

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

صاحب امتیاز: انجمن مهندسی گاز ایران

مدیر مسئول: دکتر محمدرضا امیدخواه

سر دبیر: دکتر رضا مسیبی بهبهانی

مدیر داخلی: مهندس شهلا آذرشین

ویراستاری: شبنم دانشمند، مؤسسه «ویراستاران»

صفحه آرایی: مهندس حمیدرضا کریمی

شماره شاپا: ۵۲۵۸۸-۵۲۵۵۱



هیأت تحریریه:

دکتر ابوالقاسم امامزاده (دانشگاه آزاد - واحد علوم تحقیقات تهران)

دکتر باقر انوری پور (دانشگاه صنعت نفت)

دکتر سعید پاک سرشت (شرکت ملی گاز ایران)

دکتر ناصر تیموری خانه سری (دانشگاه صنعت نفت)

دکتر محمد جامی الاحمدی (دانشگاه صنعت نفت)

دکتر هوشنگ جزایری راد (دانشگاه صنعت نفت)

دکتر رهبر رحیمی (دانشگاه سیستان و بلوچستان)

دکتر سید رضا شادی زاده (دانشگاه صنعت نفت)

دکتر سید علیرضا طباطبائی نژاد (دانشگاه صنعتی سهند)

دکتر منصور فرزاد (دانشگاه صنعت نفت)

دکتر حسین گلشن (شرکت TransCanada - کانادا)

دکتر محسن مظلوم فارسی باف (شرکت ملی گاز ایران)

دکتر سید حسام نجیبی (دانشگاه صنعت نفت)

نشانی انجمن مهندسی گاز ایران

تهران/ خیابان سپهد قرنی/ نیش خیابان سپند/ پلاک ۱۹۶

کدپستی: ۹۵۷۱۲-۱۵۹۸۹

پست الکترونیکی نشریه

ijge@irangi.org

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

فهرست مطالب

◀ سرمقاله

- ۴ نگارش صحیح مقالات علمی ترویجی

◀ مقالات

- ۶ بررسی واحد تولید گاز طبیعی مایع در مقیاس کوچک
سمیرا احمدی، محمدرضا جعفری نصر

- ۱۶ مدل سازی واکنش موازی-رقابتی Villermaux-Dushman در میکروآکتورهای
منتخب با استفاده از نرم افزار کامسول
پیوند واله شیدا، مجید یارمحمدتوسکی

- ۲۵ مروری بر روش های نوین بر آورد موجودی انتشار متان در شبکه توزیع گاز طبیعی
سیدمحمدسعید خاتمی، حمیدرضا افشون، سیدمهدی جباری

- ۳۷ شبیه سازی سه بعدی و بررسی تأثیر دما در ترک های شبه بیضوی محوری و محیطی در
مخازن استوانه ای
جلیل جمالی، هادی راکی

- ۴۷ تحلیل فنی و کاربردی واحدهای قابل حمل LNG در کشور
احمد قضاثلو، نیلوفر فتوره چی، مهران سرمد، منصوره بصیرت

- ۵۷ روشی نوین برای بهره برداری بهینه از برج خنک کننده در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی
احسان جعفریان

- ۶۱ بررسی آثار تحریم بر قراردادهای نفتی بین المللی
راحله سیدمرتضی حسینی، آرزو ملک شاه

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





سر مقاله

نگارش صحیح مقالات علمی ترویجی

دکتر بهبانی، معاون فناوری و پژوهش دانشگاه صنعت نفت

علمی پژوهشی را بر روی آن نهاد. هدف اینگونه مقالات پیشبرد علم و ارتقای مرزهای آن است به همین علت آن را پژوهشی می‌نامند. در یک مقاله علمی پژوهشی اساس و بنیان کار را ادبیات و بینشی که محقق به دنبال ایجاد آن است، تعیین می‌کند. مخاطبین اصلی این نوع از مقالات، اساتید دانشگاه‌ها، دانشجویان دوره دکتری و کارشناسی ارشد، پژوهشگران شاغل در مراکز علمی، تحقیقاتی و تولیدی هستند.

مقاله علمی ترویجی، مقاله‌ای است که ایده اصلی آن گردآوری نتایج تحقیقات پیشین است. از نام مقالات علمی ترویجی کاملاً مشخص است که به ترویج علم در یک زمینه خاص می‌پردازد. مقالات علمی ترویجی، به ترویج یکی از رشته‌های علوم می‌پردازد و هدف آن ارتقاء سطح دانش خواننده هست و سعی دارد او را با موضوعات جدید علمی آشنا سازد. اصولاً این نوع از مقالات هدفی جز آشناسازی ندارند و می‌توانند ترجمه و یا یک تألیف باشند. نام دیگر مقالات علمی ترویجی، مرور ادبیات است و کار اصلی آن بررسی یک موضوع علمی خاص در یک محدوده زمانی و بررسی آن است. مقاله علمی ترویجی می‌تواند خلاصه‌ای از مقالات و مراجع باشد. اصولاً مقالات علمی ترویجی سازمان‌دهی خاص خود را دارند و خلاصه و استنتاج‌ها را با یکدیگر مخلوط نمود و اطلاعات را در ساختاری بدیع ارائه می‌دهد.

بر خلاف نوع مقاله علمی پژوهشی که حتماً باید ایده نو و بدیعی را ارائه دهد، مقاله علمی ترویجی

امروزه نوشتن مقاله و ارائه و چاپ آن در مجله‌ای معتبر به یکی از دغدغه‌های دانشجویان و محققان تبدیل شده است. داشتن مقاله باعث قوی‌تر شدن رزومه تحصیلی و علمی فرد می‌شود. از نظر موضوعی و سبک، مقالات انواع مختلفی دارند که می‌توان به مقالات علمی پژوهشی و مقالات علمی ترویجی اشاره نمود. بارها نام مقاله‌های ترویجی و علمی پژوهشی را شنیده‌ایم معمولاً محققینی که در آغاز راه هستند تفاوت‌های آنها را با یکدیگر نمی‌دانند. معادل انگلیسی مقاله علمی ترویجی Review Paper می‌باشد اما معادل مقاله علمی و پژوهشی Research Paper است که با نام Original Article نیز یاد می‌شود.

مقاله علمی پژوهشی براساس یک پژوهش اصلی می‌باشد. این پژوهش می‌تواند برحسب زمینه مورد مطالعه انواع مختلفی مانند آزمایش، زمینه‌یابی، مصاحبه و استفاده از پرسشنامه در حین اجرای پژوهش باشد اما مولف در هر صورت که باشد نیاز دارد تا به جمع‌آوری و آنالیز داده‌ها بپردازد و از آنها یافته‌های مختص به خود را ارائه دهد. مقاله علمی پژوهشی براساس این تحلیل‌ها و تفاسیر از داده‌ها نگارش خواهد شد. یکی از مهمترین تفاوت‌هایی که مقاله علمی پژوهشی با دیگر مقالات دارد این است که عنوان و ایده‌ای که پژوهشگر برای آن انتخاب می‌کند باید برای اولین بار ثبت شده باشد و در حقیقت موضوع انتخابی آن اولین بار باشد که مطرح می‌شود در این صورت خواهد بود که می‌توان نام مقاله



۱. مقالات علمی ترویجی مروری: این مقالات مطالب و نتایج تحقیقات پیشین در یک زمینه خاص را در یک مقاله جدید گردآوری می‌کنند و در اختیار مخاطبان قرار می‌دهند.
 ۲. مقالات علمی ترویجی ترجمه‌ای: این مقالات معمولاً ترجمه‌ای از یک مقاله علمی معتبر را در یک زبان جدید، در اختیار خوانندگان بومی قرار می‌دهند.
 ۳. مقالات علمی ترویجی تحلیلی: نویسنده این نوع از مقالات، علاوه بر گردآوری نتایج تحقیقات پیشین در یک موضوع مشخص، نتایج آن‌ها را تحلیل می‌کند و روش انجام تحقیق و نتایج به دست آمده را به زبان خود تفسیر کرده، در اختیار مخاطبان قرار می‌دهند.
- در بین انواع مقالات علمی ترویجی، مقالات تحلیلی از ارزش علمی بالاتری برخوردارند و امتیاز بیشتری برای خود و نویسنده خود از منظر رزومه کاری و تحصیلی کسب خواهند کرد.
- برعکس تصویری که بسیاری از محققان دارند مقاله علمی پژوهشی یا علمی ترویجی در ماهیت خود برتری نسبت به یکدیگر ندارند اما وقتی از سوی مجلات با کیفیت مورد پذیرش قرار می‌گیرند ارزش و اعتبار پیدا می‌کنند. در ایران مقالات علمی ترویجی ممکن است که از لحاظ علمی، اعتبار کمتری نسبت به مقالات علمی پژوهشی داشته باشند ولی این اختلاف بسیار زیاد نیست. بهتر است بدانید که ارزش واقعی مقالات به نوع مجله ای است که در آن چاپ می‌شوند و یک مقاله علمی ترویجی که در مجله ای با اعتبار علمی بالاتری چاپ شده نسبت به مقاله علمی پژوهشی چاپ شده در مجله ای با اعتبار کمتر، ارزش علمی بهتری برای نویسنده اش به همراه خواهد داشت بسیاری از مقالات علمی ترویجی هم اکنون در مجلات بسیار قوی دنیا منتشر می‌شود. همچنین این تصور که مقاله علمی و ترویجی راحت‌تر و آسان‌تر از مقالات علمی پژوهشی هستند نیز تصویری بسیار نادرست است.
- می‌تواند کار بر روی مقالات و کارها قبلی باشد و یا کارهای قبلی را ادامه داده با محتوای جدید آن‌ها را ارائه دهد و این مقالات دارای ایده جدید و نوآورانه‌ای از جانب نویسنده مقاله نیستند و هدف آنها اغلب مرور فرآیند تحقیقات پیشین و مطالعه نتایج آن‌ها در یک حوزه تخصصی به خصوص و موضوع مشخص است. این مقالات نتایج و داده‌های موجود در مقالات پیشین را گردآوری می‌کنند و به طور خلاصه و در یک مقاله جامع آن‌ها را به نگارش در می‌آورند. نویسنده این مقالات هم‌چنین می‌تواند ساختار جدیدی به تحقیقات گذشته دهد و نتایج را طبق نظر خود تفسیر کند. مقالات علمی ترویجی برای خوانندگان خود یک دید کلی از مجموع تحقیقات انجام شده در یک زمینه خاص و نتایج آن‌ها فراهم می‌کند و سعی می‌کند آن‌ها را به زبان خود برای مخاطبان تفسیر کند. از لحاظ درجه‌بندی نشریات علمی در ایران، بالاترین درجه نشریات دانشگاهی در ایران، مربوط به نشریات علمی پژوهشی است و در رتبه دیگر مقاله‌های علمی ترویجی قرار دارند. جامعه هدف مقالات علمی ترویجی افراد عادی و کسانی می‌باشد که ممکن است از لحاظ فنی در شاخه علمی مورد نظر مقاله تخصص کافی نداشته باشند. در این نوع مقاله شما نیاز به آزمایش یا جمع‌آوری داده خام نخواهید داشت. مقاله علمی ترویجی ادبیات پژوهش موجود در یک زمینه خاص را خلاصه می‌کند و سعی دارد تا شرحی بر وضعیت کنونی موضوع مورد بررسی ارائه دهد. هدف مقالات علمی ترویجی این است که دانش خواننده را ارتقا بخشد و خواننده با مقالات و موضوعات جدید آشنا شود... یک مقاله علمی ترویجی دارای ساختار مشخصی می‌باشد که معمولاً در اکثر این گونه مقالات رعایت می‌شود. این ساختار شامل: عنوان مقاله، اسامی نویسندگان، چکیده، مقدمه، تعریف، اصل مقاله، نتایج و یافته‌ها، جمع بندی که شامل بحث و مقایسه می‌شود، پیشنهاد تحقیقات آینده و منابع و مأخذ می‌باشد. همان گونه که ذکر شد، نویسنده این مقالات ایده اصلی خود را از مقالات و تحقیقات پیشین موجود در یک زمینه تخصصی مشخص می‌گیرند و مطلب جدیدی به جامعه علمی اضافه نمی‌کنند. با این وجود نویسنده مقاله علمی ترویجی می‌تواند به روش‌های مختلفی این کار را انجام دهد که منجر به تولید نوع خاصی از مقالات علمی ترویجی می‌گردد. انواع مقالات علمی ترویجی به ترتیب زیر قابل طبقه‌بندی هستند:

بررسی واحد تولید گاز طبیعی مایع در مقیاس کوچک

سمیرا احمدی، محمدرضا جعفری نصر*

ایران، تهران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، دانشکده نفت و مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی ۱۳۷-۱۴۶۶۵.

نویسنده مسئول ایمیل: nasrmrj@ripi.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۵

چکیده

در این مطالعه فرایند مایع‌سازی گاز طبیعی تک‌مرحله‌ای با مبرد آمیخته بهینه‌سازی و به‌دنبال آن تحلیل انرژی و اگزرژی تجهیزات روی آن انجام شد و اثر بهینه‌سازی انرژی مصرفی ویژه بر هزینه خرید تجهیزات چرخه سردسازی بررسی شد. اساس این مطالعه بر پایه فرایند پریکو قرار دارد و با توجه به محدودیت‌هایی که در ایران با آن مواجه هستیم، به توسعه فرایند جدیدی پرداخته شده است که در آن مشکلات فرایندی رفع شده باشد و سپس فرایند ارائه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شد. دبی مولی مبرد، فشارهای پایین و بالای مبرد در چرخه، مهم‌ترین پارامترهای عملیاتی تأثیرگذار هستند که با تحلیل حساسیت انتخاب شدند. مجموع انرژی مصرفی کمپرسورها به ۱۴۱۳/۸ کیلووات رسید و ۱۱ درصد کاهش یافت. نتایج نشان داد بهینه‌سازی انرژی مصرفی ویژه، باعث افزایش هزینه مبدل حرارتی می‌شود؛ زیرا حداقل دمای نزدیکی در مبدل، کاهش و سطح تبادل حرارتی لازم بالا می‌رود؛ ولی هزینه خرید کمپرسورها به‌علت کم‌شدن انرژی مصرفی آن‌ها کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: فرایند پریکو، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، تحلیل اگزرژی، قیمت تجهیز.

۱. مقدمه

یکی از منابع مهم تأمین انرژی، سوخت‌های فسیلی هستند. گاز طبیعی به‌دلیل آلودگی زیست‌محیطی کمتر، طی سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. گاز طبیعی، سوختی پاک، ارزان و فراوان است که امروزه برای مصارف خانگی و صنعتی به‌عنوان خوراک واحدهای پتروشیمی استفاده می‌شود.

با توجه به اینکه ایران دومین کشور از لحاظ دارا بودن مخازن گازی است، پیشرفت و توسعه در پروژه‌های صنعت گاز همواره مورد توجه متخصصان و نهادها بوده است. ارسال گاز طبیعی از طریق خط لوله، خصوصاً در مسافت‌های طولانی و به‌ویژه مناطق صعب‌العبور و کف دریا، بسیار هزینه‌بر و

1. Single Mixed Refrigerant (SMR)

سرمایه‌گذاری فرایند است.

تاکنون پژوهش‌ها و مقالات متعددی در زمینه بررسی فرایندهای سردسازی گاز طبیعی انجام شده است. تعدادی از مقالات با انجام تحلیل‌های حساسیت و اگزرژی و بهینه‌سازی، انرژی مصرفی را کاهش دادند. اسلم‌بخش به مقایسه مصرف اگزرژی و انرژی فرایند پریکو و فرایند انبساطی-نیترژن پرداخت. نتایج بررسی او نشان داد که از لحاظ مصرف اگزرژی فرایند انبساطی-نیترژن ۶۱ درصد بیشتر از فرایند پریکو اتلاف اگزرژی داشت. با بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک مصرف انرژی فرایند پریکو و انبساطی-نیترژن به ترتیب ۵۸ درصد و ۷۴ درصد کاهش یافت. در نتیجه او گزارش کرد که از این نظر فرایند پریکو از دیگر فرایندها مناسب‌تر است [۲]. اسپلند و همکاران فرایند پریکو را در نرم‌افزار اسپن هایسیس^۱ شبیه‌سازی کردند و از روش سرچ تابو^۲ برای بهینه‌سازی بهره بردند و تابع هدف را نسبت به حالت اولیه ۲۳ تا ۳۶ درصد بهبود دادند [۳].

مکاری‌زاده و مولا به منظور بهینه‌سازی عملیاتی فرایند پریکو از الگوریتم ژنتیک^۳ بهره بردند. همچنین به وسیله تحلیل اگزرژی^۴ کار از دست‌رفته تجهیزات را محاسبه کردند [۴]. عبدالکریم و همکاران به بهینه‌سازی فرایند مبرد آمیخته با پیش‌سرماسازی پروپان^۵ پرداختند و با بهینه‌سازی فرایند سردسازی و سیکل پروپان به ترتیب ۱۳/۲۸ درصد و ۱۷/۱۶ درصد ذخیره انرژی صورت گرفت [۵]. هچر و همکاران چهار تابع هدف مختلف به منظور بهینه‌سازی عملیاتی فرایند پیش‌سرماسازی با پروپان^۶ انتخاب کردند و با بررسی‌های انجام‌شده، مشخص شد بهترین تابع هدف، انرژی مصرفی کمپرسور هاست [۶]. خان و همکاران روی ترکیبات بهینه مبرد آمیخته بحث کردند و انرژی مصرفی کمپرسورها را فرایند مبرد آمیخته تک‌مرحله‌ای را کاهش دادند [۷]. ول و همکاران فرایند پریکو مورد مطالعه در مقاله اسپلند را شبیه‌سازی کردند و از روش اس.کیو. پی^۷ برای بهینه‌سازی استفاده کردند. نتایج بهینه‌سازی کیس‌های مختلف در مقایسه با مقاله پیشین بهبود پیدا کرد و حدود ۱ درصد تا ۴ درصد ذخیره انرژی به همراه داشت.

همچنین زمان دستیابی به بهینه‌سازی کوتاه شد [۸]. ژو و همکاران به یافتن نقاط بهینه فرایند پریکو با الگوریتم ژنتیک پرداختند. فشارهای فرایند ثابت در نظر گرفته شد و اثر دمای ورودی به مبدل بر درصد ترکیبات مبرد به دست آمد [۹]. ژو و همکاران شبیه‌سازی فرایند پریکو را در نرم‌افزار اسپن پلاس^۸ انجام دادند و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی فرایند استفاده کردند و اثر درصد ترکیبات مبرد بر منحنی‌های سرد و گرم و محل نقطه پینچ بررسی شد [۱۰]. موروسک و همکاران به بررسی اگزرژی فرایند پریکو پرداختند. تحلیل اگزرژی نشان داد که اثرگذارترین تجهیز از نظر ترمودینامیکی و اقتصادی مبدل حرارتی است و با بهبود ترمودینامیکی آن (کاهش اختلاف دمای منحنی‌های سرد و گرم و افت فشار حین مبادله حرارتی) عملکرد فرایند به مقدار چشمگیری بهبود می‌یابد [۱۱]. نا و همکاران به ارائه الگوریتمی برای بهینه‌سازی پرداختند و مصرف انرژی فرایند پریکو را ۱۸/۹ درصد کاهش دادند [۱۲].

تعدادی از آن‌ها به تغییرات ساختاری و چیدمان تجهیزات به منظور ذخیره انرژی پرداختند. عبداللهی با تغییر آرایش مبدل‌های حاصل درون جعبه تبرید و تعبیه توربین به جای شیر فشارشکن، هدررفت اگزرژی کل فرایند را به میزان ۱۰/۱۸ درصد کاهش داد [۱۳]. حسینی پیکربندی جدیدی برای تولید هم‌زمان LNG و NGL ارائه داد و مصرف انرژی را به حداقل (۰.۴۲ kWh/kg LNG) رساند [۱۴]. کمالی‌نژاد بر روی اصلاح ساختار چرخه‌های سرمایش عمیق چندطبقه‌ای و چندجزئی واحدهای گاز طبیعی مایع برای کاهش مصرف انرژی پرداخت و مواردی از جمله فشار مکش کمپرسور، درصد ترکیبات مبرد و چیدمان کمپرسورها را تغییر داد و به صرفه‌جویی بالغ بر ۷/۱ درصد دست یافت [۱۵]. نوبیحاری با ارائه یک فرایند جدید با ادغام سامانه‌های سرمایشی جذبی آب-آمونیاک با فرایندهای تولید گاز طبیعی مایع، به کاهش ۲۰ درصدی مصرفی برق دست یافت [۱۶]. وطنی و همکاران پیکربندی جدیدی برای یکپارچه‌سازی تولید LNG و NGL معرفی کردند که مصرف انرژی بسیار کمی (۰/۴۱ kWh/kg LNG) داشت [۱۷].

مطالعه حاضر به شبیه‌سازی فرایند پریکو در محیط اسپن هایسیس پرداخته است. با توجه به محدودیت‌هایی که ایران با آن مواجه است، نظیر کمبود آب، فرایند مرجع [۱۱] توسعه یافت و فرایند جدیدی برای مرتفع کردن این مشکلات ارائه شد.

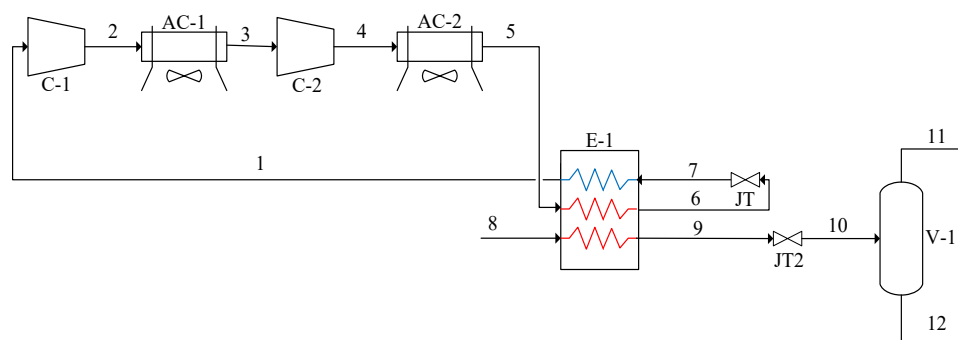
8. Aspen Plus

1. Aspen HYSYS
2. Tabu Search
3. Genetic Algorithm (GA)
4. Exergy analysis
5. Propane pre-cooled mixed refrigerant
6. C3/MCR
7. SQP



اینکه ضریب ژول تامسون مبرد مثبت است، عبور از شیر فشارشکن باعث کاهش فشار و دمای مبرد می‌شود. سپس مبرد با دمای $162/8^{\circ}\text{C}$ وارد مبدل حرارتی می‌شود و حرارت را از دو جریان دیگر دریافت می‌کند و دمای آن به حدود 36°C افزایش می‌یابد. گاز طبیعی در مبدل حرارتی نیز حرارت خود را از دست می‌دهد و دمای آن به 159°C کاهش می‌یابد.

کمبود منابع آبی یکی از معضلاتی است که کشور ایران با آن مواجه است. همچنین در برخی مناطق راهاندازی تأسیسات آبی برای تأمین آب کولرهای آبی، بسیار هزینه‌بر و مشکل است. به همین دلیل، به منظور خنک کردن جریان مبرد در چرخه سردسازی از کولرهای هوایی بهره می‌برند. میزان گاز مایع تولیدی در فرایند مرجع $1/427$ میلیون تن در سال است. این ظرفیت در مقیاس کوچک نیست [۱۸]؛ بنابراین لازم است که فرایند در مقیاس کوچک قرار گیرد. با کاهش شدت جریان گاز طبیعی و مبرد، در نهایت میزان گاز مایع تولیدی فرایند به $0.2/0$ میلیون تن در سال رسید که در محدوده مقیاس کوچک قرار می‌گیرد [۱۹]. فرایند پریکو در (شکل ۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. طرحی شماتیک از فرایند پریکو

شده است. شمار زیادی از مطالعات انجام شده روی درصد ترکیبات مبرد بر بهینه‌سازی تمرکز کردند. در این مطالعه درصد ترکیبات مبرد ثابت در نظر گرفته شد و شدت جریان مولی مبرد تغییر کرد و به تبع آن، شدت جریان ترکیبات مبرد تغییر یافت. دمای هوای ورودی به کولرهای هوایی 30° در نظر گرفته شد. متغیرهای ثابت فرایندی در (جدول ۱) نشان داده شده‌اند، در بهینه‌سازی مشخصات ترمودینامیکی گاز طبیعی و گاز طبیعی مایع ثابت در نظر گرفته شدند و در (جدول ۲) آورده شده است. تابع هدف انرژی مصرفی ویژه فرایند است که در معادله ۱ آورده شده است.

$$f(x) = (W_{C-1} + W_{C-2}) / G_{NG}$$

(۱)

با توجه به اینکه فرایندهای مایع‌سازی گاز طبیعی بسیار انرژی‌بر هستند، انرژی مصرفی ویژه فرایند توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی و مقادیر متغیرهای فرایندی به دست آمده است. تحلیل انرژی و انرژی روی تجهیزات فرایند اولیه و بهینه انجام شده و در نهایت قیمت تجهیزات فرایند در دو حالت محاسبه و تحلیل شد و اثر بهینه‌سازی بر آن‌ها ارزیابی شد.

۲. شرح فرایند

هسته اصلی فرایند پریکو و به‌طور کل فرایندهای سردسازی مبدل حرارتی است. در مبدل حرارتی، حرارت توسط جریان کم‌فشار مبرد (جریان خروجی از شیر فشارشکن) از گاز طبیعی و جریان پرفشار مبرد دریافت می‌شود تا برودت لازم برای میعان گاز طبیعی و مبرد پرفشار تأمین شود. مبرد طی عبور از دو کمپرسور، فشرده می‌شود و به حداکثر دما و فشار (جریان ۴) می‌رسد. از کولر هوایی برای خنک کردن و کاهش دمای مبرد استفاده شده است.

سپس مبرد به‌عنوان جریان گرم (جریان ۵) وارد مبدل حرارتی می‌شود و حرارت خود را از دست می‌دهد، مایع می‌شود و به دمای 159°C می‌رسد (جریان ۶). با توجه به

۳. بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک

یکی از روش‌های بهینه‌سازی انتخابی، الگوریتم ژنتیک است. الگوریتم ژنتیک ابزاری قدرتمند برای دستیابی به مقدار مینیمم کلی است و در مقالات متعددی استفاده شده است. هنگامی که نتایج پذیرفتنی نبود، با پدیده‌هایی نظیر وراثت، جهش و ترکیب، نسل جدیدی تولید می‌کند تا به مقادیر بهینه دست یابد. معادله پنگ-رابینسون^۱ برای محاسبه خصوصیات جریان‌های فرایندی انتخاب شد. ترکیبات مبرد شامل متان، اتان، بوتان و نیتروژن است. دمای خروجی جریان مبرد و گاز طبیعی مایع از مبدل ثابت در نظر گرفته

1. Peng-Robinson equation.

جدول ۱. متغیرهای ثابت فرایند در بهینه‌سازی

مقادیر	موارد
۸۰٪	راندمان آدیاباتیک کمپرسور [۳]
$3 \geq$	اختلاف دمای فوق داغ ورودی به کمپرسورها از دمای اشباع (°C) [۹]
۳	حداقل دمای نزدیکی مبدل (°C) [۹]
۰/۵	افت فشار در مبدل (bar) [۹]
۰٪	نشت حرارت مبدل [۹]
-۱۵۹	دمای جریان‌های گرم خروجی مبدل (°C) [۱۱]
۳۰	دمای هوای ورودی به کولرهای هوایی (°C)
۴۰	دمای خروجی مبرد از کولرهای هوایی (°C) [۱۹]
۰/۵	افت فشار در کولرهای هوایی (bar) [۱۹]
	ترکیبات مبرد (درصد مولی) [۱۱]
۳۰	متان
۳۰	اتان
۰	پروپان
۰	ایزوبوتان
۲۵	نرمال بوتان
۱۵	نیتروژن

جدول ۲. متغیرهای ترمودینامیکی جریان گاز و گاز طبیعی مایع

متغیر	گاز طبیعی	گاز طبیعی مایع
دبی جرمی (kg/h)	۳۶۰۰	۳۳۹۹.۳
دما (°C) [۱۱]	۳۸	۴/-۱۶۳
فشار (bar) [۱۱]	۶۷	۰.۱۳/۱
آنتالپی جرمی (kJ/kg)	-۹/۴۲۰.۸	-۵۱۱۳
ترکیبات (درصد مولی) (%) [۱۱]		
متان	۸۸	۶/۸۸
اتان	۸	۴۵/۸
پروپان	۲	۱۱/۲
ایزوبوتان	۰	۰
نرمال بوتان	۰	۰
نیتروژن	۲	۸۴/۰

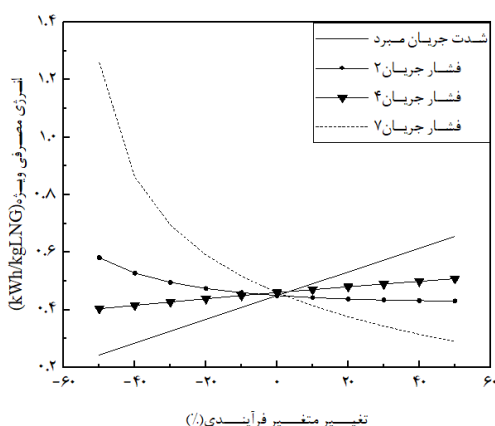
روش عملگرهای الگوریتم ژنتیک در (جدول ۳) آورده شده است.

جدول ۳. روش عملگرهای الگوریتم ژنتیک

متغیر	روش انتخابی
Selection	Stochastic uniform
Crossover	Scattered
Mutation	Adaptive feasible
Population	۷۰
Generation	۱۰۰

۴. آنالیز حساسیت

برای یافتن متغیرهای اثرگذار بر تابع هدف، آنالیز حساسیت روی متغیرهای فرایند انجام شد. متغیرهایی که بیشترین اثر را بر تابع هدف داشتند، برای متغیرهای بهینه‌سازی انتخاب شدند. همان‌طور که در (شکل ۲) مشخص است، فشار خروجی از کمپرسور اول، شدت جریان مبرد و فشار بعد از شیر فشارشکن بیشترین اثر را بر تابع هدف داشتند. مقادیر متغیرهای انتخابی توسط الگوریتم ژنتیک محاسبه شده و در (جدول ۴) آورده شده است.



شکل ۲. آنالیز حساسیت متغیرهای بهینه‌سازی بر انرژی مصرفی ویژه

جدول ۴. نتایج بهینه‌سازی

مقدار اولیه	مقدار بهینه	
۱۰۵۰	۷۷/۱۰۶۳	شدت جریان مبرد (kmole/h)
		شدت جریان ترکیبات مبرد (kmole/h)
۳۱۵	۱۳۵/۳۱۹	متان
۳۱۵	۱۳۵/۳۱۹	اتان
۵/۲۶۲	۹۴/۲۶۵	بوتان
۵/۱۵۷	۵۶/۱۵۹	نیتروژن
۸۰۰	۱۳۴۵	فشار جریان ۲ (bar)
۲۶۵۰	۲۶۵۱	فشار جریان ۴ (bar)
۶۰۰	۴/۶۵۲	فشار جریان ۷ (bar)



۵. تحلیل انرژی و انرژی

در تحلیل انرژی، مصرف انرژی توسط تجهیزات فرایند بررسی می‌شود. یکی از شاخص‌های آن، انرژی مصرفی ویژه است که در این پژوهش تابع هدف در نظر گرفته شد و در معادله ۱ آورده شده است.

مقدار انرژی مصرفی ویژه برای فرایند اولیه و بهینه به ترتیب ۰/۴۶ و ۰/۴۱ کیلووات ساعت بر کیلوگرم گاز طبیعی مایع محاسبه شد. در حقیقت در فرایند بهینه مقدار انرژی مصرفی ویژه ۰/۸ درصد کاهش یافته است. دلیل آن کاهش انرژی مصرفی کمپرسورهاست.

شاخص دیگری که به منظور بررسی عملکرد چرخه سردسازی محاسبه می‌شود، ضریب عملکرد^۱ است. ضریب عملکرد عبارت است از نسبت مجموع حرارت گرفته شده از منبع سرد به کل کار مصرفی در چرخه [۱۱].

$$COP = (\dot{H}_g - \dot{H}_9) * G_{NG} / (W_{C-1} + W_{C-2}) \quad (2)$$

در چرخه‌های سردسازی گاز طبیعی، منبع سرد گاز طبیعی است. هرچه ضریب عملکرد چرخه‌ای بیشتر باشد، به این معنی است که به ازای مقدار مشخصی حرارت گرفته شده از گاز طبیعی، کار مصرفی چرخه کمتر است و در نتیجه راندمان چرخه بیشتر خواهد بود. ضریب عملکرد چرخه سردسازی فرایند اولیه و بهینه به ترتیب ۰/۵۱۷ و ۰/۵۷۲ محاسبه شد که ۹/۶ درصد بهبود یافته است. همان طور که بیان شد، در تحلیل انرژی، انرژی مصرفی را تجهیزات فرایند بررسی می‌کند؛ لذا دلیل بهبود دو شاخص تحلیل انرژی، کاهش انرژی مصرفی کمپرسورهاست.

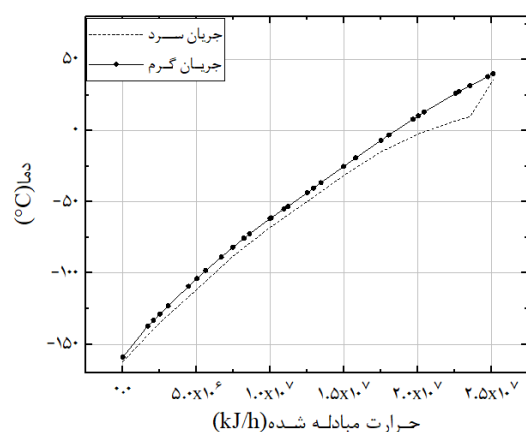
هدف آنالیز انرژی یافتن و شناسایی تجهیزاتی است که برگشت‌ناپذیری دارند و موجب افزایش کار تلف شده می‌شوند. انرژی حداکثر کار مفید تئوری به دست آمده از تبادلات انرژی سیستم با محیط برای رسیدن به تعادل ترمودینامیکی است. بنابراین برگشت‌ناپذیری‌هایی که موجب کار تلف شده می‌شوند، تحت عنوان انرژی تخریب شده در این آنالیز محاسبه می‌شوند. همچنین محاسبه نسبت انرژی خروجی یک تجهیز به انرژی ورودی آن، بیانگر عملکرد ترمودینامیکی تجهیز است. بنابراین دو شاخص در آنالیز انرژی محاسبه می‌شوند: انرژی تخریب و بازده انرژی. آنالیز انرژی استفاده شده برای فرایند مایع‌سازی گاز طبیعی،

با روش انرژی سوخت و محصول محاسبه شد [۱۱]. تعریف شاخص‌های آنالیز انرژی بر اساس این روش دقیق‌تر است و باعث دستیابی به نتایج صحیح‌تری می‌شود. معادلات مربوط به انرژی سوخت و محصول تجهیزات فرایند در (جدول ۵) آورده شده است [۲۰].

۶. منحنی‌های ترکیبی^۲

هرچه منحنی‌های سرد و گرم به یکدیگر نزدیک‌تر باشند، حرارت به صورت کارا تر انتقال می‌یابد [۲۱-۲۳]. منحنی ترکیبی مبدل فرایند پریکو بهینه در (شکل ۳) رسم شده است. با عبور جریان کم‌فشار مبرد (جریان سرد) از مبدل، دمای آن به تدریج افزایش می‌یابد. هنگامی که به طور کامل گاز می‌شود، ظرفیت گرمایی آن به طور ناگهانی کاهش می‌یابد. این کاهش ناگهانی باعث ایجاد شکستگی در منحنی سرد می‌شود [۹]. در واقع منحنی جریان سرد در نقطه شبنم مبرد (دمای ۹/۵°C) دچار شکستگی می‌شود.

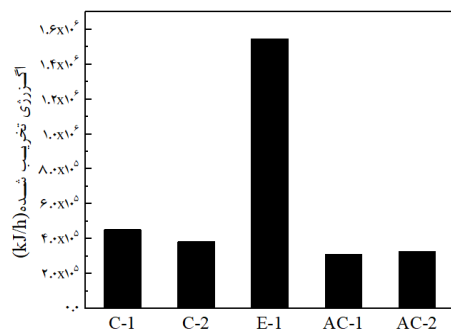
کاهش انرژی مصرفی ویژه باعث افزایش سطح مبدل حرارتی می‌شود [۳]. در واقع با کم شدن انرژی مصرفی کمپرسورها حداقل دمای نزدیکی در مبدل کاهش می‌یابد و این امر باعث افزایش سطح تبادل حرارت مبدل می‌شود. اختلاف دمای جریان سرد و گرم مبدل در فرایند پریکوی اولیه و بهینه در (شکل ۴) نشان داده شده است.



