



ردیف چینی نازل سوخت گازی در توربین‌های نیروگاهی با هدف کنترل اختلاف دمایی و بر اساس حجم سوخت گازی

پرویز اسدی^{۱*}، علی فضلی^۱، حسین جعفرزاده^۲، حسین ملکی^۳

۱- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی تبریز، تبریز، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: asadi@eng.ikiu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۳ آذر ۱۴۰۲
پذیرش: ۱۶ بهمن ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

توربین گازی
GE-F9
سوخت رسانی متوازن
ردیف چینی نازل
اختلاف دمایی

چکیده

در این پژوهش آزمایش و اندازه‌گیری حجم سوخت نازل‌های سوخت دوگانه‌سوز توربین GE-F9 با استفاده از انجام آزمایش‌های تجربی توسط دستگاه ردیف چینی نازل سوخت گازی (طراحی و ساخته شده در شرکت پرداد کامه صنعت) مورد بررسی قرار گرفتند. در ادامه، جهت نصب نازل‌ها بر روی توربین از الگو فرایند معینی به منظور ردیف چینی آن‌ها توسط نرم‌افزار ویژه دستگاه استفاده شد. اختلاف دمایی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین متغیرهای خروجی تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از این مطالعه نشان داد که کاهش اختلاف جریان گاز مصرفی تا ۲٪ و اختلاف دمایی تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد با انتخاب یک دسته ۱۴ عددی از میان ۳۰ نازل اولیه و همچنین ردیف چینی مناسب توسط نرم‌افزار امکان‌پذیر است. همچنین از طرفی در صورت استفاده از ۲ دسته نازل از میان ۳۰ نازل اولیه، می‌توان اختلاف جریان نازل‌ها را تا ۶ و ۹٪ کاهش داد و در عوض با استفاده از نرم‌افزار ردیف چینی اختلاف دمایی را زیر ۲۸ درجه سانتی‌گراد حفظ نمود.

Arrangement of gas fuel nozzle in power plant turbines with the purpose of temperature spread control and based on gas fuel flow rate

Parviz Asadi^{1*}, Ali Fazli¹, Hossein Jafarzadeh², Hossein Maleki³

1- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Tabriz Islamic Azad University, Tabriz, Iran

3- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

* Corresponding Author's Email: asadi@eng.ikiu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 4 December 2023

Accepted: 5 February 2024

Keywords:

Gas Turbine

GE-F9

Fuel Flow Balancing

Nozzle Layout

Temperature Spread

Abstract

In this research, fuel nozzles of GE-F9 turbine were tested, and fuel flow was measured using a Nozzle Layout device, which was designed and manufactured by Pardad Kameh Sanat Company. Then, the layout of nozzles was suggested by the special software of the device based on a specific algorithm, and it was installed on the turbine. The temperature spread was evaluated as the most important result of this research. The results show that by selecting a set of 14 out of the 30 initially provided nozzles and then using the layout recommended by the software, it is possible to reduce the gas flow difference by 2% and the temperature spread by 20 °C. However, using two sets of nozzles out of the 30 provided can reduce the flow difference of the nozzles to 6% and 9%, respectively. In addition, with the help of the Nozzle Layout software, the temperature spread can be maintained below 28 °C.

Please cite this article using:

Asadi P, Fazli A, Jafarzadeh H, Maleki H. Arrangement of gas fuel nozzle in power plant turbines with the purpose of temperature spread control and based on gas fuel flow rate. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 January 21;10(11):39-48. doi: 10.22034/IJME.2024.428239.1883 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

با توجه به نوع فرآیند و همچنین دقت اندازه‌گیری مورد نیاز در آن، در زمینه اندازه‌گیری جریان، با توجه به خصوصیات سیال مورد استفاده و فشار، می‌توان از دستگاه‌ها و روش‌های مختلف زیادی استفاده کرد. همچنین انتخاب دستگاه‌های اندازه‌گیری در شرایط کاری مختلف منحصر به فرد بوده و نمی‌توان از قبل قابل تعمیم به تمامی موارد باشد [۱]. به عنوان مثال، در مسیر عبور جریان گاز از داخل خطوط انتقال وجود ذرات معلق، آلودگی‌هایی مانند روغن و گریس، آلودگی‌های ناشی از خوردگی قطعات و مواردی از این قبیل شرایط متفاوتی جهت انتخاب درست سیستم اندازه‌گیری ایجاد می‌نماید. در این خصوص، یکی از دستگاه‌های مناسب اندازه‌گیری در واحدهای عملیاتی همچون نیروگاه‌ها و غیره، اریفیس‌مترها هستند که با توجه به موارد بیان شده، استفاده از آن‌ها را نمی‌توان به‌طور کلی در همه موارد تعمیم داد [۲، ۳]. یکی از موارد مهم در صنعت برق و مدیریت فروش برق چگونگی دقت اندازه‌گیری است که تعیین کننده دقت محاسبات هزینه کرد و سود و زیان در این صنعت است. از طرفی در توربین‌ها علاوه بر اهمیت دقت اندازه‌گیری مصرف سوخت، سایر پارامترهای مؤثر فنی و طراحی نیز دخیل هستند [۴].

