

Design of Mass Flow Measurement System for Industrial Gas Turbines

Abstract

The measurement of air mass flow rate in industrial gas turbines is commonly based on the measurement of static and dynamic pressures at compressor intake during steady state operation. The accuracy of this method is suitable for the instrumentation and control system applications under steady state operation of the gas turbine. During transient engine operation including start up and shut-down, the accuracy of this method reduces significantly. This method uses empirical correlations, which are specific to each turbine intake geometry and flow conditions. The development of thermodynamic models and numerical flow simulations for design and development of a gas turbine, requires accurate measurement of the air mass flow rate. In this paper two new methods for inlet mass flow rate measurement are presented. The first method uses an array of hot wire anemometers to capture velocity profile at gas turbine intake and the second method is based on air velocity measurement by an array of stagnation pressure probes and static pressure taps at turbine intake.

Keywords: Mass Flow Rate Measurement, Gas Turbine, Hot Wire Anemometer, Stagnation Pressure Probe

طراحی سامانه اندازه‌گیری دبی جرمی برای توربین‌های گاز صنعتی

المیرا پارسا، کارشناس - گروه اندازه‌گیری و تست، شرکت توربوکمپرسور تک خاورمیانه، e.parsa@turbotec-co.com، ۰۲۱-۵۶۲۳۶۹۶۱
میلااد امانی، کارشناس - گروه اندازه‌گیری و تست، شرکت توربوکمپرسور تک خاورمیانه، m.amani@turbotec-co.com
آرمان محسنی، مدیر پروژه - دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، ar_mohseni@sbu.ac.ir
امیر خوشدل، مدیر گروه - گروه اندازه‌گیری و تست، شرکت توربوکمپرسور تک خاورمیانه، a.khoshdel@turbotec-co.com
بهنام رضایی، معاون طراحی - مهندسی - شرکت توربوکمپرسور تک خاورمیانه، b.rezaei@turbotec-co.com
هیوا خالدی، مدیرعامل - شرکت توربوکمپرسور تک خاورمیانه، h.khaledi@turbotec-co.com

چکیده

در توربین‌های گاز صنعتی، دبی جرمی هوای ورودی به کمپرسور اغلب با استفاده از اندازه‌گیری فشار استاتیکی و اختلاف فشار در مجرای ورودی کمپرسور و در هنگام کارکرد مستمر توربین محاسبه می‌شود. این روش در بار کامل و در دبی جرمی نامی و در حالتی که شرایط عملکرد توربین پایدار است، روش مناسبی محسوب شده و در سیستم‌های راهبری و ابزار دقیق، دارای دقتی قابل قبول است. اما هنگامی که توربین در شرایط گذرا است، مانند زمان راه‌اندازی یا خاموش شدن، از دقت روش مذکور کاسته می‌شود. از جمله معایب دیگر این روش، این است که روابطی که اختلاف فشار در مجرای ورودی موتور را به سرعت مرتبط می‌کنند، روابطی تجربی بوده و وابستگی زیادی به هندسه دارند. همچنین رابطه مورد استفاده در هر توربین می‌تواند متفاوت از توربین دیگر باشد. از آنجایی که تولید مدل ترمودینامیکی و اعتبارسنجی مدل‌های عددی توربین گاز نیازمند به مقدار دبی جرمی است، اندازه‌گیری دقیق آن از جمله نیازمندی‌های روندهای طراحی و توسعه توربین گاز است. با توجه به محدود بودن دقت اندازه‌گیری دبی جرمی با روش اختلاف فشار، در این مقاله دو روش جدید جهت اندازه‌گیری دبی جرمی ورودی به توربین ارائه می‌شود. در روش اول دبی جرمی با استفاده از چیدمان حسگرهای سیم داغ و اندازه‌گیری توزیع سرعت در مجرای ورودی به دست می‌آید. در روش دوم دبی جرمی با استفاده از چیدمان حسگرهای اندازه‌گیری فشار سکون و فشار استاتیکی در ورودی توربین گاز و محاسبه توزیع سرعت در مقطع مجرای جریان، اندازه‌گیری می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری دبی جرمی، توربین گاز، حسگر سیم داغ، پروب فشار سکون.

مقدمه

در حال حاضر، دبی جرمی هوای ورودی به کمپرسور با استفاده از اندازه‌گیری فشار استاتیکی و اختلاف فشار در ورودی توربین‌های گاز در حین کارکرد مستمر توربین محاسبه می‌شود. این روش در حالت عملکرد توربین در بار کامل هنگامی که دبی جرمی بالا و عملکرد توربین گاز کاملاً پایدار است، روش مناسبی محسوب شده و در سیستم‌های ابزار دقیق دارای دقت قابل قبولی می‌باشد، اما هنگامی که توربین در شرایط گذرا، مانند راه‌اندازی یا خاموشی، کار می‌کند و یا اینکه در دبی ورودی تغییر ایجاد می‌شود، از دقت روش مذکور کاسته می‌شود. از جمله معایب دیگر این روش این است که روابطی که اختلاف فشار در ورودی موتور را به سرعت مرتبط می‌کنند، روابطی به تجربی بوده و وابستگی زیادی به هندسه دارد. بنابراین رابطه مورد استفاده در هر توربین متفاوت خواهد بود. از آنجایی که امروزه اولین گام در تنظیم مدل ترمودینامیکی و اعتبارسنجی مدل‌های محاسبات عددی توسعه داده شده برای توربین گاز، محاسبه دبی جرمی می‌باشد، اندازه‌گیری دقیق دبی جرمی ورودی موتور در صنعت توربین گاز مورد نیاز است. با توجه به محدودیت‌های روش‌های متداول اندازه‌گیری دبی، در این مقاله دو روش جدید جهت اندازه‌گیری دبی ورودی به توربین ارائه شده است. روش اول استفاده از سیستم چیدمان حسگر سیم داغ به منظور اندازه‌گیری مستقیم سرعت در ورودی توربین گاز است، با استفاده از این روش می‌توان تقریب مناسبی از پروفیل سرعت در ورودی توربین گاز به دست آورد و دبی جرمی هوای ورودی به موتور را با اندازه‌گیری هم‌زمان رطوبت و دمای موتور محاسبه کرد. روش دوم، استفاده از چیدمان حسگرهای اندازه‌گیری فشار سکون و فشار استاتیکی در ورودی توربین گاز و محاسبه سرعت با استفاده از رابطه بین فشار سکون و فشار استاتیک می‌باشد. در این مقاله به معرفی روش‌های متداول اندازه‌گیری دبی در توربین گاز، بررسی معایب و محدودیت‌های این روش‌ها، معرفی روش‌های نوین پیشنهادی، تعیین موقعیت نصب سیستم اندازه‌گیری با استفاده از تحلیل عددی و بررسی محدودیت‌های حاکم در طراحی آنها، طراحی سیستم اندازه‌گیری، و بررسی عدم قطعیت روش اندازه‌گیری دبی جرمی پرداخته می‌شود.

