

شبیه‌سازی انتقال گاز طبیعی توسط خط لوله در شرایط دوفازی و فوق بحرانی

مسلم ابروفراخ^۱، مرتضی زیودار^{۲*}، داود محبی کلهری^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲. عضو هیأت علمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۳. پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: mzivdar@eng.usb.ac.ir

مقاله‌ی علمی-پژوهشی

صفحه ۸ - ۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۹

چکیده

خط لوله انتقال گاز طبیعی به‌عنوان یکی از روش‌های مرسوم و اقتصادی جهت انتقال گاز طبیعی می‌باشد که بررسی و مطالعه آن جهت کاهش افت فشار و جلوگیری از تشکیل سیال دوفازی ضروری است. برای کاهش این مشکلات، در این مطالعه انتقال گاز طبیعی در شرایط فوق بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است. برای انتقال گاز طبیعی در شرایط فوق بحرانی دمای گاز باید بین دمای بحرانی و بیشترین دما در ناحیه دوفازی و همچنین فشار گاز باید بالاتر از بیشترین فشار در ناحیه دوفازی باشد. هدف اصلی در این مطالعه، شبیه‌سازی خط لوله انتقال گاز طبیعی در دو حالت فوق بحرانی و دوفازی با استفاده از نرم‌افزار اسپن پلاس نسخه ۱۲/۱ می‌باشد. برای شبیه‌سازی خط لوله از معادله پنگ-رابینسون برای محاسبه خواص ترمودینامیکی استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی شبیه‌سازی خطوط لوله نشان داد بیشترین خطای نسبی بین شبیه‌سازی و داده‌های خطوط لوله ۴/۵ درصد است؛ بنابراین تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های خطوط لوله وجود دارد. بعد از اعتبارسنجی، افت فشار، تغییرات دما، تغییرات دانسیته و هزینه‌های مرتبط در دو حالت فوق بحرانی و دوفازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعات نشان داد در حالت فوق بحرانی، افت فشار ۳ برابر کمتر از حالت دوفازی است. همچنین نتایج مطالعات نشان داد کاهش دما در حالت فوق بحرانی برابر ۲۱ درصد و در حالت دوفازی ۵۳ درصد است. نتایج مربوط به بررسی دانسیته نشان داد در حالت فوق بحرانی و دوفازی تغییرات دانسیته به ترتیب برابر با ۵ و ۳۶ درصد است. در نهایت مشخص شد هزینه مصرف کل انرژی موردنیاز در سال در حالت فوق بحرانی و دوفازی تقریباً مشابه و به ترتیب برابر با ۱۸۶۰۰۰ و ۱۸۳۱۰۰۰ دلار در سال می‌باشد.

کلید واژه‌ها: فوق بحرانی، گاز طبیعی، خط لوله، دوفازی

۱. مقدمه

گاز طبیعی با جزء اصلی متان یکی از منابع انرژی کره زمین است که در زیر زمین تشکیل می‌شود. گاز طبیعی به‌عنوان یکی از سوخت‌های فسیلی با آلودگی کمتر نسبت به سوخت‌های فسیلی دیگر، یکی از مهم‌ترین سوخت‌های فسیلی می‌باشد، بنابراین استخراج و انتقال آن بسیار مهم می‌باشد [۱ و ۲]. بعد از استخراج و پالایش گاز طبیعی، مهم‌ترین مرحله، انتقال



آن به مقصد جهت فروش و یا استفاده از آن جهت مصرف می‌باشد. برای انتقال گاز طبیعی روش‌هایی مانند خط لوله، گاز طبیعی مایع شده، گاز طبیعی فشرده شده، تبدیل گاز طبیعی به مایعات با ارزش افزوده مانند متانول، تبدیل گاز طبیعی به هیدرات گازی و تبدیل گاز طبیعی به الکتروسیته وجود دارد [۳]. از خط لوله به دلیل هزینه‌های کم می‌توان به‌عنوان یکی از روش‌های مرسوم انتقال گاز طبیعی نام برد. در (شکل ۱) روش‌های انتقال گاز طبیعی برحسب فاصله انتقال به مقصد (محوری افقی) و ظرفیت خط لوله (محور عمودی) نشان داده شده است [۴]. انتقال گاز طبیعی توسط خط لوله برای همه ظرفیت‌ها و فاصله کمتر از ۲۱۰۰ کیلومتر مناسب است، بنابراین با توجه به مزایای انتقال گاز طبیعی توسط خط لوله مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است. گرگوری^۱ و همکاران مدل‌سازی و شبیه‌سازی ریاضی یک خط لوله به طول ۳۰۰ هزار فوت و قطر ۱۲ اینچ را در حالت تک فازی مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آن‌ها تغییرات خواص فیزیکی با دما در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی سیستم از معادلات موازنه جرم و انرژی در حالت یک‌بعدی استفاده شد. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد تأثیر تغییرات خواص فیزیکی بر تغییرات دما و فشار قابل توجه است [۵]. موری^۲ و همکاران طراحی و مدل‌سازی یک خط لوله در فشار بالا را مورد بررسی قرار دادند. برای مدل‌سازی گاز طبیعی درون خط لوله از معادلات جریان و انرژی استفاده شد [۶]. مولر^۳ و همکاران معادلاتی برای بررسی افت فشار خط لوله در حالت دوفازی ارائه دادند. آن‌ها برای بررسی معادلات افت فشار از داده‌های تجربی گسترده‌ای استفاده کردند. نتایج مطالعات نشان داد با افزایش درصد کیفیت، افت فشار خط لوله افزایش می‌یابد [۷]. ژانگ^۴ و همکاران انتقال یک گاز را توسط خط لوله مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آن‌ها نشان داد دانسیته گاز در طول خط لوله کاهش می‌یابد [۸]. مخاطب روشی تحلیلی با استفاده از معادلات بقا برای بررسی دما و فشار در خط لوله گاز طبیعی در حالت‌های تک فازی و دوفازی ارائه داد. نتایج مطالعه تطابق خوبی با داده‌های تجربی نشان داد [۹]. در هر صورت، برای انتقال گاز طبیعی

