اولین همایش ملی تخصصی گاز ایران
۸ و ۹ آبان ۱۳۸۵
دانشگاه شیراز

The First National Specialty Conference on Gas
30-31 October 2006
Shiraz University

بررسی انتقال گاز از طریق فناوری هیدرات های گازی (GtS[1]) و مقایسه آن با انتقال به شکل CNG و LNG

طیبه فتاحی[۲] ، عبد الرضا مقدسی[۳]
گروه مهندسی شیمی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اراک
tayebeh_fattahi@yahoo.com

چکیده

به رغم روند کاهنده هزینه تولید گاز طبیعی در سالیان اخیر، انتقال گاز طبیعی به وسیله خطوط لوله و یا به صورت LNG همچنان پر هزینه است و بخش عمده هزینه گاز طبیعی منتقل‌شده به مصرف‌کننده را تشکیل می‌دهد.
هیدرات، جامدی بلوری است که از مولکول‌های آب تشکیل شده است و در حقیقت مولکول‌های گاز در درون آن به دام افتاده‌اند. گازهای زیادی هستند که قابلیت تشکیل هیدرات را دارند. از آن جمله می‌توان به هیدروکربن‌هایی با تعداد اتم های پایین نظیر متان اشاره کرد.
شرایط تشکیل هیدرات عبارتند از: ۱) فشار و دمای مناسب ۲) وجود مولکول آب ۳) وجود مولکول گاز. به دلیل آنکه دمای حمل هیدرات بالاتر از دمای حمل LNG می‌باشد، هیدرات گازی را به سهولت می‌توان انتقال داد. از این رو تکنولوژی ساخت کشتی‌های حمل هیدرات پیچیدگی بسیار کمتری نسبت به کشتی‌های حمل LNG خواهد داشت و تاسیسات تولید هیدرات بسیار ساده‌تر از تاسیسات LNG می‌توانند طراحی گردند.
اما مشکل اساسی، حجم کمتر گاز منتقل شده می‌باشد. براساس مطالعات انجام شده در این زمینه، هر یک متر مکعب هیدرات، به طور متوسط ۱۷۵ متر مکعب گاز را در خود جای می‌دهد. در صورتیکه در تکنولوژی LNG کاهش حجم به یک ششصدم می‌رسد و این موضوع در اقتصادی‌بودن طرح‌های انتقال گاز به‌خصوص فواصل دوردست بسیار پراهمیت است. برای

1-Gas to Solid

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی (پالایش - پتروشیمی - گاز)
۳- دکترا مهندسی شیمی - مدیر گروه مهندسی شیمی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اراک

کشورهایی نظیر کشور ما که دارای ذخایر عظیم گازی است، تحقیق و توسعه در زمینه طرح‌های هیدرات و CNG به عنوان راهکارهای جدید انتقال گاز، حرکت مهمی در تحقیق و پژوهش صنعت گاز می‌تواند به شمار رود.
در متن حاضر به بررسی و مقایسه روش های نوین انتقال گاز از قبیل فناوری هیدرات با روش های انتقال از طریق خطوط لوله، LNG و CNG پرداخته شده است

واژه‌های کلیدی: انتقال گاز ـ هیدرات‌های گاز طبیعی ـ خطوط لوله

۱- مقدمه

گاز طبیعی را نمی توان در شرایط اولیه استخراج ذخیره کرد و یا آن را انتقال داد . چون علاوه بر خورندگی، به علت خواص فیزیکی آن، نیازمند به تامین فشارهای بالا و یا دماهای بسیار پایین به منظور افزایش دانسیته توده ای[4] آن می باشد. تعدادی از روش هایی که برای صادرات گاز ازمیادین به بازارهای مصرف وجود دارند، عبارتند از:

- خطوط لوله (Pipeline)
- گاز طبیعی مایع شده (LNG)
- گاز – مایع (GtL)
- تبدیل گاز به کالاهای مصرفی (GtC)
- تولید الکتریسیته با استفاده از گاز، در میادین تولید و انتقال برق توسط کابل (GtW)
- گاز طبیعی فشرده (CNG)
- تبدیل گاز به جامد های هیدراته (GtS or NGH)

