

IJGE



نشریه مهندسی گاز ایران

سال دهم / جلد هفدهم / شماره اول

تابستان ۱۴۰۲

EISSN:25885-5251



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

صاحب امتیاز: انجمن مهندسی گاز ایران
مدیر مسئول: دکتر محمدرضا امیدخواه
سر دبیر: دکتر رضا مسیبی بهبهانی
دبیر تخصصی: دکتر مرتضی زیودار
ویراستاری: تاهید امینی
صفحه آرایی: مهندس حمیدرضا کریمی
شماره شاپا: ۵۲۵۸۸-۵۲۵۸۱



هیأت تحریریه:

دکتر علی وطنی (دانشگاه تهران)
دکتر مرتضی زیودار (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر وحید نقی خانی (دانشگاه صنعتی شریف)
دکتر سید علیرضا طباطبائی نژاد (دانشگاه صنعتی سهند)
دکتر رهبر رحیمی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر سید حسام نجیبی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر ابوالقاسم امام زاده (دانشگاه آزاد - واحد علوم تحقیقات تهران)
دکتر مسعود آفاجانی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر محمدرضا احسانی (دانشگاه صنعتی اصفهان)
دکتر علیمراد رشیدی (پژوهشگاه صنعت نفت)
دکتر سید رضا شادی زاده (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر محسن مسیحی (دانشگاه صنعتی شریف)
دکتر منصور فرزام (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر محمدرضا خسروی نیکو (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر عبدالنهی هاشمی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر هوشنگ جزایری راد (دانشگاه صنعت نفت)

نشانی انجمن مهندسی گاز ایران

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

پست الکترونیکی نشریه

ijge.igi@gmail.com

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



اعضاء هیئت داوران نشریه شماره ۱۷

- دکتر علی وطنی (دانشگاه تهران)
دکتر نسیمه حاجیلری (دانشگاه گلستان)
دکتر محمدحسین مابری (دانشگاه سمنان)
دکتر مسعود آقاجانی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر علیمیر ادرشیدی (پژوهشگاه صنعت نفت)
دکتر رضا مسیبی بهیانی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر رهبر رحیمی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر محمدرضا احسانی (دانشگاه صنعتی اصفهان)
دکتر بهاره بیدار (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر محمد رضا امیدخواه (دانشگاه تربیت مدرس)
دکتر مرتضی زیودار (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر مجتبی ساعدی مقدم (دانشگاه صنعتی قوچان)
دکتر وجیهه یوسفی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر کیانوش رزاقی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر محمد رضا خسروی نیکو (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر حمید مقدم دیمه (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر حسین زهدی فسایی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر مستانه حاجی پور (دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات)
دکتر میرمحمد خلیلی پور لنگرودی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر محمد رضا سردشتی بیرجندی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر زهره خلیفات

فهرست مطالب

◀ سرمقاله

- ۶ مدیریت بهره‌وری در صنایع

◀ مقالات

- ۸ مروری بر سنتز متانول، پیشنهاد سازوکار تولید بر اساس پتانسیل تعلیق کلونیدی و روش DFT
اسدالله فرهادی

- ۲۸ امکان‌سنجی اقتصادی و محیط‌زیستی استفاده از سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت (mCHP) در منازل مسکونی تهران
اسماعیل قاسمی کفرودی، محمدرضا حبیبی، محمد خالیدی سردشتی، محمدعلی مانیان، زینب سبحانی

- ۴۳ بهینه‌سازی افزایش تولید با یکی از روش فراز آوری مصنوعی برای افزایش تولید از یکی از چاه‌های میدان نفتی اهواز
مهدی امیرخانی، مازیار نوعی، علی حسینی، سلیمان مصلح، مسعود بیژنی

- ۵۹ توزیع میکرو/نانوذرات ZrO_2 بر روی فولاد ST37 به کمک فرآیند اصطکاک اغتشاشی و بررسی تأثیر آن بر ارتقاء خواص فولاد در برابر خوردگی
سید محمدحسین شریفی، آرمین ثابت‌قدم اصفهانی، یگانه داودبیگی

- ۶۹ بهبود شرایط تولید برای جلوگیری از پسماند مایع در یکی از چاه‌های گازی عمودی در ایران
محمد دوستی، مسعود بیژنی، همدم مجد تیموری، سجاد سپاسی‌فر

- ۸۰ اثر تعادل بخار-مایع بر جذب گاز CO_2 توسط محلول آبی پپرازین و مایع یونی به روش طراحی آزمایش مرکب مرکزی
سهیلا زارع، عبدالرسول پوران فرد

- ۹۴ راهنمای نگارش مقالات در مجله علمی / ترویجی مهندسی گاز ایران





سر مقاله



پروفسور رهبر رحیمی

از مؤسسين انجمن مهندسی گاز ایران و
عضو مدعو شاخه مهندسی شیمی فرهنگستان علوم ایران

مدیریت بهره‌وری در صنایع

سرعت رشد صنایع و توسعه آن در دهه‌های اخیر حاکی از آن است که کشور در حال گذر از یک اقتصاد نیمه‌صنعتی به صنعتی است. نمونه بارز این امر تعداد بسیار بالای شرکت‌های دانش‌بنیان می‌باشد. توجه داشتن به تولید و بهره‌ور بودن آن می‌تواند ضمن سرعت بخشیدن به رشد و توسعه صنعتی، آن را در مسیری صحیح و اصولی هدایت کند. از این رو برآشنایی سازمان‌ها با مفاهیم بهره‌وری و راهکارهای افزایش آن تأکید می‌شود. درجه توسعه‌یافتگی صنایع به میزان قابل توجهی به بهره‌گیری مطلوب و بهینه از منابع و امکانات تولید بستگی دارد. البته با توجه به شرایط سازمان‌ها و سیاست‌های مدیریتی طبیعی است که از طرق مختلف و متناسب با وضعیت موجود می‌بایست اقدام کرد. شایسته است که مدیران صنعت با آموزش هرچه بیشتر بهره‌وری را به فرهنگ عمومی شرکت تبدیل نمایند.

[۱] - محمد آسسالان، ابودر تاجیک، «بررسی ابعاد رهبری تحول‌آفرین و تأثیر آن بر سازمان‌های آموزشی»، کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در مدیریت و مهندسی صنایع، آبان ۱۳۹۴.

آدرس پست الکترونیک: rahbarrahimi@gmail.com

در بسیاری از کشورهای صنعتی در نقاط مختلف جهان بهره‌وری^۱ یک طرز فکر و فرهنگ است. به تعبیری بهره‌وری تفکر پیشبرد و بهبود آنچه که وجود دارد، است. برای واژه بهره‌وری تعاریف متفاوتی داده شده است. در سال ۱۷۵۸ کنه^۲ با طرح جدول اقتصادی، اقتدار هر دولتی را منوط به افزایش بهره‌وری در بخش کشاورزی دانست.

در سال ۱۸۸۳ فرانسوی دیگری به نام «لیتره»^۳ بهره‌وری را دانش و فن تولید تعریف کرد. در سال ۱۹۵۰ سازمان همکاری اقتصادی اروپا به‌طور علمی بهره‌وری را چنین تعریف کرد: «بهره‌وری حاصل کسری است که از تقسیم مقدار یا ارزش محصول بر مقدار یا ارزش یکی از عوامل تولید به دست می‌آید. بدین لحاظ می‌توان از بهره‌وری سرمایه، مواد اولیه و نیروی کار صحبت کرد.

سازمان بین‌المللی کار بهره‌وری را چنین تعریف کرده است: «بهره‌وری»^۴ عبارت است از نسبت ستاده به یکی از عوامل تولید (زمین، سرمایه، نیروی کار و مدیریت). در این تعریف «مدیریت» به‌طور ویژه یکی از عوامل تولید در نظر گرفته شده است. نسبت تولید به هر کدام از این عوامل معیاری برای سنجش بهره‌وری محسوب می‌شود.

در سال ۱۹۵۸ آژانس بهره‌وری اروپا بهره‌وری را درجه و شدت استفاده مؤثر از هر یک از عوامل تولید تعریف کرد. همچنین این سازمان اعلام داشت که «بهره‌وری» نوعی طرز تفکر و دیدگاه است که بر پایه آن هر فرد می‌تواند کارها و وظایفش را هر روز بهتر از روز قبل انجام دهد [۱].

1. Productivity
2. Francois Quesnay
3. Littré
4. Efficacy/efficiency

کسب رتبه یک انجمن مهندسی گاز ایران در بین تمامی گروه‌های شش‌گانه
در ارزیابی سال ۱۴۰۰ کمیسیون انجمن‌های علمی و تقدیر دبیر محترم کمیسیون از انجمن مهندسی گاز ایران

بسمه تعالی

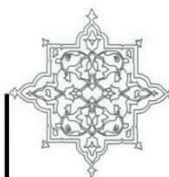
تاریخ: ۱۴۰۱/۱۲/۰۹

شماره: ۳/۳/۳۷۰۵۵۸

پیوست:



جمهوری اسلامی ایران
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری



جناب آقای مهندس منصور دفتریان
رئیس محترم انجمن مهندسی گاز ایران

با سلام و احترام

بدینوسیله مراتب سپاس و تقدیر اینجانب از زحمات و تلاشهای ارزشمند حضرتعالی و اعضای محترم هیئت مدیره در کسب رتبه یک آن انجمن در بین تمامی گروه‌های شش‌گانه در ارزیابی سال ۱۴۰۰ کمیسیون انجمن‌های علمی را اعلام می‌دارم.

از درگاه ایزد منان توفیقات روزافزون شما را در سایه توجهات حضرت بقیه الله (عج) و پیروی از منویات حکیمانه رهبر معظم انقلاب اسلامی مسئلت می‌نمایم.

امید است در سایه توجهات ایزد منان و تلاش‌های موجود، طی سالهای آتی نیز شاهد رشد و اعتلاء بیشتر آن انجمن و پیشرفت روزافزون جامعه علمی کشور باشیم.

شماره پیگیری

۱۰۰۰۰۰۷



با آرزوی توفیق الهی

علی ابرانمنش

دبیر کمیسیون انجمن‌های علمی ایران

نشانی:

تهران شهرک قدس
میدان صنعت، خیابان
خوردین، خیابان هرمزان
نبش خیابان پیروزان جنوبی
کد پستی: ۱۴۶۶۶-۶۴۸۹۱
شماره تلفن: ۸۲۲۳۱۰۰۰
صندوق پستی:
تهران ۱۵۱۳-۱۴۶۶۵
Website: www.msrt.ir
Email: info@msrt.ir



مروری بر سنتز متانول، پیشنهاد سازوکار تولید بر اساس پتانسیل تعلیق کلوئیدی و روش DFT

اسدالله فرهادی*

استادیار، گروه علوم پایه، دانشکده نفت اهواز، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: farhadichem@put.ac.ir

مقاله‌ی مروری

صفحه ۸ - ۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳

چکیده

متانول یکی از رایج‌ترین ترکیبات شیمیایی در صنایع پتروشیمی می‌باشد. این ترکیب به‌عنوان سوختی که از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه و دارای آلودگی کمتری است استفاده می‌شود. متانول قابلیت تبدیل به ترکیبات اتری، الفین، پلیمر، اسید استیک، وینیل استات و ... است. در این تحقیق، ابتدا روش‌های تولید گاز متان به‌عنوان ماده اولیه متانول، سپس روش‌های تولید متانول با استفاده از گاز منواکسید کربن، دی‌اکسید کربن و متان بررسی شد. سنتز متانول از متان تحت شرایط حرارتی و تابش امواج نوری انجام می‌گیرد که به دمای بالای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار بالای نیاز است. برای تعدیل شرایط واکنش از کاتالیزورهای مختلفی استفاده شد که نتایج نشان می‌دهد بهترین کاتالیزور، مشتقات فلز مس است. با استفاده از کاتالیزورهای بهینه‌شده تشکیل محصولات جانبی به حداقل رسید. همچنین با ثبت طیف پتانسیل تعلیق کلوئیدی و با کمک روش تابعیت چگالی سازوکاری برای تولید متانول پیشنهاد شد.

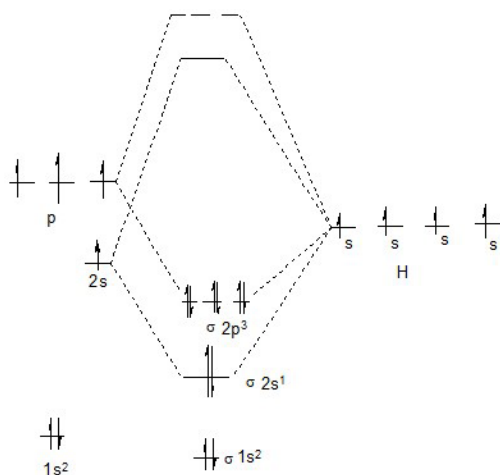
کلیدواژه‌ها: متانول، متان، منواکسید کربن، دی‌اکسید کربن، پتانسیل تعلیق کلوئیدی، روش تابعیت چگالی

۱. مقدمه

گلیکول، آمونیاک، اوره و ... را تشکیل می‌دهند. محصولات تولید شده در صنایع پتروشیمی را به چند دسته می‌توان تقسیم کرد که متانول، آمونیاک، الفین‌های سبک و ترکیبات آروماتیک جزء محصولات با ارزش قرار دارند. تقاضای عمده این مواد اولیه در تولید پلاستیک، الیاف مصنوعی، صنایع لاستیک‌سازی و تهیه کودهای نیتروژنی است. متانول و آمونیاک پرکاربردترین محصولات شیمیایی می‌باشد [۳]. گزارشات آژانس بین‌المللی انرژی نشان می‌دهد که متانول در بین محصولات پایه بیشترین رشد تا سال ۲۰۳۰ به میزان ۵۰ درصد و تا سال ۲۰۵۰ به میزان ۱۰۰ درصد را خواهد کرد [۴]. از مهم‌ترین منابع تولیدکننده ماده اولیه برای تولید متانول گاز طبیعی و

عرضه جهانی محصولات پتروشیمی با روند فزاینده‌ای در حال افزایش است و کشورهای خاورمیانه نقش بسزایی را در این روند دارند. گردش مالی پتروشیمی در سال ۲۰۱۹ از ۵,۷ تریلیون دلار عبور کرده و این متغیر در ده سال اخیر رشد سالیانه ۴ درصدی داشته است [۱ و ۲]. کشور ایران نزدیک به ۱۰ درصد ذخایر نفت و ۱۸ درصد ذخایر گاز جهان را دارد که یکی از بزرگ‌ترین منابع تأمین‌کننده خوراک صنایع پتروشیمی‌ها می‌باشد. تنوع محصولات تولیدی پتروشیمی، از عوامل اصلی پایداری در این صنعت هست. کشور ایران به‌طور متوسط طی ۱۰ سال اخیر، نزدیک به ۴۰ درصد محصولات تولیدی در مجتمع‌های پتروشیمی را صادر کرد. محصولات اصلی صادراتی ایران عبارتند از: پلی‌اتیلن، متانول، اتیلن





شکل ۱: دیاگرام اوربیتال مولکولی متان

۲-۲. اکسیداسیون مولکول متان

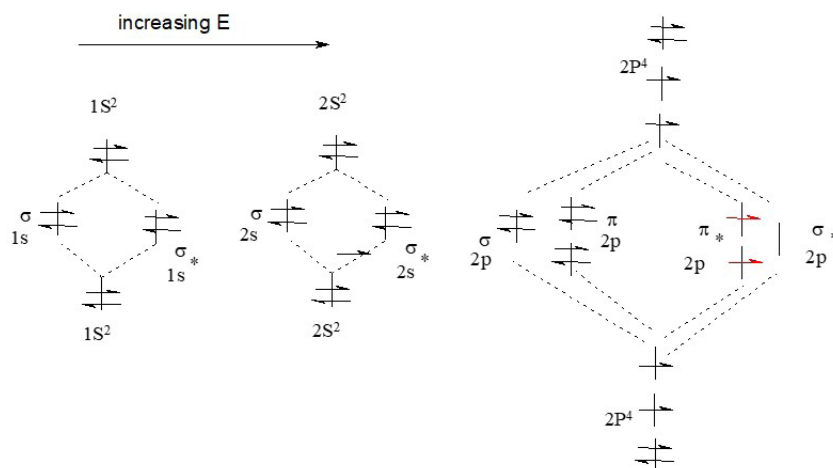
اکسیداسیون گاز متان در حضور کاتالیزور و بدون کاتالیزور (روش مستقیم) انجام می‌شود. در روش اکسیداسیون مستقیم متان، محصولات جانبی مانند فرم آلدهید و متانوائیک اسید نیز تشکیل می‌شود (واکنش ۱).



واکنش ۱: روش مستقیم اکسیداسیون متان

۲-۲-۱. سازوکار اکسایش متان

از آنجاکه انرژی شکست پیوند C-H متان و اکسیژن-اکسیژن به ترتیب ۱۰۳ و ۱۱۹ کیلوکالری/مول می‌باشد و با توجه به دیاگرام اوربیتال مولکولی اکسیژن که در لایه والانس این مولکول دوتا سطح اوربیتالی به صورت نیمه پر وجود دارد (شکل ۲) این ترکیب مانند یک ترکیب دی رادیکال عمل می‌کند بنابراین سازوکار ذیل را می‌توان برای اکسایش پیشنهاد کرد (شکل ۳).



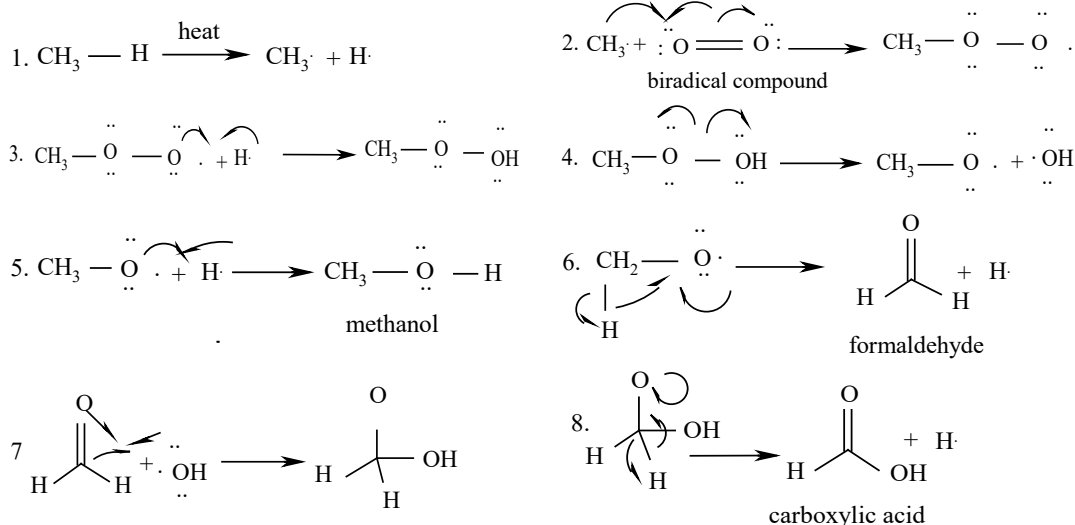
شکل ۲: دیاگرام اوربیتال مولکولی اکسیژن

زغال سنگ هست. امروزه گاز متان از پسماندهای مرغداری، غذایی، کود گوسفندی، پسماند کارخانه‌های تولید آبجو، ضایعات میوه‌ها و ... تولید می‌شود [۵-۹]. همچنین این گاز از طریق واکنش احیاء سنگ کربنات در حضور اکسید آهن و آب تهیه می‌شود [۱۰]. پسماندهای ظروف یکبار مصرف با روش بیوشیمی قابل تبدیل به گاز متان می‌باشد [۱۱]. یکی از مسائلی که امروزه زمینه تحقیقات بسیاری را فراهم آورده است استفاده از گاز طبیعی (متان) به عنوان منبع تأمین کننده انرژی و تبدیل آن به سوخت‌های مایع، مواد شیمیایی و مواد متانول با ارزش است. به دلیل کاربردهای گسترده متانول به خصوص در تولید سوخت‌های پاک مایع مصرف آن روز به روز فزونی می‌یابد. روش‌های مختلفی برای تولید متانول وجود دارد، در این مقاله سنتز متانول از گاز متان، مونواکسید کربن و دی‌اکسید کربن بررسی می‌شود.

۲. بخش تجربی

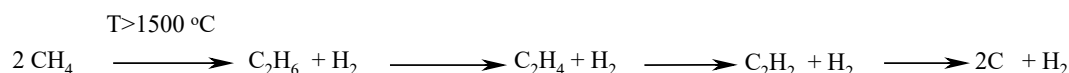
۲-۱. رسم دیاگرام اوربیتال مولکولی متان با کمک برنامه گوسین

مولکول متان فاقد گروه‌های عاملی است و به صورت مولکول غیر قطبی است بنابراین جزء دسته گازهای خنثی می‌باشد. همچنین برای شکستن پیوند C-H به ۱۰۳ کیلوکالری/مول انرژی نیاز است بنابراین اکسیداسیون مستقیم این مولکول و تولید متانول از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست [۱۲]. محاسبات دیاگرام اوربیتالی مولکول متان با کمک برنامه گوسین و دستور پایه B3LYP/6-311++G نشان می‌دهد که سطوح اوربیتال‌های مولکولی متان کاملاً پر شده می‌باشد. همچنین این مولکول چون فاقد زوج الکترون آزاد و اوربیتال خالی است بنابراین این گازی خنثی می‌باشد (شکل ۱) [۱۳].



شکل ۳: سازوکار اکسایش متان به روش مستقیم

از دیگر معایب روش اکسیداسیون مستقیم، در دماهای بالا مولکول متان از طریق واکنش رادیکالی منجر به تشکیل مولکول کربن می‌شود (واکنش ۲) [۱۴ و ۱۵].



واکنش ۲: تجزیه حرارتی متان در دماهای بالا

همچنین اکسیداسیون مستقیم این گاز باعث تولید گاز مونواکسید کربن و هیدروژن می‌شود که در مرحله دیگری گاز مونواکسید ایجاد شده از طریق واکنش احیاء قابلیت تبدیل شدن به متانول را دارد (واکنش ۳) [۱۴ و ۱۶].



واکنش ۳: تولید متانول از طریق اکسایش متان و احیاء مونواکسید کربن

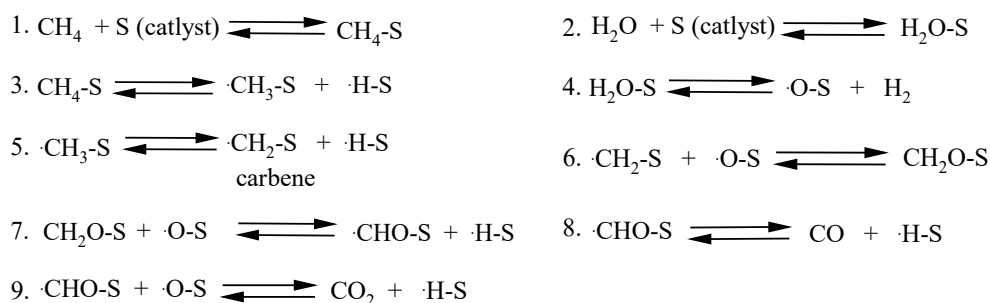
مولکول متان با آب واکنش داده و گاز مونواکسید کربن را ایجاد می‌کند که طی (واکنش ۴) در نهایت به متانول تبدیل می‌شود (واکنش ۳) [۱۴].



واکنش ۴: واکنش اکسایش متانول در حضور مولکول آب

۲-۲-۲. سازوکار اکسایش متان در حضور آب

در این واکنش ابتدا مولکول آب و متان روی سطح کاتالیزور قرار می‌گیرند (جذب فیزیکی) سپس با شکست همولیتیک پیوندهای این مواد، واکنش از طریق تشکیل رادیکال آزاد منجر به تشکیل محصولات می‌شود (شکل ۴).



شکل ۴: سازوکار اکسایش متان در حضور آب

با توجه به اینکه در سنتز متانول به روش مستقیم محصولات جانبی تولید می‌شود و به دماهای بالای نیاز است بنابراین سنتز این ترکیب با استفاده از کاتالیزورهای مختلف و در شرایط مختلف گزارش شد که در ادامه بررسی می‌شود.

تحقیق در مورد اکسایش متان به شروع قرن ۲۰ برمی‌گردد زمانی که Lance و همکارانش در سال ۱۹۰۵

سنتز متانول را از طریق واکنش اکسایش این گاز را در حضور هیدروژن پراکسید یا پراکسی سولفوریک اسید و کاتالیزور فروس سولفات گزارش کردند [۱۷]. سازوکار این واکنش به صورت ذیل می‌باشد. (شکل ۵) از آنجائیکه خصلت اسیدی هیدروژن متان بسیار کم است پس واکنش از مسیر رادیکالی پیش خواهد رفت.



شکل ۵: سازوکار تولید متانول از متان در حضور هیدروژن پراکسید- آهن سولفات

آلاینده‌های سه روش ذیل پیشنهاد می‌شود:

۱. برای استخراج نفت در برخی از مخازن نفتی که فشار پایین است می‌توان با تزریق این گاز بازدهی مخزن را افزایش داد.

۲. با استفاده از روش بیولوژیکی، این گازها قابل تبدیل به محصولات باارزش تری می‌باشد.

۳. امروزه در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی این گازهای گلخانه‌ای به ترکیبات متان و متانول تبدیل می‌شود [۲۲-۲۵].

در سال ۱۹۲۱، Patart از کاتالیزور مس و مس بر پایه اکسیدهای مختلفی مانند $\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3$ ، $\text{ZnO-Cr}_2\text{O}_3$ ، ThO_2 و V_2O_5 ، V_2O_3 سنتز متانول را در فشار ۱۵۰-۲۰۰ اتمسفر و دمای ۳۰۰-۶۰۰ درجه سانتی‌گراد از گاز متان را بررسی کرد [۱۸]. با توجه به تحقیقات انجام گرفته در مورد سنتز متانول از متان در ادامه ابتدا به سنتز تولید گاز متان پرداخته می‌شود.

۲-۳. سنتز متان با استفاده از گازهای گلخانه‌ای

مصرف جهانی انرژی رو به افزایش است داده‌های گزارش شده سازمان انرژی جهانی در سال ۲۰۱۹ با توجه به رشد سریع اقتصادی در سراسر جهان و افزایش جمعیت، نشان می‌دهد که مصرف انرژی در سال ۲۰۱۸، در سراسر جهان ۲/۳ درصد افزایش یافته است تقریباً دو برابر میانگین نرخ رشد از سال ۲۰۱۰ است. اثرات زیان‌آور چنین مصرف انرژی، باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای شد. در سال ۲۰۱۸، این سازمان روند افزایش گاز دی‌اکسید کربن را نسبت به سال ۲۰۱۷، ۱/۷ درصد گزارش کرد. با این حال، چالش‌های مربوط به انرژی‌های تجدیدپذیر نیازمند راه‌های جایگزین برای تبدیل آن به سوخت و مواد شیمیایی با رویکرد نوظهور X Power-to- X ، شامل سوخت‌های متانول، هیدروژن، آمونیاک، ترکیبات اتری و ... می‌باشد [۱۹-۲۱]. مسائل زیست‌محیطی مرتبط با افزایش دمای زمین، به مصرف سوخت‌های فسیلی مرتبط می‌شود که این روند باعث شد که جهان به سمت استفاده کارآمد و مقرون به صرفه از انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده شود. با توجه به روند افزایشی زیاد گازهای گلخانه‌ای در سال‌های اخیر، برای کاهش غلظت این

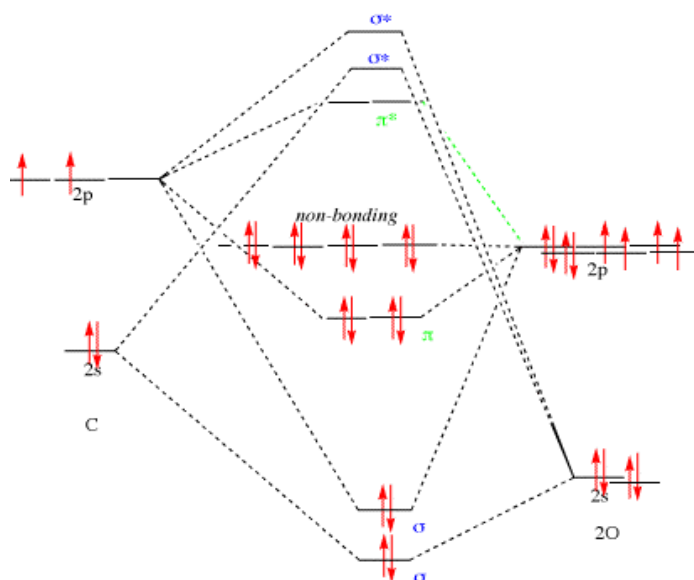
قبل از اواخر دهه ۱۹۵۰، متانول با استفاده از گازهای مونواکسید کربن و دی‌اکسید کربن در حضور کاتالیزور $\text{ZnO/Cr}_2\text{O}_3$ سنتز شد از معایب این روش فشار ۲۵-۳۵ مگاپاسکال و دمای بین ۵۹۰-۶۷۰ درجه کلوین بود. در همان زمان که از کاتالیزور CuO/ZnO برای سولفورزدایی گازهای استفاده شد، سنتز متانول با خوراک گازهای گلخانه‌ای و با کمک این کاتالیزور مورد بررسی قرار گرفت نتایج به دست آمده نشان داد که فعالیت این کاتالیزور نسبت به کاتالیزور $\text{ZnO/Cr}_2\text{O}_3$ بهتر است و واکنش در دمای پایین‌تر (۵۰۰-۵۷۵ درجه کلوین) و فشار ۵-۱۰ مگاپاسکال انجام می‌گیرد [۲۶]. تبدیل گاز دی‌اکسید کربن به متان در حضور گاز هیدروژن که از روش سازوکار واکنش‌های احیا انجام می‌گیرد تحت شرایط حرارتی، تابش امواج نوری، با استفاده از جریان الکتریکی و روش بیوژنتیکی انجام می‌شود [۲۷-۳۲]. احیا گاز مونواکسید کربن و دی‌اکسید کربن و تولید گاز متان تحت شرایط حرارتی، در دمای ۲۵۰-۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲۵ بار انجام می‌شود (واکنش ۵) [۲۷ و ۳۳ و ۳۴].



واکنش ۵: احیای گازهای دی‌اکسید و مونواکسید کربن



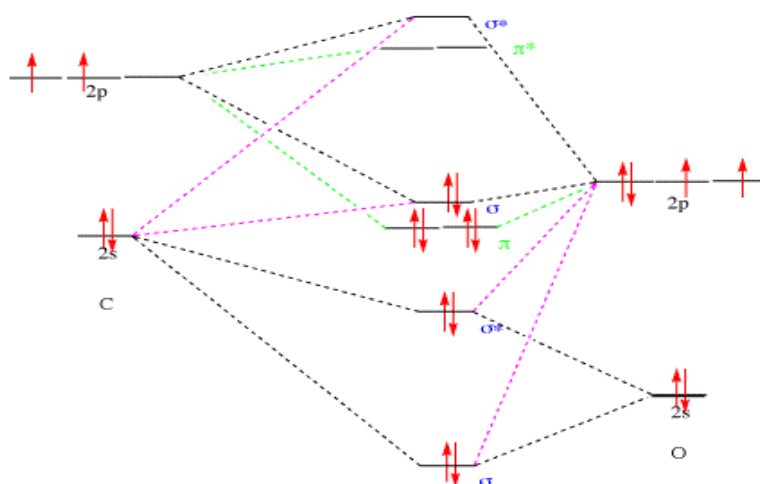
محاسبات تئوری انجام شده با روش DFT و با دستور محاسباتی B3LYP و پایه محاسباتی 6-311G++ Freq دیاگرام‌های اوربیتال مولکولی مربوط به ترکیبات مونواکسید و دی‌اکسید کربن در (شکل‌های ۶ و ۷) نمایش داده شد.



شکل ۶: دیاگرام اوربیتال مولکولی CO₂

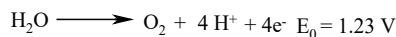
منتقل شود تا واسطه رادیکالی ایجاد شود و واکنش طی مراحل بعدی به متان تبدیل شود. همچنین چون واسطه‌های رادیکالی کربن تولید می‌شود بنابراین شکست پیوند مولکول هیدروژن هم باید به صورت همولیتیک صورت بگیرد. در این واکنش اگر اختلاف سطوح HOMO و LUMO این دو گاز کاهش یابد شرایط انجام واکنش ملایم‌تر خواهد شد علت انجام واکنش در محدوده دمایی زیاد از همین طریق قابل بررسی می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که سطوح HOMO مربوط به این دو ترکیب توسط الکترون کاملاً پر شده است به همین دلیل این مولکول‌ها برای انجام واکنش نیاز به انرژی اکتیواسیون بالایی دارند [۳۵]. نتایج نشان می‌دهد که سازوکار واکنش از طریق ایجاد واسطه‌های رادیکالی انجام می‌شود. برای اینکه واکنش احیا گازهای مونواکسید و دی‌اکسید کربن انجام شود باید یک الکترون از سطوح اوربیتالی HOMO به سطوح اوربیتالی LUMO

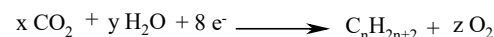
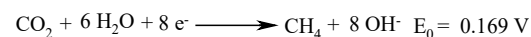


شکل ۷: دیاگرام اوربیتال مولکولی CO

واکنش احیای گاز دی اکسید کربن با استفاده از روش الکتروشیمیایی از طریق (واکنش ۵) در دو محیط اسیدی و قلیایی انجام می شود [۳۶]. این نیمه واکنش در الکتروکاتود انجام می گیرد واکنش آندی این روش، هیدرولیز آب است که می شود (واکنش ۶) [۳۷].



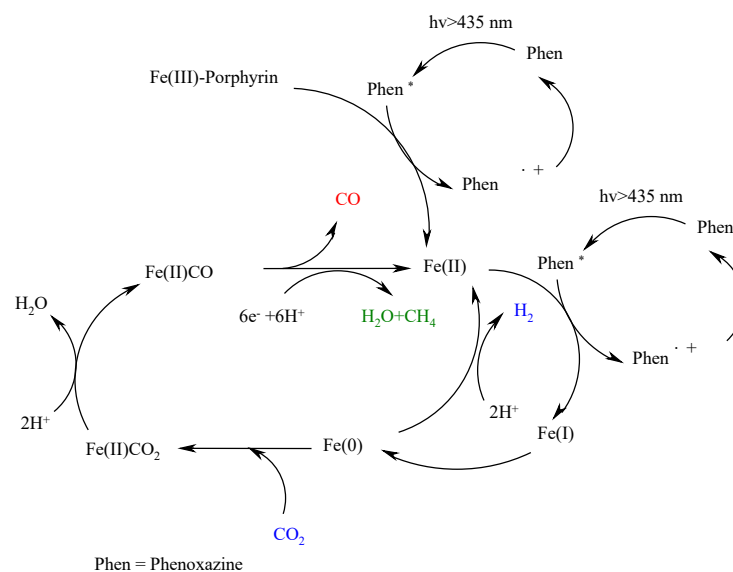
واکنش احیای گاز دی اکسید کربن با استفاده از روش الکتروشیمیایی از طریق (واکنش ۵) در دو محیط اسیدی و قلیایی انجام می شود [۳۶]. این نیمه واکنش در الکتروکاتود انجام می گیرد واکنش آندی این روش، هیدرولیز آب است که می شود (واکنش ۶) [۳۷].



واکنش ۶: سنتز ترکیبات هیدروکربن از طریق احیای گاز دی اکسید کربن با روش الکتروشیمیایی

مشتقات پیریدین-ایریدیم (III)، تیتانیوم اکسید و ... تحت تابش نور مرئی انجام می شود [۳۸]. برای انجام این واکنش می توان سازوکار ذیل را گزارش کرد. (شکل ۸) سازوکار واکنش از مسیر انتقال الکترون انجام می گیرد که باید در ابتدا گاز دی اکسید کربن به حالت تحریک شده تبدیل شود تا بتواند چنین واکنشی را انجام دهد. انجام واکنش در شرایط نور مرئی نیاز به استفاده از حسگرهای نوری است. از این حسگرهای نوری می توان به مشتقات دی هیدرو فنازین [۳۸] و فناکسازین [۳۹ و ۴۰] اشاره کرد.

در سنتز ترکیبات هیدروکربنی از طریق احیای گاز دی اکسید و مونواکسید کربن به روش الکتروشیمیایی ترکیباتی مانند: اسید فرمیک، کربن سیاه، متانول، اسید استیک، اتانال، اتانول و ... ایجاد می شود که میزان این ترکیبات ایجاد شده به نوع الکترودهای مورد استفاده در این روش بستگی دارد [۳۷]. احیای گاز دی اکسید کربن در حضور آب و تابش نور مرئی و در فشار محیطی توسط گیاهان انجام می شود. بر اساس این الگوی طبیعی، واکنش احیای این گاز در مقیاس آزمایشگاهی، در حضور فوتوکاتالیزورهای چون آهن-پورفرین،



شکل ۸: سازوکار سنتز متان تحت تابش نور مرئی با کمک فتوکاتالیزور آهن (III)-پورفیرین و حسگر نوری فناکسازین

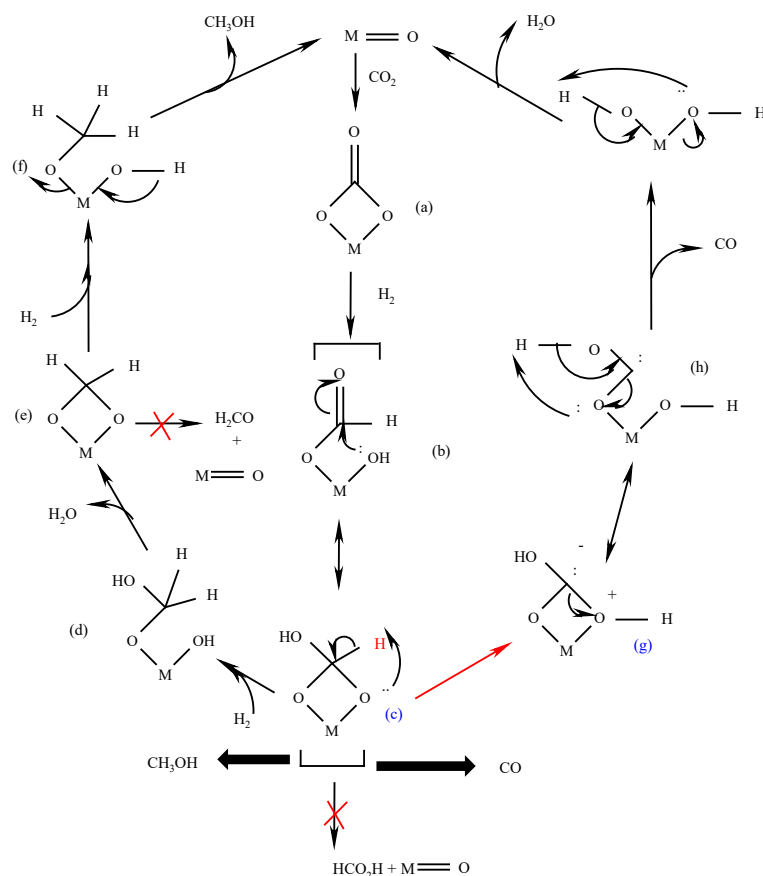
۱-۳-۲. سنتز متانول از گازهای گلخانه ای مونواکسید و

دی اکسید کربن

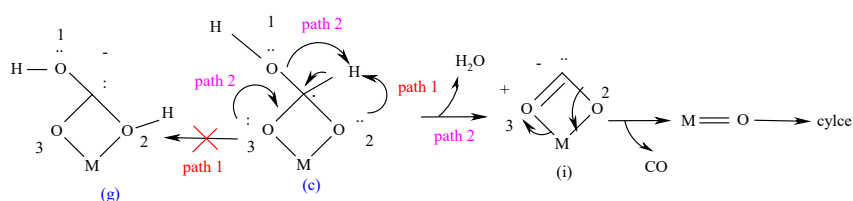
رویکردهای فناورانه ای که امکان استفاده مؤثر از CO₂ و CO را برای تولید مواد شیمیایی و سوخت با ارزش افزوده فراهم کند، می تواند به حل مشکلات زیست محیطی ناشی از انتشار زیاد این گازهای گلخانه ای که مرتبط با استفاده از سوخت های فسیلی است کمک کند. علاوه بر تولید گاز متان

که از طریق واکنش احیای انجام می شود [۴۱ و ۴۲] محصول دیگری که می توان از CO₂ سنتز کرد متانول است [۴۳]. با این حال، بهینه سازی پارامترهای عملیاتی تولید متانول از طریق واکنش هیدروژناسیون CO₂ در حال بررسی و مطالعه می باشد [۴۴]. تولید متانول از طریق سازوکار احیای

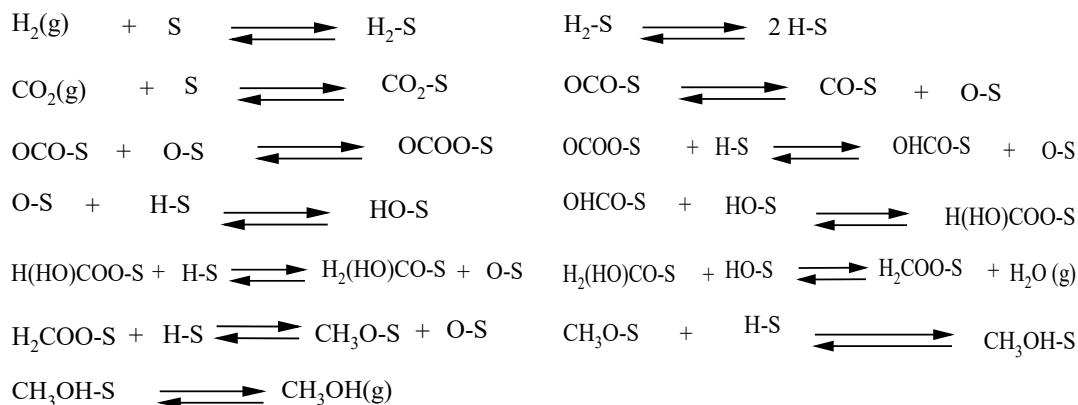
گازهای مونواکسید و دی‌اکسید کربن و در حضور کاتالیزور $\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ بررسی شد [۴۵]. بر اساس سازوکار گزارش شده در (شکل ۹)، نتایج نشان می‌دهد که در اثر احیای گاز دی‌اکسید کربن در حضور این کاتالیزور علاوه بر متانول، گاز مونواکسید کربن نیز تولید می‌شود که در حضور آب این گاز به هیدروژن و دی‌اکسید کربن تبدیل می‌شود [۴۶]. نتایج گزارش شده در این مقاله نشان می‌دهد که در مراحل تولید متانول، اسید فرمیک و فرمالدهید ایجاد نمی‌شود [۴۶]. Sahki و همکارانش اثرات فشار و دما را برای تولید متانول در حضور همین کاتالیزور را بررسی کردند نتایج گزارش نشان می‌دهد که تولید مونواکسید در فشار پایین و متانول در فشار بالا و در دمای 230°C درجه



شکل ۹: سازوکار سنتز متانول در حضور کاتالیزور $\text{CuO}/\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ [۴۶]



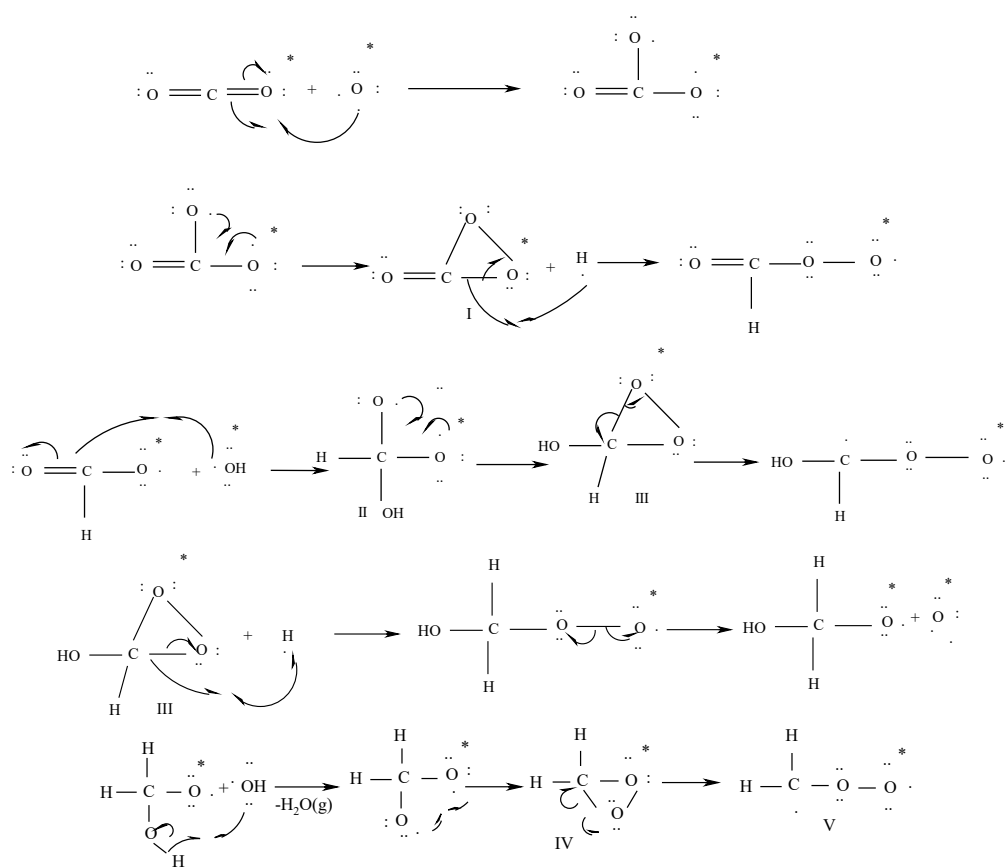
شکل ۱۰: اصلاح سازوکار پیشنهاد شده در شکل ۹



شکل ۱۱: واکنش‌های شیمیایی مربوط به سازوکار تولید متانول در حضور کاتالیزور

بر اساس واکنش‌های شیمیایی گزارش شده در مقالات سال‌های ۱۹۹۶ و ۲۰۱۱ [۴۶ و ۴۷] تولید متانول که در (شکل ۱۰) نشان داده شد با توجه به سازوکار گزارش شده در (شکل ۱۱)، این مکانیسم صحیح نیست و ساختار اصلاح شده این سازوکار در (شکل ۱۲) گزارش شد. همچنین ساختار I برای تشکیل ترکیب OHCOO^* در (شکل ۱۲) قابل پیش‌بینی است زیرا شبیه به این واسطه در ترکیبات آلی وجود دارد. تنها سازوکاری که تبدیل شدن ترکیب

OHCO^* را به H(HO)COO^* (معادله ۸)، تشکیل واسطه‌های II و III می‌باشد. (شکل ۱۲) واسطه III تشکیل شده قبل از باز شدن حلقه سه‌ضلعی می‌تواند با اتم هیدروژن واکنش داده و ترکیب $\text{H}_2(\text{HO)CO}^*$ (معادله ۹) را تولید کند. (شکل ۱۲) تشکیل ترکیب H_2CCO^* از سازوکار تشکیل واسطه IV و V پیش‌بینی می‌شود. (شکل ۱۲) واسطه V با اتم هیدروژن واکنش داده و محصول CH_3O^* را تولید می‌کند.



شکل ۱۲: اصلاح ساختار معادلات شیمیایی ۱-۱۳

۲-۴. نقش ZnO در سنتز متانول

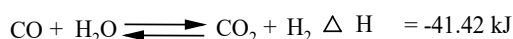
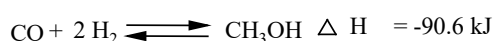
سنتز متانول توسط کاتالیزورهای دوتایی Cu/ZnO با نسبت‌های مولی متفاوت (۱۰/۹۰ تا ۹۰/۱۰) در ۴۹۳ درجه کلوین و در فشار اتمسفر مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که یک همبستگی مثبتی بین اکسید روی و اکسید مس در تولید متانول وجود دارد. با افزایش درصد اکسید روی سرعت تولید متانول افزایش می‌یابد [۴۸]. این اثر هم‌افزایی پیشنهادی در اکسید مس/روی دوتایی، باعث شده که خواص شیمیایی و فیزیکی این ترکیب در واکنش‌های شیمیایی بررسی شود [۴۹]. حداکثر فعالیت در یک محدوده ترکیبی متوسط (حدود ۷۰ مول درصد مس) مشاهده می‌شود، در حالی که مس و روی به تنهایی فعالیت ناچیزی از خود نشان می‌دهند [۴۸]. Klier بر اساس میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی (SEM)، داده‌های اشعه ایکس و طیف‌های نوری وجود فلز مس به سه حالت ظرفیتی Cu^+ ، Cu^{2+} و Cu را پیشنهاد کرد [۵۰]. در سال ۱۹۹۶، Fujitani و همکارانش بر اساس یافته‌های XRD پیشنهاد Klier را تأیید کرد [۵۱]. همچنین با کمک داده‌های XPS و core-level spectra وجود مس با سه حالت ظرفیتی در کاتالیزور $CuO/ZnO/Al_2O_3$ بررسی شد [۵۲-۵۵]. پیک $934/4$ الکترون ولت ظاهر شده با شدت زیاد در طیف core-level نشان می‌دهد که مس دوظرفیتی به صورت CuO در کاتالیزور $CuO/ZnO/Al_2O_3$ وجود دارد [۵۴].

۲-۵. نقش Al_2O_3 در کاتالیزور $CuO/ZnO/Al_2O_3$

در تولید متانول

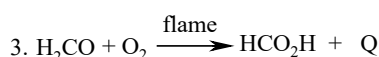
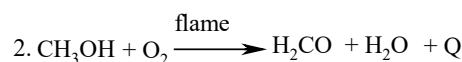
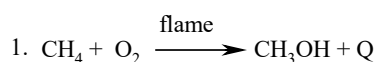
ترکیب آلومینیوم دارای خصلت اسیدی و بازی است در سنتز متانول نقش اسیدی این ترکیب بیشتر از خاصیت بازی می‌باشد افزایش خاصیت اسیدی آلومینا در سنتز متانول باعث تولید محصول جانبی دی‌متیل اتر می‌شود بنابراین برای کاهش این محصول جانبی از اکسید روی استفاده می‌شود. اکسید روی در این کاتالیزور نقش بازی دارد و باعث کاهش خاصیت اسیدی آلومینا می‌شود و در نهایت میزان تولید محصول جانبی اتر کاهش می‌یابد. [۵۶ و ۵۷] در طی سال‌های ۱۹۶۷-۱۹۹۰، گروه‌های تحقیقاتی زیادی سنتز متانول را با استفاده از کاتالیزورهای مختلفی از $CuO/ZnO/Al_2O_3$ از طریق واکنش احیاء گازهای مونواکسید و دی‌اکسید کربن را بررسی کردند [۶۰-۶۸].

سنتز متانول بر پایه سوزاندن چوب و به روش BASF در سال ۱۹۲۳ و قبل از آن در آلمان بررسی شد در این روش فشار بالای ۳۰۰ اتمسفر و دمای بالای ۳۰۰-۴۰۰ درجه سانتی گراد استفاده شد. (واکنش ۷) برای ملایم‌تر کردن شرایط سنتز متانول بر اساس این روش، Mittasch و همکارانش استفاده از کاتالیزور Cr_2O_3-ZnO را گزارش کردند [۶۹]. همین گروه تحقیقاتی در سال ۱۹۲۶ متانول را در حضور کاتالیزور آهن سنتز کردند [۷۰].

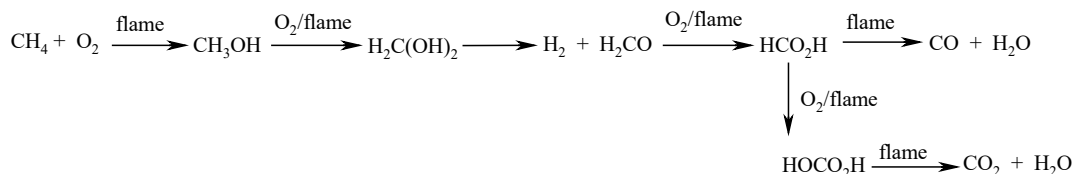


واکنش ۷: سنتز متانول بر اساس روش BASF

هیدروکربنی تهیه کرد. برای بررسی تأثیر دما و فشار در تولید متانول و محصولات جانبی، در این کار پژوهشی خوراک اولیه مورد استفاده مخلوطی از گازهای متان، مونواکسید و دی‌اکسید کربن، فرمالدهید در حضور گاز اکسیژن در دما و فشارهای مختلف بررسی شد. داده‌های گزارش شده نشان می‌دهد که افزایش فشار و کاهش دما نقش مؤثری در افزایش تولید متانول و کاهش محصولات جانبی مونواکسید و دی‌اکسید کربن دارد [۷۱].



شکل ۱۴: واکنش اکسایش متان به روش مستقیم و تولید متانول، دی‌اکسید و مونواکسید کربن



شکل ۱۴: سازوکار اکسایش مستقیم متان و تولید متانول، دی اکسید و مونواکسید کربن

الف) متیل الکل بود که باعث افزایش سرعت واکنش شد
ب) اضافه کردن فرم آلدهید باعث افزایش سرعت واکنش اکسایش شد.

ج) با اضافه شدن فرمیک اسید، سرعت واکنش افزایش یافت.

د) اضافه شدن گاز NO_2 به مخلوط واکنش زمان اکسایش واکنش را کاهش داد.

نتایج گزارش شده در این تحقیق نشان می‌دهد که بهترین شرایط برای تولید متانول، دمای 390°C درجه سانتی‌گراد است افزایش جزءهای سوم باعث کاهش زمان واکنش و کاهش محصولات جانبی در اثر اکسایش متان خواهد شد.

از آنجائی که دما، فشار و نسبت‌های استوکیومتری مختلف متان و اکسیژن در سنتز متانول و محصولات جانبی مؤثر می‌باشد Norris و همکارانش سینتیک واکنش اکسایش متان را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق موارد بررسی شده عبارتند از:

۱. غلظت‌های مختلفی از اکسیژن و متان بررسی شد نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که نسبت‌های مختلفی از این دو ترکیب در نوع محصول و میزان راندمان آن‌ها مؤثر می‌باشد به‌عنوان مثال:

۱-۱. در واکنش اکسایش متان/اکسیژن، در نسبت‌های یکسان استفاده شده از این دو گاز، محصول هیدروژن و مونواکسید کربن تولید نشد.

۱-۲. استفاده از نسبت‌های مولی $1/5$ به 1 از اکسیژن به متان محصولات عمده ایجاد شده آب، مونواکسید کربن و فرمالدهید می‌باشد.

۲. بررسی تأثیر فشار کل مخلوط واکنش در ایجاد محصولات همچنین مورد بررسی قرار گرفت نتایج نشان می‌دهد که:

۲-۱. استفاده از گاز بی‌اثر نیتروژن: با افزایش فشار مخلوط واکنش، سرعت انجام واکنش افزایش یافت.

۲-۲. نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که تأثیر افزایش

William A. Bone و همکارانش قبل از سال ۱۹۳۵ اکسایش متان را بررسی کردند. این گروه تحقیقاتی عوامل مختلفی که در روی سرعت واکنش اکسایش متان مؤثر می‌باشند را در حالت‌های مختلفی (به‌صورت خالص و مخلوط‌های از این گاز) را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که دمای پایین و فشار بالا نقش بسزایی در افزایش راندمان تولید متانول می‌تواند داشته باشد. همچنین در این تحقیق آزمایش تأثیر تابش امواج ماوراء بنفش-مرئی در اکسایش متان انجام شد [۷۲]. در این پژوهش، سنتز متانول را در شرایط زیر بررسی کردند:

۱. واکنش اکسایش گاز متان به‌صورت گاز خشک و مرطوب انجام گرفت. برای ایجاد گاز خشک مخلوط گاز متان و اکسیژن از روی ترکیب آبیگری P_2O_5 عبور داده شد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که وجود رطوبت با درصدهای مختلف باعث تولید بیشتر متانول می‌شود.
۲. مخلوط گاز خشک متان/اکسیژن را قبل از عمل اکسایش تا دماهای مختلف (به‌عنوان مثال 390°C درجه سانتی‌گراد) گرم کردند مقایسه نتایج اکسایش در این حالت با حالتی که گاز را بدون گرم کردن اکسید کردن نشان می‌دهد که پیش گرم کردن مخلوط واکنش تأثیری زیادی روی سرعت این واکنش ندارد.

۳. برای انجام این واکنش از ظرف شیشه به ابعاد (طول 275 ، قطر 5 سانتیمتر و حجم 570 میلی‌لیتر) استفاده شد. در آزمایش‌های مختلفی نسبت سطح به حجم ظرف واکنش تغییر داده شد نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که این تغییر می‌تواند در سرعت اکسایش متانول ایجاد شده مؤثر باشد.

۴. همین شرایط را تحت تابش امواج ماوراءبنفش انجام شد و نتایج این آزمایش با روش حرارتی تغییراتی زیادی نداشت.
۵. تغییر جنس ظرف واکنش از شیشه به کوارتز، در راندمان محصول فرمالدهید بسیار مؤثر بود

۶. در این تحقیق تأثیر جزء سوم به مخلوط واکنش متان/اکسیژن بررسی شد جزء سوم اضافه شده شامل:



فشار مخلوط واکنش با اضافه کردن گازهای مونواکسید و دی‌اکسید کربن و آب در سرعت واکنش در مقایسه با مورد ۱-۲ کمتر است.

۳-۲. اضافه کردن HCl باعث افزایش راندمان تولید فرمالدهید می‌شود.

۴-۲. افزایش فشار مخلوط واکنش با اضافه کردن گاز NO₂ باعث افزایش سرعت واکنش می‌شود.

۵-۲. تأثیر اضافه کردن ترکیبات کلر و ید مورد بررسی قرار گرفت که تأثیر کلر در واکنش نسبت به ید بیشتر است.

بر اساس نتایج گزارش شده در این تحقیق، این گروه تحقیقاتی معادله سینتیکی واکنش اکسایش ذیل را گزارش کردند (معادله ۱) [۷۳].

$$\text{Rate} = k[\text{CH}_4]^2[\text{O}_2]P \quad P = \text{فشار کل} \quad (1)$$

گروه تحقیقاتی Wiezevich در سال ۱۹۳۴ اکسایش گاز طبیعی را با کمک هوا (منبع تأمین‌کننده اکسیژن) مطالعه کردند. در این تحقیق برای اولین بار از فلز مس به‌عنوان کاتالیزور برای بهبود راندمان تولید متانول استفاده شد. مزیت‌های استفاده از این کاتالیزور باعث افزایش سطح تماس متان با اکسیژن و در نهایت افزایش سرعت واکنش اکسایش-کاهش می‌شود همچنین باعث بهتر انتقال گرما در سطح مولکول‌ها و راکتور می‌شود. غیرفعال شدن مس با ترکیبات گوگردی موجود در گاز طبیعی از معایب استفاده از این کاتالیزور می‌باشد. نتایج گزارش شده در این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از کاتالیزورهای آهن و نیکل در فشار بالا و دما بالا درصد بهتری از متانول ایجاد می‌شود [۷۴].

در سال ۱۹۴۷، Blasiak استفاده از کاتالیزورهای همروسوبی مس، روی و آلومینیوم به‌عنوان کاتالیزور فعال برای سنتز متانول را گزارش کرد [۷۵]. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از این کاتالیزور در مقایسه با سایر کاتالیزورها دارای عملکرد بهتر در افزایش راندمان تولید متانول به‌صورت انتخاب پذیری دارد. به‌عنوان مثال در فشار ۳۰-۱۲۰ اتمسفر و در دمای ۲۰۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد متانول تولید شده دارای راندمان بیش از ۹۹/۵ درصد می‌باشد. Boomer و همکارانش در تحقیقی واکنش مخلوط متان، اکسیژن و گاز نیتروژن را در حضور کاتالیزورهای مس، نقره، روی، نیکل و آلیاژ نیکل-مس بررسی کردند نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که کاتالیزور مس و آلیاژ نیکل-مس در

فشار بالا برای تولید متانول بهترین بازده را دارد [۷۶]. در این پژوهش موارد ذیل بررسی شد:

مخلوطی از گازهای هیدروکربنی که شامل متان، اتان و پروپان بود به‌عنوان خوراک اولیه استفاده شد.

در بررسی اکسایش مخلوط واکنش متان (۹۰ درصد) و نیتروژن (۱۰ درصد) محصول جانبی اتیلن تولید شد.

چون در خوراک اولیه از مخلوط گاز طبیعی استفاده شد، وجود گوگرد باعث غیرفعال شدن کاتالیزور گردد.

در این تحقیق از دو فرم پودر و قرصی شکل کاتالیزور استفاده شد نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که میزان متانول تولید شده در این دو حالت اختلاف زیادی دارد. به‌عنوان مثال:

۳. نتایج استفاده از فرم قرصی شکل فلز مس، روی و نقره تحت شرایط دما و فشار تقریباً یکسان، نشان می‌دهد که فلز مس در تولید متانول فعال‌تر می‌باشد.

۴. بررسی نتایج استفاده از پودرهای فلزات مس، روی، نیکل و نقره تحت شرایط واکنش تقریباً یکسان، نشان می‌دهد که پودر نقره فعال‌تر از دوتا کاتالیزور دیگر می‌باشد.

۵. نتایج به‌دست آمده از تولید متانول با استفاده از کاتالیزور آلایژ Monel (نیکل/مس) نشان می‌دهد که فعالیت این کاتالیزور نسبت به کاتالیزور فلز مس بیشتر است.

بررسی اکسید فلزات به‌عنوان کاتالیزور در اکسایش متان به متانول برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط Atroshchenko و همکارانش گزارش شد. در این تحقیق اکسایش مخلوط گازهای هیدروکربنی با اکسیژن هوا در حضور کاتالیزور همروسوبی اکسید نقره (Ag₂O)-کانی Pumice (کانی‌های متخلخل، مانند فلدسپات) و اکسید کرم-Pumice مورد بررسی قرار گرفت نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که فقط محصول متانول و فرمالدهید تولید شد که درصد زیادی از محصول متانول می‌باشد. همچنین در این پژوهش از اکسید مولیبدن (MoO₃) و کاتالیزور همروسوبی اکسید مولیبدن-کانی Pumice استفاده شد که نتایج نشان می‌دهد در فشار پایین محصول عمده فرم آلدهید است اما در فشار بالای ۲۰۰ اتمسفر این کاتالیزور با انتخاب پذیری بیشتری باعث تولید متانول می‌شود [۷۷]. به دلیل مؤثر بودن اکسید مولیبدن در تولید متانول از متان، در سال ۱۹۷۱، Dowden و همکارانش کاتالیزورهای همروسوبی ذیل

را بررسی کردند:

۱. کاتالیزور هم‌سویی آلومینا-سیلیکات

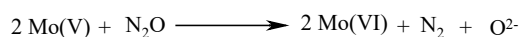
۲. مولیبدات-روی

۳. مولیبدات-آهن

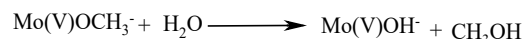
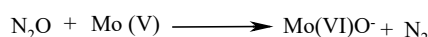
۴. مولیبدات-وانادیم

نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که کاتالیزور $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{MoO}_3)_3$ در دمای 713°C درجه کلین و فشار 30 بار مؤثرتر می‌باشد [۷۸]. یکی از محصولات جانبی که در واکنش اکسایش متان ایجاد می‌شود ترکیب اتیلن می‌باشد. استفاده از کاتالیزور هم‌سویی CuOMoO_3 ، نسبت به کاتالیزورهای هم‌سویی $1-4^\circ\text{C}$ در فشار و دمای پایین‌تر باعث واکنش اکسایش متان می‌شود ولی محصولات جانبی مانند فرمالدهید، اتانول و استالدهید نیز تولید می‌کند [۷۹]. اکسایش متان در حضور گاز N_2O در مقالاتی گزارش شد.

محصولات تولید شده در این روش متانول، فرم آلدهید، دی‌اکسید و مونواکسید کربن می‌باشد [۸۰]. اکسایش اتان در حضور کاتالیزور اکسید مولیبدات/ دی-نیتروژن اکسید باعث تولید محصول جانبی اتیلن می‌شود [۸۱ و ۸۲]. مطالعات اسپکتروسکوپی انجام شده توسط دستگاه رزونانس اسپین الکترون (e.s.r) نشان می‌دهد که یون منفی اکسیژن طی واکنش تولید می‌شود. [۸۳] در سال ۱۹۸۲، Li و همکارانش واکنش اکسایش متان را در حضور کاتالیزور اکسید مولیبدن-سیلیکات و عامل اکسید کننده نیتروژن اکسید بررسی کردند. تولید یون منفی اکسیژن از طریق (واکنش ۸) انجام می‌شود. سازوکار تولید متانول از متان در حضور این کاتالیزور در (شکل ۱۵) نشان داده شد.



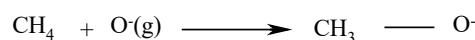
واکنش ۸: تولید یون منفی اکسیژن در حضور کاتالیزور مولیبدات



شکل ۱۵: سازوکار تولید متانول از متان در حضور کاتالیزور مولیبدات [۸۴]

شکست این پیوند می‌تواند از طریق مکانیسم‌های چون تشکیل رادیکال، کربانیون و کربوکاتیون انجام شود. برای تولید چنین واسطه‌های از کاتالیزورهای مختلفی استفاده می‌شود که این روش باعث کاهش دما واکنش اکسایش می‌شود به‌عنوان مثال از کاتالیزور $\text{Pt}(\text{bpy})\text{Cl}_2/\text{H}_2\text{SO}_4$ و PtCl_6^{2-} برای اکسایش متان استفاده شد که به‌صورت انتخابی باعث اکسایش این ترکیب شد [۸۷ و ۸۸]. همچنین پیوند کربن-هیدروژن متان در حضور نمک‌های جیوه (II) و اسیدسولفوریک شکسته شده و از طریق مکانیسم تشکیل کربوکاتیون باعث تولید استر متیل بی‌سولفات می‌شود [۸۹]. هیدروکربن‌ها، به‌ویژه هیدروکربن‌های اشباع (آلکان‌ها)، اجزای اصلی نفت و گاز طبیعی، مواد اولیه صنایع شیمیایی هستند؛ بنابراین، بدیهی است که تبدیل هیدروکربن‌های اشباع و همچنین آروماتیک، الفینی و استیلنی زمینه بسیار مهمی از شیمی معاصر را تشکیل می‌دهند. توسعه این زمینه به‌منظور پیدا کردن مسیرهای اساسی جدید برای تبدیل هیدروکربن‌ها به محصولات با ارزش‌تر مانند الکل‌ها، کتون‌ها، اسیدها و پراکسیدها ضروری است. در این ترکیبات مهم‌ترین

گاز یون اکسیژن و جذب شده از روی کاتالیزور در دمای 25°C درجه سانتی‌گراد با متان وارد واکنش شده و باعث ایجاد متانول و فرم آلدهید می‌شود که محصول اصلی متانول می‌باشد. شرایط دمایی و جذب شدن گازها از روی کاتالیزور در این تحقیق بررسی شد. (واکنش ۹) اکسایش متان را در حضور آنیون اکسیژن را نشان می‌دهد [۸۵].



واکنش ۹: اکسایش متان با کمک یون منفی اکسیژن

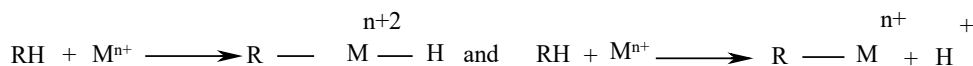
سینتیک واکنش از معادله (۲) پیروی می‌کند [۸۴].

$$\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = -k [\text{N}_2\text{O}]^1 [\text{CH}_4]^0 \quad (1)$$

در سال ۱۹۸۵ Foster روش‌های مختلفی در مورد اکسایش متان و تبدیل آن به متانول را گزارش کرد [۸۶]. با توجه به اوربیتال مولکولی متان، این مولکول به دلیل داشتن تمام سطوح اوربیتالی کاملاً پر در دسته گازهای بی‌اثر قرار می‌گیرد؛ بنابراین برای اکسایش این ترکیب باید انرژی لازم برای شکست پیوند کربن-هیدروژن فراهم شود.



شدن این ترکیبات در دمای اتاق با استفاده از تابش امواج نوری انجام پذیر است. مکانسیم فعال شدن پیوند سیگمای کربن-هیدروژن در حضور کاتالیزور در (شکل ۱۶) نشان داده شد [۹۰]. سازوکار (شکل ۱۶)، نشان می‌دهد که فلز بین پیوند C-H قرار می‌گیرد و در نهایت از مسیرهای مختلفی چون تولید رادیکال و کاتیون باعث فعال شدن ترکیبات هیدروکربنی می‌شود.



شکل ۱۶: فعال شدن ترکیبات هیدروکربنی در حضور کاتالیزور

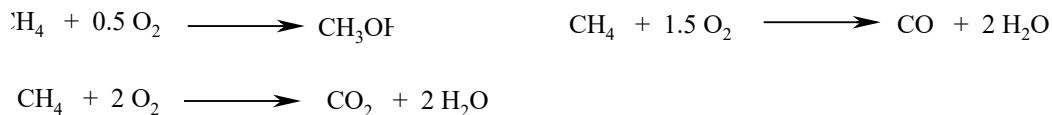
هیدرواکسید انجام می‌شود [۹۷-۱۰۱]. اکسایش متان به متانول به کمک فتوکاتالیزورهای نیمه‌هادی مس، لانتانیم، پلاتین بر پایه بستری اکسید تنگستن در دمای اتاق و در شرایط نور مرئی در سال ۲۰۰۰ گزارش شد [۱۰۲]. در این واکنش استفاده از ژئولیتی که بر پایه مس می‌باشد باعث انجام واکنش اکسایش در دمای کمتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود [۱۰۳-۱۰۵]. اکسایش متان در حضور ژئولیت‌های که دارای فلزات آهن، کبالت و نیکل انجام شد [۱۰۶] در سال ۲۰۲۱، Krisnandi و همکارانش با کمک کاتالیزور Fe_2O_3/NaY اکسایش گاز متان را بررسی کردند نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که این کاتالیزور در شرایط ملایم‌تر و به صورت انتخابی واکنش را انجام می‌دهد [۱۰۷]. در سال ۲۰۲۰، اکسایش متان به متانول به روش مستقیم با کمک کاتالیزور مس بر پایه ژئولیت mordenite در دمای ۲۰۰ درجه سلیسیوس گزارش شد [۱۰۸]. در سال ۲۰۱۷، Mirani و همکارانش با استفاده از کاتالیزور $Cu/ZnO/Al_2O_3$ سنتز متانول را با گازهای منواکسید و دی‌اکسید کربن در دمای ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۵۰ بار گزارش کردند [۱۰۹].

استفاده از مقادیر مولی مختلف از اکسیژن در اکسایش متان محصولات متنوعی را ایجاد می‌کند (شکل ۱۷) اکسایش گاز متان به متانول با انتخاب پذیری زیاد در حضور تک اتم طلا روی فسفر سیاه در حضور آب تحت شرایط تابش نور در سال ۲۰۲۱ گزارش شد [۱۱۰]. فسفر سیاه مانند گرافیت در انتقالات الکترون نقش بسیار فعال دارد. سازوکار این واکنش از طریق انتقال الکترون از فسفر به اکسیژن می‌باشد که در نهایت منجر به تشکیل رادیکال هیدروکسیل می‌شود (شکل ۱۸) [۱۱۰].

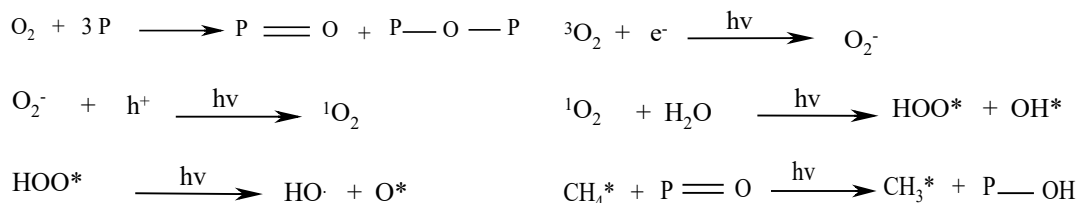
پیوند، پیوند سیگمای کربن-هیدروژن است که برای فعال شدن این پیوند روش‌های مختلفی گزارش شد. ترکیبات آلکان‌ها اگر در دمای بین ۹۰۰-۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار بگیرند متحمل واکنش‌های رادیکالی می‌شوند و باعث ایجاد محصولات متنوعی می‌شوند. مولکول متان در دمای تقریباً ۶۰۰ درجه کلوین و فشار ۵-۱۰ مگا پاسکال اکسید شده و به متانول و فرم‌آلدهید تبدیل می‌شود. همچنین فعال

در مقالات مروری که در سال ۱۹۹۷ و ۲۰۱۳ منتشر شد نتایج مربوط به فعال شده هیدروژن ترکیبات هیدروکربنی در حضور کاتالیزورهای مختلف گزارش شد [۹۰ و ۹۱]. سازوکار در همه‌ای این مقالات از (شکل ۱۶) پیروی می‌کنند. در تبدیل متان به متانول از کاتالیزورهای هموزن و هتروژن استفاده می‌شود برخی از این کاتالیزورها در مقاله مروری سال ۲۰۱۷ گزارش شد [۹۲]. به عنوان مثال یکی از کاتالیزورهای هموزن که در تولید متانول از متان استفاده شد متیل بی‌سولفیت در حضور جیوه بی‌سولفیت است که در سال ۱۹۹۳ توسط Periana و همکارانش گزارش شد [۹۳]. واکنش اکسایش متان از طریق فعال شدن پیوند C-H در حضور کاتالیزور انجام می‌شود که در محیط‌های هموزن مسیر واکنش از طریق ایجاد استرهای متانول و در نهایت هیدرولیز این واسطه‌ها باعث ایجاد متانول می‌شود [۹۲]. اکسایش متان توسط کاتالیزور آهن بر پایه ژئولیت در دمای اتاق گزارش شد در این روش از آهن آلفا استفاده شده و واکنش از مسیر تولید اکسیژن رادیکالی انجام می‌شود. همچنین از کاتالیزور مس بر پایه ژئولیت در اکسایش متان استفاده شد [۹۴-۹۶].

اکسایش متان توسط فتوکاتالیزورهای مختلف انجام می‌شود. فتوکاتالیزور تیتانیوم بر پایه ژئولیت Y در طول موج کمتر از ۲۰۰ نانومتر در دمای اتاق باعث سنتز متانول می‌شود. در این روش با کمک فتوکاتالیزور Ti/ZMS ، گاز دی‌اکسید کربن و آب به ترکیبات متان و متانول تبدیل می‌شود. سازوکار واکنش نشان می‌دهد که در این روش یون اکسیژن منفی ایجاد می‌شود [۹۷]. فتوکاتالیزور La/WO_3 به صورت انتخاب‌پذیر در دما و فشار محیط باعث انجام واکنش می‌شود واکنش از مکانیسم تشکیل رادیکال



شکل ۱۷: استفاده از نسبت‌های مختلف مولی اکسیژن در اکسایش متان



شکل ۱۸: سازوکار اکسایش متان در حضور کاتالیزور طلا-فسفر سیاه

مشقات مختلفی از کاتالیزور پلادیم در حالت‌های مختلفی از نظر شکل و فرم استفاده شد. نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که بهترین راندمان در تبدیل متان به متانول استفاده از فرم پودری کاتالیزور $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2\text{-ZrO}_2$ می‌باشد. همچنین در این تحقیق از مخلوط گاز طبیعی استفاده شده که داده‌های نشان می‌دهد که این کاتالیزور به‌صورت انتخاب‌پذیری بالا باعث تولید متانول از متان می‌شود [۱۱۴].

۲-۶. بررسی اثر کاتالیزور با کمک طیف پتانسیل تعلیق کلونییدی (زتا-پتانسیل)

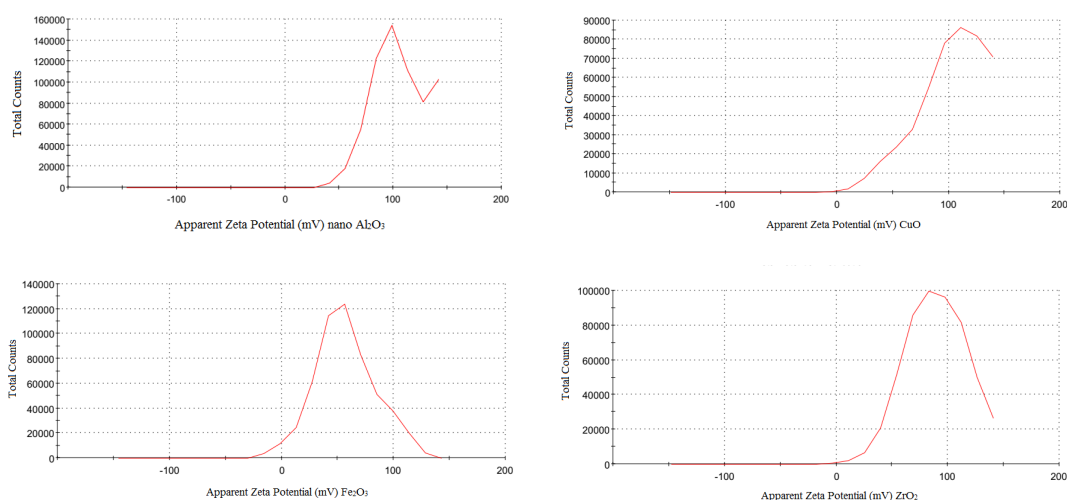
مکانیسم‌های گزارش شده در این مقاله، نشان می‌دهد که سنتز ترکیب متان از طریق جذب گازهای روی سطح کاتالیزور و از مسیر انتقال الکترون انجام می‌پذیرد؛ بنابراین، برای بررسی اثر کاتالیزورها در تولید متان، پتانسیل تعلیق کلونییدی (زتا-پتانسیل) بعضی از نانو ترکیبات در حلال آب در محدوده ۲۰۰- تا ۲۰۰+ میلی ولت اندازه‌گیری شد. (شکل ۱۹) میانگین زتا-پتانسیل ثبت شده برای آلومینا ۱۲۳+، اکسید مس ۱۰۵+، اکسید آهن ۳+ / ۵۶/۹+ و برای اکسید زیرکونیوم ۸۰/۳+ می‌باشد. با توجه به اینکه پتانسیل تعلیق کلونییدی میزان بار در غشای بیرونی مولکول را نشان می‌دهد نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که آلومینا با داشتن زتا-پتانسیل بزرگ‌تر تمایل بیشتری به جذب ترکیبات باردار دارد؛ بنابراین با توجه به داده‌های گزارش شده در این پروژه یکی از دلایلی که ترکیب اکسید مس / آلومینا دارای شرایط واکنش‌پذیری بهتری برای تولید متان دارد افزایش پتانسیل غشای خارجی این ترکیب می‌باشد. با توجه به سازوکارهای گزارش شده برای تولید متانول و نتایج پتانسیل تعلیق کلونییدی، سازوکار ذیل پیشنهاد می‌شود (شکل ۲۰).

شکست پیوند سیگمای C-H متان و تبدیل آن به متانول یکی از مهم‌ترین واکنش‌های شیمیایی است که کارهای پژوهشی زیادی در این زمینه گزارش شد. Pappas و همکارانش تبدیل مستقیم متان به متانول را با استفاده از کاتالیزور مس بر پایه بستر زئولیت FER گزارش کردند. بستر زئولیت در این کاتالیزور باعث فعال شدن سطح کاتالیزور می‌شود و فلز مس است که نقش شکست پیوند سیگمای کربن-هیدروژن را انجام می‌دهد. با توجه به اینکه زئولیت FER به‌صورت شبکه است و دارای حفره می‌باشد بنابراین سازوکار این واکنش نشان می‌دهد کاتیون مس (I) در این حفرات قرار می‌گیرد و باعث انجام واکنش از طریق انتقال الکترون می‌شود؛ که از مزیت‌های این کاتالیزور، دما پایین اکسایش و راندمان بالا می‌باشد [۱۱۱]. همچنین با استفاده از کاتالیزور Cu-ZSM-5 در دمای ۲۰۰ درجه سلیسیوس و فشار ۱ اتمسفر سنتز متانول به روش مستقیم گزارش شد [۱۱۲].

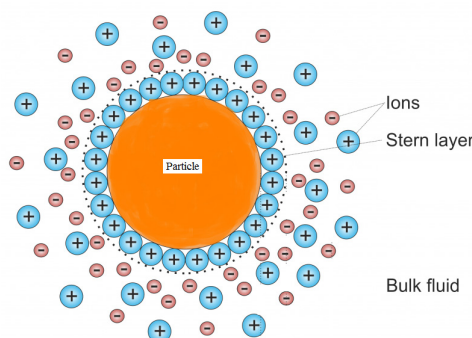
Yi و همکارانش با استفاده از کاتالیزور $\text{Ni-}\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ در شرایط پلاسما، به‌صورت انتخاب‌پذیری و در دمای پایین اکسایش گاز متان به متانول را در سال ۲۰۲۱ بررسی کردند. در این تحقیق، ابتدا از کاتالیزور $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ در دو حالت پلاسما و بدون پلاسما بررسی شد که نتایج قابل قبولی حاصل نشد. سپس از $\text{NiO-}\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ تحت دو شرط گزارش شده استفاده شد نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که این کاتالیزور در شرایط پلاسما راندمان تبدیلی بسیار بالای را دارد [۱۱۳].

در سال ۲۰۱۸ اکسایش گاز متان به متانول توسط کاتالیزور پلادیم سه لایه‌ای که به شکل شش ضلعی است در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شد. در این پژوهش از





شکل ۱۹: طیف پتانسیل تعلیق کلئید برای بعضی از نانو کاتالیزورها



شکل ۲۰: سازوکار جذب ترکیبات روی سطح کاتالیزور بر اساس پتانسیل الکتریکی غشاء بیرونی

۳. نتیجه‌گیری

می‌باشد به همین دلیل این کاتالیزورها نقش بسزایی در تبدیل گازهای گلخانه‌ای به متانول را دارند. همچنین استفاده از کاتالیزورهای ترکیبی باعث افزایش بار سطحی می‌شود که این عامل یکی از دلایل افزایش سرعت تولید متانول در شرایط ملایم‌تری می‌شود.

۴. تشکر و قدردانی

از دانشگاه صنعت نفت، دانشکده نفت اهواز به خاطر حمایت مالی جهت انجام این تحقیق تشکر می‌شود.

مراجع:

- [1]. ICC& oxford economics (2019)
- [2]. European chemical industry council (Cefic)
- [3]. International energy agency (2018)

نتایج گزارش شده از سال ۱۹۰۰-۲۰۲۱ میلادی نشان می‌دهد که با توجه به اهمیت متانول در جهان، روش‌های مختلفی برای تولید این ترکیب گزارش شد. سنتز این ترکیب با استفاده از مواد اولیه منواکسید و دی‌اکسید کربن در فشار و دمای بالایی انجام می‌شود. سنتز این ترکیب با استفاده از گاز متان نیز گزارش شد که شرایط سنتز متانول از متان نسبت به روش استفاده از گازهای گلخانه‌ای ملایم‌تر می‌باشد. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که مشتقات فلز مس نسبت به سایر کاتالیزورها دارای راندمان بهتر و زمان انجام واکنش کمتری است. نتایج سنتز متانول از گاز متان نشان می‌دهد که واکنش‌های انجام شده از مکانیسم تشکیل واسطه‌های کربوکاتیون، کربانیون و یا رادیکالی انجام می‌شود.

نتایج گزارش شده بر اساس طیف پتانسیل تعلیق کلئید بعضی از کاتالیزورهای مورد استفاده در سنتز متانول، نشان می‌دهد که بار در سطح این کاتالیزورها به صورت مثبت



- (1905) 352687.
- [18]. M. Patart, French Patent 540 (1921) 343.
- [19]. L. Capuano, DC: US Energy Information Administration (EIA), (2018) 21.
- [20]. S.R. Foit, I.C. Vinke, L.G.J. de Haart, R.A. Eichel, *Angew. Chem. Int. Ed.* 56 (2017) 5402–5411.
- [21]. D.M.A. Dueñas, M. Riedel, M. Riegraf, R. Costa, K.A. Friedrich, *Chem. Ing. Tech.* 92 (2020) 45–52.
- [22]. X. Fang, Y. Men, F. Wu, Q. Zhao, R. Singh, P. Xiao, T. Du, P.A. Webley, *Int. J. Hydrog. Energy* 44 (2019) 21913–21925.
- [23]. G. Zahedi, A. Elkamel, A. Lohi, A. Jahanmiri, M.R. Rahimpor, *Chem. Eng. J.* 115 (2005) 113–120.
- [24]. F. Azzolina-Jury, D. Bento, C. Henriques, F. Thibault-Starzyk, *J. CO₂ Util.* 22 (2017) 97–109.
- [25]. E. Fornero, D. Chiavassa, A. Bonivardi, M.A. Baltanás, *Catal. Today*, 172 (2011) 158–165.
- [26]. J.S. Carl, A.M. Melanie, G.R. Robrt, *Appl. Catal.* 50 (1989) 247–263.
- [27]. G.A. Mills, F.W. Steffgen, *Catal. Rev.* 8 (1974) 159–210.
- [28]. H. Schulz, *Appl. Catal. Gen.* 186 (1999) 3–12.
- [29]. E.V. Kondratenko, G. Mul, J. Baltrusaitis, G.O. Larrazábal, J. Pérez-Ramírez, *Energy Environ. Sci.* 6 (2013) 3112–3135.
- [30]. K. Wang, Z. Fang, X. Huang, W. Feng, Y. Wang, B. Wang, et al. *Chem. Commun.* 53 (2017) 9765–9768.
- [31]. K.S. Krishna, G. Gargi, D. Debasish, *Front. Microbiol.* 12 (2021) 1–9.
- [4]. International energy association (IEA), (2017)
- [۵]. مقدمروشنی، ا. شایگان ج. بابایی آ، محیط‌شناسی، ۶۲ (۱۳۹۱) ۸۸–۸۳.
- [۶]. صالحی ک، خضرای س. م، حسینی ف، خسروانی پور مصطفی زاده ف، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۶ (۱۳۹۳) ۴۰۸–۴۰۱.
- [7]. A. Brayan, Parra-Orobio, A. Donoso-Bravo, P. Torres-Lozada, *Ing. Compet.* 19 (2017) 219–227.
- [8]. M.A. Karim, B.L. Moss, *Ann. Civil. Environ. Eng.* 1 (2017) 34–41
- [9]. L.A.D. Santos, R.B. Valença, L.C.S.D. Silva, S.H.B.D. Holanda, A.F.V.D. Silva, J.F.T. Jucá, A.F.M.S. Santos, *J. Clean. Prod.* 256 (2020) 120389–120399.
- [10]. H.P. Scott, R.J. Hemley, H. Mao, D.R. Herschbach, L.E. Fried, W.M. Howard, S. Bastea, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 101 (2004) 14023–14026.
- [11]. M.J. Krause, T.G. Townsend, *Environ. Sci. Technol. Lett.* 3 (2016) 166–169.
- [12]. M. Ravi, M. Ranocchiari, J.A. van Bokhoven, *Angew. Chem. Int. Ed.* 56 (2013) 16464–16483.
- [13]. M.J. Frisch, G.W. Trucks, H.B. Schlegel, et.al., Gaussian, Inc., Wallingford CT, Gaussian (2009).
- [14]. A. Holmen, *Catal. Today*, 142 (2009) 2–8.
- [15]. A. Holmen, O.A. Rokstad, A. Solbakken, *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.* 15 (1976) 439–444.
- [16]. R. Guil-López, N. Mota, J. Llorente, E. Millán, B. Pawelec, J.L.G. Fierro, R.M. Navarro, *Materials* 12 (2019) 3902–3926.
- [17]. D. Lance, E.G. Elworthy, French Patent,

- M.B. Mohammed, H. Smain, *Reac. Kinet. Mech. Catal.* 103 (2011) 391–403.
- [47]. K.M. Vanden Bussche, G.F. Froment, *J. Catal.* 161 (1996) 1–10
- [48]. M.M. Günter, T. Ressler, B. Bems, C. Büscher, T. Genger, O. Hinrichsen, M. Muhler, R. Schlögl, *Catal. Lett.* 71 (2011) 37–44.
- [49]. K. Klier, *Adv. Catal.* 31 (1982) 243–313.
- [50]. Klier K, *Appl. Surf. Sci.* 19 (1984) 267–289.
- [51]. T. Fujitani, I. Nakamura, T. Uchijima, J. Nakamura, *Surf. Sci.* 383 (1997) 285–298.
- [52]. Y. Zhu, X. Kong, S. Zhu, F. Dong, H. Zheng, Y. Zhu, Y.W. Li, *Appl. Catal., B*, 551 (2015) 166–167.
- [53]. L. Binglian, M. Junguo, S. Xiong, Y. Chongya, D. Hongmin, Z. Huanwen, D. Shaoliang, L. Lin, H. Yanqiang, *Ind. Eng. Chem. Res.* 58 (2019) 9030–9037.
- [54]. A. Sepúlveda, C. Márquez, I. Rodríguez-Ramos, A. Guerrero-Ruiz, J.L.G. Fierro, *Surf. Interface Anal.* 20 (1993) 1067.
- [55]. W.L. Dai, Q. Sun, J.F. Deng, D. Wu, Y.H. Sun, *Appl. Surf. Sci.* 177 (2001) 172–179.
- [56]. R. Prins, *J. Catal.* 392 (2020) 336–346.
- [57]. M.S. Spencer, *Top. Catal.* 8 (1999) 259–266
- [58]. G.C. Chinchén, K.C. Waugh, D.A. Whan, *Appl. Catal.* 25 (1986) 101–107
- [59]. H. Wilmer, T. Genger, O. Hinrichsen, *J. Catal.* 215 (2003) 188–198
- [60]. K.W. Jun, W.-J. Shen, K.S.R. Rao, K.-W. Lee, *Appl. Catal. A: Gen.* 174 (1998) 231–238.
- [61]. B. Denise, R.P.A. Sneed, *Appl. Catal.* 28 (1986) 235–239.
- [32]. C. Cimon, P. Kadota, C. Eskicioglu, *Bioresour. Technol.* 297 (2020) 122440.
- [33]. W. Wei, G. Jinlong, *Front. Chem. Sci. Eng.* 5 (2011) 2–10.
- [34]. C.I. Méndez, J. Ancheyta, *Chem. Eng. J.* 390 (2020) 124489–124493.
- [35]. D.P. Marc, Y. Binhang, G.C. Jingguang, *Energy Environ. Sci.* 9 (2016) 62–73.
- [36]. W.S. Stafford, *Sci.* 24 (2021) 1–9.
- [37]. N. Stephanie, B. Erlend, B.S. Soren, L. Xinyan, K.E. Albert, H. Sebastian, S. Brian, E.L.S. Ifan, C. Karen, H. Christopher, K.N. Jens, F.J. Thomas, I. Chorkendorff, *Chem. Rev.* 119 (2019) 7610–7672.
- [38]. J.C. Theriot, C.H. Lim, H. Yang, M.D. Ryan, C.B. Musgrave, G.M. Miyake, *Sci.* 352 (2016) 1082–1086.
- [39]. R.M. Pearson, C.H. Lim, B.G. McCarthy, C.B. Musgrave, G.M. Miyake, *J. Am. Chem. Soc.* 138 (2016) 11399–11407.
- [40]. B.G. McCarthy, R.M. Pearson, C.H. Lim, S.M. Sartor, N.H. Damrauer, G.M. Miyake, *J. Am. Chem. Soc.* 140 (2018) 5088–5101.
- [41]. R.D. María, I. Díaz, M. Rodríguez, A. Sáiz, *Int. J. Chem. React. Eng.* 11 (2013) 469–477.
- [42]. W. Shaobin, L. GQ (Max), J.M. Graeme, *Energy Fuels* 10 (1996) 896–904.
- [43]. V. Sebastian, W.G.T. James, S. Louis, V. Jeroen, *Sci.* 70 (2019) 43–88.
- [44]. B. Prapatsorn, N. Aroonsri, *Front. Energy Res.* 7 (2019) 1–10.
- [45]. S.G. Jadhav, P.D. Vaidya, B.M. Bhanage, J.B. Joshi, *Chem Eng Res Des.* 92 (2014) 2557–2567.
- [46]. S. Rachid, B. Ouarda, C. Ouiza, T. Rene',



- [80]. J.W. Falconer, D.E. Hoare, R. Overend, *Commun. Flame.* 21 (1973) 339-344.
- [81]. W. Martir, J.H. Lunsford, *J. Am. Chem. Soc.* 103 (1981) 3728-3732.
- [82]. S.L. Kaliaguire, B.N. Shelimov, V.B. Kazanskii, *J. Catal.* 55 (1978) 384-393.
- [83]. R.S. Liu, M. Iwamoto, J.H. Lunsford, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* (1982) 78-79.
- [84]. H.F. Liu, R.S. Liu, K.Y. Liew, R.E. Johnson, J.H. Lunsford, *J. Am. Chem. Soc.* 106 (1984) 4117-4121.
- [85]. R.S. Liu, M. Iwamoto, J.H. Lunsford, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* (1982) 78-79.
- [86]. N.R. Foster, *Appl. Catal.* 19 (1985) 1-11.
- [87]. R.G. Bergman, *Nature*, 446 (2007) 391-393.
- [88]. B.L. Conley, W.J. Tenn, K.J.H. Young, S.K. Ganesh, S.K. Meier, V.R. Ziatdinov, O. Mironov, J. Oxgaard, J. Gonzales, W.A. Goddard, R.A. Periana, *J. Mol. Catal. A: Chem.* 251 (2006) 8-23.
- [89]. R.A. Periana, D.J. Taube, E.R. Evitt, D.G. Loffler, P.R. Wentrcek, G. Voss, T. Masuda, *Science*, 259 (1993) 340-343.
- [90]. A.E. Shilov, G.B. Shul'pin, *Chem. Rev.* 97 (1997) 2879-2932.
- [91]. R. Waterman, *Organometallics*, 32 (2013) 7249-7263.
- [92]. M. Ravi, M. Ranocchiari, J.A. van Bokhoven, *Angew. Chem.* 56 (2017) 16464-16483.
- [93]. R.A. Periana, D.J. Taube, E.R. Evitt, D.G. Loffler, P.R. Wentrcek, G. Voss, T. Masuda, *Science* 259 (1993) 340-343.
- [94]. C. Hammond, M.M. Forde, M.H.A. Rahim, A. Thetford, HeQ, R.L. Jenkins, [62]. T. Tagawa, G. Pleizier, Y. Amenomiyac, *Appl. Catal.* 18 (1985) 285-293.
- [63]. Z. Xu, Z. Qian, L. Mao, K. Tanabe, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 64 (1991) 1658-1663.
- [64]. T. Inoue, T. Iizuka, K. Tanabe, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 60(1987) 2663-2667.
- [65]. W.R.A.M. Robinson, J.C. Mol, *Appl. Catal.* 63 (1990) 165-179.
- [66]. Y. Kotera, M. Oba, K. Ogawa, K. Shimomura, H. Uchida, *J. Catal.* 53 (1976) 489-597.
- [67]. K. Klier, *Adv. Catal.* 31 (1982) 243-312
- [68]. M.A. Mcneil, C.J. Schack, R.G. Rinker, *Appl. Catal.* 50 (1989) 265-285.
- [69]. A. Mittasch, M. Pier, K. Winkler, A.G. BASF, German Patent 415 (1925) 686.
- [70]. A. Mittasch, M. Pier, A.G. BASF, US Patent Application, 1 (1926) 1569775A.
- [71]. D.M. Newitt, A.E. Haffner, *Proc. R. Soc. Lond. Series A.* 134 (1932) 591-604.
- [72]. W.A. Bone, J.B. Gardner, *Proc. R. Soc.* 150 (1935) 297-328.
- [73]. R.G.W. Norrish, S.G. Foord, *Proc. R. Soc. A.* 157 (1936) 503-525.
- [74]. P.J. Wiezevich, P.K. Frolich, *Ind. Eng. Chem.* 26 (1934) 268-276.
- [75]. E. Błasiak, Polish Patent (1947) 34.
- [76]. E.H. Boomer, S.N. Naldrett, *Can. J. Res.* 25 (1947) 494-501.
- [77]. V.I. Atroshchenko, Z.M. Shchedrinskaya, N.A. Gavrya, *J. Appl. Chem.* 38 (1965) 643-649.
- [78]. D.A. Dowden, G.T. Walker, *Brit. Pat.* (1971) 1244001.
- [79]. H.J.F. Stroud, *Brit. Pat.*, 1 (1975) 398,385.

- [106]. A. R. Kulkarni, Z.-J. Zhao, S. Siahrostami, J.K. Nørskov, F. Studt, *ACS Catal.* (2017) 1-24
- [107]. Y.K. Krisnandi, D.A. Nurani, D.V. Alfian, U Sofyani, M Faisal, I.R. Saragi, A.Z. Pamungkas, A.P. Pratama, *Heliyon*, 7 (2021) e08305-e08312.
- [108]. R. Zeng, L. Li, T. Shimizu, H.J. Kim, J. *Energy Eng.* 146 (2020) 4020061-4020065.
- [109]. N. Mirhosseini, M.R. Mirani, M. Hamidzadeh, R. Davarnejad, A. Taeb, *Adv. Environ. Technol.* 1 (2017) 53-58.
- [110]. L. Luo, J. Luo, H. Li, F. Ren, Y. Zhang, A. Liu, W.-X. Li, J. Zeng, *Nat. Commun.* 12 (2021) 1218-1228.
- [111]. D.K. Pappas, E. Borfecchia, M. Dyballa, K.A. Lomachenko, A. Martini, G. Berlier, B. Arstad, C. Lamberti, S. Bordiga, U. Olsbye, S. Svelle, P. Beato, *Chem. Catal.* 11 (2019) 621-627.
- [112]. L. Burnett, M. Rysakova, K. Wang, J. González-Carballo, R.P. Tooze, F.R. García-García, *Appl. Catal. A-Gen.* 587 (2019) 117272-117282.
- [113]. Y. Yi, S. Li, Z. Cui, Y. Hao, Y. Zhang, L. Wang, P. Liu, X. Tu, X. Xu, H. Guo, A. Bogaerts *Appl. Catal. B: Environ.* 296 (2021) 120384-120395.
- [114]. D. Ferri, M. Elsener, O. Kröcher, *Appl. Catal. B: Environ.* 220 (2018) 67-77.
- N. Dimitratos, J.A. Lopez-Sanchez, N.F. Dummer, D.M. Murphy, A.F. Carley, S.H. Taylor, D.J. Willock, E.E. Stangland, J. Kang, H. Hagen, C.J. Kiely, G.J. Hutchings, *Angew. Chem.* 51(2012) 5129-5133.
- [95]. J. Xu, R.D. Armstrong, G. Shaw, N.F. Dummer, S.J. Freakley, S.H. Taylor, G.J. Hutchings, *Catal. Today*, 270 (2016) 93-100.
- [96]. K. Narsimhan, K. Iyoki, K. Dinh, Y. Román-Leshkov, *ACS Central Sci.* 2 (2016) 424-429.
- [97]. H. Yamashita, A. Shiga, S. Kawasaki, Y. Ichihashi, S. Ehara, M. Anpo, *Energy Convers. Manag.* 36 (1995) 617-620.
- [98]. Z. Zakaria, S.K. Kamarudin, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 65 (2016) 250-261.
- [99]. F. Sastre, V. Fornés, A. Corma, H. García, *Chem. Eur. J.* 18 (2012) 1820-1825.
- [100]. S. Arif Sher Shah Md, C. Oh, H. Park, Y.J. Hwang, M. Ma, J.H. Park, *Adv. Sci.* 7 (2020) 2001946-2001970.
- [101]. Y. Fan, W. Zhou, X. Qiu, H. Li, Y. Jiang, Z. Sun, D. Han, L. Niu, Z. Tang, *Nat. Sustain.* 4 (2021) 509-515.
- [102]. C.E. Taylor, R.P. Noceti, *Catal. Today*, 55 (2000) 259-267.
- [103]. M.J. Wulfers, S. Teketel, B. Ipek, R. Lobo, *Chem. Commun.* 51 (2015) 4447-4450.
- [104]. K. Narsimhan, V.K. Michaelis, G. Mathies, W.R. Gunther, R.G. Griffin, Y. Román-Leshkov, *J. Am. Chem. Soc.* 137 (2015) 1825-1832.
- [105]. J. Xu, R.D. Armstrong, G. Shaw, N.F. Dummer, S.J. Freakley, S.H. Taylor, G.J. Hutchings, *Catal. Today*, 270 (2016) 93-100.

Review of Methanol Synthesis, Proposal of Production Mechanism Based on Colloidal Suspension Potential and DFT Method

Asadollah Farhadi*

Assistant Professor, Department of Sciences, Ahvaz Petroleum Faculty, University of Petroleum Industry, Ahvaz, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

Article History:

Received: 14 March 2023

Revised: 23 April 2023

Accepted: 19 June 2023

Keywords:

Methanol

Methane

Carbon monoxide

Carbon dioxide

Colloidal suspension potential

Density Functional Theory

ABSTRACT

Methanol is one of the most common chemical compounds in petrochemical industries. It is used as a fuel that is economical and has less pollution. Methanol can be converted into ether, olefin, polymer, acetic acid, vinyl acetate, etc. compounds. In this research, at first the methods of producing methane gas as the initial material of methanol, then the methods of producing methanol from carbon monoxide, carbon dioxide and methane were investigated. The synthesis of methanol from methane is carried out under thermal and radiation of light waves conditions. Which requires a temperature above 200 °C and high pressure. Various catalysts were used to adjust the reaction conditions, and that the best catalyst is copper metal derivatives. By using optimized catalysts, the formation of by-products were minimized. Also, by recording the potential spectrum of the colloidal suspension and using the density functional theory method, a mechanism for methanol production was proposed.

DOR: 20.1001.1.25885251.1402.10.1.1.5

How to cite this article

A. Farhadi, Review of Methanol Synthesis, Proposal of Production Mechanism Based on Colloidal Suspension Potential and DFT Method. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2023; 10(1): 8 -27. (https://www.ijge.irangi.org/article_707969.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: farhadichem@put.ac.ir, (A. Farhadi).

Available online 20 August 2023

2666-5468/© 2021 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>)



امکان سنجی اقتصادی و محیط‌زیستی استفاده از سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت (mCHP) در منازل مسکونی تهران

اسماعیل قاسمی کفرودی^{۱*}، محمدرضا حبیبی^۱، محمد خالیدی سردشتی^۲، محمدعلی مانیان^۲، زینب سبحانی^۳

۱. عضو هیئت علمی، پردیس پژوهش و توسعه انرژی و محیط‌زیست، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۲. رئیس واحد پژوهش و فناوری، شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت، تهران، ایران

۳. پژوهشگر، شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت، تهران، ایران

۴. پژوهشگر، پردیس پژوهش و توسعه انرژی و محیط‌زیست، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: ghasemies@ripi.ir

مقاله‌ی علمی - پژوهشی

صفحه ۲۸ - ۴۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۲

چکیده

با توجه به افزایش روزافزون انتشارات گازهای گلخانه‌ای و فاجعه زیست‌محیطی متأثر از انتشار کربن، همچنین مطابق با الزامات قانونی ابلاغ شده طی آیین‌نامه اجرایی کنوانسیون تغییر آب‌وهوا و پروتکل کیوتو و راهبرد ملی تغییر اقلیم، استفاده از سیستم‌هایی که به مدیریت کربن و کاهش انتشارات کمک می‌کند بسیار ضروری می‌باشد. امروزه سیستم‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت با توجه به کاهش تلفات، راندمان بالا و کمک به امنیت شبکه مورد توجه کشورهای توسعه‌یافته دنیا برای مصارف مسکونی قرار گرفته‌اند. برای استفاده از این سیستم‌ها در کشور ابتدا باید بازار هدف آن مشخص گردد، سپس با بررسی شرایط اقتصادی و ایجاد طرح‌های حمایتی به تشویق مصرف‌کنندگان مسکونی برای استفاده از این سیستم‌ها پرداخته شود.

بدین منظور در مقاله‌ی حاضر، ابتدا مناسب‌ترین استان برای استفاده از این گونه سیستم‌ها انتخاب و سپس با استفاده از میزان مصرف برق و گاز منازل مسکونی مقایسه‌ای بین سیستم رایج و استفاده از سیستم mCHP انجام گردید و با توجه به قیمت‌های واقعی تحلیل اقتصادی انجام و در ادامه میزان انتشار آلاینده‌های هوا برای هر دو سیستم مطالعه شد. نتایج نشان می‌دهد که استان تهران بهترین استان برای بازار این محصول می‌باشد. همچنین با توجه به تعرفه‌های کنونی استفاده از این سیستم می‌تواند پس از ۶ سال بازگشت سرمایه داشته باشد، از طرفی مقادیر تولید آلاینده‌های CO_2 ، CO ، NO_x و SO_x از سیستم رایج به ترتیب ۶۰/۹، ۶۰/۳، ۵۴/۷ و ۱۰۰ درصد بیشتر از mCHP می‌باشد. نهایتاً با توجه به بحث‌های اقتصادی و زیست‌محیطی، استفاده از سیستم تولید هم‌زمان با کمک سیاست‌های حمایتی ضمن بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش گازهای گلخانه‌ای قدم مهمی در جهت توسعه کشور می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت، شاخص نسبت نگهداشت هزینه، تحلیل اقتصادی، انتشار آلاینده‌های هوا، گازهای گلخانه‌ای، مدیریت کربن

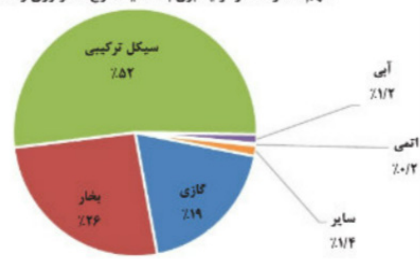
۱. مقدمه

با توجه به افزایش تقاضای انرژی در بخش مسکونی و صنعتی، به‌عنوان عامل حیاتی توسعه و پیشرفت کشورها،



علاوه بر به کارگیری منابع تجدیدپذیر انرژی مانند خورشید، باد و زیست توده، استفاده بهینه از سوخت های فسیلی مانند نفت، گاز و زغال سنگ و افزایش بازده مصرف آن ها مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۱]. در ایران با توجه به وفور منابع نفت و گاز، این سوخت ها بیشترین سهم را در تولید برق دارند. همان گونه که در (شکل ۱) نیز مشاهده می شود در سال ۱۴۰۰ با وجود به کارگیری انرژی هسته ای در نیروگاه اتمی بوشهر، ۹۷ درصد از برق کشور با استفاده از سوخت فسیلی تولید شده است [۲]. واضح است که بخش عمده میزان انرژی تولیدی نیروگاه ها در ساختمان های اداری و مسکونی استفاده می شود.

سهم مشارکت در تولید برق به تفکیک نوع تکنولوژی واحد در پاییز ۱۴۰۰



شکل ۱: سبد انرژی تولید برق کشور در سال ۱۴۰۰ [۲]

بخش عمده سوخت های فسیلی در نیروگاه ها برای تولید برق استفاده می شوند، این در حالی است که متوسط بازده عملکردی این نیروگاه ها در کل کشور در حدود ۳۶/۶ درصد است [۳]. در این نوع نیروگاه ها، مقدار زیادی انرژی حرارتی از طرق مختلف نظیر کندانسور، دیگ بخار، برج خنک کن، پمپ ها و سیستم لوله کشی موجود در تأسیسات، به هدر می رود. علاوه بر این، در شبکه های انتقال برق نیز حدود ۱۵ درصد از انرژی الکتریسیته تولیدی تلف می شود [۴]. همچنین هر یک از این نیروگاه ها به میزان قابل توجهی گازهای آلاینده و مخرب تولید می کنند.

یکی از روش های نوین برای مقابله با این مشکل، تولید پراکنده^۱ انرژی می باشد. سیستم های تولید پراکنده ای برق و حرارت باهدف بهینه سازی در مصرف انرژی، کاهش اتلافات ناشی از انتقال و توزیع انرژی الکتریکی در شبکه، کاهش آلودگی های ناشی از احتراق سوخت های فسیلی در نیروگاه های بزرگ و نیز تأمین امنیت بیشتر شبکه به کار گرفته می شوند. یکی از روش های پر کاربرد در تولید پراکنده، استفاده

از واحدهای تولید هم زمان توان و حرارت^۲ است. در این واحدها از یک منبع سوخت برای تولید توان استفاده شده و در کنار آن از گرمای اتلافی باز یافتی از این سیستم ها، برای مصارف گرمایشی، سرمایشی و بسیاری از فرایندهای صنعتی استفاده می شود. این کار نه تنها باعث بالا رفتن بازده سیستم (از دیدگاه قانون اول ترمودینامیک) می شود، بلکه کارایی آن (از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک) را نیز تا حد امکان بالا می برد. با این تفاسیر در آینده ای نزدیک که بازده بالای تولید انرژی نه یک انتخاب، بلکه یک الزام خواهد بود، استفاده از سیستم تولید توان و حرارت هم زمان بخشی از یک راه حل دراز مدت و پایدار می شود [۵]. در بخش مسکونی در کشورهای توسعه یافته بیشتر از ظرفیت های کم تر از ۵۰ کیلووات استفاده شده که به آن میکرو سی اچ پی^۳ گفته می شود. بخش تولید توان سیستم های میکرو سی اچ پی بر اساس تکنولوژی های متفاوتی طراحی و تولید می گردد: موتور احتراق داخلی، موتور استرلینگ، پیل سوختی، میکرو توربین و موتور بخار [۶، ۷].

مطالعات متعددی در زمینه ی کاربردها و همچنین امکان سنجی استفاده از این سیستم در دنیا انجام گرفته است. رن و گائو با امکان سنجی استفاده از سیستم تولید هم زمان در ساختمان های مسکونی در کشور ژاپن گزارش دادند که با استفاده از این سیستم می توان تا ۲۶ درصد در هزینه ی تولید انرژی صرفه جویی کرد و همچنین انتشار آلاینده ی کربن دی اکسید را نیز معادل کاهش مصرف انرژی می تواند کاهش دهد. [۸]. پائپه و همکارانش در مطالعه ای با بررسی انواع مختلف سیستم های تولید هم زمان گزارش دادند که استفاده از موتور گازسوز عملکرد بهتری نسبت به سایر سیستم ها دارد اما برای استفاده ی همگانی از این سیستم نیاز است تا هزینه ی راه اندازی اولیه بیش از ۵۰ درصد کاهش یابد [۹]. بهاتاچاریا و همکاران استفاده از این سیستم را در ۶ کارخانه ی بزرگ کاغذ سازی در ویتنام بررسی کرده و بازگشت سرمایه را در فاصله ی زمانی ۳ تا ۵ سال گزارش دادند [۱۰].

در ژاپن سیستم های mCHP در سال ۲۰۰۹ به بازار عرضه شد. در سال ۲۰۱۵ هیروشی ایتو مطالعاتی بر مبنای تحلیل اقتصادی و زیست محیطی انجام داد که نتایج تحلیل اقتصادی بازگشت سرمایه ۱۰ ساله و نتایج تحلیل زیست محیطی کاهش انتشار کربن تا ۱۹ درصد را نشان می دهد [۳۴].

1. Distributed Generation
2. Combined Heat and Power (CHP)
3. micro Combined Heat and Power (mCHP)

یوچونگ جونگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ ارزیابی چند معیاره روی ساختمان مسکونی دارای mCHP در کره جنوبی انجام دادند، نتایج نشان می‌دهد در صورت اعمال سیستم mCHP کل مصرف انرژی ۱۸٫۴ درصد، انتشار CO₂ حدود ۱۱٫۸ درصد و هزینه عملیات ۹٫۶ درصد کاهش می‌یابد؛ همچنین بازه بازپرداخت ۱۰ سال محاسبه شده است. [۳۵].

مهدی درزی و همکاران در سال ۲۰۲۱ بهینه‌سازی انرژی یک موتور mCHP را با استفاده از مدل‌سازی یک‌بعدی و سه‌بعدی انجام دادند. [۳۶].

لورنزو ماریو پاستوره و همکاران در خصوص نقش انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه‌های برق و گاز بر میزان توجیه اقتصادی نیروگاه‌های mCHP مطالعه کردند. [۳۷].

ایگور کروو و همکاران تأثیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و امکان‌سنجی اقتصادی mCHP با استفاده از سیستم‌های چرخه رانکین آلی (ORC) در زمینه‌های جغرافیایی مختلف را بررسی کردند. اثرات اقتصادی و اقلیمی در سه کشور با آب و هوا و شرایط بازار انرژی متفاوت، یعنی سوئد، بریتانیا و برزیل مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که پتانسیل نصب سیستم‌های ORC در سراسر جهان وجود دارد که هم از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه باشند و هم انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی را کاهش دهند [۳۸].

کیونک وو و همکاران در شانگهای مطالعاتی برای بررسی عملکرد اقتصادی سیستم‌های mCHP برای کاربردهای مسکونی انجام دادند، نتایج نشان داد که تنها در صورتی که سه اقدام پیشنهادی (اعطای ۶۰ درصد از قیمت mCHP به‌عنوان وام بدون بهره، خرید برق مازاد از کاربران mCHP به قیمت ۲ برابر فروش و فروش گاز با ۶۰ درصد کاهش نرخ) به‌صورت هم‌زمان از طرف دولت انجام شود، سیستم mCHP از دیدگاه اقتصادی امکان‌پذیر است [۳۹].

در کشورمان ایران نیز مطالعات محدودی در این زمینه صورت گرفته است. ستاری و تیموری به بررسی اقتصادی استفاده از سیستم تولید هم‌زمان در مناطق آب و هوایی کشور پرداختند ایشان با بررسی چند استان با شرایط آب و هوایی مختلف گزارش دادند که اردبیل و بندرعباس به ترتیب بهترین و بدترین شرایط را برای نصب این سیستم‌ها دارند [۱۱]. قاسم‌زاده و همکاران به طراحی سیستم تولید هم‌زمان برای اقلیم آب و هوایی تهران پرداختند و گزارش دادند که در بهترین حالت این سیستم باعث صرفه‌جویی ۱۳ درصدی در مصرف سوخت و کاهش ۱۲ درصدی آلاینده‌ها

می‌گردد [۱۲]. فرخی و همکاران به تحلیل ترموآکونومیکی یک سیستم تولید هم‌زمان مقیاس کوچک بر پایه‌ی موتور دیزل پرداختند. ایشان گزارش دادند که بیشترین اتلاف انرژی در مبدل حرارتی رخ داده که دلیل آن فرآیند انتقال دما و اختلاف دمای زیاد مبدل است [۱۳]. چهارطاقی و عزیززاده عملکرد یک سیستم تولید هم‌زمان با پیل سوختی را مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند که با استفاده از این سیستم کاهش مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها به ترتیب ۳۴ درصد و ۲۵ درصد است [۱۴]. باقری و همکاران نیز تأثیر دمای محیط بر روی عملکرد مولد موتور گازسوز سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت را در اقلیم گرم و خشک مورد بررسی قرار دادند. ایشان گزارش کردند که در دمای بالای ۴۰ درجه به ازای هر ۵ درجه افزایش دما به‌طور تقریبی توانایی تولید مولد در حدود ۱۲ درصد کاهش می‌یابد [۱۵]. گلزار و همکاران به توسعه‌ی مدل بهبودیافته سیستم ترکیبی تولید هم‌زمان برق و گرمایش و سرمایش بر اساس پیل سوختی اکسید جامد با سناریوهای مختلف پرداختند [۱۶]. کیالاشکی به تعیین اندازه‌ی بهینه‌ی تجهیزات سیستم تولید ترکیبی سرمایش، حرارت و قدرت پرداخته و گزارش دادند که استفاده از سیستم تولید هم‌زمان با استفاده از موتور احتراق داخلی نسبت به دیگر فناوری‌ها بهترین عملکرد را داشته و هزینه‌ی سرمایه‌گذاری آن هم مقرون‌به‌صرفه تر است [۱۷]. تقی‌پور و همکاران نیز به ارائه‌ی یک مدل ترکیبی برای اولویت‌بندی سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، حرارت و برودت با در نظر گرفتن اهداف توسعه‌ی پایدار پرداخته و در مورد بیمارستان طالقانی تهران مطالعه‌ی موردی انجام دادند. نتایج این تحلیل نیز نشان‌دهنده‌ی این مهم است که موتور پیستونی گازسوز بهترین انتخاب برای این سیستم از میان گزینه‌های مورد بررسی است [۱۸].

طبق مطالعات حسینی و همکاران سیستم قدرت به بهره‌برداری از ریزشبکه‌های مسکونی تمایل دارد. برای این منظور، ایشان برنامه‌ریزی عملیات مبتنی بر یک ریزشبکه مسکونی متشکل از ترکیبی از حرارت و برق (CHP)، مخزن ذخیره حرارت و دیگ بخار انجام دادند و عنوان کردند ضمن اینکه امکان فروش برق مازاد برای ایجاد درآمد به شبکه بالادست فراهم است، از کارکردهای هدف این کار بحث کاهش CO₂ در هوا است [۴۱].

از آنجایی که اقدام عملی در زمینه‌ی راه‌اندازی و نصب این سیستم در کشورمان نیازمند بررسی اقتصادی و

این گونه خانه‌ها اغلب برای مالکان آن‌ها سفارشی شده^۱ هستند. به علاوه مالکان خانه‌های بزرگ معمولاً تمایل بیشتری برای ماندن در خانه خود نسبت به خانه‌های کوچک (که برای مالکان خود بیشتر ماهیت انتقالی دارند و در واقع خانه‌های شروع هستند) را دارند. بر همین اساس با مراجعه به اسناد و مدارک می‌توان یافت که استان تهران با بیش از ۱۱۰۰۰۰ واحد آپارتمانی با متراژ بیش از ۸۰ مترمربع در مقام اول بین استان‌های کشور قرار دارد [۲۱].

۳-۲. سطح درآمد خانوار

با توجه به نوین بودن فناوری تولید هم‌زمان گرما و برق، بر اساس الگوی پذیرش فناوری و مبانی رفتاری مصرف‌کننده، این محصول در ابتدای عرضه قیمت بالایی دارد و این گونه مفروض است که پذیرندگان اولیه محصولات تولید هم‌زمان گرما و برق به احتمال قوی دارای درآمد بالاتر از میانگین هستند. متوسط درآمد ماهیانه‌ی خانوار شهری بر اساس آمار سال ۱۳۹۹ در حدود ۳۵۰ دلار بوده است. که در این بین استان تهران با متوسط درآمد ماهیانه‌ی ۴۷۵ دلار، مقام اول را بین سایر استان‌های کشور دارا می‌باشد [۲۲].

۴-۲. مصرف انرژی و سوخت

بانگاهی به استان‌هایی با بیشترین مصرف انرژی می‌توان گفت استان تهران با ۳۱ هزار گیگاوات ساعت بیشترین مصرف برق را دارد که ۳۰ درصد آن در بخش مصرف خانگی به مصرف می‌رسد. همچنین این استان با حدود ۱۵ میلیارد مترمکعب مصرف در سال بیشترین مصرف گاز را نیز در بین سایر استان‌ها دارد که حدود ۶۵ درصد آن در بخش خانگی مصرف می‌شود [۳].

۵-۲. بازار هدف

با بررسی شاخص‌های ذکر شده و همچنین نگاهی به گرمایش و سرمایش مورد نیاز استان‌های مختلف کشور می‌توان گفت استان تهران بالاترین پتانسیل برای نصب و راه‌اندازی سامانه‌ی تولید هم‌زمان برق و حرارت را دارد از این رو در ادامه با انتخاب این استان به عنوان استان هدف به بررسی و ارزیابی شاخص‌های اقتصادی و محیط زیستی پرداخته شده است.

۳. معرفی شاخص‌های ارزیابی اقتصادی و محیط زیستی

بحث‌های اقتصادی یکی از مهم‌ترین ملاحظات برای راه‌اندازی سیستم‌های مختلف است. ارزیابی اقتصادی

زیست‌محیطی است. در این مطالعه، ابتدا به بررسی بازار mCHP در کشور پرداخته سپس با استفاده از شاخص‌های مختلف اقتصادی میزان سودآوری استفاده از این سیستم‌ها به بحث گذاشته می‌شود و در نهایت مباحثی پیرامون انتشار آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که اطلاعات مربوط به سامانه‌ی تولید هم‌زمان برق و حرارت مربوط به پروژه‌ای در پژوهشگاه صنعت نفت ایران است که در آن یک سیستم تولید هم‌زمان ۱۴ کیلوواتی با موتور احتراق داخلی گازسوز ساخته شده است و در مرحله تجاری‌سازی می‌باشد که مقاله حاضر از نتایج این پروژه می‌باشد.

۲. مروری بر ادبیات تحقیق

بازار mCHP ها به تدریج در حال شکل گرفتن است. ژاپن، آمریکای شمالی و فرانسه از کشورهای پیش‌تاز در به کارگیری این سیستم می‌باشند [۱۹]. با توجه به اینکه mCHP یک محصول جدید (در بازار جهانی و به طور خاص در بازار ایران) است. ابتدا باید استانی در کشور انتخاب کرد که از نظر پارامترهای مختلف اولویت و برتری نسبت به سایر استان‌ها برای نصب و راه‌اندازی این سیستم‌ها را داشته باشد. به همین دلیل در این بخش با بررسی عوامل مهم بازار پذیری محصول به انتخاب استان هدف پرداخته شده است.

۱-۲. جمعیت شهری و تراکم جمعیت

بررسی جمعیت شهرنشین هر استان به حیث تمکن مالی و میزان پوشش‌دهی شبکه برق و گاز و همچنین تمایل به کاهش هزینه‌های زندگی نسبت به بررسی جمعیت کل استان بیشتر مورد توجه قرار خواهد گرفت، لذا گام نخست بررسی جمعیت شهرنشین هر یک از استان‌های کشور خواهد بود. بر اساس آمار ارائه شده از سازمان ملی آمار ایران برای سال ۱۳۹۵، استان تهران با داشتن حدود ۲۱ درصد از جمعیت شهری کل کشور در رده‌ی اول این فهرست قرار دارد [۲۰].

۲-۲. ساختمان‌های مسکونی با متراژ بالا

با بررسی مزایای mCHP می‌توان استنتاج کرد که این سیستم برای خانه‌های بزرگ‌تر از دو منظر دارای منافع اقتصادی بیشتری است: بازگشت سرمایه مربوط به هزینه خرید اولیه و اولویت هزینه کرد. چراکه خانه‌های بزرگ‌تر به طور طبیعی منابع بیشتری برای سرمایش و گرمایش استفاده می‌کنند و سیستم‌های گرمایش و سرمایش در

1. Customized

اطلاعاتی درباره‌ی بهترین نحوه‌ی استفاده از منابع مختلف (سوخت، سرمایه و ...) برای برطرف کردن نیاز مشتریان را در اختیار متخصصین قرار می‌دهد. سامانه‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت عمدتاً هزینه‌ی سرمایه‌گذاری بالاتری نسبت به سیستم‌های رایج انرژی دارند اما در طرف مقابل هزینه‌های جاری آن‌ها نسبت به سیستم‌های رایج که برق را از طریق شبکه برق‌رسانی و بار گرمایی را از طریق بویلرهای گازسوز تأمین می‌کند به‌مراتب پایین‌تر هستند. در ادامه با بررسی معادلات حاکم به بررسی و مقایسه‌ی این سامانه با سیستم‌های رایج پرداخته شده است.

۳-۱. معادلات حاکم

در مطالعه‌ی حاضر یک شاخص اقتصادی مهم، نسبت نگهداشت هزینه^۱ برای بررسی بیشتر به‌کار گرفته شده که به‌صورت رابطه‌ی یک تعریف می‌شود:

$$CSR = \frac{C_{Con} - C_{CHP}}{C_{Con}} \times 100 \quad (۱)$$

که در آن C_{CHP} و C_{Con} به ترتیب هزینه‌ی انرژی سالانه برای سیستم‌های رایج و سیستم تولید برق و حرارت هم‌زمان می‌باشند که به‌صورت روابط ۲ و ۳ تعریف می‌شوند.

$$C_{Con} = C_{Con}^{Ele} + C_{Con}^{Gas} \quad (۲)$$

$$C_{CHP} = C_{CHP}^{Inv} + C_{CHP}^{Ele} + C_{CHP}^{Gas} \quad (۳)$$

که در روابط فوق، C_{Con}^{Ele} و C_{Con}^{Gas} به ترتیب هزینه‌ی سالانه‌ی خرید برق و مصرف گاز برای سیستم رایج در کشور می‌باشند. همچنین به‌طور مشابه، C_{CHP}^{Inv} ، C_{CHP}^{Ele} و C_{CHP}^{Gas} به ترتیب هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری، هزینه‌ی خرید برق از شبکه (یا فروش به آن) و هزینه‌ی خرید گاز شهری برای سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت هستند [۸]. لازم به ذکر است که نحوه‌ی محاسبه‌ی این مقادیر در بخش بعدی به تفصیل بیان شده است.

در کنار بحث‌های اقتصادی، تأثیرات زیست‌محیطی یک سیستم نیز در ارزیابی استفاده از آن نقش مهمی را ایفا می‌کند. به همین منظور در ادامه روابط حاکم برای به دست آوردن میزان آلاینده‌های منتشر شده از هر دو سیستم رایج استفاده شده و سامانه‌ی تولید هم‌زمان برق و حرارت معرفی شده‌اند.

$$Em_{CON} = Em_{CON}^{Ele} + Em_{CON}^{Gas} \quad (۴)$$

$$Em_{CHP} = Em_{CHP}^{Ele} + Em_{CHP}^{Gas} \quad (۵)$$

که در آن Em_{CON} و Em_{CHP} میزان آلاینده‌های منتشر شده توسط سیستم رایج و سیستم mCHP است که برابر است با مجموع آلاینده‌های ناشی از تولید برق و گاز می‌باشد. برای مشخص شدن میزان تولید هر یک از آلاینده‌ها در طی فرآیند از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$Em_{CON}^{Ele} = E_{ele} \times EmI_{ele} \quad (۶)$$

$$Em_{CON}^{Gas} = E_{CON}^{gas} \times EmI_{gas} \quad (۷)$$

$$Em_{CHP}^{Ele} = (E_{ele} - E_{ele-chp}) \times EmI_{ele} \quad (۸)$$

$$Em_{CHP}^{Gas} = E_{CHP}^{gas} \times EmI_{gas} \quad (۹)$$

در این معادلات E_{ele} و $E_{ele-chp}$ به ترتیب برق موردنیاز سالانه و برق تولیدی توسط سیستم تولید هم‌زمان، E_{CON}^{gas} و E_{CHP}^{gas} مقدار گاز مورد نیاز سالانه به ترتیب در سیستم رایج و تولید هم‌زمان و EmI_{ele} و EmI_{gas} نیز به ترتیب شدت تولید آلاینده‌ها برای تولید برق و احتراق گاز هستند که مقادیر آن در (جدول ۱) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این مقادیر از مراجع ذکر شده و با استفاده از روش موازنه‌ی جرم بر اساس میزان مصرف سوخت محاسبه شده‌اند [۲۳ و ۲۴].

جدول ۱: میزان تولید معادل گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های مختلف در فرایند احتراق گاز و تولید برق

کمیت آلاینده	$EmI_{gas} (\frac{kg}{m^3})$ [۲۳ و ۲۴]	$EmI_{ele} (\frac{kg}{kwh})$ [۲۵]
CO ₂	۱/۹۹۸	۰/۷۱۵
CO	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۴
NO _x	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۰۵
SO _x	-	۰/۰۰۳۳

۳-۲. مقادیر اولیه و الگوریتم حل

برای محاسبه کمیت‌ها از روابط مطالعه شده ابتدا لازم است مقادیر معلوم مشخص گردند، از این رو در این بخش به معرفی مقادیر اولیه پرداخته شده است. لازم به ذکر است که مقادیر مشخص شده مربوط به پروژه‌ی mCHP می‌باشد که پژوهشگاه صنعت نفت مجری پروژه مذکور است. برای بررسی وضعیت اقتصادی مقاله در محیط نرم‌افزار متلب کد نویسی انجام شده است و برای برآورد میزان انتشار آلاینده‌های گازهای گلخانه‌ای، با توجه به مقادیر کاهش مصرف انرژی

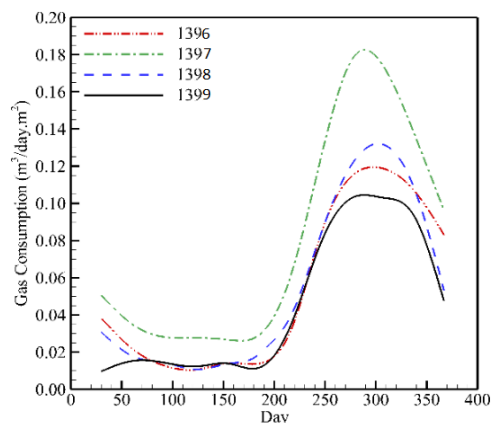
و سوخت از نرم افزار اسپن هایسیس استفاده گردیده است. قیمت ها بر مبنای سال ۱۴۰۰ می باشد. با توجه به اینکه دستگاه تجاری شده است و به صورت انبوه تولید می گردد قیمت آن واقعی و مبنای تجاری آن می باشد. در (جدول ۲) داده های مربوط به معادلات حاکم فهرست شده اند:

جدول ۲: فرضیات و مقادیر اولیه

کمیت	واحد	مقدار
بازده بویلر سیستم رایج [۱۱]	%	۸۰
بازده الکتریکی سامانه mCHP	%	۳۰
بازده گرمایی سامانه mCHP	%	۵۰
سرمایه گذاری اولیه سامانه mCHP	($\times 10^6 \text{ RLS}$)	۴۰۰
ظرفیت تولید برق سامانه mCHP	(kw)	۱۴
کارکرد سامانه mCHP	(h/day)	۱۵
قیمت برق خریداری شده از شبکه	(RLS/kwh)	مطابق تعرفه ی پلکانی قبوض [۲۶]
قیمت برق فروخته شده به شبکه [۲۷]	(RLS/kwh)	۱۰۸۶
بهای گاز مصرفی	(RLS/m ³)	مطابق تعرفه ی پلکانی قبوض [۲۸]

۳-۳. الگوی گاز مصرفی در شهر تهران

با توجه به مطالعات بخش بازاریابی و دلایل توجهی در رابطه با عدم تمایل مالکان منازل مسکونی با زیربنای بالای ۸۰ متر، به منظور آگاهی از مصرف گاز در تهران ۸ ساختمان با زیربنای ۸۰ متر مربع به بالا مورد بررسی قرار گرفته اند. در (شکل ۲) میزان مصرف میانگین این ۸ ساختمان در چهار سال ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۹ آورده شده است.



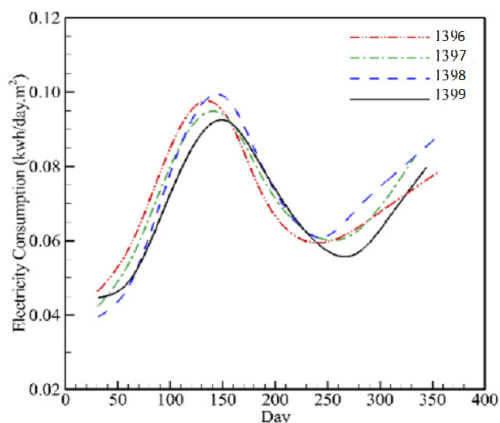
شکل ۲: تغییرات سالیانه مصرف متوسط گاز در تمامی ساختمان های انتخاب شده شهر تهران

با میانگین گیری از این چهار سال می توان متوسط مصرف گاز در روزهای مختلف سال را بر حسب نرمال مترمکعب بر روز در مترمتر خانه به دست آورد. همان طور که مشاهده می شود حاصل ضرب سطح زیر این نمودار در مترمتر واحد مسکونی میزان مصرف خانگی گاز در طول یک سال برای ماه های مختلف (بر حسب مترمکعب) را نشان می دهد. نظر به تفاوت بهای گاز در شش ماهه ی اول و دوم سال، این مقادیر برای هر ماه جداگانه محاسبه شده و مبلغ کلی هزینه گاز از این طریق بدست آمده است. لازم به ذکر است که گاز مصرفی در بخش خانگی را می توان به دو بخش گرمایشی (آب گرم و گرمایش فضای خانه) و غیر گرمایشی (پخت و پز و ...) تقسیم کرد. همان طور که قبلاً نیز گفته شد در این مطالعه هدف بخش گرمایشی مصرف گاز است. بنابر گزارش شرکت بهینه سازی مصرف سوخت، بیشترین مصرف گاز در بخش خانگی به ترتیب مربوط به گرمایش ۷۰ درصد، آب گرم ۲۳ درصد و پخت و پز با سهم ۷ درصد است [۲۹]. بنابر این در فصول سرد و گرم به ترتیب ۹۳ و ۷۵ درصد از این گاز در بخش گرمایش مصرف می شود.

سامانه ی تولید هم زمان ۲۸ کیلووات حرارت در ساعت تولید کرده که جهت تولید این مقدار حرارت به طور متوسط باید حداقل ۳ مترمکعب گاز سوزانده شود، به بیان دیگر می توان مقدار گاز صرفه جویی شده را با این روند به دست آورد. در نتیجه برای سامانه ی تولید هم زمان میزان گاز مورد نیاز با مجموع گاز مورد نیاز برای گرمایش و آب گرم، به علاوه ی گاز مورد نیاز برای تولید برق مصرفی منهای مقدار گاز صرفه جویی شده از طریق تولید حرارت توسط سیستم برابر است.

۳-۴. الگوی برق مصرفی در شهر تهران

به منظور مطالعه قبوض برق مصرفی در تهران ۶ واحد آپارتمان با زیربنای ۸۰ متر مربع به بالا انتخاب شده اند. در (شکل ۳) مصرف متوسط سالیانه این واحدها برای ۴ سال متفاوت آورده شده است.



شکل ۳: تغییرات سالیانه مصرف متوسط برق در تمامی ساختمان های انتخاب شده شهر تهران

با میانگین گیری از داده‌های این نمودار می‌توان میزان مصرف ماهانه‌ی خانه‌هایی با مترهای متفاوت را به دست آورد سپس با استفاده از تعرفه‌های پلکانی قبوض برق، هزینه‌ی برق مصرفی کل به دست می‌آید. لازم به ذکر است، هزینه‌ی مرتبط با تولید برق در سامانه‌ی تولید هم‌زمان با دو سناریو در نظر گرفته شده است، حالت اول زمانی که برق مصرفی بیش‌تر از برق تولیدی توسط خود سیستم باشد در این صورت باید مقداری برق از شبکه نیز خریداری شود (رابطه ۱۰)، همچنین حالتی که برق تولیدی بیش‌تر از تقاضای مصرفی باشد، که در این حالت برق اضافی باید به شبکه فروخته شود (رابطه ۱۱).

$$C_{CHP}^{Ele-buy} = (E_{ele} - E_{ele-chp}) \times P_{rele} \quad (10)$$

$$C_{CHP}^{Ele-sell} = (E_{ele-chp} - E_{ele}) \times P_{rsell} \quad (11)$$

که در این روابط، E_{ele} برق سالانه‌ی مورد نیاز، $E_{ele-chp}$ برق سالانه‌ی تولیدی توسط سیستم mCHP، P_{rele} تعرفه‌ی بهای برق مصرفی (مطابق بهای پلکانی ارائه شده در قبوض است) و P_{rsell} بهای برق فروخته شده به شبکه می‌باشد.

با توجه به بررسی‌ها و مطالعات انجام شده، برای محاسبه نسبت نگهداشت هزینه و میزان انتشار آلاینده‌ها، روابط (۱) تا (۱۱) باید حل گردد که بدین منظور الگوریتم آرایه شده در بخش بعدی پیشنهاد شده است و بر اساس این الگوریتم، برنامه کامپیوتری در محیط برنامه‌نویسی فرترن توسعه داده شده است.

۳-۳. الگوریتم حل

روند حل در برنامه‌ی کامپیوتری نوشته شده به شرح زیر است:

۱. وارد کردن مقادیر اولیه (مترها و تعداد واحد مسکونی، راندمان حرارتی و الکتریکی mCHP، راندمان حرارتی بویلر و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و تعمیر و نگهداری و ...)

۲. محاسبه‌ی میزان برق مورد نیاز (E_{ele}) و گاز مصرفی (E_{gas}) هر واحد بر اساس (اشکال ۲ و ۳)

۳. محاسبه‌ی بهای برق و گاز مصرفی برای هر واحد طبق سیستم رایج (بر اساس تعرفه‌ی پله‌ای قبوض) و نهایتاً محاسبه‌ی هزینه‌ی برق و گاز کلی ساختمان C_{CON}^{Ele} و C_{CON}^{Gas}

۴. محاسبه‌ی مقدار برق ($E_{ele-chp}$) و حرارت تولیدی توسط سامانه‌ی mCHP

۵. محاسبه‌ی میزان گاز مورد نیاز برای تولید برق در سامانه mCHP ($E_{CHP}^{gas for ele}$) و همچنین میزان گاز صرفه‌جویی شده بر اساس حرارت تولیدی توسط این سامانه ($E_{CHP}^{gas saved}$).

۶. محاسبه‌ی میزان گاز مورد نیاز برای حالتی که از سامانه‌ی mCHP استفاده می‌شود به صورت ($E_{CHP}^{gas} = E_{CON}^{gas} - E_{CHP}^{gas for ele} + E_{CHP}^{gas saved}$)

۷. محاسبه‌ی بهای گاز مصرفی برای هر واحد (بر اساس تعرفه‌ی پله‌ای قبوض) و نهایتاً محاسبه‌ی هزینه‌ی گاز کلی ساختمان C_{CHP}^{Gas}

۸. محاسبه‌ی میزان برق مورد نیاز و هزینه‌ی برق خریداری شده یا فروخته شده به شبکه C_{CHP}^{ele}

- اگر میزان برق تولیدی توسط سامانه بیش‌تر از برق مورد نیاز بود ($E_{ele-chp} > E_{ele}$) برق به شبکه سراسری با بهای تعیین شده فروخته می‌شود و در غیر این صورت برق مورد نیاز بر اساس تعرفه خریداری خواهد شد.

۹. محاسبه‌ی نسبت نگهداشت هزینه بر اساس داده‌های بدست آمده.

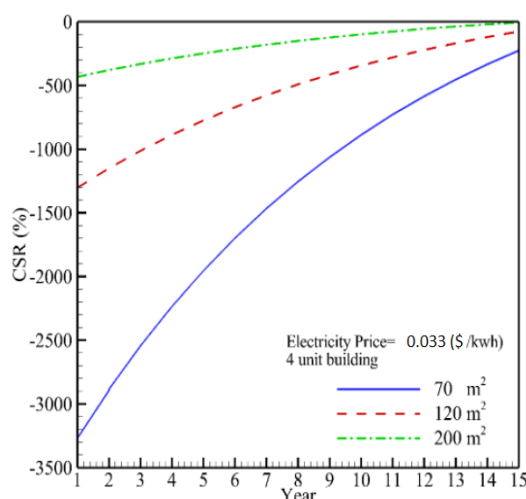
۱۰. محاسبه‌ی میزان آلاینده‌های منتشر شده در هر دو حالت مفروض.

۴. نتایج و تفسیر

در این بخش ابتدا نتایج بدست آمده از تحلیل اقتصادی دو سیستم مورد مطالعه آورده شده و سپس میزان انتشار آلاینده‌ها در هر دو سیستم مورد بحث قرار گرفته است. لازم به ذکر است که تمامی محاسبات انجام شده در این مطالعه برای ساختمان‌هایی با مترهای متفاوت و تعداد واحدهای مختلف در استان تهران صورت گرفته است. همچنین فرض بر این است که برق تولیدی توسط سامانه‌ی تولید هم‌زمان توسط واحد مسکونی به مصرف رسیده و مقدار مورد نیاز آن (طبق تعرفه) از شبکه خریداری یا میزان اضافی به فروش می‌رسد. با توجه به اینکه در حال حاضر هزینه معین و یا مالیات کربن برای آثار محیط زیستی آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای تعیین نشده است و فقط مقادیر انتشار آن مشخص شده است و از طرفی چون بازار خرید تجهیز عموم مردم می‌باشد، بحث اقتصادی ملموس‌تر می‌باشد.

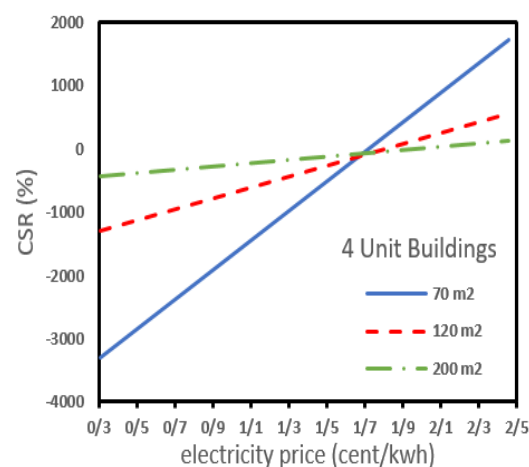
۴-۱. تحلیل اقتصادی

با هزینه‌ی سیستم رایج برابری نمی‌کند. این نتیجه نشانگر لزوم تغییر تعرفه‌ی برق خریداری شده از دارندگان سیستم تولید هم‌زمان برای تشویق آن‌ها در استفاده از این سامانه است.



شکل ۵: تغییرات نسبت نگهداشت هزینه برحسب سال برای تعرفه‌ی فعلی برق فروخته شده به شبکه برای یک ساختمان چهار واحدی با متراژ مختلف

همان‌طور که در بخش معادلات حاکم اشاره شد، نسبت نگهداشت هزینه به‌عنوان شاخص سودآوری در این مطالعه برای دو سیستم رایج و تولید هم‌زمان برق و حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. در (شکل ۴) این نسبت برحسب قیمت برق فروشی به شبکه برای یک ساختمان ۴ واحدی با زیربنای هر واحد ۷۰، ۱۲۰ و ۲۰۰ متر مربع نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود برای رسیدن به نسبت نگهداشت صفر (یعنی برابری هزینه‌های هر دو سیستم) در سال اول، قیمت برق فروخته شده به شبکه برای ساختمان‌های ۴ واحدی با زیربنای ۷۰، ۱۲۰ و ۲۰۰ باید به ترتیب ۱،۹۳، ۱،۸۱ و ۱،۷۲ سنت برای هر کیلووات ساعت باشد. علت افزایش قیمت برق با افزایش متراژ ساختمان‌ها همان افزایش مصرف برق هست که منجر به فروش کمتر برق به شبکه گردیده و درنهایت برای جبران سرمایه اولیه باید مبلغ برق فروخته شده افزایش یابد. لازم به ذکر است که طبق تعرفه‌ی موجود، برق تولیدی توسط سامانه mCHP قیمت ۰،۳۳ سنت برای هر کیلووات ساعت توسط وزارت نیرو خریداری می‌شود [۲۷].



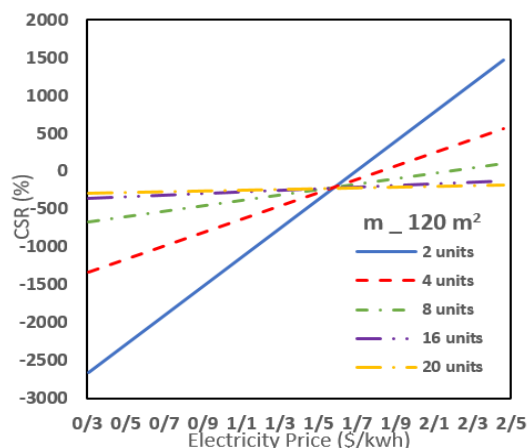
شکل ۴: تغییرات نسبت نگهداشت هزینه برحسب قیمت برق فروشی برای یک ساختمان چهار واحدی با متراژ مختلف

در (شکل ۶ الف و ب) نسبت نگهداشت هزینه برحسب سال برای قیمت‌های متفاوت برق فروخته شده در دو ساختمان ۴ واحدی با متراژهای ۷۰ و ۱۲۰ متر مربع نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش قیمت برق برای هر کیلووات ساعت از ۰،۳۱ تا ۲،۴۶ سنت، سالی که در آن نسبت نگهداشت هزینه صفر شده و به عبارت دیگر هزینه‌های سیستم رایج با سیستم تولید هم‌زمان برابر می‌گردد، کاهش می‌یابد. به این صورت که برای یک ساختمان ۴ واحدی با متراژ ۷۰ مترمربع، نسبت نگهداشت برای قیمت برق فروخته شده باقیمت ۰،۳۱ سنت در ۱۵ سال اول به صفر نرسیده، برای نرخ‌های ۰،۶۱، ۰،۹۲، ۱،۲۳ و ۱،۵۴ سنت به ترتیب در سال‌های یازدهم، هفتم، چهارم و دوم این نسبت به صفر می‌رسد و همچنین برای مبالغ بالاتر از همان سال اول این نسبت بالاتر از صفر است که این به معنی جبران سرمایه‌گذاری اولیه و سوددهی طرح می‌باشد. لازم به ذکر است که به‌علت مصرف بالاتر در ساختمان ۴ واحدی با متراژ بزرگ‌تر رسیدن این نسبت به صفر در این حالت به اواخر سال‌های ذکر شده منتهی می‌گردد.

در ادامه با فرض فروش برق به شبکه‌ی سراسری طبق تعرفه‌ی کنونی وزارت نیرو و با فرض افزایش ده درصدی تمامی هزینه‌ها در هر سال به بررسی نسبت نگهداشت هزینه برحسب مدت‌زمان پرداخته شده است. همان‌طور که در (شکل ۵) نشان داده شده است با تعرفه‌ی کنونی هزینه‌های سیستم تولید هم‌زمان بعد از گذشت ۱۵ سال هم



۱۲۰ متر مربع به یک دستگاه تولید هم‌زمان برق و حرارت نیاز است تا بتواند مصارف گرمایشی و الکتریکی هر واحد را به‌خوبی پوشش داده و نرخ برق فروشی هم در حدود ۰,۲۳ سنت به ازای هر کیلووات ساعت باقی بماند.



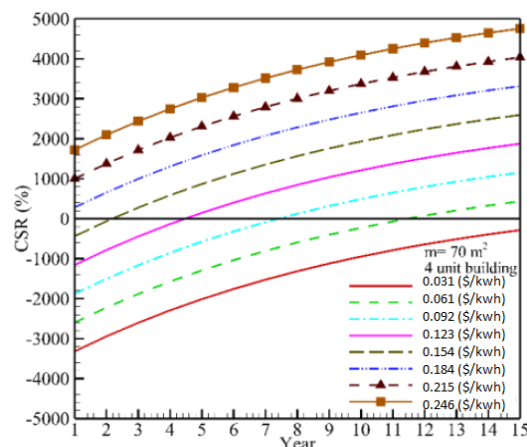
شکل ۷: تغییرات نسبت نگهداشت هزینه برحسب قیمت برق فروخته‌شده برای یک ساختمان با واحدهای مختلف ۱۲۰ متری

در ادامه برای تفسیر بهتر و پیش‌بینی دقیق‌تر، نرخ بازده داخلی یا میزان بازگشت داخلی سرمایه^۱ محاسبه شده است. این شاخص یکی از روش‌های استاندارد ارزیابی طرح‌های اقتصادی است. در این روش تلاش می‌شود تا جریان نقدینگی با نرخ بازگشت نامعلومی به نرخ کنونی تنزیل داده شوند به‌گونه‌ای که ارزش خالص فعلی^۲ آن برابر صفر گردد. ارزش فعلی خالص برابر با کسر ارزش فعلی درآمدها از ارزش فعلی هزینه‌های یک پروژه است که می‌تواند منفی یا مثبت باشد. (رابطه ۱۲) به عبارت دیگر درآمدهای تنزیل شده در طول دوره بازگشت سرمایه با هزینه‌های تنزیل شده در همین دوره برابر قرار داده می‌شوند و بر این اساس نرخ بازگشت داخلی تعیین می‌شود. در این رابطه d نرخ بهره، B_t و C_t به ترتیب منافع و هزینه‌های طرح در سال t می‌باشند. حاصل رابطه، ارزش فعلی خالص یا NPV می‌باشد.

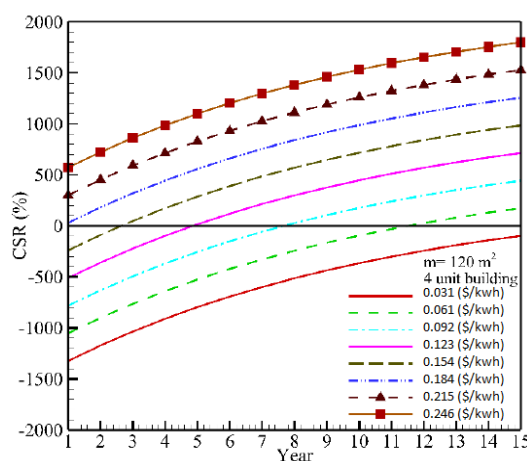
$$NPV = \sum_t \frac{B_t - C_t}{(1 + d)^t} \quad (12)$$

اگر این نرخ از نرخ بهره واقعی بیشتر باشد، طرح سودآور و قابل اجرا بوده و اگر نرخ بازگشت محاسبه شده کمتر از نرخ بهره واقعی باشد، طرح زیان‌ده و غیرقابل اجرا است.

1. Internal Rate of Return (IRR)
2. Net Present Value (NPV)



الف) ساختمان چهار واحدی با متراژ ۷۰ متر مربع



ب) ساختمان چهار واحدی با متراژ ۱۲۰ متر مربع

شکل ۸: تغییرات نسبت نگهداشت هزینه برحسب سال برای تعرفه‌های مختلف قیمت برق فروخته شده

در ادامه به بررسی تعداد واحدهای مناسب برای استفاده از سیستم تولید هم‌زمان پرداخته شده است. به همین منظور در (شکل ۷) نسبت نگهداشت هزینه برحسب تعرفه‌های برق فروخته‌شده به شبکه برای ساختمان‌هایی با تعداد واحدهای مسکونی متفاوت آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ساختمان‌های بالای ۸ واحد در صورت استفاده از یک سیستم تولید هم‌زمان با مشخصات ذکر شده در بخش‌های قبل قیمت تعرفه‌ی برق فروخته شده به بیش از ۲,۴۶ سنت به ازای هر کیلووات ساعت می‌رسد و با توجه به تعرفه‌های موجود برای انرژی خورشیدی و سایر مولدهای پراکنده رقم غیرمعقولی به حساب می‌آید؛ بنابراین می‌توان گفت برای هر ۴ واحد از یک ساختمان با متراژ در حدود

معیار دیگر، نرخ بازده داخلی است که نرخ بهره‌ای می‌باشد که ارزش فعلی درآمدهای یک پروژه را با ارزش فعلی هزینه‌های آن برابر می‌کند.

$$NPV = \sum_t \frac{B_t - C_t}{(1+d)^t} = 0 \quad (13)$$

اگر نرخ بازده داخلی بزرگ‌تر از نرخ بهره بازار باشد به معنی سودآور بودن طرح بوده و اگر این نرخ کوچک‌تر از نرخ بهره بازار باشد به معنی زیانده بودن طرح است [۴۰].

در (جدول ۳) مقادیر اولیه موردنیاز برای این بررسی آورده شده است.

جدول ۳: فرضیات و مقادیر اولیه

مورد	واحد	هزینه
تجهیزات اصلی		۱۰۹۵۷
نصب و راه‌اندازی		۲۸۸
لوله‌کشی	دلار	۲۸۸
تعمیر و نگهداری سالیانه		۵۸
سرمایه‌گذاری ثابت	دلار	۱۱۵۳۴
هزینه‌های سالانه	دلار بر سال	۵۸
نرخ بهره	درصد	۱۵

در (جدول ۴) نتایج حاصل از این بررسی آورده شده است.

جدول ۴: شاخص‌های مختلف بر اساس قیمت‌های برق متفاوت

کمیت	قیمت برق (سنت)	۰,۱۵	۰,۳۱	*۰,۳۳	۰,۶۱	۰,۹۲	۱,۲۳	۱,۵۴	۱,۸۴
IRR (%)		-۱/۲	۱۵	۱۷/۲	۳۶/۸	۵۴/۹	۷۲	۸۸/۶	۱۰۵
ارزش خالص فعلی (دلار)		-۷۰۷۵	۰,۲۵	۱۲۵۲	۱۴۳۶۵	۲۸۷۳۰	۴۳۰۶۴	۵۷۵۲۱	۷۱۹۷۸
زمان بازگشت سرمایه (سال)		بیش از ده سال	۶	۶	۴	۳	۲	۲	۲

* نرخ تعرفه‌ی برق فروخته شده به شبکه برای سامانه‌های تولید هم‌زمان.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نرخ بازگشت سرمایه به ازای مبلغ تعرفه‌ی کنونی در حدود ۶ سال است و برای قیمت‌های برق فروخته‌شده‌ی بالاتر، کمتر از ۵ سال می‌باشد؛ که در صورت استفاده از سیستم رایج در مدت ۵ سال باید در حدود ۴۴۹۱ دلار هزینه پرداخت کرد.

۴-۲. انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها

با توجه به پروتکل‌ها و استانداردهای بین‌المللی محیط زیستی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها نیز می‌تواند در انتخاب و اجرای یک سیستم نقش جذاب و مهمی را ایفا می‌کند. از این رو در (جدول ۵) مقادیر معادل گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های منتشر شده توسط هر دو سیستم مورد بحث و نسبت کاهش گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها برای یک ساختمان ۴ واحدی با زیربنای ۱۲۰ متر مربع ارایه

شده است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود سیستم تولید هم‌زمان تنها با مصرف گاز طبیعی، گاز گلخانه‌ای و آلاینده تولید می‌کند و مقادیر CO_2 ، CO ، NO_x و SO_x در سیستم رایج به ترتیب ۶۰/۹، ۶۰/۳، ۵۴/۷ و ۱۰۰ درصد بیشتر از آلاینده‌های تولیدی توسط سیستم تولید هم‌زمان می‌باشد. علت تولید آلاینده‌ی SO_x در نیروگاه‌های تولید برق، مصرف سوخت‌های مختلف مانند مازوت است که تا حدودی حاوی H_2S می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از سیستم تولید هم‌زمان منجر به کاهش چشمگیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها به محیط در حدود ۰/۳۲ کیلوگرم به ازای هر کیلو وات ساعت می‌گردد. از طرفی با توجه به مشوق‌های بین‌المللی می‌توان از این کاهش انتشار حمایت‌های مالی را از مکانیسم‌های مختلف مشابه gef و CDM جذب نمود.

1. Emission Reduction Ratio (ERR)

جدول ۵: میزان آلاینده‌های منتشر شده برای دو سیستم مورد بحث

آلاینده	کیلوگرم آلاینده‌ی تولید شده در نیروگاه برق		کیلوگرم آلاینده‌ی تولید شده از طریق گاز		ERR (%)
	CHP	Con	CHP	Con	
CO ₂	۸۲۸۰	۰	۳۲۵۱۷	۱۵۹۴۷/۷	۶۰/۹
CO	۴/۶	۰	۱۹/۵۲	۹/۵۷	۶۰/۳
NO _x	۵/۷	۰	۶۸/۳۵	۳۳/۲۵	۵۴/۷
SO _x	۳۸/۲	۰	۰	۰	۱۰۰

۵. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مطالعه به بررسی و امکان‌سنجی استفاده از سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت در منازل مسکونی استان تهران پرداخته شده که علت انتخاب این استان داشتن زیرساخت‌های مناسب برای اجرای این طرح بوده است. استان تهران با داشتن بیشترین جمعیت شهرنشین، بیشترین تعداد ساختمان با زیربنای بالای ۸۰ متر، بالاترین سطح درآمد خانوار و بیشترین میزان مصرف انرژی در کشور بهترین استان برای بازار این محصول می‌باشد. از این رو با داشتن الگوی مصرف برق و گاز سالیانه ساکنین این استان، با تعریف شاخص نسبت نگهداشت هزینه، به مقایسه‌ی هزینه‌ها در صورت استفاده از سیستم رایج (خرید برق از شبکه سراسری و خرید گاز برای مصارف گرمایشی) با سیستم تولید هم‌زمان پرداخته شد که نتایج مهم آن در ادامه آورده شده است:

- در صورتی که هدف، برابری هزینه‌های سیستم تولید هم‌زمان با سیستم رایج باشد، برای یک ساختمان ۴ واحدی با زیربنای بین ۷۰ تا ۲۰۰ مترمربع، باید مبلغ برق فروخته شده به شبکه در حدود ۱,۸۴ سنت برای هر کیلووات ساعت باشد.
- در صورت فروش برق به شبکه با تعرفه‌ی کنونی (۰,۳۳ سنت برای هر کیلووات ساعت)، این طرح در مقایسه با سیستم رایج صرفه‌ی اقتصادی نداشته و زمان برابری هزینه‌ی آن با سیستم رایج بیش از ۱۵ سال خواهد بود؛ که این نتیجه لزوم تغییر تعرفه‌ی قیمت برق خریداری شده توسط شبکه را نشان می‌دهد همان‌طور که برای سیستم‌های نظیر صفحه‌های خورشیدی این قیمت در حدود ۱,۲۳ سنت برای هر کیلووات ساعت می‌باشد.
- در صورت استفاده از سیستم تولید هم‌زمان ذکر شده با مشخصات فوق، به‌طور متوسط هر ۴ واحد مسکونی با زیربنای ۱۲۰ متر مربع نیازمند یک سیستم ۱۴ کیلوواتی

برای تأمین برق مصرفی می‌باشد، همچنین بخشی از گرمای مورد نیاز واحدها توسط این سیستم تأمین شده و برای مقدار باقیمانده آن به بویلر کمکی نیاز است.

- نتایج نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری انجام شده در خرید این سیستم (با تعرفه‌ی خرید برق کنونی) پس از حدود ۶ سال بازگشته و در صورت افزایش تعرفه این بازگشت به زیر ۵ سال نیز کاهش می‌یابد در حالی که استفاده کنندگان از سیستم رایج پس از ۵ سال باید در حدود ۴۴۹۱ دلار هزینه برای برق و گاز مصرفی خود پرداخت کنند.

در کنار بررسی اقتصادی با مشاهده‌ی تفاوت انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای صادره از هر دو سیستم لزوم استفاده از سیستم‌های تولید هم‌زمان بیشتر مشخص می‌گردد. جایی که مقادیر CO₂، CO، NO_x و SO_x تولید شده در سیستم رایج به ترتیب ۶۰/۹، ۶۰/۳، ۵۴/۷ و ۱۰۰ درصد بیشتر از همین آلاینده‌ها توسط سیستم تولید هم‌زمان می‌باشد. در مجموع با توجه به بحث‌های اقتصادی صورت گرفته و نیاز اساسی توجه کشورها به کاهش آلاینده‌ها، استفاده از سیستم تولید هم‌زمان با سیاست‌های حمایتی وزارت نیرو باید در کانون توجه بخش‌های مسکونی قرار گیرد. در این راستا طبق مطالعه‌ی حاضر با خرید برق از دارندگان سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت با مبلغی مابین هر کیلووات ساعت ۰,۶۱ تا ۰,۹۲ سنت می‌توان مصرف کنندگان بیشتری را به استفاده از این سیستم تشویق کرد. کلیه موارد ایمنی برای نصب تجهیز در ساختمان بررسی شده است و با توجه به اینکه دستگاه‌های mCHP به‌صورت تجاری تولید و در ساختمان‌ها استفاده می‌گردند و دستگاه ساخته شده در پژوهشگاه صنعت نفت نیز کاملاً استاندارد طراحی و ساخته شده است برای نصب در ساختمان‌ها مانع ایمنی ندارد. از جمله آزمون‌های مورد بررسی می‌توان به ایمنی اتصال برق دستگاه mCHP به برق ساختمان و شبکه سراسری، میزان آلودگی صوتی تجهیز، پایداری

مراجع:

- [1]. A. Esmailnia, A. Hamzekhani, Economic evaluation of using coal for power generation in Iran, Vol. 24, pp. 168-20, 1389.
- [2]. Tavanir statistics, Ministry of Energy, Iran, 1400. (In Persian).
- [3]. ترازنامه‌ی انرژی کشور سال ۱۳۹۷. آخرین ترازنامه منتشر شده در سال ۱۴۰۱.
- [4]. IEC, "Efficient electrical energy transmission and distribution," IEC, Geneva, 2010.
- [5]. M. Meckler, L. B. Hyman, Sustainable on-site CHP systems, pp.10-20, New York: McGraw-Hill, 2010.
- [6]. Ellamla, Harikishan R., et al. "Current status of fuel cell based combined heat and power systems for residential sector." Journal of Power Sources 293 (2015): 312-328.
- [7]. Du, Ruoyang, and Paul Robertson. "Cost Effective Grid-Connected Inverter for a Micro Combined Heat and Power System." IEEE Transactions on Industrial Electronics (2017).
- [8]. Ren, Hongbo, and Weijun Gao. "Economic and environmental evaluation of micro CHP systems with different operating modes for residential buildings in Japan." Energy and Buildings 42.6 (2010): 853-861.
- [9]. De Paepe, Michel, Peter D'Herdt, and David Mertens. "Micro-CHP systems for residential applications." Energy conversion and management 47.18 (2006): 3435-3446.
- [10]. Bhattacharyya, Subhes C., and Nguyen Thuy Hien. "Cogeneration potential in pulp and paper industry of Vietnam."

عملکرد موتور و مجموعه mCHP در طول زمان و بررسی مشکلات سایش، خوردگی، مشاهده ترک یا هرگونه خرابی در قطعات و مجموعه‌ها با تمرکز بر قوای محرکه اشاره نمود. این آزمون‌ها در دو بازه ۱۲۵۰ ساعت و ۲۵۰۰ ساعت و بیشتر با دو هدف بررسی ایمنی و عملکرد عمومی موتور در طول زمان و اطلاع از بروز مشکلات احتمالی و بعضاً غیرقابل پیش‌بینی انجام شده است که در همه موارد، مشکلات احتمالی رفع شده است. در رابطه با آلودگی صوتی و میزان نویز نیز با توجه به نوع کاربری سیستم‌های mCHP لازم است از نظر سطح صدا و ارتعاشات در شرایط کنترل شده و در محدوده قابل قبول ۴۹ تا ۶۸ دسیبل در فاصله یک و نیم متری باشد که این دستگاه این آزمون را به‌خوبی گذرانده است و نویز آن در محدوده قرار دارد.

۶. تشکر و قدردانی

در این قسمت از شرکت ملی نفت و شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت تشکر و قدردانی می‌گردد که پروژه «دستیابی به دانش فنی طراحی و توسعه سامانه MCHP بر پایه فناوری موتور گازسوز» را تأمین مالی نموده است و مقاله حاضر، حاصل از نتایج پژوهشی مطالعه بازار این پروژه می‌باشد.

فهرست علائم اختصاری

CSR	نسبت نگهداشت هزینه
ERR	نسبت کاهش آلاینده‌ها
C	هزینه‌ی تولید انرژی سالانه
Em	مقدار آلاینده‌ی تولیدی
EmI	شدت آلودگی
Eele - chp	برق سالانه‌ی تولید شده توسط سامانه‌ی mCHP
Eele	برق سالانه‌ی موردنیاز
Prsell	قیمت برق فروخته شده به شبکه
Pele	قیمت برق خریداری شده از شبکه
بالاوند	
Inv	سرمایه‌گذاری
Ele	برق
Gas	گاز
زیروند	
CON	سیستم رایج
CHP	سیستم تولید برق و حرارت هم‌زمان (سامانه‌ی mCHP)



- تهران). نشریه انرژی ایران. دوره ۱۹. شماره ۲. تابستان ۱۳۹۵.
- [19]. OECD (2011), Better Policies to support Eco-innovation, OECD Studies on Environmental Innovation, OECD Publishing. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264096684-en>.
- [۲۰]. درگاه ملی آمار ایران به آدرس <https://www.amar.org.ir> /خانه/برآوردهای-جمعیتی. مردادماه ۱۳۹۶.
- [۲۱]. اطلاعات پروانه‌های ساخت واحدهای مسکونی صادر شده توسط شهرداری نیمه اول ۱۳۹۴، ریاست جمهوری سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، مرکز آمار ایران.
- [۲۲]. گزیده نتایج سرشماری نفوس و مسکن، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، مرکز آمار ایران، بهمن‌ماه ۱۳۹۰.
- [23]. American Petroleum institute (API), August 2009, Compendium of Greenhouse Gas Emission Methodologies for the Oil and Natural Gas Industry.
- [24]. US Environmental Protection Agency, 2006, Complication of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources, Ap-42, (GPO 055-000-005-001)
- [25]. Validation Report, 2015, Flare Gas Recovery in Sarkhoon and Qeshm Gas Treating Company.
- [۲۶]. تعرفه‌های برق و شرایط عمومی آن‌ها، از تاریخ ۱۳۹۵/۵/۱، معاونت برنامه‌ریزی و امور اقتصادی بازار آب و برق، وزارت نیرو.
- [۲۷]. نامه‌ی وزیر نیرو به شماره‌ی ۵/۱۴۳۷۲/۲۰/۱۰۰ در تاریخ ۱۳۹۵/۲/۲۰.
- [۲۸]. درگاه اینترنتی شرکت گاز ایران به آدرس: <http://www.nigc.ir/Portal/Home/ShowPage.aspx?Object=NEWS&Cat>
- International journal of energy research 29.4 (2005): 345-358.
- [11]. TeymouriHamzehkolaei, Fatemeh, and Sourena Sattari. "Technical and economic feasibility study of using Micro CHP in the different climate zones of Iran." Energy 36.8 (2011): 4790-4798.
- [۱۲]. قاسم‌زاده، معرفت، عظیمی. «طراحی سیستم تولید هم‌زمان برق، گرما و سرما برای منازل مسکونی در اقلیم آب و هوایی تهران.» مهندسی مکانیک مدرس ۱۳، ۲ (۲۰۱۳): ۱۰۹-۱۲۲.
- [۱۳]. فرخی، پیرکندی، نصراله‌ی «تحلیل عملکرد ترموآکونومیکی یک سیستم تولید هم‌زمان مقیاس کوچک بر پایه موتور دیزل» مهندسی مکانیک مدرس ۱۶، ۱۰ (۲۰۱۵): ۳۷۵-۳۸۳.
- [۱۴]. محمود چهارطاقی و علی زاده خارکشی بهراد. «تحلیل عملکرد یک سیستم تولید هم‌زمان برق، حرارت و سرما برپایه پیل سوختی پلیمری تحت شرایط کاری مختلف.» مهندسی مکانیک مدرس ۱۶، ۳ (۲۰۱۵): ۳۸۳-۳۹۴.
- [۱۵]. احسان باقری، مهدی معرفت و عسگر مینایی، «بررسی تجربی تأثیر دمای محیط بر کارکرد مولد موتور گازسوز تولید هم‌زمان برق و حرارت در اقلیم گرم و خشک.» مهندسی مکانیک مدرس ۱۶، ۱۳ (۲۰۱۵): ۱۰۹-۱۱۲.
- [۱۶]. فرزین گلزار، مجید آستانه، رامین روشندل، «توسعه مدل بهبودیافته سیستم ترکیبی تولید هم‌زمان برق، گرمایش و سرمایش بر اساس پیل سوختی اکسید جامد.» نشریه انرژی ایران. دوره ۱۷. شماره ۴. زمستان ۱۳۹۳.
- [۱۷]. یاسر کیالاشکی، «تعیین اندازه بهینه تجهیزات سیستم تولید ترکیبی سرمایش، حرارت و قدرت.» نشریه انرژی ایران. دوره ۱۹. شماره ۱. بهار ۱۳۹۵.
- [۱۸]. علیرضا تقی‌پور رضوان، میثم شاهجونی، «ارائه‌ی یک مدل ترکیبی برای اولویت‌بندی سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، حرارت و برودت با در نظر گرفتن اهداف توسعه‌ی پایدار (مطالعه موردی: بیمارستان طالقانی



- [36]. Mahdi Darzi, Nima Zamani Meymian, Derek Johnson, Energy optimization of a micro-CHP engine using 1-D and 3-D modeling, Applied Thermal Engineering, Volume 191, 2021, 116904, ISSN 1359-4311,
- [37]. Lorenzo Mario Pastore, Gianluigi Lo Basso, Livio de Santoli, Can the renewable energy share increase in electricity and gas grids takes out the competitiveness of gas-driven CHP plants for distributed generation?, Energy, Volume 256, 2022, 124659, ISSN 0360-5442,
- [38]. Igor Cruz, Maria T. Johansson, Joakim Wren, Assessment of the potential for small-scale CHP production using Organic Rankine Cycle (ORC) systems in different geographical contexts: GHG emissions impact and economic feasibility, Energy Reports, Volume 8, 2022, Pages 7680-7690, ISSN 2352-4847.
- [39]. Qiong Wu, Hongbo Ren, Weijun Gao, Economic Assessment of Micro-CHP System for Residential Application in Shanghai, China, Energy Procedia, Volume 88, 2016, Pages 732-737, ISSN 1876-6102.
- [۴۰]. اسکونژاد، م. ۱۳۹۰. اقتصاد مهندسی، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، تهران.
- [41]. S. E. Hosseini, M. Simab and B. Bahmani, Optimal Energy Resource Planning and Combined Heat and Power Sizing in a Residential Area to Supply Electrical and Thermal Demand in a Reconfigured Power Grid, Journal of renewable energy research and applications, Vol. 4, No. 1, 2023, 113-123.
- egoryID=1601f6c2-3b71-410c-ad90-8b94b25601de&WebPartID=405f5dd3-bd18-4594-9f81-58116c8560bc&ID=6399df7b-3c5d-4f19-93c5-e1b3ecc1d1a1
- [۲۹]. دکتر جواد نوفرستی، «راهکارهای اصلی اصلاح الگوی مصرف گاز در ساختمان»، مجله‌ی اقتصاد انرژی، شماره ۱۲۱، آذرماه ۱۳۸۸.
- [30]. Frankel, David S., Model Driven Architecture: Applying MDA to Enterprise Computing, OMG Press, Wiley Publishing, 2003.
- [31]. Sannella, M. J., Constraint Satisfaction and Debugging for Interactive User Interfaces, Ph.D. Thesis, University of Washington, Seattle, WA, 1994.
- [32]. Zachman, John A., "A Framework for Information Systems Architecture", IBM Systems Journal, Vol. 26, No. 3, 1987.
- [33]. Plamondon, R., Lorette, G., "Automatic Signature Verification and Writer Identification - The State of the Art", Pattern Recognition, Vol. 22, pp. 107-131, 1989. Object Management Group. Unified Modeling Language: Superstructure, Version 2.0, ptc/03-07-06, July 2003, <http://www.omg.org/cgi-bin/doc?ptc/2003-08-02>.
- [34]. Hiroshi Ito, Economic and environmental assessment of residential micro combined heat and power system application in Japan, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 41, Issue 34, 2016, Pages 15111-15123, ISSN 0360-3199,
- [35]. Yujun Jung, Joonbyum Kim, Hoseong Lee, Multi-criteria evaluation of medium-sized residential building with micro-CHP system in South Korea, Energy and Buildings, Volume 193, 2019, Pages 201-215, ISSN 0378-7788,

Economical and Environmental Study of Using Micro Combined Heat and Power in Residential House in Tehran

Esmaeil GhasemiKafrudi^{1*}, MohammadReza Habibi¹, Mohammad Khaledi Sardashti², MohammadAli Manian³, Zeynab Sobhani⁴

1. Scientific faculty member of Energy and Environment Research Center, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran
2. Head of Research and Technology Unit, Researcher of Iranian Fuel Conservation Company, Tehran, Iran
3. Researcher of Iranian Fuel Conservation Company, Tehran, Iran
4. Researcher of Energy and Environment Research Center, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL RESEARCH

Article History:

Received: 22 January, 2023

Revised: 13 March 2023

Accepted: 24 June, 2023

Keywords:

mCHP

Cost saving ratio

Economic analysis

Air pollutant Emissions

Greenhouse gases

Carbon management

ABSTRACT

Today, combined heat and power generation systems have been taken into consideration by the developed country for residential use, due to reduced losses, high efficiency and help to network security. In order to use these systems in the country, the target market must be identified, then, by examining the economic conditions and creating incentive schemes to encourage residential customers to use these systems. For this purpose, in the present article, firstly, the most suitable province for the use of such systems was selected and then, by using the amount of electricity consumption and residential gas consumption, a comparison between the current system and the use of the mCHP system was made. According to the price Realistic economic analysis was carried out and further emissions of air pollutants were studied for both systems. The results show that Tehran province is the best province for this product market. Also, considering the current tariffs, the use of this system can return after six years, while the amount of pollutants production, and, from the current system are 60.9, 60.3, 54.7 And 100% more than mCHP. Finally, given the economic consideration and the need for countries to pay attention to reducing emissions, the use of the mCHP in conjunction with the Ministry of Energy's support policies can be implemented in our country.

DOR: [20.1001.1.25885251.1402.10.1.2.6](https://doi.org/10.1001.1.25885251.1402.10.1.2.6)

How to cite this article

E. GhasemiKafrudi, M.R. Habibi, M. Khaledi Sardashti, M.A. Manian, Z. Sobhani, Economical and Environmental Study of Using Micro Combined Heat and Power in Residential House in Tehran. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2023; 10(1): 28 -42. (https://www.ijge.irangi.org/article_707971.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: ghasemies@ripi.ir, (E. GhasemiKafrudi).

Available online 20 August 2023

2666-5468/© 2021 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 افزایش تولید با یکی از روش فرازآوری مصنوعی برای افزایش تولید از یکی از چاه‌های میدان نفتی اهواز

مهدی امیرخانی^۱، مازیار نوعی^{۲*}، علی حسینی^۳، سلیمان مصلح^۴، مسعود بیژنی^۵

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

۳. گروه مهندسی فرآیند، شرکت بین‌المللی ایتالفلوید، گچساران، ایران

۴. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۵. گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: m.noei@iautmu.ac.ir

مقاله‌ی علمی - پژوهشی

صفحه ۴۳ - ۵۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۷

چکیده

در این مطالعه چاه AW-A میدان نفتی اهواز که به دلیل افت فشار جریانی بسته مورد تهدید قرار گرفته، مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه و بهینه‌سازی چاه AW-A با بررسی سه گزینه تولید طبیعی از چاه، اصلاح ساختار داخلی چاه با راندن لوله مغزی و اعمال درصدهای متفاوت آب همراه و اعمال سامانه فرازآوری مصنوعی (با تزریق گاز) انجام گرفته است. در این مطالعه سعی گردید اطلاعات کلی مربوط به مسیر Black Oil را با توجه به اطلاعات Compositional به‌واقع نزدیک نموده و سپس مابقی مطالعات بر پایه مسیر Black Oil انجام گیرد. در این پژوهش از نرم‌افزار PIPESIM برای شبیه‌سازی فرازآوری با گاز در یکی از چاه‌های میدان نفتی اهواز و اثر تغییر اندازه و عمق لوله مغزی و مقایسه تأثیر برداشت از لوله مغزی‌های متفاوت و بهینه‌ترین قطر و عمق لوله مغزی استفاده گردید. مناسب‌ترین و بهینه‌ترین گزینه با توجه به شبیه‌سازی با نرم‌افزار استفاده از فرازآوری با گاز انتخاب گردید به‌طوری‌که می‌توان میزان تولید را در شرایط فعلی مخزن به ۲۲۱۷ بشکه بر روز رساند.

کلیدواژه‌ها: فرازآوری مصنوعی، افت فشار، لوله مغزی، شاخص بهره‌دهی، آنالیز حساسیت، برش آب

۱. مقدمه

هنگامی که انرژی طبیعی که همراه نفت در مخازن وجود دارد برای بالا آوردن نفت به سطح زمین کافی نباشد، در نتیجه جهت تأمین این انرژی از یکی از روش‌های فرازآوری مصنوعی استفاده می‌گردد. افت فشار در مخازن هیدروکربوری در حال تولید یکی از معضلات عمده در بخش تولید می‌باشد. معمولاً جهت ادامه تولید از مخزن، استخراج به روش‌های فرازآوری مصنوعی جزو اولین گزینه‌هایی است که مدنظر مهندسان نفت قرار می‌گیرد [۱ و ۲]. لازم به ذکر است که این روش‌ها ضریب بازیافت نهایی مخزن را افزایش نخواهند داد و فقط امکان تولید از چاه را آسان و راحت‌تر می‌کند. هدف از به‌کارگیری سامانه فرازآوری مصنوعی تثبیت فشار جریانی چاه برای استمرار یا افزایش تولید بوده و این

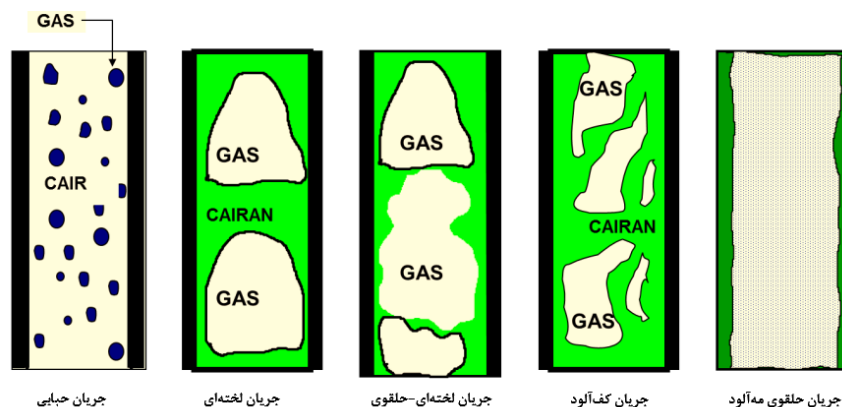




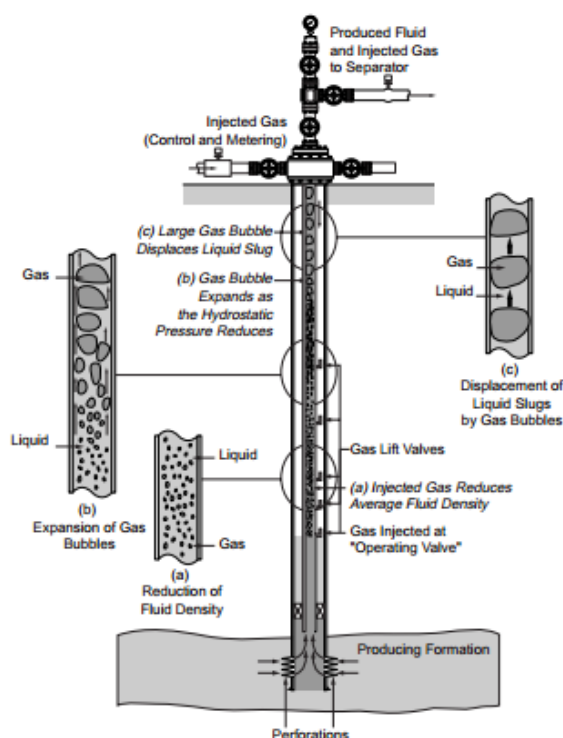
مستقل از نوع روش فرازآوری مصنوعی است [۳]. با توجه به تفاوت‌های فاحش در خصوصیات سیالات مخازن مختلف، تسهیلات فراورشی موجود و شرایط جغرافیایی حاکم بر هر میدان، روش یا روش‌های مشخصی از فناوری فرازآوری مصنوعی و بهینه‌سازی تولید، قابلیت به کارگیری خواهد داشت. در انتخاب تجهیزات فرازآوری برای یک چاه، توجه به اقتصادی بودن ابزار انتخاب شده برای دستیابی به نرخ تولید مطلوب، ضروری است [۴]. بررسی فرازآوری برای یک یا گروهی از چاه‌ها بر اساس مشخصات مخزن انجام می‌شود. هدف اصلی، تخلیه مخزن با حداقل هزینه می‌باشد. اگر چه امروزه از روش‌های مختلف فرازآوری مصنوعی در صنعت استفاده می‌شود ولی فرازآوری با گاز تنها روشی است که به روش طبیعی برداشت نفت از مخزن شبیه است. فرازآوری با گاز فرآیندی است که نفت یا سیال موجود در ستون چاه از طریق تزریق گاز پرفشار در آن، به سطح زمین رانده می‌شود. فرازآوری با گاز نوعی از فرازآوری می‌باشد که شباهت زیادی با فرآیند جریان طبیعی چاه دارد. این سامانه می‌تواند به عنوان ادامه روند جریان طبیعی در نظر گرفته شود. در تولید با جریان طبیعی چاه با حرکت سیال به طرف بالا، فشار سیال کاهش یافته و سبب آزاد شدن گاز محلول از سیال می‌گردد. گاز آزاد که سبک‌تر از سیال چاه بوده و فضای بیشتری را در لوله تولیدی اشغال می‌کند، گرادیان مجموعه (دو فاز) را کاهش داده که برآیند آن باعث کاهش وزن ستون سیال می‌گردد. این کاهش وزن باعث به وجود آمدن اختلاف فشار بیشتر بین مخزن و جداره چاه شده و منجر به تولید سیال از چاه به سطح زمین می‌گردد؛ بنابراین در روش فرازآوری با گاز، از تزریق گاز پرفشار برای بالا آوردن نفت یا سیال موجود در چاه استفاده می‌کنند. در این روش فشار مخزن آن قدر است که ستون نفت یا سیال را تا ارتفاع معینی در چاه بالا می‌آورد، این ارتفاع، ارتفاع استاتیکی نفت نام‌گذاری می‌شود. با تزریق گاز در چاه (ستون نفت) فشار هیدرو استاتیکی وارد بر ته چاه توسط این ستون، کاهش می‌یابد، زیرا نفت توسط گاز، رانده شده و هم‌زمان چگالی ستون نفت کاهش یافته و در نتیجه نفت مجدداً شروع به حرکت می‌کند [۵ و ۶]. برای تأسیسات فرازآوری با گاز نیاز به کمپرسورهای گاز و شیرهای گاز است. فرازآوری با گاز تقریباً برای تمام چاه‌های نفت مناسب است. از روش فرازآوری با گاز برای زنده کردن چاه‌هایی که به‌طور طبیعی جریان می‌یابند استفاده می‌شود [۷]. نکته مهم که در طراحی سامانه‌های فرازآوری با گاز باید مورد توجه قرار داد: ۱) تزریق گاز در حداکثر عمق ممکن به درون لوله مغزی

تزریق گردد ۲) یک مقدار گاز تزریقی بهینه وجود داشته باشد که منجر به انتقال سیال به صورت اقتصادی از ته چاه به سرچاه گردد. یکی از موضوعات مهم در فرازآوری با گاز بررسی جریان چندفازی در چاه است. الگوهای جریان در خطوط لوله عمودی به صورت جریان حبابی، لخته‌ای، جریان کف‌آلود، قطره‌ای و حلقوی می‌باشد. (شکل ۱) انواع رژیم‌های جریان دوفازی گاز و مایع که در یک مسیر عمودی مانند یک چاه نفتی در طول فرازآوری با گاز رخ دهد را نشان می‌دهد؛ بنابراین عملیات فرازآوری با گاز می‌تواند از طریق تغییر الگوی رژیم جریان گاز تزریقی به سه شیوه می‌تواند سیال را به سرچاه منتقل کند (شکل ۲) [۱۳]: ۱) کاهش چگالی سیال در بالای نقطه تزریق ۲) مقداری از گاز تزریقی به شکل محلول و بقیه به صورت حباب تغییر فاز می‌دهند و زمانی که سیالات از طریق لوله مغزی به سطح منتقل می‌شوند به علت کاهش فشار هیدرو استاتیک این حباب‌های گازی شکل منبسط می‌شوند (جریان حبابی). ۳) حباب‌های گاز به هم می‌پیوندند و باعث تشکیل حباب‌های بزرگ‌تر در لوله مغزی می‌شوند و در نهایت این حباب‌های بزرگ لخته‌های مایع را به سطح منتقل می‌کنند (جریان لخته‌ای). مقدسی و پیدایش با استفاده از اطلاعات چاه و به‌وسیله‌ای داده‌های آزمایش فشار استاتیک و جریانی و داده‌های تولید فعلی با نرم‌افزار PIPESIM اثر استفاده از لوله مغزی، فرازآوری با گاز و نصب پمپ الکتریکی شناور بر میزان دبی تولید و فشار جریانی سرچاهی شبیه‌سازی و بررسی، سپس بهترین روش فرازآوری برای چاه مورد مطالعه، انتخاب نموده است در نهایت نصب پمپ الکتریکی شناور پیشنهاد کرده‌اند [۸]. خویشوند و خامه چی نگاهی به گام‌های مختلف حل مسائل، شامل اثر نرخ تزریق گاز بر میزان سیال تولیدی، تعیین منحنی عملکرد فرازآوری با گاز و تعیین تابع هدف و روش حل بررسی نمودند [۹ و ۱۰]. عادل زاده و بهپور، یکی از میادین جنوب ایران را که در مرحله کاهش فشار و افت تولید قرار داشت با تغییر در اندازه لوله مغزی و استفاده از سامانه فرازآوری با گاز و به کار بردن پمپ‌های درون چاهی مورد بررسی قرار دادند. با توجه به هزینه زیاد پمپ‌های درون چاهی، استفاده از سامانه فرازآوری با گاز نسبت به نصب پمپ درون چاهی در میدان مورد نظر اولویت دارد [۱۱]. در شرکت نفتی آمارادا جهت افزایش تولید از چاه‌های نفت به جای استفاده از سامانه فرازآوری با گاز، قطر لوله عمودی تغییر یافت تا افزایش درصد آب‌شور موجب پس افتادگی و سنگینی مایع و در نتیجه بستن چاه نشود. آن‌ها قطر را از ۵ اینچ به ۲،۵ اینچ و سپس به ۲،۵ و در آخر به ۰،۷۵

کاهش دادند. به این نتیجه رسیدند که قطری وجود دارد که در آن کل نفت و گاز تولیدی برای ایجاد حداقل سرعت مورد نیاز کافی است. اگر قطر لوله از قطر معین بیشتر گردد، مایع در لوله جمع می‌شود ولی اگر قطر کمتر شود، سرعت زیاد می‌شود. در نتیجه اصطکاک به سرعت اثر خود را نشان می‌دهد و باعث کاهش جریان می‌شود نتایج این آزمایش در قیاس با بهینه‌سازی سامانه فراآوری با گاز که یک مقدار بهینه گاز برای حداکثر تولید نفت ضروری است، قابل توجه است. در نتیجه بهینه‌سازی با تغییر قطر لوله و در سامانه فراآوری با گاز با تغییر در میزان تزریق گاز صورت پذیرفت [۱۲].



شکل ۱: انواع رژیم‌های جریان دوفازی مایع و گاز به وجود آمده در یک مسیر عمودی مانند یک چاه نفتی



شکل ۲: روش کاهش وزن ستون سیال به علت تزریق گاز و تغییر رژیم جریانی در طول عملیات فراآوری با گاز [۱۳]

۲. روش کار انجام شده در این پژوهش

نرم‌افزار PIPESIM یکی از محصولات شرکت سرویس دهنده نفتی شلمبرژه می‌باشد که کاربرد آن در زمینه شبیه‌سازی انواع چاه‌ها و تأسیسات سطح الارضی و محاسبات پیچیده‌ی خواص سیالات می‌باشد. ساخت اولیه این نرم‌افزار در سال ۱۹۸۵ میلادی توسط یک شرکت مشاور نفتی به نام بیکر جاردین صورت گرفت. سپس با



سرمایه‌گذاری شرکت شلمبرژه و بازنگری اطلاعات علمی و تحقیقاتی در آوریل سال ۲۰۰۱ میلادی به صورت رایانه‌ای به بازار عرضه شد. انواع سامانه‌های قابل آنالیز توسط نرم‌افزار شامل بررسی عملکرد چاه‌ها^۱، طراحی سامانه‌های خط لوله و تأسیسات سطح الارضی^۲، طراحی شبکه‌های چاه‌ها و تجهیزات جانبی^۳ و بهینه‌سازی فرآیندهای بهره‌برداری^۴ می‌باشد. قابلیت‌های نرم‌افزار شامل بررسی روش‌های فرارآوری مصنوعی، طراحی فرارآوری با گاز، طراحی پمپ‌های درون چاهی، رسم نمودارهای تولید چاه و آنالیز سامانه‌ها می‌باشد [۱۴].

۳. معرفی میدان مورد مطالعه

میدان نفتی اهواز یکی از بزرگترین میدان نفتی ایران است که در جنوب غربی ایران واقع می‌باشد. این میدان در سال ۱۳۳۷ با حفر چاه شماره ۶ اهواز کشف گردید. در حال حاضر ظرفیت تولید نفت خام میدان اهواز به طور میانگین معادل ۸۰۰ هزار بشکه در روز و میزان تولید گاز آن (گاز همراه نفت) بیش از ۱۳ میلیون مترمکعب در روز می‌باشد (غیر از زمان تحریم). حجم ذخیره در جای نفت خام این میدان بیش از ۶۵ میلیارد بشکه برآورد می‌شود که به طور میانگین، در حدود ۳۷ میلیارد بشکه از آن قابل برداشت می‌باشد. طول این میدان ۶۷ کیلومتر و عرض آن در حدود ۶ کیلومتر است.

۳-۱. معرفی مخزن بنگستان

مخزن بنگستان میدان نفتی اهواز تقریباً در عمق ۳۰۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد، که سازندهای ایلام و سروک در این مخزن، حاوی ذخایر هیدروکربوری قابل توجه می‌باشند. مخزن بنگستان میدان اهواز در سال ۱۳۳۷ کشف گردید و بهره‌برداری از آن در سال ۱۳۵۰ آغاز شد. حجم ذخیره در جای اولیه نفت خام مخزن بنگستان اهواز در حدود ۳۷/۲ میلیارد بشکه برآورد می‌شود. با توجه به نقش مخزن بنگستان میدان اهواز، پس از پایان جنگ ایران و عراق، حجم بسیار بالایی از فعالیت‌های حفاری چاه‌های جدید، بر روی این مخزن متمرکز شد و از سال ۱۳۵۸ تا ۱۳۸۳ با حفاری ۹۶ حلقه چاه جدید، مجموع چاه‌های تکمیلی در مخزن بنگستان اهواز، به ۱۵۰ حلقه رسید. تا سال ۱۳۹۴ در مجموع شمار ۲۲۱ حلقه چاه نفت در بنگستان اهواز حفاری و تکمیل شده است و هم‌اکنون

با ۱۸۲ حلقه چاه فعال تولیدی، ظرفیت تولید بنگستان اهواز با سه واحد بهره‌برداری و سه کارخانه نمک‌زدایی، به حدود ۱۸۰ هزار بشکه در روز افزایش یافته است.

۳-۲. چاه اهواز-A

با توجه به تکمیل این چاه در مخزن سازند ب، محدودیتی که در آینده میزان تولید این چاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد فشار متوسط مخزن می‌باشد. در ابتدای امر چاه مورد نظر با توجه به خصوصیات مخزنی و سیالاتی در شبیه‌ساز چندفازی جریان پایدار پایپسیم شبیه‌سازی شد و سپس حساسیت سنجی بر روی پارامترهایی که بر میزان تولید تأثیرگذار هستند، صورت می‌گیرد. خصوصیات که برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد در (جدول ۱) آمده است. طرح چاه مورد مطالعه در (شکل ۳) نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات سیال مخزنی چاه اهواز-A

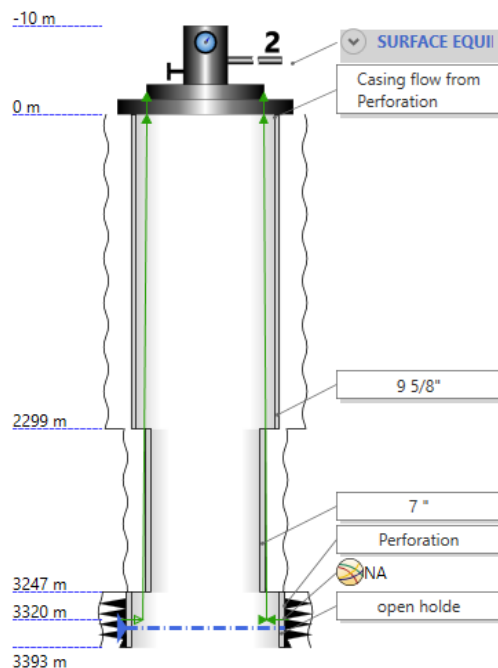
پارامترها	میزان
دمای مخزن °F	۲۲۰
دمای سیال سر چاه	۱۰۰
شاخص سبکی سیال API°	۲۱
نسبت گاز به نفت scf/stb	۴۲۰
وزن مخصوص گاز	۰٫۹
وزن مخصوص آب همراه	۱/۰۹
آب همراه جریانی %	۰٫۵
فشار استاتیک ته چاه Psig	۴۲۰۰
نرخ جریان فعلی چاه	۱۰۸۸٫۵
اندازه کاهنده اینچ ۱/۶۴	۳۶
عمق نهایی چاه متر حفار	۳۴۲۰
شاخص تولید	۲٫۱
ضریب انتقال حرارت کلی (در چاه) Btu/hr.F.ft²	۲
طول خط لوله تولیدی (متر)	۱۳۳۲۴
فشار جداکننده مرحله دوم بهره‌برداری (پام)	۸۵

1. Well Performance
2. Pipeline and Facilities
3. Network Analysis
4. Production Optimization

هگدرون و براون می‌باشند (شکل ۴ و ۵)؛ زیرا در این مدل‌ها الگوی جریان و لغزش بین فازها در نظر گرفته می‌شوند و به واقعیت نزدیک‌تر هستند؛ و برای جریان دوفازی روش هگدرون و براون در خطوط لوله عمودی و چاه نتایج دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتری نسبت به روش‌ها ارائه می‌کند. در (جدول ۲) اطلاعات مربوط به سایر آزمایش ممیزی فشار جریانی در عمق‌های مختلف آورده شده است.

جدول ۲: داده‌های آزمایش ممیزی فشار جریانی

عمق (فوت زیر سطح دریا)	فشار (پام)
۸۶	۲۶۲
۲۰۰۰	۵۶۲
۴۰۰۰	۱۰۹۰
۶۰۰۰	۱۷۱۱
۷۴۰۰	۲۱۶۷
۷۵۰۰	۲۲۰۲
۷۶۰۰	۲۲۳۵
۷۷۰۰	۲۲۶۸
۸۰۰۰	۲۳۶۸
۹۰۰۰	۲۶۹۹
۱۰۰۰۰	۳۰۲۸
۱۰۵۰۰	۳۱۹۳



شکل ۳: طرح درون چاهی اهواز - A در نرم‌افزار پایپسیم

۴. بحث و نتایج

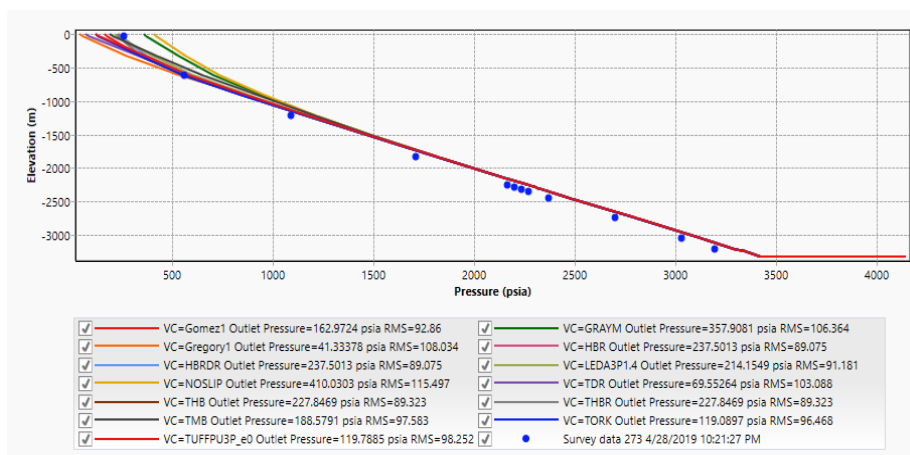
۴-۱. برازش رابطه تجربی محاسبات چند فازی

با توجه به اطلاعاتی که از آزمایش ممیزی فشار جریانی این چاه در دسترس است، سعی گردید که نتایج آن با نتایج مدل‌های چند فازی مقایسه و سپس بهترین مدل انتخاب و در نهایت دو پارامتر ضریب اصطکاک و ضریب پسماند برازش شود تا مدل به واقعیت نزدیک‌تر گردد. برای چاه یا لوله‌های عمودی بهترین مدل‌های موجود بگس و بریل، دانز و روز و

The screenshot displays the PipeSim software interface with the following sections:

- GENERAL:** Branch start: Well - Reservoir; Branch end: Well - Wellhead; Default profile plot: Elevation vs. pressure; Well survey data: 273 4/28/2019 10:21:27 PM; Override flowrate: [checked].
- CALCULATED VARIABLE:** Inlet pressure: 4200 psia; Outlet pressure: [selected]; Liquid flowrate: 1085.5 STB/d.
- HEAT TRANSFER OPTIONS:** Override heat transfer options: [unchecked]; Inside film coefficient method: Kreith.
- FLUID RATIOS:** Inflow: 1 Perforation; GOR: 420 SCF/STB; Watercut: 0.5 %.
- FLOW CORRELATIONS:** Swap angle: 45 deg. Two lists of correlations are shown:
 - Vertical flow (multiphase):** 1 Ansari, 2 Aziz Govier Fogarasi, 3 Beggs & Brill [Tulsa (Legacy 1989)], 4 Beggs & Brill Original, 5 Beggs & Brill Revised, 6 Duns & Ros [Baker Jardine], 7 Duns & Ros [Tulsa (Legacy 1989)], 8 Gomez, 9 Gomez Enhanced, 10 Govier, Aziz & Fogarasi.
 - Horizontal flow (multiphase):** 1 Baker Jardine Revised, 2 Beggs & Brill [Tulsa (Legacy 1989)], 3 Beggs & Brill Original, 4 Beggs & Brill Revised, 5 Beggs & Brill Revised, Taitel Dukler..., 6 Beggs & Brill, Taitel Dukler map, 7 Dukler [Tulsa (Legacy 1989)], 8 Dukler, AGA & Flanigan, 9 Dukler, AGA & Flanigan (Eaton Hol...), 10 Eaton Oliemans.

شکل ۴: نحوه وارد نمودن اطلاعات برای برازش در نرم‌افزار پایپسیم



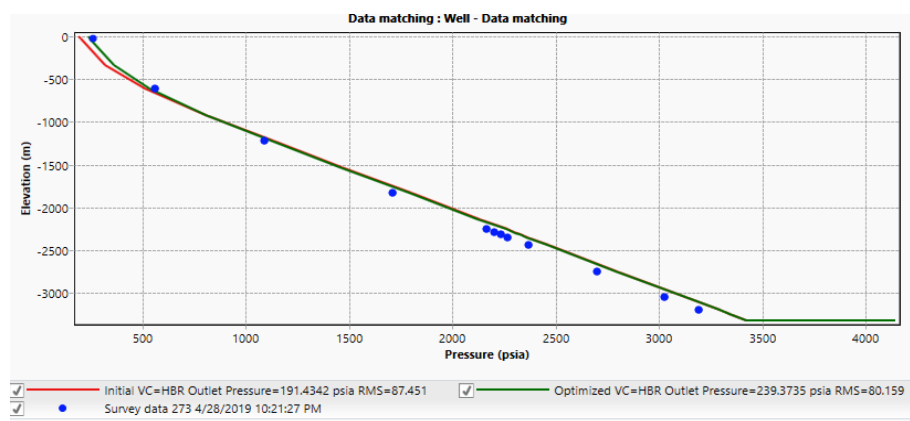
شکل ۵: مقایسه روابط تجربی محاسبات دوفازی با داده‌های میدانی چاه اهواز -A

با توجه به این که نمودارهای بالا برای محاسبه فشار نسبی خطا داده‌های آزمایش ممیزی فشار جریانی و روابط هم‌پوشانی دارند، در نتیجه برای مشاهده بهتر میانگین مربع تجربی چند فازی می‌توان به صورت (جدول ۳) نشان داد.

جدول ۳: مقایسه روابط تجربی محاسبات دوفازی با داده‌های میدانی چاه اهواز -A

	Vertical multiphase correlation	Initial pressure RMS	Initial temperature RMS	Initial holdup RMS	Initial total RMS	Status	Select
1	Beggs & Brill Revised	0	0	0	0	Unconverged	☐
2	Beggs & Brill [Tulsa (Legacy 1989)]	0	0	0	0	Unconverged	☐
3	Hagedorn & Brown	89.074998	0	0	89.074998	Converged	☐
4	Hagedorn & Brown, Duns & Ros m...	89.074998	0	0	89.074998	Converged	☐
5	Hagedorn & Brown (Original) [Tuls...	89.322762	0	0	89.322762	Converged	☐
6	Hagedorn & Brown (Revised) [Tuls...	89.322762	0	0	89.322762	Converged	☐
7	LedaFlow v. 1.4 3-Phase	91.180935	0	0	91.180935	Converged	☐
8	Gomez	92.859641	0	0	92.859641	Converged	☐
9	Orkiszewski [Tulsa (Legacy 1989)]	96.467826	0	0	96.467826	Converged	☐
10	Mukherjee & Brill [Tulsa (Legacy 1...	97.583195	0	0	97.583195	Converged	☐
11	TUFFP v. 2011.1 3-Phase (default)	98.251763	0	0	98.251763	Converged	☐
12	Duns & Ros [Tulsa (Legacy 1989)]	103.088296	0	0	103.088296	Converged	☐
13	Gray (modified)	106.364392	0	0	106.364392	Converged	☐
14	Gregory	108.033656	0	0	108.033656	Converged	☐
15	No Slip Assumption	115.496735	0	0	115.496735	Converged	☐

همان‌طور که در (شکل ۲) نشان داده شده است بهترین میانگین مربع نسبی خطا را کاهش داد از برازش پارامترهای رابطه که دارای میانگین مربع نسبی خطا کم‌تری می‌باشد رابطه هگدرون و براون (رابطه ۱ و ۲) در (جدول ۳) در حل عددی همگرا نشده‌اند می‌باشد. برای اینکه بتوان میزان



شکل ۶: برازش پارامترهای رابطه تجربی هگدرون و براون با داده‌های میدانی چاه اهواز -A



(شکل ۵) مدل اچانگ به مقداری که اندازه گیرنده جریان را نشان می‌دهد نزدیک‌تر و بهترین مدل می‌باشد.

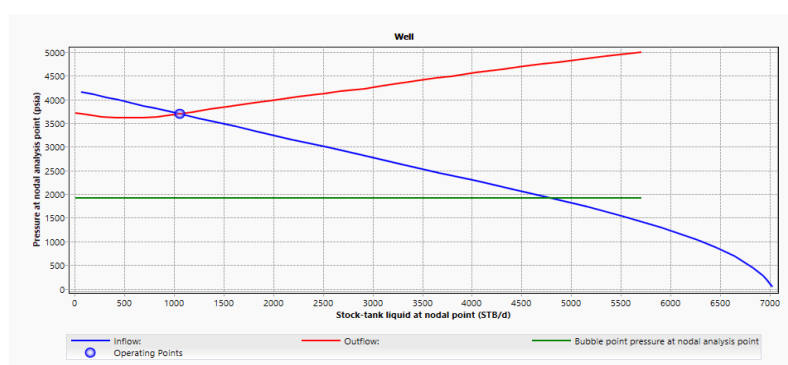
جدول ۴: میزان جریان محاسبه شده بر اساس مدل‌های چوک نرم‌افزار

رابطه	میزان جریان محاسبه شده
اچانگ	۱۰۴۶,۱۲
رز	۸۸۷,۵
یکسندل	۹۴۵
مکانیستیک	۸۱۲
گیلبرت	۸۰۰

در (شکل ۶) میزان میانگین مربع نسبی خطا تغییر زیادی نکرده است ولی میزان فشار جریان سرچاهی به واقعیت نزدیک‌تر شده است. همچنین توجه شود که خط لوله تولیدی این چاه به این صورت است که به‌اندازه ۴۷۹۲ متر دارای قطر ۶ اینچ و ۸۵۳۲ متر نیز دارای قطر ۸ اینچ می‌باشد؛ و در نهایت گره انتهایی که جداکننده مرحله دوم واحد بهره‌برداری ۸۵ پام فشار در نظر گرفته می‌شود.

۴-۲. انتخاب مدل کاهنده

در این بخش با توجه به میزان جریانی که به سمت مرحله دوم واحد بهره‌برداری می‌رود، بهترین مدلی که می‌تواند بیان کننده رابطه چوک باشد به دست می‌آید (جدول ۴). مطابق

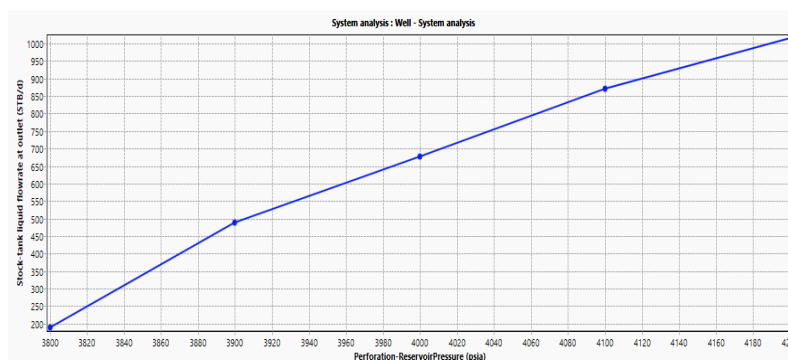


شکل ۷: نمودار IPR و TPR مربوط به چاه اهواز-A

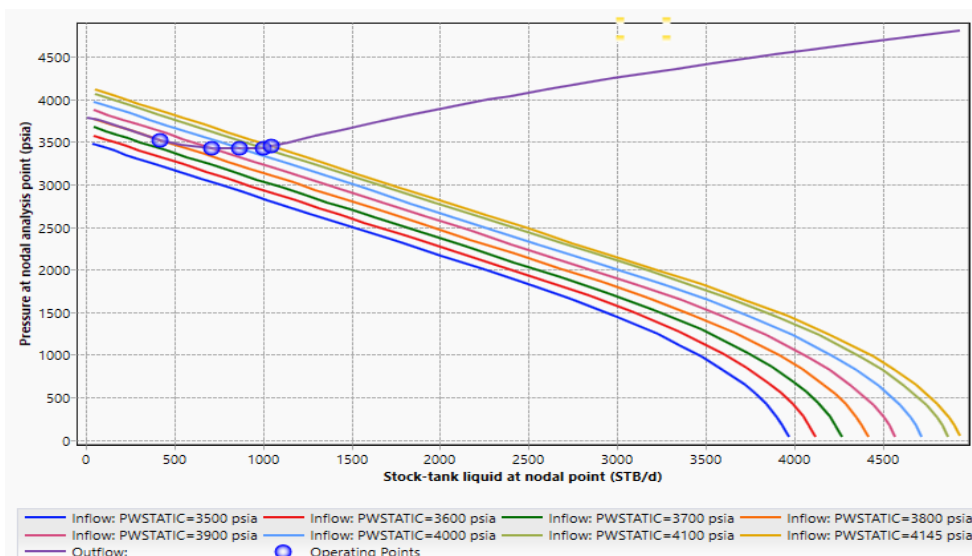
فرآیند تولید از مخزن بنگستان میدان اهواز عبارتند از افزایش میزان برش آب تولیدی، کاهش فشار متوسط مخزن (به‌طور متوسط ۴۰ پام در سال) و کاهش شاخص بهره‌دهی چاه بر اثر افزایش ضریب پوسته می‌باشند؛ بنابراین در این تحقیق سعی گردید که بر روی چاه مذکور پارامترهای اساسی حساسیت سنجی انجام گیرد و نتایج آن به‌صورت نمودارهای واضح و قابل درک ارائه گردد. توجه شود که این چاه به دلیل پایین بودن فشار جریانی سرچاهی به سمت مرحله دوم بهره‌برداری که دارای فشار ۸۵ پام است، هدایت می‌شود (شکل ۸ و ۹).

۴-۳. آنالیز حساسیت پارامترهای کلیدی تولید از چاه اهواز-A

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، چاه مورد مطالعه چاهی است تکمیلی در مخزن بنگستان و شرق میدان اهواز می‌باشد. برای رسیدن به تولید برنامه شده این میدان، در صورت تأمین امکانات لازم از قبیل حفاری و تعمیر بهینه چاه‌ها در مواقع لزوم، تأمین سامانه‌های فراآوری سطح‌الارضی (پمپ‌های چند فاز) تحت‌الارضی (پمپ‌های درون چاهی و فراآوری مصنوعی با استفاده از تزریق گاز) و تأمین فناوری‌های انگیزشی چاه‌ها از قبیل لایه شکاف هیدرولیکی می‌باشد. چالش‌هایی موجود در



شکل ۸: آنالیز حساسیت فشار مخزن ب تا ۱۰ سال آینده و تأثیر آن بر روی تولید



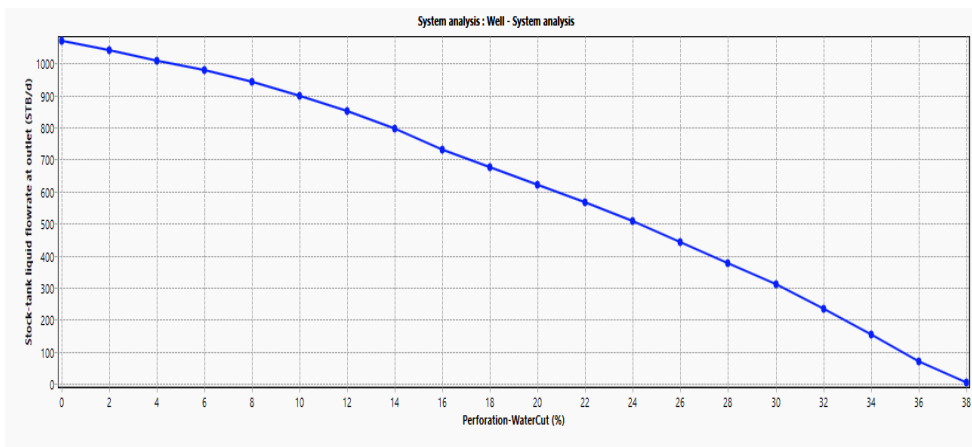
شکل ۹: نمودار IPR و TPR مربوط به آنالیز حساسیت فشار مخزن چاه اهواز - A

جدول ۵: نتایج نمودار IPR و TPR مربوط به آنالیز حساسیت فشار مخزن چاه اهواز - A

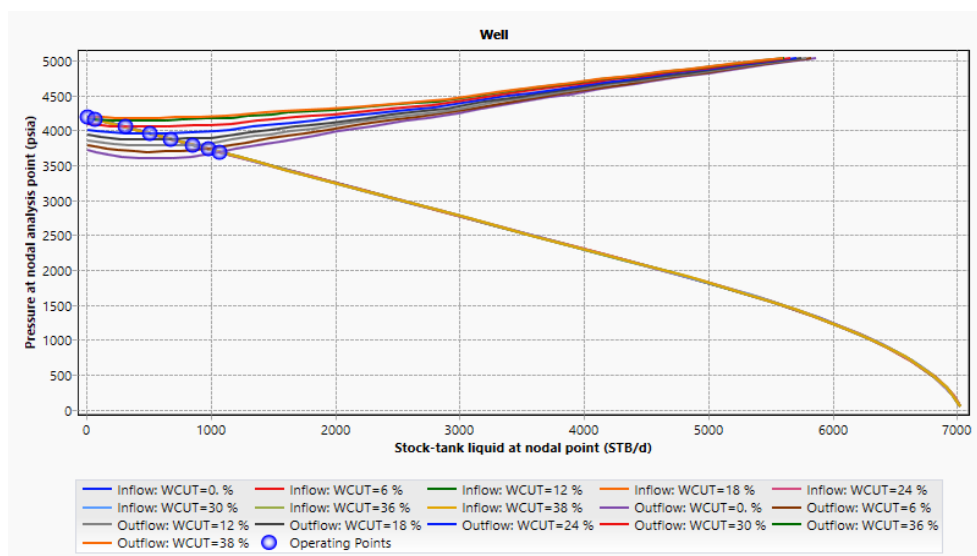
Case	
1	UNCONVERGED PWSATC=3500 psia Flowrate=46.64179 sbbl/day
2	UNCONVERGED PWSATC=3600 psia Flowrate=47.37899 sbbl/day
3	UNCONVERGED PWSATC=3700 psia Flowrate=.1006297 sbbl/day
4	PWSATC=3800 psia Flowrate=385.3513 sbbl/day
5	PWSATC=3900 psia Flowrate=598.5602 sbbl/day
6	PWSATC=4000 psia Flowrate=791.1608 sbbl/day
7	PWSATC=4100 psia Flowrate=938.1796 sbbl/day
8	PWSATC=4200 psia Flowrate=1062.313 sbbl/day

مخزن، برای درصد برش آب بالاتر، میزان تولید به شدت تحت تأثیر قرار می گیرد. همان طور که در نمودار زیر مشخص است در صورتی که درصد آب از مقدار ۳۸ درصد بیشتر گردد، نفتی از چاه تولید نخواهد شد (شکل های ۱۰ و ۱۱).

همان طور که از (شکل های ۸ و ۹) مشخص است در صورت کاهش فشار به زیر ۳۸۰۰ پام، مخزن دیگر توانایی تولید و فشار لازم برای هدایت به سمت مرحله دوم بهره برداری را نخواهد داشت. همچنین از طریق آنالیز حساسیت با ثابت قرار دادن فشار ۴۲۰۰ پام



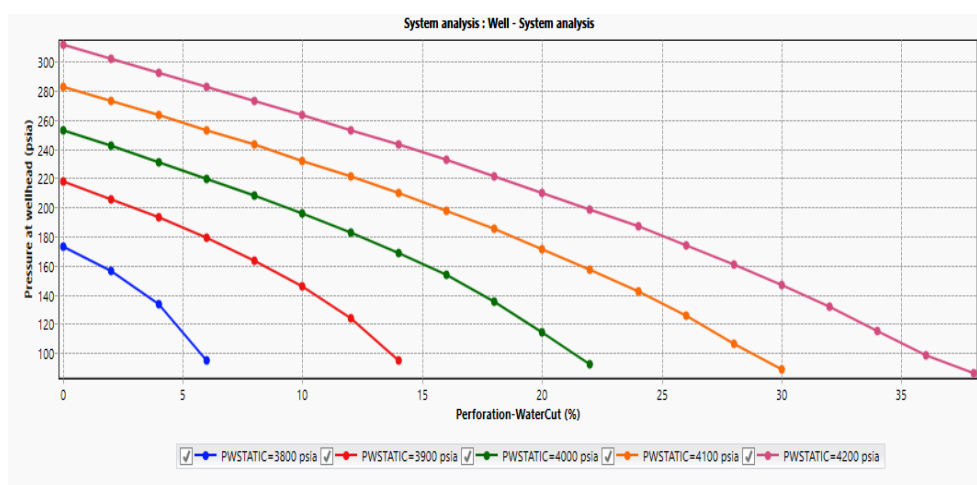
شکل ۱۰: آنالیز حساسیت برش آب مخزن بنگستان و تأثیر آن بر روی تولید



شکل ۱۱: نمودار IPR و TPR مربوط به آنالیز حساسیت برش آب چاه اهواز - A

جدول ۶: نتایج نمودار IPR و TPR مربوط به آنالیز حساسیت برش آب چاه اهواز - A

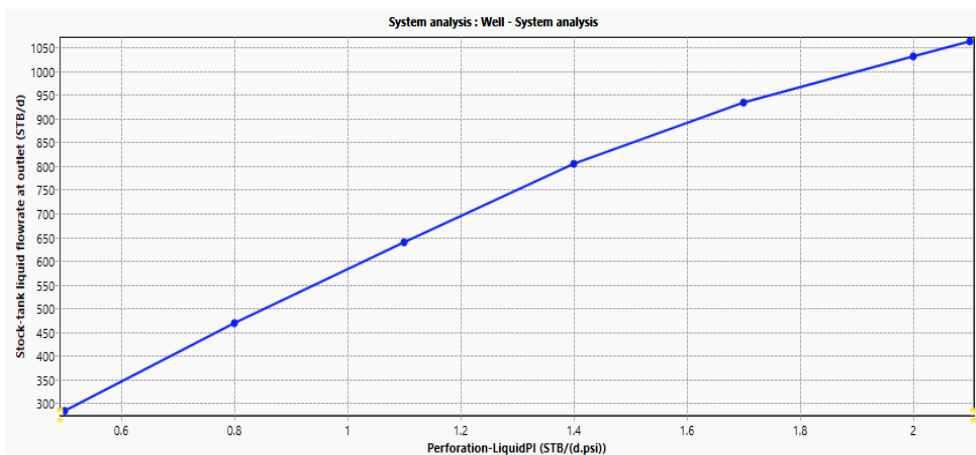
	Operating point	ST Liq. at NA	P at NA
		STB/d	psia
1	WCUT=0. % Flowrate=1069.675 sbbl/day	1069.675	3690.631
2	WCUT=6 % Flowrate=976.6548 sbbl/day	976.6548	3734.926
3	WCUT=12 % Flowrate=850.2634 sbbl/day	850.2634	3795.113
4	WCUT=18 % Flowrate=675.1067 sbbl/day	675.1067	3878.521
5	WCUT=24 % Flowrate=504.7312 sbbl/day	504.7312	3959.652
6	WCUT=30 % Flowrate=307.9688 sbbl/day	307.9688	4053.348
7	WCUT=36 % Flowrate=68.44443 sbbl/day	68.44443	4167.407
8	WCUT=38 % Flowrate=5.093279 sbbl/day	5.093279	4197.575



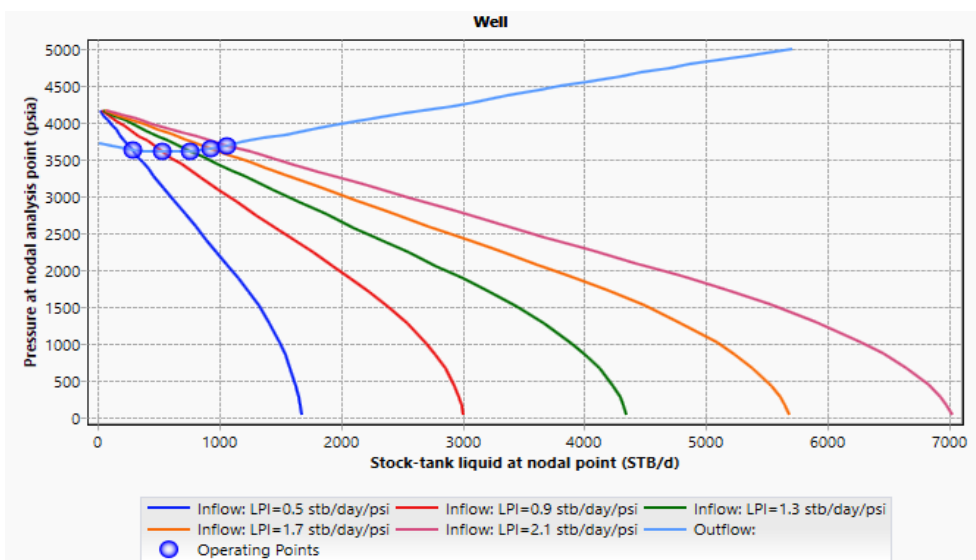
شکل ۱۲: فشار جریان چاه نسبت به افت فشار مخزن در میزان صفر تا ۳۸ درصد برش آب

پدیده دیگری که در تمام چاه‌های نفتی ممکن است روی دهد و سبب ایجاد مشکلاتی در تولید نفت می‌گردد، اثر پوسته و در پی آن کاهش شاخص بهره‌دهی چاه می‌باشد. در نتیجه لازم است که در این بخش آنالیز حساسیت بر روی این پارامتر مهم نیز صورت گرفت (شکل‌های ۱۳ و ۱۴).





شکل ۱۳: آنالیز حساسیت شاخص بهره‌دهی چاه و تأثیر آن بر روی تولید



شکل ۱۴: نمودار IPR و TPR مربوط به آنالیز حساسیت شاخص بهره‌دهی چاه اهواز A-

جدول ۷: نتایج نمودار IPR و TPR مربوط به آنالیز حساسیت برش آب چاه اهواز A-

Operating point	ST Liq. at NA		P at NA	
	STB/d		psia	
1 LPI=0.5 stb/day/psi Flowrate=284.1881 sbbl/day	284.1881		3631.624	
2 LPI=0.9 stb/day/psi Flowrate=527.8844 sbbl/day	527.8844		3613.462	
3 LPI=1.3 stb/day/psi Flowrate=755.9795 sbbl/day	755.9795		3618.477	
4 LPI=1.7 stb/day/psi Flowrate=932.2997 sbbl/day	932.2997		3651.588	
5 LPI=2.1 stb/day/psi Flowrate=1061.728 sbbl/day	1061.728		3694.415	

۴-۴. بهینه‌سازی تولید با استفاده از نصب لوله مغزی با قطر و عمق مناسب و تأثیر آن بر روی فشار سرچاهی و دبی تولیدی یکی از راه‌حل‌هایی برای زمانی که با شرایط نامناسبی همانند افزایش درصد آب و کاهش فشار مخزن با آن مواجه می‌شویم اضافه کردن لوله مغزی و تعیین عمق و قطر بهینه برای آن می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان میزان

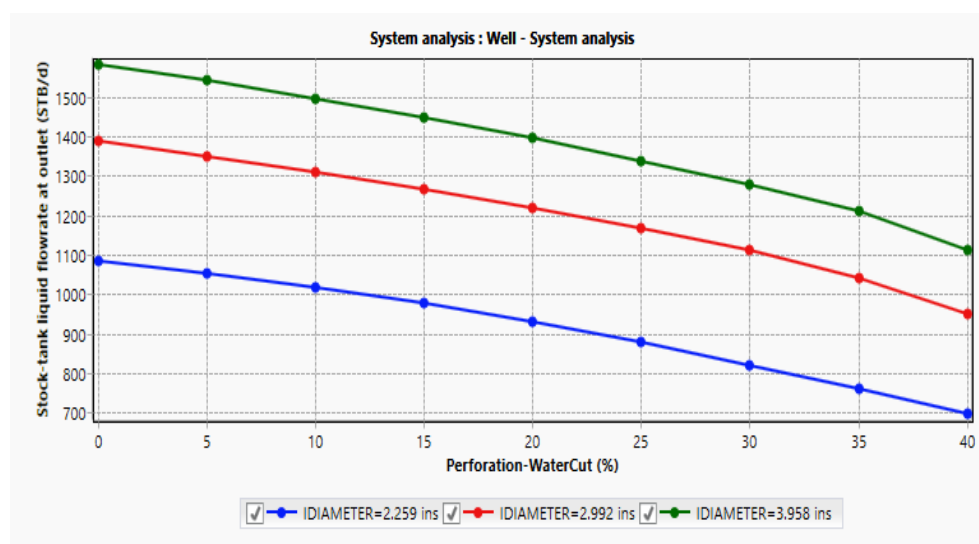
نمودار بالا نشان می‌دهد در صورتی که برنامه اسید کاری ماتریکس توسط هیدروکلرودریک اسید (با توجه به کربناته بودن جنس سازند ب) و یا شکستگی هیدرولیکی (با توجه به کم بودن تراوایی مخزن بنگستان گزینه بهتری نسبت به اسید کاری گسترده می‌باشد) بر روی سازند تولیدی چاه صورت گیرد. در نتیجه می‌توان تولید بهتری از این چاه با توجه به نمودار آنالیز حساسیت انتظار داشت.



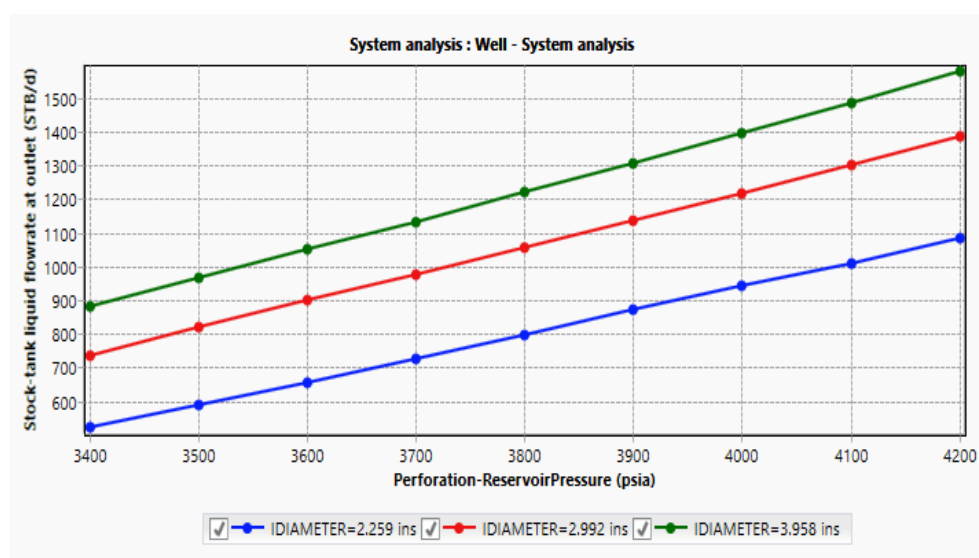
تولید در شرایط مختلف را ارزیابی کرد. نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی برای سه عمق ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ متر زیر سطح دریا در (شکل‌های ۱۳ تا ۱۵) ارائه شده است. توجه کنید که از آنجائی که هدف بهبود تولید با استفاده از رشته مغزی‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۸: مشخصات لوله مغزی‌های بررسی شده

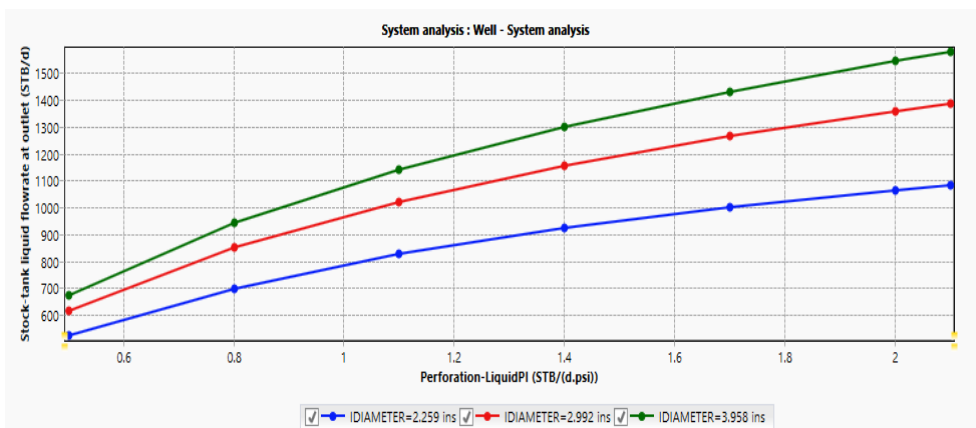
قطر خارجی (in)	قطر داخلی (in)	ضخامت (in)	زبری (in)
۲ ۷/۸	۲,۲۵۹	۰,۳۰۸	۰,۰۰۱
۳ ۱/۲	۲,۹۹۲	۰,۲۸۹	۰,۰۰۱
۴ ۱/۲	۳,۹۵۸	۰,۲۷۱	۰,۰۰۱



شکل ۱۵: آنالیز حساسیت برش آب و تأثیر آن بر روی تولید از لوله مغزی در عمق ۱۵۰۰ متری

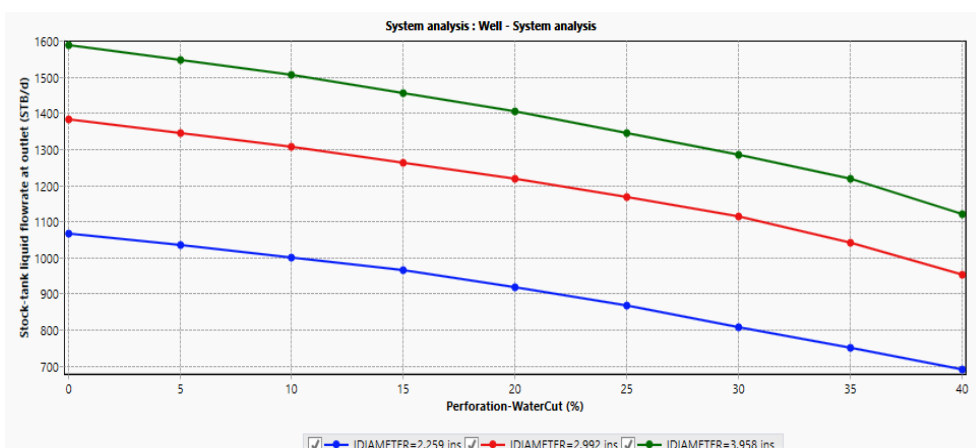


شکل ۱۶: آنالیز حساسیت فشار مخزن و تأثیر آن بر روی تولید از لوله مغزی در عمق ۱۵۰۰ متری

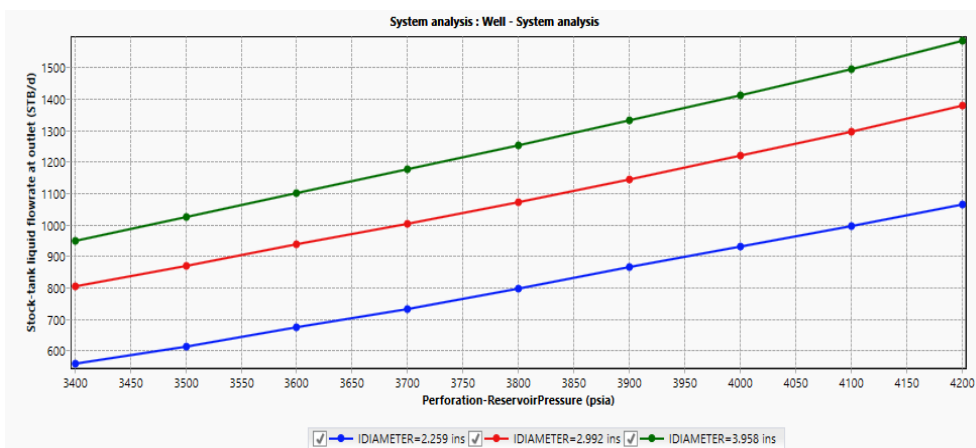


شکل ۱۷: آنالیز حساسیت شاخص بهره‌دهی و تأثیر آن بر روی تولید از لوله مغزی در عمق ۱۵۰۰ متری

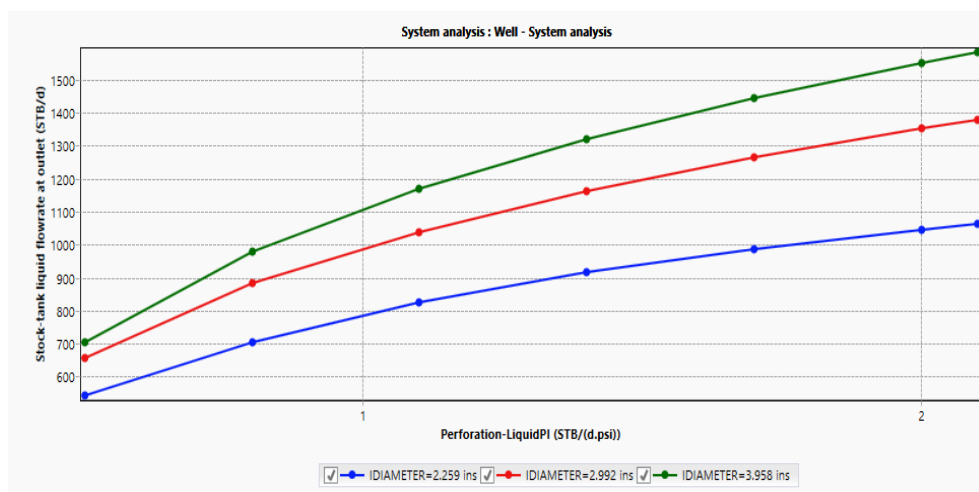
همان‌طور که از (شکل ۱۶) مشخص است برای لوله‌های مغزی مدل شده در نرم‌افزار، توانایی تولید چاه به دلیل افزایش سرعت گاز و تنش برشی بین فازی بالا و فرازآوری مناسب نسبت به لوله افزایش می‌یابد. بر اساس نمودارهای ۱۳ تا ۲۰ بهترین لوله مغزی ۴ ۱/۲" اینچ برای تولید تا عمق ۱۵۰۰ متری می‌باشد. البته دو لوله مغزی کوچک‌تر نیز توانایی تولید در برش آب تا ۴۰ درصد را دارند. در حالی که برای سناریو بدون لوله مغزی تا ۳۸ درصد بیشتر نمی‌توان تولید نمود و همچنین بدون لوله مغزی برای فشارهای پایین‌تر از ۳۸۰۰ پام چاه توانایی تولید ندارد ولی با استفاده از لوله مغزی می‌توان از چاه با فشار ۳۴۰۰ پام نیز تولید نمود. لیکن به دلیل افزایش تولید، لوله مغزی بزرگ‌تر ارجحیت دارد.



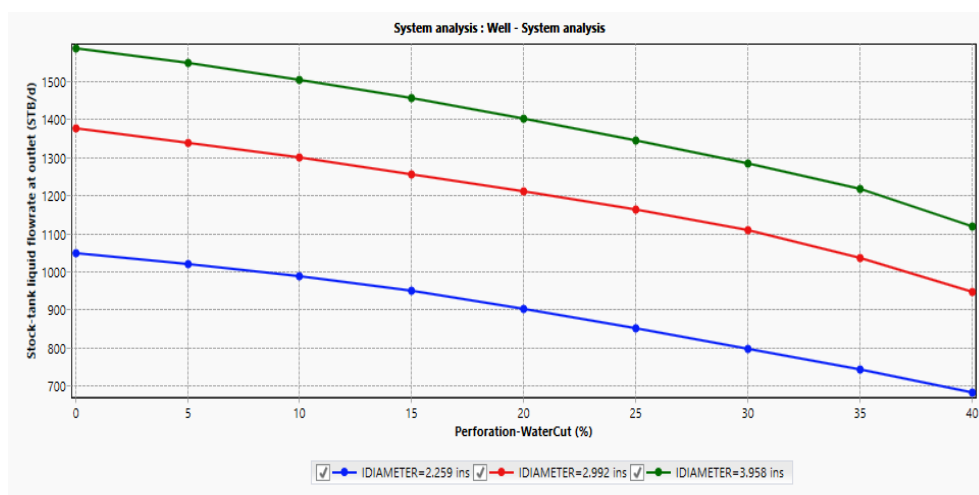
شکل ۱۸: آنالیز حساسیت برش آب و تأثیر آن بر روی تولید از لوله مغزی در عمق ۲۰۰۰ متری



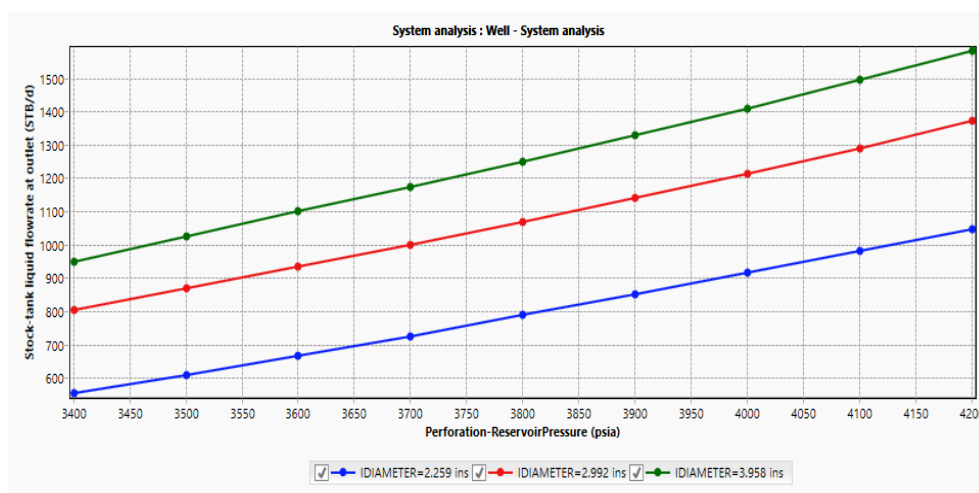
شکل ۱۹: آنالیز حساسیت فشار مخزن و تأثیر آن بر روی تولید از لوله مغزی در عمق ۲۰۰۰ متری



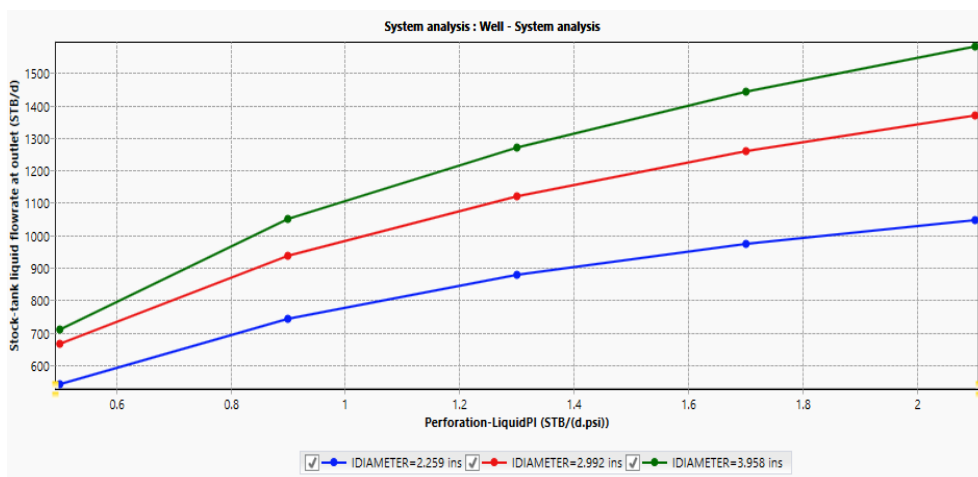
شکل ۲۰: آنالیز حساسیت شاخص بهره‌دهی و تأثیر آن بر روی تولید از لوله مغزی در عمق ۲۰۰۰ متری



شکل ۲۱: آنالیز حساسیت برش آب و تأثیر آن بر روی تولید از لوله مغزی در عمق ۲۵۰۰ متری



شکل ۲۲: آنالیز حساسیت فشار مخزن و تأثیر آن بر روی تولید از لوله مغزی در عمق ۲۵۰۰ متری



شکل ۲۳: آنالیز حساسیت شاخص بهره‌دهی و تأثیر آن بر روی تولید از لوله مغزی در عمق ۲۵۰۰ متری

۵. نتیجه‌گیری

در صورتی که تولید بدون لوله مغزی صورت گیرد، با کاهش فشار مخزن به زیر ۳۸۰۰ پام و یا افزایش درصد برش آب به ۳۸، مخزن دیگر توانایی تولید و فشار لازم برای هدایت به سمت مرحله دوم بهره‌برداری را نخواهد داشت. با توجه به اینکه افت فشار سالیانه مخزن بنگستان میدان اهواز بین ۴۰ تا ۵۰ پام می‌باشد، طبق نمودارهای حاصله، نصب لوله مغزی مناسب (۴ ۱/۲") تمامی عملیات‌های که پیش رو باشد سبب بهبود تولید می‌گردد. در صورتی که برنامه فراآوری نداشته باشیم آنگاه بهترین طول لوله مغزی برابر با ۲۰۰۰ متر است که در شرایط نرمال مخزن می‌تواند تولید را تا سقف ۱۵۷۹ بشکه/روز افزایش داد. برای سناریو فراآوری با گاز به‌منظور بهبود تولید به‌عنوان یک چاه توسعه‌ای، ۳۰۰۰ متر مناسب‌ترین طول لوله مغزی می‌باشد. عمق و دبی بهینه تزریق به ترتیب برابر با ۲۹۵۰ متر زیر سطح دریا و ۱،۷ MMscf/day و می‌توان تولید را در شرایط فعلی مخزن به ۲۲۱۷ بشکه/روز رساند.

مراجع:

- [3]. Brown, K.E., Beggs H. D, 1977. The Technology of Artificial Lift Methods, Vol.2.
- [4]. Exploration & Production Department American Petroleum Institute, 1994. "Gas Lift Book 6 of the Vocational Training Series", Third Edition.
- [5]. محمدی آزاد، س.، بهاری مقدم، م.، ۱۳۹۵. بهینه‌سازی عملکرد پمپ درون‌چاهی شناور در یکی از چاه‌های میدان نفتی پارسی، تهران، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در شیمی و مهندسی شیمی.
- [6]. Stanghelle, K.B., 2009. Evaluation of artificial lift methods on the Gyda field. M.Sc. thesis, University of Stavanger.
- [7]. Golan, M., Whitson, C.H., Well Performance, Second Edition, 1991, pp. 545-551.
- [8]. مقدسی، جمشید، پیدایش، سجاد، ۱۳۹۱. شبیه‌سازی فراآوری مصنوعی، به‌وسیله نرم‌افزار PIPESIM در یکی از چاه‌های مخازن جنوب غرب ایران، ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۹۲، صفحه ۵۹-۵۵.
- [9]. خامه‌چی، احسان، خیشوند، مهدی، ۱۳۹۳. بهینه‌سازی فراآوری طبیعی با گاز با ترکیب شبیه‌سازی مخزن و الگوریتم ژنتیک. ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۱۱۱.
- [1]. Romero, O. J. & Anderson, H, 2013. Subsea Electrical Submersible Pump Significance in Petroleum Offshore Production", Journal of Energy Resources Technology (JERT), VOL 136, JERT-12-1245, pp. 1-8.
- [2]. Ayatollahi, Sh., Narimani M., & Moshfeghian, M., 2004. "Intermittent Gas Lift in Aghajari Oil Field, A Mathematical Study", Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 42, p. 245-255.

صفحه ۸۱-۷۷.

[۱۰]. خامه چی، احسان، خیشوند، مهدی، ۱۳۹۲. الگوریتم‌های بهینه‌سازی تخصیص گاز در فرازآوری مصنوعی با گاز «ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۱۰۱، صفحه ۲۷-۲۰».

[۱۱]. عادل زاده، محمدرضا. بهپور، مسعود. مصلح تهرانی، مجتبی، ۱۳۹۰. ارزیابی اقتصادی روش‌های مختلف فرازآوری مصنوعی در یکی از میادین نفتی جنوب ایران، ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۸۰، صفحه ۷۶-۷۲.

[۱۲]. حسینی، علی، سید، عطاءالله، ۱۳۹۱. مهندسی بهره‌برداری نفت. فصل دوازدهم، انتشارات کتاب آوا تهران.

[13]. Herriot- wat university, Course note, "Gas lift". <https://www.studocu.com/en-gb/document/heriot-watt-university/gas-lift/gas-lift-heriot-watt-university/8835447>

[14]. Schlumberger, 2009. Pipesim user manual, "well design, drilling and production.



Oil Production Optimization with Artifical Lift Method for Production Increasing in Ahwaz Oil Field (AW-A Case Study)

Mahdi Amirkhani¹, Maziar Noei^{2*}, soleiman mosleh³, ali hossaini⁴, masoud bijani⁵

1. Ph.D. student, Department of Petroleum Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran
2. Assistant Professor, Department of Petroleum Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran
3. Department of Process Engineer, ITALFLUID Geo Energy SRL Company, Gachsaran, Iran
4. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran
5. Department of Petroleum Engineering, Faculty of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL RESEARCH

Article History:

Received: 07 May 2023

Revised: 30 May 2023

Accepted: 24 June 2023

Keywords:

Artificial lift
Pressure drop
Tubing
Productivity Index
Sensitive analysis
Water cut

ABSTRACT

In this study, the AW-A well of Ahvaz oil field was investigated which is threatened due to closed flow pressure drop. The study and optimization of the AW-A well has been done by mixing three natural production options from the well, modifying the internal structure of the well by driving the tubing and applying different percentages of produced water and applying the artificial production system (with gas injection). In this study, it was tried to bring the general information related to the Black Oil route closer to the reality according to the compositional information, and then the other studies were conducted based on the Black Oil route. In this research, PIPESIM software was used to simulate the gas lift in one of the wells of the Ahvaz oil field and the effect of changing the size and depth of the tubing and comparing the effect of production from different tubings and the most optimal diameter and depth of the tubing. The most suitable and optimal option was gas lift method according to the simulation, so that the production rate can be increased to 2217 barrels per day in the current conditions of the reservoir.

DOR: [20.1001.1.25885251.1402.10.1.3.7](https://doi.org/10.1001.1.25885251.1402.10.1.3.7)

How to cite this article

M. Amirkhani, M. Noei, S. Mosleh, A. Hossaini, M. Bijani, Oil Production Optimization with Artifical Lift Method for Production Increasing in Ahwaz Oil Field (AW-A Case Study). *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2023; 10(1): 43 -58. (https://www.ijge.irangi.org/article_707972.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: m.noei@iautmu.ac.ir, (M. Noei).

Available online 20 August 2023

2666-5468/© 2021 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>)



توزیع میکرو/نانوذرات ZrO_2 بر روی فولاد ST37 به کمک فرآیند اصطکاک اغتشاشی و بررسی تأثیر آن بر ارتقاء خواص فولاد در برابر خوردگی

سید محمدحسین شریفی^۱، آرمین ثابت‌قدم اصفهانی^۲، یگانه داودیگی^{۳*}

۱. گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران

۲. شرکت گاز استان هرمزگان، بندرعباس، ایران

۳. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

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

۵. هسته پژوهشی علوم و فناوری نانو و مواد پیشرفته، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

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

مقاله علمی - پژوهشی

صفحه ۵۹ - ۶۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱

چکیده

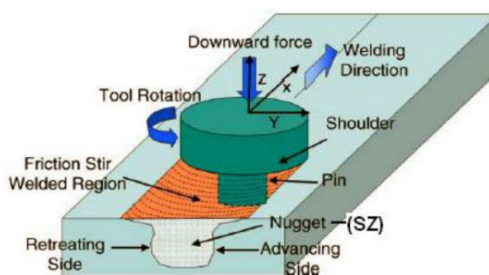
این مقاله با انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی در حالت‌های مختلف بر روی فولاد St37 به بررسی تغییر خواص آن در برابر خوردگی پرداخته است. فرآیند اصطکاک اغتشاشی در ۴ حالت روی فولاد St37 انجام شد. حالت اول فرآیند با سرعت دورانی ۹۰۰ rpm و بدون میکرو/نانو ذره، حالت دوم در سرعت دورانی ۵۶۰ rpm و با میکرو ذره ZrO_2 ، حالت سوم با سرعت دورانی ۵۶۰ rpm و با نانو ذره ZrO_2 و حالت چهارم با سرعت دورانی ۹۰۰ rpm و با نانو ذره ZrO_2 صورت پذیرفت. سرعت خطی در کلیه نمونه‌ها ۱۰۰ mm/min بود. مقاومت در برابر خوردگی هر ۴ حالت با مقاومت در برابر خوردگی فولاد ST37 که هیچ فرآیندی بر روی آن انجام نشده بود (نمونه خام)؛ مقایسه گردید. نتایج نشان دادند که نمونه تولید شده با فرآیند اصطکاک اغتشاشی همراه با نانو ذره ZrO_2 و سرعت دورانی ۹۰۰ rpm بیش‌ترین افزایش مقاومت در برابر خوردگی را دارد. نمونه‌های حاوی نانو ذره در هر دو سرعت دورانی ۵۶۰ rpm و ۹۰۰ rpm نسبت به نمونه خام، مقاومت در برابر خوردگی بیش‌تری داشتند. در نمونه‌ای که روی آن فرآیند به‌تنهایی و بدون حضور میکرو/نانو ذرات انجام شده بود و همچنین نمونه‌ای که از میکرو ذرات استفاده نموده بود؛ مقاومت در برابر خوردگی نسبت به فلز پایه کاهش یافت. افزایش سرعت دورانی فرآیند منجر به افزایش مقاومت در برابر خوردگی نمونه گردید.

کلید واژه‌ها: فرآیند اصطکاک اغتشاشی، فولاد St37، مقاومت در برابر خوردگی، نانو ذره ZrO_2

۱. مقدمه

فولاد St 37 فولادی با استحکام بالاست که به‌طور گسترده در صنعت نفت، خطوط لوله و ... استفاده می‌شود. این آلیاژ متناسب با نوع کاربرد، مرتباً در معرض سرد و گرم شدن است. همچنین به دلیل کاهش مقاومت سطحی ماده در اثر خوردگی هیدروژنی، ماده به‌شدت در معرض پدیده جوانه‌زنی ترک ناشی از خوردگی است [۱]. در حین جوشکاری روی St 37، هیدروژن از ساختار مولکول آب آزاد شده و در منطقه ذوب نفوذ می‌کند. هر چند در این حالت انتشار هیدروژن امری اجتناب‌ناپذیر

است؛ اما با کنترل متغیرهای محیطی می‌توان آن را محدود نمود [۲]. جهت کنترل این متغیرها، روش‌هایی ارائه گردیده‌اند که از آن جمله می‌توان به فرآیند اصطکاک اغتشاشی^۱ اشاره نمود. این فرآیند از فرآیندهای حالت جامد است که به‌عنوان روشی جایگزین برای جوشکاری، به‌منظور اتصال مواد مختلف و همچنین ارتقا خواص ناحیه اتصال استفاده می‌شود [۳]. فرآیند اصطکاک اغتشاشی به کمک یک ابزار استوانه‌ای و یک شانه صورت می‌پذیرد که در مجموع پین^۲ نامیده می‌شوند. این پین ضمن نفوذ در درون ماده و دوران در محل خود، به‌صورت خطی نیز مسیرهایی را در روی ماده طی می‌کند. هم‌زمانی حرکت خطی و دورانی منجر به توزیع ذرات در سطح ماده و تغییر خواص فلز پایه می‌شود [۴]. فرآیند اصطکاک اغتشاشی را می‌توان بر روی یک فلز پایه جهت تغییر ریزساختار، خواص مکانیکی و متالورژیکی آن اجرا نمود. تصویری شماتیک از فرآیند FSP در (شکل ۱)، نشان داده شده است.



شکل ۱: شماتیک از فرآیند FSP [۴]

اورفیلد FSP را روی فولاد آلیاژی AISI 4142 در شرایط خشک انجام داد [۵]. FSP توسط میشر و همکاران [۶ و ۷]، برای اصلاح میکروساختار به کار گرفته شد. در این روش، یک پین، به‌منظور اصلاح ریزساختار ماده برای بهبود خواص مکانیکی-متالورژیکی، در بخشی از ماده وارد شده و ضمن حرکت دورانی، به‌صورت خطی نیز روی ماده حرکت می‌کند. تغییرات ریزساختاری ایجاد شده در آلیاژ تجاری 7075Al از طریق FSP منجر به ارتقاء خواص مربوط به انعطاف‌پذیری ماده در نرخ کرنش بالا گردید [۶ و ۸]. روش FSP برای ساخت کامپوزیت سطحی روی آلومینیوم [۹]، کامپوزیت‌های زمینه فلزی و آلیاژهای آلومینیوم ریخته‌گری استفاده شد [۱۰ و ۱۱]. روش FSP در مقایسه با روش‌های موازی دارای مزیت‌هایی

است: (۱) FSP یک فرآیند حالت جامد با مسیر کوتاه و یک مرحله‌ای است که به پالایش ریزساختار ماده می‌پردازد. (۲) ریزساختار و خواص مکانیکی ناحیه پردازش شده را می‌توان با بهینه‌سازی طراحی ابزار، پارامترهای FSP و ... به‌دقت کنترل کرد. (۳) عمق ناحیه پردازش شده را می‌توان به‌صورت اختیاری با تغییر طول پین ابزار در حدود چند صد میکرومتر تنظیم کرد. (۴) FSP یک روش با کارایی بالا برای ساخت و پردازش مواد با خواص ارتقا یافته است. (۵) گرمای ایجاد شده در FSP از اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک فلز پایه ناشی می‌شود. پس FSP یک روش سبز است. (۶) FSP شکل و اندازه اجزای پردازش شده را تغییر نمی‌دهد [۱۲-۲۴].

در تحقیقات دیگری تأثیر توزیع نانو ذره SiC بر روی تغییر خواص کامپوزیت آلومینیوم، مورد بررسی قرار گرفته است [۲۵]. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش تعداد مسیرهای^۳ اعمال فرآیند اصطکاک اغتشاشی سختی سطحی ماده پایه ارتقا می‌یابد [۲۵]. از همین روی در تحقیقات دیگری، تأثیر استفاده از میکرو/نانو ذرات SiC بر روی تغییر خواص خوردگی کامپوزیت آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفت که در آن مشخص گردید؛ توزیع میکرو/نانو ذره مذکور بر روی کامپوزیت آلومینیوم منجر به ارتقا خواص خوردگی فلز پایه گردید [۲۶]. در تحقیق دیگری استفاده از نانوذرات SiO₂ بر روی کامپوزیت آلومینیوم جهت ارتقاء خواص خوردگی مورد بحث و بررسی قرار گرفت که نتایج نشان از کاهش مقاومت در برابر خوردگی فلز پایه پس از انجام فرآیند داشت [۲۷]. در تحقیقات دیگری تأثیر استفاده از نانو ذره سیلیکون نیترات^۴ بر روی خواص خوردگی مس مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاکی از ارتقاء خواص خوردگی مس پس از انجام فرآیند دارد [۲۸].

در این پژوهش سعی شده است تا توزیع نانو ذره و میکرو ذره ZrO₂ به کمک روش فرآیند اصطکاک اغتشاشی بر روی فلز پایه فولاد St37 در سرعت‌های دورانی مختلف، مورد بررسی قرار گیرد و تأثیر انجام فرآیند در وهله اول به‌تنهایی بروی فلز پایه، در وهله دوم با حضور میکرو ذره ZrO₂ در یک سرعت دورانی خاص بر روی فلز پایه و در وهله سوم با حضور نانو ذره ZrO₂ در سرعت‌های دورانی مختلف روی فلز پایه مورد بررسی قرار گیرد و نتایج بررسی شوند که انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی به‌تنهایی یا با حضور میکرو/نانو ذرات

1. Friction Stir Processing: FSP
2. Pin
3. Pass Numbers
4. Silicon Nitride

در سرعت‌های دورانی مختلف چه تأثیری در ارتقاء خواص فلز پایه در برابر خوردگی داشته است. شایان ذکر است که مطابق با مطالعات پیشین انجام شده، پژوهش حاضر در ۳ جنبه دارای نوآوری است؛ الف) مقایسه تأثیر توزیع نانو ذره و میکرو ذره بر چگونگی تغییر خواص خوردگی فلز پایه پس از انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی که در مطالعات پیشین مقایسه‌ای بین عملکرد این دو مؤلفه صورت نپذیرفته است؛ ب) بررسی استفاده از نانو ذره ZrO_2 با استفاده از فرآیند اصطکاک اغتشاشی بر روی تغییر خواص خوردگی فلز پایه که این مورد نیز جنبه نوآورانه دارد؛ پ) بررسی تغییر خواص خوردگی فلز پایه St37 پس از انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی که این مورد نیز طبق مطالعات پیشین جنبه نوآورانه دارد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. فولاد St 37

ابعاد ورق فولادی: یک ورق فولادی St37 با ابعاد ۲ متر طول، ۱ متر عرض و ۲ میلی‌متر ضخامت، از جنسی مشابه جنس به کار رفته در برخی لوله‌های صنعت نفت و گاز تهیه گردید. جهت‌های غلته‌شی و عرضی صفحه مشخص و خواص صفحه در طی تغییرات ریزساختاری با توجه به شرایط پردازش شناسایی و با دقت ثبت گردید. شناخت جهت عرضی مناسب در تشخیص جهت مناسب برای انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی بسیار حائز اهمیت بود.

اضافه می‌گردد که کلیه هزینه‌های انجام شده در این پژوهش اعم از هزینه تهیه ورق، نانو/میکرو ذرات و آزمایش‌های بررسی خواص، با هزینه شخصی پژوهشگران مشارکت کننده در این مقاله تهیه گردیده است.

آزمایش آنالیز شیمیایی^۱: جهت آنالیز شیمیایی فلز پایه، یک نمونه ۲۵/۴ میلی‌متری در ۲۵/۴ میلی‌متری از فولاد فلز پایه، با استفاده از دستگاه برش سیمی^۲، برش داده شد. این نمونه جهت آنالیز شیمیایی به آزمایشگاه متالورژی جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی شریف ارسال گردید تا ترکیب شیمیایی آن مشخص شود. نتیجه این آنالیز که معرف ترکیب تشکیل دهنده فولاد St 37 است، در (جدول ۱) آورده شده است.

نانو ذره ZrO_2 : در این پژوهش به‌منظور ارتقاء خواص فلز پایه St37 به کمک فرآیند اصطکاک اغتشاشی، از نانو ذره ZrO_2 (شرکت Merck، خلوص ۹۹/۹۵ درصد) با اندازه ذرات ۲۰

نانومتر و سطح ویژه ۶۰-۳۰ مترمربع بر گرم، استفاده شده است. میکرو ذره ZrO_2 : در این پژوهش به‌منظور ارتقاء خواص فلز پایه St37 به کمک فرآیند اصطکاک اغتشاشی، از میکرو ذره ZrO_2 (شرکت Merck، خلوص ۹۹ درصد) با اندازه ذرات ۲ میکرون استفاده شده است.

دسته‌بندی نمونه‌ها: چون در این پژوهش مینا بر سنجش تأثیر اندازه ذره (میکرو یا نانو) توزیع شده در فلز پایه و سرعت دورانی انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی بر ارتقاء خواص فلز پایه بوده است؛ نمونه‌های آزمایشی متفاوتی طراحی گردیدند که هر یک بر حسب شرایط آزمایش خود، کدگذاری شدند.

برای تهیه نمونه‌های مورد نظر، متناسب با شرایط، صفحه بزرگ فولادی اصلی به ۱۲ قسمت کوچک‌تر تقسیم شد. ۱۲ قطعه ایجاد شده دارای ابعاد ۱۲ سانتیمتر در ۲۰ سانتیمتر بودند و ضخامت کلیه قطعات ۲ میلی‌متر بود. چهار حالت مختلف برای اجرای روش فرآیند اصطکاک اغتشاشی بر روی قطعات در نظر گرفته شد که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است: جهت انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی تعیین ۳ پارامتر سرعت دورانی، سرعت خطی و اندازه دانه افزوده شده جهت ارتقاء خواص فلز پایه بسیار حائز اهمیت است و نقش اصلی و تعیین کننده در ارتقاء خواص را دارند. هر چه سرعت خطی انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی بیش‌تر باشد؛ مقدار حرارت منتقل شده از طرف پین (نشان داده شده در (شکل ۱) به ناحیه تحت عملیات فلز پایه و همچنین زمان تماس پین و ناحیه تحت عملیات فلز پایه کاهش می‌یابد [۱۱]. کاهش حرارت انتقال یافته از پین به ناحیه عملیاتی و همچنین کاهش زمان تماس پین و ناحیه عملیاتی منجر به کاهش اثرات حرارتی فرآیند اصطکاک اغتشاشی می‌شود [۱۱]. بنابراین هر چه سرعت خطی انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی بیش‌تر باشد؛ سطح انتقال حرارت بین ناحیه عملیاتی و پین کاهش بیش‌تری یافته و متعاقباً خواص ایجاد شده در فلز پایه پس از فرآیند اصطکاک اغتشاشی پایدارتر خواهد بود [۱۱]. با توجه به شرایط تجهیز استفاده شده در این پژوهش جهت اجرای فرآیند اصطکاک اغتشاشی (مقدار توان تجهیز و فشاری که می‌توانست بر پین اعمال نماید) سرعت انتقال خطی mm/min تقریباً سرعتی مناسب و بیشینه جهت انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی محسوب می‌شد و به همین دلیل به‌عنوان سرعت انتقال خطی انجام فرآیند انتخاب گردید. جهت

1. Quantometry
2. Wire Cut



سنجش تأثیر تغییر سرعت دورانی فرآیند اصطکاک اغتشاشی بر روی چگونگی تغییر خواص فلز پایه، آزمایش‌ها در دو سرعت دورانی مختلف تکرار گردیدند؛ یک سرعت دورانی متوسط (۵۶۰ rpm) و یک سرعت دورانی بالا (۹۰۰ rpm). علت استفاده از سرعت‌های فوق‌الذکر این بوده است که در تجهیز مورد استفاده جهت انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی سرعت دورانی ۵۶۰ rpm یک سرعت میانی^۱ و سرعت دورانی ۹۰۰ rpm یک سرعت دورانی بالا^۲ محسوب می‌شد.

با توجه به عملکرد موفق نانو ذره ZrO_2 در مطالعات پیشین انجام شده و تأثیر آن در ارتقاء خواص فلزات دیگری همچون آلومینیوم [۱۲]، تصمیم گرفته شد تا میزان تأثیر این نانو ذره در ارتقاء خواص فولاد طی فرآیند اصطکاک اغتشاشی در این پژوهش مورد بررسی قرار گیرد. در مورد تکرار آزمایش‌ها توسط نانو ذرات و میکرو ذرات، هدف سنجش میزان تأثیر اندازه ذرات در ارتقاء خواص فلز پایه پس از انجام فرآیند بوده است؛ به همین سبب کلیه آزمایش‌ها هم برای نانو ذره ZrO_2 و هم برای میکرو ذره ZrO_2 تکرار گردید. در ادامه به چگونگی کدگذاری قطعات اشاره شده است.

بر روی سه نمونه اول، فرآیند FSP با سرعت چرخشی ۹۰۰ rpm و سرعت انتقالی ۱۰۰ mm/min و بدون حضور نانو ذرات یا میکرو ذرات اجرا شد. بر روی سه نمونه دوم، فرآیند FSP با حضور میکرو ذرات ZrO_2 با سرعت چرخشی ۵۶۰ rpm و سرعت انتقالی ۱۰۰ mm/min اجرا شد. بر روی سه نمونه سری سوم، فرآیند FSP با نانو ذرات ZrO_2 با سرعت چرخشی ۵۶۰ rpm و سرعت انتقالی ۱۰۰ mm/min اجرا شد. بر روی سه نمونه سری چهارم، فرآیند FSP با نانو ذرات ZrO_2 با سرعت چرخشی ۹۰۰ rpm و سرعت انتقالی ۱۰۰ mm/min اجرا شد. برای تمامی نمونه‌ها، خواص خوردگی مورد بررسی قرار گرفتند.

۲-۲. فرآیند اصطکاک اغتشاشی

۲-۲-۱. آماده‌سازی نمونه

صافی سطح همه نمونه‌ها به روش‌های سندبلاست^۳ و ... مورد بررسی و صحت سنجی قرار گرفت. سپس نمونه‌ها به‌اندازه ۱۲ سانتی‌متر در ۲۰ سانتی‌متر دسته‌بندی شدند و بر

روی همگی FSP خشک (بدون حضور آب و محیط مرطوب) اجرا شد. (جدول ۲)، کدهای نمونه‌های مختلف را ارائه می‌دهد.

۲-۲-۲. فرآیند اصطکاک اغتشاشی

جهت انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی، نمونه‌های آزمایش بر روی محل تعبیه شده در دستگاه اجرای فرآیند اصطکاک اغتشاشی، نشان داده شده در (شکل ۲-الف)، نصب شدند. پین تجهیز بر روی خط برش سیمی^۴ شده بر روی نمونه‌های آزمایش قرار گرفت و متناسب با شرایط مورد نظر (ذکر شده در جدول ۲)، با سرعت خطی و دورانی مورد نظر به تعداد ۱ مسیر^۵ بر روی خط برش حرکت نمود. پین مورد استفاده برای انجام FSP از جنس کاربید-تنگستن و به شکل استوانه بود که در (شکل ۲-ب)، نشان داده شده است. اضافه می‌گردد که جهت جانشانی سطحی نانو/میکرو ذرات در فلز پایه، نیاز بود که به کمک دستگاه برش سیمی شیری در امتداد طول نمونه و به عمق ۲ میلی‌متر در سطح نمونه‌های آزمایش ایجاد گردد تا بتوان ذرات را به‌صورت همگن و در امتداد یک خط طولی در سطح نمونه جانشانی نمود. این شیار، خط برش نامیده می‌شود. FSP خشک در یک خط به طول ۱۴ سانتی‌متری در جهت عرضی غلتش انجام شد. نیروی بالادستی وارد شده به پین برابر ۳۵۰۰ پوند بود و پس از وارد شدن کامل پین به ۲۵۰۰ پوند کاهش یافت.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد ST 37

St 37	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
Magnitude	Base	0.131	0.0657	0.445	0.0092	0.0207	0.0278
St 37	Ni	Mo	Al	Co	Cu	Nb	Ti
Magnitude	0.0286	0.0023	0.0403	0.0045	0.0616	0.00072	
St 37	V	W	Pb	Sn	As	Zr	
Magnitude	0.0023	0.0049	0.0023	0.0043	0.0029	0.00054	

1. Mid-Range
2. High Range
3. Sandblast
4. Wire Cut
5. Pass

جدول ۲: جزئیات کدگذاری نمونه‌ها

Codes	Characteristics		
	Particle	Traverse Speed (mm/min)	Rotational Speed (rpm)
A-11	560	100	Nano
A-14	900	100	Nano
A-17	900	100	without
A-20	560	100	Micron

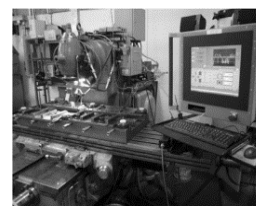
سپس با چکش، سیم در شیار قرار گرفت. در مرحله بعد، نمونه‌ها در قالب تهیه شده از لوله پولیکا قرار داده شدند. آزمایش‌های الکتروشیمیایی در دمای اتاق برای هر نمونه در محلولی حاوی ۳/۵ درصد NaCl انجام شد. آزمایش تافل برای نمونه‌ها تکرار گردید. محدوده فرکانس ۵-۱۰ تا ۲-۲۰ هرتز با استفاده از دامنه ولتاژ AC سینوسی ۲۰ میلی ولت بود. سپس، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک^۲ در محدوده ۱/۲- تا ۰/۲- ولت با سرعت اسکن ۰/۲۵ میلی ولت بر ثانیه انجام شد.

۲-۴. اندازه دانه

به فراخور موضوع و نیاز اساسی به وجود آنالیز در تحلیل‌ها صرفاً به ارائه ریزساختار و تصاویر متالوگرافی به دست آمده از بهترین نمونه تحت آزمایش یعنی A-14 در مقایسه با نمونه حاصل از فلز پایه پرداخته شده است که در (شکل ۴)، به آن اشاره شده است.



ب



الف

شکل ۲: الف) ماشین اجرای فرآیند اصطکاک اغتشاشی،
ب) پین Carbide-tungsten FSP threaded

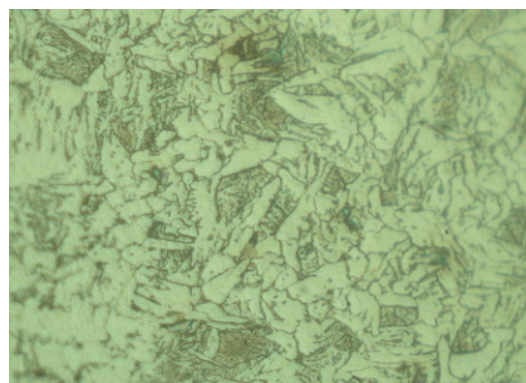
نمونه‌های به کار رفته در هر چهار حالت ذکر شده در بخش ۱-۲، پس از انجام FSP در (شکل ۳) نشان داده شده‌اند.



شکل ۳: چهار نمونه پس از انجام فرآیند FSP

۲-۳. آزمایش خوردگی

به منظور انجام آزمایش‌های خوردگی در ابتدا نمونه‌ای با ابعاد $1 \times 1 \text{ cm}^2$ برش داده شد و با استفاده از صفحات SiC و پودرهای پولیش^۱، سمباده زدنی بر روی آن صورت پذیرفت. در مرحله دوم، در یک سمت آن یک شیار ایجاد شد. در مرحله سوم، سیمی روی شیار گذاشته شد و



الف) A-17



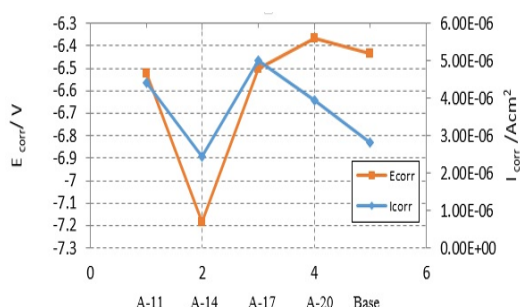
ب) A-17

شکل ۴: تصاویر حاصل از متالوگرافی؛ الف) نمونه فلز پایه؛ ب) نمونه ارتقاء یافته به کمک نانو ذره و سرعت دورانی ۹۰۰ rpm

1. Polish
2. Potentiodynamic Polarization

جدول ۳: داده‌های به‌دست آمده از نمودارهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

Sample	E _{corr} /V	I _{corr} /A cm ⁻²	β _a /V dec ⁻¹
A-11	-6.523	4.404×10 ⁻⁶	0.097
A-14	-7.183	2.44×10 ⁻⁶	0.058
A-17	-6.502	5.02×10 ⁻⁶	0.061
A-20	-6.366	3.93×10 ⁻⁶	0.047
Base	-6.435	2.818×10 ⁻⁶	0.032
Sample	β _c /V dec ⁻¹	R _p /ohm	V _{corr} /mm y ⁻¹
A-11	0.042	4.04×10 ²	6.54×10 ⁻³
A-14	0.047	4.844×10 ²	3.629×10 ⁻³
A-17	0.036	1.917×10 ²	7.448×10 ⁻³
A-20	0.037	1.893×10 ²	5.842×10 ⁻³
Base	0.048	2.336×10 ²	4.184×10 ⁻³



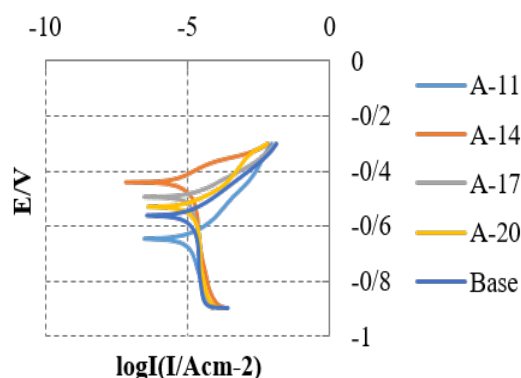
شکل ۶: جریان و پتانسیل خوردگی به‌دست آمده از نمودارهای پلاریزاسیون

همان‌طور که در نتایج نشان داده شده در (جدول ۳)، آمده است؛ به‌دست آوردن مقاومت ماده از تحلیل نتایج آزمایش‌های تافل و پلاریزاسیون، معیار بسیار مناسبی در سنجش رفتار ماده در برابر خوردگی می‌باشد. با توجه به اعداد نشان داده شده در (جدول ۳)، ذیل ستون مقاومت با نماد R_p/ohm ، مشاهده می‌شود که فلز پایه (بدون اعمال فرآیند اصطکاک اغتشاشی و نانو ذره) دارای مقاومتی برابر $102 \times 2,336$ می‌باشد که با انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی بر روی آن بدون افزودن ذره (A-17) و همچنین با افزودن میکرو ذره (A-20) مقدار این مقاومت به دلیل افزایش سطح مرز دانه‌ها کاهش می‌یابد؛ اما با به‌کارگیری نانو ذرات

همان‌طور که در (شکل ۴) مشخص است؛ در نمونه A-14، دانه‌ها به‌مراتب ریزتر و همگن‌تر شده‌اند و فضاهای خالی بین‌ذره‌ای جهت تجمع آلودگی و ذرات اضافی به‌مراتب کمتر شده است.

۳. نتایج

معمولاً یکی از آزمایش‌هایی که منجر به تشخیص نرخ خوردگی و ارزیابی مشخصات آن می‌شود؛ آزمایش‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک می‌باشند. در (شکل ۵)، به منحنی‌های پلاریزاسیون برای نمونه‌های مختلف آزمایش شده در این پژوهش اشاره شده است. جریان و پتانسیل خوردگی استخراج شده از نمودارهای پلاریزاسیون نیز در (شکل ۶) نشان داده شده‌اند. دانسیته جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی با استفاده از شیب تافل به دست آمده از منحنی‌های پلاریزاسیون و سرعت‌های خوردگی در (جدول ۳) و در (شکل ۶) ارائه شده‌اند. با توجه به مقاومت‌های به دست آمده از آزمایش‌های پتانسیودینامیک که معرف مقدار مقاومت نمونه‌های مختلف در برابر خوردگی می‌باشند و با نماد R_p/ohm در (جدول ۳)، نشان داده شده‌اند؛ می‌توان مقیاس مناسبی جهت سنجش میزان مقاومت در برابر خوردگی نمونه‌ها ارائه داد. تحلیل نمودارهای نشان داده شده در (شکل ۵)، (شکل ۶) و (جدول ۳)، نشان می‌دهند که مقاومت نمونه A-14، از سایر نمونه‌ها بیش‌تر بوده که این موضوع خود نشانه مقاومت بیش‌تر نمونه A-14 در برابر خوردگی می‌باشد.



شکل ۵: منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای نمونه‌های مختلف

با سرعت‌های دورانی ۵۶۰ rpm و ۹۰۰ rpm، (نمونه‌های A-11 و A-14) مقدار مقاومت نمونه مورد نظر نسبت به فلز پایه افزایش می‌یابد. علت این افزایش مقاومت، همگن شدن شدید اندازه دانه‌ها، کوچک‌تر شدن آن‌ها و کاهش فضاهای خالی بین ذره‌ای می‌باشد. این فضای بین دانه‌ای بهترین محل جهت تجمع ذرات زائد می‌باشد. به عبارت دیگر این فضاهای خالی موجود که محل تجمع ذرات نامطلوب است به شدت به افزایش جذب آب و اکسیژن در ماده کمک می‌نماید. حال با ریزتر شدن اندازه دانه‌ها، افزایش تعداد دانه‌ها و همگن‌تر شدن اندازه آن‌ها، فضای کم‌تری جهت تجمع ذرات زائد و متعاقباً محل کم‌تری برای جذب آب و اکسیژن وجود دارد که همین موضوع به شدت بر روی مقاومت ماده در برابر خوردگی تأثیر مثبت دارد. بدین ترتیب بیش‌ترین مقدار افزایش مقاومت ماده در برابر خوردگی پس از اعمال شرایط نمونه‌های A-11 و A-14 می‌باشد که قطعاً شدت ریزتر شدن دانه‌ها، افزایش دانه‌ها، همگن‌تر شدن اندازه دانه‌ها و کاهش فضای خالی بین ذرات در نمونه A-14 کامل‌تر بوده و متعاقباً این نمونه میزان مقاومت بیش‌تری را در برابر خوردگی از خود نشان می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

با کاهش اندازه دانه‌ها، مرز دانه‌ها افزایش می‌یابد؛ بنابراین انرژی روی مرز دانه‌ها بیش‌تر شده و سطح تماس بیش‌تری به وجود می‌آید. افزایش انرژی روی مرز دانه‌ها منجر به همگن‌تر شدن ریزساختار ماده می‌شود. به عبارت دیگر اندازه دانه‌ها به هم نزدیک‌تر شده، شکل دانه‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر شده و فضا برای قرارگیری آلودگی، ذرات جانبی و متعاقباً آب و اکسیژن در ریزساختار ماده کم‌تر می‌شود. این همگن شدن، بیش‌تر شدن انرژی روی مرز دانه و بیش‌تر شدن سطح تماس ماده، نتیجه معکوس در روند خوردگی ماده دارد؛ به عبارتی منجر به کاهش مقاومت ماده در برابر خوردگی می‌شود. ضمن کاهش مقاومت ماده در برابر خوردگی به دلیل افزایش سطح تماس، اثری دیگر منجر به افزایش مقاومت ماده در برابر خوردگی می‌شود. این اثر در حقیقت همان کاهش شدید فضای خالی بین ذرات ریز اتمی در ساختار ماده پس از اعمال فرآیند اصطکاک اغتشاشی بر روی ماده می‌باشد. در حقیقت ماده پس از اعمال فرآیند اصطکاک اغتشاشی در حضور نانوذره ZrO_2 و با سرعت دورانی ۹۰۰ rpm تحت تأثیر یک اثر دوگانه در برابر خوردگی قرار دارد که غلبه اثر افزایشی (از بین رفتن محل‌های خالی بین اتمی که محل تجمع آلودگی‌ها؛ ذرات

جانبی و متعاقباً آب و اکسیژن می‌باشد) بر اثر کاهش (اثر افزایش سطح مرز دانه)، در مجموع منجر به افزایش مقاومت ماده در برابر خوردگی می‌شود. در واقع اثر افزایش سطح تماس در افزایش خوردگی و اثر کاهش فضای خالی بین ذرات در افزایش مقاومت در برابر خوردگی، عملکردی معکوس در قبال یکدیگر دارند؛ با این احتساب که اثر کاهش فضای خالی بین ذرات در نمونه A-14، بر اثر اول غلبه کرده و همین موضوع منجر به افزایش کلی مقاومت ماده در برابر خوردگی می‌شود. به عبارت دیگر، تأثیر فرآیند اصطکاک اغتشاشی مطابق با اثر Zenner منجر به افزایش مرز دانه، همگن‌تر شدن ریزساختار، افزایش سطح تماس ماده و کاهش فضای خالی بین ذره‌ای می‌شود. حال هر چه اندازه دانه مورد استفاده کوچک‌تر باشد؛ موارد مذکور در فوق افزایش بیش‌تری را تجربه خواهند کرد. به عبارتی استفاده از نانوذرات ZrO_2 نسبت به میکرو ذرات ZrO_2 تأثیر بیش‌تری در تغییر خواص دارند. افزایش سرعت دورانی نیز منجر به افزایش موارد مذکور می‌شود. پس انجام فرآیند اصطکاک اغتشاشی با استفاده از نانو ذره و در سرعت دورانی بالاتر طبق اثر Zenner منجر به افزایش انرژی روی مرز دانه، متعاقباً همگن‌تر شدن ریزساختار ماده، افزایش سطح تماس ماده و کاهش بیش‌تر فضای خالی بین اتمی در ریزساختار می‌شود و در نهایت منجر به افزایش مقاومت ماده در برابر خوردگی می‌گردد. از این روی با توجه به دلایل گفته شده، در ظاهر انتظار می‌رود که نمونه A-14 به دلیل افزایش سطح تماس و مرز دانه‌ها، نمونه ضعیفی در برابر خوردگی باشد اما در واقع، بیش‌ترین مقاومت در برابر خوردگی متعلق به همین نمونه است.

مراجع:

- [1]. K. Masubuchi and D. C. Martin, "Mechanisms of Cracking in HY-80 Steel Weldments," Welding Journal, vol. 41, pp. 37-38, 1962.
- [2]. J. H. Nixon, "Underwater Repair Technology," Amsterdam, Netherlands, Acta Metallurgica, vol. 19, pp. 108, 2000.
- [3]. L. N. Overfield, "Feasibility of Underwater Friction Stir Welding of Hardenable Alloy Steel," M.S. Thesis, Naval Postgraduate School, pp: 42-48, September 2012.



- Modification of Cast Aluminum Alloys via Friction Stir Processing,” *Material Science Forum*, vols. 426–432, vol. 31, pp. 91–96, 2003.
- [12]. M. Afzali, and V. Asghari, “Study of the effect of nano ZrO_2 and TiO_2 and rotation speed on friction behavior of rotary friction welding of HIPS and PP,” *Functional Composites and Structures*, vol. 4, pp. 1-13, 2022.
- [13]. C.J. Lee, J.C. Huang, and P.J. Hsieh, “Irradiation Damage in Proton Irradiated Pd-Cr Alloys,” *Scripta Materialia*, vol. 54, pp. 15–20, 2006.
- [14]. Y. Morisada, H. Fujii, T. Nagaoka, and M. Fukusumi, “On the Crystal Structure and Stability of the T1 Precipitates in Aged Al-Li-Cu Alloys,” *Materials and Science Engineering*, vol. A419, pp. 44–48, 2006.
- [15]. Y. Morisada, H. Fujii, T. Nagaoka, and M. Fukusumi, “Strengthening Mechanisms Associated with T1 Particles in Two Al-Li-Cu Alloys,” *Materials and Science Engineering*, vol. A433, pp. 50–54, 2006.
- [16]. M. Dixit, J.W. Newkirk, and R.S. Mishra, “Effect of Friction Stir Processing on Microstructure and Mechanical Properties of A Cast-Magnesium-Rare Earth Alloy,” *Scripta Materialia*, vol. 56, pp. 41–44, 2007.
- [17]. S.R. Sharma, Z.Y. Ma, R.S. Mishra, and M.W. Mahoney, “Friction Stir Welding and Processing,” *Scripta Materialia*, vol. 51, pp. 37–41, 2004.
- [18]. Z.Y. Ma, S. R. Sharma, R.S. Mishra, and M.W. Mahoney, “High Strain Rate Superplasticity in a Friction Stir Processed 7075 Al Alloy,” *Metallurgical Material Transaction*, vol. 37A, pp. 23–36, 2006.
- [4]. A. Thangarasu, N. Murugan, I. Dinaharan, and S. J. Vijay, “Influence of Traverse Speed on Microstructure and Mechanical Properties of AA6082-TiC Surface Composite Fabricated by Friction Stir Processing,” *Procedia Materials Science*, vol. 5, pp. 2115-2121, 2014.
- [5]. R. S. Mishra, “Friction Stir Welding and Processing,” *Materials Science Engineering*, vol. 50, pp. 1, 2005.
- [6]. R.S. Mishra, M.W. Mahoney, S.X. McFadden, N.A. Mara, and A.K. Mukherjee, “Nitriding Thermochemical Treatment and Niobium Dual Effect on Nano Crystallization of FeSiBCu Ribbons,” *Scripta Materialia*, vol. 42, pp. 63–68, 2000.
- [7]. R.S. Mishra and M.W. Mahoney, “Time-evolution of Heat Affected Zone (HAZ) of Friction Stir Welds of AA7075-T651,” *Material Science Forum*, vol. 35, pp. 7–12, 2001.
- [8]. P.B. Berbon, W.H. Bingel, R.S. Mishra, C.C. Bampton, and M.W. Mahoney, “Influence of Texture on Mechanical Behavior of Friction-stir-processed Magnesium Alloy,” *Scripta Materialia*, vol. 44, pp. 61–66, 2001.
- [9]. R.S. Mishra, Z.Y. Ma, and I. Charit, “Effect of Friction Stir Processing on Fatigue Behavior of an Investment Cast Al-7Si-0.6 Mg Alloy,” *Material Science and Engineering*, vol. A341, pp. 7–10, 2002.
- [10]. J. C. Huang and G. T. Gray, “Serrated Flow and Negative Rate Sensitivity in Al-Li Base Alloys,” *Scripta Metallurgica and Materialia*, vol. 24, pp. 85-90, 1990.
- [11]. Z.Y. Ma, S.R. Sharma, R.S. Mishra, and M.W. Mahoney, “Microstructural



- of stir cast Al7075-2% SiC micro- and nanocomposites by friction stir processing,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 30, pp. 1-13, 2017.
- [27]. Y. Mazaheri, A. Heidarpour, M. M. Jalilvand, and M. Roknin, “Effect of Friction Stir Processing on the Microhardness, Wear and Corrosion Behavior of Al6061 and Al6061/SiO₂ Nanocomposites,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 28, pp. 4826-4837, 2019.
- [28]. R. Raja, S. Jannet, J. Aby, and D. S. Ebenezer, J. Dhas, “Study of the mechanical, wear and corrosion behaviour of silicon nitride nanoparticles reinforced copper surface composite through friction stir processing,” *Engineering Research Express*, vol. 4, pp. 1-9, 2022.
- [19]. Z.Y. Ma, S.R. Sharma, and R.S. Mishra, “Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite,” *Scripta Materialia*, vol. 54, pp. 23–26, 2006.
- [20]. K. Oh-ishi and T.R. McNelley, “Microstructural evolution by continuous recrystallization in a superplastic Al-Mg alloy,” *Metallurgical and Materials Transaction, A*, vol. 35A, pp. 51–61, 2004.
- [21]. A.H. Feng and Z.Y. Ma, “Microstructure and Strain Hardening of A Friction Stir Welded High-Strength Al-Zn-Mg Alloy,” *Scripta Materialia*, vol. 56, pp. 39–40, 2007.
- [22]. C.J. Hsu, P.W. Kao, and N.J. Ho, “Intermetallic-reinforced Aluminum Matrix Composites Produced in Situ by Friction Stir Processing,” *Scripta Materialia*, vol. 53, pp. 41–45, 2005.
- [23]. C.H. Chuang, J.C. Huang, and P.J. Hsieh, “High Strain Rate Super plasticity of Mg Based Composites Fabricated by Friction Stir Processing,” *Scripta Materialia*, vol. 53, pp. 55–60, 2005.
- [24]. C.J. Hsu, C.Y. Chang, P.W. Kao, N.J. Ho, and C.P. Chang, “Microstructural Evolution in Commercial Purity Aluminum During High-pressure Torsion,” *Acta Materialia*, vol. 54, pp. 41–49, 2006.
- [25]. H. Mehdi, and R. S. Mishra, “Effect of multi-pass friction stir processing and SiC nanoparticles on microstructure and mechanical properties of AA6082-T6,” *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, vol. 3, pp. 39-71, 2021.
- [26]. A. Kumar, K. Pal, and S. Mula, “Simultaneous improvement of mechanical strength, ductility and corrosion resistance

Nano/Micro ZrO₂ Particles Dispersion on St37 Steel by Using Friction Stir Processing and Investigating Its Effect on Steel Corrosion Resistance Promotion

Seyed Mohammad Hossein Sharifi¹, Armin Sabetghadam-Isfahani^{2,3}, Yegane Davoodbeygi^{4,5}

1. Mechanical Engineering Department, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran
2. Hormozgan Province Gas Company, Bandar Abbas, Iran
3. Mechanical Engineering Faculty, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
4. Assistant Professor of Department of Chemical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
5. Nanoscience, Nanotechnology and Advanced Materials Research Center, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL RESEARCH

Article History:

Received: 09 May 2023

Revised: 03 June 2023

Accepted: 21 July 2023

Keywords:

Friction stir processing

St 37

Corrosion Resistance

ZrO₂ nanoparticle

ABSTRACT

In this paper, the effect of Friction Stir Processing (FSP) on the enhancement of St37 properties against corrosion has been investigated. The FSP was carried out in 4 modes on St37: The first state of the process was done with a rotational speed of 900 rpm and without micro/Nano particles, the second state was done at a rotational speed of 560 rpm and with ZrO₂ micro particles, the third state was done with a rotational speed of 560 rpm and with ZrO₂ nanoparticles and the fourth state was done with a rotational speed of 900 rpm and with ZrO₂ nanoparticles. The traverse speed in all samples was 100 mm/min. Corrosion resistance of all 4 prepared samples was compared with the one in St37 steel Base Metal (which FSP had not been done on it). The results showed that the sample produced by FSP with ZrO₂ nanoparticles and rotational speed of 900 rpm has the highest increase in corrosion resistance. All Nano dispersed samples showed more corrosion resistance than the Base Metal. The two samples, the FSPed one without any particle and the FSPed one with micro particles, showed less corrosion resistance in comparison to the one in Base Metal. Increasing the rotational speed of the process led to an increase in the corrosion resistance of the sample.

DOR: [20.1001.1.25885251.1402.10.1.4.8](https://doi.org/10.1001.1.25885251.1402.10.1.4.8)

How to cite this article

S.M. Hossein Sharifi, A. Sabetghadam-Isfahani, Y. Davoodbeygi, Nano/Micro ZrO₂ Particles Dispersion on St37 Steel by Using Friction Stir Processing and Investigating Its Effect on Steel Corrosion Resistance Promotion. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2023; 10(1): 59 -68. (https://www.ijge.irangi.org/article_707973.html)

* Corresponding Author.

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

Available online 20 August 2023

2666-5468/© 2021 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>)



بهبود شرایط تولید برای جلوگیری از پسماند مایع در یکی از چاه‌های گازی عمودی در ایران

محمد دوستی^۱، مسعود بیژنی^{۲*}، همدم مجد تیموری^۱، سجاد سپاسی^{فر}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، کد پستی ۶۹۹۱-۵۳۳۱۵، تبریز، ایران

۲. گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (پلی تکنیک تهران)، کد پستی ۱۱۳۴۳۶۱۹۵۱، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: masoudbijani@aut.ac.ir

مقاله علمی - ترویجی

صفحه ۶۹ - ۷۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳

چکیده

پسماند مایع یکی از مشکلات رایج در چاه‌های گازی است که می‌تواند سبب توقف تولید گردد. این پژوهش سعی کرده وقوع این پدیده را در یکی از میادین گاز میعانی خشکی ایران با استفاده از نرم‌افزار پاپسیسم بررسی کند. در این پژوهش تشکیل مایعات در مخزن گازی در میدان مورد نظر و رفتار این پدیده در طول تولید از چاه و روش‌های کنترل آن مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان دهنده رخداد پسماند مایع در چاه به علت افشار در مخزن به اندازه ۲۲۰۰ پام می‌باشد، سپس نرخ بحرانی پسماند مایع مقدار ۶/۲ میلیون فوت مکعب توسط نرم‌افزار پاپسیسم محاسبه شد و راهکارهای مناسب برای کنترل تولید از چاه و پسماند مایع با استفاده از تغییر قطر لوله و همچنین استفاده از کاهنده جریان بررسی شد که نشان دهنده این بود که استفاده از کاهنده و لوله با قطر مناسب می‌تواند تأثیر مناسبی بر کنترل تولید بگذارد.

کلیدواژه‌ها: پسماند مایع، رژیم‌های جریان عمودی، کاهش تولید گاز، رژیم جریان دوفازی، بهبود تولید، نرخ بحرانی پسماند مایعات

۱. مقدمه

تولید از چاه‌های گازی^۱ حفاری شده در مخازن گاز میعانی، علاوه بر گاز همواره مقداری از مایعات هیدروکربنی و یا آب را به همراه دارد. افت فشاری که پس از مدتی تولید از یک مخزن گاز میعانی^۲ در آن به وجود می‌آید، سبب می‌شود تا مایعات هیدروکربنی در مخزن تشکیل شده و این مایعات همراه گاز تولیدی مسیر چاه را طی کنند و به سمت سطح زمین حرکت کنند. با ادامه این روند و باگذشت زمان، این مایعات تمام طول چاه را در برمی‌گیرند و سبب توقف تولید گاز از چاه می‌شوند؛ بنابراین نیاز است تا نرخ تولید گاز به قدری باشد تا توانایی

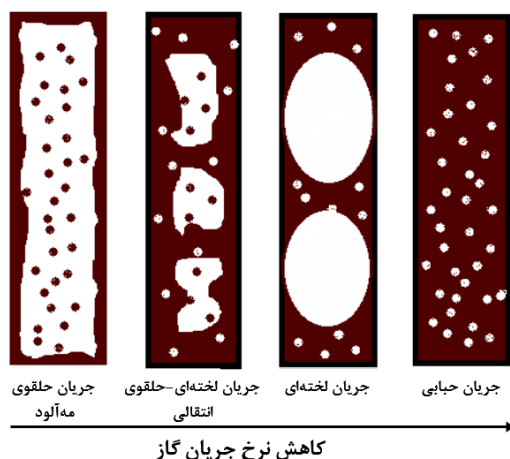
3. Liquid Loading

1. Gas Wells

2. Gas Condensate Reservoir



دارد، با این حال تأثیرات مایع در این نوع رژیم جریان غیرقابل صرف نظر کردن است. با ادامه کاهش نرخ جریان و کاهش سرعت گاز، جریان لخته‌ای^۴ در مسیر جریان دوفازی به وجود می‌آید. در این حالت جریان مایع، کسرهای بیشتری از مسیر جریان را اشغال می‌کند و فاز گاز به صورت لخته‌ای در مسیر جریان قرار می‌گیرد. با ادامه این روند و کاهش بیشتر نرخ گاز و سرعت گاز، رژیم جریانی دوفازی حبابی در مسیر جریان شکل می‌گیرد که در این حالت فاز مایع کاملاً به صورت پیوسته تمام مسیر را اشغال کرده و حباب‌های ریز گاز به صورت پراکنده در آن یافت می‌شود. در این حالت افت فشار به وجود آمده ناشی از جریان مایع است و به دلیل اختلاف چگالی فازها و وجود پدیده لغزش، سرعت حرکت دو فاز متفاوت می‌باشد. این نوع رژیم جریان نشان‌دهنده رخداد پسماند مایع در یک چاه گازی است [۵ و ۶].



شکل ۱: انواع رژیم‌های جریان دوفازی مایع و گاز به وجود آمده در یک مسیر عمودی مانند یک چاه گازی [۴]

ترنر و همکاران (۱۹۶۹) اولین پژوهشگرانی بودند که پدیده پسماند مایع را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مدلی را برای پیش‌بینی سرعت بحرانی تولید گاز از یک چاه گازی و نیز نرخ بحرانی تولید ارائه دادند؛ به عبارت دیگر تا زمانی که سرعت و نرخ تولید گاز از مقدار بحرانی مورد نظر بالاتر باشد، چاه از رخداد پدیده پسماند در امان خواهد بود. در ادامه نیز کولمن و همکاران (۱۹۹۱)، لی و همکاران (۲۰۰۱)، گوئو و همکاران (۲۰۰۶) و ایکپکا و همکاران (۲۰۱۸) مدل‌هایی را برای پیش‌بینی نرخ بحرانی تولید گاز از چاه ارائه کردند تا از وقوع

چاه‌های گازی است که سبب کاهش تولید و در نهایت توقف تولید می‌شود [۱]؛ بنابراین نیاز به تجهیزات و روش‌هایی برای رفع این مشکل احساس می‌شود که البته می‌تواند هزینه‌ها و خسارات جبران ناپذیری را برای صنعت به همراه داشته باشد [۲]. یکی از مواردی که هنگام ایجاد پسماند مایعات حائز اهمیت است، رژیم جریان دوفازی مایعات هیدروکربنی و گاز به وجود آمده در چاه است. در این مورد می‌توان گفت پسماند مایع رایج‌ترین مشکلی است که در چاه‌های گازی در زمان تولید رخ می‌دهد و ممکن است جریان نامنظم لخته‌ای را در چاه ایجاد شود؛ بنابراین برای درک اثرات مایعات تولیدی در یک چاه گازی لازم است تا برهمکنش مایع و گاز را در شرایط جریانی بشناسیم [۳]. برای آشنایی با نحوه تغییرات افت‌های فشاری که عامل تغییرات سرعت گاز و مایعات همراه آن است، باید از نحوه تغییرات رژیم‌های جریانی که در واقع تعیین‌کننده مقدار تأثیر و میزان افت فشار می‌باشد آگاهی کامل داشته باشیم. رژیم جریان دوفازی با سرعت فازهای گاز و مایع و نیز مقادیر نسبی از گاز و مایع در هر نقطه معین از مسیر تعیین می‌شود. با توجه به رژیم جریان دوفازی پسماند مایع را می‌توان این‌گونه تعریف نمود که در چاه‌های گازی پس از مدتی از تولید گاز، افت فشار صورت گرفته و در اثر تغییر رژیم جریانی از حالت مه‌آلود^۱ به حالت حبابی^۲ در یک جریان دوفازی گاز و مایع، کسر حجمی مایعات موجود در مسیر جریان گاز بیشتر شده و سبب غلبه نیروی مایعات بر گاز می‌شود و در نهایت کاهش تولید و جمع شدن مایعات در طول چاه رخ خواهد داد. (شکل ۱) انواع رژیم‌های جریان دوفازی گاز و مایع که در یک مسیر عمودی مانند یک چاه گازی ممکن است رخ دهد را نشان می‌دهد [۴]. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که در زمان‌های اولیه تولید از یک چاه گازی حفاری شده در یک مخزن گاز میعانی، رژیم جریان به صورت ترکیبی از رژیم‌های حلقوی^۳ و مه‌آلود است. در این شرایط فاز گاز به صورت پیوسته در میانه مسیر قرار می‌گیرد و فاز مایع به صورت پیوسته بر روی دیواره‌های مسیر شکل می‌گیرد. تحت این شرایط تغییرات فشار سیال عموماً توسط فاز گاز کنترل می‌شود و از تأثیرات فاز مایع چشم‌پوشی می‌شود. با کاهش سرعت گاز و یا کاهش نرخ جریان تولیدی رژیم جریان دوفازی به حالت انتقالی تغییر می‌کند. در این شرایط همچنان فاز گاز به عنوان فاز پیوسته در نظر گرفته می‌شود و جریان گاز تأثیر بیشتری بر افت فشار

1. Mist Flow
2. Bubble Flow
3. Annular Flow
4. Slug Flow

این پدیده در چاه‌های گازی جلوگیری کنند. در واقع آن‌ها کار ترنر و همکاران را هر یک به نحوی برای منطقه‌ای و شرایط خاص از تولید، تصحیح و گسترش دادند [۷ و ۸]. همچنین با گذشت زمان و گسترش استفاده از علوم داده در صنایع نفت و گاز، تحقیقات به سمت استفاده از علم یادگیری ماشین برای مدل‌سازی و پیش‌بینی شرایط تولید پیش رفت. بدین منظور سید و همکاران (۲۰۲۱) مروری بر ادبیات گذشته تحقیقات بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ میلادی در زمینه تخمین عملکرد تولید گاز شیل با توسعه مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین انجام دادند. سپس معادلات، پارامترهای ورودی و کلیدی را برای توسعه مدل‌های هوشمند مشخص نمودند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که اکثر مدل‌های توسعه یافته در یادگیری ماشین قادر به پیش‌بینی رفتار تولید مخازن گاز شیل بر مبنای داده‌های ورودی بالا است. همچنین آن‌ها مشخص کردند با ادغام نتایج چاه‌ها، طراحی تکمیل بهبود یافته، مشخصه مخزن دقیق‌تر و عمیق‌تر، میانگین قرارگیری نیرو در هر مرحله در تکنیک شکست هیدرولیکی به‌طور مؤثرتری توسعه می‌یابد و مدل قابل اعتماد می‌تواند عملکرد تولید مخازن گاز شیل را با راندمان، دقت و دقت بیشتر پیش‌بینی کند [۹]. در ادامه ابولیم و همکاران (۲۰۲۳) پیش‌بینی تجمع مایعات را با استفاده از نرم‌افزاری بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک، شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه عصبی بیزین انجام دادند. نتایج کار آن‌ها نشان داد مدل مبتنی بر نرم‌افزار شبکه عصبی مصنوعی با دقت شبیه‌سازی شده به ترتیب ۹۳ و ۹۲ درصد برای داده‌های آزمایشی و آموزش دیده شده، بهتر از مدل داده محور بهینه‌سازی ازدحام ذرات با دقت حساسیت شبیه‌سازی شده ۹۲ و ۸۳ درصد عمل می‌کند و همچنین از مدل‌های مبتنی بر داده الگوریتم ژنتیک با دقت شبیه‌سازی شده ۸۹ درصد و ۸۳ درصد نیز عملکرد مناسب‌تری دارد. همچنین شبکه عصبی بیزین نیز با دقت شبیه‌سازی ۷۷ و ۷۳ درصد برای داده‌های آموزش و آزمایش، به‌عنوان یک مدل قوی در نظر گرفته شد [۱۰]. پس از این نیز چوماش و همکاران (۲۰۲۳) رویکردی ترکیبی بین مدل‌سازی مبتنی بر فیزیک و تجزیه و تحلیل آماری یادگیری ماشین ارائه دادند. نویسندگان از یک الگوریتم ML تصفیه شده به نام XGBoost (تقویت گرادیان شدید) استفاده کردند تا یک روش کامل جدید در مورد چگونگی تشخیص چاه با مشکلات پسماند مایع و پیش‌بینی سرعت بحرانی گاز تولیدی از یک چاه را ایجاد کنند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که مدل XGBoost

به‌خوبی با پارامترهای بهینه شده در تشخیص وضعیت چاه و پیش‌بینی شروع تجمع مایعات و نیز تخمین سرعت بحرانی گاز، کارآمد است. نتایج نشان داده‌شده در تحقیق ایشان ثابت می‌کند که مدل و روش توسعه‌یافته در صورت استفاده صحیح توسط مهندسان، نتایج بهتری در تشخیص درست وضعیت چاه می‌دهد [۱۱].

بنابراین با توجه به اهمیت استفاده از منابع نفت، گاز و انرژی و صرفه اقتصادی این منابع برای ایران و نیز وجود میادین بزرگ گازی و نیز گاز میعانی در مناطق مختلف ایران و اهمیت حفاری و تولید بدون مشکل از این میادین و مخازن گازی، نیاز است تا مشکلات احتمالی برای عملیات‌های مختلف از جمله عملیات تولید از یک چاه گازی شناسایی شود؛ بنابراین در این تحقیق قصد داریم تا با استفاده از نرم‌افزار پایپسیم^۱ که یکی از نرم‌افزارهای شرکت شلمبرژر در زمینه مهندسی تولید و بهره‌برداری است، وقوع این پدیده را در یکی از میادین گاز میعانی ایران بررسی کنیم و جنبه‌های مختلف مؤثر بر روی این پدیده را شناسایی کنیم تا بتوان از رخداد این مشکل در یک چاه گازی جلوگیری به عمل آورد و بتوان تولید مؤثر و مستمری را از یک چاه گازی داشته باشیم. از طرفی همان‌طور که اشاره شد در صورتی که این پدیده در یک چاه گازی رخ دهد، علاوه بر کاهش تولید، روش‌های حذف و مهار این مایعات از یک چاه می‌تواند هزینه‌های زیادی در برداشته باشد و همچنین زمان زیادی را صرف نماید؛ بنابراین در این تحقیق قصد داریم تا راهکارهای مؤثر پیشگیری تجمع مایعات را با استفاده از نرم‌افزار ذکر شده بررسی کنیم و بتوانیم این پدیده را در میدان گازی مورد نظر کنترل کنیم.

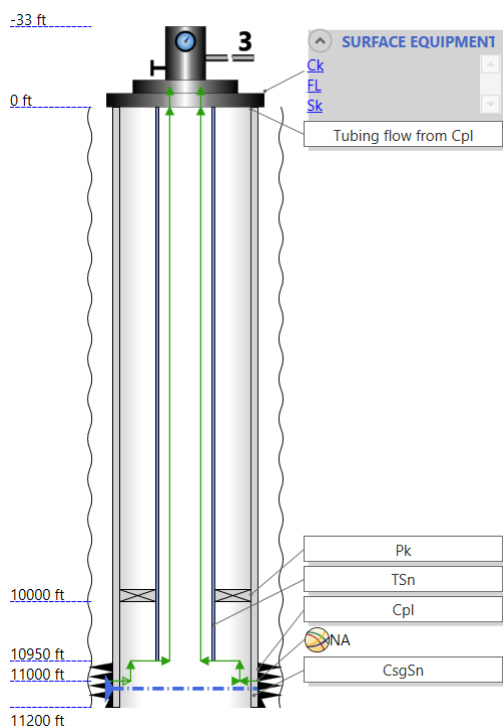
۲. شرح پژوهش

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار پایپسیم نسخه سال ۲۰۲۰ میلادی ارائه شده توسط شرکت شلمبرژر، پسماند مایع را در یکی از میادین گازی ایران مورد شبیه‌سازی و بررسی قرار گرفت. با در دست داشتن اطلاعات و داده‌های مورد نیاز شرایط مخزن، چاه تولیدی و لوله مغزی مورد استفاده در چاه مورد نظر شبیه‌سازی برای هدف مورد نظر انجام گرفت. اطلاعات ورودی به نرم‌افزار از یکی میادین گازی ایران به نام میدان هما جمع‌آوری گردید؛ بنابراین اطلاعات یک حلقه چاه عمودی گازی حفاری و تکمیل شده در این میدان که در جنوب استان فارس قرار دارد به‌عنوان داده‌های ورودی نرم‌افزار در نظر گرفته شد و شبیه‌سازی و بهبود شرایط تولید گاز از یکی از ۱۶ حلقه

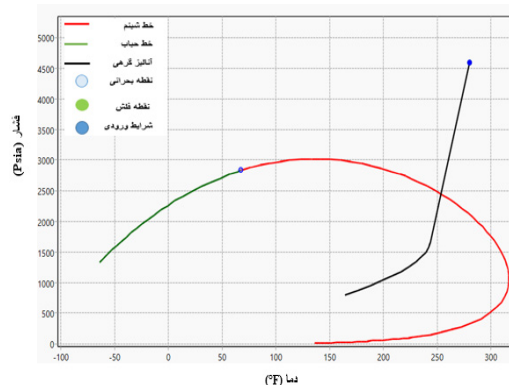
1. Pipesim Software



فشار بیشتر در مخزن که می‌تواند ناشی از تولید از آن باشد، وضعیت مخزن از حالت تک فاز گاز به یک مخزن دوفازی گاز و مایع هیدروکربنی تغییر خواهد کرد؛ بنابراین می‌توان دریافت که مایعات هیدروکربنی در مخزن گازی موردنظر تشکیل شده و با تولید از چاه این مایعات به‌طرف چاه حرکت خواهند کرد.



شکل ۲: شماتیک درون چاهی هم A- در نرم‌افزار پایپسیم



شکل ۳: منحنی فازی فشار-دمای مخزن گازی موردنظر

۳-۲. بررسی تجمع مایعات در چاه هم A

(شکل ۴) منحنی آبی عملکرد جریان درونی (مخزن) را نسبت به منحنی قرمز که بیان‌کننده عملکرد جریان خارجی (چاه یا لوله مغزی^۱) است را نشان می‌دهد. مطابق این

چاه حفاری شده در این میدان، در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. میدان گازی هما به همراه میادین گازی تابناک، شانول و وراوی چهار میدان فعال منطقه عملیاتی پارسیان به حساب می‌روند که در مجاورت شهرهای پارسیان، لامرد، خنج و مهر قرار گرفته است. ویژگی‌های سیال که به‌عنوان ورودی برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد در (جدول ۱) آورده شده است. از جمله مواردی که در این تحقیق توسط این نرم‌افزار بررسی گردید؛ می‌توان به بررسی تشکیل مایعات هیدروکربنی در چاه، شرایط حرکت مایعات در طول چاه، اندازه مناسب لوله مغزی تولیدی و فشار تولیدی سر چاهی مناسب اشاره نمود. همچنین با توجه به این موارد می‌توان با استفاده از این نرم‌افزار، بهینه‌ترین عنصر مناسب تولید را انتخاب نمود تا از تجمع مایع در یک چاه گازی قبل از آغاز تولید و با استفاده از بهینه‌ترین ابزار و شرایط تولید، جلوگیری کرد.

جدول ۱: ویژگی‌های سیال چاه هم A

	Name	Moles	Mole fraction
		mol	%
1	Water	0	
2	Methane	78	78
3	Ethane	8	8
4	Propane	3.5	3.5
5	Isobutane	1.2	1.2
6	Butane	1.5	1.5
7	Isopentane	0.8	0.8
8	Pentane	0.5	0.5
9	Hexane	0.5	0.5
10	C7+	6	6

۳. نتایج و بحث

۳-۱. بررسی تشکیل مایعات هیدروکربنی در مخزن

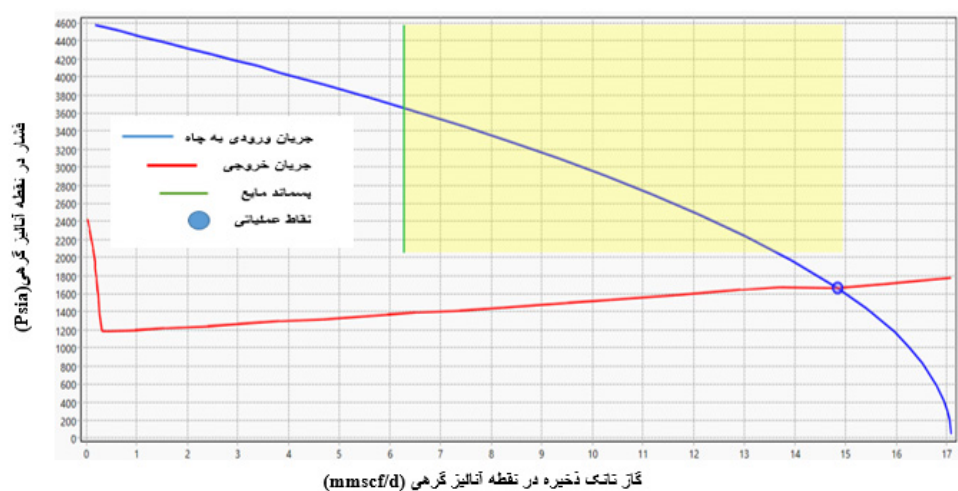
در ابتدا چاه موردنظر با توجه به خصوصیات مخزنی و سیالاتی در شبیه‌ساز چند فازی جریان پایدار پایپسیم شبیه‌سازی نموده و سپس حساسیت سنجی بر روی پارامترهایی که بر میزان پسماند مایع و درنهایت تولید اثرگذار هستند، انجام گرفت. ویژگی‌های که برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد در (جدول ۱) آمده است. شماتیک چاه مورد مطالعه در شبیه‌ساز در (شکل ۲) نشان داده شده است. (شکل ۳) منحنی فازی فشار و دمای مخزن گازی موردنظر را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل پیداست، وقتی کاهش فشار در مخزن رخ می‌دهد درنهایت سبب شکل‌گیری اولین قطرات مایع در مخزن خواهد شد. با ادامه این روند و افت

1. Tubing



کرد و نیروی مایعات بر نیروی مولکول‌های گاز غلبه خواهد کرد. لازم به ذکر است که نرم‌افزار پایپسیم پیش‌بینی نرخ بحرانی را با استفاده از روابط توسعه داده شده توسط ترنر و همکاران انجام می‌دهد؛ بنابراین با توجه به آنالیز گره‌ای انجام شده مانند (شکل ۳)، می‌توان وضعیت نرخ تولید ایمن موردنظر جهت عدم تشکیل پسماند مایع را با نرخ تولید طبیعی چاه و نرخ تولید تنظیم شده توسط مهندسين بهره‌برداری در هر چاه و مخزن گازی بررسی نمود. خط سبز رنگ در این شکل نرخ بحرانی تجمع مایع در چاه را نشان می‌دهد.

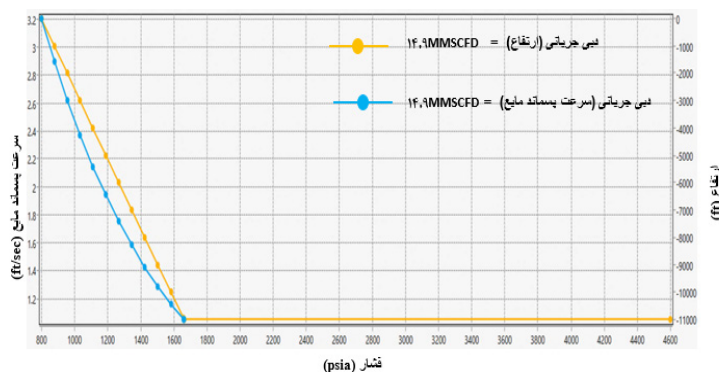
شکل می‌توان نقطه دبی عملیاتی را نیز از تقاطع دو منحنی عملکرد مخزن و چاه دریافت کرد. همچنین نکته قابل ذکر وضعیت دبی تولیدی پسماند مایع در این چاه گازی حفاری شده در مخزن موردنظر است. همان‌طور که پیداست نرخ بحرانی جهت عدم تجمع مایعات در این چاه گازی مقدار ۶ الی ۷ میلیون فوت مکعب در روز است. قسمت مشخص شده زرد رنگ در شکل نشان‌دهنده وضعیت تولید ایمن برای عدم تشکیل پسماند در چاه است. مطابق پیش‌بینی نرم‌افزار در صورتی که نرخ تولید گاز از نرخ بحرانی پیش‌بینی شده مقدار کمتری داشته باشد، مایعات در چاه تجمع خواهند



شکل ۴: وضعیت منحنی‌های عملکرد مخزن و چاه نسبت به یکدیگر و همچنین نرخ تولید طبیعی از چاه و مخزن

باعث به وجود آمدن نیرویی به نام پس‌فشار شود. در نتیجه به وجود آمدن این نیرو، مایعات ایجاد شده تمایل دارند تا به سمت پایین چاه حرکت کنند و به مناطق خالی سازند نیز نفوذ کنند؛ بنابراین چرخه‌ای از ایجاد مایعات در مخزن، حرکت آن‌ها به طرف چاه و مجدداً تمایل به سقوط قطرات مایع به سمت انتهای چاه و نفوذ مجدد در مخزن به وجود می‌آید که با ادامه یافتن این چرخه و اشباع شدن مناطق خالی سازند و مخزن از مایعات، تجمع مایعات در چاه نیز شکل می‌گیرد زیرا مایعات دیگر نقطه‌ای را برای نفوذ و جای‌گیری در محیط اطراف خود پیدا نخواهند کرد. همچنین با توجه به (شکل ۵) می‌توان نتیجه گرفت که محاسبه نرخ تولید گاز توسط نرم‌افزار در شرایط تولید طبیعی از مخزن است که در (شکل ۴) به عنوان نقطه دبی عملیاتی تعریف گردید.

در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار، (شکل ۵) منحنی زرد رنگ تغییرات فشار را از مخزن تا دهانه چاه و از دهانه چاه تا سطح زمین نشان می‌دهد. همچنین منحنی آبی رنگ سرعت حرکت مایعات هیدروکربنی تشکیل شده که از مخزن گازی موردنظر به چاه رسیده‌اند را نشان می‌دهد. سرعت حرکت مایعات در طول چاه با رسیدن به سطح زمین افزایش پیدا می‌کند و این نشان‌دهنده دبی مناسب تولید برای چاه موردنظر است که می‌تواند مایعاتی که در مخزن و در نتیجه افت فشار مخزن ایجاد شده‌اند و به چاه رسیده‌اند را با نرخ تولید مناسب از چاه خارج کنند. با این حال افت فشار شدید در مسیر رسیدن سیال مخزن به دهانه چاه رخ می‌دهد که می‌تواند عاملی برای تشکیل بیشتر قطرات مایع و ایجاد نیروی بیشتر برای حرکت این میعانات به طرف چاه باشد. افت فشار ایجاد شده می‌تواند

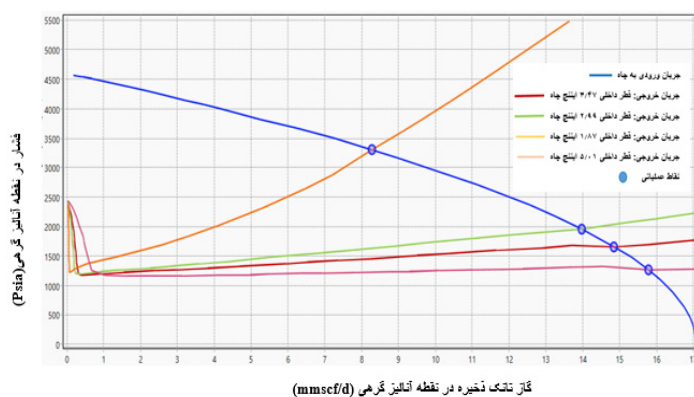


شکل ۵: منحنی‌های سرعت حرکت مایعاتی که به چاه رسیده‌اند در طول چاه به سمت سطح زمین و همچنین تغییرات فشاری ایجاد شده از مخزن تا دهانه چاه و از دهانه چاه به ابتدای چاه گازی موردنظر

۳-۳. بهینه‌سازی تولید از چاه موردنظر

صورت گرفته بر اساس قطر داخلی لوله مغزی را نشان می‌دهد. لوله مغزی تولیدی از چاه در شرایط اولیه قطر داخلی ۳/۴۷۶ اینچ را دارد. می‌دانیم کاهش قطر لوله مغزی سبب افزایش سرعت حرکت سیالات درون آن می‌شود و از طرفی افزایش قطر لوله مغزی با عبور از یک حد مشخص، کاهش سرعت حرکت سیالات درون آن را به همراه دارد. همان‌طور که از (شکل ۶) پیداست، جهت آنالیز حساسیت در این بخش از دو مدل لوله مغزی با اندازه کوچک‌تر نسبت به اندازه اولیه و یک اندازه بزرگ‌تر از اندازه اولیه لوله تولیدی استفاده شده است. اندازه مناسب لوله مغزی مقداری است که بر اساس آن در ابتدا نرخ تولید طبیعی کاهش چندانی نداشته باشد و از طرفی بتوان هزینه‌های موردنظر را نیز کاهش داد. (جدول ۲) نرخ تولید طبیعی برای هراندازه انتخاب شده لوله تولیدی در (شکل ۶) را همراه با دبی بحرانی پسماند مایع نشان می‌دهد؛ بنابراین با توجه به نرخ تولید طبیعی و اختلاف موردنظر با نرخ بحرانی تشکیل پسماند مایع در چاه موردنظر و با توجه به هزینه‌های اقتصادی موردنظر، می‌توان بهینه‌ترین قطر لوله مغزی جهت تولید از این چاه را انتخاب نمود.

یکی از روش‌هایی که مانع از تشکیل پسماند مایع در چاه می‌شود، استفاده از لوله مغزی با قطر کوچک و بهینه یا در اصطلاح لوله سرعت دهنده می‌باشد. با بکار بردن لوله مغزی با قطر کوچک به علت افزایش سرعت بحرانی پسماند مایع، سرعت جریان گاز افزایش یافته و مایعات راحت‌تر به سطح منتقل می‌گردند. البته باید به این نکته توجه کرد که در چاه‌هایی که دارای لوله مغزی با قطر کم با کوچک‌ترین تجمع فشار به شدت افت می‌کند بنابراین بهینه‌سازی قطر برای جلوگیری از پسماند مایع ضروری است [۱۲ و ۱۳]. پس از تشخیص شرایط تشکیل، تجمع و حرکت مایعات در مخزن و چاه موردنظر، در این بخش از تحقیق بهینه‌سازی تولید از چاه موردنظر با توجه به آنالیزهای حساسیت صورت گرفته در نرم‌افزار پایپسیم بررسی خواهد گردید. بدین منظور با بهینه‌سازی قطر لوله تولیدی و همچنین فشار سرچاهی، شرایط تشکیل پسماند مایع در این چاه بهبود خواهد یافت و اختلاف بین دبی بحرانی ترنر برای تشکیل پسماند مایع، دبی تولیدی از چاه موردنظر در شرایط موردنظر و هزینه‌های اقتصادی موردنظر مقایسه می‌گردند. (شکل ۵) آنالیز حساسیت



شکل ۶: آنالیز حساسیت قطرهای داخلی مختلف لوله مغزی جهت تولید از چاه موردنظر

جدول ۲: مقدار نرخ تولید طبیعی از چاه برای هراندازه لوله مغزی

نرخ تولید طبیعی (میلیون فوت مکعب استاندارد در روز)	قطر داخلی لوله مغزی (اینچ)
۸/۲	۱/۸۷
۱۴	۲/۹۹۲
۱۴/۹	۳/۴۷۶
۱۵/۸	۵/۰۱۲
۶/۳	نرخ بحرانی پسماند مایع در شرایط اولیه

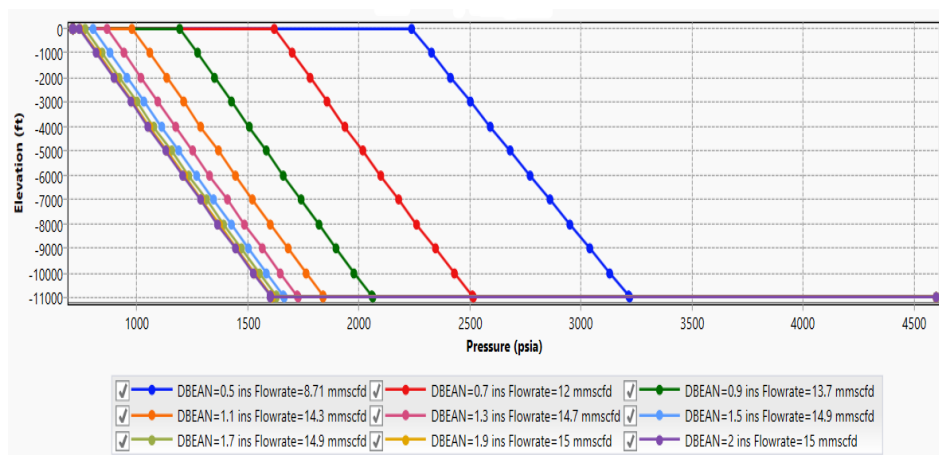
۳-۴. استفاده از کاهنده‌های سرچاهی^۱

کاهنده‌های سرچاهی به منظور کنترل و تنظیم نرخ تولید، محافظت تجهیزات سطحی و خطوط لوله از لخته‌ای شدن جریان، کنترل تولید شن ناشی از نیروی پس فشار و کنترل و اجتناب از تولید آب، مایعات اضافی و پدیده‌های مختلف همچون مخروط شدگی گاز در سرچاه نصب می‌گردند. کاهنده‌های سرچاهی به دو دسته ثابت و متغیر تقسیم می‌شوند. نصب یک کاهنده در سرچاه به معنای تثبیت فشار خروجی چاه است و در نتیجه این تثبیت فشار خروجی از چاه، فشار جریان ته چاه و همچنین نرخ جریان تولیدی از چاه تثبیت می‌شود [۱۴]. هدف از استفاده از کاهنده تسریع جریان از طریق آن است به طوری که شرایط بحرانی یا صوتی در گلوگاه آن حاصل شود. این با افزایش اختلاف فشار در پایین دست و بالادست کاهنده اتفاق می‌افتد. در یک فشار مشخص، دبی جریان از طریق کاهنده برای آن اندازه گلوگاه خاص به حداکثر می‌رسد. هرگونه افزایش بیشتر در اختلاف فشار منجر به افزایش دبی نمی‌شود. فراتر از نقطه‌ای که سرعت افزایش می‌یابد جریان متوقف می‌شود، گفته می‌شود که جریان خفه می‌شود. هنگامی که سرعت سیالی که از نازل عبور می‌کند به عدد ماخ ۱ در گلوگاه برسد، جریان بحرانی می‌شود. هنگامی که این اتفاق می‌افتد، هرگونه اختلالی که در پایین دست به سمت گلوگاه کاهنده رخ می‌دهد، بر جریان ورودی از مخزن تأثیر نمی‌گذارد. دستیابی به جریان بحرانی بسیار سودمند است، زیرا هرگونه تغییری

که ممکن است در تأسیسات پایین دست مورد نیاز باشد یا هرگونه فشار یا اختلال جریان دیگری که ممکن است در پایین دست کاهنده رخ دهد، بر جریان بالادست کاهنده تأثیر نمی‌گذارد. این امر تولید مداوم از چاه را بدون توجه به هر موقعیتی در پایین دست کاهنده تضمین می‌کند؛ بنابراین یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش پسماند مایع در چاه‌های گازی طراحی اندازه قطر کاهنده برای مایع زدایی در چاه است [۱۵]؛ بنابراین با شبیه‌سازی در نرم افزار پایپسیم ابتدا اندازه ماسوره مناسب برای کاهنده مورد نظر در سرچاه انتخاب گردید. انتخاب این اندازه با توجه به تأمین فشار خروجی در نقطه نهایی (گره) به مقدار مورد نظر پس از طی طولی مشخص از یک خط لوله کاملاً افقی صورت پذیرفت. با شبیه‌سازی مشخص گردید که مقدار مناسب اندازه ماسوره برای این کاهنده جهت تأمین فشار مناسب مورد نیاز خروجی در نقطه نهایی مقدار ۱/۳۲ اینچ می‌باشد. همچنین با توجه به (شکل ۳) مشخص گردید در صورتی که فشار مخزن به مقدار حدود ۲۴۰۰ پام افت پیدا کند، مایعات هیدروکربنی در مخزن شکل گرفته و به سمت چاه گازی حرکت می‌کنند. با توجه به این مورد نیاز است تا از کاهنده‌ای در سر چاه استفاده شود که علاوه بر توانایی تولید با نرخ مناسب، فشار جریانی ته چاه را به مقداری افزایش دهد تا با تأثیر برافت فشار مشخص شده در (شکل ۵)، از تشکیل مایعات هیدروکربنی در مخزن و چاه جلوگیری کند. به همین منظور در (شکل ۷)، آنالیز حساسیت برای اندازه ماسوره‌های مناسب کاهنده سرچاهی انجام گرفته است تا مناسب‌ترین اندازه برای کاهنده انتخاب شود و بتوان از تشکیل مایعات هیدروکربنی در چاه با تثبیت فشار جریانی ته چاه جلوگیری به عمل آورد. با توجه به (شکل ۷)، انتخاب کاهنده با اندازه کوچک‌تر، شرایط مناسب‌تری را از لحاظ افت فشار برای چاه مورد نظر ایجاد می‌کند. همچنین نرخ تولید گاز به صورت طبیعی از چاه برای هراندازه کاهنده نیز توسط نرم افزار محاسبه گردیده است. بنابراین استفاده از اندازه کاهنده کوچک‌تر نرخ تولید را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد که می‌تواند به نرخ بحرانی تولید پسماند مایع نزدیک‌تر باشد؛ بنابراین نیاز است تا کاهنده مورد نظر علاوه بر جبران افت فشاری که از مخزن تا دهانه چاه ایجاد می‌شود و همچنین نرخ تولید مناسبی را برای چاه مورد نظر در حالت طبیعی فراهم آورد.

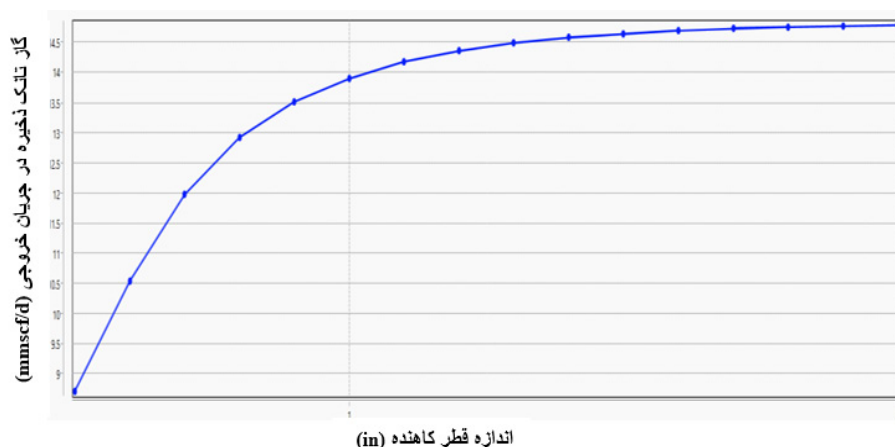
1. Choke





شکل ۷: آنالیز حساسیت اندازه‌های مختلف کاهنده سرچاهی و تأثیر آن بر شرایط فشاری و نرخ تولید از چاه موردنظر

همچنین جهت تعیین بهینه‌ترین نوع کاهنده، انتخاب کاهنده با اندازه مناسب که نرخ جریان مناسبی را داشته باشد اهمیت زیادی دارد. (شکل ۸) نرخ جریان خروجی را بر اساس اندازه کاهنده موردنظر نشان می‌دهد. همان‌طور که پیداست با عبور از یک مقدار بحرانی اندازه کاهنده، نرخ جریان تقریباً به مقدار ثابتی گرایش می‌یابد و می‌توان از لحاظ اقتصادی نیز با انتخاب کاهنده دارای اندازه کوچک‌تر، در هزینه‌های موردنظر صرفه‌جویی کرد.



شکل ۸: نرخ جریان خروجی از چاه با توجه به اندازه کاهنده

۴. نتیجه‌گیری

نرخ بحرانی پسماند مایع در چاه مورد مطالعه توسط نرم‌افزار با توجه به مدل Turner و همکاران در حدود ۶/۲ میلیون فوت مکعب استاندارد روزانه محاسبه گردید. با توجه به نرخ تولید طبیعی از مخزن که مقدار ۱۴/۹ میلیون فوت مکعب استاندارد روزانه را نشان می‌دهد، می‌توان پیش‌بینی نمود تا زمانی که نرخ تولید از چاه کمتر از نرخ بحرانی تجمع مایعات نگردد، مایعات در چاه تجمع نکنند، با این حال ادامه این روند سبب می‌شود تا کسر حجمی مایعات بر گاز غلبه کرده و با گذشت زمان ستون چاه توسط مایعات پر شود. با تولید از چاه از دهانه چاه در مخزن تا ابتدای چاه در سطح زمین، سرعت تجمع مایعات ۲/۲ فوت بر ثانیه افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده این است که در دهانه چاه در مخزن سرعت حرکت مایعات به مراتب از ابتدای چاه کمتر است و این اتفاق می‌تواند سبب تجمع مایعات در ته چاه شوند. به‌منظور بهینه‌سازی تولید گاز از چاه و همچنین کاهش هزینه‌های اقتصادی آنالیز حساسیت برای قطرهای مختلف لوله مغزی انجام گرفت. این آنالیز مشخص می‌کند که کاهش قطر لوله مغزی از مقدار اولیه ۳/۴۷۶ اینچ به مقدار ۲/۹۹۲ اینچ علاوه بر این که تأثیر محدودی بر کاهش نرخ تولید از چاه دارد، می‌تواند بر کاهش هزینه‌های صرف شده نیز تأثیر گذار

Research & Technology (IJERT), Vol. 8, Issue 06, June 2019.

- [5]. Shu Luo, Mohan Kelkar, Eduardo Pereyra, Cem Sarica, "A New Comprehensive Model for Predicting Liquid Loading in Gas Wells" Paper (SPE 172501) Pear Approved, July 2014.
- [6]. Tural Jafarov, Sami Al-Nuaim, "Critical Review of the Existing Liquid Loading Prediction Models for Vertical Gas Wells." OTC-26526-MS, March 2016.
- [7]. Liu Chang. "Advances in Gas Well Fluid Accumulation Modeling." Academic Journal of Science and Technology 5, no. 1 (2023): 169-178.
- [8]. Princewill Maduabuchi Ikpeka, Michael Onyinyechukwu Okolo, "Li and Turner Modified model for Predicting Liquid Loading in Gas Wells" Journal of Petroleum Exploration and Production Technology (2019) 9: 1971-1993.
- [9]. Fahad I. Syed, Salem Alnaqbi, Temoor Muther, Amirmasoud K. Dahaghi, Shahin Negahban, "mart shale gas production performance analysis using machine learning applications." Petroleum Research, Volume 7, Issue 1, March 2022, Pages 21-31.
- [10]. Kingsley Eromoses Abhulimen, K. E. Abhulimen, and A. D. Oladipupo. "Modelling of liquid loading in gas wells using a software-based approach." Journal of Petroleum Exploration and Production Technology 13, no. 1 (2023): 1-17.
- [11]. Abderraouf Chemmakh, Olusegun Stanley Tomomewo, Kegang Ling, Ahmed Shammari, "Evaluation of Liquid Loading in Gas Wells Using Machine Learning" PETROLEUM ENGINEERING

باشد. برای چاه موردنظر آنالیز حساسیت بر روی کاهنده‌های سرچاهی با اندازه‌های مختلف نشان داد که استفاده از کاهنده با اندازه کوچک‌تر می‌تواند تأثیر بسیار زیادی بر کاهش افت فشار مخزن تا دهانه چاه و شکل‌گیری مایعات در مخزن را داشته باشد، به‌طوری‌که کاهنده با اندازه ۰/۷ اینچ شرایط افت فشار را بالاتر از فشار تشکیل ناحیه دوفازی در مخزن قرار می‌دهد. با این حال نرخ تولید از چاه برای استفاده از کاهنده موردنظر نیز باید بررسی گردد. قابل درک است که کاهش اندازه کاهنده باعث کاهش نرخ تولید نیز می‌گردد و افزایش اندازه کاهنده پس از رسیدن به یک مقدار بحرانی، تأثیر چندانی بر افزایش نرخ تولید نخواهد گذاشت؛ بنابراین استفاده از کاهنده با اندازه‌های بین ۰/۷ الی ۰/۹ اینچ می‌تواند نرخ تولید مناسب بین ۱۲ الی ۱۳/۵ میلیون فوت مکعب استاندارد روزانه را در برداشته باشد که بالاتر از نرخ بحرانی پسماند مایع است.

مراجع:

- [1]. Lizda J.Mawarani, Widiyastuti Widiyastuti, and Heru Setyawan. Foams stabilized with silica nanoparticles derived from sodium silicate for gas well liquid unloading. Chemical Papers. 2023 Jan 27:1-0.
- [2]. Mahmoud Hassan Yaqoup, Mustafa Okasha Attijani, Mortada Ahmed Abdalla, Mohammed Hassan Omer, "Prediction of Liquid Loading in Gas Well (A1), and Solve It by Using Velocity String." Sudan University of Science & Technology College of Petroleum Engineering & Technology, Department of Petroleum Engineering, November 2016, pages 1-13.
- [3]. S. Shekhar, M. Kelkar, W. J. Hearn, L.L. Hain, "Improved Prediction of Liquid Loading in Gas Wells." Paper (SPE 186088) Pear Approved, February 2017.
- [4]. Subhashini Sankar, S. Arul Karthi, "Study of Identifying Liquid Loading in Gas Wells and Deliquification Techniques." International Journal of Engineering

- [12].Anton Skopich, Eduardo Pereyra, Cem Sarica, and Mohan Kelkar. "Pipe-diameter effect on liquid loading in vertical gas wells." SPE Production & Operations 30, no. 02 (2015): 164-176.
- [13].Fitrah Arachman, Kalwant Singh, James K. Forrest, and Monas O. Purba. "Liquid unloading in a big bore completion: A comparison among gas lift, intermittent production, and installation of velocity string." In SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, pp. SPE-88523. SPE, 2004.
- [14].James F. Lea Jr, Lynn Rowlan, "Nodal Analysis: Analyzing Loaded Wells." Gas Well Deliquification (Third Edition), Gulf Drilling Guides 2019, Pages 37-45.
- [15].Jagmit Singh, Nozzle design and experimental evaluation to mitigate liquid loading in gas wells. Colorado School of Mines, 2018.



Improving Production Conditions to Avoid Liquid Loading In one of the Vertical Gas Wells in Iran

Mohammad Dousti¹, Masoud Bijani^{2*}, Hamdam Majd Teymouri¹, Sajjad Sepasifar¹

1. Department of Petroleum Engineering, Faculty of Oil and Gas Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
2. Department of Petroleum Engineering, Faculty of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

Article History:

Received: 24 May, 2023

Revised: 04 July 2023

Accepted: 15 August, 2023

Keywords:

Liquid Loading
Vertical flow regimes
Gas production reduction
Two-phase flow regime
Production improvement
Critical rate of liquid loading

ABSTRACT

Liquid Loading is one of the common problems in gas wells that can cause production to stop. This research has tried to investigate the occurrence of this phenomenon in one of Iran's onshore condensate gas fields using PIPESIM software. In this research, the formation of liquids in the gas reservoir in the target field and the behavior of this phenomenon during production from the well and its control methods have been studied. The results of this research show the occurrence of liquid Loading in the well due to overflow in the reservoir of 2200 psi, then the critical rate of liquid loading of 6.2 million cubic feet was calculated by Pipesim software and the appropriate solutions to control the production from the well and LL It was checked by changing the diameter of the tubing and also using a choke, which showed that the use of a reducer and tubing with the right diameter can have a good effect on production control.

DOR: 20.1001.1.25885251.1402.10.1.5.9

How to cite this article

M. Dousti, M. Bijani, H. Majd Teymouri, S. Sepasifar, Improving Production Conditions to Avoid Liquid Loading In one of the Vertical Gas Wells in Iran. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2023; 10(1): 69 -79. (https://www.ijge.irangi.org/article_707974.html)

* Corresponding Author.

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

Available online 20 August 2023

2666-5468/© 2021 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>)



اثر تعادل بخار-مایع بر جذب گاز CO₂ توسط محلول آبی پپرازین و مایع یونی به روش طراحی آزمایش مرکب مرکزی

سهیلا زارع^۱، عبدالرسول پوران فرد^{۲*}

۱. دانشجوی دکترای، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: r.pouranfard@yu.ac.ir

مقاله علمی-ترویجی

صفحه ۸۰ - ۹۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲

چکیده

در این پژوهش، جذب گاز CO₂ توسط محلول آبی پپرازین و مایع یونی به روش سطح پاسخ (RSM) بر اساس طراحی مرکب مرکزی (CCD) به منظور طراحی آزمایش‌ها، ساخت مدل‌ها و یافتن شرایط عملیاتی بهینه برای دستیابی به پاسخ‌های مطلوب در محدوده دما، فشار و زمان مورد بررسی قرار گرفت. طراحی و بهینه‌سازی این گروه از واحدهای جداسازی، مستلزم داشتن داده‌های دقیق تعادلی و ترمودینامیکی بخار-مایع می‌باشد. در این تحقیق، شرایط بهینه‌ی بارگیری گاز CO₂ با استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی تعیین گردید. تجزیه و تحلیل معادلات، مطابق رگرسیون چندجمله‌ای درجه دوم و تحلیل واریانس ANOVA انجام شد. مطابق نتایج به دست آمده، افزایش فشار و زمان و کاهش دما، منجر به افزایش میزان حلالیت گاز دی‌اکسید کربن در مخلوط آمینی گردید. شرایط بهینه‌ی جذب نیز در فشار ۶/۱ bar، دمای ۲۱ °C و زمان ۱/۵ ساعت به دست آمد. در انتها، مکانیزم تأثیر دما بر میزان حلالیت با اصل لوشاتلیه، تأثیر فشار بر حلالیت با قانون هنری و تأثیر زمان بر حلالیت با بررسی سینتیکی واکنش جذب تعیین گردید.

کلیدواژه‌ها: جذب گاز دی‌اکسید کربن، مخلوط آبی آمین پپرازین و مایع یونی، تعادل بخار-مایع، روش مرکب مرکزی

۱. مقدمه

با شیوه‌ی زندگی ساکنان شهرهای جهان دارد [۲،۱]. دی‌اکسید کربن در بین گازهای گلخانه‌ای موجود در جو، دارای بیشترین تأثیر بر پدیده‌ی گرمایش زمین می‌باشد. CO₂ موجود در اتمسفر به عنوان سپر حرارتی زمین عمل می‌کند و با اثر گلخانه‌ای طبیعی مانع از سرد شدن زمین می‌شود. البته، غلظت‌های بالای دی‌اکسید کربن در جو که از سوخت‌های فسیلی حاصل می‌شود، به عنوان آلاینده‌ی جوی به شمار می‌رود [۳]. بر اساس گزارشات استانداردهای سازمان ایمنی و بهداشت شغلی^۱ (OSHA) تاکنون اثراتی از سرطان‌زایی در

اکوسیستم کروی زمین به مثابه‌ی سیستم یکپارچه‌ای است که هر شوکی بر هر ناحیه‌ی آن، بر کل سیستم اثر می‌گذارد. از این رو، مخاطرات و چالش‌های زیست‌محیطی، نه تنها یک مسئله‌ی داخلی، بلکه یک مسئله‌ی جهانی است. اهمیت این موضوع در رابطه با آلودگی هوا بیش از هر عامل دیگری نمود دارد. از آنجاکه مرزی در جو وجود ندارد، انتشار گازهای گلخانه‌ای در یک مکان و زمان معین می‌تواند باگذشت زمان، در یک مکان دیگر اثر خود را نمایان سازد. نکته‌ی قابل توجه آن است که تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای، رابطه‌ی معناداری

1. Occupational Safety and Health Administration

خصوص این گاز مشاهده نشده است. همچنین، مطالعات در خصوص کارگرانی که به‌طور مداوم با مقادیر زیاد گاز CO_2 در تماس بوده‌اند، نشان داده است که مواجهه با میزان $1/5$ درصد برای 42 تا 44 روز باعث ایجاد تداخل برگشت‌پذیر در تعادل اسیدیته‌ی خون می‌گردد و این میزان مواجهه باعث می‌شود که عمق تنفس برای فرد زیاد شود [۴]. با توجه به اینکه CO_2 گازی تقریباً بی‌بو و بی‌رنگ است، تشخیص آن در محیط در مقادیر کمتر از 40 درصد مشکل بوده و تشخیص مسمومیت با آن نیز دشوار می‌باشد؛ زیرا علائم مسمومیت با دی‌اکسید کربن مشابه مسمومیت با تعداد زیادی از آلاینده‌هاست و دارای اثرات اختصاصی نیست [۵]. دانشمندان بر این باورند که اگر روند تولید گازهای گلخانه‌ای همچنان رو به افزایش باشد، در آن صورت آهنگ پدیده‌ی گرمایش زمین سریع‌تر خواهد شد و طی پنجاه سال آینده این افزایش دما به 3 الی 5 درجه‌ی سانتی‌گراد خواهد رسید [۶]. حتی اگر از همین امروز تولید گازهای گلخانه‌ای متوقف گردد، این افزایش دما طی بیست سال آینده به یک درجه‌ی سانتی‌گراد خواهد رسید. هرچند این مقدار افزایش دما چندان زیاد به نظر نمی‌رسد، اما می‌تواند موجب تغییرات شدیدی در وضعیت پدیده‌های جوی و میزان بارندگی‌ها شده و تأثیرات ویرانگر بر جای بگذارد. به گزارش مجله‌ی نشنال جئوگرافیک، به علت افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرم شدن زمین تا سال 2050 بیش از یک میلیون گونه‌ی گیاهی و جانوری در معرض انقراض قرار خواهند گرفت و توزیع جغرافیایی خیلی از گونه‌های جانوری نیز تغییر خواهد کرد [۷]. سازمان ملل در گزارش اخیر خود به تلفات خسارات و هزینه‌ی سنگین، بروز طغیان آب، خشک‌سالی‌ها، قحطی و موج فزاینده‌ی گرما اشاره داشته و آن‌ها را از جمله بلایای طبیعی انسان ساخت بر اثر تولید گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسید کربن می‌داند. آمارها نشان می‌دهد به ازای افزایش یک درجه‌ی سانتی‌گراد دما، 3 درصد به میزان مرگ‌ومیر افزوده می‌شود [۸].

جداسازی دی‌اکسید کربن از طریق جذب آن در یک حلال فیزیکی و شیمیایی، یک تکنولوژی تجاری شده است که به مدت 60 سال در صنعت گاز طبیعی مورد استفاده قرار گرفته و به‌عنوان بالغ‌ترین فرآیند در جداسازی گاز دی‌اکسید کربن و همچنان به‌عنوان یک فناوری به‌روز، در نظر گرفته می‌شود. اساس جذب شیمیایی یا واکنشی، واکنش دی‌اکسید کربن با حلال است که این واکنش، موجب افزایش نیروی محرکه‌ی انتقال جرم، به دلیل کاهش فشار جزئی تعادلی دی‌اکسید کربن در سطح مشترک گاز-مایع و افزایش ضریب انتقال

جرم فاز مایع، می‌گردد. این واکنش برگشت‌پذیر بوده و تعادل آن وابسته به دما است. فشار جزئی دی‌اکسید کربن در گاز دودکش پس از احتراق، معمولاً در محدوده‌ی $3-15$ KPa است؛ بنابراین، جذب شیمیایی از آنجایی که حلال‌های شیمیایی به فشار جزئی وابستگی کمتری دارند، محتمل‌ترین تکنولوژی مورد استفاده برای جداسازی دی‌اکسید کربن در فشارهای جزئی پایین است. در جذب شیمیایی، به شدت جریان کمتری از حلال در مقایسه با جذب فیزیکی به دلیل افزایش ظرفیت حلال، نیاز است؛ اما همان‌طور که ذکر شد، نیاز به انرژی برای احیاء حلال یا فرآیند دفع، به دلیل انجام واکنش‌های شیمیایی، بیشتر می‌شود [۹]. توانایی یک حلال شیمیایی در جداسازی CO_2 به میزان حلالیت تعادلی و نیز مقدار انتقال جرم و سینتیک واکنش بستگی دارد. نجف‌لو (۲۰۱۹) در پژوهشی به مدل‌سازی ترمودینامیکی جذب دی‌اکسید کربن در محلول دی‌متانول آمین پرداخت. در این پژوهش به‌منظور تعیین حلالیت گاز کربن دی‌اکسید در محلول آبی متیل دی‌اتانول آمین (MDEA) از معادله حالت SAFT-HR استفاده نمود و با استفاده از پارامترهای تنظیم شده در این پژوهش، برای بازه دمایی $298-313/4$ کلوین و بازه فشاری $36-11/75$ کیلو پاسکال، پیش‌بینی حلالیت تعادلی کربن دی‌اکسید انجام گردید [۱۰]. پاشایی و همکارانش (۲۰۲۰) به مدل‌سازی تجربی و بهینه‌سازی جذب CO_2 توسط پپیرازین با استفاده از روش RSM-CCD پرداختند. در این پژوهش به حداکثر راندمان حذف $97/9$ درصد، سرعت جذب g/min $3/12$ و میزان لودینگ mol/mol $258/0$ دست یافتند [۱۱]. رشیدی و همکارش (۲۰۲۳) به مدل‌سازی سطح پاسخ فرآیند جذب CO_2 حلال متیل دی‌اتانول آمین-پپیرازین بدون آب پرداختند. در این مطالعه تأثیر عوامل مختلفی از جمله غلظت متیل دی‌اتانول آمین-پپیرازین $30-50$ درصد وزنی، دما $20-$ 40 درجه سانتی‌گراد، جریان ورودی حلال $3-9$ میلی‌لیتر در دقیقه و غلظت دی‌اکسید کربن $5-15$ درصد حجمی ارزیابی کردند. به‌منظور طراحی آزمایش‌ها و مدل‌سازی نتایج از روش سطح پاسخ Box-Behnken استفاده نمودند. ترتیب اثر متغیرها بر راندمان حذف CO_2 بدین شرح بود؛ سرعت جریان حلال $> 49/55$ درصد) غلظت حلال $> 24/59$ درصد) دمای جذب $> 18/05$ درصد). بالاترین راندمان حذف CO_2 با $94/62$ درصد در دمای بهینه 30 درجه سانتی‌گراد و غلظت 10 درصد حجمی CO_2 ، و همچنین حداکثر غلظت آمین و جریان حلال به دست آوردند [۱۲]. در این تحقیق، جذب گاز CO_2 توسط مخلوط آمینی آبی پپیرازین و مایع یونی به‌صورت آزمایشگاهی





بررسی گردیده است. این ترکیب بهینه‌ی مخلوط آمینی با استفاده از روش طراحی رئوس حدی تعیین شد. مخلوط آمینی مورد استفاده در این پژوهش شامل آب، پپرازین و ۱- بوتیل-۳- متیل ایمیدازولیوم هیدروژن سولفات بوده است. در این پژوهش به‌عنوان یک ترکیب نوین در جداسازی گاز دی‌اکسید کربن بهره گرفته شد [۱۳]. همچنین، از روش سطح پاسخ (RSM)، بر اساس روش طراحی مرکب مرکزی (CCD) به‌منظور طراحی آزمایش‌ها، ساخت مدل‌ها و یافتن شرایط عملیاتی بهینه برای دستیابی به پاسخ‌های مطلوب در محدوده‌ی دما، فشار و زمان استفاده شده است. این نوع طراحی پرکاربردترین روش سطح پاسخ می‌باشد. همچنین در این روش تعداد ۵ سطح را اعمال می‌کند و یک روش چرخش‌پذیر می‌باشد. در روش CCD هر فاکتور پنج سطح متفاوت دارد (شامل سه نقطه در داخل حدود مشخص شده برای هر عامل و دو نقطه خارج از حدود مشخص شده برای هر عامل است [۱۴]).

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مواد مورد استفاده

در این پژوهش آب یون‌زدایی شده^۱، نیتریک اسید^۲، هیدروکلریک اسید^۳، سولفوریک اسید^۴، پپرازین^۵، گاز نیتروژن^۶، سدیم هیدروکسید^۷، ۱- بوتیل-۳- متیل ایمیدازولیوم هیدروژن سولفات^۸، پتاسیم کلرید^۹، سدیم کلرید^{۱۰}، تهیه و استفاده شده است. تنظیم pH با استفاده از pH متر مدل Metrohm827 ساخت شرکت متروهم انجام شد. وزن کردن نمونه‌ها با استفاده از ترازوی سرتیوس مدل TE1245 با دقت $0.0001 \pm$ انجام گرفت.

۲-۲. راکتور جذب

راکتور جذب گاز دی‌اکسید کربن، شامل سه دهانه می‌باشد که دهانه بالایی راکتور به قطر داخلی ۲۵ میلی‌متر به سنسور فشار متصل می‌باشد. دهانه‌ی سمت چپ جهت ورود گاز تعبیه شده است. دهانه‌ی سمت راست به قطر داخلی ۲۰

میلی‌متر می‌باشد که جهت تسهیل در ورود و خروج حلال و همچنین شستشوی راکتور بر روی دیواره راکتور تعبیه گردیده است. با توجه به اینکه در طی فرآیند جذب دمای راکتور باید ثابت نگه‌داشته شود، بنابراین، جهت ثابت نگه‌داشتن دمای آن یک هیتر در زیر راکتور قرار داده و دمای آن را توسط ترمومتر مرتباً اندازه‌گیری نموده تا در طول فرآیند ثابت نگه‌داشته شود. در طول آزمایش، راکتور بر روی هیتر قرار گرفته و دمای آن کنترل گردیده است. علاوه بر این، با استفاده از هیتر آزمایشات را در دماهای مختلفی انجام داده و نقش دما را در فرآیند جذب گاز مورد بررسی قرار گرفت. بعلاوه، تغییرات فشار توسط کنترلر الکتریکی فشار اندازه‌گیری شده است. این کنترلر دارای ترانسیمتر خازنی بوده که در مقابل شوک‌های لحظه‌ای پایدار و از ثبات فیزیکی خوبی برخوردار می‌باشد.

۲-۳. آزمایش جذب گاز

به‌منظور انجام آزمایش جذب گاز دی‌اکسید کربن، ابتدا مقدار معینی از حلال پپرازین با غلظت مشخص تهیه نموده، سپس توسط سرنگ حلال مورد نظر به درون راکتور تزریق شده، دهانه‌ی ورودی حلال را کاملاً بسته و بلافاصله پمپ خلأ را روشن نموده تا اینکه سیستم تعادلی تحت خلأ قرار گیرد. سپس، المنت داخل حمام آب را روشن نموده تا اینکه دمای حمام به مقدار مورد نظر برسد. با افزایش دمای حمام، فشار داخل راکتور کمی افزایش یافته و در نهایت ثابت می‌گردد. زمانی که دمای حمام آب به دمای موردنظر آزمایش برسد، در این هنگام فشار اندازه‌گیری شده توسط سنسور فشار ثبت و یادداشت می‌گردد. این فشار را فشار بخار حلال نامیده و با P_0 نشان داده می‌شود.

۲-۴. محاسبات اندازه‌گیری ظرفیت تعادلی حلال

در این محاسبات، P_0 فشار بخار حلال، P_{TI} فشار درون بالن (فشار کل) که برابر با مقدار دی‌اکسید کربن خالص ورودی به راکتور می‌باشد. P_{CO_2} برابر با فشار جزئی اولیه دی‌اکسید کربن می‌باشد و از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌گردد.

1. De-Ionized Water
2. Nitric Acid
3. Hydrochloric Acid
4. Sulfuric Acid
5. Piperazine
6. Nitrogen Gas
7. Sodium Hydroxide
8. 1-butyl-3-methyl-imidazoliumhydrogen sulphate
9. Potassium Chloride
10. Sodium Chloride

$$P_{CO_{2i}} = P_{T1} - P_o \quad (1)$$

با داشتن مقادیر دما، حجم رآکتور و فشار جزئی دی اکسید کربن، تعداد مول دی اکسید کربن ورودی به رآکتور را طبق قانون گازهای ایده آل به دست آورده و با n_1 نشان داده می شود.

$$n_1 = \frac{v \times P_{CO_{2i}}}{ZRT} \quad (2)$$

سپس، به سیستم زمان داده شده تا فشار داخل رآکتور افت کرده و در نهایت، به حالت تعادل برسد. زمانی که فشار داخل رآکتور ثابت گردید، زمان تعادل فرا رسیده است. در این زمان، فشار کل داخل بالن با P_{T2} نشان داده می شود. فشار جزئی تعادلی یا نهایی رآکتور با $P_{CO_{2f}}$ نشان داده شده و از رابطه (۳) محاسبه می گردد.

$$P_{CO_{2f}} = P_{T2} - P_o \quad (3)$$

تعداد مول دی اکسید کربن باقی مانده در داخل رآکتور از معادله (۴) به دست می آید.

$$n_2 = \frac{v \times P_{CO_{2f}}}{ZRT} \quad (4)$$

تعداد مول دی اکسید کربن جذب شده از معادله (۵) محاسبه می گردد.

$$n = n_1 - n_2 \quad (5)$$

با داشتن تعداد مول حلال ورودی به رآکتور، مقدار ظرفیت جذب دی اکسید کربن طبق معادله (۶) به دست آمده و با α نشان داده می شود.

$$\alpha = \frac{n_{CO_2}}{\text{mole solvent}} \quad (6)$$

۲-۵. طراحی آزمایش مرکب مرکزی

در روش طراحی آزمایش^۱، آزمایش به گونه ای طرح ریزی می شود که به منظور رسیدن به پاسخ، فاکتورها به صورت هم زمان باهم آزمایش می شود. چارچوب اصلی طراحی آزمایش بر اساس یکسری طرح های استاندارد است که برهم کنش بین فاکتورها در نظر گرفته شده و همچنین، با تعداد آزمایشات کمتری می توان به نقطه ی بهینه ی نهایی رسید. پیش نیاز انجام مرحله ی بهینه سازی در طراحی آزمایش

(DOE)، مرحله ی غربال گری^۲ است. منظور از غربال گری انتخاب فاکتورهای مؤثر بر فرآیند می باشد که بهینه سازی این فاکتورهای تأثیرگذار، به منظور رسیدن به نقطه ی بهینه نهایی انجام می گردد. منظور از بهینه سازی یافتن سطوحی از فاکتورهای مؤثر برای آزمایش است که پاسخ آزمایش (بسته به هدف آن) حداکثر و یا حداقل گردد که در اینجا بایستی سطوحی از فاکتورهای مؤثر را به دست آورد که در آن راندمان حذف دی اکسید کربن حداکثر شود.

۲-۵-۱. غربال گری و تعیین پارامترهای اثرگذار بر فرآیند

آزمایش های غربال گری که شامل طرح های دو سطحی می باشند [۱۴]، به منظور تعیین برهم کنش ها و متغیرهای مهم آزمایشگاهی انجام می شوند. علاوه بر این، میزان تأثیر هر کدام از فاکتورهای تحت بررسی بر روی پاسخ سیستم (تخمین اثر) به صورت مقایسه ای به دست می آید.

۲-۵-۲. بررسی برهم کنش پارامترهای مؤثر بر فرآیند جذب و تعیین مقادیر بهینه ی پارامترها

در این پژوهش، میزان جذب دی اکسید کربن به عنوان هدف آزمایش تعیین شده و با استفاده از روش غربال گری در نرم افزار مینی تب، سه پارامتر دما (T) و فشار (P) مخلوط آمینی و همچنین زمان انجام فرآیند جذب، به عنوان متغیرهای اثرگذار بر آزمایش شناخته شدند. در روش پاسخ سطحی، اثرات پارامترهای مؤثر به صورت خطی، درجه دوم و برهم کنش های دوتایی بررسی می شوند. در (جدول ۱) سطوح مورد آزمایش متغیرها ارائه شده است.

جدول ۱: محدوددهی متغیرهای در نظر گرفته شده در طراحی آزمایش مرکب مرکزی

متغیرهای آزمایش	محدوده ی متغیرها				
	$-\alpha$	-۱	۰	+۱	$+\alpha$
فشار (bar)	۷/۴	۶	۴	۲	۰/۶
دما (°C)	۴۶/۸	۴۰	۳۰	۲۰	۱۳/۱
زمان (ساعت)	۷/۹	۶/۵	۴/۵	۲/۵	۱/۱

میزان ظرفیت جذب به عنوان متغیر پاسخ تعیین شد که با استفاده از محاسبات انجام شده جهت اندازه گیری ظرفیت

1. Design of Experiment
2. Screening





تعادلی حلال در بخش ۲-۳ محاسبه می‌شود. اکنون، با استفاده از الگوریتم طراحی مرکب مرکزی^۱ آزمایش‌های تعیین شرایط بهینه‌ی فرآیند جذب دی‌اکسید کربن طراحی می‌گردد. آزمایش‌های طراحی‌شده در (جدول ۲) نشان داده شده است.

جدول ۲: طراحی آزمایش مرکز ثقل ساده برای یافتن شرایط بهینه‌ی فرآیند جذب CO₂

آزمایش	فشار (P)	دما (T)	زمان (t)
۱	۴	۴۶/۸	۴/۵
۲	۴	۳۰	۴/۵
۳	۶	۴۰	۲/۵
۴	۴	۳۰	۴/۵
۵	۴	۱۳/۱	۴/۵
۶	۲	۴۰	۶/۵
۷	۴	۳۰	۴/۵
۸	۴	۳۰	۷/۹
۹	۲	۲۰	۲/۵
۱۰	۰/۶	۳۰	۴/۵
۱۱	۴	۳۰	۴/۵
۱۲	۶	۲۰	۲/۵
۱۳	۶	۴۰	۶/۵
۱۴	۲	۲۰	۶/۵
۱۵	۲	۴۰	۲/۵
۱۶	۶	۲۰	۶/۵
۱۷	۷/۴	۳۰	۴/۵
۱۸	۴	۳۰	۴/۵
۱۹	۴	۳۰	۴/۵
۲۰	۴	۳۰	۱/۱

۳. بررسی چگونگی تأثیر عوامل مؤثر بر فرآیند جذب نرم‌افزار طراحی آزمایش، در واقع به بررسی برهم‌کنش و بهینه‌سازی فرآیند جذب می‌پردازد. درحالی‌که غالب بررسی‌های علمی مستلزم مطالعه‌ی تأثیر تک عاملی یک فاکتور بر متغیر پاسخ می‌باشد. لذا، پس از بهینه‌سازی فرآیند، اثر هر پارامتر بر فرآیند به‌طور جداگانه بررسی می‌گردد.

۳-۱. اثر فشار

بر اساس قانون هنری، فشار بر میزان انحلال‌پذیری دی‌اکسید کربن در مخلوط آمینی تأثیرگذار است [۱۵]. بررسی اثر فشار بدین‌صورت انجام می‌پذیرد که ابتدا ۵۰۰ میلی‌لیتر از ترکیب آمینی بهینه درون رآکتور ریخته می‌شود و دما و زمان در مقادیر بهینه محاسبه شده توسط نرم‌افزار در مرحله‌ی قبل ثابت نگه‌داشته می‌شود. سپس، شیر کپسول دی‌اکسید کربن را باز کرده تا گاز به درون رآکتور تزریق شود. زمانی که فشار رآکتور به میزان موردنظر رسید، شیر بسته می‌شود تا اینکه فرآیند جذب آغاز شود. این عمل در چندین فشار انجام می‌گیرد تا اینکه منحنی تغییرات میزان جذب CO₂ با تغییرات فشار ترسیم گردد.

۳-۲. اثر دما

توابع ترمودینامیکی مورد بررسی در فرآیند جذب و دفع گاز، تابعیت دمایی دارند. لذا، دمای محلول در طی فرآیند جذب، بر مکانیزم جذب مؤثر است [۱۶]. به‌منظور بررسی اثر دما، رآکتور در دماهای مختلف قرار داده شد. درحالی‌که دمای ظروف کنترل می‌شد، ۵۰۰ میلی‌لیتر از مخلوط آمینی با ترکیب بهینه به درون رآکتور تزریق شد و در فشار بهینه به‌اندازه‌ی کافی زمان داده شد تا اینکه فرآیند جذب به‌طور کامل انجام گیرد. پس از اتمام فرآیند جذب، میزان جذب توسط محاسبات ظرفیت جذب تعیین گردید.

۳-۳. اثر زمان

زمان رسیدن به تعادل، یکی از فاکتورهای مهم در فرآیند جذب گاز CO₂ توسط مخلوط آمینی می‌باشد. اطلاعات سینتیکی، ارزش عملی بسیار زیادی دارد و بیان‌گر سرعت جذب گونه‌ی جذب‌شونده در محلول بوده و زمان رسیدن به تعادل را کنترل می‌کند [۱۷]. به‌منظور بررسی اثر زمان و به دست آوردن زمان به تعادل رسیدن فرآیند جذب، پس از تنظیم فشار و دمای مخلوط آمینی با ترکیب بهینه، فرآیند

مرحله‌ی بعد از طرح‌ریزی آزمایش، انجام آزمایش‌های طراحی‌شده است. بدین‌صورت که ۵۰۰ میلی‌لیتر از مخلوط آمینی با ترکیب بهینه‌ی مرحله‌ی قبل تهیه شده و به درون رآکتور شارژ می‌شود. سپس، فرآیند جذب دی‌اکسید کربن مطابق روش ارائه شده در بخش (۳-۲) با تنظیم پارامترهای مؤثر بر فرآیند در مقادیر خواسته شده توسط نرم‌افزار طراحی آزمایش انجام می‌گیرد. نتایج بهینه‌سازی در بخش (۴-۲) گزارش شده است.

1. Central Composite Design

جذب گاز مانند قبل انجام شده و تعداد مول‌های جذب‌شده محاسبه می‌گردد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

۴-۱. نتایج طراحی آزمایش مرکب مرکزی برای تعیین شرایط بهینه‌ی جذب گاز CO₂

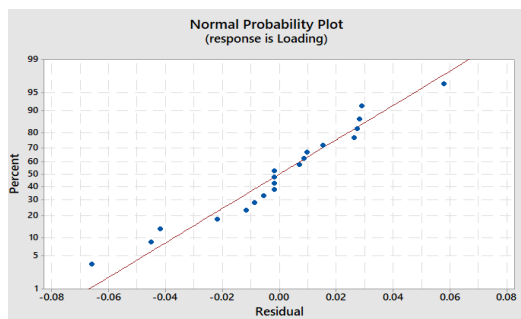
این طراحی آزمایش نیز با سطح اطمینان ۹۵ درصد و استفاده از یک مدل درجه دوم در یک بلاک با تعداد ۲۰ آزمایش و متغیر پاسخ ظرفیت جذب تحلیل شد که نتایج به‌دست‌آمده در (جدول ۳) ارائه شده است.

جدول ۳: نتایج طراحی آزمایش مرکب مرکزی برای یافتن شرایط بهینه‌ی فرآیند جذب CO₂

آزمایش	فشار (P)	دما (T)	زمان (t)	ظرفیت جذب CO ₂
۱	۴	۴۶/۸	۴/۵	۱/۴۰
۲	۴	۳۰	۴/۵	۱/۴۸
۳	۶	۴۰	۲/۵	۱/۵۲
۴	۴	۳۰	۴/۵	۱/۵۱
۵	۴	۱۳/۱	۴/۵	۱/۵۳
۶	۲	۴۰	۶/۵	۱/۴۲
۷	۴	۳۰	۴/۵	۱/۴۷
۸	۴	۳۰	۷/۹	۱/۴۶
۹	۲	۲۰	۲/۵	۱/۴۶
۱۰	۰/۶	۳۰	۴/۵	۱/۴۴
۱۱	۴	۳۰	۴/۵	۱/۴۸
۱۲	۶	۲۰	۲/۵	۱/۷۲
۱۳	۶	۴۰	۶/۵	۱/۴۶
۱۴	۲	۲۰	۶/۵	۱/۵۱
۱۵	۲	۴۰	۲/۵	۱/۴۵
۱۶	۶	۲۰	۶/۵	۱/۸۰
۱۷	۷/۴	۳۰	۴/۵	۱/۶۵
۱۸	۴	۳۰	۴/۵	۱/۴۸
۱۹	۴	۳۰	۴/۵	۱/۴۸
۲۰	۴	۳۰	۱/۱	۱/۵۰

۴-۲. تجزیه و تحلیل آماری مدل مرکب مرکزی

داده‌های آزمایشی به نرم‌افزار طراحی آزمایش داده شده و توسط یک مدل برازشی درجه دوم با لحاظ کردن اثرات دوتایی فراخوانی می‌شوند. سپس، با استفاده از مدل مرکب مرکزی بهینه‌سازی انجام می‌گیرد [۱۸]. لذا، در این مرحله نیز مشابه طرح آزمایش قبل، ابتدا بایستی کفایت مدل بررسی شده و نتایج بهینه‌سازی گزارش شود که این بررسی، همانند قبل با استفاده از جداول و شکل‌های مربوط به واریانس داده‌ها انجام می‌گیرد. برای بررسی کفایت مدل چهار فرض در نظر گرفته می‌شود. فرض اول در خصوص توزیع طبیعی داده‌ها می‌باشد. واریانس داده‌ها نباید در یک نقطه تجمع محسوسی داشته باشد؛ یعنی انحراف داده‌ها بیش از حد معینی قابل قبول نیست و توزیع جمعیت باقی‌مانده‌ها باید یک فرم گوسی^۱ داشته باشد. توزیع نرمال یا تابع گوسی، یکی از مهم‌ترین احتمالات توزیعی پیوسته در قضایای احتمال است. علت اهمیت این منحنی توزیعی، هم‌خوانی نسبتاً زیاد واریانس داده‌های حاصل از آزمایش، هنگام نوسان‌های طبیعی و فیزیکی حول یک مقدار ثابت، با مقادیر حاصل از این توزیع است. علت این موضوع، همان‌طور که قبلاً گفته شد، نقش بنیادین توزیع نرمال در اصل حد مرکزی است [۱۹]. در طرح آزمایش حاضر، بررسی احتمال نرمال بودن داده‌ها، با بهره‌گیری از نمودارهای احتمال و بافت‌نگار (شکل‌های ۱ و ۲) انجام می‌گیرد. در نمودار ترسیم احتمال نرمال (شکل ۱) بهترین خط از مقادیر باقی‌مانده عبور داده شده و اگر داده‌ها انحراف کمی از خط رگرسیونی داشته باشند، مشخص می‌شود که داده‌ها یک پراکندگی طبیعی دارند. به‌عنوان مثال اگر خط عبوری اندکی پهن‌تر شود و بتواند تمام داده‌ها را پوشش دهد، میزان تطابق قابل قبول است. (شکل ۱) به‌خوبی این شرط را اقناع می‌کند.



شکل ۱: نمودار احتمال در طرح آزمایش شرایط بهینه‌ی فرآیند جذب CO₂

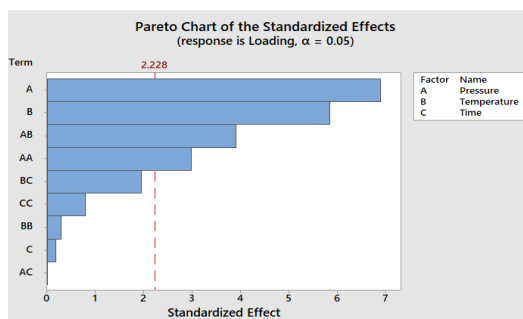
1. Gaussian





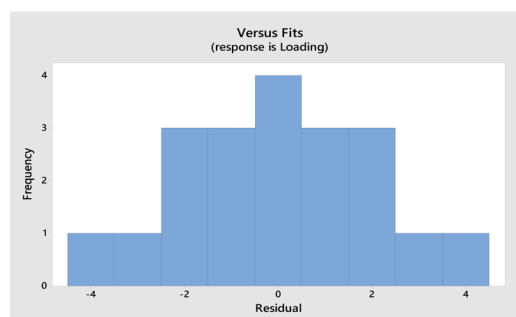
شکل ۴: نمودار باقی‌مانده در طرح آزمایش شرایط بهینه‌ی فرآیند جذب CO_2

نمودار دیگری که به‌منظور بررسی پارامترهای اثرگذار بر فرآیند بررسی می‌گردد، نمودار پارتو^۲ (شکل ۵) می‌باشد. نمودار پارتو از ۹ نمودار میله‌ای و یک نمودار خطی تشکیل شده است. نمودارهای میله‌ای که دارای یک روند نزولی می‌باشند، نشان‌دهنده‌ی تک‌تک تأثیرات آزمایش (اثرات خطی متقابل و درجه دوم) به‌صورت مجزا بوده و خط‌چین قرمز رنگ معرف مقدار کل می‌باشد. محور عمودی معرف نوع تأثیر است، این در حالی است که محور افقی درصد تجمعی را نمایش می‌دهد. نمودار پارتو به‌منظور تعیین مهم‌ترین عامل در میان مجموعه‌ای از عوامل استفاده می‌گردد. این نمودار در فرآیند کنترل کیفیت نشان‌دهنده‌ی عوامل وقوع شایع‌ترین نقایص است [۲۰]. در این منحنی یک خط به‌عنوان مبنا قرار می‌گیرد (در اینجا ۲/۲۲۸)، هر نمودار میله‌ای که خط را قطع کند، به‌عنوان یک پارامتر اثرگذار شناخته شده و نمودارهایی که قبل از خط قرار بگیرند، بر فرآیند اثرگذار نیستند. همچنین، از پایین به بالا اثرگذاری پارامترها افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که اثر متقابل فشار-دما کمترین اثرگذاری و اثر درجه اول فشار بیشترین تأثیر را بر میزان جذب دی‌اکسید کربن دارد.



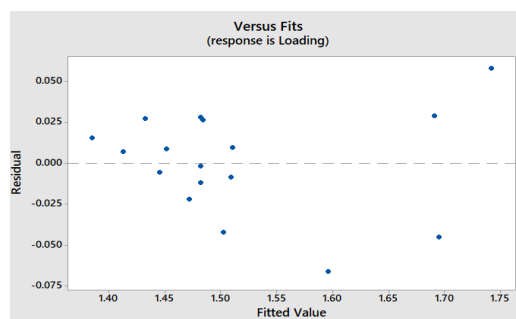
شکل ۵: نمودار پارتو در طرح آزمایش شرایط بهینه‌ی فرآیند جذب CO_2

به‌طور مشابه نمودار بافت‌نگار (شکل ۲)، نیز باید یک فرم گوسی داشته باشد تا اینکه بتوان آن را برآمده از یک جمعیت داده‌ی طبیعی فرض کرد که در شکل (۲) این فرم کاملاً مشهود بوده و داده‌ها دارای یک توزیع طبیعی هستند.



شکل ۲: نمودار بافت‌نگار در طرح آزمایش شرایط بهینه‌ی فرآیند جذب CO_2

ثابت بودن واریانس داده‌ها، دومین فرضی است که بررسی می‌شود. بر این اساس، اگر ترسیم مقادیر باقی‌مانده برحسب مقادیر تخمین زده شده از روند^۱ مشخصی تبعیت نکند و جهت خاصی نداشته باشد، شرط ثابت بودن واریانس داده‌ها برقرار است که در (شکل ۳) پخشیدگی داده‌ها کاملاً نمایان است.



شکل ۳: نمودار نقطه‌ای در طرح آزمایش شرایط بهینه‌ی فرآیند جذب CO_2

سومین شرط مورد بررسی، فرض استقلال داده‌ها نسبت به زمان می‌باشد. بررسی این شرط بدین منظور است که نشان دهد واریانس داده‌های حاصل از آزمایش تابعیت زمانی ندارد و روند تغییرات باقی‌مانده‌ها با زمان به‌صورت نوسانی بوده و از الگوی خاصی تبعیت نمی‌کند. در (شکل ۴) محور افقی ترتیب انجام ۲۰ آزمایش را به‌صورت تصادفی برای سه پارامتر اثرگذار بر فرآیند نشان می‌دهد و محرز است که نمودار روند خاصی را نشان نمی‌دهد و واریانس مستقل از زمان می‌باشد.

1. Trend
2. Pareto Chart

۳-۴. آنالیز واریانس مدل مرکب مرکزی

چهارمین شرط کفایت، بحث صحت مدل می‌باشد که از نمودار خاصی قابل دست‌یابی نیست و با استفاده از درصدهای خطا (R^2) مشخص می‌شود [۲۱]. طبق جدول (۴)، مقادیر R^2 و R^2 تعدیل‌شده به ترتیب ۹۵/۶۸ درصد و ۹۲/۰۷ درصد می‌باشد. R^2 تعدیل‌شده نسبت به R^2 رگرسیون نتایج دقیق‌تری

را نشان می‌دهد، زیرا به‌جای استفاده از مجموع مربعات از میانگین مربعات استفاده می‌کند. مزیت این کار دخیل کردن درجه‌ی آزادی به‌عنوان شاخصه‌ی عوامل مؤثر بر آزمایش می‌باشد. نتایج برازش از انطباق مناسب داده‌ها بر مدل حکایت دارد که این مؤید صحت مدل است.

جدول ۴: آنالیز واریانس طرح آزمایش مرکب مرکزی

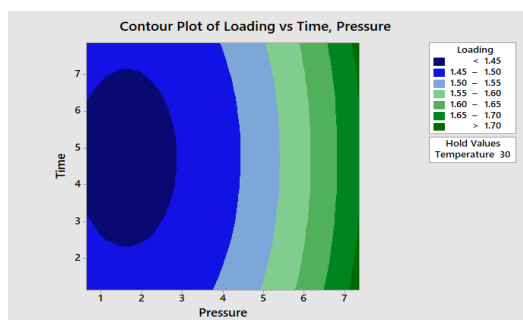
منبع	درجه‌ی آزادی	خطای مجموع مربعات	خطای میانگین مربعات	F-value	p-value	میزان تأثیر
مدل	۹	۰/۱۷۴۰	۰/۰۱۹۳	۱۲/۲۳	۰/۰۰۰۰	کاملاً تأثیرگذار
اثر درجه اول فشار	۱	۰/۰۷۵۲	۰/۰۷۵۲	۴۷/۵۶	۰/۰۰۰۲	کاملاً تأثیرگذار
اثر درجه اول دما	۱	۰/۰۵۴۰	۰/۰۵۴۰	۳۴/۱۶	۰/۰۰۰۲	کاملاً تأثیرگذار
اثر درجه اول زمان	۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۳	۰/۰۰۰۸	بدون تأثیر
اثر متقابل فشار-دما	۱	۰/۰۲۴۲	۰/۰۲۴۲	۱۵/۳۱	۰/۵۳۲۰	کاملاً تأثیرگذار
اثر متقابل فشار-زمان	۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰۰۰	بدون تأثیر
اثر متقابل دما-زمان	۱	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۶۱	۳/۸۳	۰/۲۳۰۰	بدون تأثیر
اثر درجه دوم فشار	۱	۰/۰۱۴۱	۰/۰۱۴۱	۸/۹۴	۰/۰۰۰۰	تأثیرگذار
اثر درجه دوم دما	۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۸	۰/۰۰۰۰	بدون تأثیر
اثر درجه دوم زمان	۱	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۶۳	۰/۰۰۰۰	بدون تأثیر
خطای باقی‌مانده	۷	۰/۰۱۵۸	۰/۰۰۱۶	-	-	-
انطباق ناپذیری	۳	۰/۰۱۴۹	۰/۰۰۳۰	۵/۴۲	۰/۰۶۸۱	بدون تأثیر
میزان خطای خالص	۴	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۲	-	-	-
R^2	۹۵/۶۷					
R^2 تعدیل‌شده	۹۲/۰۷					

تجزیه و تحلیل پارامترهای مستقل فشار (X_1)، دما (X_2) و زمان (X_3) بر میزان جذب دی‌اکسید کربن توسط نرم‌افزار مینی‌تب بررسی گردید. از تجزیه و تحلیل واریانس و رگرسیون به‌منظور بررسی هم‌خوانی مدل‌های پیشنهادی و بررسی آماری معنی‌داری فاکتورهای مدل استفاده شد [۲۲]. مطابق نتایج (جدول ۴)، متغیر پاسخ (ظرفیت جذب) هم‌خوانی مطلوبی با مدل رگرسیونی چندجمله‌ای درجه دوم مرکب مرکزی داشت. ضرایب برازش مدل‌های تجربی و R^2 ، R^2 تعدیل‌شده^۱ مربوطه در (جدول ۴) ارائه شده است. طراحی آزمایش حاضر در سطح اطمینان ۹۵ درصد صورت گرفته است، لذا بر اساس شاخص

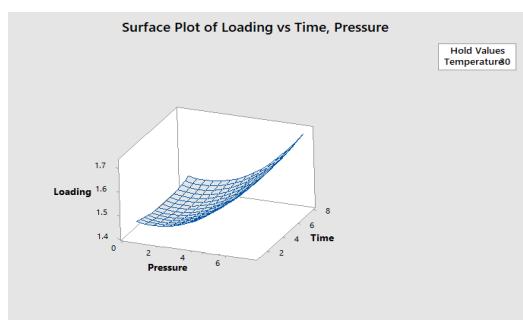
p-value، معنی‌داری^۲ آماری مدل‌ها و معادلات مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر $\alpha > ۰/۰۵$ به‌عنوان مقادیر بدون تأثیر در نظر گرفته شد. نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل‌های سطح پاسخ به‌طور قابل‌توجهی با نتایج آزمایشات هم‌خوانی داشت. در این بررسی R^2 برای ظرفیت جذب نمونه ۹۵/۶۷ درصد بود. هنگامی که این مقدار نزدیک به یک است، تغییرات داده‌های به‌دست‌آمده به‌خوبی می‌تواند توسط مدل‌های برازشی توضیح داده شوند که در این مطالعه مدل‌های تجربی درصد بالایی از تغییرات متغیرهای وابسته را توصیف کردند. علاوه بر این، کیفیت تناسب مدل‌ها به‌وسیله‌ی تست عدم تطابق مورد

1. R^2 -Adjusted
2. Signification

کانتور فشار برحسب زمان در دمای ثابت ۳۰ °C در سطح میانی در طراحی مرکب مرکزی شکل (۸) و نمودار سه بعدی شکل (۹) در نظر گرفته شده است. طبق این نمودارها، با افزایش فشار و زمان، میزان ظرفیت جذب افزایش یافته است.

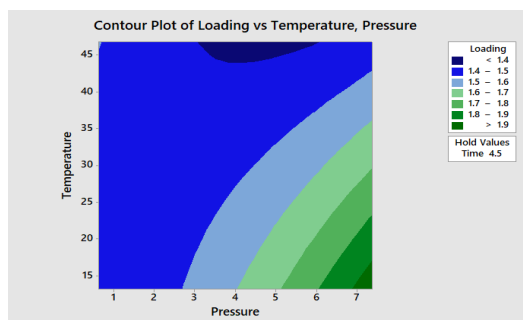


شکل ۸: کانتور فشار برحسب زمان برای طراحی مرکب مرکزی



شکل ۹: نمودار سه بعدی فشار برحسب زمان برای طراحی مرکب مرکزی

نمودار کانتور فشار برحسب دما در زمان ثابت ۴/۵ ساعت در سطح میانی، در طراحی مرکب مرکزی شکل (۱۰) و نمودار سه بعدی شکل (۱۱) در نظر گرفته شده است. طبق این نمودار، با افزایش فشار و کاهش زمان، میزان ظرفیت جذب افزایش یافته است.



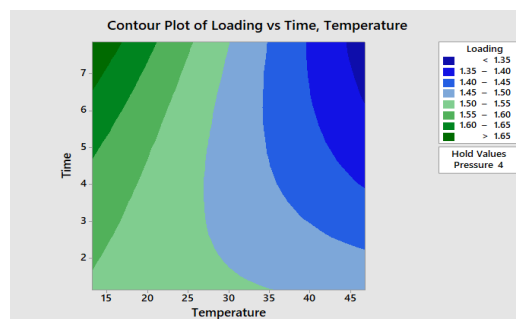
شکل ۱۰: کانتور فشار برحسب دما برای طراحی مرکب مرکزی

بررسی قرار گرفت. این آزمون دقت مدل را در پیش بینی متغیرها تعیین می کند. نتایج به دست آمده از مشاهدات تجربی با مقادیر پیش بینی شده از معادلات رگرسیون مقایسه شدند. در مجموع، نتایج نشان می دهد مدل مورد استفاده می تواند جهت تخمین شرایط بهینه ی فرآیند جذب دی اکسید کربن (ظرفیت جذب) مورد استفاده قرار گیرد [۲۳].

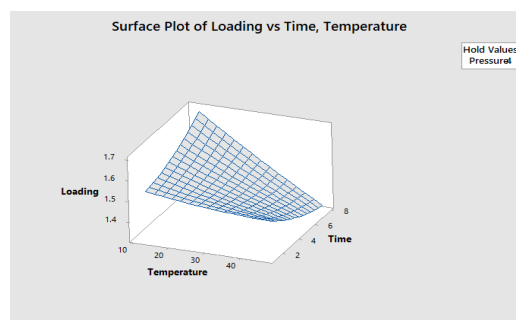
۴-۴. بهینه سازی و تعیین شرایط بهینه ی انجام فرآیند

تغییرات ظرفیت جذب با پارامترهای اثرگذار بر آزمایش، در کانتورها و نمودارهای سه بعدی ۶ تا ۱۱ ترسیم شده است. از آنجا که در این آزمایش سه پارامتر اثرگذار وجود داشت و در هر نمودار سه بعدی تنها دو پارامتر قابل رسم می باشد، پارامتر سوم در سطح میانی ثابت شده است.

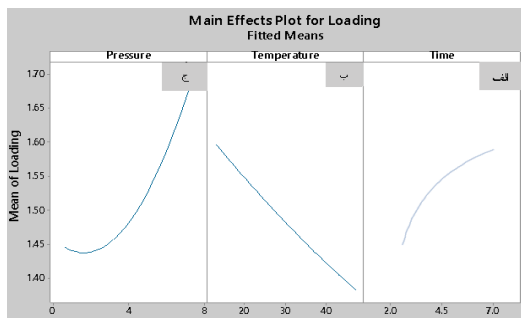
نمودار کانتور دما برحسب زمان در فشار ثابت ۴ bar در سطح میانی در طراحی مرکب مرکزی شکل (۶) و نیز نمودار سه بعدی شکل (۷) در نظر گرفته شده است. طبق این نمودارها، میزان جذب دی اکسید کربن (ظرفیت جذب)، در حداقل دما و حداکثر زمان، افزایش یافته است. به طوری که می توان گفت، با کاهش دما و افزایش مدت زمان، میزان جذب دی اکسید کربن افزایش یافته است.



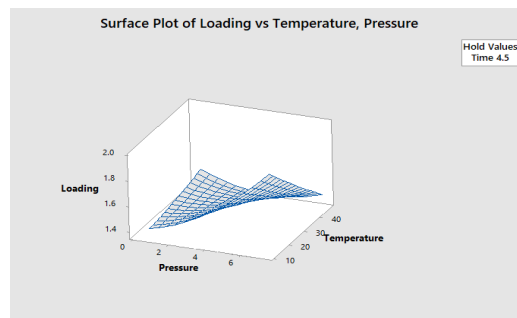
شکل ۶: کانتور زمان برحسب دما برای طراحی مرکب مرکزی



شکل ۷: نمودار سه بعدی زمان برحسب دما برای طراحی مرکب مرکزی



شکل ۱۲: نمودار تأثیر جداگانه‌ی پارامترهای مؤثر بر فرآیند جذب دی‌اکسید کربن: (الف) زمان (ب) دما (ج) فشار



شکل ۱۱: نمودار سه‌بعدی فشار بر حسب دما برای طراحی مرکب مرکزی

۵-۱. اثر زمان

همان‌طور که در شکل (۱۲-الف) مشاهده می‌شود با افزایش زمان، حلالیت گاز CO_2 افزایش می‌یابد. در زمان‌های اولیه، مخلوط آمینی ظرفیت جذب زیادی دارد، لذا افزایش زمان توأم با افزایش فرصت و شانس برخورد و در نتیجه تماس بیشتر بین مخلوط آمین و گاز CO_2 می‌باشد؛ بنابراین، جذب سریع اتفاق می‌افتد و شیب منحنی زیاد است. پس از مدتی بخش عمده‌ای از حجم مخلوط توسط گاز پر شده و ظرفیت قابل جذب در دسترس کمتر می‌شود. لذا شیب منحنی کاهش می‌یابد. در نهایت، مخلوط کاملاً از گاز اشباع شده و با شکل‌گیری فرآیند نفوذ درونی سرعت جذب خیلی کم می‌شود. در این هنگام اصطلاحاً گفته می‌شود که فرآیند جذب به تعادل رسیده است و دیگر با گذر زمان جذبی اتفاق نخواهد افتاد [۲۴].

۵-۲. اثر دما

از (شکل ۱۲-ب) قابل مشاهده است که با کاهش دما، حلالیت گاز CO_2 افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با بررسی منحنی‌های سه‌بعدی مشاهده می‌شود که افزایش دما تأثیر فشار بر حلالیت را تشدید می‌کند؛ بدین‌صورت که افزایش فشار، افزایش حلالیت CO_2 را به دنبال دارد که این افزایش در دماهای بالاتر، بیشتر است. همچنین، در بارگیری‌های پایین‌تر اثرات تغییر دما محسوس‌تر است.

دما، مقیاس و میزانی از متوسط انرژی جنبشی ماده را نشان می‌دهد. هنگامی که دما افزایش پیدا می‌کند، حرکت مولکول‌های گاز بیشتر شده و بنابراین احتمال این که ذرات گاز حل‌شده در مایع، به فاز گازی فرار کنند بیشتر شده و حلالیت گاز کاهش می‌یابد. در نتیجه، افزایش دما به معنای

نمودارهای فوق، بیان‌گر این واقعیت هستند که میزان جذب دی‌اکسید کربن با فشار و زمان نسبت مستقیم داشته و با دما نسبت عکس دارد. لذا شرایط بهینه در حداکثر فشار و زمان و حداقل دما اتفاق می‌افتد. این مقادیر بهینه، با استفاده از تابع بهینه‌ساز پاسخ^۱ در نرم‌افزار مینی‌تب و تنظیم هدف^۲ آزمایش بر بیشترین میزان جذب دی‌اکسید کربن، محاسبه شد. نتایج بهینه‌سازی پاسخ در جدول (۴) آورده شده است. نحوه‌ی تأثیرگذاری هر پارامتر در بخش ۳-۴ شرح داده می‌شود.

جدول ۴: سطوح بهینه‌ی طرح آزمایش مرکب مرکزی

ظرفیت جذب	زمان (ساعت)	دما (°C)	فشار (bar)
۱/۸۲	۵/۱	۲۱	۶/۱

نتایج بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار نشان می‌دهد شرایط بهینه‌ی جذب CO_2 عبارت است از: فشار ۶/۱ bar، دمای ۲۱ °C و زمان ۵/۱ ساعت؛ که در این حالت بیشینه‌ی ظرفیت جذب، برابر ۱/۸۲ می‌باشد.

۵. تحلیل نتایج مربوط به طراحی آزمایش مرکب مرکزی

در طراحی آزمایش، معمولاً، تمرکز بر صحت‌سنجی مدل و پس از آن یافتن حالات بهینه و بررسی برهم‌کنش‌های احتمالی بین پارامترها می‌باشد؛ اما در مطالعات کلاسیک علمی همواره اثر منفرد هر عامل بر هدف آزمایش (که در این پژوهش ظرفیت جذب می‌باشد) دارای ارزش مطالعاتی زیادی است. لذا، اثر هر پارامتر به‌طور مجزا در شکل (۱۲) نشان داده شده است که در بخش‌های بعدی اثر هر پارامتر به‌صورت جداگانه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

1. Response Optimizer
2. Target



انحلال پذیری کمتر و کاهش دما به معنای انحلال پذیری بیشتر گازهاست. طبق اصل لوشاتلیه، این رفتار گازها را بهتر می‌توان درک نمود. حل شدن گاز در مایع معمولاً گرمازا است؛ بنابراین افزایش دمای اعمال شده به سمت محصولات این واکنش، یک تغییر در سیستم به وجود آورده و سیستم به سمت واکنش دهنده‌ها پیش می‌رود تا این تغییر را کمتر کند. در نتیجه، غلظت تعادلی ذرات گاز در فاز گازی افزایش و انحلال پذیری گاز کمتر خواهد شد. برعکس این حالت نیز، برای کاهش دما در سمت محصولات برای گاز اتفاق می‌افتد؛ یعنی کاهش دما، طبق اصل لوشاتلیه، باعث افزایش انحلال پذیری گاز می‌شود.

۳-۵. اثر فشار

از مشاهدی (شکل ۱۲-ج) می‌توان نتیجه گرفت که افزایش فشار جزئی گاز CO_2 همواره باعث افزایش بارگیری آن می‌شود و این اثر برای تمامی دماها و درصدهای مختلف آمین صادق است. دلیل این امر این است که با افزایش فشار، نیروی رانش^۱ بین فاز گاز و سطح مشترک^۲ دو فاز مایع و گاز افزایش یافته و در نتیجه مقدار انتقال جرم افزایش می‌یابد. شیب نمودار فشار جزئی CO_2 نسبت به مقدار بارگیری آن در ابتدا کم بوده و با افزایش میزان بارگیری بیشتر می‌شود. این افزایش شیب به خاطر کاهش حلالیت گاز در اثر اشباع^۳ شدن محلول با جذب مقدار زیاد CO_2 می‌باشد.

در مورد گازها، با ترکیب اصل لوشاتلیه و قانون هنری، می‌توان اثر فشار را روی انحلال پذیری آن‌ها بررسی کرد. مطابق قانون هنری، هنگامی که دما ثابت است، انحلال پذیری گاز با فشار جزئی آن متناسب می‌باشد.

$$P = K_h \times C \quad (7)$$

که P ، فشار جزئی گاز موجود در بالای مایع، K_h ثابت هنری و C غلظت گاز در مایع است. در یک دمای ثابت، از این فرمول می‌توان نتیجه گرفت؛ زمانی که فشار جزئی کاهش پیدا می‌کند، غلظت گاز در مایع نیز کاهش پیدا خواهد کرد و این به معنای کاهش انحلال پذیری نیز می‌باشد و برعکس. برای سیستمی که در آن مقداری گاز در مایع حل شده است، افزایش فشار باعث افزایش فشار جزئی (فشار وارد بر هر قسمت از این ترکیب) می‌شود و گاز بیشتر متراکم می‌شود.

افزایش فشار جزئی بدین معناست که ذرات گازی بیشتری وارد مایع می‌شوند (میزان گاز بالای مایع در این حالت، کمتر می‌شود) و فشار جزئی نیز با این تغییر، کاهش پیدا می‌کند؛ یعنی برای کم کردن اثر این تغییر در افزایش فشار، واکنش خود را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که انحلال پذیری بیشتر شود. اگر در همین حالت، فشار وارد بر سیستم کاهش یابد، مولکول‌های گازی بیشتری از مایع فرار می‌کنند و برای همین انحلال پذیری کم‌تر می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عوامل مؤثر بر حلالیت گاز دی‌اکسید کربن در ترکیب آمینی و مایع یونی و رفتار این سامانه مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده عبارتند از شرایط بهینه‌ی جذب دی‌اکسید کربن با استفاده از طراحی مرکب مرکزی در پنج سطح با تعداد ۲۰ آزمایش تعیین شد که در این بررسی مشخص گردید شرایط مناسب جذب عبارت است از: فشار ۶/۱ bar، دمای $21^\circ C$ و زمان ماند ۵/۱ ساعت که حداکثر ظرفیت جذب، ۱/۸۲ حاصل گردید. مدل مرکب مرکزی نیز با بررسی آنالیز واریانس دارای کفایت تعیین شد و هم‌خوانی مناسبی ($R^2 = 95/67\%$) با داده‌های حاصل از آزمایش داشت. میزان بارگیری با افزایش فشار و زمان و کاهش دما افزایش یافت. با توجه به تجربیات حاصل از پژوهش، انجام آزمایش‌ها در دماهای بالا به‌منظور کامل کردن اطلاعات مورد نیاز در طراحی واحدهای صنعتی نیز توصیه می‌گردد.

مراجع:

- [1]. A. Mikhaylov, N. Moiseev, K. Aleshin, & T. Burkhardt, (2020). Global climate change and greenhouse effect. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(4), 2897.
- [2]. E. Ermolaev, C. Sundberg, M. Pell, S. Smårs & H. Jönsson, (2019). Effects of moisture on emissions of methane, nitrous oxide and carbon dioxide from food and garden waste composting. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118165.

1. Driving Force
2. Interface
3. Saturate



- [10]. A. Majafloo, (2019). Thermodynamic Modeling of Carbon Dioxide Absorption in Methyl Diethanolamine Aqueous Solutions. *Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran*. 23;38(2). 183-94.
- [11]. H. Pashaei, A. Ghaemi, M. Nasiri & B. Karami, (2020). Experimental modeling and optimization of CO₂ absorption into piperazine solutions using RSM-CCD methodology. *ACS omega*, 5(15), pp.8432-8448.
- [12]. Choubtashani, S., & Rashidi, H. (2023). CO₂ capture process intensification of water-lean methyl diethanolamine-piperazine solvent: Experiments and response surface modeling. *Energy*, 267, 126447.
- [13]. S. Zare, & A. Pouranfard, (2022). Experimental and theoretical study of CO₂ absorption by Water-Ionic liquid-Piperazine solution using the method of Constrained Mixture Design. *Farayandno*, 17(79), 25-40.
- [14]. J. Hagenkord, B. Funke, E. Qian, M. Hegde, K. B. Jacobs, M. Ferber, & D. Bick, (2022). Design and reporting considerations for genetic screening tests. *The Journal of Molecular Diagnostics*, 22(5), 599-609.
- [15]. N. Akbarzad, A. Ghaemi, & M. Rezakazemi, (2022). Optimization and modeling of carbon dioxide absorption into blended sulfolane and piperazine aqueous solution in a stirrer reactor. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(5), 4047-4068.
- [16]. S. Choubtashani, & H. Rashidi, (2022). CO₂ capture process intensification of water-lean methyl diethanolamine-piperazine solvent: Experiments and response surface modeling. *Energy*, 126447.
- [3]. M. Kiefer, J. Rodríguez-Guzmán, J. Watson, B. van Wendel de Joode, D. Mergler & da Silva, A. S. (2016). Worker health and safety and climate change in the Americas: issues and research needs. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 40, 192-197.
- [4]. K. Ahmed Ali, M. I. Ahmad & Yusup, Y. (2020). Issues, impacts, and mitigations of carbon dioxide emissions in the building sector. *Sustainability*, 12(18), 7427.
- [5]. J. Godin, W. Liu, S. Ren & C. C. Xu, (2021). Advances in recovery and utilization of carbon dioxide: A brief review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105644.
- [6]. İ. Koç, (2021). Changes that may occur in temperature, rain, and climate types due to global climate change: the example of Düzce. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 9(8), 1545-1554.
- [7]. T. D. Güzel, & K. Alp, (2020). Modeling of greenhouse gas emissions from the transportation sector in Istanbul by 2050. *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2190-2201.
- [8]. Y. Xiao, F. Peng, Y. Zhang, J. Wang, Y. Zhuge, S. Zhang & H. Gao, (2019). Effect of bag-controlled release fertilizer on nitrogen loss, greenhouse gas emissions, and nitrogen applied amount in peach production. *Journal of Cleaner Production*, 234, 258-274.
- [9]. P. Muthumari, R. K. Nilavuckkarasi, B. Ambedkar, J. Dhanalakshmi, P. P. Papitha & M. Moniha, (2020). Infrared spectroscopic and physico-chemical analysis of carbon dioxide-rich and-lean 30 wt% monoethanolamine. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 15(4), 164-171.

- characteristics through response surface methodology. *Fuel*, 266, 117072.
- [23]. K. Kumar, B. Dabade, L. Wankhade (2022). Determination of prediction model and optimization of process parameters for fabrication of Al-SiC composite using response surface methodology. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 17: 1-7.
- [24]. C. J. Lin,, & S. Y. Jeng, (2020) "Optimization of deep learning network parameters using uniform experimental design for breast cancer histopathological image classification". *Diagnostics*, 10 (9), 622.
- [17]. A. Esmaeili, A. Tamuzi, T. N. Borhani, Y. Xiang, & Shao, L. (2022). Modeling of carbon dioxide absorption by solution of piperazine and methyldiethanolamine in a rotating packed bed. *Chemical Engineering Science*, 248, 117118.
- [18]. R., Hasanzadeh, M., Mojaver, T., Azdast, & C. B. Park, (2021). Polyethylene waste gasification syngas analysis and multi-objective optimization using central composite design for simultaneous minimization of required heat and maximization of exergy efficiency. *Energy Conversion and Management*, 247, 114713.
- [19]. D. Ozturk, E., Dagdas, B. A. Fil, & M. J. Bashir, (2021). Central composite modeling for electrochemical degradation of paint manufacturing plant wastewater: One-step/two-response optimization. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101264.
- [20]. E., ANTIPOVA, C., POZO, G., D., GUILLÉN-GOSÁLBEZ, BOER, L. F. CABEZA, & L. JIMÉNEZ, (2016). On the use of filters to facilitate the post-optimal analysis of the Pareto solutions in multi-objective optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 74, 48-58.
- [21]. B. Saengsawang, P. Bhuyar, N. Manmai, V. K. Ponnusamy, R. Ramaraj, & Y. Unpaprom, (2020). The optimization of oil extraction from macroalgae, *Rhizoclonium* sp. by chemical methods for efficient conversion into biodiesel. *Fuel*, 274, 117841.
- [22]. M., Elkelawy, H. A. E., Bastawissi, K. K., Esmail, A. M., Radwan, H., Panchal, K. Sadasivuni, & M. Israr, (2020). Maximization of biodiesel production from sunflower and soybean oils and prediction of diesel engine performance and emission



Effect of Vapor-Liquid Equilibrium on CO₂ Gas Absorption by Amine Peprasine- Ionic liquid Solution Using Central Composite Test Design Method

Soheila Zare¹, Abdolrasoul Pouranfard^{2*}

1. PhD Student, Department of Chemical Engineering, Engineering Faculty, Yasuj University, Yasouj, Iran

2. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Engineering Faculty, Yasouj University, Yasouj, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

Article History:

Received: 12 June, 2023

Revised: 27 July, 2023

Accepted: 19 August, 2023

Keywords:

CO₂ gas absorption

Amine Peprasine-Ionic liquid

mixture

Vapor-liquid equilibrium

CMD

ABSTRACT

In this research, the absorption of CO₂ by an aqueous solution of Amine Piperazine-Ionic liquid was investigated. The Response Surface Method (RSM) based on Central Composite Design (CCD) was used to design experiments, build models, and find optimal operating conditions to achieve optimal responses in the range of used temperature, pressure, and time. The design and optimization of this group of separation units requires to accurate equilibrium and thermodynamic data of vapor-liquid equilibrium. In this study, the optimal loading conditions of CO₂ gas were determined using the central composite design (CMD) method. Analysis of the equations performed using quadratic polynomial regression and ANOVA analysis of variance. Enhancement of the pressure and time and reducing the temperature cause increase the solubility of carbon dioxide gas in the amine mixture. The optimal absorption conditions were obtained at pressure 1.6 bar, temperature 21 °C and time 1.5 hours. Finally, the mechanism of temperature effect on solubility via Lochatellier's principle, the effect of pressure on solubility by Henry's law, and the effect of time on solubility by examining the kinetics of the adsorption reaction was investigated.

DOR: 20.1001.1.25885251.1402.10.1.6.0

How to cite this article

S. Zare, A.R. Pouranfard, Effect of Vapor-Liquid Equilibrium on CO₂ Gas Absorption by Amine Peprasine - Ionic liquid Solution Using Central Composite Test Design Method. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2023; 10(1): 80 -93. (https://www.ijge.irangi.org/article_707975.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: r.pouranfard@yu.ac.ir, (A.R. Pouranfard).

Available online 20 August 2023

2666-5468/© 2021 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

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





راهنمای نگارش مقالات در مجله علمی - ترویجی مهندسی گاز ایران

رهبر رحیمی^۱، رضا مسیبی بهبهانی^{۲*}، محمد جامی الاحمدی^۳

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

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

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

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

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

۱. مقدمه:

تک رویه تایپ شود. برای بخش فارسی مقالات از قلم B- نازنین سایز ۱۱ و متن لاتین از قلم Times New Roman سایز ۱۰ استفاده می‌شود.

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

انجمن مهندسی گاز ایران با هدف افزایش تبادلات علمی و تحقیقاتی جامعه مهندسی شیمی، نفت و گاز و گسترش روحیه ابتکار، ابداع و نوآوری مهندسان و محققان تقویت ارتباطات همه جانبه صنعت با دانشگاه و جامعه مجله علمی - ترویجی مهندسی گاز ایران را در زمینه‌های تازه‌های مهندسی گاز، معرفی صنایع مرتبط، آموزش در مهندسی گاز، نفت، پتروشیمی و شیمی، معرفی نوآوری‌ها و فن‌آوری‌های نوین صنعتی و اخبار جامعه مهندسی گاز را منتشر می‌کند.

۲. شرح نوشتار:

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

۱.۲. عهده‌دار مکاتبات می‌تواند از اعضای هیأت علمی و یا شاغل در سایر موسسات باشد و وابستگی شغلی وی مشخص باشد.

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

۳.۲. مقالات با نرم افزار word ۲۰۰۷ روی کاغذ A4 بخش چکیده مقاله به صورت تک ستونی و بخش مقدمه تا مراجع به صورت دو ستونی و

۳. صفحه‌آرایی:

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

۴. بخش‌های هر مقاله به ترتیب زیر است:

۱.۴. عنوان مقاله: کوتاه و معرف محتوای مقاله باشد و از ۵۱ کلمه تجاوز نکند (بی- نازنین سایز ۲۰ سیاه).

۲.۴. اسم یا اسامی و عناوین علمی نویسندگان: عهده دار مکاتبات با علامت * مشخص گردد (قلم بی- نازنین سایز ۱۰ سیاه).

۱. معادل فارسی کلمات انگلیسی

۳.۴. آدرس نویسندگان: قلم بی- نازنین سائز ۹ نازک و در زیر

آن آدرس الکترونیکی عهده دار مکاتبات درج می شود.

۴.۴. کلمات کلیدی: حداکثر ۵ یا ۷ کلمه (بی- نازنین سائز

۱۱ ایتالیک).

۵. چکیده:

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

(بی- نازنین سائز ۱۱ ایتالیک). داشتن قسمت های ۱ تا ۵ به انگلیسی در انتهای مقاله نیز ضروری می باشد.

۶. متن اصلی:

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

بسته به نوع اثر، مقاله دارای بخش های نظری، شرح دستگاه، روش آزمایش، روش حل، یا محاسبه و نتایج است که به صورت دو ستونی با قلم B- نازنین سائز ۱۱ نازک و Times New Roman سائز ۱۰ نازک و فواصل بین خطوط به صورت single برای رسیدگی واریه به داوران نگارش می شود. تیتراهای متن مقاله شماره گذاری و با قلم بی- نازنین سائز ۱۱ سیاه می باشد.

جدول ها و شکل ها و معادلات به ترتیب، شماره گذاری و عناوین جدول ها در بالای هر جدول و عناوین شکل ها در زیر هر شکل آورده شود. جدول و شماره آن و همچنین شکل و شماره آن با قلم بی- نازنین سائز ۹ سیاه است. اما شرح آنها با فونت بی- نازنین سائز ۹ است. معادلات چپ چین و شماره آن راست چین شود.

استفاده از از رنگ در جداول و شکل ها مشمول هزینه چاپ می شود. صفحات شماره گذاری شوند.

۷. بحث: دقت نظر در این قسمت در امر داوری موثر است.

۸. نتیجه گیری

۹. تشکر و قدردانی: در صورت نیاز

مراجع:

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

ارسال مقالات:

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

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

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

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

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

VOLUME 10 • ISSUE 1 • NO. 17 • SUMMER 2023

EISSN:25885-5251



► Contents

Review of Methanol Synthesis, Proposal of Production Mechanism Based on Colloidal Suspension Potential and DFT Method 8

Asadollah Farhadi

Economical and Environmental Study of Using Micro Combined Heat and Power in Residential House in Tehran 28

Esmail Ghasemi Kafrudi, MohammadReza Habibi, Mohammad Khaledi Sardashti, MohammadAli Manian, Zeynab Sobhani

Oil Production Optimization with Artificial Lift Method for Production Increasing in Ahwaz Oil Field (AW-A Case Study) 43

Mahdi Amirkhani, Maziar Noei, Soleiman Mosleh, Ali Hossaini, Masoud Bijani

Nano/Micro ZrO_2 Particles Dispersion on St37 Steel by Using Friction Stir Processing and Investigating Its Effect on Steel Corrosion Resistance Promotion 59

Seyed Mohammad Hossein Sharifi, Armin Sabetghadam-Isfahani, Yegane Davoodbeygi

Improving Production Conditions to Avoid Liquid Loading In one of the Vertical Gas Wells in Iran 69

Mohammad Dousti, Masoud Bijani, Hamdam Majd Teymouri, Sajjad Sepasifar

Effect of Vapor-Liquid Equilibrium on CO_2 Gas Absorption by Amine Peprasine- Ionic liquid Solution Using Central Composite Test Design Method 80

Soheila Zare, Abdolrasoul Pournfar

► Guide for Authors

94