

## انتقال گاز طبیعی از طریق خط لوله در شرایط فوق بحرانی

مرتضی زیودار<sup>۱\*</sup>، مسلم ابروفراخ<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استاد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۱۰

### چکیده

خط لوله، مرسوم‌ترین روش برای انتقال گاز طبیعی است. یکی از پرهزینه‌ترین مراحل انتقال گاز طبیعی، ایستگاه‌های تقویت فشار است. برای کاهش هزینه‌های ایستگاه تقویت فشار، انتقال گاز طبیعی در حالت فوق بحرانی پیشنهاد شده است. مطالعات بسیار محدودی در زمینه انتقال گاز طبیعی در حال فوق بحرانی وجود دارد. در این مطالعه خط لوله سراسری پنجم در دو حالت فوق بحرانی و عادی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد زمانی که گاز طبیعی در حالت فوق بحرانی انتقال یابد، سرعت گاز ۴ برابر کم‌تر از حالت عادی خواهد شد. در حالت فوق بحرانی افت فشار در خط لوله چهار برابر کاهش می‌یابد. با توجه افت فشار کم‌تر در حالت فوق بحرانی تعداد ایستگاه‌های تقویت فشار از چهار به صفر کاهش می‌یابد. همچنین، در حالت فوق بحرانی در انتهای خط لوله انرژی قابل بازیافت ۳۷۹/۵ مگاوات است.

**کلمات کلیدی:** انتقال گاز طبیعی، فوق بحرانی، افت فشار، ایستگاه تقویت فشار

\* mzivdar@eng.usb.ac.ir

## ۱- مقدمه

گاز طبیعی یکی از مهم‌ترین منابع انرژی در کره زمین است. گاز طبیعی به‌عنوان سوخت فسیلی پاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. جزء اصلی گاز طبیعی متان است. همچنین در گاز طبیعی اجزای اتان، نیتروژن، دی‌اکسید کربن، سولفید هیدروژن و هیدروکربن‌های سنگین‌تر نیز وجود دارد [۱]. روش‌های مختلفی برای انتقال گاز طبیعی از جمله خط لوله، تبدیل گاز طبیعی به مایع، تبدیل گاز طبیعی به الکتریسیته، تبدیل گاز طبیعی به مایعات باارزش، تبدیل گاز طبیعی به گاز فشرده و تبدیل گاز طبیعی به هیدرات‌گازی وجود دارد. اقتصادی‌ترین روش برای انتقال گاز طبیعی به فاصله انتقال گاز طبیعی و میزان حجم انتقال گاز وابسته است. خط لوله، متداول‌ترین روش برای انتقال گاز طبیعی است [۲]. تخمین زده شده است در سال ۲۰۱۷ حدود دو میلیون و هفتصد هزار کیلومتر خط لوله در سراسر دنیا ساخته شده است. با این‌که خط لوله متداول‌ترین روش برای انتقال گاز طبیعی است مشکلاتی مانند افت فشار بالا، تشکیل هیدرات‌گازی، دوفازی شدن گاز طبیعی و هزینه بالای تعمیرات و نگهداری خط لوله در آن وجود دارد. برای کاهش برخی از این مشکلات انتقال گاز طبیعی در حالت فوق بحرانی پیشنهاد شده است. در حالت فوق بحرانی فشار گاز باید بیش‌تر از فشار کریکندبار<sup>۱</sup> و دمای گاز طبیعی بین دمای بحرانی و دمای کریکندنترم<sup>۲</sup> باشد. مطالعات بسیار محدودی در زمینه انتقال گاز طبیعی در حالت فوق بحرانی حتی در سطح بین‌المللی انجام شده است [۳]. ورا و همکاران در سال ۲۰۲۰ یک خط لوله زیر دریا را در حالت فوق بحرانی مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آن‌ها نشان داد در صورتی‌که گاز طبیعی در حالت فوق بحرانی انتقال یابد افت فشار ۲/۶ برابر کاهش می‌یابد [۴]. مشفقیان گاز طبیعی را در دو حالت دوفازی و فوق بحرانی مورد بررسی قرار داد. نتایج مطالعات نشان داد در حالت فوق بحرانی ۷۴ درصد بیش‌تر از حالت دوفازی می‌توان NGL تولید کرد [۵]. در این مطالعه برای اولین بار انتقال گاز طبیعی خط لوله سراسری پنجم ایران در دو حالت فوق بحرانی و عادی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- ترمودینامیک فازی گاز طبیعی

