بررسی روش‌های بازیابی و مدیریت گازهای دورریز واحدهای صنعتی به منظور بازگشت به چرخه انرژی

مجید سعیدی*+
تهران، دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکده شیمی، گروه شیمی کاربردی

مریم صفری پور
تهران، دانشگاه تهران، پردیس البرز، دانشکده شیمی، گروه شیمی کاربردی

چکیده: با توجه به محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی و نیاز روزافزون به انرژی در سطح جهانی و همچنین آلودگی‌های زیست‌محیطی، مدیریت بهینه منابع انرژی نقش مهمی در سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های کلان کشورها ایفا می‌کند. با این وجود حجم قابل توجهی از گازهای قابل بازیافت توسط صنایع بالادستی نفت، پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌ها در طی فرایند پالایش و از طریق سیستم آزادسازی گاز دورریز، وارد محیط‌زیست می‌شود. گازهای ارسالی به مشعل از ارزش سوختی بسیار بالایی برخوردار هستند. در عین حال سوزاندن این گازها توسط مشعل و انتشار آن‌ها در محیط‌زیست، آثار زیان بار زیست‌محیطی به همراه دارد که در بسیاری از موارد جبران‌پذیر نمی‌باشد و منجر به تحمیل هزینه‌های اقتصادی فراوان به کشورها می‌گردد. بررسی‌های انجام شده نشان داد ایران به عنوان دومین دارنده ذخایر گاز طبیعی جهان، در سال ۲۰۱۷ میلادی حدود ۹/۵ تریلیون فوت مکعب گاز طبیعی تولید کرده است که از این مقدار حدود ۰/۶ تریلیون فوت مکعب از آن (معادل با ۶/۳ درصد از گاز تولیدی) در مشعل‌ها سوزانده شده است. در این مطالعه به بررسی راهکارها و روش‌های گوناگون جهت کاهش یا بازیابی گازهای ارسالی به سیستم آزادسازی گاز دورریز به منظور بازگشت به چرخه انرژی پرداخته شده است. انتخاب بهترین فناوری به منظور پالایش گاز دوریز واحدهای صنعتی، یکی از مهم‌ترین گام‌ها در طراحی سیستم بازیافت گاز دورریز می‌باشد. متداول‌ترین روش به منظور استفاده از گاز دورریز در ایران، تولید گاز طبیعی مایع شده (LPG) است. همچنین به منظور تثبیت فشار و افزایش بهره‌برداری از مخازن نفتی، می‌توان از تکنولوژی تزریق مجدد گاز دورریز به مخازن نفت استفاده نمود. از سوی دیگر استفاده از گاز دوریز واحدهای صنعتی به منظور تولید برق در نیروگاه‌ها و همچنین استفاده از تکنولوژی تبدیل گاز به مایع (GTL) از دیگر راهکارهای پیشنهادی به منظور مدیریت گازهای دورریز واحدهای صنعتی است که هنوز در مرحله‌های ابتدایی طراحی و اجرا می‌باشند.

واژگان کلیدی: مدیریت منابع انرژی؛ بازیابی گاز فلر؛ صنایع بالادستی نفت؛ گازهای گلخانه‌ای

KEYWORDS: *Energy resources management; Flare gas recovery, Upstream oil industry; Greenhouse gases*

* عهده‌دار مکاتبات
+E-mail: majid.saidi@ut.ac.ir

مقدمه

انتشار روز افزون گازهای آلاینده در اتمسفر از طریق سوختن و مشتعل شدن، پیامدهای زیست‌محیطی فراوانی به همراه خواهد داشت و با توجه به اثرگذاری عوامل انسانی بر روی ترکیب شیمیایی اتمسفر و اقلیم، نگرانی جوامع بشری از جمله حامیان محیط‌زیست را برانگیخته است. در فرایند استخراج نفت از میادین نفتی، همواره مقداری گاز طبیعی به همراه نفت خام خارج می‌شود. این گاز به عنوان فراورده جانبی نفت محسوب شده و گاز همراه نفت[۱] نامیده می‌شود. این گاز، اغلب در میادین نفتی به دلیل‌های بسیاری از جمله عدم وجود سیستم جمع‌آوری گاز، اقتصادی نبودن فرایند جمع‌آوری گازهای همراه به دلیل پراکندگی و دور دست بودن میادین، کم بودن مقدار گاز تولیدی، کیفیت گاز تولیدی و عدم امکان مصرف گاز توسط مشترکین، سوزانده یا فلر[۲] می‌شود [۱].

به گاز فلر شده در حوزه‌های بالا دستی نفت و گاز، پالایشگاه‌های نفتی و گازی و همچنین صنایع پتروشیمی، گاز مشعل[۳] گفته می‌شود. مشعل‌ها در یک بازه زمانی کوتاه، حجم عظیمی از گاز را در هوا منتشر می‌کنند. میزان و نوع گازهای انتشار یافته از فلر به محیط‌زیست، تابع بازده احتراق، زمان فرایند احتراق، نوع گازهای ارسالی به مشعل و غیره بستگی دارد. بازده احتراق پایین در مشعل، نشان از وجود مقدارهای بالایی از ترکیب‌های آلی فرار در گاز ارسالی به مشعل است [۲].

بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته، در حدود ۲۵۰ ماده سمی شناخته شده، از طریق جریان مشعل به هوا تخلیه می‌شود که ترکیب آن بسته به منابع گازی که وارد سیستم مشعل می‌شود، متفاوت است. از جمله آن‌ها می‌توان به انتشار آلاینده‌های زیان‌آور، مانند کربن دی‌اکسید، متان، جیوه، بنزن، تولوئن و ترکیب‌های حاوی سولفور شامل سولفور دی‌اکسید و ترکیب‌های نیتروژن‌دار (NO_x) اشاره کرد. همچنین بخش قابل توجهی از گازهای ارسالی به مشعل، شامل ترکیب‌های هیدروکربنی با ارزش، از جمله متان، اتان، پروپان و غیره است که سوزاندن این ترکیب‌ها صرف نظر از اثرهای مخرب زیست‌محیطی، از نقطه نظر اقتصادی نیز زیان‌آور است و سبب اتلاف منابع انرژی می‌گردد. بر اساس گزارش‌های منتشر شده از سوی سازمان محیط‌زیست، تاکنون بیش از ۴۰۰ میلیون تن گاز CO_2 از طریق سوختن و مشتعل شدن گاز طبیعی به اتمسفر وارد شده است [۴،۳]. در جدول ۱ درصد ترکیب گاز دوریز یک واحد صنعتی[۴] گزارش شده است [۵]. گرمایش جهانی، به عنوان یکی از پیامدهای تجمع گاز کربن دی‌اکسید و دیگر گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در جو است. افزایش تقاضا برای تولید نفت و گاز در جهان سبب شده است که بخش بزرگی از افزایش نرخ انتشار گازهای گلخانه‌ای به این صنعت اختصاص یابد. براساس آمار بانک جهانی در سال ۲۰۱۶ میلادی، سالانه حدود ۱۵۴ میلیارد متر مکعب گاز در سراسر جهان سوزانده می‌شود که این میزان معادل ۵ درصد تولید گاز طبیعی دنیا می‌باشد. انرژی حاصل از سوزاندن این میزان گاز، معادل ۲/۴ میلیون بشکه نفت خام در روز است [۸-۶].

ایران به عنوان دومین دارنده ذخایر گاز طبیعی جهان، در سال ۲۰۱۷ میلادی حدود ۹/۵ تریلیون فوت مکعب گاز طبیعی تولید کرده است که از این مقدار حدود ۰/۶ تریلیون فوت مکعب از آن (معادل با ۶/۳ درصد از گاز تولیدی) در مشعل‌ها سوزانده شده است. لازم به ذکر است که حجم گاز فلر شده در جهان در سال ۲۰۱۷ میلادی حدود ۱۴۰/۶ بیلیون متر مکعب برآورد شده است و از این میزان سهم ایران در حدود ۱۷/۷ بیلیون متر مکعب بوده است [۱۰،۹].

بر اساس آمار بانک جهانی در سال ۲۰۱۸ میلادی، سه کشور روسیه، عراق و ایران به ترتیب بیش‌ترین حجم تولید گازهای مشعل را در جهان به خود اختصاص داده‌اند. در جدول ۲ حجم گازهای فلر شده در کشورهای گوناگون، از سال ۲۰۱۴ میلادی تا پایان سال ۲۰۱۸ میلادی ارایه شده است [۹]. ملاحظه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی انجام شده نشان می‌دهد استفاده از سیستم‌های بازیابی گازهای ارسالی به مشعل (FGRS)[۵] نقش بسزایی در به کمینه رساندن مقدار گاز مشعل دارد [۱۱].

فلرینگ گاز در ایران

پیشینه تاریخی

نفت به عنوان مهم‌ترین منبع انرژی، در جهان به شمار می‌رود و سهم عمده‌ای از تقاضای انرژی دنیا را تامین کرده است. اکتشاف و تولید نفت از حدود ۱۵۰ سال پیش با احداث بیش از دو میلیون چاه در سراسر جهان آغاز شده است [۱۲]. اولین عملیات اکتشاف و حفاری چاه نفت در ایران، بیش از یک قرن پیش، توسط *ویلیام ناکس دارسی*[۶]

(۱) Associated Petroleum Gas
(۲) Flaring
(۳) Flared gas
(۴) Gas flaring system
(۵) Flare gas recovery systems
(۶) William Knox D'Arcy

جدول ۱ - درصد ترکیب گاز دوریز یک واحد صنعتی [۵].

اجزا گاز فلرشده	ترکیب‌های گاز دوریز واحدهای صنعتی	بر حسب درصد (٪)		
		کمینه	بیشینه	میانگین
متان	CH_4	۷/۱۷	۸۲	۴۳/۶
اتان	C_2H_6	۰/۵۵	۱۳/۱	۳/۶۶
پروپان	C_3H_8	۴/۲	۶۰/۴	۲۰/۳
n-بوتان	C_4H_{10}	۰/۱۹۹	۲۸/۳	۲/۷۸
ایزو بوتان	C_4H_{10}	۱/۳۳	۵۷/۶	۱۴/۳
n-پنتان	C_5H_{12}	۰/۰۰۸	۳/۳۹	۰/۲۶۶
ایزو پنتان	C_5H_{12}	۰/۰۹۶	۴/۷۱	۰/۵۳۰
نئو پنتان	C_5H_{12}	۰/۰۰	۰/۳۴۲	۰/۰۱۷
n-هگزان	C_6H_{14}	۰/۰۲۶	۳/۵۳	۰/۶۳۵
اتیلن	C_2H_4	۰/۰۸۱	۳/۲۰	۱/۰۵
پروپیلن	C_3H_6	۰/۰۰	۴۲/۵	۲/۷۳
۱- بوتان	C_4H_{10}	۰/۰۰	۱۴/۷	۰/۶۹۶
کربن مونوکسید	CO	۰/۰۰	۰/۹۳۲	۰/۱۸۶
کربن دی‌اکسید	CO_2	۰/۰۲۳	۲/۸۵	۰/۷۱۳
هیدروژن سولفید	H_2S	۰/۰۰	۳/۸۰	۰/۲۶۵
هیدروژن	H_2	۰/۰۰	۳۷/۶	۵/۲۴
اکسیژن	O_2	۰/۰۱۹	۵/۴۳	۰/۳۵۷
نیتروژن	N_2	۰/۰۷۳	۳۲/۲	۱/۳۰
آب	H_2O	۰/۰۰	۱۴/۷	۱/۱۴

آغاز شد. *دارسی* و *همکاران* به فعالیت‌های اکتشافی بسیاری در غرب و جنوب غربی کشور پرداختند که در سال‌های ابتدایی اکتشاف، هیچ یک از یافته‌های آن‌ها از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نبود. سرانجام در سال ۱۹۰۵ میلادی، اولین میدان نفتی در شهر مسجد سلیمان در جنوب غربی ایران کشف شد و به این ترتیب، صنعت نفت در منطقه خاورمیانه متولد گردید. در ابتدا، حفاری و تولید نفت در ایران در اختیار کنسرسیوم بین‌المللی نفت بود تا این که شرکت ملی نفت ایران[۱] (NIOC) در سال ۱۹۵۱ میلادی تأسیس گشت و از آن زمان به بعد هدایت و تصمیم‌گیری در زمینه اکتشاف، حفاری، تولید، پژوهش و توسعه، پالایش، توزیع و صادرات نفت، گاز و فراورده‌های نفتی را برعهده گرفت. شرکت ملی نفت ایران یکی از بزرگ‌ترین شرکت‌های نفتی جهان است که در دامنه گسترده‌ای از منابع نفت و گاز کشور فعالیت دارد. شرکت نفت انگلیس[۲] (BP) در شصت و ششمین گزارش سالانه خود، رقم ذخایر اثبات شده قابل برداشت نفت ایران را در سال ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ میلادی، یکسان و برابر با ۱۵۸/۴ میلیارد بشکه عنوان کرده است. علاوه‌بر این، ایران

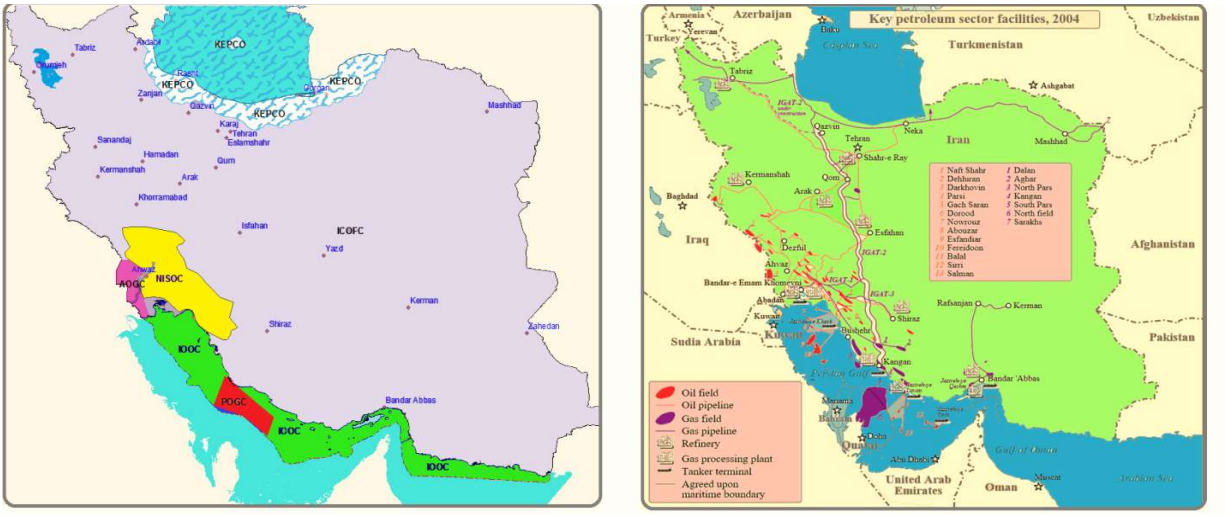
جدول ۲ - حجم گازهای فلر شده در کشورهای گوناگون از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ میلادی (ارقام: میلیارد متر مکعب در سال) [۹].

ردیف	کشور	۲۰۱۴	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۱۸
۱	روسیه	۱۸/۳	۱۹/۶	۲۲/۴	۱۹/۹	۲۱/۳
۲	عراق	۱۴/۰	۱۶/۲	۱۷/۷	۱۷/۸	۱۷/۸
۳	ایران	۱۲/۲	۱۲/۱	۱۶/۴	۱۷/۷	۱۷/۳
۴	ایالات متحده	۱۱/۳	۱۱/۹	۸/۹	۹/۵	۱۴/۱
۵	الجزایر	۸/۷	۹/۱	۹/۱	۸/۸	۹/۰
۶	نیجریه	۸/۴	۷/۷	۷/۳	۷/۶	۷/۴
۷	ونزوئلا	۱۰/۰	۹/۳	۹/۳	۷/۰	۸/۲
۸	لیبی	۲/۹	۲/۶	۲/۴	۳/۹	۴/۷
۹	آنگولا	۳/۵	۴/۲	۴/۵	۳/۸	۲/۸
۱۰	مکزیک	۴/۹	۵/۰	۴/۸	۳/۸	۳/۹
۱۱	مالزی	۳/۴	۳/۷	۳/۲	۲/۸	۲/۲
۱۲	عمان	۲/۶	۲/۴	۲/۸	۲/۶	۲/۵
۱۳	قزاقستان	۳/۹	۳/۷	۲/۷	۲/۴	۲/۰
۱۴	مصر	۲/۸	۲/۸	۲/۸	۲/۳	۲/۳
۱۵	اندونزی	۳/۱	۲/۹	۲/۸	۲/۳	۲/۱
۱۶	عربستان سعودی	۱/۹	۲/۲	۲/۴	۲/۳	۲/۳
۱۷	ترکمنستان	۲/۰	۱/۸	۱/۸	۱/۷	۱/۵
۱۸	چین	۲/۱	۲/۱	۲/۰	۱/۶	۱/۸
۱۹	گابون	۱/۵	۱/۶	۱/۶	۱/۵	۱/۴
۲۰	هند	۱/۹	۲/۲	۲/۱	۱/۵	۱/۳
۲۱	بریتانیا	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱/۴	۱/۲
۲۲	کانادا	۲/۱	۱/۸	۱/۳	۱/۳	۱/۳
۲۳	کویت	۱/۴	۰/۹	۱/۱	۰/۸	۰/۹
۲۴	کنگو	۱/۳	۱/۲	۱/۱	۱/۱	۱/۶
۲۵	برزیل	۱/۵	۱/۳	۱/۴	۱/۱	۱/۰
۲۶	اکوادور	۱/۰	۱/۱	۱/۲	۱/۱	۰/۹
۲۷	کامرون	۰/۹	۱/۱	۱/۱	۱/۰	۱/۱
۲۸	قطر	۱/۳	۱/۱	۱/۱	۱/۰	۱/۰
۲۹	استرالیا	۱/۱	۱/۱	۰/۷	۰/۷	۰/۹
۳۰	امارات	۰/۹	۱/۰	۰/۸	۱/۰	۱/۲
۳۱	سایر دنیا	۱۲/۸	۱۱/۱	۱۰/۰	۸/۴	۱۸/۸
۳۲	مجموع جهان	۱۴۳/۹	۱۴۵/۶	۱۴۷/۶	۱۴۰/۶	۱۴۵/۰

۹/۳ درصد کل ذخایر نفتی اثبات شده جهان را در اختیار دارد و همچنین چهارمین مالک بزرگ ذخایر نفتی جهان است. بر این اساس حجم ذخایر گازی ایران در سال ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ میلادی، معادل ۳۳/۵ تریلیون مترمکعب برآورد شده است که این میزان

(۱) National Iranian Oil Company

(۲) British Petroleum



الف ب

شکل ۱ - (الف): موقعیت مکانی میادین گوناگون نفت و گاز ایران، (ب) موقعیت مکانی چهار شرکت بزرگ نفتی ایران [۱۳, ۱۴].