مطابق شکل‌های ۱-الف و ۱-ب نازل سوخت در یک توربین، سوخت موردنیاز را جهت احتراق به داخل توربین هدایت می‌کند [۵]. در یک توربین تعدادی نازل سوخت رسان نصب می‌شود که تعداد و آرایش نصب آن‌ها در توربین‌ها متفاوت است. به عنوان مثال در توربین‌های GE-F9 ۱۴ عدد نازل دورتادور توربین نصب می‌گردد. این نازل‌ها می‌بایستی به لحاظ حجم سوخت‌رسانی با دقت بالایی با یکدیگر همسان باشند [۷، ۸]. همچنین علاوه بر میزان حجم سوخت‌رسانی در نازل‌ها سایر پارامترها همچون زاویه پاشش سوخت و الگوی پاشش بایستی طبق استاندارد بوده تا محل تشکیل شعله در نازل‌های مختلف همسان بوده و مانع از نوسان در محور اصلی توربین و سایر اجزای داخلی توربین شود.

مشکلاتی همچون افزایش لرزش توربین، آسیب شدید به اجزای مختلف توربین، کاهش شدید بازه‌های زمانی تعمیرات اساسی^۱، کاهش راندمان، افزایش مصرف سوخت و افزایش قابل توجه آلودگی هوا می‌تواند در اثر عدم توازن^۲ صحیح جریان^۳ سوخت یا به عبارتی ردیف چینی مناسب نازل‌ها روی توربین اتفاق بیفتد [۵، ۹].

جهت سوخت‌رسانی متوازن در نازل‌ها پیش‌تر آن‌ها به خارج از کشور ارسال می‌شد تا توسط دستگاه‌های مخصوص و بر اساس استاندارد مورد آزمایش قرار گیرند. در کنار هزینه‌های هنگفتی که برای نیروگاه‌ها تحمیل می‌شد، از زمان اعمال تحریم‌ها امکان ارسال و تحویل مجدد نازل‌ها با مشکلات دوجندان روبه‌رو شده است. در حالی‌که با هزینه تنها یک‌دهم هزینه ارسال به کشورهای خارجی و پس از ۲ سال پژوهش، سامانه "اندازه‌گیری و سوخت‌رسانی متوازن مایع و سوخت گاز در نازل توربین‌های GE-F9"، طراحی و ساخته شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱ الف) کپه‌گازی نازل سوخت دوگانه و ب) تعدادی از کپه‌های نازل‌های سوخت دوگانه توربین GE-F9

¹ Overhaul

² Balancing

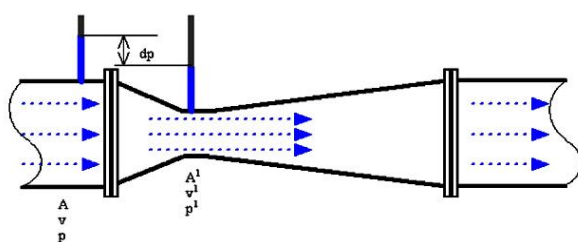
³ Flow

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، با استفاده از دستگاه تولید شده توسط شرکت دانش‌بنیان پرداد کامه صنعت که تصویر آن در شکل ۲-الف نشان داده شده است، نازل‌های سوخت توربین گازی GE-F9 آزمایش شد و در فشارهای اولیه با مقادیر مختلف، میزان جریان مصرفی آن‌ها اندازه‌گیری شد. روش اندازه‌گیری جریان هوای عبوری در این دستگاه بر اساس اندازه‌گیری جریان ونتوری است که در شکل ۲-ب نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



شکل ۲ الف) دستگاه تولیدشده برای اندازه‌گیری جریان گاز مصرفی به همراه نرم‌افزار راه‌اندازی و ردیف چینی نازل، ب) روش اندازه‌گیری جریان سوخت گازی عبوری از نازل ونتوری

تعداد نازل‌های مورد آزمایش و اندازه‌گیری در این آزمایش ۴۴ عدد بوده و همچنین فشار ورودی به ترتیب در مقادیر ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۵۰ و ۵۰۰ میلی بار تنظیم شد [۱۰، ۱۱]. جهت اطمینان از تکرارپذیری نتایج آزمایش‌ها توسط دستگاه، ابتدا برای ۱۰ مورد از نازل‌های آزمایش، اندازه‌گیری جریان در تمامی فشارها ۳ مرتبه انجام شد. خطای تکرارپذیری در بیشترین حالت ۰/۲۵ درصد حاصل شد که نشان دهنده دقت بسیار بالای دستگاه در اندازه‌گیری جریان و تکرارپذیری آن است.

