

تحلیل شبکه خطوط لوله گاز طبیعی در حالت بحرانی: تاثیر پارامترهای مهم در حالت بحرانی

محمود فرزانه گرد

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

حمید رضا رهبری*

دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

در فصول سرد سال با توجه به برودت هوا، مصرف گاز طبیعی از حالت استاندارد خارج شده و بسیار بالاتر از حد طبیعی خواهد بود. در این شرایط برای شبکه ها یک حالت بحرانی بوجود می آید، افزایش مصرف که با کاهش فشار گاز طبیعی همراه بوده، همواره یکی از مشکلات اساسی گازرسانی در نقاط مختلف می باشد. در این مطالعه، یک شبکه خطوط لوله در حالت بحرانی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. روش ارائه شده برای تحلیل شبکه با مطالعات گذشته مقایسه گردیده که نتایج معتبرسازی دقتی معادل ۰/۳۷٪ را برای روش پیشنهادی نشان می دهد. پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر روی شبکه در حالت بحرانی مانند: ضریب اصطکاک و ترکیب گاز طبیعی، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد، ضریب اصطکاک تاثیر فراوانی بر روی شبکه داشته، همچنین گازهای طبیعی با وزن مولکولی بالاتر افت فشار کمتری در شبکه ایجاد می کنند.

واژه های کلیدی: گاز طبیعی، شبکه خطوط لوله، حالت بحرانی، ضریب اصطکاک، ترکیب گاز طبیعی.

Analysis of Natural Gas Pipeline Network in Critical State: The Effect of Important Parameters in Critical State

M. Farzaneh-Gord

The Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

H. R. Rahbari

The Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract

Due to the cold air in the cold season, natural gas consumption will be greater than the standard mode and much higher than the normal. In this situation for networks comes a critical state, consumption increased as well as pressure reduced for natural gas, this condition has always been one of the main problems to deliver natural gas to various locations. In this study, a natural gas pipeline network in critical condition has been investigated. The proposed method for the analysis of pipeline network compared with previous studies, the validation results show the accuracy of 0.37% for the proposed method. The effect of important parameters on the pipeline network in critical state such as: friction factor and natural gas composition have been studied. The results show, the friction factor has a great impact on the natural gas pipeline network, also natural gas with higher molecular weights have less pressure drop in the all of natural gas pipeline network's nodes.

Keywords: Natural Gas, Pipeline Network, Critical State, Friction Factor, Natural Gas Composition.

شبکه های خطوط گاز طبیعی از نقطه نظر آرایش لوله ها به ۳ دسته تقسیم می شوند:

۱. شبکه های آنتی یا شاخه ای

۲. شبکه های حلقوی

۳. شبکه های مختلط (حلقوی و شاخه ای)

شبکه های آنتی یا شاخه ای مانند درخت هستند و ساده ترین نوع شبکه ها را تشکیل می دهند. جریان گاز در آنها همیشه یک طرفه و از سوی شاخه ی بزرگتر به شاخه ی کوچکتر متوجه می باشد. محاسبه ی این شبکه ها ساده بوده به طوریکه به راحتی می توان در هر نقطه فشار و مقدار جریان و سرعت گاز را با دقت زیاد تعیین نمود. اگر انتهای شاخه های شبکه های شاخه ای را به همدیگر وصل نماییم شبکه حلقوی به دست می آید. در این شبکه ها گاز در لوله های بسته به محل مصرف تغییر جهت می دهند و هر ناحیه دو یا چند مسیر جهت امکان گاز رسانی دارد و این حسن بزرگ شبکه های حلقوی است. چون نسب و اجرای شبکه های حلقوی خیلی گران تمام می شوند همچنین به دلیل معایب دیگر، این شبکه ها همیشه با صرفه نیستند لذا در عمل برای شبکه های گاز رسانی از ادغام شبکه های

۱- مقدمه

کاربرد گاز طبیعی به عنوان سوخت در مصارف صنعتی و خانگی گسترش چشمگیری داشته است. آلودگی پایین تر نسب به سوخت های فسیلی، قیمت تمام شده کمتر و هزینه کمتر انتقال و توزیع از جمله عوامل مهم در گسترش چشمگیر کاربرد گاز طبیعی می باشند. گاز طبیعی پس از استخراج از چاه های مربوطه و تصفیه در پالایشگاه، توسط خطوط لوله به دست مصرف کنندگان می رسد. خطوط لوله شامل: لوله ها، شیرها، کمپرسورها و غیره می باشند. اجزای مختلف خطوط لوله با قرار گرفتن در کنار یکدیگر تشکیل شبکه خطوط لوله را می دهند. شبکه های خطوط لوله برای گاز طبیعی به دو دسته کلی تقسیم می شوند. دسته اول شبکه های انتقال گاز طبیعی بوده که به شبکه های پرفشار معروف هستند. شبکه انتقال گاز طبیعی را تا دروازه اصلی شهر هدایت می کند. دسته دوم شبکه های توزیع گاز طبیعی می باشند که به شبکه های کم فشار معروف هستند. شبکه های توزیع کار پخش گاز طبیعی را در محدوده شهر بر عهده دارند.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hrahbari@gmail.com

آنتی یا شاخه ای و حلقوی استفاده شده که به شبکه های مختلط معروف می باشند. هدف این کار به حداقل رساندن معایب، افزایش محاسن و در نهایت طرح یک شبکه ی بهینه است.

در شبکه های انتقال به خاطر وجود مسیر طولانی و افت فشار معمولاً در فاصله بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلومتر، ایستگاه های تقویت فشار طراحی می گردد. ایستگاه های تقویت فشار شامل مجموعه ای از کمپرسور ها بوده که وظیفه افزایش فشار گاز را بر عهده دارند. گاز طبیعی بعد از اینکه به دروازه شهر می رسد به علت فشار بالا قابل مصرف نبوده و با ایستگاه های ویژه فشار گاز کاهش یافته و بسته به نوع مصرف کننده توسط شبکه توزیع به مصرف کننده مورد نظر می رسد. مصرف کنندگان اصلی در شبکه های توزیع گاز طبیعی عبارتند از: مصرف کنندگان خانگی (مصرف منازل)، مصرف کنندگان تجاری: (هتل ها، بیمارستان ها، رستوران ها، سینماها و ...) و مصرف کنندگان صنعتی (کارخانجات برق و سیمان و غیره).