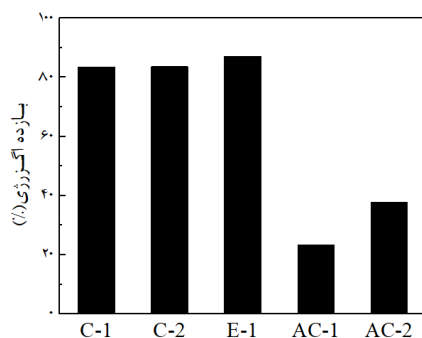
شکل ۳. منحنی‌های ترکیبی مبدل حرارتی فرایند پریکوی بهینه

جدول ۵. شاخص‌های انرژی تجهیزات فرایند پریکو

تجهیز	کمپرسور	مبدل حرارتی	کولر هوایی	کل فرایند
انرژی سوخت ($\dot{E}_{F,k}$)	$\dot{W}_{Comp}$	$\sum (\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out})_{Cold}$	$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}$	$\dot{E}_{F,total} = \sum \dot{W}_{Comp}$
انرژی محصول ($\dot{E}_{P,k}$)	$\dot{E}_{out} - \dot{E}_{in}$	$\sum (\dot{E}_{out} - \dot{E}_{in})_{Hot}$	$\dot{E}_{out}^{air}$	$\dot{E}_{F,total} - \dot{E}_{D,total}$
انرژی تخریب‌شده ($\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{F,k} - \dot{E}_{P,k}$)	$\dot{W}_{Comp} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_{in}$	$\sum (\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out})_{Cold} - \sum (\dot{E}_{out} - \dot{E}_{in})_{Hot}$	$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} - \dot{E}_{out}^{air}$	مجموع انرژی تخریب‌شده تجهیزات $\dot{E}_D$
راندمان انرژی ($\epsilon_k = \dot{E}_{P,k} / \dot{E}_{F,k}$)	$\frac{(\dot{E}_{out} - \dot{E}_{in})}{\dot{W}_{Comp}}$	$\frac{\sum (\dot{E}_{out} - \dot{E}_{in})_{Hot}}{\sum (\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out})_{Cold}}$	$\frac{\dot{E}_{out}^{air}}{(\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out})}$	$\epsilon_{total} = 1 - \left(\frac{\dot{E}_{D,total}}{\dot{E}_{F,total}} \right)$
نسبت تخریب انرژی ($y_k = \dot{E}_{D,k} / \dot{E}_{F,total}$)	$\frac{\dot{E}_{D,Comp}}{\dot{E}_{F,total}}$	$\frac{\dot{E}_{D,HE}}{\dot{E}_{F,total}}$	$\frac{\dot{E}_{D,AC}}{\dot{E}_{F,tot}}$	$y_{total} = \frac{\dot{E}_{D,total}}{\dot{E}_{F,total}}$

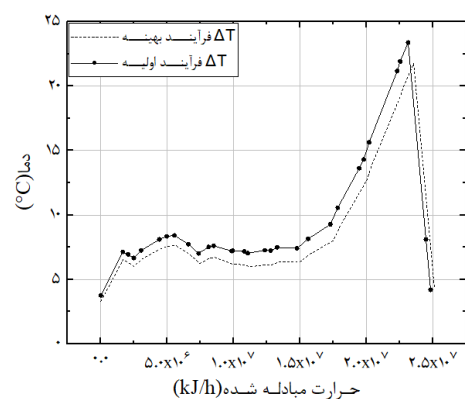


شکل ۵. نمودار انرژی تخریب‌شده تجهیزات فرایند بهینه



شکل ۶. نمودار بازده انرژی تجهیزات فرایند بهینه

بازده انرژی تجهیزات در (شکل ۶) نشان داده شده است. بازده انرژی مبدل حدود ۸۵ درصد و بیشترین مقدار است. دلیل این امر زیاده‌بودن انرژی سوخت و محصول این تجهیز است. در واقع انرژی تخریب‌شده و بازده انرژی مبدل حرارتی چندجریانه بیشترین مقدار است. بازده انرژی کولرهای هوایی کم‌ترین مقدار است. دلیل آن زیاده‌بودن مقدار حرارت مبادله‌شده و اختلاف دمای جریان‌هاست که منجر به تخریب انرژی می‌شود و در نهایت بازده انرژی کاهش می‌یابد.



شکل ۴. اختلاف دمای مبدل حرارتی فرایند اولیه و بهینه

۷. هزینه خرید تجهیزات

بعد از بهینه‌سازی فرایند شبیه‌سازی شده در اسپن هابسیس توسط الگوریتم ژنتیک، هزینه خرید تجهیزات فرایند اولیه و بهینه محاسبه و بررسی شد. معادلات محاسبه هزینه‌ها در (جدول ۶) آورده شده است. سطوح مبدل حرارتی و کولرهای هوایی توسط نرم‌افزار Aspen EDR محاسبه شد و در معادلات مربوط قرار گرفت.

۸. نتایج تحلیل انرژی و انرژی

همان‌طور که در (شکل ۵) مشخص است، انرژی تخریب‌شده مبدل حرارتی از سایر تجهیزات بیشتر است. دلیل آن وجود جریان‌های مختلف با اختلاف دمایی زیاد است. بعد از مبدل حرارتی، انرژی تخریب‌شده کمپرسورها بیشترین مقدار است و در نهایت کولرهای هوایی کم‌ترین انرژی تخریب‌شده را دارند.



مقادیر شاخص‌های انرژی در (جدول ۷) آورده شده است. در فرایند بهینه‌سازی انرژی مصرفی کمپرسور اول بیشتر از کمپرسور دوم است. این امر باعث افزایش انرژی تخریب‌شده می‌شود. همچنین گرادیان دمایی کولر هوایی دوم بیشتر از کولر هوایی اول است، این امر باعث افزایش انرژی تخریب‌شده کولر دوم نسبت به کولر اول می‌شود. (جدول ۹) آورده شده است.

جدول ۶. معادلات هزینه تجهیزات فرایند

تجهیز	معادله هزینه	متغیر
کمپرسور [۱۲]	$C_{Comp} = 580,000 + 20,000 S^{0.6}$ (\$)	S: انرژی مصرفی (kW) $75 < S < 30,000$
مبدل حرارتی [۲۲]	$C_{MSHE} = 425 A$ (\$)	A: سطح تبادل حرارت (m ²)
کولر هوایی [۲۳]	$C_{AC} = 30.0 A^{0.4}$ (k\$)	A: سطح تبادل حرارت (kft ²) $0.05 < A < 200$

جدول ۷. شاخص‌های انرژی تجهیزات فرایند اولیه و بهینه

فرایند	تجهیز	انرژی تخریب‌شده، ED (kJ/h)	بازده انرژی (%), ϵ	نسبت تخریب انرژی (%), y_k
فرایند اولیه	کمپرسور اول	5/218577	34/82	88/3
	کمپرسور دوم	7/664190	87/84	79/11
	مبدل حرارتی	6/1711226	76/85	39/30
	کولر هوایی اول	8/201541	29/16	57/3
	کولر هوایی دوم	657909	38/34	68/11
فرایند بهینه	کمپرسور اول	3/452696	52/83	89/8
	کمپرسور دوم	1/384226	59/83	54/7
	مبدل حرارتی	1545670	09/87	36/30
	کولر هوایی اول	9/310862	29/23	10/6
	کولر هوایی دوم	1/327809	72/37	44/6

جدول ۸. عملکرد ترمودینامیکی فرایند اولیه و بهینه

فرایند اولیه	فرایند بهینه	
8/1563	8/1413	انرژی مصرفی کل (kW)
9/6898	38/6978	ظرفیت سردسازی کل (kW)
35/3399	35/3399	گاز طبیعی مایع (kg/h)
46/0	41/0	انرژی مصرفی ویژه (kWh/kgLNG)
517/0	572/0	ضریب عملکرد
65/38	64/40	بازده انرژی (%), ϵ
34/61	35/59	نسبت تخریب انرژی (%), y_k

جدول ۹. مقایسه نتایج فرایند با مطالعات پیشین

فرایند	تابع مورد نظر	مقدار
فرایند تجاری پریکو [۳]	انرژی مصرفی ویژه (kWh/kgLNG)	۴۱۲۵/۰
مکاري زاده [۴]	بازده انرژی (%)	۳۰
ژو [۹]	بازده انرژی (%)	۱/۳۷
موروسک [۱۱]	بازده انرژی (%)	۹/۴۳
موروسک [۱۱]	انرژی مصرفی ویژه (kWh/kgLNG)	۵۰۶/۰
حسینی [۱۴]	بازده انرژی (%)	۷/۲۲
حسینی [۱۴]	انرژی مصرفی ویژه (kWh/kgLNG)	۴۲/۰
وطنی [۱۷]	انرژی مصرفی ویژه (kWh/kgLNG)	۴۱۴/۰
این مطالعه	انرژی مصرفی ویژه (kWh/kgLNG)	۴۱/۰
	بازده انرژی (%)	۶۴/۴۰

مجموع انرژی مصرفی کمپرسورها به ۱۴۱۳/۸ کیلووات رسید و انرژی مصرفی ویژه ۱۰/۸۶ درصد کاهش یافت. همچنین بازده انرژی و نسبت تخریب انرژی فرایند بهینه به ترتیب حدود ۵ درصد افزایش و ۳ درصد کاهش یافت. ضریب عملکرد آن نیز ۹/۶ درصد افزایش یافت. بهینه سازی انرژی مصرفی کمپرسورها، باعث کاهش حداقل دمای نزدیکی مبدل، افزایش سطح تبادل حرارت مبدل و در نتیجه گران شدن تجهیز شد. با افزایش فشار عملیاتی جریان مبرد در نتیجه بهینه سازی نیز هزینه کمپرسور افزایش یافت. به دلیل کاهش انرژی مصرفی کمپرسورها، هزینه خرید آن ها کاهش یافت؛ اما در نهایت مجموع هزینه ها تقریباً بدون تغییر ماند. در بین تجهیزات فرایند بهینه، نسبت تخریب انرژی مبدل حرارتی بیشترین مقدار و حدود ۳۰ درصد محاسبه شد که دلیل آن، وجود جریان های متعدد و اختلاف دمایی میان آن ها در نظر گرفته شد. به دلیل گرادیان دمایی چشمگیر در کولر های هوایی، بازده انرژی آن ها مقدار پایینی (برای کولر هوایی اول و دوم به ترتیب ۲۳ درصد و ۳۷ درصد) به دست آمد.

۹. نتایج ارزیابی هزینه خرید تجهیزات

با استفاده از معادلات (جدول ۶) هزینه خرید تجهیزات محاسبه شد و نتایج در (جدول ۱۰) آورده شد. با بهینه سازی انرژی مصرفی ویژه فرایند مجموع انرژی مصرفی کمپرسورها کاهش یافت؛ در نتیجه هزینه خرید کمپرسورها نیز کاهش یافت. در حالی که سطح مبدل حرارتی افزایش یافت و هزینه خرید آن افزایش یافت. افزایش فشار جریان ورودی به کولر هوایی اول منجر به افزایش هزینه خرید آن تجهیز شد. هزینه خرید برج جداکننده به دلیل ثابت بودن شرایط ترمودینامیکی گاز طبیعی مایع بررسی نشد. در نهایت هزینه خرید تجهیزات فرایند تقریباً ثابت ماند و حدود ۱ درصد کاهش داشت.

جدول ۱۰. هزینه خرید تجهیزات فرایند

تجهیز	فرایند اولیه	فرایند بهینه
کمپرسور اول (\$)	۱۲۴۵۰۶۶/۹	۱/۱۶۵۳۰۳۳
کمپرسور دوم (\$)	۲۰۰۱۸۳۶/۶	۲/۱۵۵۵۱۰۸
مبدل حرارتی (\$)	۲۲۲۰۳۲۷/۵	۵/۲۲۶۲۷۴۲
کولر هوایی اول (\$)	۹۸۰۶۱/۱	۸/۱۰۴۲۹۸
کولر هوایی دوم (\$)	۱۴۹۸۹۷/۲	۱/۹۸۰۶۱
کل هزینه (\$)	۵۷۱۵۱۸۹/۵	۵۶۷۳۲۴۴

۱۰. نتیجه گیری

فرایند پریکو شبیه سازی شده در محیط اسپن هایسیس توسط الگوریتم ژنتیک بهینه سازی شد. با بهینه سازی فرایند،

علائم و نشانه ها

- AC: کولر هوایی
- C: کمپرسور
- E: مبدل حرارتی
- IT: شیر فشار شکن
- kft²: هزار فوت مربع
- V: جداکننده عمودی
- \$: دلار
- γ_k : نسبت تخریب انرژی
- ε : بازده انرژی

زیر نویس ها

- Comp: کمپرسور
- D: تخریب
- F: سوخت
- k: تجهیز مدنظر
- MSHE: مبدل حرارتی چندجریانه

۱۱. مراجع

- [۱]. نیک آذرم و کی نژاد، نفت و گاز پیدایش - پالایش، تهران: علوم کاربردی، ۱۳۹۱.
- [۲]. اسلم بخش، بررسی فنی- اقتصادی فرایندهای SMR و N2 Expansion برای تولید LNG در مقیاس کوچک، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۹۳.





- تهران، ۱۳۹۳.
- [۱۵]. کمالی‌نژاد، اصلاح ساختار چرخه‌های سرمایش عمیق چندطبقه‌ای و چندجزئی واحدهای LNG برای کاهش مصرف انرژی و سرمایه‌گذاری از طریق تحلیل‌های مفهومی (پینچ و اکسرژی) با ابزار ریاضیات غیرخطی گسسته (MINLP)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۳.
- [۱۶]. نوبیحاری، ارائه یک فرایند جدید برای تولید LNG با استفاده از سامانه‌های سرمایش جذبی با هدف کاهش انرژی موردنیاز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۹۵.
- [17]. Vatani A., Mehrpooya M., Tirandazi B., A novel process configuration for co-production of NGL and LNG with low energy requirement, Chemical engineering and processing: process intensification, 63 (2013) 16-24.
- [18]. The Linde Group, Small-Medium Scale LNG Technology, Economics, Transportation, and Receiving Terminal, <http://docplayer.net/33970819-The-linde-group-small-medium-scale-lng-technology-economics-transportation-and-receiving-terminal.html> (14.6.2018).
- [19]. Palizdar A., Sadrameli S.M., Conventional and advanced exergoeconomic analyses applied to ethylene refrigeration system of an existing olefin plant, Energy Conversion and Management, 138 (2017) 474-485.
- [20]. Palizdar A., Ramezani T., Nargessi Z., AmirAfshar S., Abbasi M., Vatani A., Advanced exergoeconomic evaluation of a mini-Scale nitrogen dual expander process for liquefaction of natural gas, Energy, 168 (2019) 542-557.
- [۲۱]. فلسفی، بهبود ساختاری فرایند مایع‌سازی گاز طبیعی (LNG) به روش مبرد آمیخته تک‌مرحله‌ای با هدف بهبود راندمان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۹۶.
- [22]. Towler G., Sinnott R., Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design, 2nd ed., Butterworth-heinemann (2013).
- [23]. Aslambakhsh AH., Moosavian MA., Amidpour M., Hosseini M., AmirAfshar S., Global cost optimization of a mini-scale liquefied natural gas plant. Energy, 148 (2018) 1191-200.
- [24]. Couper J.R., Penney W.R., Fair J.R., Walas S.M., Chemical process equipment: selection and design, 3rd., Butterworth-heinemann (2010).
- [3]. Aspelund A., Gundersen T., Myklebust J., Nowak M.P., Tomasgard A., An optimization-simulation model for a simple LNG process, Computers and Chemical Engineering, 34 (2010) 1606-1617.
- [4]. Mokarizadeh Haghighi Shirazi M., Mowla D., Energy optimization for liquefaction process of natural gas in peak shaving plant, Energy, 35 (2010) 2878-2885.
- [5]. Alabdulkarem A., Mortazavi A., Hwang Y., Radermacher R., Rogers P., Optimization of propane pre-cooled mixed refrigerant LNG plant, Applied Thermal Engineering, 31 (2011) 1091-1098.
- [6]. Hatcher P., Khalilpour R., Abbas A., Optimisation of LNG mixed-refrigerant processes considering operation and design objectives, Computers and Chemical Engineering, 41 (2012) 123-133.
- [7]. Khan M.S., Lee S., Rangaiah G.P., Lee M., Knowledge based decision making method for the selection of mixed refrigerant systems for energy efficient LNG processes, Applied Energy, 111 (2013) 1018-1031.
- [8]. Wahl P.E., Lovseth S.W., Molnvik M.J., Optimization of a simple LNG process using sequential quadratic programming, Computers and Chemical Engineering, 56 (2013) 27-36.
- [9]. Xu X., Liu J., Jiang C., Cao L., The correlation between mixed refrigerant composition and ambient conditions in the PRICO LNG process, Applied Energy, 102 (2013) 1127-1136.
- [10]. Xu X., Liu J., Cao L., Optimization and analysis of mixed refrigerant composition for the PRICO natural gas liquefaction process, Cryogenics, 59 (2014) 60-69.
- [11]. Morosuk T., Tesch S., Hiemann A., Tsatsaronis G., Bin Omar N., Evaluation of the PRICO liquefaction process using exergy-based methods, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 27 (2015) 23-31.
- [12]. Na J., Lim Y., Han C., A modified DIRECT algorithm for hidden constraints in an LNG process optimization, Energy, 126 (2017) 488-500.
- [۱۳]. عبداللهی‌دمنه، ارائه یک فرایند جدید مایع‌سازی گاز طبیعی با استفاده از تحلیل هم‌زمان پینچ و اکسرژی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۹۴.
- [۱۴]. حسینی، طراحی و بهینه‌سازی فرایند یکپارچه تولید LNG و NGL، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه

Investigation on LNG Plant in Small Scale

Samira Ahmadi, M. R. Jafari Nasr*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Oil and Chemical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Corresponding Author, Email: nasrmrj@ripi.ir

Abstract

In this study, the process of single stage mixed natural gas liquefaction is reviewed, then process energy optimization and economic analysis are followed. The effect of specific energy consumption optimization on the costs of cooling equipment was investigated. The basis of this study is PRICO process and due to some limitations and concerns for Iran, it is tried to develop a new modified process so that the available process restrictions would expel and finally the recommended process optimized by genetic algorithm. Mole flow of refrigerant, low pressure and high pressure of refrigerant in the cycle, are the most important operational parameters that were selected by sensitivity analysis. The total energy consumption of compressors reached 1413.8 kW and decreased by 11 percent. Results showed optimization of the specific energy consumption increases the cost of the heat exchanger, due to the reduction of heat exchanger temperature driving force and need to higher heat transfer area. However, the operating cost of compressors can be reduced.

Keywords: PRICO process, Optimization, Genetic Algorithm, Exergy Analysis, Equipment Cost.





مدل سازی واکنش موازی-رقابتی Villiermaux-Dushman در میکروآکتورهای منتخب با استفاده از نرم افزار کامسول

پیوند واله شیدا، مجید یارمحمدتوسکی

گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

نویسنده مسئول ایمیل: p.valeh-sheyda@kut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۳۱

چکیده

بخش مهمی از فرایندهای شیمیایی را عمل اختلاط و ترکیب مواد تشکیل می‌دهد. در این تحقیق، سعی شده است شبیه سازی اختلاط واکنش Villiermaux-Dushman با استفاده از نرم افزار شبیه سازی COMSOL Multiphysics برای دو میکروکانال با سطح مقطع های مربعی و دوزنقه ای با ابعاد مشخص و به منظور دستیابی به حداقل شاخص جدایش خروجی بررسی می شود. از داده های تجربی برای ورودی های معلوم به نرم افزار استفاده شد. اثر دبی حجمی بر شاخص جدایی Xs به عنوان معیار سنجش کیفیت اختلاط و نیز افت فشار درون میکروکانال بررسی شد. نتایج حاصل از مدل سازی حاکی از آن است که در کلیه دبی ها، میکروکانال T شکل با سطح مقطع مربعی با شاخص جدایش نزدیک تر به صفر (۰/۰۰۰۱ - ۰/۰۰۶۷) نسبت به میکروکانال T شکل با سطح مقطع دوزنقه ای عملکرد بهتری دارد. مقادیر افت فشار، هم در کار مدل و هم کار تجربی در همه دبی ها از ۱ ml/min تا ۱۸ نزدیک به هم و در محدوده ۰/۱ bar تا ۰/۳ تغییر کرد. همچنین نرم افزار مورد استفاده نشان داد که در مدل سازی واکنش موازی - رقابتی دید-یدات از دقت نسبتاً زیادی برخوردار است.

کلمات کلیدی: اختلاط، میکروکانال، واکنش موازی-رقابتی Villiermaux-Dushman، شاخص تفکیک.

۱- مقدمه

مروری بر مطالعات گذشته در زمینه ساختار و هندسه میکروکانال ها بر خصوصیات جریان سیال، نشان می دهد که برای بررسی عملکرد اختلاط می توان از واکنش های مختلفی استفاده کرد. کاشید و همکارانش [۱] در سال ۲۰۱۱، راندمان اختلاط و نیز انرژی مصرفی در شکل های مختلفی از میکروکانال ها با سطوح مختلف را با استفاده از واکنش موازی-رقابتی دید-یدات به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. بدین منظور میکروکانال هایی با هندسه و ابعاد مختلف از جنس فولاد ضد زنگ ساخته شد. با استفاده از واکنش موازی-رقابتی دوشمان، نتایج بر اساس شاخص تفکیک تفسیر شد.

ساخت و تولید محصولات شیمیایی در صنایع تولید کننده مواد شیمیایی ریز و کوچک از جمله داروسازی با استفاده از میکروکانال ها، اخیراً شاخه جدیدی در مهندسی واکنش های شیمیایی ایجاد کرده است که بیشتر بر انتخاب پذیری بالا (تولید پسماند کمتر)، افزایش شدت انجام فرایند و نکات ایمنی تأکید می کند [۱-۳]. میکروکانال ها سطح مخصوص زیادی را فراهم می کنند و بدین ترتیب میزان انتقال حرارت و جرم را در مقایسه با کانال ها و رآکتورهای سنتی به طور مؤثری افزایش می دهند؛ بنابراین، بدیهی است که کوچک شدن اندازه کانال ها کمک شایانی به افزایش بازدهی واحدهای صنعتی، کاهش مصرف انرژی و کاهش هزینه های عملیاتی می کند [۴].



واکنش اول یک واکنش خنثی سازی است؛ در حالی که واکنش دوم واکنش یدید-یدات است. دو محلول، یکی بافر یون اسید بورات، یدید و یدات و محلول سولفوریک اسید رقیق به میکروکانال مورد مطالعه تزریق شدند. جزئیات واکنش شامل معادله سرعت و مقادیر ثابت سرعت مطابق ذیل است:

$$r_1 = k_1 [H^+] [H_2BO_3^-] \quad (4)$$

$$k_1 = 1 \times 10^{11} \text{ L.mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$r_2 = k_2 [H^+]^2 [I^-]^2 [IO_3^-] \quad (5)$$

$$\text{Log}_{10} k_2 = 9.28105 - 3 / 664 \sqrt{I} \quad (6)$$

$$\text{Log}_{10} k_2 = 8.383 - 1 / 5112 \sqrt{I} + 0.237 I \quad (7)$$

$$I = 1 / 2 \sum_{i=1}^n c_i z_i^2 \quad (8)$$

$$r_3 = r_3^+ - r_3^- = k_3^+ [I^-] [I_2] - k_3^- [I_3^-] \quad (9)$$

$$k_3^+ = 5.9 \times 10^9 \text{ L.mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \quad (10)$$

$$k_3^- = 7.5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$$

I تابعی از غلظت و عدد یونی است [۷] که مقدار آن با استفاده از رابطه ۸ و مطابق با کار آزمایشگاهی عظیمی و همکاران [۸] برابر $1/0.1393$ در نظر گرفته شده است. با فرض اختلاط ایدئال، اسید به صورت آبی حل می شود و یون های بورات به طور همگن مصرف می کنند و بوریک اسید ایجاد می شود؛ لذا واکنش دوم اتفاق نمی افتد. چنانچه واکنش ایدئال نباشد، اسید با یدید-یدات موجود در محلول واکنش می دهد که نهایتاً موجب تولید ید می شود؛ بنابراین تولید ید می تواند عملکرد اختلاط را توصیف کند. شاخص جدایی X_s به عنوان میزان نسبی اسید مصرف شده به صورت زیر تعیین می شود:

$$X_s = \frac{Y}{Y_{ST}} \quad (11)$$

$$Y = \frac{4(C_{I_2} + C_{I_3^-})}{C_{H_3O^+}} \quad (12)$$

$$Y_{ST} = \frac{6C_{IO_{3,0}^-}}{6C_{IO_{3,0}^-} + C_{H_2BO_{3,0}^-}} \quad (13)$$

در این رابطه، Y نشان دهنده نسبت مول های مصرفی در واکنش دوم به کل مول های اسید در خوراک است. Y_{ST} مقدار Y است، در حالتی که تفکیک به صورت کامل انجام می شود. در دو رابطه بالا زیروند صفر نشان دهنده غلظت آن جزء قبل از ورود به میکروکانال است.

رحیمی و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۴، در یک کار آزمایشگاهی، اثر اولتراسونیک با فرکانس ۱/۷ MHz بر اختلاط میکرو و ماکرو را در یک سونو رآکتور ناپیوسته مطالعه کردند و نتایج آن را با یک رآکتور همزن دار مجهز به پره راشتون مقایسه کردند. در این کار کیفیت اختلاط میکرو به عنوان پاسخ با استفاده از واکنش موازی-رقابتی دوشمان بررسی شد. نتایج نشان داد که در یک توان ورودی یکسان، شاخص جدایش در رآکتور همزن دار، ۱۰ درصد بیشتر از سونو رآکتور بوده است؛ بنابراین سونو رآکتور از نظر اختلاط عملکرد بهتری داشته است.

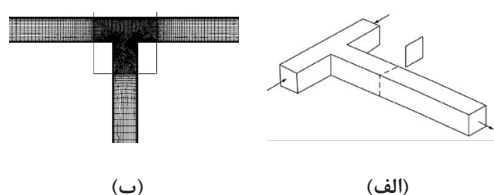
بورن [۶] در سال ۲۰۰۸، برای تعیین میزان اختلاط میکرو، بازده ید را محاسبه کرد تا از نظر کیفی نتایج مفهوم و سازگاری را بیان کند. آن ها با انجام آزمایش و انتخاب اندازه های همزن های مختلف، بازده ید و اختلاط را در مقیاس مولکولی مطالعه کردند. معلوم شد که در بررسی عملکرد کمی واکنش، نیاز به شناخت کامل سینتیک است که معرف غلظت و قدرت یونی مورد استفاده در آزمایش اختلاط است. هیچ یک از مدل های سینتیکی از مدل های واکنش دوشمان نتوانستند این شرایط را برآورده سازند و مدل ها تطابق کمی نشان دادند. در همین راستا، او نیاز به مطالعه سینتیک معادله واکنش دوم دوشمان، به کارگیری تکنیک های مدرن برای واکنش های سریع و غلظت مربوط به بررسی اختلاط را مطرح کرده است.

در تحقیق حاضر مدل سازی اختلاط میکرو در یک میکروکانال T شکل با سطح مقطع های مربعی و دوز نقه ای و با استفاده از واکنش موازی-رقابتی یدید-یدات بررسی و مطالعه می شود. هندسه، ابعاد و مشخصات جریان های مدل شامل دبی و غلظت جریان ها برای مدل سازی واکنش Villiermaux-Dushman بر اساس مطالعه کاشید و همکاران تنظیم شد. برای انجام مدل سازی، بررسی هیدرودینامیک جریان و عملکرد اختلاط از نرم افزار COMSOL Multiphysics نسخه ۵،۳ استفاده شد.

۲. سینتیک واکنش Villiermaux-Dushman و شاخص اختلاط [۱]

مطابق ذیل، واکنش موازی-رقابتی دوشمان برای سنجش شاخص اختلاط استفاده شد.





شکل ۲. الف) میکروکانال با سطح مقطع مربعی مورد استفاده کاشید و همکاران [۲]؛ ب) نمای هندسه مش‌زده در نرم‌افزار.

جدول ۱. غلظت‌های مورد استفاده واکنش دهنده‌ها برای مدل‌سازی واکنش Villiermaux-Dushman [۱]

	$C_{H_2BO_3^{-\gamma_0}}[M]$	$C_{H^{+\gamma_0}}[M]$	$C_{I^{-\gamma_0}}[M]$	$C_{IO_3^{-\gamma_0}}[M]$
ورودی دوم	0.091	0	0.016	0.0033
ورودی اول	0	0.0224	0	0

۴. تنظیمات مدل

سیال مورد استفاده در این شبیه‌سازی، حلال آب در نظر گرفته شد. مقادیر مربوط به دانسیته و ویسکوزیته در دما و فشار متناظر برای آب در نرم‌افزار تعیین شد. فشار نسبی اولیه و دما به ترتیب 0 Pa و 300 K به کار گرفته شد. جریان به‌صورت laminar flow در نظر گرفته شد. دبی معلوم 10 ml h^{-1} رای اسید و برای یکی از ورودی‌ها ثابت و برای ورودی دیگر به‌صورت افزایشی از یک تا 18 ml min^{-1} استفاده شد. شرایط مرزی برای دو ورودی میکروکانال از نوع velocity inlet و برای خروجی از نوع فشار اتمسفریک انتخاب شد. برای تعریف سینتیک واکنش، معادلات واکنش به‌صورت جداگانه با استفاده از مدل Transport of Concentrated Species و با در نظر گرفتن شرایط مرزی ورودی به‌صورت غلظت و شرایط مرزی خروجی به‌صورت جریان خروجی برای نرم‌افزار تعریف شد. معادلات Incompressible Navier-Stokes برای انتقال منتم و جرم سیال و واکنش در حالت پایا، به‌صورت عددی هم‌زمان حل شدند.

۵. نتایج و بحث

۵.۱. بررسی افت فشار

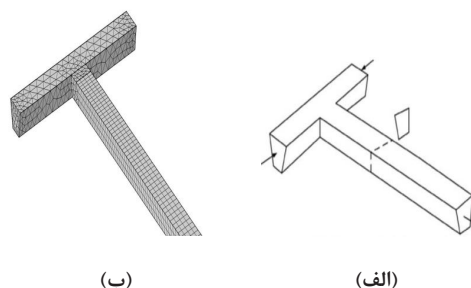
به‌طور کلی، افت فشار یکی از مباحث مهم در حوزه میکروکانال‌ها به شمار می‌رود. افت فشار به‌طور مستقیم با مصرف انرژی در ارتباط است که عمدتاً به‌دلیل قطر هیدرولیکی کوچک کانال روی می‌دهد. (شکل ۳) پروفایل فشار در دو میکروکانال مورد مطالعه را در ۵ دبی مختلف نشان می‌دهد.

هرچه پد کمتری تولید شود، اختلاط بهتری صورت می‌گیرد. کیفیت اختلاط هم بر اساس شاخص X_s توصیف شد که عددی بین صفر و یک است. هرچه این عدد به سمت صفر نزدیک‌تر باشد، یعنی اختلاط بهتر و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، یعنی اختلاط بدتر بوده یا به عبارتی تفکیک به وجود آمده است. لازم به ذکر است طیف I_3^- در طول موج 353 nm برای تعیین میزان غلظت در نظر گرفته شد.

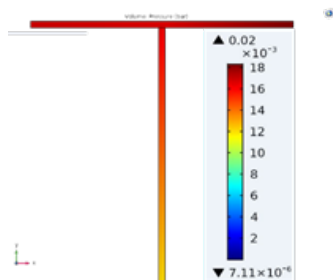
۳. مشخصات محلول و هندسه میکروکانال

هندسه میکروکانال مورد استفاده در کار آزمایشگاهی با سطح مقطع دوزنقه‌ای به‌طول 75 mm و قطر هیدرولیکی $400 \text{ }\mu\text{m}$ در نرم‌افزار کامسول تعریف شد (شکل ۱).

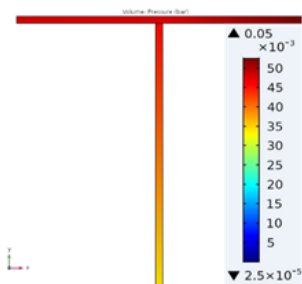
مش مورد استفاده دارای 10866 المان در دو نوع مثلثی و مستطیلی منظم است. به‌طور کلی، محدوده مدل به دو بخش تقسیم شد: بخش اول، شامل قسمت‌های ورودی و بخش دوم محل برخورد دو جریان تا کمی بعد از آن در نظر گرفته شد. در این ناحیه دوم، نرخ واکنش و گرادیان غلظت شدید است؛ لذا در این ناحیه از مش مثلثی بدون در نظر گرفتن مش‌های لایه‌های مرزی با تعداد 6066 المان با توجه به اندازه و ابعاد کل شکل میکروکانال‌ها انتخاب شد. نمای هندسه مش‌زده در نرم‌افزار در ورودی و خروجی و نیز محل تلاقی جریان‌ها در میکروکانال در (شکل ۱ و ۲. ب) نمایش داده شده است. برای بررسی عملکرد اختلاط به‌صورت تجربی، آزمایش‌های کاشید و همکاران، مطابق با غلظت‌های اولیه (جدول ۱) برای دبی‌های یکسان محلول انجام شد. بدین ترتیب، غلظت‌های دو جریان مورد استفاده با شدت جریان حجمی ثابت در دو سر ورودی میکروکانال برای مدل‌سازی در نظر گرفته شد.



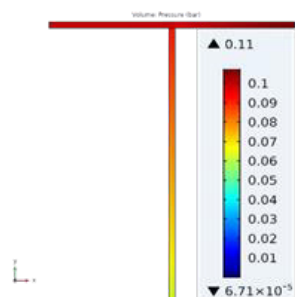
شکل ۱. الف) میکروکانال با سطح مقطع دوزنقه‌ای مورد استفاده کاشید و همکاران [۱]؛ ب) نمای هندسه مش‌زده در نرم‌افزار.



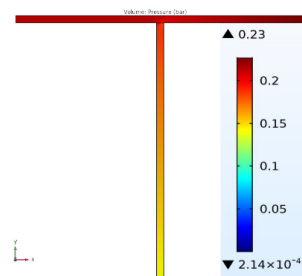
(الف)



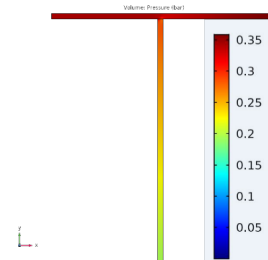
(ب)



(ج)

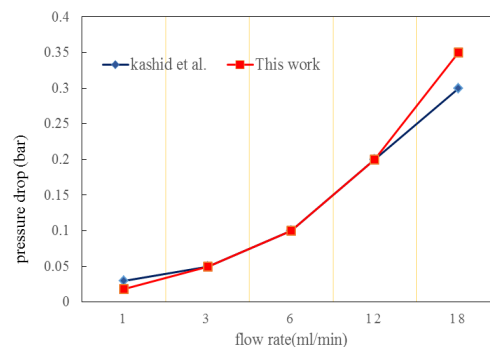


(د)

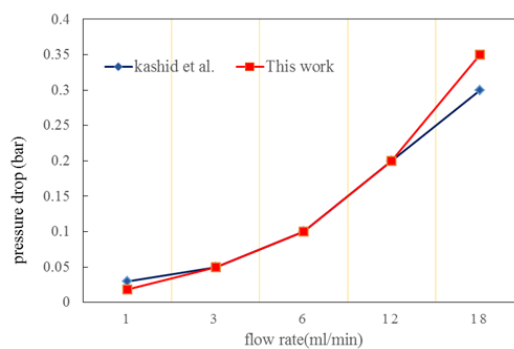


(هـ)

شکل ۴. کانتور فشار (برحسب bar) در طول میکروکانال با سطح مقطع دوزنقه‌ای الف) 1 ml min^{-1} ب) 3 ml min^{-1} ج) 6 ml min^{-1} د) 12 ml min^{-1} هـ) 18 ml min^{-1}



(الف)



(ب)

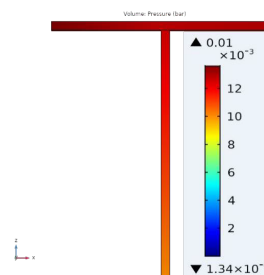
شکل ۳. مقایسه افت فشار کار آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل برای میکروکانال با سطح مقطع الف) دوزنقه‌ای؛ ب) مربعی.

مطابق (شکل‌های ۳ الف و ب)، در میکروکانال با سطح مقطع مربعی با افزایش دبی از ۱ تا 18 ml/min میزان افت فشار از 0.02 bar تا 0.35 bar به‌طور خطی افزایش می‌یابد. به این ترتیب انرژی مورد نیاز با افزایش دبی به‌طور شایان توجهی افزایش می‌یابد. این در حالی است که میزان افت فشار در آزمایش‌های تجربی از 0.03 bar تا 0.15 bar است. همچنین برای میکروکانال با سطح مقطع دوزنقه‌ای با افزایش دبی افت فشار از 0.02 bar تا 0.35 bar به‌طور خطی افزایش می‌یابد؛ در صورتی که در نتایج تجربی این مقادیر از 0.03 bar تا 0.3 bar تغییر می‌کند. با مقایسه نتایج مدل و نتایج تجربی، نتیجه به‌دست‌آمده این است که مدل از دقت نسبتاً خوبی برخوردار است؛ به‌طوری که افت فشار مدل روند صعودی افت فشار با افزایش دبی را با شبیهی پذیرفتنی گزارش می‌دهد. (شکل ۴) کانتورهای افت فشار را برای پنج دبی‌های مختلف گزارش می‌دهد.