پس از استخراج نمودارهای جریان گاز مصرفی، مقادیر آن‌ها برای نازل‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. برخی از نازل‌ها به دلیل خارج از محدوده بودن جریان مصرفی حذف گردید. در ادامه، نازل‌های باقی‌مانده توسط نرم‌افزار دستگاه، ردیف چینی شدند تا جهت بهبود بهره‌وری توربین، کاهش مصرف سوخت و آلودگی هوا، در موقعیت‌های مناسب روی توربین نصب شوند. پس از نصب نازل‌ها روی توربین، اختلاف دمایی به عنوان مهم‌ترین فاکتور خروجی مورد ارزیابی قرار گرفت.

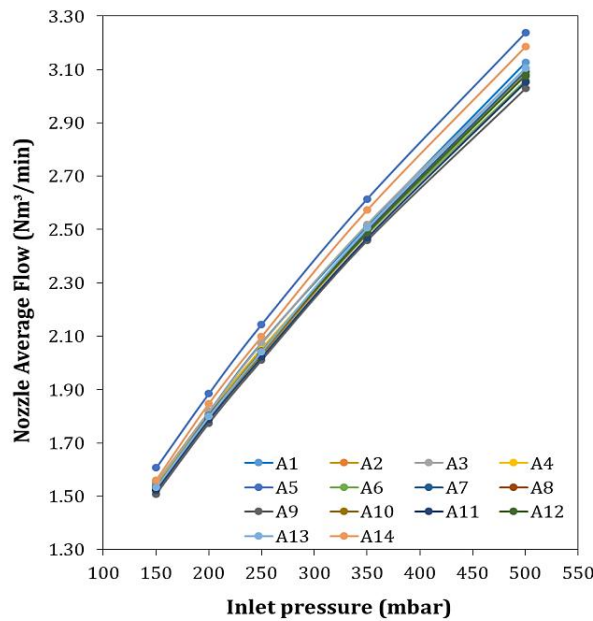
۳- نتایج و بحث

مقادیر جریان گاز مصرفی برای ۱۴ عدد از نازل‌های دوگانه‌سوز GE-F9 در جدول ۱ نشان داده شده است. شکل ۳ نمودار تغییرات حجم مصرفی در ۵ فشار ورودی مختلف برای ۱۴ نازل را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودارها مشخص است، با افزایش فشار ورودی، مقدار جریان اندازه‌گیری شده افزایش یافت و با وجود اختلاف در جریان گاز مصرفی نازل‌ها، شیب این افزایش تقریباً برای تمامی آن‌ها

یکسان بود. تقریباً در تمام فشارها دو نازل ۹ و ۱۱ کمترین جریان مصرفی و نازل‌های ۱ و ۲ بیشترین مصرف را داشتند. بقیه نازل‌ها در محدوده مصرفی بین نازل‌های قبلی قرار گرفتند و بسیار به هم نزدیک بودند.

جدول ۱ مقادیر جریان گاز مصرفی در فشارهای ورودی مختلف برای ۱۴ نازل سری اول

فشار ورودی (mbar)					نام نازل / میزان گاز مصرفی (Nm ³ /min)
500	350	250	200	150	
3.13	2.52	2.08	1.82	1.55	A1
3.08	2.48	2.05	1.81	1.53	A2
3.10	2.52	2.07	1.82	1.55	A3
3.09	2.49	2.05	1.80	1.54	A4
3.24	2.62	2.15	1.89	1.61	A5
3.06	2.48	2.04	1.80	1.52	A6
3.09	2.49	2.04	1.80	1.53	A7
3.08	2.49	2.04	1.80	1.54	A8
3.03	2.46	2.01	1.78	1.51	A9
3.08	2.49	2.03	1.80	1.53	A10
3.05	2.47	2.02	1.79	1.52	A11
3.08	2.49	2.04	1.80	1.54	A12
3.11	2.51	2.04	1.80	1.53	A13
3.19	2.57	2.10	1.85	1.56	A14
3.24	2.62	2.15	1.89	1.61	بیشینه
3.03	2.46	2.01	1.78	1.51	کمینه
6.87	6.34	6.66	6.25	6.49	بیشینه انحراف (%)



