلزم غلبه بر موانعی نظیر مقاومت در برابر تغییر فناوری، کمبود سرمایه‌گذاری و نبود استانداردهای صنعتی است [۴]. بهره‌وری انرژی^۲ به معنای استفاده از انرژی به بهینه‌ترین روش ممکن است، به‌گونه‌ای که اتلاف انرژی به حداقل برسد و مصرف منابع اولیه کاهش یابد. این مفهوم، انجام فعالیت‌های بیش‌تر با مصرف انرژی کم‌تر را ممکن می‌سازد و اهمیت آن از چندین عامل کلیدی نشئت می‌گیرد:

- افزایش قیمت حامل‌های انرژی و تأثیر آن بر هزینه‌های تولید.
- نیاز به تأمین امنیت انرژی در برابر نوسانات بازار و

بحران‌های ژئوپلیتیک (مانند اختلالات زنجیره تأمین نفت و گاز).

- ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای برای مقابله با تغییرات اقلیمی.

- ایجاد فرصت‌های شغلی در بخش فناوری‌های سبز (مانند اشتغال‌زایی در حوزه بهینه‌سازی ساختمان‌ها).

مقاله حاضر با بررسی تجربیات چهار شرکت بین‌المللی پیشرو در حوزه انرژی (سیمپلوت، جنرال موتورز، جنرال میلز و اینتل)، به تحلیل راهکارهای عملیاتی برای مقابله با ناترازی گاز و بهبود بهره‌وری انرژی می‌پردازد. این شرکت‌ها با تکیه بر سه محور اصلی شامل همکاری چندجانبه (همراهی دولت، شرکت‌های خدمات عمومی و بخش خصوصی)، سرمایه‌گذاری هدفمند در پروژه‌های پر بازده، و توانمندسازی نیروی انسانی، موفق به کاهش چشم‌گیر هزینه‌های انرژی و افزایش رقابت‌پذیری شده‌اند. برای نمونه، جنرال موتورز با اختصاص بودجه سالانه ۲۰ میلیون دلاری به بهینه‌سازی خطوط تولید، ۱۱ درصد کاهش هزینه‌های عملیاتی را محقق کرده است، در حالی که اینتل با ادغام سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی، مصرف مراکز داده خود را در حدود ۳۰ درصد کاهش داده است.

۲. اهمیت بهره‌وری انرژی در جهان امروز

در جهان امروز، بهره‌وری انرژی تحت تأثیر مستقیم نوسانات قیمت حامل‌های انرژی و بحران‌های ژئوپلیتیک قرار دارد. همان‌طور که در شکل ۱-الف نشان داده شده است، بررسی روند تاریخی قیمت نفت خام و سایر حامل‌های انرژی در کنار رویدادهای مهم سیاسی و اقتصادی، نشان می‌دهد که شوک‌های ژئوپلیتیک نقش تعیین‌کننده‌ای در جهش‌های قیمتی و بی‌ثباتی بازار انرژی داشته‌اند. برای تکمیل این تصویر، شکل ۱-ب داده‌های به‌روزشده قیمت حامل‌های انرژی را تا سال ۲۰۲۴ بر اساس منابع رسمی نشان می‌دهد که بیانگر تداوم نوسانات شدید در دهه ۲۰۱۰ و اوایل دهه ۲۰۲۰ و تأثیر رویدادهای اخیر بر بازار انرژی است. این دو نمودار در کنار هم ضرورت استفاده از رویکردهای مبتنی بر بهره‌وری انرژی و اقتصاد مهندسی را برای کاهش آسیب‌پذیری صنایع انرژی‌بر در برابر شوک‌های بیرونی برجسته می‌کنند. بررسی روند تاریخی قیمت حامل‌های انرژی (به‌ویژه نفت خام) نشان می‌دهد که پس از سال ۱۹۷۹

1. International Energy Agency (IEA)

2. Energy Efficiency

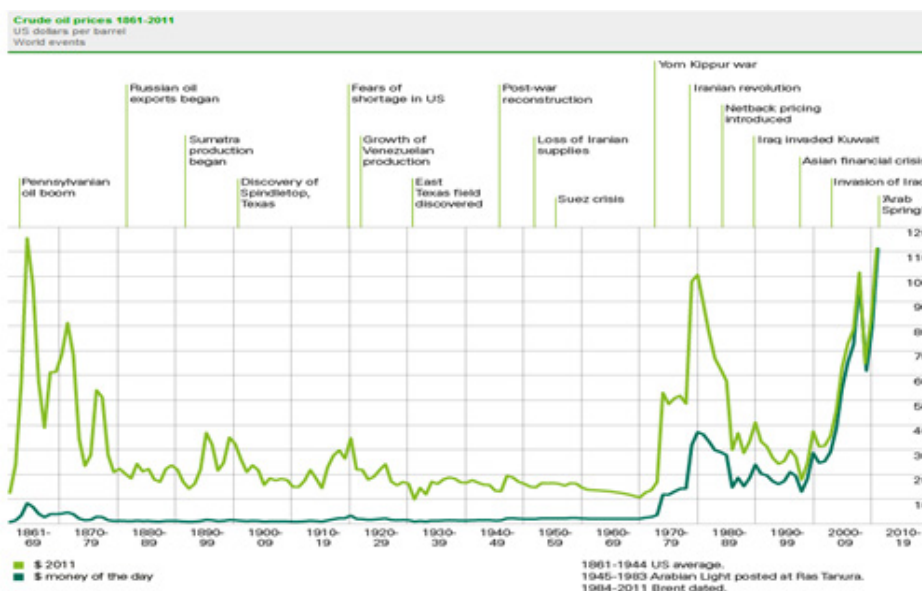
(مصادف با انقلاب اسلامی ایران)، همبستگی بین بحران‌های ژئوپلیتیک و نوسانات قیمت نفت و گاز به شدت افزایش یافته است. پیش از این تاریخ، وابستگی تغییرات قیمت انرژی تحت تأثیر بحران‌های بین‌المللی کمتر بود، چرا که بخش عمده منابع انرژی در اختیار کشورهای غربی قرار داشت؛ اما خروج ذخایر انرژی ایران و ونزولا از بازارهای غربی، وابستگی کشورهای غربی به منابع محدودتر را افزایش داد و رقابت بر سر دسترسی به این منابع را به یک مسئله استراتژیک تبدیل کرد. سه عامل کلیدی این تغییر را توضیح می‌دهد:

۱. کاهش دسترسی به منابع انرژی: خروج ایران از بازار انرژی غرب، وابستگی کشورها به ذخایر محدودتر را افزایش داد.

۲. رشد صنعتی کشورهای در حال توسعه: ورود کشورهایی مانند چین و هند به عرصه صنعت، مصرف جهانی انرژی را به میزان قابل توجهی افزایش داده است.

۳. رقابت استراتژیک بر سر منابع: محدودیت منابع انرژی و افزایش تقاضا، رقابت ژئوپلیتیک را به عاملی تعیین کننده در قیمت‌گذاری حامل‌های انرژی تبدیل کرده است.

نمونه بارز این وابستگی در جنگ اوکراین مشاهده گردید، جایی که اختلال در تأمین گاز اروپا منجر به کاهش رشد صنعتی، تورم بی‌سابقه و چالش‌های امنیتی شد. این بحران‌ها نشان می‌دهد که تأمین پایدار انرژی نه تنها یک ضرورت اقتصادی، بلکه یک ابزار استراتژیک برای حفظ ثبات اجتماعی و توسعه پایدار است.



(الف)



(ب)

شکل ۱. الف) روند تاریخی قیمت حامل‌های انرژی همراه با رویدادهای ژئوپلیتیک و شوک‌های اصلی بازار. ب) روند به‌روزشده قیمت حامل‌های انرژی تا سال ۲۰۲۴ بر اساس داده‌های رسمی اخیر



۳. تأثیر بهینه‌سازی انرژی بر توسعه پایدار

بهینه‌سازی انرژی نه تنها مصرف منابع را کاهش می‌دهد، بلکه به عنوان موتور محرکی برای دستیابی به اهداف چند بعدی توسعه عمل می‌کند. در ادامه، مهم‌ترین تأثیرات آن بر جنبه‌های مختلف توسعه بررسی می‌شود:

• ارزش افزوده^۱

بهینه‌سازی انرژی باعث کاهش چشم‌گیر مصرف منابع در فرآیندهای تولید، هزینه‌های استخراج، بهره‌برداری و تبدیل مواد اولیه می‌شود. این رویکرد به معنای تولید همان محصول با انرژی کمتر است که دو پیامد کلیدی دارد: کاهش هزینه‌های عملیاتی از طریق کمینه‌سازی نیاز به سوخت و منابع و کاهش رد پای زیست‌محیطی با حفظ خروجی تولید در عین کاهش حجم انرژی مصرفی. این فرآیند نه تنها سودآوری را افزایش می‌دهد، بلکه با آزادسازی منابع مالی، زمینه را برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین و توسعه محصولات پایدار فراهم می‌کند. در نهایت، ارزش افزوده ناشی از بهینه‌سازی انرژی، رقابت‌پذیری و جذابیت سرمایه‌گذاری بلندمدت را تقویت می‌نماید.

• مازاد مصرف‌کننده^۲

کاهش هزینه‌های تولید ناشی از بهینه‌سازی انرژی، قیمت نهایی محصولات را کاهش می‌دهد. این کاهش قیمت، قدرت خرید مصرف‌کنندگان را بهبود می‌بخشد و تقاضا برای کالاها را افزایش می‌دهد. به عنوان مثال، اگر هزینه تولید یک کالا یک میلیون تومان باشد و با سود ۱۰۰ درصدی به دو میلیون تومان برسد، بهینه‌سازی انرژی می‌تواند هزینه تولید را به هشتصد هزار تومان کاهش دهد و قیمت فروش را به یک میلیون و ششصد هزار تومان برساند. این امر نه تنها رضایت مشتری را افزایش می‌دهد، بلکه سودآوری شرکت را نیز حفظ می‌کند.

• مقرون به صرفه بودن انرژی^۳

قیمت‌گذاری انرژی در محدوده تاب‌آوری اقتصادی بازار،

از تشدید نابرابری‌ها جلوگیری می‌کند. بهینه‌سازی انرژی با کاهش هزینه‌های استخراج و مصرف، حاشیه امنیت قیمت را گسترش می‌دهد. این امر به شرکت‌ها اجازه می‌دهد محصولات را بدون تحمیل فشار اقتصادی بر خانوارهای کم‌درآمد عرضه کنند و دسترسی به انرژی پایدار را بهبود بخشند. برای نمونه، کاهش ۳۵ درصدی هزینه برق برای خانوارهای کم‌درآمد می‌تواند فقر انرژی را به طور چشم‌گیری کاهش دهد.

• ذخیره انرژی^۴

کاهش مصرف انرژی برای تولید یک محصول مشخص، امکان ذخیره منابع انرژی را فراهم می‌کند. این انرژی ذخیره شده می‌تواند در تولید محصولات جدید یا مقابله با بحران‌های احتمالی استفاده شود.

• امنیت انرژی^۵

بهینه‌سازی انرژی، وابستگی به منابع خارجی را کاهش می‌دهد و تأمین پایدار انرژی را تضمین می‌کند. برای مثال، اگر در شرایط فعلی برای تولید ۲۰ هزار مگاوات برق به ۱۰۰۰۰۰۰۰ مترمکعب گاز نیاز باشد، با بهینه‌سازی می‌توان همان میزان برق را با ۶۰۰۰۰۰۰ مترمکعب گاز تولید کرد. این کاهش وابستگی، ثبات اقتصادی و ژئوپلیتیکی را تقویت می‌کند.

• بهره‌وری سازمانی^۶

کاهش هزینه‌های انرژی، سودآوری شرکت‌ها را افزایش می‌دهد و امکان گسترش خطوط تولید یا ورود به بازارهای جدید را فراهم می‌کند. این افزایش بهره‌وری نه تنها به توسعه محصولات کمک می‌کند، بلکه از طریق ایجاد شغل‌های تخصصی در حوزه‌های فناوری و مهندسی، اشتغال‌زایی می‌نماید.

• کاهش تغییرات اقلیمی^۷

مصرف کمتر سوخت‌های فسیلی، انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند CO₂ را کاهش می‌دهد. برای نمونه، بهبود راندمان نیروگاه‌ها می‌تواند انتشار کربن را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

1. Asset Value
2. Consumer Surplus
3. Energy Affordability & Poverty Alleviation
4. Energy Savings
5. Energy Security
6. Enterprise Productivity
7. Climate Change Mitigation

- سازگاری با قیمت‌های انرژی^۱
بهینه‌سازی انرژی به شرکت‌ها و خانوارها اجازه می‌دهد باوجود افزایش قیمت حامل‌های انرژی، هزینه‌های خود را مدیریت کنند. برای مثال، کاهش ۱۵ درصدی مصرف انرژی در یک شرکت، افزایش ۴۰ درصدی قیمت انرژی را به افزایش ۲۵ درصدی هزینه‌ها تبدیل می‌کند. این انعطاف‌پذیری، ثبات مالی را در بلندمدت تضمین می‌نماید.

- دستیابی به اهداف توسعه^۲
ترکیب کاهش هزینه‌ها، افزایش رضایت مشتری، ثبات قیمتی و امنیت انرژی، بستری ایده‌آل برای جذب سرمایه‌گذاری و اجرای پروژه‌های کلان ایجاد می‌کند. این امر به توسعه زیرساخت‌ها، آموزش و بهداشت منجر شده و چرخه مثبت رشد اقتصادی را تقویت می‌نماید.

- مدیریت منابع^۳
کاهش مصرف انرژی، عمر منابع طبیعی را افزایش می‌دهد و امکان انتقال آن‌ها به نسل‌های آینده را فراهم می‌کند.

- بودجه عمومی^۴
درآمدهای مالیاتی ناشی از توسعه صنعتی، بودجه پروژه‌های عمرانی را افزایش می‌دهد. این منابع می‌تواند صرف ساخت مدارس، بیمارستان‌ها و خطوط ریلی پرسرعت شود که بهبود کیفیت زندگی و رفاه اجتماعی را در پی دارد.

- تأثیرات کلان^۵
کاهش مصرف انرژی به صرفه‌جویی در هزینه‌های استخراج، بهره‌برداری، تولید و توزیع منجر می‌شود. این صرفه‌جویی می‌تواند به‌عنوان منبع مالی برای ساخت و توسعه زیرساخت‌های مختلف، از جمله تکمیل چرخه تولید، توسعه خطوط ریلی و همچنین در حوزه‌های آموزشی، بهداشتی و حمل‌ونقل مورد استفاده قرار گیرد.

- مزایای اجتماعی و بهداشتی^۶
کاهش آلاینده‌های هوا ناشی از مصرف بهینه انرژی،

سلامت عمومی را تقویت می‌کند. برای نمونه، کاهش ذرات PM ۲/۵ می‌تواند موارد بیماری‌های تنفسی در کودکان را کاهش دهد.

- منافع تأمین‌کنندگان انرژی^۷
کاهش تقاضای انرژی از طریق بهینه‌سازی، فشار بر شبکه‌های توزیع را کم می‌کند و امکان سرمایه‌گذاری در فناوری‌های تجدیدپذیر را فراهم می‌نماید. این امر به ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضا و پایداری سیستم انرژی کمک می‌کند.

- اشتغال‌زایی^۸
رعایت مجموع موارد فوق، چون منجر به توسعه در تمامی ابعاد و زیرساخت‌ها می‌شود، اشتغال‌زایی را نیز ایجاد خواهد نمود که به رفع یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های اجتماعی کمک خواهد کرد.

بهینه‌سازی انرژی و بهبود در تمامی ابعاد زیرساختی، به‌طور طبیعی منجر به ایجاد فرصت‌های شغلی می‌شود. این اشتغال‌زایی که خود یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های اجتماعی است، به تقویت اقتصاد و بهبود کیفیت زندگی افراد کمک می‌کند.

(شکل ۲)، خلاصه‌ای از عوامل مؤثر بر بهره‌وری انرژی به‌صورت تصویری نشان داده شده است.



شکل ۲. عوامل مؤثر بر بهبود بهره‌وری انرژی

1. Energy Prices
2. Development Goals
3. Resource Management
4. Public Budgets
5. Macro Impacts
6. Health and Social Benefits
7. Energy Provider Benefits
8. Job Creation



۴. موانع کلیدی در پیاده‌سازی بهره‌وری انرژی

پیاده‌سازی راهکارهای بهینه‌سازی انرژی با چالش‌های ساختاری و فرهنگی متعددی روبرو است که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

۱. عدم آگاهی عمومی و ریسک‌های درک شده.

نبود دانش کافی در سطح جامعه و صنایع درباره مزایای بلندمدت بهره‌وری انرژی، یکی از موانع اصلی است. بسیاری از ذینفعان، کاهش مصرف انرژی را صرفاً یک هزینه اضافی می‌پندارند، در حالی که این اقدام یک سرمایه‌گذاری استراتژیک با بازدهی قطعی است. برای مثال، تصور نادرست از «بازدهی فوری» باعث می‌شود پروژه‌هایی با دوره بازگشت سرمایه ۳ تا ۵ سال مورد استقبال قرار نگیرند. راهکار این چالش، اجرای برنامه‌های آموزشی هدفمند و استفاده از رسانه‌ها برای تبلیغ تأثیر بهینه‌سازی انرژی بر کاهش تورم و بهبود کیفیت زندگی است.

۲. تعارض در اولویت‌های سرمایه‌گذاری.

صنایعی که با فناوری‌های فرسوده فعالیت می‌کنند، اغلب به دلیل هزینه‌های بالای جایگزینی تجهیزات، در بهینه‌سازی فرآیندها مقاومت نشان می‌دهند. برای نمونه، خطوط تولیدی که چند دهه بدون به‌روزرسانی کار کرده‌اند، نه تنها انرژی بیشتری مصرف می‌کنند، بلکه بهره‌وری کلی را کاهش می‌دهند. حل این مسئله نیازمند سیاست‌های حاکمیتی هوشمند است:

- تشویق مالیاتی: اعطای معافیت‌ها یا تخفیف‌های مالیاتی به شرکت‌هایی که استانداردهای بهره‌وری انرژی را رعایت می‌کنند.
- اعمال جریمه‌های هدفمند: الزام صنایع به پرداخت مالیات مضاعف در صورت عدم رعایت قوانین انرژی.

۳. فقدان الگوبرداری از بهترین تجربیات

نبود استانداردهای صنعتی و شاخص‌های قابل‌اندازه‌گیری، برنامه‌ریزی برای بهینه‌سازی انرژی را دشوار می‌کند. برای مثال، بسیاری از شرکت‌ها نمی‌دانند از کجا شروع کنند یا چگونه عملکرد خود را با رقبای مقایسه کنند. راه‌حل، توسعه بانک داده‌های صنعتی است که شامل موارد زیر باشد:

- مطالعه موردی مصرف انرژی برای صنایع مختلف.

- دستورالعمل‌های گام‌به‌گام برای اجرای پروژه‌های کم‌هزینه و پربازده.

- مطالعات موردی موفق از شرکت‌های پیشرو در حوزه بهره‌وری انرژی.

۴. عدم دسترسی به فناوری‌های پیشرفته.

در برخی کشورها، فقدان فناوری‌های کارآمد (مانند سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی یا تجهیزات کم‌مصرف) مانع بزرگی است. این چالش تنها از طریق تقویت همکاری بین‌المللی و حمایت از شرکت‌های دانش‌بنیان رفع می‌شود. برای مثال، سرمایه‌گذاری در پژوهش‌های کاربردی برای تولید کمپرسورهای هوای فشرده با راندمان بالا یا توسعه نرم‌افزارهای شبیه‌ساز مصرف انرژی، می‌تواند شکاف فناوری را کاهش دهد.

برخی تصورات نادرست، پذیرش راهکارهای بهینه‌سازی انرژی را با مانع روبه‌رو می‌سازند. نخست، انتظار بازدهی فوری از سوی برخی سرمایه‌گذاران است که گمان می‌کنند بهبود بهره‌وری انرژی باید بلافاصله سودآوری ایجاد کند، در حالی که بسیاری از پروژه‌های این حوزه نیازمند دوره بازگشت سرمایه چند ساله هستند و اثرات بلندمدت آن‌ها اغلب نادیده گرفته می‌شود. از سوی دیگر، باوری کاذب وجود دارد که افزایش ساعت کاری یا اعمال فشار کاری بیشتر بر پرسنل را معادل بهبود بهره‌وری کلی می‌پندارد. این نگرش نه تنها نادرست است، بلکه مانعی برای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمند و کاهش اتلاف انرژی محسوب می‌شود. در واقع، بهره‌وری سیستماتیک زمانی محقق می‌شود که تمرکز اصلی بر بهینه‌سازی فرآیندها و استفاده از راهکارهای نوین باشد.

۵. بخش‌های کلیدی مصرف انرژی در صنایع

صنایع انرژی‌بر عمدتاً در بخش‌های زیر متمرکز هستند:

۱. سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع (HVAC)
این سیستم‌ها برای حفظ دمای مطلوب در محیط‌های صنعتی، به‌ویژه در فضاهای بزرگ مانند کارخانه‌ها و انبارها، انرژی زیادی مصرف می‌کنند. تنظیم دما در شرایط آب و هوایی متغیر و نیاز به تهویه مطبوع پیوسته، مصرف انرژی را افزایش می‌دهد.

۲. سیستم‌های هوای فشرده

کمپرسورهای هوای فشرده از تجهیزات انرژی بر در صنایع هستند. نشتی‌های لوله‌کشی، فشار کاری نامناسب و طراحی ناکارآمد این سیستم‌ها منجر به اتلاف انرژی می‌شود.

۳. فرآیندهای گرمایشی و سرمایشی

صنایعی مانند فولاد، شیشه و مواد غذایی به عملیات حرارتی (مانند ذوب، پخت، یا انجماد) وابسته هستند. این فرآیندها به دلیل نیاز به تأمین دمای بالا یا پایین، انرژی قابل توجهی مصرف می‌کنند.

۴. سیستم‌های الکتریکی

شبکه‌های توزیع برق صنعتی، به‌ویژه در تأسیسات بزرگ، به دلیل تلفات الکتریکی در ترانسفورماتورها، کابل‌ها و تجهیزات کنترلی، بخشی از انرژی را هدر می‌دهند.

۵. روشنایی

استفاده از لامپ‌های راندمان پایین در سالن‌های تولیدی بزرگ و روشنایی دائمی خطوط مونتاژ، مصرف انرژی را افزایش می‌دهد.

۶. موتورهای الکتریکی

موتورهای فرسوده یا با بار نامناسب (مانند پمپ‌ها و فن‌ها) به دلیل بازدهی پایین، انرژی بیشتری نسبت به نیاز واقعی مصرف می‌کنند.

۷. دیگ‌های بخار

دیگ‌های بخار در صنایعی مانند پتروشیمی و تولید کاغذ، به دلیل احتراق ناقص سوخت، عایق‌بندی ضعیف، یا بازایی نشدن گرمای اتلافی، انرژی قابل توجهی را هدر می‌دهند.

۸. سیستم‌های تبرید

سردخانه‌های صنعتی، سیستم‌های خنک‌کننده در صنایع غذایی و فرآیندهای شیمیایی به دلیل نیاز به حفظ دمای پایین، مصرف انرژی بالایی دارند.

۹. فرآیندهای خشک‌کردن

سردخانه‌های صنعتی، سیستم‌های خنک‌کننده در صنایع غذایی و فرآیندهای شیمیایی به دلیل نیاز به حفظ دمای پایین، مصرف انرژی بالایی دارند.

۱۰. تصفیه پساب و مدیریت پسماند

تأسیسات تصفیه پساب و سوزاندن پسماندهای صنعتی، به‌ویژه در صنایع شیمیایی و دارویی، به دلیل نیاز به پمپاژ،

هوادهی و فرآیندهای حرارتی، انرژی بر هستند.

۶. شاخص‌های جهانی و جایگاه کشورها در بهینه‌سازی انرژی

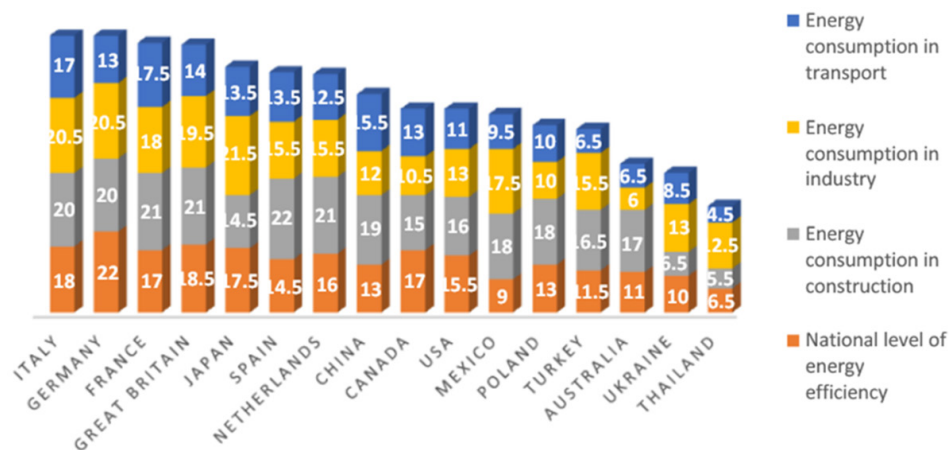
بررسی عملکرد کشورها در حوزه بهینه‌سازی انرژی نشان می‌دهد که موفقیت در این زمینه نیازمند ترکیبی از بهبود موضعی و تمرکز بر شاخص‌های کلان است. دو محور اصلی برای ارزیابی این عملکرد عبارتند از:

۶-۱. تحلیل عملکرد کشورها در بخش‌های صنعتی

بررسی عملکرد کشورها در حوزه بهینه‌سازی انرژی که در (شکل ۳) نشان می‌دهد؛ موفقیت در این زمینه مستلزم تعادل بین بهبود بخش‌های خاص و کاهش مصرف کل انرژی است. برای نمونه، ایتالیا در بخش حمل‌ونقل با اجرای سیاست‌های کاهش مصرف سوخت و توسعه حمل‌ونقل عمومی، عملکرد بهتری نسبت به آلمان دارد. با این حال، آلمان با تمرکز بر بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع سنگین (مانند فولاد و خودروسازی) و ساختمان‌های کم‌مصرف، در مجموع شاخص بهره‌وری انرژی بالاتری را ثبت کرده است. این تفاوت نشان می‌دهد که بهبود تک‌بعدی در یک حوزه، بدون توجه به سایر بخش‌ها، نمی‌تواند تضمین‌کننده موفقیت کلی باشد.

نکته کلیدی این است که کاهش مصرف انرژی در یک بخش نباید منجر به افزایش مصرف در بخش دیگر شود (شکل ۳). به‌عنوان مثال، برخی کشورها با صرفه‌جویی در انرژی صنعتی، به دلیل عدم مدیریت صحیح در بخش حمل‌ونقل یا روشنایی عمومی، مصرف کلی انرژی خود را کاهش نداده‌اند. این رویکرد نادرست نه تنها به پایداری سیستم انرژی کمک نمی‌کند، بلکه ممکن است هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی را افزایش دهد.

در نتیجه، دستیابی به بهینه‌سازی جامع انرژی نیازمند برنامه‌ریزی هماهنگ در تمامی بخش‌هاست. این شامل تدوین استانداردهای یکپارچه، نظارت بر عملکرد زیربخش‌ها و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های چندمنظوره است که هم‌زمان مصرف انرژی در صنعت، حمل‌ونقل و ساختمان‌ها را کاهش می‌دهد. تنها در این صورت است که کاهش مصرف انرژی به یک دستاورد پایدار و مؤثر تبدیل خواهد شد.



شکل ۳. رتبه‌بندی مصرف انرژی در بخش‌های صنعتی بر اساس داده‌های جهانی (۲۰۱۷-۲۰۱۸) [۵]

۲-۶. شاخص انتقال انرژی (ETI)

تکیه بر منابع کم‌کربن مانند انرژی هسته‌ای و نیروگاه‌های برق‌آبی، عملکرد قابل‌توجهی در حوزه امنیت انرژی و کاهش انتشار کربن داشته‌اند. در مقابل، اقتصادهای بزرگ مانند چین، علیرغم پیشرو بودن در فناوری‌های نوین، به دلیل وابستگی به سوخت‌های فسیلی در بخش‌های صنعتی و حمل‌ونقل، با چالش‌های جدی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مواجه هستند.

مقایسه داده‌های سال‌های اخیر نشان می‌دهد که موفقیت در انتقال انرژی نیازمند هماهنگی بین سیاست‌های کلان، سرمایه‌گذاری در نوآوری و تعامل مؤثر بخش‌های عمومی و خصوصی است. (شکل ۴) به‌وضوح تأکید می‌کند که دستیابی به سیستم انرژی پایدار تنها از طریق تعهد بلندمدت و برنامه‌ریزی یکپارچه ممکن خواهد بود.

شاخص انتقال انرژی (ETI) که در (شکل ۴) ارائه شده است، کشورها را بر اساس دو معیار اصلی ارزیابی می‌کند: عملکرد سیستم انرژی فعلی (شامل امنیت، دسترسی و پایداری) و آمادگی برای انتقال به سیستم انرژی پایدار (شامل سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین، قوانین حمایتی و مشارکت بخش خصوصی).

بر اساس رتبه‌بندی سال ۲۰۲۴، کشورهای شمال اروپا مانند سوئد، دانمارک و فنلاند به‌عنوان پیشگامان جهانی این حوزه شناخته می‌شوند. این کشورها با تمرکز بر توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر باد و زیست‌توده و همچنین بهبود راندمان انرژی در صنایع، جایگاه برتر خود را حفظ کرده‌اند. فرانسه و نروژ نیز با



شکل ۴. رتبه‌بندی شاخص انتقال انرژی (ETI) در سال ۲۰۲۴ [۶]

1. Energy Transition Index

۷. نمونه‌های بین‌المللی موفق در بهینه‌سازی انرژی

در سال‌های اخیر، صنایع پیشرو با تکیه بر راهکارهای نوآورانه و همسو با اهداف توسعه پایدار، تحولات چشمگیری در حوزه بهینه‌سازی انرژی ایجاد کرده‌اند. پیش از بررسی نمونه‌های موفق، مرور برخی از راهکارهای کلیدی که پایه این تحولات بوده است، ضروری به نظر می‌رسد:

- روش‌های مبتنی بر داده و آزمایش: استفاده از طراحی آزمایشی^۱ (DOE) برای شناسایی کارآمدترین فرایندها با کمترین مصرف انرژی.
 - سرمایه‌گذاری هدفمند: تمرکز بر پروژه‌هایی با بازگشت سرمایه سریع و تأثیر بلندمدت بر کاهش هزینه‌ها.
 - گذار به انرژی‌های پاک: جایگزینی منابع فسیلی با فناوری‌های تجدیدپذیر برای کاهش ردپای کربنی و افزایش امنیت انرژی.
 - توانمندسازی نیروی انسانی: آموزش تیم‌های تخصصی و ایجاد فرهنگ سازمانی مبتنی بر صرفه‌جویی انرژی.
 - همگرایی با سیاست‌های تشویقی: بهره‌گیری از مشوق‌های مالیاتی و برنامه‌های دولتی برای تسریع اجرای پروژه‌های بهینه‌سازی.
- این راهکارها نه تنها مصرف انرژی را کاهش می‌دهند، بلکه با آزادسازی منابع مالی و تقویت رقابت‌پذیری، صنایع را به سمت چرخه توسعه پایدار سوق می‌دهند.

۱-۷. بهره‌وری انرژی در شرکت جی. آر. سیمپلوت^۲

۱-۱-۷. پیشینه شرکت

سیمپلوت یکی از بزرگ‌ترین شرکت‌های خصوصی در جهان است که درآمد سالانه آن حدود ۴/۵ میلیارد دلار بوده و نزدیک به ۱۰۰۰۰ نفر نیروی کار در سراسر جهان دارد [۷]. این شرکت در سال ۱۹۲۹ توسط جی. آر. سیمپلوت تأسیس شد و پس از جنگ جهانی دوم، با پیشگامی در تولید سیب‌زمینی سرخ‌کرده منجمد برای صنعت نوپای فست‌فود، رشد چشمگیری تجربه کرد. نقطه عطف تاریخی این شرکت، توافق بین جی. آر. سیمپلوت و روی کراک (بنیان‌گذار مک‌دونالدز) بود که منجر به استفاده از محصولات سیمپلوت در تمامی رستوران‌های مک‌دونالدز به جای برش دستی

سیم‌زمینی شد. پس از این موفقیت، سیمپلوت فعالیت خود را به حوزه‌های دیگری مانند تولید کود، استخراج فسفات و پرورش گاو گسترش داد.

امروزه، شرکت جی. آر. سیمپلوت به‌عنوان یک شرکت یکپارچه عمودی در چندین زنجیره ارزش فعالیت می‌کند و نقش برجسته‌ای در صنایع مختلف ایفا می‌نماید. بخش‌های اصلی این شرکت شامل فرآوری مواد غذایی، تجارت کشاورزی، دامداری، بسته‌بندی گوشت و تولید محصولات سیب‌زمینی است. به‌ویژه، سیمپلوت یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان سیب‌زمینی منجمد در جهان محسوب می‌شود و سالانه حجم عظیمی از این محصولات را به بازار عرضه می‌کند. این شرکت مالک ۱۲۰ تأسیسات است که شامل ۱۳ واحد بزرگ صنعتی می‌شود، از جمله هفت کارخانه فرآوری مواد غذایی، دو معدن فسفات، یک معدن سیلیس و سه کارخانه تولید کود.

این واحدهای صنعتی توسط ۲۲ شرکت مختلف در حوزه برق و گاز طبیعی تأمین انرژی می‌شوند. علاوه بر این، سوخت دیزل سهم قابل‌توجهی از هزینه‌های انرژی سیمپلوت را به خود اختصاص می‌دهد. به‌عنوان مثال، مصرف گازوئیل در معدن فسفات «Doyle Valley Phosphate Mine»، حدود ۲۵ درصد از کل هزینه انرژی بخش کشاورزی این شرکت را تشکیل می‌دهد.

۱-۲-۷. اهداف و دستاوردهای بهره‌وری انرژی

سیمپلوت از سال ۲۰۰۰ پروژه‌های قابل‌توجهی در حوزه بهره‌وری انرژی اجرا کرده است. از سال ۲۰۰۵، این شرکت با حمایت اتحاد بهره‌وری انرژی شمال غرب^۳، کارکنان پاره‌وقتی با عنوان «قهرمانان انرژی» را در سایت‌های صنعتی بزرگ خود منصوب کرد. در سال ۲۰۰۷، با تشکیل تیم بهره‌وری انرژی در سطح شرکت، برنامه‌های مرتبط تقویت شد و این تیم در سال ۲۰۰۷ در گروه فرآوری غذا و در سال ۲۰۰۹ در گروه تجارت کشاورزی گسترش یافت. در سال ۲۰۰۸، سیمپلوت موفق به دریافت گواهینامه برنامه ستاره انرژی^۴ شد و دو کارخانه آن در سال ۲۰۱۰ به اولین تأسیسات تولید سبزیجات منجمد با این گواهینامه تبدیل شدند [۸].

دوره محوری سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ با پیوستن سیمپلوت به تعهد مدیران در حوزه برنامه‌ریزی انرژی و

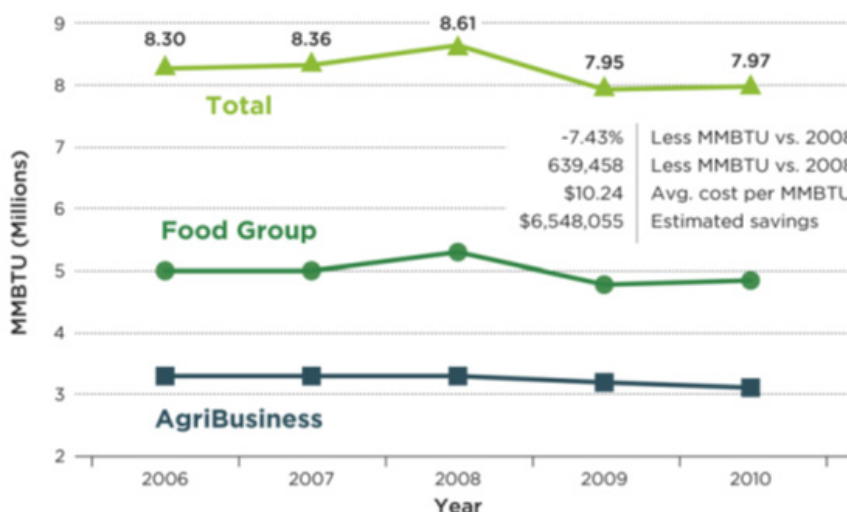
1. Design of Experiment
2. J. R. Simplot Company
3. Northwest Energy Efficiency Alliance
4. ENERGY STAR



ثبت کرد که از جمله می‌توان به کاهش ۱۸ درصدی شدت مصرف انرژی در گروه غذایی نسبت به سال پایه ۲۰۰۸ و کاهش ۴ درصدی شدت مصرف انرژی در گروه تجارت کشاورزی نسبت به سال پایه ۲۰۰۹ اشاره نمود. بر اساس گزارش‌های پایداری اخیر این شرکت، روند بهبود بهره‌وری همچنان ادامه یافته است؛ به گونه‌ای که سیمپلوت متعهد شده است تا سال ۲۰۳۰ شدت مصرف انرژی خود را ۱۵ درصد دیگر و مصرف آب را ۲۰ درصد نسبت به سال پایه ۲۰۱۶ کاهش دهد. آخرین داده‌های سال ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که پروژه‌های بهینه‌سازی فرآیند، از جمله بازیافت حرارت و استفاده از بیوگاز در تأسیسات فرآوری سیب‌زمینی، منجر به کاهش تجمعی مصرف انرژی و دستیابی به بخش عمده‌ای از این اهداف شده‌اند [۸، ۹].

کاهش ۲۵ درصدی شدت مصرف انرژی تا سال ۲۰۲۰ آغاز شد. دان استورتوانت، مدیر انرژی شرکت، این دوره را «زمان آغاز واقعی تحول» توصیف کرد. در بهار ۲۰۱۰، دفتر منابع انرژی آیداهو با استفاده از بودجه قانون بهبود و سرمایه‌گذاری، از پروژه آزمایشی استخدام دو مهندس بهره‌وری انرژی حمایت مالی کرد. این پروژه شامل پوشش ۵۰ درصدی هزینه‌های این مهندسان طی ۱۸ ماه اول بود و انتظار می‌رفت صرفه‌جویی انرژی شناسایی‌شده دو برابر هزینه‌های نیروی انسانی باشد. نتایج فراتر از انتظار بود و مهندسان موفق به شناسایی پروژه‌هایی با صرفه‌جویی انرژی قابل توجه شدند که الهام‌بخش شرکت‌های خدمات عمومی برای حمایت بیشتر گردید.

تا سال ۲۰۱۵، سیمپلوت دستاوردهای چشمگیری را



شکل ۵. روند صرفه‌جویی انرژی در سیمپلوت تا سال ۲۰۱۵ و تداوم برنامه‌های بهره‌وری (داده‌های تکمیلی ۲۰۲۳ در متن) [۸، ۷]

روند صرفه‌جویی انرژی در سیمپلوت را نشان می‌دهد که بر اساس آن، میلیون واحد حرارتی بریتانیایی (MMBTU) ذخیره‌شده به‌وضوح رشد مثبت برنامه‌های بهره‌وری انرژی را تأیید می‌کند.

۷-۱-۳. سیستم شناسایی و اجرای اقدامات

سیمپلوت برای دستیابی به اهداف بهره‌وری انرژی، به‌شدت به تیم‌های تخصصی در سطح کارخانه‌ها متکی است. قهرمانان انرژی و مهندسان انرژی در هر کارخانه، به‌عنوان «نیروی انسانی متخصص»، عملکرد تأسیسات را رصد کرده و فرصت‌های بالقوه برای صرفه‌جویی انرژی را شناسایی می‌کنند. این تیم‌ها از پشتیبانی مهندسان انرژی در سطح

ساختار تیم بهره‌وری انرژی این شرکت مبتنی بر یک هسته مرکزی تمام‌وقت شامل مدیر انرژی، دو مهندس بهره‌وری انرژی (برای بخش‌های کشاورزی و غذایی) و دو مهندس محلی در تأسیسات کشاورزی است. این تیم توسط شبکه قهرمانان انرژی در هر سایت صنعتی پشتیبانی می‌شود که علاوه بر وظایف اصلی، مسئولیت شناسایی پروژه‌های بهره‌وری انرژی و ترویج فرهنگ صرفه‌جویی را بر عهده دارند. مکانیسم انگیزشی سیمپلوت مبتنی بر تقدیر از قهرمانان انرژی با جایزه‌های نمادین مانند جام ۱۵۰ دلاری و برگزاری بازدید سالانه انرژی برای تبادل ایده است. این رویکرد نه تنها مشارکت کارکنان را افزایش داده، بلکه شناسایی فرصت‌های جدید در تأسیسات مختلف را تسهیل می‌کند. (شکل ۵)

واحدهای تجاری نیز برخوردارند که پروژه‌ها را برای رقابت در جذب بودجه آماده می‌سازند.

آموزش و توانمندسازی نیروی انسانی یکی از ارکان اصلی برنامه بهره‌وری انرژی سیمپلوت است. قهرمانان انرژی از طریق بازدید سالانه انرژی که در یکی از سایت‌های بزرگ صنعتی برگزار می‌شود، با ایده‌های نوین آشنا شده و آموزش می‌بینند. این رویدادها به ایجاد فرهنگ صرفه‌جویی انرژی کمک شایانی می‌کند. برای مثال، کارخانه کود هلم (Helm) تنها با تغییر رفتار کارکنان و بدون هیچ سرمایه‌گذاری مالی، موفق به کاهش ۳۰/۴ درصدی شدت مصرف انرژی شد [۷]. همچنین، آموزش‌ها و ابزارهای DOE در حوزه‌هایی مانند مدیریت بخار، نقش کلیدی در بهینه‌سازی مصرف انرژی ایفا کرده‌اند. در برخی تأسیسات، کارآموزان با انجام تحلیل‌های پیشرفته (مانند رگرسیون) عوامل مؤثر بر مصرف انرژی را شناسایی می‌کنند.

پروژه‌های شناسایی شده توسط مهندسان انرژی، بر اساس نرخ بازده داخلی (IRR) اولویت‌بندی و برای جذب بودجه رقابت می‌کنند. سیمپلوت تنها پروژه‌هایی را تأیید می‌کند که IRR حداقل ۱۵ درصد داشته باشند. پروژه‌های کوچک‌تر ممکن است از فرآیند طولانی تأیید بودجه سرمایه‌ای معاف شوند، مشروط بر اینکه هزینه‌ها از طریق بودجه عملیاتی تأمین گردد. با این حال، آستانه تفکیک پروژه‌های سرمایه‌ای از عملیاتی، ۱۰۰۰۰ دلار تعیین شده است.

اگرچه سیستم فعلی در شناسایی اقدامات بهره‌وری انرژی در کارخانه‌های موجود موفق عمل کرده، اما برنامه‌ریزی انرژی در طراحی کارخانه‌های جدید هنوز به‌صورت سیستماتیک ادغام نشده است. از آنجا که سیمپلوت یک شرکت خصوصی است، تصمیمات مربوط به احداث کارخانه‌های جدید ممکن است بدون مشارکت تیم انرژی و بر اساس ملاحظات داخلی اتخاذ شود. این امر خطر طراحی تأسیسات ناکارآمد از نظر انرژی را افزایش می‌دهد.

۴-۱-۷. نقش حمایت خارجی

در حوزه بهره‌وری انرژی، شرکت سیمپلوت رویکرد «همکاری با همه» را پیش گرفته است. این همکاری شامل مشارکت با DOE (Design of Experiment)، دولت‌ها و شرکت‌های خدمات عمومی متعددی است که تأسیسات این شرکت را تأمین می‌کنند.

DOE از برنامه بهره‌وری انرژی سیمپلوت با ترغیب تعهدات رهبری به بهبود مصرف انرژی و همچنین از طریق ارائه آموزش‌ها و ابزارهای کاربردی به کارکنان سطح کارخانه حمایت کرده است. «تعهد مدیران در حوزه برنامه‌ریزی انرژی» به کاهش ۲۵ درصدی شدت مصرف انرژی طی ۱۰ سال، نقش کلیدی در تقویت اولویت‌دهی به بهره‌وری انرژی در سراسر شرکت سیمپلوت داشته است. آموزش‌ها و ابزارهای DOE با توانمندسازی کارکنان در شناسایی و اجرای اقدامات مؤثر، به تحقق این تعهد کمک شایانی کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، در سال ۲۰۰۶، ابزار ارزیابی سیستم بخار DOE در کارخانه دان (Dawn) موجب صرفه‌جویی سالانه ۷۵۰۰۰ میلیون واحد حرارتی بریتانیایی (BTU) در مصرف سوخت از طریق بهینه‌سازی مدیریت جریان و عملکرد دیگ‌های بخار شد.

دولت‌های ایالتی نیز از برنامه‌های بهره‌وری انرژی سیمپلوت پشتیبانی کرده‌اند. یکی از نمونه‌های برجسته، همکاری دفتر منابع انرژی آیداهو با استفاده از بودجه قانون بهبود و سرمایه‌گذاری برای تأمین بخشی از هزینه‌های استخدام دو مهندس انرژی بود. از بهار ۲۰۱۰، این دفتر طی ۱۸ ماه مبلغ ۱۷۹۰۰۰ دلار برای استخدام دو مهندس که هر یک مسئول یکی از دو بخش اصلی صنعتی (کشاورزی و فراوری مواد غذایی) بود، در اختیار سیمپلوت قرار داد. سیمپلوت نیز با مشارکت در این برنامه، مابقی هزینه کل ۴۲۲۶۲۵ دلار را تقبل کرد. این دو مهندس پروژه‌های متعددی را اجرایی کردند، از جمله برنامه رفع نشتی در کارخانه کود دان که منجر به صرفه‌جویی ۴۴۸۲۵۳ دلاری در یک سال شد و نصب کمپرسورهای کارآمد در کارخانه فراوری سیب‌زمینی دریاچه موسی (Moses Lake) که سالانه ۱۲۰۰۰ دلار صرفه‌جویی به همراه داشت. در مجموع، پروژه‌های سال اول این مهندسان بیش از ۱۰ برابر هزینه‌های حقوق و دستمزدشان صرفه‌جویی ایجاد کرد که این موفقیت سیمپلوت را بر آن داشت تا پس از اتمام دوره حمایت مالی، آن‌ها را به‌صورت دائمی استخدام کند [۱۰].

برنامه‌های تأمین‌شده توسط مصرف‌کنندگان نیز در موفقیت برنامه بهره‌وری انرژی سیمپلوت نقش داشته‌اند. عمده کارکرد این برنامه‌ها، ارائه مشوق‌هایی برای افزایش جذابیت پروژه‌های بهره‌وری انرژی از طریق بهبود شاخص IRR (نرخ بازده داخلی) است تا این پروژه‌ها بتوانند در رقابت با سایر طرح‌ها برای جذب بودجه سرمایه‌ای موفق عمل کنند. در



مواردی، این برنامه‌ها به استخدام نیروهای متخصص در حوزه بهره‌وری انرژی کمک کرده‌اند. برای مثال، در معدن Doyle Valley Phosphate Mine، شرکت Lower Valley Energy با پوشش ۵۰ درصد از هزینه‌های استخدام یک مهندس انرژی تمام‌وقت (تا زمان دستیابی به صرفه‌جویی یک میلیون کیلووات‌ساعتی در مصرف برق) از این طرح حمایت کرد. نکته قابل توجه در مورد استخدام مهندس انرژی در این معدن، نمایش نمونه‌ای از حمایت غیرمستقیم یک شرکت خدمات عمومی از کاهش مصرف سوخت تأمین‌شده توسط خودش است. در این مورد، ۷۸ درصد از انرژی معدن از گازوئیل تأمین می‌شد و مهندس مذکور علاوه بر تحقق هدف برقی تعیین‌شده، بر کاهش هزینه‌های گازوئیل نیز متمرکز بود. به‌عنوان بخشی از فلسفه «همکاری با همه»، سیمپلوت عموماً در برنامه‌های تأمین‌شده توسط مصرف‌کنندگان مشارکت می‌کند. با این حال، در مواردی مانند «برنامه بهره‌وری انرژی آیداهو پاور»، این شرکت ابتدا روش خودگردان را انتخاب کرد، اما پس از ارزیابی هزینه‌ها و مزایا، به دلیل امکان دسترسی به مشوق‌های نامحدود برای اقدامات بهره‌وری انرژی، وارد برنامه شد. این تصمیم‌گیری انعطاف‌پذیر نشان‌دهنده تمرکز سیمپلوت بر حداکثرسازی منافع عملیاتی است.

۷-۱-۵. نگاه به آینده

با تداوم مسیر سیمپلوت برای دستیابی به اهداف بهره‌وری انرژی، فرصت‌های قابل توجهی جهت گسترش و تعمیق برنامه‌های این شرکت در این حوزه وجود دارد. توسعه مستمر تیم بهره‌وری انرژی یک ضرورت کلیدی است. این «نیروهای متخصص» که مسئول شناسایی و اجرای پروژه‌های بهره‌وری انرژی هستند، نیازمند آموزش‌ها و ابزارهای پیشرفته‌تری خواهند بود تا پس از تکمیل پروژه‌های ساده و آشکار، به سراغ اقدامات پیچیده‌تر بروند. در این زمینه، DOE تاکنون نقش مؤثری ایفا کرده است و حمایت مداوم این نهاد با ارائه ابزارها و دوره‌های آموزشی تکمیلی، به پیشرفت برنامه‌ها کمک خواهد کرد.

یکی دیگر از فرصت‌های استراتژیک، ایجاد سیستم یکپارچه برای ادغام اصول بهره‌وری انرژی در طراحی کارخانه‌های جدید است. احداث یک کارخانه جدید، فرصتی بی‌نظیر برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در تمامی بخش‌های تأسیسات، بدون دغدغه‌ی توقف خط تولید ناشی از بازسازی تجهیزات

موجود فراهم می‌کند. علاوه بر این، نرخ بازده سرمایه‌گذاری (ROI) حاصل از استفاده از تجهیزات انرژی کارآمد از همان ابتدا، بسیار بالاتر از جایگزینی تجهیزات قدیمی با نمونه‌های بهینه‌تر خواهد بود. بهره‌برداری کامل سیمپلوت از چنین فرصت‌هایی نه تنها برنامه بهره‌وری انرژی شرکت را تقویت می‌کند، بلکه هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده و دستیابی به اهداف کلان انرژی را تسهیل می‌نماید.

۷-۲. بهره‌وری انرژی در جنرال موتورز

۷-۲-۱. پیشینه شرکت

شرکت جنرال موتورز (GM) با بیش از یک قرن سابقه در صنعت خودروسازی، یکی از پیشگامان این حوزه محسوب می‌شود. این شرکت برای دهه‌ها به‌عنوان بزرگ‌ترین خودروساز جهان شناخته می‌شد، اما کاهش فروش و افزایش بدهی‌ها نهایتاً منجر به ورشکستگی آن در پی بحران مالی سال ۲۰۰۹ گردید. این ورشکستگی، فرآیند تجدید ساختار گسترده‌ای را در سراسر سازمان رقم زد که شامل بازسازی‌های عملیاتی و مدیریتی شد.

پس از این دوره، جنرال موتورز با تمرکز بر نوآوری در خط تولید و عرضه خودروهای هوشمندتر و سوخت کارآمدتر، موفق به احیای فروش خود شد. این تحولات همسو با تغییرات سریع ترجیحات مصرف‌کنندگان صورت گرفت تا جایی که در گزارش پایداری ۲۰۱۵ GM پیش‌بینی شده بود: «صنعت خودروسازی در پنج سال آینده بیش از پنجاه سال گذشته تغییر خواهد کرد» [۱۱].

در سال ۲۰۱۴، جنرال موتورز با فروش حدود ۳ میلیون دستگاه خودرو در بازار داخلی و ثبت درآمد جهانی بیش از ۱۵۰ میلیارد دلار، جایگاه برتر خود را تثبیت کرد. این شرکت مالک برندهای بزرگی همچون شورولت، جی‌ام‌سی، بیوک و کادیلک در بازار محلی و همچنین برندهایی مانند واکس‌های، جی‌فانگ و وولینگ در عرصه بین‌المللی است. پشته‌ی تولیدی گسترده این خودروساز شامل بیش از ۳۰ کارخانه تولیدی در سطح جهان می‌شود.

۷-۲-۲. اهداف و دستاوردها

جنرال موتورز (GM) طی ۱۵ سال گذشته، یک برنامه جامع بهره‌وری انرژی را طراحی و اجرا کرده است. هسته اصلی این برنامه، ایجاد طرح ابتکاری پروژه صرفه‌جویی در

1. Idaho Power Energy Efficiency Program

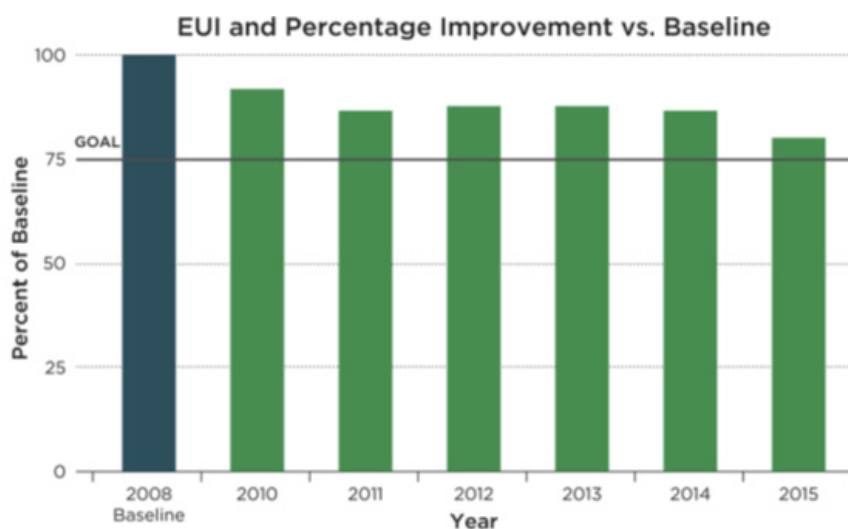
2. General Motors

انرژی^۱ (ESPI) در سال ۲۰۰۰ بود که برای اولین بار یک تیم و منابع اختصاصی به این حوزه تخصیص داد. بودجه ESPI سالانه بر اساس شرایط بازار تنظیم می‌شود. در ابتدا، بودجه سالانه این طرح ۵ میلیون دلار برای تأمین مالی پروژه‌های متنوع صرفه‌جویی انرژی در نظر گرفته شد، اما در سال‌های اخیر این مبلغ به حدود ۲۰ میلیون دلار افزایش یافته است.

پیش از راه‌اندازی ESPI، جنرال موتورز با دو شرکت بزرگ خدمات انرژی (DTE Energy و Consumers Energy) توافق‌نامه‌ای امضا کرد تا مهندسان انرژی تمام‌وقت برای کارخانه‌های خود جذب کنند. این مهندسان توسط شرکت‌های مذکور در مناطق تحت پوشش آن‌ها و حتی سایر مناطق ارائه شدند. همکاری بلندمدت بین GM و این مهندسان، پایه‌های اعتماد متقابل با شرکا را تقویت کرد.

در سال ۲۰۰۸، جنرال موتورز به برنامه «رهبران انرژی» وزارت انرژی آمریکا (DOE) پیوست و متعهد شد شدت

مصرف انرژی (EUI) به ازای هر خودروی تولیدی را تا سال ۲۰۱۸، ۲۵ درصد کاهش دهد. این هدف با توجه به تغییرات سریع صنعت خودروسازی چالشی بلندپروازانه بود. GM نه تنها به این هدف دست یافت، بلکه در استراتژی جدید خود متعهد شده است تا سال ۲۰۳۵ به کربن خنثی (Carbon Neutral) در محصولات و عملیات جهانی خود دست یابد. بر اساس گزارش پایداری ۲۰۲۳ این شرکت، شدت مصرف انرژی در تأسیسات تولیدی آمریکا طی سال‌های اخیر بیش از ۲۰ درصد نسبت به سال پایه ۲۰۱۰ کاهش یافته است که فراتر از اهداف اولیه بود. این موفقیت از طریق سرمایه‌گذاری در فناوری‌های هوشمند مدیریت انرژی و گذار به منابع تجدیدپذیر حاصل شده است، به‌طوری‌که تا سال ۲۰۲۵ تمامی تأسیسات GM در ایالات متحده با انرژی ۱۰۰ درصد تجدیدپذیر تغذیه خواهند شد [۱۲].



شکل ۶. روند کاهش شدت مصرف انرژی در GM (داده‌های نمودار تا ۲۰۱۵؛ تحلیل به‌روزرسانی شده تا ۲۰۲۴ در متن) [۹، ۱۲]

۳-۲-۷. سیستم شناسایی و اجرای اقدامات

تعهد این شرکت به بهره‌وری انرژی توسط اهداف بهره‌وری انرژی برای کارخانه‌ها و تأسیسات پشتیبانی می‌شود. از آنجا که این اهداف و پیشرفت در جهت دستیابی به آن‌ها به‌طور برجسته در بسیاری از کارخانه‌ها تحت برنامه‌های تجاری کارخانه برای اهداف زیست‌محیطی نمایش داده می‌شود، اهمیت اجرای اقدامات بهره‌وری انرژی به‌طور گسترده در بین کارکنان شناخته شده است. در هر کارخانه‌ای که توسط نویسندگان این گزارش

بازدید شد، اهداف روی تابلوهای اعلانات در کارخانه نشان داده می‌شد. علاوه بر این، این اهداف بخشی از اهداف کلی برای مدیر کارخانه را تشکیل می‌دهند و می‌توانند در ارزیابی مدیر تأثیرگذار باشند که انگیزه مهمی برای تشویق بهره‌وری انرژی فراهم می‌کند.

پروژه‌های بهره‌وری انرژی معمولاً از مدیر تأسیسات و مهندسان انرژی در محل سرچشمه می‌گیرند. این مهندسان که پیمانکارانی هستند که توسط دو شرکت بزرگ برق جنرال موتورز ارائه می‌شوند، پروژه‌هایی را

1. Energy Savings Project Initiative



شناسایی می‌کنند که در یک خط لوله از پروژه‌ها قرار می‌گیرند تا توسط تیم بهره‌وری انرژی در سطح شرکت تأیید شوند. این مهندسان بر اساس ترکیبی از مهارت‌های فنی و مهارت‌های ارتباطی انتخاب می‌شوند و اغلب برای سال‌های متمادی در همان مرکز باقی می‌مانند تا یک رابطه قوی با کارکنان کارخانه ایجاد کنند. این روابط به مهندسان کمک می‌کند تا خط لوله بهتری از پروژه‌ها داشته باشند و هنگام اجرای پروژه‌ها، مشارکت بیشتری از کارخانه بگیرند.