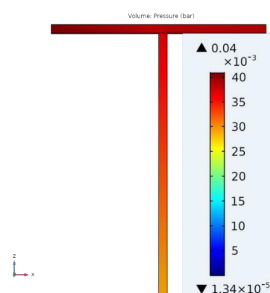


۵.۲. مطالعه پروفایل سرعت

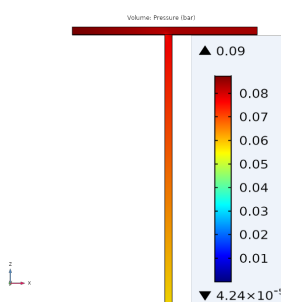
شکل‌های ۵، ۶ و ۷ اثر افزایش دبی ورودی اسید بر پروفایل سرعت روی میکروکانال‌ها با سطح مقطع مربعی و دوزنقه‌ای را نمایش می‌دهد. مطابق این دو شکل، الگوی جریان در دبی‌های مختلف تفاوت قابل ملاحظه‌ای با هم دارند. در دبی‌های بالاتر، دبی بیشتری جریان را به سمت عقب در سوی دیگر کانال می‌راند و نقطه تلاقی را تغییر می‌دهد؛ به عبارت دیگر، با تحقیق بر روی گردابه‌ها در دبی‌های مختلف، معلوم می‌شود که با افزایش دبی، تعداد و طول گردابه زیادتر می‌شود. به علاوه بزرگی بردار سرعت در کلیه طول کانال در نزدیکی جداره به صفر و در مرکز به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. کمترین مقدار سرعت 0.2 ms^{-1} و بیشترین مقدار سرعت به 3 ms^{-1} و برای میکروکانال با سطح مقطع دوزنقه‌ای کمترین مقدار سرعت 0.25 ms^{-1} و بیشترین مقدار سرعت به 4 ms^{-1} می‌رسد. همچنین می‌توان گفت بیشترین مقدار سرعت در نقطه تلاقی و تغییر مسیر جریان است؛ به طوری که پس از عبور از این ناحیه مجدداً کاهش می‌یابد.



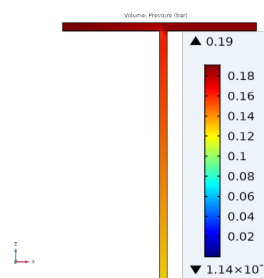
(الف)



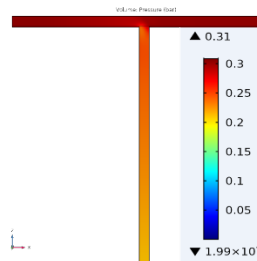
(ب)



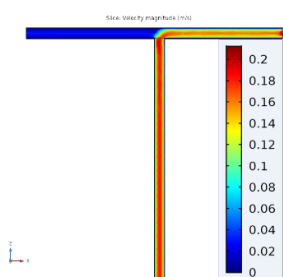
(ج)



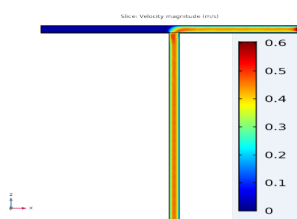
(د)



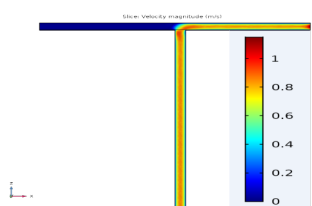
(هـ)



(الف)



(ب)

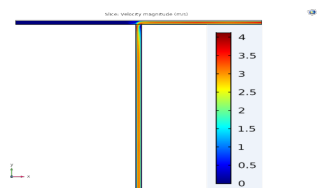


(ج)

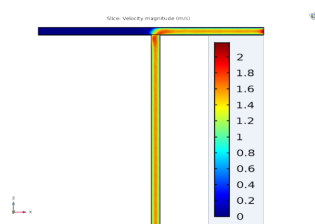
شکل ۵. کانتور فشار (بر حسب bar) در طول میکروکانال مربعی (الف)

۶ ml/min (ج) ۳ ml/min (ب) ۱ ml/min

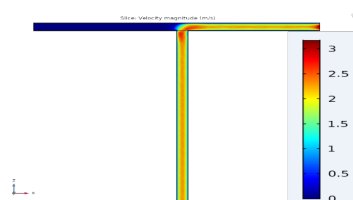
۱۸ ml/min (د) ۱۲ ml/min (هـ)



(هـ)

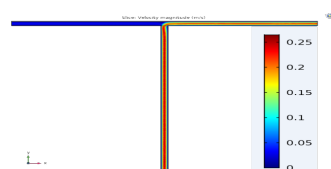


(د)

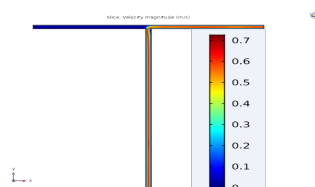


(ب)

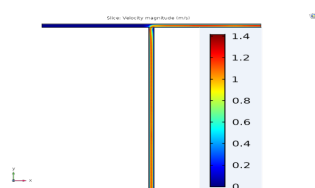
شکل ۶. کانتور سرعت (بر حسب m/s) در طول میکروکانال مربعی
الف) 1 ml min^{-1} (ب) 3 ml min^{-1} (ج) 6 ml min^{-1} (د) 12 ml min^{-1} (هـ) 18 ml min^{-1}



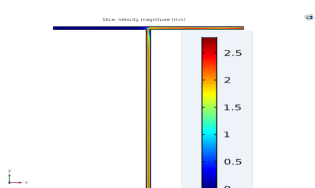
(الف)



(ب)



(ج)

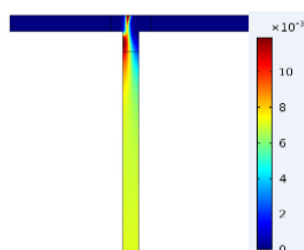


(د)

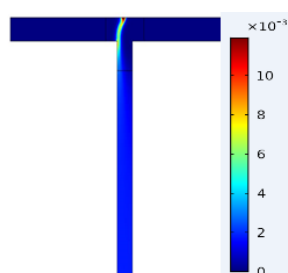
شکل ۷. کانتور سرعت (بر حسب m/s) در طول میکروکانال دوزنقه‌ای
الف) 1 ml min^{-1} (ب) 3 ml min^{-1}
ج) 6 ml min^{-1} (د) 12 ml min^{-1} (هـ) 18 ml min^{-1}

۵.۳. اثر دبی بر شاخص جداسازی (X_s)

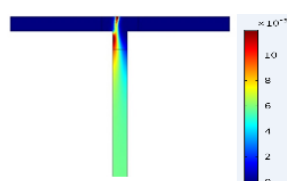
علاوه بر مطالعه اثر دبی بر هیدرودینامیک جریان، اثر دبی بر شاخص تفکیک و میزان اختلاط نیز به کمک مدل سازی مطالعه شده است. (شکل ۸)، شاخص جداسازی را برای میکروکانال دوزنقه‌ای در ۵ دبی مختلف به وضوح نمایش می‌دهد. مطابق شکل، دبی‌هایی بررسی شده‌اند که بتوان در آن‌ها این اثر را به وضوح نمایش داد. همان طور که مشاهده می‌شود، مقادیر شاخص تفکیک در ورودی میکروآکتور صفر است و پس از انجام واکنش مقادیر آن‌ها در محل تلاقی جریان‌ها ظاهر می‌شود.



(الف)



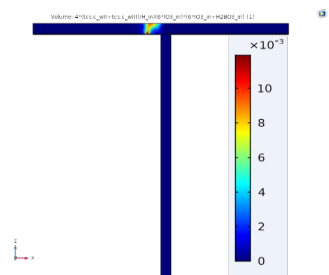
(ب)



(ج)

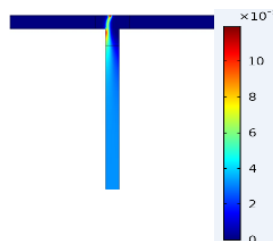


(د)



(هـ)

شکل ۹. کانتر شاخص جدایش در طول میکروکانال مربعی
الف) 1 ml/min (ب) 3 ml/min (ج) 6 ml/min (د) 12 ml/min
هـ) 18 ml/min



(د)



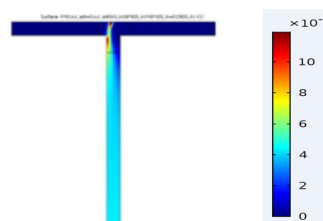
(هـ)

شکل ۸. کانتر شاخص تفکیک در طول میکروکانال دوزنقه‌ای
الف) 1 ml/min (ب) 3 ml/min (ج) 6 ml/min (د) 12 ml/min
هـ) 18 ml/min

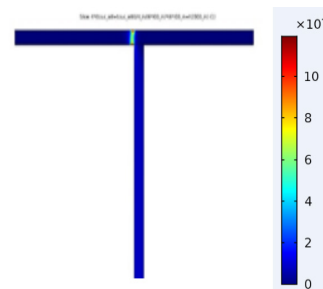
در حالت کلی، این عدد برای میکروکانال با سطح مقطع مربعی در محدوده بین صفر تا 0.1 قرار گرفته است. در دبی 1 ml/min مقدار شاخص تفکیک در خروجی میکروکانال به 0.2 است، حال آنکه با افزایش دبی به 3 ml/min و سپس 6 ml/min مقدار X_s به 0.1 و سپس 0.06 کاهش می‌یابد. تمایل X_s به سمت صفر مؤید آن است که اختلاط به صورت مؤثرتری صورت گرفته است و هرچقدر به سمت عدد 1 میل کند، یعنی تفکیک روی داده است.

همچنین مشاهده می‌شود که بخش اعظم دبی به سمت چپ وارد می‌شود و بخش کمتر آن از سمت چپ وارد می‌شود. مکان تشکیل یون I_3^- در حقیقت نقطه برخورد دو جریان را نمایش می‌دهد. مکان تشکیل I_3^- با افزایش دبی از 1 ml/min تا 18 ml/min تغییر می‌کند و به سمت چپ رانده می‌شود. این تغییر به گونه‌ای است که مقدار شاخص جداسازی با افزایش دبی کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. این پدیده را می‌توان به واکنش مقادیر زیادی H^+ با $H_2BO_3^-$ نسبت داد. به عبارت دیگر، می‌توان این گونه تفسیر کرد که با افزایش دبی حجمی، عدد رینولدز افزایش می‌یابد و بدین ترتیب اختلاط مؤثرتری اتفاق می‌افتد. این اثر مطابق با نتایج کاشید و همکاران گزارش شده است.

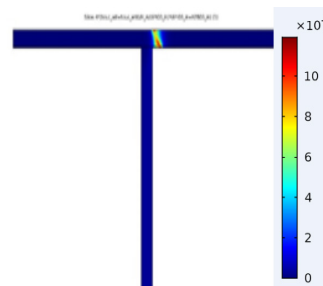
(شکل ۱۰)، مقادیر شاخص جداسازی را در دبی‌های مختلف و مقایسه آن بین نتایج حاصل از مدل و کار



(الف)

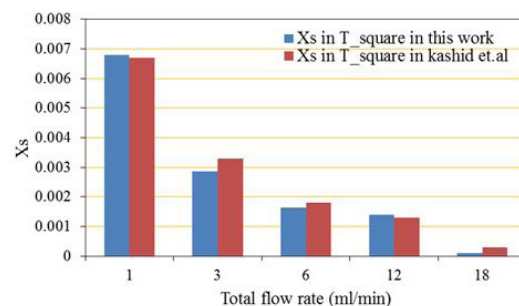


(ب)

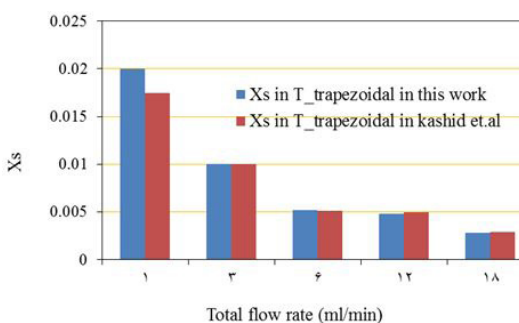


(ج)

آزمایشگاهی صورت گرفته، به طور خلاصه نمایش می دهد که بیانگر توضیحات ذکر شده در فوق است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰. مقایسه شاخص جدایش کار آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل برای دو میکروکانال: (الف) مربعی؛ (ب) دوزنقه‌ای.

۶. نتیجه گیری

مدل سازی اختلاط میکرو در یک میکروکانال T شکل و با سطح مقطع های مربعی و دوزنقه ای و با استفاده از واکنش موازی و رقابتی یدید-یدات مطالعه و بررسی شد. هندسه، ابعاد و مشخصات جریان های مدل شامل دبی و غلظت جریان ها بر اساس مطالعه کاشید و همکاران تنظیم شد. با مقایسه نتایج افت فشار تجربی و مدل سازی، می توان گفت که مدل از دقتی پذیرفتنی برخوردار است. می توان گفت که میکروکانال مربعی در شاخص جدایش به دلیل شدت اختلاط بیشتر و در محل برخورد دو جریان، نسبت به میکروکانال دوزنقه ای عملکرد بهتری داشت؛ با اینکه میکروکانال دوزنقه ای شکل نیز قطر هیدرولیکی مشابهی با مربعی داشت، عملکرد میکروکانال مربعی بهتر بود. علت این اتفاق می تواند نامتقارن بودن میکروکانال دوزنقه ای باشد که منجر به اختلاط ضعیف تری می شود. همچنین معلوم شد که با افزایش دبی از ۱ تا 18 ml min^{-1} میزان افت فشار برای میکروکانال مربعی از 0.12 bar تا 0.3 bar و افت فشار برای میکروکانال دوزنقه ای از 0.18 bar تا 0.35 bar است و به طور خطی افزایش می یابد. علاوه بر مطالعه بر

هیدرودینامیک جریان، اثر دبی بر شاخص تفکیک و میزان اختلاط نیز به کمک مدل سازی ارزیابی شد. شاخص های جداسازی در ۵ دبی مختلف نشان داد که میزان شاخص جداسازی با افزایش دبی کاهش قابل ملاحظه ای می یابد. این مقادیر برای میکروآکتور با سطح مقطع مربعی در محدوده $0.001 - 0.0067$ و در سطح مقطع دوزنقه ای در محدوده $0.0028 - 0.004$ قرار دارد. مکان تشکیل I_3^- با افزایش دبی از 1 ml min^{-1} تا 18 ml min^{-1} تغییر می کند و به سمت چپ رانده می شود. این پدیده را می توان به واکنش مقادیر زیادی از H^+ با $H_2BO_3^-$ نسبت داد. به عبارت دیگر، می توان این گونه تفسیر کرد که با افزایش دبی حجمی، عدد رینولدز افزایش می یابد و بدین ترتیب اختلاط مؤثرتری اتفاق می افتد.

۷. مراجع

- [1].Kashid, M., Renken A., and Kiwi-Minsker L. (2011), "Mixing efficiency and energy consumption for five generic microchannels designs", Chemical Engineering Journal. (167), pp 436-443.
- [2].Ehrfeld W., Hessel V., and Löwe H. (2000), "Microreactors", Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim.
- [3].Hessel,V., Renken,A., Schouten, J.C. and Yoshida, J. I. (2009), "Micro Process Engineering: A Comprehensive Handbook", Vols. 1-3, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim.
- [4].Hessel V., Lowe H., and Schonfeld F. (2005), "Micromixers-a review on passive and active mixing principles", Chem. Eng. Sci., 60, pp 2479-2501.
- [5].Rahimi M., Azimi N., Parvizian F., and Alsairafi A.A. (2014), "Computational fluid dynamics modeling of micromixing performance in presence of microparticles in a tubular sonoreactor", Comput. Chem. Eng. 60, 403-412.
- [6].Bourne J. R. (2008), "Comments on the iodide/iodate method for characterising micromixing", Chemical Engineering, 140, pp 638-641.
- [7].Falk L., and Commenge J.M. (2010), "Performance comparison of micromixers". Chem Eng Sci, 65, pp 405-411.
- [8].Rahimi M., Azimi N. Parsamogadam M. A, Rahimi A., Masahy M. M. (2017), "Mixing performance of T, Y, and oriented Y-micromixers with spatially arranged outlet channel: evaluation with Villermoux/Dushman test reaction", Microsyst Technol, pp 3117-3130.

Modeling of the Parallel-Competitive Reaction of Villiermaux-Dushman in Selected Microreactors Using COMSOL Software

Peyvand Valeh-e-Sheyda*, Majid Yarmohammad Touski

Chemical Engineering Department, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran.

Corresponding Author, Email: p.valeh-sheyda@kut.ac.ir

Abstract

A significant part of the chemical process is the mixing and mixing process. In this research, it has been tried to simulate the mixing of the Villiermaux-Dushman reaction using the COMSOL Multiphysics simulation software for two microchannels with specified square and trapezoidal dimensions to achieve the minimum output separation index. Experimental data were used for the inputs to the software. The effect of volumetric flow on the X_s , separation index, as a measure of mixing quality and the drop in microchannel pressure was investigated. The results of modeling show that for all flow rates, the T-shaped micro-channel with square cross-section with separation index close to zero (0.0067-0.0001) performs better than T-shaped micro-channel with trapezoidal cross-section. The pressure drop, both in model work and experimental work, was varied in the range of 0.01 to 0.3 bar by changing the flow rate from 1 to 18 ml/min, in discharge. The pressure, velocity, and separation index contours were compared for each microchannel. Also, the software used has shown that it has a fairly high accuracy in modeling the parallel reaction of iodide-iodate.

Keywords: Mixing, microchannel, parallel-competitive reaction of Villiermaux-Dushman, Segregation index.



مروری بر روش‌های نوین بر آورد موجودی انتشار متان در شبکه توزیع گاز طبیعی

سیدمحمدسعید خاتمی، حمیدرضا افشون، سیدمهدی جباری*

ایران، خراسان رضوی، شرکت گاز، واحد پژوهش و فناوری، صندوق پستی ۹۱۷۳۵-۳۶۳

نویسنده مسئول ایمیل: smehdi.jabbari@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰

چکیده

گاز طبیعی به عنوان یک منبع انرژی پاک، در هنگام سوختن به صورت معمول حدود ۵۰ درصد کربن دی اکسید کمتری نسبت به زغال سنگ منتشر می کند. از سوی دیگر، اثر گرمایشی متان در یک بازه بیست ساله ۸۶ برابر کربن دی اکسید است؛ بنابراین افزایش نشر متان، مزیت کربن دی اکسید حداقلی آزاد شده بر اثر سوختن را خنثی می کند. از این رو، مقوله انتشار متان به عنوان یک مسئله زیست محیطی مهم، در پژوهش های گوناگون ارزیابی شده است. امروزه در بخش های مختلف صنعت گاز، حرکت به سمت اندازه گیری سیار نشت متان آغاز شده است. مهم ترین دستاورد این ایده افزایش سرعت در یافتن نشتی ها و همچنین فراهم شدن پتانسیل برای پوشش حداکثری نشریابی در شبکه توزیع گاز و در فضای شهری بوده است. در این مطالعه، تلاش شده است تا با بررسی پروژه های اخیر انجام شده در زمینه نشریابی از شبکه توزیع گاز طبیعی، ایده های جدید به کاررفته دقیق تر بررسی شوند.

کلمات کلیدی: موجودی انتشار، اندازه گیری نشر متان، شبکه توزیع گاز، ضریب نشر.

۱. مقدمه

تقاضای جهانی انرژی طی سالیان اخیر به دلیل نگرانی های زیست محیطی به سمت سوخت هایی با محتوای کربن کمتر متمایل شده است. میزان CO_2 آزاد شده یک سوخت در هنگام سوختن، بنا به میزان کربن آن متغیر است. در (جدول ۱) میزان پوند کربن آزاد شده بر میلیون Btu انرژی آزاد شده سوخت های مختلف ذکر شده است.

جدول ۱. مقایسه پوند کربن آزاد شده بر میلیون Btu انرژی آزاد شده در سوخت های مختلف

۲۲۸/۶	زغال سنگ (آنتراسیت)
۲۰۵/۷	زغال سنگ (قیر)
۲۱۵/۴	زغال سنگ (lignite)
۲۱۴/۳	زغال سنگ (subbituminous)
۱۶۱/۳	سوخت دیزل و روغن گرمایش
۱۵۷/۲	بنزین (بدون اتانول)
۱۳۹	پروپان
۱۱۷	گاز طبیعی

که در سالیان اخیر، در مبحث انتشار متان توسعه یافته است، دقیق تر بررسی شود.

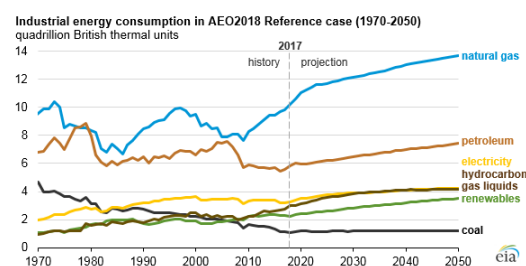
۲. مروری بر روش های نوین نشریابی و پروژه های مرتبط با آن

امروزه به دلیل حساسیت فراوان مسائل زیست محیطی، مقوله مدیریت کربن و نشر متان در صنعت نفت و گاز، تمرکز و توجه سازمان های مربوط و تولیدکنندگان بزرگ گاز طبیعی بر این موضوع دوچندان شده است. عموماً در صنایع نفت و گاز، سه نوع نشر تعریف می شود: نشر احتراقی، نشر تخلیه ای، نشر فرار. نشر احتراقی ناشی از انتشار گاز در اثر احتراق نیافتن کامل در تجهیزات گوناگون است. در بخش توزیع، این نوع از انتشار تنها در هیتراهای گاز ایستگاه های تخلیه فشار یافت می شود. نشر تخلیه ای در اثر آزادسازی عمدی گاز به علت راه اندازی، توقف اضطراری، تحریک ابزار آلات کنترل نئوماتیکی یا شرایط عملیاتی غیرمطلوب (مانند آسیب دیدگی خطوط لوله) ایجاد می شود. نشر فرار شامل اتلاف غیر عمدی گاز از سطوح آب بندی شده، اتصالات یا شکاف های ایجاد شده است [۶]. تا به امروز، عمده تحقیقات در زمینه انتشار متان در بخش های بالادستی و پایین دستی صنعت نفت و گاز، از میان نشرهای سه گانه مذکور، مربوط به نشر فرار بوده است که یک نشر ناخواسته و پیوسته محسوب می شود [۷-۱۰].

سازمان حفاظت از محیط زیست^۳ (EPA) آمریکا در سال ۲۰۱۱ مطالعاتی را در بررسی میزان انتشار متان در حوزه صنعت گاز انجام داد [۱۱]. در این پروژه، روش اتخاذ شده مشابه مطالعات مذکور در سال ۱۹۹۲ بود؛ به این بیان که در این پروژه، از ضریب نشرهای^۴ تخمین زده شده در سال ۱۹۹۲ استفاده شد؛ با این تفاوت که ضریب فعالیت تجهیزات گوناگون به روزرسانی شد. در نتیجه با روش متداول، ضرب این دو رقم برای هر دسته از تجهیزات موجود در صنعت گاز طبیعی و تجمیع مقادیر حاصل، میزان نشر سالانه متان در زیرساخت های صنعت گاز محاسبه شد. نتایج محاسباتی این پروژه نشان داد که از رقم ۶۸۹۰ Gg نشر متان در زیرساخت های گاز طبیعی در سال ۲۰۱۱ حدود ۱۳۲۹ Gg آن (حدود ۱۹ درصد) در زیرمجموعه شبکه توزیع گاز اتفاق می افتد [۱۱].

با این حال، برآوردهای EPA در سال ۲۰۱۷ تفاوت های

علاوه بر این، مطابق گزارش های سالانه اداره اطلاعات انرژی آمریکا^۱ در برآورد میزان مصرف حامل های مختلف انرژی، همان گونه که در (شکل ۱) ملاحظه می شود، سهم گاز طبیعی در سالیان پیش رو افزایش خواهد یافت [۱]؛ در نتیجه روند افزایش تقاضای منابع انرژی، به ویژه گاز طبیعی، از یک سو و مسائل مربوط به دستیابی به انرژی پاک و اهمیت روزافزون مسائل زیست محیطی از سوی دیگر، تقاضای جهانی برای دستیابی به این سوخت را رونق ویژه ای بخشیده است.



شکل ۱. روند مصرف جهانی حامل های انرژی [۱]

از سوی دیگر، متان به عنوان یک گاز گلخانه ای^۲ اثرات زیست محیطی خطرناکی نیز دارد. اثر گرمایشی متان در یک بازه بیست ساله و صدساله به ترتیب ۸۶ و ۳۴ برابر کربن دی اکسید تخمین زده شده است [۲]؛ بنابراین افزایش نشر متان در محیط، می تواند مزیت کربن دی اکسید حداقلی آزاد شده بر اثر سوختن متان را خنثی کند (جدول ۱) [۳]. با این حال، متان تنها یک گاز گلخانه ای نیست؛ بلکه نشر آن بر کیفیت هوا نیز اثر سوء دارد. در نواحی شهری، واکنش متان با NO_x منجر به تسریع تشکیل ازن می شود [۴]. علاوه بر این، طبق برآوردهای صورت گرفته، حوادث مربوط به خطوط لوله انتقال و توزیع گاز طبیعی در آمریکا سالانه به طور متوسط ۱۷ حادثه منجر به مرگ، ۶۸ حادثه همراه با آسیب دیدگی و ۱۳۳ میلیون دلار خسارات مالی ایجاد می کند [۵].

بر اساس مطالب بیان شده ملاحظه می شود که تخمینی دقیق و علمی برای ارزیابی میزان نشر متان در زیرساخت های شبکه توزیع گاز طبیعی امری ضروری است. با انجام این امر، علاوه بر کاهش اثرات سوء زیست محیطی نشر گاز، از اتلاف این ثروت ملی نیز جلوگیری خواهد شد. لذا در این پژوهش، تلاش شده است تا با مرور پروژه های انجام گرفته در کشورهای پیشرفته، ضمن مقایسه مقادیر اتلاف شده متان در بخش های مختلف این صنعت، دستاوردها و ایده های جدیدی

3. Environmental Protection Agency (EPA)

4. Emission Factor (EF)

1. U.S. Energy Information Administration

2. Greenhouse Gas

قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد؛ به‌طوری که رقم ۱۹ درصدی نشر متان در شبکه توزیع گاز طبیعی به رقم ۷ درصد (۴۷۵Gg) تقلیل پیدا کرده است [۱۲]. مطابق تخمین‌های EPA در سال ۲۰۱۷ در بخش تولید و اکتشاف رقم انتشار متان ۰/۲۲۸ تریلیون فوت مکعب است و این مقدار برای بخش‌های فراوری، ذخیره‌سازی و انتقال و همچنین توزیع گاز به ترتیب ۰/۲۴، ۰/۶۸ و ۰/۲۵ تریلیون فوت مکعب است.

همان گونه که مشخص است، در روش متداول تخمین ضریب نشر، صحت و درستی کار بر مبنای دسته‌بندی دقیقی از تجهیزات گوناگون و همچنین انتخاب نمونه آماری کاملاً تصادفی استوار شده است؛ لذا در شرایطی که نمونه آماری تهیه‌شده نمایانگر ویژگی‌های جامعه آماری حاوی آن نباشد، ممکن است تخمین‌های انجام‌گرفته اختلاف چشمگیری با واقعیت داشته باشد. به‌عنوان نمونه در مطالعات اخیر برایان لمب^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۵ که از روش اندازه‌گیری درجا و مستقیم، مشابه با روش اتخاذشده در پروژه سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا استفاده شد، استفاده کردند، سهم بخش توزیع گاز در نشر متان به رقم ۳۹۳Gg (در قیاس با میزان ۱۳۲۹Gg) کاهش یافت [۱۳]. علاوه بر این در برخی پروژه‌های مشابه، تخمین‌ها ارقام بزرگ‌تری را از مطالعات سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا نشان می‌دهند؛ به‌طوری که محاسبات کاریون^۲ [۱۴] رقم ۶/۲ درصد-۱۱/۷ درصد و پیشل^۳ و همکارانش [۱۵] عدد ۱۷ درصد را برای نشر متان در مقایسه با میزان ۲/۳ درصد محاسبه‌شده توسط سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا به نمایش می‌گذارد [۱۶].

بنابراین در این قسمت تلاش شده است برخی از پروژه‌های انجام‌شده در آمریکا در زمینه نشر متان در بخش شبکه توزیع گاز، به‌همراه روش استفاده‌شده در آن ارزیابی مختصری شود.

۲.۱. اندازه‌گیری مستقیم با روش نمونه‌برداری جریان-بالا^۴ (HFS)

در این پروژه که در سال ۲۰۱۵ توسط برایان لمب با همکاری صندوق حفاظت از محیط‌زیست آمریکا^۵ و در

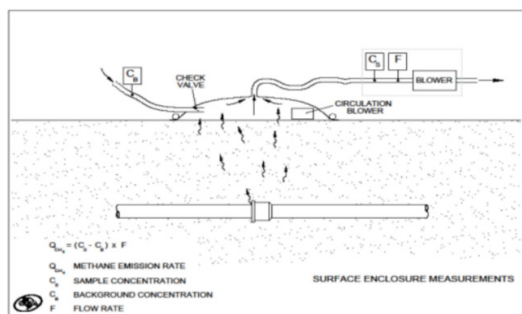
مقیاسی ملی اجرایی شد، اندازه‌گیری مستقیم نشر متان از تعداد ۲۳۰ خط لوله زیرزمینی و همچنین ۲۲۹ ایستگاه اندازه‌گیری و تقلیل فشار گاز طبیعی به‌روش HFS در دستور کار قرار گرفت [۱۳]. داده‌های اندازه‌گیری نشر گاز با استفاده از فرایند طبقه‌بندی‌شده تصادفی از مکان‌های منتخب، برای به‌حداقل‌رسانیدن خطا در تخمین و بسط مقادیر میانگین، جمع‌آوری شد. اندازه‌گیری داده‌ها در بازه زمانی ماه می تا نوامبر ۲۰۱۳ صورت گرفت؛ لذا از ارزیابی تأثیر فصل زمستان بر نشر متان خودداری شده است. برای ایجاد یک طبقه‌بندی از تجهیزات شبکه توزیع گاز، برای پوشش مناسب و کامل آن، این تجهیزات به نه دسته زیر تقسیم شدند:

۱. ایستگاه اندازه‌گیری و تقلیل فشار ۱۰۰-۳۰۰ پوند بر اینچ مربع (psi)؛ ۲. خطوط لوله اصلی شبکه با جنس پلاستیک؛ ۳. خطوط لوله خدمات با جنس فولاد محافظت‌نشده؛ ۴. خطوط لوله اصلی شبکه با جنس فولاد محافظت‌نشده؛ ۵. خطوط لوله اصلی شبکه با جنس چدن؛ ۶. ایستگاه تقلیل فشار در فشارهای بیشتر از ۳۰۰ psi؛ ۷. ایستگاه اندازه‌گیری و تقلیل فشار در فشارهای بیشتر از ۳۰۰ psi؛ ۸. ایستگاه تقلیل فشار ۳۰۰-۱۰۰ psi؛ ۹. تجهیزات مشترکین جزء.

لازم به ذکر است که در این مطالعه، داده‌های نشر تجهیزات مشترکین ارزیابی نشده‌اند و از مقادیر حاصل از مطالعات EPA استفاده شده است [۱۳]. در این پروژه، طرح و برنامه نمونه‌گیری بدین صورت اتخاذ شد که پس از دسته‌بندی داده‌ها به‌صورت فوق، با همکاری شرکت‌های توزیع گاز هر منطقه، میزان نشر گاز تعدادی از تجهیزات مذکور به‌صورت کاملاً تصادفی اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، برای اندازه‌گیری نشست‌های زیرزمینی خطوط لوله، شرکت‌های توزیع منطقه‌ای ابتدا دسته‌بندی‌ای از چنین نشست‌هایی را به کار گرفتند و سپس برای رفع آن اقدام می‌کنند. نشستی‌های مذکور معمولاً از نظر ایمنی به دسته‌های نشست ۱، ۲ و ۳ طبقه‌بندی می‌شوند که در آن، نشست‌های کلاس ۱، نیاز به تعمیر فوری دارند. البته بایستی اشاره کرد که در این پروژه، به‌علت تعمیر فوری این نشست‌ها و خطرات احتمالی آن، از اندازه‌گیری آن اجتناب شده است. پس از اینکه طبقه‌بندی صورت گرفت، سنسورهای دستی متان برای ترسیم نقشه نشست‌های سطحی و همچنین به‌منظور تعیین تعداد شبکه‌های نمونه لازم برای ضبط کامل یک نشست، استفاده شد. در بیشتر موارد، فقط یک یا دو شبکه

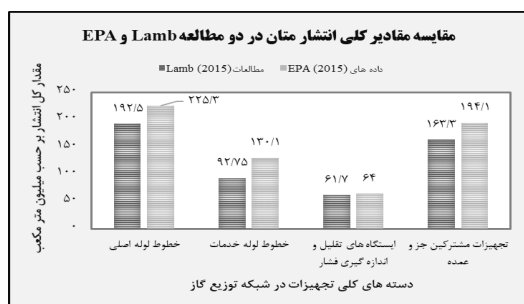
1. Brian Lamb
2. Karion
3. Peischl
4. High Flow Sampling (HFS)
5. Environmental Defense Fund





شکل ۲. نمونه‌برداری از یک محفظه سطحی ۴*۴ توسط نمونه‌بردار جریان-بالا [۳۱]

در (شکل ۳)، مقایسه مقادیر کلی انتشار متان تجهیزات گوناگون موجود در زیرساخت توزیع گاز آمریکا در دو پروژه مذکور و مطالعات EPA به نمایش گذاشته شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، بیش از ۵۵ درصد کل انتشار گاز متان در کشور آمریکا و در سال ۲۰۱۵ مربوط به خطوط لوله زیرزمینی اعم از خطوط لوله اصلی و خطوط لوله خدمات است و پس از آن رقم ۳۲ درصدی نشر متان از تجهیزات مشترکین اعم از جزء و عمده، بیشترین سهم را داراست.



شکل ۳. مقایسه مقادیر انتشار گاز طبیعی از دسته‌های کلی تجهیزات شبکه توزیع گاز آمریکا در مطالعات EPA و برابان لمب

۲.۲. اندازه‌گیری مستقیم به روش محفظه دینامیکی^۲

این پروژه را در بازه سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ و در دانشگاه بوستون آمریکا، تعدادی از پژوهشگران و متخصصان

محفظه مورد نیاز بود؛ اگرچه در برخی موارد شدیدتر، ۲۹ شبکه استفاده شده است.

اندازه‌گیری نشت خط لوله زیرزمینی با تغییراتی در روش HFS که شامل یک سیستم محفظه سطحی برای اخذ گاز و هدایت آن به ابزار اندازه‌گیری بود، انجام شد. از آنجایی که نشت در طیف وسیعی از اندازه‌ها رخ داده است، سیستمی انعطاف‌پذیر و سازگار طراحی شد. رویکرد کلی این سیستم مشابه با پروتکل‌های استفاده‌شده در فرایندهای اندازه‌گیری شار محفظه دینامیکی^۱ است، جایی که هوا از طریق محفظه در یک دبی اندازه‌گیری شده وارد می‌شود، غلظت متان پس از رسیدن به شرایط حالت پایدار، در جریان هوای ورودی و در خروجی تعیین می‌شود و سپس دبی نشت با استفاده از معادله ۱ محاسبه می‌شود.

$$Q_{Natural\ gas} = F_{Sampler} * (C_{Sample} - C_{Background}) \quad (1)$$

در این معادله $Q_{Natural\ gas}$ دبی انتشار گاز طبیعی از یک تجهیز مدنظر برحسب SCFM، $F_{Sampler}$ دبی جریان نمونه اندازه‌گیری شده برحسب SCFM، C_{Sample} غلظت گاز طبیعی در جریان گاز نمونه‌گیری شده، $C_{Background}$ غلظت گاز طبیعی در حوالی تجهیز مدنظر است.

محفظه مذکور از یک غشای پلاستیکی گذاشته شده بر روی یک قاب پی‌وی‌سی سفت‌وسخت ساخته شده است تا جریان آزاد هوا به محفظه را از طریق یک لوله ورودی انعطاف‌پذیر و خروجی را از طریق یک پورت فراهم کند که در آن غلظت گاز متان به صورت پیوسته اندازه‌گیری می‌شود. هوای محیط از طریق مجرای ورودی به داخل محفظه کشیده می‌شود و با استفاده از یک دستگاه نمونه‌بردار جریان-بالا^۲ از محفظه خارج می‌شود. میزان دبی جریان هوای محفظه در بازه ۶-۸ SCFM تعیین شده است که در نتیجه زمان اقامت در حدود یک تا دو دقیقه طول می‌کشد؛ به‌طوری که شرایط حالت پایدار پس از حدود پنج دقیقه فراهم شده است. پس از تثبیت غلظت نمونه، مقدار آن به همراه غلظت جریان هوای ورودی و همچنین سرعت ثبت می‌شود. (شکل ۲) نحوه نمونه‌برداری از محل یک نشر زیرزمینی توسط ایجاد یک محفظه را نشان می‌دهد.

1. Dynamic chamber flux measurement
2. Hi-Flow Sampler

این دانشگاه با مدیریت مارگارت هندریک^۱ انجام دادند [۱۷]. هدف از انجام این کار، شناسایی و گزارش انتشار گاز طبیعی از تعداد ۱۰۰ نقطه نشستی گاز در خطوط لوله اصلی توزیع گاز با جنس چدن در شهر بوستون آمریکا اعلام شد. در این پروژه برای شناسایی نشرهای زیرزمینی این اقدامات انجام شد:

۱. ابتدا در هر سایت نمونه‌برداری، میزان نشت گاز با استفاده از واحد یونیزاسیون شعله^۲ ارزیابی شد؛
۲. نقشه‌های سایت نمونه‌برداری ترسیم و تمامی نقاط ممکن برای فرار گاز شناسایی شد؛
۳. اندازه‌گیری‌های محفظه دینامیکی برای تعیین دبی انتشار در هریک از نقاط ممکن برای فرار گاز انجام شد؛
۴. میزان غلظت متان در خاک و نقاط دسترسی مطلوب^۳ با استفاده از یک دستگاه نشانگر گاز قابل احتراق^۴ تعیین شد و آسیب‌های احتمالی به پوشش‌های گیاهی به دلیل قرارگرفتن طولانی‌مدت در معرض گاز طبیعی ارزیابی شد.

