



## هیدرات گازی؛ تحولی شگرف در آینده فناوری‌های تولید و انتقال گاز طبیعی

مجتبی کریمی<sup>۱</sup> پژوهشگاه صنعت نفت

### ◆ مقدمه

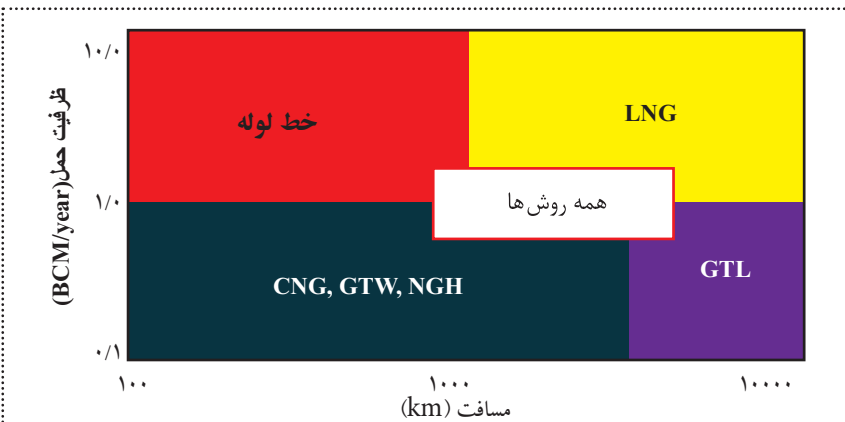
روند افزایش تقاضای منابع انرژی از یک سو و مسائل مربوط به دستیابی به انرژی پاک و اهمیت روزافزون مسائل زیست‌محیطی از سوی دیگر، تقاضای جهانی برای دستیابی به گاز طبیعی را رونق ویژه‌ای بخشیده است. در این راستا، اهمیت کشف و استخراج گاز طبیعی و همچنین مسائل مربوط به انتقال آن از میدان‌های گازی تا محل‌های مصرف بیش از پیش احساس می‌شود. امروزه این انتقال با هزینه‌های فراوان بوسیله گاز طبیعی مایع شده<sup>۲</sup> که فرایندی گران و دارای ریسک است و یا خط لوله انجام می‌گیرد. قرار گرفتن اکثر میداین گاز طبیعی در نقاط دورافتاده و قرار

نداشتن بازار مصرف در نواحی نزدیک این میداین در حال حاضر، استفاده از متداول‌ترین فناوری یعنی خط لوله را با مشکلاتی همراه ساخته است که از مهمترین دلایل، می‌توان به عدم توجه اقتصادی برای مسافت‌های طولانی نام برد. استفاده از خط لوله سال‌های زیادی است که مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما برای مسافت‌های بیشتر از ۲۵۰۰ کیلومتر اقتصادی به نظر نمی‌رسد و هزینه بسیاری صرف عایق کاری لوله‌ها می‌شود. به همین دلیل چند روش دیگر علاوه بر خط لوله برای انتقال گاز طبیعی در نظر گرفته شده که عبارتند از:

گاز طبیعی مایع شده، گاز طبیعی مایع شده تحت فشار<sup>۳</sup>، تبدیل گاز به مایعات با ارزش<sup>۴</sup>،

تبدیل گاز به الکتروسیته و انتقال آن<sup>۵</sup>، گاز طبیعی فشرده شده<sup>۶</sup>، گاز طبیعی جذب شده<sup>۷</sup> و هیدرات گازی<sup>۸</sup>.

در شکل (۱) محدوده مناسب برای هر یک از روش‌های مذکور براساس مسافت و ظرفیت حمل و نقل آمده است. هر یک از این موارد دارای مزایا و معایبی هستند. مثلاً روش گاز طبیعی مایع شده (ال.ان.جی.) قابلیت حمل ۶۰۰ حجم گاز در یک حجم از خود را دارا است، اما برای تولید و انتقال آن رسیدن به دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد زیر صفر لازم است که احتیاج به ملاحظات ایمنی ویژه‌ای دارد. روش سی.ان.جی. احتیاج به فشار ۲۰۰ اتمسفر دارد و برای انتقال آن باید از مخازن با ضخامت بالا استفاده شود که تاکنون تنها مخازن کوچک برای حمل سی.ان.جی. مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش معمولاً جهت مسافت‌های کم تا متوسط مناسب بوده، دارای راندمان حجمی پایین است [۴]. در این میان وجود مسائل مهمی نظیر کاهش ریسک و قیمت انتقال گاز، متخصصین و شرکت‌های بزرگ نفت و گاز را به استفاده از هیدرات



شکل ۱ | محدوده مناسب برای هر روش براساس مسافت و ظرفیت [۴]

<sup>۱</sup> Mojtabaz.karimi@gmail.com

<sup>۲</sup> LNG

<sup>۳</sup> PLNG

<sup>۴</sup> GTL

<sup>۵</sup> GTW

<sup>۶</sup> CNG

<sup>۷</sup> ANG

<sup>۸</sup> NGH

هیدراتها- تا کنون، به هیدرات گازی به عنوان یک پدیده عجیب علمی نگریسته می شود که در آن، آب و گاز به جامد تبدیل میشوند [۲]. در سالهای ۱۹۰۰-۱۸۹۰ اولین مطالعات بر روی هیدرات گازی آغاز شد [۳].

در دوره دوم، از سال ۱۹۳۴ تا کنون، غالباً هیدراتهای گاز به عنوان مانعی در صنعت گاز شناخته می شوند. به عبارت دیگر، این بخش از تاریخچه هیدرات، اختصاص به مشکلات ناشی از تشکیل هیدرات در موارد ناخواسته است [۲]. در سالهای ۱۹۴۰-۱۹۳۰ کشف حضور هیدراتها در لوله های گاز، تأثیر مهم آنها در صنعت را آشکار نمود. اثرات مثبت و پتانسیل مفید هیدرات گازی تا دهه ۱۹۷۰ همچنان ناشناخته بود و تا آن زمان به هیدرات به عنوان یک عامل مزاحم مسدود کننده خطوط لوله نگریسته می شد. [۳]

دوره سوم، از دهه ۱۹۷۰ تا کنون، با کشف این موضوع آغاز شد که میلیونها سال است که تشکیل هیدرات به صورت طبیعی در طبیعت انجام میشود. این هیدراتها در نواحی قطبی یا اقیانوس های عمیق و هم چنین در خارج از جو زمین (سیارات دیگری نظیر مریخ) وجود دارند [۲]. در سال ۱۹۶۴، هیدرات متان تشکیل یافته طبیعی توسط یک خدمه کشتی حفاری از روسیه در مسویاخا<sup>۹</sup> که یک میدان گازی در سیبری است کشف شد. پس از کشف هیدراتهای طبیعی، توجه زیادی به این مسأله معطوف گردید و دانشمندان در صدد یافتن مناطق دیگری که متان یخ زده در آنها وجود دارد، برآمدند. در سالهای ۱۹۸۰-۱۹۷۰، هیدراتهای متان در بستر اقیانوس یافت شد. در سال ۱۹۹۲ برنامه حفاری اقیانوس با هدف جستجوی هیدراتهای ته نشین شده آغاز شد. به این ترتیب، آوردن نمونه های هیدرات به سطح زمین و انجام مطالعات روی آنها امکانپذیر گردید [۳].

در سال ۱۹۳۴ هامر اشمیت دریافت که مسدود شدن لوله های انتقال گاز به دلیل تشکیل هیدرات است. از آن زمان بود که محققان



شکل ۲ | هیدرات گازی سوزانده شده؛ معروف به یخ مشتعل

گیرند. متان با منشأ بیوژنیک، معمول ترین گازی است که در هیدرات های گازی ذخیره شده است و حدود ۹۹ درصد گازهای تشکیل دهنده هیدرات های گاز را تشکیل می دهد. علاوه بر گاز متان، گازهای هیدروکربوری سبک مانند اتان، پروپان، ایزوبوتان و همچنین دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن نیز در هیدرات های گازی وجود دارند. همچنین گازهای دیگری نظیر نئون، آرگون، آرپتون، گزنون، نیتروژن و اکسیژن و یا هیدروکربوری نظیر سیکلوپروپان نیز قادر به ایجاد کریستال هیدرات می باشند. شرایط تشکیل هیدرات عبارتند از: فشار و دمای مناسب، وجود مولکول آب و وجود مولکول گاز.

هیدرات های گازی تشکیل شده در کف دریاها، اقیانوس ها و مناطق قطبی بیشتر از نوع هیدرات متان هستند. از این ماده بعنوان «یخ شعله ور» نیز یاد می شود (شکل ۲).

#### ◆ تاریخچه هیدرات گازی

از نظر تاریخی، تحقیقات انجام یافته روی هیدرات های گاز طبیعی به سه فاز عمده تقسیم می شود [۲]:

در اولین دوره، از سال ۱۸۱۰ - کشف

گازی ترغیب کرده است. اهمیت یافتن هیدرات های گازی در صنعت نفت متعلق به دهه ۱۹۳۰ میلادی است که تشکیل هیدرات گازی مصنوعی باعث مسدود شدن خطوط انتقال گاز طبیعی در مناطق قطبی شده و مشکلاتی را برای این صنعت بوجود آورده است. در اوایل دهه ۱۹۸۰ هیدرات گازی طی پروژه حفاری دریای عمیق در قسمت مکزیکو از رسوبات بستر دریا بازیافت شد و از آن به بعد بازیافت هیدرات گازی طی حفاری های عمیق از رسوبات قسمت های شیب قاره ای اقیانوس آرام و اطلس نیز انجام گرفت. هیدرات های گازی در حال حاضر بعنوان یکی از منابع تأمین سوخت جهان در قرن ۲۱ در نظر گرفته می شود.

در این مقاله مروری بر تحقیقات صورت گرفته در رابطه با اهمیت فناوری هیدرات گازی برای ذخیره سازی و انتقال گاز انجام می شود. همچنین به مزایا و کاربردهای این فناوری در مقایسه با سایر فناوری های کنونی انتقال گاز اشاره ای می شود. نتایج تحقیقات انجام گرفته در این باره نشان داده است که در آینده نه چندان دور فرایند هیدرات گازی می تواند به عنوان روشی برای ذخیره سازی و انتقال گاز مورد استفاده قرار گیرد، گرچه به دلیل مشکلات موجود در تولید هیدرات گازی، این فرایند در مراحل اولیه صنعتی شدن است.

#### ◆ هیدرات گازی چیست؟

هیدرات های گازی از نظر فیزیکی ظاهری شبیه برف داشته و شبکه جامد و کریستالی از مولکول های آب می باشند که با پیوند هیدروژنی به یکدیگر متصل شده اند و مولکول های گازی با وزن مولکولی کم را در خود حبس کرده اند. در هیدرات های گازی مولکول های آب به عنوان میزبان عمل کرده و مولکول های گاز را در داخل خود نگاه می دارند. هر مولکول گازی قادر به تشکیل هیدرات نیست و تنها مولکول هایی قادر به ایجاد مولکول هیدرات هستند، که از نظر اندازه کوچک بوده و بتوانند در این حفره ها جای

<sup>۹</sup> Messoyakha

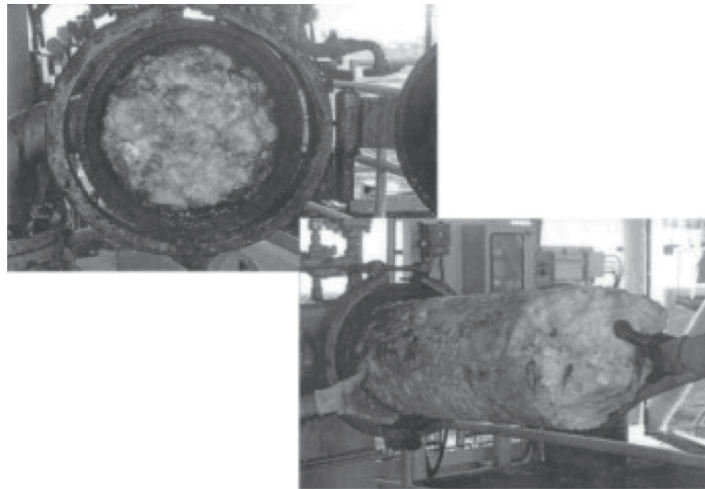


در سال ۱۹۹۷ رقم پیشین ارائه شده از سوی یو.اس.جی.اس. اصلاح شد و میزان منابع هیدرات گازی ۲۰۰ هزار تریلیون فوت مکعب اعلام شد [۳]. هیدرات گازی را می‌توان منبع هیدروکربوری متعارفی (گاز طبیعی) دانست که به حالت نامتعارف (به حالت یخ‌زده) در عمق کمتر (از ده‌ها تا صدها متر) و قابل دسترس‌تر از نفت و گازهای متعارف در قسمت‌های قطبی و رسوبات دریای عمیق یافت می‌شود. این منابع به شکل گسترده‌ای در مناطق مختلف دنیا وجود دارند [۱].

#### ◆ تولید هیدرات گازی

سیکل هیدرات شامل سه مرحله است: تولید هیدرات، انتقال و تجزیه هیدرات (تبدیل دوباره به گاز). فناوری تولید هیدرات گازی جهت انتقال گاز طبیعی توسط گودمانسون و همکاران در اوایل دهه ۹۰ میلادی ابداع شد. گودمانسون و همکاران از دانشگاه نروژ کارهای آزمایشگاهی در این زمینه را در سال ۱۹۹۰ آغاز کردند که نتایج آن در سال ۱۹۹۵ منتشر شد. این فناوری یک راه حل مناسب برای انتقال گاز مخازنی است که دارای مقدار کم تا متوسط گاز بوده و مسافت انتقال گاز نیز متوسط باشد. برای تشکیل هیدرات، شیبه سایر فرایندهای کریستالیزاسیون در ابتدا باید

<sup>10</sup> U.S. Geological Survey



شکل ۳ | مسدود شدن خط لوله توسط هیدرات گازی

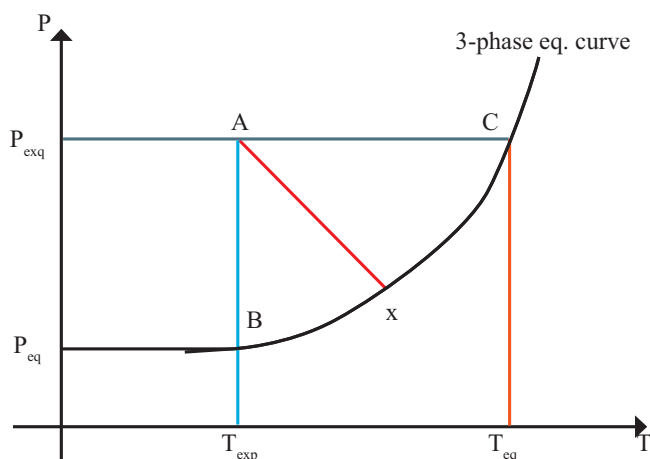
بررسی کرده و نمودار فازی تشکیل هیدرات در حضور این مواد را بدست آوردند [۴].

#### ◆ منابع طبیعی هیدرات گازی

یک منبع بالقوه گاز طبیعی در ذخایر عظیم جهانی هیدرات گازی نهفته است که به صورت طبیعی تشکیل شده‌اند. تخمینی که در سال ۱۹۹۳ درباره حجم این ذخایر منتشر شده است، میزان منابع هیدرات گازی را تا ۷۰۰ هزار تریلیون فوت مکعب (۲۰ هزار تریلیون متر مکعب) تقریب زده است [۱].

بیشتری علاقمند به کار بر روی هیدرات گازی شدند و درصدد برآمدند که با روش‌های مختلف از تشکیل آن جلوگیری کنند. این کار معمولاً با افزودن بازدارنده‌های ترمودینامیکی مانند متانول و گلیکول صورت می‌گیرد و یا با استفاده از بازدارنده‌های سینتیکی مانند پلی‌وینیل‌پیرولیدون می‌توان تشکیل هیدرات را به تاخیر انداخت. در گذشته با توجه به این که تشکیل هیدرات در لوله‌های انتقال گاز بعنوان عامل مزاحم تلقی می‌شده (شکل ۳) توجه زیادی به شرایط تشکیل هیدرات و پیش‌بینی این شرایط با استفاده از مدل‌های ترمودینامیکی صورت گرفته است که در حال حاضر با دقت خوبی می‌توان شرایط تشکیل هیدرات را پیش‌بینی کرد.

شرکت ملی نفت ژاپن با همکاری شرکت مهندسی و کشتی‌سازی میتسویی و شرکت صنایع سنگین میتسویی تحقیقاتی را در زمینه تولید و انتقال هیدرات انجام داده‌اند. کاتوشیکو باندا و همکاران شرایط تولید هیدرات در سیستم پایش آب درون گاز را بررسی کردند. در این تحقیق اثر اندازه ذرات، دما و فشار بر تشکیل هیدرات مورد بررسی قرار گرفت. توشیهارو اکویی و همکاران اثر چند ماده افزودنی را بر سرعت تشکیل هیدرات



شکل ۴ | نمودار تعادلی سه فازی هیدرات و نقطه کاربرد برای تولید هیدرات [۴]

انتقال گاز پرداخته می شود.

#### ۱- ال.ان.جی.

طی فرایند مایع سازی، حجم گاز متان تا ۶۰۰ برابر کاهش میابد [۳]. فناوری ال.ان.جی. برای انتقال گاز طبیعی با کشتی به فواصل دور و مقیاسهای بزرگ استفاده میشود. آمار سال ۲۰۰۱ نشان میدهد که سالانه حدود ۱۰۰ میلیون تن ال.ان.جی. انتقال یافته و تجارت جهانی میشود که معادل ۱۳۷ میلیارد متر مکعب گاز طبیعی است که در همان سال میزان تجارت جهانی برون مرزی صورت گرفته از طریق خطوط لوله، ۳۹۰ میلیارد متر مکعب بوده است. با توجه به این که در سال ۲۰۰۰، میزان مصرف گاز طبیعی در جهان، ۲۴۰۵ میلیارد متر مکعب بوده است، تجارت ال.ان.جی. در مقایسه با تجارت خطوط لوله، ۳۵٪ بوده است، در حالی که سهم هر یک از مصرف کل جهانی به ترتیب ۶٪ و ۱۶٪ است. ژاپن بزرگترین وارد کننده ال.ان.جی. است که بیش از نیمی از تجارت جهانی ال.ان.جی. به آن تعلق دارد [۳].

#### ● مقایسه با فناوری هیدرات

برخلاف فناوری هیدرات (که در مراحل اولیه رشد و توسعه است)، فناوری ال.ان.جی. را میتوان یک فناوری توسعه یافته دانست که مراحل اصلاح برای کاهش هزینه را طی می کند [۳]. مطالعات امکان سنجی نشان میدهد که هزینه فناوری هیدرات برای انتقال گاز طبیعی در مقیاس بزرگ و فواصل دور، یک چهارم کمتر از هزینه لازم برای فناوری ال.ان.جی. خواهد بود [۳].

استفاده از این فناوری به شدت به مقیاس بستگی دارد. برای چاههای با ظرفیت کمتر از ۴ میلیارد متر مکعب در سال، ال.ان.جی. با محدودیت اقتصادی روبرو است. از آنجا که اغلب منابع دور افتاده دارای ظرفیتی بسیار کمتر از این میزان هستند، جذابیت ال.ان.جی. در این موارد کاهش می یابد. اما فناوری هیدرات و

اساس فشرده سازی یا تبدیل شیمیایی به هیدرو کربنهای مایع توسعه یافته اند، برای انتقال گاز طبیعی موجود به گل نشسته<sup>۱۱</sup> یا دور افتاده مناسبتر از ال.ان.جی. هستند، زیرا این فناوری تنها برای انتقال گاز در مقیاسهای بزرگ طراحی شده است؛ در حالیکه در حدود نیمی از میدین دنیا در شمار گازهای به گل نشسته محسوب میشوند. اصطلاح گازهای به گل نشسته یا دور افتاده به منابع گاز طبیعی متمرکز یا غیر متمرکز که در مناطقی دور از خطوط لوله واقع شده اند یا احداث خطوط لوله در آن مناطق اقتصادی نیست، اطلاق میگردد. در برخی موارد نیز منابع گاز در نزدیکی بازارها واقع شده اند، اما این منابع در حدی کوچک هستند که صرفه اقتصادی و سرمایه گذاری هنگفت برای احداث خطوط لوله یا راه اندازی پلنت ال.ان.جی. برای انتقال آنها توجیه پذیر نیست. این منابع در صنعت گاهی با عنوان گازهای حاشیهای<sup>۱۲</sup> شناخته می شوند [۳]. این منابع دور افتاده حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد مخازن گاز جهانی را تشکیل میدهند [۵].

با توجه به مطالب ذکر شده، به نظر میرسد که فناوری ال.ان.جی. بیشتر رقیبی برای خطوط لوله محسوب می شود تا انتقال گاز به صورت هیدرات گازی. فناوریهای مطرح برای ذخیره سازی و انتقال این منابع گاز طبیعی برای استفاده از آنها شامل فناوریهای سی.ان.جی. و جی.تی.ال. هستند [۳]. انتخاب فناوری مناسب برای منابع گازی دور افتاده به فاکتورهای زیادی بستگی دارد که از این میان آن ها، مقیاس (ظرفیت و اندازه) و فاصله تا بازارها دو فاکتور مهم و اساسی می باشند. از مزایای دیگر روش هیدرات آن است که نیازمند دماهای خیلی پایین (نظیر ال.ان.جی.) و یا فشارهای خیلی بالا (نظیر سی.ان.جی.) نبوده و در ضمن فرایند تولید آن کوچک است و می توان آن را در دریا و در محل چاه بر روی سکو استفاده کرد. در هر حجم از هیدرات در شرایط استاندارد بین ۱۵۰ تا ۱۸۰ حجم گاز وجود دارد و با برآورد اقتصادی صورت گرفته هزینه سیکل هیدرات گازی ۲۵ درصد کمتر از ال.ان.جی. بوده است [۴]. در ادامه به مقایسه فناوری هیدرات گازی با سایر فناوریهای

هسته ها بوجود آیند و برای ایجاد هسته ها نیز باید غلظت گازی که قرار است کریستال هیدرات را در آب درست کند از میزان تعادلی آن فراتر رود و به غلظت فوق اشباع برسد. در شکل ۴، منحنی تعادلی سه فاز تشکیل هیدرات برای یک گاز به صورت نمادین رسم شده است. برای تشکیل هیدرات در دمای ثابت مورد آزمایش ( $T_{exp}$ ) باید با افزایش فشار از میزان تعادلی آن ( $P_{eq}$ ) (نقطه B) فراتر رفت و به مقدار ( $P_{exp}$ ) (نقطه A) رسید. با این افزایش فشار غلظت گاز در آب بیش از مقدار تعادلی آن در دمای ( $T_{exp}$ ) شده و زمینه لازم برای ایجاد هسته ها فراهم خواهد شد [۴]. گاز استخراج شده از چاه پس از فشرده شدن سرد می شود تا به دمای تشکیل هیدرات در فرایند مورد نظر برسد. سپس، گاز وارد راکتور تولید هیدرات می گردد [۴].