در خط لوله مشکلاتی مانند تشکیل سیال دوفازی، افت فشار بالا و هزینه بالای نگهداری کمپرسورها وجود دارد. برای کاهش این مشکلات انتقال گاز طبیعی در شرایط فوق بحرانی پیشنهاد شده است. برای انتقال گاز طبیعی در شرایط فوق بحرانی، دمای گاز طبیعی باید بین دمای بحرانی و بیشترین دما در ناحیه دوفازی (دمای کریکندنترم) باشد. همچنین فشار گاز طبیعی باید بالاتر از بیشترین فشار گاز در ناحیه دوفازی (فشار کریکندبار) باشد. در (شکل ۲) ناحیه فوق بحرانی در نمودار فازی نشان داده شده است. برای مثال برای انتقال گاز طبیعی (شکل ۲) در شرایط فوق بحرانی فشار گاز باید بیشتر ۱۵ مگاپاسکال و دمای گاز طبیعی بین ۳۰- و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد باشد. مطالعات محدودی در زمینه انتقال گاز طبیعی در شرایط فوق بحرانی برای کاهش افت فشار خط لوله وجود دارد. برای مثال مشفقیان در سال ۲۰۱۲ انتقال گاز طبیعی در شرایط فوق بحرانی را مورد بررسی قرار داد. در مطالعه او از یک نمونه گاز طبیعی استفاده شد. شبیه‌سازی خط لوله با استفاده از نرم‌افزار پرومکس^۵ انجام گردید و در نهایت نتایج مطالعات نشان داد افت فشار در حالت فوق بحرانی کاهش می‌یابد [۱۰]. ورگاس^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۹ انتقال گاز طبیعی توسط خط لوله زیر دریا را در حالت فوق بحرانی و دوفازی مورد بررسی قرار دادند نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد در حالت فوق بحرانی افت فشار نسبت به حالت معمول ۲/۶ برابر کاهش می‌یابد [۱۱]. همچنین در مطالعات دیگری در سال ۲۰۲۲ زیودار و همکاران نشان دادند افت فشار در حالت فوق بحرانی نسبت به حالت تک فازی ۴ برابر کاهش می‌یابد [۱۲]. آل‌مر^۷ و همکاران در سال ۲۰۲۳ خواص فیزیکی گاز طبیعی را در حالت فوق بحرانی مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات نشان داد رفتار دانسیته در فاز فوق بحرانی مشابه مایعات و ویسکوزیته آن مشابه گازها می‌باشد [۱۳]. پراساد^۸ و همکاران در سال ۲۰۲۳ انتقال گاز طبیعی را در حالت فوق بحرانی با مدل‌سازی ریاضی مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد گاز طبیعی با دبی ۸۰۰ کیلوگرم بر ثانیه می‌تواند تا ۴۸۰۱ کیلومتر بدون فشرده‌سازی انتقال

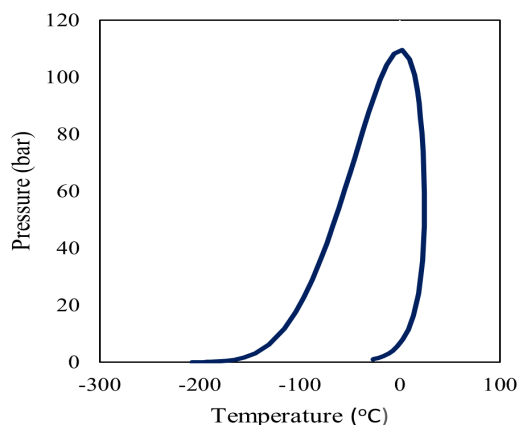
1. Gregory
2. Moore
3. Müller
4. Zhang
5. Promax
6. Vargas
7. Almara
8. Prasad