گاز طبیعی از هوا سبک‌تر است؛ لذا در صورت ایجاد یک نقطه نشستی، به سمت بالا نفوذ می‌کند و از منشأ انتشار دور می‌شود. اغلب لوله‌های توزیع گاز طبیعی، زیر سطوح نفوذناپذیر از قبیل جاده‌ها و پیاده‌روها دفن می‌شوند؛ در نتیجه متان منتشرشده از لوله‌های زیرزمینی، در امتداد مسیرهایی که حداقل مقاومت برای فرار را دارند، نفوذ کرده و به‌طرف بالا حرکت می‌کند. نقاط فرار گاز در سطح یک شهر شامل دریچه آدم‌رو، نقاط دسترسی مطلوب، شکاف‌های پیاده‌رو و سواره‌رو، حاشیه پیاده‌روها، چمن‌های شهری، سوراخ‌های حفاری در آسفالت‌ها و... است.

در این مطالعه، اندازه‌گیری‌های محفظه دینامیکی با هدف تعیین شار خروجی از یک نشستی انجام گرفت. برای نیل به این هدف، ۴ محفظه با اشکال و ابعاد متفاوت (۱، ۱۴، ۱۶/۱، ۱۷/۲، ۵۵/۶ لیتر) برای انطباق بهتر با نقاط فرار گاز مختلف طراحی شده است. بدنه محفظه‌ها از جنس پلاستیک است که با لوله‌های کیسه‌ای پر از شن و ماسه برای آب‌بندی بهتر با سطوح نمونه‌برداری مستحکم شده است. همچنین درون هر محفظه یک فن قرار گرفت تا اطمینان حاصل شود که هنگام نمونه‌برداری، هوا درون محفظه به‌درستی مخلوط می‌شود. در بالای هر محفظه سه حفره با قطر یک سانتی‌متر

تعبیه شده است که از دو تای آن‌ها، نمونه‌برداری گاز از فضای آزاد محفظه به کمک یک لوله پلاستیکی ۱/۴ صورت می‌گیرد. حفره سوم نیز با استفاده از یک بست مناسب فیکس می‌شود تا ناهمگونی‌های فشار ناشی از تلاطم باد کاهش یابد. حفره اول از طریق لوله پلاستیکی به خط ورودی آنالایزر گاز و حفره دوم نیز به خروجی آنالایزر متصل می‌شود. سپس برای نمونه‌برداری، گاز از طریق یکی از حفره‌ها به‌طرف آنالایزر مکیده می‌شود و تحت تجزیه و تحلیل این دستگاه قرار می‌گیرد. پس از تعیین غلظت متان در هوای مکیده‌شده توسط دستگاه، در نهایت از طریق خروجی آنالایزر به محفظه بازمی‌گردد. این عمل در یک بازه زمانی مشخص تکرار می‌شود تا تغییرات غلظت متان در طول زمان تعیین شود. در انتها پس از ثبت داده‌ها توسط آنالایزر، یک رگرسیون خطی ساده انجام می‌شود تا شیب خط به‌صورت $(\text{ppm CH}_4 \cdot \text{sec}^{-1})$ محاسبه شده و با استفاده از رابطه زیر، دبی انتشار متان (F_p) تخمین زده شود.

$$F_p = S_p * 10^{-6} * V_p \quad (2)$$

در این رابطه، S_p شیب نمودار مذکور و V_p حجم محفظه است.

در این پروژه، اندازه‌گیری شار انتشار متان برای مقادیر نشر در محدوده ۲۳/۶ Lpm - ۰/۰۴ صورت گرفت. یکی از نتایج این بررسی تعیین نحوه توزیع اندازه نشستی است؛ به‌طوری که برآوردها نشان می‌دهد، تنها ۷ درصد از نقاط نشستی حدود ۵۰ درصد کل انتشار متان را شامل می‌شود. یکی دیگر از دستاوردهای این پروژه بیان می‌کند که شار نشر متان رابطه مستقیمی با فشار عملیاتی خطوط لوله دارد؛ به‌طوری که در خطوط با فشار بیشتر میزان انتشار گاز طبیعی نیز افزایش می‌یابد.

۳.۲. استفاده از آنالیزورهای شرکت پیکارو^۵ برای نقشه‌برداری از نشستی‌های خطوط لوله زیرزمینی و تعیین غلظت انتشار متان

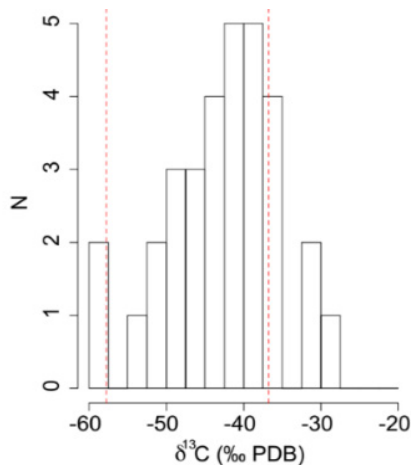
یکی از شرکت‌های پیشرو در زمینه نشریابی و اندازه‌گیری انتشار متان، شرکت پیکاروست. این شرکت تاکنون محصولات گوناگونی را در این حوزه معرفی کرده است. یکی از تکنولوژی‌های ارائه‌شده، دستگاه نقشه‌بردار پیکارو^۶ است که در اندازه‌گیری غلظت گازهای مختلف و تهیه نقشه‌های نشریابی استفاده شده است و مبتنی بر آنالیزورهای طیف‌سنجی حلقه پایین حفره^۷ (CRDS) است.

5. Picarro
6. Picarro Surveyor
7. Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS)

1. Margaret Hendrick
2. Flame Ionization Unit
3. Utility access points
4. Combustible gas indicator (CGI)

ppm ۴/۶ محاسبه شد.

یکی از مختصات ویژه این کار شناسایی و تعیین منبع انتشار متان بوده است که برای نیل به این هدف، آنالیزور G۲۱۱۲i شرکت پیکارو استفاده شده است. شناسایی منبع نشر متان بدین معناست که مشخص شود آیا منشأ یک نشر نوعی زیست‌زاست^۳ یا گرم‌زا^۴. منابع زیست‌زا معمولاً شامل نشر متان از مراکز دفن زباله^۵، فاضلاب^۶ و تالاب‌هاست^۷ و گرم‌زا مربوط به انتشار این گاز از صنایع نفت و گاز است که تشخیص آن به‌روش نشانه‌های ایزوتوپی و از طریق ایزوتوپ $\delta^{13}\text{C}_4$ صورت می‌گیرد. معمولاً برای تعیین منشأ متان از استاندارد PDB^۸ استفاده می‌کنند؛ بدین ترتیب که پس از شناسایی یک نقطه‌ی نشتی متان، مقدار PDB ایزوتوپ $\delta^{13}\text{C}_4$ را دستگاه G۲۱۱۲i اندازه‌گیری می‌کند. با علم به این مسئله که مقادیر PDB برای منابع زیست‌زای انتشار متان در محدوده‌ی رقم ۵۵- درصد بوده و همچنین برای منابع گرم‌زا در حدود ۳۵- درصد تعیین شده است، می‌توان اقدام به ارزیابی منشأ نشر متان کرد [۱۶، ۱۸]. (شکل ۴) مقادیر PDB برای ایزوتوپ $\delta^{13}\text{C}_4$ را به‌همراه مقادیر میانگین این ترم که با خطوط نقطه‌چین مشخص شده است، ارائه می‌کند.



شکل ۴. مقادیر PDB نشر متان (خطوط نقطه‌چین مقادیر میانگین را نشان می‌دهد که برای منبع گرم‌زا عدد ۳۶/۸- درصد و برای منبع زیست‌زانی ۵۷/۸- درصد محاسبه شده است.)

اما در این پروژه علاوه بر موارد مذکور، میزان شار نشر

در این تکنولوژی که در آن یک آنالیزور سیار متان CRDS به‌همراه یک پلت‌فرم برای ذخیره و پردازش داده‌ها و یک سیستم بادسنج برای تعیین جهت و سرعت باد ادغام شده است، غلظت متان موجود در هوا محاسبه می‌شود، سپس نقشه‌ی نشتی آن ترسیم شده و در انتها به گروه‌های تعمیر و مصرف‌کنندگان اعلام‌خطر می‌شود. نکته‌ی جالب‌توجه درباره‌ی این تکنولوژی این است که تمامی این فرایندها به‌صورت سیار و در سرعت نرمال خودرو انجام می‌شود. نحوه‌ی بیان میزان نشتی برحسب ppm است که اندازه‌گیری آن توسط CRDS‌هایی مانند ۲۳۰۱G و ۲۴۰۱G انجام می‌شود. تکنولوژی طیف‌سنجی شرکت پیکارو قادر به اندازه‌گیری غلظت جزئی گازهای گوناگون همانند متان، کربن‌دی‌اکسید، مونوکسیدکربن و بخار آب با دقت بسیار زیاد طی ماه‌ها جمع‌آوری داده به‌صورت مستمر و پایدار است.

نقشه‌برداری پیکارو نشتی‌های موجود در یک ناحیه را به‌مراتب سریع‌تر از روش‌های سنتی آن بررسی می‌کند؛ به‌طوری که در یک ناحیه‌ی معین شده می‌تواند در یک ساعت ۵۰۰ نقطه را بررسی کند؛ لذا سبب می‌شود که فرایند نشریابی در شبکه‌ی توزیع گاز با تعداد دفعات بیشتر، دقیق‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر انجام گیرد؛ در نتیجه مسائل ایمنی با بهبودهای چشمگیری همراه خواهد بود.

۱.۳.۲. استفاده از CRDS برای نشتیابی خطوط لوله زیرزمینی در ایالت واشنگتن

این پروژه را در سال ۲۰۱۳ و با هدف شناسایی نشر متان از خطوط لوله در ایالت واشنگتن، گروهی از محققان از دانشگاه‌های مختلف به سرپرستی رابرت جکسون^۱ صورت دادند [۱۶]. در این مطالعه حدود ۱۵۰۰ مایل از خیابان‌های این ایالت با استفاده از آنالیزور ۲۳۰۱G و به‌صورت سیار از نظر نشریابی ارزیابی‌های دقیق شدند. نقشه‌های ۵۸۹۳ نشتی گاز طبیعی در محدوده ppm ۸۸/۶ - ۲/۵ ترسیم و علاوه بر تعیین غلظت، دبی انتشار گاز از برخی خیابان‌های شهر برای شار انتشار متان در محدوده Lpm ۲۵/۵ - ۶/۴ با استفاده از دیگر تکنولوژی شرکت پیکارو، A۰۴۹۱^۲ اندازه‌گیری شد. پس از شناسایی و نقشه‌برداری، محدوده و تعداد نشتی‌های متان بدین صورت ارائه شد: تعداد ۱۱۲۲ نشتی بزرگ‌تر از ppm ۵، ۳۳۴ نشتی بزرگ‌تر از ppm ۱۰ و ۶۷ نشتی بزرگ‌تر از ppm ۲۵. میانگین انتشار متان در سطح شهر نیز

1. Robert Jackson
2. Mobile Plume Mapping Kit

3. Biogenic
4. Thermogenic
5. Landfill
6. Sewer
7. Wetland
8. Pee Dee Belemnite

متان از برخی خطوط لوله زیرزمینی و اثر سرعت باد بر این متغیر نیز ارزیابی شده است. (شکل ۵) به طور همزمان پروفایل غلظت و میزان دبی انتشار متان برای سه خیابان را نشان می دهد. مقادیر شار برای سه تصویر (شکل ۵) به ترتیب از بالا به پایین ۶/۴، ۵/۲۵ و ۲۱ لیتر بر دقیقه تخمین زده شده است. این در حالی است که در مقایسه بین تصویر وسط و تصویر پایین، به وضوح مشخص است که غلظت متان در تصویر سوم مقادیر بیشتری را در بر می گیرد. نکته حائز اهمیت، توجه به پارامتر سرعت باد است که در پنل سوم و دوم مقادیر آن به ترتیب ۱/۲۳ m/s و ۱/۷۵ m/s است. در بررسی و ارزیابی تأثیر سرعت باد بر میزان غلظت و پراکندگی متان در هوا باید توجه کافی را مبذول داشت؛ به این معنا که لزوماً میزان غلظت زیاد متان در محیط نشان از دبی زیاد نشستی گاز نیست و بسته به میزان سرعت باد، باید در این موضوع اظهار نظر کرد.

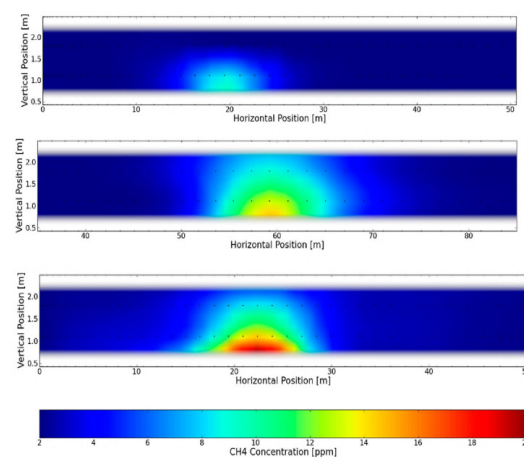
طبق محاسبات صورت گرفته، چگالی نشر متان در دو شهر واشنگتن و بوستون مقادیری نزدیک به هم دارد. در شهر بوستون به ازای هر مایل مسیر، تعداد نقاط نشست گاز ۳/۹ بوده و در واشنگتن این مقدار ۴/۲ گزارش شده است. تنها تفاوت در مبحث انتشار متان برای این دو شهر، مقدار ماکسیمم غلظت متان است که در بوستون، همان گونه که ذکر شد، ۲۸/۶ ppm و در واشنگتن ۸۸/۶ ppm اندازه گیری شده است.

۴.۲. استفاده از خودروی نقشه بردار گوگل^۲ (GSV) برای اندازه گیری شار انتشار متان و نقشه برداری از نشستی های خطوط لوله زیرزمینی

در سال ۲۰۱۵، گروهی از محققان دانشگاه کلرادو در یک همکاری ملی با شرکت گوگل و سازمان EDF آمریکا، روشی مبتنی بر ترکیب آنالیزهای متان شرکت پیکارو با خودروی GSV ارائه دادند که نتایج آن در سال ۲۰۱۷ منتشر شد [۱۹]. هدف از انجام این پژوهش، تعیین شار انتشار متان از شبکه توزیع گاز کشور آمریکا برای تسریع و تسهیل در اولویت بندی تعمیرات و جایگزینی خطوط لوله دارای نشستی عنوان شده است. شروع این پروژه در شهرهای ایندیاناپولیس، بورلینگتون، بوستون و جزیره استاتن بوده که تاکنون ایالت های دیگر را نیز پوشش داده است [۲۰].

این سیستم نقشه بردار نشستی اتومات، هم زمان موقعیت مکانی و میزان انتشار متان نقطه مذکور را بدون نیاز به اطلاعات باد ثبت می کند. اندازه نشستی، به وسیله بررسی مستمر GSV که شامل ۲ تا ۵ گذر در هر بخش از یک مسیر است، تخمین زده می شود. به عبارت دیگر، صرفاً با در دست داشتن داده های غلظت متان به همراه الگوریتمی که در ادامه توضیح داده می شود، می توان اقدام به شناسایی و اندازه گیری میزان نشستی کرد. البته طبق توضیح محققان این پروژه، روش مذکور، مقادیر نشستی را محافظه کارانه تخمین زده است. با این حال اگر چه مقادیر تخمین زده شده

متان از برخی خطوط لوله زیرزمینی و اثر سرعت باد بر این متغیر نیز ارزیابی شده است. (شکل ۵) به طور همزمان پروفایل غلظت و میزان دبی انتشار متان برای سه خیابان را نشان می دهد. مقادیر شار برای سه تصویر (شکل ۵) به ترتیب از بالا به پایین ۶/۴، ۵/۲۵ و ۲۱ لیتر بر دقیقه تخمین زده شده است. این در حالی است که در مقایسه بین تصویر وسط و تصویر پایین، به وضوح مشخص است که غلظت متان در تصویر سوم مقادیر بیشتری را در بر می گیرد. نکته حائز اهمیت، توجه به پارامتر سرعت باد است که در پنل سوم و دوم مقادیر آن به ترتیب ۱/۲۳ m/s و ۱/۷۵ m/s است. در بررسی و ارزیابی تأثیر سرعت باد بر میزان غلظت و پراکندگی متان در هوا باید توجه کافی را مبذول داشت؛ به این معنا که لزوماً میزان غلظت زیاد متان در محیط نشان از دبی زیاد نشستی گاز نیست و بسته به میزان سرعت باد، باید در این موضوع اظهار نظر کرد.



شکل ۵. مقادیر و پراکندگی غلظت متان در سه خیابان ایالت واشنگتن [۱۶]

۲.۳.۲. استفاده از CRDS برای نشستی یابی خطوط لوله زیرزمینی در شهر بوستون

در سال ۲۰۱۲ و در شهر بوستون، پروژه ای مشابه با کار فوق، به همان شیوه و تجهیزات، یعنی استفاده از دستگاه های طیفسنجی شرکت پیکارو با هدایت ناتان فیلیپس^۱ انجام شده است [۱۸]. در این پروژه، تمامی ۷۸۵ مایل خیابان های شهر بوستون زیر ذره بین نشریابی قرار گرفته و حدود ۳۳۵۶ مورد نشستی در خطوط لوله با مقادیر زیاد غلظت متان (تا ۱۵ برابر بیشتر از مقدار مجاز در محیط) گزارش شده است. ذکر این نکته ضروری است که معمولاً در مطالعات انجام شده در زمینه انتشار گاز طبیعی، آستانه مجاز غلظت متان در محیط

2. Google Street View Car

1. Nathan Phillips

با دقت کمتری محاسبه شده است، سرعت زیاد ثبت نتایج و همچنین پوشش گسترده‌تر مسیرها سبب می‌شود که روش فوق، مقرون به صرفه‌تر از روش‌های مشابه موجود باشد.

برای تخمین اندازه نشتی، فرضیه‌ای ارائه شده است که با دراختیار داشتن الگوهای غلظت متان در فضا، می‌توان نسبت به برآورد شار انتشار مبادرت ورزید. برای نیل به چنین الگویی پنج آزمایش انتشار کنترل شده صورت گرفته است. این پنج آزمایش انتشار، شامل یک آزمایش کالیبراسیون انتشار (برای مرتبط کردن الگوی غلظت متان به شار انتشار) در زمین باز، یک آزمایش اعتبارسنجی^۱ در زمین باز و سه آزمایش اعتبارسنجی در شرایط شهری است. شرایط شش گانه زیر برای انجام آزمایش‌های انتشار کنترل شده، ثبت شده است: تاریخ انجام آزمایش، موقعیت مکانی، میزان انتشار، شناسه GSV، فاصله از منبع انتشار و سرعت رانندگی.

میزان انتشار در هر دو آزمایش کالیبراسیون و اعتبارسنجی در محدوده ۱-۵۰ Lpm اختیار شده است. در دو آزمایش انجام شده در زمین باز و بدون مانع (که برای این کار یک فرودگاه متروکه در فورت کالینز^۲ انتخاب شده است)، میزان انتشار متان ۲۰، ۱۰، ۲ و ۴۰ Lpm و فاصله خودرو تا نقطه انتشار مقادیر ۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متری در نظر گرفته شده است. سه آزمایش اعتبارسنجی اجرا شده در شهر بر مبنای میزان ترافیک از یکدیگر مجزا شده‌اند که شامل ترافیک سنگین، نیمه سنگین و کم حجم بوده است. در آزمایش‌های انجام شده در فضای شهری، شرایط تقریباً مشابهی در نظر گرفته شد، با این تفاوت جزئی که مقادیر نرخ انتشار متان ۱/۵، ۰، ۱۰، ۲۵، ۴۵ و ۵۰ Lpm و فاصله از نقطه انتشار بین ۵ تا ۲۱ متر معین شد. علاوه بر این، محل رهاسازی گاز، مبتنی بر شبیه سازی نشتی گاز از یک خط سرویس، در یک نقطه ۵۰ سانتی متری از لبه جاده مقرر شد. اما سرعت خودرو برخلاف شرایط آزمایشی در زمین باز و بدون مانع که ثابت بوده است، با توجه به شرایط ترافیکی در حدود ۱۵ Km/h-۴۰ متغیر بوده است. برای هر موقعیت مکانی و در هر میزان انتشار گاز نیز، خودرو ۴ تا ۶ بار عبور کرده است.

اما آزمایش‌های پنج گانه انتشار کنترل شده برخی نتایج زیر را در بر داشته است:

- در طول آزمایش‌ها کالیبراسیون، غلظت متان در

پس زمینه^۳ ۱/۹۷ ppm بوده است (که در فضای آزاد بیرون از ستون متان رها شده اندازه گیری شده است)؛

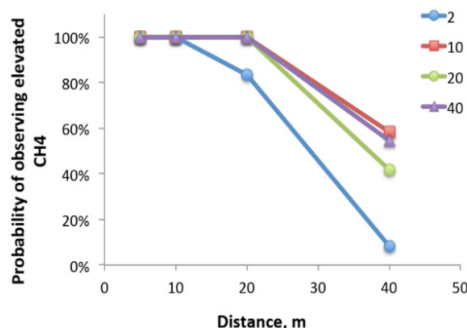
- در فاصله‌های کمتر از ۲۰ متر از منبع نشر و در تمامی مقادیر شار انتشار (۲-۴۰ Lpm) غلظت متان لااقل بزرگ‌تر از ۱۰ درصد غلظت پس زمینه بوده است (شکل ۶)؛
- در فاصله‌های بزرگ‌تر از ۲۰ متر از منبع نشر، گاهی اوقات غلظت متان، اندازه گیری و بعضی اوقات تشخیص پذیر نبوده است (شکل ۶). در نتیجه این امر محتمل است که در چنین فواصلی تخمین شار انتشار کمتر از حد واقعی محاسبه شده باشد؛
- در نهایت، فاصله ۲۰ متر و کمتر از آن از محل نشر، به عنوان یک محدودیت برای استفاده از GSV معرفی شد.

اما پس از انجام آزمایش کالیبراسیون، کارهای تحلیلی ریاضی بر روی داده‌های موجود با هدف رسیدن به رابطه‌ای مطمئن برای تخمین شار نشر متان انجام شد. لذا هر ستون متان رها شده با سه پارامتر توصیف شد: غلظت متان حداکثری، مساحت زیر نمودار هر ستون متان و نسبت مساحت مذکور به غلظت متان حداکثری. پس از ارزیابی‌های تحلیلی صورت گرفته توسط نرم افزار ANOVA و بررسی تأثیر گذاری پارامترهای سه گانه مذکور و همچنین انجام آزمایش‌های اعتبارسنجی، در نهایت رابطه ۳ به عنوان یک معادله تجربی برای تخمین شار انتشار متان ارائه شده است:

$$\log_{10}(\text{release rate}) = 0.1178 + 0.08267 * M \quad (3)$$

$$- 0.005175 * A + 0.08628 * K$$

در این رابطه M ماکسیمم غلظت متان، A مساحت زیر نمودار هر ستون متان و K نیز نسبت مساحت مذکور به غلظت متان حداکثری است.

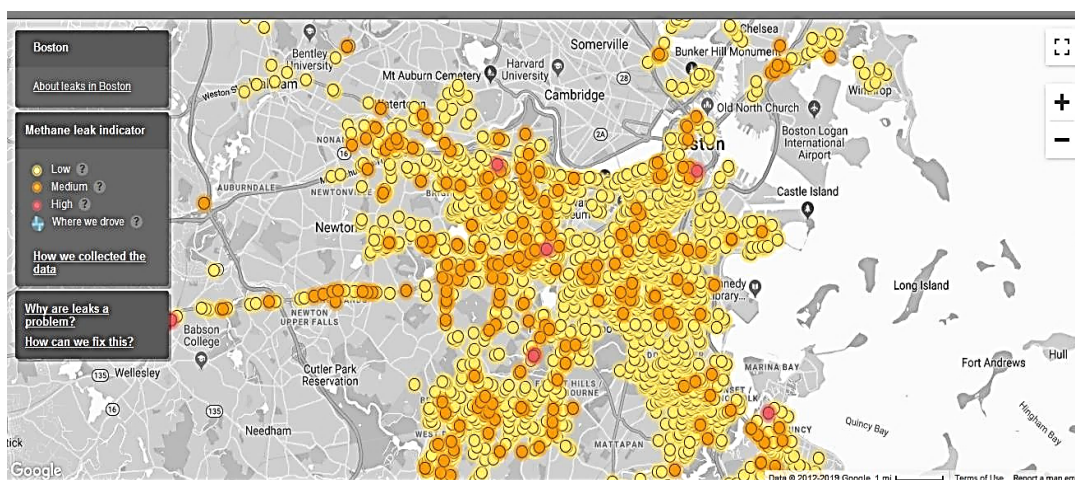


شکل ۶. احتمالات خوانش متان در آزمایش کالیبراسیون برای مقادیر نرخ انتشار ۲-۴۰ و فاصله از منبع نشتی متان ۲ تا ۴۰ متری [۱۹]

3. Background CH4 concentration

1. Validation
2. Fort Collins

در انتها پس از تعیین نرخ انتشار متان در محیط، مقادیر ثبت شده و به صورت عمومی مشاهده می شود (شکل ۷) به همراه موقعیت مکانی، به صورت آنلاین در سایت EDF [۲۰].



شکل ۷. نمایی از نقشه نشر متان به همراه موقعیت مکانی در شهر بوستون [۲۰]

۱.۴.۲. صحت سنجی سیستم GSV توسط گروهی از محققان دانشگاه کلرادو

در سال ۲۰۱۸ و در دانشگاه کلرادو، تعدادی از محققان بر روی سیستم GSV آزمایش هایی را برای ارزیابی عملکرد این سیستم انجام دادند [۲۱]. نحوه انجام آزمایش ها به گونه ای است که ابتدا تعدادی از نقاط دارای نشتی ثبت شده در (شکل ۷) به صورت اتفاقی انتخاب می شود که این نقاط نشتی قبلاً توسط سیستم GSV اندازه گیری شده و بر روی سایت فوق قرار گرفته است. سپس اطلاعات نقاط مشخص شده به شرکت های توزیع گاز منطقه ای^۱ ارسال می شوند تا هریک از شرکت های مربوط، نقاط مشخص شده را در مکان و به صورت مستقیم با استفاده از یک دستگاه مبتنی بر لیزر^۲ اندازه گیری کنند. در نهایت پس از اندازه گیری LDC، تیم تحقیقاتی این پروژه با استفاده از یک سیستم اندازه گیری مستقیم HFS اقدام به اندازه گیری درجا و مقایسه مقادیر نشتی حاصل از آن با سیستم های GSV و RMLD می کند.

نتایج حاصل از انجام این آزمایش ها حاوی نکات مهمی بوده است. طبق ارزیابی های صورت گرفته، مشخص شده است که گروه بررسی نشتی LDC (که با استفاده از دستگاه RMLD اقدام به اندازه گیری نشتی می کنند)، تنها در ۲۰ درصد از موارد تعیین شده توانسته است نشتی گاز را تشخیص دهد و اندازه گیری کند. به عبارت دیگر در

۸۰ درصد موارد تشخیص داده شده با سیستم GSV، دستگاه اندازه گیری RMLD توان تشخیص و اندازه گیری را نداشته است.

اندازه گیری های مستقیم تیم تحقیقاتی این پروژه نشان می دهد که حدود ۷۶ درصد از نقاط دارای نشتی تعیین شده از سایت مذکور، در واقع دارای نشتی گاز بوده است؛ اما با این حال محققان این پروژه گزارش داده اند که در مقادیر انتشار پایین (کمتر از ۱/۶ گرم بر دقیقه) سیستم اندازه گیری سیار GSV مقادیر نشتی را بیشتر از حد واقعی تخمین می زند. در نتیجه نکات بیان شده نشان می دهد که ضریب انتشار گاز محاسبه شده توسط شرکت های توزیع گاز منطقه ای با یک ضریب حدود ۲/۴ کمتر از مقدار واقعی آن است.

۳. جمع بندی

در این مطالعه، تلاش شد تا با بررسی پروژه های اخیر صورت گرفته در آمریکا در زمینه تشخیص نشر متان از شبکه و زیرساخت توزیع گاز طبیعی و تجهیزات گوناگون آن، ضمن مقایسه مقادیر اتلاف شده گاز مذکور در بخش های مختلف این صنعت، دستاوردها و ایده های جدیدی که در سالیان اخیر، در مبحث تشخیص انتشار متان، توسعه یافته است، دقیق تر ارزیابی و بررسی شوند. همان گونه که در کارهای انجام شده ملاحظه شده است، با گذر زمان حرکت از تکنولوژی های

1. Local gas Distribution Company (LDC)
2. Remote Methane Leak Detector (RMLD)





۴. منابع

- [1]. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/>
- [2]. Intergovernmental Panel on Climate Change, AR5. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group, I Contribution to the IPCC 5th Assessment Report.
- [3]. Wigley, T. M. L. "Coal to gas: The influence of methane leakage". Clim. Change 2011, 108, 601-608.
- [4]. West, J.J., Fiore, A.M., Horowitz, L.W., Mauzerall, D.L. "Global health benefits of mitigating ozone pollution with methane emission controls". Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A. 2006, 103, 3988-3993.
- [5]. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA), 2012. www.phmsa.dot.gov/pipeline/library/data-stats.
- [6]. EPA/GRI, "Methane Emissions from the Natural Gas Industry, Vol. 2: Technical Report". 1996, GRI-94/0257.1, EPA-600/R-96-080b.
- [7]. Allen, D.T., Pacsi, A.P., Sullivan, D.W., Zavala-Araiza, D., Harrison, M., Keen, K., Fraser, M.P., Hill, A.D., Sawyer, R.F., Seinfeld, J.H. Methane emissions from process equipment at natural gas production sites in the United States: pneumatic controllers. Environ. Sci. Technol. 2015, 49, 633-640.
- [8]. Allen, D.T., Torres, V.M., Thomas, J., Sullivan, D.W., Harrison, M., Hendler, A., Herndon, S.C., Kolb, C.E., Fraser, M.P., Hille, A.D., Lamb, B.K., Miskimins, J., Sawyer, R.F., Seinfeld, J.H. Measurements of methane emissions at natural gas production sites in the United States. Proc. Natl. Acad. Sci. 2013, 110 (44), 17768-17773.
- [9]. Brantley, H.L., Thoma, E.D., Squier, W.C., Guven, B.B., Lyon, D. Assessment of methane emissions from oil and gas production pads using mobile measurements. Environ. Sci. Technol. 2014, 48, 14508-14515.
- [10]. Mitchell, A.L., Tkacik, D.S., Roscioli, J.R., Herndon, S.C., Yacovitch, T.I., Martinez,

درجا و مستقیم که در قالب سیستم نمونه‌برداری جریان-بالا معرفی شده است، با شتاب زیادی به سمت فناوری‌های سیار در جریان است که غالباً اندازه‌گیری و نقشه‌برداری از نشتی‌های گوناگون را در سرعت نرمال خودرو مهیا کرده است. سیستم‌های مبتنی بر اندازه‌گیری درجا و مستقیم دارای محدودیت سرعت حداقلی نمونه‌برداری برای تشخیص نشت بوده است؛ به‌طوری که در پروژه‌های برایان لمب و EPA تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری‌شده به نسبت ضریب فعالیت در دسته‌ها و تجهیزات گوناگون مقادیر بسیار کمی را شامل شده است، به‌عنوان نمونه در مطالعه برایان لمب تعداد نشتی‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های تقلیل فشار بیشتر از ۳۰۰ psi، ۵۹ مورد بوده است؛ در حالی که تعداد کل ایستگاه‌های مذکور در سراسر آمریکا حدود ۴۵۰۰ مورد (ضریب فعالیت) است. بنابراین می‌توان این‌گونه بیان کرد که مهم‌ترین دستاورد استفاده از سیستم‌های سیار تشخیص نشت متان، افزایش سرعت و تعداد نمونه‌گیری در یافتن نشتی‌ها و همچنین فراهم‌شدن پتانسیل برای پوشش حداکثری نشریابی در شبکه توزیع گاز و در فضای شهری بوده است؛ به‌طوری که در مطالعه اخیر صورت‌گرفته در دانشگاه کلرادو بخش زیادی از زیرساخت شبکه گازرسانی در شهرهای مختلف آمریکا بررسی و نقشه‌برداری نشت گاز انجام شد (GSV). علاوه بر این، یکی از ضعف‌های روش مستقیم و درجا، تخمین ضریب نشت و همچنین چگونگی گزینش روش آماری در نمونه‌گیری از نقاط نشتی است. در برآوردهای سازمان EPA سهم شبکه توزیع گاز طبیعی از انتشار متان در صنعت نفت و گاز آمریکا از رقم ۱۳۲۹ Gg در سال ۲۰۱۱ به ۴۷۵ Gg در سال ۲۰۱۷ تقلیل یافته است. این امر نشان می‌دهد احتمالاً روش آماری نمونه‌برداری که بر مبنای آن، ضریب نشت تخمین زده می‌شود، تحت برخی تغییرات قرار گرفته است.

فارغ از روش تشخیص نشت، در شبکه توزیع گاز کشور آمریکا و در میان تجهیزات گوناگون استفاده‌شده در این صنعت، زیرساخت خطوط لوله اعم از خطوط لوله اصلی و خدمات، با حدود ۵۵ درصد از کل انتشار، بیشترین سهم انتشار فرار گاز طبیعی را به خود اختصاص داده است و پس از آن تجهیزات مشترکین جزء و عمده (رگولاتورها و کنتررها) با ۳۲ درصد و همچنین تمامی ایستگاه‌های تقلیل و اندازه‌گیری فشار با حدود ۱۳ درصد از کل مقدار انتشار، بیشترین میزان نشت متان را در بر داشته است.



- 4974-4990.
- [16]. Jackson, R. B.; Down, A.; Phillips, N. G.; Ackley, R. C.; Cook, C. W.; Plata, D. L.; Zhao, K. "Natural gas pipeline leaks across Washington, DC". *Environ. Sci. Technol.* 2014, 48 (3), 2051-2058.
- [17]. Hendrick, M. F.; Ackley, R.; Sanaie-Movahed, B.; Xiaojing Tang; Phillips, N. G., "Fugitive methane emissions from leak-prone natural gas distribution infrastructure in urban environments". *Environmental Pollution* 213, 2016, 710-716.
- [18]. Phillips, N. G.; Ackley, R.; Crosson, E. R.; Down, A.; Huttyra, L. R.; Brondfield, M.; Karr, J. D.; Zhao, K.; Jackson, R. B. "Mapping urban pipeline leaks: Methane leaks across Boston". *Environ. Pollut.* 2013, 173, 1-4.
- [19]. Von Fischer, J. C.; Cooley, D.; Chamberlain, S.; Gaylord, A.; Griebenow, C. J.; Hamburg, S. P.; Salo, J.; Schumacher, R.; Theobald, D.; Ham, J. "Rapid, Vehicle-Based Identification of Location and Magnitude of Urban Natural Gas Pipeline Leaks". *Environ. Sci. & Technol.* 2017, 51, 4091-4099.
- [20]. <http://www.edf.org/climate/methanemaps>,
- [21]. Zachary D. Weller, Joseph R. Roscioli, W. Conner Daube, Brian K. Lamb, Thomas W. Ferrara, Paul E. Brewer, Joseph C. von Fischer "Vehicle-Based Methane Surveys for Finding Natural Gas Leaks and Estimating Their Size: Validation and Uncertainty". *Environ. Sci. Technol.* 2018, 52, 11922-11930.
- D.M., Vaughn, T.L., Williams, L.L., Sullivan, M.R., Floerchinger, C., Omara, M., Subramanian, R., Zimmerle, D., Marchese, A.J., Robinson, A.L. Measurements of methane emissions from natural Gas gathering facilities and processing plants: measurement results. *Environ. Sci. Technol.* 2015, 49, 3219-3227.
- [11]. U. S. Environmental Protection Agency. Methane Emissions; Washington, DC, 2012; <http://epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/ch4.html>.
- [12]. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990-2017; <https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-04/documents/us-ghg-inventory-2019-main-text.pdf>.
- [13]. Lamb, B. K.; Edburg, S. L.; Ferrara, T. W.; Howard, T.; Harrison, M. R.; Kolb, C. E.; Townsend-Small, A.; Dyck, W.; Possolo, A.; Whetstone, J. R. "Direct Measurements Show Decreasing Methane Emissions from Natural Gas Local Distribution Systems in the United States". *Environ. Sci. Technol.* 2015, 49 (8), 5161-5169.
- [14]. Karion, A.; Sweeney, C.; Petron, G.; Frost, G.; Hardesty, R. M.; Kofler, J.; Miller, B. R.; Newberger, T.; Wolter, S.; Banta, R.; Brewer, A.; Dlugokencky, E.; Lang, P.; Montzka, S. A.; Schnell, R.; Tans, P.; Trainer, M.; Zamora, R.; Conley, S. "Methane emissions estimate from airborne measurements over a western United States natural gas field". *Geophys. Res. Lett.* 2013, 40 (16), 4393-4397.
- [15]. Peischl, J.; Ryerson, T. B.; Brioude, J.; Aikin, K. C.; Andrews, A. E.; Atlas, E.; Blake, D.; Daube, B. C.; de Gouw, J. A.; Dlugokencky, E.; Frost, G. J.; Gentner, D. R.; Gilman, J. B.; Goldstein, A. H.; Harley, R. A.; Holloway, J. S.; Kofler, J.; Kuster, W. C.; Lang, P. M.; Novelli, P. C.; Santoni, G. W.; Trainer, M.; Wofsy, S. C.; Parrish, D. D. "Quantifying sources of methane using light alkanes in the Los Angeles basin, California". *J. Geophys. Res.* 2013, 118 (10),

A Review on the Recently Developed Methods of the Methane Emission Inventory Estimation in the Natural Gas Distribution Network

Mohammad S. Khatami, Hamid R. Afshoun, Mehdi Jabari*

Khorasan Razavi Gas Company, Research and Technology department, Mashhad, Iran.