اندازه‌گیری دبی در توربین گاز

در حال حاضر، دبی جرمی هوای ورودی به کمپرسور با استفاده از اندازه‌گیری فشار استاتیکی و اختلاف فشار در ورودی توربین‌های گاز در حین کارکرد مستمر توربین محاسبه می‌شود. این روش در حالت عملکرد توربین در بار کامل و دبی جرمی نامی، هنگامی که عملکرد توربین گاز کاملاً پایدار است، روش مناسبی محسوب شده و در سیستم‌های ابزار دقیق دارای دقت قابل قبولی می‌باشد. اما هنگامی که توربین وارد شرایط گذرا می‌شود، مانند زمان راه‌اندازی یا خاموشی، و یا اینکه دبی ورودی کاهش می‌یابد، از دقت روش مذکور کاسته می‌شود. از جمله معایب دیگر این روش ارتباط اختلاف فشار در ورودی موتور با دبی جرمی با استفاده از روابط تجربی می‌باشد که وابستگی زیادی به هندسه ورودی موتور دارد. در نتیجه رابطه مورد استفاده در هر توربین متفاوت خواهد بود. همچنین کالیبراسیون این سیستم اندازه‌گیری بسیار دشوار می‌باشد. از آنجایی که امروزه اولین گام در تنظیم مدل ترمودینامیکی و اعتبارسنجی مدل‌های محاسبات عددی توسعه داده شده برای توربین گاز، محاسبه دبی جرمی می‌باشد، اندازه‌گیری دقیق دبی جرمی ورودی به موتور از اهمیت بسیاری برخوردار است.

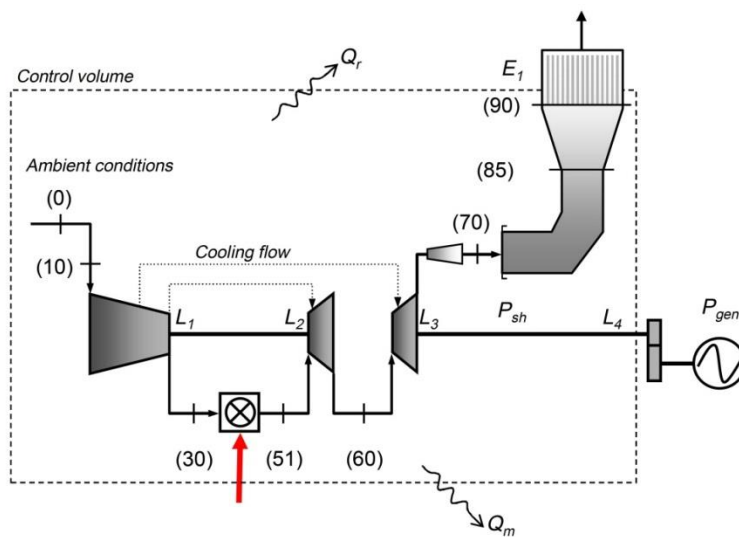
به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری دبی ورودی توربین، دو روش جدید جهت محاسبه دبی ورودی به توربین ارائه می‌گردد. روش اول، استفاده از سیستم چیدمان حسگر سیم‌داغ^۱ به منظور اندازه‌گیری مستقیم توزیع سرعت در ورودی توربین گاز است. با استفاده از این روش می‌توان تقریب مناسبی از پروفیل سرعت در ورودی توربین گاز به دست آورده و دبی جرمی هوای ورودی

^۱ Hot Wire Sensors

به موتور را با اندازه‌گیری هم‌زمان رطوبت و دمای موتور محاسبه کرد. روش دوم، استفاده از چیدمان حسگرهای اندازه‌گیری فشار سکون و فشار استاتیک در ورودی توربین گاز و محاسبه سرعت به صورت محلی با استفاده از رابطه بین فشار سکون و فشار استاتیکی و در نهایت انتگرال‌گیری سرعت بر مقطع گذر جریان به منظور محاسبه دبی می‌باشد.

در حال حاضر اندازه‌گیری دبی جرمی در سیستم کنترلی توربین‌های گاز صنعتی با استفاده از اندازه‌گیری فشار استاتیک در ورودی کمپرسور و محاسبه فشار سکون محیط، هم‌زمان با اندازه‌گیری دما و رطوبت هوای ورودی به موتور انجام می‌گیرد. اندازه‌گیری فشار استاتیک جریان به علت اغتشاشات و چرخش جریان در محل نصب حسگر می‌تواند با خطا همراه باشد و نیاز به تصحیح داشته باشد. پارامترهای اندازه‌گیری شده مذکور با استفاده از یک رابطه تجربی به سرعت مرتبط شده و دبی جرمی ورودی به توربین گاز محاسبه می‌شود (Cameron Tropea, Alexander L. Yarin, John F. Foss, 2007). از آنجایی که رابطه تجربی ارائه شده به هندسه ورودی یک توربین وابسته است، قابلیت استفاده در توربین‌های دیگر را ندارد. این روش در شرایط بار کامل دقت قابل قبولی دارد اما هنگامی که موتور وارد شرایط گذار می‌شود، دقت این روش افت می‌کند.

روش دیگری که در آزمون عملکردی توربین مطابق با استاندارد ASME PTC 22 استفاده می‌شود، استفاده از معادلات تعادل حرارتی کل موتور می‌باشد. حجم کنترلی مورد استفاده جهت نوشتن معادله تعادل انرژی در شکل ۱ نشان داده شده است. بر این اساس دبی جرمی ورودی به موتور با استفاده از معادلات (۱) تا (۳) محاسبه می‌شود (ASME, 2006-05-30).



شکل ۱: حجم کنترل انتخابی در تعیین دبی ورودی توربین

$$\dot{m}_{10} \cdot h_{10} + \dot{m}_f \cdot (LHV \cdot \eta_{cc} + c_{p,f} \cdot (T_f - T_{f,ref})) = P_{sh} + \dot{Q}_r + \dot{Q}_m + \dot{Q}_{leak} + \dot{m}_{90} \cdot h_{90} \quad (1)$$

در رابطه بالا \dot{m} دبی جرمی، h آنتالپی، LHV ظرفیت حرارتی η_{cc} بازدهی محفظه احتراق، $c_{p,f}$ ظرفیت حرارتی سوخت، T دما، P توان و Q اتلاف حرارتی می‌باشند به طوری که:

$$\dot{m}_{90} = \dot{m}_{10} \cdot (1 - \gamma_{leak}) + \dot{m}_f \quad (2)$$

و γ_{leak} ضریب نشتی است. در نتیجه دبی جرمی به توربین گاز، \dot{m}_{10} ، با استفاده از معادله (۳) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{m}_{10} = \frac{\dot{m}_f \cdot (LHV \cdot \eta_{cc} + c_{p,f} \cdot (T_f - T_{f,ref})) - \dot{Q}_r - \dot{Q}_m - \dot{Q}_{Leak} - P_{sh}}{(1 - \gamma_{leak}) \cdot (\dot{h}_{90} - \dot{h}_{10})} \quad (3)$$

به طوری که داریم:

\dot{Q}_r : مجموع افت حرارتی ناشی از خنک کاری و تشعشع

\dot{Q}_m : افت مکانیکی در شفت توربین توان و توربین گاز

\dot{Q}_{leak} : افت حرارتی به علت نشت هوا در موتور

به عنوان نمونه در بستر آزمون توربین گاز ملی IGT25 در ری از سوخت مایع استفاده می‌گردد. دمای سوخت توسط حسگر RTD در مخزن سوخت اندازه‌گیری می‌شود و از افت دما در مسیر سوخت صرف نظر می‌شود. η_{cc} نشان‌دهنده بازده محفظه احتراق بوده که برابر با ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده و از اتلافات محفظه احتراق صرف نظر می‌شود. γ_{leak} ضریبی است که برای تصحیح نشتی در طول مسیر استفاده می‌شود و به صورت تجربی به دست می‌آید. مقادیر \dot{Q}_m ، \dot{Q}_r ، \dot{Q}_{leak} با استفاده از نمودارهای تجربی به دست می‌آیند (OTC Test Procedure, 2008). همانطور که ملاحظه می‌شود، عاملهای موثر در محاسبه دبی ورودی با استفاده از این روش زیاد بوده و هر یک در دارای خطایی هستند که در مجموع خطای کل محاسبه دبی ورودی را تشکیل می‌دهد. هر یک از ساده‌سازی‌ها و فرضیات استفاده شده در این روش نیز خود خطایی به مجموعه اضافه می‌کند، که رشد خطا را افزایش می‌دهد.

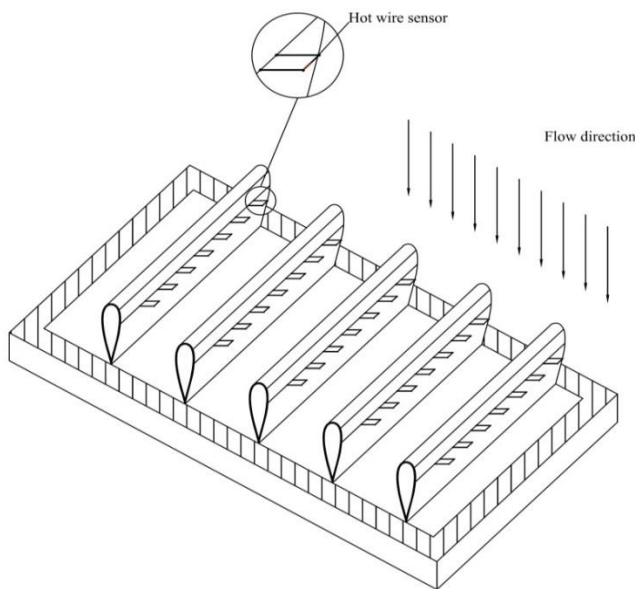
حسگر فیلم داغ

اندازه‌گیری سرعت در حسگرهای حرارتی سیم داغ با استفاده از تغییر مقاومت الکتریکی یک المان حرارتی کوچک که در معرض جریان سیال قرار می‌گیرد، انجام می‌پذیرد. این حسگرها در سه نوع جریان ثابت، ولتاژ ثابت و دما ثابت موجود می‌باشند که نمونه دما ثابت آن با توجه به اینکه دمای المان حرارتی تحت تاثیر دمای جریان قرار نمی‌گیرد و این المان تنها از سرعت جریان تاثیر می‌پذیرد دارای عملکرد بهتری می‌باشد. روش کار حسگرهای دما ثابت به این صورت است در جریان سیال، خنک کاری سیال عبوری از المان منجر به تغییر مقاومت الکتریکی آن و در نتیجه تغییر میزان جریان الکتریکی و اختلاف پتانسیل الکتریکی دو قطب المان می‌شود و با افزایش مقدار جریان ورودی به المان جبران می‌شود به گونه‌ای که درجه حرارت المان ثابت باقی بماند. تغییر در جریان الکتریکی که ناشی از سرعت سیال است، با تغییر در ولتاژ خروجی نشان داده می‌شود (dantecdynamics, 2015).

سیم داغ و فیلم داغ هر دو دارای عملکرد یکسانی هستند، انتخاب نوع حسگر (سیم داغ یا فیلم داغ) به ویژگی‌های جریان مانند میزان تغییرات سرعت، مقدار سرعت، وجود مواد خارجی در جریان و میزان دسترسی به مجرای جریان بستگی دارد. در مورد اندازه‌گیری جریان در ورودی توربین گاز، با توجه به اینکه حسگرها در موقعیت خود باقی مانده و تعویض آن‌ها دشوار است، اولین اولویت استحکام حسگر می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه این حسگرها بسیار ظریف بوده و نسبت به ذرات موجود در جریان آسیب‌پذیر هستند، اولویت دوم عدم آسیب پذیری حسگر در جریان در مدت زمان اندازه‌گیری می‌باشد. بنابراین حسگرهای سیم داغ در سیستم اندازه‌گیری سرعت ورودی به توربین گاز باید از استحکام بیشتری نسبت به نمونه‌های متداول برخوردار باشند.

اندازه‌گیری جریان با استفاده از چیدمان حسگر سیم داغ

در این روش توزیع سرعت در مقطع ورودی موتور IGT25 با استفاده از چیدمان حسگرهای سیم داغ نشان داده شده در شکل ۲ به دست می‌آید.



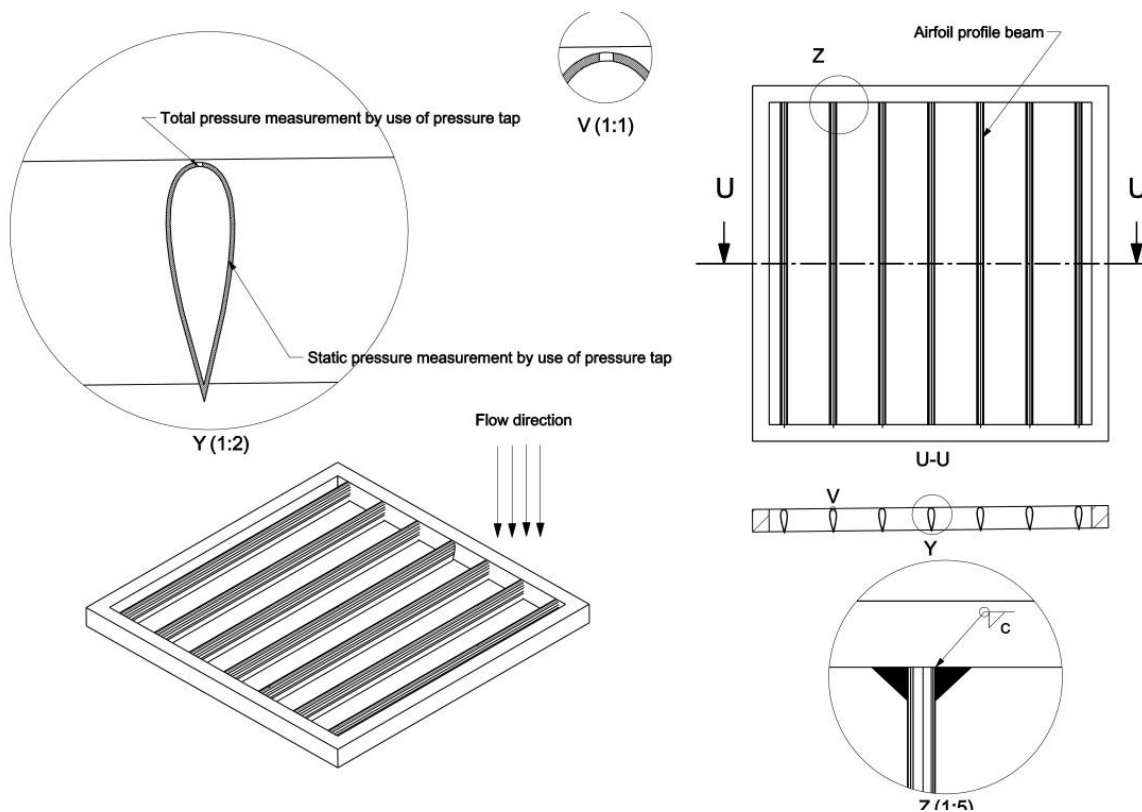
شکل ۲: شماتیک طریقه شبکه‌بندی حسگرهای سیم داغ روی ایرفویل‌های نگه‌دارنده حسگر و در سطح مقطع ورودی

در اندازه‌گیری جریان در ورودی توربین‌گاز، با توجه به اینکه این حسگرها در موقعیت خود باقی مانده و تعویض آن‌ها دشوار است، لازم است از استحکام مکانیکی کافی برخوردار باشند. به این دلیل حسگر سیم داغ با ماکزیمم قطری که توانایی تشخیص سرعت با دقت مورد نظر را داشته باشد انتخاب می‌شود. از طرفی دیگر همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای نصب یک چیدمان از این حسگرها، باید یک ردیف نگه‌دارنده برای نگهداری حسگر تعبیه شود. با توجه به اینکه این نگه‌دارنده‌ها باعث افت فشار در جریان ورودی می‌شوند، از ایرفویل برای نگه‌دارنده استفاده شده است، که کمترین افت فشار را دارا می‌باشد. از طرفی طریقه چیدمان حسگرها با استفاده از تخمین سرعتی که از مکانیک سیالات محاسباتی به دست می‌آید، تعیین می‌شود. با استفاده از این روش سرعت محلی در هر المان به دست می‌آید، با انتگرال‌گیری از سرعت در سطح عبوری جریان، دبی حجمی و با ضرب آن در چگالی، دبی جرمی در ورودی موتور به صورت لحظه‌ای حاصل می‌شود. از آنجایی که در این روش سرعت به صورت مستقیم محاسبه می‌شود، این روش دارای دقت بسیار بالایی بوده و می‌تواند در تمام شرایط کاری موتور برای اندازه‌گیری دبی ورودی به توربین‌گاز و همچنین توزیع سرعت برای تشخیص گرفتگی فیلترها به کار رود.

اندازه‌گیری توزیع فشار سکون و استاتیک در مجرای ورودی

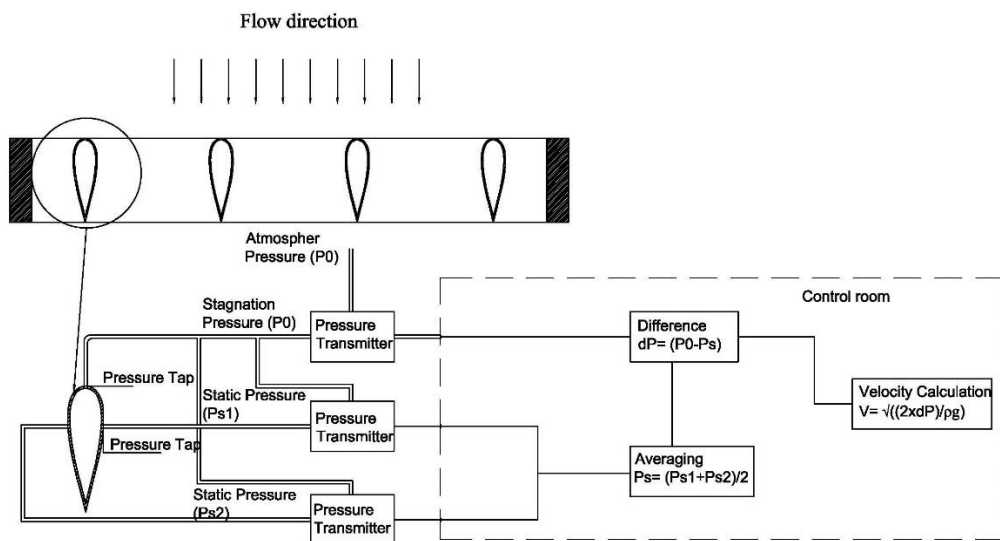
روش دیگر اندازه‌گیری دبی، استفاده از آرایه‌ی حسگرهای فشار سکون و فشار استاتیک در مجرای ورودی می‌باشد. در این روش محاسبه سرعت بر اساس اندازه‌گیری فشار سکون و فشار استاتیکی استوار است. از آنجایی که ماخ جریان سیال عبوری از ورودی موتور مورد بررسی در این مقاله کمتر از ۰/۳ می‌باشد، در نتیجه برای آن فرض تراکم‌ناپذیری جریان معتبر بوده و می‌توان

ویژگی‌های جریان را بر اساس معادله برنولی و یا معادله حاکم بر جریان آیزنروپیک حل نمود. چیدمان حسگرها مانند روش قبل با استفاده از حل عددی جریان در ورودی به دست آمده است که در شکل ۳ نمونه‌ای از این چیدمان نشان داده شده است. با توجه به توزیع سرعت و فشار در اطراف پروفیل ایرفویل انتخابی، در لبه حمله ایرفویل فشار سکون اندازه‌گیری شده و در محلی که خطوط فشار به صورت تقریباً موازی با سطح ایجاد می‌شوند، فشار استاتیکی جریان با استفاده از تپ فشار استاتیک اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۳ محل قرارگیری سوراخ‌های نصب حسگر سکون و استاتیک نشان داده شده است. نمونه‌های فشار استاتیک و فشار سکون جمع‌آوری شده به یک اسکنر فشار^۲ منتقل شده و اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از روابط جریان آیزنروپیک، فشار سکون و فشار استاتیکی به سرعت وابسته شده و سرعت در هر نقطه محاسبه می‌گردد. با انترگرال‌گیری از سرعت روی سطح و برازش یک سطح بر مقادیر سرعت سیال، دبی حجمی در سطح مقطع انتخابی که بین فیلترها و صداگیرها می‌باشد محاسبه می‌گردد. در نهایت با ضرب چگالی هوا که خود با استفاده از حسگرهای اندازه‌گیری دما و رطوبت در ورودی حاصل شده است، دبی جرمی ورودی به موتور محاسبه می‌شود. نمودار چگونگی تعیین سرعت در هر نقطه از اندازه‌گیری در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳: سیستم اندازه‌گیری سرعت ورودی جریان با استفاده از اندازه‌گیری فشار دینامیک جریان ورودی

^۲ Pressure Scanner



شکل ۴: نمودار سیستم تعیین سرعت جریان با استفاده از سیستم اندازه‌گیری اختلاف فشار

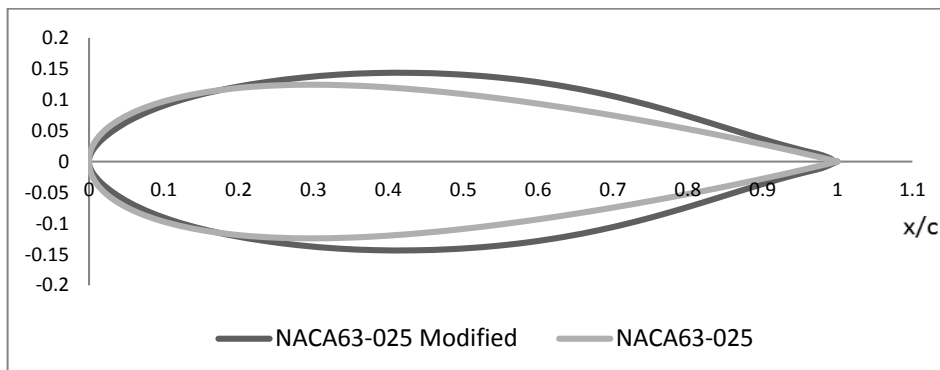
طراحی پایه سیستم اندازه‌گیری

به منظور طراحی پایه سیستم اندازه‌گیری کلیات مسئله مورد بررسی باید در نظر گرفته شود. تعیین نوع پروب و حسگرهای مورد نیاز به منظور اندازه‌گیری و طراحی مناسب مجرای جریان جهت ساخت و نصب سیستم اندازه‌گیری بسیار مهم می‌باشد. قیدهای اساسی در طراحی سیستم اندازه‌گیری عبارتند از ایجاد افت کم در جریان، امکان اندازه‌گیری همزمان در چند نقطه از جریان، تاثیر مثبت سیستم بر جریان (یکنواخت کردن جریان)، و نصب و باز کردن آسان سیستم اندازه‌گیری می‌باشد.

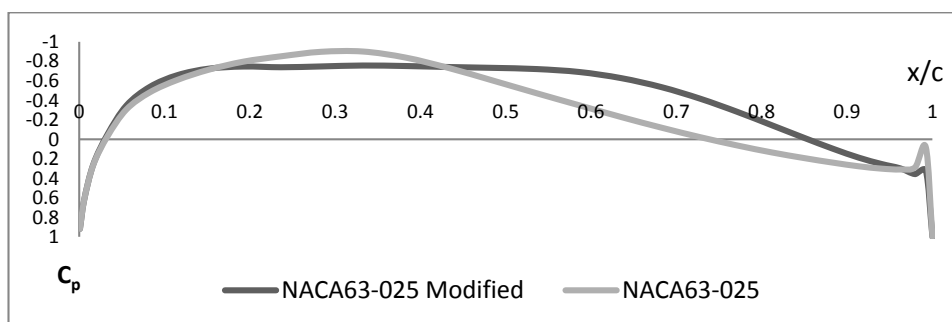
انتخاب نوع ایرفویل و چیدمان ردیف ایرفول

به منظور کاهش افت فشار در جریان ورودی توربین گاز و یکنواخت کردن جریان، انتخاب نوع ایرفویل و چیدمان ایرفویل‌ها در مجرای ورودی حائز اهمیت است. در انتخاب پروفیل ایرفویل دو دسته محدودیت وجود دارد. دسته اول محدودیت‌های طراحی شامل استحکام ایرفویل، جانمایی ابزار اندازه‌گیری در ایرفویل، محدودیت ساخت ایرفویل می‌شود و دسته دوم محدودیت‌های آیرودینامیکی مانند حداکثر افت فشار روی ایرفویل، محل جدایش جریان روی ایرفویل، طبقه تقسیم نیروهای آیرودینامیکی مانند نیروی برآ و نیروی پسا روی ایرفویل و دامنه زاویه ورود جریان به ایرفویل می‌باشند.

در انتخاب ایرفویل هدف کاهش نیروی پسا ایرفویا در زوایای مختلف می‌باشد. در بین ایرفویل‌های موجود NACA مشاهده می‌شود که ایرفویل‌های متقارن دارای ضریب برآی پایین‌تری نسبت به ایرفویل‌های خمیده (کمبر ایرفویل) هستند. از آنجایی که نیروی برآی بزرگتر در سطح مقطع ایرفویل باعث اعمال نیروی بزرگتری روی تکیه‌گاه‌ها می‌شود، در این اندازه‌گیری ایرفویل‌های متقارن گزینه بهتری برای این اندازه‌گیری می‌باشند. از آنجا که از این ایرفویل تنها به عنوان نگه‌دارنده حسگرها استفاده می‌شود، مهمترین نکته در انتخاب آن یکنواخت بودن تغییرات فشار استاتیکی در طول ایرفویل می‌باشد تا اندازه‌گیری با دقت بالاتری انجام گردد. برای این منظور بهینه‌سازی روی دو مدل ایرفویل NACA انجام گرفت تا تغییرات ضریب فشار در طول ایرفویل تقریباً به صورت خطی باشد اصلاح شکل پروفیل در شکل ۵ نشان داده شده است. مقایسه تغییرات ضریب فشار C_p در طول ایرفویل برای نمونه اصلاح شده و نمونه اصلی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵: تغییر شکل ایرفویل به منظور خطی تر کردن توزیع C_p برای پروفیل NACA63-025



شکل ۶: تغییرات C_p در طول ایرفویل اصلاح شده و ایرفویل استاندارد NACA63-025

انتخاب تعداد نگهدارنده

در انتخاب تعداد ایرفویل‌های نگهدارنده حسگرها که در مسیر جریان قرار می‌گیرد، سه عامل تاثیرگذار می‌باشد. عامل اول افت فشاری که در اثر نصب ایرفویل‌ها در جریان ورودی به توربین ایجاد می‌شود. این افت فشار طبق استاندارد ASME PTC 22 در ورودی توربین به صورت کلی (بدون در نظر گرفتن صداگیرها) باید کمتر از ده درصد فشار ورودی باشد (ASME PTC 22-2005, 2005). در صورتی که افت فشار کل بیش از ۱۰ درصد فشار ورودی باشد، سیستم کنترلی توربین فرمان خاموشی ناگهانی^۳ توربین را می‌دهد.

عامل مهم دوم، شکل‌گیری جریان موازی با سطح و جدایش دیرتر جریان روی بدنه ایرفویل می‌باشد. این موضوع وابستگی کامل به زاویه جریان ورودی به ایرفویل داشته و انتخاب تعداد ایرفویل برای بالا بردن حاشیه امنیت بر اساس بدترین شرایطی که ممکن است اتفاق بیفتد انجام می‌شود.

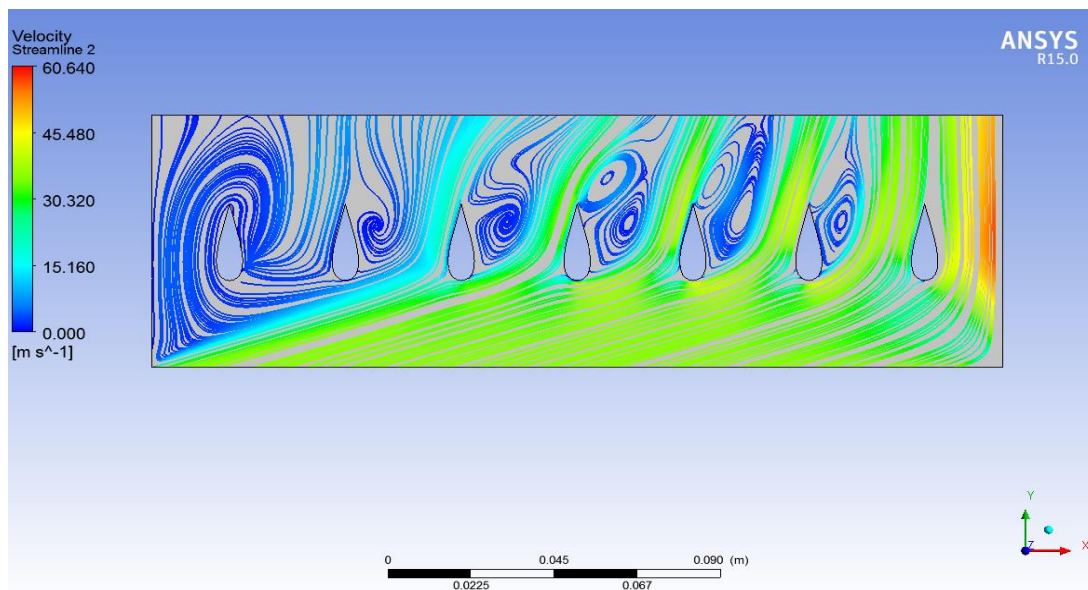
عامل سوم در انتخاب تعداد ردیف پره، توزیع سرعت در مقطع مورد نظر برای نصب حسگرها می‌باشد. انتخاب محل حسگرها به گونه‌ای صورت می‌گیرد که توزیع سرعت و فشار با دقت مناسب ثبت اندازه‌گیری شود. به منظور تعیین تعداد بهینه ردیف حسگر و شرایط جریان، مجرای ورودی با استفاده از تحلیل عددی شبیه‌سازی شده که در ادامه نتایج آن ارائه می‌شود.

^۳ trip

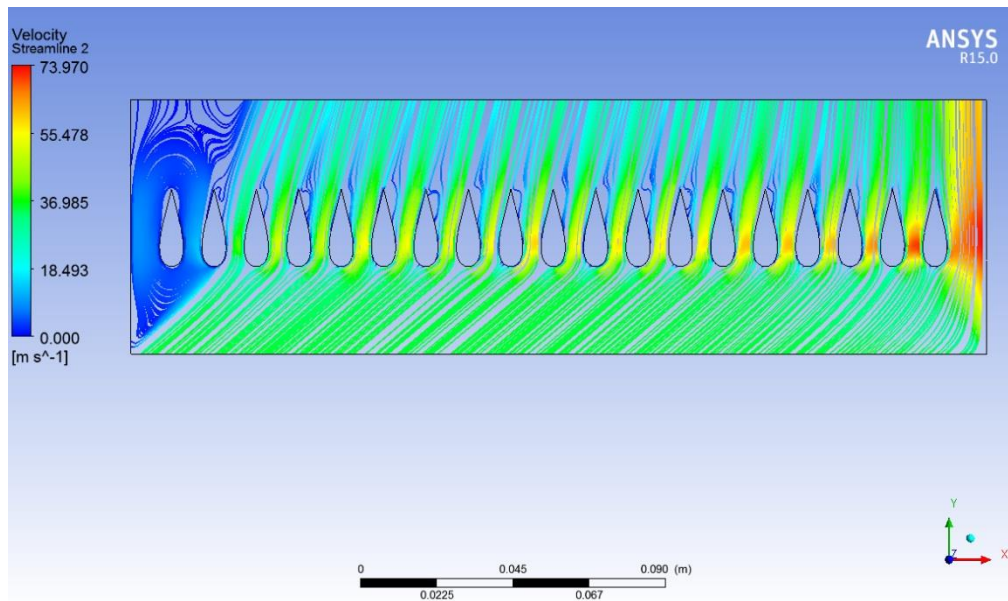
بر اساس شرایط عملکرد توربین، برای انتخاب تعداد ردیف ایرفویل جریان با سرعت ثابتی برابر با میانگین سرعت خروجی از فیلترهای ورودی توربین و زاویه جریان ۳۰ درجه شبیه سازی شده است. افت فشار به دست آمده برای تعداد ۷ ایرفویل بسیار پایین تر از حد مجاز بوده، بنابراین برای جلوگیری از تاخیر در شکل گیری گردابه تعداد ردیف ایرفویل داخل جریان می تواند افزایش یابد. افزایش تعداد ایرفویل با بررسی افت فشار تا جایی ادامه می یابد که پروفیل مطلوب سرعت برای اندازه گیری در اطراف ایرفویل ها شکل بگیرد. در نهایت تعداد ایرفویل انتخابی برابر با ۱۹ ایرفویل به دست آمد، در شکل ۷ و شکل ۸ تغییر خطوط جریان با قرار دادن هفت ایرفویل و نوزده ایرفویل در سطح مقطع ورودی به توربین گاز نشان داده شده است. تغییرات افت فشار با افزایش تعداد میله ایرفویل در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: تغییرات افت فشار با افزایش تعداد نگه دارنده ایرفویل شکل

تعداد ردیف ایرفویل	میزان افت فشار (Pa)	درصد افت فشار
۷	۱۳۰	۰/۱۳٪
۱۰	۱۶۲	۰/۱۶٪
۱۵	۳۳۹	۰/۳۳٪
۱۹	۴۱۳	۰/۴۱٪

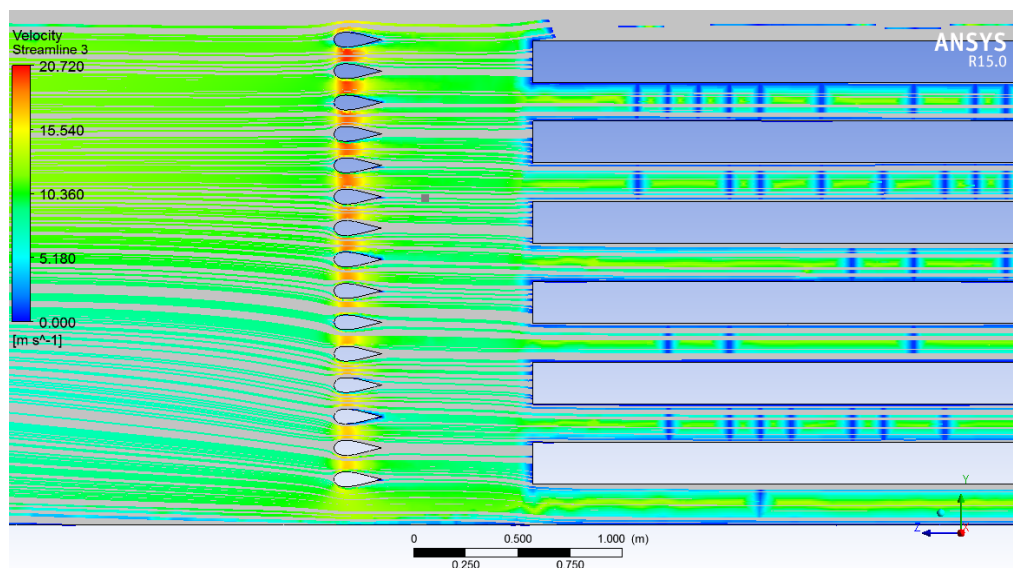


شکل ۷: خطوط جریان با قرار دادن تعداد هفت ردیف حسگر در جریان با زاویه جریان ۳۰ درجه

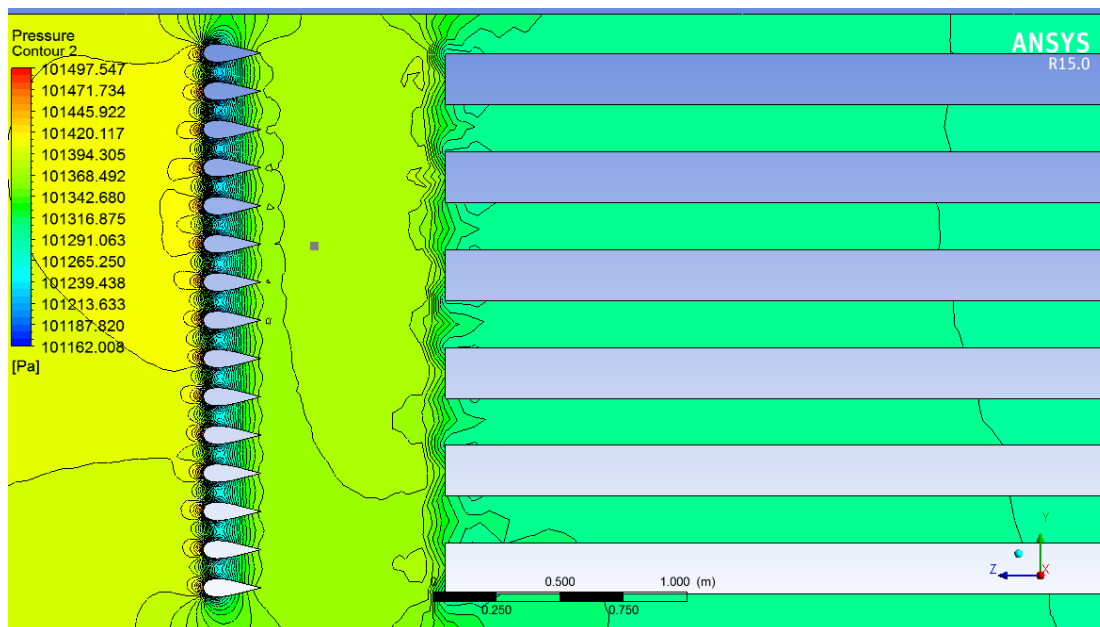


شکل ۸: خطوط جریان با قرار دادن نوزده ردیف حسگر در جریان با زاویه جریان ۳۰ درجه

بهترین مکان برای قرار دادن ردیف حسگر، سطح مقطعی از مجرای ورودی است که در آن اغتشاشات فیلترهای ورودی میرا شده باشد و تحت اثر اغتشاشات صداگیرها واقع نگردد. به این منظور کل مجرای ورودی موتور IGT25 شبیه‌سازی شده است.



شکل ۹: خطوط جریان در محل قرار گرفتن از ساینسرها



شکل ۱۰: خطوط هم‌فشار در محل قرارگیری ایرفویل‌های اندازه‌گیری فشار

محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری دبی

محاسبه خطا و عدم قطعیت هر اندازه‌گیری شامل گام‌های، تعیین روند اندازه‌گیری، تشخیص منابع خطا و توزیع خطا، توسعه مدل خطا، تخمین عدم قطعیت، تعیین برآیند عدم قطعیت و ارائه گزارش نتایج تحلیل‌ها می‌باشد (NASA, July 2010). در روش اندازه‌گیری سرعت با استفاده از حسگر فیلم داغ با توجه به این سرعت به صورت مستقیم محاسبه می‌گردد، میزان خطای اندازه‌گیری کم بوده و این نوع اندازه‌گیری را برای انواع توربین‌های گاز صنعتی مناسب می‌سازد.

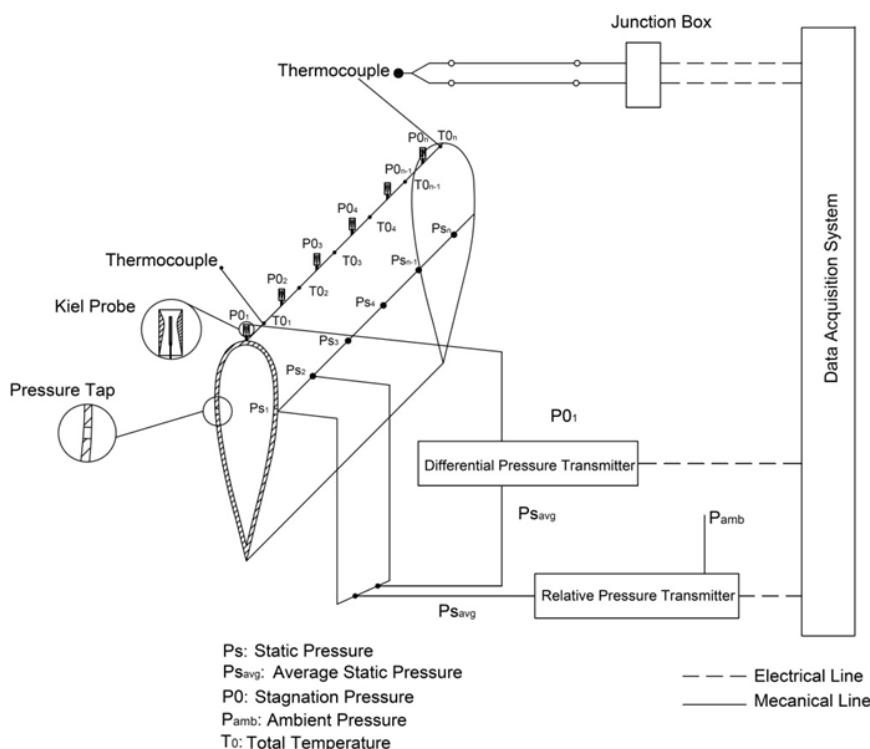
در اندازه‌گیری با استفاده از چیدمان حسگرهای اندازه‌گیری فشار سکون و استاتیک که نمودار اندازه‌گیری با استفاده از این سیستم در شکل ۱۱ نشان داده شده است، فشار با استفاده از رابطه آیزنترتروپیک به سرعت وابسته می‌شود. طبق روابط ارائه شده در استاندارد ASME PTC 19 با استفاده از رابطه محاسبه دبی جرمی، مدل توسعه یافته خطا به صورت معادله (۵) حاصل می‌گردد (ASME, 2005).

$$\dot{m} = \rho VA \quad (4)$$

با توجه به اینکه A در سطح مقطع مورد اندازه‌گیری این بررسی ثابت است داریم:

$$\dot{m} + \delta \dot{m} = (\rho + \delta \rho) \cdot (V + \delta V) \cdot A \quad (5)$$

به طوری که \dot{m} دبی جرمی ورودی به توربین گاز، $\delta \dot{m}$ خطای اندازه‌گیری دبی جرمی، ρ چگالی سیال ورودی به موتور، $\delta \rho$ خطای اندازه‌گیری چگالی، V سرعت سیال در محل اندازه‌گیری، δV خطای محاسبه سرعت و A سطح مقطع جریان می‌باشد. با فاکتورگیری از ρ ، \dot{m} از طرفین معادله (۵)، معادله (۶) حاصل می‌گردد.



شکل ۱۱: سیستم اندازه‌گیری سرعت در راستای Z با استفاده از پروب کیل و tap فشاری و ترموکوپل

$$\varepsilon_m = \varepsilon_\rho + \varepsilon_V + \varepsilon_\rho \cdot \varepsilon_V \quad (6)$$

که در آن ε نسبت خطا به کمیت است. با توجه به مدل توسعه یافته خطا، عدم قطعیت این اندازه‌گیری شامل دو منبع کلی می‌باشد. عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت و عدم قطعیت اندازه‌گیری چگالی. در روش ارائه شده در این مقاله سرعت با استفاده از معادله (۷) محاسبه می‌گردد (Spitzer, 2001).

$$V = \sqrt{\frac{2}{k-1} kRT \left[\left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} \quad (7)$$

که در آن T ، R و K به ترتیب از معادلات (۸)، (۹)، (۱۰) محاسبه می‌گردد.

$$T = T_0 - \frac{V^2}{2C_p} \quad (8)$$

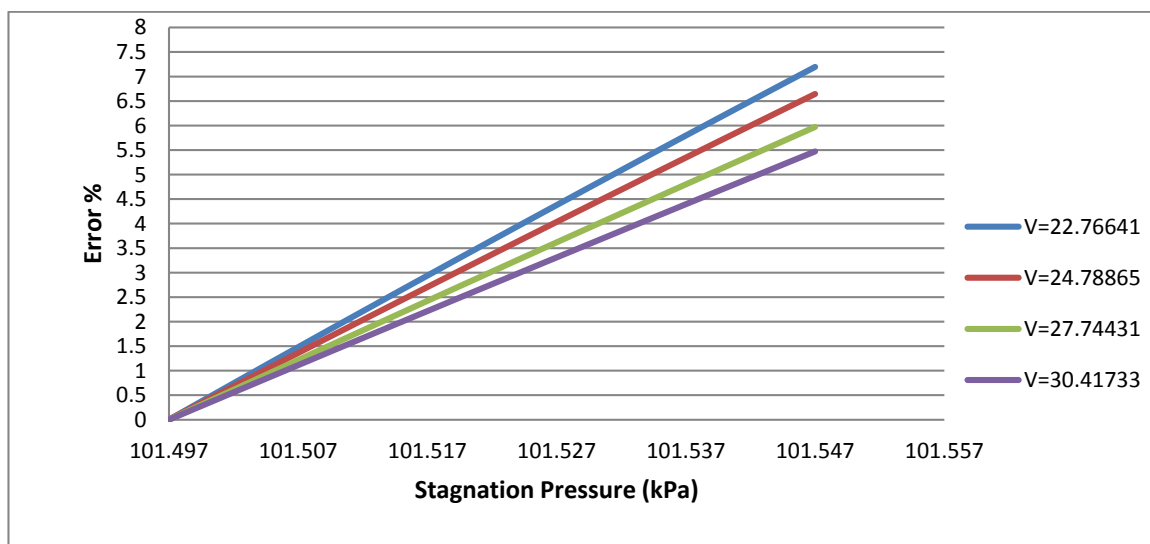
$$R = \frac{\bar{R}}{M} \quad (9)$$

$$K = \frac{C_p}{C_v} \quad (10)$$

با توجه به روابط ذکر شده در بالا مدل خطای محاسبه سرعت به صورت زیر به دست می‌آید.

$$dV = \frac{\partial V}{\partial R} \cdot dR + \frac{\partial V}{\partial k} \cdot dk + \frac{\partial V}{\partial P_0} \cdot dP_0 + \frac{\partial V}{\partial P_s} \cdot dP_s + \frac{\partial V}{\partial T} \cdot dT \quad (11)$$

با محاسبه هر یک از جمله های معادله (۱۱) مقدار خطای سرعت با تغییرات فشار استاتیکی، فشار سکون و دما محاسبه می‌گردد. این معادله نشان می‌دهد که رشد خطا در بازه‌های مختلف سرعت دارای نرخ‌های متفاوتی می‌باشد، به گونه‌ای که در اختلاف فشارهای کم (سرعت کمتر از ۲۵ متر بر ثانیه) خطای محاسبه سرعت با استفاده از این روش بین ۱۰ درصد تا ۱۶ درصد می‌شود. با افزایش اختلاف فشار سکون و استاتیکی (افزایش سرعت) مقدار این خطا کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که در سرعت‌های بالای ۲۵ متر بر ثانیه به زیر ۱۰ درصد می‌رسد. شکل ۱۲ تغییرات خطای محاسبه سرعت، در سرعت‌های مختلف با تغییر فشار سکون را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت خطای محاسبات کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲: چگونگی تغییرات خطای سرعت با تغییر فشار سکون در سرعت‌های مختلف

نتیجه‌گیری

از محاسبات بالا نتیجه می‌شود، دقت اندازه‌گیری دبی جرمی ورودی به توربین گاز با افزایش سرعت جریان سیال رابطه مستقیم دارد. به گونه‌ای که هر چه سرعت در محل اندازه‌گیری افزایش یابد، دقت محاسبات افزایش می‌یابد. برای نیل به این هدف، باید اصلاحاتی در روند اندازه‌گیری صورت گیرد که باعث افزایش هر چه بیشتر سرعت در مقطع اندازه‌گیری شود. در نتیجه در نمونه‌های توربین گاز صنعتی که سرعت ورودی سیال به موتور کمتر از سی متر بر ثانیه است، استفاده از سامانه اندازه‌گیری با استفاده از حسگرهای فیلم داغ بر روش اندازه‌گیری بر پایه اختلاف فشار ارجحیت دارد. در سرعت‌های ورودی به موتور بالای سی متر بر ثانیه سیستم اندازه‌گیری بر پایه اختلاف فشار دارای دقت قابل قبولی می‌باشد. در روش اندازه‌گیری سرعت با استفاده از اختلاف فشار استاتیک و سکون در سرعت‌های زیر ۳۰ متر بر ثانیه با استفاده از راهکارهای زیر می‌توان دقت را افزایش داد:

- ۱- افزایش سرعت با استفاده از جایگذاری تعداد بیشتر ردیف ایرفویل در جریان تا جایی که محدودیت‌های مربوط به افت فشار و سیستم کنترل اجازه می‌دهد. استفاده از تعداد بیشتر ردیف ایرفویل سبب می‌شود که سطح مقطع نازل مانند ایجاد شده بین دو ایرفویل کاهش یابد و در نتیجه سرعت افزایش یابد.

۲- طراحی مجدد مجرای ورودی توربین در محل منتخب برای اندازه‌گیری. با کاهش سطح مقطع داکت ورودی در محل اندازه‌گیری می‌توان سرعت را به میزان دلخواه افزایش داد. از آنجایی که این افزایش سرعت ممکن است روی جریان ورودی به کمپرسور موثر باشد، می‌توان پس از محل اندازه‌گیری با افزایش سطح مقطع جریان مطلوب برای ورود به کمپرسور را مجدد بازیابی کرد.

مراجع

- Specification for industrial platinum resistance thermometer sensors. (1983). BS 1904. British Standard Institute.*
- ASME. (2006-05-30). ASME PTC 22 Gas turbines performance tests. The American Society of Mechanical Engineers.*
- ASME. (2005). Test Uncertainty. New York: ASME International.*
- Bonham, C., Thorpe, S. J., Erlund, M. N., Stevenson, R. D. (2014). Stagnation temperature measurement using thin-film platinum resistance sensors. 25.*
- Tropea, C., Yarin, A. L., Foss, J. F. (2007). Handbook of Experimental Fluid Mechanics (1st ed., Vol. 1). Springer.*
- Chue, S. H. (1975). Pressure probe for fluid measurement. 16(2), 147-223.*
- Dantec Dynamics. (2015). Hot Wire and Hot Film Probes. (Dantec Dynamics A/S) <http://www.dantecdynamics.com>*
- NASA. (July 2010). Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration.*
- OTC Test Procedure. (2008). Mechanical Running Test, IGT25(0) Test Rig in Iran.*
- Spitzer, D. (2001). Flow Measurement - Practical Guides for Measurement and Control, 2nd Edition. ISA.*