این پروژه‌ها سپس توسط تیم رهبری انرژی با معیارهای مختلف بسته به نوع بودجه‌ای که برای هر پروژه استفاده می‌شود، بررسی می‌شوند. در مورد پروژه‌هایی که قرار است توسط ESPI تأمین مالی شوند، لازم است که آن‌ها بخشی از یک سبد با میانگین دوره بازگشت ۲ سال را تشکیل دهند. این الزام گسترش یافته است. در ابتدا یک قطع قطعی در بازگشت ۱ سال بود، سپس میانگین بازگشت ۱ سال برای یک سبد، قبل از رسیدن به الزام فعلی. برای پروژه‌هایی که قرار است از طریق قراردادهای عملکرد انرژی اجرا شوند، لازم است که آن‌ها چرخه عمر ۵ ساله داشته باشند و در طول کل چرخه عمر پروژه، جریان نقدی مثبت باقی بمانند.

بودجه EPSI به تأمین بودجه تأسیسات کمک می‌کند که به‌عنوان یک اقدام کاهش هزینه دیده می‌شود. ارتباط بین بهره‌وری انرژی و بودجه تأسیسات حتی بیشتر است، زیرا جنرال موتورز به سادگی بودجه تأسیسات کارخانه را با توجه به صرفه‌جویی پیش‌بینی شده در انرژی کاهش می‌دهد. این بدان معناست که بیش از حد تخمین زدن صرفه‌جویی‌های بهره‌وری انرژی به‌شدت جریمه می‌شود، زیرا پروژه‌هایی که در ارائه صرفه‌جویی‌های تخمین زده شده شکست می‌خورند، باعث از دست دادن بودجه کارخانه و از دست دادن اهداف برای مصرف انرژی به‌طور کلی می‌شوند. این سیستم همچنین از ایجاد انگیزه برای دست‌کم گرفتن صرفه‌جویی‌های بهره‌وری انرژی جلوگیری می‌کند، زیرا پروژه‌ها باید صرفه‌جویی کافی برای دستیابی به بازگشت ۲ ساله داشته باشند و زیرا بودجه تأسیسات نمی‌تواند توسط کارخانه برای چیزی غیر از تأسیسات استفاده شود. گری لوندو، یکی از مدیران ارشد انرژی در جنرال موتورز می‌گوید: «کاهش بودجه‌های انرژی کارخانه واقعاً ارزش برنامه بهره‌وری

انرژی را به افراد مالی نشان می‌دهد و مهندسان انرژی من را پاسخگو نگه می‌دارد.»

با توجه به تغییرات سریع در صنعت خودروسازی و بنابراین تغییرات سریع در خطوط تولید جنرال موتورز، اطمینان از ساخت بهره‌وری انرژی در کارخانه‌های جدید یا بازسازی شده، عنصر مهمی از برنامه بهره‌وری انرژی است. محل تیم بهره‌وری انرژی در گروه مهندسی تأسیسات جهانی، برای گنجاندن ملاحظات بهره‌وری انرژی در تأسیسات جدید مفید بوده است، زیرا تیمی که مسئول طراحی تأسیسات جدید است، به همان مدیری که تیم بهره‌وری انرژی دارد، گزارش می‌دهد. علاوه بر این، دو مهندس بهره‌وری انرژی در جلسات طراحی کارخانه‌های جدید شرکت می‌کنند. این امر تضمین می‌کند که ملاحظات انرژی در طراحی کارخانه در نظر گرفته شود. در حال حاضر، معیار سرمایه‌گذاری در بهره‌وری انرژی در تولید جدید معمولاً بازگشت در نصف چرخه عمر دارایی‌های جدید است.

۷-۲-۴. نقش حمایت خارجی

حمایت نهادهای خارجی (از شرکت‌های خدمات انرژی محلی تا نهادهای دولتی) نقش کلیدی در پیشرفت‌های جنرال موتورز (GM) در حوزه بهره‌وری انرژی ایفا کرده است. این شرکت به مدت ۵ سال متوالی به‌عنوان شریک سال برنامه ENERGY STAR برای عملکرد برتر در پایداری انرژی انتخاب شده است. این جایزه نه تنها دستاوردهای زیست‌محیطی و صرفه‌جویی‌های مالی GM را تقدیر می‌کند، بلکه انگیزه‌ای برای سرمایه‌گذاری بیشتر در پروژه‌های انرژی بوده و تبلیغات مثبتی برای برند ایجاد کرده است.

برنامه Energy Leaders نیز با رسمیت بخشیدن به تعهد GM برای کاهش ۲۰ درصدی شدت مصرف انرژی (EUI) تا سال ۲۰۲۰ (نسبت به سال پایه ۲۰۱۰)، تقویت قابل‌توجهی برای برنامه‌های این شرکت بوده است. ادغام اهداف انرژی در استراتژی کسب‌وکار، مدیران کارخانه‌ها را موظف به گنجاندن شاخص‌های بهره‌وری انرژی در اهداف عملکردی خود کرده است.

برنامه‌های حمایتی مشتریان نیز برای GM سودمند بوده‌اند. مزیت اصلی این برنامه‌ها، کوتاه کردن دوره بازگشت سرمایه پروژه‌ها به زیر آستانه ۲ سال است

که امکان تأمین مالی آن‌ها را مطابق معیارهای داخلی GM فراهم می‌کند. به همین دلیل، پروژه‌ها در مناطقی با مشوق‌های انرژی قوی (مانند Tennessee Valley Authority، Consumers Energy و DTE Energy) نسبت به مناطق فاقد چنین حمایت‌هایی، اولویت بیشتری برای جذب بودجه دارند. GM همچنین با حداکثرسازی استفاده از مشوق‌های موجود (که عدم بهره‌برداری از آن‌ها را «پول رها شده» می‌داند) در سال‌های اخیر موفق به دستیابی به سقف کمک‌های مالی در چندین منطقه عملیاتی شده است.

حمایت‌های مهندسی ارائه‌شده توسط این برنامه‌ها نیز حائز اهمیت است. برای مثال، یک سازمان پژوهشی انرژی محلی با ارائه پشتیبانی فنی به کارخانه‌های GM، جذابیت مشارکت در برنامه‌های مشتری‌محور را افزایش داده است. اگرچه GM در برخی موارد (مانند دو کارخانه قدیمی) مجبور به تعدیل نرخ‌های برق ترجیحی خود شده، اما مزایای مهندسی و مشوق‌ها این چالش را جبران کرده‌اند. شاید مهم‌ترین عامل موفقیت GM، همکاری با دو شرکت بزرگ خدمات انرژی (Consumers Energy و DTE Energy) باشد که مهندسان انرژی اختصاصی را برای تأسیسات GM در مناطق مختلف تأمین می‌کنند. این سیستم انعطاف‌پذیر (که با تقسیم هزینه‌ها بین GM و شرکت‌های خدمات انرژی همراه است) به‌عنوان ستون اصلی برنامه بهره‌وری انرژی GM شناخته می‌شود. شرکت‌های خدمات انرژی کوچک‌تر نیز در سایر مناطق حمایت‌های مشابهی را در مقیاس محدودتر ارائه می‌دهند. تصمیم GM برای مشارکت در برنامه‌های مشتری‌محور، مبتنی بر تحلیل هزینه-فایده است: این شرکت تنها زمانی وارد برنامه می‌شود که مزایای مهندسی و مالی آن از هزینه‌های مشارکت پیشی بگیرد. این رویکرد عملی، علیرغم پیچیدگی‌های ناشی از تأثیر برنامه‌ها بر نرخ‌های انرژی، تاکنون نتایج درخشانی را رقم زده است.

۷-۲-۵. نگاه به آینده

با توجه به تحول سریع صنعت خودروسازی در دهه آینده، برنامه بهره‌وری انرژی در جنرال موتورز با چالش‌های بیشتر و فرصت‌های بزرگتری روبرو خواهد شد. در بسیاری از کارخانه‌ها، دستاوردهای عمده تاکنون در زمینه روشنایی، گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع؛ برخی بهبودهای راندمان نیروی محرکه؛ و تلاش برای

کاهش مصرف بخار در تولید بوده است. برای گسترش بیشتر مزایای صرفه‌جویی در هزینه انرژی، احتمالاً نیاز به تعمیق مداوم تلاش‌های بهره‌وری انرژی خواهد بود، از جمله مشارکت در پروژه‌های بهینه‌سازی تولید با مزایای چندگانه و سایر تلاش‌های نزدیک به عملیات خط تولید؛ اجرای آزمایشی بیشتر ابتکارات بهره‌وری انرژی تغییر رفتار؛ و پیشرفت مداوم در تلاش برای ادغام طرح‌ها و فناوری‌های بهره‌وری انرژی بهترین عملکرد در سیستم‌های تولید جدید. در حالی که این زمینه‌ها می‌توانند صرفه‌جویی‌های بسیار خوبی در هزینه انرژی با هزینه کم داشته باشند، اما چالش‌های سازمانی بیشتری را نیز به همراه دارند.

یک حوزه مهم، تقویت مداوم روابط کاری بین پرسنل بهره‌وری انرژی و کارکنان و مدیریت عملیات تولید است. واضح است که هر پروژه‌ای مرتبط با تولید باید بسیار کم‌خطر باشد و شامل برنامه‌ریزی دقیق همراه با سایر کارها برای به حداقل رساندن هرگونه توقف تولید باشد. نکته کلیدی آشکار، ادغام دانش فرصت‌های بهره‌وری انرژی در برنامه‌های کلی برای تعمیر و نگهداری یا بازسازی برنامه‌ریزی شده خط تولید است.

حوزه مهم دیگر، مشارکت مداوم و هرچه بیشتر پرسنل بهره‌وری انرژی در طراحی و اجرای تأسیسات تولیدی جدید است. بهره‌وری انرژی در تأسیسات تولیدی جدید شاید مهم‌ترین جنبه کار بهره‌وری انرژی در درازمدت باشد، زیرا صنعت به‌سرعت به تکامل خود ادامه می‌دهد. چیدمان سازمانی فعلی جنرال موتورز مزایایی را برای جذب این پتانسیل فراهم می‌کند.

همچنین ممکن است بتوان سیستم تضمین خرید کارآمدترین تجهیزات جدید را با رسمی کردن گنجاندن بهره‌وری انرژی در بازسازی خط تولید یا طراحی جدید بهبود بخشید. این علاوه بر توسعه ساختمان‌های جدید و زیرساخت انرژی آن‌ها، از طریق ایجاد یک «دروازه انرژی» برای کارکنان انرژی برای تأیید پروژه‌های مرتبط کلیدی، یا با رسمی کردن روند موجود برای گنجاندن ویژگی‌های بهره‌وری انرژی با بازگشت سرمایه ۱۰ سال یا کمتر است. جنرال موتورز که در حال حاضر یک رهبر در طراحی و تولید خودروهای برقی و کارآمد انرژی است، می‌تواند به‌طور فزاینده‌ای مشارکت‌های موازی انرژی پایدار را از طریق تولید سبتر خودروهایی خود برجسته کند.





محصولات متنوعی شامل غلات، ماست، آرد و سایر اقلام غذایی را در تأسیسات متعدد تولیدی خود به عمل می‌آورد.

۷-۳-۲. اهداف و دستاوردها

جنرال میلر بیش از یک دهه است که اقدامات بهره‌وری انرژی را در دستور کار خود قرار داده است. نخستین اهداف انرژی در سطح شرکت در سال ۲۰۰۵ معرفی شدند، اما برنامه عملیاتی تا سال‌های اخیر محدود باقی ماند. نقطه عطف این مسیر، استخدام گراهام تورستینسون به عنوان مهندس انرژی در یک کارخانه آزمایشی در سال ۲۰۰۸ بود. موفقیت او در کاهش هزینه‌های انرژی این کارخانه از ۱۳ میلیون دلار به ۷/۵ میلیون دلار طی ۴ سال، دلیل محکمی برای گسترش این مدل به سایر تأسیسات فراهم کرد.

علیرغم مقاومت اولیه بخش منابع انسانی، معاون تولید شرکت با استدلالی قاطع «کارکنان عادی سه تا هفت برابر حقوق خود صرفه‌جویی نمی‌کنند» از استخدام مهندسان انرژی در تمامی تأسیسات بزرگ حمایت کرد. این تصمیم منجر به تشکیل تیم ۱۵ نفره مهندسی انرژی شد که ۵ نفر به‌طور اختصاصی در واحدهای تولید غلات و مابقی به‌صورت اشتراکی در ۲۰ کارخانه دیگر مستقر شدند. هر مهندس موظف شد ۴ برابر حقوق سالانه خود در محل کارش صرفه‌جویی انرژی ایجاد کند. گراهام به عنوان مدیر انرژی شرکت منصوب شد و ابزارهای بهبود مستمر و تحلیل انرژی را طراحی کرد که در تمامی واحدها به کار گرفته شدند. این تحولات همراه با تغییر نگرش به «انرژی به عنوان یک ماده اولیه» (مشابه آرد یا شکر که نباید هدر رود) صورت گرفت.

در سال ۲۰۱۵، هدف جدیدی برای کاهش ۲ درصدی سالانه مصرف انرژی تا ۲۰۲۵ و کاهش ۲۸ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای در کل زنجیره تأمین تعیین شد. گزارش مسئولیت جهانی ۲۰۲۴ جنرال میلز نشان می‌دهد که این شرکت با پیگیری استراتژی‌های کاهش مصرف و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، توانسته است تا سال ۲۰۲۳ انتشار گازهای گلخانه‌ای را به میزان ۵۱ درصد نسبت به سال پایه ۲۰۲۰ کاهش دهد و سهم برق تجدیدپذیر در عملیات جهانی خود را به ۹۷ درصد برساند. این دستاوردها نشان می‌دهد که نرخ کاهش شدت مصرف انرژی در سال‌های اخیر حتی از پیش‌بینی‌های اولیه (شکل ۷) فراتر رفته و با شتاب بیشتری به سمت اهداف ۲۰۳۰ در حرکت است [۱۳].

فرصت دیگر برای جنرال موتورز در بهبود بیشتر فرهنگ بهره‌وری انرژی و جلب توجه بیشتر مدیریت کارخانه به بهره‌وری انرژی نهفته است. یکی از راه‌های اصلی که جنرال موتورز شروع به پیگیری این فرصت کرده است، برگزاری شکار گنج انرژی، مطابق با دستورالعمل ENERGY STAR است که در آن کارگران دو روز و نیم را به جستجوی صرفه‌جویی در انرژی در سراسر کارخانه می‌گذرانند. این امر در وادار کردن کارگران به فکر کردن در مورد بهره‌وری انرژی و برجسته کردن تمام صرفه‌جویی‌های بالقوه از بهره‌وری انرژی برای مدیریت کارخانه مؤثر بوده است. راه دیگری که جنرال موتورز قصد داشته فرهنگ بهره‌وری انرژی را پرورش دهد، برگزاری کمپین‌های «سبز خود را به جنرال موتورز بیاورید» بر اساس برنامه ENERGY STAR است. کارکنان تشویق می‌شوند که اقدامات بهره‌وری انرژی را در محل کار و همچنین در خانه‌های خود به عنوان راهی برای شخصی کردن بهره‌وری انرژی اجرا کنند.

۷-۳-۳. بهره‌وری انرژی در جنرال میلز^۱

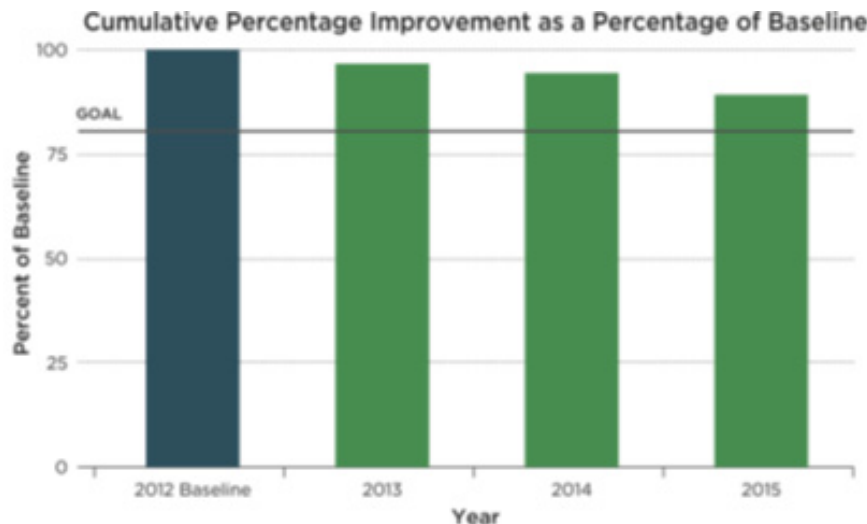
۷-۳-۱. پیشینه شرکت

جنرال میلز (General Mills) به عنوان یکی از بزرگ‌ترین فراوری کنندهای غلات و حبوبات در سطح جهانی، تاریخچه طولانی و پرفرازونشیبی دارد. برندهای این شرکت، از بتی کراکر گرفته تا چریوز، برای دهه‌ها از اقلام اصلی در خانوارهای سراسر جهان بوده‌اند. طی سالیان متمادی، جنرال میلز شرکت‌های متعددی را تأسیس و واگذار کرده است - از پارکر برادرز تا باغ زیتون - درحالی‌که شرکت‌های دیگری را نیز به مجموعه خود افزوده است که جدیدترین مورد آن، خریداری پیلزبری بوده است.

در سال‌های اخیر، برندهای غلات جنرال میلز با چالش‌های فزاینده صنعت غذا روبرو بوده‌اند که این شرکت را وادار به کاهش قابل توجه هزینه‌ها برای حفظ سودآوری کرده است. همچنین، جنرال میلز با ورود به بخش‌های رو به رشد بازار جهانی مواد غذایی (همچون ماست یونانی) و بهبود جذابیت محصولات غلاتی خود از طریق تولید تمامی غلات با دانه‌های کامل، به دنبال توسعه پایدار است.

در سال ۲۰۱۵، جنرال میلز بیش از ۱۷/۶ میلیارد دلار فروش خالص در سراسر جهان ثبت کرد. این شرکت

1. General Mills



شکل ۷. روند کاهش شدت مصرف انرژی در جنرال میلز (داده‌های نمودار تا ۲۰۱۵؛ تحلیل عملکرد ۲۰۲۴ در متن) [۹، ۱۳]

۳-۳-۷. سیستم شناسایی و اجرای اقدامات

اهداف بهره‌وری انرژی در سطح شرکت جنرال میلز نقش محوری در ترغیب واحدهای سازمانی ایفا می‌کنند، چرا که این اهداف به شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPI) در ساختار ارزیابی شرکت تبدیل شده‌اند. هر کارخانه موظف است اهداف زیست‌محیطی (از جمله شاخص‌های انرژی) را تعیین کند که مستقیماً بر رتبه‌بندی کارخانه و در نتیجه ارزیابی مدیران تأثیرگذار است. این پیوند بین عملکرد انرژی و ارزیابی مدیریت، انگیزه قوی برای تحقق اهداف انرژی و پیگیری مستمر پروژه‌های بهره‌وری ایجاد می‌کند. برنامه بهره‌وری انرژی این شرکت با ساختار غیرمتمرکز خود (ناشی از ادغام‌ها و اکتساب‌های متعدد) به صورت غیرمتمرکز طراحی شده و بر تیم‌های انرژی سطح کارخانه متکی است. این تیم‌ها متشکل از مهندسان تمام‌وقت هستند که به مدیر کارخانه گزارش می‌دهند و هم‌زمان با تیم انرژی مرکزی (ارائه‌دهنده ابزارها و آموزش‌ها) همکاری می‌کنند. مهندسان انرژی علاوه بر پیشبرد پروژه‌های محلی، مسئول تبادل ایده‌ها بین کارخانه‌ها هستند. در کارخانه‌های بزرگ موسوم به بیگ جی (Big G)، مهندسان انرژی به صورت اختصاصی فعالیت می‌کنند، در حالی که در سایر واحدها ممکن است نقش‌های دیگری نیز داشته باشند. وظیفه مدیریت تأمین انرژی به صورت مشترک بین مهندسان انرژی و تیم مالی هر کارخانه تقسیم شده است. پروژه‌های کوچک با بودجه زیر آستانه مشخص، توسط تیم مالی کارخانه تصویب می‌شوند، اما پروژه‌های بزرگ‌تر نیاز به تأیید گروه مالی مرکزی دارند. انتخاب پروژه‌ها مبتنی بر نرخ بازده داخلی (IRR) است که توسط گروه مالی مرکزی

در یک صفحه گسترده استاندارد محاسبه می‌شود. با این حال، چالش‌های بودجه‌ریزی از جمله عدم وجود بودجه اختصاصی برای پروژه‌های انرژی و محدودیت‌های سالانه، اجرای پروژه‌های جدید را در طول سال دشوار می‌سازد. علاوه بر این، تیم مالی بودجه انرژی کارخانه‌ها را متناسب با صرفه‌جویی‌های پیش‌بینی شده کاهش می‌دهد.

جنرال میلز با سرمایه‌گذاری در سامانه‌های اندازه‌گیری جزئی، امکان رصد مصرف انرژی هر دستگاه را فراهم کرده است. این سیستم نه تنها شناسایی پروژه‌های بالقوه را تسهیل می‌کند، بلکه با افزایش آگاهی کارکنان از الگوی مصرف، زمینه را برای اصلاح رفتارهای انرژی مهیا می‌سازد. اگرچه این شرکت هنوز مکانیسم رسمی برای گنجاندن الزامات انرژی در طراحی تأسیسات جدید ندارد، اما از طریق فرم درخواست بودجه، پرسش درباره کارایی انرژی پروژه‌ها را اجباری کرده است. همکاری غیررسمی بین مهندسان پروژه و مهندسان انرژی نیز اطمینان نسبی از بهینه‌سازی مصرف انرژی در طرح‌های جدید ایجاد می‌کند.

۴-۳-۷. نقش حمایت خارجی

دولت و شرکت‌های خدمات عمومی هر دو در شکل‌گیری و پیشرفت برنامه بهره‌وری انرژی جنرال میلز نقش داشته‌اند. یک برنامه ملی بهره‌وری انرژی بستری فراهم کرد تا این شرکت به صورت عمومی به اهداف بهره‌وری انرژی متعهد شود و نتایج خود را در راستای این اهداف منتشر کند. نقش حمایت‌های مالی مشتری‌محور در مناطق مختلف متفاوت بوده است. در مناطقی که جنرال میلز در این برنامه‌ها مشارکت

می‌کند، مشوق‌های مالی اصلی‌ترین مزیت محسوب می‌شوند. این مشوق‌ها با بهبود نرخ بازده داخلی (IRR) پروژه‌ها، شانس تأیید آن‌ها را افزایش می‌دهند، اگرچه به دلیل محاسبه نشدن به‌عنوان «کاهش هزینه پروژه» و در نظر گرفت‌نشده به‌عنوان «بازگشت سرمایه یکباره در سال اول»، تأثیر کمتری نسبت به برخی شرکت‌های دیگر دارند. همچنین ارزش این مشوق‌ها به دلیل وابستگی به صرفه‌جویی‌های تأییدشده در کارخانه‌ها با عدم قطعیت همراه است. با این حال، در مناطقی که امکان اجرای پروژه‌های سفارشی پیچیده را فراهم می‌کنند، مشوق‌ها ارزشمندترند، چرا که تیم انرژی را به‌جای تمرکز بر پروژه‌های ساده، به دنبال صرفه‌جویی‌های عمیق‌تر سوق می‌دهند. گراهام تورستینسون، رهبر پلتفرم انرژی جنرال میلز، تأکید می‌کند: «برنامه‌های طراحی‌شده به‌خوبی می‌توانند پروژه‌های بهتر و بلندپروازانه‌تری را رقم بزنند.»

حمایت‌های مهندسی نیز بخشی از کمک‌های برنامه‌های مشتری‌محور بوده است. برای مثال، یک سازمان پژوهش و توسعه انرژی به شرکت‌های صنعتی اجازه می‌دهد متخصصان خارجی را با هزینه‌اشتراکی به‌کارگیرند. این رویکرد برای پروژه‌های پیچیده مفید است، هرچند کیفیت متخصصان ارائه‌شده (که در برخی برنامه‌ها ضعیف است) ممکن است از اثربخشی آن بکاهد. تصمیم جنرال میلز برای مشارکت یا عدم مشارکت در این برنامه‌ها همواره مبتنی بر تحلیل هزینه-فایده است. تیم انرژی با بررسی خط لوله پروژه‌های هر کارخانه، نوع و میزان مشوق‌های موجود و پتانسیل حمایت مهندسی، مزایا را با هزینه‌های مشارکت مقایسه می‌کند. در مواردی که مشوق‌ها صرفاً به پروژه‌های ساده و از پیش تعیین‌شده محدود می‌شدند (و با پروژه‌های پیچیده‌تر شناسایی‌شده توسط مهندسان انرژی همخوانی نداشتند) شرکت ترجیح داد به‌صورت خودگردان عمل کند. این انعطاف‌پذیری استراتژیک به جنرال میلز اجازه می‌دهد تا هم‌زمان با بهره‌برداری از حمایت‌های خارجی، کنترل پروژه‌های کلیدی را در دست داشته باشد.

۷-۳-۵. نگاه به آینده

جنرال میلز با ایجاد یک برنامه قوی بهره‌وری انرژی در سال‌های اخیر، اکنون در موقعیتی استثنایی برای تقویت بیشتر این برنامه قرار دارد. یکی از راهکارهای کلیدی، اختصاص بودجه ویژه به پروژه‌های انرژی است که انعطاف‌پذیری بیشتری برای اجرای پروژه‌ها در طول سال فراهم می‌کند و نیاز به تأیید جداگانه هر پروژه توسط بخش

مالی را حذف می‌نماید. این تغییر نه‌تنها زمان مدیران انرژی را برای فرآیندهای اداری کاهش می‌دهد، بلکه امکان افزایش تعداد پروژه‌های اجراشده سالانه را نیز مهیا می‌سازد.

فرصت دیگر، تمرکز بر اقدامات بهره‌وری انرژی رفتاری است. با ایجاد فرهنگ صرفه‌جویی انرژی از طریق برنامه‌هایی مانند «شکار گنج انرژی» یا مشوق‌های بهره‌وری انرژی در خانه برای کارکنان، می‌توان به صرفه‌جویی‌های قابل توجهی دست یافت. حضور مهندسان انرژی تمام‌وقت در کارخانه‌های بزرگ جنرال میلز (مانند واحدهای موسوم به بیگ جی) این شرکت را قادر می‌سازد تا با تعامل مستقیم با کارکنان، چنین اقداماتی را به شکلی مؤثر اجرا کند.

رسمی‌سازی فرآیند ادغام بهره‌وری انرژی در پروژه‌های غیرمرتبط نیز از اولویت‌های آینده است. مشاوره اجباری با تیم انرژی در طراحی پروژه‌های جدید تولیدی، از نیاز به نوسازی‌های پرهزینه در آینده جلوگیری می‌کند. این رویکرد همچنین نصب تجهیزات کارآمد انرژی را (که ممکن است به‌عنوان پروژه‌های نوسازی استاندارد، معیارهای نرخ بازده داخلی (IRR) را برآورده نکنند) تسهیل می‌کند، چرا که هزینه نسبی این تجهیزات در مقایسه با جایگزین‌های کم‌بازده، توجیه‌پذیرتر است.

با بهره‌برداری از این فرصت‌ها، جنرال میلز می‌تواند نه‌تنها به اهداف زیست‌محیطی خود نزدیک‌تر شود، بلکه جایگاه رقابتی خود را در صنعت غذا نیز تقویت نماید.

۷-۴-۴. بهره‌وری انرژی در اینتل

۷-۴-۱. پیشینه شرکت

شرکت اینتل (Intel) به‌عنوان بزرگ‌ترین تولیدکننده نیمه‌هادی‌ها در جهان، در سال ۱۹۶۸ تأسیس شد و طی سه دهه گذشته با محوریت توسعه ریزپردازنده‌ها (که قلب تپنده رایانه‌های شخصی هستند) رشدی سریع را تجربه کرده است. اینتل علاوه بر تولید تراشه، چندین مرکز داده بزرگ را نیز مدیریت می‌کند. در سال ۲۰۱۴، درآمد این شرکت به ۵۶ میلیارد دلار رسید که نشان‌دهنده رشد ۶ درصدی نسبت به سال قبل بود. تأسیسات تولیدی اینتل در مناطق مختلف واقع شده‌اند.

۷-۴-۲. اهداف و دستاوردها

اینتل پیشرویی دیرینه در حوزه پایداری دارد و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) همراه با بهبود بهره‌وری

انرژی، ستون اصلی این تلاش‌ها محسوب می‌شوند. این شرکت از سال ۱۹۹۶ گزارش‌دهی عمومی مصرف انرژی و تعهد به کاهش GHG را آغاز کرد. در سال ۲۰۰۳، اینتل با تعیین هدف کاهش ۴ درصدی سالانه شدت مصرف انرژی (به ازای هر سانتیمتر مربع سیلیکون)، گامی بلند برداشت. این معیار در ادامه با سیستم جدیدی جایگزین شد که در آن کلیه صرفه‌جویی‌های حاصل از اقدامات بهره‌وری انرژی، جمع‌آوری و به یک رقم کلی تبدیل می‌شود تا با مصرف انرژی کل شرکت مقایسه گردد.

در حال حاضر، اینتل برای سال ۲۰۲۰ یک هدف سالانه کاهش شدت مصرف انرژی در سطح شرکت تعیین کرده که به تفکیک منطقه و سایت اجرایی می‌شود. تا سال ۲۰۱۵، این شرکت موفق به ثبت ۱/۶ میلیارد کیلووات‌ساعت صرفه‌جویی انرژی ناشی از اقدامات بهره‌وری انرژی از سال ۲۰۱۲ شده بود. این دستاوردها نه تنها جایگاه اینتل را به عنوان پیشگام فناوری تقویت می‌کند، بلکه الگویی برای صنعت در همسویی رشد اقتصادی با مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی ارائه می‌دهد.

۳-۴-۷. سیستم شناسایی و اجرای اقدامات

ساختار سازمانی نسبتاً متمرکز اینتل در برنامه بهره‌وری انرژی آن بازتاب یافته است. هر سایت تولیدی این شرکت دارای یک «قهرمان انرژی» تمام‌وقت است که به دو صورت گزارش‌دهی می‌کند: مستقیم به مدیر عملیات سایت و به صورت ماتریسی به مدیر مرکزی بهره‌وری انرژی. تیم بهره‌وری انرژی متشکل از ۱۶ عضو با تخصص‌های محلی است که از طریق کنفرانس‌های تلفنی و ویدئویی، ایده‌ها و فرصت‌ها را به اشتراک گذاشته و اقدامات استاندارد را در چندین سایت گسترش می‌دهند.

فرآیند تصویب پروژه‌ها به این صورت است که پس از شناسایی، به تیم مرکزی بهره‌وری انرژی ارجاع می‌شوند تا امکان بهینه‌سازی از نظر صرفه‌جویی و هزینه بررسی شود. پروژه‌های واجد شرایط از طریق بودجه سالانه ۳۰ میلیون دلاری این حوزه تأمین مالی شده و بر اساس ارزش خالص فعلی^۱ (NPV) اولویت‌بندی می‌شوند. پروژه‌هایی که آستانه NPV را برآورده می‌کنند، معمولاً تأیید می‌شوند. اینتل ترجیح می‌دهد پروژه‌ها را با منابع داخلی (به جای استفاده از قراردادهای عملکرد انرژی) اجرا کند. انگیزه اینتل برای پیگیری بهره‌وری انرژی سه‌جانبه است:

۱. کاهش ردپای کربن.

۲. تقویت جایگاه رهبری در حوزه پایداری.

۳. کاهش هزینه‌ها با وجود سهم ۱ درصدی انرژی از کل هزینه‌ها، این مورد پس از نیروی کار، دومین هزینه متغیر بزرگ شرکت است. تمرکز بر بهره‌وری انرژی به عنوان اهرمی برای افزایش رقابت‌پذیری، نقش کلیدی ایفا می‌کند.

اقدامات اینتل عمدتاً بر بهینه‌سازی تأسیسات (مانند سیستم‌های سرمایشی، بازایی گرما، هوای فشرده و روشنایی) متمرکز است. با این حال، این شرکت در حال گسترش دامنه فعالیت‌ها به طراحی خطوط تولید جدید و ساختمان‌های پایدار است تا اطمینان حاصل شود که بهره‌وری انرژی از مرحله طراحی در زیرساخت‌ها نهادینه می‌شود.

۴-۴-۷. نقش حمایت خارجی

اگرچه اینتل عمدتاً بر برنامه داخلی خود تکیه دارد، حمایت نهادهای خارجی (به‌ویژه برنامه‌های تأمین شده توسط مصرف‌کنندگان) نقش مکملی ایفا کرده‌اند. مهم‌ترین کمک این برنامه‌ها، ارائه مشوق‌های مالی برای عبور پروژه‌ها از آستانه NPV بوده است. به عنوان مثال، Energy Trust of Oregon با ارائه ارزیابی‌های شخص ثالث و پشتیبانی فنی، به اجرای پروژه‌ها کمک کرده است.

اینتل همچنین در شکل‌دهی به طراحی برنامه‌های مشتری‌محور مشارکت فعال دارد. نمونه بارز این همکاری، اصلاح سیستم انگیزه‌های یک شرکت خدمات عمومی بود که ابتدا سهم مشتریان بزرگ را ناعادلانه تعیین کرده بود. با همکاری اینتل و دیگر صنایع، سقف مشوق‌ها متناسب با میزان مشارکت مالی تنظیم شد. راه‌حلی که منافع همه ذینفعان را تأمین کرد. این همکاری نشان می‌دهد که مشتریان بزرگ صنعتی می‌توانند با اجرای پروژه‌های مقرون‌به‌صرفه، هم‌زمان هزینه‌های خود و کل سیستم را کاهش دهند.

۵-۷. مطالعه موردی محلی: صنعت فولاد ایران و پتانسیل تطبیق راهکارها

در حالی که تجربیات شرکت‌های بین‌المللی مانند سیمپلوت، جنرال موتورز، جنرال میلز و اینتل الگوهای موفق برای بهینه‌سازی انرژی ارائه می‌دهند، بررسی یک مطالعه

1. Net Present Value



موردی بومی می‌تواند جنبه‌های عملی و تطبیقی این راهکارها را در زمینه‌های چالش‌برانگیز حوزه انرژی برجسته کند. صنعت فولاد ایران، به‌عنوان یکی از صنایع انرژی‌بر کلیدی با تمرکز بر فرآیندهای احیای مستقیم آهن^۱ (DRI) و کوره‌های قوس الکتریکی^۲ (EAF)، با چالش‌های منحصربه‌فردی مانند ناترازی گاز، فناوری‌های قدیمی و تحریم‌های بین‌المللی مواجه است. این بخش با تحلیل مصرف انرژی در صنعت فولاد ایران و مقایسه آن با کشورهای شاخص، پتانسیل ادغام راهکارهای شرکت‌های پیشرو را برای کاهش شدت مصرف انرژی و مقابله با ناترازی گاز بررسی می‌کند.

۷-۵-۱. پیشینه صنعت فولاد ایران

ایران با تولید سالانه بیش از ۳۰ میلیون تن فولاد، یکی از ۱۰ تولیدکننده برتر جهان است [۱۴]. فرآیند غالب تولید در ایران، روش EAF-DRI است که به دلیل دسترسی به منابع غنی گاز طبیعی، حدود ۸۰ درصد از انرژی موردنیاز را از گاز تأمین می‌کند [۱۵]. با این حال، مصرف انرژی ویژه (SEC) در این فرآیند بین ۱۰ تا ۲۰ گیگاژول بر تن فولاد

است و انتشار CO₂ آن حدود ۱.۲ تن به ازای هر تن فولاد گزارش شده است [۱۶]. چالش‌های اصلی شامل فناوری‌های قدیمی (بیش از ۷۰ درصد تجهیزات متعلق به دهه ۱۹۹۰) [۱۷]، تحریم‌ها که دسترسی به فناوری‌های نوین را محدود کرده [۱۸] و سهم ناچیز انرژی‌های تجدیدپذیر (تنها ۲ درصد) [۱۹] است. این عوامل وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی را افزایش داده و رقابت‌پذیری صنعت را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۷-۵-۲. مقایسه مصرف انرژی ایران با سایر کشورها

برای درک بهتر موقعیت ایران، مصرف انرژی در تولید فولاد با کشورهای پیشرو در این صنعت مقایسه می‌شود. داده‌ها نشان می‌دهند که ایران در مصرف گاز طبیعی (۰/۸-۰/۶ مترمکعب بر تن) بالاترین وابستگی را دارد، در حالی که کشورهای مانند آلمان (با تمرکز بر EAF پیشرفته) مصرف برق را بهینه کرده و سهم تجدیدپذیرها را به ۳۵ درصد رسانده‌اند [۲۰]. (جدول ۱) مقایسه‌ای از مصرف انرژی در سال ۲۰۲۳ ارائه می‌دهد [۱۵، ۱۶].

جدول ۱. مقایسه مصرف انرژی در تولید فولاد (۲۰۲۳)

کشور	مصرف برق (kWh/ton)	مصرف گاز (m ³ /ton)	مصرف گازوئیل (liters/ton)	فناوری غالب
ایران	۳۰۰-۲۵۰	۰/۸ - ۰/۶	۰/۱ - ۰/۰۵	DRI + EAF
آمریکا	۵۰۰-۳۵۰	۰/۸ - ۰/۴	۰/۱ - ۰/۰۵	EAF
چین	۴۰۰-۲۵۰	۰/۴ - ۰/۲	۰/۲ - ۰/۱	BF-BOF
آلمان	۴۵۰-۳۰۰	۱ - ۰/۵	۰/۰۵ - ۰/۰۲	EAF پیشرفته
روسیه	۴۵۰-۳۰۰	۰/۹ - ۰/۴	۰/۱۲ - ۰/۰۸	EAF + DRI
کره جنوبی	۴۰۰-۳۰۰	۰/۶ - ۰/۳	۰/۱ - ۰/۰۵	EAF
ترکیه	۳۵۰-۲۵۰	۱ - ۰/۵	۰/۱۵ - ۰/۱	EAF
برزیل	۳۵۰-۲۰۰	۰/۵ - ۰/۲	۰/۱۵ - ۰/۱	BF-BOF

طراحی آزمایشی^۴ (DOE) و مشارکت در ENERGY STAR می‌تواند برای بهینه‌سازی فرآیندهای DRI اعمال شود و مصرف گاز را ۱۵-۲۰ درصد کاهش دهد [۱۶].

این مقایسه نشان می‌دهد که شرکت‌های ایرانی برای کاهش مصرف گاز (که عامل اصلی ناترازی در سید سوخت مطابق جدول ۱، است)، می‌توانند از راهکارهای شرکت‌های مورد مطالعه الهام بگیرند. برای مثال، رویکرد سیمپلوت در

1. Direct Reduced Iron
2. Electric Arc Furnace
3. Specific Energy Consumption
4. Design of Experiments

۷-۵-۳. پتانسیل تطبیق راهکارهای شرکت‌های پیشرو در صنعت فولاد ایران

با الهام از تجربیات بین‌المللی، راهکارهای زیر برای تطبیق در صنعت فولاد ایران پیشنهاد می‌شود:

- همکاری چندجانبه و سرمایه‌گذاری هدفمند (با الگوبرداری از سیمپلوت و جنرال موتورز): سیمپلوت با سرمایه‌گذاری در فناوری‌های بهینه‌ساز و همکاری با نهادهای دولتی، ۱۸ درصد کاهش شدت مصرف انرژی را محقق کرد [۱۶]. در صنعت فولاد ایران، این رویکرد می‌تواند برای نوسازی کوره‌های EAF با بودجه‌ریزی هدفمند اعمال شود که منجر به ۱۱ درصد کاهش هزینه‌های عملیاتی و کاهش وابستگی به گاز طبیعی شود [۱۵]. بر چالش تحریم‌ها، می‌توان با تمرکز بر فناوری‌های داخلی و همکاری با کشورهای همسایه غلبه کرد [۲۱].
- توانمندسازی نیروی انسانی و سیستم‌های هوشمند (با الگوبرداری از جنرال میلز و اینتل): جنرال میلز با استخدام مهندسان حوزه انرژی و ادغام سیستم‌های اندازه‌گیری، مصرف انرژی را ۳ درصد در سال کاهش داد [۲۲]. اینتل نیز با سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی، مصرف مراکز داده را ۳۰ درصد کاهش داد [۲۳]. در صنعت فولاد ایران، آموزش نیروی انسانی برای برنامه‌هایی مانند «بهینه‌سازی انرژی» (از جنرال موتورز) و ادغام IoT^1 در کوره‌ها می‌تواند مصرف برق را ۱۰-۱۵ درصد کاهش دهد [۲۴، ۲۵]. با پتانسیل بالای استفاده از انرژی خورشیدی در ایران، می‌توان ۵۰ درصد برق کوره‌های قوس الکتریکی (EAF) را از پنل‌های خورشیدی تأمین کرد، مشابه پروژه JSW Steel هند [۲۶].

- ادغام فناوری‌های نوین برای مقابله با ناترازی گاز: با الهام از راهکارهای مبتنی بر داده شرکت‌های پیشرو، شرکت‌های صنعتی ایران می‌توانند فناوری‌هایی مانند هیدروژن سبز (مشابه HYBRIT سوئد) [۲۲] یا جذب و ذخیره کربن $^{2}(CCUS)$ [۲۷] را پیاده‌سازی نمایند. علاوه بر این، بررسی تولید بیوهیدروژن به عنوان منبع انرژی جایگزین می‌تواند وابستگی به گاز طبیعی را کاهش دهد [۲۸]. همچنین، بهبود خواص مکانیکی مواد لوله‌ها در برابر خوردگی و ذرات جامد، با استفاده از کامپوزیت‌های نانو، می‌تواند دوام زیرساخت‌های انرژی را افزایش دهد [۲۹، ۳۰]. برای مثال، جایگزینی بخشی از گاز طبیعی با هیدروژن سبز می‌تواند انتشار CO_2 را ۹۰ درصد کاهش دهد و مصرف انرژی را ۲۰-۳۰ درصد بهینه کند [۳۱-۳۳]. همچنین، سیستم‌های بازیافت حرارت (الگوبرداری از POSCO کره جنوبی) [۲۴] می‌تواند بازدهی حرارتی را به ۸۰ درصد برساند و فشار بر منابع گاز را کاهش دهد.

تجربیات شرکت‌های بین‌المللی مانند سیمپلوت، جنرال موتورز، اینتل و جنرال میلز نشان می‌دهد که ترکیب مداخلات فناورانه و مدیریتی می‌تواند در کاهش شدت مصرف انرژی و مدیریت ریسک‌های ناشی از ناترازی گاز بسیار مؤثر باشد. در این شرکت‌ها، استفاده از طراحی آزمایشی در فرآیندها، بهینه‌سازی خطوط تولید، استقرار سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی و برنامه‌های نظام‌مند آموزش نیروی انسانی، منجر به کاهش ملموس مصرف انرژی، هزینه‌های عملیاتی و فشار بر زیرساخت‌های تأمین گاز شده است. در جدول ۲، راهکارهای کلیدی این شرکت‌ها، نتایج کمی حاصل‌شده و تأثیرات آن‌ها بر ناترازی گاز و شاخص‌های کلان اقتصادی مانند مهار تورم و رشد تولید، به صورت خلاصه ارائه شده است.

جدول ۲. راهکارهای کلیدی، نتایج و تأثیرات آن‌ها بر مدیریت ناترازی گاز، مهار تورم و رشد تولید

تأثیر بر مهار تورم و رشد تولید	تأثیر بر ناترازی گاز	نتایج	راهکار
کاهش ۱۰ درصدی هزینه‌های تولید و افزایش سودآوری	کاهش مصرف گاز و بهبود توازن عرضه-تقاضا	کاهش ۱۸ درصدی شدت مصرف انرژی در فرآیندهای غذایی	طراحی آزمایشی (DOE) در سیمپلوت
آزادسازی منابع مالی برای توسعه محصولات الکتریکی	کاهش وابستگی به گاز در فرآیندهای صنعتی	کاهش ۱۱ درصدی هزینه‌های عملیاتی	بهینه‌سازی خطوط تولید در جنرال موتورز
کاهش هزینه‌های زیرساختی و افزایش ظرفیت تولیدی	کاهش فشار بر شبکه گاز	کاهش ۳۰ درصدی مصرف انرژی مراکز داده	سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی در اینتل
کاهش قیمت تمام‌شده محصولات و افزایش رقابت در بازار	بهبود مدیریت مصرف در سایت‌های صنعتی	کاهش ۴ درصدی سالانه شدت مصرف انرژی	آموزش نیروی انسانی در جنرال میلز

1. Design of Experiments
2. Internet of Things

همان گونه که (جدول ۲) نشان می دهد، هر یک از این راهکارها علاوه بر کاهش مستقیم شدت مصرف انرژی و فشار بر شبکه گاز، از طریق کاهش هزینه های تولید، آزادسازی منابع سرمایه ای و ارتقای بهره وری، به مهار فشارهای تورمی و تقویت رشد تولید کمک می کنند. در صنعت فولاد ایران، می توان با بومی سازی این رویکردها، اقداماتی مانند استفاده از طراحی آزمایشی در بهینه سازی شرایط عملیاتی واحدهای DRI، بازطراحی خطوط نورد و ذوب، استقرار سیستم های پایش و مدیریت هوشمند انرژی در کوره های EAF و اجرای برنامه های آموزش تخصصی انرژی برای کارکنان بهره برداری را به عنوان مسیرهای عملی برای کاهش وابستگی به گاز و ارتقای رقابت پذیری دنبال کرد.

۷-۵-۴. تحلیل SWOT^۱ برای تطبیق راهکارها در ایران

برای ارزیابی عملی، تحلیل SWOT زیر ارائه می شود:

- نقاط قوت (Strengths): منابع غنی گاز طبیعی و پتانسیل انرژی خورشیدی؛ نیروی کار متخصص در صنایع انرژی بر [۱۹].
- نقاط ضعف (Weaknesses): فناوری قدیمی و تحریم ها که دسترسی به تجهیزات نوین را محدود می کند [۱۷، ۱۸].
- فرصت ها (Opportunities): همکاری بین المللی با کشورهای مانند آلمان و کره جنوبی برای انتقال دانش [۲۰، ۳۴]؛ ادغام راهکارهای شرکت های پیشرو برای کاهش ۲۰-۳۰ درصد مصرف انرژی [۱۶].
- تهدیدها (Threats): نوسانات بازار گاز و تغییرات اقلیمی که ناترازی را تشدید می کند [۲۳].

این تحلیل نشان می دهد که تطبیق راهکارها نه تنها نوآورانه است، بلکه با تمرکز بر مدل های هیبریدی (ترکیب تجربیات جهانی با شرایط محلی)، می تواند صنعت فولاد ایران را به سمت توسعه پایدار سوق دهد. برای مثال، پیاده سازی DOE سیمپلوت در فرآیندهای DRI می تواند نرخ بازده داخلی^۲ (IRR) را به ۱۵ درصد برساند، مشابه تجربیات جهانی [۲۰]. در نهایت، این مطالعه موردی محلی تأکید می کند که تجربیات شرکت های بین المللی می تواند با بومی سازی، چالش های ناترازی گاز در ایران را حل کند و به کاهش رد پای کربن کمک نماید.

۸. محاسبات عددی بهینه سازی

در دنیای امروز، جایی که صنایع انرژی بر مسئول بیش از ۳۷ درصد مصرف انرژی جهانی و سهم عمده ای از انتشار گازهای گلخانه ای هستند، مدل های عددی بهینه سازی نه تنها یک ابزار فنی، بلکه یک اهرم استراتژیک برای دستیابی به پایداری اقتصادی و زیست محیطی به شمار می روند. این مدل ها، با بهره گیری از الگوریتم های پیشرفته ریاضی، امکان شبیه سازی سناریوهای پیچیده، پیش بینی رفتار سیستم ها و شناسایی نقاط بهینه را فراهم می کنند که می تواند منجر به کاهش تا ۳۰ درصد مصرف انرژی و صرفه جویی های مالی چشمگیر شود. بر اساس گزارش های آژانس بین المللی انرژی (IEA)، کاربرد این روش ها در صنایع سنگین مانند فولاد، خودروسازی و فناوری، پتانسیل کاهش انتشار CO₂ به میزان میلیاردها تن در سال را دارد. در این بخش، با تمرکز بر رویکردهای کلیدی مانند برنامه ریزی خطی (LP)، برنامه ریزی عدد صحیح مختلط (MILP)، برنامه ریزی غیر خطی (NLP)، الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)، روابط ریاضی اساسی، کاربردهای عملی و مثال های واقعی مرتبط با شرکت های مورد مطالعه (سیمپلوت، جنرال موتورز، جنرال میلز و اینتل) و حتی صنعت فولاد ایران بررسی می شود. این روش ها نه تنها در سطح تئوریک، بلکه در پیاده سازی های واقعی، مانند بهینه سازی سیستم های انرژی در کارخانه های غذایی یا مراکز داده، اثبات شده اند و می توانند چالش هایی مانند ناترازی گاز را با دقت بالا مدیریت کنند.

۸-۱. برنامه ریزی خطی^۳ (LP): پایه ای برای تخصیص بهینه منابع

برنامه ریزی خطی، به عنوان یکی از قدیمی ترین و قدرتمندترین ابزارهای بهینه سازی، بر پایه مدل های خطی بنا شده و برای حل مسائل تخصیص منابع در محیط های محدود ایده آل است. این روش با حداکثر یا حداقل کردن یک تابع هدف خطی، تحت محدودیت های خطی، امکان تصمیم گیری های دقیق را فراهم می کند و در صنایع انرژی بر، برای کاهش هزینه های عملیاتی تا ۲۰-۳۰ درصد کاربرد دارد. مدل استاندارد LP به صورت رابطه (۱) تعریف می شود [۳۵]:

$$Z = \sum_{j=1}^n x_j c_j \quad (1)$$

1. Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats
2. Internal Rate of Return
3. Linear Programming

که در آن x_j متغیرهای تصمیم (مانند میزان استفاده از تجهیز j) و c_j ضرایب هزینه انرژی هستند. محدودیت‌ها شامل نامعادلات خطی $\sum_{j=1}^n x_{ij} a_j \leq b_i$ برای $i=1,2,\dots,m$ و قیود غیرمنفی $x_j \geq 0$ می‌شوند. الگوریتم‌هایی مانند سیمپلکس یا روش‌های داخلی، این مدل را به سرعت حل می‌کنند.

در کاربردهای عملی، LP در صنایع غذایی مانند جنرال میلز برای تخصیص بهینه منابع تولید و کاهش مصرف انرژی در خطوط فرآوری استفاده می‌شود، جایی که می‌تواند هزینه‌های انرژی را تا ۱۵ درصد کاهش دهد [۳۶]. برای مثال، در یک مطالعه موردی در صنعت نساجی (مشابه فرآیندهای غذایی سیمپلوت)، مدل LP هزینه‌های انرژی را با تخصیص بهینه سوخت و برق به حداقل رساند و صرفه‌جویی سالانه ۱۰-۲۰ درصد ایجاد کرد [۳۷]. در صنعت فولاد ایران، LP می‌تواند برای بهینه‌سازی مصرف گاز در فرآیند DRI اعمال شود، جایی که محدودیت‌های عرضه گاز را در نظر گرفته و وابستگی به سوخت فسیلی را کاهش دهد، با پتانسیل صرفه‌جویی ۱۰-۱۵ درصد [۳۵، ۳۶].

۲-۸. برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MILP): مدیریت تصمیمات گسسته در سیستم‌های پیچیده

MILP با ادغام متغیرهای پیوسته و گسسته (مانند تصمیمات روشن/خاموش تجهیزات)، برای مدل‌سازی مسائل واقعی که نیاز به انتخاب‌های باینری دارند، ایده‌آل است. این روش که اغلب با الگوریتم‌های شاخه و کران حل می‌شود، در صنایع انرژی‌بر برای بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده کاربرد دارد و می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را تا ۵۰ درصد کاهش دهد. فرم کلی مدل MILP به صورت رابطه (۲) است [۳۸]:

$$Z = \sum_{j=1}^n x_j c_j \quad (2)$$

با محدودیت‌های خطی $\sum_{j=1}^n x_{ij} a_j \leq b_i$ و قید صحیح بودن برای برخی متغیرها، یعنی $x_j \in \{0,1\}$ برای $j \in \{1,\dots,n\}$. در شرکت‌هایی مانند سیمپلوت یا جنرال موتورز، MILP برای مدل‌سازی تصمیمات گسسته مانند انتخاب تجهیزات در خطوط تولید مفید است؛ برای نمونه، در خودروسازی، این مدل زمان‌بندی تولید را بهینه می‌کند و مصرف انرژی را ۲۰-۳۰ درصد کاهش می‌دهد. یک مطالعه موردی در

سیستم‌های انرژی صنعتی نشان داد که MILP هزینه‌های انرژی را در کارخانه‌های پردازشی تا ۴۰ درصد بهینه می‌کند. در صنعت فولاد ایران، MILP می‌تواند برای تصمیم‌گیری در مورد فعال‌سازی کوره‌های EAF تحت محدودیت‌های گاز استفاده شود، که منجر به کاهش وابستگی به گاز طبیعی و صرفه‌جویی ۱۵-۲۵ درصد می‌شود [۳۹، ۳۸]. این روش، که اغلب با الگوریتم‌های شاخه و کران حل می‌شود، در صنایع انرژی‌بر برای بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده کاربرد دارد و می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را تا ۵۰ درصد کاهش دهد [۴۰].

۳-۸. برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP): مقابله با پیچیدگی‌های غیرخطی در فرآیندهای حرارتی

NLP برای مسائل با توابع غیرخطی، مانند روابط ترمودینامیکی در فرآیندهای شیمیایی، طراحی شده و با روش‌هایی مانند گرادیان یا نیوتن-رافسون حل می‌شود. این رویکرد در صنایع انرژی‌بر، جایی که رفتار سیستم‌ها غیرخطی است، می‌تواند بازدهی را تا ۲۵ درصد افزایش دهد. فرم کلی NLP عبارت است از [۴۱]:

$$Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3)$$

با محدودیت‌های نامساوی $g_i(x_1, \dots, x_n) \leq 0$ برای $i=1,2,\dots,m$ و تساوی $h_j(x_1, \dots, x_n)=0$ برای $j=1,2,\dots,p$ که h, g, f می‌توانند غیرخطی باشند.

در جنرال میلز، NLP برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در خطوط تولید پیوسته، مانند فرآیندهای حرارتی، اعمال می‌شود و اتلاف انرژی را کاهش می‌دهد. مثالی واقعی در انرژی سیستم‌ها نشان می‌دهد که NLP در مدل‌سازی فرآیندهای شیمیایی، صرفه‌جویی ۱۵-۲۰ درصد ایجاد می‌کند. در صنعت فولاد ایران، NLP می‌تواند برای بهینه‌سازی دما و فشار در فرآیندهای DRI استفاده شود که وابستگی به گاز را کاهش داده و انتشار CO_2 را ۱۰-۲۰ درصد کم می‌کند [۳۶، ۳۸، ۴۲].

۴-۸. الگوریتم ژنتیک (GA): الهام‌گرفته از طبیعت برای حل مسائل پیچیده

GA، به عنوان یک روش فراابتکاری، از اصول تکامل طبیعی برای جستجوی فضای جواب استفاده می‌کند و برای مسائل غیرخطی و چندمعیاره ایده‌آل است، با پتانسیل کاهش

1. Mixed-Integer Linear Programming
2. Non-Linear Programming
3. Genetic Algorithm



مصرف انرژی تا ۳۰ درصد در سیستم‌های پیچیده. احتمال انتخاب هر جواب بر اساس میزان برازندگی آن به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود [۴۱]:

$$P_i = \frac{F(x_i)}{\sum_{k=1}^N F(x_k)} \quad (4)$$

که در آن $F(x_i)$ مقدار تابع برازندگی جواب x_i و N اندازه جمعیت است. در خطوط مونتاژ جنرال موتورز، GA ساختار تولید را بهینه می‌کند و انرژی را صرفه‌جویی می‌کند. مطالعاتی نشان می‌دهد GA در سیستم‌های انرژی صنعتی، کارایی را افزایش می‌دهد. در صنعت فولاد ایران، GA می‌تواند برای بهینه‌سازی ترکیب سوخت در کوره‌ها استفاده شود، با صرفه‌جویی ۲۰ درصد [۴۸، ۳۴].

۸-۵. الگوریتم ازدحام ذرات (PSO): هوش جمعی برای بهینه‌سازی پویا

PSO، الهام‌گرفته از رفتار پرندگان، برای مسائل پویا و چندبعدی مناسب است و در مراکز داده مانند اینتل، مصرف انرژی را تا ۲۰-۳۰ درصد کاهش می‌دهد. معادلات به‌روزرسانی [۴۴]:

$$v_i^{t+1} = w v_i^t + c_1 r_1 (p_i - x_i^t) + c_2 r_2 (g - x_i^t) \quad (5)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (6)$$

در این روابط، $x_i(t)$ موقعیت ذره i در زمان t ، $v_i(t)$ سرعت حرکت، p_i بهترین موقعیت قبلی ذره و g بهترین موقعیت یافت‌شده توسط کل جمعیت است. ضرایب c_1 ، c_2 و w ضرایب تنظیم‌کننده الگوریتم هستند و مقادیر تصادفی r_1 ، r_2 در بازه (۰، ۱) تولید می‌شوند. در اینتل، PSO برای مدیریت انرژی مراکز داده استفاده می‌شود و صرفه‌جویی ایجاد می‌کند. مثالی در داده‌سنترها نشان می‌دهد PSO انرژی را بهینه می‌کند. در صنعت فولاد ایران، PSO می‌تواند برای زمان‌بندی کوره‌ها اعمال شود، با کاهش ۱۵-۲۵ درصد مصرف گاز [۴۵، ۴۴، ۴۲].

در نهایت، این مدل‌ها نه تنها ابزارهای محاسباتی، بلکه کلید تحول دیجیتال در صنایع انرژی‌بر هستند که با ادغام در سیستم‌های واقعی، پایداری را تضمین می‌کنند.