Corresponding Author, Email: smehdi.jabbari@gmail.com

Abstract

As a clean energy source, the natural gas emits about 50 percent less CO₂ than coal when burned normally. On the other hand, the global warming potential of the methane is 86 times greater than CO₂ on a 20-year time frame. An increase in the methane emission can eliminate the advantage of minimal carbon dioxide emitted in the natural gas combustion. Hence, methane emission as an important environmental issue, has been evaluated in the various studies. Today, it has accelerated to progress of the mobile methane leak measurement in the various sectors of the natural gas industry. The most important achievement of this idea is increasing of the emission detection rate and also providing the potential for maximum coverage of leakage finding in the natural gas distribution network. In this study, the effort has been made to evaluate the new ideas of emission detection used in natural gas distribution infrastructure.

Keywords: Emission inventory, methane emission measurement, Gas distribution network, Emission factor.



شبیه‌سازی سه‌بعدی و بررسی تأثیر دما در ترک‌های شبه‌بیضوی محوری و محیطی در مخازن استوانه‌ای

هادی راکی^۱، جلیل جمالی^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

نویسنده مسئول ایمیل: j.jamali@iau-shoushtar.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۸

چکیده

در طول مدت عمر یک مخزن، ایجاد معایبی همچون ترک‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است که به دلایلی نظیر خوردگی یا بارگذاری خستگی و... به وجود می‌آیند. یکی از انواع عمده ترک‌های ایجادشده، ترک‌های شبه‌بیضوی هستند. هدف از این تحقیق، بررسی این نوع از ترک‌ها در یک مدل مخزن استوانه‌ای از جنس استیل با استاندارد ASME و تأثیرات ترمومکانیکی آن است. برای شبیه‌سازی ترک از دو نسبت a/c و a/t که معرف ابعاد ترک هستند، استفاده شده است. در اینجا برای به‌دست آوردن ضرایب شدت تنش از شبیه‌سازی ترک و مخزن در نرم‌افزار المان محدود ANSYS، در محیط workbench استفاده شده است. برای محاسبه ضرایب شدت تنش در نقاط مختلف واقع بر جبهه ترک مشخصات موضعی ایجاد شد و بر اساس کانتورهای مختلف در نودهای اطراف نوک ترک یا میزان بازشدگی در صفحه ترک مقادیر ضرایب شدت تنش را بر اساس معیار مدنظر محاسبه شد. با استفاده از مقادیر ضرایب شدت تنش به‌دست‌آمده در ابعاد مشخص مخزن و ترک و همچنین شرایط بارگذاری و جنس مخزن، نقاط بحرانی ترک مشخص شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مراحل قبل و با کمک معادله پاریس، عمر مخزن و تعداد سیکل بارگذاری مشخص شد و در نهایت نتایج به‌دست‌آمده از ضریب شدت تنش با نتایج ضریب شدت تنش بر اثر اختلاف دمای جداری مخزن مقایسه شد.

کلمات کلیدی: مخزن تحت فشار، تخمین عمر خستگی، ترک‌های شبه‌بیضوی.

۱. مقدمه

خستگی یک قطعه صورت می‌گیرد. در ادامه ناحیه دوم به دامنه رشد پایدار ترک می‌پردازد و منحصراً به دلیل اهمیت تکنولوژیکی آن مطالعه می‌شود. ناحیه سوم نیز به دامنه رشد سریع ترک می‌پردازد و به صورت موردی به عنوان بخش کوچکی در تخمین عمر خستگی یک قطعه قلمداد می‌شود.

اردوگان و کیلبر [۳] در زمینه تحقیقات صورت گرفته درباره محاسبه مقدار ضریب شدت تنش، به مطالعه پوسته‌های کروی و استوانه‌ای دارای ترک با طول ترک‌های بزرگ پرداخته‌اند.

سلام عبید [۱] در مطالعات خود به این موضوع اشاره می‌کند که پدیده شکست هنگامی در شرایط بارگذاری کمتر از تنش تسلیم و تنش نهایی رخ می‌دهد که یک ماده به‌طور متوالی تحت بارگذاری و باربرداری قرار گیرد.

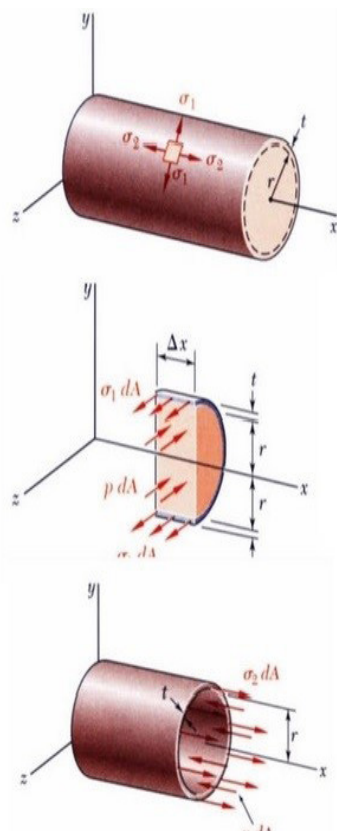
پدیده شکست با تقسیم‌بندی به سه ناحیه مشخص و جدا از هم صورت می‌پذیرد. شیگلی و بودیانس [۲] ناحیه اول به روند پیشرفت ترک با دامنه فاکتور شدت تنش پایین می‌پردازد که به عنوان مهم‌ترین بخش در تخمین عمر



$$\sum F_z = 0$$

$$\sigma_1(2t\Delta x) = p(2r\Delta x)$$

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t}$$



شکل ۱. تنش در مخازن استوانه‌ای

۳. تخمین عمر خستگی

محاسبه عمر خستگی یا تعداد سیکل انجام شده از زمان ایجاد ترک تا زمان شکست و تخریب کامل مخزن را می‌توان از رابطه پاریس به دست آورد. رابطه پاریس به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{da}{dN} = C(K_{max} - K_{op})^m \quad (7)$$

$$dN = \frac{da}{C(\alpha\Delta\sigma\sqrt{\pi})^m} \quad (8)$$

$$\int_{op}^{max} dN = \int_{op}^{max} \frac{da}{C(\alpha\Delta\sigma\sqrt{\pi})^m} \quad (9)$$

$$N_{max} = \int_{op}^{max} \frac{da}{C(\alpha\Delta\sigma\sqrt{\pi})^m} \quad (10)$$

در این رابطه C و m ثوابت وابسته به جنس مخزن و K_{max} برابر با حداکثر ضریب شدت تنش و K_{op} ضریب شدت تنش نوک ترک است.

- (۴) فرانسسکو سزاری [۴] مخازن استوانه‌ای تحت فشار داخلی را بررسی کرد که دارای ترک‌های سطحی و زیرسطحی هستند. او بر اساس قوانین ASME نحوه توزیع تنش‌های محیطی را بر مدل مدنظر خود اعمال کرد و با استفاده از روش‌های تحلیلی به بررسی ضرایب شدت تنش در شرایط بارگذاری مدنظر خود پرداخت.

K. Nasri and M. Zenasni [۵] بررسی رشد ترک خستگی را برای مواد پوشش داده شده بررسی کرد. در این تحقیق، زاویه رشد ترک، سرعت رشد آن و همچنین وجود بیش از یک ترک در نظر گرفته شد.

H. pathak و همکارانش [۶] به بررسی رشد ترک خستگی تحت بارگذاری ترموالاستیک که بارگذاری حرارتی آن با دامنه ثابت و از روش بدون مش گلرکین استفاده کرد.

پرداختن به موضوع مکانیک شکست در مخازن دارای ترک، موضوعات بسیاری از مطالعات اخیر بوده است. با توجه به نبود منبعی کامل و جامع در خصوص بررسی توزیع ضرایب شدت تنش ترک‌های محوری و محیطی در مخازن استوانه‌ای تحت بارگذاری حرارتی مکانیکی، انجام این تحقیق و به دست آوردن تغییر رفتار ترک در ابعاد مختلف ترک و مخزن ضروری است.

۲. توزیع تنش در مخازن تحت فشار استوانه‌ای

به دلیل فشارهای وارد شده از جانب سیال نگهدارنده در یک تانکر جدارنازک، مانند تانکر ذخیره سوخت یا مخازن ذخیره بخار آب، نیروهایی بر سطح داخلی مخزن اعمال می‌شود که این نیروها سبب ایجاد تنش در جداره مخزن می‌شود. این تنش‌ها در مخازن استوانه‌ای شکل به دو دسته محوری و محیطی تقسیم می‌شوند. (شکل ۱)

۱.۲. تنش‌های یکنواخت طولی

این تنش‌ها در راستای محور استوانه، بر جداره تانکر اعمال می‌شوند و مطابق روابط زیر خواهند بود: (جدول ۱)

$$\sum F_x = 0 \quad (1)$$

$$\sigma_2(2\pi r t) = p(\pi r^2) \quad (2)$$

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2t} \quad (3)$$

۲.۲. تنش‌های یکنواخت عرضی

شکل روبه‌رو یک مقطع عرضی از یک تانکر را نشان می‌دهد و تنش‌های اعمالی بر سطح مقطع عرضی آن به شکل زیر است:

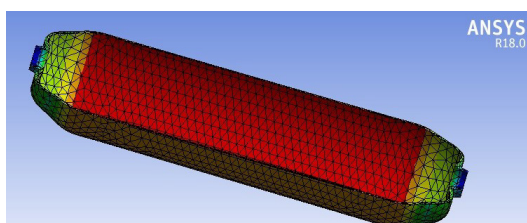
۴. شبیه سازی مخزن استوانه ای تحت فشار

شبیه سازی مخازن صنعتی و مهندسی قبل از فرایند تولید و ساخت، مهم ترین بخش از طراحی یک مخزن تلقی می شود. در این مرحله طراحان و مهندسان با کمک گرفتن از شبیه سازی، سعی در شناخت معایب احتمالی و بررسی

چگونگی ایجاد آن ها می کنند. بخش ۸ از استاندارد ASME به مخازن تحت فشار اختصاص دارد. مدلی که در این تحقیق از آن استفاده شد، با مشخصات ASME BPV Code بخش ۸، قسمت ۲ خواهد بود [۷-۱۲]. مشخصات این جنس مخزن به شرح جدول زیر است:

جدول ۱. مشخصات و خصوصیات مکانیکی مخزن

ضخامت مخزن Mm	مدول الاستیسیته G Pascal	استحکام کششی تسلیم M Pascal	ضریب پواسون	شعاع داخلی M
۲۰	۲۰۰	۲۵۰	۰,۳	۰,۲۴۶
استحکام کششی بیشینه M Pascal	فشار کاری M Pascal	دمای کاری °C	چگالی مخزن g/cm	ضریب بالک G Pascal
۴۶۰	۲۰	۲۲	۷,۸۵	۱۱۶۶



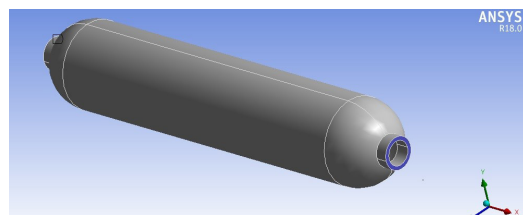
شکل ۳. توزیع تنش در مدل شبیه سازی شده

در اینجا شبیه سازی با کمک نرم افزار المان محدود ANSYS و در محیط Workbench انجام خواهد شد. در ابتدا مخزن مدنظر با مشخصات گفته شده مدل سازی می شود و پس از آن، در مدل ترک ایجاد می شود. سپس مدل مخزن دارای ترک در نرم افزار المان محدود انسیس از نظر ضرایب شدت تنش در مود اول (مود بازشوندگی) تحلیل و بررسی می شود و نتایج به دست آمده برای ترک های محوری و شعاعی به صورت نمودارهای جداگانه برای هر ابعاد منحصربه فرد ترک رسم و نشان داده خواهد شد. با بررسی نتایج مراحل گفته شده، به تفاوت ترک های محوری و محیطی در یک مخزن پی خواهیم برد و در پایان به تأثیر دما خواهیم پرداخت. تکیه گاه از نوع فلنج از انواع متداول تکیه ها در تجهیزات مهندسی برای جلوگیری از جابه جایی و حرکت تجهیز بر اثر نیروهای خارجی است. شکل ۲ مدل یک مخزن استوانه ای با فشار داخلی و تکیه گاه فلنجی در دو انتهای آن را نشان می دهد.

انتخاب نوع المان و اندازه المان ها بسیار حائز اهمیت است. تعداد المان ها باید به گونه ای انتخاب شود که در کوتاه ترین زمان، کمترین خطا را داشته باشد. با توجه به نتایج تحلیل اجزای محدود در (جدول ۲)، المان های Tetrahed و به اندازه ۰,۰۱۸ متر انتخاب شد. به دلیل هم گرایی در نتایج به دست آمده از اندازه های کوچک ترین، این اندازه مش مناسب و مقدار ماکزیمم تنش وان میسر برابر با ۲۴۲ مگاپاسکال است.

جدول ۲. آنالیز انتخاب تعداد و اندازه المان ها

Size mesh (M)	Elements (110e+3)	Stress (Pa)
0.8	2	3.09E+08
0.6	1.6	3.07E+08
0.4	2.3	3.14E+08
0.2	1	2.94E+08
0.08	4.6	2.53E+08
0.06	8.3	2.48E+08
0.04	18.7	2.44E+08
0.02	86	2.43E+08
0.018	143	2.42E+08
0.016	222	2.42E+08
0.014	305	2.42E+08
0.012	423	2.42E+08

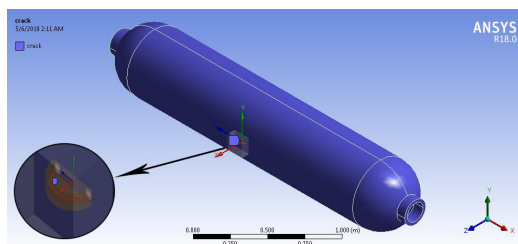


شکل ۲. مدل شبیه سازی شده مخزن استوانه ای

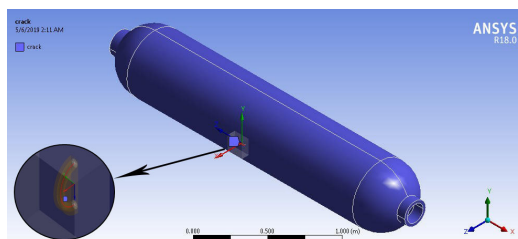
تنش در مخازن تحت فشار هنگامی که مخزن فاقد ترک باشد، از پارامترهای مهم تحلیل در فرایند طراحی است. مادامی که ترک ایجاد نشده باشد، مقادیر تنش را در هر نقطه از مخزن می توان محاسبه کرد. (شکل ۳) چگونگی توزیع تنش در مدل نشان داده شده در (شکل ۲) را بر حسب معیار von-mises نشان می دهد.

۵. شبیه سازی ترک در مخزن استوانه ای

با ایجاد ترک در مخزن، مخزن دچار ناپیوستگی های سازه ای می شود. به دلیل وجود شدت گرایان تنش در اطراف ترک، مدل سازی و انتخاب نوع المان در اطراف این ناحیه باید با دقت بسیار زیادی صورت پذیرد. به واسطه وجود ترک و افزایش ضریب شدت تنش در پیرامون آن، شاهد نقاط بحرانی در جبهه ترک خواهیم بود. (شکل ۴ و ۵) نمونه هایی از ترک محوری و محیطی در مخزن استوانه ای نشان می دهد.



شکل ۴. شبیه سازی ترک محوری در مخزن استوانه ای



شکل ۵. شبیه سازی ترک محیطی در مخزن استوانه ای

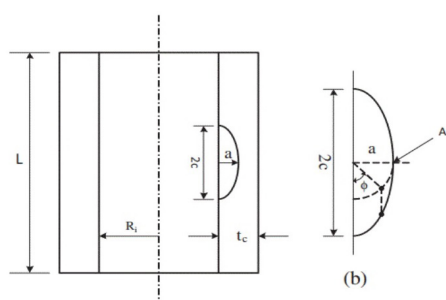
به دلیل افزایش تراکم تنش در اطراف ترک و کوچک بودن ابعاد ترک، المان های این ناحیه باید کوچک تر از نواحی دیگر انتخاب شوند. به همین منظور یک ناحیه کروی از المان ها به اندازه ۰,۰۰۵ و با شعاع ۰,۱ متر در اطراف ترک انتخاب شد.

۶. صحت سنجی

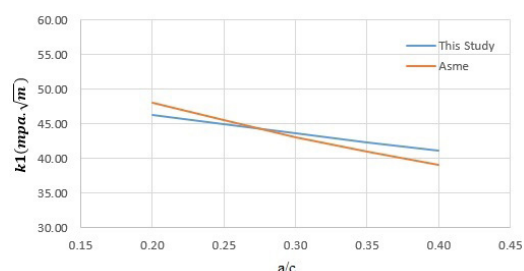
برای صحت سنجی ضرایب شدت تنش یک مدل استاندارد که در بخش سوم کد ASME است که شامل مخزنی تحت فشار داخلی و تکیه گاه ثابت استفاده شده است. نیم محور کوچک ترک نیم بیضوی مرکزی (a) برابر ۲۵ میلی متر است. در (شکل ۶) شماتیک مدل استاندارد را مشاهده می کنید.

برای صحت سنجی مخزن مورد بررسی در این تحقیق با مدل استاندارد گفته شده، به ازای نسبت ابعاد مختلف (a/c) برای ترک حداکثر ضریب شدت تنش در عمق ترک که در (شکل ۶) به صورت نقطه A نشان داده شده، به دست آمده

است و با مقادیر ارائه شده در مرجع استاندارد مقایسه می شود که در (شکل ۷) نشان داده شده است.



شکل ۶. شماتیک مدل استاندارد



شکل ۷. مقایسه ضریب شدت تنش در این تحقیق با مرجع استاندارد

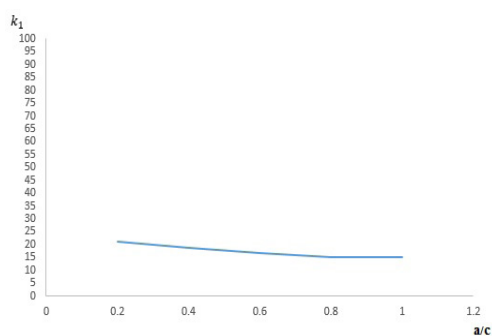
همان گونه که در (شکل ۷) مشاهده می کنید، نتایج حاضر و مرجع استاندارد به یکدیگر نزدیک هستند.

۷. نتایج و بحث

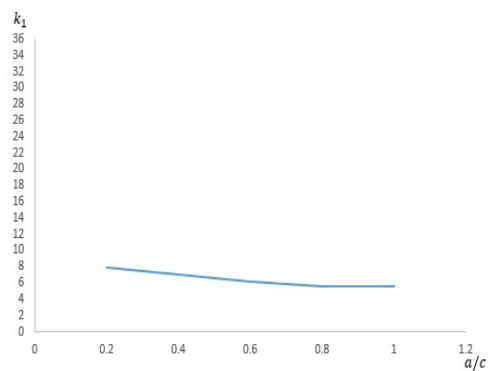
۱.۷. ضرایب شدت تنش در نسبت ابعاد مختلف ترک

در ادامه ماکزیمم ضرایب شدت تنش در ابعاد مختلف ترک نشان داده شده است. تمام مقادیر ضریب شدت تنش بر واحد $\text{Mpa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ هستند.

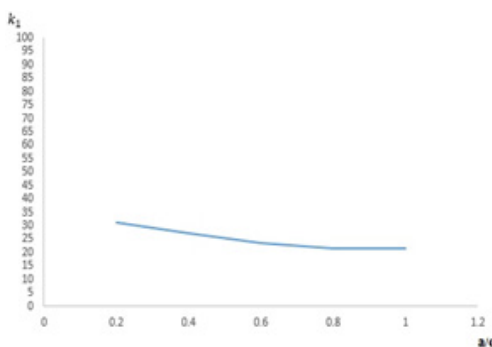
نمودارهای ضرایب شدت تنش در حالت های مختلف ابعاد ترک محوری و محیطی نشان داده شد. همان گونه که مشاهده می شود، در یک عمق ثابت ترک، با افزایش نسبت a/c، ضریب شدت تنش نیز کاهش می یابد. می توان این گونه نیز بیان کرد که ترک های بیضوی شکل از ضرایب شدت تنش بیشتری نسبت به حالت دایره ای شکل برخوردار هستند. ترک های محیطی در مقایسه با ترک های محوری از ضرایب شدت تنش کوچک تری در مد اول برخوردارند. به همین سبب می توان انتظار داشت که عمر خستگی این نوع ترک ها، نسبت به ترک های محوری نیز افزایش داشته باشد.



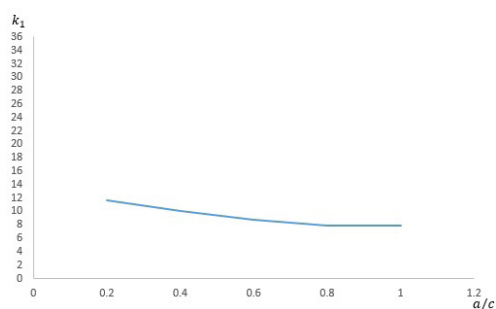
نمودار ۲. ضریب شدت تنش ترک محوری در نسبت
 $a/t = 0.1$



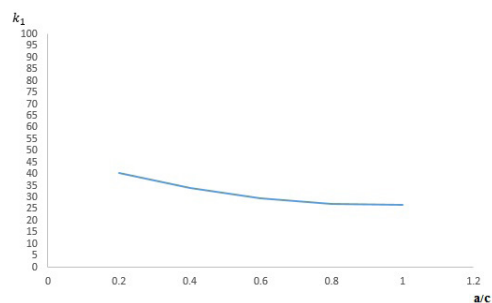
نمودار ۱. ضریب شدت تنش ترک محیطی در نسبت
 $a/t = 0.1$



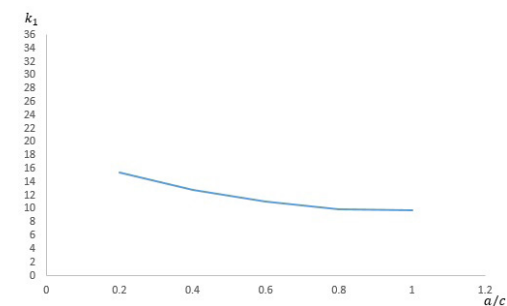
نمودار ۴. ضریب شدت تنش ترک محوری در نسبت
 $a/t = 0.2$



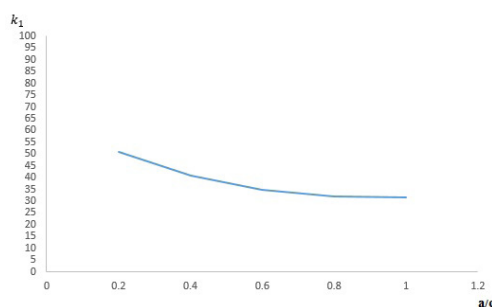
نمودار ۳. ضریب شدت تنش ترک محیطی در نسبت
 $a/t = 0.2$



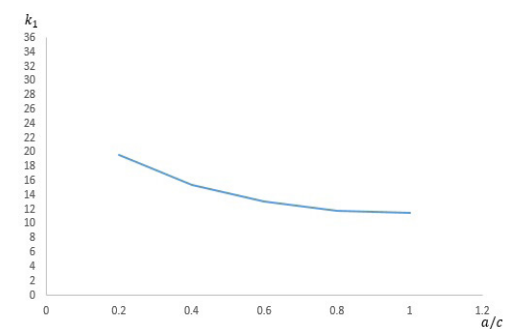
نمودار ۶. ضریب شدت تنش ترک محوری در نسبت
 $a/t = 0.3$



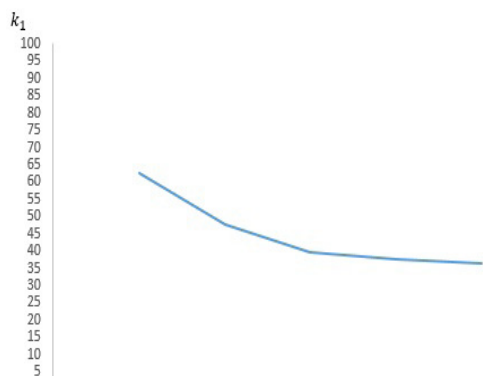
نمودار ۵. ضریب شدت تنش ترک محیطی در نسبت
 $a/t = 0.3$



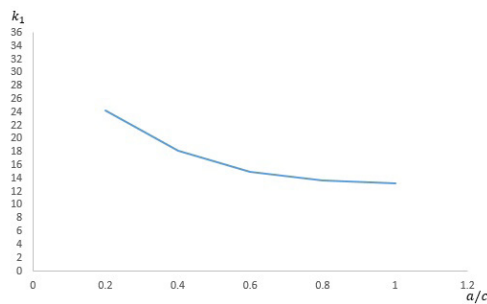
نمودار ۸. ضریب شدت تنش ترک محوری در نسبت
 $a/t = 0.4$



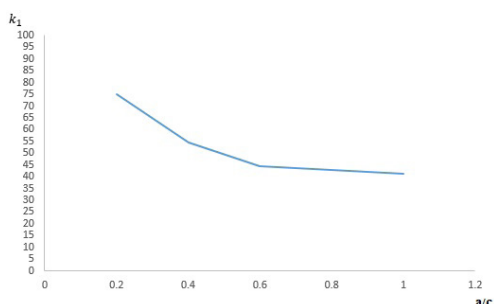
نمودار ۷. ضریب شدت تنش ترک محیطی در نسبت
 $a/t = 0.4$



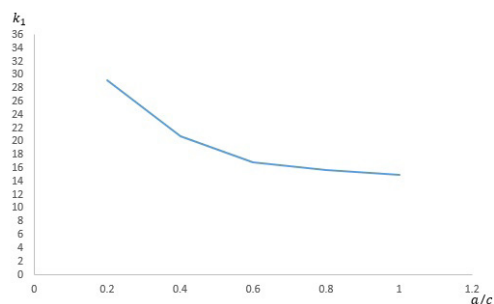
نمودار ۱۰. ضریب شدت تنش ترک محوری در نسبت $a/t = 0.5$



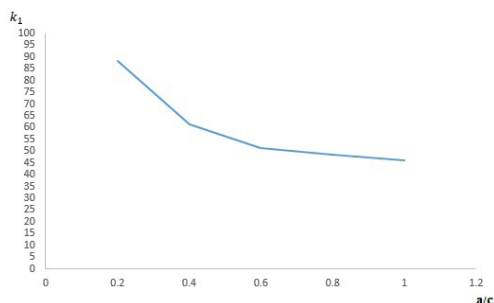
نمودار ۹. ضریب شدت تنش ترک محیطی در نسبت $a/t = 0.5$



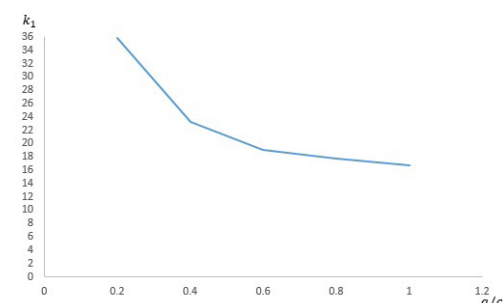
نمودار ۱۲. ضریب شدت تنش ترک محوری در نسبت $a/t = 0.6$



نمودار ۱۱. ضریب شدت تنش ترک محیطی در نسبت $a/t = 0.6$



نمودار ۱۴. ضریب شدت تنش ترک محوری در نسبت $a/t = 0.7$



نمودار ۱۳. ضریب شدت تنش ترک محیطی در نسبت $a/t = 0.7$

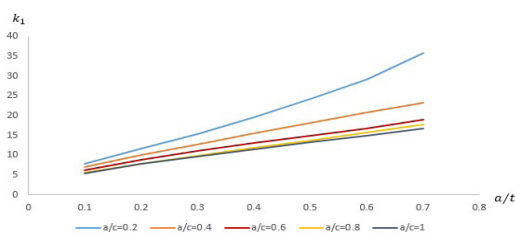
۲.۷. پیش‌بینی رشد ترک

بعد از گذشت چندین سیکل بارگذاری به حالت بحرانی و در نهایت شکست می‌رسد. تخمین عمر مخزن در هنگام ایجاد ترک، مهم‌ترین مراحل تحلیل و طراحی یک مخزن است. هنگامی که ترک ایجاد می‌شود، به دلیل سیکل بارگذاری رشد می‌کند. در مراحل اولیه رشد ترک، تعداد سیکل‌های سپری شده به نسبت مراحل بعدی رشد ترک بیشتر هستند؛ بدین صورت که تعداد سیکل‌هایی که لازم است تا نسبت a/t از ۰.۱ به ۰.۲ برسد، در مقایسه با نسبت a/t از ۰.۲ به ۰.۳، بیشتر خواهد بود.

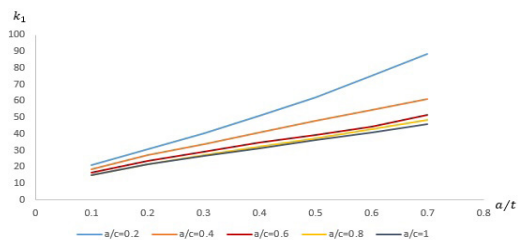
با ایجاد ترک در جداره مخزن، به واسطه فشار داخلی‌ای که سیال درون مخزن به آن وارد می‌سازد، ترک رشد پیدا می‌کند. با رشد ترک، نیم‌محور کوچک آن افزایش می‌یابد و با افزایش عمق ترک، مقادیر ضریب شدت تنش نیز افزایش خواهند یافت. نمودار ۱۵ و ۱۶، نموداری از رشد ترک محوری و محیطی را نشان می‌دهد.

۸. عمر خستگی در مخزن دارای ترک

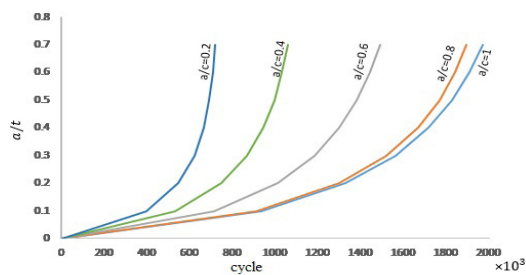
هر مخزن دارای ترک، با صرف‌نظر از طول اولیه ترک،



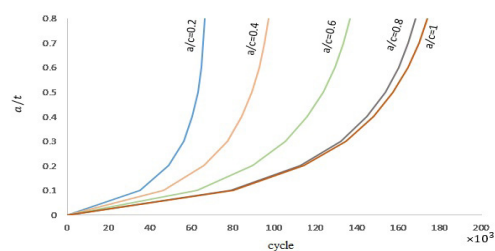
نمودار ۱۶. تحلیل رشد ترک محیطی



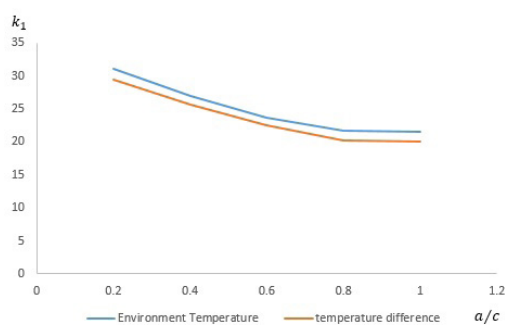
نمودار ۱۵. تحلیل رشد ترک محوری



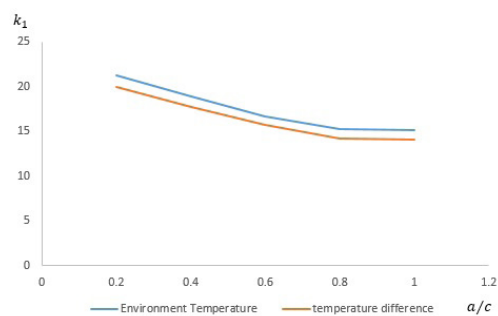
نمودار ۱۸. تخمین عمر خستگی ترک محیطی



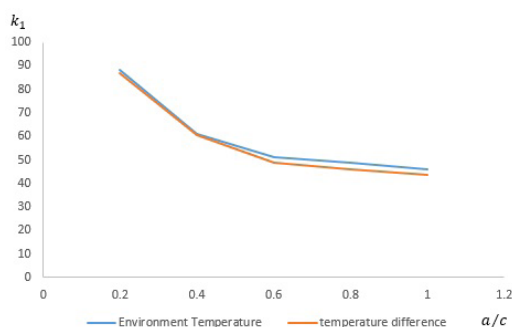
نمودار ۱۷. تخمین عمر خستگی ترک محوری



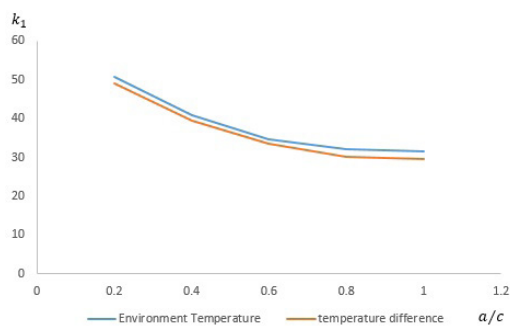
نمودار ۲۰. مقایسه ترمومکانیکی در نسبت $a/t=0.2$



نمودار ۱۹. مقایسه ترمومکانیکی در نسبت $a/t=0.1$



نمودار ۲۲. مقایسه ترمومکانیکی در نسبت $a/t=0.7$



نمودار ۲۱. مقایسه ترمومکانیکی در نسبت $a/t=0.4$



۹. تأثیر دما

اغلب وجود سیال‌های گرم یا سرد درون مخزن، باعث اختلاف دمای میان جداره داخلی و بیرونی آن می‌شود. در این تحقیق، به اختلاف دما در جداره داخلی و بیرونی مخزن می‌پردازیم. دمای ۲۸۰ و ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای جداره داخلی و بیرونی مدل انتخاب شده است. با مقایسه نتایج ضریب شدت تنش یک ترک محوری از این گام و نتایج قبلی از همین ابعاد ترک، به تأثیر اختلاف دمای مخزن بر ضرایب شدت تنش پی خواهیم برد.

۱۰. نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک مدل مخزن استوانه‌ای سه‌بعدی که دارای ترک در دو حالت محوری و محیطی است، تحت تأثیر بارگذاری ترمومکانیکی بررسی شد و نتایج آن به صورت زیر بیان می‌شود:

۱. نتایج ضرایب شدت تنش به دست آمده از تحلیل نرم‌افزار المان محدود، نشان می‌دهد ماکزیمم ضرایب شدت تنش در مد اول در ترک‌هایی که به حالت محوری هستند، بیشتر از حالت محیطی است. این امر ناشی از تنش‌های طولی و شعاعی است که پیش‌تر بیان شد. همان گونه که انتظار می‌رفت، به سبب زیادبودن مقادیر ضرایب شدت تنش در ترک‌های محوری نسبت به ترک‌های محیطی، طول عمر خستگی در ترک‌های محوری نیز کمتر است.
۲. نتایج نشان داد در هنگام ایجاد ترک در مخزن، طول اولیه ترک تأثیر زیادی در عمر خستگی آن دارد و هر اندازه طول اولیه ترک کوچک‌تر باشد، عمر خستگی افزایش بیشتری خواهد یافت.

۳. با افزایش طول ترک در یک عمق ثابت (با کاهش نسبت a/c) همان گونه که در نتایج مشاهده می‌شود، این امر موجب افزایش ضریب شدت تنش می‌شود.

۴. بررسی تأثیر اختلاف دما در مخزن هنگامی که دمای جداره داخلی بیشتر از جداره بیرونی است، باعث کاهش ضرایب شدت تنش می‌شود. مشاهده شد با انتخاب دمای داخلی و بیرونی به ترتیب ۲۸۰ و ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد، مقادیر ضرایب شدت تنش در ابعاد مختلف ترک کاهش یافت.

۵. در نهایت می‌توان گفت فشارهای داخلی مخزن بر جداره آن موجب انتشار و رشد ترک می‌شود. در مراحل اولیه

رشد ترک، میزان رشد کمتر است و در مراحل بعد افزایش می‌یابد؛ به طوری که وقتی ترک ۵۰ درصد اندازه اولیه خود رشد می‌کند، میزان رشد آن افزایش چشمگیری پیدا خواهد کرد و با تعداد سیکل کمتر شاهد رشد بیشتر ترک خواهیم بود. پیشنهاد می‌شود بعد از رشد ترک بیش از ۵۰ درصد، از اقدامات پیشگیرانه همانند استفاده از پوسته یا وصله در ناحیه ترک استفاده شود تا از شکست در این ناحیه جلوگیری کنیم.

۱۱. منابع

- [1]. Salam, I., Abid, M., and Malik, M.A., "Crack Growth Prediction in A Thick Cylinder Under Fatigue Loading – an FEA", International Journal of Pressure Applications Engineering & Development, Vol. 3., pp. 51-55, (2007).
- [2]. Shigley, J.E., Mischke, C.R. and Budynas, R.G., "Mechanical Engineering Design 7th ed", McGraw-Hill Companies, New York, (2004).
- [3]. Erdogan, F., and Sih, G.C., "On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear", Journal of basic engineering, 85(4), pp. 519-525, (1963).
- [4]. Cesari, F., "A simple procedure to evaluate the stress intensity factor in internally pressurized cylinders", International journal of pressure vessels and piping, 21(1), pp. 49-65, (1985).
- [5]. Nasri, K., and Zenasni, M., "Fatigue crack growth simulation in coated materials using X-FEM", Comptes Rendus Mécanique, 345(4), pp. 271-280, (2017).
- [6]. Pathak, H., Singh, A., and Singh, I. V. , " Numerical simulation of 3D thermo-elastic fatigue crack growth problems using coupled FE-EFG approach ", Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 98(3), pp. 295-312, (2017).
- [7]. structural steel fatigue data at zero mean stress, ASME BPV code, section 8, div 2, Table 5-110.1, (1998).



- [8]. Kirthan, L.J., Hegde, R., Suresh, B.S. and Kumar, R.G. , “Computational analysis of fatigue crack growth based on stress intensity factor approach in axial flow compressor blades”, *Procedia Materials Science*, 5, pp. 387-397, (2014).
- [9]. Murtaza, U. T and Hyder, M. J. , “ The effects of thermal stresses on the elliptical surface cracks in PWR reactor pressure vessel”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 75, pp. 124-136, (2015).
- [10]. Meriem-Benziane, M., Abdul-Wahab, S.A., Zahloul, H., Babazian, B., Hady-Meliani, M. and Pluvinaige, M., “Finite Element Analysis of the Integrity of An API X65 Pipeline With a Longitudinal Crack Repaired With Single- And Double-Bonded Composites”, *Journal of Composite Part B: Engineering*, Vol. 77, pp. 431-439, (2015).
- [11]. Pathak, H., Singh, A., and Singh, I. V., “Numerical simulation of 3D thermo-elastic fatigue crack growth problems using coupled FE-EFG approach”, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 98(3), pp. 95-312, (2017).
- [12]. Shahani, A. R and Habibi, S. E. , “ Stress intensity factors in a hollow cylinder containing a circumferential semi-elliptical crack subjected to combined loading”, *International journal of Fatigue*, 29(1), pp. 128-140, (2007).

Three-Dimensional Simulation and the Effect of Temperature on Axial and Peripheral Quasielliptical Cracks in Cylindrical Tanks

Hadi Raki¹, Jalil Jamali^{2*}

1. M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran
2. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

Corresponding Author, Email: jjamali@iau-shoushtar.ac.ir

Abstract

During the life of a reservoir, defects such as cracks are inevitable due to reasons such as corrosion or fatigue loading, and so on. One of the most common types of cracks is the half-elliptic cracks. The purpose of this study is to investigate this type of cracks in the ASME standard steel cylinder tank model and its thermomechanical effects. In order to simulate the cracks, two a/c and a/t ratios representing the dimensions of the cracks are used. Here, in order to obtain stress intensity coefficients from the crack and tank simulation in the ANSYS finite element software, the workbench environment has been used. In order to calculate the stress intensity coefficients, it was necessary to create local coordinates in different points on the crack front and calculate the stress intensity coefficients based on the different contours in the nodes around the crack tip or the crack opening in the crack front, based on the desired criterion. Regarding to the values of the stress intensity coefficients obtained from the specific dimensions of cracks in the reservoir, as well as the loading conditions and the shape of the reservoir, we can determine the criticality of the crack. According to the results obtained from the previous steps and with the help of the Paris equation, the reservoir life and the number of loading cycles were determined. Finally, the results of the stress coefficient were compared with the results of the stress intensity factor due to the difference in the temperature of the reservoir wall.

Keywords: Pressure vessel, fatigue life assessment, half-elliptic cracks.



تحلیل فنی و کاربردی واحدهای قابل حمل LNG در کشور

احمد قضاتلو^۱، نیلوفر فتوره‌چی^۱، مهران سرمد^۱، منصوره بصیرت^۲

۱. ایران، تهران، پژوهشگاه صنعت نفت، کدپستی ۷۳۱-۵۶۶۴۱

۲. ایران، تهران، شرکت ملی گاز ایران، مدیریت پژوهش و فناوری، کدپستی ۳۳۵۴-۵۷۸۵۱

نویسنده مسئول ایمیل: ghozatloo@ripi.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۲

چکیده

زنجیره فعالیت واحدهای قابل حمل LNG شامل تصفیه، مایع‌سازی و ذخیره‌سازی آن است و فعالیت خرده‌فروشی آن عبارت است از مصرف مقادیری کم LNG، بر اساس درخواست و نیاز مصرف‌کننده نهایی، مانند بخش حمل‌ونقل، نیروگاهی و گرمایشی. ویژگی‌های واحدهای قابل حمل LNG با واحدهای مقیاس بزرگ متفاوت است و مشتریان خاص خود را می‌طلبد تا از نظر اقتصادی کارا باشد. جذابیت خوراک‌رسانی به این واحدها که می‌تواند مزایای اقتصادی خوبی به دنبال داشته باشد و وجود مزایای متعدد و حوزه‌های متنوع کاربردی این واحدها، منجر شده است تا در بازار گاز جایگاه پیدا کند و آینده روشنی داشته باشد. همین موضوع جذابیت آن‌ها را در بازار داخلی کشور و تأمین اهداف استراتژیک مختلف را بیشتر کرده است؛ از جمله عدالت اجتماعی، اقتصاد مقاومتی، مقابله با تحریم‌ها، تأمین مسائل زیست‌محیطی، سودآوری و تقویت صنایع مرتبط. در این مقاله به بررسی ابعاد کمی و کیفی آن پرداخته می‌شود.

کلمات کلیدی: واحد قابل حمل LNG، مایع‌سازی، گازهای دورافتاده، فلر، جایگاه‌های سوخت‌رسانی.

۱. مقدمه

بدو تجارت LNG در ترین‌های مقیاس کوچک با ظرفیت ۲ میلیون تن در سال مرسوم بود؛ ولی با توسعه تکنولوژی و توجیه اقتصادی طرح‌ها، تولید LNG در واحدهای کوچک‌تر، جذاب‌تر و بعضاً کاربردی‌تر جلوه می‌دهد و در نتیجه با شتاب بیشتری در حال گسترش است. از طرف اتحادیه بین‌المللی گاز (IGU) ظرفیت مایع‌سازی گاز از ۲/۵ تا ۷/۵ میلیون تن در سال برای واحدهای مقیاس بزرگ و ظرفیت‌های کمتر از ۰/۵ میلیون تن در سال (۱۵۰۰ تن در روز) برای واحدهای کوچک LNG و ظرفیت‌های کمتر از ۱۵۰ تن در روز برای واحدهای میکرو LNG تعریف شده است. همچنین واحدهای نانومقیاس^۱ که بعضاً از آن‌ها به عنوان واحدهای

2. Skid Mounted LNG

3. ISO Container

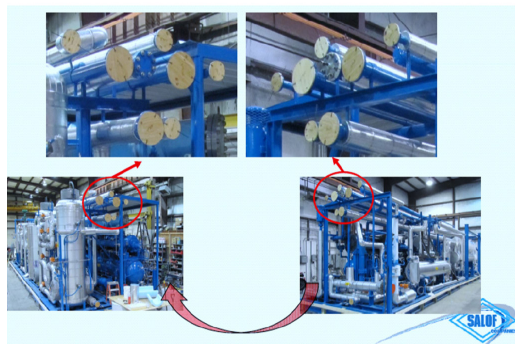
1. Nano Scale

جدول ۱: جزئیات کانتینرهای واحد قابل حمل LNG به همراه

جایگاه سوخت LNG

ابعاد (ارتفاع × طول × عرض)	کانتینر و عملکرد	No	واحد اصلی
2.4×6.0×2.9 m	Feed Pressure Booster Unit	1	خالص سازی خوراک
2.4×6.0×2.9 m	MR and MDEA Storage Unit	2	
2.4×2.4×8.0 m	MDEA Decarburization Unit	3	
2.4×6.0×2.9 m	Molecular Sieve Dehydration Unit	4	
2.4×2.4×8.0 m	Liquefaction Cold Box Unit	5	مایع سازی گاز
2.4×2.4×8.0 m	Refrigerant Compressor Unit	6	
2.4×8.0×2.9 m	LNG Storage Tank Unit	7	ذخیره LNG
2.4×6.0×2.9 m	PSA N2 and Instrument Air Unit	8	
2.4×6.0×2.9 m	DCS Control Unit	9	
2.4×6.0×2.9 m	Electric Control Unit	10	
2.4×6.0×2.9 m	LNGV Feeling and Metering Unit	11	جایگاه سوخت
2.4×6.0×2.9 m	Station Control Unit	12	

مطابق (جدول ۱) مشاهده می شود که عرض کانتینرها با یکدیگر یکسان است و در نتیجه اتصالات در مقطع عرضی صورت می پذیرد. همچنین دو کانتینر مربوط به عملیات سوخت رسانی دارای ابعاد یکسان هستند و در کمترین فضا قابلیت عرضه سوخت را دارند. این کانتینرها پس از انتقال بدون نیاز به بتن ریزی و تنها با اتصالات موقتی و فلنج و بدون عملیات جوشکاری مطابق (شکل ۱) به یکدیگر متصل می شوند و به راحتی در مدار تولید قرار می گیرند [۳].



شکل ۱. نحوه اتصال فلنجی کانتینرها به یکدیگر

چنانچه این واحد نیاز به بخش تصفیه گاز نداشته باشد، هزینه سرمایه گذاری معادل ۹۰۰ دلار برای هر تن و برای حالتی که به تصفیه گاز نیاز باشد، ۱۰۰۰ دلار در تن خواهد بود [۳]. به طور معمول منبع تأمین گاز واحدهای قابل حمل LNG می تواند از طریق گاز مخازن کوچک و مخازن حبس شده، گازهای فلر (عمده منبع خوراک در جهان)، بایوگازها، متان متصاعد شده از مخازن زغال سنگ و البته گاز خط لوله است. خوراک این واحدها باید عاری از آب باشد که در مرحله تمیزسازی و توسط مولکولارسیوهای جاذب انجام می شود. همچنین مقدار CO_2 و ترکیبات گوگردی آن ناچیز باشد تا بتوان آن را به واحد مایع سازی ارسال کرد.

۲. مزایا و کاربرد واحدهای قابل حمل LNG

واحدهای قابل حمل LNG کارا و باصرفه هستند؛ چراکه اندازه کوچک آن ها امکان تولید LNG را نزدیک به مناطق مورد نیاز فراهم می کند و این نزدیکی، کاهش هزینه های حمل و نقل و قیمت LNG را به دنبال دارد. علاوه بر آن، از خروج گازهای گلخانه ای در طول انتقال و جابه جایی های طولانی نیز جلوگیری می شود. از دیگر مزایای این واحدها می توان به کنترل و بالانس گاز طبیعی مورد نیاز در طول دوره های کوتاه و بلند مصرف و همچنین امکان بهره مندی از گاز طبیعی برای مناطق دور از خطوط انتقال گاز با احداث ایستگاه های محلی توزیع گازی که از منابع LNG ذخیره شده تغذیه می شوند، اشاره کرد. همچنین مزایای دیگر این واحدها شامل موارد زیر است:

- زمان بسیار کوتاه در ساخت تجهیزات و اسمبل کردن آن ها در کانتینرهای مربوطه؛
- نیاز به فضای بسیار کم (۱۵۰۰ متر مربع)؛
- نیاز کمتر به امکانات زیرساختی اولیه؛
- یک واحد از پیش ساخته شده با نصب سریع و آسان؛
- اجرای سریع و راحت (نصب اولیه در دو هفته) راه اندازی تا تولید (دو هفته)؛
- قابلیت حمل مجدد و انعطاف در شرایط مختلف عملیاتی؛
- امکان کنترل واحد از راه دور؛
- نیاز به حداقل پرسنل (دو تا سه نفر اپراتور)؛
- امکان خنک شدن کمپرسورها و ژنراتورها با هوای محیط، در صورت دسترسی نداشتن به منبع آب کافی؛
- نگهداری آسان (قطعات یدکی کمپرسور هر ۵۰۰۰ ساعت کارکرد نیاز به تعویض دارد)؛
- تعویض دیرتر مولکولارسیوها بر اساس نوع خوراک دریافتی (دو تا سه سال یک بار)؛
- کاهش هزینه های عملیات، تولید و نگهداری؛
- هزینه سرمایه گذاری بسیار کمتر.

هزینه سرمایه گذاری برای واحدهای قابل حمل LNG مسلماً کمتر است؛ اما اگر آن ها را از نظر میزان سرمایه به ازای هر تن ظرفیت (دلار/تن) با واحدهای مقیاس بزرگ مقایسه کنیم، لزوماً کمتر نیست. پس این واحدها از نظر صرفه مقیاس، مناسب نیستند؛ اما از نظر سرعت و نیز به دلیل نیاز نداشتن به برق مستقل و برخی از زیرساخت ها و تجهیزات خاص، ارجحیت دارند.

۳. تأمین خوراک واحدهای قابل حمل LNG

مابیع سازی در مقیاس کوچک دلایل، می تواند اهداف یا انگیزه های مختلفی داشته باشد، مثلاً برای میدان های گازی کوچک در نقاط دور دست یا گازهای همراه نفت یا گاز فلر، ممکن است اقتصادی باشد و فاصله و زمان رسیدن گاز به بازار مصرف را کاهش دهد. تأمین خوراک واحدهای قابل حمل LNG، علاوه بر اینکه از طریق شبکه انتقال گاز بسیار مرسوم و محتمل است، می تواند از مبادی مختلف دیگر هم انجام شود. در ادامه به بیان این مبادی، بر اساس دلایل مختلف انتخاب آن ها پرداخته می شود.

۱.۳. میداین گازی بسیار کوچک

از جمله کاربردهای واحدهای قابل حمل LNG برای گازهای دور افتاده ای است که امکان ارسال و دسترسی آن ها به شبکه خط لوله سراسری وجود ندارد [۴]؛ بنابراین بر اساس حجم گاز خروجی از این مخازن می توان واحدهای قابل حمل LNG را در محل نصب کرد. بر اساس پیش بینی های به عمل آمده ۴۰ تا ۶۰ درصد مخازن گازی اثبات شده در جهان در گروه میداین گازی بسیار کوچک یا دور افتاده قرار می گیرند که به دلیل نداشتن صرفه اقتصادی برای ارسال گاز آن ها توسط راهکارهای معمول، توسعه نیافته اند. تعداد این مخازن حدود ۱۲۰۰ میدان گازی پراکنده در جهان است که اغلب متمرکز در خاور میانه، آفریقا (تانزانیا و موزامبیک)، آمریکای جنوبی و سیبری شمالی هستند و در اندازه های مختلف اند. همچنین گازهای دور افتاده حدود ۱۵ تا ۲۵ درصد گاز مخازن در حال بهره برداری را تشکیل می دهند که عمدتاً در همان منطقه استفاده کردنی نیستند. (جدول ۲) به تخمین گازهای غیر اقتصادی و توسعه نیافته در قالب گازهای همراه و گازهای دور افتاده می پردازد [۲].

جدول ۲: تخمین گازهای غیر اقتصادی و توسعه نیافته

منبع	هزار میلیارد مترمکعب	هزار میلیارد فوت مکعب
گازهای همراه	۱۲	۴۲۳
میداین آب های عمیق	۸	۲۸۲
حوزه های ساحلی	۵	۱۴۱
حوزه های گازی دور از دسترس	۴۰-۲۴	۱۴۱۲-۸۴۷
مجموع	۶۵-۴۹	۲۲۵۸-۱۶۹۳

همانطور که در (جدول ۴) مشاهده می شود که تاکنون تا ۶۵ هزار میلیارد مترمکعب انواع گازهای حبس شده در مخازن گازی جهان تخمین زده شده است که به لحاظ نبود امکان اقتصادی در انتقال این گازها پس از حفاری، کمتر مورد توجه و سرمایه گذاری قرار گرفته است؛ در حالی که با توسعه تکنولوژی های نوین، واحدهای قابل حمل LNG یکی از راهکارهای بسیار مناسب برای این منظور است. از این مقدار حدود ۳۱ هزار میلیارد مترمکعب در مخازن گازی دریایی محبوس شده اند که انتقال آن ها به مراتب دشوارتر از انتقال گاز در مخازن خشکی است [۵]. حداقل ۳۰۰ هزار میلیارد فوت مکعب (۸/۵ هزار میلیارد مترمکعب) گاز همراه از مخازن نفتی و گازی واقع در دریا تولید می شود که در کنار ۱۱۰۰ هزار میلیارد فوت مکعب گاز (۳۱۱ هزار میلیارد مترمکعب) موجود در مخازن حبس شده در اقصانقاط جهان، پتانسیل عظیمی را در به کارگیری این گازها و مدیریت انتقال آن ایجاد می کند [۶]. همچنین (شکل ۲) مکان مخازن گازی محبوس را از نظر جغرافیایی نشان می دهد.



شکل ۲. مکان جغرافیایی مخازن گازی محبوس

با توجه به (شکل ۲) مشاهده می شود در مناطقی که مخازن گازی محبوس در جهان تجمع بیشتری داشته اند، فرصت های خوبی برای توسعه و کاربرد واحدهای قابل حمل LNG فراهم است؛ به عنوان مثال در جنوب شرقی آسیا که بیشترین تمرکز در مخازن گازی محبوس را دارد، واحدهای قابل حمل LNG نیز در آن مناطق بیشتر نصب شده است. واحدهای قابل حمل LNG اغلب برای انتقال گاز استحصالی از میداین کوچک گازی ای احداث می شوند که دارای مصارف داخلی و منطقه ای کوچک، مانند بخش نیروگاهی باشند؛ به عنوان مثال از سال ۲۰۰۴ میدان گازی DongHae-1 در کره جنوبی با تولید ۵/۲ میلیارد مترمکعب یک واحد قابل حمل LNG را در خود مستقر کرده است و به طور متوسط روزانه ۹۰۰ تن LNG تولید می کند.

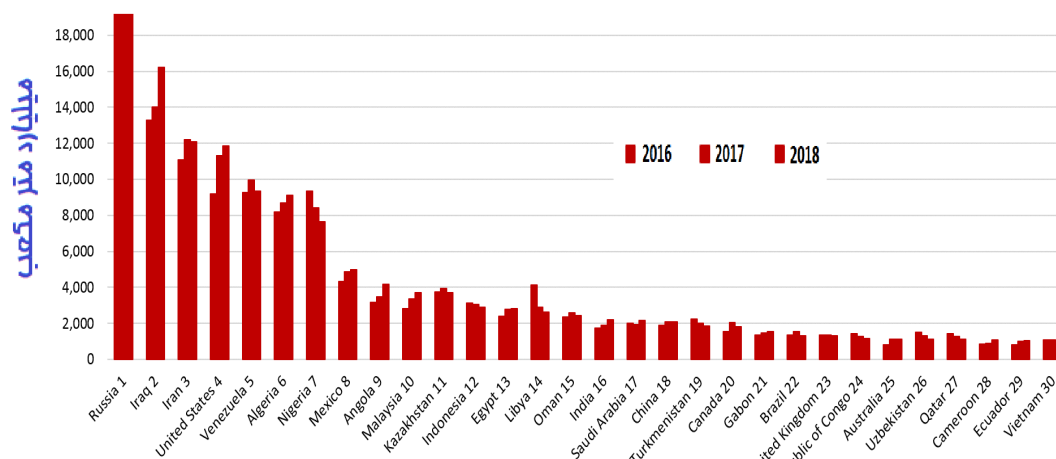




۲.۳. گازهای فلر

واحدهای قابل حمل LNG می‌تواند جایگاه مناسبی داشته باشد. بازار نیجریه و عراق در بازار LNG شباهت‌های زیادی با یکدیگر دارند، با توجه به محدودیت‌های مسائل امنیتی، انتقال محصول سرمایه‌گذاری در بخش واحدهای بزرگ LNG ریسک زیادی دارد و احتمال عرضه واحدهای قابل حمل LNG بیش از پیش خواهد بود. (شکل ۳) به مقایسه میزان فلر کردن گازهای همراه در سی کشور عمده جهان می‌پردازد [۷].

بر اساس الگوی ذخایر گازی، اروپا و خاورمیانه استعداد کافی را در جذب واحدهای قابل حمل LNG دارند. در چین واحد WSCE MiniLNG-1 مستقر در شهر Wuhai با ظرفیت تولید روزانه ۷/۵ تن LNG وجود دارد که خوراک آن به میزان ۳۵۰ هزار فوت مکعب از گاز فلر تأمین می‌شود. با توجه به میزان فلرینگ گاز در میداین کوچک نیجریه، اندونزی و عراق،



شکل ۳. کشورهای عمده فلرینگ گازهای همراه - ۲۰۱۸

جدول ۳. میزان فلرینگ در میداین نفتی و اصلی ایران

شرکت نفتی	حوزه نفتی	گاز فلر (هزار مترمکعب روزانه)
اروندان	دارخوین	۲۵۴
	یادآوران	۱۸۴۱
	آزادگان	۶۷۹
مناطق مرکزی	نفت شهر و سومار ۲	۸۱
فلات قاره	فروزان ۱	۵۳۵۰
	فروزان ۲	۲۵۴
	درود ۱	۱۳۸
	درود ۲	۳۲۲
	درود ۳	۲۵۷
	ابوذر ۱	۵۵۵
	رسالت	۱۱۰
	بهرگانسر	۳۷۳
	هندیجان	۲۲۶
	سلمان ۱	۲۴۳۰
مناطق نفتخیز جنوب	بی‌بی حکیمه	۶۲۳
	رگ سفید ۲	۵۶۶
	مارون ۳	۴۲۵
	گچساران ۱	۳۴۰

مطابق (شکل ۳) مشاهده می‌شود، روسیه، عراق و ایران بیشترین سهم را در خاورمیانه در فلر کردن گازهای همراه دارند؛ به‌طوری که سهم ایران معادل سهم ایالات متحده است و این کشورها از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ روندی صعودی را در فلرینگ در پیش گرفته‌اند؛ لذا هیچ برنامه مدونی در این حوزه و مخصوصاً در کنترل آلاینده‌ها هوا ندارند؛ در نتیجه می‌توانند به‌عنوان یک بازار هدف بسیار قوی برای واحدهای قابل حمل LNG محسوب شوند [۷]. مطابق (شکل ۳) در سال ۲۰۱۷، میزان فلرینگ بالغ بر ۱۴۱ میلیارد مترمکعب بود و در سال ۲۰۱۸ کمی کاهش یافت و به مرز ۱۳۸ میلیارد مترمکعب رسید که بخشی از این کاهش میزان فلرینگ، توسعه تکنولوژی‌های نوین از جمله به‌کارگیری واحدهای LNG مستقر در میداین نفتی و گازی است. در این بین، ایران تنها کشوری است که میزان فلرینگ آن حتی نسبت به سال ۲۰۱۳ افزایش داشته است و این موضوع لزوم کنترل فلرینگ را در میداین ایران ضروری می‌کند. از طرفی نیجریه و لیبی کاهش بسیار محسوسی داشته‌اند، به‌ترتیب در حد ۱۸ درصد و ۲۶ درصد [۷]. (جدول ۳) میداین گازی کشور را معرفی می‌کند که دارای میزان فلرینگ زیاد هستند و برای خوراک‌دهی به واحدهای قابل حمل LNG مناسب‌اند.

۴. کاربرد محصول واحدهای قابل حمل LNG

توسعه پایدار وسایط نقلیه سبک با سوخت گاز مایع موقعیت ویژه‌ای را برای بازار محصول این واحدها ایجاد کرده است [۴]؛ از این رو امروزه بسیاری از شرکت‌ها به سمت مایع‌سازی در مقیاس نانو و خرده‌فروشی محصول آن روی آورده‌اند. کاربرد LNG تولیدی این واحدها به‌طور کلی به گروه‌های زیر تقسیم‌بندی می‌شود [۸]:

۱. سوخت‌رسانی به سوخت جایگاه‌های سیار (جایگاه‌های غیرمتصل به شبکه سوخت‌رسانی)؛
۲. جایگاه‌های سوخت‌رسانی ترکیبی شامل عرضه CNG/LNG؛
۳. ایجاد و تأمین شبکه گازرسانی کوچک برای روستاها و مناطق خاص؛
۴. تزریق به واحدهای گاز مجدد برای گازرسانی منطقه‌ای و پیک‌سایی در اوج مصرف.

محصول LNG این واحدها جایگاه خود را به‌عنوان سوخت اتومبیل‌ها و ماشین‌آلات در اروپا، آمریکا و به‌ویژه چین باز کرده‌اند. به‌علاوه LNG تولیدی این واحدها می‌تواند با تربلی‌های مخصوص برای تغذیه ایستگاه‌های CNG یا ارسال گاز به روستاهای دور از خط انتقال گاز حمل شود. باید توجه داشت عرضه این سوخت در جایگاه‌های سوخت‌رسانی زمانی جذابیت پیدا می‌کند که قیمت گاز با قیمت سوخت‌های مرسوم چون بنزین و گازوئیل رقابت‌پذیر باشد یا مسائل زیست‌محیطی قواعد محدودکننده‌ای را ایجاد کرده باشد. به‌عنوان مثال در آمریکا هزینه LNG حدود ۱/۵ تا ۲ دلار در هر گالن ارزان‌تر از گازوئیل است؛ ضمن اینکه نسبت به گازوئیل سوخت پاک‌تری است [۹]. برگشت سرمایه‌گذاری در احداث جایگاه‌های سوخت LNG نسبت به جایگاه سوخت گازوئیل حدود ۱/۵ سال است [۹]. شایان ذکر است که اختلاط LNG با CNG قابلیت‌ی را ایجاد می‌کند تا سوخت‌رسانی در محدوده وسیعی از وسایط نقلیه پوشش داده شود. (شکل ۴) نمایی از یک جایگاه سوخت LNG را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نمایی از یک جایگاه سوخت LNG

در گروه عرضه سوخت جایگاهی موارد ذیل بیشتر مورد

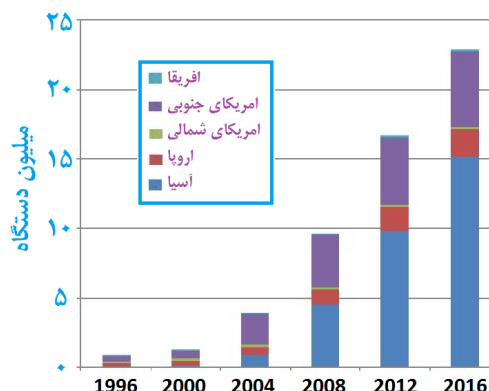
توجه قرار می‌گیرد:

- لوکوموتیوهای ریلی برون‌شهری؛
- وسایل نقلیه برون‌جاده‌ای و اتوبوس‌های عمومی؛
- کامیون‌های سنگین‌بر، بهداشتی، فرودگاهی و تانکرها؛
- ماشین‌آلات راه‌سازی، معدن‌کاری؛
- کشتی‌های کوچک، کشتی‌های مسافربر، تفریحی، بارها؛
- شناورهای نظامی و قایق‌های گشت‌زن.

در آمریکای شمالی بر اساس قیمت‌های فعلی سوخت، هزینه تبدیل تجهیز تریلرهای کانتینربر (long-haul trucks) از سوخت دیزل به LNG می‌تواند در مدت سه سال بازگشت‌پذیر شود. مخزن LNG در این گونه تریلرها حجمی معادل ۱۳۰ تا ۲۸۰ کیلوگرم را دارد؛ بنابراین یک ایستگاه Skid LNG با ظرفیت ۱۰ هزار گالن در روز می‌تواند روزانه بالغ بر ۱۰۰ تریلر را سوخت‌رسانی کند [۱۰].

در سال ۲۰۱۸، از کل ماشین‌آلات سنگین حمل‌ونقل به‌فروش‌رفته در چین، آن‌ها که سوخت LNG مصرف می‌کنند، سهمی حدود ۹/۳ درصد داشته‌اند. در استان Chongqing چین ۸۵ درصد تاکسی‌ها و ۹۲ درصد اتوبوس‌ها موتور LNG سوز دارند. در استان‌های Shanghai, Chengdu, Xi'an, Xinjiang و Hebei چین بالغ بر ۹۰ درصد وسایل نقلیه عمومی از سوخت LNG استفاده می‌کنند [۱۱]. در چین بیشتر شرکت‌های دولتی‌ای که به شبکه گاز دسترسی دارند، در این زمینه فعال هستند؛ به‌ویژه شرکت Kunlun که از زیرمجموعه‌های پتروچایناست. پس از چین، ایالات متحده قرار دارد. در نیمی از ایستگاه‌های سوخت‌گیری کالیفرنیا که قوانین زیست‌محیطی سخت‌گیرانه‌تری دارد، LNG دیده می‌شود. همچنین کالیفرنیا دارای شبکه توزیع LNG است و اغلب وسایل نقلیه سنگین از این سوخت استفاده می‌کنند. استرالیا نیز از حدود ده سال پیش وارد این حوزه شده و چند واحد کوچک مایع‌سازی احداث کرده است و LNG را برای نیروگاه‌های دور دست و ماشین‌آلات سنگین راه‌سازی و معدن حمل استفاده می‌کند. (شکل ۵) به بیان آمار وسایل نقلیه گازسوز در جهان در طول سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۶ می‌پردازد [۱۲].





شکل ۵: تعداد وسایل نقلیه گازسوز در مناطق مختلف جهان

با توجه به (شکل ۵) ملاحظه می‌شود که نرخ رشد خودروهای گازسوز در جهان با ضریب ۲۴/۲ درصد در حال افزایش است؛ به‌طوری که در سال ۲۰۱۲ از ۱۶ میلیون خودروی گازسوز به ۲۳ میلیون در سال ۲۰۱۶ رسیده است. در این بین، ایران در صدر کشورهایی قرار دارد که از وسایل نقلیه گازسوز استفاده می‌کند و جایگاه ویژه‌ای در سوخت‌رسانی گاز به خودروها دارد. همسایه مرزی آن، پاکستان نیز در رتبه بعدی قرار دارد. با توجه به اولویت‌های استفاده از LNG به جای CNG می‌توان اذعان داشت که این کشورها پتانسیل زیادی برای عرضه LNG به صنایع حمل‌ونقل خود دارند. همچنین بهره‌مندی از شبکه توزیع CNG در این کشورها ایده عرضه سوخت LNG/CNG می‌تواند زمینه‌های لازم را در اختیار قرار دهد. یکی از کاربردهای تبدیل گازهای دورافتاده به LNG، استفاده از LNG تولیدشده به‌عنوان سوخت در واحد تولید برق تجهیزات حفاری است، به‌عنوان مثال در ایالت داکوتای شمالی آمریکا یک واحد قابل حمل LNG بر روی مخزن شیل گازی منطقه باککن نصب شده است و گاز آن را تبدیل به سوخت تجهیزات حفاری می‌کند. مشابه این پروژه در میادین کوچک آرژانتین، کلمبیا، کانادا و استرالیا استفاده شده است [۱۳]. از طرفی اندونزی به دلیل جایگاه جغرافیایی خود قابلیت تأمین سوخت LNG را برای شناورها دارد؛ لذا محصول واحدهای Skid LNG در این حوزه کاربرد دارد.

۱.۴ کاربرد واحدهای قابل حمل LNG در کشور

استفاده از محصول واحدهای قابل حمل LNG در بازار داخلی کشور که اغلب به شبکه سراسری گاز دسترسی دارد، می‌تواند به شرح موارد ذیل باشد:

۱. عرضه گاز به روستاهای کوچک و مناطقی که هنوز به شبکه انتقال سراسری گاز متصل نشده‌اند؛

۲. عرضه گاز به مناطقی که تنها در مدت کوتاهی از سال (ماه‌های سرد) نیاز به گرمایش دارند؛
۳. تأمین گاز موردنیاز مشترکین گاز هنگام تعمیر شبکه گاز و قطع موقت آن؛
۴. تأمین بخشی از گاز موردنیاز مشترکین، از گاز شبکه سراسری؛
۵. عرضه گاز مداوم به مشترکین بر اساس استقلال تأمین انرژی؛
۶. عرضه در جایگاه‌های سوخت خودروها.

۵. تحلیل بازار واحدهای قابل حمل LNG

بر اساس آمار منتشره از اتحادیه بین‌المللی گاز، بازار واحدهای کوچک LNG حدود ۵ درصد ظرفیت کل LNG تولیدی را تشکیل می‌دهد که حدود ۲۰ میلیون تن در سال ۲۰۱۸ است. ساخت واحدهای مایع‌سازی برای تولید LNG برای مصارف حمل‌ونقل و جایگزین کردن آن به جای گازوئیل، به‌ویژه در ماشین‌آلات سنگین، در کشورهای چین و آمریکا با شتاب، در حال توسعه است و این می‌تواند به کشورهایی که حجم گسترده حمل‌ونقل زمینی دارند، گسترش یابد تا از این طریق نیز میزان مصرف گازوئیل و انتشار آلاینده‌های خود را کاهش دهند. در سال ۲۰۱۸ چین با ظرفیت تولید حدود ۹ میلیون تن در قالب ۶۰۰ واحد قابل حمل LNG بزرگ‌ترین تولیدکننده LNG توسط واحدهای ظرفیت کوچک در جهان است. واحدهای قابل حمل LNG در شهرهای مختلف چین با ظرفیت متوسط ۱۵ تن در روز در حال فعالیت‌اند که واحدهای Xinjiang Borli Energy و Bayanzouer Huayou Gas و Lanzhou Kunlun Gas نمونه‌هایی از این موارد هستند. در چین این جایگزینی رشد وسیعی داشته است؛ به‌طوری که در سال ۲۰۱۲ بیش از ۴۰۰ ایستگاه سوخت‌گیری وجود داشته و در سال ۲۰۱۵ به ۱۶۰۰ ایستگاه و در سال ۲۰۱۸ به ۴۲۰۰ ایستگاه افزایش یافته است. در چین بیشتر شرکت‌های دولتی که دسترسی به شبکه گاز دارند، در این زمینه فعال هستند؛ به‌ویژه شرکت Kunlun که از زیرمجموعه‌های پتروچایناست، در این زمینه سرمایه‌گذاری‌های زیادی انجام داده است. علاوه بر اینکه شرکت‌های دیگر هم در این زمینه به‌عنوان یک فرصت سرمایه‌گذاری وارد شده‌اند و به آن توجه کرده‌اند.

کشورهای جزیره‌ای جنوب شرقی آسیا، هند، تایلند و کره جنوبی نیز برنامه‌هایی را برای توسعه این صنعت برای تأمین سوخت جزایر خود در دست دارند و به‌تازگی شروع به احداث واحدهای قابل حمل LNG کرده‌اند و البته دولت و شرکت‌های



زیرساخت‌هایی برای سوخت‌گیری LNG، به‌ویژه در کشورهای اسپانیا، پرتغال، ایتالیا و سوئد به وجود آمده است و شرکت‌هایی که در زنجیره تولید گاز متان از بستر زغال‌سنگ یا تولید گاز متان از بایوگاز (سوخت بیولوژیک) فعال بوده‌اند، در این زمینه وارد شده‌اند و این صنعت به یک فرصت سرمایه‌گذاری تبدیل شده است. اتحادیه اروپا نیز از گسترش ترمینال‌های مقیاس کوچک حمایت می‌کند و ۱۰ تا ۲۰ درصد از هزینه ساخت آن‌ها را تخفیف می‌دهد. بر اساس منابع کوچک گازی و بایوگازهای زغال‌سنگ، کمیته‌ای برای توسعه بازار و ارائه راهکار برای عرضه پایدار محصول بازار تشکیل شده است و از سال ۲۰۰۵ فعالیت می‌کند. کمیته V CORE به توسعه واحدهای قابل حمل LNG از منابع مختلف، شامل گاز خط لوله، گاز سرچاهی و گاز زغال‌سنگ در آسیا می‌پردازد. در ژاپن تعداد زیادی ترمینال‌های مقیاس کوچک تبدیل مجدد به گاز، در کنار ترمینال‌های بزرگ یا در محل ترمینال‌های قدیمی در حال ساخت است. حجم سرمایه‌موردنیاز کمتر و سرعت ساخت، امکان سرمایه‌گذاری را سهل‌تر می‌کند؛ خصوصاً انعطاف شبکه گاز و قدرت مانور آن را افزایش می‌دهد. در اندونزی نیز ساخت تعداد زیادی ترمینال دریافت LNG و تبدیل آن به گاز برای تأمین نیاز جزایر پراکنده‌ای که دسترسی به خطوط لوله گاز ندارند، برنامه‌ریزی شده است که به‌عهده شرکت Bontang LNG است. تقاضای زیاد برای انرژی، محدودیت‌های زیرساختی و هزینه مطلوب LNG از عوامل اصلی توسعه تکنولوژی‌های LNG در آسیا در دهه اخیر است. به‌علاوه این عوامل در آمریکای شمالی نیز باعث ظهور بازارهای جدید شده است.

۶. شرکت‌های فعال واحدهای قابل حمل LNG

شرکت‌های فعال در زمینه مایع‌سازی واحدهای قابل حمل LNG عبارت‌اند از:

1. Kerui	11. Cryostar
2. IEV GROUP	12. Siad Macchine Impianti
3. UOP-Black & Veatch	13. Expansion Energy
4. CNOOC	14. General Electric Oil & Gas
5. Stirling Cryogenics	15. Galileo Cryobox
6. Kosan Crisplant	16. Dresser - Rand
7. Chart	17. Chester
8. Jerih	18. Cryotec
9. Eajv	19. Wartsila
10. Cryonorm	20. LNG Global

در ادامه به معرفی اجمالی سه شرکت مهم‌تر و فعالیتهای آن‌ها در حوزه واحدهای قابل حمل LNG پرداخته می‌شود.

دولتی در این زمینه فعال شده‌اند. تایلند و کره هرکدام یک واحد مایع‌سازی کوچک را ساخته‌اند که محصول آن با تریلی برای مصرف‌کنندگان حمل می‌شود. در هند ۱۸ تا ۲۰ واحد صنعتی، تجهیزات ذخیره‌سازی واحدهای قابل حمل LNG و تبدیل مجدد به گاز را خریداری کرده‌اند و LNG را از ترمینال‌های مقیاس بزرگ دریافت می‌کنند. پیش‌بینی شده است ارزش تبادلات تجاری محصول واحدهای قابل حمل LNG در سال ۲۰۲۱ به ۴۷ میلیارد دلار برسد. این بازار خوراک خود را عمدتاً از گاز مخازن کوچک دورافتاده و گازهای ارسالی به فلر موجود در میدان‌های بزرگ تأمین خواهد کرد و LNG تولیدی خود را در نیروگاه‌های برق مصرف می‌کند؛ بنابراین یکی از فاکتورهای مؤثر در توسعه بازار واحدهای قابل حمل LNG جهان، توسعه نیروگاه‌های برق است. دومین شاخص تأثیرگذار، استفاده از سوخت‌های پاک و ارزان‌قیمتی است که بر اساس قوانین زیست‌محیطی در دو بخش حمل‌ونقل خشکی و دریا در مناطق کنترل انتشار، اغلب در حوزه اروپاست. بخش دریایی آن از سال ۲۰۲۰ شروع به کار خواهد کرد. شاخص بعدی کاهش قیمت جهانی گاز طبیعی در مقابل نوسانات قیمت نفت خام است. وجود نوسانات زیاد موجب ناپایداری بازار نفت می‌شود که در سال‌های آتی مشتریان با مصرف کم را ترغیب می‌کند به واحدهای قابل حمل LNG بیشتر تمایل پیدا کنند. آلاینده‌گی زیاد دیزل و مازوت در صنایع مصرفی و نیروگاه‌ها موجب می‌شود که بازار آبی آن‌ها به سمت مصرف LNG سوق یابد؛ بنابراین اغلب واحدهای صنعتی کوچک و متوسط نیز مشتریان آبی واحدهای قابل حمل LNG خواهند بود. با افزایش تولید گاز طبیعی و سهم بیشتر آن در سبد سوخت، تقاضا برای واحدهای قابل حمل LNG در پنج سال آتی افزایش می‌یابد و تا سال ۲۰۲۰ آسیای شرقی و چین بزرگ‌ترین متقاضیان این واحدها خواهند بود. امروزه واحدهای قابل حمل LNG در اقصانقاط جهان در حال فعالیت هستند. برخی آمارها حاکی از آن است که طی ده سال آینده واحدهای قابل حمل LNG در جهان رشد ۱۰ درصدی را تجربه خواهد کرد [۱۴]. شرکت Energy World معتقد است در آینده کشورهای آسیای شرقی از جمله اندونزی، فیلیپین، سریلانکا در کنار تقاضای فراوان کره، ژاپن و چین از متقاضیان LNG در جهان خواهند بود و این مقدار، فراتر از ۱۲/۲ میلیون تن در سال است. حال برای ارائه سرویس در این منطقه هنوز راهکارهای کافی وجود ندارد و زنجیره ارزش این تکنولوژی اجرا نشده است. در سال‌های اخیر توسعه اکتشاف میدان‌های گازی در جهان و بایوگازهای متصاعدشده از منابع مختلف، زمینه توسعه بازار واحدهای قابل حمل LNG فراهم کرده است. در اروپا



شکل ۶. نمایی از یک مجموعه ده واحدی به همراه ابعاد تقریبی آن

تا ۷ واحد را نصب و راه اندازی کند؛ در حالی که اگر از روش جذب آمین استفاده شود، حداکثر می توان تا ۲ واحد موازی قابل حمل استفاده کرد. بر اساس ادعای این شرکت، مهم ترین بازار آتی واحدهای قابل حمل LNG در جهان بحث استفاده آن ها در سر چاه و جمع آوری گازهای همراه و تبدیل به LNG به منظور کاهش فلرینگ است [۳]. واحدهای قابل حمل LNG این امکان را فراهم می آورد، بدون نیاز به شبکه خط لوله انتقال یا صرف هزینه سرمایه گذاری هنگفت، به راحتی وارد بازار پررونق LNG شد.

۳.۶ شرکت EAJV

شرکت کانادایی EAJV یک شرکت مهندسی، مشاوره ای و مدیریتی در حوزه تبدیل گاز به LNG است. فناوری این شرکت در زمینه به کارگیری و تبدیل گازهای حبس شده، گازهای فلر و گازهای همراه است و در قالب واحدهای قابل حمل LNG است. به عنوان مثال در میدان های گاز طبیعی حبس شده که ذخایر شان کم یا به سرعت در حال کاهش است و همچنین در بسیاری از میدان های گاز شیل در منطقه آمریکای شمالی، مجموعه ای از تأسیسات واحدهای قابل حمل LNG خود را با ظرفیت ۱۵ هزار مترمکعب در روز نصب کرده است. با اتمام ذخایر گازی هر میدان، تأسیسات خود را به راحتی به نقطه ای دیگر جابه جا می کند. این خصیصه موجب حذف زمان و سرمایه گذاری کلان در بخش لوله گذاری گاز نیز می شود. این نگاه در خصوص واحدهای قابل حمل LNG موجب سرعت بخشیدن به اکتشاف در میادین گاز حبس شده در این مناطق شده است [۱۱].

۷. نتیجه گیری

واحدهای مقیاس کوچک LNG می تواند کاربردهای مختلفی به ویژه برای تأمین بازار داخلی کشورها داشته باشد. این واحدها می توانند برای استفاده از گازهای تولیدی پراکنده

۱.۶ GE Oil & Gas از گروه هولدینگ GENERAL ELECTRIC

شرکت GE یکی از فعالان حوزه واحدهای قابل حمل LNG است که با شعار نصب سریع و بهره برداری آبی اقدام به احداث و فروش واحدهای قابل حمل مایع سازی در ظرفیت های ۱۵ تا ۸۵ تن در روز می کند. اولین مصرف تجاری LNG تولید شده از واحدهای کانتینری گروه هولدینگ GENERAL ELECTRIC در جایگاه های عرضه سوخت گاز بود که در سال ۲۰۱۴ در مرز ایتالیا و اسلوانی نصب شد. این شرکت با ۴۰ سال تجربه در زمینه تولید LNG و با نصب بیش از ۱۲۰ واحد بزرگ و کوچک در جهان، حدود ۷۰ درصد ظرفیت مایع سازی جهان را به تأسیسات خود اختصاص داده است و آن را در جایگاه رهبر بازار LNG قرار داده است و در حال حاضر نیز ۱۶ واحد LNG در دست احداث دارد که ۱ واحد آن در کانادا، ۱۳ واحد در ایالات متحده و ۲ واحد نیز در آفریقا (نیجریه) راه اندازی خواهند شد [۱۰].

۲.۶ شرکت GALILEO

شرکت آرژانتینی گالیله، مبتکر و طراح واحدهای قابل حمل LNG است که با شعار «انرژی گاز در همه حالت ها»، به ساخت و نصب این واحدها در سطح جهان می پردازد. واحدهای Cryobox این شرکت که گروه فناوری Galileo Technologies طراحی اش کرده است، به عنوان یک نمونه کامل از واحدهای قابل حمل LNG است که قادر است مستقیماً در محل چاه استقرار یابد و گازهای همراه یا دور افتاده را به LNG تبدیل کند. ظرفیت این واحد ۱۵ تن در روز است. این واحد برای شروع عملیات با ظرفیت ۵۰ درصد به ۱۵ دقیقه زمان و برای ظرفیت ۱۰۰ درصد به ۳۰ دقیقه نیاز دارد و قادر است در طول یک روز بارها روشن و خاموش شود. همچنین می توان به طور هم زمان از چندین واحد تولید به صورت موازی برای تولید بیشتر استفاده کرد؛ به طوری که اگر از ۱۰ واحد موازی هم زمان استفاده شود، فضای مورد نیاز این واحد ۲ هزار مترمربع است؛ در حالی که یک واحد کوچک LNG با همین ظرفیت، فضای ۲۰ هزار مترمربعی نیاز دارد. (شکل ۶) نمایی از یک مجموعه ده واحدی را به همراه ابعاد تقریبی آن نشان می دهد.

با توجه به (شکل ۶) ملاحظه می شود که شرکت Galileo از روش جذب به عنوان تصفیه خوراک استفاده کرده است و در نتیجه، توانسته از واحدهای موازی قابل حمل





- sheng Lin, An-zhong Gu, “Parameter comparison of two small-scale natural gas liquefaction processes in skid-mounted packages”, Applied Thermal Engineering 26 (2006) 898–904.
- [5]. EPT International, “Bridge Gas Technology – A New Solution for Natural Gas Transportation”, <https://ept-int.com>.
- [6]. <https://ept-int.com/international/bridge-gas-technology>.
- [7]. World bank.org, eia.gov, “New Data Reveals Uptick in Global Gas Flaring”, (2016).
- [8]. Edward Lisowski, Wojciech Czyzycki, “TRANSPORT AND STORAGE OF LNG IN CONTAINER TANKS”, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 18, No. 3 2011.
- [9]. Expansion Energy LLC, Key Applications for the Patented “VXTM Cycle” Small-Scale & Mid-Scale LNG Production Plants, 2014, www.expansion-energy.com
- [10]. GE, GE Introduces LNG In A Box Fueling System”, 2013, <https://www.genewsroom.com/press-releases/ge>.
- [11]. EAJV corporate, “LNG Technology, Turning Stranded Natural Gas Field Into Profit., Skid-Mounted Small-size LNG Plants”, 2018, http://www.eajv.ca/spip.php?page=article&id_article=4.
- [12]. NGV Global, “International Highway and Road Signage for Natural Gas Vehicles”, Natural Gas Vehicle Knowledge Base, 2018, <http://www.iangv.org>.
- [13]. Galileo technology, “Choose a Galileo solution for your gas projects” 2018, <https://www.galileoar.com/en>.
- [14]. SIAD co. Ing. Giuseppe Gamba, giuseppe_gamba@siad.eu “Small scale LNG plant: perspective and technology”, Methanizing the Mediterranean Area Rome, 11-12 June 2015.
- و دور از خطوط انتقال گاز و انتقال آن‌ها به مصرف‌کنندگان و همچنین برای حل مشکلات اوج مصرف گاز و نیز برای گازرسانی به نقاطی که احداث خطوط لوله انتقال گاز دشوار و پرهزینه است، مناسب باشند. از سوی دیگر کاربردهای LNG در جهان، به‌ویژه در بخش حمل‌ونقل روبه‌گسترش است و متناسب با آن صنعت خرده‌فروشی LNG نیز در حال گسترش است. ضرورت دستیابی به دانش فنی، تأمین سوخت وسایل سنگین، مدیریت گازهای فلر و گازرسانی به نقاط دوردست بهترین هدف‌گذاری برای استفاده از واحدهای Skid LNG در ایران است. همچنین استفاده از این فناوری در صنعت حمل‌ونقل ریلی با توجه به میزان زیاد مصرف گازوئیل و امکان جایگزینی آن با LNG از جذابیت‌های توجیهی برخوردار است. نیاز به فضای کم، اجرای سریع و نصب آسان در کنار کاهش هزینه‌های عملیات، تولید و نگهداری موجب شده است که صرفه اقتصادی واحدهای Skid LNG نسبت به سایر طرح‌های LNG بهتر باشد و این امر یک مزیت بسیار مهم در حوزه سرمایه‌گذاری محسوب می‌شود. ایران به‌لطف برخورداری از منابع عظیم گاز طبیعی و به‌دلیل وقفه‌های ناشی از تحریم‌ها در دستیابی به واحدهای بزرگ LNG، در کوتاه‌مدت می‌تواند در راستای حضور در بازار داخلی و منطقه‌ای LNG، از طریق حمایت از توسعه واحدهای کوچک LNG اقدام کند. بدین ترتیب ضمن عبور از سد تولید LNG در کشور، زمینه توسعه فناوری LNG در کشور را نیز فراهم می‌کند.
- ### ۸. تقدیر و تشکر
- بدین وسیله از مدیریت پژوهش و فناوری شرکت ملی گاز ایران برای حمایت از موضوع ارائه‌شده در این مقاله تشکر و قدردانی می‌شود.
- ### ۹. منابع
- [1]. Cryonorm, “LNG liquefaction plants”, 2018, <http://cryonorm.com/lng-liquefaction-plants>.
- [2]. LNG Globa, “Mini LNG Plants small scale liquefied natural gas solution”, 2017, <http://www.lngglobal.com/mini-lng/mini-lng-plant-details.html>.
- [3]. Steve Childers, “NEW FACE OF LNG PRODUCTION”, SPATCO.COM, 803-600-1329, steve.childers@spatco.com.
- [4]. Wen-sheng Cao *, Xue-sheng Lu, Wen-

Technical and Practical Analysis of Skid Mounted LNG Plant in IRAN

Ahmad Ghozatloo^{1*}, Niloufar Fatourechi¹, Mehran Sarmad¹ & Mansooreh Basirat²

1- Faculty member of Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

2- national Iranian gas company, Tehran, Iran

Corresponding Author, Email: ghozatloo@ripi.ir

Abstract

The value chain of Skid mounted LNG units is consist of dehydration, liquefaction and LNG storage and its retail activities include of low consumption of LNG based on demand of end user such as heavy transportation vehicles, power plant and heating. The Features of Skid mounted LNG units are varies with large and mega scale LNG plants and requires its special customers to economically efficient. Skid mounted LNG units has specific position in the gas market and good outlook according to attractiveness of feeding of these units which can have good economic benefits and the numerous advantages and different fields of application of these units. This point increases its attractiveness in the domestic market of Iran and provides strategic goals including social justice, resilience, Resistive Economy, resistance to sanctions, environmental issues, profits and strengthening of related industries. This paper were discussed, the quantitative and qualitative aspects of this matter.

Keywords: LNG, Skid mounted, liquefaction, Remote Gases, Flare, Fuel Stations.



روشی نوین برای بهره‌برداری بهینه از برج خنک‌کننده در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی

احسان جعفریان*

کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

نویسنده مسئول ایمیل: emalekshah72@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۲

چکیده

در این پژوهش نحوه عملکرد یک نمونه برج خنک‌کننده ارزیابی و بررسی شده است. همان طور که می‌دانیم، یکی از پارامترهای مهم در بحث خوردگی اکسیژنی مربوط به صنایع پالایش، گاز و پتروشیمی، میزان اکسیژن محلول در آب است. به‌طور اساسی هرچه میزان این پارامتر تقلیل یابد، نقش مؤثری در بهبود عملکرد سیستم‌های خنک‌کاری، نظیر مبدل‌های حرارتی، برج‌های خنک‌کننده خواهد داشت. بر این اساس، در این طرح با استفاده از یک برج خنک‌کننده در مقیاس پایلوت، مقدار اکسیژن محلول در آب حوضچه این برج در دو حالت بدون استفاده از توپ و همراه با توپ، محاسبه و مقایسه شده است؛ به این ترتیب که با شناورسازی توپ‌های پینگ‌پنگ با رنگ مشکی روی سطح آب حوضچه در برج مذکور، نوعی مقاومت در برابر نور خورشید و همچنین در برابر برخورد مستقیم قطرات آب خنک‌شده از قسمت فوقانی برج به سمت حوضچه ایجاد شد. نتایج حاصل از این تحقیق مربوط به حالتی که از توپ استفاده شده است، بیانگر کاهش میزان DO^۱ در شرایط یکسان (دمای °C ۲۳ و فشار ۱ atm)، از ۸/۶ mg/l به ۶/۵ mg/l است. این مقدار (۶/۵ mg/l)، در حالت واقعی بهره‌برداری از یک برج خنک‌کننده در دمای حدود °C ۳۰ می‌تواند بیشتر کاهش یابد. کاهش این پارامتر (DO) اثر مثبتی بر کاهش فعالیت باکتری‌های هوازی و قارچ‌ها خواهد داشت. همچنین قرار گرفتن این توپ‌ها در کنار هم بر روی سطح آب حوضچه، میزان نور مورد نیاز قارچ‌ها برای انجام عمل فتوسنتز را کاهش می‌دهد و از شدت رشدشان به‌شکلی مطلوب می‌کاهد. علاوه بر این، هرچه مقدار اکسیژن محلول در آب کاهش یابد، در مقیاس صنعتی می‌تواند منجر به کاهش مصرف مواد شیمیایی تزریقی به آب Basing شود.

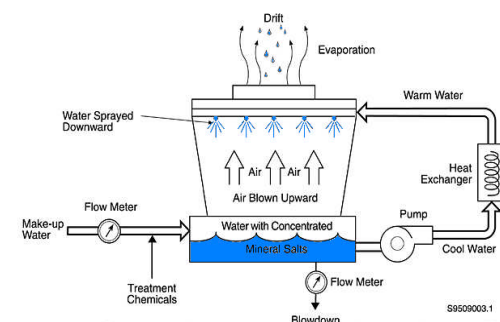
کلمات کلیدی: برج خنک‌کننده، خوردگی اکسیژنی، اکسیژن محلول، باکتری‌های هوازی، فتوسنتز.

۱. مقدمه

در واحدهای فرایندی نظیر پتروشیمی، پالایش و گاز، مبدل‌های حرارتی فراوانی وجود دارند که از آب به‌عنوان خنک‌کننده استفاده می‌کنند [۱]. در این واحدها برخی تجهیزات همراه با تولید حرارت وجود دارند، نظیر رآکتورهای شیمیایی که در آن‌ها واکنش‌های شیمیایی گرمازا اتفاق می‌افتند و لازم است حرارت را به‌نحوی از سیستم خارج

1. Dissolved Oxygen.

آب با هوا، در بالای برج خنک کننده از قطره گیرها^۱ استفاده می شود [۴]. در واقع برج خنک کننده دمای آب را به شکلی کاهش می دهد که می توان آن (آب) را در تجهیزات تبادل گر حرارتی، مخلوط کن ها و ... استفاده کرد [۵] (شکل ۱).



شکل ۱. شماتیک کلی یک برج خنک کننده [۵]

بسیاری از تجهیزات فرایندی نظیر مبدل های حرارتی از جنس فولاد غیرمقاوم در معرض خوردگی اکسیژنی قرار دارند؛ از این رو شدت خوردگی در تجهیزات فلزی (به خصوص تجهیزات از جنس آهن) و بسیاری از آلیاژهای غیرمقاوم به میزان اکسیژن محلول در آب بستگی دارد. هرچه میزان اکسیژن محلول در آب بیشتر باشد، بر شدت آن افزوده می شود. همچنین در سیستم های خنک کننده، سه عامل همراه با هم تشکیل پدیده خوردگی را می دهند که این سه عامل شامل آند، کاتد و الکترولیت هستند. در صورتی که یکی از این سه عامل را بتوان به طور کامل از سیستم حذف کرد، خوردگی شکل نمی گیرد. برای جلوگیری از خوردگی می توان از مواد بازدارنده نظیر پلی فسفات ها، نیتريت ها، کرومات ها و ... استفاده کرد که روی سطح آند یا کاتد لایه محافظ تشکیل می دهند. همچنین هرچه میزان اکسیژن محلول در آب افزایش یابد، برای رشد باکتری های هوازی و قارچ ها بستر بیشتری فراهم می شود. در واقع این مواد (باکتری های هوازی و قارچ ها) انرژی مورد نیازشان برای رشد را از طریق ترکیب شدن با اکسیژن به وسیله مواد آلی به دست می آورند. رشد هرچه بیشتر باکتری ها، رابطه مستقیمی با تشکیل رسوبات بیولوژیکی دارد [۶]. در این پژوهش نیز گام هایی برای بهره برداری بهینه از سیستم خنک کننده آب برداشته شده است؛ به این ترتیب که با استفاده از تعدادی توپ پینگ پنگ تیره رنگ و شناور سازی این توپ ها روی سطح آب موجود در حوضچه یک برج خنک کننده، اقدام به ایجاد مانعی در برابر برخورد نور خورشید با آب درون حوضچه و همچنین برخورد مستقیم قطرات

1. Drift Eliminator.

ریز آب خنک کاری شده با هوا شده که از قسمت فوقانی برج به سمت پایین (حوضچه) هدایت می شود. در بخش های بعدی بیشتر به آن پرداخته شده است.

۲. روش کار

در این تحقیق ابتدا با بهره گیری از وسایلی چون مخزن آب، هیتر حرارتی، آب شهری، پمپ آب، سیستم های لوله کشی و یک نمونه ساده از برج خنک کننده و توپ های پینگ پنگ با هدف بررسی میزان اکسیژن محلول در آب حوضچه این برج طی دو مرحله، اقدام به انجام آزمایش در مقیاس پایلوت کرده ایم. در مرحله اول، پس از گذشت حدود ۱۵ دقیقه از شروع فرایند و پایداری سیستم، ضمن نمونه برداری از آب موجود در حوضچه، میزان اکسیژن محلول $8/6 \text{ mg/l}$ در شرایط دمایی 23°C و فشار 1 atm محاسبه شد. همان طور که از پیش نیز شرح داده شد، هرچه مقدار این پارامتر در آب کمتر باشد، بهتر است؛ زیرا در مقیاس صنعتی کاهش DO موجود در آب می تواند نقش بسیار مؤثری در کاهش خوردگی تجهیزات موجود در واحد صنعتی و همچنین مختل کردن یا کاهش رشد میکروارگانیسم ها و قارچ ها به دنبال داشته باشد.

(شکل ۲) نمونه ساده ای از یک برج خنک کننده است که در این طرح استفاده شده است.



شکل ۲. نمونه یک برج خنک کننده ساده بدون استفاده از توپ پینگ پنگ

در مرحله بعد، به سبب افزودن تعدادی توپ به آب حوضچه برج خنک کننده، همان طور که قبلاً نیز شرح داده شد، نوعی حفاظت در برابر نور خورشید و قطرات آب خنک شده ایجاد می شود که این، خود منجر به تغییراتی در ضریب شکست نور از محیط رقیق تر (اتمسفر) به محیط غلیظ (آب) می شود.

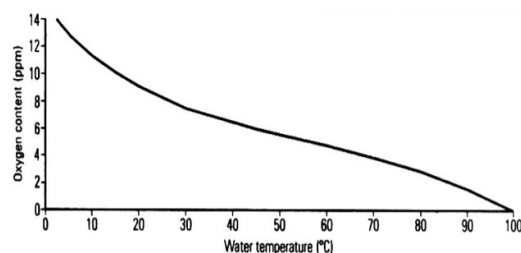
۳. نتیجه گیری

در این تحقیق، اهدافی در راستای بهره‌برداری بهینه‌تر از سیستم خنک‌کننده آب در مقیاس آزمایشگاهی دنبال شد. در این طرح مشخص شد که استفاده از توپ‌های پینگ‌پنگ مشکلی‌رنگ می‌تواند منجر به کاهش اکسیژن محلول در آب و کاهش نور موجود در حوضچه، به سبب ایجاد نوعی مقاومت یا مانع شود. به کارگیری و شناورسازی این توپ‌ها در حوضچه برج خنک‌کننده، منجر به کاهش میزان اکسیژن محلول در آب در دمای 23°C و فشار ۱ atm از $8/6\text{ mg/l}$ به $6/5\text{ mg/l}$ شد که این، خود می‌تواند ضمن کاهش خوردگی در حد مطلوب، منجر به کاهش مصرف مواد شیمیایی تزریقی به آب Basing برج خنک‌کننده شود. کاهش نور نیز همان‌طور که در بخش‌های پیشین شرح داده شد، در کاهش رشد قارچ‌ها در حوضچه‌های جمع‌آوری تا حدی زیادی اثرگذار خواهد بود. اجرای این طرح در مقیاس صنعتی با توجه کاهش حلالیت اکسیژن در آب با افزایش دما در شرایط اتمسفری، می‌تواند در کاهش خوردگی نقش چشمگیرتری داشته باشد.

۴. مراجع

- [1]. Hayashi, K., Tateno, S., & Matsuyama, H. (2019). Optimization of Maintenance Management of Industrial Water Heat Exchangers and Water Treatment. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 52(1), 121-129.
- [۲]. معتمد پ، «برج‌های خنک‌کننده»، شرکت ره‌آوران فنون پتروشیمی، ۱۳۸۴، ص ۴.
- [3]. Aquaprox. (n.d). Cooling water treatment) Springer.
- [4]. Sai, B. Bhavani, et al. (2013). "Design of Cooling Tower. *International Journal of Scientific & Engineering Research*", 4.5: 1560.
- [5]. Alton J. Mathie. (1998). Chemical treatment for cooling water. Prentice Hall.
- [۶]. برفی‌پور ا، عملکرد برج‌های خنک‌کننده، الیاس، چ ۱، ۱۳۹۶.
- [۷]. فاضل ع و پ ابراهیمی، «مرجع کاربردی بویلرهای آب گرم و بخار صنعتی»، نوآور، چ ۳، ۱۳۹۷، ص ۱۹۸.

به‌طور کلی، کاهش نور در حوضچه آب تأثیر مطلوبی در کاهش رشد قارچ‌ها به دنبال دارد [۷]. علاوه بر این، به علت مقاومت ایجادشده در برابر برخورد مستقیم قطرات آب رهاشده با سطح آب حوضچه، انتظار می‌رود که میزان DO موجود در آب نیز به‌طور مؤثری کاهش یابد. به همین علت در این مرحله همان‌طور که از (شکل ۴) نیز مشخص است، مقدار پارامتر DO آب حوضچه نیز در آزمایش جدید در دمای 23°C ، $6/5\text{ mg/l}$ محاسبه شد که این مقدار ($6/5$)، بر اساس نمودار موجود در (شکل ۳)، در دمای نزدیک به 40°C حاصل می‌شود. بنابراین، اجرای این طرح در دمای نزدیک به 30°C که دمای مناسب یک برج خنک‌کننده در مقیاس صنعتی است، می‌تواند با توجه به (شکل ۳)، که افزایش دما منجر به کاهش حلالیت اکسیژن محلول در آب می‌شود، نقش مفیدتری در راستای کاهش پارامتر DO نسبت به انجام آزمایش در دماهای پایین‌تر (23°C) داشته باشد.



شکل ۳. میزان اکسیژن محلول در آب در دماهای مختلف و فشار اتمسفری [۷]



شکل ۴. نمونه یک برج خنک‌کننده ساده به همراه توپ‌های پینگ‌پنگ



A New Method for Optimal Operation of a Cooling Tower in The Oil, Gas and Petrochemical Industries

Ehsan Jafarian*

MSc in Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran

Corresponding Author, Email: ehsan57@pgs.usb.ac.ir

Abstract

In this research, the performance of a water cooling tower has been evaluated. As we know, one of the most important parameters in the discussion of oxygen corrosion in the refining, gas and petrochemical industries is the amount of dissolved oxygen in water. Basically, the lower this parameter will have an effective role in improving the performance of cooling systems such as heat exchangers, cooling towers. Accordingly, in this project, using a pilot scale cooling tower, we compared and compared the amount of water-soluble oxygen in the pond of this tower in two non-use balls and with a ball. It was created by floating black ping pong balls on the surface of the pond of the tower, a kind of resistance to sunlight, and also against the direct collision of water drips from the upper part of the tower toward the pond. The results of this study related to the condition of the ball used indicate a decrease in DO in the same conditions (temperature of 23°C and atm1) from 8.6 mg/l to 6.5 mg/l. This amount (6.5mg/l), in real mode, the operation of a cooling tower at a temperature of about 30°C can be further reduced. Reducing this parameter (DO) will have a positive effect on reducing the activity of aerobic bacteria and fungi. Also, placing these balls together on the water surface of the pond decreases the amount of light required by the fungi to perform the photosynthesis operation and reduces their growth intensity in a desirable manner. In addition, the lower the amount of dissolved oxygen in water, the industrial scale can reduce the consumption of injectable chemicals into water.

Keywords: Cooling Tower, Oxygen Corrosion, Dissolved Oxygen, Aerobic Bacteria, Photosynthesis.



بررسی آثار تحریم بر قراردادهای نفتی بین‌المللی

راحله سیدمرتضی حسینی^۱، آرزو ملک‌شاه^۲*

۱. ایران، تهران، عضو هیئت علمی دانشگاه خوارزمی، کد پستی ۱۵۷۱۹-۱۴۹۱۱.

۲. ایران، تهران، دانشجوی دکتری فقه و حقوق خصوصی دانشگاه خوارزمی، کد پستی ۱۵۷۱۹-۱۴۹۱۱.

نویسنده مسئول ایمیل: amalekshah72@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۷

چکیده

یکی از ابزارهای اقتصادی و سیاسی برای تحمیل خواسته‌ها و تأمین منافع یک کشور به کشور دیگر، استفاده از ابزار تحریم است. کشور صاحب‌نفوذ با همراهی سایر کشورها، با اعمال محدودیت‌هایی اهداف مدنظر خود را بر کشور دیگر تحمیل می‌کند. نمونه آن، وضعیتی است که با تحریم برخی کشورها در صنعت نفت ایران به وجود آمده است. یکی از پیامدهای این تحریم‌ها اثرگذاری آن بر قراردادهای نفتی بین‌المللی و خروج اجباری شرکت‌های نفتی بین‌المللی خارجی از ایران است. نفت ایران همواره به‌عنوان یکی از قطب‌های مهم تولید انرژی در معرض توجه بوده است؛ به‌ویژه آنکه تولید نفت در ایران به ابتکار سرمایه‌گذاری خارجی شروع شد. در این مقاله سؤال اصلی این است که تحریم چه آثاری بر قراردادهای نفتی به جا می‌گذارد؟ سرنوشت قرارداد پس از تحریم به چه شکل خواهد شد؟ در این مقاله تحریم را از منظر فورس ماژور و تغییر اوضاع و احوال بنیادین بررسی کرده و در پایان راهکارهایی برای برون‌رفت از این چالش ارائه شده است.

کلمات کلیدی: قراردادهای نفتی، تحریم، شرکت‌های نفتی بین‌المللی، فورس ماژور، تغییر بنیادین اوضاع و احوال.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر با افزایش مناقشات مربوط به فعالیت‌های انرژی هسته‌ای در ایران و اعمال چهار تحریم از سوی شورای امنیت سازمان ملل علیه ایران، شاهد اثرات منفی آن در جذب سرمایه‌گذاری خارجی در ایران هستیم؛ به‌ویژه سرمایه‌گذاری خارجی در صنایع بالادستی نفت و گاز. دلیل بر این مدعا، تحقق نیافتن این هدف در بخش افزایش تولید نفت خام در برنامه توسعه چهارم است که طبق آن می‌بایست متوسط تولید نفت خام ایران در پایان برنامه سال ۱۳۸۸ به بیش از چهار میلیون و نهصد هزار بشکه در روز برسد که به‌علت نبود سرمایه‌گذاری لازم در این بخش، هدف برنامه محقق نشد [۱].

تحریم‌های بین‌المللی علیه ایران عامل دیگری است

که با افزایش هزینه مبادله و افزایش نااطمینانی در فضای سرمایه‌گذاری، تمایل سرمایه‌گذاران را علی‌رغم وجود سودهای شایان توجه تضمین‌شده به سرمایه‌گذاری و مشارکت در پروژه‌های بخش نفت و گاز ایران، کاهش داده است. یکی از اولین گام‌های ایالات متحده برای تحریم بخش انرژی ایران، محدود کردن میزان سرمایه‌گذاری شرکت‌های بین‌المللی در صنعت نفت ایران بوده است. علاوه بر اعمال سقف سرمایه‌گذاری در صنعت نفت و گاز ایران، ایالات متحده از طریق نفوذ خود در بانک جهانی و صندوق بین‌المللی پول، ایران را از دریافت وام‌های مؤثر بلندمدت محروم کرده است. همچنین آمریکا در طی سال‌ها به‌دنبال متوقف ساختن همکاری‌های بانک‌های خصوصی و همچنین اعتبارات دولتی با دولت و شرکت‌های ایرانی بوده است. به‌این ترتیب، سرمایه‌گذاری خارجی در بخش‌های نفت و گاز





کشور تصویری مبهم دارد. پس از شدت گرفتن تحریم‌ها در سال‌های اخیر، سرمایه‌گذاری خارجی در ایران محدود شده است که یکی از دلایل اصلی این امر این است که شرکت‌های خارجی به دلیل فشار ایالات متحده بر بانک‌های بین‌المللی برای قطع همکاری با ایران برای تأمین مالی پروژه‌های انرژی در داخل ایران با مشکل مواجه هستند. یکی از مواردی که ممکن است باعث اختلال در اجرای پروژه‌های نفتی شود، بحث تحریم است که اگر به درستی مدیریت نشود، ممکن است در قرارداد تأثیرات منفی به جا بگذارد. تحریم می‌تواند ضمن تأثیر بر دولت میزبان، شرکت سرمایه‌گذار را در اجرای تعهداتش دچار اختلال و مشکل کند. گاهی اوقات ممکن است شدت این تأثیر به میزانی باشد که عملاً امکان ادامه فعالیت فراهم نباشد و گاهی اوقات باعث دشواری در انجام تعهد خواهد شد. در بسیاری اوقات تحریم به عنوان ابزاری برای اعمال فشار، ارتباط بسیار نزدیکی با موضوع تغییر شرایط بنیادین زمان عقد پیدا می‌کند. بسیاری از حقوق دانان در فرض اول، تحریم را در زمره مصادیق فورس مازور قرار داده‌اند و مجوز اجرانکردن تعهد را برای متعهد صادر می‌کنند؛ اما در مواردی که اجرای تعهد غیرممکن نشده، ولی بسیار دشوار یا پرهزینه شده است، آیا می‌تواند از مصادیق تغییر اوضاع و احوال محسوب شود؟ برای پاسخ به این سؤال، ابتدا مفهوم تحریم را توضیح و انواع آن را بررسی می‌کنیم، سپس به تأثیر آن بر قرارداد خواهیم پرداخت.

۲. تعریف مفاهیم

قبل از ورود به بحث تحریم، ابتدا ضروری است تا منظور از این اصطلاح را بررسی کنیم.

۱.۲. مفهوم تحریم

نویسندگان تعاریف مختلفی از تحریم را مطرح کرده‌اند. در فرهنگ لغت و اصطلاحات سیاسی، تحریم به معنی اجازه دادن، تصویب کردن، مجازات، جریمه و ضمانت اجرایی آمده است [۲]. در نظر دیگری آمده است که تحریم را می‌توان به «تدابیر قهرآمیز اقتصادی علیه یک کشور یا چند کشور تعریف کرد که به منظور ایجاد تغییر در سیاست‌های کشور مورد هدف تحریم وضع می‌شود یا دست کم بازگوکننده نظریات کشور تحریم‌کننده در مقابل تحریم‌شونده است [۳]. در واقع می‌توان گفت تحریم نوعی خودداری از برقراری روابط سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و نظامی با یک کشور یا دولت است و برای مجازات آن دولت یا الزام به تغییر رفتار

آن کشور اعمال می‌شود. در تحریم‌ها به نوعی تنبیه هم وجود دارد؛ اما تنها برای به سختی انداختن مردم در کشورهای تحت تحریم نیست؛ بلکه هدف اصلی، ایجاد تغییر در رفتار سیاسی دولت است. برخی نیز عامل بازدارندگی را به عنوان مهم‌ترین کارکرد تحریم مطرح می‌کنند [۴]. در مجموع در تعریفی جامع‌تر، تحریم عبارت است از امتناعی نظام‌یافته در برقراری روابط اجتماعی، اقتصادی، سیاسی یا نظامی یک دولت یا مجموعه‌ای از دولت‌ها برای تنبیه یا ایجاد رفتار مدنظر. با وجود این، چهره تحریم بیشتر در روابط اقتصاد بین‌الملل آشکار می‌شود: آنجا که کالاها و خدمات یک دولت خاص بایکوت می‌شود [۵].

۲.۲. انواع تحریم

تحریم‌ها ممکن است به دو گونه اجبارکننده و کنترل‌گرایانه باشند. تحریم‌ها از سه منظر هدف، مخاطب و نحوه اجرا با یکدیگر متفاوت هستند [۶]. تحریم‌ها از نظر هدف به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱. تحریم با هدف استراتژیک: منافع استراتژیک یک کشور در معرض خطر قرار می‌گیرند و در این حالت، تحریم جانشین جنگ می‌شود؛ ۲. تحریم با هدف تغییر رفتار: در این حالت، تحریم برای وادار کردن دولت به تغییر رفتار است و هدف تحریم، بی‌ثبات کردن دولت یا تغییر رژیم آن نیست [۷].

تحریم‌ها از نظر مخاطب به سه دسته تقسیم می‌شوند: ۱. تحریم یک‌جانبه که در آن، کشور تحریم‌کننده با تصمیم خود و بر اساس سیاست و امنیت ملی خود، اقدام به تحریم کردن کشور دیگر می‌کند [۸]؛ ۲. تحریم چندجانبه که آن را چند کشور اعمال می‌کنند؛ بدین صورت که ممکن است کشورهای دیگری از کشور تحریم‌کننده پیروی کنند [۹]؛ ۳. تحریم سازمان ملل که از سوی شورای امنیت علیه کشور مدنظر اعمال می‌شود.

تحریم‌ها را از نظر روش یا نحوه اجرا می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: ۱. تحریم اولیه: به تحریمی گفته می‌شود که تنها به رابطه دو کشور تحریم‌شده و مجری تحریم مربوط می‌شود. در این تحریم، یک کشور از برقراری رابطه اقتصادی با کشور دیگر خودداری می‌کند و این موضوع محدود به روابط میان طرفین است؛ ۲. تحریم ثانویه: در این تحریم، کشور تحریم‌کننده نه تنها رابطه‌اش با کشور هدف را محدود یا قطع می‌کند، بلکه از ارتباط با سایر کشورهایی که با کشور تحریم‌شده در ارتباط هستند نیز خودداری می‌کند.

در این نوع، دامنه تحریم گسترش پیدا می کند و علاوه بر کشور هدف، کشورهای دیگری را هم در بر می گیرد. حتی در مواقعی، کشور تحریم کننده به این هم بسنده نمی کند و برای کشورها یا شرکت هایی که با کشور تحریم شده در ارتباط هستند، مجازات^۱ در نظر می گیرد [۱۰].

۳. پیشینه تحریم های نفتی علیه ایران

پس از وقایع انقلاب اسلامی و به دنبال آن، تسخیر لائنه جاسوسی آمریکا، این کشور تصمیم گرفت اقداماتی تنبیهی علیه ایران اتخاذ کند که یکی از این اقدامات، اعمال تحریم هایی در زمینه های گوناگون و به ویژه در بخش نفت و انرژی است. تلاش های آمریکا در این زمینه روز به روز گسترده تر می شد و بارزترین جلوه آن، طرح قانون داماتو در ۲۵ ژانویه ۱۹۹۵ در کنگره با هدف قطع کامل روابط تجاری میان ایران و آمریکا بود. پس از آن، کلینتون طی دستورات اجرایی صادره در سال ۱۹۵۲ آمریکا را از سرمایه گذاری در بخش انرژی ایران و سپس از تجارت و سرمایه گذاری در ایران به طور کلی منع کرد. سپس در ۱۹۹۶ قانون تحریم های نفتی ایران تصویب شد. با تصویب قانون داماتو - کندی در تاریخ ۱۵ اوت ۱۹۹۶ یا قانون مجازات ایران و لیبی، هرگونه سرمایه گذاری بیش از ۴۰ میلیون دلار در سال برای توسعه بخش نفت و گاز در ایران و لیبی توسط هر شرکتی در دنیا ممنوع شد [۱۱].

قانون تحریم های ایران، ریشه کلیه تحریم هایی است که در ایالات متحده به منظور مجبور کردن شرکت های خارجی انرژی برای خروج از بازار ایران طراحی و تصویب شده است. بر اساس این قانون، از میان تحریم های نه گانه، سه تحریم باید اعمال شود و این، به معنی افزایش شدت تحریم ها از نظر کمی است. همچنین برخی استثنائات مندرج در قانون قبلی، از جمله فروش تجهیزات مربوط به انرژی به ایران در این مصوبه حذف شد و مشمول تحریم قرار گرفت. بر اساس بند ۶ ماده ۱۰۲ این مصوبه، شرکت های خارجی ملزم شده اند تا به عنوان شرط پذیرش قرارداد با دولت آمریکا، به آژانس مرتبط با دولت گواهی دهند که شرکت آن ها و هر شرکت دیگری که تحت مالکیت یا کنترل آن ها است، از مقررات تحریم های ایران تخطی نخواهد ورزید و ضمانت اجرای اثبات صحت نداشتن گواهی مذکور، فسخ قرارداد مدنظر یا اعمال تدابیر تنبیهی خواهد بود [۱۱]. مطابق با بند ۲۳ تحریم های اتخاذ شده اتحادیه اروپا در ژوئیه ۲۰۱۰، کشورهای عضو

۱. مانند قانون داماتوی آمریکا علیه ایران.

اتحادیه اروپا نیز بایستی فروش، عرضه یا انتقال هرگونه تجهیزات و فناوری های کلیدی و همچنین کمک های تخصصی و مالی ای را ممنوع کنند که می تواند در بخش های کلیدی صنعت نفت و گاز طبیعی ایران استفاده شود. در عین حال کشورهای عضو باید هرگونه سرمایه گذاری های جدید در بخش های مذکور ایران را ممنوع کنند. تحریم های نفتی تنها محدود به میزان سرمایه گذاری شرکت های بین المللی انرژی و ایجاد محدودیت برای جریان مالی متکی به حضور آن ها در ایران نمی شود و بعد از مدتی با شدت گرفتن تحریم های نفتی علیه بخش نفت کشور و تهدیدهای ایالات متحده، شرکت های متعددی مجبور به خروج از پروژه های نفت و گاز ایران می شوند یا متعهد به خروج در افق زمانی معین و همچنین ارسال نکردن فرآورده های پالایشی، به ویژه بنزین به ایران می شوند که این به دلیل افزایش هزینه مبادله و ریسک سرمایه گذاری بخش نفت و گاز ایران به دنبال وضع تحریم ها علیه کشور است.

بنابراین، قانون جامع تحریم ایران، کامل ترین و جامع ترین قانون تحریم ایران است که قوانین و دستورات پیشین را در یک سند گردآوری کرده است و شامل موارد زیر است:

۱. تحریم سرمایه گذاری برای توسعه منابع نفتی ایران؛
۲. تحریم همکاری برای تولید محصولات پالایش شده بنزین در ایران؛
۳. تحریم محصولات پالایشگاهی ایران؛
۴. تحریم انتقال فناوری های هسته ای؛
۵. تحریم سرمایه گذاری در حوزه های انرژی در ایران؛
۶. برخی تحریم ها برای سازمان ها و نهادها و افراد ناقض حقوق بشر. با نگاهی به اسناد مشمول تحریم های انرژی ایران از سوی آمریکا، این نتیجه حاصل می شود که این کشور شدیدترین تحریم ها را بر بخش انرژی ایران وضع کرده است که نه تنها افراد و شرکت های آمریکایی را از هرگونه رابطه با ایران ممنوع می کند، بلکه با اعمال ممنوعیت ها و فشارهای تجاری و مالی اشخاص حقیقی و حقوقی متبوع دولت های دیگر را از هرگونه سرمایه گذاری، خرید و فروش، انتقال فناوری های نفتی، همکاری مشترک و... با ایران باز می دارد که در نتیجه این ممنوعیت ها، کشورهای دیگر از اجرای بسیاری از تعهدات و قراردادهای خود در مقابل ایران ناتوان شدند و تحریم های این کشور واجد وصف فراسرزمینی است [۱۲]. تحریم های آمریکا و اتحادیه اروپا باعث شد که اکثر شرکت های نفتی از سرمایه گذاری در ایران اجتناب کنند و به تبع آن، موجب شده است که کشور در بخش سرمایه گذاری در پروژه های نفتی با چالش جدی



مواجه شود. ضمن آنکه موجب شده است برخی شرکت‌ها در حین انجام پروژه، آن را رها کنند و این، موجب آسیب جدی به اقتصاد کشور و مبهم‌ماندن قرارداد می‌شود.

۴. راهکارهای مواجهه با تحریم

تحریم در دو حالت ممکن است بر قرارداد اثر بگذارد: یکی در زمان انعقاد قرارداد و دیگری در زمان اجرای قرارداد. حالت اول از بحث خارج است؛ اولاً به این دلیل که تغییر اوضاع و احوال در زمان اجرای قرارداد، موضوع بررسی است و ثانیاً اینکه در چنین حالتی، طرفین با آگاهی از تحریم، برای انعقاد قرارداد اقدام کرده‌اند و در نتیجه، با اطلاع از پیامدهای آن و پذیرش عواقبش به توافق رسیده‌اند. اما در فرضی که تحریم در طول اجرای قرارداد به وجود بیاید، می‌تواند باعث دشوار شدن اجرای تعهد یا برهم خوردن تعادل قراردادی شود. به‌طور مثال، تحریم می‌تواند باعث تورم شود و این تورم می‌تواند بر شرکت نفتی سرمایه‌گذار تأثیر منفی بگذارد. از سویی تأمین مالی پروژه با مشکل روبه‌رو می‌شود؛ زیرا مؤسسات مالی و بانک‌های خارجی از دادن وام و تسهیلات منع می‌شوند و این موضوع می‌تواند فشار مالی بر سرمایه‌گذار خارجی را بسیار کند [۱۳]. برخی از قراردادهای نفتی طولانی‌مدت هستند؛ بنابراین نیازمند گردش مالی در طول دوره اجرای قرارداد نیستند و در نتیجه تحریم باعث ایجاد مشکلات بسیار در نقل و انتقال سرمایه خواهند شد.

تحریم می‌تواند در زمینه ورود کالاها و تجهیزات مورد نیاز، محدودیت یا ممنوعیت‌هایی را ایجاد کند، مثل ممنوع شدن فروش برخی از تجهیزات لازم به کشور یا شرکت‌های طرف قرارداد دخیل در پروژه. تأمین نشدن تجهیزات یا تأخیر در تأمین آن‌ها، می‌تواند منجر به تأخیر در اجرای پروژه و عقب افتادن از برنامه زمان‌بندی شود. افزایش قیمت‌ها و نامعلوم بودن چگونگی تغییرات، می‌تواند تأمین تجهیزات مورد نیاز را با چالش‌های بسیاری روبه‌رو کند [۱۴]. از سویی این عوامل ممکن است باعث افزایش هزینه‌های سرمایه‌ای بیش از سقف توافق شده شود. با توجه به آنچه بیان شد، تحریم می‌تواند به‌نوعی باعث تغییر شرایط اولیه قرارداد شود؛ به‌گونه‌ای که انجام آن را بسیار دشوار کند یا تعادل اقتصادی قرارداد را بر هم بزند یا منجر به افزایش هزینه‌های اجرای پروژه شود. از این‌رو، در صورتی که همراه با عنصر پیش‌بینی‌ناپذیری باشد، می‌تواند به‌عنوان یکی از مصادیق تغییر بنیادین اوضاع و احوال محسوب شود. بنابراین تحریم را از دو منظر بررسی می‌کنیم: یکی فورس مازور و دیگری

تغییر اوضاع و احوال.

۱.۴. تحریم از منظر فورس مازور

فورس مازور که در فارسی به قوه قاهره یا قوه قهریه ترجمه شده است، عبارت است از یک مانع اجتناب‌ناپذیر ناشی از رویدادهای خارجی که اجرای تعهد را غیرممکن می‌سازد. در تعریف دقیق، فورس مازور دو معنای عام و خاص دارد: معنای عام آن عبارت است از هر حادثه خارجی‌ای که خارج از حیطه قدرت متعهد است و پیش‌بینی‌ناپذیر و اجتناب‌ناپذیر است و مانع از اجرای تعهد می‌شود. معنای خاص آن عبارت است از حادثه‌ای که صرفاً به سوانح طبیعی منتسب است و پیش‌بینی‌ناپذیر و اجتناب‌ناپذیر است [۱۵]. فورس مازور عبارت است از یک مانع اجتناب‌ناپذیر ناشی از رویدادهای خارجی که یا از اجرای تعهد، یا از رعایت یک قاعده حقوق بین‌الملل جلوگیری می‌کند. همه نظام‌های حقوق داخلی، رفع مسئولیت شخصی را می‌پذیرند که بر اثر قوه قاهره، اجرای تعهدات قراردادی برای او مطلقاً غیرممکن شده است. در حقوق بین‌الملل، اثر فورس مازور، معافیت دولت از مسئولیتی است که معمولاً به‌سبب اجرا نشدن عهدنامه دامن‌گیر آن است [۱۶]. در حقوق ایران نیز که متأثر از حقوق فرانسه است، این نهاد، با نام اصلی خود، یعنی همان فورس مازور با معادل‌هایی، نظیر قوه قهریه و قوه قاهره وارد قوانین شده است. گاهی نیز بدون استفاده از این عنوان‌ها، تنها به بیان ارکان و نتایج آن بسنده کرده‌اند.

۱.۱.۴. شرایط فورس مازور

معمولاً برای فورس مازور سه شرط را مطرح می‌کنند: ۱. حادثه باید اجتناب‌ناپذیر باشد؛ ۲. حادثه باید پیش‌بینی‌ناپذیر باشد؛ ۳. حادثه باید خارجی باشد.

اجتناب‌ناپذیر بودن حادثه، یعنی حادثه باید به‌گونه‌ای باشد که دفع آن امکان‌پذیر نباشد و بر اثر آن، اجرای تعهد غیرممکن شود. در واقع دشوار بودن، غیر از ممکن نبودن است و مقصود از امکان نیافتن هم در این باب، امکان نیافتن مطلق است. به عبارت دیگر، عرف عمومی اجرای آن را برای همگان غیرممکن تلقی کند؛ زیرا ممکن است در جایی، امری برای شخص خاصی غیرممکن شود؛ ولی برای دیگری امکان‌پذیر باشد. این امکان نیافتن شخصی خواهد بود. امکان نیافتن شخص برای تحقق فورس مازور کفایت نمی‌کند؛ بلکه باید امکان نیافتن مطلق باشد. پیش‌بینی‌ناپذیر بودن حادثه نیز بدین معناست که وقوع آن غیرعادی و ناگهانی باشد و

چنین باشد که معمولاً هم چنین حادثه‌ای در امر مورد تعهد وقوع پیدا نمی‌کند؛ بنابراین اگر در زمان عقد قرارداد، وقوع حادثه پیش‌بینی‌شدنی باشد یا پیش‌بینی شود، در صورت شکل‌گیری آن حادثه، مورد از مصادیق فورس ماژور نخواهد بود. در این حالت یا باید در آن موضوع تدابیر احتیاطی اتخاذ می‌شد یا اینکه از عقد قرارداد خودداری می‌شد. وقتی در موردی با علم و آگاهی قرارداد عقد می‌شود، باید بر اساس قاعده اقدام با آن پدیده برخورد کرد و از مصادیق فورس ماژور محسوب نمی‌شود. در شرط سوم، حادثه نباید منتسب به شخص متعهد باشد؛ به عبارت دیگر عنصر اصلی خارجی بودن حادثه در فورس ماژور، به این معناست که فعل یا ترک فعل نباید به متعهد به عنوان نتیجه رفتار ارادی شخص او انتساب داشته باشد. از این‌روست که قانون مدنی ایران در ماده ۲۲۶ همانند ماده ۱۱۴۷ قانون مدنی فرانسه بیان می‌دارد: «متخلف از انجام تعهد، وقتی محکوم به تأدیه خسارت می‌شود که نتواند ثابت کند که انجام‌دادن به واسطه علت خارجی بوده است که نمی‌توان به او مربوط کرد.» [۱۵]

۲.۱.۴. اثر فورس ماژور بر قرارداد

تحریم در فرض شمول فورس ماژور می‌تواند بر اجرای قرارداد تأثیر بگذارد و موجب سقوط و انحلال و تعلیق قرارداد شود.

۱.۲.۱.۴. سقوط تعهد و انحلال قرارداد

هنگامی که مانع فورس ماژور برای مدتی و در یک دوره مشخص ادامه پیدا کند، به گونه‌ای که ادامه قرارداد را با مشکل جدی مواجه سازد، موجب انحلال قرارداد می‌شود و تعهدات طرفین قرارداد در مقابل یکدیگر با انحلال قرارداد از بین می‌رود؛ اما مواردی وجود دارد که با وجود فورس ماژور موجب برائت متعهد نمی‌شود:

۱. در مواردی که متعهد به موجب قرارداد خطرات ناشی از قوه قاهره را پذیرفته است و به عبارت دیگر، در قرارداد تصریح شده باشد که متعهد حتی در صورت تحقق قوه قاهره، مسئول است.

۲. در مواردی که قبل از بروز حادثه فورس ماژور، موعد ایفای تعهد رسیده و متعهد له اجرای آن را مطالبه کرده باشد.

۳. در موردی که امکان نیافتن اجرا جزئی است و فقط شامل بعضی از تعهدات ناشی از قرارداد است. در این صورت برائت متعهد جزئی خواهد بود و درباره تعهداتی که ایفای

آن امکان دارد، مسئولیت باقی است.

۴. در صورتی که قوه قاهره یکی از علل اجرائشدن تعهد و خسارت باشد، نه علت تامه آن و تقصیر متعهد هم یکی از اسباب و علل خسارت باشد، رویه قضایی فرانسه معافیت جزئی از مسئولیت را به نسبت دخالت قوه قاهره می‌پذیرد. به عبارت دیگر، هنگامی که فورس ماژور در ورود خسارت دخالت جزئی داشته و جزو علت باشد، از میزان غرامت کاسته خواهد شد.

۵. در صورتی که فورس ماژور ناشی از تقصیر متعهد باشد، مانند غارت کالا به وسیله دشمن بر اثر تأخیر قطار، مسئولیت باقی می‌ماند؛ البته اثبات اینکه تقصیر متعهد سبب فورس ماژور بوده است، بر عهده متعهد له است [۱۵].

۲.۲.۱.۴. تعلیق قرارداد

هرگاه وقوع حادثه‌ای که منجر به انجام‌نشدن تعهدات شده است، موقتی باشد، اثر فورس ماژور تعلیق قرارداد است و پس از رفع مانع، قرارداد اثر خود را باز می‌یابد. متعهد موظف است تعهد را بر اساس قرارداد اجرا کند.

این حکم در صورتی است که اجرای تعهد در گذر زمان، فلسفه وجودی خود را از دست نداده باشد؛ اما اگر قرارداد با گذشت زمان فایده خود را از دست داده باشد، در واقع ماهیت قرارداد به طور کلی دگرگون می‌شود و موجب انحلال آن خواهد بود. تشخیص این امر در صورتی که مرجعی، از جمله داور، در متن قرارداد پیش‌بینی نشده باشد، به عهده دادگاه خواهد بود [۱۵]. در این گونه قراردادهای شرط فورس ماژور را به لحاظ آثاری که دارد، باید متفاوت از بقیه قراردادهای تنظیم کرد و با توجه به موقعیت، این شرط را در قرارداد گنجانده؛ به ویژه در قراردادهای بلندمدت نفتی که احتمال تحریم ایران می‌رود. اگر تحریم را مصداق فورس ماژور بدانیم، طرف متعهد مشمول خسارت نمی‌شود و این به ضرر طرف ایرانی است.

۲.۴. تغییر بنیادین اوضاع و احوال

بر اساس هریک از مکاتب حقوقی و مبانی مطرح‌شده درباره این اصل، تغییر بنیادین اوضاع و احوال معنی و معیار خاصی خواهد یافت. از دیدگاه مکتب اراده ذاتی حقوق، اراده دولت بر همه چیز حاکم است و لازم نیست تغییر حاصل در اوضاع و احوال بنیادین باشد؛ بلکه هر نوع تغییری در موضع و



سیاست دولت، برای استناد به این اصل به منظور لغو معاهده کافی است. در واقع آنچه اهمیت اساسی دارد، اراده و خواست دولت است؛ ولی طرفداران نظریه اراده متحد و مشترک دولت‌ها که تئوری شرط ضمنی را مطرح می‌کردند، تغییر اوضاع و احوال را مقید به اساسی و بنیادین بودن می‌کنند؛ به‌طوری که تغییرات مزبور، نتیجه و وضعیت جدیدی را اقتضا کند که برای اعضای معاهده پیش‌بینی‌شده نبوده است و بنیادین بودن را هم یک امر نسبی می‌دانند که بستگی کامل به اراده دولت‌های عضو معاهده در زمان انعقاد آن دارد. لذا ممکن است یک تغییر، نسبت به معاهده‌ای بنیادین باشد و همان تغییر نسبت به معاهده دیگر بنیادین محسوب نشود. باید دید طرفین معاهده هنگام انعقاد آن، چه اراده‌ای کرده‌اند و آن را مبتنی بر چه اوضاع و احوالی منعقد کرده‌اند؛ لذا در این نظریه کشف اراده اعضای معاهده بسیار حائز اهمیت است [۱۷]. در روابط تجاری پیچیده دنیای امروز، اطلاع کافی از اوضاع و احوال و شرایط انعقاد عقد و اجرای آن لازم است. در حقوق ایران با استفاده از قواعد فقهی نفی عسر و حرج و لاضرر می‌توان حکم حرجی یا ضرری را برداشت و برای متعهد حق فسخ قائل شد.

قراردادهای درازمدت که اجرای آن در طول سالیان متمادی تحقق می‌یابد، بیشتر در معرض تحولاتی است که آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد و تعادل و توازن قراردادی را به هم می‌زند. غالباً در زمینه‌های بین‌المللی که طرفین قرارداد از ملیت‌های مختلف هستند یا یکی از طرفین، دولت و طرف دیگر یک تبعه خارجی است، موقعیت‌های دشواری بروز پیدا می‌کند. نظر به اینکه پیش‌بینی کلیه عوامل مؤثر در قراردادها امکان‌پذیر نیست و با توجه به تنوع حوادث و وضعیت‌های دشوار، هنگام عقد، مسائلی از محاسبه طرفین خارج می‌شود. در قراردادهای مستمر که اجرای قرارداد طی سالیان متمادی صورت می‌پذیرد، حفظ منافع طرفین ایجاب می‌کند که با مذاکره به توافق برسند؛ زیرا توقف عملیات اجرایی به ضرر طرفین خواهد بود [۱۸]. در سال‌های اخیر نویسندگان حقوقی و حقوق‌دانان بین‌المللی به این نکته معطوف شده‌اند که به دلیل تحولات سریع در اوضاع و احوال بین‌المللی و تأثیر اجتناب‌ناپذیر آن بر قراردادهای تجاری، شرایطی در خصوص موقعیت‌های دشوار در قرارداد گنجانده شود. این شرط که علاوه بر شرایط معاذیر قراردادی از قبیل فورس ماژور و سایر شرایط مندرج در قراردادهاست، مربوط به تطبیق شرایط جدیدی است که بر اثر تغییر اوضاع و احوال

و به هم خوردن تعادل موازنه قرارداد و مشکل شدن اجرای قرارداد به وجود می‌آید [۱۷].

دولت ایران در سال ۱۹۲۷ اقدام به لغو یک‌جانبه تعدادی از معاهدات نابرابر کرد. در بسیاری از آن‌ها تصریح شده بود که دولت ایران حق لغو را یک سال بعد از اعلام آن به دولت‌های طرف معاهده دارد؛ ولی در معاهدات نابرابری که بین ایران و دولت‌های فرانسه و اسپانیا منعقد شده بود، چنین شرطی به نفع دولت ایران وجود نداشت. ایران به فرانسه که حافظ منافع اسپانیا هم بود، اعلام کرد که به استناد اصل تغییر بنیادین اوضاع و احوال، حق لغو این معاهدات را دارد؛ لذا یک سال بعد از این ابلاغ، معاهدات مذکور لغو خواهند شد. فرانسه و اسپانیا لغو یک‌جانبه معاهدات فی‌مابین را رد کردند و آن را غیرقانونی دانستند؛ زیرا برای مشروعیت لغو یک معاهده باید تغییر بنیادین اوضاع و احوال رخ دهد؛ به‌طوری که اجرای معاهده غیرممکن شود؛ در حالی که این امر محقق نشده است [۱۷].

۱.۲.۴. اثر اصل تغییر بنیادین اوضاع و احوال بر قرارداد

۱. لغو یک‌جانبه معاهدات توسط دولت‌ها: حقوق‌دانان زیادی معتقدند که دولت متضرر در صورت تغییر بنیادین اوضاع و احوال، حق لغو یک‌جانبه معاهدات را دارد. این نظر بیشتر با تئوری مکتب ارادی حقوق سازگار است؛ زیرا آنان قائل به وجود اصل تغییر بنیادین به صورت شرط ضمنی در معاهدات هستند که بر اساس آن، دولت متضرر در صورت تغییر بنیادین اوضاع و احوال، حق لغو معاهده را خواهد داشت. شرط ضمنی هم مانند شرط صریح است و اثر آن را دارد.

۲. اختتام خودبه‌خود و فی‌نفسه معاهدات: بر اساس این نظریه، هرگاه اوضاع و احوال زمان انعقاد معاهده، تغییر بنیادین کند، به‌طوری که باعث دگرگونی تعهدات ناشی از آن شود، معاهده مزبور لغو و پایان خواهد پذیرفت. وقتی معاهده‌ای علت وجودی خود را از دست داد، دیگر استمرار حیات آن توجیهی معقول نخواهد داشت؛ زیرا با تغییر بنیادین اوضاع و احوال، معاهده سبب مادی خود را از دست داده است و با واقعیت‌های اجتماعی موجود متعارض و ناهماهنگ شده است؛ لذا معاهده خودبه‌خود و به‌طور طبیعی، بدون دخالت اراده دولت متضرر از بین می‌رود.

۳. حق تعدیل و تجدیدنظر در معاهدات: تغییر بنیادین

اوضاع و احوال به عنوان حادثه‌ای عارضی و پیش‌بینی‌ناپذیر، تعادل و توازن لازم در معاهدات بین‌المللی را از بین می‌برد و تنها راه برقراری مجدد این تعادل بین حقوق و تعهدات معاهده، تجدیدنظر و تعدیل آن است. از این طریق، هم به اصل لزوم وفا به معاهدات عمل می‌شود و هم بین دو عنصر ثبات و تغییر معاهدات هماهنگی و تعادل برقرار می‌شود.

۴. توقف اجرای معاهدات بین‌المللی: توقف اجرای معاهده یا تعلیق آن بدین معناست که آثار معاهده به‌طور موقت مترتب نمی‌شوند و در عین حال معاهده به قوت خود باقی است و با ازبین‌رفتن علل و اسباب توقف یا تعلیق، معاهده قدرت اجرایی خود را باز خواهد یافت و آثار آن مترتب می‌شوند [۱۷].

۵. نتیجه‌گیری

اثرات بلندمدت و میان‌مدت تحریم‌های نفتی در تغییر ترکیب شرکت‌های فعال نفتی در صنعت نفت و گاز کشور مشاهده می‌شود که به‌صورت خروج شرکت‌های معتبر بین‌المللی از طرح‌ها و پروژه‌های اصلی است. امروزه مجازاتی که برای تبعیت‌نکردن از تحریم‌های اقتصادی در نظر گرفته می‌شود، گاه یک شرکت را تا مرز نابودی پیش می‌برد؛ از این رو نمی‌توان متعهد را به دلیل وضع تحریم‌های اقتصادی که ادامه روابط قراردادی را ناممکن ساخته است، وادار به اجرا کرد؛ زیرا در این وضعیت او متحمل مجازات گزافی خواهد شد و این عادلانه نیست. همان‌طور که بر اساس قانون برخی از کشورها، اجرای تعهدی که متعهد را تا مرز قربانی‌شدن پیش ببرد، لازم‌الاجرا نیست، طولانی‌بودن برخی قراردادهای نفتی و تعهدات متنوع و پرهزینه آن در نهایت سرمایه‌گذاری عظیمی را بازنمایی می‌کند. قراردادهای نفتی بالادستی از جمله گران‌ترین قراردادهای پروژه‌های بین‌المللی محسوب می‌شوند. اجرای تعهدات توسط طرفین قرارداد امری مهم محسوب می‌شود. این قراردادهای همواره با تهدیداتی از جمله تحریم روبه‌رو هستند. اگر تحریم را از مصادیق فورس مازور محسوب کنیم، با آثار آن، از جمله سقوط و انحلال قرارداد و تعلیق مواجه هستیم. تحریم‌هایی که کشور آمریکا و سایر کشورها اعمال کرده‌اند، موجب شده‌اند که پیمانکاران نفتی به‌بهانه تحریم و امکان‌نداشتن اجرای قرارداد، از قرارداد خارج شوند و این مسئله به صنعت نفت ایران آسیبی جدی وارد کرده است.

در اینجا دو رویکرد داریم: رویکرد اول این است که اگر تحریم را به‌عنوان یکی از مصادیق فورس مازور قرار بدهیم، دیگر نمی‌توان الزام متعهد به ایفاء تعهدات را از وی مطالبه کرد. رویکرد دوم اینکه اگر تحریم را مصادیق فورس مازور ندانیم، باید راهکار دیگری برای آن اندیشید. قراردادهای نفتی، همواره با مقوله‌ای به نام ریسک همراه است. منظور از ریسک، احتمال بروز نتایج متفاوت با پیش‌بینی یا انتظارات طرفین است. در تخصیص و توزیع ریسک، سعی بر آن است که ریسک به طرفی منتقل شود که بهتر می‌تواند آن را تحت‌کنترل خود درآورد یا از وقوع آن جلوگیری کند. کشور ایران همواره در تحریم اقتصادی به سر می‌برد؛ بنابراین ناگزیر می‌شود که با شرکت‌های نفتی بین‌المللی سازش کند و نمی‌تواند تحریم را از مصادیق فورس مازور خارج کند؛ چون ممکن است طرف خارجی از انعقاد قرارداد منصرف شود. اگر تحریم‌های اقتصادی را به‌عنوان ریسک تلقی کنیم و به‌شکل عادلانه بین طرفین توزیع شود، روش مناسب‌تری است.

هنگامی که طرفین برهم‌خوردن تعادل قراردادی را به‌سبب تغییر اوضاع و احوال، مانند تغییر رژیم تحریم‌ها پیش‌بینی می‌کنند، برای جلوگیری از اختلافات آینده می‌توانند در زمان انعقاد قرارداد، شروطی برای بازگرداندن تعادل به تعهدات طرفین در نظر بگیرند. به‌طور کلی شروط مزبور به دو شکل هستند: نخست شروطی هستند که در آن‌ها مبنای معلوم و معینی برای تجدیدنظر در قرارداد در نظر گرفته شده است. دوم شروطی هستند که ذیل آن‌ها مبنای مشخصی برای تجدیدنظر تعیین نشده است. در هریک از صورت‌های فوق ممکن است دخالت شخص ثالث یا حتی یکی از طرفین برای تعیین میزان دفعات و مدت‌زمان آن تعیین می‌شود. در این صورت، اگر تجدیدنظر در قرارداد با مذاکره و توافق طرفین قرارداد به انجام رسد، در صحت آن نمی‌توان تردید کرد؛ چراکه اراده مشترکی که منجر به قرارداد اولیه شده است، در اینجا نیز وجود دارد و می‌تواند در قالب الحاقیه یا اصلاحیه، قرارداد پیشین را تعدیل کند.

۶. منابع

[۱]. مؤمنی و صالحیان، هوشنگ، غنیمی فرد، حجت اله و محمودی، محمد، بررسی مقایسه‌ای قراردادهای بیع متقابل و مشارکت در تولید در پروژه‌های بالادستی صنعت نفت و گاز ایران، فصلنامه علوم اقتصادی، سال دوم، شماره ۶، ۱۳۸۸.



- [۲]. [۲] نوروزی خیابانی، مهدی، فرهنگ جامع لغات و اصطلاحات سیاسی، تهران، نشر نی، ۱۳۸۴.
- [3]. Barry, Carter. E. "International Economic Sanctions: Improving the Haphazard U.S. Legal Regime", California Law Review 75(4), 1987.
- [۴]. ظریف، محمدجواد و میرزایی، سعید، مباحث حقوق بین‌الملل: تحریم‌های یک‌جانبه آمریکا علیه ایران، سال یازدهم، شماره ۱، ۱۳۷۶.
- [۵]. [۵] گراهام ایوانر و جفری، نونام، فرهنگ روابط بین‌الملل. ترجمه حمیرا مشیرزاده و حسین شریفی طراز کوهی، تهران، نشر میزان، ۱۳۸۱.
- [۶]. زهرانی، مصطفی، مبانی نظری تحریم اقتصادی علیه جمهوری اسلامی ایران: موانع و چالش‌های نفت ایران، بررسی‌های مسائل اقتصاد انرژی، سال اول، شماره ۲، ۱۳۸۷.
- [۷]. قادری، عبدالواحد و دیگران، بررسی اصول و قواعد حقوقی حاکم بر قراردادهای نفتی جمهوری اسلامی ایران، چ اول، تهران، کتاب آوا، ۱۳۹۴.
- [۸]. غمامی، سید محمد مهدی، تحلیل گفتمان ضد حقوقی تحریم‌های آمریکا علیه دولت ایران، فصل‌نامه مطالعات حقوق بشر اسلامی، سال دوم، شماره چهارم، ۱۳۹۲.
- [۹]. یآوری، کاظم و محسنی، رضا، آثار تحریم‌های تجاری و مالی بر اقتصاد ایران: تجزیه و تحلیل تاریخی، مجلس و راهبرد، شماره ۶۱، ۱۳۸۸.
- [۱۰]. ابراهیمی، سید نصرالله و اوپار حسین، شادی، آثار تحریم بر اجرای قراردادهای بازرگانی بین‌المللی از منظر فورس ماژور، دو فصل‌نامه دانش حقوق مدنی، شماره دوم، ۱۳۹۱.
- [۱۱]. وکیل، امیرساعت و تحصیلی، زهرا، ایران و تحریم‌های بین‌المللی، چ اول، تهران، مجمع علمی و فرهنگی مجد، ۱۳۹۲.
- [۱۲]. مشهدی، علی، رشیدی، مهناز، تأثیر تحریم‌های وضع شده علیه ایران بر محیط زیست، انرژی و انتقال تکنولوژی از منظر حقوق بین‌الملل، فصل‌نامه پژوهش حقوق عمومی، سال شانزدهم، شماره ۴۶، ۱۳۹۴.
- [۱۳]. صیادی، محمد و برکشلی، فریدون، اثرات کوتاه مدت و بلندمدت تحریم‌های بین‌المللی نفتی بر بخش انرژی ایران، گزارش راهبردی، شماره ۱۵۵، ۱۳۹۱.
- [۱۴]. صادقی زیبازی، حاتم و بقائی برزآبادی، افسانه، آثار حقوقی تحریم‌های بین‌المللی هوشمند در چارچوب قطعنامه‌های شورای امنیت با تأکید بر تدارکات در صنعت نفت ایران، مجله حقوقی بین‌المللی، شماره ۵۳، ۱۳۹۴.
- [۱۵]. خوثینی، غفور، بررسی تطبیقی حقوق تعهدات، چ اول، تهران، نشر فرهنگ صبا، ۱۳۸۶.
- [۱۶]. صفایی، سید حسین، قوه قاهره یا فورس ماژور، مجله حقوقی، دفتر خدمات حقوقی بین‌المللی جمهوری اسلامی ایران، شماره ۳، ۱۳۶۴.
- [۱۷]. حسینی، سید احمد رضا، تأثیر تغییر بنیادین اوضاع و احوال بر معاهدات بین‌المللی، چ اول، تهران، انتشارات بین‌المللی الهدی، ۱۳۷۸.
- [۱۸]. صادقی مقدم، محمدحسن، مطالعه تطبیقی «تأثیر تغییر اوضاع و احوال بر قرارداد» و راه حل حقوق ایران، مجله حقوقی، نشریه دفتر خدمات حقوقی بین‌المللی جمهوری اسلامی ایران، شماره ۲۵، ۱۳۷۹.

Review the Effects of Sanctions on International Oil Contracts

Rahele Syyed Morteza Hossini¹, Arezoo Malekshah^{2*}

1. Iran, Tehran, Kharazmi University, Faculty Member.

2. Iran, Tehran, Kharazmi University, PhD Student.

Corresponding Author, Email: amalekshah72@yahoo.com

Abstract

One of the economic and political tools to impose demands and provide the interests of a country to another country is to use the sanctions tool. The country of influence, along with other countries, imposes its goals on other countries by imposing restriction. An example is a situation that has been created by boycotting some countries in the Iranian oil industry. One of the implications of these sanctions is its impact on international oil contracts and the forced withdrawal of foreign international oil companies from Iran. Iran's oil has always been regarded as one of the important energy producing poles. In particular, oil production in Iran began on the initiative of foreign investment. The main question in this article is what sanctions affect oil contracts? What will be the fate of the agreement after the boycott? This article examines the sanctions in terms of force majeure and the changing circumstances of the situation and, in the end, solutions have been proposed to overcome this challenge.

Keywords: *Oil contracts, sanctions, international oil companies, major trade, fundamental changes to the situation.*





راهنمای نگارش مقالات در مجله علمی - ترویجی مهندسی گاز ایران

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

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

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

نویسنده مسئول ایمیل: info@irangi.org

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

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

۱. مقدمه:

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

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

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

۲. شرح نوشتار:

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

۲.۱. عهده‌دار مکاتبات می‌تواند 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 بخش مقدمه تا مراجع به صورت دو ستونی و

۳. صفحه‌آرایی:

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

۴. بخش‌های هر مقاله به ترتیب زیر است:

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



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

۸. نتیجه گیری

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

۹. تشکر و قدردانی: در صورت نیاز

۱۰. مراجع:

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

ارسال مقالات:

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

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

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

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 قسمت های ۱ تا ۵ به انگلیسی در انتهای مقاله نیز ضروری می باشد.

۶. متن اصلی:

مقدمه آغاز و با نتیجه گیری پایان می یابد. کمینه و بیشینه صفحات مقاله به ترتیب ۴ تا ۱۶ صفحه است. چاپ بیشتر از ۱۶ صفحه مشمول هزینه چاپ می شود. به رعایت املاء و دستور نگارش زبان فارسی توجه شود.

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

جدول ها و شکل ها و معادلات به ترتیب، شماره گذاری و عناوین جدول ها در بالای هر جدول و عناوین شکل ها در زیر هر شکل آورده شود. جدول و شماره آن و همچنین شکل و شماره آن با قلم بی- نازنین 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 شکل ها مشمول هزینه چاپ می شود. صفحات شماره گذاری شوند.

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