



IJGE[®]

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

نشریه
مهندسی گاز
ایران

سال یازدهم / شماره اول / جلد نوزدهم

تابستان ۱۴۰۳

EISSN:25885-5251



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

صاحب امتیاز: انجمن مهندسی گاز ایران
مدیر مسئول: دکتر محمدرضا امیدخواه
سردبیر: دکتر رضا مسیبی بهیجانی
دبیر تخصصی: دکتر مرتضی زیودار
ویراستاری: ناهید امینی
صفحه آرایی: مهندس حمیدرضا کریمی
شماره شاپا: ۲۵۸۸-۵۲۵۱



هیأت تحریریه:

دکتر امیرحسین محمدی (دانشگاه کوازولو-ناتال، آفریقای جنوبی)
دکتر غلامرضا وکیلی تژاد (دانشگاه سلطان قابوس، عمان)
دکتر علی وطنی (دانشگاه تهران)
دکتر مرتضی زیودار (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر وحید نقی‌خانی (دانشگاه صنعتی شریف)
دکتر سید علیرضا طباطبائی تژاد (دانشگاه صنعتی سهند)
دکتر رهبر رحیمی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر سید حسام نجیبی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر ابوالقاسم امام زاده (دانشگاه آزاد - واحد علوم تحقیقات تهران)
دکتر مسعود آقاجانی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر محمدرضا احسانی (دانشگاه صنعتی اصفهان)
دکتر علیمیراد 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 عبدالنسی 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: ۹۵۷۱۲-۱۵۹۸۹

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 ۱۹

- دکتر علی وطنی (دانشگاه تهران)
دکتر مسعود آقاجانی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر مسعود بیژنی (دانشگاه گرمسار)
دکتر هدایت عزیزپور (دانشگاه تهران)
دکتر کاظم کاشفی (پژوهشگاه صنعت نفت)
دکتر حسینعلی رهدار (دانشگاه دانشگاه زابل)
دکتر رضا مسیبی بهبهانی (دانشگاه صنعت نفت)
دکتر بهاره بیدار (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر محمد رضا امیدخواه (دانشگاه تربیت مدرس)
دکتر بابک دیزنگیان (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر مجتبی ساعدی مقدم (دانشگاه صنعتی قوچان)
دکتر مرتضی زیودار (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر غلامرضا وکیلی نژاد (دانشگاه سلطان قابوس، عمان)
دکتر وحیده یوسفی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر محمد رضا خسروی نیکو (دانشگاه صنعت نفت)
مهندس سپیده امیری توسلی (شرکت گاز استان هرمزگان)
دکتر حمید مقدم دیمه (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر مستانه حاجی پور (دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات)
دکتر امیرحسین محمدی (دانشگاه کوازولو-ناتال، آفریقای جنوبی)
دکتر حسین زهدی فسایی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر محمد رضا سردشتی بیرجندی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)
دکتر زهره خلیفات

فهرست مطالب

۷	سرمقاله هوش مصنوعی: واقعیتی جدید برای صنایع شیمیایی دکتر کیانوش رزاقی
	مقالات
۸	بررسی عملکرد فلر LPG پالایشگاه پنجم پارس جنوبی با استفاده از شبیه‌سازی CFD و ارائه راهکار محمد ایرانی، یعقوب بهجت
۲۲	بررسی تغییر خواص مکانیکی و متالورژیکی حاصل از آزمایش هیدرواستاتیک به روش ۱۱۰ صدرتنش تسلیم در خطوط لوله گاز سیدامیر رضاییگی، محمدحسین یاس، بهروز درگاهی
۳۳	آنالیز ترمودینامیکی و زیست‌محیطی استفاده از سیستم تولید انرژی هم‌زمان خورشیدی-پیل سوختی در منازل مسکونی ایران اسماعیل قاسمی کفرودی، محمدرضا حبیبی، حسین عباسعلی خمه، زینب سبحانی
۴۶	پیش‌بینی هوشمند میزان مصرف گاز در بازه‌های سه‌ساعته، با استفاده از داده‌های ثبت شده در دوره‌های زمانی مشخص ایمان محمدی، محسن تقوی
۷۱	پیش‌بینی پنجره دمایی سیال حفاری و تشکیل هیدرات‌های گازی حین حفاری در آب‌های عمیق با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشینی محمد دوستی، الناز خداپناه
۸۷	مروری بر فناوری‌های نوین بیولوژیکی و بیوالکتروشیمیایی تصفیه‌ی فاضلاب‌های پتروشیمی و تولید هم‌زمان بیوانرژی گاگیک بدلیانس قلی‌کندی، رها رباطی، فاطمه شگری داریان
۹۹	راهنمای نگارش مقالات در نشریه علمی مهندسی گاز ایران

پنجمین کنفرانس بین المللی فناوری های جدید در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی
انجمن مهندسی گاز ایران با مشارکت فعال دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تهران پنجمین کنفرانس بین المللی
« فناوری های جدید در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی » در تاریخ ۱ و ۲ آبان ماه ۱۴۰۳ در تهران برگزار می نماید.

NTOGP.com 2024 October 22-23

با حمایت:



5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE NEW TECHNOLOGIES IN THE OIL, GAS & PETROCHEMICAL INDUSTRIES

پنجمین کنفرانس بین المللی فناوری های جدید

در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی ۱ و ۲ آبان ماه ۱۴۰۳

مرکز همایش های بین المللی پژوهشگاه صنعت نفت

ORGANIZERS:



CO-ORGANIZER:



محورهای ویژه همایش:

- مدیریت تقاضای انرژی
- گذار انرژی
- منابع جدید در صنعت نفت، گاز و پتروشیمی ایران
- افزایش بهره وری (در تولید، انتقال و مصرف)

MAIN TOPICS

- Chemical Engineering
- Petro Chemistry and Processing Technologies
- Smart water in the fractured limestone oil reservoirs - EOR
- Optimal well placement in the thin and compartmentalized oil layers
- Joint optimization of oil well placement and control
- Viscosity reduction of the heavy oil
- Innovations in maximizing areal sweep efficiency in oil reservoirs
- Advances in regional geology (Sedimentology, sequence/seismic stratigraphy & structural modelling)
- Advances in monitoring and testing technologies
- Geosciences, innovations and developments in data processing and interpretations
- Recovery of drop-downs from condensate banking in the gas - condensate reservoirs
- Gas wetting the reservoir rocks in the gas-condensate reservoirs
- Advances in the economy of LNG production and transportation
- Innovations in the sour gas two phase flow management
- Innovations in the design, material selection and optimum pressure profile to maximize the economy and safety of the new main gas transmission systems
- Inline C2 plus extraction units on the main gas trunk lines
- Innovations in gas distribution networks using smart robots, improving network safety and profitability
- Improve gas distribution networks with innovative pipeline monitoring and repair
- Innovations in methane emission cuts in oil and gas sector
- Methane conversion to olefins, aromatics and other organic chemicals
- Methanol to light olefins
- Bioplastics, plastic composites/ nanocomposites, plastic electronics, smart and reactive polymer and the self-healing polymers
- Innovations in coating materials

با حضور مقامات ارشد شرکت های:



SUPPORTING ORGANIZATION:



SCIENTIFIC INDEXERS:



تلفن: +98 21 22 03 73 83 | فکس: +98 21 88 55 24 59 | وبسایت: www.ntogp.com
تلفن: +98 21 22 04 88 59 | فکس: +98 21 88 55 20 48 | ایمیل: info@ntogp.com
آدرس: تهران، خیابان شهید سیدهد قزوینی، پلاک 195، ساختمان شرکت ملی گاز ایران، طبقه اول، واحد 104، کدپستی: 1598995712



دکتر کیانوش رزاقی

عضو هیئت علمی گروه مهندسی شیمی
دانشگاه سیستان و بلوچستان

سر مقاله

هوش مصنوعی: واقعیتی جدید برای صنایع شیمیایی

نسبتاً جدید هستند، توسعه‌دهندگان و کاربران به تدریج در حال درک مزایای آن‌ها برای تسریع در تحقیق و توسعه، بهینه‌سازی فرآیند، مهندسی محصولات شیمیایی و موارد دیگر هستند. الگوریتم‌های هوش مصنوعی با تحلیل داده‌های گسترده‌ای که از حسگرها و سوابق عملیاتی جمع‌آوری شده، می‌توانند الگوها را شناسایی کرده و پیشنهادهایی برای بهبود کارایی، کاهش مصرف انرژی و کاهش ضایعات ارائه نماید.

در حالی که نگرانی‌هایی درباره جایگزینی نیروی کار توسط هوش مصنوعی وجود دارد، این فناوری بیشتر به‌عنوان ابزاری برای حذف وظایف غیرضروری و حفاظت از کارگران در نظر گرفته می‌شود، به طوری که مهندسان می‌توانند بر روی چالش‌های پیچیده‌تر و مسائل سطح بالاتر تمرکز کنند. هوش مصنوعی می‌تواند ایمنی و کارایی را در مدیریت فرآیندهای خطرناک و ناپایدار افزایش داده و ریسک انسانی را کاهش دهد و به مهندسان این امکان را بدهد که به روش‌ها و فناوری‌های نوآورانه بپردازند.

هوش مصنوعی ابزار قدرتمندی است که می‌تواند پیشرفت‌های قابل توجهی در صنایع ایجاد کند، با این حال پذیرش آن نیازمند برنامه‌ریزی دقیق، توجه به ملاحظات اخلاقی و الزام به بهبود مستمر است. با اتخاذ رویکردی هوشمندانه، صنایع شیمیایی می‌توانند از پتانسیل هوش مصنوعی بهره‌برداری کنند و در عین حال خطرات را به حداقل رسانده و موفقیت بلندمدت را تضمین کنند.

اتوماسیون در صنایع شیمیایی به‌عنوان یک نیروی تحول‌آفرین شناخته می‌شود که به بهبود کارایی، ایمنی و تولید کمک کرده و هزینه‌ها و اشتباهات انسانی را کاهش می‌دهد. این فرآیند شامل به‌کارگیری سیستم‌های کنترلی، ماشین‌آلات و نرم‌افزارها برای مدیریت تجهیزات و فرآیندها با کمترین میزان دخالت انسان است. به دلیل پیچیدگی و مقیاس بزرگ و همچنین خطرات موجود در بسیاری از فرآیندهای شیمیایی، اتوماسیون از اهمیت بالایی برخوردار است. در حال حاضر، تمرکز عمدتاً بر روی هوش مصنوعی^۱ است که در آن منابع داده وسیع برای دستیابی به نتایج سریع‌تر و پیشرفته‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. هوش مصنوعی یک دسته وسیع از فناوری‌ها است که توانایی‌های انسانی مرتبط با یادگیری، حل مسئله و خلاقیت را شبیه‌سازی می‌کند. یادگیری ماشین^۲ و هوش مصنوعی مولد^۳ زیرمجموعه این دسته هستند. در یادگیری ماشین، الگوریتم‌ها پیش‌بینی‌هایی بر اساس داده‌هایی که یاد گرفته‌اند انجام می‌دهند، اما هوش مصنوعی مولد داده‌ی جدیدی تولید می‌کند که مشابه با داده‌هایی است که از آن‌ها یاد گرفته است.

همانند بسیاری از بخش‌های دیگر، فناوری‌های هوش مصنوعی در صنایع نفت و گاز در حال ظهور هستند. در حالی که راه‌حل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و سایر فناوری‌های مرتبط مانند اینترنت اشیا^۴، همزاد دیجیتال^۵، واقعیت افزوده^۶ و محاسبات کوانتومی^۷ هنوز برای بسیاری از کاربردهای صنعتی

1. Artificial intelligence (AI)
2. Machine learning (ML)
3. Generative AI
4. Internet of things (IoT)
5. Digital twins
6. Augmented reality (AR)
7. Quantum computing

آدرس پست الکترونیکی: razzaghi@eng.usb.ac.ir

بررسی عملکرد فلر LPG پالایشگاه پنجم پارس جنوبی با استفاده از شبیه‌سازی CFD و ارائه راهکار

محمد ایرانی*، یعقوب بهجت

عضو هیئت علمی پژوهشکده گاز، پژوهشگاه صنعت نفت، کد پستی ۱۱۱۳۱۶۵۸۴۱، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: iranim@ripi.ir

مقاله‌ی علمی - پژوهشی

صفحه ۸ - ۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱

چکیده

در این تحقیق، شبیه‌سازی فلر LPG^۱ پالایشگاه پارس جنوبی در ابعاد صنعتی به‌منظور بررسی اثر هندسه تیپ فلر بر مشخصه‌های احتراقی فلر شامل شکل و موقعیت شعله با استفاده از تکنیک CFD انجام شده است. به‌منظور جلوگیری از ایجاد خطاهای عددی، از شبکه محاسباتی هیبریدی مناسب بهره گرفته شد. نتایج حاصل از مدل توسعه یافته (CFD) شامل پروفایل دمایی و سرعت، پروفایل غلظت اجزاء گازهای ارسالی به فلر و همچنین پروفایل غلظت اجزاء محصولات حاصل از احتراق می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی CFD نشان می‌دهد که فلر LPG در شرایط عملیاتی، افزایش دمای بدنه تیپ فلر (۵۲۳ - ۳۵۰ °C) بر اثر برخورد مستقیم شعله در نقاطی از تیپ فلر، قابل توجه است. لذا عملکرد فلر در شرایط عملیاتی با مقدار گاز جارویی فعلی مناسب نیست و ادامه این روند و افزایش دمای سطح بدنه تیپ فلر، در نهایت منجر به تخریب کامل و تعویض کلی آن می‌گردد؛ بنابراین مقدار گاز جارویی تزریق شده به فلر جهت بهبود عملکرد احتراق، باید افزایش یابد. علاوه بر این با توجه به وجود تندبادهای مقطعی و افزایش سرعت باد تا ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت اثر تندبادهای مقطعی بر عملکرد و مشخصه‌های احتراقی فلر LPG بررسی گردید. نتایج حاصل از مدل CFD نشان داد که انحراف شعله در جهت مسیر باد زیاد بوده و در نتیجه شعله به داخل تیپ فلر کشیده می‌شود و دمای آب‌بند گازی^۲ و بدنه تیپ فلر و سپر باد تا ۸۵۰ °C بالا افزایش می‌یابد و نهایتاً به تخریب کامل سپر باد می‌انجامد. برای جلوگیری از به وجود آمدن چنین مخاطراتی (هنگام تندباد) باید تزریق گاز سوخت به حدی تنظیم گردد تا از برگشت شعله به درون تیپ فلر جلوگیری شود.

کلید واژه‌ها: مشخصه‌های احتراق، شعله، فلر صنعتی LPG، شبیه‌سازی CFD

۱. مقدمه

آتش‌سوزی تجهیزات را کاهش می‌دهد و از تولید محصولات ناخواسته جلوگیری می‌کند. فلرینگ به‌طور گسترده در صنایع پالایشگاهی، پتروشیمی و شیمیایی برای از بین بردن گازهای غیرمطلوب احتراق‌پذیر توسط سوختن در محیط شعله باز

فلرینگ آفرآیندی است که از طریق آن، گازهای غیرمطلوب احتراق‌پذیر را به‌صورت کنترل شده‌ای می‌سوزانند. در غیر این صورت، این گازها به شکل خطرناک و کنترل نشده‌ای آتش می‌گیرد. فلرینگ، خطرات ناشی از

1. Liquefied Petroleum Gas
2. Gas Seal
3. Flaring



انجام می‌گیرد. هدف از ساخت فلرها دریافت گازهای ناخواسته ارسالی از سوی واحد صنعتی و سوختن این گازها در جهت جلوگیری از ورود آن‌ها به محیط زیست می‌باشد. در صنعت عواملی همچون قطع جریان برق، تغییر در خوراک ورودی به واحدها، بهره‌برداری بیش از ظرفیت طراحی از واحدهای تولیدی، تعمیر و نگهداری نامناسب، انحراف از روش‌های درست و دستورالعمل‌های بهره‌برداری، اشتباهات انسانی و ... از جمله عواملی هستند که موجب تغییرات فرآیندی و بالا رفتن فشار در مخازن، برج‌ها و سایر تجهیزات صنعتی می‌گردند [۱]. تغییرات فشار به نوبه خود می‌تواند موجب صدمات جبران‌ناپذیری به تجهیزات صنعتی و در بعضی مواقع صدمات جانی گردد. فلرینگ گازهای همراه یکی از روش‌هایی است که بیشتر در ابعاد فنی به‌منظور افزایش ایمنی تجهیزات و جلوگیری از خطرهای بالقوه مانند انفجار و سایر خطرات احتمالی ناشی از افزایش فشار و شعله‌ور شدن گازهای پرفشار در جریان استحصال نفت خام صورت می‌گیرد.

در صورتی که احتراق در فلر کامل یا به عبارت دیگر بازده فرآیند احتراق در فلر ۱۰۰ درصد باشد، فقط بخار آب و دی‌اکسید کربن به‌عنوان محصولات احتراق تولید می‌شوند؛ اما در عمل به علت تغییر شرایط عملکردی و انحراف از شرایط طراحی، بازده کاهش می‌یابد. بر اساس تحقیقات صورت گرفته در جهان، در حدود ۲۵۰ ماده سمی شناخته شده نظیر دوده، بنزن، جیوه، اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد، دی‌اکسید کربن، آرسنیک، دی‌سولفید کربن، کروم، متان، تولوئن، گازهای اسیدی و هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای طی فرآیند فلرینگ به هوا تخلیه می‌شوند که برخی از ترکیبات آزاد شده می‌توانند باعث تشدید بیماری‌های تنفسی از جمله آسم شوند. زاداکبر و همکاران [۲]، خطر انتشار ترکیبات سمی برای دو حالت فلر خاموش و روشن در پالایشگاه گاز خانگی را بررسی کردند. مطالعات آن‌ها حاکی از آن بود که کارکنان پالایشگاه در هر دو حالت در معرض تنفس گازهای سرطان‌زا و غیر سرطان‌زا قرار دارند؛ اما در حالتی که شعله فلر در اثر بارانهای شدید، توفان یا باد شدید خاموش شود خطر بسیار جدی‌تر بوده و در صورتیکه این شرایط برای مدت طولانی ادامه یابد منجر به مرگ کارکنان خواهد شد. بدین ترتیب، میزان و نوع گازهای انتشار یافته از فلر به محیط زیست تابع بازده احتراق و نوع خوراک ورودی به فلر است [۳]. بازده احتراق

پایین در فلر به معنای وجود مقدار قابل توجهی ترکیبات آلی فرار در گازهای ارسالی به فلر بوده و بازده بالا نیازمند اختلاط کامل سوخت با هوا و فقدان فاز مایع در حین احتراق است [۴]. بازده احتراق برای فلری که به‌خوبی طراحی شده است، معمولاً بالای ۹۰ درصد و گاهی بیش از ۹۸ درصد است. از این رو، طراحی و بهره‌برداری از این تجهیز فرآیندی در جهت احتراق کامل ترکیبات ورودی امری ضروری است [۵-۸].

مطالعات تجربی و شبیه‌سازی زیادی درباره فلرها انجام شده است. هوآنگ و همکاران پایداری و رفتار شعله جت احتراقی پروپان را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و روابطی را برای مسیر حرکت جت‌های احتراقی در یک جریان متقاطع ارائه کردند [۹]. بورگینگتون و همکاران روشی برای اندازه‌گیری راندمان احتراق شعله در جریان متقاطع ارائه کردند [۱۰]. جانسون^۱ و همکاران با انجام درباره شعله‌های نفوذی در مسیر جریان سیال، نشان دادند که جریان باد و محتوای انرژی سوخت مستقیماً بر روی راندمان احتراق مؤثر است [۱۱]. نتایج تحقیقات کوستیوک^۲ و جانسون نشان داد که فلرها در هوای ساکن راندمان بالایی داشته و افزایش سرعت وزش باد باعث افت بازده می‌شود [۱۲]. کاستیشیرا و ادگار^۳، با شبیه‌سازی CFD اثر تزریق بخار آب و هوا را بر عملکرد فلرها در مقیاس آزمایشگاهی با شعله غیر پیش‌آمیخته بررسی کردند [۱۳]. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از بخار آب و هوا باعث اختلاط بهتر سوخت می‌شود ولی نسبت‌های خیلی بالای بخار به سوخت و هوا به سوخت باعث کاهش قابل توجه راندمان احتراق فلر و تولید هیدروکربن نسوخته می‌شود. کاستیشیرا و ادگار، در تحقیق دیگری عملکرد یک فلر با سرعت‌های مختلف باد را بررسی کردند. در این مطالعه از یک مکانیسم شامل پنج واکنش و سپس مکانیسمی شامل ۲۳ جزء و ۷۴ واکنش استفاده کردند و رفتار فلر صنعتی و انتشار گاز از آن بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی انجام شده با نتایج آزمایشگاهی هم‌خوانی خوبی نشان می‌دهد [۱۴].

اثر وزش باد بر بازده فلرهای صنعتی با استفاده از روش CFD توسط کاستیشیرا و ادگار مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵]. نتایج آن‌ها نشان داد که وزش باد با سرعت متوسط نیز تأثیر قابل توجهی بر کاهش بازده فلر داشته و شعله فلر در معرض باد کوتاه‌تر از شعله فلر بدون وزش باد می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها توافق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت.

1. Johnson
2. Kostiuik
3. Castiñeira and Edgar





لوال^۱ و همکاران اثر وزش باد و سرعت جت خروجی از فلر را با استفاده از مدل سازی CFD مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. نتایج حاصل از مدل سازی با داده های تجربی اعتبارسنجی گردید. لانگمن^۲ و همکاران، اثر نوسانات شدید ناشی از احتراق روی نرخ اختلاط یک فلر پالایشگاهی را گزارش کردند [۱۶]. سینگ^۳ و همکاران، با استفاده از یک مدل CFD فلر صنعتی و آزمایشگاهی را شبیه سازی کردند و مدل آن ها توانست بازده فلر را با خطای پنج درصد برای فلر صنعتی محاسبه کند [۱۷]. سینگ و همکاران، در مطالعه دیگری باهدف بررسی تأثیر نسبت سوخت به هوا و سوخت به بخار، با استفاده از CFD عملکرد فلر را مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج شبیه سازی آن ها با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مقادیر پیش بینی شده برای راندمان احتراق انحراف زیادی نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارد [۱۸]. جوادی و همکاران اثر وزش باد بر شکل شعله به صورت عددی انجام دادند نتایج تحقیقات آن ها نشان داد که در سرعت های بالاتر از پنج متر بر ثانیه به علت نشست شعله بر روی بدنه، دمای بدنه بالا می رود [۱۹]. صباغ و رهبر تأثیر شکل تیپ فلر بر بیشینه دمای جداره نوک فلر را مطالعه کردند [۲۰]. در این تحقیق نشان داده شد که در هندسه استوانه ای باوجود وزش باد طول شعله بلندتر از هندسه های دیگر است. جوادی و همکاران [۲۱]، تأثیر وزش باد بر شکل شعله فلر و توزیع دما را در پالایشگاه سرخون و قشم با استفاده از شبیه سازی CFD مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد وقتی سرعت باد افزایش می یابد حداکثر دمای شعله کاهش می یابد. همچنین در اثر افزایش سرعت باد، شعله به یک طرف خمیده شده و به دیواره فلر نزدیک می شود. تغییر در حداکثر دمای دیواره فلر و همچنین تغییر در محل شعله باعث ایجاد استرس های قابل توجهی بر دیواره فلر شده و باعث آسیب بدنه فلر می شود. شبیه سازی یک سیستم فلر توسط مارا و کانتینیلو^۴ انجام شد در این تحقیق سعی شده است با استفاده از شبیه سازی، هندسه فلر را برای دستیابی به راندمان بالاتر بهینه کنند [۲۲]. بهجت و همکاران با استفاده از تحلیل CFD مشخصه های احتراق را در فلر کم فشار در مقیاس صنعتی بررسی نمودند و با استفاده از شبیه سازی علل ایجاد تنش های حرارتی در تیپ فلر بررسی گردید [۲۳]. همچنین معروف و همکاران ابتدا با استفاده از API-521

یک فلر را طراحی نمود و سپس با استفاده از روش های CFD عملکرد آن را بررسی نمود. نتایج شبیه سازی عملکرد مناسب فلر را تأیید کرد [۲۴]. با توجه به مباحث مطرح شده در منابع متعدد می توان چنین نتیجه گرفت که تحقیقات انجام یافته در خصوص فلرها با استفاده از مدل سازی CFD، بیشتر محدود به فلرهای در مقیاس آزمایشگاهی بوده و تحقیقات اندکی بر روی فلرهای صنعتی انجام پذیرفته است که این امر را می توان به دلیل گستردگی بازه زمانی و اندازه فلرها، آشفستگی زیاد جریان، سینتیک پیچیده و تأثیر قابل توجه آشفستگی بر سینتیک واکنش های احتراقی دانست.

با توجه به مطالعات کتابخانه ای انجام یافته تاکنون شبیه سازی در ابعاد صنعتی برای فلر LPG انجام نشده است. در این پژوهش، شبیه سازی فلر LPG پالایشگاه پنجم پارس جنوبی در ابعاد واقعی به منظور ارزیابی اثر مشخصه های احتراقی فلر بر شکل و موقعیت شعله و توزیع دمای حاصل در بدنه فلر، آلاینده های خروجی از آن و همچنین تأثیر مؤلفه های ذکر شده بر پایداری شعله و عدم پس کشیدن شعله به داخل تیپ فلر با استفاده از تحلیل CFD مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به در دسترس بودن منابع محاسباتی قوی (Intel® core i9-990K CPU@3.6 GHZ, 32 GB RAM)، شبیه سازی فلر صنعتی LPG با بهره گیری از تکنیک شبکه بندی هیبریدی و در نظر گرفتن تمام پدیده های مرتبط شامل آشفستگی، تشعشع و سینتیک واکنش های احتراقی انجام پذیرفته است.

۲. مدل سازی CFD احتراق در فلر و معادلات حاکم

در این تحقیق از نرم افزار ANSYS FLUENT نسخه ۱۹ برای شبیه سازی استفاده شده است. برای مدل سازی هر جریان تک فاز (محیط گازی) دارای واکنش، معادلات انتقال جرم، اندازه حرکت و انرژی حاکم بر آن سیستم لازم است. معادلات حالت پایدار متوسط رینولدز ناویر-استوکس در ادامه بیان می شوند [۱۲].

۲-۱. معادله پیوستگی (بقای جرم)

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

معادله (۱) شکل کلی معادله قانون پیوستگی می باشد. در

1. Lawal
2. Langman
3. Singh
4. Marra and Continillo

صورت وجود چند جزء ماده مختلف در سیستم و با در نظر گرفتن تأثیرات انتقال جرم این رابطه برای هر جزء به صورت رابطه ذیل نوشته خواهد شد.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i \quad (2)$$

که مقدار Y_i برابر کسر جرمی هر جزء می باشد، R_i نرخ تولید در اثر واکنش های شیمیایی و J_i انتقال جزء بر اثر نفوذ است.

۲-۲. معادله بقای اندازه حرکت

شکل کلی معادلات بقای اندازه حرکت به صورت زیر می باشد.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu (\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T) - \rho \vec{v}' \vec{v}') \quad (3)$$

که در آن v' نوسان ناشی از آشفتگی بردار سرعت، μ ویسکوزیته سیال و P فشار می باشند. علامت بار روی عبارات این معادله به مقادیر متوسط اشاره می کند. تنش های رینولدز، $\rho \vec{v}' \vec{v}'$ عبارت های اضافه ای هستند که از تجزیه متغیرهای آشفتنه به مقادیر متوسط و نوسانی به وجود می آیند. این عبارات برای کامل شدن معادله (۳) باید مدل شوند. برای این منظور از مدل آشفتگی استفاده می گردد. در این پژوهش از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ تصحیح شده (k-ε Realizable) استفاده شده است [۱۳]. در این مدل دو معادله انتقال، یکی برای انرژی جنبشی (k) و دیگری برای نرخ استهلاک انرژی آشفتنه (ε) به صورت هم زمان حل می شوند. مدل $k-\varepsilon$ شامل دو معادله زیر می باشد:

$$\rho_f \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho_f \varepsilon - Y_M \quad (4)$$

$$\rho_f \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3k} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho_f \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

در نتیجه حل معادلات (۴) و (۵) مقدار انرژی جنبشی و تلفات انرژی مشخص می شود که با استفاده از آن ها ویسکوزیته مربوط به جریان مغشوش (μ_t) به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$\mu_t = \rho_f C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

۲-۳. معادله بقای انرژی

بقای انرژی برای یک المان سیال با رابطه زیر مدل سازی

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (7)$$

که k_{eff} ثابت رسانش بوده و $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$ انرژی کل سیال در حجم کنترل می باشد.

همچنین برای توضیح کامل تر لازم به ذکر است. $\nabla \cdot \sum_j h_j \vec{J}_j$ ترم انتقال حرارت ناشی از اثرات انتقال جرم می باشد و برای یک سیستم همراه با واکنش شیمیایی مقدار به صورت زیر تعریف می شود.

$$S_{h,rxn} = - \sum_j \frac{h_j^0}{M_j} R_j \quad (8)$$

که h_j^0 آنتالپی تشکیل هر جزء و R_j نرخ تولید حجمی اجزاء مختلف در سیستم است. همچنین محاسبه خصوصیات فیزیکی با استفاده از روابط قانون مخلوط ها انجام گرفته است.

۲-۴. معادله انرژی در جامد

توزیع دما در ناحیه جامد توسط هدایت حرارتی یک بعدی مطابق معادلات ۹ و ۱۰ انجام می گیرد. همچنین در فصل مشترک بین ناحیه سیال و ناحیه جامد در مدل انتقال حرارت مزدوج^۲، انتقال حرارت رسانا در سراسر جامد با انتقال حرارت همرفتی همراه است که توسط معادله ۹ و ۱۰ لحاظ می گردد. در معادلات ۹ و ۱۰، K_{wall} ضریب هدایت حرارتی جامد و K_{Fluid} ضریب هدایت حرارتی سیال و $(\nabla \theta)_{wall}$ مربوط به اختلاف دمای سمت جامد و $(\nabla \theta)_{FLUID}$ مربوط به اختلاف دمای سمت سیال می باشد.

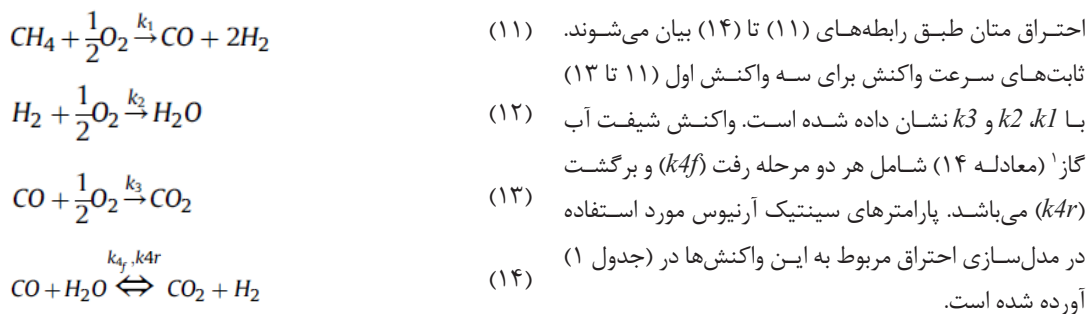
$$\nabla^2 T = 0 \quad (9)$$

$$(\nabla \theta)_{FLUID} = \frac{K_{wall}}{K_{Fluid}} (\nabla \theta)_{wall} \quad (10)$$

۲-۵. بررسی مدل های سینتیکی بکار رفته

جهت مدل سازی سینتیکی احتراق متان مجموعه واکنش های پیشنهادی توسط اسمیت و همکاران، کیم و همکاران و وستبروک و درایر [۲۷]، به طور گسترده برای شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته است. در سینتیک ارائه شده توسط اسمیت و همکاران معادلات استوکیومتری برای

1. Mixing Rules
2. Conjugative Heat Transfer



جدول ۱: پارامترهای سینتیک آرنیوس مربوط به سینتیک اسمیت و همکاران [۲۷]

ثابت سرعت	ضریب پیش‌نمایی آرنیوس	انرژی فعال‌سازی (J/kmol)	معادله سرعت (Kmol/m ³ s)
k_1	$4/4 \times 10^{11}$	$1/25 \times 10^8$	$[CH_4]^{0.5}[O_2]^{1.25}$
k_2	$2/5 \times 10^{16}$	$1/68 \times 10^8$	$[H_2]^{0.5}[O_2]^{2.25}[H_2O]^{-1}$
k_3	$3/16 \times 10^{12}$	$1/67 \times 10^8$	$[CO]^{1.5}[O_2]^{0.25}$
k_{4f}	$5/0 \times 10^{12}$	$2/83 \times 10^8$	$[CO]^{0.5}[H_2O]^1$
k_{4r}	$9/5 \times 10^{10}$	$2/39 \times 10^8$	$[CO_2][H_2]^{0.5}$

با توجه به وجود اجزاء اتان، پروپان، بوتان و پنتان، هگزان، هپتان و اکتان در خوراک ورودی به فلر LPG، برای شبیه‌سازی احتراق این اجزا از معادله استوکیومتری تک واکنشی پیشنهاد شده توسط وستبروک و درایر، استفاده می‌شود که طبق رابطه (۱۵) بیان می‌شود.

(۱۵)

$$Fuel + n_1O_2 \rightarrow n_2CO_2 + n_3H_2O$$

که در معادله استوکیومتری به جای Fuel، اتان، بوتان یا پنتان جایگذاری می‌شود. پارامترهای سینتیک آرنیوس مورد استفاده در مدل‌سازی احتراق مربوط به این واکنش در (جدول ۲) آورده شده است.

جدول ۲: پارامترهای سینتیک آرنیوس معادله سرعت آن [۲۶]

ضریب آرنیوس	انرژی فعال‌سازی (J/kmol)	معادله سرعت (Kmol/m ³ s)
$2/119 \times 10^{11}$	$2/027 \times 10^8$	$[C_2H_6]^{0.2}[O_2]^{1.3}$
$5/96 \times 10^9$	$1/256 \times 10^8$	$[C_3H_8]^{0.1}[O_2]^{1.65}$
$4/161 \times 10^9$	$1/256 \times 10^8$	$[C_4H_{10}]^{0.15}[O_2]^{1.6}$
$3/599 \times 10^9$	$1/256 \times 10^8$	$[C_3H_{12}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$
$3/205 \times 10^9$	$1/256 \times 10^8$	$[C_6H_{14}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$
$2/868 \times 10^9$	$1/256 \times 10^8$	$[C_7H_{16}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$
$2/587 \times 10^9$	$1/256 \times 10^8$	$[C_8H_{18}]^{0.25}[O_2]^{1.5}$

۲-۶. مدل‌سازی تشعشع

برای محاسبه شار تشعشعی باید ابتدا معادله انتقال حرارت تشعشعی حل شده و سپس شدت تابش در موقعیت‌های مختلف محاسبه گردد. مدل تشعشعی P1 که در این تحقیق برای مدل‌سازی تشعشع مورد استفاده قرار گرفت، ساده‌ترین حالت از مدل کلی‌تر P-N می‌باشد که بر پایه بسط شدت تشعشع (I) در یک سری هارمونیک کروی اورتوگونال شکل گرفته است. این روش به دلیل سادگی و کارآمد بودن به یکی از محبوب‌ترین روش‌های حل معادلات انتقال حرارت تشعشعی تبدیل شده است.

1. Water Gas Shift (WGS) Reaction

$$\Gamma = \frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \quad (17)$$

$$q_r = -\Gamma \nabla G \quad (18)$$

$$\nabla(\Gamma \nabla G) - aG + 4a\sigma T^4 = 0 \quad (19)$$

با ترکیب معادلات ۱۶ تا ۱۹ معادله (۲۰) به دست می‌آید

$$-\nabla q_r = aG + 4a\sigma T^4 \quad (20)$$

مقدار $-\nabla q_r$ می‌تواند به‌طور مستقیم در معادله انرژی جایگذاری شود و با استفاده از آن چشمه ناشی از تشعشع را محاسبه کرد [۲۷].

۳. روش شبیه‌سازی و شرایط مرزی مورد استفاده

برای شبیه‌سازی فلر LPG از الگوریتم سیمپل^۱ برای پیوستگی فشار و سرعت استفاده شد. هم‌چنین به‌منظور جداسازی معادلات انتقال اجزاء از روش جداسازی درجه یک^۲ و برای دیگر معادلات از روش جداسازی درجه دو^۳ استفاده شد. آشفتگی توسط معادله k-ε Realizable مدل‌سازی گردید. برای محاسبه تأثیر تشعشع بر انتقال حرارت، مدل P-1 مورد استفاده قرار گرفت. (جدول ۳) شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی فلر LPG را نشان می‌دهد.

جدول ۳: شرایط مرزی استفاده شده در شبیه‌سازی فلر LPG

شرایط مرزی مورد استفاده	مرز مورد نظر
دیواره با شرط عدم لغزش	دیواره‌های فلر
شرط مرزی انتقال حرارت: کوپل ضریب انتشار فولاد برابر با ۰/۸۵	
دیواره با شرط تنش برشی برابر با صفر	دیواره انتهای دامنه محاسباتی
دما ثابت برابر با K ۳۰۰ ضریب انتشار برابر با یک	
دیواره با شرط تنش برشی برابر با صفر	کف دامنه محاسباتی
دما ثابت برابر با K ۳۰۰ ضریب انتشار برابر با یک	
فشار خروجی ثابت برابر با فشار اتمسفری	فشار خروجی محدوده محاسباتی

به‌وضوح مشخص است تیپ فلر شامل استوانه‌هایی با قطر کم جهت تزریق بخار و ایجاد جت به شعله می‌باشد.

مزایای این مدل می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- در مدل P1 معادله انتقال تشعشعی یک معادله پخششی است، که حل معادله را ساده می‌کند.
- این مدل اثرات پراکنش را در نظر می‌گیرد.
- برای کاربردهای احتراقی که ضخامت نوری (نفوذپذیری نور در ماده) بزرگ است به‌خوبی پاسخ‌گو است.
- مدل P1 می‌تواند به‌آسانی برای هندسه‌های پیچیده به کار رود. همان‌طور که ذکر شد مدل تشعشع P1 ساده‌ترین حالت مدل کلی P-N است که بر پایه بسط شدت تشعشعی (I) به یک سری هارمونیک کروی اور توگونال شکل گرفته است.

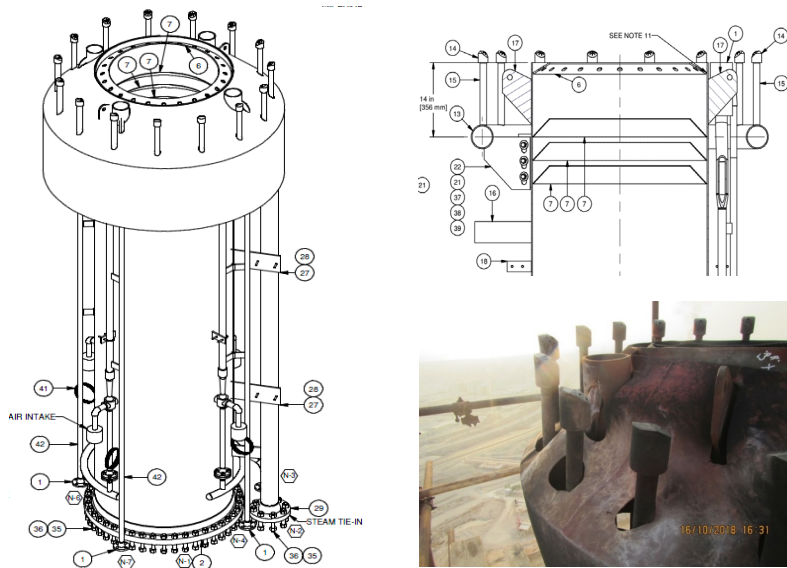
چنانچه تنها چهار ترم در این سری به کار رود، معادله (۱۶) برای شار تشعشعی به دست می‌آید.

$$q_r = -\frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (16)$$

که در آن G ، تشعشع تابیده و C ، ضریب تابع خطی فاز غیر ایزوتروپیک است. با تعریف Γ به‌صورت رابطه (۱۷)، معادله به شکل (۱۸) ساده شده و در نهایت معادله انتقال به‌صورت رابطه (۱۸) درمی‌آید.

در (شکل ۱) شماتیک تیپ فلر LPG طبق نقشه‌های طراحی و عکس گرفته شده در حین تعمیرات اساسی پالایشگاه نشان داده شده است. همان‌طور که در (شکل ۱)

1. Simple
2. First-Order Upwind
3. Second-Order Upwind



شکل ۱: تصویر واقعی، نمای از راست و ایزومتریک تیپ فلر LPG

در (جدول ۴) ترکیب درصد گازهای ارسالی به فلر LPG بر اساس شرایط طراحی و عملیاتی آورده شده است همچنین.

جدول ۴: ترکیب درصد گازهای ارسال شده به فلر LPG

ترکیب درصد (mol%)	اجزای ارسالی به فلر	ترکیب درصد (mol%)	اجزای ارسالی به فلر
۰/۰۰۶	C ₄ H ₁₀	۷/۴۹۳۰	H ₂ O
۰/۰۰۱۵	C ₅ H ₁₂	۰/۰۱۳۳	N ₂
۰/۰۵۹۳	C ₆	۵۴/۳۹۲۰	CO ₂
۰/۰۱۴۸	C ₇	۰/۵۴۸۹	CH ₄
۰/۰۱۰۷	C ₈	۰/۰۴۲۲	C ₂ H ₆
۳۷/۳۳۳۶	H ₂ S	۰/۰۱۳۱	C ₃ H ₈

در (جدول ۵) میزان گاز ارسالی به فلر LPG بر اساس شرایط عملیاتی اخذ شده از پالایشگاه پنجم پارس جنوبی گزارش شده است.

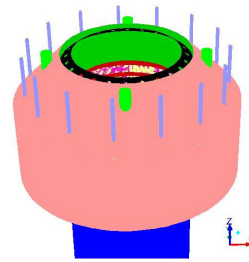
نرم‌افزار مناسب (GAMBIT) و مطابق با نقشه‌های طراحی می‌باشد. با توجه به پیچیدگی طراحی تیپ فلر و تأثیر هرکدام از بخش‌ها و جزئیات هندسی بر عملکرد و بازده تیپ فلر، لازم است تمام جزئیات و امان‌های تیپ فلر بر اساس نقشه‌های طراحی در ترسیم هندسه رعایت شود. در این شبیه‌سازی همان‌طور که در (شکل ۲) نشان داده است، ترسیم هندسه تیپ فلر با جزئیات مربوطه انجام شده است. همان‌طور که در (شکل ۲) ملاحظه می‌شود، هندسه ترسیم شده منطبق با شماتیک فلر LPG نشان داده شده بر اساس نقشه‌های طراحی و عکس‌های اخذ شده از تیپ فلر به هنگام تعمیرات اساسی می‌باشد. بطوریکه هندسه ترسیم شده فاقد هرگونه ساده‌سازی بوده و تمام جزئیات تیپ فلر در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است.

در (جدول ۵) میزان گاز ارسالی به فلر LPG بر اساس شرایط عملیاتی اخذ شده از پالایشگاه پنجم پارس جنوبی گزارش شده است.

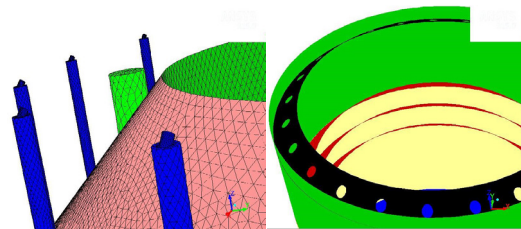
جدول ۵: ترکیب درصد گازهای ارسال شده به فلر LPG

نوع جریان	مقدار طراحی	مقدار عملیاتی
میزان گاز ارسالی به فلر (Kg/hr)	۷/۴۹۳۰	۷/۴۹۳۰
میزان بخار (Kg/hr)	۰/۰۱۳۳	۰/۰۱۳۳
میزان Assist Gas (Kg/hr)	۵۴/۳۹۲۰	۵۴/۳۹۲۰
میزان Purget Gas (NM3/hr)	۰/۵۴۸۹	۰/۵۴۸۹
میزان Pilot Gas (NM3/hr)	۰/۰۴۲۲	۰/۰۴۲۲

اولین گام جهت شبیه‌سازی CFD ایجاد هندسه در



نمای کلی از تیپ فلر

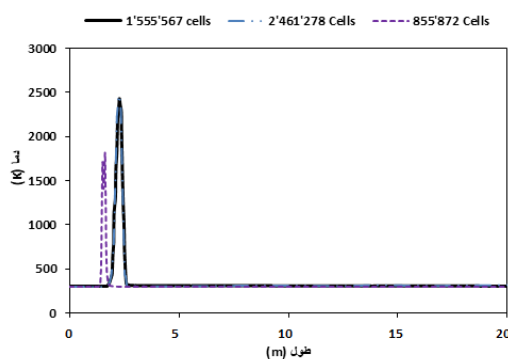


نمایی از تثبیت کننده شعله

نمایی از Gas Seal

شکل ۴: نمای از هندسه و شبکه محاسباتی ایجاد شده

سلول (حجم کنترلی) که در نهایت برای بررسی استقلال نتایج مدل سازی از مش بندی مورد استفاده قرار گرفت، ارائه می شود. با توجه به بررسی پدیده احتراق در این پروژه، پروفایل های دمای پیش بینی شده از اهمیت ویژه ای برخوردار هستند. نمودار تغییرات دمای پیش بینی شده جریان گاز در راستای خط افقی به ارتفاع ۱۰ متر در جهت وزش باد برای سه شبکه بندی مختلف در (شکل ۳) آورده شده است. با توجه به (شکل ۳) می توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد حجم های کنترلی به بیش از ۱،۵۵۵،۵۶۷ تأثیر قابل ملاحظه ای در نتایج پیش بینی شده ندارد؛ بنابراین شبکه بندی با تعداد ۱،۵۵۵،۵۶۷ سلول به عنوان شبکه بندی بهینه برای انجام محاسبات انتخاب گردید؛ بنابراین وجود تفاوت جزئی در پاسخ های به دست آمده از دو شبکه بندی با تعداد ۱،۵۵۵،۵۶۷ و ۲،۴۶۱،۲۷۸ سلول منطقی بوده و می تواند ناشی از تغییرات تناوبی اندک پاسخ در طی محاسبات سعی و خطا باشد.



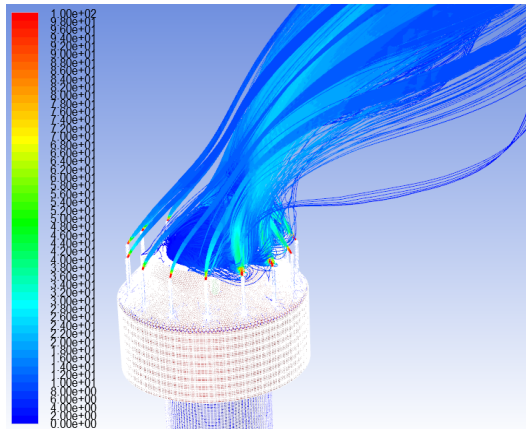
شکل ۳: دمای پیش بینی شده جریان گاز در راستای یک خط افقی در جهت وزش باد و ارتفاع ۱۰ متر

۴. نتایج شبیه سازی فلر LPG

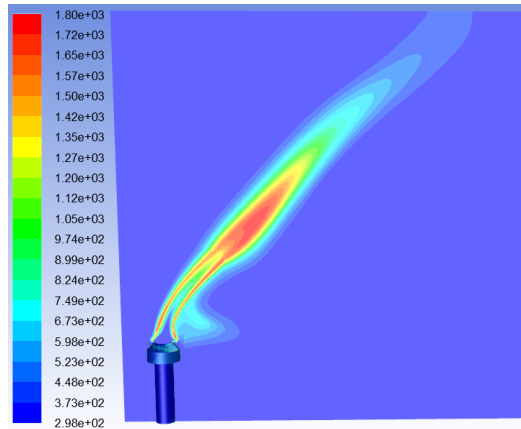
خوراک با مشخصات ارائه شده در (جدول ۴) گزارش، وارد تیپ فلر LPG می شود و اکسیژن مورد نیاز از طریق هوای محیط با سرعت باد وارد ناحیه احتراق می گردد. پس از انجام واکنش، شعله تشکیل شده و محصولات حاصل از احتراق تولید می گردند. در ادامه نتایج حاصل از شبیه سازی برای دو حالت طراحی و عملیاتی ارائه می گردد. در (شکل ۴) پروفایل دمایی و شکل شعله تشکیل شده در فلر LPG در شرایط طراحی آورده شده است. همان طور که در شکل مشخص است به علت دبی حجمی بسیار بالای گازهای ارسالی به فلر در حالت طراحی، شعله بسیار بزرگی تشکیل می شود. به طوری که ارتفاع شعله تشکیل شده حدود ۱۵ متر می باشد و بخش وسیعی از محفظه اطراف فلر، شامل شعله بوده و دمای بالایی دارد.

با توجه به هندسه ترسیم شده فلر، کیفیت شبکه محاسباتی تأثیر چشم گیری بر نتایج شبیه سازی CFD دارد. از این رو برای دستیابی به نتایج صحیح و با کمترین خطای ممکن در مطالعه CFD شبیه سازی فرایند احتراق در ابعاد واقعی و با در نظر گرفتن تمام پدیده های انتقال (انتقال مومنوم، حرارت، جرم، تابش، آشفستگی و واکنش های شیمیایی) انجام پذیرفت. بر این اساس فضایی مکعب مستطیل شکل به ابعاد $20 \times 20 \times 3$ m که ۱۶ متر بالای تیپ فلر در آن قرار دارد به عنوان فضای شبیه سازی طراحی شد.

ایجاد شبکه محاسباتی مناسب موجب همگرایی بهتر در حل معادلات و بالعکس، انتخاب نامناسب شبکه می تواند موجب ایجاد ناپایداری یا عدم همگرایی در محاسبات گردد. در این پروژه علاوه بر انتخاب شبکه مناسب، از مستقل بودن نتایج حل معادلات از شبکه استفاده شده، اطمینان حاصل گردیده است. در اطراف تثبیت کننده شعله، نازل های تزریق بخار Gas Seal و بخش های داخلی تیپ فلر مش ها ریزتر انتخاب شدند تا اطلاعات دقیق تری در این نواحی به دست آید. از طرفی در بقیه نقاط دامنه محاسباتی و به دور از تیپ فلر، از شبکه ۶ وجهی (شبکه منظم) برای کاهش خطاهای عددی، همانند نفوذ کاذب استفاده شده است. در این تحقیق هدف شبیه سازی فلر LPG مدنظر است برای بررسی مش بندی طراحی شده، این مش بندی با اندازه های مختلف در دامنه محاسباتی اجرا شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. در این گزارش نتایج سه مش بندی با تعداد ۱،۵۵۵،۵۶۷، ۸۵۵،۸۷۲ و ۲،۴۶۱،۲۷۸



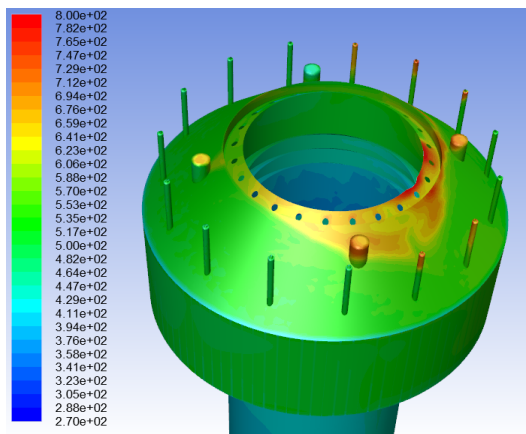
شکل ۶: مسیر حرکت بخار آب تزریقی به همراه گازهای ارسالی به فلر LPG



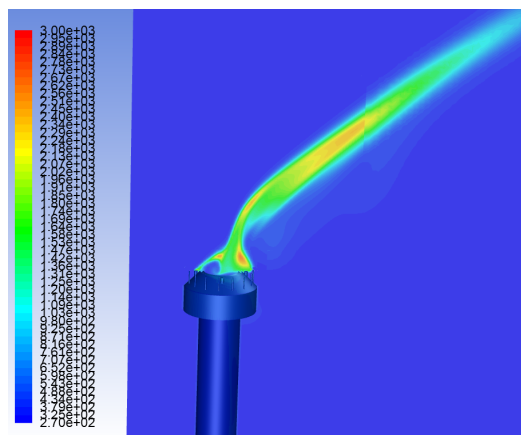
شکل ۴: پروفایل دما و ارتفاع شعله تشکیل شده در فلر LPG (شرایط طراحی)

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی CFD که در بالا گزارش شده است در اثر سرعت باد شعله به میزان کمی به سمت سپر باد منحرف می‌گردد. از طرف دیگر سرعت بالای تزریق بخار آب از طریق نازل‌های طراحی شده در اطراف تیپ فلر باعث عدم برخورد مستقیم شعله به سپر باد می‌گردد. همچنین به علت هیدرودینامیک ایجاد شده در تیپ فلر و طراحی مناسب نازل‌های تزریق بخار، شاهد عدم برگشت شعله به داخل تیپ فلر می‌باشیم به‌طوریکه دمای Gas Seal و بدنه داخلی تیپ فلر افزایشی ندارد.