هزینه های انتقال گاز به ازای واحد انرژی به علت رفتار فشار- حجم آن، در مقایسه با نفت خام بسیار بیشتر است. اقتصاد انتقال گازطبیعی به حجم سالیانه و مسافت انتقال بستگی دارد. در حال حاضراز خطوط لوله برای انتقال در خشکی با حجم های بالا و فواصل کمتر از 1000 km استفاده می شود. تبدل گاز به مایع (LNG) برای انتقالات دریایی و فواصل بیشتر از 1000 km مورد استفاده می گیرد.[6-4] سایر فناوری های انتقال بدون لوله، برای حجم و فواصل متفاوت مناسب می باشند.[4]

با توجه به توانایی‌های موجود تکنولوژی برای انتقال گاز به فواصل دوردست، روش LNG گاز طبیعی مایع‌شده به عنوان یک روش اقتصادی توانسته دشواری حمل گاز را مقدار زیادی حل نماید. با این حال فروش حجم کمی از LNG همچنان مقرون به صرفه نیست.

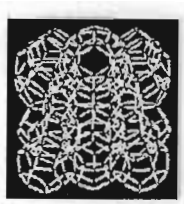
برخی از کارشناسان تبدیل گاز به فراورده‌های مایع (GTL) را نیز راهکاری مناسب جهت انتقال گاز به بازارهای دوردست بیان می‌نمایند؛ زیرا معتقدند با وجود این که هنوز تکنولوژی GTL به طور گسترده مورد استفاده کشورهای دارنده گاز قرار نگرفته است، حمل فرآورده‌های مایع به بازارهای مصرف بسیار ساده‌تر و کم هزینه‌تر از روش تبدیل به LNG می‌باشد. علاوه بر آن فرآورده‌های گاز- مایع را به سهولت می‌توان در بازار مصرف به فروش رساند ولی به دلیل نوع خاص تقاضای LNG که به تاسیسات دریافت خاصی نیازمند است، فروش LNG همواره دشواری بیشتری دربردارد.

به واسطه هزینه‌های بالا برای انتقال گاز طبیعی در هر یک از تکنولوژی‌های فوق‌الذکر، تحقیق و پژوهش برای یافتن راهکارهای دیگر همواره ادامه دارد. در این راستا علاوه بر تکنولوژی LNG و GTL، تکنولوژی‌های CNG و هیدرات نیز ممکن است بتواند به عنوان راهکاری مناسب و ارزان برای انتقال گاز مطرح شوند.[6]

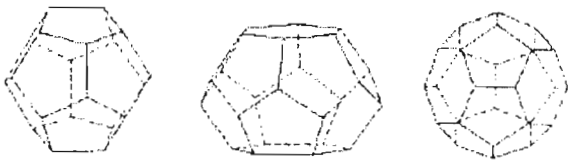
4-Bulk density

۲- هیدرات های گاز طبیعی(NGH)، انتقال گاز بدون لوله

هیدراتاسیون گاز طبیعی زمانی رخ می دهد که شرایط تشکیل بلور مهیا باشد. شرایط تشکیل هیدرات عبارتند از: ۱) فشار و دمای مناسب ۲) وجود مولکول آب ۳) وجود مولکول گاز. از نزدیک شدن پیوند های هیدروژنی مولکول های آب به یکدیگر چند وجهی هایی حاصل می شود که دارای فضاهای خالی بوده و مولکول های گاز را به دام می اندازند.[7]



شکل ۱-الف- یکی از ساختارهای هیدرات CO_2 [7]