۹. نتیجه‌گیری

این پژوهش، با بهره‌گیری از رویکرد اقتصاد مهندسی، به

کاوش عمیق راهکارهای صرفه‌جویی انرژی در صنایع انرژی‌بر پرداخته و چالش‌های ناشی از ناترازی گاز را در چارچوب تجربیات شرکت‌های بین‌المللی پیشرو مورد تحلیل قرار داده است. یافته‌ها نشان‌دهنده آن است که ادغام اصول مهندسی اقتصادی نه تنها مصرف منابع را بهینه‌سازی می‌کند، بلکه به عنوان اهرمی محوری در کنترل تورم، تقویت رشد اقتصادی و تضمین امنیت انرژی عمل می‌نماید. مطالعه موردی شرکت‌های سیمپلوت، جنرال موتورز، جنرال میلز و اینتل، همراه با بررسی بومی صنعت فولاد ایران، گواه بر این است که راهکارهای سیستماتیک (از جمله مدل‌های عددی بهینه‌سازی مانند برنامه‌ریزی خطی (LP) و الگوریتم‌های فرا ابتکاری (GA و PSO) می‌توانند شدت مصرف انرژی را تا ۳۰ درصد کاهش دهند، هزینه‌های عملیاتی را بهینه کنند و رقابت‌پذیری را ارتقا بخشند. برای نمونه، اقدامات سیمپلوت در بهینه‌سازی فرآیندهای غذایی از طریق طراحی آزمایشی (DOE) نه تنها ۱۸ درصد کاهش شدت مصرف انرژی را به ارمغان آورد، بلکه صرفه‌جویی سالانه ۴۴۸۲۵۳ دلاری را محقق ساخت که این دستاوردها فشار ناترازی گاز را کاهش داده و فضایی برای نوآوری فراهم کرد.

بر پایه گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) و داده‌های جهانی تا سال ۲۰۲۴، بخش صنعت همچنان مسئول حدود ۳۷ درصد از مصرف انرژی جهانی و بخش عمده‌ای از انتشار گازهای گلخانه‌ای است [۳]. آماري که ضرورت بازنگری فوری در الگوهای مصرف و اصلاح فرآیندهای صنعتی را برجسته می‌سازد. با این حال، موانع ساختاری همچون مقاومت سازمانی در برابر تغییرات فناورانه، کمبود سرمایه‌گذاری‌های هدفمند و فقدان استانداردهای یکپارچه صنعتی، اجرای برنامه‌های بهره‌وری انرژی را با چالش‌های جدی مواجه می‌سازد [۴]. در این زمینه، همکاری چند جانبه میان دولت، بخش خصوصی و نهادهای انرژی (مانند تجربیات موفق سیمپلوت و جنرال موتورز) به عنوان کلیدی برای غلبه بر ناترازی گاز شناسایی شد. علاوه بر این، توانمندسازی نیروی انسانی از طریق برنامه‌های آموزشی پیشرفته (نظیر «قهرمانان انرژی» در سیمپلوت) فرهنگ سازمانی را دگرگون کرده و مدیریت مصرف را به بسط‌محی نوین می‌رساند که این رویکردها در صنعت فولاد ایران نیز پتانسیل کاهش وابستگی به گاز طبیعی تا ۲۰-۳۰ درصد را داراست.

راهکارهای کلیدی استخراج‌شده از شرکت‌های مورد



- Studies, "International Energy Agency (IEA)", vol. pp. 2025.
- [3]. Energy Efficiency 2024 – Global Progress and Outlook, "International Energy Agency (IEA)", vol. pp. 2024.
- [4]. Decarbonising Energy-Intensive Industries: Electrification and Flexibility Strategies, "Fraunhofer Institute ", vol. pp. 2022.
- [5]. American Council on Energy Efficiency, 2021.
- [6]. World Economic Forum Annual Meeting 2024.
- [7]. D. Sturtevant, "Energy Efficiency: The Simplot Way", vol. pp. March 16, 2011.
- [8]. J.R. Simplot Co., "2023 J. R. Simplot Company Sustainability Summary", vol. pp. 2023.
- [9]. Energy Performance-Better Plants Data, J.R. Simplot Company, "U.S. Department of Energy, Better Buildings Initiative", vol. pp. April 2016.
- [10]. Idaho Office of Energy Resources and DOE Demonstrate the Value of Strategic Energy Management through a Pilot Project at the J.R. Simplot Company, "Idaho Governor's Office of Energy Resources", vol. pp. 2013.
- [11]. General Motors, "2015 Sustainability Report", vol. pp. 2015.
- [12]. GM Co., "GM 2023 Sustainability Report", vol. pp. 2023.
- [13]. General Mills Co., "General Mills Global Responsibility Report 2024", vol. pp. 2024.
- [14]. World Steel Association, "World Steel
- مطالعه که موفقیت آن‌ها را رقم زد، شامل روش‌های داده‌محور و آزمایشی (مانند DOE برای شناسایی فرآیندهای کم‌مصرف)، سرمایه‌گذاری استراتژیک در پروژه‌های با بازدهی بالا (با آستانه IRR ۱۵ درصد در سیمپلوت)، جایگزینی سوخت‌های فسیلی با فناوری‌های تجدیدپذیر (مانند انرژی خورشیدی در اینتل)، تقویت نیروی انسانی از طریق آموزش‌های تخصصی و هم‌راستایی با سیاست‌های تشویقی (نظیر برنامه ENERGY STAR) می‌شود. این راهکارها نه تنها مصرف انرژی را کاهش دادند، بلکه با آزادسازی منابع مالی و تقویت زنجیره ارزش، صنایع را به سمت یک چرخه توسعه پایدار هدایت کردند. ادغام مدل‌های عددی بهینه‌سازی در این راهکارها، مانند کاربرد MILP در تصمیم‌گیری‌های گسسته صنعت فولاد ایران، نوآوری را به سطح عملیاتی رسانده و پتانسیل صرفه‌جویی‌های مالی و زیست‌محیطی را دوچندان می‌کند.
- با نگاهی به افق پیش رو، صنایع انرژی‌بر برای مدیریت مؤثر ناترازی گاز و همگامی با تحولات جهانی، باید بر محورهای کلیدی زیر تمرکز کنند:
- ادغام فناوری‌های نو ظهور مانند خودروهای الکتریکی و سیستم‌های هیبریدی انرژی در زیرساخت‌های موجود که نیازمند سرمایه‌گذاری بلندمدت و همکاری‌های بین‌المللی است.
 - توسعه استانداردهای صنعتی برای اندازه‌گیری و گزارش‌دهی بهره‌وری انرژی، به‌ویژه در حوزه ایمنی، سلامت و محیط‌زیست (HSE) تا هماهنگی میان‌بخشی تقویت شود [۴۶].
 - تعمیق همکاری‌های چندجانبه میان دولت، بخش خصوصی و نهادهای جهانی مانند IEA، برای پر کردن شکاف‌های فناورانه و مالی.
 - آموزش مداوم نیروی انسانی و پرورش فرهنگ‌سازمانی مبتنی بر نوآوری، صرفه‌جویی انرژی و مدل‌های محاسباتی پیشرفته.
- مراجع:
- [1]. International Industrial Energy Efficiency Policy Case Studies, "Department for Energy Security and Net Zero", vol. pp. 2023.
- [2]. Energy Efficiency Policy Toolkit – Case

- methods, sources, and separation”, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 16, pp. 2024.
- [29]. A. Sabetghadam-Isfahani, M. Abbasi, S. Sharifi, M. Fattahi, S. Amirkhanlou, and Y. Fattahi, “Microstructure and mechanical properties of carbon nanotubes/AZ31 magnesium composite gas tungsten arc welding filler rods fabricated by powder metallurgy”, *Diamond and Related Materials*, vol. 69, pp. 160–165, 2016.
- [30]. A. Sabetghadam-Isfahani, H. Zalaghi, S. Hashempour, M. Fattahi, S. Amirkhanlou, and Y. Fattahi, “Fabrication and properties of ZrO₂/AZ31 nanocomposite fillers of gas tungsten arc welding by accumulative roll bonding”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 16, pp. 397–402, 2016.
- [31]. S. AG, “Sustainability Report”, vol. pp. 2023.
- [32]. Industrial Heat and Energy Efficiency – IDRIC Frontiers Report, “Industrial Decarbonisation Research & Innovation Centre (IDRIC)”, vol. pp. 2024.
- [33]. Energy Management in Industrial Clusters: A Systems Approach, “*Journal of Cleaner Production*”, vol. pp. 2023.
- [34]. POSCO, “Annual Sustainability Report”, vol. pp. 2023.
- [35]. I. Kimutai, P. Maina, and A. Makokha, “Energy Optimization Model Using Linear Programming for Process Industry: A Case Study of Textile Manufacturing Plant in Kenya”, vol. pp. 45–52, 2023.
- [36]. E. Arteaga-Cabrera, C. Ramírez-Márquez, E. Sánchez-Ramírez, J. G. Segovia-Hernández, O. Osorio-Mora, Association Steel Statistical Yearbook, 2010”, *World Steel Association: Brussels, Belgium*, vol. pp. 2023.
- [15]. Global Energy Statistical Yearbook, vol. pp. 2023.
- [16]. IEA, “Iron and Steel Technology Roadmap”, vol. pp. 2022.
- [17]. Ministry of Industry, “Mine and Trade of Iran, Industrial Equipment Status Report”, vol. pp. 2023.
- [18]. World Bank, “Economic Challenges in Iran”, vol. pp. 2023.
- [19]. Iran Renewable Energy Association, “Renewable Energy Potential in Iran”, vol. pp. 2023.
- [20]. Eurofer, “Sustainability in Steel Production”, vol. pp. 2023.
- [21]. Turkish Steel Producers Association, “Steel Industry Overview”, vol. pp. 2023.
- [22]. HYBRIT Initiative, “Hydrogen-Based Steelmaking”, vol. pp. 2023.
- [23]. IPCC, “Sixth Assessment Report”, vol. pp. 2023.
- [24]. POSCO, “Annual Report”, vol. pp. 2022.
- [25]. McKinsey, “The Net-Zero Steel Challenge”, vol. pp. 2022.
- [26]. JSW Group, “Sustainability Report”, vol. pp. 2023.
- [27]. Northern Lights Project, “Project Overview”, vol. pp. 2023.
- [28]. Y. Davoodbeygi, A. Sabetghadam-Isfahani, S. Allami, A. Oudi, and S. Eghtedari, “A review on biohydrogen production technology: Production





- [43]. L. V. Ramir D.T. Certeza, A. R. Purnama, A. Ahsan, J. S. C. Low, and W. F. Lu, "Review of mathematical programming models for energy-based industrial symbiosis networks", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 212, pp. 115377, 2025.
- [44]. X. Liu, G. Hou, and L. Yang, "Optimizing data center energy consumption via energy complementarity scheduling", *Energy Reports*, vol. 12, pp. 5990–5997, 2024.
- [45]. T. Djemai, P. Stolf, T. Monteil, and J.-M. Pierson, "A discrete particle swarm optimization approach for energy-efficient IoT services placement over fog infrastructures", *IEEE*, 2019.
- [46]. Integrating Energy Efficiency into HSE Systems: A Case-Based Framework, "Applied Energy", vol. pp. 2025.
- and J. A. Gómez-Salazar, "Advancing Optimization Strategies in the Food Industry: From Traditional Approaches to Multi-Objective and Technology-Integrated Solutions", *Applied Sciences*, vol. 15, pp. 3846, 2025.
- [37]. L. Wang, "Energy efficiency technologies for sustainable food processing", *Energy efficiency*, vol. 7, pp. 791–810, 2014.
- [38]. Y. Zeng, Y. Cai, G. Huang, and J. Dai, "A Review on Optimization Modeling of Energy Systems Planning and GHG Emission Mitigation under Uncertainty", *Energies*, vol. 4, pp. 1624–1656, 2011.
- [39]. O. B. Ogunmodede, "Modeling and Solving Large-Scale Optimization Problems: Case Studies in Renewable Energy and Mining", (Doctoral dissertation, Colorado School of Mines), vol. pp. 2021.
- [40]. S. Sundaramoorthy, D. Kamath, S. Nimbalkar, C. Price, T. Wenning, and J. Cresko, "Energy efficiency as a foundational technology pillar for industrial decarbonization", *Sustainability*, vol. 15, pp. 9487, 2023.
- [41]. D. Atabay, "Comparison of optimization methods for model predictive control: An application to a compressed air energy storage system", (Doctoral dissertation, Technische Universität München), vol. pp. 2018.
- [42]. B. Zhang, L. Xu, and J. Zhang, "Developing mathematical model and optimization algorithm for designing energy efficient semi-automated assembly line", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 149, pp. 106768, 2020.

Energy Optimization in Energy-Intensive Industries with a Focus on Engineering Economics: A Case Study of Productivity in International Companies

Reza Rafiei¹, Armin Sabetghadam-Isfahani², Yegane Davoodbeygi^{3*}, Seyed Mahmood Latifi⁴

1. CEO of Hormozgan Province Gas Company, Bandar Abbas, Iran
2. Instructor, Department of Safety Engineering and Technical Inspection, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
3. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
4. M. Sc, Faculty of Corrosion Engineering and Protection of Materials, Coastal Marine Campus, Amirkabir University of Technology, Bandar Abbas, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

Article History:

Received: 13 October 2025

Revised: 13 December 2025

Accepted: 26 February 2026

Keywords:

Energy Efficiency

Gas Imbalance

Energy-Intensive Industries

Sustainable Development

ABSTRACT

This article, adopting an engineering economics approach, examines energy-saving strategies in energy-intensive industries and analyzes the challenges of gas imbalance in international companies and the local context of Iran. The case study of four leading companies (Simplot, General Motors, General Mills, and Intel), along with a comparative review in Iran's steel industry, demonstrated that a combination of multilateral collaboration (government, private sector, and energy institutions), targeted investment in optimization technologies, development of specialized human resources, and numerical optimization models (such as linear programming and metaheuristic algorithms) plays a key role in reducing energy intensity by up to 30% and operational costs. For example, Simplot achieved an 18% reduction in energy intensity in food processes by employing Design of Experiments (DOE) and participating in the ENERGY STAR program, while General Motors recorded an 11% reduction in operational costs through production line optimization. The main challenge in gas imbalance is adapting energy efficiency strategies with emerging technologies (such as electric vehicles and green hydrogen) and integrating computational models into local processes like direct reduced iron (DRI) in Iran, which provides the potential to reduce dependence on natural gas by 20-30%. The findings indicate that these measures not only yield short-term financial returns (with an internal rate of return of 15%) but also contribute to sustainable industrial development through reducing carbon footprint, enhancing energy security, and applying global-local hybrid models. The results emphasize the necessity of transforming successful experiences into integrated industrial standards and incorporating them into HSE systems for efficient management of gas imbalance.

DOR: [20.1001.1.2510.1109.1404.07.21](https://doi.org/10.1001.1.2510.1109.1404.07.21)

How to cite this article

R. Rafiei, A. Sabetghadam-Isfahani, Y. Davoodbeygi, S.M. Latifi, Energy Optimization in Energy-Intensive Industries with a Focus on Engineering Economics: A Case Study of Productivity in International Companies. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2026 13(1):9-36. (https://ijge.irangi.org/article_738763.html)

* Corresponding Author.

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

Available online 21 June 2026

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

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



مدل سازی ساختاری-تفسیری پیشایندهای مدیریت منابع انسانی ناب شرکت پالایش گاز سرخون و قشم

محسن صفری^۱، زینب زارع پور^{۱*}، زیبا سالمی^۲، عیسی باخدا^۳

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

۲. شرکت پالایش گاز سرخون و قشم، مربی، بندرعباس، ایران

۳. رئیس امور پژوهش و فناوری، شرکت پالایش گاز سرخون و قشم، مربی، بندرعباس، ایران

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

مقاله علمی-پژوهشی

صفحه ۳۷ - ۵۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

چکیده

هدف این پژوهش، شناسایی و مدل سازی پیشایندهای «مدیریت منابع انسانی ناب» در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم است. این تحقیق از نظر هدف کاربردی و از نظر ماهیت، آمیخته (کیفی-کمی) می باشد. در بخش کیفی از طریق تحلیل محتوای ادبیات پژوهش و مصاحبه با ۹ نفر از خبرگان، ۲۰ عامل کلیدی شناسایی شد. در بخش کمی، این عوامل با رویکرد مدل سازی ساختاری تفسیری و تحلیل میک مک اولویت بندی شدند. یافته ها نشان داد که عوامل در ۵ سطح تعاملی قرار می گیرند. متغیرهای «رهبری خدمتگزار»، «فرهنگ ناب»، «تفکر ناب» و «ایجاد ساختار حمایتی» در سطح پنجم (زیربنایی ترین لایه) قرار گرفته و به عنوان سنگ بنای استقرار نظام ناب شناسایی شدند. در مقابل، متغیرهایی نظیر «تسهیل کار»، «کاهش تحرکات اضافی» و «انعطاف پذیری منابع انسانی» در سطح اول (دستاوردهای نهایی) جای گرفتند. تحلیل میک مک نیز تأیید کرد که اکثر عوامل ریشه ای دارای قدرت نفوذ بالا و وابستگی کم هستند. نتایج پژوهش بیانگر آن است که موفقیت در مدیریت منابع انسانی ناب در صنعت گاز، مستلزم تغییر در پارادایم های ذهنی رهبران و ایجاد زیرساخت های فرهنگی است تا در نهایت منجر به نتایج عملیاتی و بهره وری نیروی کار شود.

کلید واژه ها: مدیریت منابع انسانی ناب، تفکر ناب، صنعت گاز، مدل سازی ساختاری تفسیری، تحلیل میک مک

۱. مقدمه

در دهه های اخیر، سازمان ها با محیط هایی روبه رو هستند که به طور فزاینده ای پیچیده، پویا و رقابتی شده اند. عواملی چون جهانی شدن، تحول دیجیتال، فشارهای زیست محیطی و تغییرات سریع فناوری، سازمان ها را ناگزیر ساخته اند تا به طور مستمر در پی بهبود عملکرد، افزایش بهره وری و ارتقای اثربخشی باشند. در چنین شرایطی، ارتقای بهره وری، کاهش ضایعات و بهبود مستمر عملکرد به اولویت راهبردی بسیاری از سازمان ها تبدیل شده است [۱]. سازمان هایی که نتوانند خود را با تغییرات سریع و روندهای نوین کسب و کار تطبیق دهند، نه تنها مزیت رقابتی خود را از دست می دهند، بلکه در معرض حذف از بازار نیز قرار می گیرند.

مدیریت منابع انسانی^۱ به عنوان یکی از ارکان اصلی موفقیت سازمانی شناخته می شود. نیروی انسانی متخصص، خلاق و توانمند، عامل کلیدی در تحقق اهداف راهبردی

1. Human Resource Management (HRM)

سازمان و ایجاد ارزش پایدار برای ذی‌نفعان است. کارکنان با قابلیت یادگیری مستمر، ارتقای مهارت‌ها و سازگاری با فناوری‌های نوین، نقش مهمی در تحول سازمانی ایفا می‌کنند. پژوهش‌های علیرزاده مجد و همکاران در صنعت پتروشیمی نشان می‌دهد که راهبردهای منابع انسانی مانند چرخش شغلی و آموزش هدفمند، نقش مؤثری در ارتقای عملکرد کارکنان و افزایش انعطاف‌پذیری سازمانی دارند [۲].

پایداری منابع انسانی، به‌عنوان شاخصی از پایداری سازمانی، مستلزم بهره‌برداری مؤثر از ظرفیت‌های بالفعل و بالقوه کارکنان است. در این راستا، واحد منابع انسانی باید علاوه بر پاسخ‌گویی به نیازهای عملیاتی سازمان، نقش فعالی در توسعه، آموزش و ارتقای عملکرد ایفا کند. یکی از رویکردهای نوین در این زمینه، تلفیق اصول «فلسفه ناب» با مدیریت منابع انسانی است. این رویکرد با تمرکز بر حذف ضایعات، بهینه‌سازی فرآیندها، مشارکت کارکنان و توانمندسازی منابع انسانی، به دنبال خلق ارزش برای سازمان و ذی‌نفعان آن است. مرور نظام‌مند ادبیات توسط انتشارات امرالد^۱ نشان می‌دهد که ادغام مدیریت منابع انسانی^۲ و اصول «مدیریت ناب»^۳ نه تنها موجب بهبود بهره‌وری بلکه باعث افزایش انگیزش کارکنان، ارتقای کیفیت خدمات و کاهش مقاومت در برابر تغییرات سازمانی می‌شود [۳].

«فلسفه ناب» که ابتدا در صنعت تولید توسعه یافت، امروزه به‌عنوان یک چارچوب مدیریتی در حوزه‌های مختلف از جمله منابع انسانی، انرژی و خدمات به‌کار گرفته می‌شود. این فلسفه بر پنج اصل بنیادین تأکید دارد: تعیین ارزش از دید مشتری، شناسایی جریان ارزش، ایجاد جریان پیوسته، سیستم کششی و بهبود مستمر [۴]. در سال ۱۴۰۳ (۲۰۲۴ میلادی)، روندهای نوین در «فلسفه ناب» شامل ادغام با فناوری‌های صنعت ۴/۰ مانند هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء و تحلیل داده‌هاست که موجب تحول در فرآیندهای سازمانی شده‌اند [۵] و [۶]. همچنین، پژوهش اوراقینی و همکاران^۵ (۲۰۲۴) نشان می‌دهد که ترکیب رویکردهای ناب، چابک، تاب‌آور و پایدار در مدیریت منابع انسانی، تأثیر مثبتی بر عملکرد زیست‌محیطی و نوآوری سبز سازمان‌ها دارد [۶].

در سال‌های اخیر، نگاه به «فلسفه ناب» از تمرکز صرف بر تولید به حوزه‌های انسانی‌تر مانند منابع انسانی تغییر

یافته است. مدیریت منابع انسانی ناب نه تنها به خلق ارزش برای مشتریان بلکه به ایجاد ارزش برای کارکنان نیز توجه دارد؛ از جمله از طریق طراحی فرآیندهای کاری روان‌تر، کاهش اتلاف زمان و انرژی و ارتقای تجربه کاری افراد در سازمان [۶]. این تحول مفهومی، «تفکر ناب» را به ابزاری راهبردی برای توسعه سرمایه انسانی تبدیل کرده است.

در صنعت پتروشیمی و گاز که نقشی حیاتی در اقتصاد ملی دارد، بهره‌وری سازمانی به‌شدت وابسته به مدیریت مؤثر سرمایه انسانی است. برخلاف تصور رایج که سرمایه‌محوری این صنعت را دلیلی بر کم‌اهمیت بودن نیروی انسانی می‌داند، واقعیت آن است که فناوری‌های پیشرفته و سرمایه‌گذاری‌های سنگین بدون نیروی انسانی کارآمد، به بهره‌وری منجر نخواهند شد. باهوگونا^۶ (۲۰۲۳) در پژوهش خود بر نقش راهبردی منابع انسانی در سازمان‌های نفت و گاز تأکید کرده و نشان داده است که مدیریت منابع انسانی مؤثر می‌تواند به کاهش ریسک‌های عملیاتی، ارتقای ایمنی و افزایش انعطاف‌پذیری سازمانی منجر شود [۷].

با وجود پیشرفت‌های نظری، هنوز شکاف عمیقی در زمینه پیاده‌سازی عملیاتی «تفکر ناب» در صنایع مادر همچون صنعت گاز وجود دارد. اکثر مطالعات پیشین بر صنایع خودروسازی متمرکز بوده‌اند و الگوهای موجود لزوماً در محیط‌های پیچیده و پرخطر پالایشگاهی کارایی ندارند. نوآوری پژوهش حاضر از سه جنبه قابل بررسی است: نخست، شناسایی پیشایندهای بومی «مدیریت منابع انسانی ناب» در بافت یک شرکت پالایشگاهی (سرخون و قشم)؛ دوم، استفاده از رویکرد مدل‌سازی ساختاری-تفسیری برای کشف روابط پنهان و سلسله‌مراتبی بین این عوامل؛ و سوم، ارائه یک نقشه راه عملیاتی برای گذار از مدیریت سنتی به مدیریت بهره‌ور. این پژوهش به دنبال پاسخ به این پرسش کلیدی است که عوامل مؤثر بر استقرار مدیریت منابع انسانی ناب در این صنعت کدامند و روابط میان آن‌ها چگونه اولویت‌بندی می‌شود؟

۲. مروری بر ادبیات و پیشینه پژوهش

۲-۱. تبیین مفهوم و سیر تحول تفکر ناب^۷

«تفکر ناب» فلسفه‌ای مدیریتی است که ریشه در سیستم

1. Emerald Publishing
2. Lean Human Resource Management (Lean HRM)
3. Lean Management
4. Industry 4.0 Technologies
5. Ouragini, Ben Achour and Lakhhal
6. Bahuguna
7. Lean Thinking

تولیدی تویوتا دارد و بر «خلق ارزش حداکثری با کمترین منابع ممکن» از طریق حذف فعالیت‌های فاقد ارزش افزوده یا «ضایعات»^۱ تمرکز دارد. وومک و جونز^۲ (۱۹۹۶) تفکر ناب را روشی برای انجام کار بیشتر با بهره‌گیری از منابع کمتر (زمان، فضا، تلاش انسانی و تجهیزات) تعریف می‌کنند، در حالی که سازمان به ارائه دقیق آنچه مشتری می‌خواهد نزدیک‌تر می‌شود [۴].

بر اساس دیدگاه رادنور^۳ (۲۰۱۰)، این فلسفه امروزه از بخش تولید فراتر رفته و به‌عنوان یک پارادایم سرآمدی در تمامی فرآیندهای خدماتی و اداری پذیرفته شده است [۸]. در همین راستا، نیک‌باخ و همکاران^۴ (۲۰۱۱) و بنت^۵ (۲۰۱۴) بر این باورند که هدف نهایی تفکر ناب، ایجاد سازمانی چابک است که با بهینه‌سازی منابع فیزیکی و انسانی، بیشترین ارزش ممکن را برای مشتریان و ذینفعان خلق نماید [۱۶، ۱۷]. در واقع این رویکرد تنها مجموعه‌ای از ابزارها نیست، بلکه یک نظام فکری است که بر حذف سامانمند ضایعات هشت‌گانه (تولید بیش از حد، انتظار، حمل‌ونقل، فرآیند اضافی، موجودی، حرکت، نقص و استعدادهای بلااستفاده) استوار است.

۲-۲. مدیریت منابع انسانی ناب

«مدیریت منابع انسانی ناب»، انطباق فلسفه ناب با استراتژی‌ها و عملکردهای حوزه سرمایه انسانی است. بیولی و هاو^۶ (۲۰۱۳) این مفهوم را به‌عنوان «طراحی سیستم‌های کاری با عملکرد بالا که بر توانمندسازی کارکنان برای شناسایی و حذف ضایعات در فرآیندهای کاری تمرکز دارد» تعریف کرده‌اند و معتقدند موفقیت ابزارهای فنی ناب، در گرو تغییر نگرش و مشارکت فعال کارکنان است [۱۰].

مدیریت منابع انسانی ناب به دنبال شناسایی و حذف «ضایعات انسانی» است. مارتینز و بوناویا^۷ (۲۰۱۵) در پژوهشی جامع، هفت نوع ضایعه را در این حوزه شناسایی کردند

که برجسته‌ترین آن‌ها «عدم بهره‌گیری از هوش، استعداد و خلاقیت کارکنان» است؛ وضعیتی که در آن تخصص نیروی کار به دلیل فرآیندهای صلب سازمانی نادیده گرفته می‌شود [۱۱]. تحقق این رویکرد مستلزم تغییرات ساختاری است؛ چنانکه بوناویا و مارین^۸ (۲۰۰۶) تأکید دارند پیاده‌سازی مدیریت ناب مستلزم بازنگری اساسی در سیستم‌های سنتی پاداش و ارزیابی عملکرد است تا با فرهنگ بهبود مستمر همسو شود [۱۲]. در لایه عملیاتی نیز، تیرکل و اشمن^۹ (۲۰۱۸) نشان دادند که تفکر ناب با کاهش بروکراسی‌های زائد اداری، تمرکز نیروی انسانی را بر فعالیت‌های ارزش‌افزا معطوف کرده و از اتلاف پتانسیل‌های فکری جلوگیری می‌کند [۱۳].

۳-۲. پیشینه پژوهش‌های تجربی

مطالعات متعددی در سطح داخلی و بین‌المللی به بررسی ابعاد مدیریت ناب پرداخته‌اند. در حوزه صنایع استراتژیک، باهوگونا^{۱۰} (۲۰۲۳) نشان داد که مدیریت منابع انسانی ناب در صنعت نفت و گاز با ارتقای ایمنی و کاهش ریسک‌های عملیاتی پیوندی ناگسستنی دارد [۷]. همچنین، اوراقینی و همکاران^{۱۱} (۲۰۲۴) بر نقش این رویکرد در تحقق نوآوری سبز تأکید کردند [۶]. مطالعات مدل‌سازی توسط سابو و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۲) و تمیز و همکاران^{۱۳} (۲۰۲۱) نیز نشان داد که «رهبری ناب» و «فرهنگ سازمانی» سنگ بنای موفقیت این سیستم‌ها در صنایع پیچیده هستند [۱۴، ۱۵].

در فضای پژوهشی ایران، علیزاده مجد و همکاران (۱۴۰۱) در صنعت پتروشیمی، آموزش هدفمند و چرخش شغلی را محرک‌های اصلی بهره‌وری دانستند [۲]. همچنین یافته‌های باقری و همکاران (۱۴۰۰) و محمدی و همکاران (۱۳۹۹) نشان داد که بین حذف ضایعات فرآیندی و چابکی منابع انسانی در سازمان‌های داخلی رابطه مستقیم و معناداری وجود دارد [۱۸، ۱۹]. خلاصه این پژوهش‌ها در (جدول ۱) ارائه شده است.

1. Muda
2. Womack & Jones
3. Radnor
4. Nickbach et al.
5. Bennett
6. Bewley & Howe
7. Martinez & Bonavia
8. Bonavia & Marin
9. Tirkel & Ashman
10. Bahuguna
11. Oraquini et al
12. Sabu et al.
13. Tamiz et al



جدول ۱. واکاوی تحلیلی پژوهش‌های مرتبط

ردیف	نویسندگان	سال	یافته‌ها و نتایج کلیدی پژوهش
پژوهش‌های خارجی			
۱	اوراقینی و همکاران [۶]	۲۰۲۴	اثبات اینکه ادغام تفکر ناب و چابک ^۱ نه تنها هزینه‌ها را کاهش می‌دهد، بلکه با بهینه‌سازی مصرف انرژی، منجر به ارتقای عملکرد زیست‌محیطی و تسهیل نوآوری‌های سبز در سازمان‌های تولیدی می‌گردد.
۲	باهوگونا [۷]	۲۰۲۳	شناسایی رابطه مستقیم میان مؤلفه‌های منابع انسانی ناب (مانند آموزش چندگانه و مشارکت) با کاهش خطاهای انسانی؛ یافته‌ها نشان داد این رویکرد ریسک‌های عملیاتی را به شدت کاهش و سطح ایمنی ^۲ در صنعت نفت را ارتقا می‌دهد.
۳	سابو و همکاران [۱۴]	۲۰۲۲	اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی ناب با استفاده از مدل‌سازی ساختاری؛ این پژوهش نشان داد که «فرهنگ‌سازمانی صلب» بزرگترین مانع و «تعهد مدیریت ارشد» کلیدی‌ترین پیشران برای استقرار موفق زنجیره ارزش ناب است.
۴	تمیز و همکاران [۱۵]	۲۰۲۱	بررسی اثرات رهبری ناب بر انگیزش کارکنان؛ نتایج نشان داد که مدیران با سبک رهبری ناب، از طریق شفاف‌سازی فرآیندها و حذف تبعیض در پاداش‌ها، پیوند میان سیستم‌های جبران خدمات و بهره‌وری را تقویت می‌کنند.
۵	تیرکل و اشمن [۱۳]	۲۰۱۸	تحلیل ضایعات در فرآیندهای اداری؛ یافته‌ها حاکی از آن بود که بروکراسی زائد و تکرار فعالیت‌ها در بخش منابع انسانی مانع اصلی تمرکز کارکنان بر وظایف تخصصی است و ناب‌سازی این فرآیندها زمان چرخه اداری را ۴۰ درصد کاهش می‌دهد.
۶	مارتینز و بوناویا [۱۱]	۲۰۱۵	تدوین چارچوب ضایعات انسانی در سازمان؛ یافته اصلی پژوهش بر این استوار بود که نادیده گرفتن خلاقیت، عدم تفویض اختیار و جایگذاری نامناسب کارکنان در مشاغل، پرهزینه‌ترین نوع ضایعات در نظام‌های مدیریتی مدرن محسوب می‌شود.
۷	بیولی و هاو [۱۰]	۲۰۱۳	تبیین ضرورت همسویی استراتژیک؛ این مطالعه نشان داد که بدون تغییر در زیرساخت‌های منابع انسانی (نظیر معیارهای استخدام و آموزش)، ابزارهای فنی ناب نظیر تولید به‌موقع ^۳ در بلندمدت شکست خواهند خورد و مشارکت کارکنان شرط بقای سیستم است.
۸	نیک‌باخ و همکاران [۱۶]	۲۰۱۱	ارائه مدل خلق ارزش در سازمان‌های خدماتی؛ یافته‌ها نشان داد که با حذف فعالیت‌های موازی و بازنگری در شرح وظایف کارکنان، می‌توان بدون افزایش هزینه‌های پرسنلی، رضایت مشتری نهایی را به‌طور معناداری بهبود بخشید.
۹	رادنور [۸]	۲۰۱۰	ارزیابی قابلیت انتقال اصول ناب به بخش عمومی؛ این پژوهش ثابت کرد که مفاهیمی مانند «کایزن» و «تقسیم‌برداری جریان ارزش» در محیط‌های اداری به‌اندازه خط تولید در کاهش زمان پاسخگویی به ارباب‌رجوع مؤثر هستند.
۱۰	بوناویا و مارین [۱۲]	۲۰۰۶	شناسایی تضاد میان ارزیابی عملکرد سنتی و کار تیمی؛ یافته‌ها نشان داد که در محیط‌های ناب، پاداش‌ها باید از حالت فردی به سمت پاداش‌های گروهی و مبتنی بر بهبود مستمر فرآیندها سوق پیدا کنند.
پژوهش‌های خارجی			
۱۱	علیزاده مجد و همکاران [۲]	۱۴۰۱	تحلیل بهره‌وری در صنعت پتروشیمی ایران؛ نتایج نشان داد که آموزش‌های تخصصی و چرخش شغلی ^۴ به‌عنوان مؤلفه‌های ناب، بیشترین تأثیر را بر کاهش فرسودگی شغلی و افزایش کارایی نیروی انسانی دارند.
۱۲	باقری و همکاران [۱۸]	۱۴۰۰	بررسی رابطه ناب‌سازی و چابکی؛ یافته‌های این تحقیق در سازمان‌های ایرانی تأیید کرد که با حذف گلوگاه‌های فرآیندی، سرعت پاسخگویی و انعطاف‌پذیری کارکنان در مواجهه با تغییرات محیطی به‌طور معناداری افزایش می‌یابد.
۱۳	محمدی و همکاران [۱۹]	۱۳۹۹	شناسایی پیش‌نیازهای بومی؛ این مطالعه تأکید کرد که در صنایع ایران، «اعتمادسازی میان مدیریت و کارکنان» و «اصلاح ساختار سازمانی از هرمی به تخت» حیاتی‌ترین عوامل برای پذیرش تفکر ناب هستند.

1. Leagility
2. HSE
3. Just-In-Time (JIT)
4. Job Rotation

بنابراین سؤالات پژوهش عبارتند از:

- عوامل مؤثر بر مدیریت منابع انسانی ناب در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم کدامند؟
- الگوی روابط میان عوامل شناسایی شده در مدیریت منابع انسانی ناب به چه صورت است؟
- عوامل شناسایی شده دارای چه نقشی (نفوذ یا وابستگی) در مدل طراحی شده هستند؟

۳. روش شناسی پژوهش

تحقیق حاضر از لحاظ هدف، کاربردی و از لحاظ نحوه گردآوری اطلاعات، توصیفی-پیمایشی است. این پژوهش با رویکرد آمیخته (کیفی-کمی) انجام شده است. در بخش کیفی، شناسایی و بومی سازی عوامل با استفاده از تحلیل محتوا و پنل خبرگان صورت گرفت و در بخش کمی، روابط ساختاری میان عوامل با استفاده از روش مدل سازی ساختاری-تفسیری (ISM) تبیین گردید.

۳-۱. مرحله شناسایی و نهایی سازی عوامل

فرآیند شناسایی عوامل مؤثر بر مدیریت منابع انسانی ناب در این پژوهش طی یک رویکرد دو مرحله ای انجام شد. ابتدا با بررسی نظام مند ادبیات و پیشینه پژوهش (مندرج در جدول ۱)، کدهای اولیه استخراج گردید. سپس برای تطبیق این شاخص ها با مقتضیات صنعت گاز و تکمیل لیست عوامل، با خبرگان شرکت پالایش گاز سرخون و قشم مصاحبه های نیمه ساختار یافته انجام شد. در این مرحله، از روش کدگذاری (باز، محوری و گزینشی) برای تلخیص و دسته بندی داده های حاصل از ادبیات و مصاحبه ها استفاده شد که در نهایت منجر به شناسایی ۲۰ عامل کلیدی گردید.

۳-۲. پنل خبرگان و اشباع نظری

خبرگان مشارکت کننده در این پژوهش شامل ۹ نفر از مدیران و کارشناسان ارشد حوزه منابع انسانی بودند که به روش نمونه گیری هدفمند انتخاب شدند. ملاک انتخاب این افراد، داشتن تخصص علمی، تحصیلات مرتبط و حداقل ۱۵ سال سابقه اجرایی در صنعت گاز بود. فرآیند مصاحبه با خبرگان تا مرحله اشباع نظری^۱ ادامه یافت؛ به طوری که از مصاحبه هفتم به بعد، عامل جدیدی شناسایی نگردید و با انجام دو مصاحبه تکمیلی (نفر هشتم و نهم) و اطمینان از کفایت داده ها، لیست نهایی ۲۰ عامل تأیید شد.

۳-۳. مرحله مدل سازی ساختاری-تفسیری (ISM)

پس از نهایی شدن ۲۰ عامل در مرحله کیفی، ابزار سنجش

مرحله کمی (پرسشنامه ماتریس خودسازگار داخلی) طراحی شد. در این مرحله، پرسشنامه در اختیار ۲۵ نفر از مدیران و کارشناسان ارشد شرکت (شامل بخش های خدمات رفاهی، آموزش و برنامه ریزی و اداری) قرار گرفت که به روش سرشماری انتخاب شده بودند. برای تجمیع نظرات و تشکیل ماتریس دستیابی اولیه، از روش مد فراوانی استفاده شد. سپس با استفاده از نرم افزار متلب^۲، ماتریس دستیابی نهایی از طریق اعمال رابطه تسری و به توان رساندن ماتریس تا رسیدن به حالت پایدار استخراج گردید. در نهایت، سطح بندی متغیرها و خوشه بندی آن ها بر اساس قدرت نفوذ و وابستگی به روش تحلیل میک مک^۳ انجام پذیرفت.

(جدول ۲) نتایج حاصل از مطالعات محققین و مصاحبه با خبرگان می باشد.

جدول ۲. عوامل مؤثر در منابع انسانی ناب در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم (یافته های محقق)

ردیف	نماد	مؤلفه ها
۱	A1	رهبری خدمتگزار
۲	A2	ایجاد ساختار حمایتی
۳	A3	توسعه فرهنگ ناب
۴	A4	ادغام مدیریت ناب در تصمیم های استعدادیابی
۵	A5	گوش دادن به صدای کارکنان
۶	A6	پاداش مبتنی بر عملکرد ناب
۷	A7	تسهیل کار
۸	A8	آموزش مفاهیم ناب به نیروی انسانی
۹	A9	داشتن تفکر ناب
۱۰	A10	سیستم کاری تیم محور
۱۱	A11	توسعه مسیر شغلی و توانمندسازی مهارت های ناب کارکنان
۱۲	A12	ابتکار عمل و نوآوری در زمینه بهبود فرآیندهای ناب
۱۳	A13	توانایی پژوهش و حل مسئله
۱۴	A14	ارائه و روشن سازی تکالیف درست در جهت کاهش ضایعات
۱۵	A15	فرآیندهای کاری استاندارد
۱۶	A16	کاهش تحرکات اضافی کارکنان
۱۷	A17	ابزار مناسب برای اندازه گیری نتایج
۱۸	A18	انطباق و سازگاری نیروی انسانی
۱۹	A19	مدیریت مشارکتی و تقویت همکاری کارکنان
۲۰	A20	انعطاف پذیری منابع انسانی

1. Theoretical Saturation
2. Matlab
3. MICMAC



بر اساس عوامل ۲۰ گانه استخراج شده در (جدول ۲)، پرسشنامه ماتریس خودسازگار داخلی^۱ طراحی گردید. این ابزار به منظور مقایسه زوجی عوامل از حیث اثرگذاری و اثرپذیری مورد استفاده قرار گرفت.

روایی و پایایی: به منظور تضمین کیفیت و اعتبار ابزار پژوهش، از شاخص‌های جایگزین در تحقیقات آمیخته استفاده شد. جهت سنجش روایی محتوایی و ظاهری، پرسشنامه در اختیار سه تن از اساتید صاحب نظر رشته مدیریت دانشگاه هرمزگان قرار گرفت و پس از اعمال اصلاحات جزئی در عبارات، مورد تأیید نهایی قرار گرفت. برای تعیین قابلیت اعتماد^۲ یا پایایی، از روش بازآزمایی و مقایسه نظرات دو پژوهشگر استفاده شد. بدین منظور، کدهای استخراج شده

در دو بازه زمانی متفاوت توسط پژوهشگران با یکدیگر تطبیق داده شد که وجود همسویی بالای ۹۰ درصد، تأییدکننده پایایی فرآیند شناسایی عوامل بود.

جامعه و نمونه آماری: جامعه آماری بخش کمی پژوهش را کلیه مدیران و کارشناسان حوزه منابع انسانی شرکت پالایش گاز سرخون و قشم تشکیل دادند. با توجه به تخصصی بودن موضوع و محدودیت در تعداد افراد واجد شرایط، از روش سرشماری استفاده شد و پرسشنامه در اختیار تمامی ۲۵ نفر از متخصصان شاغل در بخش‌های خدمات رفاهی (۸ نفر)، خدمات کارکنان (۷ نفر)، آموزش و برنامه‌ریزی (۶ نفر) و اداری (۴ نفر) قرار گرفت. ویژگی‌های جمعیت‌شناختی این افراد در (جدول ۳) ارائه شده است:

جدول ۳. مشخصات جمعیت‌شناختی نمونه تحقیق

مشخصات جمعیت‌شناختی	دامنه متغیر	فراوانی	درصد فراوانی
جنسیت	مرد	۲۱	۸۴
	زن	۴	۱۶
سن	۳۵-۴۵	۸	۳۲
	۴۵-۵۵	۱۲	۴۸
	بیش از ۵۵ سال	۵	۲۰
تحصیلات	فوق دیپلم	۳	۱۲
	لیسانس	۱۵	۶۰
	فوق لیسانس	۷	۲۸

۴. یافته‌های پژوهش

پس از جمع‌آوری پرسشنامه‌های مقایسات زوجی از ۲۵ خبره و متخصص شرکت پالایش گاز سرخون و قشم، داده‌ها در نرم‌افزار Excel تجمیع گردید. جهت دستیابی به یک ماتریس واحد، از روش «مد (نما)» استفاده شد. در این روش، برای هر درایه، گزینه‌ای که بیشترین فراوانی را در میان نظرات خبرگان داشت، به عنوان مبنای تشکیل ماتریس دستیابی اولیه لحاظ گردید. ماتریس حاصل در (جدول ۴) ارائه شده است.

برای سطح‌بندی و طراحی مدل تحقیق از روش مدل‌سازی تفسیری- ساختاری استفاده شد. این روش به منظور شناسایی و نشان دادن روابط بین اجزای مختلف که ممکن است روابط پیچیده‌ای داشته باشند، به کار می‌رود. یکی از اصلی‌ترین منطق‌های این روش آن می‌باشد که همواره عناصری که در یک سیستم اثرگذاری بیشتری بر سایر عناصر دارند از اهمیت بالاتری برخوردارند.

1. SSIM
2. Reliability

جدول ۴. ماتریس دسترسی اولیه

گویه‌ها	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20
A1	.	.	.	.	.	.	۱	.	.	۱	۱	.	۱	۱	۱	۱	.	.	.	.
A2	.	.	.	.	.	۱	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A4	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A5	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A6	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A7	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A8	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A9	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A11	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A12	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A13	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A14	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A15	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A16	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A17	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A18	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A19	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
A20	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

آن تا حصول حالت پایداری ($M^k = M^{k+1}$) ادامه یافت. با اعمال این فرآیند، ماتریس دستیابی نهایی که دارای سازگاری درونی کامل است، استخراج گردید. لازم به ذکر است که در این مرحله، تمامی درایه‌های قطر اصلی برابر با یک (۱) لحاظ شدند که نشان‌دهنده اثرگذاری هر متغیر بر خودش در یک سیستم پویا است.

پس از تشکیل ماتریس دستیابی اولیه، به منظور اطمینان از برقراری روابط غیرمستقیم میان عوامل، ویژگی تعدی یا تسری^۱ مورد بررسی قرار گرفت. طبق این منطق ریاضی، اگر عامل A بر B و عامل B بر C اثرگذار باشد، باید رابطه اثرگذاری A بر C نیز در ماتریس لحاظ گردد. بدین منظور، با استفاده از نرم‌افزار متلب، ماتریس دستیابی اولیه با ماتریس همانی^۲ (I) جمع شده و فرآیند توان‌رسانی

1. Transitivity
2. Identity Matrix



جدول ۵. ماتریس دسترسی نهایی (سازگار شده)

گویه‌ها	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	قدرت نفوذ
A1	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۶
A2	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۹
A3	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۶
A4	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱۱
A5	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۵
A6	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۸
A7	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
A8	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۵
A9	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۶
A10	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۶
A11	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۸
A12	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۶
A13	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲
A14	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۵
A15	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۸
A16	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۳
A17	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۵
A18	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۳
A19	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۵
A19	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۳
میزان وابستگی	۱	۱	۱	۱	۸	۱۳	۱۷	۸	۱	۱۱	۱۳	۱۱	۱۴	۸	۱۳	۱۸	۸	۱۸	۸	۱۸	۱۸

خروجی و مشترک آن‌ها کاملاً یکسان باشد، در بالاترین سطح سلسله‌مراتب قرار می‌گیرند. این متغیرها به‌عنوان خروجی‌های سیستم عمل کرده و در تکرارهای بعدی از ماتریس حذف می‌شوند تا سطوح پایین‌تر مشخص گردند. مطابق با جداول استخراج شده، پیشایندهای مدیریت منابع انسانی ناب در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم در ۵ سطح طبقه‌بندی شدند.

پس از دستیابی به ماتریس نهایی، گام بعدی تکرار مرحله سطح‌بندی^۱ است. بدین منظور، برای هر متغیر سه مجموعه شناسایی شد: مجموعه دستیابی (خروجی) که شامل خود متغیر و متغیرهایی است که از آن تأثیر می‌پذیرند؛ مجموعه ورودی که شامل خود متغیر و متغیرهایی است که بر آن تأثیر می‌گذارند؛ و در نهایت مجموعه مشترک. طبق منطق مدل‌سازی ساختاری-تفسیری، متغیرهایی که مجموعه

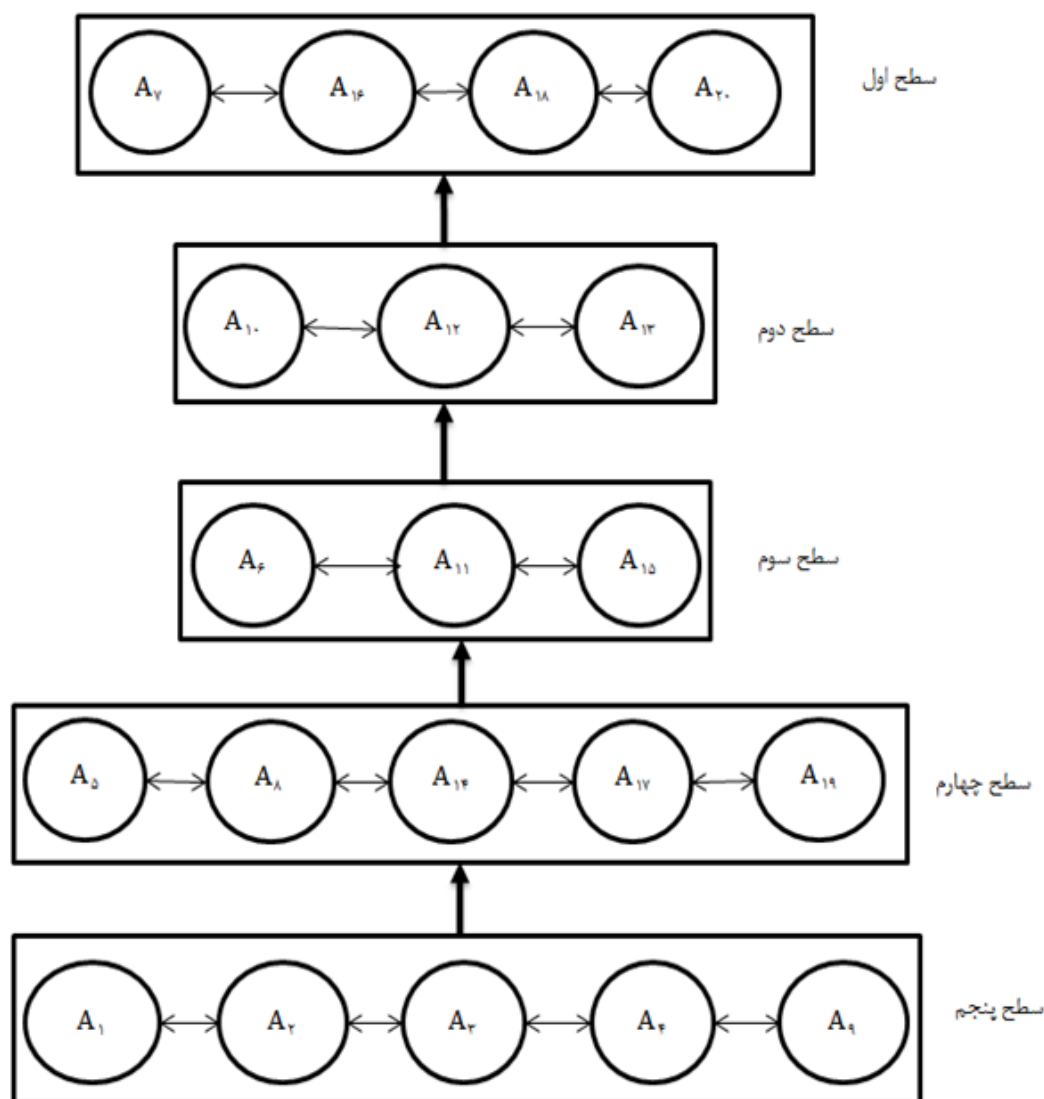
1. Level Partitioning

جدول ۶. سطح‌بندی متغیرهای تحقیق

متغیرها	مجموعه خروجی	مجموعه ورودی	مجموعه مشترک	سطح
A1	۱۵-۱۴-۱۳-۱۲-۱۱-۱۰-۸-۷-۶-۵-۱	۱	A1	سطح پنجم
A2	۲۰-۱۹-۱۸-۱۷-۱۶	۲	A2	سطح پنجم
A3	۱۶-۱۵-۱۴-۱۳-۱۲-۱۱-۱۰-۸-۷-۶-۵-۳	۳	A3	سطح پنجم
A4	۲۰-۱۹-۱۸-۱۷	۴	A4	سطح پنجم
A5	۱۶-۱۵-۱۴-۱۳-۱۲-۱۱-۱۰-۸-۷-۶-۵	۱۹-۱۷-۱۴-۹-۸-۵-۳-۱	A5-A8-A14-A17-A19	سطح چهارم
A6	۲۰-۱۸-۱۶-۱۵-۱۳-۱۱-۷-۶	۱۹-۱۷-۱۵-۱۴-۱۱-۹-۸-۶-۵-۴-۳-۲-۱	A6-A11-A15	سطح سوم
A7	۷	۱۳-۱۲-۱۱-۱۰-۹-۸-۷-۶-۵-۴-۳-۲-۱	A7	سطح اول
A8	۱۶-۱۵-۱۴-۱۳-۱۲-۱۱-۱۰-۸-۷-۶-۵	۱۹-۱۷-۱۴-۹-۸-۵-۳-۱	A5-A8-A9-A14-A17-A19	سطح چهارم
A9	۱۶-۱۵-۱۴-۱۳-۱۲-۱۱-۱۰-۹-۸-۷-۶-۵	۲۰-۱۹-۱۸-۱۷	A9	سطح پنجم
A10	۲۰-۱۸-۱۶-۱۲-۱۰-۷	۱۹-۱۷-۱۴-۱۲-۱۰-۹-۸-۵-۴-۳-۱	A10-A12	سطح دوم
A11	۲۰-۱۸-۱۶-۱۵-۱۳-۱۱-۷-۶	۱۹-۱۷-۱۵-۱۴-۱۱-۹-۸-۶-۵-۴-۳-۲-۱	A6-A11-A15	سطح سوم
A12	۲۰-۱۸-۱۶-۱۲-۱۰-۷	۱۹-۱۷-۱۴-۱۲-۱۰-۹-۸-۵-۴-۳-۱	A10-A12	سطح دوم
A13	۱۳-۷	۱۵-۱۴-۱۳-۱۱-۹-۸-۶-۵-۴-۳-۲-۱	A13	سطح دوم
A14	۱۶-۱۵-۱۴-۱۳-۱۲-۱۱-۱۰-۸-۷-۶-۵	۱۹-۱۷-۱۴-۹-۸-۵-۳-۱	A5-A8-A14-A17-A19	سطح چهارم
A15	۲۰-۱۹-۱۸-۱۷	۱۹-۱۷-۱۵-۱۴-۱۱-۹-۸-۶-۵-۴-۳-۲-۱	A6-A11-A15	سطح سوم
A16	۲۰-۱۸-۱۶	۱۵-۱۴-۱۲-۱۱-۱۰-۹-۸-۶-۵-۴-۳-۲-۱	A16-A18-A20	سطح اول
A17	۱۶-۱۵-۱۴-۱۳-۱۲-۱۱-۱۰-۸-۷-۶-۵	۱۹-۱۷-۱۴-۹-۸-۵-۳-۱	A5-A8-A14-A17-A19	سطح چهارم
A18	۲۰-۱۸-۱۶	۱۵-۱۴-۱۲-۱۱-۱۰-۹-۸-۶-۵-۴-۳-۲-۱	A16-A18-A20	سطح اول
A19	۱۶-۱۵-۱۴-۱۳-۱۲-۱۱-۱۰-۸-۷-۶-۵	۱۹-۱۷-۱۴-۹-۸-۵-۳-۱	A5-A8-A14-A17-A19	سطح چهارم
A20	۲۰-۱۸-۱۶	۱۴-۱۲-۱۱-۱۰-۹-۸-۶-۵-۴-۳-۲-۱	A16-A18-A20	سطح اول

تفسیر نتایج حاصل از (جدول ۶) نشان می‌دهد که پیشایندهای مدیریت منابع انسانی ناب در شرکت پالایش گاز در ۵ سطح متوالی قرار گرفته‌اند. طبق منطق مدل‌سازی ساختاری-تفسیری، سطح اول (A7, A16, A18, A20) به‌عنوان اثر پذیرترین لایه و خروجی نهایی مدل شناخته می‌شود؛ اما از منظر استراتژیک، متغیرهای سطح پنجم (شامل A1, A2, A3, A4, A9) حائز اهمیت حیاتی هستند؛ چرا که این عوامل به‌عنوان سنگ بنا و محرک‌های اصلی^۱ سیستم عمل می‌کنند. قرارگیری «رهبری خدمتگزار» و «تفکر ناب» در این سطح ریشه‌ای، بیانگر این واقعیت است که برای تحقق نتایجی همچون انعطاف‌پذیری و تسهیل کار (در سطوح بالاتر)، مدیریت ارشد سازمان باید ابتدا تغییرات را از لایه‌های زیرساختی و پارادایم‌های ذهنی آغاز نماید.

1. Driving Factors



شکل ۱. مدل ISM برای عوامل مؤثر بر مدیریت منابع انسانی ناب در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم

فیزیکی تمرکز کنند، بلکه باید تغییر را از «فلسفه مدیریت» آغاز نمایند. در لایه‌های میانی (سطوح ۲، ۳ و ۴)، متغیرهایی نظیر سیستم کاری تیم‌محور و پاداش مبتنی بر عملکرد ناب قرار دارند که نقش واسطه یا انتقال‌دهنده را ایفا کرده و قدرت نفوذ لایه‌های زیرین را به لایه‌های عملیاتی منتقل می‌کنند. در نهایت، متغیرهای سطح اول (مانند انعطاف‌پذیری و تسهیل کار) قرار دارند که به‌عنوان نتایج و پیامدهای^۲ نهایی سیستم تلقی می‌شوند. هرگونه ناپایداری در لایه‌های زیرین، به‌طور مستقیم بر کیفیت خروجی‌ها در سطح اول اثر منفی خواهد گذاشت.

(شکل ۱) خروجی نهایی مدل‌سازی ساختاری-تفسیری پیشاپندهای مدیریت منابع انسانی ناب را نشان می‌دهد. این مدل زنجیره علی متغیرها را از لایه‌های ذهنی و زیرساختی تا نتایج عملیاتی ترسیم می‌کند. همان‌طور که در مدل مشاهده می‌شود، روابط از سطوح پایین به سمت بالا جریان دارند.

متغیرهای سطح پنجم شامل رهبری خدمتگزار، ایجاد ساختار حمایتی، فرهنگ ناب و تفکر ناب، به‌عنوان متغیرهای کلیدی و نفوذگذار^۱ عمل می‌کنند. این بدان معناست که مدیران شرکت پالایش گاز سرخون و قشم برای استقرار موفق نظام ناب، نباید صرفاً بر ابزارهای

1. Key Driving Factors
2. Outcomes



متغیرهای مستقل										متغیرهای ارتباطی									
۲۰																			
۱۹																			
۱۸																			
۱۷																			
۱۶																			
۱۵																			
۱۴																			
۱۳																			
۱۲																			
۱۱																			
۱۰																			
۹																			
۸																			
۷																			
۶																			
۵																			
۴																			
۳																			
۲																			
۱																			
متغیرهای خودگردان										متغیرهای وابسته									
۲۰																			
۱۹																			
۱۸																			
۱۷																			
۱۶																			
۱۵																			
۱۴																			
۱۳																			
۱۲																			
۱۱																			
۱۰																			
۹																			
۸																			
۷																			
۶																			
۵																			
۴																			
۳																			
۲																			
۱																			
میزان وابستگی																			
۲۰																			
۱۹																			
۱۸																			
۱۷																			
۱۶																			
۱۵																			
۱۴																			
۱۳																			
۱۲																			
۱۱																			
۱۰																			
۹																			
۸																			
۷																			
۶																			
۵																			
۴																			
۳																			
۲																			
۱																			

شکل ۲. شناسایی و دسته‌بندی متغیرها بر اساس قدرت نفوذ و میزان وابستگی

- اکثر متغیرهای ریشه‌ای (نظیر رهبری خدمتگزار (A1) با قدرت نفوذ ۱۶ و وابستگی ۱) در ناحیه متغیرهای مستقل قرار گرفته‌اند. این امر تأیید می‌کند که تحول ناب در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم، تابعی از محرک‌های زیربنایی و مدیریتی است.
- عدم حضور هیچ‌گونه متغیری در ناحیه متغیرهای خودگردان، نشان‌دهنده انسجام بالای مدل و ارتباط مستقیم تمامی ۲۰ پیشایند شناسایی شده با اهداف مدیریت منابع انسانی ناب در سازمان است.
- متغیرهایی که در ناحیه ارتباطی قرار دارند، به‌عنوان عوامل ناپایدار شناخته می‌شوند؛ به این معنا که هرگونه اقدام اصلاحی روی آن‌ها (مانند بهبود پاداش‌های ناب (A6) می‌تواند به‌صورت زنجیره‌ای بر سایر بخش‌های سیستم اثر بگذارد.

هدف از تجزیه و تحلیل میک‌مک (شکل ۲)، شناسایی و دسته‌بندی متغیرها بر اساس قدرت نفوذ^۱ و میزان وابستگی^۲ است. در این تحلیل، متغیرها به چهار گروه اصلی تقسیم می‌شوند: ۱. متغیرهای خودگردان: دارای قدرت نفوذ و وابستگی ضعیف که عموماً از سیستم جدا هستند. ۲. متغیرهای وابسته: دارای نفوذ کم اما وابستگی شدید. ۳. متغیرهای ارتباطی (پیوندی): دارای نفوذ و وابستگی بسیار زیاد که هر تغییری در آن‌ها کل سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ۴. متغیرهای مستقل: دارای نفوذ قوی اما وابستگی ضعیف که محرک‌های اصلی سیستم محسوب می‌شوند.

مطابق با نتایج حاصل از قدرت نفوذ و وابستگی (مستخرج از جدول ۵)، متغیرهای تحقیق در (شکل ۲) جایابی شدند. تحلیل نهایی نشان می‌دهد:

1. Driving Power
2. Dependence

بنابراین، برای پیاده‌سازی موفق این الگو، اولویت استراتژیک با متغیرهای مستقل است که قدرت نفوذ بالایی در جهت‌دهی به سایر عوامل شناسایی شده در مدیریت منابع انسانی ناب دارند.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر باهدف شناسایی و سطح‌بندی پیشایندهای استقرار «مدیریت منابع انسانی ناب» در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم به انجام رسید. ضرورت این مطالعه از آنجا ناشی می‌شد که گذار به سمت مدیریت ناب در صنایع استراتژیک، نیازمند شناسایی دقیق اولویت‌ها و درک روابط متقابل میان متغیرهای متعدد سازمانی است. در این راستا، با استفاده از رویکرد آمیخته (کیفی-کمی)، ابتدا از طریق تحلیل محتوای ادبیات تحقیق و مصاحبه با خبرگان، ۲۰ عامل کلیدی در سه حوزه فردی، سازمانی و فناورانه شناسایی شد و سپس با استفاده از روش مدل‌سازی ساختاری-تفسیری و تحلیل میک‌مک، روابط سلسله‌مراتبی آن‌ها تبیین گردید.

یافته‌های حاصل از مدل‌سازی ساختاری-تفسیری نشان داد که ۲۰ پیشایند شناسایی شده در ۵ سطح تعاملی قرار می‌گیرند. متغیرهای سطح پنجم شامل «رهبری خدمتگزار، فرهنگ ناب، تفکر ناب، ایجاد ساختار حمایتی و ادغام مدیریت ناب در استعدادیابی» به‌عنوان سنگ بنای مدل شناسایی شدند. این نتیجه همسو با مبانی نظری (مانند مطالعات ومک و جونز) است که معتقدند ناب‌سازی سازمان بدون تغییر در پارادایم‌های ذهنی رهبران و فرهنگ سازمانی غیرممکن است. در واقع، شرکت پالایش گاز سرخون و قشم برای دستیابی به بهره‌وری، ابتدا باید زیرساخت‌های فکری و حمایتی را تقویت کند.

در لایه‌های میانی (سطوح ۲، ۳ و ۴)، متغیرهایی نظیر سیستم کاری تیم‌محور، پاداش مبتنی بر عملکرد ناب و توانمندسازی کارکنان قرار دارند. این عوامل نقش کاتالیزور را ایفا کرده و قدرت نفوذ لایه‌های ریشه‌ای را به خروجی‌های عملیاتی منتقل می‌کنند. درنهایت، متغیرهای سطح اول نظیر «انعطاف‌پذیری منابع انسانی و تسهیل کار» به‌عنوان پیامدهای نهایی مدل ظاهر شدند که نشان‌دهنده ثمره استقرار نظام ناب در مدیریت منابع انسانی است.

تحلیل میک‌مک مکمل یافته‌های مدل ساختاری-تفسیری بود. اکثر متغیرهای سطح پنجم در ناحیه متغیرهای مستقل قرار گرفتند که نشان‌دهنده قدرت هدایت بالای آن‌هاست؛ یعنی هرگونه تغییر در این عوامل، کل سیستم را تحت تأثیر

قرار می‌دهد. نکته حائز اهمیت از نگاه انتقادی، خالی بودن ناحیه متغیرهای خودگردان است؛ این یافته نشان می‌دهد که تمامی ۲۰ عامل شناسایی شده، پیوستگی شدیدی با یکدیگر داشته و هیچ عاملی خارج از دایره اثرگذاری بر مدیریت منابع انسانی ناب در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم نیست. این انسجام درونی نشان‌دهنده دقت در انتخاب شاخص‌ها و ماهیت یکپارچه مدیریت ناب است.

سهم نظری این پژوهش در خروج از نگاه «ابزارمحور» به مدیریت ناب و جایگزینی آن با نگاه «انسان‌محور» است. از نگاه انتقادی، بسیاری از پروژه‌های بهبود در صنایع گاز به دلیل تمرکز صرف بر تکنیک‌های مهندسی و غفلت از پیشایندهای انسانی (مانند رهبری خدمتگزار) با شکست مواجه می‌شوند. این مدل ثابت می‌کند که «مدیریت منابع انسانی ناب» پیش از آنکه یک سیستم فنی باشد، یک فرهنگ سازمانی است که از لایه‌های زیرین (تفکر ناب) نشئت می‌گیرد.

۱-۵. پیشنهادهای کاربردی

بر اساس سطوح استخراج شده از مدل، پیشنهادهای زیر جهت بهبود عملکرد شرکت پالایش گاز سرخون و قشم ارائه می‌گردد:

۱. اولویت‌بخشی به لایه ریشه‌ای (سطح ۵): پیشنهاد می‌شود مدیریت ارشد پالایشگاه، دوره‌های آموزش «تفکر ناب» را نه به‌عنوان یک ابزار فنی، بلکه به‌عنوان یک فلسفه مدیریتی برای رؤسا و سرپرستان برگزار نماید. تا زمانی که «رهبری خدمتگزار» در سازمان نهادینه نشود، ابزارهای ناب کارکرد مؤثری نخواهند داشت.

۲. بازنگری در فرآیند استعدادیابی: با توجه به قرارگیری «ادغام مدیریت ناب در استعدادیابی» در سطح ریشه‌ای، پیشنهاد می‌گردد در کانون‌های ارزیابی و مصاحبه‌های استخدامی شرکت گاز، شاخص‌های «انعطاف‌پذیری ذهنی» و «گرایش به بهبود مستمر» به‌عنوان پیش‌شرط جذب لحاظ شوند.

۳. طراحی سیستم پاداش ناب (سطح ۳): به‌جای پاداش‌های سنتی، سیستمی طراحی شود که به «پیشنهادهای کاهش ضایعات انسانی» و «بهبود فرآیندها» پاداش تعلق گیرد تا انگیزه کارکنان

برای مشارکت در نظام ناب افزایش یابد.

۴. تسهیل کار و کاهش تحرکات اضافی (سطح ۱): پیشنهاد می‌شود با استفاده از تکنیک‌های مطالعه کار و زمان، گلوگاه‌های فیزیکی و فرآیندهای موازی در بخش‌های عملیاتی پالایشگاه شناسایی و حذف شوند تا منجر به «تسهیل کار» برای نیروی انسانی گردد.

۲-۵. پیشنهادهای پژوهشی (آتی)

۱. بر اساس یافته‌های مدل پارادایمی استخراج شده، پیشنهادهای زیر برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌گردد:

۲. آزمون کمی مدل: پیشنهاد می‌گردد محققان در پژوهش‌های آینده، اعتبار و روابط میان مقوله‌های این مدل را با استفاده از روش‌های کمی نظیر مدل‌سازی معادلات ساختاری و بررسی تأثیر آن بر شاخص‌های کلیدی عملکرد مورد آزمون تجربی قرار دهند.

۳. مطالعه تطبیقی: پیشنهاد می‌شود این مدل در سایر شرکت‌های تابعه شرکت ملی گاز ایران (مانند پالایشگاه‌های پارس جنوبی) اجرا شده و نتایج آن‌ها جهت شناسایی تفاوت‌های فرهنگی بومی و سازمانی باهم مقایسه گردند.

۴. تنوع روش‌شناختی: با توجه به پویایی فرهنگ، بهره‌گیری از سایر رویکردهای کیفی مانند «پدیدارشناسی» برای درک عمیق‌تر زیست‌جهان کارکنان عملیاتی و یا روش «تحقیق کنش‌پژوهی» برای پیاده‌سازی گام‌به‌گام مدل در سازمان توصیه می‌شود.

۵. بررسی متغیرهای مداخله‌گر جدید: مطالعه تأثیر «تحول دیجیتال» و ورود نسل‌های جدید (نسل Z) به بدنه صنعت گاز بر تغییر کدهای فرهنگی استخراج شده در این پژوهش.

۳-۵. محدودیت‌های پژوهش

هر پژوهش علمی علی‌رغم رعایت دقت در تمامی مراحل، با محدودیت‌هایی روبروست که شناسایی آن‌ها می‌تواند مسیر

روشنی را برای پژوهش‌های آتی فراهم کرده و به درک دقیق‌تر یافته‌ها توسط خوانندگان و داوران کمک نماید. محدودیت‌های پژوهش حاضر به شرح زیر است:

۱. محدودیت در تعمیم‌پذیری (قلمرو موضوعی و مکانی): این پژوهش به‌صورت موردی در «شرکت پالایش گاز سرخون و قشم» انجام شده است. با توجه به بافت خاص سازمانی، دولتی بودن و ماهیت استراتژیک صنعت نفت و گاز، تعمیم یافته‌های این مدل به سایر صنایع (مانند صنایع خدماتی، فناوری اطلاعات یا بنگاه‌های کوچک و متوسط) باید با احتیاط صورت گیرد؛ چرا که ساختار منابع انسانی و مؤلفه‌های مدیریت ناب در صنایع مختلف ممکن است تحت تأثیر الزامات قانونی و ماهیت محصول متفاوت باشد.

۲. محدودیت‌های روش‌شناسی (مدل‌سازی ساختاری-تفسیری): روش ساختاری-تفسیری ابزاری قدرتمند برای تعیین جهت روابط و سلسله‌مراتب میان عوامل است، اما این روش به‌تنهایی قادر به سنجش «شدت» یا «ضریب عددی» اثرگذاری هر یک از متغیرها بر یکدیگر نیست. همچنین، این مدل بر پایه نظرات و اجماع خبرگان بنا شده است؛ لذا علی‌رغم استفاده از پانل خبرگان متخصص، سوگیری‌های ذهنی^۱ و تجربیات شخصی پاسخ‌دهندگان می‌تواند بر خروجی نهایی مدل اثرگذار باشد.

۳. محدودیت‌های ناشی از ابزارهای جمع‌آوری داده: در این مطالعه از پرسشنامه و مصاحبه برای استخراج روابط استفاده شده است. پاسخ‌دهندگان ممکن است تحت تأثیر پدیده‌هایی نظیر «مطلوبیت اجتماعی» یا محافظه‌کاری‌های سازمانی، نظرات خود را تعدیل کرده باشند که این امر از محدودیت‌های رایج در پژوهش‌های مبتنی بر خوداظهاری در سازمان‌های بزرگ است.

۴. ماهیت مقطعی پژوهش: این مطالعه از نوع مقطعی^۲ است و روابط میان پیشایندهای مدیریت منابع انسانی ناب را در یک بازه زمانی مشخص ترسیم کرده است. از آنجا که استقرار نظام ناب یک فرآیند پویا و بلندمدت است، تغییرات محیطی و تحولات تکنولوژیک (مانند ظهور صنعت ۴.۰) در آینده می‌تواند اولویت و ترتیب این عوامل را دستخوش تغییر نماید.

1. Subjective
2. Cross-sectional

- Performance – Evidence from Public Sector Organizations in the Oil and Gas Sector. ResearchGate [Internet]. 2023 [cited 2025 Oct 20]. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/372206960>
- [8]. Womack JP, Jones DT, Roos D. The Machine That Changed the World. New York: Free Press; 1990.
- [9]. Mohd Aripin N, Nawanir G, Hussain S, Tamyez PFM, Fauzi MA, Alimin NSN. The path to sustainable lean implementation: A case study in automotive industry. *Oper Res Forum*. 2024;5(1):1–15. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43069-024-00396-8>
- [10]. Radnor Z, Walley P, Stephens A, Bucci G. Evaluation of the Lean Approach to Business Management and Its Use in the Public Sector. London: HM Treasury; 2012.
- [11]. Bewley H, Hawe E. Human Resource Management and Lean Thinking. *Work Employ Soc*. 2010;24(3):635–653.
- [12]. Martinez-Jurado PJ, Moyano-Fuentes J. HRM and lean production: A review of the literature. *J Manuf Technol Manag*. 2013;24(4):460–479.
- [13]. Bonavia T, Marin JA. Integration of human resource management in lean manufacturing and its effect on organizational performance. *Int J Oper Prod Manag*. 2011;31(9):910–936.
- [14]. Niyaz MT, Qorri D, Kovács K, Juhasz C. Research trends in workforce planning in the automotive sector. *Adm Sci*. 2025;15(4):140. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3387/15/4/140>
- [15]. Szabo Z. Strategic Resource Management and Lean Change in Sunrise Healthcare. *Health Serv Manag Res*. 2014;27(2):78–85.
- [1]. Milhem M. Strategic Human Resource Management: Fostering Organizational Success Through Alignment and Innovation. In: *Business Sustainability with Artificial Intelligence (AI): Challenges and Opportunities*. Springer; 2024. p. 425–433.
- [2]. Alizadeh Majd A, Bell R, Ali S, Davoodi A, Nasirifar A. The effect of job rotation on employee performance: The mediating role of HR strategy and training in the petrochemical industry. *Ind Commer Train*. 2024;56(2):93–105.
- [3]. Emerald Publishing. The integration of lean and human resource management practices as an enabler for lean deployment – a systematic literature review. *The TQM Journal*. 2023;35(8). Available from: <https://www.emerald.com/tqm/article/35/8/2598/459426>
- [4]. Geektonight Editorial. Lean Management Principles [Internet]. 2024 [cited 2025 Oct 20]. Available from: <https://www.geektonight.com/lean-management-principles/>
- [5]. Baker C. The Future of Lean Six Sigma: Emerging Trends and Innovations [Internet]. LinkedIn; 2024 [cited 2025 Oct 20]. Available from: <https://www.linkedin.com/pulse/future-lean-six-sigma-emerging-trends-innovations-chris-baker-lkuac>
- [6]. Ouragini I, Ben Achour I, Lakhal L. The effect of lean, agile, resilient and sustainable (LARS) HRM on environmental performance: The mediating role of green innovation. *Int J Qual Reliab Manag*. 2023;41(10). Available from: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ijqrm-05-2023-0176/full/html>
- [7]. Bahuguna P. Strategic Human Resource Management: A Road to Organizational



- [16]. Thirkell P, Ashman T. Lean towards learning: Linking lean thinking and human resource management in UK higher education. TQM J. 2014;26(6):602–613.
- [17]. Ahmadbeigi A, Naderi N, Niknejad M. Designing a comprehensive model of sustainable human resource management system for automotive industry development. J Ind Technol Dev. 2021;16(2):1–20. Available from: https://jtd.iranjournals.ir/article_244208.html
- [18]. Sohrabi A, Shahhosseini M. Identifying strategic human resource management success requirements in the automotive industry. J Strategic Res Manag. 2020;11(41):1–25. Available from: https://jpap.sbu.ac.ir/article_95744.html
- [19]. Tamyez PFM, Mohd Aripin N, Nawaniir G, Hussain S. Integrating Agenda 2030 with Lean practices and Industry 4.0 Technologies: Case Study in an Automotive Industry. SAE Tech Pap. 2024;2024-36-0043. Available from: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2024-36-0043/>



Interpretive Structural Modeling of the Antecedents of Lean Human Resource Management in Sarkhoon and Qeshm Gas Refining Company

Mohsen Safari¹, Zeinab Zarepour^{1*}, Ziba Salemi², Isa Bakhoda³

1. Strategic Management Research Group, Academic Center for Education Culture and Research of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
2. M.Sc., Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
3. Head of Research and Technology Affairs, Sarkhoon and Qeshm Gas Refining Company, Bandar Abbas, Iran

ARTICLE INFO

RESEARCH ARTICLE

Article History:

Received: 05 November 2025

Revised: 05 January 2026

Accepted: 26 February 2026

Keywords:

Lean HRM

Lean Thinking

Gas Industry

Interpretive Structural

Modeling

MICMAC Analysis

ABSTRACT

This study aims to identify and model the antecedents of "Lean Human Resource Management" (Lean HRM) in the Sarkhoon and Qeshm Gas Refining Company. The research is applied in objective and follows a mixed-methods (qualitative-quantitative) approach. In the qualitative phase, 20 key factors were identified through content analysis of the literature and interviews with 9 experts. In the quantitative phase, these factors were prioritized using the Interpretive Structural Modeling (ISM) approach and MICMAC analysis. The findings revealed that the factors are structured across five hierarchical levels. Variables such as "Servant Leadership," "Lean Culture," "Lean Thinking," and "Establishing a Supportive Structure" were positioned at the fifth level (the most fundamental layer), serving as the cornerstone for implementing the lean system. Conversely, variables such as "Work Facilitation," "Reduction of Unnecessary Movements," and "HR Flexibility" were placed at the first level (the ultimate outcomes). MICMAC analysis confirmed that most root factors possess high driving power and low dependence. The results of the research indicate that success in Lean HRM within the gas industry requires a shift in the mental paradigms of leaders and the creation of cultural infrastructures, ultimately leading to operational excellence and workforce productivity.

DOR: 20.1001.1.2511.1113.1404.08.14

How to cite this article

M. Safari, Z. Zarepour, M. Salemi, I. Bakhoda, Interpretive Structural Modeling of the Antecedents of Lean Human Resource Management in Sarkhoon and Qeshm Gas Refining Company. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2026; 13(1): 37-52. (https://ijge.irangi.org/article_738764.html)

* Corresponding Author.

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

Available online 21 June 2026

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

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



آنالیز حساسیت و بهینه‌سازی اقتصادی پیکربندی‌های چندمرحله‌ای غشایی برای جداسازی دی‌اکسید کربن از متان

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

مقاله‌ی علمی-پژوهشی

صفحه ۵۳-۷۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

چکیده

در این پژوهش، به‌منظور انجام یک ارزیابی فنی و اقتصادی مقایسه‌ای از سیستم‌های جداسازی غشایی گاز، شش پیکربندی شامل سامانه‌های تک، دو و سه‌مرحله‌ای با جریان برگشتی تراویده یا پسماند، مبتنی بر غشاهای از پیش ساخته‌شده، شبیه‌سازی و بررسی شدند. این پیکربندی‌ها برای مطالعه موردی جداسازی CO_2 از CH_4 در محیط Aspen Plus طراحی و شبیه‌سازی شدند و سپس، با استفاده از محاسبات اقتصادی مقدماتی در همان نرم‌افزار، بهترین پیکربندی از منظر اقتصادی انتخاب شد. در ادامه، این پیکربندی برای انجام تحلیل‌های اقتصادی دقیق‌تر به محیط MATLAB منتقل شد.

بدین‌منظور، مقادیر تراوایی و انتخاب‌پذیری غشاهای مورد استفاده به‌عنوان داده‌های ورودی به برنامه MATLAB اعمال شد و خلوص و درصد بازیابی گازهای خروجی به‌عنوان خروجی مدل محاسبه گردید. سپس، شاخص جهانی عملکرد سیستم (IGP) که به‌صورت هم‌زمان بر پایه مجموع خلوص و درصد بازیابی گازها تعریف می‌شود، از نتایج فرآیندی محاسبه شد و از آن برای تعیین مناسب‌ترین غشا در پیکربندی منتخب استفاده گردید.

در مرحله بعد، با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی و عملکردی غشای منتخب، تحلیل اقتصادی فرایند انجام شد و سه شاخص کلیدی شامل هزینه کل (Total cost)، هزینه سرمایه‌گذاری (Capital costs) و هزینه بهره‌برداری (Operating costs) محاسبه شدند. نتایج نشان داد که غشاهایی با عمر مفید بیش از دو سال، به دلیل کاهش هزینه‌های تعویض و نگهداری، از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر هستند؛ زیرا هزینه جایگزینی غشا تنها بخش کوچکی از هزینه کل سیستم را تشکیل می‌دهد. همچنین، دبی بهینه خوراک برای غشاهای با عمر مفید طولانی‌تر حدود ۱۲۰۰ مترمکعب بر ساعت به دست آمد، زیرا در این دبی، هزینه کل سیستم به حداقل می‌رسد. در مجموع، استفاده از غشاهای با عمر مفید بیشتر، همراه با تنظیم دبی خوراک در مقدار بهینه، می‌تواند موجب بهبود عملکرد اقتصادی فرایند جداسازی گاز شود.

کلیدواژه‌ها: جداسازی متان از دی‌اکسید کربن، غشای ماتریس آمیخته، شبیه‌سازی، اسپن پلاس، ارزیابی اقتصادی، متلب





۱. مقدمه

افزایش تقاضای جهانی انرژی و روند قیمت‌گذاری آن، توجه شرکت‌های بزرگ را به سمت توسعه میادین جدید نفت و گاز حاوی درصد بالای کربن معطوف کرده است. روند استخراج و مصرف این سوخت‌های فسیلی تولید و انتشار کربن اضافی به اتمسفر را در پی دارد و این باعث شده است که انجمن‌های جهانی محیط زیستی در مورد تغییرات اقلیمی، فشار مداومی را بر شرکت‌های انرژی وارد می‌کند تا شیوه‌هایی را اتخاذ کنند که منجر به کاهش انتشار کربن شود بنابراین، جداسازی CO_2 به‌عنوان گزینه‌ای برای به حداقل رساندن انتشار CO_2 ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی مورد توجه قرار گرفته است. میزان CO_2 موجود در گاز طبیعی بسته به منبع گاز می‌تواند از ۴ درصد تا ۵۰ درصد متغیر باشد. قبل از انتقال گاز طبیعی، باید آن را پیش‌پردازش کرد تا مشخصات معمول خط لوله یعنی ۲ تا ۵ درصد CO_2 را برآورده کند در حال حاضر، بسیاری از چاه‌های گاز طبیعی به دلیل نرخ تولید پایین و کیفیت پایین، یعنی محتوای بالای CO_2 توسعه نیافته‌اند که این امر لزوم توسعه فرآیندهای کارآمد برای جداسازی CO_2 از گاز طبیعی را ایجاد کرده است CO_2 را می‌توان با توجه به عوامل هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی، مشخصات گاز و نگرانی‌های زیست‌محیطی، توسط تعدادی فرآیند حذف کرد. فرآیندهای اصلی را می‌توان به شرح زیر گروه‌بندی کرد:

۱. فرآیندهای جذب (جذب شیمیایی و فیزیکی)،

۲. فرآیند جذب سطحی (سطح جامد)،

۳. محلول ترکیبی (حلال فیزیکی و شیمیایی مخلوط)،

۴. جداسازی فیزیکی (غشاء؛ جداسازی برودتی).

فرآیندهای غشایی، فناوری اثبات‌شده تجاری برای کاربردهای تصفیه گاز طبیعی هستند. اگرچه فناوری جداسازی غشایی تنها در چند دهه اخیر به یک کاربرد صنعتی عمده تبدیل شده است، اما مطالعه جداسازی گاز سابقه طولانی دارد. اولین شرکتی که غشای بریسم را ایجاد کرد، مونسانتو بود که برای جداسازی هیدروژن به بازار عرضه شد، اما موفقیت مونسانتو شرکت‌های غشایی دیگر را تشویق کرد تا کارخانه‌های غشایی

برای تصفیه گاز طبیعی تولید کنند. در سال ۲۰۲۲ مطالعه‌ای انجام شد که آزمایش‌های میدانی ماژول‌های غشایی را برای جداسازی دی‌اکسید کربن از گاز طبیعی انجام دادند [۱]. در مطالعه خود، آن‌ها اثرات متغیرهای عملیاتی فشار، نرخ جریان خوراک و غلظت دی‌اکسید کربن در خوراک اعمال گردید. علاوه بر تجزیه و تحلیل داده‌های میدانی، مدل‌های کامپیوتری برای جداسازی گازها تحت شرایط اختلاط کامل و جریان متقاطع اعمال شدند. در سال‌های اخیر استفاده از یادگیری ماشینی به‌عنوان روشی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی تصفیه گاز و آب توسط سیستم‌های غشایی توسعه بیشتری نسبت به قبل پیدا کرد [۲]. این روش مدل‌سازی علیرغم دارا بودن بازدهی و قابلیت پیش‌بینی برتر و دقت خوب، از عدم دارا بودن تحلیل مفهومی و چرایی ریاضی رنج می‌برد. مدل‌های مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی نیز برای پیش‌بینی رفتار جداسازی غشاها در سال‌های اخیر بکار گرفته شدند [۳، ۴]. در این مدل‌ها نیز پارامترهای اثرگذار بر عملکرد سیستم‌های غشایی مانند هندسه سیستم، دبی خوراک و تنوع غشایی مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های مبتنی بر برنامه‌نویسی ریاضی و همچنین شبکه‌های عصبی و استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز نظیر Aspen Hysys و Aspen Plus نیز در پیش‌بینی عملکرد سیستم‌های جداسازی غشایی بکار گرفته شد و نقاط ضعف و قوت هر یک مرور گردید [۵-۱۰]. از بررسی مجموع کارهای مطالعه شده می‌توان به این نتیجه رسید که در اکثر این کارها، مدل‌سازی یا شبیه‌سازی براساس ویژگی‌ها و معادلات پیچیده برنامه‌ریزی شده در یک زبان برنامه‌نویسی و ارتباط آن به نرم‌افزار شبیه‌ساز است و همیشه نیاز به پیوندی پیچیده بین زبان برنامه‌نویسی دوم برای اصلاح روابط و پیوند بهتر با نرم‌افزارهای شبیه‌ساز نظیر اسپن پلاس یا اسپن هایسیس از طریق زیر روال تعریف شده توسط کاربر وجود دارد. در کار حال حاضر این عمل توسط برنامه‌نویسی ساده در محیط کاربرپسند میکروسافت اکسل با کمترین پیچیدگی و بیشترین سادگی و در عین حال کارایی بالا انجام می‌شود. در این کار روشی جدید برای پیاده‌سازی یک مدل جریان متقاطع دو بعدی در نرم‌افزار Aspen Plus برای جداسازی CO_2



غشایی طراحی شده وجود داشت در این کار ما از توربین برای تولید انرژی نیز استفاده کردیم تا صرفه‌جویی اقتصادی را به حد بیشینه برسانیم. در این کار برای پر کردن شکاف‌های موجود در مقالات منتشر شده قبلی که برخی از آن‌ها در (جدول ۱) آورده شده‌اند، تصمیم گرفتیم از شبیه‌سازی با Aspen plus جفت شده با برنامه‌نویسی Matlab برای تعریف روابط فنی و اقتصادی برای بررسی حساسیت فرآیند جداسازی کربن دی اکسید از متان براساس داده‌های مشابه خوراک پالایشگاه گاز طبیعی استفاده کنیم که مشخص شد اینکار در بررسی مقالات منتشر شده کم سابقه و یا حداقل با رویکرد گروه ما بی‌سابقه بوده است.

جدول ۱. مرور پژوهش‌های پیشین

مرجع	موضوع مورد مطالعه	رویکرد شبیه‌سازی یا مدل‌سازی یا برنامه‌نویسی
[۱۱]	گاز دودکش در نیروگاه برق تأمین شده با گاز طبیعی	برنامه‌نویسی در MATLAB
[۱۲]	جداسازی گاز طبیعی	برنامه‌نویسی در MATLAB
[۱۳]	جداسازی گاز طبیعی	شبیه‌سازی و برنامه‌نویسی Aspen Plus
[۱۴]	شبکه یکپارچه راکتور و ساختار برتر غشایی	برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP)
[۱۵]	تعیین هم‌زمان ساختار مولکولی غشا و طراحی فرآیند از طریق یادگیری ماشین همراه با بهینه‌سازی	برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP)
[۱۶]	طراحی خودکار، بهینه‌سازی، معیارسنجی و تحلیل فنی-اقتصادی انواع مختلف سیستم‌های غشایی	طراحی یک زبان برنامه‌نویسی

۲. شبیه‌سازی و مدل‌سازی

نمی‌شود، بنابراین یک مدل غشایی سفارشی با استفاده از «مدل کاربر، زیربرنامه کاربر ۲» در کتابخانه Aspen Plus طراحی و برنامه‌ریزی گردید. این مدل می‌تواند به یک فایل Microsoft Excel به‌عنوان محیط منبع برای تعریف متغیرها و محاسبه پارامترها متصل شود. روابط مدل انتقال در غشا همراه با تراوش‌پذیری‌ها و انتخاب‌پذیری‌های تجربی نمونه‌های غشایی ذکر شده در Microsoft Excel در رابط Aspen ONE - Microsoft Excel معرفی گردیدند. هر بلوک غشا دارای یک فایل Microsoft Excel

از گاز طبیعی ارائه می‌دهد. از آنجایی که واحد غشایی یک عملیات واحد از پیش تعریف‌شده در نرم‌افزار Aspen Plus نیست، مدل جریان متقاطع دوبعدی چند مرحله‌ای به‌عنوان عملیات واحد تعریف‌شده توسط کاربر به همراه سایر عملیات واحد موجود با استفاده از زیر برنامه در مایکروسافت Excel در شبیه‌سازی فرآیند گنجانده شده است.

در اغلب این کارها و بسیاری از کارهایی که در اینجا به آن‌ها اشاره نشده است، از نرم‌افزار Matlab برای ارزیابی فرایندی و اقتصادی استفاده شده بود و در برخی دیگر از کارها همواره توجه ویژه‌ای به انرژی مورد نیاز سیستم و نه امکان تولید انرژی از پیکربندی سیستم

به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند جداسازی غشایی در نرم‌افزار Aspen Plus برای کلیه نمونه‌های غشایی از پیش‌ساخته شده پارامترهای جداسازی این غشاهای مانند تراوش‌پذیری و انتخاب‌پذیری به‌عنوان ورودی‌های اصلی شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای این منظور Aspen Plus نسخه ۱۰ برای شبیه‌سازی تنظیمات غشا تک‌مرحله‌ای، دومرحله‌ای و سه مرحله‌ای با استفاده از معادله حالت Peng-Robinson به‌عنوان روش پایه استفاده گردید. کتابخانه Aspen Plus شامل سیستم جداسازی غشا



منحصر به فرد خواهد بود که به‌طور مناسب طراحی و برنامه‌ریزی می‌گردد. داده‌های ورودی تعریف شده و مقادیر آن‌ها در محیط مازول غشای Aspen Plus وارد می‌شود. این داده‌ها به‌عنوان ورودی به Microsoft Excel منتقل می‌شود، سپس محاسبات در محیط Excel انجام شده و در نهایت نتایج محاسبات به محیط Aspen Plus منتقل شده تا به کاربر به عنوان نتیجه شبیه‌سازی ارائه شود. به‌عنوان خوراک ورودی شبیه‌سازی ما خواص جداسازی غشاهای ساخته شده را به عنوان ورودی به Excel می‌دهیم.

مکانیسم حلالیت-نفوذ محلول شناخته شده و پذیرفته شده به‌عنوان پایه مدل‌سازی در این پژوهش انتخاب شد. بر همین اساس داریم [۱۳، ۱۷]:

$$J_{CO_2} = \frac{yQ}{A} = P_A [p_f x - p_p y] \quad (۱)$$

$$J_{CH_4} = \frac{(1-y)Q}{A} = P_B [p_f (1-x) - p_p (1-y)] \quad (۲)$$

که در آن‌ها y ترکیب درصد CO_2 در تراویده، x ترکیب درصد CO_2 در سمت خوراک، A سطح مقطع مؤثر غشا برحسب m^2 ، P_A تراوایی CO_2 برحسب GPU، P_B تراوایی CH_4 برحسب p_f و p_p به ترتیب فشار سمت خوراک و سمت تراویده برحسب bar، Q دبی حجمی تراویده برحسب m^3/s و J_{CO_2} و J_{CH_4} به ترتیب شار تراویده دی‌اکسید کربن و متان می‌باشند.

با تقسیم دو معادله بالا خواهیم داشت:

$$\frac{y}{1-y} = \alpha \frac{p_f x - p_p y}{p_f (1-x) - p_p (1-y)} \quad (۳)$$

که در آن α انتخاب پذیری CO_2/CH_4 غشاء است.

بازآرایی معادله (۳) در قالب معادله جبری خطی مرتبه دوم به‌دست می‌آید:

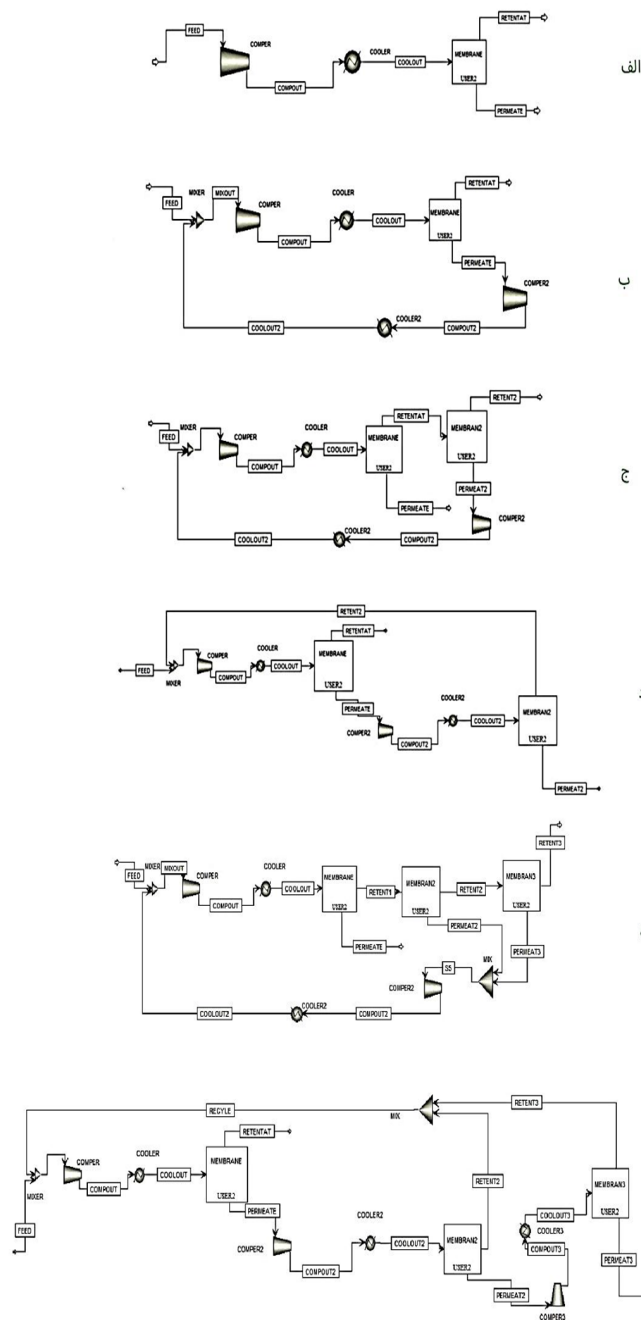
$$\left(\frac{p_p}{p_f} - \alpha (p_p - p_f) \right) y^2 + \left(1 - x + \alpha x - \frac{p_p}{p_f} + \alpha (p_p - p_f) \right) y - \alpha x = 0 \quad (۴)$$

حل این معادله y و در نتیجه شار نفوذکننده از غشاء (J) را به‌دست می‌دهد. از آنجاییکه مازول‌های غشاء دارای ناحیه مؤثر محدودی برای نفوذ هستند، باید مازول‌های غشایی متعددی در فرآیند تصفیه وجود داشته باشد:

$$J_{total} = n J_{single} \quad (۵)$$

که در آن J_{total} شار کل مازول‌های به‌کارگیری شده هست و J_{single} شار عبوری از یک مازول می‌باشد و n تعداد مازول می‌باشد. طراحی سیستم فرآیند غشایی عمدتاً براساس پارامترهای هر مازول غشایی و پیکربندی آن‌ها است. اگر خلوص بالا ضروری نباشد، پیکربندی سیستم جداسازی غشایی تک‌مرحله‌ای منجر به بازیابی رضایت‌بخش می‌شود. برای نیازهای جداسازی با خلوص بالا، استفاده از سیستم جداسازی غشایی چندمرحله‌ای ضروری است که می‌تواند از تراویده یا پسماند به‌عنوان جریان برگشتی^۱ (بازیافت) استفاده کند. طراحی سیستم با چندین مرحله پیچیده است زیرا نمی‌توان تمام ترکیب‌بندی سیستم غشایی را در نظر گرفت. در این کار، تصمیم‌گرفتن شش پیکربندی مختلف از سیستم‌های غشایی مشابه کار احمد و همکارانش با هائیسس [۱۸] در اسپن پلاس شبیه‌سازی شده‌اند: تک‌مرحله‌ای^۲ (SiS)، تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراویده^۳ (SiSRP)، دومرحله‌ای با بازیافت تراویده^۴ (DoSRP)، سه مرحله‌ای با بازیافت پسماند^۵ (DoSRR)، سه مرحله‌ای با بازیافت تراویده^۶ (TrSRP) و سه مرحله‌ای با بازیافت پسماند^۷ (TrSRR). نمودارهای جریان فرآیند این شبیه‌سازی‌ها در (شکل ۱ الف-و) ارائه شده است. آنالیز حساسیت^۸ در اسپن پلاس برای تعیین اثر متغیرهای تعریف شده بر شار نفوذ هر پیکربندی سیستم غشایی استفاده شده است.

1. Recycle
2. Single step
3. Single step with recycle of permeate
4. Double step with recycle of permeate
5. Double step with recycle of retentate
6. Triple step with recycle of permeate
7. Triple step with recycle of retentate
8. Sensitivity Analysis

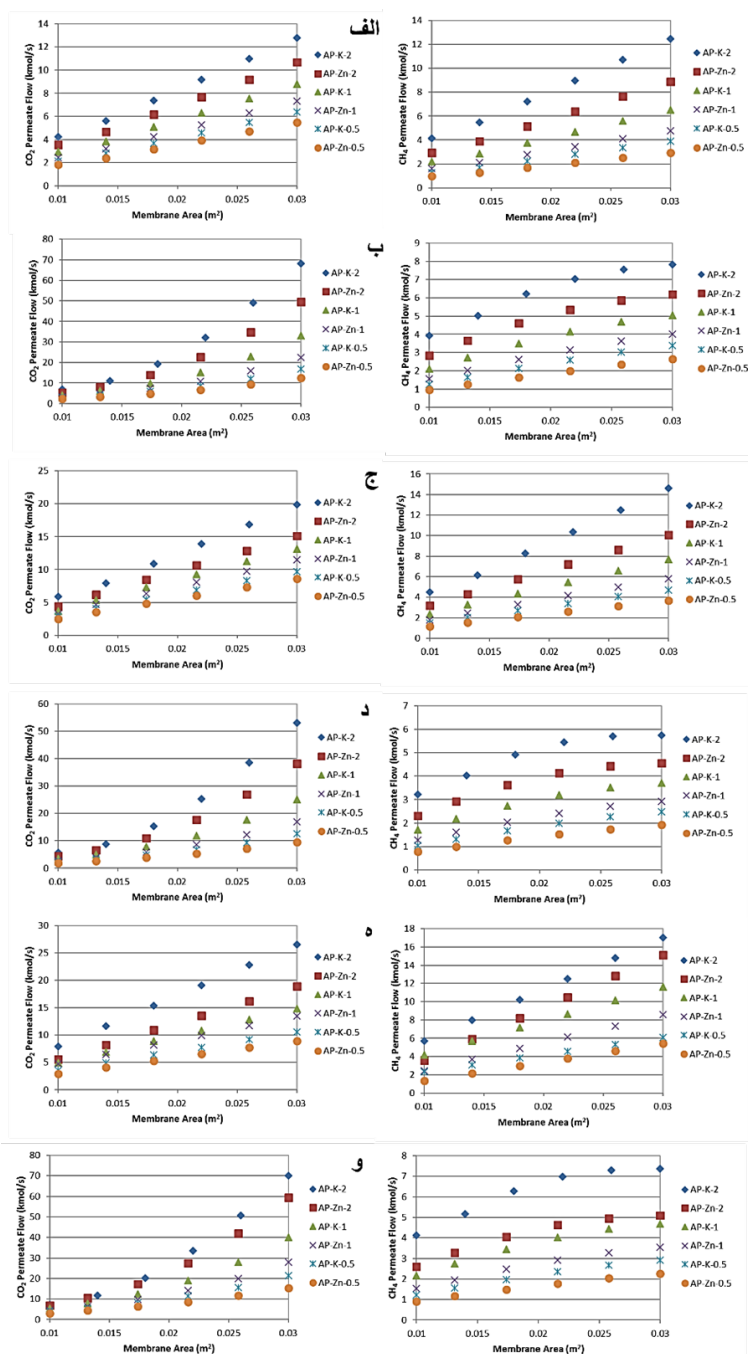


شکل ۱. جریان فرآیند الف) سیستم جداسازی غشایی تک مرحله‌ای (SiS) ب) سیستم جداسازی غشایی تک مرحله‌ای با بازیافت تراوا (SiSRP) ج) سیستم جداسازی غشایی دومرحله‌ای با بازیافت تراوا (DoSRP) د) سیستم جداسازی غشایی دومرحله‌ای با بازیافت پسماند (DoSRR) ه) سیستم جداسازی غشایی سه مرحله‌ای با بازیافت تراوا (TrSRP) و) سیستم جداسازی غشایی سه مرحله‌ای با بازیافت پسماند (TrSRR)

بازیافت تراوا، سیستم جداسازی غشایی دومرحله‌ای با بازیافت تراوا، سیستم جداسازی غشایی دومرحله‌ای با بازیافت پسماند، سیستم سه مرحله‌ای با بازیافت تراوا و سیستم جداسازی غشایی سه مرحله‌ای با بازیافت پسماند) به ترتیب در (شکل ۲ الف - و) ارائه شده است.

۳. بررسی تأثیر پارامترهای شبیه‌سازی بر فرآیندهای

۱-۳. تأثیر مساحت غشاء و تعداد ماژول بر نرخ نفوذ جریان پیکربندی‌های مختلف سیستم غشایی شبیه‌سازی شده کربن دی اکسید و متان (سیستم جداسازی غشایی تک مرحله‌ای، سیستم جداسازی غشایی تک مرحله‌ای با



شکل ۲. اثر شبیه‌سازی شده غشاء بر روی نرخ جریان تراوای دی‌اکسید کربن و متان در الف) سیستم تک‌مرحله‌ای ب) سیستم تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا ج) سیستم دو مرحله‌ای با بازیافت تراوا د) سیستم دو مرحله‌ای با بازیافت پسماند هـ) سیستم سه مرحله‌ای با بازیافت تراوا و) سیستم سه مرحله‌ای با بازیافت پسماند برای همه غشاهای ماتریس آمیخته سنتز شده

دلیل این امر به تغییرات در نرخ جریان خوراک ورودی به غشا بازمی‌گردد. در تنظیمات تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا دو- و سه مرحله‌ای با بازیافت پسماند، درصدی قابل توجه از جریان خروجی به خوراک برگشت داده می‌شود. بنابراین بخشی از خوراک، قبل از ورود به غشا، تصفیه شده‌تر است و محتوای CO_2 در جریان تراوا افزایش می‌یابد. برای متان، از آنجا که مقدار زیادی از جریان بازیافتی از گاز متان تخلیه

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌کنید جریان تراوای دی‌اکسید در سیستم‌های غشایی تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا و همچنین در سیستم‌های دو و سه مرحله‌ای با بازیافت پسماند، در سطح‌های غشایی بزرگ به‌طور قابل توجهی از جریان در سیستم‌های جداسازی غشایی تک‌مرحله‌ای و از جریان در سیستم‌های دو- و سه مرحله‌ای با بازیافت تراوا بالاتر است؛ این تفاوت برای گاز متان مشاهده نمی‌شود.

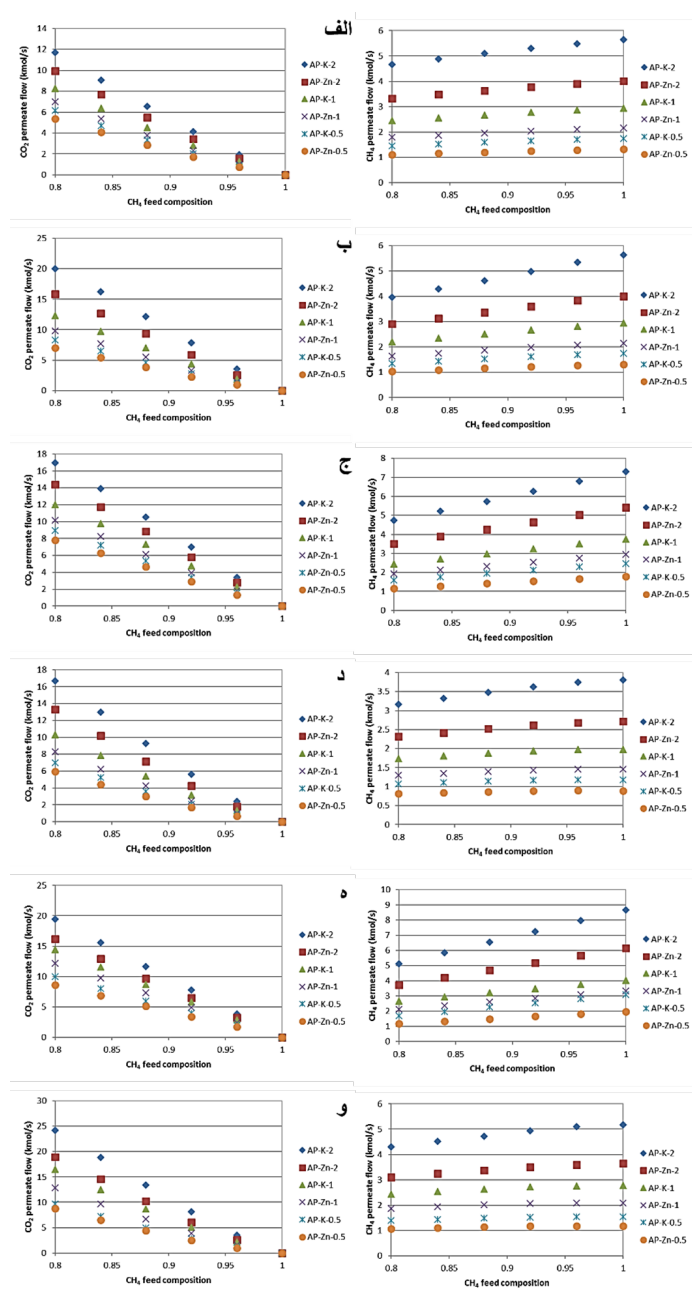
معنای آن است که برای این نمونه‌های غشای ماتریس آمیخته، افزایش سطح غشاء به بهبود عملکرد جداسازی و اختلاف بیشتر بین نرخ‌های تراوا برای CO_2 و متان منجر می‌شود.

۲-۳. تأثیر ترکیب خوراک غشایی بر نرخ جریان تراوا

تأثیر ترکیب خوراک گازی متشکل از کربن دی‌اکسید و متان در پیکربندی‌های شش‌گانه سیستم غشایی شبیه‌سازی شده در (شکل ۳ الف- و)، بر روی تراوایی CO_2 و CH_4 برای همه غشاهای ماتریس آمیخته سنتز شده ارائه شده است.

می‌شود، نرخ جریان تراوا کاهش می‌یابد. افزایش غیرخطی نرخ جریان CO_2 و کاهش نرخ جریان متان با افزایش سطح غشاء در پیکربندی‌های تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا و دو-مرحله‌ای با بازیافت پسماند می‌تواند با نرخ‌های بازیافت بالاتر در این پیکربندی‌ها ارتباط داشته باشد.

همچنین، در پیکربندی‌های با نرخ بازیافت بالاتر، سیستم‌های غشایی تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا و دو-مرحله‌ای با بازیافت پسماند سطح بالاتری از غشاهای ماتریس آمیخته با تراوایی بالاتر گازها را در بر می‌گیرند. این به



شکل ۳. اثر ترکیب خوراک غشایی شبیه‌سازی شده بر روی نرخ جریان تراوا دی‌اکسید کربن و متان (الف) سیستم تک‌مرحله‌ای (ب) سیستم تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا (ج) سیستم دو مرحله‌ای با بازیافت تراوا (د) سیستم دو مرحله‌ای با بازیافت پسماند (ه) سیستم سه مرحله‌ای با بازیافت تراوا (و) سیستم سه مرحله‌ای با بازیافت پسماند برای همه غشاهای ماتریس آمیخته سنتز شده

همان‌طور که در (شکل ۳) دیده می‌شود، هرچه نسبت متان در خوراک افزایش یابد، نرخ تراوای کربن دی‌اکسید در همه پیکربندی‌ها افت می‌کند، درحالی‌که تراوای متان به‌طور هم‌زمان بالا می‌رود. به‌طور قابل‌توجهی، کاهش CO_2 نسبت به افزایش CH_4 شدت بیشتری دارد؛ این امر از اینکه غشاهای ماتریس‌آمیخته در این مطالعه انتخاب‌پذیری بالایی برای CO_2 نسبت به CH_4 نشان می‌دهند، نشأت می‌گیرد. با افزایش محتوای متان خوراک از ۸۰ درصد به تقریباً ۱۰۰ درصد، محتوای خوراک CH_4 حدود ۲۵ درصد افزایش می‌یابد، اما محتوای CO_2 خوراک از ۲۰ درصد به تقریباً صفر کاهش می‌یابد که به‌طور قابل‌توجهی کاهش تراوای CO_2 را توضیح می‌دهد و افزایش نسبی تراوای CH_4 را توضیح می‌دهد. در سطح متان خوراکی نزدیک به ۱۰۰ درصد، بالاترین بازیابی متان به دست می‌آید اما این بالاترین بازیابی در پیکربندی سه‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا مشاهده می‌شود و در حالیکه پیکربندی دو-مرحله‌ای با بازیافت پسماند کمترین بازیابی را دارد؛ یعنی وقتی خوراک تقریباً متان خالص است، پیکربندی سه‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا بهینه است و پیکربندی دو-مرحله‌ای با بازیافت پسماند نسبتاً مطلوب نیست.

دلیل اصلی این رفتار را می‌توان در نسبت سطح غشاء و تعداد ماژول‌ها جست: اگر سطح غشاء نسبتاً کم باشد (مثلاً $0.125 m^2$) و تعداد ماژول‌ها محدود باشد (مثلاً ۱۰,۰۰۰,۰۰۰)، پیکربندی‌های دارای بازیافت تراویده عملکرد جداسازی و بازیابی متان بهتری نشان می‌دهند، زیرا مقدار بیشتری از متان به خوراک بازیافت می‌شود. این نکته در تحلیل حساسیت سطح غشاء و تعداد ماژول‌ها در مقادیر کم محور افقی قابل مشاهده است.

(شکل ۳) نشان می‌دهد که با محتوای بالای متان در خوراک، غشای ماتریس‌آمیخته با تراوایی بالاتر و انتخاب‌پذیری CO_2/CH_4 پایین‌تر، در کل رفتار بهتری از نظر جداسازی دارد. به‌طور کلی، بالاترین نرخ تراوای CH_4 در تمام پیکربندی‌ها به نمونه‌ای با بالاترین تراوایی CO_2 و CH_4 و کمترین انتخاب‌پذیری CO_2/CH_4 تعلق دارد.

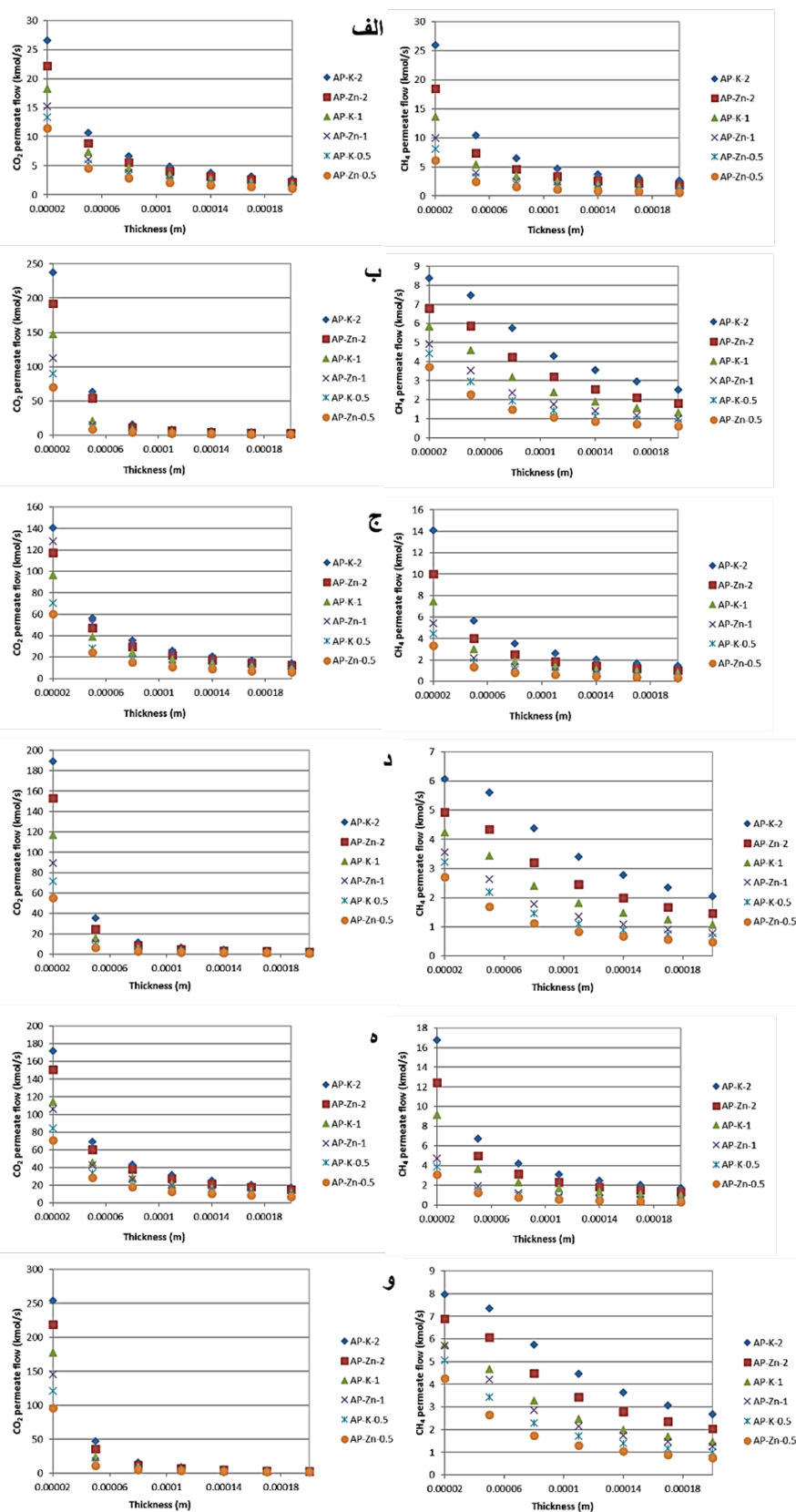
۳-۳. تأثیر ضخامت غشا بر نرخ جریان تراوا

تأثیر ضخامت غشا بر نرخ جریان تراویده کربن دی

اکسید و متان در پیکربندی‌های شش‌گانه سیستم غشایی شبیه‌سازی شده در (شکل ۴ الف- و)، برای همه غشاهای ماتریس‌آمیخته سنتز شده ارائه شده است.

با افزایش ضخامت غشاهای ماتریس‌آمیخته، نرخ تراوای CO_2 برای همه این غشاها در هر شش پیکربندی به‌شدت افت می‌کند و این کاهش، ناشی از کاهش تراوایی هر دو گاز CO_2 و CH_4 است، هرچند با توجه به اینکه این غشاها به‌طور مشخص انتخاب‌گر CO_2 هستند، اثر ضخامت بر تراوایی CO_2 نسبت به CH_4 نمایان‌تر می‌شود؛ افزایش ضخامت از ۲۰ میکرومتر به ۶۰ میکرومتر به معنی سه برابر شدن ضخامت غشا می‌باشد درحالی‌که افزایش ضخامت از ۶۰ میکرومتر به ۱۰۰ میکرومتر تقریباً دوسوم افزایش ضخامت را نشان می‌دهد که این نشان‌دهنده این حقیقت است که تأثیر تغییر ضخامت در غشاهای نازک‌تر شدیدتر هست در نتیجه تغییر شار گاز در ضخامت‌های کم نسبت به ضخامت‌های بالا چشمگیرتر است؛ مقایسه زیر شکل‌های (شکل ۴) نشان می‌دهد که قابلیت جداسازی CO_2 از CH_4 در تمامی پیکربندی‌های بررسی‌شده نسبت به پیکربندی جداسازی غشایی تک‌مرحله‌ای به‌طور قابل‌توجهی برتر است که این برتری به دلیل وجود جریان‌های بازیافت با نرخ‌های مختلف در پیکربندی‌های دو و سه مرحله‌ای است که محصول خالص‌تر را از طریق تصفیه مجدد جریان‌های تراویده یا پسماند ارائه می‌دهد؛ با توجه به مقایسه زیر شکل‌های (شکل ۴) مشخص می‌شود که هنگام استفاده از غشاهای ماتریس‌آمیخته با حداقل ضخامت ممکن، غشاهای پرتراواتر نسبت به سایر انواع غشاها در پیکربندی‌های شش‌گانه کارآمدتر عمل می‌کنند و با افزایش ضخامت، کارایی جداسازی کاهش می‌یابد و همچنین غشاهای ماتریس‌آمیخته با انتخاب‌پذیری بالاتر CO_2 نسبت به CH_4 در این سیستم‌ها کارآمدتر می‌شوند و این تحلیل حساسیت نشان می‌دهد برای دستیابی به عملکرد جداسازی برتر در پیکربندی‌های مختلف دو شرط کلیدی وجود دارد:

۱. اطمینان از نازک بودن هر غشای استفاده‌شونده در هر ماژول غشایی در عین حفظ یکپارچگی مورفولوژیکی.
۲. به‌کارگیری بازیافت تراویده یا پسماند در سیستم جداسازی غشا.