با توجه به تغییرات فشار، حجم و دمای گاز طبیعی در خط لوله، ترمودینامیک فازی گاز طبیعی بسیار حائز اهمیت است. کمال در سال ۲۰۰۲ خواص فیزیکی گاز طبیعی در حالت فوق بحرانی را مورد بررسی قرار داد. مطالعات نشان داد معادله حالت پنگ رابینسون با داده‌های تجربی تطابق بسیار خوبی دارد [۶]. در جدول ۱ اجزای گاز طبیعی خط لوله پنجم نشان داده شده است [۷].

جدول ۱- اجزای گاز طبیعی خط لوله پنجم [۶]

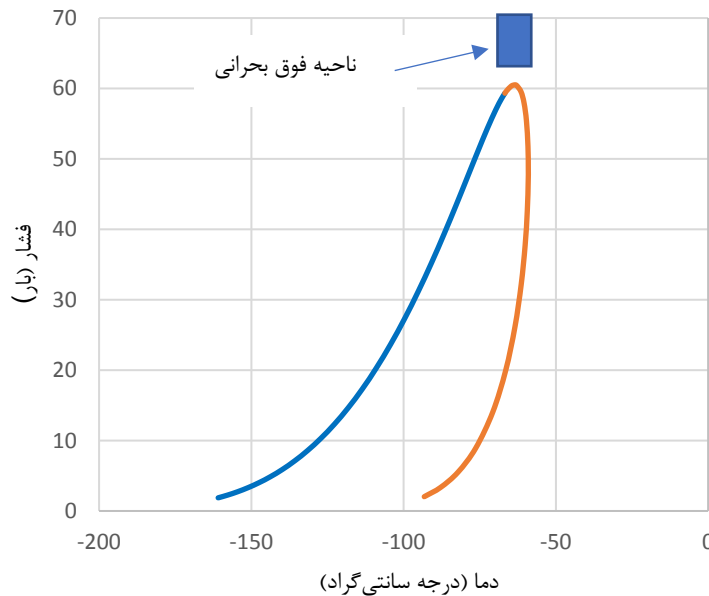
اجزا	کسر مولی
متان	۸۸
اتان	۵/۵
پروپان	۰/۶
ایزو بوتان	۰/۰۴۵
نرمال بوتان	۰/۰۴۳
ایزوانتان	۰/۰۰۲۷

<sup>۱</sup> Cricondenbar

<sup>۲</sup> Cricondenthem

نرمال پنتان	۰/۰۰۱۸
هگزان	۰/۰۰۰۱
نیتروژن	۳/۱
دی‌اکسید کربن	۱/۸
هیدروژن سولفید	۰/۶

در حالت فوق بحرانی فشار گاز طبیعی باید بیش تر فشار کریکاندبار و دمای گاز طبیعی بین دمای بحرانی و دمای کریکاندنترم باشد. در شکل ۱ نمودار فازی گاز طبیعی با استفاده از معادله حالت پنگ رابینسون نشان داده شده است. در این شکل ناحیه فوق بحرانی نیز مشخص شده است.



شکل ۱- نمودار فازی خط لوله سراسری پنجم

در خط لوله سراسری پنجم در حالت فوق بحرانی فشار گاز طبیعی باید بیش تر از ۶۱ بار و دمای گاز طبیعی بین ۶۷- و ۶۰- درجه سانتی‌گراد باشد.