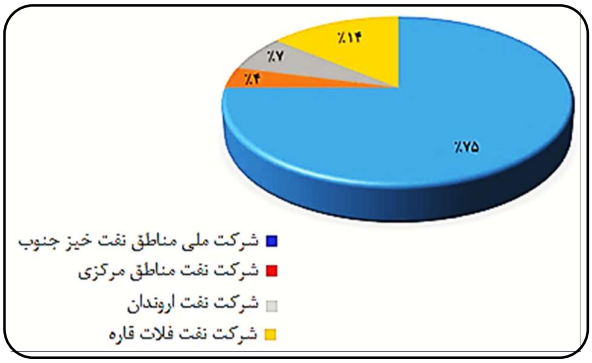
در حدود ۱۸ درصد کل ذخایر گازی جهان است و همچنان به عنوان بزرگ‌ترین دارنده ذخایر گازی جهان به شمار می‌رود. شرکت ملی نفت ایران، شامل هفده شرکت تولیدی، هشت شرکت خدمات فنی، هفت مدیریت، شش بخش (واحدهای اداری) و پنج واحد سازمانی می‌شود [۱۶،۱۵].

به طور کلی، داده‌های زیادی در مورد میزان فلرینگ گاز جهانی پیش از سال ۱۹۵۰ میلادی در دسترس نیست. هم‌چنین اطلاعات دقیقی از میزان فلرینگ گاز در ایران در دوره پیش از ملی شدن صنعت نفت (۱۹۵۱)، از میادین نفتی موجود نمی‌باشد. علت این امر تولید نفت توسط بیش‌تر کنسرسیوم‌های نفتی بین‌المللی و بدون مدیریت مرکزی ملی بوده است. با این حال داده‌های فلرینگ گاز در ایران، از سال ۱۹۸۰ میلادی براساس گزارش‌های اداره اطلاعات انرژی آمریکا[۱](EIA) و از سال ۱۹۹۵ میلادی بر اساس آمار سازمان همکاری‌های کاهش دوریز واحدهای صنعتی[۲](GGFR)، در دسترس هستند. لازم به ذکر است داده‌های گزارش شده توسط اداره اطلاعات انرژی آمریکا، ممکن است تخمینی و مستقل از اطلاعات رسمی گزارش شده توسط ایران باشد [۱۷]. همچنین می‌توان با استفاده از میزان نفت تولیدی، مقدار گاز فلر شده در هر سال را تخمین زد. در بانک داده‌های مرکز تحلیل اطلاعات کربن دی‌اکسید[۳](CDIAC) نیز مجموعه‌ای از داده‌های آماری برای میزان گاز CO_2 آزادشده به‌علت گازهای گلخانه‌ای در ایران (۲۰۰۸-۱۹۹۵ میلادی) گزارش شده است [۱۸].

منابع فلرینگ گاز در ایران

بر اساس آخرین آمار منتشر شده از سوی اوپک[۴](OPEC)، ایران به عنوان سومین دارنده ذخایر نفت خام در گروه اوپک است. همچنین بر اساس آمار شرکت BP، ایران پس از ونزوئلا، عربستان سعودی و کانادا، چهارمین دارنده ذخایر نفت جهان می‌باشد [۱۹]. با عنایت به آمار رسمی مندرج در تراز نامه هیدروکربوری ایران مربوط به سال ۲۰۱۵ میلادی، که توسط موسسه مطالعه‌های بین‌المللی انرژی وزارت نفت[۵](IIES) منتشر شده است، ۷۱ میدان فعال نفتی در ایران وجود دارد که ۵۴ میدان در خشکی و ۱۷ میدان در دریا واقع شده‌اند. لازم به ذکر است که تعداد میادین فعال گازی در سال ۲۰۱۵ میلادی نیز ۲۳ میدان گزارش شده است [۲۱،۲۰]. موقعیت مکانی میادین گوناگون نفت و گاز در ایران از جمله چهار شرکت بزرگ نفتی (شرکت ملی نفت ایران[۶](NISOC)، شرکت نفتمیادین مرکزی ایران[۷](ICOFC)، شرکت نفت خلیج فارس[۸](IOOC)، شرکت نفت و گاز اروندان[۹](AOGC))، در شکل ۱ نشان داده شده است.

(۱) Energy Information Administration
(۲) Global Gas Flare Reduction
(۳) Carbon Dioxide Information Analysis Center
(۴) Organization of the Petroleum Exporting Countries
(۵) Institute for International Energy studies
(۶) National Iranian South Oil Company
(۷) Iranian Central Oil Fields Company
(۸) Iranian Offshore Oil Company
(۹) Arvandan Oil and Gas Company



شکل ۲ - سهم چهار شرکت بزرگ نفتی ایران در تولید نفت و گاز طبیعی در سال ۲۰۱۵ میلادی [۲۲].

شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب در سال ۲۰۱۱ میلادی، با تولید روزانه حدود ۳ میلیون بشکه نفت خام و ۱۱۰ میلیون متر مکعب گاز، حدود ۷۶ درصد از کل تولید نفت خام کشور را بر عهده داشته است، لیکن در سال‌های اخیر به علت محدودیت‌های صادرات نفت با کاهش تکلیفی تولید روبه‌رو بوده است. با این حال شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب در سال ۲۰۱۵ میلادی حدود ۷۵ درصد از کل نفت خام ایران را تولید کرده است. همچنین سهم تولید نفت در شرکت مناطق مرکزی، شرکت نفت اروندان و شرکت نفت فلات قاره (تولید نفت خام از مناطق دریایی) از کل تولید نفت خام کشور در سال ۲۰۱۵ میلادی، به ترتیب در حدود ۴، ۶/۹ و ۱۴/۱ درصد بوده است که در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۲].

فلرینگ گاز نه تنها در تولید نفت، بلکه در تولید گاز طبیعی، در پالایشگاه‌های نفت و گاز و همچنین در کارخانه‌های پتروشیمی نیز رایج است. علاوه بر چهار شرکت بزرگ نفتی ایران، منابع بزرگ انتشار گازهای فلر، شامل ۹ پالایشگاه نفت، ۱۸ پالایشگاه گاز و ۳۹ کارخانه پتروشیمی است که عملیات فلرینگ گاز در آن‌ها جریان دارد [۲۲].

بر اساس گزارش ارایه شده از سوی بانک جهانی، میزان گاز فلر شده در ایران در سال ۲۰۱۷ میلادی، حدود ۱۷/۷ میلیارد متر مکعب بوده است (شکل ۳) و ایران در جایگاه سوم بیش‌ترین حجم تولید گاز فلر شده در جهان، پس از روسیه و عراق قرار دارد. در حدود دو سوم از حجم فلرینگ کشورهای حوزه خلیج فارس نیز مربوط به ایران است؛ در حالی که در یکی دو دهه اخیر، عربستان سعودی به عنوان بزرگ‌ترین عامل فلرینگ منطقه شناخته می‌شد. این کشور برای جلوگیری از هدر رفت گازهای فلر، با راه اندازی شبکه خط لوله، این گازها را در بازار داخلی مورد استفاده قرار داده است [۲۳].

با وجود آن که بخش عمده فلرینگ گاز در ایران طی فرایند تولید نفت است، اهمیت و سهم سایر منابع، مانند تولید گاز طبیعی و پالایشگاه‌ها در این زمینه نباید نادیده گرفته شود. به عنوان نمونه، پالایشگاه گاز فرآشبند واقع در جنب میدان گازی دالان و در حاشیه جنوبی استان فارس، سالانه ۴۰ میلیون متر مکعب و پالایشگاه نفت تبریز در شمال غربی ایران، سالانه ۲۲/۵ میلیون متر مکعب گاز، فلر می‌کنند [۲۵،۲۴]. این مقدارها در مقایسه با رقم ۱۷/۶ میلیارد متر مکعب گاز فلر شده در سال ۲۰۱۲ میلادی در ایران، به ترتیب سهمی برابر با ۰/۱۳٪ و ۰/۲۲٪ دارد [۲۲].

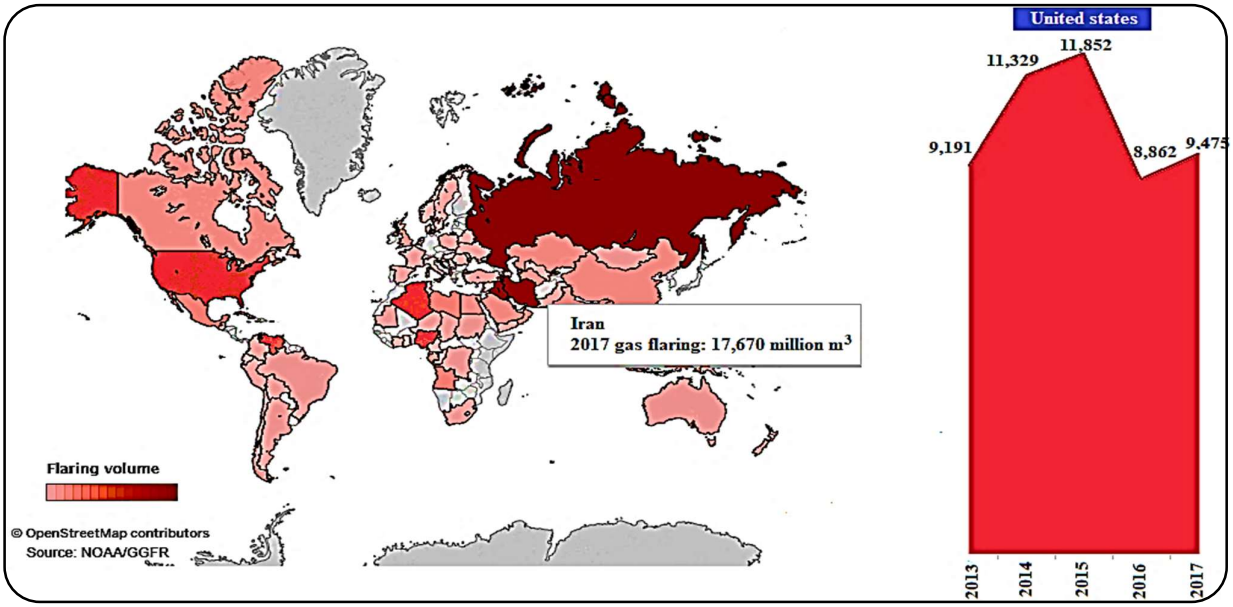
پالایشگاه‌های گاز پارس جنوبی در منطقه عسلویه (در ساحل شمالی خلیج فارس در جنوب ایران) به عنوان منبع دیگری برای فلرینگ گاز در ایران به شمار می‌آیند. با این وجود در مورد میزان واقعی انتشار گاز دوریز واحدهای صنعتی در این منابع، توافقی وجود ندارد. در سال ۲۰۱۳ میلادی، *داوودی* و *همکاران*[1] میزان کل فلرینگ گاز در ۸ فاز پالایشگاه‌های پارس جنوبی را حدود ۱/۴ میلیون متر مکعب در روز گزارش کرده‌اند [۲۶]؛ در شرایطی که بر اساس اطلاعات به دست آمده از شرکت ملی نفت ایران، متوسط سالانه حجم گاز فلر شده در حدود ۲/۸۳ میلیون متر مکعب برای ۱۰ فاز فعال در پالایشگاه گاز پارس جنوبی است که به طور تقریبی برابر با ۴/۶٪ از کل گاز فلر شده توسط شرکت ملی نفت ایران است. در گزارشی دیگر مربوط به ماه اکتبر سال ۲۰۱۳ میلادی، میزان گاز طبیعی فلر شده در منطقه نفت و گاز پارس جنوبی حدود ۳/۵ میلیون متر مکعب در روز تخمین زده شده است [۲۷]. با توجه به مطالعه‌های انجام گرفته، فلرینگ گاز به میزان ۳/۵–۳ میلیون متر مکعب واقع گرایانه‌تر است و ذکر مقدارهای کم‌تر در برخی گزارش‌های منتشر شده، ممکن است به دلیل خاموش شدن یا سایر ملاحظه‌های فنی باشد و میزان واقعی فلرینگ گاز را به خوبی نشان ندهد.

بر اساس اعلام مسئولان شرکت نفت و گاز پارس در ترازنامه هیدروکربوری ایران در سال ۲۰۱۵ میلادی، اقداماتی در جهت جلوگیری از گازسوزی در مجتمع‌های پارس جنوبی در حال انجام و اجرا است. در این مورد بیش از ۵۰ مشعل در پالایشگاه‌های گاز و مجتمع‌های پتروشیمی در منطقه ویژه اقتصادی پارس، روشن هستند. از سوی دیگر در صورت راه اندازی فازهای جدید پالایشگاهی در عسلویه، پیش‌بینی می‌شود با تکمیل کامل فازهای در دست اجرا، تعداد کل مشعل‌های گازی به بیش از ۷۰ مشعل افزایش یابد. هرچند در سال‌های اخیر متخصصان داخلی با بازنگری

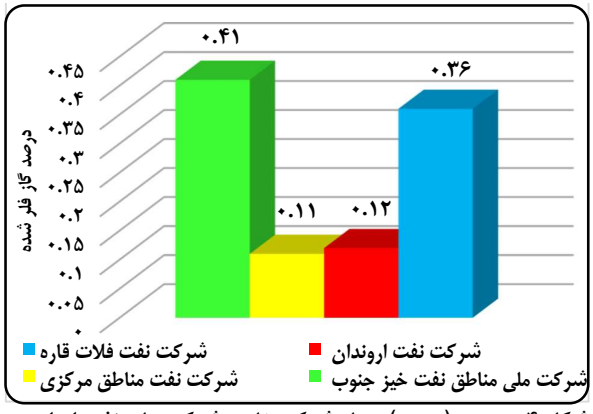
(۱) Davoudi

جدول ۳ - میزان تولید نفت، حجم گاز فلر شده و میزان انتشار گاز در چهار شرکت تولید کننده نفت در ایران در سال ۲۰۱۶ میلادی [۲۲].

شرکت	حجم گاز فلر شده (میلیون متر مکعب در روز)	حجم نفت تولیدی (۱۰۰۰ بشکه در روز)	فاکتور انتشار (متر مکعب بر بشکه)
شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب	۱۷/۴۴	۲۸۷۱/۵۵	۶/۰۷
شرکت نفت مناطق مرکزی	۴/۹۶	۱۸۴/۲۷	۲۶/۹۲
شرکت نفت فلات قاره	۱۵/۴۶	۴۰۷/۶	۳۷/۹۳
شرکت نفت اروندان	۵/۰۳	۲۸۰/۷۷	۱۷/۹۱



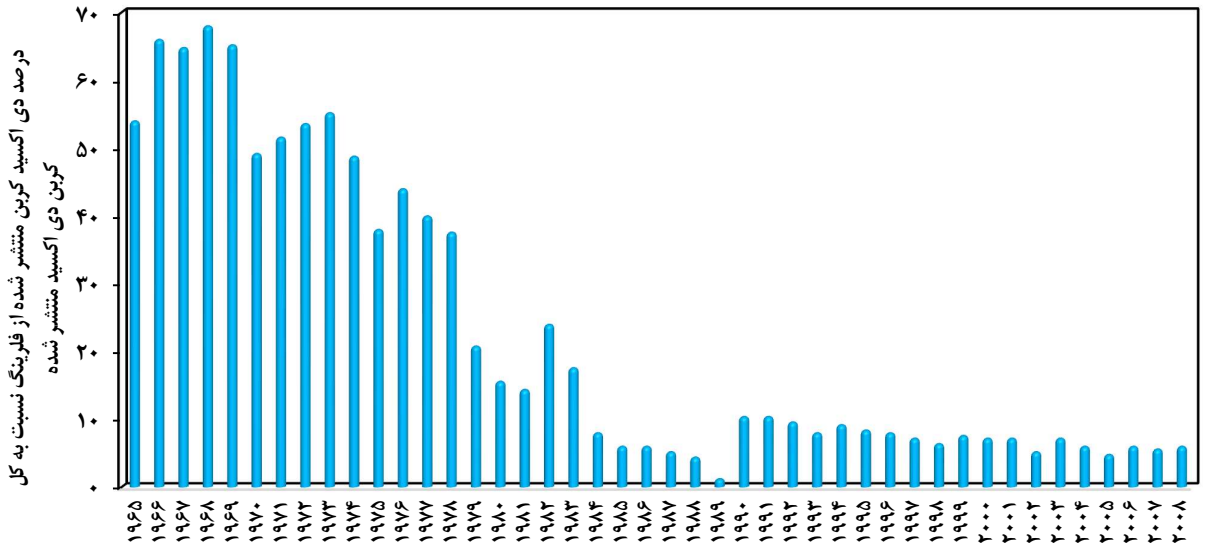
شکل ۳ - گستره تولید گاز دوریز واحدهای صنعتی در ایران و جهان [۱۷].



شکل ۴ - سهم (درصد) چهار شرکت تابعه شرکت ملی نفت ایران در میزان گاز فلر شده در سال ۲۰۱۶ میلادی [۲۲]

و بهینه کردن شرایط طراحی، میزان مجاز فلرینگ را تا ۴۵ درصد کاهش داده‌اند [۲۸]. همچنین با توجه به اطلاعات موجود، نتیجه مقایسه فلرینگ گاز در چهار منطقه عمده تولید نفت در سال ۲۰۱۶ میلادی جالب توجه خواهد بود (شکل ۴). میزان فلرینگ گاز در این مناطق در سال ۲۰۱۶ میلادی در جدول ۳ نشان داده شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که شرکت نفت فلات قاره ایران دارای بالاترین ضریب انتشار (۳۷/۹۳ متر مکعب گاز در هر بشکه نفت) است؛ در حالی که شرکت شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، کم‌ترین میزان انتشار (۶/۰۷ متر مکعب گاز در هر بشکه نفت) را به خود اختصاص داده است [۲۲].

صنایع وابسته به نفت و پالایشگاه‌های سراسر جهان، روزانه حجم بالایی از کربن دی‌اکسید را از طریق مشعل به اتمسفر می‌فرستند که تاثیر به سزایی در گرم شدن هوای زمین دارد. کربن دی‌اکسید گازی بی رنگ و بی بو است که از نظر جرمی، اصلی‌ترین فراورده احتراق سوخت‌های فسیلی به شمار می‌رود. این گاز به همراه گازهای متان و نیترو اکساید در اتمسفر، به عنوان سپر حرارتی زمین عمل می‌کنند و با اثر گلخانه‌ای، مانع از سرد شدن زمین می‌شوند. این گاز در غلظت‌های بالا به عنوان آلاینده



شکل ۵ - درصد کربن دی‌اکسید نشر شده از فلرینگ گاز نسبت به کل کربن دی‌اکسید منتشر شده در اتمسفر [۱۸].