شکل ۱-ب- نمونه هایی از پیکربندی هیدراتها

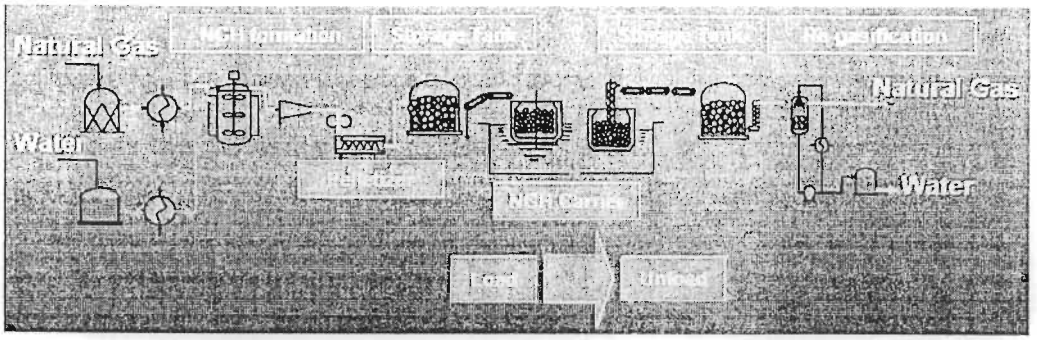
هیدرات متان در فشار 1 atm تا دمای 80- درجه سانتی گراد پایدار است. هیدرات ها در فشار جو به ندرت در دماهای بالاتر از 50-70 k تفکیک می شوند. به این ویژگی هیدرات ها خود- حفاظی[5] گویند.

این ویژگی سبب می شود NGH قابلیت لازم برای انتقال در فشار اتمسفر و دماهایی پایین تر از نقطه انجماد آب داشته باشد. هزینه های انتقال گاز نیز به همین علت کاهش می یابد.[3-1]

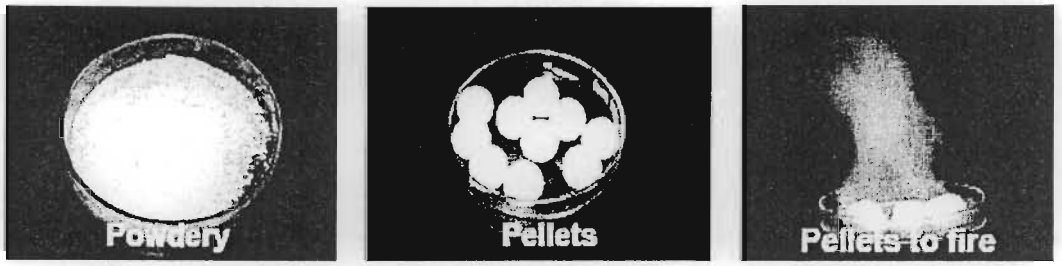
در صورتی که بتوان گاز طبیعی را در دماهای بالاتر و فشار پایین ذخیره کرده و یا انتقال دهیم، از مزایای اقتصادی بزرگی مانند جلوگیری از اتلاف انرژی برای مایع کردن گاز و کاهش هزینه های مربوط به ذخیره کردن و مایع سازی ، بهره مند خواهیم شد.[1]

انتقال گاز طبیعی به شکل NGH[6] از مفاهیم جدید در تکنولوژی انتقال می باشد.تولید NGH و همچنین انتقال آن ساده تر از فرآیند مایع کردن گاز طبیعی (LNG) می باشد. NGH به عنوان یک تکنولوژی انتقال بدون لوله، جهت انتقال حجم های سالیانه کم تا متوسط در فواصل مناسب مطرح می باشد. مطالعات انجام شده نشان می دهند که انتقال گاز به شکل هیدراتهای بلوری برای انتقالات دریایی سودمند تر می باشد.[2] شکل (۲) شمایی از زنجیره انتقال دریایی گاز طبیعی توسط گلوله های[7] NGH را نشان می دهد.

5- Self-preservation
6-Natural Gas Hydrate
7-Pellets



شکل ۲- شمایی از زنجیره انتقال دریایی گاز طبیعی توسط NGH Pellets .[3]

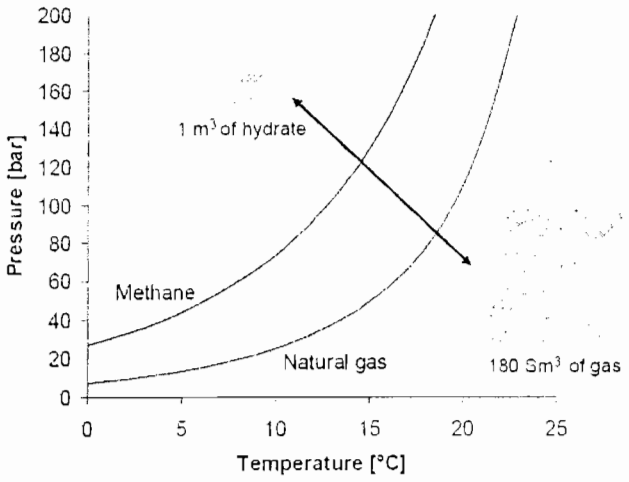


(1) (2) (3)