شکل ۳ نمودار مقایسه‌ای جریان گاز مصرفی در فشارهای ورودی مختلف برای ۱۴ نازل سری اول

همچنین نتایج نشان داد که در یک فشار مورد آزمایش میزان جریان مصرفی نازل‌های مختلف بسیار به هم نزدیک هستند. به عنوان مثال در فشار ۲۰۰ میلی بار اختلاف حجم مصرفی نازل‌های مشخص شده با مستطیل قرمز در جدول ۱ تنها در حد چند هزارم مترمکعب در دقیقه باهم اختلاف دارند. بنابراین قابل انتظار خواهد بود که در ردیف چینی نهایی روی توربین موقعیت این نازل‌ها ممکن است در فشارهای مختلف باهم متفاوت باشد زیرا فاصله نتایج آن‌ها خیلی نزدیک به هم است. از این رو در عمل میزان مصرف سوخت این نازل‌ها یکسان بوده و جابجایی آن‌ها در ردیف چینی اثر منفی بر توربین نخواهد داشت.

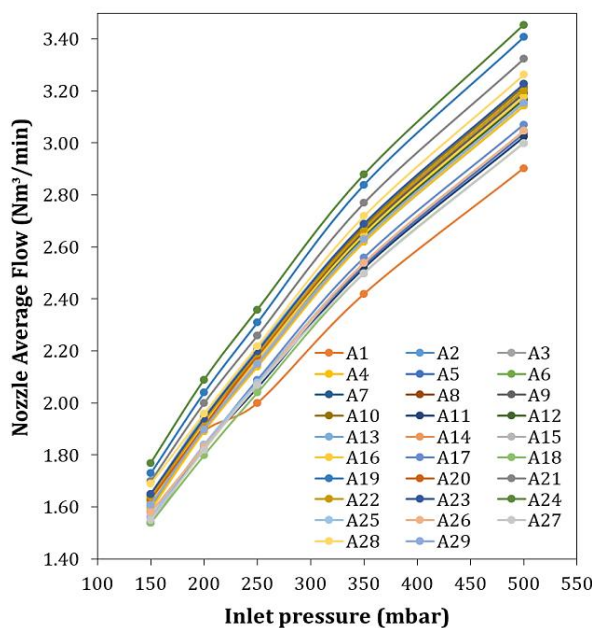
یکی از نکات مهم و قابل توجه در نتایج، میزان اختلاف مصرف بین پرمصرف‌ترین و کم‌مصرف‌ترین نازل است که مقداری در حدود ۶٪ است. این میزان تقریباً در تمامی فشارهای مورد آزمایش یکسان بوده است.

تعداد نازل‌های دریافتی سری اول جهت ردیف چینی بر روی توربین ۱۴ عدد بود. مقرر شد تا این نازل‌ها پس از آزمایش و اندازه‌گیری توسط نرم‌افزار ردیف چینی بر روی توربین با ۱۴ نازل به صورت متعادل قرار گیرد.

با استفاده از تعداد ۱۴ عدد نازل، ردیف چینی انجام گرفت و نازل‌ها طبق پیشنهاد نرم‌افزار ردیف چینی بر روی توربین نصب گردید. نتایج حاصله کاهش اختلاف دمایی از ۶۰ درجه سانتی‌گراد به ۴۰ درجه را نشان داد که مؤید بهبود بیش از ۳۳٪ است. از طرفی این نکته قابل توجه است که با توجه به مقادیر جدول ۱، اختلاف ۶ درصدی در مصرف سوخت نازل‌های مختلف وجود دارد. این اختلاف از لحاظ استاندارد GE قابل قبول نبوده و در نهایت باید اختلاف‌ها زیر ۲٪ باشد. بدین منظور می‌بایست تعداد نازل‌ها مورد آزمایش بیش از ۱۴ عدد باشند. به عنوان مثال ۲۰ عدد نازل مورد آزمایش قرار گیرد و از بین آن‌ها ۱۴ عدد که کمترین اختلاف را باهم دارند انتخاب گردیده و سپس ردیف چینی شوند.