در (شکل ۵) پروفایل دمایی (شکل شعله) گازهای حاصل از احتراق در فلر LPG در شرایط عملیاتی آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است به علت اثر سرعت باد، شعله در جهت باد به صورت ملایم متمایل شده است. چون جهت وزش باد از سمت چپ به راست می‌باشد، شعله به سمت راست کشیده شده است.



شکل ۷: پروفایل دمای سپر باد تیپ فلر LPG (شرایط عملیاتی)



شکل ۵: پروفایل دما و ارتفاع شعله تشکیل شده در فلر LPG (شرایط عملیاتی)

در (شکل ۷) پروفایل دمایی صفحه مشبک و سپر باد تیپ فلر LPG در حالت عملیاتی نشان داده شده است. مطابق (شکل ۷) دمای سپر باد و صفحه مشبک بالای تیپ فلر به علت برخورد و تماس با شعله، در برخی نقاط محدود دارای دمای بالاتری هستند. این افزایش دما به تخریب اجزای تیپ فلر می‌انجامد که در (شکل ۸) به‌وضوح دیده می‌شود.

مسیر حرکت بخار آب تزریقی به همراه گازهای ارسالی به فلر LPG و گازهای حاصل از احتراق در (شکل ۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است تفاوت سرعت بخار آب تزریق شده از نازل‌ها با سرعت گازهای ارسالی به فلر و در محدوده تزریق بخار آب در تیپ فلر، قابل ملاحظه است و بخار آب تزریق شده با سرعت زیاد و با اختلاط مناسب از تیپ فلر خارج می‌گردد.

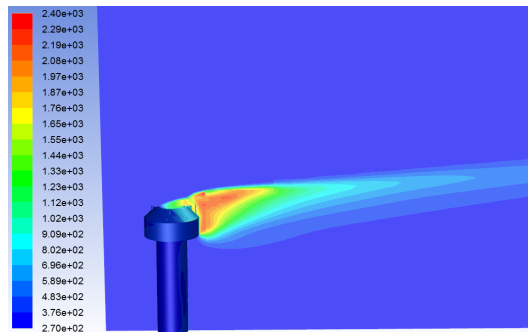




شکل ۸: تخریب تیپ فلر LPG در اثر تنش‌های حرارتی (شرایط عملیاتی)

۵. بررسی اثر تندبادهای مقطعی بر عملکرد فلر LPG

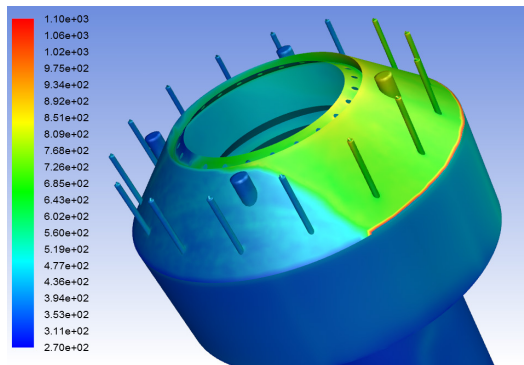
با توجه به وجود تندبادهای مقطعی در سال‌های گذشته و افزایش سرعت باد حتی تا ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت (معادل با ۳۰/۵ متر بر ثانیه) اثر تندبادهای مقطعی بر عملکرد و مشخصه‌های احتراقی فلر LPG و نهایتاً راهکار مناسب جهت کاهش مخاطرات به‌وجود آمده در ذیل تشریح شده است.



شکل ۹: پروفایل دما و ارتفاع شعله تشکیل شده در فلر LPG (شرایط عملیاتی در حالت تندباد)

در (شکل ۹) پروفایل دمایی (شکل شعله) حاصل از احتراق در فلر LPG در شرایط عملیاتی در مواقعی که سرعت باد محیطی به مقدار ۳۰/۵ متر بر ثانیه (۱۱۰ کیلومتر بر ساعت) افزایش یافته، آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است به علت سرعت بسیار زیاد باد، ارتفاع شعله نسبت به حالتی که سرعت باد محیطی برابر با ۵ متر بر ثانیه (شرایط نرمال آب و هوایی منطقه) می‌باشد در جهت باد بسیار کشیده‌تر می‌باشد. به علت تفاوت سرعت گازهای خروجی از دهانه تیپ فلر و سرعت تندباد، بخشی از هوا به داخل تیپ فلر کشیده می‌شود که منجر به تشکیل شعله در بخش بالایی تیپ فلر می‌شود. پروفایل دما در نوک تیپ فلر LPG (محدوده سپر باد) در شرایط کارکرد عملیاتی در (شکل ۱۰) در حالتی که سرعت

باد محیطی در منطقه به ۳۰/۵ متر بر ثانیه (۱۱۰ کیلومتر بر ساعت) افزایش یافته، نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است تشکیل شعله به علت سرعت بالای باد و متمایل شدن شعله در جهت افق باعث برخورد شدید شعله به بدنه تیپ فلر خصوصاً سپر باد می‌گردد. از طرف دیگر به علت کشیده شدن بخشی از هوا به داخل تیپ فلر در محدوده بالایی تیپ فلر قسمتی از شعله در محدوده Gas Seal تا صفحه سوراخ‌دار نوک تیپ فلر تشکیل می‌شود. برخورد مستقیم شعله به سپر باد و همچنین وجود شعله در قسمت داخلی تیپ فلر در دراز مدت باعث اعمال تنش‌های حرارتی به بدنه تیپ فلر شده (۵۰۰-۸۵۰ °C) و موجب تخریب بدنه تیپ فلر می‌شود؛ بنابراین جهت کاهش برخورد مستقیم شعله به بدنه تیپ فلر بایستی سرعت گازهای خروجی از تیپ فلر افزایش یابد تا شعله به سمت بالا کشیده شود و بر سرعت افقی باد غلبه کند. یکی از راه‌های مؤثر در حالتی که تندباد مقطعی وجود دارد، افزایش سرعت گازهای حاصل از احتراق در خروجی تیپ فلر با افزایش میزان تزریق گاز Purge یا گاز جارویی^۱ به تیپ فلر ممکن می‌باشد. با افزایش میزان تزریق گاز به شبکه فلر LPG میزان احتراق و در نتیجه گازهای حاصل از احتراق افزایش یافته و محصولات حاصل از واکنش احتراقی با سرعت بالایی به بالای تیپ فلر پرتاب می‌شوند. سرعت بالای گازهای حاصل از احتراق در خروجی تیپ فلر باعث غلبه بر سرعت باد افقی شده و از برخورد مستقیم شعله با بدنه تیپ فلر خصوصاً سپر باد جلوگیری می‌کند.



شکل ۱۰: پروفایل دما و برخورد شعله به سپر باد در نوک تیپ فلر LPG (شرایط عملیاتی در حالت تندباد)

با مقایسه نتایج ترسیم شده و پارامترهای احتراقی در فلر LPG در قسمت‌های قبل برای دو حالت سرعت باد ۵ و ۳۰/۵ متر بر ثانیه می‌توان نتیجه‌گیری ذیل را در قالب (جدول ۶) ارائه داد.

1. Sweep

جدول ۵: ترکیب درصد گازهای ارسال شده به فلر LPG

پارامتر	سرعت ۵ m/s	سرعت ۳۰/۵ m/s
انحراف شعله به سمت سپر باد	بسیار کم	بسیار زیاد
تشکیل شعله در داخل تیپ فلر	ناچیز	قابل توجه
افزایش دمای (Gas Seal) و بدنه تیپ فلر	ناچیز	قابل توجه
تأثیر تزریق بخار در هدایت شعله به سمت بالای تیپ فلر	بسیار کم	بسیار کم

۶. نتیجه‌گیری

فهرست علائم اختصاری

P	فشار bar	در این تحقیق، شبیه‌سازی CFD فلر LPG پالایشگاه
g	شتاب جاذبه $m.s^{-2}$	در مقیاس صنعتی و در شرایط عملیاتی و کارکردی انجام
v	سرعت $m.s^{-1}$	پذیرفت. با توجه به پیچیدگی تیپ فلر و تأثیر هرکدام از
H	آنتالپی کلی $kJ.kg^{-1}.s^{-1}$	جزئیات هندسی بر عملکرد و بازده احتراق در تیپ فلر، تمام
h	آنتالپی اجزا $kJ.kg^{-1}.s^{-1}$	جزئیات هندسی تیپ فلر بر اساس نقشه‌های طراحی در نظر
j	شار گرمی $kg.m^{-2}.s^{-1}$	گرفته شده است. به‌طوریکه هندسه ترسیم شده فاقد هرگونه
q	شار حرارتی $kJ.m^{-2}.s^{-1}$	ساده‌سازی می‌باشد. با ایجاد شبکه محاسباتی مناسب همگرایی
S	جمله مربوط به منبع مومنوم $kg.m^{-2}.s^{-2}$	بهتر در حل معادلات حاصل شد. به‌طوریکه در اطراف تشبیت
D_{ij}	ضریب نفوذ $m^2.s^{-1}$	کننده شعله، نازل‌های تزریق بخار، Gas Seal و بخش‌های
$D_{i,eff}$	Effective diffusivity coefficient $m^2.s^{-1}$	داخلی تیپ فلر مش‌ها ریزتر انتخاب شدند. از طرفی در بقیه
Y_i	جزء جرمی اجزاء گاز $kmol.m^{-3}$	نقاط دامنه محاسباتی و به دور از تیپ فلر، از شبکه‌بندی منظم
R_i	منبع مربوط به واکنش $kg.m^{-3}.s^{-1}$	برای کاهش خطاهای عددی استفاده شده است.
T	دما K	نتایج حاصل از شبیه‌سازی CFD شامل پروفایل دمایی
S_m	جمله مربوط به منبع پیوستگی	(شکل شعله) و سرعت گازهای حاصل از احتراق در فلر LPG
k_i	ثابت واکنش $mol.s^{-1}.gr^{-1}.bar^{-1}$	در شرایط عملیاتی نشان می‌دهد که افزایش دمای بدنه تیپ فلر
k	انرژی جنبشی نوسانات آشفته $m^2.s^{-2}$	بر اثر برخورد شعله قابل توجه بوده که البته توسط مشاهدات
k	Activation Energy $kJ.kmol^{-1}$	تجربی نیز تأیید شده است؛ بنابراین عملکرد آن با مقدار گاز
E_i	نوسانات سرعت $m.s^{-1}$	جارویی فعلی مناسب نیست؛ بنابراین ناگزیر از افزایش مقدار گاز
v'	تشنعش تابیده W/m^2	جارویی به فلر LPG هستیم چرا که با ادامه این روند و افزایش
G	ثابت جهانی گازها $kJ.kmol^{-1}.K^{-1}$	دمای سطح تجهیزات تیپ فلر، در نهایت منجر به تخریب کامل
R	جرم موکولی $kg.kmol^{-1}$	تیپ فلر تعویض کلی آن گردد. علاوه بر این با توجه به وجود
M_i	Volume, m^3	تندبادهای مقطعی در سال‌های گذشته و افزایش سرعت باد
V	ضریب نفوذ کلی $m^2.s^{-1}$	حتی تا ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت (معادل با ۳۰/۵ متر بر ثانیه)
D	ضریب هدایت گرمایی $kJ.m^{-1}.K^{-1}$	اثر تندبادهای مقطعی بر عملکرد و مشخصه‌های احتراقی فلر
k_m		LPG بررسی گردید. نتایج در صورت وجود تندباد نشان داد
		که انحراف شعله در جهت مسیر باد زیاد بوده و در نتیجه شعله
		به داخل تیپ فلر کشیده می‌شود و دمای Gas Seal و بدنه
		تیپ فلر و سپر باد بالا رفته و نهایتاً به تخریب کامل سپر باد
		می‌انجامد. برای جلوگیری از به وجود آمدن چنین مخاطراتی
		(هنگام تندباد) باید تزریق گاز سوخت به حدی تنظیم گردد تا
		از برگشت شعله به درون تیپ فلر جلوگیری شود.

Greek Letters

ρ	دانسیت $kg.m^{-3}$
μ	ویسکوزیت $kg.m^{-1}.s^{-1}$
ν	ویسکوزیته سینماتیک
ε	اضمحلال انرژی جنبشی نوسانات آشفته

Subscript

i	عدد اجزاء
j	عدد شمارنده جزء دوم
m	مخلوط

مراجع:

- W. Kostiuk, "The use of a closed-loop wind tunnel for measuring the combustion efficiency of flames in a cross flow," *Combust. Flame*, vol. 119, no. 3, pp. 319–334, Nov. 1999.
- [11]. M. R. JOHNSON, D. J. WILSON, and L. W. KOSTIUK, "A FUEL STRIPPING MECHANISM FOR WAKE-STABILIZED JET DIFFUSION FLAMES IN CROSSFLOW," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 169, no. 1, pp. 155–174, Aug. 2001.
- [12]. L. Kostiuk, M. Johnson, and G. Thomas, "University of Alberta Flare Research Project Final Report November 1996–September 2004," 2004.
- [13]. D. Castiñeira and T. F. Edgar, "CFD for Simulation of Steam-Assisted and Air-Assisted Flare Combustion Systems," *Energy & Fuels*, vol. 20, no. 3, pp. 1044–1056, May 2006.
- [14]. D. Castiñeira and T. F. Edgar, "Computational Fluid Dynamics for Simulation of Wind-Tunnel Experiments on Flare Combustion Systems," *Energy & Fuels*, vol. 22, no. 3, pp. 1698–1706, May 2008.
- [15]. D. Castiñeira and T. F. Edgar, "CFD for Simulation of Crosswind on the Efficiency of High Momentum Jet Turbulent Combustion Flames," *J. Environ. Eng.*, vol. 134, no. 7, pp. 561–571, 2008.
- [16]. M. S. Lawal, M. Fairweather, D. B. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, and A. Williams, "Computational Study of a Lifted Turbulent Jet Flame in a Cross-flow: Flame Length and Emissions," *Proc. 2nd Annu. Gas Process. Symp.*, pp. 237–245, 2010.
- [1]. آشنایی با فلر. مدیریت بهداشت و ایمنی محیط زیست شرکت ملی پالایش و پخش، ۱۳۹۱.
- [۲]. امید زاد اکبر، ع. و. م. انبیاء «بررسی سیستم‌های کاهش و بازیابی گازهای ارسالی به مشعل پالایشگاه (فلر)» پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی. گروه مهندسی شیمی، دانشگاه تهران، بهمن.
- [3]. D. K. Stone, S. K. Lynch, R. F. Pandullo, L. B. Evans, and W. M. Vatavuk, "Flares. Part i: Flaring technologies for controlling voc-containing waste streams," *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 42, no. 3, pp. 333–340, 1992.
- [4]. D. K. Stone, S. K. Lynch, R. F. Pandullo, and R. Corporation, *FLARES*. 1995.
- [5]. A. Bahadori, "Blow-Down and Flare Systems", *Natural Gas Processing*, Elsevier, 2014, pp. 275–312.
- [6]. B. Karthikeyan, "Manage Change to Flare Systems", <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2020/January>.
- [7]. Y. AKTAŞ, Ö. ÖZARIK, "Dynamics of operation for flare systems", *Digital Refining, Combustion Systems and Engineering*, Apr-2014.
- [8]. A. Kumar, S. Phadatare, P. Deore, "A GUIDE ON SMOKELESS FLARING: AIR/STEAM ASSISTED AND HIGH PRESSURE FLARING", *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 2020, Vol. 4, Issue 12.
- [9]. R. F. Huang and J. M. Chang, "The stability and visualized flame and flow structures of a combusting jet in cross flow," *Combust. Flame*, vol. 98, no. 3, pp. 267–278, Aug. 1994.
- [10]. E. Bourguignon, M. R. Johnson, and L.



- [25]. A. A. Maaroo, J. D. Smith, M. H.S. Zangana, "Design and simulation of a utility oilfield flare in Iraq/Kurdistan region using CFD and API-521 methodology", *Heliyon*, vol. 9, no. 8, 2023.
- [26]. C.K. Westbrook, F.L. Dryer, "Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuel in Flames", *Combustion Science and Technology*, 1981, Vol. 27, pp. 31-43.
- [27]. Frenklach, M.; Wang, H.; Goldenberg, M.; Smith, G. P.; Golden, D. M.; Bowman, C. T.; Hanson, R. K.; Gardiner, W. C.; Lissianski, V. GRI-Mech: An Optimized Detailed Chemical Reaction Mechanism for Methane Combustion; Gas Research Institute: 1995; Tech. Rep. GRI-95/0058.
- [28]. ANSYS Fluent 19.1 User Manual Guide, www.ansys.com.
- [17]. A. S. Langman and G. J. Nathan, "Influence of a combustion-driven oscillation on global mixing in the flame from a refinery flare," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 35, no. 1, pp. 199–210, Jan. 2011.
- [18]. K. D. Singh et al., "Computational fluid dynamics modeling of industrial flares operated in stand-by mode," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 51, no. 39, pp. 12611–12620, 2012.
- [19]. K. D. Singh, P. Gangadharan, D. H. Chen, H. H. Lou, X. Li, and P. Richmond, "Computational fluid dynamics modeling of laboratory flames and an industrial flare," *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 64, no. 11, pp. 1328–1340, 2014.
- [۲۰]. س. جوادی، م. عنبرسوز، ع. قبادی، م. کهرم، «بررسی عددی اثر باد بر شکل شعله در مشعل بلند پالایشگاه سرخون و قشم»، نشریه علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، جلد ۲۸، شماره دو، سال ۱۳۹۳.
- [۲۱]. ر. صباغ، ن. رهبر، «بررسی تأثیر شکل هندسی بر پیشینه دمای جداره‌ی نوک فلر و توزیع آلاینده‌های خروجی آن»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، جلد ۴، شماره ۴، ۱۳۹۴.
- [22]. M. Javadi et al., "Numerical Investigation of Wind Effects on the Flame Shape of Sarkhoon and Qeshm 's Refinery Flares," vol. 28, no. 2, 2017.
- [23]. F. S. Marra and G. Continillo, "Dynamic Numerical Simulation of an Enclosed Flare," in *Combustion Colloquia, XXXII Event of The Italian Section of The Combustion*, 2009, pp. 1–6.
- [۲۴]. یعقوب بهجت، محمد ایرانی، جعفر صادق زاده اهری، مهدی میرزا آقائبار «آنالیز مشخصه‌های احتراق و بررسی علت ایجاد تنش حرارتی در فلر پالایشگاه گاز با استفاده از تحلیل CFD» نشریه پژوهش نفت شماره ۱۳۱ مهر و آبان ۱۴۰۲، صفحه ۱۰۶.س



Investigating the Performance of the LPG Flare of the Fifth South Pars refinery Using CFD Simulation and Providing a Solution

Mohammad Irani *, Yaghoubeh Behjatn

Faculty Member, Gas Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Postal Code: 1485613111, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL ARTICLE

Article History:

Received: 11 March 2024

Revised: 23 April 2024

Accepted: 15 May 2024

Keywords:

Combustion Characteristics

Flame

LPG industrial flare

CFD simulation

ABSTRACT

In this research, the simulation of the LPG flare of South Pars Refinery in industrial dimensions was carried out in order to investigate the effect of the flare tip geometry on the combustion characteristics of the flare, including the shape and position of the flame, using CFD technique. In order to prevent numerical errors, a suitable hybrid grid was used. The results of the developed model (CFD) include the temperature and velocity profile, the concentration profile of the components of the gases sent to the flare, as well as the concentration profile of the components of the combustion products. The results of CFD simulation show that in the LPG flare in operating conditions, in some points of the flare tip, the increase in the temperature of the flare tip body (523-350 °C) due to the direct impact of the flame is significant in a limited way. Therefore, the performance of the flare in operating conditions is not suitable with the current amount of sweeping gas. With the continuation of this process and the increase in the surface temperature of the flare type body, it will eventually lead to its complete destruction and replacement. Therefore, the amount of sweep gas injected into the flare should be increased to improve the combustion performance. In addition, due to the presence of sectional gusts and the increase in wind speed up to 110 km/h, the effect of sectional gusts on the performance and combustion characteristics of the LPG flare was investigated. The results of the CFD model showed that the flame deviation in the direction of the wind direction is high and as a result the flame is drawn into the flare tip and the temperature of the gas seal and the flare tip body and the wind shield increases up to 850 °C and finally to Complete destruction of the wind shield. In order to avoid such dangers (when the wind is strong), the fuel gas injection should be adjusted to a level to prevent the flame from returning to the flare tip.

DOR: [20.1001.1.25885251.1403.00.00](https://doi.org/10.1001.1.25885251.1403.00.00)

How to cite this article

M. Irani, Y. Behjat, Investigating the Performance of the LPG Flare of the Fifth South Pars refinery Using CFD Simulation and Providing a Solution. *Iranian Journal of Gas Engineering*, 2024; 11(1): 8-21. (https://www.ijge.irangi.org/article_722818.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: iranim@ripi.ir, (M. Irani).

Available online 01 September 2024

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

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



بررسی تغییر خواص مکانیکی و متالورژیکی حاصل از آزمایش هیدرواستاتیک به روش ۱۱۰ درصد تنش تسلیم در خطوط لوله گاز

سیدامیر رضاییگی^۱، محمدحسین یاس^{۲*}، بهروز درگاهی^۳

۱. کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، شرکت گاز استان کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۲. استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳. کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، واحد بازرسی فنی، شرکت مهندسی توسعه گاز ایران، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: yas@razi.ac.ir

مقاله‌ی علمی-پژوهشی

صفحه ۲۲ - ۳۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳

چکیده

یکی از پرسش‌های مجریان و بهره‌برداران، تأثیر فشار ۱۱۰ درصدی آزمون هیدرواستاتیک بر روی خواص مکانیکی و متالورژیکی لوله و اثرات آن در زمان بهره‌برداری است. هدف این نوشتار بررسی این موضوع از طریق آزمون‌های عملی و تحلیل تئوری و نرم‌افزاری است. برای نیل به این هدف، آزمون مقاومت ۱۱۰ درصدی هیدرواستاتیک با همکاری واحد پژوهش شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران در بندرعباس بر روی لوله ۳۰ اینچ ساخت شرکت لوله‌سازی اهواز (API5L PIPE30 THK0.5 SAW X60) انجام شد و از آنجایی که لوله به مدت ۴ ساعت تحت فشار قرار گرفت نتایج به‌دست‌آمده با شرایط واقعی یکسان است.

از لوله انتخابی فوق یک رینگ قبل از اعمال فشار مقاومت و یک رینگ پس از آزمون مقاومت از لوله برش زده، ابتدا تنش پسماند در دو رینگ اندازه‌گیری و سپس ۲۸ نمونه برای انجام آزمون‌های کشش، خمش، ضربه، سختی و متالوگرافی ساخته شد.

به‌منظور دستیابی به نتایج و داده‌های قابل استناد، آزمون‌های مکانیکی خمش، کشش و ضربه در آزمایشگاه مرجع گام اراک که دارای گواهی‌نامه از اداره استاندارد می‌باشد و آزمون سختی و متالوگرافی در آزمایشگاه متالوژی واحد کنترل مرغوبیت شرکت ماشین‌سازی اراک (QA) انجام شد.

با به دست آمدن نمودار تنش کرنش و خواص لوله X60 در منطقه پلاستیک از آزمون کشش، لوله تحت فشار ۱۱۰% Sy در نرم‌افزار آباکوس تحلیل و تنش و کرنش پلاستیک ایجاد شده در لوله مورد بررسی قرار گرفت و ضخامت مناطق الاستیک و پلاستیک به کمک آباکوس تخمین زده شد.

به‌منظور بررسی تغییرهای احتمالی ساختار متالورژیکی، نمونه‌هایی از قبل و بعد از آزمون مقاومت با همکاری آزمایشگاه کنترل مرغوبیت شرکت ماشین‌سازی اراک در حالت ماکرو و میکرو مورد بررسی قرار گرفت.

کلید واژه‌ها: آزمون مقاومت، آزمون هیدرواستاتیک ۱۱۰ درصد، آزمون هیدرواستاتیک خطوط لوله



۱. مقدمه

تنش تسلیم واقعی لوله به دست آمده از آزمون کشش:

$$SMYS = 78000 \text{ Psi}$$

$$P_y = (2 \times S_y \times t) / D = 2 \times 78000 \times 0.5 / 30 = 2600$$

$$\text{Psi} = 17.9 \text{ MPa}$$

فشار آزمون مقاومت:

$$P = 1.1 \times P_y = 2860 \text{ Psi} = 19.7 \text{ MPa}$$

از لوله (PIPE30 THK0.5 SAW X60) پیش و پس از آزمون مقاومت ۱۱۰٪ S_y دو رینگ برای اندازه گیری تنش پسماند و ساخت نمونه های آزمون های مکانیکی کشش، خمش، ضربه و متالوگرافی و ... جدا شد. (شکل ۱ و ۲).

۳. محاسبه تنش پسماند

مطابق بند ۹،۱۶،۴ استاندارد (۱) IGS-M-PL-001-2 مقدار مجاز تنش پسماند نباید از ۱۰ درصد حداقل تنش تسلیم ماده بیشتر باشد [۲].

با داشتن S_y و S_{ut} از آزمایش کشش:

$$S_y = 0.10 \times 413 = 41.3 \text{ MPa}$$

مطابق بند ۹،۱۶،۳ استاندارد (۱) IGS-M-PL-001-2 مقدار تنش پسماند محاسبه می شود:

$$S = EtC / (12.566R2)$$

S residual stress in MPa (Psi)

C + change in circumference mm (in)

t nominal thickness mm (in)

$$E = 200\,000 \text{ MPa} (2.9 \times 10^7 \text{ Psi})$$

R = nominal pipe radius mm (in)

تنش پسماند لوله قبل از آزمایش هیدرواستاتیک:

$$S = 200000 \times 12.7 \times (-36) / (12.566 \times 381^2) = -50.1 \text{ MPa}$$

که طبق این رابطه لوله مذکور که ساخت کارخانه لوله سازی اهواز است شرایط استاندارد IGS را برآورده نمی کند.

تنش پسماند لوله بعد از آزمون هیدرواستاتیک:

$$S = 200000 \times 12.7 \times (-28) / (12.566 \times 381^2) = -39 \text{ MPa}$$

یعنی پس از آزمایش هیدرواستاتیک ۱۱۰ درصدی، تنش پسماند لوله کاهش یافته و در محدوده استاندارد IGS قرار گرفته است.

در سایت های علمی و پایان نامه های دانشگاهی کمتر به این موضوع پرداخته شده است و مقالاتی درباره موضوع هایی مربوط به لوله، جوشکاری، تنش پسماند و آزمون هیدرواستاتیک ۹۰ درصد تنش تسلیم در دسترس هستند اما در رابطه با میزان تغییر خواص مکانیکی و متالورژیکی پس از آزمون هیدرواستاتیک ۱۱۰ درصد و سهم کرنش ناشی از انبساط تحقیقی اگر انجام شده یا نشده قابل دسترسی نبود. از جمله مقاله های نزدیک به موضوع به موارد زیر می توان اشاره نمود:

1. Hydrostatic burst test of X80 grade steel pipe
11 september 2009

a. Research center of oil and gas safety
Engineering Technology, china university of
petroleum

b. shashi Steel Pipe Works, China Petrochemical
Group Corp.,

در مرکز تحقیقات مهندسی ایمنی در صنعت نفت و گاز دانشگاه پتروشیمی چین لوله X80 مدفون تحت آزمایش هیدرواستاتیک قرار گرفته است. تغییر شکل و تنش تسلیم جوش طولی زیر پودری لوله به قطر ۱۰۱۶ میلی متر و ضخامت ۴/۱۸ میلی متر تحت ۵ فشار متفاوت قرار گرفته و اندازه گیری شده است و نتیجه گیری شده تا زمانی که تنش هوپ کمتر از ۱،۱ SMYS باشد تغییر شکل به صورت الاستیک و یکنواخت بوده است.

۲. مقاله ای با موضوع «بررسی اهمیت آزمون هیدرواستاتیک در خطوط انتقال نفت و گاز» توسط آقای حامد بیرامی کارشناس ارشد مهندسی ابزار دقیق صنایع نفت از دانشگاه شیراز در اولین کنفرانس بین المللی نفت و گاز و پتروشیمی و نیروگاهی ارائه شده و به اهمیت آزمایش هیدرواستاتیک با فشار حداکثر ۹۰٪ S_y در ایجاد ایمنی و تشخیص نشتی ها پرداخته است و به موضوع آزمایش مقاومت ۱۱۰٪ S_y هیچ گونه اشاره ای نشده است.

۲. معادلات حاکم

آزمون هیدرواستاتیک ۱۱۰٪ S_y بر روی لوله ۳۰ اینچ و تحت فشار زیر در سایت بندرعباس انجام شد [۱].

مشخصات لوله مورد آزمایش:

API5LPSL2SAWL30" 0.5" X60





شکل ۱: کاهش قطر ۳۶ میلی‌متر رینگ پیش از آزمون مقاومت
شکل ۲: کاهش قطر ۲۸ میلی‌متر رینگ بعد از آزمون هیدرواستاتیک

۴. آزمون‌های مکانیکی لازم بر اساس استاندارد API5L

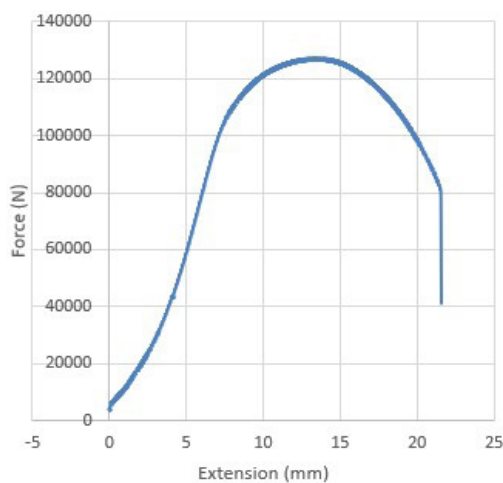
بر اساس استاندارد فوق انجام آزمایش‌های مکانیکی و متالورژیکی زیر بر روی لوله‌های گاز الزامی است:

جدول ۱: آزمایش‌های مکانیکی و متالورژیکی بر اساس API 5L

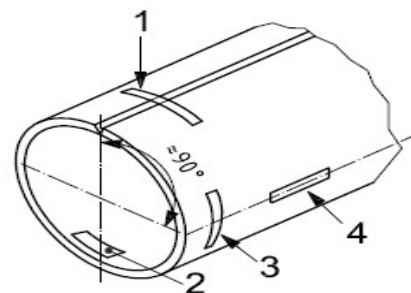
Number, Orientation and Location of Test Pieces						
After Hydro Test	Befor Hydro Test		REFERENCES	Type of Test	Sampel Location	Type of Pipe
1T180	1T180		ASTM A370	Tensile	Pipe body	SAWL or COWL
3T90	3T90		ASTM E23	CVN		
1	1			DWT		
1w and 1HAZ	1w and 1HAZ			Metalography		
1w stress strain figure	1w		ASTM A370	Tensile	Seam weld	
3w and 3HAZ	3w and 3HAZ	Weld, HAZ	ASTM E23	CVN		
2w	2w	Face, Root Weld	ASTME290-ASTM E858	Guided bend		
1w and 1HAZ	1w and 1HAZ			Metalography		

۴-۱. آزمون کشش

موقعیت نمونه‌های آزمون کشش بر اساس روش جوشکاری مطابق شکل زیر است:



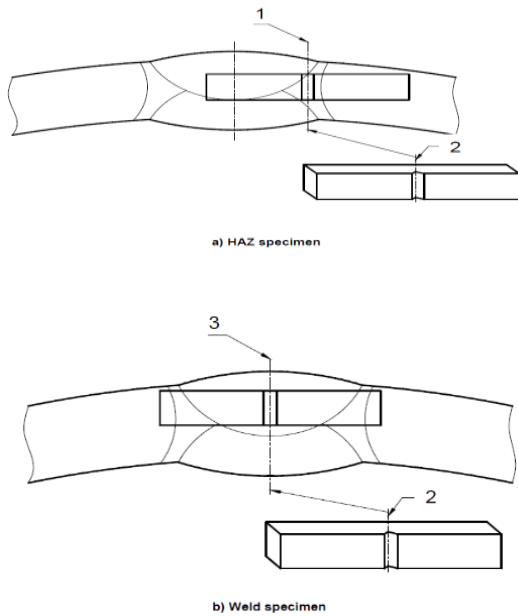
شکل ۴: آزمون کشش جوش قبل از آزمایش مقاومت



شکل ۳: CW, LFW, LW, SAWL and COWL pipe

۴-۲. آزمون ضربه

برای بررسی تمایل ماده به داشتن رفتار ترد یا چکش خوار، انواع مختلف آزمون‌های ضربه بکار می‌رود. این نوع آزمون تفاوت‌های بین مواد را آشکار می‌کند که در آزمون کشش قابل مشاهده نیستند. برای آزمون ضربه با شیار، دو دسته نمونه استاندارد وجود دارد: (۱) نمونه شاریبی با مقطع مربعی شکل و شیار V شکل ۴۵ درجه و یا U شکل که به صورت افقی قرار می‌گیرد (۲) نمونه ایزود با مقطعی مربع یا دایره‌ای شکل و شیار جناغی که به صورت عمودی قرار می‌گیرد. بر اساس استاندارد ASTM A370 انجام می‌شود [۴].



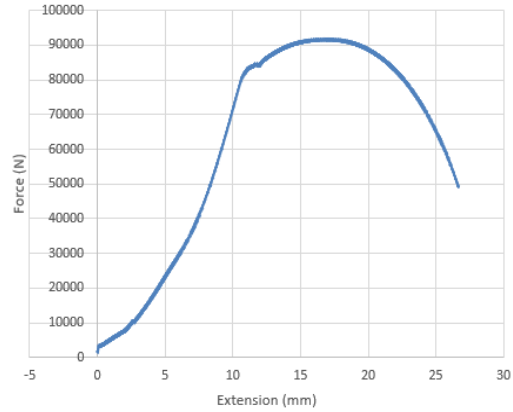
شکل ۸: موقعیت نمونه‌های آزمون ضربه

۳۶ نمونه‌ها برای آزمون ضربه شاریبی ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت.

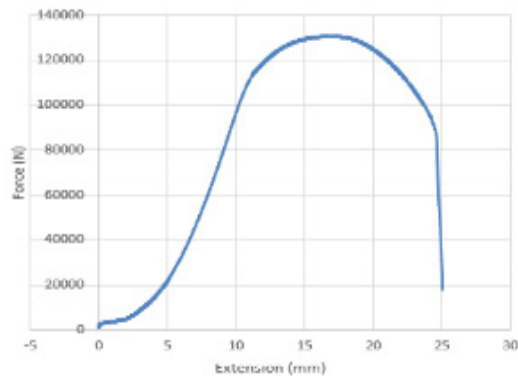
نتیجه: انرژی ضربه پس از آزمایش مقاومت در هر سه قسمت Body/HAZ/Weld افزایش یافته است.

۴-۳. آزمون خمش

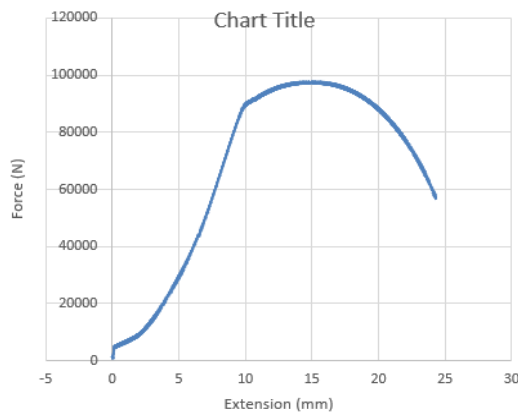
آزمایش خمش یکی از ساده‌ترین آزمون‌هاست و معمولاً برای مواد تردی استفاده می‌شود که دارای رفتار الاستیک خطی هستند. دو نوع اصلی آزمایش خمش به نام‌های خمش سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای هستند و بر اساس استاندارد ASTM A370 و یا ISO 7438 انجام می‌شود [۴].



شکل ۵: آزمون کشش فلز لوله قبل از آزمایش مقاومت



شکل ۶: آزمون کشش جوش پس از آزمایش مقاومت



شکل ۷: آزمون کشش فلز لوله پس از آزمایش مقاومت

جدول ۲: مقایسه تغییرات تنش‌های مکانیکی پس از آزمایش مقاومت

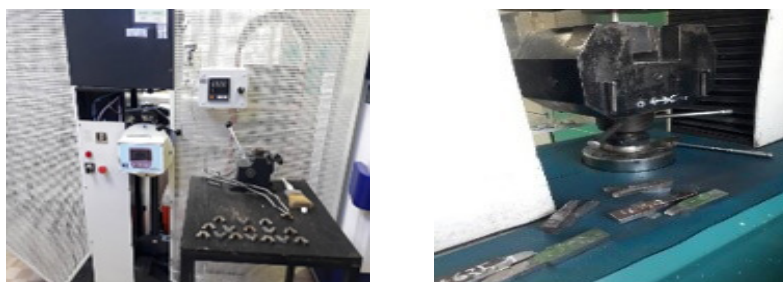
BREAK	S_{ut} (Psi)	S_y (Psi)		
45742	85294	78000	BODY	BEFOR 100%YP TEST
51880	81511	68237	WELD	
51453	88258	81040	BODY	AFTER 100%YP TEST
56173	84549	72900	WELD	

جدول ۳: نتایج آزمون خمش

تاریخ آزمایش	قطر سنجه خمش mm	عرض نمونه mm	طول mm	ضخامت mm	نتیجه آزمایش		
۱۴۰۰/۱۲/۰۷	۳۹	۳۸/۹	۲۰۰	۱۲	ترک مویی قابل قبول	WELD FACE	BEFOR 100%YP TEST
۱۴۰۰/۱۲/۰۷	۳۹	۴۲/۱	۲۰۰	۱۲	ترک مویی قابل قبول	WELD ROOT	
۱۴۰۰/۱۲/۰۷	۳۹	۳۸/۹	۲۰۰	۱۲	ترک مویی قابل قبول	WELD FACE	AFTER 100%YP TEST
۱۴۰۰/۱۲/۰۷	۳۹	۴۲/۱	۲۰۰	۱۲	ترک سرتاسری به عرض نمونه	WELD ROOT	



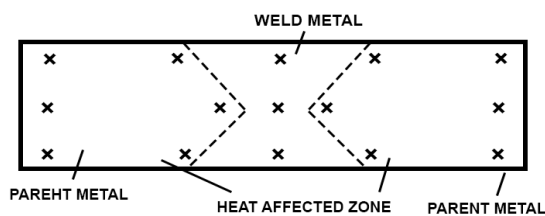
شکل ۹: آزمون خمش و ترک سراسری جوش در نمونه خمش لوله تحت فشار قرار گرفته



شکل ۱۰: آزمون‌های مکانیکی کشش و ضربه

نتیجه: نمونه‌های خمش Face/Root مربوط به لوله از فشار مقاومت دچار ترک سراسری گردید و مردود شد و پیش از فشار مقاومت دارای ترک مویی قابل قبول بودند. نمونه رویه جوش دارای ترک مویی و در محدوده قابل قبول قرار داشت. نمونه ریشه جوش مربوط به شرکت لوله‌سازی اهواز پس

۴-۴. سختی سنجه



LOCATION OF HARDNESS FOR SAW PIPE

شکل ۱۱: موقعیت نقاط سختی سنجه

به‌منظور حصول نتایج دقیق، سختی سنجه به روش سختی ویکرز HV با دندان‌ه الماسه هرمی شکل برحسب ویکرز در واحد کنترل مرغوبیت ماشین‌سازی اراک انجام شد. کیلوگرم بر میلی‌متر مربع

F: بار وارده برحسب کیلوگرم
d: قطر مربع فرورفتگی برحسب میلی‌متر

$$HV = F/A = 1.8544F/(d^2)$$

جدول ۴: نتایج آزمون سختی ویکرز برحسب kg/mm^2

AFTER 110%Yp TEST		BEFOR 110%Yp TEST		
Avrage		Avrage		
290	298-288-284	270	263-268-281	BODY
320	321-326-314-328-316-318	250	253-246-251-255+245+254	HAZ
350	345-353-354	270	264-278-269	WELD

نتیجه: با توجه به تصاویر می توان در فلز پایه ۱۵ درصد فریت و مابقی را پرلیت تخمین زد. فلز جوش نیز حدوداً حاوی حدود ۷۵ درصد پرلیت و ۱۵ درصد فریت است.

تغییری در فازها و اندازه دانه بندی فلز پایه و جوش قابل مشاهده نیست که می تواند به دلیل نامحسوس بودن انجام کار سرد باشد.

۵-۲. ماکروگرافی



شکل ۱۶: ماکروگرافی جوش پیش از آزمون مقاومت



شکل ۱۷: ماکروگرافی جوش پس از آزمون مقاومت

۶. تحلیل تئوریک

در لوله تحت فشار داخلی تنش در شعاع داخلی حداکثر است بنابراین هنگامی که فشار داخلی به مقداری برسد که پلاستیسیته آغاز شود تغییر شکل دائمی از $R = R_f$ شروع خواهد شد. مقدار بحرانی فشار بستگی به انتخاب معیار تسلیم دارد. و معیار ترسکا که معیاری محافظه کارانه است فشار کمتری را پیش بینی می کند [۶].

نتیجه: با توجه به داده های جدول فوق، سختی در هر سه قسمت جوش پس از آزمایش مقاومت افزایش یافته است.

۵. متالوگرافی

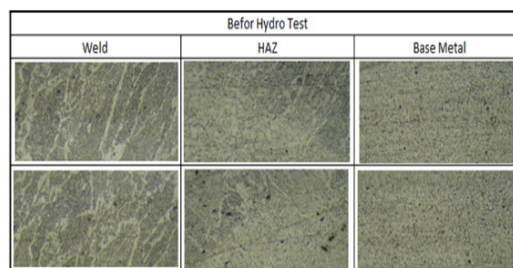
۵-۱. آماده سازی نمونه ها

دو نمونه از لوله قبل و بعد از آزمون مقاومت تهیه و پس از آماده سازی سطح و سمباده زنی با شماره های ۱۰۰۰، ۲۰۰ و ۲۰۰۰ و اچ نمودن نمونه ها، مناطق WELD/HAZ/BASEPLATE بررسی گردید [۵]

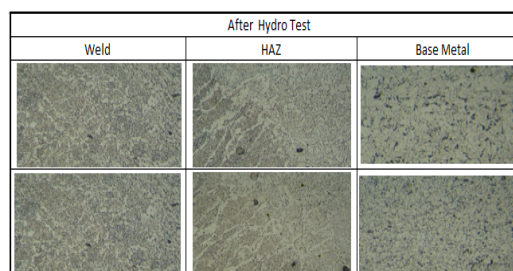


شکل ۱۳: پولیش نهایی

شکل ۱۲: سمباده زنی



شکل ۱۴: متالوگرافی لوله آزمون نشده



شکل ۱۵: متالوگرافی لوله آزمون شده





مقادیر به دست آمده از آزمون کشش:

$$S_y = 537.79 \text{ Mpa} \quad S_{ut} = 588 \text{ MPa}$$

$$R_o = 381 \text{ mm} \quad R_i = 368.3 \text{ mm}$$

۶-۱. تسلیم اولیه و فشار ترکیدگی

الف - از معیار تسلیم فون میز داریم:

فشار داخلی برای آغاز تسلیم در جداره داخلی

$$P_y | R_i = (S_y / \sqrt{3}) \times (K^2 - 1) / \sqrt{K^4 + 1/3}$$

$$P_y | R_i = 537.79 / \sqrt{3} \times (1.0345^2 - 1) / \sqrt{1.0345^4 - 1/3}$$

$$= 17.922 \text{ MPa}$$

ب - بر اساس معیار ترسکا:

$$P_y | R_i = S_y (1 - 1/k^2) / 2$$

فشار آغاز تسلیم جداره داخلی:

$$P_y | R_i = 537.8 \times (1 - 1/1.0345^2) / 2 = 17.63 \text{ MPa}$$

فشار ترکیدگی: اگر فشار داخلی تا حدی افزایش یابد که جداره خارجی به پلاستیک برسد لوله در آستانه ترکیدگی قرار می گیرد.

بر اساس معیار ترسکا فشار ترکیدگی برابر است با:

$$P_y | R_o = S_y \times \ln(k) = 18.24 \text{ MPa}$$

۶-۲. بررسی لوله تحت فشار داخلی در حالت الاستیک

$$S_{ut} = 588 \text{ MPa} \quad S_y = 537.79 \text{ MPa}$$

فشار آغاز تسلیم:

$$P_{iy} = 17.9 \text{ MPa}$$

$$K = R_o / R_i = 381 / 368.3 = 1.034$$

$$P_o = 0 \quad \sigma_r = -P_i ((R_o/r)^2 - 1) / (K^2 - 1)$$

$$P_o = 0 \quad \sigma_\theta = +P_i ((R_o/r)^2 + 1) / (K^2 - 1)$$

در وسط جداره

$$r = 0.3$$

$$\sigma_r | R_m = -17.9 ((0.381/0.374)^2 - 1) / (1.0345^2 - 1) = 9.6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_\theta | R_m = 17.9 ((0.381/0.374)^2 + 1) / (1.0345^2 - 1) = 519.7 \text{ MPa}$$

$$\sigma_r | R_o = 0$$

۶-۳. توزیع الاستوپلاستیک تنش

با توجه به اینکه فشار داخلی از فشار تسلیم بالاتر رفته است ناحیه پلاستیک به طرف شعاع خارجی مخزن گسترش می یابد. چنانچه فشار را طوری کنترل نماییم که لوله تا شعاع معینی پلاستیک شود آنگاه یک لوله دوگانه داریم. تنش تسلیم قسمت پلاستیک به خاطر کرنش سختی نسبت به ناحیه الاستیک افزایش یافته و توزیع تنش شعاعی در این قسمت یکنواخت تر می شود زیرا شیب منحنی تنش کرنش در ناحیه پلاستیک بسیار کمتر از آن در قسمت الاستیک است.

حال اگر فشار داخلی برداشته شود استوانه الاستیک نمی تواند به حالت اولیه برگردد بنابراین استوانه پلاستیک را تحت فشار قرار داده و سبب ایجاد تنش های باقیمانده فشاری در آن می گردد. این تنش ها بخشی از تنش های ناشی از بارگذاری مجدد مخزن را خنثی نموده و بدین ترتیب ظرفیت باربری مخزن را افزایش می دهد. این خاصیت موجب صرفه جویی در هزینه و نیز در مواردی که مواد موجود تحمل فشار مورد کاربرد را ندارند استفاده می شود [۶].

۷. شبیه سازی با نرم افزار

با توجه به اینکه $t/r < 1/20$ باشد لوله جداره نازک است. در این قسمت لوله تحت فشار ۱۱۰ درصد به دست آمده از تنش تسلیم واقعی لوله شبیه سازی می شود.

جدول ۵: مشخصات لوله مورد آزمایش

OD	30" = 762 mm	S_y	537.79 MPa
R_o	381 mm	S_{ut}	588 MPa
ID	29" = 736.6 mm	E	211 Gpa
R_i	368.3 mm	ν	0.3
L	12 m = 12000 mm		
THK	0.5" = 12.7 mm		

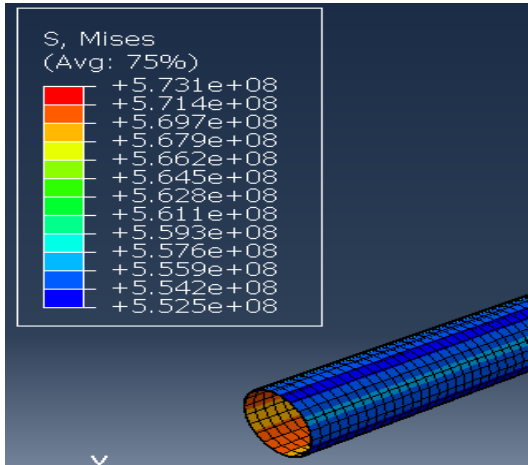
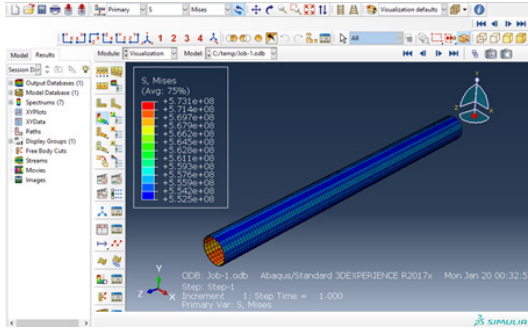
۷-۱. شرایط بارگذاری

از آزمون کشش تنش تسلیم ۷۸۰۰۰ پوند به دست آمد بنابراین:

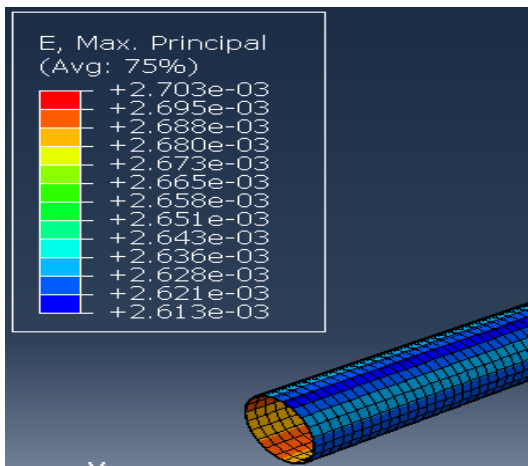
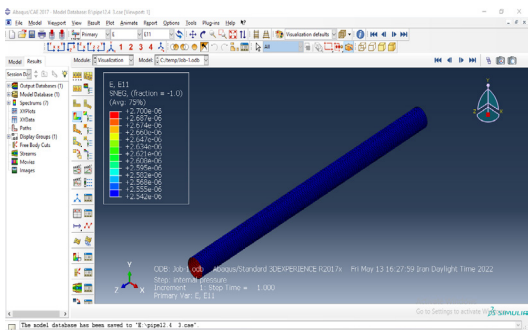
فشار داخلی تسلیم:

$$P_y = (2 \times S_y \times t) / D = 2 \times 78000 \times 0.5 / 30 = 2600$$

$$Psi = 17.9 \text{ MPa}$$



شکل ۱۸: مقادیر تنش میسز (Pa)



شکل ۱۹: مقادیر کرنش E

فشار آزمایش مقاومت:

$$P = 1.1 \times P_y = 2856$$

$$Psi = 19.69 \text{ MPa}$$

در بحرانی ترین وضعیت لوله که نیروی فشار خارجی خاک کانال بر روی لوله نباشد

$$P_o = 0$$

مقادیر تنش و کرنش پلاستیک فولاد APIX60 از آزمون کشش برابر جدول زیر است:

جدول ۶: مقادیر تنش کرنش پلاستیک

تنش	کرنش پلاستیک
$S_y = 537$	0
538.019	0.000361702
539.001	0.001460993
540.0583801	0.002316312
541.0399358	0.002990071
542.0214916	0.003751773
543.0036889	0.009021277
544.136648	0.009512057
545.042502	0.009870922
546.0246993	0.010320567
547.006255	0.010839716
548.0635124	0.011377305
549.0450682	0.012005674
550.0272654	0.012638298
551.0088212	0.013313475
552.0660786	0.014192908
553.0482759	0.014889362

با جاگذاری داده‌های فوق در نرم‌افزار آباکوس، نتایج زیر به دست می‌آید:

تنش میسز ماکزیمم در جداره داخلی (پلاستیک)

$$S = 573 \text{ MPa}$$

تنش میسز ماکزیمم در جداره خارجی (پلاستیک)

$$S = 552 \text{ MPa}$$

بر اساس تحلیل آباکوس با در نظر گرفتن تنش تسلیم واقعی و اعمال فشار ۱۱۰٪ S_y ، تمام ضخامت جداره به تسلیم می‌رسد و در آستانه ترکیدگی قرار می‌گیرد.