محسوب می‌شود [۲۹]. میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید حاصل از فلرینگ گاز در ایران، بر اساس داده‌های مرکز آنالیز اطلاعات کربن دی‌اکسید (CDIAC)[۱]، طی سال‌های ۲۰۰۸–۱۹۶۵ میلادی در شکل ۵ نشان داده شده است. بر این اساس، درصد انتشار گاز کربن دی‌اکسید به‌علت فلرینگ گاز، در مقایسه با میزان کل کربن دی‌اکسید منتشر شده در اتمسفر، طی سال‌های ۲۰۰۸–۱۹۶۵ میلادی، سیر نزولی داشته است و مقدار آن در سال ۱۹۸۹ میلادی به کم‌ترین مقدار رسیده است. همچنین میزان انتشار این گاز در فاصله سال‌های ۲۰۰۸–۱۹۹۰ میلادی به تقریب ثابت بوده است. آمار منتشر شده، برخلاف حقیقت امر یعنی افزایش میزان فلرینگ گاز در ایران در طی سال‌های گذشته است؛ علت این موضوع ممکن است به‌علت افزایش انتشار آلاینده کربن دی‌اکسید از سایر بخش‌ها، با نرخی بسیار بیش‌تر از نرخ افزایش فلرینگ گاز باشد [۱۸].

میزان فلرینگ گاز در ایران، طی سال‌های ۲۰۱۲–۱۹۸۰ میلادی، بر اساس داده‌های اداره اطلاعات انرژی آمریکا، در جدول ۴ و شکل ۶ نشان داده شده است. آمار منتشر شده نشان می‌دهد که در بازه زمانی ۳۲ ساله، ضریب انتشار گاز در ایران نوسان‌های بزرگی را تجربه کرده است. در اوایل دهه ۱۹۸۰، هم‌زمان با انقلاب مردمی ایران و کاهش ۵۰ درصدی تولید نفت، ضریب انتشار در سال ۱۹۸۲ میلادی برابر با ۱۷/۴۵٪ گزارش شده است. با افزایش میزان تولید نفت به بیش از ۳ میلیون بشکه در روز در سال ۱۹۹۰ میلادی، ضریب انتشار گاز به رقم بسیار پایین ۱/۲۲ درصد رسید و از سال ۱۹۹۰ میلادی تا سال ۲۰۰۵ میلادی، مقدار آن تقریبا ثابت و به طور میانگین در حدود ۷/۹ درصد باقی ماند. با این حال از سال ۲۰۰۶ میلادی به بعد، ضریب انتشار روند صعودی داشته است که ممکن است به‌علت اختلال در روند تولید، به دلیل تحریم‌های بین‌المللی ایران از سال ۲۰۱۲ میلادی باشد [۱۷].

با کاهش تولید نفت به علت تحریم‌های بین‌المللی، شرکت ملی نفت ایران استخراج نفت از میدان‌های مشترک نفتی خود را که به طور عمده میادین دریایی هستند، افزایش داد. بنابراین برنامه‌های محدودی برای جمع‌آوری گاز دوریز واحدهای صنعتی صورت پذیرفت. ضریب انتشار بالای فلرینگ گاز شرکت نفت خلیج فارس در میان سایر شرکت‌های بزرگ ایرانی، گواه بر این امر است که با وجود کاهش میزان تولید نفت، حجم گاز دوریز واحدهای صنعتی کاهش نیافته است. این امر نشان می‌دهد که عدم قطعیت زیادی در گزارش‌های مرتبط با داده‌های فلرینگ گاز وجود دارد.

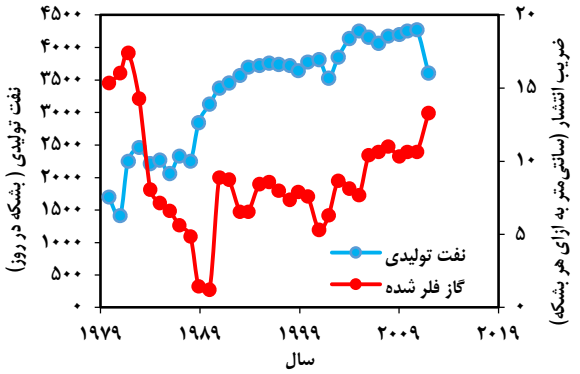
عرضه و تقاضای گاز طبیعی در ایران

براساس گزارش سالانه اوپک در سال ۲۰۱۷ میلادی، ایران با داشتن ۳۳/۵ تریلیون متر مکعب گاز، پس از روسیه (۴۷/۸۰ تریلیون متر مکعب) دومین دارنده بزرگ ذخایر گازی جهان است و بیش از ۴۰ درصد ذخایر گازی ایران در میدان گازی پارس جنوبی واقع است.

(۱) Carbon Dioxide Information Analysis Center

جدول ۴ - میزان تولید نفت، حجم گاز فلر شده و ضریب انتشار گاز در ایران طی سال‌های ۲۰۱۲-۱۹۸۰ میلادی بر اساس داده‌های به دست آمده از اداره اطلاعات انرژی آمریکا در سال ۲۰۱۵ میلادی [۱۷].

سال	۱۹۸۰	۱۹۸۱	۱۹۸۲	۱۹۸۳	۱۹۸۴	۱۹۸۵	۱۹۸۶	۱۹۸۷	۱۹۸۸	۱۹۸۹	۱۹۹۰
حجم نفت تولیدی (۱۰۰۰ بشکه در روز)	۱۶۸۳	۱۴۰۲	۲۲۳۶	۲۴۶۰	۲۱۹۶	۲۲۷۲	۲۰۴۴	۲۳۱۳	۲۲۵۳	۲۸۳۱	۳۱۱۳
گاز فلر شده (Bcm/y)	۹/۴۶	۸/۲۱	۱۴/۲۴	۱۲/۸۶	۶/۵۱	۵/۸۹	۴/۹۶	۴/۸۱	۳/۹۹	۱/۵۰	۱/۳۹
فاکتور انتشار (scm/bbl)	۱۵/۴۰	۱۶/۰۵	۱۷/۴۵	۱۴/۳۲	۸/۱۳	۷/۱۰	۶/۶۴	۵/۷۰	۴/۸۵	۱/۴۵	۱/۲۲
سال	۱۹۹۱	۱۹۹۲	۱۹۹۳	۱۹۹۴	۱۹۹۵	۱۹۹۶	۱۹۹۷	۱۹۹۸	۱۹۹۹	۲۰۰۰	۲۰۰۱
حجم نفت تولیدی (۱۰۰۰ بشکه در روز)	۳۳۵۸	۳۴۷۶	۳۵۹۱	۳۶۷۲	۳۷۰۹	۳۷۴۸	۳۷۲۸	۳۷۰۳	۳۶۲۱	۳۷۶۵	۳۸۰۰
گاز فلر شده (Bcm/y)	۱۰/۹۹	۱۱/۳۰	۸/۶۴	۸/۸۹	۱۱/۶۱	۱۱/۸۱	۱۰/۹۹	۱۰/۰۰	۱۰/۵۱	۱۰/۵۱	۷/۳۹
فاکتور انتشار (scm/bbl)	۸/۹۷	۸/۹۰	۶/۵۹	۶/۶۳	۸/۵۸	۸/۶۳	۸/۰۷	۷/۳۹	۷/۹۵	۷/۶۴	۵/۳۳
سال	۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲
حجم نفت تولیدی (۱۰۰۰ بشکه در روز)	۳۵۲۴	۳۸۳۳	۴۱۰۴	۴۲۳۹	۴۱۴۹	۴۰۳۹	۴۱۷۸	۴۱۷۸	۴۲۴۳	۴۲۶۵	۳۵۸۹
گاز فلر شده (Bcm/y)	۸/۲۱	۱۲/۰۹	۱۲/۲۰	۱۲/۰۱	۱۵/۸۳	۱۵/۶۹	۱۶/۸۲	۱۵/۸۹	۱۶/۵۹	۱۶/۶۵	۱۷/۵۶
فاکتور انتشار (scm/bbl)	۶/۳۸	۸/۶۴	۸/۱۵	۷/۷۶	۱۰/۴۵	۱۰/۶۴	۱۱/۰۳	۱۰/۴۲	۱۰/۷۱	۱۰/۷۰	۱۳/۴۰



شکل ۶ - میزان تولید نفت و ضریب انتشار گاز فلر شده در ایران طی سال‌های ۲۰۱۲-۱۹۸۰ میلادی بر اساس داده‌های به دست آمده از اداره اطلاعات انرژی آمریکا در سال ۲۰۱۵ میلادی [۱۷]

با توجه به این میزان ذخیره گازی و وجود میادین توسعه نیافته، یافتن میادین جدید دارای اولویت نیست [۳۰]. این در حالی است که شرکت BP طبق گزارش "مرور آماری انرژی جهان در سال ۲۰۱۷ میلادی" اعلام کرده است که ایران با در اختیار داشتن ۳۳/۵ تریلیون متر مکعب ذخایر گاز طبیعی اثبات شده، رتبه اول جهان را به خود اختصاص داده است. همچنین در این رتبه‌بندی، روسیه با داشتن ۳۲/۳ تریلیون متر مکعب در رتبه دوم قرار دارد [۱۵].

تحریم‌های ایالات متحده آمریکا و اتحادیه اروپا از سال ۲۰۱۱ میلادی، صادرات گاز ایران را که دارای بزرگ‌ترین ذخایر گازی جهان است، به نصف کاهش داد و پروژه‌های مرتبط با صادرات گاز را متوقف کرد. ایران یکی از سه عضو مجمع کشورهای صادر کننده گاز[۱] (GECF) است که فعالیت گسترده‌ای در زمینه پروژه‌های گاز طبیعی مایع[۲] (LNG) دارد.

طبق آخرین گزارش بانک جهانی، ایران در سال ۲۰۱۷ میلادی به میزان ۱۷/۷ میلیارد متر مکعب گاز، فلر کرده است [۹]. با توجه به این که تولید گاز طبیعی در مقایسه با تولید نفت، فلرینگ گاز قابل توجهی ندارد، این امر سبب به تأخیر انداختن اجرای برخی از پروژه‌های مرتبط با فلرینگ گاز در این حوزه شده است. در قانون جدید فلرینگ گاز توافق شده است بهای گاز دوریز واحدهای صنعتی، به یک سوم قیمت گاز پالایش شده طبیعی، که توسط شرکت ملی گاز ایران به صنایع تحویل داده می‌شود، خواهد رسید. با توجه به عرضه و تقاضای انرژی، آسیب‌های زیست‌محیطی به‌علت آلودگی هوا در ایران مورد ارزیابی قرار گرفت. هزینه آسیب به محیط‌زیست جهانی بر اثر فلرینگ گاز، بر اساس قیمت ۱۰ دلار در هر تن گاز کربن دی‌اکسید، حدود ۶۰۰ میلیون دلار در سال محاسبه شد. این رقم کمی کم‌تر از ۱٪ از تولید ناخالص داخلی سال ۲۰۰۲ میلادی است [۲۸].

بر طبق گزارش بانک جهانی در سال ۲۰۱۴ میلادی، میزان گاز فلر شده در ایران در حدود ۸ درصد از کل گازهای فلر شده در جهان است که این مقدار می‌تواند یک چهارم تقاضای خرید گاز توسط کره‌جنوبی (خریدار دوم گاز طبیعی مایع پس از ژاپن) را فراهم نماید. این گاز بر اساس محاسبه‌های بلومبرگ[۳] و با توجه به قیمت جهانی گاز، در بازارهای منطقه جنوب شرق آسیا، ۷/۳ میلیارد دلار ارزش

(۱) Gas Exporting Countries Forum

(۲) Liquefied Natural Gas

(۳) Bloomberg

دارد. اما این گاز به دلیل عدم وجود زیرساخت لازم برای فرآوری و همچنین انتقال، فلر می‌شود [۳۱].

بررسی منابع علمی موجود

بازیابی گاز مشعل جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، جلوگیری از هدر رفت ترکیب‌های هیدروکربنی و همچنین بازگشت آن‌ها به سیستم انرژی، چالشی اساسی برای صنایع گوناگون به شمار می‌رود. گاز مشعل می‌تواند به دو شیوه عمومی بازیابی شود. گروه اول که نیاز به عملیات ثانویه کم‌تری دارد، شامل انتقال گاز مشعل از طریق خط لوله، تزریق گاز مشعل به درون مخازن نفت و گاز جهت افزایش میزان برداشت، ذخیره گاز زیرزمینی و استفاده به عنوان سوخت ذخیره برای واحدهای پالایشگاهی و پتروشیمی است. گروه دوم، روش‌های بازیابی گاز مشعل از طریق فرایندهای ثانویه می‌باشد که روش‌های متفاوتی مانند اصلاح و بهینه‌سازی سیستم تبدیل گاز مشعل به مایع (GTL)[۱]، تولید برق با توربین‌های گازی و روش فشرده‌سازی را شامل می‌شود.

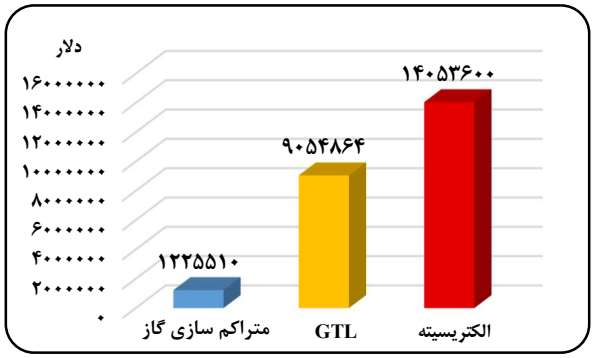
پالایشگاه‌های نفت، واحدهای صنعتی بزرگ انرژی هستند و سهم عمده‌ای در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند. از جمله روش‌های کنترل سطح گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر، جلوگیری از فلرینگ گاز است. با توجه به افزایش آگاهی نسبت به تاثیرهای زیست‌محیطی و همچنین تصویب پیمان "کیوتو[۲]" توسط بیش‌تر کشورهای عضو، انتظار می‌رود که فلرینگ گاز در آینده‌ای نزدیک ممنوع اعلام شود. به گفته *بجورندالن و همکاران*[۳]، این موضوع، تغییرهای محسوسی در شیوه‌های فعلی تولید و فرآوری نفت و گاز به وجود خواهد آورد [۳۳،۳۲]. همچنین، *گلین و همکاران*[۴] روش‌های گوناگونی را برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنایع پتروشیمی ژاپن مورد بررسی قرار دادند که از جمله آن‌ها معرفی فرایندهای جدید کاتالیستی و تغییر در مدیریت پسماند بود [۳۴].

بازیابی گاز دوریز واحدهای صنعتی به کمک تثبیت‌کننده نفت خام و از طریق یک جداکننده چند مرحله‌ای با خوراک متوسط، توسط *مراد و همکاران*[۵] انجام گرفت. این روش شامل شبیه‌سازی اولیه فرایند جداسازی با مناسب‌ترین مدل حرارتی دینامیکی است [۳۵]. *آنوموهانران*[۶] به بررسی اثر حرارتی فلرینگ گاز در منطقه‌ای از دلتای نیجریه پرداخت و نتیجه‌های هشداردهنده آن سبب شد تا دولت این کشور به دنبال تصویب قانونی برای پایان دادن به فلرینگ گاز باشد [۳۶]. در سال ۲۰۰۹ میلادی، *ژو و همکاران*[۷] طرحی جامع برای کمینه‌سازی فلر به هنگام عملیات راه اندازی کارخانه شیمیایی از طریق شبیه‌سازی دینامیکی ارایه دادند تا اتلاف انرژی مقدار زیادی از ترکیب‌های آلی فرار (VOCs)[۸]، به‌علت عملیات فلرینگ را به کمینه برسانند [۳۷]. *زاداکبر و همکاران*[۹] به مطالعه‌ای درباره کاهش، بازیابی و استفاده مجدد از گاز دوریز در دو پالایشگاه نفت تبریز و پالایشگاه گاز شهید هاشمی نژاد (خانگیران) در ایران پرداختند و عملکرد سیستم، اقتصادی بودن فرایند و طراحی آن را مورد بررسی قرار دادند [۲۴].

سعیدی[۱۰] در سال ۲۰۱۸ میلادی، با رویکردی جدید موفق به تولید هیدروژن خالص از گازهای فلر با استفاده از راکتور غشای کاتالیستی شد. در این مطالعه، یک مدل جامع دو بعدی غیر ایزوترمال، برای ارزیابی عملکرد فرایند بازیافت گاز دوریز واحدهای صنعتی در راکتور غشایی ایجاد شد [۳۸]. اهمیت بازیابی گاز دوریز واحدهای صنعتی از طریق تجزیه و تحلیل CDM (سازوکار توسعه پاک)[۱۱]، توسط *عبدالرحمن و همکاران*[۱۲] مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش نشان داد که این پروژه، توسعه پایدار در صنعت نفت و گاز مصر را در امتداد جنبه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی به همراه خواهد داشت [۳۹].

پس از ارزیابی روش‌های گوناگون بازیابی گاز دوریز واحدهای صنعتی، *سوناوات و همکاران*[۱۳] به شرح بازیابی گاز دوریز واحدهای صنعتی با استفاده از اژکتور[۱۴] پرداختند و سادگی و مقرون به صرفه بودن را از برتری‌های این روش برشمردند [۴۰]. همچنین *بان وارث*[۱۵] با توجه به شرایط عملیاتی کمپرسور حلقه مایع، مرحله‌های طراحی کمپرسور به شکل یک و یا دو مرحله‌ای را به تفصیل شرح داده است [۴۱]. شرح مفصل نکته‌های اصلی طراحی و بهره‌برداری از سیستم بازیابی گاز دوریز واحدهای صنعتی و همچنین انتخاب

(۱) Gas to liquid
(۲) Kyoto protocol
(۳) Bjorndalen et al
(۴) Gielen et al
(۵) Mourad et al
(۶) Anomohanran
(۷) Xu et al
(۸) Volatile organic compounds
(۹) Zadakbar et al
(۱۰) Saidi
(۱۱) Clean Development Mechanism
(۱۲) Abdulrahman et al
(۱۳) Sonawat et al
(۱۴) Ejector
(۱۵) Banwarth



شکل ۷ – مقایسه سود سالیانه فناوری GTL، متراکم‌سازی گاز و تولید الکتریسیته [۲۵].

فناوری، توسط *زاد اکبر و همکاران* برای یک پالایشگاه واقع در ایران و توسط *فیشر و همکاران*[۱] برای یک پالایشگاه واقع در آرکانزاس امریکا گزارش شده است. در این مورد از کمپرسورهای حلقه مایع برای بازیافت گاز استفاده شد؛ چون این نوع دستگاه به عنوان بهترین راهکار مطابق با نیازهای عملیات، راندمان، نگهداری و در نتیجه امکان برداشت H_2S موجود در گاز دوریز واحدهای صنعتی به شمار می‌آید [۴۴،۴۲].