در مورد حاضر، اگر دو نازل ۱ و ۲ که با اختلاف قابل توجه نسبت به بقیه بالاترین مصرف را دارند، از مجموعه حذف گردند اختلاف در مصرف سوخت به زیر ۳٪ و با حذف نازل ۹ اختلاف بقیه نازل‌ها زیر ۲٪ خواهد بود. بنابراین به نیروگاه محترم پیشنهاد گردید تعداد نازل‌های اولیه مورد آزمایش بیش از ۱۴ عدد نهایی باشد یا این که ۲ و بلکه بیشتر دسته نازل (یعنی ۲۸ یا ۴۲ یا بیشتر) مورد آزمایش قرار گیرند و نزدیک‌ترین نازل‌ها به هم در یک دسته قرار داده شوند.

در سری دوم نازل‌های مورد آزمایش، به تعداد ۳۰ نازل برای آزمون اندازه‌گیری و سوخت‌رسانی متوازن گازی و ردیف چینی یک دسته نازل ۱۴ عددی ارسال گردید. مقادیر اندازه‌گیری شده جریان سوخت در جدول ۲ و نمودار تغییرات جریان سوخت در فشارهای مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ نمودار مقایسه‌ای جریان گاز مصرفی در فشارهای ورودی مختلف برای ۳۰ نازل سری دوم

جدول ۲ مقادیر جریان گاز مصرفی در فشارهای ورودی مختلف برای ۳۰ نازل سری دوم

فشار ورودی (mbar)

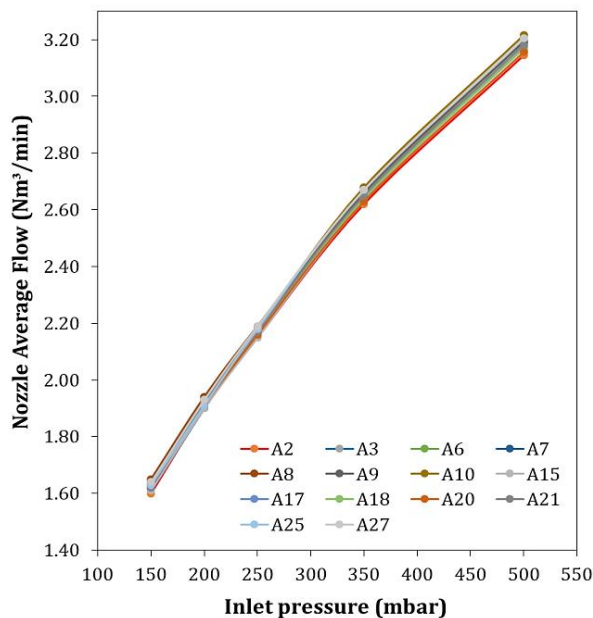
500	350	250	200	150	
2.90	2.42	2.00	1.89	1.63	A1
3.14	2.62	2.15	1.90	1.60	A2
3.18	2.65	2.18	1.90	1.61	A3
3.14	2.62	2.14	1.89	1.59	A4
3.04	2.53	2.08	1.83	1.58	A5
3.17	2.64	2.16	1.90	1.62	A6
3.20	2.67	2.18	1.94	1.64	A7
3.19	2.66	2.19	1.94	1.65	A8
3.19	2.66	2.16	1.91	1.62	A9
3.22	2.68	2.18	1.93	1.63	A10
3.02	2.52	2.06	1.83	1.54	A11
3.17	2.64	2.17	1.91	1.63	A12
3.23	2.69	2.21	1.95	1.65	A13
3.05	2.54	2.08	1.84	1.56	A14
3.16	2.63	2.16	1.91	1.63	A15
3.18	2.65	2.17	1.92	1.62	A16
3.07	2.56	2.09	1.83	1.56	A17
3.00	2.50	2.04	1.80	1.54	A18
3.41	2.84	2.31	2.04	1.73	A19
3.20	2.67	2.18	1.91	1.63	A20
3.32	2.77	2.26	2.00	1.70	A21
3.20	2.67	2.19	1.93	1.64	A22
3.23	2.69	2.20	1.94	1.65	A23
3.46	2.88	2.36	2.09	1.77	A24
3.05	2.54	2.08	1.84	1.56	A25
3.05	2.54	2.07	1.83	1.58	A26
3.00	2.50	2.07	1.82	1.55	A27
3.26	2.72	2.22	1.96	1.69	A28
3.16	2.63	2.15	1.90	1.61	A29
3.46	2.88	2.26	2.09	1.94	بیشینه
3.00	2.42	2.00	1.65	1.54	کمینه
15.2	19.008	13	26.667	25.974	بیشینه انحراف (%)

نام نازل / میزان گاز مصرفی (Nm³/min)