۲. روش

در این مطالعه هدف شبیه‌سازی خط لوله گاز طبیعی در دو حالت فوق بحرانی و دوفازی است. برای این منظور از نرم‌افزار اسپن پلاس استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی خط لوله ابتدا باید اجزای گاز طبیعی وارد شوند بعد از آن مدل ترمودینامیکی مناسب برای سیستم انتخاب گردد. در نهایت خط لوله، کمپرسور و مبدل حرارتی برای شبیه‌سازی وارد محیط نرم‌افزار می‌گردند همچنین برای شبیه‌سازی خط لوله در فاز فوق بحرانی نیاز است ابتدا شرایط بحرانی گاز طبیعی مشخص گردد. برای این منظور از نمودار فازی استفاده می‌شود؛ بنابراین در (شکل ۳) نمودار فازی گاز طبیعی (جدول ۱) نشان داده شده است. برای انتقال گاز طبیعی ایت گاز در شرایط فوق بحرانی دمای آن باید بین ۲۵- تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار آن بیشتر از ۱۱۰ بار باشد. بازه دما و فشار با استفاده از دماهای بحرانی و کریکاندنترم^۱ و همچنین فشار کریکاندنبار^۲ تعیین شدند. در حالت فوق بحرانی ابتدا فشار گاز طبیعی به ۱۲۱ بار افزایش داده می‌شود تا اطمینان حاصل شود گاز طبیعی در تمام خط لوله در شرایط فوق بحرانی می‌باشد (فشار ورودی طوری انتخاب می‌گردد که فشار خروجی از خط لوله بیشتر از ۱۱۰ بار باشد). برای شبیه‌سازی خط لوله انتقال گاز طبیعی از نرم‌افزار اسپن پلاس ورژن ۱۲/۱ استفاده شده است. در این نرم‌افزار برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی خط لوله گاز طبیعی از موازنه جرم، انرژی و معادلات بیگنر-بریل استفاده می‌شود. همچنین برای محاسبه خواص ترمودینامیکی از معادله پنگ-رابینسون استفاده می‌شود.

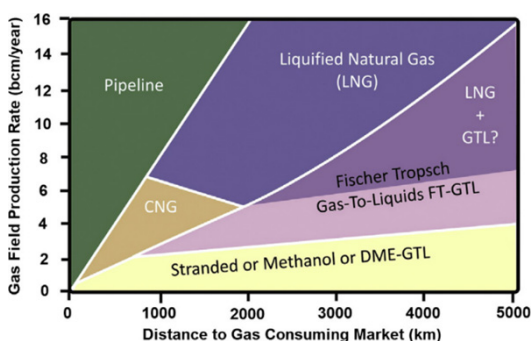
در معادلات ۱ تا ۳ معادلات موازنه جرم، انرژی جریان و بیگنر-بریل برای حالت خط لوله آدیاباتیک نشان داده شده‌اند [۱۵].



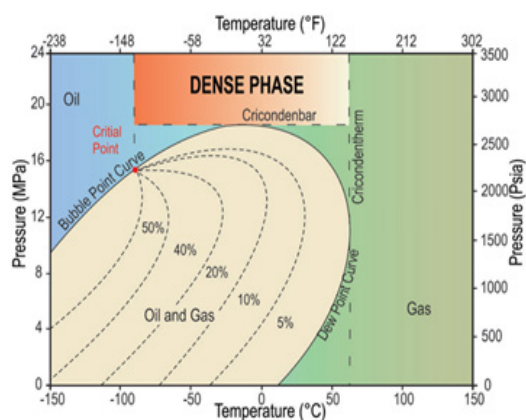
شکل ۳: نمودار فازی گاز طبیعی جدول ۱

1. Criconden therm temperature
2. Criconden bar pressure

باید [۱۴]. همان‌طور که مرور مطالعات نشان می‌دهد انتقال گاز طبیعی در حالت فوق بحرانی موضوع نسبتاً جدیدی است و نیاز به مطالعات بیشتری در این زمینه می‌باشد. همچنین در بیشتر مطالعات گذشته از گاز طبیعی پالایش شده استفاده شده است. بنابراین در این مطالعه از یک گاز طبیعی با ناخالصی قابل توجه از گاز سولفید هیدروژن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. به صورت کلی در این مطالعه هدف انتقال گاز طبیعی در شرایط فوق بحرانی و دوفازی و مقایسه نتایج این دو روش با استفاده از شبیه‌سازی خط لوله گاز طبیعی به کمک نرم‌افزار اسپن پلاس می‌باشد. برای این منظور تغییرات فشار، دما، دانسته، انرژی و هزینه‌ها برای انتقال گاز طبیعی مورد بررسی قرار خواهند گرفت. برای شبیه‌سازی گاز طبیعی با درصد بالای گاز سولفید هیدروژن از خط لوله‌ای که از بین چاه استخراج و پالایشگاه است استفاده شد است. برای این منظور از داده‌های خط لوله مسجدسلیمان تا ماهشهر استفاده می‌گردد. در (جدول ۱ و ۲) مشخصات گاز طبیعی و خط لوله نشان داده است [۹].