فناوری GTL شامل فرایندهایی است که در آن گاز طبیعی به گاز سنتز تبدیل می‌شود و با فرایند فیشر–تروپش[۲] (FT) به ساختار کربنی مورد نظر تغییر شکل می‌دهد. فراورده‌های GTL، از لحاظ زیست‌محیطی در مقایسه با سایر فراورده‌ها سازگارتر هستند. در سال ۲۰۱۲ میلادی *رحیم پور و همکاران* روش‌هایی برای بازیافت گازهای ارسالی به مشعل پالایشگاه‌های گاز با هدف کاهش آلاینده‌های زیست محیطی و صرفه‌جویی اقتصادی ارایه دادند که این روش‌ها شامل فناوری GLT، متراکم‌سازی گاز و تولید الکتریسیته است. در این بررسی، تولید برق ۲۵ مگاواتی با استفاده از گازهای فلر پالایشگاه فراشبند مورد مطالعه قرار گرفت و نتیجه‌های حاصل شده نشان داد که روش به کارگرفته شده در تولید برق در مقایسه با سایر روش‌های متداول، مقرون به صرفه‌تر است که در شکل ۷ قابل دیدن است [۴۳،۲۵].

وود و همکاران[۳] از فناوری GTL برای تبدیل گاز به فراورده‌های گوناگون، مانند متانول، دی‌متیل اتر، الفین‌ها، گازوئیل و غیره استفاده کردند [۴۴]. *ولاسکو و همکاران*[۴] استفاده از فناوری GLT را برای تامین نیاز دیزل کشور بولیوی، مورد بررسی قرار دادند، در شرایطی که فروش فراورده به صورت گاز طبیعی نیز میسر بود. نتیجه‌ها نشان داد که استفاده از این فناوری سبب کاهش آلاینده‌های هوا در شهرهای بزرگ خواهد شد [۴۵]. *حسانن و همکاران*[۵] گازهای منتشر شده از سوخت‌های معمولی را که در نتیجه فرایند احتراق است، با گازهای منتشر شده از سوخت GTL مقایسه کردند. نتیجه‌های به دست آمده نشان داد که سوخت GTL، آلاینده‌های کم‌تری (مانند CO، HC و NOx) در مقایسه با سوخت‌های دیزلی رایج تولید می‌کند [۴۶]. *ذوالفقاری و همکاران*[۶] در سال ۲۰۱۷ میلادی به بررسی فنی و همچنین ارزیابی اقتصادی گازهای فلر بازیافتی ازطریق فرایندهای GTL، GTG[۷]، GTE[۸] پرداختند [۴۷]. در مطالعه دیگر، *حیدری و همکاران*[۹] دو روش تولید برق از طریق بازیابی گاز دوریز واحدهای صنعتی را معرفی نمودند. روش اول، استفاده مجدد از گاز دوریز واحدهای صنعتی، از طریق سوزاندن آن با گاز طبیعی در محفظه احتراق و تولید انرژی مکانیکی و الکتریسیته است. روش دوم نیز شامل ارسال گاز دوریز واحدهای صنعتی به مرحله میانی توربین، پس از سوختن در محفظه احتراق است. نتیجه‌های به دست آمده نشان داد که به جز در سرعت جریان خیلی پایین گاز دوریز (کم‌تر از ۰/۸ کیلوگرم بر ثانیه)، روش اول عملکرد بهتری دارد. علاوه‌بر این، روش اول در سرعت جریان‌های متوسط، حدود ۱۸/۹٪ برق بیش‌تری تولید می‌کند (۱/۲ کیلوگرم بر ثانیه) [۴۸]. *فینکو و همکاران*[۱۰]، فناوری تولید برق با استفاده از گاز دوریز را شرح دادند و موفق به تولید ۴۹ مگاوات برق از گاز دوریز واحدهای صنعتی ، در یکی از پالایشگاه‌های گاز روسیه شدند [۴۹]. در مطالعه‌ای دیگر *آنوساک*[۱۱] استفاده از گاز همراه برای تولید برق را مورد بررسی قرار داد. نتیجه‌ها نشان داد که استفاده از توربین‌های گازی برای تولید برق، یک تکنولوژی نویدبخش برای تولید انرژی از ضایعات است [۵۰].

خانی پور و همکاران[۱۲] در سال ۲۰۱۷ میلادی موفق به افزایش تولید گاز سنتز و متانول از گاز دوریز واحدهای صنعتی، با استفاده از فرایند جداسازی بر مبنای غشا شدند [۵۱]. *وطنی و همکاران* در

(۱) Fisher *et al*
(۲) Fischer–Tropsch
(۳) Wood *et al*
(۴) Velasco *et al*
(۵) Hassaneen *et al*
(۶) Zolfaghari *et al*
(۷) Gas Turbines Generation
(۸) Gas to Ethylene
(۹) Heidari *et al*
(۱۰) Finko et al
(۱۱) Anosike
(۱۲) Khanipour et al

سال ۲۰۱۴ میلادی، به شبیه‌سازی و ارزیابی زیست‌محیطی سامانه بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر پرداختند. در این مطالعه پس از شرح فرایند سامانه بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر، شبیه‌سازی پایای سامانه مورد نظر، با انجام مطالعه موردی در یکی از پالایشگاه‌های گازی انجام گرفته است. نتیجه‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در صورت استفاده از سامانه بازیابی گازهای ارسالی به فلر، امکان بازیابی ۵۹۳۰ متر مکعب بر ساعت گاز طبیعی شیرین شده و ۱۲ تن بر ساعت میعان‌های گازی فراهم می‌شود [۵۲].

از جمله روش‌های پیشگیری از انتشار گاز دوریز واحدهای صنعتی، به کارگیری سیستم‌های متراکم‌سازی است. در این فرایند، گاز دوریز پس از فشرده‌سازی به کمک یک یا چند کمپرسور چند مرحله‌ای یا تک مرحله‌ای، به پالایشگاه‌ها و دیگر کارخانه‌های پتروشیمی و شیمی انتقال داده می‌شود. هر چند استفاده از کمپرسورها گران است، اما به کارگیری آن‌ها از مشتعل شدن مقدار زیادی گاز و همچنین اتلاف انرژی جلوگیری می‌کند. کمپرسور، متناسب با حجم گاز و میزان فشرده‌سازی مورد نیاز انتخاب می‌شود [۵۳]. مطالعه جامعی در ارتباط با این موضوع، توسط *آلا ماراجو و همکارش*[۱] ارایه شده است که از سه واحد فشرده‌سازی به منظور تراکم گازهای هیدروکربنی از سه منبع فلر[۲] گوناگون استفاده شده است [۵۴].

ضریب انتشار و بازده احتراق

به طور کلی، به منظور تعیین میزان انتشار به‌علت احتراق گاز مشعل، از چهار روش شبیه‌سازی، استفاده از ضرایب انتشار (EF)[۳]، محاسبه‌ها و اندازه‌گیری مستقیم استفاده می‌شود. روش ضریب انتشار، روشی ساده و ارزان برای تخمین میزان انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای واحدهای صنعتی، بدون نیاز به اندازه‌گیری است [۶]. به عبارت دیگر، نسبت مقدار گاز همراه (به‌طور معمول در متر مکعب)، به بشکه نفت تولید شده را ضریب انتشار می‌گویند. ضریب انتشار در میدان‌های نفتی گوناگون از حدود ۱ تا بیش‌تر از ۵۰ مترمکعب به ازای هر بشکه نفت متغیر است [۱۷]. میزان تولید نفت در ایران همراه با حجم گاز فلر شده و ضریب انتشار در سال‌های ۲۰۱۶–۲۰۰۱ میلادی در جدول ۵ و شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

نوسان‌های حجمی گاز فلر شده در مقایسه با تولید نفت در بیش‌تر مراکز تولید نفت، امری طبیعی به نظر می‌رسد. برای توجیه تغییر حجم گازهای فلر شده بین سال‌های ۲۰۰۴–۲۰۰۳، ۲۰۱۰–۲۰۰۹ و ۲۰۱۶–۲۰۱۵ میلادی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

• ممکن است عملکرد نامناسب یا از کار افتادن تاسیسات، سبب تغییر در حجم گازهای فلر شده در مرحله‌های جمع‌آوری و پردازش گازهای همراه، شده باشد.

• افت فشار در چاه‌های نفت می‌تواند سبب برخی از نوسان‌ها در نسبت گاز به نفت شود؛ که یک رخداد معمول و شناخته شده در استخراج نفت از میادین نفتی است.

• ممکن است تغییر حجم گازهای فلر شده، به‌علت برنامه‌ریزی‌های انجام شده جهت استخراج نفت در میان شرکت‌های زیر مجموعه شرکت ملی نفت ایران و با توجه به سهم هر میدان نفتی از سطح تولید کل باشد.

بنابراین با توجه به میزان فعالیت میادین گوناگون نفتی، امکان نوسان در حجم گاز فلر شده وجود دارد. به عنوان نمونه، تولید نفت در سایت‌های دریایی (مانند شرکت نفت فلات قاره ایران) می‌تواند موجب فلرینگ بیش‌تر گاز در مقایسه با سایت‌های خشکی (مانند شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب) شود؛ که علت این امر کمبود امکانات جمع‌آوری گاز در میادین دریایی است.

هدف از فرایند مشعل در واحدهای صنعتی، آزادسازی گازهای فلر به صورت ایمن و با ضریب اطمینان بالا، از طریق واکنش‌های اکسایشی و به منظور به کمینه رساندن انتشار ترکیب‌های مضر به اتمسفر، نسبت به رهاسازی ساده گازها است. بازده فرایند فلر و یا بازده احتراق (CE)[۴] معیاری از اثربخشی فرایند احتراق در اکسیداسیون کامل سوخت به گاز CO_2 است. بازده فلر به طور قابل توجهی بر ترکیب درصد اجزای منتشر شده مؤثر است. در صورتی که بازده فلر پایین باشد، ترکیب‌های سوخت اولیه، مونواکسیدکربن و سایر فراورده‌های حاصل از عدم احتراق کامل (دوده، ترکیب‌های آلی فرار، هیدروژن سولفید و غیره) به اتمسفر منتشر می‌شوند. اگر جریان فلر حاوی ترکیب‌های بدون واکنش مانند متان باشد، نشان از تشدید انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد [۵۵]. به عبارت دیگر متان در حدود ۲۵ برابر بیش‌تر از CO_2، در پدیده گرمایش جهانی نقش دارد [۵۶]. بازده واقعی فلر را می‌توان با سنجش ترکیب گازهای وارد شده به اتمسفر و همچنین گازهای فلر تعیین نمود؛ هرچند سازوکار واکنش احتراق در یک مشعل به شدت پیچیده است [۵۷]. اندازه‌گیری بازده فلر نیازمند دستگاه‌های مخصوص و ابزارهای آنالیزکننده می‌باشد. اگر چه استفاده از ضریب انتشار، سبب محاسبه میزان انتشار

(۱) Allamaraju et al

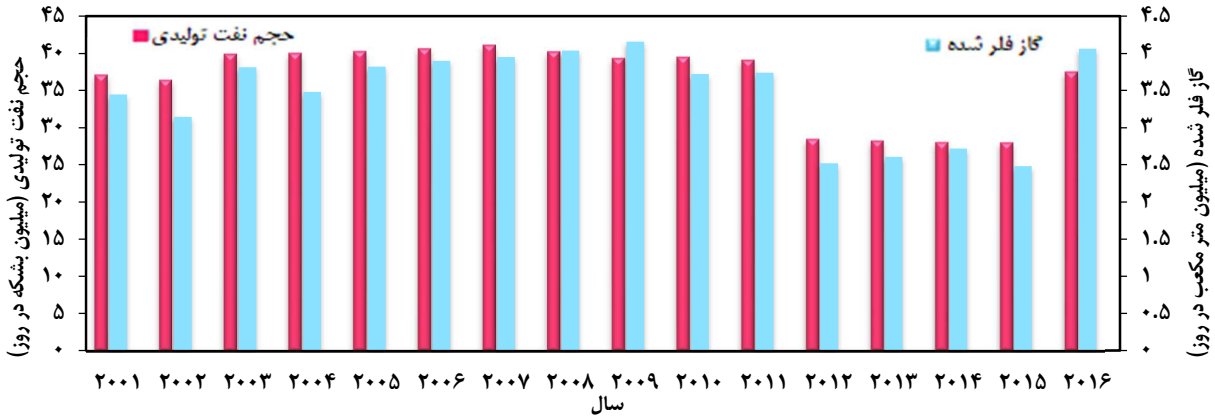
(۲) Flare headers

(۳) Emission factor

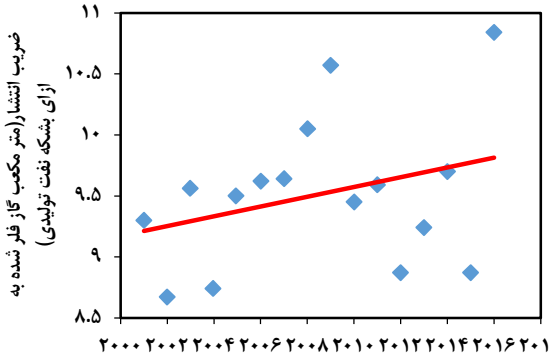
(۴) Combustion efficiency

جدول ۵ - میزان تولید نفت، حجم گاز فلر شده و ضریب انتشار گاز در ایران در سال ۲۰۱۶-۲۰۰۱ میلادی بر اساس داده‌های موسسه مطالعه‌های بین‌المللی انرژی [۲۲].

سال	۲۰۰۱	۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸
حجم نفت تولیدی (۱۰۰۰ بشکه در روز)	۳۷۰۶	۳۶۳۷	۳۹۸۳	۳۹۹۶/۲	۴۰۲۱/۶	۴۰۵۶/۹	۴۱۰۳/۶	۴۰۱۶/۶
گاز فلر شده (میلیون متر مکعب در روز)	۳۴/۴۸	۳۱/۵	۳۸/۰۸	۳۴/۸۸	۳۸/۲۱	۳۸/۹۶	۳۹/۵۳	۴۰/۳۲
ضریب انتشار (متر مکعب بر بشکه)	۹/۳۰	۸/۶۶	۹/۵۶	۸/۷۳	۹/۵۰	۹/۶۰	۹/۶۳	۱۰/۰۴
سال	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵	۲۰۱۶
حجم نفت تولیدی (۱۰۰۰ بشکه در روز)	۳۹۲۷/۴	۳۹۴۲/۴	۳۹۰۳/۷	۲۸۴۳/۰۵	۲۸۲۰/۴	۲۸۰۲/۳	۲۷۹۶/۴	۳۷۴۴/۲
گاز فلر شده (میلیون متر مکعب در روز)	۴۱/۵۶	۳۷/۲۴	۳۷/۴۶	۲۵/۲۳	۲۶/۰۶	۲۷/۱۹	۲۴/۸۰	۴۰/۶۰
ضریب انتشار (متر مکعب بر بشکه)	۱۰/۵۸	۹/۴۵	۹/۶۰	۸/۸۷	۹/۲۴	۹/۷۰	۸/۸۷	۱۰/۸۴



شکل ۷ - میزان تولید نفت و فلرینگ گاز در سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۰۱ میلادی در ایران بر اساس داده‌های موسسه مطالعه‌های بین‌المللی انرژی [۲۲].



شکل ۸- ضریب انتشار در سال‌های ۲۰۱۶- ۲۰۰۱ میلادی در ایران بر اساس داده‌های موسسه‌ی مطالعه‌ها بین‌المللی انرژی [۲۲].

گازهای گلخانه‌ای به صورت تقریبی می‌شود اما همواره یک عدم قطعیت بزرگ در این زمینه وجود خواهد داشت [۵۸]. در مطالعه *مک دانیل* فرض شده است که دقت محاسبه‌های راندمان احتراق وابسته به دو منبع اولیه خطا می‌باشد [۵۹]:

- دقت غلظت‌های لیست شده از گازهای کالیبراسیون
- دقت دستگاه اندازه‌گیری نمونه‌های گاز (رانش دستگاه، تداخل، تکرارپذیری، و غیره).

پیامدهای اشتعال گاز دوریز واحدهای صنعتی

سوزاندن بیش از ۱۵۰ میلیارد متر مکعب گاز طبیعی تصفیه نشده در صنایع نفت، سبب ورود حجم عظیمی از آلاینده‌های مضر به جو زمین می‌شود. از جمله آثار سوء به‌علت فلر کردن گاز می‌توان به اتلاف منابع انرژی، آلودگی زیست بوم و ایجاد باران‌های اسیدی، تولید گازهای گلخانه‌ای به‌علت عدم احتراق کامل، گرمایش زمین و تولید گازهای سمی و و زیان‌آور برای سلامتی اشاره کرد. اما زیان اصلی فلر کردن گاز، مربوط به مشکل‌های زیست‌محیطی و سلامت است که دارای ابعاد جهانی، منطقه‌ای و محلی است [۵،۶۰].

گازهای خروجی از فلر حاوی آلاینده‌های زیان‌آور و سمی هستند که می‌توانند پس از جذب توسط گیاهان، به سرعت وارد

زنجیره غذایی انسان شوند. فلزهای سنگین می‌توانند موجب ابتلا به سرطان، اختلال‌های ژنتیکی، بیماری‌های خونی و آسیب به سیستم عصبی مرکزی شوند. بنابراین گاز دوریز واحدهای صنعتی سلامتی انسان‌ها را به خطر می‌اندازد، تولیدهای کشاورزی را کاهش می‌دهد و به مناطق مسکونی آسیب می‌رساند. نتیجه‌های یک پژوهش جدید در زمینه اثرگذاری اشتعال گازهای فلر بر روی سلامتی و زیست بوم منطقه دلتای نیجریه، تاییدکننده آلودگی گسترده در ناحیه‌های اطراف اشتعال گازهای مشعل می‌باشد و عوارض حاصل از گرما، ارتعاش‌ها، سر و صدا و تابش حاصل از گازهای فلر، مشکل‌های جدی برای آن‌ها به وجود آورده است. همچنین این روستاییان گاز دوریز واحدهای صنعتی را عامل اصلی سقط‌های ناگهانی جنین، بیماری‌های شایع در میان افراد سالخورده و کودکان، بی‌خوابی‌های شبانه و مشکل‌های عصبی می‌دانند. تاکنون موارد زیادی مبنی بر اثرهای فیزیولوژیک گازهای فلر، شامل اختلال‌های ژنتیکی که در دوران باروری زنان در سه ماهه اول رخ داده، گزارش شده است [۶۱]. بیش از ۲۵۰ ماده سمی در ارتباط با اشتعال گازهای فلر کشف شده است که این مواد عبارتند از:

- ترکیب‌های سرطان‌زایی همچون بنزوپیرن، بنزن، کربن دی‌سولفید (CS_2)، کربونیل سولفید (COS) و تولوئن
- فلزهایی همچون جیوه، آرسنیک و کروم
- گاز ترش همراه با H_2S و SO_2
- اکسیدهای نیتروژن (NOx)، کربن دی‌اکسید (CO_2) و متان (CH_4) که جز گازهای گلخانه‌ای نیز محسوب می‌شوند [۶۲].