مطابق نتایج به دست آمده در شکل ۴، ملاحظه می‌شود مقدار جریان اندازه‌گیری شده برای نازل‌ها در فشارهای مختلف با یکدیگر تفاوت دارد و با توجه به جدول ۲ میزان این تفاوت در فشارهای ورودی مختلف بین ۱۵ تا ۲۷ درصد متفاوت است. اما با این وجود می‌توان نازل‌هایی با نزدیک‌ترین جریان را انتخاب نمود به طوری که اختلاف میزان جریان اندازه‌گیری شده حدود ۲٪ باشد. یا این‌که با قبول درصد اختلاف بیشتر می‌توان دو دسته نازل از بین ۳۰ نازل ارائه شده انتخاب نمود به طوری که کمترین انحراف ممکن را بین نازل‌های هر دسته داشت و سپس ردیف چینی نازل‌ها را بر روی توربین انجام داد تا هر دو دسته نازل قابل استفاده باشد. خروجی نمودار منحنی‌های تغییرات جریان مصرفی با تغییر فشار برای بهترین دسته نازل ۱۴ عددی از میان ۳۰ نازل در شکل ۵ و مقادیر جریان مصرفی و نیز درصد اختلاف آن در جدول ۳ آمده است. برای این دسته انتخاب شده، اختلاف دمایی اندازه‌گیری شده حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد است که بهترین نتیجه حاصل را نشان می‌دهد.

جدول ۳ مقادیر جریان گاز مصرفی در فشارهای ورودی مختلف برای بهترین دسته ۱۴ عددی از ۳۰ نازل سری دوم

فشار ورودی (mbar)					نام نازل / میزان گاز مصرفی (Nm ³ /min)
500	350	250	200	150	
3.14	2.62	2.15	1.90	1.60	A2
3.18	2.65	2.18	1.90	1.61	A3
3.17	2.64	2.16	1.90	1.62	A6
3.20	2.67	2.18	1.94	1.64	A7
3.19	2.66	2.19	1.94	1.65	A8
3.19	2.66	2.16	1.91	1.62	A9
3.22	2.68	2.18	1.93	1.63	A10
3.16	2.63	2.15	1.90	1.61	A15
3.17	2.64	2.17	1.91	1.63	A17
3.17	2.64	2.17	1.91	1.63	A18
3.16	2.63	2.16	1.91	1.63	A20
3.18	2.65	2.17	1.92	1.62	A21
3.20	2.67	2.18	1.91	1.63	A25
3.20	2.67	2.19	1.93	1.64	A27
3.22	2.68	2.19	1.94	1.65	بیشینه
3.14	2.62	2.15	1.90	1.60	کمینه
2.29	2.29	1.86	2.11	3.12	بیشینه انحراف (%)



شکل ۵ نمودار مقایسه‌ای جریان گاز مصرفی در فشارهای ورودی مختلف برای بهترین دسته ۱۴ عددی از ۳۰ نازل سری دوم

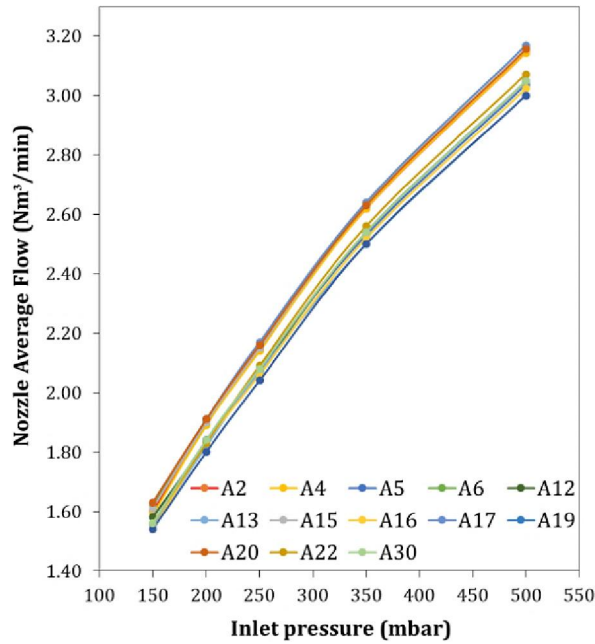
در صورتی که از بین این ۳۰ نازل، دو دسته نازل ۱۴ عددی استخراج گردد، در جداول ۴ و ۵ مقادیر جریان مصرفی و اختلاف آن‌ها و نیز در شکل‌های ۶ و ۷ منحنی تغییرات جریان مصرفی برای دو دسته نازل قابل مشاهده است. میزان اختلاف دمایی برای این دو دسته نازل بر روی توربین بین ۲۵ تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد بوده است.