۸. نتیجه گیری

نتایج آزمایش های مکانیکی و متالورژیکی انجام شده مطابق (جدول ۷) است:

جدول ۷: تجمیع نتایج آزمایش های مکانیکی و متالورژیکی

PERCENT OF CHANGES	CHANGES	AFTER 110%Y _p TEST	BEFOR 110%Y _p TEST		TYPE OF TEST	NO
9.50%	↑	558.755 MPa	537.79 Mpa	σ _y MPa	TENSILE PIPE BODY TEST T180	1
3.40%	↑	608.5266	588.089	σ _{ut}		
6.80%	↑	502.63	470.48	σ _y	TENSILE SEAM WELD TEST T90	2
3.50%	↑	582.95	562	σ _{ut}		
12.60%	↑	250.6	221.9	PIPE	CVN PIPE 3T90	3
8.30%	↑	233.5	215.6	HAZ	CVN SEAM WELD	4
8%	↑	175.1	161.6	WELD		
7.40%	↑	290	270 Kg/cm ²	BODY	HARDNESS	5
28%	↑	320	250	HAZ		
29%	↑	350	270	WELD		
		ترک مویی قابل قبول	ترک مویی قابل قبول	FACE WELD	GUIDED BEND	6
	↓	ترک سرتاسری به عرض نمونه	ترک مویی قابل قبول	ROOT WELD		
	↑	محدوده استاندارد -39MPa	خارج از استاندارد -51.1MPa		RESIDUAL STRESS	7
				GRAIN SIZE	METALOGRAPHY	8
		15%PERLIT 85% FERIT	15%PERLIT 85% FERIT	% PHASES		

حالت الاستوپلاستیک در لوله ایجاد نمود که ضمن تقویت لوله و افزایش تحمل فشار بهره برداری در خطوط لوله گاز در کنار استفاده از فولادهای HSLA، موجب اقتصادی تر شدن آن می گردد با توجه به اینکه هزینه تولید فولادهای آلیاژی بالاست و از طرفی ضعف در مقاومت به خوردگی عاملی محدود کننده در استفاده از فولادهای کربنی است.

هرگاه در تعیین فشار آزمایش، از حداقل تنش تسلیم بر اساس شماره گرید لوله استفاده می شود از فشاری که بر اساس تنش تسلیم واقعی لوله به دست می آید پایین تر بوده، تنش در مرز محدوده الاستیک باقی مانده و وارد منطقه پلاستیک نمی شود به عنوان مثال آزمایش هیدرواستاتیک لوله گرید X60 (60200 Psi < Sy < 81900 Psi) [۸و۷] مورد

(۱) خواص مکانیکی کشش، سختی و ضربه با اصلاح ناتیجی ها مطابق (جدول ۵) بهبود یافت.

(۲) مطابق ردیف ۶ جدول نتایج، نمونه آزمایش خمش ریشه جوش مربوط به لوله تحت آزمایش مقاومت قرار گرفته، دچار ترک سراسری و مردود گردید.

(۳) مطابق ردیف ۷ جدول نتایج مقدار Residual Stress لوله تحت فشار آزمون قرار نگرفته، الزامات استاندارد IGS را برآورده ننمود و پس از آزمون هیدرواستاتیک در محدوده استاندارد قرار گرفت.

آزمایش مقاومت ۱۱۰ درصد انجام شده بر اساس حداقل تنش لوله گرید X 60 (۶۰۲۰۰ پوند) انجام شد و تمام لوله در محدوده الاستیک قرار گرفت. با افزایش فشار می توان

[8]. ASME B31.8 GAS TRANSMISSION AND DISTRIBUTION PIPING SYSTEM.

استفاده در این تحقیق، با فشار زیر انجام شد:

$$S_y = 60000 \text{ Psi}$$

$$P_y = (2 \times S_y \times t)/D = 2 \times 60000 \times 0.5/30 = 2000$$

$$\text{Psi} = 13.79 \text{ MPa}$$

$$P = 1.1 \times 2000 = 2200 \text{ Psi} = 15.17 \text{ MPa}$$

و لوله تحت این فشار به تسلیم نمی‌رسد.

اما با استفاده از تنش تسلیم واقعی لوله فشار آزمایش

برابر است با:

$$P = 1.1 \times (2 \times S_y \times t)/D = 1.1 \times 2 \times 78000 \times 0.5/30 = 2860 \text{ Psi} = 19.7 \text{ MPa}$$

و تمام جداره پلاستیک می‌شود.

و بر اساس معیار ترسکا فشار داخلی برای رسیدن به

تسلیم برابر است با:

$$2557 \text{ Psi} = 17.63 \text{ MPa}$$

تشکر و قدردانی

لازم است از واحد محترم پژوهش و بازرسی شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران به دلیل حمایت بی‌دریغ آقایان دکتر اصلتی، مهندس اصغری و آقای مهندس سیدآبادی و همکاری واحد کنترل مرغوبیت (QA) شرکت ماشین‌سازی اراک قدردانی و سپاسگزاری نمایم.

مراجع:

- [1]. IGS-C-PL-100(3).
- [2]. IGS-M-PL-001-2(1).
- [3]. API Specifications 5L, Specifications for Line Pipe.
- [4]. ASTM A370.
- [5]. گل‌عذار، م. ع. (۱۳۹۲). عملیات حرارتی فولادها (ویرایش سوم). اصفهان: مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان.
- [6]. مجذوبی، غ.، و علوی‌نیا، ع. (۱۳۹۰). مقاومت مصالح III. همدان: انتشارات دانشگاه بوعلی‌سینا.
- [7]. ساری، ع. (۱۳۹۶). لوله‌های فولادی انتقال نفت و گاز. تهران: انتشارات شرکت ملی گاز ایران.



Investigating the Changes of Mechanical and Metallurgical Properties Obtained by Hydrostatic Test Using the Method of 110% Yield Stress in Gas Pipelines

Seyed Amir Rezabeigi¹, Mohammad Hossein Yas^{2*}, Behrouz Dargahi³

1. M.Sc. in Mechanical Engineering, Project Implementation Unit, Kermanshah Province Gas Company, Kermanshah, Iran
2. Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran
3. M.Sc. in Mechanical Engineering, Technical Inspection Unit, Iranian Gas Engineering and Development Company, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL ARTICLE

Article History:

Received: 13 March 2024

Revised: 22 April 2024

Accepted: 09 June 2024

Keywords:

Gas pipeline resistance test

110% hydrostatic test

Pipelines hydrostatic test

ABSTRACT

One of the questions that exist for operators is the effect of 110% pressure of the hydrostatic test on the mechanical and metallurgical properties of the pipe and its effects during operation. The purpose of this article is to examine this issue through practical tests and theoretical and software analysis. In order to achieve this goal, a 110% hydrostatic resistance test (in cooperation with the research unit of Iran Gas Engineering and Development Company at the Bandar Abbas site) was conducted on a 30-inch pipe (API5L PIPE30 THK0.5 SAW X60) and since the pipe was under 4 hours the pressure was applied and the results obtained are the same as the actual conditions.

A 30 cm ring was cut from the above-selected pipe before applying the resistance pressure and a 30 cm ring was cut from the pipe after the resistance test

With the aim of obtaining reliable results and data, mechanical bending, tensile and impact tests in the reference laboratory of Arak Gam, which has a certificate from the standards department, and hardness and metallography tests in the metallurgy laboratory of the quality control unit of Arak Machinery Company (QA) Done.

By obtaining the X60 pipe stress strain diagram and properties in the plastic area from the tensile test, the pipe under 110% S_y pressure was analyzed in Abaqus software and the plastic stress and strain created in the pipe was analyzed and the thickness of the elastic and plastic areas was estimated with the help of Abaqus. was hit.

In order to investigate the possible changes in the metallurgical structure, samples before and after the strength test were examined in macro and micro mode in cooperation with the quality control laboratory of Arak Machinsazy Company.

DOR: [20.1001.1.25885251.1403.00.00](https://doi.org/10.1001.1.25885251.1403.00.00)

How to cite this article

S.A. Rezabeigi, M.H. Yas, B. Dargahi, Investigating the Changes of Mechanical and Metallurgical Properties Obtained by Hydrostatic Test Using the Method of 110% Yield Stress in Gas Pipelines. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2024; 11(1): 22-32. (https://www.ijge.irangi.org/article_722839.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: yas@razi.ac.ir, (M.H. Yas).

Available online 01 September 2024

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

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



آنالیز ترمودینامیکی و زیست‌محیطی استفاده از سیستم تولید انرژی هم‌زمان خورشیدی-پیل سوختی در منازل مسکونی ایران

اسماعیل قاسمی کفرودی^۱، محمدرضا حبیبی^۱، حسین عباسعلی خمه^۲، زینب سبحانی^۲

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

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

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

مقاله علمی-پژوهشی

صفحه ۳۳ - ۴۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰

چکیده

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. در این پژوهش به آنالیز انرژی و انرژی و محیط‌زیستی سیستم تولید هم‌زمان توان و حرارت با استفاده از پیل خورشیدی و پیل سوختی پرداخته شده است. برای این کار از الگوی مصرف یک ساختمان مسکونی در شهر تهران و تابش ساعتی خورشید در این شهر به‌عنوان داده‌های ورودی استفاده شده است. در این بررسی نمودارهای مربوط به راندمان انرژی و انرژی پیل خورشیدی به‌صورت مجزا و در حالت یکپارچه با مجموعه استخراج گردیده است. نتایج نشان می‌دهد در مواقعی که پیل سوختی وارد مدار کار می‌شود راندمان سیستم به مقدار بیشینه خود می‌رسد. همچنین بررسی آلاینده‌های خروجی از این سیستم و مقایسه آن با حالت رایج یعنی استفاده از شبکه سراسری و بویلر نشان می‌دهد که استفاده از سیستم تولید هم‌زمان کاهش ۳۳ درصدی آلاینده‌های مخرب محیط‌زیست و گازهای آلاینده را به همراه دارد.

کلید واژه‌ها: تولید هم‌زمان برق و حرارت، آنالیز انرژی و انرژی، انرژی خورشیدی، آنالیز زیست‌محیطی

۱. مقدمه

نیاز به انرژی با توجه به رشد جمعیت و افزایش استانداردهای زندگی در سراسر جهان به‌طور پیوسته در حال افزایش است. این امر موجب شده است که جهان با فشارهای شدیدی در بازار انرژی مواجه شود. به‌عنوان مثال دهه‌ی گذشته شاهد یک افزایش چشم‌گیر در نیاز به الکتریسیته همراه با رشد قابل توجه مصرف آن و افزایش قیمت سوخت بود. برخی کشورها به علت کاهش ذخایر انرژی از این افزایش تقاضا رنج می‌بردند. محدودیت‌های موجود در سیستم تولید برق سنتی و عرضه و تحویل، رقابت‌های جهانی، نگرانی‌های پیرامون تغییر شرایط آب و هوایی، خرابی زیرساخت‌های شبکه‌ی برق‌رسانی و مسائل امنیتی از عوامل دیگر مؤثر بر زمینه‌ی تشدید فشار بر وضعیت انرژی هستند که بهداشت محیط‌زیست، سلامت انسان را تهدید کرده و پیامدهای اقتصادی متعددی به دنبال دارد؛ بنابراین باید بهینه‌سازی گسترده‌ای در مصرف انرژی با بهبود سیستم‌های مصرف‌کننده، بهبود طراحی ساختمان‌ها و پیشرفت منابع پایدار و تجدید پذیر صورت گیرد.

ساختمان‌ها، در بخش‌های مسکونی، عمومی، اقتصادی حدود ۳۲ درصد انرژی مصرفی را بر عهده‌دارند که این عدد برای کشورهای عضو آژانس بین‌المللی انرژی به ۴۰ درصد نیز





می‌رسد [۱] که این مصارف شامل برق، گرمایش، سرمایش و آب گرم مصرفی می‌باشد. این بارها معمولاً از طریق شبکه‌ی برق سراسری یا به کمک بویلرهای خانگی که از نفت و گاز تغذیه می‌شوند، تأمین می‌شوند؛ اما نیروگاه‌های حرارتی (با کمک موتورهای احتراقی یا توربین گاز و بخار) با بازده کم خود شناخته می‌شوند که در آن متوسط بهره‌وری برای تولید برق کمتر از ۴۰ درصد می‌باشد [۲]. همچنین برای بارهای حرارتی، بویلرهای رایج خانگی راندمانی در حدود ۷۰ درصد را دارند [۳]. علاوه بر این، استفاده از سوخت‌های فسیلی که پایه و اساس اکثر سیستم‌های رایج تولید قدرت است منتج به تولید مقدار قابل توجهی از آلاینده‌های مختلف از جمله گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. از طرف دیگر ذخایر نفت جهانی شروع به کاهش بی‌سابقه‌ای کرده که نرخ تولید آن پاسخگوی بهره‌برداری و نیاز فعلی نیست. بنابراین بهینه‌سازی مصرف سوخت در بخش مسکونی لازم به نظر می‌رسد به همین جهت تولید جداگانه‌ی حرارت و الکتریسیته از نظر انرژی و محیط‌زیستی ناکارآمد بوده و تولید هر دو نوع انرژی در یک سیستم تولید انرژی قابلیت اطمینان بیشتری خواهد داشت. استفاده از حرارت اتلاfi در فرآیند تولید قدرت می‌تواند یکی از راه‌های جلوگیری از اتلاف انرژی باشد که با نام فتاوری تولید هم‌زمان یا تولید سه‌گانه بکار گرفته می‌شود.

استفاده از سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت و برودت (CCHP) در بخش ساختمانی بخصوص برای کشورهای که هزینه‌ی انرژی در آن‌ها بالاست مقرون به‌صرفه است. در حال حاضر، یکی از جذاب‌ترین و در دسترس‌ترین روش‌های بهره‌وری انرژی، فتاوری CCHP است. کاهش تقاضای کل انرژی، مستقل بودن سوخت، افزایش رقابت در تجارت، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود شبکه برق، برخی از مزایای این فناوری است [۴]. سیستم‌های تولید هم‌زمان انواع مختلفی داشته و با مکانیزم‌های متعددی از قبیل توربین گاز، توربین بخار، میکروتوربین‌ها، موتورهای احتراق داخلی و ... کار می‌کنند. یک ایده‌ی نو در این زمینه استفاده از سلول خورشیدی به همراه پیل سوختی برای تولید هم‌زمان توان و حرارت می‌باشد که با توجه به این تجهیزات کمترین آلاینده‌ی خروجی را با خود به همراه دارد.

در این زمینه مطالعات مختلفی در سطح جهان انجام گرفته که در ادامه بخشی از این مطالعات آورده شده است. لو و یانگ نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی و محیط‌زیستی

استفاده از سیستم انرژی تجدید پذیر بر بام ساختمان‌های هنگ‌کنگ را در مطالعه‌ای گزارش دادند [۵]. این سیستم که شامل ۱۲۶ پنل خورشیدی به‌صورت سری و موازی بوده به شبکه برق سراسری متصل شده و توان خروجی سالانه‌ای معادل ۲۸۱۵۴ کیلووات ساعت دارد. ایشان دوره‌ی بازپرداخت انرژی و گازهای گلخانه‌ای این سیستم را به ترتیب ۷/۳ و ۵/۲ سال گزارش دادند. همچنین نتایج این مطالعه بیانگر این است که جهت‌گیری نصب و موقعیت مکانی بر پایداری سیستم فتوولتائیک تأثیر می‌گذارد. ازون اوگلو و همکارانش یک سیستم یکپارچه را برای برآورده کردن نیازهای یک ساختمان پیشنهاد دادند [۶]. این سیستم شامل یک بخش فتوولتائیک خورشیدی به همراه یک واحد الکترولیزر آب به همراه یک پیل سوختی برای تولید توان کمکی می‌باشد. تفاوت قدرت خروجی سیستم فتوولتائیک و بار موردنیاز به همراه نرخ هیدروژن مصرفی برای تأمین برق مازاد محاسبه شده است. همچنین رفتار دینامیک سیستم تحت شرایط تابشی مختلف و نیازهای بار متفاوت با داده‌های واقعی بررسی گردیده است. اتصال مستقیم الکترولیزر به سیستم فتوولتائیک برای تولید هیدروژن نیز در گزارشی توسط کلارک مطالعه شده است [۷]. با اتصال مستقیم و حذف برخی دستگاه‌ها، هزینه‌ی کلی کاهش می‌یابد. همچنین تنظیم تجربی به دنبال حداکثر قدرت تولیدشده توسط این سیستم است که به‌طور مستقیم به الکترولیزر منتقل می‌شود. بهره‌وری الکترولیزر PEM تحت تأثیر تغییرات سلولی به دلیل تغییرات بار تکراری و راندمان کلی الکترولیزر ۶۵ درصد گزارش شده است. سیستم هیدروژن-فتوولتائیک همچنین می‌تواند با یک پیل سوختی اکسید جامد به دلیل راندمان بالا و برای تولید توان مجزا یکپارچه شود. هاوک و همکارانش این سیستم یکپارچه را برای منازل مسکونی در انگلستان به‌کاربرده‌اند [۸]. نیازهای حرارتی متفاوت به همراه بررسی‌های زیست‌محیطی و اقتصادی برای سیستم‌های تولید هم‌زمان صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که این سیستم بهترین عملکرد خود را در نیازهای حرارتی پایین و پایا نشان می‌دهد. علاوه بر این، مرکز مطالعات کانادا برای فناوری‌های خانگی پیل سوختی اکسید جامد را در یک سیستم تولید هم‌زمان برق و قدرت برای مصارف خانگی مورد آزمون قرار داده است. این سیستم به مدت ۱۵۸۷ ساعت کار کرده و نیازهای حرارتی و الکتریکی را با راندمان ۵۲ درصد فراهم کرده است [۹]. بازیابی حرارتی گاز خروجی

از پیل سوختی اکسید جامد توسط حسینی و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۰]. ایشان پیشنهاد دادند که می‌توان از این حرارت برای چیلر جذبی و تولید سرمایش نیز استفاده کرد.

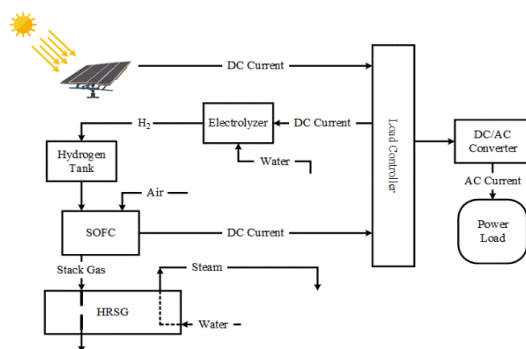
در کشور ما نیز مطالعاتی در این زمینه صورت گرفته است که برخی از این مطالعات در ادامه آورده شده است. پورمحمد و همکارانش به بررسی انرژی و انرژی و انرژی یک سیستم تولید هم‌زمان گرما و توان با استفاده از میکروتوربین پرداخته‌اند [۱۱]. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که افزودن ریکوپراتور باعث افزایش قابل ملاحظه در بازده گرمایی چرخه و همچنین باعث کاهش مصرف سوخت به میزان ۴۵ درصد در محفظه‌ی احتراق می‌گردد. فرهنگ و همکارانش به طراحی و بهینه‌سازی یک سیستم تولید هم‌زمان توان، گرمایش و سرمایش برای استفاده از یک ساختمان مسکونی پرداختند [۱۲]. این سیستم که با استفاده از موتور احتراق داخلی کار کرده با توان ۱۲ کیلووات با ۳/۳ سال کمترین زمان بازگشت سرمایه و با توان ۵ کیلووات بیشترین نسبت صرفه‌جویی در هزینه‌ی سوخت مصرفی را دارا خواهد بود.

کرباسیون و همکارانش به مقایسه‌ی عملکرد محرک‌های اولیه مختلف در سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، توان و سرمایش پرداختند [۱۳]. در این پژوهش چهار نوع تکنولوژی پیل سوختی، میکروتوربین، موتور رفت و برگشتی و استرلینگ در شرایط کاری مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که صرفه‌جویی انرژی اولیه برای پیل سوختی بیشترین مقدار و برای موتور استرلینگ کمترین مقدار را دارا می‌باشد. همچنین غفوریان و همکارانش به برآورد کاهش انتشار آلاینده‌ها در عملکرد یک سیستم تولید هم‌زمان نسبت به سیستم معمولی برای مطالعه موردی (هتل) دارای آب‌شیرین‌کن پرداختند [۱۴]. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که با استفاده از سیستم تولید هم‌زمان میزان آلاینده‌ها نسبت به سیستم معمولی به‌طور چشمگیری کاهش خواهد یافت.

با توجه به مطالعات انجام گرفته در این زمینه خلاء مطالعه در زمینه‌ی سیستم تولید هم‌زمان به کمک پنل خورشیدی و پیل سوختی احساس می‌شود. در این مطالعه به آنالیز انرژی و انرژی ساعتی و همچنین تحلیل محیط زیستی این سیستم‌ها پرداخته شده است. برای آشنایی با نحوه‌ی عملکرد این سیستم‌ها گام نخست بررسی راندمان انرژی و انرژی آن در ساعات مختلف شبانه‌روز و سپس بحث‌هایی پیرامون آلاینده‌های تولیدی این سیستم‌هاست.

۲. شرح سیستم

همان‌طور که در (شکل ۱) مشاهده می‌شود این سیستم از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است. در این طرح سیستم فوتولتائیک خورشیدی بخش اصلی مدول تولید الکتریسیته به شمار می‌آید. همچنین یک الکتروولایزر برای تولید هیدروژن با استفاده از برق مازاد تولیدی توسط سیستم خورشیدی در نظر گرفته شده است. هیدروژن در طول روز که مصرف برق پایین است تولید شده و هنگام شب برای تولید برق به‌عنوان ورودی به پیل سوختی در نظر گرفته می‌شود. یک پیل سوختی اکسید جامد در شرایط اتمسفری برای این طرح در نظر گرفته شده است. گاز داغ خروجی از پیل سوختی (با دمایی در حدود ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) مستقیماً به مبدل حرارتی برای تولید بخار وارد شده و بخار تولیدی هم برای تهیه‌ی بار گرمایی موردنیاز مجموعه استفاده می‌گردد. لازم به ذکر است که مبدل حرارتی تنها در شرایطی که پیل سوختی در حال کار است وارد مدار سیستم می‌گردد.



شکل ۱: شماتیک سیستم تولید هم‌زمان

۳. معادلات حاکم

در این بخش معادلات حاکم در بخش‌های مختلف تحلیل به تفصیل آورده شده است.

۳-۱. تحلیل انرژی و انرژی سیستم

در بخش انرژی و انرژی سیستم واحدهای مختلف به‌صورت مجزا بررسی شده‌اند:

- سیستم فوتولتائیک

سیستم فوتولتائیک از تعدادی سلول خورشیدی که به‌صورت سری و موازی بسته‌شده‌اند تشکیل شده است. مشخصات ابتدایی این سیستم با استفاده از داده‌های موجود در مرجع [۱۵] در (شکل ۲) نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که طراحی‌ها به نحوی انجام می‌گیرد که سیستم فوتوولتائیک در همین نقطه کار کند.

راندمان انرژی و اگزرژی سیستم فوتوولتائیک به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{\dot{E}n_{solar}} = \frac{I \times V}{G \times A_{cell}} \quad (5)$$

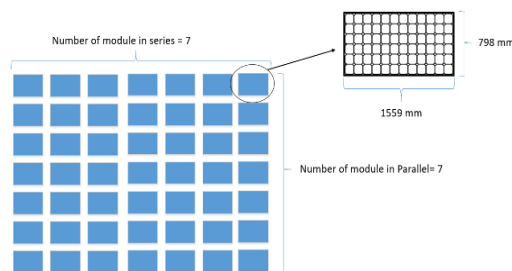
$$\psi_{PV} = \frac{P_{PV}}{\dot{E}x_{solar}} = \frac{I \times V}{G \times A_{cell} \left(1 - \frac{4T_0}{3T_{sun}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}} \right)^4 \right)} \quad (6)$$

همچنین راندمان انرژی و اگزرژی سیستم در نقطه‌ی بیشینه را می‌توان با همین معادلات به دست آورد که با اندیس mp در ادامه استفاده شده است

لازم به ذکر است که پارامترهای موردنیاز با استفاده از مراجع مختلف در (جدول ۱) آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات مدول فوتوولتائیک [۱۵]

مقدار	پارامتر (واحد)
۵/۷۵	جریان مدار کوتاه، $I_{sc}(A)$
۴۷/۷	ولتاژ مدار باز، $V_{oc}(V)$
۵/۲۵	جریان بیشینه، $I_{mp}(A)$
۴۰	ولتاژ بیشینه، $V_{mp}(V)$
۱/۲۴۴	مساحت هر آرایه، $A_{cell}(m^2)$
۷۲	تعداد سلول در هر مدول، NCS
۷	تعداد مدول‌های سری شده، NS
۷	تعداد مدول‌های موازی شده، NP
$3/5 \times 10^{-3}$	ضریب دمایی جریان مدار کوتاه، $(A^\circ C^{-1})$
$-1/36 \times 10^{-1}$	ضریب دمایی ولتاژ مدار باز، $(V^\circ C^{-1})$
شرایط مرجع	
۱۰۰۰	تابش کلی، $G_{ref}(m^2)$
۵	سرعت باد، $\dot{E}(m s^{-2})$
۲۵	دمای محیط، $T_a(^\circ C)$
سایر فرضیات	
$1/6.9 \times 10^{-19}$	شارژ الکترون، q
۰/۰۲۷۷	مقاومت‌های سری، $R_s(\Omega)$
$1/381 \times 10^{-23}$	ثابت بولتزمن، $k(J/K)$
۶۰۰۰	دمای خورشید، $T_{sun}(K)$



شکل ۲: شماتیک سیستم فوتوولتائیک

عملکرد این سیستم با منحنی غیرخطی ولتاژ - جریان نشان داده می‌شود. در مراجع معتبر این رابطه به صورت رابطه‌ی (۱) تعریف شده است [۱۶، ۱۷]:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_{cell}}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

که در آن I_0 ، R_s ، k ، q ، به ترتیب شارژ الکترون، ثابت بولتزمن، مقاومت‌های سری و جریان اشباع معکوس بوده که مقادیر آن در (جدول ۱) آورده شده است. I_L جریان نور بوده که تابعی از تابش خورشید و دما بوده و به صورت رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود:

$$I_L = \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) (I_{L,ref} + k_t(T_{cell} - T_{ref})) \quad (2)$$

که در آن G و G_{ref} به ترتیب تابش خورشیدی و تابش خورشیدی در شرایط طراحی هستند. همچنین $I_{L,ref}$ بر مبنای داده‌های سازنده برای مدار کوتاه و جریان نقطه‌ی بیشینه محاسبه شده و K_t نیز ضریب دمایی تولیدی برای جریان مدار کوتاه می‌باشد. T_{cell} نیز دمای سلول خورشیدی بوده که از رابطه‌ی (۳) به دست می‌آید.

$$T_{cell} = 0.943 T_0 + 0.028 G - 1.528 V_{wind} + 4.3 \quad (3)$$

که در آن V_{wind} سرعت متوسط باد می‌باشد. همچنین در روابط بالا γ فاکتور شکل نام دارد که از رابطه‌ی (۴) به دست می‌آید.

$$\gamma = a \times NS \times NCS \quad (4)$$

که در این رابطه a ، NS و NCS به ترتیب فاکتور تکمیل، تعداد سلول‌های متصل در هر مدول و تعداد مدول‌های متصل در هر سری می‌باشد.

قدرت خروجی سلول فوتوولتائیک بر اساس معادله‌ی غیرخطی رابطه‌ی (۱) از رابطه‌ی $V \times I$ به دست می‌آید. با رسم منحنی ولتاژ برحسب جریان نقطه‌ای وجود دارد که در آن توان بیشینه (P_{mp}) به دست می‌آید، به ولتاژ و جریان مرتبط با توان بیشینه به ترتیب V_{mp} و I_{mp} گفته می‌شود.

• واحد الکترو لایزر

برای برق مازاد تولید شده در سیستم فوتوولتائیک، راندمان انرژی واحد الکترو لایزر برای محاسبه مقدار هیدروژن تولیدی به صورت رابطه‌ی (۷) تعریف می‌شود:

$$\eta_{el} = \frac{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2}}{P_{in,el}} \quad (7)$$

که در آن LHV_{H_2} ارزش حرارتی پائین هیدروژن بوده که مقدار آن $33/33$ کیلووات ساعت بر کیلوگرم گزارش شده است. همچنین طبق مراجع یک الکترو لایزر دما پائین برای سیستم انتخاب شده که علت آن پاسخ سریع تر به تغییرات بار برای پیل سوختی می‌باشد. راندمان این واحد طبق مطالعات کلارک و همکارانش $0/65$ در نظر گرفته شده است [۷].

• پیل سوختی اکسید جامد

این واحد در مطالعه‌ی حاضر بر اساس طراحی لوله‌ای انجام گرفته و ابعاد و مواد سازنده‌ی پیل سوختی از داده‌های ارائه شده در مطالعه‌ی مطهر و همکارش برداشت شده است [۱۸]. لازم به ذکر است که الگوریتم حل و روند محاسبه‌ی هیدروژن مصرفی در پیل سوختی و قدرت خروجی بر اساس مدل دینسر و همکارانش انجام گرفته است [۱۹]. واحد پیل سوختی از هیدروژن تولیدی در واحد الکترو لایزر تغذیه شده و زمانی که برق مورد نیاز بیش از مقدار تولیدی در سیستم فوتوولتائیک باشد به عنوان واحد تولید قدرت ثانویه وارد مدار می‌شود. این هیدروژن تولیدی تحت عنوان یک کاتد، با یون‌های اکسیژن به عنوان آن‌د یک واکنش الکتروشیمیایی برقرار می‌کند. لازم به ذکر است نرخ مصرف هیدروژن به چگالی جریان در پیل سوختی بستگی دارد. قدرت الکتریکی خالص خروجی پیل سوختی به صورت رابطه‌ی (۸) محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_{net-SOFC} = \dot{W}_{SOFC} - \dot{W}_{FWP} - \dot{W}_{consumption} \quad (8)$$

که در آن \dot{W}_{SOFC} انرژی تولیدی، \dot{W}_{FWP} انرژی مصرفی توسط پمپ آب در مبدل حرارتی، $\dot{W}_{consumption}$ انرژی‌های مصرفی داخلی پیل سوختی شامل دمنده‌ی هوا و سیستم کنترلی و ... می‌باشد که طبق مرجع [۱۹] مجموعاً ۴ درصد کار کلی را تشکیل می‌دهد.

بازده انرژی و انرژی پیل سوختی از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\eta_{PV} = \frac{\dot{W}_{net-SOFC}}{\dot{m}_{H_2,SOFC} LHV_{H_2}} \quad (9)$$

$$\psi_{PV} = \frac{\dot{W}_{net-SOFC}}{\dot{m}_{H_2,SOFC} ex_{H_2}} \quad (10)$$

لازم به ذکر است که داده‌های لازم برای انجام محاسبات واحد پیل سوختی در (جدول ۲) آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات پیل سوختی [۱۹]

پارامتر (واحد)	مقدار
دمای هوای ورودی، T_0 (°C)	۲۵
دمای خروجی از پیل، T_{evap} (°C)	۹۰۰
تعداد سلول‌ها، n_{solar}	۱۵

• راندمان کلی سیستم

راندمان کلی سیستم با دو سناریوی مختلف به دست می‌آید. حالت اول زمانی است که برق مورد نیاز توسط سیستم فوتوولتائیک تأمین شده و برق مازاد به صورت هیدروژن تولیدی در الکترو لایزر ذخیره شود. ex_{H_2} انرژی ویژه هیدروژن و $\dot{E}x_{solar}$ شدت جریان انرژی می‌باشد. در این حالت راندمان کلی انرژی و انرژی سیستم برابر است با:

$$\eta_{total} = \frac{P_{demand} + \dot{m}_{H_2} LHV}{\dot{E}n_{solar}} \quad (11)$$

$$\psi_{total} = \frac{P_{demand} + \dot{m}_{H_2} ex_{H_2}}{\dot{E}x_{solar}} \quad (12)$$

در ساعاتی از شب و زمان‌هایی که سیستم فوتوولتائیک کار نمی‌کند راندمان کلی انرژی و انرژی سیستم برابر است با:

$$\eta_{PV} = \frac{\dot{W}_{SOFC} + \dot{Q}_{evap}}{\dot{m}_{fuel} LHV} \quad (13)$$

$$\psi_{PV} = \frac{\dot{W}_{SOFC} + \dot{Q}_{evap} (1 - T_0 / T_{evap})}{\dot{m}_{H_2,SOFC} ex_{H_2}} \quad (14)$$

۲-۳. فرضیات و الگوریتم حل

در مطالعه‌ی حاضر برای تحلیل انرژی و انرژی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

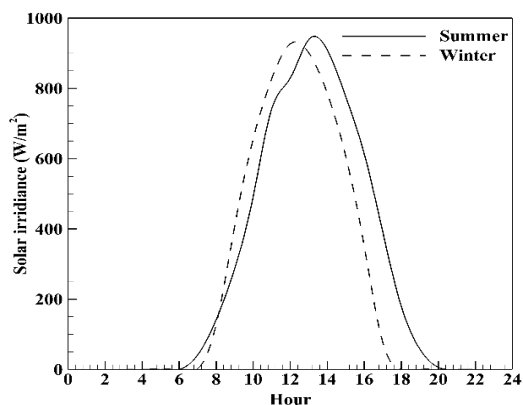
- سیستم ترکیبی در شرایط پایا عمل می‌کند.
- داده‌های ارائه شده برای تابش خورشیدی و مصرف

ساعتی برق از طریق پژوهشگاه نفت استخراج شده است.

- نویزها و تغییرات ناگهانی در منحنی‌های تابش خورشیدی و برق مصرفی در این مطالعه لحاظ نشده و مقادیر متوسط استفاده شده است.
- گرمای خروجی از مرزهای سیستم ناچیز فرض شده است.

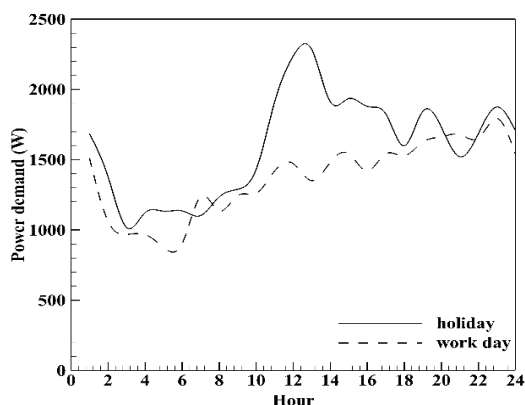
در این مطالعه از مدول فوتوولتائیک کربن-سیلیس ساخته شده توسط شرکت سان پاور با مشخصات ارائه شده در (جدول ۱) استفاده شده است. الکترولیت پیل سوختی با اکسید جامد استیلایز شده با زیرکونیا ساخته شده است که آند آن از جنس نیکل می‌باشد. همچنین مشخصات مهم پیل سوختی در (جدول ۲) آورده شده است. مصارف داخلی این پیل سوختی در حدود ۴ درصد کار کلی این سیستم نظر گرفته شده که این مقدار در محاسبه‌ی راندمان سیستم لحاظ شده است.

در (شکل ۳) داده‌های مربوط به منحنی ساعتی تابش خورشید در شهر تهران آورده شده است. لازم به ذکر است که در این مطالعه از داده‌های ارائه شده توسط پژوهشگاه صنعت نفت اندازه‌گیری شده برای شهر تهران در سال ۲۰۱۳ استفاده شده است [۲۰]. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در تابستان بین ساعت ۲۰ تا ۵ صبح تابشی وجود نداشته و این بازه برای زمستان به ۱۸ تا ۷ صبح نیز می‌رسد. سیستم فوتوولتائیک بستگی زیادی به تابش خورشیدی داشته به همین دلیل برای شهر تهران بیشترین برق تولیدی بین ساعات ۱۱ تا ۱۳ ظهر در تابستان و بین ساعات ۱۲ تا ۱۴ در زمستان خواهد بود. همچنین مشاهده می‌شود که مطابق انتظار تابش کلی در تابستان بیشتر از زمستان است.



شکل ۳: منحنی ساعتی تابش خورشید برای فصل تابستان و زمستان در شهر تهران [۲۰]

همچنین تحلیل ذکر شده نیازمند داشتن مصارف ساعتی برق مسکونی است. به همین منظور در (شکل ۴) مصرف برق ساعتی برای یک ساختمان در روزهای کاری و تعطیل در شهر تهران آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اوج مصرف برای این ساختمان بین ساعات ۱۲ تا ۱۳ ظهر در روز و حوالی ساعت ۲۲ در شب می‌باشد. لازم به ذکر است که متراژ این ساختمان در حدود ۱۳۰ مترمربع بوده است.



شکل ۴: منحنی ساعتی مصرف برق در روزهای کاری و تعطیل در شهر تهران [۲۰]

روند تحلیل این سیستم و مراحل کد نوشته شده در نرم‌افزار فترن (که بر روی رایانه ۹ هسته‌ای با رم ۸ مدل شده است) به شرح زیر می‌باشد:

۱) به دست آوردن نمودار ولتاژ-جریان با استفاده از روابط (۱) تا (۴)

۲) محاسبه‌ی راندمان انرژی و اگزرژی با استفاده از روابط (۵) و (۶)

۳) به دست آوردن مقدار هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر با استفاده از رابطه‌ی (۷)

۴) محاسبه‌ی راندمان انرژی کلی سیستم

الف) در ساعات استفاده از سیستم فوتوولتائیک با رابطه‌ی (۱۱)

ب) در ساعات استفاده از واحد پیل سوختی با کمک رابطه‌ی (۱۳)

۵) محاسبه‌ی راندمان اگزرژی کلی سیستم

الف) در ساعات استفاده از سیستم فوتوولتائیک با رابطه‌ی (۱۲)

ب) در ساعات استفاده از واحد پیل سوختی با رابطه‌ی (۱۴)

۳-۳. تحلیل زیست‌محیطی

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 منتشرشده از هر دو سیستم رایج استفاده‌شده در ساختمان‌ها (خرید برق از شبکه سراسری و استفاده از بویلر) و سامانه‌ی تولید هم‌زمان برق و حرارت معرفی شده‌اند.

$$Em_{CON} = Em_{CON}^{Ele} + Em_{CON}^{Gas} \quad (15)$$

$$Em_{CHP} = Em_{PV-FC}^{Ele} + Em_{PV-FC}^{Gas} \quad (16)$$

که در آن Em_{CHP} و Em_{CON} میزان آلاینده‌های منتشرشده توسط سیستم رایج و سیستم فوتولتائیک-پیل سوختی است که برابر 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:

$$Em_{CON}^{Ele} = E_{ele} \times EmI_{ele} \quad (17)$$

$$Em_{CON}^{Gas} = E_{CON}^{gas} \times EmI_{gas} \quad (18)$$

$$Em_{PVFC}^{Ele} = (E_{ele} - E_{ele-PVFC}) \times EmI_{ele} \quad (19)$$

$$Em_{PVFC}^{Gas} = E_{PVFC}^{gas} \times EmI_{gas} \quad (20)$$

که در آن E_{ele} و $E_{ele-PVFC}$ به ترتیب برق موردنیاز سالانه و برق تولیدی توسط سیستم تولید هم‌زمان، E_{CON}^{gas} و E_{PVFC}^{gas} مقدار گاز موردنیاز سالانه به ترتیب در سیستم رایج و EmI_{gas} و EmI_{ele} نیز به ترتیب شدت تولید آلاینده‌ها برای تولید برق و احتراق گاز هستند که مقادیر آن در (جدول ۳) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این مقادیر از مراجع ذکرشده و با استفاده از روش موازنه‌ی جرم بر اساس میزان مصرف سوخت محاسبه شده‌اند. همچنین برای مقایسه‌ی دو سیستم مذکور از پارامتری با عنوان نسبت کاهش آلاینده‌ها استفاده شده است که به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$ERR = \frac{Em_{CON} - Em_{PV-FC}}{Em_{CON}} \times 100 \quad (21)$$

جدول ۳. میزان تولید معادل گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های مختلف در فرایند احتراق گاز و تولید برق

$EmI_{ele} \left(\frac{kg}{kwh} \right)$	$EmI_{gas} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	کمیت آلاینده
[۲۳]	[۲۲, ۲۱]	
۰/۷۱۵	۱/۹۹۸	CO_2
۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱۲	CO
۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۴۲	NO_X
۰/۰۰۳۳	-	SO_X

۴. نتایج و بحث

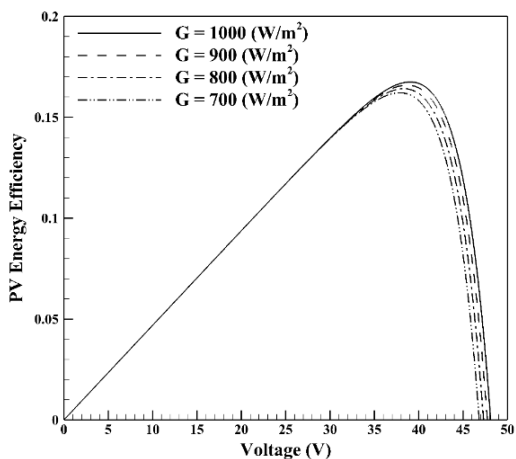
۴-۱. اعتبار سنجی

برای حصول اطمینان از صحت کد نوشته شده در (شکل ۵) نمودار جریان-ولتاژ ارائه‌شده در برگ داده با کد نوشته شده در مطالعه‌ی حاضر مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود نمودار غیرخطی ولتاژ جریان که بر اساس رابطه‌ی (۱) به دست آمده از دو بخش تشکیل شده که در ولتاژهای پایین جریان ثابتی به دست می‌دهد اما در بخش پایانی با افزایش ولتاژ مقدار جریان به شدت کاهش یافته و به صفر می‌رسد. همچنین مطابق انتظار با افزایش تابش خورشید (G) میزان جریان در ولتاژهای مشابه افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود نمودارهای جریان ولتاژ رسم شده در مطالعه‌ی حاضر تطابق قابل قبولی با داده‌های ارائه‌شده توسط شرکت سان پاور دارد.

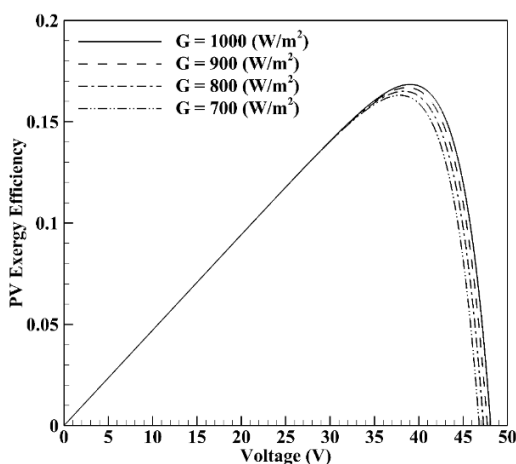
۴-۲. انرژی و انرژی

در این بخش ابتدا نتایج تحلیل برای پنل خورشیدی آورده شده است و در ادامه مباحثی پیرامون راندمان کلی سیستم انجام گرفته است. در (شکل ۶) منحنی توان برحسب ولتاژ برای مقادیر تابش خورشیدی مختلف آورده شده است. با توجه به شکل می‌توان گفت که سیستم فوتولتائیک یک نقطه‌ی کار بیشینه داشته که بعد از آن با تغییر ولتاژ توان خروجی به شدت کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که سیستم‌های خورشیدی پیشرفته در شرایطی طراحی می‌شوند که تحت تابش‌های خورشیدی متفاوت در همان نقطه‌ی بیشینه کار کنند. لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده در این بخش نیز با داده‌های ارائه‌شده توسط شرکت سان پاور مقایسه شده و نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در شرایط استاندارد آزمون برای تابش





شکل ۷: نمودار راندمان انرژی بر حسب ولتاژ برای انرژی‌های تابشی مختلف

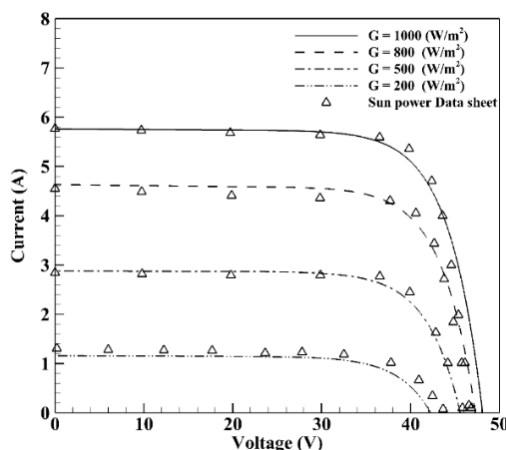


شکل ۸: نمودار راندمان انرژی بر حسب ولتاژ برای انرژی‌های تابشی مختلف

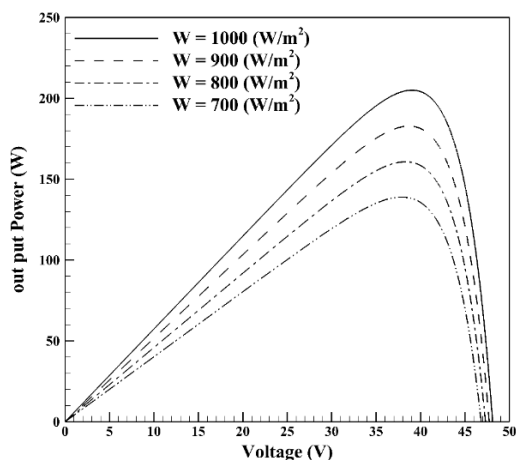
همان‌طور که اشاره شد برای استفاده از منحنی تابش خورشید بر حسب ساعات شبانه‌روز از داده‌های موجود برای شهر تهران در دو فصل تابستان و زمستان استفاده شده تا به‌نوعی بیشترین و کمترین تابش خورشید در محاسبات لحاظ گردد. در (شکل ۹) تفاضل برق تولیدی توسط سیستم خورشیدی از برق موردنیاز ساختمان‌ها در شهر تهران آورده شده است. مطابق انتظار همان‌طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود میزان برق مازاد بر نیاز در حوالی ظهر به میزان بیشینه‌ی خود رسیده و در اوایل صبح و اواخر شب نیز مقدار نیاز بیشتر از برق تولیدی می‌باشد چون در این ساعات تابشی وجود ندارد. به همین دلیل در مواقعی که تابش مازاد وجود دارد این انرژی به‌عنوان ورودی به همراه آب به الکتروولایزر منتقل شده و هیدروژن تولید می‌شود تا در مواقعی که به برق نیاز است و تابش خورشید در دسترس نیست با انتقال

خورشیدی ۱۰۰۰ وات بر مترمربع توان بیشینه در حدود ۳ درصد تفاوت با داده‌های شرکت داشته که برای مدل‌سازی حاضر قابل قبول است.

همچنین در (شکل ۷) و (شکل ۸) به ترتیب راندمان انرژی و انرژی سیستم فوتوولتائیک برای تابش‌های خورشیدی مختلف آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند هر دو نمودار مشابه روند منحنی توان-ولتاژ است. همچنین با افزایش تابش خورشیدی راندمان افزایش می‌یابد؛ و نیز راندمان انرژی در مقدار بیشینه‌ی خود مقدار بالاتری را از راندمان انرژی دارد. این روند را می‌توان با معادلات (۵) و (۶) توضیح داد؛ جایی که تنها تفاوت دو رابطه وجود تأثیر دمای خورشید در معادله‌ی انرژی است که باعث افزایش آن در مقایسه با راندمان انرژی می‌شود.

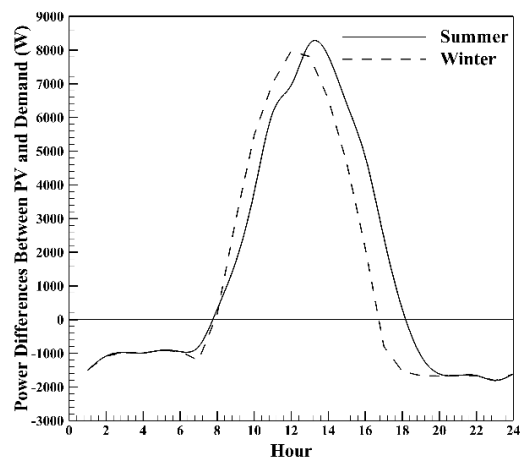


شکل ۵: اعتبارسنجی سیستم خورشیدی با مقایسه‌ی نمودار ولتاژ-جریان با داده‌های موجود در برگ‌داده‌ی شرکت سان‌پاور [۱۵]

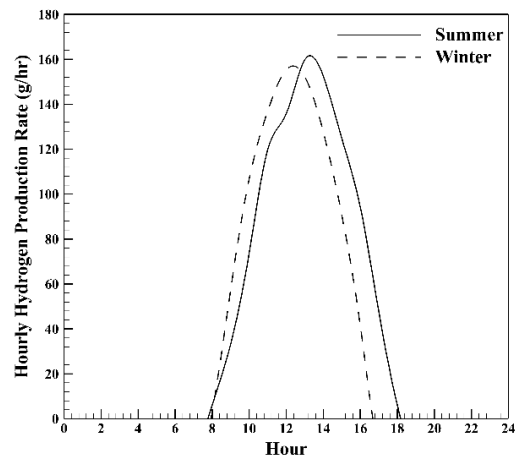


شکل ۶: تأثیر تابش خورشید در منحنی توان-ولتاژ

هیدروژن به پیل سوختی برق مورد نیاز ساختمان تأمین گردد در (شکل ۱۰) نرخ هیدروژن تولیدی توسط الکترو لایزر در ساعات مختلف شبانه روز در شهر تهران نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود روند این نمودار مطابق روند (شکل ۹) بوده و بیشینه ی نرخ تولید هیدروژن مربوط به زمانی است که تفاضل انرژی تابشی با برق مورد نیاز بیشینه است. همچنین واضح است که هیدروژن بیشتری در فصل تابستان تولید می شود که با محاسبه ی سطح زیر منحنی در (شکل ۱۰) به دست می آید.



شکل ۹: تفاوت برق تولیدی توسط سیستم خورشیدی و برق مورد نیاز ساختمان در دو فصل تابستان و زمستان برای شهر تهران

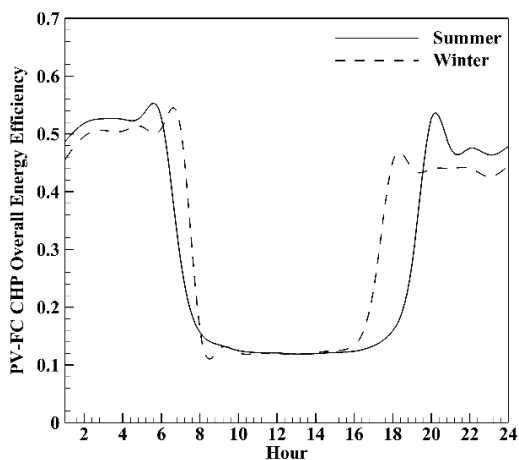


شکل ۱۰: نرخ هیدروژن تولیدی توسط الکترو لایزر در دو فصل تابستان و زمستان برای شهر تهران

راندمان کلی انرژی و انرژی سیستم با استفاده از روابط (۱۱) تا (۱۴) محاسبه شده و در (شکل های ۱۱ و ۱۲) نشان داده شده است. با وجودی که هر دو بازه در فصول مورد مطالعه روند یکسانی دارند، همان طور که مشاهده می شود بازدهی

انرژی از انرژی بیشتر است. گراف های راندمانی نشان می دهند که ساعات کار پیل سوختی در زمستان بیشتر است که علت آن کمتر بودن تابش در دسترس در این فصول است. همچنین کمترین راندمان زمانی به دست می آید که مقدار برق مازاد بیشینه است. این دو شکل در تابستان بین ساعات ۷ تا ۱۹ کمترین راندمان انرژی و انرژی کل را نشان می دهند که علت آن این است که در این زمان برق مازاد صرف تولید هیدروژن در الکترو لایزر شده و ذخیره می گردد. همچنین در زمستان این مقدار کمینه به محدوده ساعت ۸ صبح تا ۱۷ منتقل می شود.