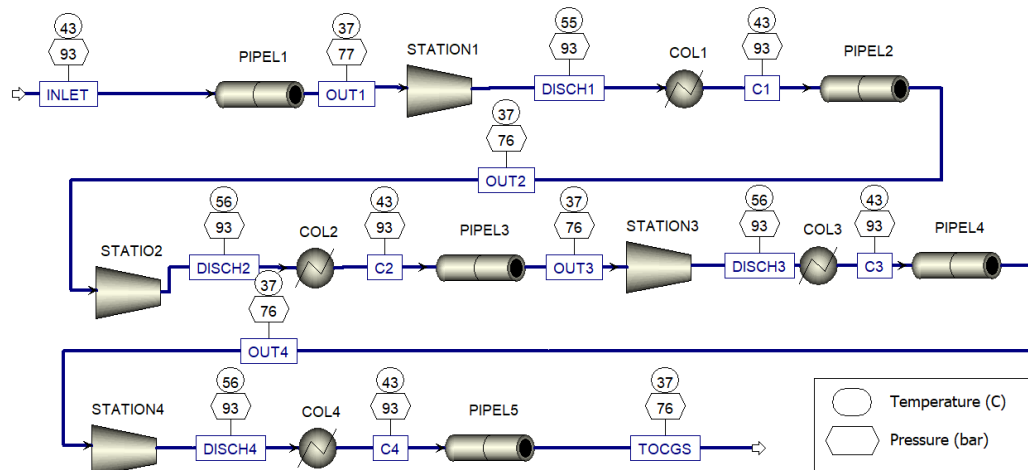
### ۳- شرح فرایند

هدف اصلی در این مطالعه، انتقال گاز طبیعی خط لوله سراسری پنجم در حالت فوق بحرانی و مقایسه آن با حالت عادی است. شبیه‌سازی خط لوله در حالت فوق بحرانی و عادی با نرم‌افزار اسپن پلاس انجام شده است. در این مطالعه معادله حالت پنگ رابینسون برای محاسبات ترمودینامیکی مورد استفاده قرار گرفته است. در خط لوله سراسری پنجم، متوسط فشار مجاز در خط لوله ۷۰ بار و انتقال حرارت از گاز درون خط لوله با محیط بیرون ناچیز فرض شده است. اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی در جدول ۲ نشان داده شده است.

**جدول ۲- اطلاعات خط لوله [۶]**

پارامتر	مقدار
فشار ورودی (bar)	۹۳
دمای ورودی (°C)	۴۳
دبی جرمی (kg/s)	۸۹۹/۴۲
دبی حجمی در شرایط استاندارد (m <sup>3</sup> /day)	۱۰۰۰۰۰۰۰
طول خط لوله (km)	۵۰۰
ایستگاه تقویت فشار	۴
قطر (in)	۵۶

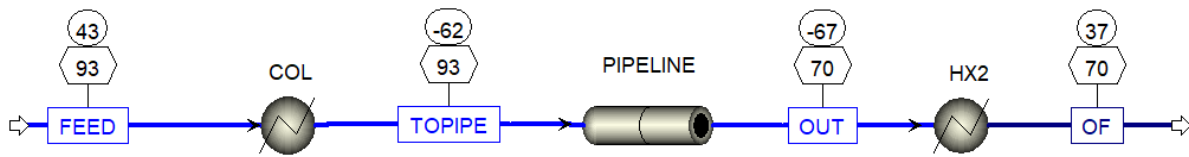
در شکل ۲ شبیه‌سازی انتقال گاز در حالت عادی نشان داده شده است. در این حالت تعداد ۴ ایستگاه تقویت فشار در فاصله ۱۰۰ کیلومتری از هم قرار گرفته‌اند. در هر ایستگاه، دما و فشار گاز طبیعی به حالت اولیه رسانده می‌شود.


**شکل ۲- شبیه‌سازی خط لوله در حالت عادی**

در شکل ۳ شبیه‌سازی انتقال گاز طبیعی در حالت فوق بحرانی نشان داده شده است. اولین مرحله برای شبیه‌سازی خط لوله در حالت فوق بحرانی، رساندن شرایط عملیاتی گاز طبیعی به ناحیه فوق بحرانی است. برای این منظور، فشار گاز باید بیش‌تر از ۶۱ بار و دمای آن بین ۶۰- و ۶۷- درجه سانتی‌گراد باشد. به دلیل این‌که فشار گاز بیش‌تر از ۶۱ بار است نیازی به افزایش آن نیست با این حال دمای گاز از ۴۵ به ۶۲- درجه سانتی‌گراد کاهش داده شده است. برای سرد کردن گاز طبیعی (۱۰۰ میلیون مترمکعب در روز در شرایط استاندارد) در حالت فوق بحرانی از دمای ۴۵ تا ۶۲- درجه سانتی‌گراد نیاز به سیکل تبرید است. با توجه به شرایط عملیاتی در حالت فوق بحرانی، در تمام طول ۵۰۰ کیلومتر نیازی به ایستگاه تقویت فشار نیست. جریان خروجی از خط لوله در دمای ۶۷- درجه سانتی‌گراد است. امکان استفاده از انرژی گاز خروجی برای خطوط لوله مجاور، تولید NGL<sup>۳</sup> و LNG<sup>۴</sup> فراهم است.