شکل ۴: روش‌های انتقال گاز طبیعی [۹]



شکل ۵: ناحیه فوق بحرانی در نمودار فازی [۹]

$$\sum_{i=1}^N m_i - \sum_{j=1}^M m_j = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N m_i H_i - \sum_{j=1}^M m_j H_j = 0 \quad (2)$$

$$\frac{dP}{dL} = \frac{g \sin(\alpha) [\rho_G (1 - H_L) + \rho_L H_L] + \frac{f G v}{2D}}{1 - \frac{[\rho_G (1 - H_L) + \rho_L H_L] v v_{sg}}{P}} \quad (3)$$

در معادلات (۱) تا (۳) m_i جریان جرمی ورودی و m_j جریان جرمی خروجی می‌باشد. N و M به ترتیب تعداد جریان‌های ورودی و خروجی می‌باشند. H_j و H_i آنتالپی‌های ورودی و خروجی می‌باشند. در معادله (۳) P فشار خط لوله، ρ دانسیته گاز طبیعی، g شتاب گرانش، v سرعت گاز طبیعی، v_{sg} سرعت سطحی گاز α زاویه با افق خط لوله H_L کسر حجم مایع (در صورت دوفازی شدن گاز طبیعی در حالت تک فازی و فوق بحرانی برابر با صفر است)، G شار جرمی، f ضریب اصطکاک داری و L طول خط لوله می‌باشد.

۳. شبیه‌سازی خط لوله:

برای شبیه‌سازی خط لوله در اسپن پلاس ابتدا اجزاء گاز طبیعی وارد و سپس معادله ترمودینامیکی مناسب انتخاب می‌گردد. در این مطالعه از معادله پنگ-رابینسون استفاده شده است. بعد انجام دو مورد فوق، تجهیزاتی مانند خط لوله، کمپرسور و مبدل حرارتی وارد محیط شبیه‌سازی می‌شوند.

در (شکل ۴) اطلاعات ورودی و خروجی در دو حالت فوق بحرانی و دوفازی در نرم‌افزار اسپن پلاس نشان داده شده است. اجزاء جریان ورودی در حالت فوق بحرانی و دوفازی مطابق (جدول ۱) است. همچنین دما و فشار ورودی برای حالت دوفازی برابر با ۳۵ درجه سانتی‌گراد و ۸۰/۲۹ بار می‌باشد. با توجه به (شکل ۴)، در حالت دوفازی گاز طبیعی وارد خط لوله شده و سپس جریان خروجی از خط لوله وارد یک درام می‌شود تا معیانات گازی از آن جدا شوند. جریان گاز بالای درام وارد کمپرسور می‌شود تا مجدد فشار آن به فشار ورودی خط لوله برسد. خروجی از کمپرسور به دلیل دمای بالا وارد مبدل حرارتی شده و دمای آن نیز به دمای ورودی می‌رسد.

در حالت فوق بحرانی از جریانی مشابه با جریان ورودی دوفازی استفاده می‌شود با این تفاوت که دما و فشار ورودی در این حالت باید متفاوت باشد؛ بنابراین در حالت فوق بحرانی ابتدا توسط کمپرسور فشار گاز طبیعی از ۸۰/۲۳ به

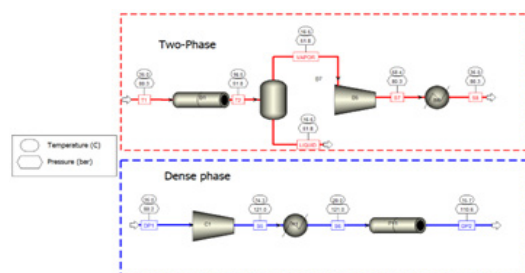
۱۲۱ بار افزایش داده شده تا فشار آن مطابق با حالت فوق بحرانی شود. فشار ۱۲۱ بار برای ورودی خط لوله فوق بحرانی طوری انتخاب شده است که فشار خط لوله در کل خط لوله در حالت فوق بحرانی باشد. همچنین به دلیل افزایش دما در خروجی از کمپرسور، جریان خروجی از کمپرسور وارد یک مبدل حرارتی شده تا دمای آن از ۷۴/۲ به ۲۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یابد. دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد باعث می‌شود گاز طبیعی در محدوده فوق بحرانی باشد؛ بنابراین افزایش فشار و کاهش دما به این دلیل است که گاز طبیعی وارد حالت فوق بحرانی شود.

جدول ۱: اجزای گاز طبیعی [۹]

اجزاء	درصد کسر مولی
H ₂ S	۲۵/۶
N ₂	۰/۲
CO ₂	۹/۹
C ₁	۶۲/۹
C ₂	۰/۷
C ₃	۰/۲
iC ₄	۰/۰۶
nC ₄	۰/۰۹
iC ₅	۰/۰۴
nC ₅	۰/۰۵
C ₇	۰/۲۶

جدول ۲: اطلاعات خط لوله [۹]

مشخصات	مقدار
طول (km)	۱۶۸/۰۰
قطر (cm)	۴۸/۲۶
ضخامت (mm)	۱۴/۰۰
دبی جرمی (kg/s)	۵۹/۱۲
فشار ورودی (bar)	۸۰/۲۹
دمای ورودی (°C)	۳۵/۰۰
دمای محیط (°C)	۱۵/۰۰



شکل ۴: شبیه‌سازی خط لوله در شرایط فوق بحرانی و دوفازی

۴. نتایج و بحث

۴-۱. اعتبار سنجی

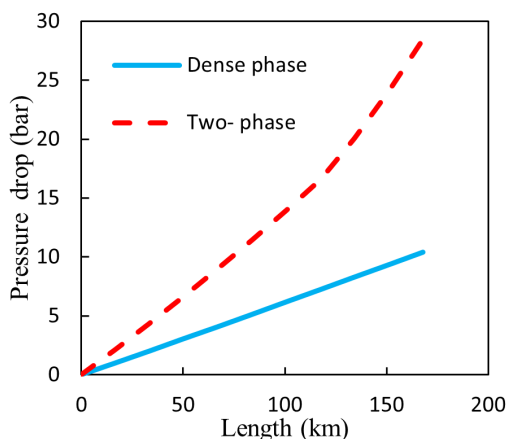
اعتبارسنجی نتایج خروجی یکی از مراحل مهم شبیه‌سازی است تا از نتایج به‌دست آمده اطمینان حاصل شود. برای این منظور از نتایج موره و همکاران [۶] برای اعتبار سنجی نتایج استفاده شده است. اطلاعات اجزای گاز طبیعی و خط لوله اول تا سوم در مرجع [۶] وجود دارند. برای اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی از فشار و دمای خروجی سه خط لوله استفاده شده است. در (جدول ۳)، فشار و دمای خروجی شبیه‌سازی با اطلاعات خروجی سه خط لوله مقایسه شده است. نتایج اعتبار سنجی نشان می‌دهد بیشترین خطای بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج موره و همکاران برابر ۴/۵۵ درصد نسبی است؛ بنابراین تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و خروجی‌های خطوط لوله وجود دارد.

جدول ۳: اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی [۶]

خط لوله	خط لوله ۱	خط لوله ۲	خط لوله ۳
فشار خروجی (خط لوله)	۲/۲۶	۴/۶۶	۳/۵۹
فشار خروجی (شبیه‌سازی)	۲/۱۵	۴/۵۵	۳/۵۷
دمای خروجی (خط لوله)	۲۸۲/۳	۲۹۰/۶	۲۸۰/۶
دمای خروجی (شبیه‌سازی)	۲۸۳/۲	۲۸۸/۹	۲۸۲/۴
درصد خطای نسبی (فشار)	۲/۱۵	۴/۵۵	۳/۵۷
درصد خطای نسبی (دما)	۰/۰۳	۰/۵۸	۰/۶۴

۴-۲. افت فشار

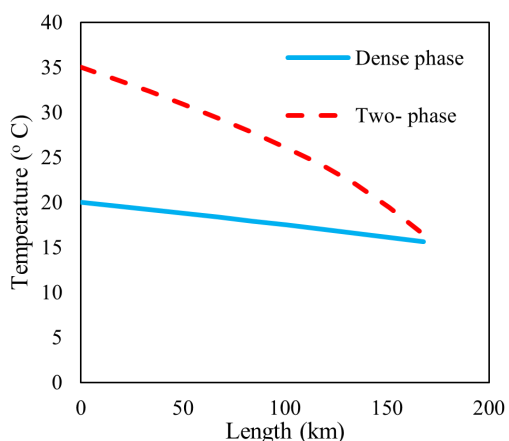
افت فشار یک فاکتور مهم برای طراحی خط لوله است؛ بنابراین بررسی آن بسیار حیاتی است. برای این منظور در (شکل ۵) افت فشار در دو حالت دوفازی و فوق بحرانی نشان داده شده است. با توجه به (شکل ۵)، افت فشار در حالت فوق بحرانی تقریباً ۳ برابر کمتر از حالت دوفازی است. در حالت فوق بحرانی دمای گاز کاهش و فشار آن افزایش یافته است؛ بنابراین با این تغییرات دانسیته گاز افزایش خواهد یافت. با افزایش دانسیته دبی حجمی گاز طبیعی کاهش می‌یابد؛ بنابراین با کاهش دبی افت فشار نیز کاهش می‌یابد



شکل ۵: تغییرات افت فشار در دو حالت دوفازی و فوق بحرانی

۴-۳. تغییرات دما

یکی دیگر از فاکتورهای مهم برای طراحی خط لوله دما است؛ بنابراین در (شکل ۶) تغییرات دما در دو حالت دوفازی و فوق بحرانی نشان داده شده است. با توجه به شکل کاهش دما در حالت فوق بحرانی برابر ۲۱ درصد و در حالت دوفازی ۵۳ درصد است. به دلیل بیشتر بودن افت فشار در حالت دوفازی، تأثیر اثر ژول تامسون در این حالت بیشتر است چراکه با کاهش بیشتر فشار در خط لوله، دما نیز بیشتر کاهش پیدا می‌کند.

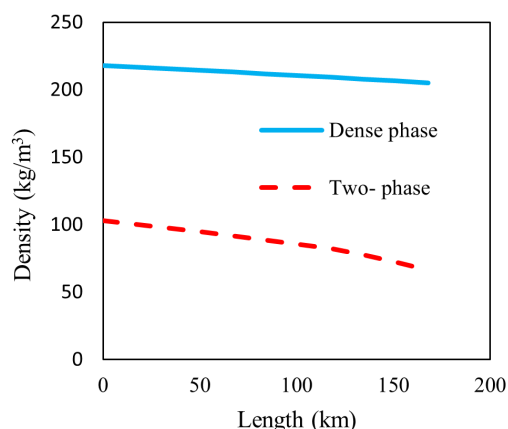


شکل ۶: تغییرات دما در دو حالت دوفازی و فوق بحرانی

۴-۴. تغییرات دانسیته

دانسیته یکی از خواص مهم گاز طبیعی است که تأثیر قابل توجهی بر افت فشار دارد. برای این منظور در (شکل ۷) تغییرات دانسیته در دو حالت دوفازی و فوق بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل دانسیته در حالت فوق بحرانی ۵ درصد و در حالت دوفازی ۳۶ درصد کاهش یافته است. دلیل بیشتر بودن تغییرات دانسیته در حالت

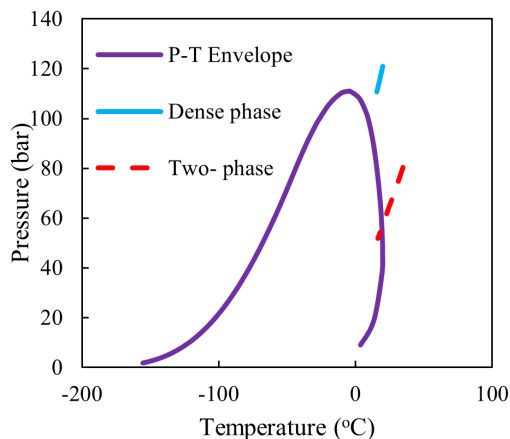
دوفازی به دلیل بیشتر بودن تغییرات دما و فشار در این فاز است. همچنین با توجه به (شکل ۷)، مقدار متوسط دانسیته در حالت فوق بحرانی برابر با ۲۱۲ و در حالت دوفازی برابر با ۸۷ کیلوگرم بر مترمکعب است؛ بنابراین دانسیته در حالت فوق بحرانی ۲/۴ برابر بیشتر از حالت دوفازی است. نتایج بررسی دانسیته گاز طبیعی در حالت فوق بحرانی نشان می‌دهد در این حالت دانسیته گاز طبیعی رفتاری شبیه مایعات دارد.



شکل ۷: تغییرات دانسیته در دو حالت دوفازی و فوق بحرانی

۴-۵. شرایط فازی

برای بررسی شرایط فازی هر فاز نیاز است تغییرات دما و فشار در طول خط لوله برای هر کدام از فازها در نمودار فازی نشان داده شود؛ بنابراین در (شکل ۸) تغییرات دما و فشار در طول خط لوله در دو حالت دوفازی و فوق بحرانی در نمودار فازی نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است در حالت دوفازی سیال وارد ناحیه دوفازی می‌شود همچنین در حالت فوق بحرانی سیال در ناحیه فوق بحرانی و تک فازی باقی می‌ماند.



شکل ۸: تغییرات دما و فشار در نمودار فازی

۴-۶. هزینه‌های جاری

در این بخش هزینه‌های جاری مرتبط به دو حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این کار نیاز است هزینه سردسازی و فشرده‌سازی برای دو حالت مشخص باشد. در (جدول ۴) انرژی سردسازی و توان فشرده‌سازی برای هر کدام از حالت‌ها نشان داده شده است. با توجه به (جدول ۴) مشخص است انرژی سردسازی در حالت فوق بحرانی ۳ برابر بیشتر از حالت دوفازی است. دلیل بیشتر بودن انرژی سردسازی در حالت فوق بحرانی به دلیل بیشتر بودن اختلاف دمای خروجی کمپرسور و دمای ورودی خط لوله در این حالت است. همچنین با توجه به نتایج (جدول ۴) انرژی فشرده‌سازی در حالت فوق بحرانی تقریباً ۶ درصد کمتر از حالت دوفازی است.

برای بررسی هزینه‌ها نیاز است ابتدا هزینه سردسازی و الکتریسیته مشخص باشد. در این مطالعه هزینه الکتریسیته برابر با ۰/۰۷ دلار بر کیلو وات ساعت در نظر گرفته می‌شود [۱۶]. همچنین هزینه سردسازی به ازای هر گیگاژول ۰/۳۵ دلار در نظر گرفته می‌شود [۱۷]. با توجه به این موارد و مقادیر انرژی، در (جدول ۵) هزینه‌های سردسازی و فشرده‌سازی برای دو حالت فوق بحرانی و دوفازی در یک سال نشان داده شده است. با توجه به نتایج (جدول ۵)، هزینه کل انرژی در سال در حالت فوق بحرانی و دوفازی تقریباً برابر است با این حال حدود ۱/۵ درصد هزینه‌ها در حالت فوق بحرانی نسبت به حالت دوفازی کمتر است.

جدول ۴: انرژی سردسازی و فشرده‌سازی

حالت	فوق بحرانی	دوفازی
انرژی سردسازی (کیلو وات)	۹۳۴۳	۳۰۹۰
توان کمپرسور (کیلو وات)	۲۸۱۸	۲۹۷۷

جدول ۵: هزینه‌های جاری در سال

حالت	فوق بحرانی	دوفازی
هزینه سردسازی (دلار در سال)	۱۰۳۰۰۰	۳۴۰۰۰
هزینه توان (دلار در سال)	۱۷۲۸۰۰۰	۱۸۲۶۰۰۰
هزینه کل (دلار در سال)	۱۸۳۱۰۰۰	۲۱۶۶۰۰۰



۵. نتیجه گیری

در این مطالعه شبیه‌سازی انتقال گاز طبیعی در حالت فوق بحرانی و دوفازی در خط لوله با استفاده نرم‌افزار اسپن پلاس انجام شد. برای بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی، اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با داده‌های خروجی سه از خط لوله مقایسه و انجام شد. نتایج اعتبار سنجی نشان داد بیشترین خطای نسبی بین شبیه‌سازی و داده‌های خط لوله ۴/۵ درصد است؛ بنابراین تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های خطوط لوله وجود دارد. بعد از اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، افت فشار، تغییرات دما و دانسیته و همچنین مقایسه هزینه‌ها در دو حالت فوق بحرانی و دوفازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مقایسه دو حالت مطابق زیر می‌باشند:

۱. افت فشار در حالت فوق بحرانی حدوداً ۳ برابر کمتر از حالت دوفازی است.
۲. کاهش دما در حالت فوق بحرانی برابر ۲۱ درصد و در حالت دوفازی ۵۳ درصد می‌باشد.
۳. دانسیته در حالت فوق بحرانی ۵ درصد و در حالت دوفازی ۳۶ درصد کاهش یافت.
۴. مقدار متوسط دانسیته در حالت فوق بحرانی برابر با ۲۱۲ و در حالت دوفازی برابر با ۸۷ کیلوگرم بر مترمکعب است.
۵. مشکل مربوط دوفازی شدن گاز طبیعی در حالت فوق بحرانی مشاهده نگردید.
۶. انرژی سردسازی در حالت فوق بحرانی ۳ برابر بیشتر از حالت دوفازی است. همچنین توان فشرده‌سازی در حالت فوق بحرانی تقریباً ۶ درصد کمتر از حالت دوفازی است.
۷. هزینه کل انرژی در سال در حالت فوق بحرانی و دوفازی تقریباً مشابه است.
۸. به‌طور کلی نتیجه‌گیری می‌شود افت فشار به‌صورت قابل توجهی در حالت فوق بحرانی کاهش می‌یابد. با این حال هزینه‌ها در سال تقریباً در دو حالت مشابه بود با این حال انتظار می‌رود با افزایش طول خط لوله و افزایش تعداد ایستگاه‌های تقویت فشار هزینه فشرده‌سازی در حالت فوق بحرانی نسبت به حالت دوفازی به‌طور قابل توجهی کاهش یابد. علاوه بر آن

امکان افزایش دبی در حالت فوق بحرانی به دلیل کمتر بودن افت فشار در این حالت نسبت به حالت دوفازی وجود دارد.

مراجع:

- [1]. C. Dorao, M. Fernandino, Simulation of transients in natural gas pipelines, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 3 (2011) 349-355.
- [2]. S. Faramawy, T. Zaki, A.-E. Sakr, Natural gas origin, composition, and processing: A review, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34 (2016) 34-54.
- [3]. S. Thomas, R.A. Dawe, Review of ways to transport natural gas energy from countries which do not need the gas for domestic use, *Energy*, 28 (2003) 1461-1477.
- [4]. S. Mokhatab, J.Y. Mak, J.V. Valappil, D. Wood, *Handbook of liquefied natural gas*, Gulf Professional Publishing 2013.
- [5]. G. Gregory, K. Aziz, R. Moore, Computer Design of Dense-Phase Pipelines, *Journal of Petroleum Technology*, 31 (1979) 40-50.
- [6]. R. Moore, P. Bishnoi, J. Donnelly, Rigorous design of high pressure natural gas pipelines using BWR equation of state, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 58 (1980) 103-112.
- [7]. H. Müller-Steinhagen, K. Heck, A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 20 (1986) 297-308.
- [8]. Z. Zhang, G. Wang, P. Massarotto, V. Rudolph, Optimization of pipeline transport for CO₂ sequestration, *Energy Conversion and Management*, 47 (2006) 702-715.
- [9]. S. Mokhatab, Explicit method predicts

natural gas pressure reduction stations, Energy Conversion and Management, 200 (2019) 112079.