شکل ۳- اشکال مختلف هیدراتهای گاز طبیعی [3]

به دلیل آنکه دمای حمل هیدرات بالاتر از دمای حمل LNG می‌باشد، هیدرات گازی را به سهولت می‌توان انتقال داد. از این رو تکنولوژی ساخت کشتی‌های حمل هیدرات پیچیدگی بسیار کمتری نسبت به کشتی‌های حمل LNG خواهد داشت و تاسیسات تولید هیدرات بسیار ساده‌تر از تاسیسات LNG می‌توانند طراحی گردند.[2]

شکل (۴) منحنی فشار- دمای متان و گاز طبیعی را نشان می دهد.مطابق با مطالعات صورت گرفته، هر یک متر مکعب هیدرات، 150-180 Sm^3 گاز را در خود جای می‌دهد.[3] در تکنولوژی LNG ،کاهش حجم به یک ششصدم و در CNG به یک دویستم می‌رسد و این موضوع در اقتصادی‌بودن طرح‌های انتقال گاز به‌خصوص فواصل دوردست بسیار پراهمیت است. [4]



شکل ۴- منحنی فشار – دما برای متان و گاز طبیعی (NGH = Natural Gas + Water)

در سال ۱۹۹۵ مطالعاتی با هدف بررسی هزینه های استفاده از NGH ، بر روی یکی از میدان های گازی دریای Barents در کشور نروژ صورت گرفت. به این منظور ازآب دریا با دمای 5°C به عنوان خنک کننده استفاده شد. دو زنجیره LNG و NGH در ظرفیت های مشابه (4.1 BCM per year[8]) و مسافت انتقال 3500 مایل دریایی (6475 Km) با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج بدست آمده در جدول (۱) نشان داده شده است. بر این اساس، هزینه های ثابت NGH حدود 24% کمتر از LNG بدست آمد.

جدول ۱- مقایسه هزینه های ثابت زنجیره NGH و LNG به ازای ظرفیت تولید 400MMscfd و مسافت انتقال 3500 مایل دریایی- بر حسب $ US در سال 1995)

Chain	LNG	NGH	Difference
Production	1220 (51%)	792 (44%)	428 (35%)
Carriers	750 (32%)	704 (39%)	46 (6%)
Regasification	400 (17%)	317 (17%)	83 (21%)
Total	2370 (100%)	1813 (100%)	557 (24%)

در سال ۲۰۰۲ نیز مطالعاتی بر روی یکی از میدان های گازی جنوب شرقی آسیا با شرایط زیر انجام گرفت:
دمای آب دریا (جهت خنک کردن گاز) برابر با 35 °C ، مسافت انتقال برابر با 3243 مایل دریایی . معادل 6000 km ، ظرفیت تولید برابر با 400 MMscfd . جدول (۲) مقایسه هزینه های ثابت زنجیره LNG و NGH در سال ۲۰۰۲ را با شرایط ذکر شده نشان می دهد.

8- = 400 MMscfd (million standarad cubic foot per day)

جدول ۲- مقایسه هزینه های ثابت زنجیره NGH و LNG به ازای ظرفیت تولید 400MMscfd و مسافت انتقال 3243 مایل دریایی - بر حسب $ US در سال 2002)

Chain	LNG	NGH	Difference
Production	1144 (55%)	992 (54%)	152(13%)
Carriers	660 (32%)	628 (34%)	32 (5%)
Regasification	285 (13%)	218 (12%)	67 (24%)
Total	2089 (100%)	1838 (100%)	251 (12%)

هزینه های ثابت LNG در سال ۲۰۰۲ به علت رقابت بازار و رشد فناوری، به میزان 12 درصد نسبت به سال ۱۹۹۵ کاهش یافت. طبق گزارشات موجود هزینه تولید LNG در این سال معادل 2.5 $US/thousand scf of gas بوده است. در این سال هزینه های ثابت NGH حدود 12% کمتر از LNG بدست امد.

بررسی های انجام شده نشان داده اند که دمای سیال خنک کننده (آب دریا) در هزینه های زنجیره NGH بسیار موثر است و به عبارتی میزان سوددهی NHG ، از دمای آب خنک کننده اثر می پذیرد.[4]

در مقایسه فناوری هایی نظیر LNG ، GTL و NGH این طور به نظر می رسد که NGH به نسبت ساده تر و کم هزینه تر بوده و نیازی به فرآیند های پیچیده یا فشار و دمای خیلی بالا ندارد.[3-4-5]

امروزه پیشرفت یک تکنیک عملی و اقتصادی موثر، برای حقیقی شدن انتقال به شکل NGH حیاتی است.[5]

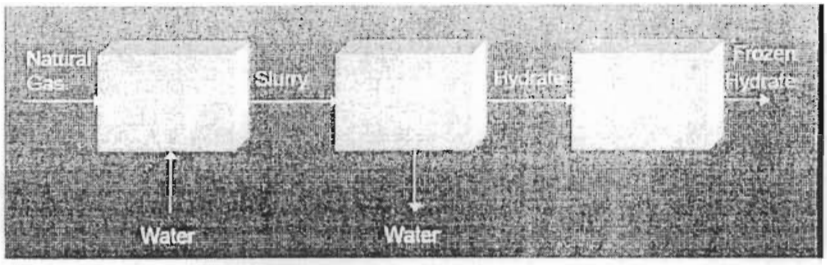
تخمین زده شده که بیش از ۶۰٪ کل هزینه های زنجیره NGH ، به تولید هیدرات های گازی بر می گردد.[5] هیدرات های گازی در مقیاس صنعتی می توانند طی دو مرحله به شکل دوغابی و خشک تولید شوند. فرآیند هیدرات خشک به منظور انتقال گاز طبیعی در مسافتهای طولانی، مورد توجه می باشد. تولید هیدرات دوغابی در یک راکتور CFSTR[9] صورت می گیرد.[4-5]

فرآیندهای شامل تشکیل هیدرات دوغابی و هیدرات زدایی از دوغاب به منظور تولید هیدرات دوغابی غلیظ و یا پودر هیدرات، در فشار اتمسفر پایدار نیستند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، دوغاب قابل پمپاژ که حاوی 75 حجم گاز به ازای حجم دوغاب می باشد، به عنوان هیدرات دوغابی غلیظ در دمای 2- °C و فشار 10 bars معرفی شده است. شکل(۵) شماتیک فرآیند تولید صنعتی هیدراتها را نشان می دهد.

معایب مهم تکنولوژی هیدرات دوغابی عبارتند از:

- سرعت تولید پایین
- نیاز به عملیات هیدرات زدایی در فشار بالا. محدودیت این فرآیند باعث می شود که هزینه های زیادی صرف واحدهای هیدرات زدایی شود. گذشته از این، فرآیند، مرکب از مراحل مختلف برای افزایش مقیاس است.[5]

9-Continuous Flow Stirred Tank Reactor



شکل ۵- شماتیک فرآیند تولید صنعتی هیدراتها[3]

هیدرات منجمد شده در فشار اتمسفر توسط مخازن حمل کننده بزرگی به بازارهای مصرف منتقل می شوند. در آنجا هیدراتها ذوب شده و گاز طبیعی آزاد می گردد.

می توان از گازهای هیدراته به منظور ذخیره سازی گاز طبیعی (در ابعاد بزرگ یا کوچک، در خشکی یا دریا) نیز استفاده نمود. این کار در فشار جو و در دمای پایداری هیدرات، قابل انجام است.