<sup>3</sup> Natural Gas Liquid

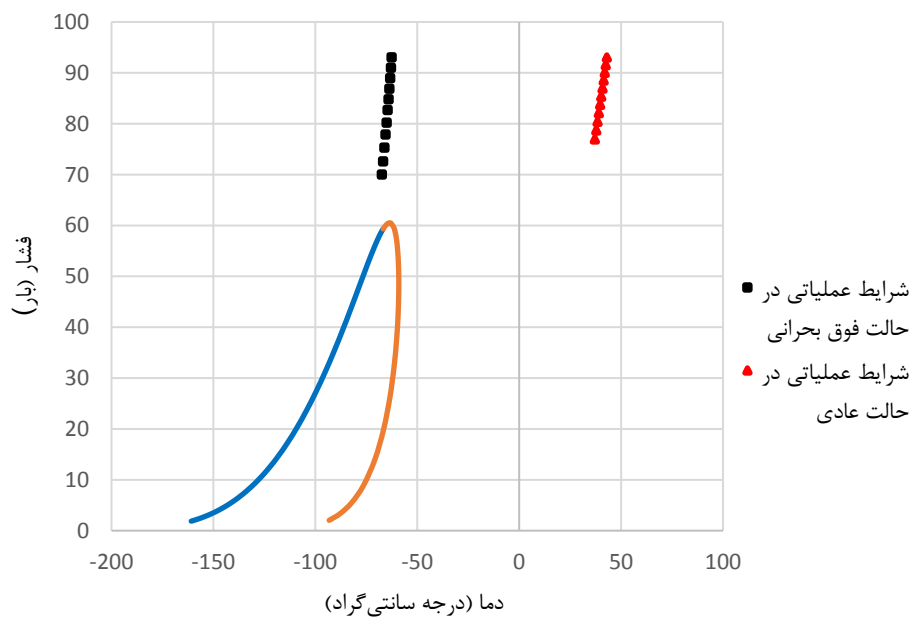
<sup>4</sup> Liquid Natural Gas



شکل ۳- شبیه‌سازی خط لوله در حالت فوق بحرانی

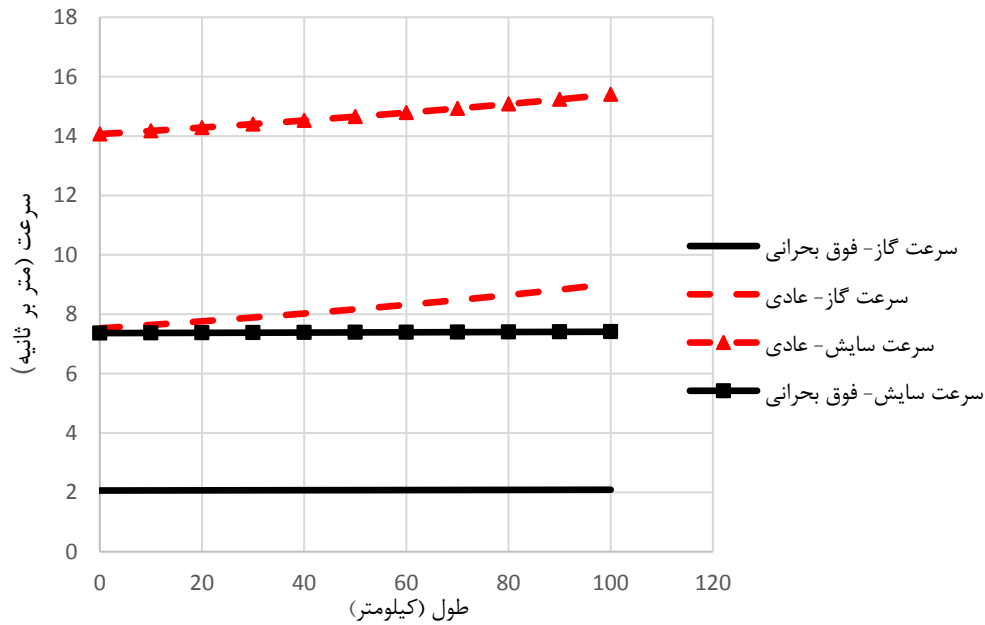
#### ۴- نتایج و بحث

در شکل ۴، شرایط عملیاتی خط لوله در طول ۵۰۰ کیلومتر در حالت فوق بحرانی و در هر ۱۰۰ کیلومتر در حالت عادی نشان داده شده است. با توجه به شکل واضح است شرایط گاز طبیعی در حالت فوق بحرانی در تمام خط لوله در شرایط فوق بحرانی است.



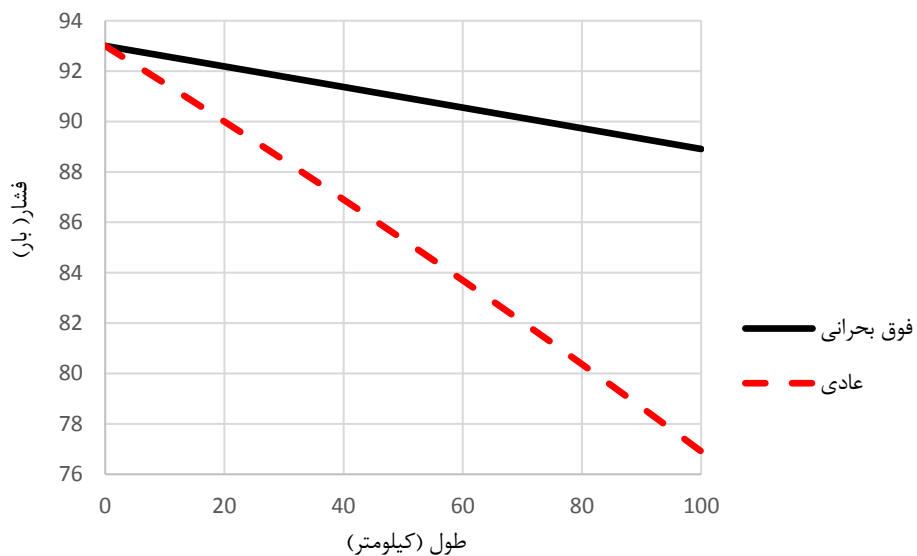