در این بخش پیامدهای انتشار آلاینده‌های حاصل از فلرینگ گاز بیش‌تر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

تاثیر اسیدیته

هنگامی که بخارهای حاصل از احتراق وارد اتمسفر می‌شوند، باران اسیدی ایجاد می‌شود. این اتفاق به ویژه در محیط‌های مرطوب گرمسیری که فاصله زیادی با ساحل دریا ندارند، رخ می‌دهد. باران اسیدی ماهیت خورندگی و فرسایشی دارد و آسیب‌های گسترده‌ای به گیاهان و آب‌های سطحی وارد می‌کند [۶۳]. باران اسیدی که بر اثر افزایش غلظت SO_4^{2-} و NO_3^- تشکیل شده باشد، از مقدارهای pH در فاصله ۴/۹۸ تا ۵/۱۵ قابل تشخیص است [۶۴].

نمونه‌برداری از خاک مناطقی که در مجاورت فلرهای گازی قرار دارند نشان می‌دهد که بسیاری از پارامترهای حیاتی خاک، برای رشد گیاهان، از مقدار معمول و دلخواه خود بسیار پایین‌تر است. همچنین آزمایش‌های خاک شناسی، به روشنی نشان از اسیدیته بالای خاک در مناطق نزدیک به فلرهای گازی دارد. این موضوع سبب به کمینه رسیدن امکان جذب ریزمغذی‌ها توسط ریشه گیاهان و در نتیجه رشد ناخواسته آن‌ها می‌گردد [۶۵،۶۶]. همچنین نتیجه‌های پژوهش‌ها نشان می‌دهد که میزان اسیدیته باران به طور قابل توجهی با افزایش فاصله از ناحیه‌های انتشار گاز دوریز کاهش یافته است. همچنین فرسایش سریع سقف‌های آهنی (ورقه گالوانیزه آهن) در مناطق نفتی را به باران اسیدی مرتبط دانسته‌اند [۶۷].

تاثیر گرمایی

درجه حرارت بالا سبب ایجاد شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مضر بر سلامت انسان، میکروارگانیسم‌های گیاهی و خاک می‌شود. افزایش دما ارتباط مستقیمی با فاصله از محل اشتعال گاز دوریز دارد و وابسته به فصول سال می‌باشد. نتیجه‌های مطالعه *آنوموهانران*، در منطقه‌ای در دلتای نیجریه نشان می‌دهد که در فصول بارانی، آلودگی گرمایی در فاصله ۲/۱۵ کیلومتری و در فصول خشک در فاصله ۲/۰۶ کیلومتری رخ داده‌است [۳۶]. در مطالعه‌ای دیگر، دماهای سطحی، فاصله‌ها، عرض‌ها و طول‌های جغرافیایی در محلی دور از محل اشتعال گازهای مشعل، در چهار جهت اصلی و به کمک یک ترمومتر، نوار فیبروس‌متر و یک سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS)[1] اندازه‌گیری شد. نتیجه‌های به دست آمده افزایش دما بیش از ۹/۱ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای عادی روزانه، در شعاع ۲۱۰ متری را نشان داد و بر اساس این پژوهش توصیه شد به منظور در امان بودن از اثرهای حرارتی اشتعال گازهای فلر، ساختمان‌های مسکونی در کم‌ترین حالت ۲۱۰ متر دورتر از محل اشتعال گازهای مشعل احداث شوند. همچنین برخی از فراورده‌های اشتعال گازهای فلر مانند CO_2 و H_2O، سهم زیادی در تابش گرمایی ایجاد شده در اطراف فلر دارند [۶۸،۳۶].

اثر فتوشیمیایی

تشکیل فتوشیمیایی ازون (O_3)[2] در تروپوسفر از طریق اکسیداسیون نیتریک اکسید (NO) به نیتروژن دی اکسید (NO_2) توسط پراکسید آلی (RO_2) یا رادیکال هیدروژن پراکسید رخ می‌دهد [۶۹]. در یک پژوهش به منظور بررسی کیفیت هوا در تگزاس با هدف درک بهتر فرایندهای شیمیایی اتمسفر در هوستون، پژوهش‌های گسترده‌ای

(۱) Global Positioning System

(۲) Ozone

جدول ۶ - آثار مواد منتشره از فرایند فلرینگ گاز بر سلامتی [۷۳،۵].

نوع آلاینده	تأثیر بر سلامتی
ازن در سطح زمین	تحریک چشم و مشکل‌های تنفسی
ذره‌های معلق	سرطان و حمله‌های قلبی
دی اکسید گوگرد	تحریک سیستم تنفسی و تشدید آسم و برونشیت
آلکان‌ها شامل متان، اتان و پروپان	خارش، التهاب، اگزما و تورم ریوی
آروماتیک‌ها (بنزن، تولوئن و زایلن)	سرطان، تأثیرگذار بر سیستم عصبی

در ماه‌های آگوست و سپتامبر ۲۰۰۶ میلادی صورت گرفت. نتیجه‌های حاصل حاکی از اهمیت منابع رادیکال با عمرکوتاه مانند HCHO و HONO در افزایش تولید O_3 است [۷۰].

تأثیرهای بر سلامتی

قرار گرفتن پوست در معرض آلاینده‌ها به‌علت فلرینگ گاز، سبب بروز آسیب‌های جدی از جمله سرطان پوست و ضایعات پوستی می‌گردد. همچنین مصرف آب‌های آلوده به باران اسیدی می‌تواند pH معده را تغییر داده و با آسیب زدن به غشای مخاطی دیواره روده، باعث زخم معده شود. علاوه‌بر این، سلامتی تعداد کثیری از مردم در جوامع روستایی ممکن است به علت مصرف آب از منابع آبی آلوده شده به آب باران اسیدی، حاوی ترکیب‌های هیدروکربنی و فلزهای سمی به ویژه وانادیم، در معرض خطر قرار گیرد [۶۷]. علاوه‌بر این بررسی‌ها نشان می‌دهد، قرار گرفتن طولانی مدت در معرض هوای آلوده به گازهای حاصل از احتراق گاز مشعل، می‌تواند عملکرد سیستم تنفسی ساکنین و همچنین افراد شاغل به کار در مناطق بالا دستی را تحت تأثیر قرار دهد و استنشاق ذره‌های معلق و اکسیدهای گوگرد سبب بروز بیمارهای مضمن تنفسی، مانند آسم و برونشیت گردد. لازم به ذکر است که آثار زیان‌آور آلاینده‌های به‌علت گاز دوریز واحدهای صنعتی بر سلامت انسان، تنها به دستگاه تنفسی محدود نمی‌شود و افرادی که در معرض استنشاق گازهای فلر بوده‌اند، نسبت به ابتلا به برخی بیماری‌ها از جمله بیماری‌های کلیوی مستعدتر هستند [۷۲،۷۱]. در جدول ۶ برخی دیگر از آثار مواد منتشره از فرایند فلرینگ گاز بر سلامتی انسان ذکر شده است [۷۳،۵].

بر اساس مطالعه‌ای که در سال ۲۰۰۴ میلادی انجام شد، محتمل است که انتشار گازهای خروجی از فلر، موجب اختلال در سلامت افراد در شهر دلتا نیجریه شده است. در این مطالعه تاثیر به‌علت دو آلاینده، یعنی ذره‌های معلق و بنزن بر روی ساکنین آن منطقه بررسی گردید. نتیجه‌های حاصل از این مطالعه نشان داد که مقدار فلرینگ گاز در حدود ۸۶۰۰ متر مکعب در روز، باعث ایجاد ذره‌های معلق، معادل ۰/۲۳ میکروگرم در هر مترمکعب در فاصله ۵۰۰۰ متری از فلر خواهد شد. همچنین نتیجه‌ها حاکی از آن بود که انتشار مواد آلاینده از فلر، ارتباط مستقیم با گاز شیرین ارسالی به فلر دارد [۷۴].

تاثیر بر گونه‌های گیاهی و جانوری

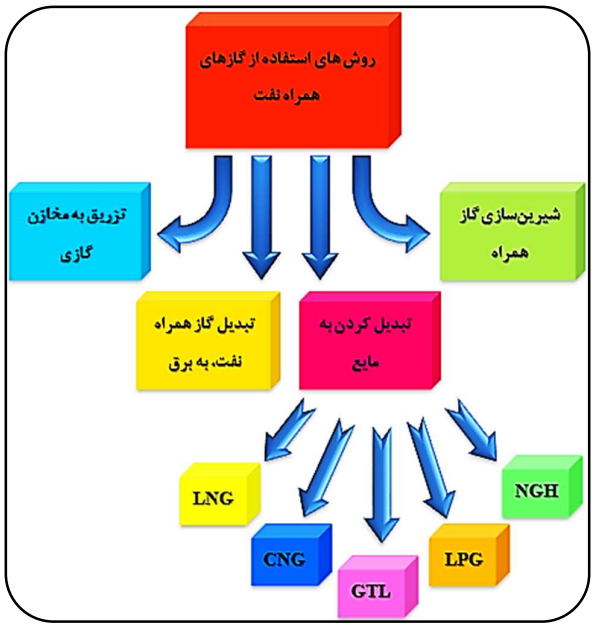
انتشار آلاینده‌های حاصل از فلرینگ گاز سبب بروز تغییرهایی در منابع آبی و کیفیت خاک شده است که نتیجه‌های حاصل از آن، تأثیر مستقیمی بر روی پراکندگی گونه‌های گیاهی داشته است. با توجه به آسیب به گونه‌های گیاهی، زیست بوم جانوری نیز در معرض تهدید قرار گرفته است. علاوه بر موارد ذکر شده، دمای بسیار بالای فلر سبب شده است که دمای محیط اطراف فلر تا شعاع زیادی به دلیل جریان همرفت و نیز تشعشع دما در ارتفاع‌های بالاتر، تحت تأثیر قرار گیرد که این موضوع مانعی برای پرواز پرندگان و یافتن مسیر حرکتشان به هنگام مهاجرت است [۷۵].

تأثیر بر کشاورزی

بررسی‌های گوناگون نشان می‌دهد که در حال حاضر، خاک به بستر نهایی بسیاری از آلودگی‌های نفتی مانند بنزن، تولوئن، اتیل بنزن، آلیفاتیک و هیدروکربن‌های آروماتیکی چند حلقه‌ای تبدیل شده است. آلودگی حرارتی به‌علت گاز دوریز واحدهای صنعتی، بر جمعیت میکروبی موجود در خاک تاثیر می‌گذارد و منجر به کاهش مواد معدنی، نیتروژن کل و همچنین جمعیت میکروبی خاک خواهد شد. بنابراین گازهای فلر تاثیر منفی بر روی حاصلخیزی خاک و چرخه مواد مغذی زیستی دارند و متعاقباً تغییر در خواص فیزیکی و شیمیایی خاک با توجه به تغییر شرایط اقلیم، برخی فراورده‌ها کشاورزی را تحت تاثیر قرار خواهد داد [۶۷].

فناوری‌های بازیابی گاز دوریز واحدهای صنعتی

امروزه مدیریت مصرف و بهره‌وری انرژی در صنایع، با توجه به قیمت فراورده‌های نفتی، محدودیت منابع فسیلی، رشد مصرف سالانه انواع حامل‌های انرژی، امکان صادرات فراورده‌های نفتی در صورت صرفه‌جویی واحدهای تولیدی و مشکل‌های مرتبط با محیط‌زیست، امری ضروری به شمار می‌رود. در این میان، آلودگی زیست‌محیطی و ارزش افزوده از دست رفته به‌علت گازهای مشعل،



شکل ۹ - روش‌های استفاده از گازهای همراه نفت به تفکیک محل استفاده از فراورده‌ها

موجب گردیده است تا جمع‌آوری این گازها در کشورهای دارای گازهای مشعل، مورد توجه قرار گیرد. لازم به ذکر است که اصلی‌ترین راه اتلاف انرژی در پالایشگاه‌ها و همچنین بیش‌ترین میزان انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، از طریق سیستم فلرینگ گاز می‌باشد. تاکنون روش‌های گوناگونی به منظور کاهش و یا بازیابی گازهای ارسالی به فلر ارایه گردیده است. فناوری‌های مورد استفاده برای جمع‌آوری گازهای مشعل را می‌توان مطابق با شکل ۹ به روش‌های زیر تقسیم کرد. انتخاب مناسب‌ترین فناوری به منظور پالایش گاز دوریز در مجتمع‌های صنعتی، به عنوان یکی از مهم‌ترین اصول در طراحی سیستم بازیافت گاز دوریز شناخته می‌شود [۷۶].

انژکتور

یکی از فناوری‌های پرکاربرد در صنایع پتروشیمی جهت پالایش گاز دوریز واحدهای صنعتی، استفاده از سیستم انژکتور می‌باشد. انژکتور به عنوان پمپ جت یا هدایت‌گر مورد استفاده قرار می‌گیرد و از اصل برنولی پیروی می‌کند. در سیستم انژکتور، افزایش سرعت (نیروی جنبشی) با کاهش فشار همراه خواهد بود. یک انژکتور تک مرحله‌ای شامل نازل محرکه، نازل مکش، محفظه اختلاط، دهانه و پخش‌کننده می‌باشد. در این روش بازیابی، گاز دوریز واحدهای صنعتی از واحدهای گوناگون جمع‌آوری شده و سپس با استفاده از سیال مایع یا گازی که انرژی مورد نیاز برای فشرده‌سازی نهایی را تأمین می‌کند، تا فشار متوسط، بین فشار پایین و بالای فرایند فشرده می‌شود. سیال محرک و سیال مکش شده در محفظه اختلاط ترکیب می‌شوند. شتاب سیال محرک کاهش می‌یابد، در حالی که شتاب سیال مکش (گاز دوریز) افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در دهانه انژکتور، فشار سیال مخلوط افزایش می‌یابد. مخلوط گازی از نازل عبور می‌کند و انرژی جنبشی آن به دلیل افزایش فشار، کاهش می‌یابد. بنابراین فشار مایع مکش با فشار خروجی افزایش می‌یابد، که به یک سطح فشار، بین فشار کمینه و بیشینه فرایند می‌رسد. گاز دوریز فشرده شده از نازل عبور کرده و با کاهش فشار، انرژی جنشی آن افزایش می‌یابد. با افت فشار سیال و ایجاد منطقه کم فشار در پایین دست نازل، سیال مجدداً به داخل انژکتور کشیده می‌شود. با توجه به مقرون به صرفه بودن تکنولوژی انژکتور، این روش در بسیاری از عملیات پالایش استفاده شده است. اگر فشار خروجی گاز مخلوط، کم‌تر از فشار مورد نیاز برای فرایندهای پالایش باشد، تعداد بیش‌تری از انژکتورها به صورت سری نصب می‌شوند [۴۳].

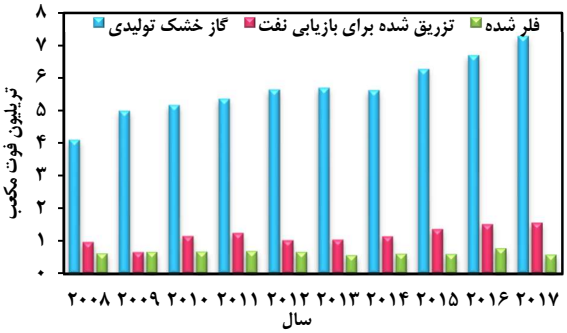
کمپرسور حلقه مایع

کمپرسور حلقه مایع یک دستگاه حجمی چرخشی است که از یک مایع ثانویه (آب یا آمین) برای فشرده کردن گاز دوریز استفاده می‌کند. اصول کار کمپرسور حلقه مایع، شبیه عملکرد یک کمپرسور لولایی است. یکی از مهم‌ترین برتری‌های استفاده از این سیستم نسبت به انژکتور، امکان حذف اجزای ترکیب‌های خطرناک همراه با گاز دوریز، مانند سولفید هیدروژن از گاز دوریز است.

این دستگاه شامل یک پروانه محوری احاطه شده در یک پروانه بیرونی است. بر روی پروانه، تعدادی معین از تیغه‌ها وجود دارند که گاز را از بخش ورودی به بخش تخلیه انتقال می‌دهند. گاز دوریز در یک سمت، توسط پره‌های پروانه و در سمت دیگر توسط سیال مایع احاطه می‌شود. کمپرسور حلقه مایع می‌تواند به نسبت‌های فشردگی بالا (به‌طور کلی تا ۱:۳۱ بین بخش‌های مکش و فشار بالا) دست یابد. یک پروانه در مرکز محفظه دایره‌ای که بخشی از آن با مایع پر شده است، نصب شده است. انتخاب مایع درون محفظه از اهمیت بسزایی برخوردار است زیرا می‌تواند در پالایش گاز دوریز مؤثر باشد. در واقع مایع درون محفظه، به عنوان حلال گازهای ترش مانند سولفید هیدروژن و دی اکسید کرین عمل می‌کند. با حرکت چرخشی پروانه، گاز دوریز فشرده می‌شود. چرخش پروانه مایع را به بخش بیرونی قسمت استوانه‌ای انتقال می‌دهد که به‌علت

جدول ۷ - میزان تولید گاز طبیعی در سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۰۸ میلادی در ایران بر اساس داده‌های اداره اطلاعات انرژی آمریکا [۱۰].

سال	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲
گاز خشک تولیدی (تریلیون فوت مکعب)	۴۱۰۷	۴۹۸۶	۵۱۶۱	۵۳۶۱	۵۶۴۰
تزریق شده برای بازیابی نفت (تریلیون فوت مکعب)	۹۶۸	۶۶۱	۱۱۵۷	۱۲۴۹	۱۰۲۱
گاز فلر شده (تریلیون فوت مکعب)	۶۲۲	۶۶۳	۶۷۴	۶۹۰	۶۶۳
سال	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۷
گاز خشک تولیدی (تریلیون فوت مکعب)	۵۶۹۶	۵۶۲۲	۶۲۶۶	۶۶۸۹	۷۲۷۴
تزریق شده برای بازیابی نفت (تریلیون فوت مکعب)	۱۰۴۵	۱۱۴۴	۱۳۶۷	۱۵۱۴	۱۵۶۴
گاز فلر شده (تریلیون فوت مکعب)	۵۵۹	۶۰۶	۶۰۰	۷۷۷	۵۸۲



شکل ۱۰ - میزان گاز تولید شده در ایران بر اساس گزارش اداره اطلاعات انرژی آمریکا در فاصله سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۰۸ میلادی [۱۰].

نیروهای گریز از مرکز می‌باشد. اگر پروانه به طور هم مرکز نصب شده باشد، یک حلقه مایع چرخشی شکل می‌گیرد و در عین حال پروانه می‌چرخد. بنابراین، یک فضای هلالی شکل بین محور پروانه و حلقه مایع در طی چرخش پروانه ایجاد می‌شود. تیغه‌های پروانه این فضا را به چندین حجم فرعی تقسیم می‌کنند. در طی چرخش، گاز به دلیل کاهش حجم موجود، فشرده شده است تا زمانی که به یک بخش تخلیه برسد. مایع ثانویه، گاز را فشرده کرده و گرما را در طی فشرده‌سازی مبادله می‌کند [۷۷،۴۱].

تزریق مجدد به مخازن نفتی و گازی

یکی از راه‌های متداول و پرکاربرد مدیریت گازهای دورریز، جمع‌آوری گاز به منظور استفاده در آینده و افزایش بهره‌وری فرایند تولید نفت، فشارافزایی و تزریق مجدد گاز به مخازن نفت و گاز است. برای این منظور، گازهای فلر پس از جمع‌آوری به سمت کمپرسورها هدایت می‌شوند. کمپرسور، برای فشرده کردن گاز و تزریق آن به مخازن کم فشار، جهت افزایش تولید نفت به کار گرفته می‌شود. در این میان انتخاب نوع کمپرسور و همچنین شیوه چیدمان آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به عنوان یک جایگزین برای کمپرسورهای گازی، می‌توان از سیستم‌های پمپ چند مرحله‌ای که توانایی انتقال هم‌زمان نفت و گاز را با اندازه کوچک‌تری نسبت به کمپرسورهای گازی دارند، استفاده نمود [۷۸]. تزریق مجدد، به‌طور معمول به منظور افزایش بازیابی نفت با حفظ فشار مخزن و کاهش هم‌زمان یا حذف نیاز به تسهیلات حمل و نقل گاز به کار گرفته می‌شود و همچنان به عنوان گزینه‌ای مناسب برای حجم‌های کم گاز همراه نفت و همچنین بازیافت گازهای فلر شناخته می‌شود. این در حالی است که گازهای فلر و گازهای همراه نفت معمولا به دلیل حجم اندک، در طول فرایند تولید، در مشعل‌ها سوزانده می‌شوند [۷۹]. استفاده از این تکنولوژی در سرتاسر جهان رو به افزایش است، به عنوان نمونه از سال ۲۰۰۰ میلادی به دنبال استفاده از تکنولوژی تزریق مجدد در قزاقستان، از انتشار سالانه بیش از ۴۹ میلیون تن دی‌اکسید کربن در اتمسفر جلوگیری شد [۸۰].

با توجه به جدول ۷ و شکل ۱۰ میزان تولید ناخالص طبیعی گاز در ایران در سال ۲۰۱۷ میلادی، تقریبا ۹/۵ میلیارد فوت مکعب بوده است که در حدود ۷/۳ میلیارد فوت مکعب آن به صورت گاز خشک به بازار عرضه شده است. در حدود ۱/۶ میلیارد فوت مکعب گاز به منظور افزایش راندمان بازیابی نفت، به چاه‌های نفتی تزریق گشته است و مقدار ۰/۶ میلیارد فوت مکعب آن فلر شده است [۱۰]. تاکنون شرکت نفت مناطق مرکزی ایران در دو پروژه ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مخزن گازی سراجه و همچنین مخزن گازی شوریجه از این روش استفاده نموده است. علاوه‌بر این پروژه‌های تزریق گاز در شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، شرکت بهره‌برداری نفت و گاز اروندان و پروژه تزریق آب در شرکت نفت فلات قاره در حال اجرا است. در جدول ۸ به طور خلاصه مقدار تزریق گاز، عملیات بازگردانی گاز و تزریق آب به میادین نفتی در سال‌های ۱۳۹۱ تا

جدول ۸ - مقدار گاز و آب تزریق شده به میادین نفتی در سال‌های ۲۰۱۵– ۲۰۱۲ میلادی [۲۲]

مناطق نفتی	واحد	سیال تزریقی	مقدار تزریق			
			۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵
شرکت مناطق نفت خیز جنوب	میلیون مترمکعب در روز	گاز	۷۷/۶۵	۸۱/۹۳	۷۲/۱۷	۷۹/۵۶
شرکت نفت و گاز اروندان	میلیون مترمکعب در روز	گاز	۰	۰	۰	۶/۸۱
شرکت نفت فلات قاره	میلیون مترمکعب در روز	گاز	۰/۰۴	۰	۰	۰
	میلیون بشکه در سال	آب	۱۳۰/۶۳	۱۲۵/۸۸	۲۹۵/۹	۲۲۹/۱۳
جمع کل گاز تزریقی	میلیون مترمکعب در روز	گاز	۷۷/۶۹	۸۱/۹۳	۷۲/۱۷	۸۶/۳۷

۱۳۹۴ ارایه شده است. بر این اساس تزریق گاز طبیعی نقش مهمی در بازیابی نفت در میادین نفتی ایران دارد. در نتیجه انتظار می‌رود میزان تزریق گاز در سال‌های آینده افزایش یابد [۲۲].

تولید انرژی الکتریکی

تولید برق از گازهای فلر دارای برتری‌های متعدی است که از جمله آن‌ها می‌توان به کاهش مصرف سوخت گازی، نداشتن هیچ‌گونه اثر جانبی سوء بر محیط‌زیست، آماده‌سازی ساده تجهیزهای مورد نیاز و هزینه‌های مقرون به صرفه آن اشاره کرد. گاز همراه در مقایسه با گاز طبیعی، دارای ترکیب‌های نفتی سنگین‌تر و در نتیجه دارای ارزش گرمایی بالاتری است. البته ممکن است تولید برق از گاز دوریز واحدهای صنعتی به صورت همیشگی امکان پذیر نباشد، زیرا گزینه‌های دیگری مانند تولید گاز مایع شده (LPG)، گاز طبیعی مایع (LNG) و همچنین تزریق مجدد به چاه‌های نفتی نیز وجود دارد [۸۱].

از دیگر تکنولوژی‌های مؤثر در بازیافت گازهای فلر، تولید انرژی الکتریکی در نزدیکی منابع انتشار گازهای مشعل توسط نیروگاه‌های کوچک گازی است. این تکنیک می‌تواند به عنوان یک گزینه برای تامین تقاضای انرژی الکتریکی منطقه یا صدور برق به شبکه‌های انتقال برق به کار گرفته شود [۸۰]. امروزه به دلیل حجم کم گازهای همراه نفت در اغلب میادین نفتی، استفاده از مولدهای پراکنده اهمیت بیش‌تری پیدا کرده است. در این روش گازهای همراه نفت، به عنوان خوراک مولدهای پراکنده استفاده شده و تبدیل به برق می‌شوند. شایان ذکر است که تکنولوژی‌های مولد تولید پراکنده[۱]، شامل توربین‌های گازی[۲]، موتورهای پیستونی[۳] و میکروتوربین‌ها[۴] می‌شود [۸۲].

انتقال به خط لوله گاز طبیعی (PNG)

خط لوله گاز طبیعی [۵](PNG)، قدیمی‌ترین و رایج‌ترین روش انتقال گاز طبیعی است که به طور معمول جهت انتقال، از لوله‌هایی به قطر بزرگ، در زیرزمین یا دریا استفاده می‌شود. شایان ذکر است که PNG، مهم‌ترین و در عین حال راحت‌ترین روش انتقال گاز به یک مکان دور از محل تولید، برای فراوری و یا اتصال به شبکه‌های توزیع موجود است. با این حال، انتقال به وسیله خط لوله، نیاز به سرمایه‌گذاری بسیار بالایی دارد. با توجه به این که گازهای فلر و گازهای همراه نفت، ترکیبی همانند گاز طبیعی دارند، می‌توان با تزریق مجدد آن‌ها به خط لوله گاز طبیعی و پالایش مجدد آن‌ها، از هدر رفت این منبع با ارزش انرژی جلوگیری نمود [۸۳،۷۹].

تکنولوژی گاز مایع (LPG)

گاز مایع که بصورت مخفف LPG[۶] نامیده می‌شود، به طور عمده از دو ترکیب هیدروکربنی پروپان و بوتان تشکیل شده است. این گاز که در برخی نقطه‌های دنیا به نام ترکیب عمده آن یعنی پروپان شناخته می‌شود، به عنوان فراورده فرعی فرایندهای تصفیه و تولید گاز طبیعی و پالایش نفت خام تولید می‌گردد. گاز مایع در شرایط فشار و دمای عادی، به صورت گاز است و تحت فشار ۱۰–۸ atm، اجزا آن به مایع تبدیل می‌شود. بنابراین نگهداری و حمل و نقل این فراورده به سادگی امکان پذیر است. البته ترکیب‌های LPG برای مکان‌های گوناگون و در فصول گوناگون متفاوت است. برای نمونه گاز مایع ارایه شده به مصرف کنندگان در ایران در فصول گوناگون بین (۹۰–۵۰) درصد بوتان و (۵۰–۱۰) درصد پروپان و تا ۲٪ ترکیب‌های سنگین‌تر مانند پنتان دارد. به علت کیفیت سوخت گاز مایع و کاهش انتشار آلاینده‌ها، استفاده از این سوخت در جهان به

(۱) Distributed Generation
(۲) Gas Turbine
(۳) Reciprocating Engines
(۴) Microturbines
(۵) Pipeline natural gas
(۶) Liquefied petroleum gas

صورت فزاینده‌ای مورد توجه بوده است. از آن جا که گازهای فلر در برخی موارد دارای پروپان و بوتان می‌باشند، تکنولوژی گاز مایع راه دیگری برای استفاده مجدد از گاز دوریز واحدهای صنعتی و گازهای همراه است. قبل از استخراج گاز مایع از گازهای فلر، ابتدا گاز باید برای حذف ناخالصی‌ها از جمله بخار آب، CO_2، بخار جیوه و H_2S تصفیه شود. با توجه به میزان کم پروپان و بوتان در گازهای مشعل، این فرایند نسبت به سایر روش‌های بازیافت چندان مقرون به صرفه و عملی نیست، اما می‌توان طی فرایندهای تصفیه گاز مایع، جریان گازهای فلر را به منظور حذف ترکیب‌های مضر و بازگشت به چرخه سوخت، طی فرایند تصفیه گاز مایع، پالایش نمود [۷۸].

تکنولوژی گازطبیعی مایع‌شده (LNG)

هرگاه خط لوله از لحاظ اقتصادی برای انتقال گاز دلخواه نباشد، LNG[1] اغلب به عنوان جایگزین در نظر گرفته می‌شود. تکنولوژی گاز طبیعی مایع شده از یک فرایند تبرید ساده تشکیل شده است و شامل بیش از ۹۵ درصد متان و درصد کمی اتان، پروپان و سایر هیدروکربن‌های سنگین‌تر است. در این تکنولوژی، ابتدا گاز به منظور حذف ناخالصی‌ها مانند گوگرد، CO_2، آب و سایر آلاینده‌ها، در فرایند پیش تصفیه شرکت می‌کند. پس از حذف ناخالصی‌ها، گاز طی فرایند تبرید، در فشار یک اتمسفر تا دمای $-162\ ^\circ C$ سرد شده و به مایع تبدیل می‌شود [۸۴،۸۳،۷۸]. دانسیته گاز مایع، ۰/۴۲ دانسیته آب است و حجم آن ۶۰۰ برابر حجم گاز طبیعی است و از لحاظ ارزش حرارتی، همانند سوخت دیزل (گازوئیل) است. با توجه به درصد بالای گاز متان در گازهای فلر، تکنولوژی گاز طبیعی مایع شده، یکی از راهکارهای عملی به منظور بازیافت گازها و جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد [۸۵]. دمای بسیار پایین محموله LNG، سبب انتقال آن با کشتی‌های خاصی می‌گردد. بارگیری، حمل‌و نقل و تخلیه LNG، در دمای حدود ۱۶۳- درجه سانتی‌گراد، نیازمند بهره‌گیری از مواد مخصوص، عایق‌گذاری و سیستم فنی بسیار دقیق است [۸۲].

تکنولوژی گاز طبیعی فشرده شده (CNG)

فناوری CNG[2]، متراکم‌سازی گاز طبیعی (که به طور عمده از متان تشکیل شده است) تا کم‌تر از ۱٪ حجم اولیه، در فشار استاندارد اتمسفری است. گاز طبیعی در سیلندرها ذخیره و منتقل می‌شود [۷۸]. CNG را می‌توان در کشتی‌های مخصوص، ذخیره و به مقاصد مورد نظر حمل کرد. اگر چه یک کشتی حامل CNG نمی‌تواند گاز را به همان میزان بارگیری شده در کشتی‌های LNG انتقال دهد، ولی روش مایع‌سازی و همچنین تبدیل مجدد به گاز، در فناوری CNG نسبت به LNG، آسان‌تر و بسیار کم هزینه‌تر است. همچنین فناوری CNG در صورت کاهش دادن خطر انفجار در هنگام انتقال آن، می‌تواند رقیبی برای فناوری LNG در فواصل کوتاه‌تر باشد [۸۶]. ذخیره‌سازی گاز در کشتی‌های CNG، به صورت نگهداری گاز در لوله‌هایی با تحمل فشار psi ۳۰۰۰-۱۵۰۰ و به قطر ۱۸ تا ۳۶ اینچ است. این لوله‌ها که به صورت افقی و عمودی در کشتی تعبیه شده‌اند، توانایی ذخیره‌سازی مقادیر زیادی گاز را در خود دارند. برای کاهش خطرهای احتمالی، دمای این لوله‌ها در ۲۰- درجه سلسیوس حفظ می‌شود. فشار بالای CNG در مخازن لوله‌ای شکل و بالا بودن احتمال خطر انفجار، از مشکل‌های اساسی عملی نشدن کاربرد وسیع فناوری CNG در جهان است. این فناوری، دارای پتانسیل زیادی برای تبدیل شدن به روش ارجح، جهت استفاده از گاز دوریز در مجتمع‌های صنعتی مانند پالایشگاه‌ها دارد، اما در حال حاضر به دلیل هزینه‌های بالای ساخت لوله‌های CNG، چندان مقرون به صرفه و اقتصادی نمی‌باشد.

تکنولوژی هیدرات‌های گازی (NGH)

هیدرات گاز طبیعی (NGH)[3]، یک ماده جامد در حالت یخ است و در دمای $-20^\circ C$ پایدار است. دمای پایداری آن به طور قابل توجهی بیش‌تر از دمای گاز طبیعی مایع شده است که منجر به کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری، حمل و نقل و ذخیره‌سازی می‌شود. علاوه‌بر این، به کارگیری آن در مقایسه با LNG و CNG به نسبت راحت است و برای حمل و نقل در مسافت‌های ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ کیلومتر مورد توجه است. با این حال کاربرد تکنولوژی هیدرات گاز طبیعی به منظور بازیافت و ذخیره‌سازی گازهای فلر، همچنان در مرحله پژوهش و توسعه می‌باشد [۸۸،۸۷].

تکنولوژی تبدیل گاز طبیعی به فراورده‌های مایع (GTL)

گاز طبیعی طی فرایندی سه مرحله‌ای، به فراورده‌های مایع و ارزشمندی همچون متانول، دی متیل اتر و سایر فراورده‌های میان تقطیر (مانند گازوئیل و نفت سفید) تبدیل می‌شود. این فناوری با

(۱) Liquefied natural gas

(۲) Compressed natural gas

(۳) Natural gas hydrates

بیش از ۷۰ سال قدمت، هنوز در مقیاس تجاری، در ابتدای راه توسعه‌ی خویش است[۸۹]. در حال حاضر فرایند GTL، که در آن سوخت‌های مایع فرآوری شده از گاز طبیعی (مانند بنزین و دیزل) تولید می‌شود، می‌تواند پاسخگوی تقاضای روزافزون نفت باشد. بنابراین سوخت‌های مایع که برای حمل و نقل گزینه مناسب‌تری هستند، می‌توانند جایگزین گاز طبیعی، در مسافت‌های طولانی باشند [۹۱،۹۰،۷۹]. قابل ذکر است که این تکنولوژی، یکی از اصلی‌ترین و پرکاربردترین روش‌های بازیافت و تبدیل گازهای فلر و از جمله فناوری‌های سازگار با محیط‌زیست است. این تکنولوژی نقش مهمی در عرضه گاز به بازار به عنوان سوخت و یا مواد شیمیایی دارد [۹۲،۵]. فرایند تبدیل گاز دوریز به فراورده‌های مایع، شامل مرحله‌های اصلی خالص‌سازی گاز و فرایند فیشر- تروپش می‌باشد [۴۴]. در این روش پرکاربرد، ابتدا گاز مشعل به عنوان خوراک، تحت فرایندهایی، خالص‌سازی شده تا ناخالصی‌های موجود در گاز دوریز که منجر به صدمه زدن به کاتالیست‌های گوناگون می‌شود، برطرف گردد. در ادامه، اکسیژن و گاز طبیعی همراه با بخار، به منظور انجام فرایند فیشر- تروپش وارد راکتور می‌شوند. فرایند فیشر- تروپش به طور کلی شامل مرحله‌های تولید گاز سنتز، تولید هیدروکربن‌های خطی و در نهایت، پالایش و بهبود کیفیت هیدروکربن‌های خطی می‌باشد. در مرحله تولید گاز سنتز با استفاده از روش‌های موجود، همچون تغییر مولکولی با بخار[۱]، تغییر مولکولی خود گرمایی[۲] یا اکسیداسیون جزئی[۳]، متان و اکسیژن ترکیب شده و گاز سنتز تولید می‌شود. به عبارت دیگر، گاز سنتز ترکیبی از هیدروژن و مونواکسید کربن است که به‌طور معمول حاوی مقادیر کمی از بخار آب و دی‌اکسیدکربن نیز می‌باشد. فناوری تهیه گاز سنتز، فناوری شناخته شده‌ای می‌باشد و شرکت‌های بسیاری در فهرست دارندگان دانش فنی آن قرار دارند. در مرحله تولید هیدروکربن‌های خطی، گاز سنتز تحت فشار اتمسفر و در درجه حرارت ۱۰۰ الی ۳۰۰ درجه سلسیوس، در مجاورت کاتالیست‌های فلزی همچون آهن، کبالت، نیکل، رتینوم و یا رودیم به هیدروکربن‌های خطی تبدیل می‌شود. در مرحله پالایش و بهبود کیفیت هیدروکربن‌های خطی، با استفاده از فرایندهای شناخته شده پالایشگاهی همچون هیدروکراکینگ[۴]، ایزومراسیون[۵]، رفورمینگ کاتالیستی[۶] و الکیل‌دار کردن[۷]، فراورده‌های چون گازوئیل، نفتا، نفت سفید و حتی بنزین یا فراورده‌های ویژه‌ای همچون روغن‌های روان‌ساز و پارافین حاصل می‌شود. لازم به ذکر است، فراورده‌های نهایی بدست آمده از این فرایند، در موارد بسیار معادل فراورده‌های نفتی حاصل از برج تقطیر پالایشگاه‌های نفت خام است که در دامنه C_{10} تا C_{20} قرار دارند و اصطلاحاً به آن‌ها فراورده‌های میان‌تقطیری گفته می‌شود. فرایند نامبرده به نام فرایند تبدیل گاز به فراورده‌های میان تقطیری نیز معروف است [۹۳].