با توجه به (شکل ۷) مقدار بیشینه ی راندمان انرژی سلول خورشیدی در حدود ۱۷ درصد است، همچنین تابش خورشیدی ۱۰۰۰ وات بر مترمربع در نظر گرفته شده است. این بدین معنی است که تنها ۱۷ درصد انرژی خورشیدی جذب شده در سلول های فوتوولتائیک به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. در ساعاتی که میزان برق تولیدی توسط انرژی خورشیدی بیشتر از برق مورد نیاز مصرفی است (شکل ۹) برق مازاد تولیدی با ورود به الکترو لایزر (که بازدهی در حدود ۶۵ درصد دارد) و صرف تولید هیدروژن گشته بنابراین در این ساعات ورودی سیستم که تابش خورشید بوده به میزان بیشینه ی خود رسیده اما خروجی سیستم تنها برق مصرفی مورد نیاز و هیدروژن تولید شده در الکترو لایزر است، به همین دلیل در این ساعات بازدهی انرژی و انرژی به میزان کمینه ی خود می رسد. به همین ترتیب تبدیل هیدروژن تولیدی در الکترو لایزر به برق مصرفی در ساعات اولیه و آخرین شبانه روز که تابش خورشید به عنوان ورودی سیستم وجود ندارد باعث افزایش چشمگیر انرژی و انرژی سیستم گردیده که این افزایش در اشکال زیر به درستی دیده می شود.



شکل ۱۱: راندمان کلی انرژی سیستم

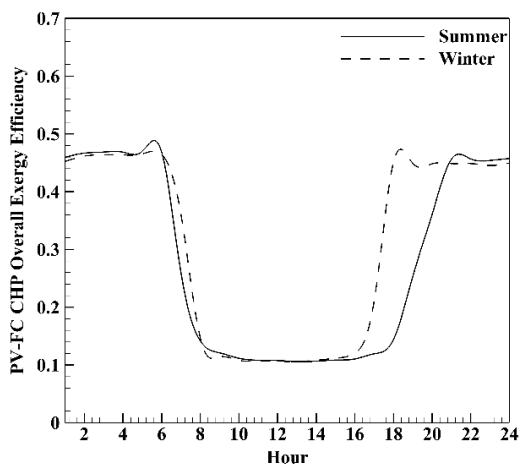
جدول ۴: میزان آلاینده‌های منتشرشده برای دو سیستم مورد بحث

آلاینده	کیلوگرم آلاینده‌ی تولیدشده از طریق گاز		کیلوگرم آلاینده‌ی تولیدشده در نیروگاه برق		ERR (%)
	PVFC	Con	PVFC	Con	
CO ₂	۲۹۱۴۷	۳۳۷۷۰	۶۸۰	۱۰۷۹۰	۳۳
CO	۱۷	۲۰	۰/۳	۶	۳۲
NO _x	۶۱	۷۱	۰/۵	۷	۲۱
SO _x	۰	۰	۳	۵۰	۹۳

۵. جمع‌بندی

در این مطالعه به تحلیل انرژی و اگزرژی، تحلیل اقتصادی و محیط‌زیستی سامانه‌ی تولید هم‌زمان برق و حرارت به کمک پیل سوختی و سلول خورشیدی پرداخته شده است. لازم به ذکر است که در بخش تحلیل اقتصادی از دو ساختمان نمونه در شهر تورنتوی کانادا و تهران استفاده شد.

در بخش تحلیل انرژی و اگزرژی سیستم نمودارهای مرتبط به واحدهای مختلف تشکیل‌دهنده‌ی آن برحسب ساعات کارکرد آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که بیشینه‌ی راندمان انرژی و اگزرژی سلول خورشیدی در حدود ۱۵ درصد و در حوالی ولتاژ ۴۰ ولت می‌باشد. همچنین نرخ تولیدی هیدروژن در اواسط روز و زمانی که تابش بیشینه است به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد و مطابق انتظار این نرخ در روزهای تابستان بیشتر از روزهای زمستانی است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که راندمان کلی دستگاه در حوالی ظهر و زمانی که سیستم پیل سوختی وارد مدار نشده در حالت کمینه‌ی خود قرار دارد که علت آن ذخیره‌ی هیدروژن تولیدی در واحد الکترولیزر است با ورود پیل سوختی به مدار در حوالی ساعت ۱۸ تا ۶ صبح راندمان به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که راندمان کلی دستگاه در حدود ۵۵ درصد به دست آمده که نسبت به راندمان سیستم رایج (حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد) بالاتر می‌باشد؛ اما در بخش تحلیل زیست‌محیطی کفای ترازو کاملاً به سمت سیستم تولید هم‌زمان سنگینی می‌کند. به طوری که استفاده از این سیستم‌ها کاهش ۳۳ درصدی آلاینده‌های مخرب محیط‌زیست و گازهای آلاینده را به همراه دارد.



شکل ۱۲: راندمان کلی انرژی سیستم

۳-۴. زیست‌محیطی

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 کند. از این رو در (جدول ۴) مقادیر معادل گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های منتشرشده توسط هر دو سیستم مورد بحث و نسبت کاهش گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها برای ساختمان مفروض ارائه شده است. لازم به ذکر است که سیستم تولید هم‌زمان توانایی تأمین تمام برق و حرارت موردنیاز برای این واحد مسکونی را نداشته و مقدار مازاد موردنیاز از شبکه گرفته شده بنابراین مقدار آلاینده‌های تولیدی از آن هم برای سیستم تولید هم‌زمان لحاظ گردیده است. همان‌طور که مشخص است سیستم تولید هم‌زمان نسبت به سیستم رایج، به گاز طبیعی و برق مصرفی کمتری نیاز دارد، به همین ترتیب گاز گلخانه‌ای و آلاینده‌ی کمتری تولید می‌کند. همان‌طور که در (جدول ۴) مشاهده می‌شود مقادیر CO₂، CO، NO_x و SO_x در سیستم رایج به ترتیب ۳۳، ۳۲، ۲۱ و ۹۳ 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 H₂S می‌باشد.

به‌طور کلی می‌توان گفت استفاده از سیستم تولید هم‌زمان منجر به کاهش چشمگیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها به محیط در حدود ۳۳ درصد می‌گردد.

علائم

T	دما [K]
T_0	دما در شرایط استاندارد [K]
t	زمان [s]
U	عدم قطعیت بسط یافته
u	عدم قطعیت استاندارد
V	حجم [m ³]
Z	ضریب تراکم‌پذیری در شرایط خط
Z_0	ضریب تراکم‌پذیری در شرایط استاندارد

حروف یونانی

ρ	چگالی [kg/m ³]
ρ_0	چگالی در شرایط استاندارد [kg/m ³]
A	سطح مقطع [m ²]
c_i	ضریب حساسیت
m	جرم [kg]
P	فشار در شرایط خط [Pa]
P_0	فشار در شرایط استاندارد [Pa]
Q	دبی [h/m ³]
Q_0	دبی در شرایط استاندارد [h/m ³]
q	دبی جرمی [kg/s]

زیرونیس

e	خروجی
m	جرمی
0	شرایط استاندارد

مراجع:

- [3]. Parliamentary Office of Science and Technology. Household energy efficiency. Post; October 2005.
- [4]. Chicco, G. and P. Mancarella, Distributed multi-generation: a comprehensive view. Renewable and sustainable energy reviews, Vol.1, No.3, pp. 535-551, 2009.
- [5]. Lu, L. and H. Yang, Environmental payback time analysis of a roof-mounted building-integrated photovoltaic (BIPV) system in Hong Kong. Applied Energy, Vol. 87, No.12, pp. 3625-3631, 2010.
- [6]. Uzunoglu, M., O. Onar, and M. Alam, Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications. Renewable energy, Vol. 34, No.3, pp. 509-520, 2009.
- [7]. Clarke, R., et al., Direct coupling of an electrolyser to a solar PV system for generating hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, Vol.34, No.6, pp. 2531-2542, 2009.
- [8]. Hawkes, A., et al., Solid oxide fuel cell micro combined heat and power system operating strategy: Options for provision of residential space and water heating. Journal of Power Sources, Vol.164, No.1, pp. 260-271, 2007.
- [9]. Bell, M., et al., Development of micro combined heat and power technology assessment capability at the Canadian Centre for Housing Technology, 2003.
- [10]. Hosseini, M., et al., Thermodynamic modelling of an integrated solid oxide fuel cell and micro gas turbine system for desalination purposes. International Journal of Energy Research, Vol.37, No.5, pp. 426-434, 2013.
- [1]. International energy Agency. Energy efficiency.
- [2]. Al-Sulaiman, F.A., I. Dincer, and F. Hamdullahpur, Energy analysis of a trigeneration plant based on solid oxide fuel cell and organic Rankine cycle. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, No.10, pp. 5104-5113, 2010.

- based performance analysis of a solid oxide fuel cell and steam injected gas turbine hybrid power system. *international journal of hydrogen energy*, Vol.34, No.5, pp. 2396-2407, 2009.
- [19]. Hosseini, M., I. Dincer, and M.A. Rosen, Hybrid solar-fuel cell combined heat and power systems for residential applications: Energy and exergy analyses. *Journal of Power Sources*, Vol.221, pp. 372-380, 2013.
- [20]. Research Institute of Petroleum Industry Data sheet, 2017.
- [21]. American Petroleum institute (API), Compendium of Greenhouse Gas Emission Methodologies for the Oil and Natural Gas Industry, August 2009.
- [22]. US Environmental Protection Agency, Complication of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources, Ap-42, (GPO 055-000-005-001), 2006.
- [23]. Validation Report, Flare Gas Recovery in Sarkhoon and Qeshm Gas Treating Company, 2015.
- [24]. Kiran K Chedella¹, Lin Zhao² and Zhihao Zhang³ Modeling of a Small Stand-Alone AC System with the Dynamic Models of Fuel Cells and Solar Panels,
- [۱۱]. پورمحمد م. اشجاری م. و خسروشاهی ع.، بررسی انرژی و انرژی ریکوپراتور در کاربرد میکروتوربین برای سیستم‌های تولید هم‌زمان گرما و توان. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۶، ش. ۳، ص ۵۵-۶۶، ۱۳۹۵.
- [۱۲]. فرهنگ م. فرزانه گرد م. و دشت بیاض م.، الگوریتم بهینه‌سازی فنی - اقتصادی سیستم تولید هم‌زمان سرمایش، گرمایش و برق با موتور احتراق داخلی در یک ساختمان خانگی نمونه. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۷، ش. ۲، ص ۱۷۹-۱۸۸، ۱۳۹۶.
- [۱۳]. کرباسیون م. داناییان م. و محسنی م.، مقایسه‌ی عملکرد محرک‌های اولیه مختلف در سیستم‌های تولید سه‌گانه توان، حرارت و برودت در مقیاس میکرو برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۷، ش. ۲، ص ۲۰۳-۲۱۱، ۱۳۹۶.
- [۱۴]. غفوریان م.م. و نیازمند ج.، برآورد کاهش انتشار آلاینده‌ها در عملکرد یک سیستم تولید هم‌زمان نسبت به یک سیستم معمولی برای مطالعه موردی (هتل) دارای آب شیرین کن. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، انتشار آنلاین از تاریخ ۰۸ آذر ۱۳۹۶.
- [15]. Document #001-42023, 210 Solar Panel, SunPower Corporation. Web link: www.prevalingwindpower.com/sunpower.pdf, (accessed 26.06.12.).
- [16]. Masoum, M.A., H. Dehbonei, and E.F. Fuchs, Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking. *IEEE Transactions on energy conversion*, Vol.17, No.4, pp. 514-522, 2002.
- [17]. Veerachary, M., T. Senjyu, and K. Uezato, Voltage-based maximum power point tracking control of PV system. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, Vol.38, No.1, pp. 262-270, 2002.
- [18]. Motahar, S. and A.A. Alemrajabi, Exergy



Thermodynamic and Environmental Analysis of Using Solar-Fuel Cell CHP Systems in Residential House of Iran

Esmaeil GhasemiKafrudi^{1*}, MohammadReza Habibi¹, Hossein Abbasali Khomeh², Zeynab Sobhani²

1. Scientific faculty member of Energy and Environment Research Center, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran
2. Researcher of Energy and Environment Research Center, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL RESEARCH

Article History:

Received: 08 April 2024

Revised: 05 May 2024

Accepted: 30 May 2024

Keywords:

Combined heat and power (CHP)

Energy and exergy analysis

Solar energy

Environmental analysis

ABSTRACT

Combined heat and power (CHP) systems are increasingly being considered for residential use in developed countries due to their reduced losses, high efficiency and ability to enhance grid security. This research investigates the energy, exergy and environmental analysis of a CHP system that uses both solar panels and fuel cells. Input data was obtained by analyzing the consumption pattern of a residential building in Tehran and the solar irradiance of the city. The study includes the extraction of individual energy and exergy efficiency diagrams for the solar panel, as well as their integration with the overall system. The results indicate that the system's efficiency is at its maximum when the fuel cell is introduced into the operating circuit. Additionally, the study examines exhaust emissions from the CHP system and compares them with the current practice of using the grid network and boiler. The findings reveal that the use of CHP systems can reduce environmental pollutants and pollutant emissions by up to 33 percent.

DOR: [20.1001.1.25885251.1403.00.0.0](https://doi.org/10.1001.1.25885251.1403.00.0.0)

How to cite this article

E. Ghasemi Kafrudi, M.R. Habibi, H. Abbasali Khomeh, Z. Sobhani, Thermodynamic and Environmental Analysis of Using Solar-Fuel Cell CHP Systems in Residential House of Iran. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2024; 11(1): 33 -45. (https://www.ijge.irangi.org/article_712576.html)

* Corresponding Author.

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

Available online 10 September 2024

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

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



پیش‌بینی هوشمند میزان مصرف گاز در بازه‌های سه‌ساعته، با استفاده از داده‌های ثبت شده در دوره‌های زمانی مشخص

ایمان محمدی^{۱*}، محسن تقوی^۲

۱. دکترای مهندسی مکانیک، شرکت گاز خراسان رضوی، مشهد، ایران

۲. کارشناسی مهندسی شیمی، شرکت گاز خراسان رضوی، مشهد، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: iman2960@gmail.com

مقاله علمی- پژوهشی

صفحه ۴۶ - ۷۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵

چکیده

مصرف گاز به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین حامل‌های انرژی در کشور، اهمیت بسزایی در مدیریت بحران، مدیریت تولید، تخصیص و مصرف، جلوگیری از هدر رفت و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی دارد؛ اما به دلیل قدیمی بودن تجهیزات اندازه‌گیری، ثبت داده‌ها به‌صورت پیوسته امکان‌پذیر نیست و اطلاعات موجود درباره مصرف گاز، معمولاً محدود به گزارش‌های مصرف دوره‌ای گاز مشترکین است؛ بنابراین، پیش‌بینی لحظه‌ای مصرف گاز با عدم قطعیت بالایی همراه است و بررسی صحت پیش‌بینی نیز به دلیل فقدان داده‌های واقعی لحظه‌ای امکان‌پذیر نیست. هدف این پژوهش، پیش‌بینی هوشمند مصرف گاز در فواصل زمانی سه‌ساعته بر اساس اطلاعات مصرف دوره‌ای آن است. روش ارائه شده در این پژوهش شامل سه‌گام است. در گام اول، با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی فازی، داده‌های مصرف گاز مشترکین خانگی به سه دسته کم‌مصرف، متعادل و پرمصرف تقسیم می‌شوند. در گام دوم، با استفاده از یک شبکه عصبی عمیق، دما به‌صورت بازه‌ای سه‌ساعته پیش‌بینی می‌شود. در گام سوم، با استفاده از یک سیستم مبتنی بر منطق فازی، مصرف سه‌ساعته گاز مشترکین خانگی بر اساس دمای پیش‌بینی شده، روز سال و ساعت شبانه‌روزی تخمین زده می‌شود. پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر داده‌های شهر بیرجند نشان می‌دهد که مجموع مصرف لحظه‌ای پیش‌بینی شده برای هر سه خوشه کم‌مصرف، متعادل و پرمصرف، میانگین مصرف دوره‌ای مشترکین آن خوشه‌ها را با خطای قابل قبولی دنبال می‌کند. همچنین، وجود همبستگی منفی قوی بین دما و مصرف گاز، به‌ویژه برای مشترکین متعادل در فصول سرد، تأثیرپذیری مصرف گاز از دما را تأیید می‌کند.

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

۱. مقدمه

انرژی یکی از مؤلفه‌های اساسی توسعه ماندگار فناوری و افزایش رفاه بشر است. از گذشته‌های دور در ایران، این تقاضا برای انرژی با بهره‌گیری از ذخایر عظیم نفت و گاز پاسخ داده شده است، ولی همین فراوانی و بهای اندک سوخت‌های فسیلی باعث شده است که سرمایه‌گذاری مناسبی در جهت به‌روزرسانی ابزارآلات اندازه‌گیری و ایجاد پایگاه داده لازم جهت مدیریت شایسته آن انجام نشود. به‌عنوان مثال، در حالی که دو دهه گذشته شاهد پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در حوزه فناوری‌های اندازه‌گیری و ارتباطات شبکه‌ای بوده است، مصرف گاز خانگی هنوز توسط عامل انسانی و در طی



بازدیدهای دوره‌های ثبت میشود و حتی در ایستگاه‌های تقلیل فشار^۱ TBS و^۲ CGS نیز دسترسی به داده‌های لحظه‌ای نمی‌باشد. این در حالی است که سوخت‌های فسیلی سهم بزرگی در ایجاد بحران آلودگی هوا و گرم شدن زمین دارند [۱]. همچنین افزایش جمعیت انسانی و نقش روزافزون انرژی در شیوه زندگی مدرن و درعین حال محدود بودن ذخایر نفت و گاز، چالش‌های استحصال، ذخیره‌سازی و انتقال آن، اهمیت مدیریت هوشمند این منبع انرژی را بیش از پیش آشکار می‌نماید [۲].

هدف از انجام این کار، به‌کارگیری ابزارهای هوشمند جهت پیش‌بینی لحظه‌ای (سه‌ساعته) مصرف گاز مشترکین خانگی شهر بیرجند با استفاده از گزارش‌های مصرف دوره‌های گاز است. تا از این طریق، مدیریت شایسته بحران و برقراری تناسب بین میزان نیاز و توان تولید در شبکه گازرسانی شهری صورت پذیرد. بدیهی است به‌علت تغییر مقیاس پیش‌بینی لحظه‌ای نسبت به داده‌های دوره‌ای موجود، این فرایند با عدم قطعیت بسیار بالایی همراه است و حتی بررسی صحت پیش‌بینی به دلیل فقدان داده‌های اندازه‌گیری شده لحظه‌ای به‌صورت متداول امکان‌پذیر نیست. از این‌رو این مسئله، بستر مناسبی برای به‌چالش کشیدن چارچوب‌ها و روش‌های مدل‌سازی و پیش‌بینی کلاسیک و هوشمند نیز می‌باشد.

ریحافت ارائه شده در این پژوهش از سه‌گام تشکیل شده است. در گام نخست، عوامل مؤثر بر میزان مصرف گاز نظیر: شاخص‌های هواشناسی، منطقه جغرافیایی، خصوصیات ساختمان و فصل و روز و ساعت مصرف در طول روز شناسایی می‌گردند. سپس به‌منظور کاهش پیچیدگی و سهولت استخراج هدفمند الگوهای مصرفی، با به‌کارگیری الگوریتم خوشه‌بندی فازی در این گام، داده‌های مصرف گاز مشترکین خانگی به سه دسته کم‌مصرف، متعادل و پرمصرف تقسیم می‌شوند. نتایج این خوشه‌بندی در طراحی توابع عضویت تالی قوانین فازی در گام سوم و نیز تحلیل جداگانه رفتار هر گروه از مشترکین مورد استفاده قرار می‌گیرد. در گام دوم، یک شبکه عصبی عمیق جهت پیش‌بینی دما به‌صورت بازه‌ای سه‌ساعته از روی شاخص‌های هواشناسی دما به کار گرفته می‌شود تا بتوان شرایط دمای سه ساعت آینده مشترکین را پیش‌بینی نمود. نهایتاً در گام سوم، از مقدار پیش‌بینی شده دما در کنار دیگر عوامل تأثیرگذار بر مصرف گاز نظیر: ساعت،

روز سال و فصل که نیازی به پیش‌بینی ندارند استفاده شده و با مجموعه‌ای از قوانین فازی، نگاشتی بین عوامل تأثیرگذار و میزان مصرف گاز برقرار می‌شود.

درنهایت، جهت راستی‌آزمایی مدل، دو اصل اساسی راهنمای این پژوهش می‌باشند. نخست این‌که مجموع مصرف لحظه‌ای پیش‌بینی شده در طول یک دوره بایستی مساوی با مصرف دوره باشد. دوم این‌که مصرف گاز خانگی پیش‌بینی شده همبستگی متقابل منفی با دما داشته باشد. پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر داده‌های شهر بیرجند نشان می‌دهد که مجموع مصرف لحظه‌ای پیش‌بینی شده برای هر سه خوشه کم‌مصرف، متعادل و پرمصرف، میانگین مصرف دوره‌ای مشترکین آن خوشه‌ها را با خطای قابل قبولی دنبال می‌کند. همچنین، وجود همبستگی منفی قوی بین دمای هوا و میزان مصرف گاز خصوصاً برای مشترکین متعادل در فصول سرد، فرض تأثیرپذیری مصرف گاز از دمای هوا را تأیید می‌نماید.

۲. بهینه‌سازی فراآوری با گاز

در این بخش نخست رویکردهایی مربوط به مدل‌سازی و پیش‌بینی باوجود سری‌های زمانی با رزولوشن زمانی متفاوت معرفی می‌شود. از آنجایی‌که ماهیت مسئله مورد بحث، پیش‌بینی مصرف گاز لحظه‌ای مشترکین با استفاده از داده‌های مصرف دوره‌ای است؛ مطالعه‌ی پژوهش‌های مربوط به پیش‌بینی سری‌های زمانی چند مقیاسی که تاکنون عموماً در حوزه اقتصاد صورت پذیرفته، ضروری به نظر می‌رسد. در ادامه، به‌مرور رویکردهای مبتنی بر مدل‌سازی سری‌های زمانی چند متغیره می‌پردازیم. به کمک این گروه از رویکردها می‌توان علاوه بر مقادیر پیشین مصرف گاز عواملی دیگر چون: شاخص‌های هواشناسی، موقعیت جغرافیایی را نیز در پیش‌بینی مصرف گاز دخیل کرد. همچنین، به‌صورت مختصر، پژوهش‌هایی که در حوزه الگوی مصرف گاز، عوامل مؤثر بر مصرف، مدل‌سازی مصرف و درنهایت پیش‌بینی مصرف انجام شده است، شرح داده می‌شود.

۲-۱. سری‌های زمانی چند مقیاسی (MSTS)^۲

مفهوم سری‌های زمانی چند مقیاسی اولین بار در سال ۲۰۰۶ معرفی شد و به‌مرور زمان روش‌های مدل‌سازی و پیاده‌سازی آن‌ها گسترش یافت. این سری‌ها برای تحلیل

1. Town border station
2. City gate station
3. Multi scale time series



رفتار سیستم‌هایی که دارای دینامیک‌های متغیر هستند و داده‌هایی که در رزولوشن‌های زمانی مختلف جمع‌آوری شده‌اند، توسعه پیدا کردند. مدل‌های اولیه این سری‌ها با نام MSTSM شناخته می‌شوند [۳]. یکی از کاربردهای اولیه این مدل‌ها در مسائلی بود که ذاتاً چند مقیاسی بودند اما داده‌های موجود از آن‌ها در کوچک‌ترین مقیاس اندازه‌گیری شده بود. برای این منظور مدلی به نام HRM^۱ یا رزولوشن مخفی معرفی شد. همچنین این مدل‌ها قابلیت ترکیب داده‌هایی را دارند که در فرکانس‌های مختلف نمونه‌برداری شده‌اند.

۲-۲. چارچوب کلی مدل سری‌های زمانی چند مقیاسی

مدل سری‌های زمانی چند مقیاسی بر اساس توزیع مشترک عناصر سری زمانی ساخته می‌شوند. فرض کنید سری زمانی X_t به صورت دنباله‌ای از اعضا (اعضای سری زمانی) بر حسب لحظه ۱ تا n_x باشد در آن صورت $p(X_{1:n_x})$ چگالی توزیع مشترک $X_{1:n_x}$ را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال X_t می‌تواند یک مدل سری زمانی خطی و ایستا را دنبال کند و یا $p(X_{1:n_x})$ نشان دهنده توزیع پیش‌بینی شده آتی^۲ باشد که بر اساس دینامیک مشاهدات پیشین سیستم شکل گرفته است. به‌صورت کلی برای پیاده‌سازی مدل‌های پیشنهادی سری‌های زمانی چند مقیاسی از سه روش AR، MA و ARMA^۳ به‌صورت معمول استفاده می‌شود [۴].

به‌منظور تعیین توزیع پسین عناصر سری زمانی از الگوریتم‌های مبتنی بر زنجیره مارکوف مونت کارلو استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها تخمینی از نمونه‌ها در توزیع پسین را تولید کرده و سپس با استفاده از این نمونه‌ها پارامترهای توزیع پسین عناصر سری زمانی همچون مقدار میانگین، انحراف از معیار و ... محاسبه می‌شود.

۲-۳. آنتروپی چند مقیاسی^۴

در دهه ۲۰۰۰، برای تحلیل و پیش‌بینی سری‌های زمانی چند مقیاسی، الگوریتم‌های مبتنی بر آنتروپی معرفی شدند که به‌عنوان آنتروپی چند مقیاسی شناخته می‌شوند. پیچیدگی‌های یک سری زمانی را می‌توان از طرق مختلف همچون آنتروپی تخمین و آنتروپی نمونه تحلیل و بررسی

کرد. آنتروپی چند مقیاسی بر پایه محاسبه آنتروپی نمونه^۵ بر روی بازه‌هایی از مقیاس‌ها بنا شده است. در ادامه الگوریتم پایه آنتروپی چند مقیاسی و سیر تحول و تکامل آن شرح داده می‌شود.

۲-۴. الگوریتم اصلی (پایه) آنتروپی چند مقیاسی

الگوریتم پایه آنتروپی چند مقیاسی از دو گام تشکیل شده است:

- پروسه درشت‌سازی دانه‌ها به‌منظور تولید یک مجموعه از سری‌های زمانی که دینامیک سیستم را در رزولوشن‌های زمانی متفاوت نشان می‌دهد.
- محاسبه آنتروپی نمونه برای هر یک از سری‌های زمانی درشت‌سازی شده.

$$y_j^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} x_i, \quad 1 \leq j \leq N/\tau \quad (1)$$

در رابطه فوق i طول پنجره‌ای است که برای پروسه درشت‌سازی دانه انتخاب می‌شود. ارتباط مستقیم i با τ واضح است و به‌نوعی می‌توان آن را نیز به‌عنوان طول پنجره در نظر گرفت. این پنجره زمانی باید به‌صورت مستمر و یکنواخت به نحوی در طول بازه جابه‌جا شود که همپوشانی نداشته و از طرفی کل محدوده زمانی را پوشش دهد. هر یک از x_i ‌ها نیز عناصر یک سیگنال (سری زمانی) تک متغیره با طول N می‌باشند. $y_j^{(\tau)}$ نیز خروجی پروسه درشت‌سازی دانه می‌باشد. طول این سری زمانی خروجی برابر است با N/τ . درواقع با پارامتر τ می‌توان طول سری زمانی خروجی که از فرایند درشت‌سازی حاصل می‌شود را تعیین کرد [۵،۶].

۲-۵. الگوریتم آنتروپی چند مقیاسی بهبود یافته

در سال ۲۰۰۹ الگوریتم آنتروپی چند مقیاسی بهبود یافته ارائه شد. در این الگوریتم راه حلی برای حذف مقیاس‌های سریع زمانی ارائه شد و همچنین از یک روش درشت‌سازی دانه استفاده شد که اثرگذاری واریانس کاهش یافته را بر ارزیابی سری زمانی محدود کرد [۴،۷]. برای بهبود عملکرد الگوریتم در مواجهه با مقیاس‌های زمانی موقتی، فیلتر FIR^۷

1. Hidden Resolution Model
2. Posterior
3. AutoRegressive Moving Average
4. Multiscale Entropy
5. Sample Entropy
6. Coarse-Graining Procedure
7. Finite-Impulse Response

با فیلتر پایین گذر جایگزین شد. مربع اندازه پاسخ فرکانسی فیلتر طبق رابطه (۲) انتخاب می‌شود:

$$|H(e^{2\pi jf})|^2 = \frac{1}{1 + (f/f_c)^{2n}} \quad (2)$$

در این رابطه n مرتبه فیلتر و f_c فرکانس قطع می‌باشد. مزیت این فیلتر نمایش مقادیر یکنواخت برای پاسخ فرکانسی در باند گذار است.

۲-۶. آنتروپی چند مقیاسی مرکب^۲

در سال ۲۰۱۳ این الگوریتم به منظور کاهش واریانس تخمین مقادیر آنتروپی در مقیاس‌های بزرگ ارائه شد [۴,۸].

۲-۷. آنتروپی چند مقیاسی مرکب بهبود یافته^۲

در سال ۲۰۱۴ کار بر روی الگوریتم آنتروپی مرکب موجب ابداع روشی شد که نواقص روش قبلی را برطرف نمود. در واقع مشکل اصلی الگوریتم آنتروپی چند مقیاسی مرکب عدم توفیق در برطرف کردن آنتروپی تعریف نشده بود. الگوریتم قبلی با وجود اینکه آنتروپی را با دقت بالاتری تخمین می‌زد اما احتمال ایجاد آنتروپی غیرقابل تعریف را نیز افزایش می‌داد. آنتروپی چند مقیاسی مرکب بهبود یافته (RCMSE) طبق رابطه (۳) تعریف می‌شود. در این رابطه τ فاکتور مقیاس، m ابعاد بردار تطبیق داده شده و $n_{k,\tau}^m$ تعداد بردارهای مذکور می‌باشد [۸].

$$RCMSE(x, \tau, m, r) = -\ln \left(\frac{\sum_{k=1}^{\tau} n_{k,\tau}^{m+1}}{\sum_{k=1}^{\tau} n_{k,\tau}^m} \right) \quad (3)$$

۲-۸. آنتروپی چند مقیاسی بهبود یافته برای سری‌های زمانی کوتاه

در سال ۲۰۱۳ یک نمونه اصلاح شده از آنتروپی چند مقیاسی ارائه شد که هدف آن برطرف نمودن دقت پایین تخمین آنتروپی و همچنین مواجهه با آنتروپی‌های تعریف نشده‌ای بود که به واسطه سری‌های زمانی کوتاه ایجاد می‌شود (سری‌های زمانی کوتاهی که توسط فرایند دانه سازی درشت تولید می‌شود). در این الگوریتم پروسه دانه‌سازی درشت با پروسه جابه‌جایی میانگین جایگزین شده بود. بر همین اساس تعداد بردارهای نمونه که در این الگوریتم استفاده می‌شود

نسبت به الگوریتم آنتروپی چند مقیاسی پایه بیشتر بوده که موجب می‌شود احتمال ایجاد آنتروپی تعریف نشده کاهش یابد اما در مقابل حجم محاسباتی این روش نیز به مراتب بیشتر است [۴,۸].

در فرازآوری با گاز، گاز از طریق فضای خالی بین لوله مغزی و لوله جداری تزریق می‌شود و افزایش تزریق گاز باعث کاهش فشار جریانی ته چاه می‌شود. در نتیجه این عمل، سیال به همراه گاز به سطح زمین منتقل می‌گردد. [۱۲]. فرازآوری با گاز از نظر اقتصادی به‌ویژه برای یک میدان بزرگ تأثیرگذارترین روش برای افزایش بهره‌وری میدان است [۱۳]. چراکه میادین زیادی برای افزایش تولید از روش فرازآوری با گاز استفاده می‌کنند [۱۴]. (شکل ۱) شماتیکی از فرآیند را نشان می‌دهد.

$$y_j^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=j}^{j+\tau-1} x_i, \quad 1 \leq j \leq N - \tau + 1 \quad (4)$$

$$MMSE(x, \tau, m, r) = S_E(y^{(\tau)}, m, r) \quad (5)$$

در رابطه (۴)، x_i عناصر یک سری زمانی گسسته هستند. همچنین در رابطه (۵)، S_E متناظر با آنتروپی نمونه برای سری زمانی $y^{(\tau)}$ می‌باشد.

۲-۹. مد آنتروپی ذاتی

روش مرسوم آنتروپی دونقطه ضعف دیگر نیز داشت که استفاده از آن را در برخی از کاربردها محدود می‌کرد. آنتروپی چند مقیاسی پایه توانایی نشان دادن اثر حضور داده‌ها با فرکانس بالا را در سیگنال نداشت [۴,۸]. همچنین این روش عملکرد مناسبی در مواجهه با سیگنال‌های غیرایستا و غیرخطی از خود نشان نمی‌دهد و بر همین اساس الگوریتم مد آنتروپی ذاتی ارائه شد که ابتدا توابع مد ذاتی^۴ (IMF) محاسبه می‌شود و پس از آن آنتروپی نمونه حاصل جمع این توابع تعیین می‌شود.

۲-۱۰. آنتروپی سلسله مراتبی

همان‌گونه که بیان شد رویکرد آنتروپی چند مقیاسی بیشتر معطوف به داده‌های فرکانس پایین در سری‌های زمانی است. به همین علت الگوریتم آنتروپی سلسله مراتبی ابداع شد. این الگوریتم از دو گام اصلی تشکیل شده است. در گام

1. Butterworth
2. Composite Multiscale Entropy
3. Refined Composite Multiscale Entropy
4. Intrinsic Mode Function



اول یک ساختار سلسله مراتبی درختی ایجاد می‌شود و در گام دوم محاسبه آنتروپی نمونه برای هر یک از گره‌ها^۱ درخت پیاده‌سازی می‌شود. تجزیه سلسله مراتبی یک سیگنال را می‌توان از دو منظر تجزیه چند مقیاسی و همچنین تجزیه موجک هار^۲ بررسی و اجرا کرد [۴,۸].

۲-۱۱. آنتروپی چند مقیاسی تطبیق پذیر (AME)^۲

بر اساس عملکرد الگوریتم آنتروپی چند مقیاسی مشاهده می‌شود که پیروسه دانه سازی درشت در این الگوریتم موجب یک رویه^۴ هموارسازی خطی می‌شود که به دنبال آن بخشی از سری زمانی اصلی از بین رفته و اثر آن دیده نمی‌شود. از طرفی عملگرهای خطی که مقیاس‌های زمانی مختلف را از سیگنال استخراج می‌کنند، عملکرد مطلوبی را هنگام ورود سیگنال‌های غیرایستا و غیرخطی از خود نشان نمی‌دهند. بدین منظور الگوریتم‌های آنتروپی چند مقیاسی تطبیق پذیر ارائه شد. الگوریتم AME بر دو گام استوار است. ابتدا تجزیه سری زمانی به IMFها در مقیاس‌های زمانی متفاوت توسط EMD^۵ چند متغیره و در گام بعدی محاسبه آنتروپی نمونه بر روی مقیاس‌های زمانی انتخاب شده. برای انتخاب مقیاس‌ها نیز دو الگوریتم پیشنهاد شده است که عبارت‌اند از AME ریز به درشت و AME درشت به ریز.

۲-۱۲. آنتروپی چند مقیاسی نمونه فازی

یکی از نوآوری‌هایی که در زمینه توسعه و به‌کارگیری الگوریتم آنتروپی نمونه پیاده شد مربوط به استفاده از توابع سیگموئید^۶ به‌جای تابع هویساید^۷ است. در واقع تغییر نوع تابع موجب می‌شود اندازه‌گیری میزان تطابق دو بردار با دقت و سهولت بیشتری انجام شود. تابع هویساید یک رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد و در عین حال دارای مرزهای محدود و سخت است. در مرحله بعدی استفاده از مجموعه‌های فازی و اندازه فازی مدنظر قرار گرفت. در واقع اندازه فازی مبتنی بر

توابع عضویت فازی است که به‌جای توابع هویساید در تحلیل سری زمانی وارد می‌شود. این رویه منجر به ایجاد مرزهای فازی به‌جای مرزهای سخت در مسئله می‌شود [۴,۸].

۲-۱۳. فیلتر کالمن

یکی از روش‌های پیشنهاد شده که برای تحلیل و پیش‌بینی سری‌های زمانی شامل داده‌ها با رزولوشن زمانی متفاوت استفاده شده است، فیلتر کالمن است [۹]. این روش از دو مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول پارامترهای مدل توسط الگوریتم برگشتی حداقل مربعات معمولی بر اساس اصولی که از مجموعه داده‌های کوتاه شده استخراج شده است، تخمین زده می‌شود. برای کاهش حجم مجموعه، از داده‌هایی استفاده می‌شود که در کمترین بازه زمانی منتشر شده‌اند. در گام بعدی فاکتورهای مشترک با اعمال فیلتر کالمن بر روی کل مجموعه داده‌ها تعیین می‌شود.

۲-۱۴. تکنیک‌های بیزی

در این روش از نمونه‌برداری بیزی گیبز^۸ برای تخمین مدل بردار برگشتی^۹ استفاده می‌شود. این روش نمونه‌برداری بیشتر در مدل‌هایی کاربردی دارد که شامل داده‌ها با فرکانس‌های گوناگون و ناهمگون است. این روش به دنبال نمونه‌برداری تکراری و مستمر از عناصر مطلوب است. برای این منظور از توزیع احتمال داده‌های معلوم استفاده می‌شود. در این مسئله عناصر مطلوب در واقع داده‌های مربوط به فرکانس‌های گم شده هستند [۱۰].

۲-۱۵. روش‌های

MIDAS^{۱۰}, U-MIDAS^{۱۱}, R-MIDAS^{۱۲} و RU-MIDAS^{۱۳}

این روش‌ها در واقع به‌منظور برقراری ارتباط بین داده‌ها با فرکانس پایین و بالا پیشنهاد شده‌اند. اساس این الگوریتم‌ها مبتنی بر تحلیل بردار بازگشتی شامل داده‌هایی

1. Nodes
2. Haar Wavelet Decomposition
3. Adaptive Multiscale Entropy
4. Surface
5. Empirical Mode Decomposition
6. Sigmoid
7. Heaviside
8. Bayesian Gibbs Sampler
9. Vector Autoregression
10. Mixed Data Sampling
11. Unrestricted Mixed Data Sampling
12. Reverse Mixed Data Sampling
13. Reverse Unrestricted Mixed Data Sampling

با فرکانس‌های گوناگون^۱ است. به صورت کلی روش‌های MIDAS و U-MIDAS برای تعیین داده‌های فرکانس پایین براساس فرکانس بالا به کار گرفته شده و روش‌های R-MIDAS و MIDAS برای محاسبه داده‌های فرکانس بالا بر اساس داده‌های فرکانس پایین ارائه شده است [۱۱]. مدل MIDAS در فرآیند تخمین از الگوریتم حداقل مربعات غیرخطی^۲ استفاده می‌کند که این امر موجب افزایش بار محاسباتی الگوریتم مخصوصاً در حالتی که بیش از یک متغیر توصیفی فرکانس بالا در مسئله وجود دارد، می‌شود. در طرف مقابل مدل U-MIDAS با بهره‌گیری از روش ساده حداقل مربعات معمولی بار محاسبات را کاهش داده اما این مدل تنها در حالتی خروجی‌های مطلوبی ارائه می‌دهد که تفاوت فرکانسی یا رزولوشن زمانی بین داده‌های فرکانس بالا و پایین کوچک باشد.

۱۶-۲. سری‌های زمانی چند متغیره

سری زمانی چند متغیره دارای دو یا تعدادی بیشتر متغیر وابسته به زمان است. هر یک از این متغیرها نه تنها به مقادیر گذشته خود وابسته هستند بلکه یک ارتباط یا وابستگی با سایر متغیرها نیز دارند. این وابستگی در پروسه پیش‌بینی مقادیر آینده هر یک از متغیرها نقش مهمی ایفا می‌کند. یکی از روش‌های معمول و پرکاربرد جهت تحلیل و پیش‌بینی رفتار سری‌های زمانی چند متغیره بهره‌گیری از بردار برگشتی است [۱۲]. در واقع در این روش یک ارتباط خطی بین هر متغیر با مقادیر گذشته خود و همچنین مقادیر گذشته سایر متغیرها تعریف می‌شود. پیشرفت‌هایی که در حوزه تئوری اطلاعات و روش‌های مرتبط با تحلیل دینامیک سیستم‌های غیرخطی به وجود آمده است امکان بررسی فرآیندهایی شامل سری‌های زمانی مختلف و وابسته را فراهم کرده است. در ادامه به برخی از مدل‌ها و الگوریتم‌هایی که به منظور تحلیل و پیش‌بینی رفتار سری‌های زمانی چند متغیره ارائه شده است، اشاره می‌شود.

۱۷-۲. آنتروپی چند متغیره چند مقیاسی (mvMSE)^۳

آنتروپی چند متغیره چند مقیاسی به عنوان یک اندازه قدرتمند از ترکیب آنتروپی نمونه چند متغیره^۴ و پروسه

دانه‌سازی درشت تشکیل شده است. mvMSE با در نظر گرفتن ناحیه‌های مکانی و بازه‌های زمانی، به خوبی پیچیدگی سیگنال‌های زمانی حاوی چند متغیر وابسته را نشان می‌دهد. آنالیز آنتروپی چند متغیره چند مقیاسی بر اساس سه اصل تفسیر می‌شود. اصل اول بیان می‌کند سری زمانی چند متغیره X نسبت به سری زمانی چند متغیره Y پیچیده‌تر است، چنانچه برای اکثر مقیاس‌های زمانی، آنتروپی نمونه چند متغیره که برای X اندازه گرفته شده است از Y بزرگ‌تر باشد. اصل دوم اطلاعاتی در خصوص داده‌های مفیدی که در سیگنال وجود دارد، در اختیار قرار می‌دهد. به عبارت دیگر کاهش یکنواخت در مقادیر آنتروپی چند متغیره با افزایش مقیاس‌های زمانی نشان می‌دهد که اطلاعات مفید در کوچک‌ترین مقیاس‌های زمانی داخل سیگنال وجود دارند. در نهایت اصل سوم بیان می‌کند اگر یک سیگنال چند متغیره بازه وسیعی از همبستگی را نشان دهد می‌توان انتظار داشت که آنتروپی نمونه چند متغیره آن، مقداری ثابت داشته و یا به صورت یکنواخت با تغییر فاکتور مقیاس زمانی افزایش پیدا می‌کند [۱۳].

۱۸-۲. خوشه‌بندی فازی و آنالیز VPCA

در سال ۲۰۱۸ به منظور خوشه‌بندی و تحلیل سری‌های زمانی چند متغیره الگوریتمی مبتنی بر خوشه‌بندی فازی و آنالیز اجزا مبتنی بر متغیره^۵ ارائه شد [۱۴]. برای کاهش بار محاسباتی و زمان محاسبات VPCA در ابتدا جهت کاهش ابعاد نمونه‌های سری زمانی چند متغیره ابداع شد. پس از آن الگوریتمی بر پایه خوشه‌بندی فازی با استفاده از ماتریس وزن دهی شده مکانی ارائه شد که به صورت مستقیم نمونه‌های سری زمانی چند متغیره را در خوشه‌های مختلف قرار داده و در نهایت ساختار ماتریس داده را حفظ می‌کند.

آنالیز بیزین: در سال ۲۰۱۸ سری‌های زمانی چند متغیره با استفاده از تحلیل بیزین غیر پارامتری مورد بررسی قرار گرفت. در این الگوریتم از ماتریس گاما جهت تحلیل و پیش‌بینی سری زمانی چند متغیره استفاده شد. به عبارت دیگر وزن‌های ماتریس مقادیر بر اساس پروسه گاما مثبت معین هرمیتی تعیین می‌شود [۱۵].

1. Mixed Frequency Vector Autoregression
2. Nonlinear Least Square
3. Multivariate Multiscale Entropy (mvMSE)
4. Multivariate Sample Entropy
5. Variable-Based Principal Component Analysis (VPCA)





۱۹-۲. یادگیری عمیق

از قیمت دوره قبل آن، درآمد سرانه، تعداد خانوارهای دارای گاز طبیعی و درجه حرارت می‌باشد [۱۸]. در سال ۱۳۸۶ پژوهشی با عنوان بررسی تابع تقاضای گاز طبیعی در بخش خانگی و تجاری انجام شد. تفسیر ضرایب به‌دست‌آمده در این تحقیق نشان می‌دهد کشش مصرف سرانه گاز طبیعی نسبت به دما در بخش خانگی و تجاری، حدود $0/۲۶-$ است. مصرف سرانه با قیمت نسبی گاز به برق ارتباط معکوس دارد. اگرچه قیمت اسمی حامل انرژی گاز در مقایسه با قیمت حامل انرژی جایگزین (برق) خیلی پایین است ولی نسبت این دو با گذشت زمان روند صعودی داشته است. تحقیقی دیگر در سال ۱۳۸۵ با عنوان برآورد تقاضای گاز طبیعی و برق خانوارهای کشور انجام شد [۱۸]. نتایج تحقیق بیان می‌کرد متغیرهایی که در برآورد الگو و بررسی ساختار الگوی مصرفی گاز طبیعی خانوارها استفاده می‌شوند عبارت‌اند از: کل درآمد خانوار، مخارج گاز خانوار، مخارج خانوار برای سایر سوخت‌ها، شاخص قیمت کالاها و خدمات شهری، شاخص قیمت اقلام غیر انرژی، شاخص قیمت تمامی حامل‌های انرژی، قیمت برق، قیمت گاز، شاخص قیمت تمامی سوخت‌ها به‌جز گاز طبیعی، سهم گاز طبیعی در مخارج خانوار. این تحقیق همچنین در خصوص متغیر مجازی برای خانوارهای با ثروت پایین، متغیر مجازی برای خانوارهای با ثروت متوسط و متغیر مجازی برای خانوارهای با ثروت بالا نیز بحث کرده است. یکی دیگر از پژوهش‌های حوزه مصرف گاز مربوط به استان گیلان است [۱۹]. در این تحقیق میزان کشش مصرف گاز بر اثر عوامل مختلف بررسی شده است. در نهایت کشش‌های کوتاه مدت و بلند مدت قیمتی مصرف گاز طبیعی در بخش خانگی و تجاری به ترتیب $0/۳۲-$ و $0/۶۴-$ و کشش‌های کوتاه مدت و بلند مدت در بخش خانگی و تجاری به ترتیب $0/۴۳$ و $0/۸۶$ برآورد شد.

برای تحلیل و پیش‌بینی سری زمانی چند متغیره الگوریتمی در سال ۲۰۱۹ ارائه شده است که از سه بخش تشکیل می‌شود. بخش اول آن یک مدل دو مرحله‌ای برای انتخاب ویژگی، بخش دوم مدل یادگیری عمیق بوده و در بخش سوم مدلی برای تصحیح خطا قرار داده شده است. بخش اصلی این الگوریتم در واقع همان فرآیندی است که یادگیری عمیق را محقق می‌سازد [۱۶]. مدل یادگیری عمیق پیشنهادی از سه واحد تشکیل شده است که عبارت‌اند از: حافظه زمان کوتاه - طولانی^۱ (LSTM)، دروازه مکرر^۲ و واحد بهینه‌سازی مبتنی بر تخمین لحظه‌ای تطبیقی^۳.

۲۰-۲. شبکه عصبی عمیق

در سال ۲۰۱۹ یک ساختار عمیق بر اساس شبکه عصبی کانولوشن برای تحلیل سری زمانی چند متغیره ارائه شد. این ساختار عمیق یادگیری از دو قابلیت مهم برخوردار است. اول اینکه در مواجهه با همبستگی ورودی‌های سری‌های زمانی عملکرد مطلوبی داشته و ورودی سیستم به شکل مناسبی برای الگوریتم تفسیرپذیر است و دوم اینکه با یادگیری و استخراج صریح گرایش‌های موجود در داده‌ها، فرآیند پیش‌بینی سری زمانی در بازه‌های زمانی هدف را انجام می‌دهد. گرایش‌های موجود در داده‌ها از طریق یک شبکه عصبی کانولوشن زمانی و ساختار سلسله مراتبی LSTM آشکار می‌شود. معماری CNN - LSTM به شکل همگون و یکپارچه همبستگی را بین چندین سری زمانی بسط می‌دهد. همچنین ویژگی‌های وزن‌دهی شده متفاوت را جهت یادگیری بهتر گرایش‌ها استخراج کرده و در نهایت الگوهای بلند مدت پشت سر هم را به‌خوبی به خاطر می‌سپارد [۱۷].

۲۱-۲. الگوی مصرف و مدل‌سازی مصرف گاز

در عرصه بین‌المللی نیز مطالعات زیادی در خصوص مصرف گاز و عوامل مؤثر بر آن انجام شده است. به‌عنوان مثال در سال ۲۰۰۷ پژوهشی به ارتباط بین دما در فصول سرد سال و مصرف گاز در بخش خانگی و مسکونی پرداخت. این تحقیق بر روی داده‌های مربوط به ایالت‌های شرقی و مرکزی آمریکا انجام شد. در این تحقیق پارامترها یا مقادیر دمایی که همبستگی DBP^4/HDD^5 را با مصرف گاز بیشینه می‌کند، شناسایی

در خصوص الگوی مصرف گاز و همچنین عوامل مؤثر بر میزان مصرف گاز که در مدل‌سازی این پدیده باید بدان توجه نمود، تحقیقات زیادی در داخل کشور انجام شده است که در ادامه به بخشی از آن‌ها اشاره می‌شود. پژوهشی که در سال ۱۳۸۱ بر روی مصرف گاز در شهر تهران انجام شد، نشان داد تقاضا برای گاز طبیعی به‌عنوان یک کالای ضروری تابعی

1. Long-Short Term Memory
2. Gated Recurrent Unit
3. Adaptive Moment Estimation
4. Days Below Percentile
5. Heating Degree-Days

شد [۲۰]. نتایج تحقیق برای یک منطقه در آمریکا (دره اوهایو) برای دو مقیاس زمانی ماهانه ۰/۹ و فصلی ۰/۹۵ به عنوان بیشینه میزان همبستگی اندازه‌گیری شد. تحقیق دیگری در سال ۲۰۱۶ برای تخمین میزان همبستگی مصرف گاز طبیعی و انرژی گرمایی مورد نیاز در بخش خانگی، تجاری و صنعتی انجام شد [۲۱]. در این پژوهش داده‌های مصرف گاز برای ۴ سال پیاپی (۲۰۱۵ - ۲۰۱۲) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد پروفایل مصرف گاز طبیعی به صورت مؤثر به الگوهای فصلی و شرایط آب و هوایی در بخش خانگی و مسکونی وابسته است در عین حال ارتباط معناداری با الگوی کاری روزانه در بخش صنعتی و تجاری دارد.