شکل ۴- نمودار عملیاتی خط لوله در شرایط فوق بحرانی

در شکل ۵ تغییرات سرعت گاز در دو حالت عادی و فوق بحرانی نشان داده شده است. سرعت متوسط گاز در حالت فوق بحرانی برابر با ۲ و در حالت عادی برابر با ۸ متر بر ثانیه است. با توجه به شکل واضح است به‌طور متوسط سرعت گاز در حالت فوق بحرانی ۴ برابر کمتر از حالت عادی است. همچنین مطابق شکل ۷، سرعت سایش در حالت فوق بحرانی به‌مراتب بیشتر از سرعت گاز درون خط لوله است بنابراین سایش اتفاق نمی‌افتد.



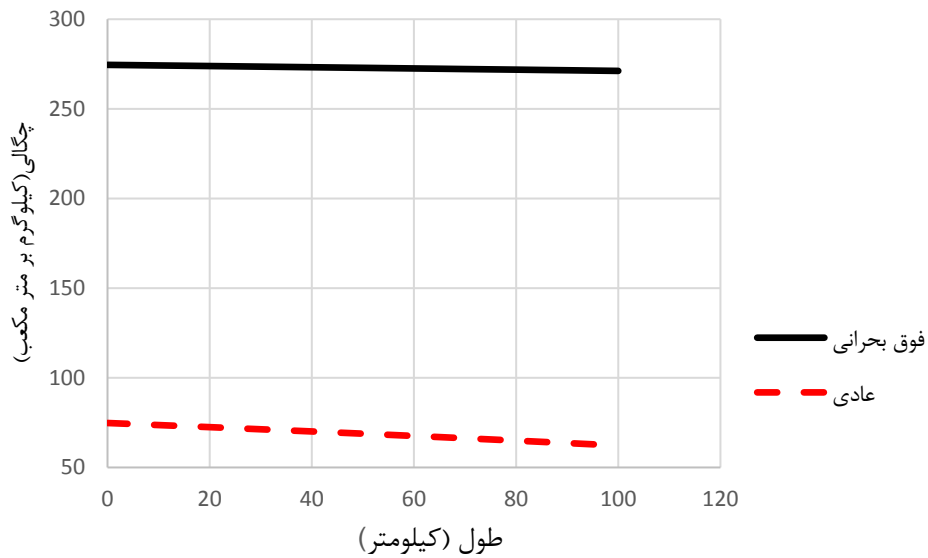
شکل ۵- تغییرات سرعت گاز در دو حالت عادی و فوق بحرانی