جدول ۴ مقادیر جریان گاز مصرفی در فشارهای ورودی مختلف برای دسته اول ۱۴ عددی از ۳۰ نازل سری دوم

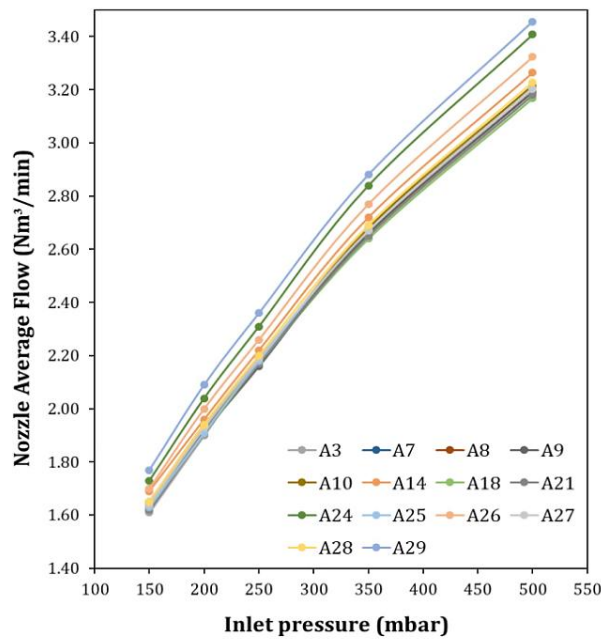
فشار ورودی (mbar)					نام نازل / میزان گاز مصرفی (Nm ³ /min)
500	350	250	200	150	
3.14	2.62	2.15	1.90	1.60	A2
3.14	2.62	2.14	1.89	1.59	A4
3.04	2.53	2.08	1.83	1.58	A5
3.17	2.64	2.16	1.90	1.62	A6
3.05	2.54	2.07	1.83	1.58	A12
3.00	2.50	2.07	1.82	1.55	A13
3.16	2.63	2.15	1.90	1.61	A15
3.02	2.52	2.06	1.83	1.54	A16
3.17	2.64	2.17	1.91	1.63	A17
3.05	2.54	2.08	1.84	1.56	A19
3.16	2.63	2.16	1.91	1.63	A20
3.07	2.56	2.09	1.83	1.56	A22
3.00	2.50	2.04	1.80	1.54	A23
3.05	2.54	2.08	1.84	1.56	A30
3.17	2.64	2.17	1.91	1.63	بیشینه
3.00	2.50	2.04	1.80	1.54	کمینه
5.60	5.60	6.37	6.11	5.84	بیشینه انحراف (%)

جدول ۵ مقادیر جریان گاز مصرفی در فشارهای ورودی مختلف برای دسته دوم ۱۴ عددی از ۳۰ نازل سری دوم

فشار ورودی (mbar)					نام نازل / میزان گاز مصرفی (Nm ³ /min)
500	350	250	200	150	
3.18	2.65	2.18	1.90	1.61	A3
3.20	2.67	2.18	1.94	1.64	A7
3.19	2.66	2.19	1.94	1.65	A8
3.19	2.66	2.16	1.91	1.62	A9
3.22	2.68	2.18	1.93	1.63	A10
3.26	2.72	2.22	1.96	1.69	A14
3.17	2.64	2.17	1.91	1.63	A18
3.18	2.65	2.17	1.92	1.62	A21
3.41	2.84	2.31	2.04	1.73	A24
3.20	2.67	2.18	1.91	1.63	A25
3.32	2.77	2.26	2.00	1.70	A26
3.20	2.67	2.19	1.93	1.64	A27
3.23	2.69	2.20	1.94	1.65	A28
3.46	2.88	2.36	2.09	1.77	A29
3.46	2.88	2.36	2.09	1.77	بیشینه
3.17	2.64	2.16	1.90	1.61	کمینه
9.09	9.09	9.26	10.00	9.94	بیشینه انحراف (%)



شکل ۶ نمودار مقایسه‌ای جریان گاز مصرفی در فشارهای ورودی مختلف برای دسته اول ۱۴ عددی از ۳۰ نازل سری دوم



شکل ۷ نمودار مقایسه‌ای جریان گاز مصرفی در فشارهای ورودی مختلف برای دسته دوم ۱۴ عددی از ۳۰ نازل سری دوم

