

## جریان سنجی دو مرحله‌ای جهت اندازه‌گیری مصارف گاز کمتر از جریان حداقل جریان سنج‌های توربینی

**چکیده:** یکی از تجهیزات اندازه‌گیری پرکاربرد برای مصرف‌کنندگان صنعتی گاز، جریان‌سنج توربینی می‌باشد. این نوع از جریان‌سنج‌ها دارای مزایای عملکردی فراوان نظیر دقت مناسب در مصارف نزدیک به ظرفیت نامی آنها، نگهداری و تعمیرات آسان می‌باشند. علیرغم این مزایا، نقطه‌ضعف آنها مربوط به دقت غیرقابل قبول برای اندازه‌گیری جریان گاز در مصارف کم و عدم توانایی اندازه‌گیری در مصارف زیر جریان حداقل-تحت عنوان پدیده  $Q_{min}$  می‌باشد. در این مقاله به منظور ارائه راهکار برای حل این مشکل، جریان سنج دو مرحله‌ای با به‌کارگیری سیستم کنترل اتوماتیک در یک ایستگاه اندازه‌گیری با ظرفیت ۱۰۰۰ مترمکعب بر ساعت طراحی و اجرا گردید. هنگامی که جریان گاز از  $Q_{min}$  کنتور اصلی کمتر گردید، به وسیله سیستم کنترل اتوماتیک، جریان گاز وارد خط فرعی شده و نسبت به اندازه‌گیری جریان گاز-که پیش‌تر به حساب نمی‌آمد- اقدام گردید. عملکرد سیستم پیشنهاد شده در این مقاله، در طول یک سال در ایستگاه مورد مطالعه، پایش گردید. نتایج نشان داد میزان ۲۵۱۵۲ مترمکعب از جریان گاز طبیعی که پیش از اجرای این تحقیق امکان اندازه‌گیری آن وجود نداشت، اندازه‌گیری گردید. همچنین دوره بازگشت سرمایه با در نظر گرفتن تعرفه صنعتی و قیمت صادراتی گاز، به ترتیب کمتر از سه و نیم سال و حدود دوماه محاسبه گردید.

**واژه‌های راهنما:** ایستگاه اندازه‌گیری، اندازه‌گیری، جریان سنج توربینی، پدیده  $Q_{min}$ ، کنترل اتوماتیک.

### سعید رستگار\*

دکتری مهندسی مکانیک، رئیس  
اندازه‌گیری و توزیع، شرکت گاز  
استان سمنان

### محسن رضایی

تکنیسین ابزار دقیق، کارشناس  
اندازه‌گیری و توزیع، شرکت گاز  
استان سمنان

مقاله علمی

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

### Saeed Rastegar\*

PhD in Mechanical  
Engineering, Head of  
Measurement and  
Distribution, Semnan  
Province Gas  
Company

### Mohsen Rezaei

Instrument Technician,  
Expert of Measurement  
and Distribution,  
Semnan Province Gas  
Company

## Two-stage flowmeter to measure gas consumptions less than the minimum flow of turbine flowmeters

**Abstract:** The most widely used measuring equipments for industrial gas consumers are turbine flowmeters. These types of flowmeters have many performance advantages such as good accuracy in applications close to their nominal capacity and easy maintenance. Despite these advantages, their weakness are related to the unacceptable accuracy of measuring gas flow at low consumption and the inability to measure at very low flow consumption. In this paper, in order to provide a solution to solve this problem, two stage flowmeter with using automatic control system was designed and implemented in the gas measuring station with a capacity of 1000SCMH. When the gas flow was less than minimum flow of the main meter, by automatic control system, switched to the auxiliary line and gas flow- that was not previously considered -was measured. The performance of the proposed system at the station under study, were monitored for one year. The result showed that the amount of 25,152 cubic meters of natural gas flow -that former could not be measured- was observed. Also, considering the industrial gas tariff and gas export price, the payback period was calculated less than three and a half years and about two months, respectively.

**Keywords:** Metering station, Measurement, Turbine flowmeter,  $Q_{min}$  phenomenon, Automatic control.

## ۱- مقدمه

حجمی و مقدار تجمعی مایعات تمیز با ویسکوزیته کم و غیر خورنده نیز مورد استفاده قرار می گیرد. جریان سنج‌های توربینی به طور گسترده در صنایع مختلف از جمله نفت، پتروشیمی، متالورژی، مایعات ارگانیک، گاز مایع شده نفتی (LPG)، شبکه خطوط لوله گاز شهری، فارماکولوژی، غذا و صنایع دیگر مورد استفاده قرار می گیرد. جریان سنج توربینی به عنوان یک تجهیز اندازه‌گیری با مقبولیت زیاد در دامنه وسیعی از فشار شامل شرایط اتمسفر تا فشار ۱۴۴۰ psig در صنعت گاز مورد استفاده قرار می گیرد. پس از ابداع جریان سنج توربینی، اکثر محققان بر روی بررسی و بهبود عملکرد آنها در حالت پایا تمرکز کرده بودند. در سال ۱۹۶۰ موضوع تحقیقات به طراحی و بهینه سازی پره-های جریان سنج توربینی تمرکز یافت [۷]. بعضی از محققان بر روی مدل ریاضی چرخش پروانه به منظور آنالیز گشتاور روی بخش‌های مختلف پره آن متمرکز شدند. با استفاده از روش عددی توسعه تولید سیکل جدید، کوتاه‌تر گردید و هزینه‌های مرتبط با آن کاهش یافت [۱۱]؛ اما مدل هنوز قادر به توصیف میدان جریان داخلی و توزیع سرعت نبود. در تولیدات ۵۰ سال گذشته این جریان سنج‌ها با تعداد قابل ملاحظه‌ای از پیکربندی و خروجی مکانیکی و الکتریکی در دسترس کاربران قرار گرفته است. دقت جریان اندازه‌گیری شده با استفاده از کالیبراسیون دقیق قابل حصول می باشد. جریان سنج توربینی می بایست به طور مناسب و به طور منظم (در بازه زمانی تعیین شده در استاندارد)، مورد کالیبره واقع شوند. متأسفانه علیرغم نصب مناسب و کالیبره به موقع، جریان سنج‌های توربینی بعضاً عملکرد نامناسبی را جریان‌های پایین نشان می دهند [۱۳]. انحراف و خطا که خصوصیت منفی است، همیشه به علت عملکرد جریان سنج توربینی و اثرات آن بستگی دارد. ظرفیت جریان حداقل برای یک جریان سنج توربینی عموماً به پایین‌ترین نرخ جریان که در آن دستگاه خطای استاندارد مجاز اشاره شده در استانداردها را دارا می باشد، تعریف می‌شود. از اینرو خطا معمولاً در جریان حداقل ( $Q_{min}$ ) بروز می نماید [۱].

جمع‌بندی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد، اگر چه مطالعات متعددی در راستای بهبود عملکرد جریان سنج توربینی به انجام رسیده؛ اما تاکنون راهکار عملیاتی برای رفع مشکل عدم دقت مناسب و یا عدم اندازه‌گیری در جریان‌های حداقل ( $Q_{min}$ ) ارائه نشده است. در این مقاله ابتدا به بررسی مبانی تئوری پدیده جریان حداقل در جریان سنج‌های توربینی و دلایل عدم اندازه‌گیری گاز در جریان‌های پایین پرداخته شده است. در ادامه ضمن

اندازه‌گیری بی وقفه<sup>۱</sup> نرخ جریان سیال یکی از مهمترین مسائل در بسیاری از صنایع از قبیل تجارت نفت، گاز، حوزه سلامت [۱] و دیگر کاربردها [۲] می باشد. خصوصیات سیال که به دلایل مختلف متغیر می باشد، سبب گردیده که کمیتهای ترمودینامیکی آن همیشه پایدار نباشد [۳-۵]. برای غلبه بر این مشکل، یک جریان سنج با دقت بالا و پاسخ سریع نیاز است. اکثر تجهیزات اندازه‌گیری گاز در جهان به دو روش جابجایی مثبت و استنتاجی عمل می‌کنند. جریان سنج‌های جابجایی مثبت عمده‌تاً شامل دیافراگم و وسایل روتاری شکل بوده که برای اندازه‌گیری حجم پایین مورد استفاده قرار می گیرد [۶]. در ایران و بسیاری از کشورهای دیگر جهان، جریان سنج دیافراگمی برای اندازه‌گیری گاز طبیعی مصرف کنندگان خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ناتوانی اندازه‌گیری دقیق در نرخ جریان پایین (زیر یک متر مکعب)، سبب می‌گردد که این تجهیزات کاملاً قابل اعتماد نبوده و به این دلیل حجم قابل توجهی از گاز طبیعی در شبکه توزیع گاز طبیعی به حساب نمی‌آید. جریان سنج‌های توربینی [۷]، آلتراسونیک [۸] و اوریفیس [۹] از کلاس جریان سنج‌های استنتاجی برای اندازه‌گیری احجام زیاد جریان گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. البته روش دیگر اندازه‌گیری، به کارگیری جریان-سنج‌های جرمی حرارتی است که کمتر به وسیله تغییرات فشار و دما تحت تاثیر قرار گرفته‌اند. یک جریان سنج جرمی حرارتی، حرارت را به جریان سیال اعمال می‌کند که تابع خصوصیات حرارتی سیال مشخص می‌باشد [۱۰]. بنابراین جریان سنج حرارتی بیشتر برای کاربردهایی که خواص حرارتی سیال در طی عملکرد واقعی ثابت باقی می‌ماند، مناسب می‌باشد. لازم به ذکر است جریان سنج حرارتی فقط برای جریان‌های گاز مناسب می‌باشد زیرا در جریان‌های مایع، مشکل جذب حرارت وجود دارد [۱۱].

تاریخچه جریان سنج توربینی به سال ۱۷۹۰ بر می‌گردد که توسط آقای ولنمن اختراع گردید [۷]. جریان سنج توربینی از روتور چند پره برای محاسبه نرخ جریان متوسط مورد استفاده قرار گرفته و یا مقدار کلی جریان را استنتاج می‌کند. از مزایای آن می‌توان به دقت بالا، تکرار پذیری خوب، ساختار ساده، مقاومت فشاری بالا، دامنه اندازه‌گیری وسیع، وزن سبک، افت فشار کم، پایداری بالا، عملکرد ساده و نگهداری و تعمیرات آسان اشاره کرد [۱۲]. این جریان سنج‌ها برای اندازه‌گیری جریان

<sup>1</sup> Real time

## ۲-۲- نرخ جریان های حداقل و حداکثر جریان سنج توربینی

دامنه پذیرگی<sup>۱</sup> جریان سنج توربینی به صورت رابطه (۲) تعیین می گردد.

$$\text{Rangeability} = \frac{Q_{min}}{Q_{max}} \quad (2)$$

این مقدار، دامنه عملکرد تمام نرخ جریان که در آن جریان-سنج توربینی دقت عملکرد مشخصی را حفظ می کند را معرفی می نماید. دامنه پذیرگی یک جریان سنج توربینی در فشارهای بالاتر، موجب افزایش چگالی گاز می گردد. با افزایش چگالی گاز، نیروی پیشران افزایش یافته و نفوذ نسبی بلبرینگ<sup>۲</sup> جریان سنج توربینی کاهش می یابد. اندازه حرکت<sup>۳</sup> اضافی باعث افزایش تحریک روتور می شود که به نوبه خود، جریان حداقل عبوری از جریان سنج را کاهش خواهد داد و در نتیجه مقدار جریان حداقل برای شرایط واقعی از رابطه (۳) محاسبه می گردد.

$$Q_{min,m} = Q_{min} \sqrt{\frac{\rho_{air,b} \times P_b}{\rho_b \times P_m}} \quad (3)$$

که  $m$  و  $b$  به ترتیب مربوط به شرایط عملیاتی و پایه می باشد. همچنین در کتب مرجع جریان سنج های توربینی،  $Q_{min}$  بر اساس نیروهای اصطکاکی بلبرینگها مشخص می شود. یک گاز متراکم می تواند گشتاور بیشتر را برای غلبه بر اصطکاک وارد کند؛ بنابراین حد پایین جریان حجمی متناسب با معکوس ریشه دوم دانسیته گاز کاهش می یابد. در این حالت جریان حداقل ( $Q_{min}$ ) در شرایط واقعی از رابطه (۴) بدست می آید [۷]:

$$Q_{min-Operating} = Q_{min air} \sqrt{\frac{p_{atm}}{p_m} \cdot \frac{1}{d}} \quad (4)$$

لازم به ذکر است وزن مخصوص یا چگالی نسبی ( $d$ )، نسبت چگالی گاز طبیعی به چگالی هوا می باشد.

جریان سنج های توربینی عموماً برای حداکثر نرخ جریان ( $Q_{max}$ ) طراحی شده اند تا از سرعت مشخص روتور توربین و افت فشار مشخص (مطابق با رابطه (۱)) تجاوز نمایند. حداکثر نرخ جریان حجمی در جریان سنج یکسان باقی می ماند، مگر اینکه در کاتالوگهای سازنده آن تصریح شده باشد [۹]. برای مقادیر مختلف فشار، دما و ترکیب سیال که به وسیله سازنده مشخص گردیده، نرخ جریان عبوری حداقل از رابطه (۵) نیز قابل محاسبه می باشد:

$$Q_{m,in} = Q_{s,min} \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_m}} \quad (5)$$

معرفی یک سیستم کنترلی، روش کاربردی برای اندازه گیری مصارف کمتر از جریان حداقل به عنوان راهکار برای ایستگاه اندازه گیری گاز طبیعی ارائه گردیده و امکان سنجی فنی و اقتصادی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مبانی تئوری

در تجهیزات اندازه گیری استنتاجی از مفهوم سرعت برای اندازه گیری حجم استفاده می شود. در مورد جریان سنج توربینی سرعت جریان گاز به وسیله چرخش روتور آن انجام می شود. سرعت یا چرخش روتور، به طور مستقیم متناسب با نرخ جریان گاز می باشد [۷]. بدین صورت که جریان گازی که از فضای بین پره های جریان سنج عبور می کند، سرعت زاویه ای به پروانه می دهد که متناسب با سرعت جریان گاز می باشد. برای اندازه گیری سرعت چرخشی روتور چندین روش وجود دارد. معمولترین روش برای تعیین دور روتور این است که دور به وسیله مجموعه ای از چرخ دنده ها به یک شمارنده الکتریکی انتقال می یابد که روابط و نحوه محاسبه سرعت زاویه ای برای جریان های دائمی و غیر دائمی در کتب مرجع ارائه گردیده است [۷-۹].

## ۲-۱- محاسبه افت فشار در جریان سنج توربینی

انرژی مورد نیاز برای به حرکت درآوردن مکانیسم عملکردی جریان سنج توربینی (دوران روتور و انتقال به شماره انداز)، افت های ناشی از اصطکاک قطعات داخلی و تغییرات در سرعت و جهت جریان از مهمترین عوامل تعیین کننده در میزان افت فشار می باشد.

افت فشار در بین یک نقطه در پایین دست و یک نقطه بالا دست جریان روی لوله در سایز یکسان که در آن جریان سنج نصب شده، محاسبه می شود. به عبارت دیگر باید به یکنواخت بودن جریان گاز ورودی به جریان سنج توجه داشت تا نوسانات الگوی جریان بر قرائت فشار تأثیر نگذارد. با توجه به اینکه نسبت نیروی اینرسی به نیروی ویسکوز در محدوده در جریان آشفته می باشد، لذا افت فشار اصولاً از رابطه متناظر با جریان آشفته استفاده می شود [۹].

$$\Delta P_m = c \rho_m Q_m^2 \quad (1)$$

که در رابطه (۱)  $c$ ،  $\rho$  و  $Q$  به ترتیب ضریب افت فشار، چگالی و جریان حجمی در شرایط عملیاتی ( $m$ ) می باشد.

<sup>3</sup> Momentum

<sup>1</sup> Rangeability

<sup>2</sup> Ball bearing

جدول ۲ مشخصات پایانه‌های حرارتی منشعب از ایستگاه مورد مطالعه

محل مصرف	ظرفیت حرارتی	توان	حداکثر مصرف	فشار مصرف
	m <sup>3</sup> /hr	kcal/hr	m <sup>3</sup> /hr	psi
نگهبانی	۵	۵۰۰۰۰	۳	۰/۲۵
مشعل پیش گرمایش	۶۵	۶۰۰۰۰۰	۷	۰/۲۵
دیگ اصلی	۷۰۰	۶۵۰۰۰۰	۶۳۶	۱۵

### ۳- راهکار ارائه شده برای حل مشکل جریان حداقل جریان سنج توربینی

در این تحقیق، به منظور ارائه یک راهکار اجرایی جهت اندازه‌گیری مصارف کمتر از جریان حداقل در جریان سنج توربینی، به کارگیری جریان سنج دو مرحله‌ای مطابق با بلوک دیاگرام شکل ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. روش انجام کار به این صورت است که جریان سنج توربینی با سایز ۲ اینچ و با حداکثر ظرفیت ۱۰۰ متر مکعب بر ساعت (G65)، در مسیر موازی با خط اصلی قرار گرفته است. حداقل جریان حجمی استاندارد در این جریان سنج، ۵ متر مکعب بر ساعت بوده که با استفاده از روابط (۳) الی (۵) مقدار جریان حجمی حداقل در شرایط عملیاتی ۳/۴ متر مکعب بر ساعت محاسبه می‌گردد. به عبارت دیگر با روش ارائه شده در این تحقیق، جریان گاز از مقادیر ۳/۴ تا ۸/۷ متر مکعب بر ساعت که پیشتر اندازه‌گیری نمی‌گردید، در دامنه اندازه‌گیری قرار گرفت. جزئیات از نحوه عملکرد این سیستم، در نقشه ایزومتریک پیوست الف ارائه شده است.

$Q_s$  جریان حداقل استاندارد،  $Q_{s,min}$  جریان حداقل اندازه‌گیری شده،  $\rho_s$  چگالی گاز در شرایط استاندارد و  $\rho_m$  چگالی گاز اندازه‌گیری شده می‌باشد.

### ۲-۳- مشخصات ایستگاه مورد مطالعه

ایستگاه مورد مطالعه، ایستگاه اندازه‌گیری با فشار ۶۰ psi و ظرفیت ۱۰۰۰ SCMH<sup>۱</sup> می‌باشد. این ایستگاه دارای دو خط بوده و مشخصات آن مطابق با جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱ مشخصات جریان سنج ایستگاه مورد مطالعه

ظرفیت کنتور	$Q_{max}$	$Q_{min}$	فشار اتمسفر	فشار محلی
	m <sup>3</sup> /hr	m <sup>3</sup> /hr	psi	psi
G160	۲۵۰	۱۳	۱۴/۷	۱۲/۸۲

شایان ذکر است جریان سنج‌های توربینی در شرایط فشار و دمای کاری، جریان گاز را اندازه‌گیری می‌کنند. برای محاسبه حجم گاز در استانداردهای مختلف، فشار و دمای معینی را به عنوان شرایط مبنا در نظر می‌گیرند. در آنالیز حساسیت و عدم قطعیت ضریب تصحیح گاز طبیعی بر اساس معادله حالت AGA8؛ عامل فشار موثرترین فاکتور در تبدیل حجم عملیاتی به حجم استاندارد می‌باشد [۱۴]. لذا از رابطه (۶)، ضریب تصحیح فشار ( $p_{corrected}$ ) محاسبه می‌شود [۷]:

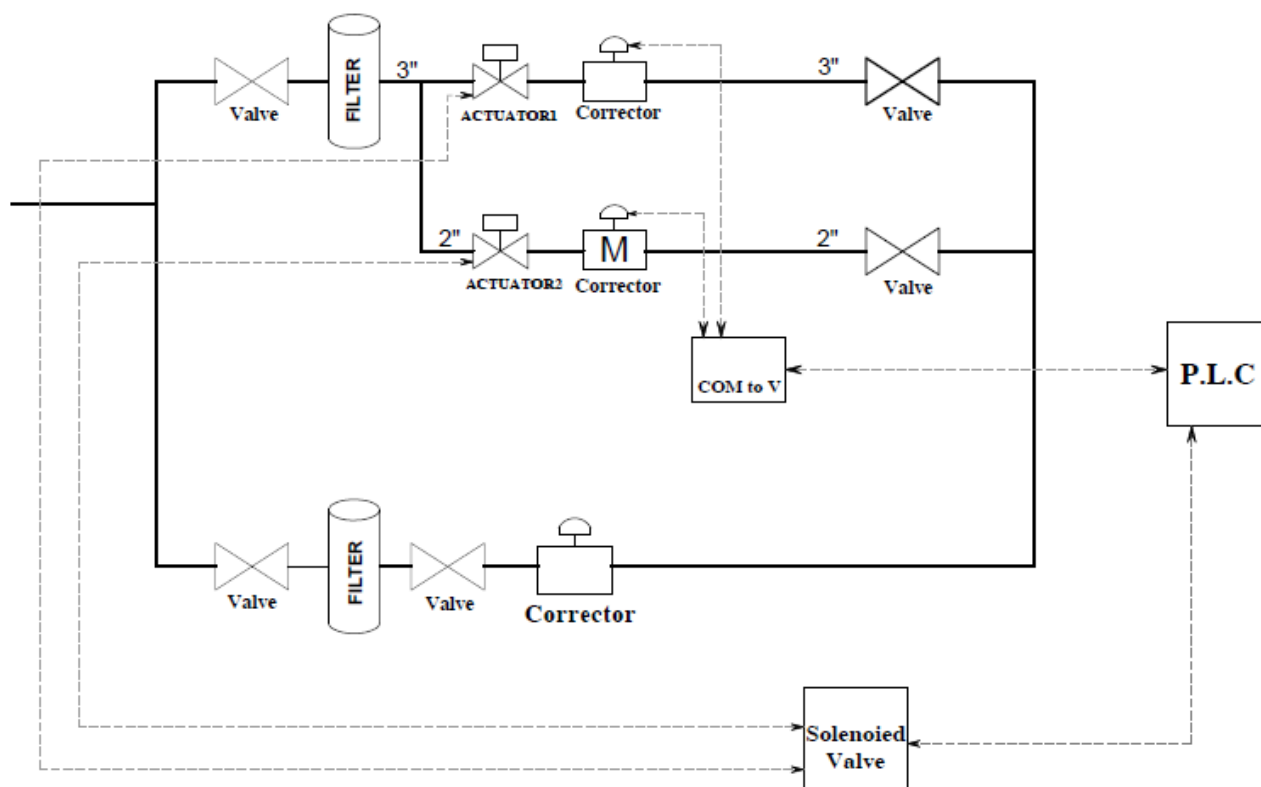
$$p_{corrected} = \frac{p_m + p_{loc}}{p_{atm}} \quad (6)$$

$p_{atm}$  و  $p_{loc}$  به ترتیب فشار محلی (شهر سمنان) و فشار اتمسفر می‌باشد. با جایگزینی مقادیر جدول ۱ در رابطه (۶) ضریب تصحیح فشار به مقدار ۴/۹۶ محاسبه می‌گردد. با استفاده از روابط (۳) الی (۵)، برای جریان سنج ۳ اینچ و با حداکثر ظرفیت ۲۵۰ متر مکعب بر ساعت (G160) در شرایط فشار کاری، نرخ جریان حداقل به میزان ۸/۷ متر مکعب بر ساعت به دست می‌آید.

جهت بررسی مقادیری از جریان گاز که احتمال عدم اندازه‌گیری وجود دارد، کلیه پایانه‌های حرارتی منشعب از ایستگاه اندازه‌گیری مورد مطالعه، بررسی شده و میزان حداکثر مصارف بر اساس فشار کاری آنها در جدول ۲ به صورت خلاصه آورده شده است. لازم به توضیح است ظرفیت حرارتی دستگاه گاز سوز از حاصل تقسیم توان آن دستگاه بر مقدار ارزش حرارتی<sup>۲</sup> گاز محاسبه می‌گردد.

<sup>2</sup> Low Heating Value (LHV)

<sup>1</sup> Standard Cubic Meter per Hour



شکل ۱ بلوک دیاگرام نحوه عملکرد جریان سنجی دو مرحله ای

### ۳-۱- معرفی سیستم کنترلی و تجهیزات ابزار دقیق ارائه شده در این تحقیق

برای اندازه‌گیری جریان گاز برای مصارف بیشتر از ۸/۷ متر مکعب بر ساعت، ضرورت دارد خط ۳ اینچ که دارای جریان‌سنج با ظرفیت ۱۶۰ G می باشد، در سرویس باشد؛ همچنین برای مصارف کمتر از ۸/۷ مترمکعب بر ساعت، لازم است خط ۲ اینچ، که شامل جریان‌سنج با ظرفیت ۶۵ G بوده (و به منظور اندازه‌گیری جریان حداقل با خط ۳ اینچ موازی شده)، فعال گردد. جهت دستیابی به این هدف، باید یک سیستم کنترل طراحی گردد که پس از رسیدن به نقاط حدی فوق، به صورت اتوماتیک تغییر مسیر انجام شود. جهت شناسایی نقاط حدی مصرف، لازم است اطلاعات پایگاه داده تصحیح کننده<sup>۱</sup> PTZ به سیستم کنترلر منطقی قابل برنامه‌نویسی<sup>۲</sup> منتقل گردد. گفتنی است پایگاه داده تصحیح کننده دارای پروتکل استاندارد نبوده و از طریق نرم‌افزار تهیه شده توسط شرکت سازنده، مطابق با دستورالعمل مد باس<sup>۳</sup> قابلیت گزارش‌گیری دارد. برای حل این مشکل از طریق برنامه

نویسی یک فصل مشترک، کشف رمز انجام و جریان آنالوگ به ولتاژ دیجیتال (با آرایش ۰-۵ ولت) تبدیل می‌گردد. نکته قابل ذکر این است به دلیل اینکه PLC موظف به تحلیل اطلاعات دو تصحیح کننده به صورت همزمان می باشد، لازم است PLC دارای دو ورودی آنالوگ و دو ورودی دیجیتال باشد. خروجی‌های دیجیتال PLC به شیربرقی<sup>۴</sup> انتقال یافته و شیر برقی فرمان باز و بسته شدن مسیر جریان گاز را به اکچویاتور<sup>۵</sup> مونتاژ شده بر روی شیرهای توپی<sup>۶</sup> موجود در ورودی هر یک از خطوط ۲ اینچ یا ۳ اینچ اعمال می‌نماید. ذکر این نکته لازم است که برای تحریک شیرهای توپی از گاز پرفشار استفاده شده و منابع تغذیه ۱۲ ولت برای شیربرقی و ۲۴ ولت برای PLC با رعایت نکات استاندارد IGS-E-EL-032 [۱۵]، مورد استفاده قرار گرفته است. دیاگرام تفصیلی از تجهیزات و اتصالات ابزار دقیق<sup>۷</sup> به-کارگیری شده، در پیوست ب آورده شده است.

### ۳-۲- افزایش دامنه اندازه‌گیری گاز به حساب نیامده با به‌کارگیری جریان‌سنج روتاری

<sup>۵</sup> Actuator

<sup>۶</sup> Ball valve

<sup>۷</sup> Instrumentation diagram

<sup>۱</sup> Pressure-Temperature-Compressibility factor corrector

<sup>۲</sup> Programmable Logic Controller (PLC)

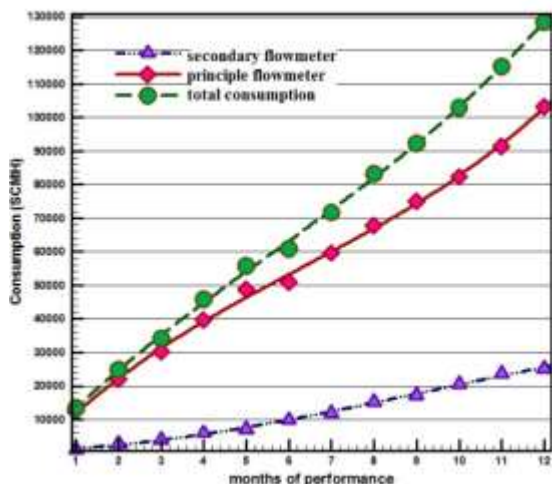
<sup>۳</sup> Modbus

<sup>۴</sup> Solenoid valve

اثربخشی و سنجش میزان اهداف طرح ریزی شده در این تحقیق، عملکرد سیستم کنترل در طی یک سال پایش و نتایج آن گزارش گردیده است. همچنین بر اساس گزارش اخذ شده از آرشیو تصحیح کننده، مصرف ساعتی سه روز به عنوان نمونه با یکدیگر مقایسه شده است. ضمن اینکه تحلیل اقتصادی ایده پیشنهادی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۴-۱- پایش، اندازه گیری و تحلیل نتایج دروه گزارش دهی

بعد از اجرای راهکار برای اندازه گیری گازهای به حساب نیامده ناشی از جریان حداقل ( $Q_{min}$ ) برای ایستگاه مورد مطالعه، طی دوره زمانی یک ساله نتایج پایش و اندازه گیری گردید. در شکل ۲ روند میزان مصارف تجمعی برای دو جریان سنج ۲ و ۳ اینچ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می گردد، مصرف واقعی گاز در ایستگاه مورد مطالعه در طی یک سال، ۱۲۸۳۲۷ متر مکعب بوده است. از این میزان، ۲۵۱۵۲ مترمکعب جز گازهای به حساب نیامده بوده که توسط راهکار پیشنهاد شده در این تحقیق، قابلیت اندازه گیری و محاسبه یافته است؛ به عبارت دیگر با کارگیری جریان سنجی دومرحله‌ای، حجم گاز فروش رفته به میزان ۱۷٪ افزایش یافته است.



شکل ۲ اندازه گیری مصرف تجمعی یک سال پس از اجرای روش پیشنهادی

#### ۴-۲- بررسی مصارف ساعتی

به منظور پایش نحوه عملکرد دستگاه‌های اندازه گیری در ساعات مختلف شبانه‌روز، مصارف گاز ایستگاه برای سه روز از آرشیو تصحیح کننده استخراج گردید. مقدار مصرف ساعتی گاز در طی سه روز مطابق با شکل ۳ می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود

روش معرفی شده برای اندازه‌گیری مصارف کمتر از جریان حداقل ( $Q_{min}$ ) در بخش قبل، قادر است جریان گاز از مقدار ۸/۷ تا ۳/۴ متر مکعب بر ساعت که قابلیت اندازه گیری نداشت، مورد اندازه گیری قرار دهد؛ اما هنوز جریان گاز تا میزان ۳/۴ متر مکعب بر ساعت اندازه گیری نمی‌شود. در ادامه، برای بهبود دامنه اندازه گیری، به کارگیری جریان سنج روتاری<sup>۱</sup> (به‌عنوان جایگزین جریان‌سنج توربینی) مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه جریان‌سنج روتاری، یک دستگاه اندازه گیری جابجایی مثبت می‌باشد، لذا نسبت به جریان سنج توربینی دارای دامنه پذیری بسیار بالاتر می‌باشد. مشخصات جریان‌سنج روتاری مورد استفاده در این تحقیق، مطابق جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳ مشخصات کنتور روتاری

ظرفیت کنتور	$Q_{min}$	$Q_{max}$	دامنه پذیری
	$m^3/hr$	$m^3/hr$	-
G65	۰/۵	۱۰۰	۱:۲۰۰

در این جریان‌سنج، حداقل جریان استاندارد قابل اندازه‌گیری ۰/۵ متر مکعب بر ساعت در شرایط استاندارد بوده، که با استفاده از روابط (۳) الی (۵) جریان حداقل برای فشار کاری تا مقدار ۰/۱۴ متر مکعب بر ساعت محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر به کارگیری جریان‌سنج روتاری، منجر به بهبود عملکرد سیستم اندازه‌گیری جریان گاز در دامنه ۳/۴ تا ۰/۱۴ متر مکعب استاندارد بر ساعت - علاوه بر مقدار تشریح شده در بخش قبل - می‌گردد. ذکر این نکته لازم است که ارزش پالس جریان‌سنج روتاری که به تصحیح کننده انتقال داده می‌شود، مشابه جریان-سنج توربینی می‌باشد. همچنین تمامی دستگاه‌های اندازه‌گیری در کلیه مراحل آزمایش و ثبت نتایج، دارای گواهی صحت و دقت عملکرد از مراکز معتبر کالیبراسیون بوده اند و بنابراین این تجهیزات دارای خطای خارج از دامنه استاندارد نمی‌باشند.

#### ۴- نتایج و بحث

اندازه‌گیری حجم گاز طبیعی در شرایط واقعی و استاندارد، متاثر از فاکتورهای متعددی نظیر دما، فشار و ترکیبات گاز می‌باشد. همچنین مشخصات جریان‌سنج توربینی نظیر سایز، مشخصات طراحی و دامنه پذیری عملکرد آن را در مواجهه با پدیده جریان حداقل تحت تاثیر قرار می‌دهد. در کاتالوگهای شرکت سازنده جریان‌سنج توربینی، مبنای اعتبارسنجی مقدار جریان حداقل ( $Q_{min}$ )، استاندارد ISO ۹۹۵۱ می‌باشد [۱۶]. به منظور بررسی

<sup>1</sup> Rotary Displacement (RD) meter

جدول ۴ ضرائب a و b

مجموع مصارف	ثابت مصرف در جریان سنج اصلی	ثابت مصرف در جریان سنج کمکی	
۹۸۸۵/۸	۷۸۰۴/۶	۲۲۸۱/۲	a
۴۳۶۷/۵	۶۲۲۷/۳	-۲۲۷۶/۵	b
۰/۹۹۸۱	۰/۹۹۴۹	۰/۹۸۵۳	R-square

#### ۴-۴- امکان سنجی اقتصادی

در جدول ۵ هزینه کالا، تجهیزات و خدمات جهت اجرای طرح پیشنهادی آورده شده است.

با در نظر گرفتن عمر مفید تجهیزات به میزان ۱۰ سال و نرخ تورم سالیانه به مقدار ۲۰٪، فاکتور بازگشت سرمایه از رابطه ذیل محاسبه می گردد [۴]:

$$CRF = i(1+i)^n / [(1+i)^n - 1] \quad (۸)$$

با جایگذاری عمر مفید تجهیزات و نرخ تورم سالیانه در رابطه (۸)، فاکتور بازگشت سرمایه  $CRF$  به میزان ۰/۲۴ محاسبه می شود.

هزینه سال اول  $FAC$  برای سیستم پیشنهادی عبارتست از [۵]:

$$FAC = P \times CRF \quad (۹)$$

از رابطه (۹)،  $FAC$  به میزان ۸۲۹۵۰۰۰۰ ریال بدست می آید. مقدار صرفه جوئی سالیانه  $ASV$  از حاصلضرب میزان صرفه جوئی ( $S$ ) در فاکتور متاثر از نرخ تنزیل سرمایه  $SFF$  بدست می آید [۵]:

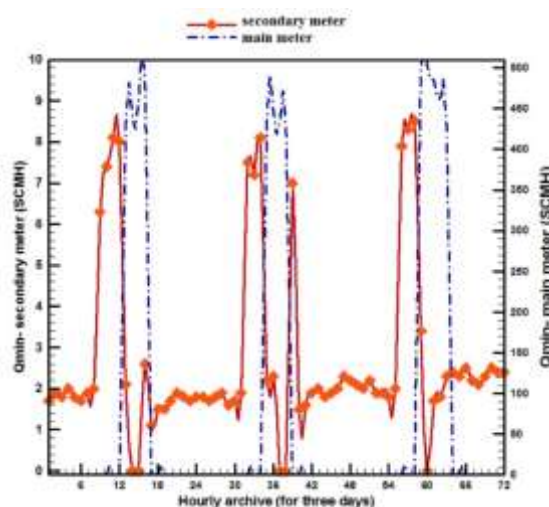
$$ASV = SFF \times S \quad (۱۰)$$

$$S = 0.2 \times P \quad (۱۱)$$

$$SFF = i / [(1+i)^n - 1] \quad (۱۲)$$

با در نظر گرفتن نرخ تورم سالیانه ۲۰ درصد و طول عمر ۱۰ سال، نرخ تنزیل سرمایه  $SFF$  به میزان ۰/۰۴ محاسبه می شود. همچنین با جایگذاری هزینه سرمایه گذاری در رابطه (۱۱)، میزان صرفه جوئی به میزان ۶۸۵۹۰۰۰۰ ریال محاسبه می شود. همچنین در صورت جایگذاری روابط (۱۱) و (۱۲) در رابطه (۱۰)

جریان گاز در طی ساعات کاری (از ۸ الی ۱۴) که مشعل پیش گرمایش (با توان ۶۰۰۰۰۰ کیلوکالری) به همراه مصارف سرایداری و نگهبانی (با مجموع حداکثر مصرف ساعتی ۵ متر مکعب) فعال بوده اند، توسط جریان سنج ۲ اینچ اندازه گیری می شود. مصارف مربوط به دیگ اصلی (با ظرفیت ۶۰۰۰۰۰۰ کیلوکالری) توسط جریان سنج ۳ اینچ اندازه گیری گردیده است. بدیهی است مصارف در ایام تعطیل و خارج از ساعات کاری که مصرف کننده های اصلی خاموش می باشند، توسط جریان سنج ۲ اینچ اندازه گیری و ثبت می گردد.



شکل ۳ تغییرات ساعتی مصرف در دو تصحیح کننده در طی سه روز

#### ۴-۳- مدل توسعه یافته

بر اساس روش پیشنهاد شده در این تحقیق، مصارف گاز در طی یک سال در ایستگاه مورد مطالعه، پایش و اندازه گیری گردید. با به کارگیری روش رگرسیون خطی، یک مدل برای پیش بینی مصارف تجمعی هر یک از جریان سنج های اصلی و فرعی و همچنین میزان گاز اندازه گیری شده (که قبل اجرای طرح، اندازه گیری نمی شد) بر اساس ماه های مختلف سال توسعه داده شد. به دلیل ضریب تعیین  $R$ -Square<sup>۱</sup> مطلوب، این مدل دارای همبستگی بوده و معادله آن مطابق رابطه (۷) ارائه شده است.

$$\text{number of month} \quad (۷) \\ = a \times \text{consumption} + b$$

ضرائب a و b که به ترتیب شیب و عرض از مبدا بوده و مقادیر آن به شرح جدول ۴ می باشد.

<sup>4</sup> Annual Salvage Value

<sup>5</sup> Sinking Fund Factor

<sup>1</sup> Coefficient of Determination

<sup>2</sup> Cost Recovery Factor

<sup>3</sup> First Annual Cost

در طی یک سال پس از اجرای پروژه، مقدار ۲۵۱۵۲ مترمکعب گاز محاسبه نشده، اندازه‌گیری گردید. حال اگر قیمت هر متر مکعب ۱۰۰۰ ریال در نظر گرفته شود، به‌طور متوسط ۲۵۱۵۲۰۰۰ ریال در سال به میزان فروش گاز برای ایستگاه مورد مطالعه افزوده می‌گردد.

بنابراین دوره بازگشت سرمایه (PBP) از رابطه (۱۵) قابل محاسبه می‌باشد [۱۹]:

$$PBP = \frac{\text{annual cost}}{\text{annual benefit}} \quad (15)$$

به عبارتی از رابطه (۱۵) دوره بازگشت سرمایه با در نظر گرفتن قیمت یارانه‌ای گاز کمتر از سه و نیم سال برآورد می‌گردد. بدیهی است با توجه به تفاوت بسیار زیاد قیمت صادرات گاز (۲۲ سنت) و تعرفه داخلی بخش صنعت (۱۰۰۰ ریال)، وبا فرض اینکه قیمت صادراتی گاز در محاسبات لحاظ شود، دوره بازگشت سرمایه در بازه زمانی حدود دوماه حاصل می‌گردد.

#### ۴-۵- بررسی مصارف کمتر از جریان حداقل جریان سنجی توربینی

به منظور اجرای اثربخش طرح جریان سنجی دو مرحله‌ای مصرف گاز با کنترل اتوماتیک در ایستگاه صنعتی، لازم است امکان-سنجی فنی و اقتصادی برای مصرف‌کننده‌های صنعتی دارای جریان سنج توربینی صورت پذیرد. بدین منظور عوامل و فاکتورهای تاثیرگذار بر مصارف جریان حداقل (Q<sub>min</sub>) در فلوچارت شکل ۴ مشخص شده است. همانطور که در این روند نما ملاحظه می‌شود شرط لازم برای استفاده از سیستم کنترلی پیشنهاد شده در این تحقیق، بررسی کلیه مصرف‌کننده‌های گاز بوده و در صورت وجود مصارف کمتر از جریان حجمی حداقل، اجرای آن به لحاظ اقتصادی نیز واری می‌گردد.

نرخ صرفه‌جوئی سالیانه (ASV) به میزان ۸۲۳۰۸۰۰۰ ریال به‌دست می‌آید.

جدول ۵ لیست کالا، خدمات و هزینه‌های متناظر با آن

شرح کالا	مقدار/تعداد	
	مبلغ	عدد
	ریال	
شیر برقی	۳۰۰۰۰۰۰	۲
فیوز، ترمینال	۵۰۰۰۰۰	۲۰
PLC	۱۱۰۰۰۰۰۰	۱
DIO card	۵۰۰۰۰۰۰	۱
PLC Power Supply	۵۵۰۰۰۰۰	۱
Communication Module RS232 with Power (barrier)	۲۶۵۰۰۰۰۰	۱
Power Supply:220/24	۳۰۰۰۰۰۰	۱
Double Power Supply: 220/12vdc/6vdc 3A	۶۰۰۰۰۰۰	۱
کوپلینگ اکچیتور ۳" و ۲"	۱۵۳۰۰۰۰۰	۲
تصحیح کننده	۱۱۰۰۰۰۰۰۰	۱
جریان سنج	۱۳۰۰۰۰۰۰۰	۱
داکت	۳۰۰۰۰۰۰	۳۰ (متر)
کابل و اتصالات	۲۰۰۰۰۰۰۰	۴۰ (متر)
برنامه نویسی PLC	۱۱۷۳۰۰۰۰۰	۸۰ (ساعت)
برنامه نویسی Communication Module	۱۳۱۲۰۰۰۰۰	۷۰ (ساعت)
مجموع هزینه (p) (۳۴۲۹۵۰۰۰۰ ریال)		

اگر هزینه نگه داری سالیانه<sup>۱</sup> (AMC) معادل ۰.۱۰٪ هزینه سال اول در نظر گرفته شود آنگاه [۱۷]:

$$AMC = 0.10 \times FAC \quad (13)$$

با جایگذاری رابطه (۹) در رابطه (۱۳) هزینه نگه داری سالیانه به میزان ۸۲۳۰۸۰۰ ریال برآورد می‌گردد.

بنابراین هزینه سالیانه<sup>۲</sup> (AC) از رابطه (۱۳) بدست می‌آید [۱۸]:

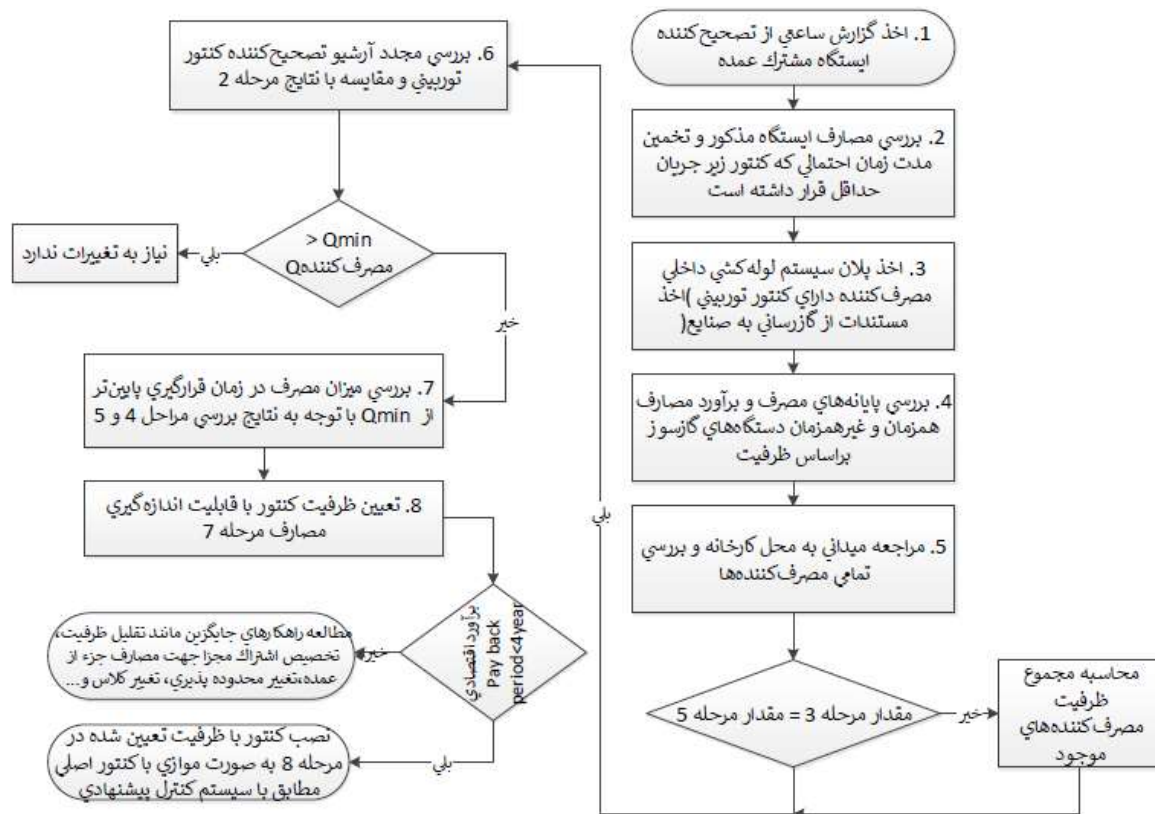
$$AC = FAC + AMC - ASV \quad (14)$$

با جای گذاری اعداد مربوط به روابط (۹)، (۱۰) و (۱۳) در رابطه (۱۴) هزینه سالیانه به میزان ۸۷۷۹۵۲۰۰ ریال محاسبه می‌شود.

<sup>2</sup> Annual Cost

<sup>1</sup> Annual Maintenance Cost





شکل ۴ فلوجارت امکان سنجی فنی و اقتصادی طرح پیشنهادی در ایستگاه های صنعتی

### ۵- نتیجه گیری

- در استاندارد IGS-C-IN-۱۰۵ به جای بازه زمانی، میزان کارکرد جریان سنج مبنای کالیبراسیون قرار گیرد. شایان ذکر است جریان سنج های مورد استفاده در روش پیشنهادی این تحقیق، به عنوان پشتیبان یکدیگر عمل می کنند؛ از این رو چرخه عمر کالیبراسیون طولانی تری برای آنها قابل تصور می باشد.

مهمترین نقطه ضعف جریان سنج توربینی، عدم اندازه گیری مصرف کمتر از جریان حداقل، می باشد. در این تحقیق جریان سنج های دو مرحله ای طراحی و در یک نمونه ایستگاه صنعتی اندازه گیری گاز، آزمایش و عملکرد آن در طی بازه زمانی یک ساله مورد پایش قرار گرفت؛ به طوریکه تمام طیف جریان گاز مصرفی اندازه گیری گردید. هرچه سیال عبوری از جریان سنج به جریان حداقل نزدیک گردد، از میزان دقت اندازه گیری کاسته شده که با توجه انتقال این میزان از مصارف به کنتور با سایز کمتر، می توان به دقت نتایج اندازه گیری نیز افزود. نتایج این تحقیق برای یک ایستگاه با ظرفیت SCM<sub>H</sub> ۱۰۰۰ گزارش گردیده است. بدیهی است اگر ظرفیت ایستگاه بیشتر باشد به تبع آن میزان جریان حداقل نیز افزایش داشته و به کارگیری روش پیشنهاد شده در این تحقیق عملکرد قابل ملاحظه تری در پی خواهد داشت. در انتها پیشنهاد می گردد:

- در طراحی و تخصیص ظرفیت به ایستگاه صنعتی، علاوه بر حداکثر جریان گاز مورد نیاز مصرف کننده، حداقل جریان نیز در نظر گرفته شود.

### ۶- فهرست علائم و اختصارات

#### علائم انگلیسی

AC	هزینه سالیانه (ریال)
AMC	هزینه نگهداری سالیانه (ریال)
ASV	نرخ صرفه جویی سالیانه (ریال)
C	ضریب افت فشار مرتبط با نوع جریان سنج
CRF	فاکتور بازگشت هزینه (ریال)
d	وزن مخصوص (kg.m/s <sup>2</sup> )
FAC	هزینه سال اول (ریال)
i	نرخ تورم سالیانه (%)
LHV	ارزش حرارتی (kcal/m <sup>3</sup> )
m	نرخ جریان جرمی (kg/s)
n	طول عمر سیستم (سال)
p	فشار (psi)
P	هزینه سرمایه گذاری (ریال)
Q	نرخ جریان حجمی (m <sup>3</sup> /h)

no. 2, pp. 143–154, (2020).

[6] Mokhatab S. and Poe W. A., *Handbook of natural gas transmission and processing*. Gulf professional publishing, (2012).

[7] Baker R. C., "Turbine flowmeters: II. Theoretical and experimental published information," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 4, no. 3, pp. 123–144, doi: [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(93\)90048-N](https://doi.org/10.1016/0955-5986(93)90048-N), (1993).

[8] Fang Z., Su R., Hu L., and Fu X., "A simple and easy-implemented time-of-flight determination method for liquid ultrasonic flow meters based on ultrasonic signal onset detection and multiple-zero-crossing technique," *Measurement*, vol. 168, p. 108398, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108398>, (2021).

[9] Cornell O., Kobayashi R., Poettmann F. T., Vary J. A., Elenbaas J. R., and Weinaug G. F., "Handbook of Natural Gas Engineering." McGraw-Hill, New York, (1959).

[10] M. W. J. and Farroll S., "No Title Development of a turbine meter for two-phase flow measurement in vertical pipes," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 6, no. 0955–5986, pp. 279–282, (1995).

[11] Parvizi S., Arabkoohsar A., and Farzaneh-Gord M., "Natural gas compositions variation effect on capillary tube thermal mass flow meter performance," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 50, pp. 229–236, doi: [10.1016/j.flowmeasinst.2016.07.007](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.07.007), (2016).

[12] Johnson M. W. and Farroll S., "Development of a turbine meter for two-phase flow measurement in vertical pipes," *Flow Meas. Instrum.*, vol. 6, no. 4, pp. 279–282, doi: [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(95\)00015-1](https://doi.org/10.1016/0955-5986(95)00015-1), (1995).

[13] Cascetta F. and Rotondo G., "Effects of intermittent flows on turbine gas meters accuracy," *Measurement*, vol. 69, pp. 280–286, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.02.008>, (2015).

[14] E. AGA8-DC92, "Compressibility and super compressibility for natural gas and other hydrocarbon gases," *Transm. Meas. Comm. Rep.*, no. 8.

SCMH استاندارد متر مکعب بر ساعت

SFF فاکتور رسوب وجه

علایم یونانی

 $\rho$  چگالی ( $kg/m^3$ )

زیر نویس ها

atm اتمسفر

loc محلی

m مقدار اندازه گیری شده

## ۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله لازم می‌دانند از واحد اندازه گیری و توزیع گاز، امور بهره برداری، امور مهندسی و امور HSE شرکت گاز استان سمنان به واسطه همکاری و در اختیار گذاشتن امکانات و تجهیزات لازم جهت انجام این تحقیق، کمال سپاسگزاری و قدردانی را ابراز نمایند.

## ۸- مراجع

[1] Farzaneh-Gord M., Farsiani M., A. Khosravi A., A. Arabkoohsar A., and Dashti F., "A novel method for calculating natural gas density based on Joule Thomson coefficient," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 26, pp. 1018–1029, doi: [10.1016/j.jngse.2015.07.029](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.07.029), (2015).

[2] Farzaneh-Gord M. and Deymi-Dashtebayaz M., "Recoverable Energy in Natural Gas Pressure Drop Stations: A Case Study of the Khangiran Gas Refinery," *Energy Explor. Exploit.*, vol. 26, no. 2, pp. 71–82, doi: [10.1260/014459808785260508](https://doi.org/10.1260/014459808785260508), (2008).

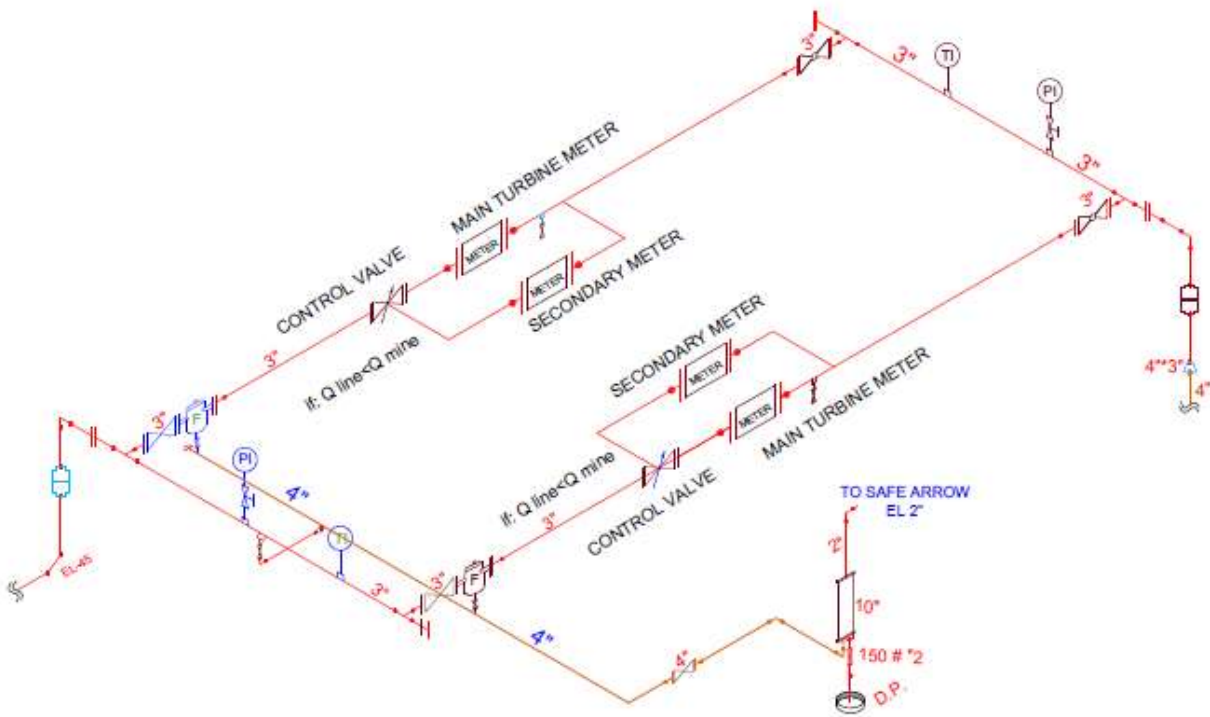
[3] Rastegar S., Kargarsharifabad H., Shafii M. B., and Rahbar N., "Experimental investigation of the increasing thermal efficiency of an indirect water bath heater by use of thermosyphon heat pipe," *Therm. Sci.*, vol. Online, doi: <https://doi.org/10.2298/TSCI190428054>, (2020).

[4] Rastegar S., Kargarsharifabad H., Rahbar N., and Shafii M. B., "Distilled water production with combination of solar still and thermosyphon heat pipe heat exchanger coupled with indirect water bath heater - experimental study and thermoeconomic," *Appl. Therm. Eng.*, p. 115437, doi: [10.1016/j.applthermaleng.115437](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.115437), (2020).

[5] Rastegar S., Kargarsharifabad H., Khalesi Doost A., and Rahbar N., "Developing a Model for Predicting the Outlet Gas Temperature of Natural Gas Pressure Reduction Stations to reduce Energy loss," *J. Heat Mass Transf. Res.*, vol. 7,

- [18] Rahbar N., Asadi A., and Fotouhi-Bafghi E., "Performance evaluation of two solar stills of different geometries: Tubular versus triangular: Experimental study, numerical simulation, and second law analysis," *Desalination*, vol. 443, doi: 10.1016/j.desal.2018.05.015, (2018).
- [19] Zabihi A. and Taghizadeh M., "Feasibility study on energy recovery at Sari-Akand city gate station using turboexpander," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 35, pp. 152–159, doi: 10.1016/j.jngse.2016.08.054, (2016).
- [15] IGS-E-EL-032, *Explosion Proof Electrical Equipments Layout in Risk Area for Pressure Reduction stations and Metering stations*. (1396).
- [16] I. 9951, *Turbine meter Used for the measurement of in closed conduits*. (1993).
- [17] Heydari A. and Rahbar N., "Energy and life cost analysis of a wet wall solar still with various pump working conditions," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 532–538, (2017).

پیوست الف- نقشه ایزومتریک طرح پیشنهادی



پیوست ب- نقشه تفصیلی به کارگیری تجهیزات ابزار دقیق در طرح پیشنهادی