در شکل ۶ پروفیل فشار برحسب طول خط لوله در دو حالت فوق بحرانی و عادی نشان داده شده است. با توجه به شکل افت فشار در حالت فوق بحرانی ۴ برابر کم تر از حالت عادی است.



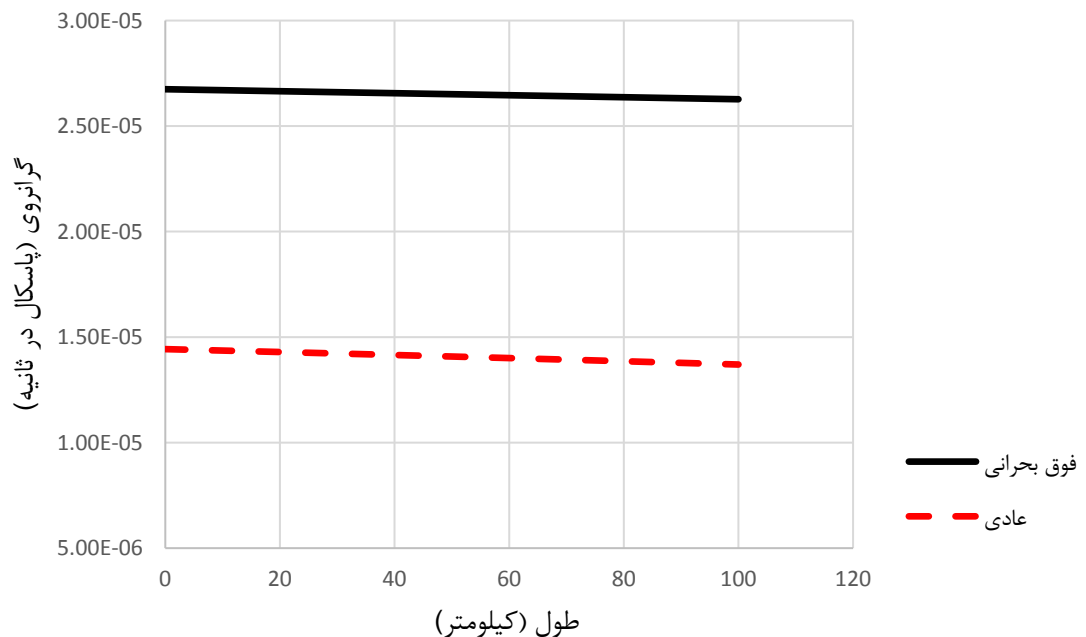
شکل ۶- تغییرات فشار در دو حالت عادی و فوق بحرانی

در شکل ۷ تغییرات چگالی در دو حالت فوق بحرانی و عادی نشان داده شده است. چگالی گاز طبیعی در حالت فوق بحرانی مشابه چگالی مایعات است. به طور متوسط چگالی در حالت فوق بحرانی برابر با ۲۷۲ و در حالت عادی ۶۸ کیلوگرم بر مترمکعب است.



شکل ۷- تغییرات چگالی در دو حالت عادی و فوق بحرانی

در شکل ۸ تغییرات گرانروی در دو حالت عادی و فوق بحرانی نشان داده شده است. گرانروی گاز در حالت فوق بحرانی مشابه گازها است. به طور متوسط گرانروی در حالت فوق بحرانی برابر با  $10^{-5} \times 2/5$  و در حالت عادی برابر با  $10^{-5} \times 1/4$  پاسکال در ثانیه است.