۲-۲۲. پیش‌بینی مصرف گاز

علاوه بر پژوهش‌هایی که در حوزه مدل‌سازی و تعیین پارامترهای مؤثر بر مصرف گاز انجام شده است که در بخش قبلی به بخشی از آن اشاره شد، مطالعات زیادی نیز در حوزه پیش‌بینی مصرف گاز در بازه‌های زمانی آینده صورت گرفته است. در سال ۱۹۹۱ تحقیقی با عنوان پیش‌بینی مصرف گاز در بخش خانگی و برای مقیاس‌های زمانی ماهانه و چهارماهه انجام شد [۲۲]. در این تحقیق مشترکین گاز در بخش خانگی کشور تایوان مدنظر بودند. در این تحقیق دو پارامتر دما و قیمت گاز به عنوان عوامل تأثیرگذار در مصرف گاز شناسایی شده و بر اساس آن‌ها مقدار مصرف گاز طبیعی در بخش خانگی پیش‌بینی شد. در این تحقیق از مدل تابع انتقال و روش تابع انتقال خطی برای پیش‌بینی مصرف گاز در آینده استفاده شد. پس از آن محققان در مطالعات خود دریافتند که مصرف گاز خانگی تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد که شامل قیمت گاز، درآمد خانوارها، شرایط آب و هوایی، تعداد انشعابات و جمعیت می‌شود. این عوامل به دسته‌های اقتصادی، فنی، اجتماعی، سیاسی، مکانی، زمانی و محیطی تقسیم می‌شوند. همچنین، متغیرهایی مانند تعداد وسایل گازسوز، بازدهی آن‌ها، نوع سیستم گرمایشی منازل و زیربنای واحدهای مسکونی نیز بر میزان مصرف گاز تأثیرگذار هستند. در سطح کلان نیز مصرف انرژی به عواملی چون درآمد ملی، تغییرات جوی، قیمت انرژی و جمعیت وابسته است. [۲۳-۲۵] در سال ۲۰۱۹ پژوهشی به منظور پیش‌بینی کوتاه مدت مصرف گاز خانگی در ایتالیا انجام شد. در این تحقیق چندین مدل یادگیری آماری شامل رگرسیون ریدج، پروسه گوسی و همچنین شبکه عصبی به منظور پیش‌بینی مصرف

گاز مورد ارزیابی قرار گرفت [۲۶]. همچنین معیار RMSE جهت ارزیابی هر یک از مدل‌ها به کار گرفته شد. تحقیق مشابهی در کشور اسلوانی طی سال ۲۰۱۸ انجام شد. در این پژوهش مدل‌هایی بر اساس داده‌های دما در گذشته، دما و متغیرهای زمانی پیش‌بینی شده در آینده که شامل تعطیلات و سایر مناسبت‌های خاص است، ارائه شد. در این پژوهش از مدل‌های رگرسیون خطی، ماشین کرنل و شبکه‌های عصبی استفاده شد که در این بین خروجی شبکه عصبی و رگرسیون، خطای کمتری در تخمین نشان دادند [۲۷]. در سال ۲۰۲۰ تحقیق دیگری پیرامون پیش‌بینی مصرف گاز مشترکین خانگی بر اساس درخت تصمیم ارائه شد. در این روش فاکتورهای مرتبط با مشخصات ساختمان، متغیرهای مرتبط با ساکنین واحد مسکونی (سن، جنسیت، میزان تحصیلات، وضعیت اشتغال و...)، فاکتورهای فیزیولوژیکی و در نهایت رفتار (الگوی مصرف) ساکنین مدنظر قرار گرفت [۱].

در نهایت می‌توان به این نکته اشاره نمود که در سال‌های اخیر با توجه به اهمیت موضوع مصرف انرژی و سیاست‌گذاری در این حوزه، بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوشمند و سیستم‌های مبتنی بر دانش فرد خبره توسعه زیادی پیدا کرده است. در این بین می‌توان به پژوهش‌هایی اشاره کرد که به ترکیب دو فضای مدل‌سازی و فضای روش پرداخته‌اند. به عنوان مثال می‌توان از ترکیب شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک یا بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک در جهت تنظیم پارامترهای سیستم استنتاج فازی نام برد. همچنین در برخی از روش‌های پیش‌بینی مصرف گاز ترکیب ماهیت شبکه‌ای و سیستم فازی در قالب سیستم‌های ANFIS پیاده‌سازی شده است.

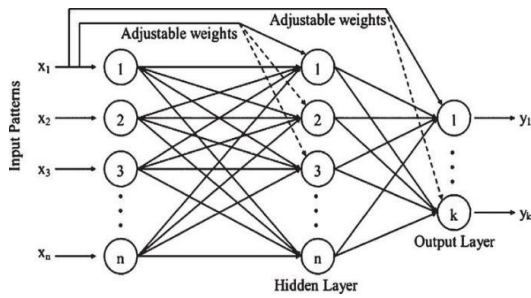
۳. مبانی ریاضی رویکرد پیشنهادی

در این بخش به معرفی خوشه‌بندی فازی، شبکه‌های عصبی عمیق و سیستم‌های فازی می‌پردازیم.

۳-۱. خوشه‌بندی C میانگین فازی^۱

خوشه‌بندی FCM یک روش خوشه‌بندی است که داده‌ها را در قالب دو یا تعداد بیشتری خوشه تقسیم می‌کند. این روش ابتدا در سال ۱۹۷۳ توسط دان ارائه شد و در سال ۱۹۸۴ بزداک آن را توسعه و ارتقا داد. از این روش به صورت گسترده در حوزه شناسایی الگو استفاده می‌شود. پایه‌گذاری این روش بر مبنای کمینه‌سازی تابع هدف مطابق رابطه (۶) است:

1. Fuzzy C-Means Clustering (FCM)



شکل ۱: شبکه عصبی عمیق آبخاری [۲۹]

۳-۳. سیستم‌های فازی

سیستم‌های فازی یک روش ریاضی-منطقی در هوش مصنوعی است که داده ورودی را به وسیله متغیرهای منطقی درون سیستم تحلیل می‌کند. برخلاف منطق دودویی که یک متغیر تنها دارای دو مقدار گسسته «درست» و «نادرست» است، این سیستم‌ها قادر به ارزش‌گذاری در بازه پیوسته $[0, 1]$ هستند. همین امر سبب می‌شود که این سیستم‌ها در مواجهه با خطاهای ورودی مانند نویز، از مقاومت کافی برخوردار باشند. گرچه روش‌های دیگر یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی قابلیت‌های یک سیستم فازی را دارا است، با این حال مزیت منطق فازی در مدل‌سازی سیستم‌هایی است که مجموعه داده در اختیار نباشد. این سیستم‌ها با کمک دانش و تجربه فرد خبره می‌توانند قوانینی منطقی را به گونه‌ای تولید کنند که وظایفی که با محوریت انسان انجام شده است، به صورت خودکار انجام پذیرد.

متغیر ورودی یک سیستم فازی را می‌توان به مجموعه‌ای فازی نگاشت، به گونه‌ای که این مجموعه شامل توابع عضویتی از متغیرهای زبانی هستند. درجه ارزش متغیر x تابع عضویت $\mu_{A(x)}$ عددی در بازه $[0, 1]$ است که عضویت صفر به معنای عدم تعلق متغیر x در مجموعه و عدد یک به معنای تعلق کامل متغیر در مجموعه مورد نظر است. در صورتی که درجه عضویت عددی مابین صفر و یک باشد، این مقدار بیانگر عضویت تدریجی متغیر خواهد بود. به طور مثال در عبارت «هوا معتدل است». عبارت «معتدل» یک متغیر زبانی است و هیچ کمیتی برای اندازه‌گیری دقیق آن وجود ندارد. با این حال می‌توان مجموعه‌ای فازی از متغیرهای زبانی روی متغیر دما با کمیت درجه سلسیوس یا فارنهایت در نظر گرفت. (شکل ۲) نمونه‌ای از مجموعه‌های فازی با متغیر دما را نشان می‌دهد. در (شکل ۲) معانی عبارات سرد و

$$J_m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \|x_i - c_j\|^2, 1 \leq m \leq \infty \quad (6)$$

در این رابطه m یک عدد حقیقی بزرگ‌تر از ۱، u_{ij} میزان یا درجه‌ای از عضویت x_i در خوشه j متغیر x_i نشان‌دهنده i امین مؤلفه در داده اندازه‌گیری شده d بعدی، c_j مرکز خوشه d بعدی و $\| \cdot \|$ نماد نرم اقلیدسی است که بیان‌کننده شباهت بین داده اندازه‌گیری شده و مرکز خوشه است [۲۸].

افراز فازی^۱ از طریق بهینه‌سازی مکرر تابع هدفی که در بالا نشان داده شده است با به‌روزرسانی میزان عضویت u_{ij} و مرکز خوشه c_j انجام می‌شود:

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^C \left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (7)$$

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m x_i}{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m} \quad (8)$$

شرط توقف تکرار فرآیند عبارت است از:

$$\max_{ij} \left\{ |u_{ij}^{(k+1)} - u_{ij}^{(k)}| \right\} < \epsilon \quad (9)$$

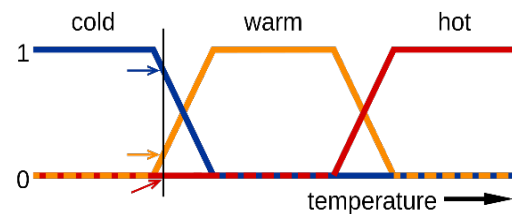
که در این رابطه ϵ معیار خاتمه و برابر با مقداری بین ۰ تا ۱ است. این فرآیند منجر به همگرایی به یک مینیمم محلی و یا یک نقطه زین اسبی برای J_m می‌شود.

۳-۲. شبکه‌های عصبی عمیق آبخاری^۲

الگوریتم یادگیری در شبکه‌های عصبی عمیق مبتنی بر روش بهینه‌سازی کاهش گرادیان است. در این روش با مشتق گرفتن از خطای تخمین (خطای مدل‌سازی)، سعی در پیدا نمودن وزن‌های شبکه به گونه‌ای است که خروجی مطلوب حاصل شود. با این حال به دلایل مختلفی نظیر نوع تابع فعال‌ساز در شبکه و یا تابع خطا، ممکن است در مدل‌های عمیق گرادیان خطا به لایه‌های اولیه شبکه منتقل نشده و آن را از یادگیری باز دارد. به همین جهت مدل‌های آبخاری به گونه‌ای طراحی شده‌اند تا بتوانند خطای موجود را به لایه‌های ابتدایی شبکه عمیق منتقل نمایند. در این گونه مدل‌ها، خروجی هر لایه به تمامی نورون‌های تمام لایه‌های بعد از خود متصل خواهد بود. (شکل ۱) نمونه‌ای از این نوع شبکه‌ها را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در چنین مدلی به دلیل پیچیدگی بالای آن، احتمال بیش‌برازش بالاتر خواهد بود.

1. Fuzzy Partitioning
2. Cascade Deep Neural Network

گرم همراه با توابع ترسیم مقیاس دما نشان داده می‌شود. یک نقطه در آن مقیاس دارای سه «مقدار حقیقت» است، یک مقدار برای هر یک از سه تابع، خط عمودی در تصویر نشان دهنده دمای خاصی است که سه فلش (مقادیر حقیقت) آن را اندازه‌گیری می‌کند. از آنجایی که فلش قرمز به صفر اشاره می‌کند، این دما ممکن است به‌عنوان «گرم نیست» تفسیر شود. یعنی این دما عضویت صفر در مجموعه فازی «گرم» را دارد. فلش نارنجی (که روی ۰,۲ را نشان می‌دهد) ممکن است آن را به‌عنوان «کمی گرم» و فلش آبی (به سمت ۰,۸) «نسبتاً سرد» را توصیف می‌کند؛ بنابراین، این دما دارای ۰,۲ عضویت در مجموعه فازی «گرم» و ۰,۸ عضویت در مجموعه فازی «سرد» است. درجه عضویت اختصاص داده شده برای هر مجموعه فازی نتیجه فازی شدن است.



شکل ۲: مجموعه‌های فازی متغیر دما

۴. مسیر حل

بسیاری از تحقیقات آکادمیک، فرآیندهای مدل‌سازی را از طریق تعیین پارامترهای تأثیرگذار و سپس کشف نحوه تعامل آنان در تخمین/پیش‌بینی رفتار سیستم آغاز میکنند. گرچه این رویکرد منطقی می‌نماید، ولی در عمل دچار چالش‌های بسیاری نیز می‌باشد، زیرا بخش عمده‌ای از پایگاه‌های داده ناقص می‌باشند، اعتبار بعضی از داده‌ها با دیگر داده‌ها یکسان نیست، ارتباط بین عناصر تأثیرگذار همراه با عدم قطعیت است، اطلاعات موجود دارای ماهیت متفاوت و غیر هم‌بافت (متن، عدد، یا تصویر) هستند و یا اندازه پایگاه داده (تعداد نمونه‌ها) نسبت به تعداد پارامترهایی که نیاز به تعیین دارند بسیار اندک است. جهت رفع این چالش‌ها، رویکرد سیستم‌های هوشمند، مبتنی بر به‌کارگیری دانش و تجربه انسانی (سیستم‌های خبره) و به‌کارگیری روش‌های جعبه سیاه و داده محور (مبتنی بر یادگیری) می‌باشد. بر اساس تحقیقات انجام‌شده، پارامترهای مؤثر در میزان مصرف گاز را می‌توان به سه دسته هواشناسی، خانوار و زمانی تقسیم نمود [۱۱]، [۱۳]، [۱۴]. از این میان، داده‌های هواشناسی به خاطر سابقه آن در پیش‌بینی رفتارهای جوی، در حال حاضر منسجم‌تر، هم

بافت‌تر و کامل‌تر از سایر پایگاه‌های داده می‌باشند. و در میان پارامترهای آن، مؤلفه‌هایی مانند دما بیشترین تأثیر را روی میزان مصرف گاز نشان داده‌اند. خوشبختانه مجموعه داده‌ها هواشناسی شهر بیرجند برای مدل‌سازی و پیش‌بینی دما موجود است. البته پیش‌بینی رفتارهای جوی از دسته مسائل آشوبگون محسوب می‌شود و لذا قالب‌هایی از مدل‌سازی را نیاز دارد که به نحو شایسته‌ای این پیچیدگی را در خود مدل نماید. در این تحقیق، از شبکه‌های عصبی عمیق آشوری به‌عنوان گزینه مناسبی برای این منظور استفاده می‌شود. رهیافت یادگیری در این مدل‌ها به‌صورت دنباله‌های زمانی خواهد بود، به این معنا که خروجی لحظه بعد، وابسته به نمونه‌های قبلی دریافتی از آن است. به‌طور مثال، با در نظر داشتن دمای چند ساعت گذشته این شبکه‌ها به دنبال تخمین دمای سه ساعت آینده خواهند بود. ولی اطلاعات خانوار مانند اطلاعات هواشناسی نیست و بسیاری از چالش‌های پایگاه‌های داده که در بالا ذکر شد در مورد آن صدق می‌کند. به‌عنوان مثال، می‌دانیم که منطقه موردنظر، تعداد هر خانوار در واحد مسکونی، متوسط درآمد آنان و یا حتی نوع شغل خانوار می‌تواند در میزان مصرف اثرگذار باشد، ولی این اطلاعات در کمتر داده‌ای به‌صورت کامل موجود است. خوشبختانه مجموعه این عوامل مفهومی به نام الگوی مصرف را می‌سازند که قابل استخراج توسط ابزار خوشه‌بندی می‌باشد. در این کار پیشنهاد شده است تا الگوی مصرف در ساعات مختلف روز و فصول سال با استفاده از سیستم‌های فازی تنظیم گردد. به‌طور مثال، رفتار مصرفی در فصل زمستان و تابستان با یکدیگر متفاوت است، همچنین در طول روز نیز ساعاتی تحت عنوان بیشینه مصرف شناخته می‌شوند که با سایر ساعات تفاوت مصرفی دارند. لذا پایگاه داده مصرف ماهیانه گاز شهر بیرجند توسط مشترکین اعم از بخش خانگی، تجاری، اماکن عمومی، دولتی و صنعتی را بین سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۸ به‌صورت دوره‌ای مورد بررسی محققین قرار گرفت. با توجه به تمرکز این کار بر روی پیش‌بینی مصرف گاز مشترکین خانگی یا مسکونی، ابتدا داده‌های مربوط به کلیه مشترکین خانگی بدون چیلر برای شش ماهه اول و دوم سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۸ در قالب یک پایگاه داده مجزا جداسازی شد. سپس داده‌های جمع‌آوری‌شده در این پایگاه با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی C میانگین فازی به سه دسته مشترکین کم‌مصرف، مشترکین پرمصرف و مشترکین با مصرف متعادل تقسیم‌بندی شد. نتایج این خوشه‌بندی فازی بر روی پایگاه داده در قسمت تالی قوانین فازی برای تعریف توابع عضویت

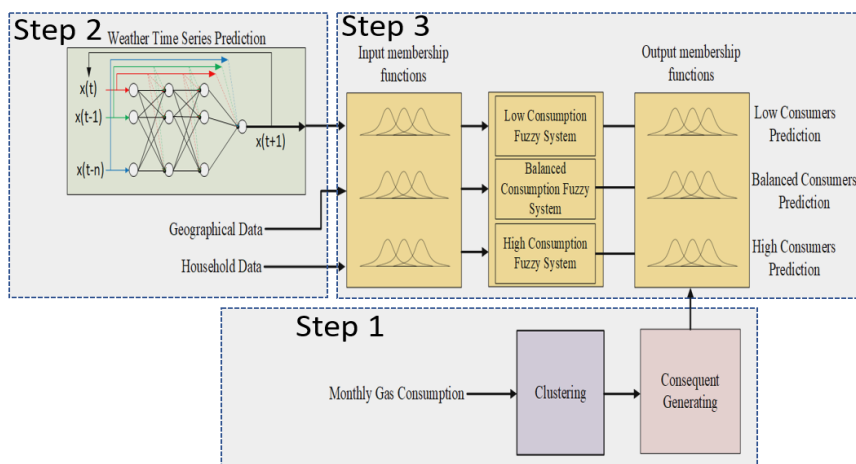
که در آن C_M و C_{3h} به ترتیب برابر میزان مصرف سه‌ساعتی و ماهیانه خواهد بود. همچنین با توجه به آن که S تعداد گام‌های لازم برای مقایسه مصرف سه ساعت و ماهیانه است، لذا مقدار آن برابر ۲۴۰ خواهد بود.

لازم به ذکر است که با توجه به اینکه مصرف گاز مشترکین خانگی بر اساس دما، روز سال و ساعت شبانه‌روز از یک روال متناوب پیروی می‌کند به‌منظور افزایش دقت و کارایی سیستم فازی و تطابق نقاط ابتدایی و انتهایی سال و ساعت‌های ابتدایی و انتهایی هر روز، در قسمت مقدم قوانین توابع عضویت اضافی مرتبط با ساعات شبانه‌روز و ایام سال در ابتدا و انتهای محور افقی توابع عضویت افزوده می‌شود. در واقع با این ترفند افزایش همپوشانی توابع عضویت در بخش‌های ابتدایی و انتهایی هر دوره زمانی (سالانه و شبانه‌روزی) محقق شده و دقت سیستم فازی در تخمین مصرف گاز بالاتر می‌رود. (شکل ۳) شمای گرافیکی از این مدل ترکیبی فازی و عمیق را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در این مسئله آن است که معادله (۱۰) را می‌توان به بی‌نهایت طریق ممکن برابر نمود، لذا پیش از بهینه‌سازی به کمک این رابطه، قوانین فازی بایستی به‌گونه‌ای طراحی شوند که مورد تأیید فرد خبره باشد. از طرفی، در صورتی که جمع‌آوری داده‌ها یکپارچه امری ممکن باشد، می‌توان از آن در کنار نظر فرد خبره استفاده کرده و عملکرد سیستم هوشمند را ارتقا داد.

استفاده می‌شود. به‌عبارتی دیگر، بر اساس داده‌های هر خوشه سه سیستم فازی و سه دسته از توابع عضویت جهت تخمین مصرف ساعتی گاز طراحی و تعریف می‌شود. در واقع ورودی هر سه سیستم فازی مشابه و برحسب پارامترهای دما، فصل (روز سال) و ساعت شبانه‌روز می‌باشد درحالی‌که در قسمت تالی، قوانین برحسب اینکه تحلیل مشترکین پرمصرف، کم‌مصرف و متعادل مدنظر باشد، توابع عضویت متفاوتی متناظر با مراکز خوشه که در بخش FCM محاسبه شده است، تعریف شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از آنجا که داده‌ها ورودی این مدل دارای عدم قطعیت هستند و همچنین مجموعه داده مناسب یکپارچه از ورودی و خروجی رگرسیون وجود ندارد، سیستم‌های مبتنی بر منطق فازی رهیافتی منطقی محسوب می‌شوند. قوانین فازی در این سیستم‌ها را می‌توان به کمک دانش فرد خبره و همچنین نتایج تحقیقات پیشین به دست آورد. همچنین به دلیل عدم تطابق فرکانسی داده‌ها ورودی و خروجی این مدل فازی، بایستی پس از تولید قوانین و محاسبه خروجی سیستم فازی، خروجی را به‌گونه‌ای بهینه کرد تا رابطه زیر همواره برقرار گردد. به‌عبارت دیگر رابطه (۱۰) به‌منظور صحت‌سنجی پیش‌بینی استفاده می‌شود.

$$\sum_{k=1}^S C_{3h} = C_M \quad (10)$$



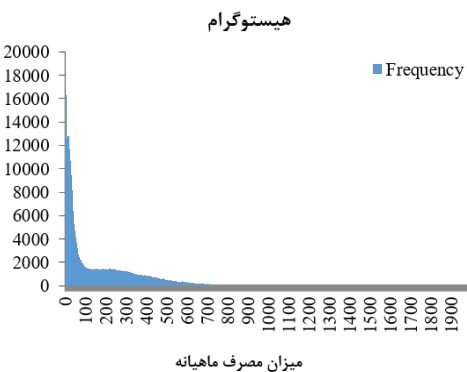
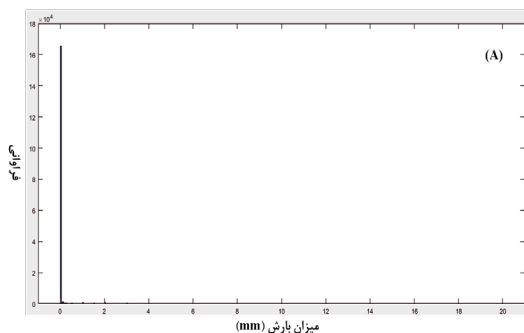
شکل ۳: شمای گرافیکی رهیافت کلی ترکیبی فازی و عمیق

۵. پایگاه داده مورد بررسی

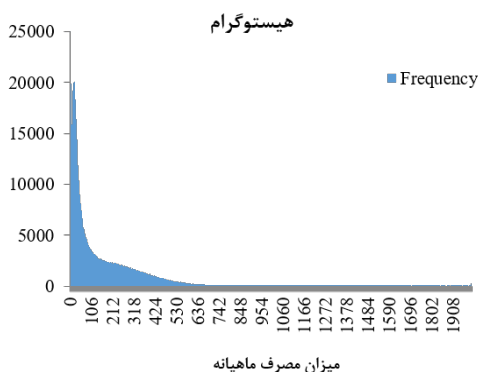
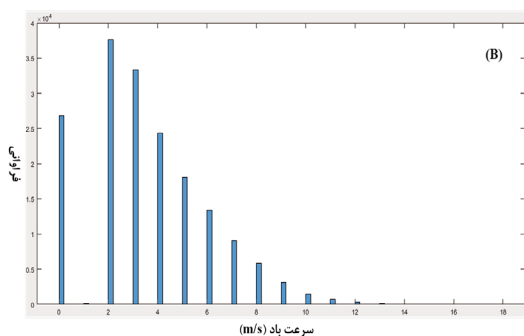
سه ساعت جمع‌آوری شده است. از این پایگاه داده برای یادگیری شبکه عصبی عمیق آبخاری به‌صورت دنباله‌های زمانی استفاده شده است. باوجود دسترسی به پارامترهای هواشناسی مختلف، در این پژوهش به دلیل تأثیر اندک سایر پارامترها تنها از داده‌های دما استفاده شده است.

به‌منظور پیاده‌سازی رهیافت پیشنهادی، پایگاه داده هواشناسی شهر بیرجند که شامل اطلاعات دما، رطوبت، میزان بارش، سرعت و جهت باد است، مورد استفاده قرار گرفته شده است. این مجموعه داده در بازه‌ی ۱۰ سال و با فرکانس

علاوه بر این، مجموعه پایگاه داده‌ای از مصرف ماهیانه تمامی مشتریان شرکت گاز در شهر بیرجند در سال‌های ۱۳۹۲ الی ۱۳۹۸ در اختیار است. این پایگاه داده که از طریق خوانش کُنترهای گاز ساختمان‌های مسکونی به‌دست‌آمده است، مصرف سی روز هر مشترک را در اختیار قرار می‌دهد.



شکل ۴: بافت نگاری مصرف گاز خانگی در سال ۱۳۹۲

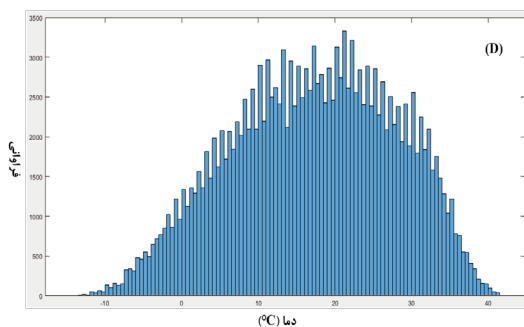
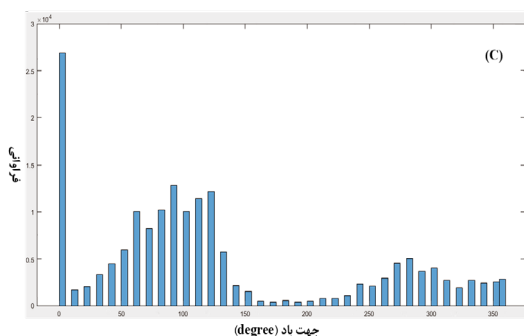


شکل ۵: بافت نگاری مصرف گاز خانگی در سال ۱۳۹۷

۶. مراحل انجام کار

۶-۱. گردآوری و پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های هواشناسی دریافت شده از شهر بیرجند، دارای تفاوت فرکانسی است. به‌طور مثال میزان بارش با فرکانس شش ساعت و دما با فرکانس سه ساعت نمونه‌برداری شده است. همچنین این مجموعه از داده‌ها دارای داده‌های ناقص^۱ است که به کمک میانگین‌گیری و بررسی مُد هر کدام از پارامترهای هواشناسی، بازیابی و نرمال‌سازی شده‌اند. علاوه بر این، با نمایش نمودار بافت نگار برای این داده‌ها دریافت می‌شود که دمای شهر بیرجند بیشترین تغییرات را نسبت به دیگر پارامترهای هواشناسی دارا است. به‌عنوان مثال میزان بارش در بیشتر اوقات نزدیک به صفر بوده و این پارامتر تأثیری در آموزش سیستم هوشمند ندارد. از طرفی همبستگی سایر پارامترها به غیر از دما با میزان مصرف گاز بسیار کوچک است، لذا دما تنها گزینه مطلوب دنباله زمانی برای پیش‌بینی مصرف گاز به نظر می‌رسد. (شکل ۶) بافت نگار این داده‌ها را نشان می‌دهد که در آن هر چهار پارامتر سرعت باد، جهت باد، دما و میزان بارش نمایش داده شده‌اند. منظور از جهت باد زاویه‌ای در بازه $[0, 360]$ درجه است.

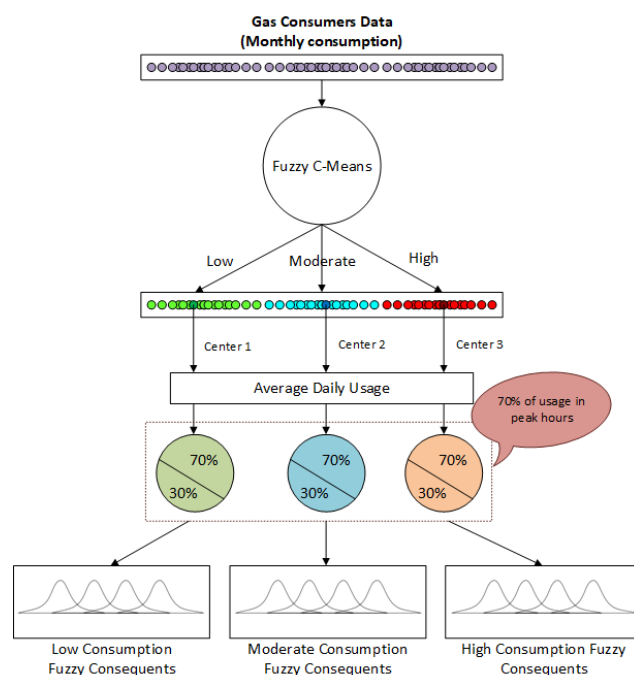


شکل ۶: بافت‌نگاری پایگاه داده هواشناسی

1. Missing Data

گام اول: خوشه‌بندی C میانگین فازی مشترکین گاز خانگی

همان‌گونه که بیان شد ابتدا با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی C میانگین فازی، کلیه مشترکین گاز خانگی شهر بیرجند را بر اساس میزان مصرف گاز ماهانه در سه خوشه دسته‌بندی می‌شود. در (جدول ۱) نتایج به‌دست‌آمده از پیاده‌سازی الگوریتم خوشه‌بندی فازی بر روی پایگاه داده مصرف گاز مشترکین نشان داده شده است. برای این منظور کلیه داده‌های مربوط به مصرف گاز در بخش خانگی (مشترکین خانگی بدون چیلر) طی سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۸ نشان می‌دهد.



شکل ۷: شمای کلی الگوریتم خوشه‌بندی میانگین فازی (FCM) بر روی پایگاه داده مصرف گاز

جدول ۱: مراکز خوشه‌های مصرف ماهانه گاز مشترکین خانگی

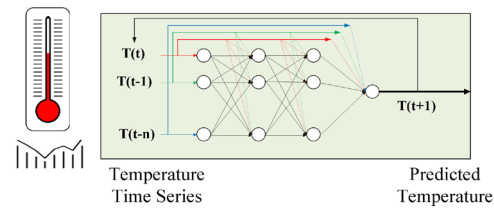
مراکز خوشه مصرف ماهانه گاز خانگی		
شش‌ماهه اول	شش‌ماهه دوم	
۸۰/۱۰۷	۱۱۳/۷۸	کم‌مصرف
۲۲۰/۸	۲۷۶/۵۳	متعادل
۲۵۳/۵۳	۵۱۶/۱۸	پرمصرف

گام دوم: پیش‌بینی شاخص‌های هواشناسی

جهت پیش‌بینی شاخص‌های هواشناسی شهر بیرجند، می‌توان از شبکه‌های عصبی عمیق آبخاری استفاده نمود. ساختار عمیق استفاده شده برای پیش‌بینی دمای سه ساعت آتی دارای یک لایه ورودی، چهار لایه مخفی و یک لایه خروجی است. (جدول ۲) مشخصات ساختاری این شبکه را نشان می‌دهد. پنجره ورودی این دنباله زمانی برابر پنج است، به این معنا است که برای پیش‌بینی دمای $temperature_{t-1}, \dots, temperature_{t-5}$ به دمای $temperature_{t-1}, \dots, temperature_{t-5}$ نیاز است.

(شکل ۸). همان‌طور که در بخش پایگاه داده‌ها نیز توضیح داده شد، فرکانس زمانی در اینجا برابر با سه ساعت خواهد بود. به جهت تخمین بهتر سیستم یادگیر عمیق، داده‌های دمای مورد نظر نرمال‌سازی می‌شوند. نرمال‌سازی به معنای تغییر بازه مجموعه داده مورد نظر به $[0, 1]$ است. به همین جهت می‌توان از فرمول زیر استفاده نمود که در آن D و D_N به ترتیب داده نرمال‌سازی شده و داده اصلی است.

$$D_N = \frac{D - \min D}{\max D - \min D} \quad (11)$$



شکل ۸: پیش‌بینی دنباله‌های زمانی شاخص‌های هواشناسی به‌وسیله شبکه‌های عصبی عمیق آبخاری

جدول ۲: ساختار شبکه عصبی عمیق آبخاری پیشنهاد شده جهت پیش‌بینی دنباله زمانی دما

لایه‌های شبکه عصبی	تعداد نورون	تابع فعال‌ساز
لایه ورودی	۵	-
لایه مخفی ۱	۵	Relu
لایه مخفی ۲	۵	Softmax
لایه مخفی ۳	۳	Relu
لایه مخفی ۴	۳	Softmax
لایه خروجی	۱	Tanh

دیگر آبر پارامترهای این شبکه را می‌توان در (جدول ۳) مشاهده نمود. جهت آموزش این شبکه عصبی از تابع میانگین مربعات خطا^۱ استفاده شده است که به‌صورت رابطه (۱۲) خواهد بود. عبارت \bar{y} و y به ترتیب عبارت است از پیش‌بینی مدل پیشنهادی و مقدار واقعی دما در زمان مورد نظر و خطا به‌صورت $e = \bar{y} - y$ تعریف می‌شود.

$$L(e) = E[e^2] \quad (12)$$

جدول ۳: آبر پارامترهای شبکه عصبی آبخاری

آبر پارامتر	مقدار
دوره	۱۰۰۰
نرخ یادگیری	۰/۰۱
تکله	۰/۹

گام سوم: ایجاد پایگاه قواعد فازی برای تخمین گاز مصرفی
بر اساس یافته‌های کنونی، میزان مصرف خانگی را می‌توان به دو بخش «بیشینه مصرف» و «سایر زمان‌ها» تقسیم نمود؛ شرکت ملی گاز ایران در سال ۱۳۸۶ در اطلاعیه‌ای هشت راهکار را در جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی به عموم مردم اعلام کرد. در بند آخر این اطلاعیه به‌صراحت این جمله قید شده است «...رعایت استفاده بهینه از گاز در ساعات اوج مصرف که از ساعت ۱۱ تا ۱۳ و از ۱۷ تا ۲۰ خواهد بود...» بر همین اساس می‌توان یک اوج مصرف در روز و یک اوج مصرف در شب را مشاهده نمود. همچنین در اصول بهینه‌سازی مصرف سوخت و انرژی توسط دستگاه‌های کنترل هوشمند موتورخانه به ساعات اوج مصرف اشاره شده است. طبق این اصول و در بخش پیک زدایی مصرف سوخت در فصول سرما اشاره شده است که «...اوج مصرف گاز در فصل سرما از ساعت ۱۷ تا ساعات اولیه بامداد می‌باشد...» این محدوده زمانی مقارن با غروب خورشید و کاهش دمای هوا و نیاز به افزایش فرآیند گرمایشی ساختمان است. همچنین در بسیاری از ساختمان‌های اداری و مدارس، موتورخانه در تابستان خاموش و تنها در زمستان مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد؛ بنابراین در این دسته از ساختمان‌ها عملاً ۱۰۰ درصد صرفه‌جویی حاصل از عملکرد سامانه‌های کنترل هوشمند موتورخانه مربوط به فصل سرما خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر تمامی صرفه‌جویی حاصل از پیاده‌سازی سیستم هوشمند مربوط به عملکرد آن در فصل زمستان است.

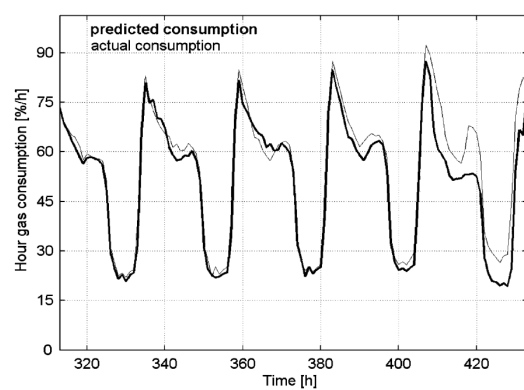
پیک‌های مصرف گاز در ساختمان‌های غیرمسکونی و اداری طی دو نوبت یکی صبح‌ها به هنگام شروع کار ادارات و دیگری در هنگام ظهر به‌موقع نماز و ناهار و استفاده از آب گرم مصرفی است که البته اثرات آن بر روی مصرف گاز شبکه ناچیز است.

در خصوص ساعات پیک مصرف و همچنین نسبت مصرف در ساعات پیک به ساعات عادی در طول شبانه‌روز تحقیقاتی انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. در سال ۲۰۰۵ تحقیقی در خصوص پیش‌بینی مصرف انرژی و تحلیل ریسک تقاضای مازاد انجام شد [۳۰]. این پژوهش بر روی داده‌های کشور اسلوونی صورت گرفت. نکته قابل‌ملاحظه در این پژوهش بررسی میزان مصرف ساعتی گاز برای مشترکین خانگی است که از گاز طبیعی برای مصارف عمومی همچون پخت‌وپز و همچنین گرمایش استفاده می‌کنند. در (شکل ۹) مصرف ساعتی گاز به‌صورت حقیقی (اندازه‌گیری شده) و تخمین زده شده مشخص شده است. با دقت در این

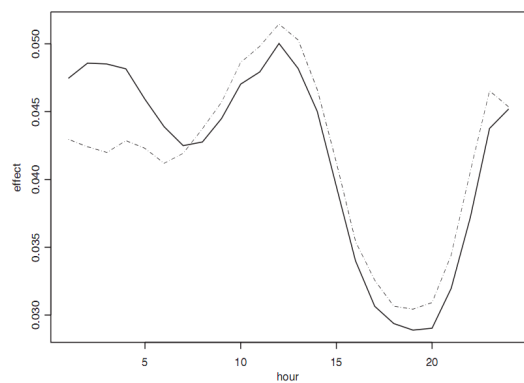
1. Mean Square Error (MSE)



شکل می‌توان دو پیک مصرف در طی ۲۴ ساعت را مشاهده نمود. در پژوهش دیگری که در سال ۲۰۰۹ انجام شد مدلی آماری برای مصرف گاز استاندارد شده مشترکین خانگی در کشور جمهوری چک ارائه شد [۳۱]. در (شکل ۱۰) پروفایل ساعتی مصرف گاز مشترکین خانگی در طی یک شبانه‌روز (از ساعت ۸ صبح تا ساعت ۷ صبح روز بعد، ۲۴ مقدار) نشان داده شده است. بررسی (شکل‌های ۹ و ۱۰) دو نکته را مشخص می‌کند. نکته اول وجود ۲ پیک مصرف گاز در طی شبانه‌روز برای مشترکین خانگی است. پیک ابتدایی در ساعات ۸ تا ۱۲ و پیک دوم از ساعت ۱۷ تا ۲۱ ادامه پیدا می‌کند. نکته دوم این است که چنانچه داده‌های مصرف این دو پیک را به‌صورت تجمعی باهم ترکیب کرده و بر مصرف کل تقسیم شود مقادیری در حدود ۰/۷ به دست می‌آید.



شکل ۹: مصرف حقیقی و پیش‌بینی شده مصرف گاز مشترکین خانگی بر حسب ساعت [۳۰]



شکل ۱۰: پروفایل مصرف گاز مشترکین خانگی بر حسب ساعت شبانه‌روز (هشت صبح تا هفت صبح روز بعد) [۳۱]

بنا بر آنچه بیان شد می‌توان مصرف گاز مشترکین خانگی را به‌طوری‌که ۷۰ درصد از مصرف روزانه هر خانوار در پیک مصرف (ساعت ۹ الی ۱۲ و ۱۸ الی ۲۱) باشد، تقسیم کرد. از سوی دیگر برای تعریف توابع عضویت فازی در بخش تالی

قوانین (توابع مصرف ساعتی گاز) به نتایج خوشه‌بندی فازی مراجعه می‌شود. بر همین اساس در ادامه روند تعیین توابع عضویت برای سه خوشه مشترکین پرمصرف، کم‌مصرف و متعادل تشریح می‌شود.

پس از تعیین مراکز خوشه برای تعریف توابع عضویت قسمت تالی سه سیستم فازی متناظر با مشترکین کم‌مصرف، پرمصرف و متعادل بدین‌صورت عمل می‌شود:

۱. محاسبه متوسط مصرف روزانه بر اساس مرکز خوشه ماهانه
۲. تقسیم‌بندی ۷۰ و ۳۰ درصدی مصرف روزانه بر اساس نظر فرد خبره
۳. محاسبه مصرف گاز در هر بازه ۳ ساعته بر اساس مصرف روزانه محاسبه شده در گام دوم (با توجه به اینکه ساعات پیک مصرف ۶ و ساعات عادی مصرف ۱۸ ساعت در شبانه‌روز است، باید نتایج گام دوم را به ترتیب به ۲ و ۶ برای ساعات پیک و عادی تقسیم کرد).

بنابراین می‌توان دو عبارت زیر را برای محاسبه توابع عضویت در نظر گرفت، به‌طوری‌که در آن C_{n3h} ، C_{p3h} ، D_m ، μ به ترتیب مرکز خوشه، تعداد روزهای یک ماه، مصرف در ساعات پیک، و مصرف در ساعات عادی است.

$$C_{p3h} = \frac{0.7 \times \mu}{2 \times D_m} \quad (13)$$

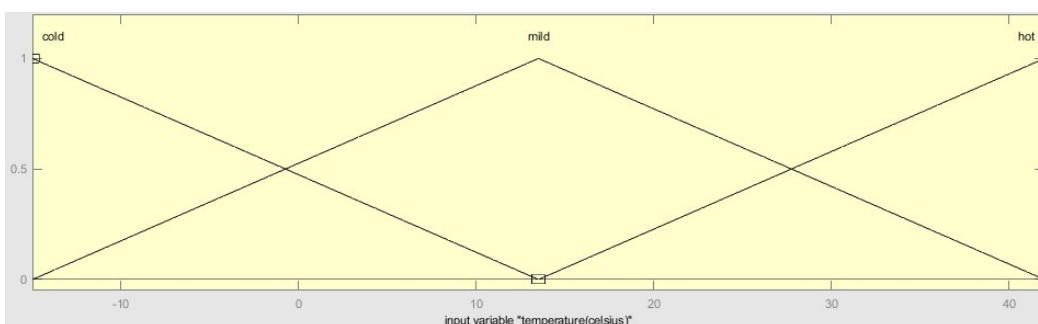
$$C_{n3h} = \frac{0.3 \times \mu}{6 \times D_m} \quad (14)$$

شایان ذکر است که همین روند برای هر سه خوشه مشترکین کم‌مصرف، پرمصرف و متعادل و برای هر دو شش ماه اول و دوم سال به‌صورت مشابه اعمال می‌شود. با استفاده از مراحل یاد شده و عبارات بالا می‌توان توابع عضویت سه سیستم فازی را محاسبه نمود (جدول ۴).

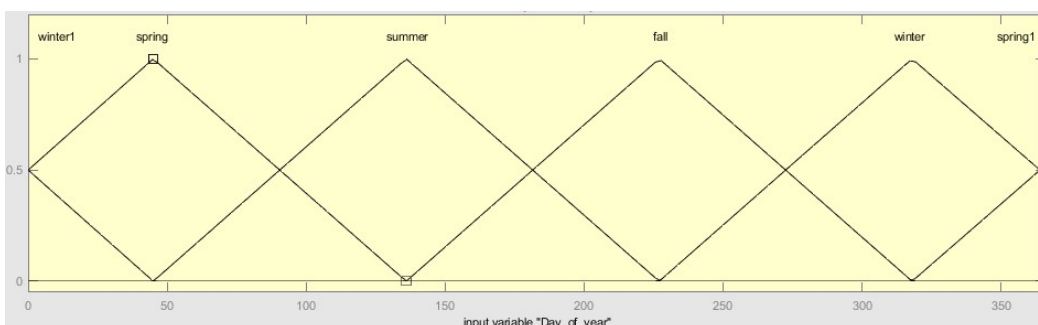
پس از آنکه مراکز توابع عضویت فازی در قسمت تالی قوانین (توابع مصرف سه ساعت گاز) مشخص شد و با توجه به اینکه توابع عضویت ورودی (دما، روز یا فصل سال و ساعت شبانه‌روز) نیز مشخص شده است، می‌توان قوانین فازی را تولید نمود. این مدل فازی دارای سه ورودی دمای سه ساعت آتی، روز سال و ساعت روز باشد. این ورودی‌ها برای هر سه سیستم فازی یکسان است. متغیرهای زبانی تعریف شده برای این سه ورودی به ترتیب در (شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳) آمده است. سیستم فازی ساخته شده دارای ۴۸ قانون است که بر اساس ادراک شهودی تولید شده‌اند.

جدول ۴: مقادیر توابع عضویت قسمت تالی سیستم‌های فازی

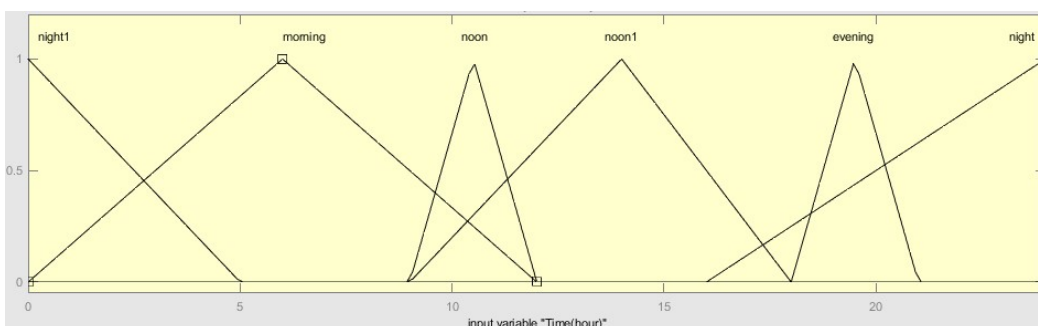
شش ماه اول	شش ماه اول		
۰,۹۱	۰,۰۲۴	پیک	کم مصرف
۰,۱۳	۰,۰۳۵	نرمال	
۳,۲۲	۱,۲۷	پیک	مصرف متعادل
۰,۴۶	۰,۱۸	نرمال	
۶,۰۲	۲,۹۵	پیک	پر مصرف
۰,۸۶	۰,۴۲	نرمال	



شکل ۱۱: متغیر زبانی دما به صورت هوای سرد، معتدل و گرم



شکل ۱۲: متغیر زبانی روزهای سال در فصل‌های بهار، تابستان، پاییز و زمستان

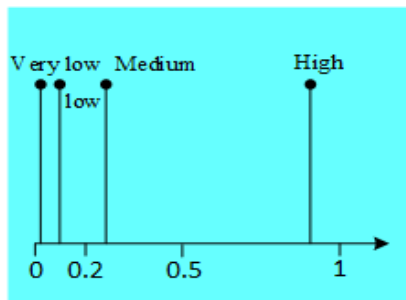


شکل ۱۳: متغیر زبانی ساعات روز دو بخش صبح و شب و دو بازه اوج مصرفی ظهر و عصر

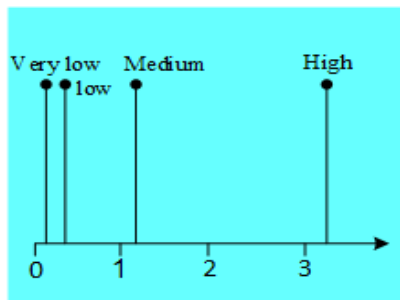
همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد با توجه به ماهیت تناوبی مصرف گاز و به‌منظور افزایش تطابق و همپوشانی خروجی سیستم فازی (مصرف سه‌ساعته گاز) در دو بخش ابتدایی و انتهایی روز و همچنین سال، در دو قسمت ابتدا و انتهای نمودار تجمعی توابع عضویت ورودی روز سال (فصل) و ساعات روز به ترتیب توابع عضویت زمستان و بهار (برای روز سال) و شب (برای ساعات شبانه‌روز) اضافه شده است. این توابع با نام‌های winter1, spring1, night1 در (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) مشخص شده است.

متعادل و پرمصرف در شش ماهه اول و دوم سال به صورت کامل تشریح شده است. توابع عضویت در بخش تالی برخلاف بخش مقدم برای هر سیستم فازی متفاوت است. در (شکل های ۱۴. الف، ب و ۱۴. ج) به ترتیب توابع عضویت برای خوشه کم مصرف، متعادل و پرمصرف نشان داده شده است.

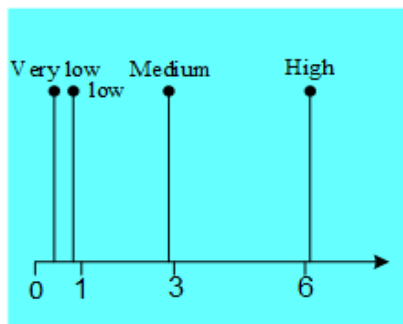
در قسمت تالی قوانین فازی چهار تابع عضویت برای مصرف گاز تعریف شده است که به ترتیب عبارتند از مصرف بسیار کم، کم، متعادل و بالا. برای تعریف این توابع عضویت از نتایج خوشه بندی فازی بر روی مقادیر مصرف گاز در پایگاه داده استفاده می شود. در بخش قبلی محاسبه مراکز این توابع برای سه خوشه کم مصرف،



(ب)



(الف)



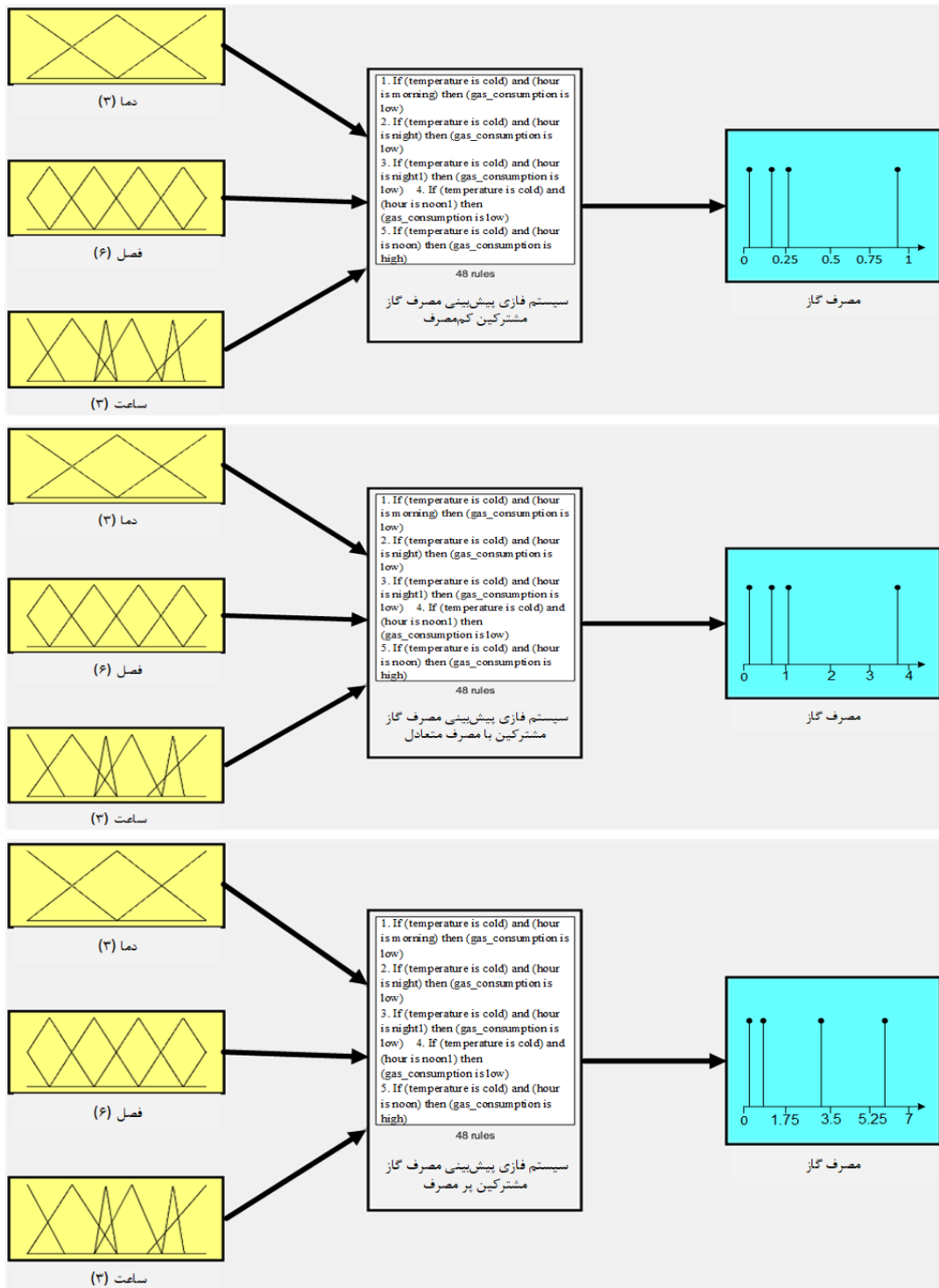
(ج)

شکل ۱۴: نمودار توابع عضویت خروجی سیستم فازی بر روی متغیر زبانی میزان مصرف گاز (الف. مشترک کم مصرف) (ب. مشترک متعادل مصرف) (ج. مشترک پرمصرف)

بر همین منوال برای تمامی فصول، ساعات شبانه روز و مقادیر کیفی دما، قواعد فازی تدوین می شود. در تنظیم قواعد فازی باید دقت نمود تا از ایجاد قوانین مشابه یا متناقض پرهیز نمود. به منظور بهینه سازی مجموع تعداد قوانین و با علم به این موضوع که مصرف گاز وابستگی مستقیم به کاهش دما دارد و در نظر داشتن این مطلب که کاهش دما عمده‌تاً با تغییر فصل و ورود به فصول سرد سال رخ می دهد، در قسمت مقدم قوانین از ترکیب عطفی دو پارامتر از سه پارامتر ورودی استفاده می شود. از طرف دیگر با توجه به اینکه پیش بینی مصرف گاز در بازه های پیک روزانه (سه ساعت در روز و سه ساعت در شب) از اهمیت ویژه ای در این کار برخوردار است، در کلیه قوانین قسمت مقدم شامل پارامتر ورودی ساعت شبانه روز است تا خروجی سیستم فازی به صورت مستقیم از این ورودی متأثر شود. در (شکل ۱۵) شمای کلی سه سیستم فازی طراحی شده نشان داده شده است.