شکل ۴. اثر شبیه سازی شده ضخامت غشاء بر روی نرخ جریان تراوای اکسید کربن و متان (الف) سیستم تک مرحله ای (ب) سیستم تک مرحله ای با بازیافت تراوا (ج) سیستم دو مرحله ای با بازیافت تراوا (د) سیستم دو مرحله ای با بازیافت پسماند (ه) سیستم سه مرحله ای با بازیافت تراوا (و) سیستم سه مرحله ای با بازیافت پسماند برای همه غشاهای ماتریس آمیخته سنتز شده

۴. مدل سازی فرآیندی و ارزیابی اقتصادی

مکانیسم حلالیت-نفوذ که مدلی تثبیت شده و به طور گسترده قابل اعتماد برای تعریف تراوایی از درون غشاء است، به عنوان پایه و اساس مدل سازی در این مطالعه در نظر گرفته شد. گرچه این مدل برای غشاهای ماتریس آمیخته با اصلاحاتی در کارهای برخی محققین دیده می شود اما در کار ما چون درصد وزنی کربن فعال در ماتریس پلیمر ناچیز می باشد مکانیزم عمده انتقال که همان حلالیت-نفوذ می باشد، برای ساده تر سازی فرآیند ارزیابی فنی و اقتصادی، در نظر گرفته می شود.

پیکربندی مناسب سیستم غشایی برای جداسازی واقعی کربن دی اکسید از متان نیازمند بروز خلوص بالا و در عین حال بازیابی بالا برای گاز پرتراواتر است؛ یعنی در کار ما علاوه بر اینکه در محصول گازی نهایی خلوص دی اکسید کربن باید بالا باشد، باید درصدی بالایی از دی اکسید کربن خوراک در محصول نهایی ظاهر شود. برای رسیدن به هر دو معیار عملکرد برای سیستم جداسازی، فرآیندهای غشایی چندمرحله ای همراه با یا بدون بازیافت تراویده یا پسماند به طور متعدد گزارش شده اند که در آن ها اکثر ماژول ها از نوع فیبر توخالی و نه تخت به منظور دستیابی به سطح جداسازی بالاتر بودند. ما در این کار با توجه به اینکه در بخش قبلی شبیه سازی فرآیند را انجام داده و عملکرد جداسازی شش پیکربندی متفاوت را از جهات مختلف با یکدیگر مقایسه کردیم، می توانیم برای بررسی بهترین پیکربندی از شبیه سازی که خودمان انجام دادیم بهره گیری نماییم. بدین منظور عملکرد فنی پیکربندی بر اساس صرفه اقتصادی آن تعیین می شود و بر اساس آن تصمیم گیری می شود که کدام

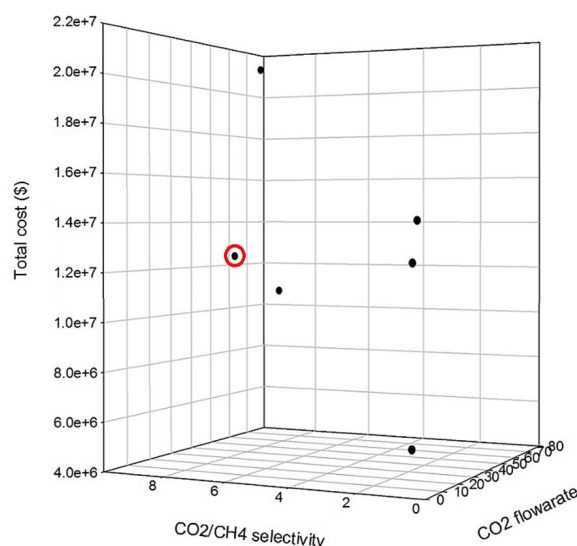
نوع پیکربندی برای محاسبات فنی و اقتصادی با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

برای بررسی دقیق تر اقتصادی یک پیکربندی جداسازی گاز غشایی، از بخش ارزیابی اقتصادی نرم افزار Aspen Plus ورژن ۱۰ کمک گرفته شد. برای این منظور شش پیکربندی متفاوتی که در شبیه سازی فرآیند، آنالیز حساسیت در مورد آن ها در Aspen Plus انجام شد، مورد ارزیابی اقتصادی قرار گرفتند. هدف از این کار تخمین سریع و سرانگشتی هزینه های ثابت و عملیاتی فرآیند می باشد که از طریق آن بتوان سیستم بهینه را انتخاب نمود. برای این منظور در نرم افزار Aspen plus بعد از اجرا شدن شبیه سازی، تیک Economic Active زده می شود و سپس از قسمت Mapping می توان Evaluate Cost را انتخاب کرد. سپس وارد پنجره ای می شویم که باید نوع تجهیزاتی که در شبیه سازی استفاده شده اند را معین کنیم. ما برای کمپرسورها، نوع سانتریفیوژی افقی را انتخاب کرده و برای کولرها، مبدل های حرارتی پوسته و لوله را انتخاب کردیم. چون ماژول غشایی در Aspen Plus تعریف نشده است تخمین قیمت آن را به صورت سرانگشتی از ضرب تعداد ماژول در سطح غشا در قیمت واحد یک ماژول غشایی در نظر گرفتیم. از قیمت سایر اجزا و لوله کشی و یوتیلیتی و غیره به دلیل اینکه در مقایسه با هزینه تجهیزات اصلی ناچیز بودند صرف نظر شد. سپس بهترین نمونه غشایی از لحاظ عملکرد جداسازی انتخاب گردید و عملکرد کل جداسازی پیکربندی های شش گانه بر اساس عملکرد این نمونه لحاظ گردید که مجموعاً به همراه محاسبات اقتصادی سرانگشتی در (جدول ۲) آورده شده است.

جدول ۲. مقادیر سرانگشتی محاسبه شده برای هزینه های ثابت، هزینه های عملیاتی، هزینه کل و همچنین دبی تراویده CO_2 و انتخاب پذیری پیکربندی های مختلف شبیه سازی شده محیط در Aspen Plus

پیکربندی غشایی	هزینه ثابت (\$)	هزینه عملیاتی (\$)	مجموع هزینه ها (\$)	دبی تراویده CO_2 (kmol/s)	نسبت CO_2/CH_4 در تراویده
SIS	۳۸۸۰۹۹۰	۱۵۱۹۰۴۰	۵۴۰۰۰۳۰	۱۲/۷۶	۱/۰۲
SISRP	۷۷۶۱۹۸۰	۳۰۳۸۰۸۰	۱۰۸۰۰۰۶۰	۶۷/۲۸	۸/۵۹
DoSRP	۸۹۶۱۹۸۰	۳۴۹۳۷۹۲	۱۲۴۵۵۷۷۲	۱۹/۸	۱/۳۷
DoSRR	۸۹۶۱۹۸۰	۳۴۹۳۷۹۲	۱۲۴۵۵۷۷۲	۵۳/۱	۹/۳۲
TrSRP	۱۰۱۶۱۹۸۰	۳۹۴۷۹۸۴	۱۴۱۰۹۹۶۶	۲۶/۵	۱/۵۶
TrSRR	۱۵۲۴۲۹۷۰	۵۹۲۱۹۷۶	۲۱۱۶۴۹۴۶	۷۰/۱	۹/۴۷

به منظور به دست آوردن پیکربندی بهینه جهت مطالعه برای محاسبات دقیق تر اقتصادی هزینه کل بر حسب دبی تراویده و انتخاب پذیری در نمودار سه بعدی رسم گردید که در شکل (۵) آورده شده است.

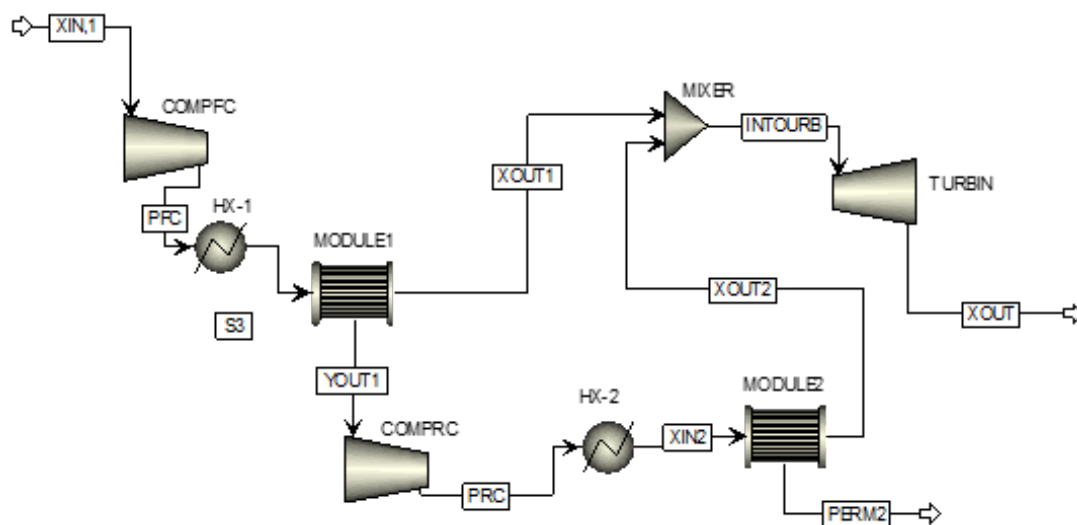


شکل ۵. هزینه کل پیکربندی های شش گانه جداسازی غشایی بر حسب دبی عبوری CO_2 و انتخاب پذیری CO_2/CH_4

همان طور که در (شکل ۵) دیده می شود، نقطه ای که دور آن دایره قرمز کشیده شده است به عنوان پیکربندی بهینه انتخاب شده است که مربوط به پیکربندی DoSRR می باشد. عامل اصلی انتخاب این گزینه به عنوان پیکربندی بهینه هزینه کل در مقایسه با عملکرد بوده است. اگر دقت کنید نقطه بالای نمودار که متعلق به پیکربندی TrSRR می باشد عملکرد جداسازی بهتری از نمونه DoSRR دارد اما هزینه تمام شده آن نزدیک به دو برابر می باشد در صورتی که بهبود عملکرد جداسازی آن چندان قابل توجه نیست. از طرفی اختلاف هزینه

DoSRR با SISRP قابل توجه نیست اما عملکرد جداسازی DoSRR نسبتاً بهتر می باشد. البته ممکن است SISRP هم پیکربندی جذابی باشد اما ما به علت عملکرد بهتر DOSRR در مقایسه با هزینه نه چندان بیشتر آن، این پیکربندی را به عنوان پیکربندی بهینه انتخاب کردیم.

(شکل ۶) نشان دهنده شماتیک پیکربندی دومرحله ای می باشد که تحت بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است قسمتی از پسماند برای راه اندازی توربین به کار می رود تا قسمتی از کار مورد نیاز کمپرسورها را تامین نماید.



شکل ۶. شماتیک پیکربندی جداسازی غشا دومرحله ای طراحی شده برای محاسبات اقتصادی



پیکربندی سیستم پیشنهادی سیستم غشایی دو مرحله‌ای با بازیافت پسماند می‌باشد که در آن ارتباط بین دو مرحله جداسازی گاز براساس قوانین پایستگی جرم استوار است:

$$F_{in,2} = \dot{V}_{out,1} \quad (6)$$

$$x_{CO_2in,2} = y_{CO_2out,1} \quad (7)$$

$$x_{CH_4in,2} = y_{CH_4out,1} \quad (8)$$

که در آن $F_{in,2}$ دبی ورودی به مرحله دوم ($m^3 \text{ STP/h}$)، $\dot{V}_{out,1}$ دبی تراویده خروجی از مرحله اول ($m^3 \text{ STP/h}$)، $x_{CO_2in,2}$ ترکیب درصد کربن دی‌اکسید ورودی به مرحله دوم، $y_{CO_2out,1}$ ترکیب درصد کربن دی‌اکسید تراویده از مرحله اول، $x_{CH_4in,2}$ ترکیب درصد متان ورودی به مرحله دوم، و $y_{CH_4out,1}$ ترکیب درصد متان تراویده از مرحله اول می‌باشند.

برای تعریف پارامترهای ارزیابی برای عملکرد سیستم جداسازی کل غشاء، باید پارامترهای مربوط به ماژول غشای تک را تعریف کرده و آن‌ها را به کل سیستم تعمیم دهیم. پارامتر عملکرد برای تک ماژول به شرح زیر است:

$$purity_{CO_2} = y_{CO_2out2} \times 100 \quad (9)$$

$$Recovery_{CO_2} = \frac{\dot{V}_{out2} \times y_{CO_2out2}}{F_{in1} \times x_{CO_2in1}} \times 100 \quad (10)$$

$$Purity_{CH_4} = \frac{F_{out1} x_{CH_4out1} + F_{out2} x_{CH_4out2}}{F_{out1} + F_{out2}} \times 100 \quad (11)$$

$$Recovery_{CH_4} = \frac{F_{out1} x_{CH_4out1} + F_{out2} x_{CH_4out2}}{F_{in1} x_{CH_4in1}} \times 100 \quad (12)$$

$$I_{GP} = purity_{CO_2} + Recovery_{CO_2} + purity_{CH_4} + Recovery_{CH_4} \quad (13)$$

که در آن‌ها $\dot{V}$ دبی تراویده ($m^3 \text{ STP/h}$)، x و y به ترتیب ترکیب درصدی سمت تراویده و پسماند (خوراک)، F دبی

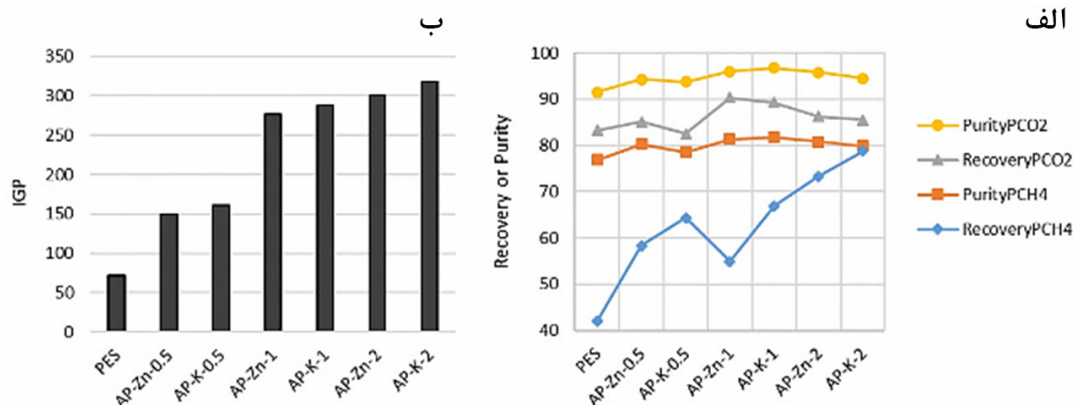
خوراک ($m^3 \text{ STP/h}$) می‌باشند. زیروندهای in و out به ترتیب خروجی یا ورودی بودن جریان را مشخص می‌کنند. CH_4 و CO_2 نشان‌دهنده محتوای ترکیب درصد می‌باشند، و شماره ۱ و ۲ به ترتیب نشان‌دهنده مرحله ۱ و یا ۲ می‌باشند. Purity به معنی خلوص و recovery به معنی بازیابی جریان‌ها می‌باشند و I_{GP} شاخص عملکرد جهانی می‌باشد.

شاخص عملکرد جهانی^۱ به‌عنوان شاخص مورد قبول برای تعیین عملکرد جداسازی سیستم تعریف می‌شود. از این پارامتر می‌توان در بهینه‌سازی عملکرد سیستم و یا در آنالیز حساسیت سیستم استفاده کرد. اهمیت شاخص عملکرد جهانی در ارزیابی عملکرد فرآیند جداسازی این است که این عامل میزان تولید و درجه خلوص سیستم را در یک عبارت خلاصه می‌کند. بدیهی است که رابطه معکوسی بین این دو پارامتر وجود دارد، از این رو یافتن نقطه بهینه این رابطه که فاکتور شاخص عملکرد جهانی را به حداکثر می‌رساند مهم است.

برای ارزیابی اقتصادی سیستم پیشنهادی، رویکرد جدیدی برای تصفیه گاز طبیعی باکیفیت پایین انتخاب شد. در این رویکرد کلیه هزینه‌های مرتبط با کمپرسورها، اینترکولرها، ماژول‌های غشایی و به‌صورت ابتکاری توربین اضافه شده برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی در نظر گرفته شده‌اند و روابط ریاضی مربوط به محاسبه این هزینه‌ها در نرم‌افزار Matlab وارد شده‌اند و به ازای هر غشای قرار گرفته در ماژول‌های غشایی محاسبات قابل انجام و هزینه‌های قابل خروجی گیری هستند.

۴-۱. خلوص و بازیابی کربن دی‌اکسید و متان و فاکتور شاخص عملکرد جهانی غشاها

بازیابی کلی و خلوص هر دو گاز همراه با فاکتور شاخص عملکرد جهانی برای همه غشاها در (شکل ۷) ارائه شده است.



شکل ۷. الف) خلوص و بازیابی کلی کربن-دی اکسید و متان (محاسبه شده و ب) شاخص عملکرد جهانی برای همه غشاها

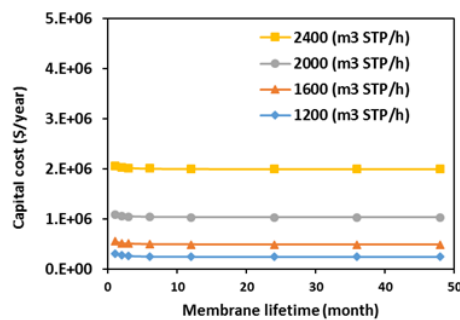
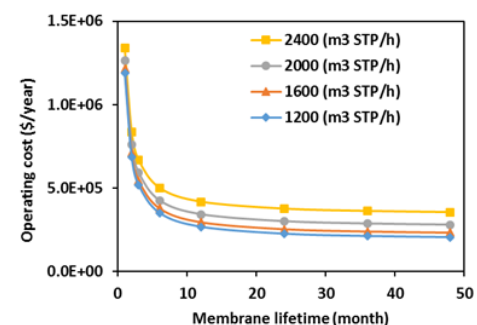
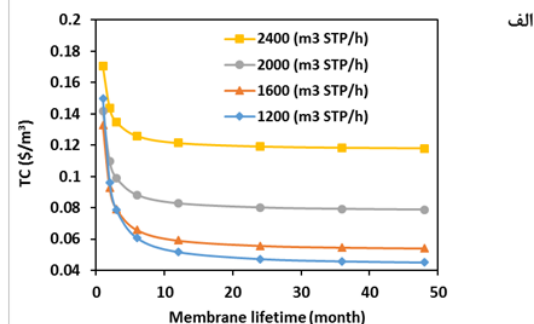
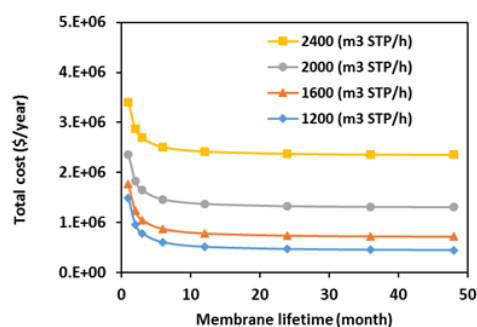
1. Index of Global Performance (I_{GP})

و انتخاب پذیری کربن دی اکسید /متان غشاها به دلیل اختلاط کربن فعال نه تنها خواص جداسازی غشاء پلی اتر سولفون را بهبود می دهد، بلکه عملکرد جداسازی کل پیکربندی سیستم پیشنهادی را نیز بهبود می دهد. تفاوتی بین شاخص عملکرد جهانی غشاهای AP-K و غشاهای AP-Zn وجود دارد که از نتایج تست های تراوایی شدیدتر می باشد. این نشان می دهد که با افزایش مراحل جداسازی، تفاوت بین عملکرد غشاهای شبیه سازی شده در سیستم جداسازی غشایی افزایش می یابد زیرا جریان تراوا تا حدی خالص شده به عنوان خوراک مرحله دو استفاده می شود و این منجر به مشاهده تفاوت عملکرد جداسازی بزرگتر در شبیه سازی بین غشاها می شود که تفاوت ملایم تری را در عملکرد جداسازی در آزمایش ها نشان می دهد.

۴-۲. کل هزینه ها، هزینه های سرمایه و هزینه های عملیاتی

برای سیستم، کل هزینه به ازای حجم واحد خوراک وارد شده، کل هزینه در سال، هزینه سرمایه در سال و هزینه عملیاتی در سال برحسب طول عمر غشاء در نرخ های جریان مختلف در (شکل ۸ الف-د) ارائه شده است

از (شکل ۷ الف) می توان استنباط کرد که با کاهش تراوایی غشاها، بازیابی کربن دی اکسید به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می گیرد. از آنجایی که خوراک عمدتاً متان است و تراوایی گاز غشاها نسبتاً کم است، بازیافت کربن دی اکسید بیشترین آسیب را می بیند. تغییرات بازیابی متان خفیف است و این به این دلیل است که تراوایی کم غشاء برای این گاز نمی تواند به طور قابل توجهی بر نرخ جریان بسیار بالای متان پسماند در هر مرحله تأثیر بگذارد. بازیابی کم کربن دی اکسید منجر به خلوص پایین متان در خروجی جریان پسماند شده شد، با این حال، خلوص کربن دی اکسید از ۱۵ درصد به بیش از ۹۶ درصد برای اکثر غشاهای مدل شده افزایش می یابد. فاکتورهای شاخص عملکرد جهانی، عملکرد غشا را در یک فرآیند دومرحله ای بهتر نشان می دهند (شکل ۷ ب). مقدار فاکتور شاخص عملکرد جهانی ایده آل ۴۰۰ است و نمونه های دارای بالاترین میزان کربن فعال، نزدیک ترین مقادیر شاخص عملکرد جهانی را به این عدد در مقایسه با سایرین دارند. فاکتور شاخص عملکرد جهانی برای غشاهای پلی اتر سولفون خالص به طور قابل توجهی کمتر از غشاهای AC/PES است. افزایش تراوایی



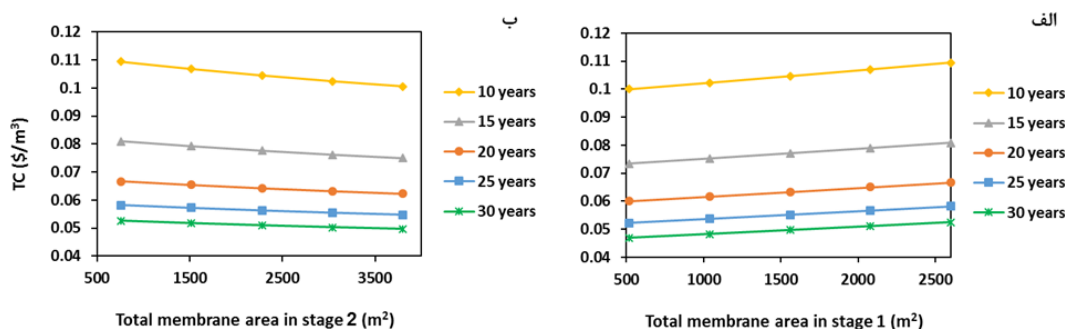
شکل ۸. الف (TC، ب) هزینه کل، ج) هزینه سرمایه گذاری و د) هزینه کل عملیاتی برحسب طول عمر غشا در دبی های مختلف

انتخاب یا سنتز غشاء برای شرایط عملیاتی واقعی، استقامت و دوام غشا باید در نظر گرفته شود زیرا اگر غشاء انتخاب شده عمر متوسط نسبتاً کوتاهی داشته باشد، این عامل به راحتی می تواند طراحی جذاب اقتصادی را از بین ببرد و یک فرآیند با صرفه اقتصادی را غیراقتصادی کند. طول عمر غشا به طور

در هر چهار بخش این شکل، با افزایش میانگین طول عمر غشاء، کل هزینه ها به ازای واحد حجم جریان، هزینه های کل، هزینه های سرمایه و هزینه های عملیاتی در نرخ های مختلف جریان کاهش می یابد. طول عمر غشاء زیر ۶ ماه باعث افزایش قابل توجهی در هزینه کل سیستم می شود. از این رو هنگام

مستقیم بر هزینه‌های جایگزینی غشا (MRC) تأثیر می‌گذارد که درصد قابل‌توجهی از هزینه عملیاتی (OC) سیستم در طول عمر کم غشاء است. به‌عنوان مثال برای غشایی با طول عمر ۴ سال، هزینه‌های جایگزینی غشا تنها حدود ۱۰ درصد هزینه عملیاتی است، اگر غشا طول عمر ۱ ماه داشته باشد، هزینه‌های جایگزینی غشا شامل ۸۴ درصد هزینه عملیاتی است. هزینه عملیاتی تنها بخشی از هزینه سرمایه است، از این رو تغییر در هزینه عملیاتی که بسیار شدید است، اثر قابل‌توجهی بر روی هزینه سرمایه به‌جز در طول عمر بسیار کم غشا ندارد. هنگامی که نتیجه این کار (شکل ۱۴ الف) را با سایر آثار منتشر شده (۱۹) مقایسه می‌کنیم، TC زیر $\$/m^3$ ۰/۰۵ که به‌عنوان سقف قیمت جذاب اقتصادی فرآیند تعیین شد، در این کار برای نمونه مورد بررسی در طول عمر غشاء بیش از ۲ سال به‌دست آمده است، به این معنی که برخی از نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق قابلیت به‌کارگیری در مقیاس بزرگ برای جداسازی گاز را دارند منوط بر اینکه

حداقل ۲ سال تحت عملیات دوام بیاورند. نکته مهم دیگری که از این شکل قابل استخراج است این است که عمدتاً با افزایش دبی جریان، تمام زیرمجموعه‌های هزینه‌ها افزایش می‌یابد، این تقریباً در تمام زیربخش‌های (شکل ۸) به‌جز شکل بخش الف در دو مقدار پایین نرخ جریان قابل مشاهده است. کمترین مقدار TC مربوط به $m^3(STP)/h$ ۱۲۰۰ $F = 1000$ در طول عمر غشاء زیر ۶ ماه است، اما پس از ۶ ماه کمترین مقدار TC مربوط به $m^3(STP)/h$ ۱۲۰۰ $F = 1200$ می‌باشد. این بدان معناست که برای غشاهای با طول عمر بیش از ۶ ماه، که شامل فعال‌ترین غشاهای صنعتی می‌باشند، دبی خوراک ۱۲۰۰ متر مکعب (STP) در ساعت از نظر اقتصادی جالب‌ترین عدد برای دبی خوراک یا به عبارتی این عدد دبی خوراک بهینه است. ما همچنین اثر طول عمر کل واحد جداسازی را بر روی TC در سطح‌های متفاوت غشاء در هر مرحله بررسی کردیم. نتایج در (شکل ۹ الف و ب) ارائه شده است.



شکل ۹. الف) TC در مقابل سطح غشاء در طول عمر صفحه مختلف برای الف) مرحله اول و ب) مرحله دوم

مورد افزایش سطح غشا در مرحله دوم (شکل ۹ ب) سناریوی کاملاً معکوس در مقایسه با افزایش سطح مرحله اول اتفاق می‌افتد. دلیل آن این است که افزایش سطح در مرحله دوم به‌اندازه آنچه برای مرحله اول مشاهده شد تأثیر قابل‌توجهی بر هزینه توربین ندارد زیرا دبی پسماند مرحله دوم درصد کمی از کل جریان پسماند است که وارد توربین می‌شود در نتیجه تأثیر آن بر هزینه‌های توربین زیاد نیست. این کاهش اندک در هزینه توربین مؤثرتر از افزایش هزینه‌های ترکیبی غشاها، مبدل‌های حرارتی و کمپرسورها در TC است که منجر به مشاهده کاهش TC با افزایش سطح غشاها در مرحله دوم می‌شود.

در فلوجارت زیر برای درک بهتر کاری که در این پروژه انجام شد، روند کاری که انجام شد و نتایجی که گرفته شد به‌صورت خلاصه آورده شده است.

در (شکل ۹ الف)، TC با افزایش سطح غشاء در مرحله اول با شیب نسبتاً ملایم افزایش می‌یابد. اما نرخ افزایش TC با کاهش طول عمر سیستم در مقایسه با افزایش سطح غشاء شدیدتر است. این بدان معنی است که پارامتر کل طول عمر واحد جداسازی از پارامترهای تعداد ماژول‌ها یا سطح غشاء در تعیین قابلیت اقتصادی سیستم حیاتی‌تر است. دو زیر (شکل ۹) با یکدیگر مقایسه می‌شوند، روند متناقض تغییر TC در دو شکل وجود دارد. این نتیجه به رابطه معکوس بین هزینه توربین و هزینه‌های مجموع غشاها، مبدل‌های حرارتی و کمپرسورها مربوط می‌شود. در نرخ جریان ثابت، افزایش سطح غشاء در مرحله اول باعث تراوایی بیشتر و دبی پسماند کمتر می‌شود، در نتیجه هزینه‌های ترکیبی غشاها، مبدل‌های حرارتی و کمپرسورها بر هزینه‌های توربین غالب است، از این رو شاهد افزایش TC با مساحت سطح غشا هستیم. در



شکل ۱۰. فلوچارت مراحل انجام و نتایج شبیه‌سازی، مدل‌سازی و ارزیابی اقتصادی در مطالعه حال حاضر

۴. نتیجه‌گیری

را افزایش می‌دهد اما در مرحله دوم این افزایش به کاهش هزینه کل منجر می‌شود بنابراین طول عمر و طراحی سطح غشاء دو عامل اصلی در اقتصادی بودن فرآیند هستند. یکی از نقاط قوت این مطالعه ارائه یک روند بهینه‌سازی شبیه‌سازی و از نتایج آن برآورد اقتصادی پیکربندی‌هایی از سیستم جداسازی غشایی می‌باشد که قبل از ساخت و صرف هزینه در مقیاس نیمه‌صنعتی و یا صنعتی می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های کل در اختیار مهندس طراح بگذارد. از جهتی این کارداری نقاط ضعفی نیز هست و یکی از عمده‌ترین آن‌ها عدم امکان تعمیم دهی نتایج آن به سیستم‌های غشایی با تعداد مراحل بیشتر و همچنین همراه با پیچیدگی جریان‌های برگشتی می‌باشد. زیرا در این حالت‌ها تعداد پارامترهای قابل بررسی بسیار زیاد می‌شوند و امکان بررسی تمامی آن‌ها به روش کنونی ممکن نیست و باید روندی دیگری برای بررسی آن‌ها طراحی گردد.

مراجع:

- [1]. Koutsiantzi C, Mitrakas M, Zouboulis A, Kellartzis I, Stavropoulos G, Kikkinides ES. Evaluation of polymeric membranes' performance during laboratory-scale experiments, regarding the CO₂ separation from CH₄. Chemosphere. 2022;299:134224.
- [2]. Osman AI, Nasr M, Farghali M, Bakr SS,

شبیه‌سازی شش پیکربندی سیستم‌های جداسازی غشایی در Aspen Plus و ارزیابی اقتصادی آن‌ها با استفاده از تحلیل‌های ساده اقتصادی در همان محیط که نهایتاً به کمک برنامه‌نویسی روابط فرآیندی و اقتصادی در MATLAB دنبال شد؛ در شبیه‌سازی، اثر سطح غشاء، ترکیب خوراک و ضخامت بر دبی تراوید CO₂ و CH₄ بررسی شد و نتایج نشان داد که سیستم‌های چندمرحله‌ای با بازیافت تراوا و پسماند به‌ویژه در جداسازی CO₂ عملکرد بهتری دارند هرچند این برتری در جداسازی CH₄ همواره مشهود نیست، با افزایش سهم متان در خوراک، تراوای CO₂ کاهش و تراوای CH₄ افزایش می‌یابد و در خوراک‌های غلیظ متان پیکربندی سه‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا بالاترین بازیابی را دارد درحالی‌که پیکربندی دومرحله‌ای با بازیافت پسماند کارایی کمتری ارائه می‌دهد، همچنین افزایش ضخامت غشاهای ماتریس آمیخته موجب کاهش تراوایی CO₂ می‌شود و برای به دست آوردن عملکرد بهینه استفاده از غشاهای نازک‌تر و سیستم‌های با بازیافت ترجیح داده می‌شود؛ از نظر اقتصادی، پیکربندی DoSRR با عملکرد مناسب و هزینه کمتر بهینه‌تر است هرچند پیکربندی TrSRR عملکرد بهتری دارد اما هزینه‌هایش تقریباً دو برابر است، غشاهای با عمر مفید بیش از دو سال از نظر اقتصادی به صرفه‌ترند زیرا تعویض و نگهداری کمتری دارند و دبی جریان بهینه برای این غشاها نزدیک به ۱۲۰۰ مترمکعب در ساعت است، در حالی که افزایش سطح غشاء در مرحله اول هزینه کل



- [9]. Mirfasihi SS, Jomekian A, Bazooyar B. Modeling and simulation of hydrocarbon dew point adjustment of natural gas via supersonic separators. In: *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications: Natural Gas Process Modelling and Simulation: Volume 8*. 2024. p. 279–310.
- [10]. Bilal Jan M, Ahmad Saddiqi H, Adil Khan M, Ullah A, Imran Ahmad M, Ahmad F. Optimizing propane–propylene separation via Aspen Plus simulation and machine learning-based predictive modeling. *Sep Sci Technol*. 2026;3:1–21.
- [11]. Xu J, Wang Z, Qiao Z, Wu H, Dong S, Zhao S, et al. Post-combustion CO₂ capture with membrane process: Practical membrane performance and appropriate pressure. *J Memb Sci*. 2019;581:195–213.
- [12]. Liu B, Yang X, Wang T, Zhang M, Chiang PC. CO₂ separation by using a three-stage membrane process. *Aerosol Air Qual Res*. 2019;19(12):167–75.
- [13]. Jomekian A, Behbahani RM. Experimental, modeling and AspenPlus Simulation of different configurations of membrane separation Systems for highly loaded CO₂ selective Pebax 1657-ZIF-8 membrane. *J Membr Sci Res* [Internet]. 2021;7. Available from: <https://doi.org/10.22079/jmsr.2020.136920.1411>
- [14]. Taifan GSP, Maravelias CT. Integrated membrane material design and system synthesis. *Chem Eng Sci*. 2023;269:134–42.
- [15]. Taifan GSP, Maravelias CT. Generalized optimization-based synthesis of membrane systems for multicomponent gas mixture separation. *Chem Eng Sci*. 2022;252:117482.
- Eltaweil AS, Rashwan AK, et al. Machine learning for membrane design in energy production, gas separation, and water treatment: a review. Vol. 22, *Environmental Chemistry Letters*. 2024. p. 505–60.
- [3]. Ferro FS, Carmo BS. Numerical modeling and simulation of hollow fiber dense membranes for CO₂/CH₄ separation using CFD. *J Memb Sci*. 2025;729:124134.
- [4]. Yao X, Freger V, He X, Wang R, Kong B. Three-dimensional CFD modeling for hollow fiber gas separation membrane modules based on a dual porous media model. *Chem Eng Sci*. 2025;302:120864.
- [5]. Saidi M, Farokhi G. Membrane-based modeling and simulation of natural gas dehydration. In: *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications: Natural Gas Process Modelling and Simulation: Volume 8*. 2024. p. 211–53.
- [6]. Vakylabad AB. Process modeling and simulation of nitrogen separation from natural gas. In: *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications: Natural Gas Process Modelling and Simulation: Volume 8*. 2024. p. 335–66.
- [7]. Zabiri H, Kamaruddin B. Case studies of modeling and simulation of natural gas sweetening processes. In: *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications: Natural Gas Process Modelling and Simulation: Volume 8*. 2024. p. 145–61.
- [8]. Vakylabad AB. Process modeling and simulation of natural gas sweetening by absorption processes. In: *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications: Natural Gas Process Modelling and Simulation: Volume 8*. 2024. p. 3–29.



- [16].Demirel SE, Li J, Hasan MMF. Membrane Separation Process Design and Intensification. Ind Eng Chem Res. 2021;60(19):7197–7217.
- [17].Abejón R, Casado-Coterillo C, Garea A. Techno-Economic Optimization of Multistage Membrane Processes with Innovative Hollow Fiber Modules for the Production of High-Purity CO₂ and CH₄ from Different Sources. Ind Eng Chem Res. 2022;61(23):8149–8165.
- [18].Ahmad F, Lau KK, Shariff AM, Murshid G. Process simulation and optimal design of membrane separation system for CO₂ capture from natural gas. Comput Chem Eng. 2012;36:119–28.
- [19].Choi J, Ideta K, Yi H, Kato T, Saito K, Watanabe H, et al. Marine biomass-derived activated carbon as an electrode material for electric double-layer capacitors. Carbon Lett. 2025;35(3):1221–33.
- [20].Ismail AF, Lorna W. Penetrant-induced plasticization phenomenon in glassy polymers for gas separation membrane. Vol. 27, Separation and Purification Technology. 2002.

Sensitivity Analysis and Economic Optimization of Multistage Membrane Configurations for Carbon Dioxide Separation from Methane

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

1. M.Sc. Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Materials Engineering, Es-farayan 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: 22 December 2025

Revised: 13 April 2026

Accepted: 03 May 2026

Keywords:

Methane-carbon dioxide separation
Mixed matrix membrane
Simulation
Aspen Plus
Economic evaluation

ABSTRACT

In this study, in order to perform a technical and economic comparative evaluation of membrane gas separation systems, six configurations consisting of single, two and three stages with permeate or waste return flow of membrane systems equipped with prefabricated membranes were simulated. These systems were designed for a case study of CO₂ separation from CH₄ in Aspen Plus environment and then the best configuration from an economic perspective was selected by short-cut economic calculations in the same software. This configuration was then transferred to MATLAB environment for more precise economic analyses. For this purpose, the permeability and selectivities of the prefabricated membranes used in the project were given as inputs to the MATLAB program and the output of the model, which was the purity of the exhaust gases and their recovery, was calculated. The global system performance index or IGP, which is simultaneously composed of the sum of the purity and the percentage of gas recovery, was calculated based on the process outputs. Using this index, the best membrane for the selected configuration was determined. Then, based on the physical and functional characteristics of the best sample, process economics calculations were performed and three key parameters Total costs, Capital costs and Operating costs were calculated. Based on the calculation of these parameters, it was determined that membranes with a lifespan of more than 2 years have lower replacement and maintenance costs and are more economically viable, due to the fact that the replacement costs are only a small part of the total system costs. Also, the optimal flow rate for membranes with a longer lifespan is about 1200 m³/h, due to the fact that at this flow rate, the total system cost is the lowest. As a result, using membranes with a long lifespan and adjusting the flow rate during this lifespan can improve the economic efficiency of the gas separation process.

DOR: 20.1001.1.2512.1115.1404.10.01

How to cite this article

S. Khademi, A. Kian, B. Maleki, Sensitivity Analysis and Economic Optimization of Multistage Membrane Configurations for Carbon Dioxide Separation from Methane. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2026; 13(1): 53-70. (https://ijge.irangi.org/article_738765.html)

* Corresponding Author.

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

Available online 21 June 2026

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

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



تبدیل متانول به آروماتیک‌های سبک با استفاده از نانوزئولیت HZSM5: اثرات شرایط عملیاتی

میثم مصطفائی^۱، فرانک اخلاقیان طباطبائی^۲*

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: fr.akhlaghian@uok.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

صفحه ۷۰ - ۸۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۴

چکیده

این مطالعه درباره استفاده از نانوزئولیت HZSM5 از شرکت زئوکیم برای تولید آروماتیک‌های سبک از متانول است. اثر مقدار نسبت Si/Al بررسی شد و کاتالیست HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۵۰ انتخاب شد. کاتالیست‌های HZSM5 به‌وسیله روش‌های تخلخل سنجی و تعیین مساحت سطح ویژه، پراش پرتو ایکس و دفع برنامه‌ریزی شده با دمای NH_3 تعیین مشخصات شدند. روش طرح مرکب مرکزی برای بررسی اثرات شرایط عملیاتی شامل دمای کوره، مقدار کاتالیست، سرعت جریان‌های متانول و نیتروژن بر روی مقدار متانول باقیمانده در محصول و تولید BTX به‌کاربرده شدند. مقادیر F برای مدل‌های متانول در محصول و تولید BTX به ترتیب برابر با ۱۲۳۳/۲۱ و ۱۴۹۷۱/۷۷ بودند. مقادیر p برای هر دو مدل کوچک‌تر از ۰/۰۰۱ بودند. نتایج تجزیه و تحلیل‌های آماری نشان دادند که سرعت جریان نیتروژن تأثیرگذارترین عامل بر تبدیل متانول و تولید BTX است. علاوه بر این‌ها، جملات برهم‌کنش بین عوامل تأثیرات اساسی بر تبدیل متانول و تولید BTX داشتند. شرایط عملیاتی برای حداکثر کردن مصرف متانول و تولید BTX بهینه شدند. عملکرد راکتور در شرایط عملیاتی بهینه؛ موجب حداکثر شدن بازده تولید BTX و متعاقباً فرآیند اقتصادی‌تر می‌شود.

کلیدواژه‌ها: آروماتیک‌های سبک، متانول به آروماتیک، نانوزئولیت HZSM5، روش سطح پاسخ، نسبت Si/Al، شرایط عملیاتی

۱. مقدمه

امروزه؛ کشورهایی که گاز طبیعی تولید می‌کنند، بر فرآیندهای تبدیلات گازی برای به دست آوردن مواد شیمیایی با ارزش افزوده تأکید دارند. متان عمدتاً جزء گاز طبیعی به‌عنوان ماده خام برای تولید مواد شیمیایی با ارزش افزوده و واسطه‌هایی مثل متانول و گاز سنتز به‌کاربرده می‌شود [۱-۳]. متانول، ساده‌ترین الکل، ۶۰ درصد تقاضا برای آن از صنایع شیمیایی است؛ و ۴۰ درصد تقاضا برای آن برای کاربرد در سوخت‌هاست [۴]. تبدیل کاتالیستی متانول به هیدروکربن‌ها^۱ (MTH) قدم مهمی در تبدیلات گاز طبیعی است و تبدیل متانول به آروماتیک‌ها^۲ (MTA) زیرمجموعه‌ای از روش‌های تبدیل متانول به هیدروکربن‌هاست. زئولیت‌ها کریستالی، دارای مساحت

1.Methanol to Hydrocarbons

2.Methanol to Aromatics



سطح ویژه بالا هستند، و نیز قابلیت گزینش پذیری با توجه به شکل، پایداری گرمایی و توانایی تبادل یون دارند. خواص فیزیکی و شیمیایی زئولیت‌ها با توجه به روش ساخت قابلیت تنظیم دارند. زئولیت‌ها، کاتالیست‌های متداول برای تبدیل متانول به هیدروکربن‌ها هستند. ZSM5 و شکل هیدروژنی آن، HZSM5 مثالی از زئولیت‌ها با پایداری گرمایی بالا، ماهیت اسیدی و غیرفعال شدن پایین هستند. تبدیل متانول با استفاده از HZSM5 به تولید آروماتیک در محدوده C_6 تا C_{10} منجر می‌شود [۵-۱۰].

تبدیل متانول با استفاده از کاتالیست HZSM5 از طریق شبکه‌ای از واکنش‌های پیچیده بین سایت‌های اسیدی برنستد و گونه‌های واسطه هیدروکربنی که معمولاً استخر هیدروکربن نامیده می‌شوند؛ انجام می‌شود. یک مکانیسم دارای دو تا چرخه، برای تبدیل متانول بر روی HZSM5 پیشنهاد شده است که در آن اولفین‌های سبک از متیلاسیون/کراکینگ اولفین‌های بزرگ به دست می‌آیند، درحالی‌که آروماتیک‌های سبک (بنزن، تولوئن و زایلن^۱ BTX) و اتیلن از آلکیلاسیون/دی آلکیلاسیون گونه‌های آروماتیک متیل دار به دست می‌آیند [۱۱].

تحقیقات زیادی برای پیدا کردن راهی که تولید آروماتیک‌ها از متانول را تقویت کند، انجام شده است. فریمن^۲ و همکاران (۲۰۰۲)، کاتالیست‌های HZSM5 و β -Ga₂O₃ را در واکنش MTA به کار بردند. آنها متوجه شدند که در مورد کاتالیست HZSM5 برای حداکثر شدن مقدار آروماتیک‌ها، مقدار بهینه‌ای برای سرعت جریان متانول وجود دارد، درحالی‌که برای کاتالیست β -Ga₂O₃/HZSM5 با افزایش سرعت جریان متانول، مقدار آروماتیک‌ها کاهش یافته است [۱۲]. وانگ^۳ و همکاران (۲۰۱۹) تولید آروماتیک‌ها از متانول و فوران را با استفاده از کاتالیست HZSM5 انجام دادند. وانگ و همکاران (۲۰۱۹) اثر دما را بررسی کردند و بیشترین بازده تولید آروماتیک‌های سبک در ۵۰۰ °C بوده و بازده در ۶۰۰ °C کاهش یافت، همچنین آنها متوجه شدند که بازده تولید هیدروکربن‌های آروماتیکی سبک با افزایش سرعت جریان متانول، به علت تشکیل پلی متیل

بنزن‌ها کاهش یافته است [۱۳]. لی^۴ و همکاران (۲۰۱۹) کاتالیست 2.0 wt.% P و 1.0 wt.% ZnO نشانده شده بر روی HZSM5 را در واکنش MTA به کار بردند. محدوده دمایی مورد بررسی آنها ۳۴۰ تا ۴۸۰ °C بود. لی و همکاران (۲۰۱۹) متوجه شدند که افزایش دما بازده تولید پارافین‌ها را کاهش ولی تولید آروماتیک‌های سبک را افزایش می‌دهد، آنها همچنین متوجه شدند که طول عمر کاتالیست با افزایش دما کاهش می‌یابد [۱۴]. چوتیان^۵ و همکاران (۲۰۱۹) HZSM5 را به وسیله خاکستر سبوس برنج اصلاح کردند و آن را در تولید هیدروکربن‌ها از متانول به کار بردند. نتایج چوتیان و همکاران (۲۰۱۹) افزایش در تولید آروماتیک‌ها، اما کاهش در اسیدیته کاتالیست با افزایش مقدار خاکستر برنج را نشان داد [۱۵]. شائو^۶ و همکاران (۲۰۲۰) یک فرآیند دومرحله‌ای را به کار بردند؛ ابتدا در یک بستر کاتالیستی با نسبت بالای Si/Al از ZSM5 متانول را به پروپن و بوتن تبدیل کردند، سپس در پایین بستر با کمک کاتالیست‌های تقویت شده با Zn و نسبت پایین Si/Al، آروماتیک‌های سبک را تولید کردند [۱۶].

(جدول ۱) نیز تعدادی از کارهای مطالعاتی انجام شده در زمینه تبدیل متانول به آروماتیک‌ها نشان می‌دهد.

در تعدادی از این کارها، اثرات شرایط عملیاتی مثل دمای کوره و سرعت جریان متانول به صورت تجربی و تک عاملی بررسی شده‌اند. در هیچ کدام اثر سرعت جریان گاز نیتروژن و مقدار کاتالیست بارگذاری شده مطالعه نشده‌اند. رابطه ریاضی مشخصی بین این عوامل و پاسخ‌های مصرف متانول و تولید BTX به دست نیامده، بهینه‌سازی شرایط عملیاتی انجام نشده و برهم‌کنش بین عوامل بررسی نشده‌اند.

استفاده از طرح آزمایش، رسیدن به نتایج قابل اعتماد را ممکن می‌سازد و منجر به صرفه‌جویی در زمان و کاهش تعداد آزمایش‌ها می‌شود. طرح آزمایش در شناسایی اثرات، اهمیت عوامل و بهینه کردن فرآیند کمک می‌کند. با روش سطح پاسخ، رابطه ریاضی بین عوامل و پاسخ‌ها برقرار می‌شود، امکان بهینه‌سازی و بررسی برهم‌کنش بین عوامل ممکن می‌شود، بدون آنکه مکانیسم فرآیند مشخص باشد [۲۶].

1. Benzene, Toluene, and Xylene
2. Freeman
3. Wang
4. Li
5. Chotiwat
6. Shao

این مطالعه، با هدف بهبود در تولید آروماتیک‌های سبک (بنزن، تولوئن، زایلین (BTX) از متانول و جستجوی اولیه برای به دست آوردن اثرات نسبت Si/Al نانو زئولیت HZSM5 انجام شد. متعاقباً، روش طرح آزمایش طرح مرکب مرکزی، یکی از روش‌های سطح پاسخ، برای بررسی و بهینه کردن شرایط عملیاتی و برهم‌کنش بین آنها استفاده شد. شرایط عملیاتی مورد بررسی در این کار شامل مقدار کاتالیست، دمای کوره و سرعت جریان‌های متانول و نیتروژن بودند.

جدول ۱. تعدادی از کارهای انجام شده

شماره	نویسندگان	سال انتشار	کاتالیست	شماره مرجع
۱	وای ونگ ^۱ و همکاران	۲۰۲۴	نانو ورقه ZSM5 تقویت شده با Ni و Zn	[۱۷]
۲	ژو ونگ ^۲ و همکاران	۲۰۲۴	نانوکریستال هسته-پوسته ZSM5@Zn/ZSM5	[۱۸]
۳	ام ونگ ^۳ و همکاران	۲۰۲۴	MOxZn/HZSM5	[۱۹]
۴	کیو زو ^۴ و همکاران	۲۰۲۵	زئولیت HZSM5 که اندازه حفرات آن مهندسی شده	[۲۰]
۵	وای ونگ و همکاران	۲۰۲۵	زئولیت ZSM5 توخالی تقویت شده با Fe و Zr	[۲۱]
۶	وای گیو ^۵ و همکاران	۲۰۲۵	ZSM5 با توزیع منطقه‌ای Al معکوس	[۲۲]
۷	وای زو ^۶ و همکاران	۲۰۲۶	Zn@ZSM5 با اندازه حفرات مهندسی شده	[۲۳]
۸	آرش عباسی و همکاران	۲۰۲۶	زئولیت ZSM5 با اندازه حفرات مهندسی شده و سنتز شده به‌وسیله پلیمرهای محلول در آب	[۲۴]
۹	آر گینگ ^۷ و همکاران	۲۰۲۶	اختلاط ایزومرهای Ga ₂ O ₃ با HZSM5	[۲۵]

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مواد

بنزن (C₆H₆)، تولوئن (C₇H₈)، زایلین (C₈H₁₀)، ۱ و ۲ و ۴-تری متیل بنزن (C₉H₁₂)، ۱، ۲ و ۴-تترا متیل بنزن (C₁₀H₁₄)، نفتالین (C₁₀H₈)، استن (C₃H₆O) و متانول (CH₃OH) همگی از شرکت مرک^۸ خریداری شده و استفاده شدند. کربید سیلیکون (SiC) از سیگما-آلدریج^۹، زئولیت HZSM5 با نسبت‌های Si/Al برابر با ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ از شرکت زئوکیم^{۱۰} و گاز نیتروژن با خلوص ۹۹/۹۹ درصد از شرکت فرا فن گاز مورد استفاده قرار گرفتند.

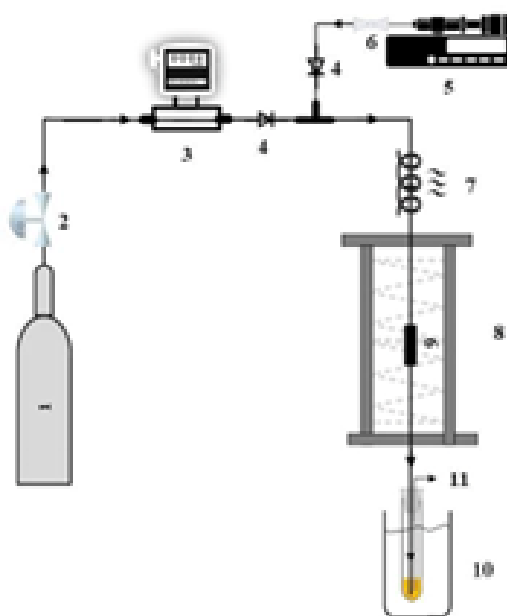
۲-۲. دستگاه‌های مورد استفاده در تعیین مشخصات

دستگاه پراش پرتو ایکس Philips X'pert برای بررسی ساختار کریستالی زئولیت HZSM5 به‌کاربرده شد. الگوهای پراش پرتو ایکس از ۱۰ تا ۸۰° با تابش آند Cu ka (λ=1.5 Å)، (40 kV, 40 mA) با سرعت اسکن ۰/۰۲°/s به‌دست آمدند. برای تعیین مساحت سطح ویژه و تخلخل سنجی از Belsorp-max استفاده شد. جذب و دفع برنامه‌ریزی شده با دمای آمونیاک برای بررسی ساختار اسیدی زئولیت‌های HZSM5 با استفاده از دستگاه Nano SRDI93 NH₃-TPD انجام شد.

1. Y. Wang
2. Zhuo Wang
3. M. Wang
4. Q. Xu
5. Y. Guo
6. Y. Xue
7. R. Geng
8. Merck
9. Sigma-Aldrich
10. Zeochem

۳-۲. واکنش کاتالیستی MTA

شماتیک سامانه مورد استفاده در (شکل ۱) نشان داده شده است. کنترل کننده شدت جریان جرمی و پمپ سرنگی به ترتیب سرعت جریان نیتروژن و متانول را تنظیم کردند. راکتور مورد استفاده لوله ۱/۴ اینچ از جنس فولاد ضدزنگ با کد ۳۱۶L و طول ۱۰ cm بود. پشم کوارتز به عنوان نگهدارنده کاتالیست استفاده شد. مخلوطی از کاتالیست و کربید سیلیکون با نسبت وزنی برابر داخل راکتور ریخته شد. کندانسور یک محفظه شیشه‌ای بود که در بشر حاوی آب سرد قرار داده شد. آروماتیک‌های تولید شده و متانول واکنش نداده در محفظه شیشه‌ای کندانسور مایع شدند. محصولات گازی (C_۱-C_۳) از کندانسور خارج شدند. مقداری از محصول مایع به عنوان نمونه به دستگاه کروماتوگراف گازی برای تجزیه و تعیین ترکیب درصد تزریق شد.



شکل ۱. شماتیک سامانه مورد استفاده: ۱- کیسول گاز نیتروژن، ۲- رگلاتور گاز، ۳- کنترل کننده شدت جریان گاز، ۴- شیر یک‌طرفه، ۵- پمپ سرنگی، ۶- شیر سوزنی، ۷- پیش گرم کننده، ۸- کوره، ۹- راکتور، ۱۰- سیستم کندانسور، ۱۱- به سمت تخلیه

۴-۲. تجزیه محصول

دستگاه کروماتوگراف گازی (مدل GC-2552 TG طیف گستره‌افراز) مجهز به آشکارساز یونی شعله و ستون کروماتوگرافی Suprawax-280 (طول ۳۰ m، قطر ۰/۲۵ mm، ضخامت ۰/۲۵ μm) برای تجزیه و تعیین ترکیب

درصد محصولات آروماتیکی به کار برده شد. گاز هیدروژن توسط دستگاه هیدروژنایزر تولید شده و به عنوان گاز حامل به کار برده شد. ستون کروماتوگرافی به مدت ۳۰ min در ۲۰۰°C نگهداری شد و سپس نمونه محصول تزریق شد. ستون به مدت ۳۰ min در ۲۰۰°C نگهداری شد و بعد از آن تا ۲۵۰°C گرم شد و سپس به تدریج تا دمای اطاق سرد شد.

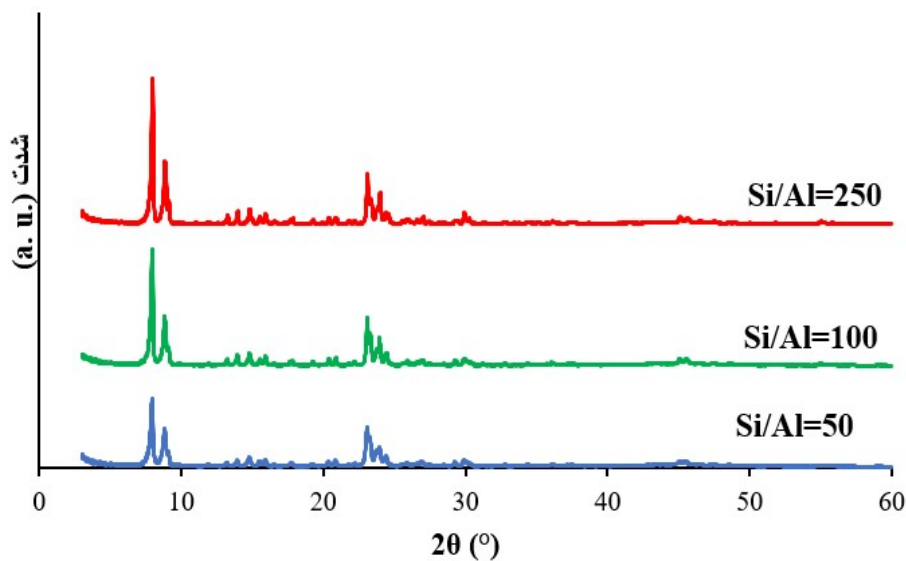
خطوط کالیبراسیون به وسیله به کار بردن محلول‌هایی با غلظت معین از اجزاء محصول مایع به دست آمدند. محصول مایع دوفازی (شامل لایه هیدروکربنی و لایه آبی) به وسیله اضافه کردن استن تک فازی شدند و مقداری از آن به دستگاه کروماتوگراف گازی تزریق شد. ترکیب درصد اجزاء محصول مایع با کمک، خطوط کالیبراسیون به دست آمدند.

۳. نتایج و بحث

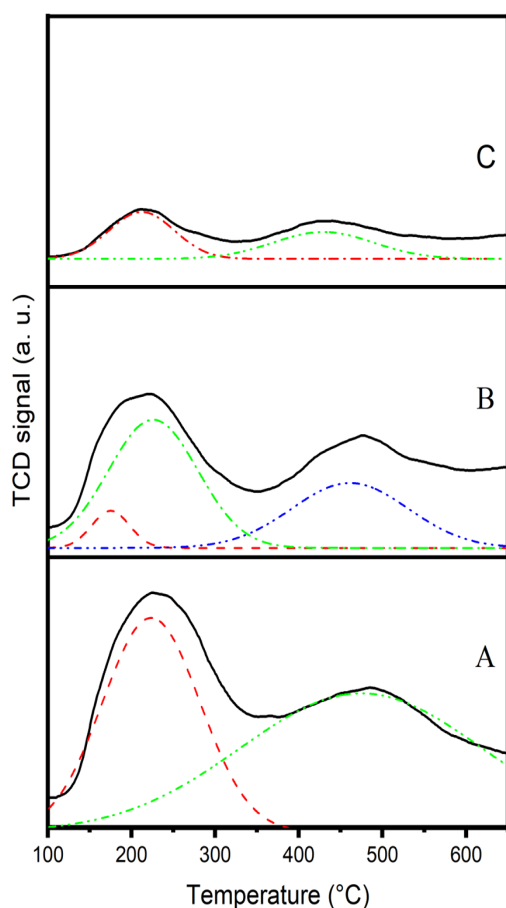
۳-۱. تعیین مشخصات کاتالیست

(شکل ۲)، الگوهای XRD زئولیت‌های HZSM5 را نشان می‌دهند. تیزترین پیک‌های HZSM5 در ۷/۹ و ۸/۸۱° برای HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۵۰، در ۷/۹۲ و ۸/۸۴° برای HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۱۰۰ و در ۷/۹۶ و ۸/۸۴° برای HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۲۵۰ مشاهده شد (JCPDS File No. 00-042-0024) [۲۷]. الگوهای پراش پرتو ایکس ساختار منوکلینیک زئولیت‌ها را تأیید می‌کند. شدت پیک‌ها با افزایش نسبت Si/Al که بلوری شدن بیشتر HZSM5 با Si/Al برابر ۲۵۰ را نشان می‌دهند. اندازه بلور به وسیله فرمول شرر $L = k\lambda / \beta(\cos\theta)$ تعیین شد که در آن L نشان دهنده اندازه بلور برحسب nm، k ضریب شکل برابر با ۰/۹، λ طول موج پرتو ایکس، β پهنای پیک در نصف ارتفاع، θ زاویه تفرق برحسب رادیان است [۲۸]. اندازه بلورهای به دست آمده ۶/۰۵، ۷/۹۶، ۱۲/۱۱ nm به ترتیب برای زئولیت‌های HZSM5 با نسبت‌های Si/Al ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ بودند. در تشکیل بلور، هسته‌زایی از Al شروع می‌شود، نسبت بالای Si/Al به معنی آلومینیم کمتر و هسته‌زایی کمتر است. هسته‌های بلور کمتر، بیشتر می‌توانند رشد کنند؛ و بنابراین، اندازه بلور با افزایش نسبت Si/Al افزایش یافته است [۲۹-۳۰].

1. Scherrer Formula



شکل ۲. الگوهای XRD زئولیت‌های HZSM5: (الف) $\text{Si/Al}=50$ ، (ب) $\text{Si/Al}=100$ ، (ج) $\text{Si/Al}=250$



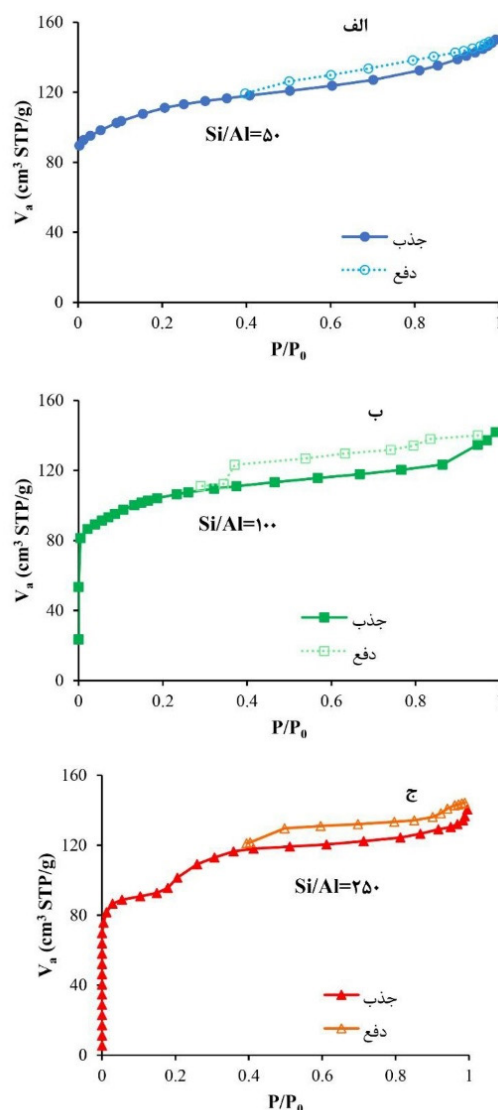
شکل ۳. پروفایل‌های $\text{NH}_3\text{-TPD}$ زئولیت‌های HZSM5 پیک‌های قابل مشاهده را نشان می‌دهد

ساختار اسیدی زئولیت‌های HZSM5 با نسبت‌های Si/Al برابر با ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ از طریق دفع برنامه‌ریزی شده آمونیاک بررسی شدند. چگالی سایت‌های اسیدی خیلی زیاد در فعالیت کاتالیستی و نیمه‌عمر HZSM5 در واکنش MTA نقش دارند. (شکل ۳)، پروفایل‌های $\text{NH}_3\text{-TPD}$ زئولیت‌های HZSM5 را پیک‌های قابل مشاهده نشان می‌دهد. سرعت گرم کردن 10°C/min بود. اولین پیک در $210/3^\circ\text{C}$ و $218/2^\circ\text{C}$ به ترتیب برای HZSM5 با نسبت Si/Al به ترتیب برابر با ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ ظاهر شدند. پیک بعدی در $417/5^\circ\text{C}$ و $472/9^\circ\text{C}$ به ترتیب برای HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ ظاهر شدند. پیک‌های مربوط به دماهای پایین‌تر مربوط به سایت‌های اسیدی ضعیف‌اند، درحالی‌که پیک‌های با دمای بالاتر به سایت‌های اسیدی قوی نسبت داده می‌شوند [۱۶-۱۹، ۲۰]. بیشترین شدت مشاهده شده مربوط به زئولیت‌های HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۵۰ است که نشان دهنده حضور سایت‌های قوی اسیدی در ساختار آن است. (جدول ۲) نشان می‌دهد که هرچه نسبت Si/Al افزایش یابد، تعداد کل سایت‌های اسیدی و نسبت سایت‌های اسیدی ضعیف به قوی کاهش می‌یابد.

جدول ۲. خواص اسیدی زئولیت‌های HZSM5

زئولیت HZSM5	ظرفیت اسیدی ($\mu\text{mol/g}$)			قوی/ضعیف
	کل	قوی	ضعیف	
Si/Al=50	۸۰۵/۲	۳۸۹/۴	۴۱۵/۸	۱/۰۶
Si/Al=100	۴۹۲/۶	۲۳۷/۷	۲۵۴/۹	۱/۰۷
Si/Al=250	۱۷۳/۱	۹۸/۶	۷۴/۵	۰/۷۵

ساختار میکرو و مزو متخلخل زئولیت‌های HZSM5 (جدول ۳) نشان داد که بیشترین مساحت سطح مربوط به به‌وسیله تحلیل ایزوترم جذب/دفع نیتروژن بررسی شدند زئولیت با نسبت Si/Al برابر با ۲۵۰ است. هرچه که مقدار (شکل ۴). این ایزوترم‌ها خواصی مشابه ایزوترم‌های نوع IV دارند. پسماند از نوع H3 است که نشان دهنده حفره‌های نامنظم به‌صورت شکاف‌های بین صفحات است [۳۳].



شکل ۴. ایزوترم‌های جذب/دفع سطحی N_2 زئولیت‌های HZSM5: (الف) Si/Al=50, (ب) Si/Al=100, (ج) Si/Al=250

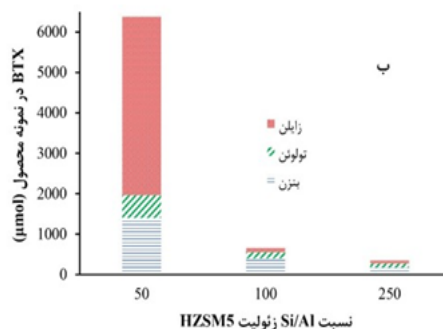
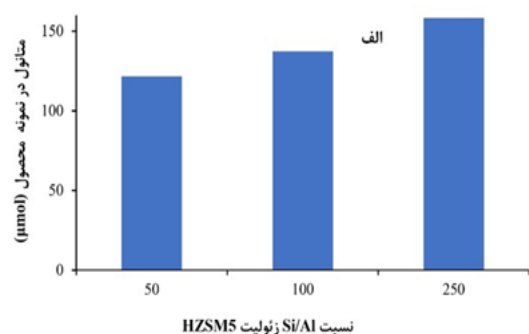
جدول ۳. خواص ساختاری زئولیت‌های HZSM5

زئولیت HZSM5	مساحت سطح ویژه (m ² /g)						قوی/ضعیف
	V _{total}	V _{meso}	V _{micro}	S _{total}	S _{meso}	S _{micro}	
Si/Al=50	۰/۰۸۷۷۹	۰/۰۵۶۶۸	۰/۰۳۱۱	۶۸/۴۳۲	۲۰/۹۸۳	۴۷/۴۴۹	۱/۲۲
Si/Al=100	۰/۰۸۳۷۲	۰/۰۵۱۳۵	۰/۰۳۳۳۷	۶۵/۹۱۵	۱۵/۸۴۷	۵۰/۰۶۸	۱/۲۲
Si/Al=250	۰/۰۹۴۷۶	۰/۰۳۸۷۹	۰/۰۵۵۹۷	۱۰۱/۷۳	۱۲/۷۹۵	۸۸/۹۳۵	۱/۲۲

۲-۳. اثر نسبت Si/Al در زئولیت HZSM5

زئولیت‌های HZSM5 با نسبت‌های Si/Al برابر با ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ به‌عنوان کاتالیست‌های تولید آروماتیک‌ها به‌کاربرده شدند. بیشترین مول متانول مصرف شده و BTX تولید شده با استفاده از زئولیت HZSM5 با نسبت Si/

Al برابر با ۵۰ به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهند که هرچه نسبت Si/Al کمتر باشد (یا مقدار Al بیشتر باشد) در HZSM5 منجر به مصرف متانول و تولید آروماتیک بیشتر می‌شود. زئولیت HZSM5 با Si/Al برابر با ۵۰ به‌عنوان بهترین زئولیت برای بررسی بیشتر واکنش MTA به‌کاربرده شد.



شکل ۵. مقادیر (الف) متانول، (ب) BTX در نمونه محصول در زئولیت‌های HZSM5 مختلف، شرایط عملیاتی: دمای کوره ۴۸۰ °C، مقدار کاتالیست ۰/۱۳ g، سرعت جریان متانول ۰/۰۳ mL/min، سرعت جریان نیتروژن ۷/۵ mL/min، زمان ۶۰ min

و نیتروژن، در آزمایش تبدیل متانول به آروماتیک‌های سبک به‌وسیله زئولیت HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۵۰، از نرم‌افزار طرح آزمایش دیزاین اکسپرت (نسخه ۱۱) و روش طرح مرکب مرکزی برای طراحی آزمایش‌ها استفاده شد. محدوده تغییرات، متغیرهای عملیاتی با کمک مقالات و آزمایش‌های اولیه تعیین شدند [۱۴-۱۲]. متغیرها در پنج سطح مورد بررسی قرار گرفتند. دمای کوره در مقادیر ۴۰۰، ۴۲۰، ۴۵۰، ۴۸۰ °C و ۵۰۰؛ کاتالیست در مقادیر ۰/۰۵، ۰/۰۷، ۰/۱، ۰/۱۳ و ۰/۱۵ g؛ سرعت جریان متانول در مقادیر ۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۵۵، ۰/۰۸ و ۰/۱ mL/min؛ و سرعت جریان نیتروژن در مقادیر ۷/۵، ۹، ۱۱/۲۵، ۱۳/۵ و ۱۵ mL/min بودند. (جدول ۴) جزئیات طرح آزمایش را همراه با پاسخ‌های تجربی و مدل‌سازی نشان می‌دهد.

در واکنش تبدیل متانول به آروماتیک‌ها؛ چگالی سایت‌های اسیدی، قدرت سایت‌ها و مساحت سطح ویژه نقش دارند. سایت‌های اسیدی قوی، مولکول‌ها را به‌واسطه‌ها تبدیل می‌کنند، ولی می‌توانند منجر به کراکینگ، تشکیل کک و هیدروکربن‌های سبک C₁-C₄ نیز شوند. سایت‌های اسیدی ضعیف، تشکیل واسطه‌های حلقوی و آروماتیک‌ها را تقویت می‌کنند. مساحت سطح ویژه مزو بیشتر، موجب می‌شود که سایت‌های فعال‌تر بیشتری برای جذب سطحی متانول و تبدیل آن در دسترس باشند و موجب کنترل بهتر توزیع محصولات می‌شود [۳۶-۳۴].

۳-۳. اثرات شرایط عملیاتی و بهینه‌سازی

در این کار برای بررسی اثرات شرایط عملیاتی، دمای کوره، مقدار کاتالیست، شدت جریان‌های متانول





جدول ۴. طراحی آزمایش‌ها برای بررسی اثرات شرایط عملیاتی و پاسخ‌ها، به‌وسیله استفاده از زئولیت HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۵۰ و زمان ۶۰ min

شماره	دمای کوره (°C)	مقدار کاتالیست (g)	شرایط عملیاتی		پاسخ‌ها	
			سرعت جریان متانول (mL/min)	سرعت جریان نیتروژن (mL/min)	متانول در محصول (μmol)	BTX محصول (μmol)
					مدل سازی	تجربی
۱	۴۵۰	۰/۱	۰/۰۱	۱۱/۲۵	۳۹۵	۳۳۰/۶
۲	۴۵۰	۰/۰۵	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۵۸۹	۱۱۵۱
۳	۴۵۰	۰/۱	۰/۱	۱۱/۲۵	۴۵۶	۲۲۷۶
۴	۴۸۰	۰/۰۷	۰/۱	۱۳/۵	۶۵۲	۴۹۲
۵	۴۵۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۷/۵	۲۹۷	۵۱۳۸
۶	۴۸۰	۰/۱۳	۰/۰۸	۹	۲۱۵	۵۰۵۸/۴۱
۷	۴۲۰	۰/۱۳	۰/۰۳	۱۳/۵	۷۶۰	۳۳۴۷/۹۳
۸	۴۵۰	۰/۱۵	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۴۳۴	۲۷۴۷
۹	۴۵۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۴۷۲	۲۶۷۶/۴
۱۰	۴۵۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۴۸۶	۲۶۵۸
۱۱	۴۵۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۱۵	۶۹۵	۱۳۳۳
۱۲	۴۵۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۴۶۵	۲۶۷۶/۰۴
۱۳	۴۲۰	۰/۰۷	۰/۰۳	۹	۲۵۲	۴۷۷۷/۵۷
۱۴	۴۲۰	۰/۰۷	۰/۰۸	۹	۲۷۹	۴۷۴۰/۱۷
۱۵	۴۲۰	۰/۱۳	۰/۰۸	۱۳/۵	۸۰۲	۳۳۶۵/۲۱
۱۶	۴۵۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۴۷۹	۲۶۷۴/۴
۱۷	۴۰۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۵۰۵	۱۸۶۸
۱۸	۴۸۰	۰/۰۷	۰/۰۸	۱۳/۵	۶۷۱	۱۶۹۵/۴۴
۱۹	۵۰۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۴۵۸	۲۶۹۲
۲۰	۴۵۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۴۸۰	۲۶۷۶/۴
۲۱	۴۸۰	۰/۱	۰/۰۳	۹	۱۷۷	۵۳۱۱/۷

در صورتی که معادلات ریاضی استخراج شده با توجه به مکانیسم فرآیند در دسترس نباشد، معادلات ریاضی به‌دست‌آمده از طراحی آزمایش، وسیله خوبی برای بررسی اثرات عوامل مختلف بر روی فرآیند است. این معادلات ریاضی معمولاً چند جمله‌ای‌هایی با مرتبه‌های مختلف از عوامل مؤثر بر فرآیند هستند. (جدول ۵ و ۶)، جداول تجزیه و تحلیل واریانس را برای مدل‌های مقدار متانول در محصول و مقدار BTX در محصول هستند. مقدار F بالا و مقدار p کوچک هر دو مدل، اعتبار آنها را تأیید می‌کند. مدل‌های ریاضی (معادلات ۱ و ۲) به‌صورت زیر هستند:

$$R1 = -9952.4980 + (23.83146)A + (54808.84629)B + (3522.9093)C + (373.07531)D - (143.59799)AB - (0.883703)AD + (501.97893)BD + (13064.93)B^2 - (26339.5868)C^2 + (1.22043)D^2 \quad (1)$$

$$R2 = 55416.92 + (449.06)A - (2.85729 \times 10^4)B + (3.5891 \times 10^6)C - (23365.15311)D + (6279.67)AB - (16228.53)AC + (50.4739)AD - (2.43873 \times 10^5)BC + (2.51118 \times 10^5)BD + (3494.67885)CD - (1.16081)A^2 - (2.9096 \times 10^5)B^2 + (5692.59259)C^2 + (39.75822)D^2 - (534.5327)ABD + (18.2227)A^2C \quad (2)$$

مقدار F بزرگ (۱۲۳۳/۲۱) و مقدار p کوچک (۰/۰۰۰۱)؛ اعتبار مدل مقدار متانول در محصول را نشان می‌دهند. R^2 (۰/۹۹۹۲) و $adjR^2$ (۰/۹۹۸۴) به یک نزدیک‌اند و صحت مدل را نشان می‌دهند. دقت مناسب (۱۲۲/۰۲) نسبت سیگنال به اغتشاش است و مقدار بزرگی دارد و مناسب بودن مدل را نشان می‌دهد. عدم قطعیت، پراکندگی نتایج آزمایش‌ها را مشخص می‌کند و معمولاً به صورت انحراف معیار بیان می‌شود. در مدل مقدار متانول باقیمانده، انحراف معیار ۷/۰۰ است.

است که با توجه به محدوده اعداد پاسخ قابل توجه نیست. در مدل مصرف متانول، مقدار F سرعت جریان نیتروژن (D و D^2) نشان می‌دهد که بیشترین تأثیر را در تبدیل متانول دارد. بعد از آن جملات مؤثرتر مقدار کاتالیست (B و B^2)، سرعت جریان متانول (C و C^2) هستند، دمای کوره (A) کمترین تأثیر را داشته است. در بین جملات برهم‌کنش اثر جمله AB (مقدار F ۱۰۸۸/۴۱)، برهم‌کنش بین دمای کوره و مقدار کاتالیست، مهم‌ترین است (جدول ۵).

جدول ۵. تجزیه و تحلیل واریانس برای مقدار متانول در محصول

منبع	متانول در محصول (μmol)		مدل
	مقدار P	مقدار F	
مدل	<۰/۰۰۰۱	۱۲۳۳/۲۱	
A، دمای کوره ($^{\circ}\text{C}$)	۰/۰۰۰۸	۲۲/۵۲	
B، مقدار کاتالیست (g)	<۰/۰۰۰۱	۲۴۴/۹۲	
C، نرخ جریان متانول (mL/min)	<۰/۰۰۰۱	۷۸/۰۱	
D، نرخ جریان نیتروژن (mL/min)	<۰/۰۰۰۱	۱۶۱۴/۸۴	
AB	<۰/۰۰۰۱	۱۰۸۸/۴۱	
AD	<۰/۰۰۰۱	۲۳۱/۸۶	
BD	<۰/۰۰۰۱	۷۴/۸۲	
B^2	<۰/۰۰۰۱	۴۰/۸۱	
C^2	۰/۰۰۱	۱۰۸/۸۳	
D^2	۰/۰۰۷۳	۱۱/۷۲	
کمبود برازش	۰/۷۳۴۷	۰/۵۸۵۲	
نامعتبر			





جملات برهم کنش موقعیتی را که در آن اثر یک متغیر مستقل بستگی به مقدار متغیر مستقل دیگر دارد، نشان می‌دهند. در برهم کنش‌ها، گاهی اوقات متغیرها اثرات همدیگر را تقویت می‌کنند و موجب هم‌افزایی می‌شوند و بعضی مواقع اثرات همدیگر را کاهش می‌دهند. این امکان وجود دارد که بعضی متغیرها در یک محدود از دامنه تغییرات اثرات هم‌افزایی داشته و در محدوده دیگری اثرات متضاد داشته باشند. مطالعه برهم کنش‌ها، بررسی نحوه اثر متغیرها را به صورت هم‌زمان امکان‌پذیر می‌سازد [۲۶]. شکل‌های (۶ الف) تا (۶ ج) نمودارهای برهم کنش اثرات شرایط عملیاتی بر مقدار متانول در نمونه محصول را نشان می‌دهند. (شکل ۶ الف) نشان می‌دهد که در مقادیر کاتالیست کمتر از $g/0.1$ ، با افزایش دما، متانول در محصول خروجی افزایش یافته است، درحالی‌که در مقادیر کاتالیست بیشتر از $g/0.1$ ، با افزایش دما متانول در خروجی کاهش یافته است که علت آن مصرف متانول در واکنش‌ها و افزایش شدت انجام واکنش‌ها با دما بوده است. در دماهای حدوداً زیر $^{\circ}C/440$ با افزایش مقدار کاتالیست، متانول در خروجی افزایش یافته است، در حالی‌که در دماهای بالای $^{\circ}C/440$ ، افزایش مقدار کاتالیست، موجب کاهش متانول در محصول شده که علت آن تشدید واکنش‌ها با افزایش دما و مصرف متانول بوده است. (شکل ۶ ب)، نشان می‌دهد که با افزایش دما، به علت مصرف در واکنش‌های تولید آروماتیک‌های سبک و گازهای $C1-C5$ ، متانول در خروجی کاهش یافته است، همچنین با افزایش سرعت گاز نیتروژن، به علت کاهش زمان اقامت ماده واکنشگر متانول و کم شدن مصرف آن، متانول در محصول افزایش یافته است. (شکل ۶ ج) نیز روند کاهشی متانول موجود در محصول همراه با افزایش مقدار کاتالیست را نشان می‌دهد، تفسیر روند تقویت انجام واکنش‌ها با افزایش مقدار کاتالیست است. همچنین (شکل ۶ ج) روند افزایش مقدار متانول در محصول را با افزایش سرعت جریان گاز نشان می‌دهد که همان‌طور گفته شد این روند به علت کاهش زمان اقامت واکنشگر متانول است.

برای مدل تولید BTX، مقادیر F و p به ترتیب برابر $14971/77$ و کوچک‌تر از 0.001 هستند. R^2 و $adjR^2$

به ترتیب برابر با 0.9999 و $1/0.000$ هستند و تطبیق خوب نتایج تجربی و مدل‌سازی را نشان می‌دهند [۳۷-۳۸]. دقت مناسب ($436/114$) مناسب بودن مدل را نشان می‌دهد. مقدار انحراف معیار در این مدل $12/44$ است؛ که با توجه نتایج مقادیر BTX مقدار کوچکی است. در مدل تولید BTX، سرعت جریان گاز نیتروژن بیشترین مقدار F ($46763/65$) را دارد و بیشترین تأثیر را روی تولید BTX داشت. بعد از آن، مقدار کاتالیست بیشترین تأثیر را داشته است. جمله برهم کنش BD بین مقدار کاتالیست و سرعت جریان گاز نیتروژن با مقدار F $10525/92$ بیشترین تأثیر را روی تولید BTX داشتند (جدول ۶).

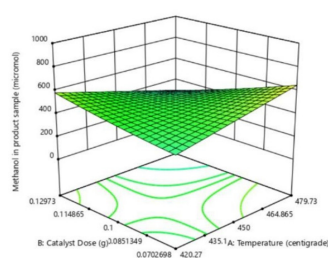
شکل‌های (۷ الف) تا (۷ و) برهم کنش بین عوامل را نشان می‌دهد؛ و در کل بازه تغییرات عامل مورد بررسی روند تغییرات یکسان است. شکل‌های (۷ الف) و (۷ ج) نشان می‌دهند که با افزایش دما، مقدار تولید BTX افزایش یافته است که نشان‌دهنده افزایش سرعت انجام واکنش‌های تولید BTX با دماست. شکل‌های (۷ الف)، (۷ د) و (۷ هـ) نشان می‌دهند که با افزایش مقدار کاتالیست، تولید BTX افزایش یافته است. شکل‌های (۷ ج) و (۷ و) نشان می‌دهند که با افزایش سرعت جریان متانول، تولید BTX کاهش یافته است؛ که می‌تواند به علت تشکیل کک و یا تبدیل متانول به هیدروکربن‌هایی غیر از BTX باشد. شکل‌های (۷ ج)، (۷ هـ) و (۷ و) مشخص است که با افزایش سرعت جریان گاز نیتروژن، تولید BTX کاهش یافته است، علت آن کاهش زمان اقامت مواد واکنشگر در راکتور است. در شکل (۷ ب)؛ روندها در نواحی مختلف تغییرات عوامل دما و سرعت جریان متانول متفاوت است. در دماهای حدوداً زیر $^{\circ}C/470$ با افزایش سرعت جریان متانول، مقدار تولید BTX کاهش یافته اما در زمان‌های بیشتر از $^{\circ}C/470$ با افزایش سرعت جریان متانول، تولید BTX افزایش یافته است. در مقدار متانول ثابت و حدوداً زیر 0.5 mL/min با افزایش دما، روند تغییرات تولید BTX افزایشی و بعد کاهشی بوده است. روند افزایشی مربوط به افزایش شدت واکنش تولید BTX با دماست، درحالی‌که روند کاهشی می‌تواند به دلیل تشکیل کک باشد [۳۹-۴۱].



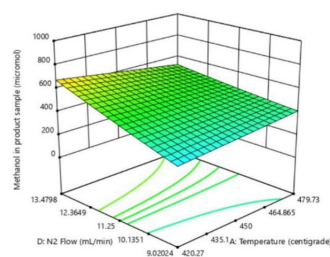
جدول ۶. تجزیه و تحلیل واریانس برای مقدار BTX در محصول

مدل	متانول در محصول (μmol)	
	مقدار F	مقدار P
مدل	۱۴۹۷۱/۷۷	< ۰/۰۰۰۱
A, دمای کوره (°C)	۲۱۹۳/۰۷	< ۰/۰۰۰۱
B, مقدار کاتالیست (g)	۸۲۲۷/۴۴	< ۰/۰۰۰۱
C, نرخ جریان متانول (mL/min)	۳۴۲۶/۶۸	< ۰/۰۰۰۱
D, نرخ جریان نیتروژن (mL/min)	۴۶۷۶۳/۶۵	< ۰/۰۰۰۱
AB	۱۱۸۴/۸۵	< ۰/۰۰۰۱
AC	۸۳/۰۴	< ۰/۰۰۰۱
AD	۸۳۵/۰۴	< ۰/۰۰۰۱
BC	۱۰۴۵/۰۱	< ۰/۰۰۰۱
BD	۱۰۵۲۵/۹۲	< ۰/۰۰۰۱
CD	۲۲۴۶/۶۳	< ۰/۰۰۰۱
A ²	۱۴۵۰/۱۰	< ۰/۰۰۰۱
B ²	۴۸۸۲/۹۰	< ۰/۰۰۰۱
C ²	۱۲۱/۲۰	۰/۰۰۰۴
D ²	۲۸۸/۷۶	< ۰/۰۰۰۱
ABD	۱۷۵۱۵/۷۲	< ۰/۰۰۰۱
A ² C	۳۹۷۵/۹۳	< ۰/۰۰۰۱

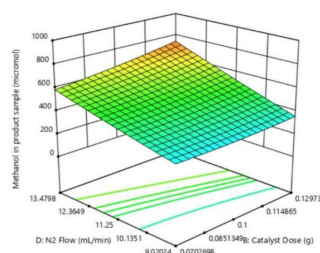
الف



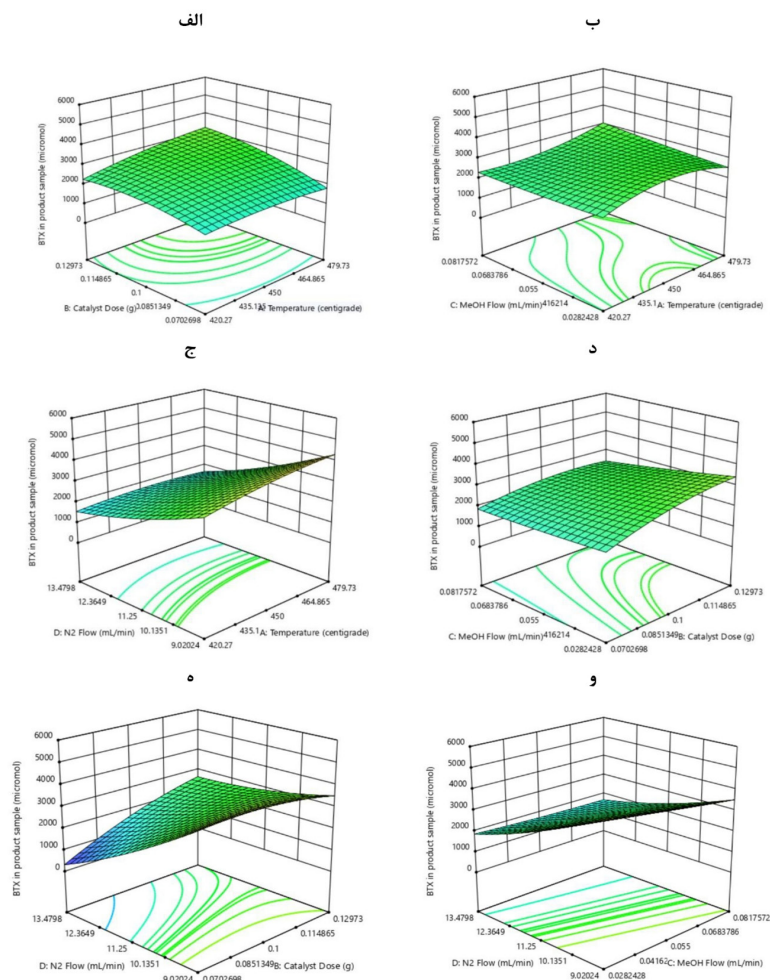
ب



ج



شکل ۶. نمودارهای سطحی سه بعدی اثرات شرایط عملیاتی بر مقدار متانول در نمونه محصول با استفاده از ژئولیت HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۵۰ و زمان ۶۰ min



شکل ۷. نمودارهای سطحی سه بعدی اثرات شرایط عملیاتی بر مقدار BTX در نمونه محصول با استفاده از ژئولیت HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۵۰ و زمان ۶۰ min

در این مرحله، نقاط بهینه به وسیله جستجو بین نقاط پیشنهادی نقاط بهینه انتخاب شده را نشان می‌دهد. آزمایش‌های مربوط به نتایج تجربی نقطه بهینه چند بار تکرار و میانگین آنها گزارش شد. شده به وسیله نرم‌افزار و نقاط طراحی انتخاب شدند. (جدول ۷)،

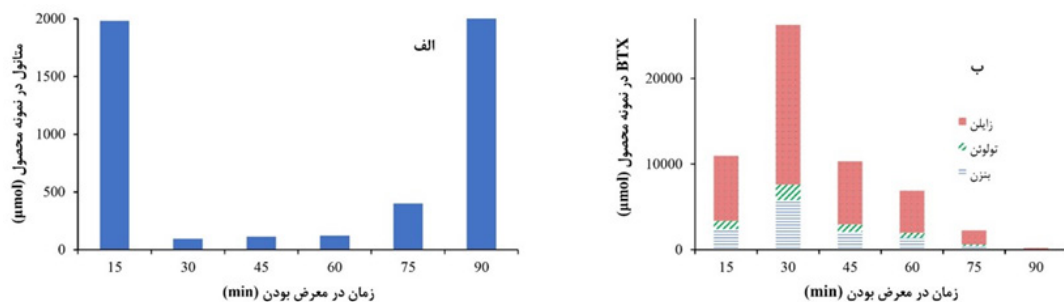
جدول ۷. نقاط بهینه انتخاب شده با استفاده از ژئولیت HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۵۰

نقطه ۱	نقطه ۲	
۶۰	۶۰	زمان (min)
۴۸۰	۴۸۰	دمای کوره (°C)
۰/۱۳	۰/۱۳	مقدار کاتالیست (g)
۰/۰۳	۰/۰۳	نرخ جریان متانول (mL/min)
۷/۵	۹	نرخ جریان نیتروژن (mL/min)
۱۷۷/۴۹	۱۲۱/۶۸	تجربی
۱۷۷/۰۹	۱۲۴/۵۵	مدل سازی
۵۲۹۴	۶۸۷۸	تجربی
۵۲۹۴	۶۹۴۳/۶۷	مدل سازی
		متانول در محصول (mL/min)
		BTX در محصول (mL/min)

۳-۴. اثر زمان در معرض بودن

۳۰ min، تولید زایلین کاهش، درحالی که تولید بنزن و تولوئن افزایش می یابد. زمان بهینه برای واکنش MTA، ۳۰ min بود. به علت مقدار بالای BTX، مول متانول تبدیل شده به آروماتیک ها نیز بیشتر بوده و زایلین بیشتری تولید شده که ارزش افزوده بیشتری نسبت به بنزن و تولوئن دارد.

تولید آروماتیک ها در ۳۰ min اول افزایش می یابد (شکل ۸). با گذشت زمان های بزرگ تر از ۳۰ min تشکیل کک افزایش می یابد و منجر به کاهش تولید آروماتیک و BTX می شود [۴۱-۴۲]. حداکثر تولید زایلین در ۳۰ min مشاهده شد، در زمان های بزرگ تر از

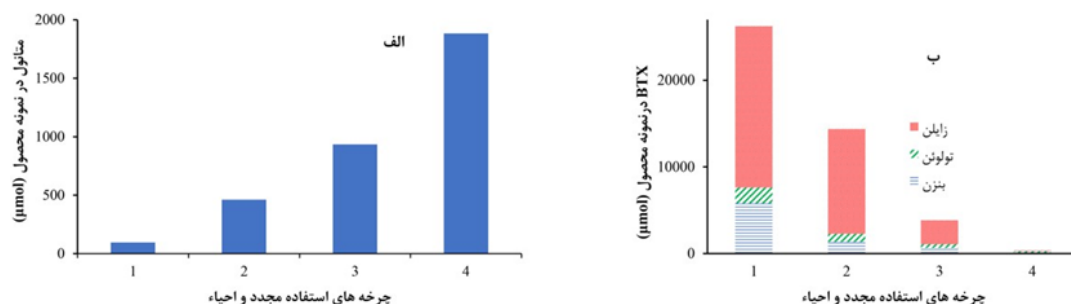


شکل ۸. مقادیر (الف) متانول، (ب) BTX در نمونه محصول برحسب زمان در معرض جریان بودن با استفاده از ژئولیت HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۵۰، شرایط عملیاتی: دمای کوره ۴۸۰ °C، مقدار کاتالیست ۰/۱۳ g، سرعت جریان متانول ۰/۰۳ mL/min، سرعت جریان نیتروژن ۷/۵ mL/min

۳-۵. استفاده مجدد

شیب ۴ °C/min به ۶۰۰ °C افزایش یافت و به مدت ۲ h در این دما تحت جریان پیوسته هوا نگهداری شد. بعد از احیاء، کوره خاموش شد و تا دمای اطاق سرد شد؛ قبل از اینکه واکنش MTA مجدد انجام شود. این فرآیند تکرار شد؛ تا مقدار آروماتیک تولید شده قابل صرف نظر کردن شد. هر چه که چرخه های احیاء افزایش یافت، مقدار متانول مصرف شده و BTX تولید شده کاهش یافت (شکل ۹). کاهش فعالیت کاتالیست بعد از احیاء در دمای ۶۰۰ °C و در حضور هوا نشان دهنده تشکیل کک سخت (گرافیتی) است، همچنین سایت های اسیدی به وسیله کک پوشانده شده و برای انجام واکنش دیگر در دسترس نیستند [۴۳-۴۴].

احیاء کاتالیست، اثرات قابل توجهی بر جنبه های اقتصادی و محیط زیستی فرآیند MTA دارد. وقتی فعالیت کاتالیست تا یک حدی کاهش می یابد، معمولاً احیاء شده و دوباره مورد استفاده قرار می گیرد. فرآیند تکلیس، متداول ترین روش احیاء کاتالیست و روش جداسازی کک است. در این مطالعه؛ پارامترهای عملیاتی که برای تولید آروماتیک ها به کار برده شدند، شامل دمای کوره ۴۸۰ °C، مقدار کاتالیست ۰/۱۳ g، سرعت جریان متانول ۰/۰۳ mL/min، سرعت جریان نیتروژن ۷/۵ mL/min و زمان ۳۰ min بودند. بعد از مرحله احیاء، هوا با سرعت جریان ۴۰۰۰ mL/min وارد راکتور شده و دمای کوره با



شکل ۹. چرخه های استفاده مجدد و احیاء؛ مقادیر (الف) متانول، (ب) BTX در نمونه محصول با استفاده از ژئولیت HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۵۰، شرایط عملیاتی: دمای کوره ۴۸۰ °C، مقدار کاتالیست ۰/۱۳ g، سرعت جریان متانول ۰/۰۳ mL/min، سرعت جریان نیتروژن ۷/۵ mL/min و زمان ۶۰ min



۳-۶. مقایسه با سایر کارها

کیوانی^۱ و همکاران (۲۰۲۰)، HZSM5 با Si/Al برابر با ۳۰ را به وسیله Zn و فسفر اصلاح کردند و در واکنش تبدیل متانول به آروماتیک‌ها به کار بردند، گزینش پذیری BTX به کل آروماتیک‌ها ۸۲/۱ درصد بود [۴۵]. صابر^۲ و همکاران (۲۰۲۲) از ژئولیت HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۲۸ برای واکنش MTA استفاده کردند. گزینش پذیری BTX به کل آروماتیک‌ها ۷۶/۸۳ درصد بود [۴۶]. ذرات ZSM5 به وسیله استفاده از سیوس برنج با ساختار متخلخل تهیه شد و در واکنش MTA به وسیله فو^۳ و همکاران (۲۰۲۴) آزمایش شد، گزینش پذیری به BTX آنها ۸۲/۱ درصد بود [۴۷]. در این کار HZSM5 با Si/Al برابر با ۵۰ به کار برده شد و گزینش پذیری BTX نسبت به کل آروماتیک‌ها ۹۸ درصد بود که نشان دهنده عملکرد بهتر کاتالیست HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۵۰ بود.

۴. نتیجه گیری

این مطالعه تبدیل موفقیت آمیز متانول به آروماتیک‌ها با استفاده از نانوزئولیت HZSM5 است. نانوزئولیت‌های HZSM5 با مقادیر مختلف Si/Al مقایسه شدند و نانوزئولیت HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۵۰ به علت تولید آروماتیک و BTX بیشتر انتخاب شد. چگالی مناسب سایت‌های اسیدی، مقدار مناسب نسبت سایت‌های اسیدی ضعیف به قوی و مساحت سطح ویژه مزو بیشتر، دلایل تبدیل بیشتر متانول و تولید آروماتیک‌های سبک بیشتر توسط ژئولیت HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۵۰ است. اثرات شرایط عملیاتی شامل دمای کوره، مقدار کاتالیست، سرعت جریان متانول، سرعت جریان نیتروژن بر روی پاسخ‌های کلیدی مثل مقدار متانول تبدیل شده به آروماتیک‌ها و مقدار BTX تولید شده از طریق نرم افزار طرح آزمایش و روش طرح مرکب مرکزی بررسی شدند. روش‌های آماری برای تعیین اعتبار مدل‌های تجربی به وسیله نرم افزار طرح آزمایش به کار برده شدند. از میان فاکتورهای مورد مطالعه، سرعت جریان نیتروژن بیشترین تأثیر را روی تولید آروماتیک‌های BTX داشت. علاوه بر این‌ها، جملات برهم کنش، نقش مهمی در تولید BTX داشتند؛ برهم کنش بین دمای کوره و سرعت جریان متانول قابل توجه بودند. بهترین پاسخ‌ها تحت شرایط عملیاتی مقدار کاتالیست ۰/۱۳ g، دمای کوره ۴۸۰°C،

سرعت جریان متانول ۰/۳ mL/min، سرعت جریان نیتروژن ۷/۵ mL/min و زمان‌های واکنش ۳۰ min به دست آمدند که شامل مقادیر متانول ۹۵ μmol و مقدار BTX برابر با ۶۸۷۸ μmol در نمونه برداشته شده از محصول بودند، مقدار پاسخ‌ها در همین شرایط عملیاتی ولی در زمان واکنش ۶۰ min مقدار متانول ۱۲۴/۵۵ μmol و مقدار BTX برابر با ۶۸۷۸ μmol بودند. مشخص کردن شرایط عملیاتی بهینه و بهره‌برداری از راکتور در این شرایط، موجب حداکثر شدن بازده تولید BTX و اقتصادی‌تر شدن فرآیند خواهد شد.

تشکر و قدردانی

از حمایت‌های مالی دانشگاه کردستان کمال تشکر و سپاسگزاری را داریم.

فهرست علائم اختصاری

<i>A</i>	دمای کوره (°C)
<i>B</i>	مقدار کاتالیست
<i>BTX</i>	بنزن، تولوئن و زایلن
<i>C</i>	سرعت جریان متانول (mL/min)
<i>CH₃OH</i>	متانول
<i>C₃H₆O</i>	استن
<i>C₆</i>	بنزن
<i>C₆H₆</i>	بنزن
<i>C₇H₈</i>	تولوئن
<i>C₈H₁₀</i>	زایلن
<i>C₉H₁₂</i>	۱، ۲، ۴-تری متیل بنزن
<i>C₁₀H₈</i>	نفتالین
<i>C₁₀H₁₄</i>	۱، ۲، ۴، ۵-تترامیل بنزن
<i>D</i>	سرعت جریان نیتروژن (mL/min)
<i>FID</i>	آشکارساز یونی شعله
<i>HZSM5</i>	نوع پروتونی ZSM5
<i>MTA</i>	متانول به آروماتیک
<i>MTH</i>	متانول به هیدروکربن
<i>RI</i>	مقدار متانول در محصول

1. Qiae
2. Saber
3. Fu



- hierarchical ZSM-5 zeolite using various templates as cracking catalysts. AIP Con 2023;020088:1-6.
- [7]. Cheng C, Li G, Ji D, Zhao Y, Shen J. Regulating hierarchical structure and acidity of HZSM-5 for methanol to aromatics via protective desiliconization and external surface modification. Microporous Mesoporous Mater 2021;312:110784.
- [8]. Pérez-Ramírez J, Christensen CH, Egeblad K, Christensen C, Green J. Hierarchical zeolites: enhanced utilization of microporous crystals in catalysis by advances in material design. Chem Soc Rev 2008;37:2530-2542.
- [9]. Tian P, Wei Y, Ye M, Liu Z. Methanol to olefins (MTO): from fundamentals to commercialization. ACS Catal 2015;5:1929-1938.
- [10]. Vicente H, Liu C, Gayubo AG, Castano P, Pidko EA. Improving the dehydrogenation function and stability of 20-modified ZSM-5 catalyst in methanol-to-aromatics reaction by Ca addition. Appl Catal A: Gen 2024;683:119854.
- [11]. Liu C, Uslamin EA, Khramenkova E, Sireci E, Ouwehand LTLJ, Ganapathy S, Kapteijn F, Pidko EA. High stability of methanol to aromatic conversion over bimetallic Ca, Ga-modified ZSM 5. ACS Catal 2022;12:3189-3200.
- [12]. Freeman D, Wells RPK, Hutchings JG. Conversions of methanol to hydrocarbons over $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{HZSM5}$ and $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{WO}_3$ catalysts. J Catal 2020;205:358-365.
- [13]. Wang C, Si Z, Wu X, Lv W, Bi K, Zhang X, Chen L, Xu Y, Zhang Q, Ma L. Mechanism study of aromatics production from furans
- R2* مقدار BTX در محصول
- S* مساحت سطح ویژه
- Si/Al* نسبت وزنی اکسید سیلیسیم (SiO_2) به اکسید آلومینیم (Al_2O_3)
- SiC* کربید سیلیسیم
- TPD* دفع برنامه ریزی شده با دما
- 3D* سه بعدی
- XRD* پراش پرتو ایکس
- ZSM5* نوعی زئولیت، زئولیت سوکونی موبایل ۵
- مراجع:
- [1]. Xi Z, Zhou B, Jiang B, Wang J, Liao Z, Huang Z, Yang Y. Efficient conversion of methane to aromatics in the presence of methanol at low temperature. J Mol Catal 2019;475:110493.
- [2]. Liu Y, Kooli F, Borgna A. Tandem dual bed Mo/HZSM-5 and Mo/HMCM-22 catalysts with enhanced catalytic performance for natural gas conversion to aromatics. Catal. Today, 2020;357:392-398.
- [3]. Schwach, P., Pan, X., & Bao, X. (2017). Direct conversion of methane to value-added chemicals over heterogeneous catalysts: challenges and prospects. Chemical Reviews, 2017;117:8497-8520.
- [4]. http://profsite.um.ac.ir/~fanaei/_private/Methanol%20production.pdf, Available in 22 May (2024).
- [5]. Yaripour F, Shariatnia Z, Sahebdehfar S, Irandoukht A. Conventional hydrothermal synthesis of nanostructured H-ZSM-5 catalysts using various templates for light olefins production from methanol. J Nat Gas Sci Eng 2015;22:260-269.
- [6]. Zahara Z, Krisnandi Y K, Wibowo YW, Nurani D A, Rahayu DUC, Haerudin H. Synthesis and characterization of

- enhanced aromatic production. *Ind Crops Prod* 2025;236:121600.
- [21]. Wang Y, Gao H, Zhao W, Yan X, Liang J, Zhao Y, Cao J, Zhu, L. Catalytic upgrading of lignite pyrolysis volatiles to light aromatics under methanol atmosphere over Zr and/or Fe modified hollow ZSM-5 zeolites. *Microporous Mesoporous Mater* 2025;381: 113362.
- [22]. Guo Y, Wang R, Zhang L, Fu T, Li Z. Constructing hollow bivalve nanocomposite ZSM-5 with inverse Al zoned distribution to strengthen the stepwise conversion of methanol to aromatics. *Appl Catal A: Gen* 2025;689:120008.
- [23]. Xue Y, Hao X, Li J, Mei Y, Zheng H, Cui X, Niu Y. Facile synthesis of hierarchical Zn@ZSM-5 zeolite with boosted aromatics selectivity for methanol to aromatics. *Microporous Mesoporous Mater* 2026;412:114250.
- [24]. Abbasi A, Pourabdollah K, Mokhtarani B. Tailoring hierarchical ZSM-5 with water-soluble polymers templates for BTX production in methanol-to-aromatics. *RSC Adv* 2026;16:7040-7056.
- [25]. Geng R, Niu X, Liu Y. Effect of extra-framework Ga_2O_3 species in Ga/ZSM-5 catalysts on methanol-to-aromatics reaction. *Microporous Mesoporous Mater* 2026;400:113907.
- [26]. Montgomery DC. *Design and Analysis of Experiments*. 5th ed., New York: John Wiley & Sons; 2001.
- [27]. Zhang GQ, Bai T, Chen TF, Fan WT, Zhang X. Conversion of methanol to light aromatics on Zn-modified nano-HZSM 5 zeolite catalysts. *Ind Eng Chem Res* with methanol over zeolite catalysts. *J Anal Appl Pyrolysis* 2019;139:87-95.
- [14]. Li H, Li XG, Xiao WD. Deactivation kinetics of individual C_6-C_9 aromatics' generation from methanol over Zn and P co-modified HZSM-5. *RSC Adv* 2019;9:22327-22355.
- [15]. Chotiwan S, Somwongsa P, Lao-Ubol S, Lao-Auyporn P, Attanatho L, Laosombut T, Larpiattaworn S. Improvement of HZSM-5 catalytic performance by rice husk ash addition for methanol to hydrocarbons. *Mater Today* 2019;17:1354-1361.
- [16]. [16] Shao J, Fu, T., & Li, Z. (2020). The selective and stable synthesis of aromatics from methanol via two-step route using light alkenes as intermediates, *Fuel*, 2020;280:118609.
- [17]. Wang Y, Zhao W-H, Yan X, Wang Q, Liang J, Zhao Y-P, Cao J, Zhu L. The application of Ni and Zr modified ZSM-5 nanosheet in upgrading of lignite pyrolysis volatiles coupling with methanol to light aromatics. *J Anal Appl Pyrolysis* 2024;180:106543.
- [18]. Wang Z, Zheng H, Meng F, Fu T, Li, Z. ZSM-5@Zn/ZSM-5 core@shell nanocrystals as integrated catalysts for efficient methanol conversion into aromatics. *Fuel* 2024;369:131728.
- [19]. Wang M, Liu N, Wu H, Dong Z, Wang J. Co-aromatization of methane and methanol over MoxZn/HZSM-5 to increase aromatic hydrocarbon yield: experimental and kinetic studies. *J Mol Catal* 2024;565:114366.
- [20]. Xu Q, Liang J, Chen Z, Guo J, Xia S, Zhao, Z, Zhu X, Zhao K, Cai P, Zheng A. Hierarchical zeolites promoting synergistic co-pyrolysis of biofuran and methanol for





- [36]. Wang Y, An H, Ma H, Zhang X, Kang G, Cao J. Catalytic properties and deactivation behavior of modified H-ZSM-5 in the conversion of methanol-to-aromatics. *Adv Powder Technol* 2021;32:1869-1880.
- [37]. Li B-x, Wang W-c, Zhang X-p, Zhang D-x, Mu W, Liu F. Integrating uniform design and response surface methodology to optimize thiacloprid suspension. *Sci Rep* 2018;7:46018.
- [38]. Zaib Q, Park HS, Kyung D. Experimental modeling and optimization for the reduction of hexavalent chromium in aqueous solutions using ascorbic acid. *Sci Rep* 2021;11:13146.
- [39]. Echevskii CV, Ione KG, Nosyreva GN, Litvak GS. Effect of temperature regime on coking of zeolite catalyst and their regeneration. *Appl Catal* 1998;43:85-89.
- [40]. Li T, Shoinkhorova T, Gascon J, Ruiz-Martínez J. Aromatics production via methanol-mediated transformation routes. *ACS Catal* 2021;11:7780-7819.
- [41]. García-Ruiz M, Solís-Casados DA, Aguilar-Pliego J, Márquez-Álvarez C, Sastre-de Andrés E, Sanjurjo-Tartalo D, Sáinz-Vaque R, Grande-Casas M. Synthesis of 10 and 12 ring zeolites (MCM-22, TNU-9 and MCM-68) modified with Zn and its potential application in the reaction of methanol to light aromatics and olefins. *Top Catal* 2020;63:451-467.
- [42]. Chen Z, Song W, Hou Y, Wang H, Zhang C, Wang J, Yang Y, Qian W. Temperature-dependent secondary conversion of primary products from methanol aromatization in a two-stage fluidized bed. *Fuel*, 2020;267:117204.
- [43]. Karpe S, Veser G. Coke formation and 2014;53:14932-14940.
- [28]. Ayodele BV, Hossain SS, Lam SS, Osazuwa OU, Khan MR, Cheng CK. (2016). Syngas production from CO₂ reforming of methane over neodymium sesquioxide supported cobalt catalyst. *J Nat Gas Sci Eng* 2016;34:873-885.
- [29]. Kim HS, Kang SK, Zhang H, Tikue ET, Lee JH, Lee PS. Al-ZSM-5 nanocrystal catalysts grown from silicalite-1 seeds for methane conversion. *Energies*, 2021;14:480.
- [30]. Shirazi L, Jamshidi E, Ghasemi MR. The effect of Si/Al ratio of ZSM-5 zeolite on its morphology, acidity and crystal size. *Cryst Res Technol* 2008;43:1300-1306.
- [31]. Kim J, Choi M, Ryoo R. Effect of mesoporosity against the deactivation of MFI zeolite catalyst during the methanol-to-hydrocarbon conversion process. *J Catal* 2010;269:219-228.
- [32]. Al-Dughaiter AS, de Lasa H. HZSM 5 zeolites with different SiO₂/Al₂O₃ ratios. characterization and NH₃ desorption kinetics. *Ind Eng Chem Res* 2014;53:15303-15316.
- [33]. Leofanti G, Padovan M, Tozzola G, Venturelli B. Surface area and pore texture of catalysts. *Catal Today* 1998;41:207-219.
- [34]. Gao Y, Zheng B, Wu G, Ma F, Liu C. Effect of the Si/Al ratio on the performance of hierarchical ZSM-5 zeolites for methanol aromatization. *RSC Adv* 2016;6:83581-83588.
- [35]. Liu J, Shen X, Lin L, Lu J, Zhou Y. Impact of the Al sites of ZSM-5 zeolite on product distribution in methanol to aromatics reaction. *J Porous Mater* 2025;32:1135-1147.

regeneration during Fe-ZSM-5-catalyzed methane dehydro-aromatization. Catal 2024;14:292.

- [44]. Wan Z, Li GK, Wang C, Yang H, Zhang D. (2018). Relating coke formation and characteristics to deactivation of ZSM-5 zeolite in methanol to gasoline conversion. Appl Catal A: Gen 2018;549: 141-151.
- [45]. Qiao J, Wang J, Frenkel AI, Teng J, Chen X, Xiao J, Zhang T, Wang Z, Yuan Z, Yang W. Methanol to aromatics: isolated zinc phosphate groups on HZSM-5 zeolite enhance BTX selectivity and catalytic stability. RSC Adv 2020;10:5961-5971.
- [46]. Saber A, Jabbarpoor M, Safari N, Bahadoran F. Aromatic product selectivity of template-free and template-synthesized ZSM-5 catalysts in methanol to hydrocarbon conversion. Nanochem Res 2022;7:93-106.
- [47]. Fu T, Han Y, Li C, Guo M, Zhan G, Li Z. Self-assembly of hierarchical ZSM-5 particles on rice husk template as hybrid catalysts for boosting methanol aromatization. Chem Eng Sci 2024;284:119457.



Methanol Conversion to Light Aromatics Using HZSM5 Nano Zeolite: Effects of Operating Conditions

Meysam Mostafaei¹, Faranak Akhlaghiantab^{2*}

1. M.Sc., Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

2. Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

ARTICLE INFO

RESEARCH ARTICLE

Article History:

Received: 03 February 2026

Revised: 18 June 2026

Accepted: 20 June 2026

Keywords:

Light Aromatics

Methanol to Aromatics

HZSM5 Nano Zeolite

Response Surface Method

Si/Al Ratio

Operating Conditions

ABSTRACT

This study employed HZSM5 nano zeolite from Zeochem to produce light aromatics from methanol. The influence of the Si content of the HZSM5 catalysts was investigated, and the HZSM5 catalyst with a Si/Al ratio of 50 was selected. The HZSM5 catalysts were characterized using porosimetry and determination of specific surface area, X-ray diffraction, and NH₃ temperature-programmed desorption techniques. The central composite design method was employed to investigate the effects of the operating conditions, including furnace temperature, catalyst dosage, methanol, and nitrogen flow rates, on the methanol in the product and BTX production. The F-values were 1233.21 and 14971.77 for methanol in product and BTX production model; respectively. The p-values were less than 0.0001 for both models. Statistical analysis revealed that the nitrogen flow rate was the most significant factor affecting methanol in the product and BTX production. Furthermore, the interaction between these factors exerted a more substantial influence on methanol in the product and BTX production. The performance of the reactor in the optimized operating conditions causes maximum BTX yield and consequently more economic process.

DOR: [20.1001.1.2602.1117.1404.11.14](https://doi.org/10.1001.1.2602.1117.1404.11.14)

How to cite this article

M. Mostafaei, F. Akhlaghian, Methanol Conversion to Light Aromatics Using HZSM5 Nano Zeolite: Effects of Operating Conditions. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2026; 13(1): 71-89. (https://ijge.irangi.org/article_738766.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: fr.akhlaghian@uok.ac.ir, (F. Akhlaghian).

Available online 21 June 2026

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

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



بهینه‌سازی خواص مکانیکی جرم نسوز ریختنی آلومینا بالا از طریق اصلاح فرمولاسیون / مطالعه کاربردی در صنعت گاز و پتروشیمی

علیرضا رحیمی*

کارشناس ارشد مکانیک، واحد مهندسی معکوس و ساخت کالا، شرکت پتروشیمی بوشهر، عسلویه، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: al.rahimi@bupc.ir

مقاله کاربردی

صفحه ۹۰ - ۱۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹

چکیده

در واحدهای ریفرمر صنایع گاز و پتروشیمی، قطعات نسوز محافظ اطراف نازل‌ها در معرض دماهای بالا، شوک‌های حرارتی و محیط‌های خورنده قرار دارند و وابستگی به مواد نسوز وارداتی یکی از چالش‌های مهم صنعتی در این حوزه محسوب می‌شود. در این پژوهش، به منظور بومی‌سازی و بهبود عملکرد مکانیکی، مهندسی معکوس یک جرم نسوز ریختنی آلومینا بالا انجام و فرمولاسیون آن با رویکردی فنی-اقتصادی بهینه شد. در ترکیب پیشنهادی از آندالوزیت به عنوان منبع آلومینا استفاده شد و ۲/۲ درصد وزنی TiO_2 به عنوان عامل معدن‌ساز جهت تسریع تشکیل فاز مولایت استفاده شد. همچنین به جای سیستم سیمانی متعارف از بایندهای نانویی استفاده گردید که منجر به کاهش CaO و بهبود تراکم ریزساختاری شد. نمونه‌های تولیدی مطابق استانداردهای ASTM C133، C113 و ISO 5017 مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نمونه بومی ضمن حفظ دمای سرویس ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، دارای چگالی حجمی ۲/۵۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، استحکام فشاری سرد بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و تغییر طول خطی دائمی ۰/۸ درصد در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد است. همچنین حدود ۳۳ درصد کاهش هزینه نسبت به نمونه وارداتی حاصل شد. این نتایج نشان می‌دهد ترکیب ارائه شده می‌تواند جایگزینی قابل اعتماد و اقتصادی برای کاربردهای دما بالا در صنعت پتروشیمی باشد.

کلید واژه‌ها: مهندسی معکوس، نسوز ریختنی، نازل ریفرمر، آلومینا، آندالوزیت، بایندهای نانویی

۱. مقدمه

تجهیزات فرآیندی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، به‌ویژه ریفرمرها، به‌طور مداوم در معرض شرایط عملیاتی شدید شامل دماهای بالا، شوک‌های حرارتی و محیط‌های خورنده قرار دارند. در چنین شرایطی، انتخاب مواد نسوز مناسب نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری عملکرد واحدهای فرآیندی و جلوگیری از توقف‌های ناخواسته تولید دارد. در این میان، قطعاتی نظیر مافل‌بلاک‌های^۱ نازل ریفرمر به عنوان لایه محافظ در برابر تماس مستقیم شعله و اجزای فلزی عمل کرده و از بروز آسیب‌های حرارتی و مکانیکی جلوگیری می‌کنند. از این رو، طراحی و انتخاب نسوزهای ریختنی^۲ با خواص

1. Muffle Block

2. Castable Refractories



مکانیکی مناسب، پایداری حرارتی بالا و مقاومت مطلوب در برابر خزش و شوک حرارتی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مواد نسوز آلومینایی به دلیل دارا بودن درصد بالای اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)، پایداری فازی مناسب، مقاومت در برابر خزش در دماهای بالا و مقاومت مطلوب در برابر سایش و خوردگی شیمیایی، به‌طور گسترده در کاربردهای دمای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که بهبود عملکرد ترمومکانیکی این مواد عمدتاً از طریق اصلاح ترکیب شیمیایی، کنترل ریزساختار و مدیریت فازهای تشکیل‌شده در طی فرآیند زینترینگ حاصل می‌شود [۲-۳]. در واقع، کنترل ریزساختار و فازهای ثانویه یکی از عوامل کلیدی در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی نسوزهای آلومینا بالا محسوب می‌شود.

یکی از راهکارهای مؤثر در بهبود عملکرد نسوزهای آلومینایی، استفاده از مواد معدنی حاوی آلومینا نظیر آندالوزیت است. آندالوزیت در محدوده دمایی حدود ۱۲۰۰ تا ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به فاز مولایت ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) و سیلیس تبدیل می‌شود که تشکیل مولایت درجا می‌تواند موجب بهبود پایداری حجمی، استحکام فشاری سرد، افزایش استحکام مکانیکی و ارتقای مقاومت خزشی گردد [۴]. مطالعات تجربی نشان داده‌اند که توزیع مناسب اندازه ذرات آندالوزیت و کنترل شرایط حرارتی می‌تواند موجب تشکیل مؤثرتر فاز مولایت و بهبود رفتار ترمومکانیکی نسوزها شود [۵]. علاوه بر این، بررسی‌های انجام‌شده در سیستم‌های نسوز آلومینایی نشان داده است که حضور آندالوزیت در ترکیب می‌تواند به کاهش تنش‌های حرارتی داخلی و افزایش دوام قطعات نسوز در شرایط عملیاتی شدید کمک کند [۶-۷].

با توسعه صنایع دمای بالا، به‌ویژه در صنایع فولاد و پتروشیمی، نیاز به نسوزهایی با محتوای آلومینا بالاتر و پایداری حرارتی بیشتر افزایش یافته است. در پاسخ به این نیاز، توسعه نسوزهای ریختنی آلومینا بالا با فاز غالب آلفا آلومینا مورد توجه قرار گرفته است که قادر به تحمل دماهایی تا حدود ۱۸۰۰ درجه سانتی‌گراد هستند [۱]. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از آندالوزیت در چنین سیستم‌هایی می‌تواند با تشکیل مولایت درجا موجب بهبود استحکام مکانیکی و مقاومت دمای بالا شود [۸-۹]؛ بنابراین استفاده هدفمند از منابع آلومینوسیلیکاتی می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی ریزساختار و خواص عملکردی نسوزهای آلومینا بالا ایفا کند.

در کنار انتخاب ماده اولیه مناسب، نوع سیستم بایندر نیز نقش مهمی در عملکرد نسوزهای ریختنی ایفا می‌کند. در دهه‌های اخیر، تحول قابل‌توجهی از نسوزهای شکل‌دار به سمت مواد نسوز بدون شکل یا ریختنی رخ داده است، زیرا این مواد امکان نصب آسان‌تر، کاهش زمان تعمیرات و تولید قطعات با هندسه‌های پیچیده را فراهم می‌کنند [۱۰]. در همین راستا، سیستم‌های ریختنی با سیمان کم (LCC)، فوق‌العاده کم (ULCC) و حتی بدون سیمان توسعه یافته‌اند تا میزان فازهای کم‌ذوب ناشی از حضور CaO کاهش یابد [۱۰]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که حضور CaO ناشی از سیمان آلومیناتی می‌تواند در دماهای بالا با اجزای ماتریس نسوز واکنش داده و فازهای با نقطه ذوب پایین تشکیل دهد که این امر موجب کاهش مقاومت به خوردگی و افت پایداری حرارتی می‌شود. از این رو روند توسعه نسوزهای ریختنی به سمت سیستم‌های کم‌سیمان و حتی بدون سیمان مبتنی بر بایندرهایی ژلی یا سل-ژل در حال حرکت است [۱۱].

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از بایندرهایی مبتنی بر نانو می‌تواند موجب ایجاد ریزساختار متراکم‌تر و افزایش استحکام مکانیکی نسوزها شود. در این سیستم‌ها، ذرات نانومتری به‌صورت سوسپانسیون‌های سرامیکی عمل کرده و پس از پخت موجب ایجاد شبکه پیوندی قوی و پایدار در ماتریس نسوز می‌شوند [۱۲-۱۴]. پژوهش‌های اخیر نیز نشان داده‌اند که استفاده از بایندرهایی نانویی در جرم‌های ریختنی موجب کاهش تخلخل، افزایش چگالی ظاهری و بهبود مقاومت در برابر شوک حرارتی می‌شود [۱۵-۱۶].

از سوی دیگر، استفاده از افزودنی‌های فعال نظیر اکسید تیتانیوم (TiO_2) به‌عنوان عامل معدن‌ساز می‌تواند در تسریع واکنش‌های زینترینگ و تشکیل فازهای پایدار نقش مهمی ایفا کند. مطالعات نشان داده‌اند که حضور TiO_2 می‌تواند از طریق کاهش انرژی فعال‌سازی واکنش‌ها و ایجاد فاز مایع‌گذرا، فرآیند تراکم ساختاری را تسهیل کند [۱۷-۱۸]. با این حال، افزایش بیش از حد این افزودنی ممکن است منجر به تشکیل فازهای ناپایدار و افت خواص دمای بالا گردد؛ بنابراین تعیین مقدار بهینه آن در ترکیب نسوز اهمیت ویژه‌ای دارد [۱۹، ۲۱]. علاوه بر ترکیب شیمیایی و سیستم بایندر، رفتار عملکردی نسوزها در شرایط عملیاتی واقعی نیز اهمیت زیادی دارد. مطالعات نشان داده‌اند که کنترل تخلخل و نفوذپذیری در ساختار نسوزهای ریختنی می‌تواند نقش مهمی در افزایش



دوام و مقاومت در برابر تخریب حرارتی ایفا کند [۲۰]. همچنین برخی تحقیقات نشان داده‌اند که رابطه مستقیمی میان ریزساختار نسوز و عملکرد آن در شرایط صنعتی وجود دارد [۱۹]. از این رو، بررسی هم‌زمان ترکیب، تراکم ساختاری و خواص مکانیکی می‌تواند درک بهتری از عملکرد واقعی نسوزها در شرایط عملیاتی فراهم کند.

در بسیاری از مجتمع‌های صنعتی کشور، همچنان وابستگی قابل توجهی به واردات برخی قطعات نسوز پیشرفته وجود دارد. در چنین شرایطی، مهندسی معکوس این قطعات می‌تواند ضمن کاهش وابستگی، به انتقال دانش فنی و بهینه‌سازی عملکرد مواد در شرایط عملیاتی ویژه هر واحد فرآیندی کمک کند.

باوجود مطالعات متعدد در زمینه بهبود خواص نسوزهای آلومینایی، بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده اثر عوامل مختلفی مانند نوع ماده اولیه، افزودنی‌های معدنی یا سیستم بایندر را به‌صورت جداگانه بررسی کرده‌اند. در مقابل، بررسی اثر هم‌زمان این عوامل در قالب یک فرمولاسیون واحد و در چارچوب یک کاربرد صنعتی مشخص، به‌ویژه در قطعات حساس ریفورمرهای صنایع نفت و پتروشیمی، محدود گزارش شده است.

مروری بر مهم‌ترین مطالعات انجام‌شده در زمینه بهبود خواص نسوزهای آلومینا بالا و عوامل مؤثر بر عملکرد آن‌ها در (جدول ۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مرور مطالعات و ارائه خلاصه نتایج پژوهش‌های گذشته

شماره مرجع	موضوع مطالعه	خلاصه نتیجه پژوهش
[۱]	خواص نسوزهای آلومینا بالا	پایداری فازی عالی در دماهای بالا
[۲]	کاربرد آندالوزیت در نسوزهای آلومینایی	افزایش پایداری حرارتی و کنترل ریزساختار
[۳]	تشکیل مولایت در نسوزهای ریختنی	بهبود استحکام مکانیکی ناشی از شبکه مولایتی
[۴]	استفاده از آندالوزیت در نسوزهای آلومینا بالا	بهبود رفتار ترمومکانیکی و پایداری ابعادی
[۵]	بهینه‌سازی توزیع ذرات آندالوزیت	ارتقای استحکام فشاری سرد و مقاومت خزشی
[۶]	اثر نانو-باند‌ها در سیستم‌های آلومینوسیلیکاتی	کاهش تخلخل و افزایش تراکم ماتریکس
[۷]	رفتار جرم‌های نسوز با باند سیلیکا سول	بهبود خواص مکانیکی در دماهای بالا
[۸]	سیستم‌های بدون سیمان	بهبود پایداری در برابر محیط‌های خورنده
[۹]	سنتز بایندر آلومینا-سیلیکا به روش سل-ژل	ایجاد پیوند قوی در دمای پایین و متوسط
[۱۰]	روند توسعه نسوزهای کم‌سیمان	کاهش فازهای کم‌ذوب و افزایش پایداری حرارتی
[۱۱]	مقایسه بایندهای سیمانی و ژلی	افزایش مقاومت در برابر شوک حرارتی در سیستم‌های ژلی
[۱۲]	ساختاردهی جرم‌های ریختنی	ایجاد ساختار متراکم و کاهش نفوذپذیری
[۱۳]	کاربرد نانوذرات در جرم‌های نسوز	کاهش تخلخل و بهبود خواص مکانیکی
[۱۴]	مکانیزم‌های پیوند نانویی	افزایش چگالی ظاهری و مقاومت مکانیکی
[۱۵]	استفاده از مواد بازیافتی در نسوزها	تائید امکان استفاده از مواد جایگزین با حفظ عملکرد
[۱۶]	اثر افزودنی‌های معدنی بر نسوزها	تسهیل واکنش‌های فازی در زینترینگ
[۱۷]	نقش TiO_2 در تشکیل فازهای پایدار	تسریع واکنش زینترینگ و تراکم ساختاری
[۱۸]	نانو-مولایت در سیستم‌های ریختنی	افزایش چشمگیر استحکام در دمای بالا
[۱۹]	تعیین مقدار بهینه TiO_2	مدیریت تشکیل فاز مایع و پایداری دمای بالا
[۲۰]	نفوذپذیری جرم‌های ریختنی	اهمیت تراکم ریزساختار در افزایش دوام صنعتی

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف مهندسی معکوس و بهینه‌سازی فرمولاسیون یک جرم نسوز ریختنی آلومینا بالا مورد استفاده در مافل‌بلاک‌های نازل ریفرورمر انجام شده است. در این تحقیق، یک سیستم بومی مبتنی بر اصلاح ترکیب شیمیایی و نوع بایندر طراحی و عملکرد آن از نظر خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی با نمونه مرجع خارجی مقایسه شده است.

نوآوری این پژوهش در ارزیابی هم‌زمان سه راهبرد بهینه‌سازی شامل بهره‌گیری از منبع جایگزین آلومینا، استفاده از عامل معدن‌ساز به مقدار بهینه و حذف سیستم سیمانی مرسوم از طریق به‌کارگیری بایندر نانویی در قالب یک کاربرد صنعتی واقعی است. برخلاف مطالعات پیشین که این عوامل را به‌صورت جداگانه بررسی کرده‌اند، در این تحقیق اثر هم‌زمان آن‌ها در چارچوب مهندسی معکوس یک قطعه عملیاتی ارزیابی شده است.

۲. مشخصات فنی و عملکردی نمونه مرجع خارجی

این فصل به تفصیل الزامات فنی استخراج‌شده از دیتاشیت و نمونه‌ی اصلی خارجی می‌پردازد و مشخصه‌های شیمیایی، فیزیکی و عملیاتی آن را به‌صورت طبقه‌بندی‌شده ارائه می‌دهد. نتایج این بررسی در (جدول ۲) آمده‌اند.

الزامات شیمیایی قطعه مرجع برای تضمین پایداری حرارتی و مقاومت نسوز در برابر شرایط فرآیندی ریفرورمر و دمای سرویس حداقل ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد حیاتی‌اند. همان‌گونه که در اطلاعات سازنده و (جدول ۲) مشاهده می‌شود، ترکیب شیمیایی نمونه بر پایه آلومینای تبلار^۱ و آندالوزیت با داشتن حداقل ۶۰ درصد اکسید آلومینیوم و حداکثر ۱/۵ درصد اکسید آهن استوار است. وجود حداقل ۶۰ درصد آلومینا و تشکیل فاز مولایت حاصل از واکنش آلومینا و سیلیکا در دماهای بالا موجب افزایش پایداری ابعادی و مقاومت خزشی نسوز می‌شود [۱].

جدول ۲. مشخصه‌های شیمیایی، فیزیکی و عملکردی مرجع خارجی

مشخصه	مقدار
Al ₂ O ₃ (درصد وزنی)	< ۶۰
SiO ₂ (درصد وزنی)	> ۳۱
Fe ₂ O ₃ (درصد وزنی)	> ۱/۵
CaO (درصد وزنی)	۲/۸ تا ۴/۲
دمای سرویس (درجه سانتی‌گراد)	< ۱۷۰۰
چگالی حجمی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	≥ ۲/۲
تغییر طول خطی دائمی در ۲۴ ساعت (درصد)	۱ (در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد)
استحکام فشاری سرد (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	< ۵۰۰

محدوده‌ی مجاز CaO در این نمونه بین ۲/۸ تا ۴/۲ درصد تعیین شده است که ناشی از حضور بایندر سیمان آلومینایی در سیستم ریختنی است. حضور این فاز علاوه بر ایجاد پیوند اولیه در مرحله هیدراتاسیون، می‌تواند به‌عنوان فاز کمک‌ذوب در فرآیند زینترینگ نیز عمل کند. با این حال افزایش بیش از حد CaO ممکن است منجر به تشکیل فازهایی نظیر آنورتیت شده و در نتیجه پایداری حرارتی و مقاومت خزشی نسوز را کاهش دهد [۳، ۱۰].

عملکرد قطعه در دمای سرویس، اصلی‌ترین شاخص ارزیابی و تأیید کیفیت آن به‌شمار می‌رود. از دیدگاه فیزیکی، چند ویژگی کلیدی تعیین‌کننده رفتار نسوز در شرایط کاری هستند. چگالی حجمی قطعه مرجع حداقل ۲/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب، تعیین شده است که به معنای کاهش تخلخل و به‌تبع آن، افزایش مقاومت در برابر نفوذ مواد مذاب است. استحکام فشاری سرد بالای ۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، نشان‌دهنده‌ی توان مکانیکی مناسب در برابر تنش‌های فشاری است.

از سوی دیگر، پایداری ابعادی در دماهای بالا برای جلوگیری از ایجاد ترک و جداسازی مکانیکی و در نهایت نشت حرارت ضروری است. در این زمینه، تغییر طول خطی دائمی قطعه، معیار مهمی محسوب می‌شود که مقدار ارائه شده در دیتاشیت نمونه مرجع، نشان‌دهنده کنترل این مقدار در محدوده مجاز و مطابقت با الزامات استاندارد ASTM C113 است [۲۱].

علاوه بر آن، فرآیند پخت مرجع نمونه‌ی اصلی شامل یک سیکل حرارتی دقیق است که در آن نمونه تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد گرمایش یافته و به مدت ۵/۵ روز در این دما نگهداری می‌شود. این مرحله برای فعال‌سازی کامل پیوندهای زینتری و دستیابی به چگالی نهایی مطلوب ضروری است.

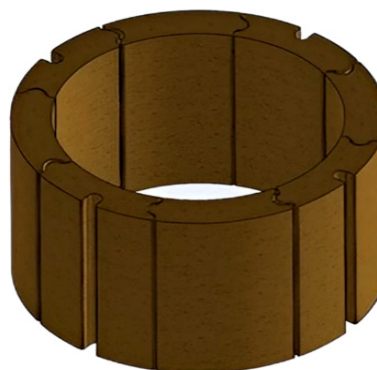
۳. طراحی و ساخت نمونه بومی‌سازی‌شده

این فرآیند بر اساس رویکرد مهندسی معکوس انجام شد؛ بدین صورت که ابتدا مشخصات شیمیایی، فیزیکی و عملکردی نمونه مرجع استخراج شده و سپس با استفاده از مواد اولیه در دسترس داخلی، فرمولاسیون معادل با هدف دستیابی به عملکرد مشابه طراحی گردید.

۳-۱. طراحی و انتخاب مواد اولیه

جهت ساخت قالب مورد نیاز در عملیات ریخته‌گری جرم نسوز و همچنین بازرسی‌های ابعادی، نقشه ساخت قطعات با

جزئیات لازم، تهیه شد. ابعاد کلی برحسب میلی متر و به صورت قطر خارجی ۶۹۰، قطر داخلی ۵۴۰ و ارتفاع کلی ۴۳۵ است. هر دسته از مافل بلاک شامل ۸ تکه می باشد. در (شکل ۱)، نقشه شماتیک مافل بلاک در حالت مونتاژ شده نشان داده شده است.



شکل ۱. نقشه شماتیک مافل بلاک در حالت مونتاژ

برای دستیابی به بهترین ترکیب بومی با عملکرد درازمدت و اقتصادی، مواد اولیه با دقت و با توجه به مطابقت حداکثری با نمونه مرجع، استانداردهای بین المللی ساخت نسوز و تجربیات سازندگان داخلی انتخاب شد. در این راستا، فرمولاسیون بومی سازی شده با جایگزینی کامل سیستم سیمانی سنتی با بایندره های نانویی توسعه داده شد. این رویکرد، مافل بلاک های ساخته شده را از جرم های سیمانی متعارف متمایز کرده و می تواند برخی ویژگی های عملکردی مشابه با اجزای پرسی پخته شده ایجاد کند که مزایای فنی مانند کاهش چشمگیر محتوای آهک، بهبود تراکم ساختاری و ارتقای مقاومت در برابر شوک حرارتی را به همراه دارد.

آنالیز شیمیایی نمونه بومی در (جدول ۳) آورده شده است.

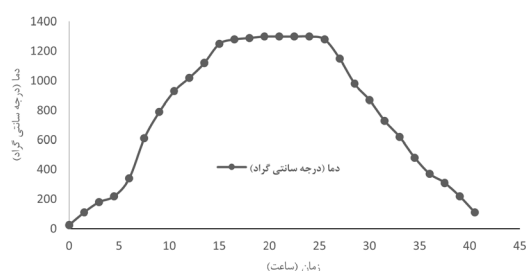
جدول ۳. نتایج آنالیز شیمیایی نمونه بومی سازی شده

مقدار	مشخصه
۵۹/۴	Al ₂ O ₃ (درصد وزنی)
۳۵/۴	SiO ₂ (درصد وزنی)
۱/۶	Fe ₂ O ₃ (درصد وزنی)
۰/۶	CaO (درصد وزنی)
۲/۲	TiO ₂ (درصد وزنی)
۰/۲ (ناخالصی)	MgO (درصد وزنی)

در این فرمولاسیون، استفاده از آندالوزیت به عنوان منبع اصلی آلومینا و افزودن ۲/۲ درصد وزنی TiO₂ به منظور جایگزینی جزئی CaO و بهبود تشکیل فاز مولایت مورد توجه قرار گرفت. نتایج آنالیز شیمیایی نشان می دهد ترکیب بومی سازی شده دارای ۵۹/۴ درصد وزنی Al₂O₃ است که به مقدار اسمی ۶۰ درصد در نمونه مرجع نزدیک است. میزان Fe₂O₃ برابر با ۱/۶ درصد وزنی اندازه گیری شد که اندکی بالاتر از حد مرجع (۱/۵ درصد) است، با این حال همچنان در محدوده قابل قبول برای جرم های آلومینایی ریختنی قرار دارد. مقدار CaO برابر با ۰/۶ درصد وزنی به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع کاهش نشان می دهد. این کاهش می تواند بر میزان تشکیل فازهای کم ذوب و رفتار دمای بالای سیستم اثرگذار باشد که در بخش «مقایسه و تحلیل» به صورت تفصیلی بررسی شده است.

۳-۲. شکل دهی و پخت قطعه

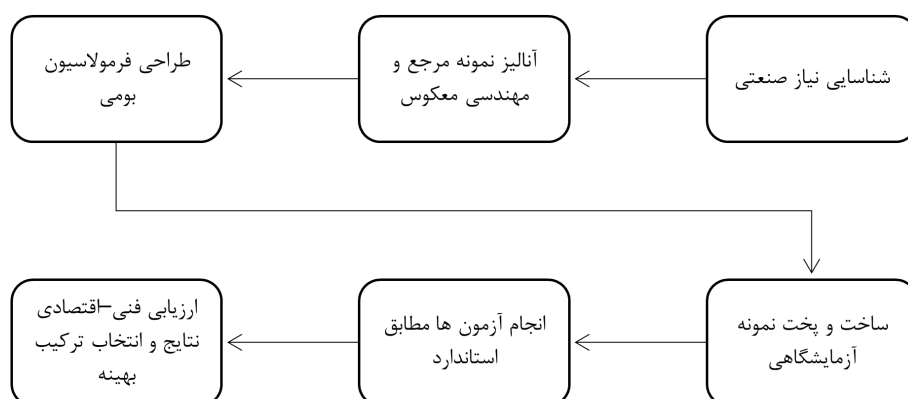
تولید قطعه مورد نظر، مستلزم پیروی دقیق از فرآیندهای تخصصی ریخته گری و پخت مواد نسوز است. فرآیند با آماده سازی دوغاب آغاز می شود؛ در این مرحله، پودرهای ماده نسوز اولیه با عوامل روان کننده اختلاط می یابند تا ویسکوزیته بهینه برای اطمینان از پر شدن حفره های قالب و به حداقل رساندن تخلخل ها در حین عملیات تراکم دهی فراهم شود. بخش حیاتی نهایی، اجرای دقیق برنامه حرارتی پخت است؛ این برنامه باید نرخ افزایش و کاهش دما، به ویژه در مرحله تثبیت ساختار متراکم در دمای نهایی را با دقت کنترل کند تا از ایجاد تنش های حرارتی داخلی جلوگیری شده و ساختار کریستالی پایدار حاصل شود.



شکل ۲. منحنی پخت مافل بلاک

پیش از اقدام به تولید انبوه، ساخت و ارسال یک قطعه شاهد جهت اخذ تأیید ابعادی و عملکردی الزامی است. این قطعه شاهد باید در کنار قطعات اصلی، تمامی سیکل های حرارتی و عملیات پخت مربوطه را دقیقاً طی کند تا خواص شیمیایی

و مکانیکی آن نماینده قطعات نهایی باشد. نمونه شاهد جهت
آزمون‌های نهایی به آزمایشگاه مرجع ارسال می‌گردد. در این تحقیق به صورت شماتیک در (شکل ۳) ارائه شده است.



شکل ۳. فلوچارت مراحل اجرای پژوهش و بهینه‌سازی فرمولاسیون

۴. روش‌های آزمون

۴-۱. استانداردهای مرجع آزمون

این فصل به تشریح دقیق استانداردهای مرجع، پروتکل‌های
نمونه‌برداری حین ساخت و نتایج اولیه آزمون‌های انجام شده
بر روی نمونه‌های بومی‌سازی شده می‌پردازد. آزمون‌های شیمیایی و مکانیکی صورت گرفته بر روی
نمونه‌ها مطابق استانداردهای معرفی شده در (جدول ۴)
انجام شده است.

جدول ۴. معرفی استانداردهای بین‌المللی در حوزه آزمون مواد نسوز ریختنی

استاندارد مرجع	نوع آزمون و کاربرد
ASTM C401-12	طبقه‌بندی ریخته‌گری‌های آلومینا و آلومینا-سیلیکات بر اساس محتوای شیمیایی و خواص فیزیکی [۲۲]
ASTM C113	تعیین تغییرات خطی دائمی مواد نسوز پس از حرارت‌دهی
ASTM C133	تعیین استحکام فشاری سرد و استحکام خمشی مواد نسوز [۲۳]
ISO 5017	روش آزمون تعیین چگالی مواد نسوز شکل‌دار [۲۴]
API STD 936	مبنای انتخاب نمونه، صلاحیت‌دهی پرسنل آزمون و مستندسازی کلی فرآیند بازرسی و آزمون [۲۵]

۴-۲. آزمون‌های نهایی شیمیایی و فیزیکی

نتایج آنالیز شیمیایی نمونه بومی قبلاً در (جدول ۳)
ارائه گردید. نتایج آزمون‌های فیزیکی انجام‌شده بر روی
نمونه‌های شاهد که برای ارزیابی عملکرد مکانیکی و
حرارتی قطعه ضروری هستند، در (جدول ۵) نشان داده
شده است. کلیه آزمون‌ها در آزمایشگاه تحقیق و توسعه
صنعت سیمان نسوز که دارای گواهی‌نامه ISO 17025
است، انجام گردید.

به‌منظور ارزیابی خواص شیمیایی و فیزیکی قطعات
تولیدی، تعداد ۹ نمونه شاهد شامل ۶ نمونه با ابعاد استاندارد
۵۰×۵۰×۵۰ (میلی‌متر) و ۳ نمونه با ابعاد ۴۰×۴۰×۱۶۰
(میلی‌متر) انتخاب و علامت‌گذاری شدند. ابعاد نمونه‌ها
مطابق با الزامات آزمایشگاه و بر اساس راهنمای API STD
936 تعیین گردید و برای انجام آزمون‌های چگالی حجمی،
استحکام فشاری سرد و تغییر طول خطی دائمی مورد استفاده
قرار گرفتند که نتایج آن در بخش بعدی ارائه شده است. کلیه
آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی حداقل در سه تکرار انجام شده
و میانگین مقادیر به‌عنوان نتایج نهایی گزارش گردیده است.

جدول ۵. نتایج آزمون‌های فیزیکی نمونه بومی

مشخصه	مقدار
دمای سرویس (درجه سانتی‌گراد)	۱۷۰۰
چگالی حجمی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۲/۵۳
تغییر طول خطی دائمی در ۲۴ ساعت (درصد)	۰/۸ (در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد)
استحکام فشاری سرد (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	۱۰۰۰ <

جسم متخلخل را نسبت به حجم کل آن بیان می‌کند و از پارامترهای اساسی در ارزیابی کیفیت ریخته‌گری است، برابر با ۱۴/۹ درصد به‌دست آمد. از آنجا که مقدار متناظر برای نمونه مرجع در دیتاشیت سازنده گزارش نشده است، امکان مقایسه مستقیم این پارامتر فراهم نبود، با این حال مقدار به‌دست‌آمده در محدوده مجاز استاندارد ISO 5017 قرار دارد و نشان‌دهنده کیفیت مناسب فرآیند ریخته‌گری و تراکم ساختاری ماده است.

۵. مقایسه و تحلیل

(جدول ۶)، مقایسه خواص شیمیایی، فیزیکی و عملکردی نمونه بومی‌سازی شده را با نمونه مرجع خارجی نشان می‌دهد. هدف از این تحلیل بررسی تأثیر تغییرات ترکیب شیمیایی و رویکرد فرمولاسیون بر خواص کلیدی نسوز شامل چگالی، استحکام فشاری سرد، تغییر طول خطی دائمی و دمای سرویس است.

دمای سرویس این ماده برابر با ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تعیین گردید که نشان‌دهنده قابلیت عملکرد در شرایط دمایی ریفورمرهای صنعتی است. چگالی حجمی نمونه بومی‌سازی شده برابر با ۲/۵۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد که بیانگر ساختار نسبتاً متراکم و کاهش تخلخل در مقایسه با حداقل الزامات نمونه مرجع است.

استحکام فشاری سرد نمونه بومی بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده استحکام مکانیکی بالا و توانایی تحمل تنش‌های فشاری و حرارتی در شرایط بهره‌برداری است. همچنین مقدار تغییر طول خطی دائمی برابر با ۰/۸ درصد پس از ۲۴ ساعت حرارت‌دهی در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد که بیانگر پایداری ابعادی مناسب ماده در دماهای بالا مطابق استاندارد ASTM C113 است.

تخلخل ظاهری^۱ که درصد حجم کل منافذ باز در یک

جدول ۶. مقایسه خواص شیمیایی، فیزیکی و عملکردی نمونه بومی با مرجع خارجی

مشخصه	نمونه مرجع خارجی	نمونه بومی
Al ₂ O ₃ (درصد وزنی)	۶۰ <	۵۹/۴
SiO ₂ (درصد وزنی)	۳۱ >	۳۵/۴
Fe ₂ O ₃ (درصد وزنی)	۱/۵ >	۱/۶
CaO (درصد وزنی)	۴/۲ تا ۲/۸	۰/۶
دمای سرویس (درجه سانتی‌گراد)	۱۷۰۰ <	۱۷۰۰
چگالی حجمی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۲/۲ <	۲/۵۳
تغییر طول خطی دائمی در ۲۴ ساعت (درصد)	۱ (در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد)	۰/۸ (در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد)
استحکام فشاری سرد (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	۵۰۰ <	۱۰۰۰ <
هزینه نهایی هر دسته (میلیون ریال)	۲۵۳	۱۶۸

1. Apparent Porosity

بررسی تطبیقی خواص نمونه بومی سازی شده در مقایسه با نمونه مرجع خارجی، نشان دهنده یک تغییر رویکرد موفق در فرمولاسیون است که بر پایه افزودن مواد اولیه‌ای نظیر آندالوزیت و اکسید تیتانیوم و همچنین استفاده از بایندهای نانویی به جای سیمان متعارف بنا شده است. این تغییرات شیمیایی که منجر به بهبود خواص عملکردی و همچنین صرفه جویی ریالی قابل توجه (کاهش هزینه از ۲۵۳ به ۱۶۸ میلیون ریال) شده، به طور مستقیم بر خواص مهندسی کلیدی تأثیر گذاشته است.

نتایج نشان می دهد که نمونه بومی با وجود تفاوت هایی در ترکیب شیمیایی، توانسته است عملکردی قابل مقایسه و در برخی موارد بهتر از نمونه مرجع ارائه دهد. یکی از مهم ترین تغییرات در فرمولاسیون، حذف سیستم سیمانی متعارف و استفاده از سیستم باینده مبتنی بر نانو بوده است که منجر به کاهش قابل توجه مقدار اکسید کلسیم در ترکیب گردید.

در نسوزهای آلومینایی، حضور CaO که عمدتاً ناشی از سیمان آلومینایی است می تواند منجر به تشکیل فازهای کم ذوب و افزایش مقدار فاز شیشه ای در ریزساختار پس از پخت شود. کاهش این ترکیب تا حدود ۰/۶ درصد در نمونه بومی باعث کاهش تشکیل این فازها و در نتیجه افزایش پایداری حرارتی ماده شده است. این موضوع ارتباط مستقیمی با بهبود پایداری ابعادی و کاهش تغییر طول خطی دائمی در دماهای بالا دارد [۱۳-۱۴].

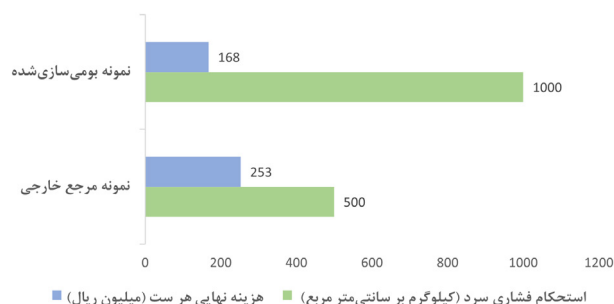
نتایج آزمون تغییر طول خطی دائمی (PLC) نیز مؤید این موضوع است. این مقدار برای نمونه بومی برابر با ۰/۸ درصد پس از ۲۴ ساعت در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی گراد اندازه گیری شد که بیانگر پایداری ابعادی مناسب در شرایط دمای بالا است. اگرچه مقدار گزارش شده برای نمونه مرجع برابر با ۱ درصد در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد است و شرایط آزمون دو نمونه کاملاً یکسان نیست، با این حال دستیابی به مقدار PLC کمتر در دمای بالاتر نشان می دهد که نمونه بومی از پایداری ابعادی قابل قبولی برخوردار بوده و عملکرد آن در شرایط حرارتی شدید نیز رضایت بخش است.

افزودن ۲/۲ درصد وزنی TiO_2 به عنوان یک عامل معدن ساز، نقش مهمی در تسریع تشکیل فاز مولایت ایفا می کند. مولایت به عنوان یکی از پایدارترین فازهای سرامیکی در دماهای بالا شناخته می شود و حضور آن موجب افزایش استحکام مکانیکی و مقاومت خزشی نسوز می گردد. در نتیجه، استحکام فشاری سرد نمونه بومی نسبت به نمونه مرجع افزایش قابل توجهی نشان داده و به بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع رسیده است.

استفاده از آندالوزیت به عنوان منبع اصلی آلومینا نیز نقش مهمی در ایجاد تعادل مناسب بین Al_2O_3 و SiO_2 داشته است. اگرچه مقدار نهایی Al_2O_3 در نمونه بومی اندکی کمتر از نمونه مرجع است، اما حضور آندالوزیت و تبدیل آن به فازهای پایدار در دماهای بالا موجب حفظ عملکرد مناسب نسوز شده است.

از نظر خواص فیزیکی، چگالی حجمی نمونه بومی برابر با ۲/۵۳ گرم بر سانتی متر مکعب اندازه گیری شد که نسبت به حداقل مقدار مورد نیاز در نمونه مرجع (۲/۲ گرم بر سانتی متر مکعب) افزایش قابل توجهی را نشان می دهد. این افزایش چگالی نشان دهنده کاهش تخلخل و تشکیل ساختار متراکم تر در ماده است. افزایش چگالی حجمی و کاهش CaO نشان دهنده تشکیل ماتریکس سرامیکی متراکم تر و کاهش فاز شیشه ای در ریزساختار نسوز است که می تواند نقش مهمی در بهبود مقاومت در برابر خزش و شوک حرارتی ایفا کند [۱۵].

علاوه بر بهبود خواص فنی، نتایج نشان دهنده مزیت اقتصادی قابل توجه در فرآیند بومی سازی است. هزینه تولید هر دسته از قطعات از ۲۵۳ میلیون ریال در نمونه مرجع به ۱۶۸ میلیون ریال در نمونه بومی کاهش یافته است که بیانگر صرفه جویی اقتصادی حدود ۳۳ درصدی است. این کاهش هزینه عمدتاً ناشی از جایگزینی مواد اولیه وارداتی با مواد در دسترس داخلی و بهینه سازی فرمولاسیون بوده است. (شکل ۴) از مقاله این برتری دوگانه را به صورت بصری نشان می دهد؛ بهبود هم زمان در استحکام فشاری سرد و کاهش هزینه تولید که در مجموع نمونه بومی را به گزینه ای رقابتی از نظر مهندسی، عملکردی و اقتصادی تبدیل کرده است.



شکل ۴. مقایسه هزینه تمام شده و استحکام فشاری سرد مرجع خارجی و نمونه بومی





۵-۱. اعتبارسنجی نتایج با منبع علمی

مرجع گزارش شده در منابع علمی معتبر از جمله کتاب Refractory Oxides مقایسه شد [۱]. نتایج این اعتبارسنجی در (جدول ۷) ارائه شده است.

به منظور ارزیابی صحت نتایج به دست آمده، ترکیب شیمیایی و خواص عملکردی نمونه بومی با داده های

جدول ۷. اعتبارسنجی خواص شیمیایی و عملکردی نمونه بومی با کتاب Refractory Oxides

مشخصه	محدوده کتاب Refractory Oxides	مقدار نمونه بومی
Al ₂ O ₃ (درصد وزنی)	۵۸ تا ۶۳	۵۹/۴
SiO ₂ (درصد وزنی)	۲۵ تا ۳۲	۲۵/۴
Fe ₂ O ₃ (درصد وزنی)	> ۱/۵	۱/۶
CaO (درصد وزنی)	۲/۸ تا ۴/۲	۰/۶
TiO ₂ (درصد وزنی)	۱ تا ۳	۲/۲
MgO (درصد وزنی)	کمتر از ۱	۰/۲
دمای سرویس (درجه سانتی گراد)	< ۱۷۰۰	۱۷۰۰
چگالی حجمی (گرم بر سانتی متر مکعب)	< ۲/۲	۲/۵۳
استحکام فشاری سرد (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	< ۵۰۰	< ۱۰۰۰

CaO می تواند موجب کاهش تشکیل فازهای کم ذوب و بهبود پایداری فازی در دماهای بالا شود.

اگرچه مقدار Fe₂O₃ و SiO₂ اندکی بالاتر از مقادیر مرجع گزارش شده است، این اختلاف احتمالاً به ترکیب شیمیایی آندالوزیت مورد استفاده مربوط می شود. با توجه به عملکرد مناسب نمونه در پارامترهای کلیدی مانند چگالی حجمی و استحکام فشاری سرد، این اختلاف تأثیر منفی قابل توجهی بر عملکرد نسوز نشان نمی دهد. همچنین مقدار MgO اندازه گیری شده در محدوده ناخالصی های مجاز قرار دارد.

برای تکمیل فرآیند اعتبارسنجی، نتایج این پژوهش با داده های گزارش شده در مطالعات پیشین نیز مقایسه شده است که در (جدول ۸) ارائه شده است.

مقایسه داده ها نشان می دهد که ترکیب شیمیایی نمونه بومی از نظر نسبت کلی اجزای اصلی در چارچوب نسوزهای آلومینا-آندالوزیت گزارش شده در منابع علمی قرار می گیرد، هرچند برخی اجزا مانند CaO و Fe₂O₃ به دلیل تفاوت در نوع مواد اولیه و سیستم بایندر با مقادیر مرجع تفاوت دارند. مقدار آلومینا با بازه های مرجع همخوانی داشته و افزودن ۲/۲ درصد وزنی TiO₂ نیز در محدوده پیشنهادی منابع قرار دارد که می تواند به بهبود فرآیند زینترینگ و افزایش استحکام مکانیکی کمک کند.

همچنین مقدار CaO در نمونه بومی به طور قابل توجهی کمتر از مقادیر گزارش شده است که ناشی از حذف سیمان آلومینایی و استفاده از سیستم بایندر نانویی است. کاهش

جدول ۸. اعتبارسنجی خواص شیمیایی و عملکردی نمونه بومی با مطالعات پیشین

مشخصه	محدوده مرجع [۷]	محدوده مرجع [۱۵]	محدوده مرجع [۹]	مقدار نمونه بومی
Al ₂ O ₃ (درصد وزنی)	۶۵ تا ۵۵	۵۰ تا ۶۰	۵۵ تا ۶۵	۵۹/۴
چگالی حجمی (گرم بر سانتی متر مکعب)	۲/۶ تا ۲/۳	۲/۵ تا ۲/۲	۲/۶ تا ۲/۳	۲/۵۳
استحکام فشاری سرد (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	۹۰۰ تا ۴۰۰	۸۰۰ تا ۳۵۰	۹۰۰ تا ۵۰۰	< ۱۰۰۰

نتایج ارائه شده در (جدول ۸) نشان می دهد که خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه بومی در محدوده داده های گزارش شده برای نسوزهای آلومینا بالا قرار دارد [۷، ۹، ۱۵]. چگالی حجمی با ۲/۵۳ گرم بر سانتی متر مکعب بیانگر تراکم مناسب ساختار بوده و استحکام فشاری سرد بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع حتی از بسیاری از مقادیر گزارش شده در مطالعات پیشین بالاتر است. این بهبود عملکرد را می توان به استفاده از آندالوزیت به عنوان منبع آلومینوسیلیکاتی، افزودن TiO_2 و به کارگیری سیستم بایندر نانویی نسبت داد که مطابق گزارش های موجود در منابع علمی، استفاده از این ترکیبات می تواند موجب تشکیل ریزساختار متراکم تر و بهبود خواص مکانیکی نسوزها شود [۱۵].

همچنین مقایسه با قطعه مرجع صنعتی نشان داد که نمونه بومی از نظر چگالی حجمی و استحکام فشاری سرد عملکردی بالاتر از حداقل الزامات دارد و مقدار تغییر طول خطی دائمی ۰/۸ درصد در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی گراد، بیانگر پایداری ابعادی مناسب در شرایط دمای بالا است. در مجموع، همخوانی بین نتایج این پژوهش، داده های منابع علمی و عملکرد قطعه مرجع صنعتی، قابلیت اطمینان فرمولاسیون نسوز مهندسی معکوس شده را تأیید می کند.

۶. نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که بومی سازی جرم نسوز ریختنی آلومینا بالا برای کاربرد در مافل بلاک ریفورمر با استفاده از رویکرد مهندسی معکوس و بهره گیری از مواد اولیه داخلی با موفقیت امکان پذیر است. در این مطالعه، استفاده از

آندالوزیت به عنوان منبع اصلی آلومینا، افزودن مقدار بهینه ۲/۲ درصد وزنی TiO_2 به عنوان عامل معدن ساز و جایگزینی سیستم سیمانی متداول با بایندر نانویی، به بهبود قابل توجه خواص فیزیکی و مکانیکی ماده منجر شد.

نمونه بومی تولید شده با چگالی حجمی ۲/۵۳ گرم بر سانتی متر مکعب و استحکام فشاری سرد بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، الزامات مرجع را برآورده کرده و در برخی شاخص ها از آن فراتر رفت. همچنین نتایج آزمون ها بیانگر پایداری ابعادی مناسب در دمای بالا و قابلیت عملکرد پایدار در دمای سرویس حدود ۱۷۰۰ درجه سانتی گراد است که برای شرایط کاری ریفورمرهای صنعتی اهمیت بالایی دارد.

از منظر صنعتی، توسعه این ترکیب نسوز می تواند به رفع یکی از چالش های مهم بهره برداری در واحدهای ریفورمر، یعنی وابستگی به قطعات نسوز وارداتی با هزینه بالا و زمان تأمین طولانی، کمک کند. علاوه بر این، نتایج تحلیل اقتصادی نشان داد که بومی سازی این قطعه امکان کاهش حدود ۳۳ درصدی هزینه تولید را نسبت به نمونه خارجی فراهم می کند؛ بنابراین، استفاده از ترکیب بهینه ارائه شده می تواند به عنوان یک راهکار قابل اعتماد برای افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات دما بالا، کاهش هزینه های نگهداری و تقویت زنجیره تأمین داخلی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی مورد توجه قرار گیرد. این نتایج نشان می دهد که رویکرد مهندسی معکوس مبتنی بر بهینه سازی هم زمان ترکیب شیمیایی و سیستم بایندر می تواند به عنوان یک استراتژی مؤثر در توسعه نسوزهای پیشرفته صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۹. فهرست اختصارات به کاررفته در مقاله

اختصار	شرح
ASTM	انجمن آزمون و مواد آمریکا - American Society for Testing and Materials (ASTM International)
ISO	سازمان بین المللی استانداردسازی - International Organization for Standardization
API	مؤسسه نفت آمریکا - American Petroleum Institute
PLC	تغییر طول خطی دائمی - Permanent Linear Change
LCC	جرم نسوز ریختنی کم سیمان - Low Cement Castable
ULCC	جرم نسوز ریختنی فوق کم سیمان - Ultra Low Cement Castable

- of Ceramic Science and Technology. 2025;16(3):107–116. <https://doi.org/10.4416/JCST2024-00014>.
- [8]. Li M, Cai C, Qi G, Lv S, Li S, Chen R. A novel tar-silica sol bonded no-cement Al_2O_3 -SiC-C castable with improved carbon dispersion and SiC whisker formation. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2025;22(6): e70025. <https://doi.org/10.1111/ijac.70025>.
- [9]. Nevřivová L, Zemánek D. Study of the mineralogical composition of an alumina-silica binder system formed by the sol-gel method. *Materials*. 2023;16(15):5466. <https://doi.org/10.3390/ma16155466>.
- [10]. Lee WE, Vieira W, Zhang S, Ghanbari Ahari K. Castable refractory concretes. *International Materials Reviews*. 2001;46(3):145–167. <https://doi.org/10.1179/095066001101528439>.
- [11]. Hou X, Chen J, Cao Y, Liu G, Wei G, Yan W, Wei Y, Li N, Zhang Y. Influence of bonding systems on the properties of Al_2O_3 -MgO refractory castables: Aluminate cement and alumina-silica gel. *Ceramics International*. 2024;50(22):46695–46704. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.09.021>.
- [12]. Kashcheev ID, Rozhkov EV, Pivinskii YuE. Structurization of unshaped refractories. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2003;44(1):37–41. <https://doi.org/10.1023/A:1023967712104>.
- [13]. Roy J, Chandra S, Maitra S. Nanotechnology in castable refractory. *Ceramics International*. 2019;45(1):19–29. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.09.261>.
- [14]. Nouri Khezrabad M, Braulio MAL, Pandolfelli VC, Golestani Fard F, Rezaie HR. Nano-bonded refractory castables. *Ceramics International*. 2013;39(4):3479–3497. <https://doi.org/10.1016/j>
- مراجع:
- [1]. Smith JD, Fahrenholtz WG. Refractory Oxides. In: Shackelford JF, Doremus RH, editors. *Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing*. Oxford, United Kingdom: Springer; 2008.
- [2]. Liao G, He K, Li L, Jiang M. Study on application of alumina in high-purity andalusite-based refractory. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2004;3(2):125–130. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2004.32009>.
- [3]. Zawrah MFM, Khalil NM. Effect of mullite formation on properties of refractory castables. *Ceramics International*. 2001;27(6):689–694. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(01\)00021-9](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(01)00021-9).
- [4]. Rebouillat L, Rigaud M. Andalusite-Based High-Alumina Castables. *American Ceramic Society Bulletin*. 2004;83(12):28–32. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2002.tb00099.x>.
- [5]. Bhattacharyya A, Singh RK, Pradhan N, Kujur MK, Kain A, Prasanth P, et al. Study of the influence of andalusite on properties of 60% Al_2O_3 -based bricks for steel plants. *SN Applied Sciences*. 2020;69:30–35. <https://doi.org/10.1007/s42411-019-0062-3>.
- [6]. Khanmohammadi S, Mohtadinia M. Parameters influencing the characteristics of the nano-bonded aluminosilicate based refractory castables. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2025;61:21–29. <https://doi.org/10.1007/s41779-024-01139-y>.
- [7]. Brochen E, Dannert C, Thiesen M, Ibarra T, Krause O, Abdelouhab S, Lang C. Thermomechanical and thermochemical behaviour of silica- and spinel-sol-bonded high-alumina refractory castables. *Journal*





- [21]. ASTM International. Standard Test Method for Reheat Change of Refractory Brick (ASTM C113-14(2019)). West Conshohocken, PA: ASTM International; 2019.
- [22]. ASTM International. Standard Classification of Alumina and Alumina-Silica Castable Refractories (ASTM C401-12). West Conshohocken, PA: ASTM International; 2022.
- [23]. ASTM International. Standard Test Methods for Cold Crushing Strength and Modulus of Rupture of Refractories (ASTM C133-24). West Conshohocken, PA: ASTM International; 2024.
- [24]. International Organization for Standardization. Dense shaped refractory products—Determination of bulk density, apparent porosity and true porosity (ISO 5017:2025). Geneva: International Organization for Standardization; 2025.
- [25]. American Petroleum Institute. Refractory Installation Quality Control—Inspection and Testing Monolithic Refractory Linings and Materials (API STD 936-24). Washington, DC: American Petroleum Institute; 2024.
- ceramint.2012.11.028.
- [15]. López Perales JF, Díaz Tato L, González Carranza Y, Contreras de León JE, Gómez Rodríguez C, Fernández González D, Rodríguez Castellanos EA. Aluminum spent foundry sand as an emergent raw material in the production of a sustainable aluminosilicate refractory castable. *Materials*. 2025;18(24):5500. <https://doi.org/10.3390/ma18245500>.
- [16]. Liu Y, Xu L, Chen M, Zhang D. Effects of andalusite and kyanite addition on the microstructure, thermo-mechanical properties and corrosion resistance of ultralow-cement bauxite-corundum castables. *Ceramics International*. 2022;48(10):14141–14150. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.300>.
- [17]. Li L, Wang Q, Liao G, Li K, Ye G. Densification behavior of mullite–Al₂TiO₅ composites by reaction sintering of natural andalusite and TiO₂. *Ceramics International*. 2018;44(4):3981–3986. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.11.191>.
- [18]. Singh AK, Sarkar R. Nano mullite bonded refractory castable composition for high temperature applications. *Ceramics International*. 2016;42(11):12937–12945. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.066>.
- [19]. Najafi A, Sarpoulaki H, Golestani-Fard F, Taqizadeh R. Investigation of the effect of TiO₂ on the properties of alumina–spinel refractory castables. *Int J Ind Eng Prod Manag*. 2008;19(5):1–8. [In Persian].
- [20]. Innocentini MDM, Silva MG, Menegazzo BA, Pandolfelli VC. Permeability of refractory castables at high temperatures. *Journal of the American Ceramic Society*. 2001;84(3):645–647. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2001.tb00715.x>.

Mechanical Property Optimization of High Alumina Castables via Formulation Adjustment in Petrochemical Applications

Alireza Rahimi*

Senior Mechanical Engineer, Reverse Engineering and Manufacturing Unit, Bushehr Petrochemical Company, Asaluyeh, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL ARTICLE

Article History:

Received: 18 February 2026

Revised: 07 June 2026

Accepted: 20 June 2026

Keywords:

Reverse Engineering

Castable Refractory

Reformer Nozzle

Alumina

Andalusite

Nano-bonded

ABSTRACT

In reformer units of gas and petrochemical industries, refractory components surrounding nozzles are exposed to high temperatures, thermal shocks, and corrosive environments, and dependence on imported refractory materials represents a major industrial challenge. In this study, reverse engineering of a high alumina refractory castable was performed to achieve localization and improve mechanical performance, and its formulation was optimized using a techno economic approach. Andalusite was used as the primary alumina source, and 2.2 wt% TiO_2 was added as a mineralizing agent to accelerate mullite formation. Furthermore, nano bonding systems were employed instead of conventional cement binders, leading to reduced CaO content and improved microstructural densification. The produced samples were evaluated according to ASTM C133, ASTM C113, and ISO 5017 standards. Results showed that the developed composition maintained a service temperature of 1700 °C, with a bulk density of 2.53 g/cm³, cold crushing strength exceeding 1000 kg/cm², and permanent linear change of 0.8% at 1450 °C. Additionally, approximately 33% cost reduction was achieved compared to the imported sample. These findings indicate that the proposed composition can serve as a reliable and cost effective alternative for high temperature applications in the petrochemical industry.

DOR: [20.1001.1.2602.1119.1404.11.29](https://doi.org/10.1001.1.2602.1119.1404.11.29)

How to cite this article

A. Rahimi, Mechanical Property Optimization of High Alumina Castables via Formulation Adjustment in Petrochemical Applications. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025; 13(1): 90-102. (https://ijge.irangi.org/article_738767.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: al.rahimi@bupc.ir, (A. Rahimi).

Available online 21 June 2026

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

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



پیش‌بینی میزان ماسه عبوری از لوله‌ی مشبک‌کاری شده به کمک الگوریتم‌های یادگیری ماشین

محمدالیاس خدائیان*

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

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: mohammadyas@hafez.shirazu.ac.ir

مقاله‌ی علمی-پژوهشی

صفحه ۱۱۸ - ۱۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶

چکیده

تولید ماسه از چاه‌های نفت و گاز باعث کاهش بهره‌وری و خرابی تجهیزات تولیدی می‌شود. برای کنترل این پدیده از توری‌های مهارکننده مکانیکی به‌ویژه لوله مشبک‌کاری شده استفاده می‌شود که عملکرد این توری به‌وسیله‌ی تحلیل نتایج آزمون نگهداشت ماسه تعیین می‌شود. در این پژوهش به‌منظور پیش‌بینی میزان ماسه عبوری از واحد سطح توری لوله مشبک‌کاری شده، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده شده است. بدین منظور، نتایج حاصل از ۵۱۹ نمونه آزمایش آزمون نگهداشت ماسه‌ی ذکرشده در مطالعات پیشین به‌عنوان پایگاه داده جمع‌آوری شد که شامل: انواع ساختار و طراحی‌های مختلف توری، توزیع اندازه ذرات ماسه و شرایط آزمایشی است. پایگاه داده‌ی نهایی شامل: ۴۹۹ نمونه داده‌ی پیش‌پردازش شده است. برای ساخت مدل از الگوریتم‌های: GB، XGBoost، RF، DT، KNN، SVM، MLP و Poly Reg استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوریتم GB با بیشترین دقت ($R^2 = 0.94$) و کمترین خطا، به‌همراه الگوریتم XGBoost بهترین عملکرد را در پیش‌بینی ارائه می‌دهند. همچنین مشخص شد که اندازه عرض شکاف‌های توری و اختلاف فشار و دبی آزمایش مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر مقدار ماسه تولیدی می‌باشند. به‌علاوه، نوع طراحی توری و اندازه عرض شکاف‌های آن باید متناسب با توزیع اندازه ذرات ماسه انتخاب شود. مدل ماشین این پژوهش، مزایایی همچون: افزایش دقت پیش‌بینی نسبت به روش‌های پیشین، ارائه‌ی یک مدل تفسیرپذیر عملکرد توری و افزایش سرعت انتخاب را به همراه دارد و می‌تواند به کنترل تولید ماسه‌ی چاه‌ها کمک کند.

کلیدواژه‌ها: آزمون نگهداشت ماسه، تکمیل چاه، تولید ماسه، لوله مشبک‌کاری شده، یادگیری ماشین

۱. مقدمه

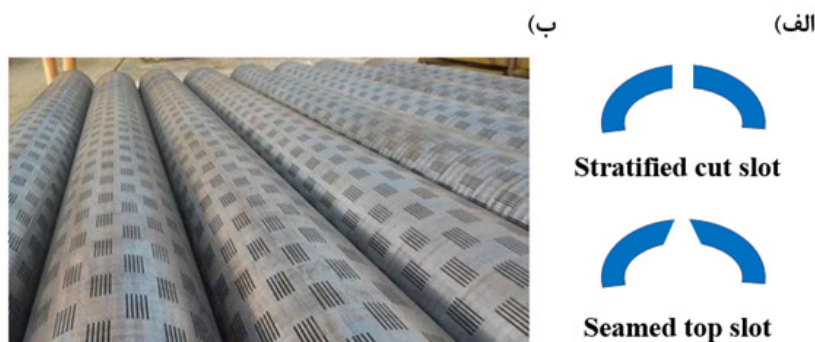
عددی، شامل: کاهش تولید، آسیب سازند و خرابی تجهیزات سطح‌الارضی و چاه را به‌همراه دارد [۱]. انتخاب یک توری مهارکننده مکانیکی^۱ مناسب از جمله: لوله مشبک‌کاری شده، می‌تواند میزان ماسه تولیدی از چاه را به حداقل برساند [۲]. لوله‌های مشبک‌کاری شده، به شکل لوله‌های دارای شکاف‌های سطحی هستند که برای جلوگیری از ورود ذرات ماسه (غالباً ذرات بزرگ‌تر ماسه) به داخل چاه طراحی شده‌اند [۳]. طراحی تعداد شکاف‌های سطح این توری با واحد SPC^۲ اندازه‌گیری می‌شود [۴، ۵]. مقدار SPC به‌گونه‌ای

2. Slot per columns

1. Mechanical Sand Screen



است. به‌طور کلی هندسه‌های Seamed و Stratified cut دو نوع رایج طراحی شکاف هستند [۶،۷]. در (شکل ۱) تفاوت نحوه‌ی طراحی هندسه شکاف‌ها و لوله‌های مشبک‌کاری شده با تعداد شکاف‌های سطحی معین نشان داده شده است:



شکل ۱. طراحی لوله مشبک‌کاری شده: (الف) تفاوت ساختار هندسه‌های دهانه‌ی داخلی شکاف، (ب) نمونه لوله‌های مشبک‌کاری شده با تعداد معینی از شکاف‌ها [۴]

یا تکمیل چاه حفره باز^۱ پرداخته‌اند [۲۴-۱۸]؛ بنابراین در مطالعات پیشین به کاربرد یادگیری ماشین برای افزایش دقت پیش‌بینی عملکرد لوله مشبک‌کاری شده، پرداخته نشده است [۱۹،۲۵]. در حالیکه با توجه کاربرد گسترده‌ی این توری در تکمیل چاه، تحلیل عوامل مؤثر بر عملکرد و انتخاب بهینه‌ترین طراحی توری به کمک یادگیری ماشین، می‌تواند به بهبود چشمگیری در زمینه‌ی کنترل تولید ماسه در چاه‌ها منجر شود [۶،۲۶،۲۷]. در این پژوهش با استفاده از یادگیری ماشین به پیش‌بینی ماسه عبوری از سطح توری لوله مشبک‌کاری شده پرداخته می‌شود و تأثیر عوامل مختلف بر عملکرد توری بررسی می‌شود. در نهایت، یک مدل ماشینی کارآمد برای تشخیص بهترین توری ارائه می‌شود که مقادیر ماسه عبوری را برای انواع طراحی‌های توری در یک چاه پیش‌بینی می‌کند و از طریق مقایسه‌ی نتایج، توری با کمترین تولید ماسه برای تکمیل چاه انتخاب می‌شود. در ادامه، روش انجام پژوهش شامل: جمع‌آوری داده‌ها و تعریف متغیرها، توصیف آماری و پیش‌پردازش^۹ داده‌ها،

عملکرد توری انتخابی به تناسب طراحی آن با شرایط تولیدی چاه بستگی دارد [۸-۱۰]. در روش سنتی برای تشخیص بهترین توری از نتایج آزمایشگاهی (آزمون نگهداشت ماسه)^۲ استفاده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که شرایط تولیدی چاه در آزمایش‌ها شبیه‌سازی می‌شود تا میزان ماسه عبوری از توری‌های مختلف (با طراحی متفاوت) با هم مقایسه شود [۱۱،۱۲]. انتخاب توری به روش سنتی، نیازمند صرف زمان و هزینه زیاد برای انجام آزمایش‌های متعدد است و مشکلات روش‌های آزمایشگاهی، افزایش خطای پیش‌بینی و ... را نیز به همراه دارد [۱۳]. برای رفع چالش‌های روش سنتی، استفاده از یادگیری ماشین پیشنهاد شده است که توانایی تحلیل دقیق پیچیدگی مسئله برای تعداد زیاد داده‌ها را دارد [۱۴-۱۶]. در این زمینه، عبدالرزاق و همکاران به کمک شبکه عصبی مصنوعی^۳ به پیش‌بینی میزان ماسه عبوری از توری ممتاز^۴، لوله‌ی سیم‌پیچی شده^۵ و مش فلزی^۶ پرداختند [۱۷]. سایر مطالعات مشابه نیز به پیش‌بینی میزان ماسه عبوری از توری‌های قابل انبساط^۷

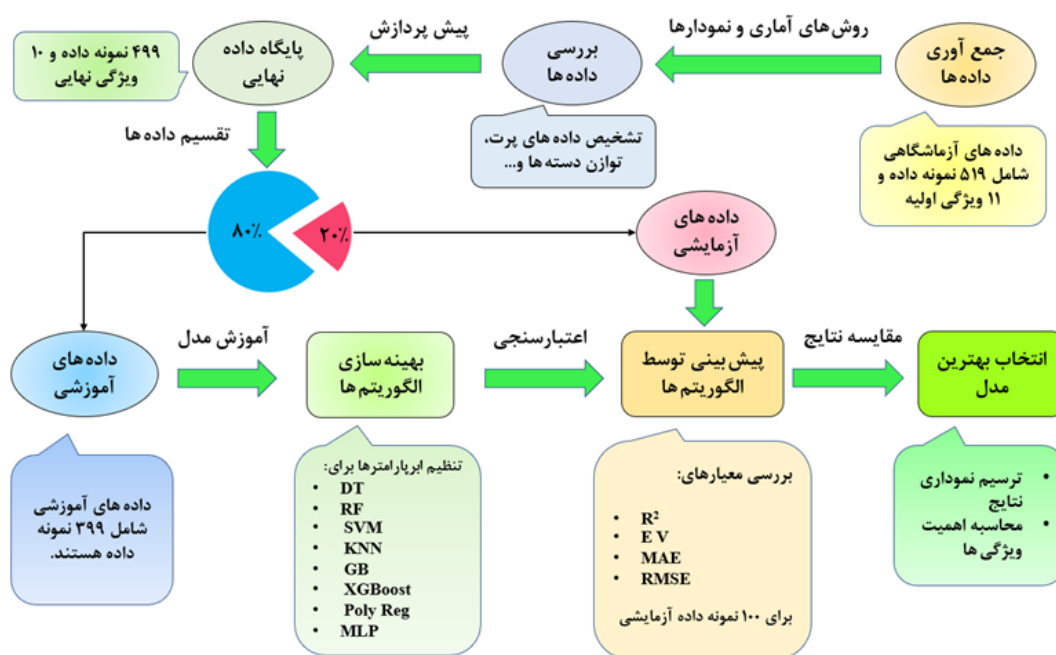
1. Completion Skin
2. SRT
3. ANN
4. Premium Screen
5. Wire Wrapped
6. Metal Mesh
7. Expandable Sand Screen
8. Openhole Well Completion
9. Preprocessing

الگوریتم‌های انتخابی، روش بهینه‌سازی، روش اعتبارسنجی نتایج و انتخاب مدل نهایی شرح داده شده است.

۲. روش انجام پژوهش

به‌منظور ساخت مدل، ابتدا داده‌های آزمایشگاهی مختلف جمع‌آوری شدند و میزان ماسه‌ی عبوری از سطح توری به‌عنوان هدف^۱ پژوهش تعریف شد. سپس تأثیر هر یک از ویژگی‌ها^۲ روی تغییرات مقادیر هدف تحلیل

شد. در ادامه به پیش‌پردازش داده‌ها پرداخته شد تا داده‌ها برای آموزش الگوریتم‌های انتخابی آماده شوند. در مرحله‌ی بعد، هریک از الگوریتم‌ها بهینه‌سازی شدند و نتایج آن‌ها به کمک روش‌های اعتبارسنجی^۳ با یکدیگر مقایسه شد تا بهترین الگوریتم به‌عنوان مدل ماشینی انتخاب شود. (شکل ۲) مراحل ساخت مدل ماشینی پژوهش را نشان می‌دهد:



شکل ۲. مراحل ساخت مدل ماشینی در پژوهش حاضر

همان‌طور که در (شکل ۲) مشاهده می‌شود؛ ساخت یک مدل مناسب برای پیش‌بینی، نیازمند انجام مراحل مختلف آماده‌سازی داده‌ها برای ورود به مدل و همچنین بهینه‌سازی و اعتبارسنجی الگوریتم‌هاست. در ادامه، مراحل مربوط به آماده‌سازی داده‌ها و الگوریتم‌ها شرح داده شده است:

۲-۱. جمع‌آوری داده‌ها و تعریف ویژگی

در این پژوهش، پایگاه داده^۴ از جمع‌آوری داده‌های

آزمایشگاهی مطالعات پیشین به‌دست‌آمده است که شامل: اطلاعات ۵۱۹ نمونه^۵ آزمایش برای انواع توری‌های لوله مشبک‌کاری شده می‌باشد [۲۸-۳۴]. برای هر نمونه، مقادیر هدف و ویژگی‌های آزمایش اندازه‌گیری و گزارش شده است. ویژگی‌های تعریف شده‌ی پژوهش، بر اساس عوامل تأثیرگذار بر تولید ماسه انتخاب‌شده‌اند که شامل: توزیع اندازه ذرات^۶ ماسه، ویژگی‌های طراحی توری و شرایط آزمایش می‌باشند. ویژگی‌های انتخابی در پژوهش در (جدول ۱) توضیح داده‌شده‌اند:

1. Target
2. Features
3. Validation
4. Dataset
5. Sample
6. Particle Size Distribution



جدول ۱. ویژگی‌های موجود در پایگاه داده و معرفی آن‌ها

دسته‌بندی کلی عوامل	نماد ویژگی در پایگاه داده	واحد اندازه‌گیری	توضیحات
توزیع اندازه ذرات ماسه [۱۲]	d10	μm	۱۰ درصد دانه‌ها در نمونه ماسه از این مقدار، قطر کوچک‌تری دارند (نماینده‌ی کوچک‌ترین دانه‌ها)
	d50	μm	۵۰ درصد دانه‌ها در نمونه ماسه از این مقدار، قطر کوچک‌تری دارند (معادل مقدار میانه قطرها)
	d90	μm	۹۰ درصد دانه‌ها در نمونه ماسه از این مقدار، قطر کوچک‌تری دارند (نماینده‌ی بزرگ‌ترین دانه‌ها)
	UC	-	معیاری (ضریب یکنواختی) که میزان نزدیکی و مشابهت اندازه ذرات میانی و کوچک‌تر در نمونه به یکدیگر را نشان می‌دهد.
	SC	-	معیاری (ضریب جور شدگی) که میزان نزدیکی بین اندازه کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین ذرات نمونه به یکدیگر را نشان می‌دهد
	Fine	-	نسبت ذرات ریز ($d < 45\mu\text{m}$) به کل ذرات برحسب درصد
SPC های ۳۰، ۴۵ و ۵۴			
ویژگی‌های طراحی توری [۳۵]	Screen type	-	تفکیک نوع هندسه طراحی شکاف (Seamed یا Stratified cut) توری بر اساس:
اندازه طول شکاف‌های توری			
	Aperture	μm	اندازه عرض شکاف‌های توری
	dp	psi	اختلاف فشار بسته‌ی ماسه ^۲
	q	ml/min	دبی جریان سیال مورد استفاده در آزمایش
شرایط آزمایش [۳۶]	fluid	-	نوع سیال آزمایشی در پایگاه داده، سیال آبی است. بنابراین یک ویژگی ثابت و بی‌تأثیر محسوب می‌شود و از پایگاه داده حذف می‌شود

۲-۲. تعریف متغیر هدف

به‌منظور مقایسه‌ی صحیح عملکرد توری‌های مختلف، رفع این چالش در پایگاه داده، مقادیر هدف به مساحت توری‌ها تقسیم شدند تا به ازای همه‌ی نمونه‌ها، واحد توری‌ها سنجیده شوند؛ زیرا تغییر مساحت توری می‌تواند بر جرم عبوری از آن تأثیر بگذارد؛ به‌منظور

1. $1\mu\text{m} = 1\text{micron} = 10^{-6}\text{ m}$

2. Sandpack

3. lb/ft²

۳-۲. توصیف آماری و پیش پردازش داده‌ها

پس از جمع‌آوری داده‌ها، انتخاب ویژگی‌ها و تعریف هدف در پایگاه داده^۱، به‌منظور پیش‌پردازش مناسب در مرحله بعدی، وجود مقادیر گم‌شده^۲ در داده‌ها بررسی شد. اطلاعات آماری نشان داد که پایگاه داده فاقد مقادیر گم‌شده است. همچنین محدوده‌ی تغییرات داده‌های هر

یک از متغیرها به‌وسیله‌ی نمودارهای گرافیکی و روش‌های آماری بررسی شد. روش‌های آماری به محاسبه‌ی مقادیر میانگین، انحراف معیار^۳، کمینه^۴، میانه^۵ و بیشینه^۶ برای هر یک از متغیرها می‌پردازند. اطلاعات آماری و توصیف داده‌های پایگاه داده، در (جدول ۲) ذکر شده است:

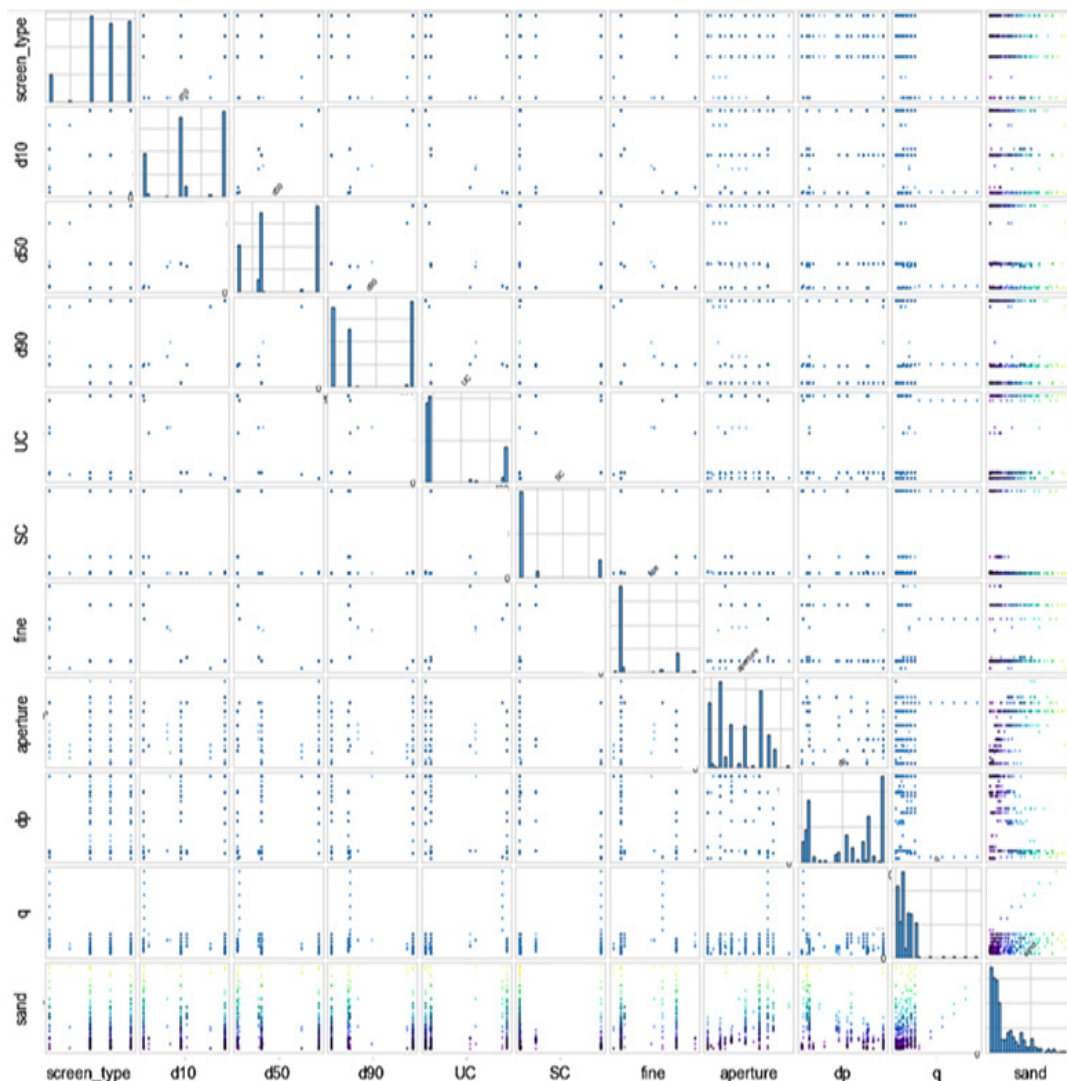
جدول ۲. اطلاعات آماری داده‌های هر یک از متغیرها

معیار	ستون	d10	d50	d90	UC	SC	fine	aperture	dp	q	sand
میانگین		۸۴/۲۵	۱۹۲/۰۸	۲۸۳/۶۵	۳/۵۴	۸/۷۶	۷/۱۱	۴۴۱/۰۶	۵۴۷/۱۰	۱۳۵/۴۹	۰/۰۰۲۸
انحراف معیار		۴۵/۸۹	۵۲/۲۸	۴۴/۷۶	۷۵/۲	۶۵۳۸/۱۱	۴/۰۷	۱۵۸/۴۵	۸۷/۳۷۶	۰۷/۱۳۶	۰/۰۰۳۰
کمینه		۱۴	۱۲۷	۲۰۸	۱/۸۸	۳/۲۰۰۳	۶۸/۳	۲۳۰	۷/۱۸	۲/۱	۰
میانه		۷۰	۱۶۵	۲۴۳	۲/۳۶	۳/۲۰۰۳	۵	۴۰۰	۶۱۰	۳۳/۱۱۰	۰/۰۰۱۴
بیشینه		۱۳۶	۲۵۶	۳۷۸	۹/۰۷	۳۵	۳۹/۱۸	۶۶۰	۱۰۰۰	۴۸/۸۶۷	۰/۰۱۳۰

با بررسی نتایج حاصل از (جدول ۲) مشخص شد که بازه‌ی تغییرات مقادیر متغیرهای پایگاه داده با یکدیگر متفاوت‌اند. این پدیده باعث سوگیری^۷ پیش‌بینی مدل به سمت متغیرهایی می‌شود که دارای بازه‌ی بزرگ‌تری هستند. به‌منظور رفع این مشکل، داده‌های هر یک از متغیرها به بازه‌ی (۰، ۱) نرمال‌سازی^۸ شدند [۳۷]. داده‌های متنی^۹ متغیر Screen_type نیز به کمک روش Encoder

به داده‌های عددی تبدیل شدند تا برای فرآیند آموزش الگوریتم‌ها آماده شوند. بهترین روش تشخیص داده‌های پرت^{۱۰} با توجه به پایگاه داده، بررسی و تحلیل وضعیت تجمع و مشابهت داده‌ها به کمک نمودارهای توزیع^{۱۱} و پراکندگی^{۱۱} است. در (شکل ۳) نمودارهای توزیع نرمال هر یک از متغیرها و نمودارهای پراکندگی متغیرها نسبت به یکدیگر نشان داده شده است:

1. Missing Values
2. Standard Deviation
3. Minimum
4. Median
5. Maximum
6. Bias
7. Normalization
8. Categorical
9. Outliers
10. Distribution Plot
11. Scatter Plot



شکل ۳. نمودارهای توزیع نرمال و پراکندگی متغیرها

نمونه داده‌ی پیش‌پردازش شده است.

۲-۴. تقسیم داده‌های آزمایشی و آموزشی

در این مرحله، داده‌های پیش‌پردازش شده به دو بخش: داده‌های آموزشی و داده‌های آزمایشی تقسیم شدند. به‌طوری‌که ۸۰ درصد داده‌ها به آموزش الگوریتم‌ها و ۲۰ درصد داده‌ها به ارزیابی نتایج پیش‌بینی‌شده توسط الگوریتم‌ها اختصاص داده شدند. مبنای انتخاب داده‌های آموزشی و آزمایشی از پایگاه داده به‌وسیله‌ی اعتبارسنجی متقابل^۱ (با قراردادن $CV=5$) انجام شد تا همه‌ی داده‌ها در فرآیند آموزش و آزمایش مدل شرکت داده شوند و نتایج مدل دچار سوگیری نشود.

با توجه به (شکل ۳) مشخص شد که توزیع داده‌های دبی جریان سیال دارای ۲۰ نمونه داده‌ی پرت است که این داده‌ها از پایگاه داده حذف شد. همچنین با بررسی نقاط دارای بیشترین فاصله نسبت به مرکز داده‌ها (نقاط زردرنگ) در نمودارها مشخص شد که این نقاط بر اساس نتایج آزمایشات تکرارپذیر معتبر به‌دست‌آمده‌اند و داده‌ی پرت محسوب نمی‌شوند. با توجه به نمودار توزیع نرمال برای ویژگی نوع توری مشخص شد که تعداد نمونه‌های انواع توری متفاوت است که ممکن است باعث سوگیری مدل شود؛ بنابراین برای رفع نامتوازن بودن تعداد نمونه در دسته‌های نوع توری از روش Smooth استفاده شده است. پس از تکمیل پیش‌پردازش، پایگاه داده‌ی نهایی برای آموزش الگوریتم‌ها شامل: ۴۹۹

1. Cross Validation

۵-۲. الگوریتم‌های مورد استفاده و روش بهینه‌سازی

به‌منظور ساخت مدل ماشینی از هشت الگوریتم، شامل: DT، RF، SVM، KNN، GB، XGBoost، رگرسیون از نوع Poly Reg و یک شبکه عصبی MLP استفاده شده است. در ادامه به بهینه‌یابی^۱ ابرپارامترها^۲ در الگوریتم‌های انتخابی پرداخته شد و هر یک از الگوریتم‌ها با تنظیم مقادیر مختلف ابرپارامترهایشان به روش جست‌وجوی شبکه‌ای^۳ روی پایگاه داده آموزش دیدند که بر اساس مقایسه‌ی دقت پیش‌بینی‌ها به‌ازای حالت‌های مختلف، بهترین مقادیر ابرپارامترهای هر الگوریتم مشخص شد. برای الگوریتم‌های مبتنی بر درخت (DT، RF، GB، XGBoost) ابرپارامترهای: حداکثر عمق^۴، تعداد درخت^۵، حداقل نمونه برای تقسیم گره^۶ و ... بهینه‌سازی شدند. ابرپارامتر نرخ یادگیری^۷ نیز برای الگوریتم‌های MLP، GB، XGBoost بهینه شد. برای شبکه عصبی حالت‌های مختلف تعداد لایه‌های پنهان^۸، تعداد نورون‌ها، حداکثر تکرارهای آموزش^۹، توابع فعال‌سازی^{۱۰} و ... آزمایش شدند. در الگوریتم SVM ابرپارامترهای: Kernel، C، Gamma و Epsilon بهینه شدند. برای الگوریتم KNN ابرپارامترهای: تعداد همسایگی^{۱۱}، وزن‌ها^{۱۲} و معیار فاصله^{۱۳} بررسی و بهینه شدند. برای رگرسیون نیز ابرپارامتر α بهینه شد و یک تحلیل حساسیت جداگانه برای بهینه‌سازی درجه‌ی چندجمله‌ای‌ها انجام شد و معادلاتی با حداکثر درجات ۱ تا ۵ ساخته شدند که بر اساس مقایسه‌ی دقت پیش‌بینی‌های این معادلات، یک معادله‌ی درجه ۲ به‌عنوان بهینه‌ترین معادله انتخاب شد.

۶-۲. تعیین تأثیر ویژگی‌ها روی هدف

به‌منظور شناسایی و تحلیل اثر هر یک از ویژگی‌ها بر روی تغییرات هدف در پایگاه داده‌ی موجود، از ماتریس ضرایب همبستگی پیرسون^{۱۴} استفاده شده است که شیب تغییرات مقادیر هر متغیر را نسبت به سایر متغیرها محاسبه می‌کند. در ماتریس ضرایب همبستگی، ضرایب مثبت نشان‌دهنده‌ی رابطه مستقیم بین دو متغیر و ضرایب منفی نیز رابطه معکوس را مشخص می‌کنند. با بررسی مشخص می‌شود که هر یک از ویژگی‌ها چه تأثیری بر ماسه‌ی عبوری از توری دارند که این نتایج در بهینه‌سازی تکمیل چاه مؤثر است.

۷-۲. اعتبارسنجی نتایج الگوریتم‌ها و نحوه انتخاب بهترین مدل

به‌منظور اعتبارسنجی دقت پیش‌بینی الگوریتم‌ها، مقادیر هدف برای داده‌های آموزشی و آزمایشی توسط الگوریتم‌ها پیش‌بینی شدند. برای مقایسه‌ی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر واقعی هدف از معیارهای دقت: R^2 و EV و معیارهای سنجش خطای: RMSE و MAE استفاده شده است. معیارهای R^2 و EV میزان مطابقت پیش‌بینی‌ها و واقعیت را نشان می‌دهند. در این دو معیار، مقدار ۱ نشان‌دهنده‌ی مطابقت کامل پیش‌بینی‌ها با مقادیر واقعی هدف است و مقادیر کوچک‌تر از ۱، نشان‌دهنده‌ی دقت کمتر پیش‌بینی می‌باشند. معیارهای دقت انتخابی به‌کاررفته در پژوهش در ادامه توضیح داده‌شده‌اند:

R^2 : معیاری که میزان تغییرپذیری مقادیر پیش‌بینی‌شده نسبت به تغییر مقادیر واقعی هدف را محاسبه می‌کند و عموماً در پایگاه داده‌ی دارای مقادیر

1. Optimization
2. Hyper parameters
3. Grid Search
4. Max_depth
5. N_estimators
6. Min_samples_split
7. Learning_rate
8. Hidden layers
9. Max_iter
10. Activation functions
11. N_neighbors
12. Weights
13. Metric
14. Pearson Correlation Coefficients Matrix

هدف پیوسته^۱ به عنوان معیار اصلی ارزیابی دقت مدل توصیه می‌شود [۳۸]. نحوه‌ی محاسبه‌ی R^2 در رابطه (۱) نشان داده شده است:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

که در رابطه (۱) n تعداد نمونه‌ها، y_i مقدار واقعی، $\hat{y}$ مقدار پیش‌بینی‌شده و $\bar{y}$ مقدار میانگین مقادیر واقعی نمونه‌های هدف را نشان می‌دهد.

EV: این معیار نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های مدل، چه میزان از واریانس مقادیر هدف را توضیح می‌دهند. این معیار نسبت به R^2 حساسیت کمتری به مقادیر پیش‌بینی پرت نشان می‌دهد و به عنوان یک معیار ارزیابی مناسب برای داده‌های آزمایشگاهی قابل استفاده است. از مقایسه‌ی مقدار اختلاف بین معیارهای R^2 و EV میزان سوگیری مدل‌ها مشخص می‌شود. نحوه‌ی محاسبه‌ی دقت مدل به روش EV در رابطه (۲) نشان داده شده است:

$$EV = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y} - (\bar{y} - \bar{\hat{y}}))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

که در رابطه (۲) n تعداد نمونه‌ها، y_i مقدار واقعی، $\hat{y}$ مقدار پیش‌بینی‌شده و $\bar{y}$ میانگین مقادیر واقعی، $\bar{\hat{y}}$ میانگین مقادیر پیش‌بینی‌شده‌ی نمونه‌ها را نشان می‌دهد [۳۹]. برای ارزیابی دقیق‌تر عملکرد الگوریتم‌ها، معیارهای خطای RMSE و MAE نیز به کار گرفته شده‌اند که می‌توانند اختلاف پیش‌بینی‌ها را ارزیابی کنند. معیارهای خطای انتخابی به کاررفته در پژوهش در ادامه توضیح داده شده‌اند:

MAE: معیاری که میانگین قدر مطلق اختلاف پیش‌بینی‌ها و مقادیر واقعی را محاسبه می‌کند و به عنوان معیار خطای اصلی برای ارزیابی عملکرد مدل در این پژوهش در نظر گرفته شده است؛ زیرا یک سنجش قابل درک از مقدار خطای مورد انتظار در پیش‌بینی مقادیر هدف ارائه می‌دهد که با همان واحد اندازه‌گیری مقادیر هدف بیان می‌شود. به علاوه برای داده‌های آزمایشگاهی که ممکن است دارای خطای ذاتی یا اندازه‌گیری باشند؛ مناسب‌تر است. نحوه‌ی محاسبه‌ی MAE در رابطه (۳) نشان داده شده است:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}| \quad (3)$$

که در رابطه (۳) n تعداد نمونه‌ها، y_i مقدار واقعی، $\hat{y}$ مقدار پیش‌بینی‌شده‌ی نمونه‌هاست.

RMSE: این معیار به محاسبه‌ی ریشه‌ی میانگین مربعات اختلاف مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر واقعی می‌پردازد و به عنوان یک معیار کمکی در کنار MAE به کار گرفته شده است که روی پیش‌بینی‌های پرت مدل حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. براساس این معیار، خطاهای بزرگ در پیش‌بینی جریمه بیشتری می‌شوند و روی نمونه‌هایی که مدل در یادگیری آن‌ها عملکرد ضعیف‌تری داشته است؛ تمرکز بیشتری دارد تا تأثیر آن‌ها را روی مدل ارزیابی کند که این مزیت برای کاربرد صنعتی پژوهش مناسب است. نحوه‌ی محاسبه‌ی RMSE در رابطه (۴) نشان داده شده است:

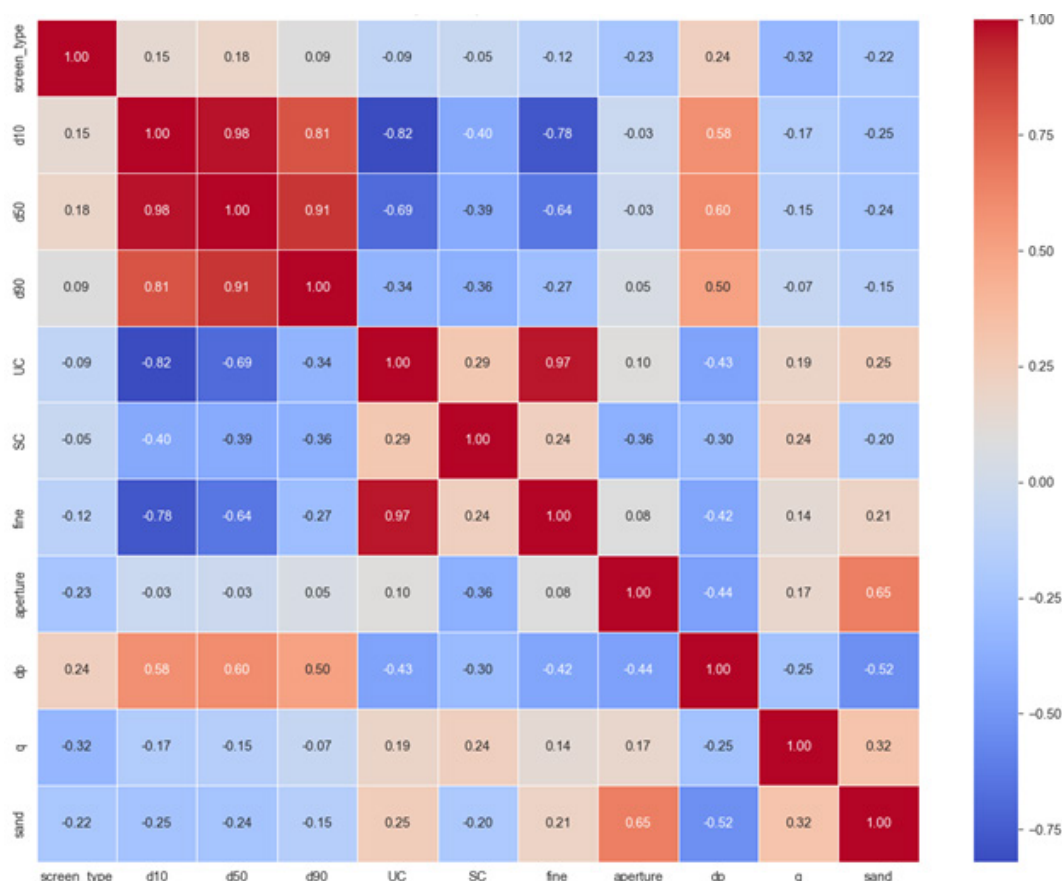
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2} \quad (4)$$

که در رابطه (۴) n تعداد نمونه‌ها، y_i مقدار واقعی، $\hat{y}$ مقدار پیش‌بینی‌شده‌ی نمونه‌هاست [۴۰].

در مرحله‌ی بعد، به مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم‌های مختلف به وسیله‌ی معیارهای دقت و خطا پرداخته شد و برای انتخاب مدل برتر بین الگوریتم‌های دارای عملکرد مشابه، از رسم نمودارهای ارزیابی استفاده شد که مقادیر پیش‌بینی‌شده را بر حسب مقادیر واقعی هدف نشان می‌دهند. در این نمودارها میزان مطابقت نتایج پیش‌بینی با مقادیر واقعی (تجمع نقاط حول نیمساز) قابل مشاهده است که به منظور تشخیص بهترین مدل استفاده شده است.

۳. نتایج مدل‌ها

به منظور بهره‌گیری از روش‌های یادگیری ماشین روی پایگاه داده، همبستگی هر یک از ویژگی‌ها با هدف پژوهش بررسی شد. تحلیل رابطه‌ی بین متغیرهای مختلف به کمک ماتریس ضرایب همبستگی امکان‌پذیر است؛ بنابراین به وسیله‌ی این روش، می‌توان به اولویت‌بندی و تحلیل عوامل مؤثر بر تولید ماسه پرداخت. در (شکل ۴) ماتریس ضرایب همبستگی نشان داده شده است:



شکل ۴. ماتریس ضرایب همبستگی محاسبه شده در پایگاه داده

می‌دهد در شرایطی که قطر ذرات مختلف نمونه ماسه به یکدیگر نزدیک‌تر باشد؛ کنترل تولید ماسه بهتر صورت می‌گیرد. در نهایت می‌توان دریافت که ویژگی‌های طراحی توری (اندازه عرض شکاف‌های توری (۰/۶۵) و نوع توری (۰/۲۲)) تأثیر قابل‌توجهی بر میزان ماسه عبوری از توری دارند و باید متناسب با توزیع اندازه ذرات ماسه و خصوصیات چاه تولیدی انتخاب شوند.

در ادامه‌ی پژوهش به فرآیند آموزش و بهینه‌سازی الگوریتم‌های انتخابی بر روی داده‌های آموزشی پرداخته شد. پس از تکمیل فرآیند آموزش برای ارزیابی دقت پیش‌بینی الگوریتم‌ها، مقادیر هدف برای داده‌های آزمایشی پیش‌بینی شدند. برای انتخاب مدل برتر از روش‌های اعتبارسنجی استفاده شد و الگوریتم‌ها براساس نتایج به‌دست‌آمده از اعتبارسنجی، به ترتیب اولویت معیارها رتبه‌بندی شدند. در (جدول ۳) خلاصه‌ی نتایج اعتبارسنجی هر یک از الگوریتم‌ها روی داده‌های آزمایشی نشان داده شده است:

با توجه به نتایج حاصل از ماتریس ضرایب همبستگی (شکل ۴)، مشخص شد که اندازه عرض شکاف‌های توری (مقدار ضریب ۰/۶۵ با هدف) بیشترین تأثیر مستقیم را بر مقدار ماسه عبوری از توری دارد. اختلاف فشار بسته‌ی ماسه (۰/۵۲-) بیشترین تأثیر معکوس را بر مقدار ماسه عبوری از توری دارد. دبی سیال (۰/۳۲) نیز تأثیر مستقیم و قابل‌توجهی در تولید ماسه دارد. همچنین در بررسی ویژگی‌های مرتبط با توزیع اندازه ذرات ماسه، مشخص شد که با افزایش Fine میزان ماسه عبوری افزایش می‌یابد. افزایش اندازه قطر دانه‌ها، باعث می‌شود که ذرات ماسه کمتری توانایی عبور از شکاف‌های توری را داشته باشند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگر توزیع اندازه ذرات ماسه‌ی چاه دارای دانه‌بندی کوچک‌تری باشد؛ مقدار تولید ماسه‌ی توری بیشتر می‌شود. رابطه‌ی UC با میزان ماسه عبوری نشان می‌دهد که مشابهت اندازه قطر دانه‌های متوسط و دانه‌های کوچک‌تر باعث افزایش تولید ماسه از توری می‌شود. بررسی SC نشان

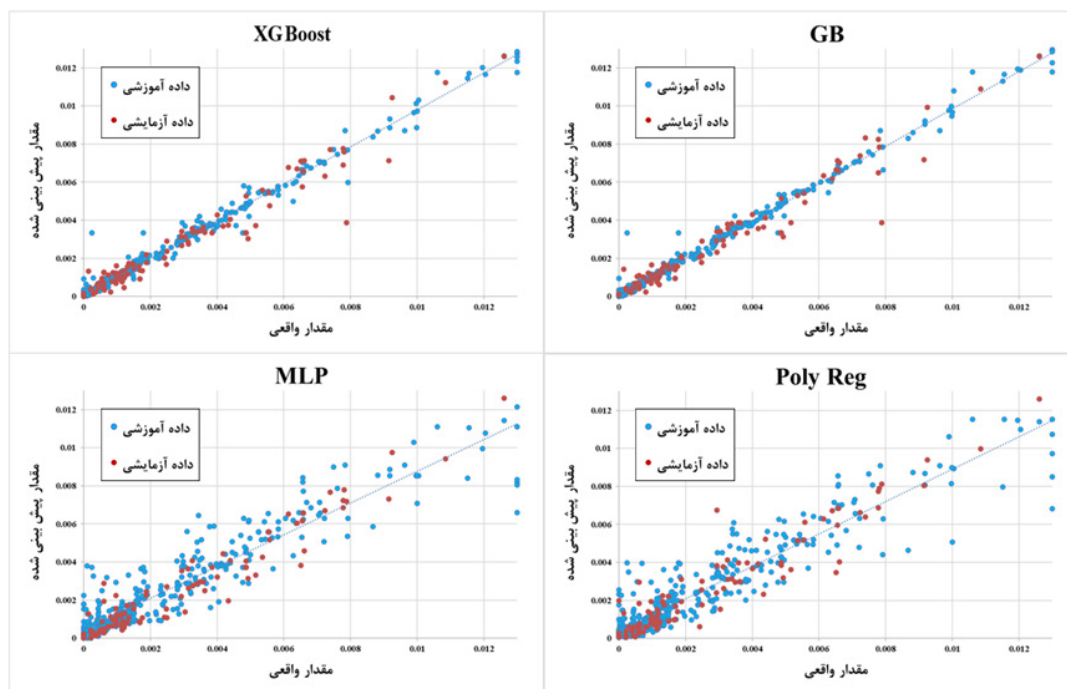


جدول ۳. اعتبارسنجی الگوریتم‌ها روی داده‌های آزمایشی به کمک معیارهای دقت و خطا

Model	R2	EV	MAE ($\times 10^{-4}$)	RMSE ($\times 10^{-4}$)
XGBoost	۰/۹۴	۰/۹۴	۴/۱۵	۷/۵۹
GB	۰/۹۴	۰/۹۴	۴/۳۷	۸/۴۴
MLP	۰/۸۸	۰/۸۹	۶/۷۶	۱۰/۷۱
Poly Reg	۰/۸۸	۰/۸۹	۶/۳۴	۹/۵۹
RF	۰/۸۷	۰/۸۸	۶/۷۱	۱۱/۶۹
DT	۰/۷۹	۰/۸۰	۸/۰۲	۱۲/۵۷
SVM	۰/۷۵	۰/۷۶	۷/۵۷	۱۳/۴۶
KNN	۰/۷۱	۰/۷۲	۷/۸۹	۱۴/۵۷

با توجه به (شکل ۵) با توجه تمرکز نقاط روی نیمساز نمودارها مشخص شد که دقت الگوریتم‌های XGBoost و GB در پیش‌بینی داده‌های آموزشی و آزمایشی بسیار به یکدیگر نزدیک است و هر دو الگوریتم روی داده‌های آموزشی و آزمایشی عملکرد بسیار مناسبی را ارائه دادند. همچنین با توجه به وضعیت انطباق داده‌ها با مقادیر پیش‌بینی شده، عملکرد مدل GB در مقایسه با XGBoost اندکی بهتر است. به توجه به نمودارها مشاهده می‌شود که این دو الگوریتم در پیش‌بینی مقادیر ماسه‌ی عبوری کمتر (توری‌های بهینه)، عملکرد بسیار دقیقی ارائه می‌دهند و به ازای مقادیر ماسه‌ی عبوری بیشتر (توری‌های متوسط یا ضعیف) اختلاف محسوس‌تری در پیش‌بینی وجود دارد. از آنجاکه برای انتخاب گزینه‌های تکمیل چاه، تمرکز بیشتر روی توری‌های بهینه است؛ به‌کارگیری این مدل‌ها برای انتخاب توری بسیار کارآمد و دقیق است. با مشاهده نمودارهای دارای نقاط پراکنده‌ی مربوط به الگوریتم‌های MLP و Poly Reg مشخص می‌شود که این دو الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های برتر، دقت کمتری در پیش‌بینی داده‌ها ارائه می‌دهند؛ به‌ویژه در پیش‌بینی مقادیر بزرگ‌تر هدف، اختلاف پیش‌بینی‌ها افزایش یافته است. به‌علاوه با توجه به وضعیت داده‌های آزمایشی در این دو الگوریتم، مشخص می‌شود که اکثر نمونه‌ها، کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی‌شده‌اند. این مشکل به‌کارگیری این دو الگوریتم را در مهار ماسه‌ی چاه نامناسب می‌کند.

با توجه به (جدول ۳) می‌توان دریافت که الگوریتم‌های XGBoost و GB نسبت به سایر الگوریتم‌ها دقت بیشتری ارائه می‌دهند. این دو الگوریتم با دقت ۰/۹۴ و مقادیر خطای مشابه در پیش‌بینی هدف، عملکرد بسیار نزدیکی به یکدیگر دارند. همچنین الگوریتم‌های MLP و Poly Reg نیز عملکرد مشابهی در پیش‌بینی نشان می‌دهند. اختلاف مقادیر معیارهای R^2 و EV برای همه‌ی الگوریتم‌ها کمتر از ۰/۰۲ است که یادگیری بدون سوگیری الگوریتم‌ها روی داده‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس معیار MAE مشخص می‌شود که برای کاربرد صنعتی، الگوریتم‌های XGBoost و GB نسبت به سایر الگوریتم‌ها مناسب‌تر هستند؛ زیرا مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر واقعی همخوانی بسیار دقیقی با یکدیگر دارند و میانگین اختلاف این مقادیر تقریباً صفر است. سایر الگوریتم‌ها نیز محدوده‌ی قابل قبولی از خطا را ارائه می‌دهند. بررسی معیار RMSE نشان می‌دهد که الگوریتم‌های XGBoost و GB نسبت به سایر الگوریتم‌ها مقادیر پرت کمتری در پیش‌بینی ارائه می‌دهند. با توجه به مشابهت نتایج اعتبارسنجی بین الگوریتم‌ها، به‌منظور مقایسه‌ی بهتر عملکردها و انتخاب بهترین مدل ماشینی، نمودارهای پیش‌بینی چهار الگوریتم برتر روی پایگاه داده در (شکل ۵) نشان داده‌شده است. در نمودارها، نقاط آبی‌رنگ نشان‌دهنده‌ی داده‌های آموزشی و نقاط قرمز رنگ نشان‌دهنده‌ی داده‌های آزمایشی هستند.



شکل ۵. نتایج پیش‌بینی الگوریتم‌ها روی داده‌های آموزشی و آزمایشی

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از داده‌های آزمون نگهداشت ماسه، به پیش‌بینی مقدار ماسه عبوری در واحد سطح برای توری‌های لوله مشبک‌کاری شده پرداخته شد. برای ساخت پایگاه داده از نتایج ۵۱۹ نمونه آزمایش موجود در مطالعات پیشین استفاده شد و حداکثر تعداد عوامل مؤثر بر تولید ماسه در آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. به‌منظور ساخت مدل ماشینی نیز از الگوریتم‌های KNN، SVM، RF، DT، XGBoost، GB، Poly Reg و MLP استفاده شد. نتایج نشان داد که:

۱. الگوریتم‌های مبتنی بر تقویت گرادیان (GB و XGBoost) بیشترین دقت (۰/۹۴) و کمترین خطا (خطای MAE به ترتیب: ۰/۰۰۰۴۱۵ و ۰/۰۰۰۴۳۷) را پیش‌بینی مقدار ماسه عبوری در واحد سطح ارائه دادند و می‌توانند عملکرد توری‌های مختلف را با دقت زیادی پیش‌بینی کنند. درنهایت بر اساس مقایسه‌ی نموداری، مدل GB به دلیل مطابقت بهتر مقادیر پیش‌بینی با داده‌های واقعی به‌عنوان مدل برگزیده انتخاب شد.

۲. ویژگی‌های اندازه‌ی عرض شکاف توری و اختلاف فشار بسته‌ی ماسه، تأثیرگذارترین عوامل در تعیین میزان

ماسه عبوری آزمایش محسوب می‌شوند. افزایش اندازه‌ی عرض شکاف توری اثر بسزایی در افزایش میزان ماسه‌ی عبوری دارد. افزایش فشار اعمال‌شده بر نمونه‌ی ماسه نیز باعث کاهش قابل‌توجه میزان ماسه‌ی عبوری می‌شود.

۳. دبی جریان سیال نیز یک عامل مؤثر در عملکرد توری محسوب می‌شود به‌طوری‌که با افزایش دبی آزمایش، ماسه‌ی عبوری بیشتری انتظار می‌رود.

۴. در توزیع اندازه ذرات ماسه، افزایش fine و UC باعث افزایش میزان ماسه عبوری می‌شود، درحالی‌که افزایش SC اثر معکوس دارد. همچنین با افزایش قطر دانه‌ها در نمونه، انتظار می‌رود که میزان ماسه عبوری کاهش می‌یابد.

۵. نوع طراحی لوله مشبک‌کاری شده و اندازه عرض شکاف‌های آن، اهمیت زیادی در بهینه‌سازی میزان ماسه‌ی عبوری دارد و باید با توجه به توزیع اندازه ذرات ماسه انتخاب شود که برای انتخاب مناسب توری می‌توان از مدل ماشینی استفاده کرد.

۶. به‌کارگیری مدل‌های ماشینی در زمینه‌ی پیش‌بینی تولید ماسه در چاه‌های نفت و گاز، می‌تواند در بهینه‌سازی تکمیل چاه‌ها کمک کند.

فهرست علائم اختصاری

معنی فارسی	عبارت کامل انگلیسی	علامت اختصاری
آزمون نگهداشت ماسه	<i>Sand Retention Test</i>	<i>SRT</i>
اعتبارسنجی متقابل	<i>Cross Validation</i>	<i>CV</i>
تعداد شکاف در هر ستون	<i>Slots Per Column</i>	<i>SPC</i>
مساحت ناحیه باز جریان	<i>Open Flow Area</i>	<i>OFA</i>
شبکه عصبی مصنوعی	<i>Artificial Neural Network</i>	<i>ANN</i>
یادگیری ماشین	<i>Machine Learning</i>	<i>ML</i>
تقویت گرادیان	<i>Gradient Boosting</i>	<i>GB</i>
تقویت گرادیان شدید	<i>Extreme Gradient Boosting</i>	<i>XGBoost</i>
جنگل تصادفی	<i>Random Forest</i>	<i>RF</i>
درخت تصمیم	<i>Decision Tree</i>	<i>DT</i>
نزدیک‌ترین همسایه	<i>K-Nearest Neighbors</i>	<i>KNN</i>
ماشین بردار پشتیبان	<i>Support Vector Machine</i>	<i>SVM</i>
پرسترون چندلایه	<i>Multi-Layer Perceptron</i>	<i>MLP</i>
رگرسیون چندجمله‌ای	<i>Polynomial Regression</i>	<i>Poly Reg</i>
توزیع اندازه ذرات	<i>Particle Size Distribution</i>	<i>PSD</i>
ضریب یکنواختی	<i>Uniformity Coefficient</i>	<i>UC</i>
ضریب جور شدگی	<i>Sorting Coefficient</i>	<i>SC</i>
ریشه میانگین مربعات خطا	<i>Root Mean Square Error</i>	<i>RMSE</i>
میانگین خطای مطلق	<i>Mean Absolute Error</i>	<i>MAE</i>
ضریب تعیین	<i>Coefficient of Determination</i>	R^2
واریانس تبیین شده	<i>Explained Variance</i>	<i>EV</i>

- مراجع:
- A, Gupta T, Goel PN, Kumari S. Sand screens for controlling sand production from hydrocarbon wells: A mini-review. *Geoenergy Science and Engineering*. 2024;240:213040.
- [1]. Zare-Reisabadi M, Safari-Beidokhti M, Kaffash A, Bataee M. Sand production prediction and well completion optimization. *International Journal of Petroleum and Geoscience Engineering (IJPGE)*. 2014;2(4):361-74.
- [2]. Kumar S, Kumar G, Krishna S, Kumar
- [3]. Velayati A, Roostaei M, Fattahpour V, Mahmoudi M, Nouri A, Alkoush A, et al., editors. *Design Optimization of Slotted*



- OTC.
- [11]. Reyes R, Sipi A, editors. Optimal sand control design & technique selection: a simplified practical guidance tool. Offshore Technology Conference Asia; 2018: OTC.
- [12]. Ballard T, Beare S, editors. An investigation of sand retention testing with a view to developing better guidelines for screen selection. SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control; 2012: SPE.
- [13]. Ballard T, Beare SP, editors. Sand retention testing: the more you do, the worse it gets. SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control; 2006: SPE.
- [14]. Hassani H, Silva ES. Big Data: a big opportunity for the petroleum and petrochemical industry. OPEC Energy Review. 2018;42(1):74-89.
- [15]. Chaudhary S, Yadav S, Kushwaha S, Shahi SRP. A brief review of machine learning and its applications. SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology. 2020;12(SUP 1):218-23.
- [16]. Ray S, editor A quick review of machine learning algorithms. 2019 International conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon); 2019: IEEE.
- [17]. Razak NNA, Abdulkadir SJ, Maoinsar MA, Shaffee SNA, Ragab MG. One-dimensional convolutional neural network with adaptive moment estimation for modelling of the sand retention test. Applied Sciences. 2021;11(9):3802.
- [18]. Ngwashi AR, Ogbe DO, Udebhulu DO, editors. Evaluation of machine-learning tools for predicting sand production. SPE Nigeria Annual International Conference Liner Completions in Cased and Perforated Wells: A Numerical Skin Model. SPE International Heavy Oil Conference and Exhibition; 2018: SPE.
- [4]. Wang C, Pang Y, Mahmoudi M, Haftani M, Salimi M, Fattahpour V, Nouri A. A set of graphical design criteria for slotted liners in steam assisted gravity drainage production wells. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020;185:106608.
- [5]. Guo Y, Nouri A, Nejadi S. Effect of slot width and density on slotted liner performance in SAGD operations. Energies. 2020;13(1):268.
- [6]. Roostaei M, Cespedes EAM, Uzcátegui AA, Soroush M, Hosseini SA, Izadi H, et al. Optimization of slotted liner in rubiales field: trade-off between sand control, flow performance, and plugging tendency. SPE Journal. 2021; 26(03)30-1110.
- [7]. Kaiser T, Wilson S, Venning L. Inflow analysis and optimization of slotted liners. SPE Drilling & Completion. 2002;17(04):200-9.
- [8]. Abduljabbar A, Amadi A, Mohyaldinn ME, Ridha S, Younis O, Alakbari FS. Sand screens application and performance for sand control: A review of selection criteria, screen materials, and causes of failure. Heliyon. 2024;10 (10).
- [9]. Haftani M, Kotb O, Nguyen PH, Wang C, Salimi M, Nouri A. A Novel sand control testing facility to evaluate the impact of radial flow regime on screen performance and its verification. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020;195:107903.
- [10]. Wu B, Choi S, Feng Y, Denke R, Barton T, Wong C, et al., editors. Evaluating sand screen performance using improved sand retention test and numerical modelling. Offshore technology conference Asia; 2016:

- and management in oil and gas wells: a review. Iranian Gas Engineering Journal. 2025;12(1):54-69. [In Persian]
- [26]. Toro C, Pietrangeli G, Lara J, Pineda M, Mesa S, editors. Innovative Remediation System for Mature-Heavy Crude Oil Fields Completed with Slotted Liners and Screens. Offshore Technology Conference Brasil; 2025: OTC.
- [27]. Xie J, editor Slotted liner design optimization for sand control in SAGD wells. SPE Thermal Integrity and Design Symposium; 2015: SPE.
- [28]. Mahmoudi M, Fattahpour V, Wang C, Kotb O, Roostaei M, Nouri A, et al., editors. A Large-Scale Sand Retention Test Facility for Evaluation and Selection of Optimal Standalone Sand Screen for Injection Wells in Thermal Operations. SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control; 2018: SPE.
- [29]. Mayorga Cespedes EA, Roostaei M, Uzcátegui AA, Soroush M, Izadi H, Hosseini SA, et al., editors. Sand control optimization for rubiales field: trade-off between sand control, flow performance and mechanical integrity. SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference; 2020: SPE.
- [30]. Ochmann L, Joseph R. Development of a sand retention test set-up focusing on the measurement of produced sand. OIL GAS European Magazine. 2021;2:25-32.
- [31]. Fattahpour V, Roostaei M, Hosseini SA, Soroush M, Berner K, Mahmoudi M, et al. Experiments with stand-alone sand-screen specimens for thermal projects. SPE Drilling & Completion. 2021;36(01):188-207.
- [32]. Mahmoudi M, Fattahpour V, Nouri A, Yao T, Baudet BA, Leitch M, Fermaniuk B, editors. New criteria for slotted liner design and Exhibition; 2021: SPE.
- [19]. Asfha DT, Latiff AHA, Otchere DA, Tackie-Otoo BN, Babikir I, Rafi M, et al. Mechanisms of sand production, prediction—a review and the potential for fiber optic technology and machine learning in monitoring. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2024;14(10):2577-616.
- [20]. Azad M, Zargar G, Arabjamaloei R, Hamzei A, Ekramzadeh M. A new approach to sand production onset prediction using artificial neural networks. Petroleum science and technology. 2011;29(19):1975-83.
- [21]. Hamid ZHA, Hernandez N, Baillard F, Looi T, editors. Sand Production and Control Benchmarking through Unstructured Data Analysis with Machine Learning in the North Sea. 84th EAGE Annual Conference & Exhibition; 2023: European Association of Geoscientists & Engineers.
- [22]. Laoufi H, Megherbi Z, Zeraibi N, Merzoug A, Ladmia A, editors. Selection of sand control completion techniques using machine learning. ARMA/DGS/SEG International Geomechanics Symposium; 2022: ARMA.
- [23]. Song J, Li Y, Liu S, Xiong Y, Pang W, He Y, Mu Y. Comparison of machine learning algorithms for sand production prediction: an example for a gas-hydrate-bearing sand case. Energies. 2022;15(18):6509.
- [24]. Laoufi H, Megherbi Z, Zeraibi N, Merzoug A, Ladmia A, editors. Selection of Sand Control Completion Techniques Using Machine Learning. International Geomechanics Symposium; 2022. ARMA-IGS-2022-118.
- [25]. Khodashenas M, Mohammadzadeh Shirazi M, Shahsavani B. Application of machine learning in sand production prediction





- [40]. Uyeh DD, Iyiola O, Mallipeddi R, Asem-Hiablie S, Amaizu M, Ha Y, Park T. Grid search for lowest root mean squared error in predicting optimal sensor location in protected cultivation systems. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:9202.
- for heavy oil thermal production. *SPE Thermal Integrity and Design Symposium*; 2016: SPE.
- [33]. Mahmoudi M, Fattahpour V, Nouri A, Leitch M, editors. An experimental evaluation of pore plugging and permeability reduction near SAGD sand control liners. *SPE Canada Heavy Oil Conference*; 2017: SPE.
- [34]. Devere-Bennett N, editor Using prepack sand-retention tests (SRT's) to narrow down liner/screen sizing in SAGD wells. *SPE Thermal Integrity and Design Symposium*; 2015: SPE.
- [35]. Fischer C, Hamby H, editors. A novel approach to constant flow-rate Sand retention testing. *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control*; 2018: SPE.
- [36]. Ismail NI, Kuang S, Zheng E, Yu A. Modeling and analysis of fluid rheology effect on sand screen performance. *Powder Technology*. 2022;411:117961.
- [37]. Cabello-Solorzano K, Ortigosa de Araujo I, Peña M, Correia L, J. Tallón-Ballesteros A, editors. The impact of data normalization on the accuracy of machine learning algorithms: A comparative analysis. *International conference on soft computing models in industrial and environmental applications*; 2023: Springer.
- [38]. Chicco D, Warrens MJ, Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *Peerj computer science*. 2021;7:e623.
- [39]. Burzykowski T, Geubbelmans M, Rousseau A-J, Valkenborg D. Validation of machine learning algorithms. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*.

Prediction of Sand Passage Rate Through Slotted Liner Using Machine Learning Algorithms

Mohammad Elyas Khodashenas*

M.Sc. Student, Petroleum Engineering, School of Chemical Engineering, Oil and Gas, Shiraz University, Shiraz, Iran

ARTICLE INFO

RESEARCH ARTICLE

Article History:

Received: 16 May 2026

Revised: 20 June 2026

Accepted: 20 June 2026

Keywords:

Sand retention test

Well completion

Sand production

Slotted liner

Machine learning

ABSTRACT

Sand production from oil and gas wells reduces productivity and causes damage to production equipment. To control this phenomenon, mechanical sand screens, particularly slotted liners, are employed, and the performance of these screens is determined through the analysis of sand retention test results. In this study, machine learning algorithms were utilized to predict the amount of sand passing through the unit surface area of slotted liner coupons. To this end, the results of 519 sand retention test samples reported in previous studies were compiled as a dataset, encompassing various screen structures and designs, sand particle size distributions, and experimental conditions. The final dataset consisted of 499 preprocessed data samples. The models were constructed using the following algorithms: GB, XGBoost, RF, DT, KNN, SVM, MLP, and Polynomial Regression. The results demonstrated that the GB algorithm, with the highest accuracy ($R^2 = 0.94$) and the lowest error, alongside the XGBoost algorithm, delivered the best predictive performance. Furthermore, it was found that slot width, pressure differential, and flow rate are the most influential factors affecting the amount of produced sand. Additionally, the screen design type and slot width must be selected in accordance with the particle size distribution of the sand. The machine learning model developed in this research offers advantages such as enhanced prediction accuracy compared to previous methods, providing an interpretable model of screen performance, and increasing the speed of selection, thereby contributing to the control of sand production in wells.

DOR: [20.1001.1.2605.1125.1405.02.26](https://doi.org/10.1001.1.2605.1125.1405.02.26)

How to cite this article

M.E. Khodashenas, Prediction of Sand Passage Rate Through Slotted Liner Using Machine Learning Algorithms. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025 13(1): 103-118. (https://ijge.irangi.org/article_738768.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: mohammadelyas@hafez.shirazu.ac.ir, (M.E. Khodashenas).

Available online 21 June 2026

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

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

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

VOLUME 13 • ISSUE 1 • NO. 25 • SPRING 2026

EISSN:25885-5251



► Contents

Energy Optimization in Energy-Intensive Industries with a Focus on Engineering Economics: A Case Study of Productivity in International Companies 9

Reza Rafiei, Armin Sabetghadam-Isfahani, Yegane Davoodbeygi, Seyed Mahmood Latifi

Interpretive Structural Modeling of the Antecedents of Lean Human Resource Management in Sarkhoon and Qeshm Gas Refining Company 37

Mohsen Safari, Zeinab Zarepour, Ziba Salemi, Isa Bakhoda

Sensitivity Analysis and Economic Optimization of Multistage Membrane Configurations for Carbon Dioxide Separation from Methane 53

Saeid Khademi, Abolfazl Kian, Basir Maleki

Methanol Conversion to Light Aromatics Using HZSM5 Nano Zeolite: Effects of Operating Conditions 71

Meysam Mostafaei, Faranak Akhlaghian

Mechanical Property Optimization of High Alumina Castables via Formulation Adjustment in Petrochemical Applications 90

Alireza Rahimi

Prediction of Sand Passage Rate Through Slotted Liner Using Machine Learning Algorithms 103

Mohammad Elyas Khodashena

IJGE
IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

نشریه مهندسی گاز ایران

سال دوازدهم / شماره اول / جلد بیستم و پنجم / بهار ۱۴۰۵
EISSN:25885-5251



سرمقاله

- ۷ خلق ارزش صنعتی
تجاری سازی فناوری و ارتقای سطح کیفی تجهیزات راهبردی؛ از بلوغ علمی تا
محمدحسین مهرآراد

مقالات

- ۹ در شرکت های بین المللی
بهینه سازی انرژی در صنایع انرژی بر با رویکرد اقتصاد مهندسی: مطالعه موردی بهره‌وری
رضا رفیعی، آرمین ثابت قدم اصفهانی، یگانه داود بیگی، سید محمود لطیفی
- ۳۷ گاز سرخون و قشم
مدل سازی ساختاری - تفسیری پیشایندهای مدیریت منابع انسانی ناب شرکت پالایش
محسن صفری، زینب زارع پور، زیبا سالمی، عیسی باخدا
- ۵۳ جداسازی دی اکسید کربن از متان
آنالیز حساسیت و بهینه سازی اقتصادی پیکربندی های چند مرحله ای غشایی برای
سعید خادمی، ابوالفضل کیان، بصیر ملکی
- ۷۱ اثرات شرایط عملیاتی
تبدیل متانول به آروماتیک های سبک با استفاده از نانوذرات HZSM5
میثم مصطفائی، فرانک اخلاقیان طاب
- ۹۰ / مطالعه کاربردی در صنعت گاز و پتروشیمی
بهینه سازی خواص مکانیکی جرم نسوز ریختنی آلومینا بالا از طریق اصلاح فرمولاسیون
علیرضا رحیمی
- ۱۰۳ یادگیری ماشین
پیش بینی میزان ماسه عبوری از لوله ی مشبک کاری شده به کمک الگوریتم های
محمدالیاس خدائشناس

IJGE
IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING