IJGE®

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

انجمن مهندسی گاز ایران

نشریه مهندسی گاز ایران

سال سیزدهم / شماره ۱ / جلد ۲۵

بهار ۱۴۰۵

EISSN:25885-5251




بسم الله الرحمن الرحیم

نشریه مهندسی گاز ایران

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

صاحب امتیاز: انجمن مهندسی گاز ایران
مدیر مسئول: دکترمحمدرضا امیدخواه
سردبیر: دکتر مرتضی زیودار
دبیر تخصصی: دکتر مهدی رضوی‌فر
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)
دکتروحید 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 محمدرضا خسروی نیکو (دانشگاه صنعت نفت)
دکترمستانه حاجی‌پور (دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات تهران)
دکتر منصور فرزام (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر فهیمه حوری آبادصبور(دانشگاه محقق اردبیلی)
دکتر حمید عرفان نیا (دانشگاه تبریز)
دکتر محمدحسین صابری (دانشگاه تبریز)
دکتر ابوالفضل کیان (دانشگاه صنعتی اسفراین)

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.

نشریه مهندسی گاز ایران

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

اعضاء هیئت داوران نشریه شماره ۲۵

دکتر علی وطنی (دانشگاه تهران)
دکتر امید رافهی (دانشگاه تبریز)
دکتر مسعود بیژنیی (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 رضوی‌فر (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 اسفراین)
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 اصفهانی (شرکت گاز استان هرمزگان)
دکترمحمدرضاسردشتی‌بیرجندی(دانشگاه‌سیستان‌وبلوچستان)

فهرست مطالب

سرمقاله

تجاری‌سازی فناوری و ارتقای سطح کیفی تجهیزات راهبردی؛ از بلوغ علمی تا خلق ارزش صنعتی ۷

محمدحسین مهرآراد

مقالات

بهینه‌سازی انرژی در صنایع انرژی‌بر با رویکرد اقتصاد مهندسی: مطالعه موردی بهره‌وری در شرکت‌های بین‌المللی ۹

رضا رفیعی، آرمین ثابت‌قدم اصفهانی، یگانه داود بیگی، سید محمود لطیفی

مدل‌سازی 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

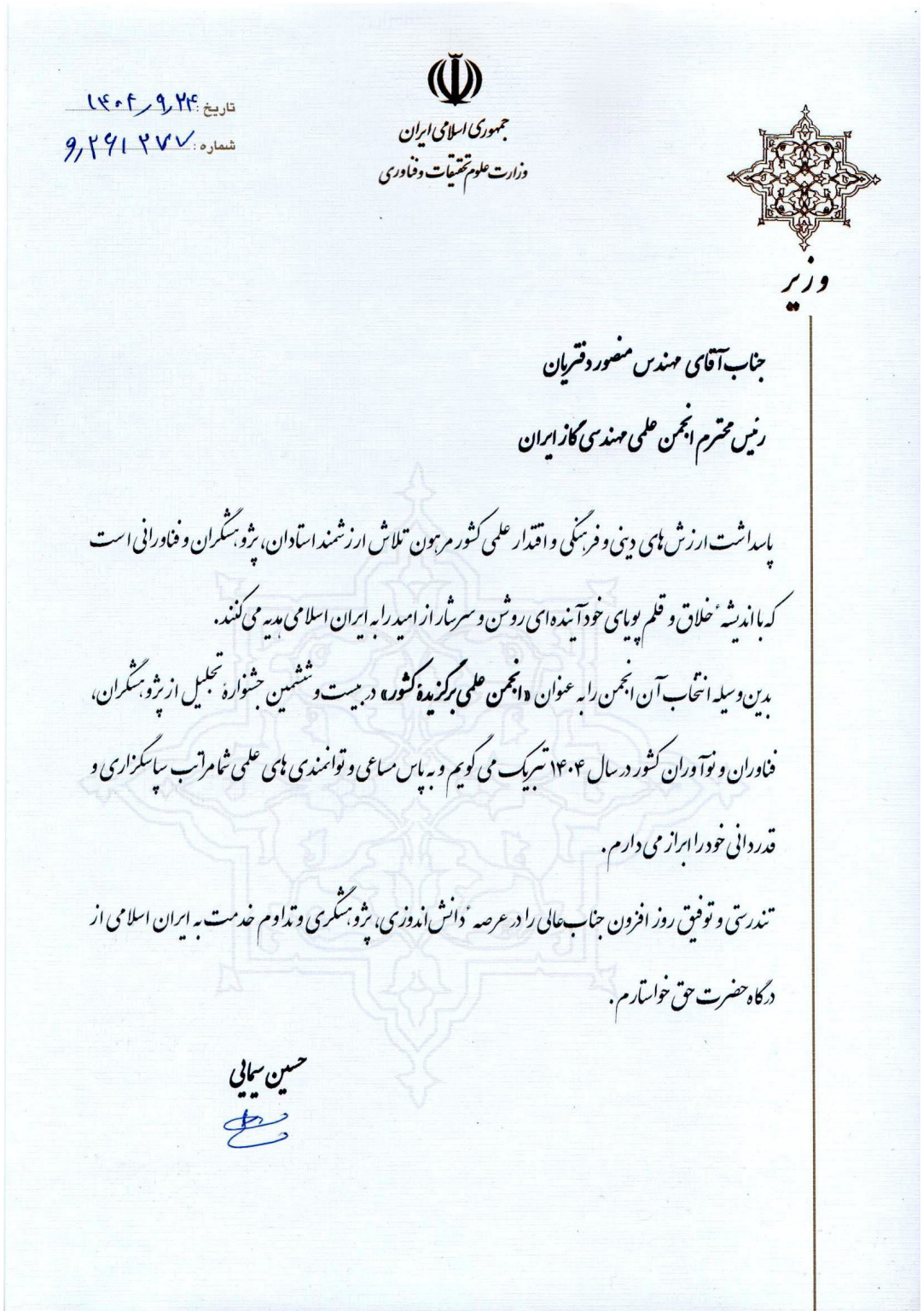
علیرضا رحیمی

پیش‌بینی میزان ماسه عبوری از لوله‌ی مشبک‌کاری شده به کمک الگوریتم‌های یادگیری‌ماشین 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 به‌عنوان انجمن علمی برگزیده کشور
در بیست‌وششمین 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 به‌عمل آمد.



جمهوری اسلامی ایران
وزارت علوم تحقیقات و فناوری

تاریخ: ۱۴۰۴/۹/۲۴
شماره: ۹/۲۶۱۲۷۷

وزیر

جناب آقای مهندس منصور دقتریان

رئیس محترم انجمن علمی مهندسی گاز ایران

پاسداشت ارزش‌های دینی و فرهنگی و اقتدار علمی کشور مرهون تلاش ارزشمند استادان، پژوهشگران و فناورانی است که با اندیشهٔ خلاق و قلم پویای خود آینده‌ای روشن و سرشار از امید را به ایران اسلامی هدیه می‌کنند.

بدین وسیله انتخاب آن انجمن را به عنوان «**انجمن علمی برگزیدهٔ کشور**» در بیست و ششمین جشنوارهٔ تجلیل از پژوهشگران، فناوران و نوآوران کشور در سال ۱۴۰۴ تبریک می‌گویم و به پاس مساعی و توانمندی‌های علمی شما مراتب سپاسگزاری و قدردانی خود را ابراز می‌دارم.

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

حسین سیمایی



دکتر محمدحسین مهرآراد
معاون تجاری‌سازی
مدیریت پژوهش و فناوری شرکت ملی گاز ایران

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

تجربه کشورهای پیشرو نشان می‌دهد که چالش اصلی نظام‌های 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 نمی‌رسند. از این منظر، تجاری‌سازی فناوری صرفاً پایان یک پروژه پژوهشی نیست، بلکه یکی از ارکان حکمرانی نوآوری و حلقه اتصال سیاست‌گذاری، پژوهش، صنعت و بازار به شمار می‌آید؛ حلقه‌ای که بدون آن، توسعه فناوری نمی‌تواند به خوداتکایی در تولید داخل، ارتقای سطح کیفی تجهیزات راهبردی، افزایش امنیت انرژی، بهبود بهره‌وری و شکل‌گیری مزیت رقابتی پایدار منجر شود.

در همین چارچوب، الگوهایی نظیر مدل (TQCP)[1] نشان می‌دهند که موفقیت در تجاری‌سازی، حاصل یک تصمیم منفرد یا یک اقدام مقطعی نیست، بلکه نتیجه استقرار زنجیره‌ای منسجم از فرآیندهای فنی، مدیریتی و اقتصادی است. این زنجیره از شناسایی راهبردی نیازهای صنعت و تحلیل جایگاه تجهیزات در زنجیره تأمین آغاز می‌شود؛ جایی که تحلیل و نقشه‌برداری سازندگان اصلی تجهیزات[2]،ارزیابی اهمیت راهبردی تجهیزات و تمرکز بر اقلام دارای بیشترین اثر بر تاب‌آوری صنعت، مسیر سرمایه‌گذاری فناورانه را هدفمند می‌کند.

در ادامه، مطالعات امکان‌سنجی، ارزیابی سطح آمادگی فناوری (TRL)[3]،سطح آمادگی ساخت (MRL)[4]، ظرفیت ساخت داخل و تحلیل اقتصادی چرخه عمر، تصویری واقع‌بینانه از امکان توسعه صنعتی و تجاری فناوری ارائه می‌دهد. هم‌زمان، احراز صلاحیت فناورانه سازندگان، تدوین بسته جامع دانش فنی (TDP)[5]،انجام آزمون‌های پذیرش کارخانه و میدانی (FAT[6] و SAT[7])، استقرار نظام‌های تضمین کیفیت و تکمیل مستندات بهره‌برداری و نگهداشت (O&M)[8]، موجب می‌شود فناوری از مرحله ایده و نمونه اولیه عبور کرده و با اطمینان بیشتری برای بهره‌برداری و قابلیت حضور در محیط عملیاتی صنعت آماده شود. ثبت محصول در سامانه کدینگ کالا و فهرست تأمین‌کنندگان مورد تأیید (AVL)[9] نیز نقطه‌ای است که در آن، دانش فنی به دارایی صنعتی و ارزش اقتصادی تبدیل می‌شود و فناوری به عضوی پایدار از زنجیره تأمین صنعت گاز بدل می‌گردد.

امروزه در بسیاری از صنایع پیشرفته، تجاری‌سازی فناوری صرفاً به انتقال یک دستاورد پژوهشی برای ورود به بازار محدود نمی‌شود، بلکه فرآیندی نظام‌مند برای کاهش ریسک فناوری[10]، کاهش عدم‌قطعیت سرمایه‌گذاری و افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات

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

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

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[1] و مدیریت ریسک، موجب کاهش هزینه‌های نگهداشت، افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات[2] 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[3] و دوقلوی دیجیتال[4]، 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، نه‌تنها 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: mehrarad@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

مقاله‌ی علمی-ترویجی

صفحه ۹ - ۳۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷

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 شدت 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 نه‌تنها 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[1] 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 نه‌تنها 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[۳-۱]، اما موفقیت این برنامه‌ها مستلزم غلبه بر موانعی نظیر مقاومت در برابر تغییر فناوری، کمبود سرمایه‌گذاری و نبود استانداردهای صنعتی است [۴].

بهره‌وری انرژی[2] 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

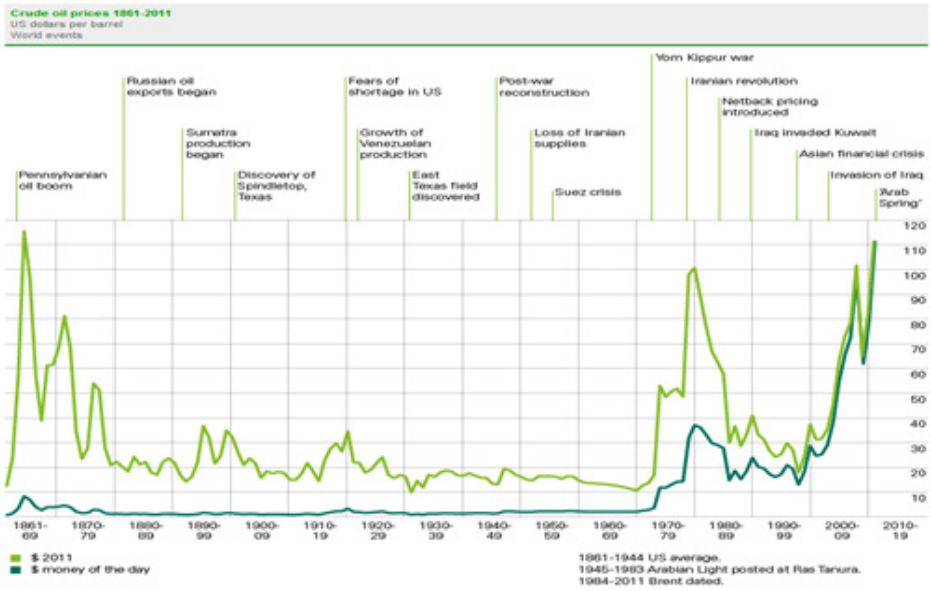
(مصادف با انقلاب اسلامی ایران)، همبستگی بین بحران‌های ژئوپلیتیک و نوسانات قیمت نفت و گاز به‌شدت افزایش‌یافته است. پیش از این تاریخ، وابستگی تغییرات قیمت انرژی تحت تأثیر بحران‌های بین‌المللی کمتر بود، چرا که بخش عمده منابع انرژی در اختیار کشورهای غربی قرار داشت؛ اما خروج ذخایر انرژی ایران و ونزوئلا از 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 قابل‌توجهی افزایش داده است.

۳. رقابت استراتژیک بر سر منابع: محدودیت منابع انرژی و افزایش تقاضا، رقابت ژئوپلیتیک را به عاملی تعیین‌کننده 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 نه‌تنها 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 نه‌تنها مصرف منابع را کاهش می‌دهد، بلکه به‌عنوان موتور محرکی برای دستیابی به اهداف چند بعدی توسعه عمل می‌کند. در ادامه، مهم‌ترین تأثیرات آن بر جنبه‌های مختلف توسعه بررسی می‌شود:

- ارزش‌افزوده[1]

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 نه‌تنها سودآوری را افزایش می‌دهد، بلکه با آزادسازی منابع مالی، زمینه را برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین و توسعه محصولات پایدار فراهم می‌کند. درنهایت، ارزش‌افزوده ناشی از بهینه‌سازی انرژی، رقابت‌پذیری و جذابیت سرمایه‌گذاری بلندمدت را تقویت می‌نماید.

- مازاد مصرف‌کننده[2]

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. به‌عنوان 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 نه‌تنها رضایت مشتری را افزایش می‌دهد، بلکه سودآوری شرکت را نیز حفظ می‌کند.

- مقرون‌به‌صرفه بودن انرژی[3]

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 به‌طور چشم‌گیری کاهش دهد.

- ذخیره انرژی[4]

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[5]

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 ۱۰۰۰۰۰۰۰۰ مترمکعب گاز نیاز باشد، با بهینه‌سازی می‌توان همان میزان برق را با ۶۰۰۰۰۰۰۰ مترمکعب گاز تولید کرد. این کاهش وابستگی، ثبات اقتصادی و ژئوپلیتیکی را تقویت می‌کند.

- بهره‌وری سازمانی[6]

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

- کاهش تغییرات اقلیمی[7]

مصرف کم‌تر سوخت‌های فسیلی، انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند CO_2 را کاهش می‌دهد. برای نمونه، بهبود راندمان نیروگاه‌ها می‌تواند انتشار کربن را به میزان قابل‌توجهی 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[1]

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[2]

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[3]

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

- بودجه عمومی[4]

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[5]

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[6]

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[7]

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[8]

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 انژی

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، نه‌تنها 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 رقبا 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 پر بازده.
- 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 نه‌تنها 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 انرژی‌بر 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 قابل‌توجهی 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 دائمیِ 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 بازیابی نشدن گرمای اتلافی، انرژی قابل‌توجهی 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، انرژی‌بر هستند.

۶. شاخص‌های جهانی و جایگاه کشورها در بهینه‌سازی انرژی

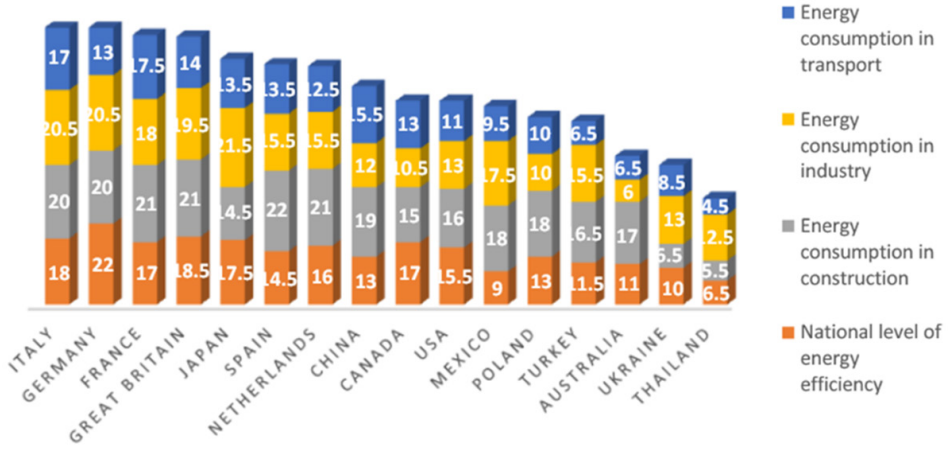
بررسی عملکرد کشورها در حوزه بهینه‌سازی انرژی نشان می‌دهد که موفقیت در این زمینه نیازمند ترکیبی از بهبود موضعی و تمرکز بر شاخص‌های کلان است. دو محور اصلی برای ارزیابی این عملکرد عبارتند از:

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، درمجموع 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 نه‌تنها 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.



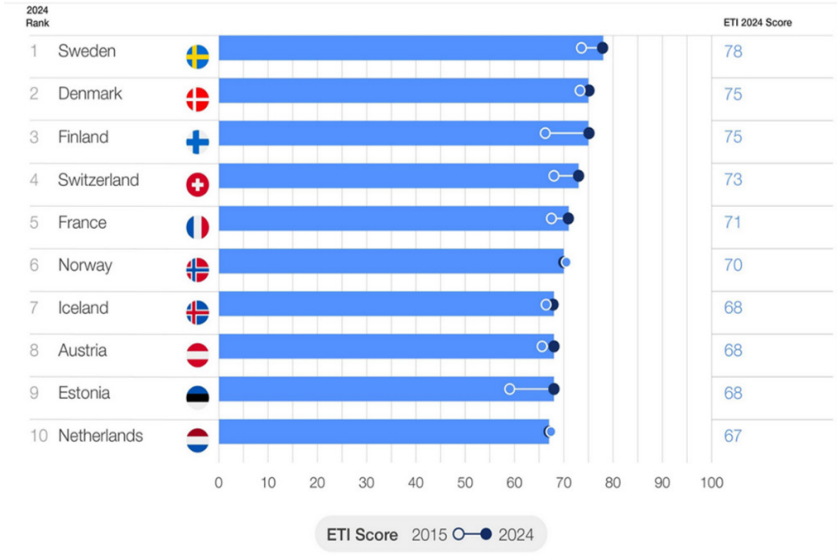
شکل ۳. رتبه‌بندی مصرف انرژی در بخش‌های صنعتی بر اساس داده‌های جهانی (۲۰۱۷-۲۰۱۸) [۵]

۶-۲. شاخص انتقال انرژی[1] (ETI)

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 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.



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 (DOE)[1] برای شناسایی کارآمدترین فرآیندها 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 فرهنگ‌سازمانی مبتنی بر صرفه‌جویی انرژی.
- همگرایی با سیاست‌های تشویقی: بهره‌گیری از مشوق‌های مالیاتی و برنامه‌های دولتی برای تسریع اجرای پروژه‌های بهینه‌سازی.

این راهکارها نه‌تنها مصرف انرژی را کاهش می‌دهند، بلکه با آزادسازی منابع مالی و تقویت رقابت‌پذیری، صنایع را به سمت چرخه توسعه پایدار سوق می‌دهند.

۷-۱. بهره‌وری انرژی در شرکت جی. آر. سیمپلوت[2]

۷-۱-۱. 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 به‌جای برش دستی سیب‌زمینی 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.

۷-۱-۲. اهداف و دستاوردهای بهره‌وری انرژی

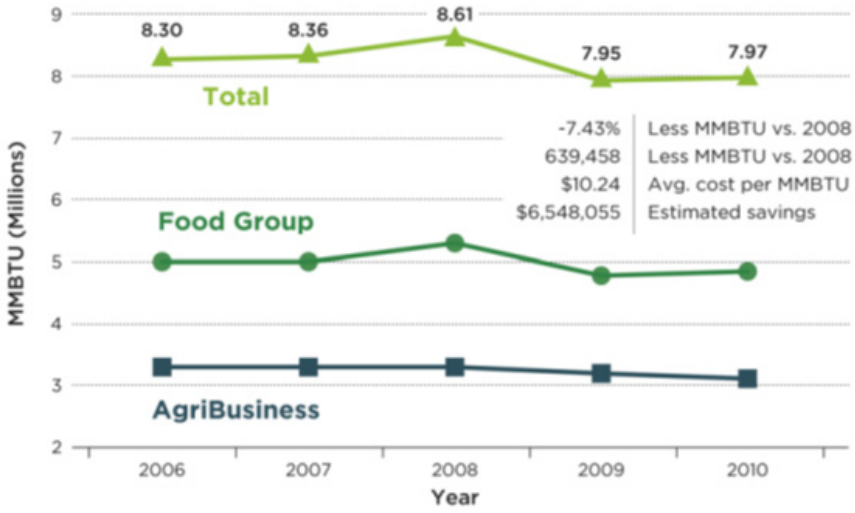
سیمپلوت از سال ۲۰۰۰ پروژه‌های قابل‌توجهی در حوزه بهره‌وری انرژی اجرا کرده است. از سال ۲۰۰۵، این شرکت با حمایت اتحاد بهره‌وری انرژی شمال غرب[3]، کارکنان پاره‌وقتی با عنوان «قهرمانان انرژی» را در سایت‌های صنعتی بزرگ خود منصوب کرد. در سال ۲۰۰۷، با تشکیل تیم بهره‌وری انرژی در سطح شرکت، برنامه‌های مرتبط تقویت 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[4] 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

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 قابل‌توجه شدند که الهام‌بخش شرکت‌های خدمات عمومی برای حمایت بیشتر گردید.

تا سال ۲۰۱۵، سیمپلوت دستاوردهای چشمگیری را 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؛ به‌گونه‌ای 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].



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

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 نه‌تنها مشارکت کارکنان را افزایش داده، بلکه شناسایی فرصت‌های جدید در تأسیسات مختلف را تسهیل می‌کند. (شکل ۵)

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

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 شناسایی‌شده توسط مهندسان انرژی، بر اساس نرخ بازده داخلی (IRR)[1] 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.

۷-۱-۴. 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 فرآوری 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 فرآوری 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

1. Internal Rate of Return

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 قابل‌توجه در مورد استخدام مهندس انرژی در این معدن، نمایش نمونه‌ای از حمایت غیرمستقیم یک شرکت خدمات عمومی از کاهش مصرف سوختِ 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[1]»، 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 قابل‌توجهی 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 انرژی‌کارآمد از همان ابتدا، بسیار بالاتر از جایگزینی تجهیزات قدیمی با نمونه‌های بهینه‌تر خواهد بود. بهره‌برداری کامل سیمپلوت از چنین فرصت‌هایی نه‌تنها 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 موتور[2]

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 GM ۲۰۱۵ 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 کادیلاک در بازار محلی و همچنین برندهایی مانند واکس‌های، جی فانگ و وولینگ در عرصه بین‌المللی است. پشتوانه تولیدی گسترده این خودروساز شامل بیش از ۳۰ کارخانه تولیدی در سطح جهان می‌شود.

۷-۲-۲. اهداف و دستاوردها

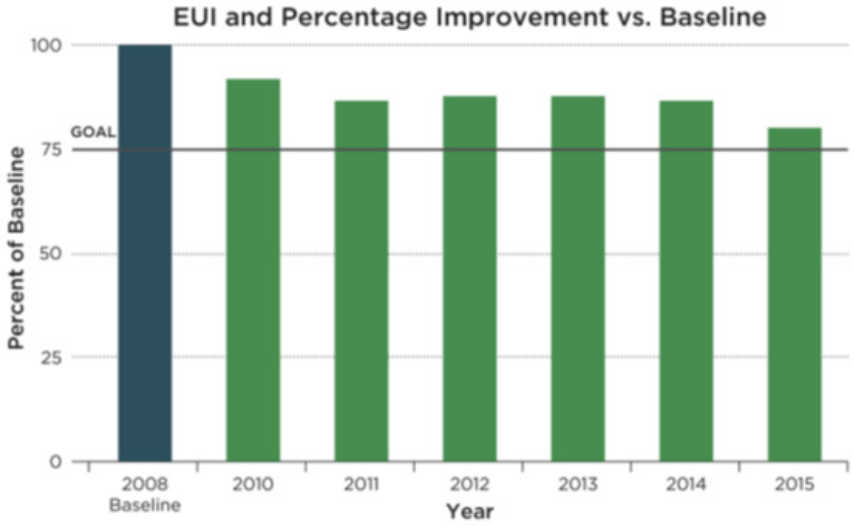
جنرال موتورز (GM) طی ۱۵ سال گذشته، یک برنامه جامع بهره‌وری انرژی را طراحی و اجرا کرده است. هسته اصلی این برنامه، ایجاد طرح ابتکاری پروژه صرفه‌جویی در

1. Idaho Power Energy Efficiency Program
2. General Motors

انرژی (ESPI)[1] 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 نه‌تنها به این هدف دست یافت، بلکه در استراتژی جدید خود متعهد شده است تا سال ۲۰۳۵ به کربن‌خنثی (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 ایالات‌متحده 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]

۷-۲-۳. 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 به‌طورکلی 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 نه‌تنها 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

کـه امـکان تأمیـن مـالی آن‌هـا را مطابـق معیارهـای داخلی GM فراهـم می‌کنـد. به همیـن دلیـل، پروژه‌هـا در مناطقی بـا مشـوق‌های انـرژی قـوی (ماننـد Tennessee Valley Authority، Consumers Energy و DTE Energy) نسـبت به مناطق فاقد چنیـن حمایت‌هایی، اولویت بیشـتری بـرای جـذب بودجه دارنـد. GM همچنیـن با حداکثرسـازی اسـتفاده از مشـوق‌های موجـود (کـه عـدم بهره‌بـرداری از آن‌هـا را «پـول رها شـده» می‌دانـد) در سـال‌های اخیر موفق بـه دسـتیابی به سـقف کمک‌هـای مـالی در چندیـن منطقه عملیاتی شـده اسـت.

حمایت‌هـای مهندسی ارائه‌شـده توسـط ایـن برنامه‌ها نیز حائـز اهمیت اسـت. برای مثال، یک سـازمان پژوهـشی انرژی محلی با ارائه پشـتیبانی فـنی به کارخانه‌هـای GM، جذابیت مشـارکت در برنامه‌هـای مشـتری‌محور را افزایش داده اسـت. اگرچـه GM در بـرخی مـوارد (ماننـد دو کارخانـه قدیـمی) مجبـور بـه تعدیـل نرخ‌هـای بـرق ترجیـحی خـود شـده، اما مزایـای مهنـدسی و مشـوق‌ها این چالـش را جبـران کرده‌اند.

شـاید مهم‌تریـن عامـل موفقیـت GM، همـکاری بـا دو شـرکت بـزرگ خدمـات انـرژی (Consumers Energy و DTE Energy) باشـد کـه مهندسـان انـرژی اختصـاصی را بـرای تأسیسـات GM در مناطـق مختلـف تأمیـن می‌کننـد. ایـن سیسـتم انعطاف‌پذیـر (کـه بـا تقسیـم هزینه‌هـا بیـن GM و شـرکت‌های خدمـات انـرژی همـراه اسـت) به‌عنـوان سـتون اصلـی برنامه بهره‌وری انرژی GM شـناخته می‌شـود. شـرکت‌های خدمـات انـرژی کوچک‌تـر نیـز در سـایر مناطق حمایت‌هـای مشـابهی را در مقیاس محدودتر ارائـه می‌دهند.

تصمیم GM برای مشـارکت در برنامه‌های مشـتری‌محور، مبتـنی بـر تحلیـل هزینه-فایـده اسـت: ایـن شـرکت تنهـا زمـانی وارد برنامـه می‌شـود که مزایـای مهنـدسی و مالی آن از هزینه‌هـای مشـارکت پیـشی بگیـرد. ایـن رویکـرد عملی، علیرغـم پیچیدگی‌هـای نـاشی از تأثیـر برنامه‌ها بـر نرخ‌های انـرژی، تاکنـون نتایـج درخشـانی را رقم زده اسـت.

۷-۲-۵. نگاه به آینده

بـا توجـه بـه تحـول سـریع صنعـت خودروسـازی در دهـه آینـده، برنامـه بهـره‌وری انـرژی در جنـرال موتـورز بـا چالش‌هـای بیشـتر و فرصت‌هـای بزرگتـری روبـرو خواهـد شـد. در بسـیاری از کارخانه‌هـا، دسـتاوردهای عمـده تاکنون در زمینـه روشـنایی؛ گرمایـش، تهویـه و تهویـه مطبـوع؛ بـرخی بهبودهـای راندمـان نیـروی محرکـه؛ و تـلاش بـرای کاهـش مصـرف بخـار در تولیـد بـوده اسـت. برای گسـترش بیشـتر مزایـای صرفه‌جـویی در هزینـه انـرژی، احتمـالاً نیـاز بـه تعمیـق مـداوم تلاش‌هـای بهـره‌وری انـرژی خواهـد بود، از جملـه مشـارکت در پروژه‌هـای بهینه‌سـازی تولیـد بـا مزایـای چندگانـه و سـایر تلاش‌هـای نزدیـک بـه عملیـات خـط تولیـد؛ اجـرای آزمایـشی بیشـتر ابتـکارات بهـره‌وری انـرژی تغییر رفتـار؛ و پیشـرفت مـداوم در تلاش بـرای ادغام طرح‌هـا و فناوری‌هـای بهـره‌وری انـرژی بهتریـن عملکـرد در سیسـتم‌های تولیـد جدیـد. در حـالی کـه ایـن زمینه‌هـا می‌تواننـد صرفه‌جویی‌هـای بسیـار خـوبی در هزینـه انرژی با هزینـه کم داشـته باشـند، اما چالش‌های سـازمانی بیشـتری را نیـز بـه همـراه دارند.

یک حـوزه مهـم، تقویت مـداوم روابط کاری بین پرسـنل بهـره‌وری انـرژی و کارکنـان و مدیریت عملیات تولید اسـت. واضـح اسـت کـه هـر پـروژه‌ای مرتبـط بـا تولیـد بایـد بسیار کم‌خطـر باشـد و شـامل برنامه‌ریـزی دقیـق همـراه بـا سـایر کارهـا بـرای به حداقـل رسـاندن هرگونـه توقف تولید باشـد. نکتـه کلیـدی آشـکار، ادغـام دانـش فرصت‌هـای بهـره‌وری انـرژی در برنامه‌هـای کلی بـرای تعمیـر و نگهـداری یـا بازسـازی برنامه‌ریـزی شـده خـط تولیـد اسـت.

حـوزه مهـم دیگـر، مشـارکت مـداوم و هرچـه بیشـتر پرسـنل بهـره‌وری انـرژی در طـراحی و اجـرای تأسیسـات تولیـدی جدید اسـت. بهره‌وری انـرژی در تأسیسـات تولیدی جدیـد شـاید مهم‌تریـن جنبـه کار بهـره‌وری انـرژی در درازمـدت باشـد، زیـرا صنعت به‌سـرعت به تکامل خـود ادامه می‌دهـد. چیدمـان سـازمانی فعلی جنـرال موتـورز مزایایی را بـرای جـذب ایـن پتانسیـل فراهـم می‌کنـد.

همچنیـن ممکـن اسـت بتـوان سیسـتم تضمیـن خریـد کارآمدتریـن تجهیـزات جدیـد را با رسـمی کـردن گنجاندن بهـره‌وری انـرژی در بازسـازی خـط تولیـد یا طـراحی جدید بهبـود بخشـید. این عـلاوه بر توسـعه سـاختمان‌های جدید و زیرسـاخت انرژی آن‌هـا، از طریق ایجاد یـک «دروازه انرژی» بـرای کارکنان انـرژی برای تأییـد پروژه‌های مرتبـط کلیدی، یـا با رسـمی کردن رونـد موجود بـرای گنجانـدن ویژگی‌های بهره‌وری انرژی با بازگشـت سـرمایه ۱۰ سـال یا کمتر اسـت. جنـرال موتـورز کـه در حـال حاضـر یـک رهبـر در طـراحی و تولیـد خودروهـای بـرقی و کارآمـد انـرژی اسـت، می‌تواند به‌طـور فزاینـده‌ای مشـارکت‌های مـوازی انـرژی پایـدار را از طریـق تولیـد سـبزتر خودروهای خـود برجسـته کند.

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 به‌عنوان راهی برای شخصی کردن بهره‌وری انرژی اجرا کنند.

۷-۳. بهره‌وری انرژی در جنرال میلز[1]

۷-۳-۱. پیشینه شرکت

جنرال میلز (General Mills) به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین فرآوری کننده‌های 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 قابل‌توجه 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 محصولات متنوعی شامل غلات، ماست، آرد و سایر اقلام غذایی را در تأسیسات متعدد تولیدی خود به‌عمل می‌آورد.

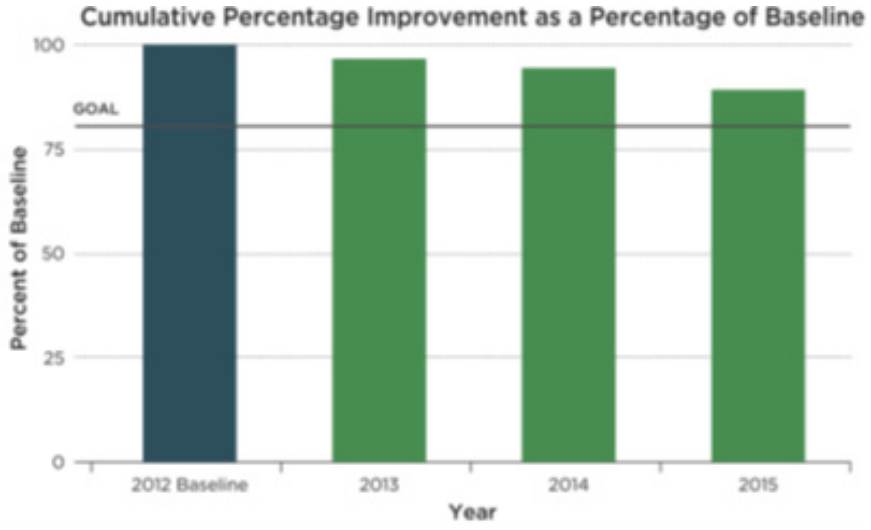
۷-۳-۲. اهداف و دستاوردها

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 به‌عنوان 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 به‌عنوان 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 به‌عنوان 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].

1. General Mills



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

۷-۳-۳. 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) به‌صورت 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 به‌صورت اختصاصی فعالیت می‌کنند، در حالی که در سایر واحدها ممکن است نقش‌های دیگری نیز داشته باشند. وظیفه مدیریت تأمین انرژی به‌صورت 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 نه‌تنها 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.

۷-۳-۴. 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 به‌صورت 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 گرفتنشان 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 قابل‌توجهی 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. 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)[1] همراه با بهبود بهره‌وری

1. Greenhouse Gas Emissions

انـرژی، سـتون اصـلی ایـن تلاش‌هـا محسـوب می‌شـوند. این شـرکت از سـال ۱۹۹۶ گـزارش‌دهی عمومی مصـرف انرژی و تعهـد به کاهـش GHG را آغاز کرد. در سـال ۲۰۰۳، اینتل با تعییـن هدف کاهش ۴ درصدی سـالانه شـدت مصـرف انرژی (بـه ازای هر سـانتیمتر مربع سیلیکون)، گامی بلند برداشـت. ایـن معیـار در ادامه با سیسـتم جدیدی جایگزین شـد که در آن کلیـه صرفه‌جویی‌های حاصل از اقدامات بهـره‌وری انرژی، جمع‌آوری و به یک رقم کلی تبدیل می‌شود تا با مصرف انرژی کل شرکت مقایسه گردد.

در حال حاضر، اینتل برای سـال ۲۰۲۰ یک هدف سـالانه کاهش شـدت مصرف انرژی در سطح شرکت تعیین کرده که به تفکیک منطقه و سایت اجرایی می‌شود. تا سال ۲۰۱۵، این شـرکت موفق به ثبت ۱/۶ میلیارد کیلووات‌ساعت صرفه‌جویی انـرژی نـاشی از اقدامات بهره‌وری انرژی از سـال ۲۰۱۲ شـده بود. این دسـتاوردها نه‌تنهـا جایگاه اینتل را به‌عنوان پیشـگام فناوری تقویت می‌کند، بلکه الگویی برای صنعت در همسویی رشد اقتصادی با مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی ارائه می‌دهد.

۷-۴-۳. سیستم شناسایی و اجرای اقدامات

سـاختار سازمانی نسـبتاً متمرکز اینتل در برنامه بهره‌وری انـرژی آن بازتاب یافته اسـت. هر سـایت تولیدی این شـرکت دارای یـک «قهرمان انرژی» تمام‌وقت اسـت که به دو صورت گـزارش‌دهی می‌کنـد: مسـتقیم بـه مدیـر عملیـات سـایت و به‌صـورت ماتریـسی بـه مدیر مرکـزی بهـره‌وری انـرژی. 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.

فرآینـد تصویـب پروژه‌هـا به این صورت اسـت کـه پس از شناسـایی، به تیم مرکزی بهـره‌وری انرژی ارجاع می‌شـوند تا امکان بهینه‌سـازی از نظـر صرفه‌جویی و هزینه بررسی شـود. پروژه‌هـای واجد شـرایط از طریـق بودجه سـالانه ۳۰ میلیون دلاری ایـن حـوزه تأمین مالی شـده و بر اسـاس ارزش خالص فعلی [1](NPV) اولویت‌بندی می‌شـوند. پروژه‌هایی که آسـتانه NPV را بـرآورده می‌کننـد، معمـولاً تأییـد می‌شـوند. اینتـل ترجیـح می‌دهـد پروژه‌ها را بـا منابع داخلی (به‌جای اسـتفاده از قراردادهـای عملکـرد انرژی) اجـرا کند. انگیـزه اینتل برای پیگیری بهره‌وری انرژی سه‌جانبه است:

۱. نکاهش ردپای کربن.

۲. تقویت جایگاه رهبری در حوزه پایداری.

۳. کاهـش هزینه‌هـا باوجـود سـهم ۱ درصـدی انـرژی از کل هزینه‌هـا، ایـن مـورد پـس از نیـروی کار، دومیـن هزینـه متغیـر بـزرگ شـرکت اسـت. تمرکـز بـر بهـره‌وری انـرژی به‌عنـوان اهرمـی بـرای افزایـش رقابت‌پذیـری، نقـش کلیـدی ایفـا می‌کنـد.

اقدامـات اینتـل عمدتاً بـر بهینه‌سـازی تأسیسـات (مانند سیستم‌های سرمایشی، بازیابی گرما، هوای فشرده و روشنایی) متمرکز است. با این حال، این شرکت در حال گسترش دامنه فعالیت‌هـا به طـراحی خطوط تولیـد جدید و سـاختمان‌های پایـدار اسـت تا اطمینان حاصل شـود کـه بهـره‌وری انرژی از مرحله طراحی در زیرساخت‌ها نهادینه می‌شود.

۷-۴-۴. نقش حمایت خارجی

اگرچـه اینتـل عمدتـاً بـر برنامه داخـلی خود تکیـه دارد، حمایـت نهادهـای خـارجی (به‌ویـژه برنامه‌هـای تأمین‌شـده توسـط مصرف‌کننـدگان) نقـش مکمـلی ایفـا کرده‌انـد. مهم‌تریـن کمـک ایـن برنامه‌هـا، ارائـه مشـوق‌های مـالی بـرای عبـور پروژه‌هـا از آسـتانه NPV بـوده اسـت. به‌عنوان مثـال، Energy Trust of Oregon بـا ارائـه ارزیابی‌هـای شـخص ثالـث و پشـتیبانی فـنی، بـه اجـرای پروژه‌هـا کمک کرده اسـت.

اینتـل همچنیـن در شـکل‌دهی بـه طـراحی برنامه‌هـای مشـتری‌محور مشـارکت فعال دارد. نمونه بارز ایـن همکاری، اصـلاح سیسـتم انگیزه‌های یک شـرکت خدمات عمـومی بود که ابتدا سـهم مشـتریان بزرگ را ناعادلانه تعیین کرده بود. با همکاری اینتل و دیگر صنایع، سقف مشوق‌ها متناسب با میزان مشارکت مالی تنظیم شـد. راه‌حلی که منافع همه ذینفعان را تأمین کـرد. این همکاری نشـان می‌دهد که مشـتریان بزرگ صنعـتی می‌توانند با اجرای پروژه‌های مقرون‌به‌صرفه، هم‌زمان هزینه‌های خود و کل سیستم را کاهش دهند.

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

در حـالی کـه تجربیـات شـرکت‌های بین‌المللـی ماننـد سیمپلوت، جنرال موتورز، جنرال میلز و اینتل الگوهای موفقی بـرای بهینه‌سـازی انرژی ارائـه می‌دهند، بـررسی 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 (DRI)[1] و کوره‌های قوس الکتریکی (EAF)[2]، 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 DRI-EAF 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)[3] در این فرآیند بین ۱۰ تا ۲۰ گیگاژول بر تن فولاد است و انتشار CO_2 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 (۰/۶-۰/۸ 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

این مقایسه نشان می‌دهد که شرکت‌های ایرانی برای کاهش مصرف گاز (که عامل اصلی ناترازی در سبد سوخت مطبق جدول ۱، است)، می‌توانند از راهکارهای شرکت‌های مورد مطالعه الهام بگیرند. برای مثال، رویکرد سیمپلوت در طراحی آزمایشی (DOE)[4] و مشارکت در ENERGY STAR می‌تواند برای بهینه‌سازی فرآیندهای DRI اعمال شود و مصرف گاز را ۱۵-۲۰ درصد کاهش دهد[۱۶].

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 (باالگوبرداری 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 همسو 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 (CCUS)[2][۲۷] را پیاده‌سازی نمایند. علاوه بر این، بررسی تولید بیوهیدروژن به‌عنوان 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[۳۰,۲۹]. 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، به‌صورت 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

همان‌گونـه کـه (جدول ۲) نشـان می‌دهد، هر یـک از این راهکارها علاوه بر کاهش مسـتقیم شدت مصرف انرژی و فشار بـر شـبکه گاز، از طریق کاهـش هزینه‌های تولید، آزادسـازی منابع سـرمایه‌ای و ارتقای بهره‌وری، به مهار فشـارهای تورمی و تقویت رشـد تولیـد کمک می‌کنـد. در صنعت فـولاد ایران، می‌توان با بومی‌سـازی این رویکردها، اقداماتی مانند اسـتفاده از طراحی آزمایشی در بهینه‌سـازی شرایط عملیاتی واحدهای DRI، بازطـراحی خطوط نورد و ذوب، اسـتقرار سیسـتم‌های پایش و مدیریت هوشـمند انرژی در کوره‌های EAF و اجرای برنامه‌های آموزش تخصصی انـرژی برای کارکنان بهره‌برداری را به‌عنـوان مسیرهـای عملی بـرای کاهش وابسـتگی به گاز و ارتقای رقابت‌پذیری دنبال کرد.

۷-۵-۴. تحلیل SWOT[1] برای تطبیق راهکارها در ایران

برای ارزیابی عملی، تحلیل SWOT زیر ارائه می‌شود:

- نقـاط قـوت (Strengths): منابـع غنـی گاز طبیعی و پتانسـیل انرژی خورشـیدی؛ نیـروی کار متخصص در صنایـع انرژی‌بـر [۱۹].
- نقـاط ضعـف (Weaknesses): فنـاوری قدیمـی و تحریم‌هـا که دسترسـی به تجهیـزات نویـن را محدود می‌کنـد [۱۷,۱۸].
- فرصت‌هـا (Opportunities): همـکاری بین‌المللـی با کشـورهای ماننـد آلمـان و کـره جنوبـی بـرای انتقال دانـش [۲۰, ۳۴]؛ ادغـام راهکارهـای شـرکت‌های پیشـرو بـرای کاهـش ۲۰-۳۰ درصـد مصـرف انـرژی [۱۶].
- تهدیدهـا (Threats): نوسـانات بـازار گاز و تغییـرات اقلیمـی کـه ناتـرازی را تشـدید می‌کنـد [۲۳].

این تحلیل نشان می‌دهد که تطبیق راهکارها نه‌تنها نوآورانه است، بلکه با تمرکز بر مدل‌های هیبریدی (ترکیب تجربیات جهانی با شرایط محلی)، می‌تواند صنعت فولاد ایران را به سمت توسعه پایدار سوق دهد. برای مثال، پیاده‌سازی DOE سیمپلوت در فرآیندهای DRI می‌تواند نرخ بازده داخلی (IRR)[2] را به ۱۵ درصد برساند، مشابه تجربیات جهانی [۲۰]. درنهایت، این مطالعه موردی محلی تأکید می‌کند که تجربیات شرکت‌های بین‌المللی می‌تواند با بومی‌سازی، چالش‌های ناترازی گاز در ایران را حل کند و به کاهش ردپای کربن کمک نماید.

۸. محاسبات عددی بهینه‌سازی

در دنیـای امـروز، جایی کـه صنایع انرژی‌بر مسـئول بیش از ۳۷ درصـد مصرف انرژی جهانی و سـهم عمده‌ای از انتشـار گازهای گلخانه‌ای هستند، مدل‌های عددی بهینه‌سازی نه‌تنها یـک ابزار فـنی، بلکه یک اهرم اسـتراتژیک برای دسـتیابی به پایـداری اقتصـادی و زیسـت‌محیطی به شـمار می‌رونـد. این مدل‌ها، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشـرفته ریاضی، امکان شبیه‌سـازی سـناریوهای پیچیده، پیش‌بینی رفتار سیسـتم‌ها و شناسـایی نقاط بهینـه را فراهم می‌کنند کـه می‌تواند منجر بـه کاهش تا ۳۰ درصد مصرف انـرژی و صرفه‌جویی‌های مالی چشمگیر شود. بر اسـاس گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، کاربـرد ایـن روش‌هـا در صنایع سـنگین مانند فولاد، خودروسازی و فناوری، پتانسیل کاهش انتشار CO_2 به میزان میلیاردهـا تـن در سـال را دارد. در ایـن بخـش، بـا تمرکـز بر رویکردهای کلیدی مانند برنامه‌ریزی خطی (LP)، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MILP)، برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP)، الگوریتـم ژنتیـک (GA) و الگوریتـم ازدحـام ذرات (PSO)، روابـط ریاضی اسـاسی، کاربردهـای عملی و مثال‌هـای واقعی مرتبط با شرکت‌های مورد مطالعه (سیمپلوت، جنرال موتورز، جنرال میلز و اینتل) و حتی صنعت فولاد ایران بررسی می‌شود. این روش‌ها نه‌تنها در سـطح تئوریک، بلکه در پیاده‌سازی‌های واقعی، مانند بهینه‌سـازی سیسـتم‌های انرژی در کارخانه‌های غـذایی یا مراکـز داده، اثبات‌شـده‌اند و می‌تواننـد چالش‌هایی مانند ناترازی گاز را با دقت بالا مدیریت کنند.

۸-۱. برنامه‌ریزی خطی[3] (LP): پایه‌ای برای تخصیص بهینه منابع

برنامه‌ریـزی خـطی، به‌عنـوان یـکی از قدیمی‌تریـن و قدرتمندتریـن ابزارهای بهینه‌سـازی، بر پایـه مدل‌های خطی بنا شـده و برای حل مسـائل تخصیـص منابـع در محیط‌های محـدود ایده‌آل اسـت. این روش بـا حداکثر یـا حداقل کردن یـک تابع هـدف خـطی، تحـت محدودیت‌های خـطی، امکان تصمیم‌گیری‌های دقیق را فراهم می‌کند و در صنایع انرژی‌بر، برای کاهش هزینه‌های عملیاتی تا ۲۰-۳۰ درصد کاربرد دارد. مدل استاندارد LP به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۳۵]:

$$Z = \sum_{j=1}^{n} x_j c_j \qquad (۱)$$

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

کـه در آن x_j متغیرهـای تصمیم (مانند میزان اسـتفاده 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 $i=1,2,\ldots,m$ و قیود غیرمنـفی $x_j \geq 0$ می‌شـوند. الگوریتم‌هایی مانند سیمپلکس یا روش‌های داخلی، این مدل را به سرعت حل می‌کنند.

در کاربردهـای عمـلی،LP در صنایع غـذایی مانند جنرال میلـز بـرای تخصیـص بهینـه منابـع تولیـد و کاهـش مصرف انرژی در خطوط فرآوری اسـتفاده می‌شود، جایی که می‌تواند هزینه‌های انرژی را تا ۱۵ درصد کاهش دهد[۳۶]. برای مثال، دریک مطالعه موردی در صنعت نسـاجی (مشـابه فرآیندهای غـذایی سیمپلوت)، مدل LP هزینه‌هـای انرژی را با تخصیص بهینه سـوخت و بـرق به حداقل رسـاند و صرفه‌جویی سـالانه ۱۰-۲۰ درصـد ایجـاد کـرد[۳۷]. در صنعت فـولاد ایران، LP می‌تواند برای بهینه‌سـازی مصـرف گاز در فرآیند DRI اعمال شـود، جایی کـه محدودیت‌هـای عرضـه گاز را در نظر گرفته و وابسـتگی بـه سـوخت فسیـلی را کاهـش دهد، بـا پتانسیل صرفه‌جویی ۱۰-۱۵ درصد[۳۶, ۳۵].

۸-۲. برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط[1](MILP): مدیریت تصمیمات گسسته در سیستم‌های پیچیده

MILP بـا ادغـام متغیرهـای پیوسـته و گسسـته (ماننـد تصمیمات روشـن/خاموش تجهیزات)، برای مدل‌سازی مسائل واقـعی که نیاز به انتخاب‌های باینری دارند، ایده‌آل اسـت. این روش کـه اغلب بـا الگوریتم‌های شـاخه و کران حل می‌شـود، در صنایع انرژی‌بر برای بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده کاربرد دارد و می‌توانـد هزینه‌هـای عملیـاتی را تـا ۵۰ درصد کاهش دهد. فرم کلی مدل MILP به‌صورت رابطه (۲) است[۳۸]:

$$Z = \sum_{j=1}^{n} x_j c_j \qquad (۲)$$

بـا محدودیت‌هـای خـطی $\sum_{j=1}^{n} x_{ij} a_j \leq b_i$ و قید صحیح بودن برای برخی متغیرها، یعنی $x_j \in \{0,1\}$ برای $j \in I \subseteq \{1,\ldots,n\}$. در شـرکت‌هایی ماننـد سیمپلوت یـا جنرال موتـورز، MILP برای مدل‌سـازی تصمیمات گسسـته ماننـد انتخاب تجهیزات در خطـوط تولید مفید اسـت؛ بـرای نمونه، در خودروسـازی، ایـن مـدل زمان‌بندی تولیـد را بهینه می‌کنـد و مصرف انرژی را ۲۰-۳۰ درصـد کاهـش می‌دهـد. یـک مطالعه مـوردی در سیسـتم‌های انرژی صنعتی نشـان داد که MILP هزینه‌های انـرژی را در کارخانه‌های پردازشی تا ۴۰ درصد بهینه می‌کند. در صنعت فـولاد ایران، MILP می‌تواند برای تصمیم‌گیری در مورد فعال‌سـازی کوره‌هـای EAF تحـت محدودیت‌های گاز اسـتفاده شـود، که منجر به کاهش وابسـتگی به گاز طبیعی و صرفه‌جـویی ۱۵-۲۵ درصد می‌شـود[۳۸, ۳۹]. این روش، که اغلـب با الگوریتم‌های شـاخه و کران حل می‌شـود، در صنایع انرژی‌بـر برای بهینه‌سـازی شـبکه‌های پیچیده کاربـرد دارد و می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را تا ۵۰ درصد کاهش دهد[۴۰].

۸-۳. برنامه‌ریزی غیرخطی[2](NLP): مقابله با پیچیدگی‌های غیرخطی در فرآیندهای حرارتی

NLP بـرای مسـائل بـا توابـع غیرخـطی، ماننـد روابـط ترمودینامیـکی در فرآیندهـای شیمیـایی، طـراحی شـده و با روش‌هایی مانند گرادیان یا نیوتن-رافسـون حل می‌شـود. این رویکرد در صنایع انرژی‌بر، جایی که رفتار سیستم‌ها غیرخطی اسـت، می‌تواند بازدهی را تـا ۲۵ درصد افزایش دهد. فرم کلی NLP عبارت است از[۴۱]:

$$Z = f(x_1, x_2, \ldots, x_n) \qquad (۳)$$

بـا محدودیت‌هـای نامسـاوی $g_i(x_1,\ldots,x_n) \leq 0$ بـرای $i=1,2,\ldots,m$ و تسـاوی $h_j(x_1,\ldots,x_n)=0$ برای $j=1,2,\ldots,p$ که h, g, f می‌توانند غیرخطی باشند.

در جنـرال میلـز، NLP برای بهینه‌سـازی مصـرف انرژی در خطـوط تولید پیوسـته، مانند فرآیندهای حـرارتی، اعمال می‌شـود و اتلاف انـرژی را کاهـش می‌دهد. مثـالی واقعی در انـرژی سیسـتم‌ها نشـان می‌دهـد کـه NLP در مدل‌سـازی فرآیندهـای شیمیـایی، صرفه‌جـویی ۱۵-۲۰ درصـد ایجـاد می‌کنـد. در صنعـت فـولاد ایـران، NLP می‌توانـد بـرای بهینه‌سـازی دما و فشـار در فرآیندهای DRI اسـتفاده شـود که وابسـتگی به گاز را کاهش داده و انتشـار CO_2 را ۱۰-۲۰ درصد کم می‌کند[۳۶, ۳۸, ۴۲].