مجموعه قواعد و قوانین فازی در واقع یک ارتباط شهودی بین پارامترهای ورودی به سیستم فازی و متغیر خروجی (مصرف گاز) برقرار می کند. بدیهی است در این قواعد تا حد امکان سعی شده است نظر فرد خبره نیز دخیل شود. در ادامه به تعدادی از این قوانین جهت نمونه اشاره می شود:

۱. اگر دما (هوا) گرم بود و هنگام شب بود آنگاه مصرف گاز بسیار کم است.
۲. اگر در فصل زمستان قرار داشتیم و هنگام صبح بود آنگاه مصرف گاز کم است.
۳. اگر دما گرم بود و هنگام غروب بود آنگاه مصرف گاز متعادل است.
۴. اگر در فصل زمستان قرار داشتیم و هنگام غروب (ابتدای شب) بود آنگاه مصرف گاز بالا است.



شکل ۱۵: سه سیستم فازی طراحی شده برای پیش‌بینی مصرف گاز خانگی مشترکین با الگوهای مصرف مختلف

۷. محاسبه میانگین قدر مطلق خطا (MAE)

در پایان برای هر سه خوشه از مشترکین مقدار میانگین قدر مطلق خطا محاسبه شده است. در واقع داده‌های مربوط به مصرف گاز تخمین زده شده (خروجی سیستم فازی برای هر خوشه از مشترکین) و مقدار واقعی برای ۶۹ ماه و کل مشترکین خانگی (۷۹۹۰۰، طبق آخرین مشترکین گاز خانگی در نیمه اول سال ۱۳۹۸) برای محاسبه میانگین

1. Mean Absolute Error



کلی محدوده خطای به دست آمده در حد قابل قبولی است و می توان با اضافه کردن متغیرهای ورودی دیگر به مسئله که در فرآیند تصمیم گیری سیستم هوشمند اثرگذار هستند خطا را به مراتب کاهش داد.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^m |(\sum_{k=1}^n C_{3h} - C_M)|}{m \times s} \quad (15)$$

با توجه به اینکه پایگاه داده مصرف گاز مشترکین بیرجند در قالب دو بازه زمانی شش ماهه (شش ماهه اول و شش ماهه دوم) تدوین شده است، میانگین قدر مطلق خطا نیز برای هر سه خوشه از مشترکین در دو بازه شش ماهه محاسبه شده است. به عبارت دیگر مصارف محاسبه شده (تخمین زده شده) و مقادیر واقعی (اندازه گیری شده) برای هر شش ماه به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته و مقدار میانگین قدر مطلق خطا محاسبه شده است. نتایج این محاسبات در (جدول ۶) مشاهده می شود.

جدول ۵: میانگین قدر مطلق خطا برای مشترکین کم مصرف، متعادل و پرمصرف (سالانه)

نوع مشترک	میانگین قدر مطلق خطا (MAE)
مشترکین کم مصرف	۰/۴۷۶
مشترکین متعادل	۲/۱۴۱۲
مشترکین پرمصرف	۵/۰۶۸۳

جدول ۶: میانگین قدر مطلق خطا برای مشترکین کم مصرف، متعادل و پرمصرف در دو بازه شش ماهه اول و دوم

نوع مشترک	شش ماهه اول (MAE)	میانگین مصرف ۶ ماهه اول	شش ماهه اول (MAE)	میانگین مصرف ۶ ماهه اول
مشترکین کم مصرف	۰/۲۳۱	۲۲/۰۷	۰/۹۰۳۶	۸۰/۱۰
مشترکین متعادل	۰/۵۷۸۶	۱۱۳/۷۸	۲/۷۴۷	۲۷۶/۵۲
مشترکین پرمصرف	۱/۹۹۶۳	۲۵۳/۵۲	۵/۷۹۰۴	۵۱۶/۱۸

۸. نتایج شبیه سازی

گاز را برحسب دو پارامتر دما و فصل (روز سال) نشان می دهد. با توجه به این نمودار می توان به دو نکته اساسی پی برد. نکته اول وابستگی میزان مصرف گاز با دما است. در کلیه ایام سال با کاهش دما مصرف گاز افزایش پیدا می کند. نکته دوم سیر صعودی مصرف گاز مشترکین خانگی با اتمام فصول گرم سال و وارد شدن به فصول سرد است. با دقت در این شکل مشخص می شود برای یک مشترک کم مصرف تقریباً در بیشتر ایام سال مصرف گاز در حوالی یک مقدار از قبل قابل پیش بینی قرار دارد و تنها در بازه زمانی ۴۰

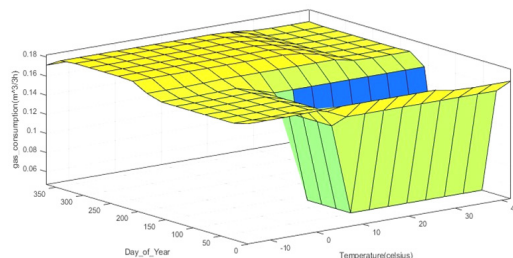
قدر مطلق خطا استفاده شده است رابطه (۷). در این فرمول s تعداد مشترکین گاز، m تعداد کل ماهها، n تعداد کل نمونه های تخمین زده شده در هر ماه، C_{3h} مقادیر محاسبه شده (تخمین) مصرف سه ساعته گاز و C_M مقدار اندازه گیری شده ماهانه مصرف گاز است. نتایج این محاسبات در (جدول ۵) گردآوری شده است. دقت در داده های این جدول نشان می دهد به هر میزان حساسیت مصرف گاز با دما بیشتر باشد مقدار میانگین مربعات خطا نیز افزایش پیدا می کند. در واقع برای مشترکین پرمصرف که میزان مصرف گاز همبستگی بیشتری با دما دارد خطای تخمین نمود بیشتری پیدا کرده و میانگین مربعات خطا افزایش پیدا می کند درحالی که برای مشترکین متعادل و کم مصرف که الگوی رفتاری آنها از دما اثرپذیری کمتری دارد و یک روال ثابت (مصرف عمومی و مستمر) را در پی می گیرد خطا کاهش پیدا کرده و تخمین با دقت بیشتری انجام می شود. به صورت

۸-۱. نتایج سیستم فازی مشترکین کم مصرف

(شکل ۱۶) یک رویه^۱ است که پیش بینی میزان مصرف

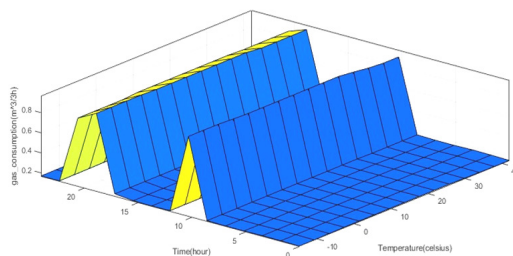
1. Surface

امین روز سال تا ۱۵۰ امین روز افت قابل ملاحظه مصرف گاز مشاهده می شود. در واقع با توجه به مقادیر مصرف گاز در نواحی ابتدایی و انتهایی این رویه می توان شاهد یک رفتار متناوب بود، به نحوی که مقادیر به دست آمده در نقاط انتهایی زمستان همپوشانی خوبی با فواصل ابتدایی بهار نشان می دهد.



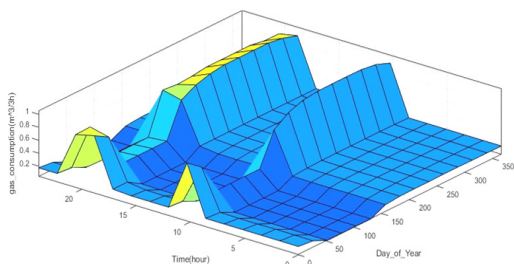
شکل ۱۶: رویه نگاشت فازی مربوط به تغییرات مصرف گاز بر حسب دو ویژگی فصل و دما (مشترک کم مصرف)

نمودار (شکل ۱۷) که در ادامه مورد بررسی قرار می گیرد پیش بینی مصرف گاز سه ساعته مشتری مشترکین خانگی بر حسب دما و ساعت شبانه روز است. با دقت در این نمودار می توان شاهد پیک (بیشینه مصرف) در طی دو بازه زمانی ۸ تا ۱۲ ظهر و ۱۹ تا ۲۲ بود که با نظرات فرد خبره همخوانی دارد. انتقال زمانی که در بازه صبح رخ داده است را می توان وابسته به اثرگذاری بیشتر پارامتر دما نسبت به ساعت شبانه روز در محاسبه خروجی دانست. همچنین نمودار بیانگر وابستگی بیشتر مصرف گاز با تغییر ساعات شبانه روز در مقایسه با تغییرات دما است. علت این پدیده را می توان وابسته به الگوی مصرف یک مشترک کم مصرف دانست. در حقیقت مصارف این مشترک اغلب مربوط به یک سری فعالیت های خاص در ساعات پیک بوده و کمتر نسبت به تغییرات دما واکنش نشان می دهد. همچون نمودار قبلی نتایج به دست آمده در این بخش نیز مبین افزایش مصرف گاز با کاهش دما است.



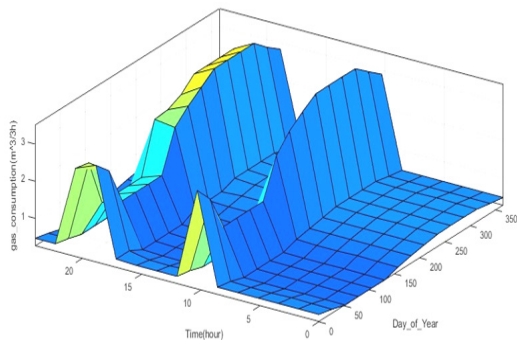
شکل ۱۷: رویه نگاشت فازی مربوط به تغییرات مصرف گاز بر حسب دو ویژگی ساعت و دما (مشترک کم مصرف)

در (شکل ۱۸) رویه مصرف گاز بر حسب ساعت شبانه روز و فصل (روز در سال) نشان داده شده است. با دقت در این رویه می توان دریافت که مطابق انتظار مصرف گاز در شش ماهه دوم سال نسبت به شش ماه اول رشد قابل ملاحظه ای پیدا می کند. به عبارت دیگر در یک ساعت مشخص از یک روز پاییزی پیش بینی می شود مصرف گاز در همان ساعت و روز در تابستان بیشتر باشد. همچنین این گراف انباشت مصرف گاز در شش ماهه دوم سال و در بازه زمانی ساعت ۱۰ تا ۲۰ را نیز به خوبی نشان می دهد. در خصوص بیشینه مصرف روزانه گاز نیز مطابق انتظار بازه های زمانی ساعات ۷ تا ۱۱ و ۱۸ تا ۲۲ از رویه قابل استخراج است. اوج مصرف گاز نیز در بازه زمانی ۱۰ تا ۱۵ و در طی روزهای ۲۰۰ تا ۳۵۵ ام سال رخ می دهد. همچنین دقت در این شکل نشان می دهد مصرف گاز در روزهای انتهایی و ابتدایی سال از همخوانی و تطابق خوبی برخوردار است که مجدداً مؤید رفتار تناوبی مصرف گاز مشترکین می باشد.

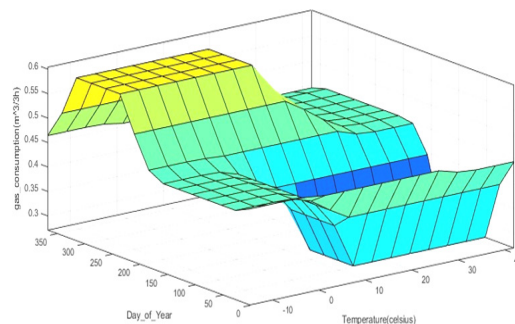


شکل ۱۸: رویه نگاشت فازی مربوط به تغییرات مصرف گاز بر حسب دو ویژگی فصل و ساعت (مشترک کم مصرف)

۲-۸. نتایج سیستم فازی مشترکین با مصرف متعادل ابتدا رویه مربوط به مصرف گاز سه ساعته مشترک بر حسب فصل و دما نشان داده شده است (شکل ۱۹). با دقت در این شکل می توان روند افزایشی مصرف گاز را با ورود به فصل پاییز و تا حدود اواخر بهمن ماه به خوبی مشاهده کرد. همچنین کمینه مصرف گاز از اواسط بهار تا انتهای تابستان رخ می دهد. کاهش محسوس مصرف گاز با افزایش دما نیز همانند شکل های قبلی مشهود است. مقایسه یک مشترک با مصرف متعادل نسبت به یک مشترک کم مصرف نشان دهنده تغییرات بیشتر و شدیدتر در مصرف سه ساعته گاز است. به عبارت دیگر در رویه اخیر تغییرات بیشتر مصرف گاز با پارامتر ورودی دما و فصل یا روز سال مشاهده می شود.



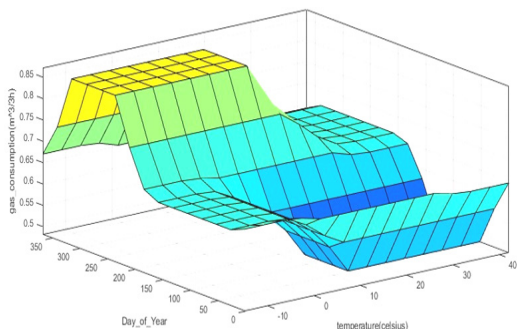
شکل ۲۱: رویه نگاشت فازی مربوط به تغییرات مصرف گاز بر حسب دو ویژگی فصل و ساعت (مشترک متعادل)



شکل ۱۹: رویه نگاشت فازی مربوط به تغییرات مصرف گاز بر حسب دو ویژگی فصل و دما (مشترک متعادل)

۳-۸. نتایج سیستم فازی مشترکین پرمصرف

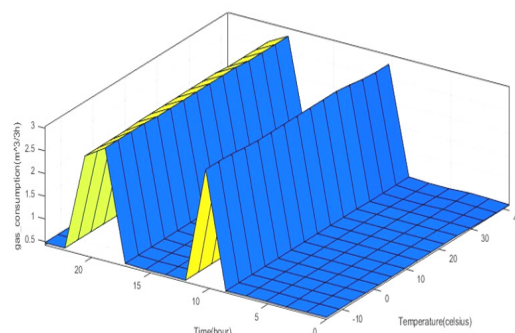
در نهایت خروجی سیستم فازی مشترکین پرمصرف مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطابق با دو حالت قبلی مصرف گاز بر حسب سه پارامتر دما، روز سال و ساعات شبانه‌روز به صورت ترکیب‌های مختلف دوتایی ورودی ترسیم شده است. مشاهده رویه مصرف گاز بر حسب دما و فصل (شکل ۲۲) و همچنین مقایسه آن با رویه متناظر برای مشترکین با مصرف متعادل مبین این نکته است که در حقیقت ظاهر این دو رویه تشابه زیادی با یکدیگر دارد و تنها برای مشترکین پرمصرف مقیاس و اعداد به دست آمده بزرگ‌تر شده است اما رفتار کلی تغییر چندانی ندارد. این مطلب نشان می‌دهد واکنش یک مشترک متعادل و یک مشترک پرمصرف در مواجهه با افزایش دما نسبت به یک مشترک کم‌مصرف شدیدتر بوده و تقریباً یک الگوی رفتاری را دنبال می‌کنند ولی در عین حال ابعاد و میزان مصرف یک مشترک پرمصرف به مراتب بیشتر است (در حدود شش برابر).



شکل ۲۲: رویه نگاشت فازی مربوط به تغییرات مصرف گاز بر حسب دو ویژگی فصل و دما (مشترک پرمصرف)

رویه‌های مربوط به مصرف گاز بر حسب دما و ساعت (شکل ۲۳) و همچنین روز سال و ساعات شبانه‌روز (شکل ۲۴)

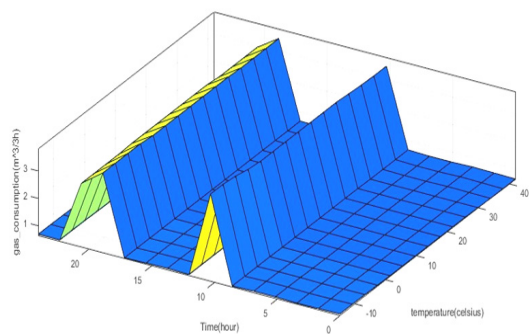
در (شکل ۲۰) مصرف گاز یک مشترک متعادل بر حسب دما و ساعت شبانه‌روز ترسیم شده است. مطابق انتظار اثرگذاری پارامتر ورودی ساعت شبانه‌روز نسبت به دما به مراتب بیشتر بوده و خروجی سیستم فازی نسبت به آن واکنش شدیدتری نشان می‌دهد. در این شکل نیز بیشترین میزان مصرف گاز در دو پیک صبحگاهی و شبانگاهی رخ می‌دهد. مقایسه این شکل با شکل متناظر مشترکین کم‌مصرف رشد حدود سه برابری مصرف گاز در پیک‌های مصرف را نشان می‌دهد.



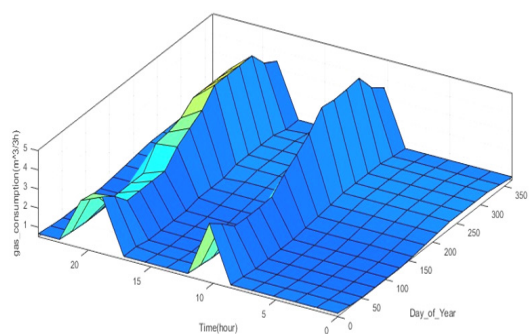
شکل ۲۰: رویه نگاشت فازی مربوط به تغییرات مصرف گاز بر حسب دو ویژگی ساعت و دما (مشترک متعادل)

در مرحله بعدی مصرف گاز بر حسب فصل (روز سال) و ساعت شبانه‌روز بررسی می‌شود. در (شکل ۲۱) نیز اثرگذاری بیشتر پارامتر ساعات شبانه‌روز در مقابل روز سال مشهود است اما مقایسه آن با رویه مربوط به مصرف گاز بر حسب دما و ساعات شبانه‌روز نشان می‌دهد در نمودار اخیر اثر روز سال تأثیر بیشتری نسبت به دما بر خروجی سیستم فازی (پیش‌بینی مصرف سه‌ساعته گاز) دارد. از طرف دیگر نمودار اخیر نشان دهنده نرم‌تر شدن تغییرات مصرف گاز نیز می‌باشد.

در ادامه نشان داده شده است. رفتار و الگوی مصرف گاز در خصوص این دو رویه نیز مانند دو حالتی است که برای مشترکین کم مصرف و متعادل شرح داده شد. نکته قابل توجه در این دو رویه نیز افزایش چندین برابری پیش‌بینی مصرف گاز نسبت به مشترکین با مصرف متعادل است. در کلیه شکل‌هایی که در این بخش نمایش داده شد همخوانی نقاط ابتدایی و انتهایی هر روز و همچنین هر سال مشهود است. در واقع این رفتار از آنجا منشأ می‌گیرد که دو پارامتر ورودی سیستم فازی یعنی روز سال و ساعات شبانه‌روز کاملاً یک سیر تغییرات دوره‌ای داشته و از طرفی با توجه به نقش پر رنگ پارامتر ورودی ساعات شبانه‌روز همین رفتار تناوبی در خروجی سیستم فازی نیز ساری و جاری است. البته باید این نکته را نیز اضافه کرد که نوسانات دما نیز تا حدی به صورت متناوب بوده و این نیز به نوبه خود در خروجی اثرگذار است.



شکل ۲۳: رویه نگاشت فازی مربوط به تغییرات مصرف گاز بر حسب دو ویژگی ساعت و دما (مشترک پر مصرف)



شکل ۲۴: رویه نگاشت فازی مربوط به تغییرات مصرف گاز بر حسب دو ویژگی ساعت و فصل (مشترک پر مصرف)

با در نظر داشتن شکل‌های شرح داده شده در بالا، پیش‌بینی میزان مصرف یک ماهه تجمعی یک مشترک کم‌مصرف را با مقدار مصرف میانگین کاربران کم‌مصرف مقایسه می‌نماییم. این مقایسه را با توجه به فرمول شماره

۱۰ انجام می‌دهیم. این مدل را در ماه‌های فروردین، آبان و دی سال ۱۳۹۷ مقایسه نموده‌ایم. تخمین میزان مصرف تجمعی ماهانه یک کاربر کم‌مصرف در فروردین ماه برابر ۹۱ مترمکعب، در آبان ماه ۱۱۶ واحد و دی ماه ۱۲۴ مترمکعب است. با مقایسه این تخمین با میانگین مصرف مشترکین کم‌مصرف در این سه ماه درمی‌یابیم که خروجی به‌دست‌آمده منطقی به نظر می‌رسد. با این حال بایستی در نظر داشت که جواب به‌دست‌آمده در این سیستم ترکیبی فازی و عمیق، یکی از بی‌نهایت جواب‌های ممکن برای برقراری فرمول شماره ۱۰ است. لذا به جهت ایجاد دقت و صحت بالاتر در این تخمین، پیشنهاد می‌شود تا داده‌های بیشتری در اختیار گروه پژوهشی قرار داده شود

۹. نتیجه‌گیری و روال آتی

هدف از این گزارش پیش‌بینی هوشمند میزان مصرف لحظه‌ای گاز برای مشترکین خانگی با استفاده از اطلاعات مصرف دوره‌ای گاز و تهیه و تولید نرم‌افزار و مستندات لازم در این راستا است. بدین منظور، در اولین گام شناسایی پارامترهای اثرگذار و میزان اثرگذاری آنان، ادغام اطلاعات موجود از منابع مختلف و تدوین یک پایگاه داده منسجم و به‌کارگیری ابزارهای خوشه‌بندی جهت تقسیم‌الگوی مصرف مشترکین به سه سطح پر مصرف، متعادل و کم مصرف بررسی شد. به‌طور خاص، با توجه به پایگاه‌های داده‌ای که در اختیار بود و همچنین اهمیت پیش‌بینی میزان مصرف در ساعات اوج مصرف، سه پارامتر دما، ساعت شبانه‌روز و روز سال (فصل) به‌عنوان ورودی‌های سیستم هوشمند و مصرف سه‌ساعته گاز به‌عنوان خروجی سیستم هوشمند در نظر گرفته شد. در گام دوم، برای پیش‌بینی متغیر دما از یک شبکه عصبی عمیق آشناری استفاده شد که ورودی آن مقادیر پنج گام قبلی دما و خروجی آن دمای لحظه بعد است. سپس برای هر یک از خوشه‌های الگوی مصرف یک سیستم فازی (جمعاً سه سیستم) جهت پیش‌بینی مصرف گاز در بخش خانگی طراحی شد و نتایج مربوط به مقادیر پیش‌بینی شده مصرف گاز بر اساس متغیرهای ورودی محاسبه شد. در نهایت همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده مصرف گاز و متغیر دما مورد بررسی قرار گرفت و وجود ارتباطی معنادار بین آن‌ها بر اساس داده‌های آماری نشان داده شد. جهت محک زدن عملکرد، پارامتر میانگین قدر مطلق خطا بر اساس مصارف گاز تخمین زده شده و مقادیر قرائت شده از کنتورها برای هر سه خوشه

- in healthy and aortic stenosis subjects. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2009, 56, 2202–2213.
- [8]. Wu, S.D.; Wu, C.W.; Lin, S.G.; Lee, K.Y.; Peng, C.K. Analysis of complex time series using refined composite multiscale entropy. *Phys. Lett. A* 2014, 378, 1369–1374
- [9]. Giannone, Domenico, Lucrezia Reichlin, and David Small. “Nowcasting: The real-time informational content of macroeconomic data.” *Journal of Monetary Economics* 55, no. 4, (2008), p 665-676.
- [10]. Eraker, Bjørn, Ching Wai Chiu, Andrew T. Foerster, Tae Bong Kim, and Hernán D. Seoane. “Bayesian mixed frequency VARs.” *Journal of Financial Econometrics* 13, no. 3, (2014), p 698-721.
- [11]. Forni, Claudia, Pierre Guérin, and Massimiliano Marcellino. “Using low frequency information for predicting high frequency variables.” *International Journal of Forecasting* 34, no. 4, (2018), p 774-787.
- [12]. Reinsel, Gregory C. *Elements of multivariate time series analysis*. Springer Science & Business Media, 2003.
- [13]. Ahmed, Mosabber Uddin, and Danilo P. Mandic. “Multivariate multiscale entropy: A tool for complexity analysis of multichannel data.” *Physical Review* 84, no. 6, (2011), p 061918.
- [14]. He, Hong, and Yonghong Tan. “Unsupervised Classification of Multivariate Time Series Using VPCA and Fuzzy Clustering With Spatial Weighted Matrix Distance.” *IEEE transactions on cybernetics*, (2018).
- [15]. Meier, Alexander, Claudia Kirch, and Renate Meyer. “Bayesian nonparametric analysis of multi-variate time series: A matrix Gamma Process approach.” *Journal of Multivariate Analysis* 175, (2020), p 104560.
- مشترکین محاسبه شد که نتایج آن در محدوده قابل قبول قرار داشت. به عنوان مثال مقایسه میانگین قدر مطلق خطا برای مشترکین کم مصرف (۰/۴۷۶) با مقادیر مراکز خوشه در شش ماهه اول و دوم (۸۰ و ۱۱۳) نشان دهنده عملکرد مطلوب سیستم هوشمند پیشنهادی است. با توجه به نتیجه اولیه به دست آمده، می توان به این نتیجه رسید که پیش بینی مصرف گاز مشترکین بیرجند امری قابل انجام است.

مراجع:

- [1]. M. Namazkhan, C. Albers, and L. Steg, “A decision tree method for explaining household gas consumption, The role of building characteristics, socio-demographic variables, psychological factors and household behaviour,” *Renew. Sustain. Energy Rev.* 119, (2019), p 109542.
- [2]. H. Karimi and J. Dastranj, “Artificial neural network-based genetic algorithm to predict natural gas consumption,” *Energy Syst.* 5, no. 3, (2014), p 571–581.
- [3]. Ferreira MA, Marco AR, Lee HK. “Multiscale modeling: a Bayesian perspective.” *Springer Science Business Media*, (2007).
- [4]. Humeau-Heurtier, Anne. “The multiscale entropy algorithm and its variants: A review.” *Entropy* 17, no. 5, (2015), p 3110-3123.
- [5]. Costa, M; Goldberger, A.L.; Peng, C.K. Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series. *Phys. Rev. Lett.* 2002, 89, 068102.
- [6]. Costa, M; Goldberger, A.L.; Peng, C.K. Multiscale entropy analysis of biological signals. *Phys. Rev. E* 2005, 71, 021906.
- [7]. Valencia, J.F.; Porta, A.; Vallverdu, M.; Claria, F.; Baranowski, R.; Orłowska-Baranowska, E.; Caminal, P. Refined multiscale entropy: Application to 24-h Holter recordings of heart period variability



- [24]. Asgharpour, H., Behboudi, D., & Ghazvinian, M.H. Structural Failure: Case of Natural Gas Consumption and Economic Growth in Iran. *Quarterly Journal of Quantitative Economic* 5, (2009), p 105-121, (in Persian).
- [25]. Lin, W., Chen, B., Luo, S., & Liang, L. Factor analysis of residential energy consumption at the provincial level in China. *Sustainability*, 6, (2014), p 7710-7724.
- [26]. Marziali, Andrea, Emanuele Fabbiani, and Giuseppe De Nicolao. "Short-term forecasting of Italian residential gas demand." arXiv, (2019).
- [27]. Potočnik, Primož, Jurij Šilc, and Gregor Papa. "A comparison of models for forecasting the residential natural gas demand of an urban area." *Energy* 167, (2019), p 511-522.
- [28]. Bezdek, James C., Robert Ehrlich, and William Full. "FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm." *Computers & Geosciences* 10, no. 2-3 (1984), p 191-203.
- [29]. Emmanuel Gbenga Dada, David Opeoluwa Oyewola, Joseph Hurcha Yakubu and Ayotunde Alaba, "Fadale Predicting Protein Secondary Structure Based On Ensemble Neural Network." *Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications*, (2021), p 49-56.
- [30]. Thaler, Marko, Igor Grabec, and Alojz Poredoš. "Prediction of energy consumption and risk of excess demand in a distribution system." *Physica A: Statistical mechanics and its applications* 355, no. 1 (2005), p 46-53.
- [31]. Brabec, Marek, Ondřej Konár, Marek Malý, Emil Pelikán, and Jiří Vondráček. "A statistical model for natural gas standardized load profiles." *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)* 58, no. 1 (2009), p 123-139.
- [16]. Niu, Tong, Jianzhou Wang, Haiyan Lu, Wendong Yang, and Pei Du. "Developing a Deep Learning Framework with Two-Stage Feature Selection for Multivariate Financial Time Series Forecasting." *Expert Systems with Applications*, (2020), p 113237.
- [17]. Cui, Zhicheng, Wenlin Chen, and Yixin Chen. "Multi-scale convolutional neural networks for time series classification." arXiv, (2016).
- [۱۸]. مجتبی بهمنی، آرش جمشید نژاد، محمد صالح انصاری لاری. «بررسی عوامل مؤثر بر مصرف انرژی بخش خانگی استان‌های کشور» فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی، سال دهم شماره ۴۲، پاییز ۱۳۹۳.
- [۱۹]. عباسعلی ابونوری، هادی پرهیزی گشتی، تیمور محمدی. «تجزیه و تحلیل و بررسی عوامل مؤثر بر تقاضای گاز خانگی و تجاری در استان گیلان» فصل‌نامه علوم اقتصادی سال دوم شماره ۵، زمستان ۱۳۸۷.
- [20]. Timmer, Reed P., and Peter J. Lamb. "Relations between temperature and residential natural gas consumption in the Central and Eastern United States." *Journal of applied meteorology and climatology* 46, no. 11, (2007), p 1993-2013.
- [21]. Franco, Alessandro. "Natural gas consumption and correlation with the uses of thermal energy: Analysis of the Italian case." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 31, (2016), p 703-714.
- [22]. Liu, Lon-Mu, and Maw-Wen Lin. "Forecasting residential consumption of natural gas using monthly and quarterly time series." *International Journal of Forecasting* 7, no. 1, (1991), p 3-16.
- [۲۳]. صادقی، س. ک، موسویان، س.م، تحلیل آماری و برآورد فاصله‌ی اطمینان پیش‌بینی شبکه‌ی عصبی ARIMA: ترکیبی به منظور مقایسه با مدل خطی (مطالعه‌ی موردی مصرف ماهانه گاز طبیعی در بخش خانگی ایران، فصل‌نامه‌ی تحقیقات مدل‌سازی اقتصادی، صفحات ۱۰۶-۷۶، سال ۱۳۹۳.

Intelligent Prediction of Gas Consumption in Three-Hour Intervals, Using Data Recorded in Specific Time Periods

Iman Mohammadi^{1*}, Mohsen Taghavi²

1. Ph.D. in Mechanical Engineering, Khorasan Razavi Gas Company, Mashhad, Iran
2. B.Sc in Chemical Engineering, Khorasan Razavi Gas Company, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL ARTICLE

Article History:

Received: 13 April 2024

Revised: 25 May 2024

Accepted: 09 June 2024

Keywords:

Periodic gas consumption
Intelligent prediction of gas consumption
Clustering algorithm
Deep neural network
Fuzzy logic

ABSTRACT

Gas consumption, as one of the most consumed energy carriers in the country, is very important in crisis management, production management, allocation and consumption, preventing wastage and reducing environmental pollution. However, due to the oldness of the measuring equipment, it is not possible to record data continuously, and the available information about gas consumption is usually limited to the periodic gas consumption reports of consumers. Therefore, real-time forecasting of gas consumption is associated with high uncertainty, and it is not possible to check the accuracy of the forecast due to the lack of real-time data. The aim of this research is to intelligently predict gas consumption in three-hour intervals based on its periodic consumption information. The method presented in this research includes three steps. In the first step, using the fuzzy clustering algorithm, the gas consumption data of household consumers are divided into three categories: low consumption, balanced and high consumption. In the second step, using a deep neural network, the temperature is predicted in three-hour intervals. In the third step, using a system based on fuzzy logic, the three-hour gas consumption of household consumers is estimated based on the predicted temperature, day of the year and time of day. The implementation of the proposed method on the data of the city of Birjand shows that the total instantaneous consumption predicted for all three low-consumption, balanced and high-consumption clusters follows the average periodic consumption of the consumers of those clusters with an acceptable error. Also, the presence of a strong negative correlation between temperature and gas consumption, especially for balanced consumers in cold seasons, confirms the influence of gas consumption on temperature.

DOR: [20.1001.1.25885251.1403.00.00](https://doi.org/10.1001.1.25885251.1403.00.00)

How to cite this article

I. Mohammadi, M.Taghavi, Intelligent Prediction of Gas Consumption in Three-Hour Intervals, Using Data Recorded in Specific Time Periods. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2024; 11(1): 46-70. (https://www.ijge.irangi.org/article_722819.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: iman2960@gmail.com, (I. Mohammadi).

Available online 01 September 2024

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

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



پیش‌بینی پنجره دمایی سیال حفاری و تشکیل هیدرات‌های گازی حین حفاری در آب‌های عمیق با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشینی

محمد دوستی^۱، الناز خداپناه^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: khodapanah@sut.ac.ir

مقاله‌ی علمی-پژوهشی

صفحه ۷۱ - ۸۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶

چکیده

حفاری در سازندهای هیدرات‌گازی در آب‌های عمیق دارای خطرات و چالش‌های زیادی است. به همین منظور در این پژوهش باهدف تعیین پنجره دمایی سیال حفاری برای حفاری در آب‌های عمیق، پس از بررسی روابط پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌گازی، با استفاده از دو الگوریتم یادگیری ماشین، «رگرسیون چندجمله‌ای در زبان پایتون و پرسپترون چندلایه در MATLAB»، پیش‌بینی لازم برای تعیین پنجره دمایی سیال حفاری انجام می‌شود. از بین روابط بررسی شده برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌گازی رابطه سحرخیزان با میانگین خطای نسبی ۰/۴۹ بالاترین دقت را در میان روش‌های بررسی شده، دارد. همچنین در پیش‌بینی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای ۶ ترکیب گازی با وزن مخصوص‌های مختلف، مشخص گردید ترکیب گازی با وزن مخصوص ۰/۶۱ با مقدار $R^2 = ۰/۹۷۴۳$ در پیش‌بینی با الگوریتم رگرسیون چندجمله‌ای و ترکیب گازی با وزن مخصوص ۰/۶۵ در پیش‌بینی با الگوریتم پرسپترون چندلایه بالاترین دقت را داشتند.

کلیدواژه‌ها: هیدرات‌های گاز طبیعی، پنجره دمایی سیال حفاری، حفاری در آب‌های عمیق، الگوریتم رگرسیون چندجمله‌ای، الگوریتم پرسپترون چندلایه

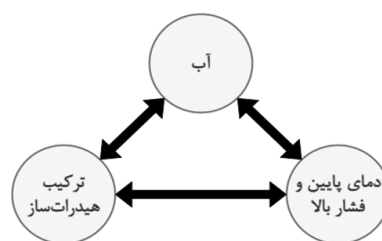
۱. مقدمه

کریستال‌های هیدرات ترکیباتی هستند دارای ساختارهای پیچیده و سه‌بعدی که در آن مولکول‌های آب یک قفس را تشکیل می‌دهند و مولکول‌های مهمان درون این قفس‌ها به دام افتاده‌اند. نکته قابل توجه در مورد این ترکیبات این است که هیچ پیوندی بین مولکول‌های مهمان و میزبان وجود ندارد؛ در واقع مولکول‌های مهمان آزاد هستند که در داخل قفس‌های ساخته شده از مولکول‌های میزبان بچرخند. تشکیل این ترکیبات که هیدرات نامیده می‌شود به سه شرط مهم (۱) ترکیب مناسب از دما و فشار؛ هیدرات‌ها در دماهای پایین و

فشارهای بالا شکل می‌گیرند، (۲) وجود ترکیبات هیدرات‌ساز، شامل متان، اتان و دی‌اکسید کربن (گاز) و (۳) وجود هر شکلی از آب (بخار یا مایع) نیاز دارد. (شکل ۱) توصیف ساده‌ای از سه معیار اصلی اشاره شده در بالا را نشان می‌دهد. وجود این سه عامل و ارتباط آن‌ها با یکدیگر سبب تشکیل هیدرات‌ها می‌شود [۱]. برخی از ترکیبات تشکیل دهنده هیدرات شامل CH_4 ، C_2H_6 ، C_3H_8 ، CO_2 و H_2S می‌باشد [۲]. هیدرات‌های گاز ترکیبات کریستالی هستند که تحت شرایط خاص دمای پایین و فشار بالا شکل می‌گیرند. منابع هیدرات‌گازی، مانند



یخ قابل اشتعال بوده و غنی از متان هستند و در سطح جهانی در رسوبات کم عمق قطبی و حاشیه قاره‌ای توزیع شده‌اند. از دلایلی که باعث شناخته شدن ترکیبات هیدرات شده است، می‌توان به ذخایر انرژی فراوان، توزیع گسترده، رسوبات کم عمق، چگالی انرژی بالا و احتراق پاک اشاره نمود. از زمان تولید آزمایشی موفقیت‌آمیز ذخایر هیدرات در منطقه شنهو در جنوب چین و در سال ۲۰۱۷، پیشرفت در بهره‌برداری تجاری از منابع هیدرات افزایش یافته است. با این حال، به علت بازده روزانه و راندمان تولید پایین، هنوز چاه‌های حفاری شده در سازند هیدرات‌گازی نمی‌توانند معیارهای لازم برای تولید تجاری گاز متان را از این منابع برآورده کنند [۳-۵].



شکل ۱: سه معیار اصلی تشکیل هیدرات [۱]

بنابراین با توجه به افزایش مستمر تقاضای انرژی در جهان، گاز طبیعی به دلیل مزایای زیست‌محیطی مزیت بالاتری نسبت به سایر سوخت‌های فسیلی دارد. از طرفی همان‌طور که اشاره شد گاز طبیعی مانند متان در هیدرات‌های گازی محبوس شده است. یک ویژگی منحصر به فرد هیدرات‌های گازی، افزایش چشم‌گیر حجم این ترکیبات در تغییر از حالت هیدرات به حالت گاز آزاد می‌باشد، به طوری که در شرایط دما و فشار استاندارد (یعنی دمای صفر درجه سانتی‌گراد و فشار یک بار)، یک مترمکعب از هیدرات‌های گازی به ۱۶۴ مترمکعب گاز متان و ۰/۸ مترمکعب آب تجزیه می‌شوند [۶]. با این حال یکی از چالش‌هایی که در مسیر دسترسی به هیدرات‌های گازی وجود دارد، عدم بلوغ کافی در حفاری چاه در سازند هیدرات‌گازی در آب‌های عمیق است. حفاری در سازند هیدرات‌گازی معمولاً با چالش‌ها و مخاطراتی همراه است که سبب گردیده عملیات حفاری در این سازندها نیازمند تکنولوژی‌های دقیق و به‌روزتری باشد. یکی از چالش‌های موجود در این زمینه، انتخاب سیال حفاری مناسب عملیات حفاری است. یکی از موارد مهم در حین حفاری سازند مستعد تشکیل هیدرات‌گازی، دما است. از این رو، نظارت دقیق و کامل بر دمای مخزن و نیز دمای سیال حفاری در عملیات حفاری حائز اهمیت است. به‌طور معمول دمای مخزن هیدرات‌گازی در حین عملیات

حفاری و سیمان‌کاری چاه افزایش می‌یابد، بنابراین، انتظار می‌رود هیدرات‌گازی تجزیه شود؛ تجزیه هیدرات‌گازی در حین عملیات حفاری می‌تواند پیامدهای ناخواسته‌ای به همراه داشته باشد که نشان‌دهنده اهمیت بالای شرایط پایداری هیدرات‌گازی است. هیدرات‌های گازی به دلیل وجود مقادیر زیادی ذخایر به‌ویژه در رسوبات دریایی به‌عنوان یک منبع انرژی بالقوه در آینده در نظر گرفته می‌شوند. همچنین در مقایسه با فعالیت‌های حفاری و تولید از مخازن نفت و گاز معمولی، تجربه کمتری در زمینه حفاری سازندها و مخازن مستعد تشکیل هیدرات‌گازی وجود دارد [۷-۹]. سیال حفاری عموماً به دلیل اختلاف فشار بین انتهای چاه و سازند، در طول عملیات تزریق به چاه، درون سازند نیز نفوذ می‌کند، تداوم این اتفاق نه تنها سبب مهاجرت سیالات درون سازند به مناطق عقب‌تر و نیز انتقال مواد می‌شود، بلکه می‌تواند باعث تغییرات دما، فشار و شوری آب منفذی نیز شود. تغییر در این پارامترها می‌تواند باعث انحراف منحنی تعادل فازی هیدرات‌شود و در نتیجه باعث ایجاد خطرات مختلف در حین حفاری گردد؛ بنابراین، به‌منظور حفاظت مؤثر از مخزن هیدرات‌گازی و جلوگیری از تفکیک هیدرات‌ها در حین حفاری، تکنیک حفاری مورد نظر باید به‌شدت از نظر امکان‌سنجی و صرفه اقتصادی مورد بررسی قرار گیرد [۱۰]. همچنین، انتخاب سیال حفاری مناسب و تنظیم پنجره دمایی سیال به‌گونه‌ای که در حین حفاری سازند هیدرات، احتمال تجزیه هیدرات‌های موجود در سازند به حداقل برسد و یا این که در شرایط مناسب به دلیل شرایط دمایی از تشکیل هیدرات‌ها در سیال حفاری جلوگیری گردد، ضروری است. در ادامه این مطالعه روابط و تئوری‌های مختلفی که برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌گازی تاکنون ارائه شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرند. روابطی که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود، عموماً با توجه به فشار تشکیل هیدرات و وزن مخصوص ترکیب‌گازی مستعد تشکیل هیدرات‌گازی، دمای تشکیل هیدرات‌گازی را برای هر ترکیب‌گازی پیش‌بینی می‌کند. با این حال هر یک از روابط ارائه شده در این زمینه شرایط خاصی را برای استفاده دارد و هر یک در شرایط خاصی پاسخگوی نیازهای متخصصان در این زمینه می‌باشد.

مطالعات آکادمیک هیدرات‌های گازهای مختلف از سال ۱۷۷۸ میلادی آغاز و تا ۱۹۳۴ ادامه یافت. نتایج در این زمینه استفاده تجاری گسترده‌ای پیدا نکرد و کاربردی برای آن‌ها یافته نشد. با این حال نتایج مطالعات دانشگاهی برای شروع مطالعات صنعتی هیدرات‌های گازی مهم بود. مطالعات صنعتی از سال ۱۹۳۴ میلادی آغاز و تا ۱۹۶۵ ادامه یافت. کارهای مهمی در

ایالات متحده در سال ۱۹۳۴ بر اساس مطالعات تجربی منتشر شد که نشان داد جامداتی که در خطوط لوله تشکیل می‌شوند هیدرات هستند. این کار انگیزه‌ای برای مطالعات هیدرات‌های گاز در صنعت به منظور جلوگیری از تشکیل هیدرات و حذف آن‌ها در خط لوله و استفاده از خواص هیدرات‌ها در فناوری‌های مختلف ایجاد کرد [۱۱]. به منظور پیش‌بینی شرایط دمایی تشکیل هیدرات‌های گازی نیاز است روش‌های مختلفی که تاکنون معرفی و توسعه داده شده‌اند، بررسی شوند. این روش‌ها شامل روابط تجربی و آزمایشگاهی و همچنین استفاده از نرم‌افزارهای توسعه داده شده در این زمینه است. این روابط تجربی برای شرایط خاص و بر مبنای ویژگی‌های خاص یک منطقه توسعه داده شده‌اند. رابطه هامر اشمیت از اولین روابطی بود که در سال ۱۹۳۴ توسط این محقق برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات در شرایط مختلف ارائه شد. این رابطه دقت بالایی در پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی ندارد و به صورت زیر ارائه شده است [۱۲]:

$$T = 8.9 \times P^{0.285} \quad (1)$$

در رابطه بالا P بیانگر فشار بر حسب psi و T دمای تشکیل هیدرات گازی بر حسب °F می‌باشد.

در ادامه و در سال ۱۹۸۱ ماکوگون نیز رابطه‌ای را برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی ارائه داد. این رابطه مطابق معادله (۲) تعریف می‌شود [۱۳]:

$$T = \sqrt{\frac{\log(P) + 1 - \beta}{0.0497k} + \frac{0.25}{k^2}} - k \quad (2)$$

همان‌طور که در این معادله مشخص است، دو ثابت β و k نیز در این رابطه تأثیرگذار هستند. نکته قابل ذکر در مورد این معادله این است که فشار بر حسب Mpa به عنوان ورودی رابطه داده می‌شود و دما بر حسب °C محاسبه می‌شود. همچنین ثوابت اشاره شده نیز مطابق معادلات (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند:

$$k = -0.006 + 0.011\gamma + 0.011\gamma^2 \quad (3)$$

$$\beta = 2.681 - 3.811\gamma + 1.679\gamma^2 \quad (4)$$

با توجه به روابط بالا، مشخص است برای محاسبه ثوابت β و k مقدار پارامتر γ به عنوان وزن مخصوص ترکیب گاز تأثیرگذار است و برای انجام محاسبات دمای تشکیل هیدرات با استفاده از روابط (۲) تا (۴)، معلوم بودن وزن مخصوص گاز و یا محاسبه آن ضروری است. پرگ^۱ در سال ۱۹۸۶ معادله جدیدی را برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی ارائه کرد؛ در روابط (۵) و (۶) دمای تشکیل هیدرات گازی به صورت تابعی از فشار و وزن مخصوص گاز در دو محدوده مشخص وزن مخصوص تعریف شده است [۱۴]:

$$\text{برای } 0.555 \leq \gamma \leq 0.58$$

$$T = -96.03 + 23.57 \times \ln(P) - 0.64 \times \ln(P)^2 + \frac{\gamma - 0.555}{0.025} \times (80.61 \times P + \frac{1.16 \times 10^4}{P + 599.16} - 96.03 + 23.57 \times \ln(P) - 0.64 \times \ln(P)^2) \quad (5)$$

$$\text{و برای } 0.58 < \gamma \leq 1$$

$$T = \frac{-1.23 \times 10^4 + 80.61P - 2.1 \times 10^4 - \frac{1.22 \times 10^3}{\gamma - 0.535} - \frac{1.71 \times 10^3}{\gamma - 0.509}}{P - 260.42 - \frac{15.18}{\gamma - 0.535}} \quad (6)$$

در این روابط، فشار ورودی بر حسب kPa می‌باشد و دمای خروجی بر مبنای °F محاسبه می‌شود. در سال ۱۹۸۷، کابویاشی^۲ رابطه‌ای با تعداد پارامترهای قابل توجه برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات گازی ارائه کرد که مطابق معادل (۷) بیان می‌شود [۱۵]:

$$T = 1 / [a_1 + a_2 \times \ln(\gamma) + a_3 \times \ln(P) + a_4 \times \ln(\gamma)^2 + a_5 \times \ln(\gamma) \times \ln(P) + a_6 \times \ln(P)^2 + a_7 \times \ln(\gamma)^3 + a_8 \times \ln(\gamma)^2 \times \ln(P) + a_9 \times \ln(\gamma) \times \ln(P)^2 + a_{10} \times \ln(P)^3 + a_{11} \times \ln(\gamma)^4 + a_{12} \times \ln(\gamma)^3 \times \ln(P) + a_{13} \times \ln(\gamma)^2 \times \ln(P)^2 + a_{14} \times \ln(\gamma) \times \ln(P)^3 + a_{15} \times \ln(P)^4] \quad (7)$$

1. Berge
2. Kaboyashi





مقادیر ثوابت a_1 تا a_{15} در (جدول ۱) نشان داده شده است. توسط کابویاشی، دقت لازم را ندارد و در مواردی دمای محاسبه شده در حالت فشار و وزن مخصوص نرمال به صورت منفی به دست می‌آید؛ بنابراین از این رابطه در محاسبات پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی استفاده نمی‌شود [۱۵].

جدول ۱: ثوابت رابطه کابویاشی و همکاران (۱۹۸۷) [۱۵]

تعداد نوروں	تابع فعال‌ساز	تعداد نوروں	لایه‌های شبکه عصبی
$-۲/۳۲۷۹۱۸۱ \times ۱۰^{-۴}$	a_9	$۲/۷۷۰۷۷۱۵ \times ۱۰^{-۳}$	a_1
$-۲/۶۸۴۰۷۵۸ \times ۱۰^{-۵}$	a_{10}	$-۲/۷۸۲۲۳۸ \times ۱۰^{-۳}$	a_2
$۴/۶۶۱۰۵۵ \times ۱۰^{-۳}$	a_{11}	$-۵/۶۴۹۲۸۸ \times ۱۰^{-۴}$	a_3
$۵/۵۵۴۲۱۲ \times ۱۰^{-۴}$	a_{12}	$-۱/۲۹۸۵۹۳ \times ۱۰^{-۳}$	a_4
$-۱/۴۷۲۷۶۵ \times ۱۰^{-۵}$	a_{13}	$۱/۴۰۷۱۱۹ \times ۱۰^{-۳}$	a_5
$۱/۳۹۳۸۰۸ \times ۱۰^{-۵}$	a_{14}	$۱/۷۸۵۷۴۴ \times ۱۰^{-۴}$	a_6
$۱/۴۸۸۵۰۱۰ \times ۱۰^{-۵}$	a_{15}	$۱/۱۳۰۲۸۴ \times ۱۰^{-۳}$	a_7
		$۵/۹۷۲۸۲۳۵ \times ۱۰^{-۴}$	a_8

موتی^۱ در سال ۱۹۹۱ رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی به صورت تابعی از فشار و وزن مخصوص گاز مطابق معادله (۸) ارائه داد [۱۶]:

$$T = -283.24469 + 78.99667 \times \log(P) - 5.352544 \times (\log P)^2 \quad (8)$$

$$+ 349.473877 \times \gamma - 150.854675 \times \gamma^2 - 27.604065 \times \log P \times \gamma$$

در این رابطه فشار برحسب kPa و دما برحسب °C است.

در سال ۲۰۰۵ تولر و مخاطب^۲ رابطه موتی را تصحیح نموده و رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات گازی به صورت تابعی از فشار و وزن مخصوص گاز ارائه کردند [۱۷]:

$$T = 13.47 \times \ln(P) + 34.27 \times \ln(\gamma) - 1.675 \times \ln(P) \times \ln(\gamma) - 20.35 \quad (9)$$

در این رابطه فشار برحسب psi و دما برحسب °F است.

در ادامه نیز از آخرین روابطی که برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی ارائه گردید، می‌توان به رابطه قییم و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۴ اشاره نمود. در این رابطه با تعریف ثوابت مشخص، دقت محاسبه دمای تشکیل هیدرات گازی افزایش یافته است. این معادله مطابق رابطه (۱۰) به صورت زیر تعریف می‌شود و (جدول ۲) ثوابت این رابطه را نشان می‌دهد [۱۸]:

$$T = a + \frac{b}{\gamma} + c \times \ln(P) + d \times \exp(\gamma^g) + e \times \ln(P)^2 + f \times \ln(P) \times \exp(\gamma^h) \quad (10)$$

در رابطه بالا فشار برحسب psi و دما برحسب °F می‌باشد.

جدول ۲: ثوابت رابطه قییم و همکاران [۱۸]

مقدار	ثابت	مقدار	ثابت
-۱/۱۳۵	e	-۲۶/۱۱۵	a
۰/۴۴۳	f	-۲۳/۷۲۸	b
-۲/۳۰۰	g	۲۳/۹۴۲	c
-۱/۷۰۰	h	-۰/۷۳۸	d

1. Motiee

2. Towler and Mokhtab

3. Ghayyem et al.

در سال ۲۰۱۵ سحرخیزان^۱ رابطه‌ای ساده، اما دقیق برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی ارائه داد. این رابطه مطابق معادله (۱۱) به صورت تابعی از فشار و وزن مخصوص گاز بیان می‌شود [۱۹]:

$$T = 194.681789 \times \gamma^{0.044323} \times (\ln[P])^{0.189829} \quad (11)$$

که در آن فشار برحسب kPa و دما برحسب K می‌باشد. در سال‌های اخیر تحقیقات پیرامون هیدرات‌های گازی به سمت استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی سوق پیدا کرده است. در سال ۲۰۲۱، رانیان^۲ از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تخمین توزیع جهانی مجموع کربن آلی کف دریا به منظور محدود کردن ناحیه پایداری هیدرات‌های گازی و تولید متان استفاده نمود. کار وی سبب بهبود پیش‌بینی‌ها از مقدار کربن و تولید متان از مخازن هیدرات‌های گازی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین شد. نتایج کار رانیان باعث پیش‌بینی کاملی از توزیع جهانی کربن آلی کف دریا، متان و هیدرات‌های گازی شد [۲۰].

در سال ۲۰۲۱، عمار^۳ در تحقیقات خود رابطه‌ای را برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی برای انواع مختلف گاز طبیعی شامل گازهای ترش، اسیدی و شیرین ارائه نمود. این رابطه بر اساس یکی از تکنیک‌های یادگیری ماشین با عنوان GEP^۴ به دست آمد. وی برای انجام این تحقیق از تعداد ۲۷۹ داده تجربی و آزمایشگاهی استفاده کرد. نتایج این مطالعه انسجام مناسب برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌ها را نشان داد. مقدار میانگین خطای نسبی رابطه ارائه شده توسط عمار ۰/۱۳۹۷ درصد بود که دقت بالایی را در پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های نشان می‌دهد [۲۱].

در سال ۲۰۲۲، الهشودی^۵ و همکاران بر پایه شبکه‌های عصبی مصنوعی یک مدل جامع همراه با معادله ریاضی متناظر آن برای تسهیل پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های

گازی ارائه کردند. همچنین آن‌ها، یک کد MATLAB و برنامه کامپیوتری مستقل برای ارائه درجه بالایی از سازگاری با بسته‌های نرم‌افزاری شبیه‌سازی و طراحی ایجاد نمودند. مدل شبکه عصبی مصنوعی آن‌ها بر اساس ۱۴۶۹ مجموعه داده فشار تشکیل هیدرات‌های گازی، دما و وزن مخصوص گاز ساخته شده است. نتایج کار آن‌ها میانگین خطای نسبی ۰/۰۰۵- درصد، میانگین خطای مطلق ۰/۱۱۴۵ و مجذور میانگین مربعات خطای ۰/۰۷۳ درصد را برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی نشان می‌دهد [۲۲].

در سال ۲۰۲۲ ژیمنگ^۶ و هایلونگ^۷ از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی شرایط تشکیل هیدرات‌های گازی طبیعی برای غلبه بر هزینه محاسباتی بالا و دقت پایین استفاده نمودند. آن‌ها در مدل خود از الگوریتم‌های جنگل تصادفی^۸ (RF)، بیز ساده^۹ (NB) و ماشین بردار پشتیبان^{۱۰} (SVR) برای تعیین شرایط تشکیل هیدرات‌های گازی استفاده نمودند. همچنین به‌عنوان یک مدل ترمودینامیکی نماینده، از مدل C-G^{۱۱} برای تجزیه و تحلیل کارایی محاسباتی و دقت مدل‌های یادگیری ماشین استفاده شد. مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل C-G و مدل RF بهتر از مدل‌های NB و SVR در سرعت و دقت محاسبات عمل می‌کند. با توجه به داده‌های تجربی، میانگین AADP محاسبه شده توسط مدل C-G ۷/۶۲ برابر مدل RF به دست آمد. آن‌ها نشان دادند در مقایسه با دو مدل دیگر یادگیری ماشین، انتظار می‌رود مدل RF با دقت بالاتری در پیش‌بینی شرایط تشکیل هیدرات‌های گازی طبیعی در شرایط میدانی استفاده شود [۲۳].

در سال ۲۰۲۳، دوآن و همکاران^{۱۲} مدلی را ارائه کردند که می‌تواند توزیع فشار و دمای چاه را پیش‌بینی کند و مکان‌های تشکیل هیدرات‌ها را تخمین بزند. آن‌ها توزیع دما و فشار در داخل چاه، منحنی تشکیل هیدرات‌ها و نیز مناطق

1. Saharkhizan
2. Runyan
3. Amar
4. Gene Expression Programming
5. El-hoshoudy
6. Zimeng
7. Hailong
8. Random Forest
9. Naïve Bayes
10. Support Vector Machine
11. Chen-Guo
12. Duan et al.



تشکیل هیدرات را پیش‌بینی نمودند و عوامل مؤثر بر توزیع فشار و دما را در چاهی که در سازند حاوی هیدرات‌های حفاری و تکمیل شده است بررسی نمودند. نتایج کار آن‌ها نشان داد با افزایش تولید گاز از چاه، دمای سیال تولیدی افزایش می‌یابد، از طرفی فشار سیال سر چاه نیز در ابتدا افزایش می‌یابد؛ اما پس از مدتی کاهش می‌یابد. به‌طور مشابه با افزایش تولید آب از چاه نیز، دمای سیال چاه افزایش

می‌یابد در حالی که فشار کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها دریافتند تشکیل هیدرات‌های سیال به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر وزن مخصوص گاز طبیعی است؛ به‌طوری‌که افزایش وزن مخصوص گاز، منجر به تشکیل آسان‌تر هیدرات‌های سیال می‌شود [۲۴]. (جدول ۳) به‌طور خلاصه تحقیقات پیشین در زمینه هیدرات‌های سیال و نقاط ضعف و قوت هر یک از مطالعات را نشان می‌دهد.

جدول ۳: مروری بر تحقیقات پیشین در زمینه هیدرات‌های سیال

سال	نویسنده	نتایج تحقیق
۱۹۳۴	هامر اشمیت	ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال با دقت پایین
۱۹۸۱	ماکوگون	ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال به‌منظور جلوگیری از تشکیل هیدرات در لایه‌های سنگ متخلخل
۱۹۸۴	برگ	ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال که بر مبنای وزن مخصوص گاز به دو بخش تقسیم می‌شود تا رابطه با دقت بالاتری استخراج شود. همچنین در این رابطه در صورت محاسبه فشار بر حسب psi نتیجه‌ای ناپایدار تولید می‌کند.
۱۹۸۷	کابویاشی	ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال با ۱۵ تعریف ثابت که هر ثابت با یک روش رگرسیون به‌دست‌آمده است. همچنین این رابطه نتیجه‌ای در محدوده دمایی $34^{\circ}F - 60^{\circ}F$ ، فشار $65 - 1500 psi$ و وزن مخصوص $0/55$ تا $0/9$ به دست می‌دهد.
۱۹۹۱	موتی	ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال با توجه به فشار تشکیل و وزن مخصوص ترکیب گاز مستعد تشکیل هیدرات‌های سیال
۲۰۰۵	تولر و مخاطب	ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال با توجه به رابطه موتی (۱۹۹۱)
۲۰۱۴	قیم و همکاران	ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال با انجام تصحیحاتی روی رابطه موتی (۱۹۹۱) و رابطه تولر و مخاطب (۲۰۰۵) و با توجه به ثابت‌های تعریف شده
۲۰۱۵	سحرخیزان	ارائه رابطه‌ای ساده شده برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال بر مبنای ۲۲ نقطه داده و وزن مخصوص ترکیبات گاز بین $0/55$ تا ۱

۲. روش کار

به‌منظور پیش‌بینی پنجره دمایی سیال حفاری و جلوگیری از تشکیل هیدرات‌های سیال حفاری لازم است با استفاده از نرم‌افزارهای موردنظر و استخراج داده‌های مناسب، شبیه‌سازی و مدل‌سازی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام شود. بدین منظور ابتدا ۱۴ نمونه ترکیب‌های سیال حفاری که مستعد تشکیل هیدرات‌های سیال هستند استخراج شدند و برای هر نمونه ترکیب مقدار وزن مخصوص محاسبه گردید. وزن مخصوص هر ترکیب‌های سیال مطابق رابطه (۱۲) در زیر محاسبه گردید.

$$\gamma_g = \frac{MW}{28.97} = \frac{\sum y_i MW_i}{28.97} \quad (12)$$

بنابراین با توجه به مطالب فوق، این مطالعه قصد دارد پنجره دمایی سیال حفاری هنگام حفاری سازند هیدرات‌های سیال را با استفاده از دو الگوریتم یادگیری ماشین پیش‌بینی کند تا بتوان با مدیریت صحیح دمای سیال حفاری حین حفاری این سازندها، از تشکیل هیدرات‌های سیال حفاری و یا تجزیه هیدرات‌های سیال موجود در لایه‌های زیرزمینی به دلیل افزایش دمای ناشی از عملیات حفاری جلوگیری نمود. پس از استخراج داده‌های مورد نیاز دما بر حسب فشار تشکیل هیدرات، با توجه به دقیق‌ترین رابطه برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های سیال، با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، پیش‌بینی محدوده دمایی مناسب برای سیال حفاری حین حفاری سازند هیدرات‌های سیال انجام می‌شود.

در رابطه بالا γ_g بیانگر وزن مخصوص گاز، MW_i بیانگر وزن مولکولی هر جزء گازی و نشاندهنده وزن مخصوص هر جزء گازی می‌باشد. همچنین، عدد ۲۸/۹۷ جرم مولکولی هوا (به‌طور معمول شامل ۷۹ درصد نیتروژن و ۲۱ درصد اکسیژن) را نشان می‌دهد [۲۵].

سپس ترکیب و اجزاء تشکیل‌دهنده هر نمونه گازی برای شبیه‌سازی وارد نرم‌افزار PVTsim nova 1 شد. شرایط استاندارد برای شبیه‌سازی در این نرم‌افزار، دمای ۵۹ °F فانه‌پایت و فشار ۱۴/۶۹ psi در نظر گرفته شد. نتیجه خروجی شبیه‌سازی در نرم‌افزار نمودارهای تعادل هیدرات بود. سپس داده‌های دمای تشکیل هیدرات مورد نیاز شبیه‌سازی شده هر نمونه در فشار مشخص برای هر نمونه ترکیب گازی در برنامه GetData Digitizer استخراج شدند و در مجموع تعداد ۱۵۸۵ داده فشار-دما از شبیه‌سازی در نرم‌افزار PVTsim به دست آمد. در ادامه با کدنویسی برنامه‌ای در نرم‌افزار MATLAB بر مبنای داده‌های به‌دست‌آمده، دقیق‌ترین رابطه برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات گازی تعیین شد. از بین روابط معرفی شده، برای ۶ نمونه ترکیب گازی با مقادیر وزن مخصوص متفاوت از الگوریتم‌های یادگیری

ماشین برای پیش‌بینی پنجره دمایی سیال حفاری استفاده شد. قابل ذکر است یکی از فرضیات انجام این تحقیق در نظر گرفتن سیال حفاری پایه آبی حاوی ۹۰/۶۷ درصد مولی آب به‌عنوان پایه تشکیل‌دهنده سیال حفاری و نیز ۹/۳۳ درصد مولی متانول به‌عنوان بازدارنده تشکیل هیدرات می‌باشد. با در نظر گرفتن فرضیات فوق، برای نمونه‌های ترکیب گازی (جدول ۴) اطلاعات هر نمونه ترکیب گازی را نشان می‌دهد) با مقادیر وزن مخصوص ۰/۵۸۱، ۰/۶۱۸۱، ۰/۶۵۳۲، ۰/۶۷۷۹، ۰/۷۴۵ و ۰/۷۶۲۳ برنامه‌نویسی برای پیش‌بینی شرایط تشکیل هیدرات گازی در محیط پایتون با الگوریتم رگرسیون چندجمله‌ای به‌عنوان یکی از زیرمجموعه‌های یادگیری ماشین و نیز پرسپترون چندلایه (MLP) به‌عنوان یکی از زیرمجموعه‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی در محیط MATLAB انجام شد. همچنین با استفاده از نرم‌افزار CSMHyd مقدار فشار تشکیل هیدرات گازی برای هر نمونه ترکیب گازی تعیین شد و به‌وسیله فشار تعیین‌شده، مقدار دمای موردنیاز جهت عدم تشکیل هیدرات گازی توسط پیش‌بینی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین مشخص شد که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. [۲۶-۳۲].

جدول ۴: ترکیب گازی مستعد تشکیل هیدرات گازی برای شبیه‌سازی و داده‌یابی [۲۸]

نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵	نمونه ۶	نام ترکیب
درصد وزنی هر جزء گازی						
۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۵۶	۰/۰۱۰۹	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۸۷	N_2
۰/۰۰۰۱	۰/۰۳۹۲	۰/۰۱۷۳	۰/۰۶۱۱	۰/۰۵۸۴	۰/۰۳۷۵	CO_2
۰/۹۶۸۱	۰/۹۲۰۸	۰/۸۵۱۹	۰/۷۷۲۵	۰/۷۸۰۶	۰/۸۷۷۶	C_1
۰/۰۱۷۵	۰/۰۲۵۲	۰/۰۶۷۶	۰/۰۸۷۷	۰/۰۸۹۶	۰/۰۴۸۶	C_2
۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۵۱	۰/۰۲۷۳	۰/۰۳۳۴	۰/۰۳۳۳	۰/۰۱۵۱	C_3
۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۷۱	۰/۰۰۳۱	iC_4
۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۲	۰/۰۱	۰/۰۱۳۲	۰/۰۱۲۱	۰/۰۰۴۱	nC_4
۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۱۹	iC_5
۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱۲	nC_5
۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۲۱	C_{6+}
۰/۰۰۰۴	.	.	.	.	.	C_7
۰/۰۰۰۲	.	.	.	.	.	C_8
۰/۰۰۰۰۱	.	.	.	.	.	C_9
۰/۵۸۱	۰/۶۱۸۱	۰/۶۵۳۲	۰/۶۷۷۹	۰/۷۶۲۳	۰/۷۴۵	وزن مخصوص

1. Multilayer Perceptron



۳. نتایج و بحث

همان‌طور که از (شکل ۲) مشخص است، رابطه برگ که در سال ۱۹۸۶ جهت پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات گازی ارائه شده است، بالاترین مقدار خطا را بین روابط بالا دارد، بعد از آن به ترتیب روابط موتی، هامر اشمیت، تولر و قییم مقدار میانگین خطای نسبی کمتری دارند و در نهایت رابطه سحرخیزان و همکاران که در سال ۲۰۱۵ ارائه گردید کمترین مقدار میانگین خطای نسبی را بین روابط به کار رفته دارد و رابطه‌ای قابل اطمینان برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات گازی می‌باشد؛ بنابراین از رابطه سحرخیزان و همکاران در الگوریتم‌های یادگیری ماشین در این مطالعه استفاده شد. در ادامه نتایج به دست آمده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کدنویسی الگوریتم رگرسیون از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، برای شش ترکیب گازی با مقادیر وزن مخصوص متفاوت که به صورت تصادفی انتخاب شدند، در محیط برنامه‌نویسی ژوپیترا پایتون انجام شد. سپس، منحنی فشار-دما برای هر ترکیب گازی به صورت جداگانه رسم گردید. داده‌های فشار-دما رسم شده برای هر ترکیب گازی با استفاده از یک م چند جمله‌ای درجه دو برازش شد. به این ترتیب، با استفاده از الگوریتم رگرسیون چندجمله‌ای که زیرشاخه‌ی یادگیری تحت نظارت از یادگیری ماشین به روش کلاسیک است، شرایط تشکیل هیدرات شش ترکیب گازی مطابق رابطه درجه دوم (۱۵) به دست آمد. همچنین ثوابت این رابطه در (جدول ۵) برای شش ترکیب گازی مستعد تشکیل هیدرات گازی ارائه شده است.

$$T = aP^2 + bP + c \quad (15)$$

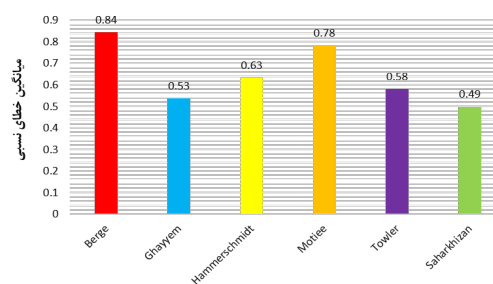
در رابطه بالا فشار ورودی برحسب kPa و دمای خروجی برحسب K است. همچنین (شکل ۳ الف تا ج) نمودار رگرسیون درجه دوم رسم شده فشار-دما را برای ترکیبات گازی اشاره شده در (جدول ۵) نشان می‌دهد.

در بخش مقدمه روابط پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات گازی معرفی شدند. در این بخش ابتدا دقیق‌ترین رابطه برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات گازی از بین روابط ارائه شده مشخص می‌شود. رابطه موردنظر با توجه به داده‌های استخراج شده که ترکیب گاز مخازن مستعد تشکیل هیدرات گازی را نشان می‌دهد و برای شرایط سیال حفاری آب همراه با دارنده متانول، به دست می‌آید تا بتوان با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین پنجره دمایی سیال حفاری را برای حفاری سازند هیدرات مشخص نمود. کد نویسی برای دقت سنجی روابط موردنظر در نرم‌افزار MATLAB انجام شد. با توجه به پارامترهای ورودی فشار و وزن مخصوص گاز، مقدار دمای تشکیل هیدرات گاز برای ۱۵۸۵ داده محاسبه شد. سپس، با توجه به روابط خطای نسبی (RE) و میانگین خطای نسبی (MRE) بین مقادیر دمای پیش‌بینی شده و دمای شرایط شبیه‌سازی که از داده‌ها به دست آمده‌اند، مقدار خطا برای هر رابطه به دست آمد. مقادیر میانگین خطای نسبی به دست آمده برای هر رابطه در (شکل ۲) نشان داده شده است. همچنین رابطه‌های (۱۳) و (۱۴)، معادلات خطای نسبی و میانگین خطای نسبی را نشان می‌دهد [۱۸].

$$RE = \left| \frac{x_{exp} - x_{pre}}{x_{exp}} \right| \quad (13)$$

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{exp_i} - x_{pre_i}}{x_{exp_i}} \right|}{n} \quad (14)$$

در روابط بالا، x_{exp} داده‌های آزمایشگاهی و x_{pre} داده‌های پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. همچنین n بیانگر تعداد کل داده‌ها است.

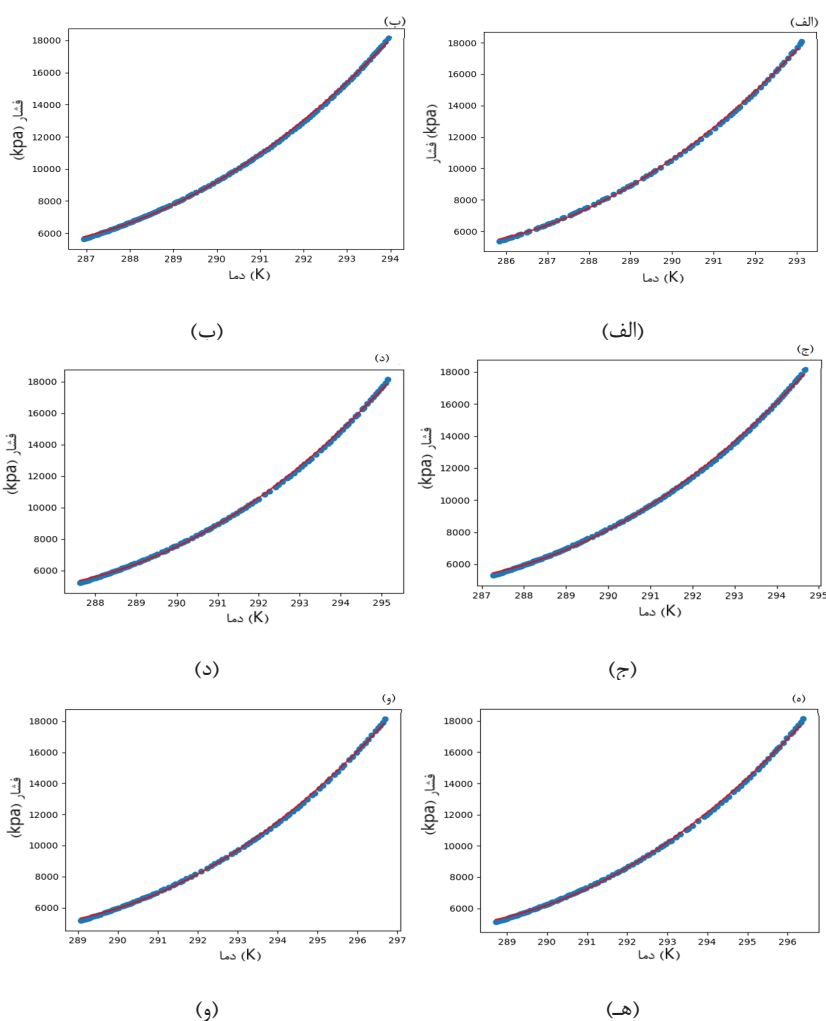


شکل ۲: میانگین خطای نسبی محاسبه شده برای روابط پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات گازی

1. Relative Error
2. Mean Relative Error

جدول ۵: ثابت‌های مورد نظر روابط درجه دوم استخراج شده با رگرسیون چندجمله‌ای

شماره ترکیب	وزن مخصوص ترکیب	a	b	c
۱	۰/۵۸۱	-۲/۹۰۶۹۵	۱/۲۲۵۸۸	۲۸۰/۲۹۱
۲	۰/۶۱۸۱	-۲/۸۰۴۱۷	۱/۲۰۰۲۳	۲۸۱/۲۴۱
۳	۰/۶۵۳۲	-۲/۹۶۸۷۶	۱/۲۴۲۶۳	۲۸۱/۷۰۰
۴	۰/۶۷۷۹	-۳/۰۲۶۱۲	۱/۲۵۸۹۶	۲۸۲/۰۷۹
۵	۰/۷۴۵	-۳/۰۹۰۹۱	۱/۲۷۶۵۷	۲۸۳/۱۹۵
۶	۰/۷۶۲۳	-۳/۰۳۴۰۸	۱/۲۶۴۵۹	۲۸۳/۵۴۶



شکل ۳: نمودار رگرسیون درجه دو به دست آمده در پایتون برای شرایط تشکیل هیدرات در ترکیبات گازی با مقادیر وزن مخصوص (الف) ۰/۵۸۱۰، (ب) ۰/۶۱۸۱، (ج) ۰/۶۵۳۲، (د) ۰/۶۷۷۹، (ه) ۰/۷۴۵ و (و) ۰/۷۶۲۳

با استفاده از نمودار فشار-دمای رسم شده، مقدار دمای میانگین برای هر ترکیب برحسب درجه کلونین با توجه به فشار پیش‌بینی شده تشکیل هیدرات در نرم‌افزار CSMHyd محاسبه گردید. مقادیر خطای نتایج پیش‌بینی با استفاده از الگوریتم رگرسیون پشتیبانی که شامل مربعات خطا (R^2) می‌باشد، در (جدول ۶) قابل نشان داده شده است. رابطه

(۱۶) در ادامه معادله مربعات خطا را نشان می‌دهد [۳۳]. با محاسبه مقدار میانگین دما در هر منحنی و نیز تأیید دقت مناسب پیش‌بینی‌ها بر مبنای رگرسیون خطی، از نرم‌افزار CSMHyd برای پیش‌بینی شرایط ترمودینامیکی تشکیل هیدرات گازی در شرایط ترکیب سیال حفاری که ترکیب آن در (جدول ۷) قابل مشاهده است (سیال حفاری فرض



CSMHyd می‌توان مقدار دمای تشکیل هیدرات گازی را با توجه به رابطه (۱۵) که برای ترکیبات گازی مختلف در (جدول ۵) تعیین شده‌اند، پیش‌بینی نمود که مقادیر آن در (جدول ۶) قابل مشاهده است و به‌عنوان حداکثر دمای عملیاتی ممکن سیال حفاری (حداکثر دمای تشکیل هیدرات گاز طبیعی) تعریف می‌شود که از تشکیل هیدرات گازی در سیال حفاری پایه آبی در حین عملیات حفاری در سازندهای مستعد تشکیل هیدرات گازی در آب‌های عمیق جلوگیری می‌کند.

شده در شبیه‌سازی)، استفاده شد. در این نرم‌افزار با استفاده از ترکیب گازی مورد نظر و درصد مولی هر جزء و مقدار دمای ورودی (به‌صورت فرضی دمای میانگین موجود در (جدول ۶) برای هر ترکیب گازی)، فشار تشکیل هیدرات گازی در شرایط معرفی شده پیش‌بینی می‌شود. (جدول ۶) مقدار فشار پیش‌بینی شده تشکیل هیدرات گازی در شرایط ترکیب هیدرات گازی در سیال حفاری پایه آبی همراه متانول را برای ترکیبات گازی با وزن مخصوص مشخص نشان می‌دهد. با توجه به فشار پیش‌بینی شده در نرم‌افزار

جدول ۶: نتایج به‌دست آمده از پیش‌بینی شرایط تشکیل هیدرات گازی با رگرسیون چندجمله‌ای در پایتون و نرم‌افزار CSMHyd

وزن مخصوص ترکیب مورد نظر	مربعیات خطا (R^2)	دمای میانگین هر ترکیب (K)	فشار تشکیل هیدرات محاسبه شده در نرم‌افزار (CSMHyd kPa)	دمای تشکیل هیدرات پیش‌بینی شده با الگوریتم رگرسیون چندجمله‌ای (K)
۰/۵۸۱۰	۰/۹۷۳۹	۲۸۹/۴۱۵	۹۶۶۵/۹۱۱	۲۸۹/۴
۰/۶۱۸۱	۰/۹۷۴۳	۲۹۰/۲۸۷	۱۲۵۵۶/۷۰۴	۲۹۱/۸
۰/۶۵۳۲	۰/۹۷۳۲	۲۹۰/۷۵۵	۹۳۳۴/۶۰۵	۲۹۰/۹
۰/۶۷۷۹	۰/۹۷۳۰	۲۹۱/۰۷۷	۷۸۹۲/۴۸۴	۲۹۰/۲
۰/۷۴۵۰	۰/۹۷۲۱	۲۹۲/۲۳۹	۹۴۱۶/۹۸۰	۲۹۲/۶
۰/۷۶۲۳	۰/۹۷۲۴	۲۹۲/۵۶۰	۱۰۳۲۲/۹۸۶	۲۹۳/۲

جدول ۷: ترکیب سیال حفاری پایه آبی همراه با متانول به‌عنوان بازدارنده تشکیل هیدرات

جزء	درصد مولی
آب (H_2O)	۹۰/۳۲۷
متانول (MeOH)	۹/۶۷۳

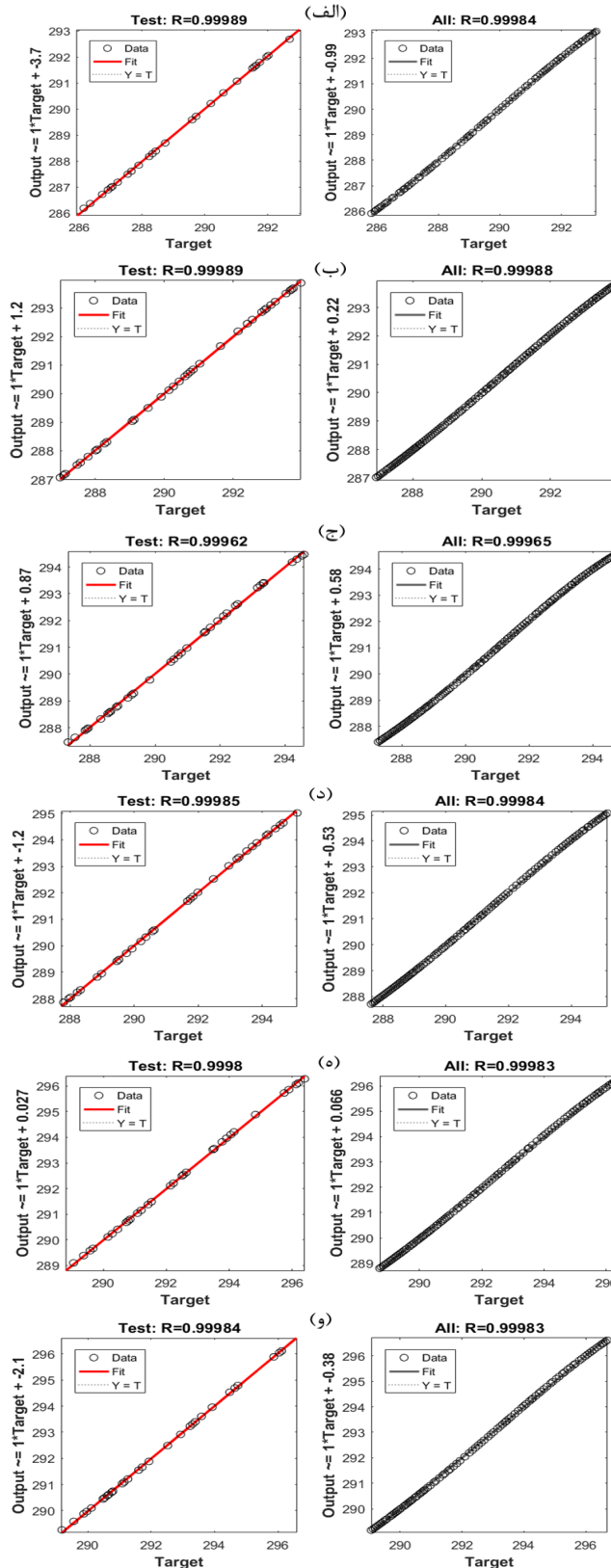
برای شش ترکیب گازی منتخب، داده‌های فشار و دما به‌صورت مجزا برای هر ترکیب تفکیک شدند؛ بنابراین داده‌های فشار هر ترکیب گازی به‌عنوان داده ورودی و داده‌های دمای هر ترکیب به‌عنوان داده هدف انتخاب شد. برای پیش‌بینی با این الگوریتم لازم بود مقدار داده‌های آموزشی، داده‌های اعتبارسنجی و داده‌های تست مشخص شود. با توجه به اهمیت بالاتر داده‌های آموزشی و داده‌های تست سهم بیشتری از داده‌های موجود به این نوع دو داده اختصاص یافت. بدین منظور ۵۵ درصد از داده‌ها را داده‌های آموزشی تشکیل داد، ۳۰ درصد از داده‌ها به‌عنوان داده‌های تست در نظر گرفته شد و باقی‌مانده داده‌ها (۱۵ درصد) نیز به داده‌های اعتبارسنجی مورد اختصاص یافت. پس از اجرای شبکه برای داده‌های هر ترکیب گازی، مقدار تابع هدف برای پیش‌بینی بهتر توسط شبکه عصبی مشخص شد، مقدار خطای پیش‌بینی محاسبه گردید و نمودار رگرسیون هر شبکه به‌صورت (شکل ۴) به دست آمد.

$$R^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (16)$$

در معادله (۱۶)، Y_i مقدار داده اندازه‌گیری شده و \hat{Y}_i مقدار داده واقعی را در محاسبه خطا نشان می‌دهد.

در ادامه این مطالعه، پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات گازی و پنجره دمایی سیال حفاری برای جلوگیری از تشکیل هیدرات گازی متان در سیال حفاری حین حفاری در سازند گازی مستعد تشکیل هیدرات، به‌وسیله الگوریتم MLP به‌عنوان زیرشاخه‌ای از شبکه‌های عصبی مصنوعی و یادگیری ماشین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه که یکی از الگوریتم‌های مهم طبقه‌بندی در شبکه‌های عصبی مصنوعی است، برای شش ترکیب گازی با وزن مخصوص مشخص، پیش‌بینی‌ها انجام شد و نتایج به دست آمد و مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور انجام پیش‌بینی با پرسپترون چندلایه



شکل ۴: نتایج خروجی از پیش‌بینی تشکیل هیدرات با استفاده از الگوریتم MLP

راهنما: در (شکل‌های الف تا و) محور Target به‌عنوان تابع هدف و محور عمودی Output به‌عنوان خروجی نهایی (پیش‌بینی شده) از شبکه برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات ترکیبات گازی با مقادیر وزن مخصوص (الف) ۰/۵۸۱۰، (ب) ۰/۶۱۸۱، (ج) ۰/۶۵۳۲، (د) ۰/۶۷۷۹، (ه) ۰/۷۴۵۰ و (و) ۰/۷۶۲۳ معرفی می‌شود.



رابطه (۱۷) مقدار تابع نهایی مناسب با دقت بالا را با توجه به نتایج به دست آمده بر اساس داده‌های تست برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گازی در شرایط سیال حفاری پایه آبی نشان می‌دهد.

$$T_f = T_i + d \quad (17)$$

همچنین در رابطه بالا، T_f دمای نهایی و T_i دمای ابتدایی هستند که بر حسب درجه کلون محاسبه می‌شوند. همچنین ثابت d این معادله در (جدول ۸) برای شش ترکیب گازی اشاره شده ارائه گردیده است.

جدول ۸: مقدار محاسبه شده ثابت d رابطه (۱۳) با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه

شماره ترکیب	وزن مخصوص ترکیب گازی	مقدار ثابت d
۱	۰/۵۸۱	۳/۷
۲	۰/۶۱۸۱	۱/۲
۳	۰/۶۵۳۲	۰/۸۷
۴	۰/۶۷۷۹	-۱/۲
۵	۰/۷۴۵	۰/۰۲۷
۶	۰/۷۶۲۳	-۲/۱

در نهایت نیز خطای حاصل از پیش‌بینی با MLP برای ترکیبات گازی فوق، همراه دمای پیش‌بینی شده نهایی برای جلوگیری از تشکیل هیدرات‌های گازی در سیال حفاری در (جدول ۹) گردآوری شده است. همان‌طور که در جدول نیز مشاهده می‌شود، مقادیر پیش‌بینی شده دمای تشکیل هیدرات به وسیله الگوریتم پرسپترون چندلایه دقت بالایی

دارد و مقادیر خطای پایینی برای هر ترکیب گازی در شرایط تعریف شده به دست آمده است. به عنوان مثال با توجه به مقدار ثابت d می‌توان پیش‌بینی نمود که ترکیب گازی با وزن مخصوص ۰/۷۴۵ کمترین مقدار تصحیح دمای نهایی تشکیل هیدرات را نسبت به دمای اولیه پیش‌بینی شده را نیاز دارد. همچنین با توجه به مقدار میانگین مربعات خطا می‌توان گفت ترکیب گازی با وزن مخصوص ۰/۶۵۳۲ می‌تواند بهترین نتیجه را بین سایر ترکیبات داشته باشد. در ادامه مشابه پیش‌بینی‌ها با رگرسیون چندجمله‌ای، با انتخاب دمای میانگین به عنوان دمای ورودی مقدار دمای پیش‌بینی شده به وسیله MLP محاسبه شد که نتایج آن در (جدول ۹) آورده شده است. به عبارت دیگر دمای میانگین به عنوان دمای اولیه برای هر ترکیب گازی در معادله (۱۷) در نظر گرفته شد و دمای تشکیل هیدرات با استفاده از الگوریتم MLP محاسبه شد. دمای نهایی محاسبه شده در (جدول ۹)، مقدار حداقل دمایی را نشان می‌دهد که در آن دما در سیال حفاری پایه آبی همراه با دارنده متانول هیدرات‌های گازی تشکیل نمی‌شود؛ بنابراین، برای یک ترکیب گازی با وزن مخصوص مشخص که در سازند مستعد تشکیل هیدرات‌های گازی طبیعی وجود دارد، با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، می‌توان مقدار پنجره دمایی مناسب سیال حفاری را طوری مشخص نمود که از تشکیل هیدرات‌های حین عملیات حفاری جلوگیری گردد و مخاطرات حفاری سازند هیدرات‌ها به حداقل برسد. به این ترتیب، با گذشت از مرحله حفاری موفق سازند هیدرات، می‌توان در راستای تولید و استخراج گاز طبیعی متان از این ترکیبات ارزشمند گام نهاد.

جدول ۹: نتایج پیش‌بینی و خطای پیش‌بینی با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه

وزن مخصوص ترکیب گازی	R^2	مقدار میانگین مربعات خطا	مقدار دمای میانگین تشکیل هیدرات (K)	مقدار دمای نهایی پیش‌بینی شده (K)
۰/۵۸۱	۰/۹۹۹۸۴	۰/۰۰۱۱۸	۲۸۹/۴۱۵	۲۹۳/۱۱۵
۰/۶۱۸۱	۰/۹۹۹۸۳	۰/۰۰۱۶۸۴	۲۹۰/۲۸۷	۲۹۱/۴۸۷۶۳
۰/۶۵۳۲	۰/۹۹۹۸۸	۰/۰۰۳۷۷۶	۲۹۰/۷۵۵	۲۹۱/۶۲۵۱۴
۰/۶۷۷۹	۰/۹۹۹۶۵	۰/۰۰۱۸۰۵	۲۹۱/۰۷۷	۲۸۹/۸۷۷۷۱
۰/۷۴۵	۰/۹۹۹۸۴	۰/۰۰۲۱۳۸	۲۹۲/۲۳۹	۲۹۲/۲۶۶۱۱
۰/۷۶۲۳	۰/۹۹۹۸۳	۰/۰۰۱۵۸۸	۲۹۲/۵۶۰	۲۹۰/۴۶۰۰۱

۴. نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعه انجام شده با هدف پیش‌بینی پنجره دمایی مناسب سیال حفاری برای سازندهای هیدرات

با توجه به نتایج به دست آمده برای ۱۵۸۵ داده و با کدنویسی در محیط MATLAB، رابطه سحرخیزان (۲۰۱۵) با مقدار میانگین خطای نسبی ۰/۴۹۸ بالاترین دقت و کمترین خطا را در بین روابط پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌های گاز نشان داد. همچنین رابطه برگ (۱۹۸۶) با مقدار میانگین خطای نسبی ۰/۸۴۴ کمترین دقت را برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌ها دارا بود؛ بنابراین، برای اجرای الگوریتم‌های یادگیری ماشین از رابطه سحرخیزان (۲۰۱۵) استفاده شد.

با اجرای رگرسیون چندجمله‌ای در محیط پایتون برای شش ترکیب‌های اشاره شده یک چندجمله‌ای درجه دو با پارامترهایی که بهترین تطابق را با داده‌های مورد نظر داشت، استخراج شد. نتایج به دست آمده نشان داد ترکیب‌های گاز با وزن مخصوص ۰/۶۱۸۱ با مقدار R^2 برابر ۰/۹۷۴۳ کمترین مقدار خطا را بین سایر ترکیب‌های گاز برای پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌ها دارد. سپس با استفاده از نرم‌افزار CSMHyd مقدار فشار تشکیل هیدرات برای ترکیب‌های گاز در مقادیر دمایی مشخص که به عنوان میانگین دما در محدوده دمایی تشکیل هیدرات‌ها برای هر ترکیب در نظر گرفته شد، به دست آمد و برای محاسبه دمای تشکیل هیدرات بر اساس معادله به دست آمده از رگرسیون به کار رفت. نتایج به دست آمده نشان داد دمای پیش‌بینی تشکیل هیدرات برای ترکیب‌های گاز منتخب با وزن مخصوص ۰/۶۱۸۱، حدود ۱/۶ درجه کلوین از دمای میانگین اولیه بالاتر است که به عنوان حداکثر دمایی تعریف می‌شود که در آن دما هیدرات‌های گاز در سیال حفاری پایه آبی همراه با دارنده متانول تشکیل می‌شود. به این ترتیب، حداقل دمای مورد نیاز سیال حفاری که در آن دما هیدرات‌های گاز طبیعی در حین عملیات حفاری به وسیله سیال حفاری پایه آبی تشکیل نمی‌شود، برای ترکیب‌های گاز مورد نظر به دست آمد.

همچنین با انجام پرسپترون چندلایه در شبکه‌های عصبی مصنوعی در محیط MATLAB برای شش ترکیب‌های اشاره شده محاسبات مربوط انجام شد. بر اساس نتایج به دست آمده از MLP، بیشترین مقدار مجذور مربعات خطا در پیش‌بینی دمای تشکیل هیدرات‌ها برای ترکیب‌های گاز با وزن مخصوص ۰/۶۵۳۲ محاسبه شد. سپس برای ترکیب‌های گاز منتخب، مشابه قسمت رگرسیون، رابطه‌ای برای پیش‌بینی دما به دست آمد. رابطه استخراج شده به دمای اولیه که به طور فرضی دمای میانگین در منحنی فشار-دمای هر ترکیب‌های انتخاب شد، وابسته می‌باشد. به این ترتیب،

برای ترکیب‌های گاز مورد نظر، مقادیر دمای تشکیل هیدرات در سیال حفاری تعیین گردید. بر همین اساس، برای ترکیب‌های گاز با وزن مخصوص ۰/۶۵۳۲ مقدار دمای نهایی پیش‌بینی تشکیل هیدرات‌ها در سیال حفاری مقدار ۲۹۱/۶۲۵ کلوین به دست آمد که از مقدار دمای میانگین حدود ۰/۸۷ بیشتر بود؛ بنابراین، برای هر ترکیب‌های گاز مقدار حداقل دمای مورد نیاز سیال حفاری که تا آن دما به دلیل شرایط دمایی هیدرات‌های تشکیل نمی‌شود، به دست آمد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت شرکت نفت خزر به انجام رسیده است. نویسندگان از مجموعه شرکت نفت خزر، آقای مهندس حکمی مسئول بخش حفاری و سرکار خانم جتیی مسئول بخش پژوهش و فناوری، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع:

- [1]. Carroll, J. (2020). Introduction. In *Natural Gas Hydrates* (pp. 1–26). Elsevier, pp: 12-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821771-9.00001-X>.
- [2]. Englezos, P. (1993). Clathrate Hydrates. In *Ind. Eng. Chem. Res* (Vol. 32).
- [3]. Yang, M., Zhao, J., Zheng, J. nan, & Song, Y. (2019). Hydrate reformation characteristics in natural gas hydrate dissociation process: A review. In *Applied Energy* (Vol. 256). Elsevier Ltd. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113878>.
- [4]. Wang, X., Pan, L., Lau, H. C., Zhang, M., Li, L., & Zhou, Q. (2018). Reservoir volume of gas hydrate stability zones in permafrost regions of China. *Applied Energy*, 225, 486–500. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.125>.
- [۵]. شرکت نفت خزر. (۱۳۹۸). هیدرات‌های گاز در آب‌های عمیق (چاپ اول). صفحات ۱–۳۰.
- [6]. Li, J. fa, Ye, J. liang, Qin, X. wen, Qiu, H. jun, Wu, N. you, Lu, H. long, Xie, W. wei, Lu, J. An, Peng, F., Xu, Z. qiang, Lu, C., Kuang, Z. gui, Wei, J. gong, Liang, Q. yong, Lu, H.



- Gas. Penn Well Publishing Company, Tulsa, p. 237.
- [14]. Berge, B.K. (Norsk Hydro). Hydrate prediction on a microcomputer. SPE 15306, Presented at the Society of Petroleum Engineers Symposium on Petroleum Industry Applications, Colorado, USA, Silvercreek, 1986, 18e20 June.
- [15]. Kobayashi, R., Song, K., Sloan, E., 1987. Phase behavior of water/hydrocarbon systems. In: Brad-ley, H.B., Gipson Fred, W. (Eds.), *Petroleum Engineering Handbook*. Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX, USA.
- [16]. Motiee, M., 1991. Estimate possibility of hydrate. *Hydrocarb. Process.* 70 (7), 98-99.
- [17]. Towler, B.F., Mokhatab, S., 2005. Quickly estimate hydrate formation conditions innatural gases. *Hydrocarb. Process.* 84 (4), 61e62.
- [18]. Ghayyem, M. ali, Izadmehr, M., & Tavakoli, R. (2014). Using an eclectic approach, developing a simple and accurate correlation for initial estimation of hydrate formation temperature of sweet nat-ural gases. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 21, 184–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.08.003>.
- [19]. Safamirzaei, M. (n.d.). Predict gas hydrate formation temperature with a simple correlation. www.GulfPub.com.
- [20]. Runyan Lee, T. (n.d.). A machine learning approach to predicting seafloor properties and their ap-plication in estimating a global methane hydrate inventory. 2021 <https://scholarsjunction.msstate.edu/td>
- [21]. Menad Nait Amar, Prediction of hydrate formation temperature using gene expression program-ming, *Journal of* feng, & Kou, B. bei. (2018). the first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea. *China Geolo-gy*, 1(1), 5–16. DOI: <https://doi.org/10.31035/cg2018003>.
- [7]. Merey, Ş. (2016). Drilling of gas hydrate reservoirs. In *Journal of Natural Gas Science and Engi-neering* (Vol. 35, Issue Part A, pp. 1167–1179). Elsevier B.V. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.09.058>.
- [8]. Yakushev, V.S., Collett, T.S., 1992. Gas hydrates in Artic regions: risk to drilling and production. In: *Proceedings of the Second (1992) International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, USA, 14e19 June 1992.
- [9]. Collett, T., Bahk, J.J., Baker, R., Boswell, R., Divins, D., Frye, M., Goldberg, D., Husebø, J., Koh, C., Malone, M., Morell, M., Myers, G., Shipp, C., Torres, M., 2015. Methane hydrates in nature-current knowledge and challenges. *J. Chem. Eng. Data* 60 (2), 319e329.
- [10]. Wei, N., Pei, J., Zhao, J., Zhang, L., Zhou, S., Luo, P., Li, H., & Wu, J. (2022). A state-of-the-art review and prospect of gas hydrate reservoir drilling techniques. In *Frontiers in Earth Science* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.997337>.
- [11]. Kozhevnykov, A., Khomenko, V., Liu, B., Kamyshatskyi, O., & Pashchenko, O. (2020). The histo-ry of gas hydrates studies: From laboratory curiosity to a new fuel alternative. *Key Engineering Ma-terials*, 844, 49–64. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.844.49>.
- [12]. Hammerschmidt, E.G., 1934. Formation of gas hydrates in natural gas transmission lines. *Ind. Eng. Chem.* 26, 851.
- [13]. Makogon, Y., 1981. *Hydrates of Natural*



MS/1742567/spe-131663-ms.pdf/1.

- [29]. Sarker, I. H. (2021). Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions. In SN Computer Science (Vol. 2, Issue 3). Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00592-x>.
- [۳۰]. حاجی آبادی، مرتضی؛ شبکه عصبی چیست: شبکه عصبی مصنوعی چیست، ارائه شده در سایت کنکور کامپیوتر، ۱۴۰۱. <https://ai-center.ir>
- [31]. Mahesh, B. (2018). Machine Learning Algorithms-A Review. International Journal of Science and Research. DOI: <https://doi.org/10.21275/ART20203995>.
- [32]. Sarker, I. H. (2021). Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions. In SN Computer Science (Vol. 2, Issue 3). Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00592-x>.
- [33]. Deepak K., Mayukh Ch., Gurmehak K., Suchitra V., Deep Learning for Medical Applications with Unique Data, chapter3- Deep learning applications for disease diagnosis, pages 31-51, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824145-5.00005-8>.
- Natural Gas Science and Engineering, Volume 89, May 2021, 103879, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103879>.
- [22]. El-hoshoudy A. N., Ahmed A., Gomma S., Abdelhady A., An Artificial Neural Network Model for Predicting the Hydrate Formation Temperature, Arabian Journal for Science and Engineering 47(6), 2021, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06340-w>.
- [23]. Zimeng Yu, Hailong Tian, Application of Machine Learning in Predicting Formation Condition of Multi-Gas Hydrate, Energies 2022, 15(13), 4719; DOI: <https://doi.org/10.3390/en15134719>.
- [24]. Xinyue D., Jiaqiang Z., Jiadong Li, Yu T., Chuanyong Zhu, Liang G., Prediction of Gas Hydrate Formation in the Wellbore, Energies 2023, 16(14), 5579; DOI: <https://doi.org/10.3390/en16145579>.
- [25]. Abdullah Hussein, Essentials of Flow Assurance Solids in Oil and Gas Operations, Chapter 12 - Flow Assurance Solids Prediction and Modeling, pages 503-577, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99118-6.00018-6>.
- [26]. PVTsim Nova. A leading PVT software. Available online: <https://www.calsep.com/pvtsim-nova/> (accessed on 2021).
- [27]. CSMHYD. Publicly Available Software. Available online: <http://hydrates.mines.edu/CHR/Software.html> (accessed on 2 July 2021).
- [28]. Rajnauth, J., Barrufet, M., & Falcone, G. (2010). SPE 131663 Hydrate Formation: Considering the effects of Pressure, Temperature, Composition and Water. <http://onepetro.org/SPEEURO/proceedings-pdf/10EURO/All-10EURO/SPE-131663->



Prediction of Drilling Fluid Temperature Window and Formation of Gas Hydrates During Drilling in Deep Water Using Machine Learning Algorithms

Mohammad Dousti¹, Elnaz Khodapanah^{2*}

1. M.Sc., Faculty of Petroleum and Natural Gas Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
2. Associate Professor, Faculty of Petroleum and Natural Gas Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL RESEARCH

Article History:

Received: 05 June 2024

Revised: 20 July 2024

Accepted: 10 August 2024

Keywords:

Natural gas hydrates
Drilling fluid temperature window
Deepwater drillin
Polynomial regression algorithm
Multilayer perceptron algorithm

ABSTRACT

Drilling in gas hydrate formations in deep water poses significant risks and challenges. This research aims to determine the temperature window for drilling fluid in deep water drilling, after examining the relations of predicting the temperature of gas hydrate formation, using two machine learning algorithms, "polynomial regression in Python and multilayer perceptron in MATLAB". The predictions are used to establish the required temperature range for the drilling fluid. Among the examined methods for predicting gas hydrate formation temperatures, the Saharkhizan relationship, with an average relative error of 0.49, demonstrated the highest accuracy. Furthermore, for six gas compounds with varying specific gravities, the gas compound with a specific gravity of 0.61 yielded an R^2 value of 0.9743 using the polynomial regression algorithm. Similarly, the gas compound with a specific gravity of 0.65 showed the highest accuracy when using the multilayer perceptron algorithm.

DOR: [20.1001.1.25885251.1403.00.00](https://doi.org/10.1001.1.25885251.1403.00.00)

How to cite this article

M. Dousti, E. Khodapanah, Prediction of Drilling Fluid Temperature Window and Formation of Gas Hydrates During Drilling in Deep Water Using Machine Learning Algorithms. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2024; 11(1): 71-86. (https://www.ijge.irangi.org/article_722820.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: khodapanah@sut.ac.ir, (E. Khodapanah).

Available online 01 September 2024

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

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



مروری بر فناوری‌های نوین بیولوژیکی و بیوالکتروشیمیایی تصفیه‌ی فاضلاب‌های پتروشیمی و تولید هم‌زمان بیوانرژی

گاگیک بدلیانس قلی کندی^{۱*}، رها رباطی^۲، فاطمه شکری داریان^۲

۱. استاد، گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: g_badalians@sbu.ac.ir

مقاله‌ی مروری

صفحه ۸۷ - ۹۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

چکیده

با توجه به محدودیت‌های روش‌های متداول تصفیه‌ی فاضلاب‌های صنعت پتروشیمی از جمله مصرف بالای انرژی، تولید لجن زیاد، امکان بسیار محدود بازیافت مواد و هزینه‌های عملیاتی بالا، تلاش برای دستیابی به فناوری‌های تصفیه‌ی نوین کارآمد باهدف حذف آلاینده‌ها و بازیافت آب، انرژی و محصولات با ارزش الزامی است. در این پژوهش، رویکردهای نوین مختلف از جمله به‌کارگیری روش‌های هیبریدی و فرایندهای بیولوژیکی از طریق استفاده از میکروارگانیسم‌ها مورد توجه و ارزیابی قرار گرفت. نظر به اینکه سامانه‌های بیوالکتروشیمیایی به‌عنوان فناوری‌های دارای قابلیت‌های لازم برای تصفیه‌ی مواد پتروشیمیایی مختلف و بازیابی انرژی و محصولات با ارزش مطرح می‌باشند، ضمن ارزیابی ویژه‌ی روش‌های یادشده، نتایج امکان‌سنجی به‌کارگیری آن‌ها برای تصفیه‌ی فاضلاب‌های پتروشیمیایی، از جمله حذف بنزن، تولوئن، هیدروکربن‌های پلی آروماتیک، زایلن، اتیل بنزن، سولفات، نیترات و فنل ارائه شده‌اند. همچنین مزیت‌ها و چالش‌های مهم مرتبط با اجرا و راهبری این سامانه‌ها مشخص گردیده است.

کلیدواژه‌ها: تصفیه‌ی فاضلاب‌های پتروشیمی، سامانه‌های بیولوژیکی و بیوالکتروشیمیایی، حذف آلاینده‌های مقاوم، بازیابی آب، مواد و انرژی

۱. مقدمه

توسعه‌ی فعالیت‌های صنعت پتروشیمی به دلیل افزایش تقاضا برای محصولات آن، با حجم بالایی از فاضلاب تولید شده‌ی حاوی مقادیر زیادی مواد آلاینده‌ی خطرناک مواجه می‌باشد. این فاضلاب حاوی آلاینده‌های سمی و پایداری (مقاومی) است که در صورت تخلیه‌ی بدون تصفیه‌ی کارآمد به منابع آب، با خطرات جدی برای محیط‌زیست و سلامتی همراه است [۱]. فاضلاب‌های صنعتی غالباً حاوی مقدار قابل توجه آلاینده‌های آلی و معدنی و طیف گسترده‌ای از ساختارهای مولکولی متنوع هستند. در همین راستا،

فاضلاب‌های پتروشیمی نیز معمولاً حاوی مواد با قابلیت تجزیه‌پذیری محدود بیولوژیکی و آلاینده‌های متنوعی با غلظت‌های زیاد کربن و نمک موجود می‌باشند [۲]. به دلیل وجود انواع مختلفی از مواد در فاضلاب‌های پتروشیمیایی مانند هیدروکربن‌های پلی سیکلیک، آروماتیک و آلیفاتیک، سیانیدها، اکتانول‌ها، فرم آلدهیدها، فنل‌ها، اسیدهای آلی، سولفیدها و دیگر مواد که اثرات منفی بر محیط‌زیست و سلامت انسان دارند، تصفیه‌ی کارآمد آن‌ها الزامی است. تاکنون برای این منظور از روش‌های مختلف تجزیه‌ی فتوکاتالیستی،



جذب، شناورسازی هوای محلول، لجن فعال، اکسیداسیون هوای مرطوب، رسوب‌گیری، انعقاد الکتریکی، فیلتراسیون و روش‌های پیشرفته‌ی غشایی مانند بیوراكتورهای غشایی استفاده شده است. با این حال، استفاده از این روش‌ها همواره با مشکلات و محدودیت‌هایی از جمله مصرف بالای انرژی، بازیافت کم، تولید لجن زیاد و هزینه‌های عملیاتی بالا همراه بوده است [۱ و ۳]؛ بنابراین، به کارگیری فرایندهای تکمیلی یا نوین تصفیه برای غلبه بر این محدودیت‌ها یا جایگزینی روش‌ها با فناوری‌های نوین مانند سامانه‌های بیوالکتروشیمیایی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در کنار روش‌های متعارف، به کارگیری روش‌های متعدد هیبریدی تصفیه‌ی فاضلاب‌های پتروشیمی مورد توجه محققین قرار گرفته است. روش‌های هیبریدی^۱ تصفیه فاضلاب، ترکیبی از چندین فناوری مختلف برای بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها هستند. برخی از روش‌های هیبریدی مطرح در تصفیه فاضلاب پتروشیمی عبارتند از: بازیافت آب از طریق روش اسمز معکوس-الکترودیالیز معکوس برای ارتقای کیفی پساب خروجی از تصفیه‌خانه‌ی متعارف فاضلاب پتروشیمی [۴]، روش فتوپراکسی کواگولاسیون نیز برای حذف اکسیژن خواهی شیمیایی^۲ از فاضلاب بسیار شور^۳ پتروشیمیایی دارای غلظت بالای کل جامدات محلول^۴ [۵]، روش ازن دهی-انعقاد الکتروشیمیایی^۵ برای تصفیه‌ی فاضلاب بسیار شور در واحد اولفین مجتمع پتروشیمی [۶]، روش انعقاد-صافی شنی به‌عنوان روش پیش تصفیه‌ی فاضلاب حاوی غلظت بالای نفتی با استفاده از سولفات آلومینیوم [۷]، استفاده از روش‌های مدل‌سازی باهدف کاهش مصرف آب، کاهش تولید فاضلاب و کاهش هزینه‌ها در صنایع پتروشیمی [۸]، راهکار یکپارچه‌ی فرایندهای تصفیه شامل پیش تصفیه (هیدرولیز

هوای میکروبی و اسیدسازی)، تصفیه‌ی بیولوژیکی (سامانه‌ی بی‌هوای-هوای^۶) و تصفیه‌ی تکمیلی (میکروفلوکولاسیون فیلتراسیون و ازوناسیون کاتالیستی) [۹].

به کارگیری شیمی سبز^۷ به‌عنوان رویکردی نوین برای دستیابی به روش‌ها و مواد نوین سازگار با محیط‌زیست، رویکرد سبز نامیده شده است که از طریق آن، به‌عنوان مثال، تولید نانوذرات با مشخصه‌های ویژه از طریق انجام فرایند بیوسنتز با استفاده از میکروارگانیسم‌ها میسر می‌گردد [۱۰]. استفاده از نانومواد به‌عنوان روشی پیشرفته برای حذف انواعی از آلاینده‌ها، از جمله فلزات سنگین سمی، مواد شیمیایی هالوژنه، حلال‌های کلرینه، آفت‌کش‌ها و ... مطرح است [۱۱].

بسیاری از محققین، رویکرد میکروبی (بیولوژیکی) را برای تصفیه‌ی پسماندهای صنعتی در مقایسه با روش‌های شیمیایی بهتر و مناسب‌تر (ارزان‌تر، سازگاری با محیط‌زیست، راهبری آسان‌تر) ارزیابی می‌کنند [۱۲]. میکروارگانیسم‌های مورد توجه شامل باکتری‌ها، قارچ‌های میکروسکوپی، جلبک‌ها و آکتینوباکتری‌ها هستند. در این رابطه باید به قابلیت بسیار بالای قارچ‌های میکروسکوپی در زمینه‌ی تجزیه‌ی ترکیبات پیچیده و تبدیل آن‌ها به مواد ساده‌تر و بدین ترتیب، تصفیه‌ی پسماندهای صنعتی توجه داشت. یکی از دلایل مهم، قابلیت این قارچ‌ها در تشکیل اسپور^۸ و ادامه‌ی حیات طولانی در محیط آلوده است. به‌عنوان مثال می‌توان به قابلیت اسپرژیلوس^۹ و پنی‌سیلیوم^{۱۰} در خصوص حذف هیدروکربن‌های آلیفاتیک، فلزات سنگین کبالت و مس، همچنین ان هگزان^{۱۱} اشاره نمود. در رابطه با باکتری‌ها نیز قابلیت حذف هیدروکربن‌ها توسط باکتری‌های سیدولتروموناس^{۱۲} و آگریورانس^{۱۳} حذف

1. Hybrid Process
2. Chemical Oxygen Demand
3. Spent Caustic
4. Total Dissolved Solids
5. Ozonation-Electrochemical Coagulation
6. Anaerobic-Aerobic Method, A/O
7. Green Chemistry
8. Sporogenesis
9. Aspergillus sp.
10. Penicillium sp.
11. n-Hexadecane
12. Pseudoalteromonas sp.
13. Agarivorans sp.

رنگ توسط باسیلوس لیکنیفورمیس^۱ و حذف کروم، اورانیوم، نیکل و مس توسط سودوموناس آئروژینوزا^۲ و آئروموناس^۳ قابل ذکر است. همچنین بیوسورفاکتانت رامنولیپید تولیدشده توسط سودوموناس آئروژینوزا به منظور بازیافت مواد نفتی از لجن ته نشین شده در مخازن نفت مطرح شده است. همچنین محیط تخمیری این باکتری دارای پتانسیل لازم برای کاربردهای صنعتی است [۱۳]. در رابطه با جلبک‌ها نیز می‌توان به قابلیت حذف آرسنیک توسط کلامیدوموناس رینهارتی^۴ و آلمرینسیس^۵ اشاره کرد [۱۴]. در همین راستا، استفاده از ریزجلبک تریبونما^۶ به عنوان مرحله‌ی تصفیه‌ی پس از مرحله‌ی تصفیه‌ی بیولوژیکی سامانه‌ی بی‌هوازی-هوازی باعث حذف قابل توجه آلاینده‌ها و دستیابی به غلظت بالای بیومس و مواد نفتی گزارش شده است [۱۵]. در کنار فرایند تجزیه‌ی مواد، لازم است که به فرایند جذب بیولوژیکی توسط بیومس قارچی یا باکتریایی نیز اشاره شود. تبدیل پسماند صنعتی به یک محصول غنی از گیاهاک دارای ارزش افزوده مانند کمپوست نیز مورد توجه قرار گرفته است [۱۶]. همچنین حذف دی‌کلرواتان-۱،۲ در نيزار مصنوعی با جریان زیرسطحی نیز با استفاده از گونه‌ی ماکروفیت لویی^۸ برای تصفیه‌ی فاضلاب پتروشیمی [۱۷]، به کارگیری اجتماعات میکروبی برای تصفیه‌ی شورآب حاصل در میدان‌های حفاری نفت و گاز از جمله، تجزیه‌ی بیولوژیکی آن آلکان^۹ هم‌زمان با تولید لیپیدهای خنثی با استفاده از باکتری نفت خوار^{۱۰} [۱۸] و تصفیه‌ی هم‌زمان و تولید بیومس با استفاده

از ریزجلبک‌های نانوکلوپسیس اوکولاتا^{۱۱} و ایزوکرایسیس گالابانا^{۱۲} [۱۹]، نئوکلریس^{۱۳}، کلرلا^{۱۴}، مونورافیدیوم^{۱۵}، سندسموس^{۱۶}، دیکتوسفریوم^{۱۷} [۲۰] و فیلتراسیون فعال بیولوژیکی با استفاده از کربن فعال گرانولی به همراه دو مخلوط مغذی مکمل برای حذف کارآمد مواد آلی و جامدات موجود در شورآب نفتی با حذف درصد بسیار بالای اکسیژن خواهی شیمیایی (حدوداً برابر ۸۰ تا ۹۰ درصد) [۲۱] مورد توجه قرار گرفته‌اند.

استفاده از فناوری‌های بیوالکتروشیمیایی، رویکردی نوآورانه و امیدوارکننده برای اصلاح کیفی محیط‌های آلوده به آلاینده‌های پتروشیمیایی است [۲۲]. مواد پتروشیمیایی مانند بنزن، تولوئن، زایلن، اتیل بنزن و هیدروکربن‌های پلی آروماتیک دارای ماهیت سمی و مقاوم هستند. روش‌های تصفیه‌ی متعارف غالباً دارای معایبی مانند مصرف بالای انرژی، تشکیل آلاینده‌های ثانویه و کارآمدی محدود در خصوص حذف مواد مقاوم موجود هستند. در مقابل، در تصفیه‌ی بیوالکتروشیمیایی از قابلیت فعالیت میکروبی محافظت شده و کارآمدی بالای واکنش‌های الکتروشیمیایی برای تجزیه و حذف آلاینده‌های پتروشیمیایی، همچنین تولید انرژی و محصولات جانبی با ارزش حاصل می‌گردد [۲۳]. در این پژوهش، فناوری‌های بیوالکتروشیمیایی به دقت ارزیابی شده‌اند و نتایج امکان‌سنجی استفاده از این فناوری‌ها برای تصفیه فاضلاب‌های پتروشیمیایی ارائه شده است. این نتایج شامل حذف آلاینده‌های مختلفی مانند بنزن، تولوئن، هیدروکربن‌های پلی آروماتیک، زایلن، اتیل بنزن، سولفات،

1. Bacillus Licheniformis
2. Pseudomonas aeruginosa
3. Aeromonas sp.
4. Chlamydomonas Reinhardtii
5. S. Almeriensis
6. Tribonema sp.
7. 1,2-Dichloroethane (1,2-DCA)
8. Typha Angustifolia L.
9. n-alkane
10. Alcanivorax borkumensis SK2
11. Nannochloropsis Oculata
12. Isochrysis Galbana
13. Neochloris
14. Chlorella
15. Monoraphidium
16. Scenedesmus
17. Dictyosphaerium





نیترا و فنل می‌باشد. علاوه بر این، مزایا و چالش‌های کلیدی مرتبط با پیاده‌سازی و مدیریت این سیستم‌ها نیز شناسایی و تحلیل شده‌اند.

۲. فناوری‌های بیوالکتروشیمیایی برای تصفیه پسماندهای پتروشیمی

در سال‌های اخیر، به‌کارگیری فناوری‌های الکتروشیمیایی میکروبی، به‌عنوان فناوری‌های نوآورانه و سازگار با محیط‌زیست برای تصفیه فاضلاب‌های پتروشیمی و بازیابی هم‌زمان انرژی و تولید محصولات دارای ارزش افزوده مانند هیدروژن، متان و پراکسید هیدروژن مورد توجه محققین قرار گرفته است. کارآمدی این روش‌ها بستگی به شرایط ویژه، غلظت‌های مواد پتروشیمیایی و طراحی سامانه دارد. سامانه‌های بیوالکتروشیمیایی را می‌توان از سویی به دو دسته اصلی پیل‌های سوخت میکروبی^۱ و سلول‌های سوخت آنزیمی^۲ وابسته به بیوکاتالیست تقسیم‌بندی نمود. از سوی دیگر، طبقه‌بندی آن‌ها بر اساس شیوه‌ی استفاده از آن‌ها شامل پیل‌های سوخت میکروبی، سلول‌های الکترولیز میکروبی^۳، سلول‌های نمک‌زدایی میکروبی^۴ و سلول‌های خورشیدی میکروبی انجام می‌پذیرد [۲۴].

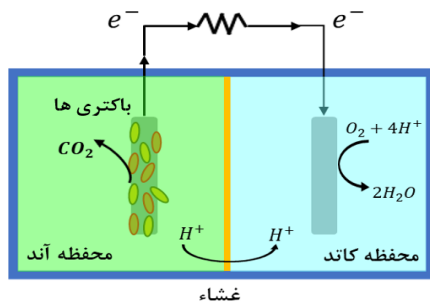
در سامانه‌ی پیل سوخت میکروبی، میکروارگانیسم‌ها قادرند از طریق سوخت و ساز سلولی مواد آلی موجود در سوبستره^۵، مستقیماً انرژی شیمیایی را به برق تبدیل کنند (شکل ۱). انواع مختلفی از مواد پتروشیمیایی نیتروژنه شامل مواد مورد استفاده در کشاورزی، آفت‌کش‌ها و ... در سامانه‌های پیل سوخت میکروبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که نتایج آن‌ها نشان‌دهنده کارآمدی لازم تصفیه هم‌زمان با تولید انرژی می‌باشد [۲۸]. در همین رابطه، بررسی تصفیه فاضلاب اکریلیک اسید با استفاده از این سامانه (دو محفظه‌ای) با استفاده از باکتری‌های بی‌هوازی (لجن بی‌هوازی) به دلیل پتانسیل لازم برای حمایت از انواع مختلفی از میکروارگانیسم‌ها انجام پذیرفته است [۲۹]. با این حال، با توجه به چالش‌های موجود مرتبط با تجزیه‌پذیری

بیولوژیکی مواد موجود در فاضلاب‌های پتروشیمیایی و لزوم ارتقای کارآمدی تولید انرژی باید پژوهش‌های بیشتری انجام شوند.

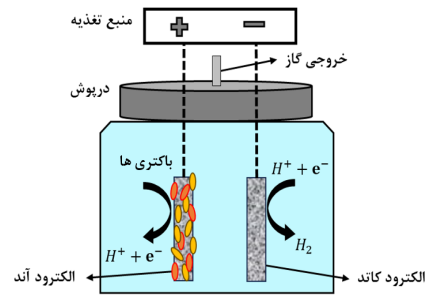
در فناوری نوین سلول الکترولیز میکروبی از میکروارگانیسم‌ها برای تولید گاز هیدروژن از مواد آلی یا فاضلاب استفاده می‌شود. میکروارگانیسم‌های الکترواکتیو (بیوکاتالیست‌های سبزی) قادر به تجزیه‌ی مواد آلی موجود و تولید الکترون و پروتون هستند. الکترون آزادشده به الکتروود آند منتقل می‌گردد. پروتون‌ها نیز به بخش کاتد منتقل شده و به هیدروژن احیا می‌شوند. شماتیک سلول الکترولیز میکروبی در (شکل ۱) نمایش داده شده است. به دلیل اینکه بخش کاتد آن بی‌هوازی است (عدم وجود اکسیژن)، تولید جریان برق میسر نیست [۳۰]. برای تولید هیدروژن در بخش کاتد، حداقل ولتاژ خارجی مورد نیاز ۰/۲ ولت است که این مقدار بسیار کمتر از ولتاژ مورد نیاز برای تولید هیدروژن از آب با استفاده از الکترولیز در دمای پایین است. به‌کارگیری کارآمد تکمیلی این سامانه در کنار روش‌های دیگر تولید بیوهیدروژن میسر است [۳۱]. علاوه بر این، تبدیل گلیسرول به هیدروژن در این سامانه، امکان دیگری برای تولیدکنندگان بیودیزل فراهم می‌سازد [۳۲]. تحقیقات مختلفی از جمله؛ حالت‌های راه‌اندازی سلول الکترولیز میکروبی به‌صورت تک محفظه‌ای یا دو محفظه‌ای و مقایسه آن‌ها از لحاظ اقتصادی و عملکردی [۳۳]، بررسی انواع بسترها از جمله فاضلاب شهری، فاضلاب صنعتی [۳۴]، مواد کاتالیست الکتروود آند و کاتد انجام شده است؛ اما هنوز باید پژوهش‌های بیشتری در خصوص تصفیه سوبستره‌های پیچیده‌تر و افزایش کارآمدی تولید انرژی و بازیابی مواد با ارزش انجام پذیرند.

رویکرد سلول‌های نمک‌زدایی میکروبی باهدف دستیابی هم‌زمان به نمک‌زدایی و بازیابی انرژی با استفاده از سامانه‌ی دو محفظه‌ای کارآمد دارای غشاهای تبادل آنیونی و کاتیونی نیز مطرح است (شکل ۱) [۳۵].

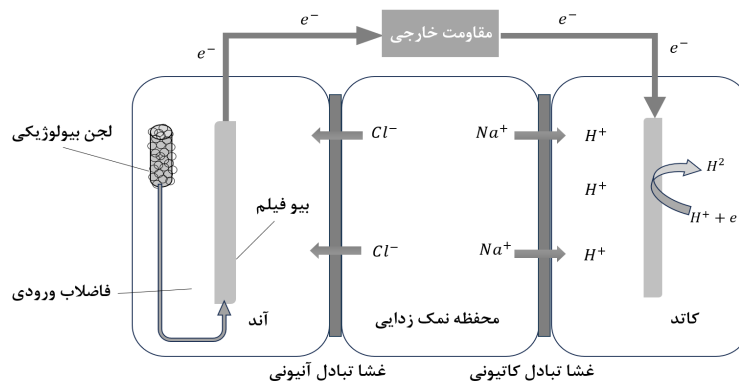
1. Microbial Fuel Cells, MFCs
2. Enzymatic Fuel Cells, Efcs
3. Microbial Electrolysis Cells, MECs
4. Microbial Solar Cells, MSCs
5. Substrate



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱: انواع سامانه‌های بیوالکتروشیمیایی: (الف) سلول الکترولیز میکروبی تک محفظه‌ای [۲۵] (ب) سلول سوختی میکروبی [۲۶] (ج) سلول نمک‌زدایی میکروبی [۲۷]

آلاینده‌های دیگر موجود (بازدارندگی) بر میکروارگانیسم‌ها و در نتیجه، محدودیت اجرا در مقیاس بزرگ هستند [۳۶].

۲-۲. حذف تولوئن^۲ با استفاده از سلول الکترولیز میکروبی

اکسیداسیون تولوئن در آند انجام شده و منجر به آزادسازی الکترون‌ها و پروتون‌ها می‌گردد. الکترون‌ها از طریق آند و یک مدار خارجی منتقل می‌شوند و پروتون‌ها به سمت کاتد حرکت می‌کنند (در سامانه‌های دو محفظه‌ای با عبور از غشای تبادل پروتون). گاز هیدروژن از طریق احیای پروتون‌ها در بخش کاتد تولید می‌شود. از جمله مزیت‌های این روش می‌توان به کارآمدی بالای حذف تولوئن، تولید محصول جانبی با ارزش هیدروژن و مصرف کمتر انرژی در مقایسه با روش‌های متعارف اشاره کرد. چالش‌های فعلی این روش نیز شامل مسمومیت کاتالیست به دلیل وجود ناخالصی‌ها در موارد پتروشیمیایی، عدم پایداری سامانه به دلیل بروز تغییرات در ترکیب جریان ورودی و هزینه‌ی بالای اجرای سامانه در مقیاس بزرگ هستند [۳۶].

مجموعه‌ای از آخرین نتایج بررسی‌های موردی در خصوص تصفیه‌ی مواد پتروشیمیایی با استفاده از فناوری‌های بیوالکتروشیمیایی به همراه مزیت‌ها و چالش‌های مربوطه بررسی شدند. همچنین نتایج بررسی مقایسه‌ای این روش‌ها در (جدول ۱) مشاهده می‌گردد.

۲-۱. حذف بنزن^۱ با استفاده از پیل سوخت میکروبی

اکسیداسیون بنزن توسط میکروارگانیسم‌ها در آند و تولید الکترون‌ها و پروتون‌ها. الکترون‌ها از طریق یک مدار خارجی جریان یافته و منجر به تولید برق می‌شوند. پروتون‌ها با عبور از غشای تبادل پروتونی به سمت کاتد منتقل شده و با اکسیژن موجود واکنش انجام می‌دهند که در نتیجه‌ی آن، آب تشکیل می‌گردد. از جمله مزیت‌های شناسایی شده می‌توان به حذف کارآمد بنزن و تولید هم‌زمان برق، همچنین هزینه‌ی کم‌بهره برداری و مصرف کم انرژی اشاره نمود. چالش‌های موجود در حال حاضر شامل مدت‌زمان طولانی راه‌اندازی راکتور برای تشکیل اجتماع میکروبی، تأثیر منفی

1. Benzene
2. Toluene



۲-۳. حذف زایلن^۱ با استفاده از سامانه‌ی بیوالکتروشیمیایی^۲

زایلن در بخش آند تجزیه‌ی بیولوژیکی شده و آزادسازی الکترون‌ها و پروتون‌ها انجام می‌پذیرد. الکترون‌ها از طریق یک مدار خارجی جریان می‌یابند و پروتون‌ها ضمن عبور از غشای تبادل پروتونی به سمت کاتد حرکت می‌کنند. احیای اکسیژن در بخش کاتد به وقوع می‌پیوندد. مزیت‌های شناسایی شده شامل تجزیه‌ی کارآمد زایلن، تولید برق و رویکردی سازگار با محیط‌زیست هستند. در خصوص چالش‌های موجود نیز می‌توان به حساسیت سامانه به شرایط محیطی مانند مقدار pH، دما و ...، همچنین نرخ آهسته‌تر تصفیه در صورت غلظت بالای زایلن و مشکلاتی در زمینه‌ی نگهداری و تعمیرات اشاره نمود [۳۶].

۲-۴. حذف اتیل بنزن^۳ با استفاده از پیل سوخت میکروبی

اکسیداسیون اتیل بنزن، تولید برق و تشکیل آب همانند حذف بنزن در سامانه‌ی پیل سوخت میکروبی (بخش ۲-۱) است. مزیت‌های این روش شامل تبدیل مستقیم اتیل بنزن به برق، مصرف کم انرژی، همچنین پایداری و سازگاری با محیط‌زیست می‌باشند. چالش‌های موجود نیز شامل کارآمدی محدود تجزیه‌ی اتیل بنزن در صورت غلظت بالای آن، دستیابی به جنس پایدار آند و کاتد، همچنین حفظ پایداری اجتماع میکروبی در راکتور هستند [۳۶].

۲-۵. حذف هیدروکربن‌ها پلی‌آروماتیک^۴ با استفاده از فرایند اصلاح بیوالکتروشیمیایی

تجزیه‌ی میکروبی هیدروکربن‌های پلی‌آروماتیک، تولید برق و تشکیل آب مانند حذف بنزن در سامانه‌ی پیل سوخت میکروبی (بخش ۲-۱) است. از جمله مزیت‌های این روش می‌توان به حذف کارآمد این مواد، تولید برق در حین انجام فرایند و قابلیت لازم برای اجرای در محل و به‌صورت پیش‌ساخته اشاره داشت. چالش‌های موجود در این رابطه نیز شامل تولید محدود برق با هیدروکربن‌های پلی‌آروماتیک

پیچیده و مقاوم، دستیابی به پایداری طولانی مدت اجتماع میکروبی و لزوم بهینه‌سازی عملکردی فرایند برای تصفیه‌ی مخلوط‌های ویژه‌ی این هیدروکربن‌ها هستند [۳۶].

۲-۶. حذف سولفات و نیترات با استفاده از فرایند بیوالکتروشیمیایی

سولفات تحت شرایط بی‌هوازی از جمله ضعیف‌ترین پذیرندگان الکترون به شمار می‌رود و از نظر ترمودینامیکی نامناسب در نظر گرفته می‌شوند؛ بنابراین، به کارگیری بیوکاتد به همراه باکتری‌های احیاکننده‌ی سولفات از عملکرد بهتری برخوردارند. در سامانه‌های بیوالکتروشیمیایی، اکسیداسیون و احیای سولفات و تشکیل گوگرد در محیط میکروسکوپی بخش آند و کاهش غلظت سولفات میسر است. نیترات نیز یکی از آلاینده‌های اولیه‌ی موجود در فاضلاب‌های پتروشیمی در کنار سولفات می‌باشد. نیترات در مقایسه با سولفات از نرخ فعالیت متابولیکی بالاتری برخوردار است. در بررسی‌های انجام شده، امکان دستیابی به کارآمدی حذف نیترات تا حدوداً ۹۵ درصد (در صورت غلظت کم سولفات موجود در جریان ورودی فاضلاب پتروشیمی) گزارش شده است [۳۷، ۳۸ و ۳۹].

۲-۷. تجزیه‌ی فنل در پیل سوخت میکروبی

بررسی اجتماع میکروبی و فرایند بیوالکتروشیمیایی در پیل سوخت میکروبی با استفاده از مجموعه‌ی میکروارگانیسم‌های بومی در صنعت پتروشیمی به همراه اجتماع میکروبی فاضلاب خانگی باهدف ارتقای کارآمدی حذف ۲،۴-دی‌کلروفنول^۵ و تولید انرژی منجر به شناسایی باکتری دیکتوسفریوم^۶ به‌عنوان عامل میکروبی تجزیه‌ی فنل گردید. نتیجه‌گیری حاصل این بود که در این سامانه، تجزیه‌ی فنل و تولید انرژی به‌طور هم‌زمان میسر است [۴۰]. لازم به ذکر است که تکرار یا انجام آزمایش‌های مرتبط با موضوعات مطرح در این مقاله باید در آزمایشگاه استاندارد با استفاده از تجهیزات و لوازم استاندارد با رعایت تمامی نکات ایمنی انجام پذیرند.

1. Xylene
2. Bioelectrochemical System, BES
3. Ethylbenzene
4. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs
5. 2,4-dichlorophenol
6. Cloacibacterium

جدول ۱: بررسی مزایا و چالش‌های تصفیه فاضلاب پتروشیمی با استفاده از انواع سامانه‌های بیوالکتروشیمیایی

ردیف	فناوری‌های بیوالکتروشیمیایی	مزایا	چالش‌ها
۱	پیل سوخت میکروبی	<ul style="list-style-type: none"> حذف بنزن تولید برق هزینه‌ی کم بهره برداری مصرف کم انرژی 	<ul style="list-style-type: none"> مدت زمان طولانی راه‌اندازی راکتور تأثیر منفی آلاینده‌های دیگر بر میکروارگانیسم‌ها محدودیت اجرا در مقیاس بزرگ
۲	پیل سوخت میکروبی	<ul style="list-style-type: none"> تبدیل مستقیم اتیل بنزن به برق مصرف کم انرژی سازگار با محیط‌زیست 	<ul style="list-style-type: none"> تجزیه محدود اتیل بنزن در غلظت بالا دستیابی به جنس پایدار آند و کاتد حفظ پایداری اجتماع میکروبی در راکتور
۳	پیل سوخت میکروبی	<ul style="list-style-type: none"> تجزیه فنل تولید انرژی حذف ۲، ۴-دی‌کلرو فنول 	<ul style="list-style-type: none"> پیچیدگی فرآیند
۴	سلول الکترولیز میکروبی	<ul style="list-style-type: none"> حذف تولوئن تولید هیدروژن مصرف کم انرژی 	<ul style="list-style-type: none"> مسمومیت کاتالیست به دلیل وجود ناخالصی‌ها در مواد پتروشیمیایی عدم پایداری سامانه به دلیل بروز تغییرات در ترکیب جریان ورودی هزینه‌ی بالای اجرای سامانه در مقیاس بزرگ
۵	سامانه‌ی بیوالکتروشیمیایی	<ul style="list-style-type: none"> حذف هیدروکربن‌های پلی‌آروماتیک (PAHs) تولید برق قابلیت اجرا در محل و به صورت پیش‌ساخته 	<ul style="list-style-type: none"> تولید محدود برق با هیدروکربن‌های پلی‌آروماتیک پیچیده دستیابی به پایداری طولانی مدت اجتماع میکروبی لزوم بهینه‌سازی عملکردی فرایند برای تصفیه‌ی مخلوط این هیدروکربن‌ها
۶	سامانه‌ی بیوالکتروشیمیایی	<ul style="list-style-type: none"> تجزیه‌ی زایلن تولید برق سازگار با محیط‌زیست 	<ul style="list-style-type: none"> حساسیت سامانه به شرایط محیطی نرخ آهسته تصفیه در صورت غلظت بالای زایلن مشکلات نگهداری و تعمیرات
۷	سامانه‌ی بیوالکتروشیمیایی	<ul style="list-style-type: none"> کارایی بالا در حذف سولفات و نیترات اکسیداسیون و احیای سولفات 	<ul style="list-style-type: none"> پیچیدگی فرآیند و نیازمند دانش فنی بالا و کنترل شرایط عملیاتی غلظت بالای سولفات می‌تواند کارایی حذف نیترات را کاهش دهد

۳. نتیجه‌گیری

دستیابی به فناوری‌های کارآمد فنی-اقتصادی-زیست‌محیطی تصفیه‌ی فاضلاب‌های پتروشیمی باهدف حذف آلاینده‌های موجود از یک سو و بازیابی و استفاده‌ی مجدد (آب، انرژی و محصولات دارای ارزش افزوده) از سوی دیگر، همچنان با چالش‌های متعددی روبرو است. در این پژوهش تلاش گردید، ضمن توجه به همه‌ی رویکردهای موجود، فناوری‌های نوین مطرح و روند تکاملی آن‌ها مورد توجه ویژه قرار گیرد. در این راستا، به‌کارگیری روش‌های میکروبی و شیمی سبز، همچنین فناوری‌های بیوالکتروشیمیایی و هیبریدی مورد بررسی قرار گرفتند و در هر مورد، به کارآمدی ممکن و چالش‌های مربوطه اشاره گردید. بر اساس نتایج بررسی به‌کارگیری فناوری‌های بیوالکتروشیمیایی برای

using down flow microaerophilic fixed film bioreactor. *Biores Technol* 175:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.040>.

- [4]. Venzke, C. D., Giacobbo, A., Ferreira, J. Z., Bernardes, A. M., & Siqueira Rodrigues, M. A. (2018) Increasing water recovery rate of membrane hybrid process on the petrochemical wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.04.023>.
- [5]. Jorfi, S., Alavi, S., Jaafarzadeh, N., Ghanbari, F., Ahmadi, M. (2018) COD removal from high salinity petrochemical wastewater using photo-assisted peroxi-coagulation. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 32(2), 229–238. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2017.1268>.
- [6]. Shokri, A. (2018) The treatment of spent caustic in the wastewater of olefin units by ozonation followed by electrocoagulation process. *Desalination and Water Treatment*, 111, 173–182. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22248>.
- [7]. Almojjly, A., Johnson, D., Oatley-Radcliffe, D. L., Hilal, N. (2018) Removal of oil from oil-water emulsion by hybrid coagulation/sand filter as pre-treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 26, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.09.004>.
- [8]. Hansen, E., Siqueira Rodrigues, M. A., Aragao, M. E., de Aquim, P. M. (2018) Water and wastewater minimization in a petrochemical industry through mathematical programming. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1814–1822. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.005>.

تصفیه‌ی فاضلاب‌های پتروشیمیایی می‌توان گفت که این روش‌ها، چشم‌انداز نوین امیدوارکننده‌ای را ارائه می‌کنند. ترکیب قابلیت‌های میکروبی و فرایند الکتروشیمیایی رویکردی سازگار با محیط‌زیست است که تحت شرایط بهینه‌ی راهبری، تجزیه‌ی آلاینده‌های موجود، حذف فلزات سنگین و تولید محصولات با ارزش، تولید برق و بیهیدروژن را میسر می‌سازد. در عین حال، مدت‌زمان طولانی راه‌اندازی راکتورها، حساسیت به شرایط محیطی، محدودیت اجرا در مقیاس واقعی، پیچیدگی‌های فرایند و چالش‌های نگهداری این سامانه‌ها از چالش‌های پیشرو برای به‌کارگیری این سامانه‌ها در مقیاس بزرگ است؛ بنابراین ادامه‌ی پژوهش‌های هدفمند کاربردی برای دستیابی به راهکارهای نوین کارآمد مطابق با نیازهای صنعت پتروشیمی الزامی است. لازم به ذکر است که تکرار یا انجام آزمایش‌های مرتبط با موضوعات مطرح در این مقاله باید در آزمایشگاه استاندارد با استفاده از تجهیزات و لوازم استاندارد با رعایت تمامی نکات ایمنی انجام پذیرند.

مراجع:

- [1]. Khaki, E., Boleydei, H., Abyar, H., Nowrouzi, M., Integrating eco-environmental assessment with energy recovery for petrochemical wastewater treatment technologies: A transition towards green and sustainable management, *Journal of Water Process Engineering*, Volume 55, 2023, 104103, ISSN 2214-7144, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104103>.
- [2]. Sathya, K., Nagarajan, K., Carlin Geor Malar, G. (2022) A comprehensive review on comparison among effluent treatment methods and modern methods of treatment of industrial wastewater effluent from different sources. *Appl Water Sci* 12, 70. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01594-7>.
- [3]. Balapure, K., Bhatt, N., Madamwar, D. (2015) Mineralization of reactive azo dyes present in simulated textile waste water





- [16]. Gunjal, A., Rajapakshe, D. (2023) Application of Microorganisms in Industrial Waste Treatment. *Green Technologies for Industrial Waste Remediation, Environmental Science and Engineering*, 1-10.
- [17]. Al-Baldawi, I. A. (2018) Removal of 1,2-Dichloroethane from real industrial wastewater using a subsurface batch system with *Typha angustifolia* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, 260–265. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.022>.
- [18]. Sudmalis, D., Da Silva, P., Temmink, H., Bijmans, M. M., & Pereira, M. A. (2018). Biological treatment of produced water coupled with recovery of neutral lipids. *Water Research*, 147, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.050>.
- [19]. Ammar, S. H., Khadim, H. J., Mohamed, A. I. (2018). Cultivation of *Nannochloropsis oculata* and *Isochrysis galbana* microalgae in produced water for bioremediation and biomass production. *Environmental Technology & Innovation*, 10, 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.02.002>.
- [20]. Hakim, M. A. A., Al-Ghouti, M. A., Das, P., Abu-Dieyeh, M., Ahmed, T. A., & Aljabri, H. M. S.J. (2018) Potential application of microalgae in produced water treatment. *Desalination and Water Treatment*, 135, 47–58. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.23146>.
- [21]. Riley, S. M., Ahoor, D. C., Cath, T. Y. (2018) Enhanced biofiltration of O&G produced water comparing granular activated carbon and nutrients. *Science of the Total Environment*, 640, 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.228>.
- [22]. Debnath, K., Dutta, S. (2023) Bio-
- [9]. Wu, C., Li, Y., Zhou, Y., Li, Z., Zhang, S., Liu, H. (2018) Upgrading the Chinese biggest petrochemical wastewater treatment plant: Technologies research and full-scale application. *Science of the Total Environment*, 633, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.164>.
- [10]. Kumar, N., Sinha, R.V. (2022) Potential applications of green synthesized nano particles in human diseases. 7(12):1796–1801.
- [11]. Patel, A.K., Singhanian, R.R., Albarico, F.P.J.B., Pandey, A., Chen, C-W., Dong, C-D. (2022) Organic wastes bioremediation and its changing prospects. *Sci. Total Environ.* 153889.
- [12]. Nagda, A., Meena, M., Shah, M. (2021) Bioremediation of industrial effluents: A synergistic approach. *J Basic Microbiol* 62:395–414.
- [13]. Liu, C., Zhang, Y., Sun, S., Huang, L., Yu, L. I., Liu, X., Zhang, Z. (2018) Oil recovery from tank bottom sludge using rhamnolipids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 170, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.06.031>.
- [14]. Ayilara, M., Babalola, O. (2023) Bioremediation of environmental wastes: the role microorganisms. *Front Agron*, 1–15.
- [15]. Huo, S., Chen, J., Chen, X., Wang, F., Xu, L., Zhu, F., Li, Z. (2018) Advanced treatment of the low concentration petrochemical wastewater by *Tribonema* sp microalgae grown in the open photobioreactors coupled with the traditional Anaerobic/Oxic process. *Bioresource Technology*, 270, 476–481. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.024>.

- Mater Sci Eng 736(3):32015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/3/032015>.
- [29]. Koul, B., Bhat, N., Abubakar, M. (2022) Application of natural coagulants in water treatment: a sustainable alternative to chemicals. *Water* 14:3751. <https://doi.org/10.3390/w14223751>.
- [30]. Amar Dubrovin, I., Ouaknin Hirsch, L., Rozenfeld, S. (2022) Hydrogen production in micro-bial electrolysis cells based on bacterial anodes encapsulated in a small bioreactor platform. *Microorganisms* 10:1007. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10051007>.
- [31]. Zhang, S., et al. (2020) A review of bioelectrochemical systems for antibiotic removal: efficient antibi-otic removal and dissemination of antibiotic resistance genes. *J Water Process Eng* 37:101421. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101421>.
- [32]. Chilakamarry, C.R., Sakinah, A.M.M., Zularisam, A.W. (2021) Glycerol waste to value added products and its potential applications. *Syst Microbiol Biomanuf* 1:378–396. <https://doi.org/10.1007/s43393-021-00036-w>.
- [33]. Mutalib, A. A. A., Jaafar, N. F., and Torlaema, T. A. M. (2024), Basic Electrochemical Concept of Microbial Electrolysis Cell. In *Microbial Electrolysis Cell Technology: Fundamental to Sustainable Applications* (pp. 1-18). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-3356-9_1.
- [34]. Hemashenpagam, N., Selvajeyanthi, S., Gunasheela, N., (2024). Effect of Substrate on the Efficiency of Microbial Electrolysis Cells. In *Microbial Electrolysis Cell Technology: Fundamental to Sustainable electrochemical system analysis and improvement: a technical review*. *Cleaner Circular Bioecon* 6:100052. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2023.100052>.
- [23]. Varjani, S., Upasani, V. (2017) A new look on factors affecting microbial degradation of petroleum hydrocarbon pollutants. *Int Biodeterior Biodegradation* 120:71–83. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.02.006>.
- [24]. Kondaveeti, S., Govindarajan, D., Mohanakrishna, G., Thatikayala, D., Abu-Reesh, I.M., Min, B., Nambi, I.M., Al-Raoush, R.I., Aminabhavi, T.M. (2023) Sustainable bioelectrochemical systems for bioenergy generation via waste treatment fom petroleum industries. *Fuel* 331, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125632>.
- [25]. Pawar, A. A., Karthic, A., Lee, S., Pandit, S., & Jung, S. P. (2022). Microbial electrolysis cells for electromethanogenesis: Materials, configurations and operations. *Environmental Engineering Research*, 27(1).
- [26]. Vishwanathan, A.S. Microbial fuel cells: a comprehensive review for beginners. *3 Biotech* 11, 248 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02802-y>.
- [27]. Carmalin Sophia, A., Bhalambaal, V.M., Lima, C., Thirunavoukkarasu, M., 2016, Microbial desalination cell technology: Contribution to sustainable waste water treatment process, current status and future applications, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 4, Issue 3, Pages 3468-3478, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.07.024>.
- [28]. Sarmin, S., et al. (2020) Potentiality of petrochemical wastewater as substrate in microbial fuel cell. *IOP Conf Ser*:



Applications (pp. 75-92). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-3356-9_5.

[35]. Tavker, N., Kumar, N. (2023) Chapter 6-Bioelectrochemical systems: understanding the basics and overcoming the challenges. In: Shah MP et al (eds) Elsevier, pp 79–98. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88505-8.00003-6>.

[36]. Kumar, D., Mishra, S., Kumari, S., Dutta, A.K. (2023) An Overview on Fungi and Nanomaterial-Based Technologies for the Treatment of Industrial Effluents. Environmental Science and Engineering, Green Technologies for Industrial Waste, Springer, 11-27.

[37]. Gupta, S.K., et al. (2022) Bioelectrochemical technologies for removal of xenobiotics from wastewater. Sustain Energy Technol Assess 49:101652. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101652>.

[38]. Hamelers, H.V.M., et al. (2009) New applications and performance of bioelectrochemical systems. Appl Microbiol Biotechnol 85:1673–1685. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2357-1>.

[39]. He, Z., Angenent, L.T. (2006) Application of bacterial biocathodes in microbial fuel cells. Electro-analysis 18(19–20):2009–2015. <https://doi.org/10.1002/elan.200603628>.

[40]. Hassan, H., Jin, B., Donner, E., Vasileiadis, S., Saint, C., Dai, S. (2018) Microbial community and bioelectrochemical activities in MFC for degrading phenol and producing electricity: Microbial consortia could make differences. Chemical Engineering Journal, 332, 647–657. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.114>.



Novel Biological and Bioelectrochemical Technologies for Petrochemical Wastewater Treatment and Simultaneous Bioenergy Generation: an Investigative and Comparative Review

Gagik Badalians Gholikandi^{1*}, Raha Robati², Fatemeh Shokri Dariyan²

1. Professor, Department of Water, Wastewater, and Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. Ph.D. Candidate, Department of Water, Wastewater, and Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW PAPER

Article History:

Received: 29 June 2024

Revised: 16 July 2024

Accepted: 10 August 2024

Keywords:

Petrochemical wastewater treatment

Biological & Bioelectrochemical systems

Removal of persistent pollutants

Recovery of water

Materials and energy

ABSTRACT

Due to the limitations of traditional wastewater treatment methods in the petrochemical industry, such as high energy use, large amounts of sludge, very limited material recovery potential, and high operational costs, it is essential to develop efficient and innovative treatment technologies aimed at removing pollutants and recovering water, energy, and valuable products. This review focuses on various innovative approaches, including the application of hybrid methods and biological processes utilizing microorganisms. Considering that bioelectrochemical systems are emerging as technologies with the necessary capabilities for treating various petrochemical substances and recovering energy and valuable products, this study provides a detailed evaluation of these methods. The feasibility results of their application for treating petrochemical wastewater, including the removal of benzene, toluene, polyaromatic hydrocarbons, xylene, ethylbenzene, sulfate, nitrate, and phenol, are presented. Additionally, the key advantages and challenges associated with the implementation and operation of these systems are identified.

DOR: [20.1001.1.25885251.1403.00.00](https://doi.org/10.1001.1.25885251.1403.00.00)

How to cite this article

G. B. Gholikandi, R. Robati, F. Shokri Dariyan, Novel Biological and Bioelectrochemical Technologies for Petrochemical Wastewater Treatment and Simultaneous Bioenergy Generation: an Investigative and Comparative Review. Iranian Journal of Gas Engineering. 2024; 11(1): 87-98. (https://www.ijge.irangi.org/article_722821.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: g_badalians@sbu.ac.ir, (G. B. Gholikandi).

Available online 01 September 2024

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

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



راهنمای نگارش مقالات در مجله علمی مهندسی گاز ایران

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

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

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

آدرس پست الکترونیکی 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:

بخش مقدمه تا مراجع به صورت دوستونی و 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 می شود.

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 واژه نامه 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 مهندسی گاز ایران را در زمینه های تازه های مهندسی گاز، معرفی صنایع مرتبط، آموزش در مهندسی گاز، نفت، پتروشیمی و شیمی، معرفی نوآوری ها و فن آوری های نوین صنعتی و اخبار جامعه مهندسی گاز را منتشر می کند.

۲. شرح نوشتار:

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

۲.۱. عهده دار مکاتبات می تواند از اعضاء 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.

۲.۳. مقالات با نرم افزار word ۲۰۰۷ روی کاغذ A4 بخش چکیده مقاله به صورت تک ستونی و

۳. صفحه آرایی:

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. بخش های هر مقاله به ترتیب زیر است:

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

۴.۲. 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





۴.۳. آدرس نویسندگان: قلم بی- نازنین سایز ۹ نازک و در زیر آن آدرس الکترونیکی عهده دار مکاتبات درج می‌شود.

۸. نتیجه‌گیری

۴.۴. کلمات کلیدی: حداکثر ۵ یا ۷ کلمه (بی- نازنین سایز ۱۱ ایتالیک).

مراجع:

۵. چکیده: متن چکیده در حداکثر ۱۵۰ کلمه، به صورت تک ستونی و حاوی نکات اصلی و نتایج مقاله باشد. (بی- نازنین سایز ۱۱ ایتالیک). داشتن قسمت‌های ۱ تا ۵ به انگلیسی در انتهای مقاله نیز ضروری می‌باشد.

۶. متن اصلی:

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

بسته به نوع اثر، مقاله دارای بخش‌های نظری، شرح دستگاه، روش آزمایش، روش حل، یا محاسبه و نتایج است که به صورت دو ستونی با قلم B- نازنین سایز ۱۱ نازک و Times New Roman سایز ۱۰ نازک و فواصل بین خطوط به صورت single برای رسیدگی و ارایه به داوران نگارش می‌شود. تیترهای متن مقاله شماره گذاری و با قلم بی- نازنین سایز ۱۱ سیاه می‌باشد.

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

استفاده از از رنگ در جداول و شکل‌ها مشمول هزینه چاپ می‌شود. صفحات شماره گذاری شوند.

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

۸. نتیجه‌گیری

۴.۴. کلمات کلیدی: حداکثر ۵ یا ۷ کلمه (بی- نازنین سایز ۱۱ ایتالیک).

مراجع:

۵. چکیده: متن چکیده در حداکثر ۱۵۰ کلمه، به صورت تک ستونی و حاوی نکات اصلی و نتایج مقاله باشد. (بی- نازنین سایز ۱۱ ایتالیک). داشتن قسمت‌های ۱ تا ۵ به انگلیسی در انتهای مقاله نیز ضروری می‌باشد.

۶. متن اصلی:

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

بسته به نوع اثر، مقاله دارای بخش‌های نظری، شرح دستگاه، روش آزمایش، روش حل، یا محاسبه و نتایج است که به صورت دو ستونی با قلم B- نازنین سایز ۱۱ نازک و Times New Roman سایز ۱۰ نازک و فواصل بین خطوط به صورت single برای رسیدگی و ارایه به داوران نگارش می‌شود. تیترهای متن مقاله شماره گذاری و با قلم بی- نازنین سایز ۱۱ سیاه می‌باشد.

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

استفاده از از رنگ در جداول و شکل‌ها مشمول هزینه چاپ می‌شود. صفحات شماره گذاری شوند.

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

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

VOLUME 11 • ISSUE 1 • NO. 19 • SUMMER 2024

EISSN:25885-5251



► Contents

Investigating the Performance of the LPG Flare of the Fifth South Pars refinery Using CFD Simulation and Providing a Solution 8

Mohammad Irani, Yaghoubeh Behjatn

Investigating the Changes of Mechanical and Metallurgical Properties Obtained by Hydrostatic Test Using the Method of 110% Yield Stress in Gas Pipelines 22

Seyed Amir Rezabeigi, Mohammad Hossein Yas, Behrouz Dargahi

Thermodynamic and Environmental Analysis of using Solar-Fuel Cell CHP Systems in Residential House of Iran 33

Esmail Ghasemi Kafrudi, Mohammad Reza Habibi, Hossein Abbasali Khomeh, Zeynab Sobhani

Intelligent Prediction of Gas Consumption in Three - 46 Hour Intervals, Using Data Recorded in Specific Time Periods

Iman Mohammadi, Mohsen Taghavi

Prediction of Drilling Fluid Temperature Window and Formation of Gas Hydrates During Drilling in Deep Water Using Machine Learning Algorithms 71

Mohammad Dousti, Elnaz Khodapanah

Novel Biological and Bioelectrochemical Technologies for Petrochemical Wastewater Treatment and Simultaneous Bioenergy Generation: an Investigative and Comparative Review 87

Gagik Badalians Gholikandi, Raha Robati, Fatemeh Shokri Dariyani

► Guide for Authors

99

IJGE
IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

نشریه مهندسی گاز ایران

سال یازدهم / شماره اول / جلد نوزدهم / تابستان ۱۴۰۳
EISSN:25885-5251



◀ سرمقاله

۶ هوش مصنوعی: واقعیتی جدید برای صنایع شیمیایی

◀ مقالات

۸ بررسی عملکرد فلر LPG پالایشگاه پنجم پارس جنوبی با استفاده از شبیه‌سازی CFD و ارائه راهکار

محمد ایرانی، یعقوب بهجت

۲۲ بررسی تغییر خواص مکانیکی و متالورژیکی حاصل از آزمایش هیدرواستاتیک به روش ۱۱۰ صدرتنش تسلیم در خطوط لوله گاز

سیدامیر رضایی، محمدحسین یاس، بهروز درگاهی

۳۳ آنالیز ترمودینامیکی و زیست‌محیطی استفاده از سیستم تولید انرژی هم‌زمان خورشیدی-پیل سوختی در منازل مسکونی ایران

اسماعیل قاسمی کفرودی، محمدرضا حبیبی، حسین عباسعلی خمه، زینب سبحانی

۴۶ پیش‌بینی هوشمند میزان مصرف گاز در بازه‌های سه‌ساعته، با استفاده از داده‌های ثبت شده در دوره‌های زمانی مشخص

ایمان محمدی، محسن تقوی

۷۱ پیش‌بینی پنجره دمایی سیال حفاری و تشکیل هیدرات‌های گازی حین حفاری در آب‌های عمیق با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشینی

محمد دوستی، الناز خداپناه

۸۷ مروری بر فناوری‌های نوین بیولوژیکی و بیوالکتروشیمیایی تصفیه‌ی فاضلاب‌های پتروشیمی و تولید هم‌زمان بیوانرژی

گاگیک بدلیانس قلی‌کندی، رها رباطی، فاطمه شکری داریان

۹۹ راهنمای نگارش مقالات در نشریه علمی مهندسی گاز ایران

IJGE
IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING