

## اثر کاهش فشار شبکه توزیع گاز بر میزان هدر رفت گاز، اتلاف انرژی و پایداری شبکه

زهرة شمس\* استادیار، گروه مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران، shams.z@qiet.ac.ir

مجتبی باغبان\* استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران، baghban.mo@gonabad.ac.ir

عباس خاکسار کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی پیروزان، فردوس، ایران، khaksar1363142@gmail.com

### چکیده

گاز طبیعی با استفاده از خطوط انتقال فشار بالا از پالایشگاهها به نقاط مصرف منتقل می‌شود. در نواحی مصرف، فشار گاز در ایستگاه‌های دروازه شهری به ۲۵۰ psi کاهش می‌یابد. سپس در ایستگاه حاشیه شهری با کاهش فشار به ۶۰ psi، گاز به خطوط انتقال داخل شهری تزریق می‌شود. در این مطالعه اثر کاهش فشار به کمتر از ۶۰ psi بر هدر رفت گاز، اتلاف انرژی و پایداری شبکه مورد مطالعه قرار گرفته است. داده‌های آزمایشگاهی برای شهر اسلامی واقع در خراسان جنوبی اندازه‌گیری شده است. نتایج بیانگر این است که با کاهش فشار خط تغذیه از ۶۰ psi به ۳۰ psi، هدررفت گاز به ترتیب در دوره زمستانه و تابستانه ۳۵٪ و ۷۳٪ کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود که در فشار ۶۰ psi، بیشینه اتلاف انرژی در رگلاتور مصرف اتفاق می‌افتد که قابل جبران نیست. در حالی که در فشارهای کمتر از فشار ۶۰ psi بیشترین اتلاف انرژی در ایستگاه ناحیه شهری اتفاق می‌افتد. بنابراین در فشارهای پایین می‌توان با نصب توربین انبساطی به جای شیر اختناق بازگشت ناپذیری را کاهش داد. با بررسی پایداری شبکه، کاهش فشار خط تغذیه به ۳۰ psi به شرکت ملی گاز پیشنهاد می‌شود. **واژه‌های کلیدی:** کاهش فشار، گاز طبیعی، تحلیل انرژی، ایستگاه گاز، خط توزیع، رگلاتور.

## Effect of reducing the pressure of the gas distribution network on the rate of gas loss, exergy destruction and network stability

Z. Shams

Department of Energy Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran

M. Baghban

Department of Mechanical Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran

A. Khaksar

Department of Mechanical Engineering, University of pirouzan, Ferdows, Iran

### Abstract

Natural Gas (NG) is transported from producing regions to consumption regions by using transmission pipelines at high pressures. At consumption regions, the pressure of natural gas is dropped to 250 psi in City Gate Station (CGS). Then in Town Border Station (TBS), by reducing the pressure to 60 psi, gas is injected into the transmission lines. In the present study, the effect of reducing the pressure of the gas distribution network to less than 60 psi on the rate of gas loss, exergy destruction and network stability is studied. The experimental data has been measured for the city of Islamieh in South Khorasan province. Results show that by reducing the pressure from 60 psi to 30 psi, the rate of gas loss in winter and summer periods decreased by 35% and 73%, respectively. In addition, the maximum exergy destruction at a pressure of 60 psi occurs in the home regulators which cannot be recoverable. While at pressures below 60 psi, the greatest exergy destruction is occurred at the TBS. Therefore, at low pressures, the irreversibility can be reduced by installing a turbo expander instead of throttling valve. By examining the stability of the network, the reduction of distribution line pressure to 30 psi is proposed to the National Gas Company.

**Keywords:** Pressure reduction, Natural gas, Exergy analysis, Gas station, distribution line, Regulator.

به طول مسیر انتقال و افت فشار گاز، در چند نقطه از مسیر ایستگاه-های تقویت فشار تعبیه می‌گردد تا فشار ورودی ایستگاه دروازه شهری تامین گردد. پس از کاهش فشار توسط رگلاتور ایستگاه دروازه شهری، گاز با فشار ۲۵۰ psi وارد خطوط تغذیه می‌گردد. در ایستگاه‌های شهری فشار گاز از ۲۵۰ psi به ۶۰ psi کاهش می‌یابد. سپس توسط خطوط توزیع به مبادی مصرف هدایت می‌شود و با توجه به نوع مصرف با فشارهای متناسب با نیاز مصرف کننده تحویل مشترک می‌گردد. کاهش فشار شبکه توزیع فواید بسیاری برای شرکت گاز دارد که از آن جمله می‌توان به کاهش هدررفت گاز، ایمنی بالاتر، افزایش عمر شبکه، بهبود اختلاط مرکباتان با گاز و کاهش گازهای گمشده اشاره کرد. در مقابل باید ملاحظات ایمنی قبیل فرسودگی شبکه به علت سرعت بالا، تحویل گاز به متقاضیان با فشار خاص و غیره را در نظر گرفت.

### ۱- مقدمه

با توجه به نیاز و روند افزایش مصرف انرژی در کشور و با در نظر گرفتن این نکته که حدود ۹۰ تا ۹۵ درصد انرژی مصرفی از ترکیبات هیدروکربنی، اعم از فرآورده‌های نفتی و گاز طبیعی تامین می‌شود، نقش گاز طبیعی در تامین انرژی مورد نیاز بخش‌های خانگی، تجاری و صنعتی کشور مشخص می‌شود. قیمت پایین، دسترسی آسان، نداشتن مشکلات حمل و نقل، احتراق کامل، عدم وجود خاکستر، کاهش آلودگی محیط زیست از مزایای استفاده از گاز طبیعی است. گاز از چاه‌ها و مناطق مختلف به وسیله سیستم جمع‌آوری به واحد مرکزی پالایش فرستاده می‌شود. سپس توسط خطوط انتقال با فشار بین ۳۵۰ تا ۱۰۰۰ psi وارد ایستگاه دروازه شهری می‌گردد. با توجه

همان‌طور که گفته شد از ابتدای مسیر تولید تا مصرف کننده فشار گاز طبیعی در چندین مرحله افزایش و کاهش می‌یابد که این فرآیندها باعث اتلاف انرژی زیادی می‌گردد. تحلیل انرژی این امکان را می‌دهد که سهم هر یک از اجزا در اتلاف کل چرخه تعیین شده و در مکان‌یابی ناکارآمدی‌های یک چرخه به‌طور دقیق عمل شود [۱].

مطالعات متنوعی بر روی ایستگاه‌های تقویت فشار و کاهش فشار و شبکه توزیع انجام شده است. نسلی و همکاران [۲] به امکان‌سنجی تولید برق در ایستگاه‌های کاهش فشار در منطقه از میر پرداختند. در مطالعه آن‌ها به جای استفاده از شیرهای انبساطی، فشار گاز به کمک توربین‌های انبساطی کاهش پیدا کرد. علاوه بر این بازده انرژی ایستگاه تقلیل فشار با توربین انبساطی تعیین گردید.

با توجه به این‌که اتلاف انرژی زیادی در گرم‌کن‌های ایستگاه تقلیل فشار وجود دارد، فرزانه‌گرد و همکاران [۳] به بررسی جایگزین کردن گرم‌کن‌های فعلی با گرم‌کن‌های خورشیدی پرداخته و نشان دادند که با توجه به تعداد زیاد روزهای آفتابی در ایران، این کار باعث جلوگیری از اتلاف انرژی می‌گردد. اگر چه هزینه اولیه اجرای طرح زیاد می‌باشد ولی در دراز مدت باعث صرفه‌جویی بسیاری می‌گردد به‌طوری‌که برآوردها از بازگشت سرمایه بین ۵/۵ تا ۸ سال حکایت دارد.

عرب کوهسار و همکاران [۴] با استفاده از سیستم گرمایش خورشیدی صفحه تخت مصرف سوخت را در ایستگاه‌های تقلیل فشار کاهش دادند. علاوه بر این به منظور استفاده از انرژی جریان، شیر اختناق را با یک توربین انبساطی جایگزین کردند. آن‌ها زمان بازگشت سرمایه طرح خود را ۳/۵ سال پیش‌بینی کردند.

در مطالعه فرزانه‌گرد و همکاران [۵] استفاده از انرژی زمین گرمایی به منظور کاهش مصرف سوخت در ایستگاه تقلیل فشار گنبد کاووس پیشنهاد شده است.

در مقاله ذبیحی و تقی‌زاده [۶] دو راه حل مختلف برای جایگزینی دو شیر فشارشکن در ایستگاه تقلیل فشار پیشنهاد شده است. در روش اول هر دو شیر با یک توربین انبساطی جایگزین شده‌اند. در روش دوم فقط به جای شیر فشارشکن اول توربین انبساطی نصب شده است. آن‌ها چالش‌های نصب توربین انبساطی شامل نوسانات جریان گاز طبیعی و هزینه بالای نصب وسایل گرمایشی جدید در ایستگاه تقلیل فشار واقع در ساری را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که پیشنهاد نصب توربین انبساطی به جای یک شیر نسبت به نصب توربین انبساطی به جای دو شیر دوره بازگشت سرمایه کمتری دارد. علاوه بر این آن‌ها گزارش کردند که نوسانات گاز طبیعی منجر به عدم امکان استفاده از توربین انبساطی برای پنج ماه از سال می‌شود.

ابراهیمی مقدم و همکاران [۷] با استفاده از روش عددی به محاسبه میزان نشتی گاز طبیعی از یک روزنه در خطوط انتقال گاز پرداختند و رابطه‌ای بین دبی نشت یافته با فشار و قطر سوراخ پیشنهاد کردند.

الفتی و همکاران [۸] به تحلیل انرژی و انرژی در یک ایستگاه دروازه شهری پرداختند تا به کمک آن مکان و مقدار دقیق اتلاف در چهار فصل سال تعیین شود. آن‌ها گزارش کردند که اگر چه شیر تنظیم از نظر انرژی بیشترین راندمان را دارد، اما در عین حال بیشترین اتلاف انرژی را ایجاد می‌کند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین کمترین اتلاف انرژی به ترتیب مربوط به فصل زمستان و تابستان

می‌باشد.

عرب کوهسار و اندرسن [۹] با پیشنهاد ترکیب ایستگاه کاهش فشار با چیلر جذبی بیمارستان آرهاس در دانمارک توانستند صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در مصرف انرژی ایجاد کنند.

غایبی و همکاران [۱۰] به تجزیه و تحلیل انرژی، انرژی، انرژی، اقتصادی و محیطی دو سیستم ترکیبی جدید برای تولید همزمان توان و هیدروژن پرداختند. سیستم‌های ترکیبی از یک سیستم ایستگاه دروازه شهری، یک چرخه رانکین، یک چرخه تولید توان جذبی و یک الکترولیز غشای تبادل پروتون تشکیل شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که مولد بخار سهم اصلی را در تخریب انرژی دارد.

در مطالعه سعادت و خان‌محمدی [۱۱] مدل‌سازی ترمودینامیکی و بهینه‌سازی یک ایستگاه تقلیل فشار ترکیبی با چرخه رانکین و سیستم ترموالکتریک ارائه شده است. آن‌ها برای تعیین میزان اتلاف انرژی مولفه‌های مختلف چرخه به تحلیل انرژی سیستم پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که کمترین نرخ اتلاف انرژی در چگالنده چرخه رانکین، مازول ترموالکتریک و گرم‌کن حمام آب ایجاد می‌شود.

رنجبر و همکاران [۱۲] به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد کوپل گرم‌کن ایستگاه تقلیل فشار شهری پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که با تغییر در ساختار گرم‌کن، نرخ تخریب انرژی کاهش می‌یابد.

شکوهی و همکاران [۱۳] تحلیل انرژی، انرژی و اقتصادی کاربرد چرخه فوق بحرانی فشرده سازی دی اکسید کربن با انرژی خورشیدی را در ایستگاه دروازه شهری گاز طبیعی ارائه کردند. در مطالعه آن‌ها، از گرمای اتلافی چرخه برای تون برای پیش‌گرم کردن گاز طبیعی استفاده شده است. آن‌ها از نقطه نظر اقتصادی دوره بازگشت سرمایه سیستم پیشنهادی را چهار سال تخمین زدند.

هدف از مطالعه دیمی و همکاران [۱۴] استفاده از انرژی اتلافی ایستگاه‌های گاز شهری برای تولید برق و آب شیرین می‌باشد. بر این اساس، فشار گاز طبیعی به کمک یک توربین انبساطی کاهش می‌یابد. از آنجا که دمای گاز در عبور از توربین انبساطی بیشتر کاهش می‌یابد، برای جلوگیری از هیدراته شدن آن، دمای گاز درون یک گرم‌کن افزایش می‌یابد. در این مطالعه از گرمای اتلافی در خروجی گرم‌کن برای تولید آب شیرین استفاده شده است.

تا پیش از این مطالعه شرکت گاز طبق یک روال مشخص، فارغ از جمعیت، وسعت و یا تعداد و نوع مصرف کننده، فشارخط تغذیه را روی ۶۰ psi تنظیم می‌نموده است. در این مقاله اثر کاهش فشار به کمتر از ۶۰ psi مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل انرژی بر روی ایستگاه تقلیل فشار، شبکه توزیع و رگلاتورهای خانگی به منظور تعیین مکان بیشترین برگشت ناپذیری انجام شده است. علاوه بر این اثر کاهش فشار بر میزان هدررفت گاز و پایداری شبکه مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- معادلات حاکم

در یک شبکه گازرسانی اتلاف انرژی را می‌توان در ایستگاه‌های تقلیل فشار، رگلاتورهای خانگی و شبکه توزیع گاز در نظر گرفت. طرحواره‌ای از ایستگاه تقلیل فشار، شبکه توزیع و رگلاتورهای مصرف

میزان حجم گاز ذخیره شده در خطوط تغذیه برای تحلیل پایداری شبکه با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود [۱۸]:

$$V = 1.955ZD^2LP_m \quad (8)$$

در این رابطه  $V$  حجم گاز بر حسب فوت مکعب،  $D$  قطر داخلی لوله،  $L$  طول لوله و  $P_m$  فشار متوسط بر حسب پوند بر اینچ مربع است. علاوه بر میزان حجم گاز ذخیره شده، فشار در ورودی رگلاتورهای مصرف نیز از کمیت‌های لازم جهت بررسی پایداری شبکه است. از معادله برنولی می‌توان برای تعیین فشار ورودی رگلاتورها استفاده کرد. شکل کلی معادله برنولی بدین صورت نوشته می‌شود:

$$\Delta \left( \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z \right) = -f \frac{L_e}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

در این رابطه  $L_e$  طول معادل و  $v$  سرعت متوسط سیال است. در این مطالعه حجم ذخیره شده گاز و فشار ورودی رگلاتورهای مصرف به ترتیب با استفاده از نرم افزارهای تخصصی شرکت گاز به نام‌های GNPURG و GPNET تعیین شده‌اند.

### ۳- نتایج

در این مطالعه تاثیر کاهش فشار خط تغذیه به کمتر از ۶۰ psi بر میزان هدررفت گاز، اتلاف انرژی و پایداری شبکه توزیع پرداخته شده است. اطلاعات مورد نیاز از قبیل دبی مصرف، مشخصات شبکه توزیع و اطلاعات دما و فشار بر اساس داده‌های باغشهر اسلامیه واقع در شهرستان فردوس در استان خراسان جنوبی استخراج شده است. شهر اسلامیه دارای یک ایستگاه تقلیل فشار کابینتی به ظرفیت ۱۰۰۰۰ متر مکعب بر ساعت می‌باشد. تعداد مشترکین گاز طبیعی این شهر ۲۸۶۹ مشترک بوده که ۴ مورد از آن ایستگاه ۴۰۰ متر مکعبی گاز است. جهت انجام محاسبات نیاز به برداشت اطلاعات مصرف، دمای ورودی و خروجی و فشار ورودی و خروجی ایستگاه می‌باشد. جهت برداشت هر کدام از اطلاعات، تجهیزات خاصی استفاده شده است. برای اندازه‌گیری مصرف ایستگاه یک کنتور توربینی در خروجی ایستگاه نصب شده است. برای تعیین دما و فشار از حسگرهای دما و فشار نصب شده روی کنتور استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری دمای گاز در فشارهای مختلف، با مجوز شرکت گاز استان خراسان جنوبی فشار شبکه در مقدار مشخص تنظیم و پس از دستیابی به شرایط پایا اطلاعات ثبت گردید. این تغییر فشار در یک بازه زمانی کوتاه صورت پذیرفت تا اختلالی در گازرسانی اتفاق نیفتد. میزان دبی عبوری در فشار ۶۰ psi در دوره تابستانه (هفت ماه اول سال) و زمستانه (پنج ماه دوم سال) به ترتیب ۷۴۷۳/۲۹ و ۴۳۷۱۴/۷۸ مترمکعب در شبانه‌روز اندازه‌گیری شده است. با اخذ میزان مصرف متوسط کنتورهای خانگی از سامانه مشترکین شرکت گاز، متوسط مصرف برای کل کنتورهای موجود در دوره تابستانه ۷۱۱۷/۴۲ متر مکعب در شبانه‌روز و در دوره زمستانه ۳۹۹۲۲/۱۸ متر مکعب در شبانه‌روز تعیین گردید. علت اصلی اختلاف بین مقادیر گزارش شده برای دبی ایستگاه و دبی مصرف‌کنندگان به علت نشتی زیاد در شبکه توزیع است. همه ساله شرکت گاز نسبت به نشت‌یابی اتصالات اقدام می‌نماید تا از هدررفت گاز جلوگیری گردد. در سال ۹۷ طی فرآیند نشت‌یابی در باغشهر اسلامیه، تعداد ۲۶۴ مورد نشتی از زیر اتصالات رگلاتور و ۱۹۱ مورد از اتصالات بالای رگلاتور

در شکل ۱ نشان داده شده است. انرژی در غیاب اثرات میدان مغناطیسی، الکتریکی، شیمیایی و کشش سطحی را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۵]:

$$X = X_p + X_{Th} + X_{Di} + X_K \quad (1)$$

در این رابطه  $X_p$ ،  $X_{Th}$ ،  $X_{Di}$  و  $X_K$  به ترتیب انرژی جنبشی، انرژی پتانسیل، انرژی ترمودینامیکی و انرژی دیفیوژنی است. در یک رگلاتور به دلیل یکسان بودن دبی و اندازه سطح مقطع ورودی و خروجی، تغییر انرژی جنبشی صفر است. تغییر انرژی پتانسیل نیز به دلیل قرار گرفتن در یک ارتفاع صفر می‌باشد. علاوه بر این، چون هیچ کاری انجام نمی‌گیرد انرژی دیفیوژنی که وابسته به کار است، نیز صفر است. در نتیجه انرژی کلی را می‌توان برابر با انرژی وابسته به آنتالپی دانست. انرژی یک گاز در دمای  $T$  و فشار  $P$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$X = C_p [(T - T_0) - T_0 \ln(T/T_0)] + ZRT \ln(P/P_0) \quad (2)$$

که در این رابطه  $T_0$ ،  $P_0$ ،  $C_p$  و  $Z$  به ترتیب دمای محیط، فشار محیط، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب تراکم‌پذیری است. اتلاف انرژی در ایستگاه تقلیل فشار با محاسبه اختلاف انرژی ورودی و خروجی تعیین می‌شود:

$$I = \dot{m} (X_{in} - X_{out}) \quad (3)$$

در این رابطه دبی جرمی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{m} = \dot{V} / ZRT \quad (4)$$

در این رابطه  $\dot{V}$  دبی حجمی و  $R$  ثابت گاز است. داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که اختلاف دما در شبکه توزیع گاز بسیار کم (حدود یک درجه سانتیگراد) است. بنابراین تنها عامل مؤثر در تولید انرژی و اتلاف انرژی در لوله اصطکاک می‌باشد. انرژی تولید شده ناشی از اصطکاک در جریان داخل لوله به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$S_{gen} = (8\rho^2 Q^3 f L) / (\pi^2 D^5 T_0) \quad (5)$$

در این رابطه  $L$  طول لوله،  $D$  قطر لوله،  $\rho$  چگالی گاز،  $f$  ضریب اصطکاک و  $Q$  دبی جریان می‌باشد. ضریب اصطکاک در جریان متلاطم با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود [۱۷]:

$$f = 0.25 \log \left[ \frac{\epsilon}{D} + \frac{5.74}{(Re)^{0.9}} \right]^{-2} \quad (6)$$

در این رابطه  $\epsilon$  زبری و  $Re$  عدد رینولدز جریان است. افت انرژی در ضرب دمای محیط در انرژی تولیدی به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$I = T_0 S_{gen} = (8\rho^2 Q^3 f L) / (\pi^2 D^5) \quad (7)$$

برای تعیین اتلاف انرژی، شبکه توزیع به ۲۵ گره تقسیم گردید. برای هر گره، مقدار دبی با توجه به کنتورهای نصب شده در مسیر شبکه مشخص گردید و اتلاف انرژی هر گره به دست آمد. محاسبات برای دو دوره مصرف تابستانه و زمستانه در فشارهای مختلف انجام گرفته است.

در این مطالعه اطلاعات مورد نیاز از قبیل دما، فشار و دبی با داده برداری آزمایشگاهی استخراج شده است. مقادیر دبی گاز در ایستگاه تقلیل فشار درون شهری با استفاده از دبی‌سنج توربینی و تصحیح کننده نصب شده در ایستگاه اندازه‌گیری شده است. دبی گاز عبوری از اطلاعات سامانه مشترکین گاز استخراج شده است.

مندرج در این جدول بیان گر کاهش ۴۸ درصدی هدررفت گاز در دوره زمستانه با تغییر فشار از ۶۰ psi به ۲۰ psi می باشد.

جدول ۱- میزان هدررفت گاز (متر مکعب در شبانه روز) در قطر نشستی

مختلف						
قطر	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۴۵
دبی	۵۵/۹	۲۲۳/۷	۷۲۶/۴	۱۳۹۰/۳	۲۴۴۶/۹	۳۸۱۷/۳

جدول ۲- میزان هدررفت گاز (متر مکعب در شبانه روز) در فشار

مختلف						
فشار (Psi)	۲۰	۳۰	۴۵	۶۰		
دوره تابستانه	۷۶/۵	۹۵/۹	۲۱۳/۷	۳۵۵/۹		
دوره زمستانه	۱۹۸۲/۵	۲۴۵۹/۰	۳۰۰۷/۲	۳۷۹۲/۶		

جدول ۳- داده های تجربی در ایستگاه تقلیل فشار.

فشار خروجی ایستگاه (psi)	دمای ورودی ایستگاه (°C)	دمای خروجی ایستگاه (°C)
۶۰	۲۰	۱۷
۴۵	۲۰	۱۶
۳۰	۲۰	۱۵/۵
۲۰	۲۰	۱۵

جدول ۴- اتلاف انرژی در ایستگاه تقلیل فشار.

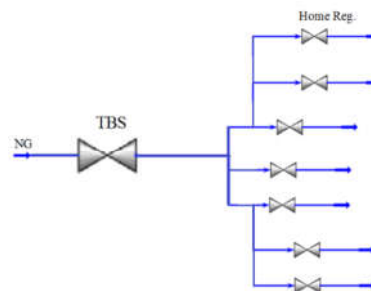
فشار خروجی ایستگاه (psi)	اتلاف انرژی در ایستگاه (W)	اتلاف انرژی در ایستگاه (W)
۶۰	۱۱۸۵۴	۶۹۲۳۵
۴۵	۱۳۷۴۸	۸۰۵۰۷
۳۰	۱۶۰۶۹	۹۴۴۱۰
۲۰	۱۸۲۴۷	۱۰۶۲۸۶

در ادامه با استفاده از داده های تجربی برداشت شده، به ترتیب در ایستگاه تقلیل فشار، رگلاتور خانگی و شبکه توزیع، تحلیل انرژی انجام شده و سهم هر کدام در اتلاف انرژی در فشارهای مختلف بررسی شده است. گاز مصرفی شهر اسلامیه از پالایشگاه شهید هاشمی نژاد سرخس تأمین می گردد. در این مطالعه با فرض ۸۵ درصد متان و ۱۵ درصد اتان و صرف نظر از هیدروکربن های سنگین تر، مقدار ظرفیت گرمایی (Kj/Kgk) ۹۷/۳۶ محاسبه شده و مقدار ضریب تراکم پذیری برای گاز طبیعی ۰/۹۴ در نظر گرفته شده است [۱]. داده های تجربی شامل فشار و دمای ورودی و خروجی ایستگاه به ازای چهار فشار خروجی ۶۰، ۴۵، ۳۰ و ۲۰ در جدول ۳ ارائه شده است.

اتلاف انرژی در ایستگاه تقلیل فشار در دوره تابستانه و زمستانه برای چهار فشار مختلف در جدول ۴ و شکل ۲ ارائه شده است. همان طور که قبلا اشاره شد، اتلاف انرژی به دبی گذرنده از ایستگاه و مقدار تغییرات دما و فشار بستگی دارد. نتایج نشان می دهد که اتلاف انرژی در فشار خروجی ۶۰ psi در دوره زمستانه ۶۹۲۳۵ وات و در دوره تابستانه ۱۱۸۵۴ وات می باشد. افزایش اتلاف انرژی در دوره زمستانه نسبت به دوره تابستانه به علت افزایش دبی می باشد. همان طور که

گزارش شده است. در واقعیت علاوه بر فشار خط تغذیه و قطر نشستی عوامل دیگری از قبیل سرعت سیال، دمای سیال و چگالی آن و دما و فشار محیط بر میزان هدررفت گاز تاثیرگذار هستند. میزان هدر رفت گاز را می توان به کمک نرم افزار GNPURG و بر اساس میزان فشار شبکه، قطر معادل نشستی و مدت زمان خروج گاز در دما، فشار و سرعت مرجع تعیین کرد. در واقع قطر معادل بیان گر قطری است که در آن میزان نشستی در شرایط مرجع برابر با میزان واقعی نشستی باشد. در نبود اطلاعات نشستی در فشار ۲۰، ۳۰ و ۴۵psi، در این مطالعه برای تخمین میزان هدر رفت گاز در هر کدام از فصول تابستان و زمستان (با توجه به تفاوت سرعت و دمای سیال و نیز دما و فشار محیط در هر کدام از فصول) قطر معادل نشستی تعیین می شود. اکنون با دانستن این قطر برای هر فصل و فشار شبکه میزان نشستی گاز توسط نرم افزار GNPURG تخمین زده می شود.

میزان هدررفت گاز در فشار ۶۰ psi در جدول ۱ گزارش شده است. به عنوان مثال میزان هدررفت گاز در قطر نشستی معادل ۰/۱ میلیمتر برابر با ۲۲۳/۷ مترمکعب در شبانه روز تخمین زده شده است. با مقایسه اعداد مندرج در این جدول و میزان واقعی نشت گاز، هدررفت گاز در دوره تابستانه را می توان از نشستی با قطر معادل تقریبی ۰/۱۲ میلیمتر و در دوره زمستانه از نشستی با قطر معادل ۰/۴۴ میلیمتر تعیین کرد.



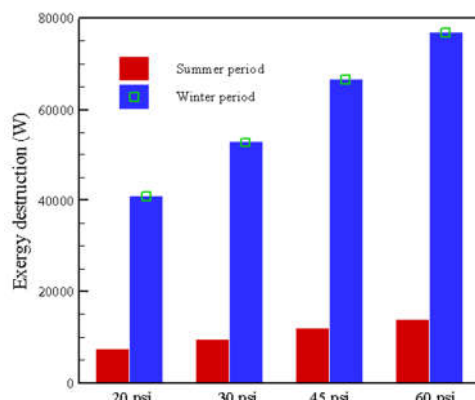
شکل ۱- طرحواره ای از ایستگاه تقلیل فشار، شبکه توزیع و رگلاتورهای مصرف

لازم به ذکر است که علاوه بر هدررفت گاز از اتصالات عوامل دیگری از قبیل دستکاری غیرمجاز وسایل اندازه گیری جریان، دقت پایین و نیز خرابی آن ها در میزان گازهای گم شده سهمیم هستند. تعیین سهم هر کدام در عمل به آسانی امکان پذیر نیست. در این مطالعه فرض بر این است که تمام گازهای گم شده به علت نشستی شبکه انتقال گاز باشد. هرچند این فرض می تواند سبب ایجاد خطا در تعیین دقیق میزان هدررفت گاز شود، اما با توجه به ماهیت مقایسه ای این مطالعه، به علت اعمال این فرض در همه فشارها خطای تخمین میزان هدررفت گاز تعدیل خواهد شد. میزان هدررفت گاز در فشارهای مختلف در دوره تابستانه و زمستانه در جدول ۲ ارائه شده است. همان طور که انتظار می رود کمترین هدررفت گاز در فشار خروجی ۲۰ psi و بیشترین هدر رفت در فشار ۶۰ psi است. در دوره تابستانه کاهش حدود ۷۳ درصدی میزان هدررفت گاز با کاهش فشار خط تغذیه از ۶۰ psi به ۲۰ psi تخمین زده می شود. این کاهش هدررفت در اثر کاهش فشار از ۶۰ psi به ۲۰ psi حدود ۷۸ درصد گزارش می شود. نتایج

جدول ۶- اتلاف انرژی در رگلاتورهای شبکه توزیع.

فشار ورودی رگلاتور (psi)	اتلاف انرژی تابستانه (W)	اتلاف انرژی زمستانه (W)
۶۰	۱۳۶۸۷	۷۶۷۵۵
۴۵	۱۱۸۵۶	۶۶۵۰۶
۳۰	۹۴۰۶	۵۲۷۶۵
۲۰	۷۲۶۲	۴۰۷۳۹

جهت محاسبه اتلاف انرژی در شبکه توزیع گاز نیاز به اطلاعاتی از قبیل جنس شبکه، طول شبکه و سایز شبکه می‌باشد. این اطلاعات در جدول ۷ بر اساس نقشه ازبیلت شبکه توزیع باغشهر اسلامی استخراج شده است. سایر کمیت‌ها در محاسبه انرژی در جدول ۸ ارائه شده است.



شکل ۳- اتلاف انرژی در رگلاتورهای مصرف در فشارهای مختلف برای دوره تابستانه و زمستانه

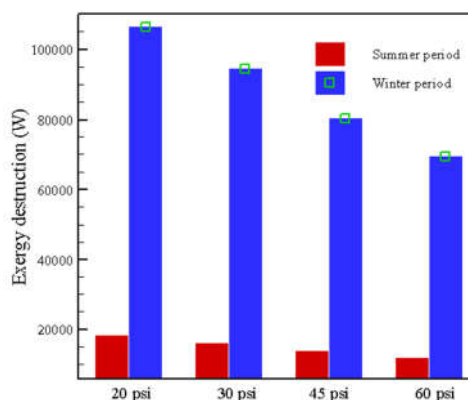
جدول ۷- اطلاعات شبکه توزیع اسلامی.

جنس شبکه	متر از (متر)	قطر شبکه
پلی اتیلن	۴۲۳۵۸	۶۳ میلیمتر
پلی اتیلن	۱۶۷۲۳	۹۰ میلیمتر
پلی اتیلن	۴۲۰۵	۱۲۵ میلیمتر
پلی اتیلن	۳۰۲۱	۱۶۰ میلیمتر
فولادی	۱۷۰	۸ اینچ

جدول ۸- سایر کمیت‌ها در محاسبه انرژی شبکه توزیع [۲۴].

مقدار	مشخصه
۰/۵۷۲	چگالی گاز طبیعی ( $\text{kg/m}^3$ )
۰/۰۳۶	لزجت دینامیکی (Pa.s)
۲۵	دمای متوسط گاز ( $^{\circ}\text{C}$ )
۰/۰۳۵	زبری لوله فولادی (mm)
۰/۰۰۵۱	زبری لوله پلی اتیلن (mm)

مشاهده می‌شود با کاهش فشار خروجی از ایستگاه، اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. به طوری که با کاهش فشار از ۶۰ psi به ۳۰ psi و ۲۰ psi اتلاف انرژی به ترتیب ۳۵ و ۵۴ درصد افزایش یافته است. این افزایش اتلاف انرژی را می‌توان ناشی از افزایش افت فشار دانست. با توجه به این که توربین‌های انبساطی موجود در مدل‌های ۷۵ تا ۱۳۰ کیلووات می‌باشند، تا پیش از این مطالعه استفاده از توربین انبساطی امکان‌پذیر نبود [۲]. با این وجود در فشارهای کمتر از ۶۰ psi با توجه به افت فشار بیشتر در ایستگاه، امکان استفاده از توربین انبساطی بخصوص در دوره زمستان فراهم می‌شود که باعث کاهش برگشت ناپذیری خواهد شد.



شکل ۲- اتلاف انرژی در ایستگاه تقلیل فشار در فشارهای مختلف برای دوره تابستانه و زمستانه

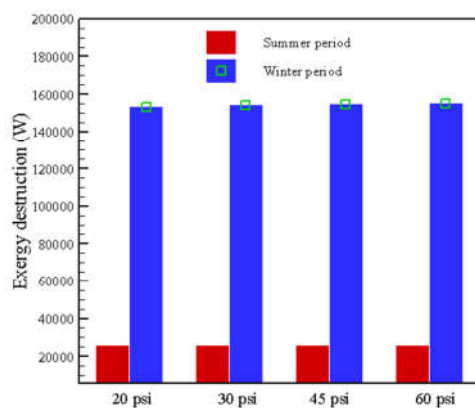
داده‌های اندازه‌گیری شده شامل فشار، دمای ورودی و دمای خروجی رگلاتور در چهار فشار خروجی ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ psi و ۲۰ در جدول ۵ ارائه شده است. برآورد اتلاف انرژی در رگلاتورهای مصرف طبق جدول ۶ و شکل ۳ محاسبه شده است. مشاهده می‌شود که اتلاف انرژی در فشار ورودی رگلاتور ۶۰ psi در دوره زمستانه ۷۶۷۵۵ وات و در دوره تابستانه ۱۳۶۸۷ وات است. همچنین برای فشار ورودی رگلاتور ۲۰ psi در دوره زمستانه این اتلاف ۴۰۷۳۹ وات و در دوره تابستانه ۷۲۶۲ وات می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رود با کاهش فشار ورودی، اتلاف انرژی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در دوره زمستانه، با کاهش فشار از ۶۰ psi به ۲۰ psi، اتلاف انرژی ۴۷ درصد کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که با توجه به تعداد زیاد رگلاتورهای مصرف، افت انرژی در آن‌ها جبران ناپذیر است.

جدول ۵- برداشت داده‌های تجربی از رگلاتورها.

فشار ورودی رگلاتور (psi)	دمای ورودی رگلاتور ( $^{\circ}\text{C}$ )	دمای خروجی رگلاتور ( $^{\circ}\text{C}$ )
۶۰	۱۹	۱۸/۵
۴۵	۱۹	۱۸
۳۰	۱۹	۱۸
۲۰	۱۹	۱۸

جدول ۹- اتلاف انرژی در شبکه توزیع گاز شهر اسلامیه.

فشار (psi)	اتلاف تابستانه (W)	اتلاف زمستانه (W)
۶۰	۲۵۵۹۶	۱۵۴۸۹۸
۴۵	۲۵۶۵۱	۱۵۴۶۵۵
۳۰	۲۵۵۱۷	۱۵۴۰۱۷
۲۰	۲۵۵۴۸	۱۵۳۳۱۷



شکل ۵- اتلاف انرژی در فشارهای مختلف برای دوره تابستانه و زمستانه

جدول ۱۰- حجم شبکه توزیع در فشارهای مختلف بر حسب متر مکعب.

فشار (psi)	۶۰	۴۵	۳۰	۲۰
حجم شبکه (m <sup>3</sup> )	۱۰۲۳/۳	۷۶۶/۳	۵۱۰/۱	۲۳۹/۷

جدول ۱۱- مدت زمان ماندگاری و پایداری شبکه توزیع در فشارهای مختلف.

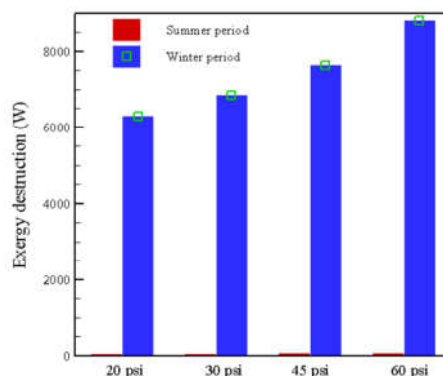
فشار (psi)	۶۰	۴۵	۳۰	۲۰
ماندگاری خط در دوره زمستانه (min)	۱۹۷	۱۴۸	۹۸	۶۵
ماندگاری خط در دوره زمستانه (min)	۳۴	۲۵	۱۷	۱۱

همان‌طور که گفته شد، هرچه فشار شبکه توزیع کاهش یابد، اتلاف انرژی و نشتی گاز کاهش خواهد یافت. با این وجود می‌بایست تأثیرات این کاهش فشار بر پایداری شبکه بررسی گردد. شبکه گاز پایدار به شبکه‌ای اطلاق می‌شود که فشار گاز در ورودی رگلاتورهای مصرف از حداقل فشار کاری رگلاتور (۱۵psi) بیشتر باشد. علاوه بر این در یک شبکه پایدار حجم گاز موجود در شبکه باید به حدی باشد تا در صورت ایجاد مشکل در ایستگاه تقلیل، امدادگر فرصت لازم جهت

همان‌طور که در جدول ۸ و شکل ۴ مشاهده می‌شود اتلاف انرژی در شبکه توزیع در دوره زمستانه در فشار ۲۰ psi، ۶۲۹۲/۶۸ وات و در فشار ۶۰ psi، ۸۸۰۸/۲۱ وات می‌باشد. این مقدار در مقابل افت انرژی ایستگاه و رگلاتورهای شبکه توزیع ناچیز بوده و در بیشترین حالت حدود ۵/۶ درصد اتلاف سیستم را تشکیل می‌دهد. اتلاف انرژی در چهار فشار در جدول ۹ و شکل ۵ ارایه شده است. نتایج بیانگر این است که در فشار فعلی شبکه توزیع گاز طبیعی اتلاف انرژی بیشتر از سایر فشارها است. به عنوان مثال در دوره زمستانه با کاهش فشار شبکه از ۶۰ psi به ۳۰ psi و ۲۰ psi، اتلاف انرژی به ترتیب ۴۲۸۱ و ۶۴۲۵ وات کاهش خواهد یافت. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که در فشار ۶۰ psi بیشترین اتلاف انرژی در رگلاتورهای مصرف اتفاق می‌افتد. به عنوان نمونه نزدیک به ۵۳ درصد از افت انرژی در دوره تابستان در رگلاتورها گزارش شده است. با توجه به تعداد زیاد رگلاتورهای توزیع، امکان استفاده از این انرژی تلف شده وجود ندارد. در مقابل در فشارهای پایین مانند فشار ۳۰ psi، بیشترین افت انرژی در ایستگاه تقلیل فشار مشاهده می‌شود. به طوری که در این فشار افت انرژی در دوره تابستانه و زمستانه به ترتیب ۶۳ و ۶۱ درصد از افت کل است. این افت انرژی را می‌توان از روش‌های مختلف از قبیل نصب توربین انبساطی کاهش داد.

جدول ۸- اتلاف انرژی در شبکه توزیع گاز شهر اسلامیه.

فشار (psi)	اتلاف تابستانه (W)	اتلاف زمستانه (W)
۶۰	۵۴/۵۱	۸۸۰۸/۲۱
۴۵	۴۷/۲۷	۷۶۴۱/۹۵
۳۰	۴۲/۳۰	۶۸۴۱/۵۲
۲۰	۳۸/۹۰	۶۲۹۲/۶۸



شکل ۴- اتلاف انرژی در شبکه توزیع در فشارهای مختلف برای دوره تابستانه و زمستانه

کمتر از ۶ درصد اتلاف کل است.

۴. در فشار بالا بیشترین اتلاف انرژی در رگلاتورهای مصرف اتفاق می‌افتد. در حالی که در فشارهای کم بیشترین تلفات در ایستگاه تقلیل فشار اتفاق می‌افتد. از نقطه نظر اقتصادی استفاده از توربین انبساطی در فشارهای پایین مقرون به صرفه است که سبب کاهش اتلاف انرژی خواهد شد.

#### ۵- سپاسگزاری

نویسندگان از شرکت گاز خراسان جنوبی برای حمایت معنوی و مالی از این پژوهش تشکر می‌کنند.

#### ۶- مراجع

- [1] Rosen M. and Dincer I., Exergy-cost-energy-mass analysis of thermal systems and processes. *Energy Conversion and Management* 44(10): p. 1633-1651, 2003.
- [2] Neseli M.A., Ozgener O. and Ozgener L., Energy and exergy analysis of electricity generation from natural gas pressure reducing stations. *Energy Conversion and Management* 93: p. 109-120, 2015.
- [3] Farzaneh-Gord M., et al., Energy and exergy analysis of natural gas pressure reduction points equipped with solar heat and controllable heaters. *Renewable Energy* 72: p. 258-270, 2014.
- [4] Arabkoohsar A., et al., A new design for natural gas pressure reduction points by employing a turbo expander and a solar heating set. *Renewable Energy* 81: p. 239-250, 2015.
- [5] Farzaneh-Gord M., et al., Employing geothermal heat exchanger in natural gas pressure drop station in order to decrease fuel consumption. *Energy* 83: p. 164-176, 2015.
- [6] Zabihi A. and Taghizadeh M., Feasibility study on energy recovery at Sari-Akand city gate station using turboexpander. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 35: p. 152-159, 2016.
- [7] ابراهیمی مقدم، ا.، فرزانه گرد، م.، دیمی دشت بیاض، م.، محاسبه میزان هدر رفت گاز طبیعی از یک حفرة در خطوط لوله توزیع گاز زیر زمینی، نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۴۷(۳)، ص. ۱-۱۰، ۱۳۹۶.
- [8] Olfati M., et al., A comprehensive analysis of energy and exergy characteristics for a natural gas city gate station considering seasonal variations. *Energy* 155: p. 721-733, 2018.
- [9] Arabkoohsar A. and Andresen G., A smart combination of a solar assisted absorption chiller and a power productive gas expansion unit for cogeneration of power and cooling. *Renewable energy* 115: p. 489-500, 2018.
- [10] Ghaebi H., et al., Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of using city gate station (CGS) heater waste for power and hydrogen production: A comparative study. *International Journal of Hydrogen Energy* 43(3): p. 1855-1874, 2018.
- [11] Saadat-Targhi M. and Khanmohammadi S., Energy and exergy analysis and multi-criteria optimization of an integrated city gate station with organic Rankine flash cycle and thermoelectric generator. *Applied Thermal Engineering* 149: p. 312-324, 2019.
- [12] Ranjbar B., Rahimi M and Mohammadi F., Exergy Analysis and Economical Study on Using Twisted Tape Inserts in CGS Gas Heaters. *International Journal of Thermophysics* 42(7): p. 1-19, 2021.
- [13] Shokouhi Tabrizi A.H., et al., Energy, exergy and economic analysis of utilizing the supercritical CO2 recompression Brayton cycle integrated with solar energy

اصلاح را داشته باشد. حجم گاز شبکه و فشار در ورودی رگلاتورهای مصرف را می‌توان با استفاده از نرم افزارهای GNPURG و GPNET تعیین کرد. همان‌طور که در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود حجم شبکه در فشار ۲۰ psi، مقدار ۲۳۹/۷ متر مکعب و در فشار ۶۰ psi، مقدار ۱۰۲۴/۳ متر مکعب می‌باشد. با توجه به حجم شبکه و مصرف روزانه ایستگاه، زمان ماندگاری و پایداری شبکه توزیع در فشارهای مختلف طبق جدول ۱۱ مشخص شده است. ماندگاری شبکه در فشار ۶۰ psi در ۷ ماهه اول، ۱۹۷ دقیقه و در ۵ ماهه دوم، ۳۴ دقیقه می‌باشد. هم چنین ماندگاری شبکه در فشار ۲۰ psi در ۷ ماهه اول سال ۶۵ دقیقه و در ۵ ماهه دوم ۱۱ دقیقه می‌باشد. به عبارت دیگر، در فشار ۲۰ psi در ۵ ماهه دوم سال در صورت از سرویس خارج شدن ایستگاه، شبکه از گاز خالی شده و گاز مشترکین قطع می‌گردد. با توجه به فاصله ۱۰ کیلومتری تا پست امداد گاز، حداقل زمان لازم جهت واکنش ۱۵ دقیقه می‌باشد. در نتیجه امدادگر زمان کافی برای واکنش نخواهد داشت. علاوه بر این با توجه به افت فشار حدود ۶ psi در دورترین نقطه شبکه برای باغشهر اسلامی، در انتهای مسیر فشار ۱۴ psi خواهد بود. از آنجا که رگلاتورهای خانگی در فشار ۱۵ psi جریان گاز را قطع می‌کنند، در عمل در فشار ۲۰ psi گاز مشترکین قطع خواهد شد. در نتیجه فشار خروجی از ایستگاه تقلیل فشار نمی‌تواند ۲۰ psi باشد. بنابراین شبکه در فشار ۲۰ psi پایدار نیست. از آنجا که در فشار ۳۰ psi هم زمان لازم جهت عکس‌العمل در جلوگیری از قطع گاز مشترکین در اختیار امدادگر است و هم از قطع گاز رگلاتور جلوگیری می‌شود، فشار پیشنهادی در ایستگاه تقلیل فشار ۳۰ psi می‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر کاهش فشار خط تغذیه بر هدررفت گاز، اتلاف انرژی و پایداری شبکه مورد مطالعه قرار گرفت. تحلیل انرژی در ایستگاه تقلیل فشار، خط انتقال و رگلاتورهای مصرف انجام پذیرفت. مطالعه نمونه در شهر اسلامی واقع در خراسان جنوبی در چهار فشار ۶۰ psi، ۴۵ psi، ۳۰ psi و ۲۰ psi و برای دوره‌های تابستانه و زمستانه انجام شد. مهم‌ترین نتایج این مطالعه عبارتست از:

۱. کاهش فشار گاز خط تغذیه سبب کاهش هدررفت گاز می‌شود. به عنوان مثال در دوره تابستانه و زمستانه کاهش فشار خط تغذیه از ۶۰ psi به ۳۰ psi به ترتیب سبب کاهش حدود ۷۳ درصدی و ۳۵ درصدی میزان هدررفت گاز می‌شود.
۲. بررسی پایدار شبکه نشان می‌دهد که فشار بهینه برای شبکه توزیع ۳۰ psi می‌باشد. در این فشار هم زمان لازم جهت عکس‌العمل در جلوگیری از قطع گاز مشترکین در اختیار امدادگر است و هم از قطع گاز رگلاتور جلوگیری می‌شود.
۳. اتلاف انرژی در خط انتقال گاز سهم ناچیزی از اتلاف انرژی کل را شامل می‌شود. در بیشترین حالت افت انرژی در خط تغذیه

- in natural gas city gate station. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 145(3): p. 973-991, 2021.
- [14] Deymi-Dashtebayaz, M., D. Dadpour, and J. Khadem, Using the potential of energy losses in gas pressure reduction stations for producing power and fresh water. *Desalination* 497: p. 11476, 2021.
- [15] Kotas T.J., *The exergy method of thermal plant analysis*, Elsevier, 2013.
- [16] Safarzadeh S., et al., Energy and entropy generation analyses of a nanofluid-based helically coiled pipe under a constant magnetic field using smooth and micro-fin pipes: Experimental study and prediction via ANFIS model. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 126: p. 10540, 2021.
- [17] Swamee P.K. and Jain A.K., Explicit equations for pipe-flow problems. *Journal of the hydraulics division* 102(5): p. 657-664, 1976.
- [18] Katz D.L.V., *Handbook of natural gas engineering*, McGraw-Hill, 1959.