۸-۴. الگوریتم ژنتیک[3](GA): الهام‌گرفته از طبیعت برای حل مسائل پیچیده

GA، بـه عنـوان یـک روش فرابتـکاری، از اصـول تکامـل طبیعی برای جسـتجوی 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

مصـرف انرژی تـا ۳۰ درصد در سیسـتم‌های پیچیده. احتمال انتخاب هر جواب بر اساس میزان برازندگی آن به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود[۴۱]:

$$P_i = \frac{F(x_i)}{\sum_{k=1}^{N} F(x_k)} \qquad (۴)$$

کـه در آن $F(x_i)$ مقـدار تابـع برازنـدگی جـواب x_i و N اندازه جمعیت اسـت. در خطـوط مونتاژ جنـرال موتورز، GA سـاختار تولید را بهینه می‌کند و انرژی را صرفه‌جویی می‌کند. مطالعاتی نشـان می‌دهد GA در سیسـتم‌های انرژی صنعتی، کارایی را افزایش می‌دهد. در صنعت فولاد ایران، GA می‌تواند برای بهینه‌سـازی ترکیب سـوخت در کوره‌ها استفاده شود، با صرفه‌جویی ۲۰ درصد[۴۸,۳۴].

۸-۵. الگوریتم ازدحام ذرات[1](PSO): هوش جمعی برای بهینه‌سازی پویا

PSO، الهام‌گرفتـه از رفتـار پرنـدگان، بـرای مسـائل پویا و چندبعـدی مناسـب اسـت و در مراکـز داده ماننـد اینتـل، مصرف انـرژی را تـا ۲۰-۳۰ درصد کاهش می‌دهـد. معادلات به‌روزرسانی[۴۴]:

$$v_i^{t+1} = w v_i^{t+1} c_1 r_1 (p_i - x_i^t) + c_2 r_2 (g - x_i^t) \qquad (۵)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t v_i^{t+1} \qquad (۶)$$

در ایـن روابـط، $x_i(t)$ موقعیـت ذره i در زمـان t، $v_i(t)$ سـرعت حرکـت، p_i بهتریـن موقعیـت قبـلی ذره و g بهترین موقعیت یافت‌شـده توسط کل جمعیت اسـت. ضرایب c_1، c_2 و w ضرایب تنظیم‌کننده الگوریتم هسـتند و مقادیر تصادفی r_1، r_2 در بازه‌ی (۰ ,۱) تولید می‌شـوند. در اینتل، PSO برای مدیریـت انرژی مراکـز داده اسـتفاده می‌شـود و صرفه‌جویی ایجـاد می‌کنـد. مثـالی در داده‌سـنترها نشـان می‌دهد PSO انرژی را بهینه می‌کند. درصنعـت فولاد ایران، PSO می‌تواند برای زمان‌بندی کوره‌ها اعمال شـود، با کاهش ۱۵-۲۵ درصد مصرف گاز[۴۲, ۴۴, ۴۵].

در نهایـت، این مدل‌هـا نه تنها ابزارهای محاسـباتی، بلکه کلید تحول دیجیتال در صنایع انرژی‌بر هستند که با ادغام در سیستم‌های واقعی، پایداری را تضمین می‌کنند.

۹. نتیجه‌گیری

این پژوهش، با بهره‌گیـری از رویکرد اقتصاد مهندسی، به کاوش عمیق راهکارهای صرفه‌جویی انرژی در صنایع انرژی‌بر پرداختـه و چالش‌هـای نـاشی از ناتـرازی گاز را در چارچوب تجربیات شرکت‌های بین‌المللی پیشرو مورد تحلیل قرار داده اسـت. یافته‌ها نشان‌دهنده آن است که ادغام اصول مهندسی اقتصـادی نه تنها مصـرف منابع را بهینه‌سـازی می‌کند، بلکه بـه عنـوان اهـرمی محـوری در کنتـرل تـورم، تقویـت رشـد اقتصـادی و تضمیـن امنیت انـرژی عمـل می‌نمایـد. مطالعه موردی شـرکت‌های سیمپلوت، جنرال موتورز، جنرال میلز و اینتـل، همراه با بررسی بومی صنعت فـولاد ایران، گواه بر این است که راهکارهای سیسـتماتیک (از جمله مدل‌های عددی بهینه‌سازی مانند برنامه‌ریزی خطی (LP) و الگوریتم‌های فرا ابتـکاری (GA و PSO) می‌توانند شـدت مصـرف انرژی را تا ۳۰ درصـد کاهش دهند، هزینه‌های عملیاتی را بهینه کنند و رقابت‌پذیری را ارتقا بخشـند. برای نمونه، اقدامات سیمپلوت در بهینه‌سـازی فرآیندهای غذایی از طریق طراحی آزمایشی (DOE) نـه تنهـا ۱۸ درصد کاهش شـدت مصـرف انرژی را بـه ارمغـان آورد، بلکه صرفه‌جویی سـالانه ۴۴۸۲۵۳ دلاری را محقق ساخت که این دسـتاوردها فشار ناترازی گاز را کاهش داده و فضایی برای نوآوری فراهم کرد.

بـر پایـه گزارش‌هـای آژانـس بین‌المللی انـرژی (IEA) و داده‌هـای جهـانی تـا سـال ۲۰۲۴، بخـش صنعـت همچنان مسـئول حـدود ۳۷ درصـد از مصـرف انرژی جهـانی و بخش عمـده‌ای از انتشـار گازهای گلخانـه‌ای اسـت [۳]. آماری که ضرورت بازنگری فوری در الگوهای مصرف و اصلاح فرآیندهای صنعـتی را برجسـته می‌سـازد. با ایـن حال، موانع سـاختاری همچون مقاومت سـازمانی در برابر تغییـرات فناورانه، کمبود سـرمایه‌گذاری‌های هدفمند و فقدان اسـتانداردهای یکپارچه صنعـتی، اجرای برنامه‌هـای بهره‌وری انرژی را بـا 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 بـر ناتـرازی گاز شناسـایی شـد. علاوه بـر این، توانمندسـازی نیروی انسـانی از طریـق برنامه‌های آموزشی پیشـرفته (نظیر «قهرمانان انرژی» در سیمپلوت) فرهنگ سازمانی را دگرگون کرده و مدیریت مصرف را به بسـطحی نوین می‌رساند که این رویکردها در صنعت فولاد ایران نیز پتانسیل کاهش وابستگی به گاز طبیعی تا ۲۰-۳۰ درصد را داراست.

راهکارهـای کلیـدی استخراج‌شـده از شـرکت‌های مـورد

1. Particle Swarm Optimization

مطالعـه کـه موفقیـت آن‌هـا را رقـم زد، شـامل روش‌هـای داده‌محور و آزمایشی (مانند DOE برای شناسایی فرآیندهای کم‌مصرف)، سرمایه‌گذاری استراتژیک در پروژه‌های با بازدهی بـالا (بـا آسـتانه IRR ۱۵ درصـد در سیمپلـوت)، جایگزینی سـوخت‌های فسـیلی بـا فناوری‌هـای تجدیدپذیـر (ماننـد انرژی خورشـیدی در اینتل)، تقویت نیروی انسـانی از طریق آموزش‌های تخصصی و هم‌راسـتایی با سیاسـت‌های تشویقی (نظیـر برنامـه ENERGY STAR) می‌شـود. ایـن راهکارها نه‌تنهـا مصـرف انـرژی را کاهـش دادنـد، بلکـه با آزادسـازی منابع مـالی و تقویت زنجیـره ارزش، صنایع را به سـمت یک چرخـه توسـعه پایدار هدایـت کردند. ادغـام مدل‌های عددی بهینه‌سـازی در ایـن راهکارهـا، ماننـد کاربـرد MILP در تصمیم‌گیری‌هـای گسسـته صنعت فولاد ایران، نـوآوری را به سـطح عملیاتی رسـانده و پتانسیـل صرفه‌جویی‌هـای مالی و زیست‌محیطی را دوچندان می‌کند.

با نـگاهی به افق پیـش رو، صنایع انرژی‌بر بـرای مدیریت مؤثـر ناتـرازی گاز و همـگامی بـا تحـولات جهـانی، بایـد بـر محورهای کلیدی زیر تمرکز کنند:

- ادغام فناوری‌هـای نوظهور مانند خودروهای الکتریکی و سیسـتم‌های هیبریـدی انـرژی در زیرسـاخت‌های موجـود کـه نیازمنـد سـرمایه‌گذاری بلندمـدت و همکاری‌های بین‌المللی است.
- توسـعه اسـتانداردهای صنعتـی بـرای اندازه‌گیـری و گزارش‌دهـی بهـره‌وری انـرژی، به‌ویـژه در حـوزه ایمنی، سـلامت و محیط‌زیسـت (HSE) تا هماهنگی میان‌بخشی تقویت شود [۴۶].
- تعمیـق همکاری‌هـای چندجانبـه میـان دولت، بخش خصوصـی و نهادهـای جهانـی ماننـد IEA، بـرای پـر کردن شکاف‌های فناورانه و مالی.
- آموزش مداوم نیروی انسانی و پرورش فرهنگ‌سازمانی مبتنـی بـر نـوآوری، صرفه‌جویـی انـرژی و مدل‌هـای 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 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 Association Steel Statistical Yearbook,

[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, and J. A. Gómez-Salazar, “Advancing Optimization Strategies in the Food Industry: From Traditional Approaches to Multi-Objective and Technology-Integrated Solutions”, 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 methods, sources, and separation”, Journal of Renewable and Sustainable Energy, vol. 16, pp. 2024.

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.

[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.

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

Volume 13 / Issue 1 / NO. 25 / Spring 2026 / Pages 9-36

Journal Homepage: https://ijge.irangi.org

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

Reza Rafiei[1], Armin Sabetghadam-Isfahani[2], Yegane Davoodbeygi[3*], Seyed Mahmood Latifi[4]

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

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)

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

محسن صفری[1]، زینب زارع‌پور[1*]، زیبا سالمی[2]، عیسی باخدا[3]

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

۲. کارشناسی ارشد، گروه مدیریت، دانشکده اقتصاد، دانشگاهی شهید چمران، اهواز، ایران

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

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

مقاله‌ی علمی-پژوهشی

صفحه ۳۷ - ۵۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷

چکیده

هدف این پژوهش، شناسایی و مدل‌سازی 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) می‌باشد. 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 مدل‌سازی ساختاری‌تفسیری و تحلیل میک‌مک اولویت‌بندی شدند. یافته‌ها نشان داد که عوامل در ۵ سطح تعاملی قرار می‌گیرند. متغیرهای «رهبری خدمتگزار»، «فرهنگ ناب»، «تفکر ناب» و «ایجاد ساختار حمایتی» در سطح پنجم (زیربنایی‌ترین لایه) قرار گرفته و به‌عنوان سنگ بنای استقرار نظام ناب شناسایی شدند. در مقابل، متغیرهایی نظیر «تسهیل کار»، «کاهش تحرکات اضافی» و «انعطاف‌پذیری منابع انسانی» در سطح اول (دستاورد نهایی) جای گرفتند. تحلیل میک‌مک نیز تائید کرد که اکثر عوامل ریشه‌ای 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 پارادایم‌های ذهنی رهبران و ایجاد زیرساخت‌های فرهنگی است تا درنهایت منجر به نتایج عملیاتی و بهره‌وری نیروی کار شود.

کلید واژه‌ها: مدیریت منابع انسانی ناب، تفکر ناب، صنعت گاز، مدل‌سازی ساختاری تفسیری، تحلیل میک‌مک

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، سازمان‌ها با محیط‌هایی روبه‌رو هستند که به‌طور فزاینده‌ای پیچیده، پویا و رقابتی شده‌اند. عواملی چون جهانی‌شدن، تحول دیجیتال، فشارهای زیست‌محیطی و تغییرات سریع فناوری، سازمان‌ها را ناگزیر ساخته‌اند تا به‌طور مستمر در پی بهبود عملکرد، افزایش بهره‌وری و ارتقای اثربخشی باشند. در چنین شرایطی، ارتقای بهره‌وری، کاهش ضایعات و بهبود مستمر عملکرد به اولویت راهبردی بسیاری از سازمان‌ها تبدیل شده است[۱]. سازمان‌هایی که نتوانند خود را با تغییرات سریع و روندهای نوین کسب‌وکار تطبیق دهند، نه‌تنها مزیت رقابتی خود را از دست می‌دهند، بلکه در معرض حذف از بازار نیز قرار می‌گیرند.

مدیریت منابع انسانی[1] به‌عنوان یکی از ارکان اصلی موفقیت سازمانی شناخته می‌شود. 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. پژوهش علیزاده 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[1] نشان می‌دهد که ادغام مدیریت منابع انسانی[2] و اصول «مدیریت ناب»[3] نه‌تنها 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[4] مانند هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء و تحلیل داده‌هاست که موجب تحول در فرآیندهای سازمانی شده‌اند[۵ و ۶]. همچنین، پژوهش اوراقینی و همکاران[5] (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 نه‌تنها 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[6] (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 پیشنه پژوهش

۲-۱. تبیین مفهوم و سیر تحول تفکر ناب[7]

«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 ارزش‌افزوده یا «ضایعات»[1] تمرکز دارد. وومک و جونز[2] (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[3] (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[4] (۲۰۱۱) و بنت[5] (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[6] (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[7] (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[8] (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[9] (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].

۲-۳. پیشینه پژوهش‌های تجربی

مطالعات متعددی در سطح داخلی و بین‌المللی به بررسی ابعاد مدیریت ناب پرداخته‌اند. در حوزه صنایع استراتژیک، باهوگونا[10] (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[11] (۲۰۲۴) بر نقش این رویکرد در تحقق نوآوری سبز تأکید کردند[۶]. مطالعات مدل‌سازی توسط سابو و همکاران[12] (۲۰۲۲) و تمیز و همکاران[13] (۲۰۲۱) نیز نشان داد که «رهبری ناب» و «فرهنگ‌سازمانی» 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[1] نه‌تنها 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 به‌شدت کاهش و سطح ایمنی[2] 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[3] 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 «نقشه‌برداری 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[4] 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 تائید 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 شناسایی‌شده در مدیریت منابع انسانی ناب به چه صورت است؟
- عوامل شناسایی‌شده دارای چه نقشی (نفوذ یا وابستگی) در مدل طراحی‌شده هستند؟

۳. روش‌شناسی 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 بومی‌سازی عوامل با استفاده از تحلیل محتوا و پنل خبرگان صورت گرفت و در بخش کمی، روابط ساختاری میان عوامل با استفاده از روش مدل‌سازی 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 مرحله‌ای انجام شد. ابتدا با بررسی نظام‌مند ادبیات و پیشینه پژوهش (مندرج در جدول ۱)، کدهای اولیه استخراج گردید. سپس برای تطبیق این شاخص‌ها با مقتضیات صنعت گاز و تکمیل لیست عوامل، با خبرگان شرکت پالایش گاز سرخون و قشم مصاحبه‌های نیمه‌ساختار یافته انجام شد. در این مرحله، از روش کدگذاری (باز، محوری و گزینشی) برای تلخیص و دسته‌بندی داده‌های حاصل از ادبیات و مصاحبه‌ها استفاده شد که درنهایت منجر به شناسایی ۲۰ عامل کلیدی گردید.

۳-۲. پنل خبرگان و اشباع نظری

خبرگان مشارکت‌کننده در این پژوهش شامل ۹ نفر از مدیران و کارشناسان ارشد حوزه منابع انسانی بودند که به روش نمونه‌گیری 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[1] ادامه یافت؛ به‌طوری که از مصاحبه هفتم به بعد، عامل جدیدی شناسایی نگردید و با انجام دو مصاحبه تکمیلی (نفر هشتم و نهم) و اطمینان از کفایت داده‌ها، لیست نهایی ۲۰ عامل تأیید شد.

۳-۳. مرحله مدل‌سازی 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 بخش‌های خدمات رفاهی، آموزش و برنامه‌ریزی 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 نرم‌افزار متلب[2]، ماتریس دستیابی نهایی از طریق اعمال رابطه تسری و به توان رساندن ماتریس تا رسیدن به حالت پایدار استخراج گردید. درنهایت، سطح‌بندی متغیرها و خوشه‌بندی آن‌ها بر اساس قدرت نفوذ و وابستگی به روش تحلیل میک‌مک[3] انجام پذیرفت.

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

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

ردیف	نماد	مؤلفه‌ها
۱	A1	رهبری خدمتگزار
۲	A2	ایجاد ساختار حمایتی
۳	A3	توسعه فرهنگ ناب
۴	A4	ادغام مدیریت ناب در تصمیم‌های 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 تیم‌محور
۱۱	A11	توسعه مسیر شغلی و توانمندسازی مهارت‌های ناب کارکنان
۱۲	A12	ابتکار عمل و نوآوری در زمینه بهبود فرآیندهای ناب
۱۳	A13	توانایی پژوهش و حل مسئله
۱۴	A14	ارائه و روشن‌سازی تکالیف درست در جهت کاهش ضایعات
۱۵	A15	فرآیندهای کاری استاندارد
۱۶	A16	کاهش تحرکات اضافی کارکنان
۱۷	A17	ابزار مناسب برای اندازه‌گیری نتایج
۱۸	A18	انطباق و سازگاری نیروی انسانی
۱۹	A19	مدیریت مشارکتی و تقویت همکاری کارکنان
۲۰	A20	انعطاف‌پذیری منابع انسانی

1. Theoretical Saturation
2. Matlab
3. MICMAC

بر اساس عوامل ۲۰ گانه استخراج شده در (جدول ۲)، پرسشنامه ماتریس خودسازگار داخلی[1] طراحی گردید. این ابزار به‌منظور مقایسه زوجی عوامل از حیث اثرگذاری و اثرپذیری مورد استفاده قرار گرفت.

روایی و پایایی: به‌منظور 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 صاحب‌نظر رشته مدیریت دانشگاه هرمزگان قرار گرفت و پس از اعمال اصلاحات جزئی در عبارات، مورد تائید نهایی قرار گرفت. برای تعیین قابلیت اعتماد[2] 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	۴۵-۳۵	۸	۳۲
	۵۵-۴۵	۱۲	۴۸
	بیش از ۵۵ سال	۵	۲۰
تحصیلات	فوق‌دیپلم	۳	۱۲
	لیسانس	۱۵	۶۰
	فوق‌لیسانس	۷	۲۸

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

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، به‌عنوان مبنای تشکیل ماتریس دستیابی اولیه لحاظ گردید. ماتریس حاصل در (جدول ۴) ارائه شده است.

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	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
A2	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰
A3	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
A4	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
A5	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰
A6	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰
A7	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
A8	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
A9	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
A10	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
A11	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
A12	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
A13	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
A14	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱
A15	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱
A16	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱
A17	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱
A18	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
A19	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱
A20	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰

پس از تشکیل ماتریس دستیابی اولیه، به‌منظور اطمینان از برقراری روابط غیرمستقیم میان عوامل، ویژگی تعدی یا تسری[1] 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[2] (I) جمع شده و فرآیند توان‌رسانی 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.

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	۰	۱	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	۱	۰	۱	۰	۱	۶
A11	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۸
A12	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	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	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۸
A16	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	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	۱	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	۱	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	

پس از دستیابی به ماتریس نهایی، گام بعدی تکرار مرحله سطح‌بندی[1] 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 درنهایت مجموعه مشترک. طبق منطق مدل‌سازی ساختاری-تفسیری، متغیرهایی که مجموعه 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.

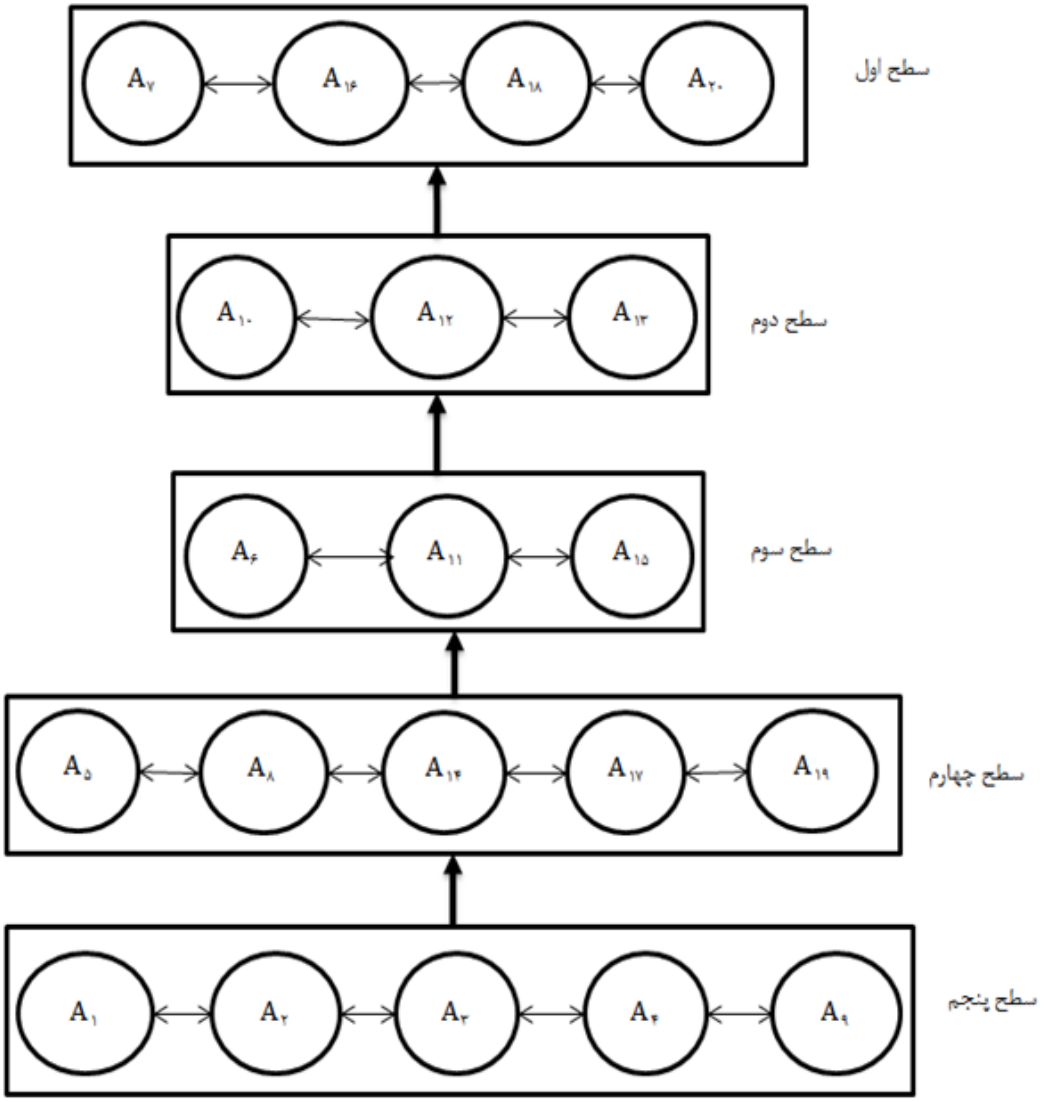
1. Level Partitioning

جدول ۶. سطح‌بندی متغیرهای تحقیق

متغیرها	مجموعه خروجی	مجموعه ورودی	مجموعه مشترک	سطح
A1	۱-۵-۶-۷-۸-۱۰-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۰	۱	A1	سطح پنجم
A2	۲-۶-۷-۱۱-۱۳-۱۵-۱۶-۱۸-۲۰	۲	A2	سطح پنجم
A3	۳-۵-۶-۷-۸-۱۰-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۰	۳	A3	سطح پنجم
A4	۴-۶-۷-۱۰-۱۱-۱۲-۱۳-۱۵-۱۶-۱۸-۲۰	۴	A4	سطح پنجم
A5	۵-۶-۷-۸-۱۰-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۰	۱-۳-۵-۸-۹-۱۴-۱۷-۱۹	A5-A8-A14-A17-A19	سطح چهارم
A6	۶-۷-۱۱-۱۳-۱۵-۱۶-۱۸-۲۰	۱-۲-۳-۴-۵-۶-۸-۹-۱۱-۱۴-۱۵-۱۷-۱۹	A6-A11-A15	سطح سوم
A7	۷	۱-۲-۳-۴-۵-۶-۷-۸-۹-۱۰-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۷	A7	سطح اول
A8	۵-۶-۷-۸-۱۰-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۰	۱-۳-۵-۸-۹-۱۴-۱۷-۱۹	A5-A8-A9-A14-A17-A19	سطح چهارم
A9	۵-۶-۷-۸-۹-۱۰-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۰	۹	A9	سطح پنجم
A10	۷-۱۰-۱۲-۱۶-۱۸-۲۰	۱-۳-۴-۵-۸-۹-۱۰-۱۲-۱۴-۱۷-۱۹	A10-A12	سطح دوم
A11	۶-۷-۱۱-۱۳-۱۵-۱۶-۱۸-۲۰	۱-۲-۳-۴-۶-۸-۹-۱۱-۱۴-۱۵-۱۷-۱۹	A6-A11-A15	سطح سوم
A12	۷-۱۰-۱۲-۱۶-۱۸-۲۰	۱-۳-۴-۵-۸-۹-۱۰-۱۲-۱۴-۱۷-۱۹	A10-A12	سطح دوم
A13	۷-۱۳	۱-۲-۳-۴-۵-۶-۸-۹-۱۱-۱۳-۱۴-۱۵-۱۷-۱۹	A13	سطح دوم
A14	۵-۶-۷-۸-۱۰-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۰	۱-۳-۵-۸-۹-۱۴-۱۷-۱۹	A5-A8 -A14-A17-A19	سطح چهارم
A15	۶-۷-۱۱-۱۳-۱۵-۱۶-۱۸-۲۰	۱-۲-۳-۴-۵-۶-۸-۹-۱۱-۱۴-۱۵-۱۷-۱۹	A6-A11-A15	سطح سوم
A16	۱۶-۱۸-۲۰	۱-۲-۳-۴-۵-۶-۸-۹-۱۰-۱۱-۱۲-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۰	A16-A18-A20	سطح اول
A17	۵-۶-۷-۸-۱۰-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۰	۱-۳-۵-۸-۹-۱۴-۱۷-۱۹	A5-A8-A14-A17-A19	سطح چهارم
A18	۱۶-۱۸-۲۰	۱-۲-۳-۴-۵-۶-۸-۹-۱۰-۱۱-۱۲-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۰	A16-A18-A20	سطح اول
A19	۵-۶-۷-۸-۱۰-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۰	۱-۳-۵-۸-۹-۱۴-۱۷-۱۹	A5-A8-A14-A17-A19	سطح چهارم
A20	۱۶-۱۸-۲۰	۱-۲-۳-۴-۵-۶-۸-۹-۱۰-۱۱-۱۲-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۰	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[1] 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

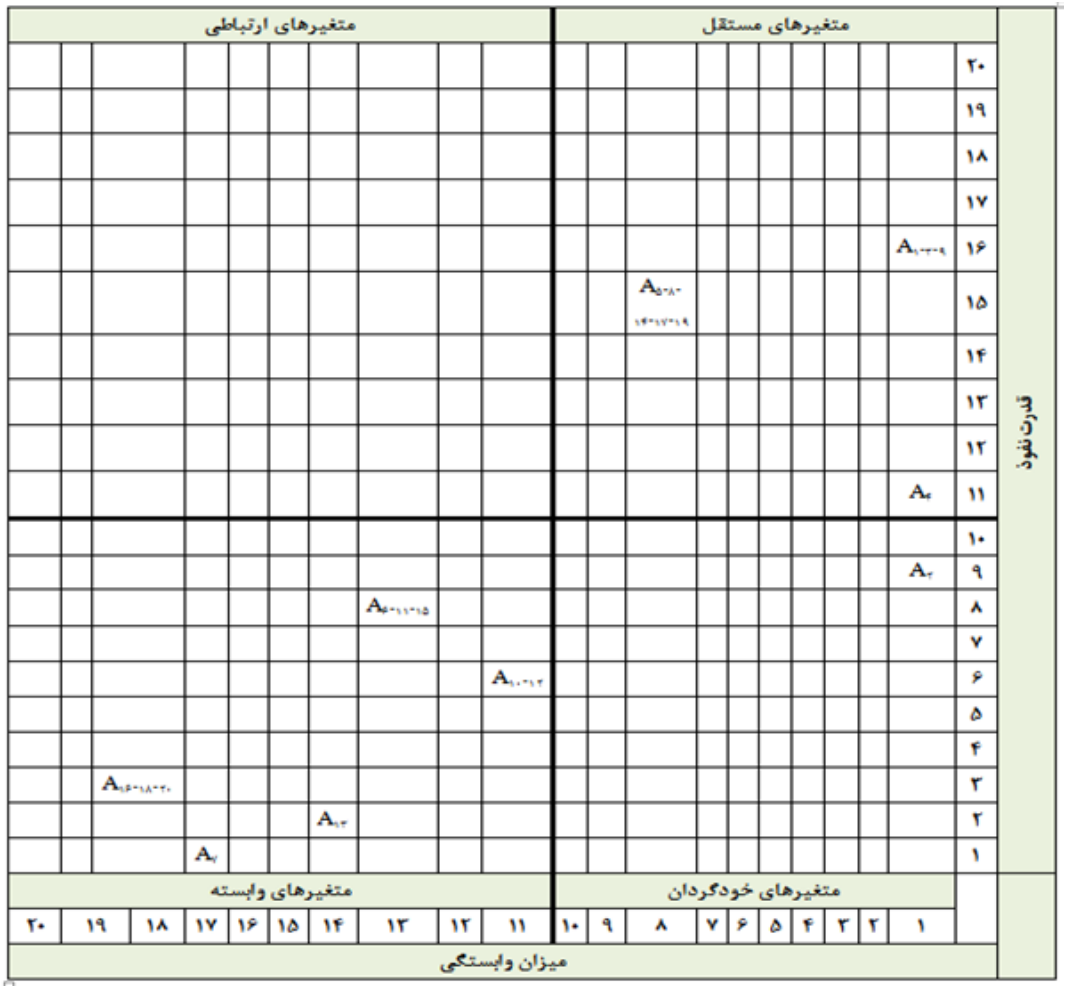


شکل ۱. مدل ISM برای عوامل مؤثر بر مدیریت منابع انسانی ناب در شرکت پالایش گاز سرخون و قشم

(شکل ۱) خروجی نهایی مدل‌سازی ساختاری-تفسیری پیشایندهای مدیریت منابع انسانی ناب را نشان می‌دهد. این مدل زنجیره علیِ 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[1] عمل می‌کنند. این بدان معناست که مدیران شرکت پالایش گاز سرخون و قشم برای استقرار موفق نظام ناب، نباید صرفاً بر ابزارهای 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 واسط یا انتقال‌دهنده را ایفا کرده و قدرت نفوذ لایه‌های زیرین را به لایه‌های عملیاتی منتقل می‌کنند. درنهایت، متغیرهای سطح اول (مانند انعطاف‌پذیری و تسهیل کار) قرار دارند که به‌عنوان نتایج و پیامدهای[2] نهایی سیستم تلقی می‌شوند. هرگونه ناپایداری در لایه‌های زیرین، به‌طور مستقیم بر کیفیت خروجی‌ها در سطح اول اثر منفی خواهد گذاشت.

1. Key Driving Factors
2. Outcomes



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

هدف از تجزیه‌وتحلیل میک‌مک (شکل ۲)، شناسایی و دسته‌بندی متغیرها بر اساس قدرت نفوذ[1] و میزان وابستگی[2] 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:

- اکثر متغیرهای ریشه‌ای (نظیر رهبری خدمتگزار (A1) باقدرت 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.

1. Driving Power
2. Dependence

بنابرایـن، بـرای پیاده‌سـازی موفـق ایـن الگـو، اولویـت اسـتراتژیک با متغیرهای مستقل اسـت که قدرت نفوذ بالایی در جهت‌دهی به سایر عوامل شناسایی‌شده در مدیریت منابع انسانی ناب دارند.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر باهدف شناسایی و سطح‌بندی پیشایندهای اسـتقرار «مدیریـت منابـع انسـانی نـاب» در شـرکت پالایش گاز سـرخون و قشـم بـه انجام رسـید. ضرورت ایـن مطالعه از آنجا ناشی می‌شـد که گذار به سـمت مدیریـت ناب در صنایع اسـتراتژیک، نیازمند شناسـایی دقیق اولویت‌ها و درک روابط متقابل میان متغیرهای متعدد سـازمانی اسـت. در این راستا، با اسـتفاده از رویکـرد آمیختـه (کیفی-کمی)، ابتـدا از طریق تحلیـل محتـوای ادبیـات تحقیـق و مصاحبه با خبـرگان، 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 مدل‌سـازی سـاختاری-تفسیری نشان داد کـه ۲۰ پیشـایند شناسایی‌شـده در ۵ سـطح تعامـلی قرار می‌گیرند. متغیرهای سـطح پنجم شـامل «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 ذهـنی رهبـران و فرهنگ‌سـازمانی غیرممکـن اسـت. در واقع، شـرکت پالایش گاز سرخون و قشم برای دستیابی به بهره‌وری، ابتدا باید زیرساخت‌های فکری و حمایتی را تقویت کند.

در لایه‌هـای میـانی (سـطوح ۲، ۳ و ۴)، متغیرهـایی نظیر سیسـتم کاری تیم‌محـور، پـاداش مبتـنی بـر عملکـرد ناب و توانمندسـازی کارکنان قرار دارند. این عوامـل نقش کاتالیزور را ایفا کرده و قدرت نفوذ لایه‌های ریشـه‌ای را به خروجی‌های عملیـاتی منتقـل می‌کننـد. درنهایـت، متغیرهای سـطح اول نظیـر «انعطاف‌پذیـری منابع انسـانی و تسـهیل کار» به‌عنوان پیامدهـای نهـایی مـدل ظاهر شـدند کـه نشـان‌دهنده ثمره استقرار نظام ناب در مدیریت منابع انسانی است.

تحلیل میک‌مک مکمل یافته‌های مدل ساختاری-تفسیری بود. اکثر متغیرهای سـطح پنجم در ناحیه متغیرهای مستقل قرار گرفتند که نشـان‌دهنده قـدرت هدایت بالای آن‌هاسـت؛ یعـنی هرگونه تغییر در این عوامل، کل سیسـتم را تحت تأثیر قـرار می‌دهد. نکته حائـز اهمیت از نگاه انتقـادی، 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 انسـانی ناب در شـرکت پالایش گاز سـرخون و قشـم نیسـت. این انسـجام درونی نشـان‌دهنده دقت در انتخاب شاخص‌ها و ماهیت یکپارچه مدیریت ناب است.

سـهم نظری این پژوهش در خـروج از نگاه «ابزارمحور» به مدیریـت ناب و جایگزینی آن با نگاه «انسـان‌محور» اسـت. از نگاه انتقادی، بسیاری از پروژه‌های بهبود در صنایع گاز به دلیل تمرکز صرف بر تکنیک‌های مهندسی و غفلت از پیشـایندهای انسـانی (مانند رهبری خدمتگزار) با شکسـت مواجه می‌شوند. این مدل ثابت می‌کند که «مدیریت منابع انسـانی ناب» پیش از آنکه یک سیستم فنی باشـد، یک فرهنگ‌سازمانی است که از لایه‌های زیرین (تفکر ناب) نشئت می‌گیرد.

۵-۱. پیشنهادهای کاربردی

بر اسـاس سطوح استخراج شـده از مدل، پیشنهادهای زیر جهت بهبود عملکرد شـرکت پالایش گاز سرخون و قشم ارائه می‌گردد:

۱. اولویت‌بخشـی به لایه ریشـه‌ای (سـطح ۵): پیشـنهاد می‌شـود مدیریـت ارشـد پالایشـگاه، دوره‌هـای آمـوزش «تفکر نـاب» را نـه به‌عنـوان یک ابـزار فنی، بلکـه به‌عنـوان یـک فلسـفه مدیریتـی بـرای رؤسـا و سرپرسـتان برگـزار نمایـد. تـا زمانـی کـه «رهبـری خدمتگـزار» در سـازمان نهادینه نشـود، ابزارهای ناب کارکـرد مؤثـری نخواهنـد داشـت.

۲. بازنگـری در فرآینـد اسـتعدادیابی: بـا توجـه بـه قرارگیـری «ادغـام مدیریـت نـاب در اسـتعدادیابی» در سـطح ریشـه‌ای، پیشـنهاد می‌گردد در کانون‌های ارزیابـی و مصاحبه‌هـای اسـتخدامی شـرکت گاز، شـاخص‌های «انعطاف‌پذیـری ذهنـی» و «گرایـش به بهبـود مسـتمر» به‌عنـوان پیش‌شـرط جـذب لحـاظ شوند.

۳. طراحـی سیسـتم پـاداش نـاب (سـطح ۳): به‌جـای پاداش‌هـای سـنتی، سیسـتمی طراحـی شـود کـه به «پیشـنهادهای کاهـش ضایعـات انسـانی» و «بهبـود فرآیندهـا» پـاداش تعلـق گیـرد تـا انگیـزه کارکنـان

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.

۵-۲. 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 (نسلZ) به بدنه صنعت گاز بر تغییر کدهای فرهنگی استخراج شده در این پژوهش.

۵-۳ 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[1] 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[2] 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

مراجع:

[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 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.

[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, Nawanir 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/

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

Volume 13 / Issue 1 / NO. 25 / Spring 2026 / Pages 37-52

Journal Homepage: https://ijge.irangi.org

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

Mohsen Safari[1], Zeinab Zarepour[1*], Ziba Salemi[2], Isa Bakhoda[3]

1. Strategic Management Research Group, Academic Center for Education Culture and Research of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
2. M.Sc., Department of Management, Faculty of Economics,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[1]، ابوالفضل کیان[2*]، بصیر ملکی[3]

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 دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳

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 می‌کنند 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 تجزیه‌وتحلیل 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 [۱۰-۵]. 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 مایکروسافت 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

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 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

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

۲. شبیه سازی و مدل‌سازی

به‌منظور شبیه‌سازی فرآیندجداسازی غشایی در نرم‌افزار Aspen Plus برای کلیه نمونه‌های غشایی از پیش‌ساخته شده پارامترهای جداسازی این غشاهای مانند تراوش پذیری و انتخاب پذیری به‌عنوان ورودی‌های اصلی شبیه‌سازی مورد بررسی قرارگرفته‌اند. 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 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

منحصر به فرد خواهد بود که به‌طور مناسب طراحی و برنامه‌ریزی می‌گردد. داده‌های ورودی تعریف شده و مقادیر آن‌ها در محیط ماژول 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 ، p_p و GPU 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:

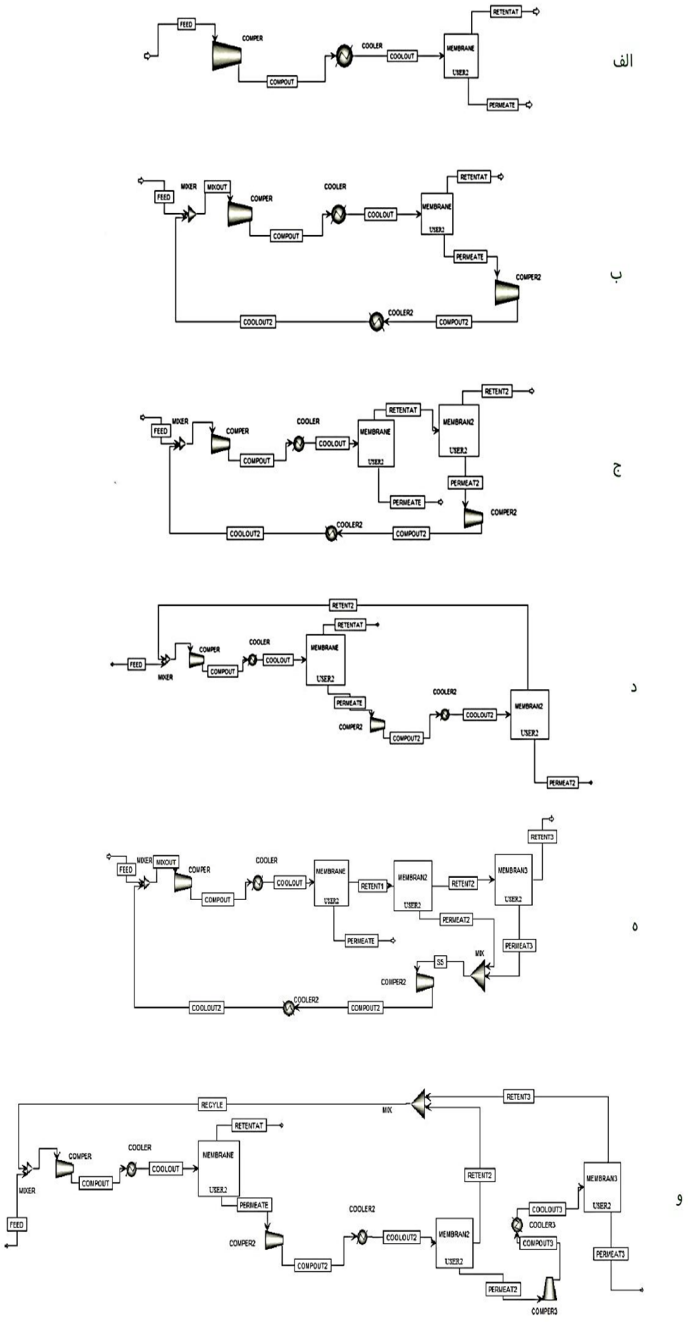
$$\left(\frac{p_p}{p_f} - \alpha(p_p - p_f)\right)y^2 + \left(1 - x + \alpha x - \frac{p_p}{p_f} + \alpha(p_p - p_f)\right)y - \alpha x = 0 \quad (۴)$$

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

$$J_{total} = nJ_{single} \quad (۵)$$

که در آن J_{total} شار کل ماژول‌های به‌کارگیری شده هست و J_{single} شار عبوری از یک ماژول می‌باشد و n تعداد ماژول می‌باشد. طراحی سیستم فرآیند غشایی عمدتاً براساس پارامترهای هر ماژول 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، تصمیم گرفتیم شش پیکربندی مختلف از سیستم‌های غشایی مشابه کار احمد و همکارانش با هایسیس[۱۸] در اسپن پلاس شبیه‌سازی شده‌اند: تک‌مرحله‌ای[۲](SiS)، تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراویده [۳](SiSRP)، دومرحله‌ای با بازیافت تراویده[۴](DoSRP) ، دومرحله‌ای 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

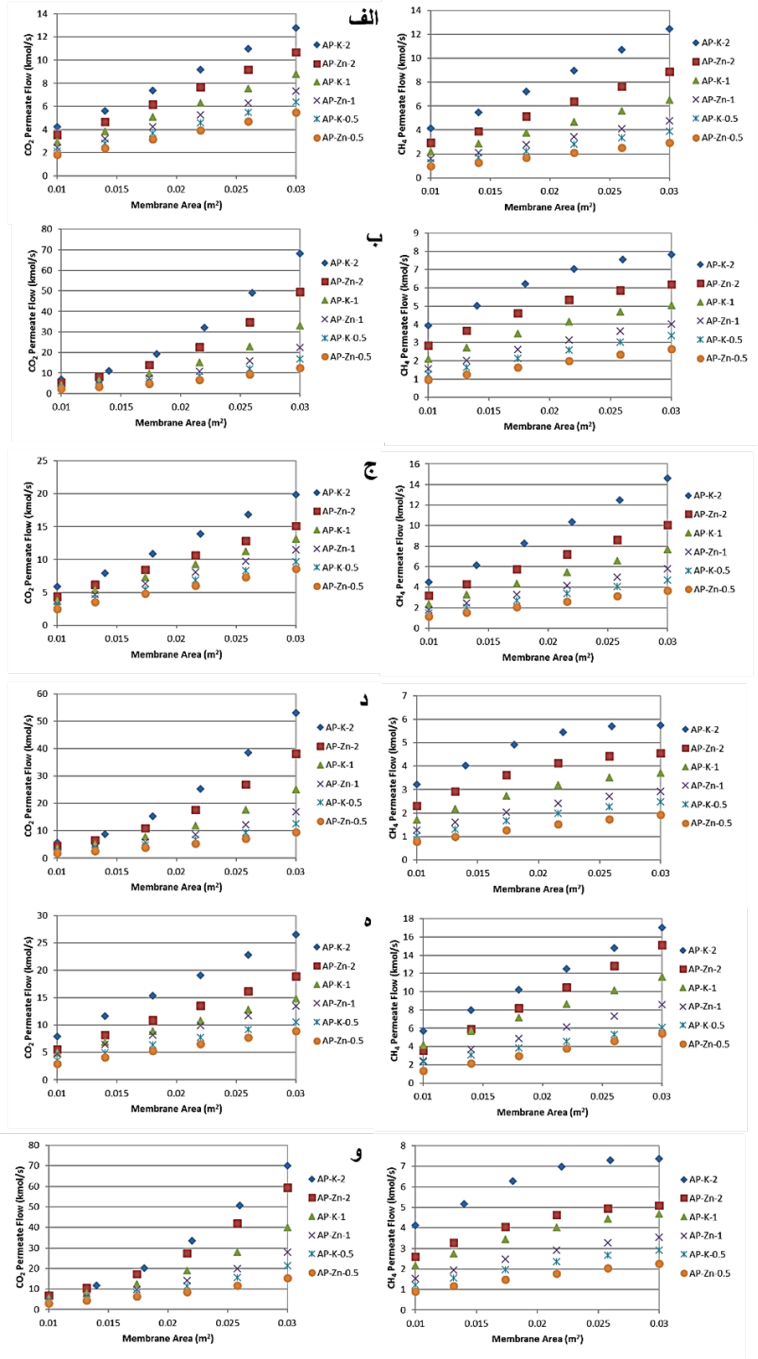


شکل ۱. جریان فرآیند الف) سیستم جداسازی غشایی تک‌مرحله‌ای(SiS) ب) سیستم جداسازی غشایی تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا (SiSRP) ج) سیستم جداسازی غشایی دومرحله‌ای با بازیافت تراوا (DoSRP) د) سیستم جداسازی غشایی دومرحله‌ای با بازیافت پسماند (DoSRR) هـ) سیستم جداسازی غشایی سه مرحله‌ای با بازیافت تراوا (TrSRP)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

۳. بررسی تأثیر پارامترهای شبیه‌سازی بر فرآیندهای

۳-۱. تأثیر مساحت غشاء و تعداد ماژول بر نرخ نفوذ جریان

پیکربندی‌های مختلف سیستم غشایی شبیه‌سازی‌شده کربن‌دی اکسید و متان (سیستم جداسازی غشایی تک‌مرحله‌ای، سیستم جداسازی غشایی تک‌مرحله‌ای با 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.



شکل ۲. اثر شبیه‌سازی‌شده سطح غشاء بر روی نرخ جریان تراوای دی‌اکسید کربن و متان در الف) سیستم تک‌مرحله‌ای ب) سیستم تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا ج) سیستم دومرحله‌ای 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

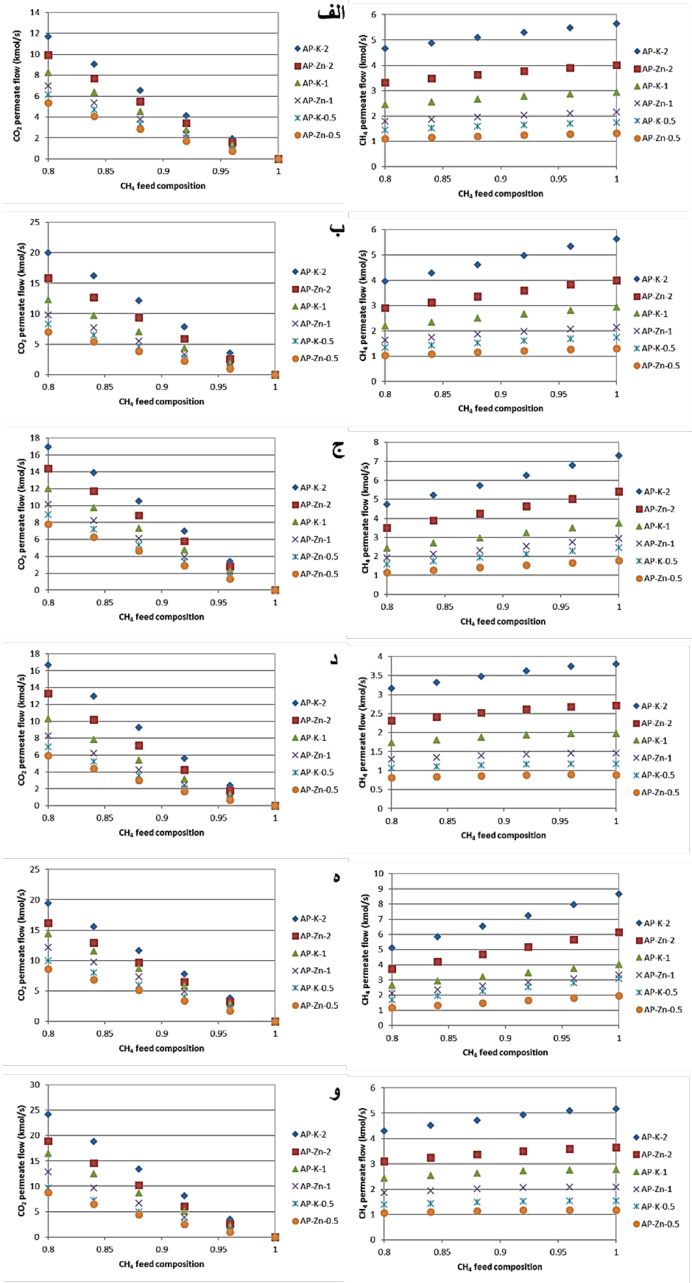
همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌کنید جریان تراوای کربن دی‌اکسید در سیستم‌های غشایی تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا و همچنین در سیستم‌های دو و سه‌مرحله‌ای با بازیافت پسماند، در سطح‌های غشایی بزرگ به‌طور قابل‌توجهی از جریان در سیستم‌های جداسازی غشایی تک‌مرحله‌ای و از جریان در سیستم‌های دو- و سه‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا بالاتر است؛ این تفاوت برای گاز متان مشاهده نمی‌شود. دلیل این امر به تغییرات در نرخ جریان خوراک ورودی به غشا بازمی‌گردد. در تنظیمات تک‌مرحله‌ای با بازیافت تراوا و دو- و سه‌مرحله‌ای با بازیافت پسماند، درصدی قابل‌توجه از جریان خروجی به خوراک برگشت داده می‌شود. بنابراین بخشی از خوراک، قبل از ورود به غشا، تصفیه‌شده‌تر است و محتوای CO_2 در جریان تراوا افزایش می‌یابد. برای متان، از آنجا که مقدار زیادی از جریان بازیافتی از گاز متان تخلیه

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- و سه‌مرحله‌ای 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- و سه‌مرحله‌ای با بازیافت پسماند سطح بالاتری از غشاهای ماتریس آمیخته با تراوایی بالاتر گازها را در بر می‌گیرند. این به 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.

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

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



شکل ۳. اثر ترکیب خوراک غشایی شبیه‌سازی‌شده 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 هـ) 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، نشئت 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 ۰/۱۲۵ m^2) و تعداد ماژول‌ها محدود باشد (مثلاً ۱,۰۰۰,۰۰۰)، 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.

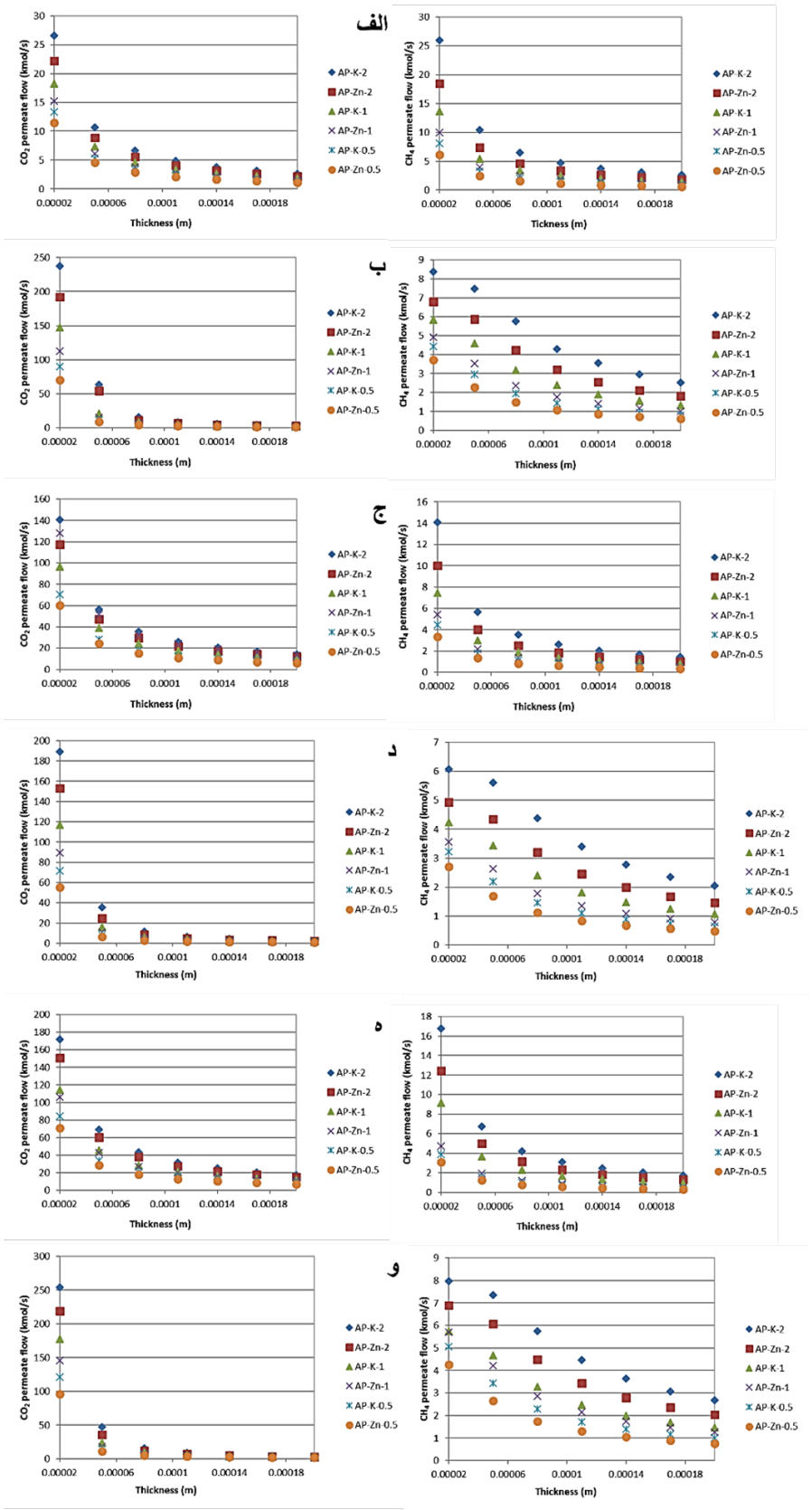
(شکل ۳) نشان می‌دهد که با محتوای بالای متان در خوراک، غشای ماتریس‌آمیخته با تراوایی بالاتر و انتخاب‌پذیری CO_2/CH_4 پایین‌تر، در کل رفتار بهتری از نظر جداسازی دارد. به‌طورکلی، بالاترین نرخ تراوای CH_4 در تمام پیکربندی‌ها به نمونه‌ای با بالاترین تراوایی CO_2 و CH_4 و کمترین انتخاب‌پذیری CO_2/CH_4 تعلق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

۳-۳. تأثیر ضخامت غشا بر نرخ جریان تراوا

تأثیر ضخامت غشا بر نرخ جریان تراویده کربن‌دی اکسید و متان در پیکربندی‌های شش‌گانه سیستم غشایی شبیه‌سازی شده در (شکل ۴ الف- و)، برای همه غشاهای ماتریس آمیخته 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 استفاده شونده در هر ماژول غشایی در عین حفظ یکپارچگی مورفولوژیکی.
۲. به‌کارگیری بازیافت تراویده یا پسماند در سیستم جداسازی غشا.



شکل ۴. اثر شبیه‌سازی‌شده ضخامت غشاء 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

۴. مدل‌سازی فرآیندی و ارزیابی اقتصادی

مکانیسم حلالیت-نفوذ که مدلی تثبیت‌شده و به‌طور گسترده قابل اعتماد برای تعریف تراوایی از درون غشاء است، به‌عنوان پایه و اساس مدل‌سازی در این مطالعه در نظر گرفته شد. گرچه این مدل برای غشاهای ماتریس آمیخته با اصلاحاتی در کارهای برخی محققین دیده می‌شود اما در کار ما چون درصد وزنی کربن فعال در ماتریس پلیمر ناچیز می‌باشد مکانیزم عمده انتقال که همان حلالیت-نفوذ می‌باشد، برای ساده‌تر سازی فرآیند ارزیابی فنی و اقتصادی، در نظر گرفته می‌شود.

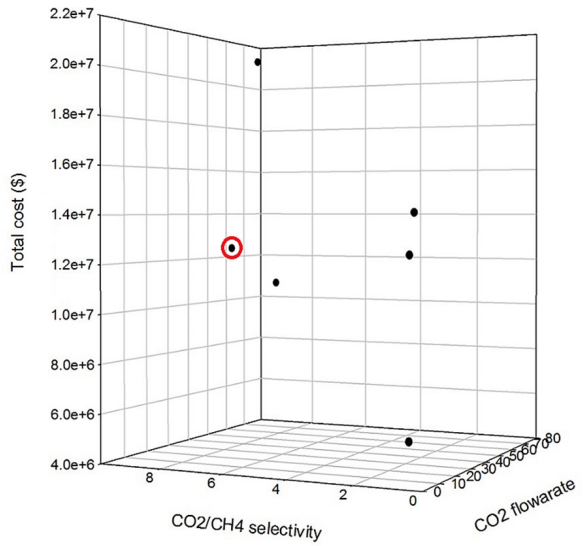
پیکربندی مناسب سیستم غشایی برای جداسازی واقعی کربن‌دی اکسید از متان نیازمند بروز خلوص بالا و در عین حال بازیابی بالا برای گاز پرتراواتر است؛ یعنی در کار ما علاوه بر اینکه در محصول گازی نهایی خلوص دی اکسید کربن باید بالا باشد، باید درصدی بالایی از دی‌اکسید کربن خوراک در محصول نهایی ظاهر شود. برای رسیدن به هر دو معیار عملکرد برای سیستم جداسازی، فرآیندهای غشایی چندمرحله‌ای همراه با یا بدون بازیافت تراویده یا پسماند به‌طور متعدد گزارش شده‌اند که در آن‌ها اکثر ماژول‌ها از نوع فیبر توخالی و نه تخت به‌منظور دستیابی به سطح جداسازی بالاتر بودند. ما در این کار با توجه به اینکه در بخش قبلی شبیه‌سازی فرآیند را انجام داده و عملکرد جداسازی شش پیکربندی متفاوت را از جهات مختلف با یکدیگر مقایسه کردیم، می‌توانیم برای بررسی بهترین پیکربندی از شبیه‌سازی که خودمان انجام دادیم بهره‌گیری نماییم. بدین منظور عملکرد فنی پیکربندی بر اساس صرفه اقتصادی آن تعیین می‌شود و بر اساس آن تصمیم‌گیری می‌شود که کدام نوع پیکربندی برای محاسبات فنی و اقتصادی با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

برای بررسی دقیق‌تر اقتصادی یک پیکربندی جداسازی گاز غشایی، از بخش ارزیابی اقتصادی نرم‌افزارAspen Plus ورژن ۱۰ کمک گرفته شد. برای این منظور شش پیکربندی متفاوتی که در شبیه‌سازی فرآیند، آنالیز حساسیت در مورد آن‌ها در Aspen Plus انجام شد، مورد ارزیابی اقتصادی قرار گرفتند. هدف از این کار تخمین سریع و سرانگشتی هزینه‌های ثابت و عملیاتی فرآیند می‌باشد که از طریق آن بتوان سیستم بهینه را انتخاب نمود. برای این منظور در نرم‌افزار Aspen plus بعد از اجرا شدن شبیه‌سازی، تیک Economic Active زده می‌شود و سپس از قسمت Mapping می‌توان Evaluate Cost را انتخاب کرد. سپس وارد پنجره‌ای می‌شویم که باید نوع تجهیزاتی که در شبیه‌سازی استفاده‌شده‌اند را معین کنیم. ما برای کمپرسورها، نوع سانتریفیوژی افقی را انتخاب کرده و برای کولرها، مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله را انتخاب کردیم. چون ماژول غشایی در Aspen Plus تعریف نشده است تخمین قیمت آن را به‌صورت سرانگشتی از ضرب تعداد ماژول در سطح غشا در قیمت واحد یک ماژول غشایی در نظر گرفتیم. از قیمت سایر اجزا و لوله‌کشی و یوتیلیتی و غیره به دلیل اینکه در مقایسه با هزینه تجهیزات اصلی ناچیز بودند صرف‌نظر شد. سپس بهترین نمونه غشایی از لحاظ عملکرد جداسازی انتخاب گردید و عملکرد کل جداسازی پیکربندی‌های شش‌گانه 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 هزینه‌های ثابت، هزینه‌های عملیاتی، هزینه کل و همچنین دبی تراویده CO_2 و انتخاب پذیری پیکربندی‌های مختلف شبیه‌سازی شده محیط در Aspen Plus

پیکربندی غشایی	هزینه ثابت($)	هزینه عملیاتی($)	مجموع هزینه‌ها($)	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

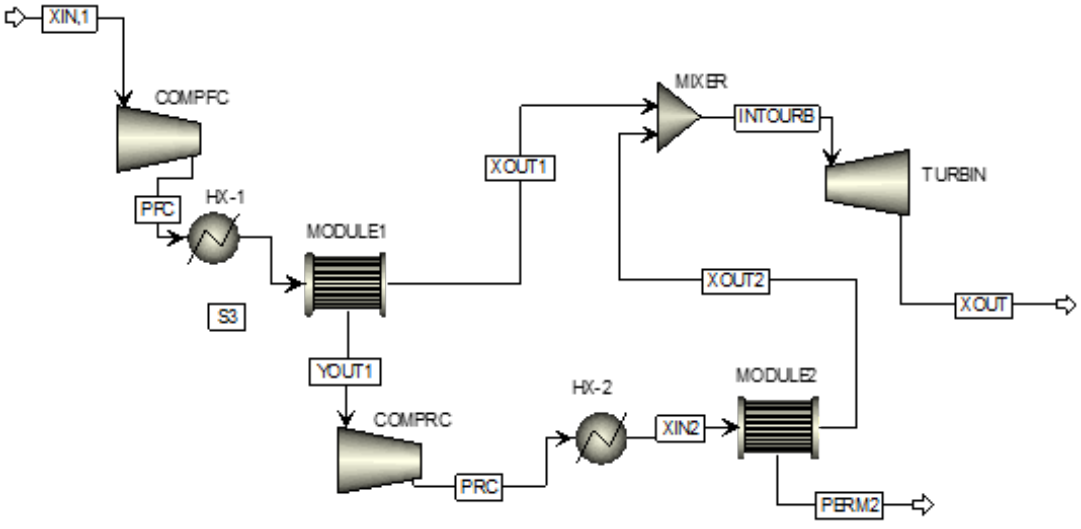
به‌منظور به‌دست آوردن پیکربندی بهینه جهت مطالعه برای محاسبات دقیق‌تر اقتصادی هزینه کل برحسب دبی تراویده و انتخاب پذیری در نمودار سه‌بعدی رسم گردید که در شکل (۵) آورده شده است.



شکل ۵. هزینه کل پیکربندی های شش‌گانه جداسازی غشایی برحسب دبی عبوری CO_2 و انتخاب پذیری CO_2/CH_4

همان‌طور که در (شکل ۵) دیده می‌شود، نقطه‌ای که دور آن دایره قرمز کشیده شده است به‌عنوان پیکربندی بهینه انتخاب شده است که مربوط به پیکربندی DoSRR می‌باشد. عامل اصلی انتخاب این گزینه به‌عنوان پیکربندی بهینه هزینه کل در مقایسه با عملکرد بوده است. اگر دقت کنید نقطه بالای نمودار که متعلق به پیکربندی TrSRR می‌باشد عملکرد جداسازی بهتری از نمونه DoSRR دارد اما هزینه تمام‌شده آن نزدیک به دو برابر می‌باشد در صورتی‌که بهبود عملکرد جداسازی آن چندان قابل‌توجه نیست. از طرفی اختلاف هزینه DoSRR با SISRP قابل‌توجه نیست اما عملکرد جداسازی DoSRR نسبتاً بهتر می‌باشد. البته ممکن است SISRP هم پیکربندی جذابی باشد اما ما به علت عملکرد بهتر DOSRR در مقایسه با هزینه نه‌چندان بیشتر آن، این پیکربندی را به‌عنوان پیکربندی بهینه انتخاب کردیم.

(شکل ۶) نشان‌دهنده شماتیک پیکربندی دومرحله‌ای می‌باشد که تحت بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است قسمتی از پسماند برای راه‌اندازی توربین به کار می‌رود تا قسمتی از کار مورد نیاز کمپرسورها را تامین نماید.



شکل ۶. شماتیک پیکربندی جداسازی غشا دومرحله‌ای 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:

$$F_{in,2} = \dot{V}_{out,1} \quad (۶)$$

$$x_{CO_2 in,2} = y_{CO_2 out,1} \quad (۷)$$

$$x_{CH_4 in,2} = y_{CH_4 out,1} \quad (۸)$$

که در آن $F_{in,2}$ دبی ورودی به مرحله دوم (m^3 STP/h)، $\dot{V}_{out,1}$ دبی تراویده خروجی از مرحله اول (m^3 STP/h)، $x_{CO_2 in,2}$ ترکیب درصد کربن دی‌اکسید ورودی به مرحله دوم، $y_{CO_2 out,1}$ ترکیب درصد کربن دی‌اکسید تراویده از مرحله اول، $x_{CH_4 in,2}$ ترکیب درصد متان ورودی به مرحله دوم، و $y_{CH_4 out,1}$ 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 به‌کل سیستم تعمیم دهیم. پارامتر عملکرد برای تک ماژول به شرح زیر است:

$$purity_{CO_2} = y_{CO_2 out2} \times 100 \quad (۹)$$

$$Recovery_{CO2} = \frac{\dot{V}_{out2} \times y_{CO_2 out2}}{F_{in1} \times x_{CO_2 in1}} \times 100 \quad (۱۰)$$

$$Purity_{CH_4} = \frac{F_{out1} x_{CH_4 out1} + F_{out2} x_{CH_4 out2}}{F_{out1} + F_{out2}} \times 100 \quad (۱۱)$$

$$Recovery_{CH_4} = \frac{F_{out1} x_{CH_4 out1} + F_{out2} x_{CH_4 out2}}{F_{in1} x_{CH_4 in1}} \times 100 \quad (۱۲)$$

$$I_{GP} = purity_{CO_2} + Recovery_{CO_2} + purity_{CH_4} + Recovery_{CH_4} \quad (۱۳)$$

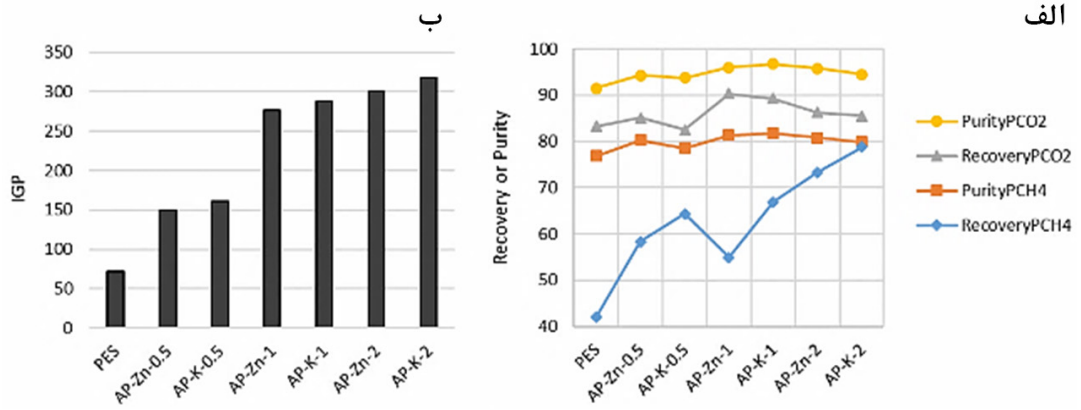
که در آن‌ها $\dot{V}$ دبی تراویده (m^3 STP/h)، y و x به ترتیب ترکیب درصدهای سمت تراویده و پسماند (خوراک)، F دبی خوراک (m^3 STP/h) می‌باشند. زیروندهای out و in به ترتیب خروجی یا ورودی بودن جریان را مشخص می‌کنند. CH_4 و CO_2 نشان‌دهنده محتوای ترکیب درصد می‌باشند، و شماره ۱ و ۲ به ترتیب نشان‌دهنده مرحله 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[1] 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 گرفته‌شده‌اند و روابط ریاضی مربوط به محاسبه این هزینه‌ها در نرم‌افزار Matlab واردشده‌اند و به ازای هر غشای قرار گرفته در ماژول‌های غشایی محاسبات قابل انجام و هزینه‌های قابل‌خروجی گیری هستند.

۴-۱. خلوص و بازیابی کربن‌دی اکسید 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.



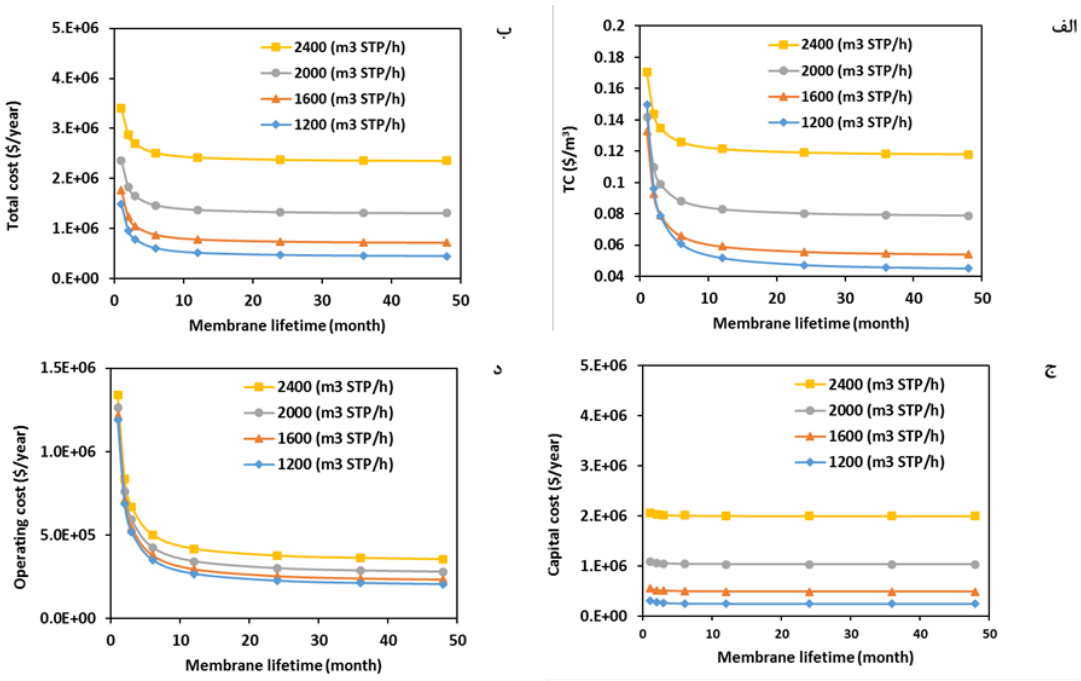
شکل ۷. الف) خلوص و بازیابی کلی کربن-دی اکسید و متان محاسبه شده و ب) شاخص عملکرد جهانی برای همه غشاها

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

از (شکل ۷ الف) می‌توان استنباط کرد که با کاهش تراوایی غشاها، بازیابی کربن‌دی اکسید به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. از آنجایی‌که خوراک عمدتاً متان است و تراوایی گاز غشاها نسبتاً کم است، بازیافت کربن‌دی اکسید بیشترین آسیب را می‌بینند. تغییرات بازیابی متان خفیف است و این به این دلیل است که تراوایی کم غشاء برای این گاز نمی‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر نرخ جریان بسیار بالای متان پسماند در هر مرحله تأثیر بگذارد. بازیابی کم کربن‌دی اکسید منجر به خلوص پایین متان در خروجی جریان پسماند شده شد، با این حال، خلوص کربن‌دی اکسید از ۱۵ درصد به بیش از ۹۶ درصد برای اکثر غشاهای مدل شده افزایش می‌یابد. فاکتورهای شاخص عملکرد جهانی، عملکرد غشا را در یک فرآیند دومرحله‌ای بهتر نشان می‌دهند (شکل ۷.ب). مقدار فاکتور شاخص عملکرد جهانی ایده‌آل ۴۰۰ است و نمونه‌های دارای بالاترین میزان کربن فعال، نزدیک‌ترین مقادیر شاخص عملکرد جهانی را به این عدد در مقایسه با سایرین دارند. فاکتور شاخص عملکرد جهانی برای غشاهای پلی اتر سولفون خالص به‌طور قابل‌توجهی کمتر از غشاهای AC/PES است. افزایش تراوایی و انتخاب پذیری کربن‌دی اکسید /متان غشاها به دلیل اختلاط کربن فعال نه‌تنها خواص جداسازی غشاء پلی اتر سولفون را بهبود می‌دهد، بلکه عملکرد جداسازی کل پیکربندی سیستم پیشنهادی را نیز بهبود می‌دهد. تفاوتی بین شاخص عملکرد جهانی غشاهای AP-K و غشاهای AP-Zn وجود دارد که از نتایج تست‌های تراوایی شدیدتر می‌باشد. این نشان می‌دهد که با افزایش مراحل جداسازی، تفاوت بین عملکرد غشاهای شبیه‌سازی‌شده در سیستم جداسازی غشایی افزایش می‌یابد زیرا جریان تراوا تا حدی خالص‌شده به‌عنوان خوراک مرحله دو استفاده می‌شود و این منجر به مشاهده تفاوت عملکرد جداسازی بزرگ‌تر در شبیه‌سازی بین غشاها می‌شود که تفاوت ملایم‌تری را در عملکرد جداسازی در آزمایش‌ها نشان می‌دهد.

۴-۲. کل هزینه‌ها، هزینه‌های سرمایه و هزینه‌های 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 نرخ‌های جریان مختلف در (شکل ۸ الف-د) ارائه شده است



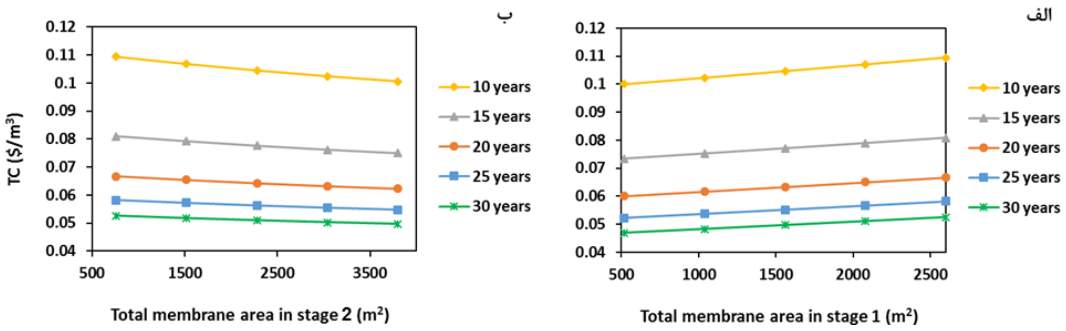
شکل ۸. الف) TC، ب) هزینه کل، ج) هزینه سرمایه‌گذاری و د) هزینه کل عملیاتی برحسب طول عمر غشا در دبی‌های مختلف

در هر چهار بخش این شکل، با افزایش میانگین طول عمر غشا، کل هزینه‌ها به ازای واحد حجم جریان، هزینه‌های کل، هزینه‌های سرمایه و هزینه‌های عملیاتی در نرخ‌های مختلف جریان کاهش می‌یابد. طول عمر غشاء زیر ۶ ماه باعث افزایش قابل‌توجهی در هزینه کل سیستم می‌شود. از این رو هنگام 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 به‌راحتی می‌تواند طراحی جذاب اقتصادی را از بین ببرد و یک فرآیند با صرفه اقتصادی را غیراقتصادی کند. طول عمر غشا به‌طور

مستقیم بر هزینه‌های جایگزینی غشا (MRC) تأثیر می‌گذارد که درصد قابل‌توجهی از هزینه عملیاتی (OC) سیستم در طول عمر کم غشاء است. به‌عنوان‌مثال 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. هنگامی‌که 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 قابل‌مشاهده است. کمترین مقدار TC مربوط به $m^3(STP)/h$ F = ۱۰۰۰ در طول عمر غشاء زیر ۶ ماه است، اما پس از ۶ ماه کمترین مقدار TC مربوط به $m^3(STP)/h$ F = ۱۲۰۰ 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

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، درنتیجه هزینه‌های ترکیبی غشاها، مبدل‌های حرارتی و کمپرسورها بر هزینه‌های توربین غالب است، از این رو شاهد افزایش TC با مساحت سطح غشا هستیم. در 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 فلوچارت 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.



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

۴. نتیجه‌گیری

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 CO_2 و CH_4 بررسی شد و نتایج نشان داد که سیستم‌های چندمرحله‌ای با بازیافت تراوا و پسماند به‌ویژه در جداسازی CO_2 عملکرد بهتری دارند هرچند این برتری در جداسازی CH_4 همواره مشهود نیست، با افزایش سهم متان در خوراک، تراوای CO_2 کاهش و تراوای CH_4 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 ماتریس‌آمیخته موجب کاهش تراوایی CO_2 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 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 قابل‌بررسی 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 CO_2 separation from CH_4. Chemosphere. 2022;299:134224.

[2]. Osman AI, Nasr M, Farghali M, Bakr SS,

[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 CO_2 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. CO_2 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 CO_2 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 CO_2/CH_4 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 CO_2 and CH_4 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 CO_2 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.

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

Volume 13 / Issue 1 / NO. 25 / Spring 2026 / Pages 53-70

Journal Homepage: https://ijge.irangi.org

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

Saeid Khademi[1], Abolfazl Kian[2*], Basir Maleki[3]

1. M.Sc. Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Materials Engineering, Es-farayen 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 CO_2 separation from CH_4 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: a.jomekian@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[1]، فرانک اخلاقیان طاب[2*]

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

مقاله‌ی علمی-پژوهشی

صفحه ۷۰ - ۸۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

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 ۰/۰۰۰۱ 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 عمده‌ترین 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[1] (MTH) قدم مهمی در تبدیلات گاز طبیعی است و تبدیل متانول به آروماتیک‌ها[2] (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 گزینش‌پذیری 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-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 به‌دست می‌آیند، درحالی‌که آروماتیک‌های سبک (بنزن، تولوئن و زایلن[1] 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[2] و همکاران (۲۰۰۲)، کاتالیست‌های HZSM5 و β-Ga_2O_3/HZSM5 را در واکنش MTA به‌کار 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-Ga_2O_3/HZSM5 با افزایش سرعت جریان متانول، مقدار آروماتیک‌ها کاهش یافته است[۱۲]. وانگ[3] 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 و بازده در ۶۰۰ °C کاهش یافت، همچنین آنها متوجه شدند که بازده تولید هیدروکربن‌های آروماتیکی سبک با افزایش سرعت جریان متانول، به‌علت تشکیل پلی متیل بنزن‌ها کاهش یافته است[۱۳]. لی[4] و همکاران (۲۰۱۹) کاتالیست 2.0 wt.% P و 1.0 wt.% ZnO نشانده شده بر روی HZSM5 را در واکنش MTA به‌کار 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]. چوتیوان[5] و همکاران (۲۰۱۹) HZSM5 را به‌وسیله خاکستر سبوس برنج اصلاح کردند و آن را در تولید هیدروکربن‌ها از متانول به‌کار بردند. نتایج چوتیوان و همکاران (۲۰۱۹) افزایش در تولید آروماتیک‌ها، اما کاهش در اسیدیته کاتالیست با افزایش مقدار خاکستر برنج را نشان داد[۱۵]. شائو[6] و همکاران (۲۰۲۰) یک فرآیند دومرحله‌ای را به‌کار بردند؛ ابتدا در یک بسترکاتالیستی 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 به‌صورت تجربی و تک عاملی بررسی‌شده‌اند. در هیچ‌کدام 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 قابل‌اعتماد 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. Wamg
4. Li
5. Chotiwan
6. Shao

این مطالعه، با هدف بهبود در تولید آروماتیک‌های سبک (بنزن، تولوئن، زایلن 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[1] و همکاران	۲۰۲۴	نانو ورقه ZSM5 تقویت شده با Zn و Ni	[۱۷]
۲	ژو ونگ[2] و همکاران	۲۰۲۴	نانوکریستال هسته-پوسته ZSM5@Zn/ZSM5	[۱۸]
۳	ام ونگ[3] و همکاران	۲۰۲۴	MOxZn/HZSM5	[۱۹]
۴	کیو زو[4] و همکاران	۲۰۲۵	زئولیت HZSM5 که اندازه حفرات آن مهندسی شده	[۲۰]
۵	وای ونگ و همکاران	۲۰۲۵	زئولیت ZSM5 توخالی تقویت شده با Zr و Fe	[۲۱]
۶	وای گیو[5] و همکاران	۲۰۲۵	ZSM5 با توزیع منطقه‌ای Al معکوس	[۲۲]
۷	وای زو[6] 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[7] و همکاران	۲۰۲۶	اختلاط ایزومرهای Ga_2O_3 با HZSM5	[۲۵]

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مواد

بنزن (C_6H_6)، تولوئن (C_7H_8)، زایلن (C_8H_{10})، ۱ و ۲-۴ تری متیل بنزن (C_9H_{12})، ۱ ، ۲ و ۴-۵ تترا متیل بنزن ($C_{10}H_{14}$)، نفتالین ($C_{10}H_8$)، استن (C_3H_6O) و متانول (CH_3OH) همگی از شرکت مرک[8] خریداری شده و استفاده شدند. کربید سیلیکون (SiC) از سیگما-آلدریچ[9]، زئولیت HZSM5 با نسبت‌های Si/Al برابر با ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ از شرکت زئوکیم[10] و گاز نیتروژن با خلوص ۹۹/۹۹ درصد از شرکت فرافن گاز مورد استفاده قرار گرفتند.

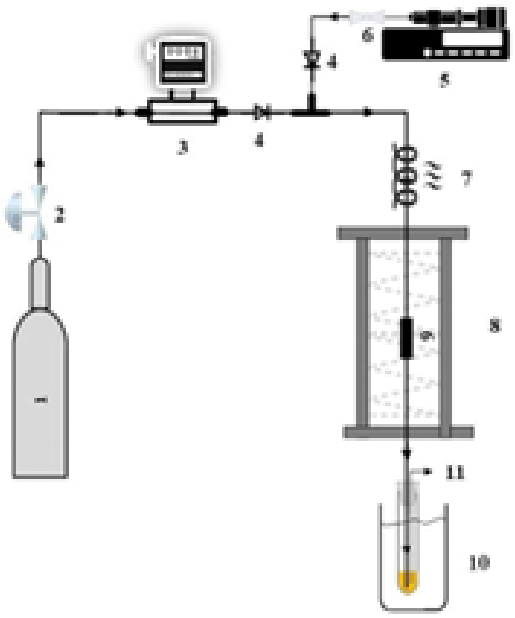
۲-۲. دستگاه‌های مورد استفاده در تعیین مشخصات

دستگاه پراش پرتوایکس Philips X'pert برای بررسی ساختار کریستالی زئولیت HZSM5 به‌کاربرده شد. الگوهای پراش پرتوایکس از ۱۰ تا ۸۰° با تابش آند Cu kα (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 NH_3-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

۲-۳. واکنش کاتالیستی MTA

شماتیک سامانه مورد استفاده در (شکل ۱) نشان داده شده است. کنترل‌کننده 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 به‌عنوان 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_1-C_5) از کندانسور خارج شدند. مقداری از محصول مایع به‌عنوان نمونه به دستگاه کروماتوگراف گازی برای تجزیه و تعیین ترکیب درصد تزریق شد.



شکل ۱. شماتیک سامانه مورد استفاده؛ ۱-کپسول گاز نیتروژن، ۲- رگلاتور گاز، ۳- کنترل‌کننده شدت جریان گاز، ۴- شیر یک‌طرفه، ۵- پمپ سرنگی، ۶- شیر سوزنی، ۷- پیش گرم‌کننده، ۸- کوره، ۹- راکتور، ۱۰- سیستم کندانسور، ۱۱- به‌سمت تخلیه

۲-۴. تجزیه محصول

دستگاه کروماتوگراف گازی (مدل GC-2552 TG طیف گسترفراز) مجهز به آشکارساز یونی شعله و ستون کروماتوگرافی Suprawax-280 (طول ۳۰ m، قطر ۰/۲۵ m، ضخامت ۰/۲۵ µm) برای تجزیه و تعیین ترکیب درصد محصولات آروماتیکی به‌کاربرده شد. گاز هیدروژن توسط دستگاه هیدروژنایزر تولید شده و به‌عنوان گاز حامل به‌کاربرده شد. ستون کروماتوگرافی به مدت min ۳۰ 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 به‌تدریج تا دمای اطاق سرد شد.

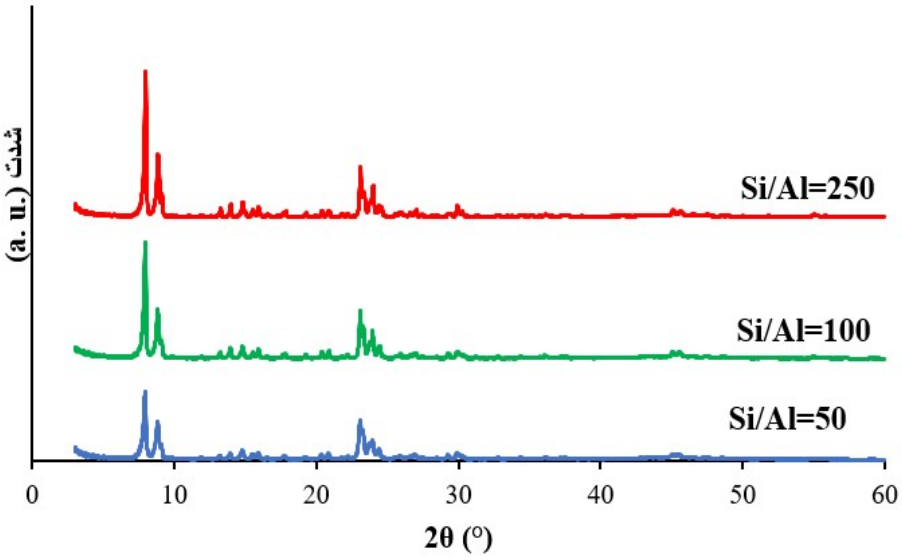
خطوط کالیبراسیون به‌وسیله به‌کاربردن محلول‌هایی با غلظت معین از اجزاء محصول مایع به‌دست آمدند. محصول مایع دوفازی (شامل لایه هیدروکربنی و لایه آبی) به‌وسیله اضافه کردن استن تک فازی شدند و مقداری از آن به دستگاه کروماتوگراف گازی تزریق شد. ترکیب درصد اجزاء محصول مایع با کمک، خطوط کالیبراسیون به دست آمدند.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. تعیین مشخصات کاتالیست

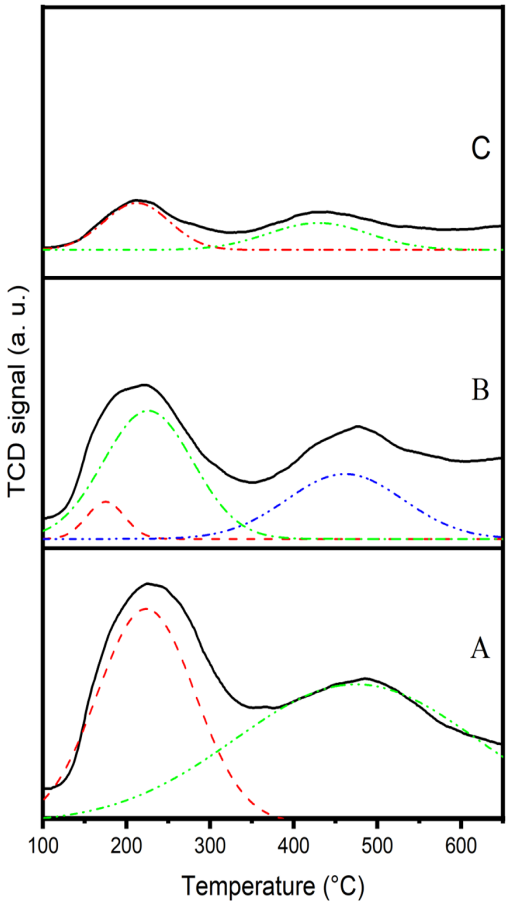
(شکل ۲)، الگوهای XRD زئولیت‌های HZSM5 را نشان می‌دهند. تیزترین پیک‌های HZSM5 در ۷/۹ و ۸/۸۱ ° برای HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۵۰، در ۷/۹۲ و ۸/۸۴ ° برای HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۱۰۰ و در ۷/۹۶ و ۸/۸۴ ° برای HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۲۵۰ مشاهده شد (JCPDS File No. 00-042-0024) [۲۷]. الگوهای پراش 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 به‌وسیله فرمول شرر[1] $L=k\lambda/\beta(\cos\theta)$ 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 به‌دست 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 آلومنیم کمتر و هسته‌زایی کمتر است. هسته‌های بلور کمتر، بیشتر می‌توانند رشد کنند؛ و بنابراین، اندازه بلور با افزایش نسبت Si/Al افزایش یافته است [۳۰-۲۹].

1. Scherrer Formula



شکل ۲. الگوهای XRD زئولیت‌های HZSM5؛ (الف) Si/Al=۵۰، (ب) Si/Al=۱۰۰، (ج) Si/Al=۲۵۰

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 NH3-TPD زئولیت‌های HZSM5 را پیک‌های قابل‌مشاهده نشان می‌دهد. سرعت گرم کردن ۱۰ °C/min بود. اولین پیک در ۲۱۰/۳، ۲۱۸/۲ و ۲۲۵/۱ °C به ترتیب برای HZSM5 با نسبت Si/Al به ترتیب برابر با ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ ظاهر شدند. پیک بعدی در ۴۱۷/۵، ۴۷۲/۹ و ۴۸۰ °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 [۱۶-۱۶، 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.



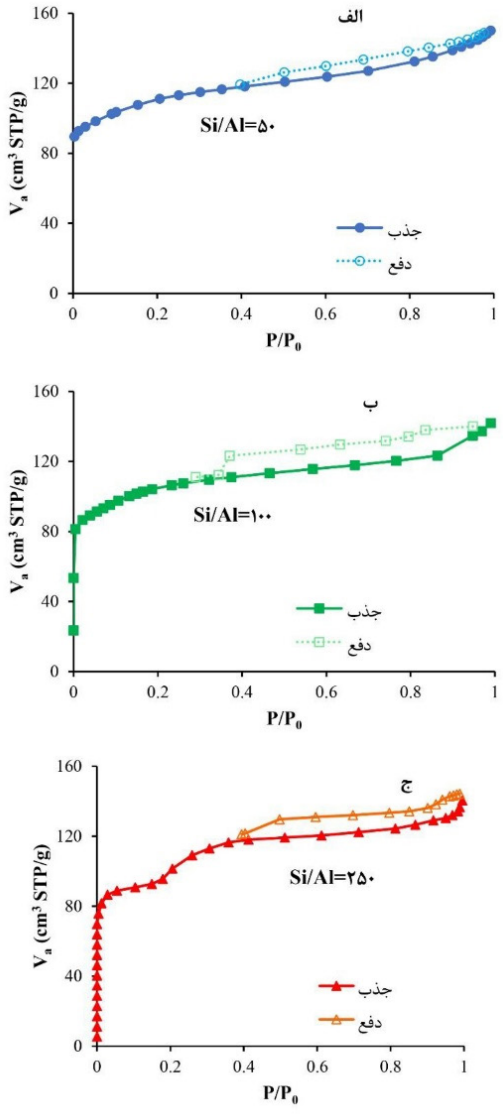
شکل ۳. پروفایل‌های NH_3-TPDزئولیت‌های HZSM5 پیک‌های قابل مشاهده را نشان می‌دهد

جدول ۲. خواص اسیدی زئولیت‌های HZSM5

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

ساختار میکرو و مزو متخلخل زئولیت‌های HZSM5 به‌وسیله تحلیل ایزوترم جذب/دفع نیتروژن بررسی شدند (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].

(جدول ۳) نشان داد که بیشترین مساحت سطح مربوط به زئولیت با نسبت Si/Al برابر با ۲۵۰ است. هرچه که مقدار Si/Al زئولیت افزایش می‌یابد، مساحت سطح ویژه و حجم ماکرو افزایش می‌یابد؛ درحالی‌که مساحت سطح و حجم حفره‌های مزو کاهش می‌یابند.



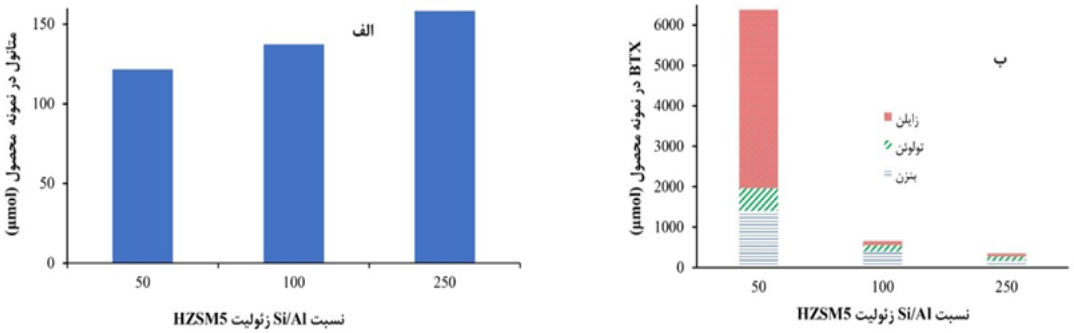
شکل ۴. ایزوترم‌های جذب/دفع سطحی N_2 زئولیت‌های HZSM5؛ (الف) Si/Al=۵۰، (ب) Si/Al=۱۰۰، (ج) Si/Al=۲۵۰

جدول ۳. خواص ساختاری زئولیت‌های HZSM5

زئولیت HZSM5	مساحت سطح ویژه (m^2/g)						قوی/ضعیف
	S_{micro}	S_{meso}	S_{total}	V_{micro}	V_{meso}	V_{total}	
Si/Al=50	۴۷/۴۴۹	۲۰/۹۸۳	۶۸/۴۳۲	۰/۰۳۱۱	۰/۰۵۶۶۸	۰/۰۸۷۷۹	۱/۲۲
Si/Al=100	۵۰/۰۶۸	۱۵/۸۴۷	۶۵/۹۱۵	۰/۰۳۲۳۷	۰/۰۵۱۳۵	۰/۰۸۳۷۲	۱/۲۲
Si/Al=250	۸۸/۹۳۵	۱۲/۷۹۵	۱۰۱/۷۳	۰/۰۵۵۹۷	۰/۰۳۸۷۹	۰/۰۹۴۷۶	۱/۲۲

۳-۲. 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

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 C_1-C_4 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 [۳۴-۳۶].

۳-۳. اثرات شرایط عملیاتی و بهینه‌سازی

در این کار برای بررسی اثرات شرایط عملیاتی، دمای کوره، مقدار کاتالیست، شدت جریان‌های متانول 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 و ۵۰۰ °C؛ 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.

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 min ۶۰

شماره	شرایط عملیاتی				پاسخ‌ها			
	دمای کوره (°C)	مقدار کاتالیست (g)	سرعت جریان متانول (mL/min)	سرعت جریان نیتروژن (mL/min)	متانول در محصول (µmol)		BTX محصول (µmol)	
					تجربی	مدل‌سازی	تجربی	مدل‌سازی
۱	۴۵۰	۰/۱	۰/۰۱	۱۱/۲۵	۳۹۵	۳۹۶/۴۱	۳۳۰۶	۳۳۰۶
۲	۴۵۰	۰/۰۵	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۵۸۹	۵۸۸/۰۷	۱۱۵۱	۱۱۵۱
۳	۴۵۰	۰/۱	۰/۱	۱۱/۲۵	۴۵۶	۴۵۶/۷۲	۲۲۷۶	۲۲۷۶
۴	۴۸۰	۰/۰۷	۰/۱	۱۳/۵	۶۵۲	۶۵۱/۲۴	۴۹۲	۴۳۰/۸۲
۵	۴۵۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۷/۵	۲۹۷	۲۹۶/۰۷	۵۱۳۸	۵۱۳۸
۶	۴۸۰	۰/۱۳	۰/۰۸	۹	۲۱۵	۲۱۱/۵۵	۵۰۱۲	۵۰۵۸/۴۱
۷	۴۲۰	۰/۱۳	۰/۰۳	۱۳/۵	۷۶۰	۷۷۳/۵۱	۳۳۳۰	۳۳۴۷/۹۳
۸	۴۵۰	۰/۱۵	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۴۳۴	۴۳۳/۶۵	۲۷۴۷	۲۷۴۷
۹	۴۵۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۴۷۲	۴۷۷/۹۰	۲۶۸۶	۲۶۷۶/۴
۱۰	۴۵۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۴۸۶	۴۷۷/۹۰	۲۶۵۸	۲۶۵۸
۱۱	۴۵۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۱۵	۶۹۵	۴۹۴/۰۷	۱۳۳۳	۱۳۳۳
۱۲	۴۵۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۴۶۵	۴۷۷/۹۰	۲۶۸۸	۲۶۷۶/۰۴
۱۳	۴۲۰	۰/۰۷	۰/۰۳	۹	۲۵۲	۲۴۹/۹۳	۴۷۴۸	۴۷۷۷/۵۷
۱۴	۴۲۰	۰/۰۷	۰/۰۸	۹	۲۷۹	۲۸۱/۲۱	۴۶۹۵	۴۷۴۰/۱۷
۱۵	۴۲۰	۰/۱۳	۰/۰۸	۱۳/۵	۸۰۲	۸۰۵/۶۱	۳۳۳۵	۳۳۶۵/۲۱
۱۶	۴۵۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۴۷۹	۴۷۷/۹۰	۲۶۸۰	۲۶۷۴/۴
۱۷	۴۰۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۵۰۵	۵۰۱/۴	۱۸۶۸	۱۸۶۸
۱۸	۴۸۰	۰/۰۷	۰/۰۸	۱۳/۵	۶۷۱	۶۸۲/۵۲	۱۷۴۰	۱۶۹۵/۴۴
۱۹	۵۰۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۴۵۸	۴۵۴/۴	۲۶۹۲	۲۶۹۲
۲۰	۴۵۰	۰/۱	۰/۰۵۵	۱۱/۲۵	۴۸۰	۴۷۷/۹۰	۲۶۷۰	۲۶۷۶/۴
۲۱	۴۸۰	۰/۱	۰/۰۳	۹	۱۷۷	۱۸۰/۲۷	۵۲۹۴	۵۳۱۱/۷

درصورتی‌که 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. (جداول 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:

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

$$R2=55416.92+(449.06)A-(2.85729\times10^4)B+(3.5891\times10^6)C-(23365.15311)D+(6279.67)AB-(16228.53)AC+(50.4739)AD-(2.43873\times10^5)BC+(2.51118\times10^5)BD+(3494.67885)CD-(1.16081)\ A^2-(2.9096\times10^5)\ B^2+(5692.59259)\ C^2+(39.75822)\ D^2-(534.5327)ABD+(18.2227)A^2C \quad (2)$$

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 به‌صورت انحراف معیار بیان می‌شود. در مدل مقدار متانول باقیمانده، انحراف معیار ۷/۰۰ است که با توجه به محدوده اعداد پاسخ قابل‌توجه 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

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

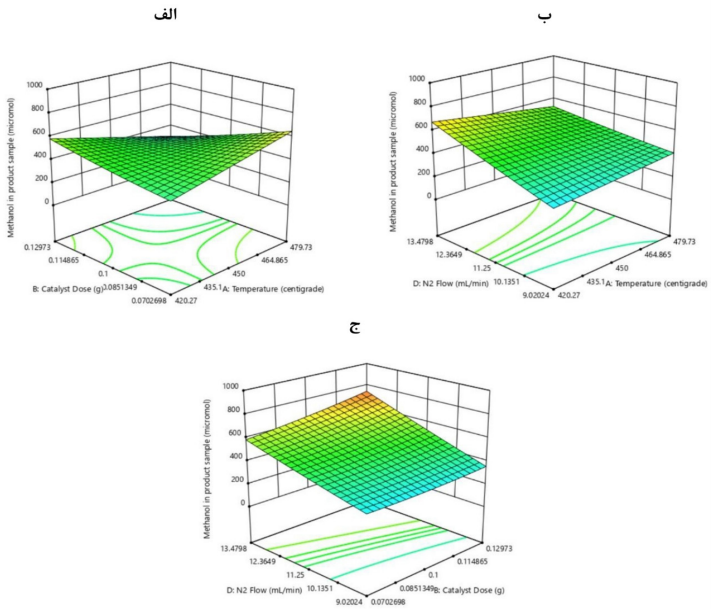
جملات برهم‌کنش موقعیتی را که در آن اثر یک متغیر مستقل بستگی به مقدار متغیر مستقل دیگر دارد، نشان می‌دهند. در برهم‌کنش‌ها، گاهی اوقات متغیرها اثرات همدیگر را تقویت می‌کنند و موجب هم‌افزایی می‌شوند و بعضی مواقع اثرات همدیگر را کاهش می‌دهند. این امکان وجود دارد که بعضی متغیرها در یک محدود از دامنه تغییرات اثرات هم‌افزایی داشته و در محدوده دیگری اثرات متضاد داشته باشند. مطالعه برهم‌کنش‌ها، بررسی نحوه اثر متغیرها را به‌صورت هم‌زمان امکان‌پذیر می‌سازد [۲۶]. شکل‌های (۶ الف) تا (۶ ج) نمودارهای برهم‌کنش اثرات شرایط عملیاتی بر مقدار متانول در نمونه محصول را نشان می‌دهند. (شکل ۶ الف) نشان می‌دهد که در مقادیر کاتالیست کمتر از g ۰/۱، با افزایش دما، متانول در محصول خروجی افزایش یافته است، درحالی‌که در مقادیر کاتالیست بیشتر از g ۰/۱، 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 °C ۴۴۰ با افزایش مقدار کاتالیست، متانول در خروجی افزایش یافته است، در حالی‌که در دماهای بالای °C ۴۴۰، 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 ۱۴۹۷۱/۷۷ و کوچک‌تر از ۰/۰۰۰۱ هستند. R^2 و $adjR^2$ به ترتیب برابر با ۱/۰۰۰۰ و ۰/۹۹۹۹ هستند و تطبیق خوب نتایج تجربی و مدل‌سازی را نشان می‌دهند [۳۷-۳۸]. دقت مناسب (۴۳۶/۱۱۴) مناسب بودن مدل را نشان می‌دهد. مقدار انحراف معیار در این مدل ۱۲/۴۴ است؛ که با توجه نتایج مقادیر BTX مقدار کوچکی است. در مدل تولید BTX، سرعت جریان گاز نیتروژن بیشترین مقدار F (۴۶۷۶۳/۶۵) را دارد و بیشترین تأثیر را روی تولید BTX داشت. بعد از آن، مقدار کاتالیست بیشترین تأثیر را داشته است. جمله برهم‌کنش BD بین مقدار کاتالیست و سرعت جریان گاز نیتروژن با مقدار F ۱۰۵۲۵/۹۲ بیشترین تأثیر را روی تولید BTX داشتند (جدول ۶).

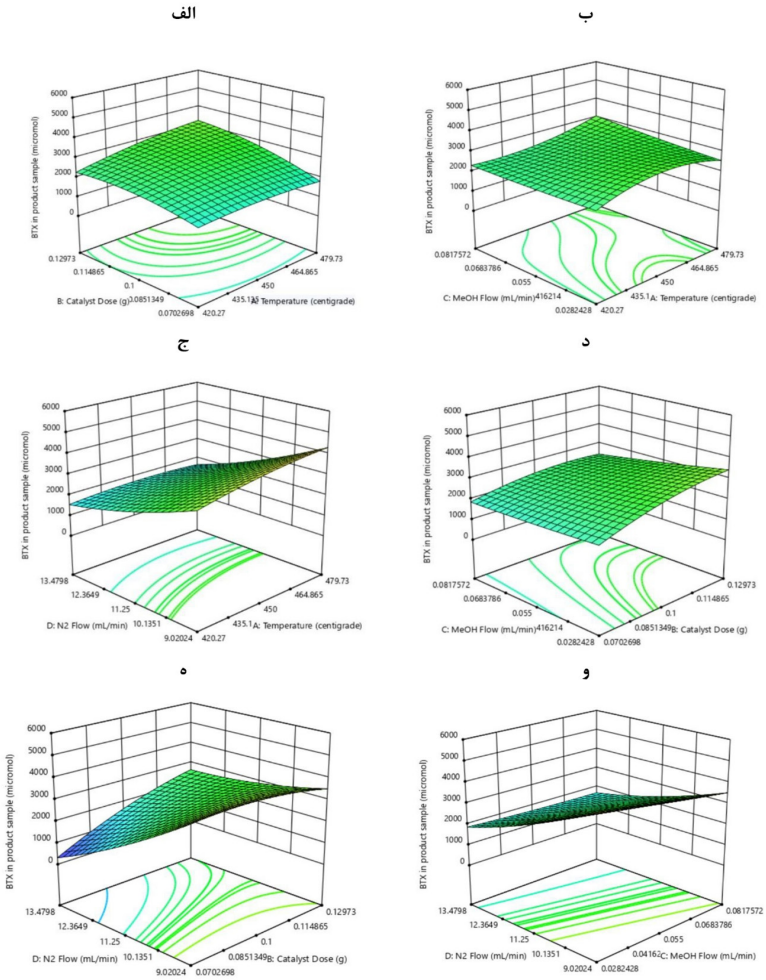
شکل‌های (۷ الف) تا (۷ و) برهم‌کنش بین عوامل را نشان می‌دهد؛ و در کل بازه تغییرات عامل مورد بررسی روند تغییرات یکسان است. شکل‌های (۷ الف) و (۷ ج) نشان می‌دهند که با افزایش دما، مقدار تولید BTX افزایش یافته است که نشان‌دهنده افزایش سرعت انجام واکنش‌های تولید BTX با دماست. شکل‌های (۷ الف)، (۷ د) و (۷ هـ) 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 °C ۴۷۰ با افزایش سرعت جریان متانول، مقدار تولید BTX کاهش یافته اما در زمان‌های بیشتر از °C ۴۷۰ با افزایش سرعت جریان متانول، تولید BTX افزایش یافته است. در مقدار متانول ثابت و حدوداً زیر mL/min ۰/۰۵ 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 به‌دلیل تشکیل کک باشد [۳۹-۴۱].

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

مدل / منبع	متانول در محصول (µmol)		
	مقدار F	مقدار P	
مدل	۱۴۹۷۱/۷۷	<۰/۰۰۰۱	معتبر
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^2C	۳۹۷۵/۹۳	<۰/۰۰۰۱	



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



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

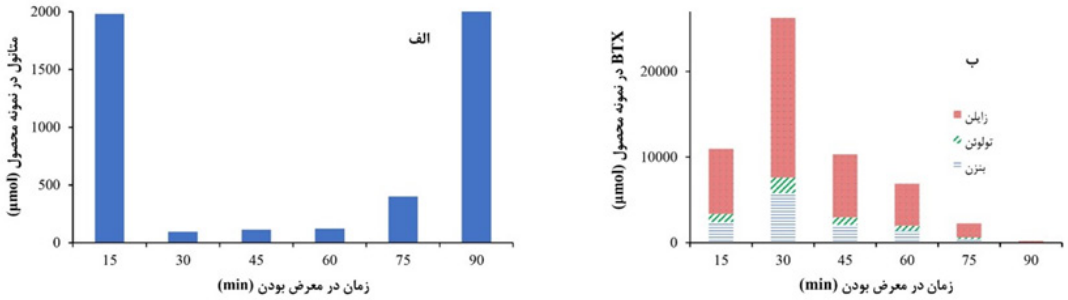
در این مرحله، نقاط بهینه به‌وسیله جستجو بین نقاط پیشنهاد شده به‌وسیله نرم‌افزار و نقاط طراحی انتخاب شدند. (جدول ۷)، نقاط بهینه انتخاب شده را نشان می‌دهد. آزمایش‌های مربوط به نتایج تجربی نقطه بهینه چند بار تکرار و میانگین آنها گزارش شد.

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

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

۳-۴. اثر زمان در معرض بودن

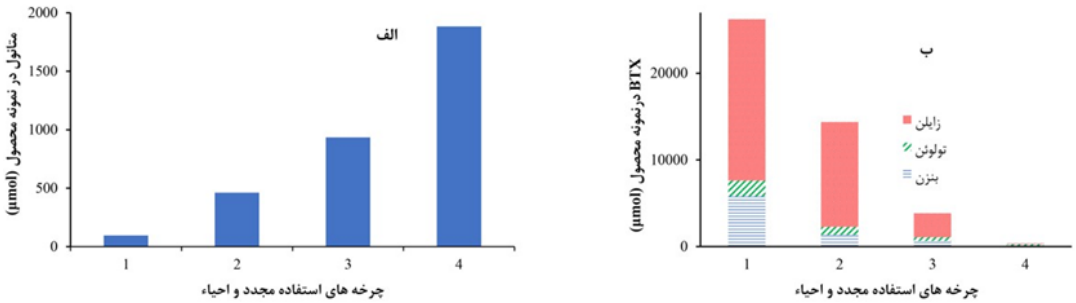
تولید آروماتیک‌ها در ۳۰ min اول افزایش می‌یابد (شکل ۸). با گذشت زمان‌های بزرگ‌تر از ۳۰ min تشکیل کک افزایش می‌یابد و منجر به کاهش تولید آروماتیک و BTX می‌شود [۴۱-۴۲]. حداکثر تولید زایلن در ۳۰ min مشاهده شد، در زمان‌های بزرگ‌تر از ۳۰ min، تولید زایلن کاهش، درحالی‌که تولید بنزن و تولوئن افزایش می‌یابد. زمان بهینه برای واکنش MTA، ۳۰ min بود. به علت مقدار بالای BTX، مول متانول تبدیل شده به آروماتیک‌ها نیز بیشتر بوده و زایلن بیشتری تولید شده که ارزش افزوده بیشتری نسبت به بنزن و تولوئن دارد.



شکل ۸. مقادیر (الف) متانول، (ب) BTX در نمونه محصول برحسب زمان در معرض جریان بودن با استفاده از زئولیت 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

احیاء کاتالیست، اثرات قابل توجه‌ای بر جنبه‌های اقتصادی و محیط‌زیستی فرآیند MTA دارد. وقتی فعالیت کاتالیست تا یک حدی کاهش می‌یابد، معمولاً احیاء شده و دوباره مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرآیند تکلیس، متداول‌ترین روش احیاء کاتالیست و روش جداسازی کک است. در این مطالعه؛ پارامترهای عملیاتی که برای تولید آروماتیک‌ها به‌کاربرده 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 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 چرخه‌های 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 نشان‌دهنده تشکیل کک سخت (گرافیتی) است، همچنین سایت‌های اسیدی به‌وسیله کک پوشانده شده و برای انجام واکنش دیگر در دسترس نیستند [۴۳-۴۴].



شکل ۹. چرخه‌های استفاده مجدد و احیاء؛ مقادیر (الف) متانول، (ب) BTX در نمونه محصول با استفاده از زئولیت 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

کیوائی[1] و همکاران (۲۰۲۰)، HZSM5 با Si/Al برابر با ۳۰ را به‌وسیله Zn و فسفر اصلاح کردند و در واکنش تبدیل متانول به آروماتیک‌ها به‌کار بردند، گزینش پذیری BTX به‌کل آروماتیک‌ها ۸۲/۱ درصد بود [۴۵]. صابر[2] و همکاران (۲۰۲۲) از زئولیت HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۲۸ برای واکنش MTA استفاده کردند. گزینش‌پذیری BTX به‌کل آروماتیک‌ها ۷۶/۸۳ درصد بود [۴۶]. ذرات ZSM5 به‌وسیله استفاده از سبوس برنج با ساختار متخلخل تهیه شد و در واکنش MTA به‌وسیله فو[3] 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 به‌کاربرده شد و گزینش پذیری BTX نسبت به‌کل آروماتیک‌ها ۹۸ درصد بود که نشان‌دهنده عملکرد بهتر کاتالیست HZSM5 با نسبت Si/Al برابر با ۵۰ بود.

۴. نتیجه‌گیری

این مطالعه تبدیل موفقیت‌آمیز 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 زئولیت 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 نرم‌افزار طرح آزمایش و روش طرح مرکب مرکزی بررسی شدند. روش‌های آماری برای تعیین اعتبار مدل‌های تجربی به‌وسیله نرم‌افزار طرح آزمایش به‌کاربرده شدند. از میان فاکتورهای مورد مطالعه، سرعت جریان نیتروژن بیشترین تأثیر را روی تولید آروماتیک‌های BTX داشت. علاوه بر این‌ها، جملات برهم‌کنش، نقش مهمی در تولید BTX داشتند؛ برهم‌کنش بین دمای کوره و سرعت جریان متانول قابل‌توجه بودند. بهترین پاسخ‌ها تحت شرایط عملیاتی مقدار کاتالیست ۰/۱۳ g، دمای کوره ۴۸۰°C، سرعت جریان متانول ۰/۰۳ mL/min، سرعت جریان نیتروژن ۷/۵ mL/min و زمان‌های واکنش ۳۰ min به‌دست آمدند که شامل مقادیر متانول ۹۵ µmol و مقدار BTX برابر با µmol ۲۶۲۴۰ 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

دمای کوره (°C)	A
مقدار کاتالیست	B
بنزن، تولوئن و زایلن	BTX
سرعت جریان متانول (mL/min)	C
متانول	CH_3OH
استن	C_3H_6O
بنزن	C_6
بنزن	C_6H_6
تولوئن	C_7H_8
زایلن	C_8H_{10}
۱، ۲، ۴- تری متیل بنزن	C_9H_{12}
نفتالین	$C_{10}H_8$
۱، ۲، ۴، ۵- تترامتیل بنزن	$C_{10}H_{14}$
سرعت جریان نیتروژن (mL/min)	D
آشکارساز یونی شعله	FID
نوع پروتونی ZSM5	$HZSM5$
متانول به آروماتیک	MTA
متانول به هیدروکربن	MTH
مقدار متانول در محصول	$R1$

1. Qiae
2. Saber
3. Fu

مقدار BTX در محصول	*R2*
مساحت سطح ویژه	*S*
نسبت وزنی اکسید سلیسیم (SiO_2) به اکسید آلومنیم (Al_2O_3)	*Si/Al*
کربید سیلیسیم	*SiC*
دفع برنامه‌ریزی‌شده با دما	*TPD*
سه‌بعدی	*3D*
پراش پرتو ایکس	*XRD*
نوعی زئولیت، زئولیت سوکونی موبایل ۵	*ZSM5*

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, Shariatinia Z, Sahebdelfar 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 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 Ga_2O_3/HZSM5 and Ga_2O_3/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

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, Larpkiattaworn 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 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

2014;53:14932-14940.

[28]. Ayodele BV, Hossain SS, Lam SS, Osazuwa OU, Khan MR, Cheng CK. (2016). Syngas production from CO_2 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-Dughaither AS, de Lasa H. HZSM 5 zeolites with different SiO_2/Al_2O_3 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.

[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

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.

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

Volume 13 / Issue 1 / NO. 25 / Spring 2026 / Pages 71-89

Journal Homepage: https://ijge.irangi.org

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

Meysam Mostafaei[1], 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 NH_3 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

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 ۱۰۲ - ۹۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

چکیده

در واحدهای ریفورمر 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، به‌منظور 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 به‌عنوان منبع آلومینا استفاده شد و ۲/۲ درصد وزنی TiO_2 به‌عنوان عامل معدن‌ساز جهت تسریع تشکیل فاز مولایت استفاده شد. همچنین به‌جای سیستم سیمانی متعارف از بایندرهای 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 ارائه‌شده می‌تواند جایگزینی قابل اعتماد و اقتصادی برای کاربردهای دما بالا در صنعت پتروشیمی باشد.

کلید واژه‌ها: مهندسی معکوس، نسوز ریختنی، نازل ریفورمر، آلومینا، آندالوزیت، بایندرهای نانویی

۱. مقدمه

تجهیزات فرآیندی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، به‌ویژه ریفورمرها، 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[1] نازل ریفورمر به‌عنوان 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[2] 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[۳-۲]. 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 ($3Al_2O_3.2SiO_2$) و سیلیس تبدیل می‌شود که تشکیل مولایت درجا می‌تواند موجب بهبود پایداری حجمی، استحکام فشاری سرد[1]، 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[۷-۶].

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[۹-۸]؛ 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 بایندرهای ژلی یا سل-ژل در حال حرکت است[۱۱].

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از بایندرهای 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[۱۴-۱۲]. پژوهش‌های اخیر نیز نشان داده‌اند که استفاده از بایندرهای نانویی در جرم‌های ریختنی موجب کاهش تخلخل، افزایش چگالی ظاهری و بهبود مقاومت در برابر شوک حرارتی می‌شود[۱۶-۱۵].

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 مایع گذرا، فرآیند تراکم ساختاری را تسهیل کند[۱۸-۱۷]. 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 [۱۱، ۱۹].

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

1. CCS (Cold Crushing Strength)

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 قابل‌توجهی 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 بایندرهای 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 ریفورمر 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 ریفورمر و دمای سرویس حداقل ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد حیاتی‌اند. همان‌گونه که در اطلاعات سازنده و (جدول ۲) مشاهده می‌شود، ترکیب شیمیایی نمونه بر پایه آلومینای تبولار[1] و آندالوزیت با داشتن حداقل ۶۰ درصد اکسید آلومینیوم و حداکثر ۱/۵ درصد اکسید آهن استوار است. وجود حداقل ۶۰درصدآلومینا 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_2O_3 (درصد وزنی)	> ۶۰
SiO_2 (درصد وزنی)	> ۳۱
Fe_2O_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 CaOدر 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 جداشدگی 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، نشان دهنده 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 ۵/۵روز 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

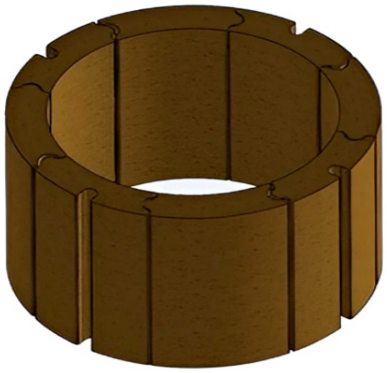
این فرآیند بر اساس رویکرد مهندسی معکوس انجام شد؛ بدین صورت که ابتدا مشخصات شیمیایی، فیزیکی و عملکردی نمونه مرجع استخراج شده و سپس با استفاده از مواد اولیه در دسترس داخلی، فرمولاسیون معادل با هدف دستیابی به عملکرد مشابه طراحی گردید.

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

1. Tabular Alumina

جزئیات لازم، تهیه شد. ابعاد کلی برحسب میلی‌متر و به‌صورت قطر خارجی ۶۹۰، قطر داخلی ۵۴۰ و ارتفاع کلی ۴۳۵ است. هر دسته از مافل بلاک شامل ۸ تکه می‌باشد. 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 بین‌المللی ساخت نسوز و تجربیات سازندگان داخلی انتخاب شد. در این راستا، فرمولاسیون بومی‌سازی شده با جایگزینی کامل سیستم سیمانی سنتی با بایندرهای نانویی توسعه داده شد. این رویکرد، مافل‌بلاک‌های ساخته شده را از جرم‌های سیمانی متعارف متمایز کرده و می‌تواند برخی ویژگی‌های عملکردی مشابه با اجزای پرسی پخته‌شده 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.

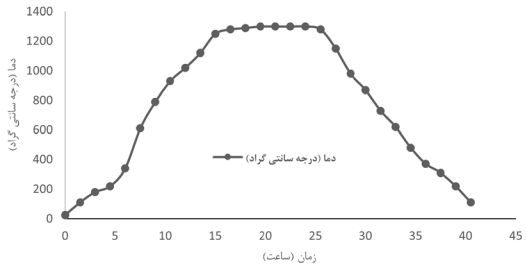
جدول ۳. نتایج آنالیز شیمیایی نمونه بومی‌سازی شده

مشخصه	مقدار
Al_2O_3 (درصد وزنی)	۵۹/۴
SiO_2 (درصد وزنی)	۳۵/۴
Fe_2O_3 (درصد وزنی)	۱/۶
CaO (درصد وزنی)	۰/۶
TiO_2 (درصد وزنی)	۲/۲
MgO (درصد وزنی)	۰/۲ (ناخالصی)

در این فرمولاسیون، استفاده از آندالوزیت به‌عنوان منبع اصلی آلومینا و افزودن ۲/۲ درصد وزنی TiO_2 به‌منظور جایگزینی جزئی CaO و بهبود تشکیل فاز مولایت مورد توجه قرار گرفت. نتایج آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد ترکیب بومی‌سازی‌شده دارای ۵۹/۴ درصد وزنی Al_2O_3 است که به مقدار اسمی ۶۰ درصد در نمونه مرجع نزدیک است. میزان Fe_2O_3 برابر با ۱/۶ درصد وزنی اندازه‌گیری شد که اندکی بالاتر از حد مرجع (۱/۵ درصد) است، بااین‌حال همچنان در محدوده قابل‌قبول برای جرم‌های آلومینایی ریختنی قرار دارد. مقدار CaO برابر با ۰/۶ درصد وزنی به‌دست آمد که نسبت به نمونه مرجع کاهش نشان می‌دهد. این کاهش می‌تواند بر میزان تشکیل فازهای کم‌ذوب و رفتار دمای بالای سیستم اثرگذار باشد که در بخش «مقایسه و تحلیل» به‌صورت تفصیلی بررسی شده است.

۳-۲. شکل‌دهی و پخت قطعه

تولید قطعه مورد نظر، مستلزم پیروی دقیق از فرآیندهای تخصصی ریخته‌گری و پخت مواد نسوز است. فرآیند با آماده‌سازی دوغاب آغاز می‌شود؛ در این مرحله، پودرهای ماده نسوز اولیه با عوامل روان‌کننده اختلاط می‌یابند تا ویسکوزیته بهینه برای اطمینان از پر شدن حفره‌های قالب و به حداقل رساندن تخلخل‌ها در حین عملیات تراکم‌دهی فراهم شود. بخش حیاتی نهایی، اجرای دقیق برنامه حرارتی پخت است؛ این برنامه باید نرخ افزایش و کاهش دما، به‌ویژه در مرحله تثبیت ساختار متراکم در دمای نهایی را با دقت کنترل کند تا از ایجاد تنش‌های حرارتی داخلی جلوگیری شده و ساختار کریستالی پایدار حاصل شود.

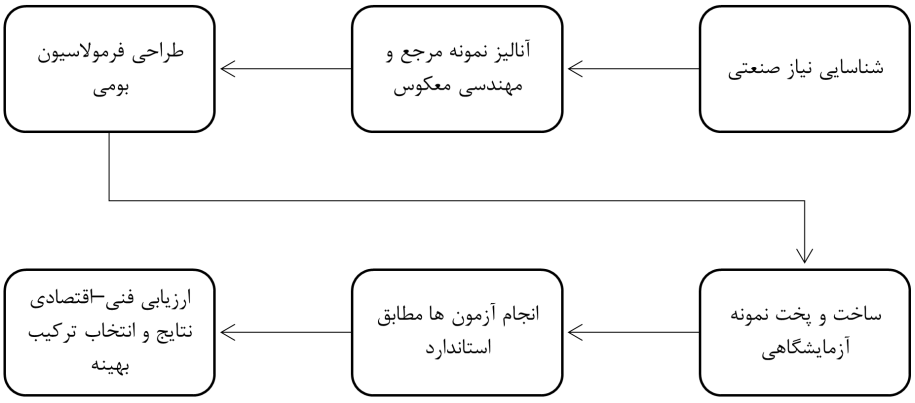


شکل ۲. منحنی پخت مافل بلاک

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 سیکل‌های حرارتی و عملیات پخت مربوطه را دقیقاً طی کند تا خواص شیمیایی

و مکانیکی آن نماینده قطعات نهایی باشـد. نمونه شاهد جهت آزمون‌های نهایی به آزمایشگاه مرجع ارسال می‌گردد.

مراحل کلی اجرای پژوهش و فرآیند بهینه‌سازی اتخاذشده در این تحقیق به‌صورت شماتیک در (شکل ۳) ارائه شده است.



شکل ۳. فلوچارت مراحل اجرای پژوهش و بهینه‌سازی فرمولاسیون

۴. روش‌های آزمون

این فصل به تشریح دقیق استانداردهای مرجع، پروتکل‌های نمونه‌برداری حین ساخت و نتایج اولیه آزمون‌های انجام شده بر روی نمونه‌های بومی‌سازی شده می‌پردازد.

۴-۱. استانداردهای مرجع آزمون

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]

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 ۱۶۰×۴۰×۴۰ (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.

۴-۲. آزمون‌های نهایی شیمیایی و فیزیکی

نتایـج آنالیـز شیمیـایی نمونـه بومی قبـلاً در (جـدول ۳) ارائـه گردیـد. نتایـج آزمون‌هـای فیزیـکی انجام‌شـده بر روی نمونه‌هـای شـاهد کـه بـرای ارزیـابی عملکـرد مکانیـکی و حـرارتی قطعـه ضروری هسـتند، در (جـدول ۵) نشـان داده شـده اسـت. کلیه آزمون‌هـا در آزمایشـگاه تحقیق و توسـعه صنعـت سیمـان نسـوز کـه دارای گواهینامـه ISO 17025 اسـت، انجـام گردید.

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 <

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[1] که درصد حجم کل منافذ باز در یک 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.

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

مشخصه	نمونه مرجع خارجی	نمونه بومی
Al_2O_3 (درصد وزنی)	۶۰ <	۵۹/۴
SiO_2 (درصد وزنی)	۳۱ >	۳۵/۴
Fe_2O_3 (درصد وزنی)	۱/۵ >	۱/۶
CaO (درصد وزنی)	۲/۸ تا ۴/۲	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 بومی‌سازی شده در مقایسه با نمونه مرجع خارجی، نشان‌دهنده یک تغییر رویکرد موفق در فرمولاسیون است که بر پایه افزودن مواد اولیه‌ای نظیر آندالوزیت و اکسید تیتانیوم و همچنین استفاده از بایندرهای نانویی به‌جای سیمان متعارف بنا شده است. این تغییرات شیمیایی که منجر به بهبود خواص عملکردی و همچنین صرفه‌جویی ریالی قابل‌توجه (کاهش هزینه از ۲۵۳ به ۱۶۸ میلیون ریال) شده، به‌طور مستقیم بر خواص مهندسی کلیدی تأثیر گذاشته است.

نتایج نشان می‌دهد که نمونه بومی باوجود تفاوت‌هایی در ترکیب شیمیایی، توانسته است عملکردی قابل مقایسه و در برخی موارد بهتر از نمونه مرجع ارائه دهد. یکی از مهم‌ترین تغییرات در فرمولاسیون، حذف سیستم سیمانی متعارف و استفاده از سیستم بایندر مبتنی بر نانو بوده است که منجر به کاهش قابل‌توجه مقدار اکسید کلسیم در ترکیب گردید.

در نسوزهای آلومینایی، حضور CaO که عمدتاً ناشی از سیمان آلومینایی است می‌تواند منجر به تشکیل فازهای کم‌ذوب و افزایش مقدار فاز شیشه‌ای 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].

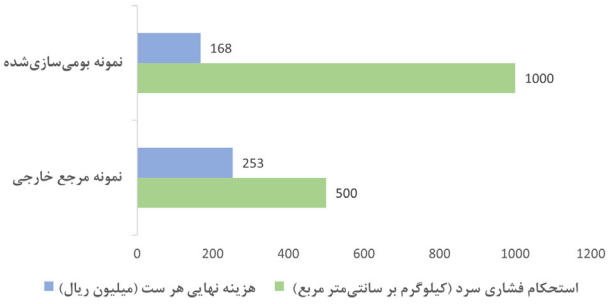
نتایج آزمون تغییر طول خطی دائمی (PLC) نیز مؤید این موضوع است. این مقدار برای نمونه بومی برابر با ۰/۸ درصد پس از ۲۴ ساعت در دمای ۱۴۵۰درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد که بیانگر پایداری ابعادی مناسب در شرایط دمای بالا است. اگرچه مقدار گزارش‌شده برای نمونه مرجع برابر با ۱ درصد در دمای ۱۰۰۰درجه سانتی‌گراد است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

افزودن ۲/۲ درصد وزنی TiO_2 به‌عنوان یک عامل معدن‌ساز، نقش مهمی در تسریع تشکیل فاز مولایت ایفا می‌کند. مولایت به‌عنوان یکی از پایدارترین فازهای سرامیکی در دماهای بالا شناخته می‌شود و حضور آن موجب افزایش استحکام مکانیکی و مقاومت خزشی نسوز می‌گردد. در نتیجه، استحکام فشاری سرد نمونه بومی نسبت به نمونه مرجع افزایش قابل‌توجهی نشان داده و به بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسیده است.

استفاده از آندالوزیت به‌عنوان 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 سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد که نسبت به حداقل مقدار مورد نیاز در نمونه مرجع (۲/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب) افزایش قابل‌توجهی را نشان می‌دهد. این افزایش چگالی نشان‌دهنده کاهش تخلخل و تشکیل ساختار متراکم‌تر در ماده است. افزایش چگالی حجمی و کاهش CaO نشان‌دهنده تشکیل ماتریکس سرامیکی متراکم‌تر و کاهش فاز شیشه‌ای در ریزساختار نسوز است که می‌تواند نقش مهمی در بهبود مقاومت در برابر خزش و شوک حرارتی ایفا کند[۱۵].

علاوه بر بهبود خواص فنی، نتایج نشان‌دهنده مزیت اقتصادی قابل‌توجه در فرآیند بومی‌سازی 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 صرفه‌جویی اقتصادی حدود ۳۳ درصدی است. این کاهش هزینه عمدتاً ناشی از جایگزینی مواد اولیه وارداتی با مواد در دسترس داخلی و بهینه‌سازی فرمولاسیون بوده است. (شکل ۴) از مقاله این برتری دوگانه را به‌صورت بصری نشان می‌دهد؛ بهبود هم‌زمان در استحکام فشاری سرد و کاهش هزینه تولید که در مجموع نمونه بومی را به گزینه‌ای 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

به‌منظور ارزیابی صحت نتایج به‌دست‌آمده، ترکیب شیمیایی و خواص عملکردی نمونه بومی با داده‌های مرجع گزارش‌شده در منابع علمی معتبر از جمله کتاب Refractory Oxides مقایسه شد[۱]. نتایج این اعتبارسنجی در (جدول ۷) ارائه شده است.

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

مشخصه	محدوده کتاب Refractory Oxides	مقدار نمونه بومی
Al_2O_3 (درصد وزنی)	۵۸ تا ۶۳	۵۹/۴
SiO_2 (درصد وزنی)	۲۵ تا ۳۲	۳۵/۴
Fe_2O_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 سانتی‌گراد)	۱۷۰۰ <	۱۷۰۰
چگالی حجمی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۲/۲ <	۲/۵۳
استحکام فشاری سرد (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	۵۰۰ <	۱۰۰۰ <

مقایسه داده‌ها نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی نمونه بومی از نظر نسبت کلی اجزای اصلی در چارچوب نسوزهای آلومینا-آندالوزیت گزارش‌شده در منابع علمی قرار می‌گیرد، هرچند برخی اجزا مانند CaO و Fe_2O_3 به دلیل تفاوت در نوع مواد اولیه و سیستم بایندر با مقادیر مرجع تفاوت دارند. مقدار آلومینا با بازه‌های مرجع همخوانی داشته و افزودن ۲/۲ درصد وزنی TiO_2 نیز در محدوده پیشنهادی منابع قرار دارد که می‌تواند به بهبود فرآیند زینترینگ و افزایش استحکام مکانیکی کمک کند.

همچنین مقدار CaO در نمونه بومی به‌طور قابل‌توجهی کمتر از مقادیر گزارش‌شده است که ناشی از حذف سیمان آلومینایی و استفاده از سیستم بایندر نانویی است. کاهش CaO می‌تواند موجب کاهش تشکیل فازهای کم‌ذوب و بهبود پایداری فازی در دماهای بالا شود.

اگرچه مقدار Fe_2O_3 و SiO_2 اندکی بالاتر از مقادیر مرجع گزارش شده است، این اختلاف احتمالاً به ترکیب شیمیایی آندالوزیت مورد استفاده مربوط می‌شود. با توجه به عملکرد مناسب نمونه در پارامترهای کلیدی مانند چگالی حجمی و استحکام فشاری سرد، این اختلاف تأثیر منفی قابل‌توجهی بر عملکرد نسوز نشان نمی‌دهد. همچنین مقدار MgO اندازه‌گیری‌شده در محدوده ناخالصی‌های مجاز قرار دارد.

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

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_2O_3 (درصد وزنی)	۵۵ تا ۶۵	۵۰ تا ۶۰	۵۵ تا ۶۵	۵۹/۴
چگالی حجمی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۲/۳ تا ۲/۶	۲/۲ تا ۲/۵	۲/۳ تا ۲/۶	۲/۵۳
استحکام فشاری سرد (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	۴۰۰ تا ۹۰۰	۳۵۰ تا ۸۰۰	۵۰۰ تا ۹۰۰	۱۰۰۰ <

نتایـج ارائه‌شـده در (جدول ۸) نشـان می‌دهـد که خواص فیزیـکی و مکانیـکی نمونـه بـومی در محـدوده داده‌هـای گزارش‌شـده برای نسـوزهای آلومینا بالا قرار دارد[۷، ۹، ۱۵]. چـگالی حجـمی بـا ۲/۵۳ گرم بـر سـانتی‌متر مکعـب بیانگر تراکم مناسـب سـاختار بوده و اسـتحکام فشـاری سـرد بیش از ۱۰۰۰ کیلوگـرم بـر سـانتی‌متر مربـع حـتی از بسیـاری از مقادیـر گزارش‌شـده در مطالعـات پیشیـن بالاتـر اسـت. این بهبـود عملکـرد را می‌توان به اسـتفاده از آندالوزیـت به‌عنوان منبع آلومینوسیلیکاتی، افزودن TiO_2 و به‌کارگیری سیسـتم بایـندر نانویی نسـبت داد کـه مطابق گزارش‌هـای موجود در منابع علمی، استفاده از این ترکیبات می‌تواند موجب تشکیل ریزسـاختار متراکم‌تـر و بهبـود خـواص مکانیـکی نسـوزها شود[۱۵].

همچنیـن مقایسـه با قطعه مرجـع صنعتی نشـان داد که نمونه بومی از نظر چگالی حجمی و اسـتحکام فشـاری سـرد عملکـردی بالاتر از حداقـل الزامات دارد و مقـدار تغییر طول خطی دائـمی ۰/۸ درصد در دمای ۱۴۵۰ درجه سـانتی‌گراد، بیانگر پایداری ابعادی مناسـب در شـرایط دمای بالا است. در مجمـوع، همخـوانی بین نتایج ایـن پژوهش، داده‌هـای منابع علـمی و عملکـرد قطعـه مرجـع صنعـتی، قابلیـت اطمینـان فرمولاسیون نسوز مهندسی معکوس‌شده را تأیید می‌کند.

۶. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که بومی‌سازی جرم نسوز ریختنی آلومینا بالا برای کاربرد در مافل‌بلاک ریفورمر با استفاده از رویکرد مهندسی معکوس و بهره‌گیری از مواد اولیه داخلی با موفقیت امکان‌پذیر است. در این مطالعه، استفاده از آندالوزیت به‌عنوان منبع اصلی آلومینا، افزودن مقدار بهینه ۲/۲ درصد وزنی TiO_2 به‌عنوان عامل معدن‌ساز و جایگزینی سیستم سیمانی متداول با بایندر نانویی، به بهبود قابل‌توجه خواص فیزیکی و مکانیکی ماده منجر شد.

نمونـه بـومی تولیدشـده با چـگالی حجـمی ۲/۵۳ گرم بر سـانتی‌متر مکعب و اسـتحکام فشـاری سـرد بیـش از ۱۰۰۰ کیلوگـرم بـر سـانتی‌متر مربـع، الزامـات مرجـع را بـرآورده کـرده و در بـرخی شـاخص‌ها از آن فراتـر رفـت. همچنیـن نتایـج آزمون‌هـا بیانگـر پایـداری ابعـادی مناسـب در دمـای بـالا و قابلیـت عملکـرد پایـدار در دمـای سـرویس حـدود ۱۷۰۰ درجـه سـانتی‌گراد اسـت کـه بـرای شـرایط کاری ریفورمرهـای صنعـتی اهمیـت بـالایی دارد.

از منظر صنعتی، توسعه این ترکیب نسوز می‌تواند به رفع یکی از چالش‌های مهم بهره‌برداری 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 بومی‌سازی این قطعه امکان کاهش حدود ۳۳ درصدی هزینه تولید را نسبت به نمونه خارجی فراهم می‌کند؛ بنابراین، استفاده از ترکیب بهینه ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان یک راهکار قابل اعتماد برای افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات دما بالا، کاهش هزینه‌های نگهداری و تقویت زنجیره تأمین داخلی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی مورد توجه قرار گیرد. این نتایج نشان می‌دهد که رویکرد مهندسی معکوس مبتنی بر بهینه‌سازی هم‌زمان ترکیب شیمیایی و سیستم بایندر می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی مؤثر در توسعه نسوزهای پیشرفته صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۹. فهرست اختصارات به‌کاررفته در مقاله

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

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.

[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 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.

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–Al_2TiO_5 composites by reaction sintering of natural andalusite and TiO_2. 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 TiO_2 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.

[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.

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

Volume 13 / Issue 1 / NO. 25 / Spring 2026 / Pages 90-102

Journal Homepage: https://ijge.irangi.org

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/cm^3, cold crushing strength exceeding 1000 kg/cm^2, 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

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 خداشناس*

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

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

مقاله‌ی علمی-پژوهشی

صفحه ۱۱۸ - ۱۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

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 الگوریتم-های 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: MLP، SVM، KNN، DT، RF، XGBoost، GB و Poly Reg استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوریتم GB با بیشترین دقت (R^2 =۰/۹۴) 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 ماشینی 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

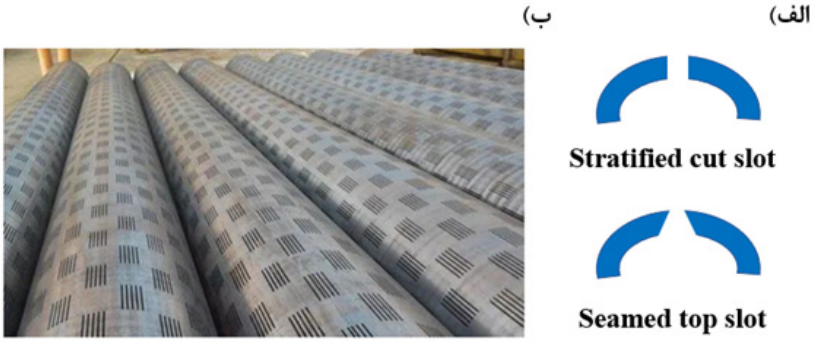
۱. مقدمه

عددی، شامل: کاهش تولید، آسیب سازند و خرابی تجهیزات سطح‌الارضی و چاه را به‌همراه دارد[۱]. انتخاب یک توری مهارکننده مکانیکی[1] 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[2] اندازه‌گیری می‌شود[۵،۴]. مقدار SPC به‌گونه‌ای

1. Mechanical Sand Screen

2. Slot per columns

تعیین می‌شود که مسیر ورودی سیال چاه، دچار اثر پوسته اضافی ناشی از تکمیل نشود و درعین‌حال کمترین میزان ماسه از توری عبور کند[۴]. همچنین به‌منظور جلوگیری از عبور ذرات با شکل‌های مختلف، هندسه‌های متفاوتی برای دهانه شکاف‌ها ارائه شده است. به‌طورکلی 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]

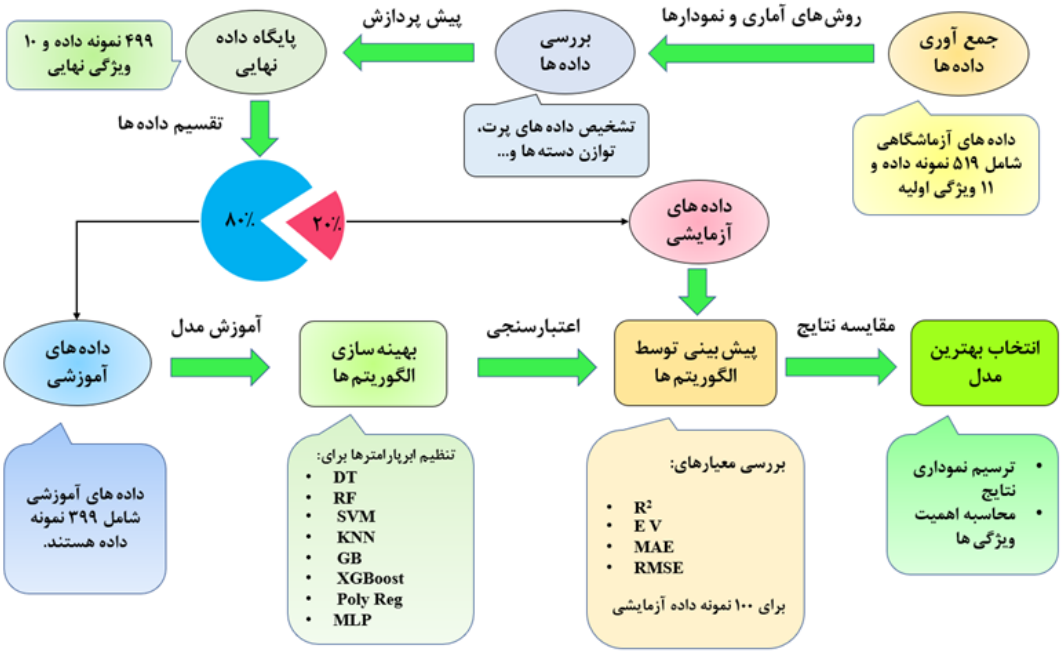
عملکرد توری انتخابی به‌تناسب طراحی آن با شرایط تولیدی چاه بستگی دارد[۸-۱۰]. در روش سنتی برای تشخیص بهترین توری از نتایج آزمایشگاهی (آزمون نگهداشت ماسه[۲]) استفاده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که شرایط تولیدی چاه در آزمایش‌ها شبیه‌سازی می‌شود تا میزان ماسه عبوری از توری‌های مختلف (با طراحی متفاوت) با هم مقایسه 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 به‌همراه 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] یا تکمیل چاه حفره باز[۸] پرداخته‌اند[۱۸-۲۴]؛ 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 به‌کمک 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. درنهایت، 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،

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[1] پژوهش تعریف شد. سپس تأثیر هر یک از ویژگی‌ها[2] 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[3] 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[4] از جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی مطالعات پیشین به‌دست‌آمده است که شامل: اطلاعات ۵۱۹ نمونه[5] آزمایش برای انواع توری‌های لوله مشبک‌کاری شده می‌باشد[۴، ۹، 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[6] 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

جدول۱. 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[1]	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 بزرگ-ترین ذرات نمونه به یکدیگر را نشان می‌دهد
	Fine	-	نسبت ذرات ریز (d<45μm) به‌کل ذرات برحسب درصد
ویژگی‌های طراحی توری [۳۵]	Screen type	-	تفکیک نوع توری بر اساس: هندسه طراحی شکاف (Seamed یا Sstratified cut)
			اندازه طول شکاف‌های توری: SPC های ۳۰، ۴۵ و ۵۴
	Aperture	μm	اندازه عرض شکاف‌های توری
	dp	psi	اختلاف فشار بسته‌ی ماسه[2]
	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، باید نتایج به‌دست‌آمده به ازای واحد سطح یکسان توری‌ها سنجیده شوند؛ زیرا تغییر مساحت توری می‌تواند بر جرم عبوری از آن تأثیر بگذارد؛ به‌منظور رفع این چالش در پایگاه داده، مقادیر هدف به مساحت توری‌ها تقسیم شدند تا به ازای همه‌ی نمونه‌ها، واحد اندازه‌گیری میزان ماسه عبوری از توری، برحسب پوند بر فوت مربع[3] بیان شود.

1. 1μm = 1micron= 10 -6 m
2. Sandpack
3. lb/ft2

۲-۳. توصیف آماری و پیش‌پردازش داده‌ها

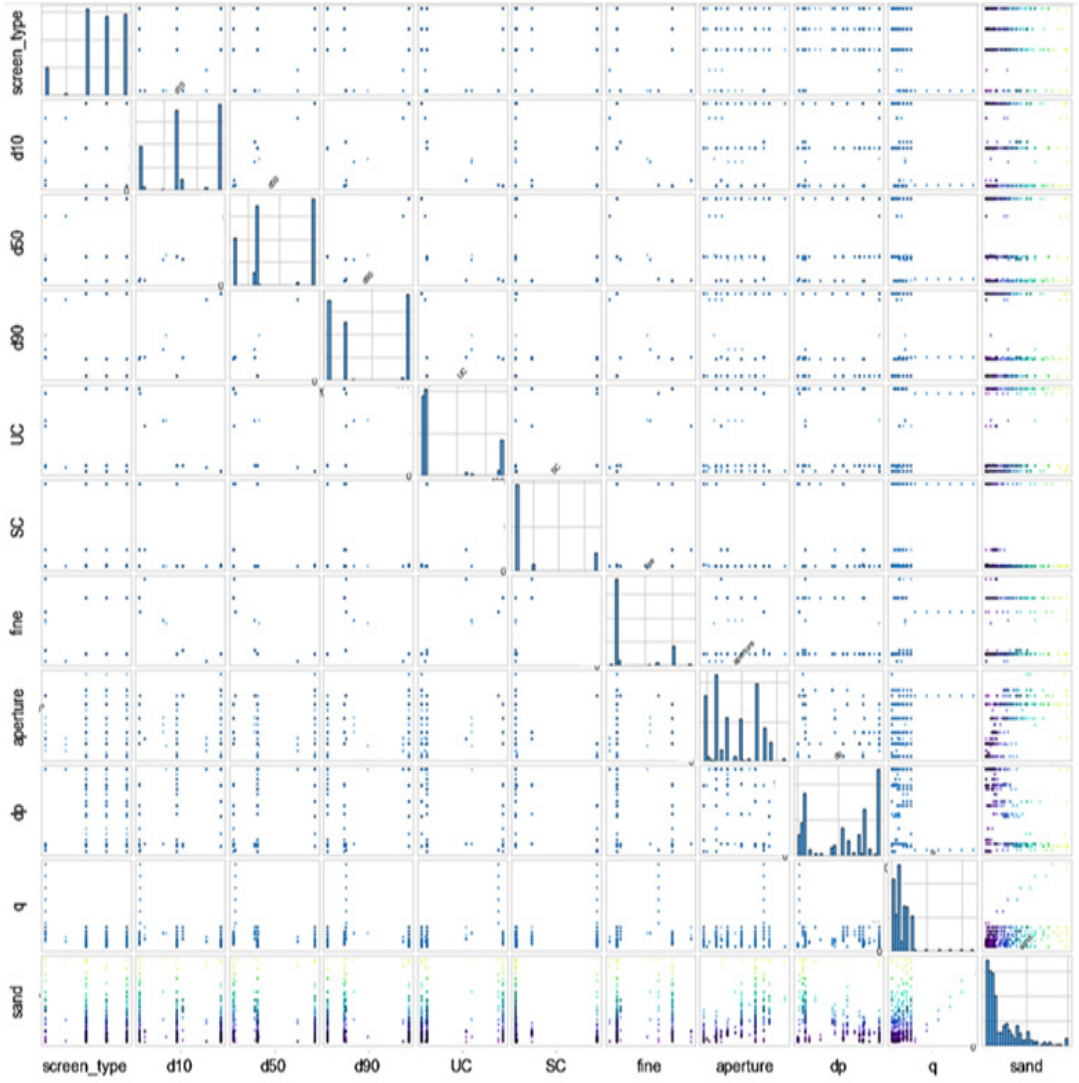
پـس از جمـع‌آوری داده‌هـا، انتخـاب ویژگی‌هـا و تعریف هـدف در پایـگاه داده[1]، به‌منظـور پیش‌پـردازش مناسـب در مرحلـه بعـدی، وجـود مقادیـر گمشـده[2] در داده‌هـا بـررسی شـد. اطلاعات آماری نشـان داد کـه پایگاه داده فاقـد مقادیر گمشـده اسـت. همچنیـن محـدوده‌ی تغییـرات داده‌های هر یک از متغیرهـا به‌وسیله‌ی نمودارهـای گرافیکی و روش‌های آماری بـررسی شـد. روش‌های آمـاری به محاسـبه‌ی مقادیر میانگیـن، انحـراف معیـار[3]، کمینه[4]، میانـه[5] و بیشینـه[6] برای هـر یـک از متغیرهـا می‌پردازند. اطلاعـات آمـاری و توصیف داده‌هـای پایـگاه داده، در (جدول ۲) ذکر شـده اسـت:

جدول ۲. اطلاعات آماری داده‌های هر یک از متغیرها

ستون / معیار	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

بـا بـررسی نتایج حاصل از (جدول ۲) مشـخص شـد که بـازه‌ی تغییـرات مقادیـر متغیرهـای پایـگاه داده بـا یکدیگر متفاوت‌انـد. ایـن پدیـده باعـث سـوگیری[6] پیش‌بیـنی مـدل به سـمت متغیرهـایی می‌شـود کـه دارای بـازه‌ی بزرگ‌تری هسـتند. به‌منظـور رفـع ایـن مشـکل، داده‌هـای هـر یـک از متغیرها به بازه‌ی (۰،۱) نرمال‌سـازی[7] شـدند[۳۷]. داده‌های متـنی[8] متغیـر Screen_type نیز به کمـک روش Encoder بـه داده‌هـای عـددی تبدیل شـدند تا بـرای فرآینـد آموزش الگوریتم‌هـا آمـاده شـوند. بهتریـن روش تشـخیص داده‌های پـرت[9] بـا توجـه بـه پایـگاه داده، بـررسی و تحلیـل وضعیت تجمـع و مشـابهت داده‌هـا بـه کمـک نمودارهـای توزیع[10] و پراکنـدگی[11] اسـت. در (شـکل ۳) نمودارهـای توزیـع نرمال هریـک از متغیرهـا و نمودارهـای پراکندگی متغیرها نسـبت به یکدیگر نشـان داده شـده اسـت:

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

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 نامتوازنی تعداد نمونه در دسته‌های نوع توری از روش Smooth استفاده شده است. پس از تکمیل پیش‌پردازش، پایگاه داده‌ی نهایی برای آموزش الگوریتم‌ها شامل: ۴۹۹ 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[1] (با قراردادن CV=۵) انجام شد تا همه‌ی داده‌ها در فرآیند آموزش و آزمایش مدل شرکت داده شوند و نتایج مدل دچار سوگیری نشود.

1. Cross Validation

۲-۵. 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[1] ابرپارامترها[2] در الگوریتم‌های انتخابی پرداخته شد و هر یک از الگوریتم‌ها با تنظیم مقادیر مختلف ابرپارامترهایشان به روش جست‌وجوی شبکه‌ای[3] 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[4]، تعداد درخت[5]، حداقل نمونه برای تقسیم گره[6] و ... بهینه‌سازی شدند. ابرپارامتر نرخ یادگیری[7] نیز برای الگوریتم‌های MLP، GB، XGBoost بهینه شد. برای شبکه عصبی حالت‌های مختلف تعداد لایه‌های پنهان[8] تعداد نورون‌ها، حداکثر تکرارهای آموزش[9]، توابع فعال‌سازی[10] و... آزمایش شدند. در الگوریتم SVM ابرپارامترهای: Kernel، C، Gamma و Epsilon بهینه شدند. برای الگوریتم KNN ابرپارامترهای: تعداد همسایگی[11]، وزن‌ها[12] و معیار فاصله[13] 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.

۲-۶. 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[14] 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.

۲-۷. 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

هـدف پیوسـته[1] به‌عنـوان معیـار اصـلی ارزیـابی دقـت مدل توصیه می‌شـود [۳۸]. نحـوه‌ی محاسـبه‌ی R^2 در رابطه (۱) نشـان داده شـده اسـت:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \quad (۱)$$

کـه در رابطـه (۱) n تعـداد نمونه‌هـا، y_i مقـدار واقـعی، $\hat{y}$ مقـدار پیش‌بینی‌شـده و $\bar{y}$ مقـدار میانگیـن مقادیـر واقـعی نمونه‌هـای هـدف را نشـان می‌دهـد.

EV: ایـن معیار نشـان می‌دهـد کـه پیش‌بینی‌های مدل، چـه میـزان از واریانس مقادیـر هدف را توضیـح می‌دهند. این معیـار نسـبت به R^2 حسـاسیت کمتری به مقادیـر پیش‌بینی پـرت نشـان می‌دهـد و به‌عنـوان یک معیـار ارزیابی مناسـب برای داده‌های آزمایشـگاهی قابل‌اسـتفاده اسـت. از مقایسه‌ی مقـدار اختـلاف بیـن معیارهـای R^2 و EV میـزان سـوگیری مدل‌ها مشـخص می‌شـود. نحوه‌ی محاسـبه‌ی دقـت مدل به روش EV در رابطه (۲) نشـان داده‌شـده است:

$$EV = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \hat{y} - (\bar{y} - \hat{y}.)\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \quad (۲)$$

کـه در رابطـه (۲) n تعـداد نمونه‌هـا، y_i مقـدار واقـعی، $\hat{y}$ مقدار پیش‌بینی‌شـده و $\bar{y}$ میانگین مقادیـر واقعی، .$\hat{y}$میانگین مقادیـر پیش‌بینی‌شـده‌ی نمونه‌هـا را نشـان می‌دهـد[۳۹]. بـرای ارزیابی دقیق‌تـر عملکرد الگوریتم‌هـا، معیارهای خطای RMSE و MAE نیـز به‌کاررفتـه گرفته‌شـده‌اند که می‌توانند اختلاف پیش‌بینی‌ها را ارزیابی کنند. معیارهای خطای انتخابی به‌کاررفته در پژوهش در ادامه توضیح داده‌شده‌اند:

MAE: معیـاری کـه میانگیـن قـدر مطلـق اختـلاف پیش‌بینی‌هـا و مقادیـر واقعی را محاسـبه می‌کنـد و به‌عنوان معیـار خطای اصلی برای ارزیابی عملکرد مدل در این پژوهش در نظر گرفته شـده است؛ زیرا یک سنجش قابل‌درک از مقدار خطای مورد انتظار در پیش‌بینی مقادیر هدف ارائه می‌دهد که با همان واحد اندازه‌گیری مقادیر هدف بیان می‌شـود. به‌علاوه بـرای داده‌هـای آزمایشـگاهی کـه ممکن اسـت دارای خطای ذاتی یا اندازه‌گیری باشـند؛ مناسب‌تر است. نحوه‌ی محاسبه‌ی MAE در رابطه (۳) نشان داده‌شده است:

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} | y_i - \hat{y} | \quad (۳)$$

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

RMSE: این معیار به محاسبه‌ی ریشه‌ی میانگین مربعات اختـلاف مقادیـر پیش‌بینی‌شـده و مقادیـر واقـعی می‌پـردازد و به‌عنـوان یـک معیـار کمـکی در کنـار MAE به‌کارگرفتـه شـده اسـت کـه روی پیش‌بینی‌هـای پـرت مـدل حسـاسیت بیشـتری نشـان می‌دهد. براسـاس این معیار، خطاهای بزرگ در پیش‌بیـنی جریمـه بیشـتری می‌شـوند و روی نمونه‌هـایی که مدل در یادگیری آن‌ها عملکرد ضعیف‌تری داشـته اسـت؛ تمرکز بیشتری دارد تا تأثیر آن‌ها را روی مدل ارزیابی کند که این مزیت برای کاربرد صنعتی پژوهش مناسـب است. نحوه‌ی محاسبه‌ی RMSE در رابطه (۴) نشان داده‌شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y})^2} \quad (۴)$$

کـه در رابطه (۴) n تعـداد نمونه‌ها، y_i مقدار واقـعی، $\hat{y}$ مقدار پیش‌بینی‌شده‌ی نمونه‌هاست[۴۰].

در مرحلـه‌ی بعـد، بـه مقایسـه‌ی عملکـرد الگوریتم‌هـای مختلف به‌وسیله‌ی معیارهای دقت و خطا پرداخته شد و برای انتخاب مـدل برتر بین الگوریتم‌های دارای عملکرد مشـابه، از رسم نمودارهای ارزیابی استفاده شد که مقادیر پیش‌بینی‌شده را برحسب مقادیر واقعی هدف نشان می‌دهند. در این نمودارها میـزان مطابقت نتایج پیش‌بینی بـا مقادیر واقعی (تجمع نقاط حول نیمساز) قابل‌مشاهده است که به‌منظور تشخیص بهترین مدل استفاده‌شده است.

۳. نتایج مدل‌ها

به‌منظـور بهره‌گیـری از روش‌های یادگیـری ماشین روی پایگاه داده، همبسـتگی هر یـک از ویژگی‌ها با هدف پژوهش بـررسی شـد. تحلیـل رابطـه‌ی بیـن متغیرهـای مختلـف به کمک ماتریس ضرایب همبسـتگی امکان‌پذیر اسـت: بنابراین به‌وسیله‌ی این روش، می‌توان به اولویت‌بندی و تحلیل عوامل مؤثـر بر تولید ماسـه پرداخت. در (شـکل ۴) ماتریس ضرایب همبستگی نشان داده‌شده است:

1. Continuous



شکل ۴. ماتریس ضرایب همبستگی محاسبه‌شده در پایگاه داده

با توجه به نتایج حاصل از ماتریس ضرایب همبستگی در (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 می‌دهد در شرایطی که قطر ذرات مختلف نمونه ماسه به یکدیگر نزدیک‌تر باشد؛ کنترل تولید ماسه بهتر صورت می‌گیرد. درنهایت 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.

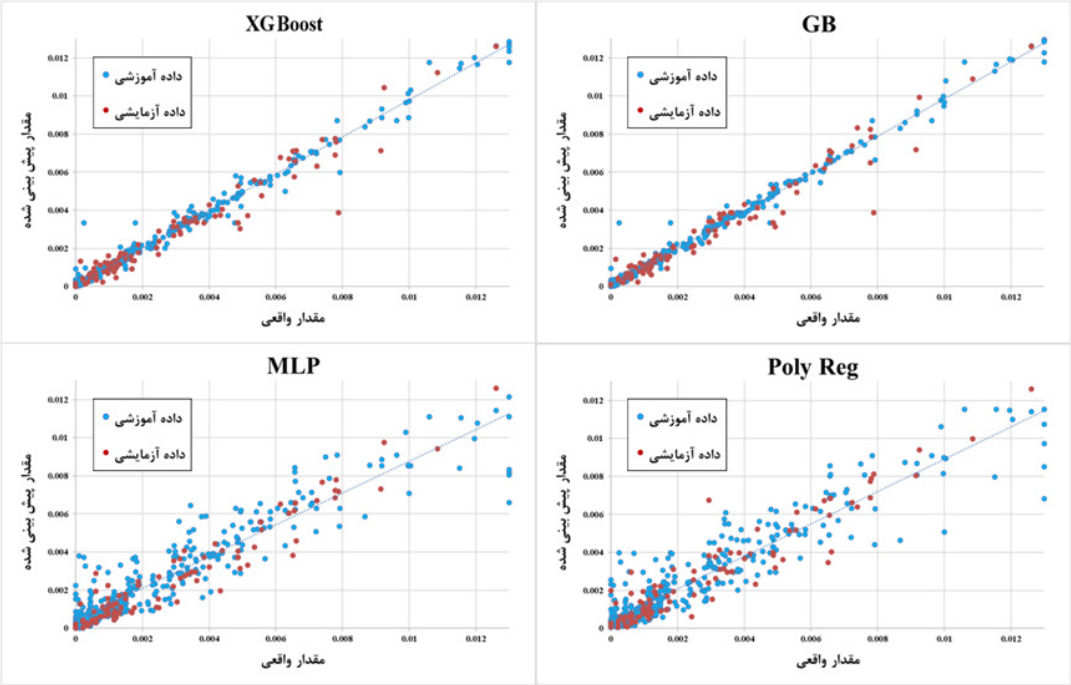
در ادامه‌ی پژوهش به فرآیند آموزش و بهینه‌سازی الگوریتم‌های انتخابی بر روی داده‌های آموزشی پرداخته شد. پس از تکمیل فرآیند آموزش برای ارزیابی دقت پیش‌بینی الگوریتم‌ها، مقادیر هدف برای داده‌های آزمایشی پیش‌بینی شدند. برای انتخاب مدل برتر از روش‌های اعتبارسنجی استفاده شد و الگوریتم‌ها براساس نتایج به‌دست‌آمده 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:

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

Model	R2	EV	MAE ($\times10^{-4}$)	RMSE ($\times10^{-4}$)
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 (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 Regنیز 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 قرمزرنگ نشان‌دهنده‌ی داده‌های آزمایشی هستند.

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. ازآنجاکه 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 افزایش‌یافته 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.



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

مراجع:

[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 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.

[3]. Velayati A, Roostaei M, Fattahpour V, Mahmoudi M, Nouri A, Alkouh A, et al., editors. Design Optimization of Slotted

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: 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, Maoinser 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

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

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.

[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.

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

Volume 13 / Issue 1 / NO. 25 / Spring 2026 / Pages 102-118

Journal Homepage: https://ijge.irangi.org

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: 07 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

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

IRANIAN GAS INSTITUTE

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

نشـــریه مهندسی‌گاز ایـــران

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

سرمقاله

تجاری‌سـازی فناوری و ارتقای سـطح کیفی تجهیزات راهبردی؛ از بلوغ علمی تا خلـق ارزش صنعـتی ۷
محمدحسین مهرآراد

مقالات

بهینه‌سازی انرژی در صنایع انرژی‌بر با رویکرد اقتصاد مهندسی: مطالعه موردی بهره‌وری در شرکت‌های بین‌المللی ۹
رضا رفیعی، آرمین ثابت‌قدم اصفهانی، یگانه داود بیگی، سید محمود لطیفی

مدل‌سازی 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 بهینه‌سـازی اقتصادی پیکربندی‌های چندمرحله‌ای غشایی برای جداسـازی دی‌اکسید کربن از متان ۵۳
سعید خادمی، ابوالفضل کیان، بصیر ملکی

تبدیـل متانول به آروماتیک‌های سـبک با اسـتفاده از نانوزئولیت HZSM5: اثرات شـرایط 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 ماسـه عبوری از لوله‌ی مشـبک‌کاری شده به کمک الگوریتم‌های یادگیـری‌ماشیـن ۱۰۳
محمدالیاس خداشناس

IJGE
IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

www.ijge.irangi.org