در شبکه های خطوط لوله گاز طبیعی معمولاً به اتصال دو لوله گره^۱ گفته می شود. همچنین یک شبکه از چندین حلقه بسته تشکیل شده است. با توجه به مصرف مصرف کنندگان نواحی مختلف شهر، میزان مصرف^۲ باید برای هر گره مشخص باشد. با توجه به وجود وسایل اندازه گیری، قطع شدن ناگهانی گاز و مصرف متناوب شهر، باید شبکه های خطوط لوله را در حالت گذرا (ناپایا) مورد تحلیل و بررسی قرار بدهیم. در صنعت گاز طبیعی شبکه ها معمولاً به صورت پایا مورد بحث و بررسی قرار می گیرند که نمی تواند به عنوان یک جواب مناسب مورد استناد قرار بگیرد. همچنین مطالعات اندکی برای تحلیل شبکه ها در حالت گذرا (ناپایا) انجام گردیده است.

تاث و تی [۱] و کی و تی [۲] شبکه خطوط لوله گاز را با مدارهای الکتریکی مقایسه نموده اند. ایده اصلی این رویکرد این است که قسمت های مختلف شبکه خطوط لوله گاز، با استفاده از مقاومت های الکتریکی شبیه سازی می شوند. گونزالز و همکاران [۳] با استفاده از MATLAB Simulink شبکه توزیع گاز طبیعی را در حالت گذرا و هم دما بررسی کرده اند. نتایج کار آنها در مقایسه با کار کی و تی خطای کمتری نسبت به داده های آزمایشگاهی داشته است.

های و همکاران [۴] با استفاده از روش حجم محدود روشی را برای شبکه توزیع گاز طبیعی مورد بررسی و تحلیل قرار داده اند. نتایج آنها نشان می دهد محاسبات و روش پیشنهادی آنها خطایی حدود ۱/۱۵٪ نسبت به داده های آزمایشگاهی دارد. بهبهانی نژاد و باقری [۵] با استفاده از MATLAB Simulink، جریان گذرا و همدمای گاز درون خطوط لوله و شبکه های انتقال را مورد بررسی قرار داده اند. آنها روش ارائه شده را با روشهای تفاضل محدود مورد مقایسه قرار داده و نتایج آنها حاکی از دقت و کارآمدتر بودن روش ارائه شده نسبت به سایر روش های تفاضل محدود می باشد. بهبهانی نژاد و شکاری [۶] با استفاده از روش کاهش درجه جریان درون لوله در حالت گذرا را مورد بررسی قرار داده اند. آنها همچنین نشان دادند روش ارائه شده از نظر دقت با سایر روشهای عددی برابری کرده و در بعضی از موارد کارایی بهتری نسبت به سایر روش ها دارد. علامیان و همکاران [۷] با استفاده

از یک روش فضای حالت^۳ خطوط لوله و شبکه توزیع گاز طبیعی را در حالت گذرا مورد تحلیل و بررسی قرار داده اند. در حقیقت روش مورد مطالعه آنها یک روش Simulink و یک روش کنترلی می باشد. آنها از دو روش سعی و خطا و روش مستقیم شبکه مورد نظر را مورد بررسی قرار داده اند. نتایج بدست آمده از روش آنها نشان دهنده مطابقت خوب روش ارائه شده نسبت به مطالعات گذشته می باشد. فرزانه گرد و رهبری [۸] روشی تحلیل را برای تحلیل شبکه های خطوط لوله گاز طبیعی در حالت گذرا ارائه نمودند. روش ارائه شده توسط آنها، نسبت به دیگر مطالعات گذشته دارای سادگی بیشتری بوده ضمن اینکه از دقت بالایی نیز برخوردار می باشد. آنها همچنین تاثیر ضرایب اصطکاک مختلف و ترکیب گاز طبیعی را نیز بررسی کرده اند.

در تمامی مطالعات اشاره شده در بالا، شبکه های خطوط گاز طبیعی تنها در حالت گذرا (ناپایا) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته شده اند. در مطالعات اشاره شده گره مینا^۴ مانند یک مخزن بی نهایت بزرگ در نظر گرفته شده تا با کاهش یا افزایش مقدار دبی در گره مینا، فشار گره ثابت باقی بماند. اما این شرط یک حالت ایده آل بوده که در واقعیت اتفاق نمی افتد.

با کاهش دما و متعاقب آن افزایش برودت هوا، مصرف گاز طبیعی در گره های مصرف کننده^۵ افزایش چشمگیری پیدا می کند. این شرایط در حالتی است که دبی گاز طبیعی ورودی به شبکه از طریق گره مینا، در طی همه زمان ها ثابت باقی می ماند. این شرایط به حالت بحرانی در شبکه های خطوط لوله معروف می باشد. در حقیقت حالت بحرانی در شرایطی اتفاق می افتد که در نقاطی از شبکه مصرف بیش از حد معمول باشد. حالت بحرانی علاوه بر افزایش مصرف گاز طبیعی به خاطر برودت دما، می تواند شامل افزایش مصرف ناگهانی به علت پارگی خطوط لوله نیز باشد که موضوع اصلی این مقاله نمی باشد. در حالت بحرانی با افزایش مصرف، فشار گاز طبیعی افت پیدا کرده و باعث بروز مشکلاتی برای فرایند گازرسانی می گردد. برای جلوگیری از بروز مشکلات ناشی از حالت بحرانی، در خطوط لوله شیرهای اتوماتیکی^۶ استفاده می شوند که در صورت افزایش بیش از حد مصرف خط مورد نظر را از شبکه اصلی قطع کرده تا به مشکل آن رسیدگی گردد.

در زمینه تحلیل شبکه های خطوط لوله در حالت بحرانب مطالعات اندکی انجام گردیده است. کیوچی [۹] یک شبکه گاز طبیعی را در حالت بحرانی در نظر گرفته است. در مطالعه اشاره شده، معادلات خطوط لوله گاز طبیعی با استفاده از روشهای عددی مورد تحلیل قرار گرفته و اثر شرایط بحرانی به طور مختصری بیان گردیده است. اسیاداکز [۱۰] ابتدا روشی برای تحلیل معادلات خطوط لوله ارائه داده و در ادامه با تعمیم معادلات برای شبکه های خطوط لوله، شبکه ها را در حالت گذرا (ناپایا) مورد بحث و بررسی قرار داده است. در مطالعه اشاره شده تاثیر شرایط بحرانی به صورت ساده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

³ State space model

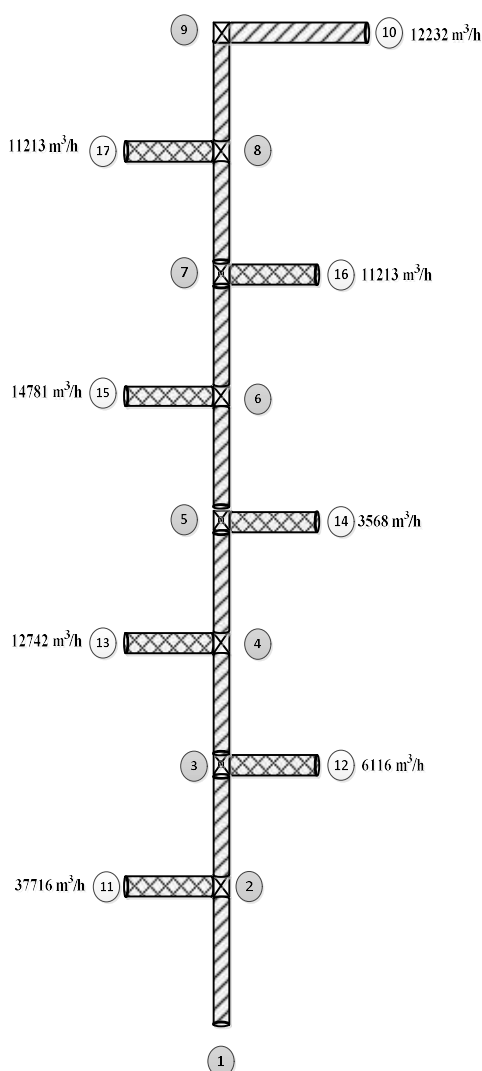
⁴ Source Node

⁵ Demand

⁶ line packing

¹ Node

² Demand



شکل ۱- شبکه خطوط لوله گاز طبیعی مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات شبکه خطوط لوله مورد مطالعه

گره تا گره	D(mm)	L(Km)	گره تا گره	D(mm)	L(Km)
۱ تا ۲	۴۳۷	۱/۸/۵	۲ تا ۱۱	۳۳۵	۲۹/۸
۲ تا ۳	۴۳۷	۳۹/۴	۳ تا ۱۲	۲۰۳	۷۸/۸
۳ تا ۴	۴۳۷	۲۰/۱	۴ تا ۱۳	۲۰۳	۱۱/۳
۴ تا ۵	۴۳۷	۲۰/۱	۵ تا ۱۴	۱۵۲	۱۳/۷
۵ تا ۶	۴۳۷	۱۰/۷	۶ تا ۱۵	۳۳۵	۱۶/۹
۶ تا ۷	۴۳۷	۱۰/۳	۷ تا ۱۶	۳۰۵	۱۶/۱
۷ تا ۸	۴۳۷	۱/۸/۵	۸ تا ۱۷	۳۳۵	۳۸/۶
۸ تا ۹	۴۳۷	۳۰/۶			
۹ تا ۱۰	۳۰۵	۱۲/۹			

شکل ۲ دبی گره‌های مختلف را بر حسب زمان مورد نظر نشان می‌دهد. این گره‌ها به عنوان شرایط مرزی در تحلیل شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در تحلیل شبکه‌های گاز طبیعی در حالت گذرا، می‌توان از قوانین کیرشهف استفاده نمود ([۱] و [۲])، اما در حالت بحرانی استفاده از این معادلات موضوعیت پیدا نمی‌کنند. در حالت استفاده از این قوانین هر گره به مانند یک المان با حجم صفر در نظر گرفته می‌شوند بنابراین مقدار انباشتگی گاز طبیعی در گره‌های مختلف را نمی‌توان با استفاده از این قوانین تحلیل نمود.

یکی از پارامترهای مهم در حالت بحرانی ترکیب گاز طبیعی می‌باشد. گاز طبیعی ترکیبی از چندین عنصر بوده و ترکیب گاز طبیعی از یک منطقه به منطقه دیگر متفاوت می‌باشد. مطالعات فراوانی توسط نویسندگان این مطالعه در زمینه تاثیر ترکیب گاز طبیعی در فرآیندهای گاز طبیعی از جمله: تاثیر ترکیب گاز بر روی پیمایش خودرهای گازسوز[۱۱]، تاثیر ترکیب گاز طبیعی بر روی دمای هیدراته شدن در لوله‌ها [۱۲] و تاثیر گاز طبیعی در یک شبکه خطوط گذرای گاز طبیعی[۸] انجام گرفته شده است.

در مطالعه حاضر، ابتدا روشی برای تحلیل گاز طبیعی درون لوله‌ها در شرایط گذرا (ناپایا) ارائه گردیده است. سپس روشی برای تحلیل گاز طبیعی درون شبکه خطوط لوله ارائه گردیده است. روش پیشنهادی برای یک شبکه نمونه اعمال شده و نتایج با مطالعات گذشته مورد مقایسه و معتبرسازی انجام گرفته شده است. سپس شبکه مورد نظر در حالت بحرانی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و پاسخ نقاط مختلف شبکه، نسبت به شرایط بحرانی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته شده است. در نهایت تاثیر پارامترهای مهم مانند: ضریب اصطکاک و ترکیب گاز طبیعی، بر روی شبکه نمونه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

۲- شبکه خطوط لوله گاز طبیعی

در این قسمت شبکه خطوط لوله گاز طبیعی مورد مطالعه، معرفی گردیده است. شکل ۱، شبکه خطوط لوله مورد نظر را نشان می‌دهد. شبکه مورد نظر از نوع شاخه ای یا آنتی بوده و شامل ۱۰ گره اصلی و ۷ گره به عنوان مصرف کننده می‌باشد. گره شماره یک گره مبنا بوده و گره‌های شماره ۱۰ تا ۱۷ به عنوان مصرف کننده می‌باشد. دبی‌های نوشته شده بر روی شکل برای گره‌های مصرف کننده در حالت پایا می‌باشند. جدول ۱، مشخصات لوله‌ها و فواصل را در شبکه مورد نظر نشان می‌دهد.

حالت بحرانی برای شبکه مورد مطالعه به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

الف) مصرف گره‌های ۱۰ تا ۱۷ طی یک بازه نیم ساعته دو برابر شده و سپس در همین مقدار باقی می‌ماند.

ب) دبی ورودی شبکه، یا به عبارت دیگر دبی گره مبنا در طی تمامی زمان‌ها ثابت باقی می‌ماند.

هدف پاسخ شبکه به شرایط بحرانی ۳/۵ بعد از اعمال این شرایط می‌باشد. لازم به توضیح است که دبی ورودی به شبکه برای کلیه زمان‌ها برابر با دبی در حالت پایا بوده که عبارت است از مجموع دبی مصرف شده در گره‌های مصرف کننده ۱۰ تا ۱۷.

$$\left(\frac{RZT}{Mw_a \gamma_g} \right) \frac{dP}{P} = - \frac{1}{2g_c} \left(\frac{4q_h T P_b Z}{\pi T_b P D^2} \right)^2 \frac{dx}{dt} \quad (6)$$

$$- \frac{1}{2g_c} \left(\frac{4q_h T P_b Z}{\pi T_b P D^2} \right)^2 - \frac{f}{2g_c} \left(\frac{4q_h T P_b Z}{\pi T_b P D^2} \right)^2 \frac{dx}{D}$$

با مرتب سازی معادله (۶) و انتگرال گیری بر حسب زمان، طول و فشار خواهیم داشت:

$$\int_t^P \left(\frac{RZT}{Mw_a \gamma_g} \right) P dP dt = - \int_x^1 \frac{1}{2g_c} \left(\frac{4q_h T P_b Z}{\pi T_b P D^2} \right)^2 dx \quad (7)$$

$$- \int_x^1 \frac{1}{2g_c} \left(\frac{4q_h T P_b Z}{\pi T_b P D^2} \right)^2 dt - \int_x^1 \frac{f}{2g_c} \left(\frac{4q_h T P_b Z}{\pi T_b P D^2} \right)^2 dx dt$$

با محاسبه انتگرال ها در معادله (۷) به معادله زیر برای محاسبه دبی خط لوله بر حسب فشار و در حالت گذرا (تابع زمان) می رسیم:

$$q_h = 1.329 \times 10^{-8} \left(\frac{T_b}{P_b} \right) \times \sqrt{\left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{Z T \gamma_g} \right) D^5 \left[\frac{\Delta t}{f L \Delta t + \frac{D \Delta t}{10^6} + \frac{D L}{10^3}} \right]} \quad (8)$$

چنانکه در معادله (۸)، Δt بازه زمانی مسئله می باشد.

۲-۳- مدلسازی شبکه

برای مدلسازی شبکه خطوط لوله گاز طبیعی به صورت زیر عمل می کنیم:

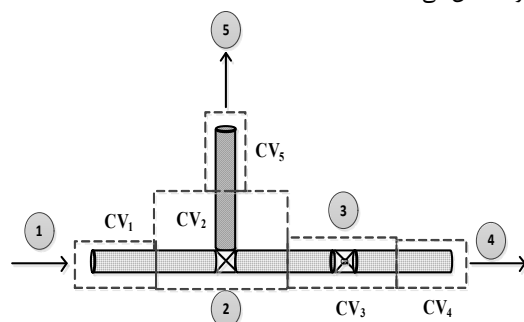
۱. هر گره و قسمتی از لوله های متصل شده به گره را به عنوان حجم کنترل در نظر می گیریم.

۲. معادله بقای جرم را در حالت گذرا برای حجم کنترل مخصوص به هر گره می نویسیم.

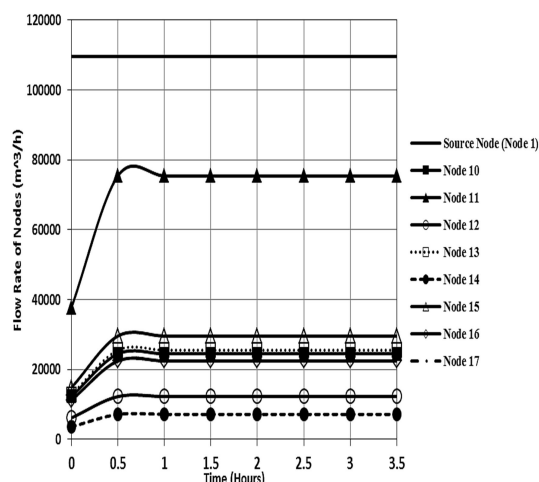
۳. با استفاده از معادله (۷) برای محاسبه دبی در یک خط لوله، معادله دیفرانسیل مربوط به هر گره را استخراج می کنیم.

۴. با گسسته سازی معادله دیفرانسیل مربوط به هر گره، و با توجه به شرایط مرزی مشخص (مشخص بودن دبی مصرف کننده ها)، فشار هر گره را در زمان بعدی با توجه به مشخص بودن شرایط محاسبه می نماییم.

شکل ۳، حجم کنترل های مخصوص به هر گره را برای یک شبکه نمونه، نشان می دهد.



شکل ۳- حجم کنترل برای گره ها در یک شبکه نمونه



شکل ۲- دبی گره ها بر حسب زمان مورد مطالعه

۳- مدلسازی

۱-۳- مدلسازی خط لوله

مدلسازی خطوط لوله به دو قسمت حالت پایا و حالت گذرا تقسیم می شود. در حالت پایا، ترم زمان از معادلات حاکم حذف می شود. در این حالت معادله محاسبه دبی گاز عبوری به صورت زیر بیان می گردد:

$$q_h = 1.329 \times 10^{-8} \left(\frac{T_b}{P_b} \right) \times \sqrt{\left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{Z f T \gamma_g} \right) D^5} \quad (9)$$

در حالت گذرا، معادله جریان یک بعدی برای یک خط لوله به صورت زیر ارائه می شود:

$$\frac{\rho}{g_c} \frac{du}{dt} + \frac{\rho u}{g_c} \frac{du}{dx} + \frac{dP}{dx} = - \frac{f \rho u^2}{2g_c D} \quad (10)$$

در معادله (۱) و (۲)، u سرعت، P فشار، ρ چگالی، D قطر لوله، f ضریب اصطکاک و g_c ضریب تبدیل شتاب گرانشی می باشند. می توان معادله (۲) را به صورت زیر بازنویسی نمود [۱۳]:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} = - \frac{u}{g_c} \frac{du}{dt} - \frac{u}{g_c} \frac{du}{dx} - \frac{f u^2}{2g_c D} \quad (11)$$

با توجه به تعریف چگالی برای گاز طبیعی با فرض گاز واقعی به صورت:

$$\rho = \frac{Mw_a P \gamma_g}{ZRT} \quad (12)$$

که در معادله (۴)، Mw_a وزن مولکولی، Z ضریب تراکم پذیری، γ_g وزن مولکولی نسبی، T دما و R ثابت جهانی گازها می باشند.

همچنین تعریف سرعت با توجه به دبی حجمی به صورت زیر می باشد:

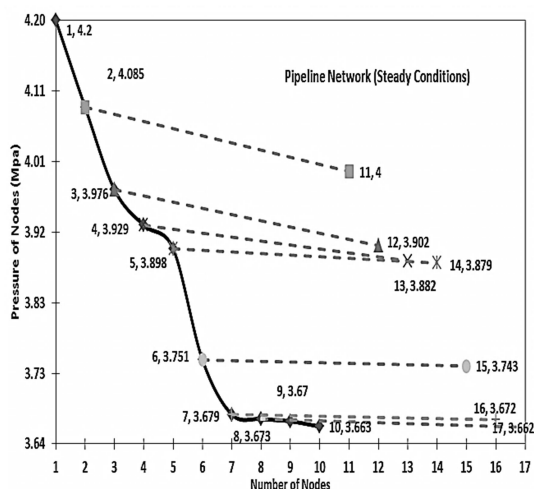
$$u = (Q) \left(\frac{T}{T_b} \right) \left(\frac{P_b}{P} \right) \left(\frac{Z}{1} \right) \left(\frac{4}{\pi} \right) \left(\frac{1}{D^2} \right) \quad (13)$$

در معادله (۵)، Q دبی حجمی، T_b, P_b دما و فشار مبنا می باشند. با ترکیب معادلات (۴) و (۵) با (۱۱) به معادله دیفرانسیلی زیر می رسیم:

۴- نتایج

۴-۱- حالت پایا

با توجه به اینکه برای محاسبه فشار بر حسب زمان نیازمند داشتن فشار در حالت اولیه می باشیم، این حالت اولیه را حالت پایای شبکه در نظر می گیریم. فشار در نقاط مختلف شبکه در حالت پایا محاسبه گردیده است. شکل ۴، فشار در گره های مختلف شبکه خطوط مورد مطالعه در شکل ۱، را نشان می دهد.



شکل ۴- فشار در نقاط مختلف شبکه در حالت پایا

با توجه به شکل ۴، فشار در گره های اصلی ۱ تا ۹ و فشار در گره های مصرف کننده ۱۰ تا ۱۷ محاسبه گردیده است.

۴-۲- اعتبارسنجی

در این قسمت روش ارائه شده برای محاسبه فشار گره ها در حالت بحرانی در یک بازه زمانی ۳/۵ ساعته، با شرایط مرزی مشخص شده در شکل ۲، با مطالعات گذشته مقایسه گردیده است. در این حالت ضریب اصطکاک مانند مرجع [۹] ثابت و برابر با ۰/۰۰۸ در نظر گرفته شده است. شکل ۵، فشار گره های ۱ تا ۱۰ را بعد از بازه زمانی ۳/۵ ساعته محاسبه شده توسط این مطالعه و مطالعه توسط مرجع [۹] را نشان می دهد. همچنین شکل ۶، درصد خطای محاسبات را در مقایسه با مرجع [۹]، نشان می دهد.

معادله بقای جرم برای حجم کنترل مخصوص به هر گره به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{dm_j}{dt} = \sum_{i=1}^N K_{ij} (\dot{m}_{ij} - \dot{m}_j) \quad (9)$$

که در آن m_j مقدار جرم موجود در گره j ، $\dot{m}_{ij}$ دبی جرمی وارد

شده یا خارج شده به گره j توسط لوله i ام متصل به آن، $\dot{m}_j$ دبی جرمی مصرف شده توسط گره j ، N تعداد لوله های متصل به گره j و

K_{ij} برابر با یک اگر دبی جرمی $\dot{m}_{ij}$ ورودی و برابر با منفی یک اگر

$\dot{m}_{ij}$ خروجی باشد، می باشند. سمت چپ تساوی در معادله (۹) را می توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho V)}{dt} = \left(\frac{V}{ZRT} \right) \frac{dP}{dt} \quad (10)$$

در معادله (۱۰)، V برابر با حجم می باشد.

با ترکیب معادلات (۹) و (۱۰) و تبدیل دبی های جرمی به دبی های حجمی خواهیم داشت:

$$\left(\frac{V}{ZRT} \right) \frac{dP_j}{dt} = \sum_{i=1}^N K_{ij} \times \rho^* \times (q_{h_{ij}} - Q_j) \quad (11)$$

در معادله (۱۱)، ρ^* چگالی در شرایط مرجع، q_h دبی حجمی لوله متصل به گره محاسبه شده از رابطه (۸) و Q دبی حجمی مصرف شده در گره مورد نظر می باشند. با گسسته سازی معادله (۱۰) و با توجه به رابطه (۷) خواهیم داشت:

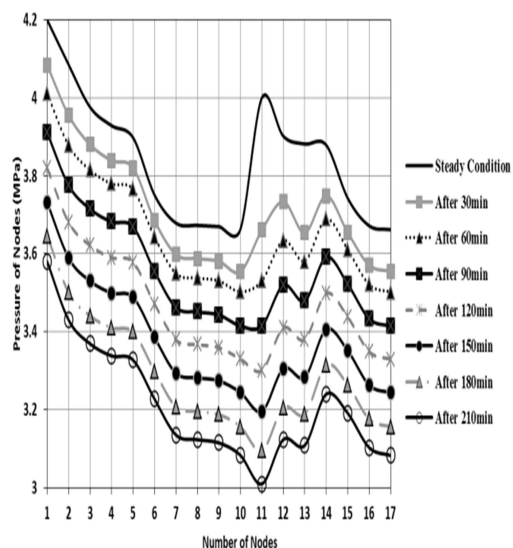
$$\left(\frac{V}{ZRT} \right) \frac{P_j^{k+1} - P_j^k}{\Delta t} = \sum_{i=1}^N K_{ij} \times \rho^* \times (q_{h_{ij}} - Q_j) \quad (12)$$

در معادله (۱۲):

$$q_{h_{ij}} = \left[\frac{1.329 \times 10^{-8} \left(\frac{T_b}{P_b} \right) \times \sqrt{\frac{P_i^{2(k+1)} - P_j^{2(k+1)}}{Z T \gamma_g}} D^5 \left[\frac{\Delta t}{f L \Delta t + \frac{D \Delta t}{10^6} + \frac{D L}{10^3}} \right]} \right] \quad (13)$$

است.

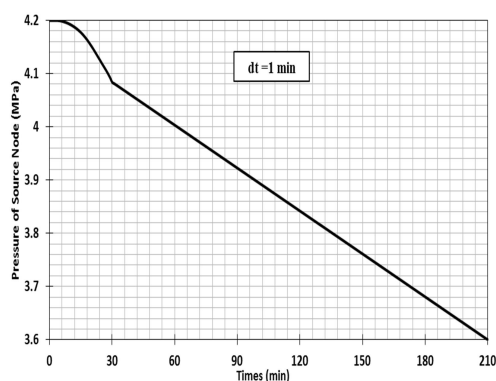
با توجه به معادلات (۱۲) و (۱۳)، فشار هر گره در زمان بعدی $k+1$ را باید از زمان قبلی k محاسبه نمود. همچنین با نوشتن معادلات برای تمامی گره های شبکه به یک دستگاه غیر خطی n معادله و n مجهول می رسمیم. در این دستگاه n تعداد گره های شبکه مورد نظر می باشد. دستگاه های غیر خطی در این مطالعه با استفاده از روشهای سعی و خطا [۱۴] حل شده و برای هر بازه زمانی فشار گره ها بر حسب زمان محاسبه گردیده است.



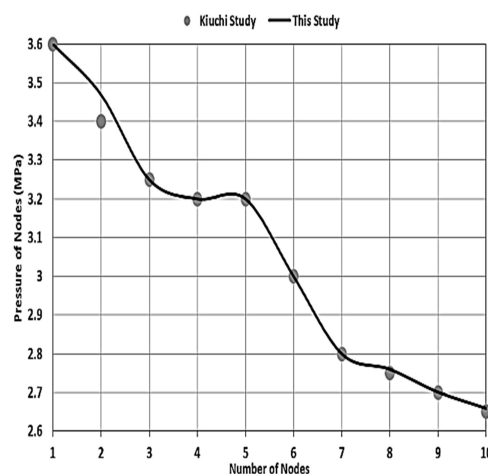
شکل ۷- فشار در گره های مختلف شبکه در بازه های نیم ساعته از حالت پایا تا ۳/۵ ساعت

با توجه به شکل ۷، در بازه زمانی نیم ساعته از حالت پایا که مصرف در گره های ۱۰ تا ۱۷ دو برابر می شود، افت فشار بیشتری در گره ها اتفاق افتاده است. همچنین از نیم ساعت تا ۳/۵ ساعت که مصرف گره ها تغییر نمی کنند در بازه های نیم ساعته، افت فشار یکسانی برای گره ها اتفاق افتاده است.

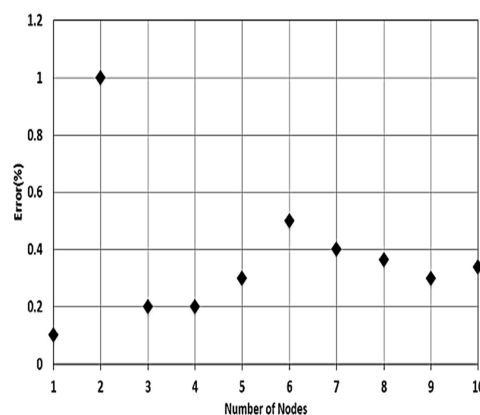
از آنجائیکه دبی ورودی برای گره شماره ۱ به عنوان گره مبنا در طول بازه ۳/۵ ساعته تغییر نمی کند، افت فشار این گره از اهمیت خاصی برخوردار می باشد. فشار در گره مبنا اگر در شرایط بحرانی از مقدار خاصی کمتر شود باعث افزایش سرعت در خطوط لوله شده که می تواند برای شبکه گازرسانی خطرآفرین باشد. شکل ۸، تغییرات فشار گره مبنا را بر حسب زمان در حالت بحرانی و در یک بازه ۳/۵ ساعته نشان می دهد. با توجه به شکل ۸، افت فشار در نیم ساعت اول با توجه به افزایش خطی دبی مصرف کننده ها، به صورت درجه دو بوده و برای بازه های دیگر زمانی با توجه به ثابت ماندن دبی مصرف کننده در حالت بحرانی به صورت خطی تغییر می کند.



شکل ۸- فشار در گره مبنا بر حسب زمان در حالت بحرانی



شکل ۹- فشار در گره های ۱ تا ۱۰ توسط این مطالعه و مرجع [۹]



شکل ۱۰- درصد خطا در محاسبه فشار گره ها نسبت به مرجع [۹]

شکل های ۵ و ۶ نشان دهنده آن است که روش پیشنهادی در این مطالعه از دقت قابل قبولی در مقایسه با روش های دیگر برخوردار می باشد. همچنین درصد خطای متوسط میانگین در مقایسه با مطالعه توسط مرجع [۹] برابر با ۰/۳۷٪ می باشد که دقت بسیار بالایی می باشد.

۴-۳- حالت بحرانی

در این قسمت فشار گره های مختلف شبکه در حالت بحرانی و در بازه زمانی ۳/۵ ساعته محاسبه گردیده است. شکل ۷، فشار در گره های مختلف شبکه را در بازه های نیم ساعته از حالت پایا را نشان می دهد.

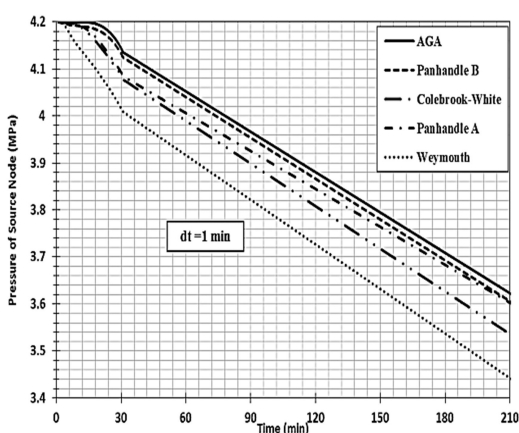
۴-۴- تاثیر ضریب اصطکاک

در تمامی قسمت های مورد مطالعه، ضریب اصطکاک همچون سایر مطالعات ثابت در نظر گرفته شده است. در این قسمت فشار گره مبنا در حالت بحرانی برای ضرایب اصطکاک مختلف محاسبه گردیده است. جدول ۲، معادلات مختلف و تعریف ضریب اصطکاک در آنها را نشان می دهد. این معادلات از جمله معادلات پر کاربرد در صنعت گاز طبیعی می باشند.

جدول ۲- معادلات مختلف و تعریف ضریب اصطکاک در آنها

نوع معادله	ضریب اصطکاک	محدوده استفاده
ویموث	$f = \frac{0.032}{D^{1/3}}$	فشار بالا و جریان متلاطم
پن هندل A	$f = \frac{0.085}{Re^{0.147}}$	$5000 < Re < 11 \times 10^6$
پن هندل B	$f = \frac{0.015}{Re^{0.0392}}$	$4000 < Re < 11 \times 10^6$
AGA	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{2.825}{Re \sqrt{f}} \right)$	$Re > 4000$
کلبروک - وایت	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2 \log_{10} \left(\frac{2\varepsilon}{D} + \frac{18.7}{Re \sqrt{f}} \right)$	$Re > 4000$

شکل ۹، فشار گره مبنا را برای ضرایب اصطکاک مختلف بر حسب زمان و در حالت بحرانی نشان می دهد. با توجه به شکل ۹، معادله ویموث بیشترین افت فشار و معادله AGA کمترین افت فشار را برای گره مبنا بر حسب زمان گزارش کرده اند. با توجه به سادگی معادله ویموث و وابسته نبودن آن به عدد رینولدز و زبری نسبی لوله ها، در اکثر مواقع از این معادله در صنعت گاز استفاده می شود. اما تقریب درست تر نسبت به حالت های دیگر استفاده از معادلاتی است که تاثیر عدد رینولدز و همچنین دبی جریان در آنها لحاظ شده باشد. با توجه به نتایج حاصله، می توان نتیجه گیری نمود که ضریب اصطکاک یک پارامتر مهم در تحلیل شبکه خطوط لوله به طور ویژه در حالت بحرانی می باشد.



شکل ۹- فشار در گره مبنا بر حسب زمان برای ضرایب اصطکاک مختلف و در حالت بحرانی

۴-۵- تاثیر ترکیب گاز طبیعی

گاز طبیعی مخلوطی از حدوداً ۲۱ عنصر می باشد بنابراین خواص ترمودینامیکی آن از جمله چگالی و ضریب تراکم پذیری تابع درصد مولی اجزای تشکیل دهنده آن می باشد. در این قسمت، تاثیر ترکیب گاز طبیعی بر روی فشار گره مبنا در حالت بحرانی پرداخته شده است. ضریب تراکم پذیری در این مقاله از معادله حالت AGA8 که معتبرترین معادله در زمینه گاز طبیعی می باشد استفاده گردیده است [۱۵]. این معادله از حیث محدوده دما و فشار بسیار گسترده می باشد بطوریکه محدوده دمای آن بین ۱۴۳ تا ۶۷۶ کلوین و تا فشارهای ۲۸۰ مگاپاسکال بوده و در این گستره دما و فشار از دقت بسیار بالایی برخوردار می باشد.

معادله حالت AGA8 مدلی برای محاسبه ضریب تراکم پذیری

گاز طبیعی به صورت زیر ارائه می کند [۱۵]:

$$Z = 1 + B\rho_m - \rho_r \sum_{n=1}^{18} C_n^* + \sum_{n=13}^{58} C_n^* D_n^* \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، B ضریب دوم ویریل بوده که با استفاده از رابطه زیر

تعریف می شود [۱۵]:

$$B = \sum_{n=1}^{18} a_n T^{-u_n} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N X_i X_j E_{ij}^{u_n} (K_i K_j)^{3/2} B_{nij}^* \quad (15)$$

ضرایب مربوط به معادله (۱۵)، در مرجع [۱۵] آورده شده است.

در رابطه (۱۴)، C_n^* تابعی از ترکیب اجزای تشکیل دهنده و دمای گاز می باشد که با استفاده از رابطه زیر تعریف می شود [۱۵]:

$$C_n^* = a_n (G + 1 - g_n)^{g_n} (Q^2 + 1 - q_n)^{q_n} (F + 1 - f_n)^{f_n} U^{u_n} \quad (16)$$

پارامترهای U، G، Q، F، به ترتیب پارامترهای انرژی، موقعیت، کوادراتیو و دمای بالای مخلوط می باشند.

در رابطه (۱۳)، D_n^* با استفاده از رابطه زیر تعریف شده است [۱۵]:

$$D_n^* = T^{-u_n} (b_n - c_n K_n \rho_r^{k_n}) \rho_r^{b_n} \exp(-c_n \rho_r^{k_n}) \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، ρ_r دانسیته کاهیده بوده که تابعی از دانسیته مولار می باشد. جدول ۳، ترکیب گاز طبیعی مناطق مختلف ایران که در این مقاله استفاده شده است را نشان می دهد. [۱۶].

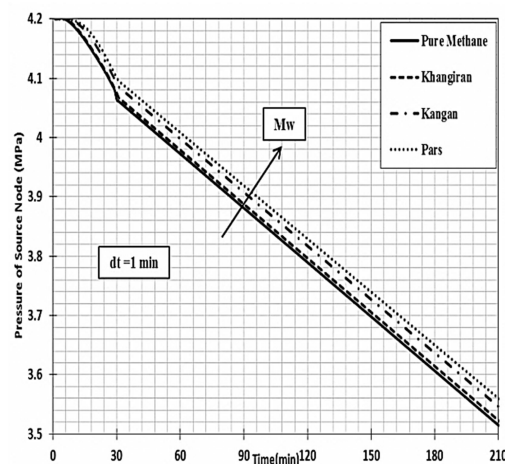
با توجه به جدول ۳، گازهای طبیعی مناطق مختلف ایران دارای ترکیب گازهای متفاوتی می باشند. تاثیر ترکیب گاز طبیعی در معادلات حاکم مربوط به محاسبه ضریب تراکم پذیری در معادله (۸) و چگالی در معادله (۱۲) بوده که با تغییر ترکیب گاز طبیعی این دو پارامتر بر طبق معادله حالت AGA8، تغییر می کنند. شکل ۱۰، فشار در گره مبنا بر حسب زمان را برای متان خالص و گازهای طبیعی مناطق مختلف ایران در حالت بحرانی را نشان می دهد.

جدول ۳- ترکیب گاز طبیعی در مناطق مختلف گازی ایران

اجزای گاز طبیعی	درصد مولی (%)		
	پارس	کنگان	خانگیران
متان	۸۷	۹۰/۰۴	۹۸/۶
اتان	۵/۴	۳/۶۹	۰/۵۹
پروپان	۱/۷	۰/۹۳	۰/۰۹
ایزو بوتان	۰/۳	۰/۲	۰/۰۲
نورمال بوتان	۰/۴۵	۰/۳۹	۰/۰۴
ایزو پنتان	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۰۲
پنتان نورمال	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۰۲
هگزان نورمال	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۰۷
کربن ۷ و بالاتر	۰/۰۳	۰/۰۱	۰
نیترژن	۳/۱	۴/۴۸	۰/۵۶
دی اکسید کربن	۱/۸۵	۰	۰
وزن مولکولی (کیلوگرم بر کیلو مول)	۱۸/۶۸	۱۷/۷۹	۱۶/۳۱

با توجه به شکل ۱۰ و جدول ۳، با افزایش وزن مولکولی گاز طبیعی، افت فشار کمتری در گره مبنا اتفاق افتاده است و به طور مثال افت فشار در گره مبنا برای گاز طبیعی پارس با وزن مولکولی ۱۸/۶۸ کمتر از گاز طبیعی خانگیران با وزن مولکولی ۱۶/۳۱ می باشد. فرزانه گرد و رهبری [۱۱] نشان داده اند که با افزایش وزن مولکولی میزان جرم ذخیره شده توسط گاز طبیعی در یک مخزن مشخص و فشار مشخص، افزایش پیدا می کند. با توجه به نکته ذکر شده، با افزایش وزن مولکولی گاز طبیعی، مقدار گاز بیشتری در فشار مشخص در لوله های متصل به گره مبنا ذخیره شده و در نهایت با توجه به انباشتگی گاز طبیعی درون خطوط لوله شبکه، گره مبنا در این حالت افت فشار کمتری را گزارش می کند.

بنابراین می توان نتیجه گیری نمود برای جلوگیری از مشکلات ناشی از شرایط بحرانی و افت فشار ناشی از آن، می توان از گازهای با وزن مولکولی بزرگتر استفاده نمود تا دچار مشکلاتی از قبیل افزایش سرعت و از کار افتادن شیرهای فشارشکن در شبکه ها نشویم.



شکل ۱۰- فشار در گره مبنا بر حسب زمان برای گازهای طبیعی مناطق مختلف در حالت بحرانی

۵- نتیجه گیری

شبکه های خطوط لوله گاز طبیعی مهمترین جزء در تحویل گاز طبیعی به مصرف کنندگان می باشند. در فصول سر سال و با افزایش برودت هوا، مصرف گاز طبیعی افزایش چشمگیری داشته و از حالت استاندارد خود خارج می شود. در این شرایط شبکه ها حالت بحرانی را تجربه می کنند. در مطالعه حاضر، شبکه خطوط گاز طبیعی در حالت بحرانی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. دبی مصرف کننده ها در یک بازه زمانی نیم ساعته دو برابر شده و با همین نرخ ادامه پیدا می کند. این در حالی است که دبی ورودی به شبکه توسط گره مبنا در طی همه زمان ها ثابت و برابر با دبی حالت پایای شبکه می باشد. روشی برای محاسبه فشار و دبی در خطوط لوله و شبکه های خطوط لوله ارائه گردیده است. روش پیشنهادی با مطالعات گذشته مورد مقایسه قرار گرفته و درصد خطای متوسط میانگین ۰/۳۷٪ را نسبت به مطالعات گذشته بدست آمده است. تاثیر پارامترهای مختلف و مهم مانند ضریب اصطکاک و ترکیب گاز طبیعی بر افت فشار گره مبنا مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد، ضریب اصطکاک تاثیر بسزایی بر روی افت فشار گره های مختلف شبکه می گذارد. همچنین با استفاده از گازهای طبیعی با وزن مولکولی بالاتر، افت فشار کمتری در گره های شبکه ایجاد شده که می تواند از مشکلات کاهش فشار مانند افزایش سرعت و عمل نکردن شیرهای فشار شکن، جلوگیری نماید.

۶- سپاسگزاری

این پژوهش از حمایت شرکت ملی گاز ایران (استان سمنان) برخوردار می باشد.

۷- نمادها

T	دما (K)
L	طول (Km)
P	فشار (MPa)
f	ضریب اصطکاک
Δt	بازه زمانی
$\dot{m}$	دبی جرمی گاز (kg/s)
Q	دبی حجمی (m ³ /s)
g _c	ضریب تبدیل گرانشی
M _w	وزن مولکولی (kg/kmol)
R	ثابت جهانی گازها (kJ/kmol.K)
u	سرعت گاز طبیعی
V	حجم (m ³)
Z	ضریب تراکم پذیری
ρ	چگالی گاز طبیعی (kg/ m ³)
ρ^*	چگالی گاز طبیعی در شرایط مبنا (kg/ m ³)

- [16] National Iran Gas Company official website, <http://NIGC.com/pages/Products.html>.

γ_g ون مولکولی نسبی

T_b, P_b دما و فشار مبنا

۸- مراجع

- [1] Tao W.Q., and Ti H.C, Transient Analysis of Gas Pipeline Network, Chemical Engineering Journal, Vol. 69, No. 1, pp. 47-52, 1998.
- [2] Ke S.L., Ti H.C., Transient analysis of isothermal gas flow in pipeline network, Chemical Engineering Journal, Vol. 76, pp. 169-177, 2000.
- [3] Herra'n-Gonza'lez A., De La Cruz J.M., De Andre's-Toro B., Risco-Marti'n J.L., Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network, Applied Mathematical Modeling, Vol. 33, pp. 1584-1600, 2009.
- [4] Hai W., Xiaojing L., Weiguo Z., Transient flow simulation of municipal gas pipelines, Procedia Engineering, Vol. 12, pp. 217-223, 2011.
- [5] Behbahani-Nejad M. and Bagheri A., The accuracy and efficiency of a MATLAB Simulink library for transient flow simulation of gas pipelines and networks, Journal of Petroleum Science and Engineering , Vol. 70, No. 3-4, pp. 256-265, 2010.
- [6] Behbahani-Nejad M. and Shekari Y., The accuracy and efficiency of a reduced-order model for transient flow analysis in gas pipelines, Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 73, No. 1-2, pp. 13-19, 2010.
- [7] Alamian R., Behbahani-Nejad M., Ghanbarzadeh A., A state space model for transient flow simulation in natural gas pipelines, Journal of Natural Gas Science and Engineering , Vol. 9, pp. 51-59, 2012.
- [8] Farzaneh-Gord, M. and Rahbari, H.R., Unsteady natural gas flow within pipeline network, an analytical approach. Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 28, pp. 397-409, 2016.
- [9] Kiuchi, T., An implicit method for transient gas flows in pipe networks. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 15, No. 5, pp. 378-383, 1994.
- [10] Osiadacz, A., Optimal numerical method for simulating dynamic flow of gas in pipelines. International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 3, No. 2, pp. 125-135, 1983.
- [11] Farzaneh-Gord, M., Rahbari, H.R. and Nikofard, H., The effect of important parameters on the natural gas vehicles driving range. Polish Journal of Chemical Technology, Vol. 14, No. 4, pp. 61-68, 2012.
- [12] Farzaneh-Gord, M., Rahbari, H.R., Bajelan, M. and Pilehvari, L., Investigation of hydrate formation in natural gas flow through underground transmission pipeline. Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 15, pp. 27-37, 2013.
- [13] Adeosun, T.A., Olatunde, O.A., Aderohunmu, J.O. and Ogunjare, T.O., Development of unsteady-state Weymouth equations for gas volumetric flow rate in horizontal and inclined pipes. Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 1, No. 4, pp. 113-117, 2009.
- [14] Coleman, T.F. and Li, Y., An interior trust region approach for nonlinear minimization subject to bounds. SIAM Journal on optimization, Vol. 6, No. 2, pp. 418-445, 1996.
- [15] AGA8-DC92 EOS, Compressibility and Super Compressibility for Natural Gas and Other Hydrocarbon Gases. Transmission Measurement Committee Report No. 8, AGA Catalog No. XQ 1285, Arlington, VA, 1992.