۳- بحث و بررسی

همانطور که گفته شد فناوریLNG از نظر اقتصادی فقط در پروژه های با مقیاس بزرگ عملی است و هزینه استاندارد تولید آن نیز باید محدود به 4 BCM [10] باشد. برای میدان های گازی کوچک تا متوسط، تکنولوژی هیدرات و CNG مناسب تر از مایع سازی گاز، LNG ، می باشد.[3-5]

رشد صنعت در فناوری LNG از ارزشمندی ها و مزایای مهم آن به شمار می آید و این در حالی است که CNG و NGH همچنان از فناوری های نو به حساب آمده و به رشد نرسیده اند. در حال حاضر درکشورهای انگلیس و نروژ تکنولوژی هیدرات ها به کاربردهای عملی رسیده است. کشورهایی نظیر ژاپن نیز در حال طراحی فرآیند های مرتبط با آن می باشند.[4-3-2]

تکنولوژی CNG یا گاز طبیعی فشرده شده، برای انتقال گاز طبیعی در مسافت‌های طولانی، قابلیت مهمی به شمار می‌رود. CNG را می‌توان در کشتی‌های مخصوصی ذخیره و سپس به مقاصد مورد نظر حمل نمود. اگرچه یک کشتی حامل CNG نمی‌تواند گاز را به مقادیر بارگیری شده در کشتی‌های LNG انتقال دهد، ولی روش مایع‌سازی و همچنین تبدیل مجدد به گاز در تکنولوژی CNG سهل‌تر و بسیار کم‌هزینه‌تر از LNG است.

ذخیره‌سازی گاز در کشتی‌های CNG به صورت نگهداری گاز در لوله‌هایی با تحمل 1500-3000 psi و به قطر ۱۸ تا ۳۶ اینچ می‌باشد. این لوله‌ها که به‌صورت افقی و عمودی در کشتی تعبیه شده‌اند، توانایی ذخیره‌سازی مقادیر زیادی گاز را در خود دارند. برای کاهش خطرات احتمالی، دمای این لوله‌ها در ۲۰- درجه سانتی‌گراد حفظ می‌شود.

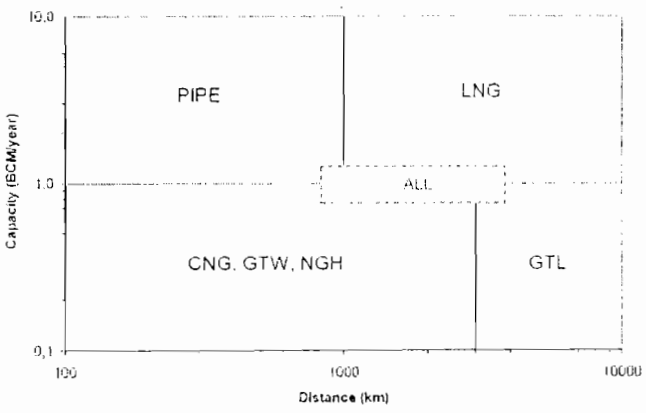
به دلیل فشار بالای CNG در مخازن لوله‌ای شکل، بالابودن احتمال خطر انفجار از مشکلات اساسی عملی‌نشدن کاربرد وسیع تکنولوژی CNG در جهان می‌باشد. امروزه استفاده از تکنیک‌های جدید در ساخت کشتی‌های CNG یعنی به‌کارگیری لوله‌هایی به قطر ۶ اینچ که به‌صورت قرقره‌های بزرگ در درون کشتی تعبیه می‌شوند، پیشنهاد شده است. به هر حال همواره فرآیند های اتمسفری از نظر ایمنی و نداشتن هزینه های مربوط به تامین فشار بیشتر مورد توجه قرار می گیرند.[6]

هزینه واحد های GtL و CtC و همچنین مواد خام مورد نیاز در آنها (مثلا بوکسیت، سیلیکا، لیمستون و ...) بسیار زیاد است. تحقیقات در مورد این دو صنعت همچنان ادامه دارد.[6]