تولید متانول و آمونیاک

متان موجود در گاز طبیعی و گازهای همراه می‌تواند به متانول تبدیل شود. متانول تولید شده به عنوان خوراک، طی دو مرحله واکنش به گستره‌ای از هیدروکربن الفینی مانند اتیلن و پروپیلن و همچنین برای تولید دی‌متیل اتر (DME)[۸] در رآکتورهای ساده، تحت شرایط عملیاتی معمول و در حضور کاتالیست‌های تجاری به کار گرفته می‌شود [۷۹]. متان در گاز همراه نیز می‌تواند از طریق فرایند هابر[۹] به آمونیاک، به منظور تولید کودهای نیتروژنی استفاده شود. این روش در کشورهای تولید کننده نفت حوزه خلیج فارس، بسیار معمول است [۷۸]. در یک پژوهش مرتبط با این زمینه، *سیاوشی* و *همکاران* از گاز دور ریز واحد آمونیاک به منظور تولید هیدروژن خالص به عنوان سوخت پیل سوختی و یا خوراک فرایند هابر استفاده نمودند [۹۴].

مقایسه میان فناوری‌های موجود

عوامل رقابتی گوناگونی از جمله سرمایه‌گذاری، خطرهای فناوری، بازار داخلی و زیرساخت‌های آن، و استراتژی شرکت‌ها در قبال محیط‌زیست در تصمیم‌گیری‌ها مؤثر هستند. این عوامل می‌توانند باعث شوند که یک فناوری در منطقه‌ای عملی و اجرایی شود، در حالی که ممکن است استفاده از همان تکنولوژی در محلی دیگر منطقی نباشد. با توجه به این که مقایسه کلی همه عوامل دشوار است، توصیه می‌شود برای انتخاب بهترین اقدام، مطالعه موردی جنبه‌های گوناگون صورت گیرد.

همچنین روش‌های گوناگون ذخیره‌سازی و انتقال گاز نیز،

(۱) Steam Reforming
(۲) Auto thermal Reforming
(۳) Partial oxidation
(۴) Hydrocracking
(۵) Isomerization
(۶) Reforming catalyst
(۷) Alkylation
(۸) Dimethyl ether
(۹) Haber process

بستگی به نوع مخزن گازی، ترکیب و حجم گاز، مسافت آن تا بازارهای مصرف، میزان سرمایه‌گذاری و سایر ویژگی‌های عملیاتی دارد. در صورت کوتاه بودن مسیر تا بازار و حجم کم گاز، تولید برق یا انتقال با خط لوله گاز، می‌تواند پیشنهاد اقتصادی مناسبی برای فلرینگ باشد. اگر حجم گاز بیش از ۱۰ میلیون متر مکعب در روز و فاصله تا بازار بیش از ۲۰۰۰ کیلومتر باشد، گزینه‌های دیگری برای استفاده از گاز از جمله واحدهای LNG یا GTL و انتقال مایع تولید شده از طریق تانکرها به بازار وجود دارد [۹۶،۹۵]. اگر چه LNG، هزینه های عملیاتی کم‌تری نسبت به GTL دارد، اما هزینه کلی تولید فراورده‌های LNG و GTL برای همان مقدار گاز طبیعی، بسیار همانند و در حدود ۲/۵ میلیارد دلار است. بنابراین GTL و LNG نیاز به سرمایه‌گذاری عظیم در بخش زیرساخت‌ها دارند. قیمت‌گذاری برای فراورده‌های LNG مستلزم قراردادهای بلند مدت است. بنابراین تصمیم‌گیری به منظور نصب و احداث واحد LNG یا GTL وابسته به عوامل دیگری مانند نیاز بازار داخلی، منابع موجود و اولویت شرکت‌ها، دولت‌ها و غیره خواهد داشت [۵۶،۳۳]. با این حال، حجم کم گاز متناوب، از لحاظ اقتصادی برای فروشندگان عمده گاز به خصوص برای تاسیسات و یا خط لوله نفتی، قابل توجه نیست.

فناوری‌های PNG، LNG، CNG و NGH برای حمل ۱۰۰ میلیون متر مکعب گاز طبیعی از بندر عسلویه در جنوب ایران در منطقه خلیج فارس به بازارهای هدف مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه‌ها نشان داد که برای مسافت‌های کوتاه (تا ۲۷۰۰ کیلومتر) PNG بهترین گزینه است. در این بازه، CNG دارای هزینه تولید پایین‌تر از LNG و NGH است، اما هزینه تولید CNG با افزایش فاصله به شدت افزایش می‌یابد. برای مسافت‌های بیش از ۲۷۰۰ کیلومتر، LNG گزینه مناسب‌تری خواهد بود. هم چنین در فواصل متوسط (از ۲۷۰۰ تا ۷۶۰۰ کیلومتر) هنوز PNG دارای کم‌ترین هزینه تولید است. LNG بهترین گزینه برای فاصله‌های بیش‌تر از ۷۶۰۰ کیلومتر می‌باشد [۸۳].

بررسی مقایسه‌ای سه روش گوناگون برای بازیابی گازهای مشعل پالایشگاه گاز عسلویه شامل تبدیل گاز به مایع‌ها (GTL)، تولید برق با توربین گازی، متراکم‌سازی و تزریق به خطوط لوله پالایشگاهی توسط *رحیم‌پور* و *همکاران* انجام شد. نتیجه‌های شبیه‌سازی نشان داد که با روش GTL، حدود ۴۸۰۵۶ بشکه در روز از فراورده‌های GTL تولید می‌شود. روش دوم (تولید برق با توربین گازی)، ۲۱۳۰ مگاوات برق و روش سوم گاز طبیعی متراکم با فشار ۱۲۹ bar را برای تزریق به خط لوله پالایشگاهی تامین می‌کند. از لحاظ اقتصادی، GTL بیش‌ترین نرخ بازگشت را فراهم می‌کند اما در عین حال، نیازمند سرمایه بیش‌تر است. متراکم‌سازی گاز نیز بالاترین میزان بازگشت را به خود اختصاص داد و به دلیل نیاز به سرمایه‌گذاری کم، بهترین گزینه برای پالایشگاه گاز عسلویه محسوب می‌شود. این فرایند جایگزین مناسب برای گازهای معمولی است و از طریق کاهش انتشار مقدار قابل توجهی از دی‌اکسید کربن در اتمسفر، مانع اثرهای زیست‌محیطی می‌شود [۴۳].

استفاده از گاز دوریز واحدهای صنعتی به عنوان خوراک سلول سوختی، می‌تواند به عنوان یک رویکرد جدید برای FGRS در نظر گرفته شود. سلول‌های سوختی، سیستم‌های تولید انرژی هستند که به طور مستقیم انرژی شیمیایی سوخت را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. سلول سوختی اکسید جامد (SOFC)[1]، در میان انواع گوناگون سلول‌های سوختی کارآمدتر است [۹۷]. در سال ۲۰۱۴ میلادی، *سعیدی* و *همکاران* در رویکردی جدید، از سلول سوختی اکسید جامد، برای بازیابی گاز دوریز واحدهای صنعتی استفاده کردند. نتیجه‌های مدل‌سازی برای بازیابی گازهای فلر منطقه عملیاتی پالایش گاز عسلویه نشان داد که استفاده از این فناوری نه تنها موجب تولید برق ۱۲۰۰ مگاواتی می‌شود، بلکه سبب کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از ۱۷۰۰ کیلوگرم در ثانیه به ۶۸ کیلوگرم در ثانیه شده است که در شکل ۱۲ قابل دیدن است. همچنین مطابق با شکل ۱۳ از لحاظ اقتصادی نیز، میزان سرمایه‌گذاری بلند مدت برای فناوری‌های بازیابی گاز دوریز برای توربین گازی (GT) بیش‌تر از سایر موارد بود و پس از آن به ترتیب GTL و فشرده‌سازی گاز قرار داشت. در این میان، میزان سرمایه‌گذاری برای SOFC، به طور قابل توجهی پایین‌تر از سایر روش‌های فلرینگ گاز بود [۹۸].

تجارب موفق در بازیافت گاز دوریز واحدهای صنعتی

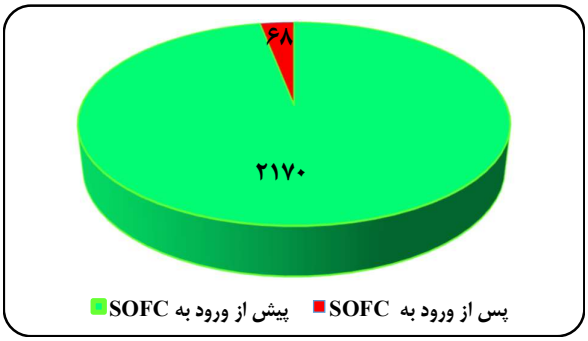
در این بخش برخی از پروژه‌های موفق و بهترین گزینه‌های عملی در زمینه مدیریت و بازیافت گازهای فلر، مورد بررسی قرار خواهند گرفت. از جمله مهم‌ترین طرح‌های جمع‌آوری گازهای همراه در ایران، طرح آماک[2] (آب‌تیمور، منصوری، مارون، اهواز و کوپال) است که گسترده‌ترین پروژه زیست‌محیطی شرکت ملی نفت جنوب ایران به شمار می‌رود. این طرح در فوریه ۲۰۰۵ میلادی جمع‌آوری گاز همراه از ۷ میدان نفتی اهواز (آب‌تیمور، منصوری،

(۱) Solid Oxide Fuel Cell

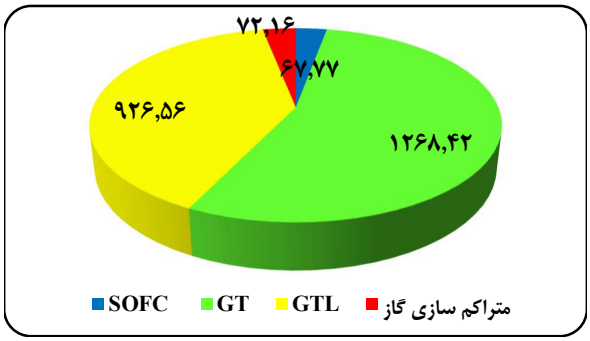
(۲) AMAK

جدول ۹ - گاز سبک تحویل داده شده توسط طرح آماک در سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۰۸ میلادی [۲۰-۲۲].

سال	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵	۲۰۱۶
میزان گاز تحویل داده شده (هزار متر مکعب در روز) طرح آماک	۱۷۱۸/۴	۱۳۹۰/۳	۱۵۷۸/۱	۱۹۵۱/۰	۱۴۰۶/۰۶	۵۳۲/۳	۷۰۱/۵	۴۱۷/۰	۱۱۶۰/۵



شکل ۱۲ - مقایسه جرم معادل گازهای گلخانه‌ای رها شده، پیش و پس از ورود به SOFC [۹۸]



شکل ۱۳- میزان سرمایه‌گذاری ثابت فناوری‌های متراکم سازی گاز، GTL، GT و SOFC [۹۸].

مارون، اهواز و کوپال)، در جنوب غربی ایران آغاز شد. هدف از اجرای این طرح پیشگیری از انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی از طریق جمع‌آوری، آب‌زدایی و شیرین‌سازی گازهای ترش و تبدیل این گازها به گاز شیرین غنی است. گستردگی این پروژه به میزانی بود که مجریان این پروژه می‌بایست هفت کمپرسور گاز ترش، یک کمپرسور گاز اسیدی، یک کارخانه شیرین‌سازی، خط لوله گازرسانی به طول ۲۸۰ کیلومتر و ۹۵ کیلومتر خطوط برق بنا می‌کردند. اجرای این پروژه بزرگ، مانع از انتشار ۶/۸ میلیون متر مکعب گاز ترش و در نتیجه آن بازیابی این میزان گاز می‌شود [۳]. مطابق با ترازنامه هیدروکربوی ایران در سال ۲۰۱۶ میلادی، میزان گازهای سبک تحویل شده توسط طرح آماک، به شرکت ملی گاز ایران در طی سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۰۸ میلادی در جدول ۹ نشان داده شده است [۲۱،۲۰].

متداول‌ترین روش برای استفاده از گاز دوریز در ایران، تولید گاز طبیعی مایع شده (LPG) در واحدهای NGL است. بسیاری از واحدهای NGL در نقطه‌های گوناگون کشور، از گازهای جمع‌آوری شده میدان‌های گوناگون نفتی، برای تولید گاز طبیعی استفاده می‌کنند. همچنین در دهه گذشته، تکنولوژی تزریق مجدد به مخازن در برخی از پروژه‌ها به منظور افزایش بهره‌برداری از نفت رواج داشته است. اگر چه در سال‌های اخیر برخی از پروژه‌های تولید برق و GTL توسط شرکت‌های خصوصی در ایران پیشنهاد شده است، اما این پروژه‌ها هنوز در حال پیشرفت هستند و برای مرحله طراحی و پیاده‌سازی آماده نشده‌اند.

در سطح جهان نیز نمونه‌های موفق بسیاری از مدیریت و بازیافت گاز دوریز وجود دارد. علیرغم افزایش سطح تولید نفت، نروژ با در نظر گرفتن بسته‌های تشویقی و همچنین جریمه‌هایی مانند الحاق مالیات به انتشار گاز کربن دی‌اکسید، موفق به کاهش فلرینگ گاز شده‌اند. در سال ۲۰۰۷ میلادی کل تولید گاز مربوط به کانادا، ۲۳/۷ بیلیون متر مکعب بوده است که ۹۴ درصد آن به منظور گرمایش خانگی، تولید برق و همچنین استفاده صنعتی و تجاری مورد استفاده قرار گرفته است. گاز دوریز در برخی از میدان‌های نفتی، دوباره به مخازن تزریق شده و علاوه بر این، به عنوان سوخت در فرایندهای صنعتی به کار گرفته می‌شود. زیرساخت‌های خط لوله و زیربنای توسعه یافته در کانادا و ایالات متحده، توزیع گاز دوریز در شبکه گاز آمریکای شمالی را ممکن ساخته است. با وجود آن که قوانین مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایالات متحده تنظیم نشده است، قوانین مربوط به سایر ترکیب‌های گازهای همراه، به طور جدی توسط آژانس حفاظت از محیطزیست (EPA)[۱] کنترل می‌شود. آژانس حفاظت از محیطزیست، شرکت‌ها را ملزم به گزارش حجم فلرینگ گاز و تنظیم انتشار گازهای گلخانه‌ای بر اثر فعالیت‌های احتراقی می‌کند. تولیدکنندگان نفت و گاز در خشکی و دریا ملزم به مدیریت گاز همراه، از طریق حمل و نقل به بازار، تولید برق و یا تزریق مجدد به مخازن هستند. در آنگولا نیز چندین پروژه در مدیریت گاز دوریز و تبدیل آن به گازطبیعی مایع شده در حال انجام است [۷۸].

(۱) United States Environmental Protection Agency

نتیجه‌گیری

امروزه اهمیت بکارگیری سامانه‌های بازیابی گازهای ارسالی به مشعل، با توجه به روند رو به رشد تقاضای انرژی در جهان، محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی و همچنین افزایش نگرانی‌ها در ارتباط با آلاینده‌های زیست‌محیطی امری ضروری و انکارناپذیر است. بر اساس آمار بانک جهانی در سال ۲۰۱۷ میلادی، ایران در رتبه سوم بیش‌ترین تولیدکنندگان گازهای فلر در جهان قرار گرفته است که از جمله علل این امر می‌توان به عدم وجود زیرساخت لازم برای فراوری و همچنین انتقال اشاره کرد. بنابراین بررسی راهکارها و روش‌های گوناگون به منظور کاهش یا بازیابی گازهای ارسالی به فلر به منظور بازگشت به چرخه انرژی حائز اهمیت بوده و علاوه بر اقدام‌های نظارتی، نیازمند سرمایه‌گذاری مناسب توسط شرکت‌های نفتی است. این مطالعه به بررسی منابع علمی گوناگون در ارتباط با شیوه‌های موفقیت‌آمیز کاهش میزان فلرینگ و ارزیابی زیست‌محیطی سامانه بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر پرداخته است و با مقایسه فناوری‌های گوناگون بر ضرورت انتخاب هر یک از فناوری‌ها در مناطق گوناگون جغرافیایی، با توجه به عوامل رقابتی گوناگون از جمله زیرساخت‌ها و میزان سرمایه‌گذاری تاکید کرده است. نتیجه‌های بررسی‌ها نشان داده است که برای مسافت‌های کوتاه (تا ۲۷۰۰ کیلومتر) PNG و برای مسافت‌های بیش از ۲۷۰۰ کیلومتر، LNG گزینه مناسب‌تری خواهد بود. همچنین در فواصل متوسط (از ۲۷۰۰ تا ۷۶۰۰ کیلومتر) هنوز PNG دارای کم‌ترین هزینه تولید است. متداول‌ترین روش برای استفاده از گاز دوریز واحدهای صنعتی در ایران، تولید گاز طبیعی مایع شده (LPG) در واحدهای NGL است. در سال‌های اخیر برخی از پروژه‌های تولید برق و GTL توسط شرکت‌های خصوصی در ایران پیشنهاد شده است که هنوز در مرحله‌های ابتدایی طراحی و پیاده‌سازی هستند.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۱

مراجع

[۱] سامانه بازیافت گاز فلر، گروه نوآوری و توسعه فناوری‌های برق و انرژی، وزارت نیرو، معاونت امور برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی (۱۳۹۳).

[۲] ابراهیم فتح آبادی ه.، مدیریت گازهای مشعل ۱ در صنایع نفت و گاز، *ماهنامه علمی- ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز*، ۱۰۳ (۱۳۹۲).

[3] Andersen R.D., Assembayev D.V., Bilalov R., Duissenov D., Shutemov D., "Efforts to Reduce Flaring and Venting of Natural Gas World-Wide", Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, (2012).

[4] Saidi M., Kinetic Study and Process Model Development of CO_2 Absorption Using Hollow Fiber Membrane Contactor with Promoted Hot Potassium Carbonate, *Journal of Environmental Chemical Engineering,* **5(5):** 4415-4430 (2017).

[5] Emam E.A., Gas Flaring in Industry: An Overview, *Petroleum & Coal,* **57(5):** 532-555 (2015).

[۶] وهاب‌پور ا.، شجاعی م.، طهماسب‌زاده م.، رسولی ف.، بررسی آثار محیطزیستی گاز مشعل در ایران و اهمیت آن در راستای تعهدات کشور در توافق پاریس، *مطالعه‌های راهبردی سیاستگذاری عمومی*، **۸:** ۱۳۳ تا ۱۵۴ (۱۳۹۷).

[7] Saidi M., Heidarinejad S., Rahimpour H.R., Talaghat M.R., Rahimpour M.R., Mathematical Modeling of Carbon Dioxide Removal Using Amine-Promoted Hot Potassium Carbonate in a Hollow Fiber Membrane Contactor, *Journal of Natural Gas Science and Engineering,* **18:** 274-285 (2014).

[8] Saidi M., Process Assessment and Sensitivity Analysis of CO_2 Capture by Aqueous Methyldiethanolamine + Piperazine Blended Solutions Using Membrane Contactor: Model Development of Kinetics and Mass Transfer Rate, *Separation and Purification Technology,* **204:** 185-195 (2018).