شکل ۸- تغییرات گرانروی در دو حالت عادی و فوق بحرانی

در جدول ۳ تعداد ایستگاه‌های تقویت فشار، مقادیر توان کل کمپرسورها (کل خط لوله)، انرژی سردسازی و انرژی قابل بازیافت در دو حالت فوق بحرانی و عادی نشان داده شده است. از مقدار انرژی قابل بازیافت در حالت فوق بحرانی

می‌توان برای سردسازی گاز طبیعی خط لوله‌های مجاور، تولید LNG و یا تولید NGL استفاده کرد. مقدار صفر برای توان کمپرسورها در حالت فوق بحرانی به دلیل عدم وجود ایستگاه‌های تقویت فشار در حالت فوق بحرانی است.

#### جدول ۳- انرژی و توان مصرفی تجهیزات

پارامتر	عادی	فوق بحرانی
ایستگاه تقویت فشار	۴	۰
(MW) توان کمپرسور	۱۲۰	۰
(MW) انرژی سردسازی	۱۱۹	۳۷۴/۴
(MW) انرژی قابل بازیافت	۰	۳۷۹/۵

#### ۵- تخمین هزینه‌ها

هزینه‌ها عمدتاً در حالت فوق بحرانی مربوط به سردسازی گاز و در حالت عادی مربوط به ایستگاه‌های تقویت فشار است. برای تخمین هزینه سردسازی و فشرده‌سازی گاز از بخش تخمین اقتصادی نرم‌افزار اسپن پلاس استفاده شده است. در جدول ۴ مجموع هزینه‌های سردسازی و فشرده‌سازی نشان داده شده است.

#### جدول ۴- هزینه‌های انرژی

پارامتر	عادی	فوق بحرانی
هزینه‌های انرژی در یک سال (دلار)	۸۱,۹۷۱,۰۰۰	۶۸,۹۴۱,۰۰۰

با این‌که هزینه‌های انرژی در حالت فوق بحرانی ۱۹ درصد کمتر از حالت عادی است اما در خروجی از خط لوله ۳۷۹/۵ مگاوات انرژی قابل بازیافت در حالت فوق بحرانی نیز وجود دارد که می‌تواند برای تولید NGL و LNG مورد استفاده قرار گیرد.

#### نتیجه‌گیری

در این مطالعه انتقال گاز طبیعی خط لوله پنجم در حالت فوق بحرانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد:

- در حالت فوق بحرانی، افت فشار ۴ برابر کاهش می‌یابد.
- تعداد ایستگاه‌های تقویت فشار از چهار به صفر کاهش پیدا می‌کند.
- انرژی قابل بازیافت در حالت فوق بحرانی ۳۷۹/۵ مگاوات است.
- امکان تولید NGL و LNG در شرایط فوق بحرانی امکان‌پذیر است.
- گاز طبیعی در کل خط لوله در شرایط فوق بحرانی بوده و بنابراین حالت دوفازی برای گاز طبیعی ایجاد نخواهد شد.
- سرعت گاز طبیعی در حالت فوق بحرانی ۵/۵ برابر کمتر از حالت عادی است.
- سایش در کل خط لوله اتفاق نخواهد افتاد.





- [1] Faramawy, S., Zaki, T., Sakr, A., Natural gas origin, composition, and processing: A review. J. Nat. Gas Sci. Eng., Vol. 34, 2016, pp. 35-45.
- [2] Thomas, S., Dawe, R., 2003. Review of ways to transport natural gas energy from countries which do not need the gas for domestic use. Energy, Vol. 28, 2003, pp. 1461–1477.
- [3] Zivdar, M., Abrofarakh, M., 2021. Investigating the Natural Gas Transmission in Supercritical Condition, Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 20(116), 2021, pp. 50-63.
- [4] Vargas, B., Santiago, A., Simancasa, M., gas transport at dense phase condition for the development deep-water fields in the Colombian Caribbean Sea, CT&F, Vol 10, 2020, pp. 17-32.
- [5] Moshfeghian, M, <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2012/08/transportation-of-natural-gas-in-dense-phase>.
- [6] Kamal, K.B., 2002. Performance of five equations of state for the prediction of VLE and densities of natural gas mixtures in the dense phase region, Chem. Eng. Comm, Vol.189, 2002, pp. 151-172.
- [7] Haddad, J., Behbahani, R., Shishesaz, M., 2014. Power Consumption Minimization of Khormoj Compressor Station, Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology, Vol 3 (2), 2014, pp. 66-79.