10-Billion cubic meter

خطوط لوله به عنوان یکی از روش های رایج انتقال مطرح است. فشار خطوط لوله معمولاpsig 1100-700 است که به جنس ماده و عمر لوله بستگی دارد. هزینه نصب خطوط لوله در حدود $US 5-1 به ازای هر مایل می باشد.[6] در طراحی خطوط لوله خشکی باید کلیه مسیر های موجود را از حیث مسافت و تاثیرات آن بر هزینه های سرمایه گذاری و عملیاتی پروژه، وضعیت طبیعی و حقوق پرداختی به صاحبان اراضی واقع در مسیر با یکدیگر مقایسه نموده و در نهایت اقتصادی ترین مسیر را جهت انتقال گاز انتخاب کرد. در خصوص مسیر های دریایی با استفاده از تکنولوژی های موجود، امروزه قابلیت نصب خطوط لوله تا عمق بیش از ۲۰۰۰ متر از سطح دریا وجود دارد. اما افزایش فوق العاده هزینه های چنین طرح هایی همراه با افزایش ریسک فنی آن معمولا گرایش کمتری را در بین تامین کنندگان مالی طرح های انتقال گاز جهت سرمایه گذاری چنین طرح هایی (در مقایسه با طرح های خط لوله خشکی) به خود جذب می کند.[8] می توان این مطلب را از دلایل اقتصادی برتری NGH بر خطوط لوله در مسیر های دریایی دانست.

البته باید توجه داشت که میزان بازار بر روی ظرفیت انتقال خصوصا توسط خط لوله اثر می گذارد. شکل (۶) منحنی ظرفیت-مسافت را برای روش های انتقال نشان می دهد.[4]



شکل۶- منحنی ظرفیت تولید- مسافت [4]

۴- نتیجه گیری

از زمان اکتشاف مخزن گازی پارس جنوبی و افزایش ذخایر اثبات شده گاز طبیعی ایران، دولت ایران تلاش خود را برای افزایش صادرات گاز طبیعی توسعه بخشیده است.

بر اساس آخرین آمار موجود، در سال ۲۰۰۴ بیش از ۵۰۲ میلیارد متر مکعب گاز توسط خطوط لوله از کشورهای تولید کننده به کشورهای مصرف کننده منتقل شده است. این رقم ۷۴ درصد از کل تجارت جهانی گاز در این سال را تشکیل می دهد.[8] استفاده از تکنولوژی های ساده تر و کم هزینه تر می تواند سبب کاهش هزینه ها و جذب سود بیشتر برای کشورهای صاحب اینگونه فناوری ها شود. به نظر می رسد NGH ساده ترین و کم هزین ترین گزینه برای انتقال در شرایط مناسب باشد.[7-6-5-4]

مراجع

1- Hideyuki SHIROTA, Kenjiro HIKIDA,Yasuharu NAKAJIMA,Susumu OTA, Toru IWASAKI; " Research on Dissociation Properties of Methane Hydrate Pellets – Use of Gas Hydrate for Natural Gas Sea- borne Transport (2nd Report)- "; The 3rd International Workshop On Methane Hydrate R & D; November 18-21,2003.

2- Tatsuya TAKAOKI; "Technological Developments in NGH Sea Transportation"; Natural Gas Hydrate (NGH):The New Gas Transport System Conference Organised by the Japan Ship Centre (JETRO); London; November 2005;
http://www.jstra.jp/images/research/maritimeseminar2005_20.pdf .

3- Jon Steinar Gudmundsson; "Transport of Natural Gas Using Hydrate Technology"; NTNU-Trondheim, Norway; January 17, 2006.

4- Jón S. Gudmundsson, Norwegian University of Science and Technology-Oscar F. Graff, Aker Kvaerner Technology AS; "Hydrate Non-pipeline Technology for Transport of Natural Gas"; 2003;
http://www.igu.org/WGC2003/WGC_pdffiles/10056_1046347297_14776_1.pdf.

5- R. Masoudi, SPE, and B. Tohidi, SPE, Heriot-Watt U.; SPE 93492, "Gas-Hydrate Production Technology for Natural-Gas Storage and Transportation and CO2 Sequestration"; 2005 SPE 14th Middle East Oil & Gas Show and Conference, Bahrain, 12–15 March.

6- Sydney Thomas, Richard A. Dawe; "Review of ways to transport natural gas energy from countries which do not need the gas for domestic use"; January 2002.

7- http://srs.dl.ac.uk/Annual_Reports/AnRep94_95/Ch2/Studying.html; "Studying the formation of hydrate crystals".

۸- ماهنامه نفت گاز پتروشیمی؛ شماره ۳۵، آبان و آذر ۱۳۸۴.