temperature and pressure profiles of gas-condensate pipelines, Energy Sources, Part A, 29 (2007) 781-789.

[10]. Moshfageyan, <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2012/08/transportation-of-natural-gas-in-dense-phase>, jmcampbell, 2012.

[11]. B.-H. Vargas-Vera, A.-M. Rada-Santiago, M.-E. Cabarcas-Simancas, Gas transport at dense phase conditions for the development of deepwater fields in the Colombian Caribbean sea, CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro, 10 (2020) 17-32.

[12]. M. Zivdar, Natural Gas Transmission in Dense Phase Mode, Journal of Gas Technology. JGT, 6 (2021).

[13]. L.M. Almara, G.-X. Wang, V. Prasad, Conditions and thermophysical properties for transport of hydrocarbons and natural gas at high pressures: Dense phase and anomalous supercritical state, Gas Science and Engineering, 117 (2023) 205072.

[14]. V. Prasad, L.M. Almara, G.-X. Wang, Ultra-long-distance transport of supercritical natural gas (SNG) at very-high mass flow rates via pipelines through land, underground, water bodies, and ocean, Gas Science and Engineering, 117 (2023) 205053.

[15]. A. Tech, Aspen plus, 2021.

[16]. K. Mohammadi, Y. Jiang, S. Borjian, K. Powell, Thermo-economic assessment and optimization of a hybrid triple effect absorption chiller and compressor, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 38 (2020) 100652.

[17]. C. Li, S. Zheng, J. Li, Z. Zeng, Optimal design and thermo-economic analysis of an integrated power generation system in



Simulation of Natural Gas Transmission in the Pipeline in Two-Phase and Supercritical Conditions

Moslem Abrofarakh¹, Mortaza Zivdar^{1,3*}, Davod Mohebbi-Kalhari²

1. Ph.D. student, Department of Chemical Engineering, Shaid Nikbakhat Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchistan, Zahedan, Iran
2. Academic staff, Department of Chemical Engineering, Shaid Nikbakhat Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchistan, Zahedan, Iran
3. Academic staff, Department of Chemical Technologies, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), P.O. Box 33535111, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL RESEARCH

Article History:

Received: 11 October 2023

Revised: 13 November 2023

Accepted: 17 December 2023

Keywords:

Supercritical

Natural gas

Pipeline

Two-phase

ABSTRACT

The pipeline transportation of natural gas serves as a conventional and economical method for transmitting natural gas, making it crucial to investigate for reducing pressure drop and preventing the occurrence of two-phase fluid formation. To address these concerns, this study delves with the transport of natural gas under supercritical conditions. Under such supercritical conditions, the gas temperature must be between the critical temperature and the maximum temperature within the two-phase region, while the gas pressure must exceed the maximum pressure within this region. The main objective of this study is to simulate natural gas pipeline behavior under supercritical and two-phase conditions utilizing Aspen Plus software version 12.1. The Peng-Robinson equation was employed to compute thermodynamic properties for pipeline simulation. Validation of pipeline simulations indicate a maximum relative error of 4.5% between simulated and actual pipeline data, demonstrating satisfactory agreement between simulation and pipeline data. After validation, pressure drop, temperature variations, density variations, and associated costs under supercritical and two-phase conditions were investigated. Findings reveal that under supercritical conditions, the pressure drop is three times less compared to two-phase conditions. Additionally, temperature reduction under supercritical conditions amounts to 21%, contrasting with a 53% reduction in two-phase conditions. Density variations in supercritical and two-phase states were approximately 5% and 36%, respectively. Finally, it was found that the cost of the total energy consumption required per year in supercritical and two-phase mode is almost similar and is equal to 1,860,000 and 1,831,000 dollars per year, respectively.

DOR: [20.1001.1.25885251.1402.00.0.0](https://doi.org/10.1001.1.25885251.1402.00.0.0)

How to cite this article

M. Abrofarakh, M. Zivdar, D. Mohebbi-Kalhari, Simulation of Natural Gas Transmission in the Pipeline in Two-Phase and Supercritical Conditions. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2023; 10(2): 8 -16. (https://www.ijge.irangi.org/article_712577.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: mzivdar@eng.usb.ac.ir, (M. Zivdar).

Available online 31 December 2023

25885-5251/© 2023 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