#### ◆ هیدرات گازی؛ به منزله فناوری نوین در انتقال گاز طبیعی

همانطور که ذکر شد، دانش شناسایی دقیق تر هیدرات گازی به مثابه فناوری نوین به منظور ذخیره سازی و انتقال گاز طبیعی در حال توسعه است. فناوری هیدرات خصوصاً در کشورهای نروژ و انگلستان در حال توسعه است و می تواند برای انتقال منابع گازی متمرکز و غیر متمرکز استفاده شود. طی این فرایند حجم گاز ۱۵۰ بار کاهش می یابد. فشار مناسب برای تولید هیدرات بین ۶۰ تا ۹۰ بار است که با توجه به دما تعیین می شود. کاربردهای هیدرات عبارتند از [۳]:

- انتقال گاز طبیعی به فواصل دور
- ذخیره سازی گاز طبیعی
- انجام فرایندهای پالایش (جداسازی نیتروژن و گازهای اسیدی) روی گاز طبیعی
- جداسازی نمکها و مواد بیولوژیکی از گاز طبیعی
- بازیابی ترکیبات آلی فرار<sup>۱۱</sup>
- کنترل و عاری سازی از دی اکسید کربن

#### ◆ فناوریهای رقیب

به طور کلی فناوری هیدرات و سایر فناوریهای غیر خطوط لوله که بر

<sup>11</sup> Volatile Organic Compounds (VOC)

<sup>12</sup> stranded gas

<sup>13</sup> marginal gas





## ۱ | مقایسه فناوری هیدرات گاز با فناوری ال.ان.جی

اختلاف	LNG	NGH (هیدرات)	زنجیره
۴۲۸	۱۲۲۰	۷۹۲	تولید
۴۶	۷۵۰	۷۰۴	انتقال
۸۳	۴۰۰	۳۱۷	تبدیل دوباره به گاز
۵۵۷	۲۳۷۰	۱۸۱۳	مجموع

### ● مقایسه با فناوری هیدرات

○ فناوری سی.ان.جی. در ابعاد بزرگ برای انتقال گازهای دور افتاده مشابه فناوری هیدرات در حال توسعه است [۳].

○ فناوری سی.ان.جی. معمولاً جهت مسافت‌های کم تا متوسط مناسب بوده و دارای راندمان حجمی پایین است.

### ۳- جی.تی.ال.

این فناوری که طی فرایندی گاز طبیعی را به هیدروکربن‌های با ارزش تبدیل می‌کند اکنون در مرحله تحقیقات قرار دارد. فناوریهای جی.تی.ال. برای حل مشکل بهره‌برداری از منابع دور افتاده، مناسب و قابل رشد و ترقی به نظر می‌رسند. نیگلوروت<sup>۱۸</sup> در سال ۲۰۰۰ یک فناوری جی.تی.ال. برای تولید تقطیر میانی ارائه نموده و با ال.ان.جی. مقایسه کرده است. در این مقایسه یک منبع گاز با ظرفیت ۶/۲ میلیارد متر مکعب در سال در نظر گرفته شده است. این میزان گاز طبیعی می‌تواند به ۶ میلیون تن متانول در سال، ۴ میلیون تن ال.ان.جی. در سال یا ۳ میلیون تن تقطیر میانی در سال تبدیل شود. این محصولات به ترتیب، ۲۰٪، ۴٪ و ۱٪ درصد از بازار جهانی را در بر میگیرند که مشاهده میشود که تبدیل گاز به متانول از طریق فناوری جی.تی.ال. جذابیت بیشتری دارد. جی.تی.ال. می‌تواند مانند ال.ان.جی. در انتقال گاز در مقیاس بزرگ و فواصل دور استفاده شود [۳].

### ◆ نتیجه‌گیری

بطور کلی، روش‌های مختلف ذخیره‌سازی و انتقال گاز طبیعی بستگی به نوع مخزن گازی (ترکیب و حجم گاز)، مسافت آن تا بازارهای مصرف، میزان سرمایه‌گذاری مورد نظر و سایر پارامترهای عملیاتی و تکنولوژیکی داشته و

سی.ان.جی. برای انتقال گاز از این منابع در مقایسه با ال.ان.جی. اقتصادی تر هستند [۳]. گودمسن<sup>۱۴</sup> و بورگ<sup>۱۵</sup> در سال ۱۹۹۶ یک مطالعه موردی را در مورد میدان گازی دریای برنت انجام دادند. فرض شد که گاز طبیعی با خط لوله به ساحل انتقال یافته و فرستادن آن به دو زنجیره گازی هیدرات و ال.ان.جی. با هم مقایسه شدند. هر دو زنجیره متشکل از تجهیزات سطح الارضی، انتقال دریایی توسط تانکرها و تبدیل دوباره سطح الارضی به گاز در نظر گرفته شدند. ظرفیت زنجیره‌ها ۴/۱ میلیارد متر مکعب در سال در نظر گرفته شد و فاصله انتقال ۳۵۰۰ مایل دریایی بود. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه به دست آمده برای هیدرات ۲۵٪ کمتر از ال.ان.جی. محاسبه شد. نتایج این مطالعه در جدول ۱ خلاصه شده است.

### ۲- سی.ان.جی.

طی فرایند فشرده‌سازی فناوری سی.ان.جی، حجم گاز به میزان ۲۰۰ برابر کاهش می‌یابد. از این فناوری به میزان وسیعی برای ذخیره انرژی در اتومبیلها و اتوبوسها استفاده میگردد. از فناوری سی.ان.جی هنوز در مقیاس‌های بزرگ استفاده نمیشود، اما این کاربرد در حال توسعه است. در تخمین هزینه‌ای که توسط استنینگ<sup>۱۶</sup> و کرن<sup>۱۷</sup> در سال ۲۰۰۰ برای تولید سالانه ۴/۱ میلیارد متر مکعب سی.ان.جی. و ال.ان.جی. صورت گرفته است، هزینه تخمین زده شده برای سی.ان.جی. کمتر از ال.ان.جی. بوده است. به عنوان مثال برای انتقال گاز در یک فاصله ۱۷۱۰ کیلومتری هزینه ال.ان.جی.، ۲/۵ دلار به ازای هر بی‌تی‌یو (\$/BTU) و برای سی.ان.جی.، ۱/۵ دلار در هر بی‌تی‌یو بوده است [۳].

هر کدام از خصوصیات ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. فرایند تولید هیدرات گازی هنوز صنعتی نشده است؛ چون مشکلاتی نظیر پایین بودن تبدیل، کم بودن سرعت و مشکل بودن جداسازی آب اضافی در این فرایند وجود دارند؛ گرچه برای بالا بردن سرعت تشکیل هیدرات و افزایش پایداری آن مواد مختلفی به عنوان تسریع کننده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به نظر می‌رسد که با غلبه بر مشکلات فرایند تولید هیدرات در آینده می‌توان از آن به عنوان رقیبی برای فرایند شناخته شده ال.ان.جی. برای میداین کوچک و دور افتاده گاز استفاده کرد. مسئله انتقال گاز و دست‌یابی به فناوریهای نوین آن برای ایران، یکی از مهمترین مسائل استراتژیک در صنعت نفت و گاز است. جمهوری اسلامی ایران اکنون در حال تلاش برای دست‌یابی به بازارهای بیشتری برای فروش گاز منطقه پارس جنوبی است که انجام مطالعات و پژوهش‌هایی در حوزه فناوریهای نوین انتقال گاز طبیعی نظیر هیدرات‌های گازی می‌تواند مسیر پیش روی را برای تدوین استراتژی تکنولوژی توسعه صنعت گاز کشور روشن تر سازد.

### ◆ منابع

- [1] The Schlumberger Natural Gas Strategy; 2004
- [2] Sloan, E. Dendy; "Clathrate Hydrates of Natural Gases"; Taylor Sc Francis Group; Third Edition; 2008
- [3] M.Farkhondeh, A.R.Gheisi; "An Introduction to Natural Gas Hydrate Transportation"; Chemical Engineering Department, Tehran University, Iran; 2002
- [4] محمد آقاییگی؛ "فرایند هیدرات گازی و اهمیت آن"، پتروننت. (<http://www.petronet.ir>)
- [5] "Cooperation with Mitsui for gas technology"; <http://www.ipntnu.no/gudmundssonNGH/pressrelease.pdf>

<sup>14</sup> Gudmundsson

<sup>15</sup> Børrehaug

<sup>16</sup> Stenning

<sup>17</sup> Cran

<sup>18</sup> Nagelvoort