این نکته قابل ذکر است که قبل از به کارگیری دستگاه اندازه‌گیری و سوخت‌رسانی متوازن گازی در نازل توربین GE-F9 و اجرای ردیف چینی نازل با استفاده از نرم‌افزار ویژه دستگاه، نازل‌های A1 تا A14 برای یکی از واحدهای توربین و A15 تا A28 نیز برای واحد دیگر مورد استفاده قرار می‌گرفت که با توجه به نمودارهای شکل ۴ و اطلاعات جدول ۲ اختلاف جریان بیش از ۱۵٪ از یک‌سو و نیز عدم اجرای ردیف چینی از سوی دیگر منجر به اختلاف دمایی بالای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و بهره‌وری پایین توربین می‌شد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از دستگاه طراحی و ساخته شده در شرکت پرداز کامه صنعت با همکاری نیروگاه شهید رجایی قزوین نازل‌های سوخت توربین GE-F9 مورد آزمایش و اندازه‌گیری جریان سوخت قرار گرفته و سپس توسط نرم‌افزار دستگاه ردیف چینی شد. نتایج حاصله نشان داد با انتخاب یک دسته ۱۴ عددی از میان ۳۰ نازل ارائه شده اولیه و سپس ردیف چینی توسط نرم‌افزار می‌توان اختلاف جریان گاز مصرفی را تا ۲٪ و اختلاف دمایی را تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد کاهش داد. اما در صورت استفاده از ۲ دسته نازل از میان ۳۰ نازل ارائه شده می‌توان اختلاف جریان نازل‌ها را تا ۶ و ۹٪ کاهش داد و در عوض به کمک نرم‌افزار ردیف چینی اختلاف دمایی را زیر ۲۸ درجه سانتی‌گراد حفظ نمود.

References

- [1] Hashim MA, Khalid A, Salleh H, Sunar NM. Effects of fuel and nozzle characteristics on micro gas turbine system: a review. *Materials Science and Engineering*. 2017 Aug 1;226:012006. doi: [10.1088/1757-899X/226/1/012006](https://doi.org/10.1088/1757-899X/226/1/012006)
- [2] He Y, Kim CH. Effect of nozzle port shape of fuel injector of micro gas turbine engine combustor on mixture gas formation for combustion. *Fluids*. 2022 May 26;7(6):184. doi: [10.3390/fluids7060184](https://doi.org/10.3390/fluids7060184)
- [3] Nouri JM, Mackenzie S, Gaskell C, Dhunput A. Effect of viscosity, temperature and nozzle length-to-diameter ratio on internal flow and cavitation in a multi-hole injector. *InFuel Systems for IC Engines*. 2012 Jan 1:265-278. doi: [10.1533/9780857096043.7.265](https://doi.org/10.1533/9780857096043.7.265)
- [4] Kulor F, Markus ED, Kanzumba K. Design and control challenges of hybrid, dual nozzle gas turbine power generating plant: A review. *Energy Reports*. 2021 Nov 1;7:324-35. doi: [10.1016/j.egy.2020.12.042](https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.12.042)
- [5] Boyce MP. *Gas turbine engineering handbook*. Elsevier; 2011 Nov 23.
- [6] Cho JH. Engineering design and analysis of flow distribution in multiple flow circuits with partial contractions. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2021 Sep;35(9):3979-87. doi: [10.1007/s12206-021-0811-x](https://doi.org/10.1007/s12206-021-0811-x)
- [7] Nedelcu D, Cojocaru V, Avasiloaie RC. Numerical investigation of nozzle jet flow in a pelton microturbine. *Machines*. 2021 Aug 8;9(8):158. doi: [10.3390/machines9080158](https://doi.org/10.3390/machines9080158)
- [8] Feng L, Qiang Y, Xiao L, Ming-jia LI, Jun-hui R, Ya-jun L. Experimental Study on Fuel-Switching of Dual-Fuel Gas Turbine Combustor. *Frontiers in Energy Research*. 2022 Feb 23;9:796220. doi: [10.3389/fenrg.2021.796220](https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.796220)
- [9] LaNasa PJ, Upp EL. *Fluid flow measurement: A practical guide to accurate flow measurement*. Butterworth-Heinemann; 2014 Apr 12.
- [10] Zheng H, Pan G, Chen X, Hu X. Effect of dual fuel nozzle structures on combustion flow field in CRGT combustor. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013 Jan 1;2013. doi: [10.1155/2013/913837](https://doi.org/10.1155/2013/913837)
- [11] Fulara S, Chmielewski M, Gieras M. Experimental research of the small gas turbine with variable area nozzle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2019 Dec;233(15):5650-9. doi: [10.1177/0954410019853977](https://doi.org/10.1177/0954410019853977)