[9] Zhang D.-D., Wang L., Liu D., Zhao F.-Y., Wang H.-Q., Free Convective Energy Management of an Inclined Enclosure Mounted with Triple Heating Elements: Multiple Morphology Optimizations with Unique Global Energy Supply, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* **115:** 406-420 (2017).

[10] Eia, Country Analysis Brief: Iran, Energy Information Administration, (2018).

[11] Duck B., Reducing Emissions in Plant Flaring Operations, *Hydrocarbon World,* **6(1):** 42-45 (2011).

[12] Ruddy D.A., Schaidle J.A., Ferrell Iii J.R., Wang J., Moens L., Hensley J.E., Recent Advances in Heterogeneous Catalysts for Bio-Oil Upgrading Via "Ex Situ Catalytic Fast Pyrolysis": Catalyst Development through the Study of Model Compounds, *Green Chemistry,* **16(2):** 454-490 (2014).

[13] Iran key Petroleum Sector facilities, svg (2004).

[۱۴] پایگاه اطلاع رسانی شرکت ملی نفت ایران، شرکت نفت در یک نگاه (۱۳۹۷).

[15] BP Statistical, BP Statistical Review of World Energy, BP plc, London, UK (2017).

[16] Drilling Magazine, vol 1 (2016).

[17] EIA , International Energy Statistics. Energy Information Administration (2018).

[18] CDIAC, Fossil-fuel CO_2 emissions. Carbon dioxide information analysiscenter, (2014).

[19] OPEC, Annual Statistical Bulletin. Organization of the Petroleum Exporting Countries, (2018).

[20] Rameshni M., Cost Effective Options to Expand Sru Capacity Using Oxygen Paper Presented at the Sulfur Recovery Symposium Brimstone Engineering Services, Inc., Banlf, Alberta, Calgary, (2002).

[21] Demirbas A., Alidrisi H., Balubaid M., Api Gravity, Sulfur Content, and Desulfurization of Crude Oil, *Petroleum Science and Technology,* **33(1):** 93-101 (2015).

[22] IIES, Hydrocarbon Balance. International Institute for Energy Studies, Ministry of Petroleum, Islamic Republic of Iran, (2016).

[۲۳] ابدی م.ت.، ایرانی م.، توسلی ا.، مدیریت گازهای فلر با استفاده از روش‌های بازیابی، *نشریه مهندسی گاز ایران*، (۱۳۹۶).

[24] Zadakbar O., Vatani A., Karimpour K., Flare Gas Recovery in Oil and Gas Refineries, *Oil & Gas Science and Technology-Revue de l'IFP,* **63(6):** 705-711 (2008).

[25] Rahimpour M.R., Jokar S.M., Feasibility of Flare Gas Reformation to Practical Energy in Farashband Gas Refinery: No Gas Flaring, *Journal of hazardous materials,* **209:** 204-217 (2012).

[26] Davoudi M., Rahimpour M.R., Jokar S.M., Nikbakht F., Abbasfard H., The Major Sources of Gas Flaring and Air Contamination in the Natural Gas Processing Plants: A Case Study, *Journal of Natural Gas Science and Engineering,* **13:** 7-19 (2013).

[27] Jiang P.-X., Fan M.-H., Si G.-S., Ren Z.-P., Thermal–Hydraulic Performance of Small Scale Micro-Channel and Porous-Media Heat-Exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* **44(5):** 1039-1051 (2001).

[28] Shafie-Pour M., Ardestani M., Environmental Damage Costs in Iran by the Energy Sector, *Energy Policy,* **35(9):** 4413-4423 (2007).

[۲۹] سعیدی م.، سیاوشی ف.، تولید هیدروژن با بازیافت گاز دورریز واحد آمونیاک برای تأمین خوراک پیل سوختی اکسید جامد و کاهش گازهای گلخانه‌ای، *نشریه علمی پژوهشی شیمی و مهندسی شیمی ایران*، **۳۶(۴):** ۲۲۱ تا ۲۳۷ (۱۳۹۶).

[30] Worldwide Look at Reserves and Production, *Oil & Gas Journal*, (2017).

[31] Wang X., Sun T., Yang J., Zhao L., Jia J., Low-Temperature H_2S Removal from Gas Streams with SBA-15 Supported ZnO Nanoparticles, *Chemical Engineering Journal,* **142(1):** 48-55 (2008).

[32] Bjorndalen N., Mustafiz S., Rahman M., Islam M., No-Flare Design: Converting Waste to Value Addition, *Energy sources,* **27(4):** 371-380 (2005).

[33] Zhang K., Pang M., The Present and Future of the World's Lng Industry, *International Petroleum Economics,* **13:** 55-59 (2005).

[34] Gielen D., Moriguchi Y., Yagita H., CO_2 Emission Reduction for Japanese Petrochemicals, *Journal of Cleaner Production,* **10(6):** 589-604 (2002).

[35] Mourad D., Ghazi O., Noureddine B., Recovery of Flared Gas through Crude Oil Stabilization by a Multi-Staged Separation with Intermediate Feeds: A Case Study, *Korean journal of chemical engineering,* **26(6):** 1706-1716 (2009).

[36] Anomohanran O., Thermal Effect of Gas Flaring at Ebedei Area of Delta State, Nigeria, *The Pacific Journal of Science and Technology,* **13(2):** 555-560 (2012).

[37] Xu Q., Yang X., Liu C., Li K., Lou H.H., Gossage J.L., Chemical Plant Flare Minimization via Plantwide Dynamic Simulation, *Industrial & Engineering Chemistry Research,* **48(7):** 3505-3512 (2009).

[38] Saidi M., Application of Catalytic Membrane Reactor for Pure Hydrogen Production by Flare Gas Recovery as a Novel Approach, *International Journal of Hydrogen Energy,* **43(31):** 14834-14847 (2018).

[39] Abdulrahman A.O., Huisingh D., Hafkamp W., Sustainability Improvements in Egypt's Oil & Gas Industry by Implementation of Flare Gas Recovery, *Journal of Cleaner Production,* **98:** 116-122 (2015).

[40] Sonawat A., Samad A., Flare Gas Recovery using Ejector-A Review, P*roceedings of the Thirty Ninth National Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power*, SVNIT Surat, Gujarat, India (2012).

[41] Bannwarth H., "Liquid Ring Vacuum Pumps, Compressors and Systems: Conventional and Hermetic Design", John Wiley & Sons, (2006).

[42] Fisher P., Brennan D., Minimize Flaring with Flare Gas Recovery, *Hydrocarbon Processing,* **6(81):** 83-85 (2002).

[43] Rahimpour M., Jamshidnejad Z., Jokar S., Karimi G., Ghorbani A., Mohammadi A., A Comparative Study of Three Different Methods for Flare Gas Recovery of Asalooye Gas Refinery, *Journal of Natural Gas Science and Engineering,* **4:** 17-28 (2012).

[44] Wood D.A., Nwaoha C., Towler B.F., Gas-to-Liquids (GTL): A Review of an Industry Offering Several Routes for Monetizing Natural Gas, *Journal of Natural Gas Science and Engineering,* **9:** 196-208 (2012).

[45] Velasco J.A., Lopez L., Velásquez M., Boutonnet M., Cabrera S., Järås S., Gas to Liquids: A Technology for Natural Gas Industrialization in Bolivia, *Journal of Natural Gas Science and Engineering,* **2(5):** 222-228 (2010).

[46] Hassaneen A., Munack A., Ruschel Y., Schroeder O., Krahl J., Fuel Economy and Emission Characteristics of Gas-to-Liquid (GTL) and Rapeseed Methyl Ester (RME) as Alternative Fuels for Diesel Engines, *Fuel,* **97:** 125-130 (2012).

[47] Zolfaghari M., Pirouzfar V., Sakhaeinia H., Technical Characterization and Economic Evaluation of Recovery of Flare Gas in Various Gas-Processing Plants, *Energy,* **124:** 481-491 (2017).

[48] Heidari M., Ataei A., Rahdar M.H., Development and Analysis of Two Novel Methods for Power Generation from Flare Gas, *Applied Thermal Engineering,* **104:** 687-696 (2016).

[49] Finko V., Finko V., Flared Gas: How to Generate Power and Utilize Combustion Products for CO_2 Recovery, *Digest, Gas Industry of Russia*, (2006).

[50] Anosike N.B., Technoeconomic Evaluation of Flared Natural Gas Reduction and Energy Recovery Using Gas-to-Wire Scheme, *Ph.D. Thesis, Cranfield University, Cranfield.***:** (2013).

[51] Khanipour M., Mirvakili A., Bakhtyari A., Farniaei M., Rahimpour M.R., Enhancement of Synthesis Gas and Methanol Production by Flare Gas Recovery Utilizing a Membrane Based Separation Process, *Fuel Processing Technology,* **166:** 186-201 (2017).

[۵۲] عنایتی سنگسری م.، وطنی ع.، رشتچیان د.، شبیه‌سازی و ارزیابی زیست‌محیطی سامانه بازیابی گازهای ارسالی به شبکه فلر، *نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی*، **۴:** ۳۰ تا ۳۹ (۱۳۹۳).

[53] Brown R.N., Compressors: Selection and Sizing:, *Gulf Professional Publishing*, (1997).

[54] Allamaraju J.P., Mukherjee R., Successful Implementation of Flare Gas Recovery Systems in Gasco Plants, Society of Petroleum Engineers, (2016).

[55] Kostiuk L., Johnson M., Thomas G., University of Alberta Flare Research Project: Final Report, November 1996-September 2004, **37(25):** (2004).

[56] Johnson M.R., Coderre A.R., Opportunities for CO_2 Equivalent Emissions Reductions via Flare and Vent Mitigation: A Case Study for Alberta, Canada, *International Journal of Greenhouse Gas Control,* **8:** 121-131 (2012).

[57] Xiong H., Pham H.N., Datye A.K., Hydrothermally Stable Heterogeneous Catalysts for Conversion of Biorenewables, *Green Chemistry,* **16(11):** 4627-4643 (2014).

[58] Liu Z., Guan D., Wei W., Davis S.J., Ciais P., Bai J., Peng S., Zhang Q., Hubacek K., Marland G., Reduced Carbon Emission Estimates from Fossil Fuel Combustion and Cement Production in China, *Nature,* **524(7565):** 335-338 (2015).

[59] McDaniel M., Tichenor B.A., Flare Efficiency Study, (1983).

[۶۰] خدابنده جهرمی م.، بازیابی گازهای ارسالی به فلر و تبدیل آن‌ها به فراورده‌های پتروشیمی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، (۱۳۹۰).

[61] Anejionu O.C., Whyatt J.D., Blackburn G.A., Price C.S., Contributions of Gas Flaring to a Global Air Pollution Hotspot: Spatial and Temporal Variations, Impacts and Alleviation, *Atmospheric Environment,* **118:** 184-193 (2015).

[62] Ismail O.S., Umukoro G.E., Global Impact of Gas Flaring, *Energy and Power Engineering,* **4(04):** 290 (2012).

[63] Hassan A., Kouhy R., Gas Flaring in Nigeria: Analysis of Changes in Its Consequent Carbon Emission and Reporting, Elsevier, **37(2):** 124-134, (2013).

[64] Efe S., Spatial Variation in Acid and Some Heavy Metal Composition of Rainwater Harvesting in the Oil-Producing Region of Nigeria, *Natural hazards,* **55(2):** 307-319 (2010).

[65] Atuma M.I., Ojeh V.N., Effect of Gas Flaring on Soil and Cassava Productivity in Ebedei, Ukwuani Local Government Area, Delta State, Nigeria, *Journal of Environmental Protection,* **4(10):** 1054 (2013).

[66] Sanchez P., "Properties and Management of Soils in the Tropics", Properties and management of soils in the tropics, John Wiley, New York, (1976).

[67] Ite A.E., Ibok U.J., Gas Flaring and Venting Associated with Petroleum Exploration and Production in the Nigeria's Niger Delta, *American Journal of Environmental Protection,* **1(4):** 70-77 (2013).

[68] Julius O., Thermal Gradient Due to the Gas Flared at Umusadege Marginal Oil Field, Umusadege-Ogbe Kwale Delta State, Nigeria, *Archives of Applied Science Research,* **3(6):** 280-290 (2011).

[69] Li L., Sun T.H., Shu C.H., Zhang H.B., Low Temperature H_2S Removal with 3-D Structural Mesoporous Molecular Sieves Supported ZnO from Gas Stream, *Journal of Hazardous Materials,* **311:** 142-150 (2016).

[70] Webster M., Nam J., Kimura Y., Jeffries H., Vizuete W., Allen D.T., The Effect of Variability in Industrial Emissions on Ozone Formation in Houston, Texas, *Atmospheric Environment,* **41(40):** 9580-9593 (2007).

[71] Egwurugwu J., Nwafor A., Oluronfemi O., Iwuji S., Alagwu E., Impact of Prolonged Exposure to Oil and Gas Flares on Human Renal Functions, *Int. Res. J. Medical Sci,* **1(11):** 9-16 (2013).

[۷۲] آشنایی با فلر، مدیریت بهداشت، ایمنی و محیطزیست شرکت ملی پالایش و پخش (۱۳۹۱).

[۷۳] شمس اردکانی.، آینده گرایی و انرژی: نقش فلرها در ساختار انرژی کشور، *هفتمین همایش مدیریت سبز*، تهران، ایران، (۱۳۹۱).

[74] Argo J., Unhealthy Effects of Upstream Oil and Gas Flaring, A report prepared for Save Our Seas and Shores (SOSS) for presentation before the Public Review Commission Into Effects of Potential Oil and Gas Exploration, *Drilling Activities Within Licenses,* **236(236):** 236 (2002).

[75] Ogidiolu A., Effects of Gas Flaring on Soil and Vegetation Characteristics in Oil Producing Region of Niger Delta Nigeria, *International Journal of Ecology and Environmental Dynamics,* **1(1):** 47-53 (2003).

[76] Hansen, J.,Sato, M., Ruedy, R., Lacis, A., Oinas, V., Global Warming in the 21st Century: An Alternative Scenario, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 97(18): 9875-9880 (2000).

[۷۷] عاملی ف.، فرضی ف.، دبیر ب.، مدل‌سازی جذب گازهای اسیدی در محلول MDEA در کمپرسورهای حلقه – مایع با استفاده از تئوری فیلمی، *دوازدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران*، (۱۳۸۷).

[78] Buzcu-Guven B., Harriss R., Hertzmark D., Gas Flaring and Venting: Extent, Impacts and Remedies, E*nergy Market Consequences of an Emerging US Carbon Management Policy*, *Energy Forum*. Houston: James A. Baker III Institute for Public Policy, Rice University, (2010).

[79] Odumugbo C.A., Natural Gas Utilisation in Nigeria: Challenges and Opportunities, *Journal of Natural Gas Science and Engineering,* **2(6):** 310-316 (2010).

[80] Farina M., Flare Gas Reduction–Recent Global and Policy Considerations, Ge Energy Global Strat, Plan, (2010).

[81] Marouf Mashat A., Technical and Economical Feasibility Study of Using Flare Gas for Converting to Other Products in Iran, *Master's degree final Thesis, Sharif Technical University* (2010).

[۸۲] وضعیت گازهای مشعل و آسیب شناسی عدم موفقیت جمع‌آوری این گازها، *اندیشکده سیاست‌های راهبردی اقتصاد و مدیریت (سرآمد) دپارتمان نفت و انرژی*، (۱۳۹۵).

[83] Najibi H., Rezaei R., Javanmardi J., Nasrifar K., Moshfeghian M., Economic Evaluation of Natural Gas Transportation from Iran's South-Pars Gas Field to Market, *Applied Thermal Engineering,* **29(10):** 2009-2015 (2009).

[84] Thomas S., Dawe R.A., Review of Ways to Transport Natural Gas Energy from Countries Which Do Not Need the Gas for Domestic Use, *Energy,* **28(14):** 1461-1477 (2003).

[۸۵] بیات ع.ر.، یوسفیان ح.، نگاهی بر چرخه و فرایندهای تولید LNG با تاکید بر مخازن نگهداری، *دومین کنفرانس بین‌المللی صادرات گاز ایران، تهران* (۱۳۸۷).

[۸۶] خزایی س.، رضایی ب.، آل یاسین ع.، فضلعلی ع.ر.، بررسی و مقایسه کاربردی روش‌های انتقال و تبدیل گاز طبیعی بر اساس سیاست‌های صنعت گاز طبیعی در ایران، اولین کنفرانس ملی CNG (۱۳۸۷).

[87] Eriksen R., Brandstorp J.M., Cramer E., Evaluating the Viability of Offshore Lng Production and Storage, *paper presented at the GasTech Conference and Exhibition, Doha, Qatar*, (2002).

[88] Marcano J., Cheung R., Monetizing Standard Natural Gas, *Oil and Gas Financial Journal,* **4(2):** (2007).

[89] Fleisch T.H., Associated Gas Monetization Via Minigtl Conversion of Flared Gasinto Liquid Fuels and Chemicals, *Global Gas Flare Reduction Partnership,* (2014).

[90] Hall K.R., A New Gas to Liquids (GTL) or Gas to Ethylene (GTE) Technology, *Catalysis Today,* **106(1):** 243-246 (2005).

[91] Schulz H., Short History and Present Trends of Fischer–Tropsch Synthesis, *Applied Catalysis A: General,* **186(1):** 3-12 (1999).

[92] Iandoli C.L., Kjelstrup S., Exergy Analysis of a Gtl Process Based on Low-Temperature Slurry F−T Reactor Technology with a Cobalt Catalyst, *Energy & Fuels,* **21(4):** 2317-2324 (2007).

[۹۳] احمد خانی ع.ر.، جوان ا.، بررسی اقتصادی فناوری GTL، *نشریه انرژی ایران*، **۸:** (۱۳۸۲).

[94] Siavashi F., Saidi M., Rahimpour M.R., Purge Gas Recovery of Ammonia Synthesis Plant by Integrated Configuration of Catalytic Hydrogen-Permselective Membrane Reactor and Solid Oxide Fuel Cell as a Novel Technology, *Journal of Power Sources,* **267:** 104-116 (2014).

[95] Dong L., Wei S.a., Tan S., Zhang H., GTL or LNG: Which Is the Best Way to Monetize "Stranded" Natural Gas?, *Petroleum Science,* **5(4):** 388-394 (2008).

[۹۶] کریمی م.، هیدرات گازی، تحولی شگرف در آینده فناوری‌های تولید و انتقال گاز طبیعی، *ماهنامه اکتشاف و تولید نفت و گاز*، **۸۱:** ۲۰ تا ۲۴ (۱۳۹۰).

[97] Petruzzi L., Cocchi S., Fineschi F., A Global Thermo-Electrochemical Model for Sofc Systems Design and Engineering, *Journal of Power Sources,* **118(1):** 96-107 (2003).

[98] Saidi M., Siavashi F., Rahimpour M., Application of Solid Oxide Fuel Cell for Flare Gas Recovery as a New Approach; a Case Study for Asalouyeh Gas Processing Plant, Iran, *Journal of Natural Gas Science and Engineering,* **17:** 13-25 (2014).